

令和 5 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費
(建物・構築物の地震応答解析における減衰の設定に関する調査・分析) 事業

株式会社篠塚研究所

令和 6 年 2 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1. 概要	1-1
2. 建築物の減衰定数に関する文献の調査、分析	2-1
2.1 調査方針	2-1
2.1.1 調査手順	2-1
2.1.2 調査範囲	2-1
2.2 調査報告の概要	2-2
2.3 建屋減衰に関する国内外の文献等の調査、分析	2-4
2.3.1 原子力発電関連施設を対象とした文献調査、分析	2-4
2.3.2 一般建築物の減衰定数に関する文献調査、分析	2-81
2.4 第2章のまとめ	2-93
2.5 第2章の参考文献	2-96
3. 地震観測、微動計測、振動実験等を用いた一般建築物の減衰定数に関する文献等の抽出、公開されたデータ等の情報の収集	3-1
3.1 文献の抽出方針	3-1
3.2 公開データの情報の収集	3-1
3.2.1 日本建築学会の実測データベース	3-1
3.2.2 E-ディフェンス実験データアーカイブ	3-17
3.3 シミュレーション解析等の検討における課題の抽出	3-76
3.3.1 シミュレーション解析等の検討	3-76
3.3.2 課題の抽出	3-79
3.4 第3章のまとめ	3-79
3.5 第3章の参考文献	3-81
4. まとめ	4-1

表一覧

表 2.1.2-1	調査対象	2-1
表 2.3.1-1	原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧 (BWR) 参 2-15	2-5
表 2.3.1-2	原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧 (PWR) 参 2-15	2-6
表 2.3.1-3	原子炉施設の地震観測と解析評価比較一覧 (BWR) 参 2-15	2-8
表 2.3.1-4	原子炉施設の地震観測と解析評価比較一覧 (PWR) 参 2-15	2-9
表 2.3.1-5	RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価 参 2-1	2-13
表 2.3.1-6	原子炉建屋 (PWR) での地震観測記録の分析結果 参 2-1	2-16
表 2.3.1-7	既往の実験結果・観測結果の整理 参 2-1	2-22
表 2.3.1-8	柏崎刈羽原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理 参 2-1	2-24
表 2.3.1-9	柏崎刈羽原子力発電所の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 参 2-1	2-24
表 2.3.1-10	再処理施設の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理 参 2-2	2-25
表 2.3.1-11	再処理施設の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 参 2-2	2-25
表 2.3.1-12	高浜発電所 1 号機原子炉格納施設の固有振動数及び減衰定数の同定結果 参 2-3	2-27
表 2.3.1-13	高浜発電所 1 号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数 h の考察にあたっての整理 参 2-3	2-29
表 2.3.1-14	高浜発電所 1 号機の入力地震動ならびに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数 h の整理 参 2-3	2-30
表 2.3.1-15	高浜発電所 2 号機の入力地震動ならびに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数 h の整理 参 2-4	2-30
表 2.3.1-16	東海第二発電所の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 参 2-5	2-36
表 2.3.1-17	東海第二発電所の入力地震動なら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 参 2-5	2-36
表 2.3.1-18	使用材料の物性値 参 2-6	2-37
表 2.3.1-19	女川原子力発電所の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 参 2-6	2-42
表 2.3.1-20	女川原子力発電所の入力地震動なら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 参 2-6	2-42
表 2.3.1-21	減衰定数の評価結果 参 2-8	2-43
表 2.3.1-22	伊方発電所 3 号機の RC 耐震壁試験と観測記録を用いた検討を踏まえた整理 参 2-8	2-47
表 2.3.1-23	伊方発電所 3 号機の $S_s \cdot S_d$ 応答レベルを踏まえた減衰定数の整理 参 2-8	2-47
表 2.3.1-24	床応答スペクトル【3 号機原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋】 参 2-9	2-51

表 2.3.1-25	床応答スペクトル【3号機原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋】 ^{参 2-9}	2-52
表 2.3.1-26	玄海原子力発電所の RC 耐震壁試験と観測記録を用いた検討を踏まえた整理 ^{参 2-9} 2-53	
表 2.3.1-27	玄海原子力発電所の入力地震動なら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 ^{参 2-9}	2-54
表 2.3.1-28	連絡通路の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理 ^{参 2-10}	2-55
表 2.3.1-29	RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価（再掲） ^{参 2-1}	2-59
表 2.3.1-30	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（再掲） ^{参 2-1}	2-61
表 2.3.1-31	第 7-1 表 ^{参 2-9}	2-64
表 2.3.1-32	第 1-1 表 ^{参 2-14}	2-65
表 2.3.1-33	過去の主要地震と固有振動数変化 ^{参 2-20}	2-67
表 2.3.1-34	実機起振機試験による振動数と減衰定数 ^{参 2-17}	2-73
表 2.3.1-35	常時微動による振動数と減衰定数 ^{参 2-17}	2-73
表 2.3.1-36	地震観測による振動数と減衰定数 ^{参 2-17}	2-73
表 2.3.1-37	SSE Damping Values ^{参 2-31}	2-74
表 2.3.1-38	OBE Damping Values ^{参 2-31}	2-74
表 2.3.1-39	Proposed structural damping values for a safe shutdown earthquake ^{参 2-32}	2-76
表 2.3.1-40	Proposed structural damping values for an operating basis earthquake ^{参 2-32} 2-76	
表 2.3.1-41	Specified Damping Values for Dynamic Analysis ^{参 2-33}	2-77
表 2.3.1-42	Estimating Damping Response Level ^{参 2-33}	2-77
表 2.3.2-1	壁式構造の試験条件と試験結果 ^{参 2-35}	2-81
表 3.2.1-1	実測方法のグループ化	3-3
表 3.2.1-2	減衰評価手法のグループ化	3-3
表 3.2.1-3	実測データベースの抜粋（S 造）	3-9
表 3.2.1-4	実測データベースの抜粋（RC 造）	3-10
表 3.2.1-5	実測データベースの抜粋（SRC 造）	3-11
表 3.2.1-6	常時微動データを対象とした減衰定数の評価結果に影響を与える因子とその影響 . 3-16	
表 3.2.2-1	RC 構造物に関する ASEBI のデータ	3-18
表 3.2.2-2	大型振動台に関する文献の一覧	3-19
表 3.2.2-3	免震構造の加振日程（ASEBI ^{参 3-8} より抜粋・編集）	3-20
表 3.2.2-4	耐震構造の加振日程（ASEBI ^{参 3-8} より抜粋・編集）	3-21
表 3.2.2-5	試験体の主な仕様	3-22
表 3.2.2-6	免震構造の加振日程（ASEBI ^{参 3-9} より抜粋・編集）	3-27
表 3.2.2-7	耐震構造の加振日程（ASEBI ^{参 3-9} より抜粋・編集）	3-28

表 3.2.2-8	加振日程 (ASEBI 参 3-10 より抜粋・編集)	3-32
表 3.2.2-9	試験体の主な仕様	3-33
表 3.2.2-10	加振日程 (ASEBI 参 3-12 より抜粋・編集)	3-37
表 3.2.2-11	試験体の主な仕様	3-38
表 3.2.2-12	加振日程 (ASEBI 参 3-14 より抜粋・編集)	3-43
表 3.2.2-13	試験体の主な仕様	3-44
表 3.2.2-14	加振日程 (ASEBI 参 3-16 より抜粋・編集)	3-49
表 3.2.2-15	試験体の主な仕様	3-50
表 3.2.2-16	加振日程 (ASEBI 参 3-17 より抜粋・編集)	3-54
表 3.2.2-17	試験体の主な仕様	3-55
表 3.2.2-18	加振日程 (ASEBI 参 3-19 より抜粋・編集)	3-60
表 3.2.2-19	試験体の主な仕様	3-61
表 3.2.2-20	加振日程 (ASEBI 参 3-21 より抜粋・編集)	3-66
表 3.2.2-21	加振日程 (ASEBI 参 3-23 より抜粋・編集)	3-71
表 3.2.2-22	試験体の主な仕様	3-72

図一覧

図 2.3.1-1	地盤剛性 (Vs) と試験結果の減衰定数の関係 ^{参 2-15}	2-7
図 2.3.1-2	解析での建屋 (鉄筋コンクリート) の減衰定数 ^{参 2-15}	2-10
図 2.3.1-3	減衰定数の設定根拠の検討フロー ^{参 2-1}	2-12
図 2.3.1-4	地盤剛性 (Vs) と試験結果の減衰定数の関係 ^{参 2-15}	2-14
図 2.3.1-5	地震観測による減衰定数と入力加速度レベルの関係 (女川 2 号機及び 3 号機) ^{参 2-1}	2-15
図 2.3.1-6	川内 1 号機 外部遮蔽建屋の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係 ^{参 2-1}	2-16
図 2.3.1-7	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 ^{参 2-1}	2-18
図 2.3.1-8	最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 中越沖地震 ^{参 2-1}	2-20
図 2.3.1-9	加速度応答スペクトルの比較 : 中越沖地震 ^{参 2-1}	2-21
図 2.3.1-10	最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震 ^{参 2-5}	2-31
図 2.3.1-11	加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震 ^{参 2-5}	2-32
図 2.3.1-12	最大応答加速度分布の比較 : 東北地方太平洋沖地震 ^{参 2-5}	2-34
図 2.3.1-13	加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震 ^{参 2-5}	2-35
図 2.3.1-14	最大応答加速度分布の比較 : 東北地方太平洋沖地震 ^{参 2-6}	2-38
図 2.3.1-15	加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) ^{参 2-6}	2-39
図 2.3.1-16	減衰定数の検討結果 ^{参 2-7}	2-41
図 2.3.1-17	伊方 3 号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係 ^{参 2-8}	2-44
図 2.3.1-18	応答スペクトルの比較結果 (抜粋) ^{参 2-8}	2-45
図 2.3.1-19	床応答スペクトルの比較結果 (抜粋) ^{参 2-8}	2-46
図 2.3.1-20	減衰定数の同定結果 (PCCV) ^{参 2-9}	2-49
図 2.3.1-21	減衰定数の同定結果 (I/C) ^{参 2-9}	2-50
図 2.3.1-22	地盤剛性 (Vs) と試験結果の減衰定数の関係 (再掲) ^{参 2-15}	2-56
図 2.3.1-23	最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 中越沖地震 (再掲) ^{参 2-1}	2-58
図 2.3.1-24	地震観測による減衰定数と入力加速度レベルの関係 (女川 2 号機及び 3 号機) (再 掲) ^{参 2-1}	2-59
図 2.3.1-25	伊方 3 号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係 (再掲) ^{参 2-8}	2-60
図 2.3.1-26	安芸灘地震の観測記録による減衰定数 ^{参 2-21}	2-68
図 2.3.1-27	PCCV の振動台試験の模型試験体 ^{参 2-25}	2-68
図 2.3.1-28	PCCV の振動台試験の固有振動数と減衰定数 ^{参 2-25}	2-69
図 2.3.1-29	女川 1 号機原子炉建屋のシミュレーション解析モデル ^{参 2-19}	2-70
図 2.3.1-30	振動台試験シミュレーションの解析モデル ^{参 2-28}	2-71
図 2.3.1-31	基礎上端最大加速度と減衰定数の関係 ^{参 2-21}	2-71
図 2.3.1-32	仮定した履歴による等価粘性減衰値とせん断変形関係 ^{参 2-23}	2-72
図 2.3.2-1	壁式構造の模型試験体 ^{参 2-35}	2-81
図 2.3.2-2	立体架構モデルの解析と実験の鉄筋降伏位置の比較 ^{参 2-57}	2-82

図 2.3.2-3	3次元非線形 FEM の解析モデル ^{参 2-58}	2-83
図 2.3.2-4	RC 造中低層建物の減衰定数 ^{参 2-54}	2-83
図 2.3.2-5	RC 造超高層建物の減衰定数 ^{参 2-54}	2-84
図 2.3.2-6	試験体 5F1W 立面図 (左 南側、中 北側、右 東側) ^{参 2-37}	2-85
図 2.3.2-7	実大試験結果の減衰定数-変形角図 ^{参 2-37}	2-85
図 2.3.2-8	試験体 3 の形状 ^{参 2-40}	2-86
図 2.3.2-9	減衰定数と経験した平均変形角の関係 ^{参 2-40}	2-86
図 2.3.2-10	水平方向の振動特性 ^{参 2-42}	2-87
図 2.3.2-11	上下方向の振動特性 ^{参 2-42}	2-87
図 2.3.2-12	減衰定数の振幅依存性 ^{参 2-49}	2-88
図 2.3.2-13	固有振動数および減衰定数の経年変化 ^{参 2-53}	2-88
図 3.2.1-1	1 次の固有周期実測値と減衰定数実測値の関係 (S 造)	3-4
図 3.2.1-2	1 次の固有周期実測値と減衰定数実測値の関係 (RC 造)	3-5
図 3.2.1-3	1 次の固有周期実測値と減衰定数実測値の関係 (SRC 造)	3-6
図 3.2.1-4	同じ微動計測データに対して異なる減衰評価手法を適用した 1 次減衰定数の比較 (S 造)	3-12
図 3.2.1-5	同じ微動計測データに対して異なる減衰評価手法を適用した 1 次減衰定数の比較 (RC 造)	3-13
図 3.2.1-6	同じ微動計測データに対して異なる減衰評価手法を適用した 1 次減衰定数の比較 (SRC 造)	3-14
図 3.2.2-1	試験体図面	3-22
図 3.2.2-2	加速度センサ位置	3-23
図 3.2.2-3	ランダム波 15gal (表 3.2.2-4 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-24
図 3.2.2-4	エルセントロ波 100% (表 3.2.2-4 整理番号 13) による X 成分の波形データ	3-25
図 3.2.2-5	ランダム波 (表 3.2.2-7 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-30
図 3.2.2-6	エルセントロ波 50kine (表 3.2.2-7 整理番号 20) による X 成分の波形データ	3-31
図 3.2.2-7	試験体図面	3-33
図 3.2.2-8	加速度センサ位置	3-34
図 3.2.2-9	ホワイトノイズ波 (表 3.2.2-8 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-35
図 3.2.2-10	JMA 神戸波 100% (表 3.2.2-8 整理番号 9) による X 成分の波形データ	3-36
図 3.2.2-11	試験体図面	3-38
図 3.2.2-12	加速度センサ位置	3-39
図 3.2.2-13	ランダム波 30gal (表 3.2.2-10 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-40
図 3.2.2-14	3.11 観測東雲波 100% (表 3.2.2-10 整理番号 7) による X 成分の波形データ	3-41
図 3.2.2-15	試験体図面	3-45
図 3.2.2-16	加速度センサ位置	3-46
図 3.2.2-17	特性把握ランダム波 (表 3.2.2-12 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-47
図 3.2.2-18	K-NET 古川波 100% (表 3.2.2-12 整理番号 17) による X 成分の波形データ	3-48

図 3.2.2-19	試験体図面	3-50
図 3.2.2-20	加速度センサ位置	3-51
図 3.2.2-21	ランダム波 1 回目 (表 3.2.2-14 整理番号 1) による X 成分の波形データ	3-52
図 3.2.2-22	JMA 神戸波 100%相当 (表 3.2.2-14 整理番号 15) による X 成分の波形データ ..3-53	
図 3.2.2-23	試験体図面	3-56
図 3.2.2-24	加速度センサ位置	3-57
図 3.2.2-25	ランダム波 (表 3.2.2-16 整理番号 12) による X 成分の波形データ	3-58
図 3.2.2-26	JMA 神戸波 100% (表 3.2.2-16 整理番号 20) による X 成分の波形データ	3-59
図 3.2.2-27	試験体図面	3-62
図 3.2.2-28	加速度センサ位置	3-63
図 3.2.2-29	特性把握ランダム波 B15% (表 3.2.2-18 整理番号 15) による	3-64
図 3.2.2-30	内山波 100% (表 3.2.2-18 整理番号 18) による X 成分の波形データ	3-65
図 3.2.2-31	ランダム波 XY260%Z185%1 (表 3.2.2-20 整理番号 12) による	3-68
図 3.2.2-32	JMA 神戸波(X,EW)100% (表 3.2.2-20 整理番号 20) による X 成分の波形データ	3-69
図 3.2.2-33	試験体図面	3-72
図 3.2.2-34	加速度センサ位置	3-73
図 3.2.2-35	ホワイトノイズ波 20gal (表 3.2.2-21 整理番号 1) による X 成分の波形データ ..3-74	
図 3.2.2-36	告示波エルセントロ NS100% (表 3.2.2-21 整理番号 5) による	3-75
図 3.3.1-1	台形型バンドパスフィルターの模式図	3-77
図 3.3.1-2	バンドパスフィルター処理をしたランダム波の X 成分	3-77
図 3.3.1-3	バンドパスフィルター処理をしたランダム波の X 成分 (図 3.3.1-2) に対して ARX を用いて試算した 1 次の減衰定数	3-78

1. 概要

地震応答解析における建物の減衰定数については、これまで原子炉建屋等の設計評価において適用実績のある経験的な値を基本に、不確かさを考慮した感度解析等によりその影響が検討されてきた。しかし、これまで経験的に用いられてきた建物の減衰定数は、その対象が原子炉建屋のような比較的複雑な構造物での知見に基づくものであり、近年追設された比較的単純な構造の建物への適用性については知見を蓄積することが重要である。

そこで、本事業では原子力発電所施設のうち比較的単純な構造形式の鉄筋コンクリート造建物を対象に、その構造形式や応答性状等を踏まえて建物の観測記録や振動試験の結果等に基づく文献を調査、分析し、地震応答解析における建物の減衰定数の設定に関する考え方を整理した。

以下に実施内容を示す。

(1) 建築物の減衰定数に関する文献の調査、分析

①に示す観点で動的解析モデルの減衰定数に関する文献を調査、分析、整理する。

①建屋減衰に関する国内外の文献等の調査、分析

a) 原子力発電関連施設を対象とした文献調査、分析

2001年までの原子力発電所施設における地震観測記録、振動実験の結果等については、日本建築学会の活動の中で調査報告書として整理されており、これに加えて、2001年以降における各発電所での公表資料等の文献調査、分析を行い、減衰定数等の項目についてまとめた。

b) 一般建築物の減衰定数に関する文献調査、分析

地震観測や振動実験を用いた減衰定数に関する研究文献を調査し、建物規模、構造形式等について整理し、分析を行った。

(2) 地震観測、微動計測、振動実験等を用いた一般建築物の減衰定数に関する文献等の抽出、公開されたデータ等の情報の収集

「(1) 建築物の減衰定数に関する文献の調査、分析」で調べた既往文献の中で、地震観測や振動実験等を用いた一般建築物の減衰定数に関する文献等から、諸条件等が記載されている文献として、日本建築学会の各種建築物の実測データベースと国立研究開発法人防災科学技術研究所 E-Defense 実験データベースを抽出した。また、これらのデータから、シミュレーション解析等の検討における課題を抽出した。

2. 建築物の減衰定数に関する文献の調査、分析

2.1 調査方針

2.1.1 調査手順

本調査では、建物の減衰について地震観測記録や振動実験により検討を行っている論文等に関して検索し、その中から壁構造及びラーメン構造の鉄筋コンクリート造を対象とする文献を選択する。

2.1.2 調査範囲

調査の対象とした論文集を表 2.1.2-1 に示す。

表 2.1.2-1 調査対象

	名称	発行元
1	日本建築学会構造委員会 原子力施設の構造小委員会、「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
2	日本建築学会構造系論文集	日本建築学会
3	日本建築学会大会学術講演梗概集	日本建築学会
4	日本建築学会技術報告集	日本建築学会
5	土木学会年次学術講演会	土木学会
6	土木学会論文集A1(構造・地震工学)	土木学会
7	日本地震工学会論文集	日本地震工学会
8	電力中央研究報告	電力中央研究所
9	土木研究所年報	土木研究所
10	原子力規制委員会資料	原子力規制委員会
11	建築研究所年報	建築研究所
12	Structural Mechanics in Reactor Technorogy	IASMiRT
13	World Conference on Earthquake Engineering	WCEE

2.2 調査報告の概要

2.1.1 の調査手順による検索と選定を以下に示す。

①新規制基準適合性に係わる審査会合資料

原子力規制委員会の web サイトから、鉄筋コンクリート造の減衰定数、について検索した結果の中から重複分を除いた。

また、鉄筋コンクリート造部の減衰定数を 3%とした場合の地震応答解析についての資料を加えた。

②日本建築学会

最も対象となる論文が多いと考えられる日本建築学会の論文については、日本建築学会の論文検索サイトで、(地震観測、減衰)、(振動実験、減衰)、(振動試験、減衰)、(原子力、地震観測)、(原子炉建屋、地震観測)、(原子力、振動試験)、(原子力、振動実験)、(原子炉建屋、振動実験)、(原子炉建屋、振動試験)、大型振動台、(ARX、減衰)のキーワードで検索し、免震、木造、鉄骨造、シェル構造に関する論文を除いた。

③日本地震工学会

J-STAGE で(鉄筋コンクリート、減衰)、(地震観測、減衰)、(減衰定数、RC、同定)のキーワードで検索し、免震、鉄骨造等に関する論文を除いた。

④土木学会

J-STAGE で(鉄筋コンクリート、減衰)、(地震観測、減衰)、(減衰定数、RC、同定)のキーワードで検索し、免震、鉄骨造等に関する論文を除いた。

⑤電力中央研究報告、土木研究年報、建築研究所年報

各研究所の報告書の検索サイトで、減衰のキーワードで検索した。

⑥Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT)

2005 年開催の 18th SMiRT から 2022 年開催の 26th SMiRT までの論文タイトルで damping を検索し、鉄筋コンクリート造を対象としたものを選択した。

⑦World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)

2000 年開催の 12th WCEE から 2021 年開催の 17th WCEE までの論文タイトルで damping を検索し、シェルを除く鉄筋コンクリート造を対象としたものを選択した。

⑧その他

検討の過程でコンクリート工学会、日本原子力学会、免震建築物、地震応答解析手法の論文を入れた。

以下、文献調査内容を次のように示す。

2.3.1 原子力発電関連施設を対象とした文献調査、分析

(1)日本建築学会構造委員会 原子力施設の構造小委員会、「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書

(2)原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の会議資料

0 原子力発電関連施設を対象とした論文等の公開文献

(4)海外の文献 (NRC)

(5)分析

2.3.2 一般建築物の減衰定数に関する文献調査、分析

(1)調査の概要

(2)分析

2.3 建屋減衰に関する国内外の文献等の調査、分析

参考文献からの引用は「」で示すこととする。

2.3.1 原子力発電関連施設を対象とした文献調査、分析

(1) 日本建築学会構造委員会 原子力施設の構造小委員会、「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書、2001年3月²⁻¹⁵

全国のほぼすべての原子力発電所サイトで振動試験と地震観測が実施されている。以下に、a)減衰定数（減衰の設定に必要）と b)地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）についてまとめる。

a) 減衰定数

①実機起振機試験から算定された減衰定数

原子炉建屋の振動試験の減衰定数の記載によると、減衰定数の算定方法について「振動試験における建屋の1次固有振動モードでの減衰定数は、変位振幅の共振曲線での1次共振ピーク形状から読み取る方法（ハーフパワー法等）や同定による方法（1質点系回帰分析等）が用いられている。」²⁻¹⁵である。

表 2.3.1-1、表 2.3.1-2、図 2.3.1-1 より以下のようなことが言える。

これらの減衰定数は、地盤－建物動的相互作用による減衰を含んでいるため、比較的支持地盤の V_s の小さい V_s 1000m/s 以下の福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、東海第二原子力発電所、柏崎刈羽原子力発電所、浜岡原子力発電所、では1次振動モードに対する減衰定数が20%以上と大きくなっている。

一方、支持地盤の V_s が1000m/s 以上の原子力発電所サイトでは1次振動モードに対する鉄筋コンクリートの減衰定数は10%以下で多くの場合、2%～5%と小さくなっている。また、PCCV の減衰定数は2%となっている。

②地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数

原子炉建屋の地震観測の減衰定数の記載によると、地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数について、「シミュレーション解析では、建屋（鉄筋コンクリート、鉄骨）や地盤に各部別の減衰定数が用いられている。これらは、振動試験時の解析値をもとに定めているもの、あるいは対象としている地震観測結果に合うように定められている等がある。」

「シミュレーション解析に用いられている建屋（RC）の減衰定数は2%～5%が多く用いられているがパラスタで10%が検討されている例もある。PWR型PCCVでは2%が採用されており、BWR型の鉄骨屋根には1.5%～2%が採用されている。」²⁻¹⁵である。

表 2.3.1-3、表 2.3.1-4、図 2.3.1-2 にその図表を示す。

b) 地震応答解析モデル

文献の記載によると、シミュレーション解析等で用いられている地震応答解析モデルは、建屋には、FEMモデルが用いられた場合があるが、ほとんどの場合、質点系モデルが用いられ、地盤は地盤－建物動的相互作用効果を考慮するためにFEMモデル、FEMとBEMのハイブリッドモデル、格子型モデルが用いられている。

表 2.3.1-1 原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧 (BWR) 参 2-15

項目	文献B(V)-1	文献B(V)-2~4	文献B(V)-5	文献B(V)-6	文献B(V)-7、8	文献B(V)-9	文献B(V)-10	文献B(V)-11	文献B(V)-12~14	
サイト	女川1	福島1-1	福島2-1	東海2	柏崎6	浜岡2 (1)	浜岡3	浜岡4	島根1	
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [ABWR]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I改]	原子炉建屋 [BWR Mark-I改]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	
起振機 [加振力]	電中研大型起振機 [20t x 2]	大型起振機 [3t]	- -	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [20t x 2]	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	起振機 [3t]	
測定箇所	・屋根 ・クレーン階 ・オペフロ ・基礎 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎 ・機器 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎	・建屋各階床	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部) ・機器 等	
地盤条件	Vs=1620m/s	E=45t/cm 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	0.25s	3Hz	2.7Hz	3.5Hz	4.8Hz	3.8Hz	4.1Hz	0.19s
	解析	5.55Hz	0.25s	約3Hz	2.4Hz	3.9Hz	-	3.8Hz	4.0Hz	0.19s
減衰定数	試験	1次：5.1%	-	1次：33%	1次：20%	1次：54%	1次：19~20%	1次：41%	1次：36%	-
	解析	FEM建屋：5% 質点系：7.5%	33.70%	建屋：3% 地盤：5%	1次：15%	建屋：3% 地盤：波動論	-	建屋：5% 地盤：格子型	建屋：5% 地盤：格子型	建屋：(0.00064s) 地盤：(0.012s)
建屋材料定数 (ヤング率)	設計	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	260t/cm ²	210t/cm ²
	解析	325t/cm ²	520t/cm ²	360t/cm ²	235t/cm ²	432t/cm ²	-	420t/cm ²	440t/cm ²	520t/cm ²
解析モデル	設計	SRモデル	SRモデル	SRモデル	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
	解析	・FEMモデル ・SRモデル	SRモデル	SRモデル (地盤：FEM/BEM ハイブリット)	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
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 ・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。	

表 2.3.1-2 原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧 (PWR) 参 2-15

項目	文献 P(V)-1~3	文献 P(V)-4~6	文献 P(V)-7, 8	文献 P(V)-9, 103	文献 P(V)-11	文献 P(V)-12	文献 P(V)-13			
サイト	敦賀 2	玄海 3	大飯 3	川内 1	泊 1	伊方 2	もんじゅ			
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [3-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [FBR]			
起振機[加振力]	大型起振機 [150tx2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10tx2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [50t]、[10t]	大型起振機 [10tx2]			
測定箇所	・ I/C ・ PCCV(オハール振動測定も含む) ・ REB ・ E/B	・ I/C ・ PCCV(オハール振動測定も含む) ・ REB	・ I/C ・ PCCV(オハール振動測定も含む) ・ REB	・ O/S(オハール振動測定も含む) ・ I/C	・ O/S(オハール振動測定も含む) ・ I/C ・ C/V	・ O/S(オハール振動測定も含む) ・ I/C ・ C/V	・ O/S(オハール振動測定も含む) ・ I/C ・ C/V			
地盤条件	Vs=1600m/s	Vs=1350m/s	Vs=2230m/s	Vs=1500m/s	Vs=1400m/s	Vs=2300m/s	Vs=1900m/s			
固有振動数 (1次)	試験	PCCV: 4.86 Hz I/C: 7.57 Hz E/B: 3.15 Hz	PCCV: 4.97Hz (NS) I/C: 9.62Hz (NS) 9.71Hz (EW)	PCCV: 5.01Hz (NS) 4.97Hz (EW) I/C: 9.78Hz (NS) 10.62Hz (EW)	O/S: 4.7Hz I/C: 9.4Hz (X) 10.6Hz (Y)	O/S: 5.4Hz (X) 5.6Hz (Y) I/C: 11.9Hz (X) 12.9Hz (Y)	O/S: 6.9~7.18Hz I/C: 13.7~13.9Hz (X) 11.3~11.8Hz (Y) C/V: 8.1Hz	I/C: 9.03Hz (NS) 9.11Hz (EW) A/B: 5.44Hz (NS) 5.50Hz (EW)		
	解析	PCCV: 4.92 Hz I/C: 7.66 Hz	-	PCCV: 5.5(NS) 5.5(EW) I/C: 9.4(NS) 10.5(EW)	O/S: 4.1Hz I/C: 9.6Hz (X) 10.2Hz (Y)	O/S: 5.1Hz (X) 5.9Hz (Y) I/C: 11.9Hz (X) 12.8Hz (Y)	O/S: 6.81Hz I/C: 13.17Hz (X) 11.87Hz (Y) C/V: 7.36Hz	I/C: 9.18Hz (NS) 9.01Hz (EW) A/B: 5.99Hz (NS) 5.80Hz (EW)		
減衰定数	試験	PCCV: 2.2% I/C: 3.4% E/B: 2.2% (NS)	PCCV: 2.6%(NS) I/C: 3.0%(NS) 3.8%(EW)	PCCV: 1.7%(NS) 1.9%(EW) I/C: 3.0%(NS) 2.0%(EW)	O/S: 3.6% I/C: 2.6%(X) 2.0%(Y)	O/S: 7.0%(X) 5.8%(Y) I/C: 4.6%(X) 2.9%(Y)	O/S: 3.3% I/C: 2.8%(X) 3.1%(Y)	I/C: 5.29%(NS) 5.44%(EW) A/B: 7.74%(NS) 9.13%(EW)		
	解析	PCCV: 2.0% I/C: 4.0%	PCCV: 2.0% I/C: 3.0%	PCCV: 2.0% I/C: 3.0%(NS) 3.0%(EW)	試験値と同じ値を採用	O/S: 5.6%(X) 8.3%(Y) I/C: 4.4%(X) 3.1%(Y)	試験値と同じ値を採用	I/C: 4.27%(NS) 4.14%(EW) A/B: 9.85%(NS) 9.53%(EW)		
建屋材料定数 (ヤング率)	設計	I/C: 230 t/cm ² PCCV: 304 t/cm ²	I/C: 230 t/cm ² PCCV: 304 t/cm ²	I/C: 257 t/cm ² PCCV: 315 t/cm ²	RC: 223 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²	RC: 210 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²		
	解析	I/C: 270 t/cm ² PCCV: 400 t/cm ²	I/C: 380 t/cm ² PCCV: 380 t/cm ²	I/C: 370 t/cm ² PCCV: 430 t/cm ²	RC: 380 t/cm ²	RC: 340 t/cm ²	RC: 390 t/cm ²	RC: 310 t/cm ²		
解析モデル	設計	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	S-R モデル		
	解析	・全体建屋: 3次元質点系モデル ・PCCV: 3DFEM	・I/C部分を有限要素モデルとした質点系モデル(水平) ・3DFEM(上下)	・I/C部分を有限要素モデルとした質点系モデル	・上部構造曲げせん断質点系のS-Rモデル	・上部構造曲げせん断質点系のS-Rモデル	・上部構造曲げせん断質点系のS-Rモデル	・上部構造曲げせん断質点系のS-Rモデル		
評価方法 評価項目	一質点系回帰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	一質点系回帰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	一質点系回帰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 ・振動形 ・共振曲線	多自由度回帰分析のモード同定法 ・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 ・振動形 ・共振曲線	一質点系回帰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										

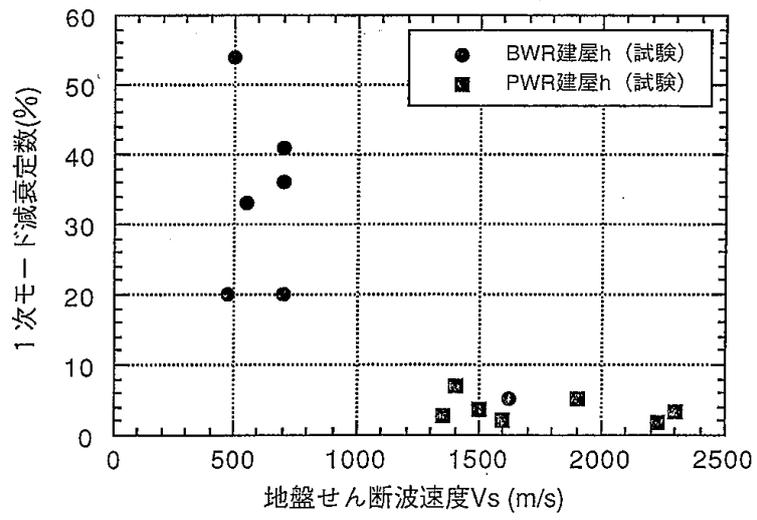


図 2.3.1-1 地盤剛性 (Vs) と試験結果の減衰定数の関係^{参 2-15}

表 2.3.1-3 原子炉施設の地震観測と解析評価比較一覧 (BWR) 参 2-15

項目	文献B(E)-1~3	文献B(E)-4,5	文献B(E)-6	文献B(E)-12	文献B(E)-13	文献B(E)-15~17	文献B(E)-7~11	文献B(E)-14
サイト	福島1-1	福島1-6	福島1-6	東海2	浜岡2	島根1	福島	浜岡3
建屋 [炉型]	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 [BWR Mark-II]	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-I改]
観測地震 M [Δ]	M4.7 [50km]	・ M7.4 [140km] ・ M5.0 [37km]	・ M7.0 [159km] ・ M5.8 [59km] 等、5地震	M7.4 [250km]	M7.0 [107km]	M5.1 [46km]	・ M5.8 [48km] ・ M6.6 [77km] ・ M6.5 [59km]	M4.3 [18km] M6.6 [99km]
対象方向	水平	水平	水平	水平	水平	水平	上下	上下
最大加速度記録	・ 基礎：10.7Gal ・ 3階：10.8Gal ・ 5階：16.9Gal ・ 6階：58.8Gal ・ GSW：12.5Gal	・ 屋根：148~ 222Gal(M7.4) ・ 屋根：26~ 29Gal(M5.0)	・ 屋根：100Gal ・ オペフロ：60Gal ・ 基礎：25Gal [M7.0の場合]	・ オペフロ：55Gal ・ 中間床：21Gal ・ 基礎：19Gal	・ 基礎：17Gal ・ オペフロ：23Gal ・ 屋根：60Gal	・ 基礎：5.3Gal ・ オペフロ：8.4Gal ・ 屋根：21.3Gal	・ 基礎：30~40Gal ・ オペフロ：60~90Gal ・ 屋根：70~100Gal	・ 基礎：2.70Gal ・ 3階：4.23Gal ・ 屋根端部：4.99Gal ・ 屋根中央：16.65Gal [M4.3の場合]
測定箇所	・ 基礎 ・ 3階 ・ 5階 ・ 6階 等	・ 屋根 ・ 基礎 ・ オペフロ	・ 屋根 ・ オペフロ ・ 基礎	・ オペフロ ・ 中間床 ・ 基礎	・ 屋根 ・ 各階床 ・ 基礎	・ 屋根 ・ オペフロ ・ 基礎	・ 屋根 ・ オペフロ ・ 基礎	・ 屋根 ・ 3階床 ・ 基礎
地盤条件	E=45t/cm ²	Vs≒500m/s	Vs=550m/s	Vs=470m/s	Vs≒700m/s	Vs=1800m/s	Vs=500m/s	Vs≒700m/s
固有振動数 (1次)	4.2Hz	-	約3Hz	2.7Hz	-	0.18s	約13Hz	-
減衰定数 (解析)	RC：0.2%(1s) 鉄骨：0.1%(1s) 地盤：13%(1s) [内部粘性減衰]	建屋：2%	振動試験を参考	-	RC：5% 鉄骨：2% 格子地盤：10%	RC：0.00064 鉄骨：0.00032 地盤：0.012 [粘性減衰係数]	RC：5~10% [パラスタ実施] 鉄骨：2%	RC：5% 鉄骨：1.5% 地盤：波動論
RC材料定数 (ヤング率)	設計	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ²	-
	解析	520t/cm ²	-	振動試験を参考	-	450t/cm ²	340t/cm ²	-
解析モデル	設計	SRモデル	SRモデル	SRモデル	SRモデル	SRモデル	SRモデル	-
	解析	SRモデル	建屋質点系- 地盤FEMモデル	埋込みSRモデル	埋込みSRモデル	格子型モデル	SRモデル	上下ばねモデル 屋根格子状
評価方法	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較	記録・解析比較
評価項目	・ 加速度波形 ・ 応答スペクトル	・ 応答スペクトル	・ 最大加速度 ・ 応答スペクトル	・ 最大加速度 ・ 加速度波形 ・ 応答スペクトル	・ 最大加速度 ・ 加速度波形 ・ 応答スペクトル	・ 加速度波形 ・ 応答スペクトル	・ 最大加速度 ・ 応答スペクトル	・ 最大加速度 ・ 加速度波形 ・ 応答スペクトル
備考							文献には何号機か 書かれていない	

表 2.3.1-4 原子炉施設の地震観測と解析評価比較一覧 (PWR) 参 2-15

項目	文献 P(E)-1,2	文献 P(E)-3,4	文献 P(E)-5,6	文献 P(E)-7,8	文献 P(E)-9	文献 P(E)-10	文献 P(E)-11,12,14	文献 P(E)-13
サイト	敦賀 2	大飯 3/4	高浜 3/4	泊 1	川内 1	川内 1	伊方 1	伊方 2
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [3-loop]	原子炉建屋 [3-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [2-loop]
観測地震 M [Δ]	M7.2[160km]	M7.2[120km]	No.1 M5.1[24km] No.2 M4.2[1.5km]	M7.8[1121km]	No.1 M3.5[20km] No.2 M7.1[200km] No.3 M5.5[30km]	No.1 M6.5[22km] No.2 M6.3[16.5km]	No.1 M6.1[55km] No.2 M5.0[60km]	No.1 M5.0[15km] No.2 M4.9[35km] No.3 M6.8[66km] No.4 M7.1[124km] No.5 M6.0[60km]
対象方向	水平	水平、上下	上下	水平	水平	水平	水平、上下	水平
最大加速度記録 (Gal)	・PCCV 頂部 :38.2 ・I/C 操作床:13.5 ・REB 操作床:17.1 ・基礎版上部:13.8	水平・PCCV 頂部: 84.7(NS),108.3(EW) ・I/C 頂部: 18.0(NS),25.0(EW) 上下・PCCV: 20.7(ト-A頂部) 18.8(シタ-A頂部)	・O/S 頂部: 67.5Gal (No.1) 40.2Gal (No.2)	基礎上端に対する各構造物頂部の加速度応答倍率 ・O/S:4.6(X),5.5(Y) ・I/C:1.7(X),1.5(Y) ・E/B:1.5(X),2.1(Y) ・C/V:4.2(X),4.8(Y)	・O/S:12.4 (No.1) 13.2 (No.2) 61.8 (No.3)	・O/S 頂部: 407.8 (No.1) ・I/C 最上階: 133.1 (No.1),180.9 (No.2) ・基礎上端: 64.1 (No.1),68.3 (No.2)	水平 ・O/S:130 (No.1),197 (No.2) ・C/V:115 (No.1),94 (No.2) 上下 ・O/S:49.4 (No.1) ・C/V:34.4 (No.1)	基礎上端 14.4 (No.1) 5.1 (No.2) 24.4 (No.3) 9.1 (No.4) 24.5 (No.5)
測定箇所	・PCCV 頂部 ・I/C 操作床 ・REB 操作床 ・基礎版上部	・PCCV 頂部 ・I/C 頂部 ・基礎版直下	・O/S 頂部 ・O/S-E/B 接続部 ・I/C 横壁 ・基礎上端、下端	・自由地盤 ・原子炉建屋直下地盤 ・原子炉建屋内に合計 30 点、58 成分	・岩盤:GL-130m ・基礎下端:GL-30m ・O/S 頂部 ・I/C 最上階	・岩盤 ・O/S ・I/C 27 箇所 58 成分	・直下岩盤 ・基礎上端 ・I/C ・C/V ・O/S 合計 16 点、38 成分	・自由地盤 ・O/S(オーバル)振動含む ・I/C ・C/V
地盤条件	Vs=1600m/s	Vs=2230m/s	Vs=2200m/s	Vs=1400m/s	Vs=1500m/s	Vs=1500m/s	Vs=2570m/s	Vs=2300m/s
固有振動数 (1 次) (Hz)	・PCCV:4.86 ・I/C:7.57 ・E/B:3.15	・PCCV: 5.01(NS),4.97(EW) ・I/C: 9.8(NS),10.6(EW)	—	・O/S:6.1(Y) ・I/C:12.2(Y) ・E/B:5.9(Y) ・C/V:8.8(Y)	・O/S:5.0(X), 4.7-4.8(Y) ・I/C:9.4-9.7(X), 10.3-10.4(Y)	・O/S:4.0(X,Y) ・I/C:8.5(X) 9.5(Y)	・O/S:5.2 ・I/C:9.8(X) 9.0(Y) ・C/V:7.9-8.7	・O/S:7.26 ・I/C:11.36(Y) ・C/V:7.18
減衰定数(解析)	REB : 4% I/C : 4% B/M : 4% PCCV : 2% (材料)	REB : 3% I/C : 3% B/M : 3% PCCV : 2% (材料)	地盤減衰: 2% コンクリート : 3% (材料)	地盤減衰: 5.0% コンクリート: 4.3% C/V : 3.7% (材料)	地盤減衰: 5% コンクリート: 3% (材料)	地盤減衰: 8.6% コンクリート: 2.9% (材料)	O/S: 2.6% I/C: 3.0% C/V: 2.0% (材料)	O/S: 3% I/C: 3% C/V: 2% (材料)
RC 材料定数 (ヤング率)	設計	I/C : 230 t/cm ² PCCV: 304 t/cm ²	I/C : 257 t/cm ² PCCV: 315 t/cm ²	RC: 230 t/cm ²	RC: 223 t/cm ²	RC: 223 t/cm ²	210 t/cm ²	210 t/cm ²
	解析	I/C : 270 t/cm ² PCCV: 400 t/cm ²	I/C : 340 t/cm ² PCCV: 390 t/cm ²	300 t/cm ²	340 t/cm ²	—	310 t/cm ²	340~350 t/cm ²
解析モデル	設計	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	S R モデル
	解析	REB を 3 次元系行'ルとする地盤-建屋連成質点系 SR 行'ル	・多質点系行'ル ・I/C のみ FEM とした多質点系 SR 行'ル	多質点系 SR 行'ル ・基礎剛の軸バ'ネ行'ル ・基礎剛 O/S 面外曲げ及び I/C 床の面外振動考慮行'ル ・基礎柔性考慮行'ル	・建屋: 質点系行'ル ・地盤: 薄層要素行'ル	地盤・構造物連成質点系行'ル	・地盤・構造物連成質点系行'ル ・岩盤を薄層要素で行'ル化した質点系行'ル	・地盤・構造物連成質点系行'ル ・岩盤を薄層要素で行'ル化した質点系行'ル
評価方法	・質点重量等の条件を振動試験時から運転時の値に変更する ・地盤ばねは D 法により評価する	観測/解析との比較(水平・上下)	・固有値解析 ・伝達関数 ・時刻歴波形を用いて観測と解析結果を比較	・観測/解析との比較 ・各建屋頂部の水平方向応答からロッキング'による剛度成分を除去している	・固有値解析 ・時刻歴波形を用いて観測と解析結果を比較	加速度応答ハ'ルを用いて観測と解析結果を比較	コンクリート等の弾性係数及び減衰定数をハ'ネ'クとして、観測値と良く適合する定数を算定する	観測/解析との比較
評価項目	観測/解析との比較 ・最大加速度 ・加速度時刻歴波形 ・加速度応答ハ'ル	・加速度時刻歴波形 ・フ'リスハ'ル比	・O/S ト-A 部の面外曲げ及び I/C 床の面外振動効果 ・基礎の柔性効果 ・水平動入力によるロッキング'上下動の影響	・フ'リスハ'ル比 ・加速度応答ハ'ル	・時刻歴波形の比較 ・フ'リスハ'ル比の比較	最大加速度及び加速度応答ハ'ル'ル比較 ・O/S ト-A 頂部 ・I/C 最上階	・フ'リスハ'ル比 ・時刻歴応答波形	・フ'リスハ'ル比 ・加速度応答波形
備考								

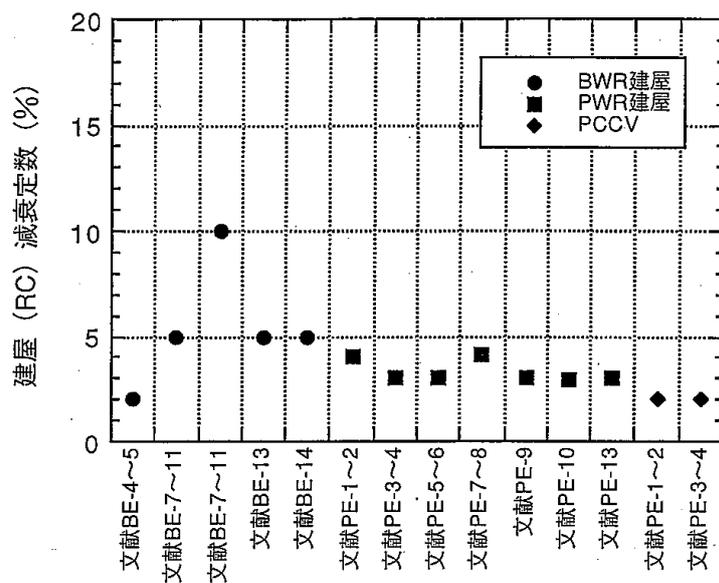


図 2.3.1-2 解析での建屋（鉄筋コンクリート）の減衰定数^{※ 2-15}

(2) 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合などの会議資料^{参 2-1~参 2-14}

a) 検討の概要

参 2-1~参 2-11 では、ほぼ同じ手順で検討を行い、検討結果を総合的に判断して、鉄筋コンクリート造部の減衰定数 5% (PCCV は 3%) が妥当であることを説明している。以下では、東京電力柏崎刈羽原子力発電所の資料^{参 2-1}の概要を示し、参 2-2~参 2-11 については、東京電力柏崎刈羽原子力発電所の文献と主に異なる部分を示す。

参 2-1~参 2-11 の文献調査内容を次のように示す。

b) 減衰定数 5%を用いることの妥当性の検討

- 1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所^{参 2-1}
- 2) 日本原燃再処理施設^{参 2-2}
- 3) 関西電力高浜発電所 1 号機^{参 2-3}、関西電力高浜発電所 2 号機^{参 2-4}
- 4) 日本原子力発電東海第二発電所^{参 2-5}
- 5) 東北電力女川原子力発電所^{参 2-6}、^{参 2-7}
- 6) 四国電力伊方発電所 3 号機^{参 2-8}
- 7) 九州電力玄海原子力発電所^{参 2-9}
- 8) 九州電力川内原子力発電所緊急時対策棟（連絡通路）^{参 2-10}
- 9) 減衰定数 5%を用いることの妥当性の検討のまとめ

参 2-2~参 2-4、参 2-7、参 2-9、参 2-10、参 2-12~参 2-14 は建屋減衰定数 3%の検討を行っている文献である。ここでは、文献中の建屋減衰定数 3%の検討について次のように示す。

c) 建屋減衰定数 3%の検討

- 1) 日本原燃再処理施設^{参 2-2}
- 2) 関西電力高浜発電所 1 号機^{参 2-3}
- 3) 関西電力高浜発電所 2 号機^{参 2-4}
- 4) 東北電力女川原子力発電所 女川第 2 号機^{参 2-7}
- 5) 九州電力玄海原子力発電所 玄海 3 号機^{参 2-9}
- 6) 九州電力川内発電所緊急時対策棟（連絡通路）^{参 2-10}
- 7) 東北電力女川原子力発電所第 2 号機 緊急時対策建屋^{参 2-12}
- 8) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機 大物搬入建屋^{参 2-13}
- 9) 四国電力伊方発電所 3 号機 使用済燃料乾式貯蔵建屋^{参 2-14}
- 10) 建屋減衰定数 3%の検討のまとめ

b) 減衰定数 5%を用いることの妥当性の検討^{参 2-1~参 2-11}

1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所^{参 2-1}

i) 検討の概要

地震応答解析に RC 造部の減衰定数 5%を用いることの妥当性について、既往の知見に加え、原子炉建屋の地震観測記録による検討を行い、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、検討している（図 2.3.1-3 参照）。

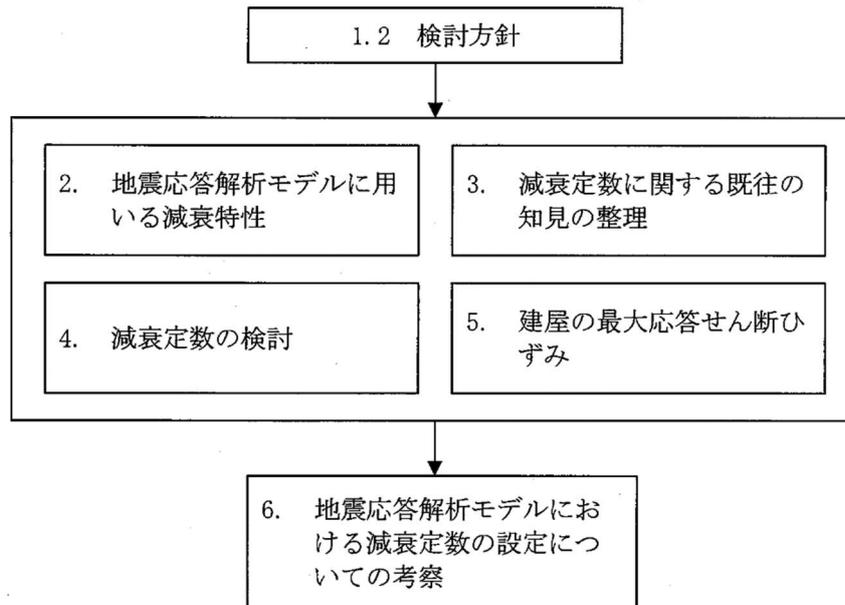


図 2.3.1-3 減衰定数の設定根拠の検討フロー^{参 2-1}

ii) 地震応答解析モデルに用いる減衰特性

参 2-1 によれば、「地震応答解析モデルにおける減衰特性は、「JEAG4601-1987」及び「JEAG4601-1991 追補版」に基づき、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。」具体的には、減衰特性のモデル化は以下である。

- ・地盤と建物の動的相互作用の効果は地盤ばね（剛性と減衰係数）としてモデル化。
- ・建屋－地盤連成系の減衰マトリクスは、減衰定数に基づいてひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定し、近似法により算定した地盤ばねの減衰定数と組合わせて算定する。
- ・履歴減衰として設定している RC 造部の復元力特性は、 τ - γ 関係においては、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した最大点指向型モデルを用いており、 M - ϕ 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。

iii) 減衰定数に関する既往の知見の整理

① RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験

表 2.3.1-5 を参照し、参 2-1 に以下の記載がある。

「等価粘性減衰 (heq) は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。更に、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。」^{参 2-1}

表 2.3.1-5 RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価^{参 2-1}

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

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）^{参 2-15}を参照し、参 2-1 に以下の記載がある。

「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。」^{参 2-1}

参照されている地盤剛性（ V_s ）と試験結果の減衰定数の関係を図 2.3.1-4 に示す。

なお、得られた減衰定数は地盤への逸散減衰（地盤－建物相互作用の影響）を含んでいる。

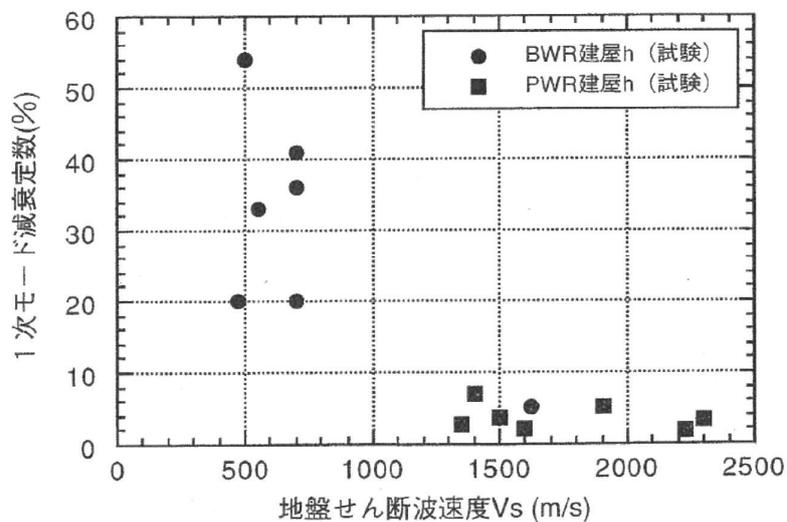


図 2.3.1-4 地盤剛性（ V_s ）と試験結果の減衰定数の関係^{参 2-15}

③ 実構造物の地震観測

以下の原子力発電所での地震観測シミュレーションやモード同定から RC 造部の減衰定数の検討を記載している。

(a) 原子炉建屋(BWR)での地震観測(RC 造部)

(i)では振幅依存性について記載があり (図 2.3.1-5 参照)、(ii)~(vii)では参 2-1 に「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、観測記録をおおむね再現できることが確認された。」^{参 2-1}、「減衰定数 5%を設定した上下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。」^{参 2-1}、「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、観測記録をおおむね良く対応できることが確認された。」^{参 2-1}、「RC 造部の減衰定数 5%が観測記録とより良好な対応を示すことが確認された。」^{参 2-1}と記載している。

(i) 女川 2 号機及び 3 号機での地震観測

(ii) 福島第二・2 号機での地震観測

(iii) 東通 1 号機での地震観測

(iv) 柏崎刈羽 1 号機の地震観測

(v) 浜岡 3 号機の地震観測

(vi) 浜岡 4 号機の地震観測

(vii) 東海第二発電所の地震観測

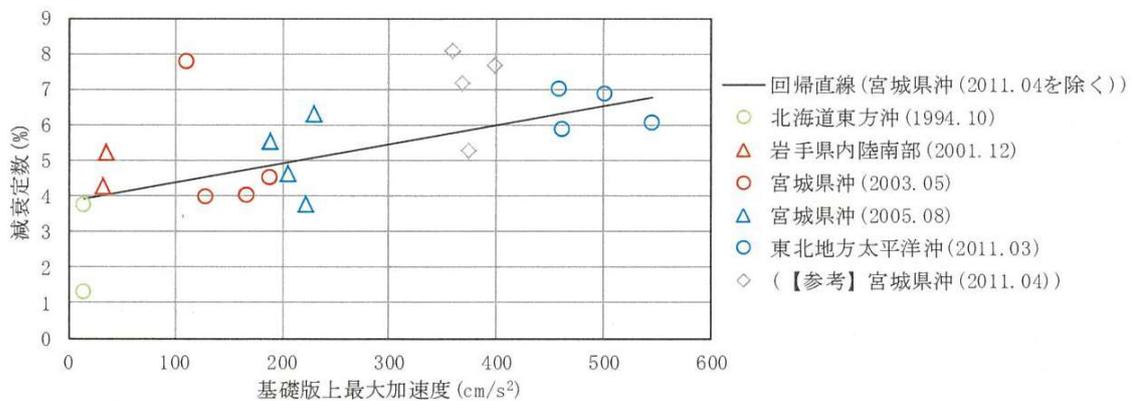


図 2.3.1-5 地震観測による減衰定数と入力加速度レベルの関係 (女川 2 号機及び 3 号機) ^{参 2-1}

(b) 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行前)

表 2.3.1-6 及び図 2.3.1-6 を参照し、参 2-1 に以下のように記載している。

「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。」^{参 2-1}

「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みられるとしている。」^{参 2-1}

表 2.3.1-6 原子炉建屋 (PWR) での地震観測記録の分析結果^{参 2-1}

	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：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 鹿児島件北西部地震 (余震を含む24地震)

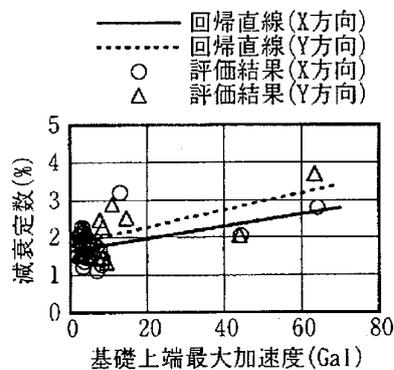


図 2.3.1-6 川内1号機 外部遮蔽建屋の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{参 2-1}

(c) 原子炉建屋(PWR)での地震観測(新規制基準施行後)

以下の工事計画認可申請書から建屋減衰定数に関する記載を引用している。引用部分はシステム同定による減衰定数の評価、構造及び形状による考察、3次元 FEM モデルを用いた動的非線形解析による検討である。

(i) 川内 1 号機での地震観測(RC 造部)

(ii) 高浜 3 号機の地震観測(RC 造部)

(iii) 伊方 3 号機の地震観測(RC 部)

(iv) 玄海 3 号機の地震観測(PCCV)

(v) 大飯 3 号機の地震観測

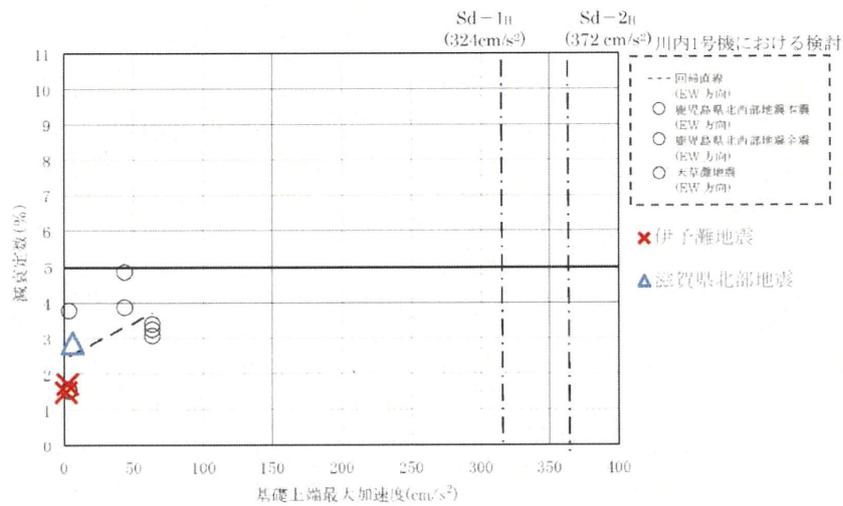
システム同定による減衰定数の評価の引用の例を図 2.3.1-7 に示す。

また、構造及び形状による考察について、参 2-1 に以下の記載がある。

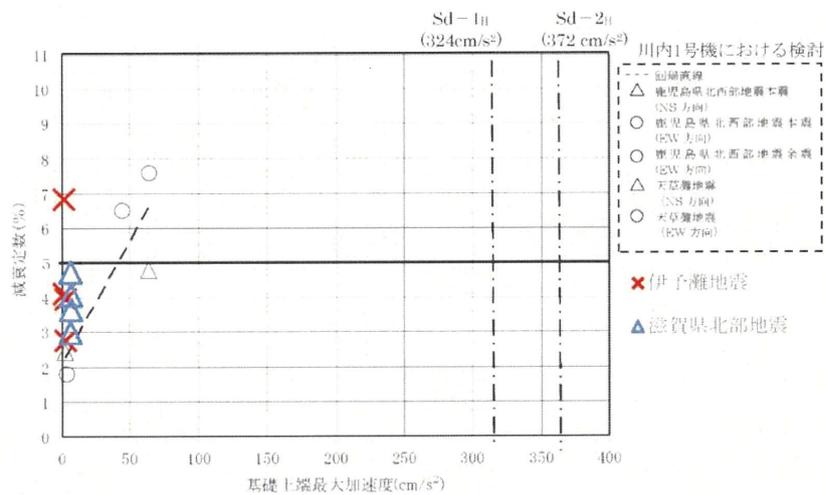
「単純な構造体は、外部遮蔽建屋が該当し、トップドーム部を除き、高さ方向に構造床がなく、耐震壁に取り付くはり及び耐震壁がないような構造で、直交する接合部が少ないことが特徴といえる。

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。

これらの複雑な構造体は、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。」^{参 2-1}



(1) 外部しゃへい建屋（水平方向）



(2) 内部コンクリート（水平方向）

図 2.3.1-7 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^{参 2-1}

iv) 減衰定数の検討

①地盤への逸散減衰の検討

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(地盤-建物相互作用)の影響を検討している。参 2-1 に以下の記載がある。

「水平方向では、NS 方向及び EW 方向ともに1次、2次が建屋-地盤連成モード、3次が建屋単独モードとなっている。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 20.5%のうち 19.4%が、EW 方向は 21.3%のうち 20.3%が、2次でも NS 方向は 37.7%のうち 36.7%が、EW 方向は 37.6%のうち 36.7%が地盤減衰の影響であり、全体に占める割合が大きい。建屋単独モードである3次では、NS 方向は 5.4%のうち 0.4%が、EW 方向は 5.6%のうち 0.7%が地盤減衰の影響であり、1次、2次に比較して地盤減衰の影響が小さいが、刺激係数も小さいため、建屋の減衰が地震応答に与える影響は小さい。

また、鉛直方向では、1次、3次が屋根トラスのモード、2次が建屋-地盤連成モードとなっている。モード減衰定数は、建屋-地盤連成のモードである2次では 36.4%のうち 35.5%が地盤減衰の影響であり、全体に占める割合が大きい。屋根トラスの振動モードのうち、1次では 12.9%のうち 10.7%が地盤減衰の影響であり、全体に占める割合が大きく、3次では地盤減衰の割合が 0.0%であるが、鉄骨部材の減衰の影響が主である。

以上より、原子炉建屋の地震応答解析モデルにおいては、地盤への逸散減衰の影響が建屋の減衰よりもかなり大きいと言える。」^{参 2-1}

②地震観測記録を用いたシミュレーション解析

原子炉建屋を対象に、2007年7月16日新潟県中越沖地震（以下「中越沖地震」という。）時の観測記録を用いて、シミュレーション解析を実施している。

参 2-1 に以下の記載がある。

「最大応答加速度分布では、RC 造部の減衰 3%と 5%のケースともに、観測記録に対して保守的な値となったが、減衰 5%の結果のほうが減衰 3%の結果よりも観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC 造部の減衰 3%と 5%のケースともに、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、最大応答加速度分布と同様に、減衰 5%の結果のほうが減衰 3%の結果よりも観測記録に整合する傾向にある。」参 2-1

シミュレーション解析の結果の例を図 2.3.1-8 及び図 2.3.1-9 に示す。

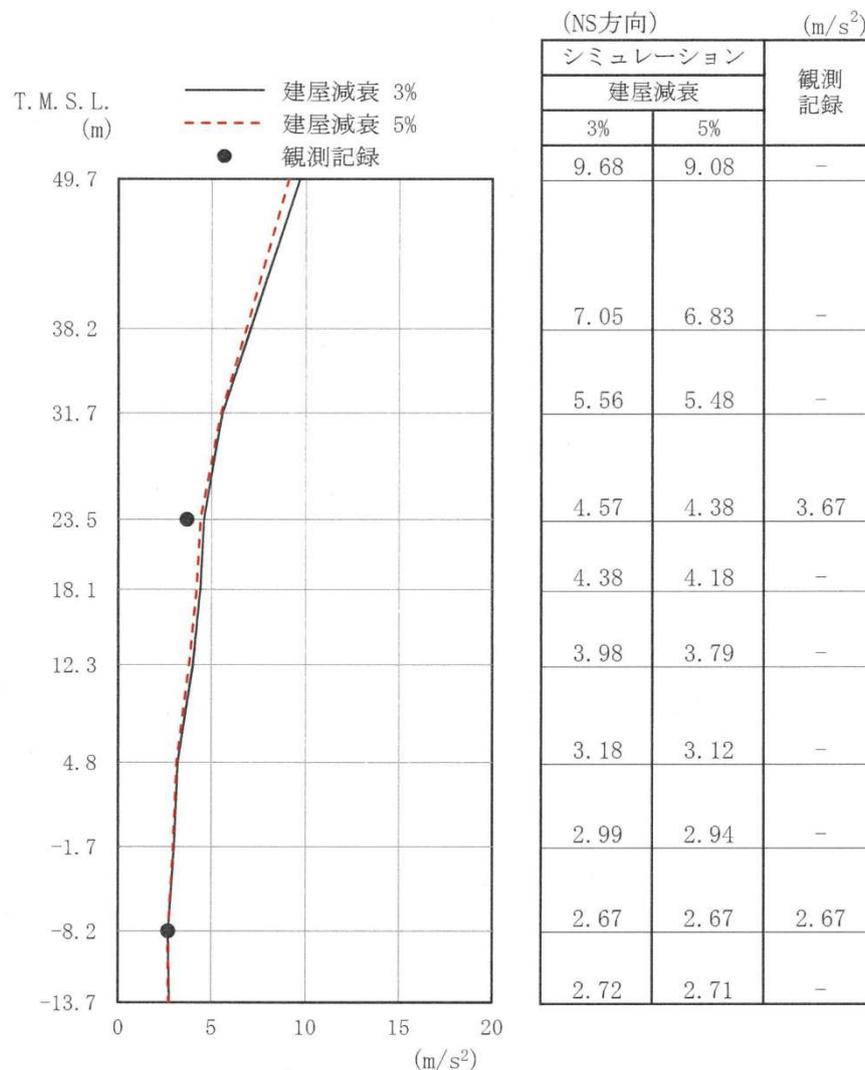
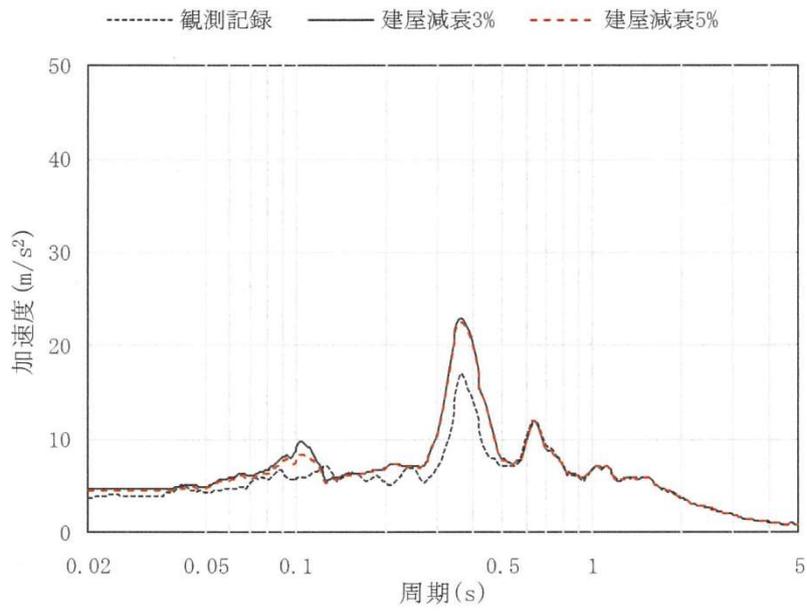
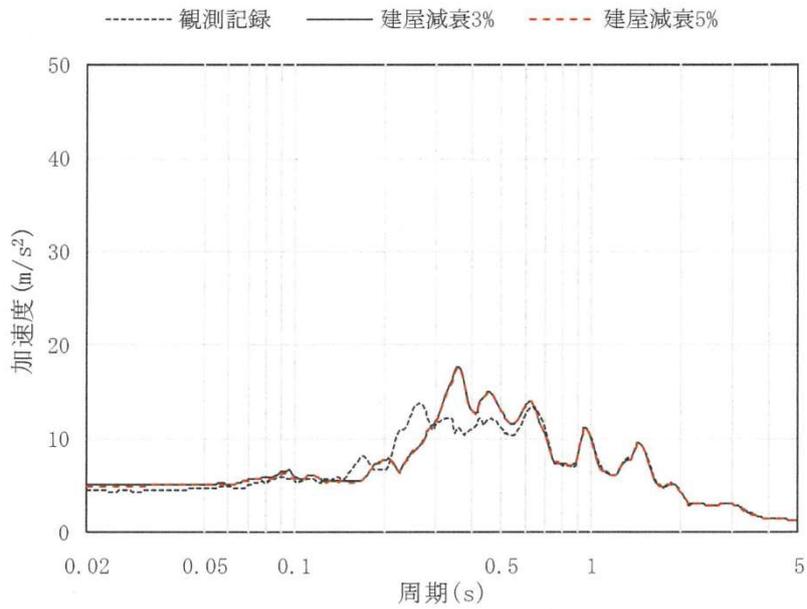


図 2.3.1-8 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 中越沖地震参 2-1



(a) NS方向 3F (T.M.S.L. 23.5m, h = 5%)



(b) EW方向 3F (T.M.S.L. 23.5m, h = 5%)

図 2.3.1-9 加速度応答スペクトルの比較：中越沖地震^{参 2-1}

v) 建屋の最大応答せん断ひずみ

原子炉建屋の基準地震動 Ss 及び弾性設計用地震動 Sd での応答レベルを以下のように記載している。

- ・原子炉建屋の基準地震動 Ss による耐震壁の最大応答せん断ひずみは、スケルトン曲線の第 1 折点を通過する部位もあるが、全部位で第 2 折点を下回っている。
- ・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、全部位でスケルトン曲線の第 1 折点を下回っている。

vi) 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

①実現象における減衰

(i) 応答レベルごとの減衰定数と振幅依存性

表 2.3.1-7 のようにまとめられている。

表 2.3.1-7 既往の実験結果・観測結果の整理^{参 2-1}

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

(ii) 構造の複雑さによる減衰効果

構造の複雑さによる減衰効果について、参 2-1 に以下の記載がある。

「履歴減衰を含む RC 耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC 部の減衰定数は弾性域で 1%～4%程度、それを越えた付近で 5%～7%程度である。一方で、原子力発電所の振動試験及び地震観測記録に基づく減衰定数は、弾性域の非常に小さい応答レベルでも 1%～10%程度の減衰が得られている。これは、RC 耐震壁実験が、ボックス型 RC 耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁と

の接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。」^{参 2-1}

「PWR 型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ことが考えられる。」^{参 2-1}

②地震応答解析モデルにおける減衰

(i) 地盤への逸散減衰

地盤への逸散減衰について、参 2-1 に以下の記載がある。

「原子炉建屋のひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果より、各次固有周期におけるモード減衰定数が、その主たるモードをな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、原子炉建屋においては、地盤への逸散減衰の影響が建屋の減衰よりも非常に大きい。」^{参 2-1}

(ii) 履歴減衰

履歴減衰について、参 2-1 に以下の記載がある。

「「JEAG4601-1991 追補版」に基づく履歴減衰の設定では、 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。」^{参 2-1}

「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、更に第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。」^{参 2-1}

(iii) 建物・構築物の減衰

建物・構築物の減衰について、参 2-1 に以下の記載がある。

「「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。」^{参 2-1}

③地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察

結論として、これまでの検討から、以下の表 2.3.1-8 及び表 2.3.1-9 のようにまとめられている。

表 2.3.1-8 柏崎刈羽原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理^{参 2-1}

	応答レベル	線形		非線形	
		第1折点未満	第1折点付近	第2折点付近	許容限界付近
実現象	柏崎刈羽原子力発電所における地震動	弾性設計用地震動 S_d		基準地震動 S_s	
	RC耐震実験 (履歴減衰を含む)	1%~4%程度 ↓ 構造の複雑さによる減衰の増加 2%程度以上	5%程度	6%~7%程度	6%~7%程度
	柏崎刈羽原子力発電所	5%程度以上 ↑ 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 (柏崎刈羽原子力発電所)	3%, 5%で 中越沖地震の観測記録を シミュレーション (水平・鉛直)			

表 2.3.1-9 柏崎刈羽原子力発電所の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^{参 2-1}

建物・構築物		原子炉建屋	コントロール建屋	タービン建屋	緊急時対策所	廃棄物処理建屋	格納容器 圧力逃がし装置基礎
構造及び形状		複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体
入力地震動	S_s	水平	5%	5%	5%	5%	5%
		鉛直	5%	5%	5%	5%	5%
	S_d	水平	5%	5%	5%	—	—
		鉛直	5%	5%	5%	—	—

2) 日本原燃再処理施設^{参 2-2}

表 2.3.1-10 及び表 2.3.1-11 に再処理施設の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-10 再処理施設の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理^{参 2-2}

	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

表 2.3.1-11 再処理施設の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^{参 2-2}

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 S_d	水平	5%	5%*
		鉛直	5%	5%*
	基準地震動 S_s	水平	5%	5%*
		鉛直	5%	5%*
	$1.2 \times S_s$	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。

3) 関西電力高浜発電所 1 号機^{参 2-3}、関西電力高浜発電所 2 号機^{参 2-4}

1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所との主に異なる部分を以下に示す。

なお、高浜発電所 2 号機は高浜発電所 1 号機を代表として検討している。

i) 地震観測記録による減衰定数の評価

RC 造部の減衰定数を地震観測記録より評価するため、高浜発電所 1 号機の原子炉格納施設 (R/B) における地震観測記録を用いて、システム同定により減衰定数を評価している (表 2.3.1-12 参照)。

システム同定により減衰定数を評価した結果について、参 2-3 に以下の記載がある。

「システム同定により評価した減衰定数 h について、水平方向は O/S で 1.4~1.5% 程度、I/C 1.6~5.8% 程度、O/S 及び I/C の鉛直方向で 1.4~6.2% 程度であった。」^{参 2-3}

表 2.3.1-12 高浜発電所 1 号機原子炉格納施設の固有振動数及び減衰定数の同定結果^{参 2-3}

(1) 伊予灘地震

検討ケース	入力データ				出力データ				同定結果	
	設置個所		成分	最大 加速度 (Gal)	設置個所		成分	最大 加速度 (Gal)	1次 減衰 定数 h(%)	1次 固有 振動数 (Hz)
	建屋名	E.L. (m)			建屋名	E.L. (m)				
1	R/B	□	NS	2.23	I/C	□	NS	3.75	1.60	8.02
2			EW	1.54			EW	2.81	5.82	8.75
3			UD	1.81			UD	1.94	4.94	20.8
4			NS	2.23			NS	2.65	3.72	10.3
5			EW	1.54			EW	2.12	3.34	8.89
6			UD	1.81			UD	1.69	3.41	21.0
7			NS	2.23	O/S	□	NS	16.3	1.51	3.43
8			EW	1.54			EW	6.00	1.39	3.44
9			UD	1.81			UD	4.78	1.36	10.7

(2) 滋賀県北部地震

検討ケース	入力データ				出力データ				同定結果	
	設置個所		成分	最大 加速度 (Gal)	設置個所		成分	最大 加速度 (Gal)	1次 減衰 定数 h(%)	1次 固有 振動数 (Hz)
	建屋名	E.L. (m)			建屋名	E.L. (m)				
1	R/B	□	NS	7.26	I/C	□	NS	18.7	1.96	7.83
2			EW	9.39			EW	20.4	4.91	8.94
3			UD	5.75			UD	10.8	4.17	20.6
4			NS	7.26			NS	11.0	3.11	10.1
5			EW	9.39			EW	10.2	4.68	8.63
6			UD	5.75			UD	6.99	6.21	22.4
7			NS	7.26	O/S	□	NS	19.3	1.54	3.46
8			EW	9.39			EW	29.7	1.53	3.46
9			UD	5.75			UD	24.2	1.60	10.6

ii)地盤への逸散減衰の検討

地盤への逸散減衰について、参 2-3 に以下の記載がある。

「地盤連成モードは内部コンクリート (I/C) の 1 次モードと重なっており、そのモードの減衰定数 h は NS 方向で 9.29%、EW 方向で 9.71%であった。外部しゃへい建屋 (O/S) の 1 次モードの減衰定数 h は、NS 方向で 5.22%、EW 方向で 5.22%であり、O/S については、建物・構築物の減衰定数として設定した RC 造部 5%に対し概ね同等の値となっている。

これより、高浜発電所 1 号機の原子炉格納施設の地震応答解析モデルにおいては、I/C の 1 次モードについては、地盤連成のモードと重なっていることから地盤への逸散減衰の影響がやや表われているものの、建物全体の振動系の各モードの減衰定数 h は、建物の構造種別に応じて設定した h とほぼ対応しており、相対的に地盤への逸散減衰の影響は、建物全体の材料減衰の効果よりも小さい。」^{参 2-3}

iii) 高浜発電所 1 号機と高浜発電所 2 号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数

表 2.3.1-13 及び表 2.3.1-14 に高浜発電所 1 号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示し、表 2.3.1-15 に高浜発電所 2 号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-13 高浜発電所 1 号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数 h の考察にあたっての整理^{参 2-3}

	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
	高浜発電所 1 号機における地震動	伊予灘地震 滋賀県北部地震	弾性設計用地震動 Sd		基準地震動 Ss	
実現象	RC 耐震壁実験 ※履歴減衰を含む	構造の複雑さによる減衰の増加	1~4%程度	5%程度	6~7%程度	6~7%程度
	川内原子力発電所 1 号機	3~10%程度	振幅依存性による減衰の増加 3~10%程度以上	7%程度以上	8%程度以上	8%程度以上
解析	3次元 FEM モデル	3%で観測記録をシミュレーション	非線形性の考慮 Sd 応答レベルを模擬 (減衰 3%+履歴減衰 地盤への逸散減衰 構造の複雑さ)		Ss 応答レベルを模擬 (減衰 3% +履歴減衰 地盤への逸散減衰 構造の複雑さ)	
	質点系モデル		概ね同等 Sd 応答レベルを模擬 (減衰 5% 履歴減衰(※) 地盤への逸散減衰) ※履歴減衰は保守的に設定		概ね同等 Ss 応答レベルを模擬 (減衰 5% +履歴減衰(※) 地盤への逸散減衰) ※履歴減衰は保守的に設定	

表 2.3.1-14 高浜発電所 1 号機の入力地震動ならびに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数 h の整理^{参 2-3}

構造及び形状			単純な構造体	複雑な構造体		
構造体			外部しゃへい 建屋 シリンダー部 (RC 造部)	内部コンクリート	原子炉補助建屋	緊急時対策所建屋
入力地震動	Ss	水平方向	5%	5%	5%	5%
		鉛直方向	5%	5%	5%	5%
	Sd	水平方向	5%(3%) ^(注)	5%	5%	5%
		鉛直方向	5%(3%) ^(注)	5%	5%	5%

(注) $h=5\%$ を基本とし、 3% とした場合の影響確認を行う。

表 2.3.1-15 高浜発電所 2 号機の入力地震動ならびに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数 h の整理^{参 2-4}

構造及び形状			単純な構造体	複雑な構造体	
構造体			外部しゃへい 建屋 シリンダー部 (RC 造部)	内部コンクリート	原子炉補助建屋
入力地震動	Ss	水平方向	5%	5%	5%
		鉛直方向	5%	5%	5%
	Sd	水平方向	5%(3%) ^(注)	5%	5%
		鉛直方向	5%(3%) ^(注)	5%	5%

(注) $h=5\%$ を基本とし、 3% とした場合の影響確認を行う。

4) 日本原子力発電東海第二発電所^{参 2-5}

1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所との主に異なる部分を以下に示す。

i) 原子炉建屋の地震観測シミュレーション

東海第二発電所原子炉建屋を対象に 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時の観測記録を用いたシミュレーション解析を行っている。シミュレーション解析結果について、参 2-5 に以下の記載がある。

「最大応答加速度分布では、RC 造部の減衰 3%と 5%の両者ともに観測記録に対して保守的な値となったが、減衰 5%の結果の方が観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC 造部の減衰 3%と 5%のケース共に、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、減衰 5%の結果の方が観測記録により整合する傾向にある。」^{参 2-5}

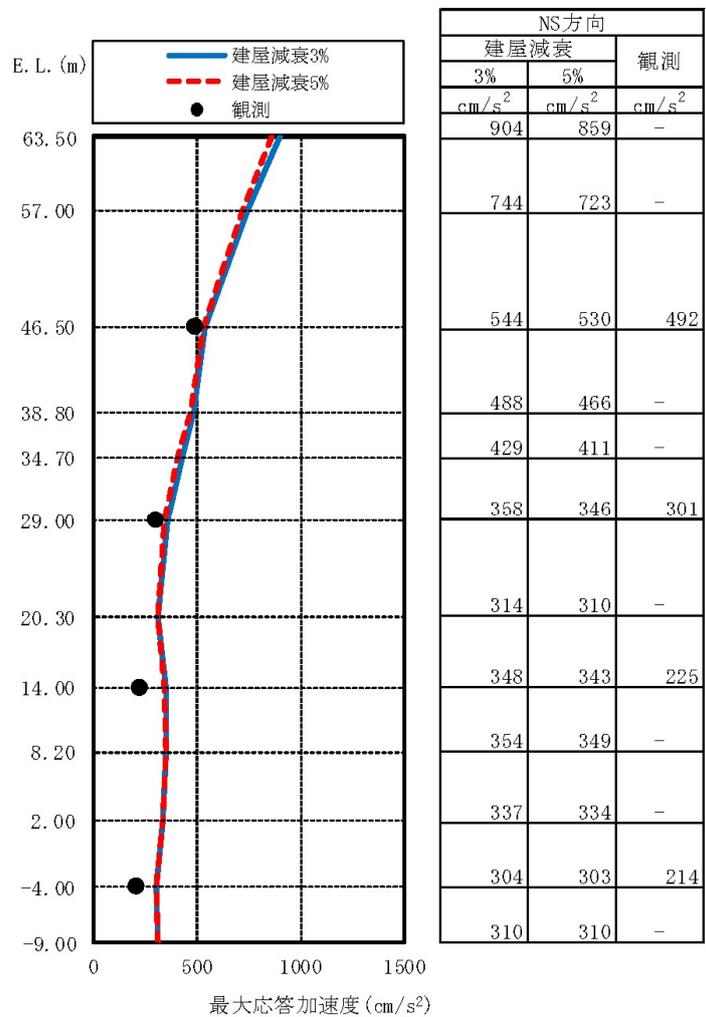
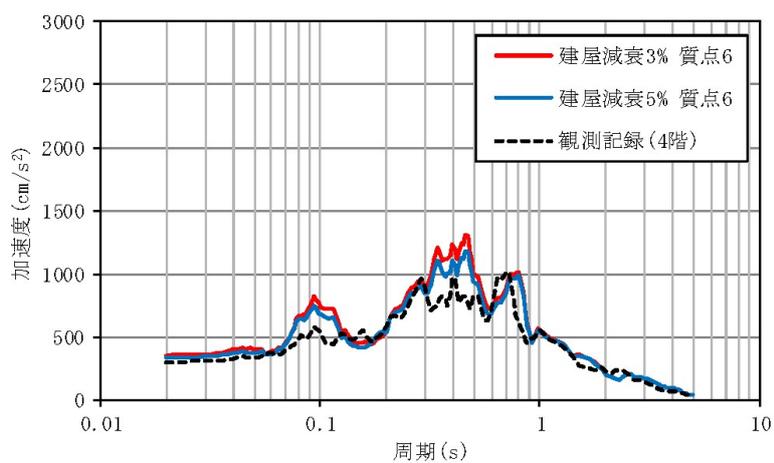
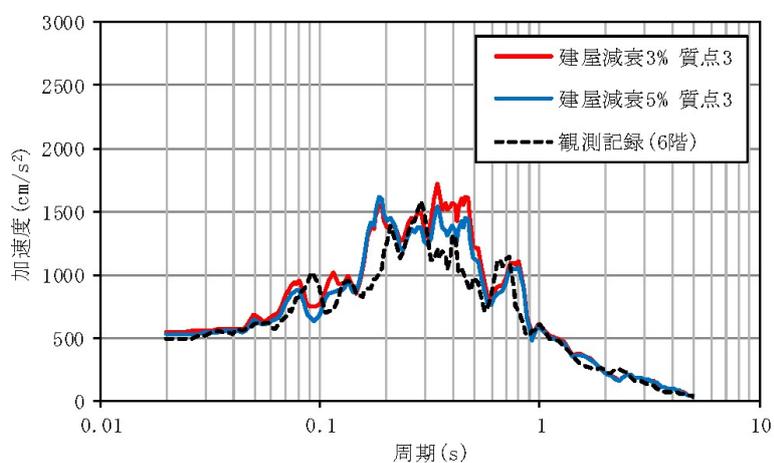


図 2.3.1-10 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震^{参 2-5}



(c) 4階 (EL. 29.00 m, h=5%)



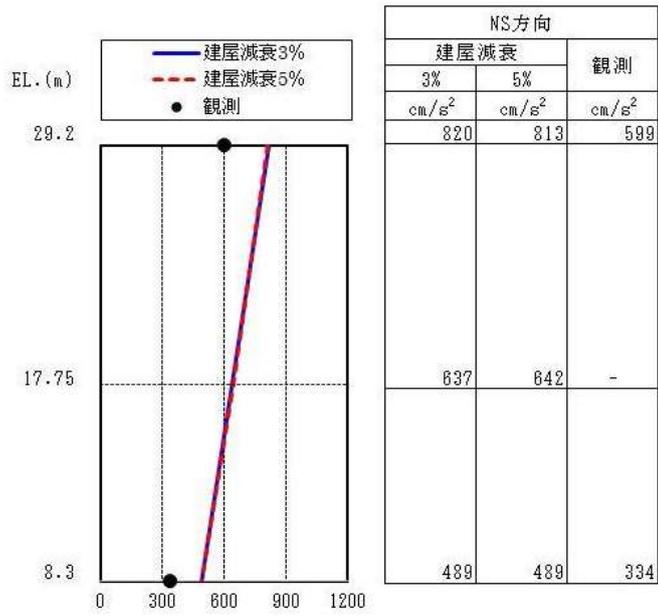
(d) 6階 (EL. 46.50 m, h=5%)

図 2.3.1-11 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震^{参 2-5}

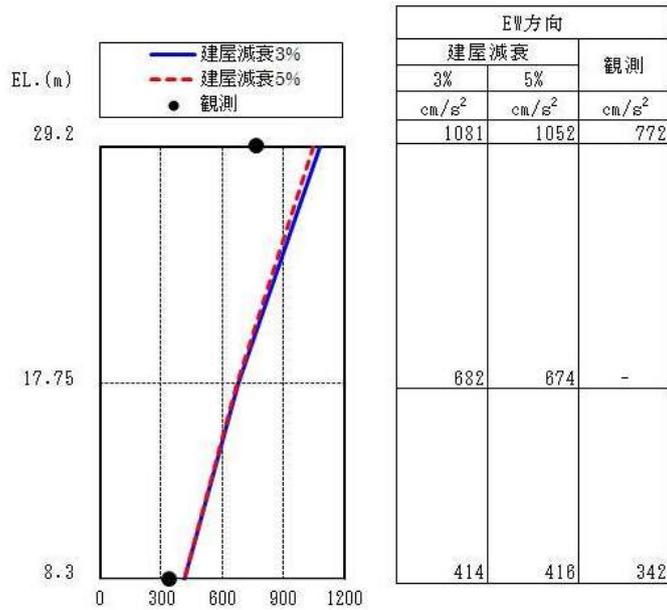
ii) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震観測シミュレーション

東海第二発電所使用済燃料乾式貯蔵建屋を対象に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行っている。シミュレーション解析結果について、参 2-5 に以下の記載がある。

「最大応答加速度分布では、RC 造部の減衰 3%と 5%の両者ともに観測記録に対して保守的な値となったが、減衰 5%の結果の方が観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC 造部の減衰 3%と 5%のケース共に、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、減衰 5%の結果の方が観測記録により整合する傾向にある。」^{参 2-5}

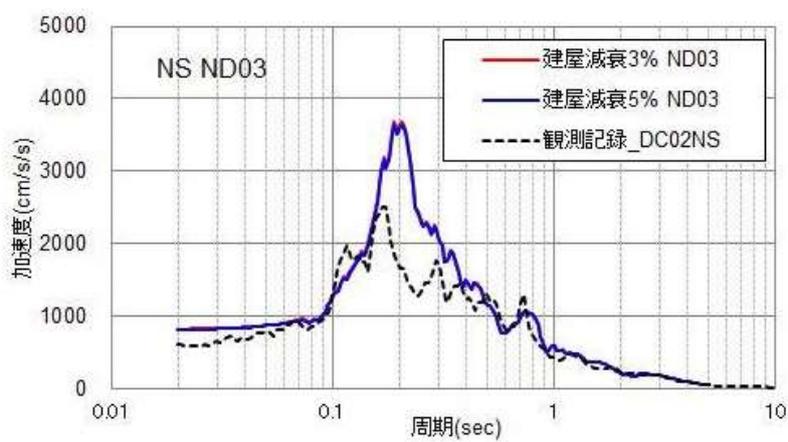


最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

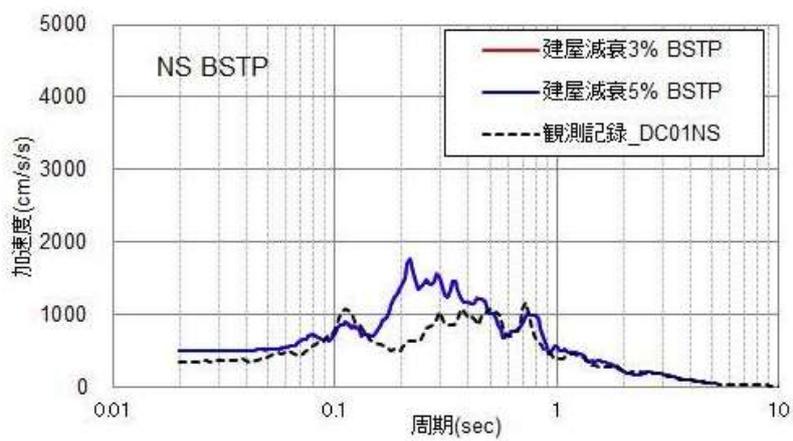


最大応答加速度分布の比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

図 2.3.1-12 最大応答加速度分布の比較 : 東北地方太平洋沖地震^{参 2-5}



(a) 屋上階 (EL. 29.2 m, h=5 %)



(b) 1階 (EL. 8.3 m, h=5 %)

図 2.3.1-13 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震^{参 2-5}

iii) 東海第二発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数

表 2.3.1-16 及び表 2.3.1-17 に東海第二発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-16 東海第二発電所の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^{参 2-5}

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

表 2.3.1-17 東海第二発電所の入力地震動なら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^{参 2-5}

建物・構築物		原子炉建屋	使用済燃料乾式貯蔵建屋	緊急時対策所建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽
構造及び形状		複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体
入力地震動	S_s	水平	5%	5%	5%
		鉛直	5%	5%	5%
	S_d	水平	5%	5%	—
		鉛直	5%	5%	—

5) 東北電力女川原子力発電所^{参 2-6, 参 2-7}

1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所との主に異なる部分を以下に示す。

i) 原子炉建屋の地震観測シミュレーション

女川原子力発電所 2号機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行っている。表 2.3.1-18 に使用材料の物性値を示し、図 2.3.1-14 及び図 2.3.1-15 にシミュレーション解析結果の例を示す。コンクリートの減衰定数は 7%を用いている。シミュレーション解析結果について、参 2-6 に以下の記載がある。

「加速度応答スペクトル及び最大応答加速度分布より、水平方向、鉛直方向ともに、観測記録と良く整合しているといえる。」^{参 2-6}

表 2.3.1-18 使用材料の物性値^{参 2-6}

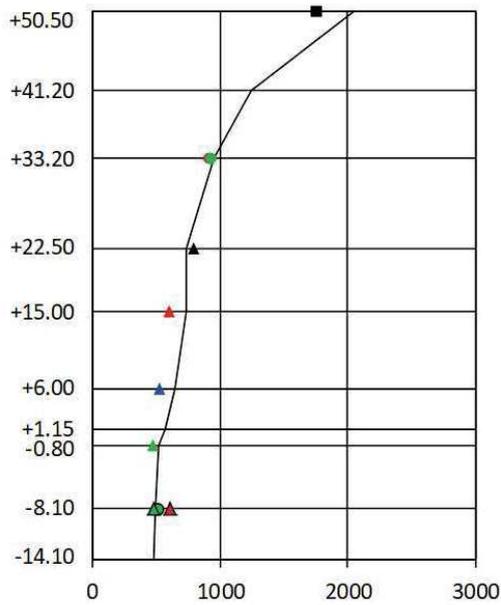
(a) 水平方向

材 料		方 向	初期剛性 補正係数*	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	減衰 定数 h (%)
コ ン ク リ ー ト	地上 3 階及びクレーン階 (O. P. 33.2m より上部)	NS	0.3	7.94×10 ³	3.41×10 ³	7
		EW	0.5	13.24×10 ³	5.69×10 ³	7
	地下 3 階～地上 2 階 (O. P. 33.2m より下部)	NS	0.75	19.86×10 ³	8.53×10 ³	7
		EW	0.80	21.18×10 ³	9.10×10 ³	7

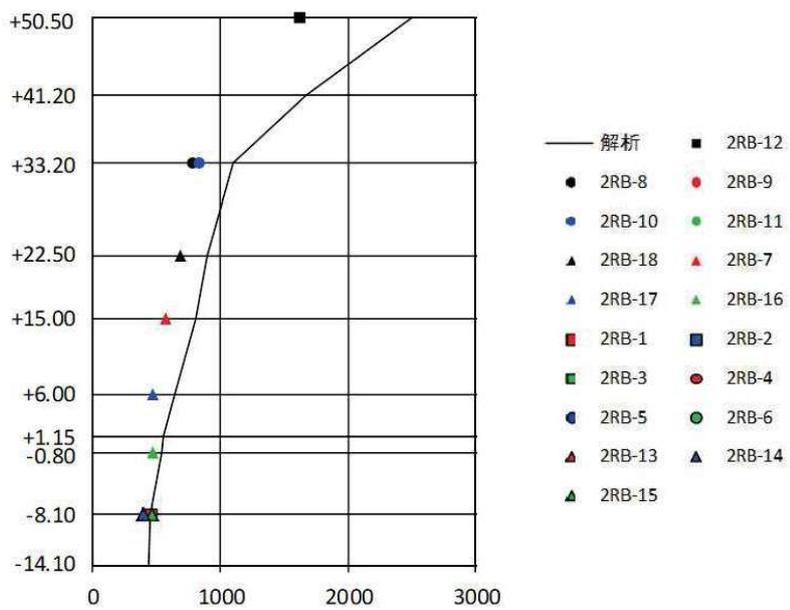
注記*：初期剛性補正係数は、観測記録と整合するように設定したコンクリートの設計基準強度に基づく初期剛性に対する係数

(b) 鉛直方向

材 料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
コンクリート	2.65×10 ⁴	1.14×10 ⁴	5
鉄 骨	20.59×10 ⁴	7.94×10 ⁴	2



最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震



最大応答加速度分布の比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

図 2.3.1-14 最大応答加速度分布の比較 : 東北地方太平洋沖地震^{参 2-6}

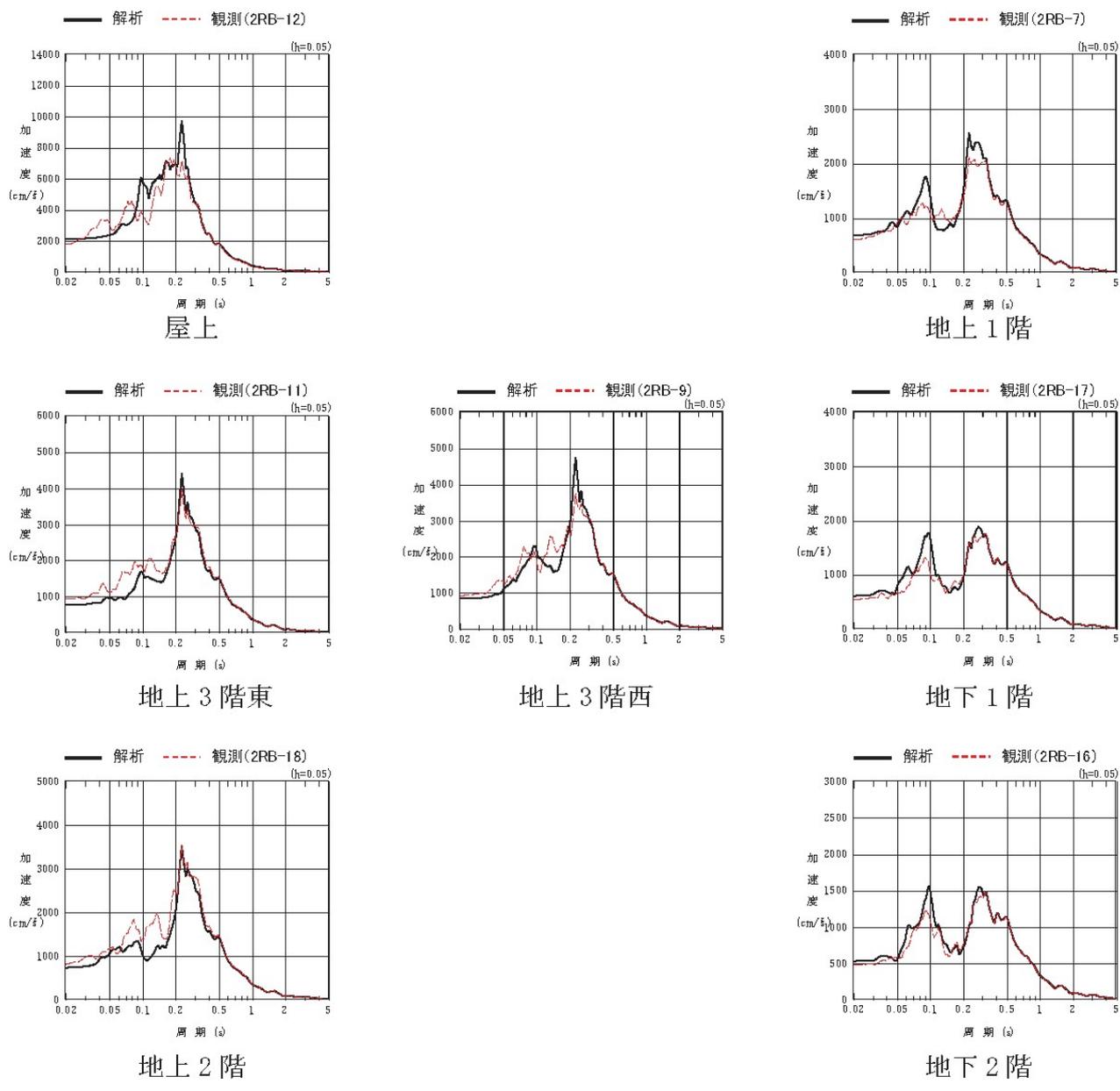


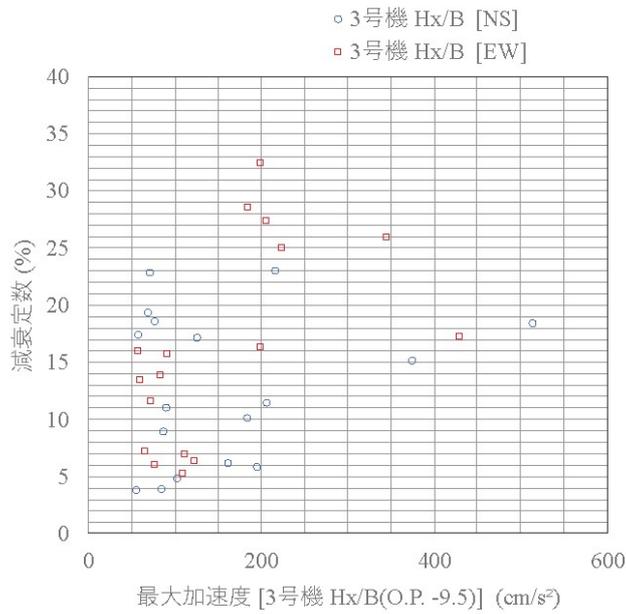
図 2.3.1-15 加速度応答スペクトルの比較 (NS方向) 参 2-6

ii) ARX モデルを用いた減衰定数の分析^{参 2-7}

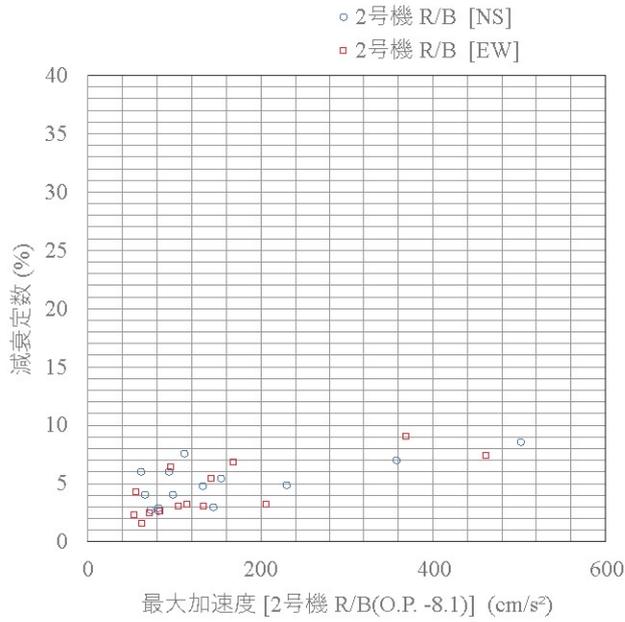
建屋を等価 1 質点系モデルに置換した ARX モデルを用いて、中小地震記録に対する建屋全体の平均的な減衰定数の変化の分析を行っている（図 2.3.1-16 参照）。ARX モデルを用いた減衰定数の分析結果について、参 2-7 に以下の記載がある。

「第 3 号機海水熱交換器建屋については、ばらつきは見られるものの、基礎版上観測記録の最大加速度が 100cm/s^2 以下の地震に対しても 5%以上の減衰定数が得られている。また、原子炉建屋についても、同様にばらつきはあるものの、弾性設計用地震動 S_d の地震動レベルよりも小さい中小地震記録に対しても、平均で 5%程度の減衰定数が得られている。

原子炉建屋よりも第 3 号機海水熱交換器建屋の方が得られた減衰定数が有意に大きいことが確認できるが、これは、第 3 号機海水熱交換器建屋が建屋全体が埋め込まれた建屋である一方で、原子炉建屋は建屋の半分が埋め込まれた状況であることから、埋め込まれていることによる効果（地盤への逸散減衰）による差があるためと考えられる。新設建屋のうち、特に基準地震動 S_s に対する応答レベルが小さい緊急用電気品建屋及び淡水貯水槽もほぼ全体が埋め込まれた状況であるため、減衰定数 5%を設定することは十分に保守性があると判断できる。」^{参 2-7}



減衰定数の検討結果（第3号機海水熱交換器建屋）



減衰定数の検討結果（原子炉建屋）

図 2.3.1-16 減衰定数の検討結果^{参 2-7}

iii) 女川原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数

表 2.3.1-19 及び表 2.3.1-20 に女川原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-19 女川原子力発電所の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^{参 2-6}

	応答レベル	線形		非線形	
		第1折点未満	第1折点付近	第2折点付近	許容限界付近
実現象	女川原子力発電所における地震動	弾性設計用地震動 S_d	基準地震動 S_s		
	RC耐震実験 (履歴減衰を含む)	1%~4%程度 ↓ 構造の複雑さによる減衰の増加 2%程度以上	5%程度	6%~7%程度	6%~7%程度
	女川原子力発電所	5%程度以上 ↑ 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 (女川原子力発電所)	NS方向：7% EW方向：7% UD方向：5% で東北地方太平洋沖地震の観測記録をシミュレーション(水平・鉛直)			

表 2.3.1-20 女川原子力発電所の入力地震動なら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^{参 2-6}

建屋		原子炉建屋	制御建屋	緊急用電気品建屋	緊急時対策建屋	第3号機海水熱交換器建屋	タービン建屋	補助ボイラー建屋	第1号機制御建屋
構造及び形状		複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体
入力地震動	S_s	水平	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
		鉛直	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
	S_d	水平	5%	5%	—	—	—	—	—
		鉛直	5%	5%	—	—	—	—	—

6) 四国電力伊方発電所3号機^{参 2-8}

1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所との主に異なる部分を以下に示す。

i) システム同定による減衰定数の評価

① 芸予地震による検討結果

芸予地震による検討結果を表 2.3.1-21 に示す。芸予地震による検討結果について、参 2-8 に以下の記載がある。

「芸予地震を用いてシステム同定により評価した弾性域(小振幅レベル)の減衰定数には、ばらつきがあるものの、内部コンクリート(I/C)で 5%程度、外周コンクリート壁(O/S(RE/B))及び原子炉補助建屋(A/B)で 3%程度となっている。」^{参 2-8}

表 2.3.1-21 減衰定数の評価結果^{参 2-8}

部位		EL+	方向		同定結果		
					固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	
R/B	I/C	38m	水平	EW	8.50	4.7	
				NS	8.74	5.5	
		32m (東側)		EW	8.52	3.7	
				NS	9.55	3.8	
		32m (西側)		EW	8.53	5.3	
				NS	8.67	5.0	
		24m		EW	8.43	5.3	
	NS			8.63	5.8		
	17m	EW		8.51	5.0		
		NS		8.61	5.6		
	O/S (RE/B [※])	32m (西側)		鉛直	UD	21.70	5.3
				83m	水平	EW	5.33
		NS				5.45	2.9
		61m (北側)		EW		5.33	2.7
NS			5.42	2.9			
61m (南側)		EW	5.36	3.2			
		NS	5.45	2.1			
32m (北側)	EW	5.33	3.2				
	NS	5.42	2.7				
32m (南側)	EW	5.34	3.4				
	83m	鉛直	UD	13.97		3.1	
A/B	34m	水平	EW	7.13		3.0	
			NS	6.64		2.0	
	34m	鉛直	UD	22.07		2.8	

※EL+32mの観測点は原子炉周辺補機棟(RE/B)とも見なせることから併記

② 複数の観測記録を用いた検討結果(振幅依存性)

複数の観測記録を用いた検討結果を図 2.3.1-17 に示す。複数の観測記録を用いた検討結果について、参 2-8 に以下の記載がある。

「内部コンクリート、外周コンクリート壁他に着目し、複数の観測記録を用いて水平方向の基礎上端最大加速度とシステム同定により評価した減衰定数を比較した結果、システム同定により評価した減衰定数には、ばらつきがあるものの、基礎上端加速度レベルに応じて大きくなる傾向を示しており、検討に用いた観測記録の基礎上端最大加速度(10~50Gal 程度)よりも大きいレベルでは、さらに大きな減衰が推定される。」参 2-8

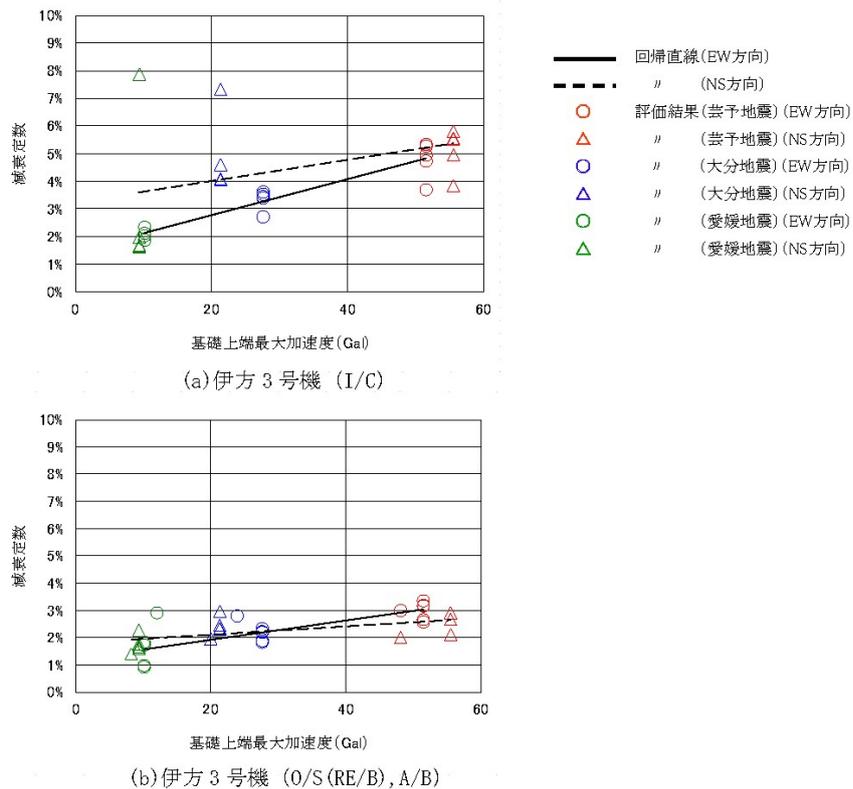


図 2.3.1-17 伊方3号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係参 2-8

ii) 地震観測記録のシミュレーション解析

① 質点系モデルによる検討結果

質点系モデルによる検討結果を図 2.3.1-18 に示す。質点系モデルによる検討結果について、参 2-8 に以下の記載がある。

「最大応答加速度、応答スペクトルは、5%と 3%の結果に大きな差異はないが、内部コンクリートでは 5%の結果が、外周コンクリート壁では 3%の結果が相対的に観測記録に整合的となっている。」参 2-8

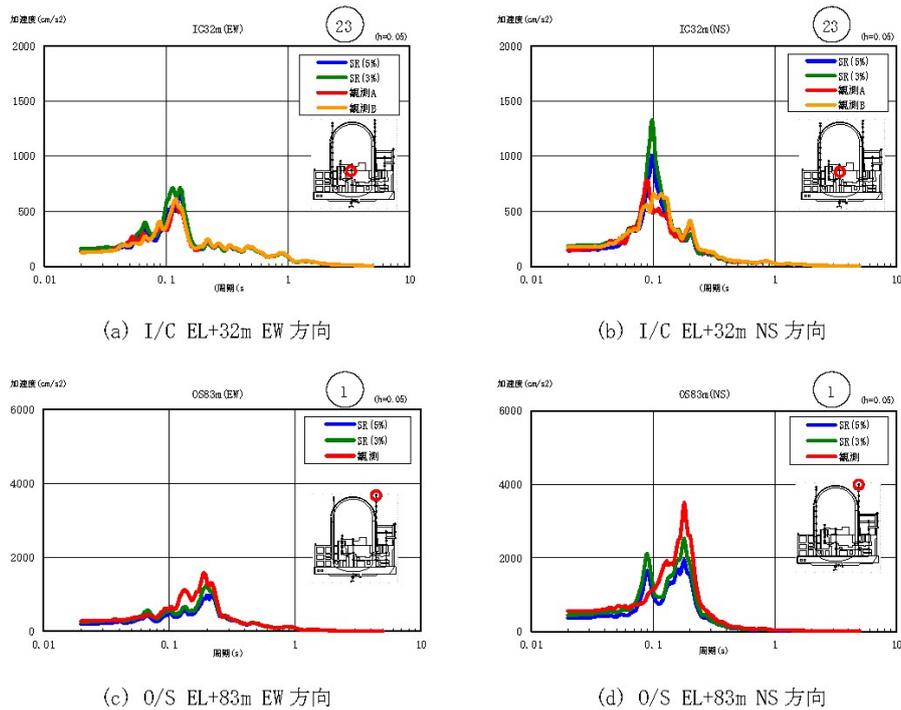


図 2.3.1-18 応答スペクトルの比較結果 (抜粋) 参 2-8

② 3次元 FEM モデルによる検討結果

3次元 FEM モデルによる検討結果を図 2.3.1-19 に示す。3次元 FEM モデルによる検討結果について、参 2-8 に以下の記載がある。

「最大応答加速度、応答スペクトルは、5%と 3%の結果に大きな差異はないが、内部コンクリートでは5%の結果が、外周コンクリート壁では3%の結果が相対的に観測記録に整合的となっている。」参 2-8

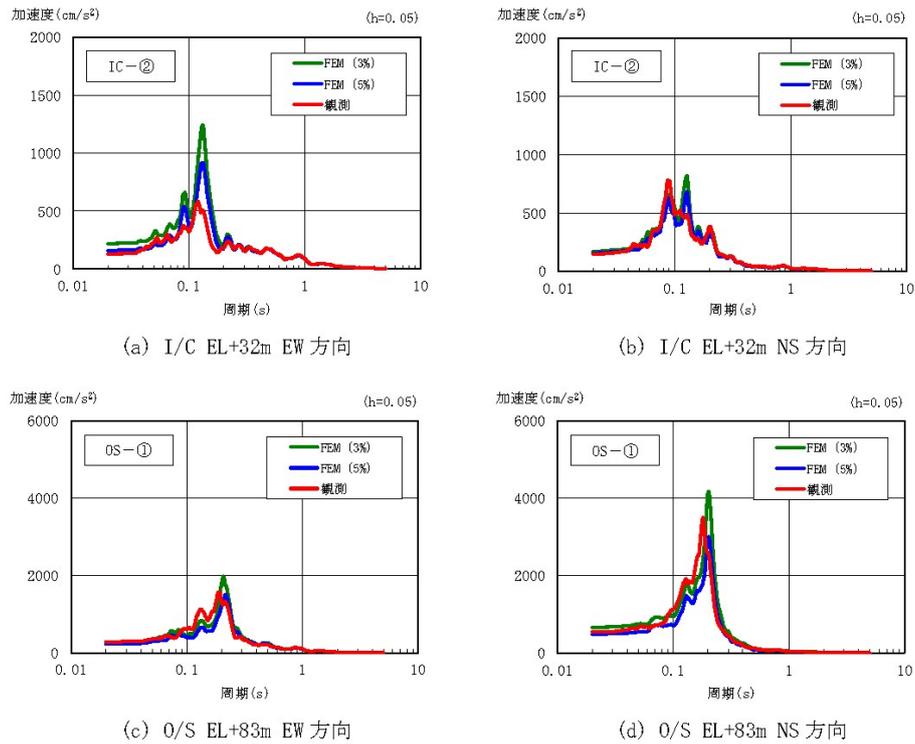


図 2.3.1-19 床応答スペクトルの比較結果 (抜粋) 参 2-8

iii) 伊方原子力発電所3号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数

表 2.3.1-22 及び表 2.3.1-23 に伊方原子力発電所3号機の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-22 伊方発電所3号機のRC耐震壁試験と観測記録を用いた検討を踏まえた整理^{参 2-8}

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	許容限界付近				
3号機建屋 (芸予地震等)	振幅依存性による減衰の増加 3~5%程度 → 3~5%程度以上		5%程度以上	5%程度以上				地盤減衰をあまり含まない
耐震壁実験	構造の複雑さによる減衰の増加 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

表 2.3.1-23 伊方発電所3号機のS_s・S_d応答レベルを踏まえた減衰定数の整理^{参 2-8}

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	許容限界付近			
3号機建屋 (芸予地震等) 【】基礎上限最大加速度	振幅依存性による減衰の増加 S _s 【50Gal程度】 → S _d 【350Gal程度】 3~5%程度 → 5%程度		5%程度以上	5%程度以上			地下逸散減衰をあまり含まない
耐震壁実験	構造の複雑さによる減衰の増加 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

7) 九州電力玄海原子力発電所^{参 2-9}

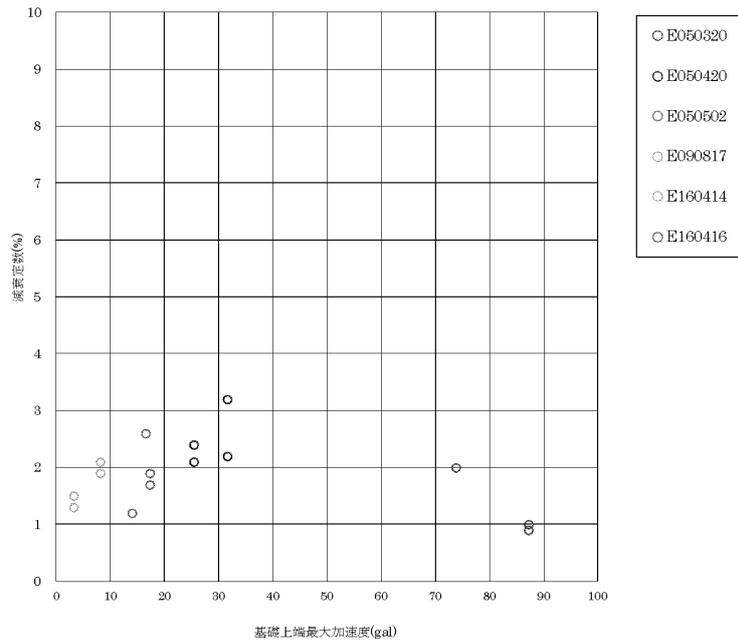
1) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所との主に異なる部分を以下に示す。

i) システム同定による減衰定数の評価

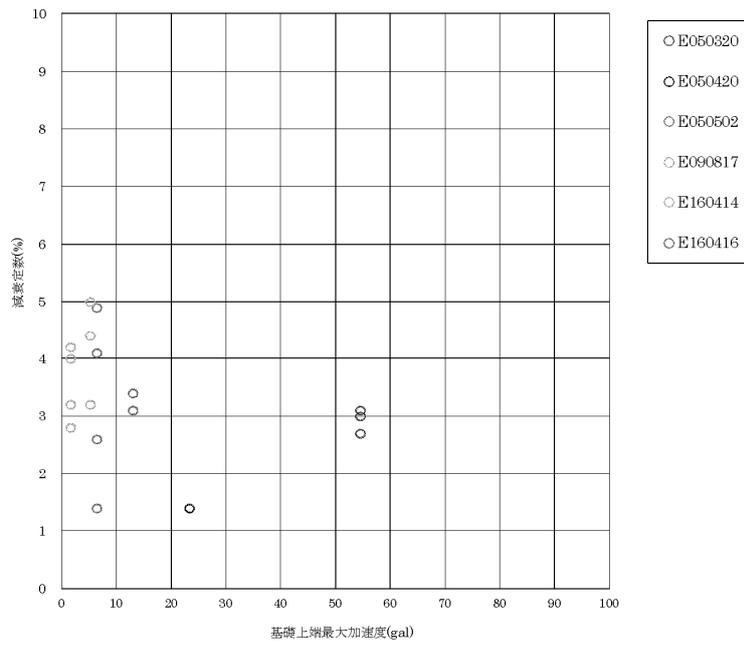
玄海3号機における地震観測記録を用いてシステム同定を実施し、PCCV及びRC造部の減衰定数を評価している(図2.3.1-20、図2.3.1-21参照)。その結果について、参2-9に以下の記載がある。

「PCCVでは、水平で0.9%~3.2%、鉛直で1.4%~5.0%の減衰定数となっている。低振幅である観測記録レベルでも、水平では2%程度以上の結果が得られており、最大では3%を超える減衰定数となった。また、鉛直では2%程度以上の結果が得られており、最大では5%の減衰定数となった。

I/Cでは、1.9%~7.8%の減衰定数となっており、低振幅である観測記録レベルでも、5%程度以上の結果が得られ、最大では8%近い減衰定数となった。」^{参 2-9}



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 2.3.1-20 減衰定数の同定結果 (PCCV) 参 2-9

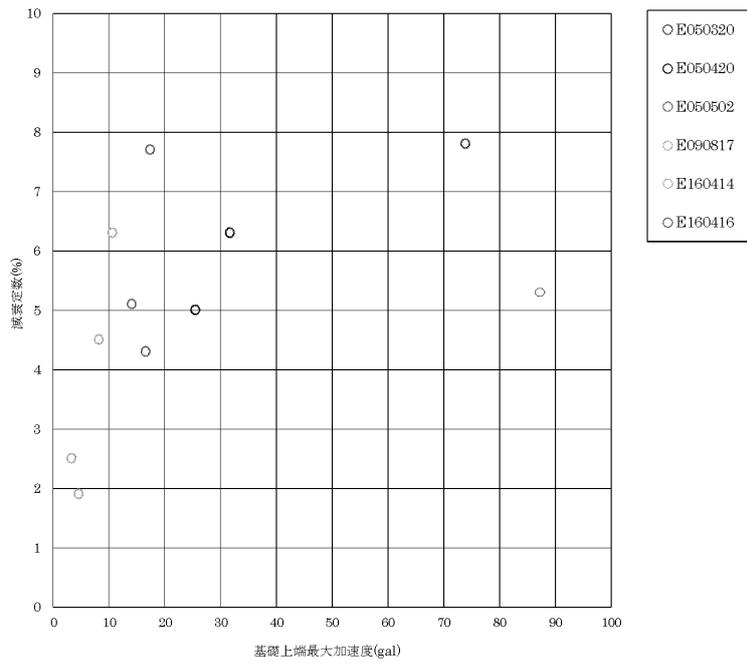


図 2.3.1-21 減衰定数の同定結果 (I/C) 参 2-9

ii) 3次元 FEM モデルを用いた地震観測記録のシミュレーション解析

玄海3号機のPCCVの減衰定数を3%、RC部の減衰定数を5%とした解析ケース（基本ケース）及びPCCVの減衰定数を2%かつRC部の減衰定数を3%とした解析ケース（減衰定数の不確かさ考慮ケース）による地震応答解析を行い、観測記録との比較検討を実施している（表 2.3.1-24、表 2.3.1-25 参照）。その結果について、参 2-9 に以下の記載がある。

「3次元 FEM モデルによる解析結果は、ほとんどのケースで観測記録と同等または保守的な床応答となっている。また、保守的な解析結果が得られた場合でも、基本ケースの方が、比較的、観測記録と整合がよいと考えられる。」参 2-9

表 2.3.1-24 床応答スペクトル【3号機原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋】参 2-9

位置	EL.60.4m	位置	EL.60.4m
NS 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCVドーム頂部 EL.60.4m NS方向</p>	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCVドーム頂部 EL.60.4m EW方向</p>	
位置	EL.60.4m	位置	EL.35.3m
鉛直 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCVドーム頂部 EL.60.4m 鉛直方向</p>	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCVドーム端部(西側) EL.35.3m EW方向</p>	
位置	EL.-5.2m	位置	EL.-5.2m
鉛直 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCV脚部(東側) EL.-5.2m 鉛直方向</p>	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>PCCV脚部(西側) EL.-5.2m NS方向</p>	

表 2.3.1-25 床応答スペクトル【3号機原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋】 参 2-9

位置	EL.22.4m	位置	EL.11.3m
NS 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>I/C西側壁頂部 EL.22.4m NS方向</p>	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>燃料取扱棟中間部 EL.11.3m NS方向</p>	
鉛直 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>燃料取扱棟中間部 EL.11.3m 鉛直方向</p>	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>燃料取扱棟頂部 EL.32.3m EW方向</p>	
位置	EL.32.3m	—	—
鉛直 方向	<p>観測記録 PCCV:3%,RC:5% PCCV:2%,RC:3%</p> <p>加速度(cm/s²)</p> <p>周期(s)</p> <p>燃料取扱棟頂部 EL.32.3m 鉛直方向</p>	—	—

iii) 九州電力玄海原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数

表 2.3.1-26 及び表 2.3.1-27 に九州電力玄海原子力発電所の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。

表 2.3.1-26 玄海原子力発電所の RC 耐震壁試験と観測記録を用いた検討を踏まえた整理^{参 2-9}

(a) RC 造部

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
玄海原子力発電所 3号機における 地震動	観測記録	弾性設計用地震動 Sd		基準地震動 Ss	
RC 耐震壁試験 ※履歴減衰を含む		1~4% 程度 0~数% 程度以上	5% 程度	6~7% 程度	6~7% 程度
玄海原子力発電所 3号機 (RC 造部)	2~8% 程度	2~8% 程度以上	5% 程度以上	5% 程度以上	5% 程度以上

構造の複雑さによる減衰の増加

振幅依存性による減衰の増加

(b) PCCV

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
玄海原子力発電所 3号機における 地震動	観測記録	弾性設計用地震動 Sd		基準地震動 Ss	
PCCV 模型による 振動試験	1.5~2.5% 程度		3.0~5.0% 程度	—	—
玄海原子力発電所 3号機 (PCCV)	1~5% 程度	1~5% 程度以上	3% 程度以上	3% 程度以上	3% 程度以上

振幅依存性による減衰の増加

表 2.3.1-27 玄海原子力発電所の入力地震動なら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^{※ 2-9}

構造及び形状		RC 造部		PCCV
		複雑な構造体	単純な構造体	単純な構造体
構造体		<ul style="list-style-type: none"> ・ I/C ・ 原子炉周辺建屋 ・ 原子炉補助建屋 ・ 廃棄物処理建屋 ・ タービン建屋 ・ 第 1 重大事故等 対処設備保管庫 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料取替用水タンク建屋 ・ 燃料油貯油そう基礎 ・ 代替緊急時対策所 ・ 待機所 ・ 増設壁 ・ 燃料油貯蔵タンク基礎 ・ 大容量空冷式発電機用燃 料タンク基礎 ・ タンクローリ車庫 	<ul style="list-style-type: none"> ・ PCCV
入力 地震 動	基準地震動 Ss	5%	5%	3%
	弾性設計用 地震動 Sd	5%	5%(3%) ^(注)	3%(2%) ^(注)

(注) () 内の数値は、減衰定数の設定に起因する不確かさとして考慮する。

8) 九州電力川内原子力発電所緊急時対策棟（連絡通路）^{参 2-10}

表 2.3.1-28 に川内原子力発電所緊急時対策棟（連絡通路）の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の検討結果を示す。減衰定数の検討結果について、参 2-10 に以下の記載がある。

「考察の結果、連絡通路の地震応答解析モデルに用いる RC 造部の減衰定数は、基準地震動 S_s に対して、5%が妥当である。

ただし、連絡通路は、内部コンクリート及び原子炉補助建屋のような多数の耐震壁及び構造床から構成される構造ではなく、地震観測を実施していないことから、減衰定数の設定に起因する不確かさとして、3%とした場合を考慮する。」^{参 2-10}

表 2.3.1-28 連絡通路の地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察に当たっての整理^{参 2-10}

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
連絡通路		基準地震動 S_s			
RC 耐震壁試験 ※履歴減衰をあまり含まない		2~4% 程度	4% 程度	4~5% 程度	4~5% 程度
システム同定による評価 ^(注)	3~10% 程度	3~10% 程度以上	5% 程度以上	5% 程度以上	5% 程度以上
3次元 FEM モデルを用いた検討	5%程度	5%程度			

注: 図中の矢印とテキストは、RC耐震壁試験とシステム同定/3次元FEMモデルとの関係を示している。
 - 斜め上向き矢印: 構造の複雑さによる減衰の増加 (RC耐震壁試験からシステム同定へ)
 - 斜め下向き矢印: 1~数%程度以上 (システム同定からRC耐震壁試験へ)
 - 水平矢印: 振幅依存性による減衰の増加 (システム同定から3次元FEMモデルへ)
 - 垂直矢印: 振幅依存性による減衰の増加 (3次元FEMモデルからシステム同定へ)

(注) 川内1号機外部遮蔽建屋の減衰 3~5%程度 (1~60 cm/s^2 程度)

伊方3号機外周コンクリート壁の減衰 3%程度 (10~50 cm/s^2 程度)

女川2号機、3号機原子炉建屋の減衰 6~7%程度 (500 cm/s^2 程度)

9) 減衰定数 5%を用いることの妥当性の検討のまとめ

既往の知見、施設の地震観測記録による検討、入力地震動及び建物・構築物の構造と形状を考慮し、鉄筋コンクリート造部の減衰定数 5% (PCCV は 3%) が妥当であることを示している。

i) 減衰定数

①実機起振機試験

日本建築学会の「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書^{参 2-15}を引用し、以下のように記載している (図 2.3.1-22 参照)。

「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。」^{参 2-1}

また、減衰定数の大きな発電所については、「軟質岩盤に立地しており、地盤への逸散減衰を多く含んでいるためと考えられる。」^{参 2-1}との記載がある。

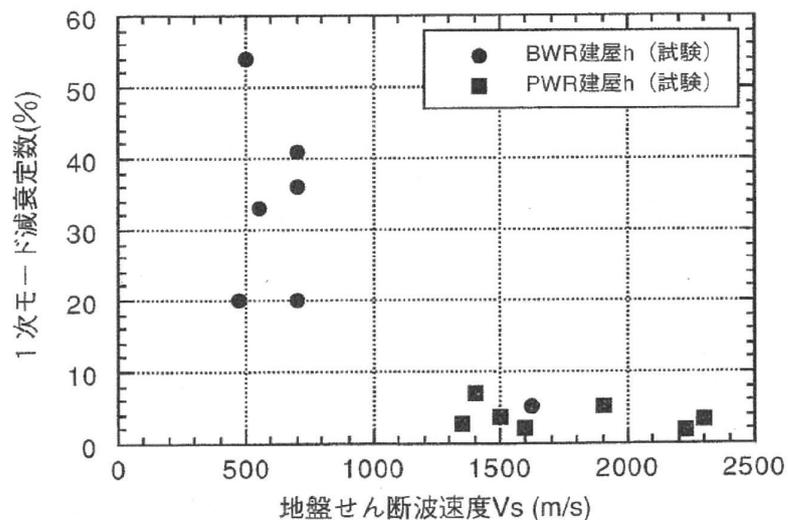


図 2.3.1-22 地盤剛性 (V_s) と試験結果の減衰定数の関係 (再掲) ^{参 2-15}

②地盤－建物相互作用の影響

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（地盤－建物相互作用）の影響を検討している。その結果、軟岩サイトにありかつ地盤に埋め込まれている場合の多い BWR 型原子炉建屋では、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、硬岩サイトにあり地盤に埋め込まれていない PWR 型原子炉建屋では、地盤への逸散減衰の影響が小さく、そのため、建物全体の振動系の各モードの減衰定数 h は、建物の構造種別に応じて設定した h とほぼ対応している。

③地震観測

既往の知見や原子力発電所関連施設の地震観測シミュレーションにより、鉄筋コンクリート造部の建屋減衰定数 5%を用いて地震観測記録がおおむね再現できることが確認されたと記載している。

また、例えば、図 2.3.1-23 等を示し、「最大応答加速度分布では、RC 造部の減衰 3%と 5%のケースともに、観測記録に対して保守的な値となったが、減衰 5%の結果のほうが減衰 3%の結果よりも観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC 造部の減衰 3%と 5%のケースともに、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、最大応答加速度分布と同様に、減衰 5%の結果のほうが減衰 3%の結果よりも観測記録に整合する傾向にある。」^{参 2-1}と記載して、減衰定数 5%の妥当性を示している。

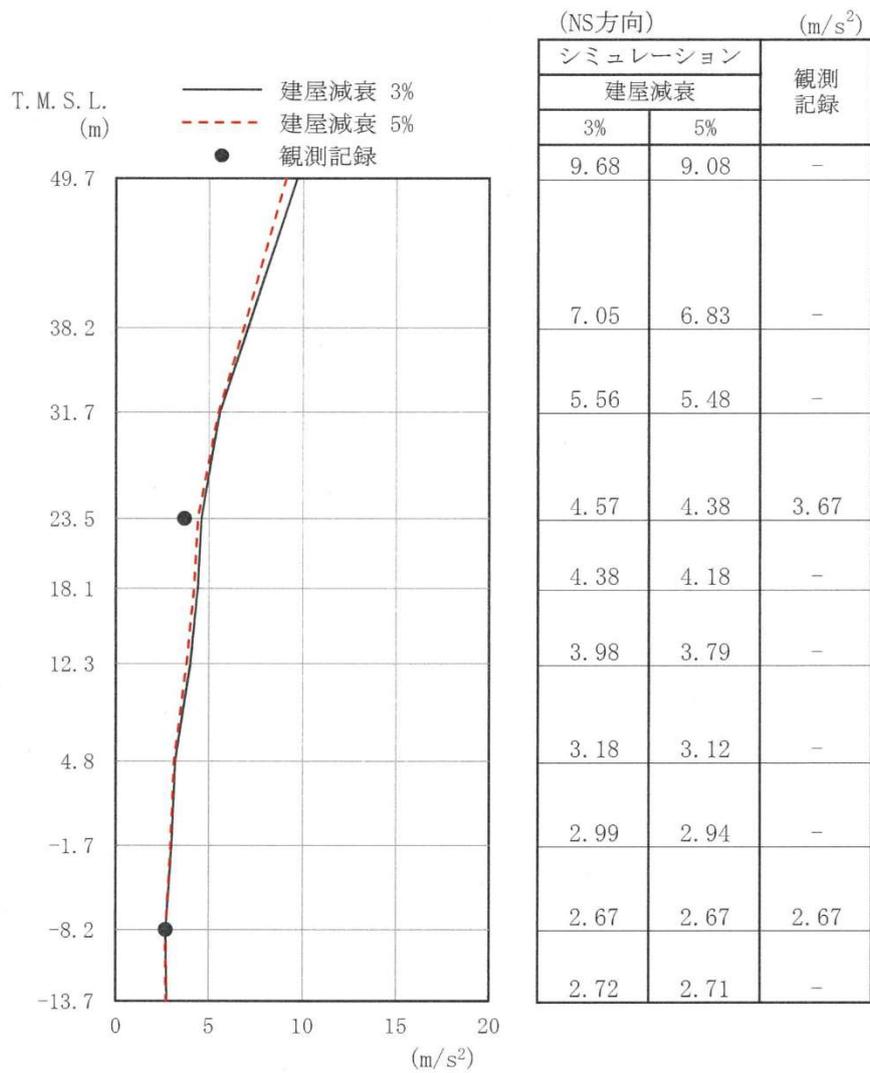


図 2.3.1-23 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 中越沖地震 (再掲) 参 2-1

ii) 振幅依存性

①RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験

表 2.3.1-29 を示し、以下のように記載している^{参 2-1}。

「等価粘性減衰は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。更に、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。」^{参 2-1}

表 2.3.1-29 RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価 (再掲)^{参 2-1}

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

②地震観測記録を用いた検討

例えば、図 2.3.1-24 や図 2.3.1-25 に示すようなシステム同定の結果から、基礎版上加速度レベルに応じて大きくなる傾向を指摘している。

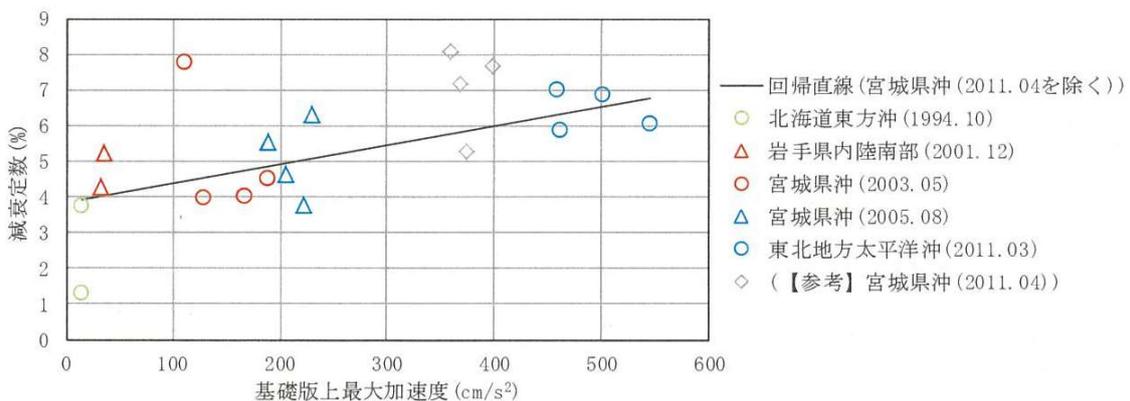


図 2.3.1-24 地震観測による減衰定数と入力加速度レベルの関係 (女川 2 号機及び 3 号機)
(再掲)^{参 2-1}

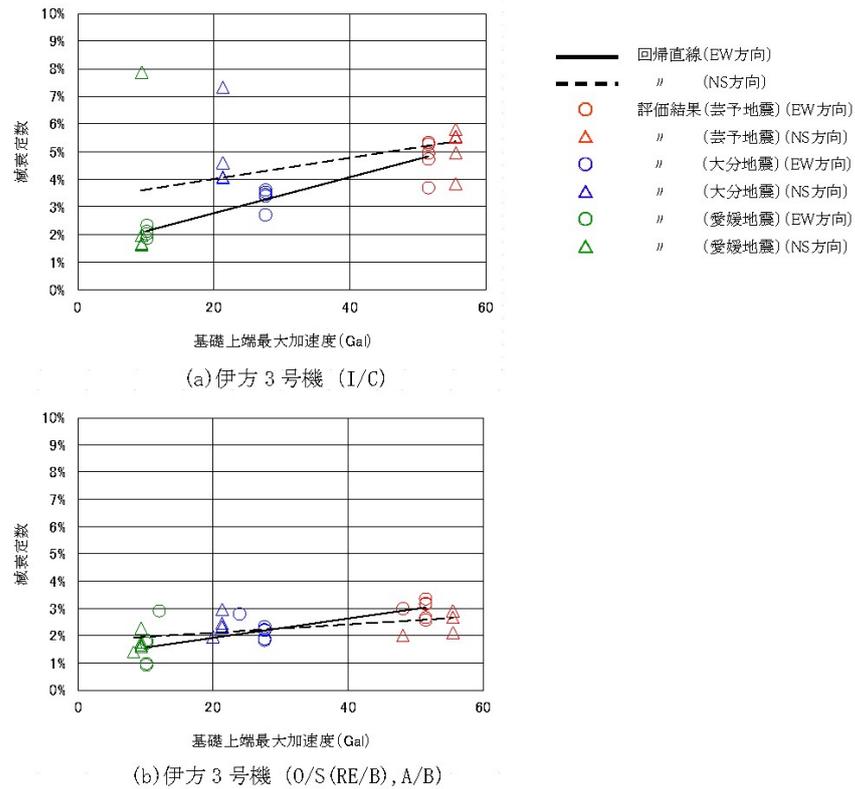


図 2.3.1-25 伊方 3 号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係（再掲） 参 2-8

iii) 地震応答解析モデル

地震観測シミュレーションで質点系モデルと 3 次元 FEM モデルが用いられている。

① 質点系モデル

質点系モデルの減衰特性は「JEAG4601-1987」及び「JEAG4601-1991 追補版」に基づいており、以下である。

- 地盤と建物の動的相互作用の効果は地盤ばね（剛性と減衰係数）としてモデル化
- 建屋－地盤連成系の減衰マトリクスは、減衰定数に基づいてひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定し、近似法により算定した地盤ばねの減衰定数と合わせて算定する。
- 履歴減衰として設定している RC 造部の復元力特性は、 τ - γ 関係においては、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した最大点指向型モデルを用いており、 M - ϕ 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。

iv) 構造の複雑さによる減衰定数の増分について

構造の複雑さによる減衰定数の増分に関して、以下のように記載している。また、記載を踏まえた結果として、例えば、表 2.3.1-30 が示されている。

「履歴減衰を含む履歴減衰を含む RC 耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC 部の減衰定数は弾性域で 1%～4%程度、それを超えた付近で 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%程度の減衰が得られている。これは、RC 耐震壁実験が、ボックス型

RC耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁との接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。」²⁻¹

「PWR型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ことが考えられる。」²⁻¹

表 2.3.1-30 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（再掲）²⁻¹

	応答レベル	線形	非線形		
		第1折点未満	第1折点付近	第2折点付近	許容限界付近
実現象	柏崎刈羽原子力発電所における地震動	弾性設計用地震動 S_d	基準地震動 S_s		
	RC耐震実験（履歴減衰を含む）	1%～4%程度 ↓ 構造の複雑さによる減衰の増加 2%程度以上	5%程度	6%～7%程度	6%～7%程度
	柏崎刈羽原子力発電所	5%程度以上 ↑ 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（柏崎刈羽原子力発電所）	3%, 5%で 中越沖地震の観測記録を シミュレーション (水平・鉛直)			

c) 建屋減衰定数 3%の検討^{参 2-2~ 参 2-4、参 2-7、参 2-9、参 2-10、参 2-12~ 参 2-14}

鉄筋コンクリート造部の減衰定数を 3%とした場合の検討についての記載を以下に示す。

1) 日本原燃再処理施設^{参 2-2}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載がある。

「再処理施設等の建物・構築物の弾性設計用地震動 Sd レベル、基準地震動 Ss レベル及び $1.2 \times Ss$ 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 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 2-2}

2) 関西電力高浜発電所 1 号機^{参 2-3}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、外部しゃへい壁の弾性設計用地震動 Sd に対する建屋の減衰定数を 3%とした場合の機器・配管系への影響について検討を行っている。

「高浜発電所 1 号機の建物・構築物の基準地震動 Ss レベル及び弾性設計用地震動 Sd レベルの地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数は、水平方向及び鉛直方向とも $h=5\%$ 程度以上と考えられる。ただし、単純な構造体である外部しゃへい建屋については、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、減衰定数を $h=3\%$ とした場合についても影響確認を行うこととする。

なお、緊急時対策所建屋については、上記のとおり減衰定数 $h=5\%$ が基本であるが、耐震性向上の観点から、 $h=3\%$ とした場合の検討についても行うこととする。」^{参 2-3}

3) 関西電力高浜発電所 2 号機^{参 2-4}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、外部しゃへい壁の弾性設計用地震動 Sd に対する建屋の減衰定数を 3%とした場合の機器・配管系への影響について検討を行っている。

「高浜発電所 2 号機の建物・構築物の基準地震動 Ss レベル及び弾性設計用地震動 Sd レベルの地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数は、水平方向及び鉛直方向とも h=5% 程度以上と考えられる。ただし、単純な構造体である外部しゃへい建屋については、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、減衰定数を h=3%とした場合についても影響確認を行うこととする。」^{参 2-4}

4) 東北電力女川原子力発電所 女川第 2 号機^{参 2-7}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載がある。

「なお、減衰定数を 5%と設定することの十分な保守性を確認したものの、緊急用電気品建屋、淡水貯水槽及び緊急時対策建屋については、新設建屋であり観測記録を用いたシミュレーション解析ができていないことを踏まえ、念のため減衰定数 h=3%による解析を実施し、その影響を確認することとする。」^{参 2-7}

5) 九州電力玄海原子力発電所 玄海 3 号機^{参 2-9}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、原子炉格納容器 (PCCV) の弾性設計用地震動 Sd に対する建屋の減衰定数を 2%とした場合、燃料取替用水タンク建屋の弾性設計用地震動 Sd に対する建屋の減衰定数を 3%とした場合の機器・配管系への影響及び代替緊急時対策所 (待機所、L 型遮蔽壁含む)、燃料油貯蔵タンク基礎、タンクローリー車庫及び第 1 重大事故等対処設備保管庫は、耐震性向上の観点、減衰定数を 3%とした場合の検討を行っている (表 2.3.1-31 参照)。

「建物・構築物の地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数については、第 7-1 表に示す建物・構築物の RC 造部のうち複雑な構造体については減衰定数 5%が妥当であるとする。但し、RC 造部のうち単純な構造体は、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、減衰定数 5%を基本とするが、弾性設計用地震動 Sd を用いた評価においては、減衰定数の設定に起因する不確かさとして 3%とした場合についても考慮する。

また、同様に PCCV については減衰定数 3%が妥当であるとする。但し、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、減衰定数 3%を基本とするが、低振幅である観測記録レベルにおいても 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 を用いた評価において、減衰定数の設定に起因する不確かさとして、2%とした場合についても考慮する。

さらに、新設である代替緊急時対策所 (待機所、L 型遮蔽壁含む)、燃料油貯蔵タンク基礎、タンクローリー車庫及び第 1 重大事故等対処設備保管庫は、耐震性向上の観点、から、第 7-1 表に示す評価において、減衰定数を 3%とした場合を考慮する。」^{参 2-9}

表 2.3.1-31 第7-1表^{参 2-9}

第7-1表 玄海原子力発電所3号機 建物・構築物の減衰定数

建物・構築物	構造種別	建設工認時の減衰定数	今回工認の減衰定数 ^(注)	
			基準地震動 Ss	弾性設計用地震動
原子炉格納容器 [PCCV]	プレストレストコンクリート造	3%	3%	3%(2%)
内部コンクリート [I/C]	RC造	5%	5%	5%
原子炉周辺建屋 [REB]	RC造	5%	5%	5%
蒸気発生器 [S/G]	—	1%	水平：3% 鉛直：1%	水平：3% 鉛直：1%
原子炉補助建屋	RC造	5%	5%	5%
燃料取替用水タンク建屋	RC造	5%	5%	5%(3%)
燃料油貯油そう基礎	RC造	5%	5%	5%(3%)
代替緊急時対策所 (待機所、L型遮蔽壁含む)	RC造	—	5%(3%)	—
燃料油貯蔵タンク基礎	RC造	—	5%(3%)	5%(3%)
大容量空冷式発電機用燃料タンク基礎	RC造	—	5%(3%)	—
タンクローリ車庫	RC造	—	5%(3%)	—
第1重大事故等対処設備保管庫	RC造	—	5%(3%)	—
廃棄物処理建屋	RC造	—	5%	5%
タービン建屋	RC造部	—	5%	5%
	S造部	—	2%	2%

(注) () 内の値は、減衰定数の設定に起因する不確かさとして考慮する。

6) 九州電力川内発電所緊急時対策棟 (連絡通路) ^{参 2-10}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載がある。

「考察の結果、連絡通路の地震応答解析モデルに用いる RC 造部の減衰定数は、基準地震動 Ss に対して、5%が妥当である。

ただし、連絡通路は、内部コンクリート及び原子炉補助建屋のような多数の耐震壁及び構造床から構成される構造ではなく、地震観測を実施していないことから、減衰定数の設定に起因する不確かさとして、3%とした場合を考慮する。」^{参 2-10}

7) 東北電力女川原子力発電所第2号機 緊急時対策建屋^{参 2-12}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、耐震評価上の影響を確認している。

「減衰定数 5%に設定することの十分な保守性を確認している。

本資料では、緊急時対策建屋が新設であること、添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」に示す通り、基準地震動 S_s に対する応答がおおむね弾性範囲であることを踏まえ、補足説明資料「補足-600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、念のため建屋鉄筋コンクリート造部の減衰定数 3%とした場合の地震応答解析を行い、耐震評価上の影響を確認する。」^{参 2-12}

8) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所第7号機 大物搬入建屋^{参 2-13}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、耐震評価上の影響を確認している。

「鉄筋コンクリート造である大物搬入建屋の地震応答解析においても、建屋の減衰定数 5%としている。

本資料では、大物搬入建屋が新設であることを考慮し、建屋の減衰定数を 3%とした場合の地震応答解析を行い、耐震評価上の影響を確認する。」^{参 2-13}

9) 四国電力伊方発電所3号機 使用済燃料乾式貯蔵建屋^{参 2-14}

建屋減衰定数 3%の検討について、以下の記載があり、地震応答解析を行っている（表 2.3.1-32 参照）。

「使用済燃料乾式貯蔵容器の間接支持構造物である使用済燃料乾式貯蔵建屋基礎を含む使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析は、第 1-1 表に示す材料物性の不確かさ等を考慮しており、鉄筋コンクリート部の減衰定数は 5%を基本ケースとし、耐震性向上の観点から 3%とした場合についても考慮している。」^{参 2-14}

表 2.3.1-32 第 1-1 表^{参 2-14}

第1-1表 材料物性の不確かさ等を考慮した地震応答解析ケース

ケース名	地盤のせん断波速度 V_s [*] (m/s)		鉄筋コンクリート部の 減衰定数 h (%)
基本	1,700	2,700	5
$V_s+1\sigma$	1,836 (1.08)	2,916 (1.08)	5
$V_s-1\sigma$	1,564 (0.92)	2,484 (0.92)	5
減衰 3%	1,700	2,700	3

※：基礎底面の地盤ばねの算定に用いた地盤のせん断波速度。

()内は基本ケースに対する比率。

 は本資料で示す減衰定数を3%とした解析ケース。

10) 建屋減衰定数 3%の検討のまとめ

鉄筋コンクリート造部の減衰定数 5%は基本としつつ、①既設工認における設定の踏襲、②構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいこと、③新設建屋であり観測記録を用いたシミュレーション解析ができていないこと、④地震観測を実施していないこと、⑤基準地震動 S_s に対する応答がおおむね弾性範囲であること、⑥耐震性向上の観点から以下の建物で減衰定数 3%を用いる検討を行うとの記載がある。

- ・ 燃料加工建屋
- ・ PWR 型原子力発電所の外部しゃへい建屋
- ・ 緊急用電機品建屋
- ・ 淡水貯水槽
- ・ 緊急時対策所建屋
- ・ 代替緊急時対策所（待機所、L 型遮蔽壁含む）
- ・ 燃料油貯蔵タンク基礎、タンクローリ車庫
- ・ 第 1 重大事故等対処設備保管庫
- ・ 緊急時対策棟（連絡通路）
- ・ 大物搬入建屋
- ・ 使用済燃料乾式貯蔵建屋

(3) 原子力発電関連施設を対象とした論文等の公開文献^{参 2-16~参 2-30、参 2-69~参 2-75}

以下に、a)減衰定数（減衰の設定に関係）、b)振幅依存性（減衰の設定に関係）、c)算定方法による減衰定数のばらつき（減衰定数の評価に関係）、d)地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）についてまとめる。

a) 減衰定数

①実機起振機試験、実機起振機試験シミュレーション^{参 2-16、参 2-17}

参 2-16 は ABWR 型で支持地盤の等価せん断波速度は 787m/s、参 2-17 は BWR 型で支持地盤のせん断波速度は 1500m/s である。起振機試験結果の伝達関数から算定した減衰定数は地盤－建物相互作用を含んだ減衰定数で参 2-16 では 30%（NS 方向）、40%（EW 方向）、参 2-17 では、15%（NS 方向）、14%（EW 方向）と報告されている。

また、参 2-16 では格子型モデルによるシミュレーション解析が行われており、建屋の減衰定数は 5%を用いたと報告されている。

参 2-17 では質点系モデルによるシミュレーション解析が行われている。解析に用いられた減衰定数の値は記載されていないが、コンクリート強度試験における動的試験結果に基づいた値を用いたと報告されている。

②地震観測^{参 2-17、参 2-20、参 2-21}

参 2-17 では、地震観測結果の伝達関数から減衰定数を算定している。振幅のみをフィットさせた場合では 1.7%（NS 方向）、4.9%（EW 方向）、振幅と位相をフィットさせた場合では 0.7%（NS 方向）、6.4%（EW 方向）と報告されている。

参 2-20 では地震観測記録を用いて ARX モデルによりモード同定を行っており、観測記録により値はばらついているが、水平方向 3.78%~6.03%、上下方向 4.51%~7.66%が報告されている（表 2.3.1-33 参照）。

表 2.3.1-33 過去の主要地震と固有振動数変化^{参 2-20}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

参 2-21 では地震観測記録を用いて ARX モデルによりモード同定を行っており、観測記録により値はばらついているが、内部コンクリートの減衰定数は、5%程度の値であり、約 4~6%の範囲に分布している。また、外周コンクリート壁の減衰定数は、3%程度の値であり、

約 2~4%の範囲に分布していると報告されている (図 2.3.1-26 参照)。

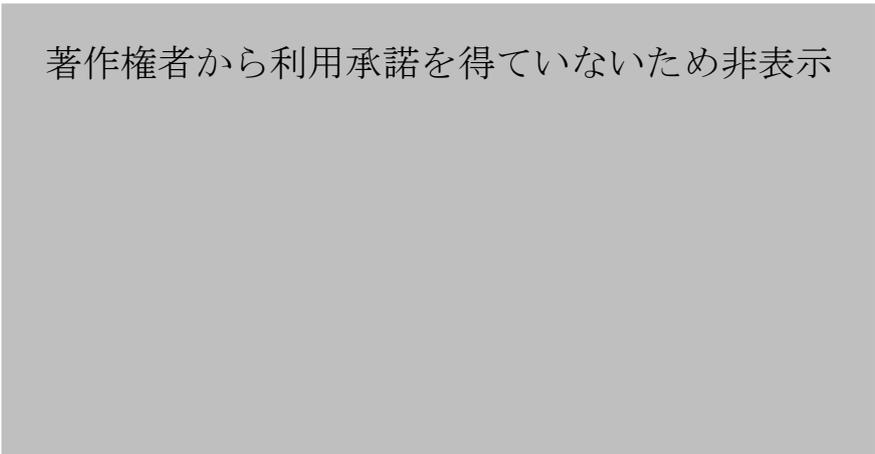


図 2.3.1-26 安芸灘地震の観測記録による減衰定数^{参 2-21}

③常時微動^{参 2-17}

参 2-17 では、常時微動のパワースペクトルと伝達関数から減衰定数を算定している。パワースペクトルを用いた場合では 1.1% (RF、NS 方向) 2.3% (RF、EW 方向)、伝達関数を用いた場合では 2.5% (RF、NS 方向) 4.9% (RF、EW 方向) と報告されている。

④振動台試験での模型試験体試験^{参 2-25、参 2-26、参 2-74}

参 2-25 では PCCV の振動台試験での模型試験体試験により、減衰定数を算定している。減衰定数は平行線法により求め、その結果、S₂ レベルまでの加振では本加振で大きくなるものの、水平・上下ともほぼ 1~2%で推移し、裕度試験の本加振後の特性変化確認加振では水平方向は 2%前後に推移していると報告されている (図 2.3.1-27、図 2.3.1-28 参照)。

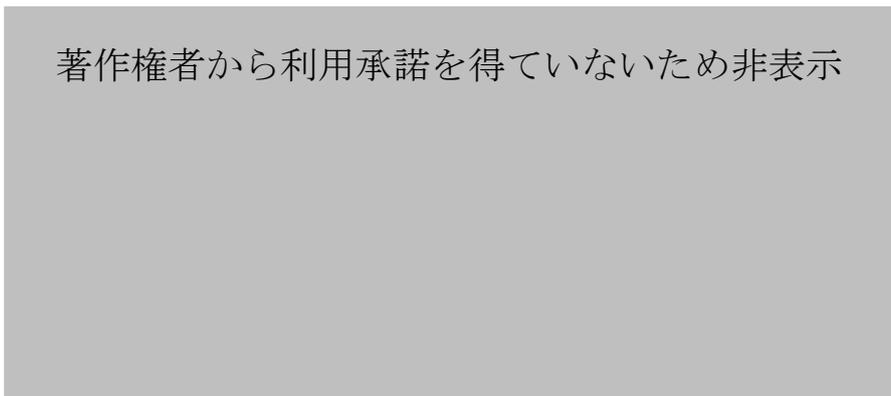


図 2.3.1-27 PCCV の振動台試験の模型試験体^{参 2-25}

著作権者から利用承諾を得ていないため
非表示

図 2.3.1-28 PCCV の振動台試験の固有振動数と減衰定数^{参 2-25}

参 2-26 では RCCV の振動台試験での模型試験体試験により、減衰定数を算定している。減衰定数は履歴ループの面積から等価粘性減衰定数としてせん断成分が 5.67%、曲げ成分が 4.52%を得たと報告されている。

参 2-74 では、試験体のアスペクト比と入力動をパラメータとした振動台試験での模型試験体試験を行っている。減衰定数は、FEM モデルによるパラメータスタディにより算定し、平均 3.6%であったと報告されている。

⑤地震観測シミュレーション^{参 2-17~参 2-20、参 2-69、参 2-70}

参 2-17 では質点系モデルによるシミュレーション解析を行っている。解析に用いられた減衰定数の値は記載されていないが、コンクリート強度試験における動的試験結果に基づいた値を用いたと報告されている。

参 2-18 では質点系モデルによるシミュレーション解析を行っている。シミュレーション解析に用いる減衰定数は伝達関数によるフィッティングにより算定し、2.9%を用いていると報告されている。

参 2-19、参 2-69 では質点系モデルにより減衰定数 3%を用いて、シミュレーション解析を行っていると報告されている（図 2.3.1-29 参照）。

著作権者から利用承諾を得て
いないため非表示

図 2.3.1-29 女川 1 号機原子炉建屋のシミュレーション解析モデル^{参 2-19}

参 2-20 では質点系モデルにより水平方向 7%、上下方向 5%を用いて、シミュレーション解析を行っていると言われている。

参 2-70 では質点系モデルと 3 次元非線形 FEM モデルを用いて、シミュレーション解析を行っている。質点系モデルでは 5%、3 次元非線形 FEM モデルでは 1 次と 2 次の振動数に対して 3%のレーリー減衰を用いたと言われている。

⑥振動台試験シミュレーション^{参 2-23、参 2-24、参 2-27、参 2-28、参 2-30、参 2-71~参 2-73}

参 2-23、参 2-24 では、質点系モデルを用いている。

参 2-23 では、曲げせん断棒モデルと履歴面積を持たない復元力モデル（JEAG4601 で示されている手法）を用いた場合、減衰を加振レベルに応じて適切に等価な粘性減衰として評価することにより、原子炉建屋模型の破壊に近い領域までの挙動を解析的に再現できたと報告されている。

参 2-24 では、減衰のモデル化は粘性減衰 2%で、履歴に等価な粘性減衰はせん断のスケルトンカーブで第 1 折点から第 2 折点まで 0%~3%まで線形に増加し、第 2 折点から 4.0×10^{-3} まで線形に増加するモデルを用いたと言われている。

参 2-27、参 2-28、参 2-72 では、3 次元非線形 FEM モデルを用いている（図 2.3.1-30 参照）。

参 2-27、参 2-28 では、初期剛性比例型減衰を用い、1 次固有周期に対して 3%を用いていると言われている。

著作権者から利用承諾を得ていないため
非表示

図 2.3.1-30 振動台試験シミュレーションの解析モデル^{参 2-28}

参 2-72 では、剛性比例型減衰を用い、1 次固有周期に対して 1.1%を用いていると報告されている。

参 2-30、参 2-71、参 2-73 では 3 次元 FEM モデルを用いた等価線形解析によるシミュレーション解析が行われている（減衰定数の値は振幅依存性を参照）。

b) 振幅依存性^{参 2-18、参 2-21~参 2-24、参 2-27~参 2-30、参 2-71、参 2-73}

参 2-18、参 2-21 では、地震観測により、減衰定数を評価している。

参 2-18 では、減衰定数は伝達関数によるフィッティングにより算定しており、図から基礎上端の最大加速度により 1%~4%と読める。

参 2-21 では、内部コンクリートで 5%程度、外周コンクリート壁で 3%程度である。また、基礎上端部の最大加速度が大きい観測記録ほど減衰定数が大きくなる傾向が認められると報告されている。文献の図から、内部コンクリートで 2%程度~5%程度、外周コンクリート壁で 1%程度~3%程度と読める（図 2.3.1-31 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.1-31 基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{参 2-21}

参 2-22 では、鉄筋コンクリート柱部材の静的及び動的実験を行っている。履歴ループを用いた等価粘性減衰はひび割れ進展領域で 10%以上と報告されている。

参 2-23 では、曲げせん断棒モデルと履歴面積を持たない復元力モデル（JEAG4601 で示されている手法）を用いた場合、減衰を加振レベルに応じて適切に等価な粘性減衰として評

価することにより、原子炉建屋模型の破壊に近い領域までの挙動を解析的に再現している。解析に用いた減衰定数はせん断ひずみの大きさにより 2%~10%である。また、実験で観察されるループを持った荷重-変形関係を取り入れた手法では、減衰のモデル化は粘性減衰 2%で、履歴に等価な粘性減衰はせん断のスケルトンカーブで第 1 折点までは 0、第 1 折点から第 2 折点までは線形に増加し、第 2 折点では 4%、第 2 折点から 4.0×10^{-3} までは 4%、 $4.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3}$ までは線形に増加し、 8.0×10^{-3} で 8%を用いたと報告されている（図 2.3.1-32 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.1-32 仮定した履歴による等価粘性減衰値とせん断変形関係^{参 2-23}

参 2-27、参 2-28 では、振動台試験結果の 3 次元非線形 FEM による解析が行われており、初期剛性比例型減衰を用い、1 次固有周期に対して 3%を用いている。また、終局点近傍の解析では減衰 3%に比べて、減衰 1%の場合は試験結果と比較的良く対応していることから、全体変形角で 6×10^{-3} を超えるような強非線形の状態においては、履歴減衰が増大するため、強非線形の状態で初期剛性比例型減衰を与える場合は注意を要すると報告されている。

参 2-29 では、振動台試験結果から、等価粘性減衰定数を評価しており、JEAG4601 のせん断のスケルトンカーブの第二折れ点付近以降で、等価粘性減衰定数は塑性履歴減衰を含む場合 6~7%、塑性履歴減衰を余り含まない場合 4~5%程度と報告されている。

参 2-30、参 2-71、参 2-73 では 3 次元 FEM モデルを用いた等価線形解析による解析が行われている。参 2-30 では、有効せん断ひずみ 4×10^{-3} 付近で減衰定数は 18.6%、参 2-71、参 2-73 では、文献の図より、せん断変形応じた減衰定数は 8×10^{-3} 付近まで 5%、それ以後、線形に増加していき 14×10^{-3} 付近で 10%と読める。

c) 算定方法による減衰定数のばらつき^{参 2-17}

参 2-17 では実機起振機試験、地震観測、常時微動により減衰定数の算定を行っている。その結果、起振機試験 15%程度、微動計測 1%程度~5%程度、地震観測：2%程度~10%程度と結果に違いがあった。また、カーブフィットでも伝達関数を用いた場合とパワースペク

トルを用いた場合で差があり、伝達関数を用いた場合でも、振幅のみと振幅と位相の両方をフィットさせた場合とも差が出ていた（表 2.3.1-34、表 2.3.1-35、表 2.3.1-36 参照）。

表 2.3.1-34 実機起振機試験による振動数と減衰定数^{参 2-17}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

表 2.3.1-35 常時微動による振動数と減衰定数^{参 2-17}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

表 2.3.1-36 地震観測による振動数と減衰定数^{参 2-17}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

d) 地震応答解析モデル^{参 2-16~参 2-20、参 2-23、参 2-24、参 2-27、参 2-28、参 2-30、参 2-69~参 2-73、参 2-75}

シミュレーション解析等で用いられている地震応答解析モデルは、参 2-16 では格子型モデルが用いられていた。

参 2-17~参 2-20、参 2-23、参 2-24、参 2-69、参 2-70、参 2-75 では質点系モデルが用いられており、その中で参 2-23、参 2-24、参 2-70、参 2-75 では JEAG4601 (JEAC4601) で示されている非線形解析モデルが用いられていた。

参 2-27、参 2-28、参 2-30、参 2-70~参 2-73、参 2-75 では 3 次元 FEM モデルが用いられていた。

また、FEM モデルの中でも参 2-27、参 2-28、参 2-70、参 2-72、参 2-75 は非線形 FEM が用いられ、参 2-30、参 2-71、参 2-73 では非線形性を考慮するために等価線形 FEM が用いられていた。

(4) 海外の文献 (NRC) 参 2-31、参 2-32、参 2-33

a) REGULATORY GUIDE 1.61 DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS、2007年3月参 2-31

建屋減衰に関連して、以下の記載がある。

「ここで示す減衰値はエネルギー吸収が粘性減衰で近似される弾性応答解析を意図している。」参 2-31

「以下の規制見解は、SSC (Structure, System and component) の弾性動的耐震解析及び設計に使用される許容減衰値を規定するものである。もし、試験データにより、より大きな減衰値の妥当性が示されれば、規定より大きな減衰値を使用してもよい。」参 2-31

「表 2.3.1-37 に SSE (Safe Shutdown Earthquake) の解析に使用できる減衰の値が示されている。」参 2-31

表 2.3.1-37 SSE Damping Values 参 2-31

Structural Material	Damping (% of Critical Damping)
Reinforced Concrete	7%
Reinforced Masonry	7%
Prestressed Concrete	5%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	4%
Bolted Steel with Bearing Connections	7%

Note : For steel structures with a combination of different connection types, use the lowest specified damping value, or as an alternative, use a “weighted average” damping value based on the number of each type present in the structure.

「表 2.3.1-38 に OBE (Operating Basis Earthquake) の解析に使用できる減衰の値が示されている。」参 2-31

表 2.3.1-38 OBE Damping Values 参 2-31

Structural Material	Damping (% of Critical Damping)
Reinforced Concrete	4%
Reinforced Masonry	4%
Prestressed Concrete	3%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	3%
Bolted Steel with Bearing Connections	5%

「表 2.3.1-37 に示される構造物の線形動的解析に用いる減衰値は、SSE を含む荷重の組み合わせによる構造物の応力が許容応力に近いという前提に基づいている。しかし、SSE を含む荷重の組み合わせによる構造物の応力が許容応力を大幅に下回る場合がある。等価粘性減衰は構造物の応答レベルに依存するので表 2.3.1-37 に示された値が、応答による応力レベルと整合しない可能性に留意する必要がある。」参 2-31

b) NUREG/CR-6919, "Recommendations for Revision of Seismic Damping Values for the Seismic Damping Values in Regulatory Guide 1.61", 2006年11月²⁻³²

建屋減衰に関連して、以下の記載がある。

「この報告書は、Brookhaven 国立研究所が作成した「REGULATORY GUIDE 1.61 DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS Rev.0」における減衰値の改訂を提言するものである。」²⁻³²

「提言事項は、最近発行された ASCE Standard 43-05, "Seismic Design Criteria For Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities" と ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Non-Mandatory Appendix N, "Dynamic Analysis Methods", 2004 Edition に記載されている地震応答解析に対する減衰についての指針を考慮している。」²⁻³²

「ここでの提言は REGULATORY GUIDE 1.61 DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS Rev. 0 で示された減衰の値からの抜本的な変更は含んでいない。主な改善点は(1)機械設備及び電気設備と非配管装置に対する減衰に対する明確な指針、(2)低応答レベルでの構造減衰に対する明確な指針、(3)1973年に Rev. 0 が発行されてから作成された実験データ、減衰に関する重要な許認可措置、減衰に関する規基準の改定の考慮である。」²⁻³²

また、以下に減衰定数についての記載をまとめる。

(i) REGULATORY GUIDE 1.61 の改定版の使用に対する条件の提言

- ・特定の減衰のカテゴリーに記載されている場合を除き、表中の減衰は時刻歴解析、応答スペクトル、等価静的地震解析に適用可能である。
- ・非線形解析の場合には、粘性減衰値は Operating Basis Earthquake に対する減衰値に限定されなければならない。異なる減衰値の使用は場合に応じて検討・評価される。

(ii) 提案する REGULATORY GUIDE 1.61 の改定版に対する導入部

- ・ここで示す減衰値はエネルギー吸収が粘性減衰で近似される弾性応答解析を意図している。
- ・SSE を含む設計荷重組合せに対して、通常、弾性限界をいくらか超える部材応答が許容されている。弾性解析で使用されるために示された SSE 減衰値は非線形部材応答に起因するエネルギー吸収を考慮している。従って、ここで示された SSE 減衰値は部材の非線形挙動を明確に含む解析には使用できない。

(iii) 構造減衰

表 2.3.1-39 に SSE (Safe Shutdown Earthquake) の構造減衰の提案値を示し、表 2.3.1-40 に OBE (Operating Basis Earthquake) の減衰の提案値を示す。

表 2.3.1-39 Proposed structural damping values for a safe shutdown earthquake^{参 2-32}

Structre	Proposed Damping Value
Reinforced Concrete	7%
Reinforced Masonry	7%
Prestressed Concrete	5%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	4%
Bolted Steel with Bearing Connections	7%

Note: For steel structures with a combination of different connection types, use the lowest specified damping value, or as an alternative, use a "weighted average" damping value based on the number of each type present in the structure.

表 2.3.1-40 Proposed structural damping values for an operating basis earthquake^{参 2-32}

Structre	Proposed Damping Value
Reinforced Concrete	4%
Reinforced Masonry	4%
Prestressed Concrete	3%
Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections	3%
Bolted Steel with Bearing Connections	5%

(iv) 部材応答レベルと SSE 減衰との関係

部材応答レベルと SSE 減衰との関係について、以下の記載がある。

「SSE を含む荷重の組合せに対して、予想される部材応答が適用される許容応力を大幅に下回る場合もあり得る。等価粘性減衰比は部材応答レベルに依存することが示されているため、表 2.3.1-39 で示された SSE 減衰値が予想された部材応答と整合しない可能性とより小さい減衰値が適切であることを考慮する必要がある。

従って、表 2.3.1-39 で示された SSE 減衰値を使用することの妥当性を評価し、必要であれば減衰値を減らして再解析するための指針を示す。

- (1) SSE を含む荷重の組合せによる大部分の応力が、少なくとも部材の許容応力の 80% であれば SSE 減衰を地震応答解析に使用することは適切であり許容される。
- (2) SSE を含む荷重の組合せによる大部分の応力が、許容応力の 80%未満である場合、SSE 減衰値を使用すると、地震荷重に対する構造物の応答を過少に予測する可能性がある。この場合、構造評価と応答スペクトルは表 2.3.1-40 に示された OBE 減衰値を使った地震応答解析に基づく必要がある。
- (3) (2)の代替案として、申請者／ライセンサーは表 2.3.1-40 に示された OBE 減衰値より大きく、最初に使用された SSE 減衰値より小さい減衰値を用いるプラント固有の根拠を提出することができる。」^{参 2-32}

c) ASCE Standard 43-05, "Seismic Design Criteria For Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities", 2005 年^{参 2-33}

この資料は原子力施設の構造、システム、装置の耐震設計基準について記載されている。その中で線形弾性解析のモデル化に用いる構造部材の減衰定数が示されている。

REGULATORY GUIDE 1.61 の SSE に対する減衰定数は Response Level 2、OBE に対する減衰値は Prestressed concrete structure が 2% となっているのを除いて、Response Level 1 となっている。

表 2.3.1-41 Specified Damping Values for Dynamic Analysis ^{参 2-33}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

表 2.3.1-42 Estimating Damping Response Level ^{参 2-33}

著作権者から利用承諾を得
ていないため非表示

De : 非地震荷重を含む応答

C : 許容値

(5) 分析

以下に、a) 減衰定数（減衰の設定に関係）、b) 振幅依存性（減衰の設定に関係）、c) 算定方法による減衰定数のばらつき（減衰定数の評価に関係）、d) 地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）、その他、減衰に関する観点から、e) 複雑さによる減衰定数の増分、f) BWR 型原子炉建屋と PWR 型原子炉建屋の違い、についてまとめる。

a) 減衰定数

- ・実機起振機試験、地震観測、常時微動から算定された減衰定数

実機起振機試験、地震観測、常時微動から算定された減衰定数は、地盤－建物相互作用の影響を含んでいるため、参 2-16 の 30%（NS 方向）、40%（EW 方向）のように支持地盤のせん断波速度が小さいサイトでは、減衰定数が大きく評価される。

実機起振機試験については、ほぼすべての原子力発電所サイトで実施されており、日本建築学会の「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書^{参 2-15}では、「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。」^{参 2-15}とまとめられている。

- ・模型試験体を用いた試験から評価された減衰定数

模型試験体を用いた試験から評価された減衰定数は、地盤－建物相互作用の影響と新規制基準適合性に係わる審査会合資料の中で記述のある「構造の複雑さによる減衰」が含まれていないが、鉄筋コンクリート部材は非線形材料であるため、参 2-21 等で示されるように振幅依存性について注意が必要である。

参 2-25 では PCCV の減衰定数は 2%前後、参 2-26 参では RCCV の減衰定数はせん断で 5.67%となっている。

- ・地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数

地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数は、地盤－建物相互作用を含まないが、「構造の複雑さによる減衰」を含み、振幅依存性による増加は地震による建物の応答レベルの形で影響している。通常、地震による原子炉建屋や原子炉補助建屋の応答が強非線形範囲に入っていることはないと考えられるので、いわゆる弾性領域にあると考えられる。

日本建築学会の「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書^{参 2-15}によれば、建屋の減衰定数は 2%～5%が多く用いられており、PWR 型 PCCV では 2%が採用されている。

新規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料では、「建屋減衰定数 5%を用いて地震観測記録がおおむね再現できることが確認された。」^{参 2-1}、「建屋減衰定数 5%と 3%の結果を比較した場合、減衰 5%の結果のほうが減衰 3%の結果よりも観測記録により整合する結果となっている。」^{参 2-1}と記載されている。

参 2-18 等では質点系モデルが用いられ 3%が用いられている。また、参 2-70 の 3 次元 FEM モデルを用いた解析では 3%が用いられている。

参 2-20 は水平方向 7%、上下方向 5%を用いているが、埋込み効果が含まれているた

め、建屋の減衰定数より大きいと考えられる。

- ・振動台試験シミュレーションで用いられている減衰定数

振動台試験シミュレーションで用いられている減衰定数は、地盤－建物相互作用、「構造の複雑さによる減衰」を含まず、振幅依存性による増加は加振による模型試験体の応答レベルの形で影響している。質点系モデルを用いた参 2-24 では 2%、3 次元 FEM モデルを用いた解析では参 2-28、参 2-29 では 3%、参 2-72 では 1.1%が用いられている。

b) 振幅依存性

- ・地震観測からの検討

地震観測からの検討では、応答レベルの小さい領域での減衰定数と考えられる。

新規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料では、女川原子力発電所 2 号機及び 3 号機、川内原子力発電所 1 号機 外部遮蔽建屋、高浜発電所 3 号機、伊方発電所 3 号機の検討結果から、建屋応答が大きくなると建屋減衰定数が大きくなることを指摘している。

参 2-18 では文献の図から基礎上の最大加速度に応じて、1%程度～4%程度と読める。同じく、参 2-21 では、内部コンクリートで 2%程度～5%程度、外周コンクリート壁で 1%程度～3%程度と読める。

- ・模型試験体を用いた検討

参 2-22～参 2-24 では、破壊に近い領域までの応答に対して検討されており、その領域では、7%から 10%以上と報告されている。

参 2-29 では JEAG4601 のせん断のスケルトンカーブの第 2 折れ点付近以降で、等価粘性減衰定数は塑性履歴減衰を含む場合 6～7%、塑性履歴減衰を余り含まない場合 4～5%程度と報告されており、新規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料でもこれを引用している。

参 2-27、参 2-28 では 3 次元非線形 FEM モデルを用いた解析が行われており、終局点近傍の解析では 3%より 1%の方が試験結果とよく一致しており、 6×10^{-3} を超えるような強非線形の状態においては、履歴減衰が増大するためと報告されている。

参 2-30、参 2-71、参 2-73 では 3 次元 FEM モデルを用いた等価線形解析が行われており、 4×10^{-3} 付近で減衰定数は 18.6%、 8×10^{-3} 付近まで 5%、それ以後、線形に増加していき 14×10^{-3} 付近で 10%となっている。

c) 算定方法による減衰定数のばらつき

算定方法によるばらつきを検討した文献は少なく、参 2-17 で、実機起振機試験、地震観測、常時微動によるばらつき、カーブフィットのさせ方によるばらつきについての記載がある。

実機起振機試験、地震観測、常時微動によるばらつきは、建物の応答レベルにより振幅依存性が影響していると考えられ、常時微動による減衰定数が 1%程度～5%程度と一番小さくなっていることは、これに整合している。

d) 地震応答解析モデル

質点系モデルが多く用いられている。部材の非線形特性は JEAG4601 が用いられている。減衰定数は地震観測シミュレーション、振動台試験のシミュレーションのような目的に応じた値を用いている。

3次元 FEM モデルは、初期剛性比例型が用いられており、減衰定数の値は 1.1%と 3% が用いられている。

e) 構造の複雑さによる減衰定数の増分

新規規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料では、構造の複雑さによる減衰定数の増分についての考察があり、以下のように記載されている。

「履歴減衰を含む RC 耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC 部の減衰定数は弾性域で 1%~4%程度、それを越えた付近で 5%~7%程度である。一方で、原子力発電所の振動試験及び地震観測記録に基づく減衰定数は、弾性域の非常に小さい応答レベルでも 1%~10%程度の減衰が得られている。これは、RC 耐震壁実験が、ボックス型 RC 耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁との接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。」²⁻¹

「PWR 型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ことが考えられる。」²⁻¹

これらを根拠に減衰定数の増分 2%程度以上を考慮している。

f) BWR 型原子炉建屋と PWR 型原子炉建屋の違い

日本建築学会の「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書²⁻¹⁵や新規規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料で指摘されているように、軟岩サイトにありかつ地盤に埋め込まれている場合の多い BWR 型原子炉建屋では、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、硬岩サイトにあり地盤に埋め込まれていない PWR 型原子炉建屋では、地盤への逸散減衰の影響が小さく、そのため、建物全体の振動系の各モードの減衰定数 h は、建物の構造種別に応じて設定した h とほぼ対応している。

PWR 型原子炉建屋では、構造壁や構造床の少ない外部遮蔽建屋や PCCV があり、複雑な構造の内部コンクリート等に比べて減衰定数が小さい傾向にあることがモード同定等によって示されている。

2.3.2 一般建築物の減衰定数に関する文献調査、分析^{参 2-34~参 2-68、参 2-76~参 2-79}

(1) 調査の概要

以下に、a) 減衰定数（減衰の設定に必要）、b) 振幅依存性（減衰の設定に必要）、c) 算定方法による減衰定数のばらつき（減衰定数の評価に関係）、d) 地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）についてまとめる。

a) 減衰定数

① 模型試験体試験^{参 2-34~参 2-36、参 2-63、参 2-65、参 2-66、参 2-76、参 2-79}

参 2-34、参 2-35 では模型試験体試験により、減衰定数を検討している。

参 2-34 はラーメン構造で、減衰定数は自由振動により算定している。その結果、コンクリートにヘアークラックが入る以前の減衰定数は $h \approx 0.024$ 、ヘアークラックの発生後、 $h \approx 0.029$ 、塑性域実験の1回目加振後、 $h=0.069$ 、塑性域実験の2回目加振後、 $h=0.081$ であったと報告されている。

参 2-35 は壁式構造で、減衰定数は対数減衰法により算定している。その結果、弾性域における減衰定数はほぼ1%前後でクラックが入ると3%前後であったと報告されている（図 2.3.2-1、表 2.3.2-1 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-1 壁式構造の模型試験体^{参 2-35}

表 2.3.2-1 壁式構造の試験条件と試験結果^{参 2-35}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

参 2-63 では、中空断面橋脚の加力試験から、減衰定数を評価している。減衰定数は、参 2-63 の図より塑性率 9 で 30%程度と読める。

参 2-65 では、橋脚模型の自由振動試験から減衰定数を検討している（減衰定数の値は振幅依存性を参照）。

参 2-66 では、同一設計・同時製作 16 体の RC 柱供試体の一斉加振実験を行うことにより、動的応答の不確定性を検討している。その結果、線形応答時の減衰定数は約 5%程度であり、構造設計時に標準的に用いられている値と近い結果を得たが、そのばらつきは大きい。一方、非線形応答時（最大応答時）は最大応答変位のばらつきが小さいことにも関連し、その等価減衰定数の変動係数は、約 6.5%と小さな結果を得たと報告されている。非線形応答時（最大応答時）の減衰定数は、参 2-66 の図に 11.2%と記載がある。

参 2-76 では、静的載荷試験から減衰定数を検討している。弾性範囲では、曲げ 0.5%、せん断 1.5%で弱非線形領域では 2%であったと報告されている。

参 2-79 では、実物大の 3 階建て鉄筋コンクリート造建物に対して、自由振動、強制振動、周囲振動、モード衝撃ハンマー試験などの動的試験を実施している（減衰定数の値は振幅依存性を参照）。

②振動台試験シミュレーション^{参 2-36、参 2-57、参 2-58}

参 2-36 では、質点系モデルを用いている。梁の履歴が武藤ループで瞬間剛性比例減衰 3%の場合が弱塑性域から強塑性域の広い応答範囲で層間変位に関して実験との適合性が比較的良かったと報告されている。

参 2-57 では立体架構モデルを用いている。減衰定数は瞬間剛性比例減衰 3%、復元力特性に劣化型 Tri-Linear モデルを用いたと報告されている^{図 2.3.2-2}。

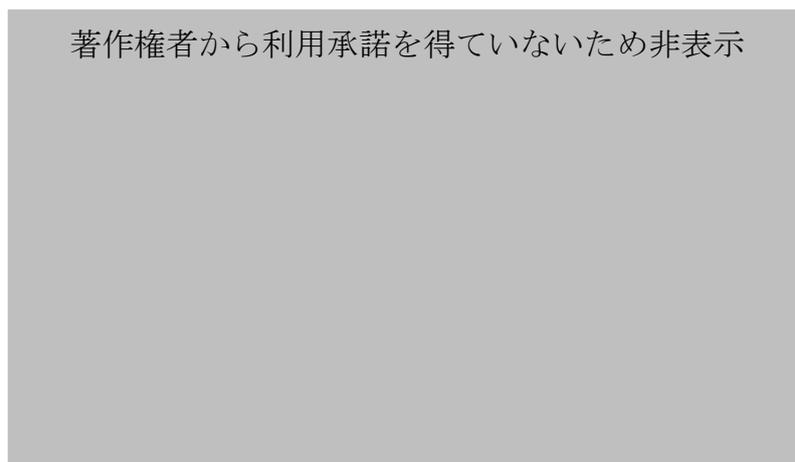


図 2.3.2-2 立体架構モデルの解析と実験の鉄筋降伏位置の比較^{参 2-57}

参 2-58 では陽解法を用いた 3 次元非線形 FEM モデルを用いている。減衰定数は質量比例型 3%を用いたと報告されている（図 2.3.2-3 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-3 3次元非線形 FEM の解析モデル^{参 2-58}

③起振機試験^{参 2-77}

参 2-77 では、鉄筋コンクリートせん断コアオフィスビル 11 階建て構造物に対して強制振動試験が行われている（減衰定数の値は振幅依存性を参照）。

④地震観測^{参 2-49~参 2-56}

参 2-49~参 2-56 では、時間領域の評価法を用いて、減衰定数を検討している。

参 2-49~参 2-53、参 2-55 では、初期あるいは 3.11 地震以前は 1%程度~2%程度、3.11 地震以後は 3%~5%程度あるいは 1%程度増加と報告されていたり、3.11 地震以前は平均値は 2~4%程度で 3.11 地震以後はわずかに増加と報告されている。

参 2-54 では、RC 造中低層建物の減衰定数は 2~5%の範囲に分布しており、経年変化に依存した明確な傾向は認められない（図 2.3.2-4 参照）。RC 造超高層建物の減衰定数は 1~4%程度の範囲に分布しており、平均的には 2%程度の値を示すと報告されている（図 2.3.2-5 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-4 RC 造中低層建物の減衰定数^{参 2-54}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-5 RC 造超高層建物の減衰定数^{参 2-54}

⑤常時微動^{参 2-46~参 2-48、参 2-65}

参 2-46 では、RC 造校舎を対象として常時微動測定を行い、減衰定数を微動計測結果から RD 法でランダム成分を除去し多モード成分を含む自由振動波形を AR 法によって分離し評価した。梁間方向で 3.68%と報告されている。

参 2-46 では、常時微動の分析に適したデータ解析手法を開発している。耐震補強前の建物の減衰定数の同定結果について、文献の図より 1%程度~2%程度と読めるが、ばらつきが大きく考察が難しいと報告されている。

参 2-48 では、集合住宅の減衰定数について、RD 法により算出した連成系の 1 次卓越振動数における減表定数は、短辺方向と長辺方向で、それぞれ 5.5~6.0%、6.5~6.9%となったと報告されている。

参 2-65 では、RC 橋脚の減衰定数について、参 2-65 の図から 2%程度~5%程度と読める。

⑥地震観測シミュレーション^{参 2-64}

参 2-64 では 3 次元非線形 FEM モデルを用い、解析ケースにより減衰定数 5%と 2.9%を用いたと報告されている。

⑦免震建物^{参 2-67、参 2-68}

参 2-67、参 2-68 では、免震構造の建物の減衰について種々の計測結果から検討している。

参 2-67 では、常時微動測定からカーブフィットを用いて算定した結果は X 方向 1.66%、Y 方向 2.47%、人力加振結果の自由振動波形から算定した結果は X 方向 1.6%程度、Y 方向 1.3%程度、地震観測記録からカーブフィットで算定した結果は X 方向 2.15%、Y 方向 1.68%と報告されている。

参 2-68 では、常時微動測定の結果から、伝達関数のカーブフィットを用いて算定した結果は NS 方向 1.6%、EW 方向 1.7%、パワースペクトルのカーブフィットを用いて算定した結果は NS 方向 1.9%、EW 方向 1.6%、RD 法を用いて算定した結果は NS 方向 1.6%、

EW 方向 1.3%、定常加振試験結果からスペクトルフィッティングを用いて算定した結果は NS 方向 3.4%~10.5%、自由振動実験の結果から対数減衰法を用いて算定した結果は NS 方向 2.1%~4.0%、EW 方向 1.5%~5.4%と報告されている。

b) 振幅依存性^{参 2-37~参 2-44、参 2-49~参 2-53、参 2-55、参 2-65、参 2-77、参 2-79}

参 2-37 では、実大実験結果から、壁式 RC 造の安全限界時の全体変形角はおよそ 1/200 ~1/100 と考えられ、その安全限界時近傍での履歴減衰定数は、おおむね 10%以上期待できると報告されている（図 2.3.2-6、図 2.3.2-7 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-6 試験体 5F1W 立面図（左 南側、中 北側、右 東側）^{参 2-37}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-7 実大試験結果の減衰定数-変形角図^{参 2-37}

参 2-38 では、既往の実験データを用いて、小変形サイクルから降伏点以後まで、等価粘性減衰定数を適切に評価する履歴特性のモデル化を行っている。減衰定数の範囲は、参 2-38 の図から、4%程度~10%程度（層間変形角 20×10^{-3} ）と読める。

参 2-39 では、部材の降伏変形および履歴減衰定数は所与としたときの、架構の降伏変形評価手法について提案している。減衰定数の範囲は、参 2-39 の図から、2%程度~13%程度（層間変形角 25×10^{-3} ）と読める。

参 2-40 では、経験した最大変形と振動特性に対する影響に着目した検討を行っている。その結果、初期の 1 次固有周期が 0.2 秒、0.4 秒、0.5 秒程度と特性の異なる 3 つの試験体において、1 次減衰定数はそれぞれ 8~10%、4~8%、1~2%程度であり、変形の増大に伴う増加傾向が見られ、非線形化後は、比較的小振幅の加振においても大きな値を示す傾向がある。

これは、非線形化に伴い生じる履歴減衰の影響が相対的に大きくなるためと考えられると報告されている（図 2.3.2-8、図 2.3.2-9 参照）。

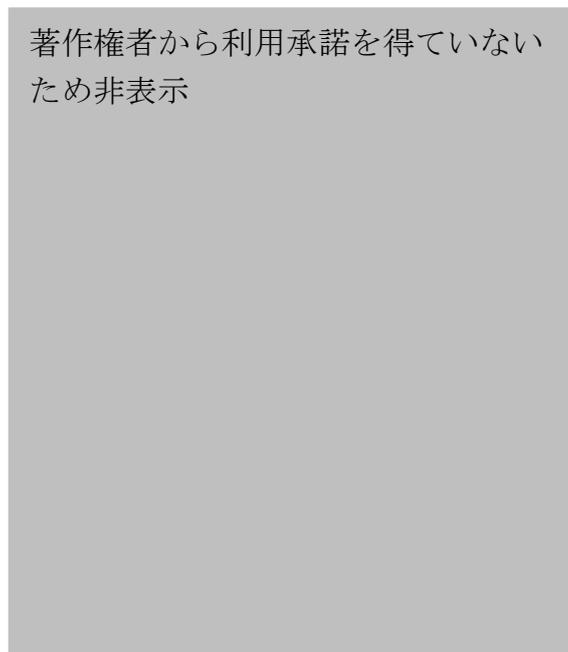


図 2.3.2-8 試験体 3 の形状^{参 2-40}

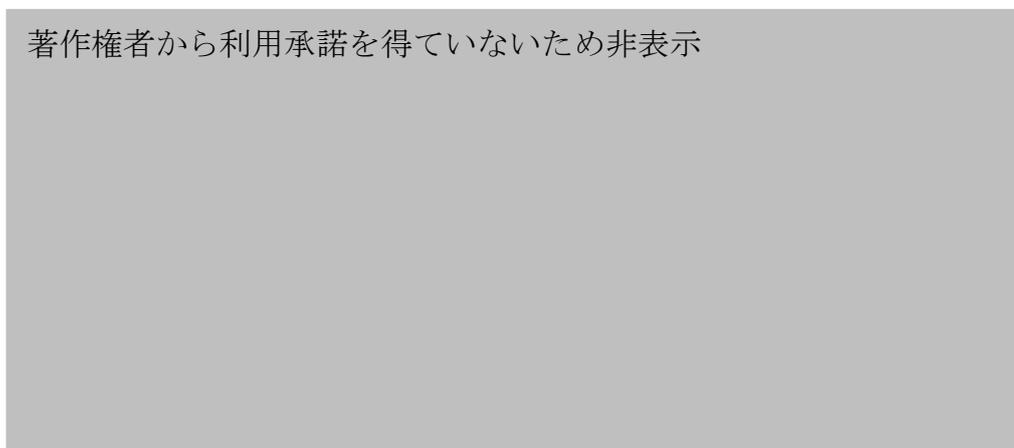


図 2.3.2-9 減衰定数と経験した平均変形角の関係^{参 2-40}

参 2-41 では、実験で得られた試験体応答から、等価線形化法に基づいて等価 1 自由度系の 1 次モード応答への縮約を行い、減衰定数と最大応答の関係について検討している。参 2-41 の図から、塑性率 6 で 20%程度と読める。

参 2-42～参 2-44 では、大型振動台実験結果からモード同定を用いて、減衰定数を検討している。その結果、水平・上下方向減衰定数は、水平・上下方向どちらも固有周期と比較してばらつきが大きかった。また、水平・上下方向ともに加振が進むにつれて、全体的に上昇する傾向が見られたと報告されている。減衰定数の範囲は、参 2-42 の図から、水平方向で 3%程度～25%程度、上下方向で 1%程度～8%程度と読める（図 2.3.2-10、図 2.3.2-11 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため
非表示

図 2.3.2-10 水平方向の振動特性^{参 2-42}

著作権者から利用承諾を得ていないため
非表示

図 2.3.2-11 上下方向の振動特性^{参 2-42}

参 2-49～参 2-53、参 2-55 では、地震観測から時間領域の評価手法を用いて、減衰定数を検討している。その結果、参 2-49 では初期あるいは 3.11 地震以前は 1%程度～2%程度、3.11 地震以後は 3%～5%程度あるいは 1%程度増加、参 2-53 では、3.11 地震以前は 1 次、2 次減衰定数ともに 1～6%程度で、3.11 地震後、1 次減衰定数は 1%程度増加、2 次減衰定数は 1%弱増加と報告されている（図 2.3.2-12、図 2.3.2-13 参照）。

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-12 減衰定数の振幅依存性^{参 2-49}

著作権者から利用承諾を得ていないため非表示

図 2.3.2-13 固有振動数および減衰定数の経年変化^{参 2-53}

参 2-51 では、東北地方太平洋沖地震時の地震観測記録から、高震度地域の鉄筋コンクリート (RC) または鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造の建物 27 棟をネットワークから抽出し、グリッドサーチ法を用いて、強震データの始動部、最強部、コーダ部の固有周期と減衰比を求めている。その結果、減衰比は 1% から 20% 以上とばらついていたと報告されている。

参 2-65 では、RC 橋脚の模型試験体と実橋の常時微動と人力加振から、減衰定数を算定し、振幅の増加に対して増加していると報告されており、参 2-65 の図から振幅の増加に対して、模型試験体で微小～2% 程度、実橋で 2% 程度～5% 程度と読める。

参 2-77 では、鉄筋コンクリートせん断コアオフィスビル 11 階建て構造物に対して、自由振動の異なる振幅に対して 1.49%、1.58%、1.72% であったと報告されている。

参 2-79 では、実物大の 3 階建て鉄筋コンクリート造建物の減衰定数に対して、準静的試験中の竣工時/ゼロドリフト、1.5% 全体ドリフト、3.0% 全体ドリフト (損傷状態) のドリフトレベル後の構造から得られた結果では、それぞれ、0.8%、2% 程度、2.5% 程度であったと報告されている。

c) 算定方法による減衰定数のばらつき 参 2-42～参 2-45

参 2-42 では、ARX モデルを使用して同定を行っており、フィルター幅により同定結果が変わるので注意が必要であると報告されている。

参 2-43、参 2-44 では、部分空間法と 1 入力 1 出力系 (SISO) 及び 1 入力多出力系 (SIMO) の ARX モデルの三種による同定結果を比較し、ARX (SIMO) が最も安定した値をとり、フィルタリングによるばらつきも小さかった。部分空間法は次数の取り方によって同定精度やばらつきが変化したと報告されている。

参 2-45 では、杭基礎建物の実大振動台実験に対して同手法を適用し、微小振幅から地盤・基礎の非線形化が進行する大振幅レベルの地震動を経験した際に、相互作用が建築物の振動特性に及ぼす影響について検討している。その結果、回転のみの相互作用を考慮する系を上部構造のみを考慮した基礎固定系と見なす場合には、建物の減衰定数を過大に評価する可能性があるとして報告されている。

d) 地震応答解析モデル 参 2-36、参 2-57～参 2-62、参 2-64、参 2-78

シミュレーション解析等で用いられている地震応答解析モデルは、参 2-36、参 2-59～参 2-62、参 2-78 では質点系モデルが用いられており、すべて非線形解析モデルが用いられている。復元力特性は武田型が多く、それ以外では武藤型が用いられている。

参 2-57 では、立体架構モデルが用いられ、復元力特性に劣化型 Tri-Linear モデルが用いられている。

参 2-58、参 2-64 では、3 次元非線形 FEM モデルが用いられている。

(2) 分析

以下に、a) 減衰定数（減衰の設定に関係）、b) 振幅依存性（減衰の設定に関係）、c) 算定方法による減衰定数のばらつき（減衰定数の評価に関係）、d) 地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）、その他、減衰に関する観点から e) 構造の複雑さによる減衰定数の増分、f) 建物規模による減衰の違い、g) 構造形式による減衰の違い、についてまとめる。

a) 減衰定数

- ・実機起振機試験、地震観測、常時微動から算定された減衰定数

実機起振機試験、地震観測、常時微動から算定された減衰定数は、地盤－建物相互作用の影響を含んでいる。そのため、減衰定数の幅が大きくなっている。

参 2-77、参 2-79 では実機起振機試験が行われており、減衰定数は 2%程度であると報告されている。

参 2-49～参 2-56 では、地震観測記録から、減衰定数は 1%程度～2%程度あるいは平均的に 2%～4%程度であると報告されている。

参 2-46～参 2-48、参 2-65 では、常時微動から、減衰定数は 1%程度～2%程度、4%程度、6%程度～7%程度と文献によるばらつきが大きい。

- ・模型試験体を用いた試験から評価された減衰定数

模型試験体を用いた試験から評価された減衰定数は、地盤－建物相互作用の影響と新規制基準適合性に係わる審査会合資料の中で記述のある「構造の複雑さによる減衰」が含まれていないが、鉄筋コンクリート部材は非線形材料であるため、参 2-37 等で示されるように振幅依存性について注意が必要である。

参 2-34、参 2-35 では、減衰定数はクラックが入る前は 1%ないしは 2%、クラックが入ると 3%、参 2-76 では、弾性範囲のせん断で 1.5%、弱非線形領域で 2%と報告されている。

減衰定数は、参 2-65 では、微小、参 2-66 では約 5%と報告されているが、参 2-66 の減衰定数の算定方法は他の文献と異なり、変位応答スペクトルにフィットする減衰定数として求めているので、他の文献と同じようには扱えない可能性がある。

- ・地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数

地震観測シミュレーションで用いられている減衰定数は、地盤－建物相互作用を含まないが、「構造の複雑さによる減衰」を含み、振幅依存性による増加は地震による建物の応答レベルの形で影響している。

参 2-64 で、解析ケースにより減衰定数 5%と 2.9%が用いられている。

- ・振動台試験シミュレーションで用いられている減衰定数

振動台試験シミュレーションで用いられている減衰定数は、地盤－建物相互作用、「構造の複雑さによる減衰」を含まず、振幅依存性による増加は加振による模型試験体の応答レベルの形で影響している。

参 2-36、参 2-57、参 2-58 で質点系モデル、立体架構モデル、3次元非線形 FEM モデルとそれぞれモデルは異なっているが、減衰定数 3%が用いられている。

b) 振幅依存性

・地震観測からの検討

参 2-49～参 2-53、参 2-55 では、初期あるいは 3.11 地震以前は 1%程度～2%程度、3.11 地震以後は 3%～5%程度あるいは 1%程度増加と報告されていたり、3.11 地震以前は 1 次、2 次減衰定数ともに 1～6%程度で、3.11 地震後、1 次減衰定数は 1%程度増加、2 次減衰定数は 1%弱増加と報告されている。

参 2-51 では、強震データの始動部、最強部、コーダ部の固有周期と減衰比を求めており、減衰比は 1%から 20%以上とばらついていたと報告されている。

・常時微動からの検討

参 2-65 では、RC 橋脚の減衰定数について、文献の図から 2%程度～5%程度と読める。

・模型試験体を用いた検討

参 2-37～参 2-44 の結果から、降伏点近傍で減衰定数 10%程度以上と考えられる。

参 2-65 では、模型試験体の常時微動から、微小～2%程度と読める。

参 2-79 では、実物大の 3 階建て鉄筋コンクリート造建物の減衰定数に対して、準静的試験中の竣工時／ゼロドリフト、1.5%全体ドリフト、3.0%全体ドリフト（損傷状態）のドリフトレベル後の構造から得られた結果では、それぞれ、0.8%、2%程度、2.5%程度であったと報告されている。

・起振機試験からの検討

参 2-77 では、鉄筋コンクリートせん断コアオフィスビル 11 階建て構造物に対して、自由振動の異なる振幅に対して 1.49%、1.58%、1.72%であったと報告されている。

c) 算定方法による減衰定数のばらつき

参 2-43、参 2-44 で、部分空間法と 1 入力 1 出力系(SISO)及び 1 入力多出力系(SIMO)の ARX モデルの三種による同定結果を比較し、ARX(SIMO)が最も安定した値をとり、フィルタリングによるばらつきも小さかった。部分空間法は次数の取り方によって同定精度やばらつきが変化すると報告されている。

フィルタリングによるばらつきに関して、参 2-42 で ARX を用いたモード同定でフィルター幅により同定結果が変わることが指摘されている。

d) 地震応答解析モデル

質点系モデルが多く用いられ、すべて非線形解析モデルが用いられている。減衰は瞬間剛性比例型または初期剛性比例型が用いられている。部材の復元力特性は武田型が多く、それ以外では武藤型が用いられている。これらの復元力特性は JEAG4601 で用いられている復元力特性と異なり、履歴ループによるエネルギー消費がある。

参 2-57 では、立体架構モデルが用いられ、復元力特性に劣化型 Tri-Linear モデルが用いられている。

参 2-58、参 2-64 では、3 次元非線形 FEM モデルが用いられている。

e) 構造の複雑さによる減衰定数の増分

構造の複雑さによる減衰定数の増分について、構造の複雑さによる減衰が含まれない模型試験体による検討と構造の複雑さによる減衰が含まれる地震観測による検討を比較してみる。

参 2-34、参 2-35 の模型試験体試験の検討では、弾性域で 1%程度、弱非線形で 2%、クラックが入ると 3%と報告されている。参 2-36、参 2-57、参 2-58 の振動台シミュレーション解析では 3%が用いられている。

一方、地震観測による検討では、参 2-49～参 2-53、参 2-55 では、初期あるいは 3.11 地震以前は 1%程度～2%程度、あるいは 3.11 地震以前は平均値は 2～4%程度であると報告されている。

地震観測による検討では地盤－建物相互作用の影響が入っていることを考慮すると、一般建築物では構造の複雑さによる減衰の増分は無いと考えられる。

f) 建物規模による減衰の違い

参 2-52 によると、中低層 RC、SRC 造建物の減衰定数は、3.11 地震前では微小振幅レベルで 2%程度となっている。

参 2-54 によると、RC 造中低層建物の減衰定数は 2～5%の範囲に分布しており、RC 造超高層建物の減衰定数は 1～4%程度の範囲に分布している。また、RC 造超高層建物の減衰定数より RC 造中低層建物の減衰定数の方がばらつきが大きい結果となっている。

これは、RC 造中低層建物の方が固有振動数が大きく、地盤－建物相互作用の影響が大きいためと考えられる。

g) 構造形式による減衰の違い

一般建築物の構造形式はほとんどがラーメン構造であり、振動台試験を対象とした参 2-40 等もラーメン構造を対象としたものがほとんどであった。模型試験を用いた振動台試験ではラーメン構造を対象とした参 2-34 と壁式構造を対象とした参 2-35 がある。これらの文献によると、ラーメン構造ではひび割れ以前 2%程度、壁式構造ではひび割れ以前 1%程度でどちらもクラックが入ると 3%、と報告されていることからラーメン構造と壁式構造の減衰定数に大きな違いはないと考えられる。

2.4 第2章のまとめ

2.3.1 及び 2.3.2 の結果を、a) 減衰定数（減衰の設定に関係）、b) 振幅依存性（減衰の設定に関係）、c) 算定方法による減衰定数のばらつき（減衰定数の評価に関係）、d) 地震応答解析モデル（シミュレーション解析に関係）、その他、減衰に関する観点から e) 構造の複雑さによる減衰定数の増分、f) BWR 型原子炉建屋と PWR 型原子炉建屋の違い、g) 建物規模による減衰の違い、h) 構造形式による減衰の違い、i) 対象とする応答レベルについてまとめる。

a) 減衰定数

i) 模型試験体

- ・ラーメン構造ではひび割れ以前 2%程度^{参 2-34}
- ・壁式構造ではひび割れ以前 1%程度^{参 2-35}
- ・どちらもひび割れ後 3%程度^{参 2-34、参 2-35}
- ・壁式構造で弱非線形領域（ $\gamma=0.7 \times 10^{-3}$ ）で 2%^{参 2-76}

ii) 常時微動から算定した減衰定数^{参 2-46 等}

- ・微小～数%程度とばらついている。地盤－建物相互作用の影響と振幅依存性の影響を含んでいるためと考えられる。

iii) 地震観測から算定した減衰定数^{参 2-49 等}

- ・微小～数%程度とばらついている。地盤－建物相互作用の影響と振幅依存性の影響を含んでいるためと考えられる。

iv) シミュレーション解析で用いられた減衰定数

- ・原子力発電施設では 3%程度^{参 2-18 等}
- ・一般建物では 3%^{参 2-36 等}

b) 振幅依存性

対象とする応答レベルにより異なる。

- ・微小な応答レベルでも振幅依存性がある^{参 2-18}。
- ・破壊に近いレベルでは 10%以上^{参 2-22}
- ・JEAG4601 のせん断のスケルトンカーブの第 2 折れ点付近以降で、履歴減衰を含む場合 6～7%^{参 2-29}

c) 減衰の算定方法によるばらつき

カーブフィット、ARX モデル、部分空間法等の手法によるばらつき、フィルタリングによるばらつき等がある。

- ・部分空間法は次数の取り方によって同定精度やばらつきが変化する^{参 2-42}。
- ・1 入力 1 出力系 (SISO) 及び 1 入力多出力系 (SIMO) の ARX モデルでは、ARX(SIMO) が最も安定した値をとり、フィルタリングによるばらつきも小さい^{参 2-43 等}。
- ・回転のみの相互作用を考慮する系を上部構造のみを考慮した基礎固定系と見なす場合には、建物の減衰定数を過大に評価する可能性がある^{参 2-45}。
- ・カーブフィットでも伝達関数を用いた場合とパワースペクトルを用いた場合で差がある^{参 2-17}。
- ・伝達関数を用いた場合でも、振幅のみと振幅と位相の両方をフィットさせた場合とも差

がある^{参 2-17}。

d) 地震応答解析モデル

- ・質点系モデルは原子力発電関連施設と一般建築物のどちらにも使われている。
- ・質点系モデルで用いられる減衰モデルは原子力発電関連施設ではモード減衰（歪エネルギー比例型減衰）、一般建築物では剛性比例型減衰が用いられる。
- ・質点系モデルに用いられる復元力特性は原子力発電関連施設では通常 JEAG4601 の方法（せん断の復元力特性にエネルギー吸収がない）、一般建築物では履歴によるエネルギー吸収の有る武田型、武藤型、劣化型 Tri-Linear モデルが用いられる^{参 2-36}等。
- ・一般建築物では質点系モデル以外に、立体架構モデルが用いられる^{参 2-57}。
- ・立体架構モデルの減衰モデルは剛性比例型減衰が用いられる。
- ・原子力発電関連施設では質点系モデル以外に、3次元 FEM モデルが用いられる^{参 2-23}等。
- ・3次元 FEM モデルの減衰モデルは Rayleigh 減衰、剛性比例型減衰が用いられる。
- ・3次元 FEM モデルの材料非線形の考慮の方法は、等価線形を用いた手法^{参 2-30}等と材料非線形モデル^{参 2-23}等を用いた手法がある。

e) 構造の複雑さによる減衰定数の増分

- ・原子力発電関連施設

新規規制基準適合性に係わる審査会合の会議資料で、構造の複雑さによる減衰定数の増分についての考察があり、以下のように記載されている。

「履歴減衰を含む RC 耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC 部の減衰定数は弾性域で 1%~4%程度、それを越えた付近で 5%~7%程度である。一方で、原子力発電所の振動試験及び地震観測記録に基づく減衰定数は、弾性域の非常に小さい応答レベルでも 1%~10%程度の減衰が得られている。これは、RC 耐震壁実験が、ボックス型 RC 耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁との接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。」^{参 2-1}

「PWR 型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ことが考えられる。」^{参 2-1}

これらを根拠に 2%程度以上の増加を考慮している。

- ・一般建築物

構造の複雑さによる減衰が含まれない模型試験体の減衰定数と構造の複雑さによる減衰が含まれる地震観測から算定した減衰定数を比較した結果では、いずれの結果も減衰定数は 3%程度であるため構造の複雑さによる減衰の増分は無いと考えられる。

f) BWR 型原子炉建屋と PWR 型原子炉建屋の違い

軟岩サイトにありかつ地盤に埋め込まれている場合の多い BWR 型原子炉建屋では、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、硬岩サイトにあり地盤に埋め込まれていない PWR 型原子炉建屋では、地盤への逸散減衰の影響が小さく、そのため、建物全体の振動系の各モードの減衰定数 h は、建物の構造種別に応じて設定した h とほぼ

対応している。

PWR 型原子炉建屋では、構造壁や構造床の少ない外部遮蔽建屋や PCCV があり、複雑な構造の内部コンクリート等に比べて減衰定数が小さい傾向にあることがモード同定等によって示されている。

g) 建物規模による減衰の違い

参 2-52 や参 2-54 によれば、RC 造中低層建物の減衰定数の方が RC 造超高層建物の減衰定数よりやや大きくなっており、RC 造超高層建物の減衰定数より RC 造中低層建物の減衰定数の方がばらつきが大きい結果となっている。これは、RC 造中低層建物の固有振動数が大きく、地盤-建物相互作用の影響が大きいためと考えられる。

h) 構造形式による減衰の違い

一般建築物の構造形式はほとんどがラーメン構造であり、振動台試験もラーメン構造を対象としたものがほとんどであった。模型試験を用いた振動台試験ではラーメン構造ではひび割れ以前 2%程度^{参 2-34}、壁式構造ではひび割れ以前 1%程度^{参 2-35}、どちらもクラックが入ると 3%、と報告されていることからラーメン構造と壁式構造の減衰定数に大きな違いはないと考えられる。

i) 対象とする応答レベル

- ・ 常時微動では微小
- ・ 地震観測では地震動の大きさによるが、小～中と考えられる。
- ・ 加振試験では試験計画による。

応答レベルが大きくなるに従って減衰定数も増加するため、減衰定数の値は常時微動<地震観測となっている。

2.5 第2章の参考文献

- 参 2-1 東京電力ホールディングス株式会社、別紙 4 地震応答解析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、<https://www.nra.go.jp/data/000331962.pdf>
- 参 2-2 日本原燃株式会社、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、<https://www2.nra.go.jp/data/000343757.pdf>
- 参 2-3 関西電力株式会社、高浜発電所 1 号機耐震性に関する説明書に係る補足説明資料、<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11242280/www.nsr.go.jp/data/000152863.pdf>
- 参 2-4 関西電力株式会社、高浜発電所 2 号機耐震性に関する説明書に係る補足説明資料、<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11242280/www.nsr.go.jp/data/000152930.pdf>
- 参 2-5 日本原子力発電株式会社、建物・構築物の地震応答解析についての補足説明資料 補足-400-2【地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数に関する検討】、<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000106768/000238227.pdf>
- 参 2-6 東北電力株式会社、別紙 4 地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数に関する検討、<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000151185/000317837.pdf>
- 参 2-7 東北電力株式会社、補足-610-1 建屋耐震評価に関する補足説明資料、<https://www.nra.go.jp/data/000375563.pdf>
- 参 2-8 四国電力株式会社、伊方発電所 3 号機耐震評価に係るコメント回答、https://warp.ndl.go.jp/collections/content/info:ndljp/pid/8945337/www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shinsa/data/ikata3/mendan/20140311_02shiryō_01.pdf
- 参 2-9 九州電力株式会社、資料-10 工事計画に係る補足説明資料（建物/構築物の地震応答解析についての補足説明資料）10-3 地震応答解析モデルに用いるプレストレストコンクリート造部及び鉄筋コンクリート造部の減衰定数に関する検討、<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000085934/000189350.pdf>
- 参 2-10 九州電力株式会社、川内 1 号機 緊急時対策棟接続工事設工認 説明事項リスト（耐震関係）9-6. 地震応答解析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、<https://www.da.nra.go.jp/file/NR000209261/000367268.pdf>
- 参 2-11 四国電力株式会社、伊方発電所 3 号機の耐震安全性評価、https://www.ensc.jp/release_info/2009/file/houkokusho-3_1.pdf
- 参 2-12 東北電力株式会社、補足-610-11 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料、<https://www.nra.go.jp/data/000377787.pdf>
- 参 2-13 東京電力株式会社、原子炉建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料、<https://www.nra.go.jp/data/000320027.pdf>
- 参 2-14 四国電力株式会社、伊方発電所 3 号機設計及び工事計画に係る説明資料（耐震性に関する説明書）（使用済燃料乾式貯蔵建屋）、<https://www2.nra.go.jp/data/000358270.pdf>
- 参 2-15 「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原子力施設の構造小委員会、2001 年 3 月
- 参 2-16 立花篤史他、ABWR 型原子炉建屋の起振機振動試験 :その 1 その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1133-1136、2004 年 8 月

- 参 2-17 伊澤忠明他、BWR 型原子炉建屋の小振幅レベルにおける振動特性について:その 1 その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1067-1070、2007 年 8 月
- 参 2-18 木下大他、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、pp.1099-1104、1998 年 9 月
- 参 2-19 尾形芳博他、2003 年宮城県沖の地震による女川発電所のシミュレーション解析について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1137-1138、2004 年 8 月
- 参 2-20 熊谷周治他、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による女川原子力発電所 3 号機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、pp.1273-1278、2012 年 10 月
- 参 2-21 坂本潤哉他、伊方発電所 3 号機建屋の地震観測記録を用いた ARX モデルによる減衰定数の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1067-1068、2015 年 9 月
- 参 2-22 遠藤孝夫他、動的外力を受ける鉄筋コンクリート柱部材の力学的特性に関する実験的研究、電力中央研究所報告、研究報告:384037、1986 年 6 月
- 参 2-23 中村紀吉他、BWR 型原子炉建屋全体模型振動台実験結果の塑性領域まで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、pp.803-808、1991 年 9 月
- 参 2-24 室井一夫他、原子炉建屋耐震壁の動的復元力特性:塑性時の減衰性能と解析用履歴モデル、日本建築学会構造系論文集、第 501 号、pp.65-72、1997 年 11 月
- 参 2-25 中村進他、コンクリート製原子炉格納容器耐震実証試験(I.PCCV 耐震実証試験):その 7 その 8、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1081-1084、1998 年 9 月
- 参 2-26 室井一夫他、コンクリート製原子炉格納容器耐震実証試験(II. RCCV 耐震実証試験)その 5、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1179-1180、1999 年 9 月、その 16、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1099-1100、2000 年 9 月
- 参 2-27 鳥田晴彦他、多方向入力を受ける RC 耐震壁の動的試験その 1~その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.275-280、2003 年 9 月
- 参 2-28 鳥田晴彦他、多方向入力を受ける RC 耐震壁の動的試験その 4~その 6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.285-290、2004 年 8 月
- 参 2-29 松本良一郎他、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、pp.613-618、2003 年
- 参 2-30 市原義孝他、鉄筋コンクリート等価線形解析の適用性検討:原子炉建屋耐震壁終局応答試験の三次元有限要素法シミュレーション解析、日本原子力学会和文論文誌、2021 年
- 参 2-31 U.S. Nuclear Regulatory Commission、REGULATORY GUIDE 1.61、"DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS"、NRC、2007 年 3 月
- 参 2-32 Brookhaven National Laboratory、NUREG/CR-6919、"Recommendations for Revision of Seismic Damping Values in Regulatory Guide 1.61"、NRC、2006 年 11 月
- 参 2-33 ASCE/SEI Standard 43-05、"Seismic Design Criteria For Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities"、American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute、2005 年

- 参 2-34 大谷圭一他、大型振動台による鉄筋コンクリート造ラーメンの耐震実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.729-730、1977年10月
- 参 2-35 五十嵐克哉他、鉄筋コンクリート構造物の減衰特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.377-378、1989年10月
- 参 2-36 中山尚之他、RC3層立体架構の2方向振動台実験その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1103-1104、1999年9月、その2、pp.699-700、2001年9月
- 参 2-37 平石久廣他、壁式鉄筋コンクリート構造建物の履歴減衰と変形分布に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第577号、pp.131-136、2004年3月
- 参 2-38 石川裕次他、RC造骨組み架構の履歴特性モデル、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.2、pp.1015-1020、2005年
- 参 2-39 浅井竜也他、RC造建物の降伏変形評価手法の提案とその震動台実験に基づく検証、日本建築学会構造系論文集、第87巻、第795号、pp.464-474、2022年5月
- 参 2-40 東城峻樹他、大型震動台実験に基づくRC造建物の振動特性の分析、日本建築学会構造系論文集、第82巻、第741号、pp.1695-1705、2017年11月
- 参 2-41 土佐内優介他、大型振動台実験による等価1自由度系の減衰定数と最大応答変形に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.251-252、2018年9月
- 参 2-42 久保一晴他、大型震動台実験に基づくRC造建物の上下振動特性の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.143-144、2021年9月
- 参 2-43 中村尚弘他、大型振動台実測データに基づくRC建物の水平・上下方向の振動特性の同定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.861-862、2022年9月
- 参 2-44 浜井勇樹他、大型震動台実測データに基づく水平・上下方向の振動特性の同定、日本建築学会中国支部研究報告集、pp.247-250、2022年3月
- 参 2-45 東城峻樹他、大型振動台実験に基づく地盤一建物の動的相互作用を考慮したRC造建物の振動特性の分析、日本建築学会構造系論文集、第88巻、第808号、pp.920-931、2023年6月
- 参 2-46 壁谷澤寿成他、実測に基づく鉄筋コンクリート造建物の減衰の定量化、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.1015-1020、2006年
- 参 2-47 金澤健司、常時微動計測に基づく大型構造物の振動特性評価技術—稼働中の設備や工事によるノイズに埋もれた微小振動にも適用可能な高精度なシステム同定法の開発—、電力中央研究所報告、総合報告:NO5、2009年8月
- 参 2-48 大川出他、常時微動等を利用した集合住宅の振動特性の評価、建築研究資料、No.122、2009年12月
- 参 2-49 森下真行他、長期間の地震観測記録に基づくRC造超高層建物の動特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.695-696、2012年9月
- 参 2-50 永野正行他、2011年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性、日本地震工学会論文集、第12巻、第4号、pp.4_65-4_79、2012年

- 参 2-51 T. Kashima et.al., Change of Dynamic Characteristics of RC/SRC Buildings During the 2011 Great East Japan Earthquake, 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 2014 年 7 月
- 参 2-52 中村尚弘他、振幅依存性を考慮した中低層 RC, SRC 造建物の水平 1 次振動特性、日本建築学会構造系論文集、第 81 巻、第 721 号、pp.471-481、2016 年 3 月
- 参 2-53 杉野文哉他、長期間の地震観測記録に基づく SRC 造建物の振動特性の変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.497-498、2017 年 8 月
- 参 2-54 森下真行他、近年の知見に基づく建築物の減衰と固有周期に関する検討 その 3 RC 系建物の経年変化の分析 (RC 造中低層および超高層建物)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.511-512、2017 年 8 月
- 参 2-55 杉野文哉他、長期間の地震観測記録に基づく SRC、RC 造建物の振動性状評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.197-198、2018 年 9 月
- 参 2-56 郡司和弥他、強震観測記録に基づく構造種別の異なる中低層建物の振動特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.201-202、2018 年 9 月
- 参 2-57 池田周英他、耐震構造での解析と実験結果の比較—震災時における建物の機能保持に関する研究開発 (その 13) 解析結果と実験結果に対する考察—震災時における建物の機能保持に関する研究開発 (その 14)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.989-992、2009 年 8 月
- 参 2-58 武田慈史他、実大 6 層 RC 建物の振動台実験結果への陽解法衝軍解析コードの適用性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.227-228、2011 年 8 月
- 参 2-59 藤原圭康他、大型震動台実験による RC 造建物を対象とした時刻歴応答解析の解析精度に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.465-466、2020 年 9 月
- 参 2-60 浮田紳二他、構造物の振動特性に及ぼす初期減衰モデルと履歴モデルの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.141-142、2017 年 8 月
- 参 2-61 浮田紳二他、構造物の 1 次、2 次振動特性に及ぼす履歴モデルの影響評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.43-44、2018 年 9 月
- 参 2-62 梁川幸盛他、構造設計で利用される履歴モデルの等価減衰定数に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.389-390、2019 年 9 月
- 参 2-63 湯川保之他、中空断面鉄筋コンクリート高橋脚の耐震性能、土木学会論文集、No. 613/V-42、pp.103-120、1999 年 2 月
- 参 2-64 有賀義明、地震観測記録に基づく既設ダムの地震時挙動の三次元再現解析、日本地震工学会論文集、第 7 巻、第 2 号、pp.130-143、2007 年
- 参 2-65 竹嶋竜司他、異なる振動レベルにおける RC 橋脚を有する橋梁の振動特性の変化に関する研究、土木学会論文集 A1、Vol.70、No.4、pp.130-139、2014 年
- 参 2-66 高橋良和他、縮小 RC 橋脚模型 16 対の一斉震動実験に基づく地震応答特性の定量的評価、土木学会論文集 A1、Vol.72、No.1、pp.176-191、2016 年
- 参 2-67 山崎崇寛他、伊方発電所事務所免震棟の起振機加振試験その 1~その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.223-228、2012 年 9 月

- 参 2-68 吉田和彦他、神奈川大学 23 号館(免震棟)および 1 号館の地震的挙動その 1~その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.807-812、2001 年 9 月
- 参 2-69 Yoshihiro Ogata et.al.、SIMULATION ANALYSIS OF EARTHQUAKE RESPONSE OF NUCLEAR POWER PLANT TO THE 2003 MIYAGI-OKI EARTHQUAKE、18th SMiRT、pp.3270-3277、2005 年 8 月
- 参 2-70 KUMAGAI Takahiro et.al.、Simulation Analysis using 3-D Nonlinear FEM model for Onagawa Unit 2 Control Building at the time of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku、23th SMiRT、2015 年 8 月
- 参 2-71 Mohamed-Bachir HOCINE et.al.、Equivalent Linear response of reinforced concrete structures under seismic loading、24th SMiRT、2017 年 8 月
- 参 2-72 Junya Sakamoto et.al.、Effectiveness investigation of the seismic response analysis of a reactor building using three-dimensional nonlinear FEM、25th SMiRT、2019 年 8 月
- 参 2-73 Guillaume Hervé-Secourgeon et.al.、Equivalent linear calculation of dynamic civil structure response: a new efficient and robust approach、25th SMiRT、2019 年 8 月
- 参 2-74 Hyeon-Keun Yang et.al.、SHAKING TABLE TEST FOR ELASTIC DAMPING RATIO OF RC WALLS WITH ASPECT RATIO OF 0.6 AND 1.0、25th SMiRT、2019 年 8 月
- 参 2-75 Takaki Tojo et.al.、SEISMIC RESISTANCE EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH COMPLEX PLANAR SHAPES、26th SMiRT、2022 年 7 月
- 参 2-76 Katsuya IGARASHI、"DAMPING CHARACTERISTICS OF RC SHEAR WALL IN THE WEAK NONLINEAR RANGE"、12th WCEE、2000 年 1 月、2 月
- 参 2-77 John BUTTERWORTH et.al.、"EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MODAL DAMPING FROM FULL SCALE TESTING"、13th WCEE、2004 年 8 月
- 参 2-78 Nobuyuki Izumi et.al.、"SEISMIC RESPONSE OF RC HIGH-RISE BUILDINGS IN JAPAN CONSIDERING INTERNAL VISCOUS DAMPING"、14th WCEE、2008 年 10 月
- 参 2-79 F. Consuegra et.al.、"VARIATION OF DYNAMIC PROPERTIES WITH DISPLACEMENT IN A 3-STORY REINFORCED CONCRETE FLAT PLATE STRUCTURE"、14th WCEE、2008 年 10 月