

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-060 改2
提出年月日	平成30年2月5日

V-2-1-6 地震応答解析の基本方針

目次

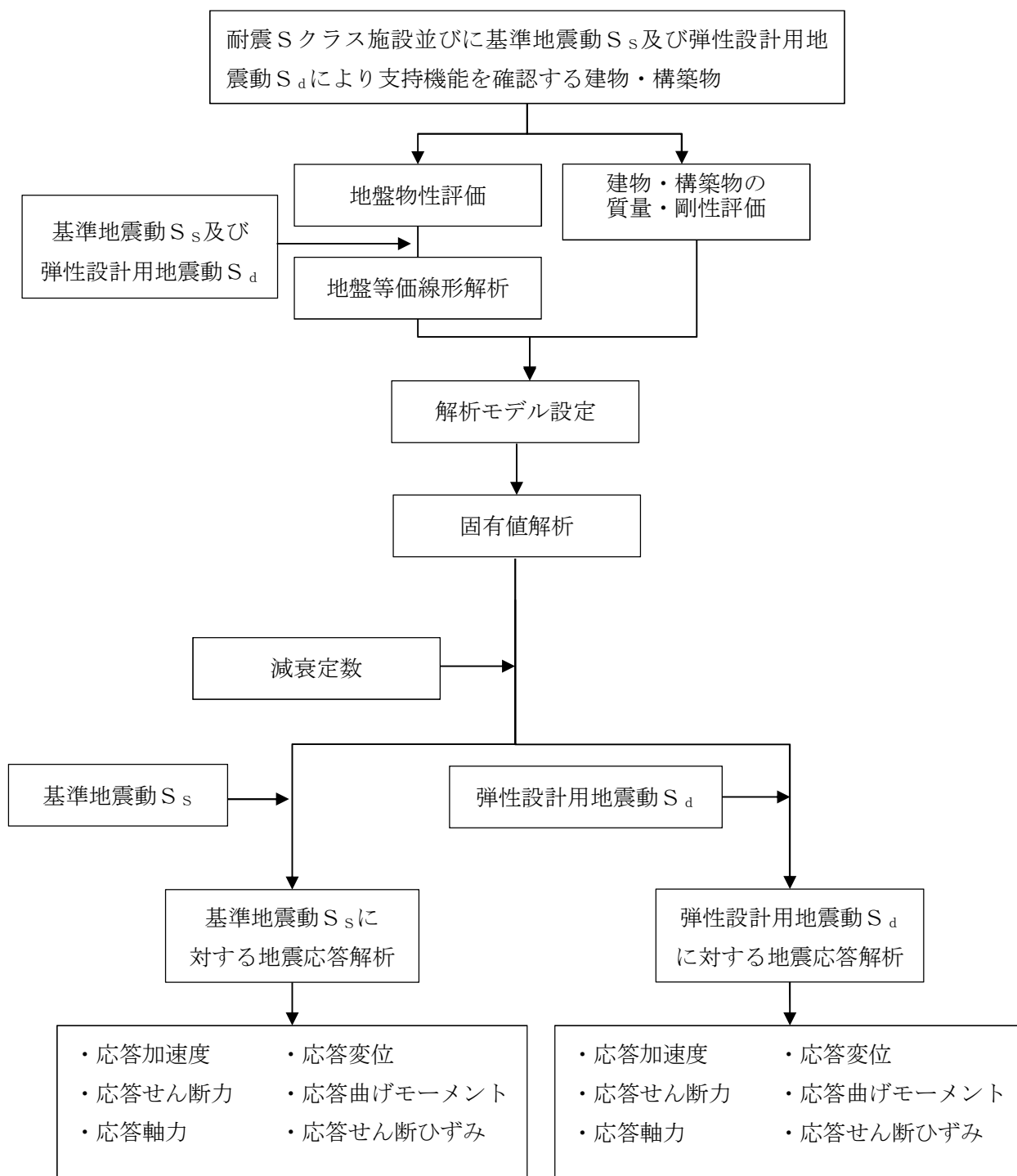
1. 概要	1
2. 地震応答解析の方針	5
2.1 建物・構築物	5
2.2 機器・配管系	7
2.3 屋外重要土木構造物	9
3. 設計用減衰定数	10

別紙 地震観測網について

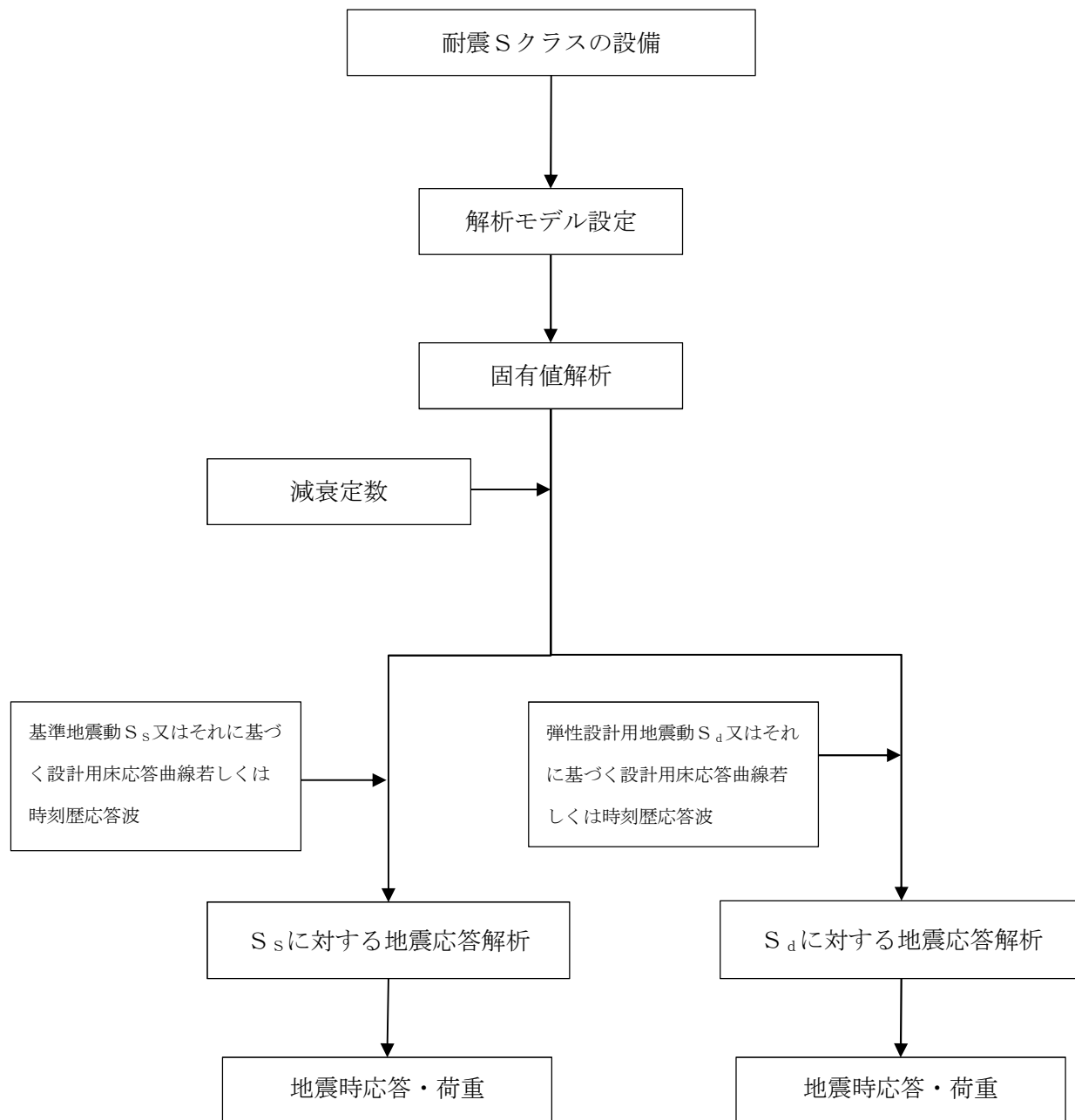
1. 概要

本資料は、V-2-1-1「耐震設計の基本方針」のうち「4. 設計用地震力」に基づき、建物・構築物、機器・配管系及び屋外重要土木構造物の耐震設計を行う際の地震応答解析の基本方針を説明するものである。

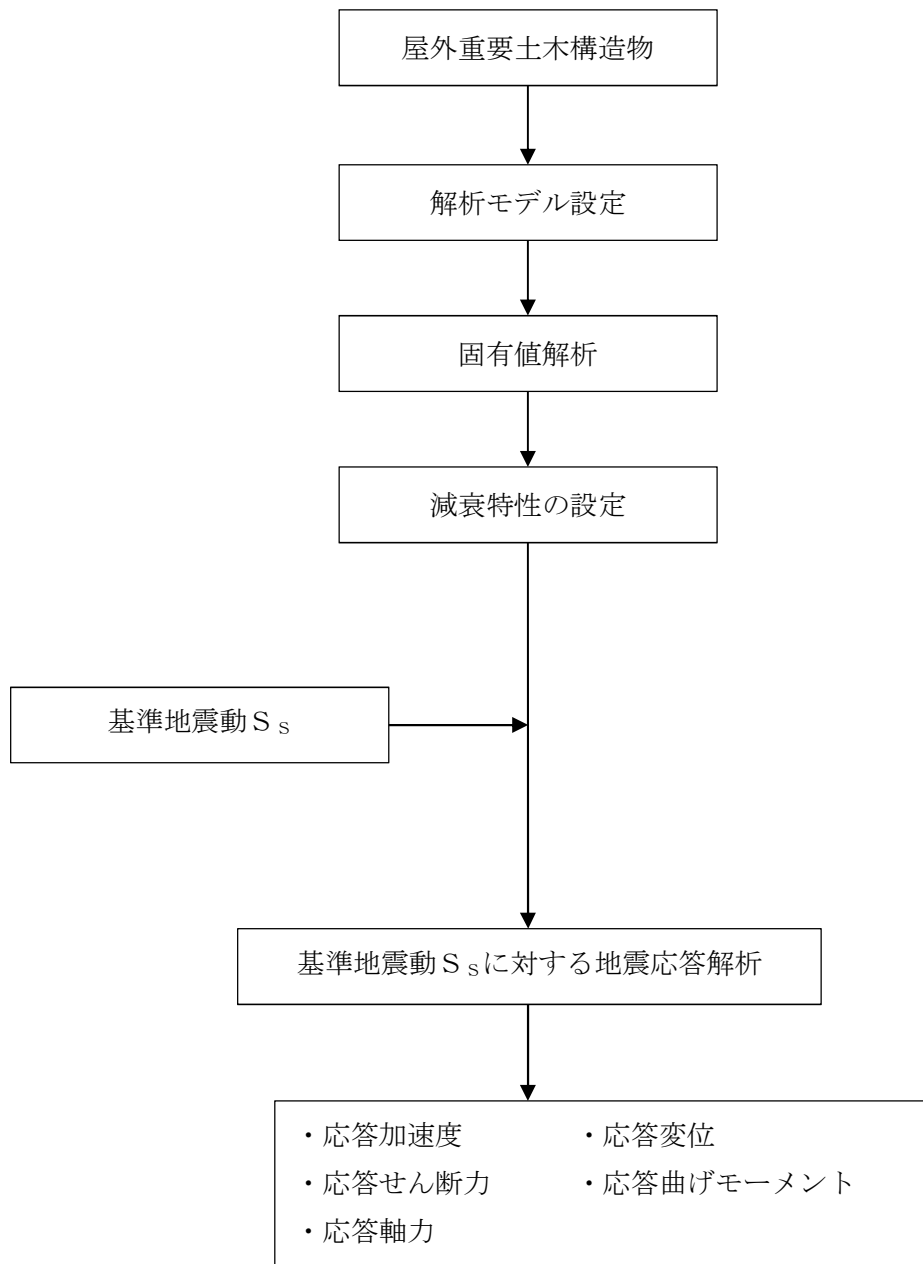
第 1-1 図、第 1-2 図及び第 1-3 図に建物・構築物、機器・配管系及び屋外重要土木構造物の地震応答解析の手順をそれぞれ示す。



第 1-1 図 建物・構築物の地震応答解析の手順



第 1-2 図 機器・配管系の地震応答解析の手順



第 1-3 図 屋外重要土木構造物の地震応答解析の手順

2. 地震応答解析の方針

2.1 建物・構築物

(1) 入力地震動

解放基盤表面は、S波速度が0.7km/s以上であるEL. -370mとしている。

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d を基に、対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮した上で、必要に応じ2次元FEM解析又は1次元波動論により、地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。

地盤条件を考慮する場合には、地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係や対象建物・構築物位置と炉心位置付近での地質・速度構造の違いにも留意するとともに、地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。更に必要に応じ敷地における観測記録による検証や最新の科学的・技術的知見を踏まえ、地質・速度構造等の地盤条件を設定する。特に杭を介して岩盤に支持された建物・構築物については杭の拘束効果についても適切に考慮する。

また、設計基準対象施設における耐震Bクラスの建物・構築物及び重大事故等対処施設における耐震Bクラスの施設の機能を代替する常設重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設の建物・構築物のうち共振のおそれがあり、動的解析が必要なものに対しては、弾性設計用地震動 S_d を1/2倍したものをを用いる。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析による地震力の算定に当たっては、地震応答解析手法の適用性及び適用限界等を考慮の上、適切な解析法を選定するとともに、建物・構築物に応じた適切な解析条件を設定する。また、原則として、建物・構築物の地震応答解析及び床応答曲線の策定は、線形解析及び非線形解析に適用可能な時刻歴応答解析法による。

建物・構築物の動的解析に当たっては、建物・構築物の剛性はそれらの形状、構造特性等を十分考慮して評価し、集中質点系等に置換した解析モデルを設定する。

動的解析には、建物・構築物と地盤との相互作用を考慮するものとし、解析モデルの地盤のばね定数は、基礎版の平面形状、基礎側面と地盤の接触状況及び地盤の剛性等を考慮して定める。各入力地震動が接地率に与える影響を踏まえて、地盤ばねには必要に応じて、基礎浮上りによる非線形性又は誘発上下動を考慮できる浮上り非線形性を考慮するものとする。設計用地盤定数は、原則として、弾性波試験によるものをを用いる。

地盤－建物・構築物連成系の減衰定数は、振動エネルギーの地下逸散及び地震応答における各部のひずみレベルを考慮して定める。

地震応答解析において、主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には、実験等の結果に基づき、該当する建物部分の構造特性に応じて、その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した地震応答解析を行う。

また、Sクラスの施設を支持する建物・構築物及び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建物・構築物の支持機能を検討するための動的解析において、建物・構築物の主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には、その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した地震応答解析を行う。

地震応答解析に用いる材料定数については、材料物性のばらつき等を適切に考慮する。また、ばらつきによる変動が建物・構築物の振動性状や応答性状に及ぼす影響として考慮すべきばらつきの要因を選定した上で、選定された要因を考慮した動的解析により設計用地震力を設定する。

建物・構築物の3次元応答性状及び機器・配管系への影響については、建物・構築物の3次元モデルによる解析に基づき、施設の重要性、建屋規模、構造特性を考慮して評価する。3次元応答性状等の評価は、周波数応答解析法等による。解析方法及び解析モデルについては、V-2-1-8「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」に示す。

建物・構築物の動的解析にて地震時の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には、有効応力解析を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は、代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。

また、更なる信頼性の向上を目的として設置した地震観測網から得られた観測記録により振動性状を把握する。動的解析に用いるモデルについては、地震観測網により得られた観測記録を用い解析モデルの妥当性確認などを行う。地震観測網の概要は、別紙「地震観測網について」に示す。

a. 解析方法

建物・構築物の地震応答は、(1)式の多質点系の振動方程式をNewmark- β 法 ($\beta = 1/4$)を用いた直接積分法により求める。

$$[m] \cdot \{\ddot{x}\}_t + [c] \cdot \{\dot{x}\}_t + [k] \cdot \{x\}_t = -[m] \cdot \{\ddot{y}\}_t \quad (1)$$

ここで、

$[m]$: 質量マトリックス

$[c]$: 減衰マトリックス

$[k]$: 剛性マトリックス

$\{\ddot{x}\}_t$: 時刻 t の加速度ベクトル

$\{\dot{x}\}_t$: 時刻 t の速度ベクトル

$\{x\}_t$: 時刻 t の変位ベクトル

$\{\ddot{y}\}_t$: 時刻 t の入力加速度ベクトル

ここで、時刻 $t + \Delta t$ における解を次のようにして求める。なお、 Δt は時間メッシュを示す。

$$\{x\}_{t+\Delta t} = \{x\}_t + \{\dot{x}\}_t \cdot \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \{\ddot{x}\}_t + \beta \cdot \{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} \right] \cdot \Delta t^2 \quad (2)$$

$$\{\dot{x}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{x}\}_t + \frac{1}{2} \cdot [\{\ddot{x}\}_t + \{\ddot{x}\}_{t+\Delta t}] \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{x}\}_t + \{\Delta\ddot{x}\}_{t+\Delta t} \quad (4)$$

(2), (3)及び(4)式を(1)式に代入して整理すると, 加速度応答増分ベクトルが次のように求められる。

$$\{\Delta\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = -[A]^{-1} \cdot ([B] + [m] \cdot \{\Delta\ddot{y}\}_{t+\Delta t}) \quad (5)$$

ここで,

$$[A] = [m] + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot [c] + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot [k]$$

$$[B] = \left(\Delta t \cdot [c] + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot [k] \right) \cdot \{\ddot{x}\}_t + \Delta t \cdot [k] \cdot \{\dot{x}\}_t$$

$$\{\Delta\ddot{y}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{y}\}_{t+\Delta t} - \{\ddot{y}\}_t$$

(5)式を(2), (3)及び(4)式に代入することにより, 時刻 $t+\Delta t$ の応答が時刻 t の応答から求められる。

b. 解析モデル

(a) 原子炉建屋

水平方向は, 地盤との相互作用を考慮し, 曲げ及びせん断剛性を考慮した多質点系モデルとする。鉛直方向は, 耐震壁等の軸剛性及び屋根トラスの曲げせん断剛性を評価した多質点系モデルとする。

(b) 使用済燃料乾式貯蔵建屋

水平方向は, 地盤との相互作用を考慮し, 曲げ及びせん断剛性を考慮した多質点系モデルとする。鉛直方向は, 耐震壁等の軸剛性及び屋根トラスの曲げせん断剛性を評価した多質点系モデルとする。

(c) 主排気筒

水平方向は, 地盤との相互作用を考慮し, 曲げ及びせん断剛性を考慮した2軸の多質点系モデルとする。鉛直方向は, 地盤との相互作用を考慮し, 筒身及び鉄塔の軸剛性を考慮した2軸の多質点系モデルとする。

(d) 非常用ガス処理系配管支持架構

水平方向, 鉛直方向とも, 地盤との相互作用を考慮し, 鉄骨部材の軸, 曲げ及びせん断剛性を考慮した要素と, 軸剛性のみを考慮した要素による, 剛基礎を有する3次元フレームモデルとする。

2.2 機器・配管系

(1) 入力地震動又は入力地震力

機器・配管系の地震応答解析における入力地震動又は入力地震力は、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d 、又は当該機器・配管系の設置床における設計用床応答曲線若しくは時刻歴地震波とする。設計用床応答曲線の作成方法については、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に示す。

また、設計基準対象施設における耐震Bクラスの機器・配管系及び重大事故等対処施設における耐震Bクラスの施設の機能を代替する重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系のうち共振のおそれがあり、動的解析が必要なものに対しては、弾性設計用地震動 S_d を基に線形解析により作成した設計用床応答曲線の応答加速度を 1/2 倍したものをを用いる。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析による地震力の算定に当たっては、地震応答解析手法の適用性及び適用限界等を考慮の上、適切な解析法を選定するとともに、解析条件として考慮すべき減衰定数、剛性等の各種物性値は、適切な規格・基準、あるいは実験等の結果に基づき設定する。

機器の解析に当たっては、形状、構造特性等を考慮して、代表的な振動モードを適切に表現できるよう 1 質点系、多質点系モデル等に置換し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法により応答を求める。また、時刻歴応答解析法又はスペクトルモーダル解析法を用いる場合は地盤物性等のばらつきを適切に考慮する。

配管系については、適切なモデルを作成し、設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析法により応答を求める。スペクトルモーダル解析法及び時刻歴応答解析法の選択に当たっては、衝突・すべり等の非線形現象を模擬する観点又は既往研究の知見を取り入れ実機の挙動を模擬する観点で、建物・構築物の剛性及び地盤物性のばらつき等への配慮を考慮しつつ時刻歴応答解析法を用いる等、解析対象とする現象、対象設備の振動特性・構造特性等を考慮し適切に選定する。

3次元的な広がりを持つ設備については、3次元的な配置を踏まえ、適切にモデル化し、水平2方向及び鉛直方向の応答成分について適切に組み合わせるものとする。具体的な方針についてはV-2-1-8「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」に示す。

剛性の高い機器は、その機器の設置床面の最大応答加速度の 1.2 倍の加速度を震度として作用させて構造強度評価に用いる地震力を算定する。

a. 解析方法

スペクトルモーダル解析法における最大値は、二乗和平方根 (SRSS) 法により求める。時刻歴応答解析法においては直接積分法、若しくはモーダル時刻歴解析による。

b. 解析モデル

代表的な機器・配管系の解析モデルを以下に示す。

- (a) 原子炉格納容器，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物

原子炉格納容器，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物は，建物質量に対しその質量が比較的大きく，また支持構造上からも原子炉建屋による影響が無視できないため，原子炉建屋と連成させた解析モデルを用いる。原子炉格納容器，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物は，質点系モデルに置換し，各構造物を結合するスタビライザ等は等価なばねに置き換える。

(b) 一般機器

容器，熱交換器等の一般の機器は，機器本体及び支持構造物の剛性をそれぞれ考慮し，原則として重心位置に質量を集中させた1質点系にモデル化する。

ただし，振動特性の観点から質量分布，剛性変化等を考慮する方が適切と考えられる構造の場合は，多質点系モデルに置換する。

(c) 配管

配管は，その振動性状を適切に考慮するため，3次元多質点はりモデルに置換する。

(d) クレーン類

クレーン類は，その構造特性を考慮して3次元はりモデルに置換する。なお，すべり等の非線形現象を考慮する場合は，すべり要素等の非線形要素を取り込んだ上で3次元はりモデルに置換する。

2.3 屋外重要土木構造物

(1) 入力地震動

屋外重要土木構造物及び重大事故等対処施設における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土木構造物の地震応答解析における入力地震動は，解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を基に，対象構造物の地盤条件を適切に考慮した上で，必要に応じ2次元FEM解析又は1次元波動論により，地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。地盤条件を考慮する場合には，地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係にも留意し，地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。

(2) 解析方法及び解析モデル

動的解析による地震力の算定にあたっては，地震応答解析手法の適用性及び適用限界等を考慮の上，適切な解析法を選定するとともに，各構造物に応じた適切な解析条件を設定する。地震応答解析は，構造物と地盤の相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法とし，地盤及び構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて，線形，等価線形，非線形解析のいずれかにて行う。地震応答解析に用いる材料定数については，材料物性のばらつきによる変動が屋外重要土木構造物の振動性状や応答性状に及ぼす影響を検討し，材料物性のばらつきを適切に考慮する。また，動的解析にて地震時の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮して設定する。

また，地震応答解析では，水平地震動と鉛直地震動の同時加振とするが，構造物の応答特性

により水平2方向の同時性を考慮する必要がある場合は、水平2方向の組合せについて適切に評価する。具体的な方針についてはV-2-1-8「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」に示す。

重大事故等対処施設のうち、設計基準対象施設の既往評価を適用できる基本構造等と異なる施設については、適用する地震力に対して、要求される機能及び構造健全性が維持されることを確認するため、当該施設の構造を適切にモデル化した上での地震応答解析、加振試験等を実施する。

3. 設計用減衰定数

地震応答解析に用いる減衰定数は、J E A G 4 6 0 1 -1987, 1991 に記載されている減衰定数を設備の種類、構造等により適切に選定するとともに、試験等で妥当性が確認された値も用いる。具体的には第3-1表に示す値を用いる。

なお、建物・構築物の地震応答解析に用いる鉄筋コンクリートの材料減衰定数の設定については、既往の知見に加え、既設施設の地震観測記録等により、その妥当性を検討する。入力地震動による建物・構築物の応答レベル及び構造形状の複雑さを踏まえ、既往の知見に加え、地震観測記録等による検討を行い、適用性が確認できたことから第3-1表に示す建物・構築物に対して5%と設定する。

地盤と屋外重要土木建造物の連成系地震応答解析モデルの減衰定数については、地中建造物としての特徴、同モデルの振動特性を考慮して適切に設定する。

第3-1表 減衰定数

1. 建物・構築物

対象設備		使用材料	減衰定数 (%)	
			水平方向	鉛直方向
原子炉建屋	建屋	鉄筋コンクリート	5	5
		鉄骨	2	2
	地盤	—	J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定*1	
使用済燃料乾式貯蔵建屋	建屋	鉄筋コンクリート	5	5
		鉄骨	2	2
	地盤	—	J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定*2	
主排気筒	構築物	鉄筋コンクリート	5	5
		鉄骨	2	2
		筒身	1	1
	地盤	—	J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定*2	
非常用ガス処理系配管支持架構	構築物	鉄骨	2	2
	地盤	—	J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定*2	

注記*1：地盤条件及び基礎形状等を基に振動アドミッタンス理論により動的地盤ばねを算定し，
J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定

*2：地盤条件，杭及び基礎形状等を基に三次元薄層要素法により動的地盤ばねを算定し，
J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の近似法により算定

2. 機器・配管系

対象設備	減衰定数 (%)	
	水平方向	鉛直方向
溶接構造物	1.0	1.0 ^{*1}
ボルト及びリベット構造物	2.0	2.0 ^{*1}
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	1.0 ^{*1}
燃料集合体	7.0	1.0 ^{*1}
制御棒駆動機構	3.5	1.0 ^{*1}
空調用ダクト	2.5	2.5 ^{*1}
電気盤	4.0	1.0 ^{*1}
建屋クレーン	2.0 ^{*3}	2.0 ^{*1}
燃料取替機	2.0 ^{*3}	1.5(2.0) ^{*1*2}
配管系	0.5~3.0 ^{*3*4}	0.5~3.0 ^{*1*3*4}
液体の揺動	0.5	—

注記*1：既往の研究等において，設備の地震入力方向の依存性や減衰特性について検討され妥当性が確認された値

*2：()外は，燃料取替機のトロリ位置が端部にある場合，()内は，燃料取替機のトロリ位置が中央部にある場合

*3：既往の研究等において，試験及び解析等により妥当性が確認されている値

*4：具体的な適用条件を「3. 配管系の設計用減衰定数」に示す。

(参考文献)

電力共通研究「機器・配管系に対する合理的耐震評価法の研究(H12~H13)」

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)」

3. 配管系の減衰定数

配管区分		設計用減衰定数* ¹ (%)	
		保温材無	保温材有* ²
I	スナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、支持具(スナッパ又は架構レストレイント)の数が4個以上* ⁴ のもの	2.0	3.0* ³
II	スナッパ、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Iに属さないもの	1.0	2.0* ³
III	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* ⁴ のもの	2.0* ³	3.0* ³
IV	配管区分I、II及びIIIに属さないもの	0.5	1.5* ³

注記*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：金属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：J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版で規定されている配管系の設計用減衰定数に、既往の研究等において妥当性が確認された値を反映

*4：支持具の種類及び数は、アンカからアンカまでの独立した振動系について算定する。

(参考文献)

電力共通研究「機器・配管系に対する合理的耐震評価法の研究(H12～H13)」

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)」

地震観測網について

目 次

1. 概要	別紙-1
2. 地震観測網の基本方針	別紙-1
3. 地震観測網の配置計画	別紙-1

1. 概要

東海第二発電所の主要な建屋には、原子炉格納施設等の安全上重要な施設の実地震時の振動特性を把握するために、各建屋に地震計を設置し、継続して地震観測を行う。また、比較的規模の大きい地震の観測記録が得られた場合は、それらの測定結果に基づく解析等により、主要な施設の健全性を確認すること等に活用する。

2. 地震観測網の基本方針

東海第二発電所の原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋については、地震時の建屋の水平方向及び鉛直方向の振動特性を把握するため、建屋の基礎や最上部、原子炉棟の外壁の壁面等の適切な位置に地震計を配置することにより、実地震による建屋の振動（建屋増幅特性、ロッキング動等）を観測する。なお、地震計は水平2成分と鉛直1成分の計3成分を観測するものとする。

3. 地震観測網の配置計画

各建屋の地震計の設置方針を表3-1に、地震計配置を図3-1～図3-4に示す。

表3-1 各建屋の地震計の設置方針

建屋		設置方針
原子炉建屋	原子炉棟の外壁	・水平方向及び鉛直方向の振動を観測する。
	基礎	・水平方向及び鉛直方向の振動を観測する。 ・ロッキング動を確認できるよう設置する。
使用済燃料乾式貯蔵建屋		・水平方向及び鉛直方向の振動を観測する。

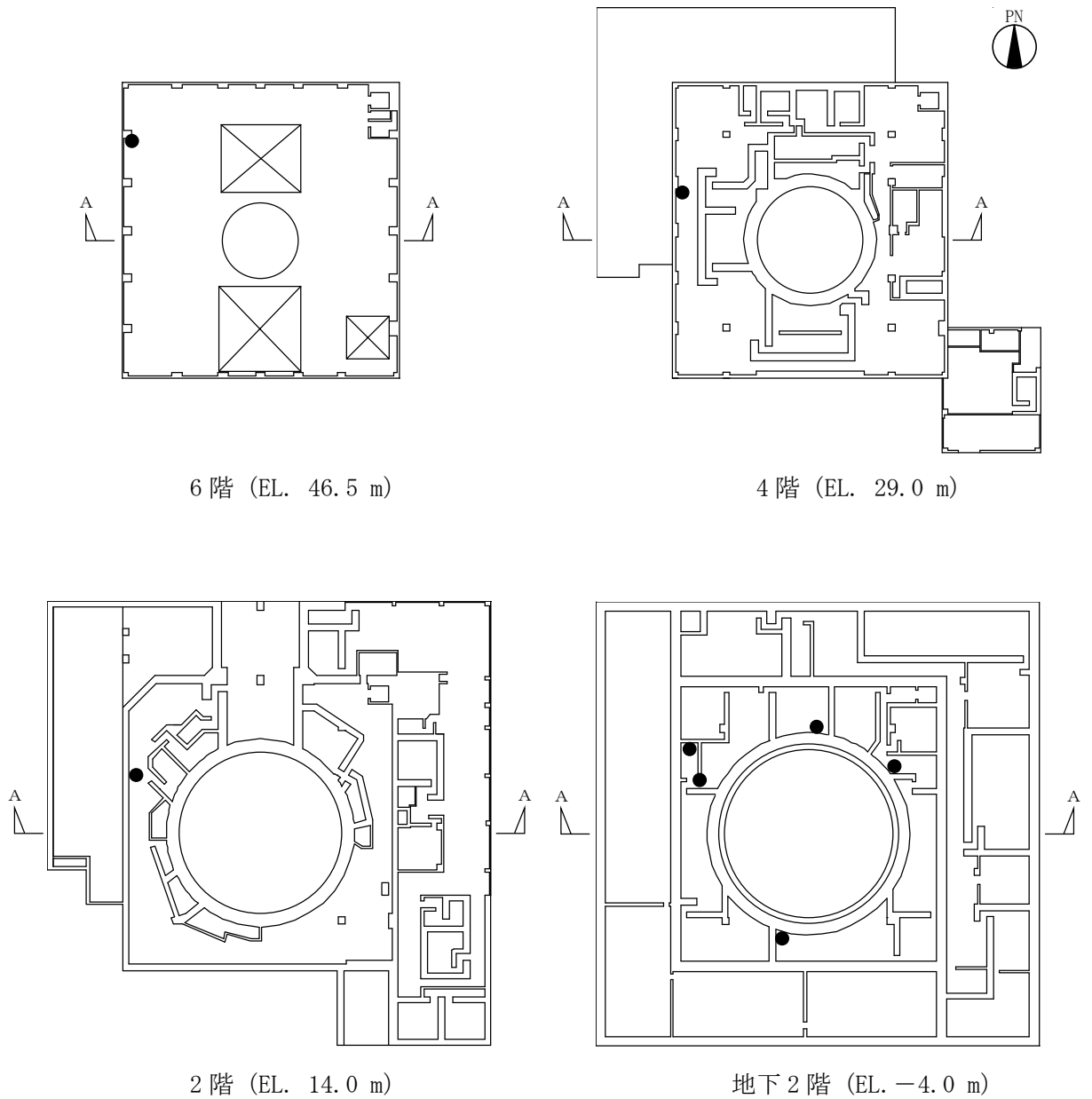
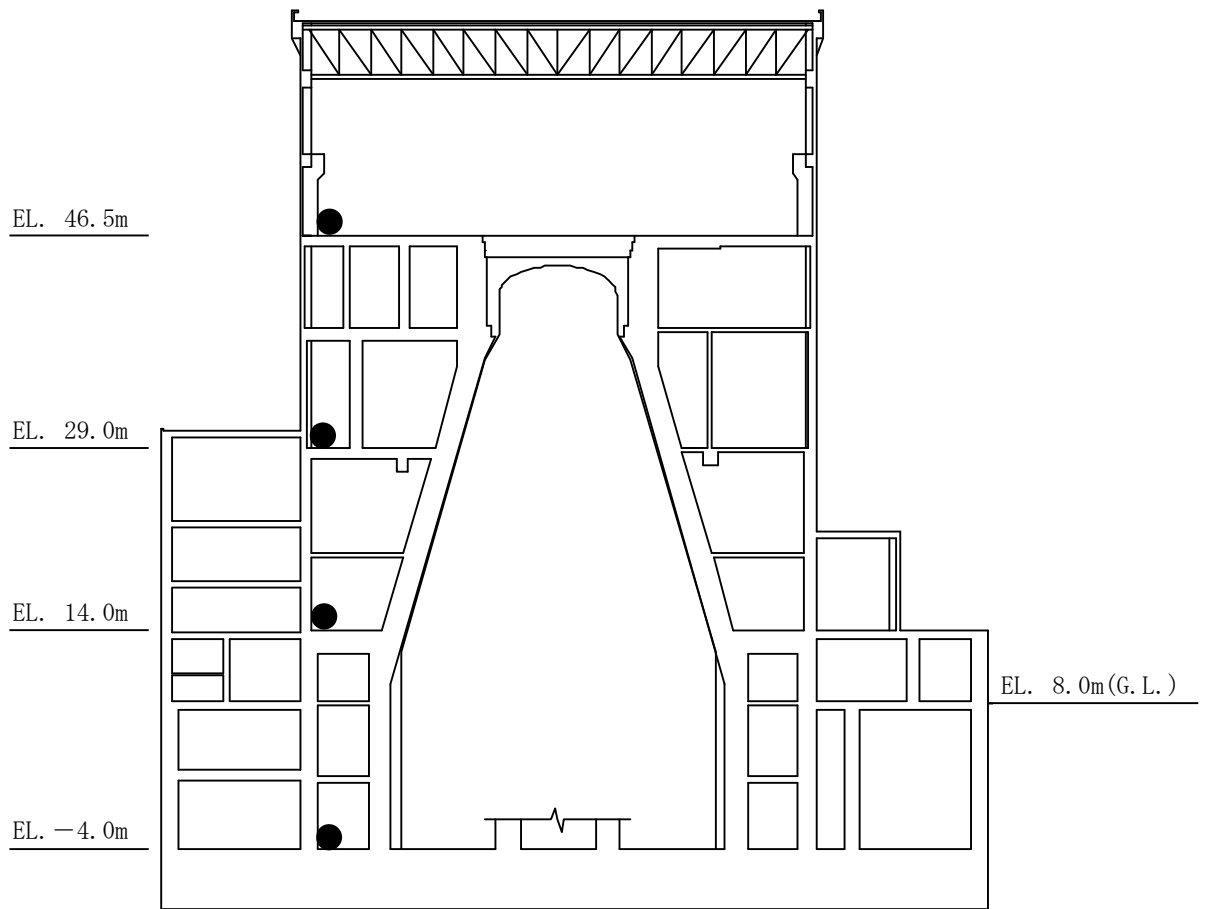


図3-1 地震計配置図(平面図) (原子炉建屋)



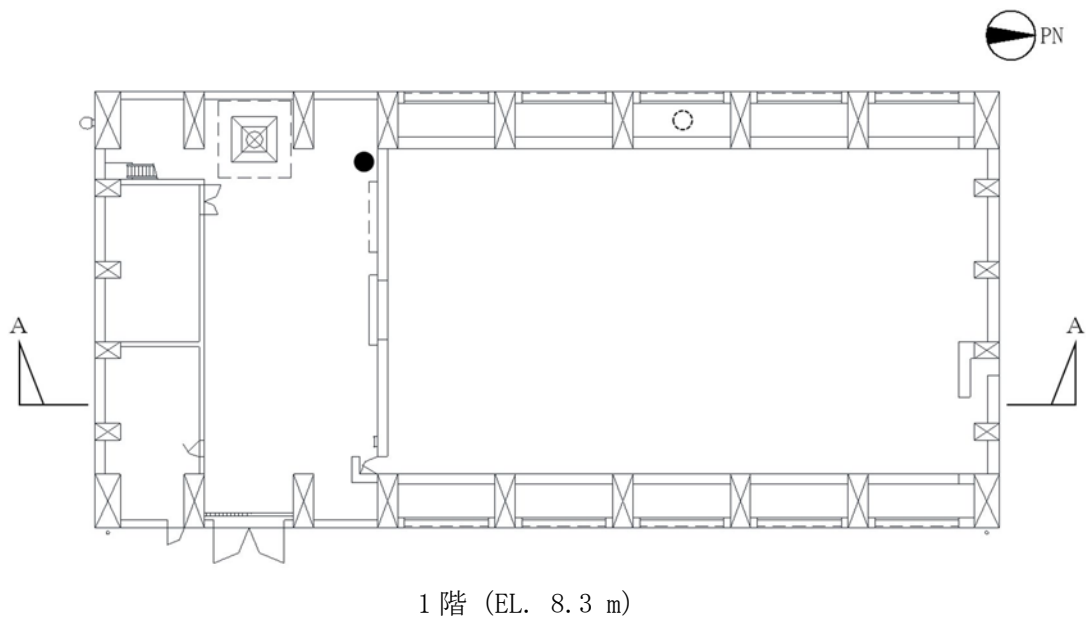
(A-A断面)

凡例

● : 地震計

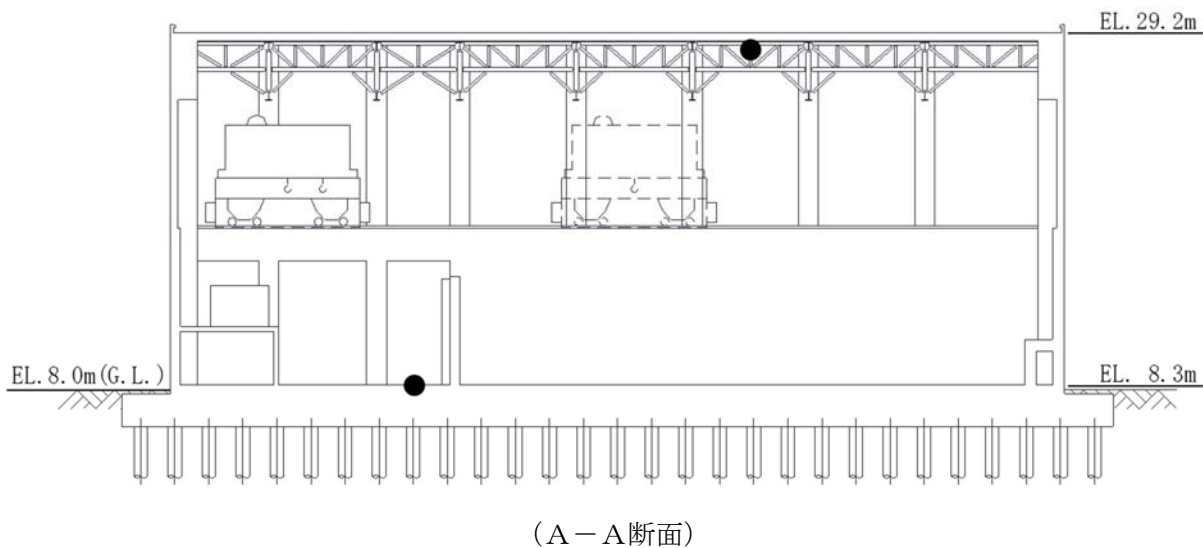
(観測成分は、NS成分、EW成分及びUD成分の3成分)

図3-2 地震計配置図(断面図) (原子炉建屋)



<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> ● : 地震計 ○ : 地震計 (屋根スラブに設置) <p>(観測成分は、NS 成分、EW 成分及びUD 成分の 3 成分)</p>

図 3-3 地震計配置図 (平面図) (使用済燃料乾式貯蔵建屋)



<p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> ● : 地震計 <p>(観測成分は、NS 成分、EW 成分及びUD 成分の 3 成分)</p>

図 3-4 地震計配置図 (断面図) (使用済燃料乾式貯蔵建屋)