

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震建物 10 R7
提出年月日	令和4年10月19日

設工認に係る補足説明資料

地震応答計算書に関する

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

1. 文章中の下線部は R6 から R7 への変更箇所を示す。
2. 本資料 (R7) は 7 月 14 日に提示した「地震応答計算書に関する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 R6」に対し、ヒアリングにおける指摘事項である地震観測記録のシミュレーション解析についての指摘を踏まえ、記載内容を見直したものである。

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	4
2.1 地震応答解析における減衰特性の取扱い	4
2.2 建物・構築物の減衰定数の設定	5
2.3 地盤への逸散減衰の設定	6
2.4 減衰マトリクスの策定	9
2.5 復元力特性(履歴減衰)の設定	11
3. 減衰定数に関する既往の知見の整理	12
3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験	13
3.2 実建造物の振動試験	15
3.3 実建造物の地震観測	17
4. 減衰定数の検討	43
4.1 地盤への逸散減衰の検討	43
4.2 再処理施設等における地震観測記録を用いたシミュレーション解析	52
5. 減衰定数を整理する上での建屋の応答レベル	78
5.1 弾性設計用地震動 S_d 応答レベル	78
5.2 基準地震動 S_s 応答レベル	78
5.3 基準地震動を 1.2 倍した地震力の応答レベル	78
6. 地震応答解析モデルにおける RC 造部の減衰定数の設定についての考察	79
6.1 地震応答解析モデルに設定する減衰の整理	80
6.2 減衰定数に影響を与える要因	81
6.3 再処理施設等における地震観測記録との対応	83
6.4 地震応答解析モデルの RC 造部の減衰定数の設定に関する考察	84
6.5 まとめ	88
【参考文献】	89

■：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

本資料は、再処理施設及び MOX 燃料加工施設に対する、第 1 回設工認申請（令和 2 年 12 月 24 日申請）のうち、以下に示す建物・構築物（本資料においては、建物及び屋外機械基礎とし、洞道、竜巻防護対策設備及び排気筒は含まない。＊）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考え方を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「Ⅳ-2-1-1-1-1-1 安全冷却水 B 冷却塔基礎の地震応答計算書」
- ・MOX 燃料加工施設 添付書類「Ⅲ-2-1-1-1-1-1 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-6-2-1-1-1 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」

なお、本資料で示す地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数の設定の考え方については、今回申請対象以外の再処理施設、MOX 燃料加工施設及び廃棄物管理施設（以下、「再処理施設等」という。）の建物・構築物に対しても適用するものである。

※：本資料に示す内容において、適用範囲外とした施設についてはそれぞれの資料において説明を行う。また、本資料の引用で他の資料の説明に代える場合には、引用範囲を明らかに記すこととする。

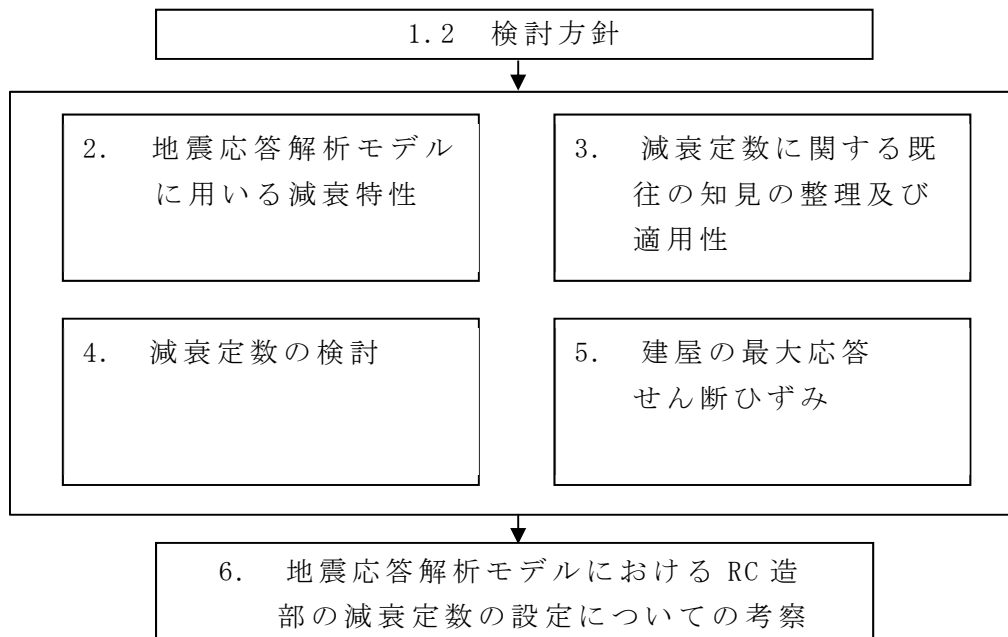
1.2 検討方針

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, 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。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%とすることを基本としている。なお, 第 1 回設工認申請で申請した MOX 燃料加工施設の燃料加工建屋については, 既設工認時に当時の発電炉の安全審査の実績を考慮して, RC 造部の減衰定数を保守的に 3%として設定した経緯があること, また, 当該建屋全体の減衰としては逸散減衰の影響が支配的であることも踏まえ, 3%を採用している。上記の燃料加工建屋における RC 造部の減衰定数の考え方の詳細については「6.4.3 燃料加工建屋の減衰定数」に示す。

減衰定数の設定根拠の検討フローを第 1.2-1 図に示す。

本資料では, まず 2 章で地震応答解析モデルに用いる減衰特性の整理及び減衰の設定方法について述べる。次に, 3 章で RC 造部の減衰定数に関する既往の実験及び先行発電炉での検討実績を示す。また, これらの既往の知見を再処理施設等の建物・構築物に適用しても差し支えないことを考察する。4 章では再処理施設等の建物・構築物における減衰定数の検討として, ひずみエネルギー比例型モード減衰定数による検討及び地震観測記録を用いたシミュレーション解析による検討について示す。5 章では既往の知見より減衰定数には振幅依存性がみられる(詳細は「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」に示す。)ことから, 各入力レベルにおける建屋の最大応答せん断ひずみを整理する。最後に 6 章にて 2~5 章での整理・検討を踏まえた上で, 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, 再処理施設等の建物・構築物の減衰定数の設定の妥当性を確認する。



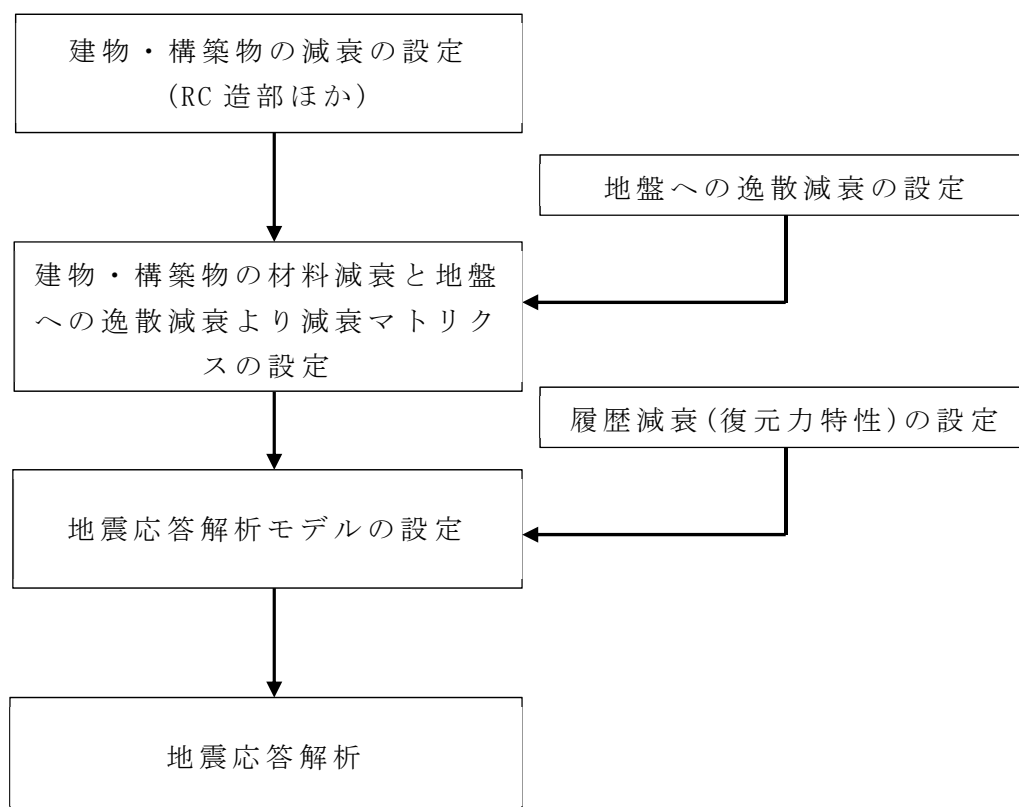
第1.2-1図 減衰定数の設定根拠の検討フロー

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の設定のフロー

2.2 建物・構築物の減衰定数の設定

「JEAG 4601-1987」には、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。再処理施設等の建物・構築物の地震応答解析においても、原則、RC造部の減衰定数を同様に5%としている。ただし、燃料加工建屋の地震応答解析においては、既設工認時の発電炉の安全審査の実績を考慮し設計上の保守性に配慮して3%とした。再処理施設等の建物・構築物の減衰定数の設定状況を第2.2-1表に示す。

第2.2-1表 各施設の建物・構築物の減衰定数の設定状況

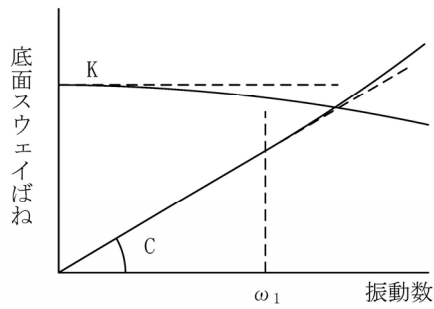
施設	構造種別	減衰定数
再処理施設等の建物・構築物 (燃料加工建屋以外)	RC造	5%
	鉄骨造	2%
燃料加工建屋	RC造	3%

※表中には各施設における建物・構築物(建屋及び屋外機械基礎)の減衰定数を示しており、機器・配管系に分類される屋外機械基礎の上部構造物の減衰定数には適用しない。

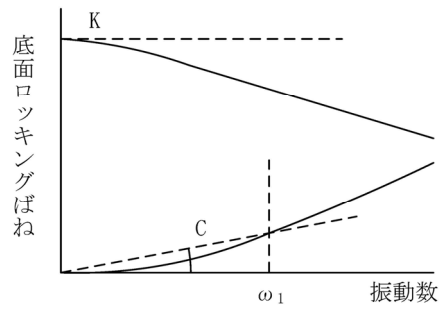
2.3 地盤への逸散減衰の設定

建物・構築物は、「JEAG 4601-1987」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(ω_1)に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾きで定数化する。地盤ばねのばね定数及び減衰係数の算定の概念図を第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。基礎浮き上がりによる回転ばねの剛性の非線形特性を第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。



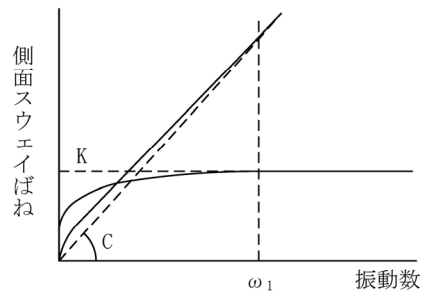
(a) 底面スウェイばね



(b) 底面ロックイングばね

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 ω_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

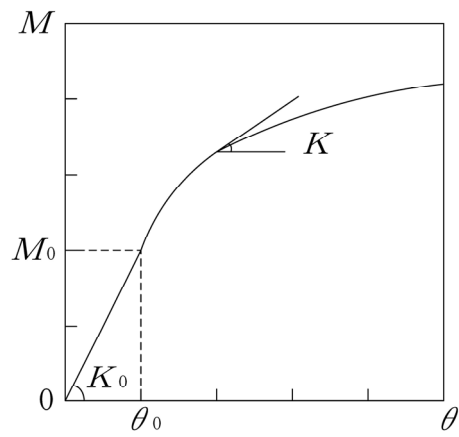


(c) 側面スウェイばね

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 ω_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 地盤ばねのばね定数及び減衰係数の算定の概念図

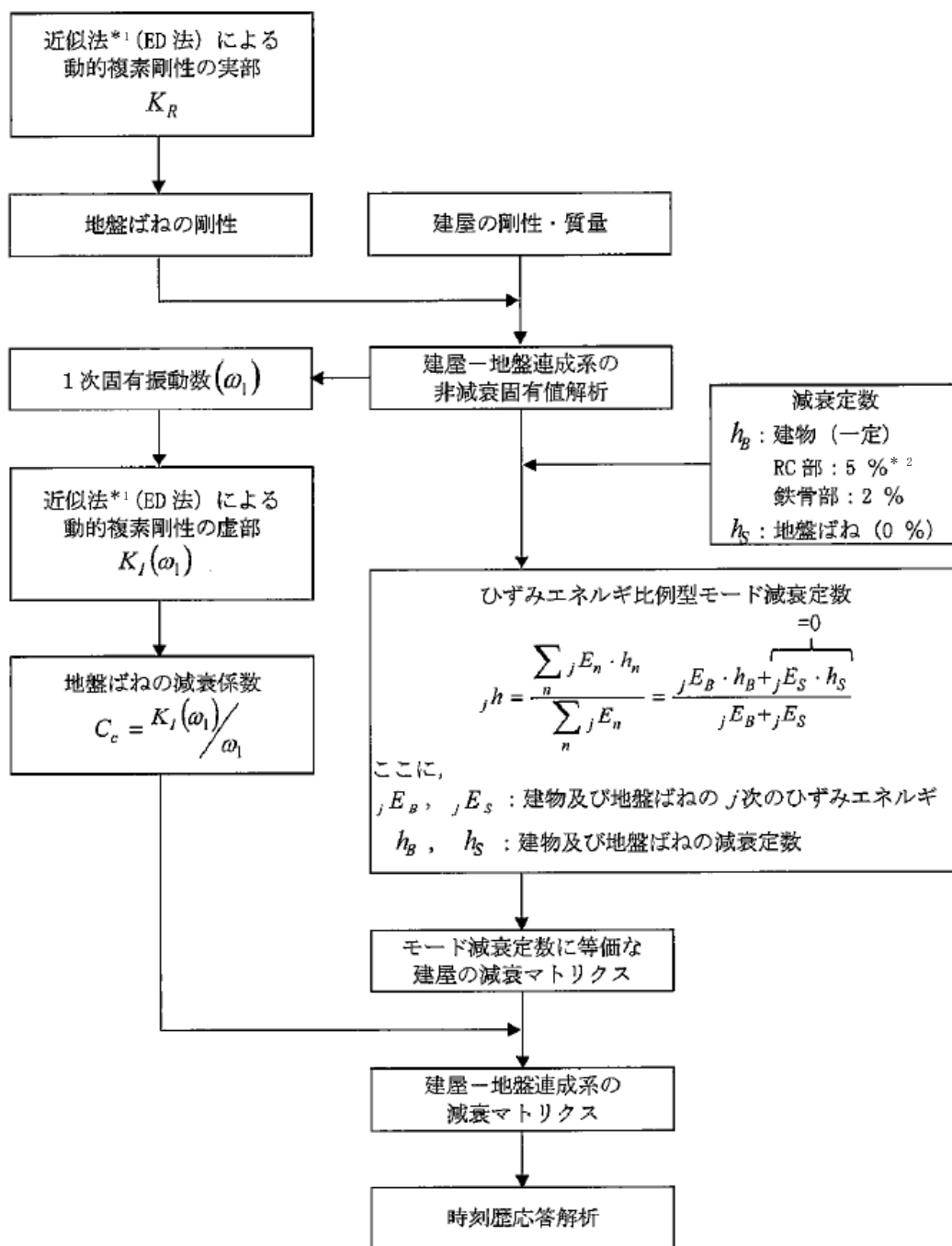


- M : 転倒モーメント
- M_0 : 浮上り限界転倒モーメント
- θ : 回転角
- θ_0 : 浮上り限界回転角
- K_0 : 底面ロックングばねのばね定数(浮上り前)
- K : 底面ロックングばねのばね定数(浮上り後)

第2.3-2図 基礎浮き上がりによる回転ばねの剛性の非線形特性

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 *1: 近似法は, 「JEAG 4601-1991 追補版」に基づく
 *2: 燃料加工建屋では 3%とする

第 2.4-1 図 建物・構築物-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

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、各建物・構築物の基礎部及び二重床の間に位置する耐震壁(連層壁となっている内・外壁及び束壁)の要素はせん断面積が大きく、十分な剛性を有していると判断し、線形材料として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"> ・最大点指向型履歴ループ ・安定ループは面積を持たない 	(第2剛性域内) <ul style="list-style-type: none"> ・最大点指向型履歴ループ ・安定ループは面積を持たない(第3剛性域内) ・最大型指向型ループ ・ディグレイディングトリリニア型の安定ループを形成
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。

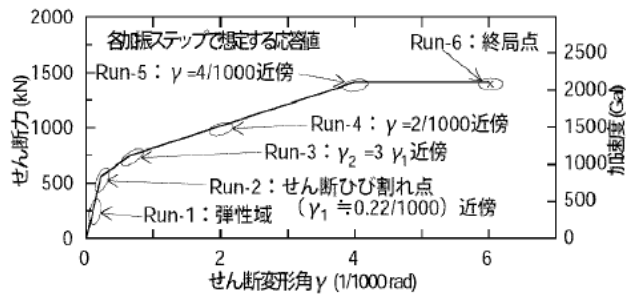
なお、次頁以降の既往の知見はBWR及びPWRの発電炉を対象にしたものであるが、再処理施設等の建物・構築物は、BWRの発電炉と同様に軟岩サイトに埋込んで設置していることから、BWRの発電炉に対する知見を適用して考察を行う。ただし、PWRの発電炉に対する知見についても、参考扱いとしたうえで確認を行う。

また、BWRの発電炉に対する知見の適用に当たっては、以下①～③に示すとおり、BWRの発電炉の建物・構築物と地震応答解析に係る構造的特徴及び想定する地震動に関して類似性を有することから、BWRの発電炉に対する知見を、再処理施設等に適用しても差し支えないと判断した。

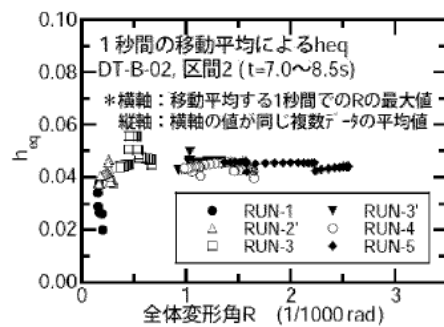
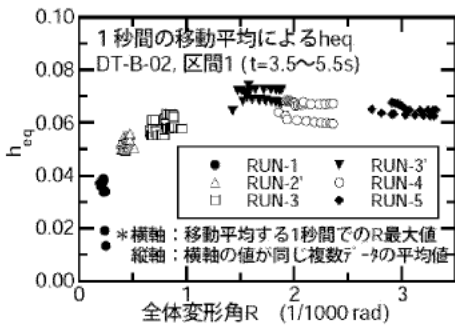
- ①：再処理施設等の建物・構築物と発電炉の建物・構築物は、その躯体がどちらも遮蔽や閉じ込め機能を兼ねるため、JEAG 4601に基づく耐震設計を行っており、平面的に釣り合いよく配置された耐震壁を主たる耐震要素とするRC造の壁式構造である。
- ②：再処理施設等の建物・構築物と発電炉の建物・構築物は、どちらも1次固有モードが卓越し、且つ、1次固有周期が短い剛な構造物であるとともに、十分な支持性能を有する岩盤に支持されている。
- ③：再処理施設等の建物・構築物と発電炉の建物・構築物は、想定する地震動（基準地震動 S_s ）の入力レベル及び地震に対する建屋応答が概ね同程度である。

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^{3.1)}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耐震壁試験結果より算出された等価粘性減衰定数を示す。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等価粘性減衰定数^{3.1)}

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)^{3.2)})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-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 等	・ 鉄骨屋根 ・ 建屋各階床 ・ 基礎 等	・ 建屋各階床 ・ 基礎 等	・ 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
地震条件	Vs=1620m/s	E=45J/cm ²	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 0.25s	3Hz 約3Hz	2.7Hz 2.4Hz	3.5Hz 3.9Hz	4.8Hz -	3.8Hz 3.8Hz	4.1Hz 4.0Hz	0.19s 0.19s
減衰定数	試験 1次: 5.1%	-	1次: 33%	1次: 20%	1次: 5.4%	1次: 19~20%	1次: 41%	1次: 36%	-
解析	FEM法による 質量系: 7.5%	33.70%	減衰: 3%	1次: 15%	減衰: 3%	-	減衰: 5%	減衰: 5%	減衰: (0.00064e)
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 210t/cm ² 解析 325t/cm ²	210t/cm ² 520t/cm ²	210t/cm ² 360t/cm ²	210t/cm ² 235t/cm ²	270t/cm ² 432t/cm ²	210t/cm ² -	420t/cm ² -	260t/cm ² 440t/cm ²	210t/cm ² 520t/cm ²
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 のみ)	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	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	東海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 [160t 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 (F-N) 振動測定も含む ・ REB ・ E/B	・ 1/C ・ PCV (F-N) 振動測定も含む ・ REB	・ 1/C ・ PCV (F-N) 振動測定も含む ・ REB	・ O/S (F-N) 振動測定も含む ・ 1/C	・ O/S (F-N) 振動測定も含む ・ 1/C ・ C/V	・ O/S (F-N) 振動測定も含む ・ 1/C ・ C/V	・ O/S (F-N) 振動測定も含む ・ 1/C ・ C/V	
地震条件	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 PCV: 4.02 Hz 1/C: 7.66 Hz	PCV: 4.97Hz (NS) 1/C: 18.62Hz (NS) 9.71Hz (EB)	PCV: 5.01Hz (NS) 4.97Hz (EB) 1/C: 15.78Hz (NS) 10.62Hz (EB)	0/S: 4.7Hz 1/C: 19.4Hz (X) 10.6Hz (Y)	0/S: 15.4Hz (O) 5.9Hz (Y) 1/C: 11.3Hz (O) 12.9Hz (Y)	0/S: 16.9~17.1Hz 1/C: 13.7~13.9Hz (O) 11.3~11.9Hz (Y) C/V: 1.1Hz	1/C: 15.03Hz (NS) 8.1Hz (EB) A/B: 15.44Hz (NS) 5.50Hz (EB)	1/C: 18.1Hz (NS) 5.01Hz (EB) A/B: 15.99Hz (NS) 4.89Hz (EB)
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% (EB)	PCV: 1.7% (NS) 1.8% (EB) 1/C: 13.0% (NS) 2.0% (EB)	0/S: 3.0% 1/C: 2.4% (O) 2.0% (Y)	0/S: 17.0% (O) 5.8% (Y) 1/C: 14.6% (O) 2.8% (Y)	0/S: 15.3% 1/C: 12.0% (O) 3.1% (Y)	1/C: 15.22% (NS) 5.44% (EB) A/B: 17.4% (NS) 5.13% (EB)	1/C: 14.1% (EB) A/B: 18.8% (NS) 5.5% (EB)
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 1/C: 230 t/cm ² PCV: 304 t/cm ² 解析 1/C: 270 t/cm ² PCV: 400 t/cm ²	1/C: 230 t/cm ² PCV: 304 t/cm ²	1/C: 257 t/cm ² PCV: 315 t/cm ²	RC: 223 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²	RC: 210 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²
解析モデル	設計 S-Rモデル 解析 ・ 全体建屋: 3次元 質量系による ・ PCV: 3D FEM	S-Rモデル	S-Rモデル	上部構造曲げせん断 質量系による S-R FEM 等	上部構造曲げせん断 質量系による S-R FEM 等	上部構造曲げせん断 質量系による S-R FEM 等	上部構造曲げせん断 質量系による S-R FEM 等	
評価方法 評価項目	一質点系固有振動分析 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	一質点系固有振動分析 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	一質点系固有振動分析 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 ・ 減衰定数 ・ 共振曲線	多自由度固有振動分析 のモード決定法 ・ 固有振動数 ・ 減衰定数 ・ モード図 ・ 共振曲線	ハーフパワー法 ・ 固有振動数 ・ 減衰定数 ・ 共振曲線	一質点系固有振動分析 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))^{3.2)}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^{3.3)}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)を含むそれ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。基礎スラブ上の加速度が 500cm/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 ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s ²)	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 -

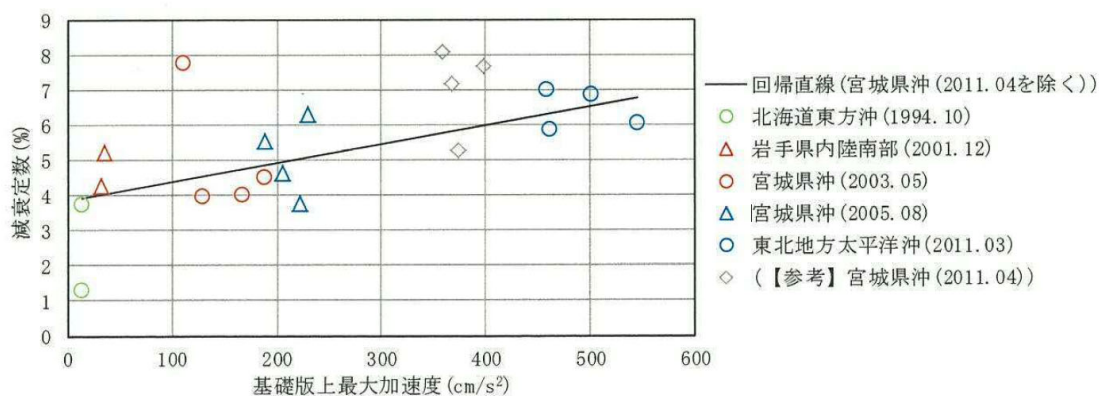
↑ 3.11
以前

(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 ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s ²)	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 -

↑ 3.11
以前

(「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)]^{3.3)}に加筆)

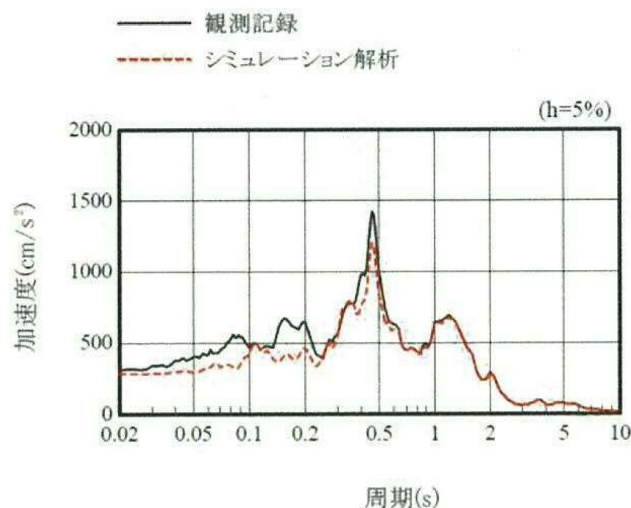


第3.3.1-1図 減衰定数と入力加速度レベルの関係

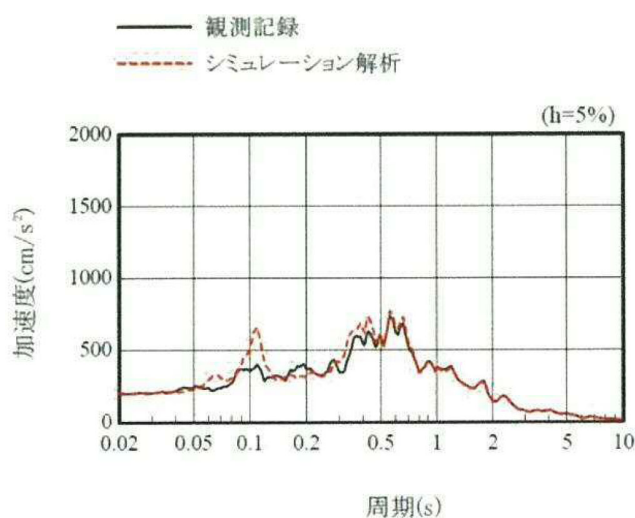
(2) 福島第二・2号機での地震観測

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^{3,4)}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、基礎スラブ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 0.1×10^{-3} 程度となつたとしている。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



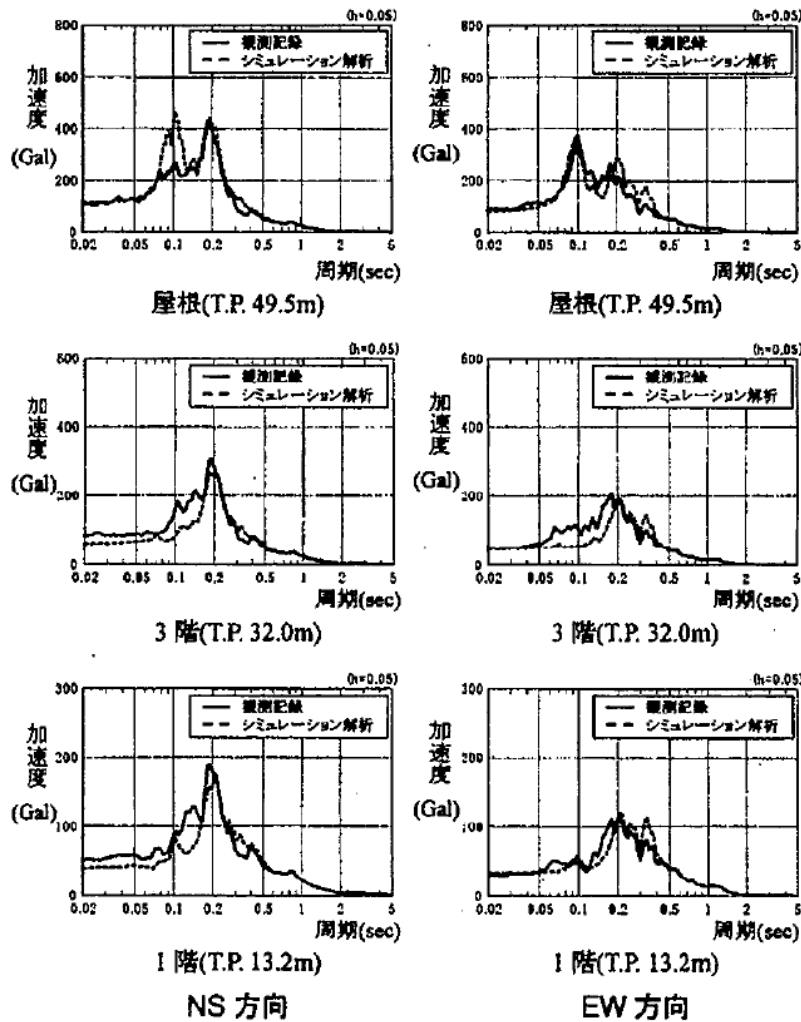
(b) 東西方向

第3.3.1-2図 地上2階の加速度応答スペクトルの比較^{3,4)}

(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^{3,5)}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。



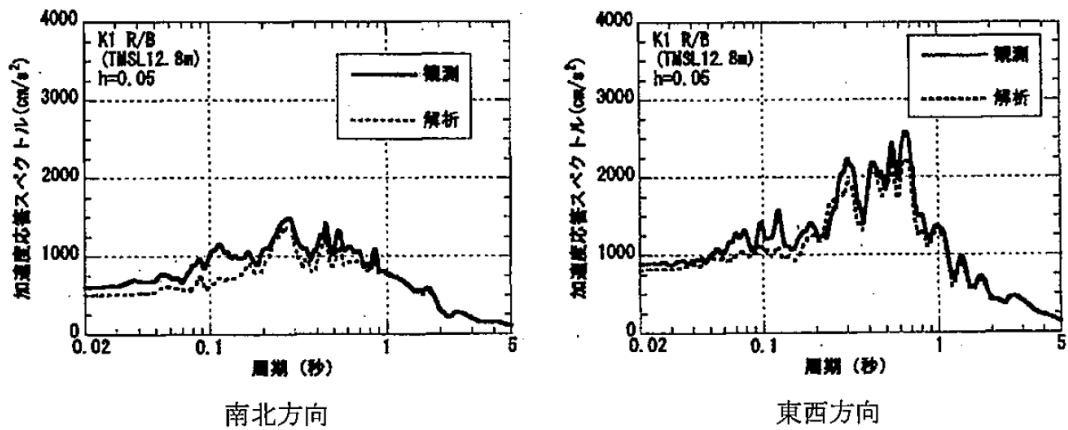
第 3.3.1-3 図 加速度応答スペクトルの比較^{3,5)}

(4) 柏崎刈羽1号機及び7号機の地震観測

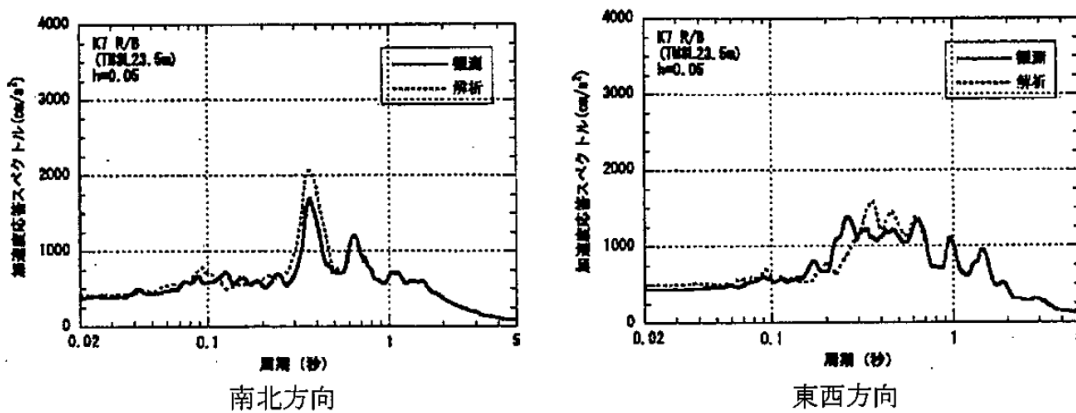
東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機及び7号機原子炉建屋の新潟県中越沖地震を対象としたシミュレーション解析^{3,6)}では、設計時のモデルに実状を踏まえた建屋及び地盤条件を考慮した埋込みSRモデルにより、基礎スラブ上の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際建屋RC造部の材料減衰は5%とし、解析モデルへはひずみエネルギー比例型減衰として与えている。

シミュレーション解析結果の1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1号機で 0.2×10^{-3} 程度、7号機で 0.12×10^{-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



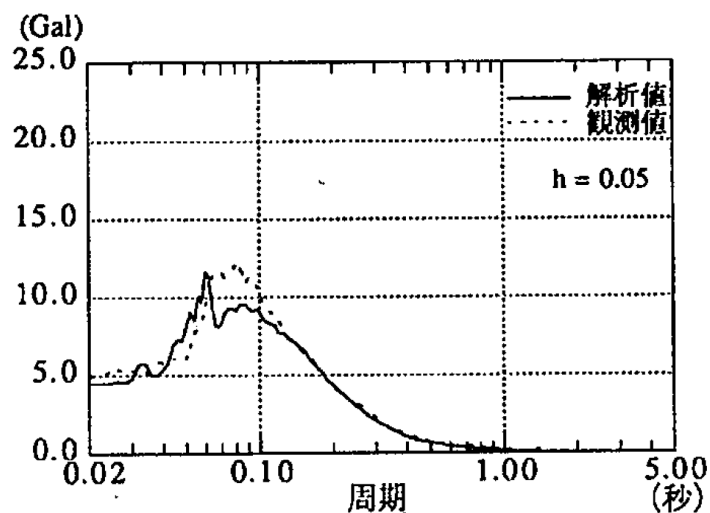
(b) 7号機

第3.3.1-4図 加速度応答スペクトルの比較^{3,6)}

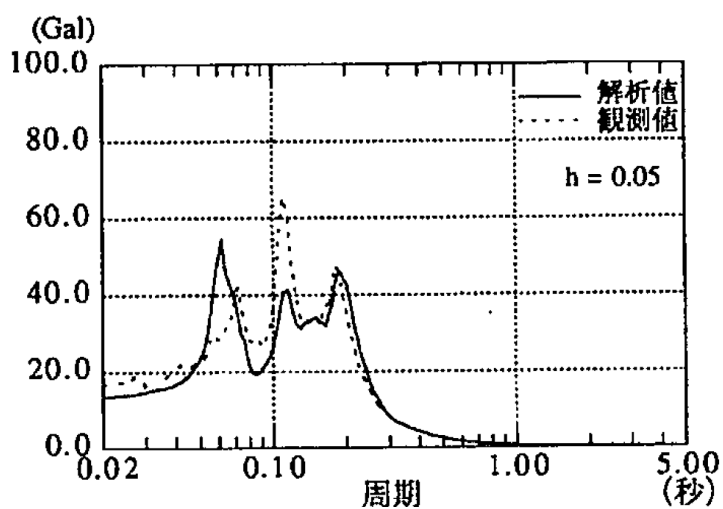
(5) 浜岡 3 号機の地震観測

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^{3,7)}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、基礎スラブ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



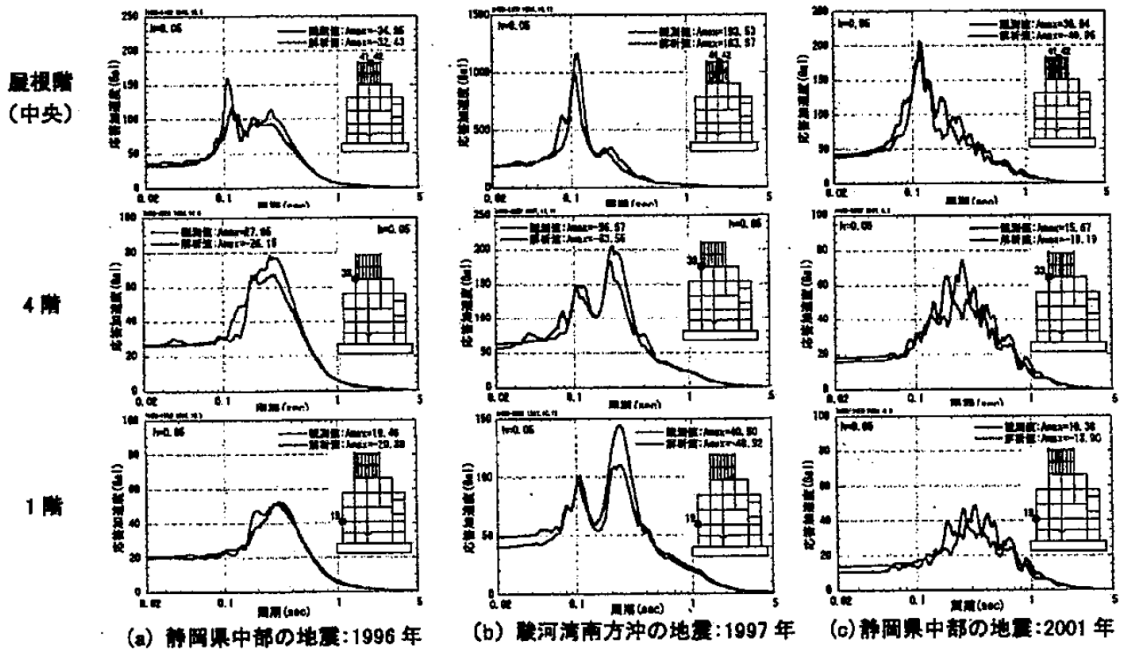
(b) 屋根中央部

第3.3.1-5図 加速度応答スペクトルの比較^{3,7)}

(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^{3,8)}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。



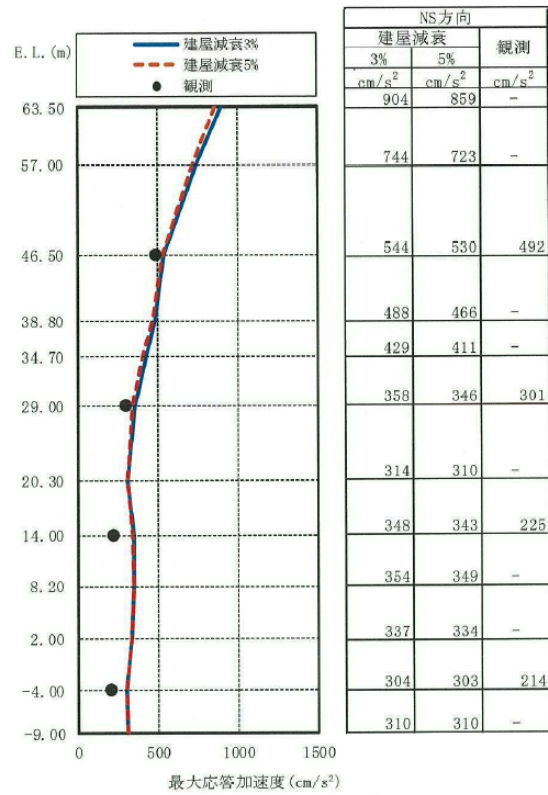
第3.3.1-6図 加速度応答スペクトルの比較^{3,8)}

(7) 東海第二発電所の地震観測

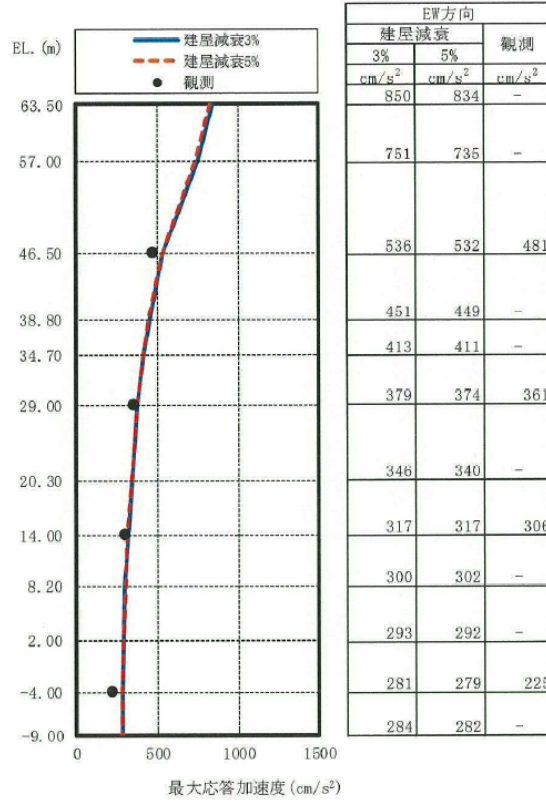
日本原子力発電(株)は東海第二発電所の減衰定数に関する検討^{3.9)}において、原子炉建屋を対象に2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施し、RC造部の減衰定数について検討を行っている。

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。

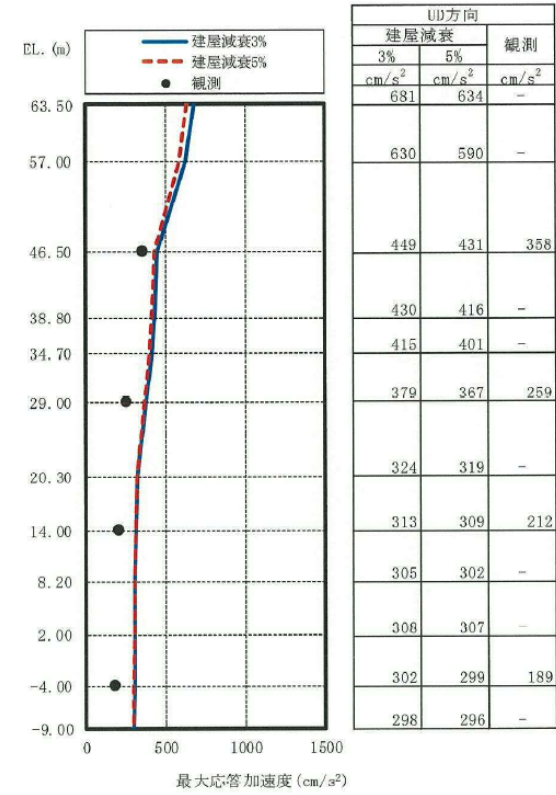
シミュレーション解析の結果、RC造部の減衰3%と5%の両ケース共に観測記録との整合性はほぼ同等であるが、減衰5%の結果のほうが観測記録により整合する傾向にあることが確認された。シミュレーション解析の結果を第3.3.1-7図～第3.3.1-10図に示す。



(a) NS 方向

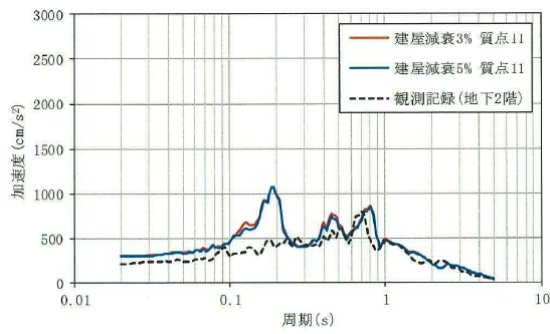


(b) EW 方向

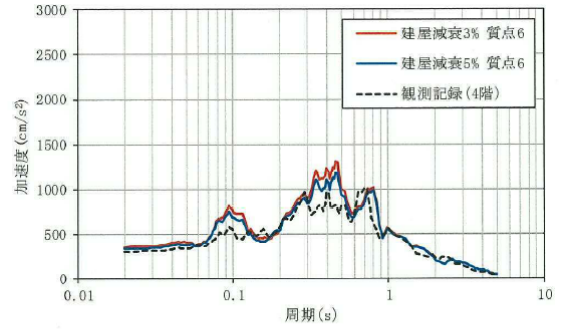


(c) 鉛直方向

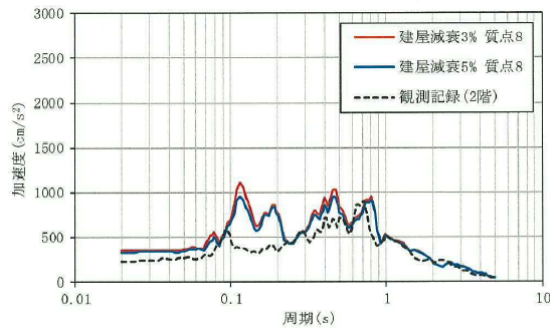
第 3.3.1-7 図 最大応答加速度分布の比較^{3.9)}



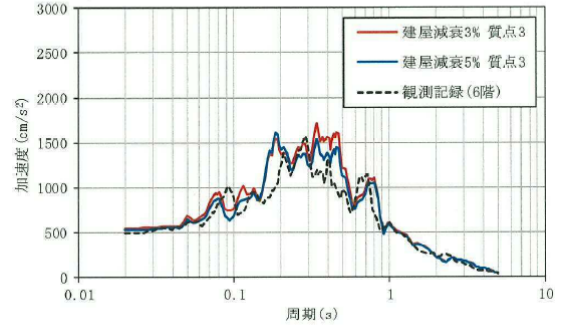
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)

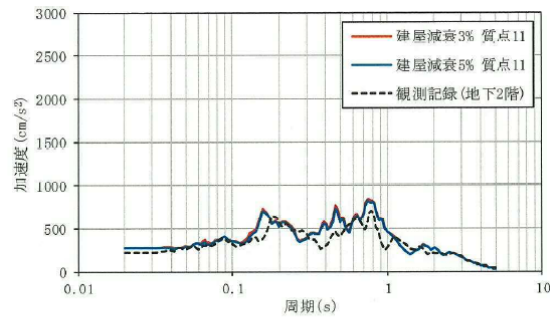


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)

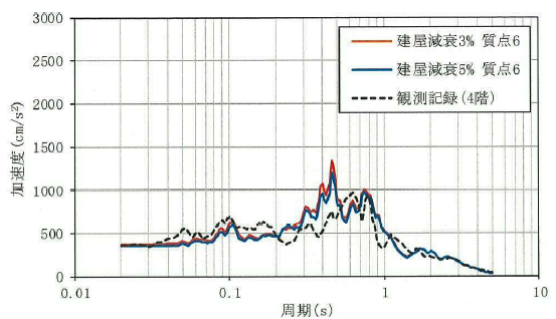


(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

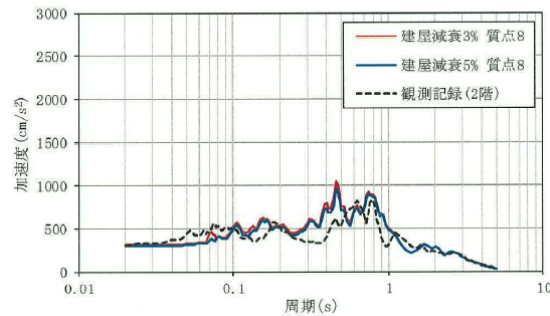
第 3.3.1-8 図 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) 3.9)



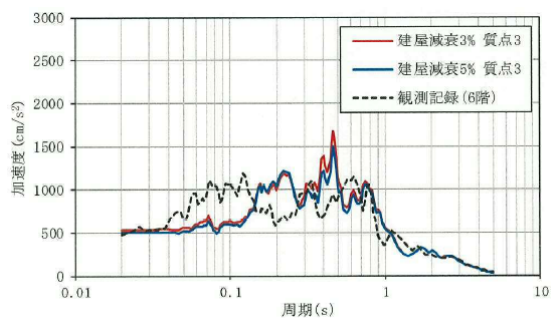
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)

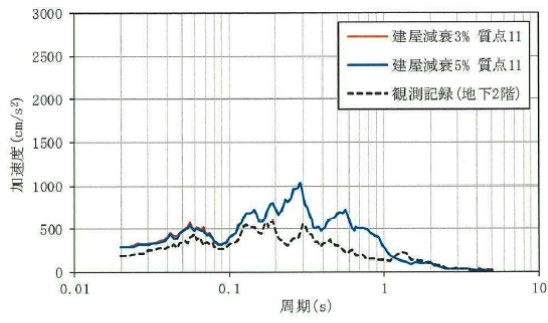


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5%)

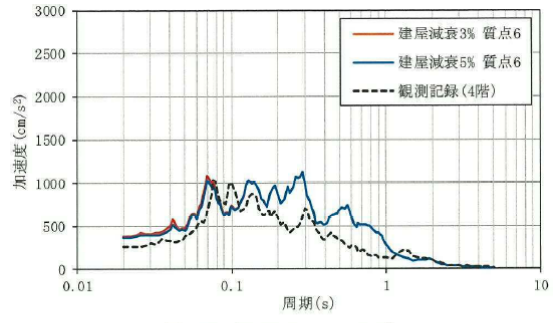


(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

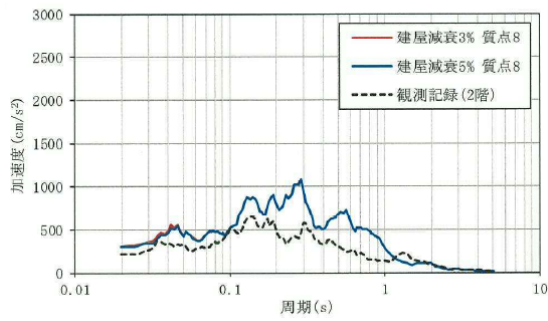
第 3.3.1-9 図 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) 3.9)



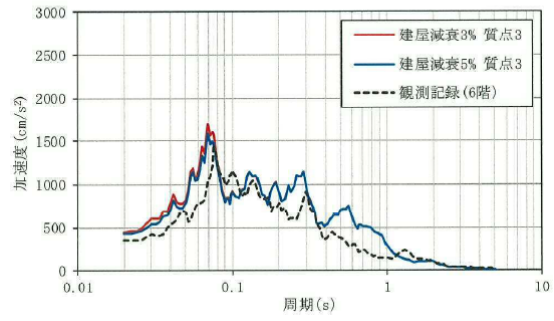
(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)



(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) ^{3.9)}

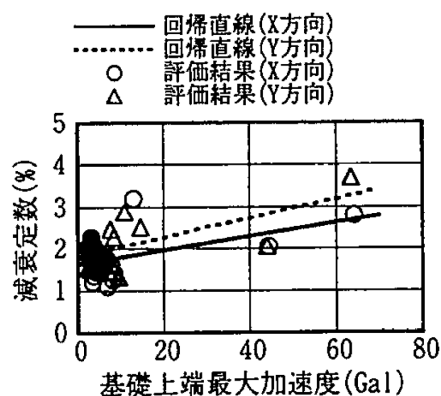
3.3.2 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行前)

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の評価をしている。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 ^{3.10)}	約25cm/s ² (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 ^{3.11)}	約40cm/s ² (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 ^{3.12)}	1cm/s ² ~ 68cm/s ² 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^{3.12)}

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)

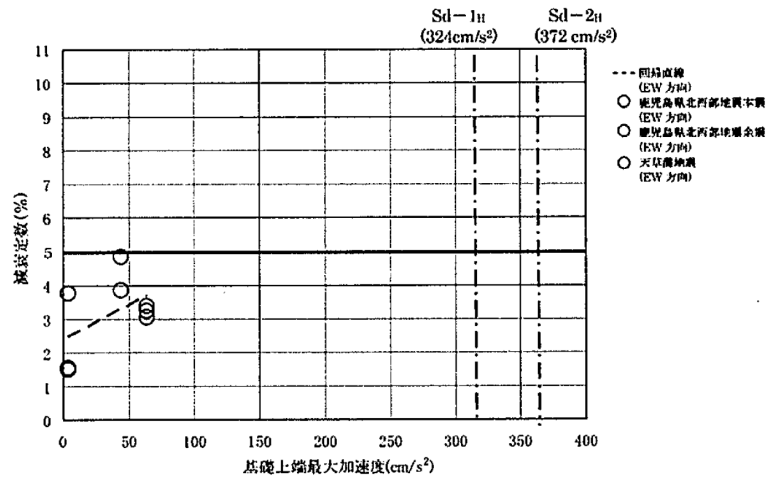
九州電力(株)は川内1号機の減衰定数に関する検討^{3.13)}において、複数の地震観測記録を用いた詳細な検討を行い、川内1号機の外部遮蔽建屋、内部コンクリート及び原子炉補助建屋における減衰定数 h について、構造及び形状による考察並びに基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d 応答レベルでの減衰定数 h の考察を実施している。

① システム同定による減衰定数 h の評価

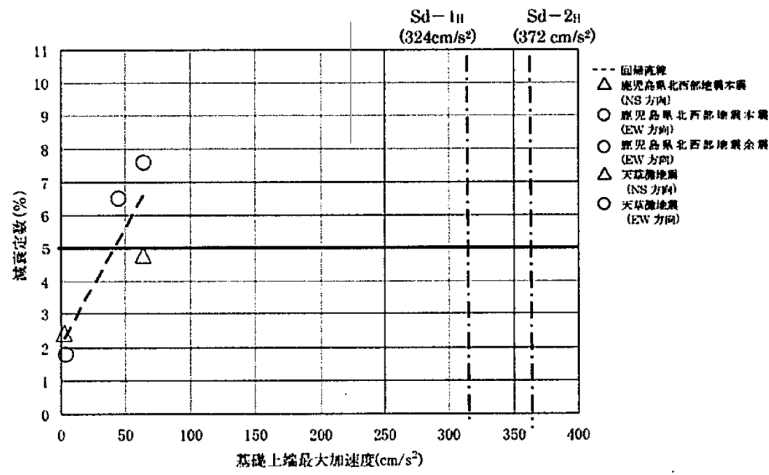
九州電力(株)は鹿児島県北西部地震の本震、同地震の余震及び天草灘地震の地震観測記録を用いて、システム同定により減衰定数 h を評価した結果、水平方向は外部遮蔽建屋で2%~5%程度、内部コンクリートで2%~8%程度、原子炉補助建屋で2%~10%程度、鉛直方向は各建屋で2%~5%程度であるとしている。減衰定数 h と基礎上端最大加速度を比較した結果を第

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。

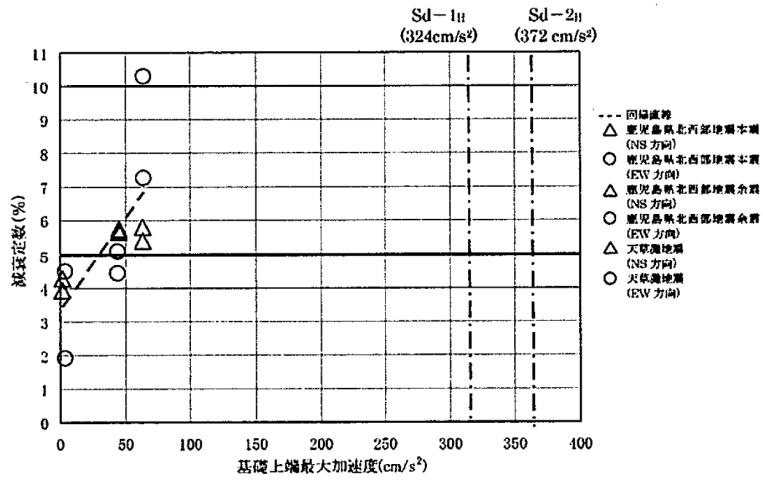


(a) 外部遮蔽建屋 (水平方向)

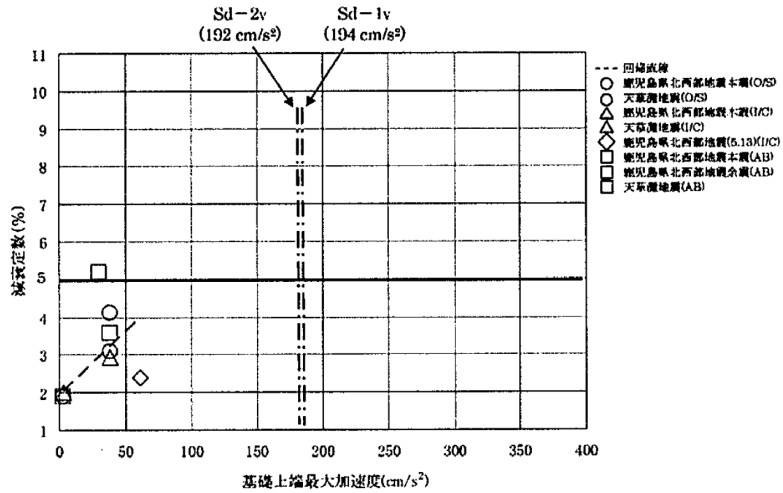


(b) 内部コンクリート (水平方向)

第3.3.3-1図 川内1号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{3.13)} (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号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{3.13)} (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

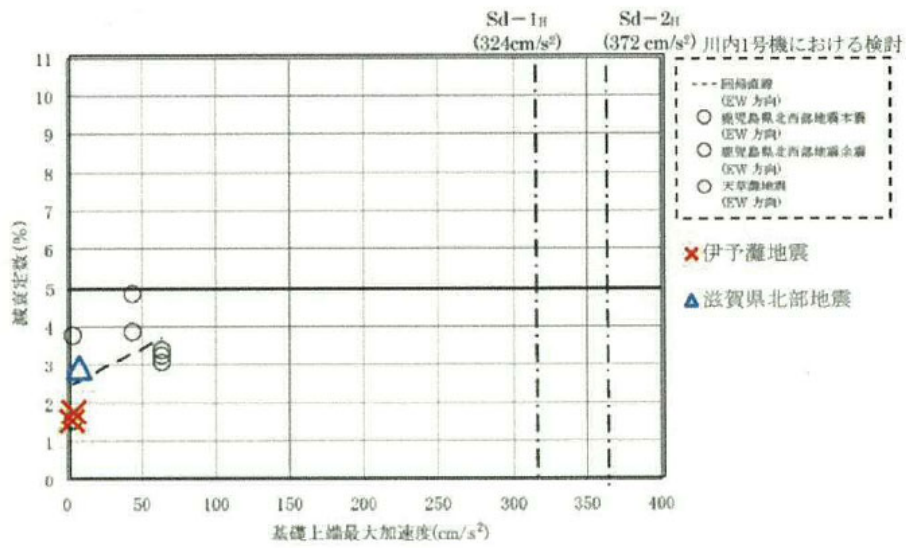
な構造体である外部遮蔽建屋については，観測記録より得られた減衰定数 h に加え，振幅依存性を踏まえると弾性設計用地震動 S_d レベルにおいても 5% 程度以上とできるものと考えられるが，構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから，弾性設計用地震動 S_d を用いた評価では減衰定数を 3% とした場合についても考慮するとしている。

(2) 高浜3号機の地震観測 (RC造部)

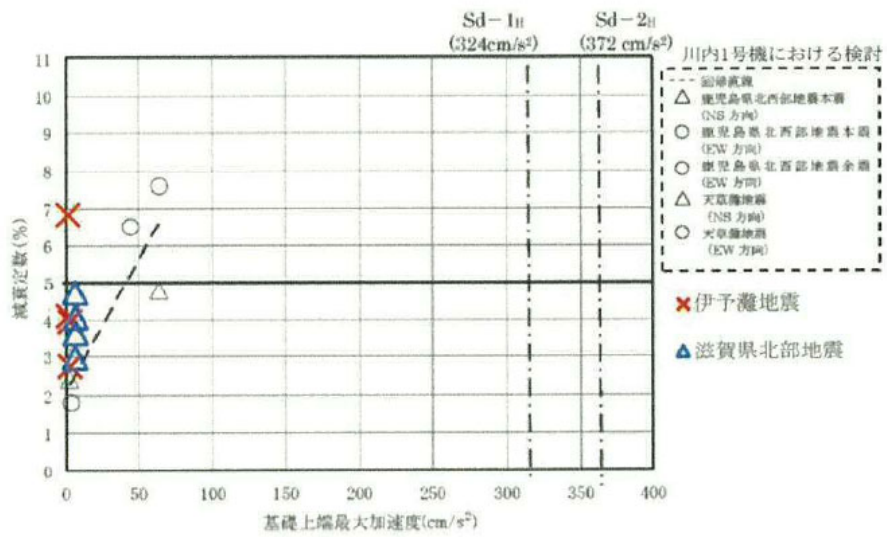
関西電力(株)は高浜発電所3号機(以下，「高浜3号機」という)における減衰定数に関する検討^{3.14)}では，地震観測記録を用いて建屋の減衰定数 h の考察を川内1号機の結果も踏まえて実施している。

システム同定により減衰定数 h を評価した結果，水平方向は外部しゃへい建屋で 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。

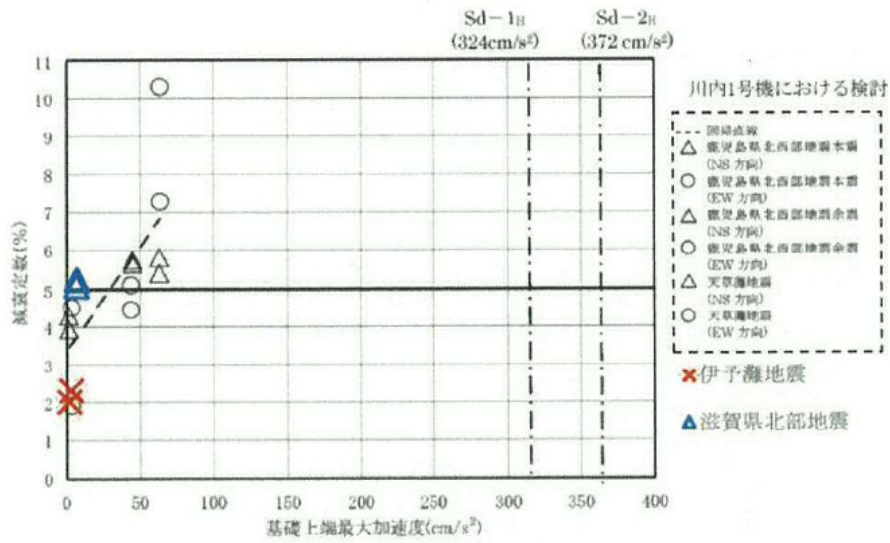


(a) 外部しゃへい建屋(水平方向)

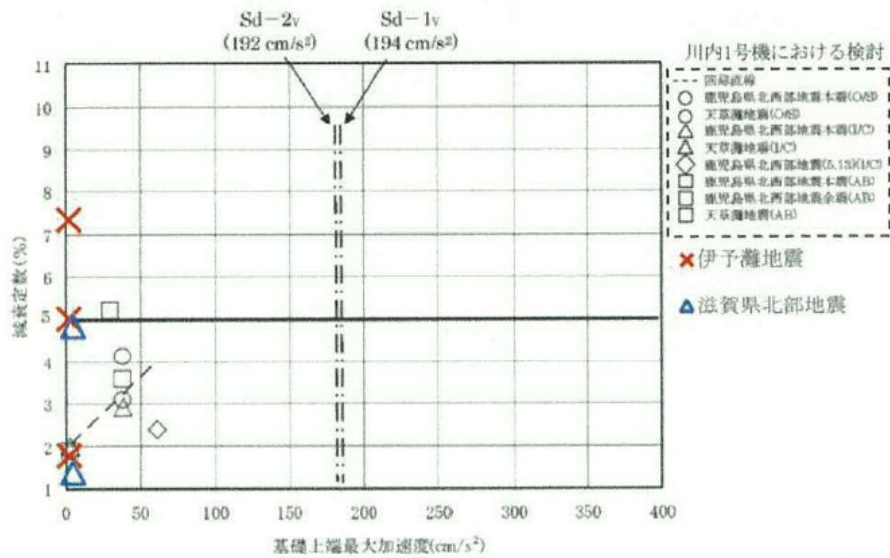


(b) 内部コンクリート(水平方向)

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^{3.14)} (1/2)



(c) 外周建屋(川内：原子炉補助建屋)(水平方向)



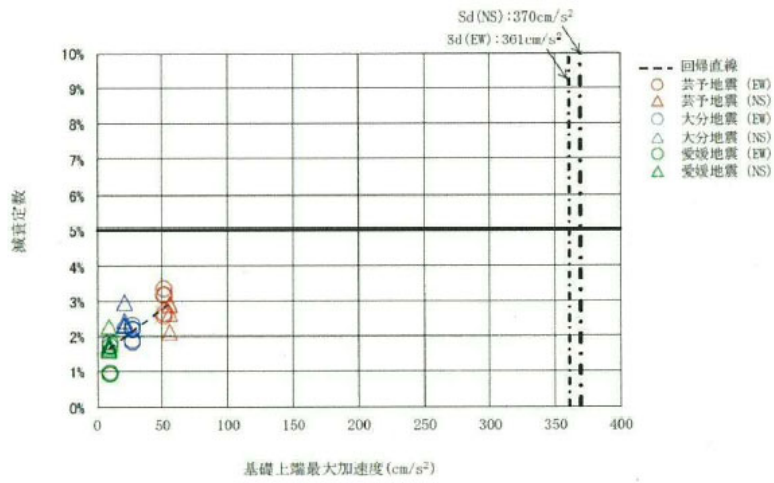
(d) 外部しゃへい建屋，内部コンクリート，外周建屋(川内：原子炉補助建屋)(鉛直方向)

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^{3.14)} (2/2)

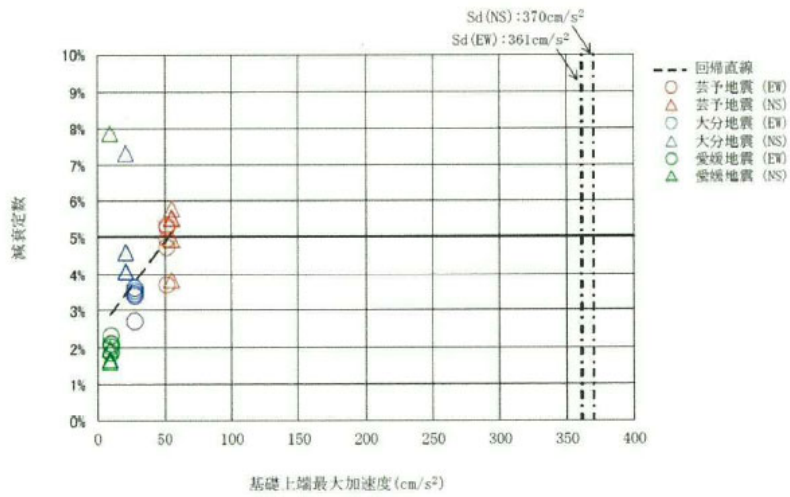
(3) 伊方3号機の地震観測(RC部)

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^{3.15)}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。

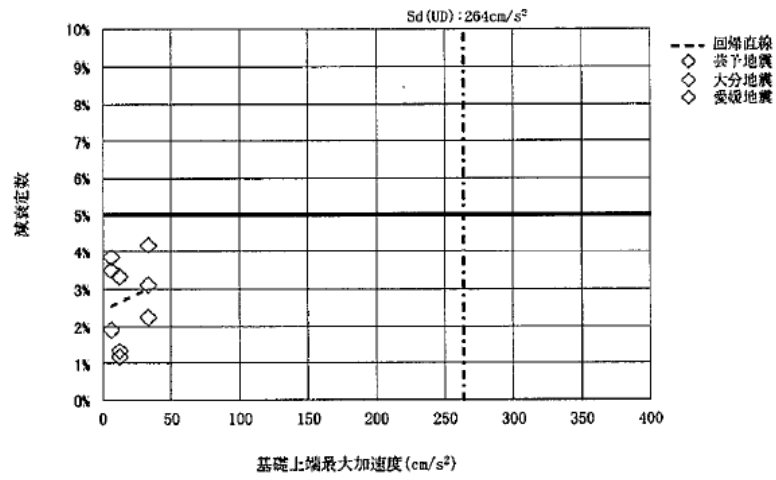


(a) 外周コンクリート壁 (水平方向)



(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^{3.15)} (1/2)



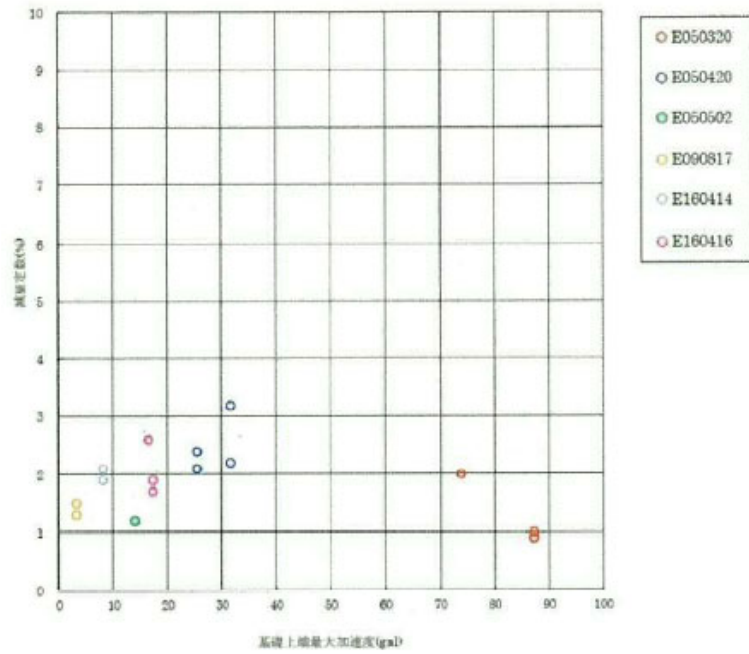
(c) 外周コンクリート(鉛直方向)

第3.3.3-3図 伊方3号機の震予地震等によるシステム同定結果^{3.15)} (2/2)

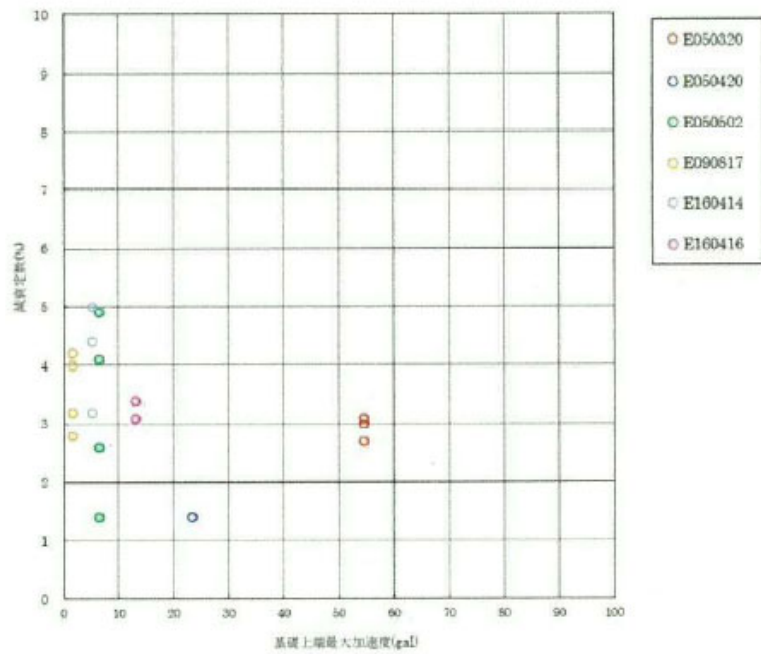
(4) 玄海3号機の地震観測(PCCV)

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^{3.16)}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^{3.16)}

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^{3.17)}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造部では水平方向で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

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。

後次回申請分を含めた建物・構築物において、建屋としては燃料加工建屋を、屋外機械基礎としては安全冷却水 B 冷却塔を代表としてひずみエネルギー比例型モード減衰定数を用いた検討を行い、そこから得られた知見を再処理施設等の建物・構築物全体に適用する。

なお、燃料加工建屋及び安全冷却水 B 冷却塔から得られた知見を再処理施設等の建物・構築物全体に適用しても差し支えないと判断した理由を以下に示す。

(a) 建屋

再処理施設等の建屋については、以下①～③に示す類似性を有しており、ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定に関する構造的特徴及び想定する地震動が同等であることから、燃料加工建屋の検討で代表できると考えた。

- ①：いずれの建屋も平面的に釣り合いよく複雑に配置された耐震壁を主たる耐震要素とする RC 造の壁式構造である。
- ②：いずれの建屋も同等の地盤に埋め込まれて設置されている。
- ③：いずれの建屋も想定する地震動（基準地震動 S_s ）が同じである。

(b) 屋外機械基礎

再処理施設等の屋外機械基礎については、以下①～③に示す類似性を有しており、ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定に関する構造的特徴及び想定する地震動が同等であることから、安全冷却水 B 冷却塔の検討で代表できると考えた。

- ①：いずれの屋外機械基礎も同程度の部材厚の RC 造の直接基礎である。
- ②：いずれの屋外機械基礎も同等の地盤に直接設置されている。
- ③：いずれの屋外機械基礎も想定する地震動（基準地震動 S_s ）が同じである。

4.1.1 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の算定結果

燃料加工建屋の地震応答計算書に示す質点系モデルに対して、基本ケースの地盤条件における、基準地震動 S_s-A を用いた際のひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定した結果を第 4.1.1-1 表に示す。また、算定に用いた建物・構築物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 4.1.1-2 表に示す。燃料加工建屋について、建屋-地盤連成系の減衰量に対する、建屋（RC 造部）の材料減衰が占める割合を踏まえた考察を以下に示す。

第 4.1.1-1 表より、水平方向、鉛直方向ともに 1 次が建屋-地盤連成モードになっている。また、第 4.1.1-2 表より、刺激係数の大きな 1 次では、NS 方向は建屋-地盤連成系のモード減衰定数が 22.68%（第 4.1.1-2 表中の㊸）であり、その内 0.77%（第 4.1.1-2 表中の㊶）が建屋の材料減衰によるものである。よって、地盤への逸散減衰は 21.91%（ $22.68-0.77=21.91$ ）となるため、建屋-地盤連成系の減衰に対しては、地盤への逸散減衰が大部分を占めており、建屋の材料減衰の影響は小さいと言える。

同様に、EW 方向の 1 次においても、建屋-地盤連成系のモード減衰定数 23.37%（第 4.1.1-2 表中の㊹）の内、0.71%（第 4.1.1-2 表中の㊷）が建屋の材料減衰によるものであり、22.66%（ $23.37-0.71=22.66$ ）が地盤への逸散減衰によるものであるため、EW 方向についても建屋-地盤連成系の減衰に対する建屋の材料減衰の影響は小さいと言える。

鉛直方向においても、建屋-地盤連成系のモード減衰定数 48.28%（第 4.1.1-2 表中の㊺）の内、0.29%（第 4.1.1-2 表中の㊸）が建屋の材料減衰によるものであり、47.99%（ $48.28-0.29=47.99$ ）が地盤への逸散減衰によるものであるため、鉛直方向についても建屋-地盤連成系の減衰に対する建屋の材料減衰の影響は小さいと言える。

これらの傾向は 2 次及び 3 次についても同様である。3 次では 1 次及び 2 次と比較すると、建屋の材料減衰の占める割合が増加しているが、刺激係数も小さいため建屋への応答に与える影響は小さいと考えられる。

以上より、燃料加工建屋の地震応答解析モデルにおいては、建物・構築物の応答に支配的な 1 次では、建屋-地盤連成系の減衰量に対して地盤逸散減衰はその大部分を占めるため、その影響が大きく、建物・構築物の材料減衰の影響は相対的に小さいと言える。

第 4.1.1-1 表 ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果
(燃料加工建屋)

(a) NS 方向 S_s-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考
1	3.18	22.7%	1.378	建屋-地盤連成 1 次
2	6.32	27.2%	0.335	
3	11.86	9.4%	-0.159	

(b) EW 方向 S_s-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	23.4%	1.333	建屋-地盤連成 1 次
2	6.29	27.2%	0.324	
3	12.46	10.1%	-0.133	

(c) UD 方向 S_s-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考
1	5.22	48.3%	1.104	建屋-地盤連成 1 次
2	22.02	8.8%	-0.136	
3	38.71	4.4%	0.043	

第 4.1.1-2 表 建物・構築物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 ギーの比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② ひずみエネ ギーの比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② ひずみエネ ギーの比率	①×②	
NS 方向	建屋				3.0%	25.64%	A 0.77%	3.0%	26.95%	0.81%	3.0%	84.65%	2.54%	
	地盤 ばね	側面	T.M.S.L.	43.20	並進	92.0%	1.30%	1.20%	95.9%	0.27%	0.26%	97.8%	0.07%	0.07%
			T.M.S.L.	35.00	並進	90.6%	0.61%	0.56%	95.2%	0.30%	0.29%	97.4%	0.05%	0.05%
			T.M.S.L.	34.23	並進	78.7%	1.23%	0.97%	88.5%	0.64%	0.57%	93.7%	0.11%	0.10%
			T.M.S.L.	31.53	並進	78.7%	0.87%	0.69%	88.6%	0.56%	0.50%	93.7%	0.07%	0.07%
		底面	T.M.S.L.	31.53	並進	33.0%	49.39%	16.30%	52.9%	31.61%	16.72%	70.1%	3.92%	2.75%
			T.M.S.L.	31.53	回転	10.5%	20.95%	2.20%	20.3%	39.67%	8.05%	34.8%	11.13%	3.87%
	合計(モード減衰定数)						B 22.68%			27.19%			9.45%	
EW 方向	建屋				3.0%	23.64%	C 0.71%	3.0%	24.97%	0.75%	3.0%	86.10%	2.58%	
	地盤 ばね	側面	T.M.S.L.	43.20	並進	92.1%	1.30%	1.19%	95.9%	0.25%	0.24%	97.9%	0.08%	0.08%
			T.M.S.L.	35.00	並進	90.7%	0.63%	0.57%	95.1%	0.29%	0.27%	97.5%	0.08%	0.08%
			T.M.S.L.	34.23	並進	78.9%	1.26%	1.00%	88.5%	0.62%	0.55%	94.0%	0.16%	0.15%
			T.M.S.L.	31.53	並進	79.0%	0.90%	0.71%	88.5%	0.54%	0.48%	94.0%	0.11%	0.10%
		底面	T.M.S.L.	31.53	並進	33.2%	50.73%	16.84%	52.7%	30.54%	16.10%	71.2%	6.18%	4.40%
			T.M.S.L.	31.53	回転	10.9%	21.54%	2.35%	20.6%	42.79%	8.81%	36.9%	7.29%	2.69%
	合計(モード減衰定数)						D 23.37%			27.20%			10.08%	
UD 方向	建屋				3.0%	9.62%	E 0.29%	3.0%	92.99%	2.79%	3.0%	98.40%	2.95%	
	地盤 ばね	T.M.S.L.	31.53	底面 並進	53.1%	90.38%	F 47.99%	85.2%	7.01%	5.97%	91.3%	1.60%	1.46%	
合計(モード減衰定数)						F 48.28%			8.76%			4.41%		

4.1.2 安全冷却水 B 冷却塔におけるひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果

安全冷却水 B 冷却塔の地震応答計算書に示す質点系モデルに対して、基本ケースの地盤条件における、基準地震動 S_s-A を用いた際のひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定した結果を第 4.1.2-1 表に示す。また、算定に用いた建物・構築物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 4.1.2-2 表に示す。安全冷却水 B 冷却塔について、建屋-地盤連成系の減衰量に対する、基礎部 (RC 造部) の材料減衰が占める割合を踏まえた考察を以下に示す。(基礎上部の支持架構は、建物・構築物ではなく、S 造の機器・配管系に分類されるため、本考察の対象外である。)

[Redacted content]

第 4.1.2-1 表 ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果
(安全冷却水 B 冷却塔)

(a) NS 方向 Ss-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考

(b) EW 方向 Ss-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考

(c) UD 方向 Ss-A

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数	刺激係数	備考

第 4.1.2-2 表 建物・構築物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
(安全冷却水 B 冷却塔)

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	支持架構 (鉄骨造)													
	基礎 (鉄筋コンクリート造)													
	地盤 ばね	T.M.S.L.	■■■■	底面										並進
		T.M.S.L.	■■■■											回転
	合計 (モード減衰定数)													
EW 方向	支持架構 (鉄骨造)													
	基礎 (鉄筋コンクリート造)													
	地盤 ばね	T.M.S.L.	■■■■	底面										並進
		T.M.S.L.	■■■■											回転
	合計 (モード減衰定数)													
UD 方向	支持架構 (鉄骨造)													
	基礎 (鉄筋コンクリート造)													
	地盤 ばね	T.M.S.L.	■■■■	底面										並進
		合計 (モード減衰定数)												

4.1.3 地盤への逸散減衰の検討のまとめ

地盤への逸散減衰の検討として、建屋としては燃料加工建屋を、屋外機械基礎としては安全冷却水 B 冷却塔をそれぞれ代表として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した。

このことから、地震応答解析モデルにおける減衰には、地盤への逸散減衰による影響が大きく、建物・構築物（RC 造部）の材料減衰の違いによる影響は小さいことが言える。

再処理施設等の建物・構築物においては、ひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定に係る構造的特徴及び想定する地震動に関して類似性を有することから、燃料加工建屋及び安全冷却水 B 冷却塔から得られた上記の知見を再処理施設等の建物・構築物全体に適用しても差し支えないと考える。

4.2 再処理施設等における地震観測記録を用いたシミュレーション解析

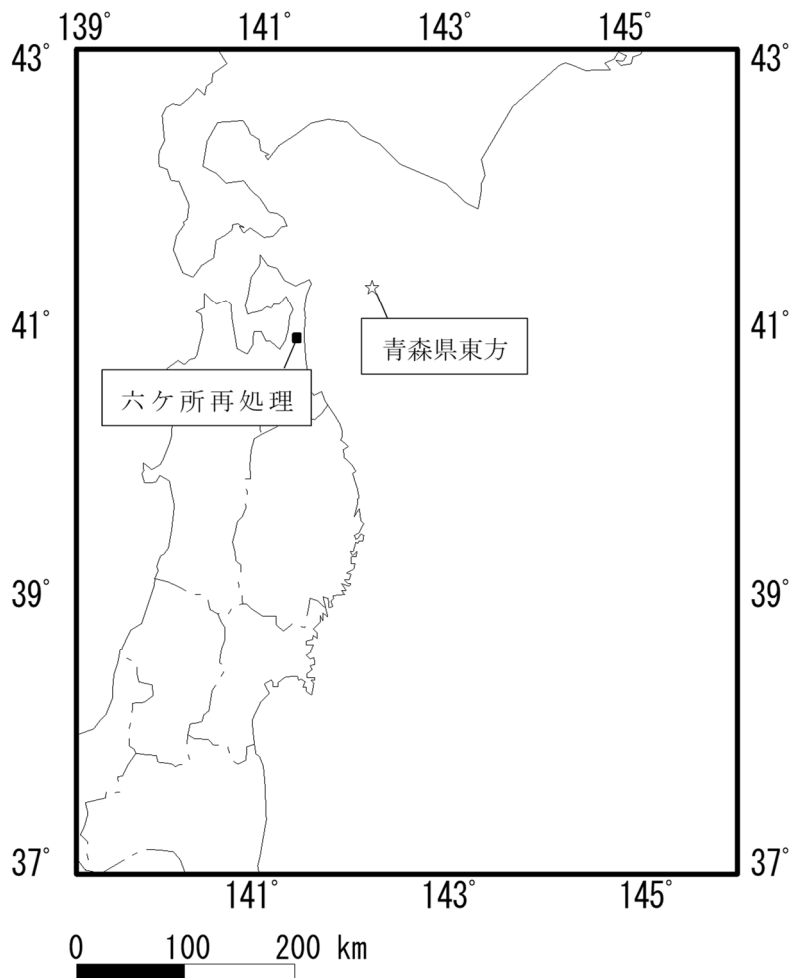
再処理施設等の建物・構築物のうち、地震計を設置している建屋の中で偏心率の大きい分離建屋を対象に2012年5月24日青森県東方沖地震（以下、「青森県東方沖地震」という。）時の観測記録を用いた質点系モデルによるシミュレーション解析を行った。解析に用いる地震の震央位置を第4.2-1図に示す。解析に用いる観測記録の諸元を第4.2-1表に、分離建屋における地震計の位置を第4.2-2図に、また、分離建屋の地下3階で得られた観測記録を第4.2-3図及び第4.2-4図に示す。

使用材料の物性値を第4.2-2表に示す。解析モデルにおけるコンクリート強度は実現象を模擬するために実強度とし、RC造部の減衰定数は5%とした。シミュレーション解析に用いた分離建屋の解析モデル図を第4.2-5図及び第4.2-6図に示す。解析モデルの諸元を第4.2-3表～第4.2-5表に示す。また、シミュレーション解析に用いた分離建屋の地盤ばねの物性値を第4.2-6表に示す。なお、「耐震建物07 耐震設計の基本方針に関する水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する評価部位の抽出」に示す分離建屋の3次元FEMモデルによるシミュレーション解析において、側面回転ばねを考慮することで、観測記録の再現性が向上したことから、ここでも側面回転ばねを考慮した場合の影響を確認する。また、地盤ばねを算出する際には、観測記録の振幅が小さいため、地盤の初期物性値を使用した。側面回転ばねを考慮した場合の解析モデル図を第4.2-7図に、地盤ばねの物性値を第4.2-7表に示す。

側面回転ばねなしとしたシミュレーション解析結果として、最大応答加速度分布を第4.2-8図に、加速度応答スペクトルを第4.2-9図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造部の減衰定数を5%とした解析結果は観測記録を超える結果となった。加速度応答スペクトルについては解析結果と観測記録は概ね一致しており、解析結果の方が若干大きな結果が得られた。

側面回転ばねを考慮した場合のシミュレーション解析結果として、最大応答加速度分布を第4.2-10図に、加速度応答スペクトルを第4.2-11図に側面回転ばねなしの場合の解析結果と観測記録と比較して示す。RC造部の減衰定数を5%とし、側面回転ばねを考慮した場合、側面回転ばねなしとした場合と比較して、観測記録の再現性が向上しながらも解析結果は観測記録を上回る結果となることを確認した。また、加速度応答スペクトルについては、側面回転ばねの考慮により応答のピークは小さくなるものの、ピークの出る周期帯に変化はないことを確認した。なお、側面回転ばねを考慮した場合、NS方向に比べてEW方向のほうが応答のピークがより小さくなっているが、これは分離建屋の建屋形状として、NS方向が長辺でEW方向が短辺であり、短辺方向の方がロッキング応答が発生しやすく、側面回転ばねにより応答が抑制されやすいためと考えられる。

以上より再処理施設等の建物・構築物に対してはRC造部の減衰定数を5%とすることは妥当であるといえる。



第 4.2-1 図 解析に用いる地震の震央位置

第 4.2-1 表 解析に用いる観測記録の諸元

No.	発震日時 震央地名	東経 北緯	地震規模 震源 深さ (km)	震央 距離 (km)	最大加速度振幅値 (上段：NS、中段：EW、下段：UD、単位：cm/s ²)		
					分離建屋観測点		
					地下3F	地上1F	地上4F
					T. P. [] m	T. P. [] m	T. P. [] m
1	2012. 5. 24 0: 2 青森県東方沖	142° 7. 42'	6. 1	79	42. 12	49. 03	71. 58
					31. 99	29. 48	37. 65
					31. 55	30. 23	31. 20



(単位 : m)

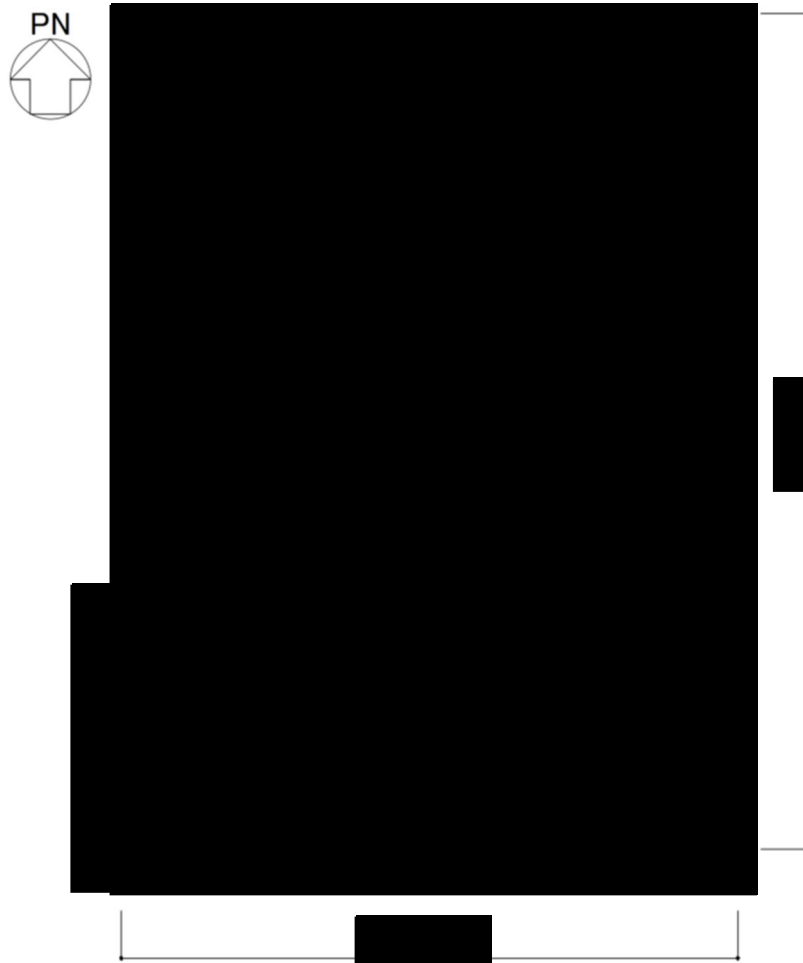
凡例

● : 地震計

(観測成分は, NS 成分, EW 成分及び UD 成分の 3 成分)

(a) 地上 4 階

第 4.2-2 図 分離建屋における地震計の位置 (1/4)

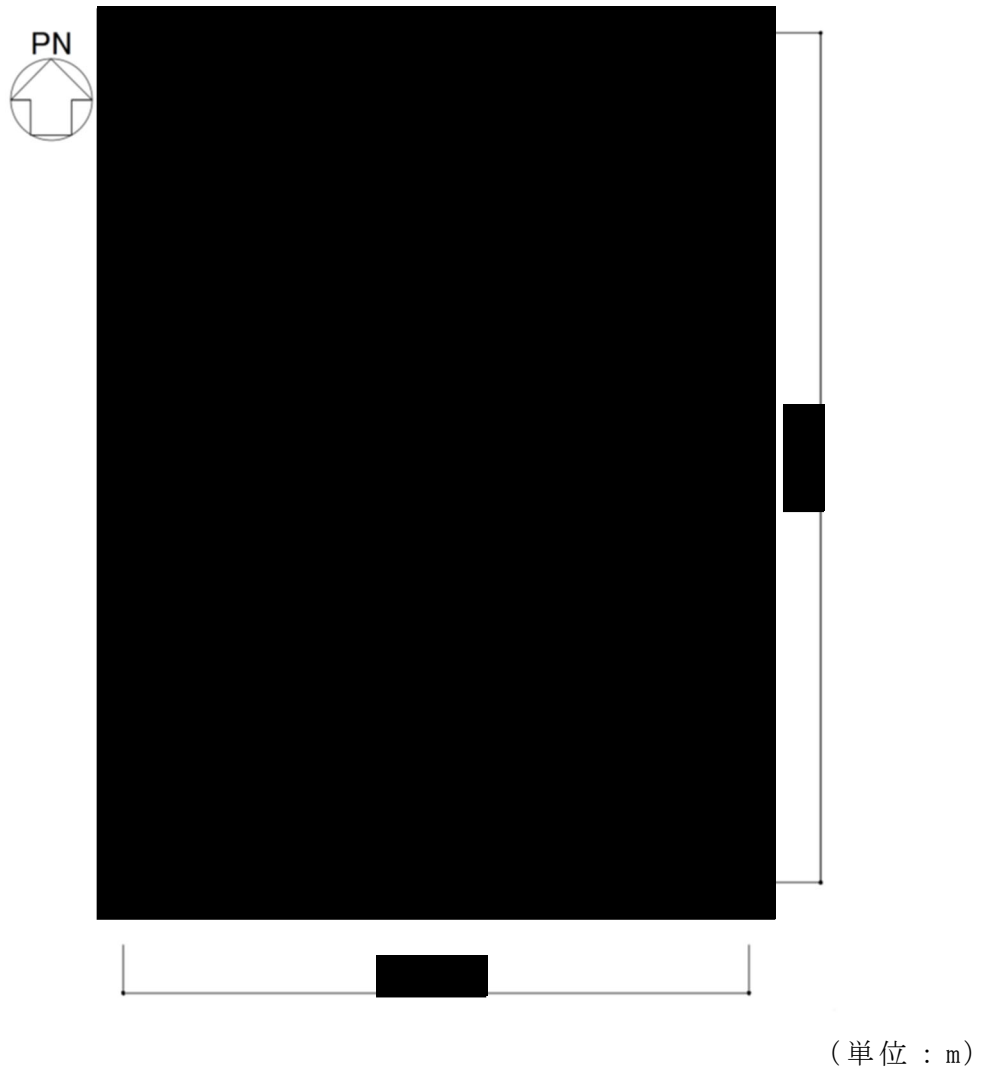


(単位 : m)

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)

(b) 地上 1 階

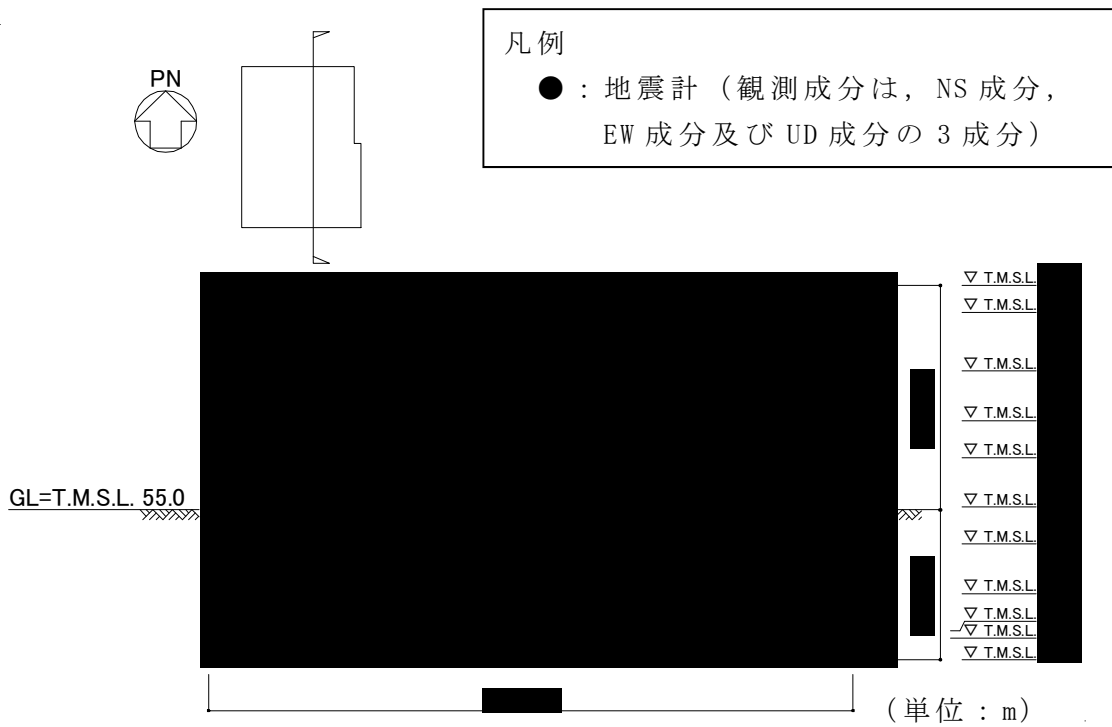
第 4.2-2 図 分離建屋における地震計の位置 (2/4)



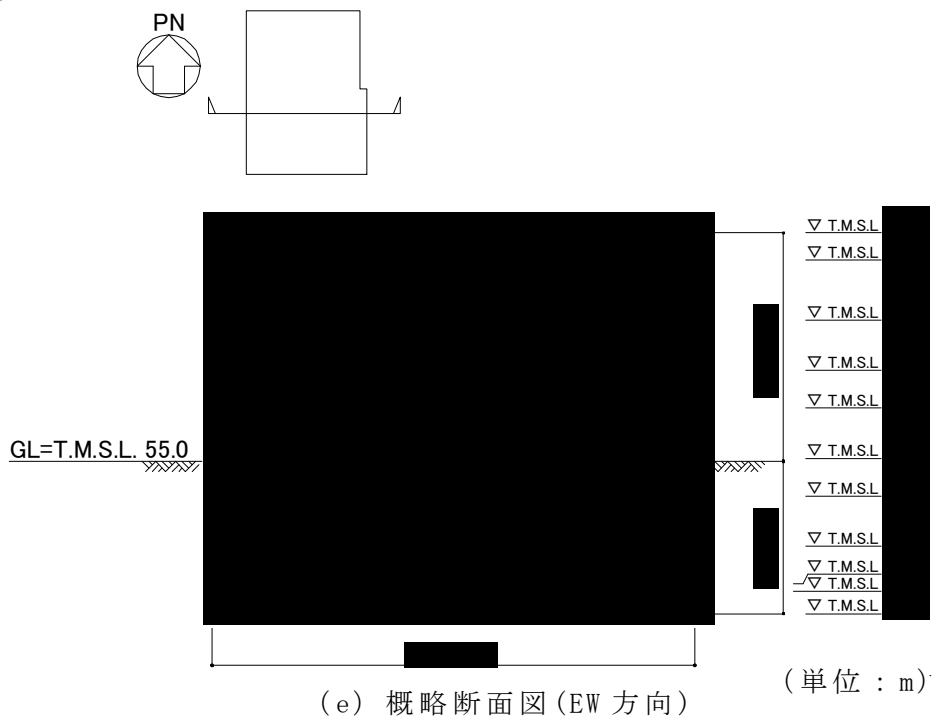
凡例
 ● : 地震計
 (観測成分は, NS 成分, EW 成分及び UD 成分の 3 成分)

(c) 地下 3 階

第 4.2-2 図 分離建屋における地震計の位置 (3/4)

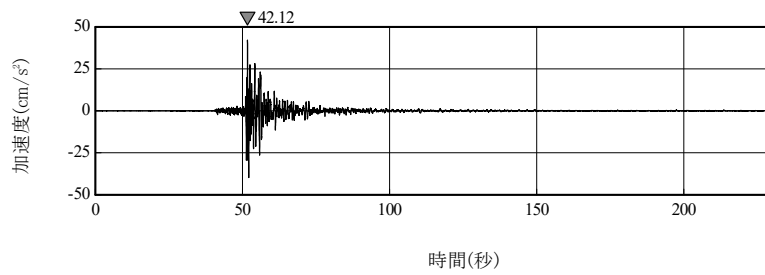


(d) 概略断面図 (NS 方向)

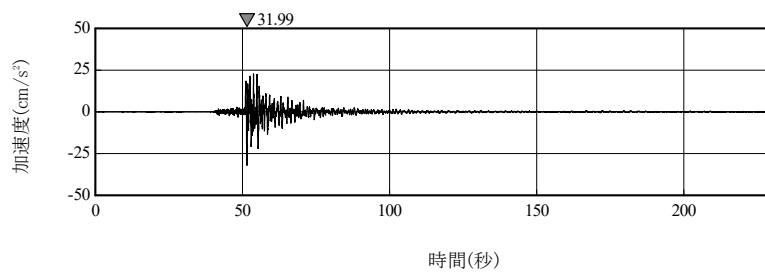


(e) 概略断面図 (EW 方向)

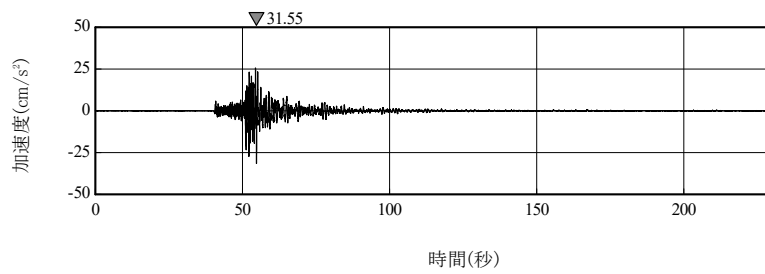
第 4.2-2 図 分離建屋における地震計の位置 (4/4)



(a) NS 方向

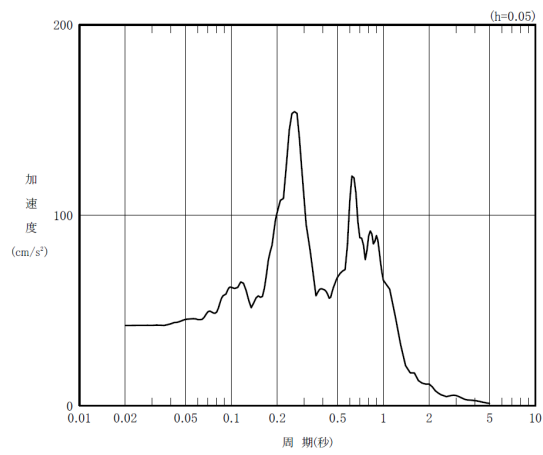


(b) EW 方向

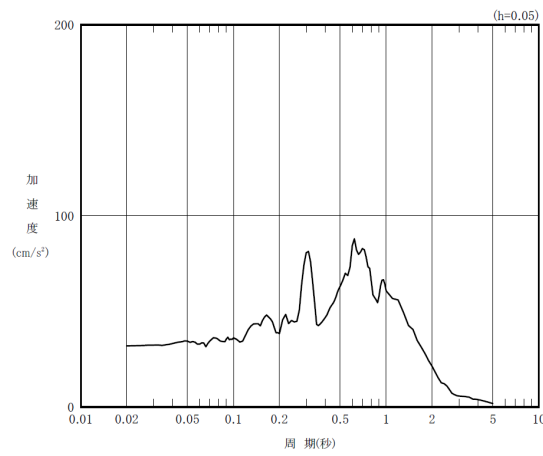


(c) UD 方向

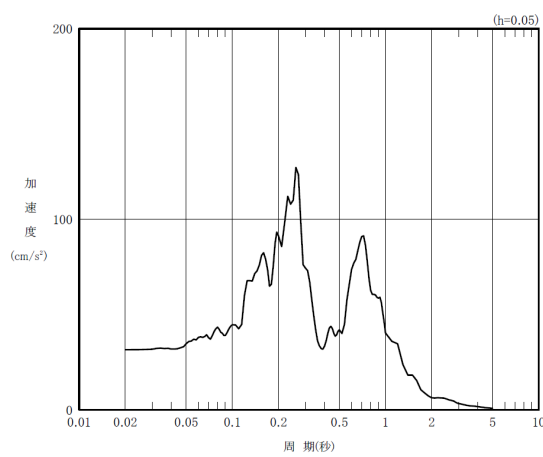
第 4.2-3 図 分離建屋地下 3 階で得られた観測記録



(a) NS 方向



(b) EW 方向



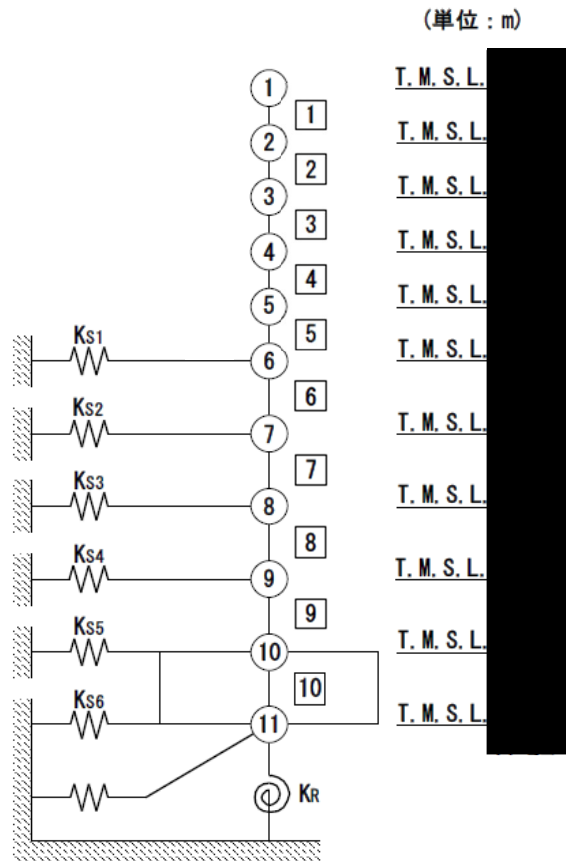
(c) UD 方向

第 4.2-4 図 分離建屋地下 3 階で得られた観測記録

第 4.2-2 表 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： Fc=47.5 (N/mm ²) *	2.85 × 10 ⁴	1.19 × 10 ⁴	5

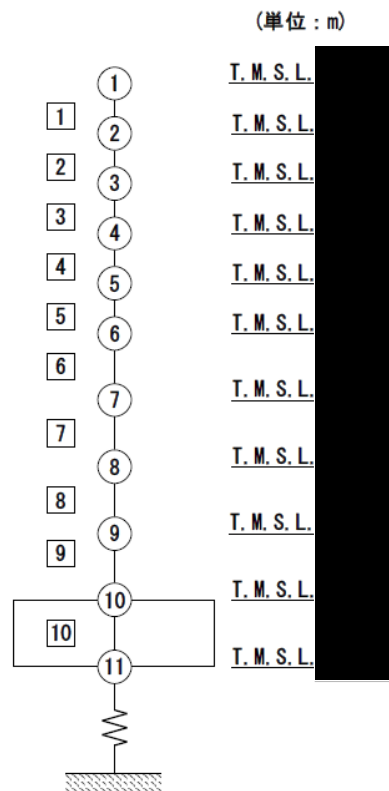
* : コンクリート強度は実強度を用いる。



注記 1 : ○ 数字は質点番号を示す。

注記 2 : □ 番号は要素番号を示す。

第 4.2-5 図 分離建屋の解析モデル (水平方向)



注記 1 : ○数字は質点番号を示す。
 注記 2 : □番号は要素番号を示す。

第 4.2-6 図 分離建屋の解析モデル (鉛直方向)

第 4.2-3 表 地震応答解析モデル諸元 (NS 方向)

質点番号	質点位置 T. M. S. L. (m)	重量 W (kN)	回転慣性 重量 I_g ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)	要素 番号	要素位置 T. M. S. L. (m)	断面二次 モーメント I ($\times 10^4 \text{m}^4$)	せん断 断面積 A_s (m^2)
①		25080	0.5	1		0.07	47.9
②		136790	45.6	2		7.70	276.7
③		291650	174.7	3		22.15	501.6
④		300130	195.3	4		38.52	711.0
⑤		297060	193.3	5		44.94	852.9
⑥		328810	214.0	6		48.21	893.4
⑦		350410	229.0	7		51.47	905.8
⑧		314050	205.2	8		56.84	886.8
⑨		213660	139.5	9		89.53	1443.0
⑩		216950	141.7	10		367.38	5626.8
⑪		213180	139.2	—	—	—	—
建屋総重量		2687770	—	—	—	—	—

第 4.2-4 表 地震応答解析モデル諸元 (EW 方向)

質点番号	質点位置 T. M. S. L. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 I_g ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)	要素番号	要素位置 T. M. S. L. (m)	断面二次モーメント I ($\times 10^4 \text{m}^4$)	せん断断面積 A_s (m^2)
①		25080	5.6	1		0.71	130.9
②		136790	21.6	2		1.40	193.6
③		291650	93.0	3		7.02	334.3
④		300130	102.4	4		14.66	573.4
⑤		297060	101.3	5		17.98	614.6
⑥		328810	112.2	6		20.09	717.4
⑦		350410	118.6	7		21.57	739.4
⑧		314050	106.2	8		21.70	675.1
⑨		213660	72.2	9		33.44	1159.5
⑩		216950	73.3	10		190.05	5626.8
⑪		213180	72.0	—	—	—	—
建屋総重量		2687770	—	—	—	—	—

第 4.2-5 表 地震応答解析モデル諸元 (鉛直方向)

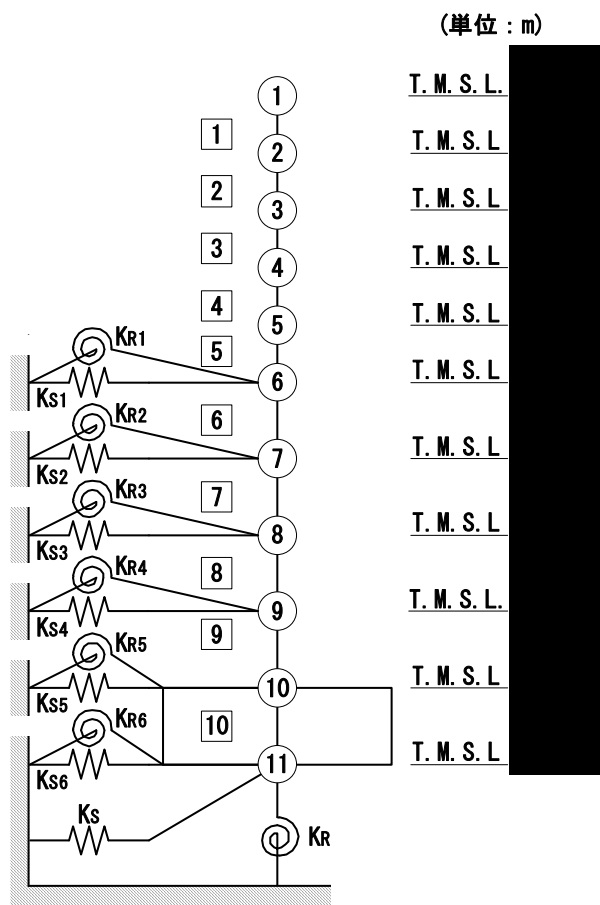
質点番号	質点位置 T. M. S. L. (m)	重量 W (kN)	要素番号	要素位置 T. M. S. L. (m)	軸断面積 A (m ²)
①		25080	①		193.9
②		136790	②		515.9
③		291650	③		913.8
④		300130	④		1280.4
⑤		297060	⑤		1424.8
⑥		328810	⑥		1535.6
⑦		350410	⑦		1545.2
⑧		314050	⑧		1465.5
⑨		213660	⑨		2369.9
⑩		216950	⑩		5626.8
⑪		213180	—	—	—
建屋総重量		2687770	—	—	—

第 4.2-6 表 質点系モデルに用いる地盤ばね定数と減衰係数

		方向	ばね定数	減衰定数
底面スウェイばね K_S		NS	2.47×10^8	7.90×10^6
		EW	2.54×10^8	8.39×10^6
底面ロッキングばね K_R		NS	5.48×10^{11}	6.01×10^9
		EW	3.39×10^{11}	2.43×10^9
側面スウェイばね	K_{S1}	NS	6.26×10^5	2.68×10^5
		EW	6.49×10^5	3.72×10^5
	K_{S2}	NS	2.24×10^6	7.78×10^5
		EW	2.33×10^6	1.10×10^6
	K_{S3}	NS	3.40×10^6	9.79×10^5
		EW	3.53×10^6	1.37×10^6
	K_{S4}	NS	2.17×10^6	5.63×10^5
		EW	2.26×10^6	7.79×10^5
	K_{S5}	NS	1.58×10^6	3.86×10^5
		EW	1.64×10^6	5.37×10^5
	K_{S6}	NS	1.27×10^6	3.01×10^5
		EW	1.32×10^6	4.15×10^5
底面鉛直ばね K_V		UD	3.45×10^8	1.67×10^7

※スウェイばね及び鉛直ばね：ばね定数 (kN/m)，減衰係数 (kN・s/m)

ロッキングばね：ばね定数 (kN・m/rad)，減衰係数 (kN・m・s/rad)



注記 1 : ○数字は質点番号を示す。
 注記 2 : □番号は要素番号を示す。

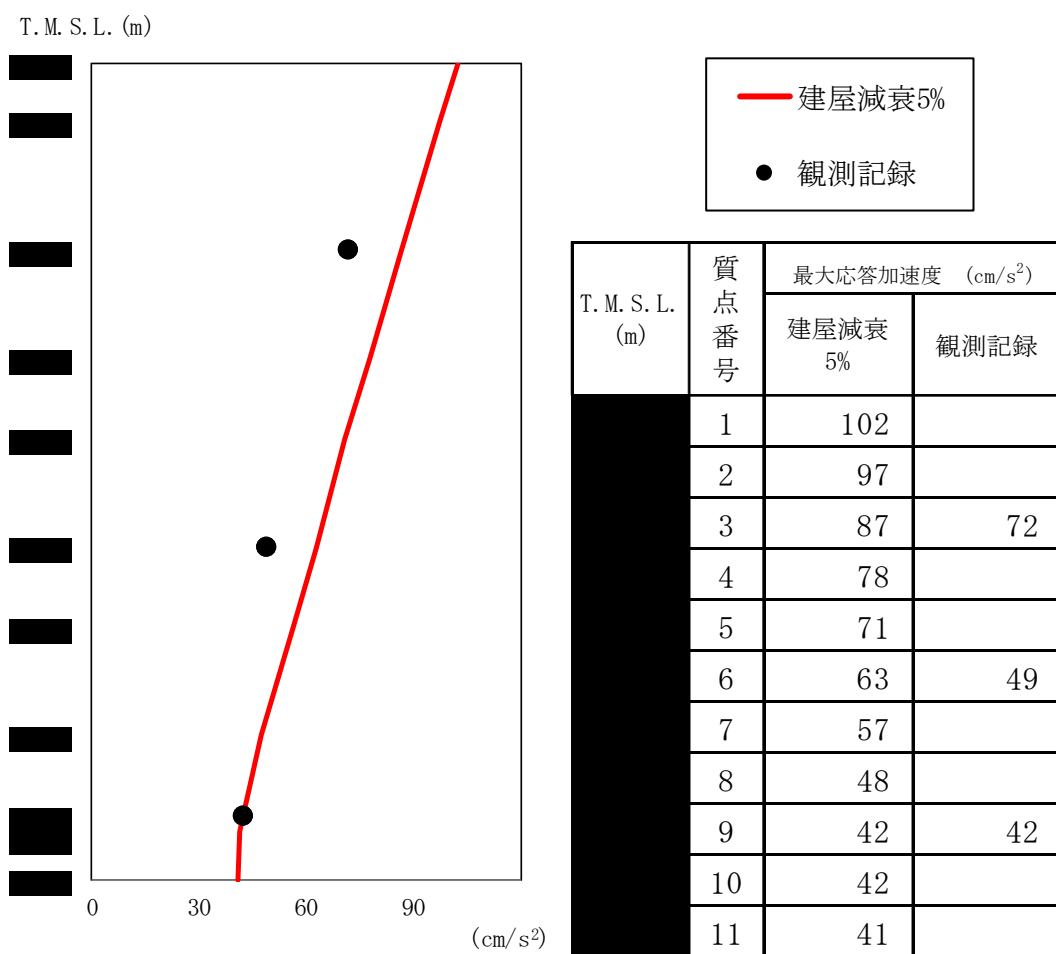
第 4.2-7 図 側面回転ばねを考慮した場合の分離建屋の解析モデル
 (水平方向)

第 4.2-7 表 側面回転ばねを考慮した場合の質点系モデルに用いる地盤ばね定数と減衰係数

		方向	ばね定数	減衰定数
底面スウェイばね K_S		NS	2.47×10^8	7.90×10^6
		EW	2.54×10^8	8.39×10^6
底面ロックンクばね K_R		NS	5.48×10^{11}	6.01×10^9
		EW	3.39×10^{11}	2.43×10^9
側面スウェイばね	K_{S1}	NS	6.26×10^5	2.68×10^5
		EW	6.49×10^5	3.72×10^5
	K_{S2}	NS	2.24×10^6	7.78×10^5
		EW	2.33×10^6	1.10×10^6
	K_{S3}	NS	3.40×10^6	9.79×10^5
		EW	3.53×10^6	1.37×10^6
	K_{S4}	NS	2.17×10^6	5.63×10^5
		EW	2.26×10^6	7.79×10^5
	K_{S5}	NS	1.58×10^6	3.86×10^5
		EW	1.64×10^6	5.37×10^5
	K_{S6}	NS	1.27×10^6	3.01×10^5
		EW	1.32×10^6	4.15×10^5
側面ロックンクばね	K_{R1}	NS	1.11×10^9	1.84×10^8
		EW	7.05×10^8	1.46×10^8
	K_{R2}	NS	3.98×10^9	5.37×10^8
		EW	2.53×10^9	4.38×10^8
	K_{R3}	NS	6.03×10^9	6.86×10^8
		EW	3.84×10^9	5.57×10^8
	K_{R4}	NS	3.85×10^9	3.87×10^8
		EW	2.45×10^9	3.20×10^8
	K_{R5}	NS	2.79×10^9	2.65×10^8
		EW	1.78×10^9	2.19×10^8
	K_{R6}	NS	2.24×10^9	2.08×10^8
		EW	1.43×10^9	1.71×10^8
底面鉛直ばね K_V		UD	3.45×10^8	1.67×10^7

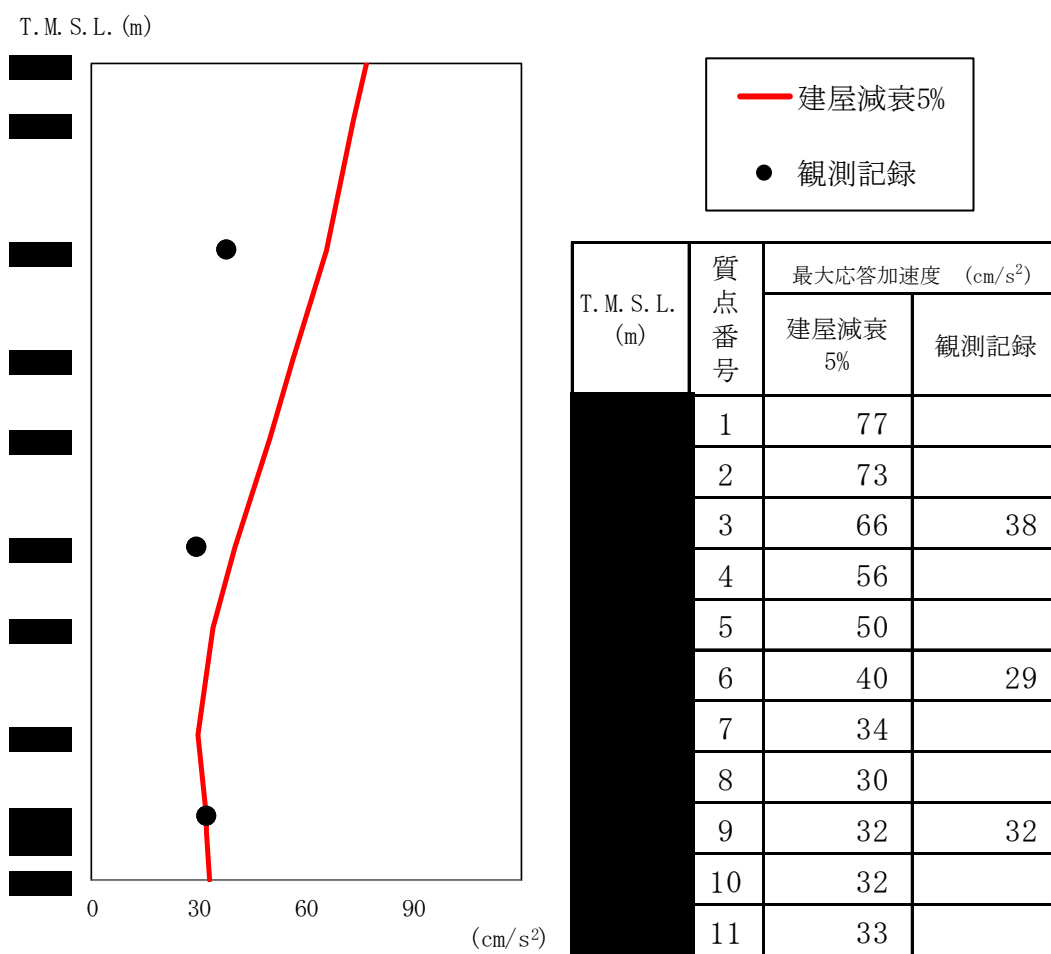
※スウェイばね及び鉛直ばね：ばね定数 (kN/m) , 減衰係数 (kN・s/m)

ロックンクばね：ばね定数 (kN・m/rad) , 減衰係数 (kN・m・s/rad)



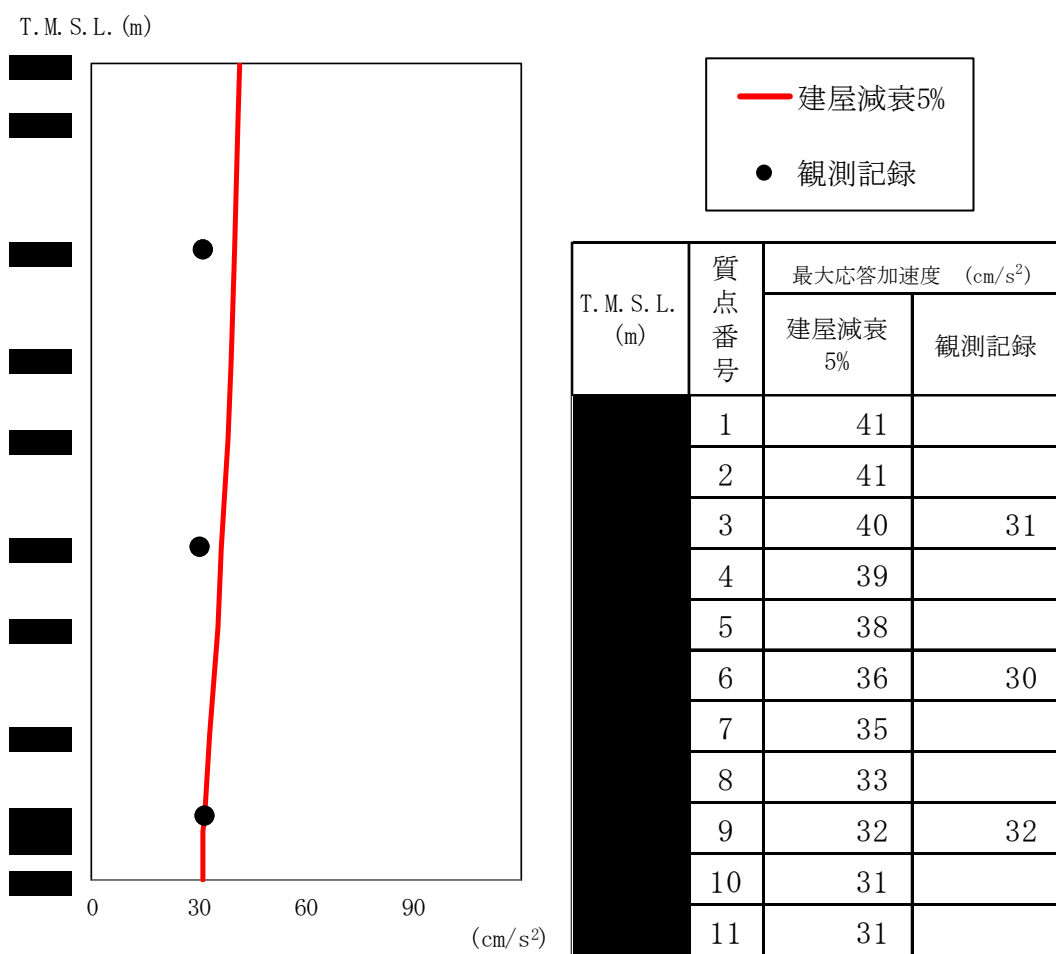
(a) NS 方向

第 4.2-8 図 最大応答加速度分布の比較 (1/3)



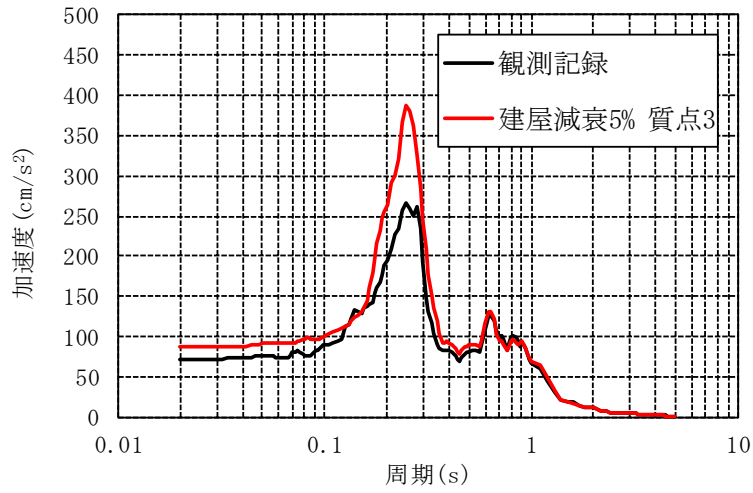
(b) EW 方向

第 4.2-8 図 最大応答加速度分布の比較 (2/3)

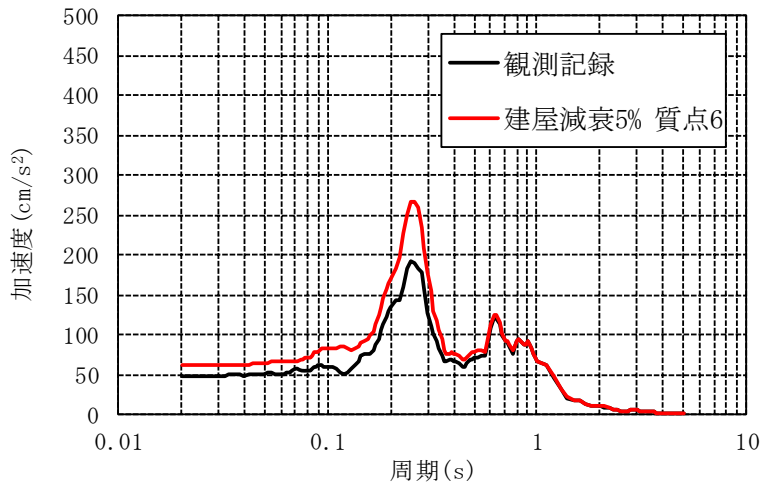


(c) UD 方向

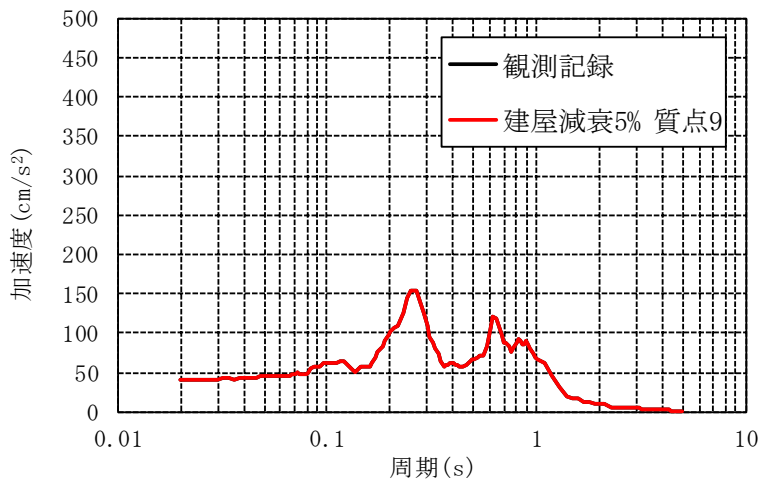
第 4.2-8 図 最大応答加速度分布の比較 (3/3)



(a) 4階 (T.M.S.L. ■■■■■ m) (h=5%)

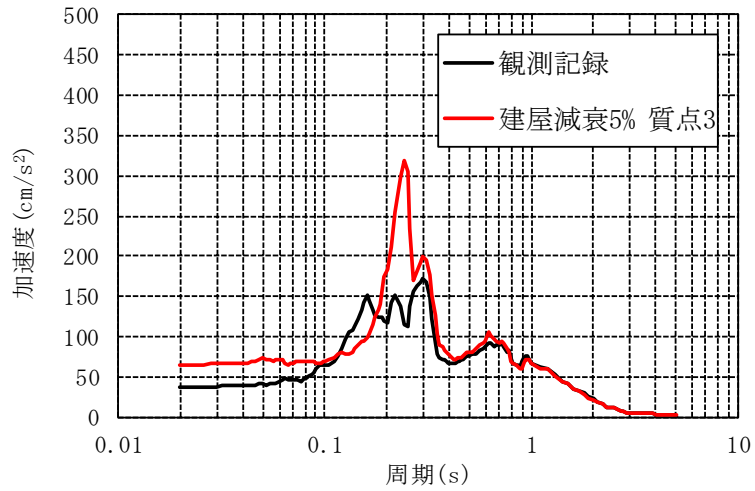


(b) 1階 (T.M.S.L. ■■■■■ m) (h=5%)

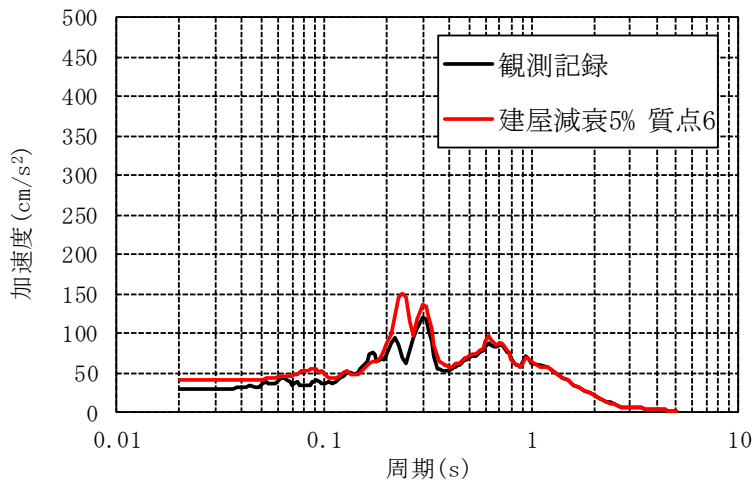


(c) 地下3階 (T.M.S.L. ■■■■■ m) (h=5%)

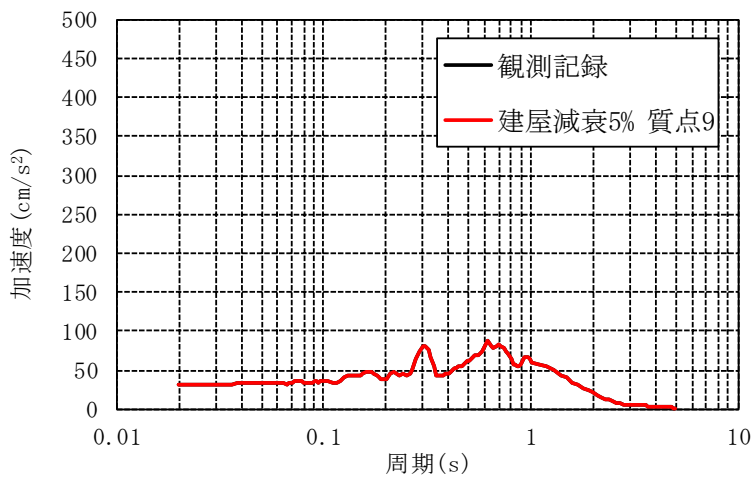
第 4.2-9 図 加速度応答スペクトルの比較 (1/3) (NS 方向)



(a) 4階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

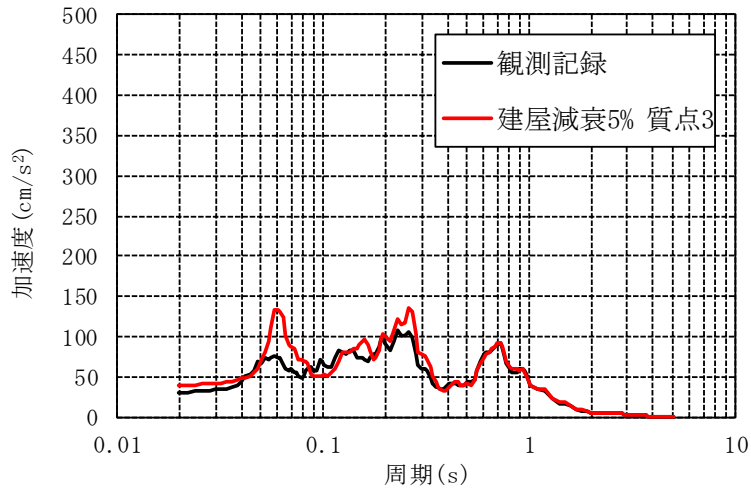


(b) 1階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

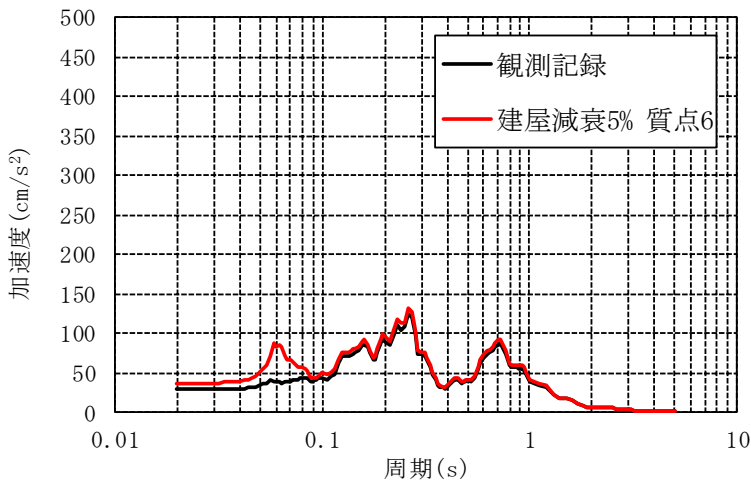


(c) 地下3階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

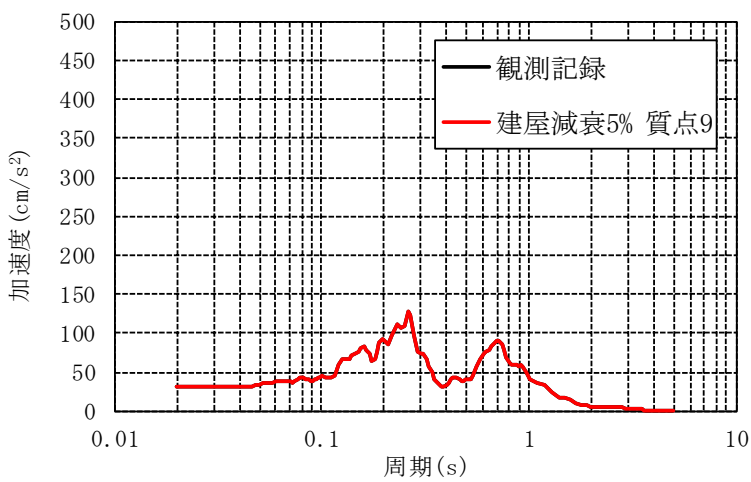
第 4.2-9 図 加速度応答スペクトルの比較 (2/3) (EW 方向)



(a) 4階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

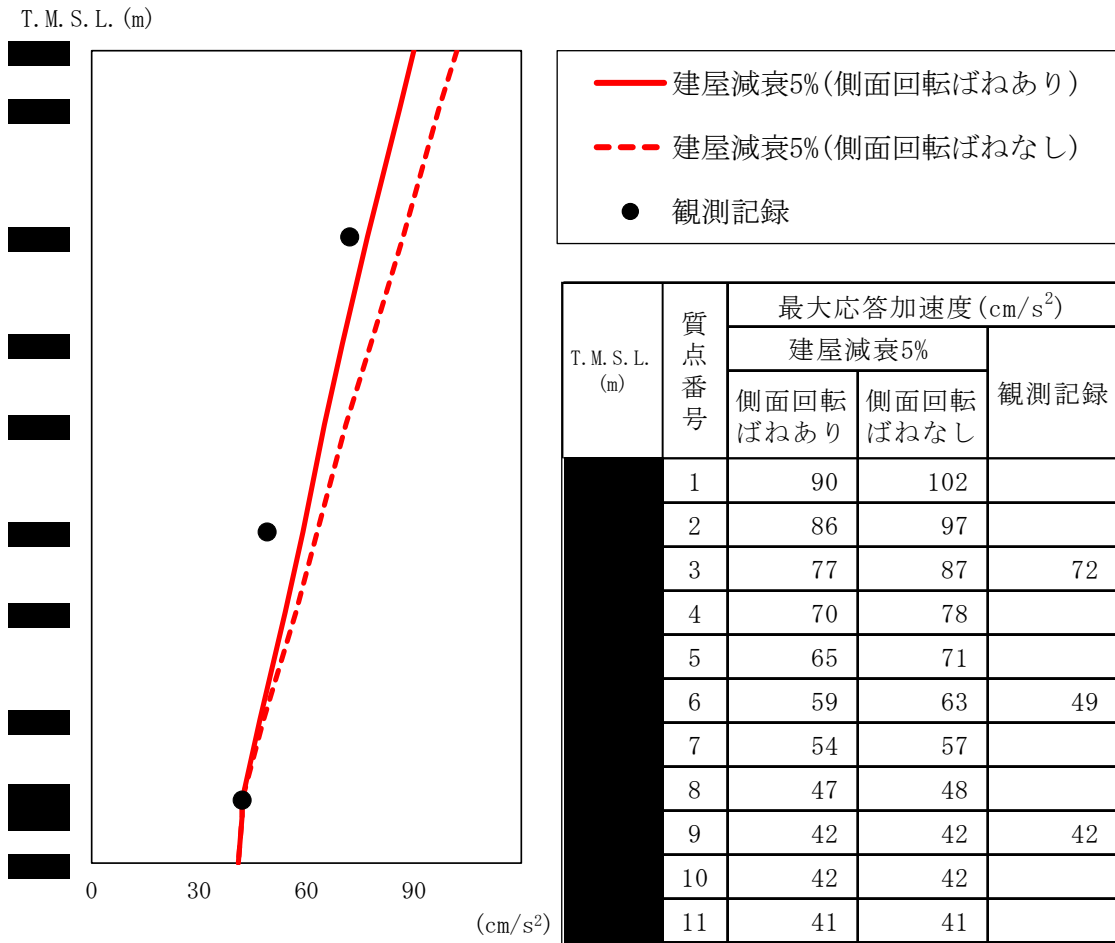


(b) 1階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)



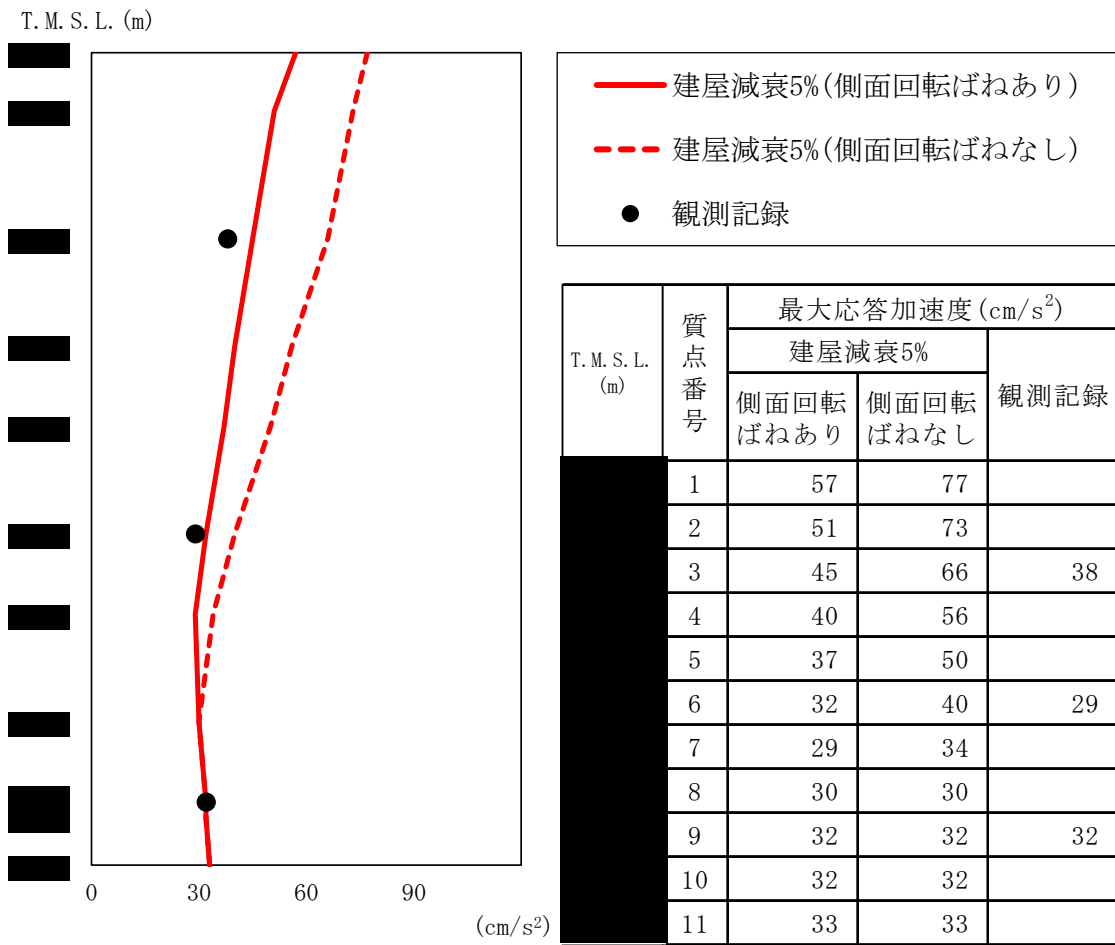
(c) 地下3階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

第 4.2-9 図 加速度応答スペクトルの比較 (3/3) (UD 方向)



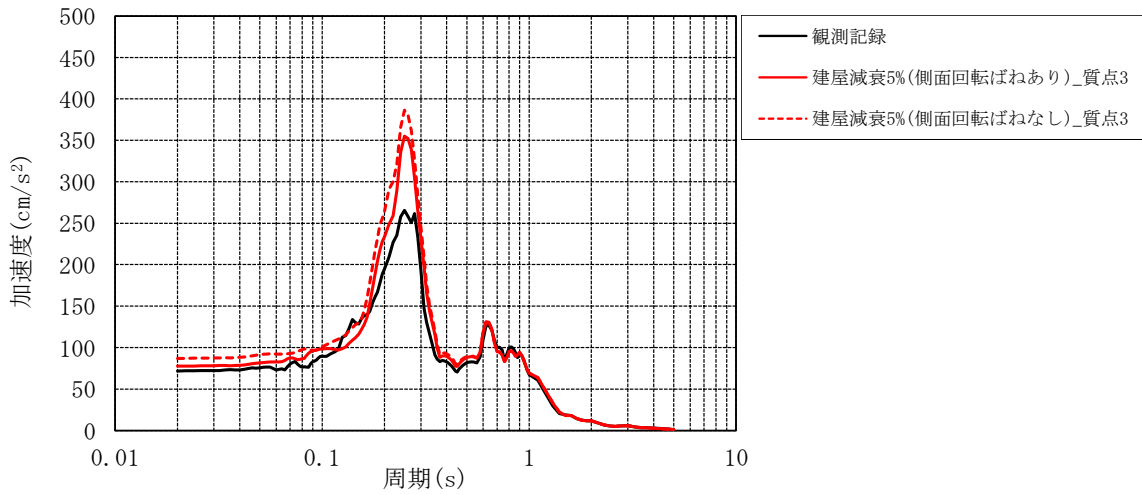
(a) NS 方向

第 4.2-10 図 側面回転ばねを考慮した場合の最大応答加速度分布の比較
(1/2)

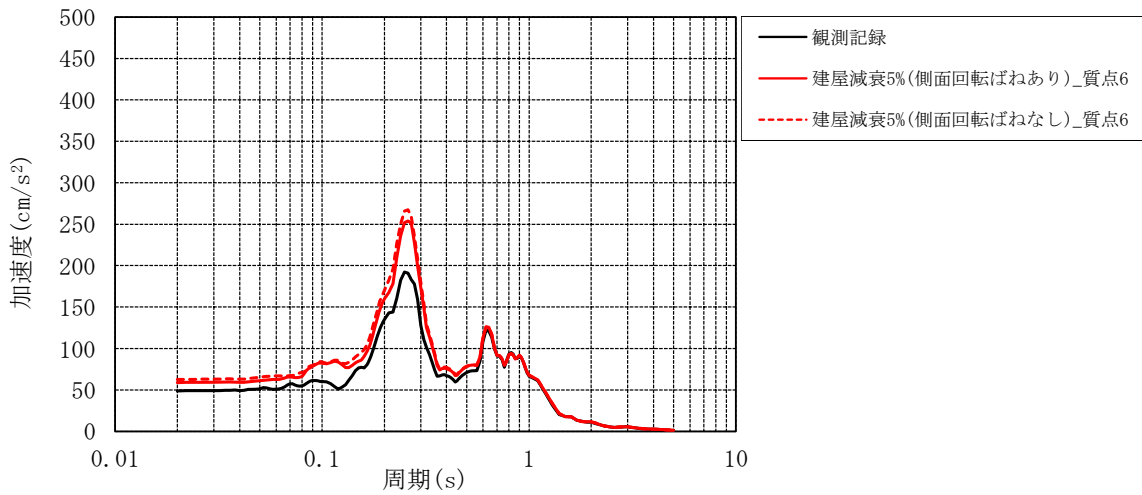


(b) EW 方向

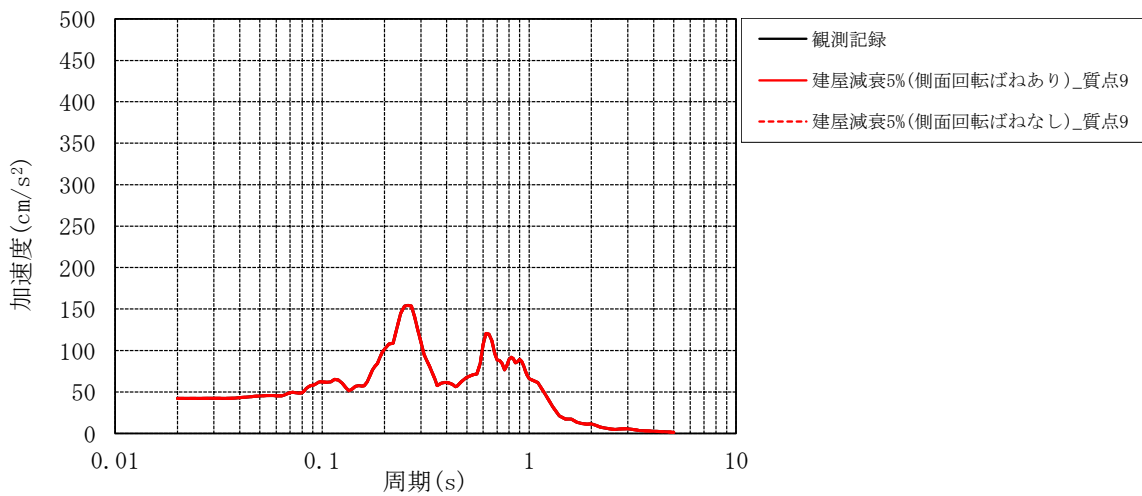
第 4.2-10 図 側面回転ばねを考慮した場合の最大応答加速度分布の比較
 (2/2)



(a) 4階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

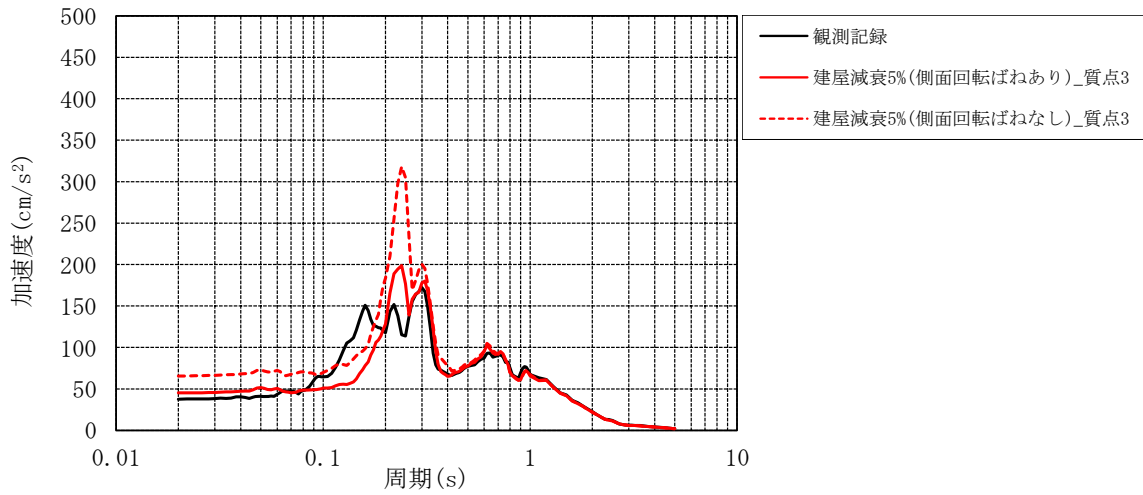


(b) 1階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

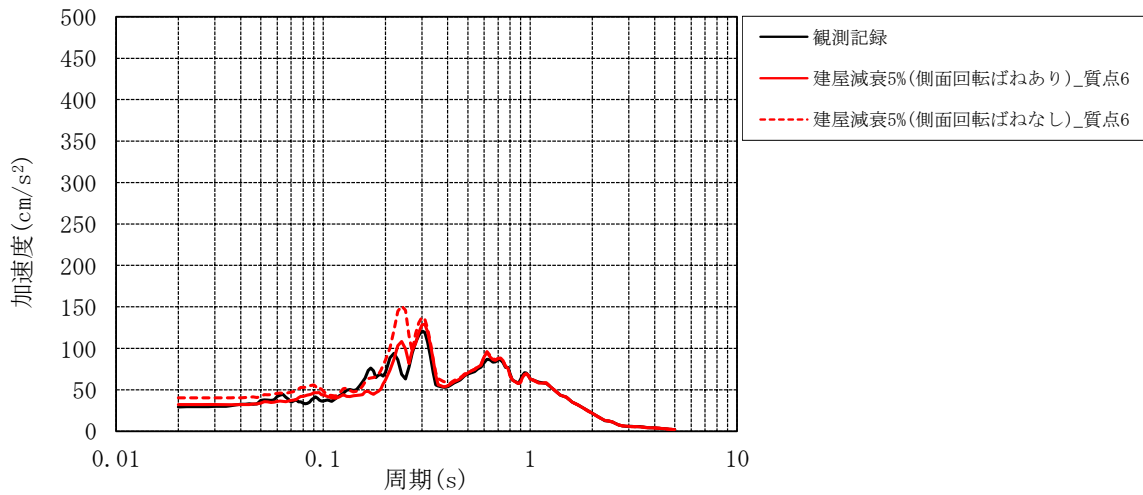


(c) 地下3階 (T.M.S.L. ■■■ m) (h=5%)

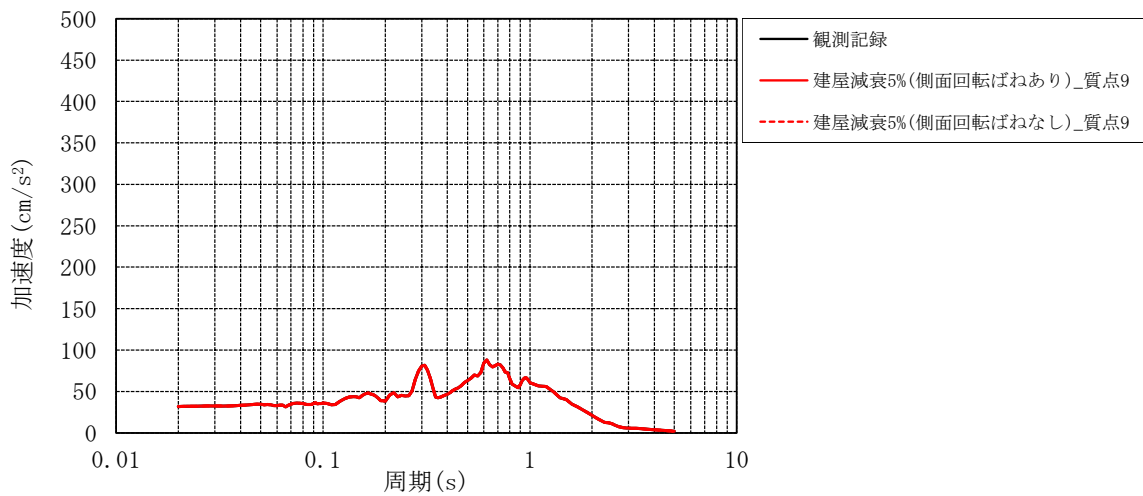
第 4.2-11 図 側面回転ばねを考慮した場合の加速度応答スペクトルの比較 (1/2) (NS 方向)



(a) 4階 (T.M.S.L. m) (h=5%)



(b) 1階 (T.M.S.L. m) (h=5%)



(c) 地下3階 (T.M.S.L. m) (h=5%)

第 4.2-11 図 側面回転ばねを考慮した場合の加速度応答スペクトルの比較 (2/2) (EW 方向)

5. 減衰定数を整理する上での建屋の応答レベル

後述の「6.2.1 減衰定数の振幅依存性」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 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。

5.2 基準地震動 S_s 応答レベル

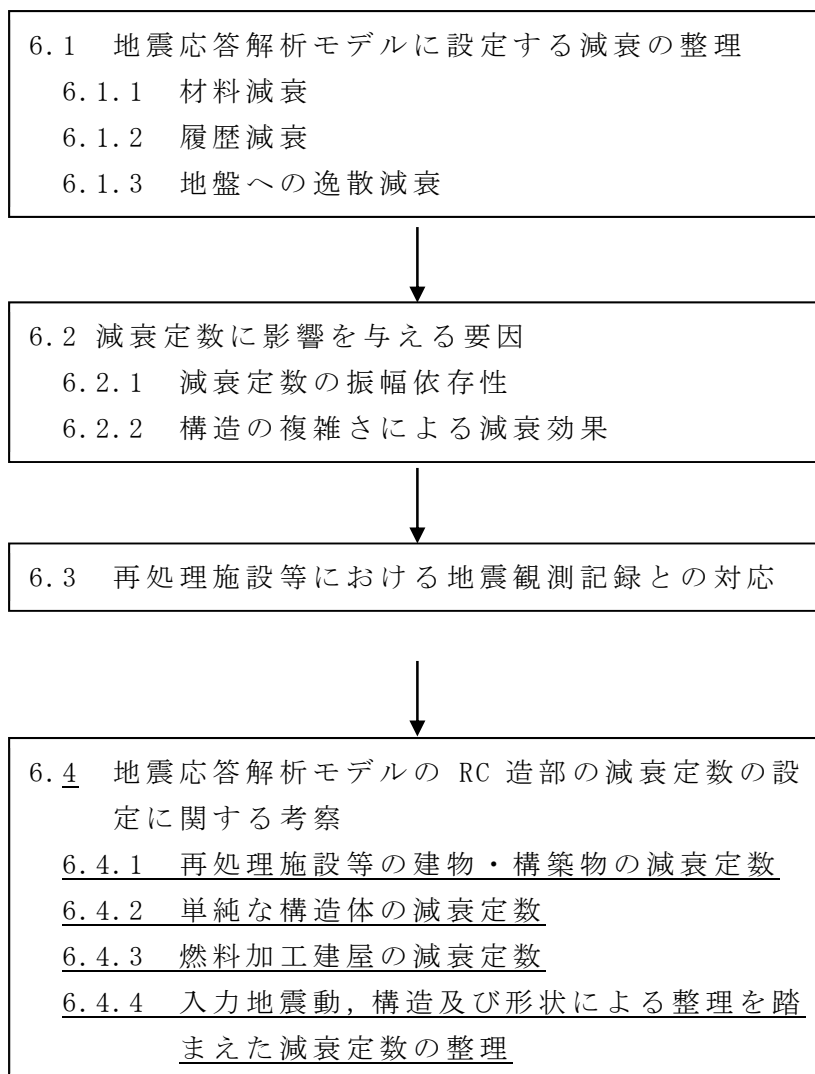
燃料加工建屋の基準地震動 S_s による基本ケースの耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 1 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、基準地震動 S_s の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点と第 2 折点の間程度となっている。

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 1 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 RC 造部の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・構築物の地震応答解析について，RC造部の減衰定数の設定の妥当性を考察する。

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の妥当性についての考察のフロー

6.1 地震応答解析モデルに設定する減衰の整理

「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、「JEAG 4601-1987」及び「JEAG 4601-1991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以下のとおり設定している。

6.1.1 材料減衰

材料減衰は減衰定数として設定しており、「JEAG 4601-1987」に基づきRC造部を5%としている。なお、燃料加工建屋の地震応答解析においては、既設工認時の発電炉の安全審査の実績を踏まえ、設計上の保守性に配慮して3%とした。また、「6.1.2 履歴減衰」に示すとおり、「JEAG 4601-1991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、材料減衰は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。

6.1.2 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、「JEAG 4601-1991追補版」に基づく履歴減衰の設定による。この設定では、 τ - γ 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、「JEAG 4601-1991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。

6.1.3 地盤への逸散減衰

「2.3 地盤への逸散減衰の設定」に示したとおり、再処理施設等の建物・構築物は、「JEAG 4601-1987」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。その影響度合いについては、「4.1 地盤への逸散減衰の検討」において、建屋-地盤連成系全体の減衰量に対して地盤への逸散減衰の占める割合が非常に高く、建物・構築物(RC造部)の材料減衰の占める割合は低いという結果が得られたことから、地震応答解析モデルにおける減衰には、地盤への逸散減衰による影響が大きく、建物・構築物(RC造部)の材料減衰の違いによる影響は小さいことがいえる。

6.2 減衰定数に影響を与える要因

6.2.1 減衰定数の振幅依存性

3.1節～3.3節に示した既往の実験結果・観測結果を表6.2.1-1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と、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定数の間には振幅依存性がみられ、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、基礎スラブ上最大加速度と減衰定数の間には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、弾性域において、BWRのRC造部では水平方向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。

第 6.2.1-1 表 既往の実験・観測結果の整理

応答レベル		線形			非線形	
		弾性域	第1折点 付近	第2折点 付近	許容限界 $\gamma = 2/1000$	備考
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
	PWR 鉛直	1%～8% 程度	—	—	—	をあまり 含まない
	BWR 水平	1%～8%程度		—	—	履歴減衰 等を含む

6.2.2 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耐震壁試験の結果に着目すると、RC造部の減衰定数は弾性域で1%～4%程度、弾性域を超えた付近で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%程度の減衰定数が得られている。

これは、RC耐震壁試験が、ボックス型RC耐震壁を用いた単純な構造体による試験であるのに対し、振動試験及び地震観測を行っている原子力発電所の建屋は、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に起因して、より大きな減衰効果が得られたものと考えられる。

また、「3.3.2 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行前)」においても、単純な構造体である外部遮蔽建屋やPCCVは、複雑な構造体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。

6.3 再処理施設等における地震観測記録との対応

「4.2 再処理施設等における地震観測記録を用いたシミュレーション解析」に示すとおり、再処理施設等の建物・構築物において、再処理施設の分離建屋を対象に青森県東方沖地震の観測記録によるシミュレーション解析を実施し、減衰定数を5%とした解析結果（最大応答加速度分布、加速度応答スペクトル）が観測記録よりも大きな値となることを確認した。

このことから、実際の分離建屋の減衰定数は5%以上であると判断することができる。

なお、分離建屋における青森県東方沖地震の観測記録は、弾性設計用地震動 S_d よりも小さく、建屋の応答レベルとしては弾性域となる地震レベルである。

また、観測記録より得られた分離建屋の減衰定数（5%以上）は、弾性設計用地震動 S_d より応答レベルが小さいにも関わらず、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。これは、6.2.2節に示すとおり、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、再処理施設等の建物・構築物は多数の耐震壁から構成された3次元的な広がりを持つ複雑な構造体であり、構造の複雑さによる減衰効果が付加されたためであると考えられる。

ただし、屋外機械基礎については、壁と床の接合部が少ない単純な構造体に分類されることから、構造の複雑さによる減衰効果の付加が期待しにくいと考えられる。

6.4 地震応答解析モデルの RC 造部の減衰定数の設定に関する考察

6.4.1 再処理施設等の建物・構築物の減衰定数

地震応答解析モデルの RC 造部の減衰定数の設定に関する考察を行うにあたって、「6.1 地震応答解析モデルに設定する減衰の整理」～「6.3 再処理施設等における地震観測記録との対応」を踏まえた整理を第 6.4-1 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効果が付加されたことにより 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。また、再処理施設の分離建屋を対象に青森県東方沖地震の観測記録によるシミュレーション解析を実施し、減衰定数を 5%とした解析結果が観測記録よりも大きな値となることを確認した。

ここで「JEAG 4601-1987」及び「JEAG 4601-1991 追補版」に基づく地震応答解析モデルは、「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。

以上のとおり、実現象における建物・構築物の RC 造部の減衰定数は、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、「JEAG 4601-1987」及び「JEAG 4601-1991 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、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。

第 6.4-1 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	
		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 ↑ 上記に加えて、 構造の複雑さによる減衰効果の 付加分として 2%程度以上が見 込める	5%程度	6%~7% 程度	6%~7% 程度
	再処理施設等の 建物・構築物	↓ 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 (分離建屋)	↑ 5%程度以上 減衰 5%で青森県 東方沖地震の観 測記録をシミュ レーション(水 平・鉛直)	-	-	-

6.4.2 単純な構造体の減衰定数

九州電力（株）及び関西電力（株）は、建屋の構造の複雑さによる減衰効果の付加について、建物・構築物を単純な構造体と複雑な構造体に分類した考察を行っており、単純な構造体についても、観測記録より得られた減衰定数に、振幅依存性を踏まえた付加減衰を考慮すると、弾性設計用地震動 Sd レベルにおいても減衰定数 5%程度以上が期待できるとしている。ただし、単純な構造体については、構造の複雑さによる減衰効果の付加が期待しにくいことを考慮し、弾性設計用地震動 Sd を用いた評価においては、RC 造部の減衰定数を 3%とした場合の影響評価を別途実施している。

このことを踏まえ、単純な構造体に分類される再処理施設等の屋外機械基礎についても、先行発電炉での検討に倣い、弾性設計用地震動 Sd に対して RC 造部の減衰定数を 3%とした場合と 5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い、両者の結果がほぼ一致することを確認することで、減衰定数 5%としても差し支えないことを別途確認しており、その結果を別紙 3 に示す。

6.4.3 燃料加工建屋の減衰定数

RC 造部の減衰定数としては、「6.4.1 再処理施設等の建物・構築物の減衰定数」の通り 5%が妥当であると考えているが、燃料加工建屋においては、設計上の保守性を考慮して 3%とした。その理由を以下①～③に整理する。

①既設工認時に当時の発電炉の安全審査の実績を考慮して、RC 造部の減衰定数を 3%として設定した経緯があり、今回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。

②建物・構築物の減衰特性は、材料減衰、履歴減衰及び地盤への逸散減衰の 3つの組合せによりモデル化しているが、「4.1 地盤への逸散減衰の検討」より、燃料加工建屋において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。このため、材料減衰の影響は相対的に小さいと言える。

③燃料加工建屋の減衰定数を設定するにあたっては、RC 造部の減衰定数を 3%とした場合と 5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い、両者の結果がほぼ一致しており 3%の方が概ね保守的であることを確認することで、減衰定数 3%としても差し支えないことを別途確認している。その結果は別紙 4 に示す。

6.4.4 入力地震動、構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数の整理

「6.4.1 再処理施設等の建物・構築物の減衰定数」～「6.4.3 燃料加工建屋の減衰定数」より、入力地震動、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 6.4-2 表に示す。

第 6.4-2 表 入力地震動，構造及び形状による整理を踏まえた
建物・構築物の RC 造部の減衰定数の整理

建物・構築物		建物・構築物 (燃料加工建屋 除く)のうち， 建屋	建物・構築物 (燃 料加工建屋除く) のうち，屋外機械 基礎	燃料加工建屋	
構造及び形状		複雑な構造体	単純な構造体	複雑な構造体	
入力 地震 動	弾性設 計用地 震動 Sd	水平	5%	5% (3%) ^{*1}	3% ^{*2}
		鉛直	5%	5% (3%) ^{*1}	3% ^{*2}
	基準地 震動 Ss	水平	5%	5%	3% ^{*2}
		鉛直	5%	5%	3% ^{*2}
	1.2×Ss	水平	5%	5%	3% ^{*2}
		鉛直	5%	5%	3% ^{*2}

*1：先行発電炉での検討に倣い，影響確認として，弾性設計用地震動 Sd に対して RC 造部の減衰定数を 3%とした場合と 5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い，両者の結果がほぼ一致することを確認することで，減衰定数 5%としても差し支えないことを別紙 3 に示す。

*2：RC 造部の減衰定数を 3%とした場合と 5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い，両者の結果がほぼ一致することを確認することで，減衰定数 3%としても差し支えないことを別紙 4 に示す。

6.5 まとめ

6.1 節から 6.4 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，再処理施設等の建物・構築物の地震応答解析では，原則，RC 造部の減衰定数を 5%と設定した。ただし，燃料加工建屋の地震応答解析では，既設工認時の発電炉の安全審査の実績を踏まえ，設計上の保守性に配慮して 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) 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) 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))
- 3.5) 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))
- 3.6) 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))
- 3.7) 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))
- 3.8) 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))
- 3.9) 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)
- 3.10) 宇都宮ほか：原子力発電所の地震動観測とこの解析(その1), (その2)(日本建築学会大会学術講演梗概集(1981))
- 3.11) 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))
- 3.12) 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))
- 3.13) 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)
- 3.14) 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)
- 3.15) 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)
- 3.16) 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)
- 3.17) 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

別紙リスト 耐震建物 10【地震応答計算書に関する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】

別紙				備考
資料 No.	名称	提出日	Rev	
別紙 1	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	2022/7/14	2	
別紙 2	各建物・構築物の図面集	2022/1/19	0	
別紙 3	単純な構造体に分類された建物・構築物における RC 造部の減衰定数を 3%とした場合の地震応答解析結果	2022/10/19	1	
別紙 4	燃料加工建屋における RC 造部の減衰定数を 5%とした場合の地震応答解析結果	2022/7/14	2	

別紙 1

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 1-1
 - 1.1 燃料加工建屋..... 別紙 1-1

※後次回申請においては申請する建物・構築物のせん断ひずみを申請の都度示す。

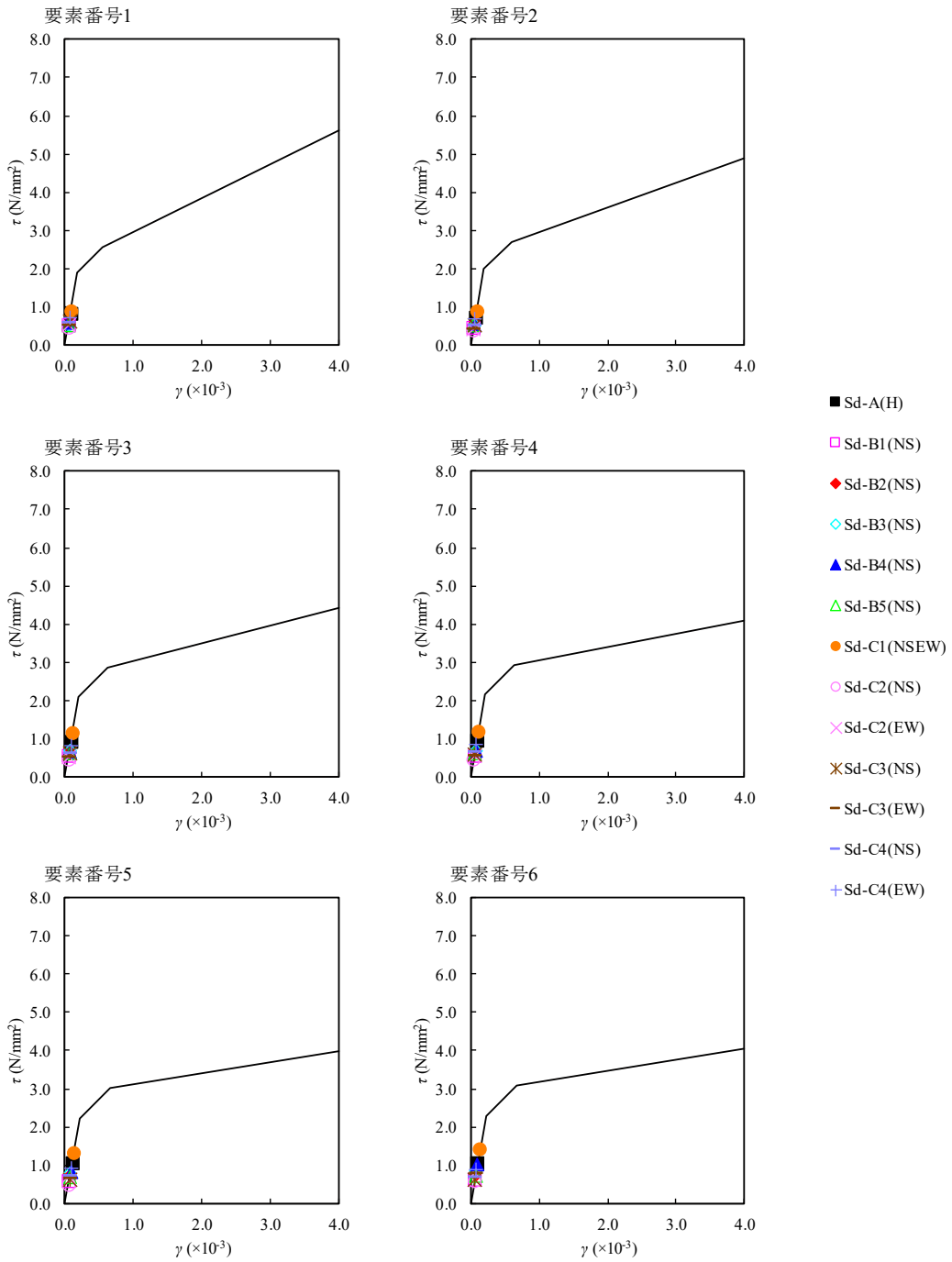
1. 各建物・構築物の最大応答せん断ひずみ

本文「6.2.1 減衰定数の振幅依存性」では、応答レベルの観点から減衰定数の振幅依存性の関係について考察を行っている。そこで、本資料では各建物・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（以下、「 $1.2 \times S_s$ 」という。）に対する最大応答せん断ひずみを示し、各建物・構築物の応答レベルの整理を行う。

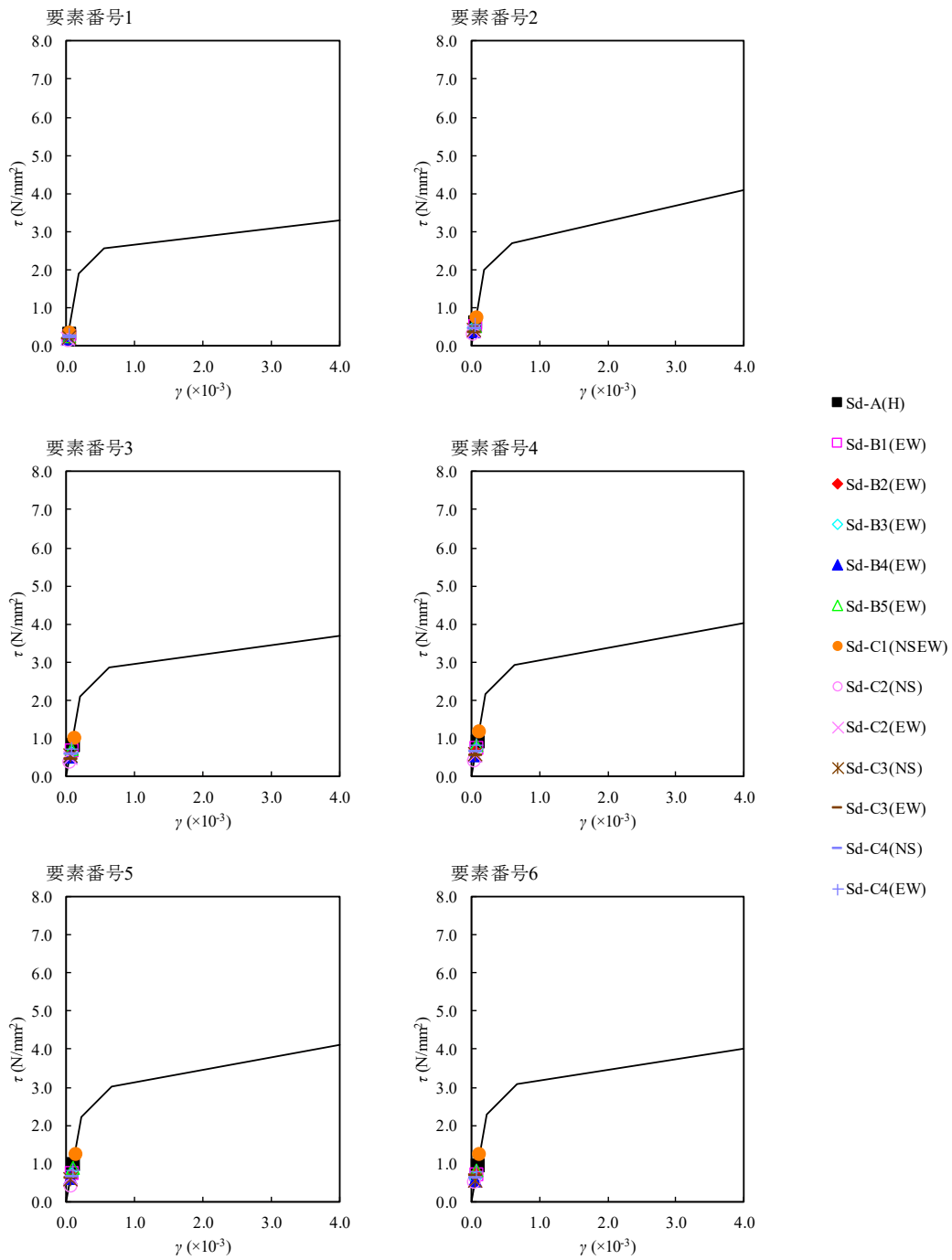
1.1 燃料加工建屋

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。



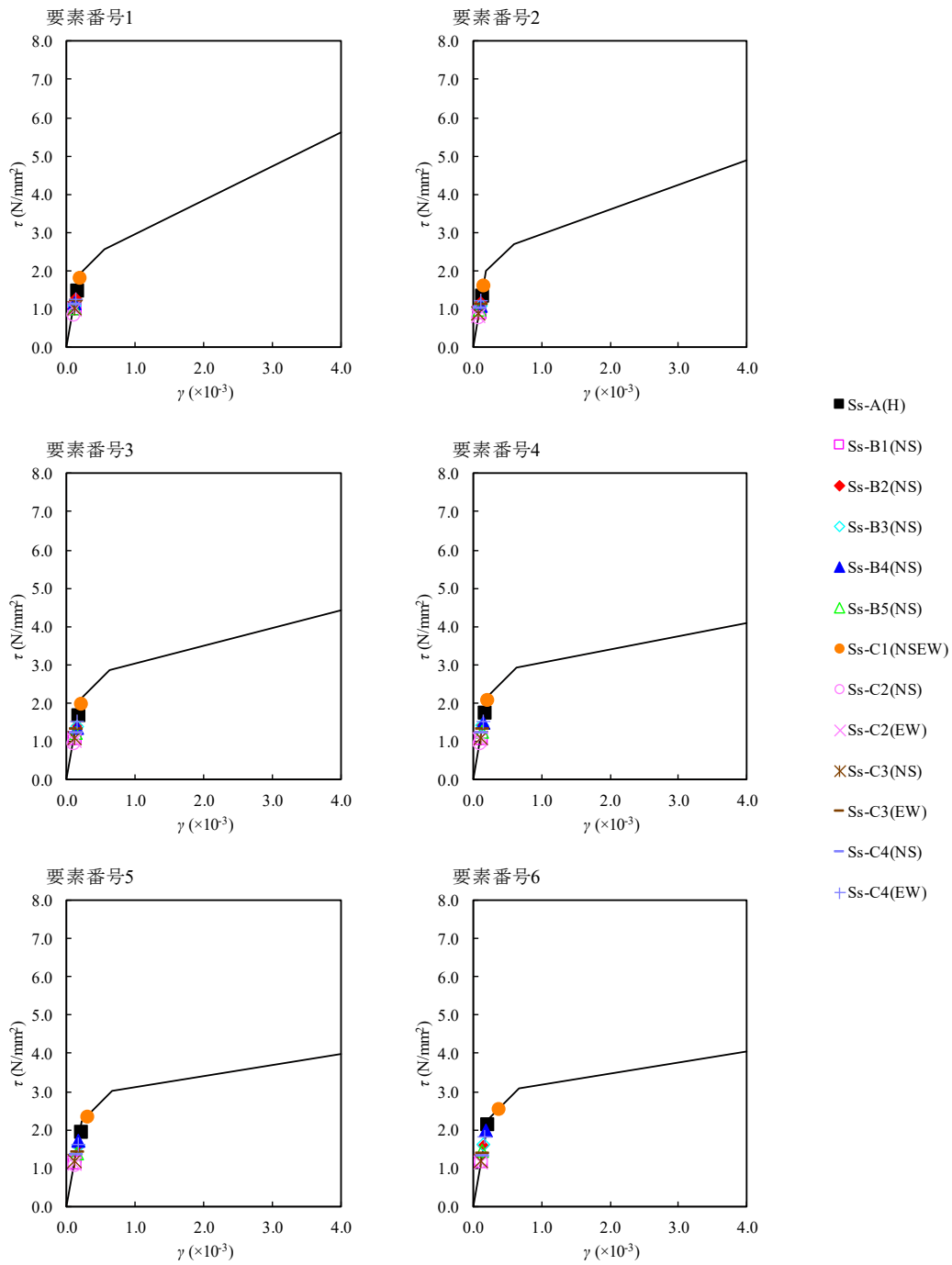
第 1.1.1-1 図 τ - γ 関係と最大応答値
(弾性設計用地震動 Sd, ケース No.0, NS 方向)



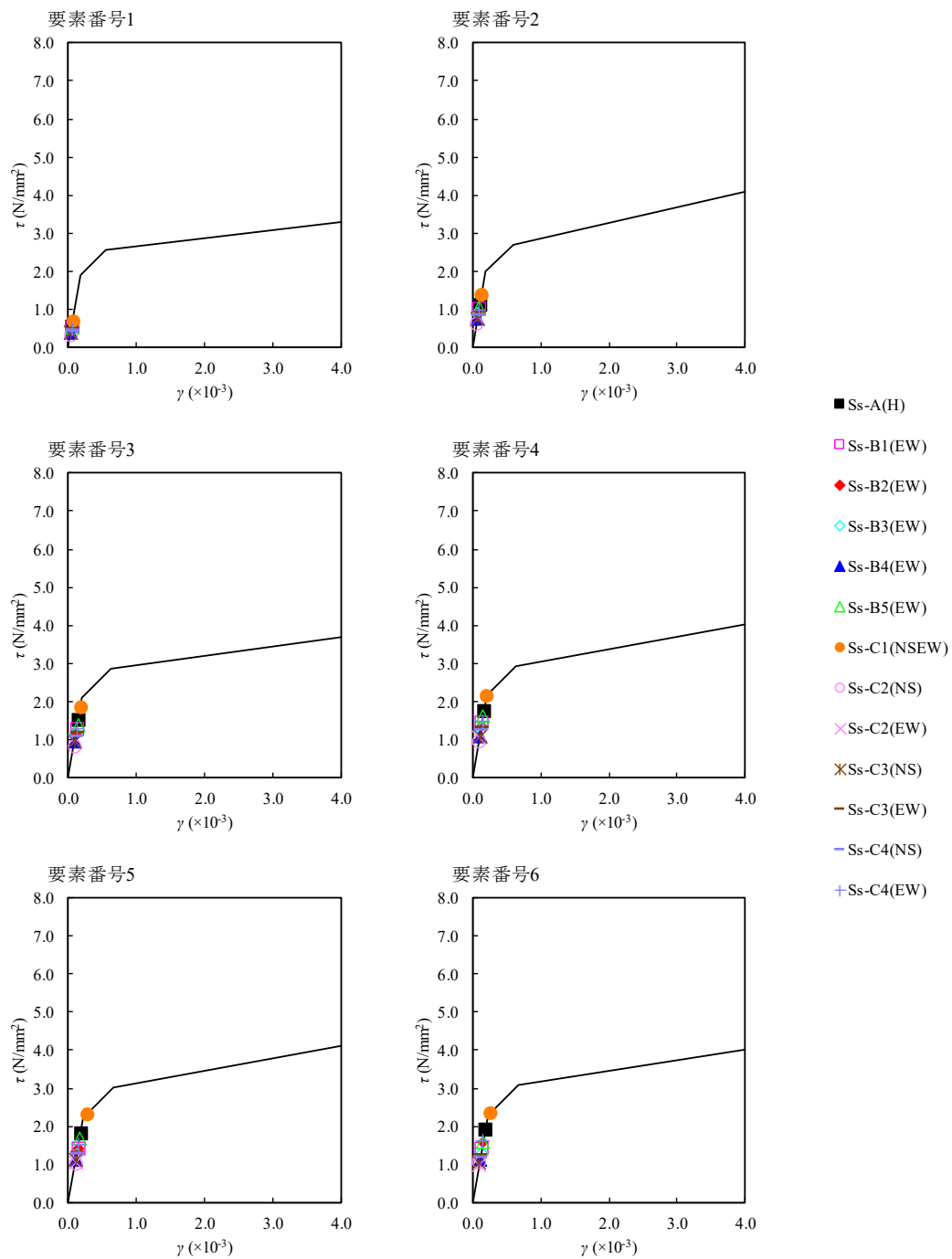
第 1.1.1-2 図 $\tau - \gamma$ 関係と最大応答値
(弾性設計用地震動 Sd, ケース No.0, EW 方向)

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。



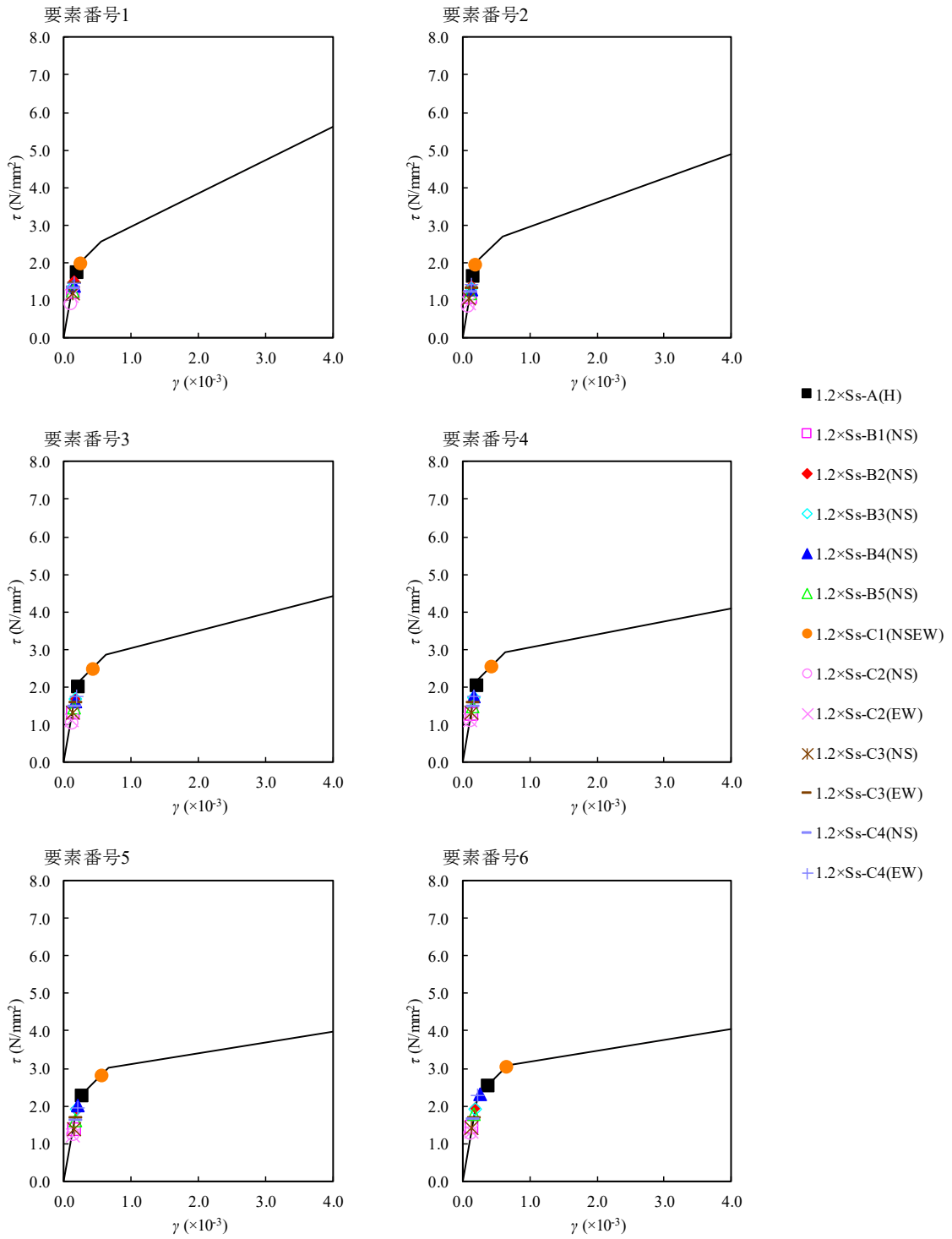
第 1.1.2-1 図 $\tau - \gamma$ 関係と最大応答値 (基準地震動 S_s , ケース No.0, NS 方向)



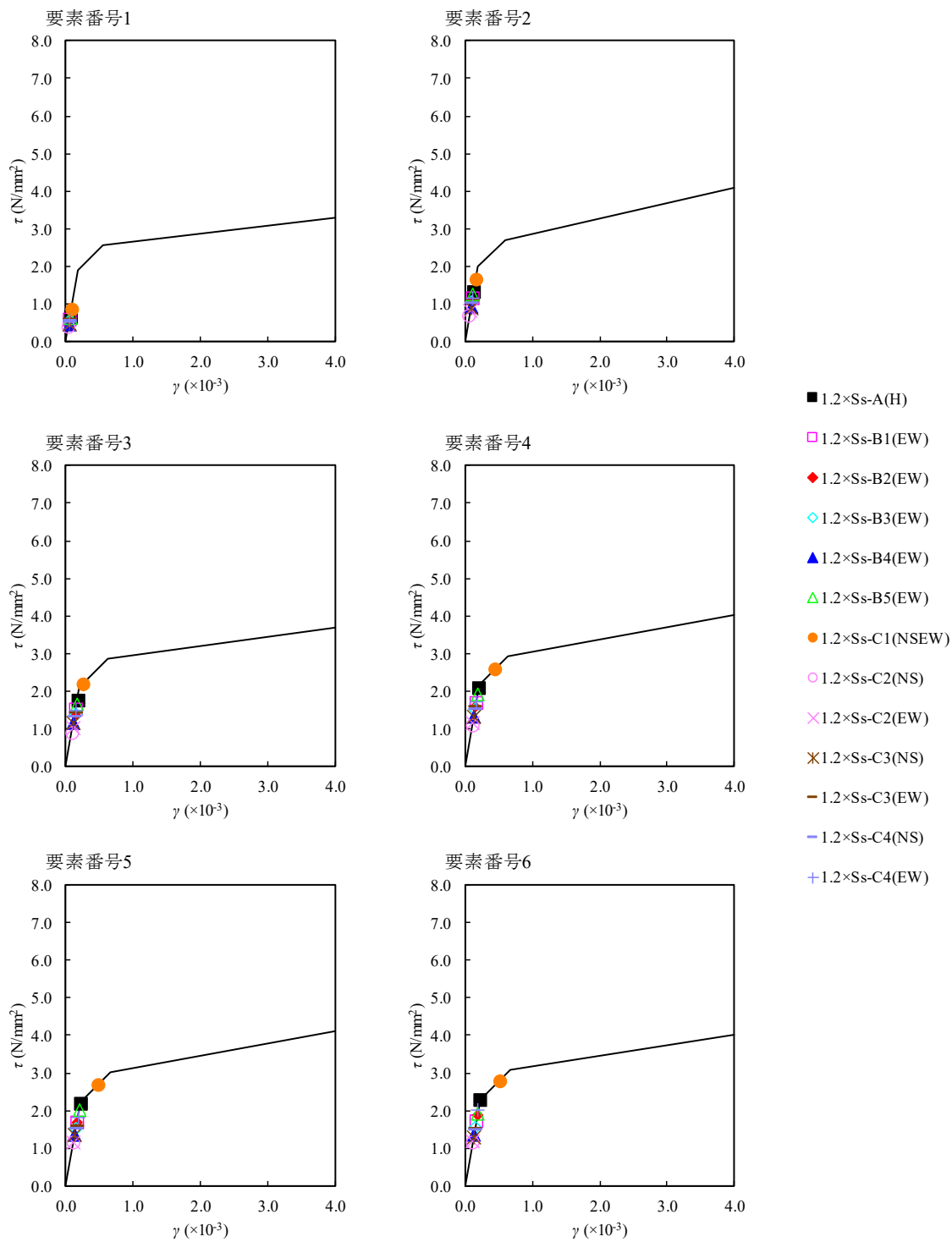
第 1.1.2-2 図 $\tau - \gamma$ 関係と最大応答値 (基準地震動 S_S, ケース No.0, EW 方向)

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2折点付近となっている。



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)

令和 4 年 1 月 19 日 R0

別紙 2

各建物・構築物の図面集

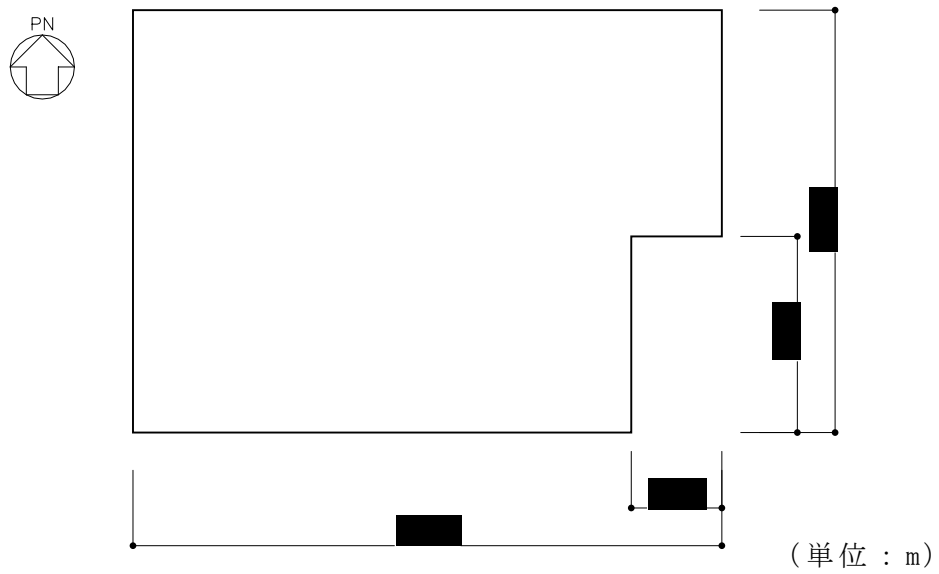
目 次

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

※後次回申請においては申請する建物・構築物の概略図を申請の都度示す。

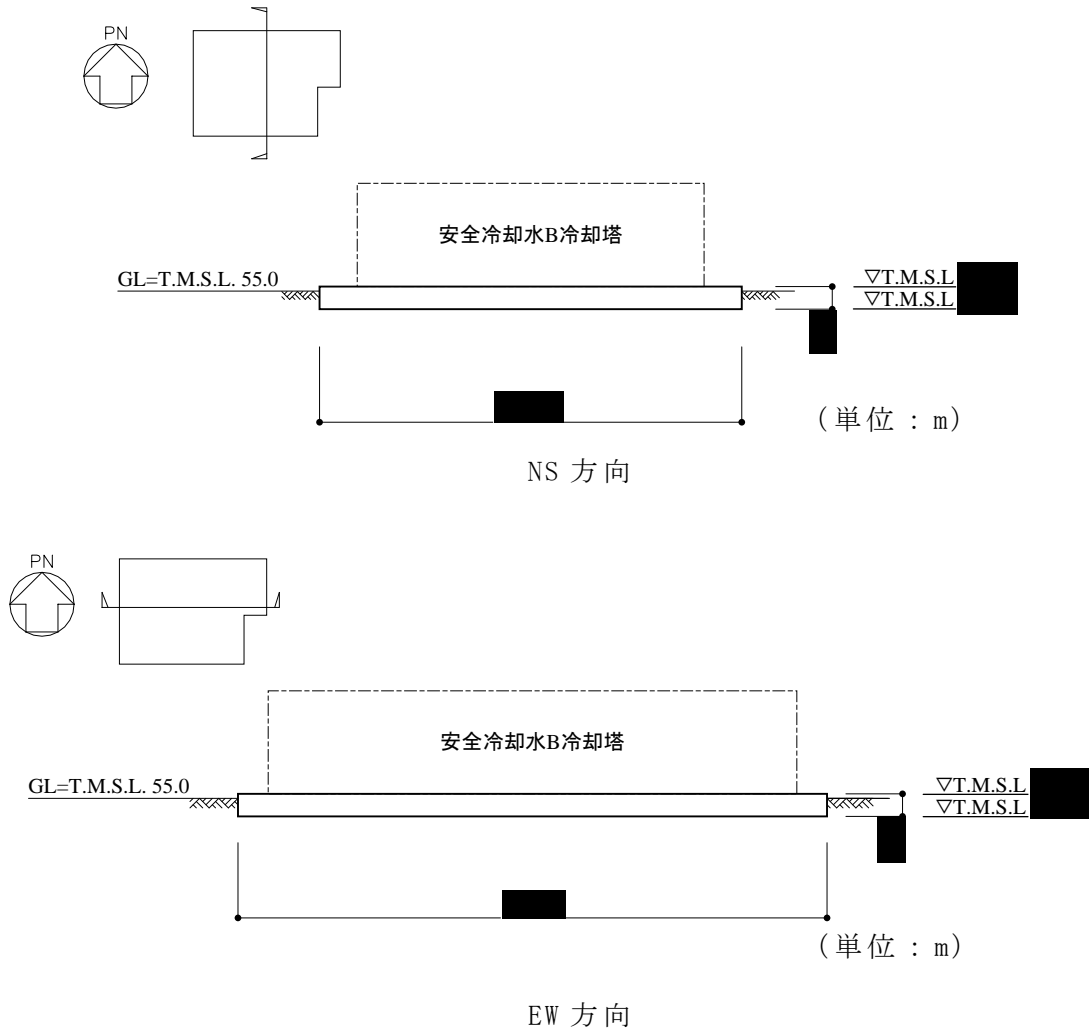
1. 安全冷却水 B 冷却塔基礎の概略図

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。

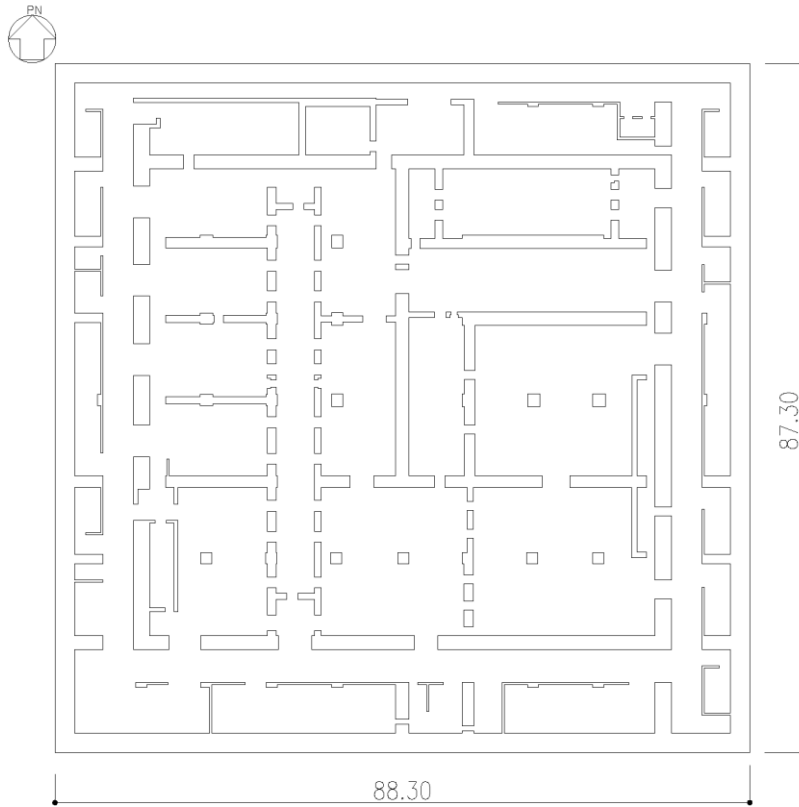
第 1. -1 図 概略平面図 (T. M. S. L. ■■■ m)



第 1.-2 图 概略断面图

2. 燃料加工建屋の概略図

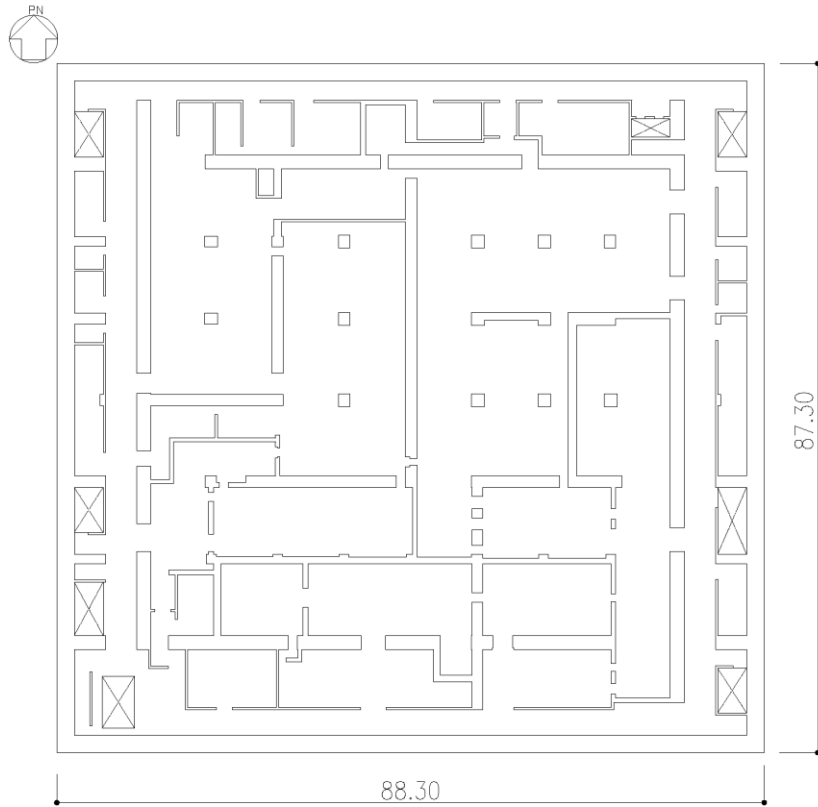
燃料加工建屋の概略平面図を第2.-1図に、概略断面図を第2.-2図に示す。



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

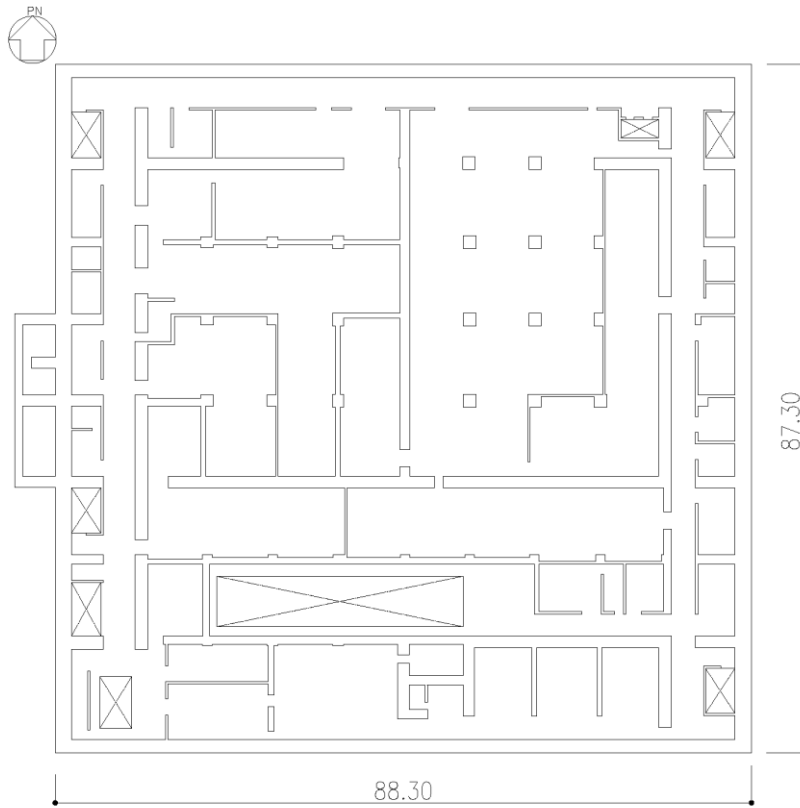
第 2.-1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 35.00m) (1/7)



(単位 : m)

注記 : 建屋寸法は、壁外面押えとする。

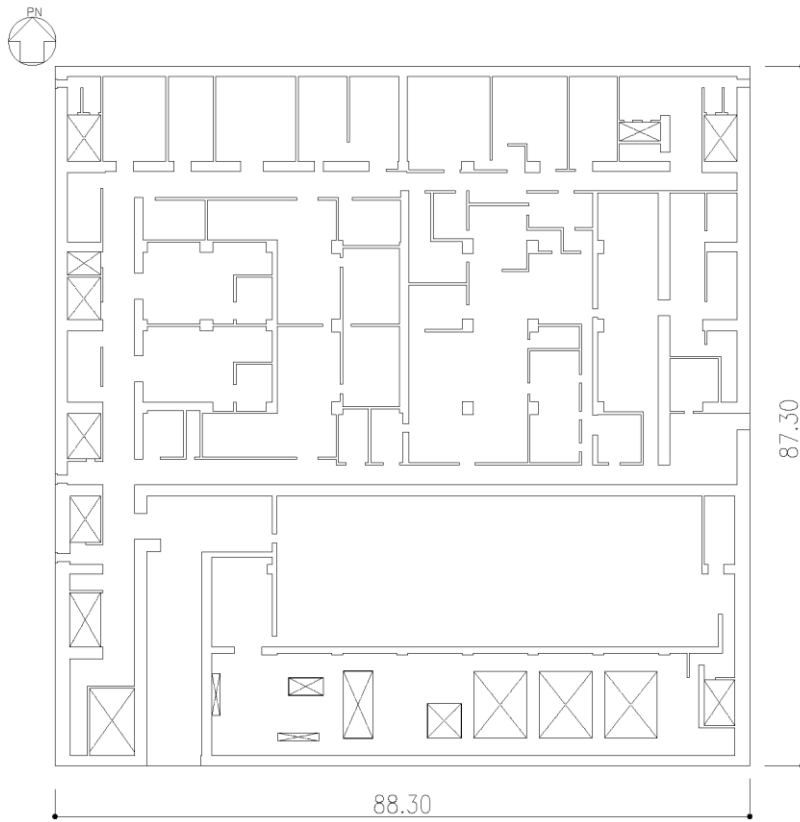
第 2.-1 図 概略平面図 (T. M. S. L. 43.20m) (2/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は，壁外面押えとする。

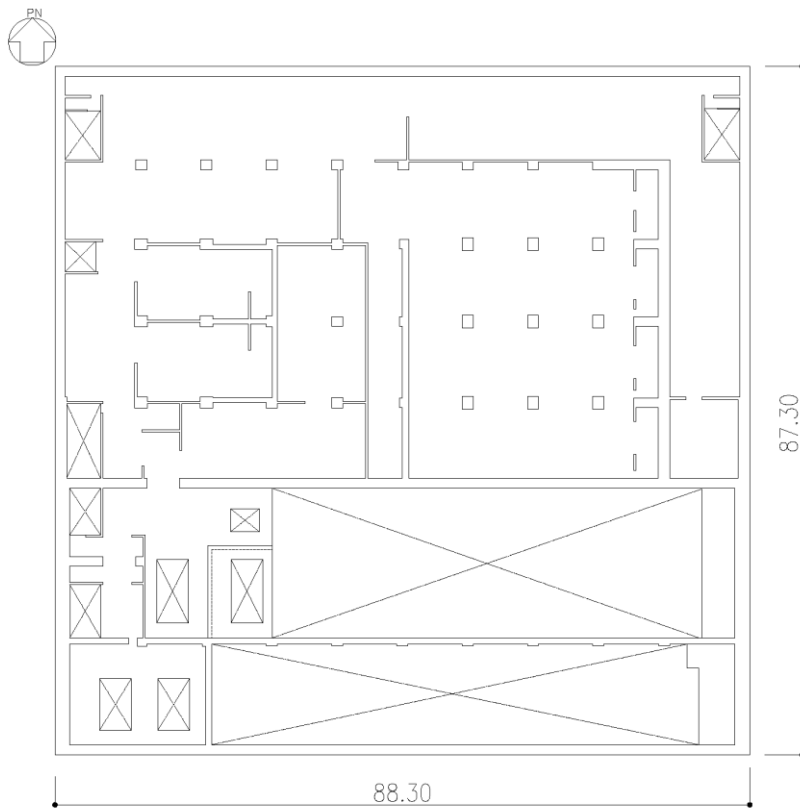
第 2.-1 図 概略平面図 (T.M.S.L. 50.30m) (3/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

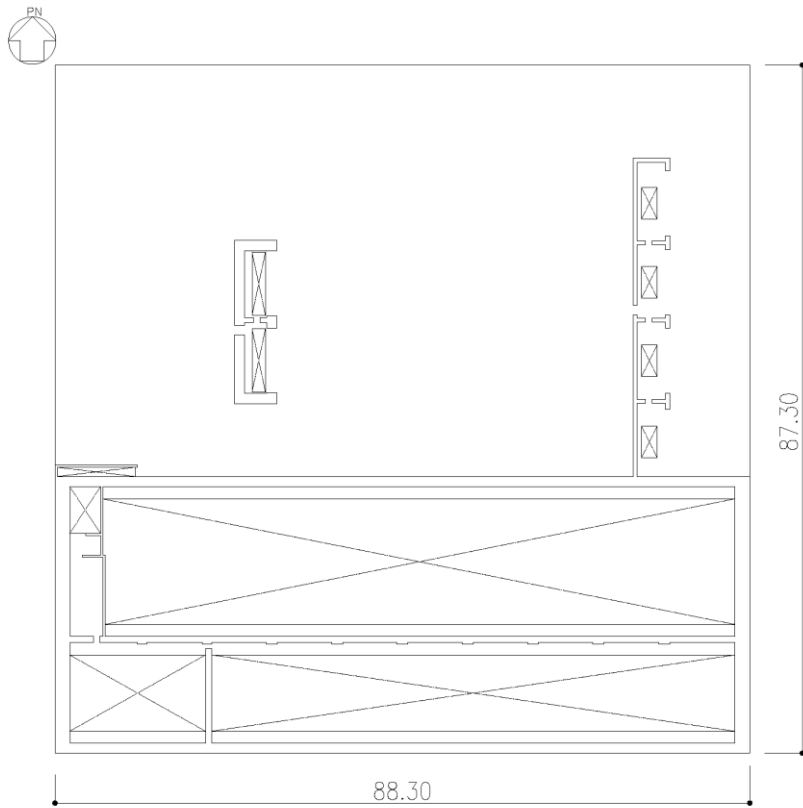
第 2.-1 図 概略平面図 (T.M.S.L. 56.80m) (4/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

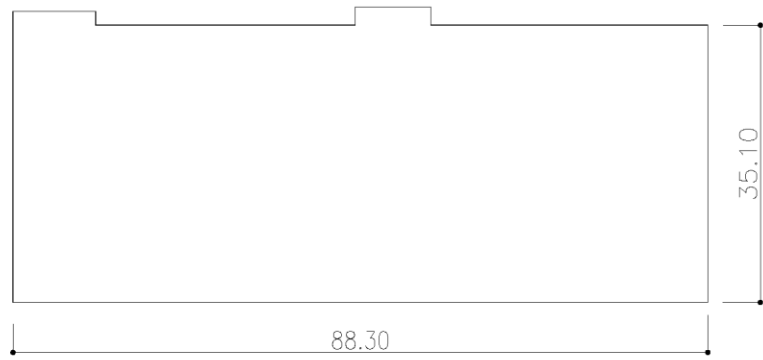
第 2.-1 図 概略平面図 (T.M.S.L.62.80m) (5/7)



(単位：m)

注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

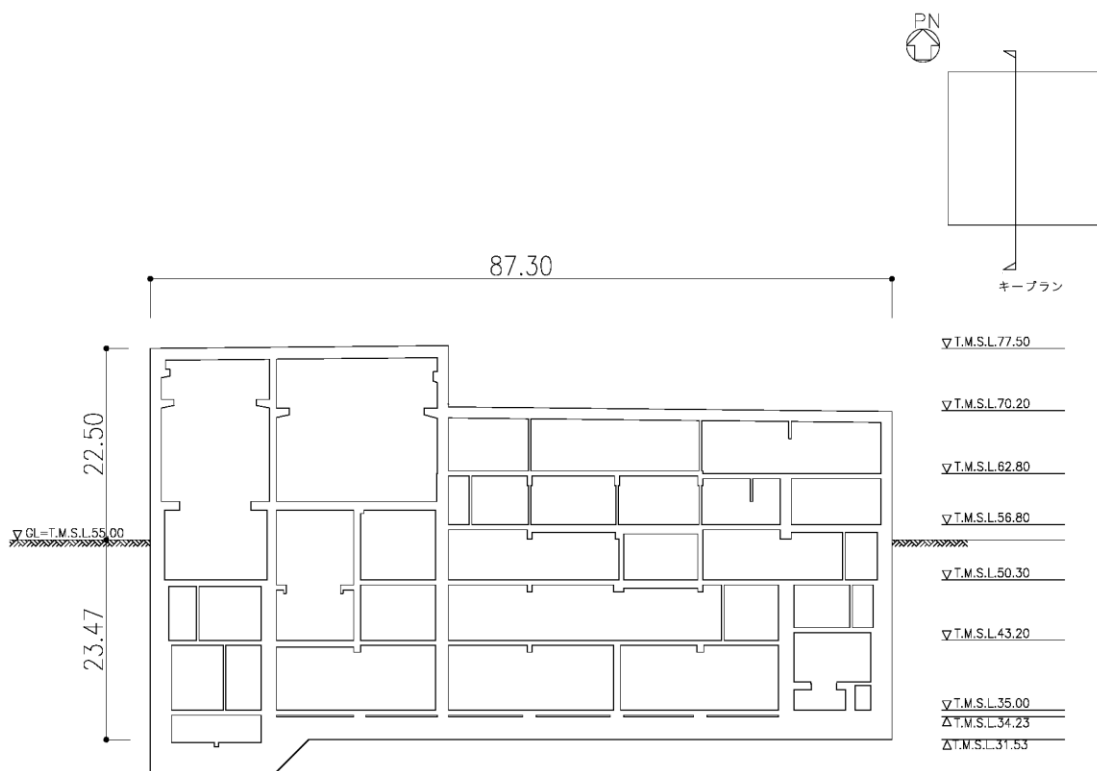
第 2.-1 図 概略平面図 (T.M.S.L. 70.20m) (6/7)



(単位：m)

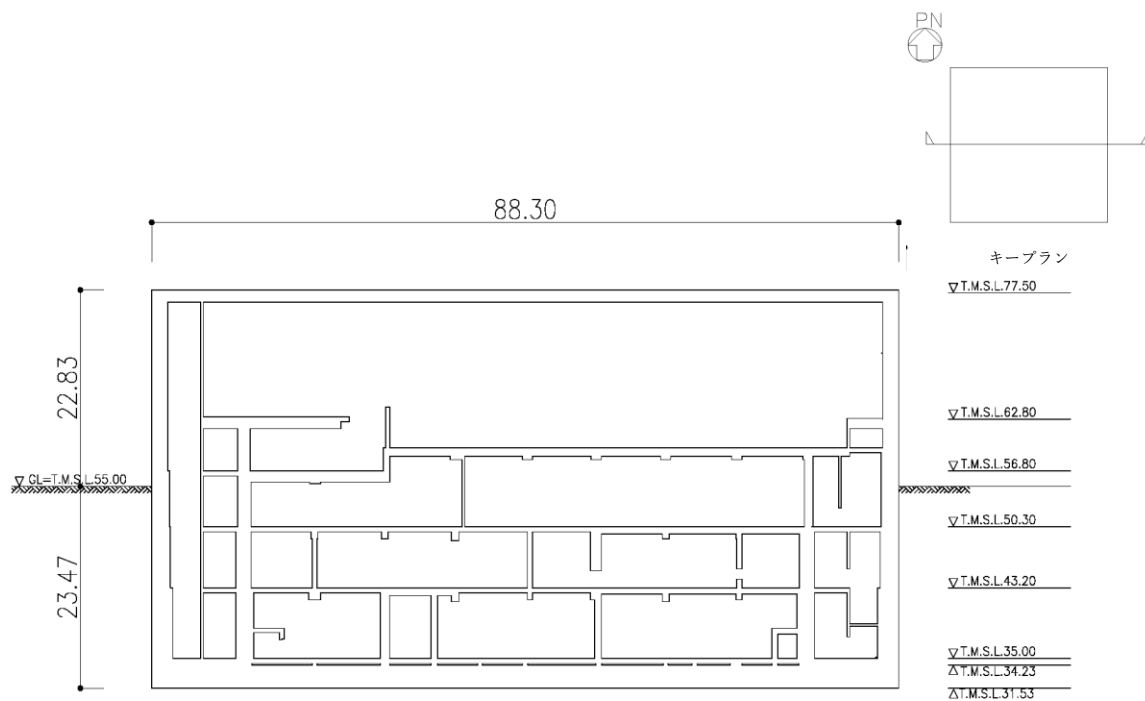
注記：建屋寸法は、壁外面押えとする。

第 2.-1 図 概略平面図 (T.M.S.L. 77.50m) (7/7)



(a) NS 方向

(単位 : m)



(b) EW 方向

(単位 : m)

第 2.-2 図 概略断面図

別紙 3

単純な構造体に分類された建物・構築物における
RC 造部の減衰定数を 3%とした場合の
地震応答解析結果

目 次

1. 概要 別紙 3-1
2. 安全冷却水 B 冷却塔の基礎 別紙 3-2

※後次回申請においては、申請する建物・構築物のうち、単純な構造体に分類されたものについて本資料内にて検討を行うこととする。

1. 概要

単純な構造体に分類される再処理施設等の屋外機械基礎についても、本文における検討を踏まえ、RC造部の減衰定数は5%が妥当と考えている。

ただし、単純な構造体については、構造の複雑さによる減衰効果の付加が期待しにくいことを考慮し、RC造部の減衰定数を3%とした場合と5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い、両者の結果がほぼ一致することを確認することで、減衰定数5%としても差し支えないことを示す。なお、検討に当たっては、補足説明資料本文「6.2.1 減衰定数の振幅依存性」において、応答レベルの観点から減衰定数の振幅依存性について考察を行っており、応答レベルが小さい場合には減衰定数も小さくなることが確認されている。そのため、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s の内、入力レベルの小さい弾性設計用地震動 S_d について、RC造部の減衰定数を3%とした場合の影響を検討する。

2. 安全冷却水 B 冷却塔の基礎

RC 造部の減衰定数を 3%と 5%にした場合の各方向の建屋応答を比較したものを第 2.-1 表～第 2.-8 表に示す。また、基礎部の質点における各方向の加速度応答スペクトルを比較したものを第 2.-1 図～第 2.-3 図に示す。

検討の結果、RC 造部の減衰を 3%にしても

5%としても差し支えないことを示した。

第 2.-1 表 最大応答加速度一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, NS 方向）

T. M. S. L. (m)	質点 番号	最大応答加速度 (cm/s^2)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の質点番号 3 及び 4 が RC 造部の基礎スラブである。
上部の S 造の支持架構(質点番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-2 表 最大応答せん断力一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, NS 方向）

T. M. S. L. (m)	要素 番号	最大応答せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の要素番号 3 が RC 造部の基礎スラブである。
上部の S 造の支持架構(要素番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-3 表 最大応答曲げモーメント一覧表
(弾性設計用地震動 Sd-A, NS 方向)

T. M. S. L. (m)	要素 番号	最大応答曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の要素番号 3 が RC 造部の基礎スラブである。
上部の S 造の支持架構(要素番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-4 表 最大応答加速度一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, EW 方向）

T. M. S. L. (m)	質点 番号	最大応答加速度 (cm/s^2)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の質点番号 3 及び 4 が RC 造部の基礎スラブである。
 上部の S 造の支持架構(質点番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-5 表 最大応答せん断力一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, EW 方向）

T. M. S. L. (m)	要素 番号	最大応答せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の要素番号 3 が RC 造部の基礎スラブである。
 上部の S 造の支持架構(要素番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-6 表 最大応答曲げモーメント一覧表
 （弾性設計用地震動 Sd-A, EW 方向）

T. M. S. L. (m)	要素 番号	最大応答曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の要素番号 3 が RC 造部の基礎スラブである。
 上部の S 造の支持架構(要素番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

第 2.-7 表 最大応答加速度一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, UD 方向）

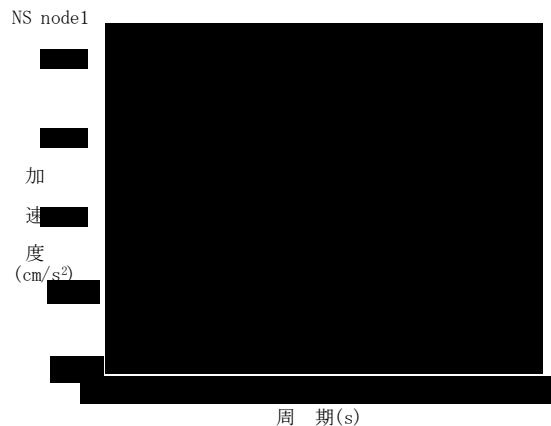
T. M. S. L. (m)	質点 番号	最大応答加速度 (cm/s^2)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

※青枠の質点番号 3 及び 4 が RC 造部の基礎スラブである。
 上部の S 造の支持架構(質点番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。

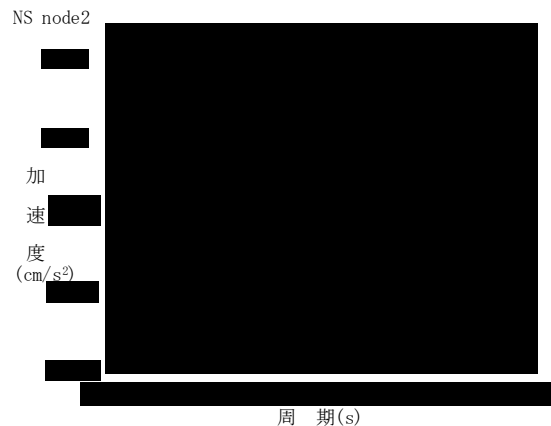
第 2.-8 表 最大応答軸力一覧表（弾性設計用地震動 Sd-A, UD 方向）

T. M. S. L. (m)	要素 番号	最大応答軸力 ($\times 10^3 \text{kN}$)		比率 3% / 5%
		減衰定数 5%	減衰定数 3%	

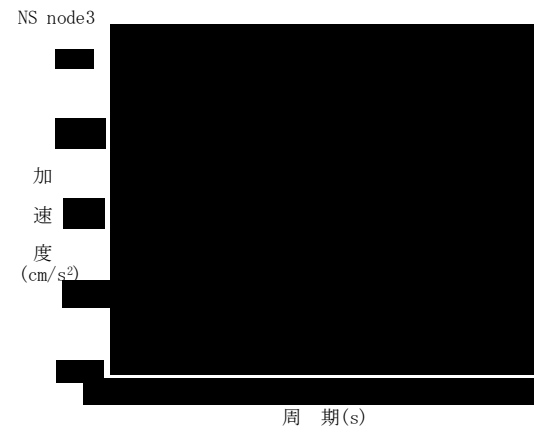
※青枠の要素番号 3 が RC 造部の基礎スラブである。
 上部の S 造の支持架構(要素番号 1 及び 2)の応答は参考として示す。



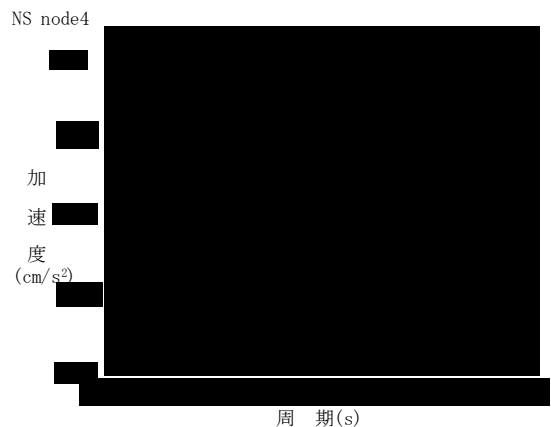
(a) 質点 1



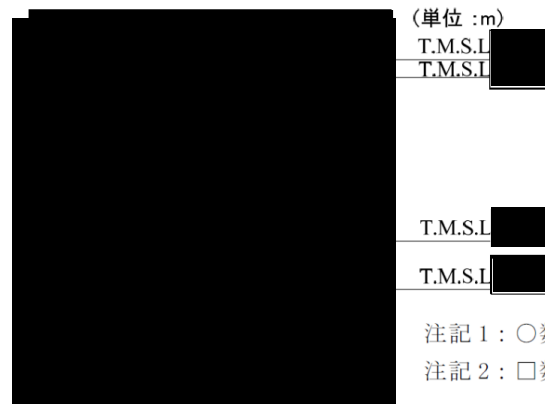
(b) 質点 2



(c) 質点 3



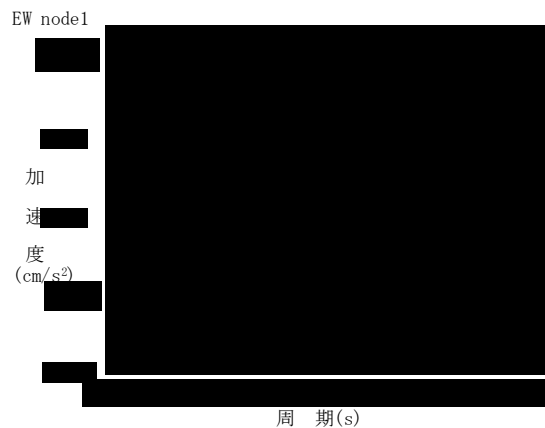
(d) 質点 4



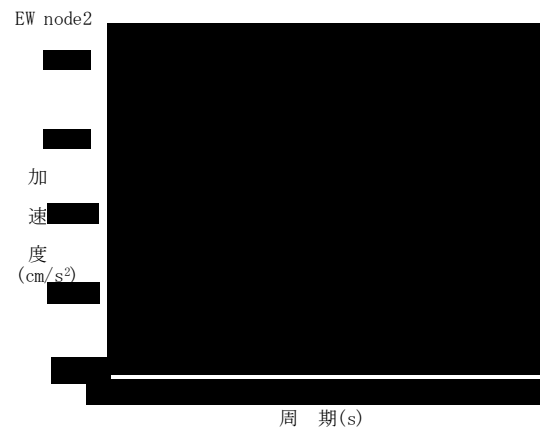
注記 1 : ○数字は質点番号を示す。
 注記 2 : □数字は要素番号を示す。

第 2.-1 図 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 Sd-A, NS 方向)

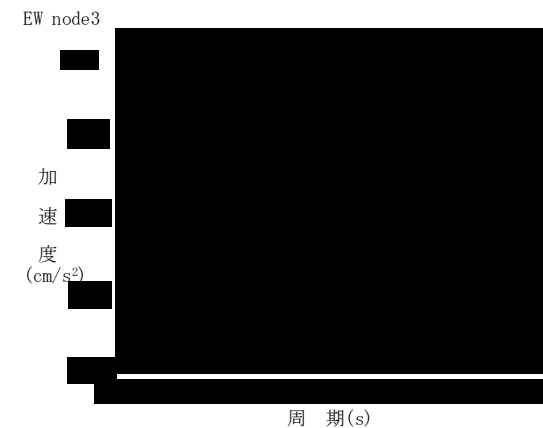
※質点 1 及び質点 2 (上部の S 造の支持架構) の減衰は ■%, 質点 3 及び質点 4 (RC 造の基礎スラブ) の減衰は ■%



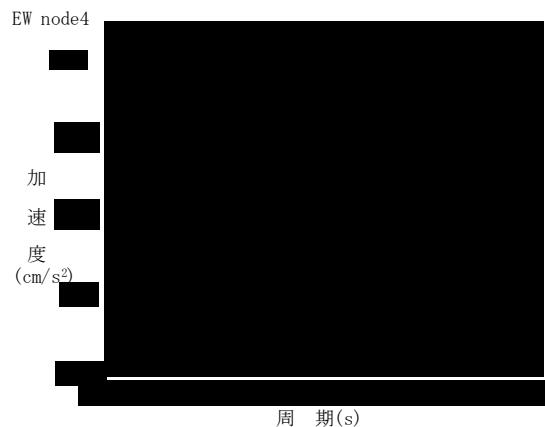
(a) 質点 1



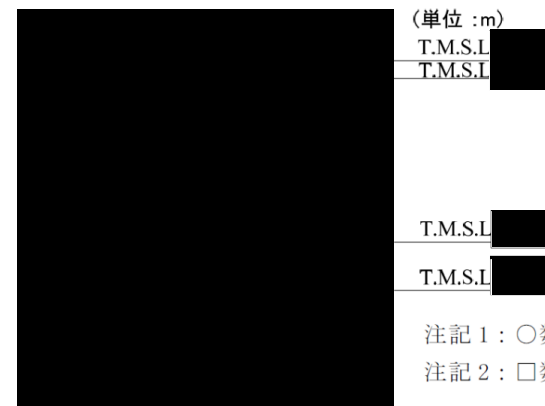
(b) 質点 2



(c) 質点 3



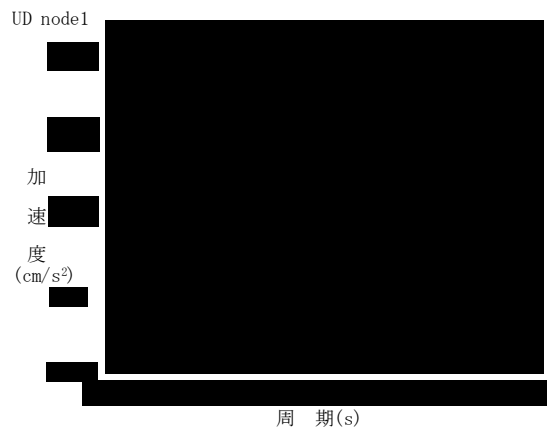
(d) 質点 4



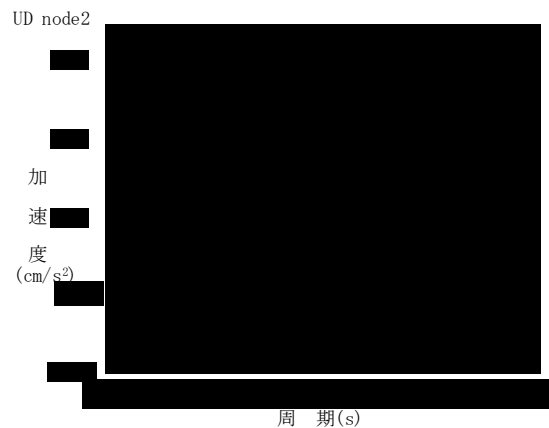
注記 1 : ○数字は質点番号を示す。
 注記 2 : □数字は要素番号を示す。

第 2.-2 図 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 Sd-A, EW 方向)

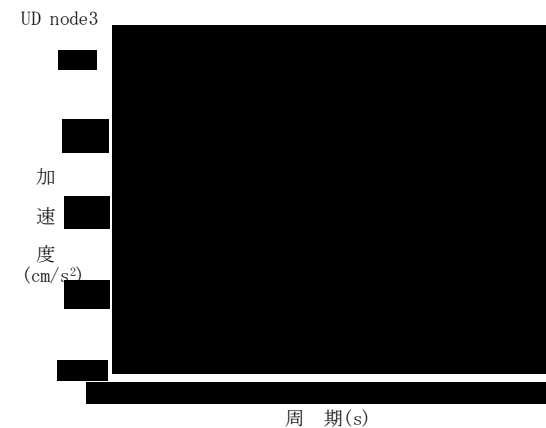
※質点 1 及び質点 2 (上部の S 造の支持架構) の減衰は ■%, 質点 3 及び質点 4 (RC 造の基礎スラブ) の減衰は ■%



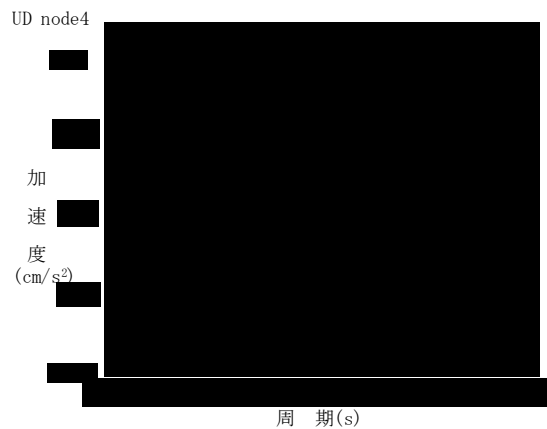
(a) 質点 1



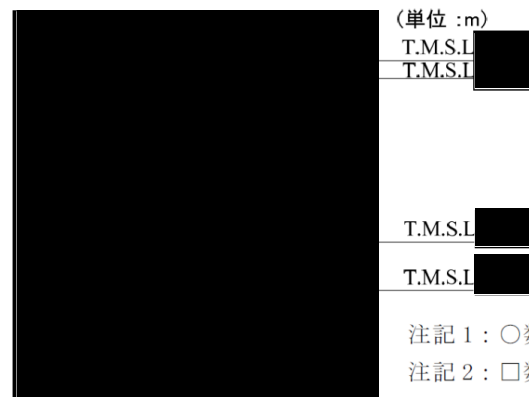
(b) 質点 2



(c) 質点 3



(d) 質点 4



注記 1 : ○数字は質点番号を示す。
 注記 2 : □数字は要素番号を示す。

第 2.-3 図 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 Sd-A, UD 方向)

※質点 1 及び質点 2 (上部の S 造の支持架構) の減衰は ■%, 質点 3 及び質点 4 (RC 造の基礎スラブ) の減衰は ■%

別紙 4

燃料加工建屋における
RC 造部の減衰定数を 5%とした場合の
地震応答解析結果

目 次

1. 概要 別紙 4-1
2. 検討内容 別紙 4-1
3. 検討結果 別紙 4-1

1. 概要

燃料加工建屋の地震応答解析モデルに用いる RC 造部の減衰定数については、5%が妥当であると考えているものの、既設工認時の発電炉の安全審査の実績を踏まえ、設計上の保守性に配慮して3%としている。

本資料では、燃料加工建屋について、RC 造部の減衰定数を3%とした場合と5%とした場合の地震応答解析結果の比較を行い、両者の結果がほぼ一致し、3%の方が概ね保守的であることを確認することで、減衰定数3%としても差し支えないことを示す。

2. 検討内容

本文「6.1.1 応答レベルごとの減衰定数と振幅依存性」では、応答レベルの観点から減衰定数の振幅依存性について考察を行っており、応答レベルが大きい場合には減衰定数も大きくなることが確認されている。そのため、燃料加工建屋の地震応答解析に用いている、弾性設計用地震動 S_d 、基準地震動 S_s 及び $1.2 \times S_s$ の内、入力レベルの大きい $1.2 \times S_s$ について、RC 造部の減衰定数を5%とした場合の影響を検討する。検討に用いる入力地震動は、卓越周期に著しい偏りがなく、継続時間が長い $1.2 \times S_s - A$ を代表として用いることとし、地盤物性は基本ケースとした。RC 造部の減衰定数を3%と5%にした場合の各方向の建屋応答を比較したものを第2.-1表～第2.-8表に示す。また、各方向の加速度応答スペクトルを比較したものを第2.-1図～第2.-3図に示す。

3. 検討結果

燃料加工建屋の地震応答解析において、RC 造部の減衰定数を3%と5%とした場合の結果の比較を行った。その結果、RC 造部の減衰を5%にしても応答に与える影響は非常に小さく、3%の方が概ね保守的であることが確認できた。そのため、燃料加工建屋の地震応答解析モデルに用いる減衰定数については、5%が妥当であると考えた上で、既設工認時の発電炉の安全審査の実績を踏まえ、設計上の保守性に配慮して3%としているが、減衰定数の違いが、燃料加工建屋が有する耐震性に与える影響は小さいことを確認した。

第 2.-1 表 最大応答加速度一覧表 (1.2×S_s-A, NS 方向)

T. M. S. L. (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	1328	1277	0.961
70.20	2	1099	1080	0.983
62.80	3	1014	989	0.975
56.80	4	954	922	0.967
50.30	5	901	876	0.973
43.20	6	878	851	0.969
35.00	7	756	757	1.001
34.23	8	757	753	0.995
31.53	9	753	750	0.996

第 2.-2 表 最大応答せん断力一覧表 (1.2×S_s-A, NS 方向)

T. M. S. L. (m)	要素番号	最大応答せん断力 (×10 ⁵ kN)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	2.35	2.26	0.960
70.20				
62.80	2	6.00	5.78	0.964
	56.80	3	9.61	9.53
50.30	4	13.22	13.18	0.997
	43.20	5	17.23	16.97
35.00	6	22.33	21.97	0.984
	34.23	7	24.16	23.73
31.53	8	25.27	24.81	0.982

第 2.-3 表 最大応答曲げモーメント一覧表 (1.2×S_s-A, NS 方向)

T. M. S. L. (m)	要素番号	最大応答曲げモーメント (×10 ⁵ kNm)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	20.41	19.60	0.960
70.20				
62.80	2	104.79	101.25	0.966
56.80	3	195.82	192.70	0.984
50.30	4	304.49	294.85	0.968
43.20	5	428.25	417.95	0.976
35.00	6	595.55	583.37	0.980
34.23	7	623.70	613.78	0.984
31.53	8	685.65	673.83	0.983

第 2.-4 表 最大応答加速度一覧表 (1.2×S_s-A, EW 方向)

T. M. S. L. (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	1157	1125	0.972
70.20	2	1061	1028	0.968
62.80	3	988	977	0.989
56.80	4	936	922	0.985
50.30	5	857	849	0.990
43.20	6	839	806	0.960
35.00	7	749	739	0.987
34.23	8	751	739	0.985
31.53	9	747	740	0.991

第 2.-5 表 最大応答せん断力一覧表 (1.2×S_s-A, EW 方向)

T. M. S. L. (m)	要素番号	最大応答せん断力 (×10 ⁵ kN)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	2.05	2.02	0.983
70.20				
62.80	2	5.61	5.41	0.965
	56.80	3	9.17	9.07
50.30	4	13.24	13.10	0.990
	43.20	5	17.41	17.31
35.00	6	22.41	22.26	0.993
	34.23	7	24.44	24.21
31.53	8	25.67	25.35	0.987

第 2.-6 表 最大応答曲げモーメント一覧表 (1.2×S_s-A, EW 方向)

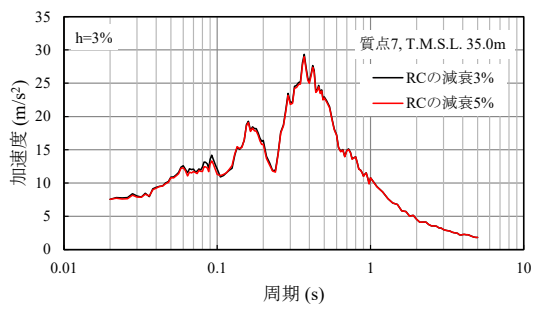
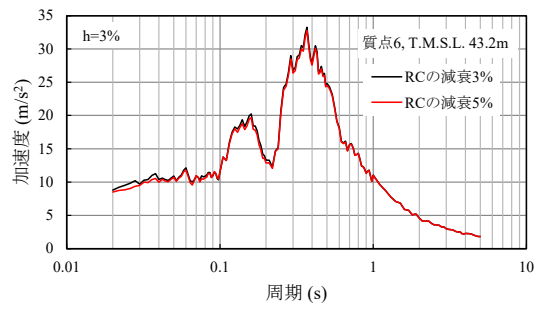
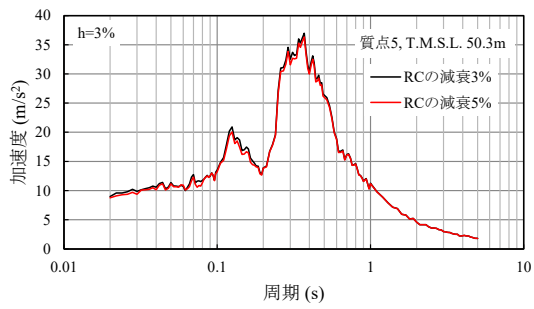
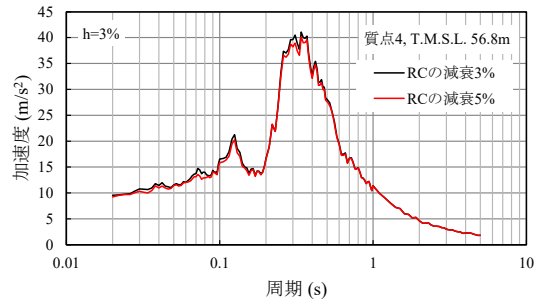
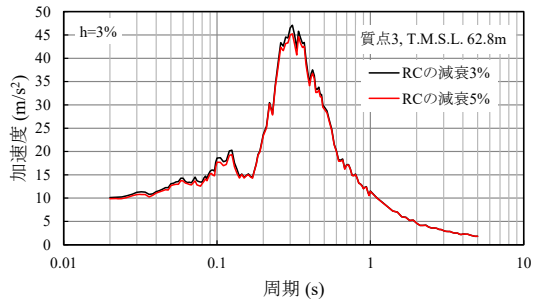
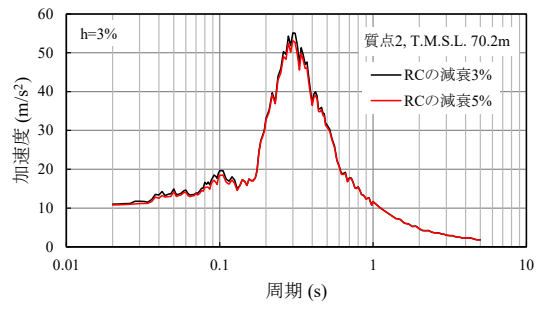
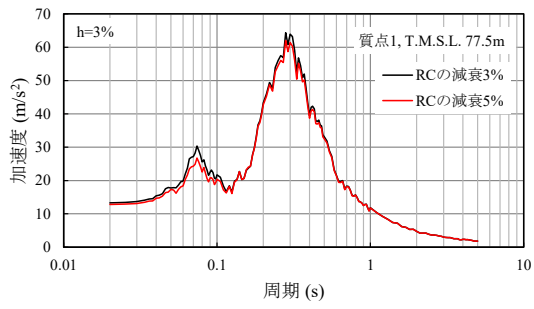
T. M. S. L. (m)	要素番号	最大応答曲げモーメント (×10 ⁵ kNm)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	37.09	36.22	0.977
70.20				
62.80	2	112.37	109.89	0.978
56.80	3	198.15	193.68	0.977
50.30	4	296.06	290.09	0.980
43.20	5	412.79	402.78	0.976
35.00	6	577.34	569.52	0.986
34.23	7	605.04	596.28	0.986
31.53	8	669.21	661.47	0.988

第 2.-7 表 最大応答加速度一覧表 (1.2×S_s-A, UD 方向)

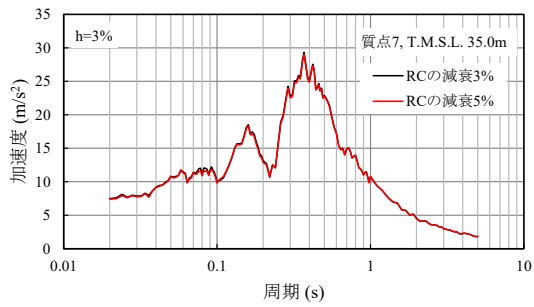
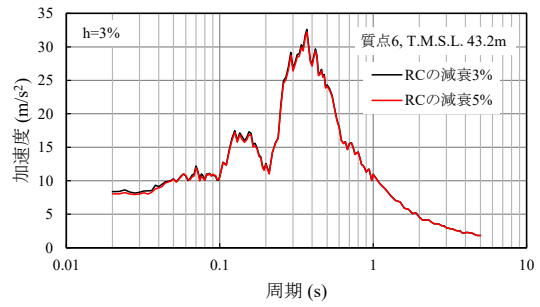
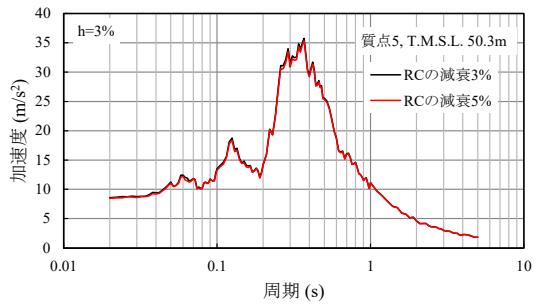
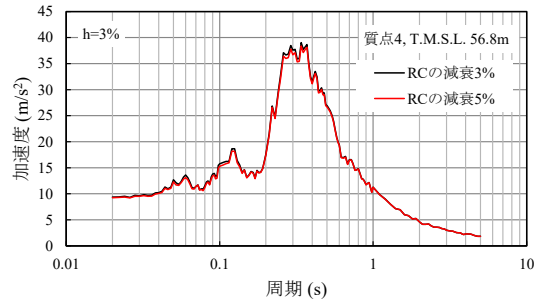
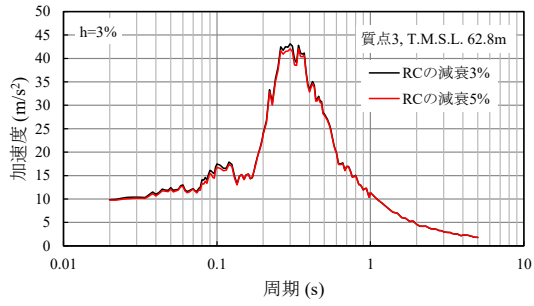
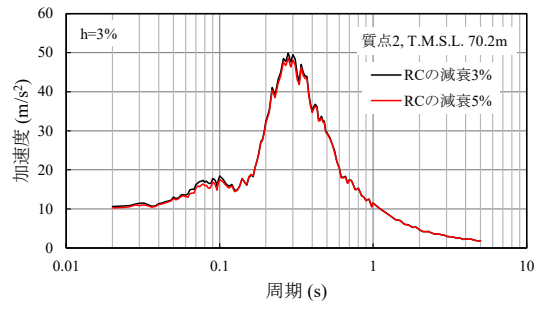
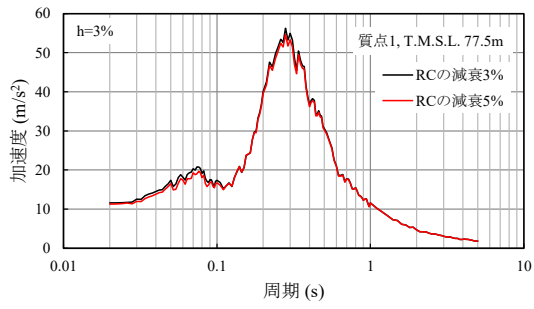
T. M. S. L. (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s ²)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	729	718	0.985
70.20	2	685	679	0.991
62.80	3	632	626	0.991
56.80	4	569	567	0.997
50.30	5	519	518	0.997
43.20	6	507	504	0.995
35.00	7	497	493	0.992
34.23	8	498	494	0.992
31.53	9	500	496	0.992

第 2.-8 表 最大応答軸力一覧表 (1.2×S_s-A, UD 方向)

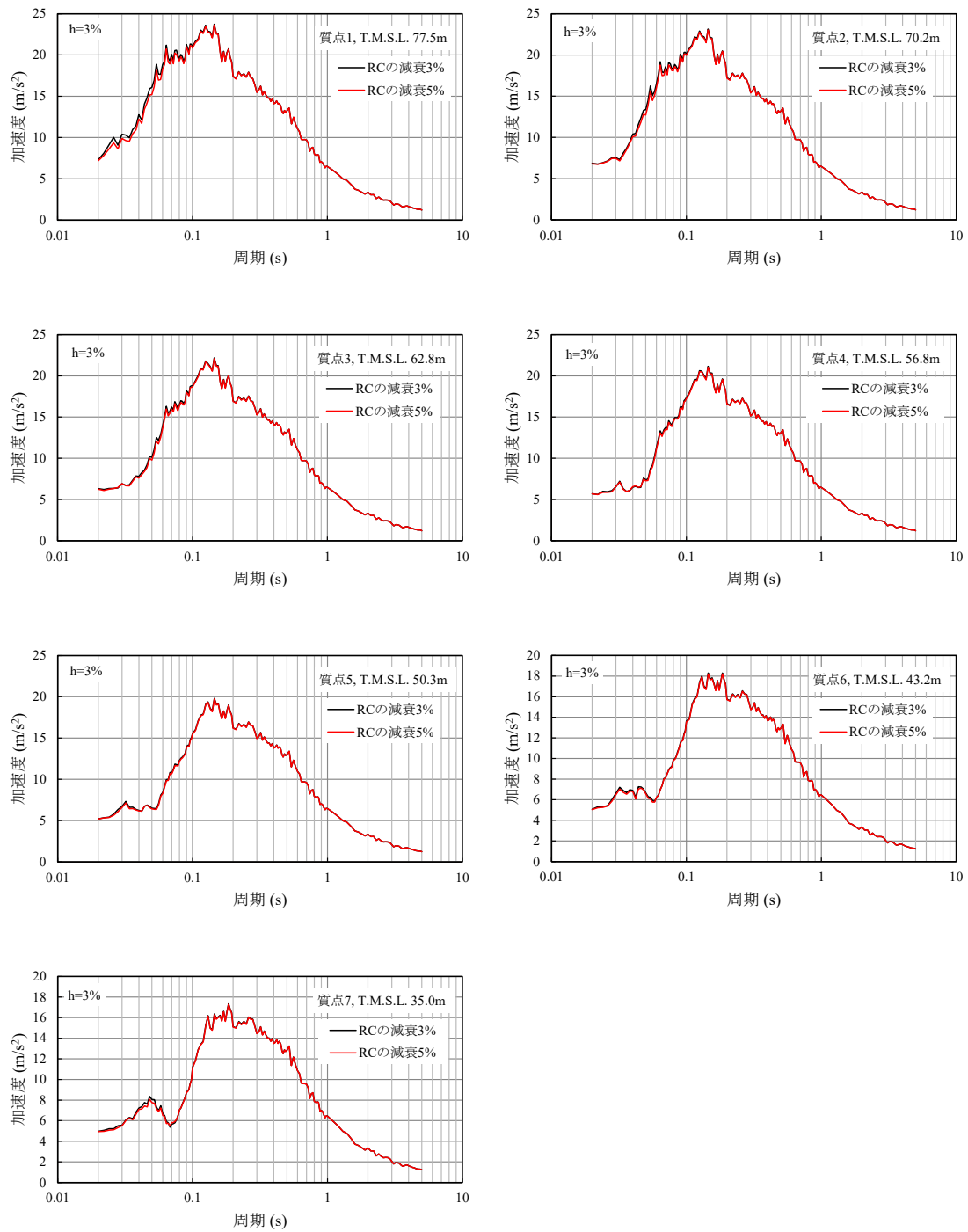
T. M. S. L. (m)	要素番号	最大応答軸力 (×10 ⁴ kN)		応答比率 5% / 3%
		減衰定数 3%	減衰定数 5%	
77.50	1	12.94	12.73	0.984
70.20				
62.80	2	35.94	35.54	0.989
50.30	3	60.77	60.18	0.990
35.00	4	85.73	85.07	0.992
34.23	5	110.99	110.42	0.995
31.53	6	135.31	134.76	0.996
31.53	7	151.04	150.31	0.995
31.53	8	162.26	161.39	0.995



第 2.-1 図 加速度応答スペクトル (1.2×S_s-A, NS 方向)



第 2.-2 図 加速度応答スペクトル (1.2×S_s-A, EW 方向)



第 2.-3 図 加速度応答スペクトル (1.2×S_s-A, UD 方向)