

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-03-0600-8-3_改6
提出年月日	2021年11月9日

補足-600-8-3 建屋-機器連成解析モデルにおける原子炉本体の基礎の非線形復元力特性等の設定に関する補足説明資料

目次

1.	はじめに	1
2.	RPV ペDESTALの構造概要	1
2.1	RPV ペDESTALの構造	1
2.2	RPV ペDESTALの設計フロー及び今回工認の変更点	5
2.3	RPV ペDESTALの構造強度評価	5
2.4	先行プラントとの RPV ペDESTALの構造の比較	7
3	詳細化の目的と効果	9
3.1	詳細化の目的	9
3.2	詳細化の効果	10
4.	RPV ペDESTALのスケルトンカーブの設定方法	13
4.1	せん断力-せん断変形角関係 ($Q-\gamma$ 関係)	13
4.1.1	第1折点の設定	14
4.1.2	第2折点の設定	15
4.2	せん断力-せん断変形角関係の履歴特性	16
4.3	曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ 関係)	17
4.3.1	第1折点の設定	18
4.3.2	第2折点の設定	19
4.3.3	今回工認におけるスケルトンカーブの設定方法	20
4.4	曲げモーメント-曲率関係の履歴特性	21
5.	評価に適用する RPV ペDESTALのスケルトンカーブ	22
5.1	使用材料の物性値	22
5.2	スケルトンカーブの設定方法	23
5.3	せん断力のスケルトンカーブ	27
5.4	曲げモーメントのスケルトンカーブ	32
5.5	RPV ペDESTALの剛性に対する影響確認	37
	別紙-1 RPV ペDESTALの復元力特性の設定の考え方及び妥当性検証	
	別紙-2 地震応答解析モデルにおける RPV ペDESTALの減衰定数	
	別紙-3 SC 規程を参考にした RPV ペDESTALのスケルトンカーブ導出過程	
	別紙-4 SC 規程を参考に作成したスケルトンカーブに基づく試験体の荷重変位特性の 作成方法	
	別紙-5 既往試験の概要, 信頼性及び実機への適用性	
	別紙-6 コンクリートせん断ひび割れ後の RPV ペDESTALの支持性能	
	別紙-7 コンクリートせん断ひび割れ後の剛性評価の理論式	

別紙-8 隔壁方式の鋼板コンクリート構造に関する理論式と試験結果の比較

別紙-9 地震応答解析における RPV ペデスタル下部の扱いについて

別紙-10 RPV ペデスタル復元力特性の直線近似の影響検討

別紙-11 復元力特性の設定における温度に応じた材料物性値の設定

: 今回提出範囲

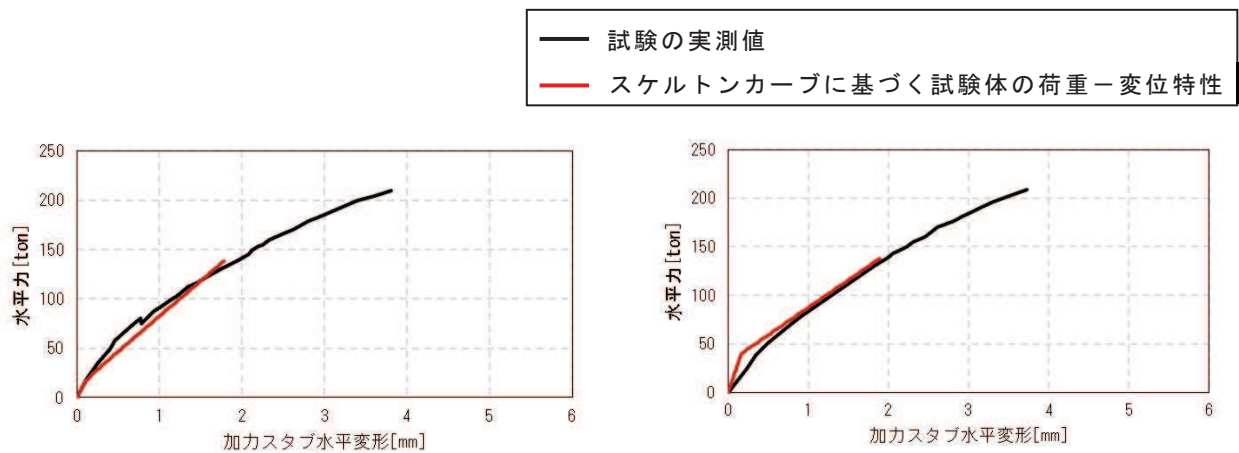
RPV ペデスタル復元力特性の直線近似の影響検討

1. はじめに

RPVペデスタルのスケルトンカーブは、曲げ、せん断ともに第1折点を内部コンクリートのひび割れが生じる点、第2折点を鋼板が降伏する点として2直線で近似しており、第1折点を越えた範囲では剛性が一定との仮定に基づいている。

一方、実現象としては第1折点で初期ひび割れが生じた後も、荷重の増加に伴い内部コンクリートのひび割れは徐々に増加していく。ひび割れの増加はコンクリートの剛性低下を意味することから、第1折点から第2折点の間の区間は直線で近似するよりも、徐々に剛性すなわちスケルトンカーブの勾配が低下する曲線で近似する方が実現象に近いと考えられる。

以上を踏まえ、RPVペデスタルについて曲線近似したスケルトンカーブを作成し、直線近似との比較により影響検討を行うこととする。なお、図1-1に示すように、曲げ及びせん断のうち、せん断変形については、直線近似したスケルトンカーブに基づく荷重－変位特性が加力試験の実測値を上回っていることから、影響検討は曲げ変形についてのみ実施する。



(a) 曲げ変形の比較

(b) せん断変形の比較

図 1-1 荷重-変形関係の比較

2. 曲線近似したスケルトンカーブの作成方法

RPVペデスタルの曲げの第2折点は，断面の鋼板及びコンクリートを等価断面に置き換えてモデル化したファイバーモデルを用いて鋼板が降伏状態に至る際の曲げモーメント及び曲率を求めている。スケルトンカーブの曲線近似は，第2折点の算出と同様の手法で曲げモーメント及び曲率の関係を求め，プロットすることにより行う。

3. 影響検討

図3-1に，曲線近似及び直線近似のスケルトンカーブを示す。第1折点を超えた範囲において，曲線近似として作成したRPVペデスタルのスケルトンカーブは上に凸の形状で，直線近似のものに比べて曲げモーメントが大きく算出されることを確認した。

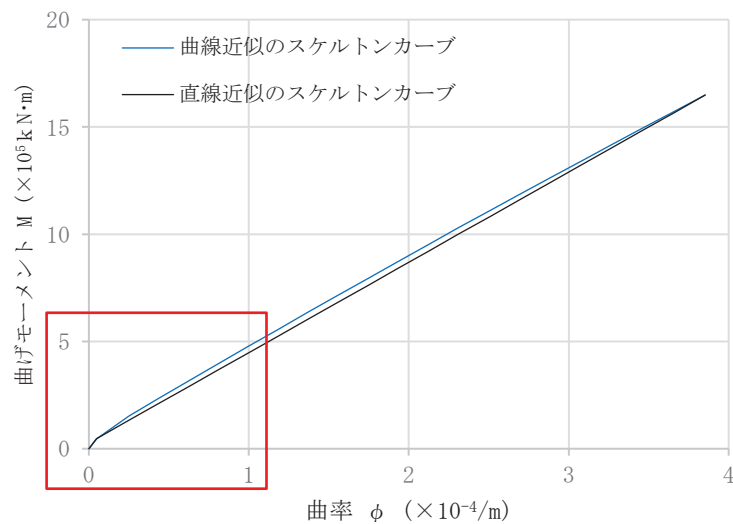


図 3-1 RPV ペデスタル（要素④）の曲線近似と直線近似との比較（NS 方向）

図3-2に、図3-1の赤線部の拡大図を示す。直線近似のスケルトンカーブ上に、基準地震動 $S_s - D2$ における応答値をプロットし、同じ曲率における曲線近似のスケルトンカーブ上の値を参照すると、曲線近似による値は、直線近似に比べ、約6.5%大きい値が得られた。

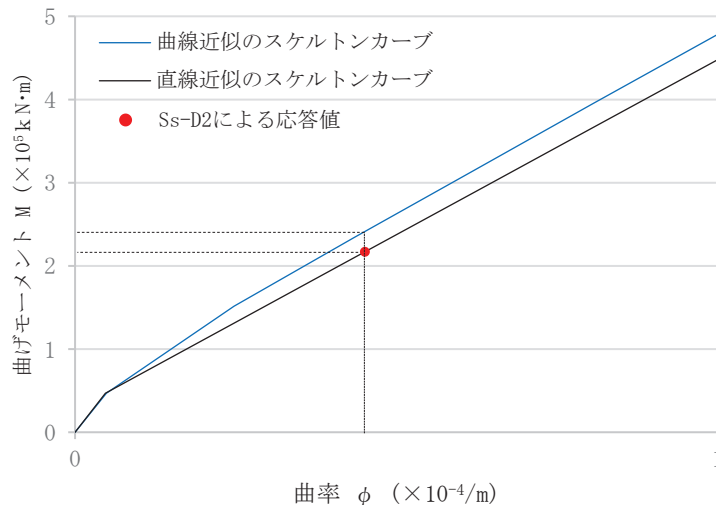


図 3-2 RPV ペDESTAL (要素④) の曲線近似と直線近似との比較 (拡大図)

4. 設計への反映方針

直線近似による変形量を設計に用いる場合は、同じ荷重レベルに対して大きい変形量を与えることになり安全側の設計となる。一方、直線近似による荷重を設計に用いる場合は、同じ変形量に対して小さい荷重を与えることになる。

曲線近似のスケルトンカーブを用いた場合の応答は、地震応答解析により得られるため、図3-1に示す曲線近似と直線近似の比は純粋な荷重比にはならないものの、直線近似では表現できていない不確実性を表すものと考えられる。

以上を踏まえ、設計においては、RPVペDESTALの地震応答解析から得られる地震荷重に対して、直線近似による不確実性を考慮し、曲線近似のスケルトンカーブを包絡するように設定した折線のスケルトンカーブ(曲線包絡スケルトンカーブ)を用いることとする。曲線包絡スケルトンカーブを設計に用いる場合、直線近似のスケルトンカーブ(影響検討条件)を用いた場合と比較して、同じ変位に対して荷重が大きくなるため、保守的な設計となる。なお、今回工認で曲線包絡スケルトンカーブを設定したRPVペDESTALにおいて、ドライウェル床面(O.P.)を基準としたRPVペDESTAL頂部(O.P.)の地震時の相対変位は5mm程度、原子炉しゃへい壁頂部(O.P.)における相対変位は20mm程度である。原子炉建屋から原子炉格納容器及び原子炉しゃへい壁を貫通し、原子炉圧力容器に接続されるような配管に対しては、補足説明資料「補足-600-40-10 管の耐震評価における相対変位の考慮方法について」に示すとおり、原子炉建屋と原子炉しゃへい壁の応答変位差の最大値に原子炉しゃへい壁と原子炉圧力容器の応答変位差の

最大値を加えたものを入力して評価を実施している。これらの応答変位差の最大値は同時刻で発生するものではないものの、同時に逆方向に変位が生じたものと仮定して足し合わせることによって保守的な評価となっているため、スケルトンカーブの近似方法の違いによる変位の差が評価に及ぼす影響は小さいと考えられる。

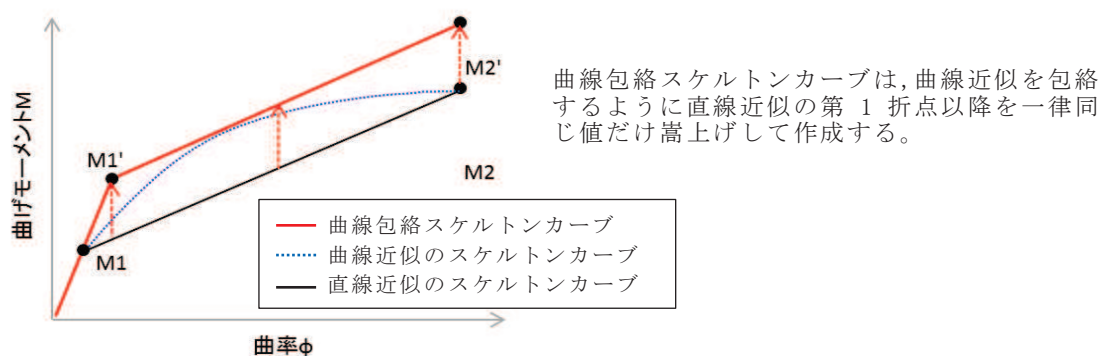


図 4-1 曲線包絡スケルトンカーブの概念図

直線近似のスケルトンカーブを適用した場合と曲線包絡スケルトンカーブを適用した場合との比較を実施した。影響検討に当たっては、大型機器系モデルにおいて、RPV ペDESTALに発生する荷重（モーメント）が大きい基準地震動 S s - D 2 での評価結果を比較する。評価に用いた直線近似のスケルトンカーブを表 4-1、表 4-2、図 4-2 及び図 4-3 に、地震荷重の比較を表 4-3 及び表 4-4 に、床応答曲線の比較を図 4-4 から図 4-7 に示す。

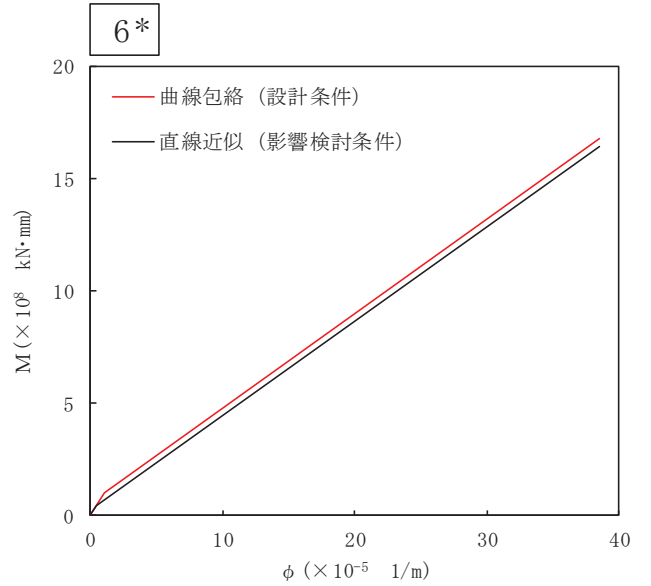
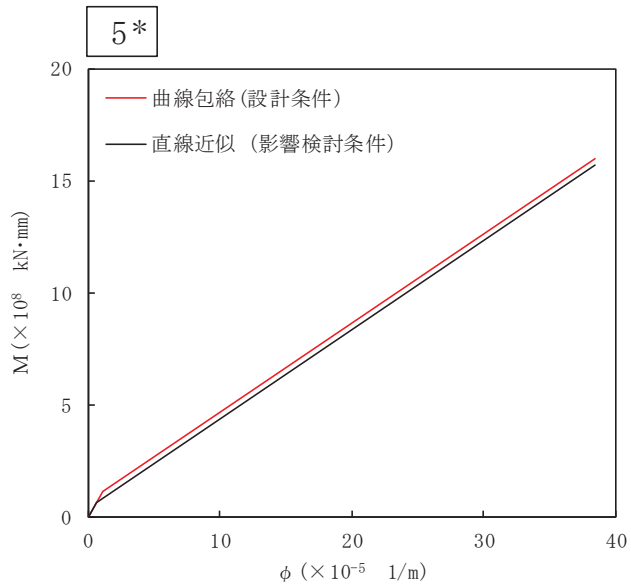
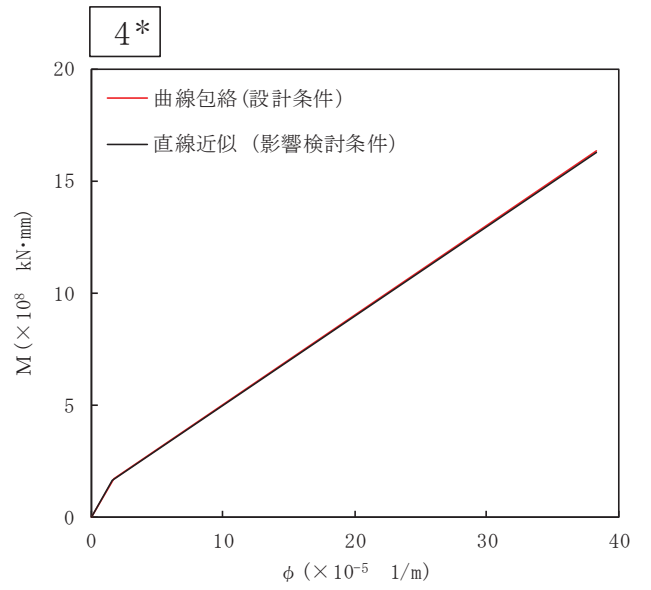
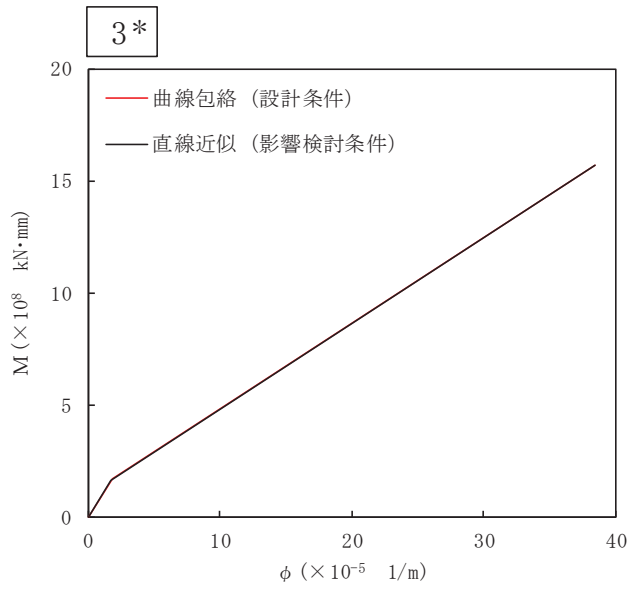
比較の結果から、地震荷重は±3%程度の変動であり、評価に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、直線近似のスケルトンカーブを適用した場合の床応答曲線は、設計条件の床応答曲線におおむね包絡されており、評価に及ぼす影響がないと考えられる。

表 4-1 曲げモーメントのスケルトンカーブ (M- ϕ 関係)
(直線近似 (影響検討条件), NS 方向)

質点番号	要素番号	M ₁ ($\times 10^8$ kN \cdot mm)	ϕ_1 ($\times 10^{-5}$ 1/m)	M ₂ ($\times 10^8$ kN \cdot mm)	ϕ_2 ($\times 10^{-5}$ 1/m)
7	6	0.4687	0.4710	16.49	38.53
6					
5	5	0.6326	0.6570	15.70	38.49
	4	1.641	1.623	16.30	38.39
4	3	1.632	1.689	15.67	38.50
3					

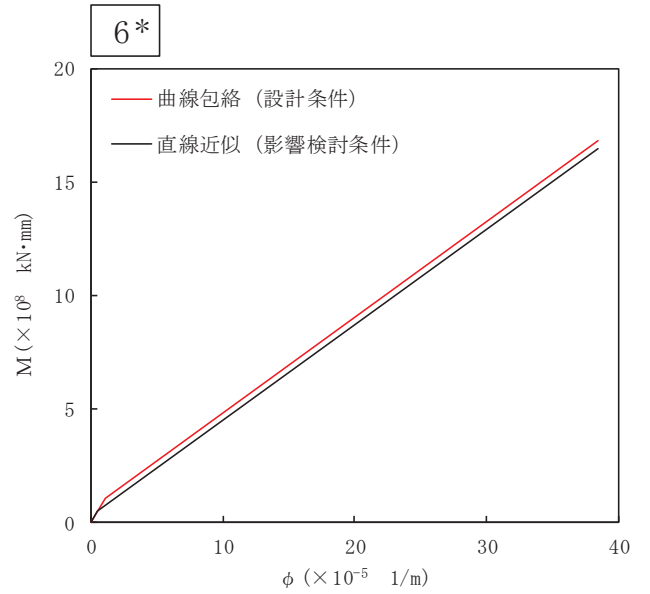
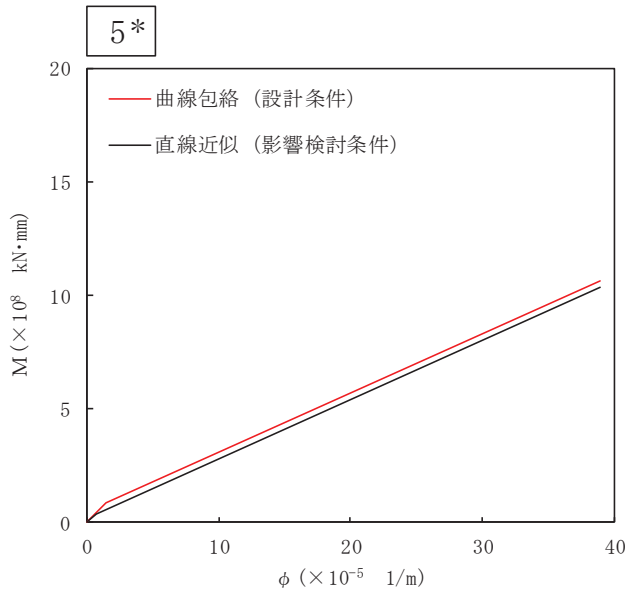
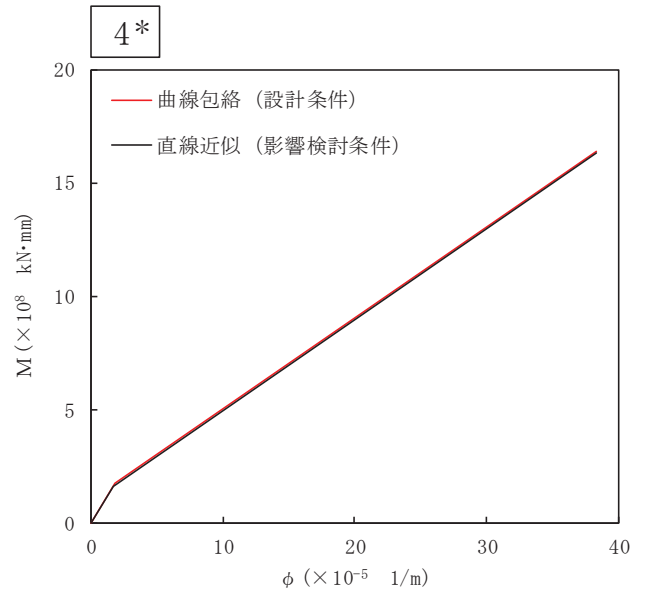
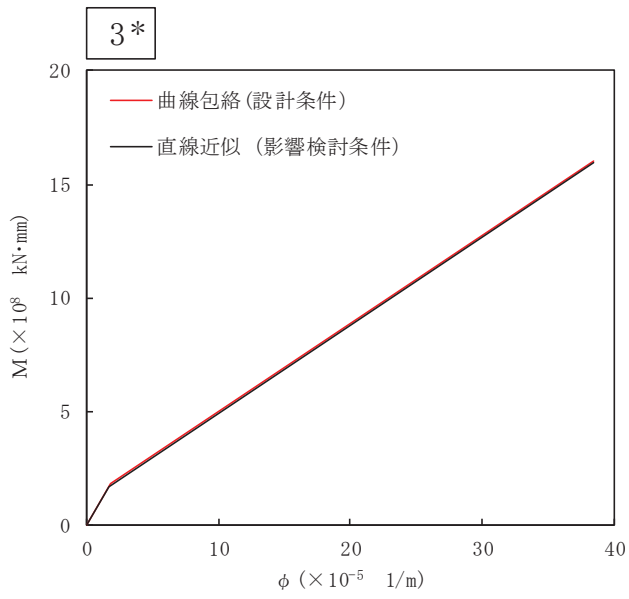
表 4-2 曲げモーメントのスケルトンカーブ (M- ϕ 関係)
(直線近似 (影響検討条件), EW 方向)

質点番号	要素番号	M ₁ ($\times 10^8$ kN \cdot mm)	ϕ_1 ($\times 10^{-5}$ 1/m)	M ₂ ($\times 10^8$ kN \cdot mm)	ϕ_2 ($\times 10^{-5}$ 1/m)
7	6	0.4687	0.4705	16.49	38.53
6					
5	5	0.4100	0.6575	10.38	38.90
	4	1.641	1.623	16.30	38.39
4	3	1.663	1.688	15.95	38.49
3					



注記* : 各図上に記載の番号は, 表 4-1 の要素番号に対応

図 4-2 M- ϕ 関係の比較 (NS 方向)



注記* : 各図上に記載の番号は、表 4-2 の要素番号に対応

図 4-3 M- ϕ 関係の比較 (EW 方向)

表 4-3 せん断力の比較

構造物	標高 O. P. (m)	せん断力 $\times 10^2$ (kN)		比率 (B) / (A)
		曲線包絡 (A) (設計条件)	直線近似 (B) (影響検討条件)	
原子炉圧力容器		5.36	5.45	1.02
		21.3	21.3	1.00
		42.1	42.5	1.01
		30.5	30.7	1.01
		32.7	31.8	0.98
		64.8	64.2	1.00
		89.3	89.0	1.00
		111	111	1.00
原子炉本体の基礎		28.3	28.1	1.00
		30.2	30.0	1.00
		32.2	32.1	1.00
		34.1	34.0	1.00
原子炉しゃへい壁		68.4	67.6	0.99
		66.4	64.3	0.97
		86.1	83.7	0.98
		125	123	0.99
		166	164	0.99
原子炉格納容器		2.86	2.86	1.00
		5.56	5.56	1.00
		32.2	32.9	1.03
		39.8	40.4	1.02
		262	263	1.01
		273	274	1.01
		281	281	1.00
		294	294	1.00
		298	299	1.01
	314	315	1.01	

表 4-4 モーメントの比較

構造物	標高 O. P. (m)	モーメント $\times 10^6$ (kN \cdot mm)		比率 (B)/(A)
		曲線包絡 (A) (設計条件)	直線近似 (B) (影響検討条件)	
原子炉压力容器		0	0	-
		1.47	1.50	1.03
		6.12	6.15	1.01
		14.1	14.2	1.01
		16.9	16.5	0.98
		27.9	27.2	0.98
		46.7	45.6	0.98
		59.5	58.3	0.98
		77.8	76.5	0.99
原子炉本体の基礎		199	195	0.98
		222	217	0.98
		261	256	0.99
		321	316	0.99
		385	379	0.99
原子炉しゃへい壁		0	0	-
		18.9	18.7	0.99
		35.3	34.2	0.97
		53.3	51.6	0.97
		76.8	74.6	0.98
		122	119	0.98
原子炉格納容器		0	0	-
		0.657	0.658	1.01
		1.85	1.85	1.00
		6.21	6.31	1.02
		17.8	18.1	1.02
		129	130	1.01
		207	207	1.00
		343	343	1.00
		484	485	1.01
		543	544	1.01
	587	588	1.01	

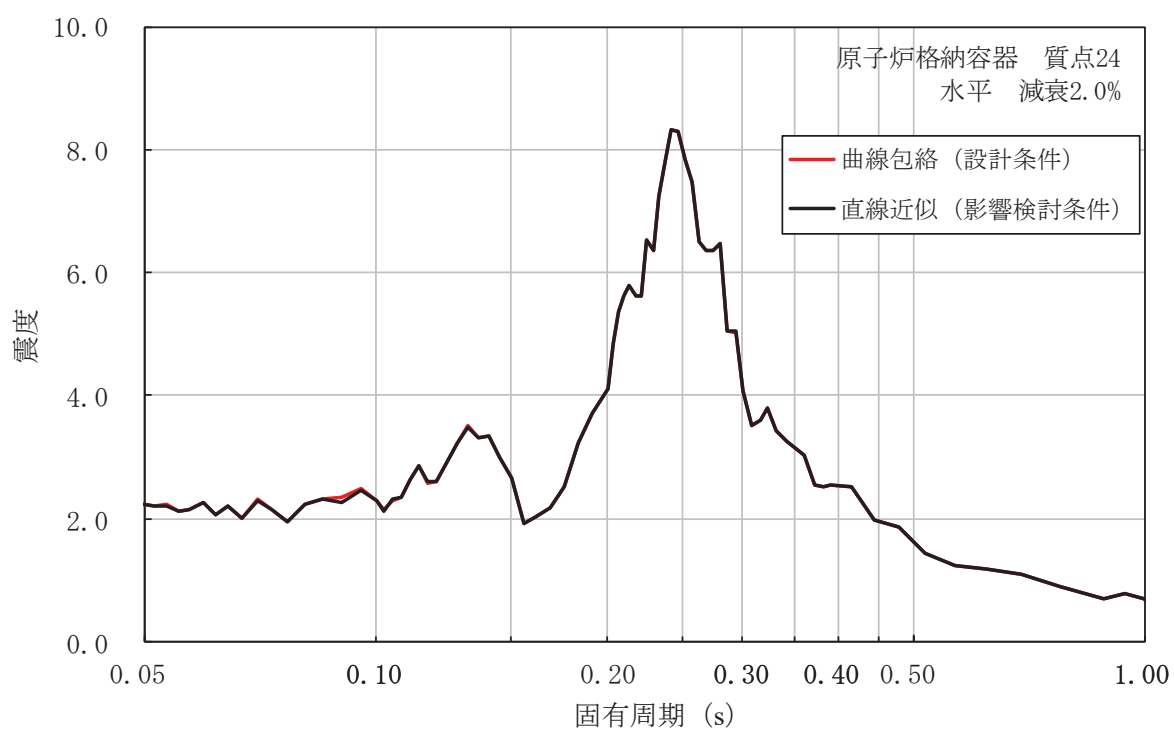


図 4-4 床応答曲線の比較（原子炉格納容器）

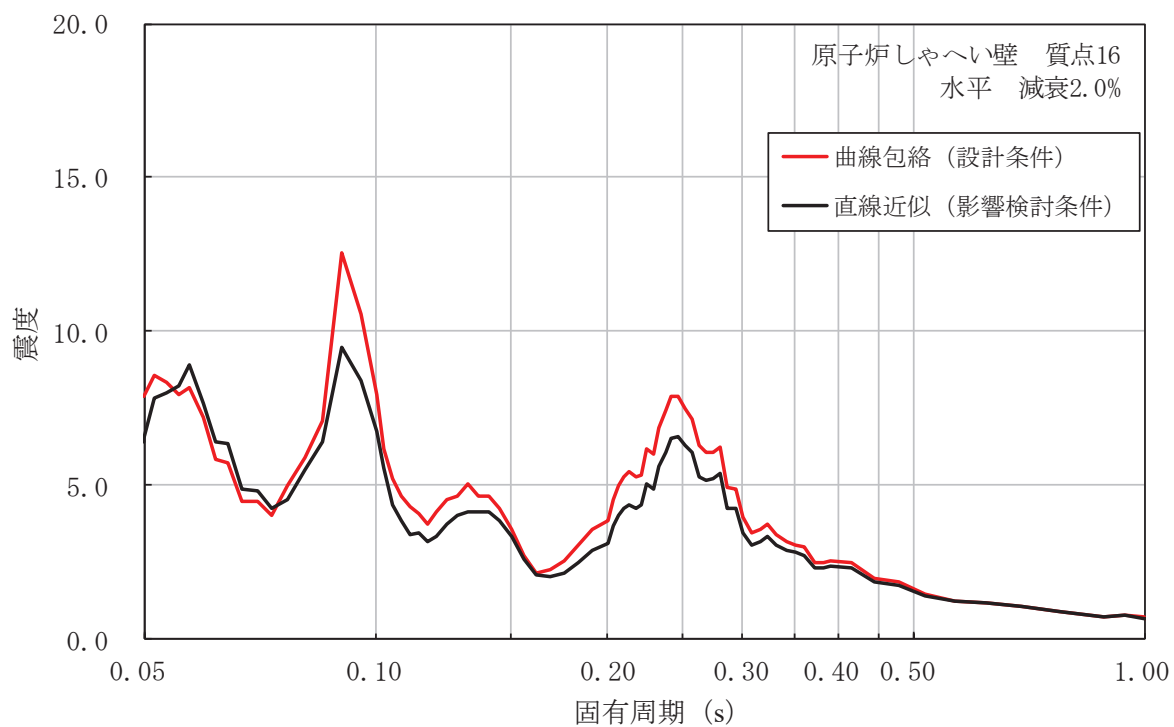


図 4-5 床応答曲線の比較（原子炉しゃへい壁）

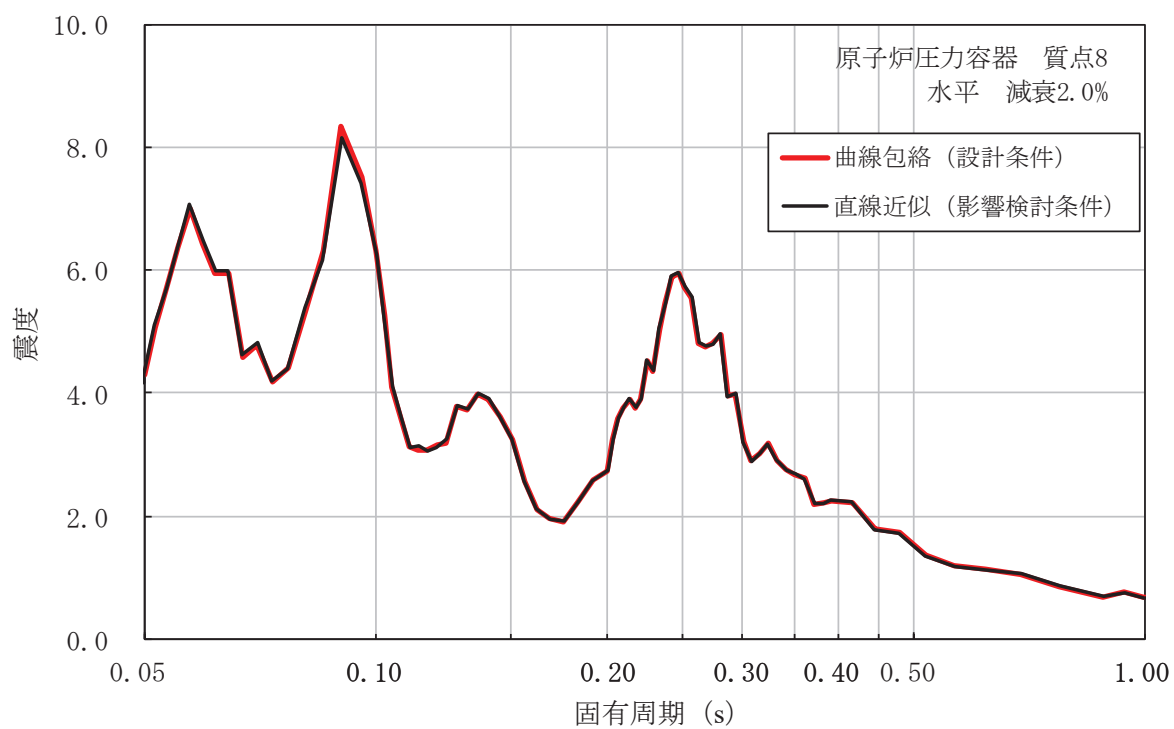


図 4-6 床応答曲線の比較 (原子炉压力容器)

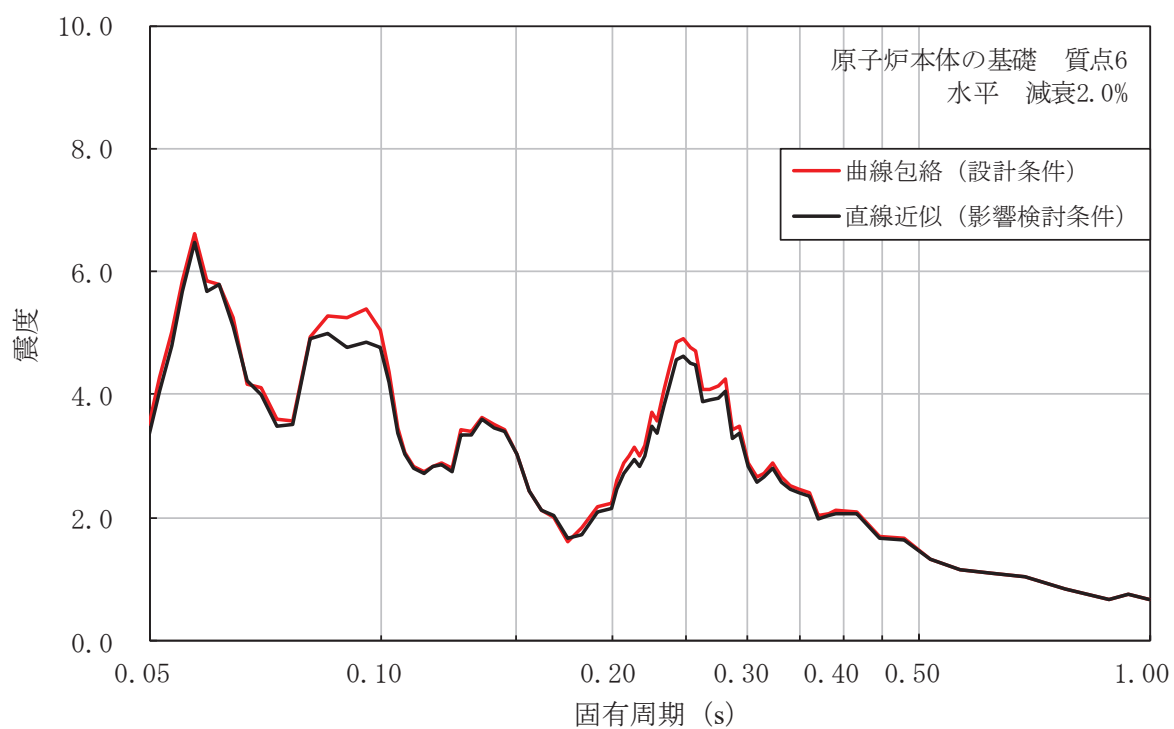


図 4-7 床応答曲線の比較 (原子炉本体の基礎)