

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震建物 10 R0
提出年月日	令和 3 年 2 月 17 日

## 地震応答計算書に関する補足説明

地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート造部の  
減衰定数に関する検討

## 目 次

1. 概要	1
1.1 検討概要と適用範囲	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 減衰マトリクスの策定	8
2.5 復元力特性(履歴減衰)の設定	10
3. 減衰定数に関する既往の知見の整理	11
3.1 RC耐震壁の多方向同時入力振動台試験	11
3.2 実建造物の振動試験	13
3.3 実建造物の地震観測	15
4. 減衰定数の検討	41
5. 建屋の最大応答せん断ひずみ	42
5.1 弾性設計用地震動 Sd 応答レベル	42
5.2 基準地震動 Ss 応答レベル	42
5.3 基準地震動を 1.2 倍した地震力の応答レベル	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	49
別紙 1 各建物・構築物のひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定	
別紙 2 各建物・構築物の弾性設計用地震動 Sd, 基準地震動 Ss 及び基準地震動を 1.2 倍した地震力に対する最大応答せん断ひずみ	
別紙 3 各建物・構築物の図面集	

■: 商業機密の観点から公開できない箇所

## 1. 概要

### 1.1 検討概要と適用範囲

建物・構築物（建屋及び屋外機械基礎）（以下、「建物・構築物」という）の地震応答解析においては、鉄筋コンクリート造部（以下、「RC造部」という）に材料減衰として減衰定数を設定している。本資料は、建物・構築物の地震応答解析におけるRC造部の減衰定数の設定の妥当性について示すものである。

本資料の適用範囲は、再処理施設、廃棄物管理施設及びMOX燃料加工施設（以下、「再処理施設等」という）の建物・構築物のうち、添付書類「耐震性に関する説明書」のうち地震応答計算書、「波及的影響をおよぼすおそれのある下位クラス施設の耐震性についての計算書」及び「基準地震動を1.2倍した地震力に対する計算書」とする。

また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）における、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・再処理施設 添付書類「Ⅳ-2-1-1-1 a. 安全冷却水B冷却塔の地震応答計算書」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「Ⅲ-3-1-1-1 燃料加工建屋の地震応答計算書」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「Ⅲ-別添-3-1-1 燃料加工建屋の基準地震動を1.2倍した地震力に対する耐震性評価結果」

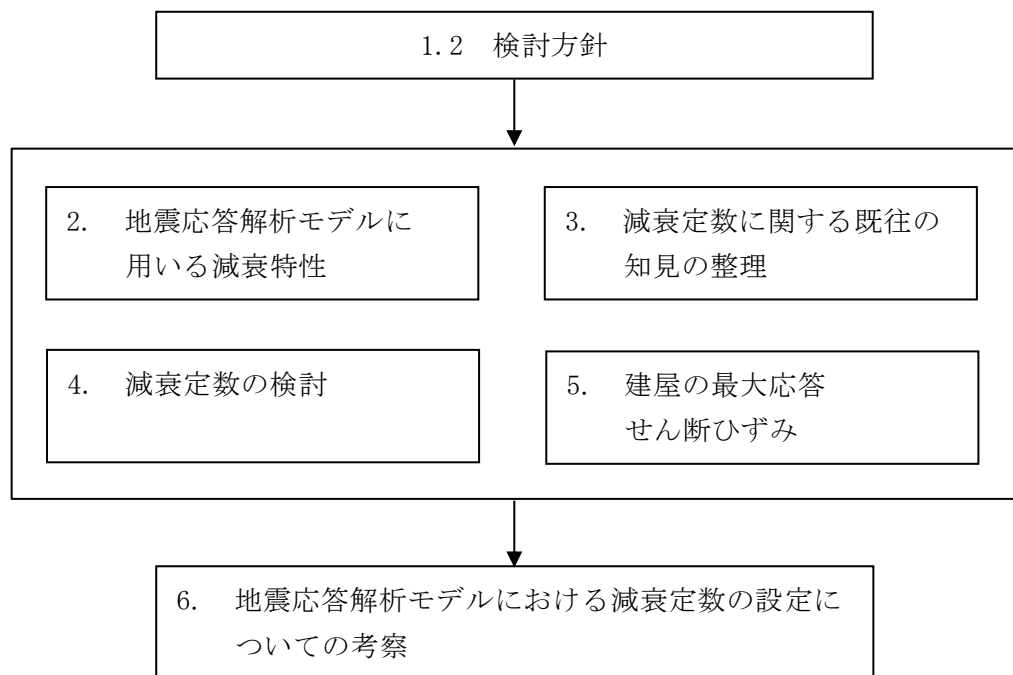
## 1.2 検討方針

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 JEAG 4601(以下, 「JEAG 4601」という。)-1987」及び「JEAG 4601-1991 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, 再処理施設等の建物・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, 「JEAG 4601-1987」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。再処理施設及び廃棄物管理施設の建物・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。また, MOX 燃料加工施設の建物・構築物の地震応答解析においては, 既設工認における設定を踏襲し 3%としている。

本資料では, 既往の知見に加え, 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 造部の減衰定数についての妥当性を考察する。

減衰定数の設定根拠の検討フローを第 1.2-1 図に示す。



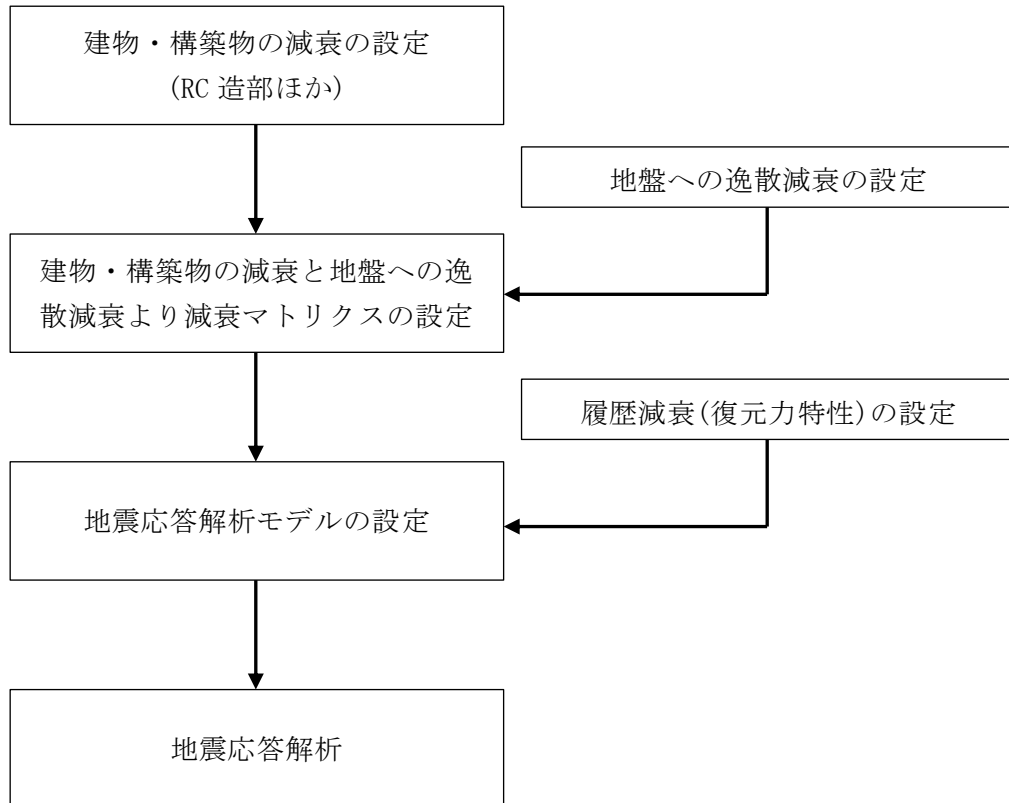
第1.2-1図 減衰定数の設定根拠の検討フロー

## 2. 地震応答解析モデルに用いる減衰特性

### 2.1 地震応答解析における減衰特性の取扱い

再処理施設等の建物・構築物の地震応答解析モデルにおける減衰特性は、「JEAG 4601-1987」及び「JEAG 4601-1991 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，材料減衰が建物・構築物の減衰定数に対応する。

地震応答解析に用いる減衰特性の設定フローを第 2.1-1 図に示す。



第 2.1-1 図 地震応答解析に用いる減衰特性策定のフロー

## 2.2 建物・構築物の減衰定数の設定

「JEAG 4601-1987」には、既設の原子炉施設の地震応答解析で用いられている建物・構築物(RC造部)の減衰定数5%が慣用的に使用されている値として示されている。安全冷却水B冷却塔の地震応答解析においても、RC造部(基礎部)の減衰定数を同様に5%としている。また、燃料加工建屋の地震応答解析においては、既設工認における設定を踏襲し3%としている。各建屋の減衰定数の設定状況を第2.2-1表に示す。

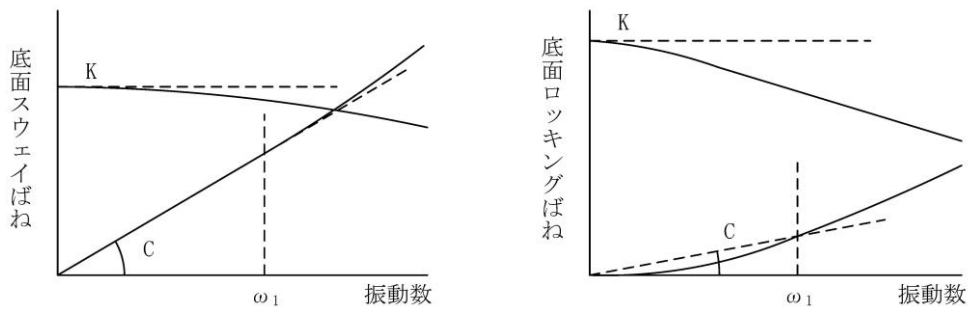
第2.2-1表 各建物・構築物の減衰定数の設定状況

建物・構築物	構造種別	減衰定数
安全冷却水B冷却塔(基礎部)	RC造	5%
燃料加工建屋	RC造	3%

### 2.3 地盤への逸散減衰の設定

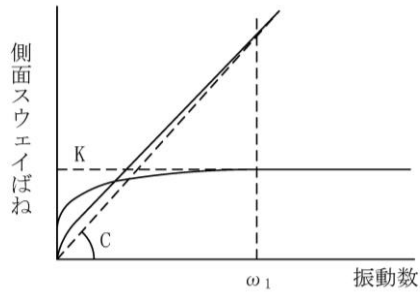
再処理施設等の建物・構築物は、「JEAG4601-1987」及び「JEAG 4601-1991 追補版」に基づき、建屋—地盤連成系としてモデル化し、地盤連成の効果は地盤ばねとしてモデル化している。地盤ばねについては、地盤条件及び基礎形状等を基に剛性及び減衰係数を評価している。減衰係数は、振動系全体のうち地盤の影響が卓越する最初の固有振動数( $\omega_1$ )に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾きで定式化する。地盤ばねの減衰特性を第2.3-1図に示す。

基礎底面地盤の回転ばねについては、「JEAG 4601-1991 追補版」に基づき基礎浮き上がりによる幾何学的非線形を考慮している。地盤の回転ばねの復元力特性を第2.3-2図に示す。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。



ばね定数：0Hz のばね定数  $K$  で定数化

減衰係数：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を結ぶ直線の傾き  $C$  で定数化

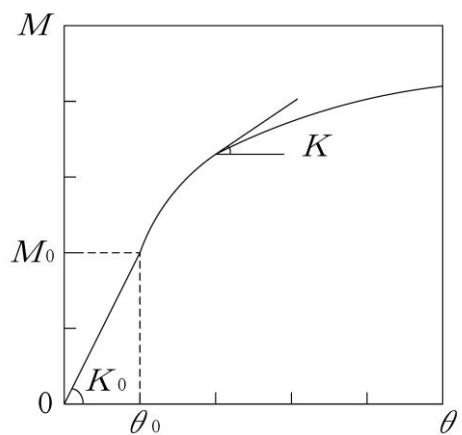


ばね定数：ばね定数  $K$  の最大値で定数化

減衰係数：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を結ぶ直線の傾き  $C$  で定数化

第2.3-1図 地盤ばねの減衰特性



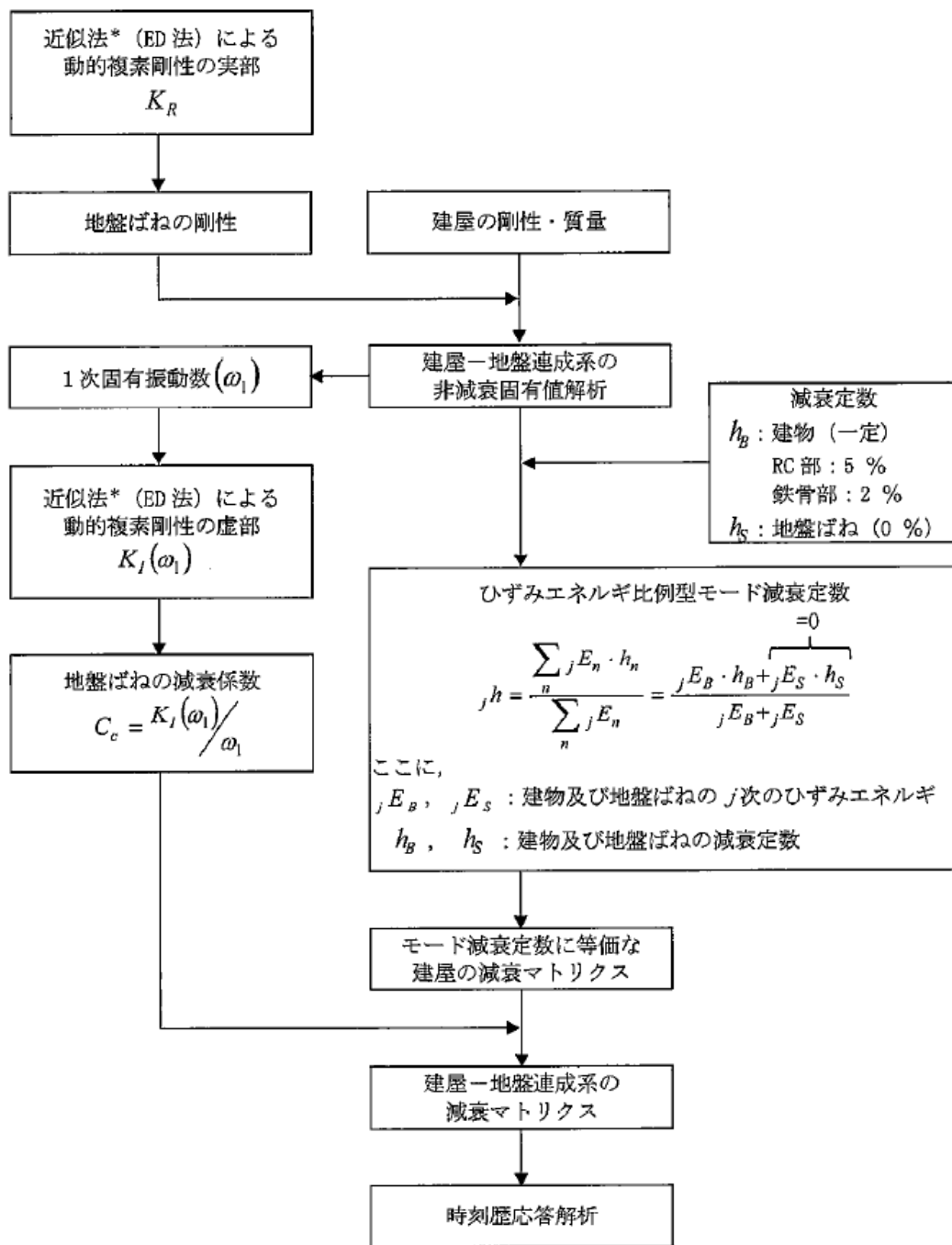


- M : 転倒モーメント
- $M_0$  : 浮上り限界転倒モーメント
- $\theta$  : 回転角
- $\theta_0$  : 浮上り限界回転角
- $K_0$  : 底面ロックングばねのばね定数(浮上り前)
- K : 底面ロックングばねのばね定数(浮上り後)

第2.3-2図 地盤の回転ばねの復元力特性

#### 2.4 減衰マトリクスの策定

建物・構築物と地盤の相互作用を考慮した地盤連成系の減衰マトリクスは、第2.4-1図のように、建物・構築物の減衰定数(地盤への逸散減衰定数を0%とする)に基づき、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。



注記 \* : 近似法は, 「JEAG4601-1991 追補版」に基づく

第 2.4-1 図 建屋-地盤連成系の減衰マトリクスの算定フロー

## 2.5 復元力特性(履歴減衰)の設定

再処理施設等の建物・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)を第2.5-1表に示す。RC造部の復元力特性は、「JEAG 4601-1991 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。なお、安全冷却水B冷却塔のRC造部(基礎部)には復元力特性は設定していない。

第2.5-1表 RC造部の復元力特性(履歴減衰)

	$\tau-\gamma$ 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ない</li> </ul>	(第2 剛性域内) <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ない</li> </ul> (第3 剛性域内) <ul style="list-style-type: none"> <li>・最大型指向型ループ</li> <li>・ディグレイディングトリリニア型の安定ループを形成</li> </ul>
モデル図	<最大点指向型モデル> 	<ディグレイディングモデル> 

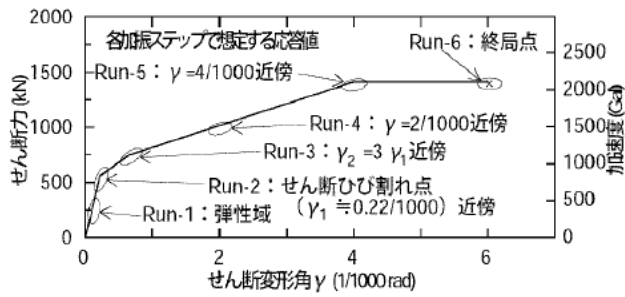
### 3. 減衰定数に関する既往の知見の整理

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。整理に当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。

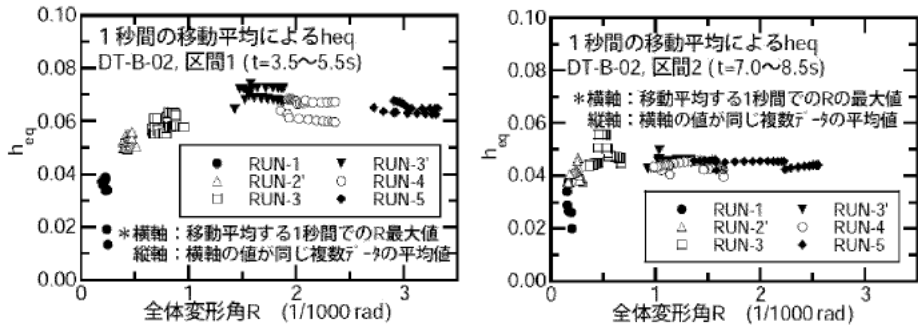
なお、以下の既往の知見は発電炉を対象にしたものであるが、これらの発電炉と再処理施設等の建物・構築物は共に RC 造の壁式構造であり、類似した構造種別であるため、以下の既往の知見を再処理施設等の建物・構築物へ適用することは問題ないと考える。

#### 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。第3.1-1図に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は、第3.1-1表に示すように、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

第3.1-1図 RC耐震壁試験結果より算出された減衰定数<sup>3.1)</sup>

第3.1-1表 RC耐震壁試験による等価粘性減衰の評価

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 実建造物の振動試験

「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造部では2%~7%程度となっている。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。原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧を第3.2-1表に示す。

第 3.2-1 表 原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧

(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-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [ABWR]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I2]	原子炉建屋 [BWR Mark-I2]	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=1600m/s
固有振動数 (1次)	試験 5.55Hz 解析 5.55Hz	0.25s	約3Hz	2.7Hz	3.5Hz	4.8Hz	3.8Hz	4.1Hz	0.19s
減衰定数	試験 1次: 5.1% 解析 FEM減衰: 5% 質点系: 7.5%	-	1次: 33% 地盤: 5%	1次: 20%	1次: 54%	1次: 19~20%	1次: 41%	1次: 36%	-
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>	360t/cm <sup>2</sup>	210t/cm <sup>2</sup> 235t/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'メソッド)	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 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	宝海3	大塚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 [150t x 2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t x 2] 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 [10t x 2]
測定箇所	・1/C ・PCV(0-N)振動測定も含む ・REB ・E/B	・1/C ・PCV(0-N)振動測定も含む ・REB	・1/C ・PCV(0-N)振動測定も含む ・REB	・0/S(0-N)振動測定も含む ・1/C	・0/S(0-N)振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S(0-N)振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S(0-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 PCV: 4.86 Hz 1/C: 7.57 Hz E/B: 3.15 Hz 解析 4.92 Hz 1/C: 7.66 Hz	PCV: 4.97 Hz (NS) 1/C: 18.62 Hz (NS) S: 7.1 Hz (E)	PCV: 5.0 Hz (NS) 4.9 Hz (E) 1/C: 15.7 Hz (NS) 10.5 Hz (E) PCV: 5.5 Hz (NS) 5.5 Hz (E) 1/C: 13.4 Hz (NS) 10.2 Hz (E)	0/S: 4.7 Hz 1/C: 9.4 Hz (X) 10.8 Hz (Y)	0/S: 15.4 Hz (X) 9.8 Hz (Y) 1/C: 11.3 Hz (X) 12.9 Hz (Y)	0/S: 16.9~17.1 Hz 1/C: 13.7~13.9 Hz (X) 11.3~11.8 Hz (Y) C/V: 18.1 Hz	1/C: 15.0 Hz (NS) 8.1 Hz (E) A/B: 15.4 Hz (NS) 5.5 Hz (E) 1/C: 18.1 Hz (NS) 8.0 Hz (E) A/B: 15.9 Hz (NS) 8.2 Hz (E)
減衰定数	試験 PCV: 2.2% 1/C: 3.4% E/B: 2.2% (NS) 解析 PCV: 2.0% 1/C: 4.0%	PCV: 2.0% (NS) 1/C: 3.0% (NS) 3.0% (E)	PCV: 1.7% (NS) 1.4% (E) 1/C: 13.0% (NS) 2.0% (E)	0/S: 3.6% 1/C: 2.0% (X) 2.0% (Y)	0/S: 17.0% 5.0% (X) 1/C: 14.0% 2.1% (Y)	試験値と同じ値を採用	試験値と同じ値を採用
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 1/C: 230 t/cm <sup>2</sup> PCV: 304 t/cm <sup>2</sup> 解析 1/C: 270 t/cm <sup>2</sup> PCV: 400 t/cm <sup>2</sup>	1/C: 230 t/cm <sup>2</sup> PCV: 304 t/cm <sup>2</sup>	1/C: 1257 t/cm <sup>2</sup> PCV: 315 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次元質点系行'A'・PCV: 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	一質点系固有分振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	一質点系固有分振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	一質点系固有分振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 ・振動数 ・共振曲線	多自由度固有分振のモード同定法 ・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 ・振動数 ・共振曲線	一質点系固有分振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							

注記 \* : 「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)

##### (1) 女川2号機及び3号機での地震観測

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>を第3.3.1-1表に示す。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第3.3.1-1図に示す。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。

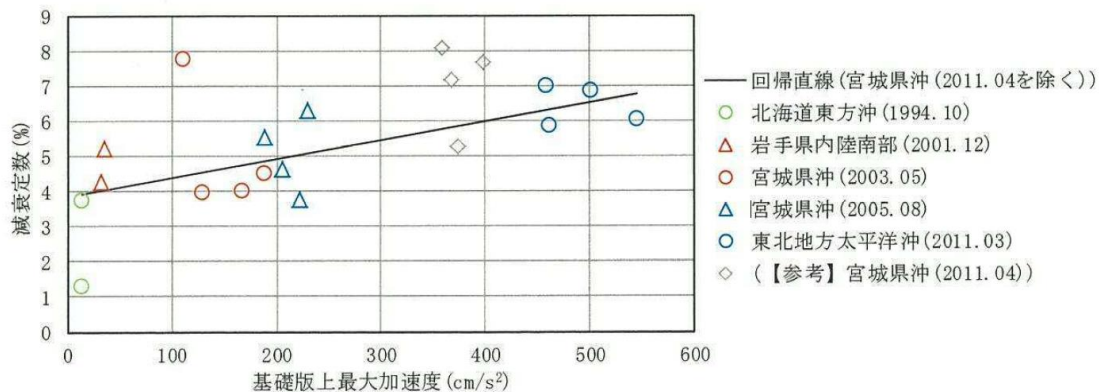
第3.3.1-1表 東北電力(株)女川2号機及び3号機原子炉建屋シミュレーション解析結果  
(a) 女川2号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

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 1.31	1.40 -	15	6.50 3.73	1.32 -
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 7.77	1.15 -	168	5.29 4.01	1.08 -
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 6.30	1.13 -	206	5.24 4.63	1.07 -
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 6.88	0.92 -	461	4.43 5.87	0.90 -
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 8.08	0.89 -	367	4.36 7.19	0.89 -

(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 4.29	1.25 -	35	5.75 5.25	1.17 -
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 3.95	1.16 -	189	5.31 4.51	1.08 -
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 3.78	1.11 -	188	5.20 5.57	1.06 -
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 6.03	0.94 -	458	4.58 7.00	0.93 -
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 5.27	0.91 -	398	4.48 7.66	0.91 -

(「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)〕<sup>3,4)</sup>に加筆)



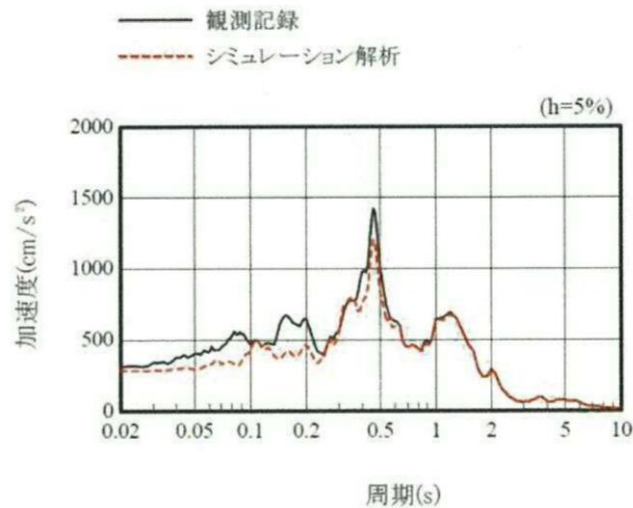
第3.3.1-1図 減衰定数と入力加速度レベルの関係

(2) 福島第二・2号機での地震観測

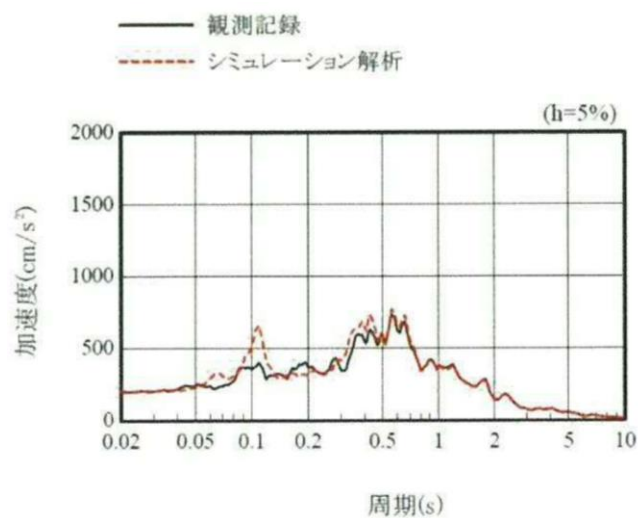
東京電力(株)福島第二・2号機原子炉建屋の東北地方太平洋沖地震を対象としたシミュレーション解析<sup>3.5)</sup>では、設計モデルを基本として実状を踏まえた建屋及び地盤条件を考慮した埋込みSRモデルにより、基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際、建屋RC造部の材料減衰は5%とし、解析モデルへはひずみエネルギー比例型減衰として与えている。

シミュレーション解析結果の地上2階の加速度応答スペクトルは、観測記録の傾向を概ね捉えている(第3.3.1-2図参照)。なお、シミュレーション解析結果の各階の最大せん断ひずみは最大でも $0.1 \times 10^{-3}$ 程度となったとしている。

減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。



(a) 南北方向



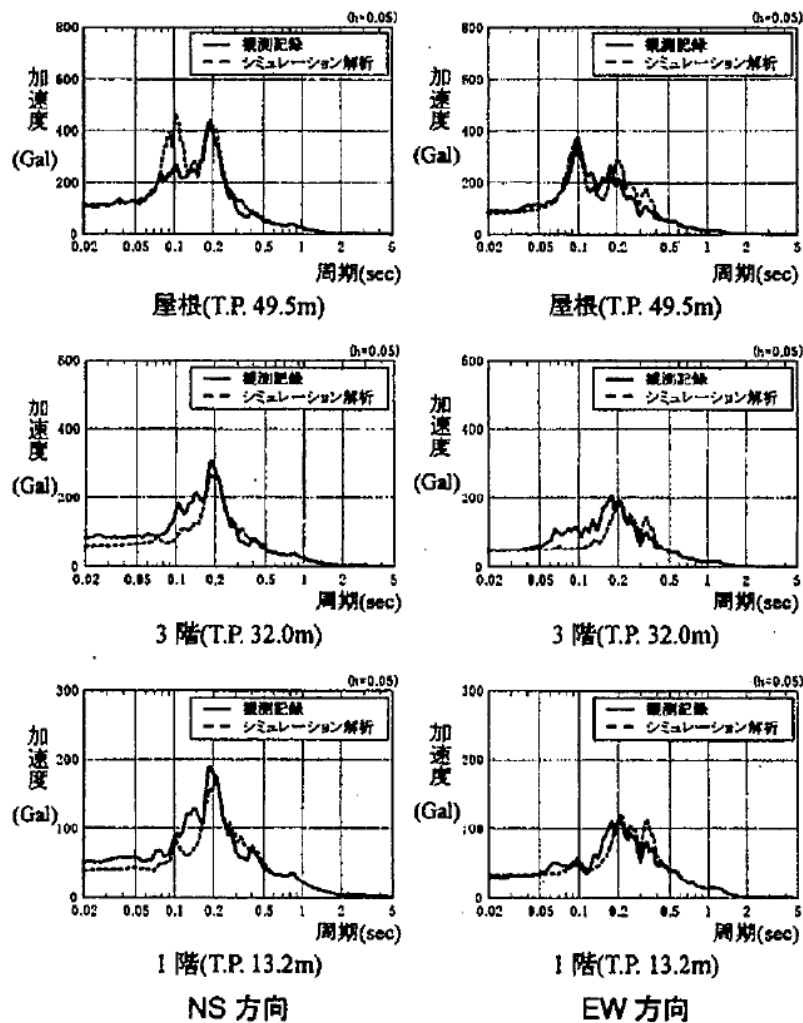
(b) 東西方向

第3.3.1-2図 地上2階の加速度応答スペクトルの比較<sup>3.5)</sup>

(3) 東通1号機での地震観測

東北電力(株)東通原子力発電所1号機原子炉建屋の2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震を対象としたシミュレーション解析<sup>3,6)</sup>では、地盤との相互作用を考慮した多軸多質点系のシミュレーション解析モデルにより、基礎スラブ上端質点の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際、建屋RC造部の材料減衰は5%としている。

シミュレーション解析結果の1階、3階及び屋根の加速度応答スペクトルは、観測記録を概ね再現している(第3.3.1-3図参照)。減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。



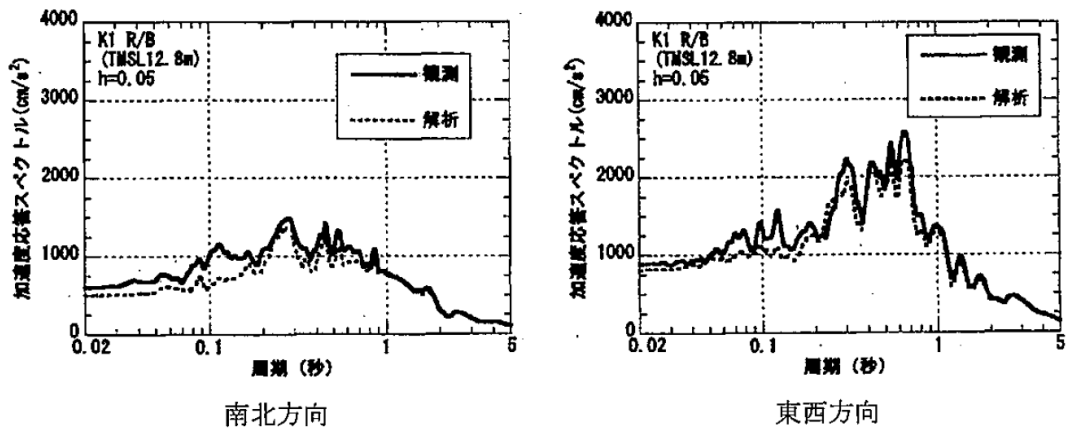
第3.3.1-3図 加速度応答スペクトルの比較<sup>3,6)</sup>

(4) 柏崎刈羽5号機及び7号機の地震観測

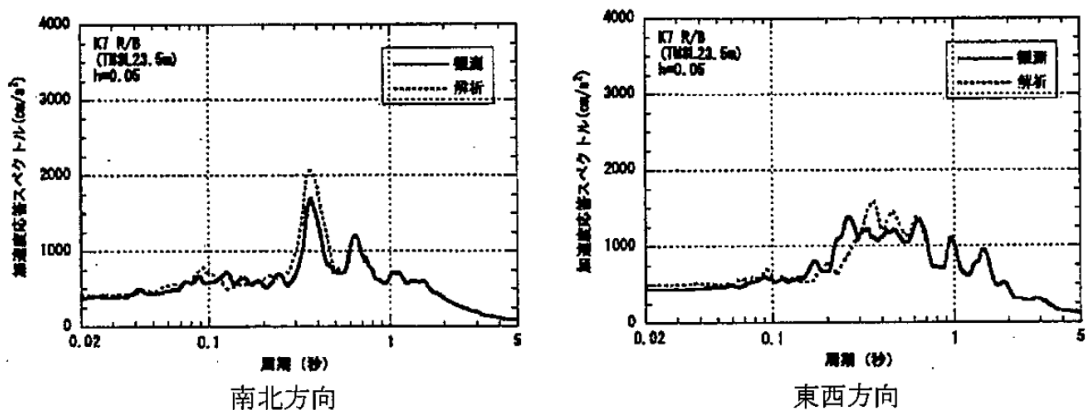
東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所5号機及び7号機原子炉建屋の新潟県中越沖地震を対象としたシミュレーション解析<sup>3,7)</sup>では、設計時のモデルに実状を踏まえた建屋及び地盤条件を考慮した埋込みSRモデルにより、基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際建屋RC造部の材料減衰は5%とし、解析モデルへはひずみエネルギー比例型減衰として与えている。

シミュレーション解析結果の5号機地上2階及び7号機地上3階の加速度応答スペクトルは、観測記録を比較的良好に再現できることが示されたとしている(第3.3.1-4図参照)。なお、シミュレーション解析結果の各階の最大せん断ひずみは、最大でも5号機 $0.2 \times 10^{-3}$ 程度、7号機で $0.12 \times 10^{-3}$ 程度となったとしている。

減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。



(a) 1号機



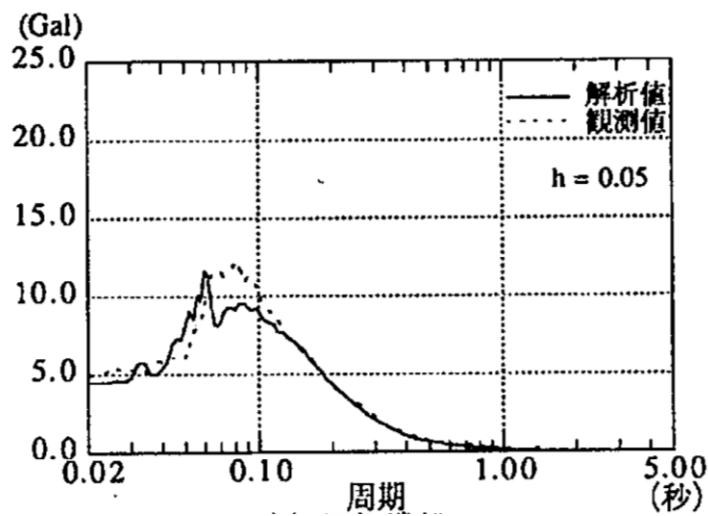
(b) 7号機

第3.3.1-4図 加速度応答スペクトルの比較<sup>3,7)</sup>

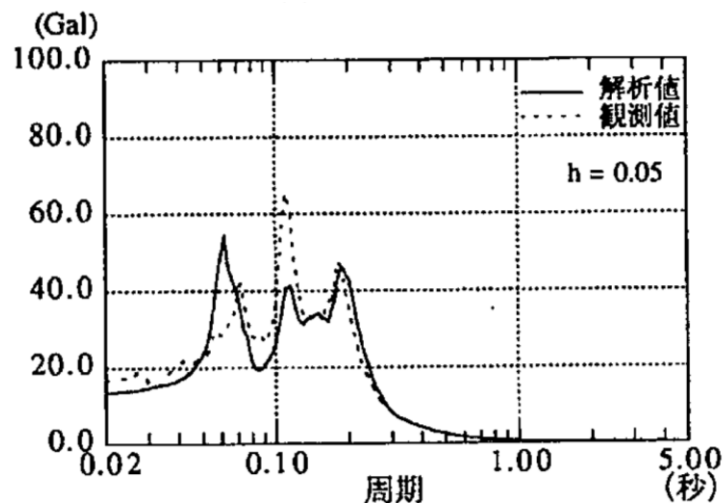
(5) 浜岡3号機の地震観測

中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機原子炉建屋の上下動シミュレーション解析<sup>3.8)</sup>では、静岡県南部地震(1988年6月1日)を対象として、建屋を多質点系モデルで評価したシミュレーション解析モデルにより、基礎版上端における上下動観測波を入力とした解析を実施している。この際、建屋RC造部の材料減衰は5%としている。

シミュレーション解析結果の屋根端部及び中央部の加速度応答スペクトルは、観測記録にみられる卓越振動数及び増幅特性を概ね捉えている(第3.3.1-5図参照)。減衰定数5%を設定した上下動地震観測シミュレーション解析により、観測記録と比較的良好な対応を示すことが確認された。



(a) 屋根端部



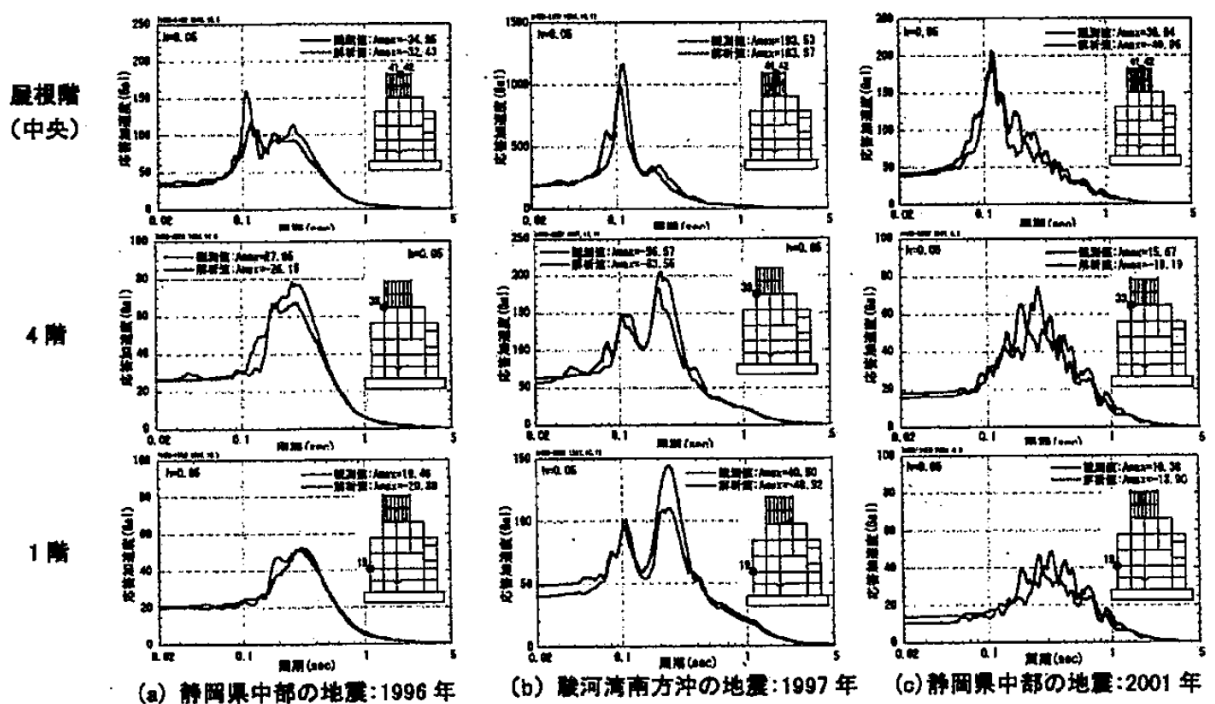
(b) 屋根中央部

第3.3.1-5図 加速度応答スペクトルの比較<sup>3.8)</sup>

(6) 浜岡4号機の地震観測

中部電力(株)浜岡原子力発電所4号機原子炉建屋と周辺地盤を含めた建屋-地盤連成系のシミュレーション解析<sup>3,9)</sup>では、建屋を質点系、地盤を多質点系並列地盤モデルで評価したシミュレーション解析モデルにより、自由地盤のGL-20mの3地震の観測波を入力とした解析を実施している。この際建屋RC造部の材料減衰は5%としている。

シミュレーション解析結果の屋根階中央部、4階及び1階の加速度応答スペクトルは、観測記録と概ね良い対応を示している(第3.3.1-6図参照)。減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね模擬できることが確認された。



第3.3.1-6図 加速度応答スペクトルの比較<sup>3,9)</sup>

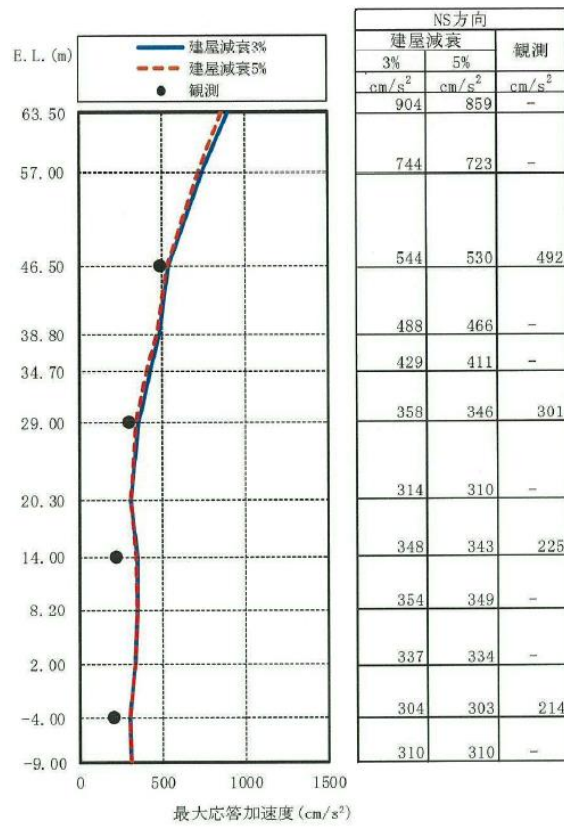
(7) 東海第二発電所の地震観測

日本原子力発電(株)は東海第二発電所の減衰定数に関する検討<sup>3.10)</sup>において、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時の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施し、RC造部の減衰定数について検討を行っている。

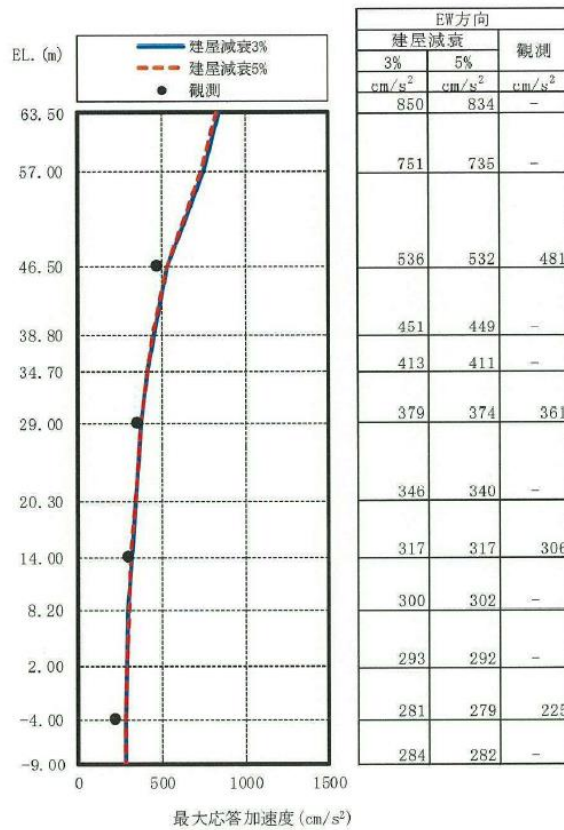
シミュレーション解析では地震応答解析で用いた埋込みSRモデルを用い、RC造部の減衰定数を3%と5%の2種類のケースについて検討を行っている。

シミュレーション解析の結果、RC造部の減衰3%と5%の両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%の結果のほうが観測記録により整合する傾向にあることが確認された。シミュレーション解析の結果を第3.3.1-7図～第3.3.1-10図に示す。

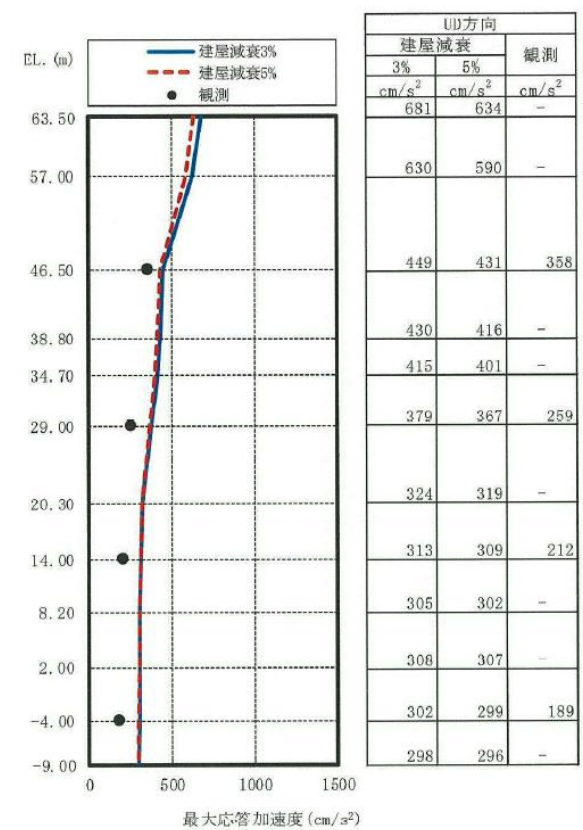




(a) NS 方向

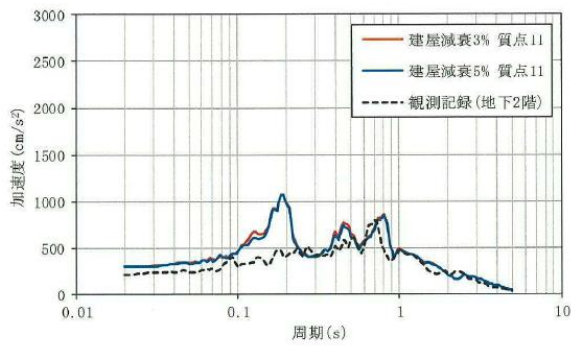


(b) EW 方向

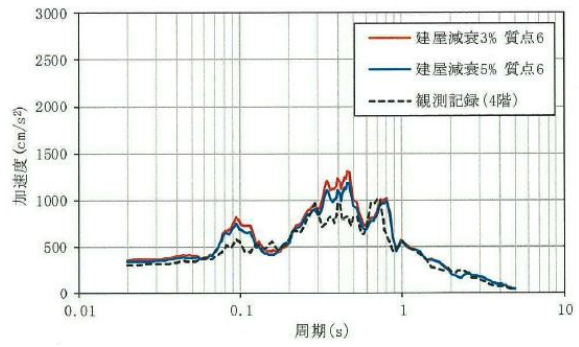


(c) 鉛直方向

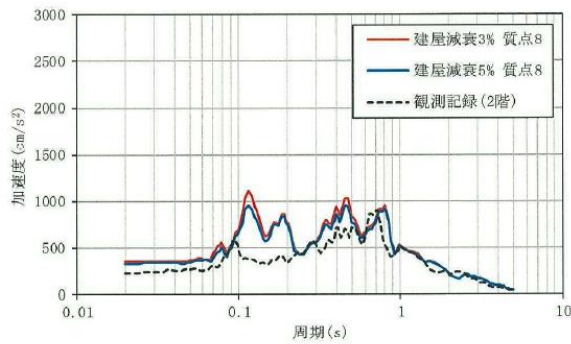
第 3.3.1-7 図 最大応答加速度分布の比較<sup>3.10)</sup>



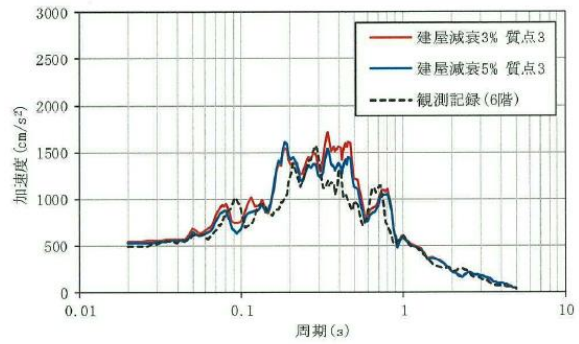
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)

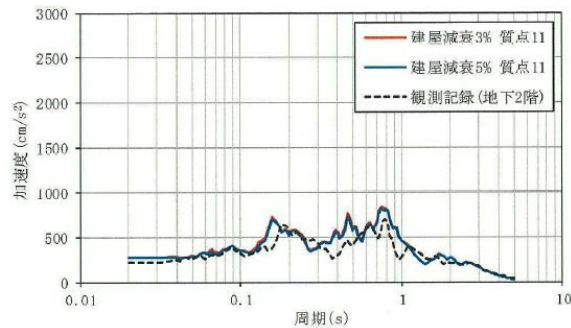


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)

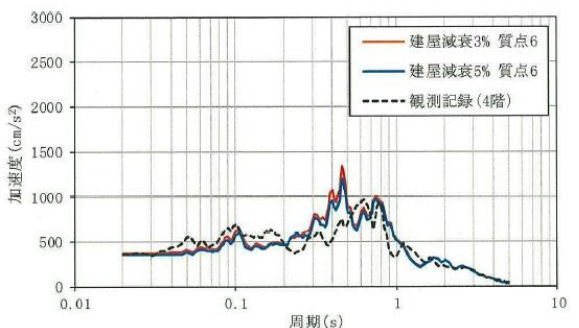


(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

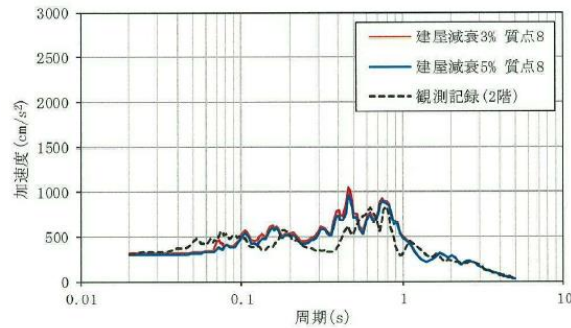
第 3.3.1-8 図 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) 3.10



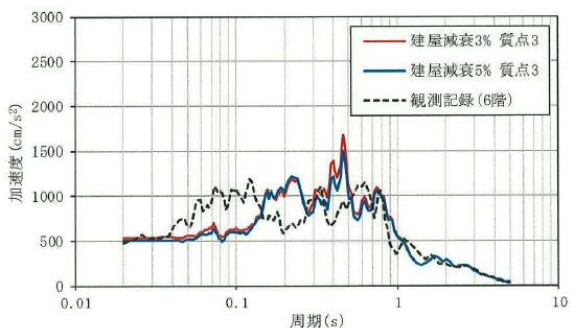
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)

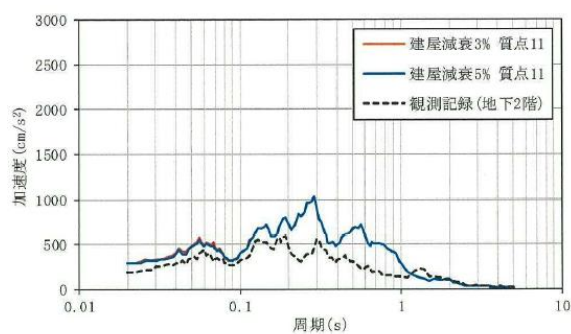


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)

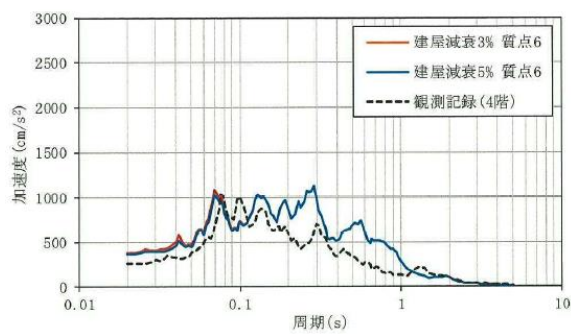


(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

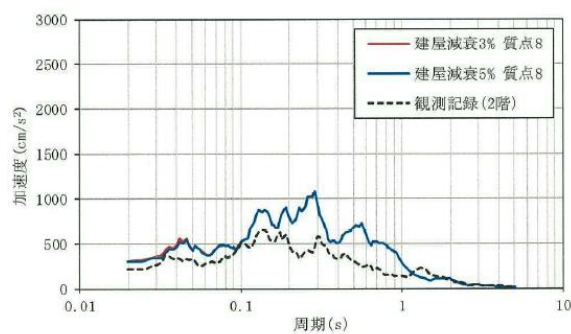
第 3.3.1-9 図 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) 3.10



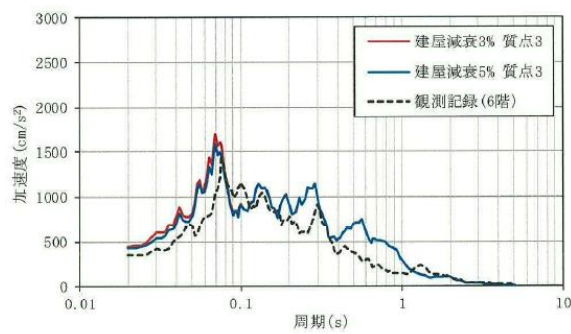
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)



(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)



(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

第 3.3.1-10 図 加速度応答スペクトルの比較(鉛直方向) 3.10

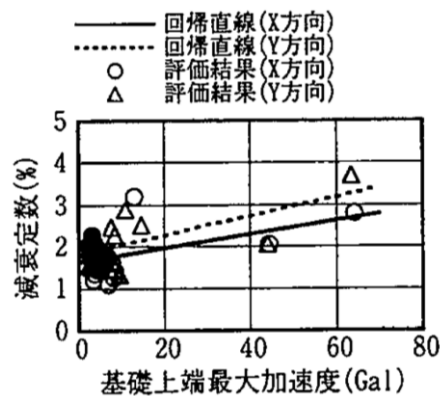
### 3.3.2 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行前)

原子炉建屋(PWR)における地震観測記録の分析結果を第3.3.2-1表に整理する。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。評価結果を第3.3.2-1図に示す。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。

第3.3.2-1表 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>3.11)</sup>	約25cm/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>3.12)</sup>	約40cm/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>3.13)</sup>	1cm/s <sup>2</sup> ~68cm/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)



第3.3.2-1図 川内1号機の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>3.13)</sup>

### 3.3.3 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行後)

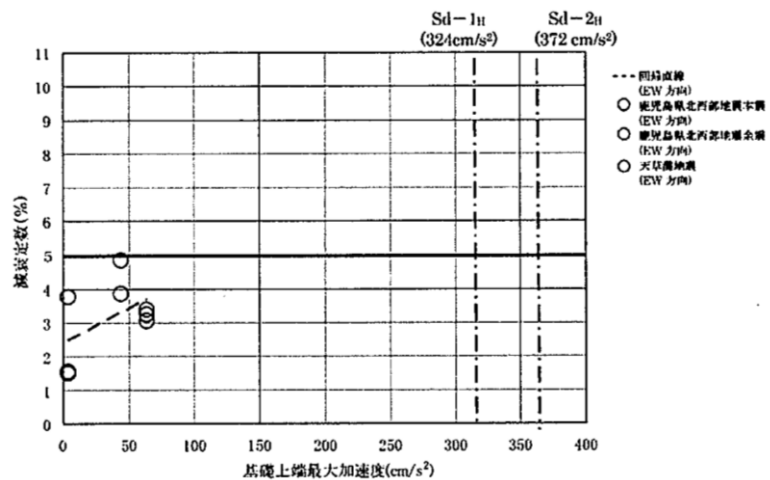
#### (1) 川内1号機での地震観測(RC造部)

九州電力(株)は川内1号機の減衰定数に関する検討<sup>3,14)</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。

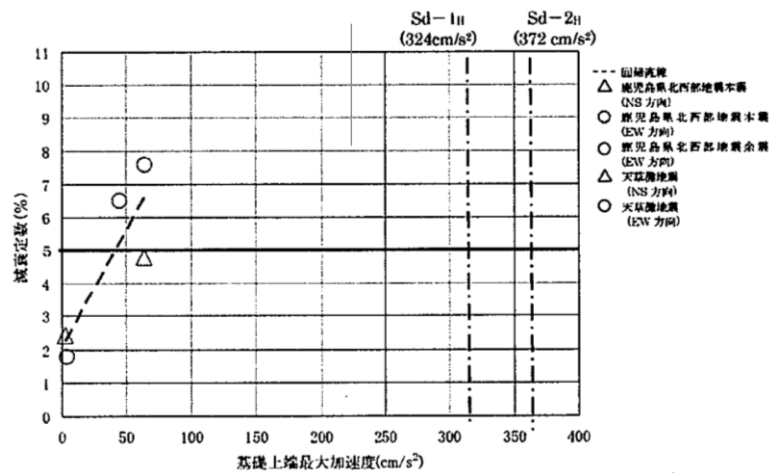
#### ① システム同定による減衰定数 $h$ の評価

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第3.3.3-1図に示す。

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。

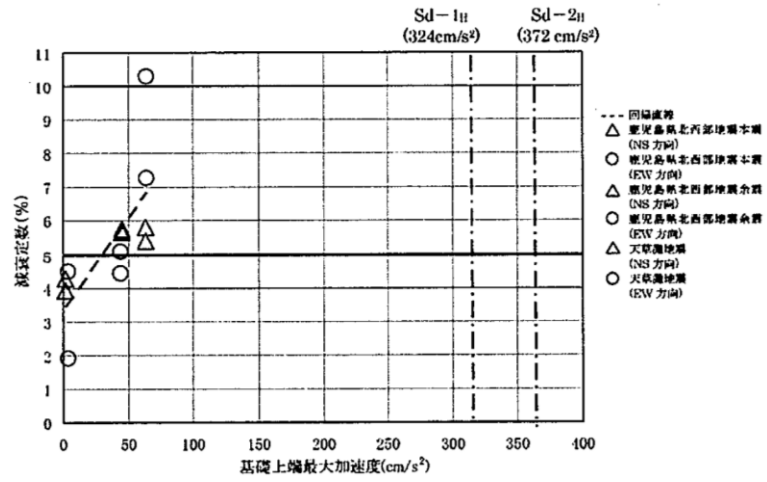


(a) 外部遮蔽建屋(水平方向)

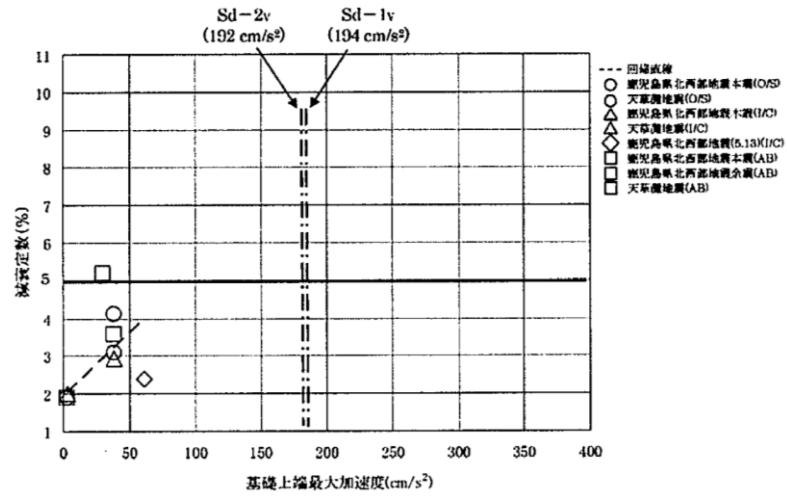


(b) 内部コンクリート(水平方向)

第3.3.3-1図 川内1号機の基礎先端最大加速度と減衰定数の関係<sup>3,14)</sup> (1/2)



(c) 原子炉補助建屋 (水平方向)



(d) 外部遮蔽建屋, 内部コンクリート, 原子炉補助建屋 (鉛直方向)

第3.3.3-1図 川内1号機の基礎先端最大加速度と減衰定数の関係<sup>3,14)</sup> (2/2)



## 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540gal以上、鉛直方向320gal以上)及び弾性設計用地震動 $S_d$ レベル(水平方向320gal以上、鉛直方向190gal以上)では、観測記録レベル(1gal~60gal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(1gal~60gal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 $S_d$ 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 $S_d$ 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するとしている。

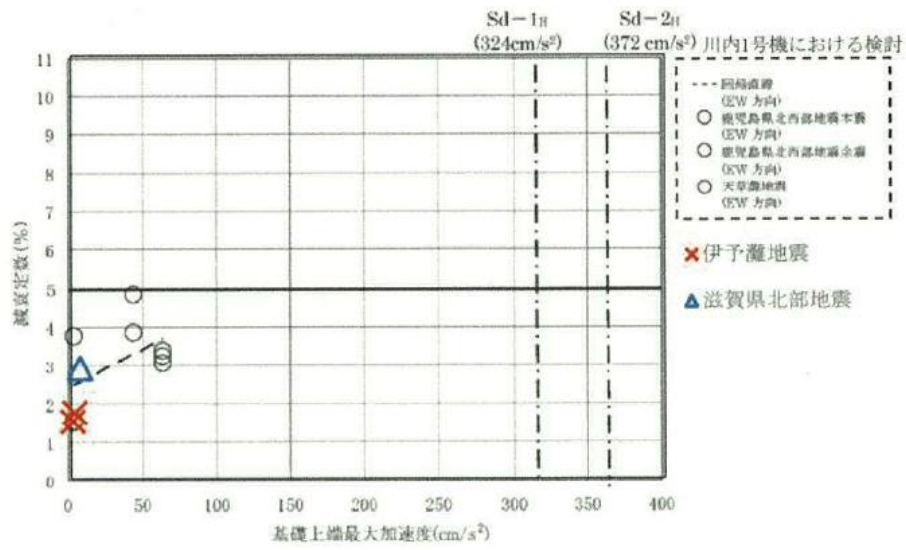


(2) 高浜3号機の地震観測(RC造部)

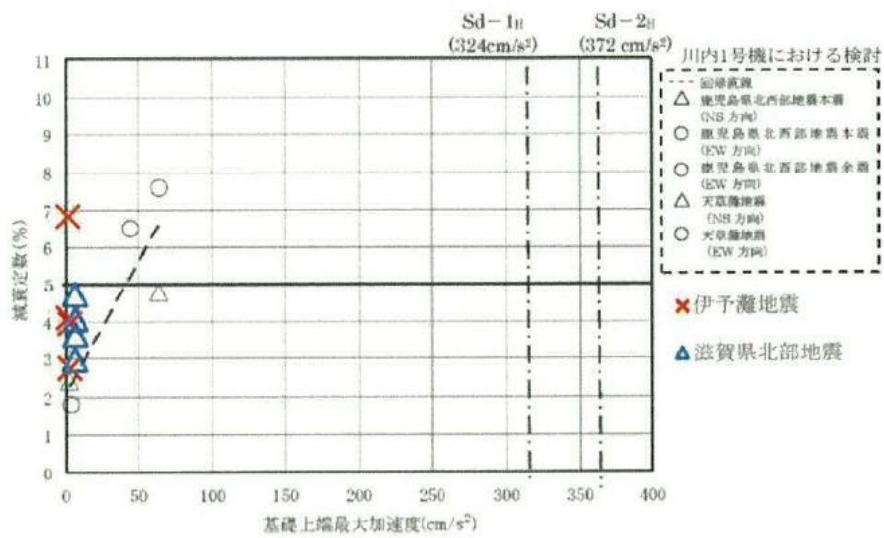
関西電力(株)は高浜発電所3号機(以下、「高浜3号機」という)における減衰定数に関する検討<sup>3.15)</sup>では、地震観測記録を用いて建屋の減衰定数 $h$ の考察を実施している。

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第3.3.3-2図に示す。

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。

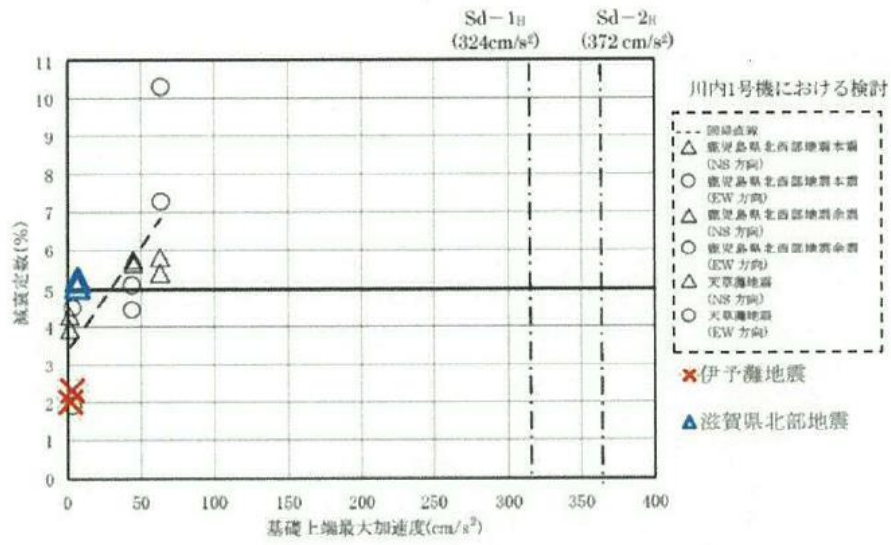


(a) 外部しゃへい建屋(水平方向)

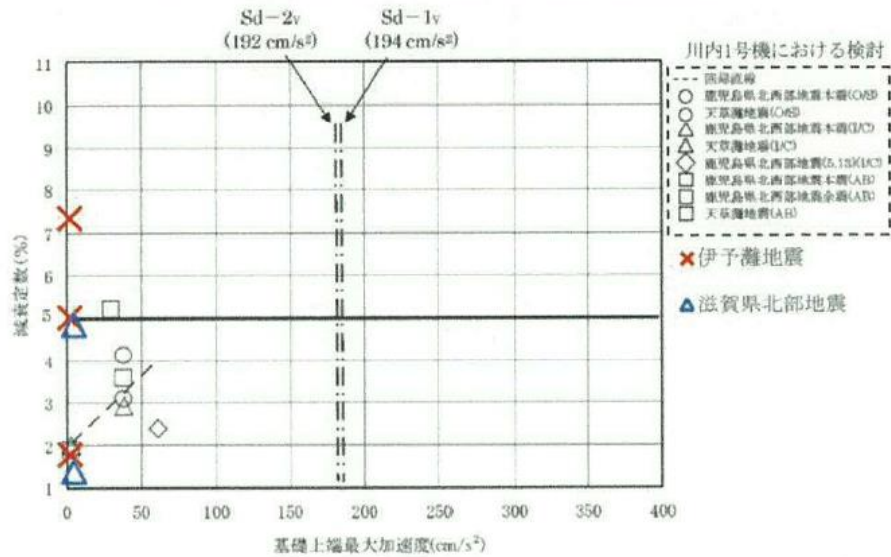


(b) 内部コンクリート(水平方向)

第3.3.3-2図 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>3.15)</sup> (1/2)



(c) 外周建屋(川内：原子炉補助建屋)(水平方向)



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)

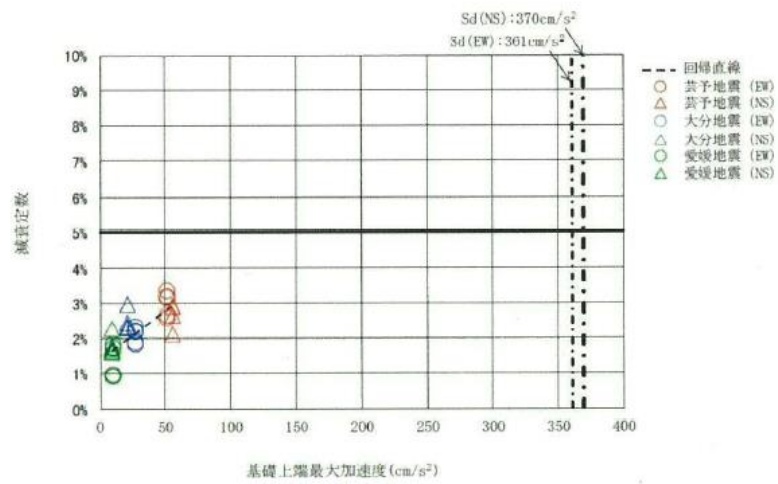
(d) 外部しゃへい建屋、内部コンクリート、外周建屋(川内：原子炉補助建屋)(鉛直方向)

第3.3.3-2図 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>3.15)</sup> (2/2)

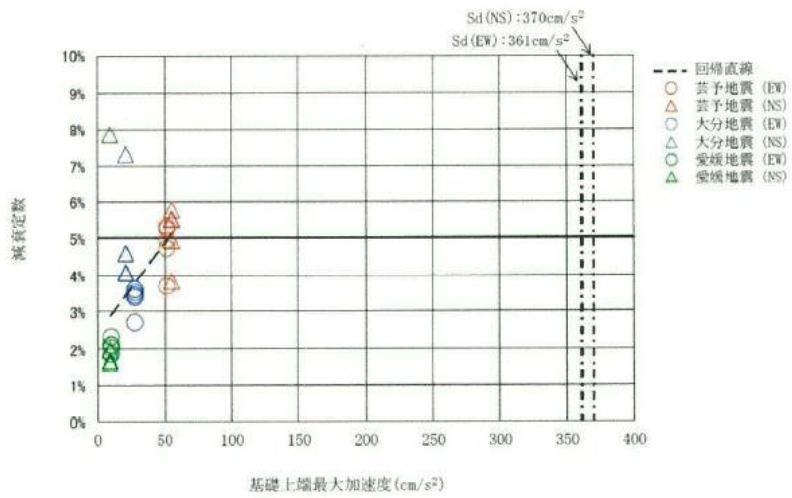
(3) 伊方3号機の地震観測(RC部)

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>3.16)</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第3.3.3-3図に示す。

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。

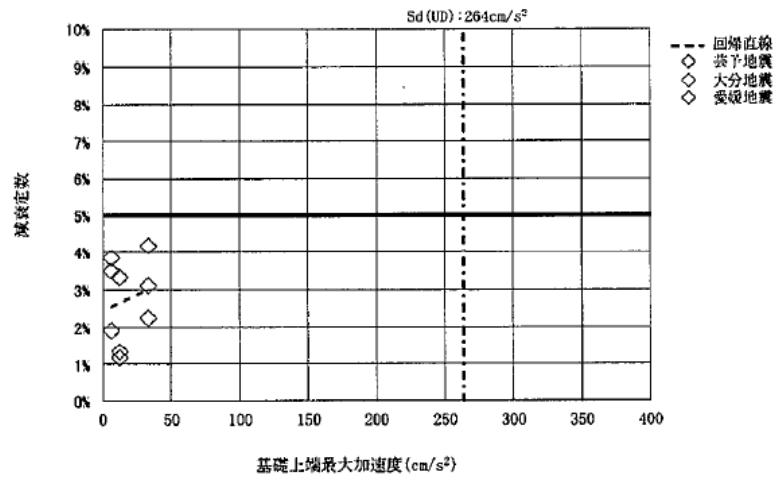


(a) 外周コンクリート壁(水平方向)



(b) 内部コンクリート(水平方向)

第3.3.3-3図 伊方3号機の芸予地震等によるシステム同定結果<sup>3.16)</sup> (1/2)



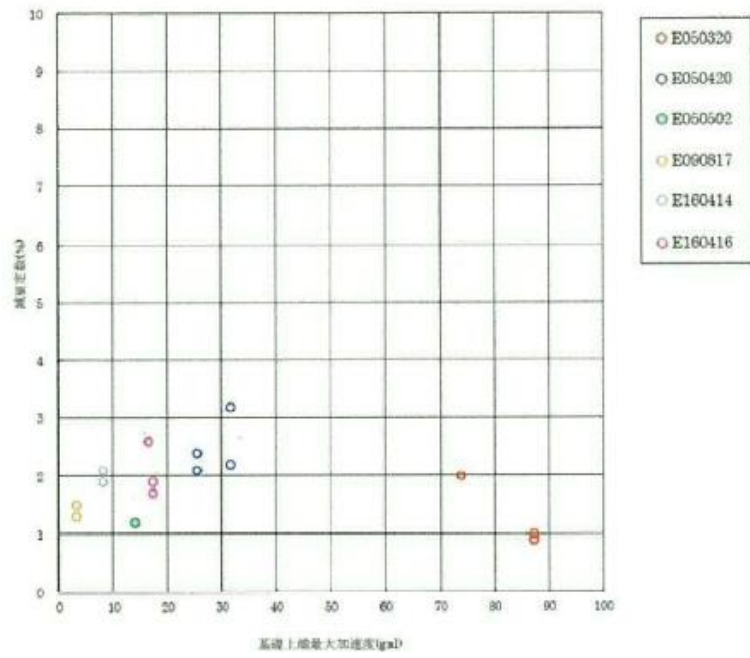
(c) 外部コンクリート(鉛直方向)

第3.3.3-3図 伊方3号機の芸予地震等によるシステム同定結果<sup>3.16)</sup> (2/2)

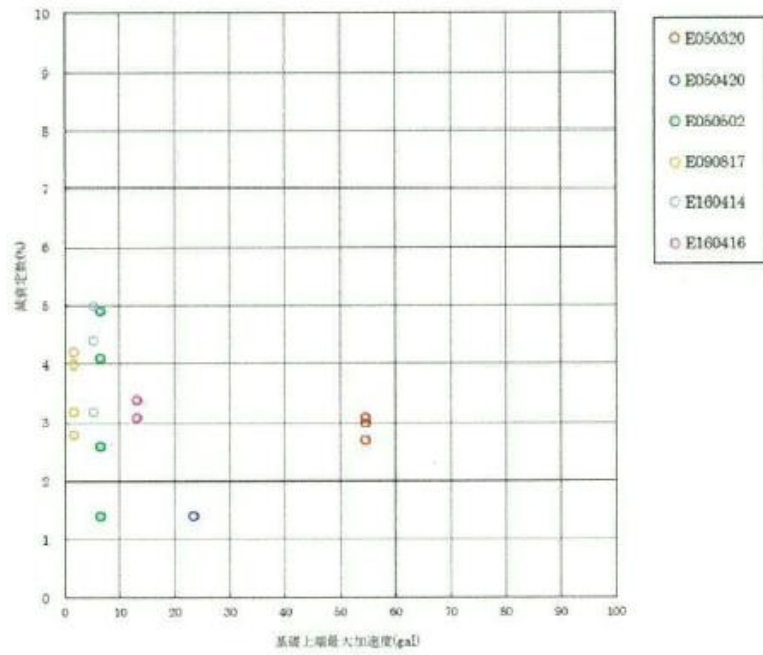
(4) 玄海3号機の地震観測(PCCV)

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>3.17)</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第3.3.3-4図に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

第3.3.3-4図 玄海3号機の観測記録によるシステム同定結果<sup>3.17)</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Ss及び弾性設計用地震動Sd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Ss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折点を超える程度となり、弾性設計用地震動Sd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Ssに対するPCCVの応答レベルは、スケルトンカーブの第1折点を超える程度であり、第1折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るとしている。

また、弾性設計用地震動Sd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Sd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Ss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Sd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>3.18)</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

減衰定数の検討として「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。

第1回申請の建物・構築物においてはRC造の壁式構造である燃料加工建屋におけるひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定した。なお、後次回申請では観測記録によるシミュレーション解析の結果を示す建屋についてのひずみエネルギー比例型モード減衰定数を示す予定である。算定結果の詳細については別紙1に示す。算定の結果、燃料加工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は建屋の減衰よりもかなり大きく、特に底面からの影響が大きいことを確認した。

## 5. 建屋の最大応答せん断ひずみ

後述の「6.1.1 応答レベルごとの減衰定数と振幅依存性」において、建屋の応答レベルと減衰定数の相関性について考察するため、再処理施設等の建物・構築物の地震応答解析における、各入力に対する応答レベルを整理した。

### 5.1 弾性設計用地震動 $S_d$ 応答レベル

燃料加工建屋の弾性設計用地震動  $S_d$  による基本ケースの耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 2 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。

### 5.2 基準地震動 $S_s$ 応答レベル

燃料加工建屋の基準地震動  $S_s$  による基本ケースの耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 2 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 折点と第 2 折点の間程度となっている。

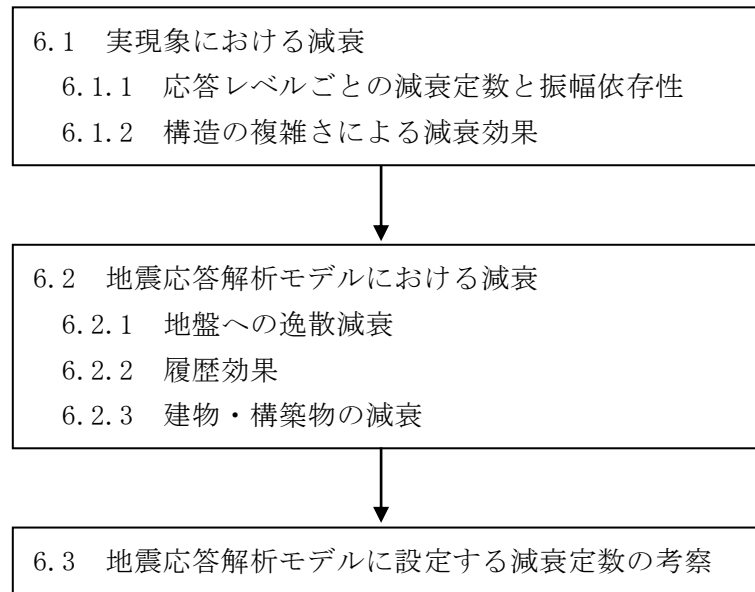
### 5.3 基準地震動を 1.2 倍した地震力の応答レベル

燃料加工建屋の基準地震動を 1.2 倍した地震力(以下、「 $1.2 \times S_s$ 」という。)による耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 2 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、 $1.2 \times S_s$  の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点と第 2 折点の間程度となっている。

## 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章から5章で述べた内容について整理を行い，再処理施設等の建物・構築物の質点系モデルによる地震応答解析について，建物・構築物のRC造部の減衰定数の設定値の妥当性を検討する。

考察のフローを第6.-1図に示す。



第6.-1図 RC造部の減衰定数の設定値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6.1.1-1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。

実機の地震観測記録を用いたシステム同定結果によれば、BWRのRC造部で水平1%～8%程度、PWRのRC造部(外部遮蔽建屋、原子炉補助建屋、外周建屋等)では水平方向1%～10%程度、鉛直方向1%～8%程度である。なお、鉛直方向の減衰定数については、PWRのPCCVに比べて、RC造部は大きな値が得られており、水平方向と同程度の値となっている。

第 6.1.1-1 表 既往の実験・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 $\gamma = 2/1000$
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
実建造物の 振動試験	PWR	2%～7%程度	—	—	—	地盤への逸散減衰を含む
	BWR	5%～54%程度	—	—	—	地盤への逸散減衰を含む
地震観測 記録	PWR 水平	1%～10%程度	—	—	—	地盤への逸散減衰をあまり含まない
	PWR 鉛直	1%～8%程度	—	—	—	
	BWR 水平	1%～8%程度		—	—	履歴減衰等を含む

### 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造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方向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、「JEAG4601-1987」及び「JEAG4601-1991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

別紙1に示した燃料加工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、燃料加工建屋においては、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、「JEAG4601-1991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、「JEAG4601-1991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、「JEAG4601-1987」及び「JEAG4601-1991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、「JEAG4601-1987」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、「JEAG4601-1991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、JEAG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第 6.3-1 表に示す。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%程度減衰は増加し、第 1 折点付近では 7%程度、第 2 折点付近では 8%程度の減衰定数に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 地盤の逸散減衰の検討」に示した通り、減衰を建物・構築物の材料減衰、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、再処理施設等の建物・構築物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」に基づき設定した再処理施設等の建物・構築物における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 1 折点付近では 7%程度、第 1 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第 6.3-2 に示す。

第 6.3-1 表 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		
		微小振幅領域	第 1 折点未満	第 1 折点付近	第 2 折点付近	許容限界付近 $\gamma=2/1000$
実現象	再処理施設等の建物・構築物における地震動	-	弾性設計用地震動 $S_d$	基準地震動 $S_s$ $1.2 \times S_s$		-
	RC 耐震壁試験 (履歴減衰を含む)	-	1%~4%程度	5%程度	6%~7%程度	6%~7%程度

第 6.3-2 表 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			安全冷却水 B 冷却塔 (基礎部)	燃料加工建屋
入力地震動	弾性設計用 地震動 Sd	水平	5%	5%*
		鉛直	5%	5%*
	基準地震動 Ss	水平	5%	5%*
		鉛直	5%	5%*
	1.2×Ss	水平	—	5%*
		鉛直	—	5%*

\*：減衰定数としては 5%が妥当であると考えているが，既設工認における設定を踏襲し 3%とした。

#### 6.4 まとめ

6.1 節から 6.3 節を踏まえ、再処理施設等の建物・構築物の弾性設計用地震動  $S_d$  レベル、基準地震動  $S_s$  レベル及び  $1.2 \times S_s$  レベルの地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数は、水平及び鉛直とも 5%程度以上と考えられる。以上を踏まえ、安全冷却水 B 冷却塔の地震応答解析では RC 造部の減衰定数を 5%と設定した。なお、燃料加工建屋の地震応答解析では既設工認における設定を踏襲し 3%とした。

## 【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) 加藤ほか：東海第二発電所原子炉建屋起振実験(その1)実験計画と測定結果(第5回地震工学シンポジウム, 1978)
3. 4) 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. 5) 菊地ほか：東北地方太平洋沖地震による福島第一・第二原子力発電所原子炉建屋のシミュレーション解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(2012))
3. 6) 相澤ほか：2008年岩手県沿岸北部の地震による東通原子力発電所の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(2009))
3. 7) 菊地ほか：中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋のシミュレーション解析(その1)～(その3)(日本建築学会大会学術講演梗概集(2008))
3. 8) 久野ほか：原子力発電所における地震観測記録の上下動シミュレーション解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(1994))
3. 9) 立花ほか：原子力発電所における地震観測記録のシミュレーション解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(2005))
3. 10) 東海第二原子力発電所 工事計画認可申請書 工事計画に係る補足説明資料(日本原子力発電(株), 2018)
3. 11) 宇都宮ほか：原子力発電所の地震動観測と解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(1981))
3. 12) 藤田ほか：泊発電所の地震動とシミュレーション解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(1996))
3. 13) 木下ほか：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(その1)～(その3)(日本建築学会大会学術講演梗概集(1998))
3. 14) 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. 15) 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. 16) 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), 2015)
3. 17) 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. 18) 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

各建物・構築物の

ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定

目 次

- 1. ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果 ..... 別紙 1-1
  - 1.1 燃料加工建屋..... 別紙 1-1

## 1. ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果

### 1.1 燃料加工建屋

燃料加工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を第 1.1-1 表に示す。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第 1.1-2 表に示す。

水平方向，鉛直方向ともに 1 次が地盤—建屋連成モードになっている。水平方向のモード減衰定数は，刺激係数の大きな 1 次では，NS 方向は 24.3%の内 23.54%が，EW 方向は 25.0%の内 24.3%が 2 次でも NS 方向は 27.2%の内 26.37%が，EW 方向は 27.2%の内 26.43%が地盤減衰の影響であり全体に占める割合が大きい。3 次では NS 方向は 9.6%の内 7.06%が，EW 方向は 10.2%の内 7.62%が地盤減衰の影響であり 1 次，2 次に比較して小さいが刺激係数も小さいため建屋への地震応答に与える影響は小さいと考えられる。鉛直方向のモード減衰定数は，刺激係数の大きな 1 次では，49.4%の内 49.14%が地盤減衰の影響であり全体に占める割合が大きい。2 次では 8.4%の内 5.55%，3 次では 4.3%の内 1.34%と 1 次に比較して割合が小さいが刺激係数も小さいため建屋への地震応答に与える影響は小さいと考えられる。

これより，燃料加工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屋の減衰よりもかなり大きく，特に底面の影響が大きいと言える。

第 1.1-1 表 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果(燃料加工建屋)

(a) NS 方向 S<sub>S</sub>-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考
1	3.22	24.3%	1.382	建屋-地盤連成 1 次
2	6.36	27.2%	0.334	
3	11.88	9.6%	-0.160	

(b) EW 方向 S<sub>S</sub>-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考
1	3.26	25.0%	1.336	建屋-地盤連成 1 次
2	6.33	27.2%	0.321	
3	12.47	10.2%	-0.133	

(c) UD 方向 S<sub>S</sub>-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考
1	5.02	49.4%	1.096	建屋-地盤連成 1 次
2	21.96	8.4%	-0.125	
3	38.68	4.3%	0.039	



第 1.1-2 表 建屋及び地盤ばねの減衰定数並びにひずみエネルギーの比率(燃料加工建屋)

方向	部材				1次			2次			3次		
					① 各部材の 減衰定数	② ひずみエネ ルギーの比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② ひずみエネ ルギーの比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② ひずみエネ ルギーの比率	①×②
NS 方向	建屋				3.0%	25.34%	0.76%	3.0%	27.51%	0.83%	3.0%	84.51%	2.54%
	地盤 ばね	側面	T.M.S.L. 56.80	並進	95.5%	0.13%	0.13%	97.7%	0.00%	0.00%	98.8%	0.00%	0.00%
			T.M.S.L. 50.30	並進	91.6%	1.10%	1.01%	95.6%	0.08%	0.08%	97.6%	0.02%	0.02%
			T.M.S.L. 43.20	並進	88.1%	2.76%	2.43%	93.8%	0.59%	0.55%	96.6%	0.15%	0.14%
		T.M.S.L. 35.00	並進	88.9%	0.87%	0.78%	94.2%	0.43%	0.41%	96.9%	0.08%	0.08%	
		T.M.S.L. 34.23	並進	89.2%	0.31%	0.28%	94.4%	0.16%	0.15%	96.9%	0.03%	0.03%	
		T.M.S.L. 31.53	並進	89.3%	0.22%	0.20%	94.4%	0.14%	0.13%	97.0%	0.02%	0.02%	
		T.M.S.L. 31.53	底面	並進	33.6%	49.20%	16.53%	53.4%	31.66%	16.90%	70.4%	3.98%	2.80%
	T.M.S.L. 31.53	底面	回転	10.8%	20.07%	2.17%	20.7%	39.43%	8.16%	35.4%	11.22%	3.97%	
	合計(モード減衰定数)						24.3%			27.2%			9.6%
EW 方向	建屋				3.0%	23.36%	0.70%	3.0%	25.55%	0.77%	3.0%	86.03%	2.58%
	地盤 ばね	側面	T.M.S.L. 56.80	並進	95.6%	0.13%	0.13%	97.7%	0.00%	0.00%	98.8%	0.00%	0.00%
			T.M.S.L. 50.30	並進	91.7%	1.08%	0.99%	95.6%	0.07%	0.07%	97.8%	0.01%	0.01%
			T.M.S.L. 43.20	並進	88.2%	2.75%	2.43%	93.7%	0.54%	0.51%	96.8%	0.17%	0.16%
		T.M.S.L. 35.00	並進	89.0%	0.90%	0.80%	94.2%	0.41%	0.39%	97.0%	0.11%	0.11%	
		T.M.S.L. 34.23	並進	89.4%	0.32%	0.29%	94.4%	0.16%	0.15%	97.1%	0.04%	0.04%	
		T.M.S.L. 31.53	並進	89.4%	0.23%	0.20%	94.4%	0.14%	0.13%	97.1%	0.03%	0.03%	
		T.M.S.L. 31.53	底面	並進	33.8%	50.64%	17.12%	53.2%	30.49%	16.22%	71.5%	6.27%	4.48%
	T.M.S.L. 31.53	底面	回転	11.2%	20.59%	2.31%	21.0%	42.64%	8.95%	37.3%	7.33%	2.73%	
	合計(モード減衰定数)						25.0%			27.2%			10.2%
UD 方向	建屋				3.0%	8.8%	0.26%	3.0%	93.6%	2.81%	3.0%	98.5%	2.96%
	地盤 ばね	T.M.S.L. 31.53	底面	並進	53.9%	91.2%	49.14%	86.1%	6.4%	5.55%	91.8%	1.5%	1.34%
合計(モード減衰定数)						49.4%			8.4%			4.3%	

## 別紙 2

各建物・構築物の弾性設計用地震動  $S_d$ ,  
基準地震動  $S_s$  及び基準地震動を 1.2 倍した地震力に対する  
最大応答せん断ひずみ

## 目 次

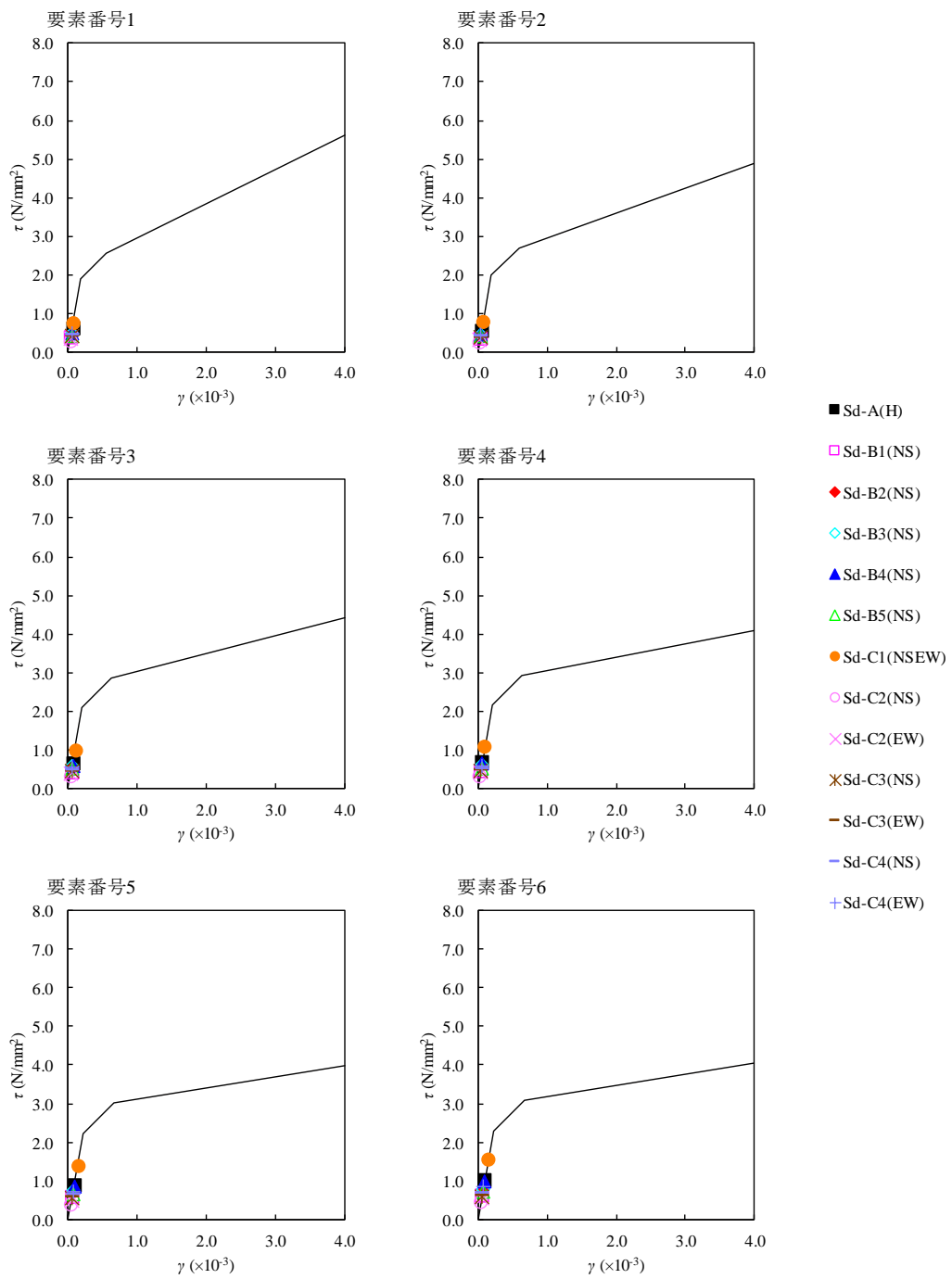
- 1. 各建物・構築物の最大応答せん断ひずみ..... 別紙 2-1
  - 1.1 燃料加工建屋..... 別紙 2-1

1. 各建物・構築物の最大応答せん断ひずみ

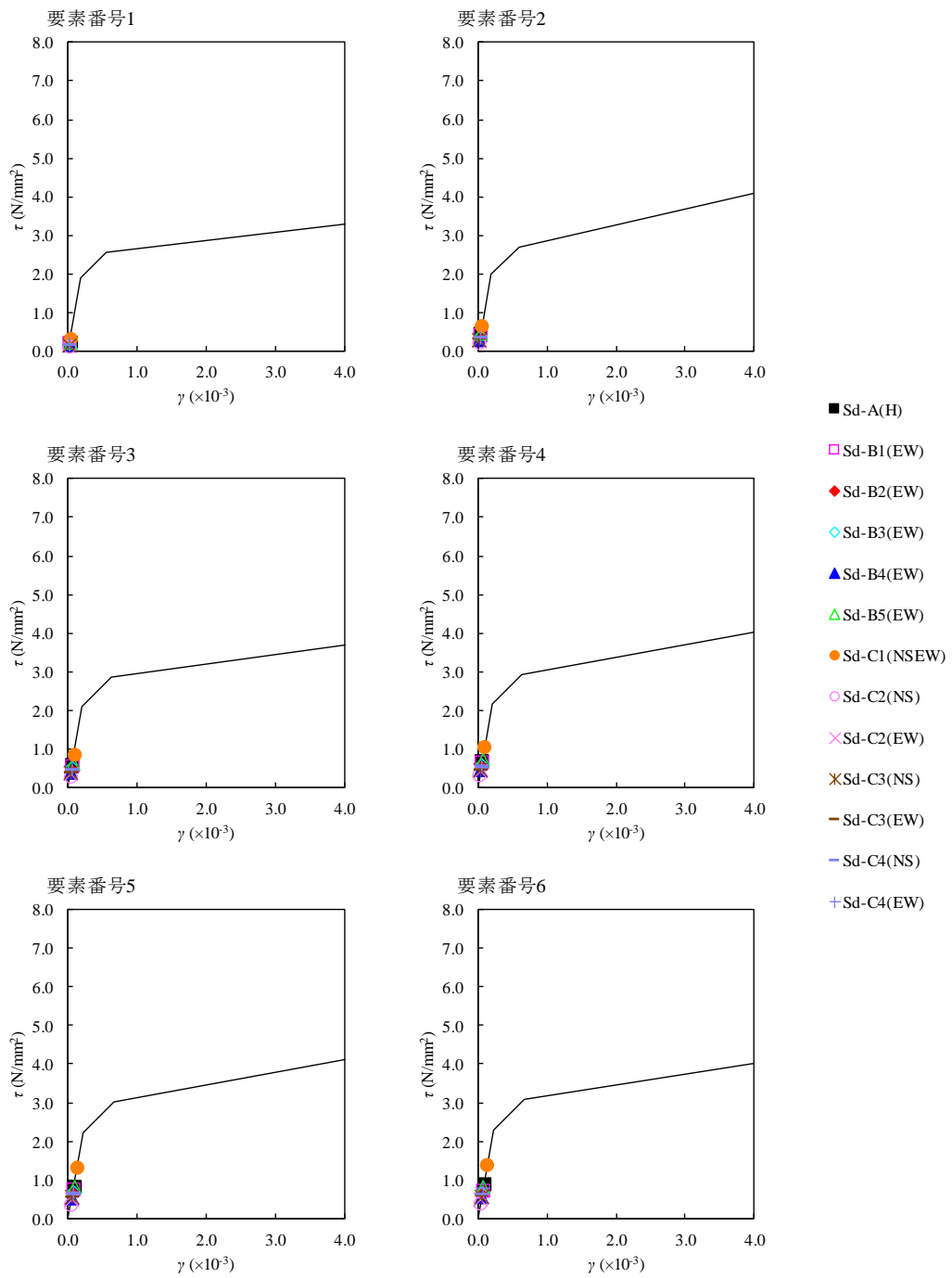
1.1 燃料加工建屋

1.1.1 弾性設計用地震動  $S_d$  応答レベル

燃料加工建屋の弾性設計用地震動  $S_d$  による基本ケースの耐震壁の最大応答せん断ひずみを第 1.1.1-1 図及び第 1.1.1-2 図に示す。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。



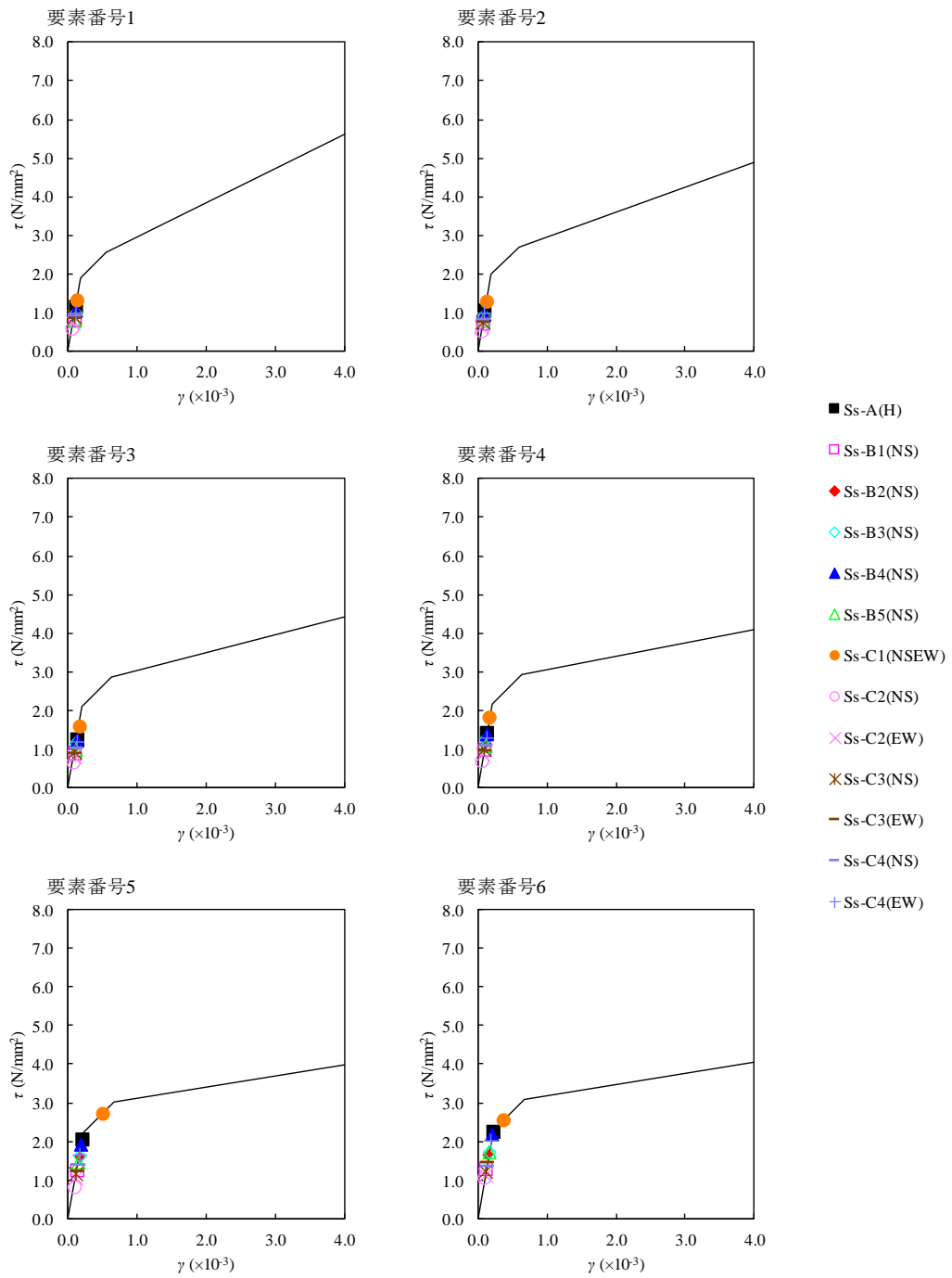
第1.1.1-1 図  $\tau$ - $\gamma$  関係と最大応答値 (弾性設計用地震動 Sd, ケース No. 0, NS 方向)



第1.1.1-2図  $\tau$ - $\gamma$  関係と最大応答値 (弾性設計用地震動 Sd, ケース No. 0, EW 方向)

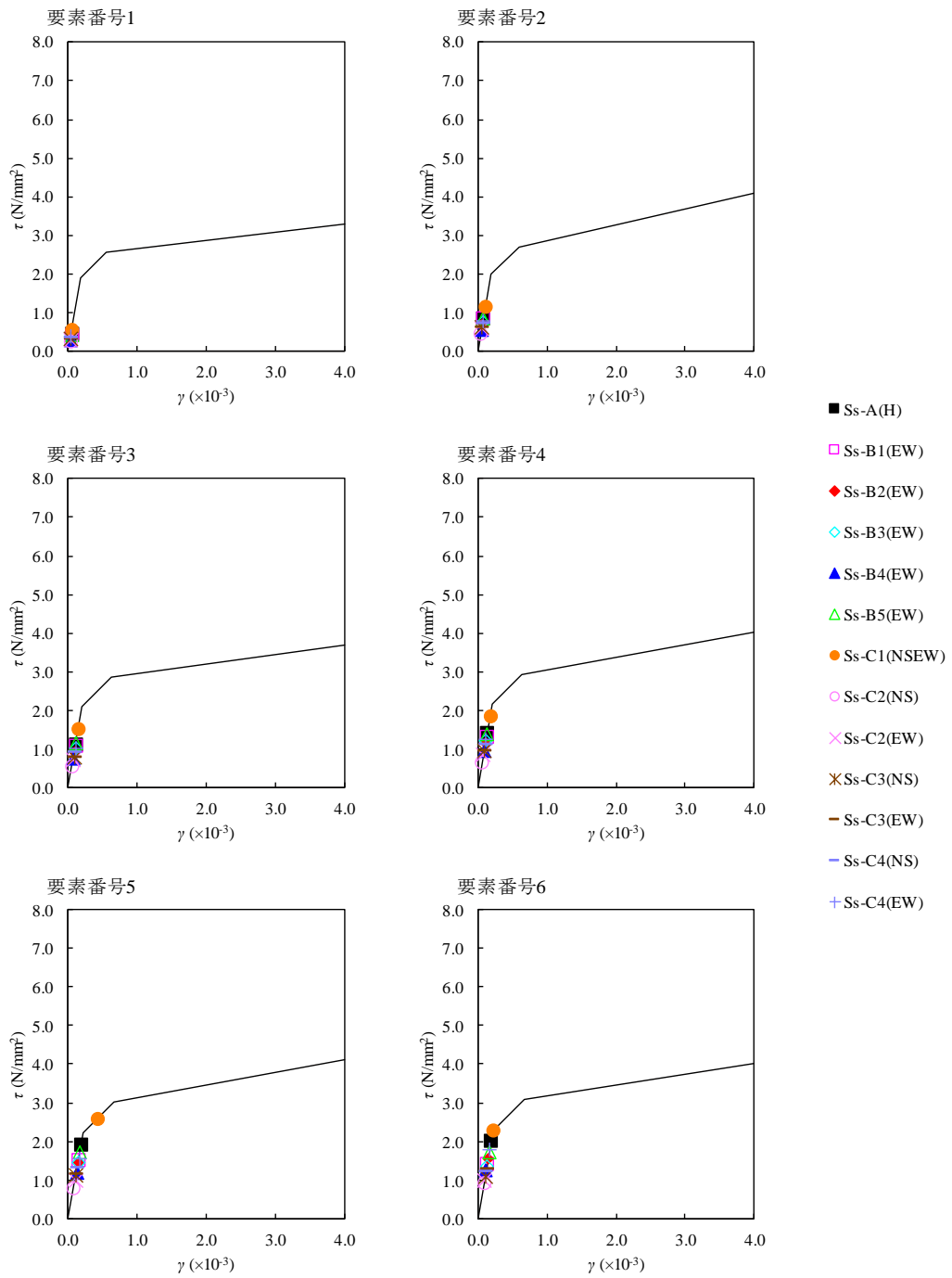
### 1.1.2 基準地震動 $S_s$ 応答レベル

燃料加工建屋の基準地震動  $S_s$  による基本ケースの耐震壁の最大応答せん断ひずみを第 1.1.2-1 図及び第 1.1.2-2 図に示す。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 折点と第 2 折点の間程度となっている。



第 1.1.2-1 図  $\tau - \gamma$  関係と最大応答値 (基準地震動 Ss, ケース No. 0, NS 方向)

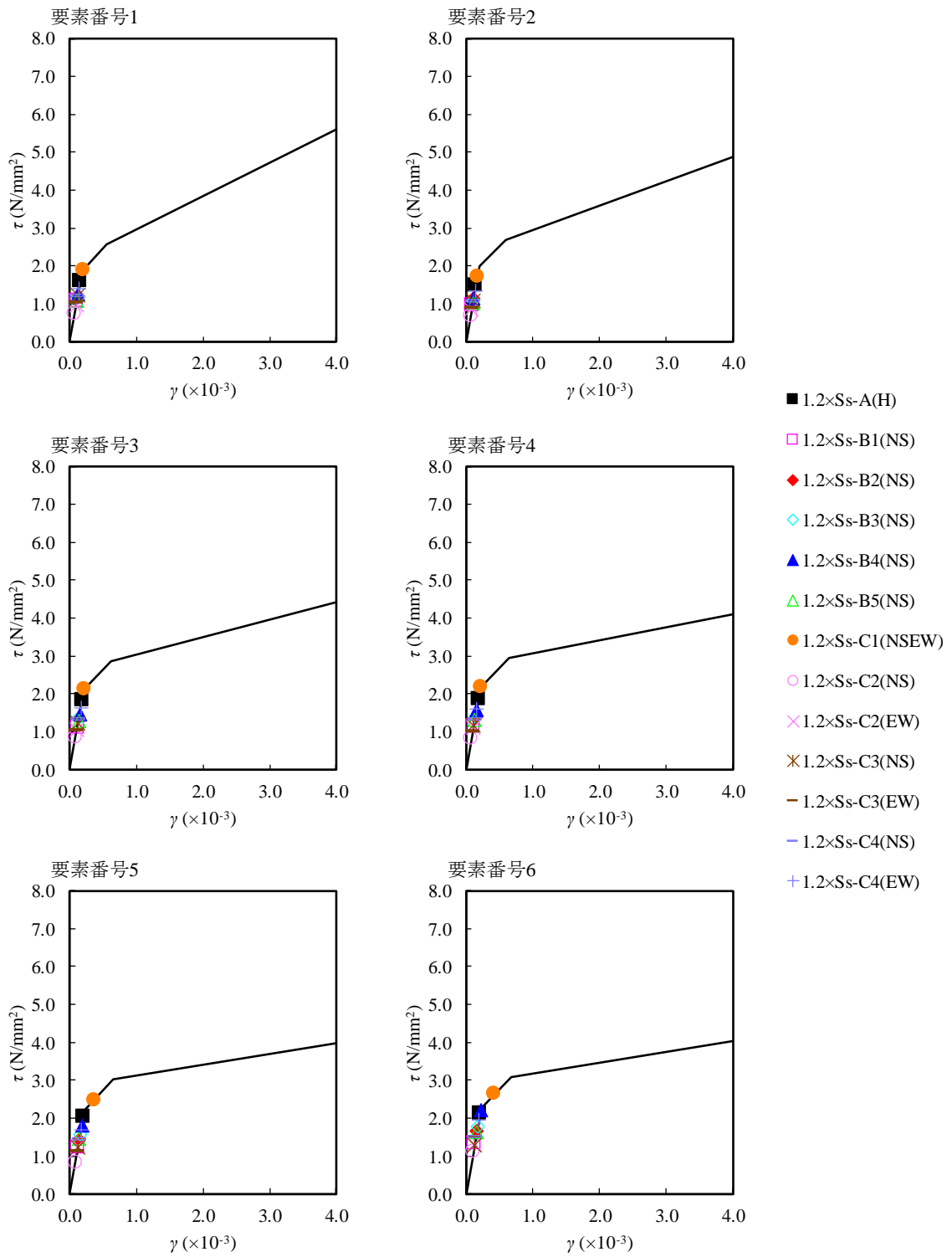




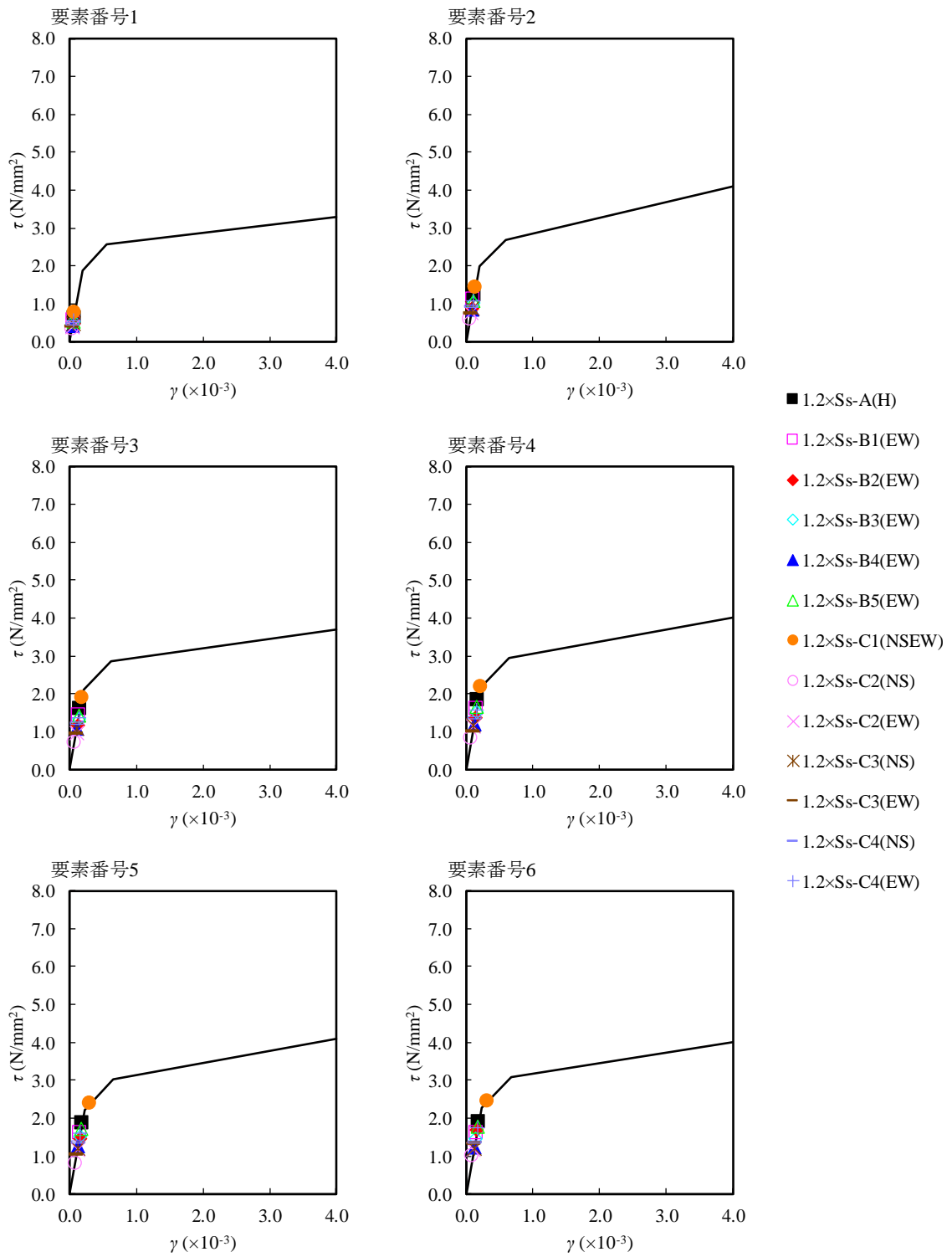
第 1.1.2-2 図  $\tau - \gamma$  関係と最大応答値 (基準地震動 Ss, ケース No. 0, EW 方向)

### 1.1.3 基準地震動を1.2倍した地震力の応答レベル

燃料加工建屋の基準地震動を1.2倍した地震力(以下、「 $1.2 \times S_s$ 」という。)による耐震壁の最大応答せん断ひずみを第1.1.3-1図及び第1.1.3-2図に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、 $1.2 \times S_s$ の応答レベルで、スケルトンカーブの第1折点と第2折点の間程度となっている。



第 1. 1. 3-1 図  $\tau - \gamma$  関係と最大応答値 (1.2×Ss, NS 方向)



第 1.1.3-2 図  $\tau - \gamma$  関係と最大応答値 (1.2×Ss, EW 方向)

別紙 3

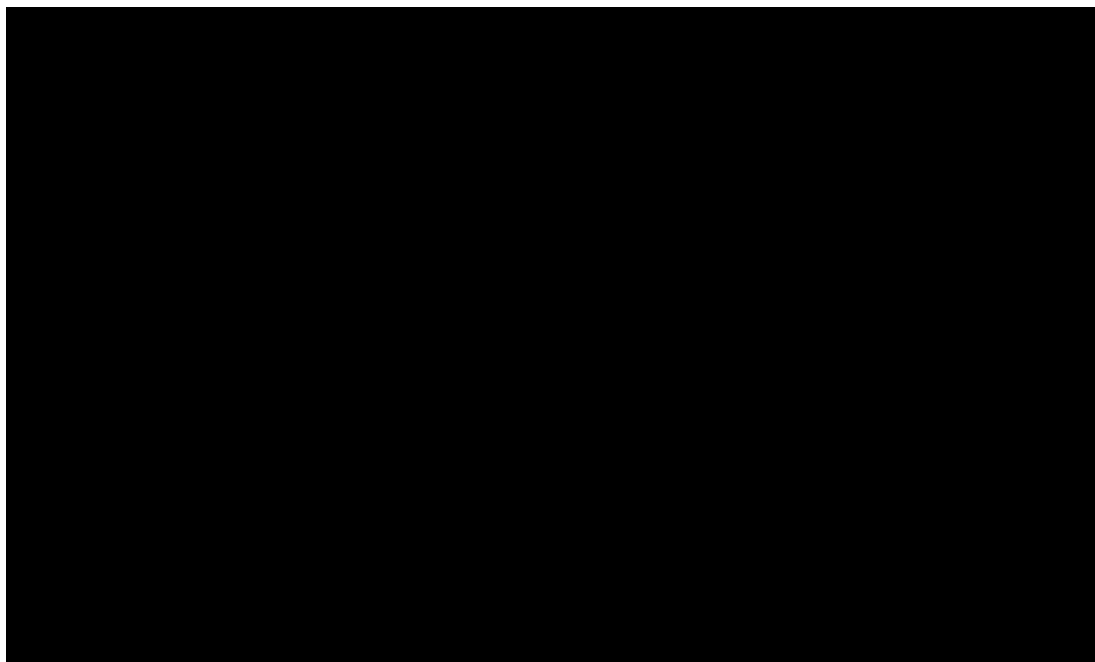
各建物・構築物の図面集

目 次

1. 安全冷却水 B 冷却塔基礎の概略図..... 別紙 3-1
2. 燃料加工建屋の概略図..... 別紙 3-4

1. 安全冷却水 B 冷却塔基礎の概略図

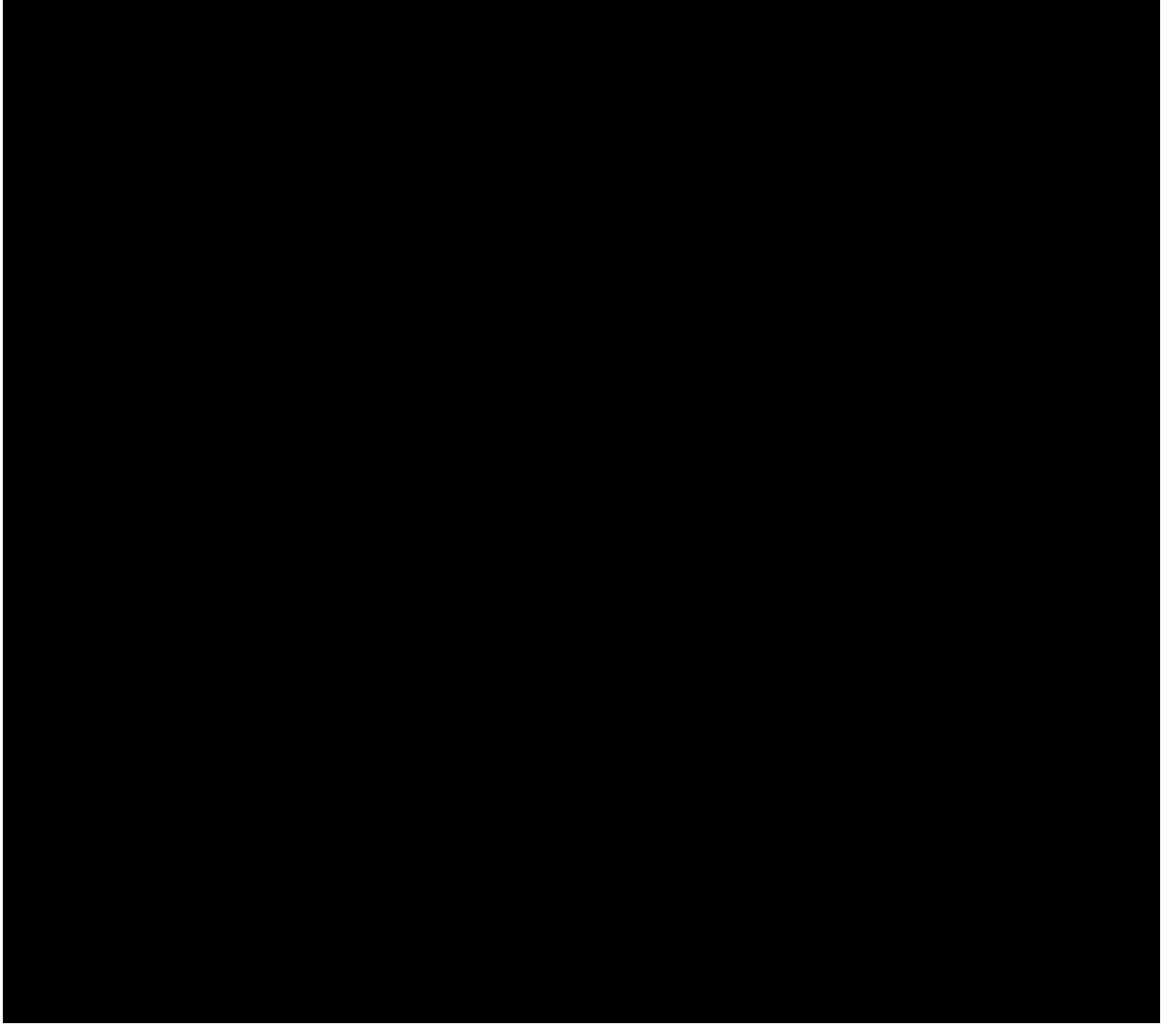
安全冷却水 B 冷却塔基礎の概略平面図を第 1. -1 図に，概略断面図を第 1. -2 図に示す。



注記：構築物寸法は、基礎外面押えとする。

第 1. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 55. 30m)

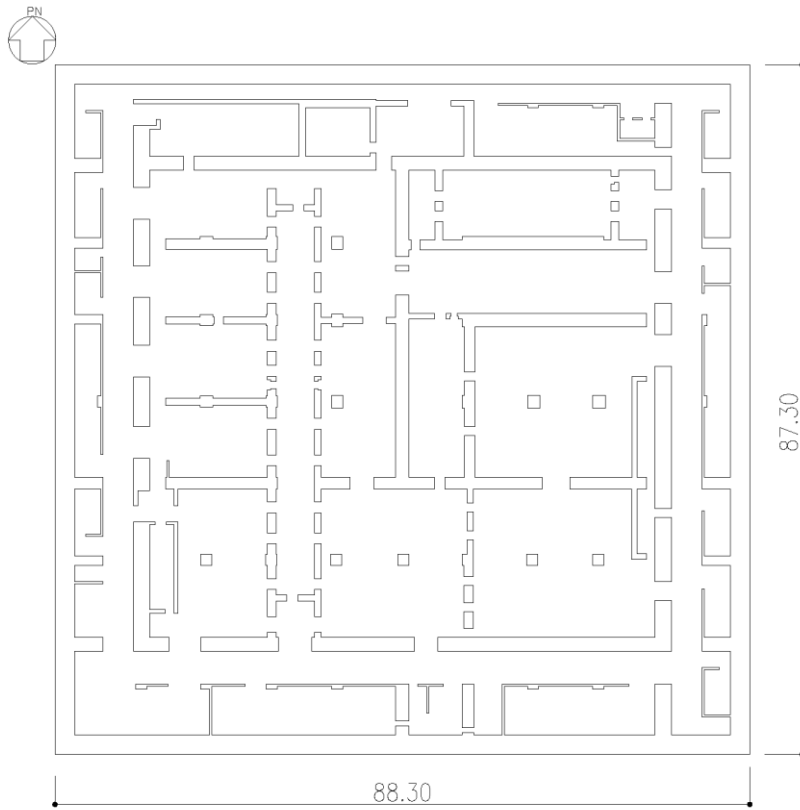




第 1.-2 図 概略断面図

## 2. 燃料加工建屋の概略図

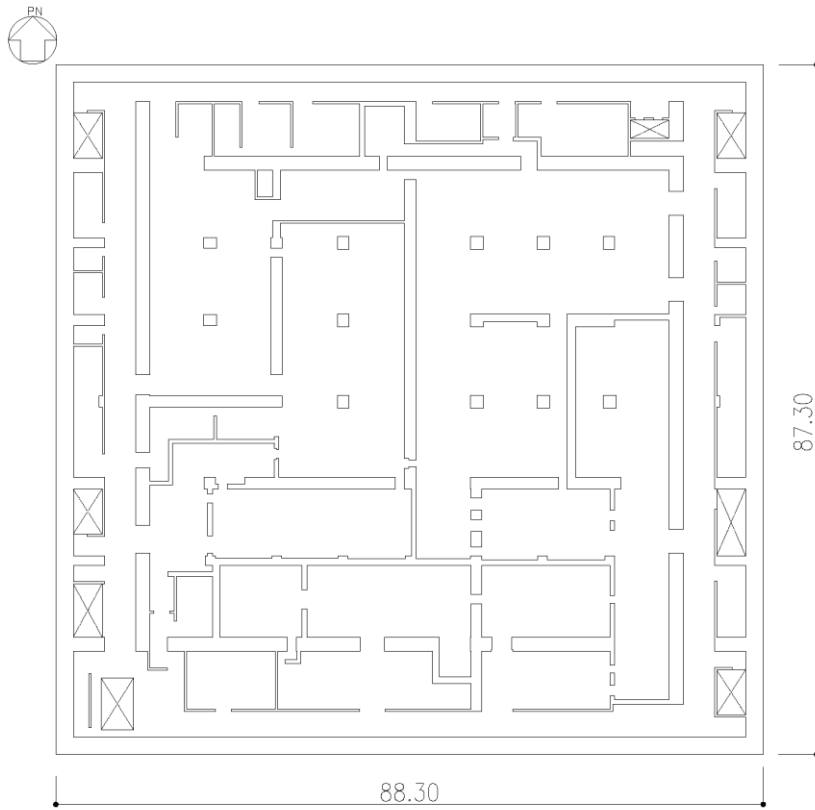
燃料加工建屋の概略平面図を第 2. -1 図に，概略断面図を第 2. -2 図に示す。



(単位：m)

注記：建屋寸法は，壁外面押えとする。

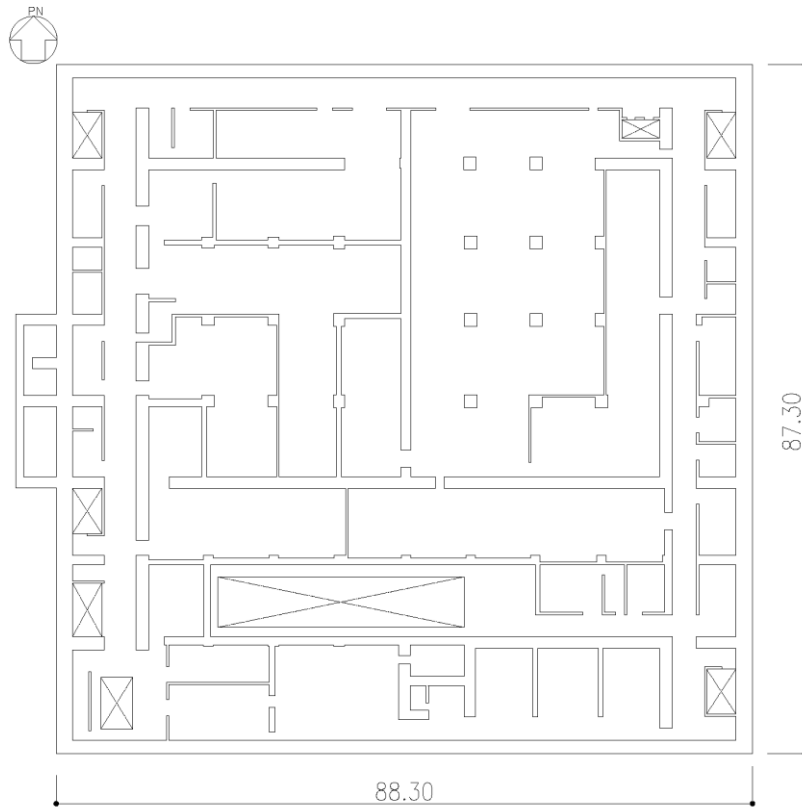
第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 35. 00m) (1/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

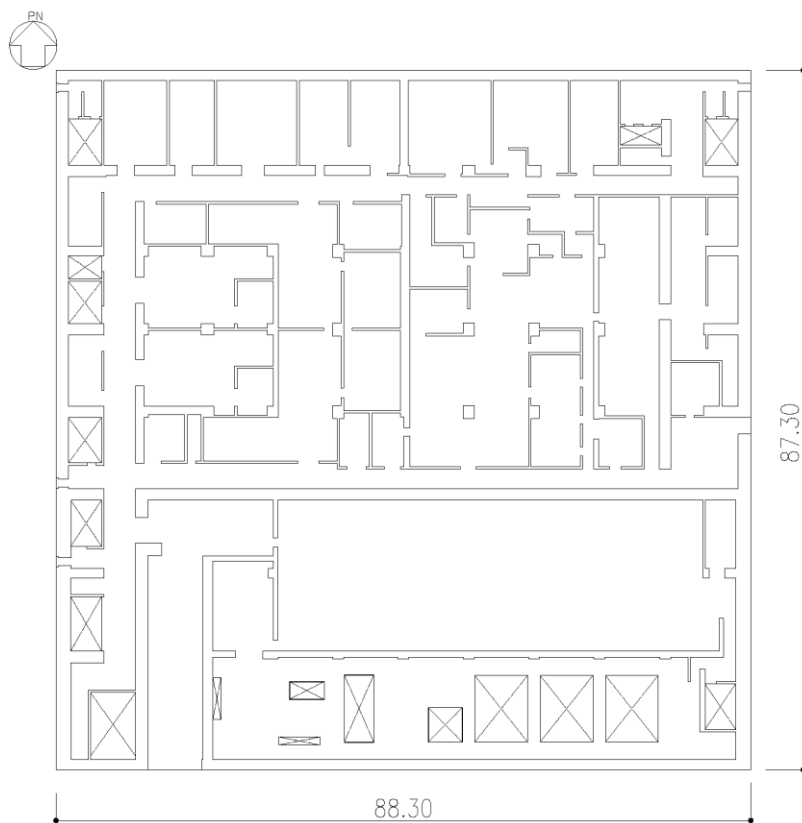
第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 43. 20m) (2/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は，壁外面押えとする。

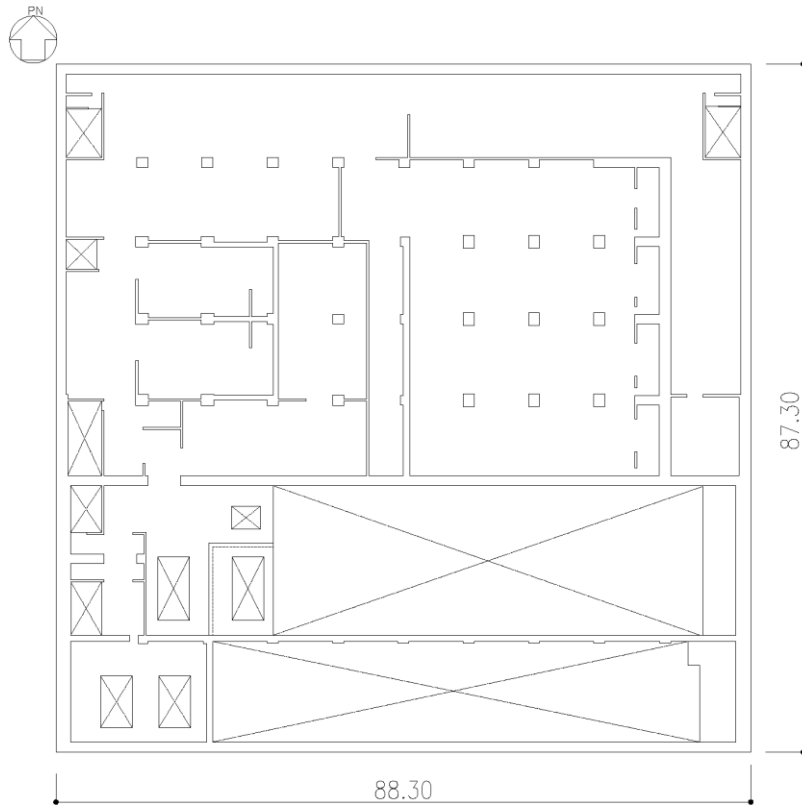
第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 50. 30m) (3/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

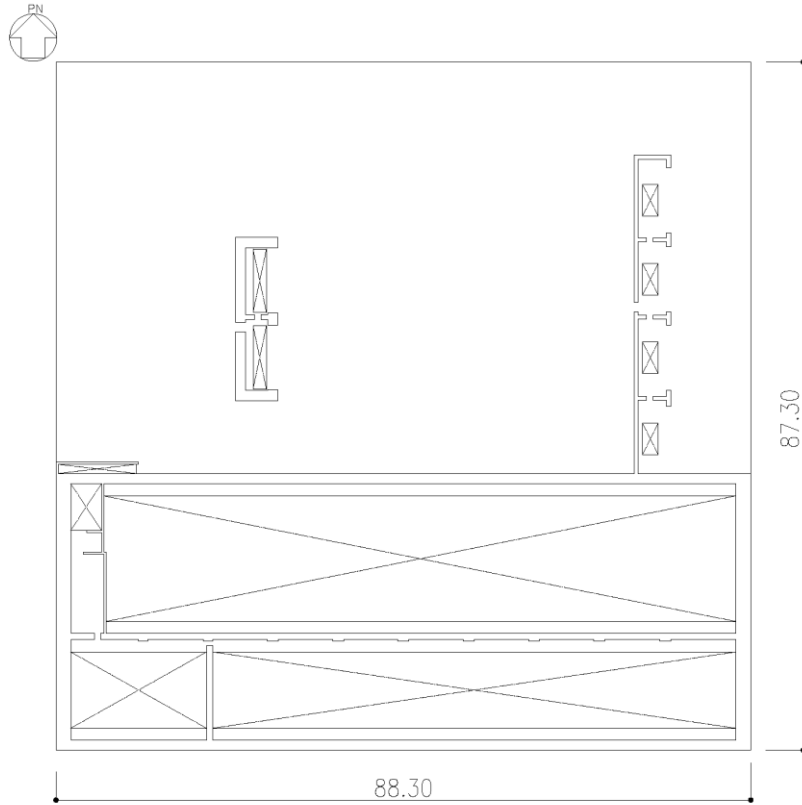
第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 56. 80m) (4/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 62. 80m) (5/7)

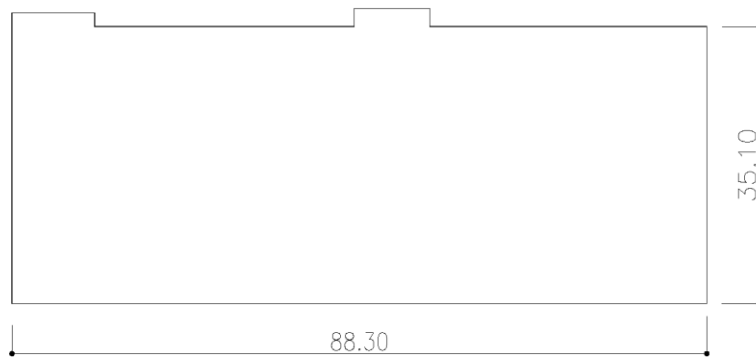


(単位：m)

注記：建屋寸法は，壁外面押えとする。

第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 70. 20m) (6/7)

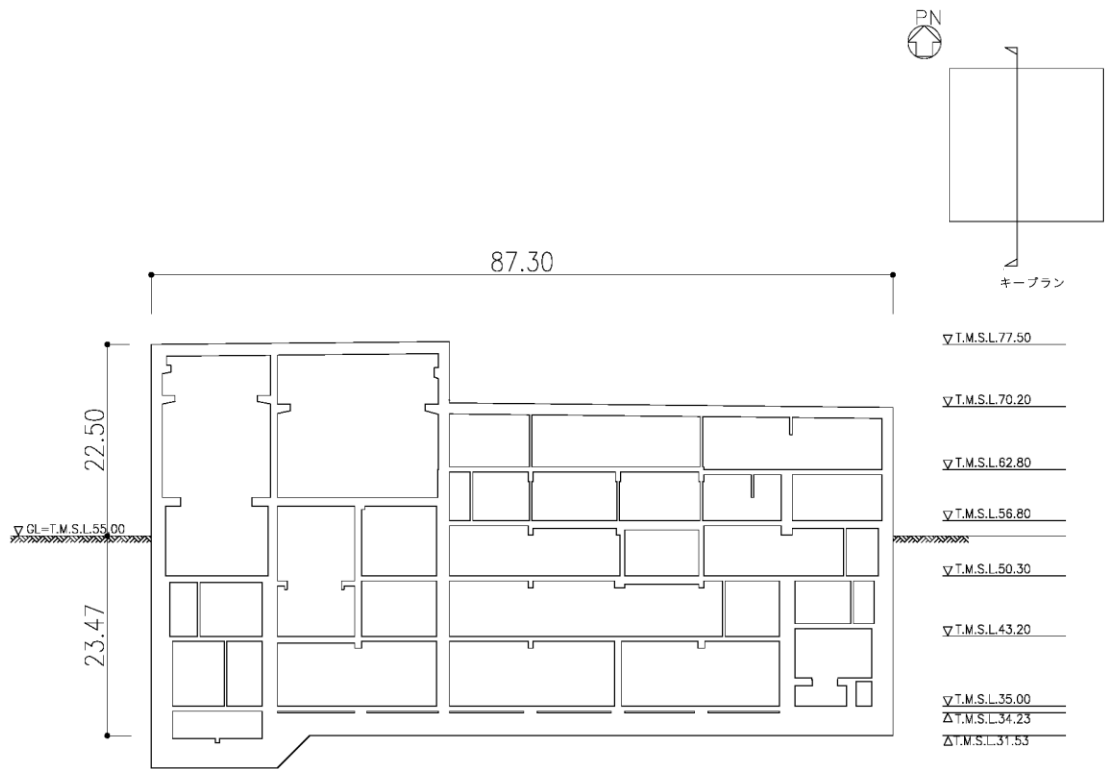




(単位：m)

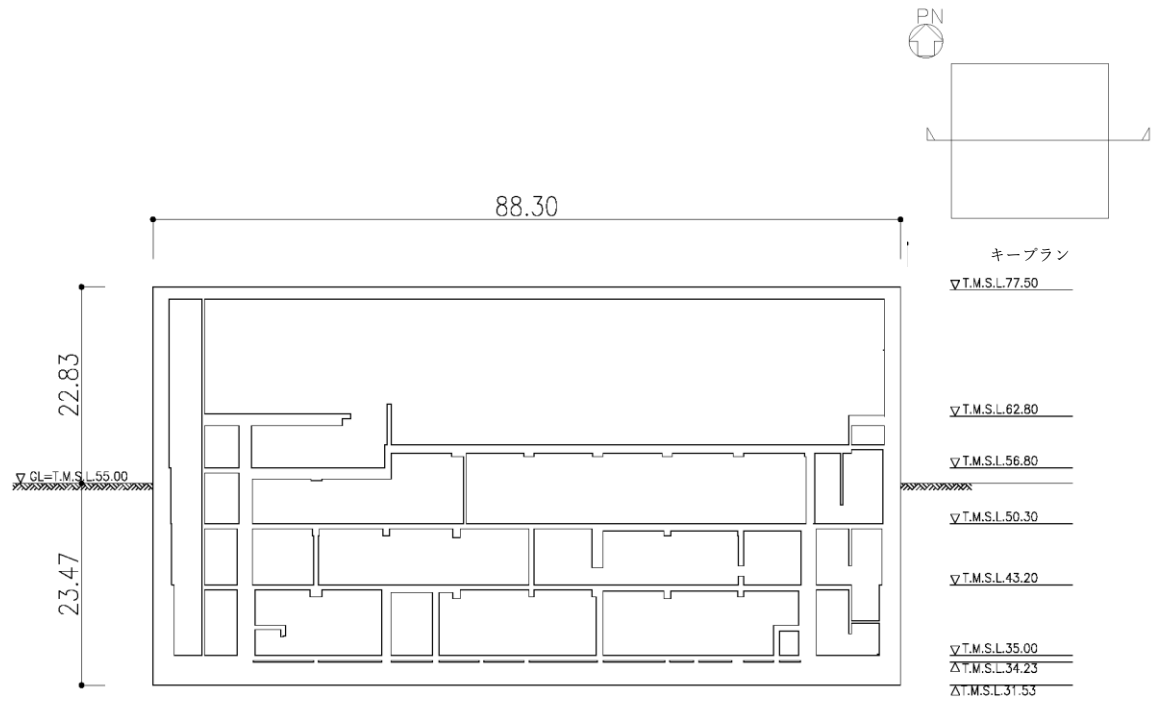
注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

第 2. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 77. 50m) (7/7)



(単位 : m)

(a) NS 方向



(単位 : m)

(b) EW 方向

第 2.-2 図 概略断面図