

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PD-1-14 改 12
提出年月日	平成 29 年 9 月 19 日

東海第二発電所

地震による損傷の防止

平成 29 年 9 月
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、 は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

第4条：地震による損傷の防止

目 次

第1部

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

下線部：今回提出範囲

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置，構造及び設備

(2) 安全設計方針

(3) 適合性説明

1.3 気象等

1.4 設備等

1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針

1.1 基本方針

1.2 適用規格

2. 耐震設計上の重要度分類

2.1 重要度分類の基本方針

2.2 耐震重要度分類

3. 設計用地震力

3.1 地震力の算定法

3.2 設計用地震力

4. 荷重の組合せと許容限界

4.1 基本方針

5. 地震応答解析の方針

5.1 建物・構築物

5.2 機器・配管系

5.3 屋外重要土木構造物

5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備 又は津波監視設備が設置された建物・構築物

6. 設計用減衰定数

7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響

8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針

9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添 - 1 設計用地震力
- 別添 - 2 動的機能維持の評価
- 別添 - 3 弾性設計用地震動 S_d ・静的地震力による評価
- 別添 - 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添 - 5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添 - 6 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添 - 7 主要建屋の構造概要について

(別 紙)

- 別紙 - 1 既工認との手法の相違点の整理について (設置変更許可申請段階での整理)
- 別紙 - 2 原子炉建屋の地震応答解析モデルについて
- 別紙 - 3 応力解析における弾塑性解析の適用
- 別紙 - 4 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙 - 5 機器・配管系における手法の変更点について
- 別紙 - 6 下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別紙 - 7 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について
- 別紙 - 8 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定について
- 別紙 - 9 使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価方針について
- (別紙 - 10 液状化影響の検討方針について)
- 別紙 - 11 屋外二重管の基礎構造の設計方針について
- 別紙 - 12 既設設備に対する耐震補強について
- 別紙 - 13 動的機能維持評価の検討方針について

() は、今後提出予定の資料

東海第二発電所

原子炉建屋屋根トラス評価モデルへの 弾塑性解析適用について

1. はじめに

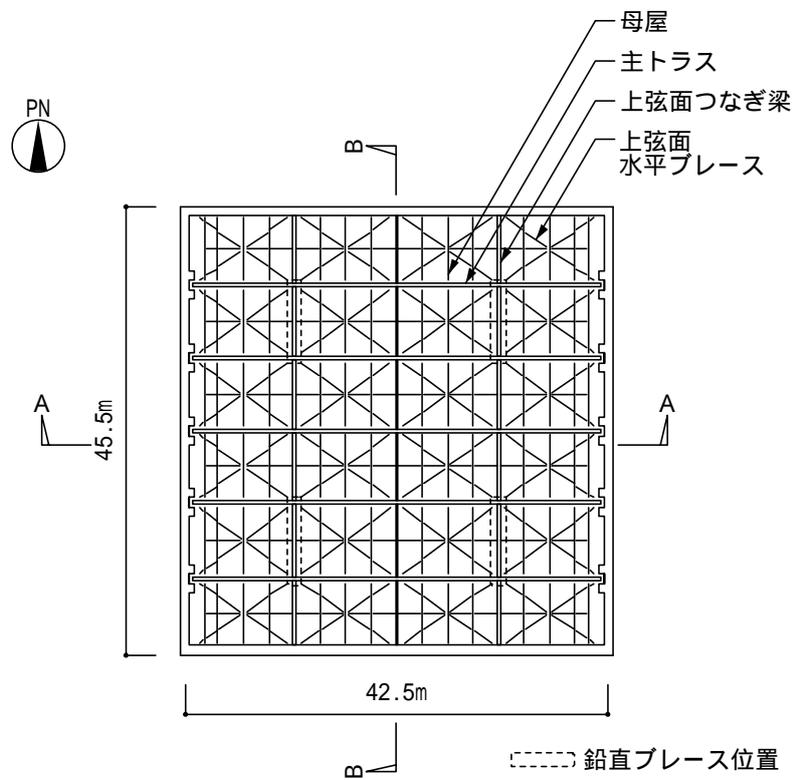
本資料は、東海第二発電所の建物・構築物のうち、鉄骨構造部の詳細評価モデルを構築して評価を実施する原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルに弾塑性解析を適用する目的とその適用性について説明するものである。

2. 原子炉建屋屋根トラスについて

2.1 原子炉建屋屋根トラスの概要

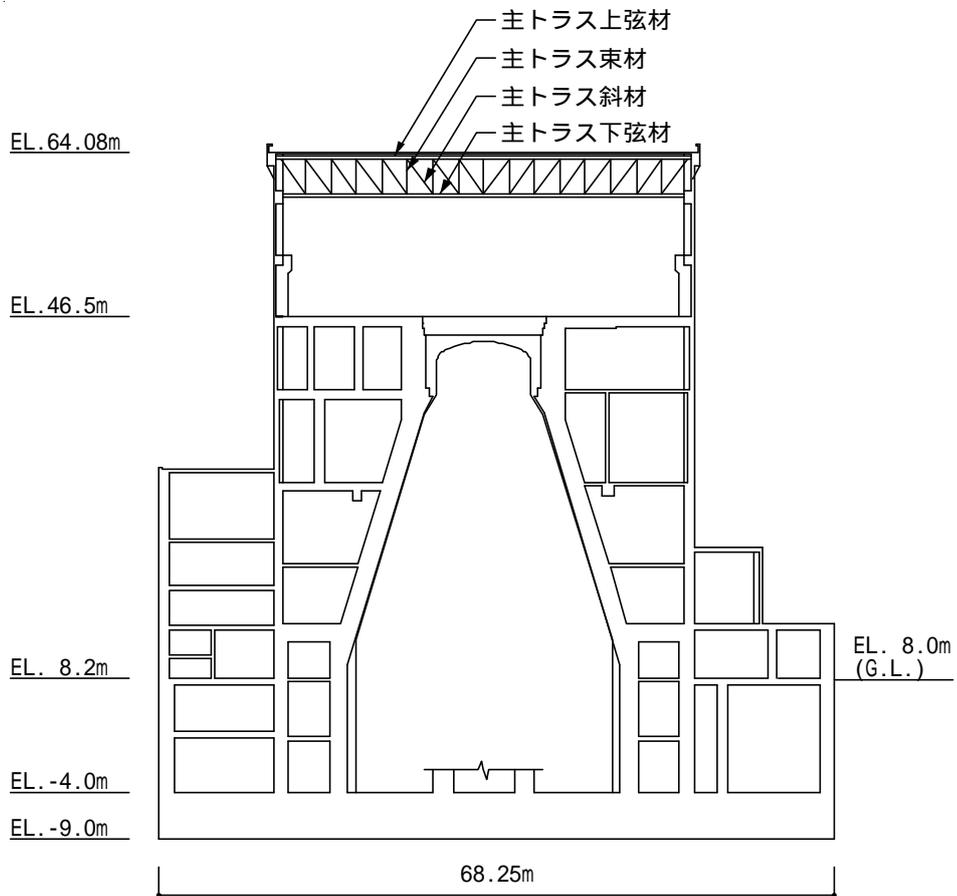
原子炉建屋の上部構造は、鉄骨造陸屋根をもつ屋根トラスで構成されている。屋根トラスの平面は、45.5 m (南北) × 42.5 m (東西) のほぼ正方形をなしており、燃料取替床レベル (EL.46.5 m) からの高さは約 17.0 m である。屋根トラスの概要を第 3 - 2 - 1 図に示す。

屋根トラスは、二次格納施設を構成する屋根スラブの間接支持構造物であり、屋根面に作用する鉛直荷重を上弦面つなぎ梁、母屋及び主トラスで負担し、水平荷重については上弦面水平ブレースで両側の耐震壁に伝達する。



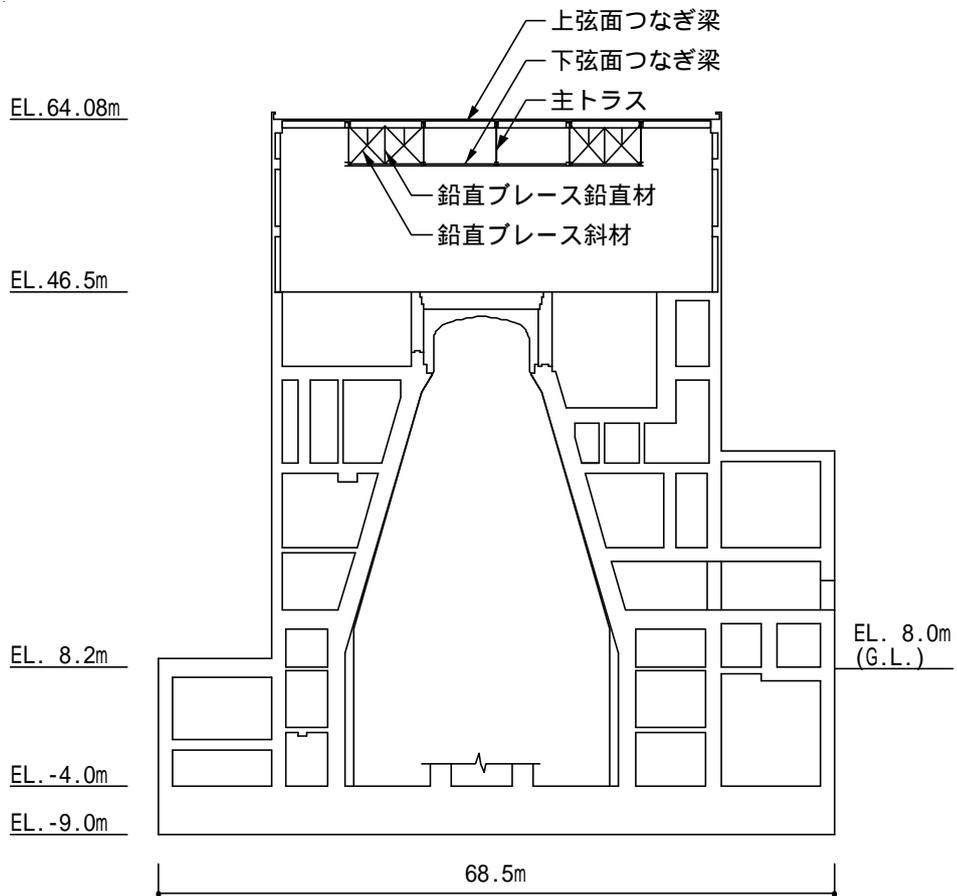
(屋根伏図)

第3-2-1図(1/3) 原子炉建屋屋根トラスの概要



(A - A 断面図)

第 3 - 2 - 1 図 (2 / 3) 原子炉建屋屋根トラスの概要



(B - B 断面図)

第 3 - 2 - 1 図 (3 / 3) 原子炉建屋屋根トラスの概要

2.2 原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデル

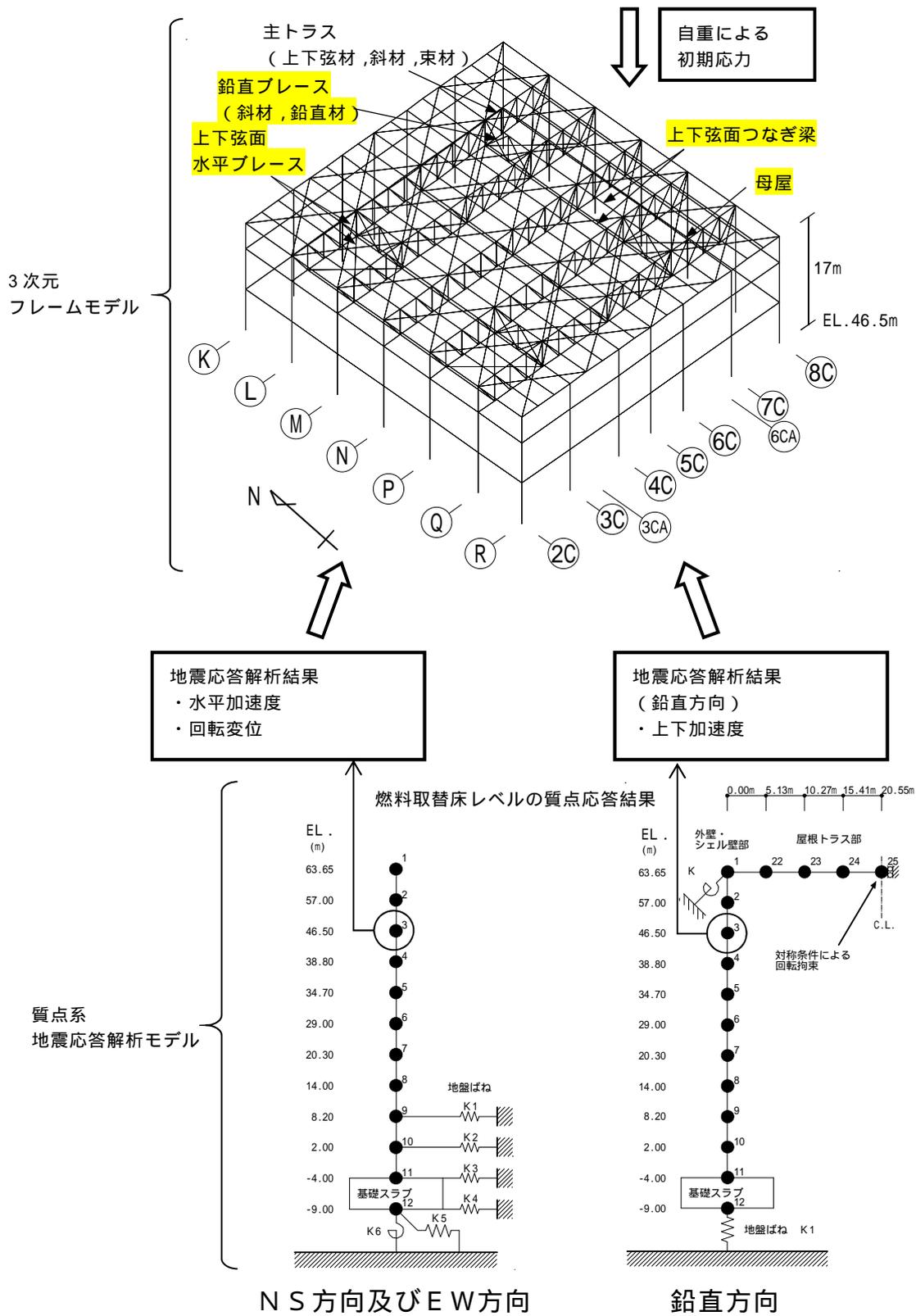
原子炉建屋屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平 2 方向及び鉛直方向地震動の同時入力による評価を行うことができる 3 次元モデルによる地震応答解析を採用する。

地震応答解析モデルは、燃料取替床レベル (EL.46.5 m) より上部の鉄筋コンクリート造の柱、梁、壁及び鉄骨造の屋根トラスを線材、面材により立体的にモデル化した 3 次元フレームモデルとし、部材に発生する応力を地震応答解析によって直接評価できるモデルとする。解析評価モデルの概要を第 3 - 2 - 2 図に示す。

屋根トラス部は、主トラス、上下弦面つなぎ梁、上下弦面水平ブレース、鉛直ブレース及び母屋をモデル化する。各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮した梁要素 (主トラスの上下弦材、上下弦面つなぎ梁及び母屋) と軸変形のみを考慮したトラス要素 (上下弦面水平ブレース、主トラスの斜材及び束材、鉛直ブレース) としてモデル化する。また、耐震壁及び外周梁は、各々シェル要素及び軸、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化する。なお、柱脚の条件は固定とする。

基準地震動 S_g に対する評価を実施する際、トラス要素としてモデル化した引張材の一部については、圧縮側で弾性範囲を超えることが考えられるため、部材座屈後の挙動を模擬できる手法 (修正若林モデル) に基づく弾塑性特性を考慮する。考慮した弾塑性特性の詳細については、「2.3 弾塑性解析の採用について」で示すこととする。

解析モデルへの入力地震動は、原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル (EL.46.5 m) の応答結果 (水平、鉛直及び回転成分) を用いることとし、燃料取替床位置を固定として、水平 2 方向及び鉛直方向地震動の同時入力による地震応答解析を実施する。



第3-2-2図 屋根トラスの解析評価モデルの概要

2.3 弾塑性解析の採用について

2.3.1 弾塑性解析を採用することの目的

原子炉建屋屋根トラスについては、基準地震動 S_s による地震動の増大に伴い、トラスを構成する引張材の一部が圧縮側で塑性領域に入ると考えられるが、弾性解析では、当該部材の塑性化による影響を考慮できないため、解析と実現象に乖離が生じることになる。そこで今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価することを目的として、部材の弾塑性特性を考慮した地震応答解析を採用する予定としている。

原子炉建屋屋根トラスの応力解析に弾塑性解析を取り入れることにより、部材の塑性化に伴う応力分布の変化を考慮することができるため、大入力時の挙動を精緻に評価することができる。

原子炉建屋の弾塑性挙動を適切に評価するにあたっては、部材の弾塑性特性を適切に設定し解析を実施する必要がある。

今回工認では、原子炉建屋屋根トラス部材の弾塑性特性として、修正若林モデルを採用する予定である。

以下では、修正若林モデルの概要を確認した上で、原子炉建屋屋根トラス部材への適用性を検討する。また、修正若林モデルを用いた弾塑性解析を実施することにより、一部引張材の座屈を考慮することとなるため、当該部材の繰り返し座屈による影響がないことについても検討する。

2.3.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について

(1) 今回工認で採用予定の弾塑性特性（修正若林モデル）の概要

原子炉建屋屋根トラスを構成する部材に，弾塑性特性として修正若林モデルを使用する。

修正若林モデルは，原子力発電所建屋（実機）を対象として実施された谷口らの研究^[1]に示される部材レベルの弾塑性特性である。修正若林モデルは，若林モデル^[2]を基本としているが，谷口らの研究^[1]で実施された実験のシミュレーション解析を踏まえて，繰り返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を累積塑性歪の関数で表現し，実験との対応度を向上させた手法であり，式（3-2-1）により評価される。

$$n/n_0 = 1/(\bar{\epsilon} - Pn)^{1/6} \quad 1 \quad (3-2-1)$$

$$n = N/N_y \quad N : \text{軸力} \quad N_y : \text{降伏軸力}$$

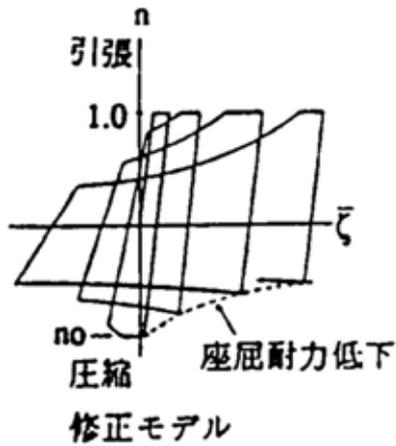
$$n_0 : \text{無次元化初期座屈耐力}$$

$$\bar{\epsilon} : \text{無次元化圧縮側累積塑性歪}$$

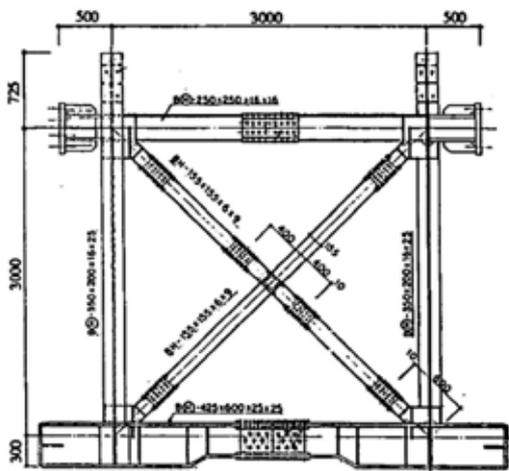
$$Pn = (n_E^2/4) - 5 \quad n_E = \pi^2 E / (\lambda e^2 \sigma_y) \quad \lambda e : \text{有効細長比}$$

修正若林モデルの弾塑性特性を第3-2-3図に示す。

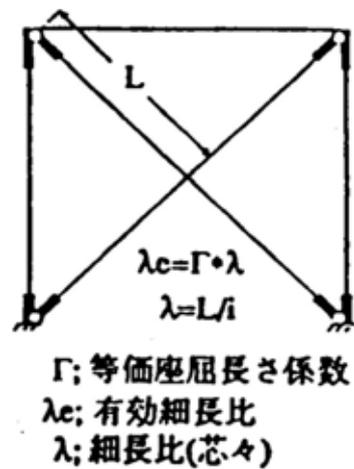
谷口らの研究^[1]においては，実機の特徴を反映したX型ブレース架構の静的繰り返し実験を実施している。また，修正若林モデルの妥当性を確認するにあたって，ブレース部材の弾塑性特性として修正モデルを適用した解析モデルによる実験のシミュレーション解析を実施しており，解析結果は実験結果をおおむねよく捉えているとしている。試験体の概要を第3-2-4図，解析モデルを第3-2-5図，解析結果と実験結果の比較を第3-2-6図に示す。



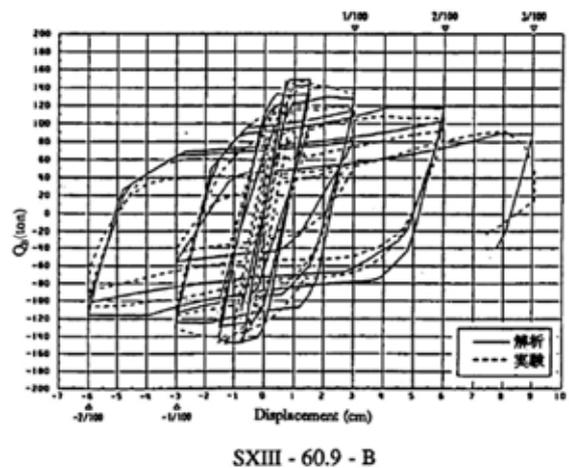
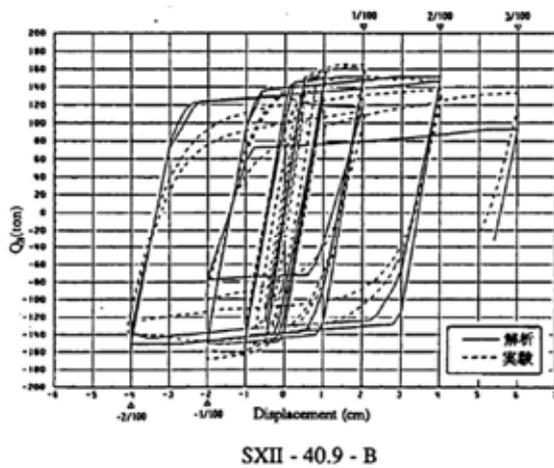
第 3 - 2 - 3 図 修正若林モデルの弾塑性特性 ([1]より引用)



第 3 - 2 - 4 図 試験体の概要 ([1]より引用)



第 3 - 2 - 5 図 解析モデル ([1]より引用)



第 3 - 2 - 6 図 解析結果と実験結果の比較 ([1]より引用)

(2) 原子炉建屋屋根トラスに対する検証例

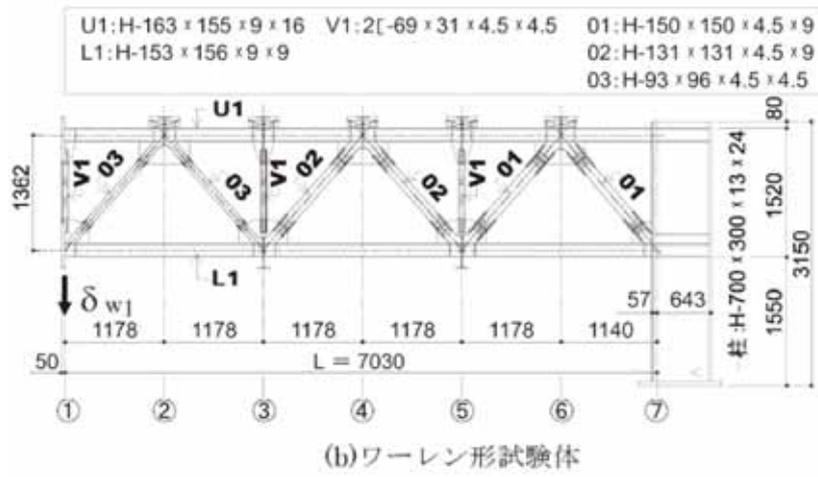
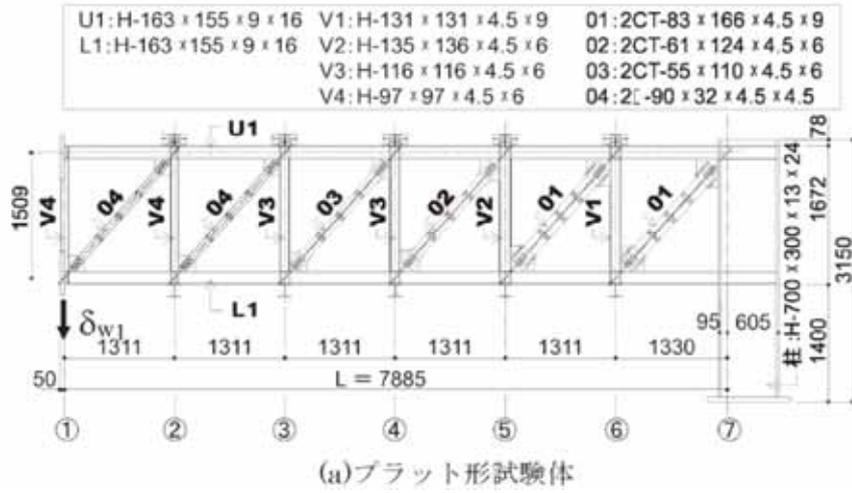
谷口らの研究^[1]は、X型ブレース架構を対象としたものであった。原子炉建屋屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例としては、鈴木らの研究^[3]がある。

この研究は、原子炉建屋屋根トラスの終局耐力について検討したものであるが、実験結果を高精度にシミュレーションするために構築したモデルの中で本弾塑性特性が適用されている。

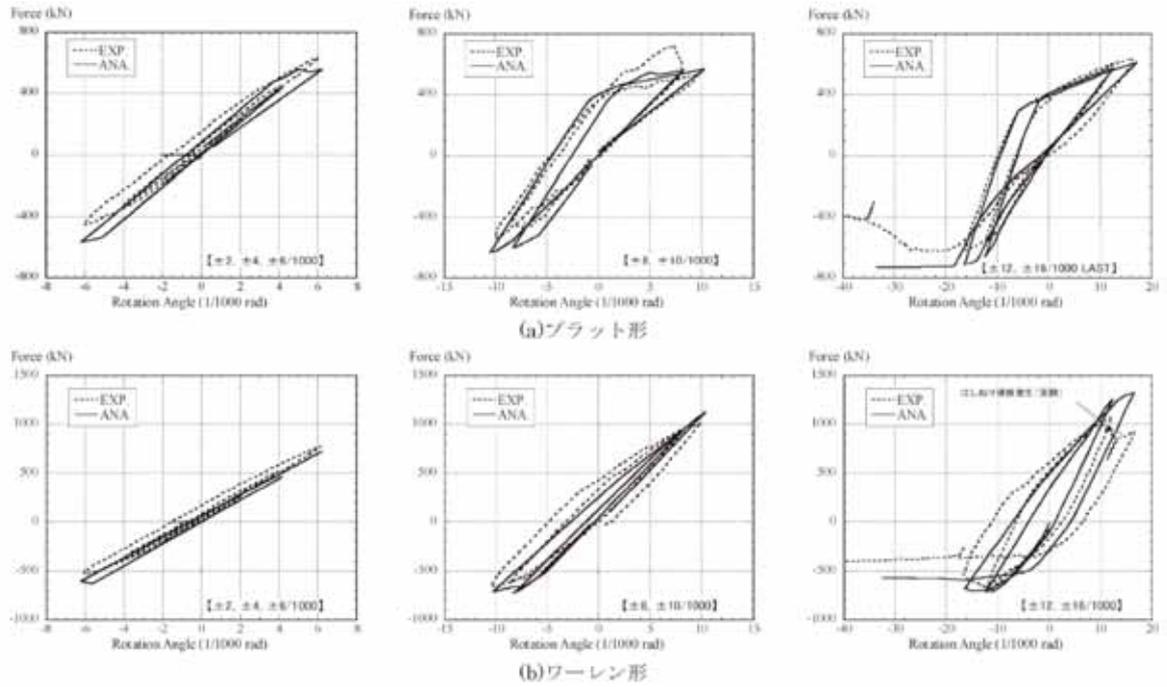
鈴木らの研究^[3]では、終局耐力を検討するにあたり原子炉建屋屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的載荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験にあたっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。東海第二発電所原子炉建屋屋根トラスは、このうちプラット形に該当する。試験体の概要を第3-2-7図に示す。

実験のシミュレーション解析においては、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として修正若林モデルが適用されており、実験結果とシミュレーション解析を比較し、精度良く実験結果を追跡できているとしている。結果の比較を第3-2-8図に示す。

以上のように修正若林モデルは、提案当初のX型ブレース材に加えて、ワーレン形、プラット形の鉄骨トラスでも実験結果を精度良く追跡できている。幅広い鉄骨架構形式において、軸力のみを負担する部材の弾塑性特性として適用可能であると考えられる。



第 3 - 2 - 7 図 試験体の概要 ([3] より引用)



第 3 - 2 - 8 図 実験のシミュレーション解析結果 ([3] より引用)

(3) 原子炉建屋屋根トラスへの適用性

今回弾塑性解析モデルとして採用を予定している修正若林モデルは、提案当初より、原子力発電所建屋（実機）を対象として実施された実験により妥当性が検証されており、また、原子炉建屋屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析においてもその適用性・妥当性が検証されている。これより、原子炉建屋屋根トラスの鉄骨部材のうち、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として、修正若林モデルを採用することは妥当であると考えられる。

2.3.3 各部材のクライテリアについて

入力地震動の増大に伴い鉄骨部材の一部が塑性領域に入ると考えられることから、今回工認の原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルについては、弾塑性解析による評価を実施するが、鉛直荷重を負担する主トラス（上下弦材、斜材及び束材）、母屋並びに上弦面つなぎ梁については、地震後も長期荷重を負担する必要があるため弾性範囲に留める設計とする。さらに、主トラスの横座屈を防止する下弦面つなぎ梁についても弾性範囲に留める設計とする。水平荷重を負担する上弦面水平ブレース並びに下弦面の振れ止めとなる下弦面水平ブレース及び鉛直ブレースの斜材は、引張材として地震時に荷重を負担するが、地震時の過大な変形を抑制するために引張側を弾性範囲に留めることとし、圧縮側の繰返し座屈により累積した塑性ひずみが引張材としての機能に影響を及ぼさないことを確認する。なお、鉛直ブレースの鉛直材については弾性範囲に留めることとする。第3-2-1表に各部材のクライテリアを示す。

引張材の繰返し座屈による影響の確認にあたっては、各部材の累積塑性変形倍率を整理した上で、累積塑性変形倍率が最も大きい部材について検討を実施する。検討では、当該部材の履歴ループを参照し、局部集中ひずみの繰返し回数が、中込らの研究^[4]に基づき算定される当該部材の最大ひずみ度に対する疲労寿命（繰返し回数）を下回っていることを確認する。

第3-2-1表 原子炉建屋屋根トラス各部材のクライテリア

評価部位		評価方法
主トラス	上弦材	弾性範囲内であることを確認
	下弦材	
	斜材	
	束材	
つなぎ梁	上弦面	弾性範囲内であることを確認
	下弦面	
水平ブレース	上弦面	弾性範囲内であることを確認（引張側）
	下弦面	弾性範囲内であることを確認（引張側）
鉛直ブレース	斜材	弾性範囲内であることを確認（引張側）
	鉛直材	弾性範囲内であることを確認

2.4 原子炉建屋屋根トラス評価の弾塑性解析採用についてのまとめ

原子炉建屋屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平 2 方向及び鉛直方向地震動の同時入力による評価を行うことができる 3 次元モデルによる地震応答解析を採用する。

今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの評価にあたって、3 次元フレームモデルによる弾塑性解析（弾塑性特性としては修正若林モデルを考慮）を採用する予定である。修正若林モデルは、先行審査で採用実績のある弾塑性特性であるが、X型ブレースを対象として検討されたものであったため、本検討においては、修正若林モデルの原子炉建屋屋根トラスへの適用性を検討する必要があると判断した。既往文献（原子炉建屋鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析）を参照し、その適用性・妥当性が検証されていることを確認した。

以上より、今回工認において東海第二発電所原子炉建屋屋根トラスの評価に弾塑性解析を採用することは妥当であると考ええる。

【参考文献】

- [1] 谷口ほか：鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol.37B号，1991年3月，pp.303 - 316
- [2] 柴田ほか：鉄骨筋違の履歴特性の定式化，日本建築学会論文報告集第316号，昭和57年6月，pp.18 - 24
- [3] 鈴木ほか：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 Vol.76 No.661，2011年3月，pp.571 - 580
- [4] 中込ほか：繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 No.469，1995年3月，pp.127 - 136

東海第二発電所

機器・配管系における手法の変更点について
(耐震)

1. はじめに

今回工認における機器・配管系の耐震評価において、既工認から評価手法を変更するものについて、「別紙 1 既工認との手法の相違点の整理について（設置変更許可申請段階での整理）」の整理結果を踏まえ、以下に結果を示すものである。

2. 手法の相違点

(1) 原子炉建屋クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用

原子炉建屋クレーンの解析では、より詳細な手法を用いる観点から、すべり及び浮き上がりの条件を考慮した非線形時刻歴応答解析にて評価を実施する。原子炉建屋クレーンの非線形時刻歴応答解析の適用については、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料 1 参照）。

(2) ポンプ等の解析モデルの精緻化

最新の工認実績等を踏まえ、ポンプ等の一部設備に対して解析モデルの質点数の変更、設備の支持構造に沿った解析モデルの精緻化を行う。多質点モデルによる地震応答解析モデルの適用は、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料 2 参照）。

(3) 容器等の応力解析への F E Mモデルの適用

既工認において、公式等による評価にて耐震計算を実施していた設備について、3次元 F E Mモデル、多質点モデルを適用した耐震評価を実施する。F E Mモデルを用いて応力解析を行う手法は、他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料 3 参照）。

(4) 解析コードの変更

今回工認における格納容器、原子炉压力容器等の主要設備の耐震評価に

適用する解析コードについては，建設時に適用した解析コードから他プラントを含む既工認において適用実績がある解析コードに変更する（詳細は添付資料 4 参照）。

(5) 最新知見として得られた減衰定数の採用

最新知見として得られた減衰定数を採用する設備は以下のとおりであり，その値は，振動試験結果等を踏まえ，設計評価用として安全側に設定した減衰定数を採用したものである。

また，鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い，鉛直方向の設計用減衰定数についても新たに設定している。

天井クレーン，燃料取替機及び配管系の減衰定数並びに鉛直方向の設計用減衰定数は他プラントを含む既工認において適用実績がある（詳細は添付資料 5 参照）。

天井クレーンの減衰定数

燃料取替機の減衰定数

配管系の減衰定数

(6) 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せ

今回工認の評価では，鉛直方向の動的地震力が導入されたことから，水平方向と鉛直方向の地震力の組み合わせとして，既往の研究等に基づき二乗和平方根（以下「SRSS」という。）法を用いる。SRSS法による荷重の組み合わせは，他プラントを含む既工認において適用実績がある手法である（詳細は添付資料 6 参照）。

(7) 鉛直方向応答解析モデルの追加

今回工認では，鉛直方向に動的地震動が導入されたことから，原子炉本体及び炉内構造物について，鉛直方向の応答を適切に評価する観点で，水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向応答解析モデルを新たに採用し鉛

直地震動に対する評価を実施する。鉛直方向応答解析モデルは他プラントを含む既工認にて適用実績があるモデルである。(詳細は添付資料7参照)。

(8) 炉内構造物への極限解析による評価の適用

既工認において、公式等による評価にて耐震計算を実施していた炉内構造物について、3次元FEMモデルを適用した極限解析による評価を実施する。極限解析による評価は、規格基準に基づく手法であり、他プラントでの既工認において適用実績がある手法である(詳細は添付資料8参照)。

3. 手法の変更項目に対する東海第二発電所への適用性

手法の変更点について、以下に示す3項目に分別した上で、東海第二発電所としての適用性を示す

(1) 先行プラントの知見反映を基本として変更する手法

先行プラントで適用されている知見を反映する目的の変更項目については、従来からの耐震設計手法に基づき、評価対象施設を質点系モデル、有限要素法モデルに置換し、地震応答解析を実施することにより評価は可能であるため、東海第二発電所への適用に際して問題となることはない。

- ・クレーンの時刻歴応答解析の適用
- ・ポンプ等の応答解析モデルの精緻化
- ・容器等の応力解析へのFEMモデルの適用
- ・解析コードの変更

(2) 鉛直方向地震の動的な取扱いを踏まえて適用する手法

平成18年9月の耐震設計審査指針改訂から鉛直方向地震力に対する動的に取扱いがされており、大間1号炉及び新規制基準での工認においてPWRプラントで適用実績があり、東海第二発電所への適用に際して問題となることはない。

- ・ 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根による組合せ
- ・ 鉛直方向応答解析モデルの追加

(3) より現実的な応答を模擬する観点から採用する手法

a . 最新知見として得られた減衰定数の採用

今回工認においては、配管系、天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数は、振動試験結果等を踏まえて設定した減衰定数を採用する。

配管系においては、新規制基準での PWR プラントでの適用実績があり、また炉型、プラント毎による設計方針について大きな差はない。また、最新知見として採用する減衰定数の設定の検討に際して、BWR プラントの配管系を踏まえた検討も実施しており、適用に際して問題となることはない。

天井クレーン及び燃料取替機の減衰定数の設定に際しては、振動試験を用いた検討を実施している。振動試験の試験体は、実機と同等の振動特性である試験体を用いることにより、減衰定数のデータを採取している。東海第二発電所として適用する天井クレーン及び燃料取替機について、振動試験に用いた試験体と同等の構造仕様であることを確認しており、最新知見として得られた減衰定数の適用に際して問題となることはない（試験等の詳細は、添付資料 5 に記載）。なお、本減衰定数の適用は、大間 1 号炉及び天井クレーンに対しては新規制基準での工認において PWR プラントで適用実績がある。

b . 極限解析による評価の適用

極限解析による評価については、JEAG 4 6 0 1 及び JSME 設計・建設規格で規定されており適用に際して問題となることはない。ただし、他の手法に比べて適用実績及び審査実績が少ないことを踏まえて、極限解析による評価の妥当性の確認を行う。

4. 添付資料

- (1) 原子炉建屋クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について
- (2) ポンプ等の解析モデルの精緻化について
- (3) 容器等の応力解析へのF E Mモデルの適用について
- (4) 解析コードの変更について
- (5) 最新知見として得られた減衰定数の採用について
- (6) 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せについて
- (7) 鉛直方向応答解析モデルの追加について
- (8) 炉内構造物への極限解析による評価の適用について

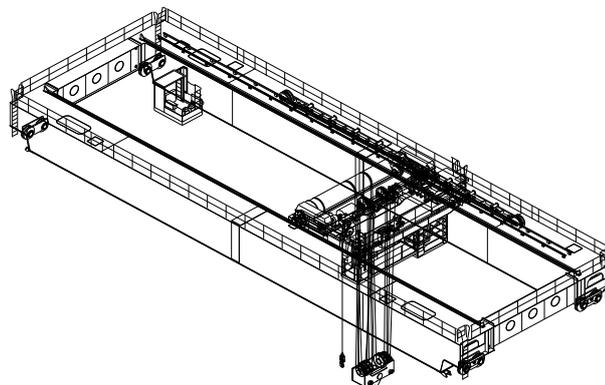
原子炉建屋クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用について

1. 概要

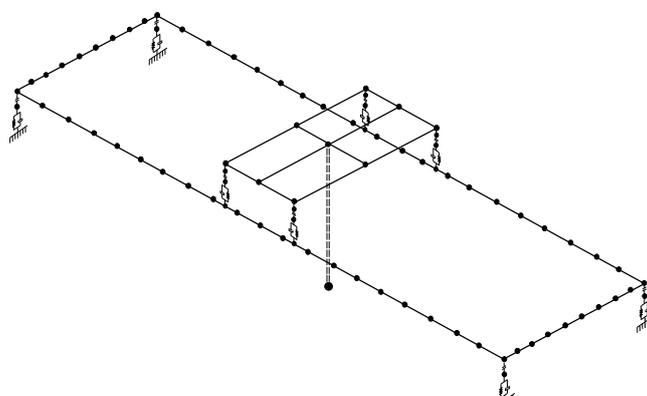
原子炉建屋クレーン（第 1-1 図）の耐震評価は，既工認では鉛直方向は静的地震力のみであったことから簡便に手計算により実施していた。

今回工認では，鉛直方向の動的地震力を考慮する必要があること及びクレーンの車輪部がレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ，鉛直方向の地震力に対する車輪部の浮き上がり挙動を考慮した解析モデル（第 1-2 図）を用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

なお，本モデル及び評価手法は大間 1 号炉の建設工認にて適用例があり，大間 1 号炉と東海第二発電所の原子炉建屋クレーンは類似構造であることから，東海第二発電所の原子炉建屋クレーンにも適用可能である。



第 1-1 図 原子炉建屋クレーン構造概要図



第 1-2 図 今回工認の解析モデル

2. 原子炉建屋クレーンの構造

大間1号炉と東海第二発電所の原子炉建屋クレーンは、第1-3図に示すとおり原子炉建屋に設置された走行レール上をガーダ及びサドルが走行し、ガーダ上に設置された横行レールをトロリが横行する構造であり、いずれも同様の構造（別紙1参照）となっており、地震力に対し以下の挙動を示す。

(1) 走行方向の水平力

- a. クレーンは走行レール上に乗っているだけで固定されていないため、走行方向の水平力がクレーンに加わっても、クレーンはレール上をすべるだけで、クレーン自身にはレールと走行車輪間の最大静止摩擦力以上の水平力は加わらない。
- b. クレーンの走行車輪は、駆動輪又は従動輪である。
- c. 駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、地震の加速度が車輪部に加わると回転部分が追従できず、最大静止摩擦力以上の力が加わればレール上をすべる。

(2) 横行方向の水平力

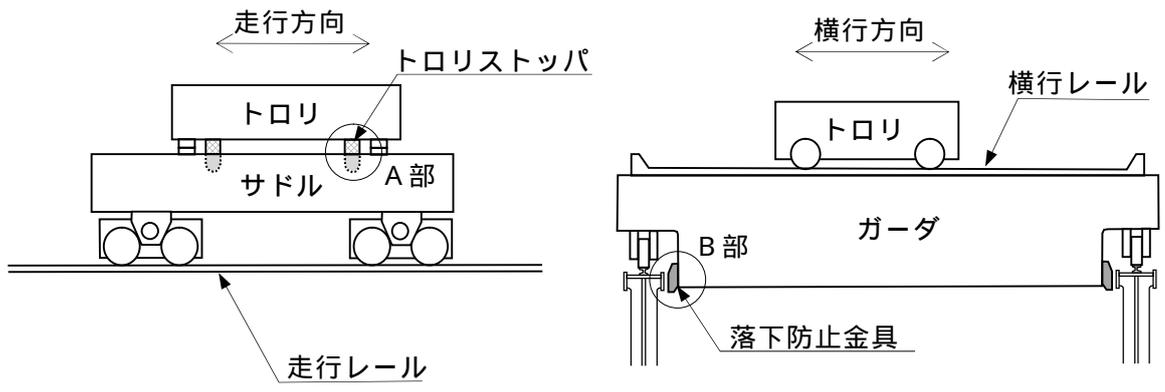
- a. ガーダ関係
 - (a) 横行方向は、走行レールに対して直角方向であるため、ガーダは建屋と固定されているものとし、水平力がそのままガーダに作用する。
- b. トロリ関係
 - (a) トロリはガーダの上に乗っているだけでガーダとは固定されていないため、水平力がトロリに加わっても、トロリはレール上をすべるだけで、トロリ自身にはレールと横行車輪間の最大静止摩擦力以上の水平力は加わらない。
 - (b) トロリの横行車輪は、駆動輪又は従動輪である。

(c) トロリの駆動輪は、電動機及び減速機等の回転部分と連結されているため、地震の加速度が車輪部に加わると回転部分が追従できず、最大静止摩擦力以上の力が加われればレール上をすべる。

(3) 鉛直力

ガーダ及びトロリは、レールと固定されていないことから、鉛直方向の地震力によってレールから浮き上がる可能性がある。

また、東海第二発電所の原子炉建屋クレーンは、今後実施する耐震補強工事により、大間1号炉のトロリストッパ及び脱線防止ラグと同様な構造変更を行うことにより、車輪まわりのトロリストッパ及び落下防止金具とレールの間を取り合い構造は、認可実績のある大間1号炉の原子炉建屋クレーンと同様の構造となることから、車輪まわりを含めた地震応答解析モデルは大間1号炉と同様にモデル化することができる（構造変更の概要は別紙2参照）。



	大間1号炉	東海第二発電所
A部	<p>トロリ ストップ</p> <p>トロリ</p> <p>ガーダ</p>	<p>トロリ</p> <p>トロリストップ</p> <p>ガーダ</p>
B部	<p>ガーダ</p> <p>脱線防止ラグ</p>	<p>ガーダ</p> <p>落下防止金具</p>

第1-3図 車輪まわりの構造比較

3. 解析評価方針

(1) 評価方法

既工認と今回工認の評価方法を第 1-1 表に示す。今回工認では、鉛直方向の動的地震力を考慮する必要があること及びクレーンの車輪部の構造を変更しておりレール上に固定されていないという構造上の特徴を踏まえ、鉛直方向の地震力に対する車輪部の浮き上がり、衝突の挙動を考慮した 3 次元 F E M 解析モデルを用いた非線形時刻歴応答解析により評価を実施する。

第 1-1 表 既工認と今回工認の評価方法の比較

項 目	東海第二発電所		大間 1 号炉
	既工認	今回工認	
解析手法	公式等による 評価	非線形時刻歴 応答解析	同左
解析モデル	-	3 次元 F E M 解析モデル	同左
車輪 - レール間の境 界条件	すべり考慮	すべり、浮き上 がり、衝突考慮	同左
地震力	水平	動的地震力	同左
	鉛直		同左
減衰定 数	水平	2.0% ²	同左
	鉛直		同左
解析プログラム	-	Abaqus (Ver.6.5-4)	同左

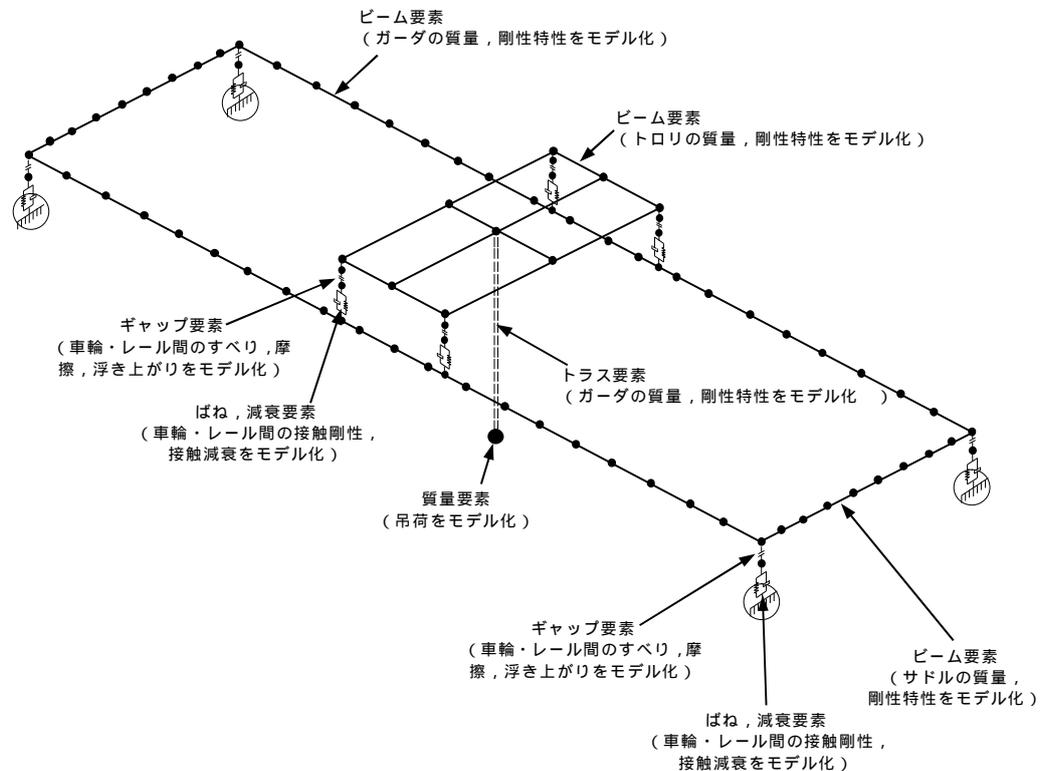
1：既工認では剛として耐震評価を実施しているため減衰定数は使用していない。

2：添付資料 5 にて適用性を説明。

(2) 地震応答解析モデル

クレーンを構成する主要部材をビーム要素でモデル化し、車輪部はレール上に乗っており固定されておらず、すべり、浮き上がり及び衝突の挙動を示す構造であることから、ギャップ要素、ばね要素及び減衰要素でモデル化する。クレーンの解析モデルを第 1-4 図に示す。

なお、今回工認の原子炉建屋クレーンのモデル化は、大間 1 号炉と同一の設定方法とする（車輪部の非線形要素については別紙 3 参照）。



原子炉建屋におけるクレーン設置フロアの床応答加速度時刻歴の入力位置

ワイヤロープ長さは、最大吊荷荷重を取扱う際の実運用を踏まえて、クレーン本体の評価が保守的になるように設定する。

第 1-4 図 原子炉建屋クレーン地震応答解析モデル

(3) 地盤物性等の不確かさに対する検討方針

スペクトルモーダル解析等では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期のシフトを考慮して周期方向に $\pm 10\%$ 拡幅したものをを用いている。

本評価では設計用床応答スペクトルを用いない時刻歴応答解析を採用することから、今回工認では地盤物性等の不確かさによる建屋固有周期のシフトの影響も考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対し ASME Boiler Pressure Vessel Code SECTION , DIVISION1-NONMANDATORY APPENDIX N-1222.3 Time History Broadening) に規定された設計用床応答スペクトルで考慮されている拡幅 $\pm 10\%$ に相当するゆらぎを仮定する手法による検討を行う予定である。

なお、ゆらぎを考慮した設計用床応答スペクトルの谷間にクレーンの固有周期が存在する場合は、ASME の規程に基づきピーク位置が固有周期にあたるようにゆらぎを考慮した評価も行う。

4. 別紙

- (1) 原子炉建屋クレーンの主要諸元
- (2) 原子炉建屋クレーンの耐震補強工事による構造変更
- (3) クレーン車輪部の非線形要素（摩擦・接触・減衰）
- (4) 原子炉建屋クレーンの地震時挙動に関する補足説明

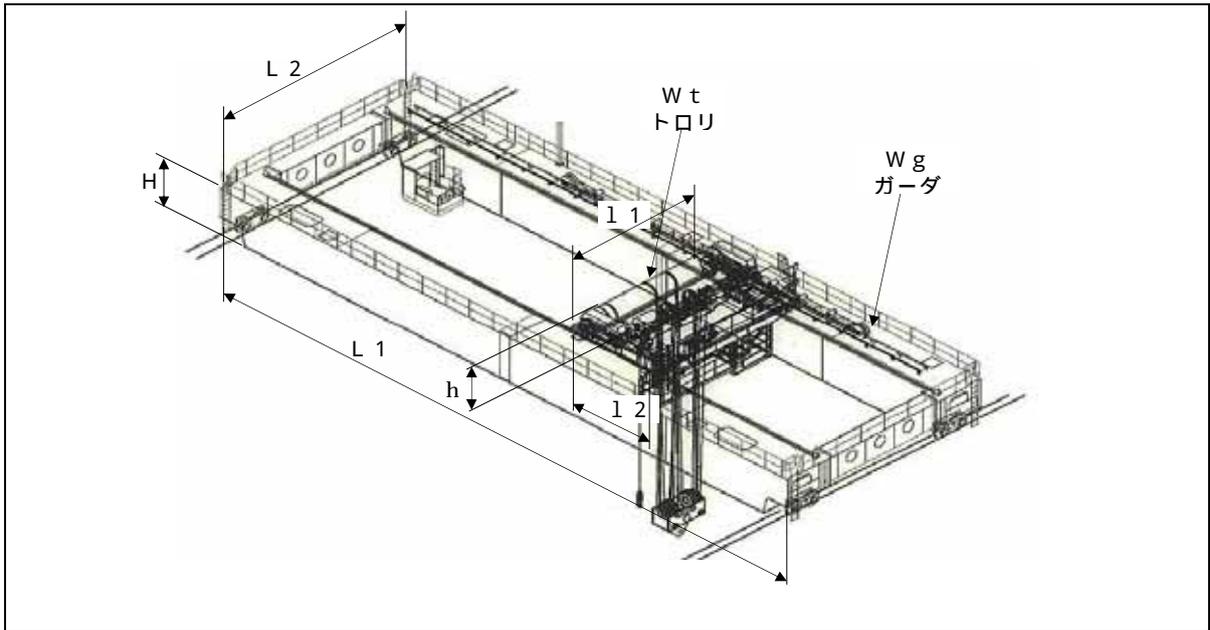
5. 参考文献

- (1) 平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査

動的上下動耐震試験(クレーン類)に関わる報告書(08 耐部報-0021 (独)
原子力安全基盤機構)

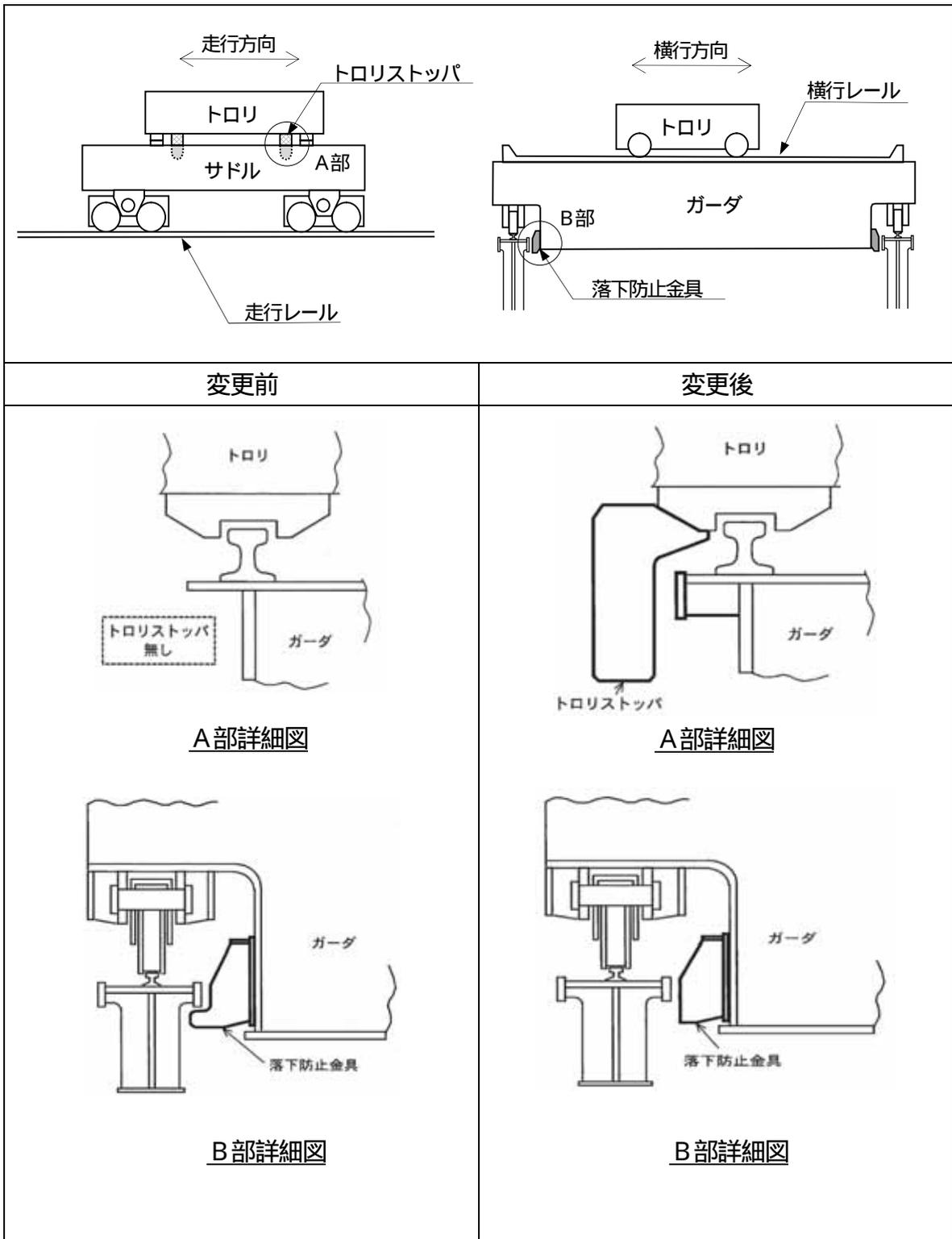
- (2) 平成 20 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査
動的上下動耐震試験(クレーン類)に関わる報告書(08 耐部報-0021 (独)
原子力安全基盤機構)

別紙 1 原子炉建屋クレーンの主要諸元



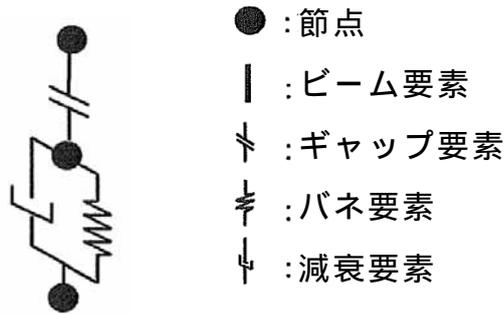
仕様		大間 1 号炉	東海第二発電所
トロリ	質量 W t (ton)	80.0	48.0
	高さ h (m)	2.815	2.280
	スパン l 1 (m)	7.7	5.6
	スパン l 2 (m)	4.6	4.1
ガーダ	質量 W g (ton)	190	118.0
	高さ H (m)	2.5	1.915
	スパン L 1 (m)	34.9	39.5
	スパン L 2 (m)	9.38	6.2
総質量	W (ton)	270.0	166.0

別紙2 原子炉建屋クレーンの耐震補強工事による構造変更



別紙3 クレーン車輪部の非線形要素（摩擦・接触・減衰）

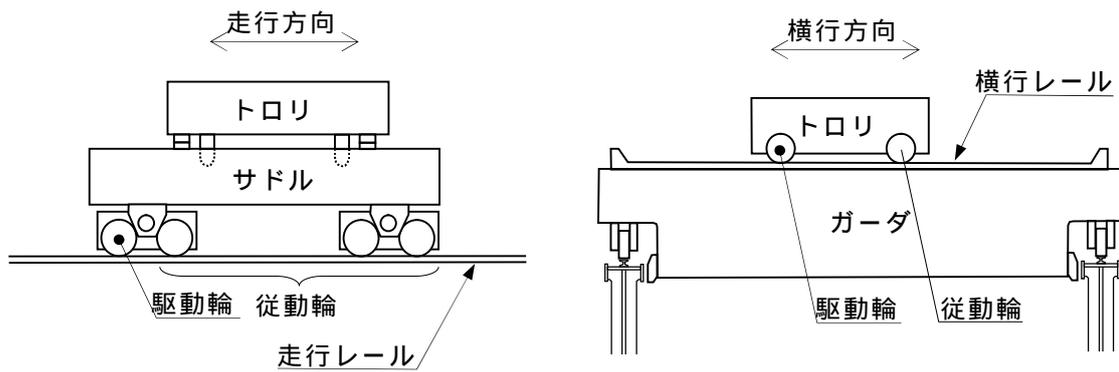
クレーン車輪部のモデル化では、すべり、浮き上がり及び衝突の挙動を模擬するためギャップ要素を用いる。また、接触部位の局所変形による接触剛性をバネ要素で、衝突による減衰効果を減衰要素で模擬し、別図 1-1 に示すように、ギャップ要素と直列に配置する。



別図 1-1 車輪部の非線形要素

1. 車輪とレール間の摩擦特性

クレーンの車輪には電動機、減速機等の回転部分と連結された駆動輪と、回転部分と連結されている従動輪の 2 種類がある。このうち駆動輪は回転が拘束されているため、地震の加速度が車輪部に入力されると回転部分が追従できず、最大静止摩擦力以上の力が加わればレール上をすべる。ここで、摩擦係数は既工認と同様の 0.3 を用いる。天井クレーンの車輪とレール間の摩擦係数 0.3 を適用し設計震度として算定することについては、クレーン耐震設計指針（日本クレーン協会規格 JCAS 1101-2008）に定められている。また「天井クレーンのすべりを伴う地震時挙動試験(火力原子力発電 Vol.40 NO.6 1989)」にて、地震波による加振試験において、摩擦係数の平均値として 0.14 の結果が得られている。



別図 1-2 概要図

2. 車輪とレールの接触剛性

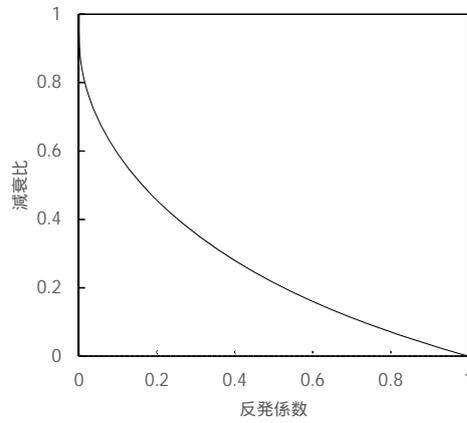
接触剛性は、「平成 20 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン試験）に関わる報告書（09 耐部報-0008,（独）原子力安全基盤機構）」^(参2)を参照し、車輪とレールの衝突時の剛性を模擬するものとして接触剛性を考慮したばね要素とクレーン質量で構成される 1 自由度系の固有振動数が 20Hz 相当になるよう設定する。

3. 車輪とレールの衝突による減衰

衝突による減衰は、「平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験（クレーン類）に関わる報告書（08 耐部報-0021,（独）原子力安全基盤機構）」^(参1)にて実施した要素試験のうちの車輪反発係数試験結果から評価した反発係数から換算する。なお、減衰比と反発係数の関係式には次式を用いる。

$$e = \exp\left(-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\right)$$

ここで、 e は反発係数、 h は減衰比である。別図 1-3 に、上記の式で表される反発係数と減衰比の関係を示す。



別図 1-3 反発係数と減衰比の関係

別紙 4 原子炉建屋クレーンの地震時挙動に関する補足説明

1. 車輪とレールとの摩擦力及び落下防止部材との接触による摩擦力の考慮について

クレーンは、レール上を車輪で移動する構造であるため、建屋に固定されておらず、地震時にはレールに沿う方向にはすべりが発生し、摩擦力以上の荷重を受けない構造である。

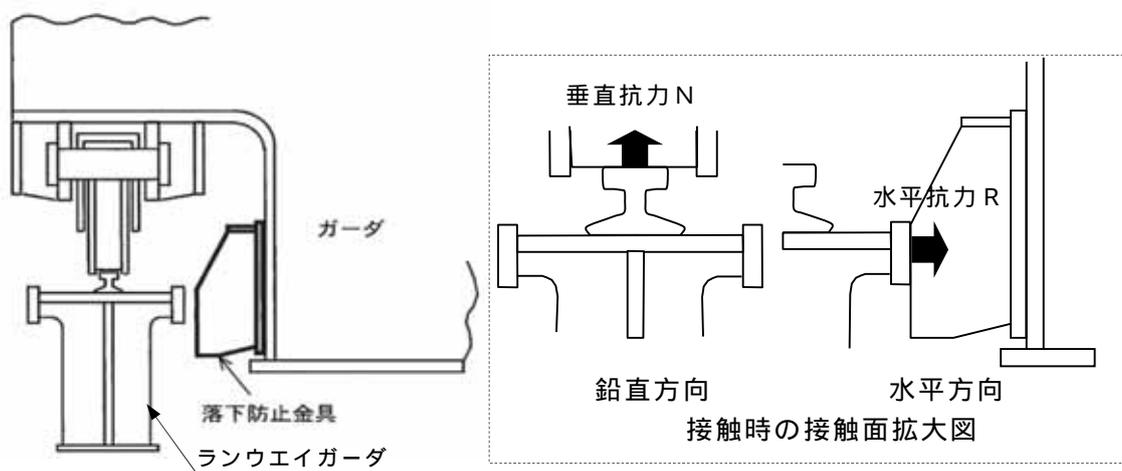
クレーン本体とランウェイガーダ間の取り合い部を例とすると、すべりを想定する面としては、鉛直方向（車輪からレール間）と水平方向（落下防止金具からランウェイガーダ間）が挙げられる（別図 1-4）。

鉛直方向には、自重が常時下向きに加わっており、地震による鉛直方向加速度が 1 G を上回りクレーン本体が浮き上がりの挙動を示すごく僅かな時間帯を除き、常に車輪はレール上面に接触し垂直抗力 N が発生する状態であることから、摩擦係数 μ ($= 0.30$) 一定の条件の下、垂直抗力 N を時々刻々変化させた摩擦力 f ($= \mu N$) を考慮している。

これに対して、水平方向には常時作用する荷重が無く、水平方向（横行方向）の地震力が作用し落下防止金具がランウェイガーダ側面に接触する際のみ水平抗力 R が発生する。しかしながら、地震力は交番荷重であること及び、接触後も部材間の跳ね返りが発生することから、側面の接触時間はごく僅かな時間となる。また、大きな摩擦力が発生するためには、横行方向の地震力により瞬間的に水平抗力 R が発生する間に、走行方向の大きな地震力が同時に作用することが必要であることから、各方向地震動の非同時性を考慮し、側面の接触による摩擦力は考慮していない。

なお、基準地震動 S_g による地震力に対して、駆動輪に接続される電動機及び減速機等の回転部分が破損し駆動輪が自由に回転する可能性も考えられ

るが、その場合は駆動輪が回転することにより摩擦力は低減することから、上記のように摩擦力を考慮した評価を行うことで保守的な評価となると言える。



別図 1-4 鉛直方向と水平方向との接触面

2. レール等の破損による解析条件への影響について

クレーンのモデル化にあたっては、車輪がレール上にあり、レール直角方向に対しては落下防止金具又はトロリストッパが接触して機能することを前提としている。

ここでは、地震応答解析モデルの前提としている「レール上に車輪が乗っていること」が落下防止金具又はトロリストッパの健全性を確認することで満足されることを、クレーン本体とランウェイガーダ間の取り合い部を例として示す。

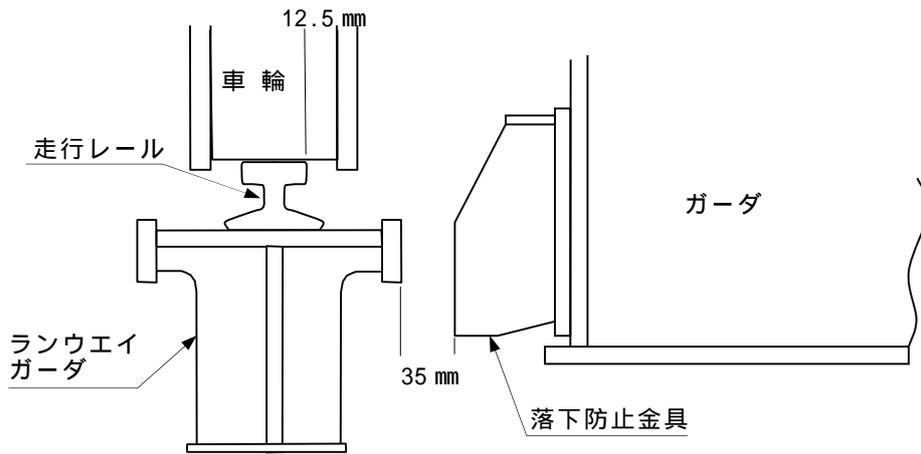
クレーン横行方向に地震力が作用する際は、車輪がレール上に乗り上がる挙動が想定されるが、落下防止金具がランウェイガーダに接触することで、横行方向の移動量は制限される。落下防止金具は構造強度部材として基準地震動 S_s によって生じる地震力に対して、許容応力を満足する設計としており、地震で破損することは無いため、落下防止金具とランウェイガーダ間の

ギャップ量に相当する移動量となった場合であっても、構造上車輪はレール上から落ちることは無い(別図 1-5)。

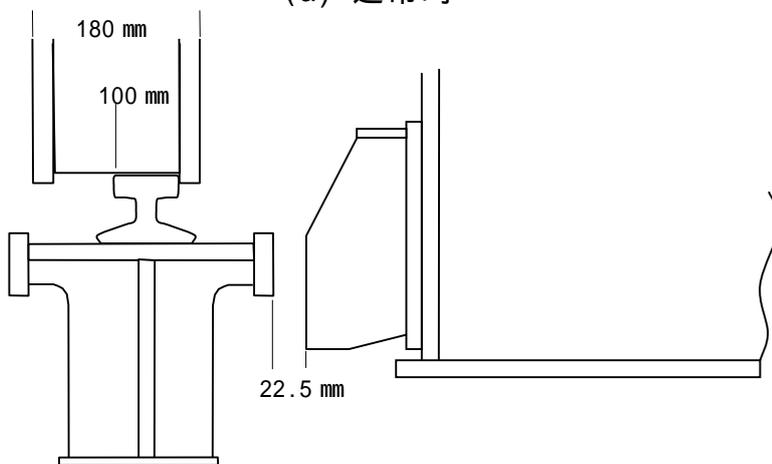
本体ガードとトロリストッパの寸法も同様の関係となっている。

また、落下防止金具とランウェイガードが接触するより前に、車輪からレールに荷重が伝わることとなるが、車輪のつばとレールが接触(移動量 12.5mm)してから落下防止金具とランウェイガードが接触(移動量 35mm)し移動が制限されるまでの移動量は 22.5mm (= 35mm - 12.5mm) 程度であることから、落下防止金具が接触して機能する前に鋼製部材であるレールが大きく破損することは無いと考えられる。このように、車輪のつばの有無によらず構造強度部材である落下防止金具が機能することで車輪がレール上にとどまる設計であることから、車輪のつばは地震応答解析の前提条件に影響するものではない。

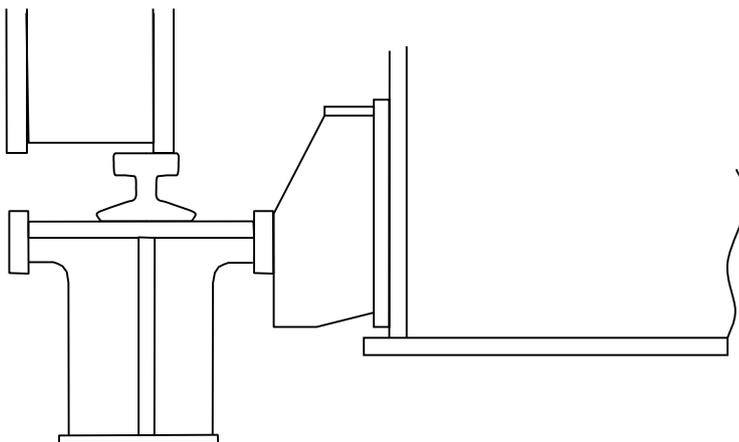
以上より、地震時に落下防止金具がランウェイガードに接触して機能する前に、車輪がすべり面であるレールから落下することや、レールが大きく破損することが無いことから、落下防止金具が機能する前に地震応答解析モデルの前提を満足しなくなるおそれは無いと言える。



(a) 通常時



(b) 水平方向地震力により車輪のつばがレールに接触
(水平移動量 12.5mm)



(c) 水平方向地震力により落下防止金具とランウエイガードが接触
(水平移動量 35mm)

(本図は車輪がレールから外されないことを示すための概念図であり，構造物の大きさや間隙については実物とは異なる。)

別図 1-5 概念図

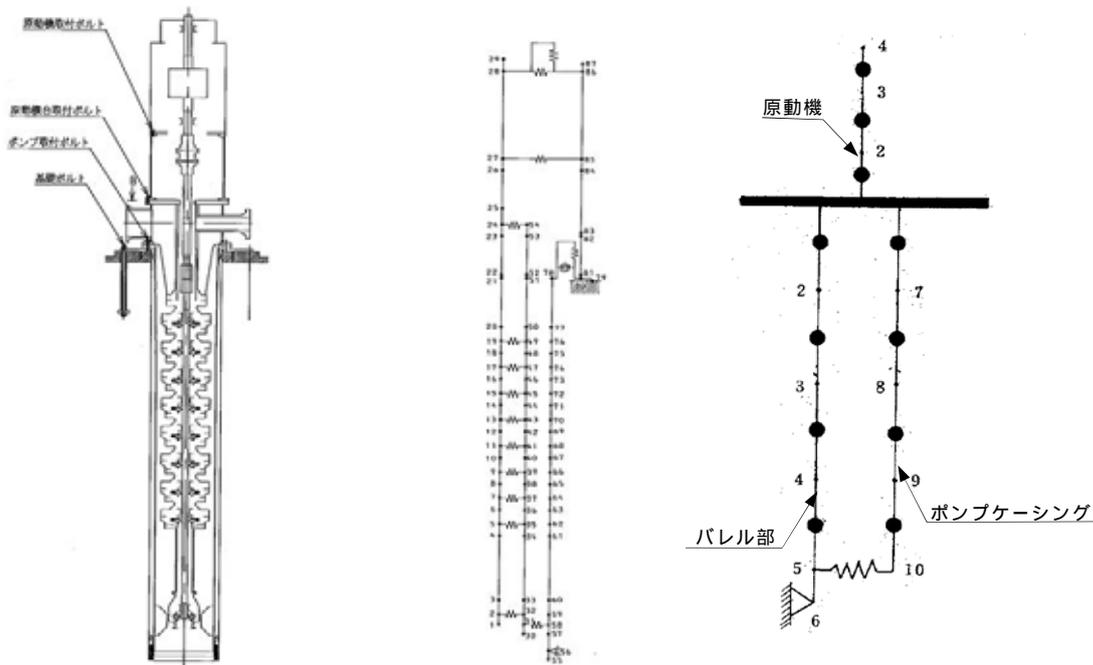
4条 - 別紙 5 - 23

ポンプ等の解析モデルの精緻化について

1. 立形ポンプの解析モデルの精緻化

既工認における高圧炉心スプレイポンプ，低圧炉心スプレイポンプ及び残留熱除去系ポンプの解析モデルは，立形ポンプの構造を模擬したバレル部及びポンプケーシングによる質点系モデルを構築していた。今回工認では，最新の知見によるモデル化を行う観点から，J E A G 4601-1981 追補版に基づき，モデルの精緻化を行う（第 2-1 図参照）。

なお，本解析モデルは大間 1 号炉の既工認及び東海第二発電所の立形ポンプのうち，非常用ディーゼル発電機海水ポンプ及び残留熱熱除去系海水ポンプの既工認にて適用実績がある（第 2-2 図参照）。



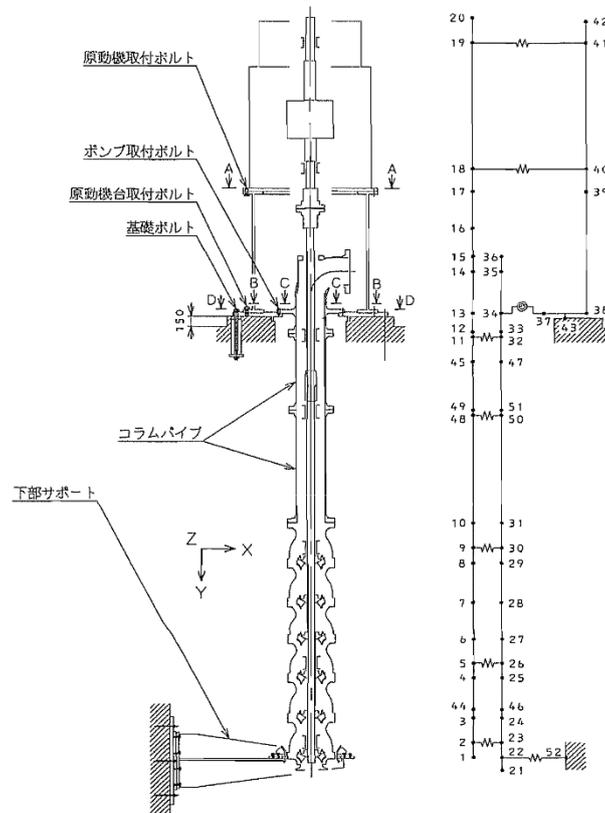
構造概要図

今回工認の解析モデル

既工認の解析モデル

第 2-1 図 立形ポンプの解析モデル図

（高圧炉心スプレイポンプ解析モデルの例）



構造概要図 既工認の解析モデル

第 2-2 図 残留熱除去系海水ポンプ解析モデル

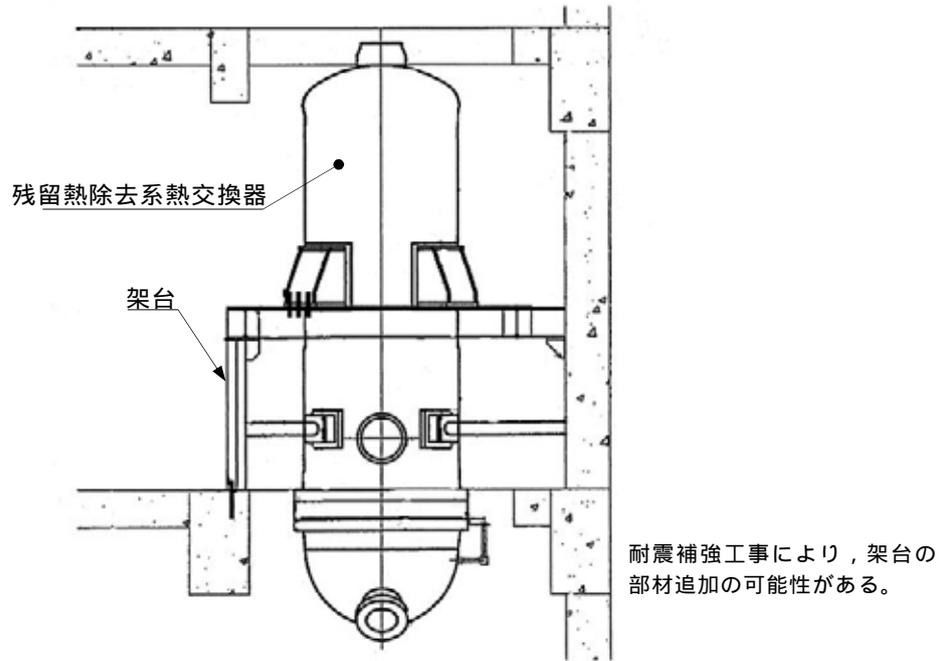
2. 残留熱除去系熱交換器の解析モデルの精緻化

残留熱除去系熱交換器の支持構造概要図を第 2-3 図に示す。残留熱除去系熱交換器は、原子炉建屋床面に設置された架台を介して支持する構造である。既工認における応力評価は、架台部の 1 次固有周期に対して設計用床応答スペクトルから算出される加速度を入力として、規格計算式によって熱交換器本体の評価を実施していた。

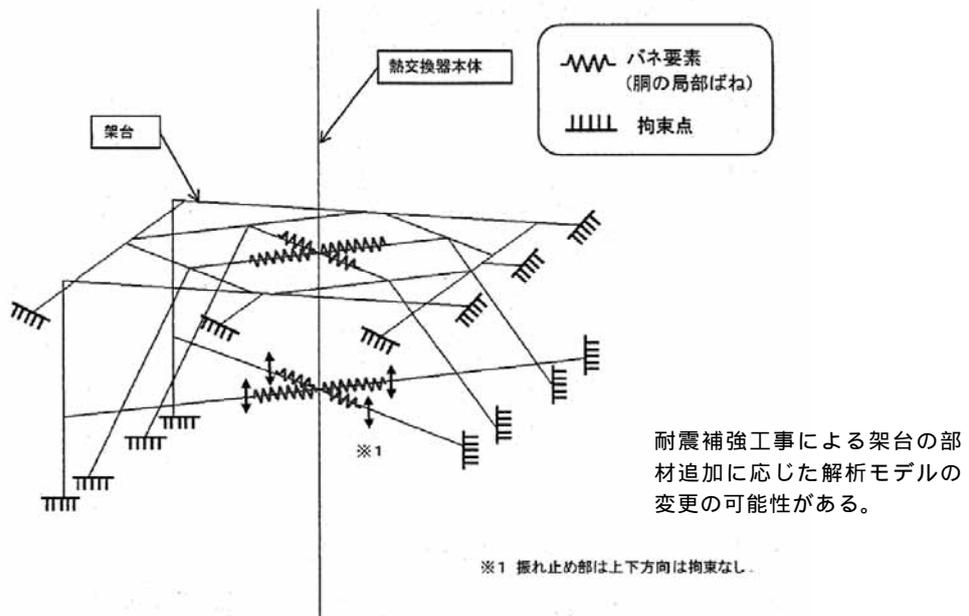
今回工認においては、架台及び熱交換器本体との相互影響を精緻に評価す

る観点から、第2-4図に示す多質点系のはりモデルを用いた地震応答解析により評価を行う。

なお、多質点系のはりモデルを用いた地震応答解析については、大間1号炉においての既工認にて適用実績がある。



第2-3図 残留熱除去系熱交換器支持構造概要図

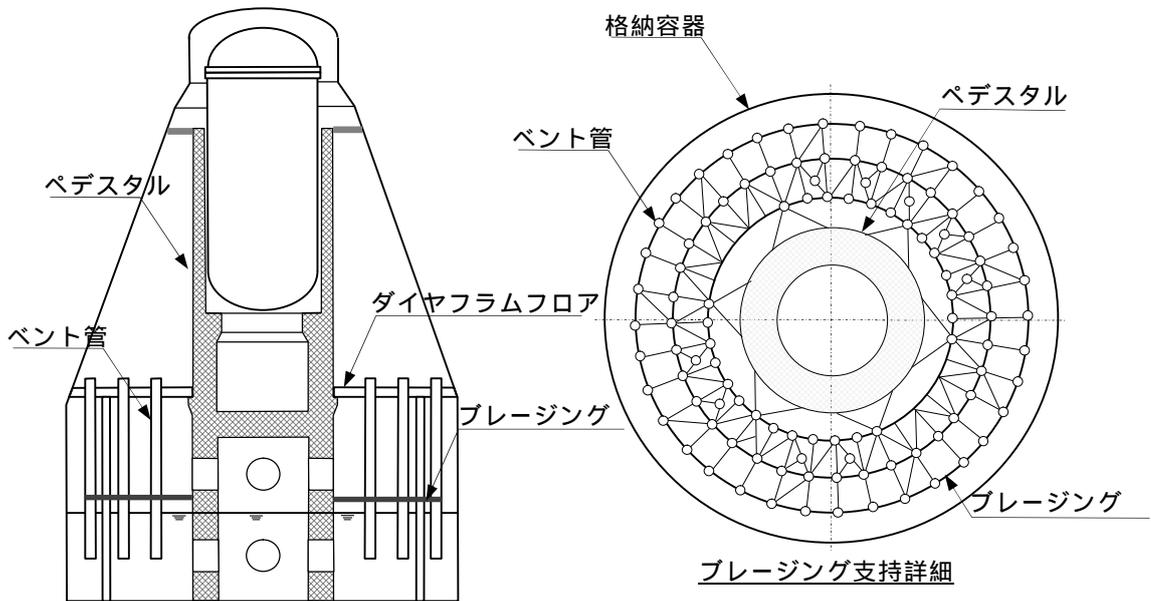


第2-4図 残留熱除去系熱交換器解析モデル図

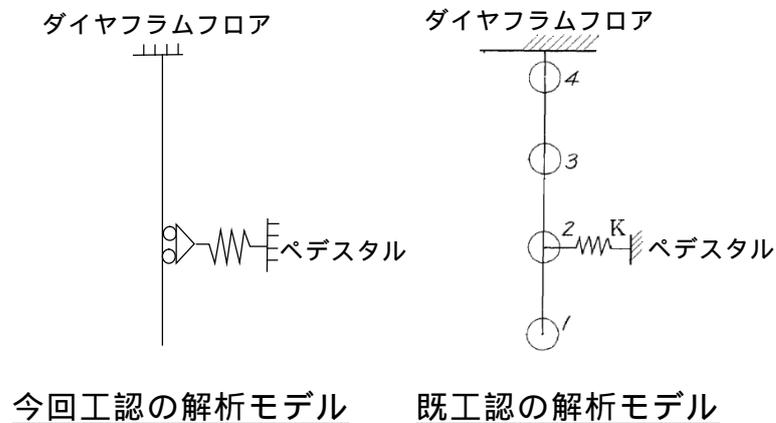
3. 格納容器ベント管の解析モデルの精緻化

格納容器のベント管の支持構造図を第 2-5 図に示す。ベント管はダイヤフラムフロアにより支持され、ブレイジングにて水平方向を拘束されている。

第 2-6 図にベント管の解析モデル図を示す。今回工認においては、大間 1 号炉の既工認実績を踏まえて、質点モデルからビーム要素に変更した解析モデルを用いた地震応答解析により評価を行う。



第 2-5 図 ベント管概要図



第 2-6 図 ベント管解析モデル図

容器等の応力解析への F E Mモデルの適用について

既工認において、公式等による評価にて耐震計算を実施していた設備について、至近の既工認の適用実績を踏まえて、3次元 F E Mモデル、多質点モデルを適用した耐震評価を実施する。F E Mモデルを用いる手法等は、大間 1号炉を含めて他 B W Rでの適用実績がある手法である。

1. 容器への F E Mモデルの適用

パーソナルエアロック、サプレッションチェンバ、アクセスハッチ等の格納容器本体に取付く各構造物並びにディーゼル発電機の付属設備である始動用空気だめ及び燃料油デイトンクについて、実機の形状をシェル要素にて模擬し、J S M E等に基づく材料諸元を与えてモデル化することにより、応答解析を行う。応答解析に用いる解析モデル図の例を第 3-1 図に示すとともに第 3-1 表及び第 3-2 表に解析概要を示す。



第 3-1 図 格納容器の F E Mモデル図
(パーソナルエアロックの F E Mモデルの例)

第 3-1 表 格納容器の F E M 解析概要

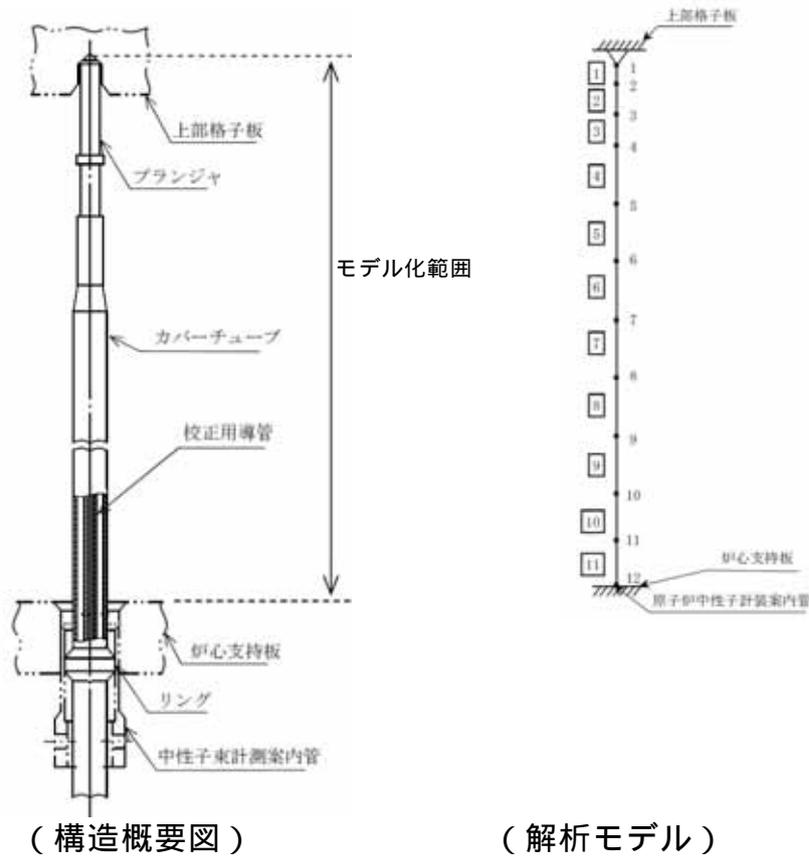
項 目	内 容
適用部位	パーソナルエアロック取付部 サプレッションチェンバアクセスハッチ取付部 イクイPMENTハッチ取付部 配管貫通部取付部 電気配線貫通部取付部 上部シアラグ取付部 下部シアラグ取付部
解析コード	NASTRAN
地震条件	別途実施する地震応答解析から得られる地震力（荷重，加速度）を入力とする。

第 3-2 表 D G 用補機類容器の F E M 解析概要

項 目	内 容
適用部位	非常用ディーゼル発電機用始動空気だめ及び燃料油デイトンク 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用始動空気だめ及び燃料油デイトンク
解析コード	Abaqus
地震条件	別途実施する原子炉建屋地震応答解析から得られる加速度を入力とする。

3. 原子炉圧力容器内構造物への多質点モデルの適用

原子炉圧力容器内構造物であるジェットポンプ、炉心スプレイスパージャ及び出力領域計装検出器（LPRM）について、実機形状を質点とはり要素に置き換えた多質点モデルにて応答解析を行う。応答解析に用いる解析モデル図の例を第 3-2 図に示すとともに第 3-3 表に解析概要を示す。



第 3-2 図 原子炉圧力容器内構造物の多質点モデル図

(出力領域計装検出器の多質点モデルの例)

第 3-3 表 原子炉压力容器内構造物解析概要

項目	内容
適用部位	ジェットポンプ ^{*1} 高圧炉心スプレイスパージャ ^{*1} 低圧炉心スプレイスパージャ ^{*1} 出力領域計装検出器 ^{*2}
解析コード	NASTRAN (* 1 に適用) SAP - (* 2 に適用)
地震条件	別途実施する地震応答解析から得られる加速度を入力とする。

解析コードの変更について

今回工認における格納容器，原子炉压力容器等の主要設備の耐震評価に適用する解析コードについては，既工認時に適用した解析コードから第 4-1 表に示す大間 1 号炉の既工認において適用実績がある解析コードに変更する。各評価対象設備の解析モデルの設定の妥当性については，工事計画認可申請の耐震計算書において説明するものとする。

第 4-1 表 格納容器，原子炉压力容器等の解析コードの変更（1 / 2）

評価対象設備		解析コード		適用実績
		既工認	今回工認	
格納容器	<ul style="list-style-type: none"> ・ドライウエル ・サブプレッションチェンバ ・ベント管 ・格納容器スプレイヘッダ 	ASSAL	NASTRAN	大間 1 号炉 既工認
原子炉压力容器	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒胴 ・下鏡 ・制御棒駆動機構ハウジング貫通部 ・再循環水出口ノズル ・再循環水入口ノズル ・蒸気出口ノズル ・給水ノズル ・低圧炉心スプレイノズル ・高圧炉心スプレイノズル ・低圧注水ノズル ・上鏡スプレイノズル ・ベントノズル ・ジェットポンプ計測管貫通部ノズル ・液体ポイズン及び炉心計測ノズル ・円筒胴計測ノズル ・ドレンノズル ・支持スカート 	ASSAL 及び FEMR	ASHSD2	大間 1 号炉 既工認
	<ul style="list-style-type: none"> ・差圧検出・ほう酸水注入配管 	EBASCO 社 構造解析コード	NASTRAN	大間 1 号炉 既工認

第 4-1 表 格納容器，原子炉压力容器等の解析コードの変更（2 / 2）

設備名	評価対象項目	解析コード		適用実績
		既工認	今回工認	
炉心支持構造物 （压力容器内構造物を含む）	・シュラウドサポート	ASSAL	ASHSD2	大間 1 号炉 既工認
	・給水スパージャ ・炉心スプレイ系配管（原子炉压力容器内） ・差圧検出・ほう酸水注入系配管（原子炉压力容器内）	EBASCO 社 構造解析コード	NASTRAN	大間 1 号炉 既工認
	・起動領域計装	HISAC	SAP-	大間 1 号炉 既工認
その他機器類	・水圧制御ユニット	EBASCO 社 構造解析コード	SAP-	大間 1 号炉 既工認

最新知見として得られた減衰定数の採用について

1. 概要

今回工認では、以下の設備について最新知見として得られた減衰定数を採用する。これらの変更は、振動試験結果を踏まえ設計評価用として安全側に設定した減衰定数を最新知見として反映したものであり、大間1号炉の建設工認並びに配管及び建屋クレーンについては新規制工認におけるPWRプラントでの適用実績がある。

原子炉建屋クレーン及び使用済燃料乾式貯蔵建屋クレーン（以下「建屋クレーン」という。）の減衰定数^{1, 3}

燃料取替機の減衰定数^{1, 3}

配管系の減衰定数^{1, 2, 3}

- 1 電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(H7～H10)」
- 2 電力共通研究「機器・配管系に対する合理的耐震評価手法に関する研究(H12～H13)」
- 3 原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008 に規定化されている。

なお、本資料に記載する～の内容については、「大間原子力発電所1号機の工事計画認可申請に関わる意見聴取会」において聴取されたものである。

また、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数についても大間1号炉と同様に新たに設定している。

2. 今回の評価で用いた設計用減衰定数

最新知見として反映した建屋クレーン，燃料取替機及び配管系の設計用減衰定数を第 5-1 表及び第 5-2 表に示す。

第 5-1 表 建屋クレーン及び燃料取替機の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数(%)			
	水平方向		鉛直方向	
	JEAG4601 ^{*1}	東海第二 ^{*2}	JEAG4601 ^{*1}	東海第二 ^{*2}
建屋クレーン	1.0	2.0	-	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	-	1.5(2.0) ^{*3}

注記 *1：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版（社団法人日本電気協会）に定まる設計用減衰定数

*2：東海第二発電所にて適用する設計用減衰定数

*3：() 外は，燃料取替機のトリ位置が端部にある場合

() 内は，燃料取替機のトリ位置が中央部にある場合

：新たに設定したもの

：JEAG4601 から見直したもの

第 5-2 表 配管系の設計用減衰定数

		設計用減衰定数 ^{*1} (%)			
		保温材無		保温材有 ^{*2}	
		JEAG 4601 ^{*3}	東海 第二 ^{*4}	JEAG 4601 ^{*3}	東海 第二 ^{*4}
	スナップ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、支持具(スナップ又は架構レストレイント)の数が4個以上のもの	2.0	同左	2.5	3.0
	スナップ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系で、アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり、配管区分 に属さないもの	1.0	同左	1.5	2.0
	Uボルトを有する配管系で、架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4個以上のもの ^{*5}	-	2.0	-	3.0
	配管区分 , 及び に属さないもの	0.5	同左	1.0	1.5

: 新たに設定したもの
 : JEAG4601 から見直したもの

- * 1 : 水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数は同じ値を使用
- * 2 : 保温材による付加減衰定数は、配管全長に対する金属保温材使用割合が 40% 以下の場合 1.0% を適用するが、金属保温材使用割合が 40% を超える場合は、0.5% とする。
- * 3 : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版(社団法人 日本電気協会) に定まる設計用減衰定数
- * 4 : 東海第二発電所にて適用する設計用減衰定数
- * 5 : 区分 (Uボルトを有する配管系) については、新たに設定したものであり、現状 JEAG4601 では区分 に含まれる。

(適用条件)

- a. 適用対象がアンカからアンカまでの独立した振動系であること。
 大口径管から分岐する小口径管は、その口径が大口径管の口径の 1/2 倍以下である場合、その分岐部をアンカ相当とする独立の振動系とみなしてよい。
- b. 配管系全体として、配管系支持具の位置及び方向が局所的に集中していないこと。
- c. 配管系の支持点間の間隔が次の条件を満たすこと。
 配管系全長 / (配管区分ごとに定められた支持具の支持点数) 15 (m / 支持点)
 ここで、支持点とは、支持具が取付けられている配管節点をいい、複数の支持具が取付けられている場合も 1 支持点とする。
- d. 配管と支持構造物の間のガタの状態等が施工管理規程に基づき管理されていること。ここで、施工管理規程とは、支持装置の設計仕様に要求される内容を反映した施工要領等をいう。

3. 設計用減衰定数の考え方

(1) 建屋クレーン及び燃料取替機の設計用減衰定数

- a . 原子力発電所耐震設計技術指針「J E A G 4601-1991 追補版(以下「J E A G 4601」という。)に基づく設計用減衰定数

J E A G 4601 において建屋クレーン及び燃料取替機は溶接構造物として分類されているため、設計用減衰定数は 1.0%が適用される。

- b . 設計用減衰定数の見直し

建屋クレーン及び燃料取替機の減衰定数に寄与する要素には、材料減衰と部材間に生じる構造減衰に加え、車輪とレール間のガタや摩擦による減衰があり、溶接構造物としての 1.0%より大きな減衰定数を有すると考えられることから、実機を試験体とした振動試験が実施された。

振動試験の結果、建屋クレーンの減衰定数については水平 2.0%、鉛直 2.0%が得られた。また、燃料取替機の減衰定数については水平 2.0%、鉛直 1.5%(燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合)、2.0%(燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合)が得られた。

- c . 東海第二発電所への適用性

振動試験の概要並びに振動試験における試験体、東海第二発電所の実機及び先行認可実績のある大間 1 号炉の実機との仕様の比較を参考資料 1 及び参考資料 2 に示す。

東海第二発電所における建屋クレーン及び燃料取替機については、試験結果の適用性が確認されている大間 1 号炉の原子炉建屋クレーン及び燃料取替機と同等の基本仕様を有する。従って、今回の評価における建屋クレーンの減衰定数については水平 2.0%、鉛直 2.0%を用いる。また、燃料取替機の減衰定数については水平 1.5%(燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合)、2.0%(燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合)

を用いる。

(2) 配管系の設計用減衰定数

a . J E A G 4601 に基づく設計用減衰定数

J E A G 4601 における配管系の設計用減衰定数は、配管支持装置の種類や個数によって 3 区分に分類されており、さらに保温材を設置した場合の設計用減衰定数が規定されている。

b . 今回の評価で用いる設計用減衰定数

以下 ,(a),(b) に示す項目については、配管系の振動試験の研究成果に基づき、J E A G 4601 に規定する値を見直し設定する。

(a) Uボルト支持の配管系

J E A G 4601 におけるUボルト支持配管系の設計用減衰定数は、0.5%と規定されている。

Uボルト支持の配管系の減衰に寄与する要素には、主に配管支持部における摩擦があり、架構レストレイントを支持具とする配管系と同程度の減衰定数を有すると考えられることから、振動試験等が実施され、減衰定数 2.0%が得られた。

振動試験で用いられたUボルトについては、原子力発電所で採用されている代表的なものを用いていることから、振動試験等により得られた減衰定数を適用できると判断し、今回の評価におけるUボルト支持配管系の設計用減衰定数は、振動試験結果から得られた減衰定数 2.0%を設定する。

なお、参考として振動試験結果の概略を参考資料 3 に示す。

(b) 保温材を設置した配管系

J E A G 4601 における保温材を設置した設計用減衰定数は、振動試験の結果に基づき、保温材を設置していない配管系に比べ設計用減衰定

数を 0.5%付加できることが規定されている。

その後、保温材の有無に関する減衰定数の試験データが拡充され、保温材を設置した場合に付加できる設計用減衰定数を見直すための検討が行われた。

今回の評価における保温材を設置した場合に付加する設計用付加減衰定数は、振動試験結果から得られた減衰定数 1.0%を、保温材無の場合に比べて付加することとする。

なお、振動試験結果の概略を参考資料 4 に示す。

c . 東海第二発電所への適用性

減衰定数の検討においては、要素試験結果から減衰定数を算出するための評価式を求め、その上で、実機配管系の解析を行い、減衰定数を求めている。

要素試験においては、原子力発電所で採用されている代表的な 4 タイプ(参考資料 3 補足参照)を選定しており、東海第二発電所においても、この 4 タイプの U ボルトを採用している。また、実機配管系の解析対象とした 28 モデルには、BWR プラントの実機配管も含まれており、配管仕様(口径,肉厚,材質),支持間隔・配管ルートについてはも、様々な配管剛性や振動モードに対応した検討を実施している。(参考資料 3 参照)

従って、今回検討した設計用減衰定数は東海第二発電所へ適用可能であり、東海第二発電所における配管の設計用減衰定数として設定する。

4. 鉛直方向の設計用減衰定数について

今回工認では、鉛直方向の動的地震力を適用することに伴い、鉛直方向の設計用減衰定数を新たに設定している。今回工認で適用する設計用減衰定数について、J E A G 4601 に規定されている設計用減衰定数との比較を第 5-3 表に示す。

鉛直方向の設計用減衰定数は、基本的に水平方向と同様とするが電気盤や燃料集合体等の鉛直地震動に対し剛体挙動する設備は 1.0%とする。また、建屋クレーン、燃料取替機及び配管系については、既往の試験等により確認されている値を用いる。

なお、これらの設計用減衰定数は、大間 1 号炉の建設工認にて適用例がある。

第 5-3 表 機器・配管系の設計用減衰定数

設 備	設計用減衰定数 (%)			
	水平方向		鉛直方向	
	JEAG4601	今回工認	JEAG4601	今回工認
溶接構造物	1.0	同左	-	1.0
ボルト及びリベット構造物	2.0	同左	-	2.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	同左	-	1.0
燃料集合体	7.0	同左	-	1.0
制御棒駆動機構	3.5	同左	-	1.0
電気盤	4.0	同左	-	1.0
建屋クレーン	1.0	2.0	-	2.0
燃料取替機	1.0	2.0	-	1.5(2.0)*
配管系	0.5~2.0	0.5~3.0	-	0.5~3.0

注記 * : () 外は、燃料取替機のトリ位置が端部にある場合
() 内は、燃料取替機のトリ位置が中央部にある場合

建屋クレーンの振動試験～減衰比の検討～設計用減衰定数の設定

実機を試験体とした振動試験から得られた天井クレーン構造の減衰特性に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

3. 計測データの処理

1. 代表試験体の選定

原子炉建屋天井クレーン8タイプ、一般用2タイプの天井クレーンの基本仕様（トロリ及びびガーダの高さ、スパン）を調査。
各クレーンの、構成要素・基本構造、減衰に影響を与えると考えられるクレーン全重量とトロリ重量の比及び減衰特性が同等であることを確認。

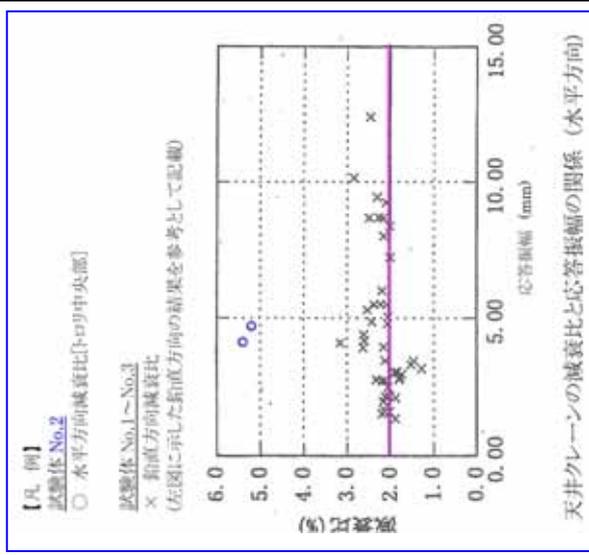
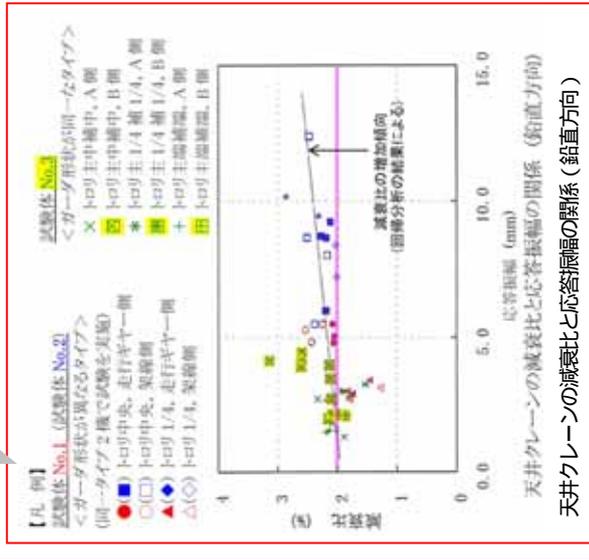
一般用天井クレーンを代表試験体とし、個体差及びびガーダ形状の相違の影響を確認するために、ガーダの断面形状が異なるタイプの同一仕様の試験体 1, 2 及びガーダの断面形状が同じタイプの試験体 3 を使用し、合計3機の試験体で実施。

2. 振動試験

【鉛直方向の加振方法】
吊荷を床から50mm程度まで持ち上げた後、最大速度で下降させて床に着地させ、この時の自由振動を計測する。

【水平方向の加振方法】
クレーンを1m程度走行させ急停止することにより、自由振動を計測する。

振動試験で得られた自由振動波形から減衰比を算定



4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果（鉛直方向）】
応答振幅に対する減衰比の傾向は、応答振幅が比較的小さい場合には減衰比のばらつきが大きい、応答振幅が大きくなると、減衰比の発生源となる構造減衰が増加し、減衰比が徐々に増加するともに、そのばらつきが小さくなる。
応答振幅5.0mmで減衰比2.0%以上が得られた。

【試験結果（水平方向）】
水平方向の減衰比は、応答振幅4.7mmにおいて5.2%という結果が得られた。

【設計用減衰定数（鉛直方向）】
応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、設計用減衰幅（トロリ位置中央部12.2mm、端部6.0mm）レベルで減衰比2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数2.0%と設定した。

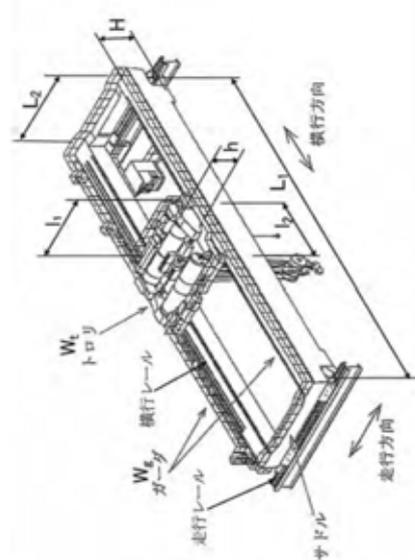
【設計用減衰定数（水平方向）】
水平方向の減衰比は、応答振幅レベル4.7mmにおいて5%程度の減衰比が得られているが、データ数が少ない（設計用減衰幅8.9mmに達していない）ため、鉛直方向と同じ2.0%を水平方向の設計用減衰定数と設定した。

建屋クレーンの試験体と実機との仕様比較

建屋クレーンは、ガーダ2本上にトロリが設置されている構造である。表2-1に天井クレーン試験体、東海第二発電所及び大間1号炉の建屋クレーンの主要な仕様を示す。

表2-1 天井クレーン試験体、実機建屋クレーン仕様の比較

仕様	試験体		実機建屋クレーン		備考
	試験体 No1,2	試験体 No3	東海第二 原子炉建屋クレーン	大間1号機 原子炉建屋クレーン	
トロリ	重量 W_t (ton)	43.5	48.0	30.0	80.0
	高さ h(m)	2.265	2.280	0.975	2.815
	スパン L_1 (m)	5.8	6.8	4.0	7.7
	スパン L_2 (m)	4.1	3(主巻用) 2.5(補助巻用)	4.1	4.6
ガーダ	重量 W_g (ton)	104.5	118.0	67.0	190
	高さ H(m)	1.32	2.3	4.42	1.915
	スパン L_1 (m)	33.0	33.0	20.4	34.9
	スパン L_2 (m)	7.06	8.9	6.2	9.38
総重量	W_t (ton)	148.0	166.0	107.0	270.0
トロリ重量と総重量の比	W_t / W_g	0.294	0.289	0.309	0.298



試験体と実機の比較の考え方

減衰比は、一般的に振動エネルギーと消散エネルギーの比で表される。消散エネルギーはガーダ等の構造部材の材料減衰、トロリ、ガーダ等のガタや摩擦による構造減衰により発生すると考えられ、天井クレーン構造の建屋クレーンにおいては、ガーダ、トロリは固定構造ではなく、レールと車輪間にすべりが発生する構造であることから、トロリとガーダとの微小な相対運動によるエネルギーの消散が減衰特性に最も影響が大きい因子と考えられる。

ここで、トロリの相対運動による消散エネルギーはトロリ質量に比例し、振動エネルギーは建屋クレーンの振動質量に比例する。建屋クレーンは建屋に対して走行車輪部のみで支持された両端支持はりの構造をしており、地震時の振動モードは上下・水平方向共にガーダ中央のたわみが最大となる1次モードが支配的となる。そのため、振動質量はクレーンの総質量に比例し、減衰比はトロリ質量とクレーンの総質量の比に影響を受けることになる。

上表とおり、東海第二発電所の建屋クレーンのトロリ重量と総重量の比は、試験体及び大間1号炉の実機と同程度であることを確認している。以上から、建屋クレーンの設計用減衰定数として水平2.0%、鉛直2.0%を適用する。

燃料取替機の振動試験～減衰比の検討～設計用減衰定数の設定

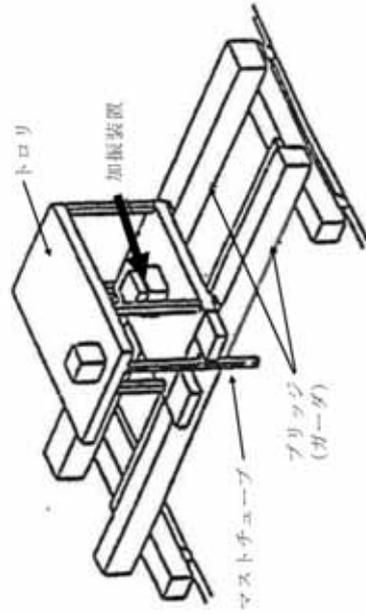
実機を試験体とした振動試験から得られた燃料取替機の減衰特性に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

1. 代表試験体の選定

燃料取替機5機について、基本仕様（トロリ及びガーダの重量、高さ、スパン）を調査。
各燃料取替機の、構成要素・基本構造・サイズ・重量・振動耐性が同等であることを確認。

燃料取替機5機の中から建設中プラントの燃料取替機を代表試験体として選定。

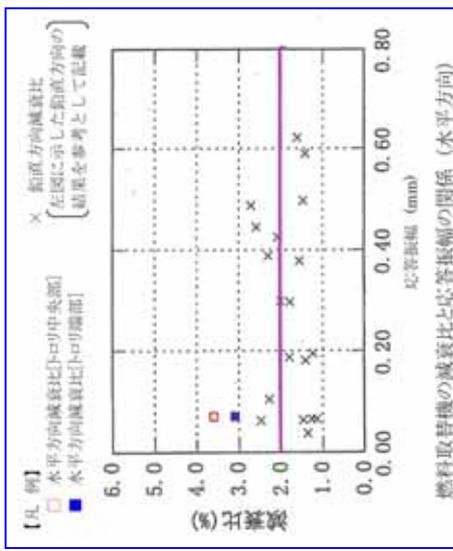
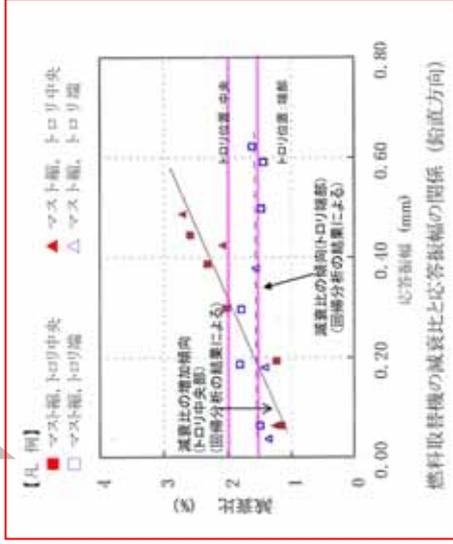
2. 振動試験



【加振方法（鉛直・水平方向）】
トロリ中央部に設置した加振装置による強制的振（正弦波 5Hz から 20Hz）

3. 計測データの処理

振動試験で得られた周波数応答曲線からハーフパワー法で減衰比を算定



4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果（鉛直方向）】
トロリ位置が中央部の場合では、応答振幅の増加に従って減衰比は増加する傾向を示している。応答振幅0.40mmで減衰比2.0%以上が得られている。
トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず1.5%程度の減衰比が得られている。

【試験結果（水平方向）】
燃料取替機の水平方向の減衰比は、トロリ位置が中央部では応答振幅0.07mmにおいて3.6%、トロリ位置が端部では応答振幅0.07mmにおいて3.1%という結果が得られている。

【設計用減衰定数（鉛直方向）】
トロリ位置が中央部の場合では、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、応答振幅レベル0.40mmでも減衰比2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数2.0%としたとしている。
トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず1.5%程度の減衰比が得られていることから、設計用減衰定数1.5%とした。

【設計用減衰定数（水平方向）】
水平方向の減衰比は、応答振幅レベル0.07mmで3.6%（トロリ中央部）及び3.1%（トロリ端部）の減衰比が得られているが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ2.0%を水平方向の設計用減衰定数とした。

燃料取替機の試験体と実機との仕様比較

燃料取替機は、フレーム構造のブリッジ上にトロリが設置されている構造である。表 3-1 に燃料取替機試験体、東海第二発電所及び大間 1 号炉の燃料取替機の主要な仕様を示す。

表 3-1 燃料取替機試験体、実機燃料取替機仕様の比較

仕様	試験体	実機		備考	
		東海第二	大間		
トロリ	質量 W_t (ton)	15.5	27.0		
	高さ h (m)	4.795	5.795		
	スパン l_1 (m)	3.0	3.0		
	スパン l_2 (m)	2.6	3.0		
ブリッジ	質量 W_g (ton)	23.6	40.0		
	高さ H (m)	2.005	2.075		
	スパン L_1 (m)	12.46	15.16		
	スパン L_2 (m)	4.6	4.43		
総質量		39.1	67.0		

試験体と実機の比較の考え方

燃料取替機については、ブリッジ等の骨組み構造の材料減衰、トロリ、ブリッジ等のガタや摩擦による構造減衰が減衰比に影響を与えられ、トロリの構造減衰はトロリ位置によって異なる。試験で得られた減衰比データとしては、ブリッジ中央にトロリがある場合、ブリッジの端部にトロリのある場合の 2 種類ある。鉛直方向に関しては、ブリッジの中央にトロリがある場合の方が、ブリッジの端部にトロリがある場合に比べて、減衰比は高くなっている。

ブリッジ中央にトロリがある場合、鉛直方向に関しては、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、応答振幅レベル 0.40mm で減衰比 2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数を 2.0%とす。水平方向の減衰比は、応答振幅レベル 0.07mm で 3.6%の減衰比が得られているが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0%を水平方向の設計用減衰定数とした。

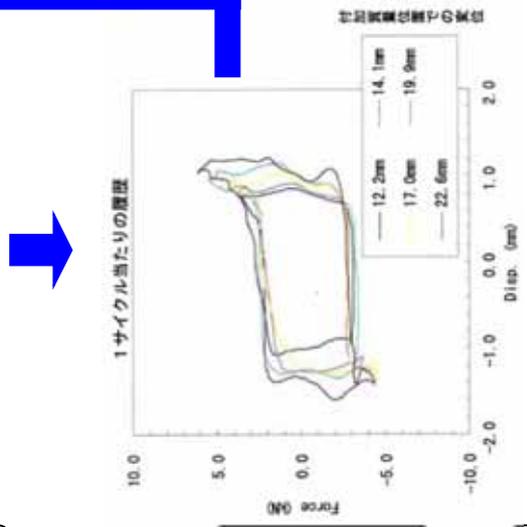
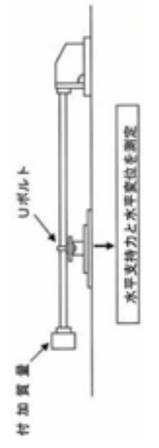
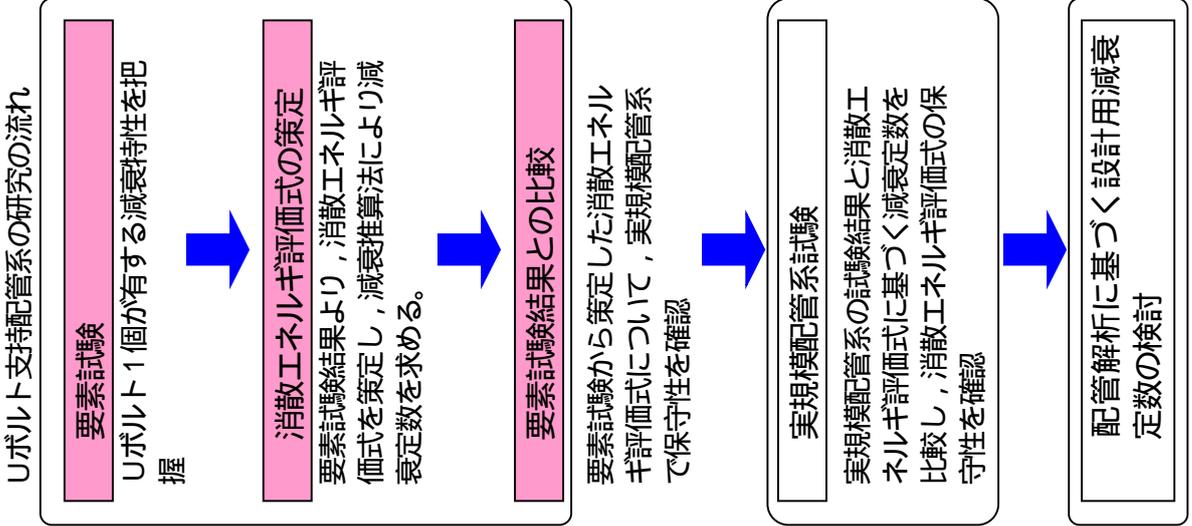
ブリッジ端部にトロリがある場合、鉛直方向に関しては、応答振幅に係らず 1.5%程度の減衰比が得られていることから、設計用減衰定数 1.5%とした。水平方向の減衰比は、応答振幅レベル 0.07mm で 3.1%の減衰比が得られているが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0%を水平方向の設計用減衰定数とした。

実機への適用性の観点では、上表の試験体と東海第二発電所における燃料取替機の構造の比較から、ブリッジスパン、質量は同等以上となっており、振動特性として応答は大きくなる傾向にあると考えられる。また、試験では低加速度レベル（水平約 100Gal、鉛直約 200Gal）にて実施されているが、実際の基準地震動 S_s はそれよりも大きな加速度レベルとなる。試験結果から、応答の増加に伴い減衰比も増加傾向にあるため、上記の試験結果より得られた減衰比は適用可能と考えられる。

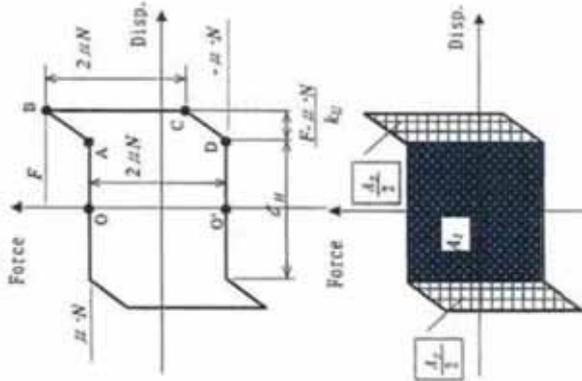
以上から、燃料取替機の設計用減衰定数として水平 2.0%、鉛直 1.5%（燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合）、2.0%（燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合）を適用する。

Uボルト支持配管系の振動試験-(1/3): 要素試験 ~ 消散エネルギー評価式の策定 ~ 要素試験結果との比較

Uボルト支持配管系の研究の流れ



変位 - 荷重履歴のモデル化

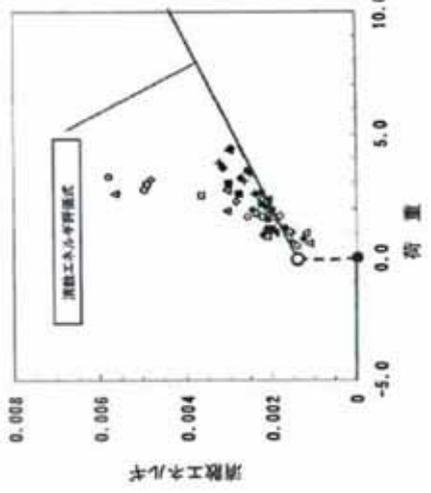
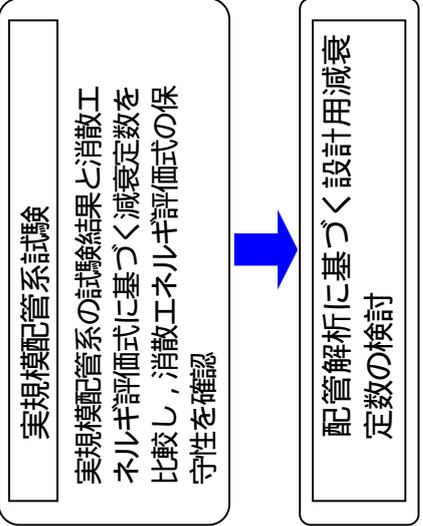


(消散エネルギー評価式の策定)

【消散エネルギー評価式の策定】
 モデル内部の面積が消散されるエネルギーであり、この面積を数式化

$$\Delta E = A_1 + A_2$$

$$A_1 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{\delta_H}{2}$$

$$A_2 = 4 \cdot \mu \cdot N \cdot \frac{F - \mu \cdot N}{k_u}$$


要素試験結果と消散エネルギー評価式の結果の比較
 ↓
 消散エネルギー評価式の保守性の確認

Uボルト支持配管系の振動試験-(2/3)： 実規模配管系試験

要素試験結果に基づき策定した消散エネルギー評価式の実機への適用性確認のため、実規模配管系試験による振動試験を実施し、試験結果より得られる減衰定数と消散エネルギー評価式より得られる減衰定数の比較検討を行った。

Uボルト支持配管系の研究の流れ

要素試験

Uボルト1個が有する減衰特性を把握

消散エネルギー評価式の策定

要素試験結果より、消散エネルギー評価式を策定し、減衰推算法により減衰定数を求める。

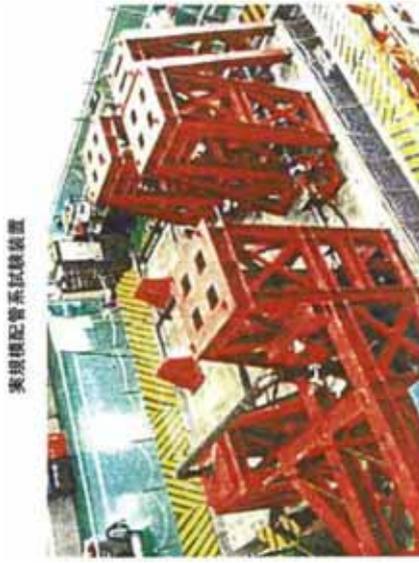
要素試験結果との比較

要素試験から策定した消散エネルギー評価式について、実規模配管系で保守性を確認

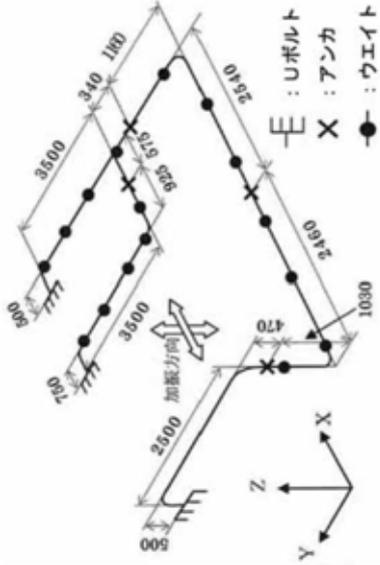
実規模配管系試験

実規模配管系の試験結果と消散エネルギー評価式に基づく減衰定数を比較し、消散エネルギー評価式の保守性を確認

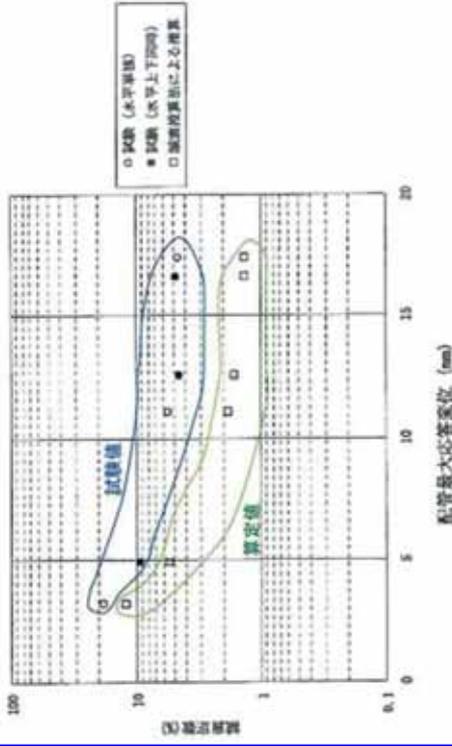
配管解析に基づく設計用減衰定数の検討



実規模配管系試験装置



試験結果と消散エネルギー評価式による減衰定数の比較



試験結果と消散エネルギー評価式による減衰定数を比較した結果、消散エネルギー評価式の方が全変位領域で下回っており、消散エネルギー評価式の保守性が確認された。

Uボルト支持配管系の振動試験- (3/3): 配管解析に基づく設計用減衰定数の検討

実験プラントにおいては、配管系の支持箇所やレートは多種多様である。ここでは、実機配管系の計算モデルに対して消散エネルギー評価式を用いて減衰定数を算出し、さらに、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数の検討を行った。

Uボルト支持配管系の研究の流れ

要素試験

Uボルト1個が有する減衰特性を把握

消散エネルギー評価式の策定

要素試験結果より、消散エネルギー評価式を策定し、減衰推算法により減衰定数を求める。

要素試験結果との比較

要素試験から策定した消散エネルギー評価式について、実規模配管系で保守性を確認

実規模配管系試験

実規模配管系の試験結果と消散エネルギー評価式に基づく減衰定数を比較し、消散エネルギー評価式の保守性を確認

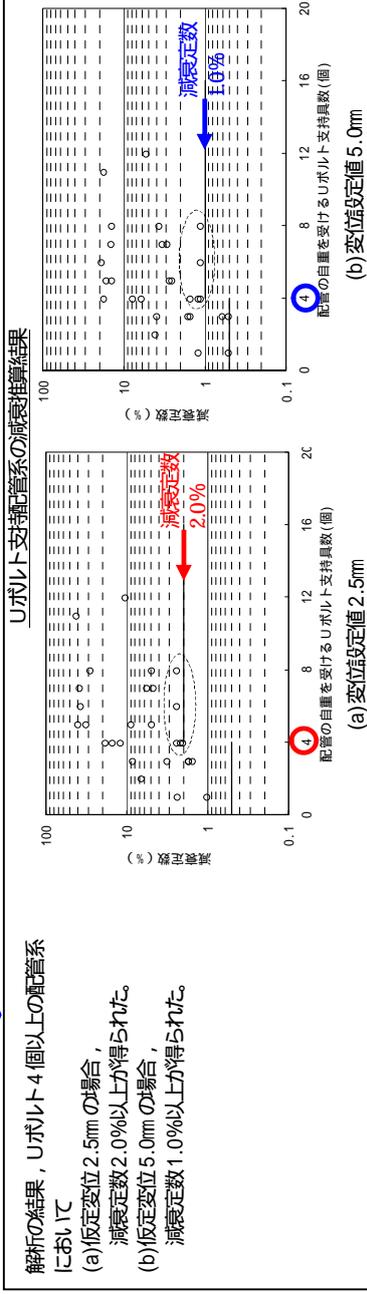
配管解析に基づく設計用減衰定数の検討

変位仮定減衰定数

モード別減衰定数

Uボルト支持配管系 (28 モデル) に対する解析による検討 (各振動モードが全一の変位が生じると仮定)

前項までに、実規模配管系試験にて消散エネルギー評価式の保守性を確認し、設計用減衰定数を設定するにあたっては、Uボルト支持具数や配管レートなど様々な配管系について検討する必要がある。消散エネルギー評価式による減衰定数が配管変位に依存するため、配管系の振動モード変位を一定と仮定した状態で減衰定数(変位仮定減衰定数)を算出した。対象はUボルト支持部を有する実規模配管系(28 モデル)とした。

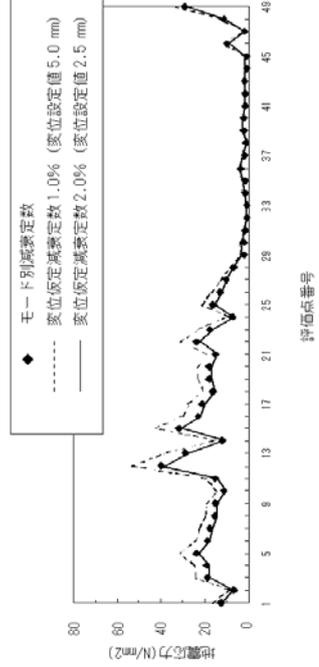


詳細計算による減衰定数の検討 (モード別減衰定数による検討)

変位仮定減衰定数は計算結果からも判るように「仮定する変位」に依存する。変位 2.5mm の減衰定数及び変位 5.0mm の減衰定数のそれぞれ 2.0%及び 1.0%を与える下限値を示した配管モデルに対して、より詳細な解析を行い、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数を検討した。

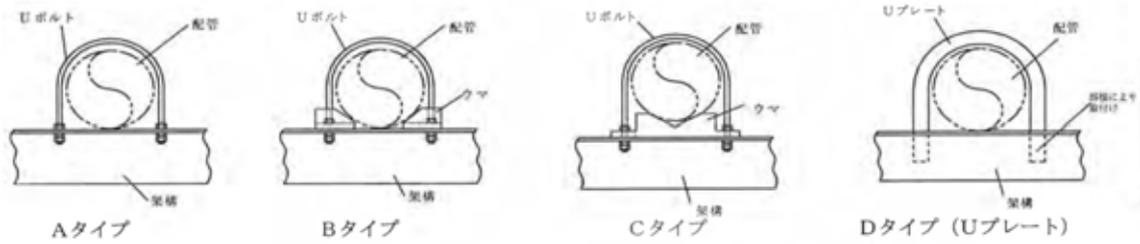
比較検討の結果、詳細計算結果と変位 2.5mm を与えた場合の結果がよく一致していることがわかり、Uボルト支持配管系の設計用減衰定数を 2.0%に設定した。なお、2.0%の適用に当たっては、以下の項目を条件ととしている。

Uボルトは、運転時に配管とボルト頂部との間に隙間があるよう施工されること。今回、検討対象としたUボルトの据付状態であること(水平配管の自重を架構で受けるUボルト)。



【補足】要素試験に用いたUボルト支持構造物のタイプ

試験に用いたUボルトは、原子力発電所で採用されている代表的な4タイプを選定した。



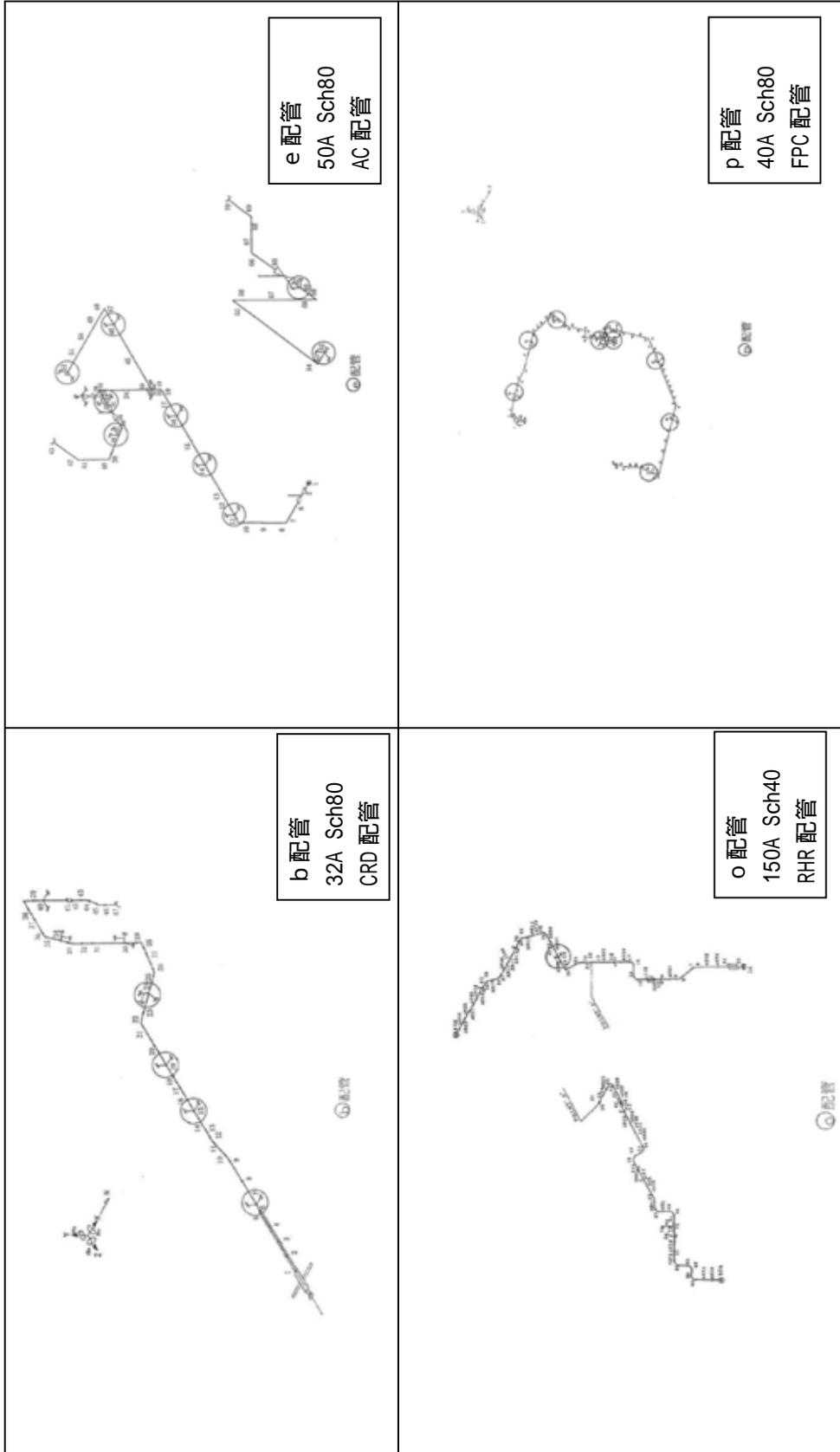
【解析を行った配管仕様】

- ・口径：20 A ~ 400 A
- ・材質：ステンレス鋼，炭素鋼

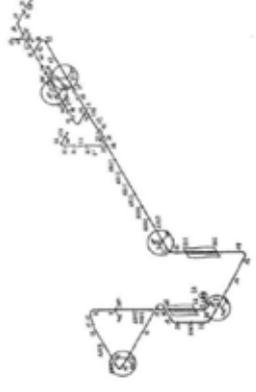
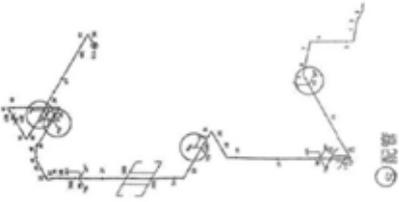
上記のうちBWR実機配管

	系統	口径
b 配管	CRD	32 A
e 配管	AC	50 A
o 配管	RHR	150 A
p 配管	FPC	40 A
q 配管	MUWC	100 A
r 配管	MUWC	150 A , 80 A
s 配管	RCW	200 A
t 配管	RCW	200 A , 80 A
u 配管	CRD	32 A

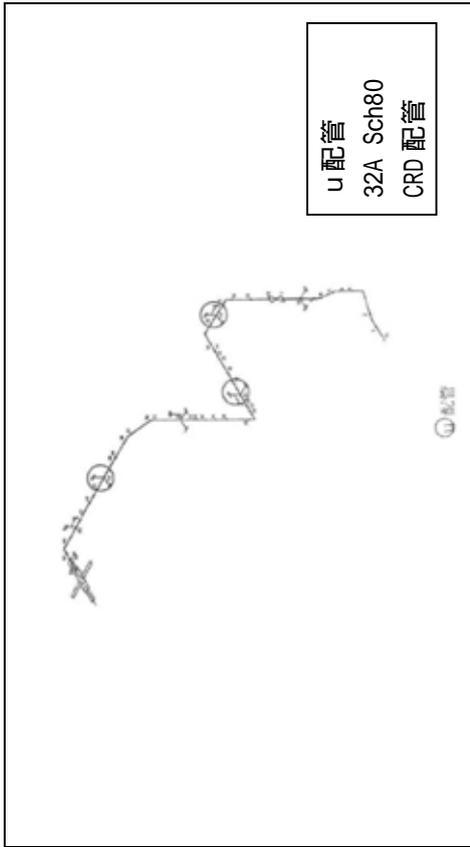
実機配管系の解析モデル図 (b・e・o・p 配管)



実機配管系の解析モデル図 (q・r・s・t 配管)

 <div data-bbox="683 1037 810 1227" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>q 配管 100A Sch40 MUWC 配管</p> </div>	 <div data-bbox="630 197 810 387" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>r 配管 150A Sch40 80ASch40 MUWC 配管</p> </div>
 <div data-bbox="1168 1037 1295 1227" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>s 配管 200A Sch40 RCW 配管</p> </div>	 <div data-bbox="1117 208 1297 398" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>t 配管 200A Sch40 80ASch40 RCW 配管</p> </div>

実機配管系の解析モデル図 (u 配管)



配管系の保温材による付加減衰定数

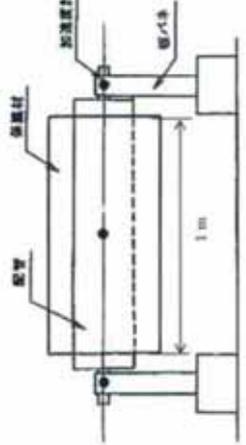
試験体を使用した振動試験から得られた配管系の保温材による付加減衰定数に基づき、設計用減衰定数の検討を行った。

1. 試験体

配管口径の異なる3種類（8B(200A)、12B(300A)、20B(500A)）の試験体を用いて振動試験を実施

2. 振動試験

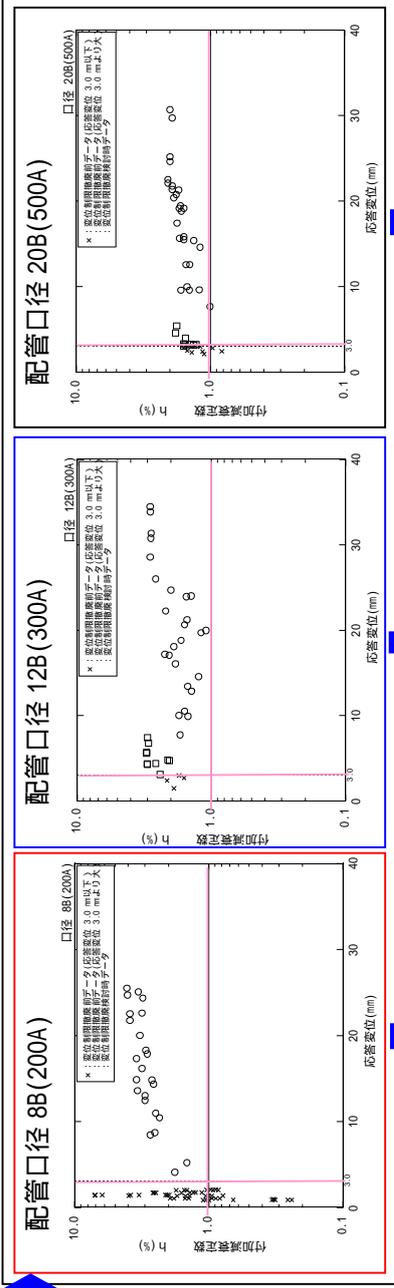
振動試験は保温材有り場合/保温材無しの場合について実施。(保温材厚さ75mm)



試験装置の概略図

3. 試験結果

(保温材有・無の結果を比較し、保温材が有る場合に付加できる減衰定数(以下「付加減衰定数」という。)と変位との関係を示す。)



4. 設計用減衰定数の設定

【試験結果(8B, 12B, 20B)】

応答変位3mm以上の領域

保温材による付加減衰定数は1.0%以上、応答変位の漸増または一定の値を示す傾向

応答変位3mm以下の領域(小応答領域)

減衰データにはばらつきあり、付加減衰定数1.0%以下の場合もある

【設計用減衰定数の設定】

小応答変位領域については、配管上強度問題とならないことから、保温材による付加減衰定数は1.0%とする。

ただし、本試験において金属保温材が施工されている配管長さに対して40%を超える割合であったことから、下記の適用条件を設定した。

金属保温材が施工されている配管長さに対して40%以下の場合・・・1.0%を付加する

金属保温材が施工されている配管長さに対して40%を超える場合・・・0.5%を付加する

水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根法による組合せについて

1. 概要

今回工認の耐震設計では、これまで静的な取扱いのみであった鉛直方向の地震力について、動的な地震力を考慮することとなるとともに、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力による荷重を適切に組み合わせることが必要となる。

従来 of 水平方向及び鉛直方向の荷重の組合せは、静的な地震力による鉛直方向の荷重には地震継続時間や最大加速度の生起時刻のような時間の概念がなかったことから、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の最大値同士の絶対値の和としていた。(以下「絶対値和法」という。)

一方、水平方向及び鉛直方向の両者がともに動的な地震力である場合、両者の最大加速度の生起時刻に差があるという実挙動を踏まえると、従来と同じように絶対値和法を用いるのではなく、時間的な概念を取り入れた荷重の組み合わせ法を検討する必要がある。

本資料では、水平方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せに関する既往研究⁽¹⁾をもとに、二乗和平方根法(以下「SRSS法(Square Root of the Sum of the Squares)」という。)による組合せ法のの妥当性を説明するものである。

なお、SRSS法による組合せは、大間1号炉の既工認において適用実績のある手法である。

2. 東海第二発電所で用いる荷重の組合せ法

東海第二発電所では、静的な地震力による荷重の組合せについては、従来

どおり絶対値和法を用いて評価を行う。また，動的な地震力による荷重の組合せについては，既往知見に基づき，S R S S法を用いて評価を行う。

3. 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ法に関する研究の成果

3.1 荷重の組合せ法の概要

絶対値和法とS R S S法の概要を以下に示す。

(1) 絶対値和法

本手法は，水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）を絶対値和で組み合わせる方法である。

この方法は，水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重が同時刻に同位相で生じることを仮定しており，組合せ法の中で最も大きな荷重を与える。本手法は，主に地震力について時間の概念がない静的地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = | M_H | \max + | M_V | \max$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

(2) S R S S法

本手法は，水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）を二乗和平方根で組み合わせる方法である。

この方法は，水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重の生起時刻に時間的なずれがあるという実挙動を考慮しており，水平方向及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析との比較において平均的な荷重を与える。本手法は，動的な地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = \sqrt{(M_H) \max^2 + (M_V) \max^2}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

：荷重の段階で組み合わせる場合と，荷重による発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。

(補足) 荷重または応力による組合せについて

水平方向及び鉛直方向の動的地震力をS R S S法で組み合わせる際、評価対象の機器の形状や部位に応じて荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。ここでは、その使い分けについて具体例を用いて説明する。

A. 荷重の段階で組合せを行う場合

横形ポンプの基礎ボルトの引張応力の評価を例とすると、以下の式で示すように水平方向地震力と鉛直方向地震力の組合せは、荷重である水平方向地震力によるモーメント($m \cdot g \cdot C_H \cdot h$)と鉛直方向地震力によるモーメント($m \cdot g \cdot C_V \cdot l_1$)を組み合わせる。

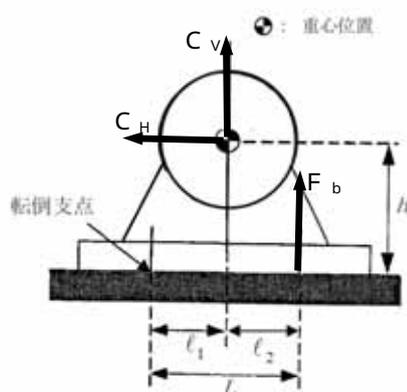
本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみS R S Sしており、実績のある妥当な手法である。

【絶対値和法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ m g (C_H h + C_V l_1) + m g C_p (h + l_2) + M_p - m g l_1 \}$$

【S R S S法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ m g \sqrt{ (C_H h) ^ 2 + (C_V l_1) ^ 2 } + m g C_p (h + l_2) + M_p - m g l_1 \}$$



F_b : 基礎ボルトに生じる引張力
 C_H : 水平方向震度
 C_V : 鉛直方向震度
 C_p : ポンプ振動による震度
 g : 重力加速度
 h : 据付面から重心までの距離
 l_1, l_2 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
 L : 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離
 m : 機器の運転時質量

B . 応力による組合せを行う場合

横置円筒形容器の脚部の組合せ応力の評価を例とすると，脚部には水平方向地震力による曲げモーメント M_{11} 及び鉛直方向荷重 P_1 ,鉛直方向地震力による鉛直荷重 $(R_1 + m_{a1}g) C_V$ が作用する。(図 B - 1)

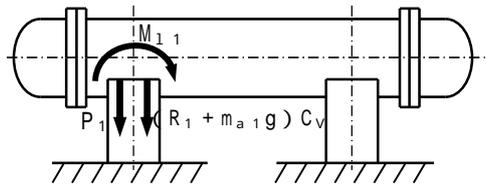


図 B - 1 横置円筒系容器の脚部に作用する荷重

水平方向地震力による応力 s_2 及び鉛直方向地震力による応力 s_4 は式 B - 1 及び式 B - 2 で表され，脚部の組合せ応力の評価の際は，これらの応力を S R S S 法により組み合わせて式 B - 4 を用いて評価を行う。

$$s_2 = \frac{M_{11}}{Z_{sy}} + \frac{P_1}{A_s} \quad \dots \text{ (式 B - 1)}$$

$$s_4 = \frac{R_1 + m_{s1}g}{A_s} C_V \quad \dots \text{ (式 B - 2)}$$

s_2 : 水平方向地震により脚部に生じる曲げ及び圧縮応力の和
 M_{11} : 水平方向地震力により脚底面に作用する曲げモーメント
 P_1 : 水平方向地震力により胴の脚付け根部に作用する鉛直方向荷重
 Z_{sy} : 脚部の断面係数
 A_s : 脚部の断面積

s_4 : 鉛直方向地震力により生じる圧縮応力
 R_1 : 脚部が受ける自重による荷重
 m_{a1} : 脚部の質量

【絶対値和法】

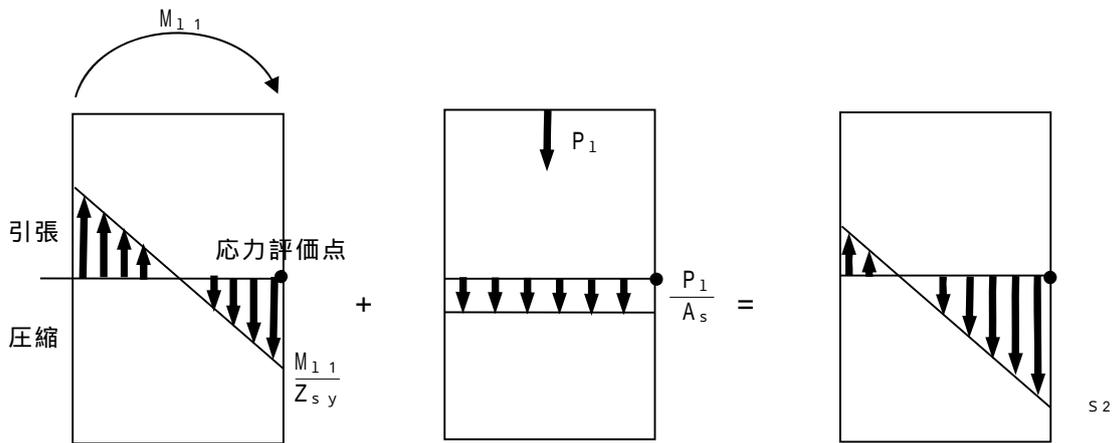
$$s_1 = \sqrt{(s_1 + s_2 + s_4)^2 + 3 s_2^2} \quad \dots \text{ (式 B - 3)}$$

【S R S S 法】

$$s_1 = \sqrt{s_1 + \sqrt{(s_2^2 + s_4^2)^2 + (3 s_2^2)}} \quad \dots \text{ (式 B - 4)}$$

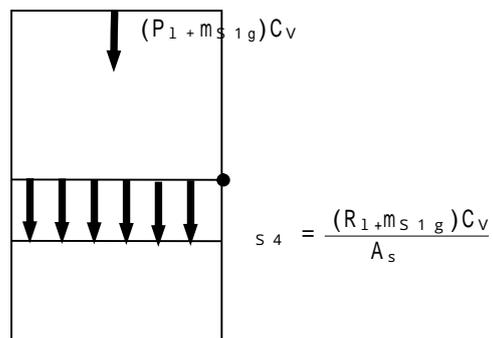
s_1 : 水平方向地震力及び鉛直方向地震力が作用した場合の脚部の組合せ応力
 s_1 : 運転時質量により脚部に生じる圧縮応力
 s_2 : 水平方向地震力により脚に生じるせん断応力

ここで、水平方向地震力による応力 s_2 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 s_4 は図 B - 2 の示すように、ともに脚部の外表面の応力を表すものであり、脚部の同一評価点、同一応力成分であることから、これらの組合せを SRS 法により行うことは妥当である。



(ア) 曲げによる応力 (イ) 圧縮による応力 (ウ) 曲げ + 圧縮による応力

(a) 水平地震力による応力評価点の応力



(b) 鉛直地震力による応力評価点の応力

図 B - 2 横置円筒形容器の脚部に作用する地震力による応力概念図

3.2 S R S S 法の妥当性

既往研究では，実機配管系に対して，水平及び鉛直地震動による最大荷重を S R S S 法により組み合わせた場合と水平及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析法により組み合わせた場合との比較検討を以下の通り行っている。

(1) 解析対象配管系モデル

解析対象とした配管は，代表プラントにおける格納容器内の配管系で給水系（FDW）×2本，残留熱除去系（RHR）及び主蒸気系（MS）の計4本の配管モデルである。当該配管系は，耐震Sクラスに分類されるものである。

(2) 入力地震

解析に用いた入力地震動は，地震動の違いによる影響を確認するため，兵庫県南部地震（松村組観測波），人工波及びエルセントロ波の3波を用いた。機器・配管系への入力地震動となる原子炉建屋中間階の応答波の例を第6-1図から第6-3図に示す。

(3) 解析結果

解析結果を第6-4図から第6-7図に示す。第6-4図から第6-7図は，水平方向及び鉛直方向の応力に対して，同時入力による時刻歴応答解析法及びS R S S法により組み合わせた結果をまとめたものであり，参考までに絶対値和法による結果も併記した。

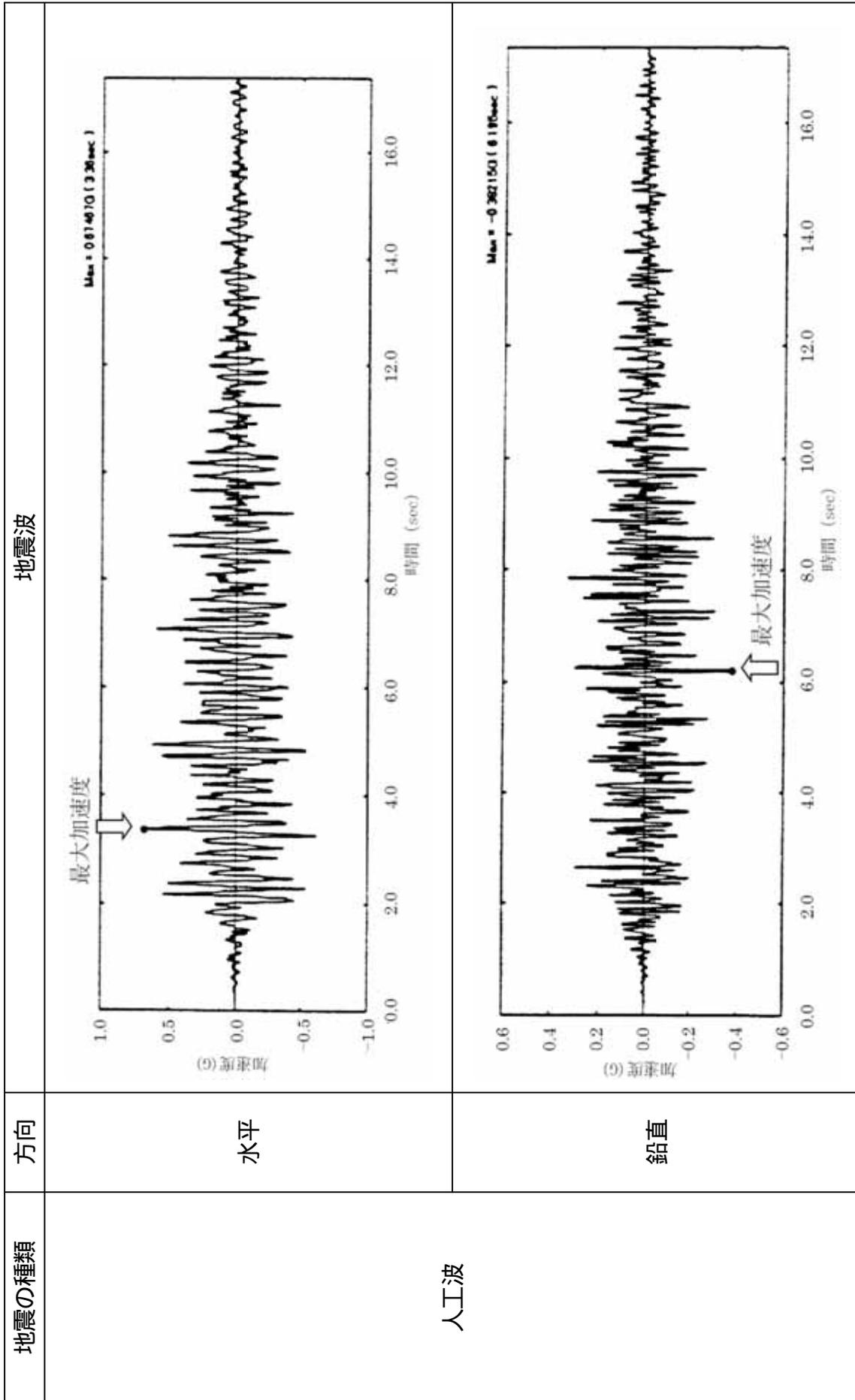
第6-4図から第6-7図より，いずれの配管系においても最大応力発生点においては，時刻歴応答解析法に対してS R S S法の方が約1.1倍から約1.4倍の比率で上回る結果となった。最大応力発生点におけるS R S S法と同時入力による時刻歴応答解析との評価結果の比較を第6-1表に示す。また，最大応力発生点の部位を第6-8図から第6-11図に示す。

さらに，配管系全体の傾向を確認するため，配管系の主要な部位におけ

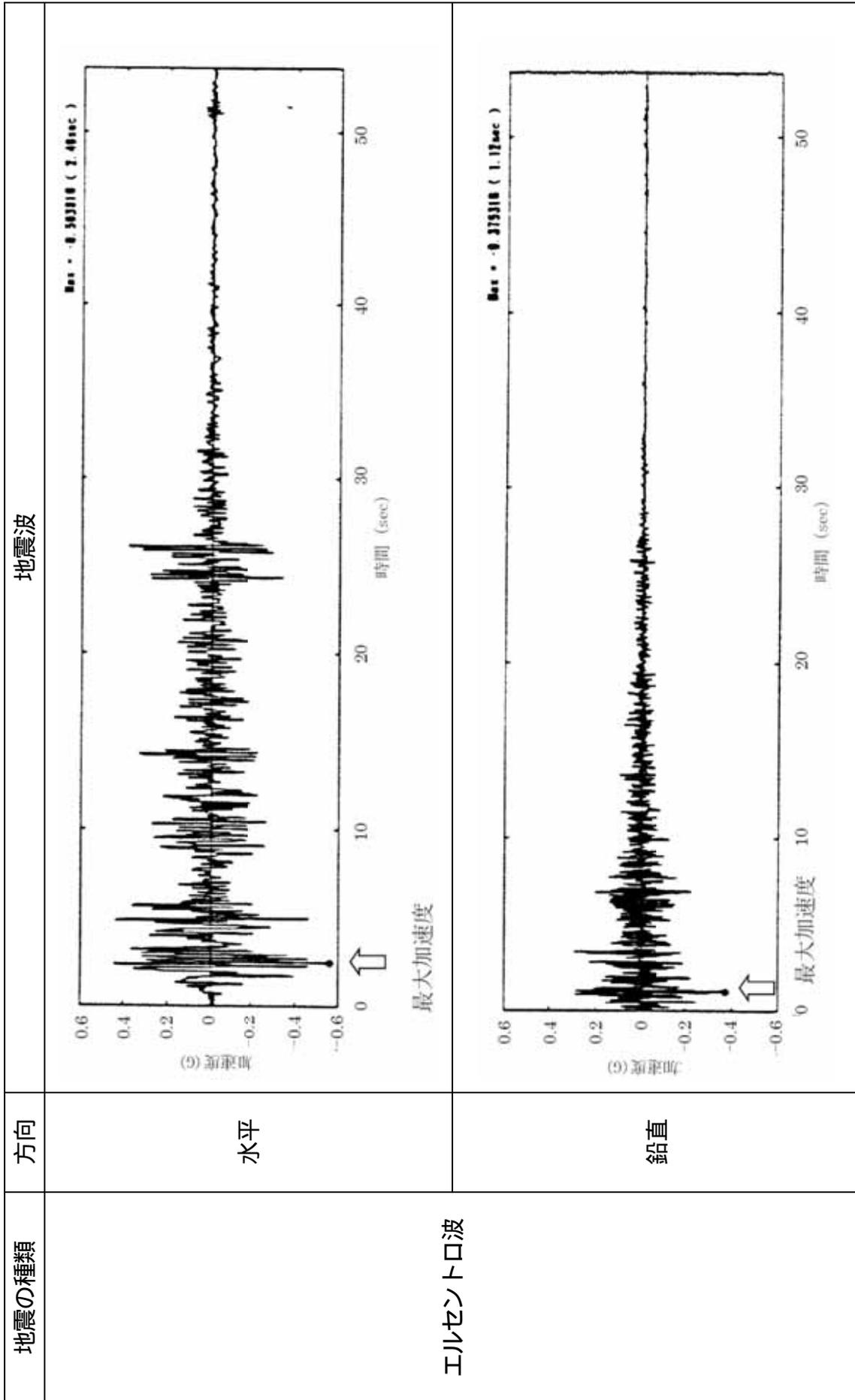
る発生応力の比較を第 6-12 図に示す。第 6-12 図は、第 6-4 図から第 6-7 図に基づき、各配管モデルの節点の応力値をプロットしたものである。第 6-12 図より、S R S S 法は発生応力の低い領域では同時入力による時刻歴応答解析法に対して平均的な結果を与え、発生応力の増加に伴い保守的な結果を与える傾向にあることが確認できる。

地震の種類	方向	地震波
兵庫県南部地震 (松村組観測波)	水平	
	鉛直	

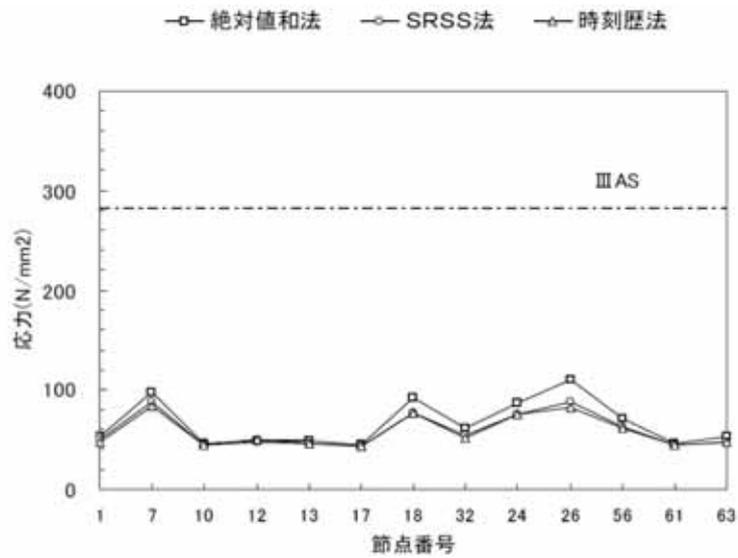
第 6-1 図 機器・配管系への入力地震動（兵庫県南部地震）



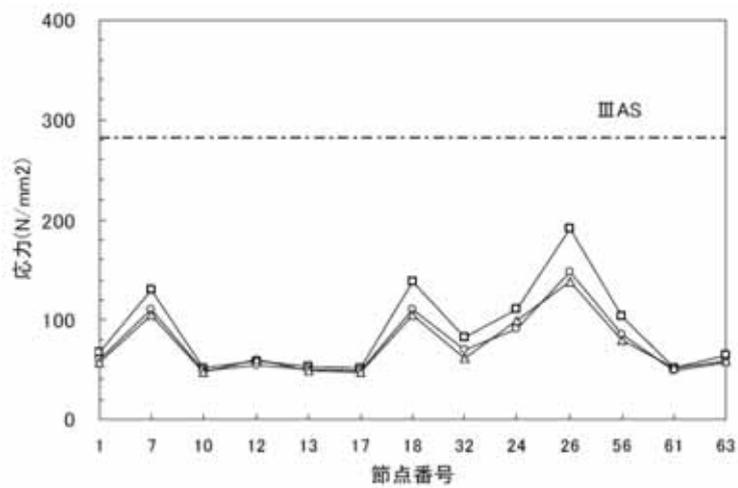
第6-2図 機器・配管系への入力地震動（人工波）



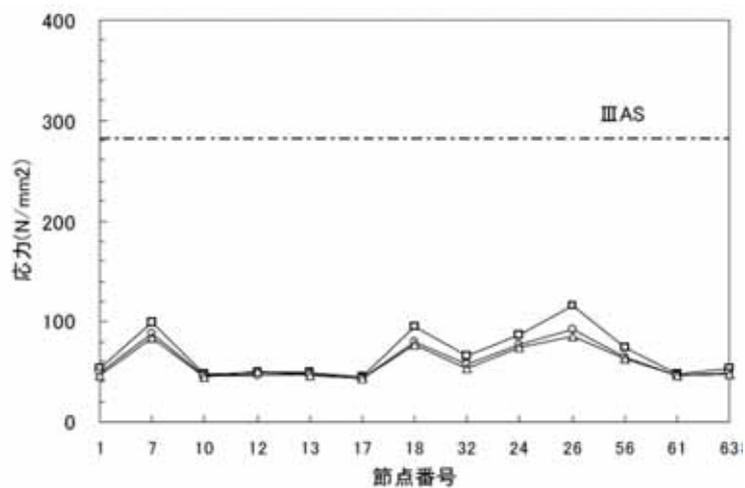
第 6-3 図 機器・配管系への入力地震動（エルセントロ波）



兵庫県南部地震（松村組観測波）



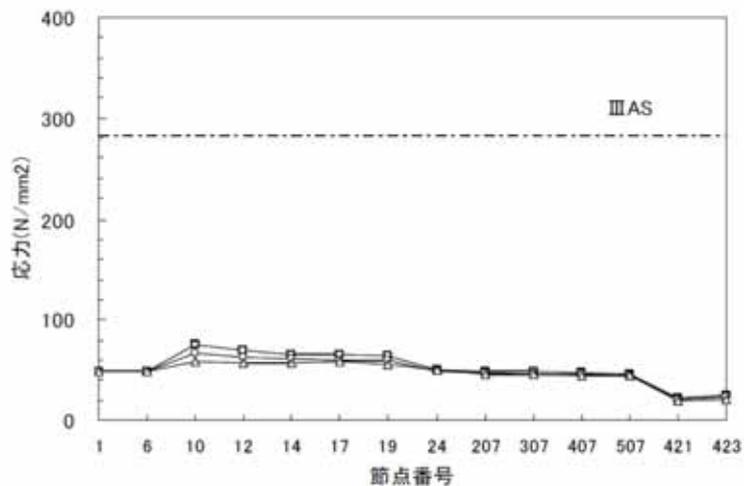
人工波



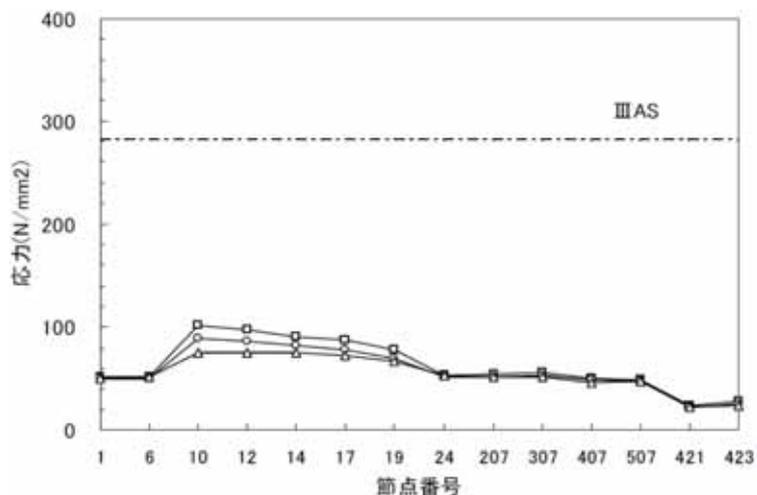
エルセントロ波

第 6-4 図 主要な部位における発生応力（FDW-001 A プラント）

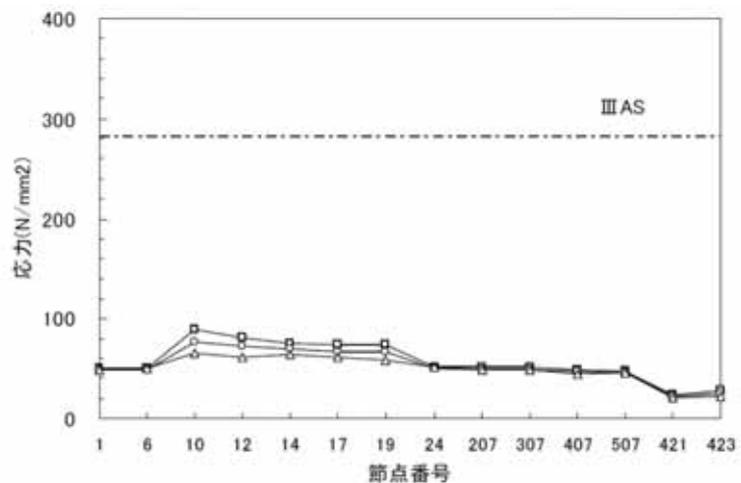
—□— 絶対値和法 —○— SRSS法 —△— 時刻歴法



兵庫県南部地震（松村組観測波）

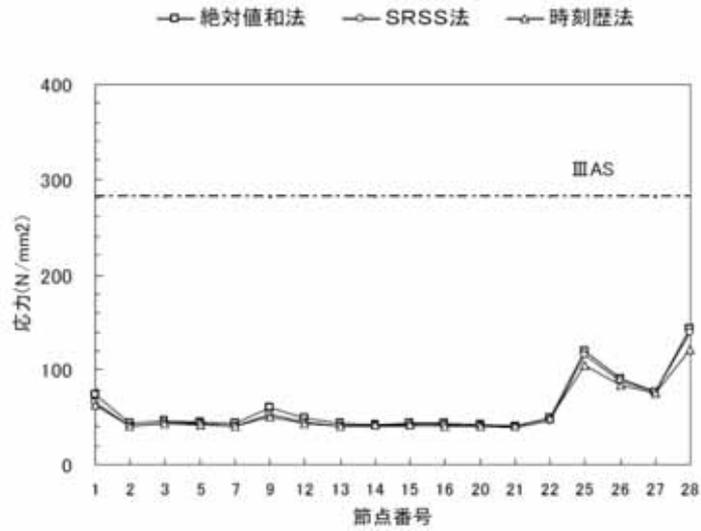


人工波

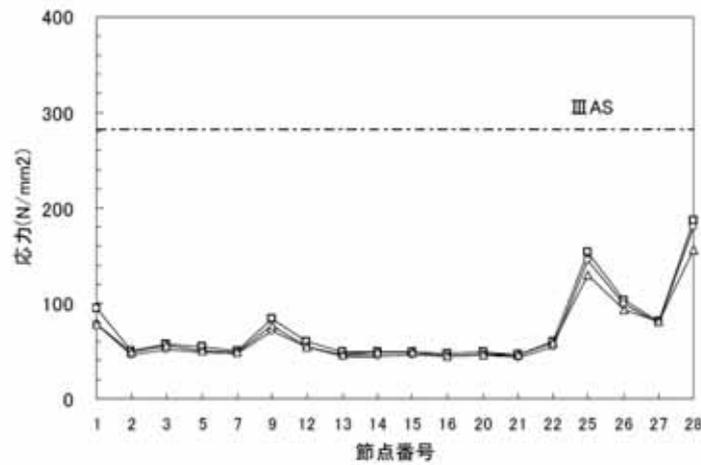


エルセントロ波

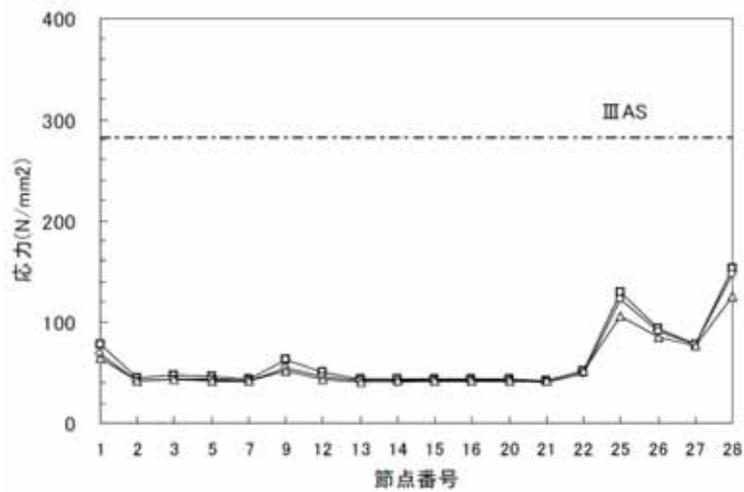
第6-5図 主要な部位における発生応力（MS-001 Aプラント）



兵庫県南部地震 (松村組観測波)

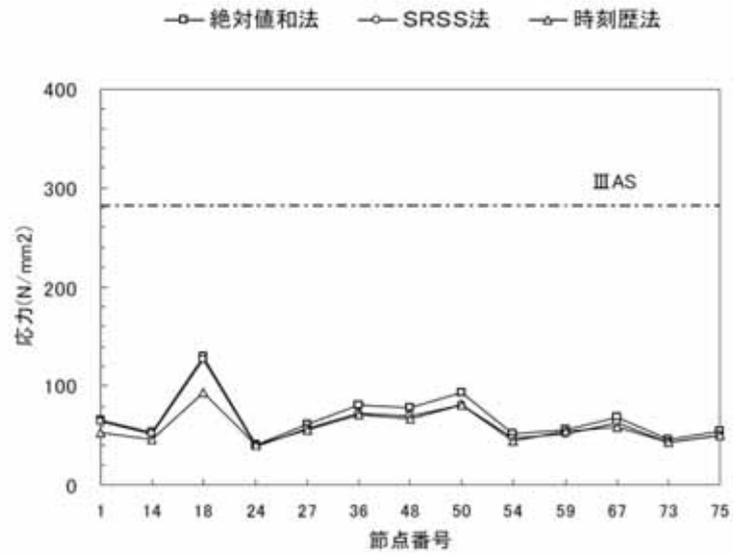


人工波

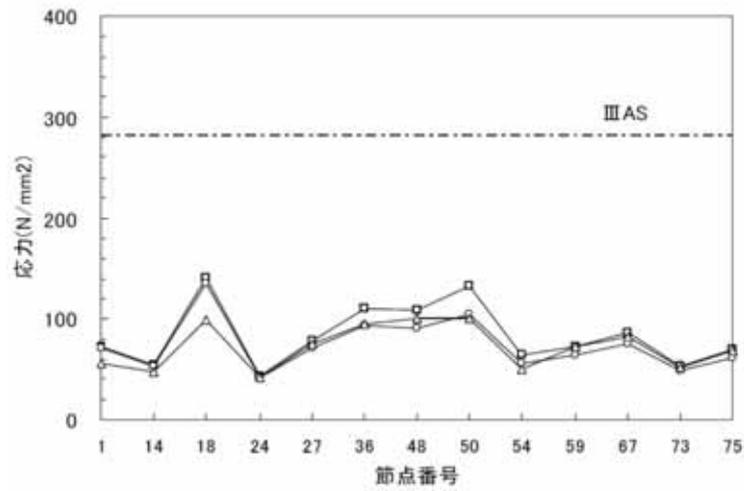


エルセントロ波

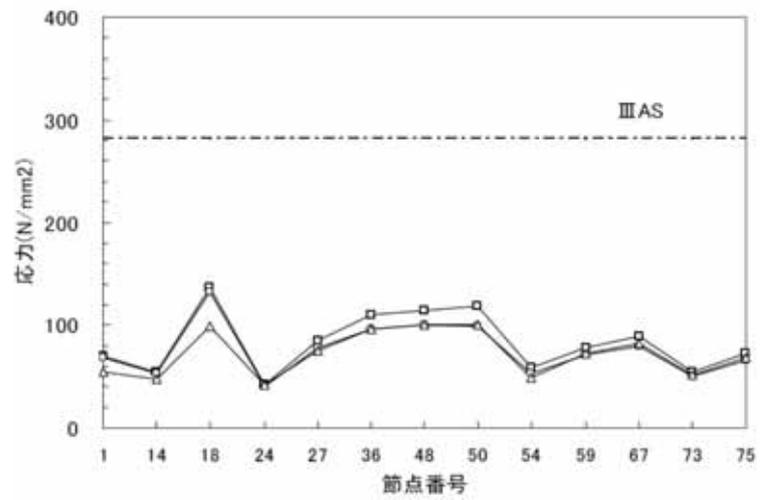
第6-6図 主要な部位における発生応力 (RHR-001 Aプラント)



兵庫県南部地震（松村組観測波）



人工波



エルセントロ波

第 6-7 図 主要な部位における発生応力 (FDW-001 B プラント)

第 6-1 表 S R S S 法と同時入力による時刻歴応答解析法との比較（最大応力発生点）

解析対象配管	入力地震波	最大応力発生点	S R S S /同時入力
FDW-001 (A プラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No26)	1.08
	人工波	分岐部(節点 No26)	1.08
	エルセントロ波	分岐部(節点 No26)	1.08
MS-001 (A プラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No10)	1.15
	人工波	分岐部(節点 No10)	1.20
	エルセントロ波	分岐部(節点 No10)	1.18
RHR-001 (A プラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No28)	1.15
	人工波	拘束点(節点 No28)	1.15
	エルセントロ波	拘束点(節点 No28)	1.18
FDW-001 (B プラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No18)	1.35
	人工波	拘束点(節点 No18)	1.37
	エルセントロ波	拘束点(節点 No18)	1.34

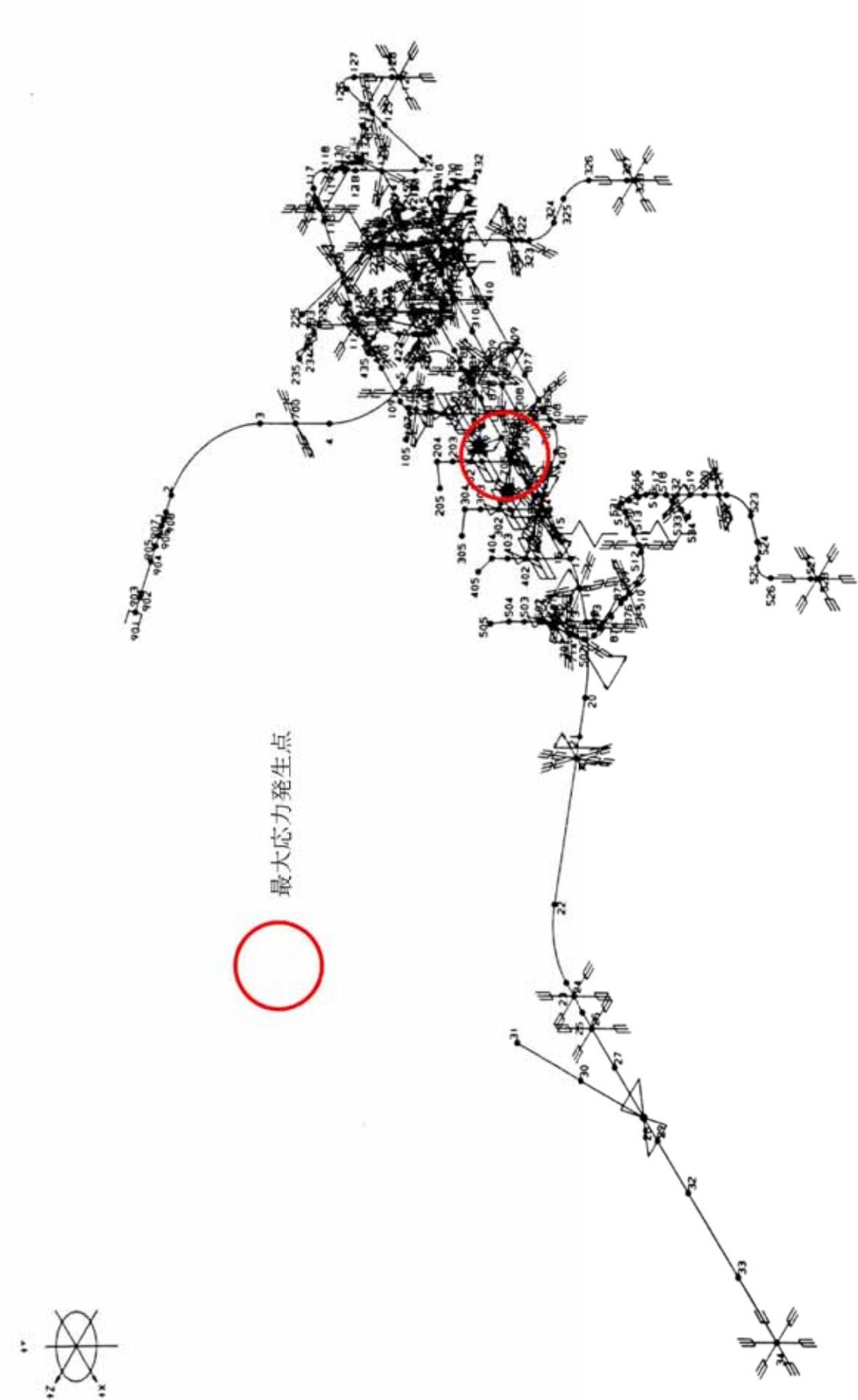
FDW：給水系配管

MS：主蒸気系配管

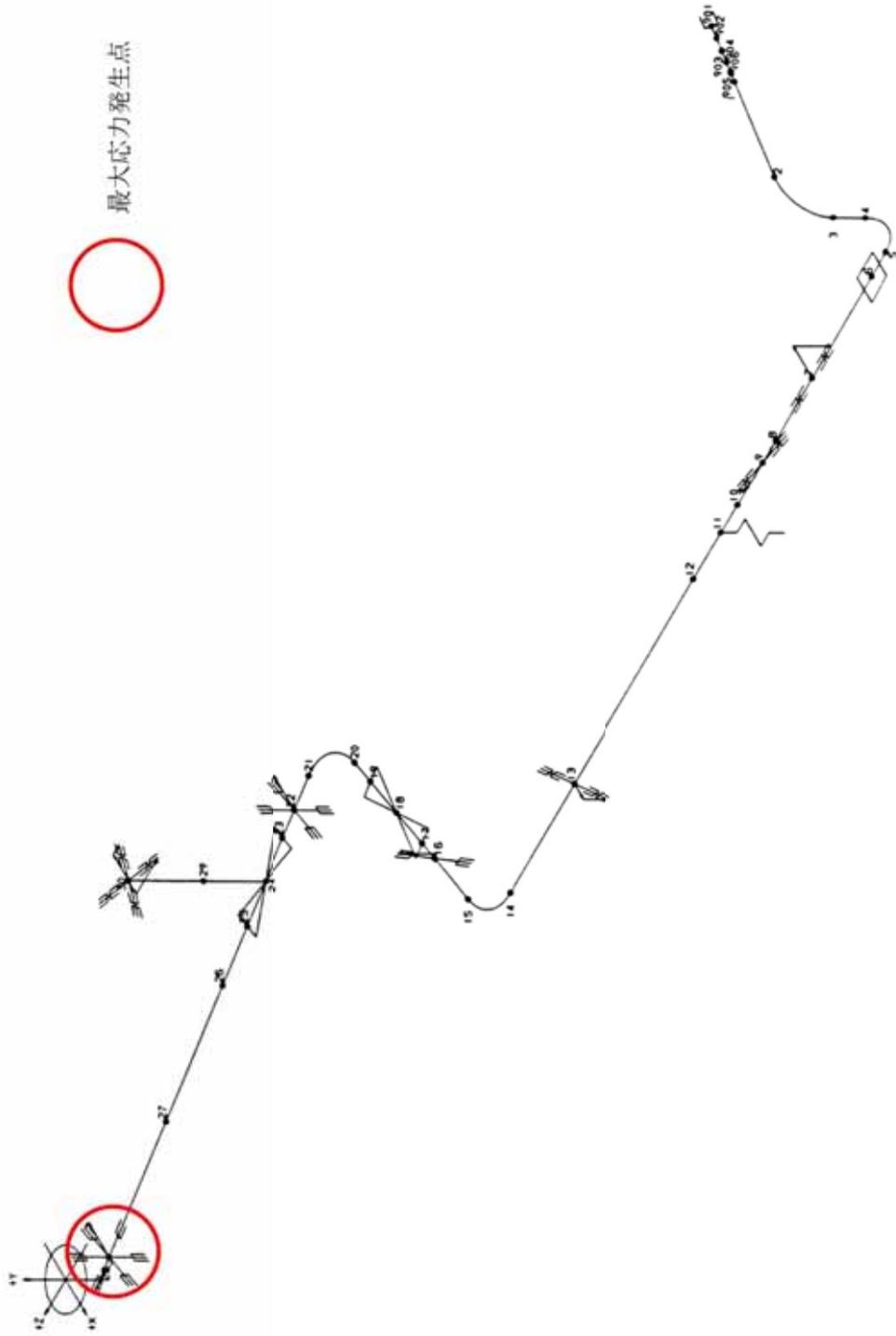
RHR：残留熱除去系配管



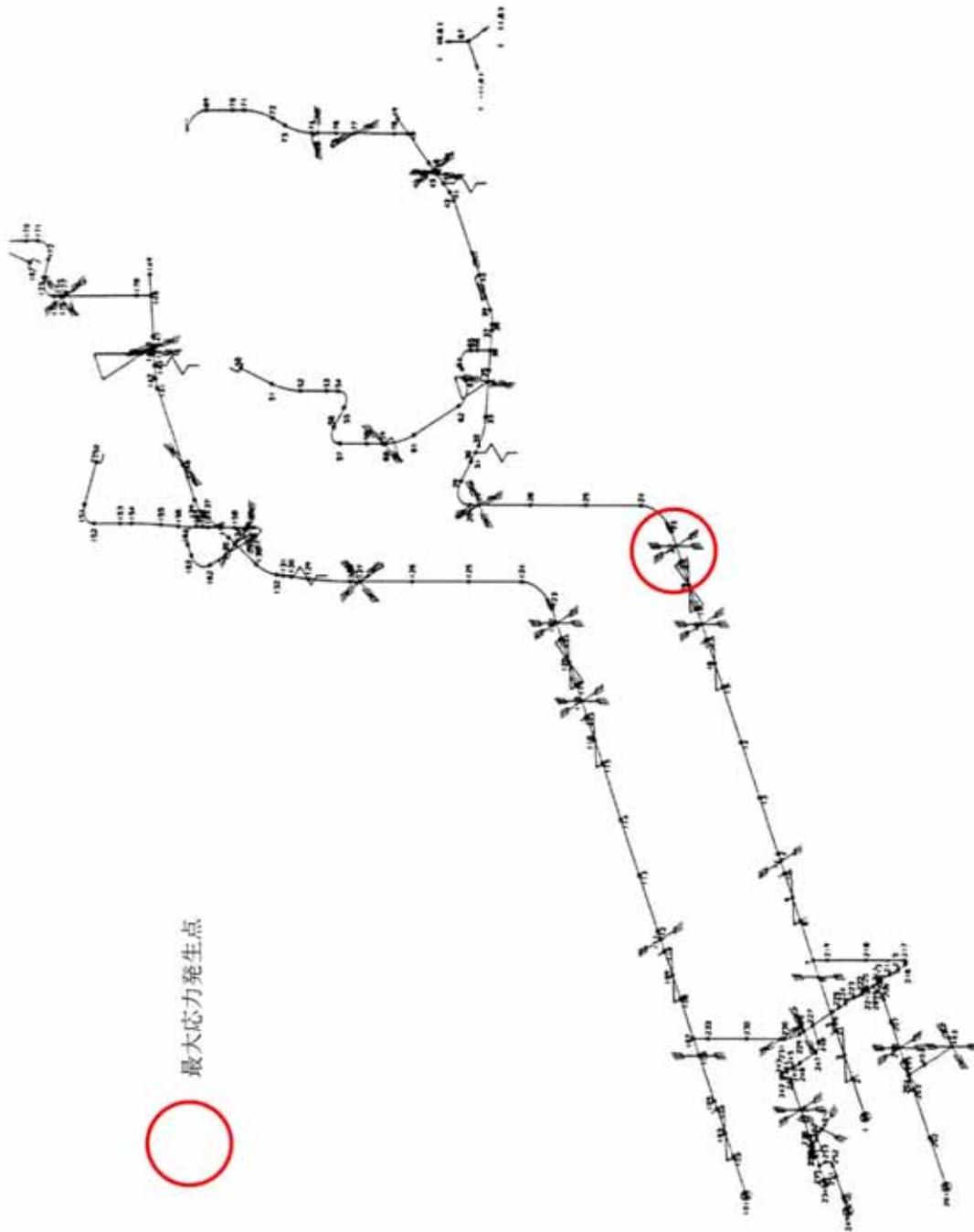
第6-8図 給水系配管 (FDW-001 Aプラント)



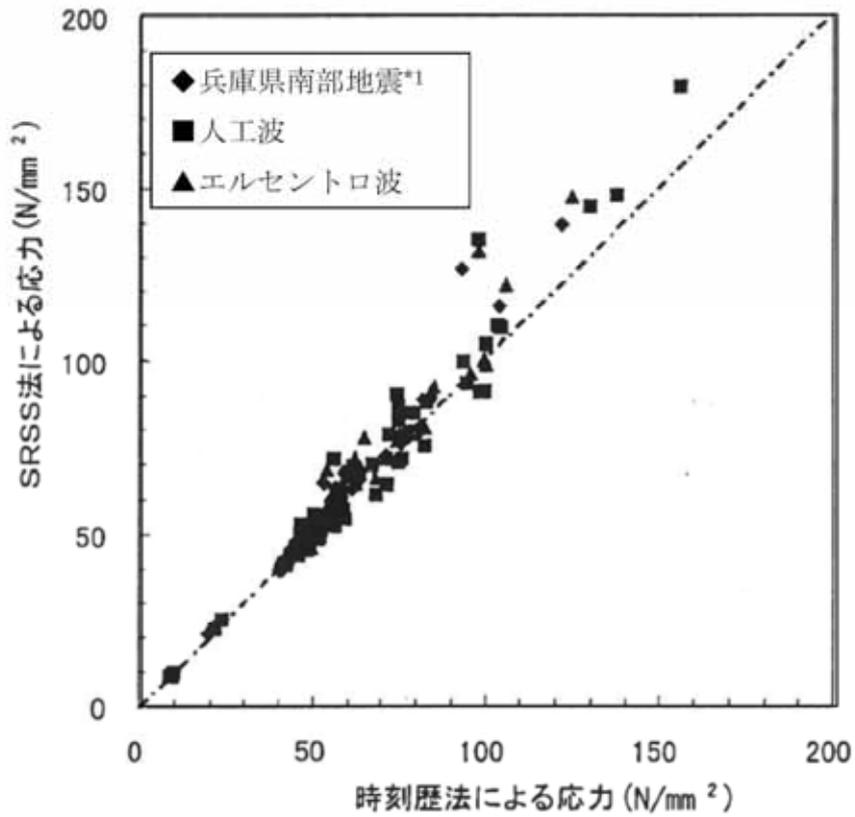
第 6-9 図 主蒸気系配管 (MS-001 A プラント)



第6-10図 残留熱除去系配管（RHR-001 Aプラント）



第 6-11 図 給水系配管 (PDW-001 B プラント)



注記

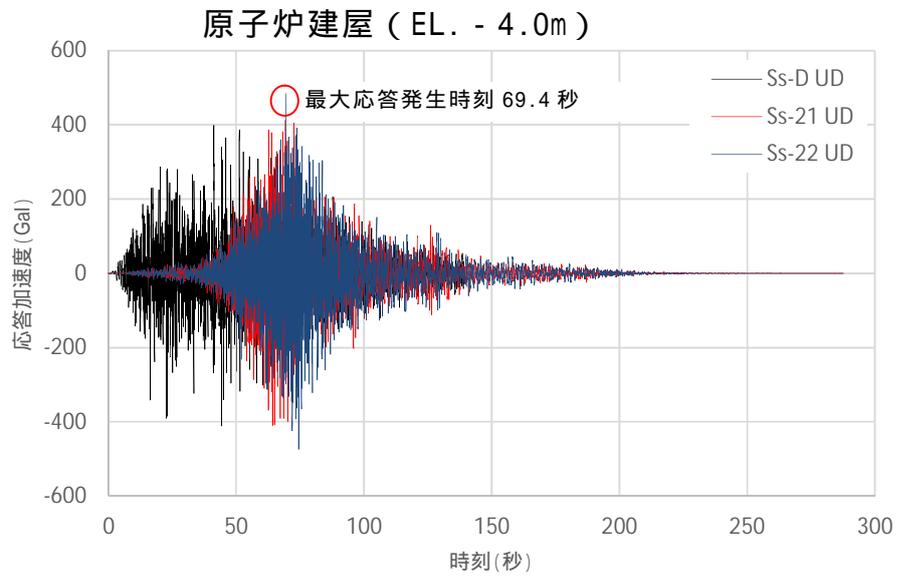
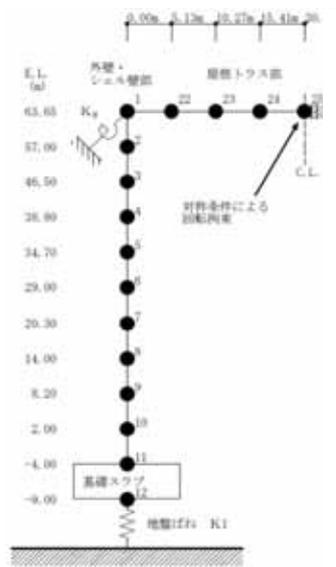
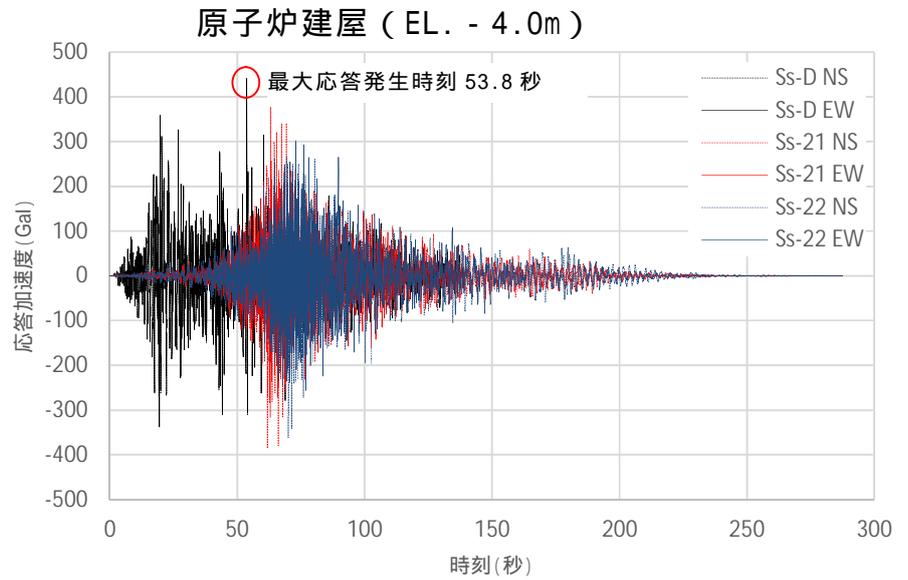
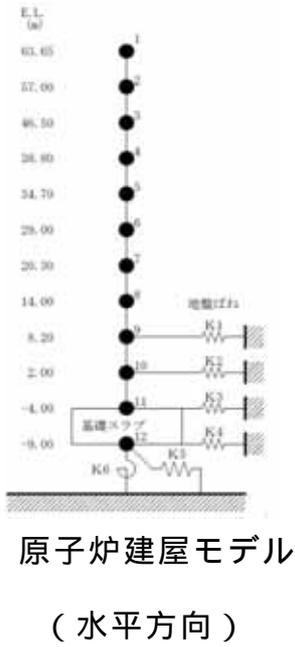
* 1 : 松村組観測波

第 6-12 図 S R S S 法による応力と時刻歴応答解析による応力の比較 (主要部位)

4 . 東海第二発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

東海第二発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、原子炉建屋を例に、原子炉建屋の施設の耐震性評価において主要な地震動である基準地震動 $S_S - D$ 、 $S_S - 21$ 及び $S_S - 22$ に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計用震度は、全ての地震動に対する南北方向と東西方向の最大応答加速度を包絡した値を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の生起時刻については、基準地震動 $S_S - D$ 、 $S_S - 21$ 及び $S_S - 22$ における南北方向及び東西方向を通じた最大応答加速度の生起時刻を用いた。

第 6-13 図及び第 6-2 表に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には約 0.9 秒～約 41 秒の差があり、東海第二発電所においても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認した。



第 6-13 図 原子炉建屋の応答値 (EL. - 4.0m の例)

第 6-2 表 最大応答値の生起時刻の差

位置 (m)	最大応答値の生起時刻 (秒)		生起時刻の差(秒)
	水平方向	鉛直方向	
63.65	73.0	68.6	4.4
57.00	61.9	68.6	6.7
46.50	61.9	61.0	0.9
38.80	19.9	61.0	41.1
34.70	73.0	61.0	12.0
29.00	20.0	61.0	41.0
20.30	63.3	68.7	5.4
14.00	63.3	68.7	5.4
8.20	53.8	74.5	20.7
2.00	53.8	74.5	20.7
-4.00	53.8	69.4	15.6
-9.00	53.8	69.4	15.6

5. まとめ

以上から，東海第二発電所では，水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の荷重の組合せ法としてS R S S法を用いることとする。

6. 参考文献

- (1)電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(ステップ2)」(平成7年～平成10年)

7. 別紙

別紙1 東北地方太平洋沖地震による東海第二発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

別紙2 東海第二発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について(補足説明)

東北地方太平洋沖地震による東海第二発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

1. はじめに

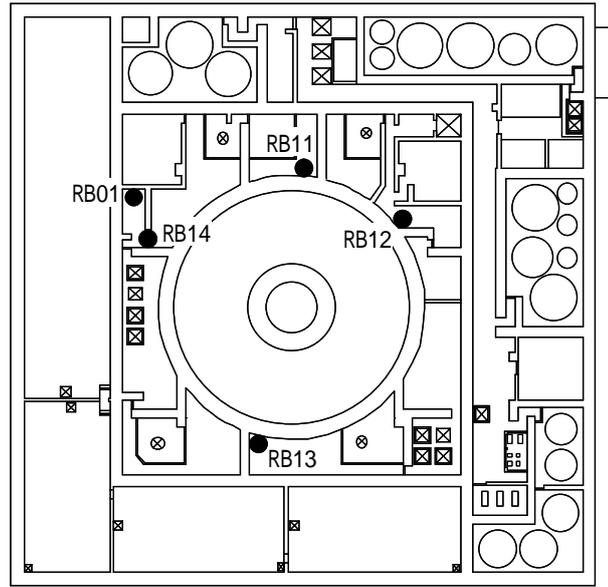
東海第二発電所では、平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震による観測記録が得られている。本資料では、東北地方太平洋沖地震による東海第二発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について参考として確認する。

2. 確認結果

別表 6-1 に示すように、東海第二発電所において観測された実地震についても、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には 0.6 秒及び 4.2 秒の差があることが確認された。また、最大応答値の生起時刻の差が比較的小さな EW-UD の生起時刻の差 0.6 秒について、別図 6-3 にて水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認した。

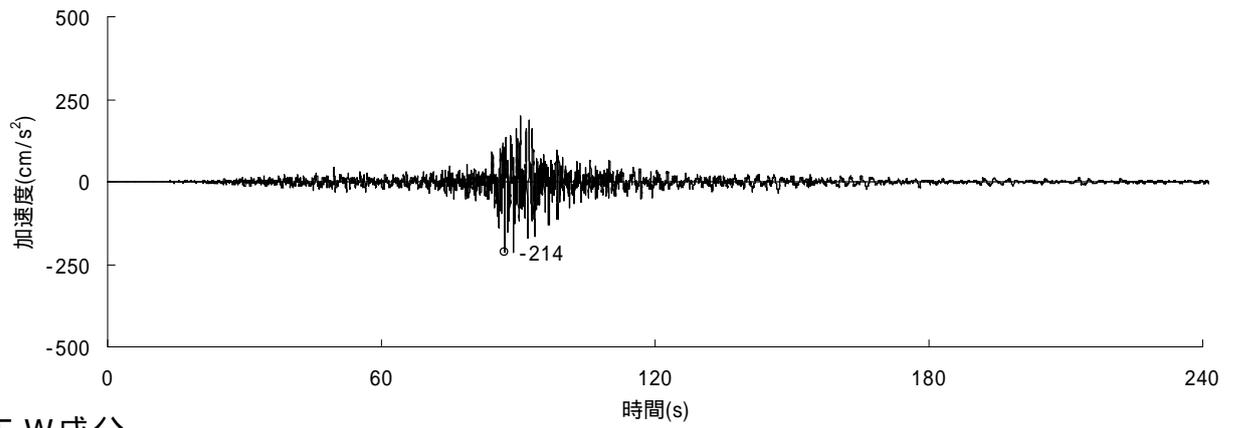
別表 6-1 東北地方太平洋沖地震の観測記録における最大応答値の生起時刻の差

位置 (m)	最大応答値の生起時刻 (秒)			生起時刻の差 (秒)	
	南北方向 (NS)	東西方向 (EW)	鉛直方向 (UD)	NS-UD	EW-UD
-4.0 (RB01)	87.0	91.8	91.2	4.2	0.6

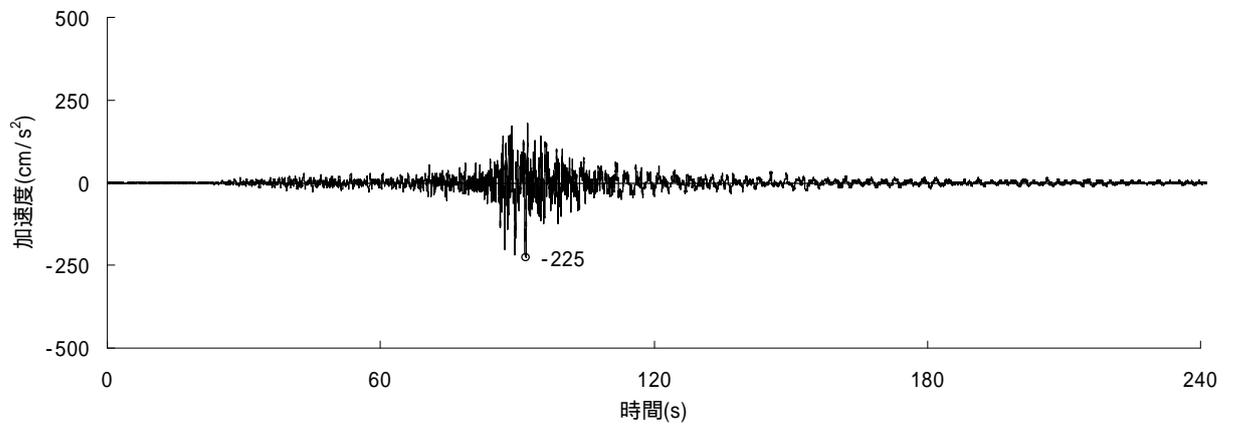


別図 6-1 原子炉建屋基礎上 (EL. -4.0m) 地震計設置位置

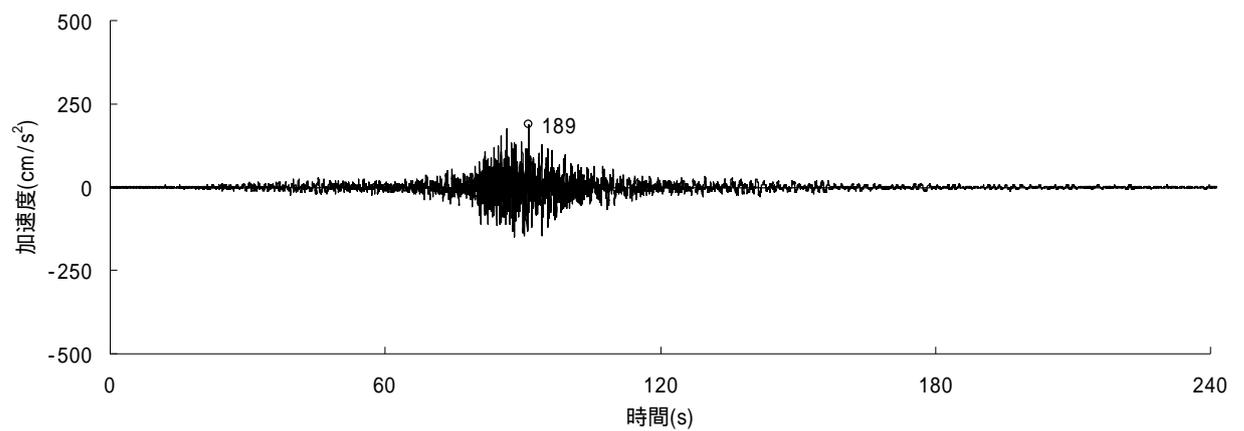
N S 成分



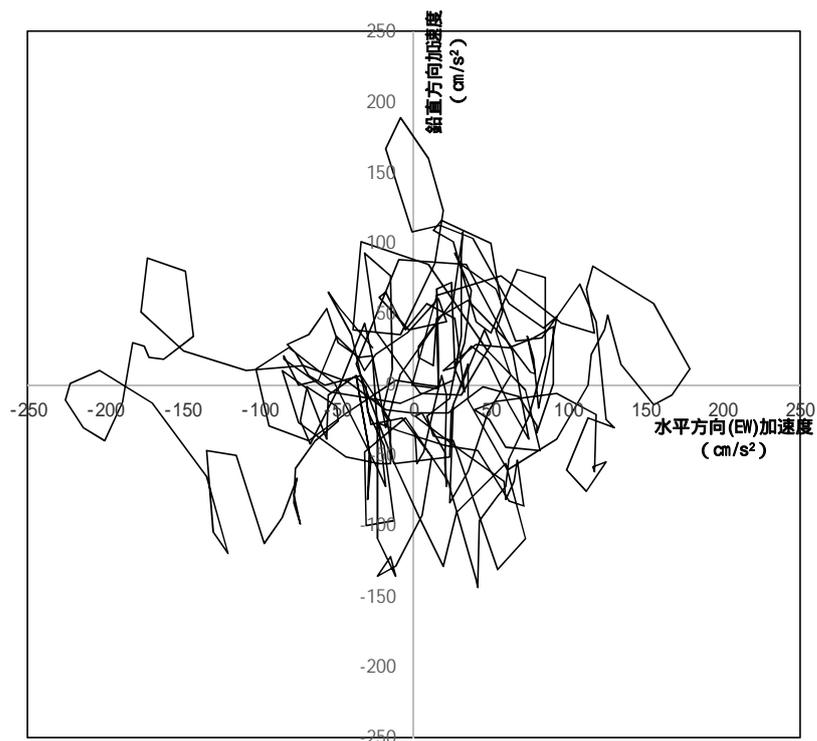
E W 成分



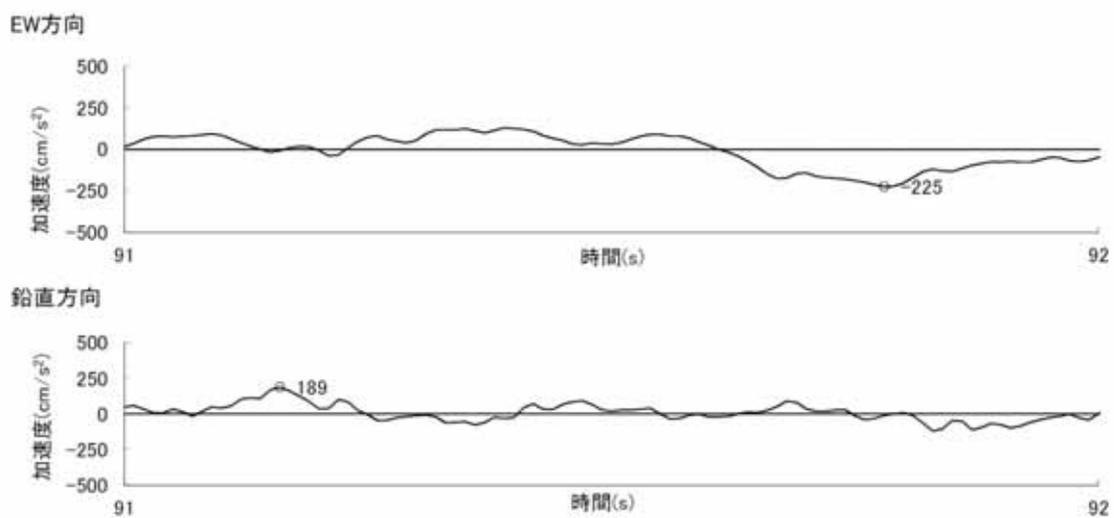
U D 成分



別図 6-2 原子炉建屋基礎上 (EL. -4.0m) RB01 の観測記録加速度時刻歴波形



原子炉建屋基礎上 (EL. -4.0m) RB01 のリサーチ波形 (9 0 秒から 9 3 秒)



原子炉建屋基礎上 (EL. -4.0m) RB01 の観測記録加速度時刻歴波形 (9 1 秒から 9 2 秒)

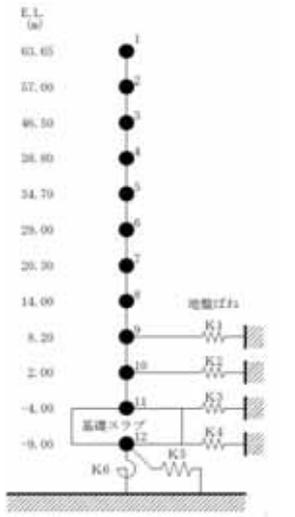
別図 6-3 最大応答値(EW-UD)における生起時刻の差

東海第二発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について（補足説明）

本資料では東海第二発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、4項で選定した基準地震動 $S_S - D$ 、 $S_S - 21$ 及び $S_S - 22$ の3波に加えて、基準地震動 $S_S - 31$ も加えた場合の水平方向及び鉛直方向の生起時刻の差について説明する。

4項で示した同様の手法にて水平方向と鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を別図6-4及び別表6-2に示す。別表6-2には4項で整理した基準地震動 $S_S - D$ 、 $S_S - 21$ 及び $S_S - 22$ の3波で整理した生起時刻の差についても記載した。

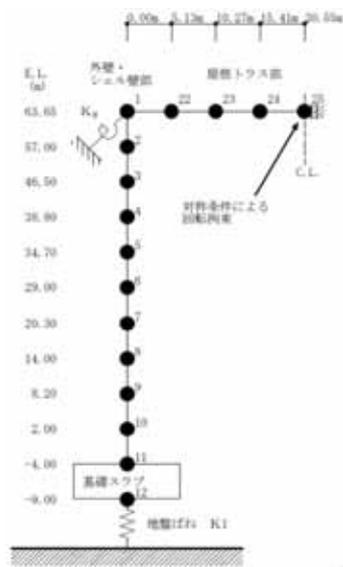
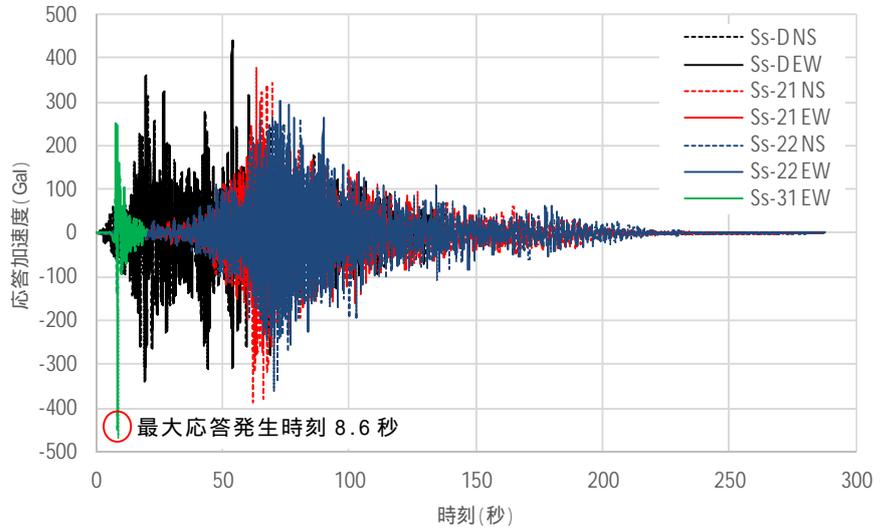
別図6-4に示すとおり $S_S - 31$ は、地震継続時間が短く、水平方向の最大応答値の生起時刻は約9秒となり、他 S_S よりも早い時刻で最大応答値の生起時刻が生じる。また $S_S - 31$ の鉛直方向については、他の S_S の応答加速度値と比べても小さな傾向を示す。このため $S_S - 31$ の水平方向の最大応答値の生起時刻9秒と他 S_S の鉛直方向の最大応答値の生起時間を用いて評価すると、生起時刻の差として大きくなる傾向となる。



原子炉建屋モデル

(水平方向)

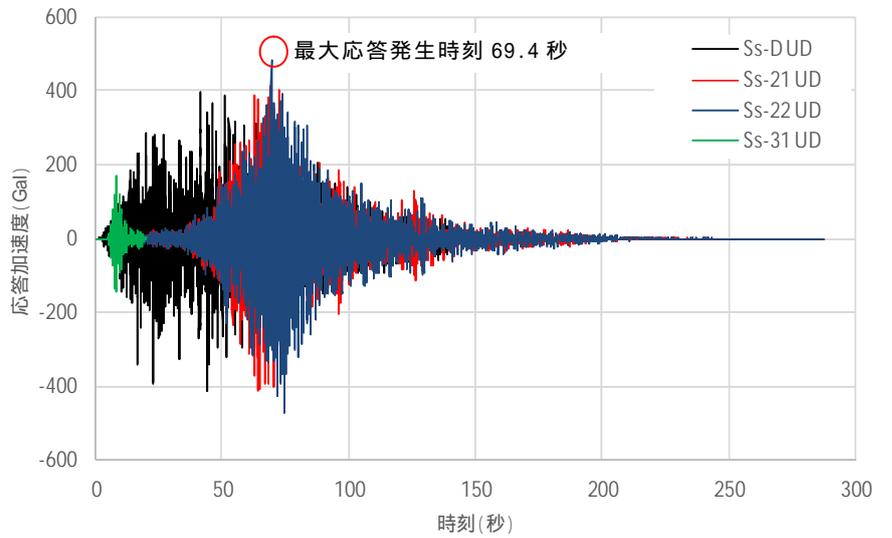
原子炉建屋 (EL. - 4.0m)



原子炉建屋モデル

(鉛直方向)

原子炉建屋 (EL. - 4.0m)



別図 6-4 原子炉建屋の応答値 (EL. -4.0m の例)

別表 6-2 S_s - 31 考慮時の最大応答値の生起時刻の差

位置 (m)	S _s - 31 考慮時の検討			S _s 3 波時の 生起時刻 の差 (秒)
	最大応答値の 生起時刻 (秒)		生起時刻 の差 (秒)	
	水平方向	鉛直方向		
63.65	73.0	68.6	4.4	4.4
57.00	61.9	68.6	6.7	6.7
46.50	8.6	61.0	52.4	0.9
38.80	8.7	61.0	52.3	41.1
34.70	8.7	61.0	52.3	12.0
29.00	8.7	61.0	52.3	41.0
20.30	8.6	68.7	60.1	5.4
14.00	8.7	68.7	60.0	5.4
8.20	8.6	74.5	65.9	20.7
2.00	8.6	74.5	65.9	20.7
-4.00	8.6	69.4	60.8	15.6
-9.00	8.6	69.4	60.8	15.6

鉛直方向応答解析モデルの追加について

1. 概要

格納容器内の原子炉圧力容器等の大型機器は、一般機器や配管等に比べて質量が大きく、原子炉建屋との相互作用を考慮した地震応答の算定が必要である。そのため、既工認において、原子炉圧力容器（炉心支持構造物及び炉内構造物含む）、原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎等の大型機器・構造物の耐震設計では、水平方向の動的地震力については原子炉建屋と大型機器を連成させた多質点モデルによる時刻歴応答解析を行うことで動的地震力を算定し、鉛直方向については静的震度による地震荷重を算定していた。

今回工認においては、新たに鉛直方向の動的地震力に対する考慮が必要となったことから、鉛直方向についても水平方向と同様に動的地震力の算定を行う。鉛直方向の地震応答解析モデルについては、鉛直方向の各応力評価点における軸力を算定するため、従来の水平方向モデルをベースに新たに多質点モデルを作成する。

なお、鉛直方向の地震応答解析モデルは、大間 1 号炉の建設工認において適用例がある。

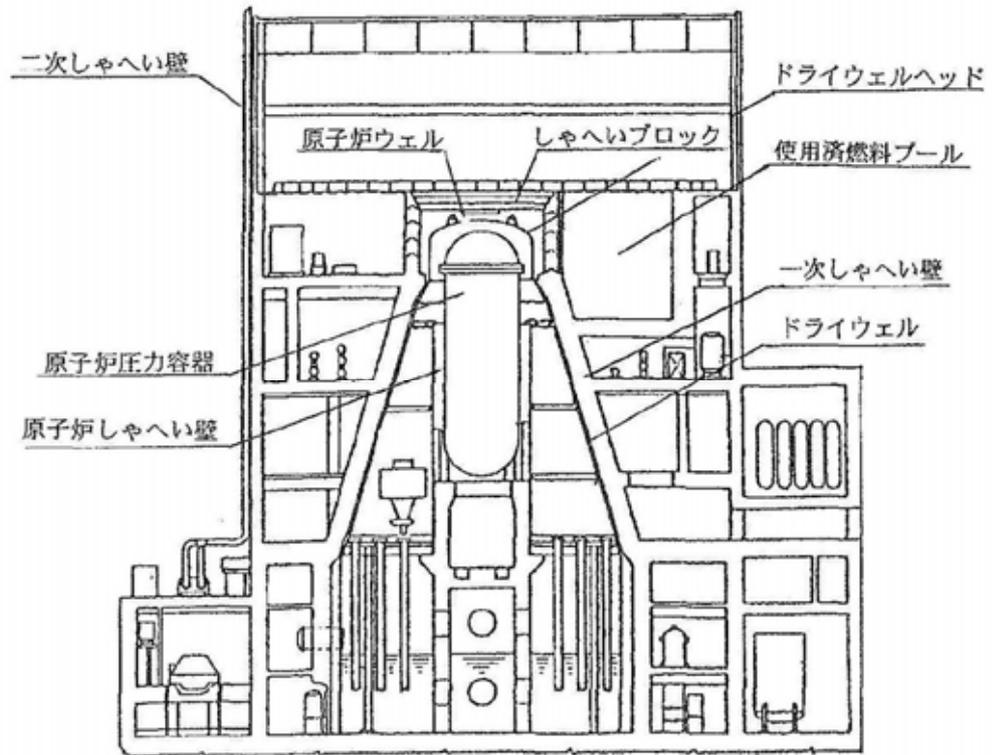
2. 地震応答解析モデルについて

原子炉建屋、格納容器の概略断面図を第 7-1 図、原子炉圧力容器内部構造物の構造図を第 7-2 図に示す。

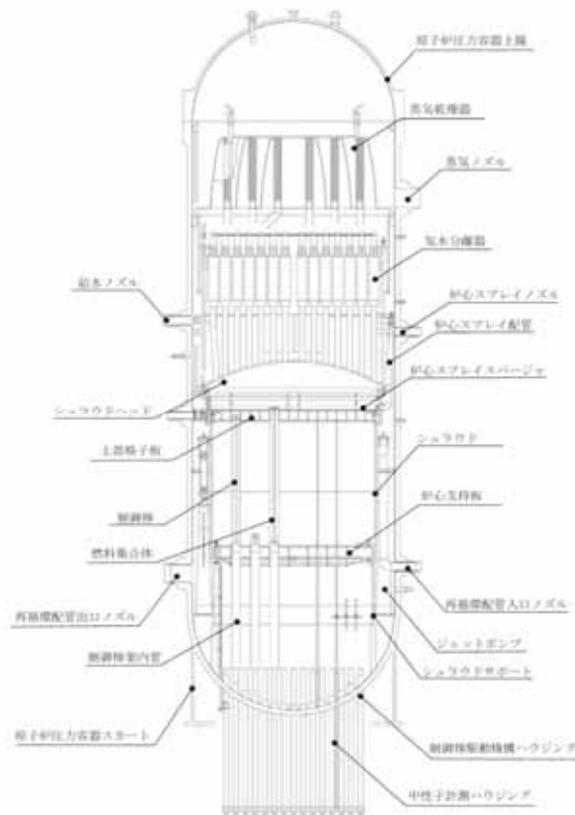
水平方向の解析モデルにおいては、原子炉圧力容器、原子炉遮蔽壁、原子炉本体基礎は第 7-3 図に示すような多質点モデルにてモデル化する。原子炉圧力容器は原子炉圧力容器スタビライザと等価なばねで原子遮蔽壁と結ば

れ，原子炉本体基礎と剛に結合される。原子炉本体基礎はその下端において原子炉建屋基礎版上端と剛に結合され，さらにダイヤフラムフロアの剛性と等価なばねにより原子炉格納容器を介して原子炉建屋に支持される。

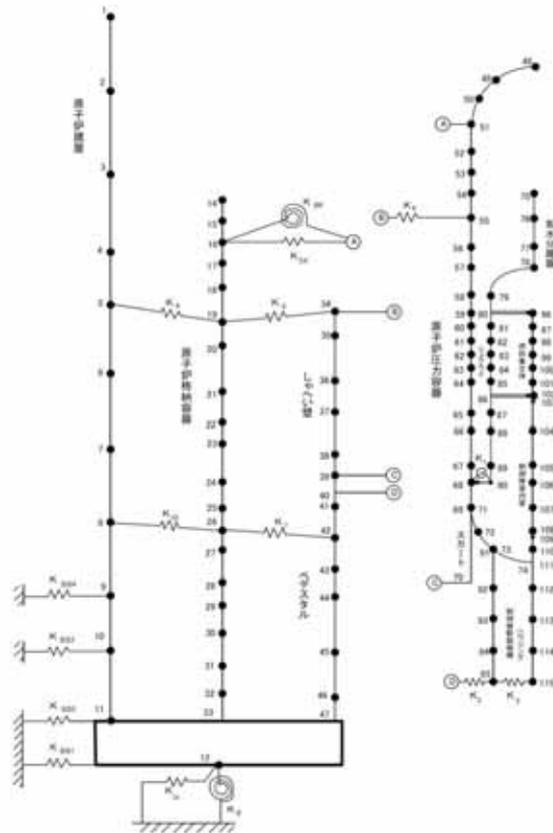
鉛直方向の解析モデルにおいても水平方向の解析モデルと同様に第 7-4 図に示すような多質点モデルにてモデル化する。原子炉压力容器は，原子炉本体基礎と剛に結合される。原子炉本体基礎は，その下端において原子炉建屋基礎版上端と剛に結合され，原子炉建屋に支持される。



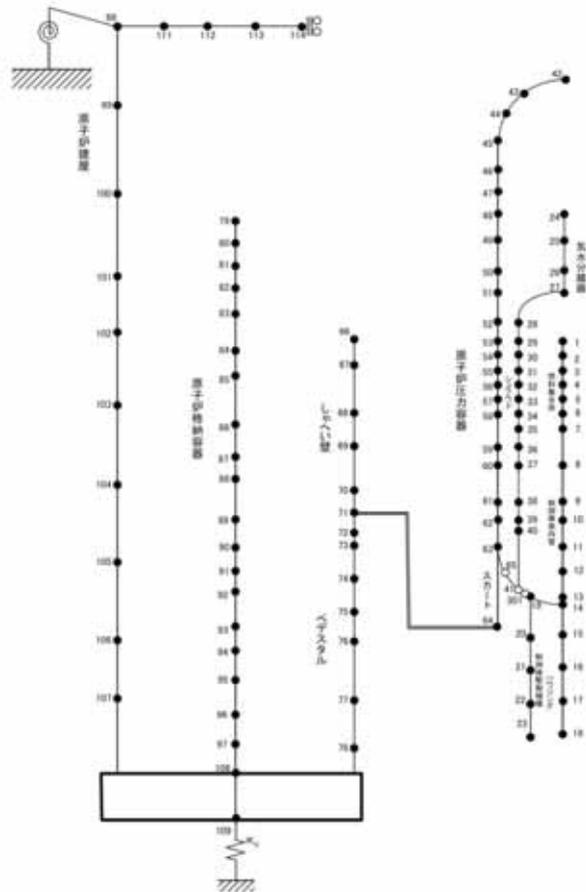
第 7-1 図 原子炉建屋，格納容器 概略断面図



第 7-2 図 原子炉圧力容器内部構造物 構造図



第 7-3 図 原子炉建屋 - 炉内構造物系連成 地震応答解析モデル (水平方向)



第 7-4 図 原子炉建屋 - 炉内構造物系連成 地震応答解析モデル (鉛直方向)

炉内構造物への極限解析による評価の適用について

1. 概要

既工認においては、炉内構造物として公式等を用いた評価を行っていたが、今回工認では、機能限界を踏まえた許容限界をより現実的に示す観点で、J E A G 4601、J S M E 設計・建設規格で定められた極限解析による評価（以下「極限解析」という。）を採用する。極限解析については、規格基準に基づく手法であり、また新規制基準での工認における高浜 1、2 号炉、美浜 3 号炉で適用実績のある手法である。

2. 炉内構造物への極限解析の適用

(1) 規格基準における扱い

極限解析は、第 8-1 表に示すとおり、J E A G 4601、J S M E 設計・建設規格において、炉心支持構造物、炉内構造物に適用可能な設計手法として規定されている。しかしながら、極限解析の適用実績が少ないことから、以下に極限解析について説明する。J E A G 4601、J S M E 設計・建設規格の抜粋を第 8-1, 2 図に示す。

第 8-1 表 極限解析の規格基準における扱い

規格基準	適用範囲	備考
J E A G 4601	炉心支持構造物 炉内構造物	具体的な手法は JSME に記載（JEAG では告示 501 号を読み込み）
JSME S NC1-2005/2007	炉心支持構造物 炉内構造物	

2.5 炉心支持構造物の許容応力

2.5.1. 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力

炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次一般膜応力 + 1次曲げ応力	1次+ 2次応力	1次+ 2次 + ピーク応力	特別な応力限界		
					純せん 断応力	支 圧 応 力	ねじり 応 力
設計条件	$S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	—	—	—
I _A	—	—	$3 S_m^{(2)}$	運転状態 I 及び II における荷重の組合せについて疲れ解析を行い疲れ累積係数が1.0以下であること。 ⁽³⁾	$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
II _A	—	—			$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
III _A	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m^{(4)}$	$1.5 S_y^{(5)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m^{(7)}$
IV _A	$2/3 S_u^{(1)}$ 。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m^{(4)}$	$2 S_y^{(5)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m^{(7)}$
III _A S	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m$	$1.5 S_y^{(6)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m$
IV _A S	$2/3 S_u^{(1)}$ 。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m$	$2 S_y^{(6)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m$

注：(1) 告示第96条第1項第一号の崩壊荷重の下限に基づく評価（ただし、設計条件については同号イ、III_A及びIII_ASについては同号ロ、IV_A及びIV_ASについては同号ハの評価）を適用する場合は、この限りではない。

(2) $3 S_m$ を超えるときは告示第97条の弾塑性解析を用いることができる。

(3) 告示第96条第1項第三号を満たすときは、疲れ解析を行うことを要しない。

(4) 告示第96条第1項第一号へによる。

(5) 告示第96条第1項第一号トによる。（ ）内の値は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

(6) （ ）内の値は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

(7) 告示第96条第1項第一号リによる。

第 8-1 図 J E A G 4601・補-1984 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容値に関する抜粋

表 CSS-3110-1 応力強さの限界(ボルト等を除く)

応力の分類 供用状態	一次応力		二次応力	ピーク応力	特別な応力限界
	一般膜応力	曲げ応力	膜応力と曲げ応力		
	P_m	P_b	Q	F	
設計条件	P_m S_m 弾性解析 または $2/3 P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44 L_e$ 試験(注5)	$P_m + P_b$ $1.5 S_m$ 弾性解析 または $2/3 P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44 L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	—
供用状態A およびB			$P_m + P_b + Q$ $3S_m$ 弾性解析 または $P_m + P_b + Q + F$ S_a 弾塑性解析	$P_m + P_b + Q + F$ S_a 疲労解析	支圧荷重 S_y または 平均支圧応力 $1.5S_y$ せん断荷重 $0.6S_m$ 平均せん断応力 $0.8S_m$ 最大ねじりせん断応力
供用状態C	P_m $1.5 S_m$ 弾性解析 または 極限解析(注1) P_{cr} または $0.6 L_e$ 試験(注5)	$P_m + P_b$ $2.25 S_m$ 弾性解析 または 極限解析(注1) P_{cr} または $0.6 L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の1.5倍
供用状態D	P_m $2.4S_m / 2/3S_u$ (注2, 注3) 弾性解析 $2/3 S_u$ (注4) または 極限解析(注1) $0.9 P_{cr}$ または 試験(注5) $0.8 L_e$	$P_m + P_b$ $3.6S_m / 3S_u$ (注2, 注3) 弾性解析 S_u (注4) または 極限解析(注1) $0.9 P_{cr}$ または 試験(注5) $0.8 L_e$	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の2倍

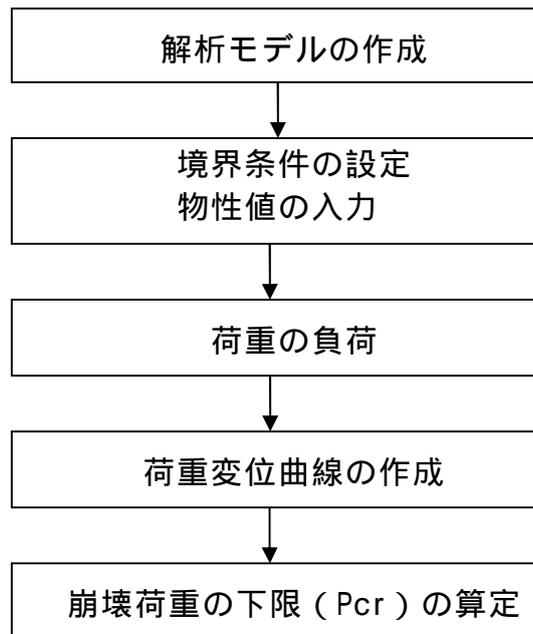
(備考)
 (注1) 供用状態D以外の P_{cr} は $1.5 S_m$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。供用状態Dの P_{cr} は $MIN[2.3S_m, 0.7S_u]$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。

- (注2) 2つのうちのいずれか小さい方の値をとる。
- (注3) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金に適用する。
- (注4) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金以外の材料に適用する。
- (注5) L_e はプロトタイプまたはモデル試験により評価を行う場合の最大荷重である。
- (注6) 実線は応力に基づく評価、破線は荷重に基づく評価を示す。

第 8-2 図 J S M E 設計・建設規格 炉心支持構造物(ボルト等を除く)の許容値に関する抜粋

(2) 極限解析による評価

極限解析は、3次元FEMモデルを用いて、弾完全塑性体の物性値を入力した解析により崩壊荷重の下限を求め、求めた崩壊荷重の下限から許容荷重設定するものである。極限解析フローを第8-3図に示す。

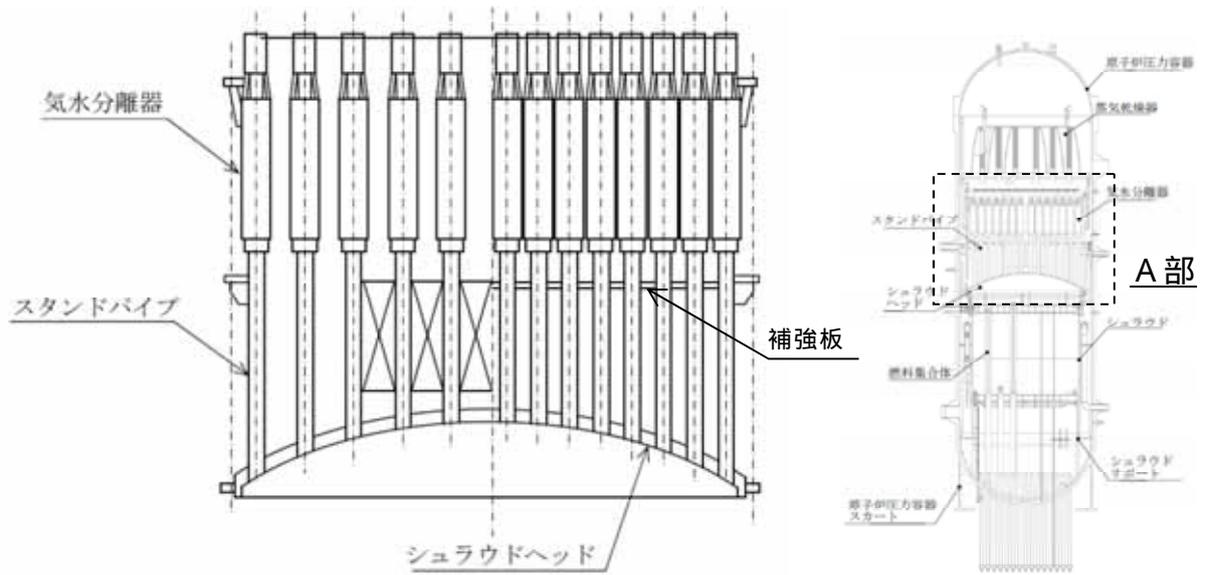


第8-3図 極限解析フロー

解析モデルの作成

気水分離器及びスタンドパイプは、第8-4図に示すとおり、シュラウドヘッドに取り付けられている。気水分離器に作用する地震時の荷重は、スタンドパイプを介してシュラウドヘッドへ伝達される構造となっている。各スタンドパイプは同一断面形状で曲げ剛性は等しいこと、及び補強板で連結されていることから、各スタンドパイプの地震時の応答変位は等しくなるため、解析においては、1本のスタンドパイプに着目してソリッド要素にてモデル化することとする。モデル図を第8-5図に示す。

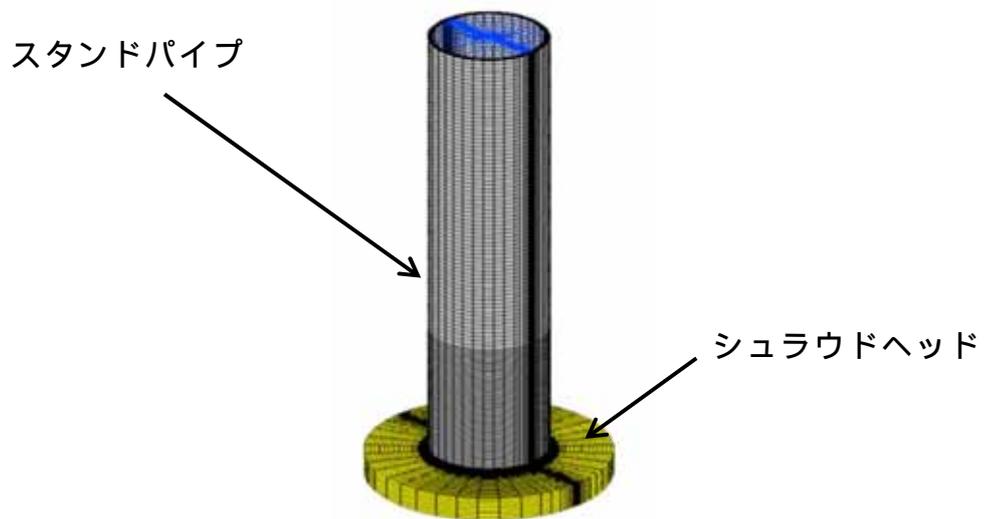
また、解析モデルはスタンドパイプがシュラウドヘッドに対して平面に取り付く中央位置及び斜めに取り付く最外周位置の2種類のモデルとする。



A部詳細

压力容器内構造物

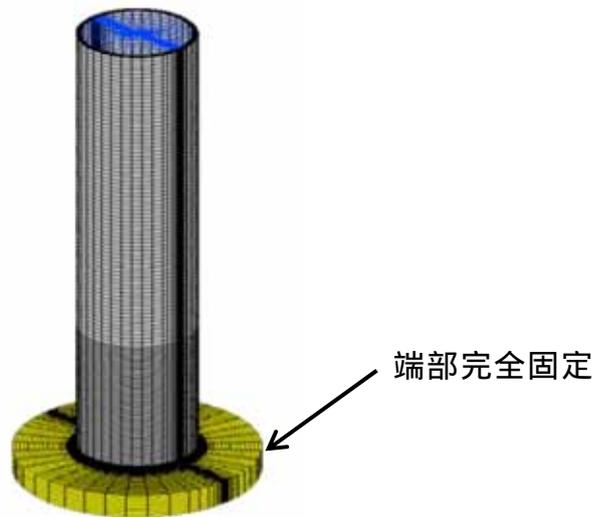
第 8-4 図 炉内構造物（気水分離器及びスタンドパイプ）構造概要図



第 8-5 図 極限解析に用いる解析モデル概要図（中央位置）

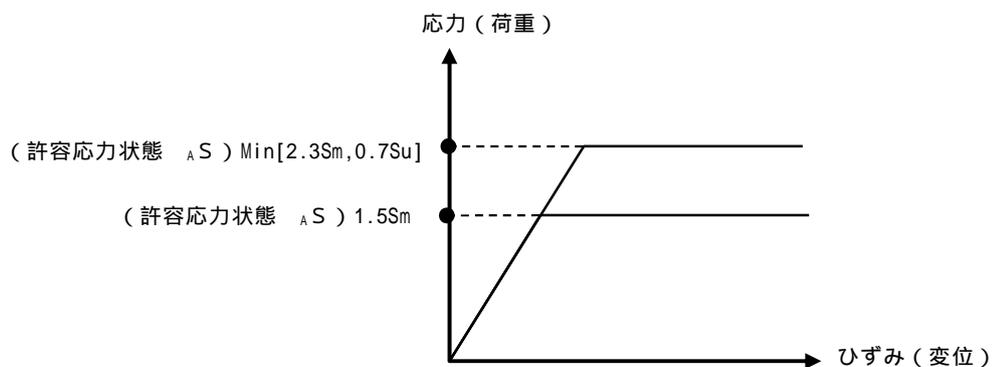
境界条件及び物性値

解析モデルの境界条件を第 8-6 図に示す。境界条件として、モデル化したシュラウドヘッドの端部を完全固定としている。



第 8-6 図 解析モデルの境界条件

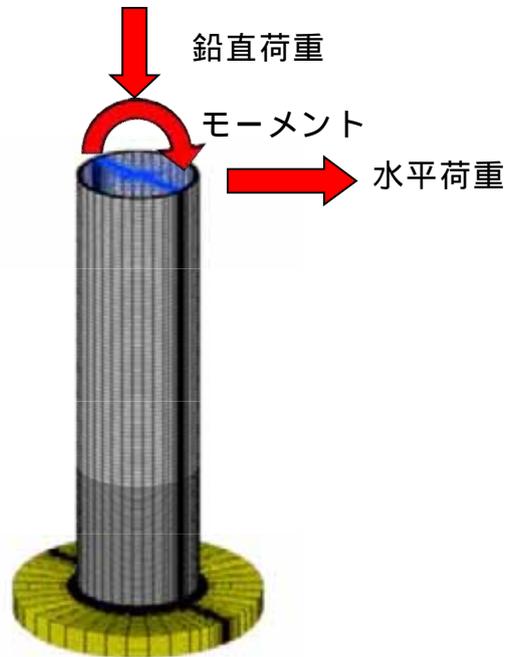
解析モデルの物性値は、許容応力状態 A_S における許容荷重を求める際には、J S M E 設計・建設規格 CSS-3160 に規定されているとおり、 $2.3S_m$ と $0.7S_u$ の小さい方を材料の降伏点とした弾完全塑性体を入力する(第 8-7 図 参照)。なお、許容応力状態 A_S における許容荷重を求める際には、同じく、 $1.5S_m$ を材料の降伏点とした弾完全塑性体を入力する。



第 8-7 弾完全塑性体として応力とひずみの関係

荷重の負荷

第 8-8 図に示すように，スタンドパイプ上部に荷重を負荷することにより，スタンドパイプの変位を求める。



第 8-8 図 荷重の負荷

荷重変位曲線の作成

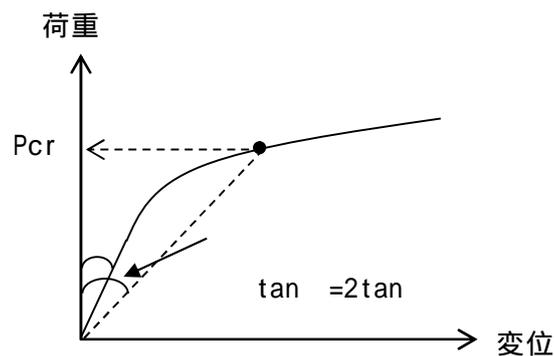
地震時においては，スタンドパイプを介して，シュラウドヘッドと気水分離器の間で荷重伝達が行なわれ，この荷重伝達を維持することがスタンドパイプに求められる。したがって，この荷重伝達の観点から，第 8-8 図に示すスタンドパイプへの負荷荷重と，荷重を与えた際にスタンドパイプに生じる変位(シュラウドヘッドとスタンドパイプの間の変位)の関係から，荷重 - 変位曲線を作成する。

崩壊荷重の下限 (Pcr) の算定

にて作成した荷重変位曲線を基に崩壊荷重の下限 (Pcr) を算定する。

ここで、崩壊荷重の下限は、J S M E 設計・建設規格 CSS-3160 から「荷重とそれによる変形量の関係直線に対して、弾性範囲の関係曲線の勾配の2倍の勾配を有する直線が交わる点に相当する荷重」と定義されている(第8-9図参照)

また、崩壊荷重とは、ひずみ硬化を含まない理想的な弾完全塑性体の材料からなる構造物が荷重を受けて、全断面降伏又は座屈限界に達し、これ以上の荷重を加えると構造物が不安定になって変形が際限なく増加するときの荷重をいう。



第 8-9 図 崩壊荷重の下限 (Pcr) の定義

(3) 極限解析に対する試験による確認

気水分離器及びスタンドパイプにおける今回工認の申請は、極限解析を用いてスタンドパイプ部の有する耐力が地震荷重以上であることを確認することで、地震時における健全性を評価する。極限解析は、これまでの工認での適用例としてPWRの炉内構造物での適用実績はあるが、第8-2表に示すように、適用範囲及び解析手法は同じであるものの、適用部位が異なる。なお、先行PWRと同様に東海第二発電所の気水分離器及びスタンドパイプへの適用性を確認する観点から、縮尺の試験体を用いた試験を行う。

第8-2表 先行実績と東海第二との比較

	先行PWR	東海第二
適用範囲	炉内構造物	同左
適用部位	ラジアルサポート	スタンドパイプ
適用規格	J S M E 設計・建設規格 CSS-3160	同左
解析手法	3次元FEMによる 弾塑性解析	同左

東海第二発電所

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せ
に関する検討について
(耐震)

目 次

1. はじめに
2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動
 - 2.1 東海第二発電所の基準地震動 S_s
 - 2.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動
3. 各施設における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価
 - 3.1 建物・構築物
 - 3.1.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方
 - 3.1.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法
 - 3.1.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出方針
 - 3.1.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針
 - 3.2 機器・配管系
 - 3.2.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方
 - 3.2.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価方針
 - 3.2.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法
 - 3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備（部位）の抽出
 - 3.2.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの抽出結果及び今後の評価方針
 - 3.3 屋外重要土木構造物
 - 3.3.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方
 - 3.3.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針
 - 3.3.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法
 - 3.3.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出
 - 3.3.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出結果

3.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備

3.4.1 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備における評価対象構造物の抽出及び整理

3.4.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方

3.4.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

3.4.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出

別紙 - 1 機器・配管系に関する説明資料

参考資料 - 1 方向性を考慮していない水平方向地震動における模擬地震波の作成方針

1. はじめに

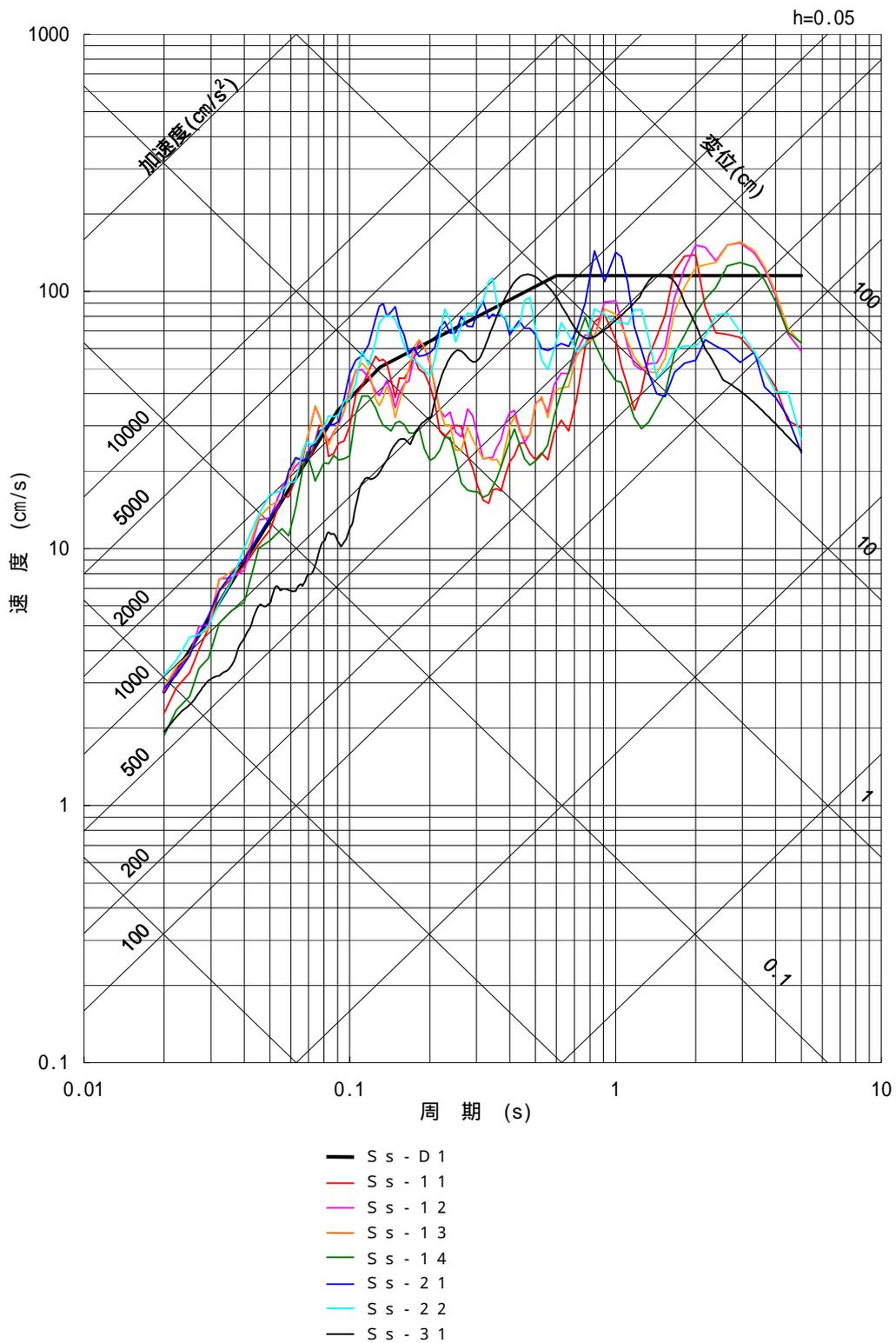
今回、新たに水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせによる耐震設計に係る技術基準が制定されたことから、従来の設計手法における水平 1 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた耐震設計に対して、施設の構造特性から水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性があるものを抽出し、施設が有する耐震性に及ぼす影響を評価する。本資料は、検討対象施設における評価対象部位の抽出方法と抽出結果、並びに影響評価の方針について記すものである。

2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動

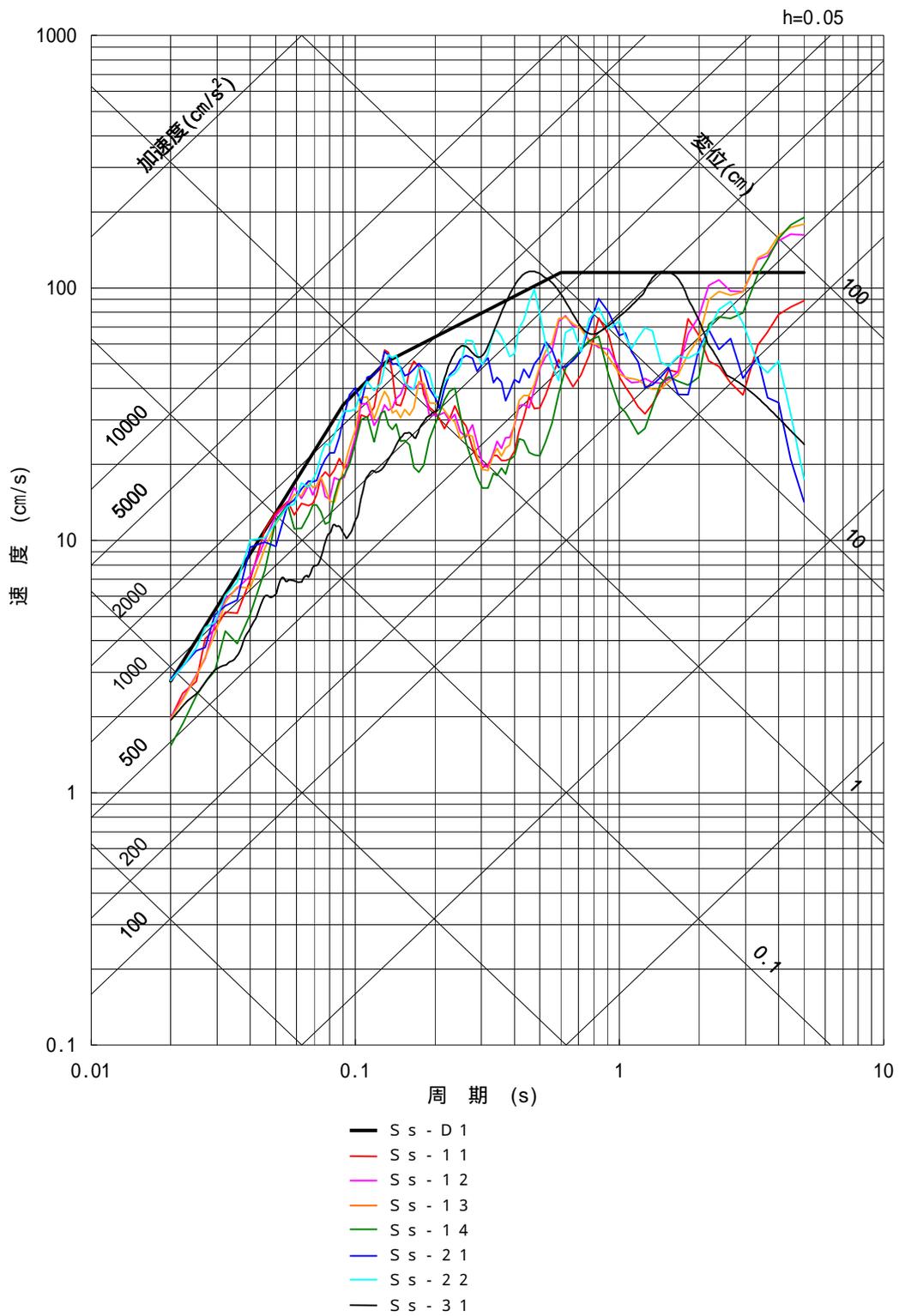
2.1 東海第二発電所の基準地震動 S_s

東海第二発電所の基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を評価して、これらの評価結果に基づき策定している。「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」としては、応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を実施し、その結果を踏まえ、応答スペクトルに基づく地震動として基準地震動 $S_s - D1$ 、断層モデルを用いた地震動として $S_s - 11 \sim S_s - 14$ 、 $S_s - 21$ 、 $S_s - 22$ を策定している。また、「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動 $S_s - 31$ を策定している。

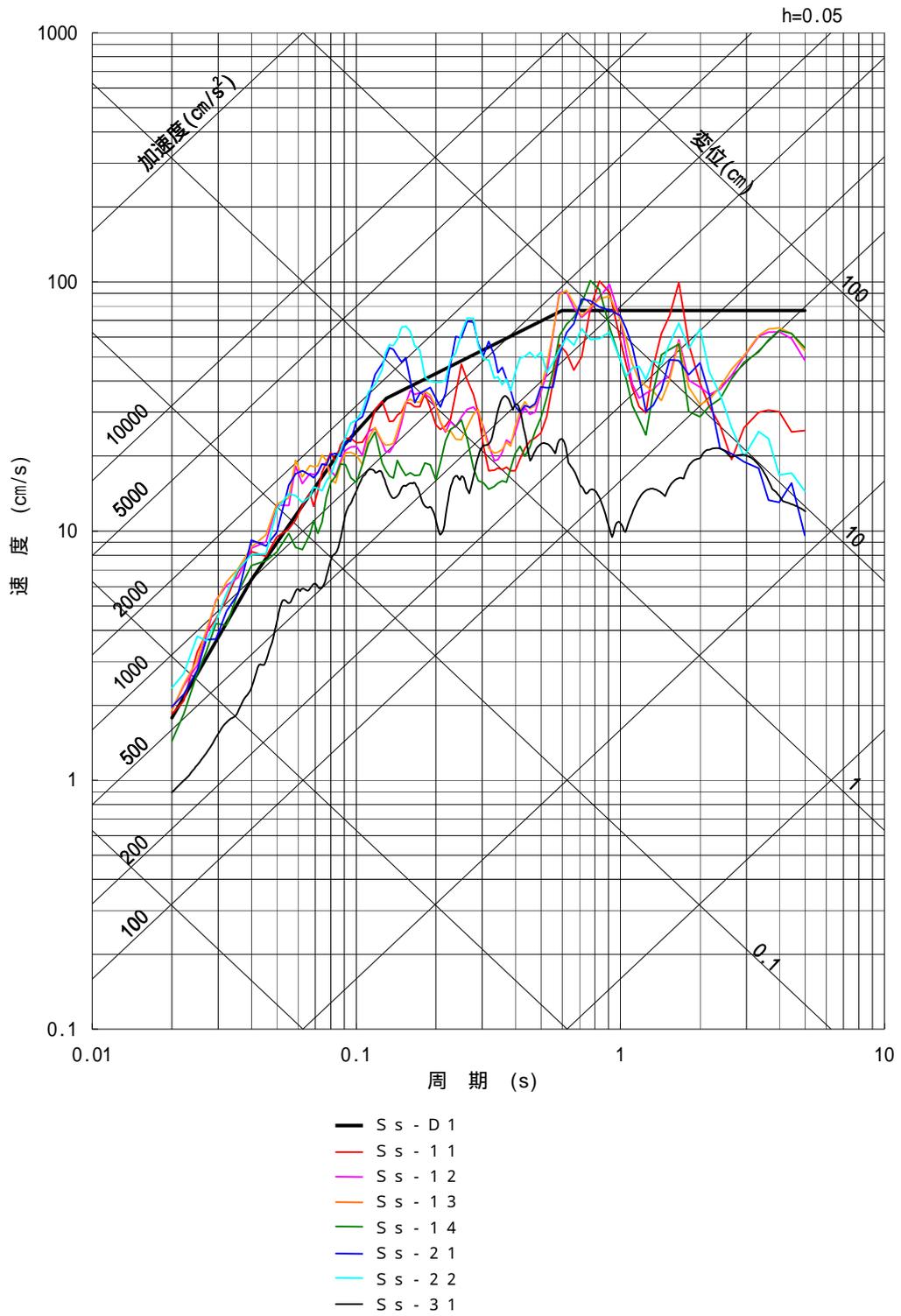
基準地震動 S_s の水平方向のスペクトル図を第 2 - 1 図に、鉛直方向のスペクトル図を第 2 - 2 図に示す。



第 2 - 1 図 (1 / 2) 基準地震動 S_s の応答スペクトル (NS 方向)



第 2 - 1 図 (2 / 2) 基準地震動 S_s の応答スペクトル (E W 方向)



第 2 - 2 図 基準地震動 S_s の応答スペクトル (鉛直方向)

2.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価に用いる基準地震動は、複数の基準地震動 S_s における地震動の特性及び包絡関係と施設の特性による影響も考慮した上で選定し、本影響評価に用いる。

3. 各施設における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価

3.1 建物・構築物

3.1.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方

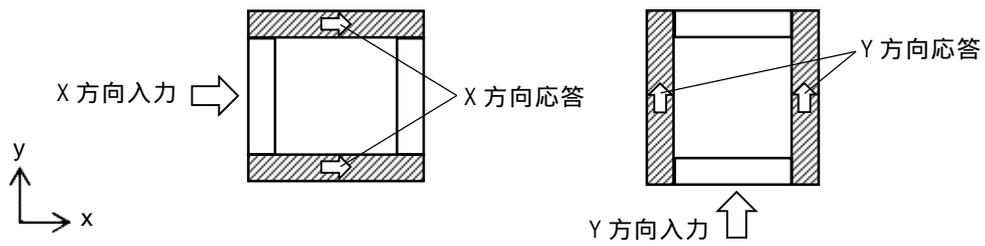
従来の設計手法では、建物・構築物の地震応答解析において、水平方向及び鉛直方向の地震動を質点系モデルに方向ごとに入力し、解析を行っている。また、原子炉施設における建物・構築物は、全体形状及び平面レイアウトから、地震力を主に耐震壁で負担する構造であり、剛性の高い設計としている。

水平方向の地震力に対しては、せん断力について評価することを基本とし、建物・構築物に生じるせん断力に対して、地震時の力の流れが明解となるように、直交する 2 方向に釣合いよく配置された鉄筋コンクリート造耐震壁を主な耐震要素として構造計画を行う。地震応答解析は、水平 2 方向の耐震壁に対して、それぞれ剛性を評価し、各水平方向に対して解析を実施している。したがって、建物・構築物に対し、水平 2 方向の入力がある場合、各方向から作用するせん断力を負担する部位が異なるため、水平 2 方向の入力がある場合の評価は、水平 1 方向にのみ入力がある場合と同等な評価となる。

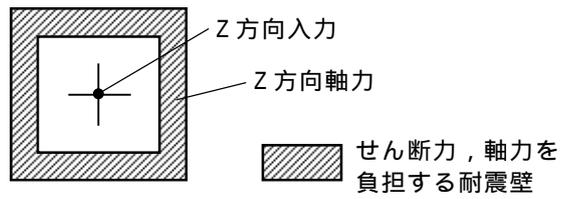
鉛直方向の地震力に対しては、軸力について評価することを基本としている。建物・構築物に生じる軸力に対して、鉄筋コンクリート造耐震壁を主な耐震要素として構造計画を行う。

入力方向ごとの耐震要素について、第 3 - 1 - 1 図及び第 3 - 1 - 2 図に示す。

従来設計手法における建物・構築物の応力解析による評価は、上記の考え方を踏まえた地震応答解析により算出された応答を、水平 1 方向及び鉛直方向に組み合わせて行っている。

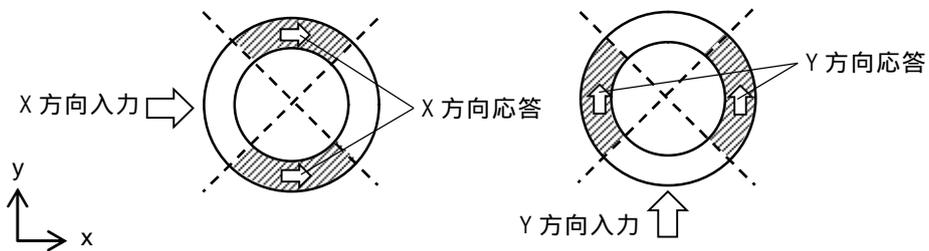


(a) 水平方向

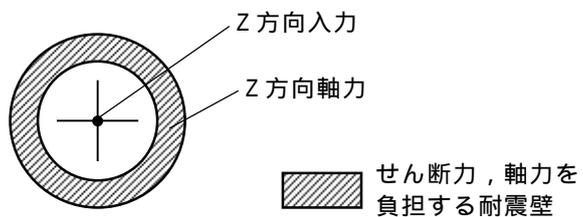


(b) 鉛直方向

第 3 - 1 - 1 図 入力方向ごとの耐震要素 (矩形)



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

第 3 - 1 - 2 図 入力方向ごとの耐震要素 (円筒形)

3.1.2 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

建物・構築物において、従来設計手法に対して水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある部位の評価を行う。

評価対象は、耐震重要施設及びその間接支持構造物、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する部位とする。

対象とする部位について、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性から、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位を抽出する。

応答特性から抽出された水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位は、既往の評価結果の荷重又は応力の算出結果を水平2方向及び鉛直方向に組み合わせ、各部位に発生する荷重や応力を算出し、各部位が有する耐震性への影響を確認する。

各部位が有する耐震性への影響があると確認された場合は、詳細な手法を用いた検討等、新たに設計上の対応策を講じる。

影響評価のフローを第3-1-3図に示す。

(1) 耐震評価上の構成部位の整理

建物・構築物における耐震評価上の構成部位を整理し、該当する耐震評価上の構成部位を網羅的に確認する。

(2) 応答特性の整理

建物・構築物における耐震評価上の構成部位について、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性を整理する。応答特性は、荷重の組合せによる影響が想定されるもの及び3次元的な挙動から影響が想定されるものに分けて整理する。

(3) 荷重の組合せによる応答特性が想定される部位の抽出

整理した耐震評価上の構成部位について、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性のうち、荷重の組合せによる応答特性により、耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

(4) 3 次元的な応答特性が想定される部位の抽出

従来設計手法における応答特性が想定される部位として抽出されなかった部位について、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し、3 次元的な応答特性により、耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

(5) 3 次元モデルによる精査

3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出された部位について、3 次元モデルを用いた精査を実施し、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより、耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

また、3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出されなかった部位についても、局所応答の観点から、3 次元モデルによる精査を実施し、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより、耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

局所応答に対する 3 次元モデルによる精査を行う建物・構築物は、その重要性、規模、構造特性及び機器評価確認への適用性を考慮し、代表施設を選定する。原子炉建屋は、耐震 S クラスの原子炉棟を含み、建屋規模も大きいいため多くの重要機器を内包している。そのため、3 次元モデルによる精査は、原子炉建屋を代表として行うこととする。

(6) 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価においては、従来設計手法の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる局部評価の荷重又は応力の算出結果を用いて評価を行う。水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組合せる方法として、米国 REGULATORY GUIDE 1.9X(注)の 2. Combining

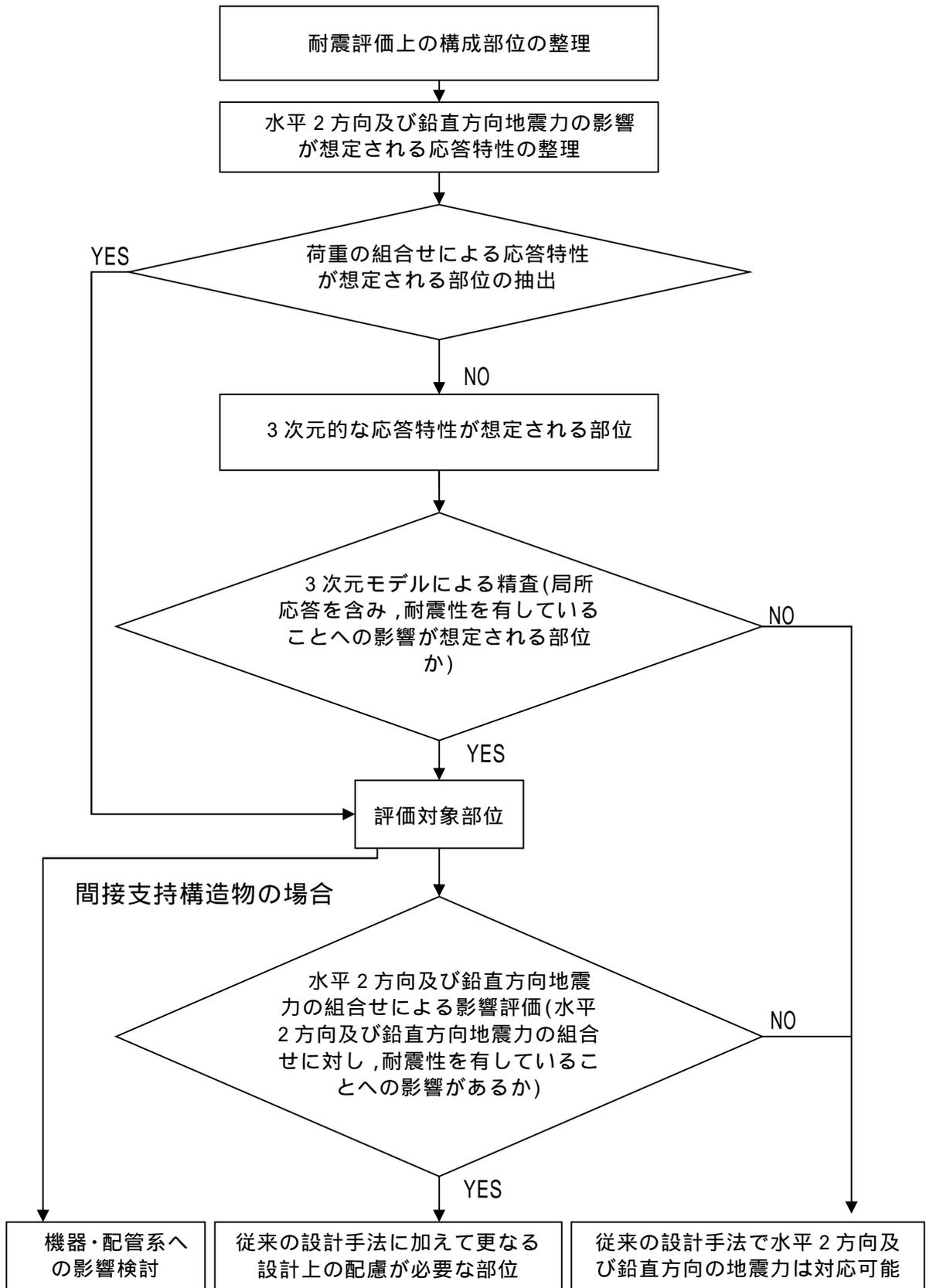
Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として、組合せ係数法（1.0：0.4：0.4）に基づいて地震力を設定する。

評価対象として抽出した耐震評価上の構成部位について、構造部材の発生応力を適切に組み合わせることで、各部位の設計上の許容値に対する評価を実施し、各部位の耐震性への影響を評価する。

（注）REGULATORY GUIDE（RG）1.92 “COMBINING MODAL RESPONSES AND SPATIAL COMPONENTS IN SEISMIC RESPONSE ANALYSIS”

（7）機器・配管系への影響検討

評価対象として抽出された部位が、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持機能を有する場合、原子炉建屋の3次元モデルによる精査結果から、水平2方向及び鉛直方向入力時と水平1方向入力時の加速度応答スペクトルを比較し、その傾向から機器・配管系に対する応答値への影響を確認する。



第 3 - 1 - 3 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価のフロー

3.1.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出方針

(1) 耐震評価上の構成部位の整理

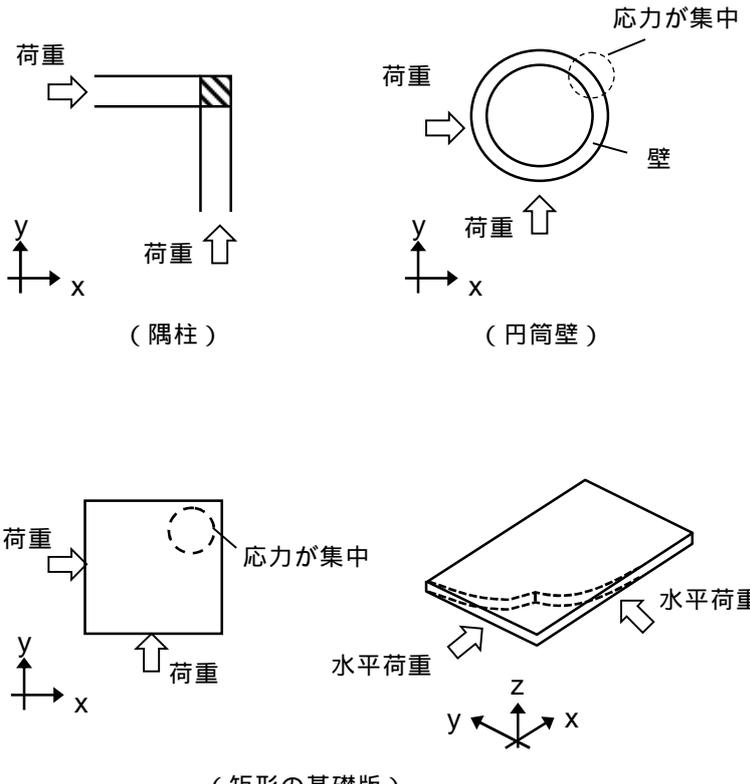
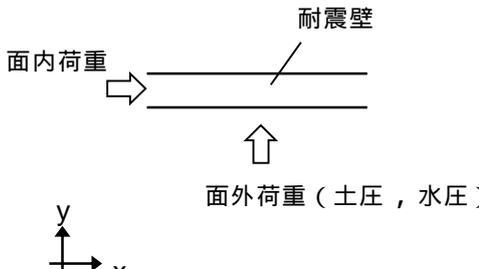
建物・構築物の耐震評価上の構成部位を整理し，該当する耐震評価上の構成部位を網羅的に確認する。

(2) 応答特性の整理

建物・構築物における耐震性評価部位について，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性を整理した。応答特性は，荷重の組合せによる影響が想定されるもの及び 3 次元的な挙動から影響が想定されるものに分けて整理した。整理した結果を第 3 - 1 - 1 表及び第 3 - 1 - 2 表に示す。また，応答特性を踏まえ，耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響の考え方を第 3 - 1 - 3 表に示す。

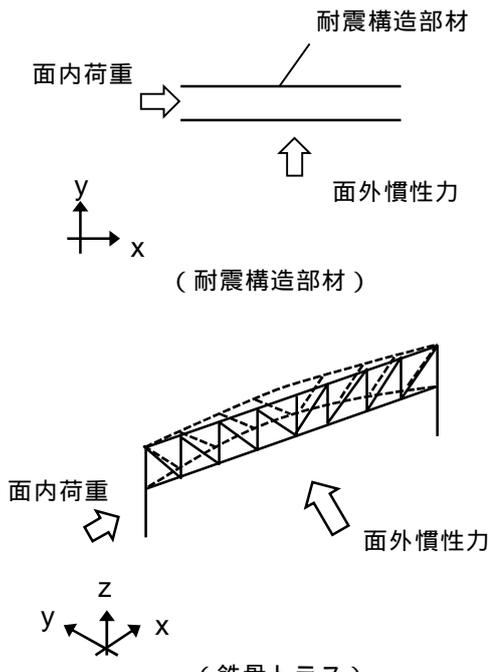
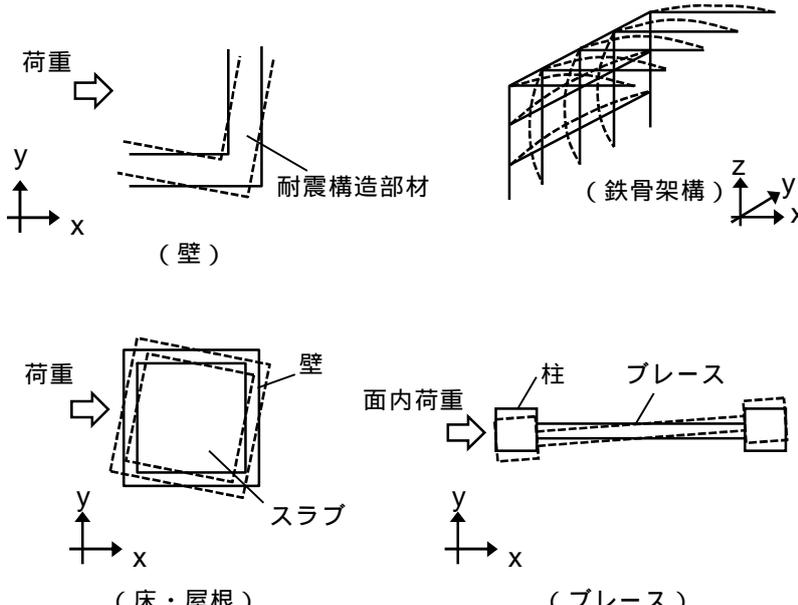
第 3 - 1 - 1 表 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性

(荷重の組合せによる応答特性)

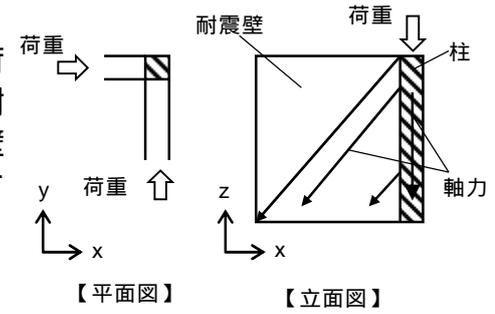
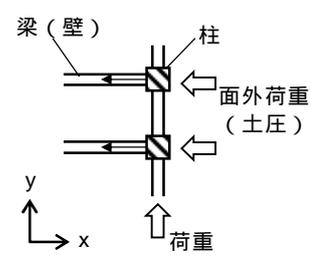
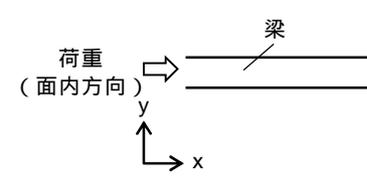
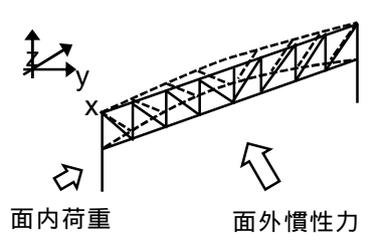
荷重の組合せによる 応答特性	影響想定部位
<p>- 1</p> <p>直交する水平 2 方向の荷重が、応力として集中</p>	<p>応力の集中する隅柱等</p> <p>(例)</p>  <p>荷重 → (隅柱)</p> <p>荷重 → (円筒壁)</p> <p>荷重 → (矩形の基礎版)</p> <p>応力が集中</p> <p>壁</p> <p>水平荷重</p>
<p>- 2</p> <p>面内方向の荷重を負担しつつ、面外方向の荷重が作用</p>	<p>土圧を負担する地下耐震壁等 水圧を負担するプール壁等</p> <p>(例)</p>  <p>面内荷重 → 耐震壁</p> <p>↑ 面外荷重 (土圧, 水圧)</p>

第 3 - 1 - 2 表 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性

(3 次元的な応答特性)

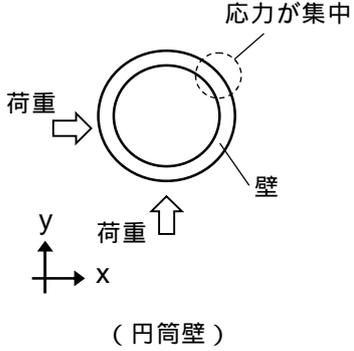
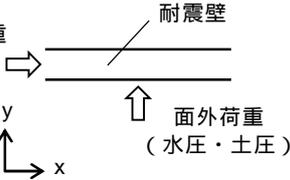
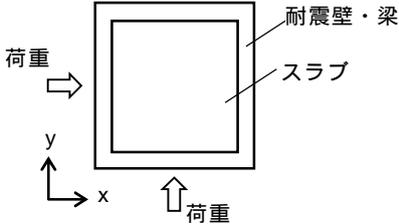
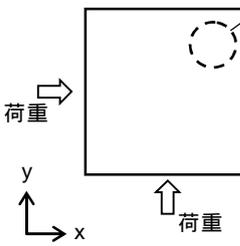
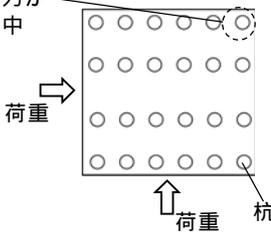
3 次元的な 応答特性	影響想定部位
<p>- 1</p> <p>面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい</p>	<p>大スパン又は吹き抜け部に設置された部位 (例)</p>  <p>耐震構造部材</p> <p>面内荷重</p> <p>面外慣性力</p> <p>(耐震構造部材)</p> <p>面内荷重</p> <p>面外慣性力</p> <p>(鉄骨トラス)</p>
<p>- 2</p> <p>加振方向以外の方に励起される振動</p>	<p>塔状構造物を含む，ねじれ挙動が想定される建物・構築物 (例)</p>  <p>荷重</p> <p>耐震構造部材</p> <p>(壁)</p> <p>(鉄骨架構)</p> <p>荷重</p> <p>壁</p> <p>スラブ</p> <p>(床・屋根)</p> <p>柱</p> <p>ブレース</p> <p>面内荷重</p> <p>(ブレース)</p>

第 3 - 1 - 3 表 耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響
の考え方 (1 / 2)

耐震評価上の構成部位		水平 2 方向入力の影響
柱	一般部	耐震壁付構造の場合，水平入力による影響は小さい。
	隅部 (端部を含む)	<p>独立した隅柱は，直交する地震荷重が同時に作用する。ただし，耐震壁付きの隅柱は，軸力が耐震壁に分散されることで影響は小さい。</p>  <p>【平面図】 【立面図】</p>
	地下部	<p>地下外周柱は面内方向の荷重を負担しつつ面外方向(土圧)の荷重が作用する。ただし，外周部耐震壁付のため 水平入力による影響は小さい。また，土圧が作用する方向にある梁及び壁が応力を負担することで 水平面外入力による影響は小さい。</p> 
梁	一般部	<p>大スパン又は吹抜け部では面内方向の荷重に加え，面外慣性力が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床及び壁の拘束により面外地震荷重負担による影響は小さい。</p> 
	地下部	<p>地下外周梁は面内方向の荷重を負担しつつ面外方向(土圧)の荷重が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床及び壁の拘束により面外地震荷重負担による影響は小さい。</p>
	鉄骨トラス	<p>大スパン又は吹抜け部では面内方向の荷重に加え，面外慣性力が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床による拘束があるため，面外地震荷重負担による影響は小さい。</p> 

第 3 - 1 - 3 表 耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響

の考え方 (2 / 2)

耐震評価上の構成部位		水平 2 方向入力の影響
壁	一般部	<p>1 方向のみ地震荷重を負担することが基本である。 円筒壁は直交する水平 2 方向の地震力により、集中応力が作用する。</p>  <p>(円筒壁)</p>
	地下部 プール壁	<p>地下部分の耐震壁は、直交する方向からの地震時面外土圧荷重も受ける。同様にプール部の壁については水圧を面外方向から受ける。</p>  <p>(耐震壁)</p>
	鉄骨 ブレース	<p>1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり、ねじれによる荷重増分は軽微と考えられ影響は小さい。</p>
床・ 屋根	一般部	<p>スラブは四辺が壁及び梁で拘束されており、水平方向に変形しにくい構造となっており、水平地震力の影響は小さい。</p>  <p>(スラブ)</p>
基礎	矩形 杭基礎	<p>直交する水平 2 方向の地震力により、集中応力が作用する。</p>  <p>(矩形基礎)</p>
		 <p>(杭基礎)</p>

(3) 荷重の組合せによる応答特性が想定される部位の抽出方針

耐震評価上の構成部位のうち，第3-1-1表に示す荷重の組合せによる応答特性により，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される部位か否かの考えを纏め，影響が想定される部位の抽出方針を示す。

a．柱

建物・構築物の隅柱は， - 1「直交する水平2方向の荷重が，応力として集中」の部位として抽出した。ただし，耐震壁付隅柱の場合，軸力が耐震壁に分散されることから該当しない。

- 2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，土圧が作用する地下外周柱が考えられるが，通常は耐震壁に囲まれており，耐震壁が面内の荷重を負担するため，地下外周柱は面内の荷重を負担しないため，該当しない。

b．梁

梁の一般部及び鉄骨トラス部については，地震力の負担について方向性を持っており， - 1「直交する水平2方向の荷重が，応力として集中」の部位に該当しない。

- 2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，土圧が作用する地下外周梁が考えられるが，通常は直交する床及び壁が存在し，これらによる面外方向の拘束があるため，該当しない。

c．壁

矩形の壁は，地震力の負担について方向性を持っており， - 1「直交する水平2方向の荷重が，応力として集中」の部位は存在しない。独立した円筒壁は応力の集中が考えられる。ただし，原子炉建屋の一次格納

容器を囲む円型遮蔽壁の様に、建屋の中央付近に位置し、その外側にあるボックス型の壁とスラブで一体化されている場合は、 - 1「直交する水平 2 方向の荷重が、応力として集中」の部位に該当しない。

- 2「面内方向の荷重を負担しつつ、面外方向の荷重が作用」の部位としては、土圧や水圧が作用するプール部や地下部が考えられ、建物・構築物の地下外壁及びプール側壁を、 - 2 に該当するものとして抽出する。

なお、隣接する上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための建物・構築物の評価は、上位クラスの建物・構築物との相対変位による衝突可否判断が基本となる。

そのため、せん断及び曲げ変形評価を行うこととなり、壁式構造では耐震壁（ラーメン構造では柱、梁）を主たる評価対象部位とし、その他の構成部位については抽出対象に該当しない。

d．床及び屋根

床及び屋根については、通常、四辺が壁又は梁で拘束されているために地震力の負担について方向性を持っており、 - 1「直交する水平 2 方向の荷重が、応力として集中」及び - 2「面内方向の荷重を負担しつつ、面外方向の荷重が作用」の部位に該当しない。

e．基礎

- 1「直交する水平 2 方向の荷重が、応力として集中」の部位としては、矩形の基礎板及び杭基礎が考えられる。

矩形の基礎板については、隅部への応力集中が考えられるため、 - 1 に該当するものとして抽出する。また、杭基礎についても、 - 1 に該当するものとして抽出する。

また、 - 2「面内方向の荷重を負担しつつ、面外方向の荷重が作用」

の部位としては、基礎は該当しない。

(4) 3次元的な応答特性が想定される部位の抽出

耐震評価上の構成部位のうち、荷重の組合せによる応答特性が想定される部位として抽出されない部位についても、第3-1-3表に示す3次元的な応答特性により水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される部位か否かの考えを纏め、影響が想定される部位の抽出方針を示す。

a. 柱

(3)で抽出されている以外の柱は当然両方向に対して断面算定が実施されている。そのため、面外慣性力の影響も考慮されており、-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」の部位には該当しない。

建物・構築物は、鉄筋コンクリート造耐震壁又は鉄骨造ブレースを主な耐震要素として扱っており、地震力のほとんどを耐震壁又はブレースが負担する。ねじれ振動の影響が想定される部位が存在したとしても、その場合には、通常、ねじれを加味した構造計画を行っており、-2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位にも該当しない。

b. 梁

梁一般部及び地下部は、通常、剛性の高い床や耐震壁が付帯し、面外方向の変形を抑制することから、-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」及び-2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位には該当しない。

鉄骨トラス部は、1方向トラスの場合には、面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きいと考えられるが、通常、直交方向にトラスや繋ぎ梁が存在し、面外慣性力を負担する。1方向にしかトラスが存在し

ない場合， - 1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位に該当するものとして抽出する。また，塔状構造物の水平材については，ねじれ挙動が想定されることから， - 2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当するものとして抽出する。

c．壁

(3)で抽出されている以外の壁については，通常，直交方向に壁又は大梁を配置した設計がなされ，また，ねじれの無い構造設計がなされるため， - 1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」及び - 2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当しない。

塔状構造物の斜材については，ねじれ挙動が想定されるため， - 2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当するものとして抽出する。

なお，隣接する上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための建物・構築物の評価は，上位クラスの建物・構築物との相対変位による衝突可否判断が基本となる。

そのため，せん断及び曲げ変形評価を行うこととなり，壁式構造では耐震壁（ラーメン構造では柱，梁）を主たる評価対象部位とし，その他の構成部位については抽出対象に該当しない。

d．床及び屋根

床及び屋根については，通常，釣合いよく壁を配置した設計がなされるため， - 1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」及び - 2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当しない。

e．基礎

矩形の基礎及び杭基礎は，(3)の荷重の組合せによる応答特性を踏まえたスクリーニングで既に抽出されている。

(5) 3次元モデルによる精査の方針

3次元的な応答特性が想定される部位として抽出された評価部位については、代表評価部位にて3次元モデルによる精査を行う。

3次元モデルを用いた精査は、水平2方向及び鉛直方向を同時入力時の応答の水平1方向入力時の応答に対する増分を確認することとする。

局所応答に対する3次元モデルによる精査を行う建物・構築物は、その重要性、規模、構造特性及び機器評価確認への適用性を考慮し、原子炉建屋とする。原子炉建屋は、耐震Sクラスの原子炉棟を含み、建屋規模も大きいため多くの重要機器を内包しているため代表施設として選定した。評価に用いる地震動については、「2.2 水平2方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動」に基づき、複数の基準地震動 S_s における地震動の特性及び包絡関係と施設の特性による影響も考慮した上で選定し、本影響評価に用いる。

3.1.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価部位として抽出された部位で、水平 2 方向及び鉛直方向の同時入力による評価を行わない部位については、建物・構築物の重要性、規模及び構造特性の観点から代表評価部位を選定し、基準地震動 S_s を用い、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を評価する。評価にあたっては、従来設計手法による各部位の解析モデル及び鉛直方向地震力の組合せによる評価結果を用いることとする。

また、影響評価は水平 2 方向及び鉛直方向を同時に入力する時刻歴応答解析による評価又は基準地震動 S_s の各方向地震成分により、個別に計算した最大応答値を用い、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組合せる方法として、米国 REGULATORY GUIDE1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考に、組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）に基づいた評価により実施する。

組合せ係数法の妥当性については、念のため代表施設において水平 2 方向及び鉛直方向同時入力との応力比較を実施する。

3.2 機器・配管系

3.2.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方

機器・配管系における従来の水平方向及び鉛直方向の組合せによる設計手法では、建物・構築物の振動特性を考慮し、変形するモードが支配的となり応答が大きくなる方向(応答軸方向)に基準地震動 S_s を入力して得られる各方向の地震力(床応答)を用いている。

応答軸(強軸・弱軸)が明確となっている設備の耐震評価においては、水平各方向の地震力を包絡し、変形モードが支配的となる応答軸方向に入力するなど、従来評価において保守的な取り扱いを基本としている。

一方、応答軸が明確となっていない設備で3次元的な広がりを持つ設備の耐震評価においては、基本的に3次元のモデル化を行っており、建物・構築物の応答軸方向の地震力をそれぞれ入力し、この入力により算定される荷重や応力のうち大きい方を用いて評価を実施している。

さらに、応答軸以外の振動モードが生じ難い構造の採用、応答軸以外の振動モードが生じ難いサポート設計の採用といった構造上の配慮など、水平方向の入力に対して配慮した設計としている。

3.2.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価方針

機器・配管系において、水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある設備(部位)の評価を行う。

評価対象は、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故対処施設の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備とする。また、耐震Bクラス設備については共振のおそれのあるものを評価対象とする。

対象とする設備を機種ごとに分類し，それぞれの構造上の特徴により荷重の伝達方向，その荷重を受ける構造部材の配置及び構成等により水平 2 方向の地震力による影響を受ける可能性のある設備（部位）を抽出する。

構造上の特徴により影響の可能性のある設備（部位）は，水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響の検討を実施する。水平各方向の地震力が 1 : 1 で入力された場合の発生値を従来の評価結果の荷重又は算出応力等を水平 2 方向及び鉛直方向に整理して組み合わせる又は新たな解析等により高度化した手法を用いる等により，水平 2 方向の地震力による設備（部位）に発生する荷重や応力を算出する。

これらの検討により，水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた荷重や応力の結果が従来の発生値と同等である場合は影響がある設備として抽出せず，従来の発生値を超えて耐震性への影響が懸念される場合は，設備が有する耐震性への影響を確認する。

設備が有する耐震性への影響が確認された場合は，詳細な手法を用いた検討等，新たに設計上の対応策を講じる。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価は，基準地震動 S_s を対象とするが，複数の基準地震動 S_s における地震動の特性及び包絡関係，地震力の包絡関係を確認し，代表可能である場合は代表の基準地震動 S_s にて評価する。また，水平各方向の地震動は，それぞれの位相を変えた地震動を用いることを基本とするが，保守的な手法を用いる場合もある。

3.2.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

機器・配管系において，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響を受ける可能性があり，水平 1 方向及び鉛直方向の従来評価に加え，更なる設計上の配

慮が必要な設備について、構造及び発生値の増分の観点から抽出し、影響を評価する。影響評価は従来設計で用いている質点系モデルによる評価結果を用いて行うことを基本とする。影響評価のフローを第3-2-1図に示す。

なお、耐震評価は基本的におおむね弾性範囲でとどまる体系であることに加え、国内と海外の機器の耐震解析は、基本的に線形モデルにて実施している等類似であり、水平2方向及び鉛直方向の位相差は機器の応答にも現れることから、米国Regulatory Guide 1.92の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を検討する際は、地震時に水平2方向及び鉛直方向それぞれの最大応答が同時に発生する可能性は極めて低いとした考え方であるSquare-Root-of-the-Sum-of-the-Squares法(以下「最大応答の非同時性を考慮したSRSS法」という。)又は組合せ係数法(1.0:0.4:0.4)を適用し、各方向からの地震入力による各方向の応答を組み合わせる。

評価対象となる設備の整理

耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備、共振のおそれのある耐震Bクラス施設を評価対象とし、代表的な機種ごとに分類し整理する(第3-2-1図)。

構造上の特徴による抽出

機種ごとに構造上の特徴から水平2方向の地震力が重複する観点、もしくは応答軸方向以外の振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点にて検討を行い、水平2方向の地震力による影響の可能性のある設備を抽出する(第3-2-1図)。

発生値の増分による抽出

水平 2 方向の地震力による影響の可能性のある設備に対して、水平 2 方向の地震力が各方向 1:1 で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生値の増分を用いて影響を検討し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

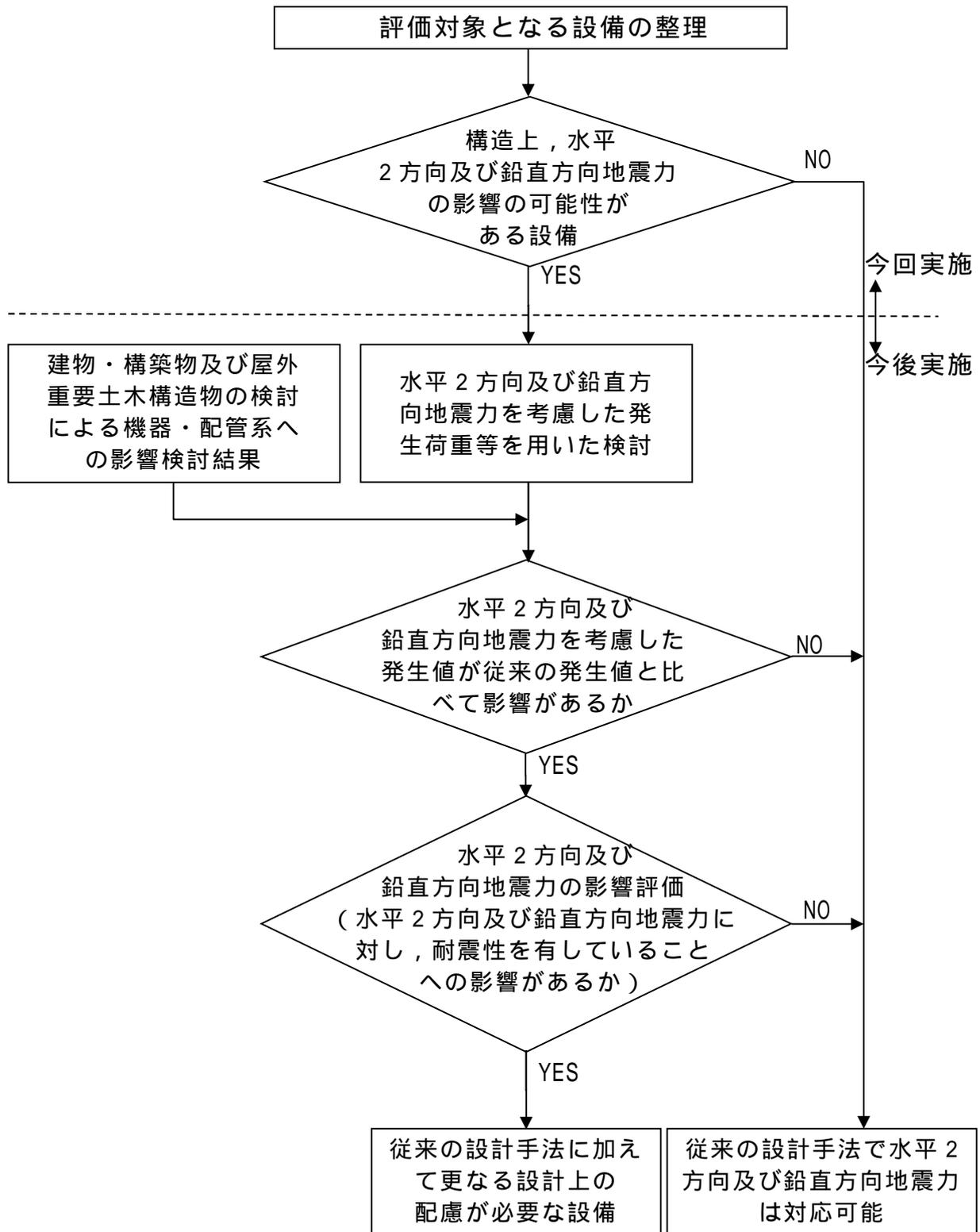
また、建物・構築物及び屋外重要土木構築物の検討により、機器・配管系への影響の可能性のある部位が抽出された場合は、機器・配管系への影響を評価し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

影響の検討は、機種ごとの分類に対して地震力の寄与度に配慮し耐震裕度が小さい設備（部位）を対象とする（第 3 - 2 - 1 図）。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価

の検討において算出された荷重や応力を用いて、設備の耐震性への影響を確認する（第 3 - 2 - 1 図）。

なお、現時点においては、各機器の耐震性に関する詳細検討が完了していないことから、上記 及び を実施し、今後、詳細検討の進捗に伴い 及び を実施することとする。



第3-2-1図 水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価フロー

3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備（部位）の抽出

評価対象設備を機種ごとに分類した結果を，第 3 - 2 - 1 表に示す。機種ごとに分類した設備の各評価部位，応力分類に対し構造上の特徴から水平 2 方向の地震力による影響を水平 2 方向の地震力が重複する観点より検討し，影響の可能性のある設備を抽出した。

(1) 水平 2 方向の地震力が重複する観点

水平 1 方向の地震力に加えて，さらに水平直交方向に地震力が重複した場合，水平 2 方向の地震力による影響を検討し，影響が軽微な設備以外の影響検討が必要となる可能性があるものを抽出する。以下の場合には，水平 2 方向の地震力により影響が軽微な設備であると整理した。なお，ここでの影響が軽微な設備とは，構造上の観点から発生応力への影響に着目し，その増分が 1 割程度以下となる機器を分類しているが，今後詳細検討においては水平 1 方向地震力による裕度（許容応力 / 発生応力）が 1.1 未満の機器については個別に検討を行うこととする。

a．水平 2 方向の地震力を受けた場合でも，その構造により水平 1 方向の地震力しか負担しないもの

横置き of 容器等は，水平 2 方向の地震力を想定した場合，水平 1 方向を拘束する構造であることや水平各方向で振動特性及び荷重の負担断面が異なる構造であることにより，特定の方向の地震力の影響を受ける部位であるため，水平 1 方向の地震力しか負担しないものとして分類した（別紙 1 参照）。

b．水平 2 方向の地震力を受けた場合，その構造により最大応力の発生箇

所が異なるもの

一様断面を有する容器類の胴板等は、水平 2 方向の地震力を想定した場合、それぞれの水平方向地震力に応じて応力が最大となる箇所があることから、最大応力の発生箇所が異なり、水平 2 方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した。その他の設備についても同様の理由から最大応力の発生箇所が異なり、水平 2 方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した(別紙 1 参照)。

c . 水平 2 方向の地震力を組み合わせても水平 1 方向の地震による応力と同等と言えるもの

原子炉圧力容器スタビライザ及び格納容器スタビライザは、周方向 8 箇所を支持する構造で配置されており、水平 1 方向の地震力を 6 体で支持する設計としており、水平 2 方向の地震力を想定した場合、地震力を負担する部位が増え、また、最大反力を受けもつ部位が異なることで、水平 1 方向の地震力による荷重と水平 2 方向の地震力を想定した場合における荷重が同等になるものであり、水平 2 方向の地震を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同等のものと分類した。

スタビライザと同様の支持方式を有するその他の設備についても、同様の理由から水平 2 方向の地震を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同様のものと分類した(別紙 1 参照)。

d . 従来評価において、水平 2 方向の考慮をした評価を行っているもの

蒸気乾燥器支持ブラケット等は、従来評価において、水平 2 方向地震を考慮した評価を行っているため、水平 2 方向の影響を考慮しても影

響がないものとして分類した。

(2) 水平方向とその直交方向が相関する振動モード（ねじれ振動等）が生じる

観点

水平方向とその直交方向が相関する振動モードが生じることで優位な影響が生じる可能性のある設備を抽出する。

機器・配管系設備のうち、水平方向の各軸方向に対して均等な構造となっている機器は、評価上有意なねじれ振動は生じない。

一方、3次元的な広がりを持つ配管系等は、系全体として考えた場合、有意なねじれ振動が発生する可能性がある。しかし、水平方向とその直交方向が相関する振動が想定される設備は、従来設計より3次元のモデル化を行っており、その振動モードは適切に考慮した評価としているため、この観点から抽出される機器は無かった。

3.2.5 水平2方向及び鉛直方向地震力の評価部位の抽出結果及び今後の評価

方針

3.2.4で抽出した結果を別紙1に示す。これらの設備に関して、今後3.2.3

「発生値の増分等による抽出」に記載の方法に従い発生値の増分から評価対象部位の抽出を行った上で、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。また、建物・構築物及び屋外重要土木構造物の検討結果より機器・配管系の耐震性への影響を与えると判断された設備についても同様に発生値の増分の観点から評価対象部位の抽出を行った上で、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。

第3 - 2 - 1表 水平 2 方向入力の影響検討対象設備

設 備		部 位	応力分類
炉心支持構造物	炉心シュラウド	下部胴	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			支圧応力
	シュラウドサポート	レゲ	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
		シリンダプレート 下部胴	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
	上部格子板	グリッドプレート	一次一般膜応力
	炉心支持板	補強ビーム 支持板	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
燃料支持金具	中央燃料支持金具 周辺燃料支持金具	一次一般膜応力	
制御棒案内管	下部溶接部	一次一般膜応力	
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	
原子炉压力容器	円筒胴 下鏡	炉心回り円筒胴 下鏡 下鏡と胴板の接合部 下鏡とスカートの接合部	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
			一次 + 二次 + ピーク応力
	制御棒駆動機構ハウジング貫 通部	スタブチューブ ハウジング	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
			一次 + 二次 + ピーク応力
	中性子計測ハウジング貫通部	ハウジング	座屈（軸圧縮）
			一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
	ノズル	各部位	一次 + 二次 + ピーク応力
			一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
	ブラケット類	原子炉压力容器スタビライザブラ ケット	一次一般膜応力
		蒸気乾燥器支持ブラケット	一次膜応力 + 一次曲げ応力
		炉心スプレイブラケット	一次一般膜応力
		給水スパーチャブラケット	一次膜応力 + 一次曲げ応力
原子炉压力容器 支持構造物	支持スカート	スカート	一次一般膜応力
			一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
			一次 + 二次 + ピーク応力
			座屈（軸圧縮）
	原子炉压力容器基礎ボルト	基礎ボルト	引張応力
			せん断応力
			組合せ応力

1 本表は、詳細設計時等の進捗に応じて見直しを行う。

設 備		部 位	応力分類	
原子炉圧力容器 付属構造物	格納容器スタビライザ 原子炉圧力容器スタビライザ	トラス ロッド ディスクスプリング支持板	引張応力	
			せん断応力	
			圧縮応力	
	制御棒駆動機構ハウジングレ ストレイントビーム	レストレイントビーム	曲げ応力	
			組合せ応力	
			せん断応力	
原子炉圧力容器 内部構造物	蒸気乾燥器ユニット	ユニット	一次一般膜応力	
		耐震用ブロック	一次膜応力 + 一次曲げ応力	
	気水分離器及びスタンドパイ プ シュラウドヘッド	各部位	せん断応力	
			一次一般膜応力	
	スパージャ 炉内配管	各部位	一次膜応力 + 一次曲げ応力	
			一次一般膜応力	
使用済燃料貯蔵ラック (共通ベース含む)	ラック部材		一次一般膜応力	
			せん断応力	
			組合せ応力	
	基礎ボルト ラック取付ボルト			引張応力
				せん断応力
				組合せ応力
四脚たて置き円筒形容器	胴板		一次一般膜応力	
			一次膜応力 + 一次曲げ応力	
			一次 + 二次応力	
	脚			組合せ応力
				引張応力
				せん断応力
横置円筒形容器	胴板		一次一般膜応力	
			一次膜応力 + 一次曲げ応力	
			一次 + 二次応力	
	脚			組合せ応力
				引張応力
				せん断応力
立形ポンプ	コラムパイプ パレルケーシング		一次一般膜応力	
			引張応力	
			せん断応力	
	基礎ボルト 取付ボルト			組合せ応力
				引張応力
				せん断応力
ECCSストレーナ	各部位（ボルト以外）		一次膜応力 + 一次曲げ応力	
			ボルト	引張応力
横形ポンプ ポンプ駆動用タービン 海水ストレーナ 空調ファン 空調ユニット 空気圧縮機	基礎ボルト 取付ボルト		引張応力	
			せん断応力	
			組合せ応力	

設 備		部 位	応力分類	
水圧制御ユニット	フレーム	引張応力		
		せん断応力		
		圧縮応力		
		曲げ応力		
		組合せ応力		
	取付ボルト	引張応力		
せん断応力				
組合せ応力				
平底たて置円筒容器	胴板	一次一般膜応力		
		一次+二次応力		
	基礎ボルト	引張応力		
		せん断応力		
		組合せ応力		
核計装設備	各部位	一次一般膜応力		
		一次膜応力+一次曲げ応力		
伝送器（壁掛）	取付ボルト	引張応力		
		せん断応力		
		組合せ応力		
伝送器（円形壁掛）	取付ボルト	引張応力		
伝送器（円形吊下）	取付ボルト	引張応力		
制御盤	取付ボルト	引張応力		
		せん断応力		
		組合せ応力		
原子炉格納容器	サプレッションチェンバ底部ライナ	ライナプレート		
		リングガータ部		
	ドライウエルトップヘッド	頂部 不連続部 フランジ付根部	圧縮ひずみ	
			引張ひずみ	
			一次一般膜応力	
	ドライウエル円錐部及びサプレッションチェンバ円筒部 シェル部及びサンドクッション部	各部位	一次膜応力+一次曲げ応力	
			一次+二次応力	
			一次一般膜応力	
	ドライウエルビームシート	各部位	一次膜応力+一次曲げ応力	
			一次+二次応力	
			引張応力	
			せん断応力	
		ビームシート	圧縮応力	曲げ応力
				組合せ応力
	ドライウエル上部シアラグ及びスタビライザ ドライウエル下部シアラグ及びスタビライザ	各部位	一次膜応力+一次曲げ応力	
			一次+二次応力	
			引張応力	
			せん断応力	
上部シアラグと格納容器胴との接合部 下部シアラグと格納容器胴との接合部		曲げ応力	組合せ応力	
			一次膜応力+一次曲げ応力	
ドライウエルスプレイヘッド	案内管直管部 案内管エルボ部	一次+二次応力		
		一次膜応力+一次曲げ応力		
パーソナルエアロック イクイPMENTハッチ サブプレッションチェンバ・アクセスハッチ	パーソナルエアロック（イクイPMENTハッチ，サブプレッションチェンバアクセスハッチ）本体と補強板との接合部 補強板と格納容器胴一般部との接合部	一次膜応力+一次曲げ応力		
		一次+二次応力		

設 備		部 位	応力分類
原子炉格納容器	原子炉格納容器胴アンカー部	各部位	引張応力
			曲げ応力
			圧縮応力
			組合せ応力
	原子炉格納容器配管貫通部	原子炉格納容器胴とスリーブ接合部	一次膜応力 + 一次曲げ応力
			一次 + 二次応力
原子炉格納容器電気配線貫通部	スリーブ付根部	一次膜応力 + 一次曲げ応力	
	補強板付根部	一次 + 二次応力	
ダイヤフラムフロア	構造用スラブ	引張応力度	
		せん断応力度	
		圧縮応力度	
	大ばり 小ばり	曲げ応力	
		せん断応力	
柱	圧縮応力		
シヤコネクタ	せん断応力		
ベント管	上部 ブレージング部	一次膜応力 + 一次曲げ応力	
		一次 + 二次応力	
格納容器スプレイヘッダ	スプレイ管部 ディー部 案内管部	一次膜応力 + 一次曲げ応力	
		一次 + 二次応力	
可燃性ガス濃度制御系再結合装置プロウ	ブレース	圧縮応力	
	ベース取付溶接部	引張応力	
		せん断応力	
	基礎ボルト 取付ボルト	引張応力	
せん断応力			
非常用ディーゼル発電機	基礎ボルト 取付ボルト	組合せ応力	
		引張応力	
		せん断応力	
スカート支持たて置円筒形容器	胴板	一次一般膜応力	
		一次 + 二次応力	
	スカート	組合せ応力	
		座屈	
	基礎ボルト	引張応力	
		せん断応力	
プレート式熱交換器	側板	一次一般膜応力	
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	
		一次 + 二次応力	
	脚	組合せ応力	
		引張応力	
		せん断応力	
ラグ支持たて置き円筒形容器	胴板	一次一般膜応力	
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	
		一次 + 二次応力	
	ラグ	組合せ応力	
		引張応力	
		せん断応力	
基礎ボルト	組合せ応力		
	せん断応力		

設 備	部 位	応力分類
その他電源設備	取付ボルト	引張応力
		せん断応力
		組合せ応力
配管本体，サポート（多質点梁モデル解析）	配管，サポート	一次応力
		一次＋二次応力
矩形構造の架構設備（静的触媒式水素再結合装置，架台を含む）	各部位	各応力分類
通信連絡設備（アンテナ）	ボルト	引張応力
		せん断応力
		組合せ応力
水位計	取付ボルト	引張応力
		せん断応力
		組合せ応力
監視カメラ	取付ボルト	引張応力
		せん断応力
	据付部材	組合せ応力
貫通部止水処置	シール材	シールに生じる変位
浸水防止蓋	蓋	曲げ応力
	基礎ボルト	せん断応力
逆流防止逆止弁	各部位	各応力分類
原子炉ウェル遮へいプラグ	本体	せん断応力度
原子炉本体の基礎	円筒部 中間スラブ	引張応力度
		圧縮応力度
		せん断応力度
	下層円筒基部	引張応力度
せん断応力度		
曲げ応力度		
燃料取替機	燃料取替機構造物フレーム ブリッジ脱線防止ラグ(本体) トロリ脱線防止ラグ(本体) 走行レール 横行レール	引張応力
		せん断応力
		組合せ応力
	ブリッジ脱線防止ラグ(取付ボルト) トロリ脱線防止ラグ(取付ボルト)	せん断応力
吊具	吊具荷重	
建屋クレーン	クレーン本体ガード	せん断応力
		曲げ応力
		浮上り量
	落下防止金具	圧縮応力
	トロリストッパ	圧縮応力
		曲げ応力
トロリ	組合せ応力	
吊具	浮上り量	
吊具荷重		
原子炉遮へい壁	一般胴部 開口集中部	せん断応力
		圧縮応力
		曲げ応力
		組合せ応力

3.3 屋外重要土木構造物

3.3.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方

従来設計手法の考え方について，RC構造物である取水構造物を例に第3 - 3 - 1表に示す。

一般的な地上構造物では，躯体の慣性力が主たる荷重であるのに対し，屋外重要土木構造物は，概ね地中に埋設されているため，動土圧や動水圧等の外力が主たる荷重となる。また，屋外重要土木構造物は，比較的単純な構造部材の配置で構成され，ほぼ同一の断面が奥行き方向に連続する構造的特徴を有することから，3次元的な応答の影響は小さいため，2次元断面での耐震評価を行っている。

屋外重要土木構造物は，主に海水の通水機能や配管等の間接支持機能を維持するため，通水方向や管軸方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されることから，構造上の特徴として，明確な弱軸，強軸を有する。

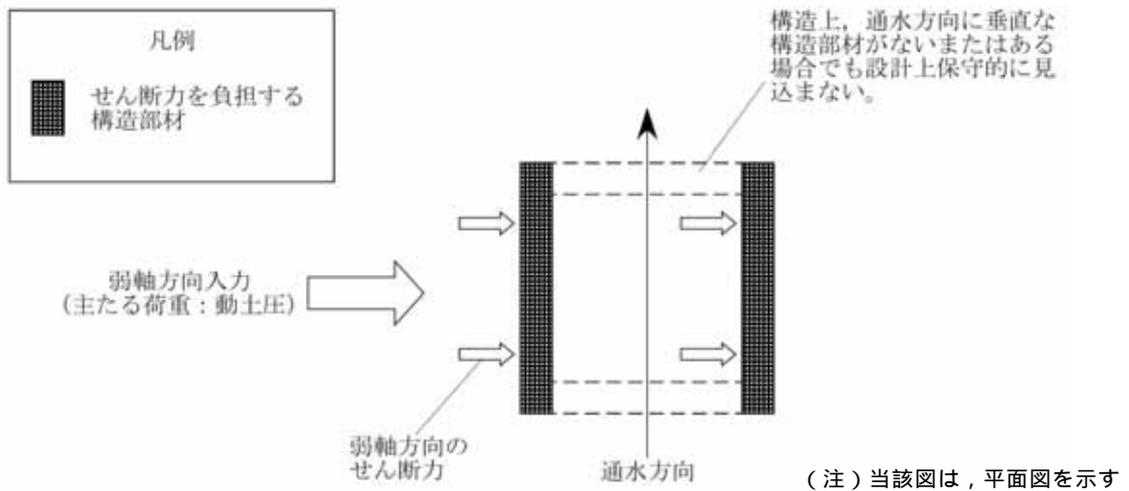
強軸方向の地震時挙動は，弱軸方向に対して顕著な影響を及ぼさないことから，従来設計手法では，弱軸方向を評価対象断面として，耐震設計上求められる水平1方向及び鉛直方向地震力による耐震評価を実施している。

第3 - 3 - 1図に示すとおり，従来設計手法では，屋外重要土木構造物の構造上の特徴から，弱軸方向の地震荷重に対して保守的に加振方向に平行な壁部材を見込まず，垂直に配置された構造部材のみで受けもつよう設計している。

なお，屋外重要土木構造物のうち，既設構造物は取水構造物と屋外二重管（基礎部除く）であり，それ以外の構造物は新設構造物である。ここでは，既設構造物，新設構造物の両方について検討を行う。

第 3 - 3 - 1 表 従来設計における評価対象断面の考え方（取水構造物の例）

	横断方向の加振	縦断方向の加振
従来設計 の評価対 象断面の 考え方	<p>加振方向に平行な壁部材が少ない</p> <p>A-A 断面</p> <p>B-B 断面</p>	<p>加振方向に平行な側壁及び隔壁を耐震設計上見込むことができる</p> <p>A-A 断面</p> <p>B-B 断面</p>



第 3 - 3 - 1 図 従来設計手法の考え方

3.3.2 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針

屋外重要土木構造物において、水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある構造物の評価を行う。

評価対象は、屋外重要土木構造物である、取水構造物及び屋外二重管並びに波及影響防止のために耐震評価する土木構造物とする。また、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の間接支持構造物のうち常設代替高圧電源装置置場、常設代替高圧電源装置用カルバート、代替淡水貯槽、常設低圧代替注水系ポンプ室、常設低圧代替注水系配管カルバート、緊急用海水ポンプピット、格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート、緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎及び可搬型設備用軽油タンク基礎並びに重大事故時における海水の通水構造物のうちS A用海水ピット取水塔、海水引込み管、S A用海水ピット及び緊急用海水取水管も本評価では屋外重要土木構造物として扱うこととし、評価対象に含める。

屋外重要土木構造物を構造形式ごとに分類し、構造形式ごとに作用すると考えられる荷重を整理し、荷重が作用する構造部材の配置等から水平2方向及び鉛直方向地震力による影響を受ける可能性のある構造物を抽出する。

抽出された構造物については、従来設計手法での評価対象断面（弱軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の照査において、評価対象断面（弱軸方向）に直交する断面（強軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の発生応力等を適切に組み合わせることで、水平2方向及び鉛直方向地震力による構造部材の発生応力を算出し、構造物が有する耐震性への影響を確認する。

構造物が有する耐震性への影響が確認された場合は、詳細な手法を用いた検討等、新たに設計上の対応策を講じる。

3.3.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

屋外重要土木構造物において、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を受ける可能性があり、水平1方向及び鉛直方向の従来評価に加え、更なる設計上の配慮が必要な構造物について、構造形式及び作用荷重の観点から影響評価の対象とする構造物を抽出し、構造物が有する耐震性への影響を評価する。影響評価のフローを第3-3-2図に示す。

(1) 影響評価対象構造物の抽出

構造形式の分類

評価対象構築物について、各構造物の構造上の特徴や従来設計手法の考え方を踏まえ、構造形式ごとに大別する。

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の整理

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重を抽出する。

荷重の組合せによる応答特性が想定される構造物形式の抽出

で整理した荷重に対して、構造形式ごとにどのように作用するかを整理し、耐震性に与える影響程度を検討した上で、水平2方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される構造形式を抽出する。

従来設計手法における評価対象断面以外の3次元的な応答特性が想定される箇所の抽出

で抽出されなかった構造形式について、従来設計手法における評価対象断面以外の箇所で、水平2方向及び鉛直方向地震力の影響により3次元的な応答が想定される箇所を抽出する。

従来設計手法の妥当性の確認

で抽出された箇所が、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して、従来設計手法における評価対象断面の耐震評価で満足できるか検討を行う。

(2) 影響評価手法

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価

評価対象として抽出された構造物について、従来設計手法での評価対象断面（弱軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の照査において、評価対象断面（弱軸方向）に直交する断面（強軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の発生応力等を適切に組合せることで、水平 2 方向及び鉛直方向地震力による構造部材の発生応力を算出し、構造物が有する耐震性への影響を確認する。

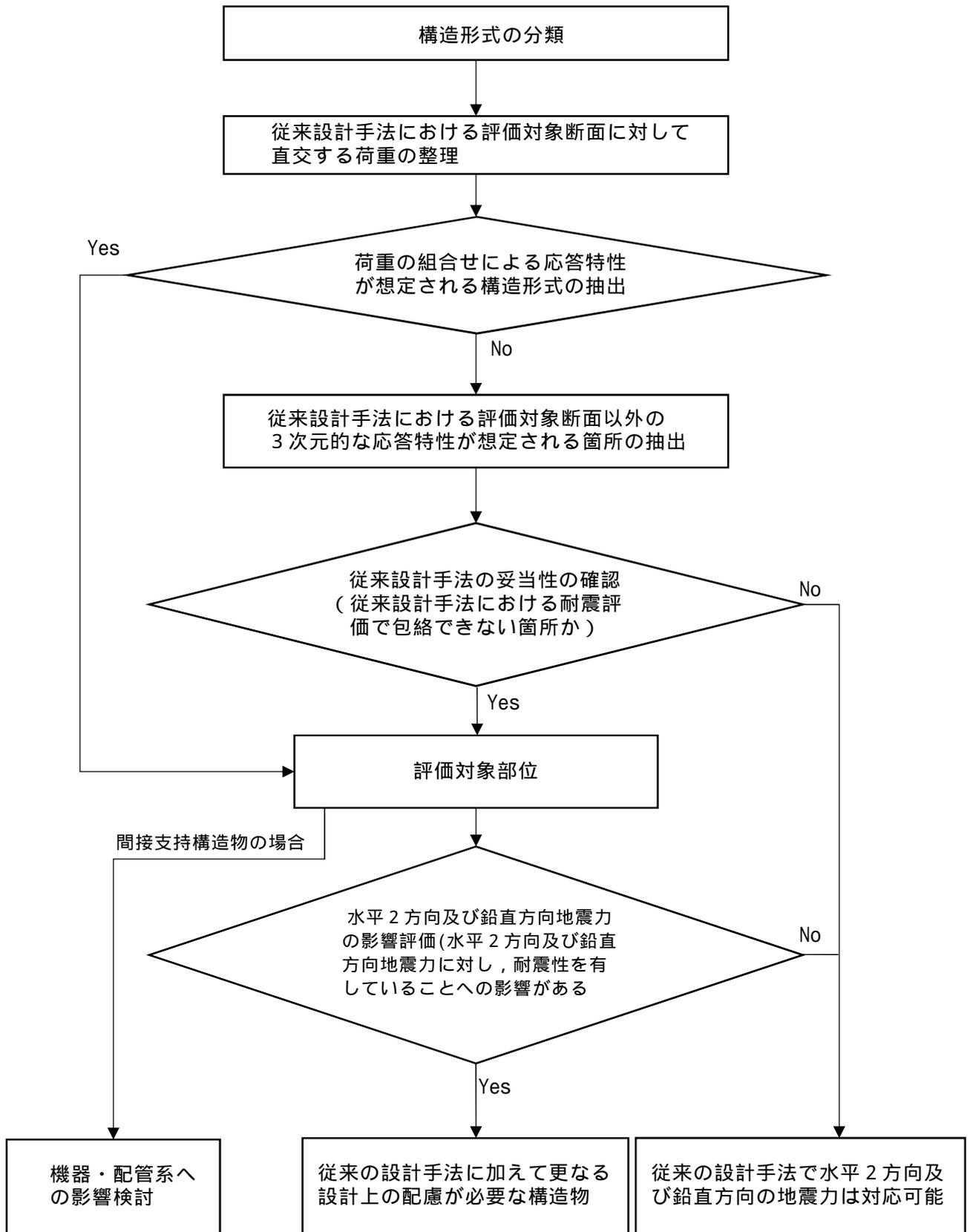
評価対象部位については、屋外重要土木構造物が明確な弱軸・強軸を示し、地震時における構造物のせん断変形方向が明確であることを考慮し、従来設計手法における評価対象断面（弱軸方向）における構造部材の耐震評価結果及び水平 2 方向の影響の程度を踏まえて選定する。

機器・配管系への影響検討

評価対象として抽出された構造物が、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持構造物である場合、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響を確認する。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響が確認された場合、機器・配管系の影響評価に反映する。

なお、及び の精査にて、屋外重要土木構造物の影響の観点から抽出されなかった部位であっても、地震応答解析結果から機器・配管系への影響の可能性が想定される部位については検討対象として抽出する。



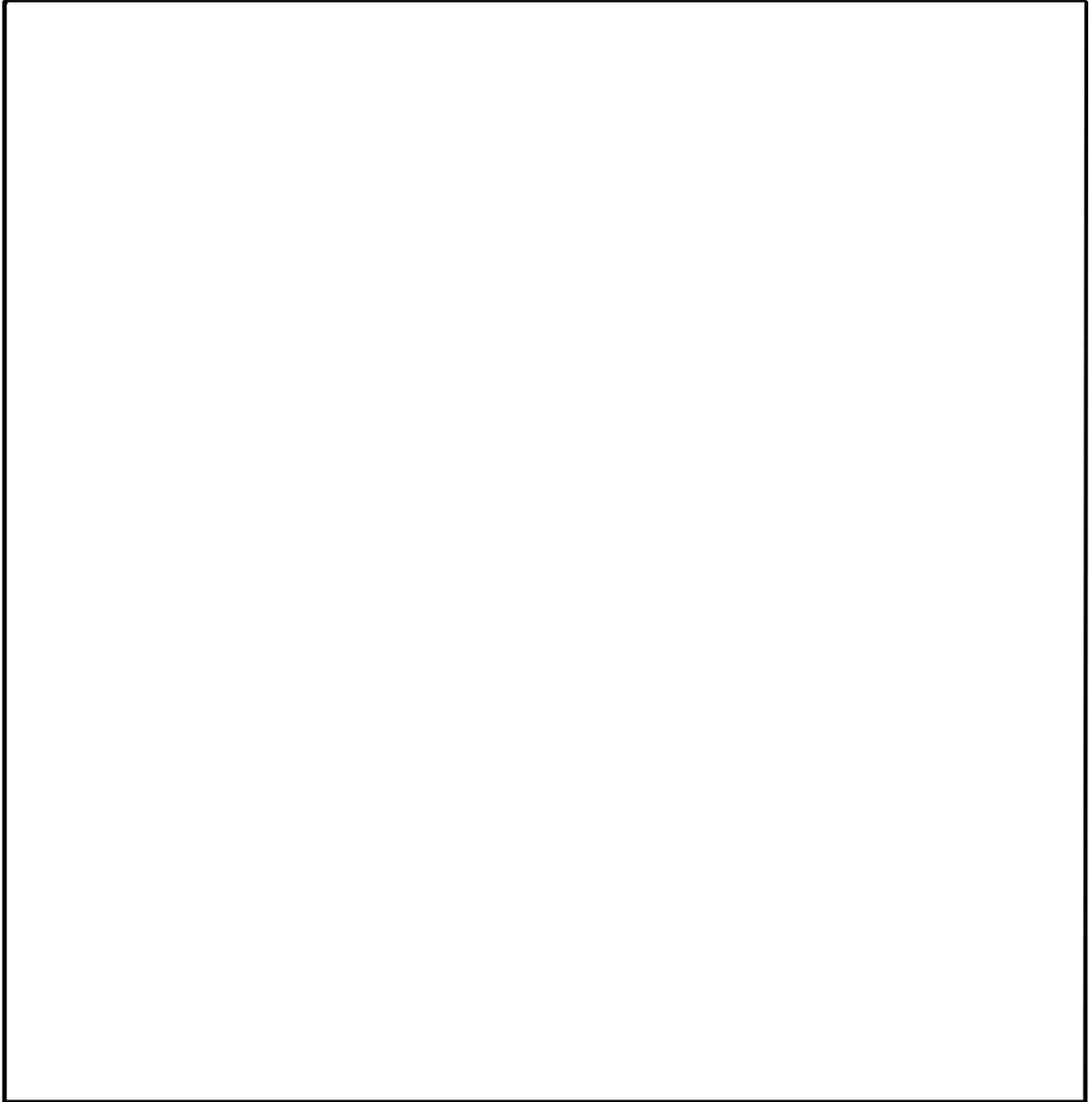
第 3 - 3 - 2 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価のフロー

3.3.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出

(1) 構造形式の分類

第3-3-3図に屋外重要土木構造物の配置図を示す。

屋外重要土木構造物は、その構造形式より1)取水構造物、常設代替高圧電源装置置場、常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）、常設低圧代替注水系ポンプ室、緊急用海水ポンプピット、緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎及び可搬型設備用軽油タンク基礎のような箱型構造物、2)常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部、カルバート部）、常設低圧代替注水系配管カルバート及び格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートのような線状構造物、3)代替淡水貯槽、S A用海水ピット取水塔及びS A用海水ピットのような円筒状構造物、4)屋外二重管基礎コンクリートのような梁状構造物、5)取水構造物、屋外二重管、緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎及び可搬型設備用軽油タンク基礎の鋼管杭基礎、並びに6)屋外二重管、海水引込み管及び緊急用海水取水管のような管路構造物の6つに大別される。



第 3 - 3 - 3 図 屋外重要土木構造物配置図

(2) 従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の整理

第3-3-2表に、従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重を示す。

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重として、動土圧及び動水圧、摩擦力、慣性力が挙げられる。

第3-3-2表 従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重

作用荷重		作用荷重のイメージ(注)
㊦ 動土圧 及び動水 圧	従来設計手法における 評価対象断面に対し て、平行に配置される 構造部材に作用する動 土圧及び動水圧	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>動土圧・動水圧</p>
㊧ 摩擦力	周辺の埋戻土と躯体間 で生じる相対変位に伴 い発生する摩擦力	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>摩擦力</p>
㊨ 慣性力	躯体に作用する慣性力	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>慣性力</p>

(注) 作用荷重のイメージ図は平面図を示す。

(3) 荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式の抽出

第3-3-3表に、3.3.4(1)で整理した構造形式毎に、3.3.4(2)で整理した荷重作用による影響程度を示す。

評価対象構造物の地震時の挙動は、躯体が主に地中に埋設されることから、周辺地盤の挙動に大きく影響される。3.3.4(2)で整理した荷重のうち①摩擦力や②慣性力は、③動土圧及び動水圧と比較するとその影響は小さいことから、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響検討の対象とする構造物の抽出では、③動土圧及び動水圧による影響を考慮する。

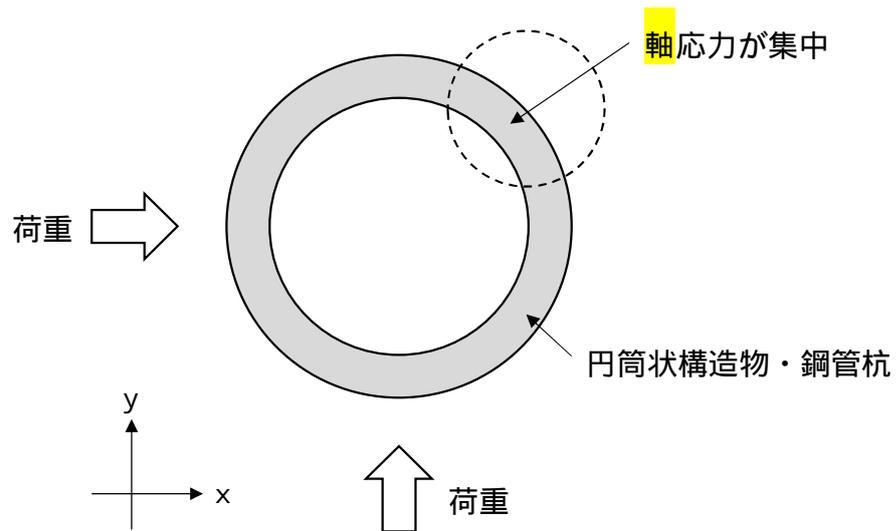
線状構造物については、その構造上の特徴として、妻壁（評価対象断面に対して平行に配置される壁部材）等を有さない若しくは妻側（小口）の面積が小さいことから、従来設計手法における評価対象断面に対して直交する③動土圧及び動水圧は作用しない。

箱型構造物は、妻壁等を有することから、従来設計手法における評価対象断面に対して直交する③動土圧及び動水圧が作用する。

同様に、梁状構造物は、従来設計手法における評価対象断面に対して直交する③動土圧及び動水圧が構造物側面に作用する。

円筒状構造物及び鋼管杭基礎は、第3-3-4図に示すように水平2方向入力による応力の集中が考えられる。

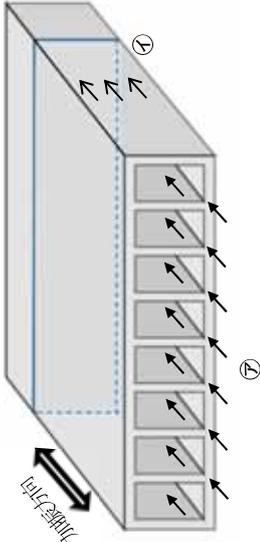
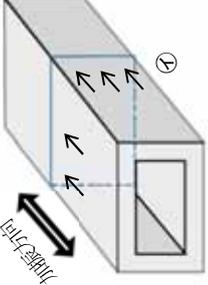
管路構造物については、従来設計手法において管軸方向と管軸直角方向の応力を合成した応力評価を実施しており、水平2方向及び鉛直方向の地震力を同時に作用させて評価を行っている。



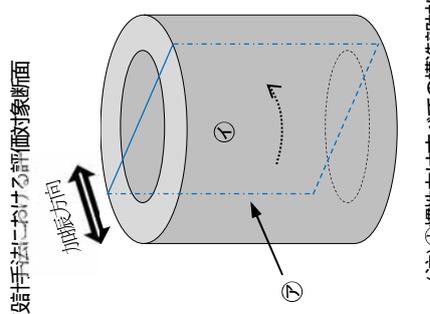
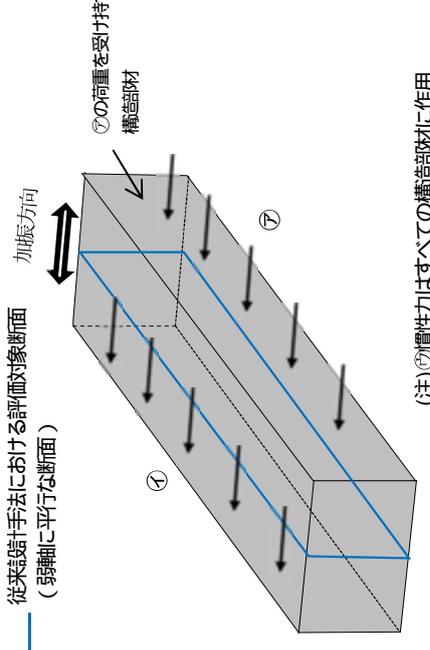
第 3 - 3 - 4 図 円筒状構造物・鋼管杭基礎に係る応答特性

以上のことから，荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式として，従来評価手法における評価対象断面に対して直交する⑦動土圧及び動水圧が作用する箱型構造物及び梁状構造物ならびに水平 2 方向入力による応力の集中が考えられる円筒状構造物，鋼管杭基礎及び管路構造物を抽出する。

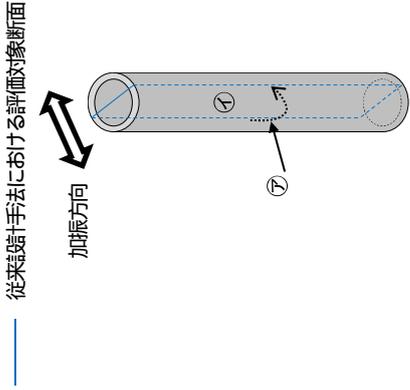
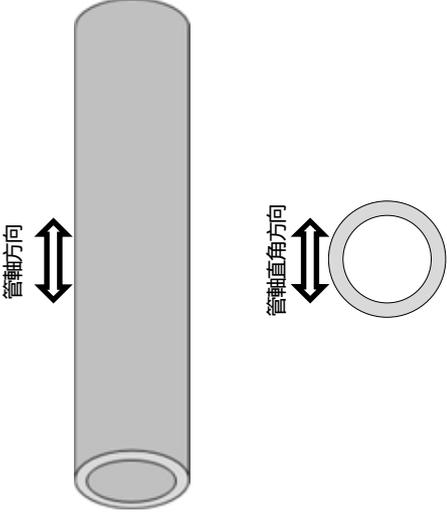
第3-3-3表 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出(1/3)

<p>3.3.4(1)で整理した構造形式の分類</p>	<p>1)箱型構造物 (取水構造物等)</p> <p>—— 従来設計手法における評価対象断面(弱軸に平行な断面)</p>  <p>(注)⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>	<p>2)線状構造物 (常設低圧代替注水系配管カルバート等)</p> <p>—— 従来設計手法における評価対象断面(弱軸に平行な断面)</p>  <p>(注)⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>																		
<p>3.3.4(2)で整理した荷重の作用状況</p>	<table border="1"> <tr> <td>⑦動土圧及び動水圧</td> <td>主に妻壁に作用</td> <td>⑦動土圧及び動水圧</td> <td>作用しない</td> </tr> <tr> <td>①摩擦力</td> <td>側壁に作用</td> <td>①摩擦力</td> <td>側壁, 頂版に作用</td> </tr> <tr> <td>⑦慣性力</td> <td>全ての部材に作用</td> <td>⑦慣性力</td> <td>全ての部材に作用</td> </tr> </table>	⑦動土圧及び動水圧	主に妻壁に作用	⑦動土圧及び動水圧	作用しない	①摩擦力	側壁に作用	①摩擦力	側壁, 頂版に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用	<table border="1"> <tr> <td>⑦動土圧及び動水圧</td> <td>作用しない</td> </tr> <tr> <td>①摩擦力</td> <td>側壁, 頂版に作用</td> </tr> <tr> <td>⑦慣性力</td> <td>全ての部材に作用</td> </tr> </table>	⑦動土圧及び動水圧	作用しない	①摩擦力	側壁, 頂版に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用
⑦動土圧及び動水圧	主に妻壁に作用	⑦動土圧及び動水圧	作用しない																	
①摩擦力	側壁に作用	①摩擦力	側壁, 頂版に作用																	
⑦慣性力	全ての部材に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用																	
⑦動土圧及び動水圧	作用しない																			
①摩擦力	側壁, 頂版に作用																			
⑦慣性力	全ての部材に作用																			
<p>従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の影響程度</p>	<p>従来設計手法における評価対象断面に対して平行に配置される構造部材(妻壁)を有し, ⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用するため影響大</p>	<p>従来設計手法における評価対象断面に対して平行に配置される構造部材を有さず⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用しないため影響小</p>																		
<p>抽出結果 (: 影響検討実施)</p>		<p style="text-align: center;">×</p>																		

第3-3-3表 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出(2/3)

3.3.4(1)で整理した 構造形式の分類	3)円筒状構造物 (代替淡水貯槽等)	4)梁状構造物 (屋外二重管基礎コンクリート)
3.3.4(2)で整理した 荷重の作用状況	 <p>従来設計手法における評価対象断面 (弱軸に平行な断面)</p> <p>⑦の荷重を受け持つ 構造部材</p> <p>⑦</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>	 <p>従来設計手法における評価対象断面 (弱軸に平行な断面)</p> <p>⑦の荷重を受け持つ 構造部材</p> <p>⑦</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>
従来設計手法における 評価対象断面に対して 直交する荷重の影響度	<p>⑦動土圧及び動水圧</p> <p>①摩擦力</p> <p>⑦慣性力</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>	<p>⑦動土圧及び動水圧</p> <p>①摩擦力</p> <p>⑦慣性力</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>
抽出結果 (: 影響検討実施)	<p>胴体部において、⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用する ため影響大</p>	<p>主に胴体部に作用</p> <p>主に胴体部に作用</p> <p>全ての部材に作用</p> <p>従来設計手法における評価対象断面に対して平行な側面に、 ⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用するため影響大</p>

第 3 - 3 - 3 表 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出 (3 / 3)

<p>3.3.4 (1) で整理した 構造形式の分類</p>	<p>5) 鋼管杭基礎 (取水構造物等の杭基礎)</p> 	<p>6) 管路構造物 (屋外二重管等)</p>
<p>3.3.4 (2) で整理した 荷重の作用状況</p>	<p>㉞ 動土圧及び動水圧 主に胴体部に作用 ㉟ 摩擦力 主に胴体部に作用 ㊱ 慣性力 全ての部材に作用</p> <p>胴体部において、㉞ 動土圧及び動水圧による荷重、及び上部工からの荷重が作用するため影響大。</p>	<p>管軸方向と管軸直角方向の応力を合成した応力評価を実施しており、従来設計手法において水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが考慮されている</p> 
<p>従来設計手法における 評価対象断面に対して 直交する荷重の影響度</p> <p>抽出結果 (: 影響検討実施)</p>		

(4) 従来設計手法における評価対象断面以外の 3 次元的な応答特性が想定される箇所の抽出

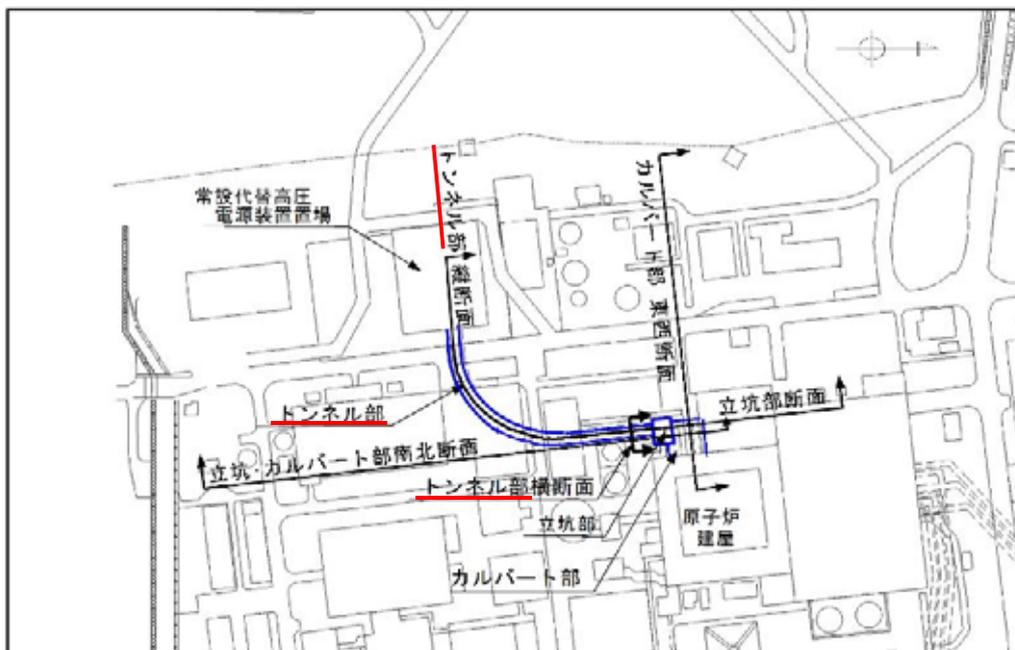
(3)で抽出しなかった構造形式である線状構造物について，構造物ごとの平面・断面図を以下に示す。各構造物の構造，地盤条件等を考慮した上で，従来設計手法における評価対象断面以外の 3 次元的な応答特性が想定される箇所を抽出する。

a)常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）

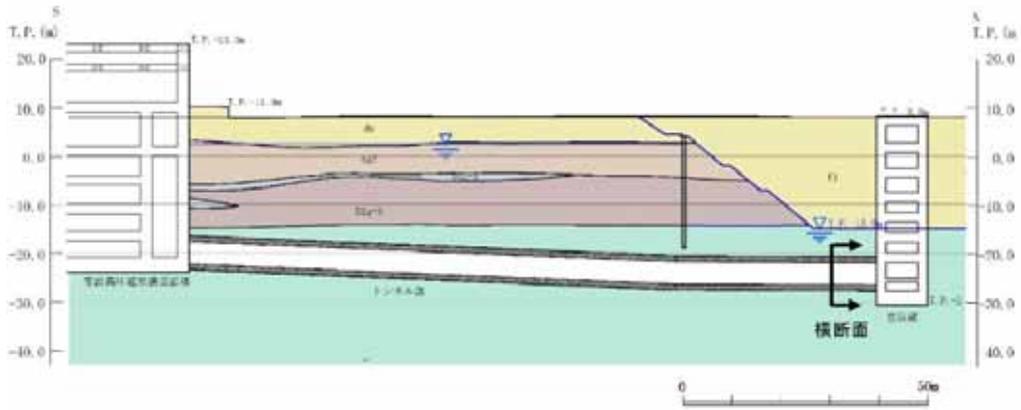
【線状構造物】

第3-3-5図に常設代替高圧電源装置用カルバートの配置図，第3-3-6図及び第3-3-7図に常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の断面図を示す。

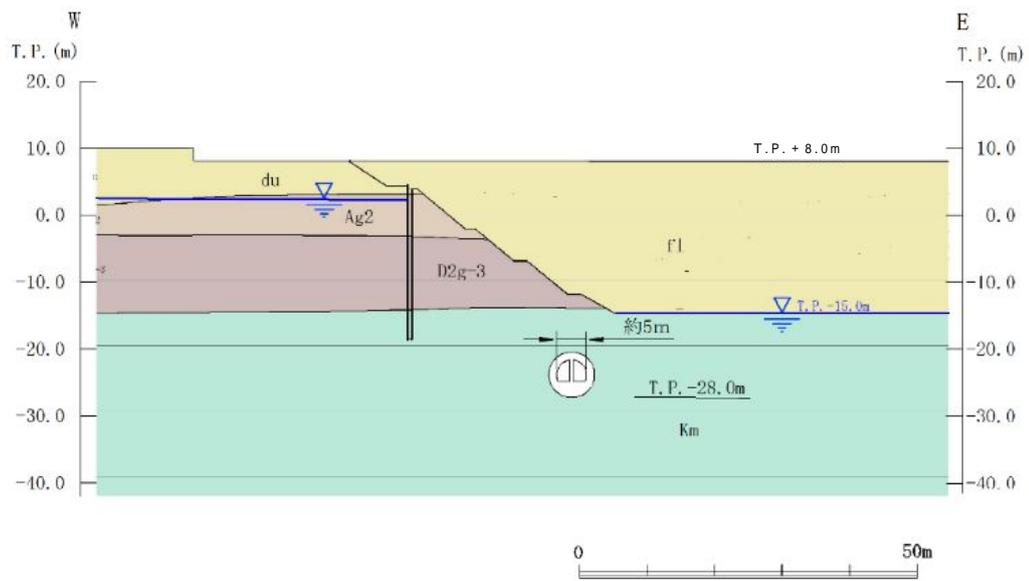
当該トンネルは，断面変化がほとんどないが，緩やかな曲線部が計画されている。第3-3-8図（施工目地の割り付け概念図）に示すように，適切な間隔で施工目地を設けることにより，構造物に応力集中が発生しないような設計方針とする。なお，施工目地の間隔は，トンネルの適用事例が多い「トンネル標準示方書：土木学会」に基づき決定する。



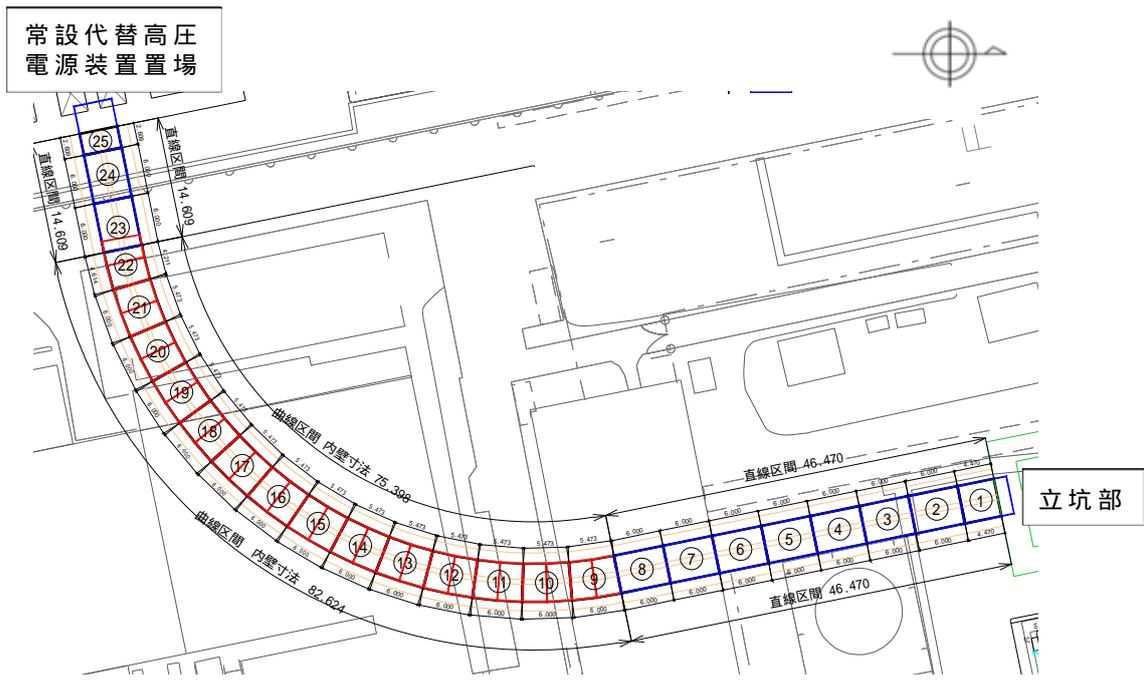
第3-3-5図 常設代替高圧電源装置用カルバート配置図



第 3 - 3 - 6 図 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）
縦断面図



第 3 - 3 - 7 図 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）
横断面図



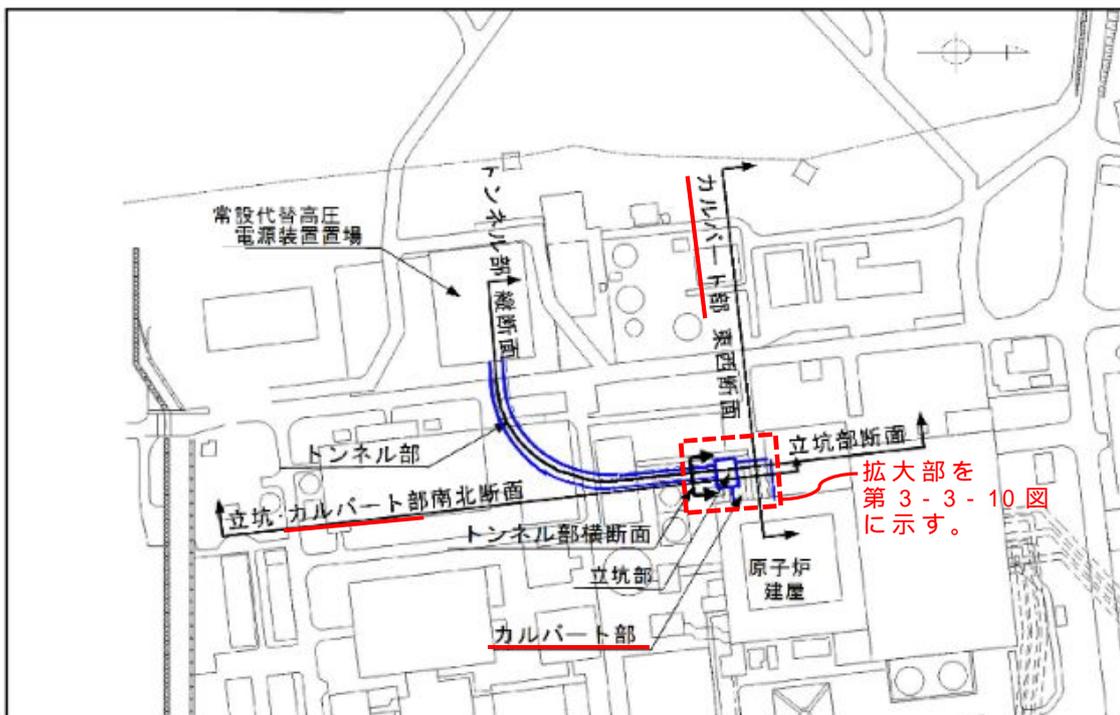
第 3 - 3 - 8 図 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）
 施工目地の割り付け概念図

b)常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）

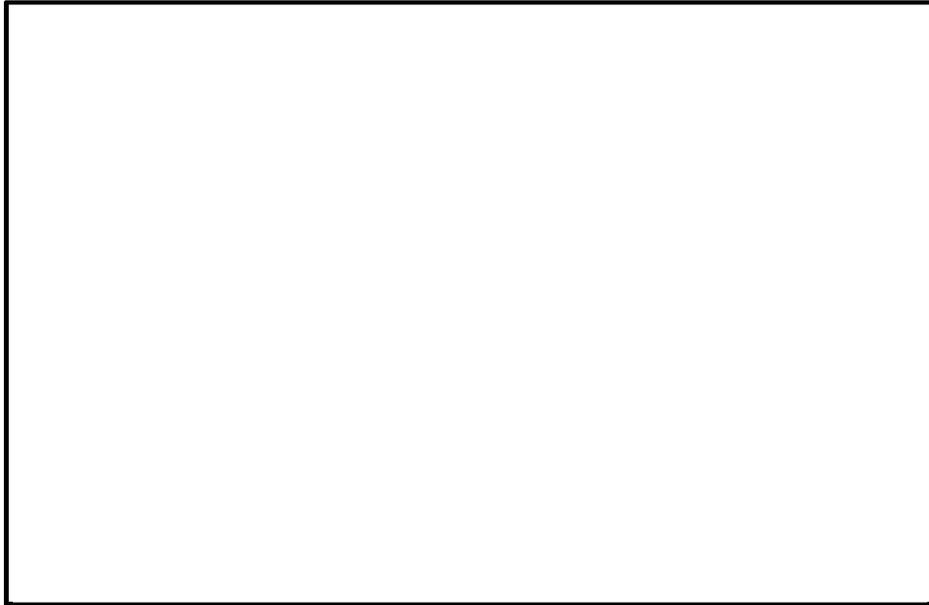
【線状構造物】

第3-3-9図に常設代替高圧電源装置用カルバートの配置図，第3-3-10図及び第3-3-11図に常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の平面図及び断面図を示す。

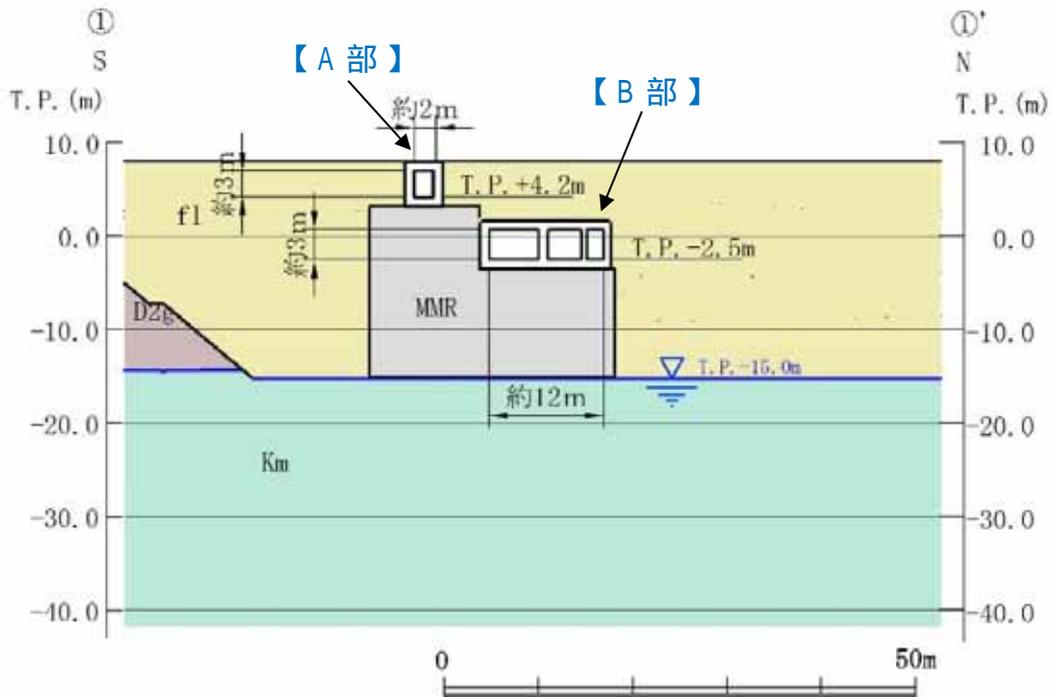
内空幅約2m，内空高さ約3mのカルバート部【A部】は，断面変化もほとんどなく直線である。また，マンメイドロックを介して十分な支持性能を有する岩盤に設置されるため，強軸方向の曲げの影響をほとんど受けない。一方，内空幅約12m，内空高さ約3mのカルバート部【B部】は，内空寸法はほぼ一様であるが屈曲部（隅角部）を有するため，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響として，弱軸方向のせん断変形や強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。



第3-3-9図 常設代替高圧電源装置用カルバート配置図



第 3 - 3 - 10 図 常設代替高圧電源装置用カルバート
(カルバート部) 平面図

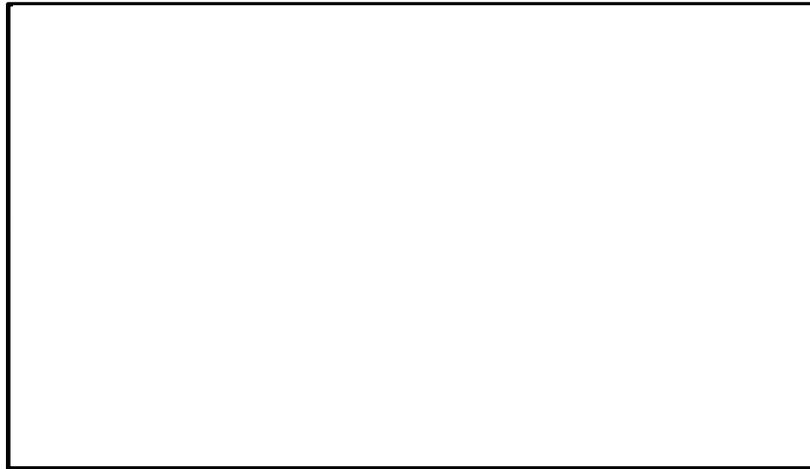


第 3 - 3 - 11 図 常設代替高圧電源装置用カルバート
(カルバート部) 断面図 (- '断面)

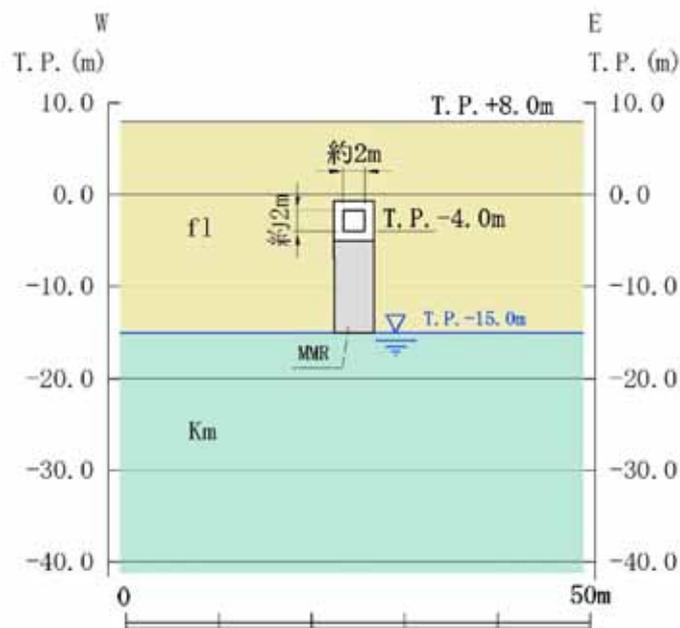
c) 常設低圧代替注水系配管カルバート【線状構造物】

第 3 - 3 - 12 図及び第 3 - 3 - 13 図に常設低圧代替注水系配管カルバートの平面図及び断面図を示す。

当該構造物は、断面変化もほとんどなく直線である。また、マンメイドロックを介して十分な支持性能を有する岩盤に設置されるため、強軸方向の曲げの影響をほとんど受けない。



第 3 - 3 - 12 図 常設低圧代替注水系配管カルバート
平面図



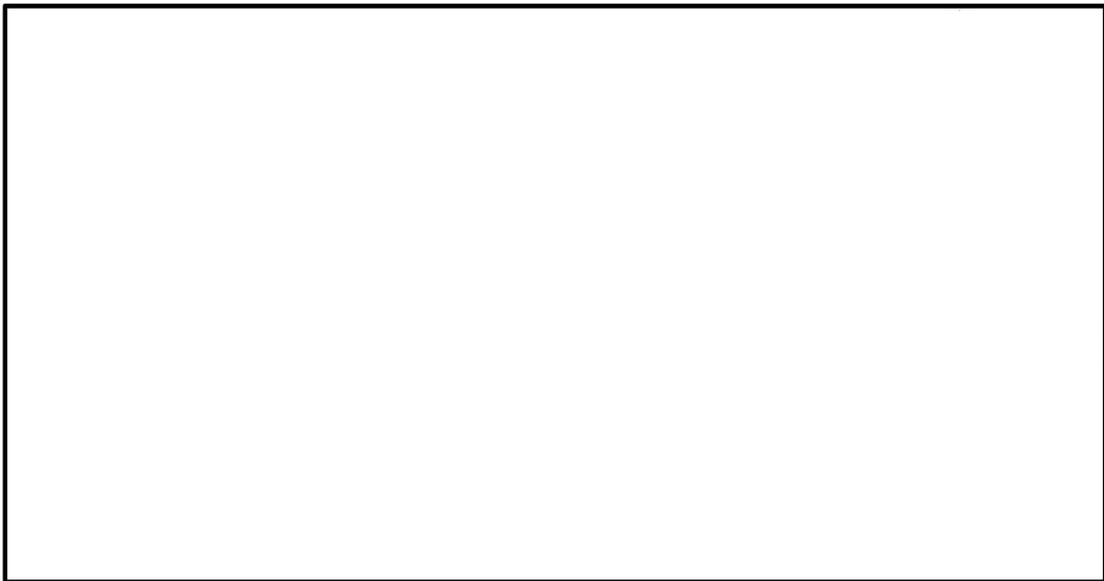
第 3 - 3 - 13 図 常設低圧代替注水系配管カルバート
断面図（東西断面）

d) 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート（上部工）

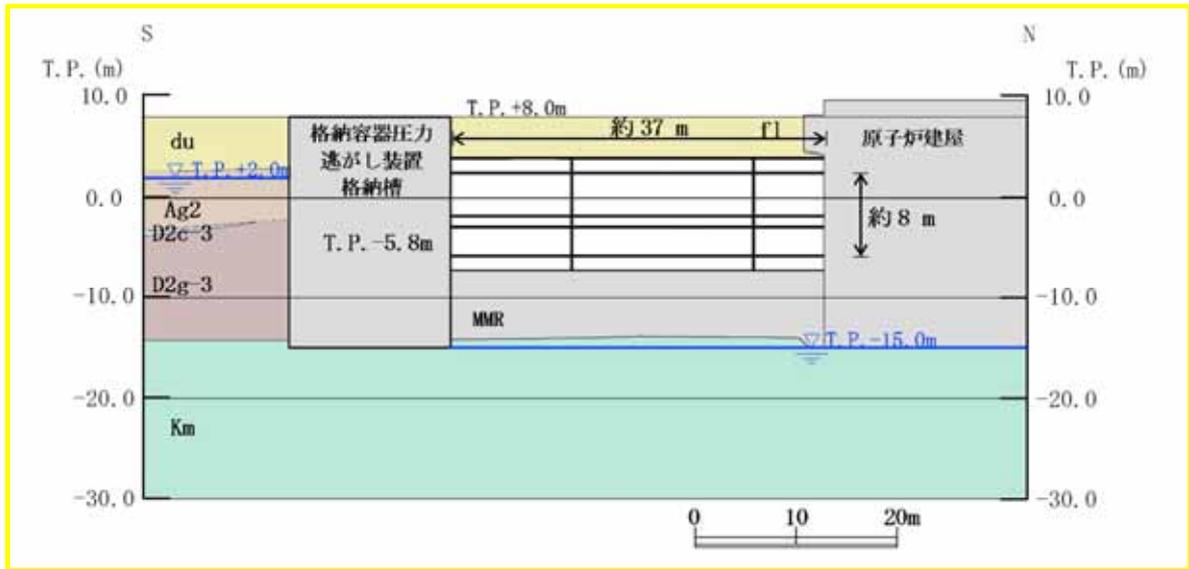
【線状構造物】

第 3 - 3 - 14 図，第 3 - 3 - 15 図及び第 3 - 3 - 16 図に格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの平面図及び断面図を示す。

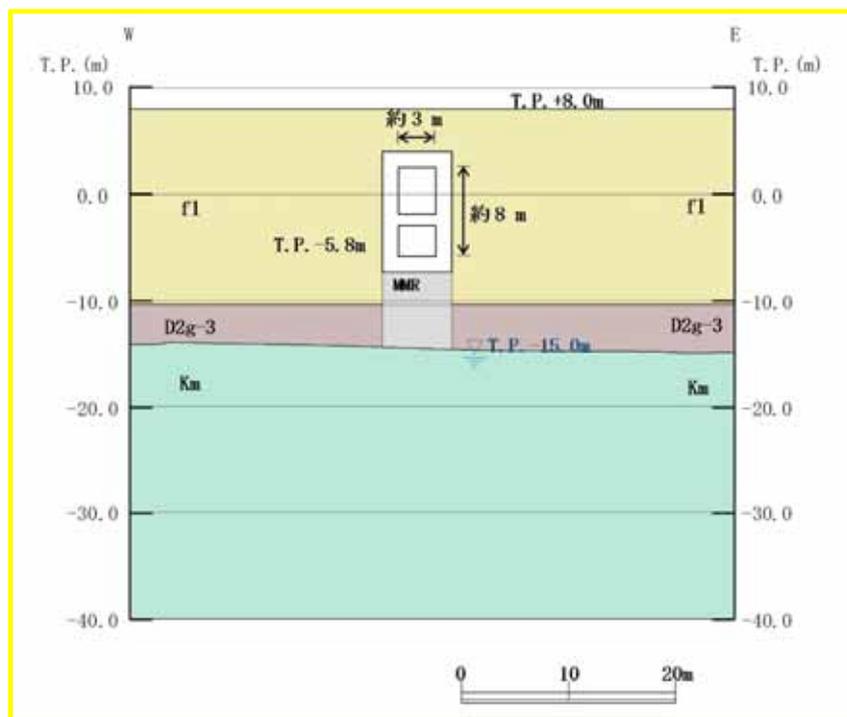
当該構造物は，断面変化があり屈曲部を有するため，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響として，弱軸方向のせん断変形や強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。



第 3 - 3 - 14 図 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート平面図



第 3 - 3 - 15 図 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート断面図 (A - A 断面)



第 3 - 3 - 16 図 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート断面図 (B - B 断面)

線状構造物として大別した常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）及び格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートは、構造物の配置上、屈曲部を有する。線状構造物の屈曲部では、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響として、弱軸方向のせん断変形や強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。

以上のことから、常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）及び格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの屈曲部について水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を検討する。

(5) 従来設計手法の妥当性の確認

i) 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）

常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）【B部】の従来設計では，第3-3-4表に示す通り，屈曲部における3次元的な拘束効果（評価対象断面のせん断変形を抑制する箇所や構造部材）を期待せず，保守的に評価対象断面に直交する部材のみで荷重を受け持たせる設計となっている。また，常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）は，マンメイドロックを介して十分な支持性能を有する岩盤に設置されるため，躯体が底面で拘束されていることから，屈曲部における強軸方向の曲げの影響もほとんど受けない。

以上のことから，常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）における屈曲部での水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響は，従来設計手法における評価対象断面での耐震評価で担保される。

第3-3-4表 屈曲部における3次元的な拘束効果
（常設代替高圧電源装置用カルバート）

--

ii) 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート

格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの従来設計では，第3-3-5表に示す通り，屈曲部における3次元的な拘束効果（評価対象断面のせん断変形を抑制する箇所や構造部材）を期待せず，保守的に評価対象断面に直交する部材のみで荷重を受け持たせる設計となっている。また，格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートは，マンメイドロックを介して十分な支持性能を有する岩盤に設置されるため，躯体が底面で拘束されていることから，屈曲部における強軸方向の曲げの影響もほとんど受けない。

以上のことから，格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートにおける屈曲部での水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響は，従来設計手法における評価対象断面での耐震評価で担保される。

第3-3-5表 屈曲部における3次元的な拘束効果
（格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート）

--

3.3.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出結果

3.3.4 の検討を踏まえ，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を検討すべき構造物として，構造及び作用荷重の観点から，箱型構造物，梁状構造物，円筒状構造物及び鋼管杭基礎を抽出する。なお，管路構造物については，従来設計手法において水平 2 方向及び鉛直方向の地震力を同時に作用させて評価を行っているため対象外とする。

箱型構造物，円筒状構造及び鋼管杭基礎については，構造物の規模等を考慮し（第 3 - 3 - 6 表），箱型構造物の代表構造物（施設）として常設代替高圧電源装置置場，円筒状構造の代表構造物（施設）として代替淡水貯槽及び SA 用海水ピット，鋼管杭基礎の代表構造物（施設）として取水構造物を選定し，影響評価を行う。第 3 - 3 - 17 図から第 3 - 3 - 34 図に各構造物の概要図を示す。

梁状構造物は屋外二重管基礎コンクリートのみであることから，当該構造物にて影響評価を行う。

第 3 - 3 - 6 表 代表構造物の選定検討表 (1 / 2)

構造形式	構造物 (施設) 名	規模			選定理由
		長辺	短辺	高さ	
箱型	取水構造物	約56m	約43m	約12m	
	常設代替高圧電源装置置場	約56m	約46m	約47m	長辺・短辺・高さが最大
	常設代替高圧電源装置用カルバート (立坑部)	約15m	約11m	約39m	
	常設低圧代替注水系ポンプ室	約15m	約11m	約30m	
	緊急用海水ポンプピット	約12m	約12m	約36m	
	緊急時対策所用発電機用燃料油タンク基礎	約12m	約7m	約7m	
	可搬型設備用軽油タンク基礎 (西側) ・ (南側)	約17m	約15m	約7m	
円筒状	代替淡水貯槽	直径 約20m		約22m	直径が最大
	SA用海水ピット	直径 約14m		約34m	高さが最大
	SA用海水ピット取水塔	直径 約8m		約21m	

緑色ハッチングが、代表構造物(施設)

第 3 - 3 - 6 表 代表構造物の選定検討表 (2 / 2)

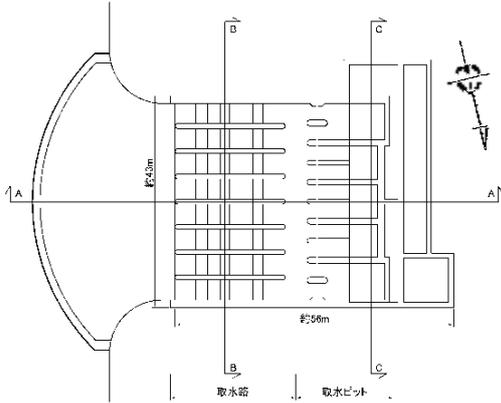
構造形式	構造物 (施設) 名	上部工規模			鋼管杭	選定理由
		長辺	短辺	高さ	長さ(最大)	
鋼管杭基礎	取水構造物	約56m	約43m	約12m	約43m	上部工の長辺・短辺、杭長さが最大
	屋外二重管 ^{注)}	約10m	約4m	約3m	約42m	
	緊急時対策所用発電機用燃料油タンク基礎	約12m	約7m	約7m	約33m	
	可搬型設備用軽油タンク基礎 (西側)	約17m	約15m	約7m	約33m	
	可搬型設備用軽油タンク基礎 (南側)	約17m	約15m	約7m	約15m	

注) 屋外二重管の上部工規模は基礎コンクリートの寸法

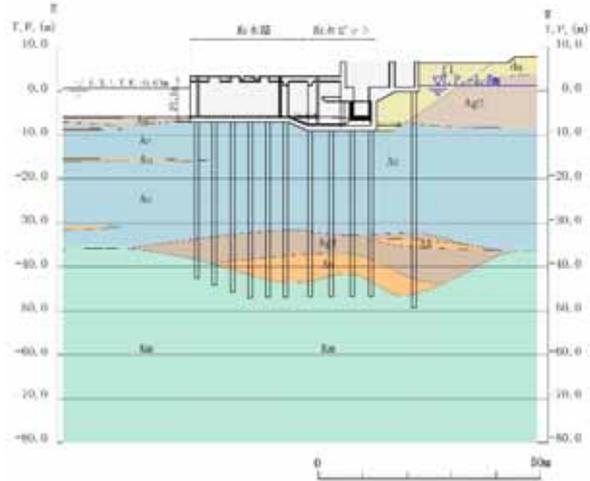
緑色ハッチングが、代表構造物(施設)

a) 取水構造物 【箱型構造物】 【鋼管杭基礎の代表】

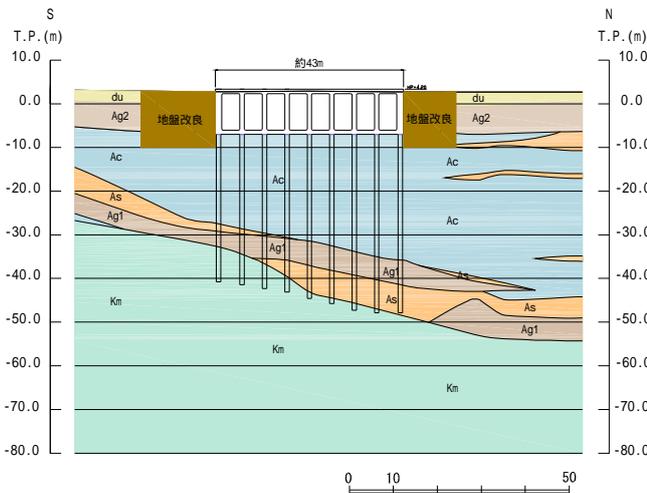
第 3 - 3 - 17 図から第 3 - 3 - 20 図に取水構造物の平面図及び断面面図を示す。



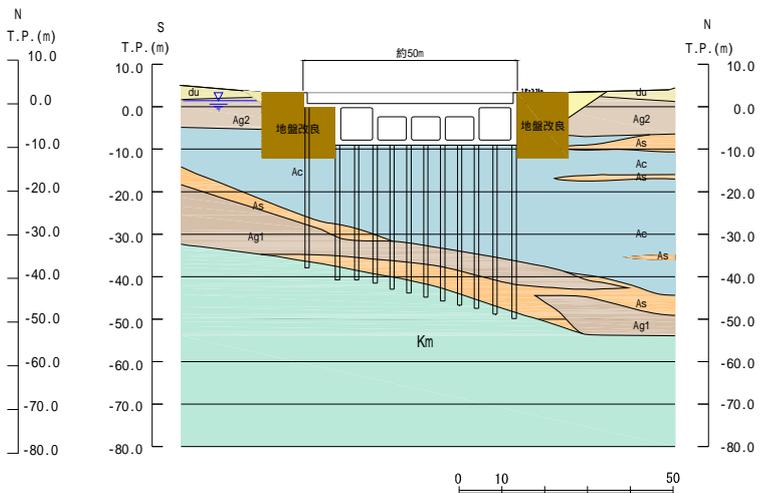
第 3 - 3 - 17 図 取水構造物
平面図



第 3 - 3 - 18 図 取水構造物
縦断面図 (A - A 断面)



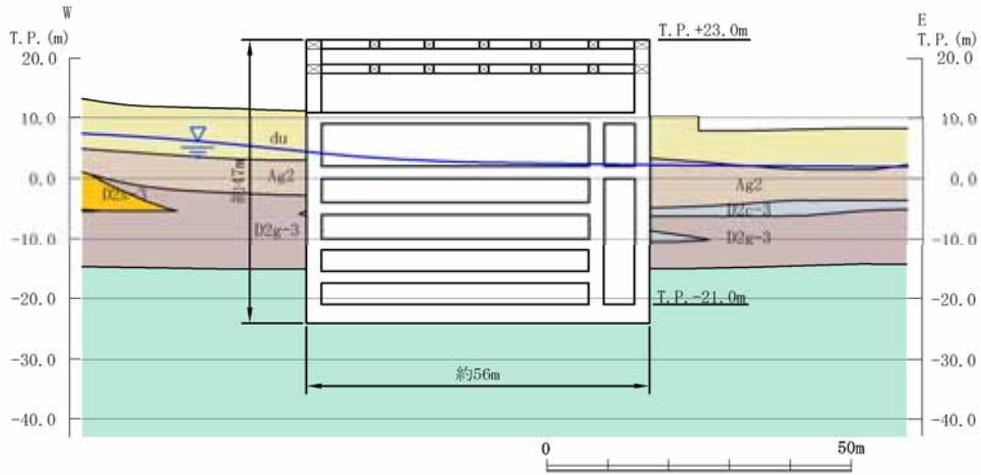
第 3 - 3 - 19 図 取水構造物
縦断面図 (B - B 断面)



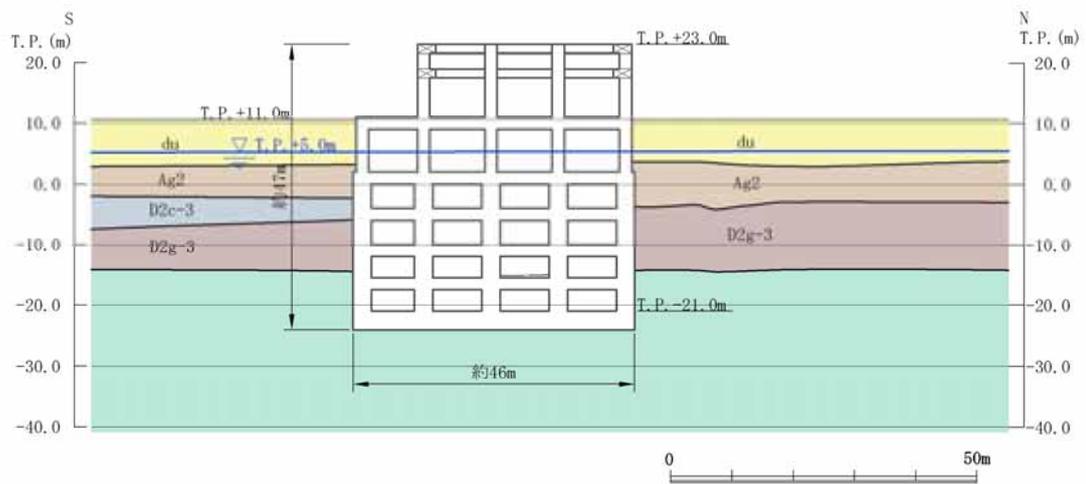
第 3 - 3 - 20 図 取水構造物
縦断面図 (C - C 断面)

b) 常設代替高圧電源装置置場 【箱型構造物の代表】

第 3 - 3 - 21 図及び第 3 - 3 - 22 図に常設代替高圧電源装置置場の断面図を示す。



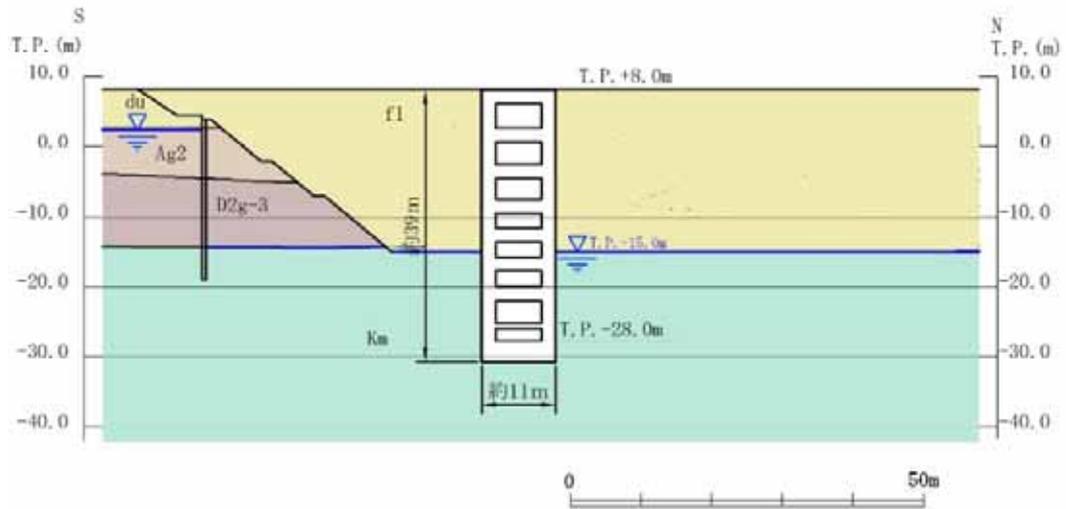
第 3 - 3 - 21 図 常設代替高圧電源装置置場 断面図（東西断面）



第 3 - 3 - 22 図 常設代替高圧電源装置置場 断面図（南北断面）

c) 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）【箱型構造物】

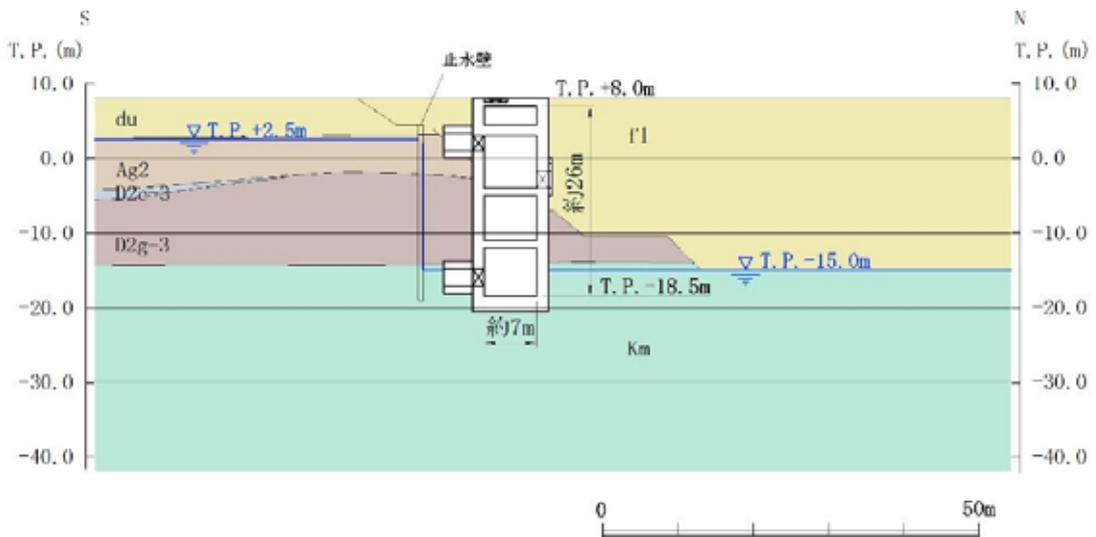
第 3 - 3 - 23 図に常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の断面図を示す。



第 3 - 3 - 23 図 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）断面図

d) 常設低圧代替注水系ポンプ室 【箱型構造物】

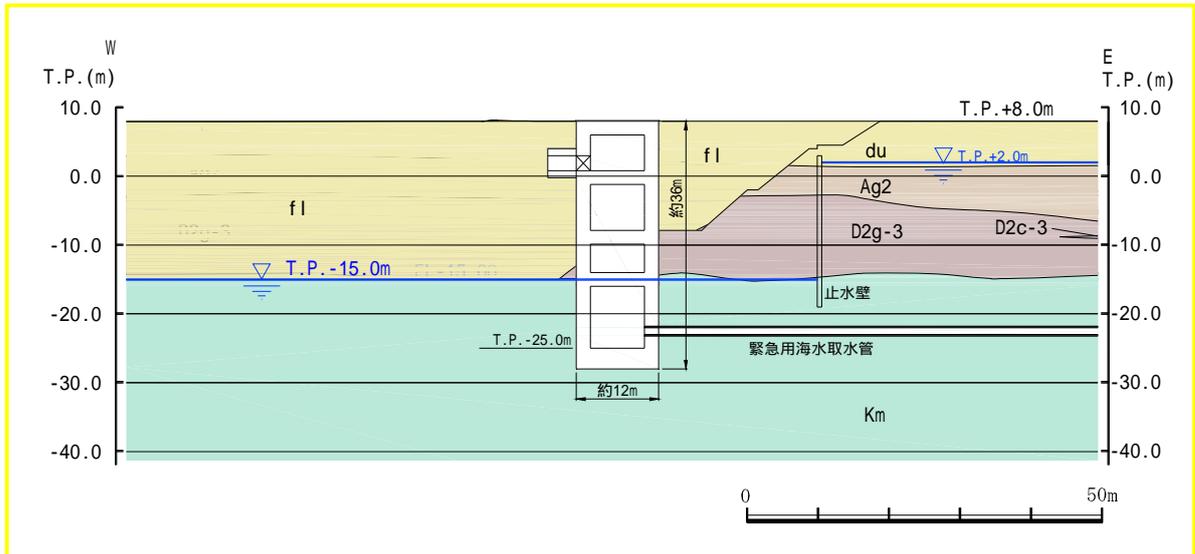
第 3 - 3 - 24 図に常設低圧代替注水系ポンプ室の断面図を示す。



第 3 - 3 - 24 図 常設低圧代替注水系ポンプ室
断面図（南北断面）

e) 緊急用海水ポンプピット 【箱型構造物】

第 3 - 3 - 25 図に緊急用海水ポンプピットの断面図を示す。

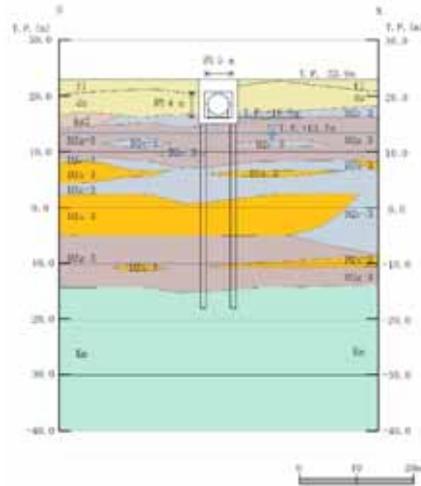


第 3 - 3 - 25 図 緊急用海水ポンプピット
断面図 (東西断面)

f) 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎

【箱型構造物】 【鋼管杭基礎】

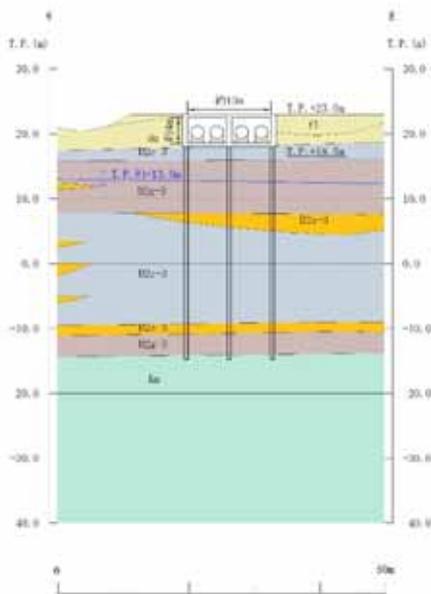
第 3 - 3 - 26 図に緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の断面図を示す。



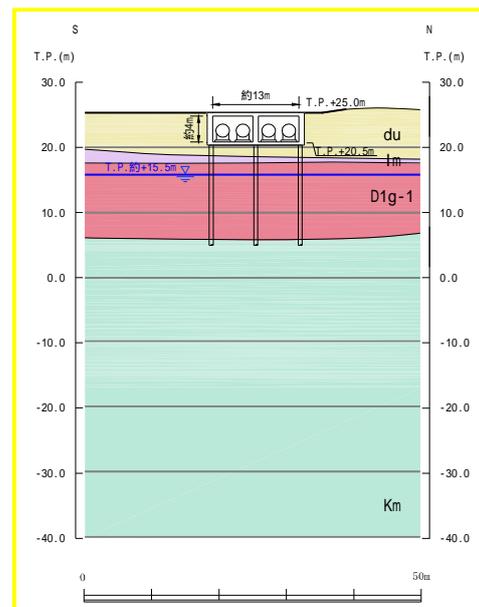
第 3 - 3 - 26 図 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎 断面図

g) 可搬型設備用軽油タンク基礎 【箱型構造物】 【鋼管杭基礎】

第 3 - 3 - 27 図及び第 3 - 3 - 28 図に可搬型設備用軽油タンク基礎の断面図を示す。



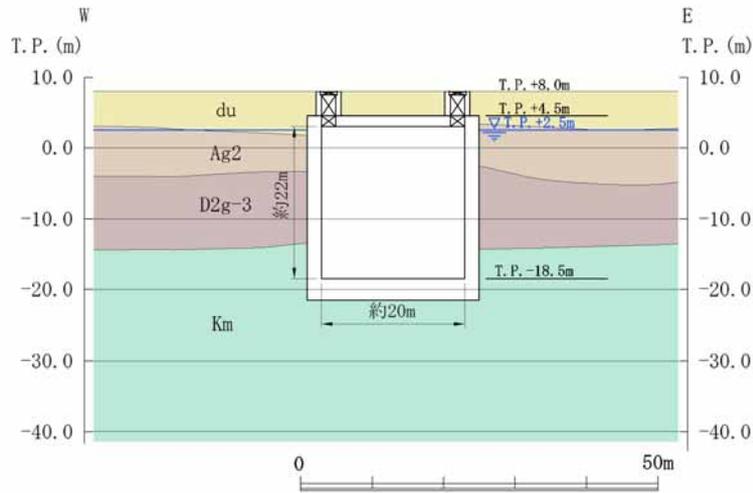
第 3 - 3 - 27 図 可搬型設備用軽油タンク基礎断面図【西側】



第 3 - 3 - 28 図 可搬型設備用軽油タンク基礎断面図【南側】

h) 代替淡水貯槽 【円筒状構造物の代表】

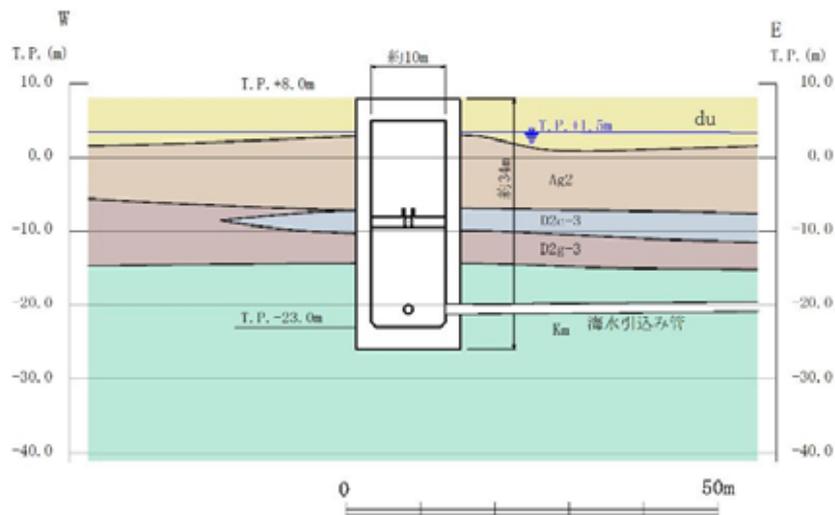
第 3 - 3 - 29 図に代替淡水貯槽の断面図を示す。



第 3 - 3 - 29 図 代替淡水貯槽 断面図（東西断面）

i) S A 用海水ピット 【円筒状構造物の代表】

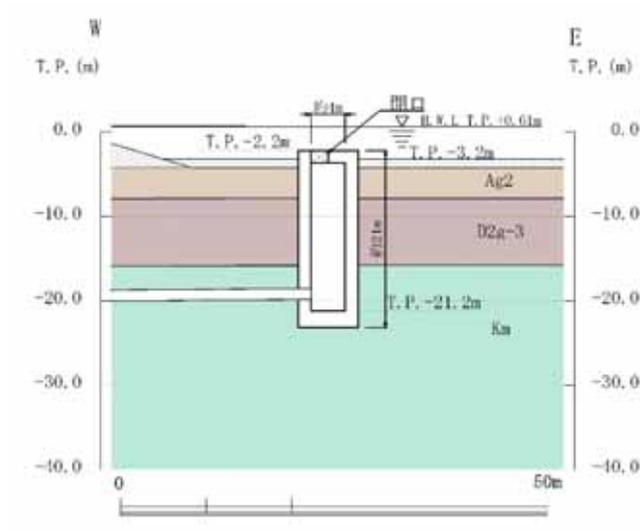
第 3 - 3 - 30 図に S A 用海水ピットの断面図を示す。



第 3 - 3 - 30 図 S A 用海水ピット 断面図

j) S A用海水ピット取水塔 【円筒状構造物】

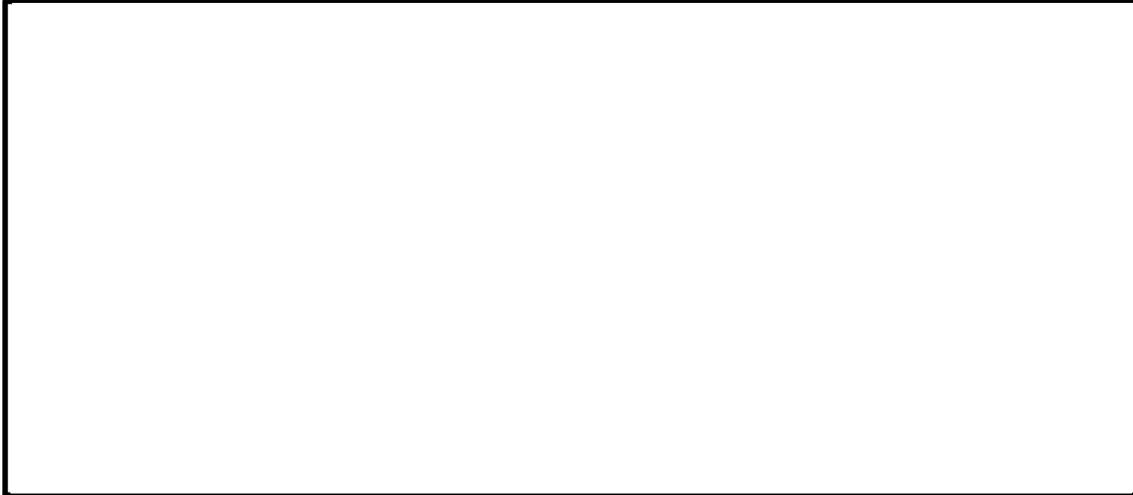
第 3 - 3 - 31 図に S A用海水ピット取水塔の断面図を示す。



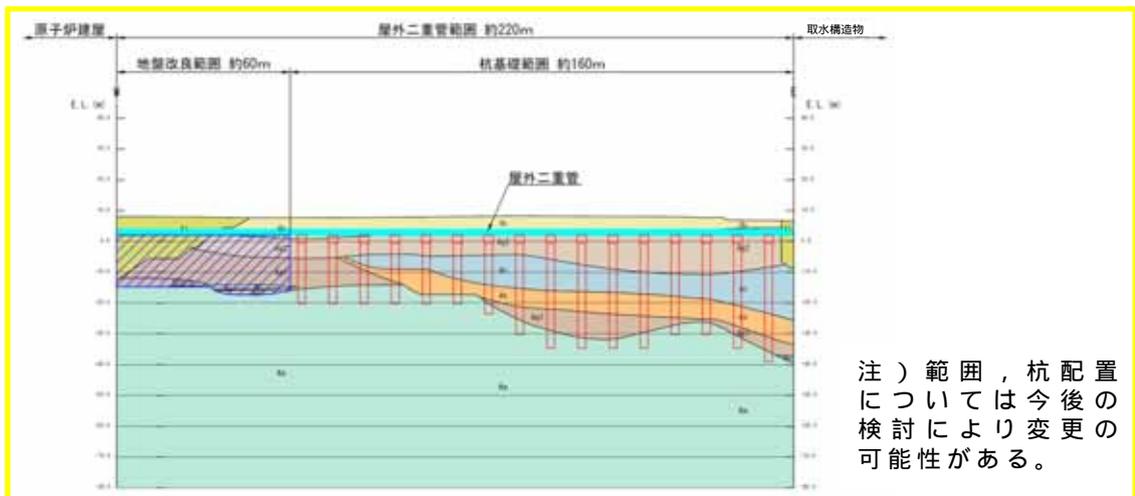
第 3 - 3 - 31 図 S A用海水ピット取水塔 断面図

k) 屋外二重管 【鋼管杭基礎】

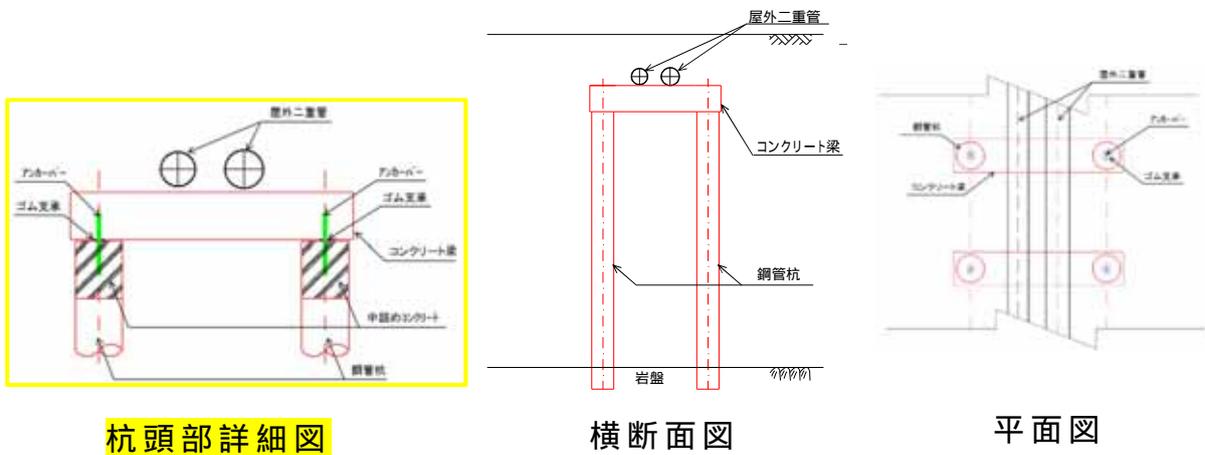
第 3 - 3 - 32 図及び第 3 - 3 - 33 図に屋外二重管の平面及び断面図を示す。第 3 - 3 - 34 図に概念図を示す。



第 3 - 3 - 32 図 屋外二重管 平面図



第 3 - 3 - 33 図 屋外二重管 縦断面図 (A - A 断面)



杭頭部詳細図

横断面図

平面図

第 3 - 3 - 34 図 屋外二重管概念図

3.3.6 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価

(1) 箱型構造物

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価については、箱型構造物の弱軸方向（評価対象断面）と強軸方向（評価対象断面に直交する断面）におけるそれぞれの2次元の地震応答解析にて、互いに干渉し合う断面力や応力を選定し、弱軸方向加振における部材照査において、強軸方向加振の影響を考慮し評価する。

強軸方向加振については、箱型構造物の隔壁・側壁が、強軸方向加振にて耐震壁としての役割を担うことから、当該構造部材を耐震壁と見なし、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 - （日本建築学会，1999）（以下「RC基準」という。）に準拠し耐震評価を実施する。

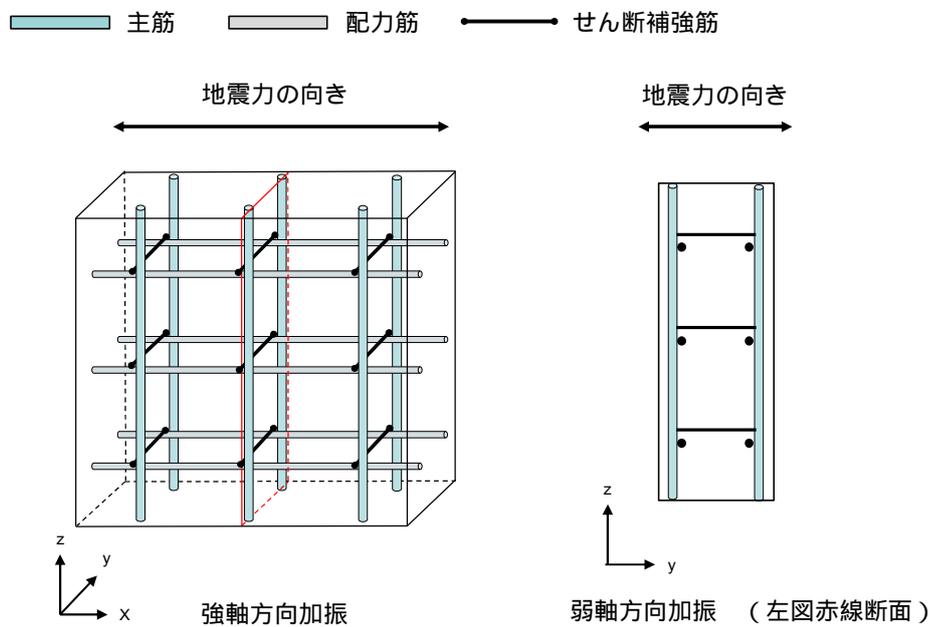
RC基準では、耐震壁に生じるせん断力（面内せん断）に対して、コンクリートのみで負担できるせん断耐力と、鉄筋のみで負担できるせん断耐力のいずれか大きい方を鉄筋コンクリートのせん断耐力として設定する。したがって、壁部材の生じるせん断力がコンクリートのみで負担できるせん断力以下であれば、鉄筋によるせん断負担は無く鉄筋には応力が発生しないものとして取り扱う。

一方、強軸方向加振にて生じるせん断力を、箱型構造物の隔壁・側壁のコンクリートのみで負担できず、鉄筋に負担させる場合、第3-3-35図に示すとおり、強軸方向加振にて発生する側壁・隔壁の主筋の発生応力が、弱軸方向における構造部材の照査に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価においては、強軸方向加振にて発生する応力を、弱軸方向における構造部材の照査に付加することで、その影響の有無を検討する。

なお、弱軸方向及び強軸方向の地震応答解析では、保守的に両方とも基準地震動 S_g を用いる。

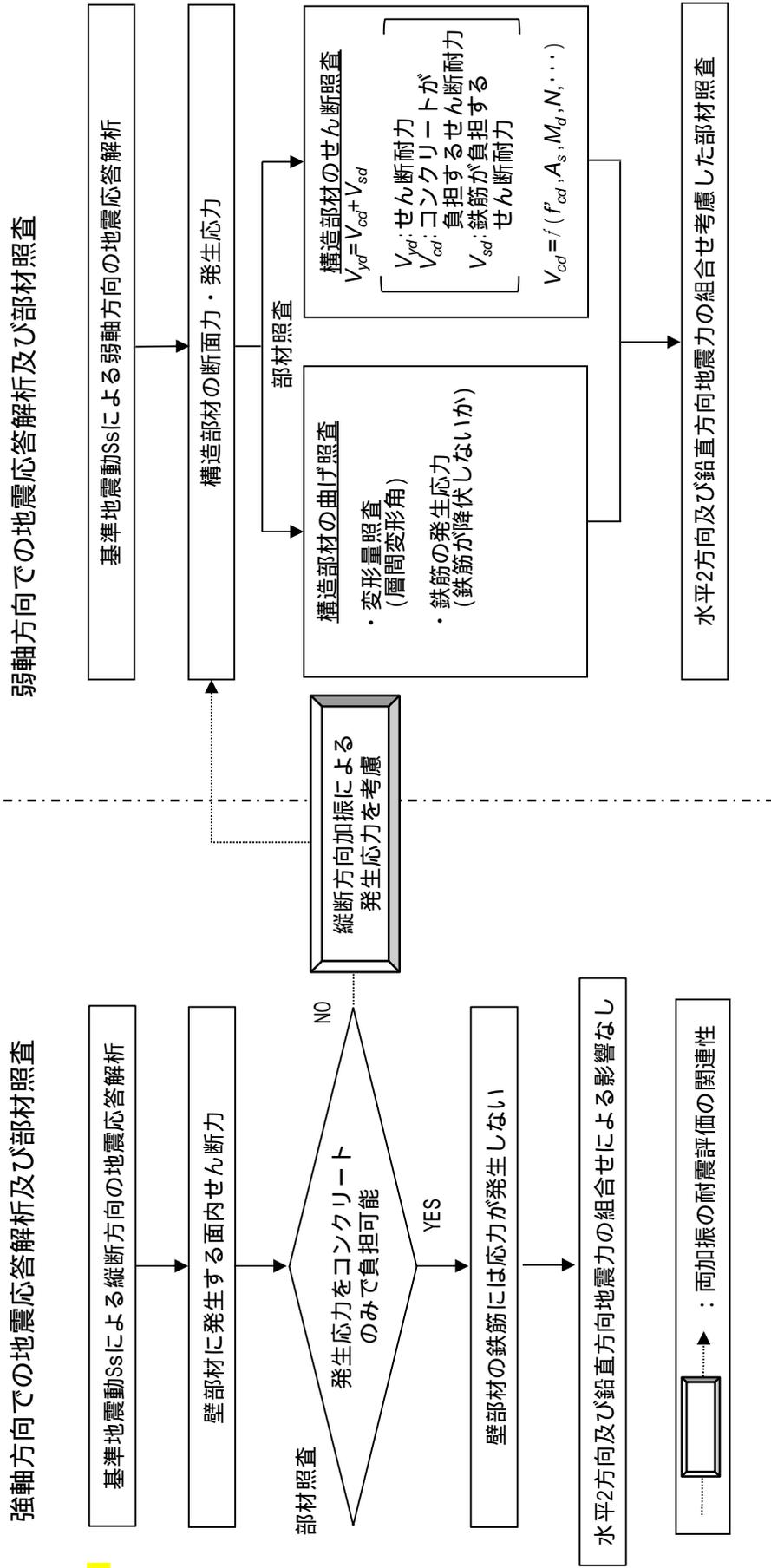
第3-3-36図に水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価フローを示す。



		強軸方向加振	弱軸方向加振	備考
断面力	My (y軸まわりの曲げモーメント)		×	
	Mx (x軸まわりの曲げモーメント)	×		
	Nz (鉛直方向軸力)			互いに干渉する可能性あり
	Nzx (zx平面内せん断)		×	
	Qz (z方向面外せん断)	×		
応力	主筋			互いに干渉する可能性あり
	配力筋		×	
	せん断補強筋	×		

(: 発生する可能性あり, : 発生する可能性があるが極めて軽微, × : 発生しない)

第3-3-35図 縦断方向加振及び横断方向加振において発生する断面力・応力



第 3 - 3 - 36 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価フロー
4 条 - 別紙 7 - 77

(2) 梁状構造物，円筒状構造物及び鋼管杭基礎

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価については，従来の設計手法である水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる局部評価の荷重又は応力の評価結果等を用い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせる方法として，米国 Regulatory Guide 1.92(注)の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として，組合せ係数法(1.0:0.4:0.4)に基づいて地震力を設定する。

評価対象として抽出した耐震評価上の部位について，構造部材の発生応力等を適切に組み合わせることで，各部位の設計上の許容値に対する評価を実施し，各部位が有する耐震性への影響を評価する。

(注)Regulatory Guide(RG) 1.92 “ Combining modal responses and spatial components in seismic response analysis ”

3.3.7 機器・配管系への影響評価

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が確認された構造物が、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持構造物である場合、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響を確認する。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響が確認された場合、機器・配管系の影響評価に反映する。

なお、屋外重要土木構造物の影響の観点から抽出されなかった部位であっても、地震応答解析結果から機器・配管系への影響の可能性が想定される部位については検討対象として抽出する。

3.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物

3.4.1 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物における評価対象構造物の抽出及び整理

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価を実施する対象施設の設置位置図を第3 - 4 - 1図に示す。各対象施設において，「3.1 建物・構築物」，「3.2 機器・配管系」，「3.3 屋外重要土木構造物」の何れかの区分に基づき設計するものについて，その方針を第3 - 4 - 1表に示す。

津波防護施設については，「3.3 屋外重要土木構造物」の水平2方向の設計方針に基づき影響評価を実施する。なお，評価対象施設の構造的な特徴を踏まえ，3.4.4項以降に水平2方向及び鉛直方向地震の組合せ影響を整理する。

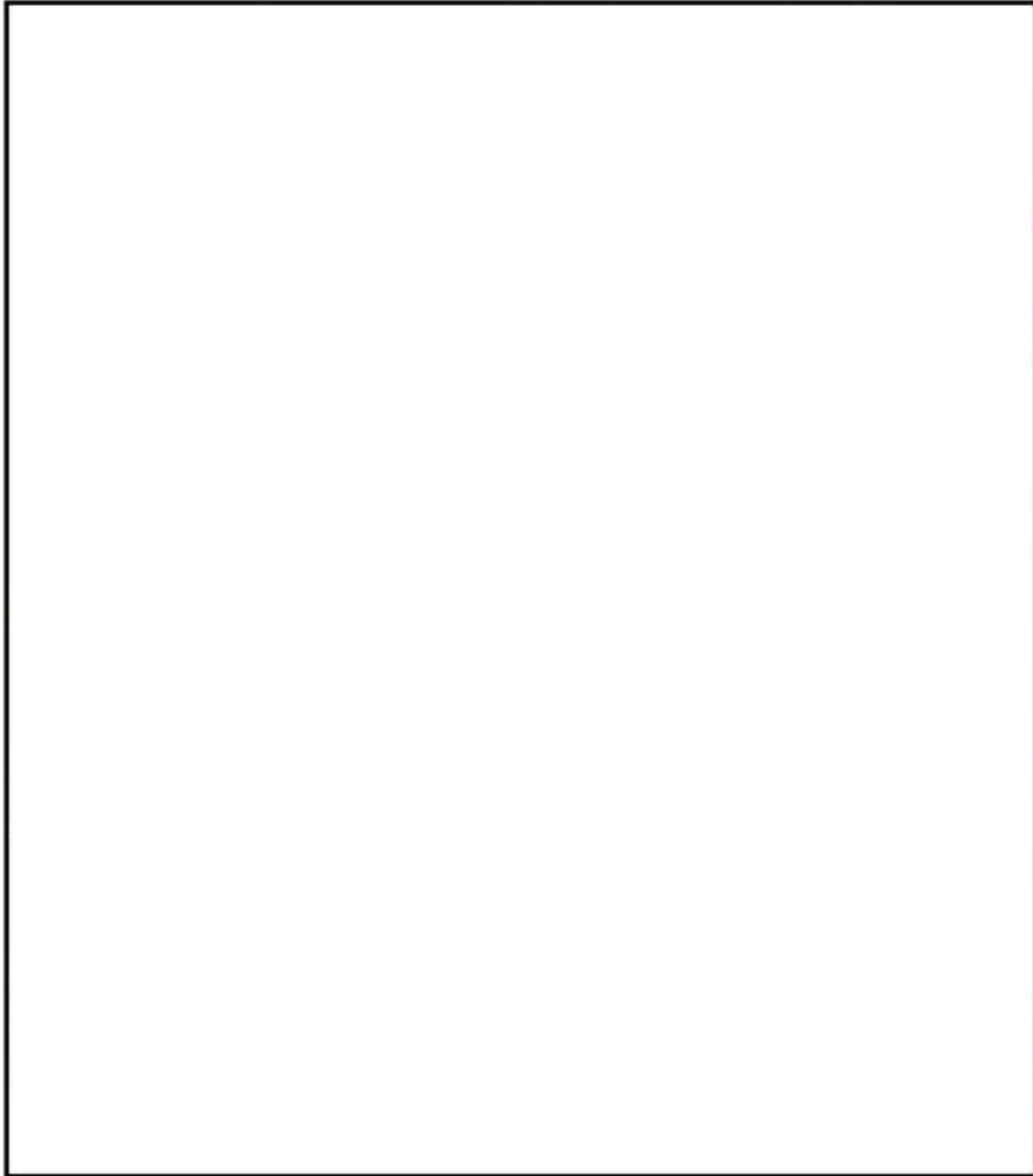
浸水防止設備及び津波監視設備については，「3.2 機器・配管系」の水平2方向の設計方針に基づき影響評価を実施する。

浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物については，各構造物の構造上の特徴を踏まえ「3.1 建物・構築物」又は「3.3 屋外重要土木構造物」の水平2方向の設計方針に基づき影響評価を実施する。

【凡例】

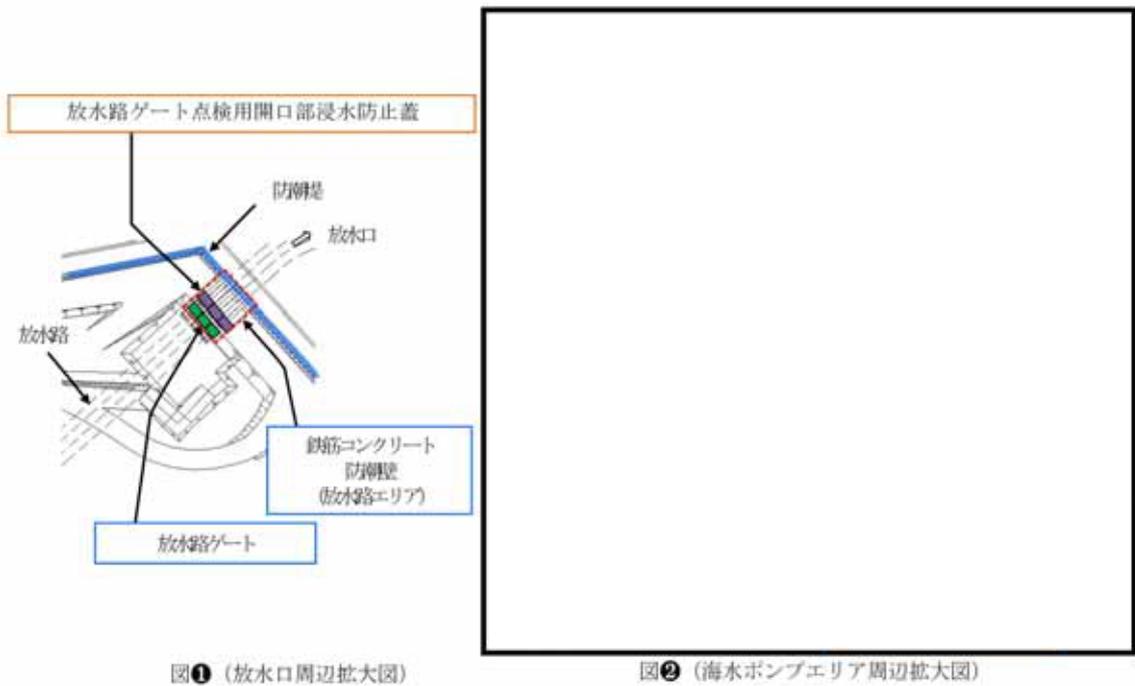
- T. P. +3.0m~T. P. +8.0m
- T. P. +8.0m~T. P. +11.0m
- T. P. +11.0m 以上

- 津波防護施設
- 浸水防止設備
- 津波監視設備
- 設計基準対象施設の津波防護対象設備を内包する建屋及び区画



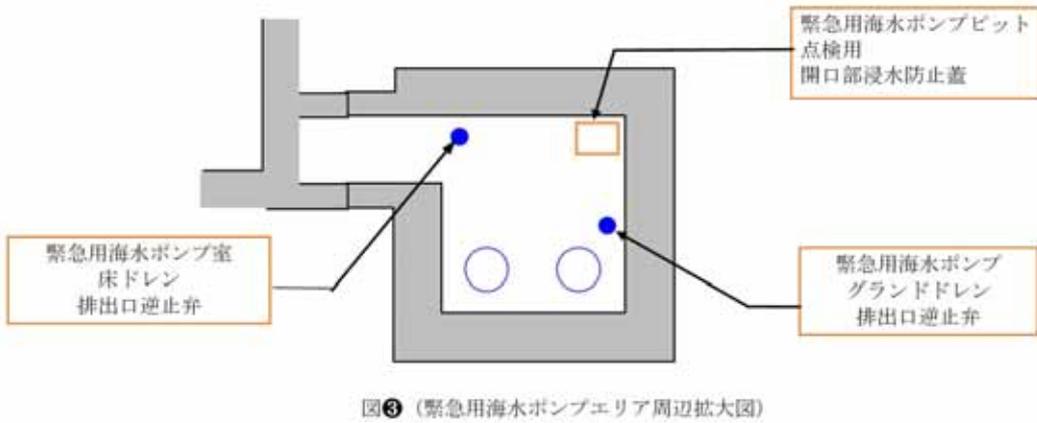
第 3 - 4 - 1 図 (1 / 2) 津波防護施設 , 浸水防止設備及び津波監視設備位置図

- 【凡例】
- 津波防護施設
 - 浸水防止設備
 - 津波監視設備
 - 設計基準対象施設の津波防護対象設備を内包する建屋及び区画



図① (放水口周辺拡大図)

図② (海水ポンプエリア周辺拡大図)



図③ (緊急用海水ポンプエリア周辺拡大図)

第 3 - 4 - 1 図 (2 / 2) 津波防護施設 , 浸水防止設備及び津波監視設備位置図

第 3 - 4 - 1 表 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備の分類

分類	施設，設備名称		区分
津波防護施設	防潮堤及びゲート類	鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁	「3.3 屋外重要土木構造物」の設計方針に基づく。影響評価については3.4.4以降に整理する。 津波防護施設のうち放水路ゲート，防潮扉本体，構内排水路逆流防止装置は，「3.2 機器・配管系」の設計方針に基づく。
		鋼製防護壁	
		鉄筋コンクリート防潮壁	
		鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）	
	構内排水路逆流防止設備	逆流防止装置	
		出口側集水桝	
	貯留堰		
浸水防止設備	取水路点検用開口部浸水防止蓋		「3.2 機器・配管系」の設計方針に基づく
	海水ポンプグランド dren 排出口逆止弁		
	取水ピット空気抜き配管逆止弁		
	海水ポンプ室ケーブル点検口浸水防止蓋		
	放水路ゲート点検用開口部浸水防止蓋		
	S A用海水ピット開口部浸水防止蓋		
	緊急用海水ポンプピット点検用開口部浸水防止蓋		
	緊急用海水ポンプグランド dren 排出口逆止弁		
	緊急用海水ポンプ室床 dren 排出口逆止弁		
	貫通部止水処置		
津波監視設備	津波監視カメラ		「3.2 機器・配管系」の設計方針に基づく
	取水ピット水位計		
	潮位計		
浸水防止設備及び津波監視設備が設置された建物・構築物	取水構造物		「3.3 屋外重要土木構造物」の設計方針に基づく。鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の影響評価については3.4.4以降に整理する。
	鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁		
	S A用海水ピット		
	緊急用海水ポンプピット		
	原子炉建屋		「3.1 建物・構築物」の設計方針に基づく

： 間接支持構造物

3.4.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計の考え方

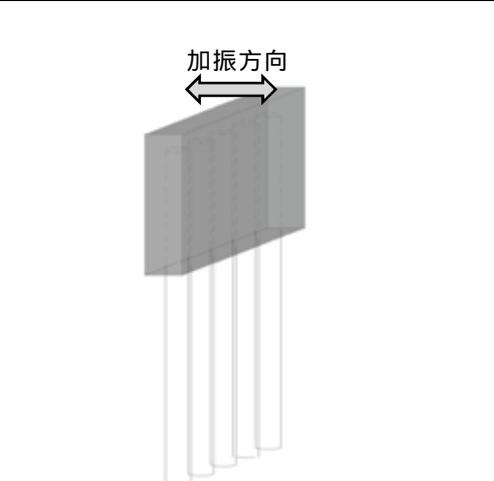
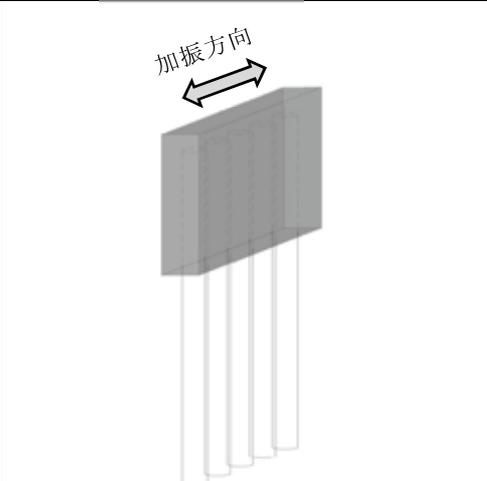
津波防護施設における従来設計手法の考え方について、防潮堤を例に第 3 - 4 - 2 表に示す。津波防護施設は、地中構造物と地上構造物に分けられる。地上構造物は、躯体の慣性力や基礎部分に係る動土圧等が主たる荷重となる。地中構造物については、屋外重要土木構造物同様、比較的単純な構造部材の配置で構成される。地中構造物、地上構造物共にほぼ同一の断面が奥行方向に連続する構造的特徴を有することから、3 次元的な応答の影響は小さいため、2 次元断面での耐震評価を行っている。

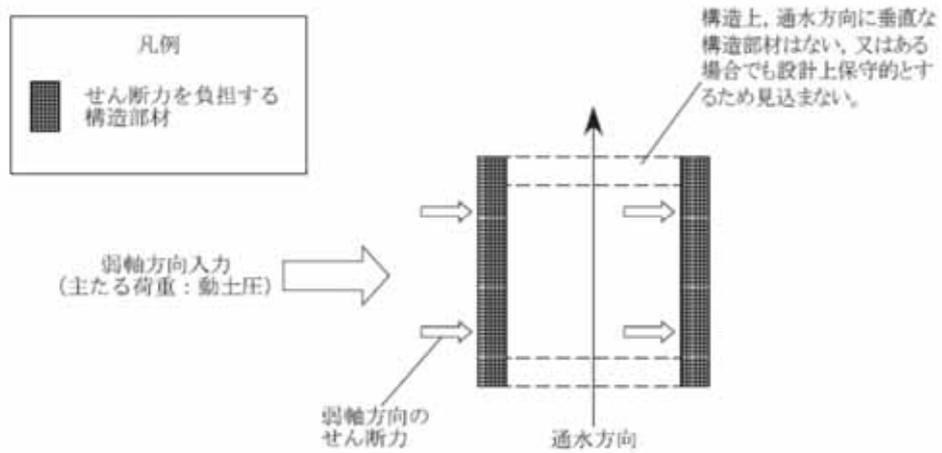
上述のとおり、地中構造物、地上構造物共にほぼ同一の断面が長手方向に連続する構造的な特徴を有していることから、構造上の特徴として明確な弱軸、強軸を有する。

強軸方向の地震時挙動は、弱軸方向に対して顕著な影響を及ぼさないことから、従来評価手法では弱軸方向を評価対象として、耐震設計上求められる水平 1 方向及び鉛直方向地震力による耐震評価を実施している。

第 3 - 4 - 2 図に示す通り、従来設計手法では、津波防護施設の構造上の特徴から、弱軸方向の地震荷重に対して、保守的に加振方向に平行な壁部材を見込まず、垂直に配置された構造部材のみで受け持つよう設計している。

第3-4-2表 従来設計における評価対象断面の考え方（防潮堤）

	横断方向の加振	縦断方向の加振
従来設計 の評価対 象断面の 考え方	 <p>加振方向に対する抵抗力が小さい</p>	 <p>加振方向に同一構造が連続している</p>



(注) 当該図は平面図を示す

第3-4-2図 従来設計手法の考え方

3.4.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

津波防護施設において，水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある構造物の評価を行う。

対象とする部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が想定される応答特性から，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位を抽出する。

応答特性が抽出された，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位は，既往の評価結果の荷重又は応力の算出結果等を水平2方向及び鉛直方向に組合せ，対象部位に発生する荷重や応力を算出し，各部位が有する耐震性への影響を確認する。

各部位が有する耐震性への影響が確認された場合は，詳細な手法を用いた検討等，新たな設計上の対応策を講じる。

評価フローを第3-4-3図に示す。

(1) 影響評価対象構造物の抽出

構造形式の分類

評価対象構築物について，各構造物の構造上の特徴や従来設計手法の考え方を踏まえ，構造形式ごとに大別する。

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の整理

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重を抽出する。

荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式の抽出

で整理した荷重に対して，構造形式ごとにどのように作用するかを整理し，耐震性に与える影響程度を検討した上で，水平2方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される構造形式を抽出する。

従来設計手法における評価対象断面以外の3次元的な応答特性が想定される箇所の抽出

で抽出されなかった構造形式について、従来設計手法における評価対象断面以外の箇所、水平2方向及び鉛直方向地震力の影響により3次元的な応答が想定される箇所を抽出する。

従来設計手法の妥当性の確認

で抽出された箇所が、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して、従来設計手法における評価対象断面の耐震評価で満足できるか検討を行う。

(2) 影響評価手法

水平2方向及び鉛直方向地震力の影響評価

評価対象として抽出された構造物について、従来設計手法での評価対象断面（弱軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の照査において、評価対象断面（弱軸方向）に直交する断面（強軸方向）の地震応答解析に基づく構造部材の発生応力等を適切に組合せることで、水平2方向及び鉛直方向地震力による構造部材の発生応力を算出し、構造物が有する耐震性への影響を確認する。

評価対象部位については、津波防護施設が明確な弱軸・強軸を示し、地震時における構造物のせん断変形方向が明確であることを考慮し、従来設計手法における評価対象断面（弱軸方向）における構造部材の耐震評価結果及び水平2方向の影響の程度を踏まえて選定する。

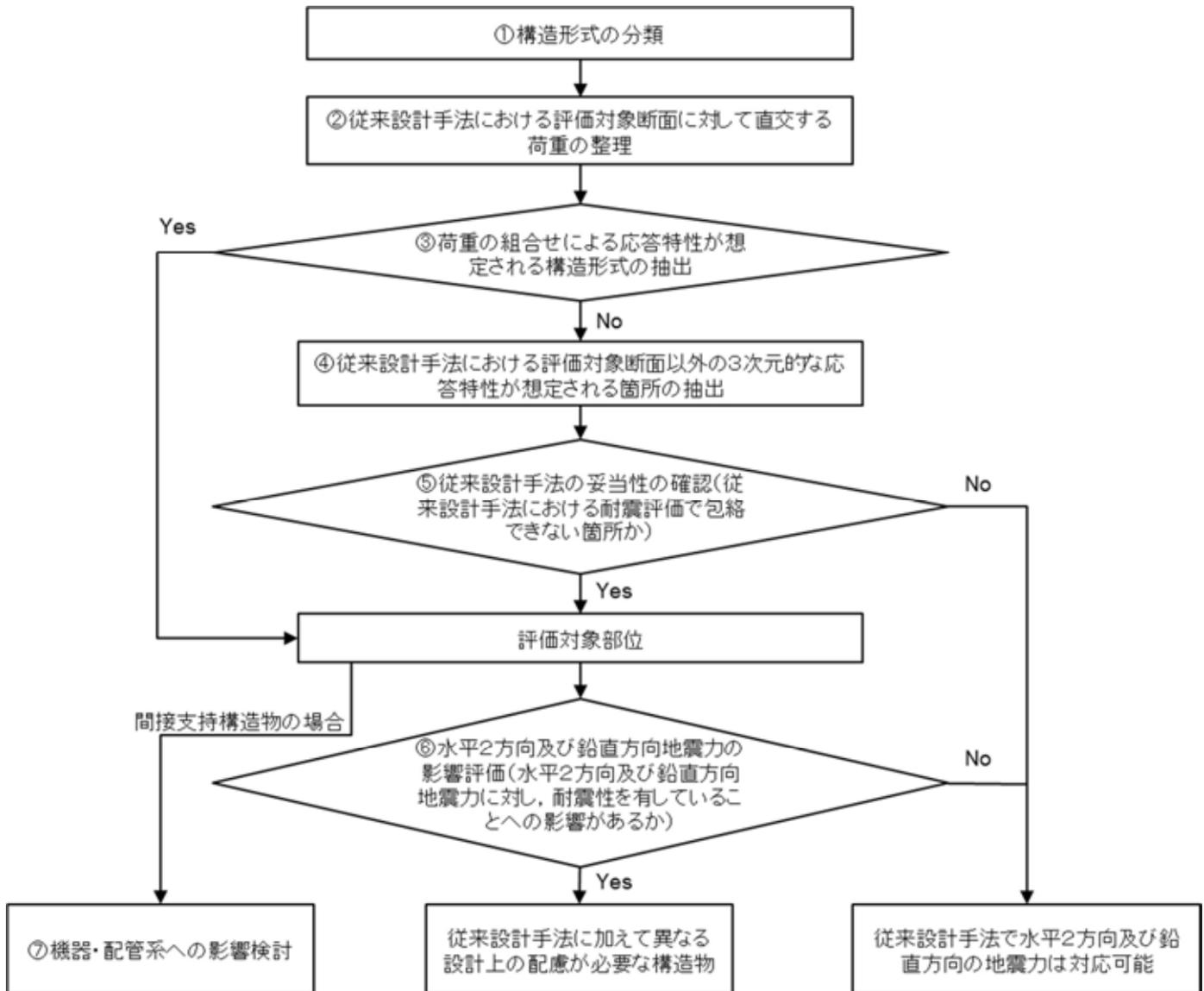
機器・配管系への影響評価

評価対象として抽出された構造物が、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持構造物である場合は、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響を確認する。

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響が確認さ

れた場合、機器・配管系の影響評価に反映する。

なお、及びの精査にて、津波防護施設の影響の観点から抽出されなかった部位であっても、地震応答解析結果から機器・配管系への影響の可能性が想定される部位については検討対象として抽出する。



第 3 - 4 - 3 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価のフロー

3.4.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出

(1) 構造形式の分類

津波防護施設は，その構造形式より 1)鋼製防護壁の上部工のような鋼殻構造物，2) 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工，鉄筋コンクリート防潮壁の上部工，鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の防潮壁，鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路，貯留堰のような線状構造物，3)鋼製防護壁の下部工，鉄筋コンクリート防潮壁の下部工，鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の基礎のような地中連続壁基礎，4) 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工，出口側集水柵の下部工のような鋼管杭基礎，並びに 5) 出口側集水柵の上部工のような箱型構造物の 5 つに大別される。

(2) 従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の整理

第3-4-3表に、従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重を示す。

従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重として、動土圧及び動水圧、摩擦力、慣性力が挙げられる。

第3-4-3表 従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重

作用荷重		作用荷重のイメージ(注)
㊦ 動土圧 及び動水 圧	従来設計手法における 評価対象断面に対し て、平行に配置される 構造部材に作用する動 土圧及び動水圧	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>動土圧・動水圧</p>
㊧ 摩擦力	周辺の埋戻土と躯体間 で生じる相対変位に伴 い発生する摩擦力	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>摩擦力</p>
㊨ 慣性力	躯体に作用する慣性力	<p>従来設計手法の評価対象断面</p> <p>加振方向</p> <p>慣性力</p>

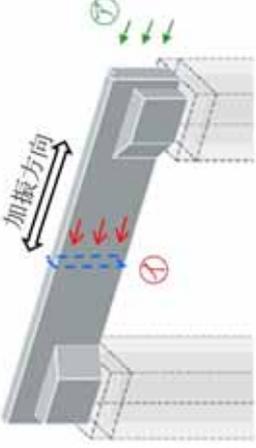
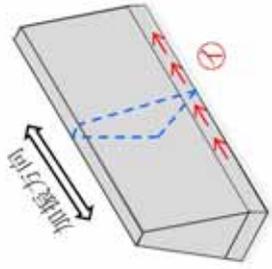
(注) 作用荷重のイメージ図は平面図を示す。

(3) 荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式の抽出

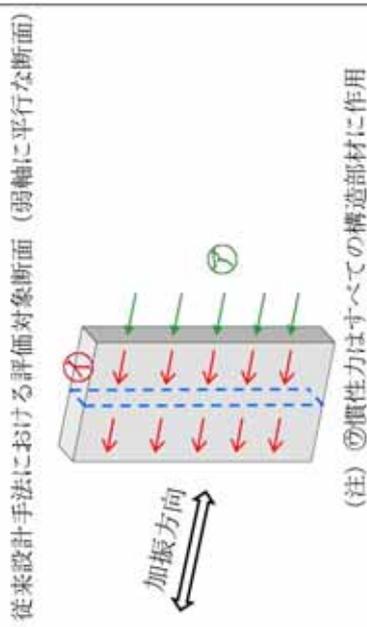
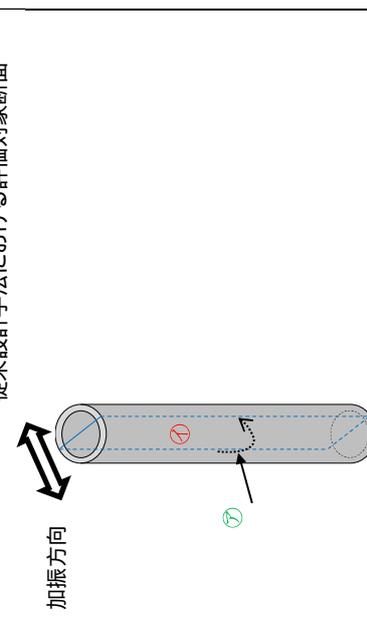
第3-4-4表に，3.4.4(1)で整理した構造形式毎に，3.4.4(2)で整理した荷重作用による影響程度を示す。

また，構造形式ごとに，各構造物の概略図と特徴について以下に示す。

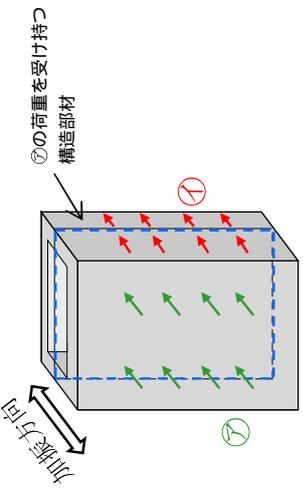
第3-4-4表 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出(1/3)

3.4.4(1)で整理した構造形式の分類	a) 鋼殻構造物 (鋼製防護壁の上部工)	b) 線状構造物 (鉄筋コンクリート防潮壁の上部工等)
3.4.4(2)で整理した荷重の作用状況	 <p>-----: 従来設計手法における評価対象断面 (弱軸に平行な断面)</p> <p>加振方向</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>	 <p>-----: 従来設計手法における評価対象断面 (弱軸に平行な断面)</p> <p>加振方向</p> <p>(注) ⑦慣性力はすべての構造部材に作用</p>
	<p>⑦動土圧及び動水圧</p> <p>①摩擦力</p> <p>⑦慣性力</p>	<p>⑦動土圧及び動水圧</p> <p>①摩擦力</p> <p>⑦慣性力</p>
従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の影響程度	<p>当該構造物の上部工は、基礎深さ及び地盤条件が異なる下部工を有し、また形状が複雑であるため、水平2方向及び鉛直地震力の組合せの影響の程度が大きい。</p>	<p>従来設計手法における評価対象断面に対して直角方向(強軸方向)に⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用しないため影響小</p>
抽出結果 (: 影響検討実施)		x

第3-4-4表 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出(2/3)

3.4.4(1)で整理した 構造形式の分類	<p>c) 地中連続壁基礎 (鉄筋コンクリート防潮壁下部工等)</p> 	<p>d) 鋼管杭基礎 (鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁下部工等)</p> 											
	3.4.4(2)で整理した 荷重の作用状況	<table border="1"> <tr> <td>⑦動土圧及び動水圧</td> <td>従来設計手法における評価対象断面に対して平行する面に作用</td> <td>⑦動土圧及び動水圧</td> <td>主に胴体部に作用</td> </tr> <tr> <td>①摩擦力</td> <td>従来設計手法における評価対象断面に対して直交する面に作用</td> <td>①摩擦力</td> <td>主に胴体部に作用</td> </tr> <tr> <td>⑦慣性力</td> <td>全ての部材に作用</td> <td>⑦慣性力</td> <td>全ての部材に作用</td> </tr> </table> <p>従来設計手法における評価対象断面に対して、平行する面に⑦動土圧及び動水圧による荷重が、上部工との接合面に上部工から伝わる荷重が作用するため影響大</p>	⑦動土圧及び動水圧	従来設計手法における評価対象断面に対して平行する面に作用	⑦動土圧及び動水圧	主に胴体部に作用	①摩擦力	従来設計手法における評価対象断面に対して直交する面に作用	①摩擦力	主に胴体部に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用	⑦慣性力
⑦動土圧及び動水圧	従来設計手法における評価対象断面に対して平行する面に作用	⑦動土圧及び動水圧	主に胴体部に作用										
①摩擦力	従来設計手法における評価対象断面に対して直交する面に作用	①摩擦力	主に胴体部に作用										
⑦慣性力	全ての部材に作用	⑦慣性力	全ての部材に作用										
従来設計手法における評価対象断面に対して直交する荷重の影響度	抽出結果 (: 影響検討実施)												

第3-4-4表 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出 (3/3)

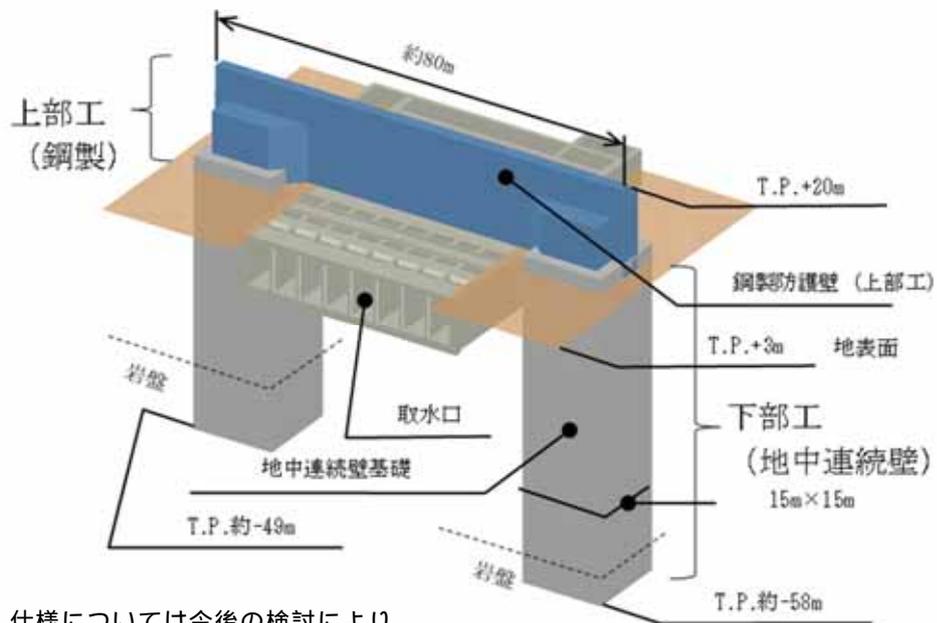
<p>3.4.4(1)で整理した 構造形式の分類</p>	<p>e) 箱型構造物 (出口側集水桝の上部工)</p>						
<p>3.4.4(2)で整理した 荷重の作用状況</p>	<p>----- : 従来設計手法における評価対象断面(弱軸に平行な断面)</p>  <p>(注) ⑨慣性力はすべての構造部材に作用</p>						
<p>従来設計手法における 評価対象断面に対して 直交する荷重の影響度</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="790 1030 965 1310"> <p>⑦ 動土圧及び動水圧</p> </td> <td data-bbox="790 566 965 1030"> <p>加振方向に対して直交して配置される構造部材に作用</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="965 1030 1005 1310"> <p>⑧ 摩擦力</p> </td> <td data-bbox="965 566 1005 1030"> <p>加振方向に対して平行に配置される構造部材に作用</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="1005 1030 1045 1310"> <p>⑨ 慣性力</p> </td> <td data-bbox="1005 566 1045 1030"> <p>全ての部材に作用</p> </td> </tr> </table> <p>従来設計手法における評価対象断面に対して平行に配置される構造部材を有し、⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用するため影響大</p>	<p>⑦ 動土圧及び動水圧</p>	<p>加振方向に対して直交して配置される構造部材に作用</p>	<p>⑧ 摩擦力</p>	<p>加振方向に対して平行に配置される構造部材に作用</p>	<p>⑨ 慣性力</p>	<p>全ての部材に作用</p>
<p>⑦ 動土圧及び動水圧</p>	<p>加振方向に対して直交して配置される構造部材に作用</p>						
<p>⑧ 摩擦力</p>	<p>加振方向に対して平行に配置される構造部材に作用</p>						
<p>⑨ 慣性力</p>	<p>全ての部材に作用</p>						
<p>抽出結果 (: 影響検討実施)</p>	<p style="text-align: center;">■</p>						

a) 鋼殻構造物

・ 鋼製防護壁の上部工

第 3 - 4 - 4 図に鋼製防護壁の上部工の概要図を示す。

当該構造物の上部工は、基礎深さ及び地盤条件が異なる下部工を有し、また形状が複雑であるため、水平 2 方向及び鉛直地震力の組合せの影響がある可能性が大きい。したがって、三次元解析を実施する。



注) 仕様については今後の検討により変更の可能性がある。

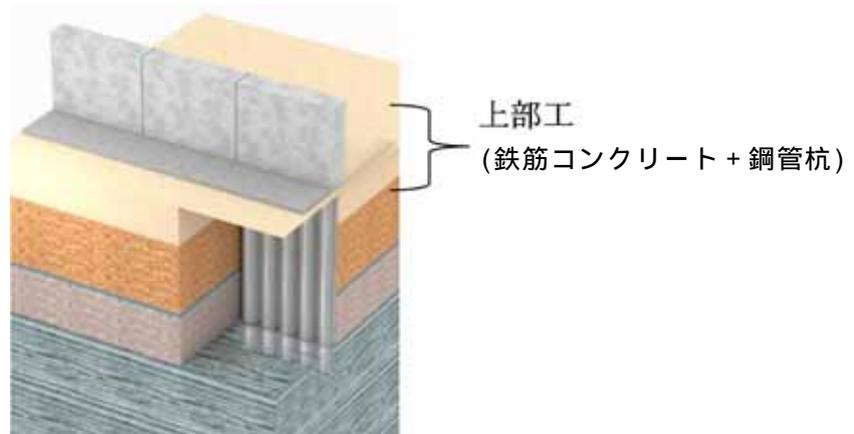
第 3 - 4 - 4 図 鋼製防護壁の上部工

b) 線状構造物

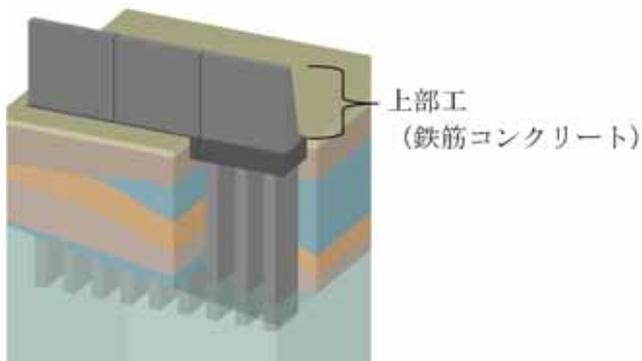
- ・ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工，鉄筋コンクリート防潮壁の上部工，鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の防潮壁

第3-4-5図，第3-4-6図及び第3-4-7図に鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工，鉄筋コンクリート防潮壁の上部工及び鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の防潮壁の概要図を示す。

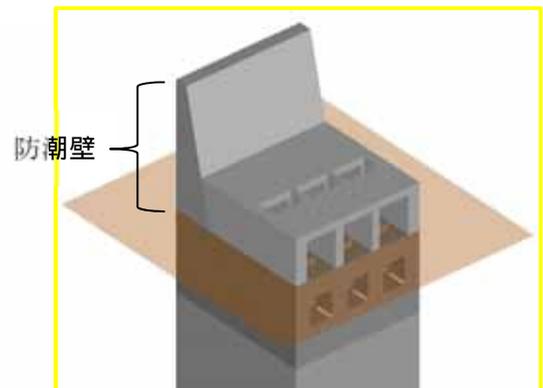
当該構造物は，擁壁タイプの線状構造物であり，その構造上の特徴として，妻壁（評価対象断面に対して平行に配置される壁部材）等を有さず，妻側（小口）の面積も小さいことから，従来設計手法における評価対象断面に対して直交する⑦動土圧及び動水圧はほとんど作用しない。



第3-4-5図 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工



第3-4-6図 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工

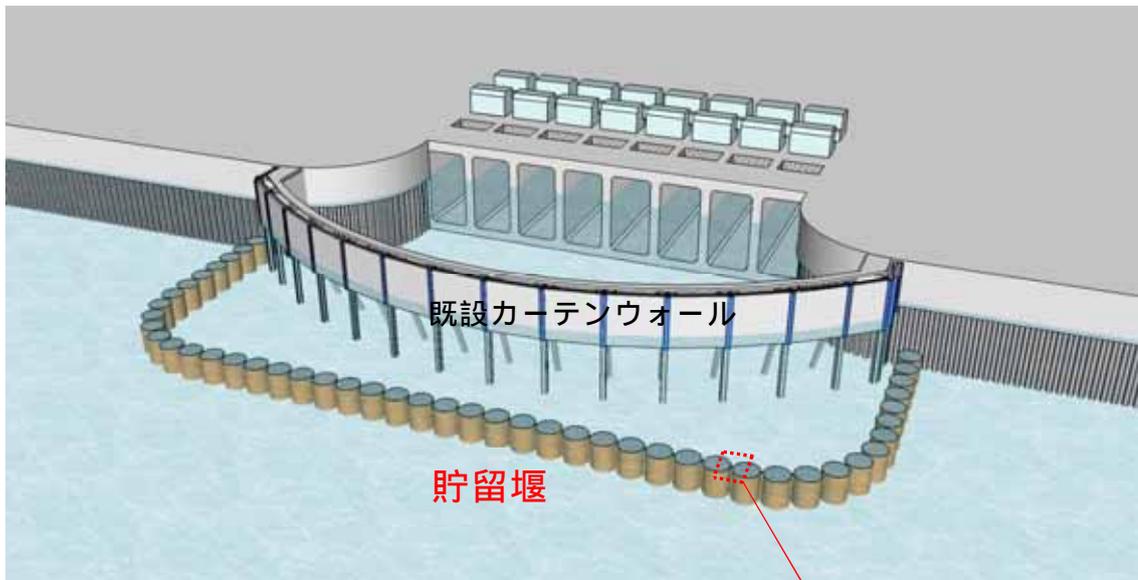


第3-4-7図 鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の防潮壁

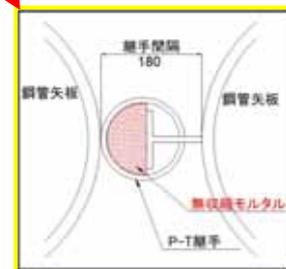
・貯留堰

第3-4-8図に貯留堰の概要図を示す。

貯留堰は鋼管矢板構造であり，線状構造物に分類される。各鋼管矢板は，継手部を介して隣接鋼管矢板により鋼管矢板の法線方向に拘束されており，法線方向の断面係数は，法線直角方向と比べて大きく，明確な強軸方向を示す。そのため，強軸方向の水平力により鋼管矢板に発生する曲げモーメントは比較的小さい。したがって，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響は小さい。



第3-4-8図 貯留堰

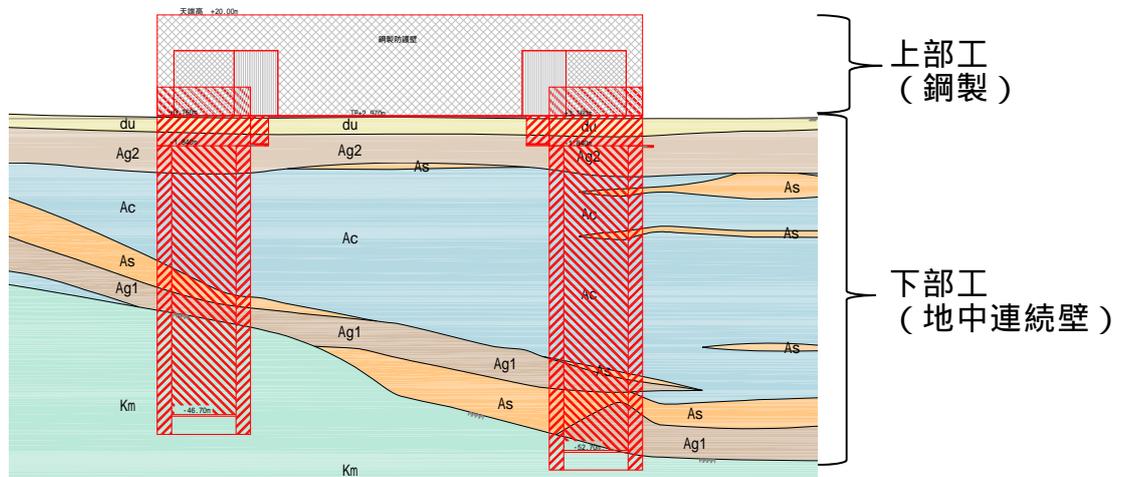


c) 地中連続壁基礎

・ 鋼製防護壁の下部工

第 3 - 4 - 9 図に鋼製防護壁の下部工の断面図を示す。

当該構造物の南北二つの下部工は、基礎深さ及び地盤条件が異なり 3 次元的に複雑な挙動をすることが考えられるため、水平 2 方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。

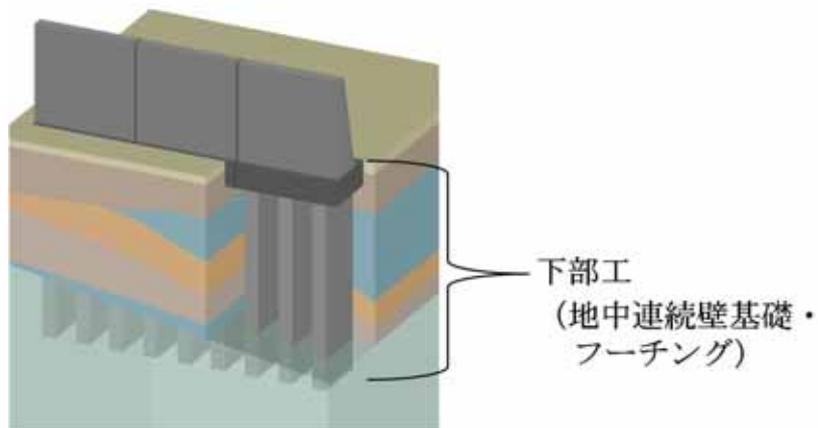


第 3 - 4 - 9 図 鋼製防護壁の下部工

・鉄筋コンクリート防潮壁の下部工

第3-4-10図に鉄筋コンクリート防潮壁の下部工の概要図を示す。

当該構造物の下部工は，上部工法線方向の水平地震力による動土圧及び動水圧と上部工からの荷重による発生応力，並びに上部工法線直角方向の水平地震力による動土圧及び動水圧による発生応力が足し合わされるため，水平2方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。

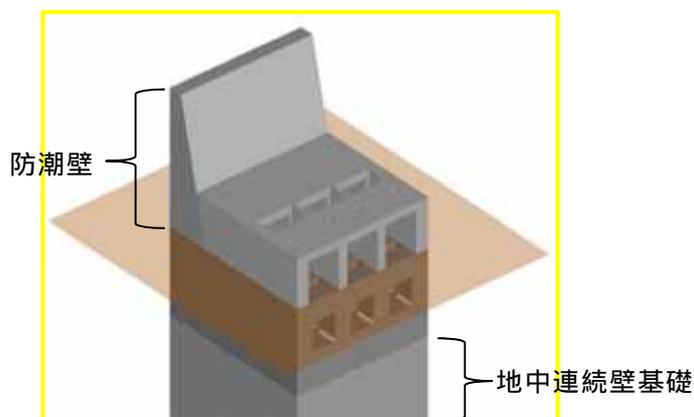


第3-4-10図 鉄筋コンクリート防潮壁の下部工

・鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の地中連続壁基礎

第3-4-11図に鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の地中連続壁基礎の概要図を示す。

当該構造物の地中連続壁基礎は、防潮壁法線方向の水平地震力による動土圧及び動水圧と防潮壁からの荷重による発生応力、並びに防潮壁法線直角方向の水平地震力による動土圧及び動水圧による発生応力が足し合わされるため、水平2方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。



第3-4-11図 鉄筋コンクリート防潮壁(放水路エリア)の地中連続壁基礎

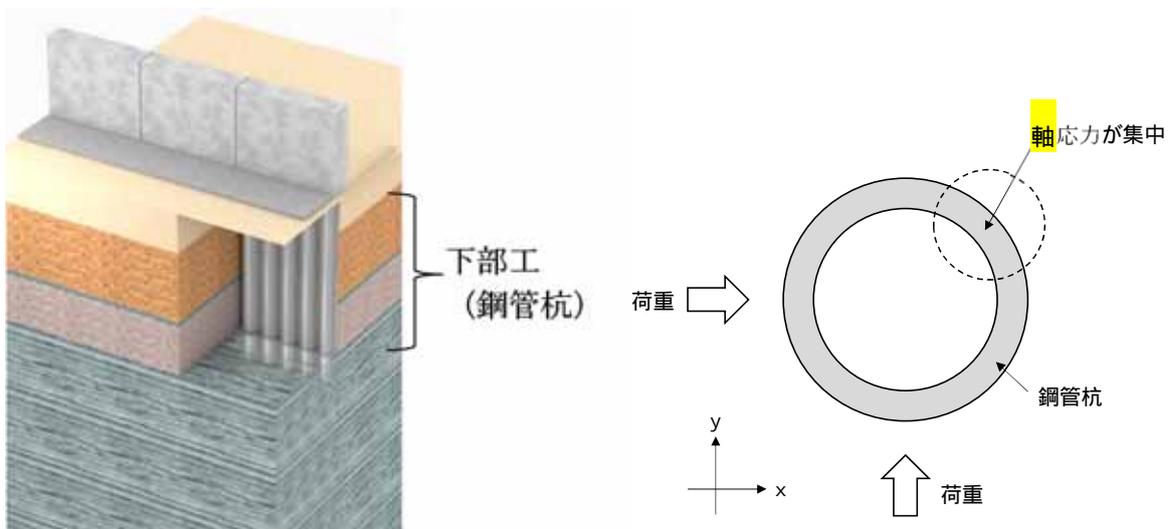
d) 鋼管杭基礎

- ・ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工

第 3 - 4 - 12 図に鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工の概要図を示す。

鋼管杭基礎は，第 3 - 4 - 13 図に示すように水平 2 方向入力による応力の集中が考えられる。

当該構造物の鋼管杭は，上部工法線方向の水平地震力による動土圧及び動水圧と上部工からの荷重による発生応力，並びに上部工法線直角方向の水平地震力による動土圧及び動水圧による発生応力が足し合わされるため，水平 2 方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。



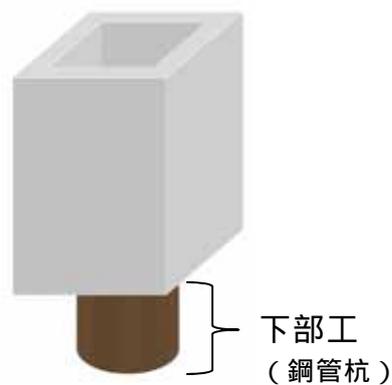
第 3 - 4 - 12 図 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工

第 3 - 4 - 13 図 鋼管杭基礎に係る応答特性

・ 出口側集水桝の下部工

第 3 - 4 - 14 図に出口側集水桝の下部工の概要図を示す。

当該構造物の下部工（鋼管杭）も，互いに直交する方向の各水平地震力による動土圧及び動水圧と，上部工からの荷重による発生応力が足し合わされるため，第 3 - 4 - 13 図に示すように水平 2 方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。



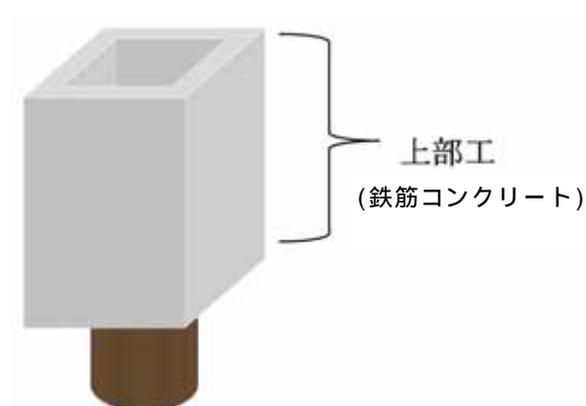
第 3 - 4 - 14 図 出口側集水桝の下部工

e) 箱型構造物

- ・ 出口側集水桝の上部工

第3-4-15図に出口側集水桝の上部工の概要図を示す。

箱型構造物については、従来設計手法における評価対象断面に対して平行に配置される構造部材を有し、⑦動土圧及び動水圧による荷重が作用するため、水平2方向及び鉛直地震力の組合せの影響が想定される。



第3-4-15図 出口側集水桝の上部工

以上のことから、荷重の組合せによる応答特性が想定される構造形式として、鋼殻構造物、地中連続壁基礎、鋼管杭基礎及び箱型構造物を抽出する。

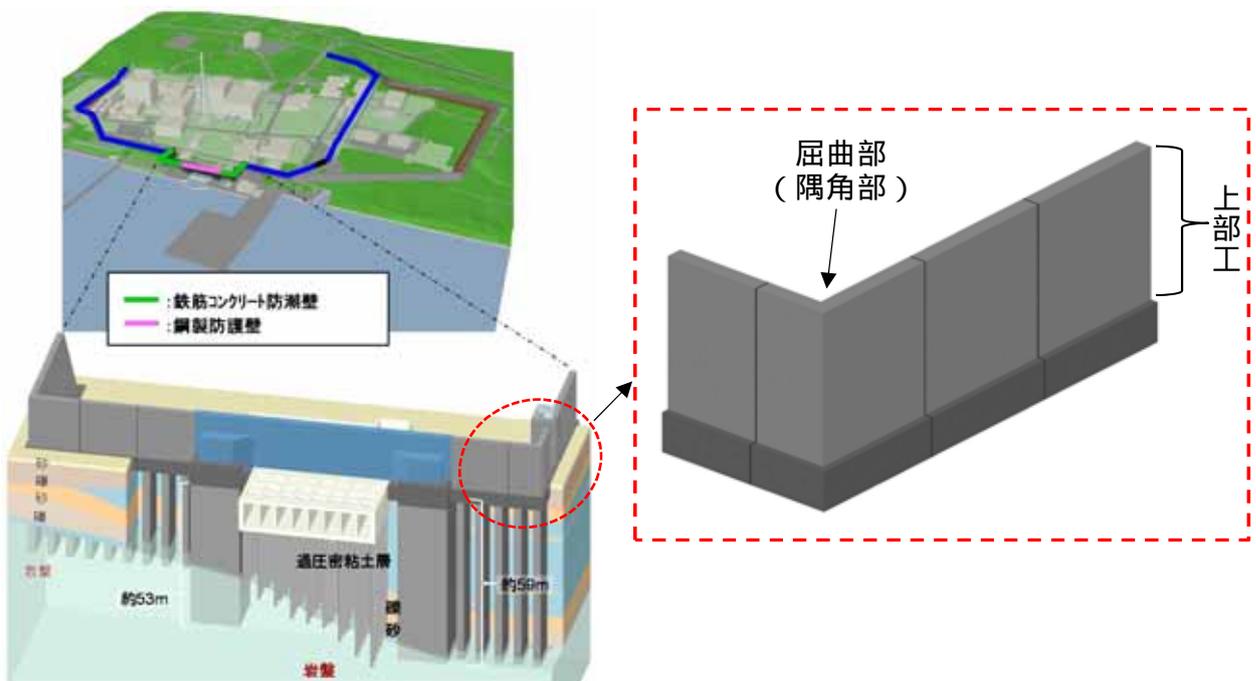
(4) 従来設計手法における評価対象断面以外の3次元的な応答特性が想定される箇所の抽出

(3)で抽出しなかった構造形式である線状構造物について、各構造物の構造等を考慮した上で、従来設計手法における評価対象断面以外の3次元的な応答特性が想定される箇所を抽出し、以下に示す。

a) 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工 【線状構造物】

第3-4-16図に鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の概要図を示す。

当該構造物は、構造物の配置上、屈曲部（隅角部）を有する。線状構造物の屈曲部（隅角部）では、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響として、弱軸方向のせん断変形や強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。



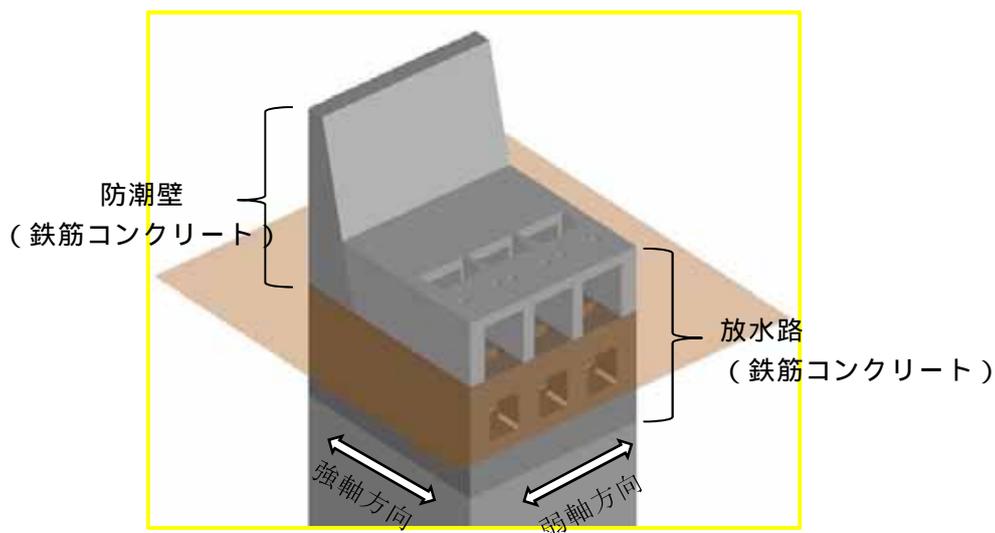
注) 仕様については今後の検討により変更の可能性がある。

第3-4-16図 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の屈曲部（隅角部）

b) 鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路 【線状構造物】

第3-4-17図に鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路の概要図を示す。

当該構造物は、防潮壁から強軸方向の荷重を受ける。よって、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響として、強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。

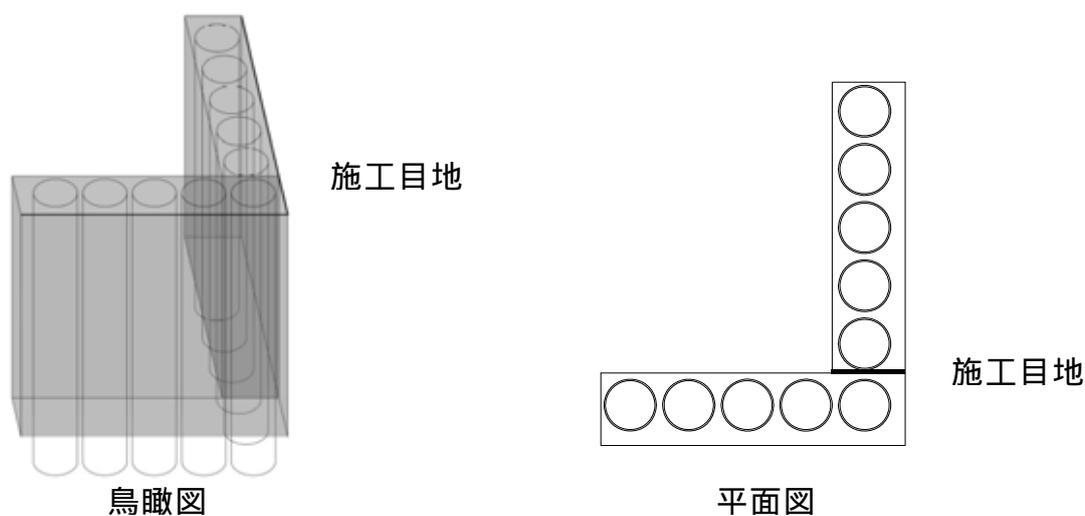


第3-4-17図 鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路

c) 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工 【線状構造物】

第3-4-18図に鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の概要図を示す。

当該構造物は、屈曲部（隅角部）に施工目地を設けるため、独立した線状構造物が接しているだけとなり、3次元的な応答特性は想定されない。よって、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響はない。



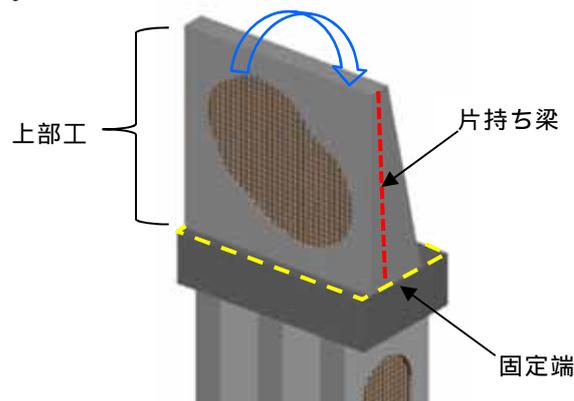
第3-4-18図 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工

以上のことから、鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の屈曲部（隅角部）及び鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路については、水平2方向地震力の組合せの影響を検討する。

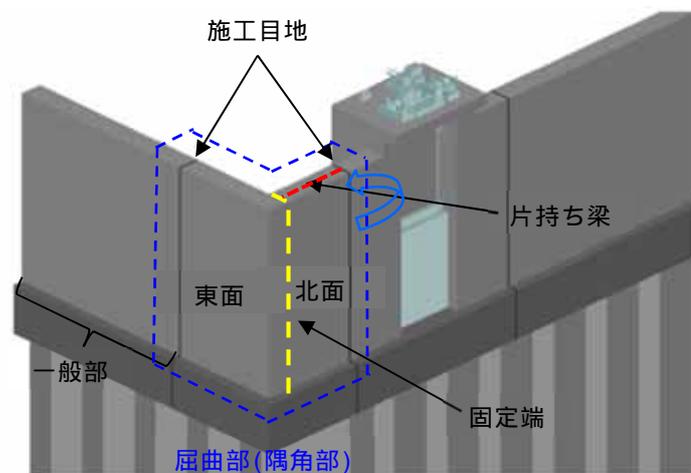
(5) 従来設計手法の妥当性の確認

i) 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工

鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の設計において、一般部は第3-4-19図に示すように、フーチング側を固定端とする鉛直方向の片持ち梁として設計する。屈曲部（隅角部）の東面鉛直壁は一般部と同様に設計するが、屈曲部（隅角部）の北(南)面は第3-4-20図に示すように、東面鉛直壁を固定端とする水平方向の片持ち梁として設計する。したがって、屈曲部（隅角部）は水平2方向の荷重を組み合わせた設計となるため、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価対象部位として抽出する。なお、片持ち梁モデルの妥当性については、静的三次元モデル解析を実施し確認する。



第3-4-19図 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工 [一般部]

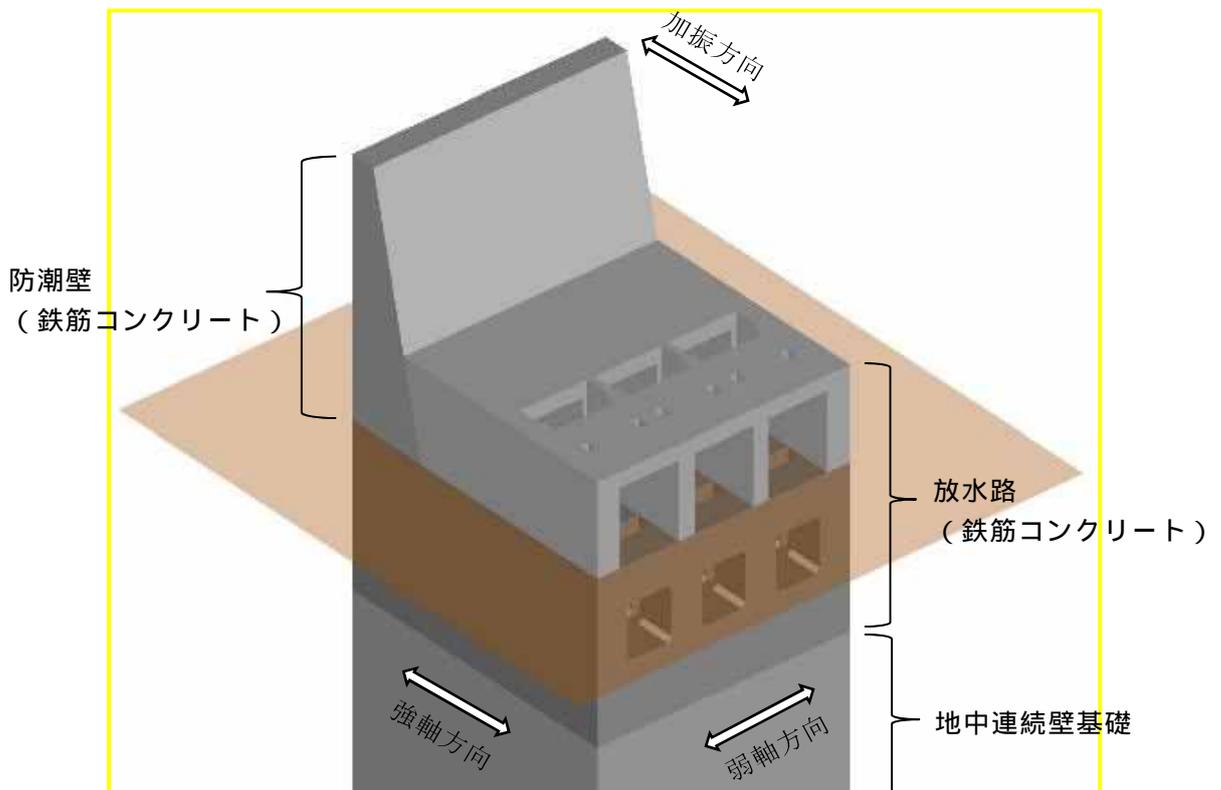


第3-4-20図 鉄筋コンクリート防潮壁の上部工 [屈曲部（隅角部）]

) 鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路

第3-4-21図に鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路の概要図を示す。

鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路の設計において、評価対象断面に直交する水平地震力については、カルバート構造物であるため、評価対象断面直交方向（強軸方向）には動土圧・動水圧はほとんど作用しない。しかしながら、放水路（カルバート）上に設置される防潮壁は、当該加振方向による水平地震力により慣性力を受けるため、下部の放水路（カルバート）に荷重が伝わり、強軸方向の曲げ変形への影響が想定される。したがって、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価対象部位として抽出する。



第3-4-21図 鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路

3.4.5 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出結果

3.4.4の検討を踏まえ、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を検討すべき構造物として、構造及び作用荷重の観点から、地中連続壁基礎、鋼管杭基礎、箱型構造物、線状構造物のうち鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の屈曲部（隅角部）及び鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路を抽出する。

なお、鋼殻構造物については、三次元解析を実施するため、ここでは対象外とする。

第3-4-5表に抽出した評価対象施設（構造物）を示す。

第3-4-5表 評価対象施設（構造物）の抽出結果

構造形式	施設（構造物）名称	フロー 中の対応番号
地中連続壁基礎	鋼製防護壁の下部工	
	鉄筋コンクリート防潮壁の下部工	
	鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の地中連続壁基礎	
鋼管杭基礎	鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部工	
	出口側集水柵の下部工	
箱型構造物	出口側集水柵の上部工	
線状構造物	鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の屈曲部(隅角部)	
	鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路	

注) 鋼殻構造物は三次元解析を実施するため対象外とする。

第3-4-3図に示す影響評価フロー

3.4.6 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価

(1) 地中連続壁基礎，鋼管杭基礎，線状構造物のうち鉄筋コンクリート防潮壁の上部工の屈曲部（隅角部）

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価については，従来の設計手法である水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる局部評価の荷重又は応力の評価結果等を用い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせる方法として，米国 Regulatory Guide 1.92(注)の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として，組合せ係数法(1.0:0.4:0.4)に基づいて地震力を設定する。

評価対象として抽出した耐震評価上の部位について，構造部材の発生応力等を適切に組み合わせることで，各部位の設計上の許容値に対する評価を実施し，各部位が有する耐震性への影響を評価する。

(注)Regulatory Guide(RG) 1.92 “ Combining modal responses and spatial components in seismic response analysis ”

2) 箱型構造物、鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路

箱型構造物及び鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア）の放水路に対する水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価については、箱型構造物及び放水路の弱軸方向（評価対象断面）と強軸方向（評価対象断面に直交する断面）におけるそれぞれの2次元の地震応答解析にて、互いに干渉し合う断面力や応力を選定し、弱軸方向加振における部材照査において、強軸方向加振の影響を考慮し評価する。

強軸方向加振については、構造物の隔壁・側壁が、強軸方向加振にて耐震壁としての役割を担うことから、当該構造部材を耐震壁と見なし、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 -（日本建築学会，1999）（以下「RC基準」という。）に準拠し耐震評価を実施する。

RC基準では、耐震壁に生じるせん断力（面内せん断）に対して、コンクリートのみで負担できるせん断耐力と、鉄筋のみで負担できるせん断耐力のいずれか大きい方を鉄筋コンクリートのせん断耐力として設定する。したがって、壁部材の生じるせん断力がコンクリートのみで負担できるせん断力以下であれば、鉄筋によるせん断負担は無く鉄筋には応力が発生しないものとして取り扱う。

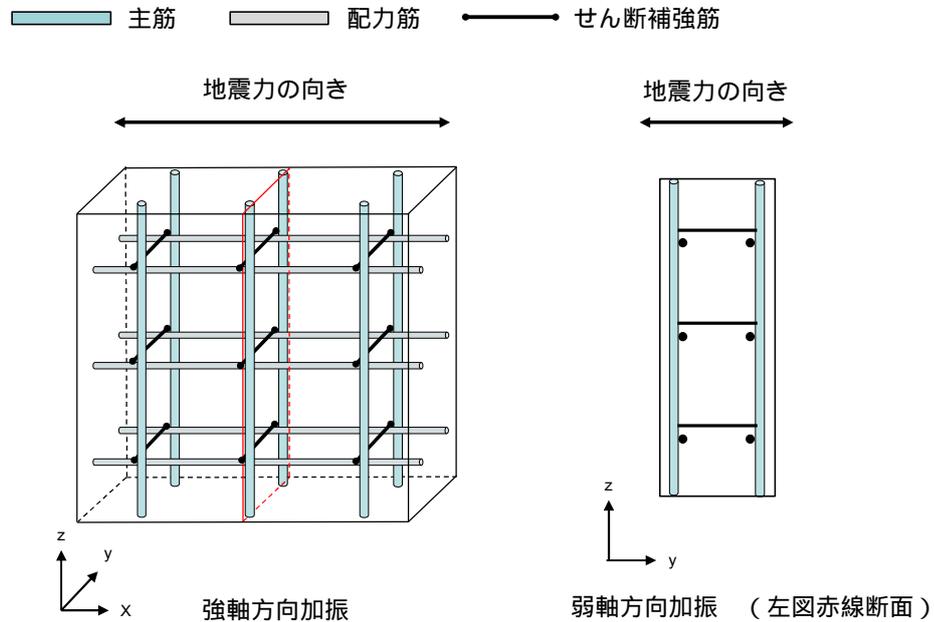
一方、強軸方向加振にて生じるせん断力を、構造物の隔壁・側壁のコンクリートのみで負担できず、鉄筋に負担させる場合、第3-4-22図に示すとおり、強軸方向加振にて発生する側壁・隔壁の主筋の発生応力が、弱軸方向における構造部材の照査に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価においては、強軸方向加振にて発生する応力を、弱軸方向における構造部材の照査に付加することで、その影響の有無を検討する。

なお、弱軸方向及び強軸方向の地震応答解析では、保守的に両方とも基

準地震動 S_s を用いる。

第 3 - 4 - 23 図に水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価フ
 ーを示す。

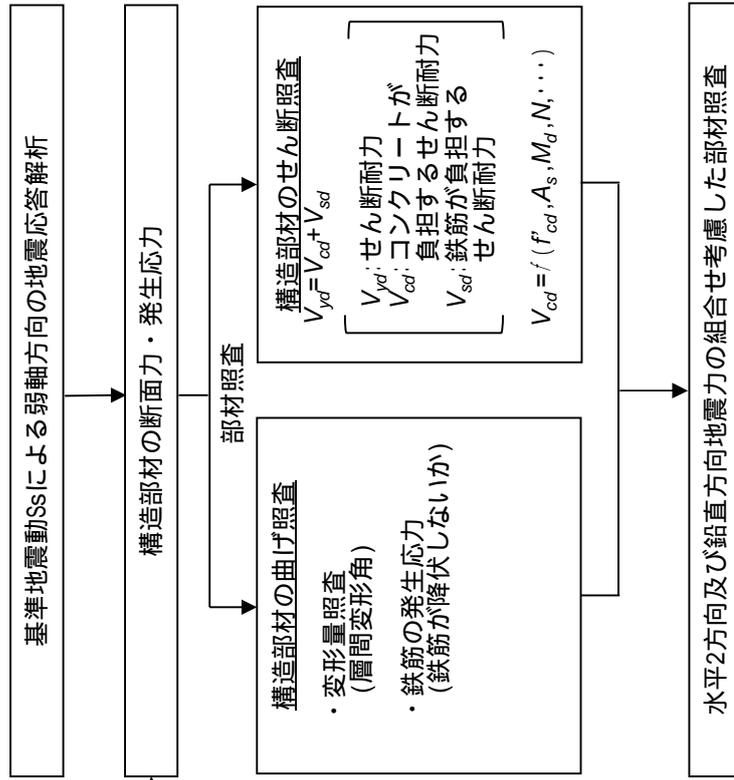


		強軸方向加振	弱軸方向加振	備考
断面力	My (y軸まわりの曲げモーメント)		×	
	Mx (x軸まわりの曲げモーメント)	×		
	Nz (鉛直方向軸力)			互いに干渉する可能性あり
	Nzx (zx平面内せん断)		×	
	Qz (z方向面外せん断)	×		
応力	主筋			互いに干渉する可能性あり
	配力筋		×	
	せん断補強筋	×		

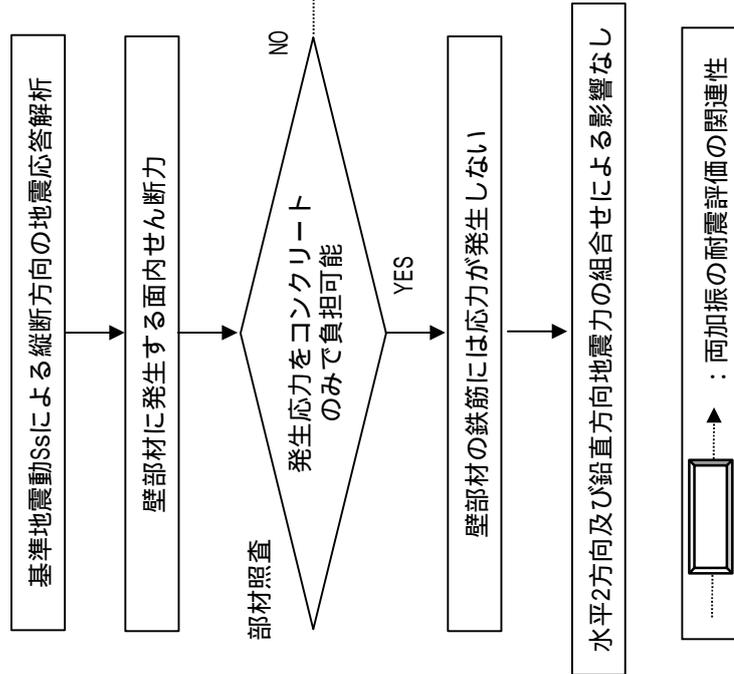
(: 発生する可能性あり, : 発生する可能性があるが極めて軽微, × : 発生しない)

第 3 - 4 - 22 図 縦断方向加振及び横断方向加振において発生する断面力・応力

弱軸方向での地震応答解析及び部材照査



強軸方向での地震応答解析及び部材照査



第 3 - 4 - 23 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価フロー

3.4.7 機器・配管系への影響評価

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が確認された構造物が、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持構造物である場合、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響を確認する。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響が確認された場合、機器・配管系の影響評価に反映する。

なお、津波防護施設の影響の観点から抽出されなかった部位であっても、地震応答解析結果から機器・配管系への影響の可能性が想定される部位については検討対象として抽出する。

表 1 構造強度評価

設備	部位	応力分類	-1 水平 2 方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平 2 方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平 1 方向の地震力しか負担しないもの B: 水平 2 方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平 2 方向の地震を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平 2 方向の地震力を考慮しているもの	-1 の影響有無の説明	-2 水平 2 方向とその直交方向が相関する振動モード (ねじれ振動等) が生じる観点 (3.2.4項(2)に対応)	左記の振動モードの影響がないこととの理由 新たな応力成分が発生しない理由 x: 発生しない : 発生する
炉心シユラウド	下部胴	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力 支圧応力	B C	鉛直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平 2 方向入力の影響はない。			
シユラウドサポ一ト	レグ	一次一般膜応力	B	評価部位は円周配置であるため、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力 軸圧縮応力	B B	同上			
炉心支持構造物	シリンドラプレート下部胴	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
上部格子板	グリッドプレート	一次一般膜応力	B	評価部位は格子構造であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
炉心支持板	補強ビーム支持板	一次一般膜応力	B	水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
燃料支持金具	中央燃料支持金具 周辺燃料支持金具	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
制御棒案内管	下部溶接部	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
原子炉圧力容器	円筒胴下部胴 下鏡と胴板の接合部 下鏡とスカートとの接合部	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平 2 方向の地震力を組み合わせた場合でも水平 2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料 3】	同上	x	-
		一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	同上			
		一次 + 二次応力	B	同上			
		一次 + 二次 + ビーク応力	B	同上			

1 本表は、詳細設計時等の進捗に応じて見直しを行う。

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.41項(1)に対応) ：影響あり ：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造が異なるもの C：水平2方向の地震力を受けた場合でも1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその他の直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.42項(2)に対応)			
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x：発生しない ：発生する	左記の振動モードの影響がないこと、理由 新たな応力成分が発生しないこと、理由		
原子炉圧力容器	制御機駆動機構ハウジング貫通部	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上					
		一次+二次応力	B	同上		x			
		一次+二次+ピーク応力	B	同上					
		強屈(軸圧縮)	B	同上					
		一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					
	中性子計測ハウジング貫通部	一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上			x		
		一次+二次応力	B	同上					
		一次+二次+ピーク応力	B	同上					
		一次一般膜応力	-	評価においては3次元的に配置されている接続配管の応答を使用しており、接続配管において地震入力方向に対する直角方向の応答が生じるため、水平2方向入力の影響がある。				3次元はりモデルの応答解析結果(配管反力)を用い、耐震評価を実施している。	
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	同上					
		一次+二次応力	-	同上					
原子炉圧力容器 ノズル	各部位	一次+二次+ピーク応力	-	同上					
		一次一般膜応力	-	同上					
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	同上					
		一次+二次応力	-	同上					
		一次+二次+ピーク応力	-	同上					
		一次一般膜応力	C	水平方向の地震荷重を分散して負担する多角形配置の構造となっているため、水平2方向の地震荷重が同時に作用した場合においても方向毎にその地震荷重は分担される。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料1】			x		
ブラケット類	原子炉圧力容器スタビライザブラケット	一次一般膜応力	C	同上					
		一次膜応力+一次曲げ応力	C	同上					
	蒸気乾燥器支持ブラケット	一次一般膜応力	D	水平2方向入力時の地震力を4つのブラケットのうち2つで分担した荷重を方向毎に考慮した評価を行っている。【補足説明資料2】				x	
		一次膜応力+一次曲げ応力	D	同上					
		一次一般膜応力	-	評価においては3次元的に配置されている炉内配管の応答を使用しており、炉内配管において地震入力方向に対する直交方向の応答が生じるため、水平2方向入力の影響がある。					
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	同上					

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.41項(1)に対応) 無 : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A : 水平2方向の地震力を受けただけでも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B : 水平2方向の地震力を受けた場合、構造が異なるもの C : 水平2方向の地震力を受けた場合でも1方向の地震による応力と同等といえるもの D : 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.41項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないことと理由 新たな応力成分が発生しないことと理由
原子炉圧力容器	ブラケット類	給水スパーチャブラケット	-	評価においては3次元的に配置されている炉内配管の応差を使用しており、炉内配管において地震入力方向に対する直交方向の応差が生じるため、水平2方向入力の影響がある。	x	-	
		一次一般膜応力	-	同上			
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	同上			
原子炉圧力容器支持構造造物	サポート	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点位置が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上	x	-	
		一次+二次応力	B	同上			
		一次+二次+ピーク応力	B	同上			
		座屈(軸圧縮)	B	同上			
		引張応力	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点が変わる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力の時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。	x	-	
原子炉圧力容器付属構造造物	基礎ボルト	組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		引張応力	C	水平方向の地震荷重を分散して負担する多角形配置の構造となっているため、水平2方向の地震荷重が同時に作用した場合においても方向毎にその地震荷重は分担される。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料1】			
		せん断応力	C	同上	x	-	
		圧縮応力	C	同上			
		曲げ応力	C	同上			
		組合せ応力	C	同上			
		せん断応力	B	水平方向地震が作用する際に、加振軸上に最大応力が発生する。水平2方向の地震力が同時に作用した場合においても、それぞれの方向の加振軸上に最大応力が発生する。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。			
		圧縮応力	B	同上	x	-	
曲げ応力	B	同上					

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ：影響あり ：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	左記の振動モードの影響がないこと 理由 新たな応力成分が発生しないこと 理由	
							振動モード及び新たな応力成分の有無 ：発生しない ：発生する
蒸気乾燥器ユニット	ユニット	一次一般膜応力	C	従来評価で評価が厳しくなる方向に地震荷重を与えているため、水平2方向入力を考慮しても水平1方向の地震荷重と同等となる。したがって水平2方向の影響は軽微である。	x	-	
	前震用ブロック	一次膜応力+一次曲げ応力	C	同上			
原子炉圧力容器内部構造物	各部位	一次一般膜応力	D	地震の水平力は4箇所の耐震用ブロックのうち相対する2箇所で見られるものとして評価しているが、水平2方向入力では4箇所の耐震用ブロックに荷重が分担されるため、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-	
		一次一般膜応力 一次膜応力+一次曲げ応力	B B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】	x	-	
スパーシャ炉内配管	各部位	一次一般膜応力	-	3次元的に配置されているため、水平それぞれ方向の地震力に対し、各方向で応力が発生する。したがって、水平2方向入力の影響がある。		従来より、3次元はりモデルの応答解析結果を用いて、耐震評価を実施しており、ねじれる状態について耐震評価に用いている同種の荷重として算出される。	
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	同上			
使用済燃料貯蔵ラック(共通ベース含む)	ラック部材	引張応力	-	水平それぞれ方向における評価において、最大応力発生箇所は異なるものの、円形状の断面でないため、発生応力は積算される。したがって、水平2方向入力の影響がある。		3次元FEMモデルを作成し、耐震評価を実施している。	
		せん断応力 組合せ応力	- -	同上 同上			
基礎ボルト ラック取付ボルト	基礎ボルト ラック取付ボルト	引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		せん断応力 組合せ応力	C C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料6】	x	-	
四脚たて置き円筒形容器	脚板	一次一般膜応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	-	評価点が脚付根部等の局所であり、1方向の地震においても軸直角方向の評価点へも影響が生じることから、2方向入力の影響がある。			
		一次膜応力+一次曲げ応力 一次+二次応力	- -	同上 同上		x	-
		組合せ応力	-	評価点が脚付根部等の局所であり、1方向の地震においても軸直角方向の評価点へも影響が生じることから、2方向入力の影響がある。			

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ：影響あり ：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせたも1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	-1の影響有無の説明	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x：発生しない ：発生する	左記の振動モードの影響がないことと理由 新たな応力成分が発生しないことと理由
四脚たて置き円筒形容器	基礎ボルト	引張応力	-	1方向の地震においても軸直角方向の評価点へも影響が生じることから、2方向入力の影響がある。	x		
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		組合せ応力		1方向の地震においても軸直角方向の評価点へも影響が生じることから、2方向入力の影響がある。			
		一次一般膜応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の関係が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。			
		一次膜応力+一次曲げ応力	A	同上			
横置円筒形容器	脚	一次一般膜応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の関係が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。	x		
		一次膜応力+一次曲げ応力	A	同上			
		一次+二次応力	A	同上			
		組合せ応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の関係が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。			
		引張応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の関係が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。			
立形ポンプ	基礎ボルト 取付ボルト	せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点位置が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		引張応力	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。			
ECGSトレーナ	各部位(ボルト以外) ボルト	一次膜応力+一次曲げ応力	D	水平2方向の組合せを考慮した評価を実施している。	x		
		引張応力	D	同上			
		引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
横形ポンプ ポンプ駆動用タービン 海水ストレーナ 空調ファン 空調ユニット 空気圧縮機	基礎ボルト 取付ボルト	せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】	x		
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		引張応力	C	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) 無 : 影響あり 有 : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない ○ : 発生する	左記の振動モードの影響がないことと理由 新たな応力成分が発生しないことと理由
水圧制御ユニット	フレーム	引張応力	-	非対象構造であるため3次元モデルを用いた解析を行っており、水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力方向の影響がある。			
		せん断応力	-	同上			
		圧縮応力	-	同上			
		曲げ応力	-	同上			
		組合せ応力	-	同上			
平底たて置円筒容器	取付ボルト	引張応力	-	非対象構造であるため3次元モデルを用いた解析を行っており、水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力方向の影響がある。			
		せん断応力	-	同上			
		組合せ応力	-	同上			
		一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点位置が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		一次+二次応力	B	同上		x	
核計装設備	各部位	引張応力	-	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。		-	
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点位置が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上		x	
伝送器(壁掛)	取付ボルト	引張応力	-	水平2方向入力の影響がある。			
		せん断応力	A	水平1方向及び鉛直方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。		x	
		組合せ応力	-	水平2方向入力の影響がある。			
伝送器(円形壁掛)	取付ボルト	引張応力	A	水平1方向及び鉛直方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。		x	

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力が負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震力を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応) 振動モード及びび新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないこととの理由 新たな応力成分が発生しないこととの理由
伝送器(円形吊下)	取付ボルト	引張応力	C	縦直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平2方向の影響はない。	x	-	
		引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
制御盤	取付ボルト	せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料6】	x	-	
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びびせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。	x	-	
		圧縮ひずみ	-	水平2方向入力の影響がある。			
		引張ひずみ	-	同上			
原子炉格納容器	サブレーション チエンバ底部ライ ナ	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点 が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】	x	-	
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上			
		一次+二次応力	B	同上			
	ドライウエルトッ プヘッド	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点 が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2 方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】	x	-	
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上			
		一次+二次応力	B	同上			
		引張応力	C	多角形配置により水平地震力は分担されるため、水平2方向入力の影響は軽 微である。			
	ドライウエル円錐 部及びサブレッ ションチエンバ円 筒部シエル部及び サンドクッション 部	各部位	せん断応力	C	同上		
		各部位	圧縮応力	C	同上		
		各部位	曲げ応力	C	同上		
ドライウエルビー ムシート	組合せ応力	C	同上		x	-	
	一次膜応力+一次曲げ応力	C	多角形配置により水平地震力は分担されるため、水平2方向入力の影響は軽 微である。				
	ビームシート	一次+二次応力	C	同上			

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力が負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震力を組み合わせても1方向の地震力による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とそれと直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)		
						振動モード及び応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	上記の振動モードの影響がないこととの理由 新たな応力成分が発生しないこととの理由	
原子炉格納容器	ドライウエル上部シアラグ及びヒスタ ドライウエル下部シアラグ及びヒスタ ヒライサ	引張応力	C	水平方向の地震荷重を分散して負担する多角形配置の構造となっているため、水平2方向の地震荷重が同時に作用した場合においても方向毎にその地震荷重は分担される。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。 【補足説明資料1】	-1の影響有無の説明	x		
		せん断応力	C	同上				
		曲げ応力	C	同上				
		組合せ応力	C	同上				
	ドライウエルスプレッド	一次膜応力+一次曲げ応力	C	水平方向の地震荷重を分散して負担する多角形配置の構造となっているため、水平2方向の地震荷重が同時に作用した場合においても方向毎にその地震荷重は分担される。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。 【補足説明資料1】	-1の影響有無の説明	x		
		一次+二次応力	C	同上				
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	3次元的に配置されているため、水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力の影響がある。				
		一次+二次応力	-	同上				
	原子炉格納容器胴	原子炉格納容器胴 スリッパ	一次膜応力+一次曲げ応力	-	評価部位は水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力の影響がある。	-1の影響有無の説明	x	
			一次+二次応力	-	同上			
引張応力			B	評価部位は円周上に配置されていることから、水平地震の方向毎に最大応力点が異なる。従って、水平2方向入力の影響は軽微である。				
曲げ応力			B	同上				
原子炉格納容器配管貫通部	原子炉格納容器配管貫通部	圧縮応力	B	同上	-1の影響有無の説明	x		
		組合せ応力	B	同上				
		せん断応力	B	評価部位は円周上に配置されていることから、水平地震の方向毎に最大応力点が異なる。従って、水平2方向入力の影響は軽微である。				
		一次膜応力+一次曲げ応力	-	評価部位は水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力の影響がある。				
原子炉格納容器配管貫通部	原子炉格納容器配管貫通部	一次+二次応力	-	同上	-1の影響有無の説明		3次元はりモデルの応答解析結果(配管反力)を用い、耐震評価を実施している。	
		一次+二次応力	-	同上				
原子炉格納容器配管貫通部	スリッパ付根部	一次膜応力+一次曲げ応力	D	水平2方向を考慮した評価した評価を実施している。	-1の影響有無の説明	x	-	

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震力を組み合わせたも1方向の地震力による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応) 振動モード及びび新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないこと理由 新たな応力成分が発生しないこと理由
ダイヤフラムフロア	補強板付根部	一次 + 二次応力	D	同上	-1の影響有無の説明		
	構造用スラブ	引張応力度	C	鉛直方向荷重が支配的であるため、水平2方向入力の影響は軽微である。 【補足説明資料4】			
		せん断応力度	C	同上			
		圧縮応力度	C	同上			
		曲げ応力	C	鉛直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平2方向の影響はない。【補足説明資料4】	x		
	柱	せん断応力	C	同上			
		圧縮応力	C	同上			
	ベント管	シャークコネクタ	せん断応力	C	多角形配置により水平地震力は分担されるため、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料4】		
		上部ブレイジング部	一次膜応力 + 一次曲げ応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点がある。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】	x	
			一次 + 二次応力	B	同上		
格納容器スプレイヘッド	スプレイ管部 ティー部 案内管部	一次膜応力 + 一次曲げ応力	-	評価部位は、非対象構造であるため水平地震力に対する発生応力が入力方向毎に異なる。したがって、水平2方向入力の影響がある。		3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。	
		一次 + 二次応力	-	同上			
可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロウ	ブレース	圧縮応力	A	ブレースはブロウの重心とサポートプレート設置位置のずれによる軸方向転倒防止のため設置している。そのためブレースが受け持つ荷重は現在評価対象としている軸方向の転倒モーメントのみと考えられ、軸直方向の水平地震荷重はベース溶接部のせん断で受け持つと考えられる。したがって、水平2方向入力の影響は受けない。	x		
		引張応力	A	溶接部の配置は矩形であり、水平2方向の入力で対角方向に転倒することはなく、2方向入力の影響は軽微である。			
	基礎ボルト取付ボルト	せん断応力	-	ベース溶接部で水平方向のそれぞれの水平荷重を負担する。したがって、水平2方向入力の影響がある。	x		
		引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料6】	x		
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) 無 : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A : 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B : 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C : 水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D : 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応) 振動モード及びび新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないこととの理由 新たな応力成分が発生しないこととの理由
非常用ディーゼル発電機	基礎ボルト 取付ボルト	引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】	-1の影響有無の説明	x	-
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料6】			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		一次+二次応力	B	同上			
		組合せ応力	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
スカート支持たて置円筒形容器	スカート	座屈	B	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大点は地震方向で異なるため影響は軽微である。	-1の影響有無の説明	x	-
		引張応力	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の割合が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。			
		一次+二次応力	A	同上			
プレート式熱交換器	脚	組合せ応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の割合が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。	-1の影響有無の説明	x	-
		引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料6】			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
		一次一般膜応力	A	水平2方向が同時に作用した場合においても、強軸と弱軸の割合が明確であり、斜め方向に変形するのではなく、支持構造物の強軸側と弱軸側に変形するため、最大応力発生部位は変わらず影響は軽微である。			
		一次+二次応力	A	同上			

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震力を受けた場合でも1方向の地震力による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及びび新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないことと理由 新たな応力成分が発生しないことと理由
ラグ支持たて置き円筒形容器	胴板	一次一般膜応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点評価が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		一次膜応力+一次曲げ応力	B	同上			
		一次+二次応力	B	同上			
	ラグ	組合せ応力	B	水平2方向が同時に作用した場合においても、応力評価点が区別されるため、2方向入力の影響は軽微である。	x	-	
		引張応力	B	ラグ構造は径方向にスライド可能であり、水平2方向が同時に作用した場合においても、応力評価点が区別されるため、2方向入力の影響は軽微である。			
		せん断応力	B	ラグ構造は径方向にスライド可能であり、荷重を分担する部材が地震方向により異なるため、荷重の重ね合わせが発生せず、影響は軽微である。			
		組合せ応力	B	上記引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組み合わせ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
	基礎ボルト	引張応力	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向の入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】	x	-	
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。【補足説明資料6】			
		組合せ応力	C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組み合わせ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
一次応力		-	水平2方向入力の影響がある。		3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。		
一次+二次応力		-	同上				
各応力分類		-	水平2方向入力の影響がある。	x			
配管本体、サポート(多質点梁モデル解析)	各部位	引張応力	A	壁面に据付部材を介して支持される。構造上、壁に垂直な方向の地震入力では据付ボルトの応力成分は引張応力のみであるのに対し、壁面と平行な方向はせん断応力及び曲げモーメントによる引張応力が発生する。壁面と平行な応力が支配的であるため、水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	A	同上			
		組合せ応力	A	同上			
	ボルト	引張応力	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。			
		せん断応力	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。	x	-	
		組合せ応力	C				
水位計	取付ボルト	引張応力					
		せん断応力					

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ：影響あり ：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震力を組み合わせても1方向の地震力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×：発生しない ：発生する	左記の振動モードの影響がないこととの理由 新たな応力成分が発生しないこととの理由
監視カメラ	取付ボルト	組合せ応力		C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。		
		引張応力		B	ボルトは円周状に配置され、水平地震の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。		
		せん断応力		C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。	×	-
		組合せ応力		C	上記の引張応力及びせん断応力は、水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。		
		組合せ応力		-	水平2方向入力の影響がある。		
貫通部止水処置	シール材	シールに生じる変位		C	対象となる貫通部は建屋軸に沿った配置となっていることから、シール材に加わるせん断方向及び圧縮方向の変位は、水平1方向の地震力の応答が支配的であり、他の水平方向の地震力による応答は小さいため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
		曲げ応力		C	鉛直方向加速度のみを用いた評価であるため、水平2方向を考慮しても影響はない。		
		せん断応力		C	同上		
		組合せ応力		C	同上	×	-
		せん断応力		C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震における最大応力の非同時性を考慮することにより、影響は軽微である。		
逆流防止用逆止弁	各部位	各応力分類		-	水平2方向入力の影響がある。	×	-
		せん断応力度		C	鉛直方向荷重が支配的であるため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
原子炉ウエル逆へいブラグ	本体	引張応力度		B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】		
		圧縮応力度		B	同上		
		せん断応力度		B	同上		
		引張応力度		B	円周配置であり、水平地震の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって水平2方向の影響は軽微である。	×	-
		せん断応力度		B	同上		
原子炉本体の基礎	下層円筒基部	曲げ応力度		B	同上		

設備	部位	応力分類	-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) 無 : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A : 水平2方向の地震力を受けただけでも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B : 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C : 水平2方向の地震力を受けた場合でも1方向の地震による応力と同等といえるもの D : 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1の影響有無の説明	-2 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x : 発生しない : 発生する	左記の振動モードの影響がないことと理由 新たな応力成分が発生しないことと理由
燃料取扱機	燃料取扱機 レーム フリッジ脱線防止ラゲ(本体) トロリ脱線防止ラゲ(本体) 走行レール 横行レール	引張応力	A	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。【補足説明資料5】	-1の影響有無の説明	x	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		せん断応力	A	同上			
		組合せ応力	A	同上			
		せん断応力	A	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料5】			
建屋クレーン	吊具 クレーン本体ガード 落下防止金具 トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ	吊具荷重	C	鉛直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平2方向方向入力の影響はない。	-1の影響有無の説明	x	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		せん断応力	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		曲げ応力	D	同上			
		浮上り量	D	同上			
		圧縮応力	A	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向の影響は軽微である。			
		圧縮応力	A	同上			
		曲げ応力	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		組合せ応力	D	同上			
		浮上り量	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		吊具荷重	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		せん断応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		圧縮応力	C	鉛直方向荷重のみ作用し、水平方向荷重が作用しない。したがって、水平2方向方向入力の影響は軽微である。			
曲げ応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					
組合せ応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					
原子炉遮へい壁	一般胴部 開口裏中部	せん断応力 圧縮応力 曲げ応力 組合せ応力	B C B B	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料5】	-1の影響有無の説明	x	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
燃料取扱機	レーム フリッジ脱線防止ラゲ(本体) トロリ脱線防止ラゲ(本体) 走行レール 横行レール	引張応力	A	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。【補足説明資料5】			
		せん断応力	A	同上			
		組合せ応力	A	同上			
建屋クレーン	吊具 クレーン本体ガード 落下防止金具 トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ トロリ	吊具荷重	C	鉛直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平2方向方向入力の影響はない。	-1の影響有無の説明	x	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		せん断応力	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		曲げ応力	D	同上			
		浮上り量	D	同上			
		圧縮応力	A	すべり方向とすべり直交方向では、それぞれの水平方向地震を受けた場合の影響が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向の影響は軽微である。			
		圧縮応力	A	同上			
		曲げ応力	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		組合せ応力	D	同上			
		浮上り量	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		吊具荷重	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
		せん断応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】			
		圧縮応力	C	鉛直方向荷重のみ作用し、水平方向荷重が作用しない。したがって、水平2方向方向入力の影響は軽微である。			
曲げ応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					
組合せ応力	B	評価部位は円形の断面であることから、水平地震の方向毎に最大応力点異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向の影響は軽微である。【補足説明資料3】					

表2 動的 / 電気的機能維持評価

機種	-1. 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) : 影響あり : 影響軽微	影響軽微とした分類 A: 水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B: 水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C: 水平2方向の地震力を組み合わせても1方向の地震力による応力と同等といえるもの D: 従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	-1.の影響有無の説明	-2. 水平2方向とその直交方向が相関する振動モード (ねじれ振動等)が生じる観点 (3.2.4項(2)に対応)	
				振動モード及び新たな応力成分の発生有無 x: 発生しない : 発生する	上記の振動モードのないこと、理由 新たな応力成分が発生しないこと、理由
立形ポンプ	-	-	軸受は円周に均等に地震力を受け持つため、水平2方向入力の影響を受ける。	x	-
構形ポンプ	A	A	現行の機能維持確認加速度における詳細評価で、最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-
ポンプ駆動用タービン	B	B	現行の機能維持確認加速度における詳細評価で、最弱部である弁類(主蒸気止め弁ヨーク部(立置き))に対して、水平2方向入力による最大応力の発生箇所が異なるため影響は軽微である。	x	-
立形機器用電動機	D	D	最弱部である軸系に対して、現行の機能維持確認加速度における詳細評価において十分な裕度が確認されており、水平2方向入力による応答増加の影響は軽微である。	x	-
構形機器用電動機	D	D	最弱部であるフレームに対して、現行の機能維持確認加速度における詳細評価において十分な裕度が確認されており、水平2方向入力による応答増加の影響は軽微である。	x	-
空調ファン	A	A	現行の機能維持確認加速度における詳細評価で、最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-
非常用ディーゼル発電機 (機本体)	A	A	現行の機能維持確認加速度における詳細評価で、最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-
非常用ディーゼル発電機 (カハナ)	-	-	カハナについては水平2方向合成による応答増加の影響がある。ただし、JEA601に記載の機能維持確認加速度は1.8gであるが、旧JNES試験より4gまで機能維持を確認しているため、2方向合成加速度が4g未満であれば問題ない。	x	-
弁	-	-	弁については水平2方向合成による応答増加の影響があるが、2方向合成加速度が試験にて確認した機能維持確認加速度未満であれば問題ない。	x	-
制御棒挿入性	-	-	水平2方向入力の影響がある。	x	-
電気盤	A	A	電気盤、制御盤等に取り付けられているリレー、遮断器等の電気品は、基本的に1次元的な接点のON-OFFに関わる比較的単純な構造をしている。加えて、基本的には全て梁、扇等の剛体部材に固定されているため、器具の非線形応答はないと考えられる。したがって、電気品は水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-
伝送器・指示計	A	A	伝送器・指示計の掃引試験結果において、X、Y各成分に共振点はなく、出力変動を生じないことを確認していることから、X、Y2方向成分にも共振点はないものと考えられる。よって、水平2方向入力に対しても応答増加が生じないものと考えられることから、水平2方向入力の影響は軽微である。	x	-
常設代替高圧電源装置	A	A	水平2方向の入力に対して対角方向に共振することはないため、水平2方向の入力の影響は軽微である。	x	-
水位計	加振試験時の掃引試験により水平2方向に対する影響有無を確認し、方針を決定する。				
監視カメラ	加振試験時の掃引試験により水平2方向に対する影響有無を確認し、方針を決定する。				
通信連結設備 (アンテナ類)	-	-	水平2方向入力の影響がある。	x	-

: JEA601で定められた評価部位の裕度評価

別紙 1 補足説明資料

目 次

1. 水平2方向同時加振の影響評価について（原子炉圧力容器スタビライザ及び格納容器スタビライザ）
2. 水平2方向同時加振の影響評価について（蒸気乾燥器支持ブラケット）
3. 水平2方向同時加振の影響評価について（円筒形容器）
4. 水平2方向同時加振の影響評価について（ダイヤフラムフロア）
5. 水平2方向同時加振の影響評価について（燃料取替機）
6. 水平2方向同時加振の影響評価について（矩形配置されたボルト）
7. 水平2方向同時加振の影響評価について（電気盤）

1. 水平2方向同時加振の影響評価について（原子炉压力容器スタビライザ及び格納容器スタビライザ）

1.1 はじめに

本項は、原子炉压力容器スタビライザ（以下「RPVスタビライザ」という。）及び格納容器スタビライザ（以下「PCVスタビライザ」という。）に対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

RPVスタビライザとPCVスタビライザは、地震時の水平方向荷重を周方向45°間隔で8体の構造部材にて支持する同様の設計であるため、以下水平2方向同時加振の影響については、RPVスタビライザを代表に記載する。

1.2 現行評価の手法

RPVスタビライザは、周方向45°間隔で8体配置されており、第1-1図に地震荷重と各RPVスタビライザが分担する荷重の関係を示す。

水平方向の地震荷重に関して現行評価では、RPVスタビライザ6体に各水平方向地震力（X方向，Y方向）の最大地震力が負荷されるものとしている。

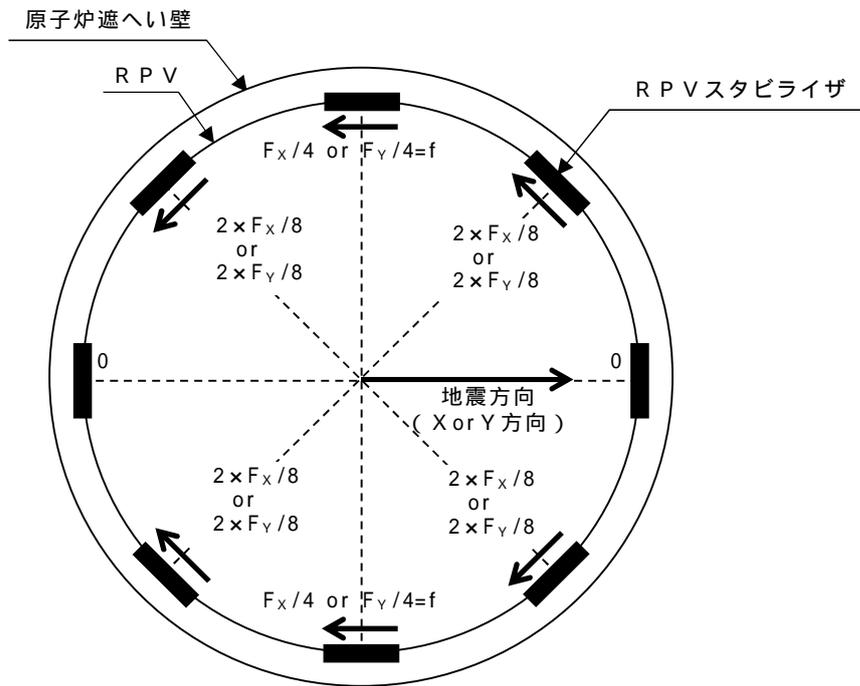
$$f = \text{MAX}\left(\frac{F_X}{4}, \frac{F_Y}{4}\right)$$

ここで、

f : RPVスタビライザ1個が受けもつ最大地震荷重

F_X : X方向地震によりスタビライザ全体に発生する荷重

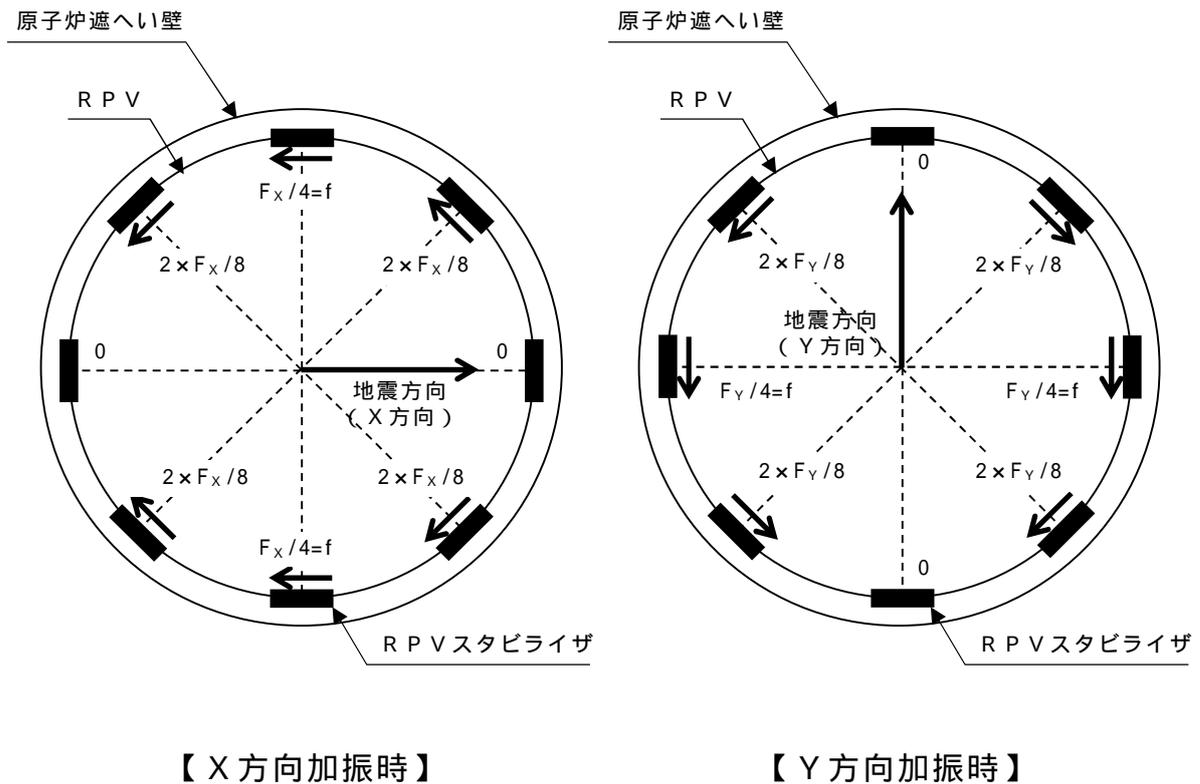
F_Y : Y方向地震によりスタビライザ全体に発生する荷重



第 1 - 1 図 原子炉圧力容器スタビライザの水平地震荷重の分担（水平 1 方向）

1.3 水平2方向同時加振の影響

RPVスタビライザは、水平2方向の地震力を受けた場合における荷重分担について、第1 - 2図及び第1 - 1表に示す。第1 - 2図及び第1 - 1表に示すとおり、方向別地震荷重 F (F_x または F_y) に対する最大反力を受け持つ部位が異なることが分かる。



第 1 - 2 図 原子炉压力容器スタビライザの水平地震荷重の分担（水平 2 方向）

第 1 - 1 表 原子炉压力容器スタビライザ各点での分担荷重

位置	方向別地震力 F に対する反力	
	X 方向	Y 方向
0 °	$F_x/4$	0
45 °	$2 \times F_x/8$	$2 \times F_y/8$
90 °	0	$F_y/4$
135 °	$2 \times F_x/8$	$2 \times F_y/8$
180 °	$F_x/4$	0
225 °	$2 \times F_x/8$	$2 \times F_y/8$
270 °	0	$F_y/4$
315 °	$2 \times F_x/8$	$2 \times F_y/8$
最大	$F_x/4$	$F_y/4$

水平2方向地震力の組合せの考慮については、第1 - 1表に示した水平方向反力を用いてX方向・Y方向同時には最大の地震力が発生しないと仮定し、以下の2つの方法にて検討を行った。

組合せ係数法： $F_Y = 0.4F_X$ と仮定し、X方向・Y方向のそれぞれの水平1方向応答結果を単純和する。

最大応答の非同時性を考慮したS R S S法： $F_Y = F_X$ と仮定し、X方向・Y方向のそれぞれの水平1方向応答結果をS R S S法にて合成する。

上記検討の結果を第1 - 2表に示す。いずれの検討方法を用いても、水平2方向反力の組合せ結果の最大値は f となり、これは水平1方向反力の最大値と同値である。

したがって、RPVスタビライザに対して水平2方向の影響はない。

第1 - 2表 RPVスタビライザ各点における水平2方向の考慮

	組合せ係数法を用いた 水平2方向反力の組合せ ($F_Y=0.4 F_X$)	S R S S法を用いた 水平2方向反力の組合せ ($F_Y=F_X$)
0°	$F_X/4 = f$	$F_X/4 = f$
45°	$2 \times F_X/8 + 2 \times F_X/8 = 2 \times 1.4 \times F_X/8$ $= 0.990 \times F_X/4 < f$	$((2 \times F_X/8)^2 + (2 \times F_X/8)^2)$ $= F_X/4 < f$
90°	$F_Y/4 = 0.4 \times F_X/4 < f$	$F_Y/4 = F_X/4 < f$
135°	$2 \times F_X/8 + 2 \times F_X/8 = 2 \times 1.4 \times F_X/8$ $= 0.990 \times F_X/4 < f$	$((2 \times F_X/8)^2 + (2 \times F_X/8)^2)$ $= F_X/4 < f$
180°	$F_X/4 = f$	$F_X/4 = f$
225°	$2 \times F_X/8 + 2 \times F_X/8 = 2 \times 1.4 \times F_X/8$ $= 0.990 \times F_X/4 < f$	$((2 \times F_X/8)^2 + (2 \times F_X/8)^2)$ $= F_X/4 < f$
270°	$F_Y/4 = 0.4 \times F_X/4 < f$	$F_Y/4 = F_X/4 < f$
315°	$2 \times F_X/8 + 2 \times F_X/8 = 2 \times 1.4 \times F_X/8$ $= 0.990 \times F_X/4 < f$	$((2 \times F_X/8)^2 + (2 \times F_X/8)^2)$ $= F_X/4 < f$
最大	$F_X/4 = f$	$F_Y/4 = f$

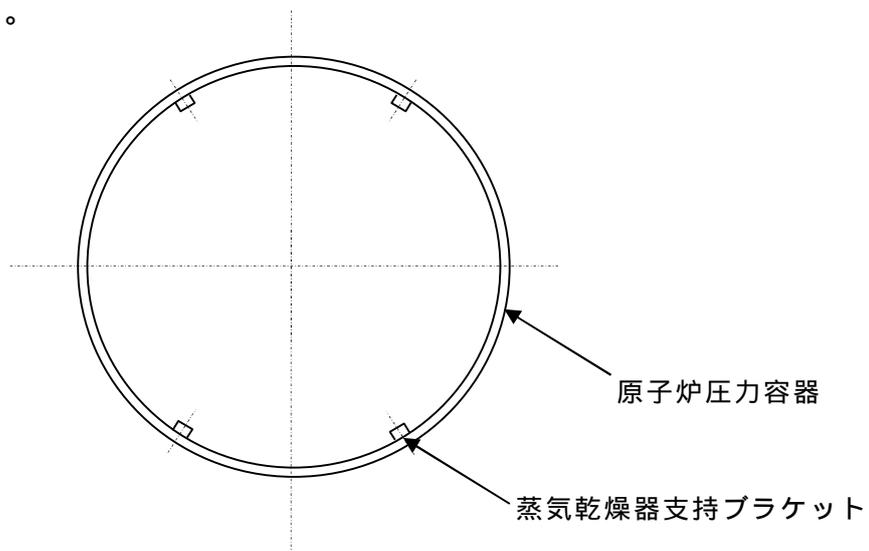
2. 水平2方向同時加振の影響評価について（蒸気乾燥器支持ブラケット）

2.1 はじめに

本項は、蒸気乾燥器支持ブラケットに対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

2.2 現行評価の手法

蒸気乾燥器支持ブラケットは、4体配置されており、位置関係は第2 - 1図の通りとなる。



第2 - 1図 蒸気乾燥器支持ブラケット配置図

蒸気乾燥器支持ブラケットは、4体で耐震用ブロックを介し蒸気乾燥器ユニットを支持する設計である。しかし、耐震用ブロックと蒸気乾燥器支持ブラケットの間にはクリアランスが存在し、水平地震動の入力方向によっては、4体のうち対角のブラケット2体のみがその荷重を負担する可能性があるため、現行評価では対角のブラケット2体により、水平2方向の地震荷重を支持するものとして評価している。

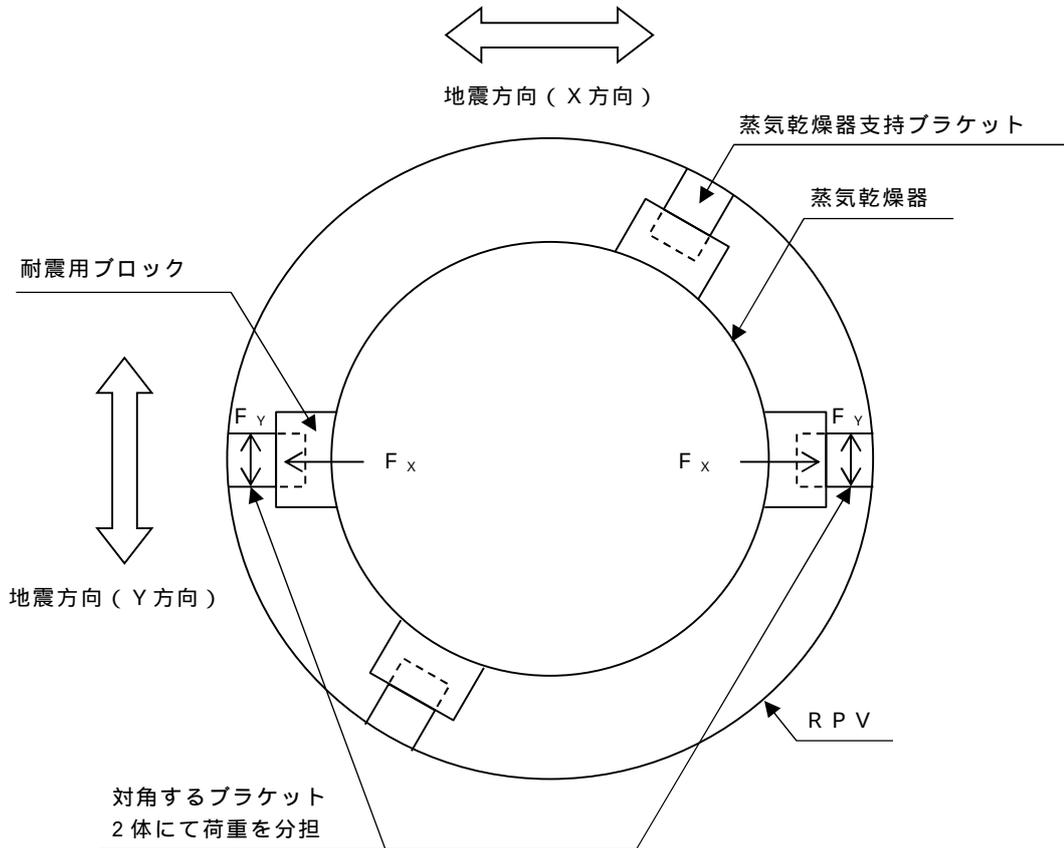
第2 - 2図に評価においてブラケットに負荷される水平方向の地震荷重を示す。

$$f = \text{MAX} \left(\frac{F_x}{2}, \frac{F_y}{2} \right)$$

f : 蒸気乾燥器ユニットから受ける地震荷重

F_x : X方向地震よりブラケット全体に発生する荷重

F_y : Y方向地震よりブラケット全体に発生する荷重



第2 - 2図 評価におけるブラケットの負荷状態

2.3 水平2方向同時加振の影響

蒸気乾燥器支持ブラケットは、現行評価において、水平2方向の地震荷重を同時に考慮し、ブラケットと耐震ブロックの接触状態として想定される最も厳しい状態として、4体のブラケットのうち2体で荷重を支持すると評価しており、水平2方向同時加振による現行の評価結果への影響はない。

3 水平2方向同時加振の影響評価について（円筒形容器）

3.1 はじめに

本項は、水平地震動が水平2方向に作用した場合の円筒形容器に対する影響検討をFEMモデルを用いた解析で確認した結果をまとめたものである。

容器については、X方向地震とY方向地震とでは最大応力点が異なるため、それぞれの地震による応力を組み合わせても影響軽微としている。本項では解析にて影響確認することを目的として、円筒形容器のFEMモデルを用いた解析を実施した結果を示す。ここで、本検討は軸方向応力、周方向応力及びせん断応力の組合せにより確認を行うため、胴の組合せ一次応力を対象としたものである。

具体的な確認項目として、以下2点を確認した。

X方向地震とY方向地震とで最大応力点が異なることへの確認

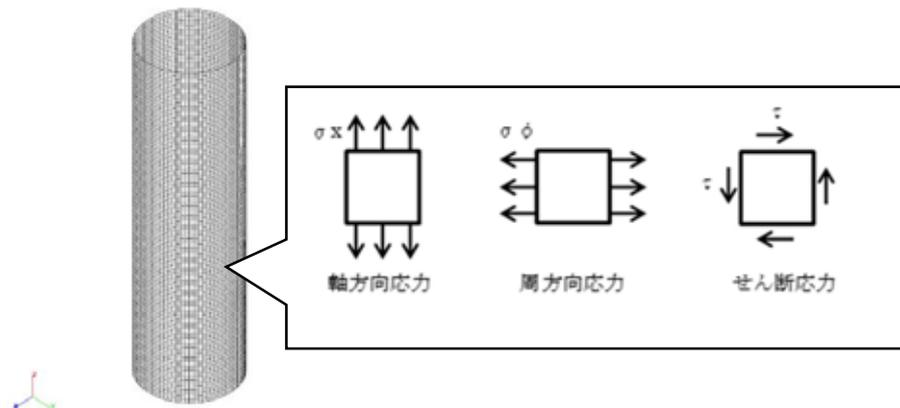
最大応力点以外に、X方向地震とY方向地震による応力を組み合わせた場合に影響のあるような点があるかを確認

3.2 影響評価検討

評価検討モデルを第3-1図に示す。検討方法を以下に示す

- ・ 検討方法 : 水平地震力1Gを、X方向(0°方向)へ入力し、周方向の0°方向から90°方向にかけて応力分布を確認する。また、水平1方向地震による応力を用いて水平2方向地震による応力を評価する。
- ・ 検討モデル : たて置き円筒形容器をシェル要素にてモデル化
- ・ 拘束点 : 容器基部を拘束
- ・ 荷重条件 : モデル座標のX方向に水平地震力1Gを負荷

- ・ 解析方法 : 静的解析
- ・ 対象部位及び応力 : 容器基部における応力
- ・ 水平2方向同時加振時の組合せ方法
 - 組合せ係数法 (最大応答の非同時性を考慮)
 - S R S S 法 (最大応答の非同時性を考慮)



第3 - 1図 評価検討モデル

3.3 検討結果

3.3.1 軸方向応力 σ_x

容器基部における水平地震時の軸方向応力コンター図を第3 - 2図に示す。

この結果により、最大応力点は $0^\circ / 180^\circ$ 位置に発生していることが分かる。円筒形容器のため評価部位が円形の一様断面であることから、Y方向から水平地震力を入力した場合においても、最大応力点は $90^\circ / 270^\circ$ 位置に発生することは明白であるため、水平方向地震動の入力方向により最大応力点は異なる。

また、第3 - 1表にX方向、Y方向、2方向入力時の軸方向応力分布を示す。

中間部($0^\circ / 90^\circ$ 方向以外)において2方向入力時の影響が確認できる。

なお、組合せ係数法及びS R S S法のそれぞれを用いた水平2方向入力時の応力 $\sigma_{x,c}$ ()及び $\sigma_{x,s}$ ()は、水平1方向入力時の軸方向応力解析結果 (X

方向入力時応力 $\sigma_{x,x}(t)$, Y方向入力時応力 $\sigma_{x,y}(t)$)により , 以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$\sigma_{x,c}(t) = \max (\sigma_{x,c(X)}(t) , \sigma_{x,c(Y)}(t))$$

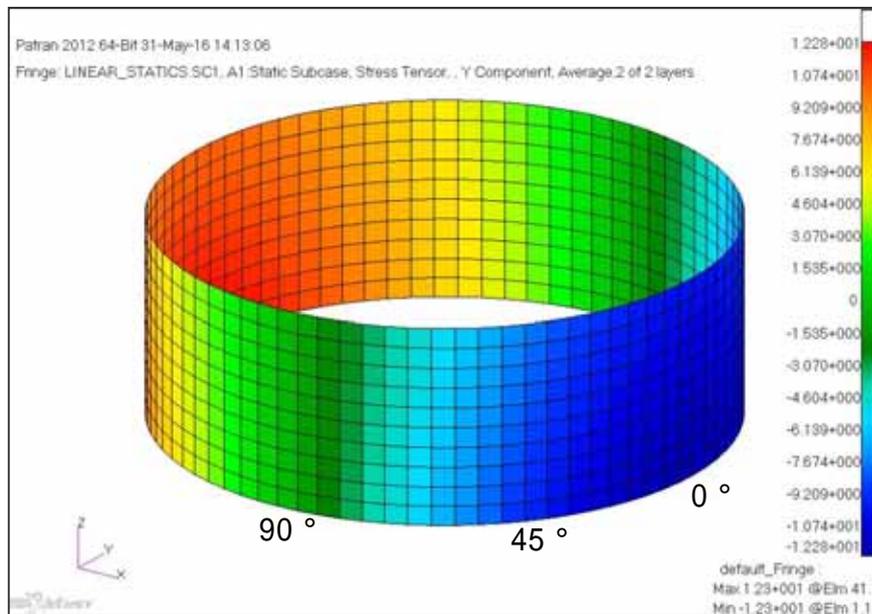
ただし , $\sigma_{x,c(X)}(t)$ は $\sigma_{x,x}(t)$ に 1 , $\sigma_{x,y}(t)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの軸応力を組み合わせた応力 , $\sigma_{x,c(Y)}(t)$ は $\sigma_{x,y}(t)$ に 1 , $\sigma_{x,x}(t)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり , 以下のように表わされる。

$$\sigma_{x,c(X)}(t) = \sigma_{x,x}(t) + 0.4 \times \sigma_{x,y}(t)$$

$$\sigma_{x,c(Y)}(t) = 0.4 \times \sigma_{x,x}(t) + \sigma_{x,y}(t)$$

< S R S S 法 >

$$\sigma_{x,s}(t) = \sqrt{ \sigma_{x,x}(t)^2 + \sigma_{x,y}(t)^2 }$$



第3 - 2図 水平地震時軸方向応力コンター図

第3 - 1表 水平地震時の軸方向応力分布

角度	X方向入力時 応力(MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	Y方向入力時 応力(MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	2方向入力時応力(MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$	S R S S 法 $\sigma_{x,s}(\theta)$
0° 方向	12.28	0.00	12.28 $\sigma_{x,c(X)}(0^\circ)=12.28$ $\sigma_{x,c(Y)}(0^\circ)=4.91$	12.28
22.5° 方向	11.34	4.70	13.22 $\sigma_{x,c(X)}(22.5^\circ)=13.22$ $\sigma_{x,c(Y)}(22.5^\circ)=9.24$	12.28
45° 方向	8.68	8.68	12.15 $\sigma_{x,c(X)}(45^\circ)=12.15$ $\sigma_{x,c(Y)}(45^\circ)=12.15$	12.28
67.5° 方向	4.70	11.34	13.22 $\sigma_{x,c(X)}(67.5^\circ)=9.24$ $\sigma_{x,c(Y)}(67.5^\circ)=13.22$	12.28
90° 方向	0.00	12.28	12.28 $\sigma_{x,c(X)}(90^\circ)=4.91$ $\sigma_{x,c(Y)}(90^\circ)=12.28$	12.28

3.3.2 周方向応力

容器基部における水平地震時の周方向応力コンター図を第3 - 3図に、周方向応力分布を第3 - 2表に示す。軸方向応力同様に最大応力点は0° / 180° 位置に発生しており、最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2方向入力時の影響についても軸方向応力と同様に中間部(0° / 90° 方向以外)において2方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及びS R S S法のそれぞれを用いた水平2方向入力時の応力 $\sigma_{x,c}(\theta)$ 及び $\sigma_{x,s}(\theta)$ は、水平1方向入力時の周方向応力解析結果(X方向入力時応力 $\sigma_{x,x}(\theta)$),Y方向入力時応力 $\sigma_{x,y}(\theta)$)により、以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$\sigma_{x,c}(\theta) = \max(\sigma_{x,c(X)}(\theta), \sigma_{x,c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\sigma_{x,c(X)}(\theta)$ は $\sigma_{x,x}(\theta)$ に1、 $\sigma_{x,y}(\theta)$ に0.4の係数を乗じてX・Y方向入力時それぞれの軸応力を組み合わせた応力、 $\sigma_{x,c(Y)}(\theta)$ は

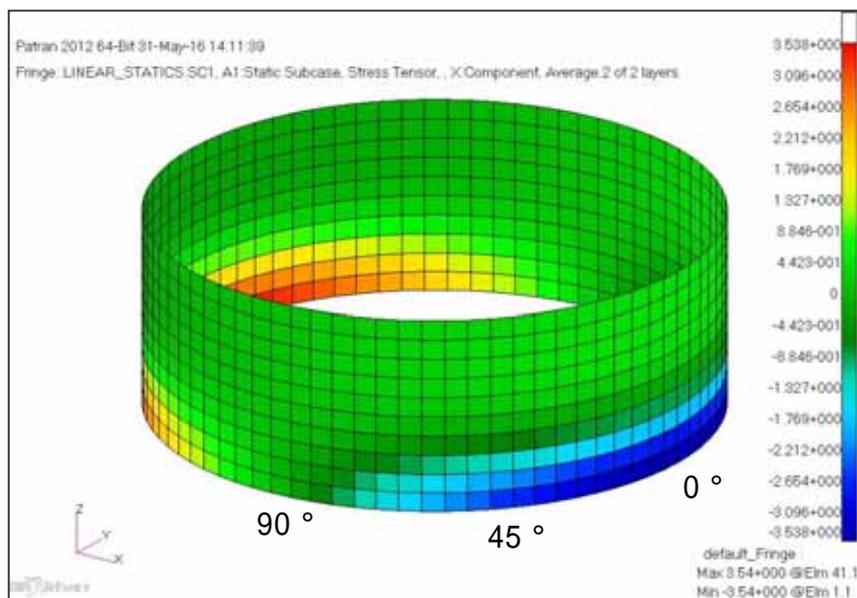
σ_x に 0.4 , σ_y に 1 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり , 以下のように表わされる。

$$\sigma_x = \sigma_x + 0.4 \times \sigma_y$$

$$\sigma_y = 0.4 \times \sigma_x + \sigma_y$$

< S R S S 法 >

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$



第3 - 3図 水平地震時周方向応力コンター図

第3 - 2表 水平地震時の周方向応力分布

角度	X方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_x(\theta)$	Y方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_y(\theta)$	2方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_c(\theta)$	S R S S 法 $\sigma_s(\theta)$
0° 方向	3.54	0.00	3.54 $\sigma_c(x)(0^\circ)=3.54$ $\sigma_c(y)(0^\circ)=1.42$	3.54
22.5° 方向	3.27	1.35	3.81 $\sigma_c(x)(22.5^\circ)=3.81$ $\sigma_c(y)(22.5^\circ)=2.66$	3.54
45° 方向	2.50	2.50	3.50 $\sigma_c(x)(45^\circ)=3.50$ $\sigma_c(y)(45^\circ)=3.50$	3.54
67.5° 方向	1.35	3.27	3.81 $\sigma_c(x)(67.5^\circ)=2.66$ $\sigma_c(y)(67.5^\circ)=3.81$	3.54
90° 方向	0.00	3.54	3.54 $\sigma_c(x)(90^\circ)=1.42$ $\sigma_c(y)(90^\circ)=3.54$	3.54

3.3.3 せん断応力

容器基部における水平地震時のせん断応力コンター図を第3 - 4図に、周方向応力分布を第3 - 3表に示す。せん断応力は軸方向及び周方向応力とは異なり、最大応力は90° / 270°位置に生じているが、最大応力最小応力の生じる点が回転しているのみで応力の傾向として最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2方向入力時の影響についても同様に中間部(0° / 90°方向以外)において2方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及びS R S S法のそれぞれを用いた水平2方向入力時の応力 $\sigma_c(\theta)$ 及び $\sigma_s(\theta)$ は、水平1方向入力時の周方向応力解析結果(X方向入力時応力 $\sigma_x(\theta)$), Y方向入力時応力 $\sigma_y(\theta)$)により、以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$c(\) = \max (\ c(x)(\), \ c(y)(\))$$

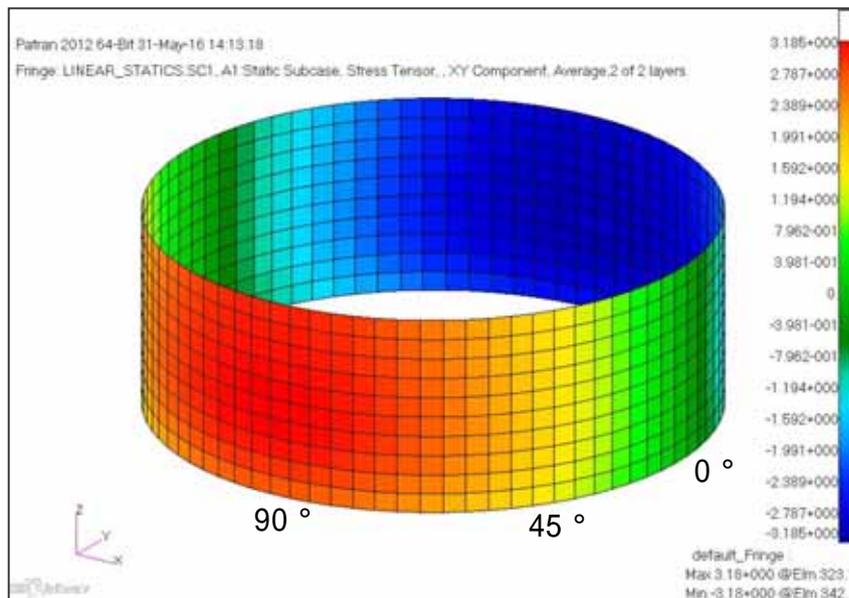
ただし、 $c(x)(\)$ は $x(\)$ に1、 $y(\)$ に0.4の係数を乗じてX・Y方向入力時それぞれの軸応力を組み合わせた応力、 $c(y)(\)$ は $y(\)$ に1、 $x(\)$ に0.4の係数を乗じてX・Y方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり、以下のように表わされる。

$$c(x)(\) = x(\) + 0.4 \times y(\)$$

$$c(y)(\) = 0.4 \times x(\) + y(\)$$

< S R S S 法 >

$$s(\) = \sqrt{ x(\)^2 + y(\)^2 }$$



第3 - 4図 水平地震時せん断応力コンタ図

第3 - 3表 水平地震時のせん断応力分布

角度	X方向入力時 応力(MPa) $\sigma_x(\theta)$	Y方向入力時 応力(MPa) $\sigma_y(\theta)$	2方向入力時応力(MPa)	
			組合せ係数法 $c(\theta)$	S R S S 法 $s(\theta)$
0° 方向	0.00	2.70	2.70 $c_x(0^\circ)=1.08$ $c_y(0^\circ)=2.70$	2.70
22.5° 方向	1.03	2.49	2.91 $c_x(22.5^\circ)=2.03$ $c_y(22.5^\circ)=2.91$	2.70
45° 方向	1.91	1.91	2.67 $c_x(45^\circ)=2.67$ $c_y(45^\circ)=2.67$	2.70
67.5° 方向	2.49	1.03	2.91 $c_x(67.5^\circ)=2.91$ $c_y(67.5^\circ)=2.03$	2.70
90° 方向	2.70	0.00	2.70 $c_x(90^\circ)=2.70$ $c_y(90^\circ)=1.08$	2.70

3.3.4 組合せ応力強さ

胴の組合せ応力強さは、第3 - 1表から第3 - 3表に示したX方向、Y方向、2方向入力時それぞれの軸方向応力 σ_x 、周方向応力 σ_y 及びせん断応力 τ を用いて算出する。

< 水平1方向のうち、X方向入力時の組合せ応力強さ $\sigma_{c,x}(\theta)$ >

主応力 $\sigma_{1,x}(\theta)$ 、 $\sigma_{2,x}(\theta)$ 、 $\sigma_{3,x}(\theta)$ は以下のとおり表わされる。

$$\sigma_{1,x}(\theta) = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{x,x}(\theta) + \sigma_y(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,x}(\theta) - \sigma_y(\theta))^2 + 4\tau(\theta)^2} \right\}$$

$$\sigma_{2,x}(\theta) = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{x,x}(\theta) + \sigma_y(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,x}(\theta) - \sigma_y(\theta))^2 + 4\tau(\theta)^2} \right\}$$

$$\sigma_{3,x}(\theta) = 0$$

各主応力により、応力強さ $\sigma_x(\theta)$ は以下のとおりとなる。

$$\sigma_x(\theta) = \max(|\sigma_{1,x}(\theta) - \sigma_{2,x}(\theta)|, |\sigma_{2,x}(\theta) - \sigma_{3,x}(\theta)|, |\sigma_{3,x}(\theta) - \sigma_{1,x}(\theta)|)$$

なお、Y方向入力時の組合せ応力強さ $\sigma_{c,y}(\theta)$ は、上記の式におけるXをY

に置き換えた式により算出する。

ここで， $\theta = 0^\circ$ の場合，第3 - 1表より $\sigma_{1,x}(0^\circ) = 12.28$ ，第3 - 2表より

$\sigma_{2,x}(0^\circ) = 3.54$ ，第3 - 3表より $\sigma_{3,x}(0^\circ) = 0$ であるため，

$$\sigma_{1,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \} = 12.28$$

$$\sigma_{2,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \} = 3.54$$

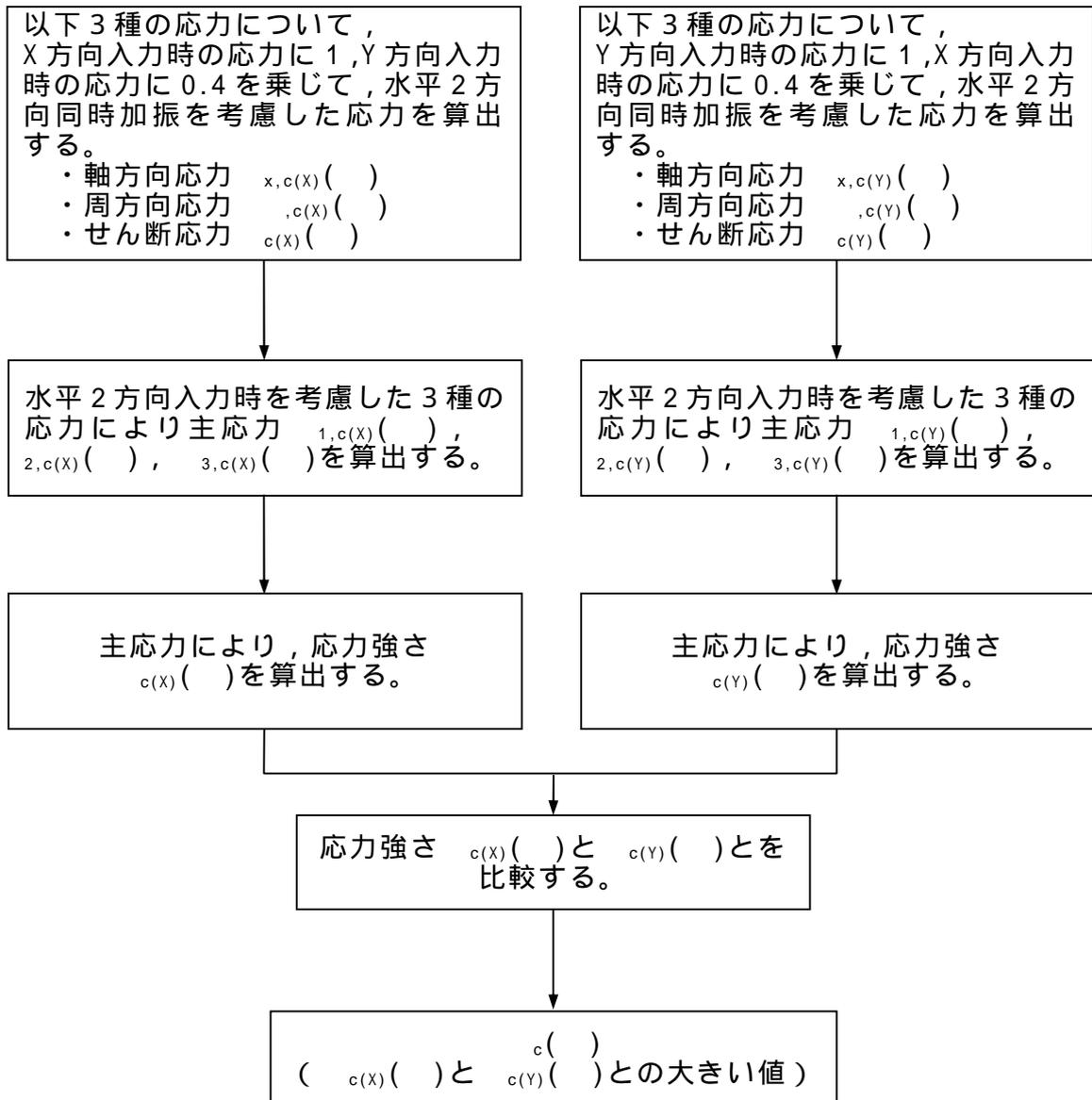
$$\sigma_{3,x}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって，

$$\sigma_x(0^\circ) = \max(|12.28 - 3.54|, |3.54 - 0|, |0 - 12.28|) = 12.28$$

< 組合せ係数法による水平2方向入力時の組合せ応力強さ $\sigma_c(\theta)$ >

$\sigma_c(\theta)$ の算出フローを第3 - 5図に示す。



第3 - 5図 組合せ係数法による組合せ応力算出フロー

X方向入力時の応力に1, X方向入力時の応力に0.4を乗じて組み合わせた水平2方向入力時を考慮した応力は以下の通りとする。

$$\sigma_{x,c(X)} = \sigma_{x,X} + 0.4 \times \sigma_{x,Y}$$

$$\sigma_{\theta,c(X)} = \sigma_{\theta,X} + 0.4 \times \sigma_{\theta,Y}$$

$$c(X)(\theta) = x(\theta) + 0.4 \times y(\theta)$$

水平2方向入力時を考慮した各応力により主応力 $1,c(X)(\theta)$, $2,c(X)(\theta)$, $3,c(X)(\theta)$ は以下のとおり表わされる。

$$1,c(X)(\theta) = \frac{1}{2} \{ x,c(X)(\theta) + y,c(X)(\theta) + \sqrt{(x,c(X)(\theta) - y,c(X)(\theta))^2 + 4c(X)(\theta)^2} \}$$

$$2,c(X)(\theta) = \frac{1}{2} \{ x,c(X)(\theta) + y,c(X)(\theta) - \sqrt{(x,c(X)(\theta) - y,c(X)(\theta))^2 + 4c(X)(\theta)^2} \}$$

$$3,c(X)(\theta) = 0$$

各主応力により，応力強さ $c(X)(\theta)$ は以下の通りとなる。

$$c(X)(\theta) = \max(|1,c(X)(\theta) - 2,c(X)(\theta)|, |2,c(X)(\theta) - 3,c(X)(\theta)|, |3,c(X)(\theta) - 1,c(X)(\theta)|)$$

同様に，Y方向入力時の応力に1，X方向入力時の応力に0.4を乗じて組み合わせた水平2方向入力時を考慮した応力により，応力強さ $c(Y)(\theta)$ を算出する。

この応力強さ $c(X)(\theta)$ と $c(Y)(\theta)$ とを比較し，大きいほうの値を $c(\theta)$ とする。

$$c(\theta) = \max(c(X)(\theta), c(Y)(\theta))$$

ここで， $\theta = 0^\circ$ の場合，第3 - 1表より $x,c(X)(0^\circ) = 12.28$ ，第3 - 2表より $y,c(X)(0^\circ) = 3.54$ ，第3 - 3表より $c(X)(0^\circ) = 1.08$ であるため，

$$1,c(X)(0^\circ) = \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \} = 12.41$$

$$2,c(X)(0^\circ) = \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \} = 3.41$$

$$3,c(X)(0^\circ) = 0$$

となる。したがって，応力強さ $c(X)(0^\circ)$ は以下のとおり算出される。

$$c(X)(0^\circ) = \max(|12.41 - 3.41|, |3.41 - 0|, |0 - 12.41|) = 12.41$$

同様に，第3 - 1表より $x,c(Y)(0^\circ) = 4.91$ ，第3 - 2表より $y,c(Y)(0^\circ) = 1.42$ ，第3 - 3表より $c(Y)(0^\circ) = 2.70$ であるため，

$$\begin{aligned}
1, c(Y)(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ 4.91 + 1.42 + \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \} = 6.38 \\
2, c(Y)(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ 4.91 + 1.42 - \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \} = -0.05 \\
3, c(Y)(0^\circ) &= 0
\end{aligned}$$

となる。したがって、応力強さ $c(Y)(0^\circ)$ は以下のとおり算出される。

$$c(Y)(0^\circ) = \max(|6.38 - (-0.05)|, |-0.05 - 0|, |0 - 6.38|) = 6.43$$

応力強さ $c(X)(0^\circ)$ と $c(Y)(0^\circ)$ により、組合せ係数法による水平2方向入力時を考慮した応力強さ $c(0^\circ)$ は、

$$c(0^\circ) = \max(12.41, 6.43) = 12.41$$

となる。

< S R S S 法による水平2方向入力時を考慮した組合せ応力強さ $s(0^\circ)$ >

主応力 $1, s(0^\circ)$, $2, s(0^\circ)$, $3, s(0^\circ)$ は以下のとおり表わされる。

$$\begin{aligned}
1, s(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ \sigma_x(0^\circ) + \sigma_y(0^\circ) + \sqrt{(\sigma_x(0^\circ) - \sigma_y(0^\circ))^2 + 4\tau_{xy}(0^\circ)^2} \} \\
2, s(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ \sigma_x(0^\circ) + \sigma_y(0^\circ) - \sqrt{(\sigma_x(0^\circ) - \sigma_y(0^\circ))^2 + 4\tau_{xy}(0^\circ)^2} \} \\
3, s(0^\circ) &= 0
\end{aligned}$$

各主応力により、応力強さ $s(0^\circ)$ は以下の通りとなる。

$$s(0^\circ) = \max(|1, s(0^\circ) - 2, s(0^\circ)|, |2, s(0^\circ) - 3, s(0^\circ)|, |3, s(0^\circ) - 1, s(0^\circ)|)$$

ここで、 $\theta = 0^\circ$ の場合、第3 - 1表より $\sigma_x(0^\circ) = 12.28$ 、第3 - 2表より

$\sigma_y(0^\circ) = 3.54$ 、第3 - 3表より $\tau_{xy}(0^\circ) = 2.70$ であるため、

$$\begin{aligned}
1, s(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \} = 13.05 \\
2, s(0^\circ) &= \frac{1}{2} \{ 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \} = 2.77 \\
3, s(0^\circ) &= 0
\end{aligned}$$

となる。したがって、

$$s(0^\circ) = \max(|13.05 - 2.77|, |2.77 - 0|, |0 - 13.05|) = 13.05$$

= 0° の場合に , S R S S 法 , 組合せ係数法を用いて算出した応力強さを第3 - 4表に示す。

第3-4表 S R S S 法，組合せ係数法を用いて算出した応力強さ ($\theta = 0^\circ$)

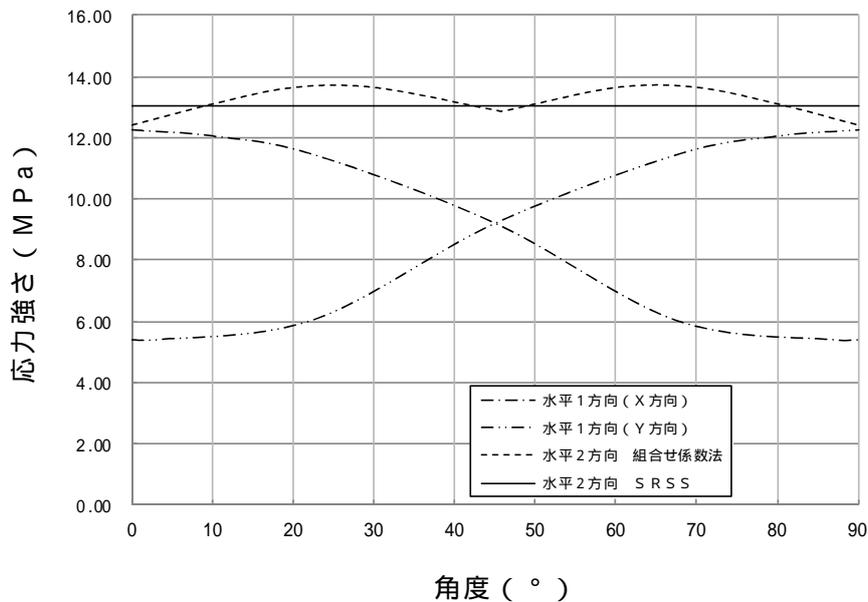
	X	Y	S R S S 法	組合せ係数法	
				$1.0 \times X + 0.4 \times Y$	$0.4 \times X + 1.0 \times Y$
x ()	12.28	0.00	$(12.28^2 + 0.00^2) =$ 12.28	$12.28 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 12.28	$12.28 \times 0.4 + 0.00 \times 1.0 =$ 4.91
()	3.54	0.00	$(3.54^2 + 0.00^2) =$ 3.54	$3.54 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 3.54	$3.54 \times 0.4 + 0.00 \times 1.0 =$ 1.42
()	0.00	2.70	$(0.00^2 + 2.70^2) =$ 2.70	$0.00 \times 1.0 + 2.70 \times 0.4 =$ 1.08	$0.00 \times 0.4 + 2.70 \times 1.0 =$ 2.70
1 ()	-	-	$1/2 \times [12.28+3.54+{(12.28-3.54)^2+4 \times 2.70^2}] =$ 13.05	$1/2 \times [12.28+3.54+{(12.28-3.54)^2+4 \times 1.08^2}] =$ 3.41	$1/2 \times [4.91+1.42+{(4.91-1.42)^2+4 \times 2.70^2}] =$ 6.38
2 ()	-	-	$1/2 \times [12.28+3.54-{(12.28-3.54)^2+4 \times 2.70^2}] =$ 2.77	$1/2 \times [12.28+3.54-{(12.28-3.54)^2+4 \times 1.08^2}] =$ 12.41	$1/2 \times [4.91+1.42-{(4.91-1.42)^2+4 \times 2.70^2}] =$ -0.05
3 ()	-	-	0	0	0
()	-	-	MAX $(13.05-2.77 , 2.77-0 , 0-13.05) =$ 13.05	MAX $(3.41-12.41 , 12.41-0 , 0-3.41) =$ 12.41	MAX $(6.38-(-0.05) , -0.05-0 , 0-6.38) =$ 6.43
			MAX (12.41, 6.43) = 12.41		

(注) 本表記載の数値は計算例を示すものであり，桁処理の関係上，他表の数値と一致しないことがある。

算出した応力強さの分布及び分布図を第3 - 5表及び第3 - 6図に示す。

第3 - 5表 水平地震時の組合せ応力強さ

角度	X方向入力時 応力強さ (MPa) $x()$	Y方向入力時 応力強さ (MPa) $y()$	2方向入力時応力強さ (MPa)	
			組合せ係数法 $c()$	S R S S 法 $s()$
0° 方向	12.28	5.40	12.41	13.04
22.5° 方向	11.47	6.03	13.64	13.04
45° 方向	9.22	9.22	12.91	13.04
67.5° 方向	6.03	11.47	13.64	13.04
90° 方向	5.40	12.28	12.41	13.04



第3 - 6図 水平地震時組合せ応力強さ分布図

組合せ応力強さは、S R S S 法では全方向において一定であるのに対して、組合せ係数法では24.75°及び65.25°にピークを持つ分布となった。組合せ応力強さは0°、45°及び90°付近ではS R S S 法のほうが組合せ係数法に比べ大きな値となるのに対して、組合せ係数法がピークを持つ24.75°及び65.25°付近ではS R S S 法を約5%上回る結果となった。

水平2方向入力時のS R S S 法による組合せ最大応力強さは、第3 - 6表に示すとおり水平1方向入力時の最大応力強さに対して6%上回る程度であり、水平2方向による影響は軽微といえる。

一方、水平2方向入力時の組合せ係数法による組合せ最大応力強さについては、水平1方向入力時の最大応力強さに対して11%上回る結果となった。これは水平2方向入力時の影響軽微と判断する基準(応力の増分が1割)を超えているが、本検討においては水平地震力のみを考慮しており、実際の耐震評価においては水平地震力以外に自重、内圧及び鉛直地震力等を考慮して評価を実施することから、水平2方向を考慮した際の応力強さの増分は小さくなる。このため、水平2方向による影響は軽微であると考えられる。

第3 - 6表 水平地震時の最大組合せ応力強さ及び水平2方向による影響

		最大組合せ応力強さ (MPa)	水平2方向 / 水平1方向 最大応力強さ比
水平1方向入力		12.28	1.00
水平2方向 入力	S R S S 法	13.05	1.06
	組合せ係数法	13.67	1.11

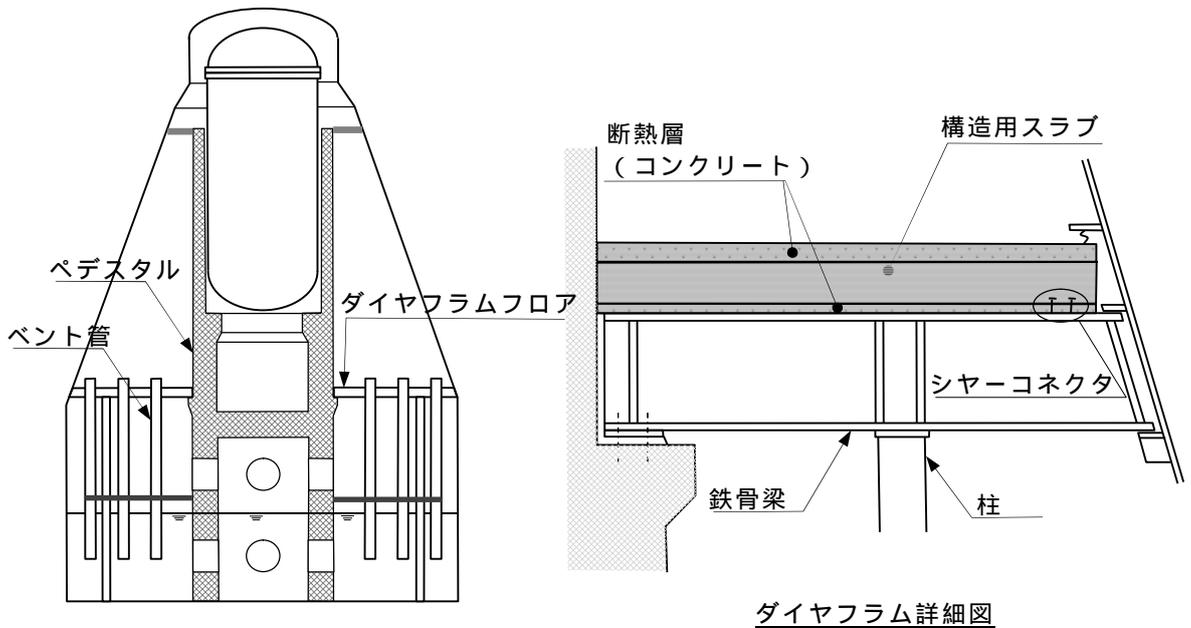
4. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（ダイヤフラムフロア）

4.1 はじめに

本項は、ダイヤフラムフロアに対する水平 2 方向同時加振の影響についてまとめたものである。

4.2 ダイヤフラムフロアの構造

ダイヤフラムフロアは、格納容器をドライウェルとサブプレッションチェンバとを隔離する構造物であり、上部及び下部に断熱層を持った鉄筋コンクリート製の構造用スラブで構成されている。垂直方向の荷重は、鉄筋コンクリート製スラブから鉄骨梁に伝えられ、その下部にあるペDESTALび鉄骨の柱で支持されている。水平方向の荷重も同様に鉄骨梁から原子炉本体基礎及び格納容器周囲に設置されたシアラグを介して原子炉建屋に伝達される（第 4 - 1 図）。



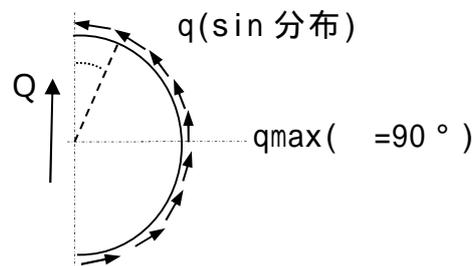
第 4 - 1 図 ダイヤフラムフロアの構造

4.3 水平2方向同時加振の影響

構造用スラブ及び鉄骨梁は、水平方向に広がりを持つことから、作用する荷重は鉛直方向の荷重が支配的であり、水平2方向の地震に対して影響は軽微である。また、同様に構造用スラブ及び鉄骨梁を支持する柱についても、各構造物からの鉛直方向の荷重を受ける構造であるため、水平2方向の地震に対する影響はない。

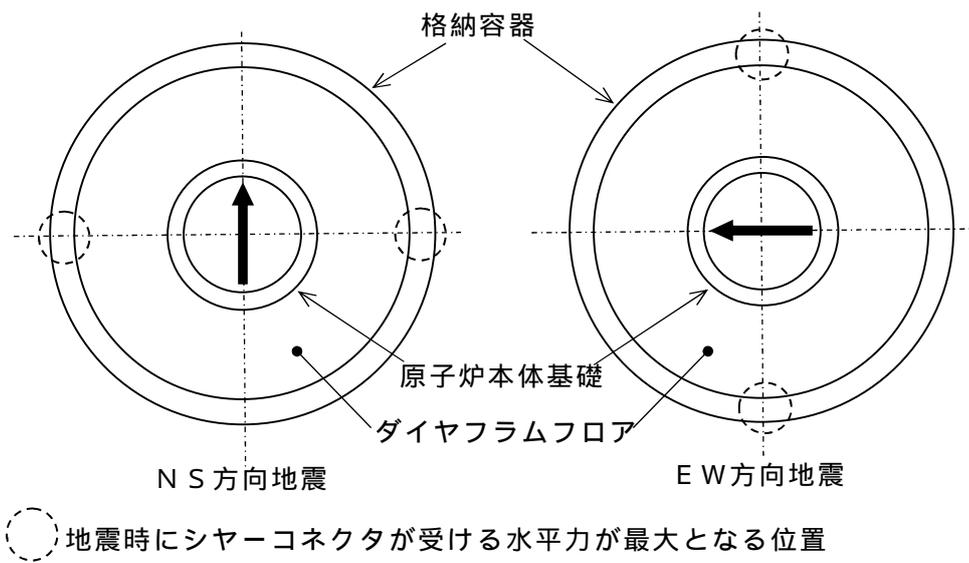
水平地震力を構造用スラブから鉄骨梁に伝達するシヤーコネクタに対する水平2方向の地震の影響について整理する。地震時にダイヤフラムフロア全体に加わる水平力 Q とした場合、シヤーコネクタが設置されているダイヤフラムフロア端部に加わる水平力 q は、第4-2図に示すとおりsin分布として与えられるため、地震方向との角度が 90° の位置で最大となることから、NS、EW方向で最大となる地震力の位置は異なる(第4-3図)。

さらに、水平2方向同時加振時の水平力は、第4-4図に示すとおり水平1方向加振時の最大の水平力と比較しSRS法を用いた場合は同値、組合せ係数法を用いた場合は最大で約1.08倍の値となるため、水平2方向同時加振の影響は軽微である。

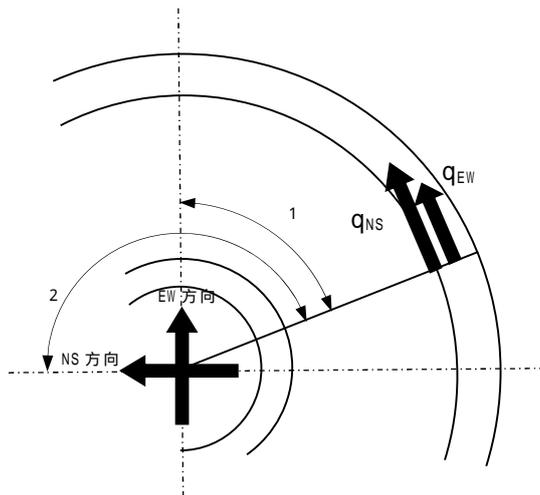


Q : 地震時にダイヤフラムフロア全体が受ける水平力
 q : ダイヤフラム端部に作用する水平力

第4-2図 ダイヤフラムフロア端部における水平力の分布



第 4 - 3 図 シヤーコネクタに与える水平 2 方向地震組合せの影響



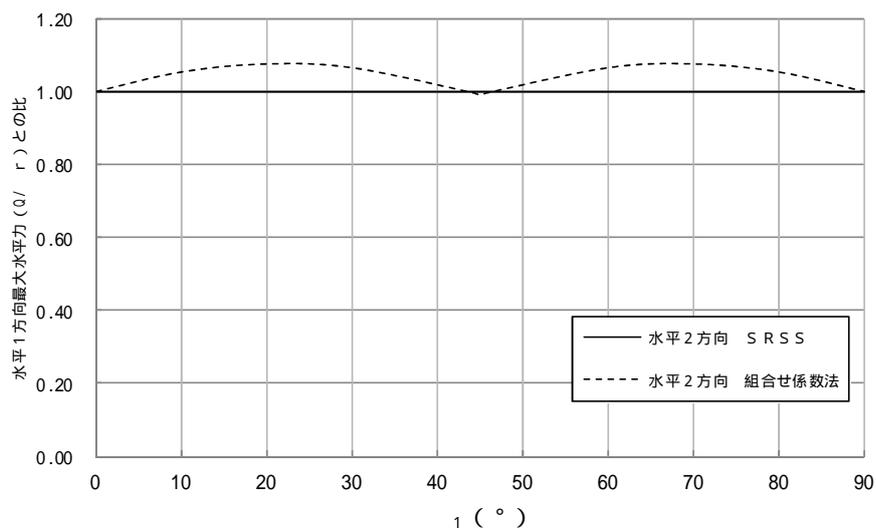
$$\begin{aligned}
 \text{NS 加振時水平力: } q_{NS} &= Q / r \times \sin \alpha_1 \\
 \text{EW 加振時水平力: } q_{EW} &= Q / r \times \sin \alpha_2 \\
 &= Q / r \times \sin(\alpha_1 / 2 + \alpha_1) \\
 &= Q / r \times \cos \alpha_1
 \end{aligned}$$

< 組合せ係数法を用いた2方向入力時水平力 >

$$\begin{aligned}
 q &= \max(q_{NS} + 0.4 \times q_{EW}, 0.4 \times q_{NS} + q_{EW}) \\
 &= Q / r \times \max(\sin \alpha_1 + 0.4 \times \cos \alpha_1, 0.4 \times \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)
 \end{aligned}$$

< S R S S 法を用いた2方向入力時水平力 >

$$\begin{aligned}
 q &= \sqrt{(q_{NS}^2 + q_{EW}^2)} \\
 &= \sqrt{((Q / r \times \sin \alpha_1)^2 + (Q / r \times \cos \alpha_1)^2)} \\
 &= Q / r
 \end{aligned}$$



第4 - 4図 水平2方向同時加振時の水平力分布について

5 水平2方向同時加振の影響評価について（燃料取替機）

5.1 はじめに

本項は、燃料取替機（以下「FHM」という。）に対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

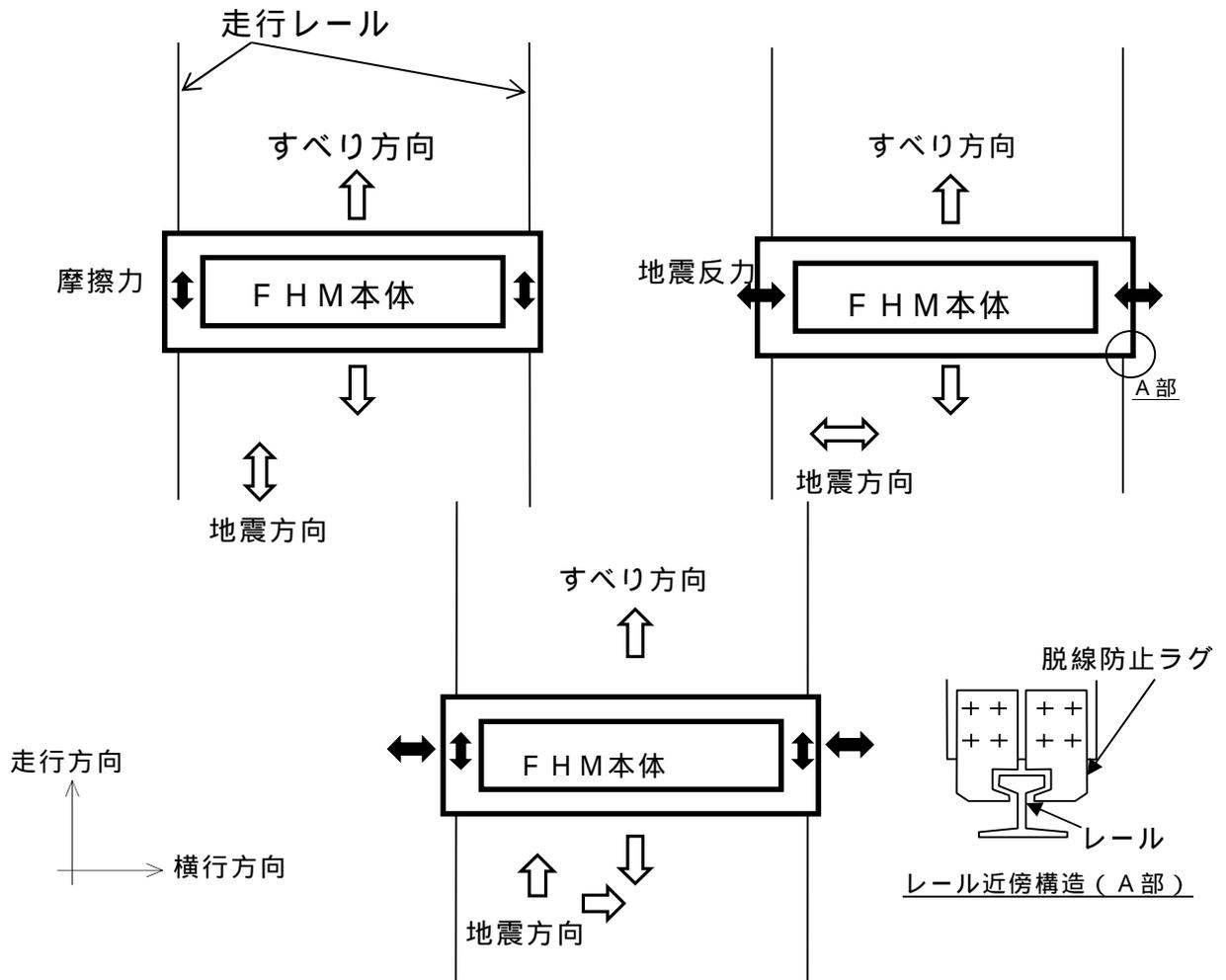
5.2 現行評価の手法

燃料取替機の負担する水平地震荷重の概念図を第5 - 1図に示す。

FHMはレール上を車輪で移動する構造であるため、基本的には建屋との固定はないが、地震時に横行方向（走行レールに対し直角方向）にすべりが生じた場合は、レールに沿って取り付けられている脱線防止ラグがレールの側面と接触し、FHMのすべりを制限する構造となっている。つまり、ラグとレールが接触し、FHMが横行方向に建屋と固定された体系では、地震入力がFHM本体へそのまま伝達されることが想定される。

一方、走行方向（走行レールの長手方向）については、FHMの車輪とレールの接触面(踏面)を介してFHM本体へと荷重が伝達される構造であり、その荷重は摩擦力により制限されるため、地震入力により生じる荷重は軽微（FHM本体への影響は軽微）と考えられる。

上記により、FHM本体の耐震評価では横行方向に対する地震応答が支配的であり、走行方向に対しては比較的軽微であると考えられるため、水平2方向同時加振の考慮として、耐震性評価で走行方向の地震応答を追加で組み合わせたとしても、従来評価の応答結果への影響は小さいと考えられる。



第 5 - 1 図 燃料取替機の負担する水平地震荷重

6. 水平 2 方向入力時の影響評価について（矩形配置されたボルト）

6.1 はじめに

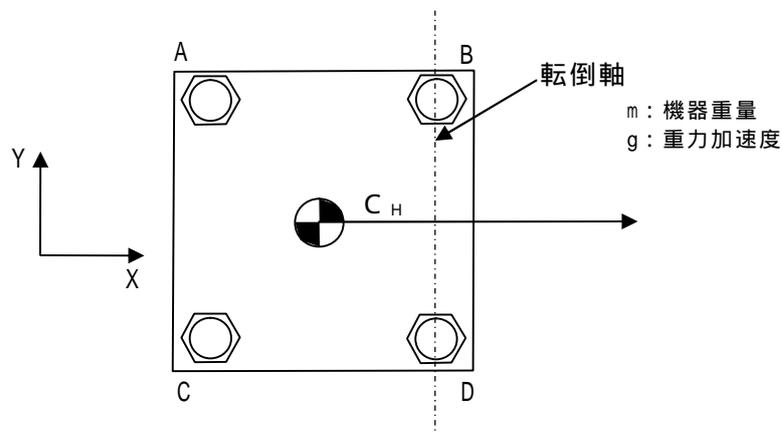
本項は，水平 2 方向に地震力が作用した場合の矩形配置されたボルトに対する影響検討結果をまとめたものである。強軸・弱軸が明確なものについては，弱軸方向に応答し水平 2 方向地震力による影響が軽微であるため，機器の形状を正方形として検討を行った。

6.2 引張応力への影響

水平 1 方向に地震力が作用する場合と水平 2 方向に地震力が作用する場合のボルトへの引張力の違いを考察する。なお，簡単のため機器の振動による影響は考えないこととする。

(1) 水平 1 方向に地震力が作用する場合

第 6 - 1 図のように X 方向に震度 C_H が与えられる場合を考慮する。



第 6 - 1 図 水平 1 方向の地震力による応答（概要）

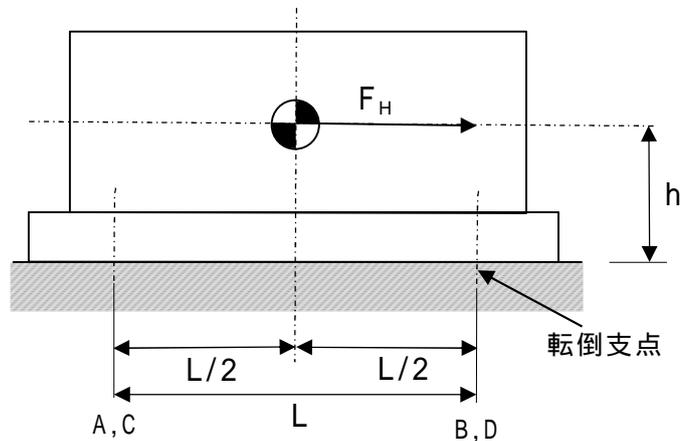
この場合，対象としている系の重心に作用する水平方向の力 F_H は，

$$F_H = mg C_H$$

と表せ， F_H によるボルト B とボルト D の中心を結んだ軸を中心に転倒

モーメントを生じる。この転倒モーメントはボルト A , C により負担される。

このとき，系の重心に生じる力は，第 6 - 2 図に示すとおりである。



第 6 - 2 図 水平 1 方向の地震力による力

第 6 - 2 図より，水平方向地震動による引張力は

$$F_b = \frac{1}{L} (mg C_H h)$$

である。

ボルトに発生する引張応力 σ_b は全引張力を断面積 A_b のボルト n_f 本で受けると考え，

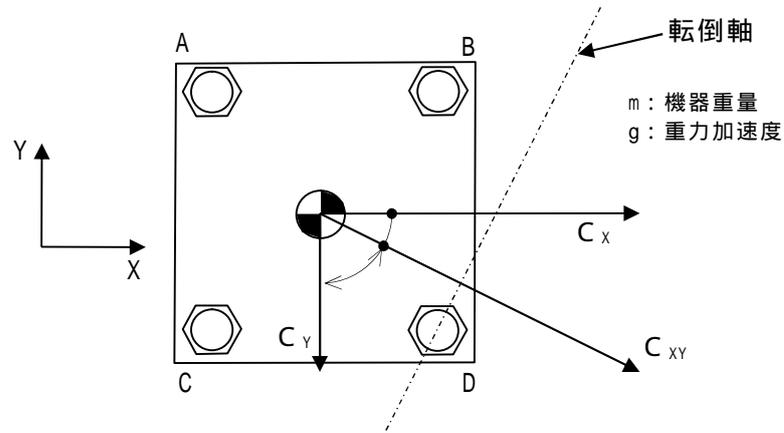
$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

となる。

(2) 水平 2 方向に地震力が作用する場合

第 6 - 3 図のように X 方向と Y 方向にそれぞれ震度 C_x , C_y が作用する場合を考慮する。なお，本検討においては，X 方向と Y 方向に同時に最大

震度が発生する可能性は低いと考え X 方向の震度と Y 方向の震度を 1:0.4
 ($0.4 C_x = C_y$) と仮定する。



第 6 - 3 図 水平 2 方向の地震力による応答 (概要)

この時 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{4}{10}\right)$ であることから、水平方向の震度 C_{XY} は

$$\begin{aligned} C_{XY} &= C_x \cos \theta + C_y \sin \theta \\ &= \frac{5}{\sqrt{29}} C_x + 0.4 \times \frac{2}{\sqrt{29}} C_y \\ &= \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x \end{aligned}$$

と表される。この時、対象としている系の重心に作用する水平方向の力 F_H は、

$$F_H = mg C_{XY} = mg \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x$$

となる。この F_H により、転倒軸を中心に転倒モーメントが生じ、ボルト A, B, C により負担される。

水平 2 方向の地震力を受け対角方向に応答する場合、各ボルトにかかる引

張力を F_A, F_B, F_C とし，第 6 - 4 図に示すようにボルト D の中心を通る直線を転倒軸とすると，

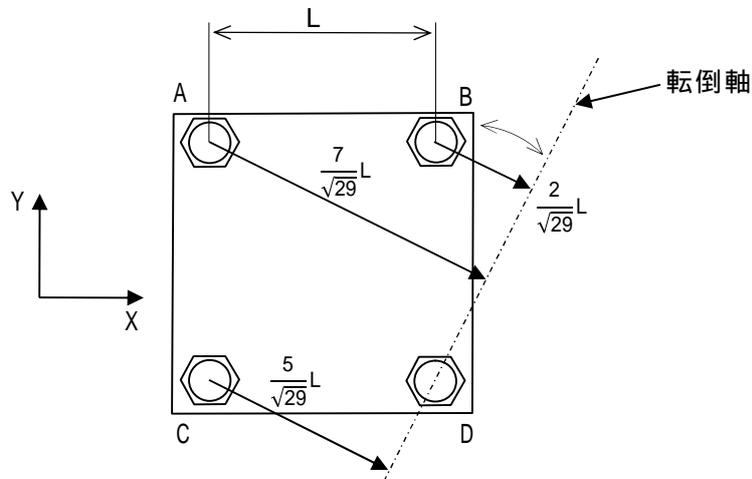
転倒軸からの距離により，

$$F_A : F_B : F_C = 7 : 2 : 5$$

であり，転倒軸周りのボルトの軸力により発生するモーメント M は，

$$\begin{aligned} M &= \frac{7}{\sqrt{29}} L F_A + \frac{2}{\sqrt{29}} L F_B + \frac{5}{\sqrt{29}} L F_C \\ &= \frac{7}{\sqrt{29}} L \times F_A + \frac{2}{\sqrt{29}} L \times \frac{2}{7} F_A + \frac{5}{\sqrt{29}} L \times \frac{5}{7} F_A \\ &= \frac{78}{7\sqrt{29}} L F_A \end{aligned}$$

である。



第 6 - 4 図 対角方向に応答する場合の転倒軸から距離

転倒しない場合，転倒軸周りのボルトの軸力により発生するモーメント M と水平方向地震力モーメントが釣り合っているので，

$$mg C_{XY} h = \frac{78}{7\sqrt{29}} L F_A$$

であり，引張力 F_A は以下のとおりとなる。

$$F_A = \frac{7\sqrt{29}}{78L} (mg C_{XY} h)$$

以上より，最も発生応力の大きいボルト A に発生する応力 σ'_b は

$$\sigma'_b = \frac{F_A}{A_b} = \frac{7\sqrt{29}}{78A_b L} (mg C_{XY} h)$$

であり，水平 1 方向地震動を考慮した場合のボルトにかかる応力 σ_b

$$\sigma_b = \frac{F_b}{2A_b} = \frac{1}{2A_b L} (mg C_H L)$$

に対して，震度 $C_{XY} = \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_H$ であることから

$$\begin{aligned} \sigma'_b &= \frac{7\sqrt{29}}{39 \times 2A_b L} (mg C_{XY} h) \\ &= \frac{7\sqrt{29}}{39 \times 2A_b L} \times \frac{5.8}{\sqrt{29}} (mg C_H h) \\ &= \frac{40.6}{39} \sigma_b \\ &= 1.04 \sigma_b \end{aligned}$$

となる。したがって，水平 2 方向入力時を考慮した場合，ボルトに発生する引張応力は増加するが，その影響は軽微である。

6.3 せん断応力への影響

せん断力は全基礎ボルト断面で負担するため，全ボルトに対するせん断力 F_b は，

$$F_b = F_H$$

であり、せん断応力 σ_b は断面積 A_b のボルト本数 n でせん断力 F_b を受けるため、

$$\sigma_b = \frac{F_b}{nA_b}$$

となる。

水平 1 方向の地震力を考慮した場合のせん断力 F_b 及び水平 2 方向の地震力を考慮した場合のせん断力 F_b' はそれぞれ、

$$F_b = mg C_x$$

$$F_b' = mg \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x = 1.08mg C_x$$

$$= 1.08 F_b$$

となる。水平 1 方向及び水平 2 方向地震時に断面積 A_b 及びボルト全本数 n は変わらないため、水平 2 方向地震を考慮した場合、ボルトに発生するせん断応力は増加するが、その影響は軽微である。

7. 水平 2 方向同時加振の影響について（電気盤）

7.1 はじめに

本資料は、電気盤に取り付けられている器具に対する水平 2 方向入力の影響をまとめたものである。

7.2 水平 2 方向加振の影響について

電気盤に取り付けられている器具については、1 次元的な接点の ON - OFF に関わる比較的単純な構造をしている。加えて、基本的にはすべて梁、扉等の強度部材に強固に固定されているため、器具の非線形応答もなく、水平 2 方向の加振に対しては独立に扱うことで問題ないものと考ええる。さらに器具の誤動作モードは、水平 1 方向を起因としたモードであるため、水平 2 方向加振による影響は軽微であると考ええる。

なお、念のために既往研究等において、電気盤の器具取付位置の応答加速度に対し、器具の確認済加速度が十分に高いことも確認している。

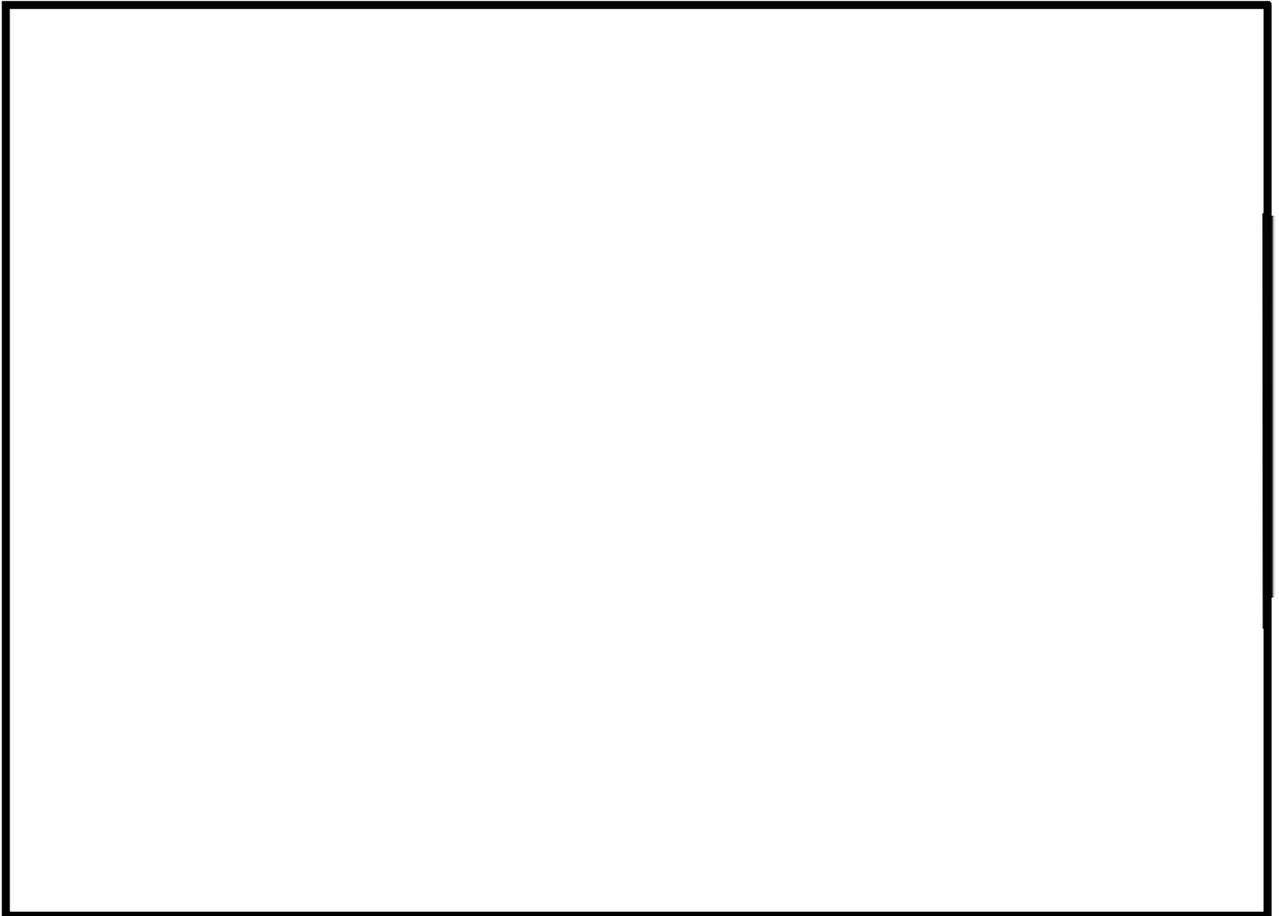
次頁より、メタクラ取付器具を代表とし、器具の構造から検討した結果をまとめる。

7.2.1 補助リレー

(1) 構造，作動機構の概要

第 7 - 1 図に補助リレーの構造及び作動機構を示す。補助リレーはコイルに通電されることにより生じる電磁力でアマチュア部を動作させ、接点の開閉を行うものである。

補助リレーのうち、固定鉄心、固定接点（A、B 接点）はいずれも強固に固定されており、可動鉄心は左右方向にのみ動くことのできる構造となっている。



第 7 - 1 図 補助リレー構造図

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

補助リレーの誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動鉄心が振動することにより，接点が誤接触，又は誤開放（左右方向）

ただし，補助リレーは取付部をボルト固定していること，また，器具の可動部は左右方向にのみ振動することから，誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と補助リレーの既往試験における確認済加速度及び試験結果を第7-1表に示す。

第7-1表 補助リレーの発生加速度及び機能確認済加速度

方 向	前 後	左 右	上 下
発生加速度(G)	0.97	0.97	0.84
確認済加速度(G)			

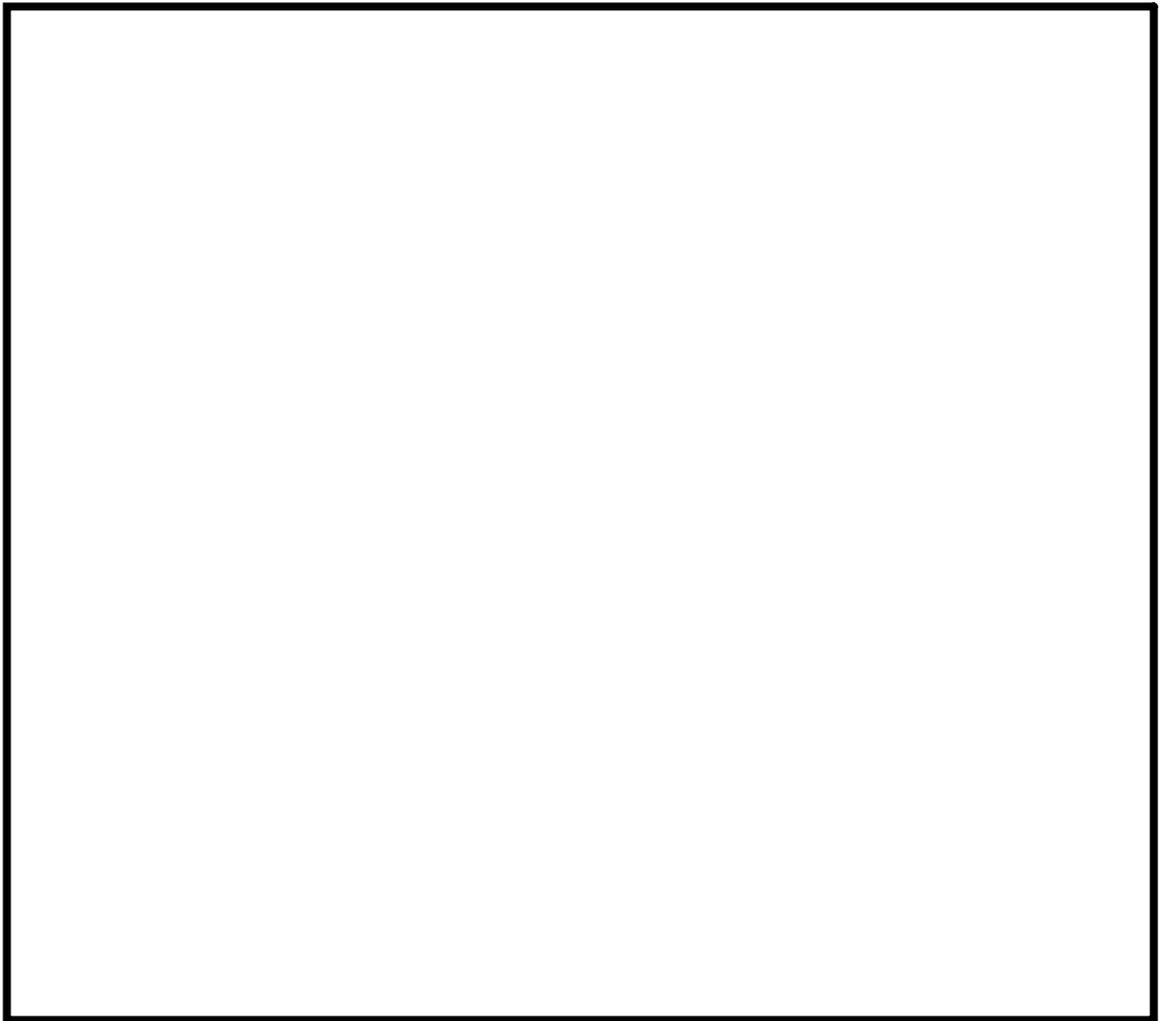
7.2.2 ノーヒューズブレーカ(MCCB)

(1) 構造，作動機構

第7-2図にMCCBの構造及び作動機構を示す。配線用遮断器には熱動電磁式と完全電磁式がある。下記に代表して熱動電磁式の動作原理と内部構造を示す。

熱動電磁式は、過電流が流れるとバイメタルが湾曲し、トリップ桿によりラッチの掛け合いが外れ、キャッチがバネにより回転し、リンクに連結された可動接点が作動し回路を遮断する。

また、短絡電流等の大電流が流れた場合は、固定鉄心の電磁力で可動鉄心が吸引されトリップ桿が作動し、以降は上述と同じ動作により回路を遮断する。



第 7 - 2 図 M C C B 構造図

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

M C C B の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・ ハンドルが逆方向へ動作する（上下方向）
- ・ 接点が乖離する（前後方向，左右方向）
- ・ ラッチが外れてトリップする（前後方向，上下方向）

上記より，M C C B の誤動作として 2 方向の振動の影響が考えられる。

ただし，ハンドルは 1 方向にしか振動できないこと，前後 - 左右の接点乖

離は各々独立であること（前後方向は接触 - 非接触，左右方向はずれによる）から，これらについては誤動作に至る事象に多次元的な影響はないものと考えられる。

ラッチ外れについては 2 軸の影響は無視できないと考えられるが，左右方向はラッチ外れに影響を与える誤動作モードではないため，水平 2 方向の影響はないものと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として，発生加速度と M C C B の既往試験における確認済加速度及び試験結果を第 7 - 2 表に示す。

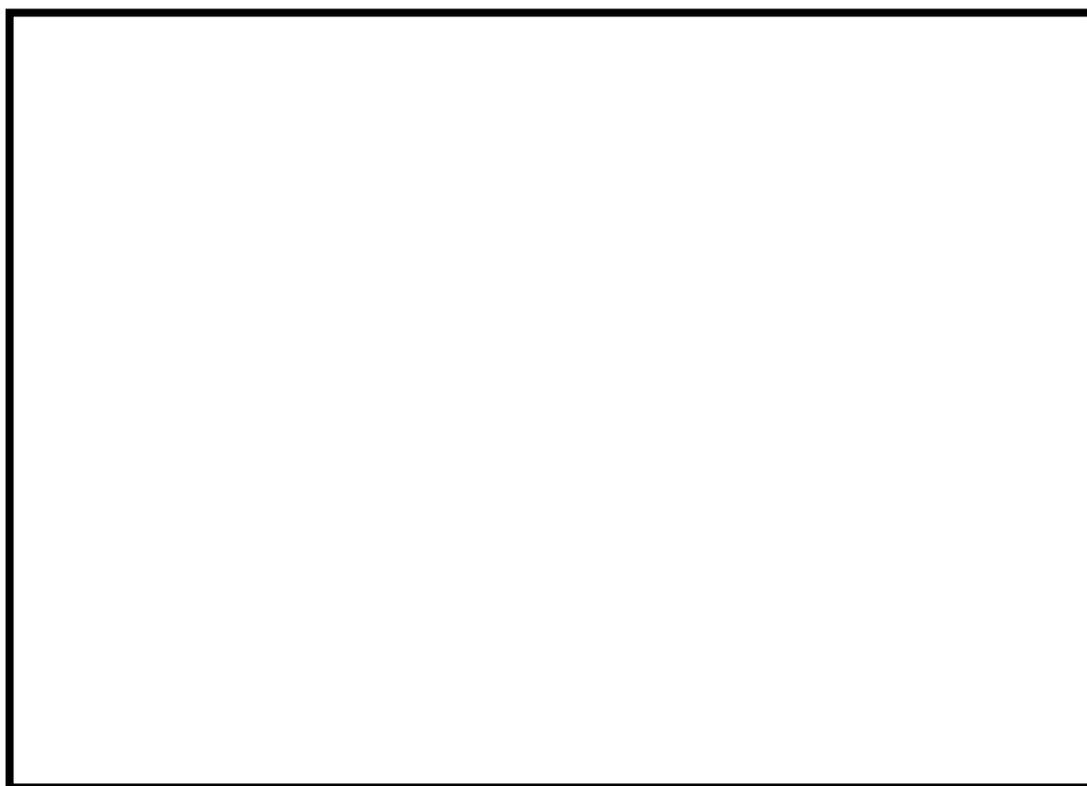
第 7 - 2 表 M C C B の発生加速度及び機能確認済加速度

方 向	前 後	左 右	上 下
発生加速度 (G)	0.97	0.97	0.84
確認済加速度 (G)	3.0	3.0	1.0

7.2.3 過電流リレー（保護リレー）

(1) 構造，作動機構の概要

第 7 - 3 図に過電流リレー(保護リレー)の構造を示す。過電流リレーは，電流コイル 1 個を持つ電磁石が動作トルクを発生し，永久磁石の制動により限時特性を得る円板形リレーであり，タップ値以上の過電流が流れると接点が動作し，警報や遮断器引き外しを行う。なお，過電流リレーはボルトにて盤の扉面に強固に取り付けられている。



第 7 - 3 図 過電流リレー

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

過電流リレーの誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・誘導円板が接触し，固渋する（上下方向）
- ・可動接点が振動し，接点の誤接触が生じる（前後，左右方向）

誘導円板の固渋については，昭和 56 年の日本機械学会講演論文集「誘導円板型リレーの地震時誤動作に関する研究」において，誘導円板が水平 2 方向入力により，回転し接点接触により，誤動作が生じることが報告されている。しかし，平成 13 年度に行われた電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究」において，水平 2 方向加振時に鉛直方向加振を加えた試験を実施しており，正弦波加振試験では誘導円板の回

転挙動が発生したが、地震波加振試験では誘導円板の回転挙動が発生しないことを確認している。したがって、地震波による水平 2 方向の影響はないものと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と過電流リレーの既往試験における確認済加速度及び試験結果を第 7 - 3 表に示す。

第 7 - 3 表 過電流リレーの発生加速度及び機能確認済加速度

方 向	前 後	左 右	上 下
発生加速度 (G)	0.97	0.97	0.84
確認済加速度 (G)			

方向性を考慮していない水平方向地震動における模擬地震波の作成方針

1. はじめに

応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動 $S_S - D1$ (以下「 $S_S - D1$ 」という。)及び震源を特定せず策定する地震動として策定された基準地震動 $S_S - 31$ (以下「 $S_S - 31$ 」という。)については、水平方向の地震動に方向性を考慮していないことから、水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う場合、水平2方向のうち新たにもう1方向の模擬地震波を作成し入力する等の方法が考えられる。本資料では、水平2方向のうち新たにもう1方向の模擬地震波の作成方針を示すものである。

2. 模擬地震波の作成方針

応答スペクトルに基づく地震動及び震源を特定せず策定する地震動における模擬地震波の作成方針を示す。

(1) 応答スペクトルに基づく地震動における模擬地震波

応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動の模擬地震波については、全く同じ地震動が同時に水平2方向に入力されることは現実的に考えにくいことから、 $S_S - D1$ を作成した方法と同一の方法で、目標とする応答スペクトルに適合する位相の異なる模擬地震波を作成する。

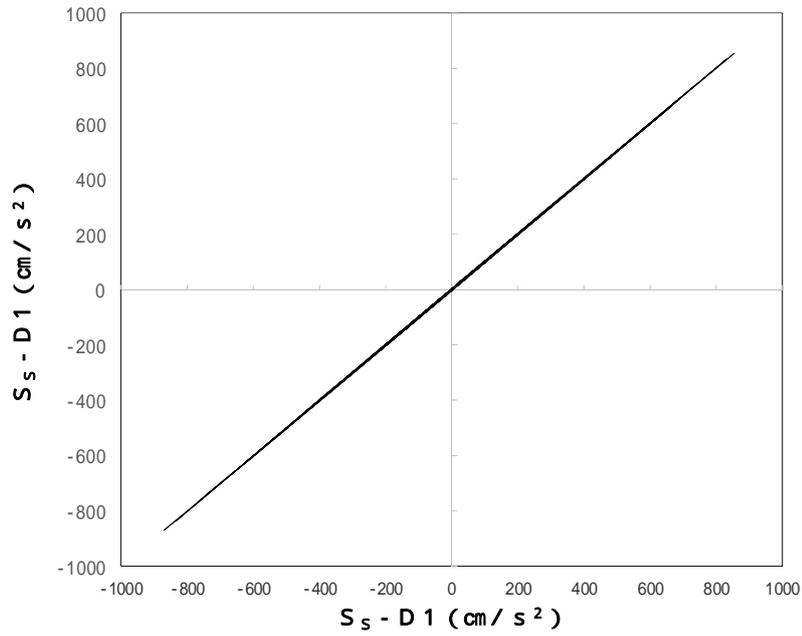
(2) 震源を特定せず策定する地震動における模擬地震波

$S_S - 31$ については、2004年北海道留萌支庁南部地震(以下「留萌地震」という。)の観測記録より策定された地震動である。水平方向の地震動は、EW方向の観測記録から推定される基盤相当位置の地震動に基づき敷地地盤の物性等を踏まえて作成されている。水平2方向の影響評価に用いる模擬地震波については、 $S_S - 31$ を作成した方法と同一の方法により、

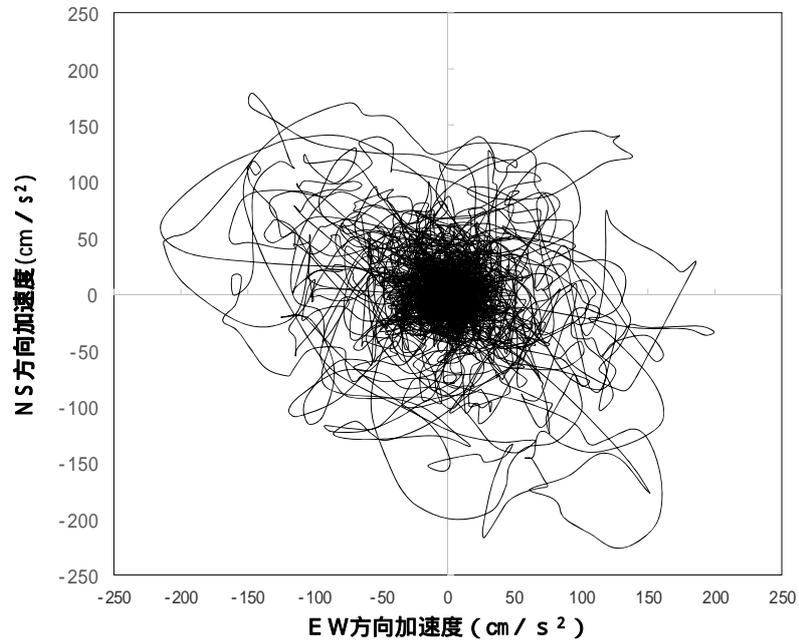
NS方向の観測記録を用いて地震波を作成する。

同位相の模擬地震波を2方向に入力した場合の例として、 $S_s - D1$ を2方向に入力した場合のオービットを第1図に、位相の異なる地震波を2方向に入力した例として、東北地方太平洋沖地震における原子炉建屋での観測記録のオービットを第2図に示す。

第1図に示すように同位相の模擬地震波を入力した場合は、 45° 方向に直線的な軌跡を示すが、観測記録として得られた東北地方太平洋沖地震によるオービットは第2図に示すようにランダムな軌跡となる。模擬地震波の作成においては、第2図に示すような位相差によって生じるランダムな軌跡を示す模擬地震波を作成する。



第1図 $S_s - D 1$ を水平2方向に入力した場合のオービット
 (同位相の模擬地震波を2方向入力した場合の傾向)



第2図 東北地方太平洋沖地震における原子炉建屋(EL.-4.0m)のオービット
 (位相が異なる地震波を2方向入力した場合の傾向)

東海第二発電所

使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価方針について

1. はじめに

本資料の構成は、以下の3項目から成る。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析

使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震計算書

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの既工認からの
変更について

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析

目 次

1. 概要
2. 基本方針
 - 2.1 位置
 - 2.2 構造概要
 - 2.3 解析方針
 - 2.4 適用規格・基準等
3. 解析方法
 - 3.1 地震応答解析モデル
 - 3.2 入力地震動
 - 3.3 解析方法
 - 3.4 解析条件
4. 解析結果
 - 4.1 動的解析

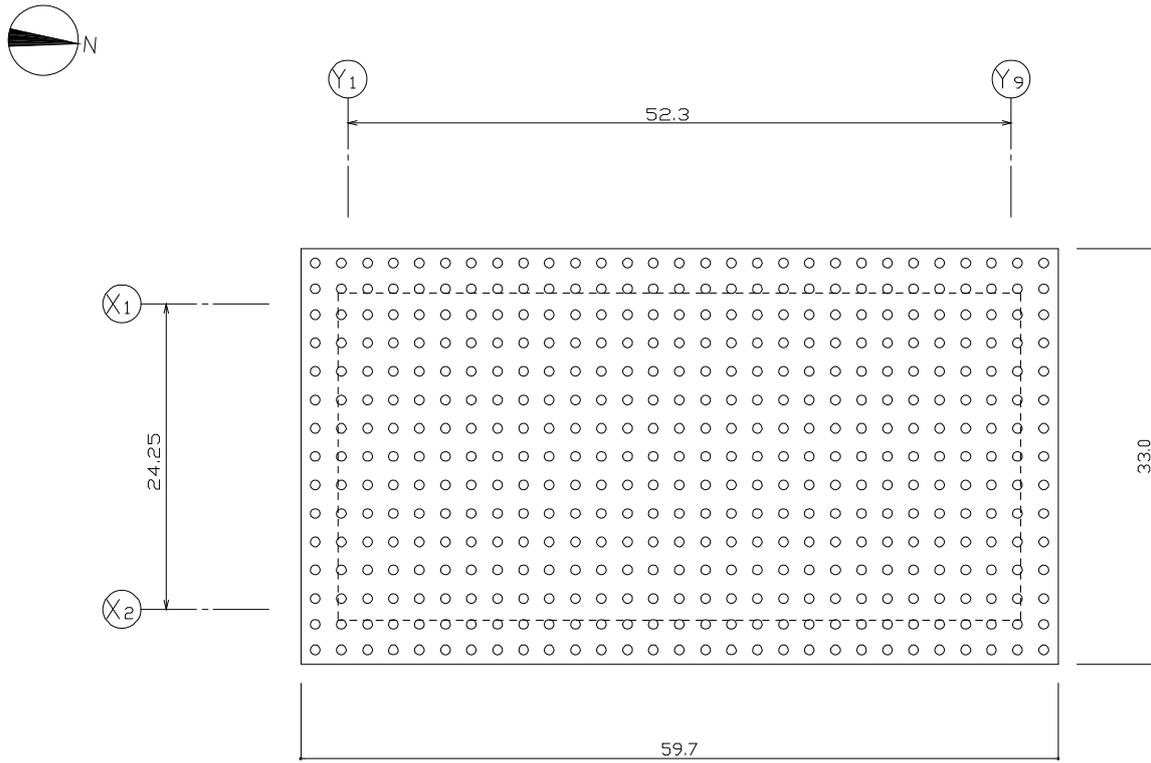
1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を24基収納する地上1階建、平面が約52 m（南北方向）×約24 m（東西方向）、地上高さ約21 mの鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物である。使用済燃料乾式貯蔵建屋の平面図を図1-1に示す。

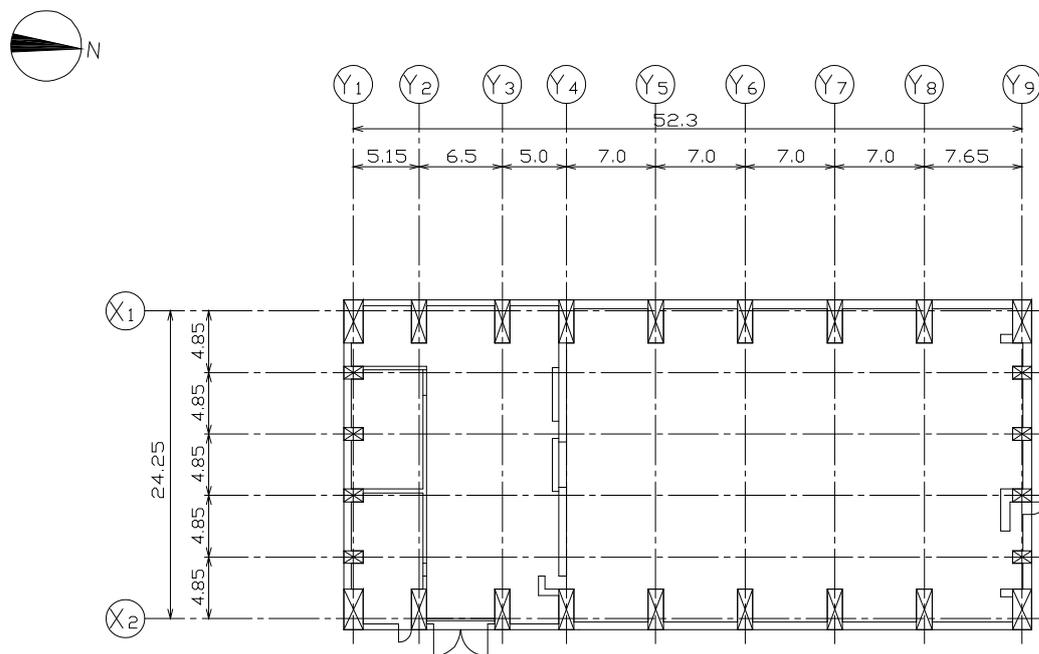
使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎版は厚さ約2.5 m（一部約2.0 m）で、鋼管杭を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。使用済燃料乾式貯蔵建屋に加わる地震時の水平力は、外周部に配置された耐震壁と柱及び梁（屋根トラス）からなるフレーム構造で負担する。耐震壁には、冷却空気取り入れのための開口がある。

本資料は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析について説明するものである。

地震応答解析結果により算出した各種応答値は、検討用地震力として用いる。



(杭伏図 : EL. - 5.8 m)



(1階平面図 : EL.8.3 m)

図 1 - 1 使用済燃料貯蔵建屋の概要 (平面図)

2. 基本方針

2.1 位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置を図2 - 1に示す。

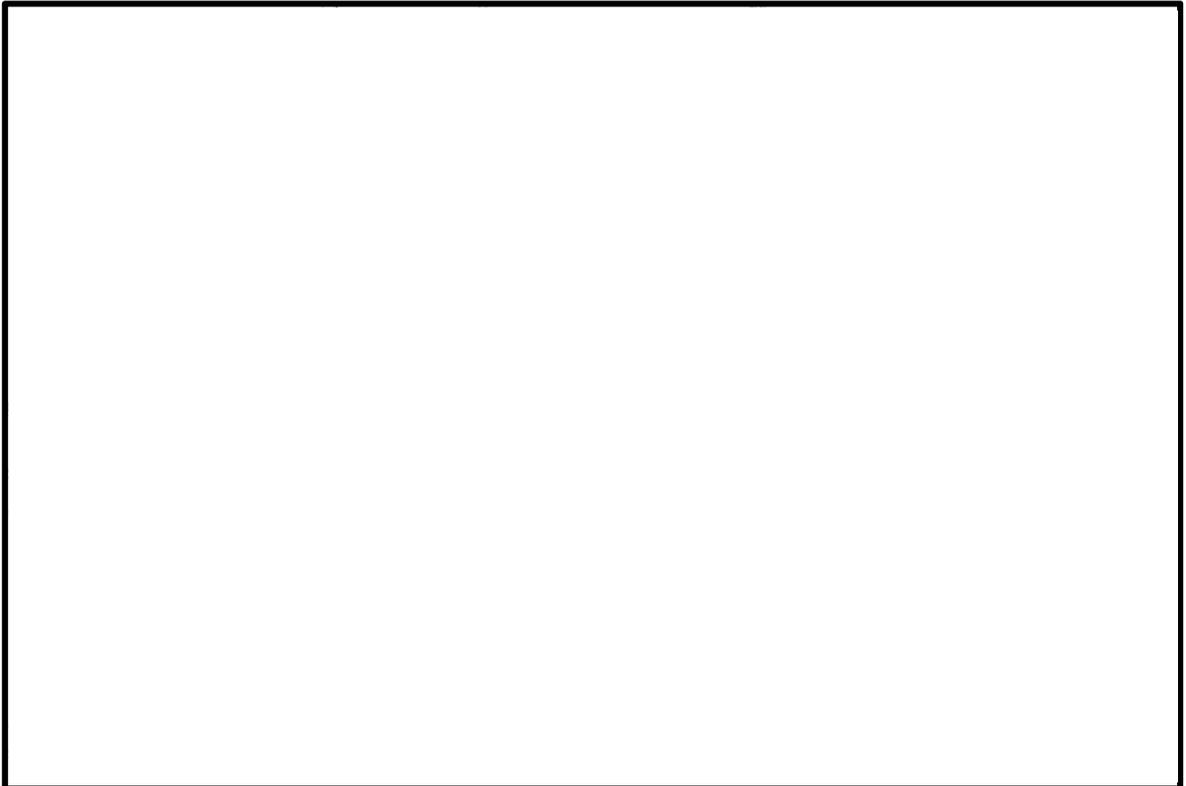


図2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置

2.2 構造概要

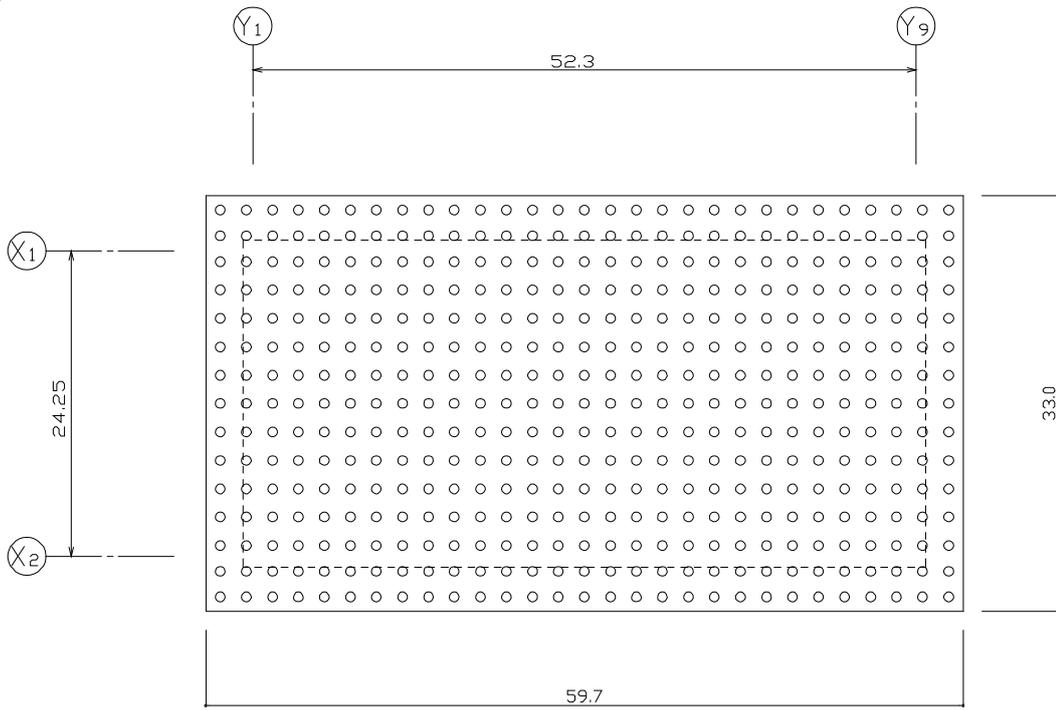
使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を24基収納する地上1階建の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート及び鉄骨造）の建物である。

使用済燃料乾式貯蔵建屋に加わる地震時の水平力は、外周部に配置された耐震壁と柱及び梁（屋根トラス）からなるフレーム構造で負担する。耐震壁には、冷却空気取り入れのための開口がある。

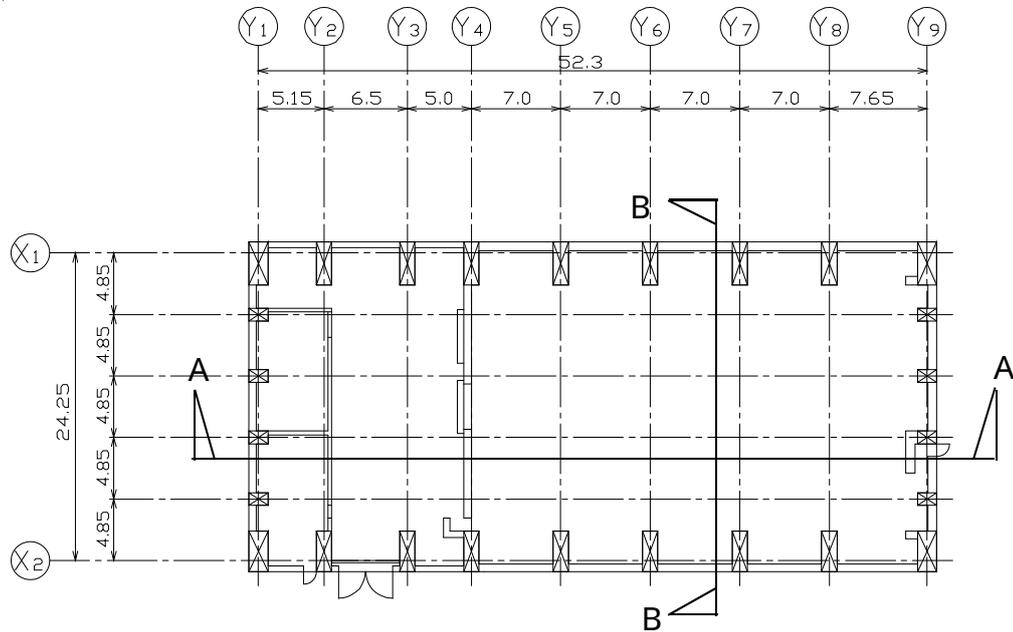
使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要を図2 - 2及び図2 - 3に示す。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、地上1階建で平面が約52 m（南北方向）×約24 m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物であり、適切に配置された耐震壁で構成された剛な構造としている。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎は、平面が約60 m（南北方向）×約33 m（東西方向）、厚さ約2.5 m（一部約2.0 m）で、鋼管杭を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。

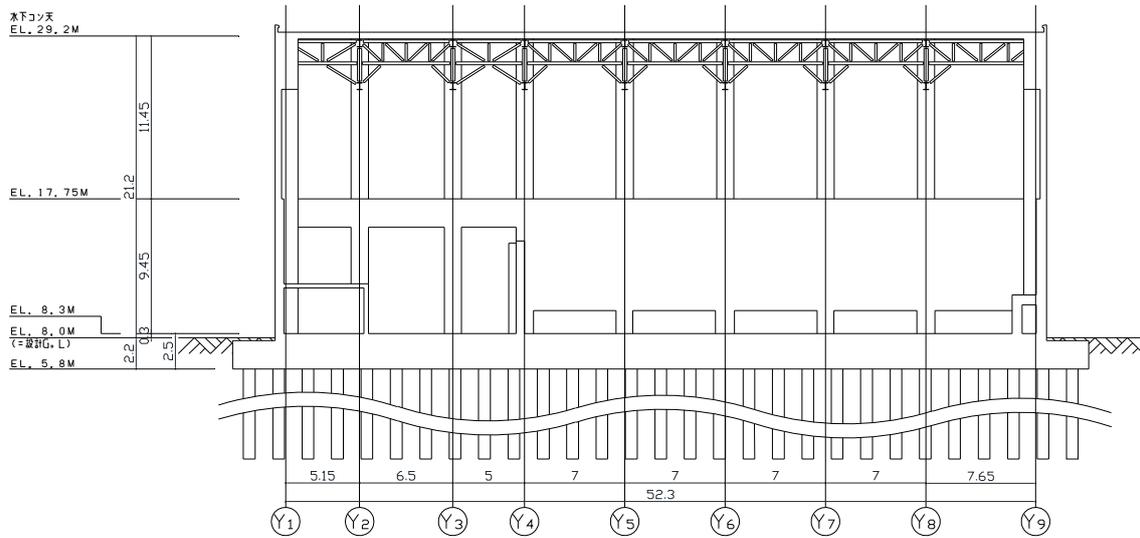


(杭伏図 : EL. - 5.8 m) 杭仕様 : 鋼管杭 812.8 ,
t = 16 (SKK400)

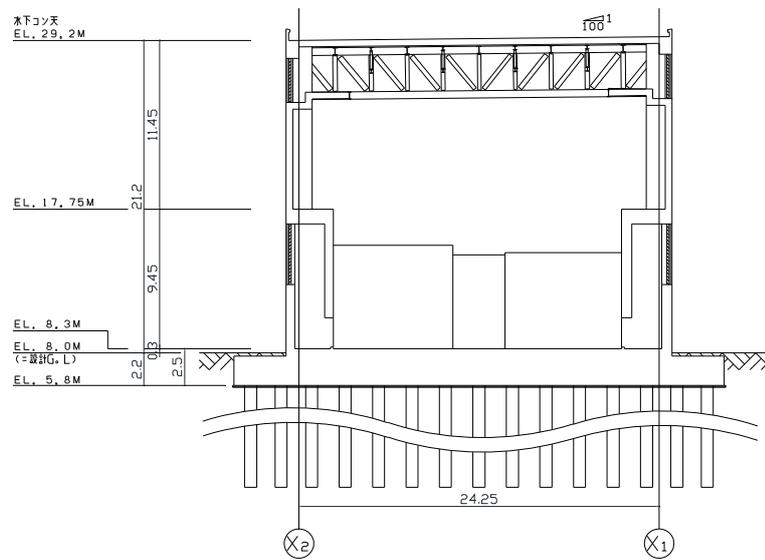


(1 階平面図 : EL. 8.3 m)

図2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (平面図)



(NS方向 , A - A 断面)



(EW方向 , B - B 断面)

図2 - 3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (断面図)

2.3 解析方針

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析フローを図2 - 4に示す。

地震応答解析は、「3.1 地震応答解析モデル」において設定した地震応答解析モデル及び「3.2 入力地震動」において設定した入力地震動を用いて実施することとし、「3.3 解析方法」及び「3.4 解析条件」に基づき、「4.1 動的解析」においては、せん断ひずみ等を含む各種応答値を算出する。

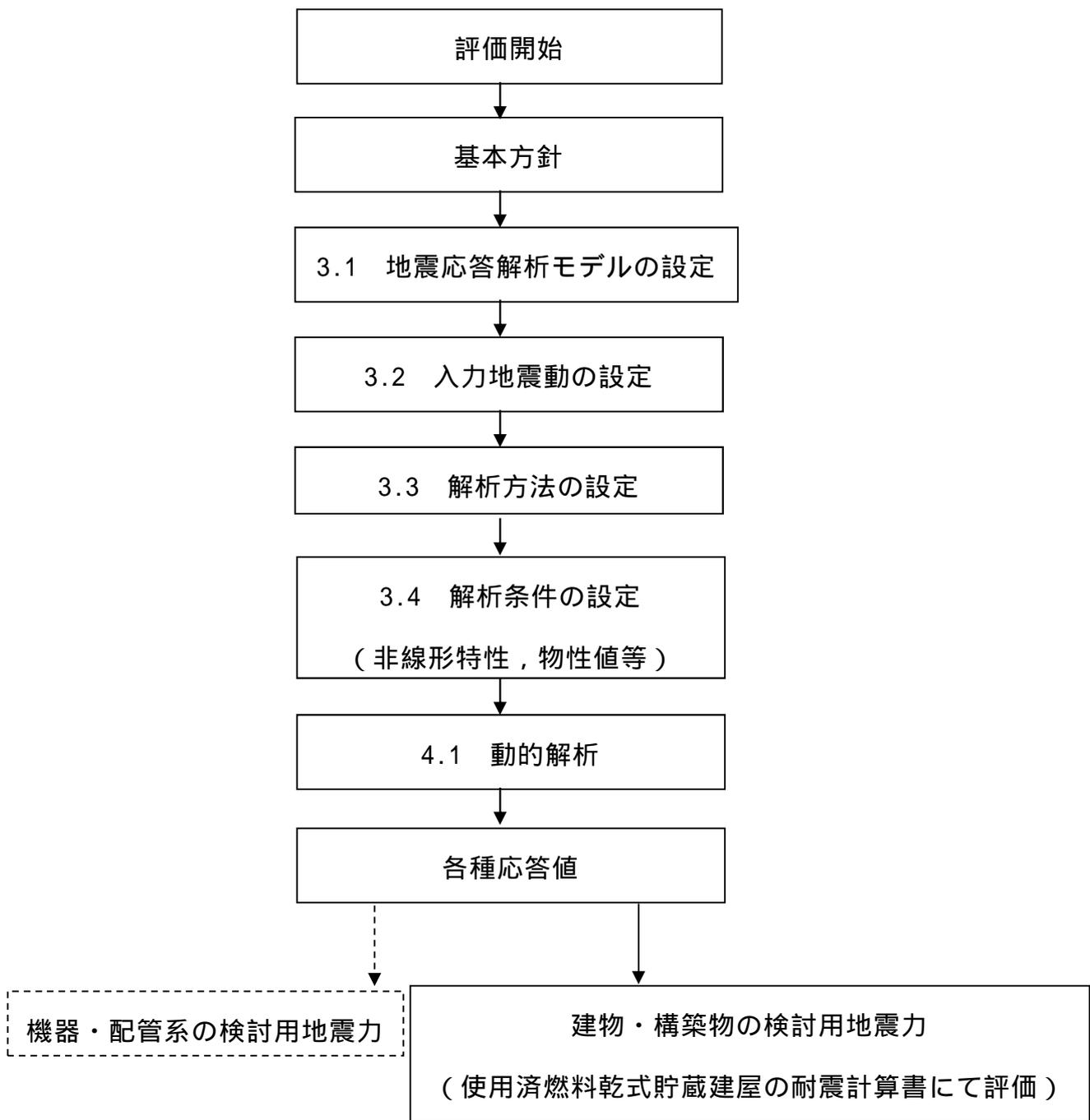


図 2 - 4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析フロー

2.4 適用規格・基準等

地震応答解析において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社)日本建築学会, 2010)
- ・ 建築基礎構造設計指針((社)日本建築学会, 2001)
- ・ 鋼構造塑性設計指針((社)日本建築学会, 2017)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力度編 J E A G 4601・補-1984((社)日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987((社)日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1991 追補版((社)日本電気協会) (以下「J E A G 4601-1991 追補版」という。)

3. 解析方法

3.1 地震応答解析モデル

地震応答解析モデルの設定に用いた使用済燃料乾式貯蔵建屋の物性値を表 3 - 1 に示す。

建屋の減衰定数は、鉄筋コンクリート部を5%、鉄骨部を2%とし、モード減衰として与えている。各次のモード減衰定数は、建屋各部のひずみエネルギーに比例した値として算定している。

水平方向の地震応答解析モデルは、耐震壁の非線形性を考慮した質点系モデルとし、建屋 - 杭 - 地盤の相互作用を考慮するため、基礎下端に薄層要素法により算定した水平及び回転ばねを設けている。

鉛直方向の地震応答解析モデルは、耐震壁の軸剛性を軸ばねで表現した質点系モデルとし、建屋 - 杭 - 地盤の相互作用を考慮するため、基礎下端に薄層要素法により算定した鉛直ばねを設けている。屋根トラスモデルは、曲げ変形とせん断変形を生じる質点系の曲げせん断ばりとしている。

地震応答解析モデル及び振動諸元を図 3 - 1 ~ 図 3 - 3、表 3 - 2 ~ 表 3 - 4 に示す。

基礎下端の底面地盤ばねは、薄層要素法により算定している。

この振動数依存の複素ばねを J E A G 4601-1991 追補版に基づき近似したものを解析に用いており、底面地盤ばねの剛性は、静的解を用いて振動数に対して一定値とし、底面地盤ばねの減衰は、 γ の 1 次式の形で示し、地盤 - 建屋連成系の 1 次固有円振動数で虚部の値と一致するように設定している。地盤ばねの近似法を図 3 - 4 に、地盤ばね定数（入力地震動 $S_s - D 1$ の場合）を表 3 - 5 に示す。

表 3 - 1 建物・構築物の物性値

建物 ・構築物	使用材料	ヤング 係数 E (N / mm ²)	せん断 弾性係数 G (N / mm ²)	減衰 定数 h (%)
使用済燃料 乾式貯蔵 建屋	コンクリート : $F_c = 23.5$ (N / mm ²) ($F_c = 240$ kgf / cm ²) 鉄 筋 : SD345 SD390	2.25×10^4	9.38×10^3	5
	鉄 骨 : SS400 SM400A	2.05×10^5	7.9×10^4	2
	鋼管杭 : SKK400 812.8 × t 16	2.05×10^5	7.9×10^4	2

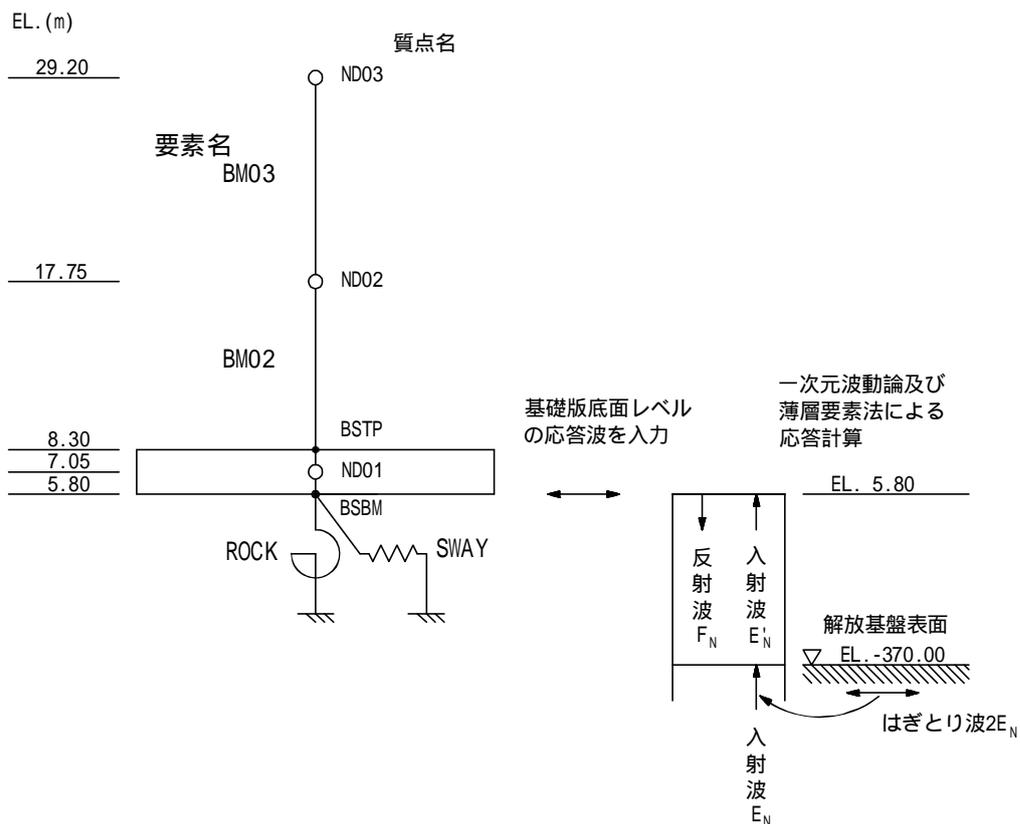


図 3 - 1 地震応答解析モデル (N S 方向)

表 3 - 2 地震応答解析モデル及び振動諸元 (N S 方向)

質点名	質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^6$ kN \cdot m 2)	せん断断面積 (m 2)	断面2次 モーメント (m 4)	要素名
ND03	40,700	9.81	24.17	5,997	BM03
ND02	40,900	16.5			
ND01	163,000	48.6	30.09	8,000	BM02

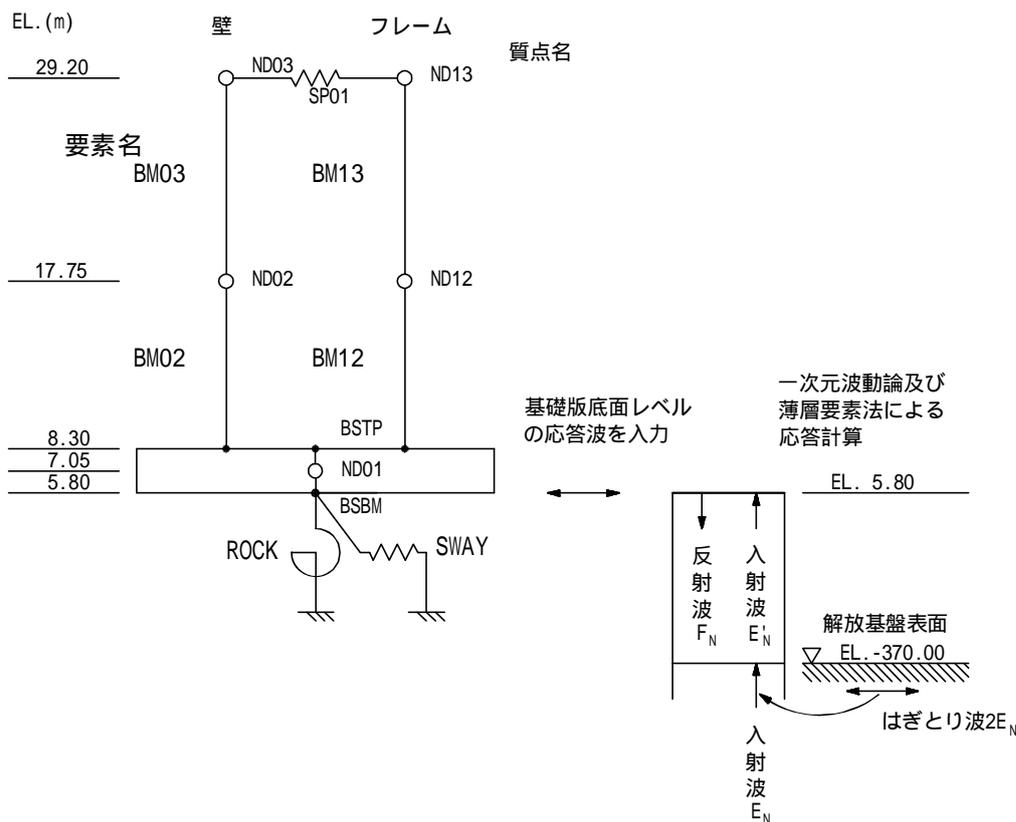


図3 - 2 地震応答解析モデル (E W方向)

表3 - 3 地震応答解析モデル及び振動諸元 (E W方向)

質点名 (ND)	質点重量 (kN)		回転慣性重量 ($\times 10^6$ kN \cdot m 2)		せん断断面積 (m 2)		断面2次 モーメント (m 4)		要素名 (BM)		
	壁	フレーム	壁	フレーム	壁	フレーム	壁	フレーム	壁	フレーム	
03	13	12,300	28,400	0.701	-	23.40	29.40	3,495	7.503	03	13
02	12	13,600	27,300	0.774	-						
01		163,000		15.27		33.63	55.44	4,429	50.45	02	12

屋根スラブせん断ばね	剛性
SP01	8.38×10^6 kN / m

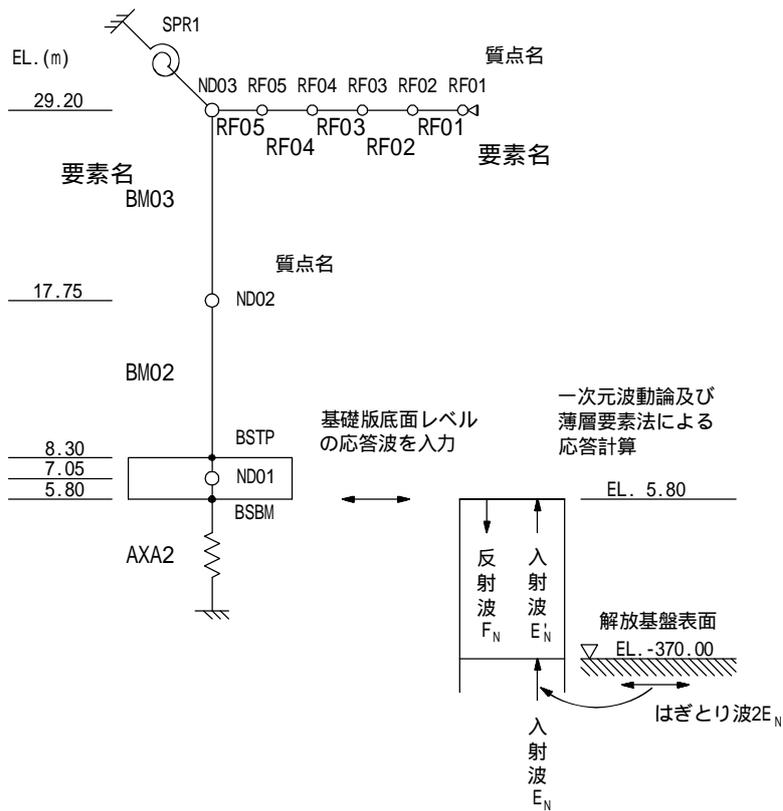


図3 - 3 地震応答解析モデル（鉛直方向）

表3 - 4 地震応答解析モデル及び振動諸元（鉛直方向）

質点名	重量 (kN)	軸断面積 (m ²)	せん断断面積 (m ²)	断面2次 モーメント (m ⁴)	要素名
RF01	235	-	0.0182	0.1898	RF01
RF02	481		0.02584	0.1898	RF02
RF03	481		0.02584	0.1898	RF03
RF04	481		0.03432	0.1898	RF04
RF05	481		0.03432	0.1898	RF05
ND03	3,140	9.42	-	-	BM03
ND02	5,320	15.46	-	-	BM02
ND01	21,200		-	-	

回転拘束ばね	剛性
SPR1	1.69 × 10 ⁷ kN・m / rad

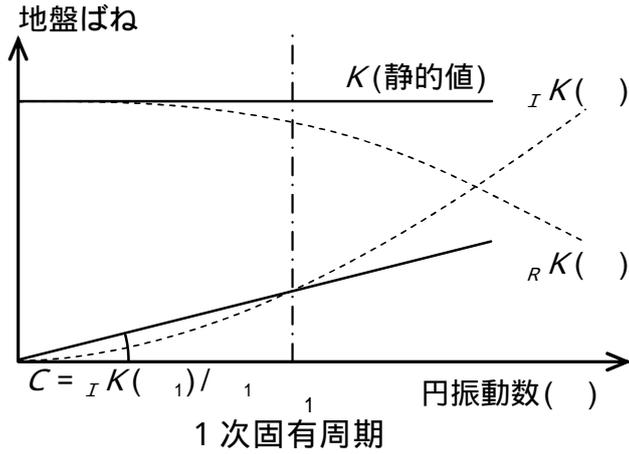


図3 - 4 底面地盤ばねの近似法

表3 - 5 地盤ばね算定結果 (基準地震動 S_s - D 1 の場合)

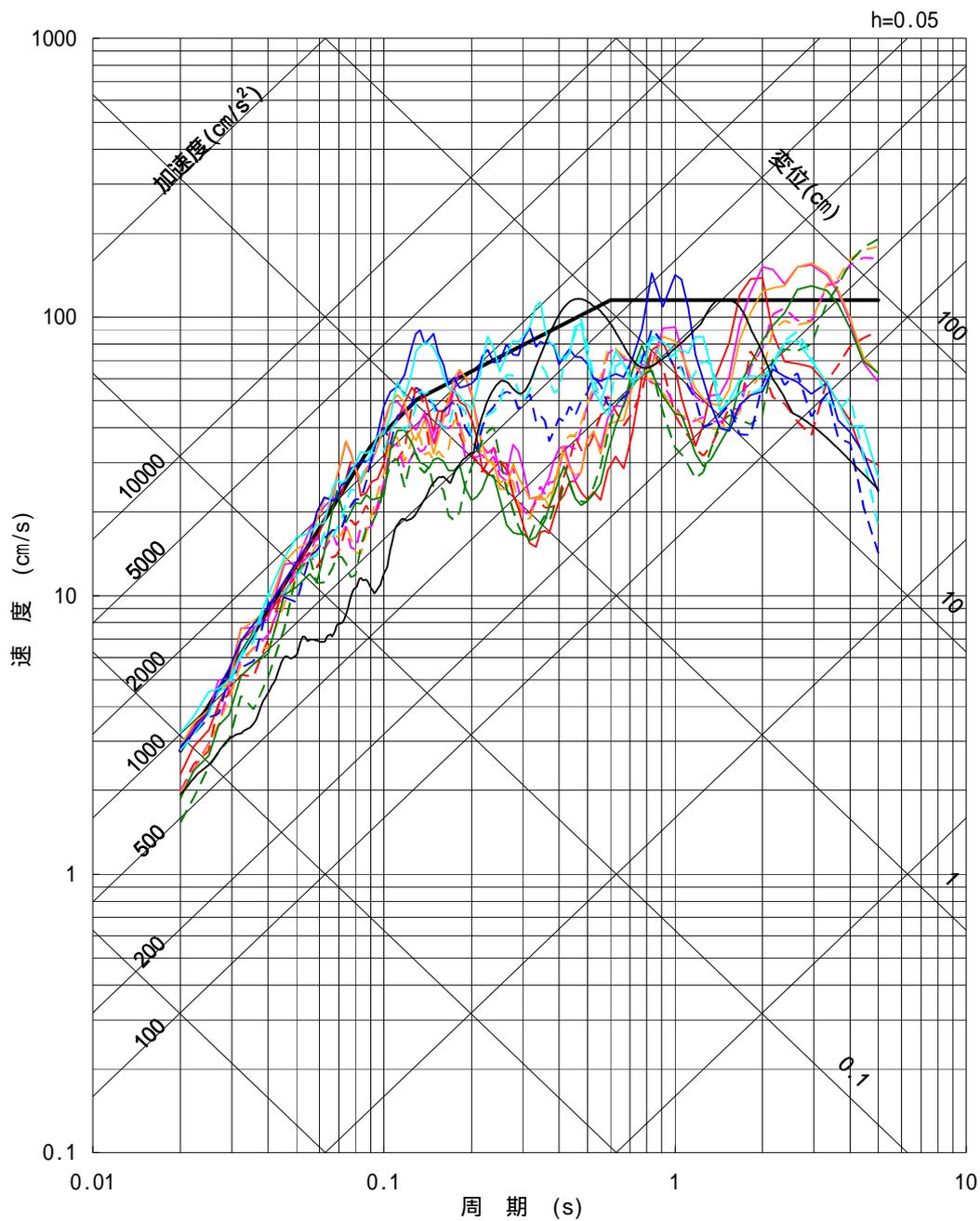
加振方向	固有振動数	ばね種別	標高 EL.	算定結果				
				K : ばね定数		C : 減衰係数		
	Hz			m				
N S	3.76	底面	水平	5.8	1.63 × 10 ⁷	kN / m	7.18 × 10 ⁵	kN・s / m
			回転	5.8	2.99 × 10 ¹⁰	kN・m / rad	5.62 × 10 ⁸	kN・m・s / rad
水平	5.8		1.79 × 10 ⁷	kN / m	8.32 × 10 ⁵	kN・s / m		
回転	5.8		1.17 × 10 ¹⁰	kN・m / rad	1.36 × 10 ⁸	kN・m・s / rad		
E W	3.67	上下	5.8	7.45 × 10 ⁶	kN / m	5.25 × 10 ⁵	kN・s / m	

3.2 入力地震動

地震応答解析に用いる入力地震動は、基準地震動 S_s を用いた地盤応答解析に基づき算定する。

3.2.1 基準地震動 S_s

基準地震動 S_s の設計用応答スペクトルを図3 - 5に、一覧を表3 - 6に、加速度波形を図3 - 6に示す。



実線はNS成分，破線はEW成分を示す。

- Ss - D1
- Ss - 11
- Ss - 12
- Ss - 13
- Ss - 14
- Ss - 21
- Ss - 22
- Ss - 31

図3 - 5 (1 / 2) 基準地震動 S_s の応答スペクトル (水平方向)

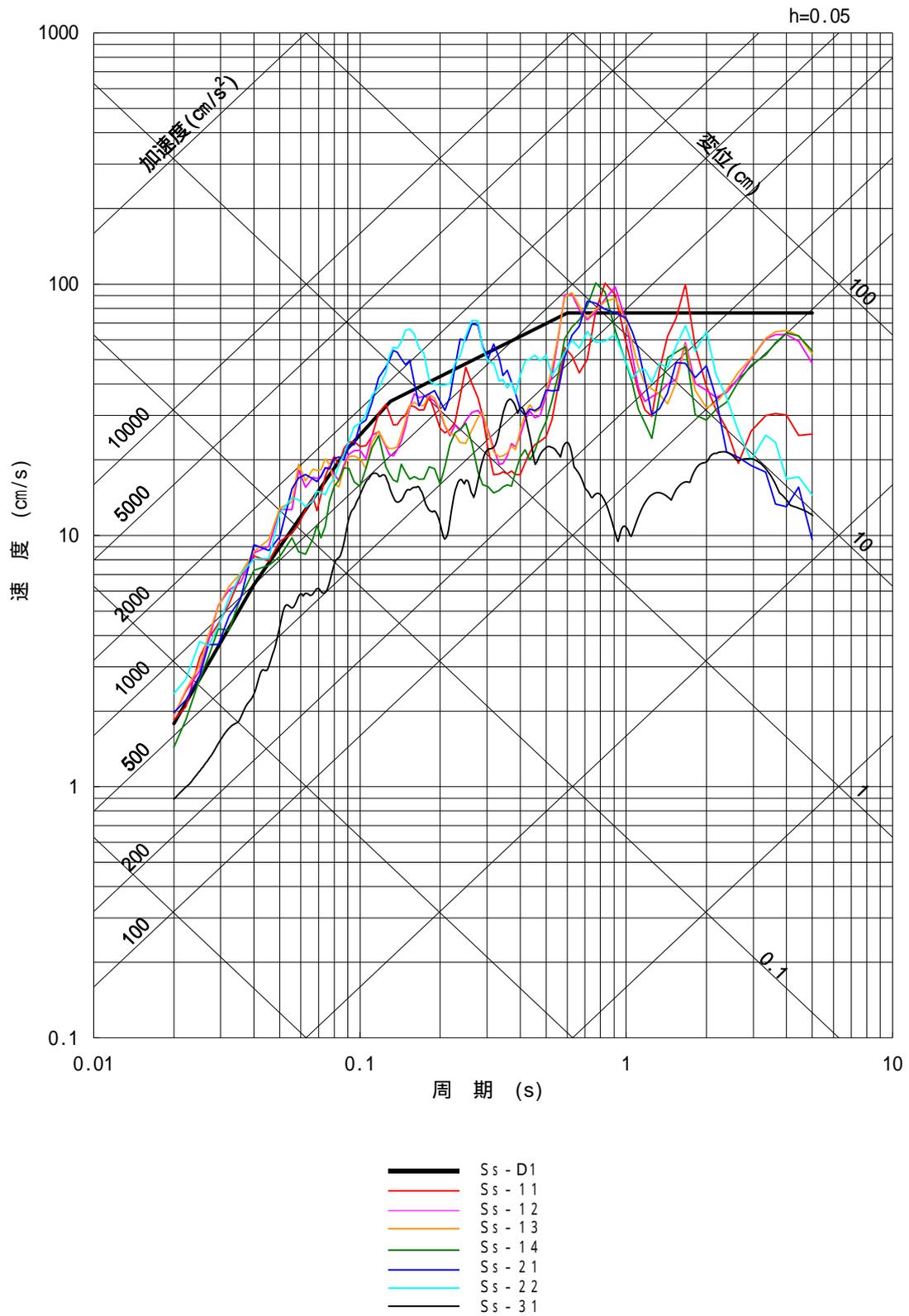
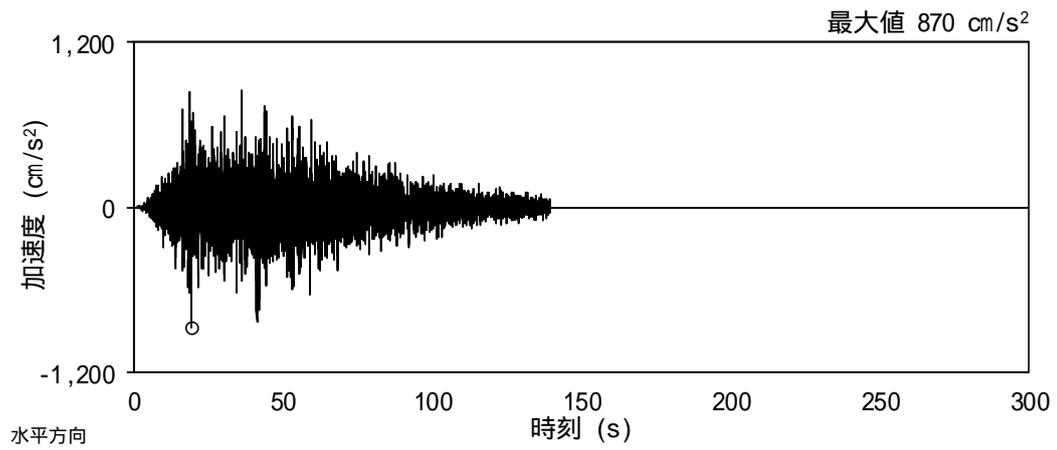


図3-5(2/2) 基準地震動 S_s の応答スペクトル(鉛直方向)

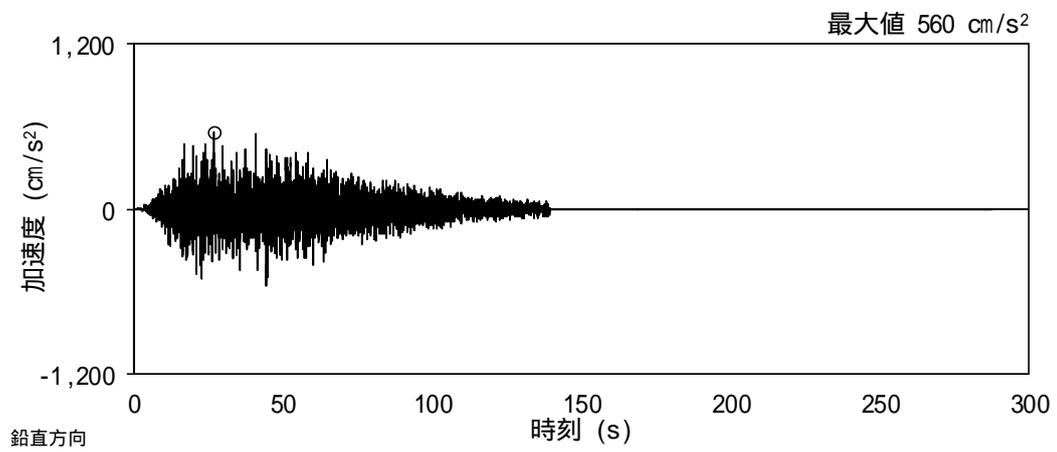
表 3 - 6 基準地震動 S_s の一覧

No.	名称	継続時間 (s)	方向	加速度最大値 (cm / s^2)
1	$S_s - D 1$	139.28	水平	870
			鉛直	560
2	$S_s - 1 1$	194.03	N S	717
			E W	619
			U D	579
3	$S_s - 1 2$	173.18	N S	871
			E W	626
			U D	602
4	$S_s - 1 3$	179.22	N S	903
			E W	617
			U D	599
5	$S_s - 1 4$	174.46	N S	586
			E W	482
			U D	451
6	$S_s - 2 1$	287.83	N S	901
			E W	887
			U D	620
7	$S_s - 2 2$	287.59	N S	1,009
			E W	874
			U D	736
8	$S_s - 3 1$	20.00	水平	610
			鉛直	280

注：いずれも時間刻みは 0.01 s

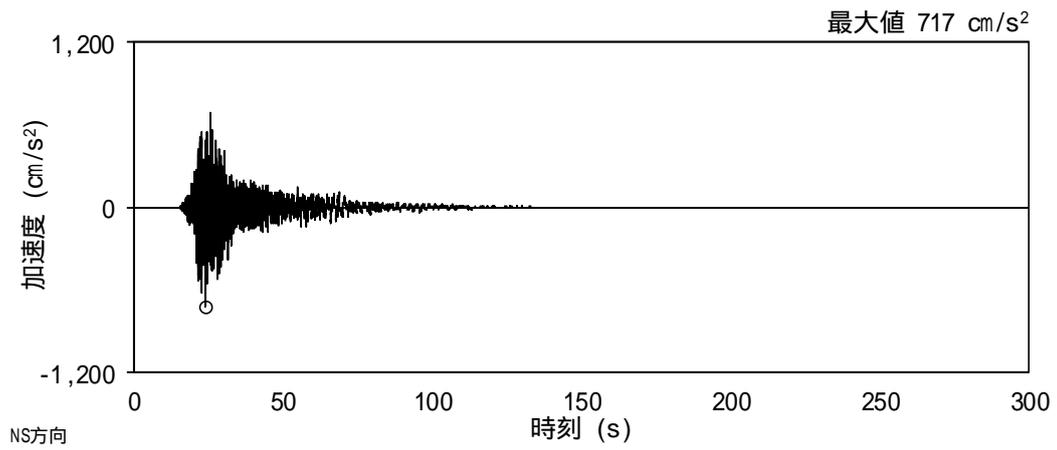


(a) 水平方向

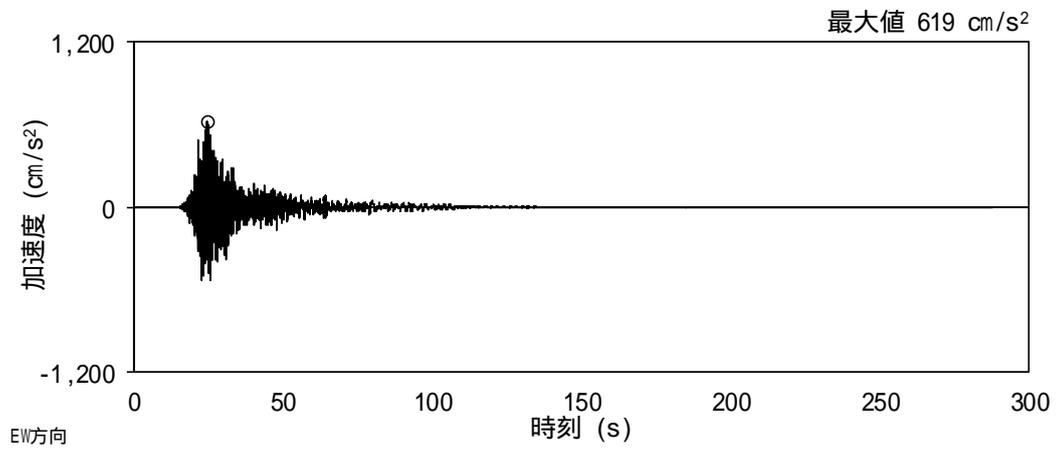


(b) 鉛直方向

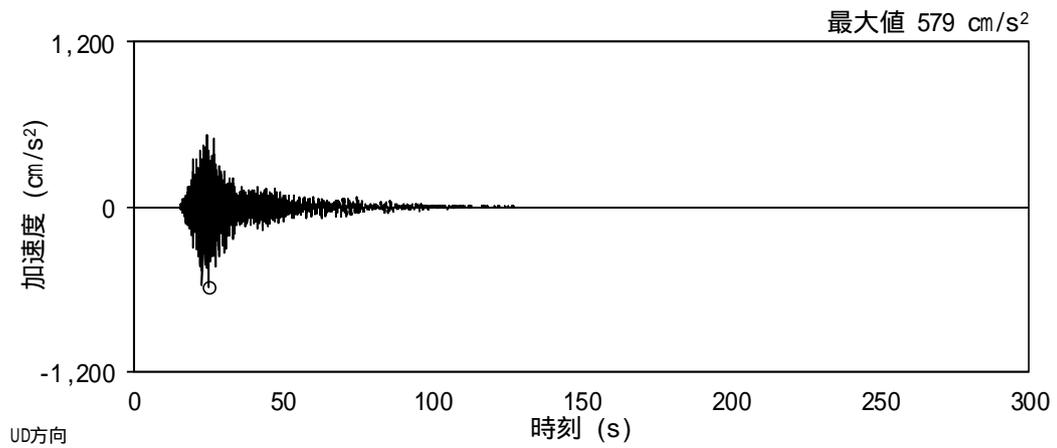
図3 - 6 (1 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - D1$)



(a) N S 方向

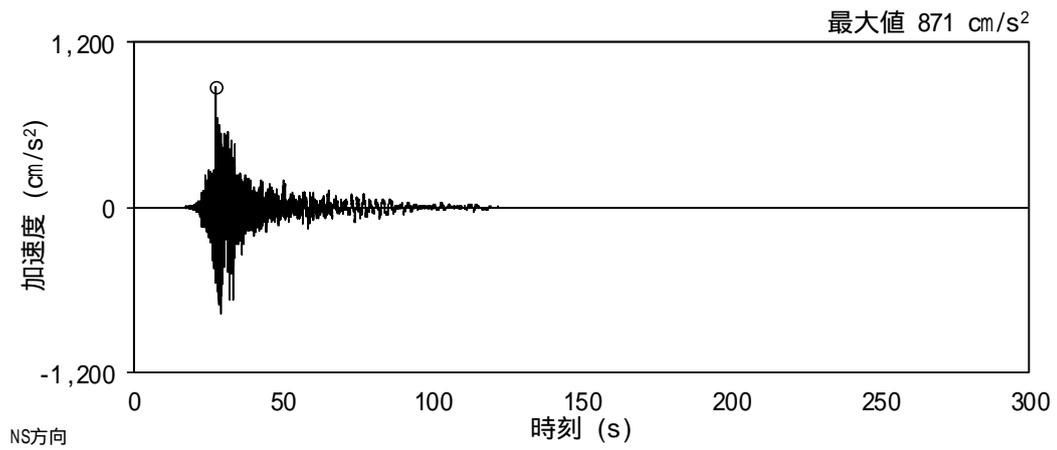


(b) E W 方向

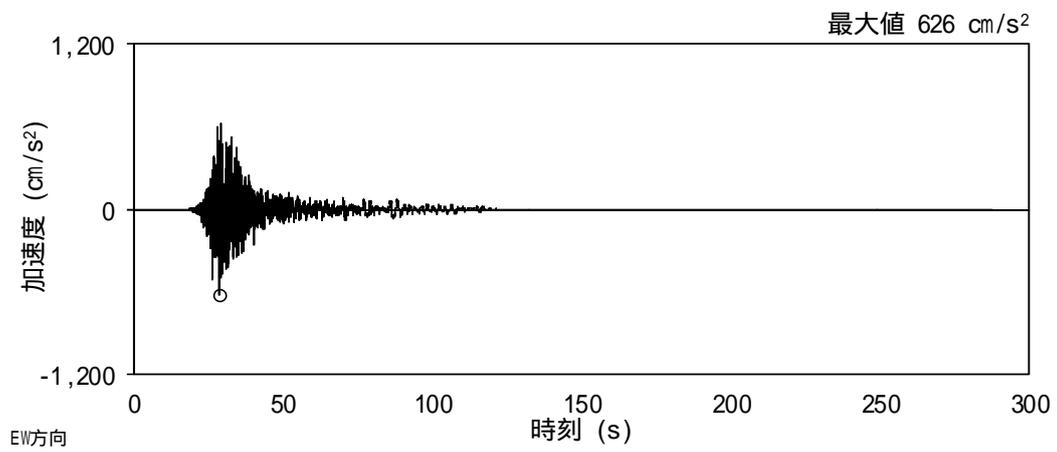


(c) U D 方向

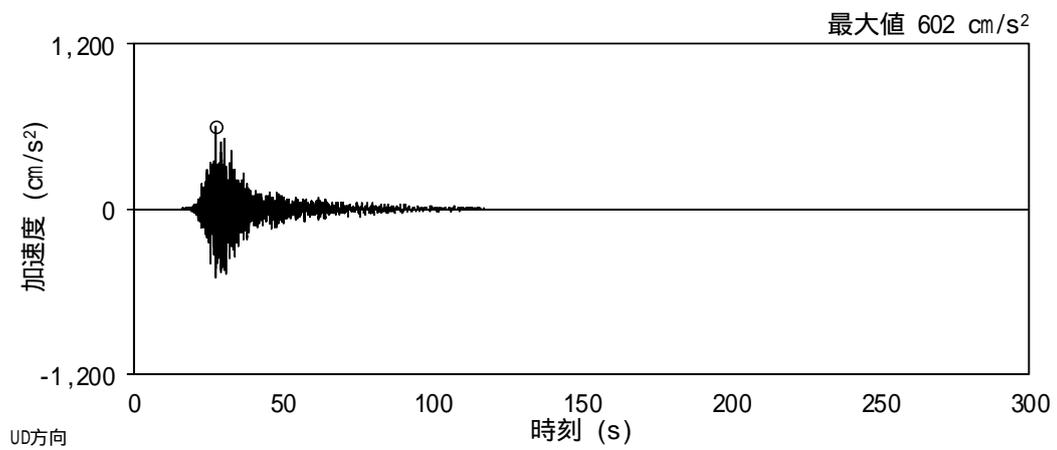
図 3 - 6 (2 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - 11$)



(a) N S 方向

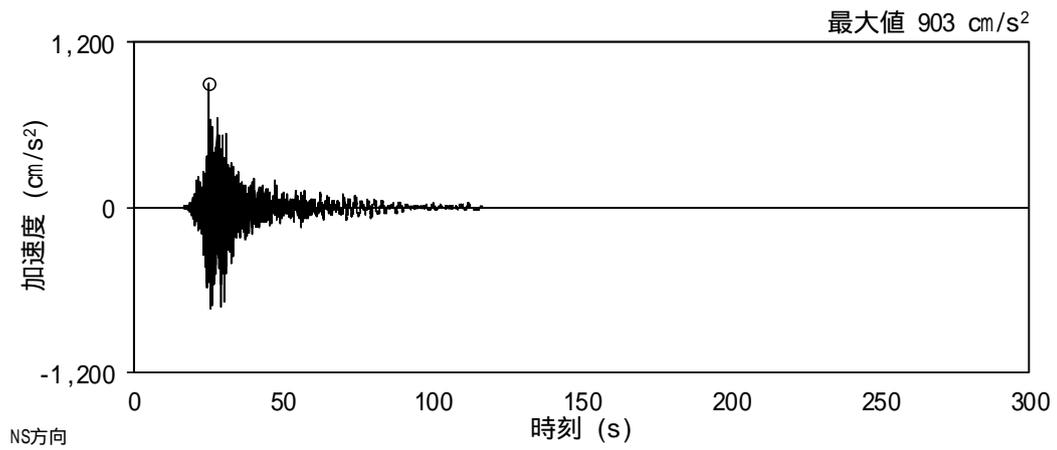


(b) E W 方向

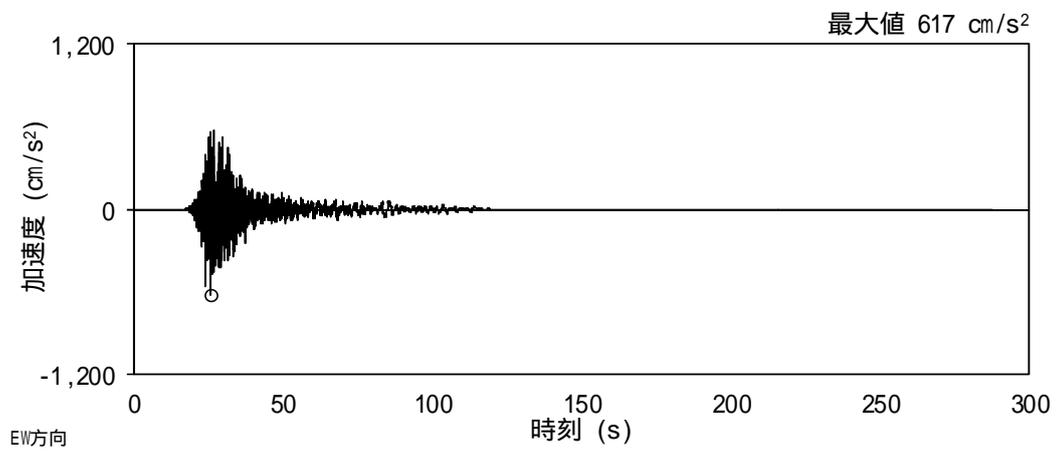


(c) U D 方向

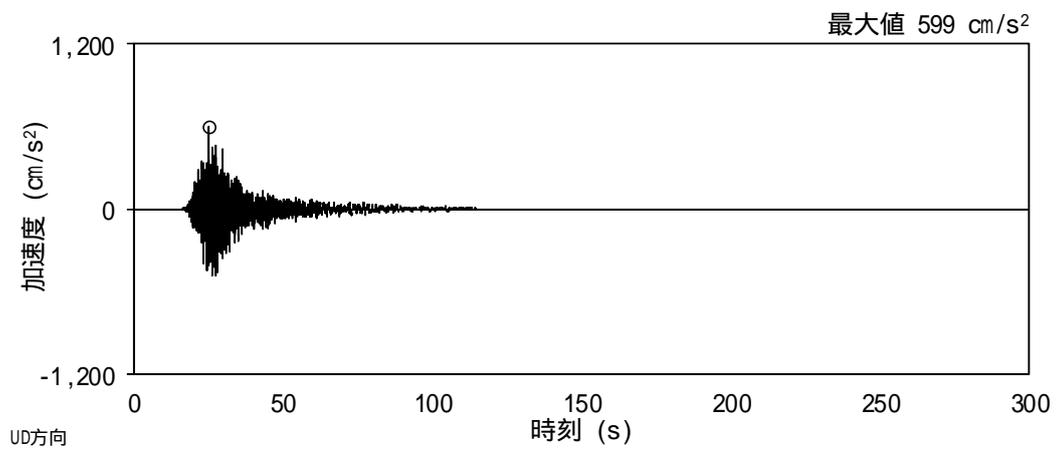
図 3 - 6 (3 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - 12$)



(a) N S 方向

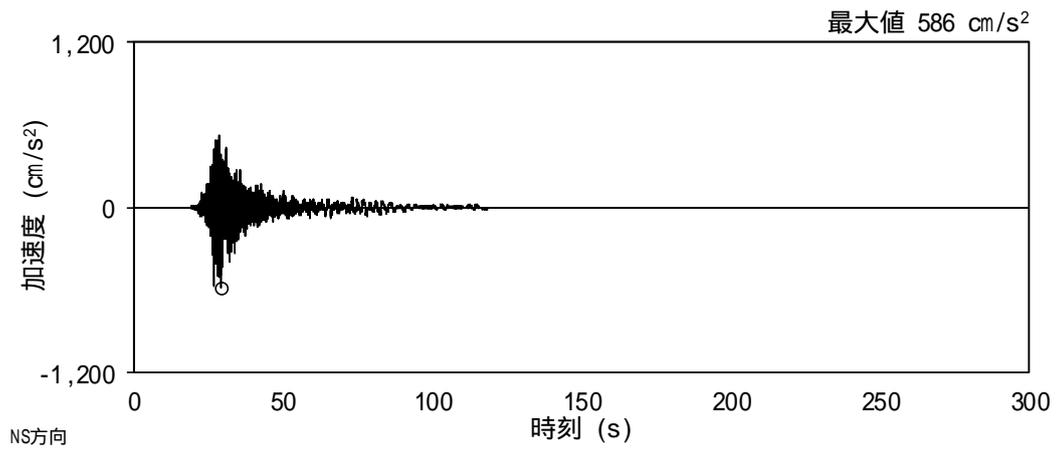


(b) E W 方向

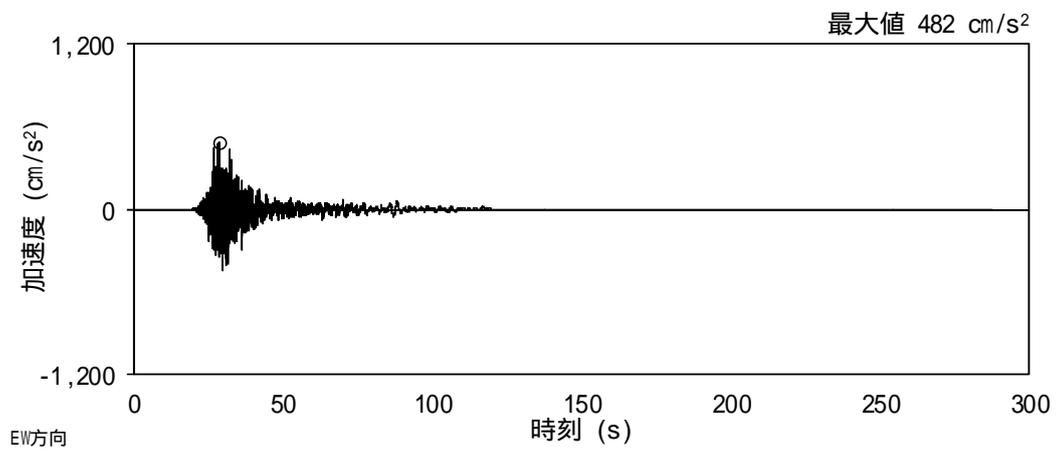


(c) U D 方向

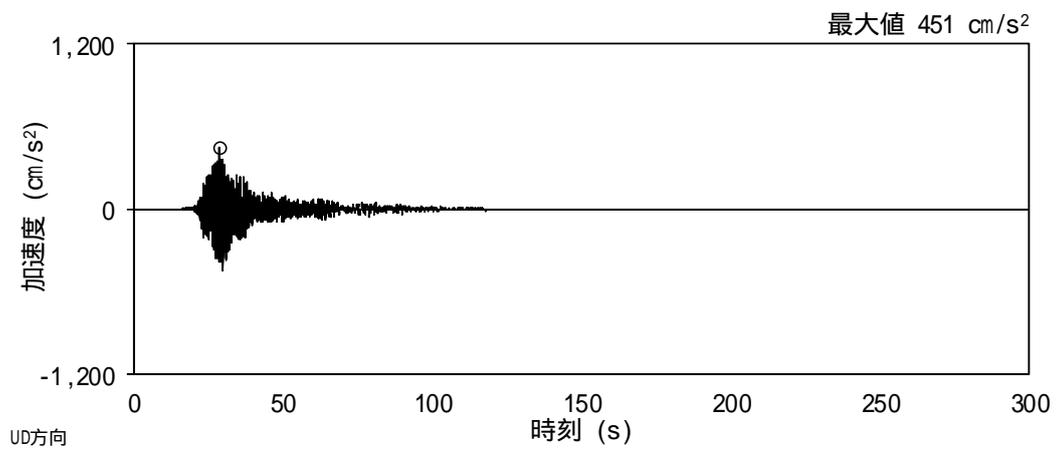
図 3 - 6 (4 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - 13$)



(a) N S 方向

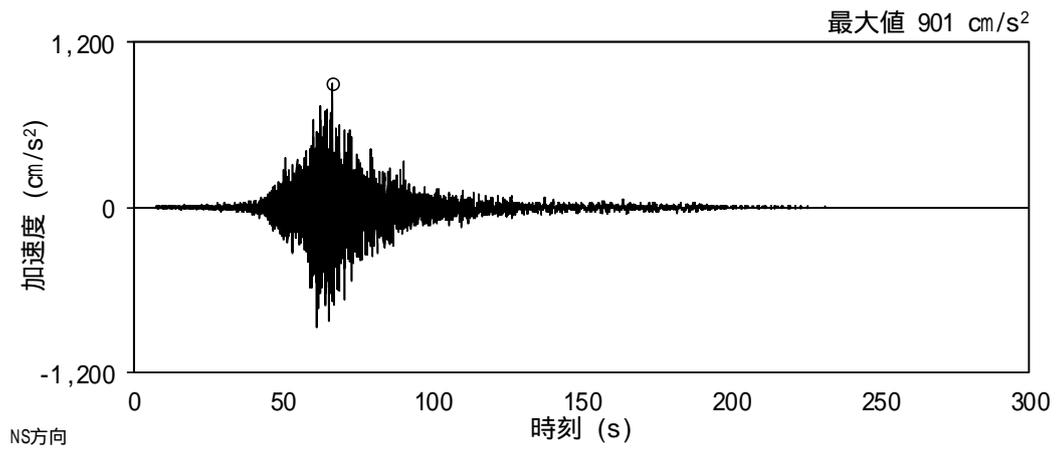


(b) E W 方向

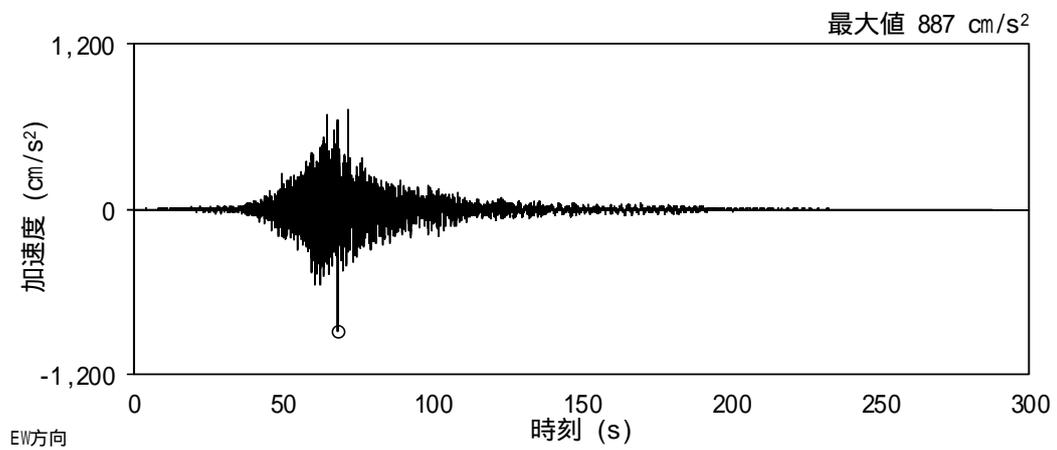


(c) U D 方向

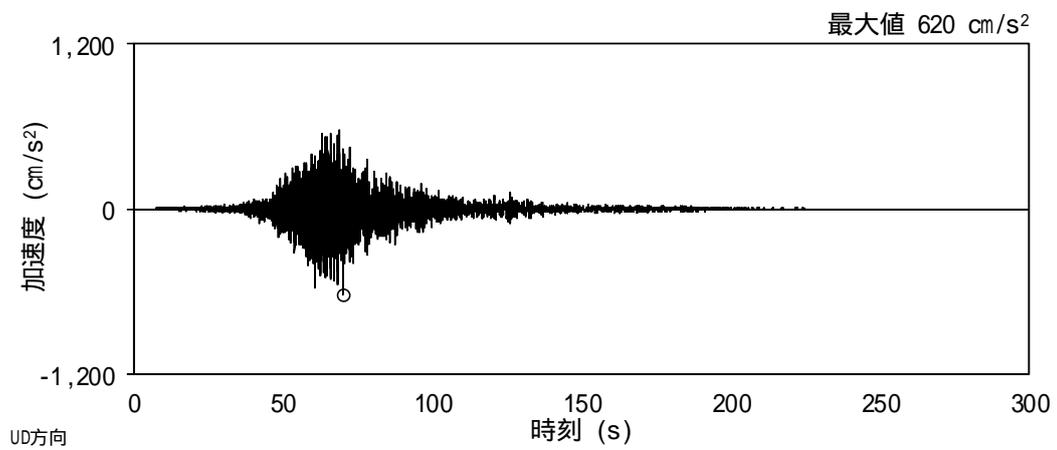
図 3 - 6 (5 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 (S_s - 1 4)



(a) N S 方向

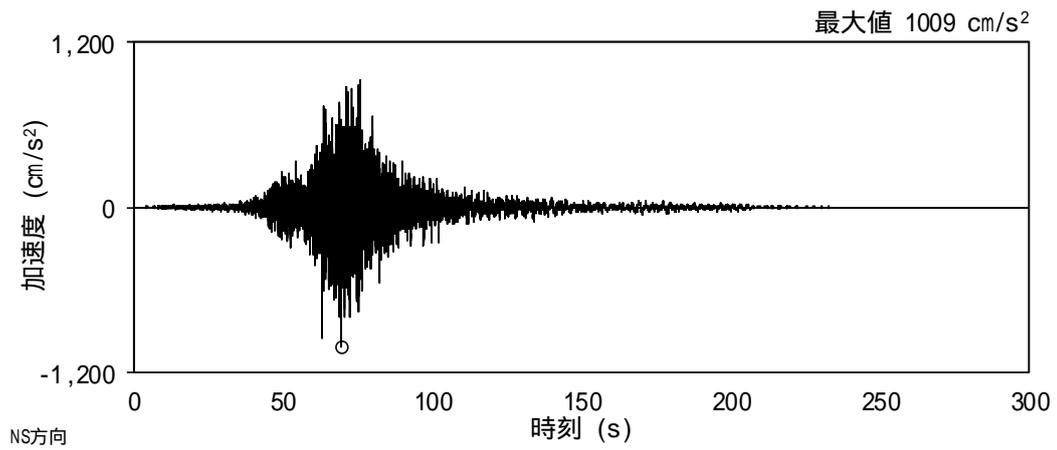


(b) E W 方向

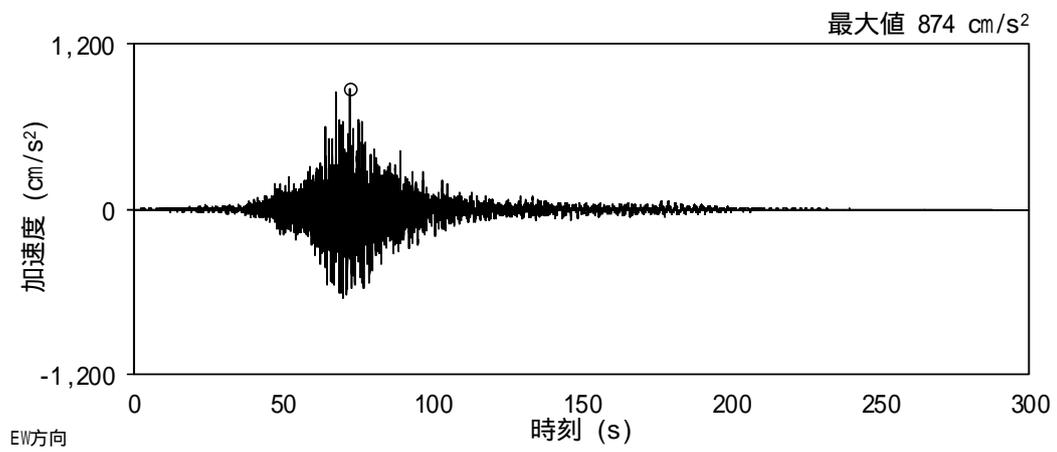


(c) U D 方向

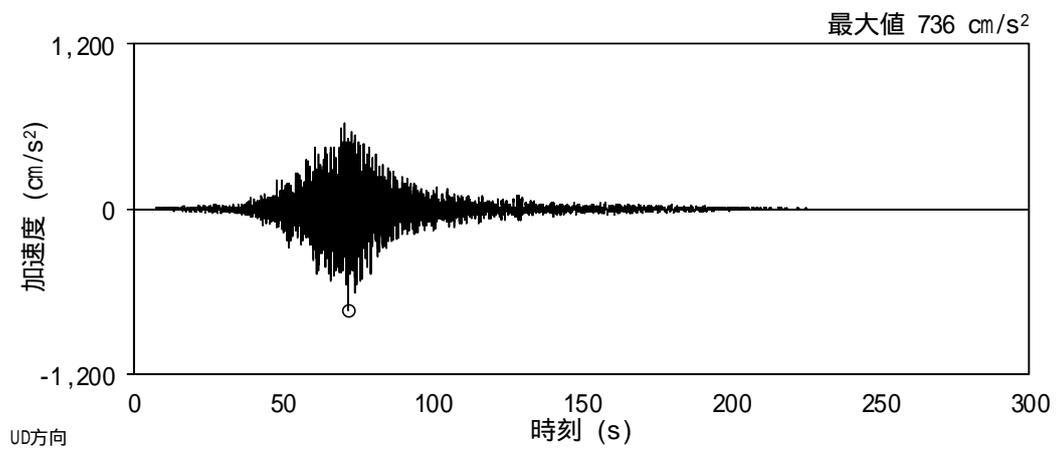
図 3 - 6 (6 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - 21$)



(a) N S 方向

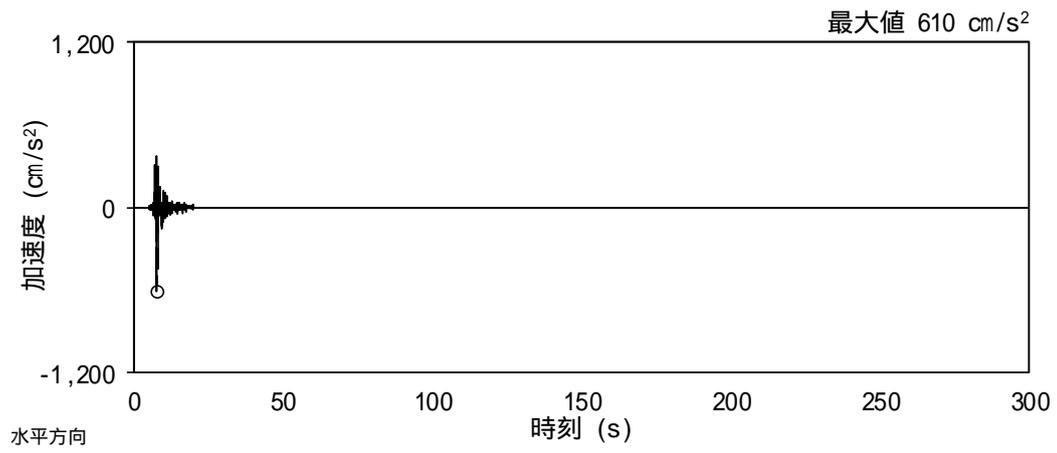


(b) E W 方向

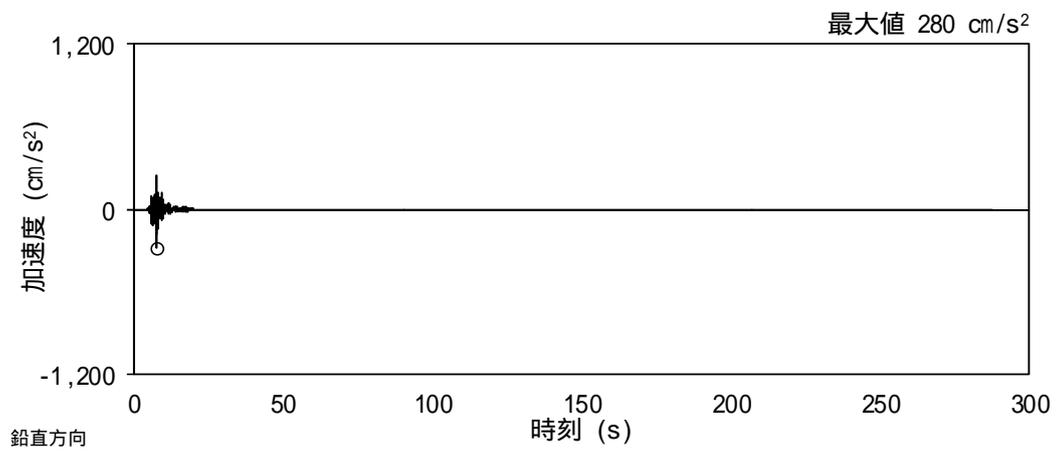


(c) U D 方向

図 3 - 6 (7 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 (S_s - 2 2)



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 3 - 6 (8 / 8) 基準地震動 S_s の加速度波形 ($S_s - 31$)

3.2.2 地震応答解析による入力地震動の評価

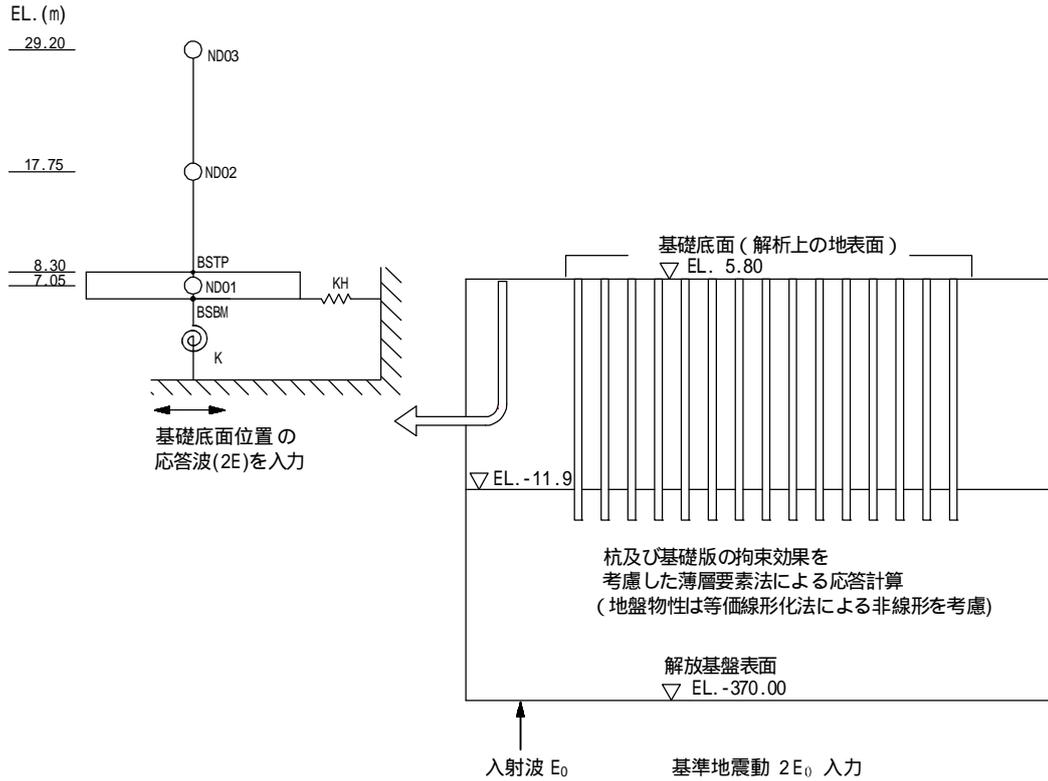
地盤応答解析による入力地震動の評価の概要を図3 - 7に示す。

水平方向の入力地震動は，解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s ($2E_0$) を用いて，薄層要素法により算定した杭の拘束効果を考慮した基礎下端位置での応答波 ($2E$) とする。

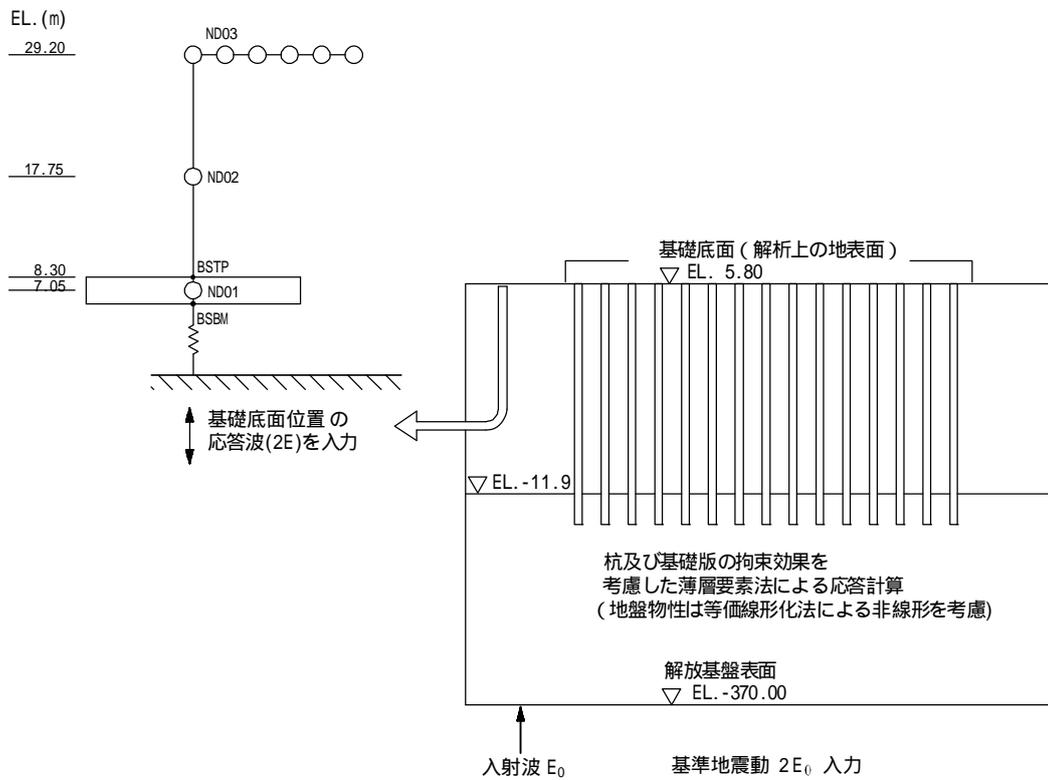
水平方向の入力地震動算定に用いる地盤モデルは，当該敷地の地層等を考慮して設定した水平成層地盤とし，等価線形化法により地盤の非線形を考慮した等価地盤物性値を用いている。

鉛直方向の入力地震動算定に用いる地盤モデルは，水平方向の入力地震動算定に用いた地盤モデルの等価せん断波速度に基づき，地下水位 (EL.3.0 m) 以深は，体積弾性率一定として求めた疎密波速度を，地下水位以浅は，ポアソン比より求めた疎密波速度を用いる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地盤モデル(初期物性値)を表3 - 7に，地盤の非線形特性を表3 - 8及び図3 - 8に示す。また，地盤応答解析による等価地盤物性値(基準地震動 $S_s - D1$ の場合)を表3 - 9に，地盤の最大応答値を図3 - 9に示す。



(水平方向 代表としてNS方向断面を記載)



(鉛直方向)

図 3 - 7 水平方向及び鉛直方向の解析概要

表 3 - 7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地盤モデル(初期物性値)

標高 EL. m	地層 区分	層厚 m	密度 t/m ³	S波速度 Vs m/s	ポアソン比	
5.8	du [*]	2.8	1.82	210	0.385	
3.0	du	0.2	1.98	210	0.493	
2.8						
	Ag2	5.1	2.01	240	0.491	
-2.3	D2c-3	7.4	1.77	270	0.488	
-9.7	D2g-3	2.2	2.15	500	0.462	
-11.9	Km	1	8.1	1.72	445	0.461
-20.0		2	20.0	1.72	456	0.460
-40.0		3	20.0	1.73	472	0.458
-60.0		4	30.0	1.73	491	0.455
-90.0		5	30.0	1.73	514	0.452
-120.0		6	30.0	1.73	537	0.449
-150.0		7	40.0	1.74	564	0.445
-190.0		8	40.0	1.74	595	0.441
-230.0		9	40.0	1.75	626	0.437
-270.0		10	50.0	1.75	660	0.433
-320.0		11	50.0	1.76	699	0.427
-370.0	解放基盤		1.76	718	0.425	

表 3 - 8 使用済燃料乾式貯蔵建屋 地盤の非線形特性

地層区分	剛性低下率 $G / G_0 -$	減衰定数 $H -$
砂丘砂層 (du)	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 1540\gamma^{1.04}}$	$h = \frac{\gamma}{4.27\gamma + 0.00580} + 0.0102$
沖積層 (Ag2)	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 2520\gamma^{1.14}}$	$h = \frac{\gamma}{4.10\gamma + 0.00577} + 0.00413$
段丘堆積物 (D2c-3)	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 269\gamma^{0.862}}$	$h = \frac{\gamma}{6.62\gamma + 0.00949} + 0.0205$
段丘堆積物 (D2g-3)	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 237\gamma^{0.732}}$	$h = \frac{\gamma}{9.70\gamma + 0.00754} + 0.0233$
久米層(Km)	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 107\gamma^{0.824}}$	$h = \frac{\gamma}{4.41\gamma + 0.0494} + 0.0184$

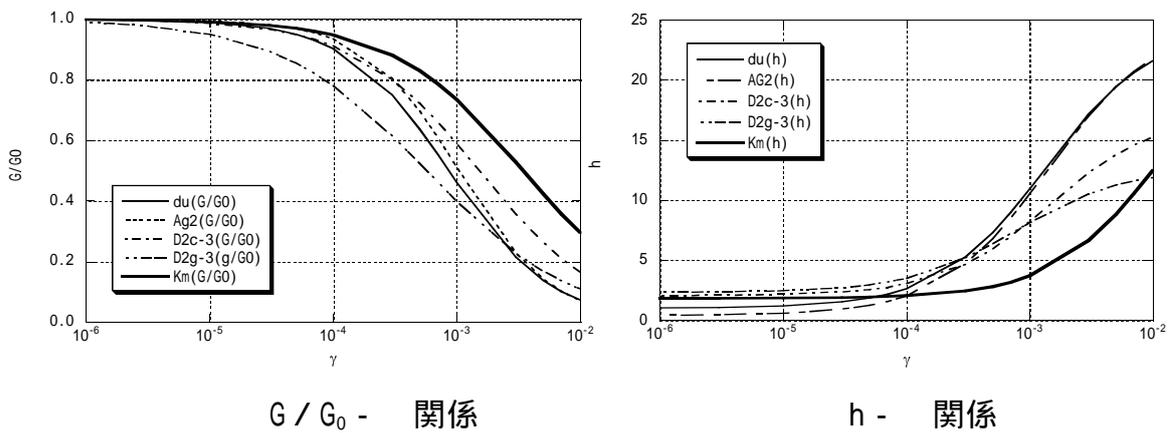


図 3 - 8 使用済燃料乾式貯蔵建屋 地盤の非線形特性

表 3 - 9 等価地盤物性値 (基準地震動 $S_S - D1$ の場合)

標高 EL. m	地層 区分	層厚 m	密度	S波速度	P波速度	ポアソン比	減衰定数 h	
			t/m^3	Vs m/s	Vp m/s			
5.8	du'	2.8	1.82	192	445	0.385	0.037	
3.0	du	0.2	1.98	175	1782	0.493	0.063	
2.8		Ag2	5.1	2.01	194	1798	0.491	0.077
-2.3	D2c-3	7.4	1.77	203	1752	0.488	0.087	
-9.7	D2g-3	2.2	2.15	389	1846	0.462	0.053	
-11.9	Km	1	8.1	1.72	410	1642	0.461	0.027
-20.0		2	20.0	1.72	413	1660	0.460	0.029
-40.0		3	20.0	1.73	425	1679	0.458	0.030
-60.0		4	30.0	1.73	442	1691	0.455	0.030
-90.0		5	30.0	1.73	467	1719	0.452	0.029
-120.0		6	30.0	1.73	488	1746	0.449	0.028
-150.0		7	40.0	1.74	510	1770	0.445	0.029
-190.0		8	40.0	1.74	541	1809	0.441	0.029
-230.0		9	40.0	1.75	577	1850	0.437	0.027
-270.0		10	50.0	1.75	612	1899	0.433	0.026
-320.0		11	50.0	1.76	651	1936	0.427	0.025
-370.0	解放基盤		1.76	718	1988	0.425	0.000	

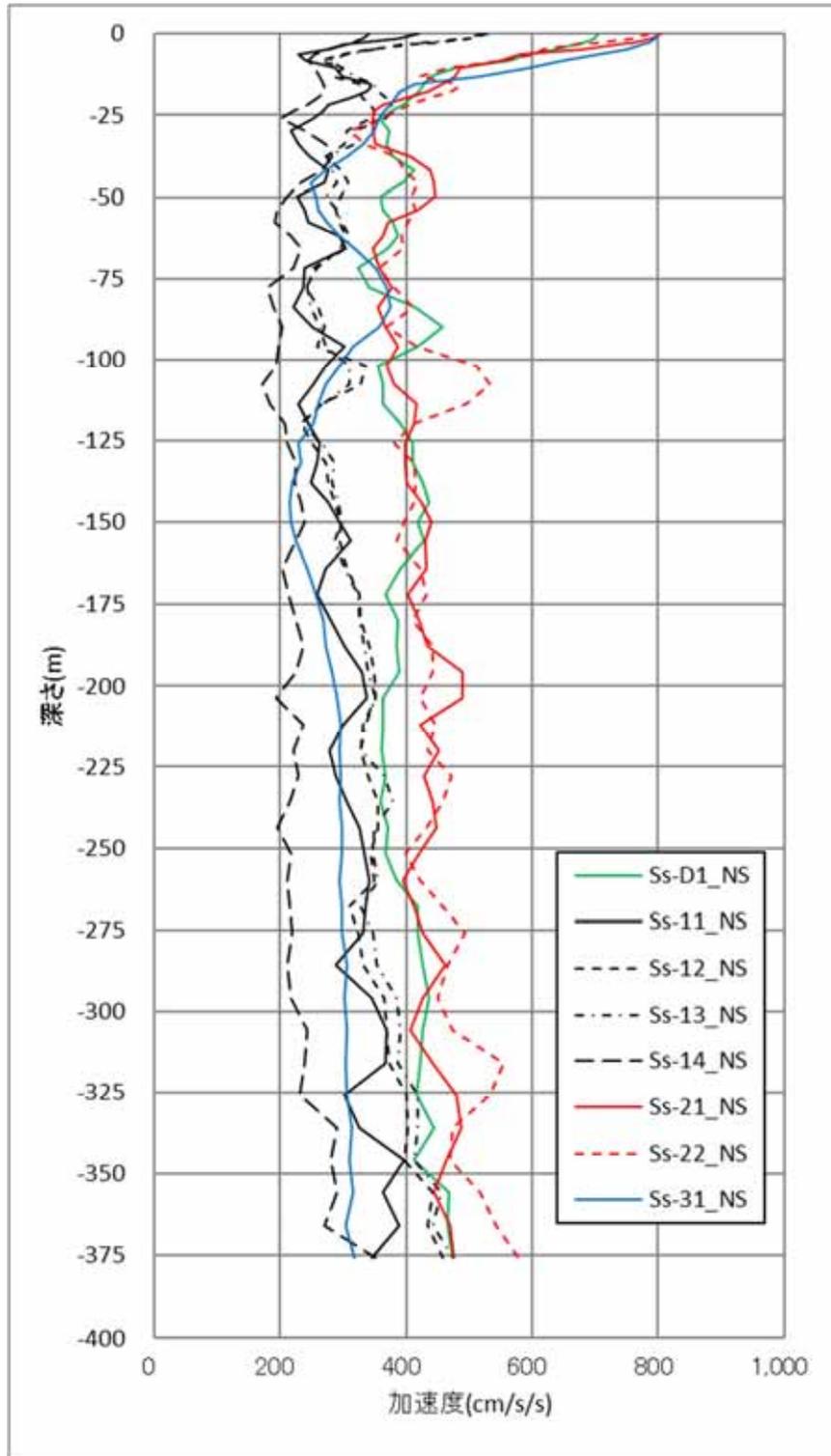


図 3 - 9 (1 / 3) 地盤応答解析結果 (N S 方向)

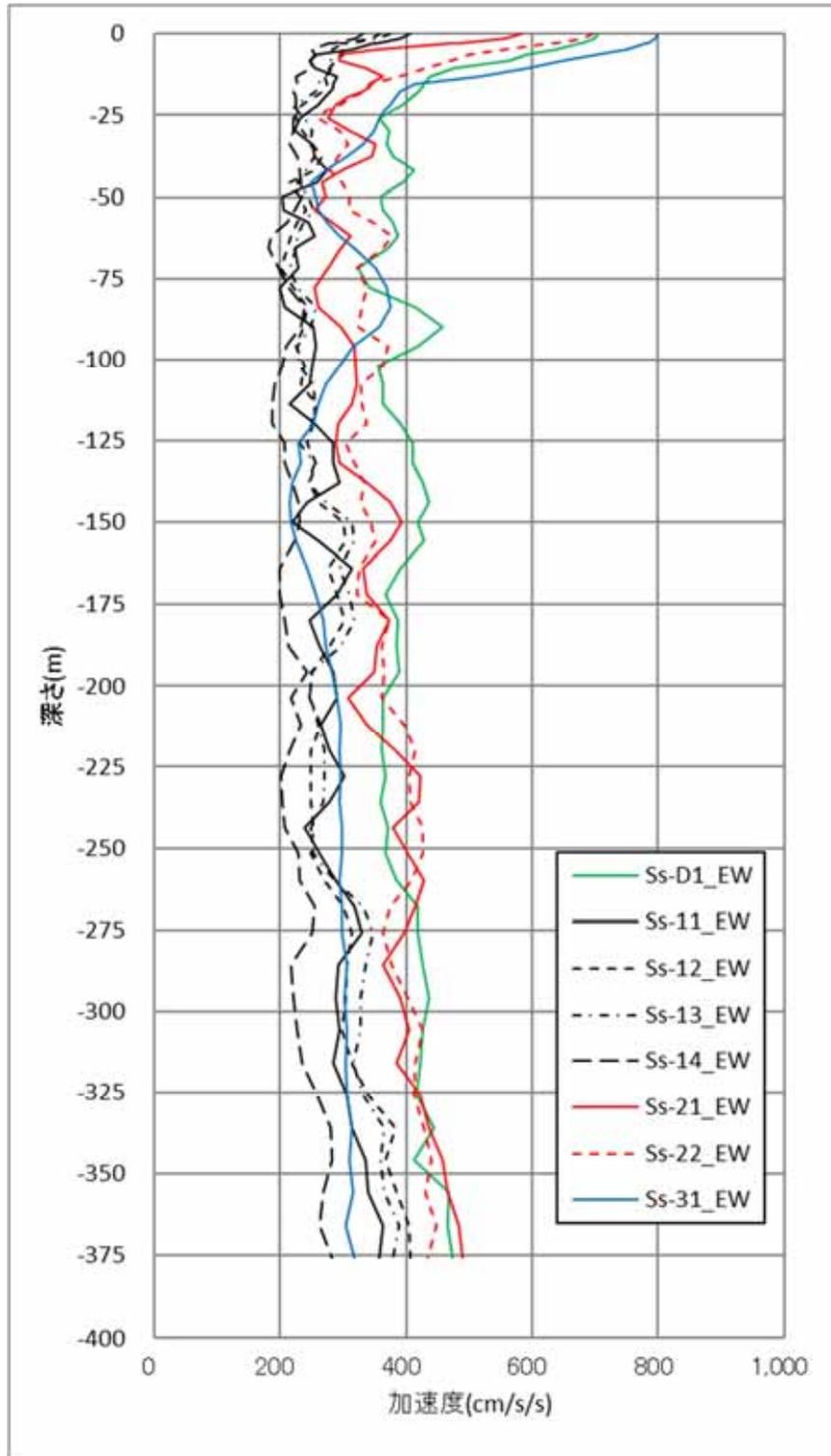


図 3 - 9 (2 / 3) 地盤応答解析結果 (E W 方向)

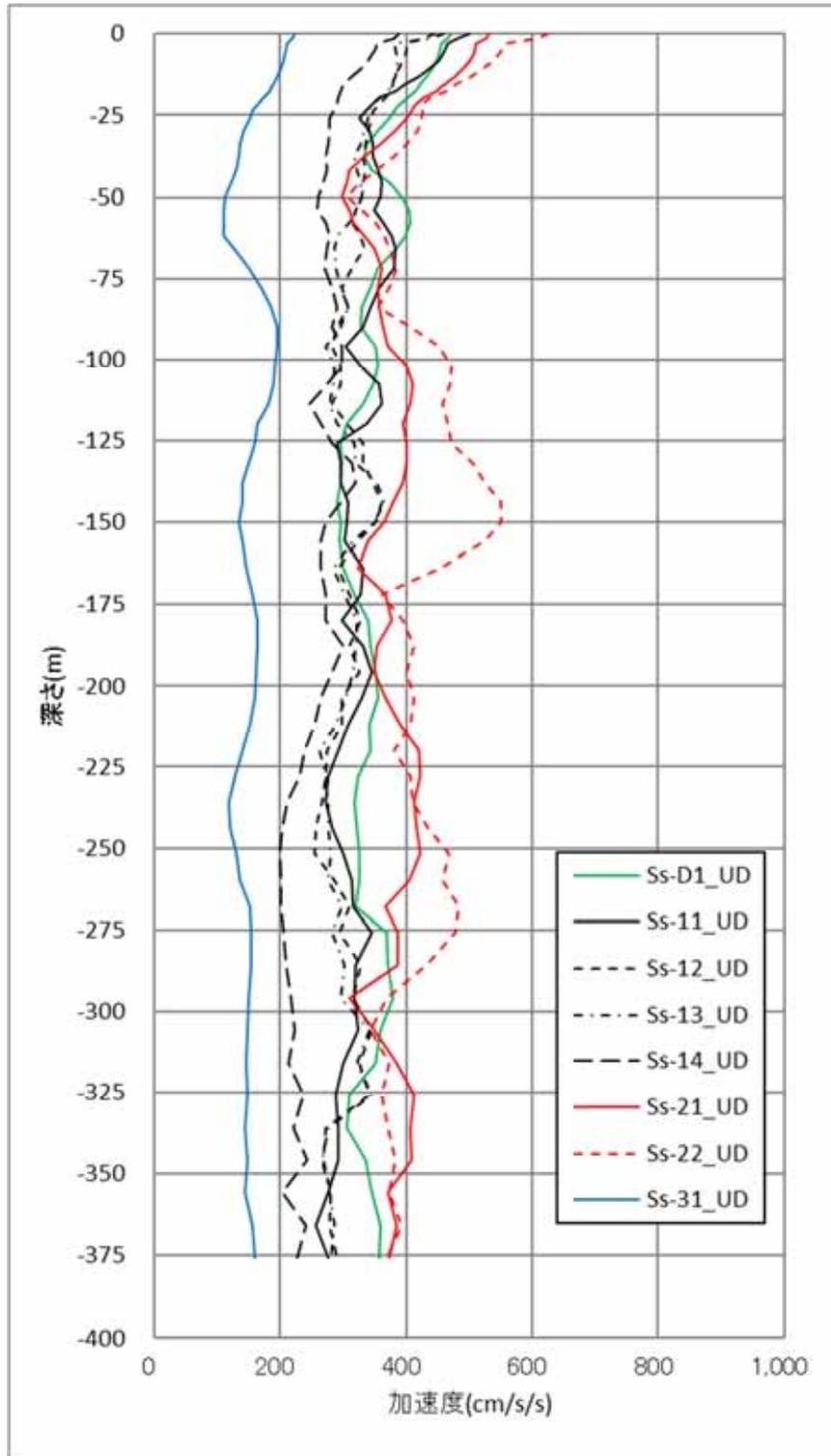


図 3 - 9 (3 / 3) 地盤応答解析結果 (UD方向)

3.3 解析方法

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析には、解析コード「NORA2D Ver.01.03.00」を用いる。

3.3.1 動的解析

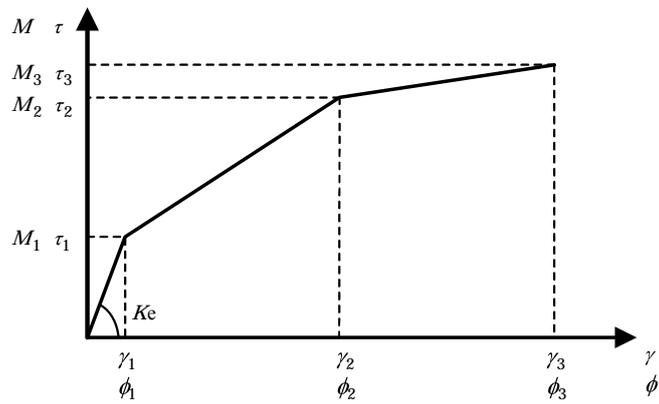
建物・構築物の動的解析は、時刻歴応答解析により実施する。

3.4 解析条件

3.4.1 建物・構築物の復元力特性

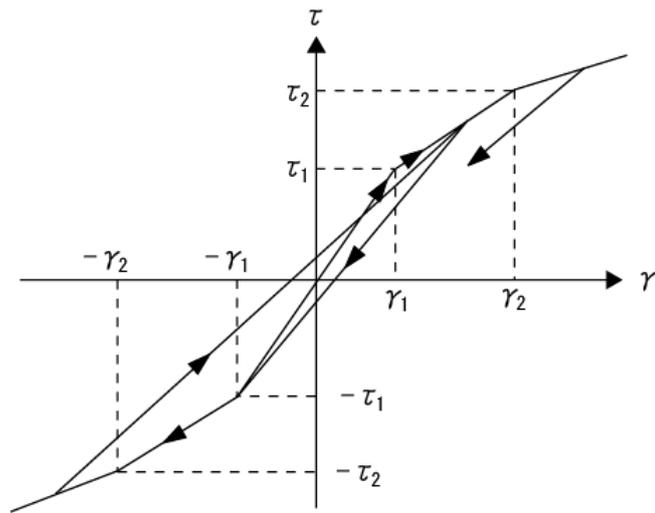
耐震壁の非線形特性については、J E A G 4601-1991 追補版に基づき、トリリニア形スケルトン曲線とし、せん断力の履歴特性は、最大点指向型を考慮している。また、曲げモーメントの復元力特性は、第2折点までは最大点指向型を、それ以上ではディグレイディングトリリニア型を考慮している。復元力特性のスケルトン曲線を図3 - 10に、復元力特性の履歴特性を図3 - 11に、設定したスケルトン曲線数値表を表3 - 10及び表3 - 11に示す。

なお、耐震壁のせん断力 Q は、耐震壁のせん断応力度 σ に耐震壁のせん断断面積を乗じて算出する。

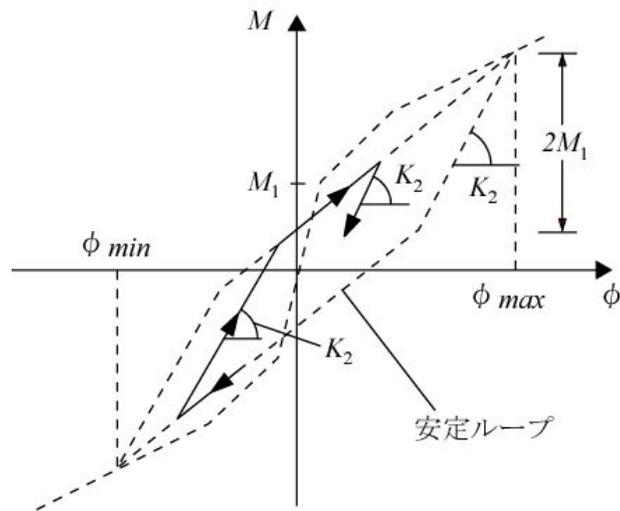


- 1 : 第 1 折れ点のせん断応力度
- 2 : 第 2 折れ点のせん断応力度
- 3 : 終局点のせん断応力度
- 1 : 第 1 折れ点のせん断ひずみ
- 2 : 第 2 折れ点のせん断ひずみ
- 3 : 終局点のせん断ひずみ
- M_1 : 第 1 折れ点の曲げモーメント
- M_2 : 第 2 折れ点の曲げモーメント
- M_3 : 終局点の曲げモーメント
- 1 : 第 1 折れ点の曲率
- 2 : 第 2 折れ点の曲率
- 3 : 終局点の曲率

図3 - 10 耐震壁の復元力特性のスケルトン曲線



(a) 最大点指向型



(b) ディグレイディングトリリニア型

図3 - 11 復元力特性の履歴特性

表3 - 10 せん断応力度のスケルトン曲線（ - 関係）

方向	要素名	1	1	2	2	3	3
		(N/mm ²)	(×10 ⁻³)	(N/mm ²)	(×10 ⁻³)	(N/mm ²)	(×10 ⁻³)
N S	BM03	1.86	0.198	2.51	0.594	5.61	4.00
	BM02	2.01	0.214	2.71	0.642	5.20	4.00
E W	BM03	1.79	0.191	2.42	0.573	4.88	4.00
	BM02	1.84	0.197	2.49	0.590	4.82	4.00

表3 - 11 曲げモーメントのスケルトン曲線（M - 関係）

方向	要素名	M ₁	1	M ₂	2	M ₃	3
		(×10 ⁶ kN・m)	(×10 ⁻⁶ /m)	(×10 ⁶ kN・m)	(×10 ⁻⁶ /m)	(×10 ⁶ kN・m)	(×10 ⁻⁶ /m)
N S	BM03	0.619	4.26	1.59	47.7	2.59	444
	BM02	1.00	5.17	2.33	49.0	3.55	415
E W	BM03	0.575	8.82	1.17	90.8	1.64	1,820
	BM02	0.843	10.7	1.77	96.3	2.50	1,640

4. 解析結果

4.1 動的解析

4.1.1 固有値解析結果

地震応答解析モデルの固有値解析結果（固有振動数及び刺激関数）を表4 - 1に、刺激関数図を $S_s - D 1$ を代表に図4 - 1に示す。

4.1.2 応答解析結果

作成中

表4 - 1 (1 / 3) 固有値解析結果 (N S 方向)

CASE	1次		2次	
	固有振動数 (Hz)	刺激係数	固有振動数 (Hz)	刺激係数
Ss-D1	3.76	1.339	7.07	-0.286
Ss-11	4.03	1.384	7.30	-0.325
Ss-12	4.00	1.378	7.26	-0.319
Ss-13	4.00	1.379	7.26	-0.319
Ss-14	4.05	1.387	7.31	-0.326
Ss-21	3.86	1.356	7.17	-0.301
Ss-22	3.82	1.348	7.14	-0.295
Ss-31	3.69	1.329	7.01	-0.277

表4 - 1 (2 / 3) 固有値解析結果 (E W 方向)

CASE	1次		2次	
	固有振動数 (Hz)	刺激係数	固有振動数 (Hz)	刺激係数
Ss-D1	3.67	1.574	6.82	-0.652
Ss-11	3.88	1.619	7.08	-0.714
Ss-12	3.85	1.613	7.05	-0.706
Ss-13	3.85	1.614	7.05	-0.706
Ss-14	3.89	1.621	7.10	-0.717
Ss-21	3.75	1.592	6.93	-0.676
Ss-22	3.72	1.584	6.89	-0.665
Ss-31	3.61	1.563	6.76	-0.636

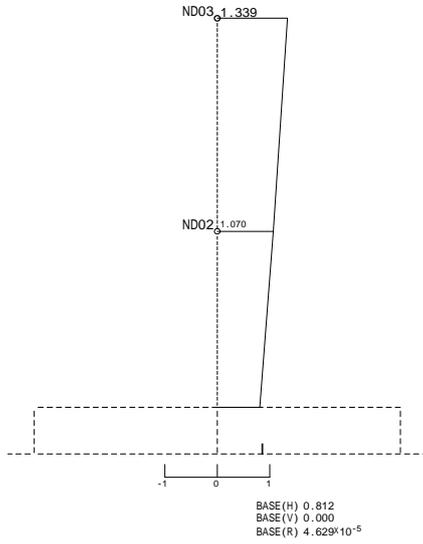
表4 - 1 (3 / 3) 固有値解析結果 (U D 方向)

CASE	1次		2次	
	固有振動数 (Hz)	刺激係数	固有振動数 (Hz)	刺激係数
Ss-D1	4.73	2.068	7.92	-1.210
Ss-11	4.74	1.992	8.23	-1.150
Ss-12	4.73	2.016	8.13	-1.168
Ss-13	4.73	2.014	8.13	-1.167
Ss-14	4.73	2.003	8.18	-1.158
Ss-21	4.73	2.022	8.10	-1.173
Ss-22	4.73	2.027	8.08	-1.177
Ss-31	4.72	2.088	7.84	-1.226

() 刺激係数は、各次の固有ベクトル $\{u_s\}$ の最大値が 1 となるように規準化した値である。

TOKAI-DC Ss-D1_NS

EXCITING FUNCTION ..NO 1 f= 3.76 Hz
T= 0.266 s
B= 1.339



TOKAI-DC Ss-D1_NS

EXCITING FUNCTION ..NO 2 f= 7.07 Hz
T= 0.142 s
B= -0.286

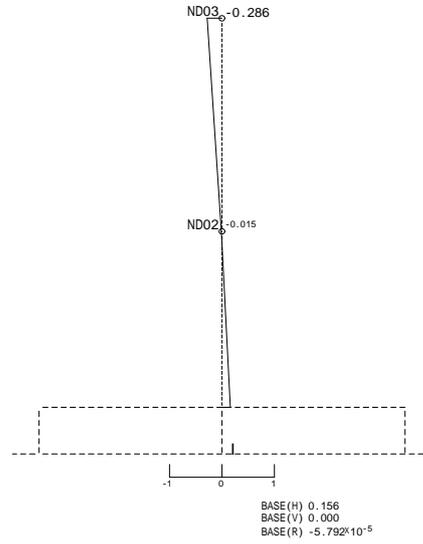
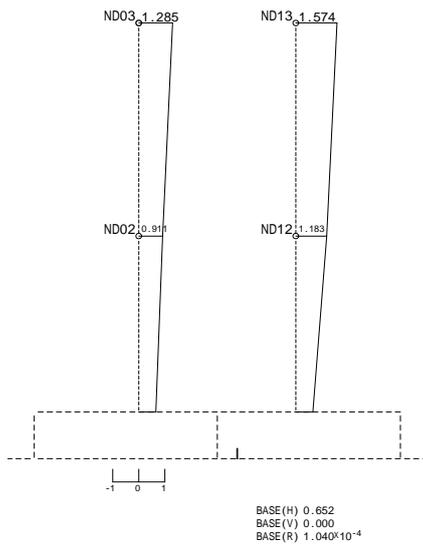


図4-1 (1/3) 刺激関数 (S_s - D1, NS方向)

TOKAI-DC Ss-D1_EW

EXCITING FUNCTION ..NO 1 f= 3.67 Hz
T= 0.273 s
B= 1.574



TOKAI-DC Ss-D1_EW

EXCITING FUNCTION ..NO 2 f= 6.82 Hz
T= 0.147 s
B= -0.652

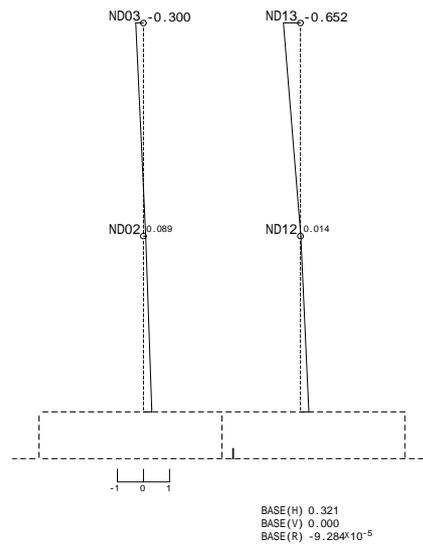
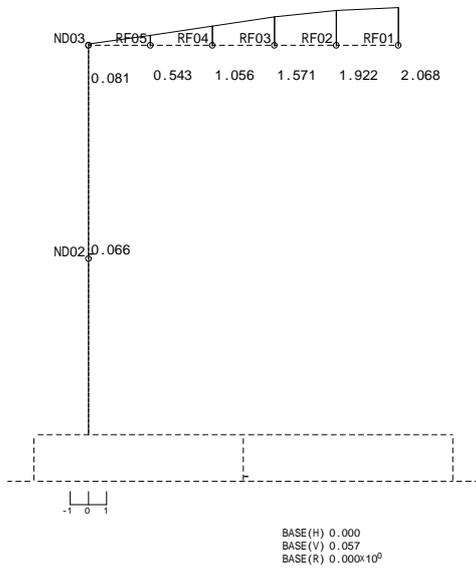


図4-1 (2/3) 刺激関数 (S_s - D1, EW方向)

TOKAI-DC Ss-D1_UD

EXCITING FUNCTION ..NO 1
 f= 4.72 Hz
 T= 0.212 s
 B= 2.068



TOKAI-DC Ss-D1_UD

EXCITING FUNCTION ..NO 2
 f= 7.92 Hz
 T= 0.126 s
 B= -1.210

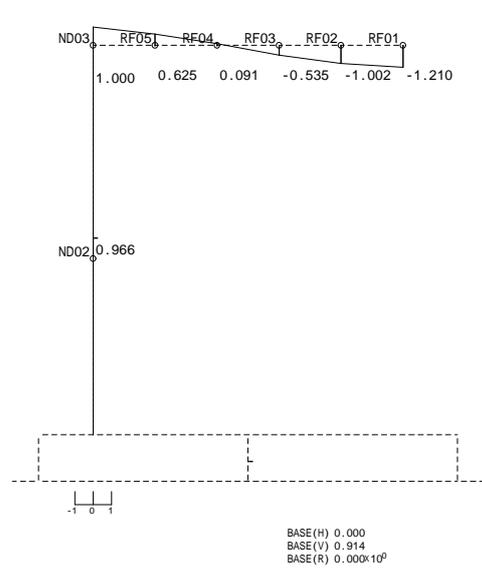


図4 - 1 (3 / 3) 刺激関数 (S_S - D 1 , UD方向)

使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震計算書

目 次

1. 概要
2. 基本方針
 - 2.1 位置
 - 2.2 構造概要
 - 2.3 評価方針
 - 2.4 準拠規格・基準等
3. 地震応答解析による評価方法
4. 応力解析による評価方法
 - 4.1 評価対象部位及び評価方針
 - 4.2 荷重及び荷重の組合せ
 - 4.3 許容限界
 - 4.4 解析モデル及び諸元
 - 4.5 評価方法
5. 評価結果

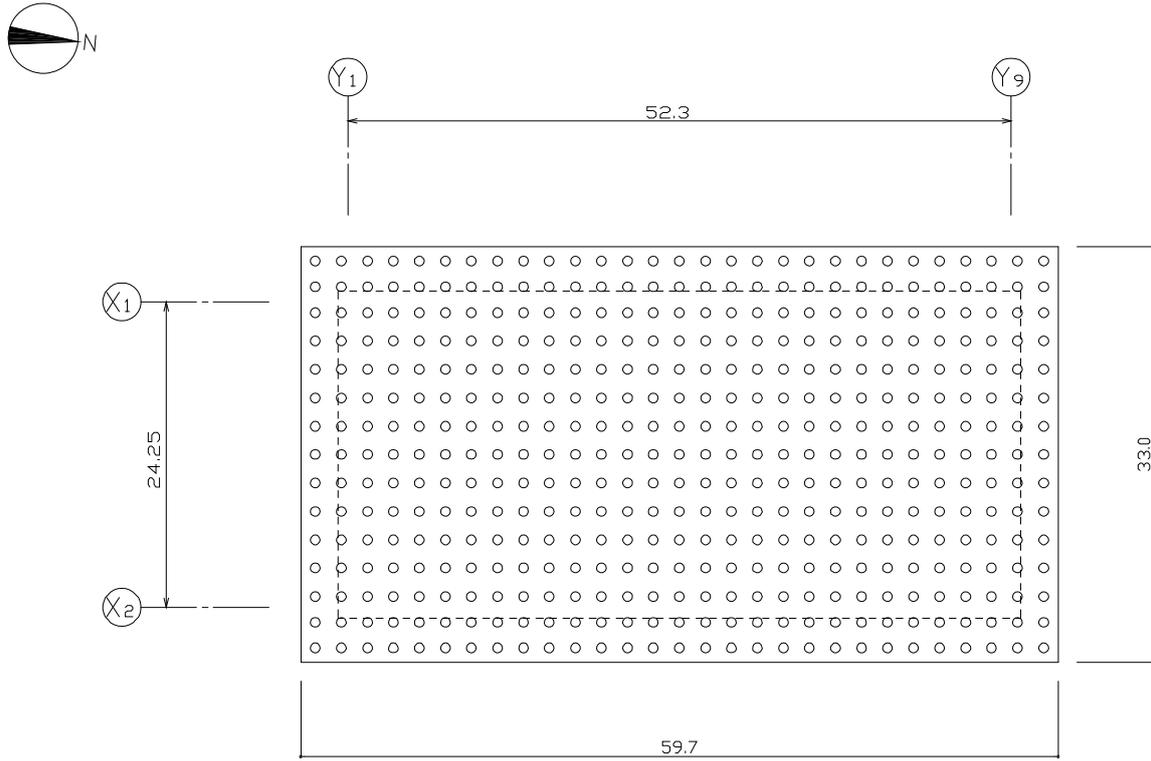
1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を 24 基収納する地上 1 階建、平面が約 52 m (南北方向) × 約 24 m (東西方向)、地上高さ約 21 m の鉄筋コンクリート造 (一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造) の建物である。使用済燃料乾式貯蔵建屋の平面図を図 1 - 1 に示す。

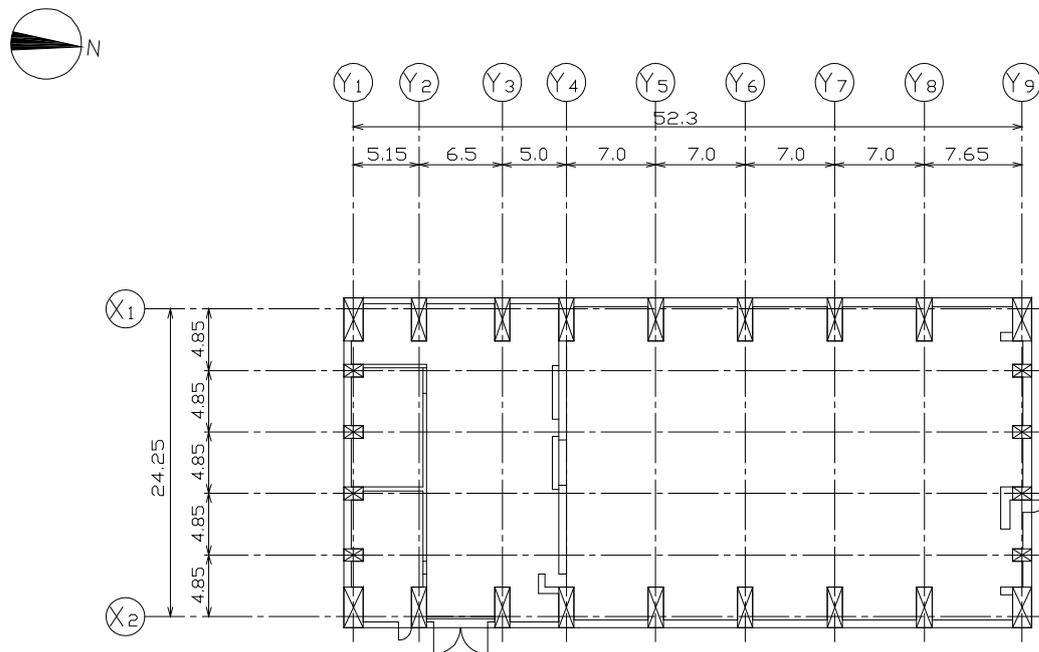
使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎版は、厚さ約 2.5 m (一部約 2.0 m) で、鋼管杭を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。使用済燃料乾式貯蔵建屋に加わる地震時の水平力は、外周部に配置された耐震壁と柱及び梁 (屋根トラス) からなるフレーム構造で負担する。耐震壁には、冷却空気取り入れのための開口がある。

本資料は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、地震応答解析による評価及び応力解析による評価により行う。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎部は、設計基準対象施設において「S クラス施設の間接支持構造物」に分類されるため、分類に応じた耐震評価を示す。また、使用済燃料乾式貯蔵建屋の上屋については、上位クラスである使用済燃料乾式貯蔵容器に対する波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。その波及的影響評価は、使用済燃料乾式貯蔵容器の有する機能が保持されることを確認するため、下位クラス施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の構造物全体としての変形性能の評価及び使用済燃料乾式貯蔵容器への影響評価を行う。



(杭伏図 : EL. - 5.8 m)



(1階平面図 : EL. 8.3 m)

図 1 - 1 使用済燃料貯蔵建屋の概要 (平面図)

2. 基本方針

2.1 位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置を図2 - 1に示す。



図2 - 1 使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置

2.2 構造概要

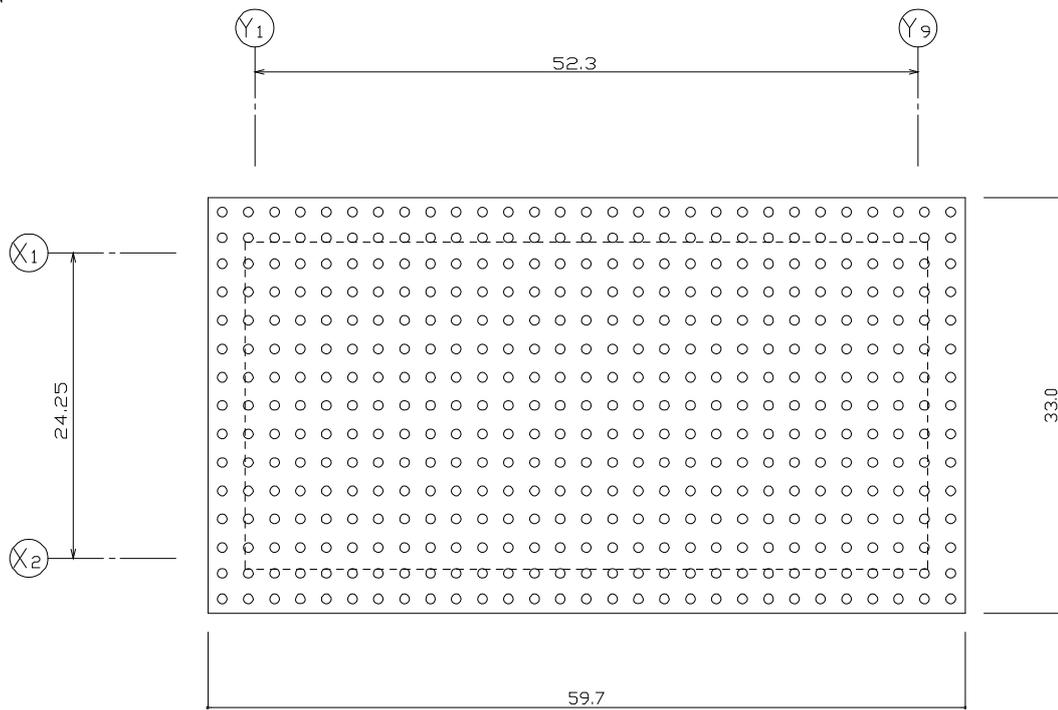
使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を24基収納する地上1階建の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート及び鉄骨造）の建物である。

使用済燃料乾式貯蔵建屋に加わる地震時の水平力は、外周部に配置された耐震壁と柱及び梁（屋根トラス）からなるフレーム構造で負担する。耐震壁には、冷却空気取り入れのための開口がある。

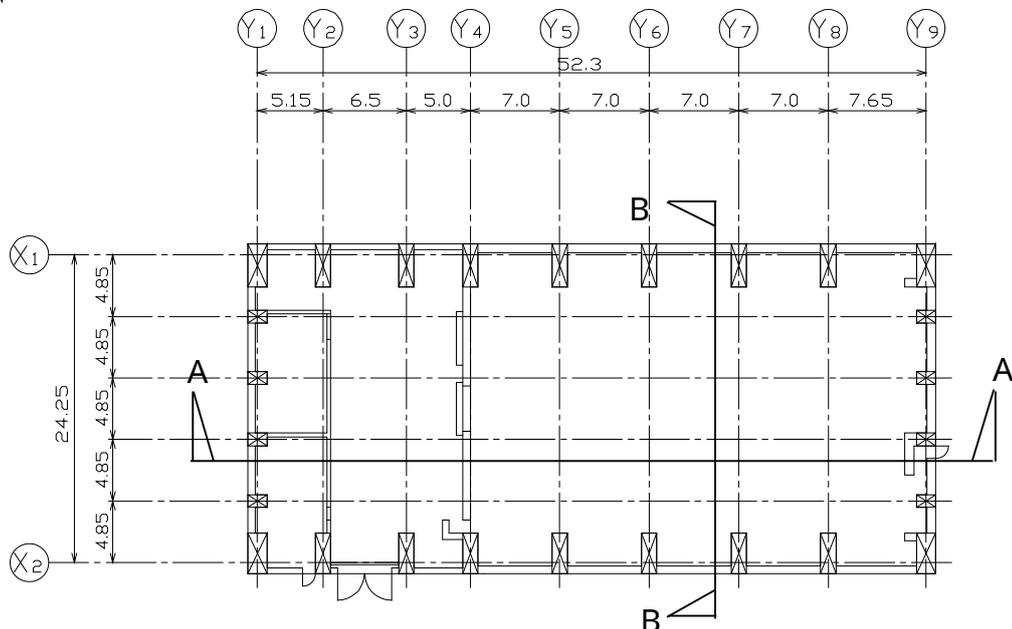
使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要を図2 - 2及び図2 - 3に示す。

使用済燃料乾式建屋は、地上1階建で平面が約52 m（南北方向）×約24 m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物であり、適切に配置された耐震壁で構成された剛な構造としている。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎は、平面が約60 m（南北方向）×約33 m（東西方向）、厚さ約2.5 m（一部約2.0 m）で、鋼管杭を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。

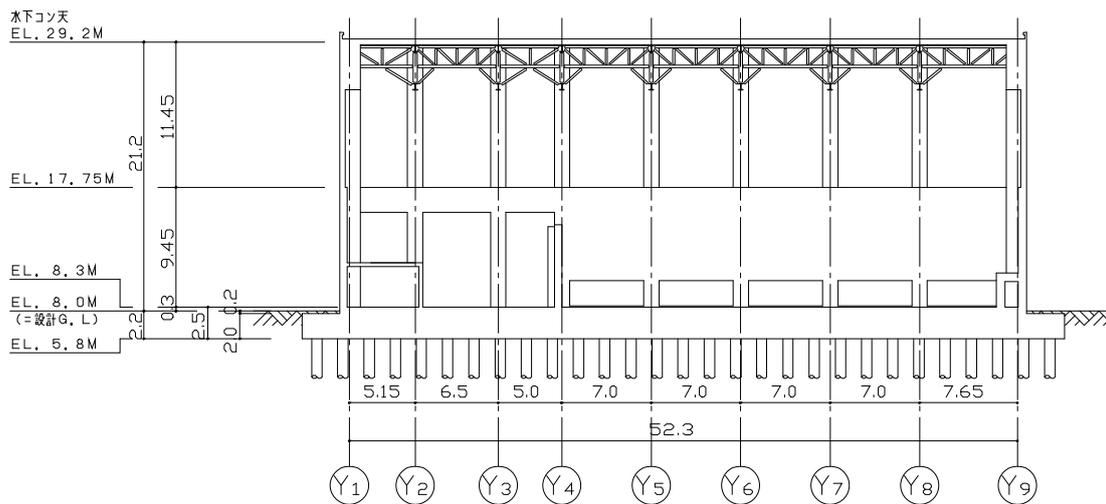


(杭伏図 : EL. - 5.8 m) 杭仕様 : 鋼管杭 812.8 ,
t = 16 (SKK400)

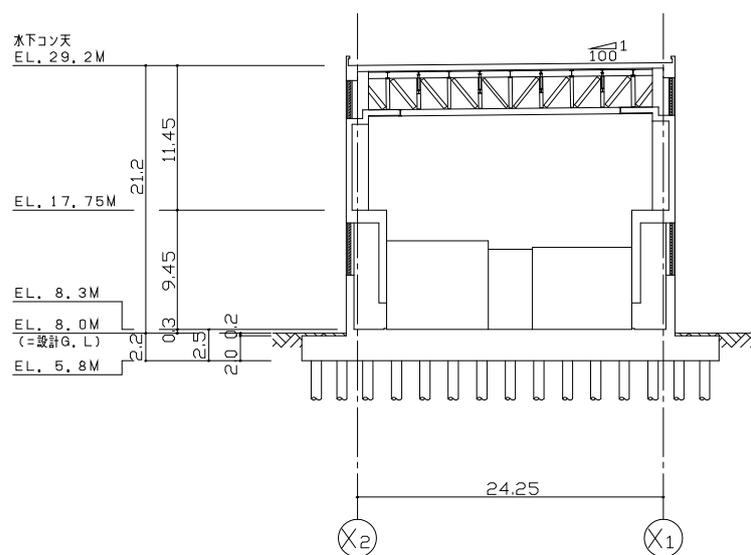


(1階平面図 : EL. 8.3 m)

図2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (平面図)



(NS方向 , A - A断面)



(EW方向 , B - B断面)

図2 - 3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (断面図)

2.3 評価方針

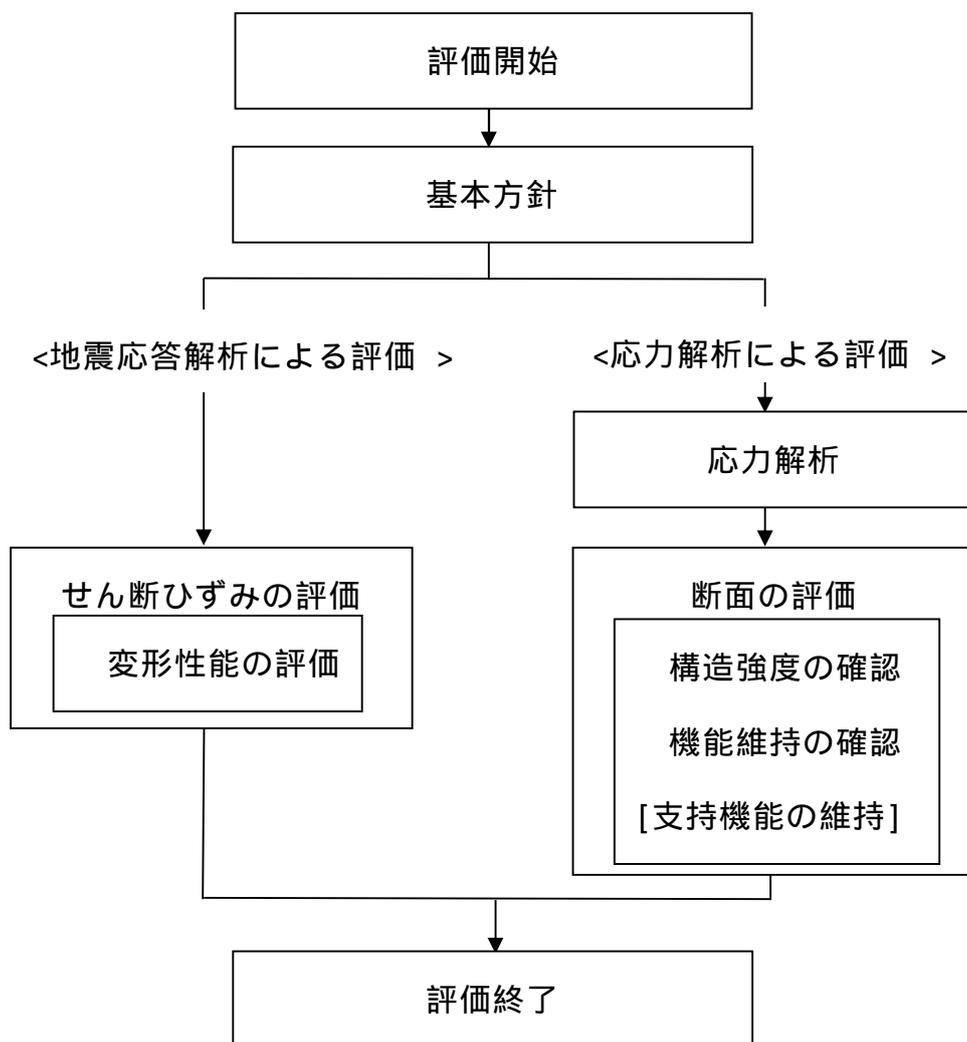
使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎部は、設計基準対象施設において「Sクラス施設の間接支持構造物」に分類される。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎部の設計基準対象施設としての評価においては、基準地震動 S_s による地震力に対する評価（以下「 S_s 地震時に対する評価」という。）を行うこととし、その評価は「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析」の結果を踏まえたものとする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎部の評価は、応力解析による評価を行う。

応力解析による評価では、応力解析を行い、基礎版、杭及び屋根トラスの断面検討を実施し、構造強度の確認及び機能維持の確認を行う。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価フローを図2 - 4に示す。



「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析」の結果を踏まえた評価を行う

図 2 - 4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析フロー

2.4 適用規格・基準等

地震応答解析において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社)日本建築学会, 2010)
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説((社)日本建築学会, 2005) (以下「RC-N規準」という。)
- ・ 建築基礎構造設計指針((社)日本建築学会, 2001)
- ・ 鋼構造塑性設計指針((社)日本建築学会, 2017)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力度編 J E A G 4601・補-1984((社)日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1987((社)日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1991 追補版((社)日本電気協会) (以下「J E A G 4601-1991 追補版」という。)
- ・ 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書(国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所) (以下「技術基準解説書」という。)

3. 地震応答解析による評価方法

地震応答解析による評価において，使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造強度及び支持機能の維持については，「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析」に基づき，最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。

表3 - 1 地震応答解析による評価における許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
-	上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないこと	基準地震動 S_s	耐震壁	最大せん断ひずみが波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 4.0×10^{-3}

4. 応力解析による評価方法

4.1 評価対象部位及び評価方針

使用済燃料乾式貯蔵建屋の応力解析による評価対象部位は、基礎版、杭及び屋根トラスとし、 S_s 地震時に対して以下の方針に基づき評価を行う。

S_s 地震時に対する評価は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析によることとし、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、準拠規格・基準等を参考に設定した許容限界を超えないことを確認する。

3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析に当たっては、「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析」より得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。応力解析による評価フローを図4-1に示す。

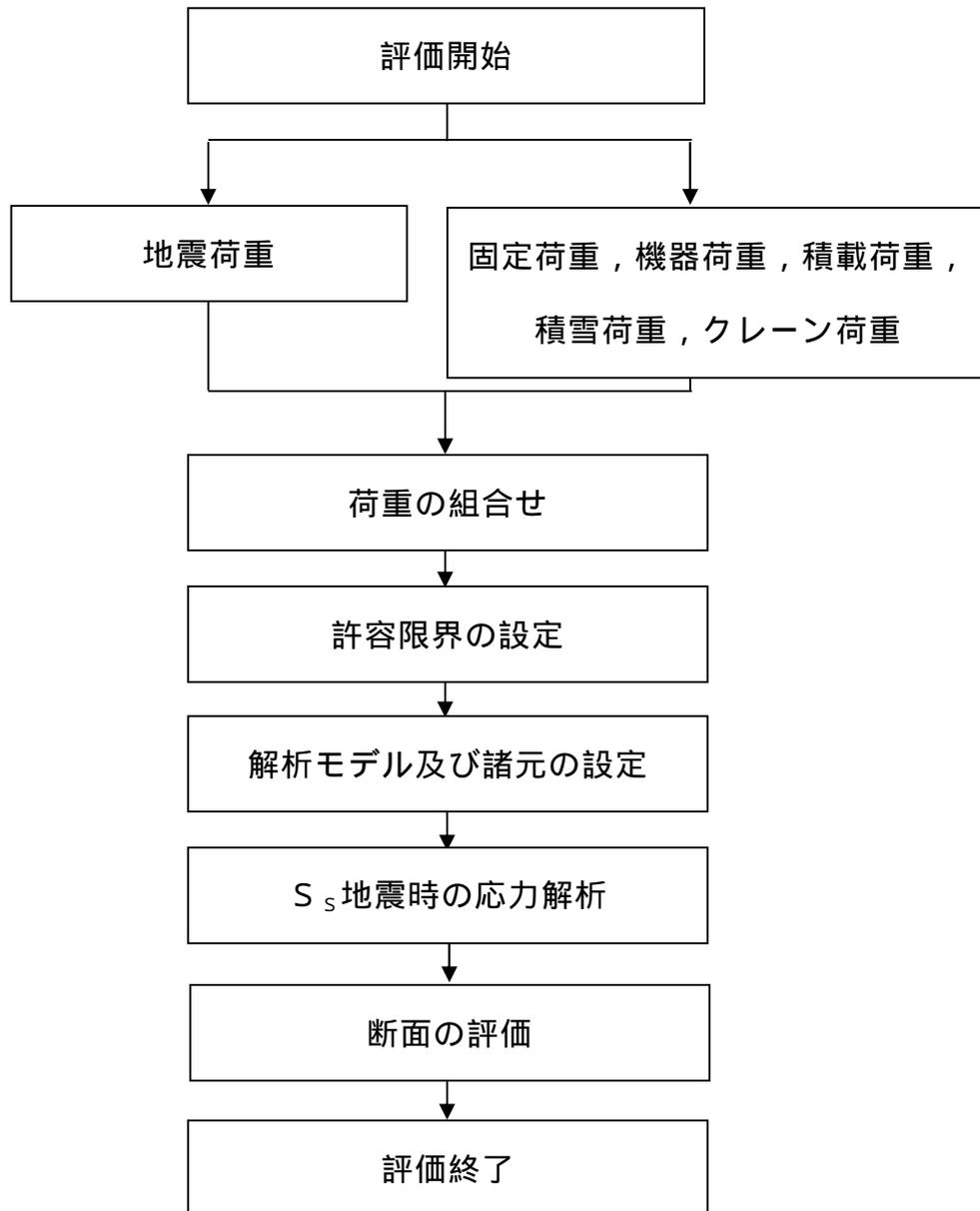


図4 - 1 応力解析による評価フロー（基礎）

4.2 荷重及び荷重の組合せ

4.2.1 荷重

- (1) 固定荷重(G)，機器荷重(E)，積載荷重(P)，積雪荷重(S)，クレーン荷重(CL)

作成中

- (2) 地震荷重(Ks)

水平地震力及び鉛直地震力は，基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力より設定する。

S_s 地震荷重を表に示す。

作成中

4.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表4 - 1に示す。

表4 - 1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S_s 地震時	G + E + P + S + CL + Ks

G : 固定荷重

E : 機器荷重

P : 積載荷重

S : 積雪荷重

CL : クレーン荷重，ただし吊荷荷重を除く。

Ks : 地震荷重

4.3 許容限界

応力解析による評価における使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎版，杭及び屋根トラスの許容限界は，表4 - 2のとおり設定する。

また，コンクリート，鉄筋及び鋼材の許容応力度を表4 - 3～表4 - 7に示す。杭の許容応力度及び杭の S_s 地震時の許容支持力と許容引抜き抵抗力を表4 - 11及び表4 - 12に示す。

表4 - 2 応力解析による評価における許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
-	構造強度を有すること	基準 地震動 S_s	基礎版 杭 屋根トラス	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	準拠規格・基準等に基づく終局耐力
支持機能 ¹	機器・配管系などの設備を支持する機能を損なわないこと	基準 地震動 S_s	基礎版 杭	部材に生じる応力が支持機能を維持するための許容限界を超えないことを確認	準拠規格・基準等に基づく終局耐力

1：「支持機能」の確認には，「内包する設備に対する波及的影響」の確認が含まれる。

表4 - 3 コンクリートの許容応力度

設計基準強度 F_c (N/mm^2)	短期	
	圧縮 (N/mm^2)	せん断 (N/mm^2)
23.5	15.6	1.08

表4 - 4 鉄筋の許容応力度

外力の 状態	SD390 (D22以上)		SD345 (D19以下)	
	引張及び圧縮 (N/mm^2)	せん断補強 (N/mm^2)	引張及び圧縮 (N/mm^2)	せん断補強 (N/mm^2)
S_s 地震時	390	390	345	345

・材料強度は、許容応力度（引張及び圧縮）を1.1倍して算出する。

表4 - 5 鉄骨の許容応力度

外力の状態	鋼材種類	板厚(mm)	基準強度 F (N/mm^2)
S_s 地震時	SS400, SM400A	40	235

・材料強度は、基準強度を1.1倍して算出する。

表4 - 6 杭の許容応力度

外力の状態	鋼材種類	杭径 (mm) 板厚 (mm)	基準強度 F (N / mm ²)
S _s 地震時	SKK400	812.8 t = 16	235

- ・ 材料強度は，基準強度を1.1倍して算出する。
- ・ 杭外周は，腐食代2 mmを考慮する。

表4 - 7 杭のS_s地震時の許容支持力及び許容引抜き抵抗力

杭径	S _s 地震時	
	許容支持力 (kN)	許容引抜き抵抗力 (kN)
812.8	2,740	1,000

4.4 解析モデル及び諸元

4.4.1 建屋（基礎版及び屋根トラス）

作成中

4.4.2 杭

4.4.2.1 モデル化の基本方針

杭の S_s 地震時軸力は、使用済燃料乾式貯蔵建屋基礎底面に作用する自重、水平方向地震応答解析で得られる地盤回転ばね反力及び上下方向地震応答解析で得られる地盤鉛直ばね反力を用いて算定する。杭の軸力算定概念を図4 - 2に示す。

杭の S_s 地震時のせん断力と曲げモーメントを評価するための応力解析は、弾性支承ばりモデルを用いた弾性応力解析とする。解析には、解析コード「MSC NASTRAN 2008R1」を用いる。弾性支承ばりモデルによる杭応力評価概念を図4 - 3に示す。建屋慣性力による杭応力と地盤震動による杭応力の絶対値の和より算出する。弾性支承ばりモデルの地盤ばねは、杭の水平載荷試験結果から評価した水平地盤反力係数を用いて算定する。

4.4.2.2 境界条件

弾性支承ばりモデルの境界条件は、杭頭は固定条件、杭先端はピン条件とする。

4.4.2.3 解析諸元

杭の断面性能を表4 - 8に示す。

$$P_i = \frac{N'}{n} + \frac{M}{\sum_j X_j^2} \cdot X_i$$

ここに、 P_i : i 番目の杭の軸力

N' : 建屋基礎版底面における軸力 $N' = N \pm \Delta N$

N : 建屋総重量

ΔN : 上下方向応答解析で得られる地盤鉛直ばね反力

M : 建屋基礎版底面における転倒モーメント
(地盤回転ばね反力)

n : 杭本数

X_i : i 番目の杭の杭群図心線からの距離

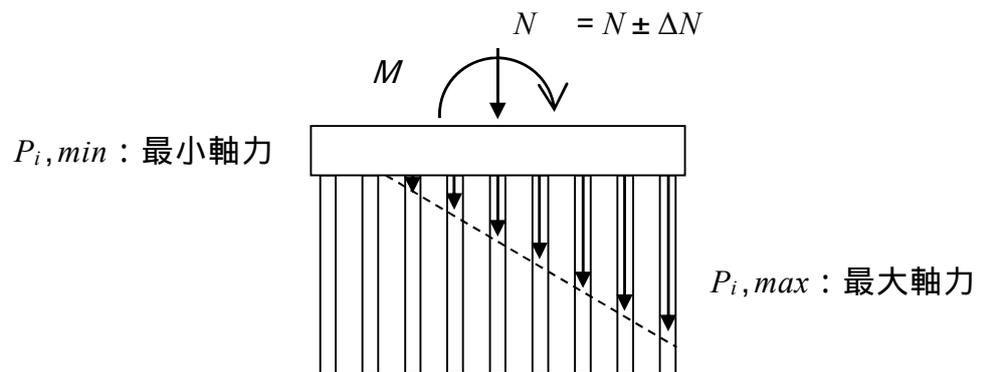
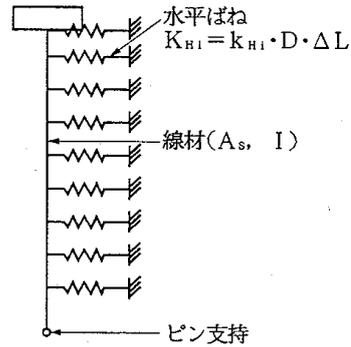


図4 - 2 杭の軸力算定概念

$$K_H = k_H \cdot D \cdot \Delta L、$$

ここに、 K_H : 水平ばね (kgf/cm)

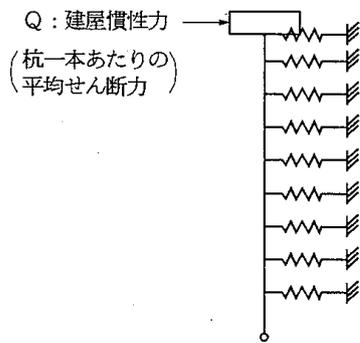
k_H : 水平方向地盤反力係数 (kgf/cm³)



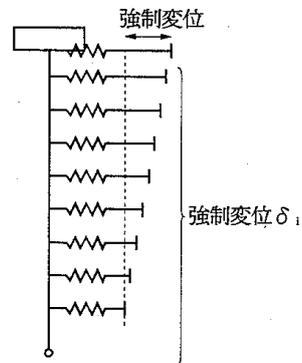
地層名	K_H
d _u	1.7
A _{r2}	5.1
D _{c3}	3.0
D _{r3}	5.1
K _c	7.1

D : 杭径 (cm)

ΔL : ばね間隔



(a) 建屋慣性力による



(b) 地盤震動による場

図4 - 3 弾性支承ばりモデルによる杭応力評価概念

表4 - 8 杭の断面性能 (腐食代考慮)

外径	板厚	内径	断面積	せん断断面積	断面二次モーメント
D(mm)	t(mm)	d(mm)	A(cm ²)	As(cm ²)	I(cm ⁴)
808.8	14	780.8	349.6	174.8	276,000

4.5 評価方法

4.5.1 建屋（基礎版及び屋根トラス）

作成中

4.5.2 杭

(1) 応力解析方法

使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭について，弾性支承ばりモデルを用いた弾性応力解析を実施する。

a．荷重ケース

S_S 地震時の応力は，次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

G　：固定荷重

E　：機器荷重

P　：積載荷重

S　：積雪荷重

$K_{S_{NS}}$ ：N S 方向 S_S 地震荷重

$K_{S_{EW}}$ ：E W 方向 S_S 地震荷重

$K_{S_{UD}}$ ：鉛直方向 S_S 地震荷重

b．荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 4 - 14 に示す。

c．荷重の入力方法

杭の S_S 地震時のせん断力と曲げモーメントは，建屋慣性力による杭応力と地盤震動による杭応力の絶対値和より算出する。

(a) 建屋慣性力

建屋慣性力による杭応力を求める際に杭頭に入力する建屋慣性力は，水平方向の地震応答解析で得られる地盤水平ばね反力を杭本数（435

本)で除した,杭1本当たりのせん断力とする。

(b) 地盤振動による強制変位

地盤震動による杭応力を求める際に地盤ばねに入力する杭の強制変位は,地盤応答解析から得られる杭先端に対する相対変位とする。

表 4 - 14 杭の評価における荷重の組合せケース

	ケース No.	荷重の組合せ
S _s 地震時	1	$G+E+P+S+1.0K_{NS}-0.4K_{UD}$
	2	$G+E+P+S+1.0K_{NS}+0.4K_{UD}$
	3	$G+E+P+S+0.4K_{NS}-1.0K_{UD}$
	4	$G+E+P+S+0.4K_{NS}+1.0K_{UD}$
	5	$G+E+P+S+1.0K_{EW}-0.4K_{UD}$
	6	$G+E+P+S+1.0K_{EW}+0.4K_{UD}$
	7	$G+E+P+S+0.4K_{EW}-1.0K_{UD}$
	8	$G+E+P+S+0.4K_{EW}+1.0K_{UD}$

K_{UD}は、下向きを正とする

(2) 断面の評価方法

使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭の軸力の評価は、 S_s 地震時に発生する杭軸力が許容支持力及び許容引抜き抵抗力以内であることを確認する。

また、杭の断面の評価は、弾性支承ばりモデルを用いた応力解析により得られた各断面力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）を用いることとし、 S_s 地震時に対して以下のとおり行う。

軸力及び曲げモーメントに対する検討では、杭に生じる曲げモーメントが杭断面の軸方向力を考慮した全塑性モーメントを超えないことを確認する。

せん断力に対する検討では、杭に生じるせん断力が、杭体の終局せん断強度以内であることを確認する。

5. 評価結果
作成中

使用済燃料乾式貯蔵建屋の
地震応答解析モデルの既工認からの変更について

1. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの既工認からの変更

1.1 目的

今回工認に用いる使用済燃料乾式貯蔵建屋のS Rモデルについて検討する。使用済燃料乾式貯蔵建屋はN S方向に細長い形状をしている。このような形状であるとE W方向振動に対して、中央部の振動を含め、1本棒モデルに集約するのは難しい。設計当時は1本棒モデルであるが、3次元F E Mの1次固有周期（中央部振動の固有周期）に整合するように剛性を設定していた。これは、耐震壁の剛性を小さく見積もることであり、クライテリアをせん断ひずみとした場合には保守的な設定と言える。また、設計当時の基準地震動 S_2 に対しては、この保守的なモデルを用いても弾性範囲に収まっていたため耐震壁の復元力特性を作成していない。

今回工認では基準地震動 S_s 入力に対し、非線形領域に入ることが予想されるため耐震壁の復元力特性を設定する必要がある。

上記を背景に、N S方向も含め、より実情に近い建屋の振動性状を評価できる耐震壁の復元力特性を考慮した解析モデルを設定することを目的とする。

1.2 今回工認モデルの設定方針

地震応答解析モデルは、以下の方針に基づいて、建設当時の工認（以下「既工認」という。）のモデルから変更する。N S方向の耐震壁には、金属キャスク冷却のために大開口が設けられている。既工認モデルでは、開口の影響を考慮したはり理論による等価剛性を設定しており、既工認モデルでは、3次元全体F E Mと1次固有周期は整合していたものの、上階の方が下階よりも剛性が大きく評価されていた。今回は、より詳細に開口の影響を考慮するために、3次元全体F E Mモデルによる剛性評価を採用することに修正する。復元力特性は、原子力発電所耐震設計技術指針J E A G 4601-1991

追補版 [社団法人日本電気協会] (以下「J E A G 4601-1991 追補版」という。)に基づいて設定する。

E W方向の既工認モデルは、「1.1 目的」に記載したように、保守的に1本棒のモデルを構築していた。基準地震動 S_s に対する今回工認では、非線形挙動を精度良く表現するために、妻側耐震壁と耐震壁間のフレーム部をそれぞれ1本棒でモデル化し、屋根スラブレベルで屋根スラブ剛性を模擬したせん断ばねで連結する2本棒多質点系モデルに変更する。

1.3 既工認との比較

地震応答解析モデルの変更点を第1-1表に示す。

既工認では、質点系モデルの基礎底面位置に杭と地盤との動的相互作用を考慮して評価したばね（水平ばね，回転ばね及び鉛直ばね）を取り付けてモデル化している。基礎底面ばねは，地盤の成層性と半無限性を考慮した3次元薄層要素法による加振解に基づく方法により算定している。また，建屋入力動については，基礎版底面レベルでの応答波を用いている。

今回工認で変更した点は，建屋入力動評価の適正化を鑑み，薄層要素法により算定した杭の拘束効果を考慮した基礎版底面レベルでの応答波（以下「有効入力動」という。）を採用したことである。

第 1 - 1 表 (1 / 3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析条件)

項目	既工認	今回工認
材料諸元	R C 部 : ヤング係数 E ・せん断弾性係数 G (従来単位)	R C 部 : R C - N 規準に基づくヤング係数 E ・せん断弾性係数 G
モデル形状 ¹	N S , E W 方向ともに 1 軸多質点系モデル	N S 方向 : 1 軸多質点系モデル E W 方向 : 建屋振動特性を考慮した 2 軸多質点系モデル 鉛直方向 : モデルを新設
耐震剛性 ¹	N S 方向 : 剛床仮定に基づいた従来ベースの弾性剛性を設定 E W 方向 : 3 次元 F E M モデルにより屋根スラブ剛性を考慮した等価剛性を設定 鉛直方向 : モデル未設定	N S 方向 : 3 次元 F E M モデルにより大開口の影響をより詳細に考慮した等価剛性を設定 E W 方向 : 耐震壁と中間フレーム部を独立させ , それぞれ従来ベースの弾性剛性を設定 鉛直方向 : 耐震壁配置に応じ従来ベースで剛性を設定 (単スパン集約モデル)
耐震重量	積雪荷重を未考慮	積雪荷重 30cm × 0.35 考慮 (30tf 増)

第 1 - 1 表 (2 / 3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析条件)

項目	既工認	今回工認
解析手法	建屋剛性は線形としてモデル化 (線形応答解析)	せん断及び曲げの非線形性を考慮 (復元力特性の設定による非線形 応答解析) 鉛直方向は線形応答解析
入力 地震動	地盤応答解析による基礎版底面レ ベルの応答波	薄層要素法による杭の拘束効果を 考慮した有効入力動

1 : 解析モデルの妥当性は , 観測記録シミュレーションより確認した。

第 1 - 1 表 (3 / 3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析モデル形状)

	既工認	今回工認
N S 方向		
E W 方向		
鉛直 方向		

【補足資料 1】薄層要素法とは

薄層要素法とは，弾性地盤における正弦的な波動伝播を求めるのに際し，地盤を水平な薄層に分割して水平方向には均質な連続体とするが，深さ方向には分割面で離散的に扱う方法である。即ち、水平方向には弾性波動論、深さ方向には有限要素法で定式化したのが薄層要素法である。薄層要素法では，波動伝播の解が解析的に求められるため積分する必要がなく，計算効率の面で極めて有利となるため，地盤内部に多数の加振源を有する埋込み基礎や群杭の動的相互作用解析に広く適用されている。

【補足資料 2】観測記録を用いた応答解析モデルの妥当性検討

建屋のモデル化における振動特性評価の妥当性確認として、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）時の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施した。

1. 地震計設置位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋には、地震時の基本的な振動性状を把握する目的で基礎上端と屋根トラス上部に各1台の地震計を設置している。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置を図1 - 1に示す。

2. シミュレーション解析結果

既工認での地震応答解析の概要図を第2 - 1図に、今回の工認での評価の概要図を第2 - 2図に示す。観測記録を用いたシミュレーション解析は、既工認モデルと今回の工認モデルの両方を用い、第2 - 2図の方法で実施した。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として、両者の最大応答加速度分布の比較を第2 - 3図に示す。今回工認モデルは既工認モデルとほぼ同等の応答となっており、観測記録に対しては両モデルともに観測記録よりも大きい結果となっている。

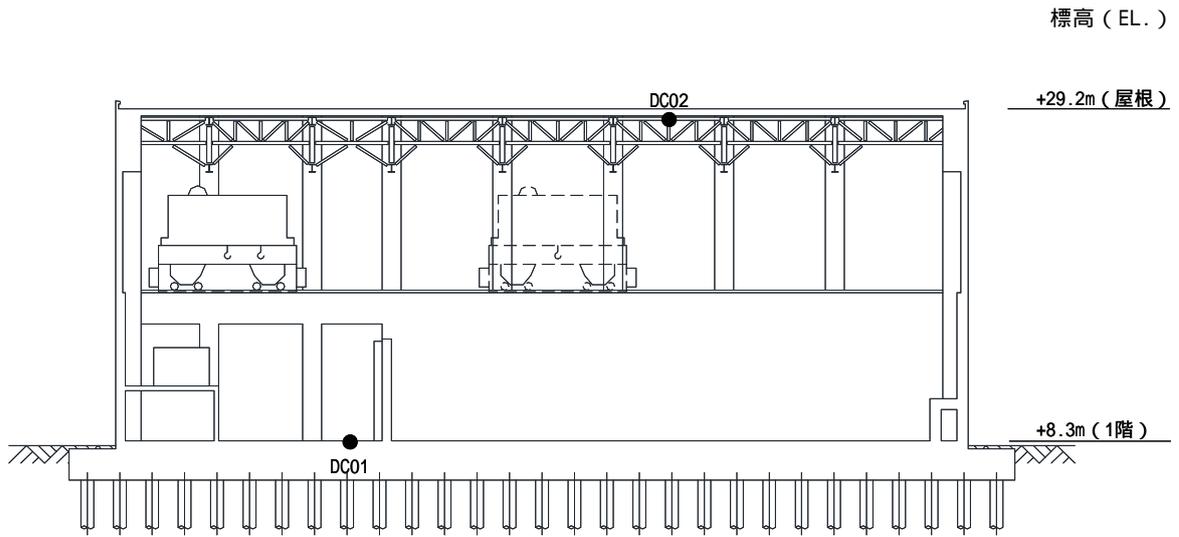
床応答スペクトルの比較を第2 - 4図に示す。観測記録、既工認モデル及び今回工認モデルのピークは、ほぼ同じ周期で生じていることから、建屋の剛性は適切に模擬できているものとする。

3. 工認に用いる地震応答解析モデルの妥当性について

使用済燃料乾式貯蔵建屋が細長い形状をしていること等を考慮し、地震応答解析モデルを既工認から変更をしたが、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果より、既工認モデルと今回工認モデルの観測記録の説明性は同程度であることを確認した。

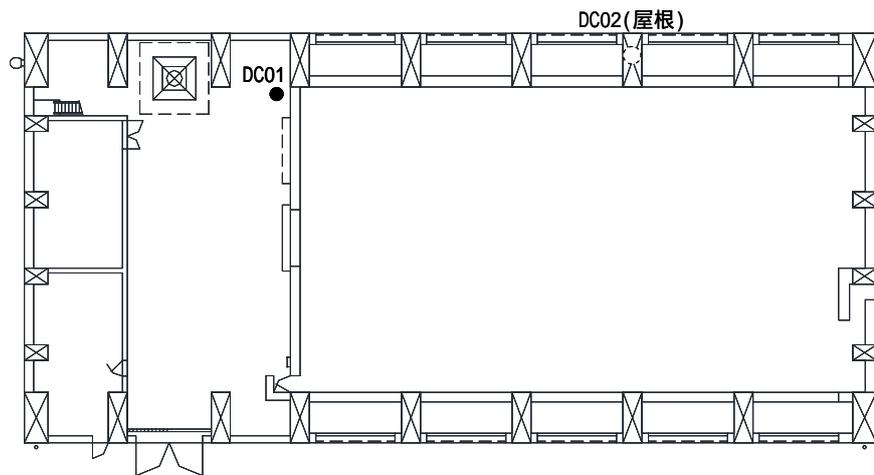
以上の結果を踏まえ、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算及び耐震計

算書に用いる応答解析モデルには，今回工認モデルを用いることとした。



: 地震計

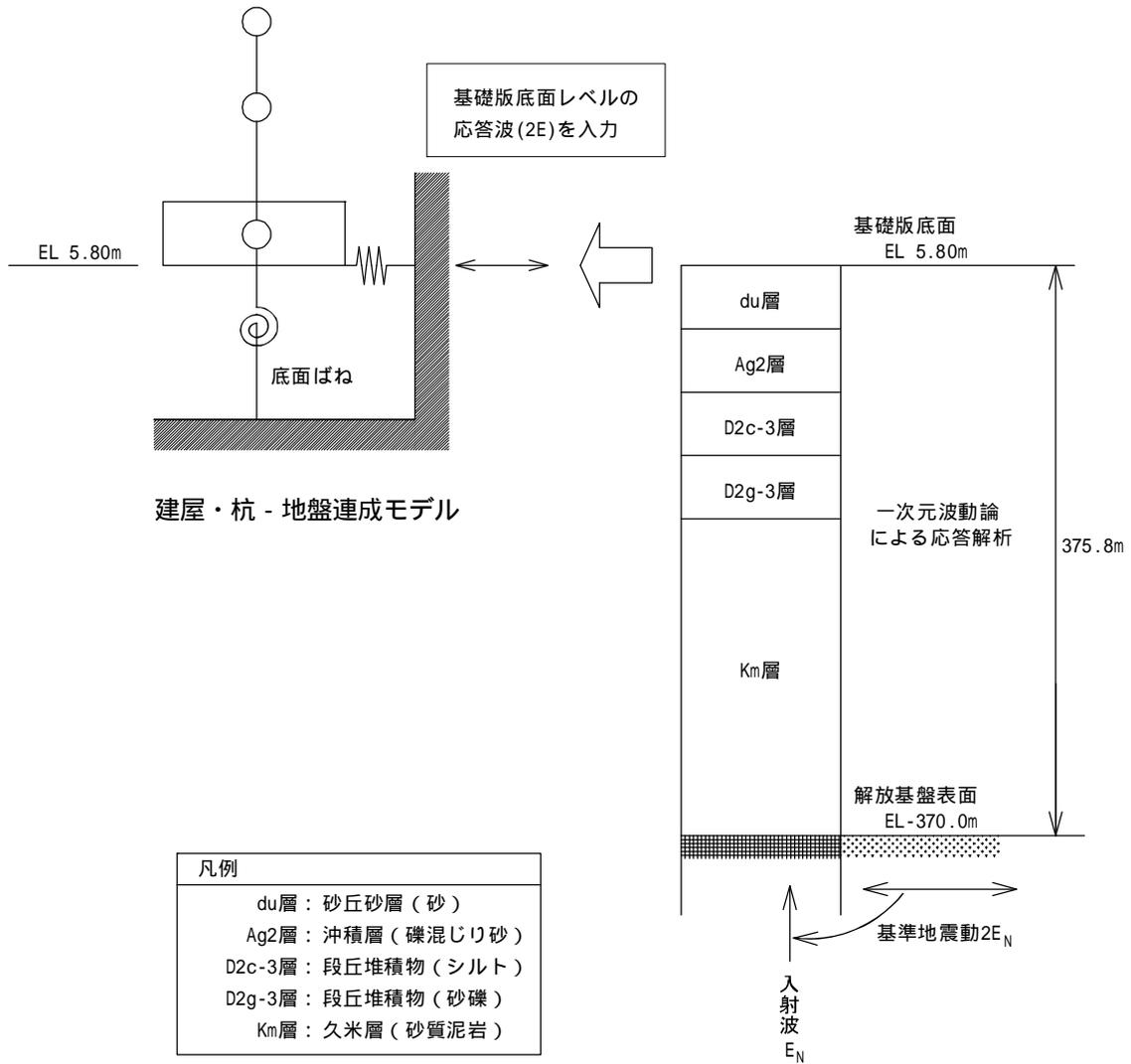
(a) 断面図



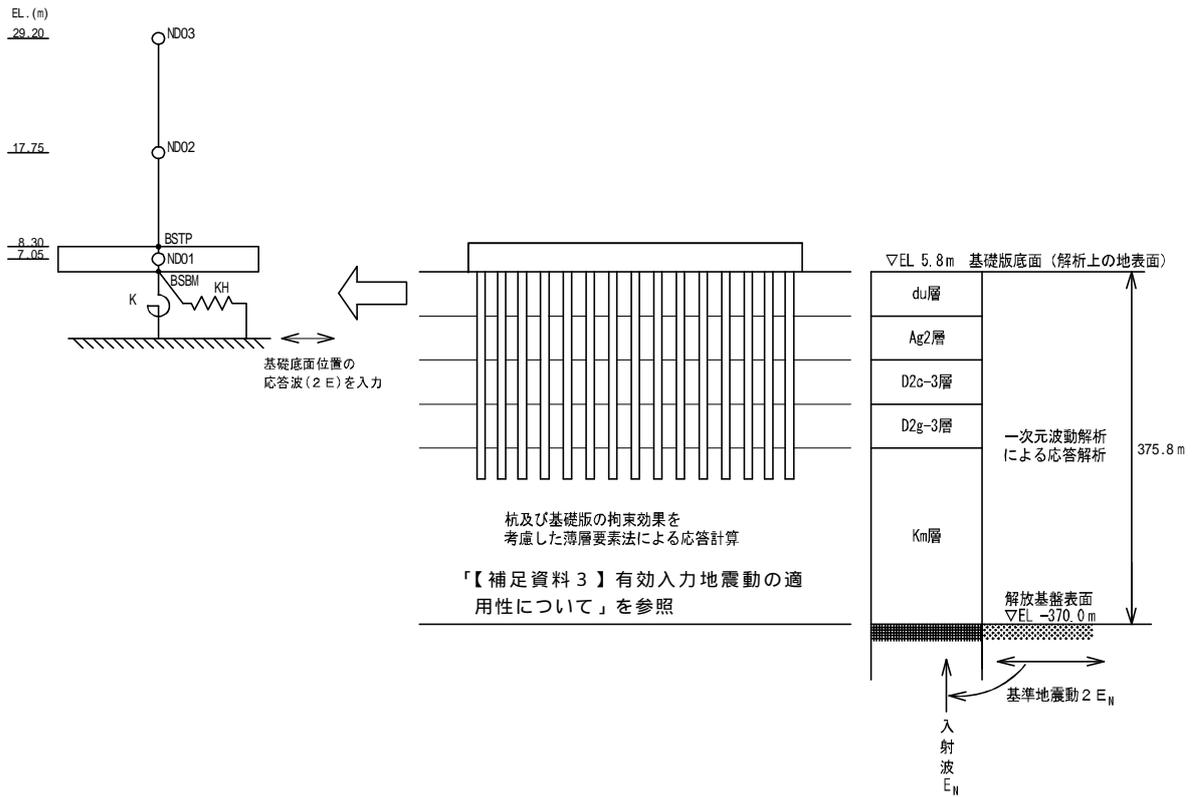
: 地震計

(b) 1階 (EL.8.3 m) 平面図

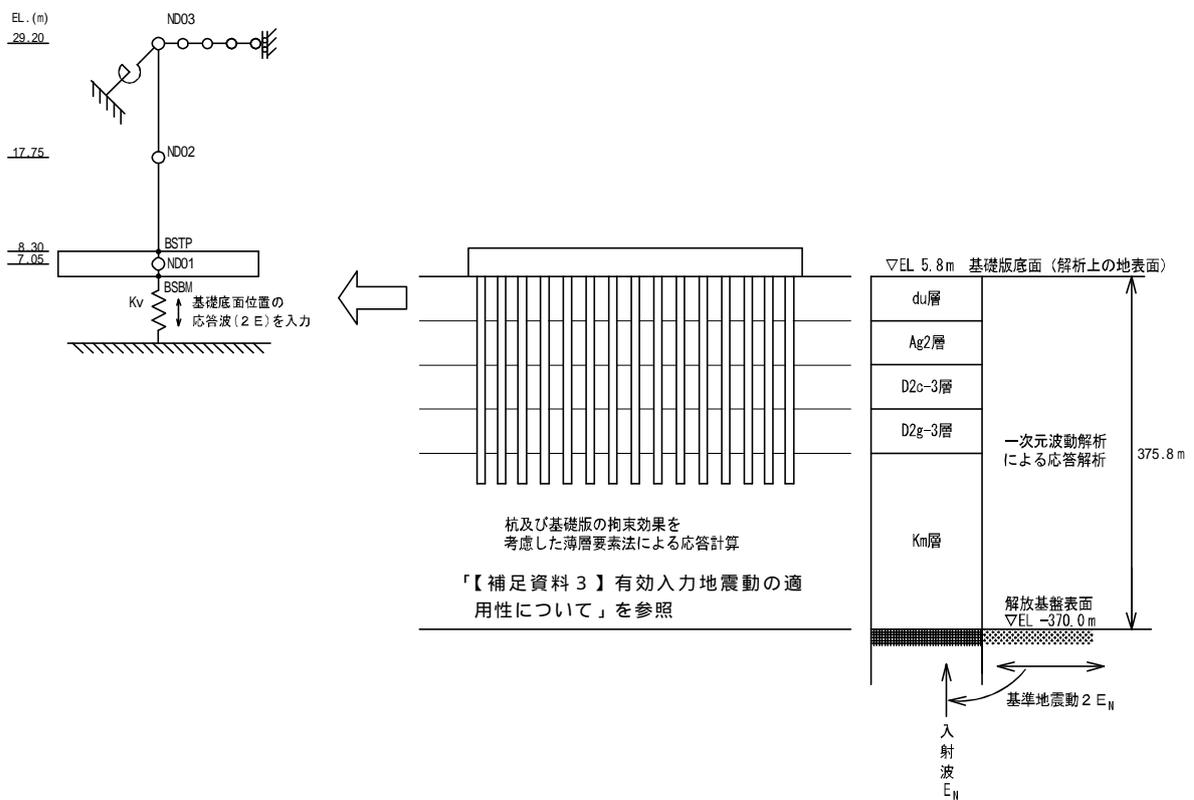
第1 - 1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置



第2 - 1図 地震応答解析の概要図 (既工認)

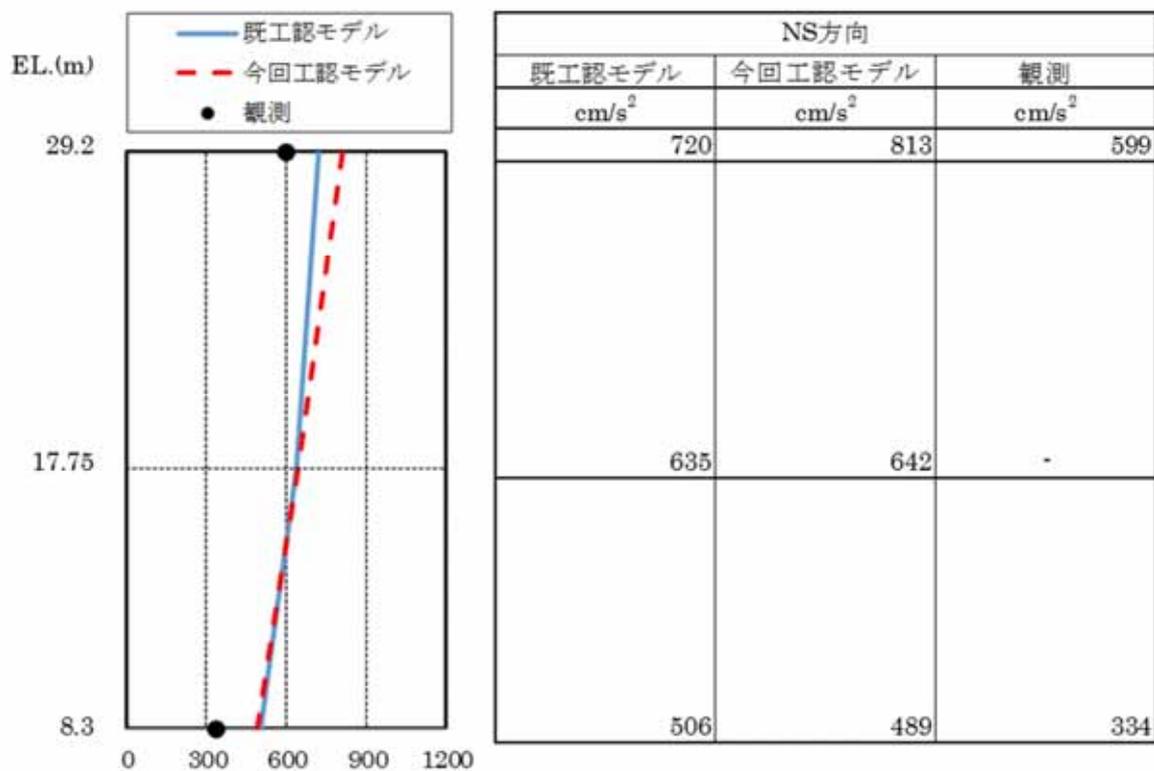


(水平方向)

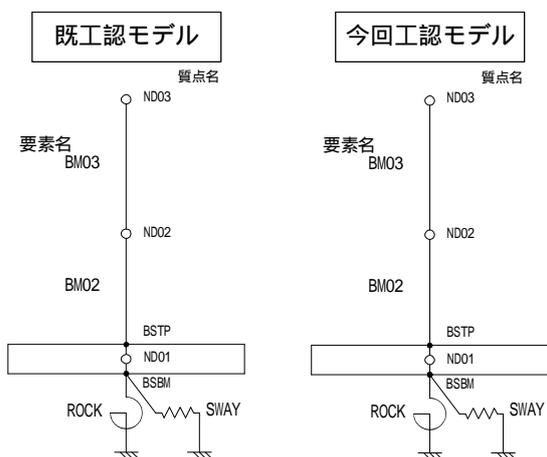


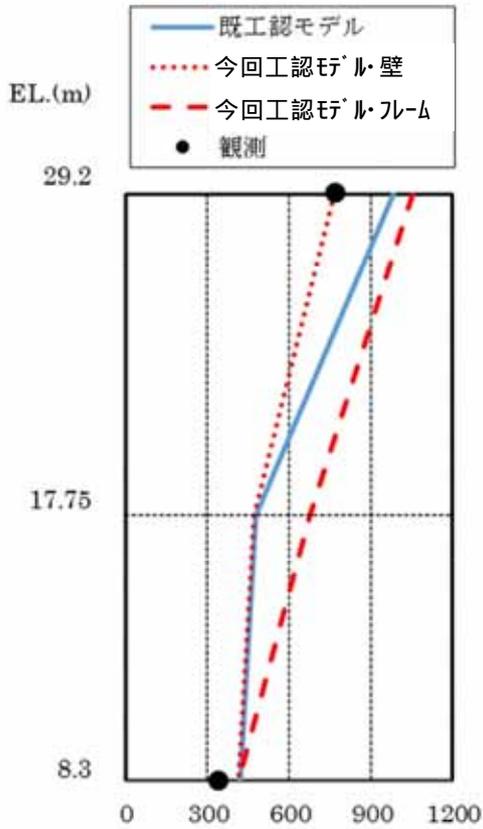
(鉛直方向)

第2 - 2図 地震応答解析の概要図(今回工認での評価)



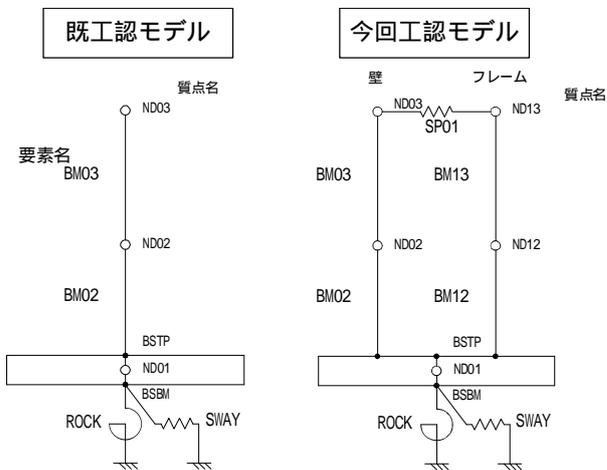
第2 - 3図 (1 / 3) 最大応答加速度分布の比較 (N S 方向)

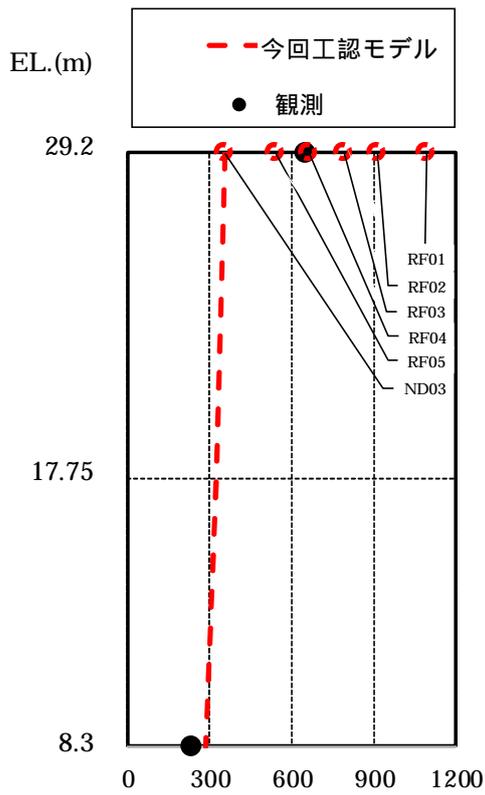




既工認モデル	EW方向		観測
	今回工認モデル		
	壁	フレーム	
cm/s ²	cm/s ²	cm/s ²	cm/s ²
986	763	1052	772
480	469	674	-
417	416	416	342

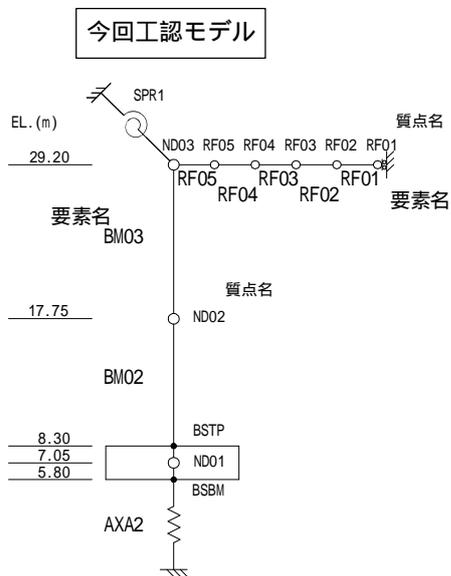
第2 - 3図 (2 / 3) 最大応答加速度分布の比較 (E W方向)

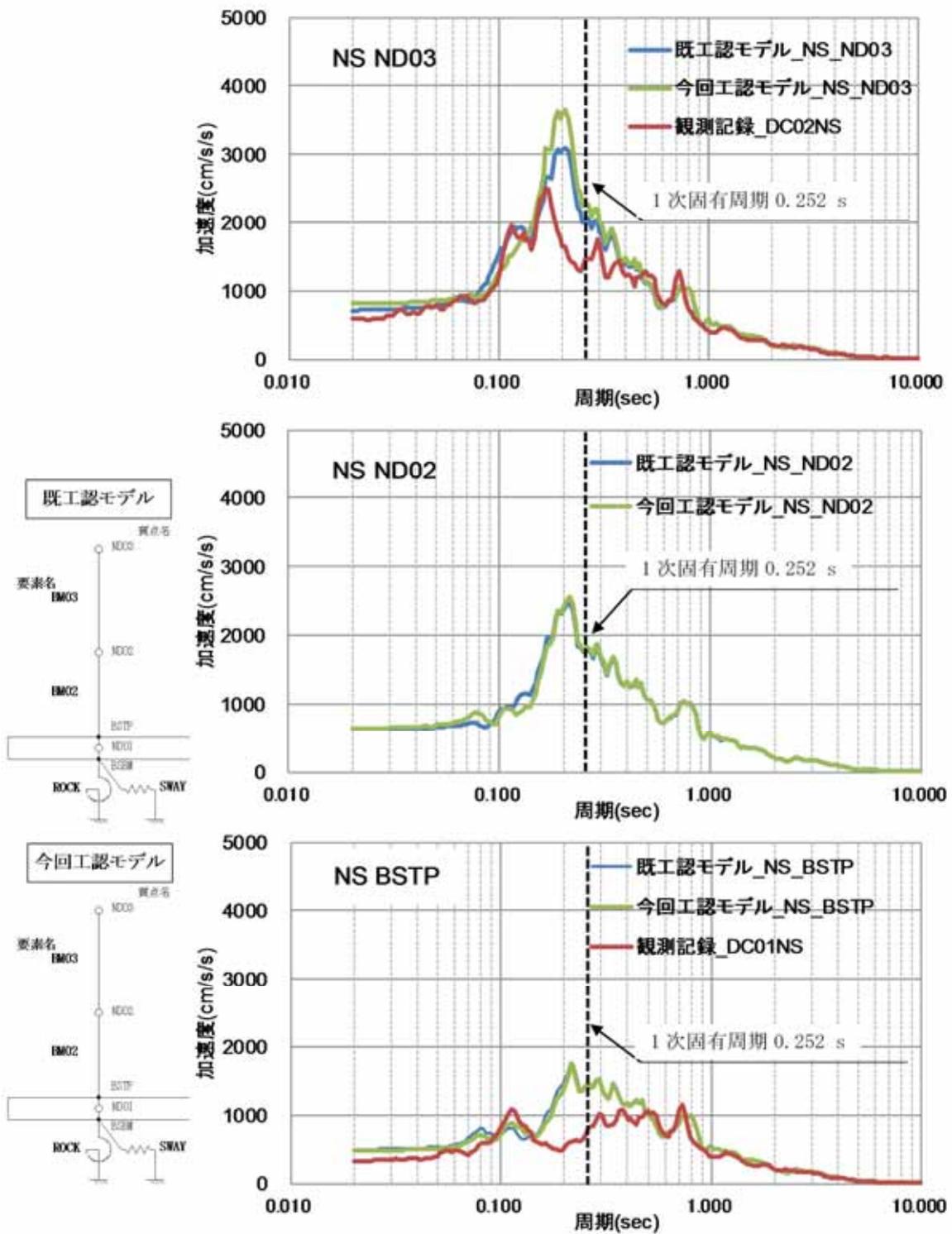




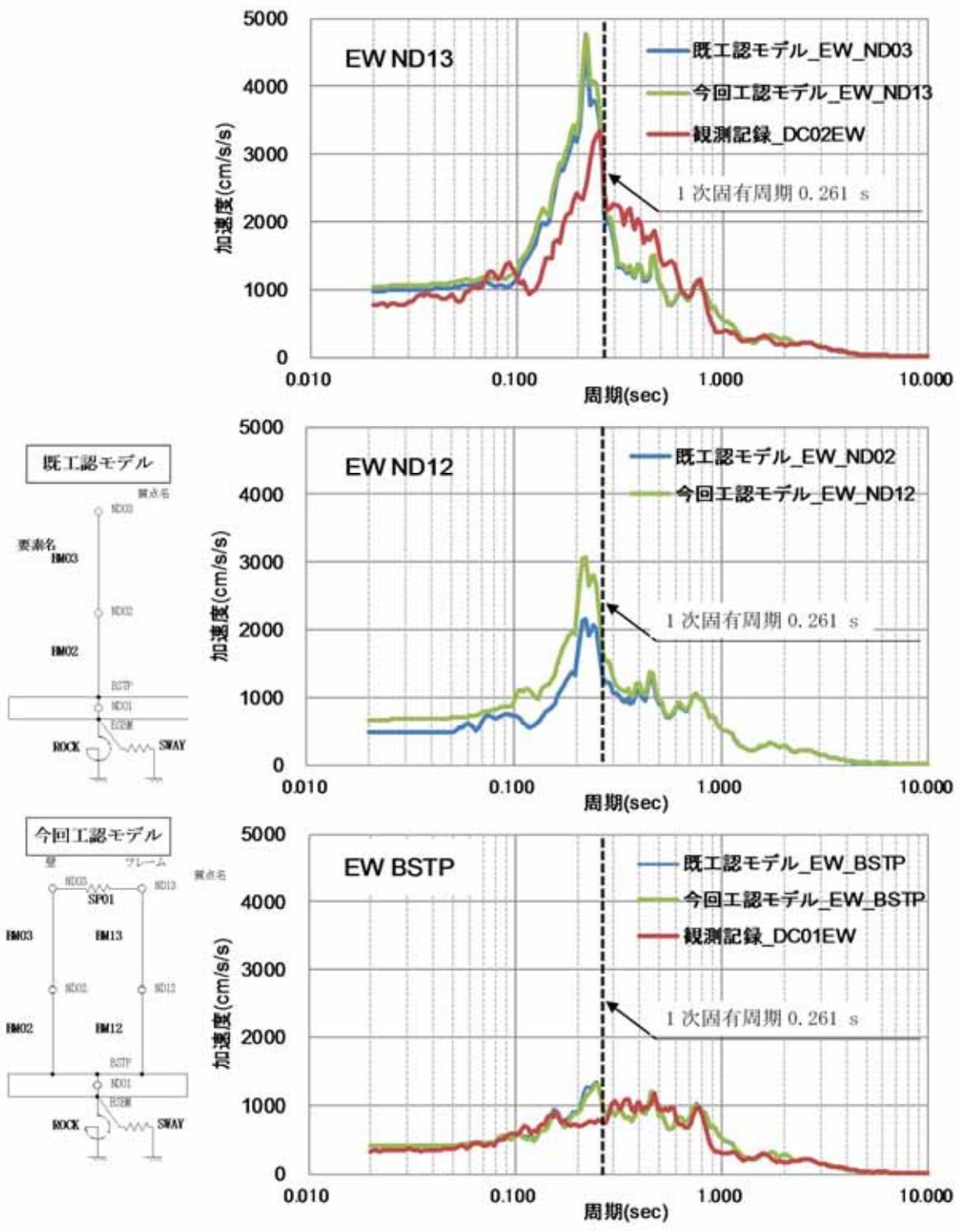
上下方向						
今回工認モデル						観測
cm/s ²						
358	539	662	793	915	1094	653
321	-	-	-	-	-	-
283	-	-	-	-	-	236

第2 - 3図 (3 / 3) 最大応答加速度分布の比較 (上下方向)

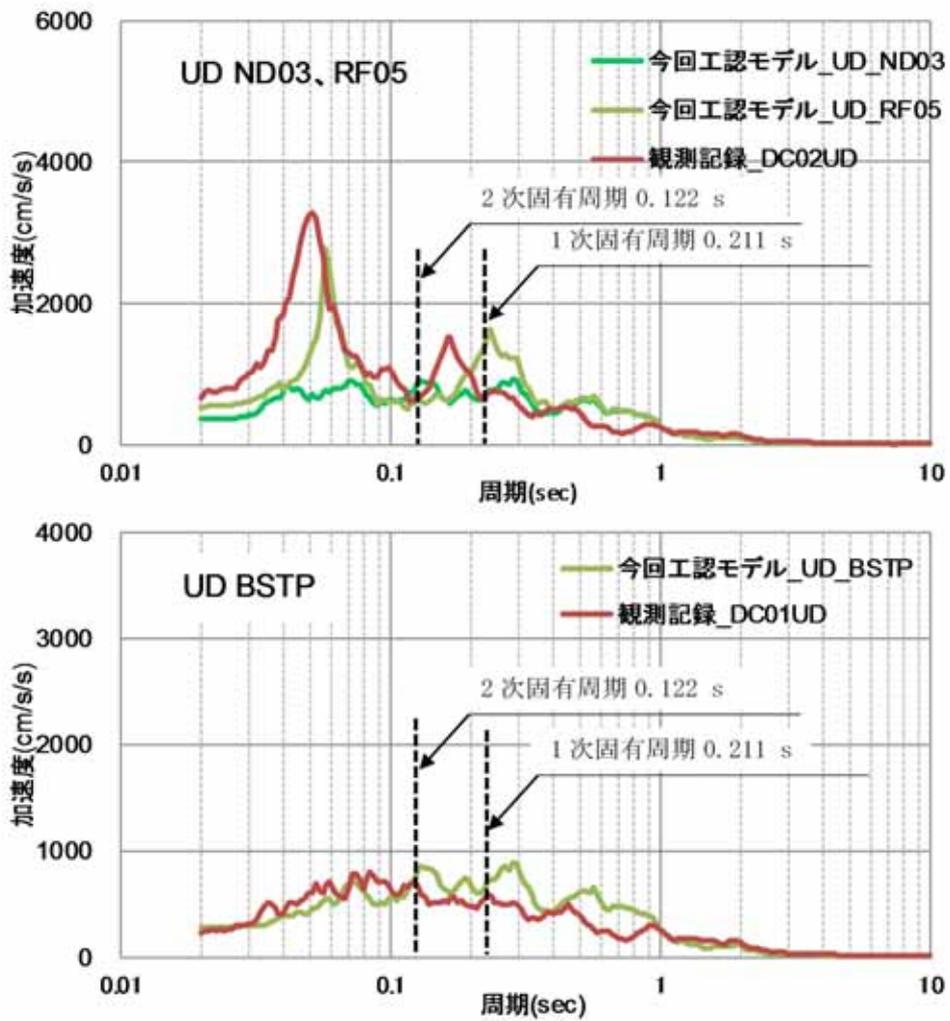




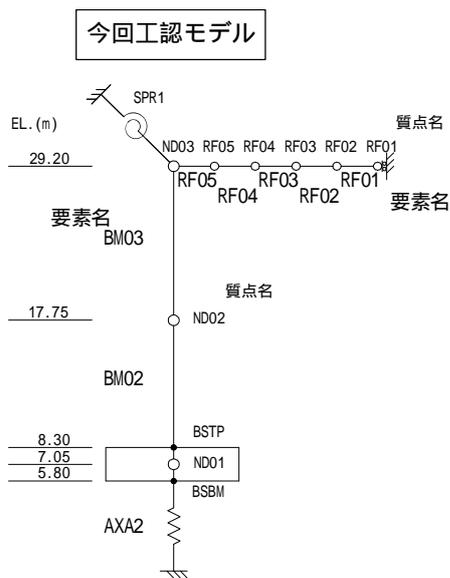
第2 - 4図 (1 / 3) 床応答スペクトルの比較 (NS方向, h = 5%)



第2 - 4図 (2 / 3) 床応答スペクトルの比較 (EW方向 , h = 5%)



第2 - 4図 (3 / 3) 床応答スペクトルの比較 (上下方向 , h = 5%)



【補足資料3】有効入力動の適用性について

既工認では、建屋への入力地震動に地盤応答解析で算定した基礎版底面レベルにおける露頭波を用いて地震応答解析を行っていたが、今回の検討では薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動を用いて地震応答解析を実施した。

ここでは、この有効入力動の適用性について示す。

1. 薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動の評価方法

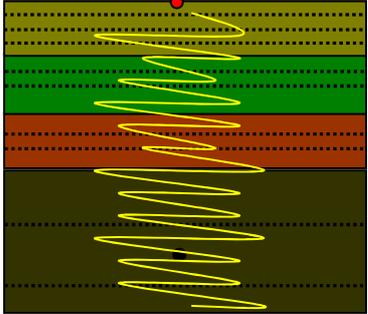
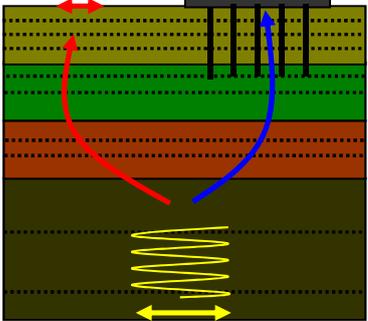
薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動は、表1-1に示すように、以下の手順で評価する。

杭や基礎版を考慮しない成層地盤モデルを用いて、基準地震動 (X_G) を解放基盤表面に入力したときの自由地盤地震動 (X_S) を、1次元波動論により算定する

成層地盤モデルについて、解放基盤面を単位振幅加振して得られる自由地盤伝達関数 (T_S) と杭の剛性を考慮した無質量剛基礎の基礎伝達関数 (T_F) を薄層要素法により算定する。

で算定した X_S に、 で算定した T_S に対する T_F の比を乗じることにより、杭の拘束効果を考慮した有効入力動 (X_F) を評価する。

第 1 - 1 表 杭の拘束効果を考慮した有効入力動の評価方法

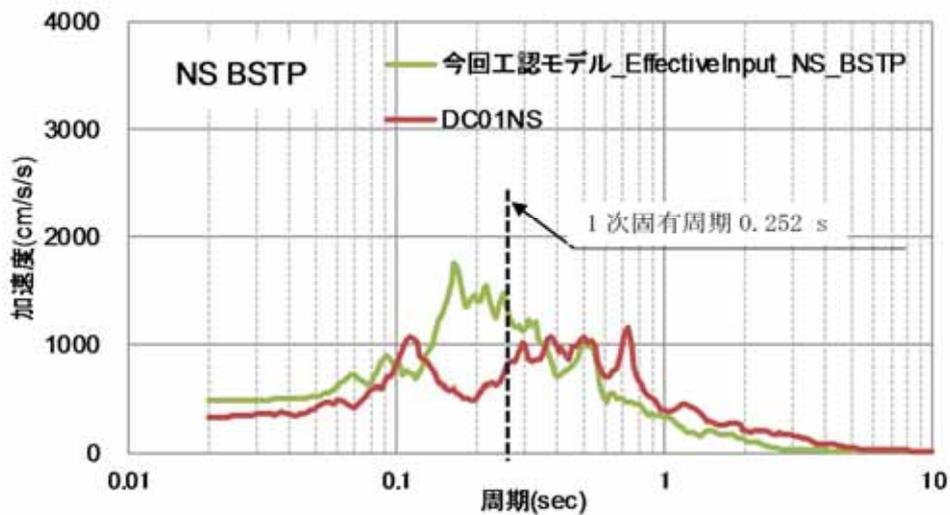
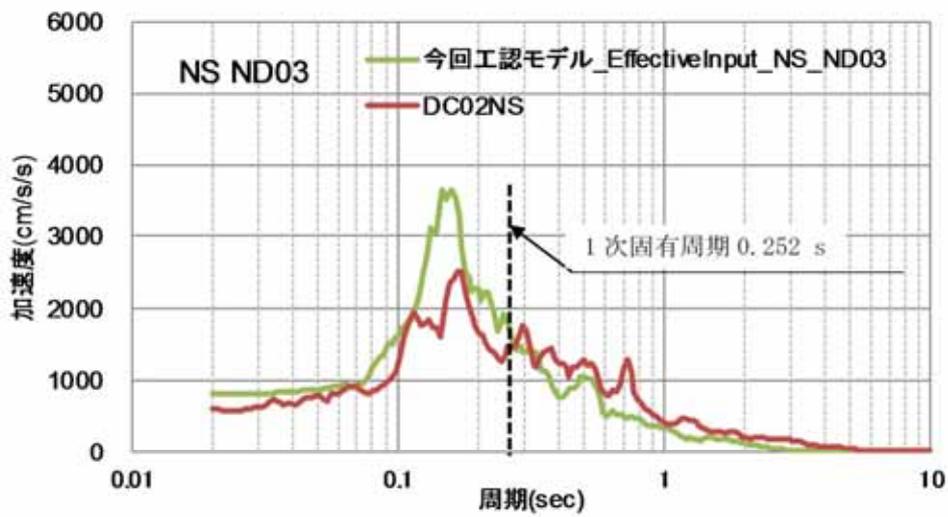
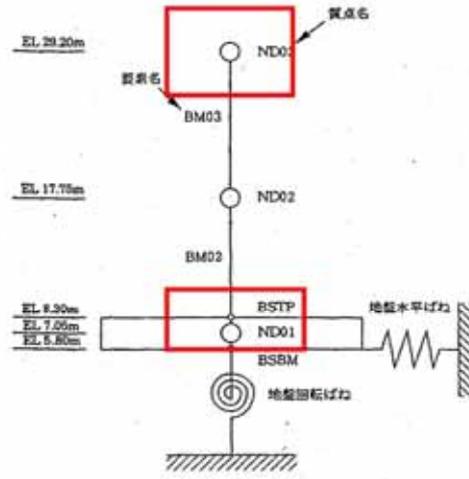
<p>自由地盤地震動：X_S</p>  <p>基準地震動：X_G</p>	<p>自由地盤伝達関数：T_S 基礎伝達関数：T_F</p>  <p>単位振幅加振</p>	<p>薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動X_Fを次式で評価する。</p> $X_F = X_S \times \frac{T_F}{T_S}$

2. 杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性の検討

杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性を東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果に基づき考察する。地震観測記録と有効入力動を用いた解析結果の床応答スペクトルの比較を第2 - 1図に示す。

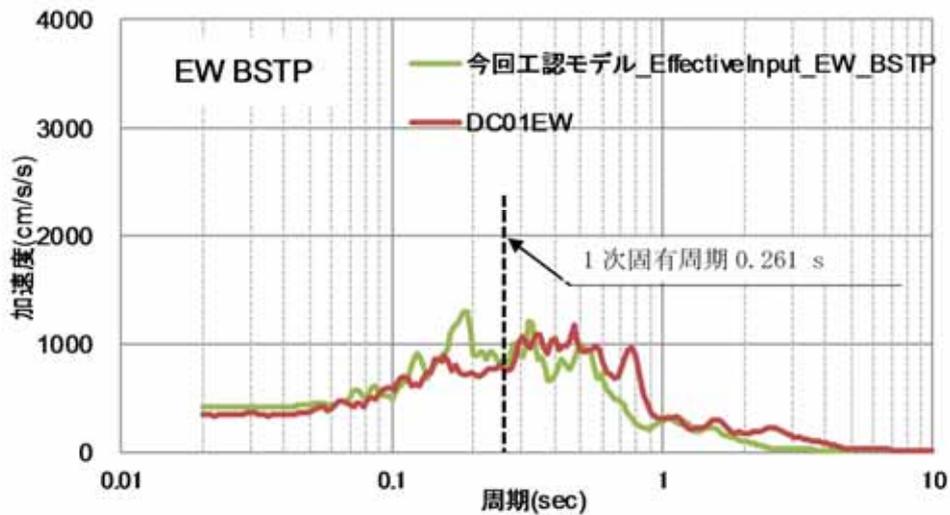
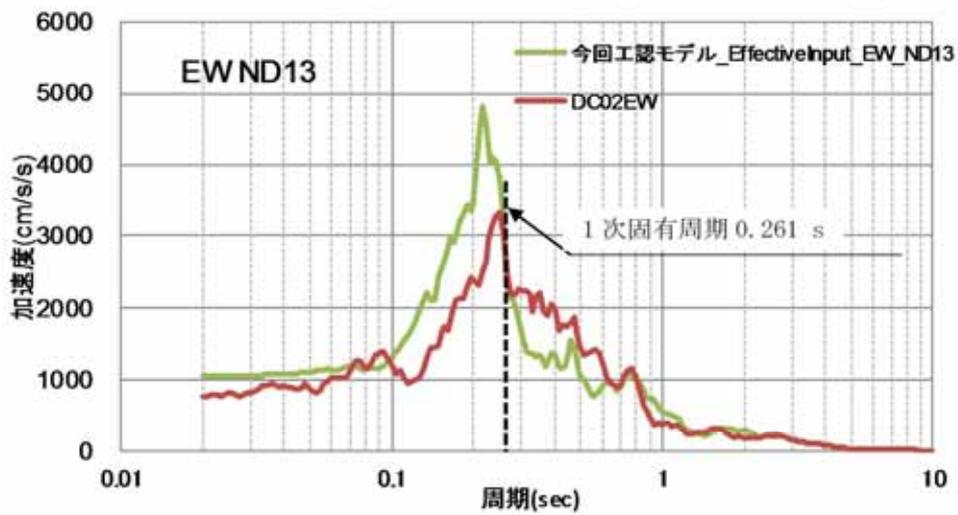
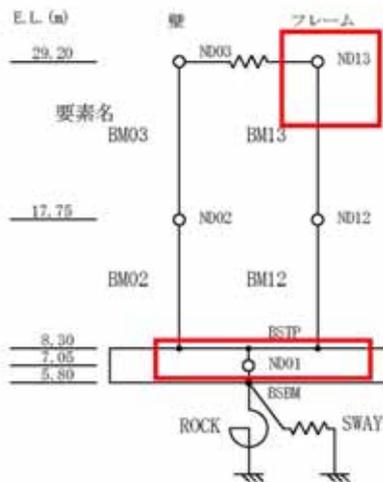
有効入力動を用いた解析結果は、N S方向においてはほぼ全振動数領域で観測記録を包絡している。E W方向においては建屋1次固有周期より高振動数側で、観測記録を包絡している。今回工認モデルによるE W方向建屋耐震壁のS s地震時応答はほぼ弾性領域内にあり、長周期化しないため、解析結果は安全側の評価である。上下方向においては、壁際の質点ND03よりも屋根トラスの質点RF05の応答の方が、観測記録を良く再現していることがわかる。

以上より、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析に、薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動を適用することは問題ないと判断した。



第2 - 1図 (1 / 3) 床応答スペクトルの比較

(NS方向 , h = 5%)



第2 - 1図 (2 / 3) 床応答スペクトルの比較

(EW方向 , フレーム部 , h = 5%)

【補足資料 4】指針類での有効入力動に関する記載の抜粋

1. J E A G 4616-2003 乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針（日本電気協会，2003）

b) FEM モデル

FEM モデルは、一般に地盤及び杭基礎を二次元にモデル化し、杭基礎全体モデルとして応答解析を行う。FEM モデルでは、地盤を平面ひずみ要素、杭を梁要素、建屋を質点系あるいは平面ひずみ要素にモデル化する。また、地盤を軸対称要素、群杭をリング杭要素にモデル化した軸対称 FEM モデル^(7.3.2-6)による応答解析も可能である。地盤モデルの側面と底面の境界には、波動エネルギーの逸散を考慮するため、エネルギー伝達境界あるいは粘性境界などを設けて地盤の半無限性を考慮する。FEM モデルでは、群杭と地盤を直接モデル化することが可能であり、群杭効果や埋込み効果を考慮できる。また、液状化対策などの目的で実施する地盤改良の効果を直接取り込むことができる。

杭体や地盤の非線形性は、それぞれの要素に非線形特性を組み込んだモデルによる時刻歴応答解析により考慮する。

なお、二次元 FEM モデルや軸対称 FEM モデルによる解析では、三次元的に配置されている群杭を適切に二次元又は軸対称にモデル化する必要がある。

c) SR モデル

SR モデルでは、建屋を質点系にモデル化し、基礎底面位置に群杭と地盤との動的相互作用を考慮して評価した群杭ばね（水平ばねと回転ばね）を取り付けてモデル化する。基礎底面の群杭ばねは、地盤の成層性と半無限性を考慮した三次元薄層法による加振解などを用いて、群杭効果を考慮して評価することができる。また、杭本数が多本数となる場合には、2本杭の柔性を重ね合わせる方法^{(7.3.2-9)、(7.3.2-10)}や群杭係数を用いる方法などの近似解法^{(7.3.2-11)、(7.3.2-12)、(7.3.2-13)}により求めることができる。貯蔵建屋に埋込みが有る場合の側面地盤ばねは、質点系モデルと同様に Novak の方法などにより評価する。群杭ばねは、基礎スラブを剛体として評価した場合、水平ばね、回転ばね、水平・回転連成ばねの3成分が算定されるが、水平・回転連成ばねの影響は小さいため、通常考慮しなくてもよい。

群杭ばねは、複素数として振動数に依存した形で求められるが、時刻歴応答解析に用いる場合は「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 (JEAG 4601)」（日本電気協会）による近似法と同様に、地盤ばねの剛性に相当する実数部は振動数 $\omega = 0$ における値、すなわち、振動数に依存しない一定値として取扱うこととする。減衰に相当する虚数部は、建屋連成系の1次振動数 ω_1 における減衰定数 h_1 を通る ω の1次式とする。

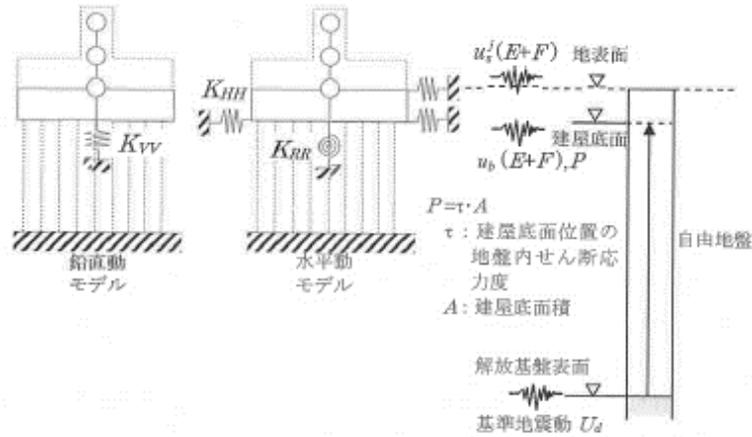
SR モデルへの入力動は、原則として、第5章「表層地盤の応答評価」に述べた自由地盤の地震応答解析結果に基づき、基礎底面深さにおける応答波形とする。ただし、群杭による拘束効果や地盤改良の影響などにより建屋への入力動が自由地盤の応答と差を生じる場合には、必要に応じて別途有効入力動を評価することとする。

なお、SR モデルによって地震応答解析を行う場合には、杭体の応力と変形は

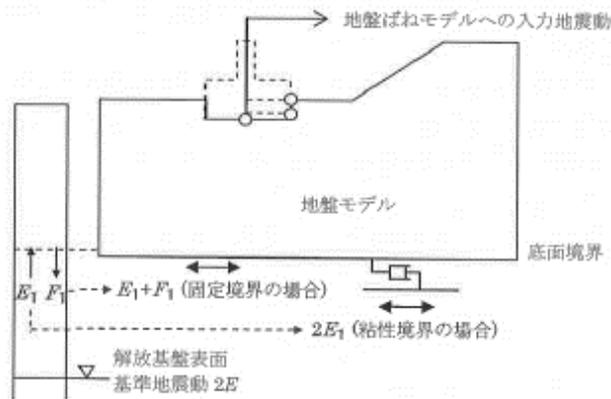
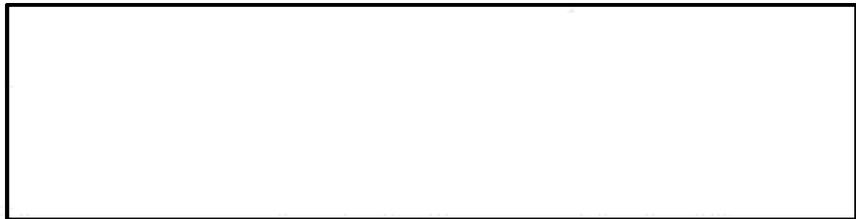
2. J E A C 4616-2009 乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程（日本電気協会，2010）

る。このとき、補正水平力 P は建屋底面位置における地盤のせん断応力度と建屋底面積との積として求める。

杭応答は、応答変位法により評価する。杭に作用する変動軸力は地震応答解析から得られる建屋の最大応答転倒モーメントを適切な方法により杭位置に配分して求める。杭の最大・最小軸力は、変動軸力に長期荷重による軸力及び鉛直方向の地震応答解析による軸力を組み合わせて評価する。



附図2.6-5 地盤ばねモデルへの入力地震動（一次元波動論による場合）



附図2.6-6 地盤ばねモデルへの入力地震動（離散系モデルによる場合）

3. 入門・建物と地盤との動的相互作用（日本建築学会，1996）

3.3.3 基礎入力動

基礎入力動は基礎の剛性が地盤震動を拘束する効果を考慮した建物-基礎系への入力地震動であり、解析的には図 3.13 に示すごとく入力地震動を受けたときの無質量・剛体基礎の応答として求めることができる。鉛直入射 S 波 $E_0 \exp(i\omega t)$ に対する R1 基礎の基礎入力動を図 3.14 に示す。縦軸は基礎入力動の水平成分 Δ^* および回転成分 Φ^* に基礎の半幅 b を掛けた基礎端での上下変位 $\Phi^* b$ を地表面の応答振幅 U_S で基準化した値である。R1 基礎は地中梁程度の埋め込みを有する直接基礎であるが、埋め込みのない地表面基礎では水平の基礎入力動は振幅比 Δ^*/U_S が 1 で回転成分 Φ^* はゼロとなる。すなわち、基礎入力動は地表面の応答そのものになる。基礎が若干埋め込まれたことにより、上記の地表面基礎での基礎入力動の特性とは異なり、特に回転成分は振動数が高くなるにつれて大きくなる。水平成分の基礎入力動の振幅比は均質地盤 G1 においては振動数とともに減少するが、成層地盤 G2 と G3 においては地盤の固有振動数の影響を受けて波打ち、固有振動数付近では谷になる。これは地盤の固有振動数で共振する地盤の応答を基礎が拘束していることに起因する。

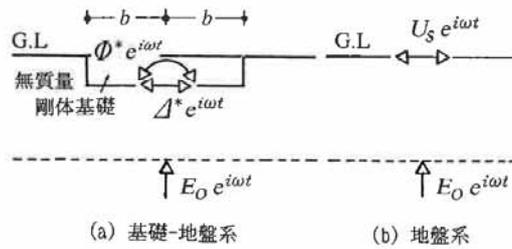


図 3.13 基礎入力動

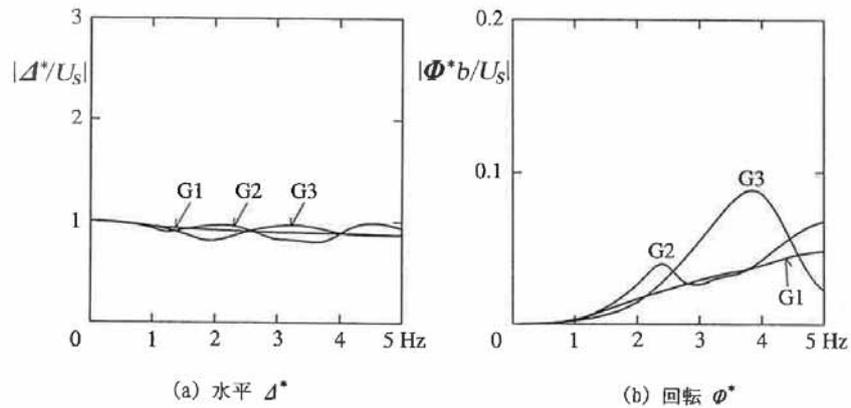


図 3.14 基礎入力動：R1 基礎

6.3.4 プログラムの流れ

図 6.3.6 に、直接境界要素法による動的相互作用解析プログラムの流れを示し、前 3 項の数式および留意点の参照箇所を位置付けた。まず、問題の定義において地盤物性、基礎形状、ならびに擾乱の種類が定義される。次に、境界要素法の要素積分とマトリックス解の評価が行われ、目的とする動的相互作用基本物理量が求められる。

境界要素積分の評価においては、対象振動数範囲に相応しい要素分割、使用するグリーン関数の選択と評価、ならびに境界要素特異積分および非特異積分の手法の選択が行われる。評価された影響関数（境界積分結果）にマトリックス演算を行う際には、外部問題において発生する内部固有値の取り扱いに注意が必要となる。

6.4 薄層要素法

薄層要素法または薄層法とは、弾性地盤における正弦的な波動伝播を求めるのに際し、地盤を水平な薄層に分割して水平方向には均質な連続体とするが、深さ方向には分割面で離散的に扱う方法に対して名付けられたものである¹⁷⁷⁾。当初、この方法は有限要素法の普及とも関係して、地盤を規則領域と不規則領域とに分けたとき、規則領域の無限の広がり代わりに代わるエネルギー伝達境界の設定に応用されてきた^{178)-181)など}。その後、同じ薄層モデルを用いて、任意節面上に正弦的な点加振を与えたときの波動伝播の解が解析的に導きだされた^{35), 182), 183)}。その結果、これを成層地盤のグリーン関数として用いることにより、サブストラクチャー法に基づいた三次元の動的相互作用解析が著しく簡易化されることになった。

一般に、弾性地盤における波動伝播の解は波数に関する無限積分で表され、その数値計算は極めて煩雑となる。しかしながら、薄層法ではこの無限積分が解析的に求められ、解がいわゆる Closed form で与えられる。したがって、計算効率の面で極めて有利となるため、

本節では、この薄層法について、その基礎方程式と導出される解の最終表現を示し、解の精度を検討して薄層モデル設定の際の注意点を述べる。また、薄層法の適用例として、ここでは群杭の動的相互作用問題をとりあげ、若干の数値解析例を紹介する。

6.4.1 薄層モデルにおける加振解

まず、図 6.4.1 のような半無限成層地盤に対し、薄層モデルを以下のように設定する。

- 1) 地盤の深さ方向にモデル化領域を定め、その成層状況および解析精度を考慮して多数の水平な薄層に分割する。ここに、各薄層は均質とし、層内では深さ方向の変位分布を直線に仮定する。
- 2) 各薄層節面に対し、その節面番号を地表面より順次 $1, 2, \dots, N$ と付す。この番号は節面下の層要素についても共用する。
- 3) 地盤の半無限性を考慮するため、最下層（第 N 層）をダッシュポットまたは半無限要素でモデル化する [図 6.4.2 参照]。

(2) 薄層領域の精度

10層モデルを用いて、最下層がダッシュポットの場合と半無限境界の場合について薄層領域による解の精度を検討する。ただし、前述の薄層分割による精度を考え、ここでは $r/H \geq 3$ および $n \geq 5$ をほぼ満足するようにモデルを設定してある。 $r/L=1/2, 1$ の場合について、 $\omega L/V_s$ を変数として求めた変位関数の比較を図 6.4.7 に示す。ここでも同様に、せん断波の1波長： λ とモデル深さ： L の関係の考えると、

$$m = \frac{\lambda}{L} \rightarrow \frac{\omega L}{V_s} = \frac{2\pi}{m} \tag{6.4.21}$$

一般の離散化手法では、対象振動数に対してモデル深さを $m=1$ 程度に選ぶ。そこで、ここでも式 (6.4.21) から $0 < \omega L/V_s \leq 6.0$ の範囲を対象とし、図の横軸には上記の $m=\lambda/L$ も示した。

まず、 r/L に着目してモデルの設定深さを考えると、図からはダッシュポットモデルの場合に $r/L \leq 1/2$ 、半無限境界モデルでは $r/L \leq 1$ となるように薄層領域を設けるのが望ましいといえる。さらにこのとき、ダッシュポットモデルおよび半無限境界モデルとも、水平加振に対しては $m \leq 4$ ($\omega L/V_s \geq 1.5$)、上下加振に対しては少なくとも $m \leq 2$ ($\omega L/V_s \geq 3.0$) となるように設定することも必要である。結局、ここでも加振点—受振点間距離： r とせん断波の1波長： λ の両者に対するバランスが問題となる。

(3) 薄層モデルの設定方法

以上の精度検討をまとめると、薄層モデルを設定する際の指標として、薄層分割については表 6.4.1 が、薄層領域については表 6.4.2 が提唱できよう。もちろん、現実の地盤は層序が複雑なこともあって、このように単純には設定できない場合もある。しかしながら、同表は薄層モデル設定の際のめやすになろう。

表 6.4.1 薄層分割 (分割層厚) の設定指標

r/H		$\lambda/H (\omega H/V_s)$	
少なくとも	できれば	少なくとも	できれば
>3	≥ 4	>5 (≤ 1.25)	≥ 6 (≤ 1.0)

表 6.4.2 薄層領域 (モデル深さ) の設定指標

r/L		$\lambda/L (\omega L/V_s)$	
ダッシュポット	半無限境界	水平加振	上下加振
$\leq 1/2$	≤ 1	≤ 4 (≥ 1.5)	≤ 2 (≥ 3.0)

6.4.4 薄層モデルによる群杭の動的相互作用解析

計算効率や成層地盤への適用性などにより、薄層モデルは埋込み基礎や杭基礎の三次元的相互作用解析に広く用いられている。ここでは、最近注目されている群杭の動的相互作用解析について数値計算例を紹介する。

いま、図 6.4.8 (a) のような構造物—杭—地盤系を考え、サブストラクチャー法を適用して同

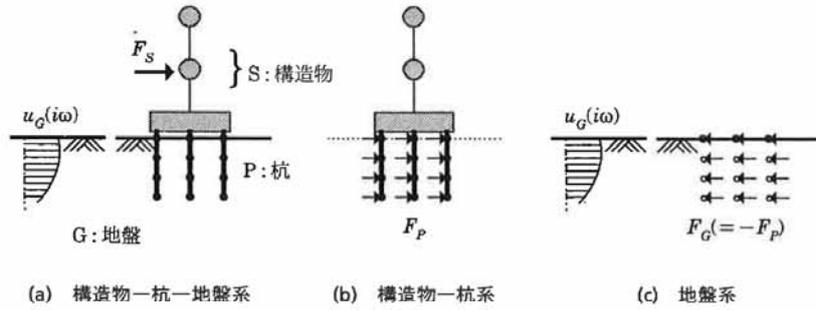


図 6.4.8 サブストラクチャー法による構造物—杭系と地盤系の分離

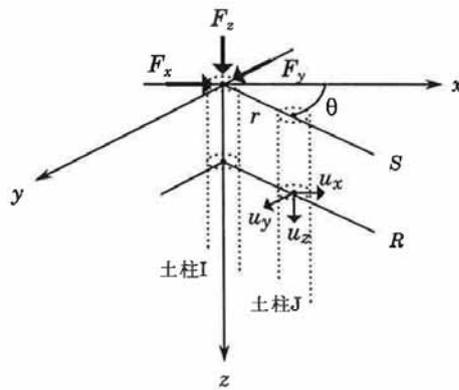


図 6.4.9 地盤系における加振力と変位の関係

図 (b), (c) のように構造物—杭系と地盤系に分離する。分離にあたっては、容積法を採用するのがこの場合には便利である。まず、同図 (c) の地盤系に着目して薄層モデルを設定し、杭と地盤とが連続する節点を薄層節面上に設ける。このように空間的に分布された節点群に対し、先の薄層解を適用して変位と加振力の関係式を求める。このとき、図 6.4.9 を参照して、杭と置き換わるすべての土柱に対し $I \neq J$ の場合には式 (6.4.8) を、 $I = J$ の場合には式 (6.4.11) または式 (6.4.13) を適用すると、変位と加振力の関係は次式で表す。

$$\begin{Bmatrix} \{u_x\} \\ \{u_y\} \\ \{u_z\} \end{Bmatrix} = [A(i\omega)] \begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{F_z\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.22)$$

または、これを簡単に $\{u\} = [A]\{F\}$ と表す。この関係式が求められていれば、以後はサブストラクチャー法に従い定式化すればよい。すなわち、図 6.4.8 を参照して相互作用力 F_P , F_G の釣合い条件と変位の連続条件を考慮すると、最終的な運動方程式は以下のように導かれる。

$$\left(\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SP}] \\ [K_{PS}] & [K_{PP}] - [K_{PP}^G] + [A]^{-1} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_S] \\ [M_P] - [M_P^G] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_S\} \\ \{u_P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S\} \\ \{F^*\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.23)$$

ここに,

$$\{F^*\} = [A]^{-1} \{u_0\}$$

ただし, $[K_{SS}]$, $[K_{PP}]$, ... および $[M_S]$, $[M_P]$, ... は, それぞれ構造物: S と杭: P の離散化表示による剛性マトリックスと質量マトリックスを意味する. とくに, $[K_{PP}^0]$ と $[M_P^0]$ は杭と同体積の土柱の剛性マトリックスと質量マトリックスを表す. また, $\{F_S\}$ は構造物に外部から作用する加振力ベクトルで, $\{F^*\}$ は地震時に杭に作用するドライビングフォースベクトルである.

数値例¹⁹⁾として, 杭径: B に対する杭中心間隔: S の比が $S/B=2.5$ の場合について, 杭本数: N をパラメーターに求めた群杭の水平インピーダンスを図 6.4.10 に示す. 同図には参考のため単

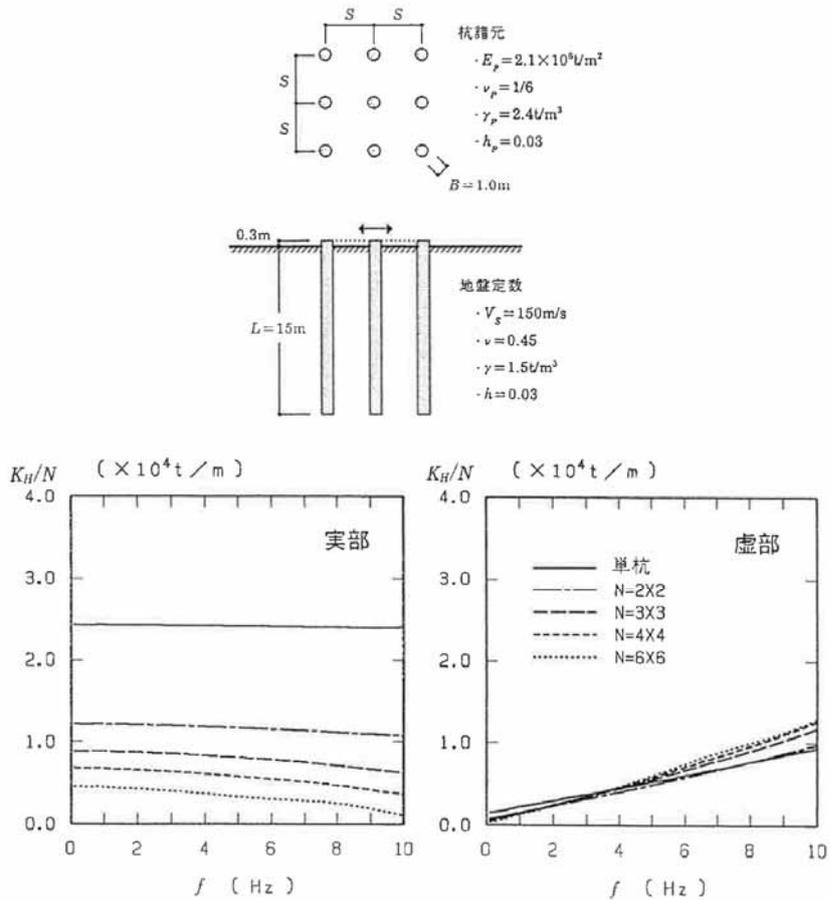


図 6.4.10 群杭の水平インピーダンス (杭間隔比: $S/B=2.5$)

4. 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（日本建築学会，2006）

1.2.3 慣性の相互作用と入力の相互作用

相互作用を理解するには、図1.2.4に示すように、建物と地盤とを分離して考えると分かりやすい。この考え方は、後に、動的サブストラクチャー法として解説されているが、ここでは導入部としてその概要を示しておく。

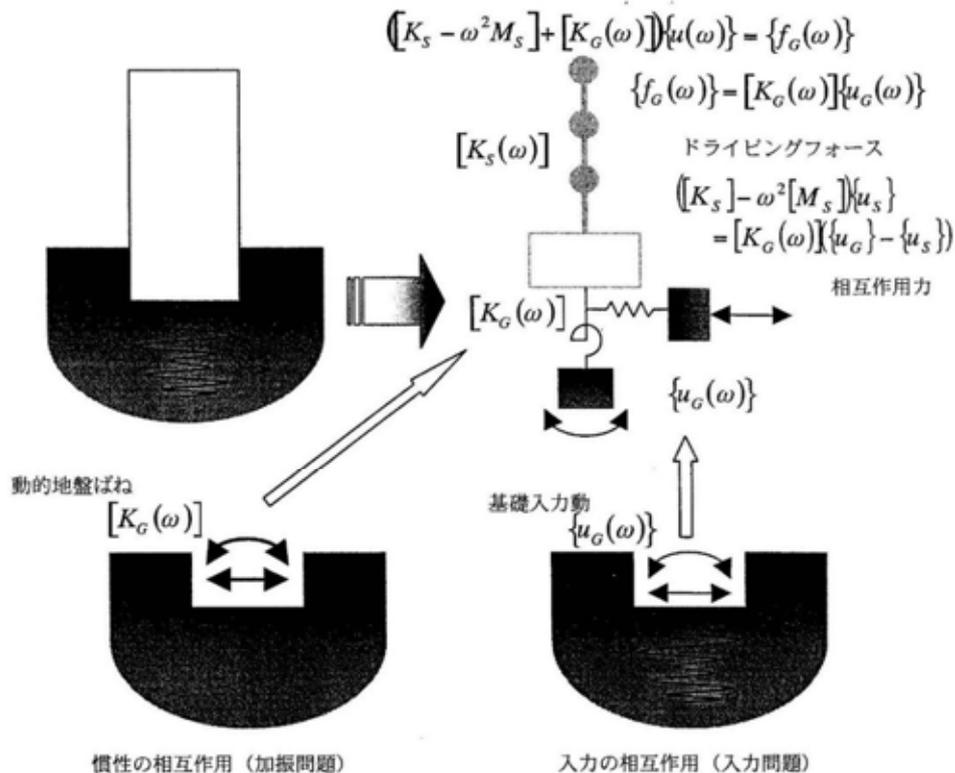


図 1.2.4 建物と地盤とを分離した解析

まず、建物が存在しない状態（建物部を切り欠いた地盤）を想定する。このときの建物と地盤との境界部での力-変位関係を、「動的地盤ばね」と呼んでいる（相互作用ばね、インピーダンスなどとも呼ぶ）。また、地震動が入射したときの建物-地盤境界部での動きを、「基礎入力動」と呼んでいる。基礎入力動は、地盤ばねを介して建物に作用する入力地震動に相当する。動的地盤ばねと基礎入力動を求める問題を、それぞれ、「加振問題」、「入力問題」と呼び、それぞれの相互作用効果を「慣性の相互作用」、「入力の相互作用」と呼ぶ。上に示した地盤ばねや地下逸散減衰は慣性の相互作用効果の一つ、入力損失は入力の相互作用効果の一つである。

動的地盤ばねと基礎入力動の積は「ドライビングフォース」と呼ばれる。ドライビングフォースは、地震動が入射したことによって生じた建物-地盤境界部の変位を、元に戻すために必要となる力である。この力が、作用・反作用の関係で上部構造に作用することになる。

したがって、上部構造物の運動方程式には、剛性行列に動的地盤ばねが加わり、外力ベクトルにドライビングフォースが与えられることになる。動的地盤ばねは、建物の存在の有無による変位差（基礎の応答変位と基礎入力動との相対変位）に比例した抵抗力を生み出す。これが建物と地盤との間でやりとりされる「相互作用力」である。

6.4 基礎入力動の評価

6.4.1 杭基礎の基礎入力動の特徴

杭基礎建物の入力動は、直接基礎のように表層地盤の地表面応答波がそのまま上部構造に入力されるのではなく、地盤内に存在する群杭が表層地盤の挙動を拘束するため、自由地盤の応答波とは異なる。図 6.4.1 は薄層法を用いて求めた杭基礎の基礎入力動を、自由地表面の応答に対する比（応答倍率）として示している。地盤モデルは 3 章の図 3.3.3 に示した地盤-2 の地盤モデル（支持層 GL-25m）であり、液状化層がない場合と考慮した場合である。杭径は 1200mm と 1500mm、杭間距離は 6m とし、杭本数は $2 \times 2=4$ 本と $6 \times 6=36$ 本としている。

地盤の 1 次固有振動数に相当する 1Hz 以下の低振動数では、基礎入力動の振幅は自由地表面を下回り、いわゆる「入力損失効果」が見られる。その低減効果は、群杭が表層地盤の挙動を拘束する効果に応じて杭本数が多く、杭径が大きくなるほど大きくなる。また液状化層を考慮した地盤では入力損失効果が顕著に見られるが、杭本数が多い杭基礎では 2Hz 付近の高振動数域で自由地盤に比べ大きくなる場合がある。これは、液状化層をもつ自由地盤では地盤の非線形化による減衰効果により増幅が抑えられるのに対し、杭基礎では杭の支持層地盤から直接杭体を伝わり上部構造に入力する地震動成分があるためである。このような杭基礎への基礎入力動の性状は、群杭効果と同様に杭径、杭長、杭間距離、地盤剛性によって異なる。杭基礎と上部構造をモデル化した一体型モデルを用いた応答解析ではこのような基礎入力動の影響は自動的に考慮されるが、分離型モデルでは別途基礎入力動を評価して SR モデルに入力する必要がある。

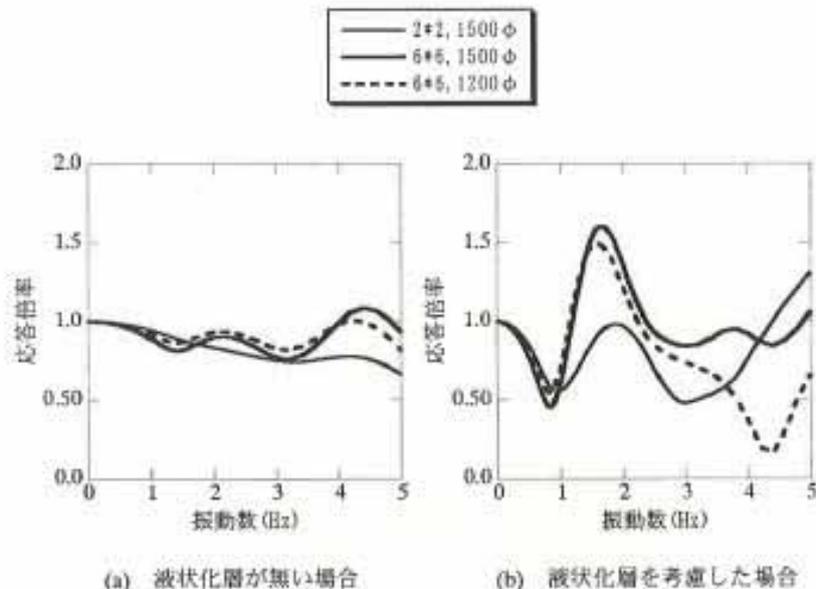


図 6.4.1 自由地表面の応答に対する杭基礎の基礎入力動の比

東海第二発電所

既設設備に対する耐震補強について (耐震)

1. はじめに

本資料では、今回工認の申請において耐震性を向上させる観点から今後実施する計画である既設設備に対する耐震補強について整理する。

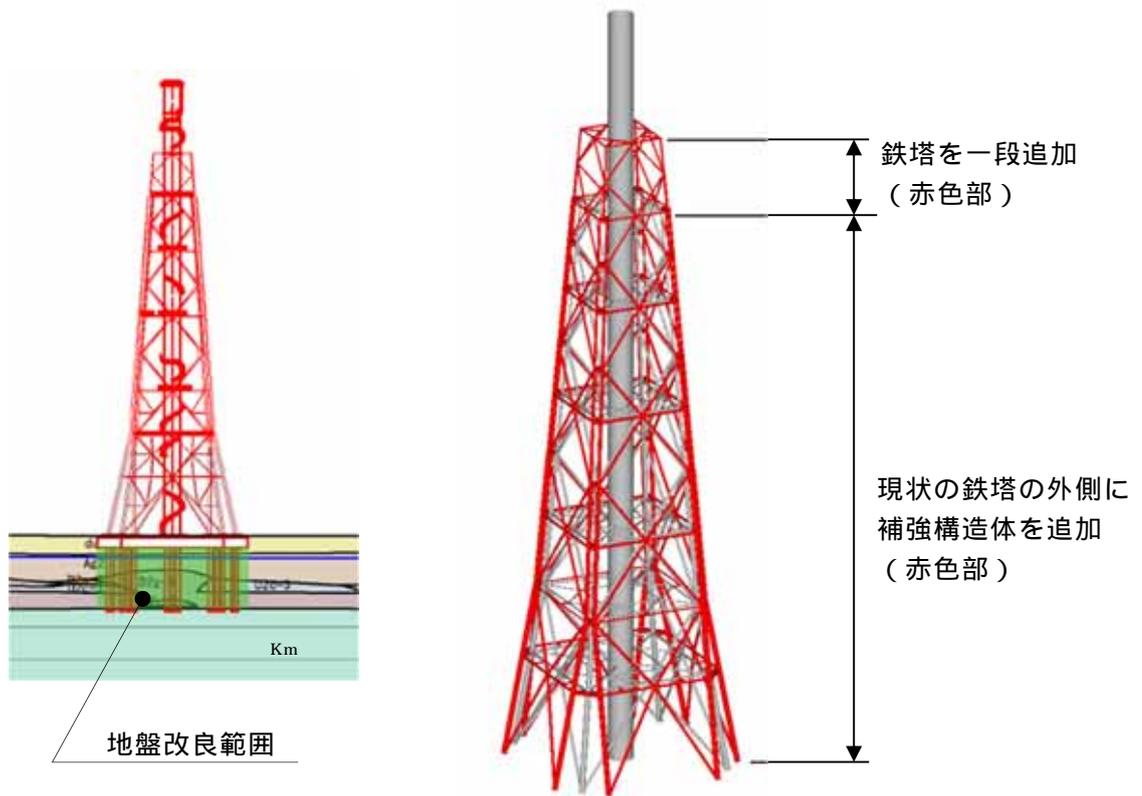
なお、今後の設計進捗により補強対象の施設、設備の変更及び補強内容の変更の可能性がある。

2. 既設設備に対する耐震補強について

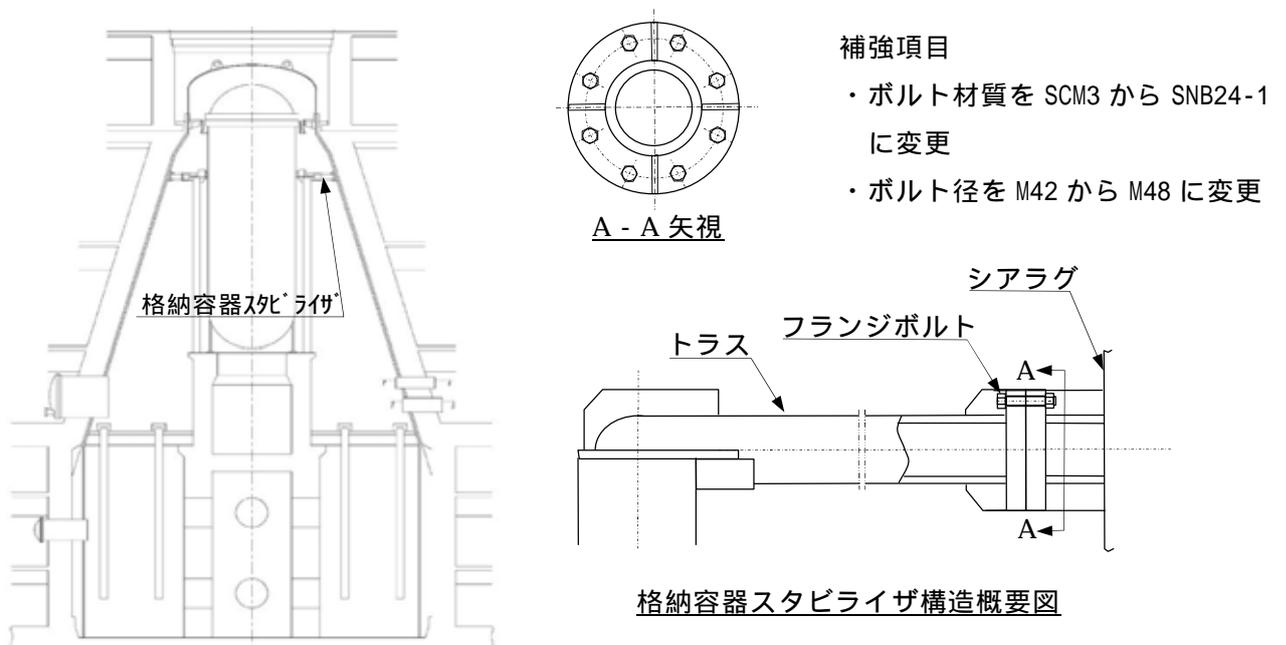
建物・構築物，機器・配管系，屋外重要土木構造物における耐震補強の一覧を第1表に，耐震補強の概要を第1図～第10図に示す。

第1表 既設設備の耐震補強一覧

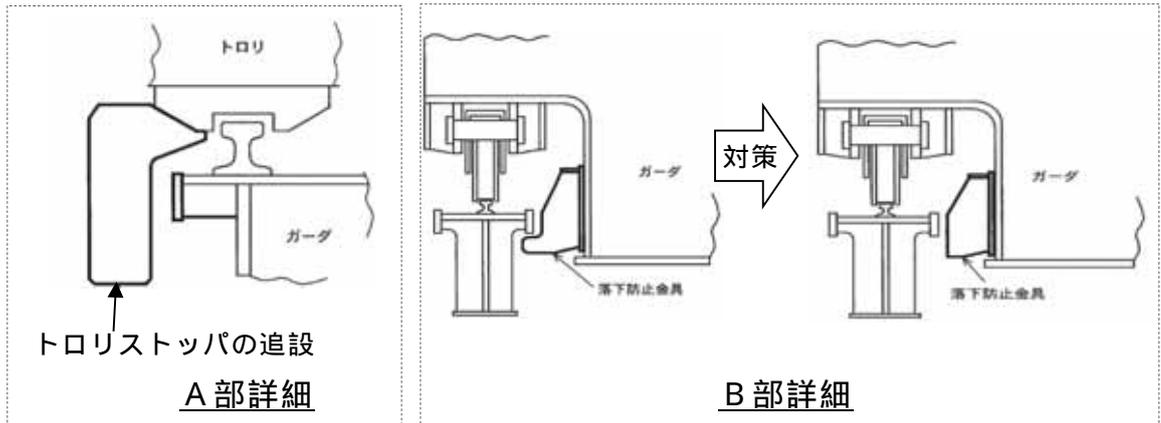
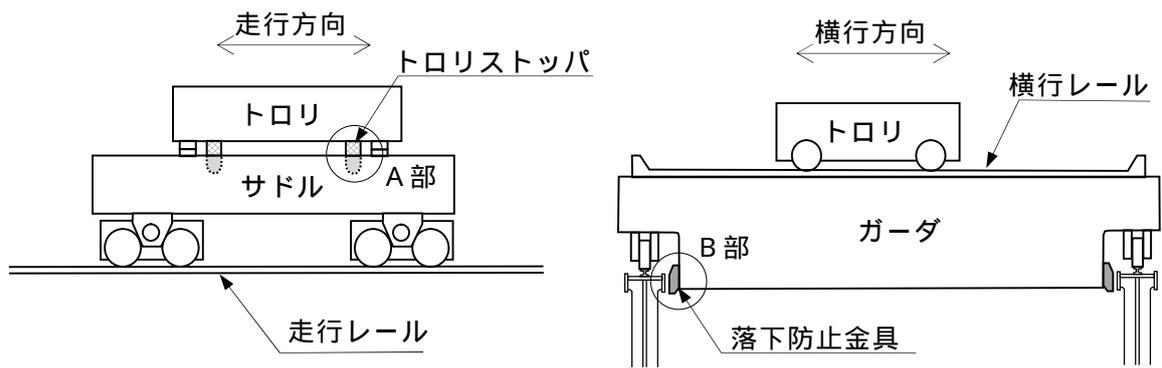
	施設・設備名称	内容	添付図番号
建物・構築物	排気筒	鉄塔部への支持部材の追加及び地盤改良	1
機器・配管系	格納容器スタビライザ	フランジボルトへの高強度材料適用及び口径変更	2
	原子炉建屋クレーン	落下防止対策	3
	燃料取替機	ガーダ等の部材強化	4
	配管系	サポートの追加及び補強	5
	残留熱除去系熱交換器	架台部への耐震補強サポート追設	6
	水圧制御ユニット	架構部への補強梁追加	7
	格納容器シアラグ部	シアラグ部への補強材追加	8
屋外重要土木構造物	貯留堰取付護岸	地盤改良	9
	屋外二重管基礎構造	屋外二重管を支持する基礎構造の追設	10



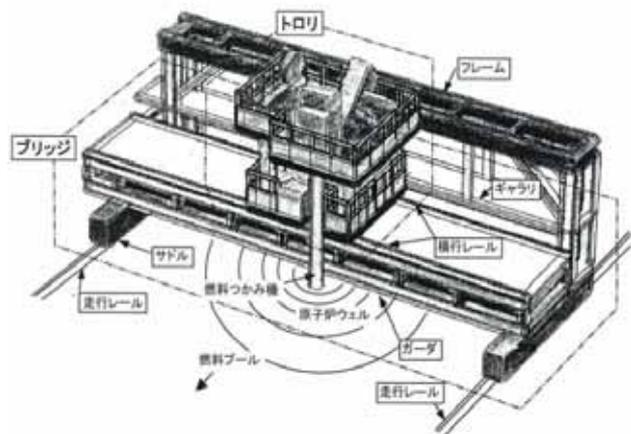
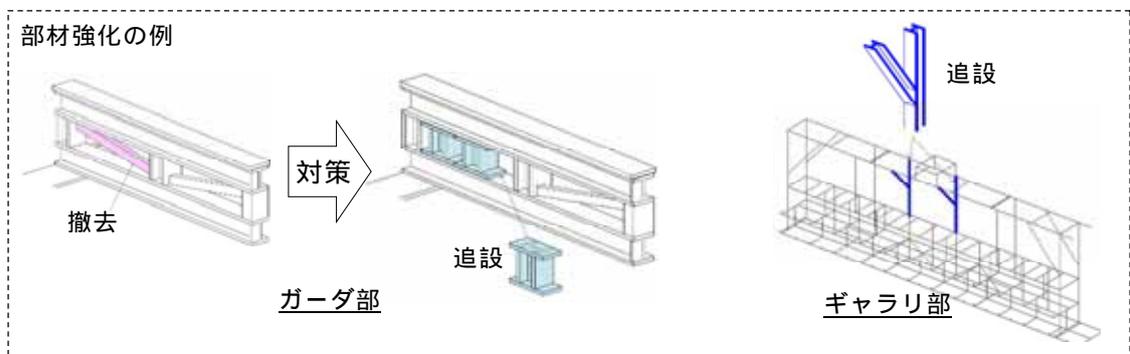
第 1 図 排気筒の耐震補強概要図



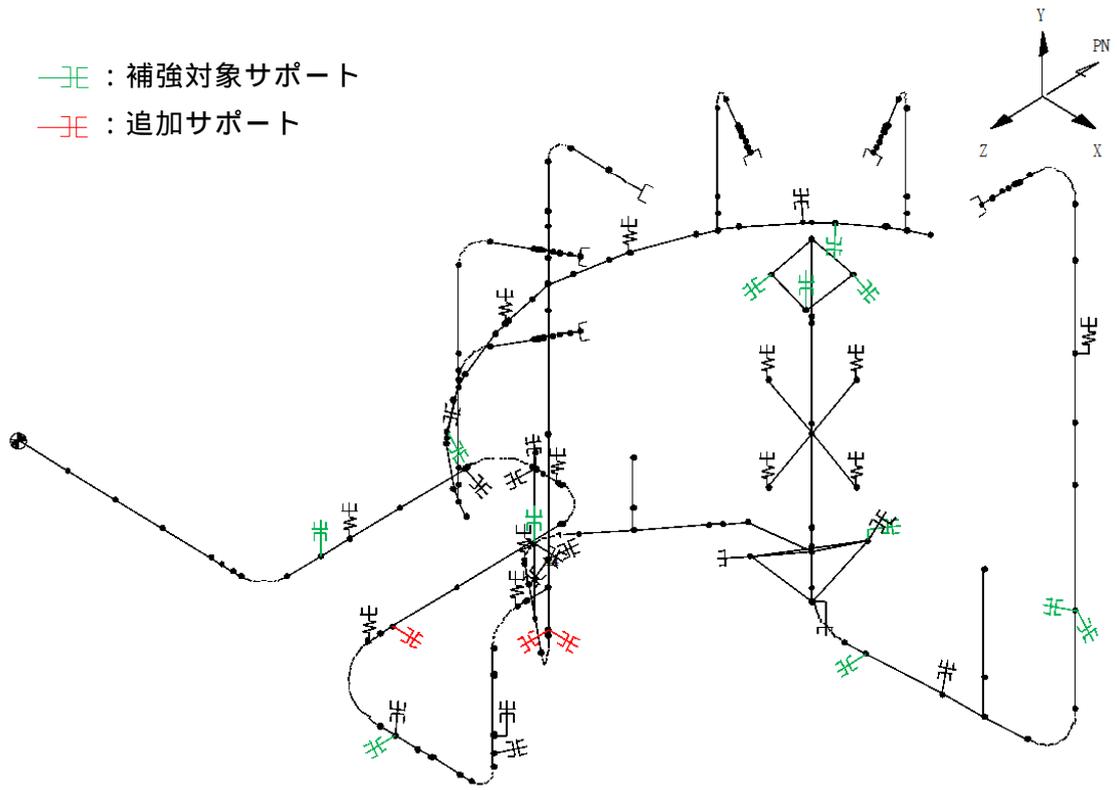
第 2 図 格納容器スタビライザの耐震補強概要図



第3図 原子炉建屋クレーンの耐震補強概要図

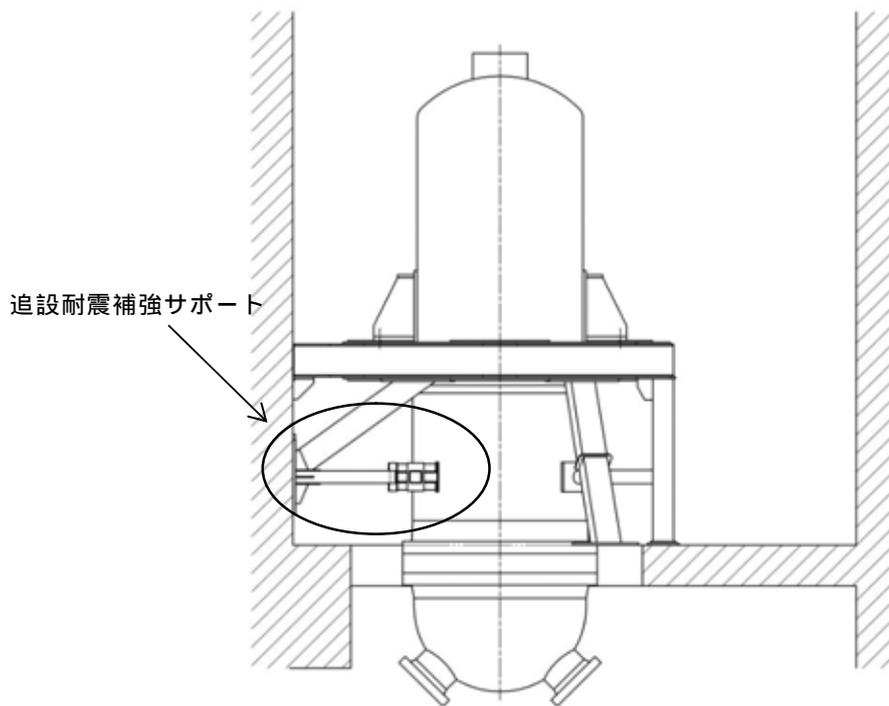


第4図 燃料取替機の耐震補強概要図

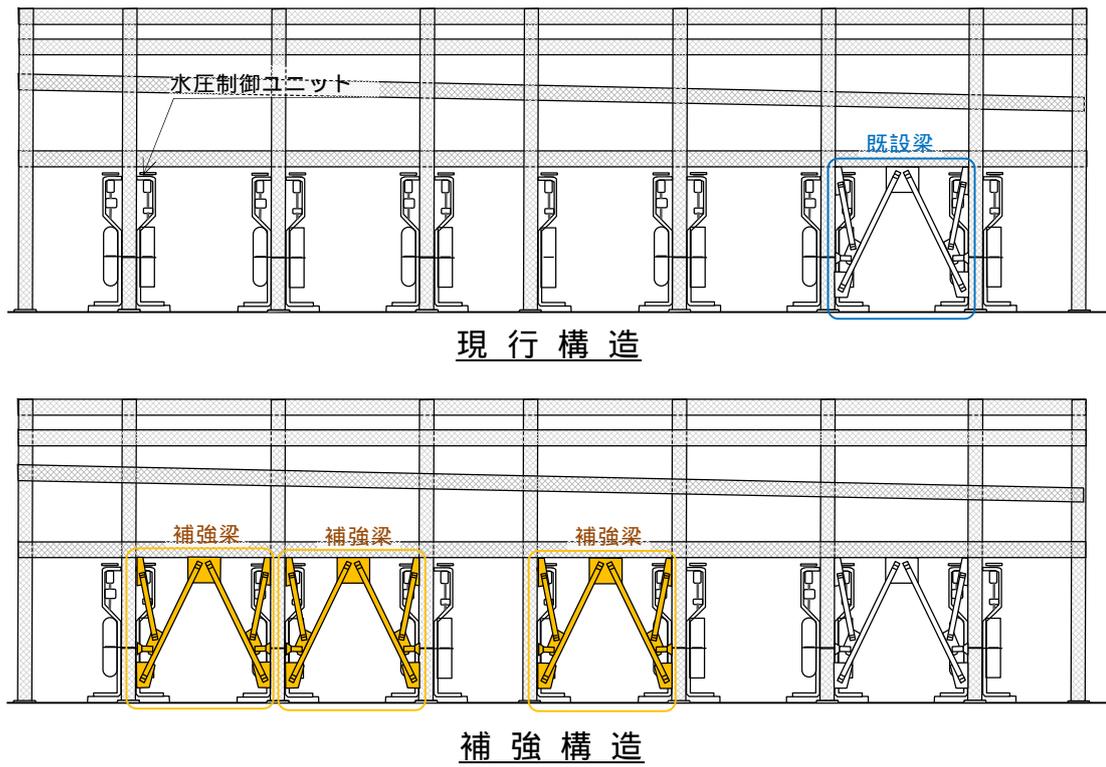


原子炉再循環系配管の耐震補強の例

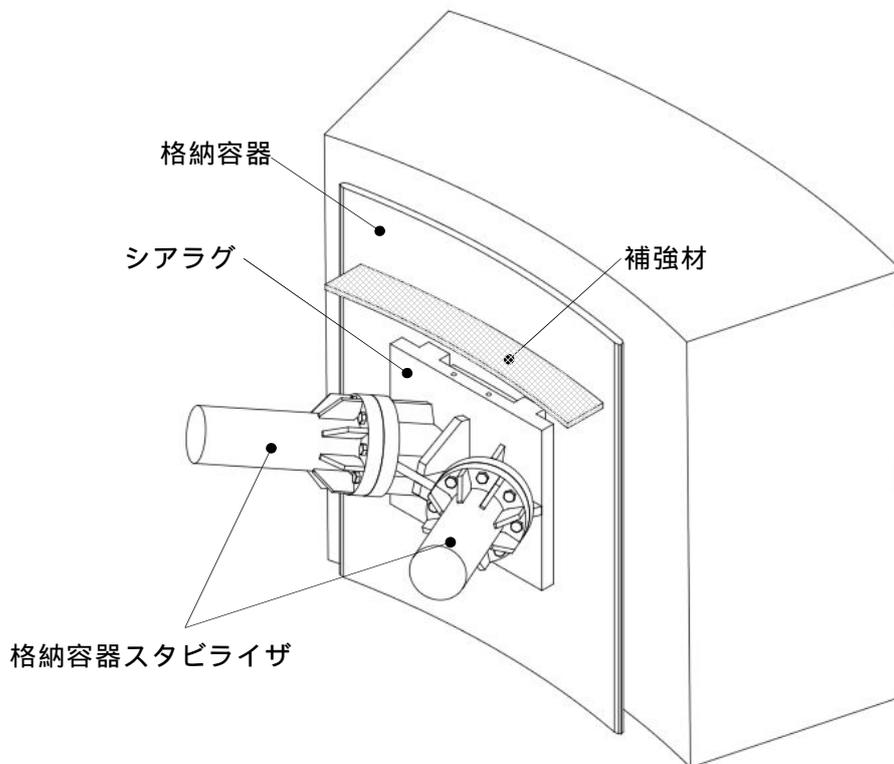
第 5 図 配管系の耐震補強概要図



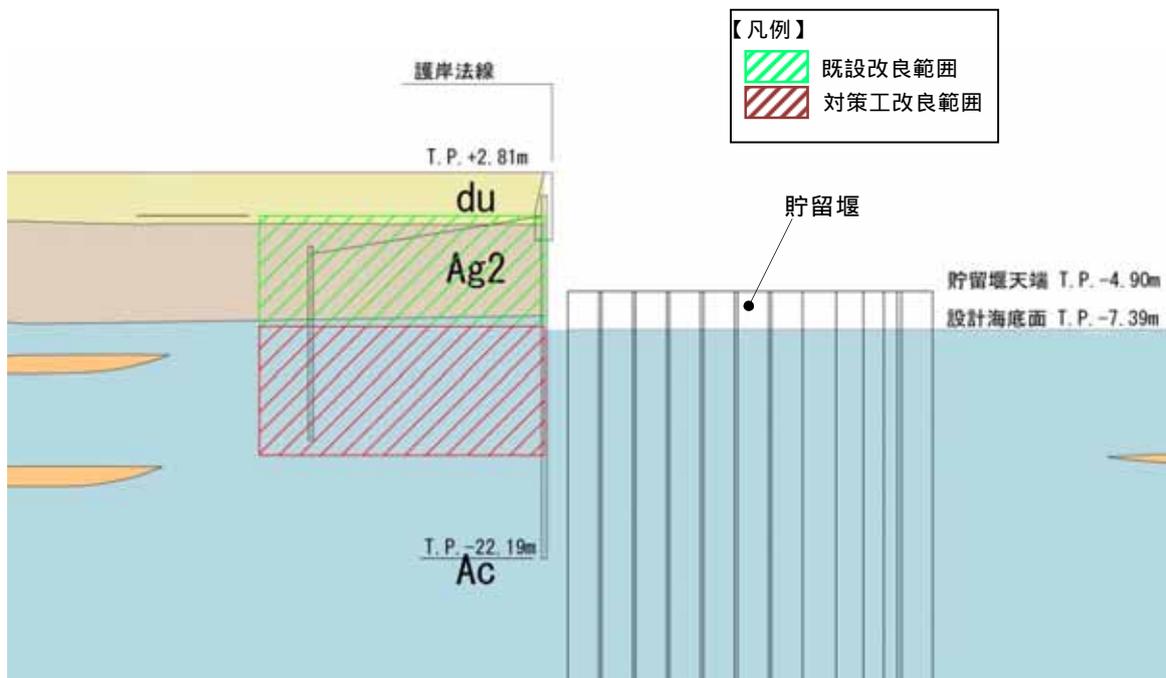
第 6 図 残留熱除去系熱交換器の耐震補強概要図



第7図 水圧制御ユニット架構の耐震補強概要図



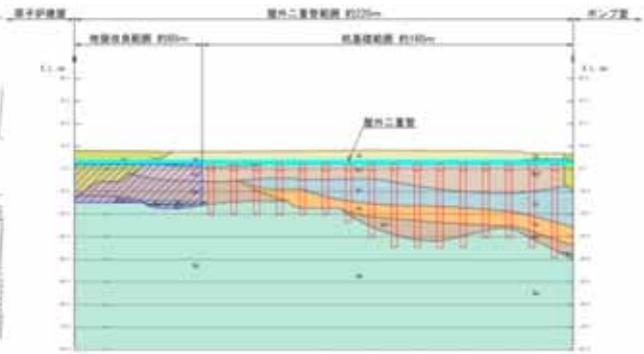
第8図 格納容器シアラグ部の耐震補強概要図



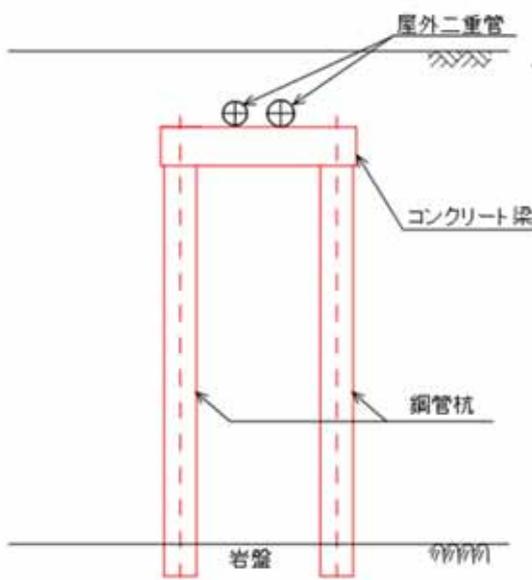
第9図 貯留堰取付護岸の耐震補強概要図



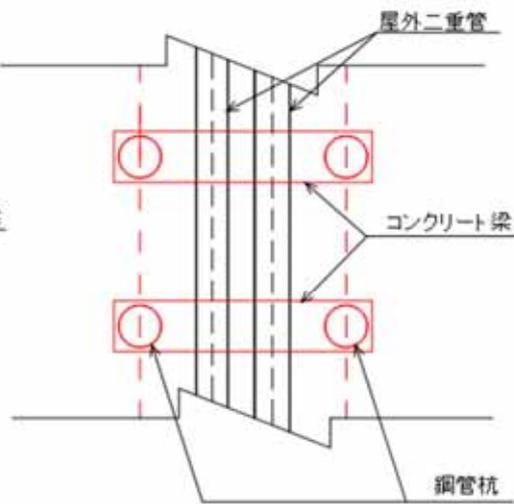
基礎平面配置図



基礎縦断配置図



基礎構造図(管軸直角方向イメージ)



基礎構造図(管軸方向イメージ)

(注記) 赤色表示部は追設する基礎構造部を示す。

第 10 図 屋外二重管の耐震補強概要図

東海第二発電所

動的機能維持評価の検討方針 (耐震)

1. はじめに

本資料では、動的機能維持要求が必要な設備において、JEAG4601 に定められた適用範囲から外れ新たな検討が必要な設備又は評価用加速度が機能維持確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備を抽出するとともに、抽出された設備における動的機能維持のための検討方針を示す。

2. 動的機能維持のための新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出

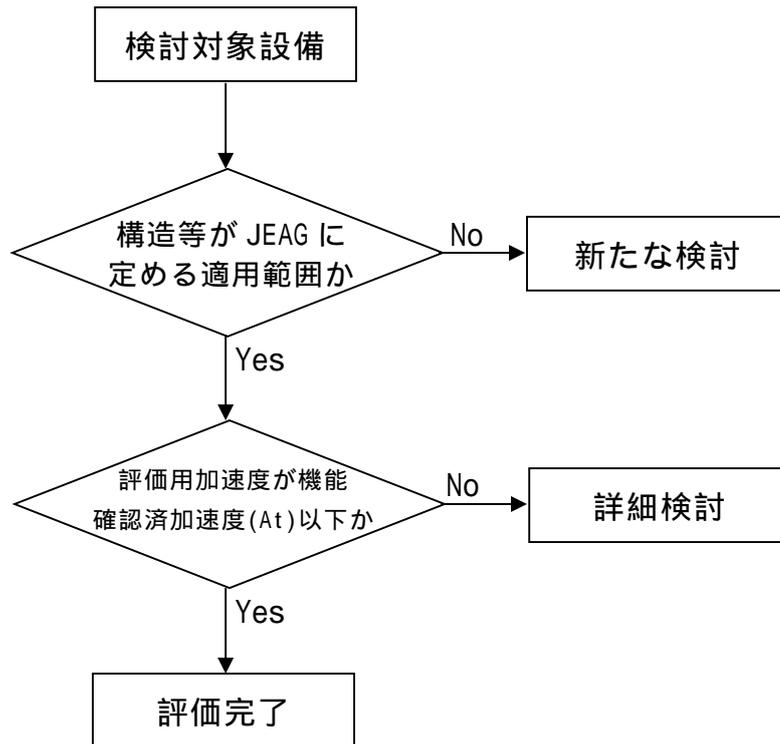
(1) 検討対象設備

検討対象設備は、動的機能が必要な設備として耐震 S クラス並びに常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備とする。ただし、本検討の目的は、JEAG4601 への適合性を主とする観点で実施するものであるため加振試験により機能維持を確認する設備及び JEAG4601 にて評価用加速度が機能維持確認済み加速度を超えた場合の詳細検討の具体的手順が定められている設備については検討から除外する。

(2) 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出

第 1 図に抽出フローを示す。検討対象設備について、JEAG4601 に定める適用機種に対して構造、作動原理等が同じであることを確認する。同じであることが確認できない場合は、新たな検討が必要な設備として抽出する。

さらに評価用加速度が JEAG4601 に定める機能確認済加速度以内であることの確認を行い、機能確認済加速度を超える設備については詳細検討が必要な設備として抽出する。



第 1 図 検討が必要な設備の抽出フロー

(3) 抽出結果

第 1 表に新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果を示す。

新たな検討が必要となる設備として、Vベルトの方式のファンとなる中央制御室換気系空気調和機ファン，中央制御室換気系フィルタ系ファン及び非常用ガス処理系排風機並びにスクリー式，ギヤ式の横形ポンプとして非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ，常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ及び緊急時対策所用発電機給油ポンプが該当する。

また，評価用加速度が機能確認済加速度を超える設備として残留熱除去系海水系ポンプ，非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ並びにこれらポンプ用の電動機が該当する。

第 1 表(1) 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	JEAG4601 適用範囲 ：可 ×：否(新たな 検討が必要)	At 確認 ：OK ×：NG(詳細 検討が必要)
立形ポンプ	残留熱除去系ポンプ		
	高圧炉心スプレイ系ポンプ		
	低圧炉心スプレイ系ポンプ		
	残留熱除去系海水系ポンプ		×
	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ		×
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用 海水ポンプ		×
	緊急用海水ポンプ		注 1
横形ポンプ	原子炉隔離時冷却系ポンプ		
	非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ	×	-
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃 料移送ポンプ	×	-
	常設低圧代替注水系ポンプ		注 1
	代替燃料プール冷却系ポンプ		
	格納容器圧力逃がし装置移送ポンプ		注 1
	代替循環冷却系ポンプ		
	常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ	×	-
	緊急時対策所用発電機給油ポンプ	×	-
ポンプ駆動用 タービン	原子炉隔離時冷却系ポンプ用駆動タービ ン		
電動機	残留熱除去系ポンプ用電動機		
	高圧炉心スプレイ系ポンプ用電動機		
	低圧炉心スプレイ系ポンプ用電動機		
	残留熱除去系海水系ポンプ用電動機		×
	ほう酸水注入ポンプ用電動機		
	中央制御室換気系空気調和機ファン用電 動機		

注 1) 設計の進捗により変更があり得る

第 1 表(2) 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	JEAG4601 適用範囲 ：可 ×：否(新たな 検討が必要)	At 確認 ：OK ×：NG(詳細 検討が必要)
電動機	中央制御室換気系フィルタ系ファン用電動機		
	非常用ガス処理系排風機用電動機		
	非常用ガス再循環系排風機用電動機		
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロウ用電動機		
	非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ用電動機		注 1
	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機		×
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ用電動機		注 1
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機		×
	常設低圧代替注水系ポンプ用電動機		注 1
	代替燃料プール冷却系ポンプ用電動機		
	格納容器圧力逃がし装置移送ポンプ用電動機		注 1
	代替循環冷却系ポンプ用電動機		
	緊急用海水ポンプ用電動機		注 1
	緊急時対策所非常用送風機用電動機		注 1
	常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ用電動機		注 1
	緊急時対策所用発電機給油ポンプ用電動機		注 1
ファン	中央制御室換気系空気調和機ファン	×	-
	中央制御室換気系フィルタ系ファン	×	-
	非常用ガス処理系排風機	×	-
	非常用ガス再循環系排風機		
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロウ		
	緊急時対策所非常用送風機		注 1

注 1) 設計の進捗により変更があり得る。

第 1 表(3) 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	JEAG4601 適用範囲 ：可 ×：否(新たな 検討が必要)	At 確認 ：OK ×：NG(詳細 検討が必要)
非常用ディー ゼル発電機	非常用ディーゼル発電機		
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機		
	非常用ディーゼル発電機調速装置及び非常用ディーゼル発電機非常調速装置		
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機調速装置及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機非常調速装置		
往復動式ポン プ	ほう酸水注入ポンプ		

3. 動的機能維持の検討方針

(1) 新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

新たな検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針としては、先行電力の審査状況を踏まえて、公知化された検討として（社）日本電気協会 電気技術基準調査委員会の下に設置された原子力発電耐震設計特別調査委員会（以下「耐特委」という。）により取り纏められた類似機器における検討をもとに実施する。

具体的には、耐特委では動的機能の評価においては、対象機種ごとに現実的な地震応答レベルでの異常のみならず、破壊に至るような過剰な状態を念頭に地震時に考え得る異常状態を抽出し、その分析により動的機能上の評価点を検討し、機能維持を評価する際に確認すべき事項として、基本評価項目を選定している。

今回新たな検討が必要な設備については、基本的な構造は類似している機種 / 型式に対する耐特委での検討を参考に、型式による構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を実施し、基本評価項目を選定し機能維持評価を実施する（第2表）。

第2表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種 / 型式

新たな検討が必要な設備	機種 / 型式	参考とする機種 / 型式
・中央制御室換気系空気調和機ファン ・中央制御室換気系フィルタ系ファン ・非常用ガス処理系排風機	ファン / 遠心Vベルト 方式	ファン / 遠心直結式
・非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ ・常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ ・緊急時対策所用発電機給油ポンプ	横形ポンプ / スクリー方式 又はギヤ式	横形ポンプ / 単段遠心式

(2) 詳細検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の検討については、JEAG4601 - 1991 追補版及び耐特委報告書にて、動的機能維持評価上必要な基本評価項目が地震時異常要因分析に基づき選定されている(第3表)。機能維持評価に当たっては、先行電力の審査状況を踏まえて、基本評価項目に対して、必要な評価項目を選定し、その妥当性を示した上で検討を実施する。

第3表 各設備における基本評価項目

詳細検討が必要な設備	機種 / 型式	基本評価項目
<ul style="list-style-type: none"> ・ 残留熱除去系海水系ポンプ ・ 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ ・ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ 	立形ポンプ / 立形斜流ポンプ	基礎ボルト 取付ボルト ディスチャージケーシング コラム コラムサポート 軸受 軸 冷却水配管 メカニカルシール熱交換器 電動機
<ul style="list-style-type: none"> ・ 残留熱除去系海水系ポンプ用電動機 ・ 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機 ・ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機 	電動機 / 立形ころがり軸受電動機	端子箱 フレーム 基礎ボルト 取付ボルト 固定子 軸(回転子) 軸受 固定子と回転子とのクリアランス 軸継手