

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
商業機密あるいは防護上の観点  
から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-400-2 改0
提出年月日	平成30年3月29日

建物・構築物の地震応答解析についての補足説明資料

補足-400-2 【地震応答解析モデルに用いる

鉄筋コンクリート部の減衰定数に関する検討】

平成30年3月

日本原子力発電株式会社

## 目 次

1. 概要	1
1.1 検討概要	1
1.2 検討方針	2
2. 地震応答解析モデルに用いる減衰特性	3
2.1 地震応答解析モデルにおける減衰特性の取扱い	3
2.2 建物・構築物の減衰定数の設定	4
2.3 地盤への逸散減衰の設定	5
2.4 減衰マトリクスの設定	7
2.5 履歴減衰（復元力特性）の設定	9
3. 減衰定数に関する既往の知見の整理	10
3.1 RC耐震壁の多方向同時入力振動台試験	10
3.2 実建造物の振動試験	12
3.3 実建造物の地震観測	14
4. 減衰定数の検討	32
4.1 地盤への逸散減衰の検討	32
4.2 地震観測記録を用いたシミュレーション解析	34
5. 建屋の最大応答せん断ひずみ	42
5.1 基準地震動 $S_s$ 応答レベル	42
5.2 弾性設計用地震動 $S_d$ 応答レベル	42
6. 地震応答解析モデルにおける減衰定数の設定についての考察	43
6.1 実現象における減衰	44
6.2 地震応答解析モデルにおける減衰	46
6.3 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察	47
6.4 まとめ	50
7. 機器・配管系評価への影響	51
別紙1 原子炉建屋の基準地震動 $S_s$ 及び弾性設計用地震動 $S_d$ に対する最大応答せん断ひずみ	
別紙2 各建物・構築物の図面集	

## 1. 概要

### 1.1 検討概要

本資料は、資料V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」において設定している、東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート造部（以下「RC造部」という）の減衰定数の設定の妥当性について説明するものである。

地震応答解析に用いるRC造部の減衰定数について、既往の知見に加え、施設の地震観測記録による検討を行ったうえで、入力地震動及び建物・構築物の構造と形状を踏まえた考察を加えて、妥当性を確認する。

また、本資料は、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」
- ・資料V-2-2-4「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」
- ・資料V-2-2-10「緊急時対策所建屋の地震応答計算書」
- ・資料V-2-2-17「格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書」

## 1.2 検討方針

一般に建物・構築物の減衰作用としては、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられる。「日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）－1987」及び「J E A G 4 6 0 1－1991 追補版」では、建物・構築物の地震応答解析における減衰特性を建物・構築物の材料減衰、履歴減衰（復元力特性）及び地盤への逸散減衰の組合せとしてモデル化することが提案されており、東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析においても、これに従いモデル化している。

また、「J E A G 4 6 0 1－1987」には、建物・構築物の RC 造部に対して 5 %が慣用的に使用されている値として示されている。東海第二発電所の工事計画認可申請書の建物・構築物の地震応答解析においても、RC 造部の減衰定数を 5 %としている。

本資料では、既往の知見に加え、東海第二発電所の原子炉建屋による検討から、入力地震動及び建物・構築物の構造と形状に応じ、建物・構築物の RC 造部の減衰定数に 5 %を用いることについての妥当性を考察する。

検討フローを図 1-1 に示す。

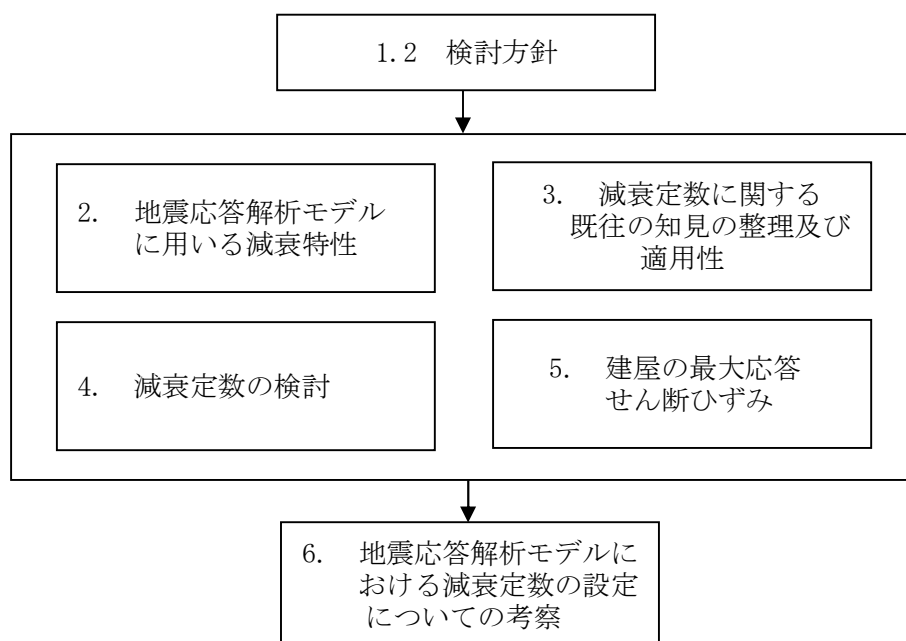


図 1-1 減衰定数の設定根拠の検討フロー

## 2. 地震応答解析モデルに用いる減衰特性

### 2.1 地震応答解析モデルにおける減衰特性の取扱い

東海第二発電所の地震応答解析モデルにおける減衰特性は、「J E A G 4 6 0 1 -1987」及び「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき、建物・構築物の材料減衰，履歴減衰（復元力特性）及び地盤への逸散減衰の組合せとしてモデル化している。この中で，材料減衰が減衰定数に対応する。

地震応答解析モデルに用いる減衰特性の設定フローを図 2-1 に示す。

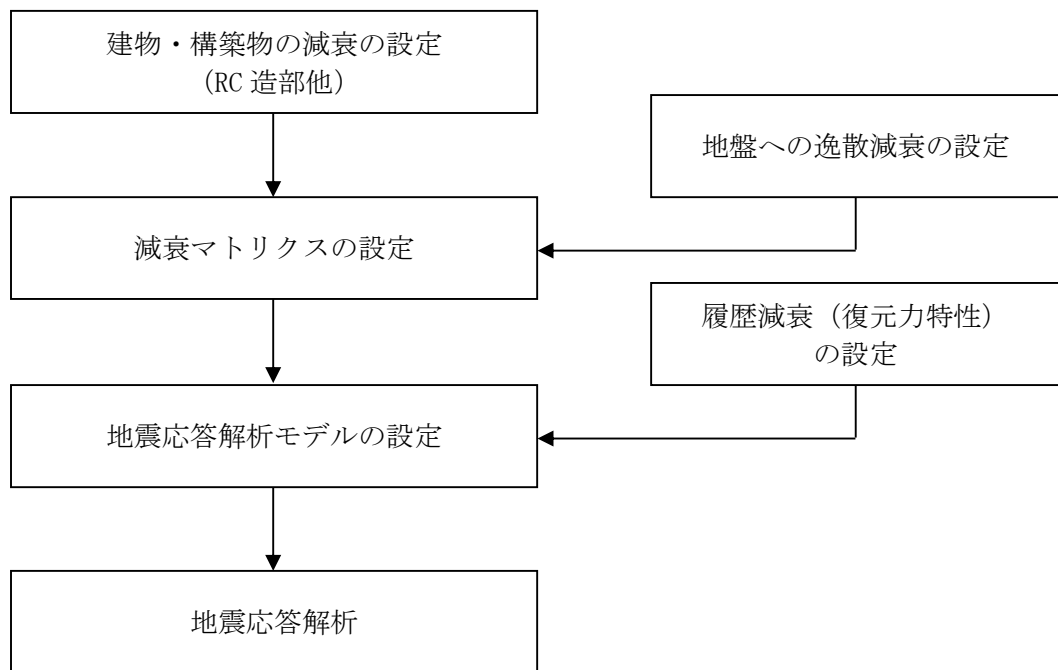


図 2-1 地震応答解析モデルに用いる減衰特性の設定フロー

## 2.2 建物・構築物の減衰定数の設定

東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析モデルにおいて、減衰定数は「J E A G 4 6 0 1 -1987」に基づき RC 造部を 5 %としている。

東海第二発電所の建物・構築物の減衰定数の設定状況を表 2-1 に示す。

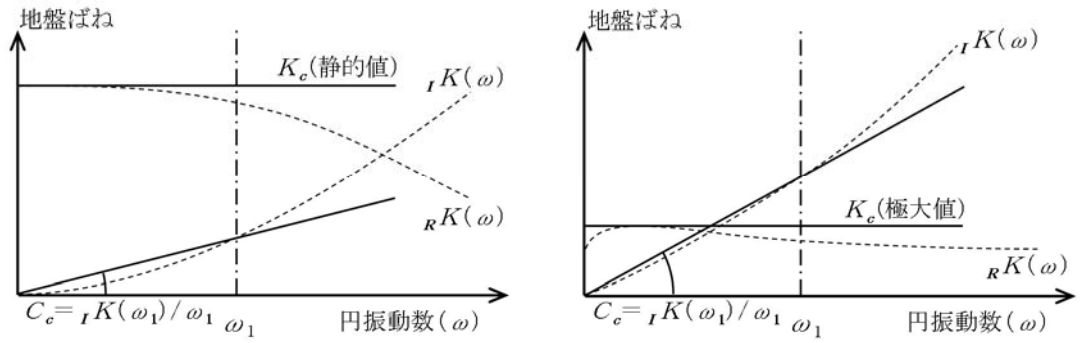
表 2-1 東海第二発電所 建物・構築物の減衰定数の設定状況

建物・構築物	構造種別	減衰定数
原子炉建屋 (R/B)	RC 造	5 %
	鉄骨造	2 %
使用済燃料乾式貯蔵建屋	RC 造	5 %
	鉄骨造	2 %
緊急時対策所建屋	RC 造	5 %
格納容器圧力逃がし装置格納槽	RC 造	5 %

### 2.3 地盤への逸散減衰の設定

東海第二発電所の建物・構築物は、「J E A G 4 6 0 1 -1987」及び「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき、建屋-地盤連成系としてモデル化し、地盤連成の効果は地盤ばねとしてモデル化している。地盤ばねについては、地盤条件、基礎形状等を基に剛性及び減衰係数を評価している。減衰係数は、振動系全体のうち地盤の影響が卓越する最初の固有振動数 ( $\omega_1$ ) に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾き ( $C_c$ ) により算定している。地盤ばねの剛性及び減衰係数の算定の概念図を図 2-2 に示す。

基礎底面地盤の回転ばねについては、接地率が 75 %を下回る場合、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき基礎浮き上がりによる幾何学的非線形性を考慮する。基礎浮き上がりによる回転ばねの剛性の非線形特性を図 2-3 に示す。基礎浮き上がりによる回転ばねの減衰係数の低下率は、地震応答解析の各時刻における回転ばねの剛性の低下率と同じとしている。杭基礎を有する建物・構築物については、杭が引き抜けない事を確認する場合には、基礎底面地盤ばねは基礎浮上がりによる幾何学的非線形性を考慮せずに線形ばねとする。

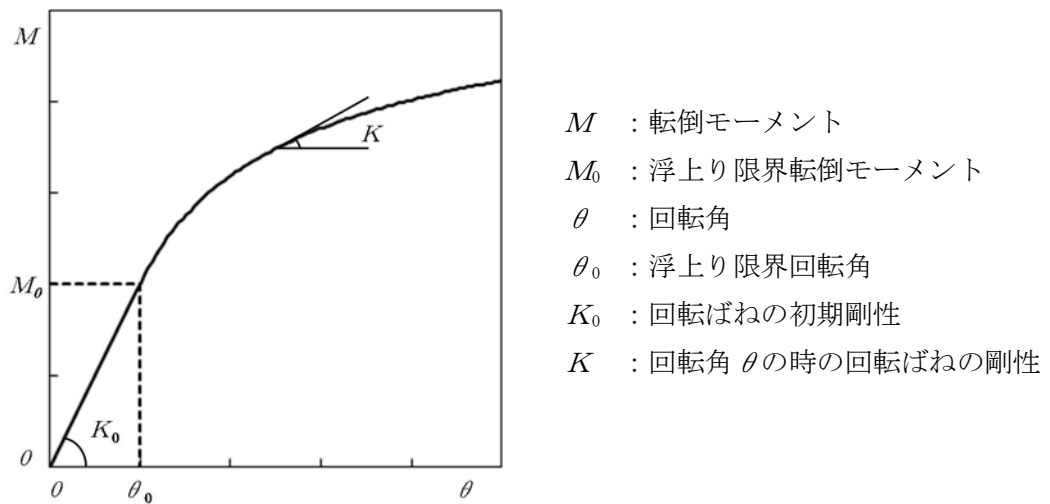


$K_c$  : 地盤ばねの剛性  
 $C_c$  : 地盤ばねの減衰係数  
 $\omega_1$  : 地盤の影響が卓越する最初の固有振動数

(a) 底面ばね

(b) 側面ばね (埋め込みを考慮する場合)

図 2-2 地盤ばねの剛性及び減衰係数の算定の概念図



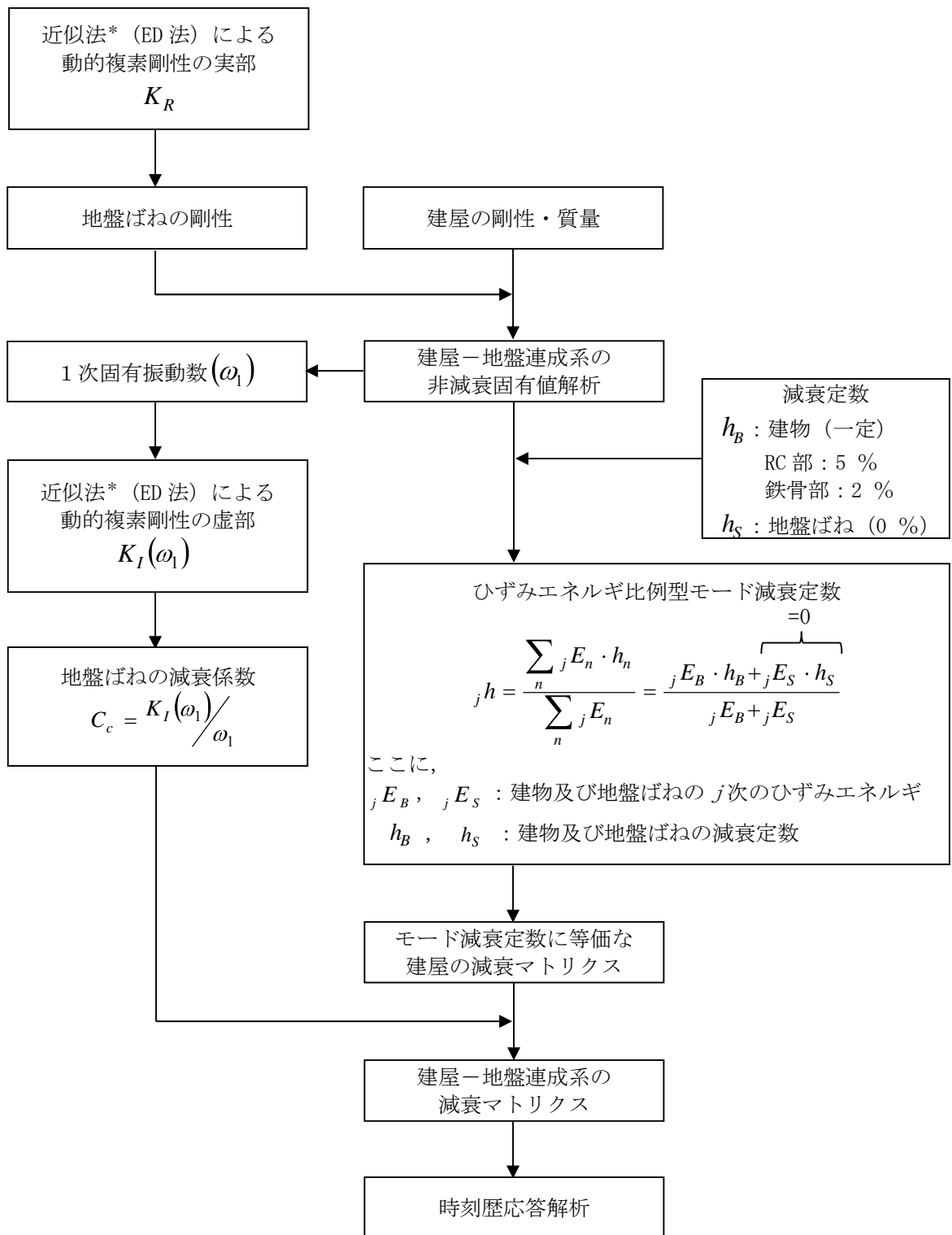
$M$  : 転倒モーメント  
 $M_0$  : 浮上り限界転倒モーメント  
 $\theta$  : 回転角  
 $\theta_0$  : 浮上り限界回転角  
 $K_0$  : 回転ばねの初期剛性  
 $K$  : 回転角  $\theta$  の時の回転ばねの剛性

図 2-3 基礎浮き上がりによる地盤の回転ばねの剛性の非線形特性



## 2.4 減衰マトリクスの設定

東海第二発電所の建屋－地盤連成系の減衰マトリクスは、図 2-4 に示すように、建物・構築物の減衰定数に基づいてひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定した後、近似法により算定した地盤ばねの減衰定数と組み合わせて算定する。



\* : 近似法は, 「J E A G 4 6 0 1  
 —1991 追補版」に基づく。

図 2-4 建屋—地盤連成系の減衰マトリクスの算定フロー

## 2.5 履歴減衰（復元力特性）の設定

東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析に用いた RC 造部の復元力特性（履歴減衰）を表 2-2 に示す。RC 造部の復元力特性は「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき、 $\tau - \gamma$  関係においては最大点指向型モデルを、 $M - \phi$  関係においてはディグレイディングモデルを用いている。 $\tau - \gamma$  関係では安定ループにおける履歴吸収エネルギーによる減衰効果を期待していない設定となっている。

表 2-2 RC 造部の復元力特性

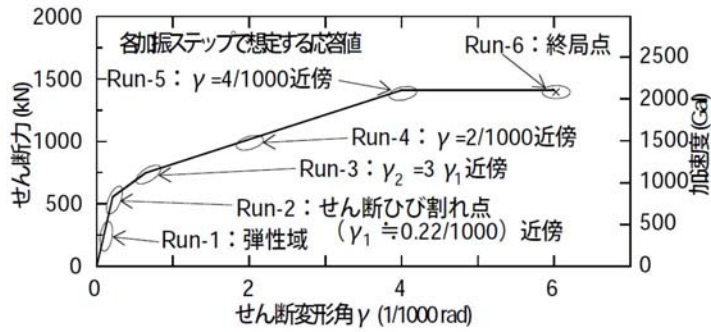
	$\tau - \gamma$ 関係 (せん断応力度-せん断ひずみ関係)	$M - \phi$ 関係 (曲げモーメント-曲率関係)
スケルトンカーブ	トリリニア	トリリニア
履歴特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大点指向型履歴ループ</li> <li>安定ループは面積を持たず、履歴吸収エネルギーがない</li> </ul>	<p>(第 2 剛性域内)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>最大点指向型履歴ループ</li> <li>安定ループは面積を持たず、履歴吸収エネルギーがない</li> </ul> <p>(第 3 剛性域内)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ディグレイディングトリリニア型</li> <li>安定ループは面積があり、履歴吸収エネルギーがある</li> </ul>
モデル図	<p>&lt;最大点指向型モデル&gt;</p>	<p>&lt;ディグレイディングモデル&gt;</p>

### 3. 減衰定数に関する既往の知見の整理

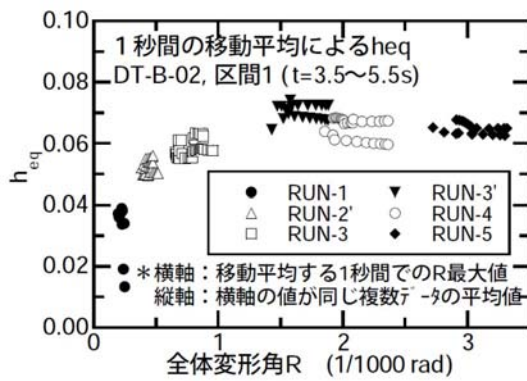
本章では応答レベルに応じた減衰定数を検討する観点から既往の知見や観測記録の整理を行う。整理にあたっては地盤への逸散減衰や履歴減衰を含むものかどうかにも着目する。

#### 3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験

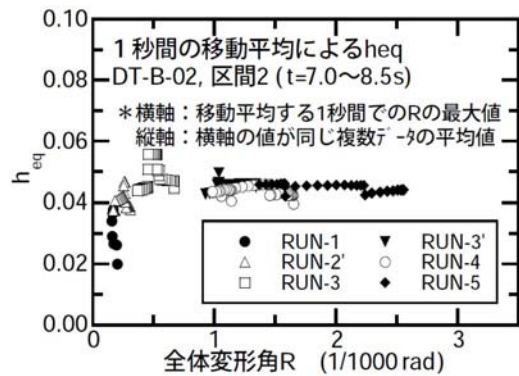
(財)原子力発電技術機構<sup>3.1)</sup>において「原子炉建屋の多入力試験分科会」の審議の下、ボックス型 RC 耐震壁が多方向から同時に地震力を受ける際の動的挙動の調査を目的として、三次元振動台を用いた加振試験（以下「RC 耐震壁試験」という。）を実施している。図 3-1 に RC 耐震壁試験の試験結果を示す。試験の結果によると等価粘性減衰定数 (heq) は、表 3-1 に示すように、履歴減衰を含む場合の弾性域で 1 %~4 %程度、第 1 折点付近で 5 %程度、第 2 折れ点付近で 6 %~7 %程度となっている。この値は、履歴減衰をあまり含まない場合の等価粘性減衰定数よりも、第 1 折点付近でも 1 %程度大きい値となっている。さらに、第 2 折点以降では 2 %程度大きくなっており、応答レベルが大きくなり非線形化するにつれ、履歴減衰は大きくなる傾向がある。また、等価粘性減衰定数には、第 1 折点付近までは応答レベルに応じて大きくなる傾向（振幅依存性）がみられる。



(a) 応答レベルと復元力特性の対応



(b) 履歴減衰を含む場合



(c) 履歴減衰をあまり含まない場合

図 3-1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験結果より算定された減衰定数<sup>3) 1)</sup>

表 3-1 RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価表

応答レベル	弾性域	第 1 折点 付近	第 2 折点 付近	許容限界 $\gamma = 2/1000$	終局点付近 $\gamma = 4/1000$
履歴減衰 を含む場合	1 % ~ 4 % 程度	5 % 程度	6 % ~ 7 % 程度	6 % ~ 7 % 程度	6 % ~ 7 % 程度
履歴減衰 をあまり 含まない場合	2 % ~ 4 % 程度	4 % 程度	4 % ~ 5 % 程度	4 % ~ 5 % 程度	4 % ~ 5 % 程度

### 3.2 実構造物の振動試験

「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書(日本建築学会構造委員会(2001))<sup>3. 2)</sup>によると, 原子炉建屋 (BWR) での起振機による振動試験結果において弾性域 (微小振幅レベル) での減衰定数は, 5 %~54 %程度となっており, 原子炉建屋 (PWR) では, PCCV で 2 %~3 %程度, RC 造部で 2 %~7 %程度となっている。ここで, 東海第二発電所原子炉建屋の振動試験結果も含まれており, 減衰定数は 20 %となっている。

なお, 得られた減衰定数は地盤への逸散減衰を含むと考えられる。特に, 原子炉建屋 (BWR) の地盤条件  $V_s=500 \text{ m/s} \sim 700 \text{ m/s}$  程度のサイトでは, 地盤への逸散減衰を多く含む結果になっている。原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧を表 3-2 に示す。

表 3-2 原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧<sup>注)</sup>

(a) BWR

項目	文献B(V)-1	文献B(V)-2~4	文献B(V)-5	文献B(V)-6	文献B(V)-7、8	文献B(V)-9	文献B(V)-10	文献B(V)-11	文献B(V)-12~14
サイト	女川1	福島1-1	福島2-1	東海2	柏崎6	浜岡2(1)	浜岡3	浜岡4	島根1
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [ABWR]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I改]	原子炉建屋 [BWR Mark-I改]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]
起振機 [加振力]	電中研大型起振機 [20t x 2]	大型起振機 [3t]	-	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [20t x 2]	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	起振機 [3t]
測定箇所	・屋根 ・クレーン階 ・オペフロ ・基礎 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎 ・機器 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎	・建屋各階床	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部) ・機器 等
地盤条件	Vs=1620m/s	E=45t/cm <sup>2</sup>	Vs=550m/s	Vs=470m/s	(Vs≒500m/s)	(Vs≒700m/s)	Vs≒700m/s	Vs≒700m/s	Vs=1800m/s
固有振動数 (1次)	試験 5.55Hz 解析 5.55Hz	0.25s	約2Hz	3Hz 2.7Hz	3.5Hz 2.4Hz	4.8Hz	3.8Hz	4.1Hz	0.19s 0.19s
減衰定数	試験 1次: 5.1% 解析 FEM建屋: 5% 質点系: 7.5%	-	1次: 33% 建屋: 3% 地盤: 5%	1次: 20% 1次: 15%	1次: 54% 建屋: 3% 地盤: 波動論	1次: 19~20%	1次: 44% 建屋: 5% 地盤: 格子型	1次: 26% 建屋: 5% 地盤: 格子型	- 建屋: (0.00064e) 地盤: (0.012s)
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 210t/cm <sup>2</sup> 解析 325t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 520t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 360t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 235t/cm <sup>2</sup>	270t/cm <sup>2</sup> 432t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 420t/cm <sup>2</sup>	260t/cm <sup>2</sup> 440t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 520t/cm <sup>2</sup>
解析モデル	設計 SRモデル 解析 ・FEMモデル ・SRモデル	SRモデル	SRモデル (地盤: FEM/BEM n/n'リスト)	SRモデル 埋込みSRモデル	埋込みSRモデル	-	格子型モデル 格子型モデル	格子型モデル 格子型モデル	SRモデル
評価方法 評価項目	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線	試験結果 ・共振曲線 ・位相曲線	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・振動モード
備考						本文献は試験結果のみを示している			解析の減衰は内部粘性減衰で評価。

(b) PWR

項目	文献P(V)-1~3	文献P(V)-4~6	文献P(V)-7,8	文献P(V)-9,103	文献P(V)-11	文献P(V)-12	文献P(V)-13
サイト	敦賀2	玄海3	大飯3	川内1	泊1	伊方2	もんじゅ
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [3-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [FBR]
起振機 [加振力]	大型起振機 [150tx2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10tx2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [10tx2]
測定箇所	・1/C ・PCCV(θ-n)振動測定も含む ・REB ・E/B	・1/C ・PCCV(θ-n)振動測定も含む ・REB	・1/C ・PCCV(θ-n)振動測定も含む ・REB	・0/S(θ-n)振動測定も含む ・1/C	・0/S(θ-n)振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S(θ-n)振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S(θ-n)振動測定も含む ・1/C ・C/V
地盤条件	Vs=1600m/s	Vs=1350m/s	Vs=2230m/s	Vs=1500m/s	Vs=1400m/s	Vs=2300m/s	Vs=1900m/s
固有振動数 (1次)	試験 PCCV: 4.86 Hz I/C: 7.57 Hz E/B: 3.15 Hz 解析 PCCV: 4.92 Hz I/C: 7.66 Hz	PCCV: 4.97Hz (NS) I/C: 9.62Hz (NS) 9.71Hz (EW)	PCCV: 5.01Hz (NS) 4.97Hz (EW) I/C: 9.78Hz (NS) 10.62Hz (EW) 解析 PCCV: 5.5(NS) 5.5(EW) I/C: 9.4(NS) 10.5(EW)	0/S: 4.7Hz I/C: 9.4Hz (X) 10.6Hz (Y)	0/S: 5.4Hz (X) 5.8Hz (Y) I/C: 11.9Hz (X) 12.9Hz (Y)	0/S: 6.9~7.1Hz I/C: 13.7~13.8Hz (X) 11.3~11.8Hz (Y) C/V: 8.1Hz	0/S: 9.03Hz (NS) 9.11Hz (EW) A/B: 5.44Hz (NS) 5.50Hz (EW) 解析 I/C: 5.18Hz (NS) 5.01Hz (EW) A/B: 5.99Hz (NS) 5.80Hz (EW)
減衰定数	試験 PCCV: 2.2% I/C: 3.4% E/B: 2.2% (NS) 解析 PCCV: 2.0% I/C: 4.0%	PCCV: 2.6%(NS) I/C: 3.0%(NS) 3.8%(EW)	PCCV: 1.7%(NS) 1.8%(EW) I/C: 13.0%(NS) 2.0%(EW)	0/S: 3.6% I/C: 2.6%(X) 2.0%(Y)	0/S: 7.0%(X) 5.8%(Y) I/C: 14.8%(X) 2.0%(Y)	0/S: 3.3% I/C: 2.8%(X) 3.1%(Y)	試験値と同じ値を採用
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 I/C: 230 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 304 t/cm <sup>2</sup> 解析 I/C: 270 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 400 t/cm <sup>2</sup>	設計 I/C: 230 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 304 t/cm <sup>2</sup> 解析 I/C: 380 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 380 t/cm <sup>2</sup>	設計 I/C: 257 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 315 t/cm <sup>2</sup> 解析 I/C: 370 t/cm <sup>2</sup> PCCV: 430 t/cm <sup>2</sup>	RC: 223 t/cm <sup>2</sup>	RC: 230 t/cm <sup>2</sup>	RC: 210 t/cm <sup>2</sup>	RC: 230 t/cm <sup>2</sup>
解析モデル	設計 S-R モデル 解析 ・全体建屋 3次元質点系* ・PCCV: 3DFEM	S-R モデル	S-R モデル	S-R モデル	S-R モデル	S-R モデル	S-R モデル
評価方法 評価項目	一質点系固有解析により各モードの固有振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図	一質点系固有解析により各モードの固有振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図	一質点系固有解析により各モードの固有振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図 ・伝達関数	ハーフパワー法 ・固有振動数 ・振動形 ・共振曲線	多自由度固有解析のモード固定法 ・固有振動数 ・モード図 ・共振曲線	ハーフパワー法 ・固有振動数 ・振動形 ・共振曲線	一質点系固有解析により各モードの固有振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図
備考							

注) 「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書 (日本建築学会構造委員会 (2001))<sup>3. 2)</sup> に加筆)

### 3.3 実構造物の地震観測

#### 3.3.1 原子炉建屋（BWR）での地震観測（RC造部）

東北電力（株）女川2号機及び3号機原子炉建屋シミュレーション解析結果<sup>3. 3)</sup>を表3-3に示す。基礎上端と上部構造の観測記録を用いているため、解析結果に対する地盤への逸散減衰の影響は小さいと考えられるものの、建屋が地盤に埋め込まれていることによる減衰への影響が考えられる。地震による累積的影響が小さいと考えられる、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）以前の地震観測記録の分析結果によると、減衰定数  $h$  は1%～8%程度となっている。

減衰定数と加速度レベルの関係を図3-2に示す。基礎版上加速度が  $500 \text{ cm/s}^2$  程度までは、加速度レベルに応じて大きくなる傾向がある。



表 3-3 東北電力（株）女川 2 号機及び 3 号機原子炉建屋シミュレーション解析結果  
 (a) 女川 2 号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s <sup>2</sup> )	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s <sup>2</sup> )	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -
1994.10.04 22:22 北海道東方沖 マグニチュード8.2 震央距離758km	15	6.74	1.40	15	6.50	1.32
		1.31	-		3.73	-
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	112	5.55	1.15	168	5.29	1.08
		7.77	-		4.01	-
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	230	5.44	1.13	206	5.24	1.07
		6.30	-		4.63	-
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	501	4.42	0.92	461	4.43	0.90
		6.88	-		5.87	-
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	358	4.31	0.89	367	4.36	0.89
		8.08	-		7.19	-

(b) 女川 3 号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s <sup>2</sup> )	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s <sup>2</sup> )	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -
2001.12.02 22:02 岩手県内陸南部 マグニチュード6.4 震央距離112km	33	6.23	1.25	35	5.75	1.17
		4.29	-		5.25	-
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	129	5.78	1.16	189	5.31	1.08
		3.95	-		4.51	-
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	222	5.55	1.11	188	5.20	1.06
		3.78	-		5.57	-
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	545	4.72	0.94	458	4.58	0.93
		6.03	-		7.00	-
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	373	4.57	0.91	398	4.48	0.91
		5.27	-		7.66	-

(「東北電力（株）女川 2 号機及び 3 号機原子炉建屋 建屋シミュレーション解析について  
 (コメント回答) [建築物・構造 6-3-2 (2012)] 3. 3) に加筆)

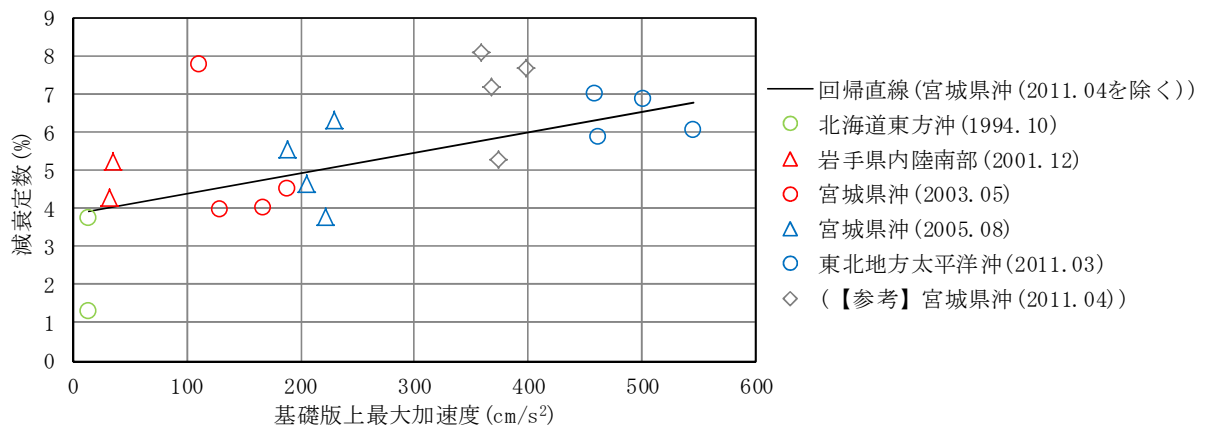


図 3-2 減衰定数と入力加速度レベルの関係

### 3.3.2 原子炉建屋（PWR）での地震観測（新規制基準施行前）

原子炉建屋（PWR）における地震観測記録の分析結果を表3-4に整理する。整理にあたっては、地盤への逸散減衰の影響が小さいと考えられる上部構造物と基礎上端の記録に基づく文献を選定している。得られた観測記録レベルでの減衰定数は1%～4%程度となっている。

また、九州電力（株）では1997年鹿児島県北西部地震の本震及び余震等の観測記録を用いて、川内原子力発電所1号機（以下「川内1号機」という。）の外部遮蔽建屋における基礎上端最大加速度と減衰定数の関係性を評価している。評価結果を図3-3に示す。加速度レベルが大きくなるにつれ、減衰定数は大きくなる傾向が見られるとしている。

表3-4 原子炉建屋（PWR）での地震観測記録の分析結果

	基礎上端最大加速度 (推定される応答レベル)	減衰定数	備考
伊方1号機 <sup>3.4)</sup>	約25 cm/s <sup>2</sup> (弾性域)	内部コンクリート：3% 外周コンクリート壁：3.5%	1979年7月13日 周防灘の地震
泊1号機 <sup>3.5)</sup>	約40 cm/s <sup>2</sup> (弾性域)	外部 遮蔽建屋, 内部コンクリート, 周辺補機棟の平均：4.1%	1993年7月12日 北海道南西沖地震
川内1号機 <sup>3.6)</sup>	1 cm/s <sup>2</sup> ～68 cm/s <sup>2</sup> 程度 (弾性域)	外部 遮蔽建屋：1%～4%程度	1997年3月26日, 5月13日 鹿児島県北西部地震 (余震を含む24地震)

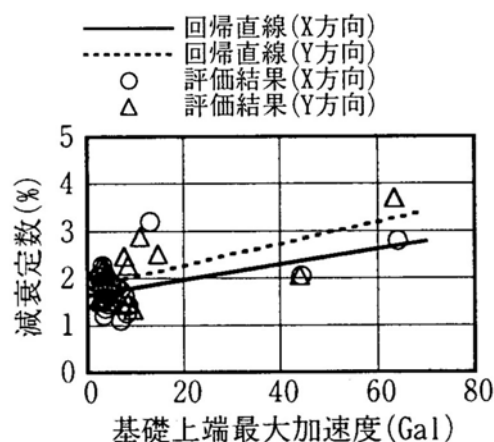


図3-3 川内1号機 外部遮蔽建屋の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係<sup>3.6)</sup>

### 3.3.3 原子炉建屋（PWR）での地震観測（新規制基準施行後）

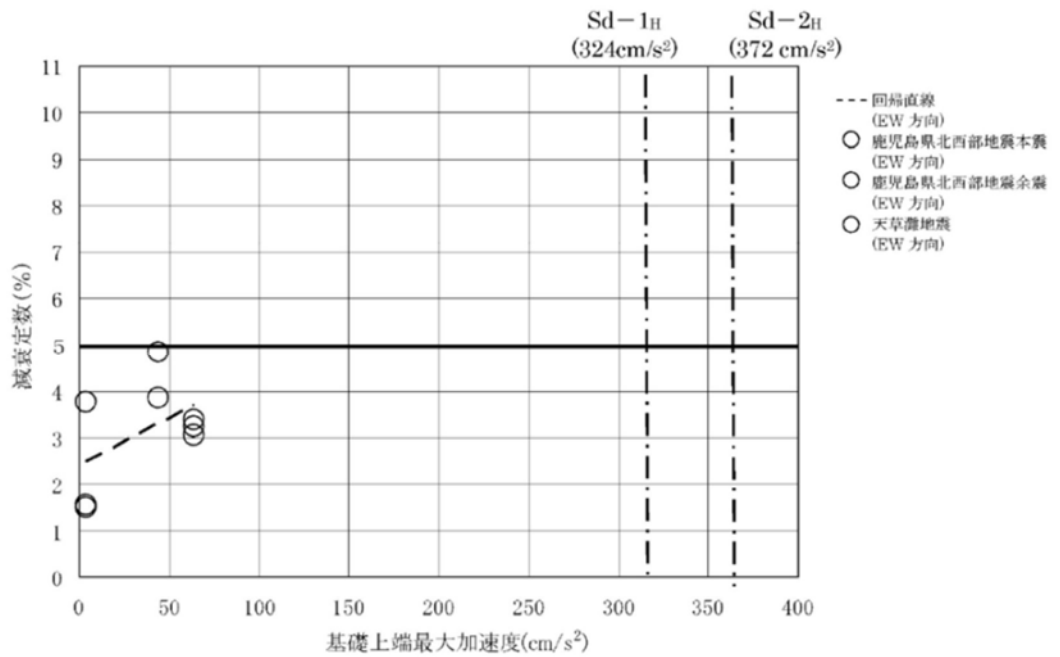
#### (1) 川内1号機での地震観測（RC造部）

九州電力（株）は川内1号機の減衰定数に関する検討<sup>3)・7)</sup>において、複数の地震観測記録を用いた詳細な検討を行い、川内1号機の外部遮蔽建屋、内部コンクリート及び原子炉補助建屋における減衰定数  $h$  について、構造及び形状による考察並びに基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  応答レベルでの減衰定数  $h$  の考察を実施している。

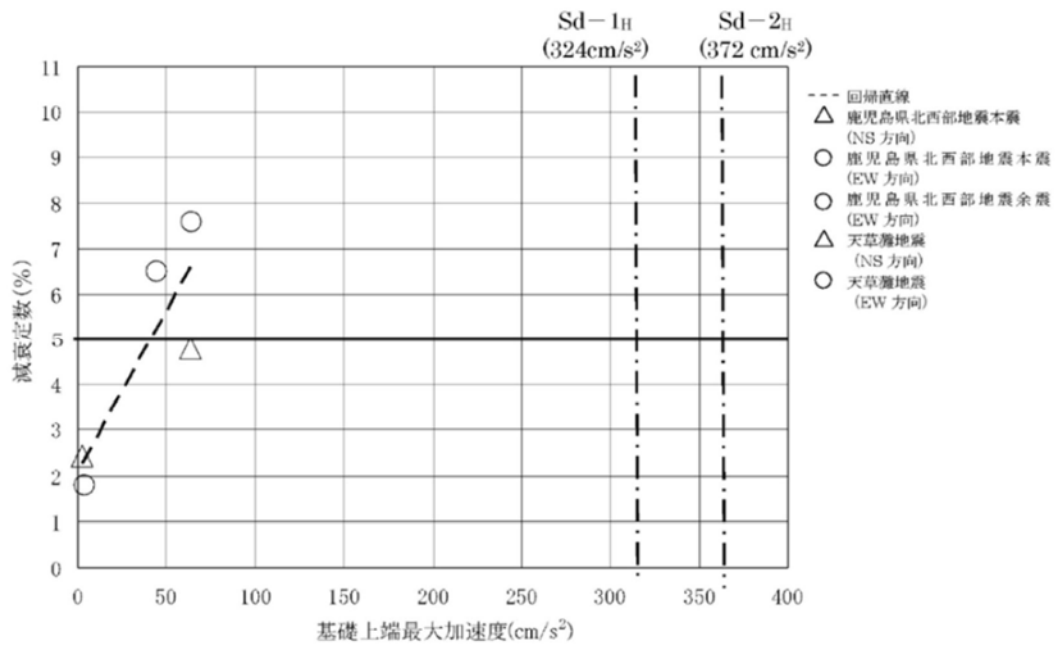
##### ① システム同定による減衰定数 $h$ の評価

九州電力（株）は鹿児島県北西部地震の本震、同地震の余震及び天草灘地震の地震観測記録を用いて、システム同定により減衰定数  $h$  を評価した結果、水平方向は外部遮蔽建屋で2%～5%程度、内部コンクリートで2%～8%程度、原子炉補助建屋で2%～10%程度、鉛直方向は各建屋で2%～5%程度であるとしている。減衰定数  $h$  と基礎上端最大加速度を比較した結果を図3-4に示す。

これらの結果を踏まえ九州電力（株）は、川内1号機について、システム同定により評価した減衰定数は入力地点の加速度レベルに応じて大きくなる傾向を示しており、検討に用いた地震観測記録の入力地点の加速度よりも大きいレベルでは、更に大きな減衰が推定できるとしている。



(a) 外部遮蔽建屋 (水平方向)



(b) 内部コンクリート (水平方向)

図3-4 (1/2) 川内1号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係<sup>3. 7)</sup>

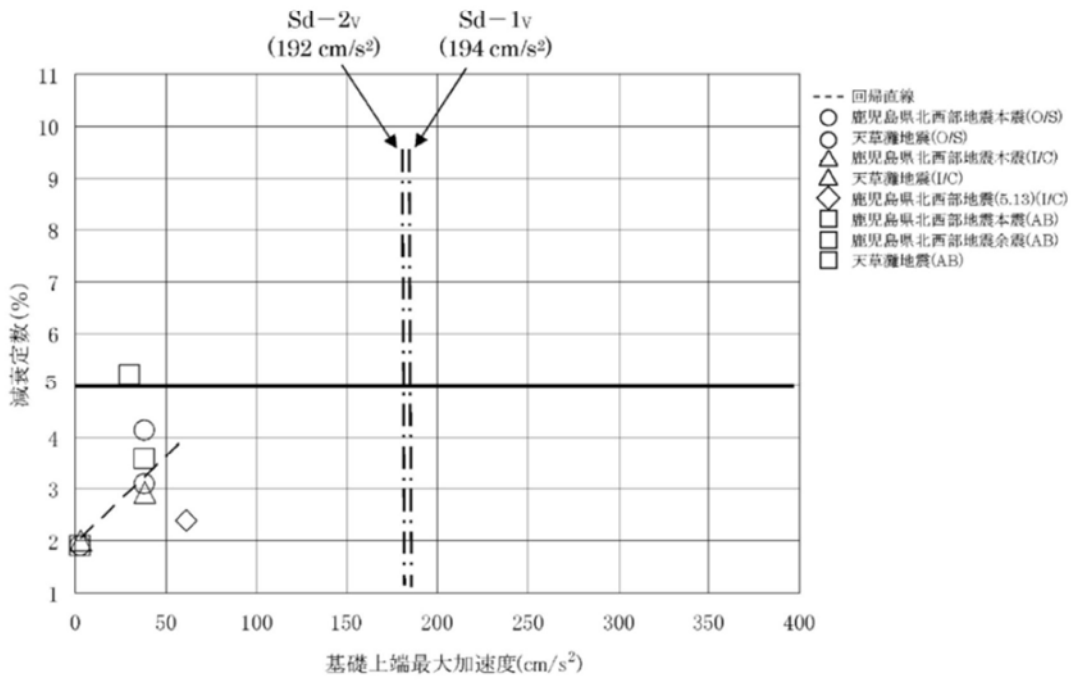
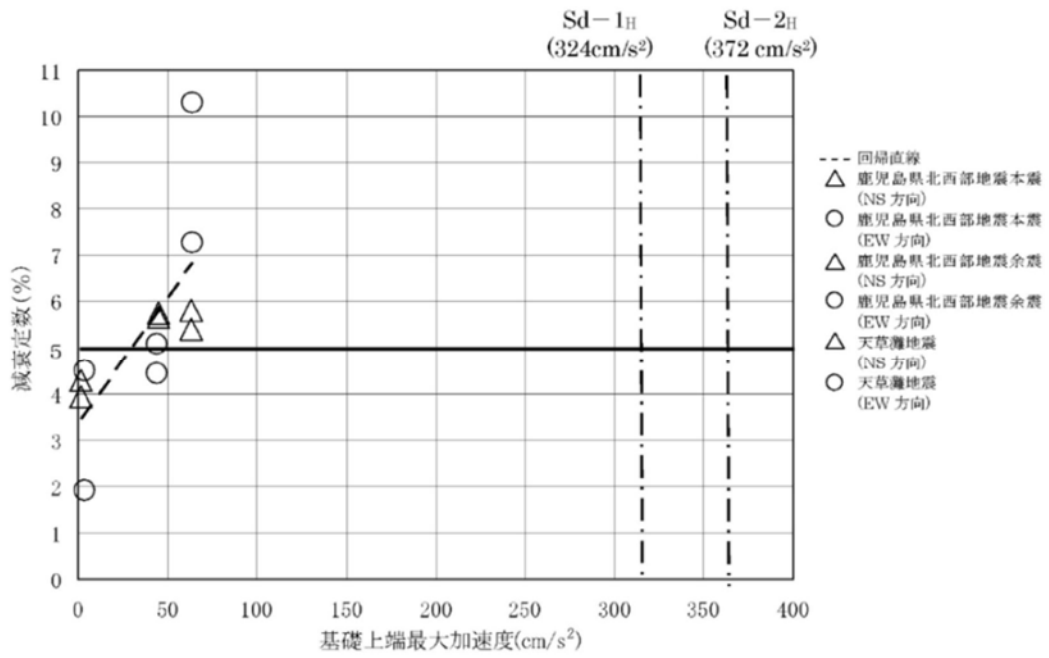


図3-4 (2/2) 川内1号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係<sup>3, 7)</sup>

## ② 構造及び形状による考察

九州電力（株）は RC 造の建物・構築物の減衰定数  $h$  について、構造及び形状により、以下のように考察している。

RC 耐震壁試験と比較して減衰効果が期待できる要因に着目し、単純な構造体と、多数の耐震壁及び構造床から構成された 3 次元的な広がりを持つ複雑な構造体に分類して考察を行う。

単純な構造体は、外部遮蔽建屋が該当し、トップドーム部を除き高さ方向に構造床がなく、耐震壁に取り付く梁及び耐震壁がないような構造体で、直交する接合部が少ないことが特徴と言える。

複雑な構造体は、直交部材との接合部を複数有する構造体とし、内部コンクリート及び原子炉補助建屋が該当する。内部コンクリートは、構造床を有し、耐震壁は 3 次元的に複雑な形状となっている。また、原子炉補助建屋は、複数の層にそれぞれ構造床があり、耐震壁も多数の区画を形成している。

これら複雑な構造体は、水平方向及び鉛直方向の地震力に対し、耐震壁及び構造床に加え、接合部を介した挙動及び加力方向と直交する構造部材の挙動から、減衰効果が得られると考えられる。これらは、内部コンクリート及び原子炉補助建屋の水平方向については、システム同定による減衰定数の評価結果において、単純な RC 耐震壁と比較して、減衰効果が特に大きい傾向が得られていること、また、鉛直方向については、地震応答解析モデルによる検討結果において、鉛直方向の観測記録で減衰効果が解析結果以上に得られていることから推察できる。

## ③ 基準地震動 $S_s$ 及び弾性設計用地震動 $S_d$ に対する応答レベルでの減衰定数の考察

九州電力（株）は川内 1 号機の基準地震動  $S_s$  による耐震壁の最大せん断ひずみは、スケルトンカーブにおいて概ね第 1 折点付近であり、弾性設計用地震動  $S_d$  による耐震壁の最大せん断ひずみは、スケルトンカーブにおいて概ね第 1 折点付近以下であるとしている。

既往の実験・観測結果に加え、川内 1 号機におけるシステム同定による減衰定数  $h$  の評価結果からも、減衰定数  $h$  には振幅依存性が確認されることから、基準地震動  $S_s$  レベル（水平方向 540 gal 以上、鉛直方向 320 gal 以上）及び弾性設計用地震動  $S_d$  レベル（水平方向 320 gal 以上、鉛直方向 190 gal 以上）では、観測記録レベル（1 gal～60 gal 程度）で得られた減衰定数  $h$  よりも大きいと考えられ、基準地震動  $S_s$  レベル及び弾性設計用地震動  $S_d$  レベルの解析に用いる減衰定数  $h$  は水平方向及び鉛直方向とも 5 % 程度以上と考えられるとしている。

ここで、複雑な構造体である内部コンクリート及び原子炉補助建屋については観測記録地震動レベル（1 gal～60 gal 程度）で 5 % を超える減衰定数  $h$  が得られているが、単純な構造体である外部遮蔽建屋は最大で約 5 % と、構造の複雑さによる減衰効果の違いが見られることから、九州電力（株）は単純な構造体である外部遮蔽建屋については、観測記録より得られた減衰定数  $h$  に加え、振幅依存性を踏まえると弾性設計用地震動  $S$

Ⅱレベルにおいても5%程度以上とできるものと考えられるが、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、弾性設計用地震動 $S_{II}$ を用いた評価では減衰定数を3%とした場合についても考慮している。

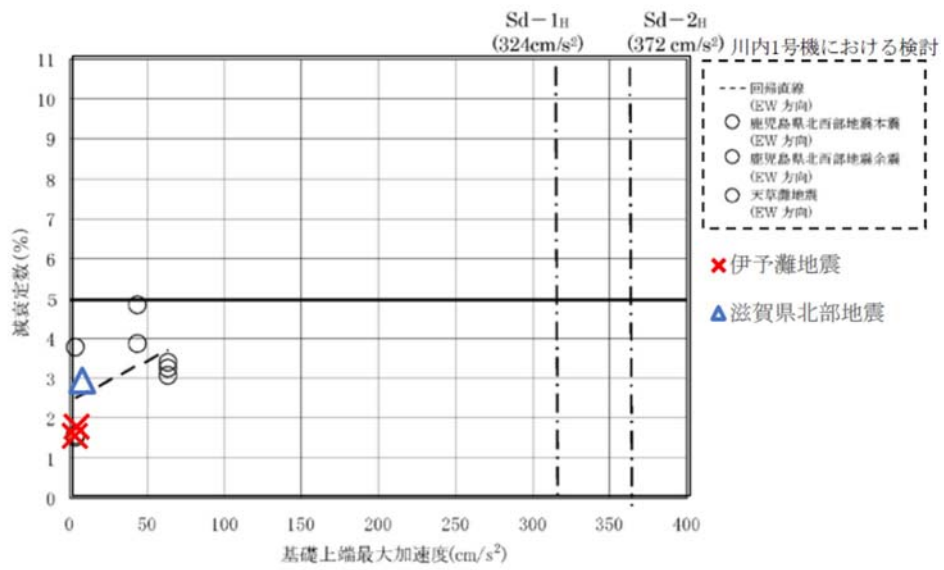
(2) 高浜 3 号機の地震観測 (RC 造部)

関西電力 (株) は高浜発電所 3 号機 (以下「高浜 3 号機」という) における減衰定数に関する検討<sup>3)・8)</sup>では, 地震観測記録を用いて建屋の減衰定数  $h$  の考察を実施している。

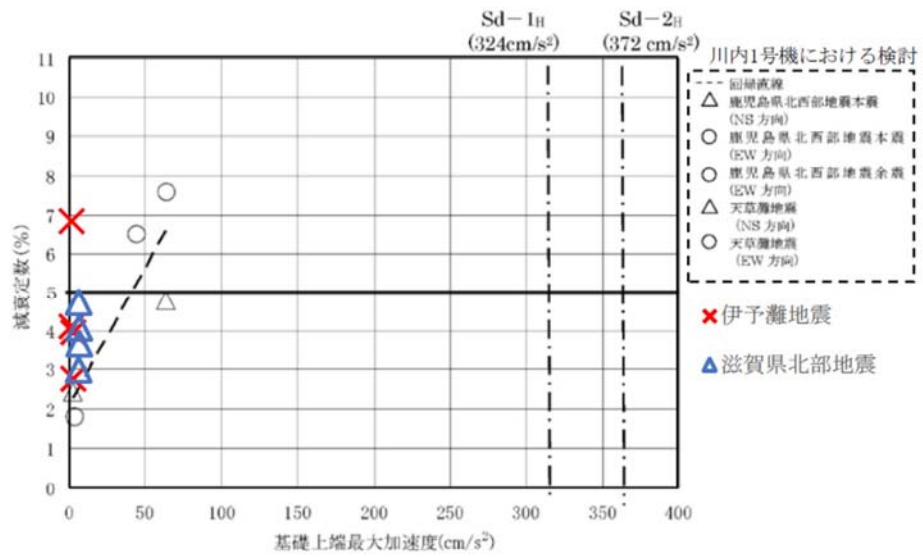
システム同定により減衰定数  $h$  を評価した結果, 水平方向は外部遮蔽建屋で 1.6 %～2.9 %程度, 内部コンクリートで 2.8 %～6.8 %程度, 外周建屋で 2.2 %～5.2 %程度, 鉛直方向は各建屋で 1.4 %～7.3 %程度であるとしている。高浜 3 号機のシステム同定結果を図 3-5 に示す。

また, 高浜 3 号機と川内 1 号機は, 建物・構築物の配置やその構造的特徴には共通点が見られることから, 川内 1 号機の観測記録及びそれに基づく検討内容の結果を高浜 3 号機に適用できるとしている。



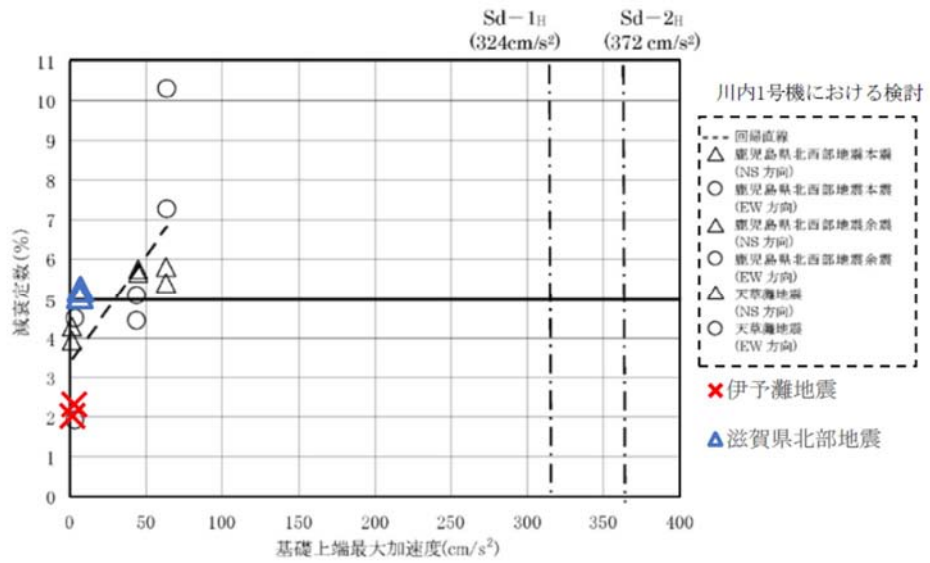


(1) 外部しゃへい建屋 (水平方向)

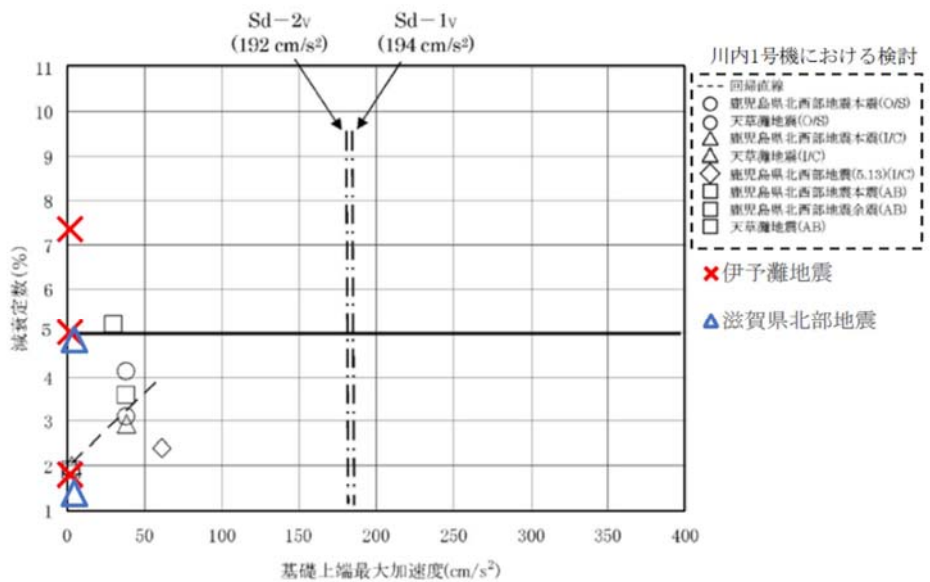


(2) 内部コンクリート (水平方向)

図3-5 (1/2) 川内1号機における鹿児島県北西部地震の本震及び余震等を含むシステム同定結果と高浜3号機の伊予灘地震によるシステム同定結果<sup>3, 8)</sup>



(3) 外周建屋（川内：原子炉補助建屋）（水平方向）



(4) 外部しゃへい建屋、内部コンクリート、外周建屋（川内：原子炉補助建屋）（鉛直方向）

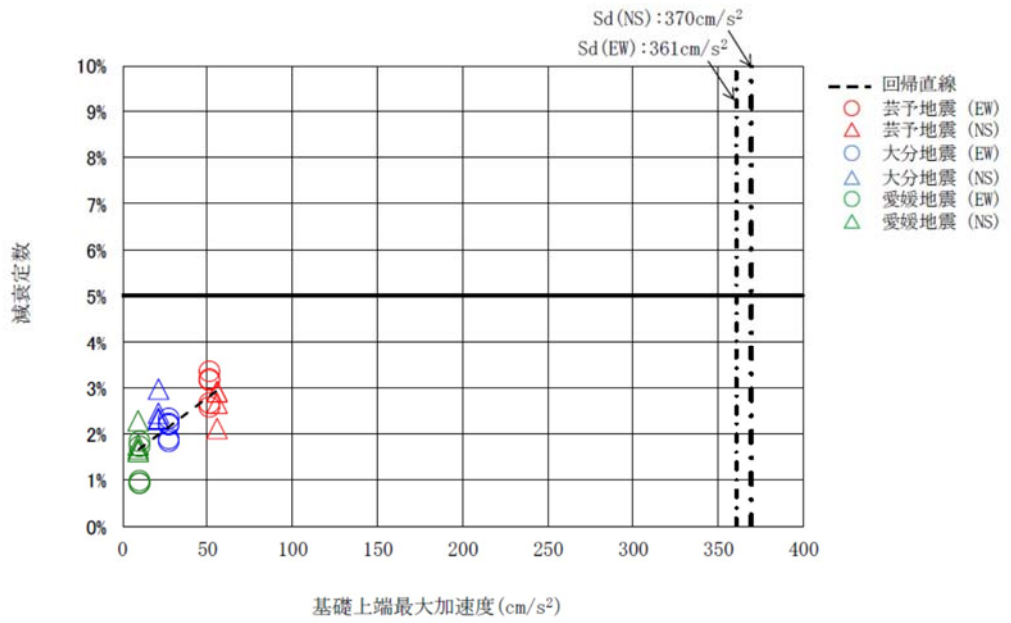
図3-5 (2/2) 川内1号機における鹿児島県北西部地震の本震及び余震等を含むシステム同定結果と高浜3号機の伊予灘地震によるシステム同定結果<sup>3, 8)</sup>

(3) 伊方3号機の地震観測（RC造部）

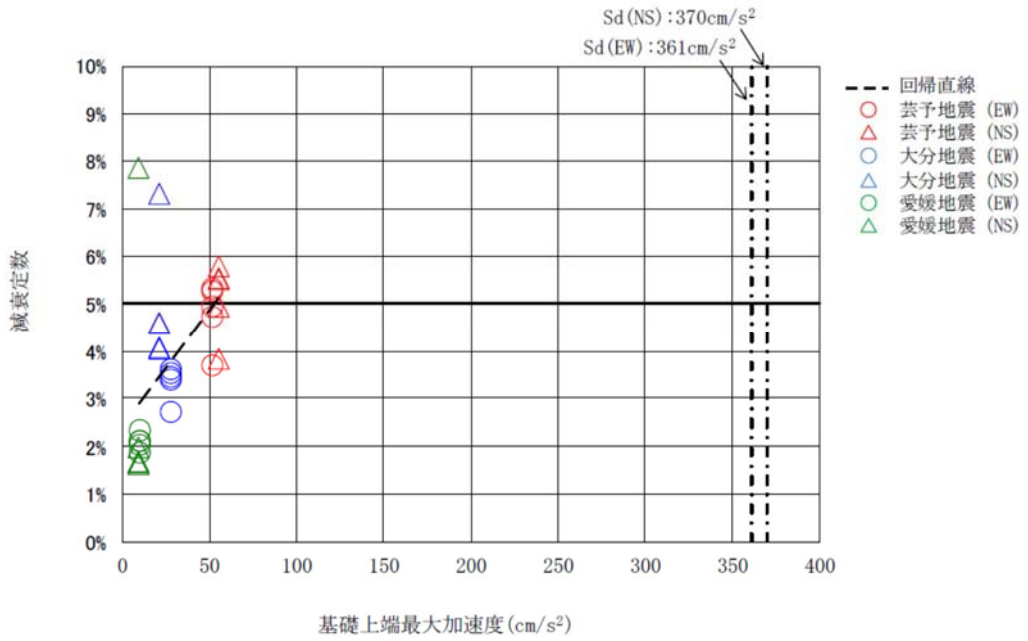
四国電力（株）は伊方発電所3号機（以下「伊方3号機」という）における減衰定数に関する検討<sup>3・9）</sup>では、地震観測記録を用いて建屋の減衰定数 $h$ の考察を実施している。

システム同定により減衰定数 $h$ を評価した結果、水平方向は外周コンクリート壁で3%程度、内部コンクリートで5%程度であるとしている。鉛直方向は、外周コンクリート壁、内部コンクリートともに5%程度であるとしている。伊方3号機のシステム同定結果を図3-6に示す。

また、伊方3号機と川内1号機は、類似の構造をもつ建物・構築物であり、川内1号機の観測記録及びそれに基づく検討内容を伊方3号機に適用できるとしている。

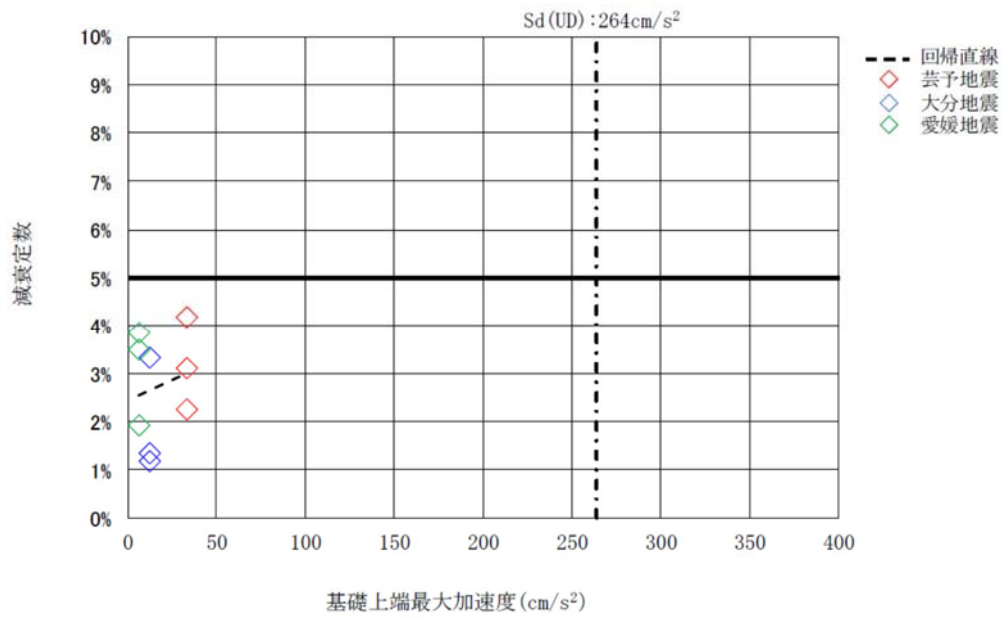


(a) 外周コンクリート壁 (水平方向)



(b) 内部コンクリート (水平方向)

図 3-6 (1/2) 伊方 3 号機の芸子地震等によるシステム同定結果<sup>3, 9)</sup>



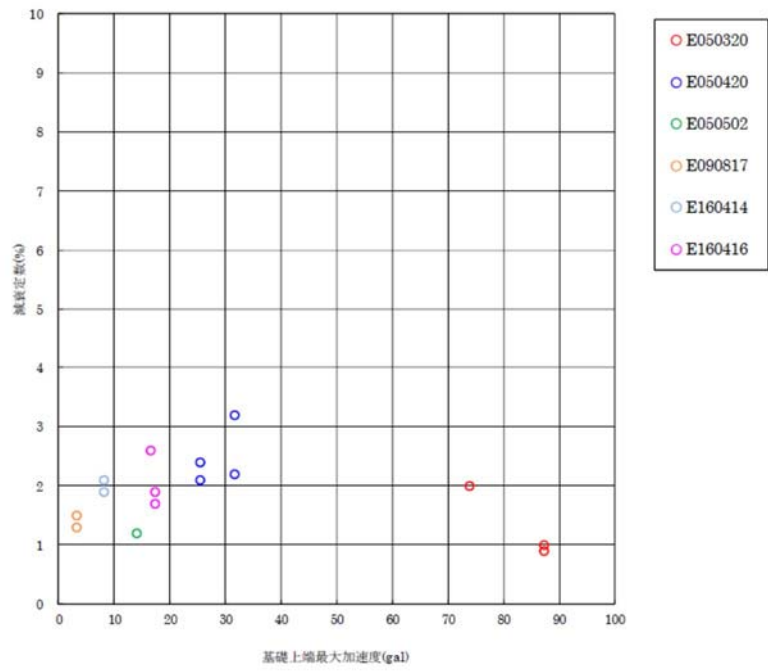
(c) 外周コンクリート壁 (鉛直方向)

図 3-6 (2/2) 伊方 3 号機の芸予地震等によるシステム同定結果<sup>3. 9)</sup>

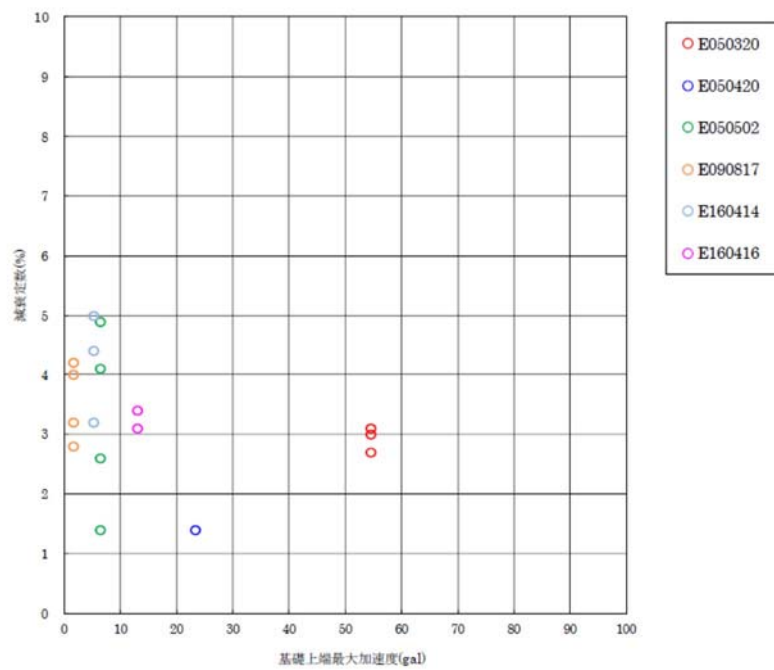
(4) 玄海 3 号機の地震観測 (PCCV)

① 玄海 3 号機における地震観測記録を用いた減衰定数の検討

玄海発電所 3 号機 (以下「玄海 3 号機」という) における減衰定数に関する検討<sup>3. 10)</sup>では, 地震観測記録を用いたシステム同定を実施し, PCCV では減衰定数が低振幅の観測記録レベルでも, 水平方向では 2 %程度以上であり最大では 3 %を超える減衰定数が得られ, 鉛直方向では 2 %程度以上の結果であり最大では 5 %程度の減衰定数が得られたとしている。玄海 3 号機のシステム同定結果を図 3-7 に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 3-7 玄海 3 号機の観測記録によるシステム同定結果<sup>3. 10)</sup>

## ② 3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討

玄海3号機では、減衰定数が地震応答解析モデルに与える影響を確認する観点から、3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討を実施している。この検討では、PCCVの減衰定数を3%、RC造部の減衰定数を5%とした解析ケース（以下「基本ケース」という）及びPCCVの減衰定数を2%、RC造部の減衰定数を3%とした解析ケース（以下「減衰定数の不確かさ考慮ケース」という）による地震応答解析を行い、観測記録との比較検討を行っている。

上記によると、3次元FEMモデルによる解析結果は、概ね観測記録と同等または保守的な評価となっており、保守的な解析結果が得られる場合においても、基本ケースの方が観測記録と比較的よく整合するとしている。

## ③ 基準地震動 $S_s$ 及び弾性設計用地震動 $S_d$ に対する応答レベル

九州電力（株）によると、玄海3号機のPCCVの基準地震動 $S_s$ による耐震壁の最大応答せん断ひずみは、スケルトンカーブの第1折れ点を超える程度となり、弾性設計用地震動 $S_d$ による耐震壁の最大応答せん断ひずみは、スケルトンカーブの第1折れ点未満であるとしている。

## ④ 減衰定数の考察

玄海3号機における基準地震動 $S_s$ に対するPCCVの応答レベルは、スケルトンカーブの第1折れ点を超える程度であり、第1折れ点付近の減衰定数について考察している。玄海3号機の観測記録を用いたシステム同定結果は、水平方向で2%~3%程度、鉛直方向で2%~5%程度であり、第1折れ点付近の減衰定数としては、このシステム同定結果に既往の実験結果による減衰定数の振幅依存性を考慮できるとしている。また、3次元FEMモデルの動的線形解析により観測記録レベルにおいて、減衰定数3%の妥当性を確認しており、第1折れ点付近におけるPCCVの減衰定数は3%程度以上となることが推定されたとしている。

また、弾性設計用地震動 $S_d$ レベルでのPCCVの減衰定数については、観測記録の地震動レベルと $S_d$ 地震動レベルとの振幅レベルの違いによる減衰定数の振幅依存性を踏まえると、基準地震動 $S_s$ と同様にPCCVで3%を基本とするとしている。これは、3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討において、観測記録レベルの床応答スペクトルは、PCCVの減衰定数を3%とした基本ケース及びPCCVの減衰定数を2%とした減衰定数のばらつき考慮ケースともに、観測記録と同等または保守的な結果を示すこと、基本ケースの方が観測記録と整合する傾向があることから、3%が妥当な設定であるとしている。

なお、単純な構造体のPCCVについては、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくく低振幅である観測記録レベルにおいても水平方向、鉛直方向ともに2%程度以上の減衰定数が得られていることを踏まえ、弾性設計用地震動 $S_d$ に対する評価において、減衰定数の設定に起因するばらつきとして2%を考慮するとしている。



(5) 大飯 3 号機の地震観測

大飯発電所 3 号機（以下「大飯 3 号機」という）における減衰定数に関する検討<sup>3. 11)</sup>では、2 つの地震観測記録を用いたシステム同定を実施し、RC 造部及び PCCV の減衰定数を評価している。RC 造部では水平方向 7.1 %～9.7 %程度の減衰定数が得られ、鉛直方向では、6.1 %～8.2 %程度の減衰定数が得られたとしている。PCCV では、水平方向で 1.7 %～2.4 %程度、鉛直方向 1.6 %～4.2 %程度の減衰定数が得られたとしている。

また、大飯 3 号機、高浜 3 号機及び伊方 3 号機は、原子炉格納施設の構造的特徴の類似性が確認され、高浜 3 号機及び伊方 3 号機における減衰定数に関する既往の知見を大飯 3 号機の RC 造部の減衰定数の検討に適用することは可能であるとしている。さらに、大飯 3 号機と玄海 3 号機については、原子炉格納施設及び PCCV の構造的特徴の類似性が確認され、玄海 3 号機における PCCV の減衰定数に関する既往の知見を大飯 3 号機の PCCV の減衰定数の検討に適用することは可能であるとしている。

#### 4. 減衰定数の検討

##### 4.1 地盤への逸散減衰の検討

「2.4 減衰マトリクスの設定」に示したひずみエネルギー比例型モード減衰定数を用いて、建屋全体の減衰量に対する地盤への逸散減衰の影響を検討する。

東海第二発電所原子炉建屋のひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果を表 4-1 に示す。また、算定に用いた建屋及び地盤の減衰定数並びにひずみエネルギーの比率を表 4-2 に示す。

水平方向では、NS 方向及び EW 方向ともに 1 次が地盤-建屋連成のスウェイモード、2 次が地盤-建屋連成のロッキングモード、3 次が建屋単独モードになっているが、モード減衰定数は 1 次、2 次のモードでは地盤減衰の影響が非常に大きく、3 次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。また、鉛直方向では、1 次が屋根トラスの 1 次モード、2 次が地盤-建屋連成のモード、3 次が屋根トラスの 2 次モードになっているが、モード減衰定数は 2 次のモードでは地盤減衰の影響が非常に大きく、1 次及び 3 次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。

これより、東海第二発電所原子炉建屋の地震応答解析モデルにおいては、地盤への逸散減衰の影響が建物・構築物の減衰よりもかなり大きいといえる。

表 4-1 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果：(原子炉建屋)

(a) NS 方向,  $S_s-D1$

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	備考
1	2.44	21.2	地盤-建屋連成一次
2	4.96	39.9	
3	9.60	14.4	

(b) EW 方向,  $S_s-D1$

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	備考
1	2.43	20.9	地盤-建屋連成一次
2	4.96	39.8	
3	9.32	13.9	

(c) UD 方向,  $S_s-D1$

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	備考
1	2.50	2.7	屋根トラス一次
2	3.65	55.1	地盤-建屋連成一次
3	10.79	2.1	

表 4-2 建屋及び地盤の減衰定数並びにひずみエネルギーの比率（原子炉建屋）

方向	部材				1次			2次			3次		
					① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②
NS 方向	建屋				5.0%	22.1%	1.1%	5.0%	18.4%	0.9%	5.0%	75.9%	3.8%
	地盤 ばね	側面	EL. 8.20	並進	86.8%	0.7%	0.6%	93.2%	0.2%	0.1%	96.4%	0.0%	0.0%
				EL. 2.00	並進	82.8%	1.0%	0.9%	91.1%	0.5%	0.5%	95.3%	0.0%
			EL. -4.00	並進	63.2%	3.5%	2.2%	79.3%	3.4%	2.7%	88.6%	0.0%	0.0%
		底面	EL. -9.00	並進	31.4%	7.3%	2.3%	51.7%	12.2%	6.3%	69.9%	0.2%	0.2%
			EL. -9.00	並進	36.0%	24.4%	8.8%	56.8%	40.7%	23.1%	73.8%	0.8%	0.6%
			EL. -9.00	回転	13.0%	40.9%	5.3%	25.1%	24.7%	6.18%	42.4%	23.1%	9.8%
	合計(モデル減衰定数)				21.2%			39.9%			14.4%		
EW 方向	建屋				5.0%	22.9%	1.1%	5.0%	19.0%	0.9%	5.0%	76.7%	3.8%
	地盤 ばね	側面	EL. 8.20	並進	86.7%	0.7%	0.6%	93.2%	0.2%	0.1%	96.3%	0.0%	0.0%
				EL. 2.00	並進	82.7%	1.0%	0.9%	91.1%	0.5%	0.5%	95.2%	0.0%
			EL. -4.00	並進	63.0%	3.5%	2.2%	79.3%	3.5%	2.8%	88.3%	0.0%	0.0%
		底面	EL. -9.00	並進	31.2%	7.2%	2.2%	51.7%	12.3%	6.3%	69.2%	0.3%	0.2%
			EL. -9.00	並進	35.8%	24.1%	8.6%	56.8%	41.0%	23.2%	73.2%	1.0%	0.7%
			EL. -9.00	回転	12.9%	40.7%	5.2%	25.0%	23.7%	5.9%	41.5%	22.0%	9.1%
	合計(モデル減衰定数)				20.9%			39.8%			13.9%		
UD 方向	建屋(RC)				5.0%	13.6%	0.7%	5.0%	4.6%	0.2%	5.0%	2.0%	0.1%
	建屋(鉄骨)				2.0%	85.8%	1.7%	2.0%	0.6%	0.0%	2.0%	98.0%	2.0%
	地盤 ばね	EL. -9.00	底面	並進	46.7%	0.6%	0.3%	58.0%	94.7%	54.9%	82.5%	0.0%	0.0%
	合計(モデル減衰定数)				2.7%			55.1%			2.1%		

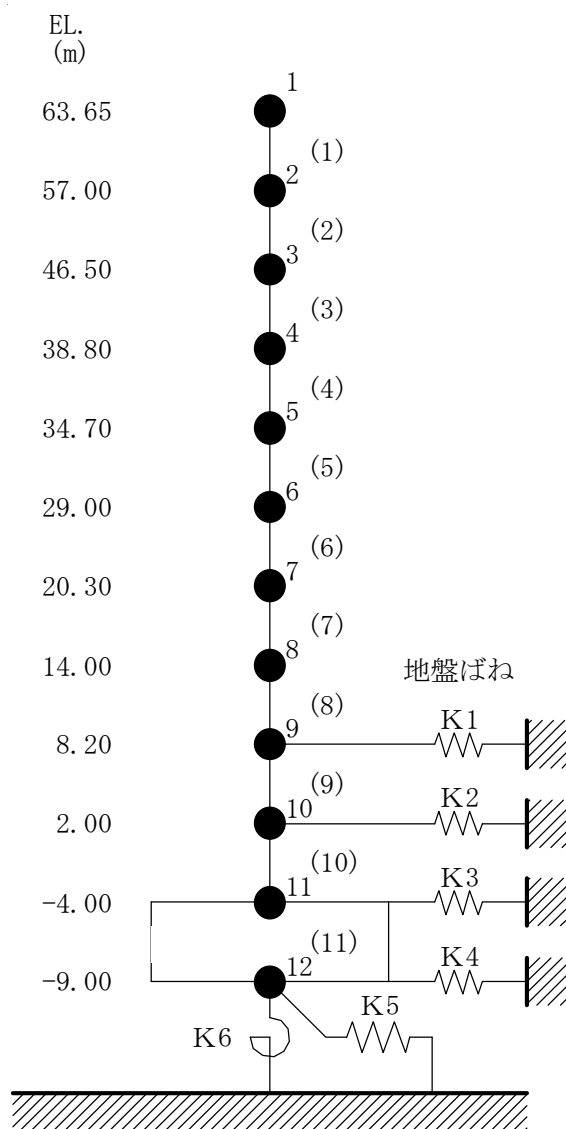
#### 4.2 地震観測記録を用いたシミュレーション解析

東海第二発電所原子炉建屋を対象に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行った。解析モデルは資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答解析」に示すモデルを用いる。

解析モデルを図4-1に、解析に用いた使用材料の物性値を表4-3に示す。減衰定数は「3.3.1 原子炉建屋（BWR）での地震観測（RC造部）」で示されている減衰定数と入力加速度レベルの関係の結果を踏まえてRC造部を3%と5%の2種類の場合について検討する。

シミュレーション結果として、最大応答加速度分布を図4-2に、加速度応答スペクトルを図4-3、図4-4に解析結果と観測記録を比較して示す。

最大応答加速度分布では、RC造部の減衰3%と5%の両者ともに観測記録に対して保守的な値となったが、減衰5%の結果の方が観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC造部の減衰3%と5%のケース共に、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、減衰5%の結果の方が観測記録により整合する傾向にある。



- ・ 数字は質点番号を示す。
- ・ ( ) 内は部材番号を示す。

図 4-1 解析モデル

表 4-3 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 ( $N/mm^2$ )	せん断 弾性係数 ( $N/mm^2$ )	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート コンクリート： $F_c = 22.1$ ( $N/mm^2$ ) ( $F_c = 225$ ( $kgf/cm^2$ ))	$2.21 \times 10^4$	$9.21 \times 10^3$	3, 5

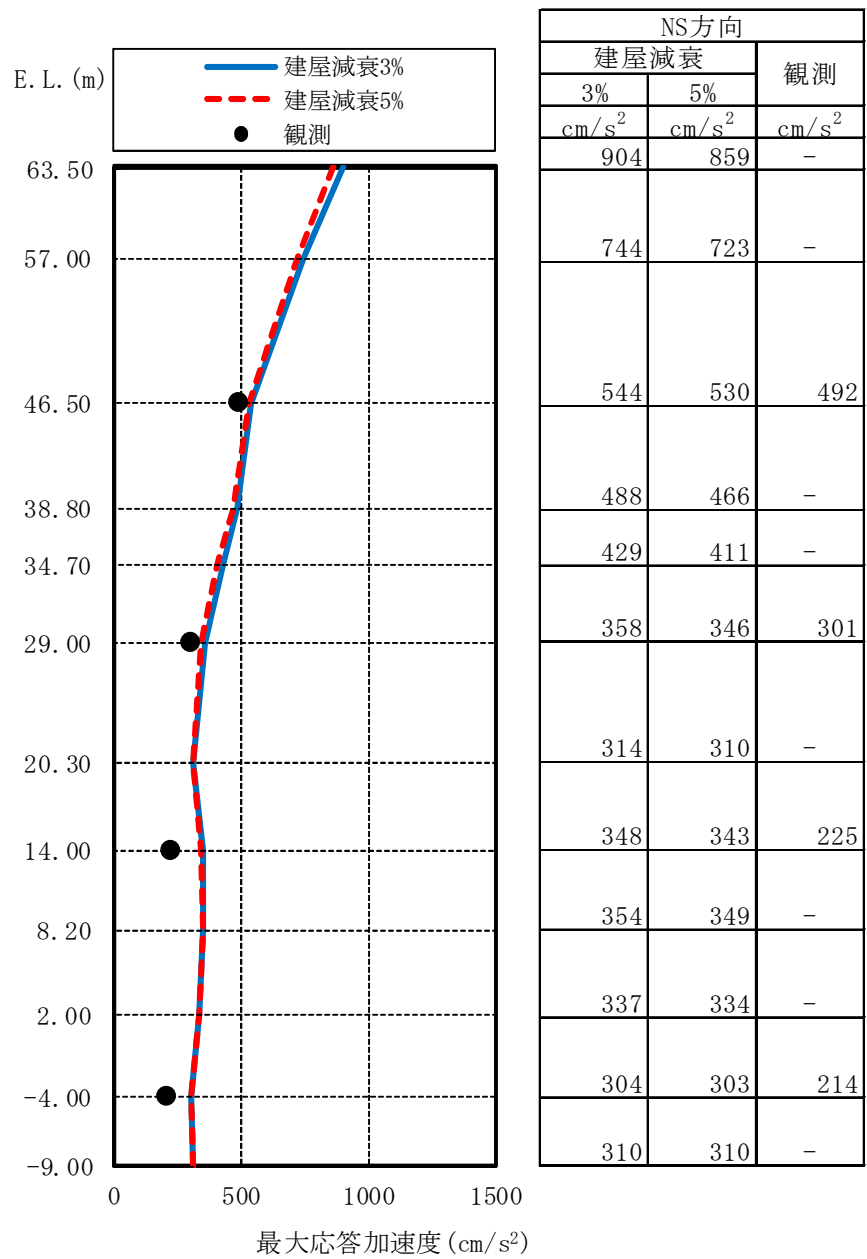


図 4-2 (1/2) 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

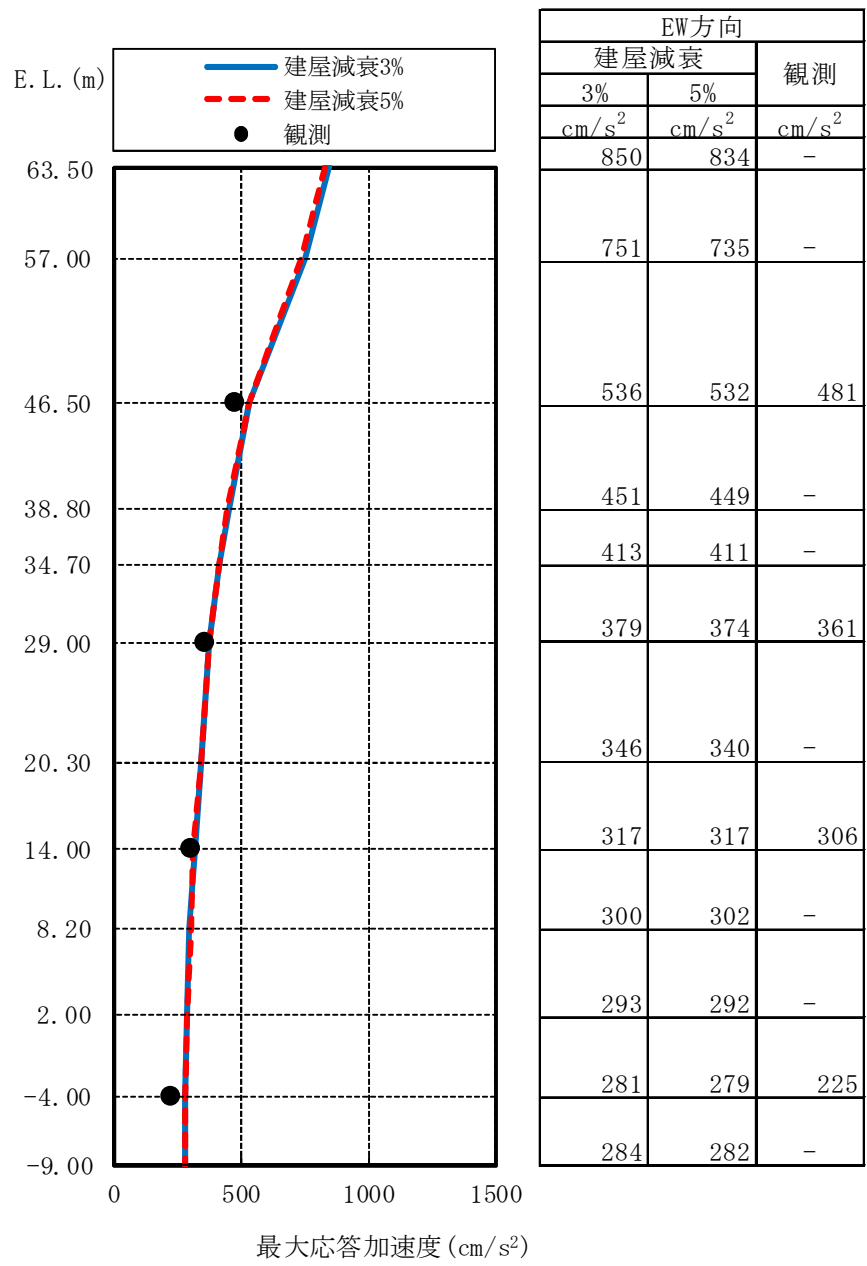
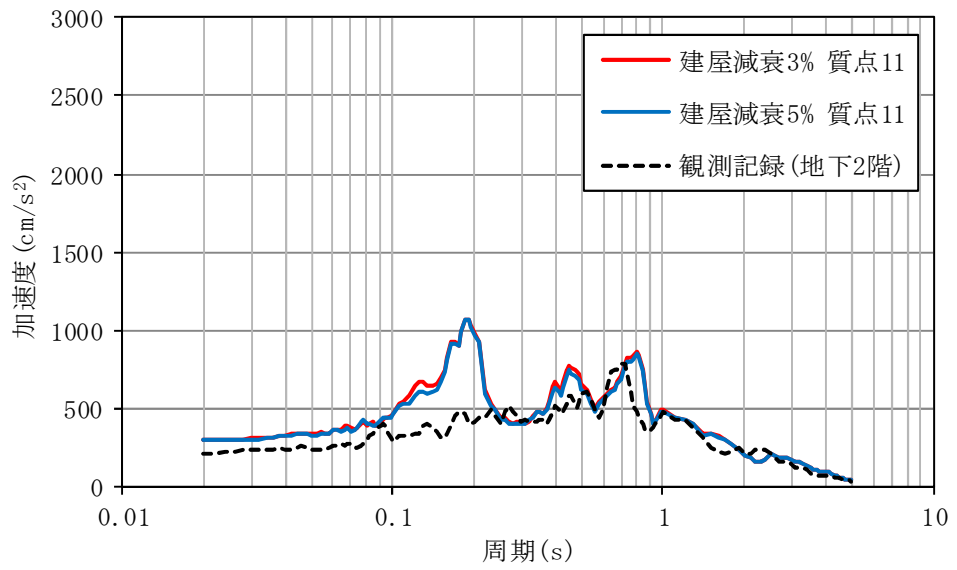
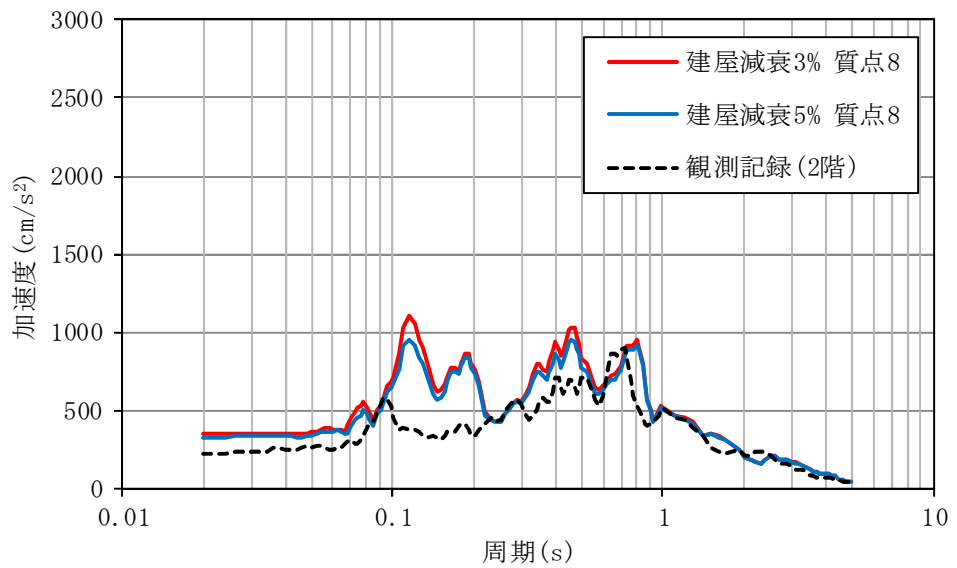


図 4-2 (2/2) 最大応答加速度分布の比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震



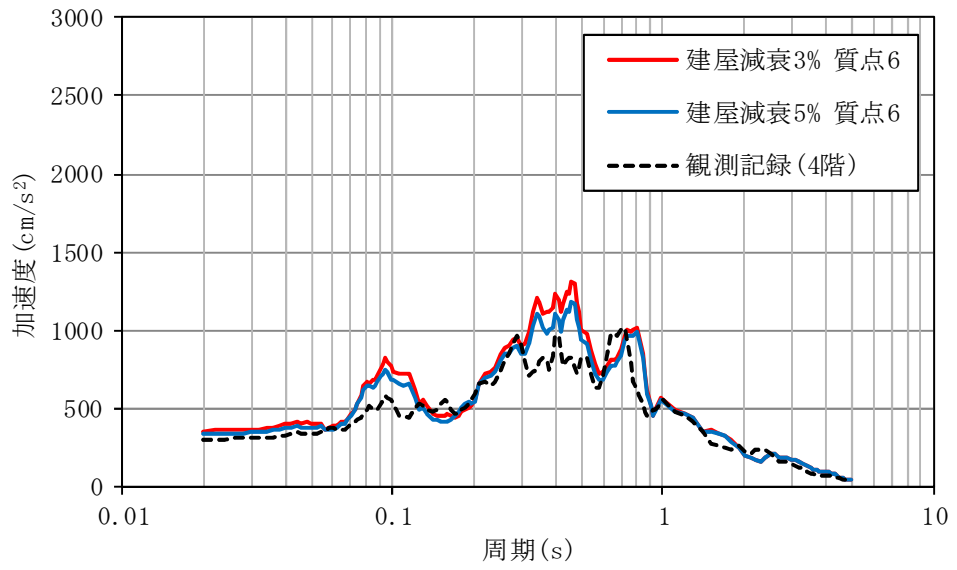
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5 %)



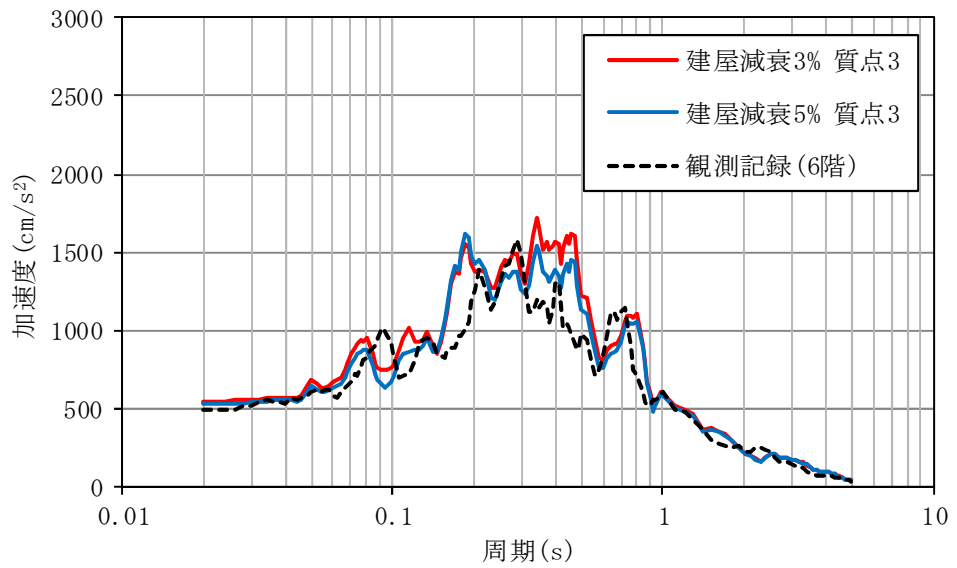
(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5 %)

図4-3 (1/2) 加速度応答スペクトルの比較 (NS方向) : 東北地方太平洋沖地震



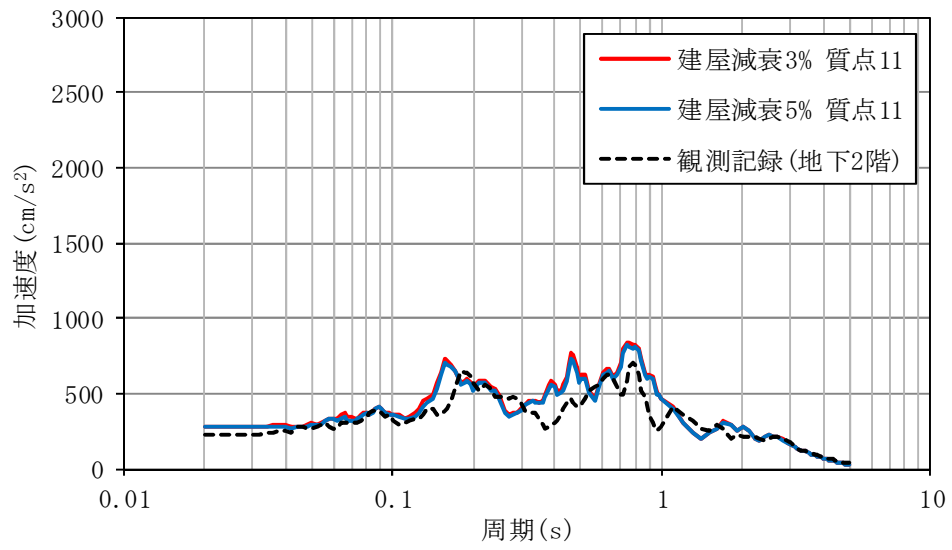


(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)

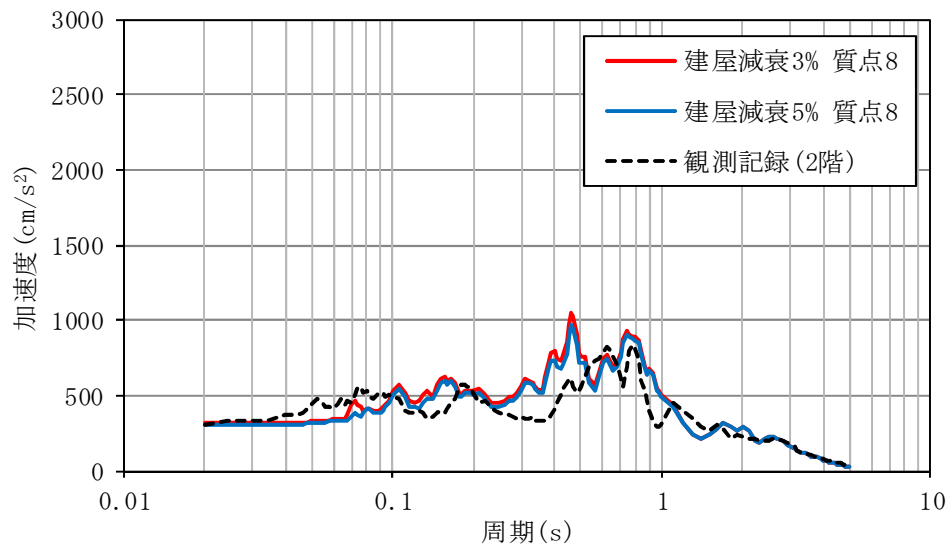


(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

図 4-3 (2/2) 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

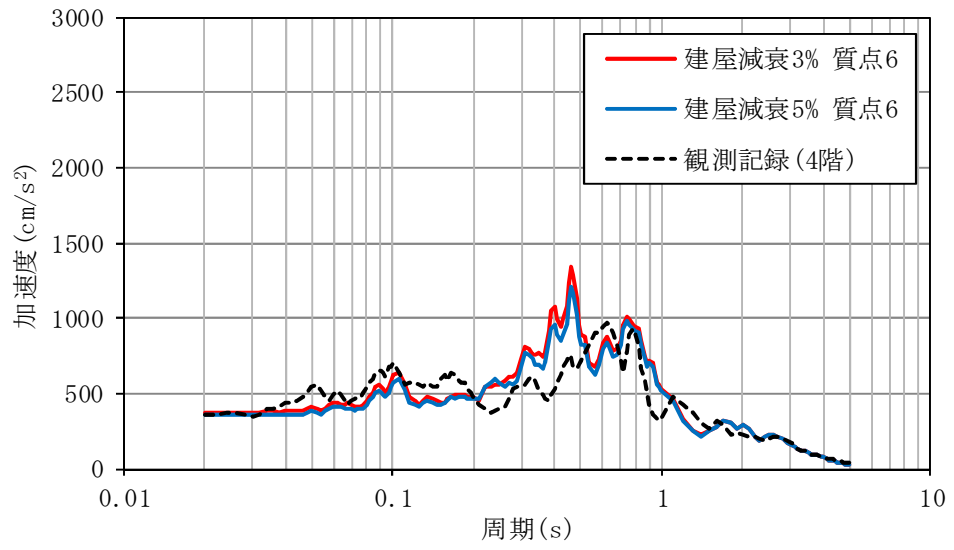


(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)

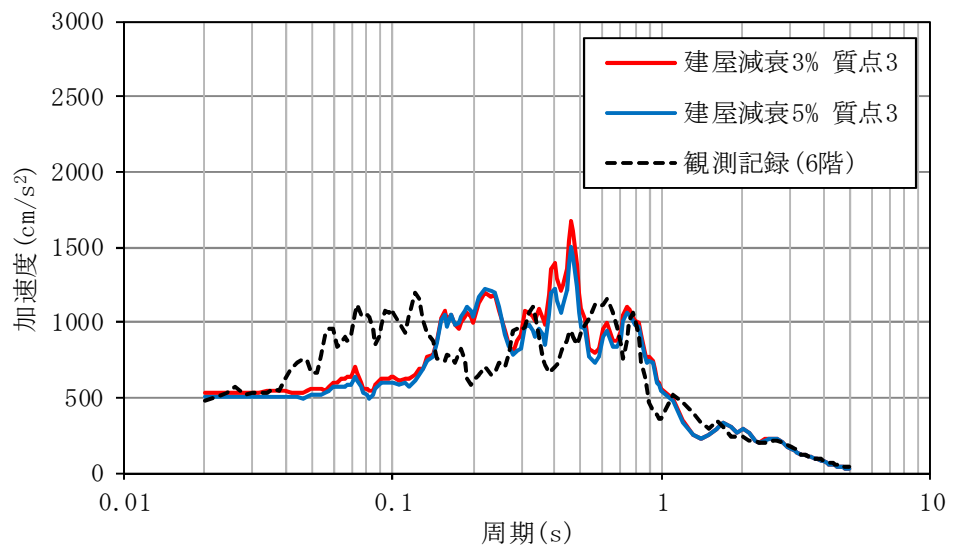


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)

図 4-4 (1/2) 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5 %)



(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5 %)

図 4-4 (2/2) 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

## 5. 建屋の最大応答せん断ひずみ

### 5.1 基準地震動 $S_s$ 応答レベル

東海第二発電所原子炉建屋の基準地震動 $S_s$ による耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 1 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、基準地震動 $S_s$ の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点付近から第 2 折点を若干越える程度となっている。

### 5.2 弾性設計用地震動 $S_d$ 応答レベル

東海第二発電所原子炉建屋の弾性設計用地震動 $S_d$ による耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 1 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、弾性設計用地震動 $S_d$ の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点以下となっている。

## 6. 地震応答解析モデルにおける減衰定数の設定についての考察

2章～5章で述べた内容について整理を行い,東海第二発電所の質点系モデルによる地震応答解析において,建物・構築物のRC造部の減衰定数に5%を用いることの妥当性を検討する。

考察のフローを図6-1に示す。

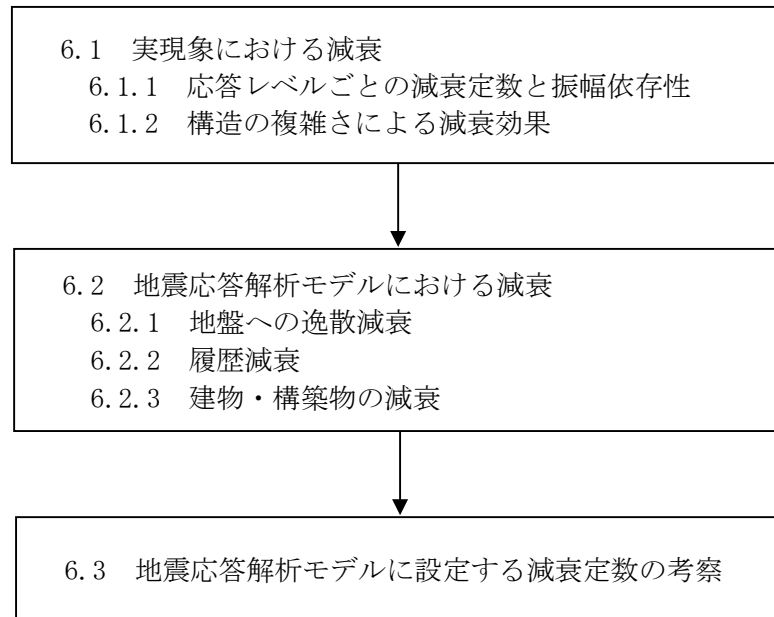


図6-1 RC造部の減衰定数に5%を用いることの妥当性についての考察のフロー

## 6.1 実現象における減衰

### 6.1.1 応答レベルごとの減衰定数と振幅依存性

3.1 節～3.3 節に示した既往の実験結果・観測結果を表 6-1 に整理する。

「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」の結果に着目すると、RC 造部の減衰定数は応答レベルが第 1 折点付近までで 1 %～5 %程度、それを越えた付近で 6 %～7 %である。また、原子力発電所における観測記録による減衰定数は応答レベルが弾性域で 1 %～10 %程度である。

また、「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」結果より、弾性域において応答レベルと減衰の間に振幅依存性がみられ、また、3.3.2 節及び 3.3.3 節の実機の地震観測記録を用いた検討結果においても基礎版上最大加速度と減衰の間に振幅依存性がみられる。

表 6-1 既往の実験結果・観測結果の整理

応答レベル		線形 / 非線形				備考
		弾性域	第 1 折点 付近	第 2 折点 付近	許容限界	
RC 耐震壁実験		1 %～4 % 程度	5 %程度	6 %～7 % 程度	6 %～7 % 程度	履歴減衰を含む
		2 %～4 %程 度	4 %程度	4 %～5 % 程度	4 %～5 % 程度	履歴減衰を あまり含まない
実構造物の 振動試験	BWR	5 %～54 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 を含む
	PWR	2 %～7 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 を含む
実機の 地震観測記録	BWR	1 %～8 %程度		—	—	履歴減衰等を含む
	PWR	1 %～10 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 をあまり含まない

### 6.1.2 構造の複雑さによる減衰効果

「3.1 RC耐震壁の多方向同時入力振動台試験」結果のうち、履歴減衰を含むRC耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC部の減衰定数は弾性域で1%～4%程度、それを越えた付近で5%～7%程度である。一方で、原子力発電所の振動試験及び地震観測記録に基づく減衰定数は、弾性域の非常に小さい応答レベルでも1%～10%程度の減衰が得られている。これは、RC耐震壁実験が、ボックス型RC耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁との接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。

また、3.3.2節においても、PWR型の原子力発電所の構造壁や構造床の少ない単純な構造物である外部遮蔽建屋やPCCVは、複雑な構造である内部コンクリート等に比べて減衰定数が小さい傾向がある。このことから、構造の複雑さによる減衰効果が存在すると考えられる。

## 6.2 地震応答解析モデルにおける減衰

「1.2 検討方針」に示したとおり、一般に建物・構築物の減衰作用には、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、復元力特性による履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられるが、「J E A G 4 6 0 1 - 1987」及び「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に基づく建屋の地震応答解析モデルである質点系モデルでは、これらの減衰作用を整理し、材料減衰、履歴減衰及び地盤への逸散減衰の組合せとして設定している。ここで、材料減衰は減衰定数として設定している。

### 6.2.1 地盤への逸散減衰

「4.1 地盤への逸散減衰の検討」に示した東海第二発電所原子炉建屋のひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果より、各次固有周期におけるモード減衰定数が、その主たるモードを成す建屋に設定した減衰定数に対して非常に大きく、地盤部分のひずみエネルギーの比率が大きくなっていることから、東海第二発電所原子炉建屋においては、地盤への逸散減衰の影響が建物・構築物の減衰よりも非常に大きい。

### 6.2.2 履歴減衰

「2.5 復元力特性（履歴減衰）の設定」に示したとおり、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰の設定による。この設定では、 $\tau$ - $\gamma$ 関係の履歴特性の安定ループにおいて履歴吸収エネルギーによる減衰効果を期待していない。

一方で、3.1 節に示した RC 耐震壁試験において、履歴減衰を含む場合の等価粘性減衰定数は、履歴減衰をあまり含まない場合よりも、第1折点付近で1%程度、さらに第2折点以降で2%程度大きくなるという結果が得られている。

以上より、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰は、保守的に設定されているといえる。

### 6.2.3 建物・構築物の減衰

「1.2 検討方針」に示したとおり、一般に建物・構築物の減衰作用には、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられるが、J E A G 4 6 0 1 - 1987 及び J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく地震応答解析では、これらの減衰を整理し、建物・構築物の減衰、地盤への逸散減衰及び復元力特性（履歴減衰）の組合せとして減衰特性をモデル化している。このことから、J E A G 4 6 0 1 - 1987 に記載されている地震応答解析モデルに設定する建物・構築物の減衰定数は材料減衰として与えられていると考えられる。また、「6.2.2 履歴減衰」に示したとおり、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰が保守的に設定されていることを踏まえると、J E A G のモデル化では、材料減衰に応答レベルに応じて実際の履歴減衰の一部も含まれているものと考えられる。



### 6.3 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察

地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察にあたっての整理を表6-2に示す。

表6-2 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察にあたっての整理

	応答レベル	線形		非線形	
		第1折点 未満	第1折点 付近	第2折点 付近	許容 限界 付近
実 現 象	東海第二発電所 における地震動	弾性設計用 地震動 $S_d$	基準地震動 $S_s$		
	RC耐震実験 ※履歴減衰を含む	1%~4%程度 ↓ 構造の複雑さによる 減衰の増加 2%程度以上	5%程度	6%~7% 程度	6%~7% 程度
	東海第二発電所	5%程度以上 ↑	7%程度 以上	8%程度 以上	8% 程度 以上
解 析	質点系モデル (東海第二発電所)	5%程度 以上 3%, 5%で東北地方 太平洋沖地震の観測記録 をシミュレーション			

東海第二発電所については、東北地方太平洋沖地震の観測記録の建屋減衰を3%、5%としたシミュレーションを行っており、その結果は3%、5%ともに観測記録に対して保守的な値となった。

ここで、東海第二発電所における東北地方太平洋沖地震の観測記録は弾性設計用地震動 $S_d$ 相当の地震レベルである。RC耐震壁試験結果よりも2%程度大きな減衰定数となっているが、RC耐震壁試験は耐震壁そのものを用いた単純な構造体に対する減衰を評価しているのに対し、建物・構築物は多数の耐震壁から構成された3次元的な広がりをもつ複雑な構造体であるためと考えられる。鉛直方向についても、複数の壁と床により構成される複雑な構造をもつ部位については、構造の複雑さによる減衰効果があると考えられる。東海第二発電所の原子炉建屋は平面図・断面図（別紙2）から判断し、多数の構造床や構造壁で構成されており、複雑な構造体に分類できる。

以上より実現象においては、RC耐震壁試験から得られた5%程度の減衰定数に対し、構造の複雑さによる減衰の増加により2%程度以上減衰は増加し、第1折点付近では7%程度以上、第2折点付近では8%程度以上の減衰定数となることが推定される。ここで、JEAG4601-1987及びJEAG4601-1991追補版に基づく応答解析モデルは、「2. 地震応答解析モデルに用いた減衰特性」及び「4.1 地盤への逸散減衰の検討」に示したとおり、減衰を建物・構築物の減衰、履歴減衰及び地盤への逸散減衰の3つの組合せにより減衰特性をモデル化しているが、履歴減衰は保守的に設定されている。また、東海第二発電所においては、地盤への逸散減衰が非常に大きく、3つの組合せの減衰特性のうち、応答に与える支配的な要因となっている。

以上より、JEAG4601-1987及びJEAG4601-1991追補版に基づく地震応答解析モデルでは、実現象における建物・構築物の減衰として第一折点付近では7%程度以上、第一折点未満でも5%程度以上であることから、設計に用いる建物・構築物の減衰として5%を設定することは妥当であると考えられる。

入力地震動並びに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数の整理を表6-3に示す。

表 6-3 入力地震動並びに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数の整理

建物・構築物		原子炉建屋	使用済燃料 乾式貯蔵建屋	緊急時対策所 建屋	格納容器圧力 逃がし装置 格納槽
構造及び形状		複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体
入力地震動	S <sub>s</sub>	水平	5 %	5 %	5 %
		鉛直	5 %	5 %	5 %
	S <sub>d</sub>	水平	5 %	5 %	—
		鉛直	5 %	5 %	—

#### 6.4 まとめ

6.1 節～6.3 節を踏まえ、東海第二発電所の建物・構築物の基準地震動  $S_s$  レベル及び弾性設計用地震動  $S_d$  レベルの地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数は、水平及び鉛直とも 5 %程度以上と考えられる。

7. 機器・配管系評価への影響

追而

【参考文献】

- 3.1) 松本ほか:論文 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験(コンクリート工学年次論文集 Vol. 25, No. 2, 2003)
- 3.2) 「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書(日本建築学会構造委員会, 2001)
- 3.3) 東北電力(株) 女川2号機及び3号機原子炉建屋シミュレーション解析について(コメント回答)(建築物・構造 6-3-2), 2012)
- 3.4) 原子力発電所の地震動観測とその解析(日本建築学会大会学術講演梗概集(1981))
- 3.5) 泊発電所の地震動とシミュレーション解析(日本建築学会大会学術講演梗概集(1996))
- 3.6) 鹿児島県北西部地震による川内原子力発電所の地震動観測とシミュレーション解析(日本建築学会大会学術講演梗概集(1998))
- 3.7) 川内原子力発電所1号機 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(九州電力(株), 2015)
- 3.8) 高浜原子力発電所3号機 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(関西電力(株), 2015)
- 3.9) 伊方原子力発電所3号機 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(四国電力(株), 2016)
- 3.10) 玄海原子力発電所3号機 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(九州電力(株), 2017)
- 3.11) 大飯原子力発電所3号機 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(関西電力(株), 2017)

別紙 1 原子炉建屋の基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$   
に対する最大応答せん断ひずみ

## 目 次

1. 地震応答解析モデルの概要…………… 別紙 1-1
2. 基準地震動  $S_s$  に対する最大応答せん断ひずみ…………… 別紙 1-2
3. 弾性設計用地震動  $S_d$  に対する最大応答せん断ひずみ…………… 別紙 1-7



1. 地震応答解析モデルの概要

東海第二発電所原子炉建屋の地震応答解析モデル図を図 1-1 に示す。

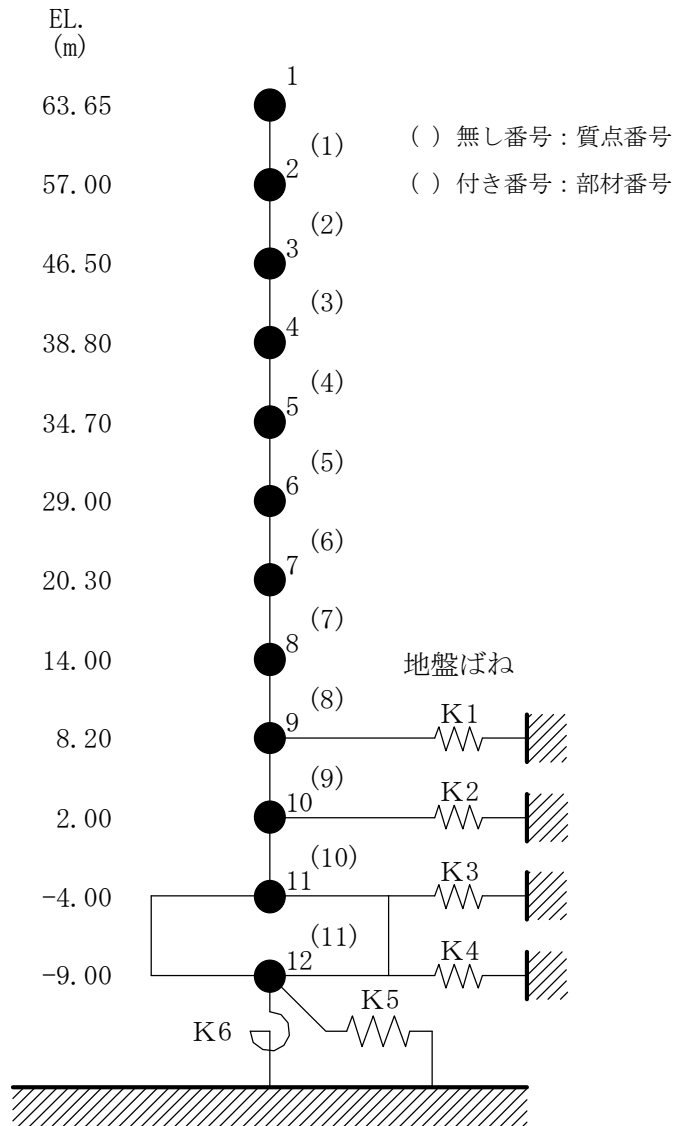
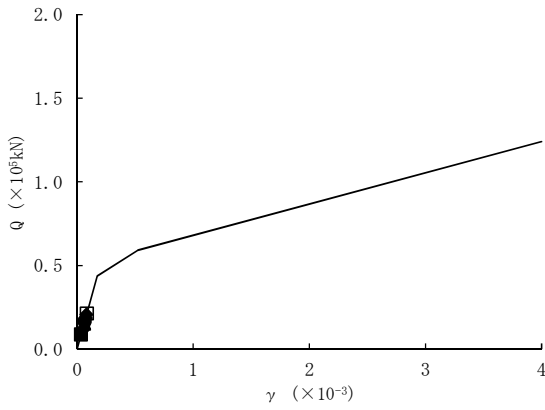


図 1-1 地震応答解析モデル (水平方向)

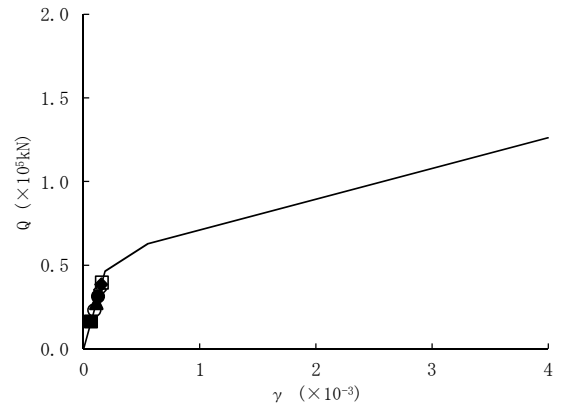
2. 基準地震動  $S_s$  に対する最大応答せん断ひずみ

東海第二発電所原子炉建屋の基準地震動  $S_s$  に対する最大応答せん断ひずみを図 2-1 及び図 2-2 に示す。

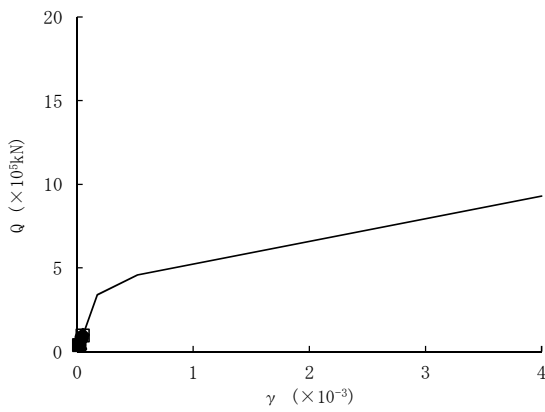
なお、最大応答せん断ひずみは、資料 V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の「3.5.2 材料物性のばらつき」に示している地盤のせん断波速度平均値とした「基本ケース」について示す。



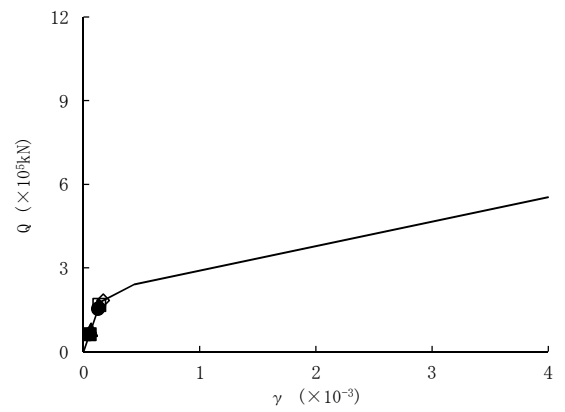
部材番号 (1)



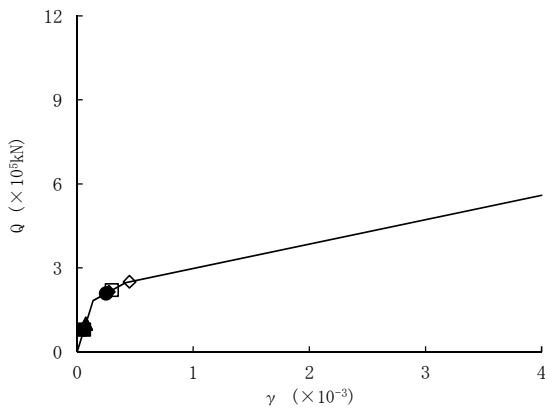
部材番号 (2)



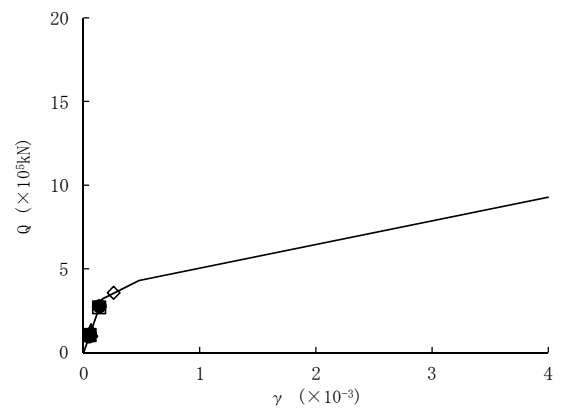
部材番号 (3)



部材番号 (4)

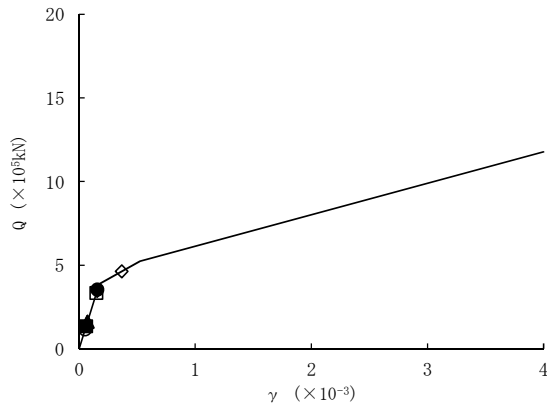


部材番号 (5)

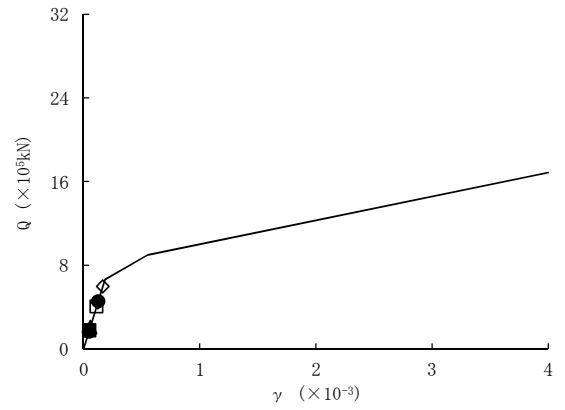


部材番号 (6)

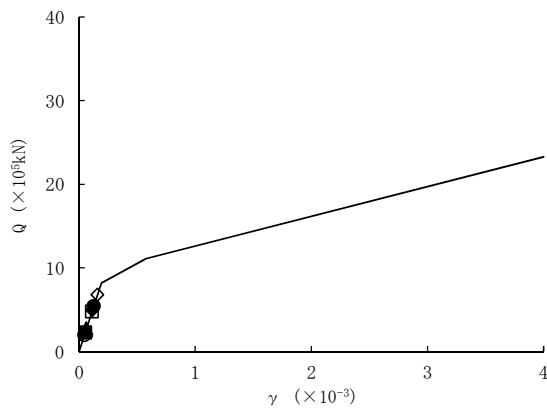
図 2-1 (1/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>s</sub>基本ケース, NS 方向)



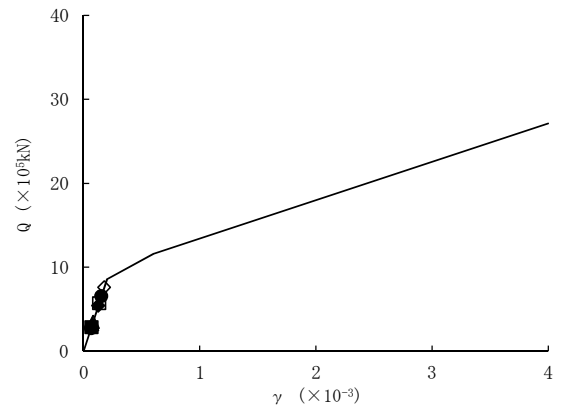
部材番号 (7)



部材番号 (8)

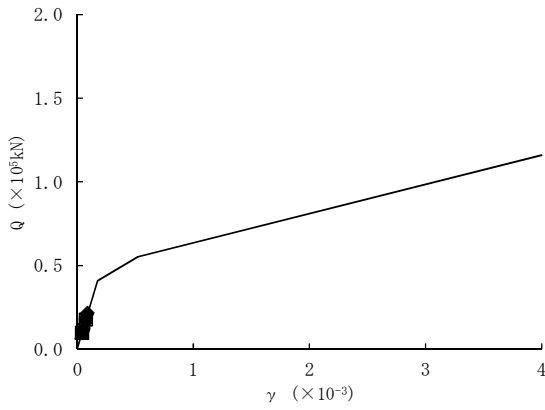


部材番号 (9)

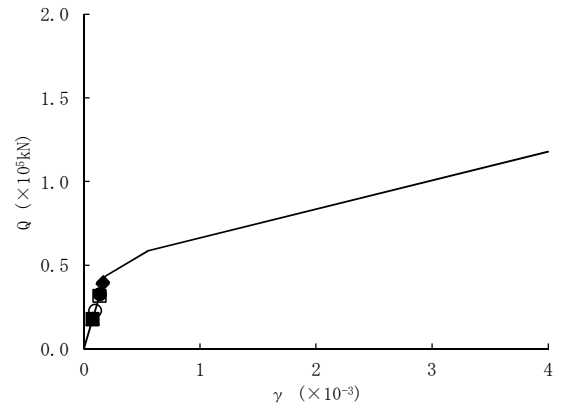


部材番号 (10)

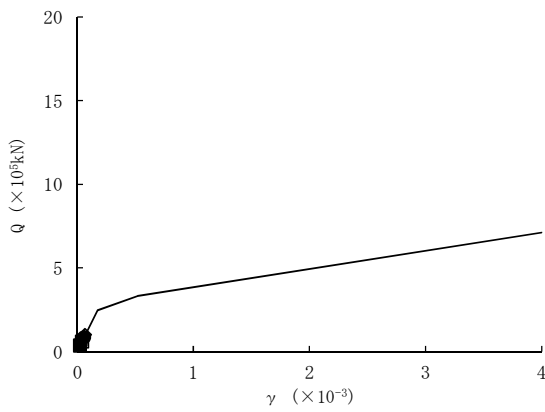
図 2-1 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>s</sub>基本ケース, NS 方向)



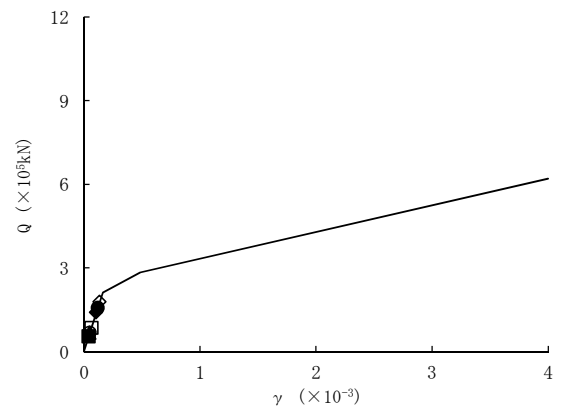
部材番号 (1)



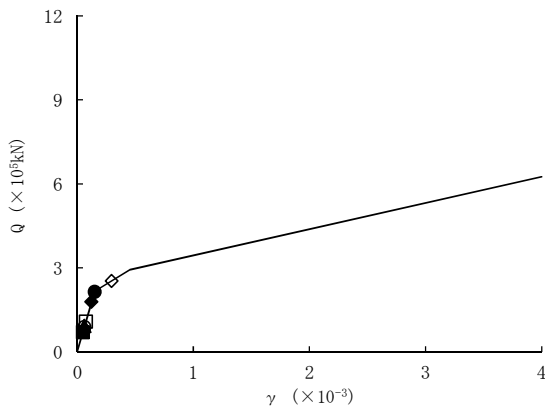
部材番号 (2)



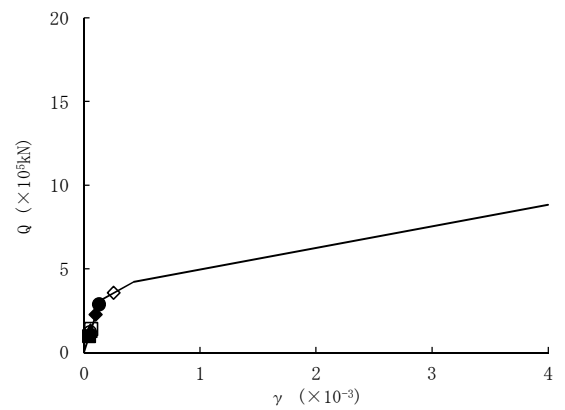
部材番号 (3)



部材番号 (4)

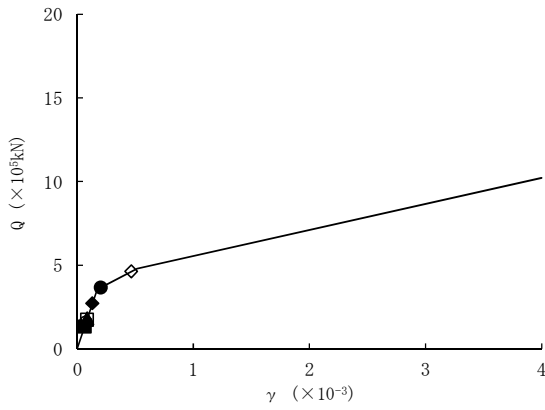


部材番号 (5)

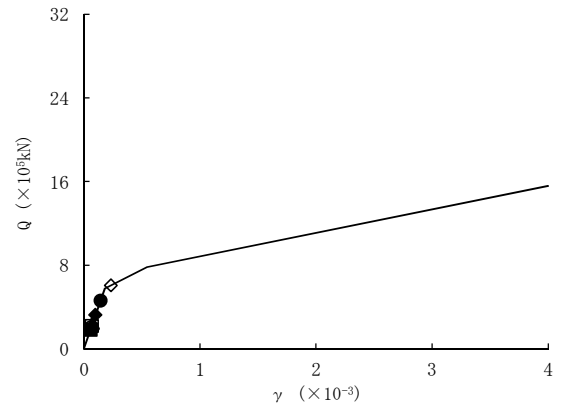


部材番号 (6)

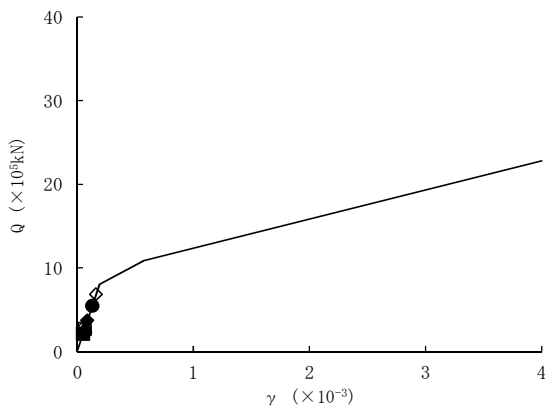
図 2-2 (1/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>s</sub>基本ケース, EW 方向)



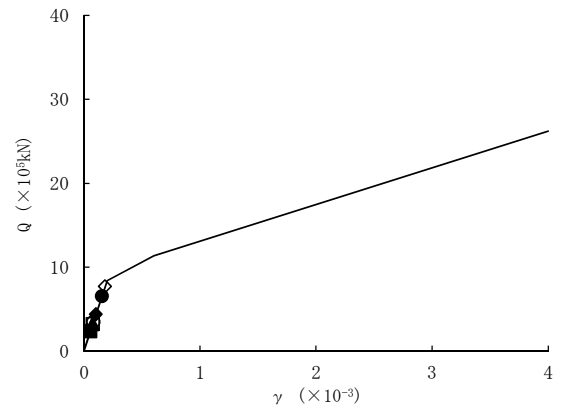
部材番号 (7)



部材番号 (8)



部材番号 (9)



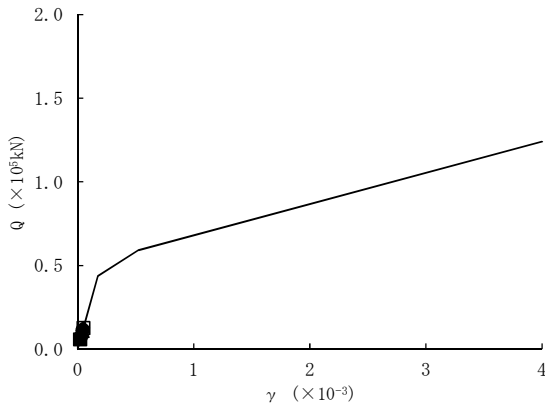
部材番号 (10)

図 2-2 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>s</sub>基本ケース, EW 方向)

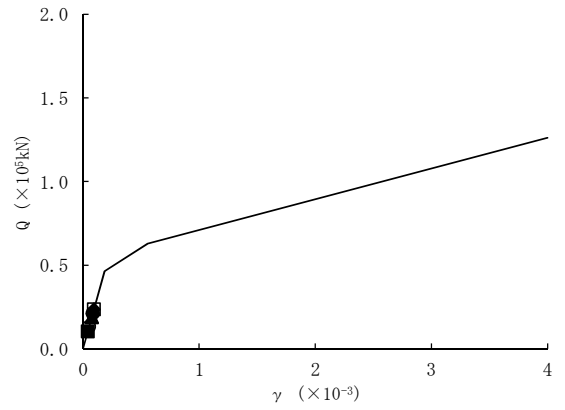
3. 弾性設計用地震動  $S_d$  に対する最大応答せん断ひずみ

東海第二発電所原子炉建屋の弾性設計用地震動  $S_d$  に対する最大応答せん断ひずみを図 3-1 及び図 3-2 に示す。

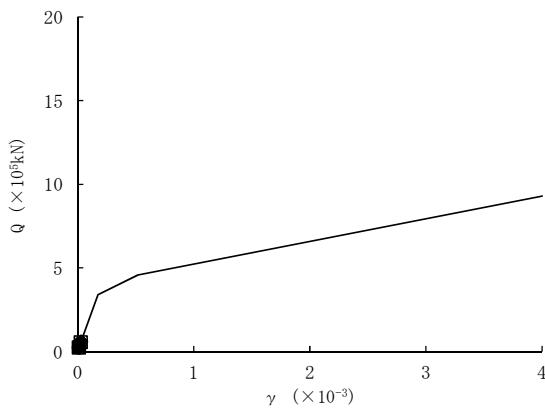
なお、最大応答せん断ひずみは、資料 V-2-2-1 「原子炉建屋の地震応答計算書」の「3.5.2 材料物性のばらつき」に示している地盤のせん断波速度平均値とした「基本ケース」について示す。



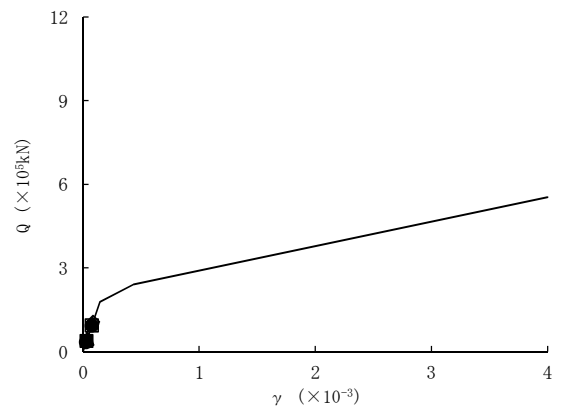
部材番号 (1)



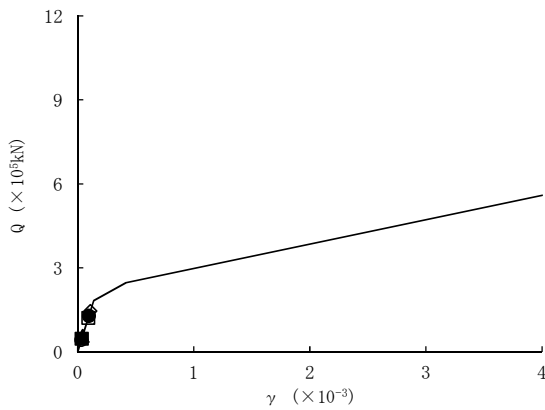
部材番号 (2)



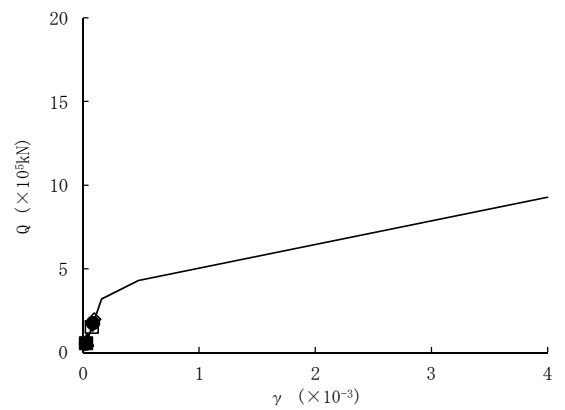
部材番号 (3)



部材番号 (4)



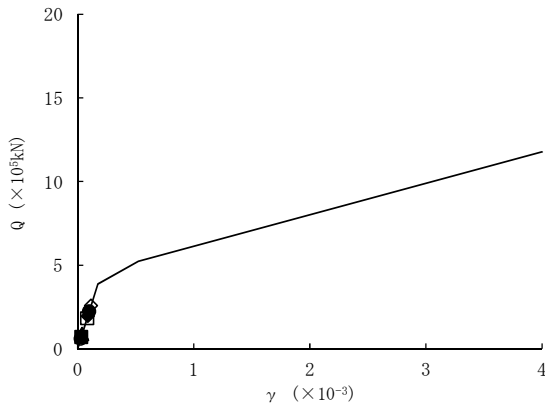
部材番号 (5)



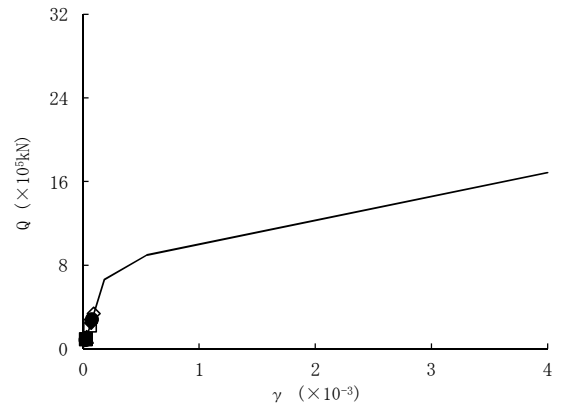
部材番号 (6)

図3-1 (1/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>d</sub>基本ケース, NS方向)

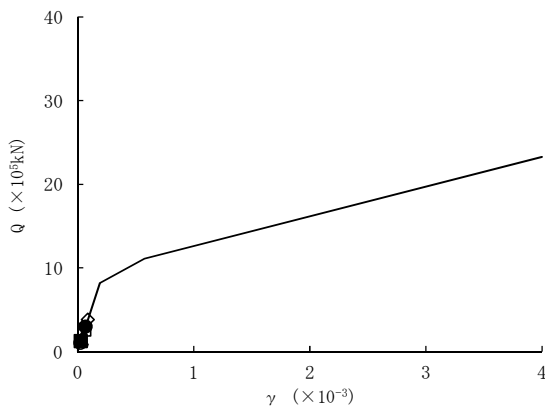




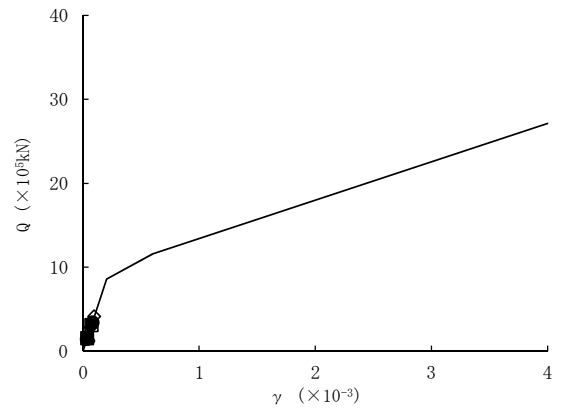
部材番号 (7)



部材番号 (8)

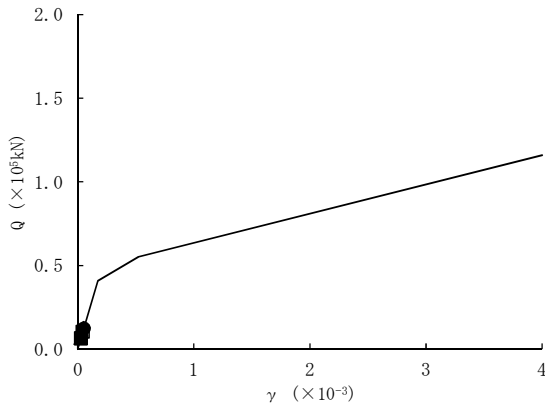


部材番号 (9)

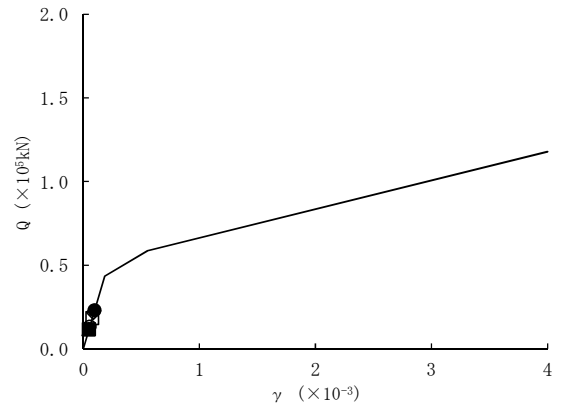


部材番号 (10)

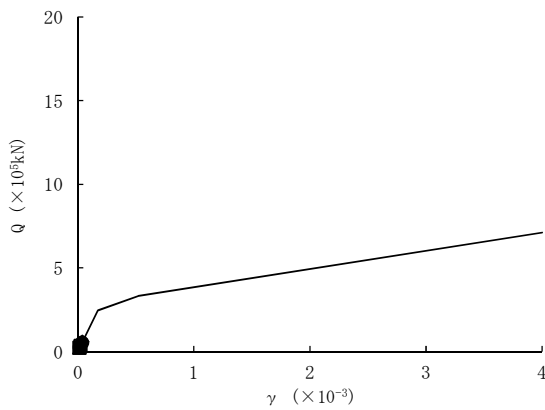
図 3-1 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>d</sub>基本ケース, NS 方向)



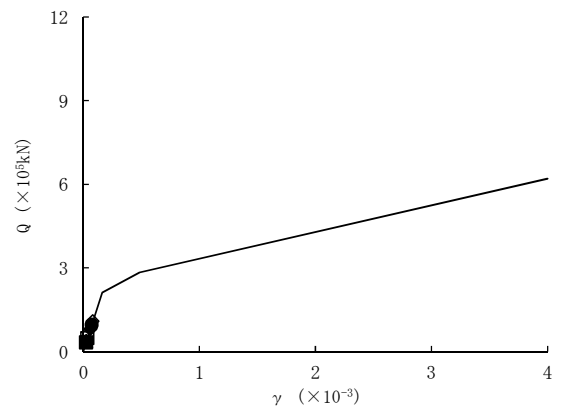
部材番号 (1)



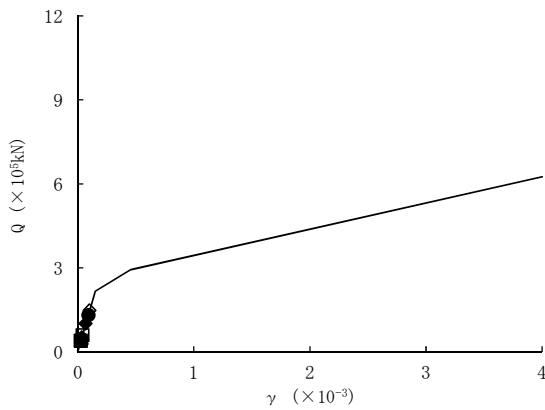
部材番号 (2)



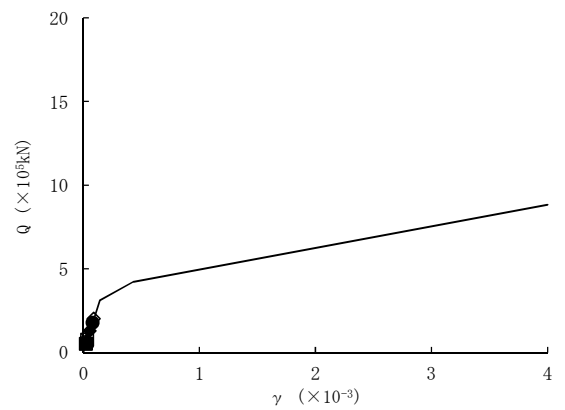
部材番号 (3)



部材番号 (4)

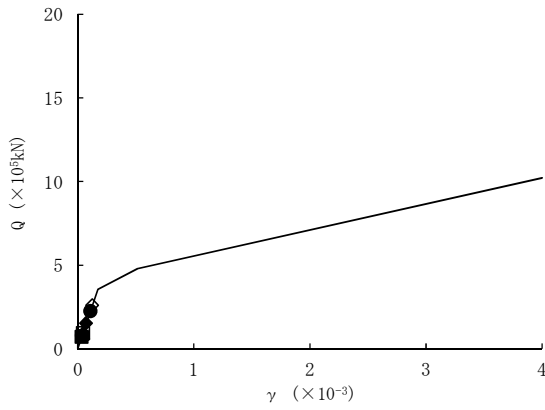


部材番号 (5)

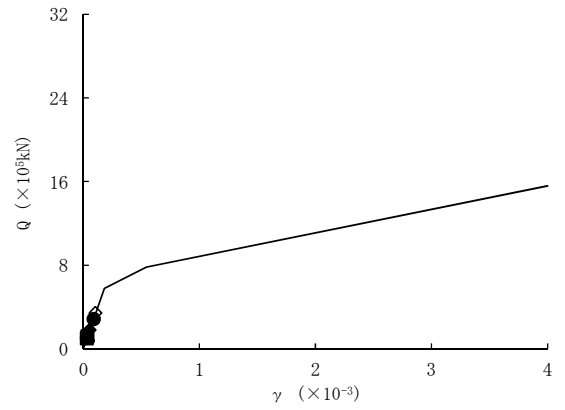


部材番号 (6)

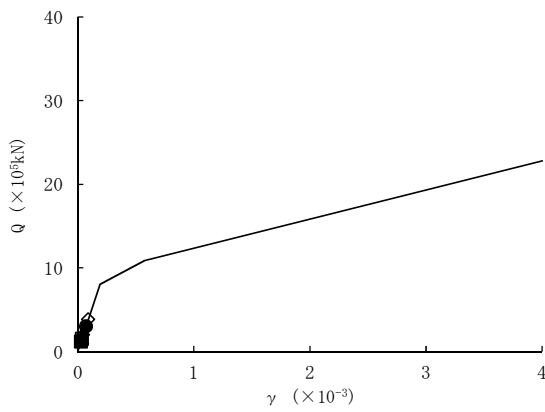
図 3-2 (1/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>d</sub>基本ケース, EW 方向)



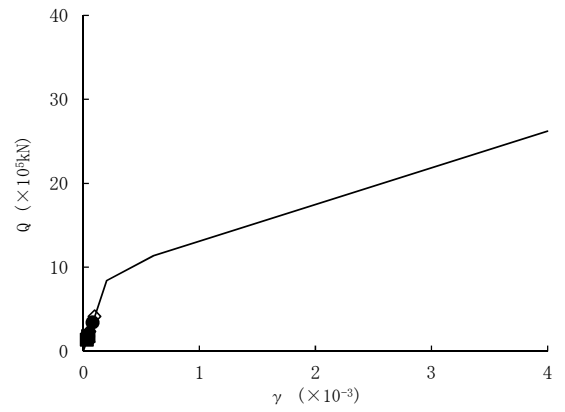
部材番号 (7)



部材番号 (8)



部材番号 (9)



部材番号 (10)

図 3-2 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (S<sub>d</sub>基本ケース, EW 方向)

## 別紙 2 各建物・構築物の図面集

## 目 次

1. 原子炉建屋の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 2-1
2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 2-5
3. 緊急時対策所建屋の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 2-8
4. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 2-11

1. 原子炉建屋の概略図

東海第二発電所の原子炉建屋の概略平面図を図 1-1 に，概略断面図を図 1-2 に示す。

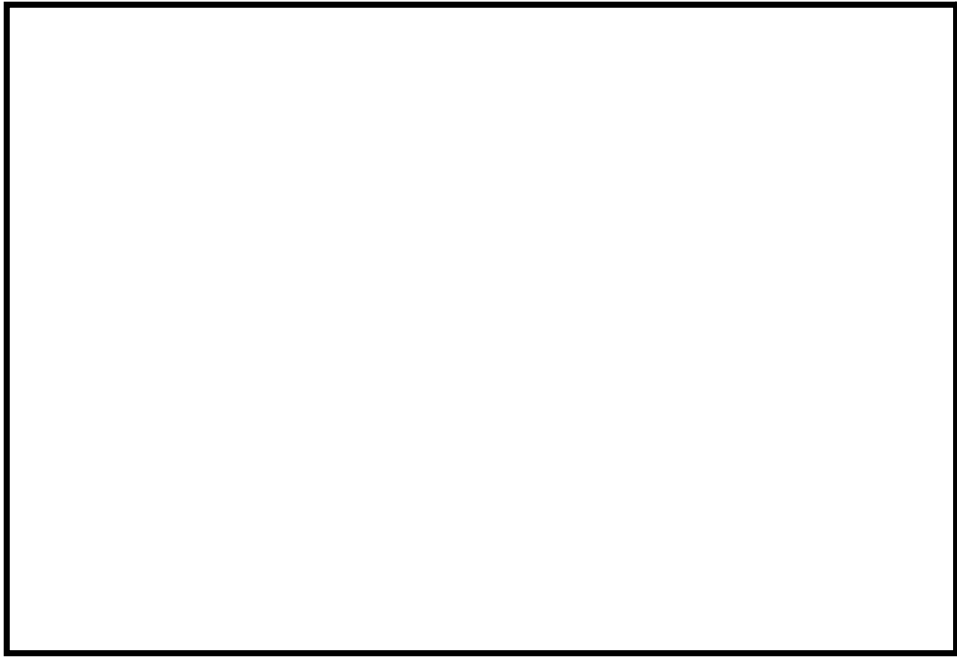


図 1-1 (1/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. 46.5 m)

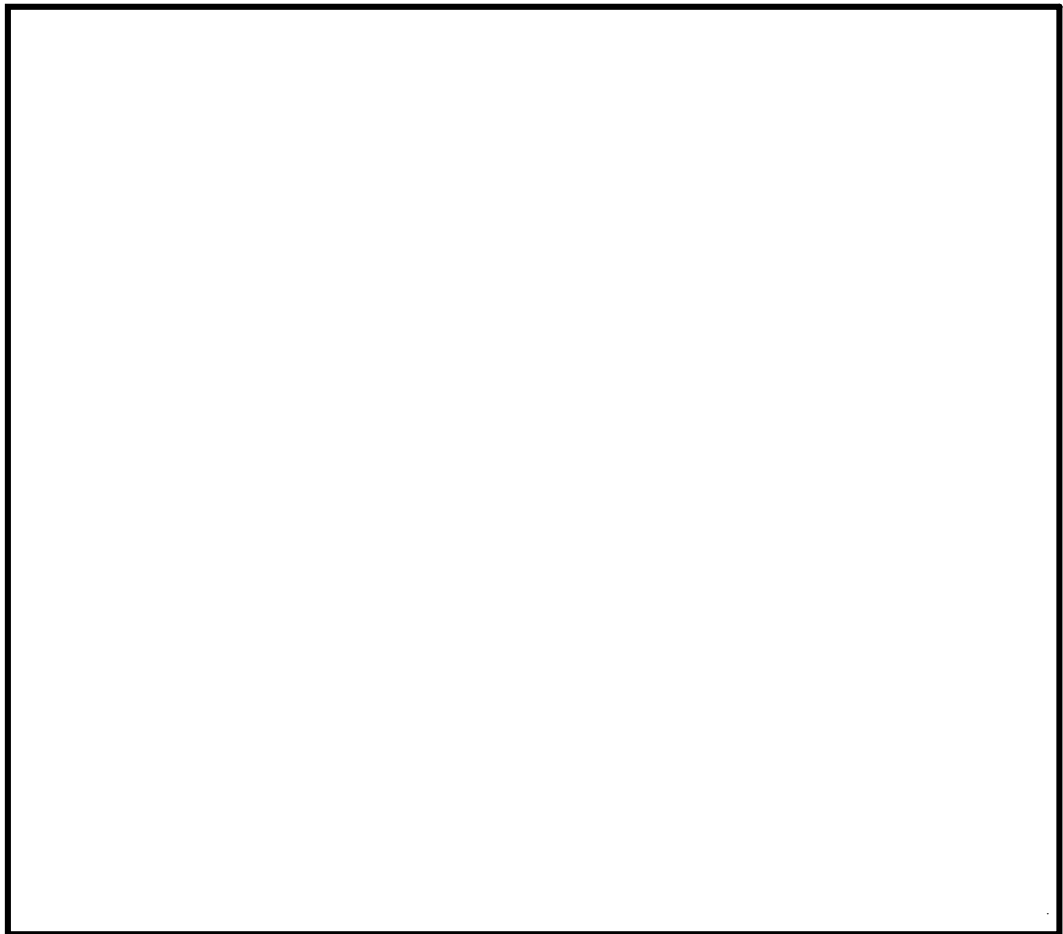


図 1-1 (2/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. -4.0 m)



図 1-2 (1/2) 原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)



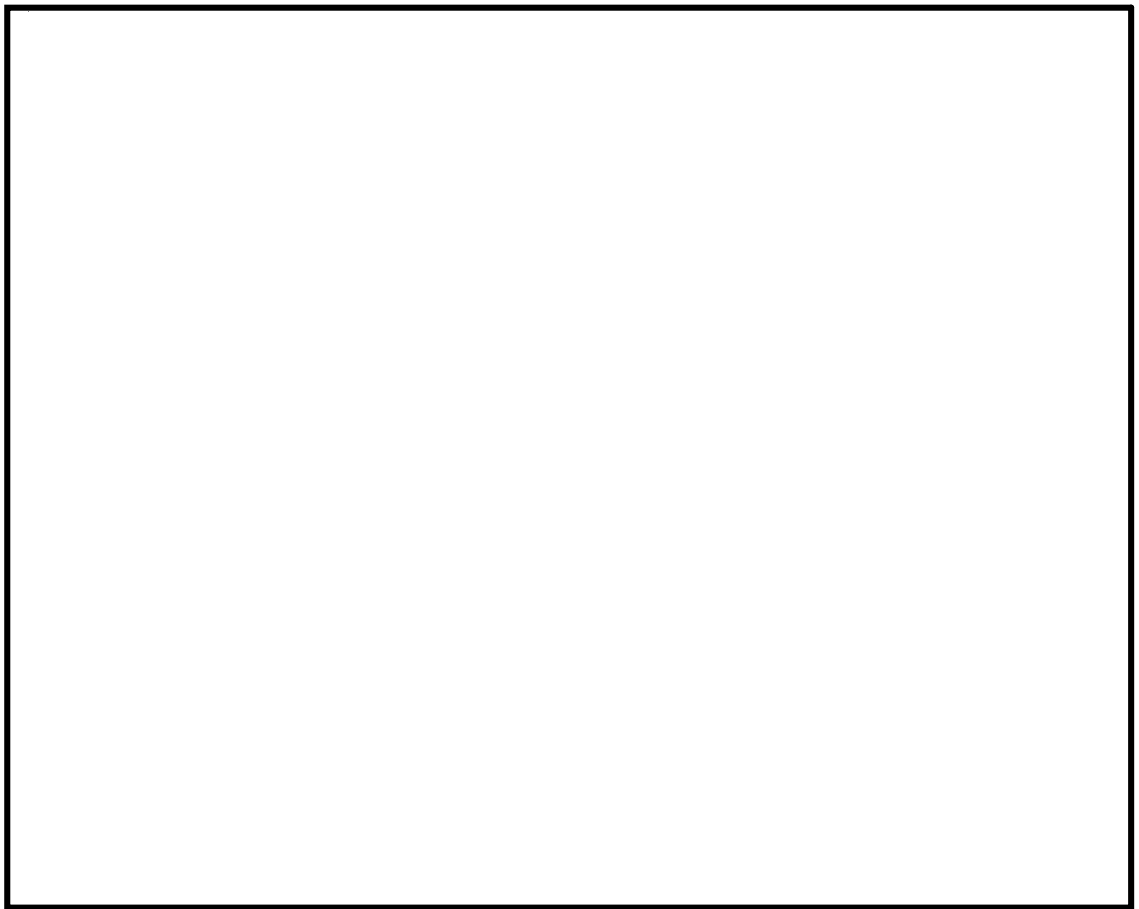


図 1-2 (2/2) 原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面)

2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略図

東海第二発電所の使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図を図 2-1 に，概略断面図を図 2-2 に示す。

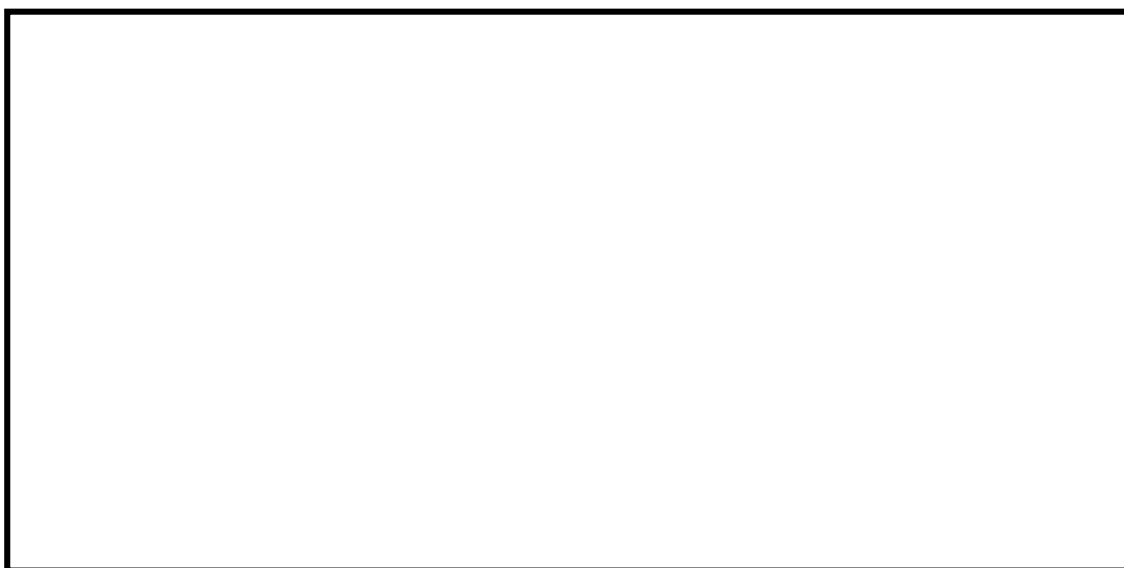


図 2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図 (EL. 8.3 m)

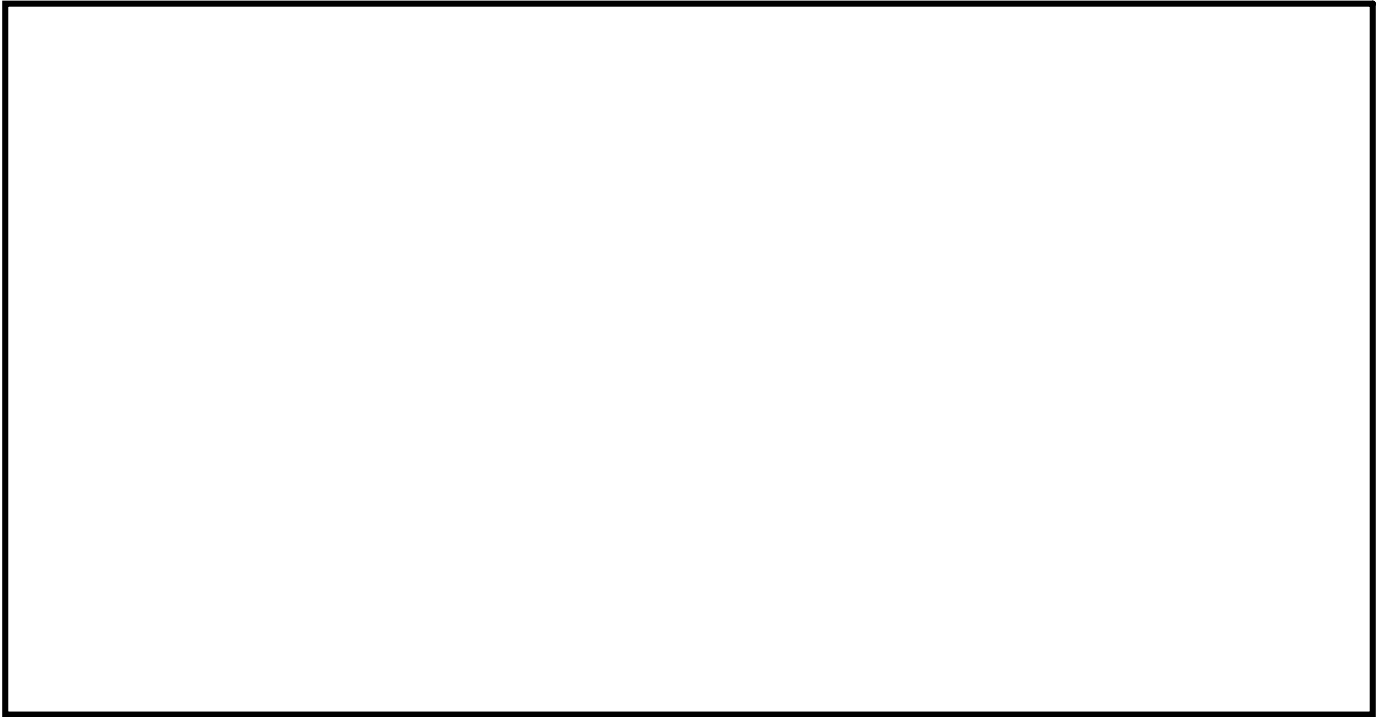


図 2-2 (1/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (A-A 断面)

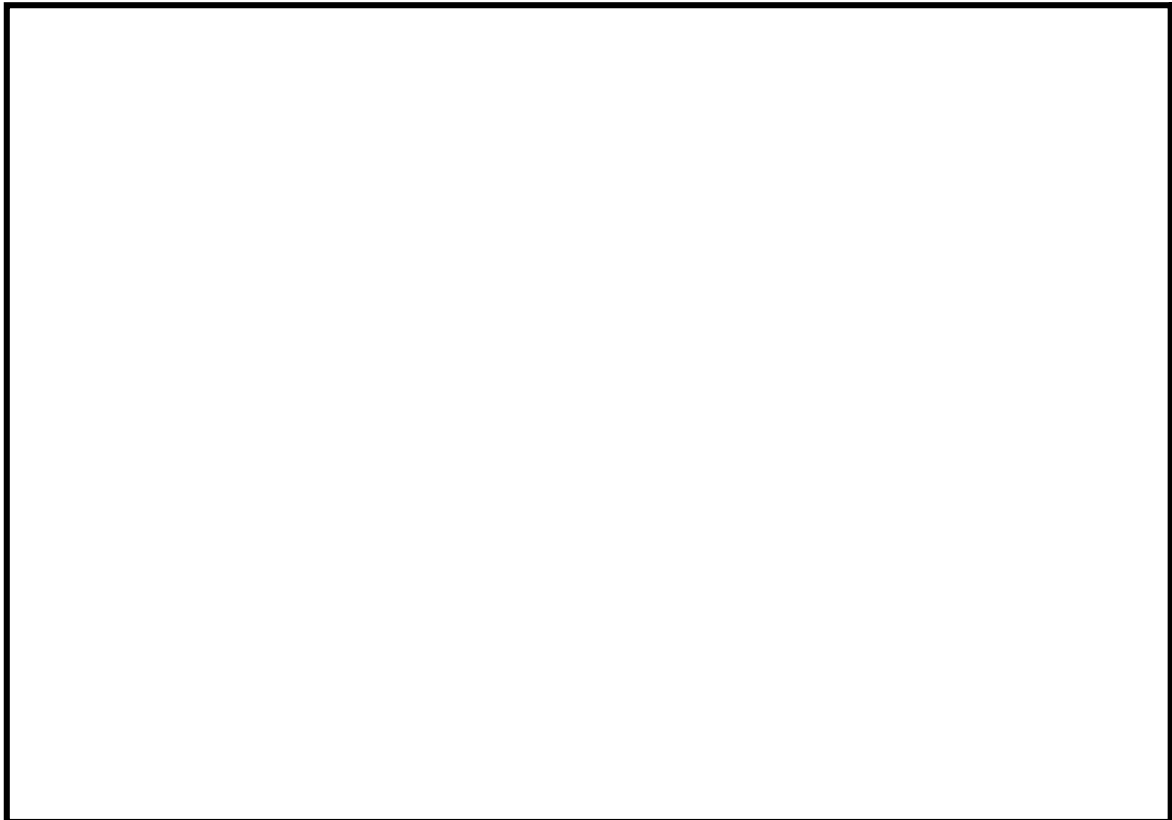


図 2-2 (2/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (B-B 断面)

3. 緊急時対策所建屋の概略図

東海第二発電所の緊急時対策所建屋の概略平面図を図 3-1 に，概略断面図を図 3-2 に示す。

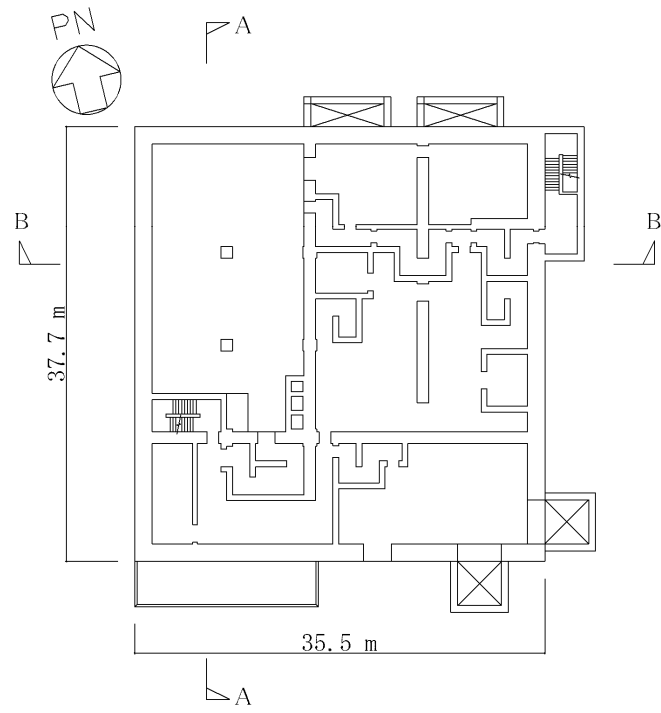


図 3-1 緊急時対策所建屋の概略平面図 (EL. 30.3 m)

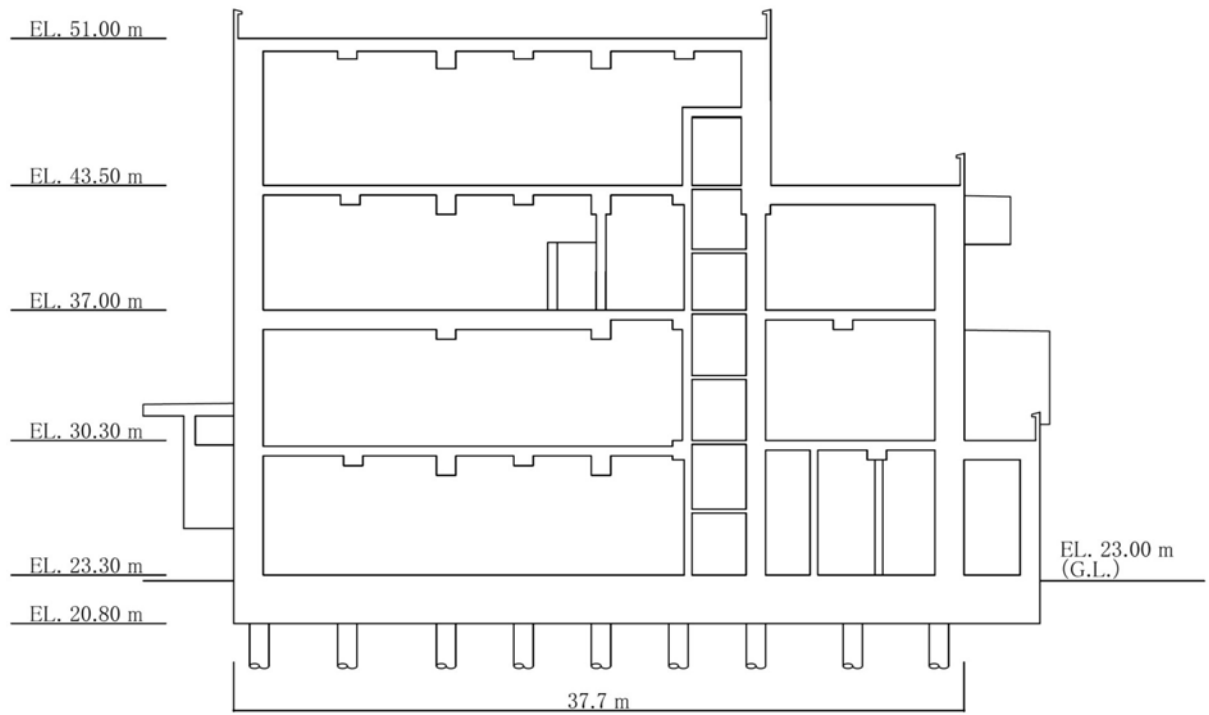


図 3-2 (1/2) 緊急時対策所建屋の概略断面図 (A-A 断面)

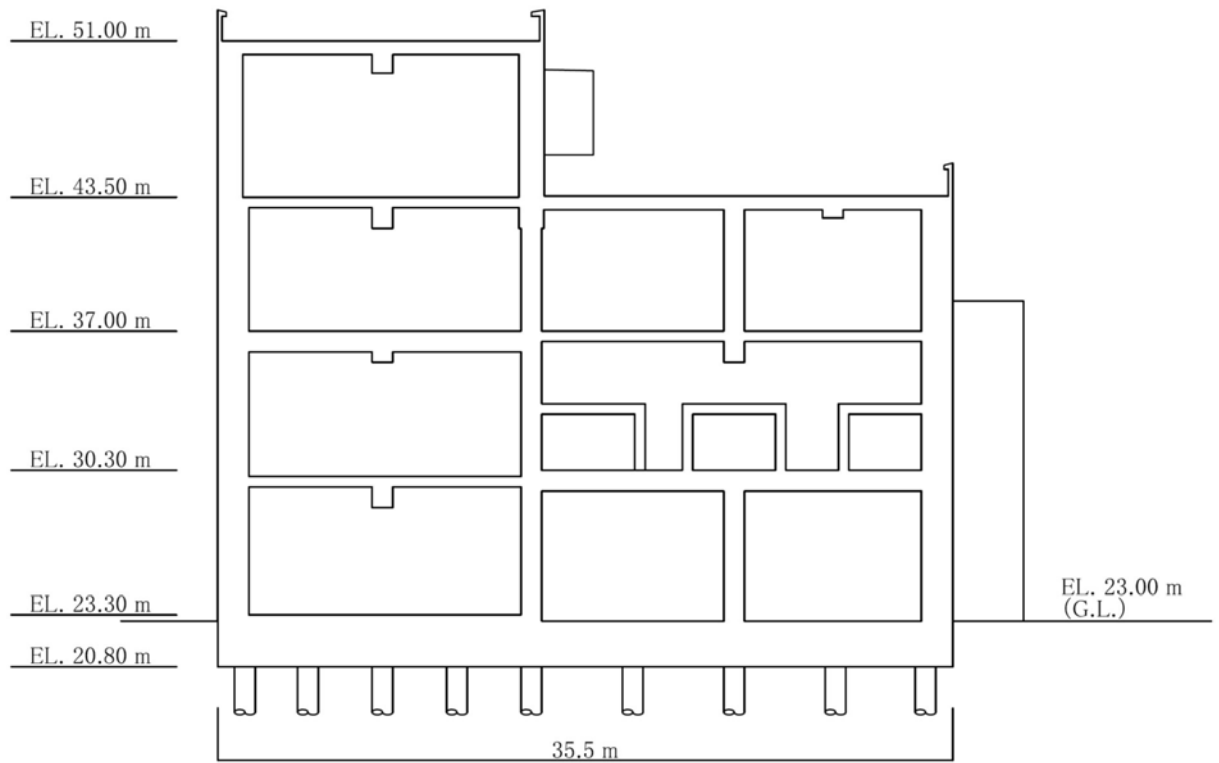


図 3-2 (2/2) 緊急時対策所建屋の概略断面図 (B-B 断面)

4. 格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略図

東海第二発電所の格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略平面図を図 4-1 に、概略断面図を図 4-2 に示す。



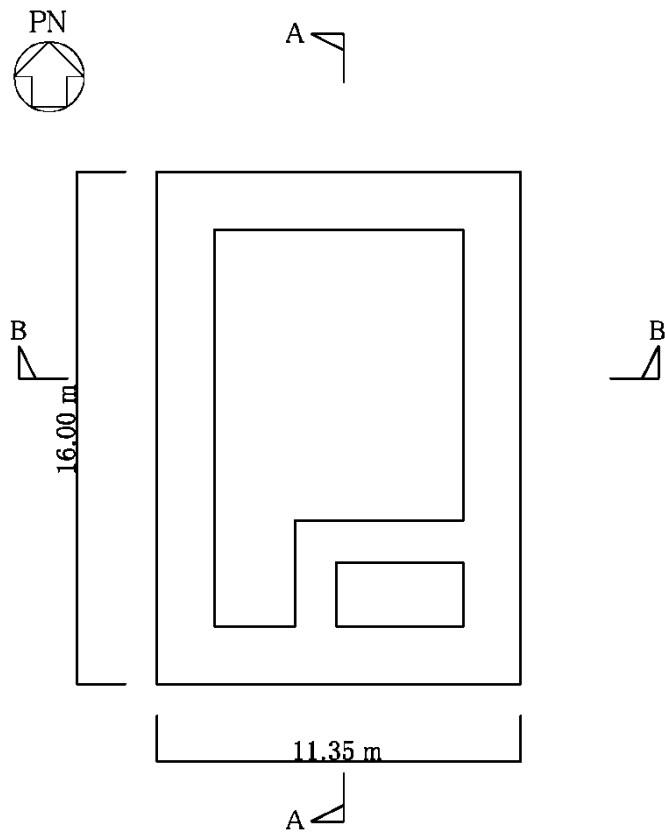


図 4-1 格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略平面図 (EL. -12.8 m)

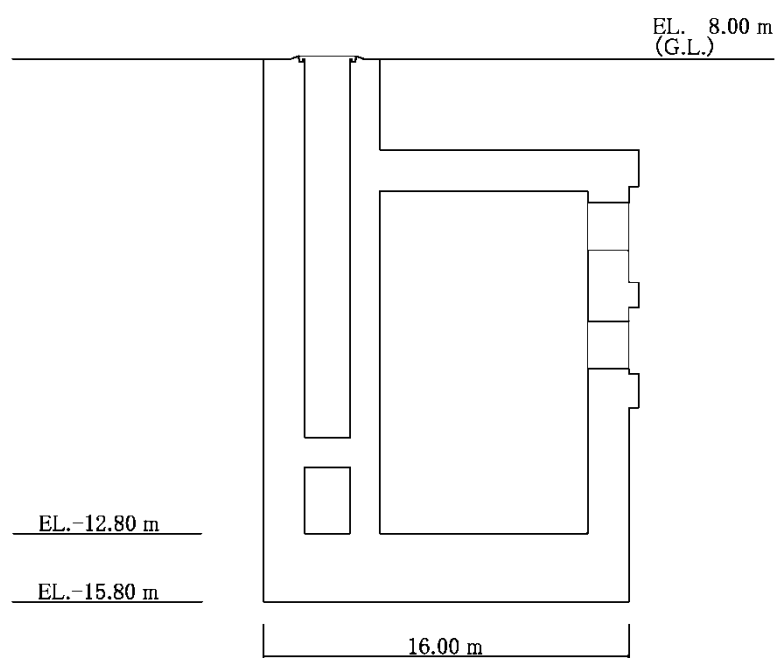


図 4-2 (1/2) 格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略断面図 (A-A 断面)

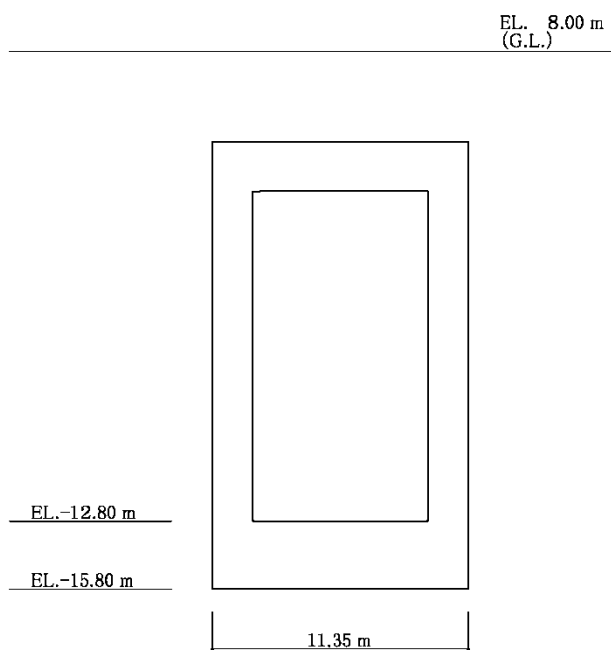


図 4-2 (2/2) 格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略断面図 (B-B 断面)