

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点や防護上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-19-0610-20_改 23
提出年月日	2021年11月8日

記載の適正化範囲については、修正箇所のみ抜粋

補足－610－20 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について

## 目 次

### 資料 1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について

1. 対象設備
2. 屋外重要土木構造物等の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容
3. 安全係数
4. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定及び解析手法選定
  - 4.1 断面選定の方針
  - 4.2 各施設の構造上の特徴と断面選定の方針の整理
  - 4.3 解析手法選定の方針
  - 4.4 軽油タンク連絡ダクト
  - 4.5 排気筒連絡ダクト
  - 4.6 原子炉機器冷却海水配管ダクト
  - 4.7 取水路（漸拡部）
  - 4.8 軽油タンク室
  - 4.9 軽油タンク室（H）
  - 4.10 海水ポンプ室
  - 4.11 取水口，貯留堰
  - 4.12 取水路（標準部）
  - 4.13 復水貯蔵タンク基礎
  - 4.14 ガスタービン発電設備軽油タンク室
  - 4.15 第3号機海水ポンプ室
5. 地盤物性及び材料物性のばらつきの考慮方法
6. 許容限界
7. ジョイント要素のばね設定
8. 隣接構造物のモデル化方針
9. 地震応答解析における構造物の減衰定数
10. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定
11. 等価剛性モデルの設定方針
12. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における地下水位及び内水位の設定

資料 2 軽油タンク連絡ダクトの耐震安全性評価

資料 3 排気筒連絡ダクトの耐震安全性評価

資料 4 原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）の耐震安全性評価

資料 5 原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の耐震安全性評価

資料 6 取水路（漸拡部）の耐震安全性評価

資料 7 軽油タンク室の耐震安全性評価

資料 8 軽油タンク室（H）の耐震安全性評価

資料 9 海水ポンプ室の耐震安全性評価

資料 10 取水口，貯留堰の耐震安全性評価

資料 11 取水路（標準部）の耐震安全性評価

資料 12 復水貯蔵タンク基礎の耐震安全性評価

資料 13 ガスタービン発電設備軽油タンク室の耐震安全性評価

資料 14 第 3 号機海水ポンプ室の耐震安全性評価

：記載適正化範囲

本補足説明資料は、耐震性に関する説明書のうち屋外重要土木構造物の耐震安全性評価についての内容を補足するものである本補足説明資料と添付書類との関連を以下に示す。

補足説明資料と添付書類との関連

<p>工事計画に係る補足説明資料 耐震性に関する説明書のうち 補足－610－20 【屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について】</p>	<p>該当添付書類</p>
<p>1. 対象設備</p>	<p>共通事項</p>
<p>2. 屋外重要土木構造物等の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容</p>	
<p>2.1 支持機能</p>	<p>共通事項</p>
<p>2.2 通水機能</p>	<p>共通事項</p>
<p>2.3 貯水機能</p>	<p>共通事項</p>
<p>2.4 止水機能</p>	<p>共通事項</p>
<p>2.5 屋外重要土木構造物等の耐震安全性に関する整理</p>	<p>共通事項</p>
<p>3. 安全係数</p>	<p>共通事項</p>
<p>4. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定及び解析手法選定</p>	
<p>4.1 断面選定の方針</p>	<p>共通事項</p>
<p>4.2 各施設の構造上の特徴と断面選定の方針の整理</p>	<p>共通事項</p>
<p>4.3 解析手法選定の方針</p>	<p>共通事項</p>
<p>4.4 軽油タンク連絡ダクト</p>	<p>VI-2-2-19 軽油タンク連絡ダクトの地震応答計算書</p>
<p>4.5 排気筒連絡ダクト</p>	<p>VI-2-2-27 排気筒連絡ダクトの地震応答計算書</p>
<p>4.6 原子炉機器冷却海水配管ダクト</p>	<p>VI-2-2-11 原子炉機器冷却海水配管ダクト(水平部)の地震応答計算書 VI-2-2-12-2 原子炉機器冷却海水配管ダクト(鉛直部)の耐震性についての計算書</p>
<p>4.7 取水路(漸拡部)</p>	<p>VI-2-10-4-4-1 取水路(漸拡部)の耐震性についての計算書</p>



4.8	軽油タンク室	VI-2-2-13 軽油タンク室の地震応答計算書
4.9	軽油タンク室 (H)	VI-2-2-15 軽油タンク室 (H) の地震応答計算書
4.10	海水ポンプ室	VI-2-2-7 海水ポンプ室の地震応答計算書
4.11	取水口, 貯留堰	VI-2-10-4-3 取水口の耐震性についての計算書
4.12	取水路 (標準部)	VI-2-10-4-4-2 取水路 (標準部) の耐震性についての計算書
4.13	復水貯蔵タンク基礎	VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書
4.14	ガスタービン発電設備軽油タンク室	VI-2-2-17 ガスタービン発電設備軽油タンク室の地震応答計算書
4.15	第3号機海水ポンプ室	VI-2-2-9 第3号機海水ポンプ室の地震応答計算書
5. 地盤物性及び材料物性のばらつきの考慮方法		
5.1	耐震安全性評価における解析ケース	共通事項
5.2	屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価における解析ケースの組合せ	共通事項
5.3	機器・配管系の耐震安全性評価に適用する解析ケース	共通事項
6. 許容限界		
6.1	許容応力度法による耐震安全性評価	共通事項
6.2	限界状態設計法による照査	共通事項
6.3	土木学会マニュアル2005の適用性	共通事項
7.	ジョイント要素のばね設定	共通事項
8.	隣接構造物のモデル化方針	共通事項
9. 地震応答解析における構造物の減衰定数		
9.1	時刻歴応答解析 (全応力解析) で設定する Rayleigh 減衰	共通事項
9.2	時刻歴応答解析 (有効応力解析) で設定する Rayleigh 減衰	共通事項
10. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定		
10.1	評価方針	共通事項
11.	等価剛性モデルの設定方針	共通事項

11.1	等価剛性モデルを設定する構造物	共通事項
11.2	等価剛性モデルの設定手順	共通事項
12.	屋外重要土木構造物等の耐震評価における地下水位及び内水位の設定	共通事項
12.1	地下水位の設定	共通事項
12.2	内水位の設定	共通事項

資料1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について


## 目 次

1. 対象設備	資料 1-1
2. 屋外重要土木構造物等の要求機能と要求機能に対する耐震評価内容	資料 1-2
2.1 支持機能	資料 1-2
2.2 通水機能	資料 1-3
2.3 貯水機能	資料 1-3
2.4 止水機能	資料 1-4
2.5 屋外重要土木構造物等の耐震安全性に関する整理	資料 1-5
3. 安全係数	資料 1-8
4. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定及び解析手法選定	資料 1-13
4.1 断面選定の方針	資料 1-13
4.2 各施設の構造上の特徴と断面選定の方針の整理	資料 1-16
4.3 解析手法選定の方針	資料 1-18
4.4 軽油タンク連絡ダクト	資料 1-22
4.5 排気筒連絡ダクト	資料 1-30
4.6 原子炉機器冷却海水配管ダクト	資料 1-46
4.7 取水路（漸拡部）	資料 1-57
4.8 軽油タンク室	資料 1-71
4.9 軽油タンク室（H）	資料 1-79
4.10 海水ポンプ室	資料 1-86
4.11 取水口，貯留堰	資料 1-98
4.12 取水路（標準部）	資料 1-108
4.13 復水貯蔵タンク基礎	資料 1-126
4.14 ガスタービン発電設備軽油タンク室	資料 1-133
4.15 第3号機海水ポンプ室	資料 1-140
5. 地盤物性及び材料物性のばらつきの考慮方法	資料 1-150
5.1 耐震安全性評価における解析ケース	資料 1-150
5.2 屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価における解析ケースの組合せ	資料 1-157
5.3 機器・配管系の耐震安全性評価に適用する解析ケース	資料 1-162
6. 許容限界	資料 1-166
6.1 許容応力度法による耐震安全性評価	資料 1-166
6.2 限界状態設計法による照査	資料 1-168
6.3 土木学会マニュアル 2005 の適用性	資料 1-178
7. ジョイント要素のばね設定	資料 1-186
7.1 せん断強度の設定	資料 1-189
7.2 ばね定数の設定	資料 1-192
8. 隣接構造物のモデル化方針	資料 1-194
9. 地震応答解析における構造物の減衰定数	資料 1-196

9.1	時刻歴応答解析（全応力解析）で設定する Rayleigh 減衰	資料 1-196
9.2	時刻歴応答解析（有効応力解析）で設定する Rayleigh 減衰	資料 1-202
10.	屋外重要土木構造物等の耐震評価における追加解析ケースの選定	資料 1-203
10.1	評価方針	資料 1-203
11.	等価剛性モデルの設定方針	資料 1-208
11.1	等価剛性モデルを設定する構造物	資料 1-208
11.2	等価剛性モデルの設定手順	資料 1-209
12.	屋外重要土木構造物等の耐震評価における地下水位及び内水位の設定	資料 1-220
12.1	地下水位の設定	資料 1-220
12.2	内水位の設定	資料 1-220

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価についての参考資料

- 参考資料 1 O. P. 14. 8m盤に分布する盛土・旧表土の液状化特性
- 参考資料 2 地中構造物の耐震性に支配的な要因の検討
- 参考資料 3 地震応答解析による断面選定の確認
- 参考資料 4 断層交差部の影響評価
- 参考資料 5 新設する構造物のコンクリートの圧縮強度の設定
- 参考資料 6 後施工せん断補強工法の適用性
- 参考資料 7 地中構造物への鉛直地震動の位相が与える影響
- 参考資料 8 等価剛性モデルにおける鉛直方向床応答への影響
- 参考資料 9 解析手法の選定（④全応力解析）の補足確認結果
- 参考資料 10 追加解析ケースの選定方法の詳細について
- 参考資料 11 女川原子力発電所における地盤の振動特性について
- 参考資料 12 ジョイント要素のばね定数の妥当性確認結果について
- 参考資料 13 三次元構造解析による耐震評価の照査時刻の妥当性確認方針
- 参考資料 14 浮上り評価について
- 参考資料 15 屋外重要土木構造物等におけるコンクリート初期剛性低下の機器・配管系への影響

 : 記載適正化範囲

参考資料 15 屋外重要土木構造物等におけるコンクリート初期剛性  
低下の機器・配管系への影響



## 目 次

1. 概要	資料 1- (参考) 15-1
2. 検討方針	資料 1- (参考) 15-1
3. 検討対象	資料 1- (参考) 15-2
4. 検討内容	資料 1- (参考) 15-4
5. 検討結果	資料 1- (参考) 15-51
6. まとめ	資料 1- (参考) 15-53

## 1. 概要

本資料は、屋外重要土木構造物等に対して建物・構築物で考慮しているコンクリートの初期剛性低下を考慮した場合の機器・配管系への影響について確認する。

なお、屋外重要土木構造物等の耐震性に支配的な要因である土圧は、構造物と周囲の地盤の剛性差により生じることから、構造物の剛性が低下し、地盤との剛性差が小さくなることは、耐震裕度が向上することとなるため、屋外重要土木構造物等の耐震性への影響検討は対象外とする。

## 2. 検討方針

機器・配管系への屋外重要土木構造物等におけるコンクリートの初期剛性低下による影響の考慮にあたっては、以下の資料に示す「コンクリート初期剛性低下を考慮した解析ケース（影響検討ケース）」の応答を求め「工認用解析ケース（基本ケース及び不確かさケース）」の地震応答解析結果と比較する。

- ・ 補足-610-16 【排気筒基礎の耐震性についての計算書に関する補足説明資料】
- ・ 補足-610-20 【屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について】
  - ・ 資料 2 軽油タンク連絡ダクトの耐震安全性評価
  - ・ 資料 3 排気筒連絡ダクトの耐震安全性評価
  - ・ 資料 4 原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）の耐震安全性評価
  - ・ 資料 7 軽油タンク室の耐震安全性評価
  - ・ 資料 8 軽油タンク室（H）の耐震安全性評価
  - ・ 資料 9 海水ポンプ室の耐震安全性評価
  - ・ 資料 12 復水貯蔵タンク基礎の耐震安全性評価
  - ・ 資料 13 ガスタービン発電設備軽油タンク室の耐震安全性評価

影響検討フローを図 2-1 に示す。

屋外重要土木構造物等にコンクリートの初期剛性低下を考慮した影響検討用解析ケースの応答から作成した耐震条件（以下「影響検討条件」という。）と工認用解析ケースの応答から作成した耐震条件（以下「設計条件」という。）を比較し、最大応答加速度及び床応答曲線の応答比率を作成する。作成した応答比率と検討対象設備の裕度（許容値／発生値）を用いた簡易評価（応答比率 $\leq$ 裕度であれば影響なし）を行う。

また、簡易評価で成立性を確認できなかった設備に対しては影響検討条件を用いた詳細評価（当該設備の耐震計算書と同様の評価手法（スペクトルモーダル解析など）による設備評価）を行う。

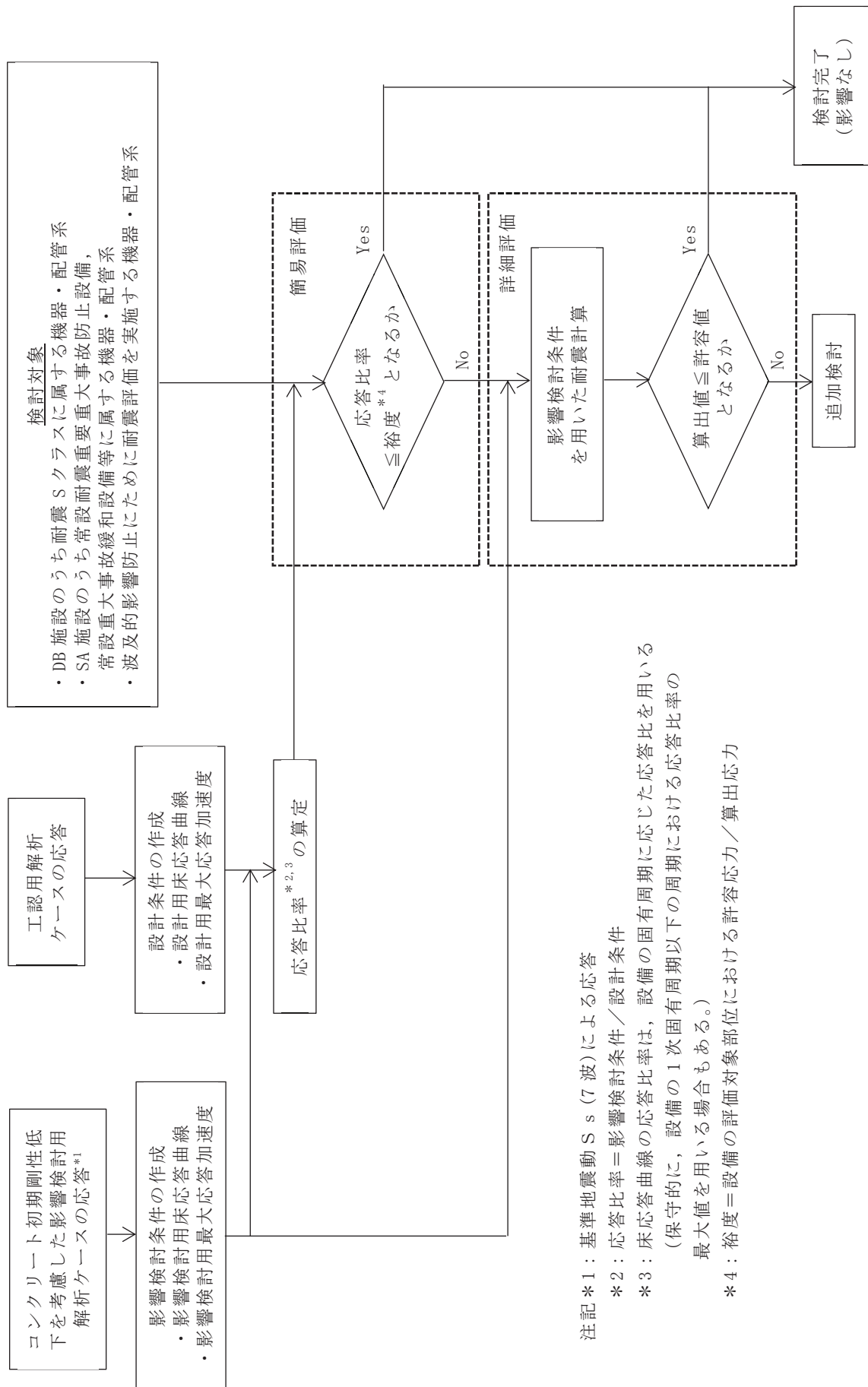
なお、相対変位による機器・配管系の耐震性への影響については、4.2 項に記載のとおり、影響検討条件の相対変位と設計条件の相対変位を比較すると、その大小関係は一定ではないが、設計条件を上回る場合であっても、相対変位の差異は 1mm 未満であるこ

とから影響は軽微であると判断し，最大応答加速度及び設計用床応答曲線を用いた影響検討を実施する。

### 3. 検討対象

屋外重要土木構造物等に設置される以下の機器・配管系を影響検討の対象とする。

- ・設計基準対象施設のうち，耐震重要度分類のSクラスに属する機器・配管系
- ・重大事故等対処施設のうち，常設耐震重要重大事故防止設備，常設重大事故緩和設備，常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類がSクラスのもの）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）に属する機器・配管系
- ・波及的影響防止のために耐震評価を実施する機器・配管系



注記\*1：基準地震動S<sub>s</sub>(7波)による応答  
 \*2：応答比率＝影響検討条件／設計条件  
 \*3：床応答曲線の応答比率は、設備の固有周期に応じた応答比を用いる  
 (保守的に、設備の1次固有周期以下の周期における応答比率の最大値を用いる場合もある。)  
 \*4：裕度＝設備の評価対象部位における許容応力／算出応力

図 2-1 屋外重要土木構造物等におけるコンクリート初期剛性低下を考慮した影響検討フロー

#### 4. 検討内容

##### 4.1 応答比率算定

機器・配管系の耐震計算に用いる条件の応答比率の算定方法及び応答比率を以下に示す。

##### 4.1.1 最大応答加速度

各屋外重要土木構造物等の各標高における最大応答加速度の比較結果（水平方向（NS/EW 方向別又は NS/EW 方向包絡）及び鉛直方向）を表 4-1～9 に示す。

影響検討条件の最大応答加速度が設計条件の最大応答加速度を一部上回ることを確認した。

##### (1) 復水貯蔵タンク基礎

表 4-1(1) 最大応答加速度の応答比率  
（基準地震動  $S_s$  , 1.2ZPA, 水平方向（NS/EW 方向包絡））

位置	標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
		①設計条件	②影響検討条件	
復水貯蔵タンク	21.362	4.60	4.52	0.99
	19.362	4.33	4.26	0.99
	17.402	4.06	4.00	0.99
	15.442	3.73	3.67	0.99
	13.482	2.87	2.83	0.99
	11.522	1.80	1.77	0.99
	9.562	1.21	1.18	0.98
しゃへい壁	20.600	2.21	2.44	1.11
	19.600	2.02	2.23	1.11
	17.800	1.73	1.75	1.02
	14.800	1.51	1.55	1.03
	13.250	1.43	1.45	1.02
	11.225	1.36	1.33	0.98
	9.200	1.20	1.18	0.99
バルブ室	14.800	2.40	2.43	1.02
	13.250	1.86	1.85	1.00
	11.225	1.45	1.44	1.00
連絡トレンチ	10.500	1.25	1.21	0.97

表 4-1(2) 最大応答加速度の応答比率  
 (基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

位置 名称	標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
		①設計条件	②影響検討条件	
復水貯蔵タンク	21.362	0.92	0.90	0.98
	19.362	0.92	0.90	0.98
	17.402	0.92	0.90	0.98
	15.442	0.92	0.90	0.98
	13.482	0.92	0.90	0.98
	11.522	0.92	0.90	0.98
	9.562	0.92	0.90	0.98
しゃへい壁	20.600	0.92	0.90	0.98
	19.600	0.92	0.90	0.98
	17.800	0.92	0.90	0.98
	14.800	0.92	0.90	0.98
	13.250	0.92	0.90	0.98
	11.225	0.92	0.90	0.98
	9.200	0.92	0.90	0.98
バルブ室	14.800	0.92	0.90	0.98
	13.250	0.92	0.90	0.98
	11.225	0.92	0.90	0.98
連絡トレンチ	10.500	0.92	0.90	0.98

(2) 海水ポンプ室

表 4-2(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.800	7.34	5.30	0.73
11.025	3.15	2.85	0.91
7.250	2.76	2.60	0.95
2.250	1.83	1.77	0.97
-0.550	1.88	1.75	0.94
-7.025	1.50	1.55	1.04
-9.800	1.18	1.30	1.11

表 4-2(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.800	1.56	1.30	0.84
11.650	1.17	1.23	1.06
7.250	1.03	1.06	1.03
2.250	0.94	0.94	1.00
-0.550	0.89	0.89	1.00
-6.400	0.82	0.84	1.03
-9.800	0.82	0.84	1.03

表 4-2(3) 最大応答加速度の応答比率  
 (基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (EW))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.800	7.34	5.30	0.73
11.025	3.15	2.85	0.91
7.250	2.76	2.60	0.95
2.250	1.83	1.77	0.97
-0.550	1.88	1.75	0.94
-7.025	1.50	1.55	1.04
-9.800	1.18	1.30	1.11

表 4-2(4) 最大応答加速度の応答比率  
 (基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.800	2.72	2.96	1.09
11.025	2.47	2.34	0.95
7.250	2.26	1.85	0.82
2.250	1.94	1.61	0.83
-0.550	1.48	1.30	0.88
-7.025	1.44	1.25	0.87
-9.800	1.44	1.25	0.87



(3) 原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）

表 4-3(1) 最大応答加速度の応答比率

（基準地震動  $S_s$ ，1.2ZPA，水平方向）

標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
-0.65	1.34	1.12	0.84
-4.75	1.36	1.31	0.97
-8.85	1.19	1.03	0.87

表 4-3(2) 最大応答加速度の応答比率

（基準地震動  $S_s$ ，1.2ZPA，鉛直方向）

標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
-0.65	1.11	1.12	1.01
-4.75	1.13	1.06	0.94
-8.85	1.02	0.97	0.96

(4) 軽油タンク室

表 4-4(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

位置	標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
		①設計条件	②影響検討条件	
タンク室	14.80	1.65	1.61	0.98
	9.50	1.31	1.30	1.00
ポンプ室	14.80	1.69	1.56	0.93
	9.50	1.30	1.33	1.03

表 4-4(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

位置	標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
		①設計条件	②影響検討条件	
タンク室	14.80	1.10	1.19	1.09
	9.50	0.99	0.95	0.96
ポンプ室	14.80	0.95	0.93	0.98
	9.50	0.91	0.89	0.98

(5) 軽油タンク室 (H)

表 4-5(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.80	2.16	2.13	0.99
6.40	1.72	1.36	0.80

表 4-5(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.80	1.33	1.36	1.03
6.40	1.03	1.00	0.98

(6) ガスタービン発電設備軽油タンク室

表 4-6(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
62.30	1.47	1.55	1.06
56.70	0.94	0.90	0.96

表 4-6(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
62.30	0.94	0.94	1.00
56.70	0.69	0.69	1.00

(7) 軽油タンク連絡ダクト

表 4-7(1) 最大応答加速度の応答比率

(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
12.1	1.79	1.52	0.85
10.5	1.56	1.34	0.86
9.5	1.31	1.20	0.92

表 4-7(2) 最大応答加速度の応答比率

(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
12.1	1.22	1.08	0.89
10.5	1.25	1.08	0.87
9.5	1.13	1.02	0.91

(8) 排気筒基礎

表 4-8(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向 (NS/EW 方向包絡))

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.80	1.69	1.64	0.98
10.41	1.56	1.49	0.96
6.60	1.48	1.35	0.92
1.00	1.25	1.17	0.94

表 4-8(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O. P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
14.80	0.99	0.94	0.95
10.41	0.96	0.92	0.96
6.60	0.91	0.90	0.99
1.00	0.85	0.85	1.00

(9) 排気筒連絡ダクト

表 4-9(1) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 水平方向)

標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
上床板	1.54	1.59	1.04
中間点	1.03	0.99	0.97
底板	1.11	1.12	1.01

表 4-9(2) 最大応答加速度の応答比率  
(基準地震動  $S_s$ , 1.2ZPA, 鉛直方向)

標高 O.P. (m)	最大応答加速度 ( $\times 9.80665\text{m/s}^2 \times 1.2$ )		応答比率 (②/①)
	①設計条件	②影響検討条件	
上床板	1.17	1.18	1.01
中間点	1.13	1.10	0.98
底板	0.83	0.78	0.94

#### 4.1.2 床応答スペクトル

各屋外重要土木構造物等の各標高における床応答スペクトルの比較結果を図 4-1 に示す。なお、床応答スペクトルの減衰定数は、耐震裕度の比較的小さい配管系の主要な減衰定数である 2.0%を用いる。

影響検討条件の床応答スペクトルが一部周期帯において、設計条件の床応答周スペクトルを一部上回ることを確認した。

床応答スペクトルの応答比率は、方向、標高、減衰定数及び設備の固有周期に応じた応答比率を算定する。応答比率の算定例を図 4-2 に示す。

(1) 復水貯蔵タンク基礎

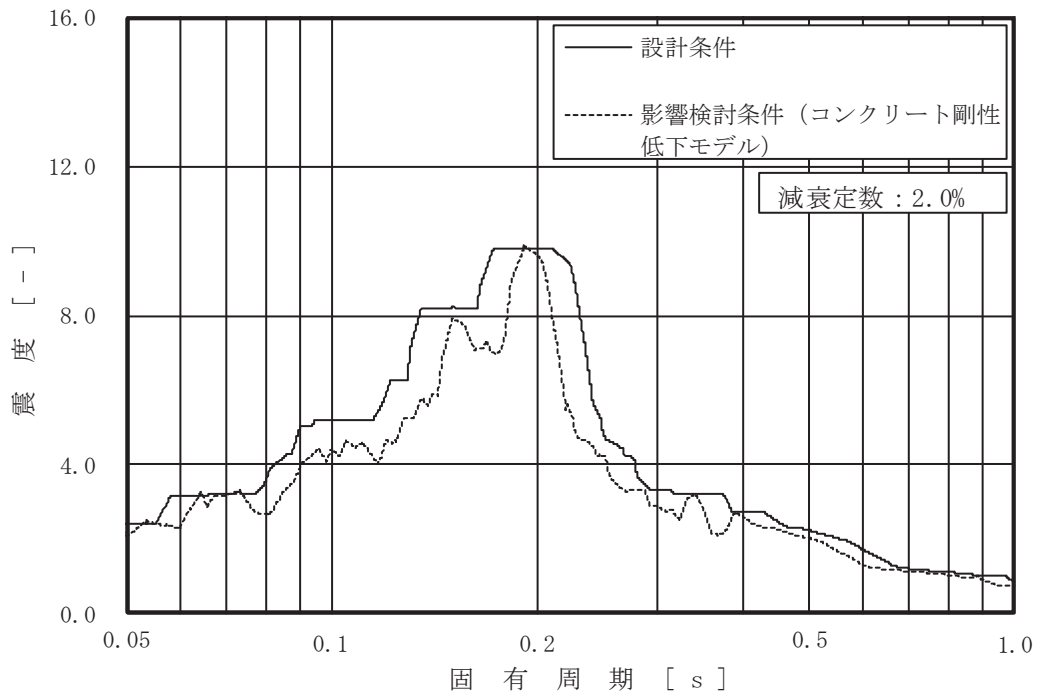


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (1/63) (基準地震動  $S_s$  , 復水貯蔵タンク基礎 (バルブ室) 0.P.13.250m , 水平 (NS/EW 包絡))

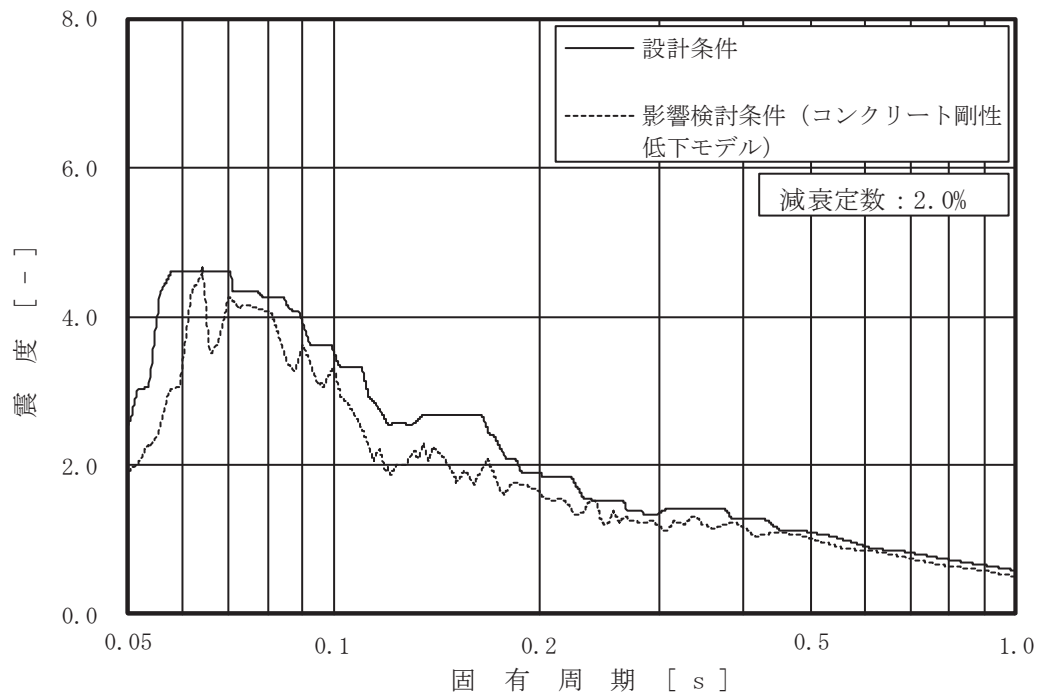


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (2/63) (基準地震動  $S_s$  , 復水貯蔵タンク基礎 (バルブ室) 0.P.13.250m , 鉛直)



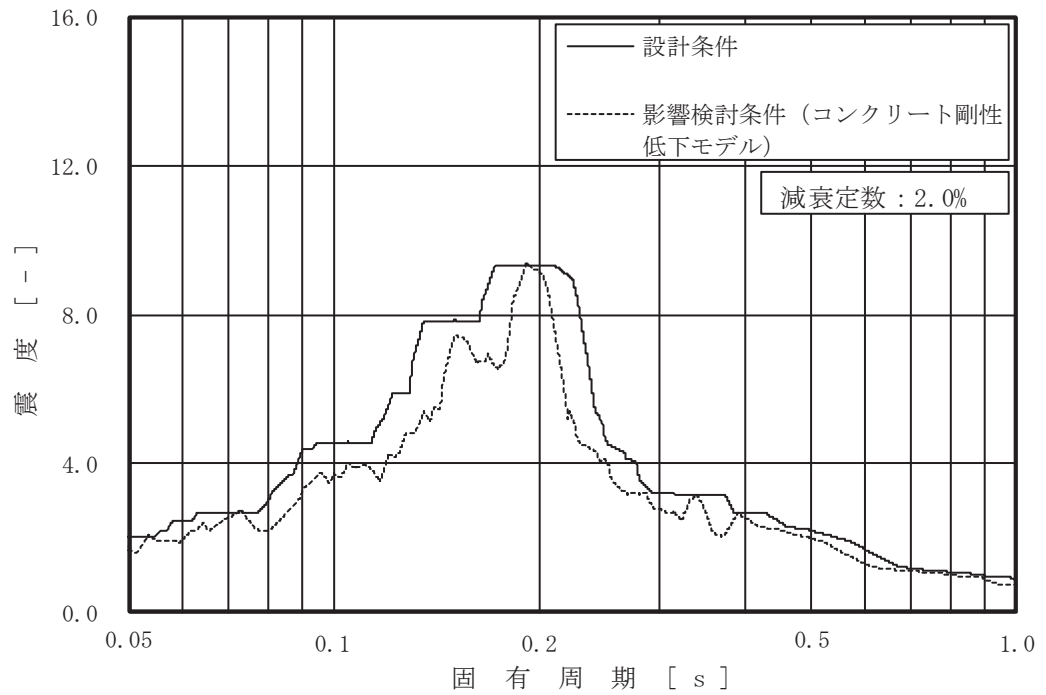


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (3/63) (基準地震動  $S_s$  , 復水貯蔵タンク基礎 (バルブ室) 0.P.11.225m , 水平 (NS/EW 包絡))

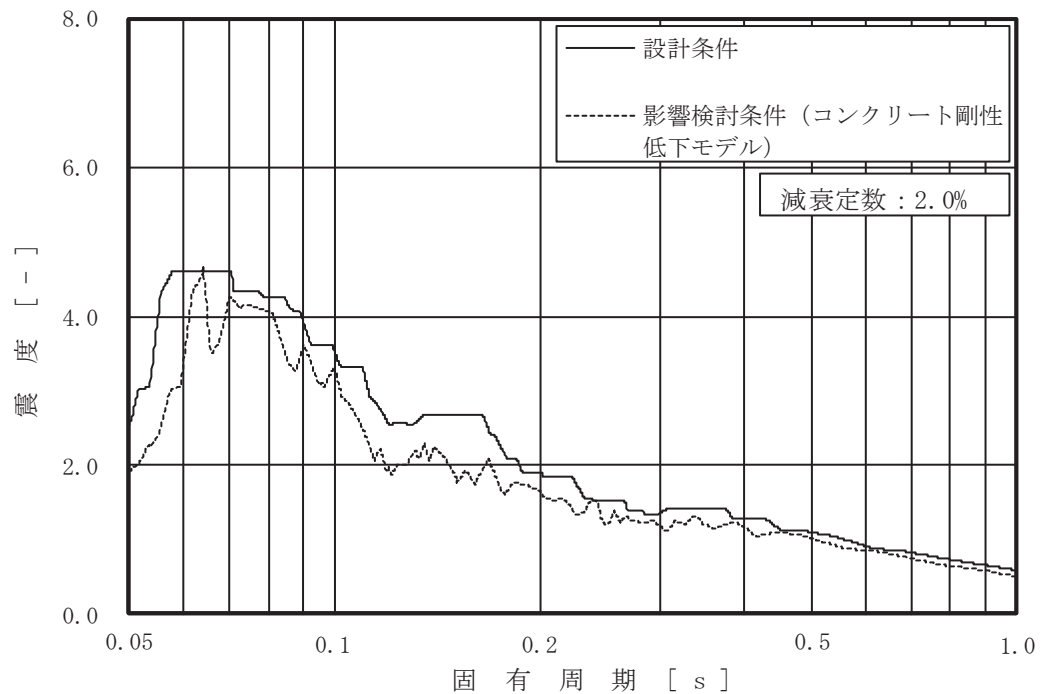


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (4/63)  
(基準地震動  $S_s$  , 復水貯蔵タンク基礎 (バルブ室) 0.P.11.225m , 鉛直)

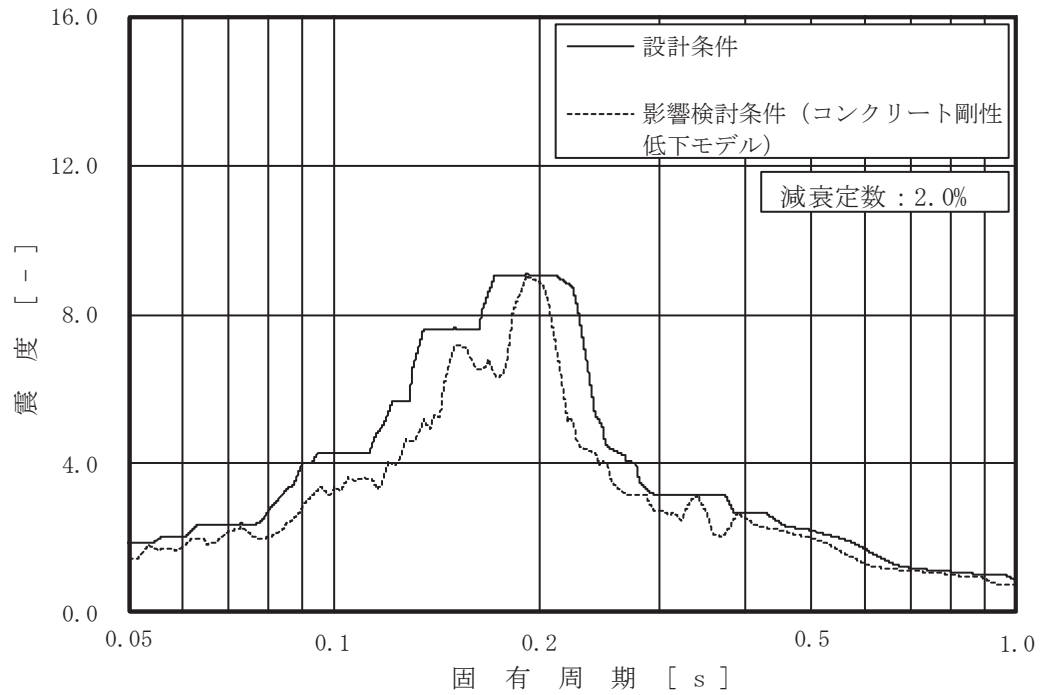


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (5/63) (基準地震動  $S_s$ , 復水貯蔵タンク基礎 (連絡トレンチ) 0.P.10.500m, 水平 (NS/EW 包絡),)

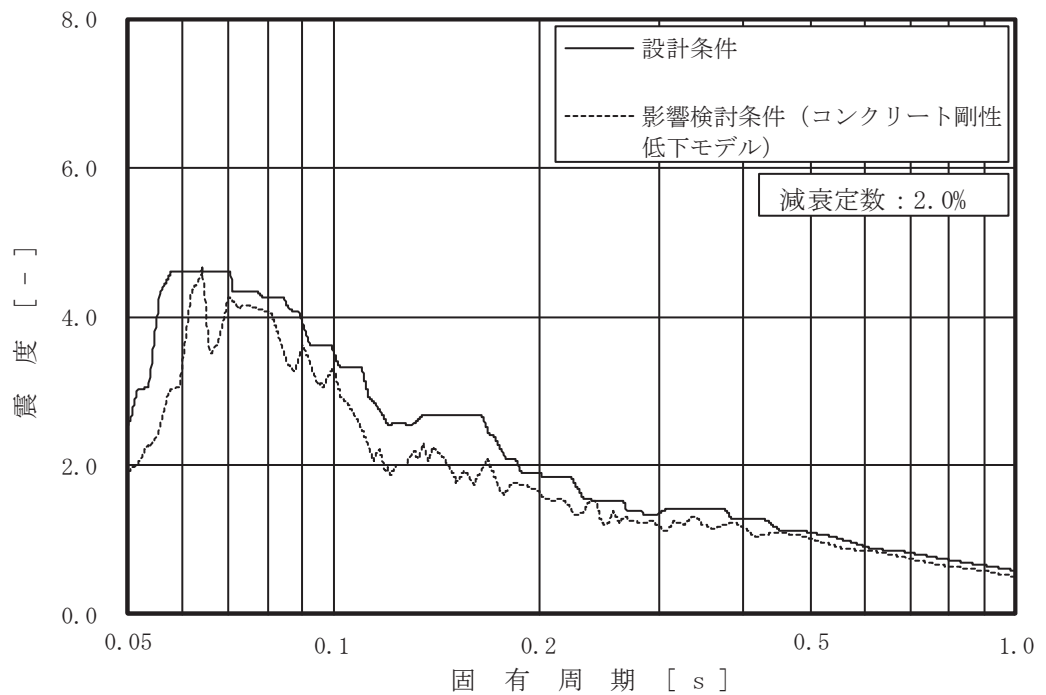


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (6/63)  
(基準地震動  $S_s$ , 復水貯蔵タンク基礎 (バルブ室) 0.P.10.500m, 鉛直)

(2) 海水ポンプ室

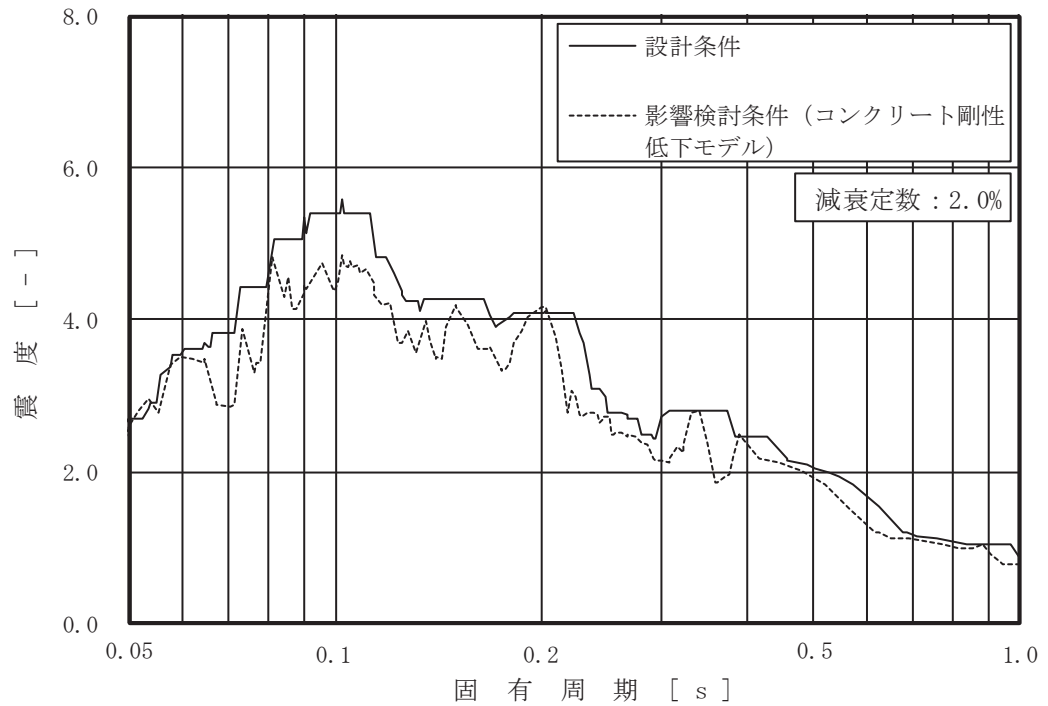


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (7/63)

(基準地震動  $S_s$  , 海水ポンプ室 0.P.14.800m , 水平 (NS))

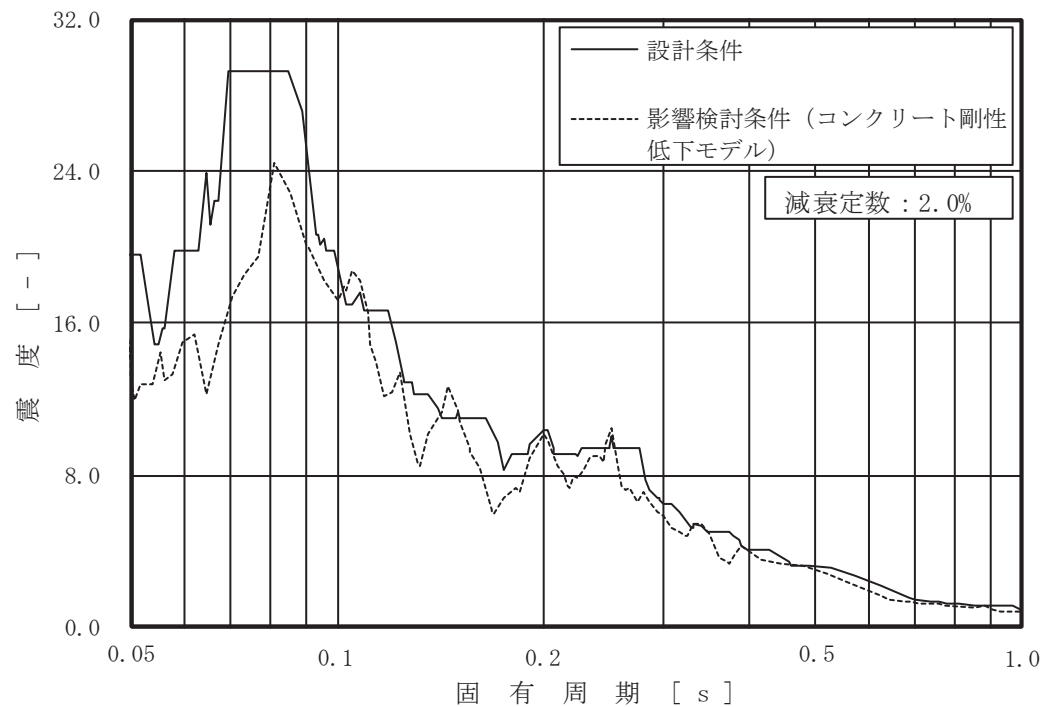


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (8/63)

(基準地震動  $S_s$  , 海水ポンプ室 0.P.14.800m , 水平 (EW))

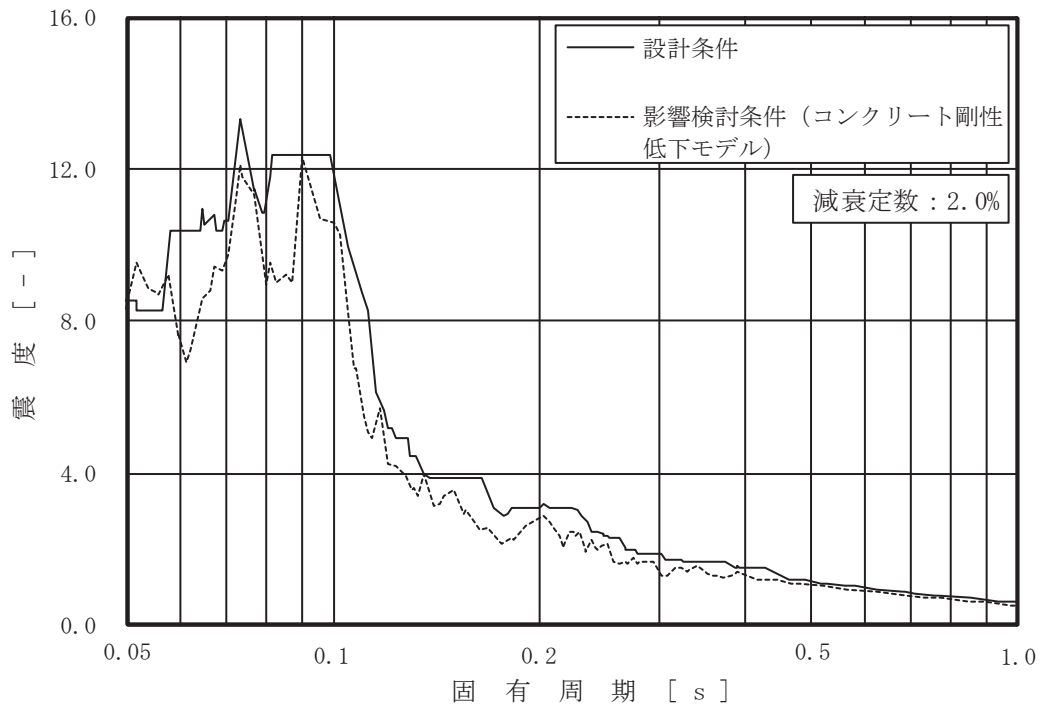


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (9/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 海水ポンプ室 0.P.14.800m , 鉛直)

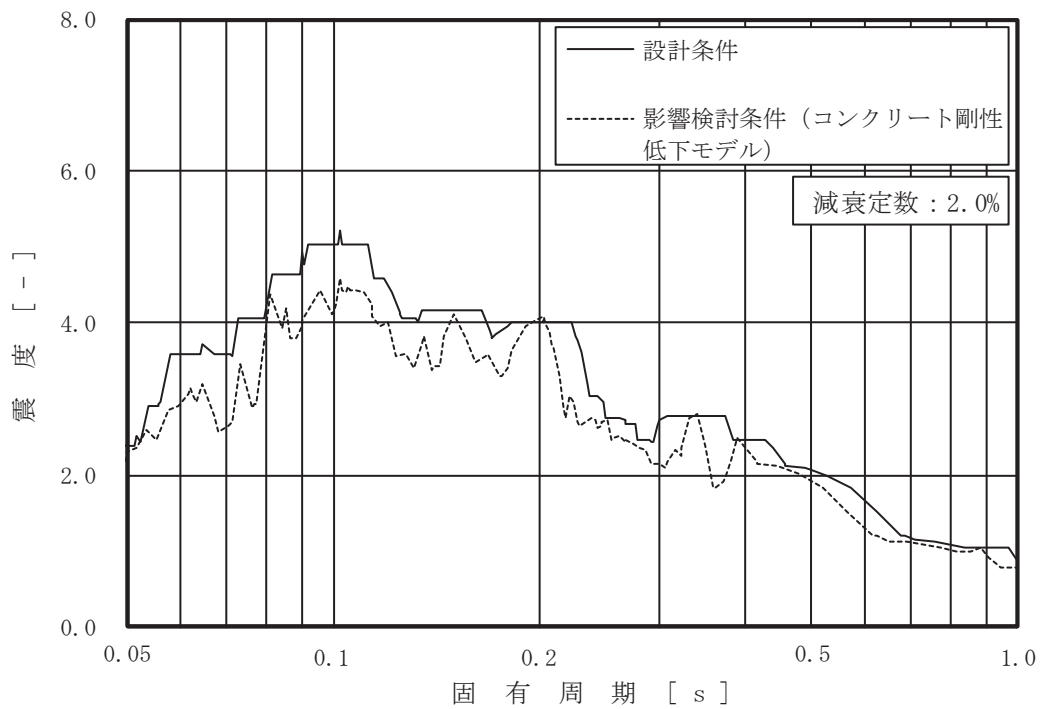


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (10/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 海水ポンプ室 0.P.11.650m , 水平 (NS))

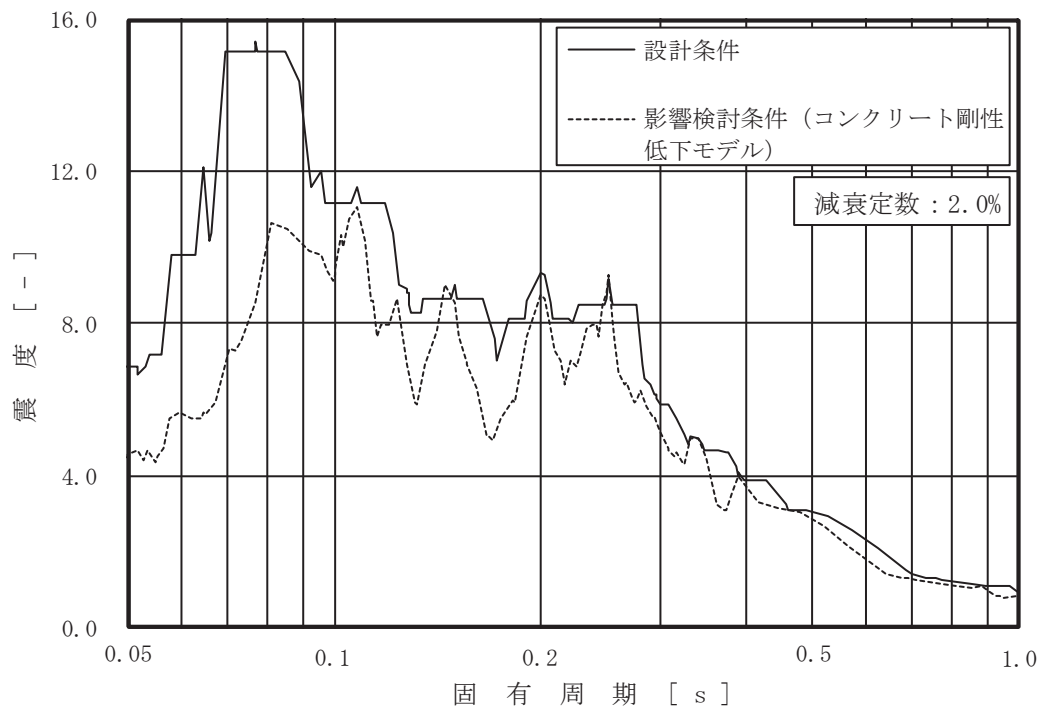


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (11/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.11.025m , 水平 (EW))

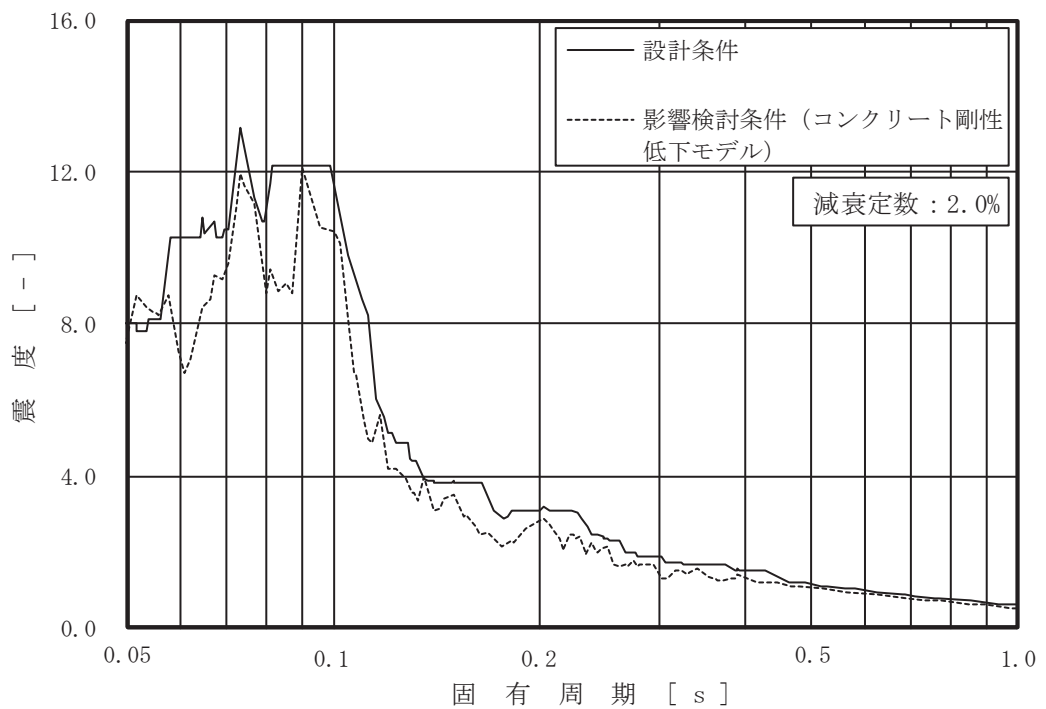


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (12/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.11.025m , 鉛直)

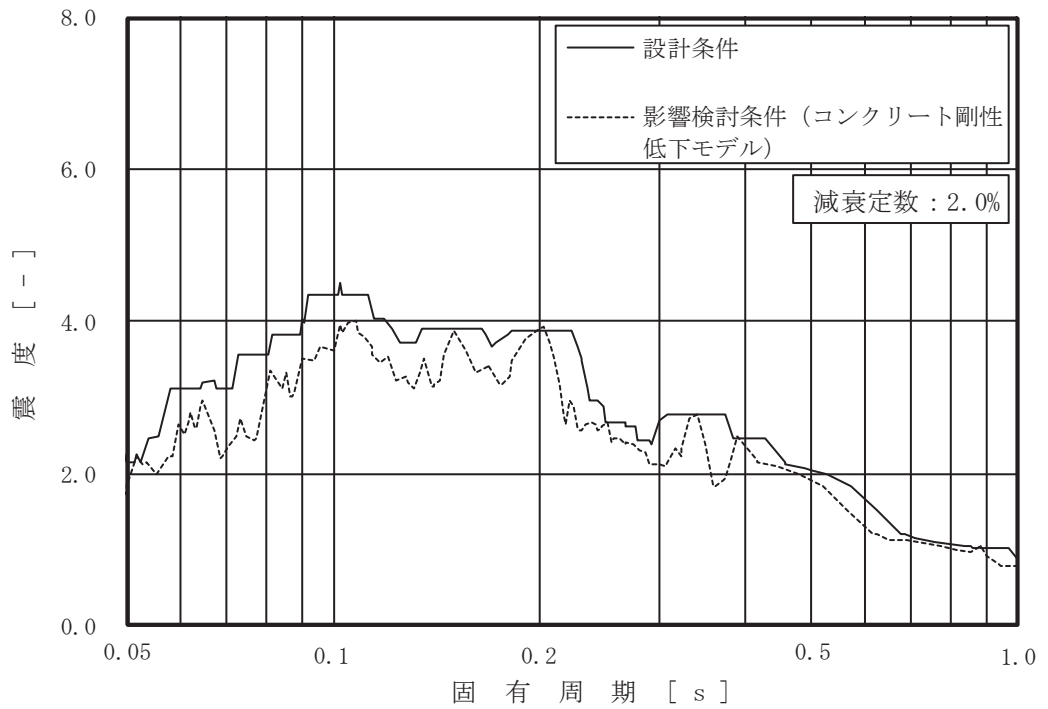


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (13/63)

(基準地震動 S s, 海水ポンプ室 0.P.7.250m, 水平 (NS))

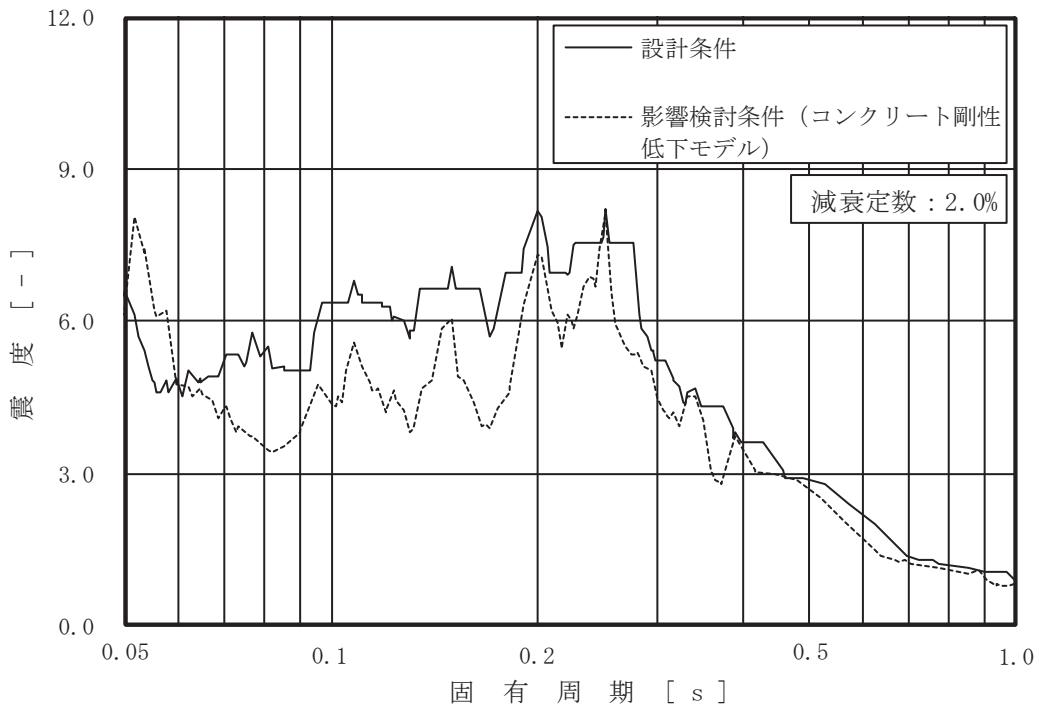


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (14/63)

(基準地震動 S s, 海水ポンプ室 0.P.7.250m, 水平 (EW))

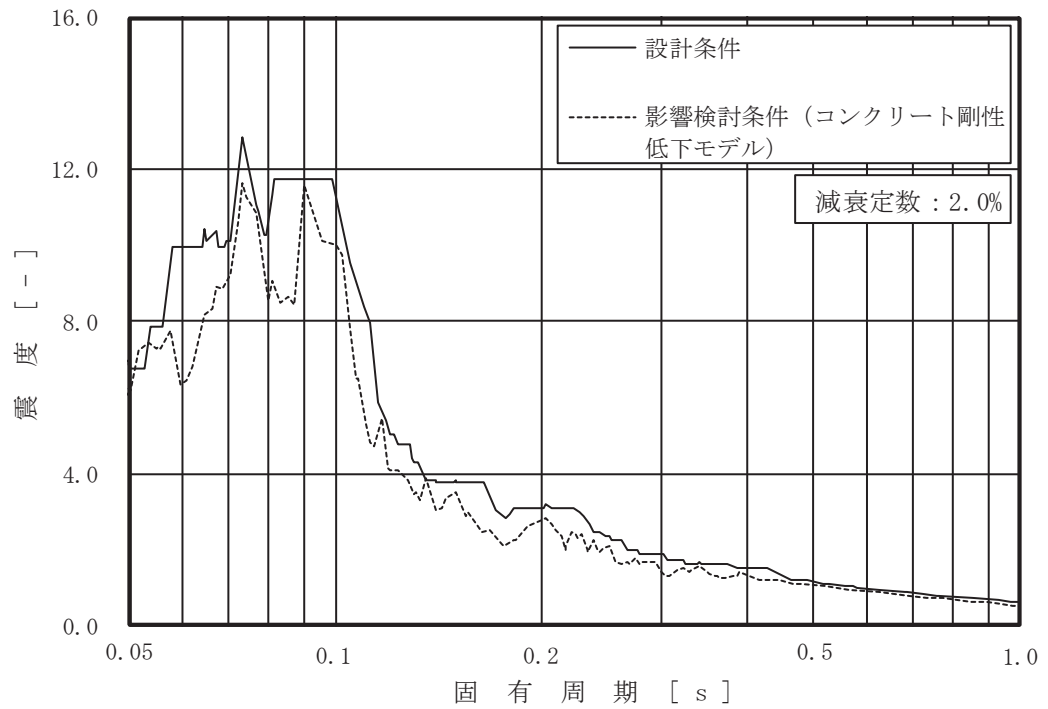


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (15/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.7.250m , 鉛直)

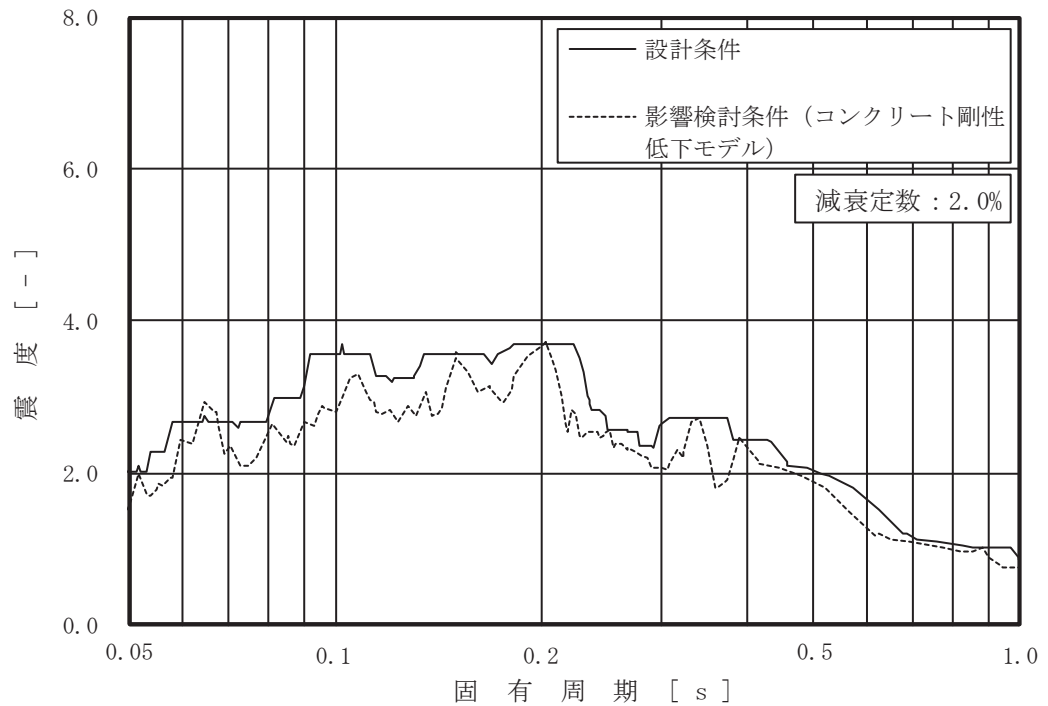


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (16/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.2.250m , 水平 (NS))

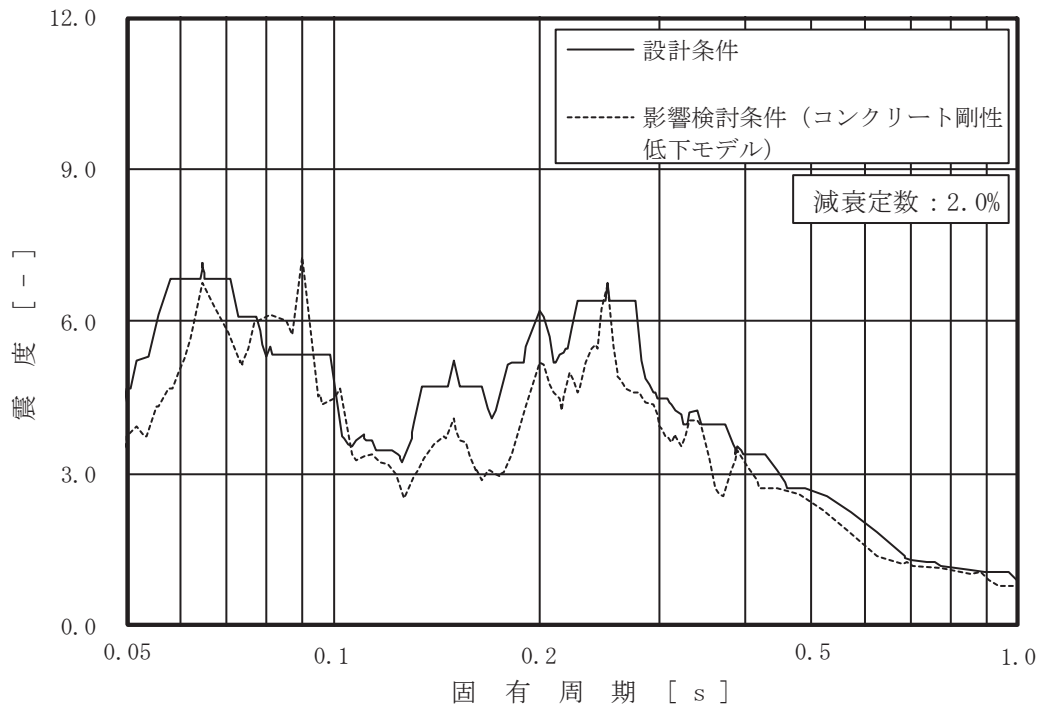


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (17/63)

(基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.2.250m , 水平 (EW))

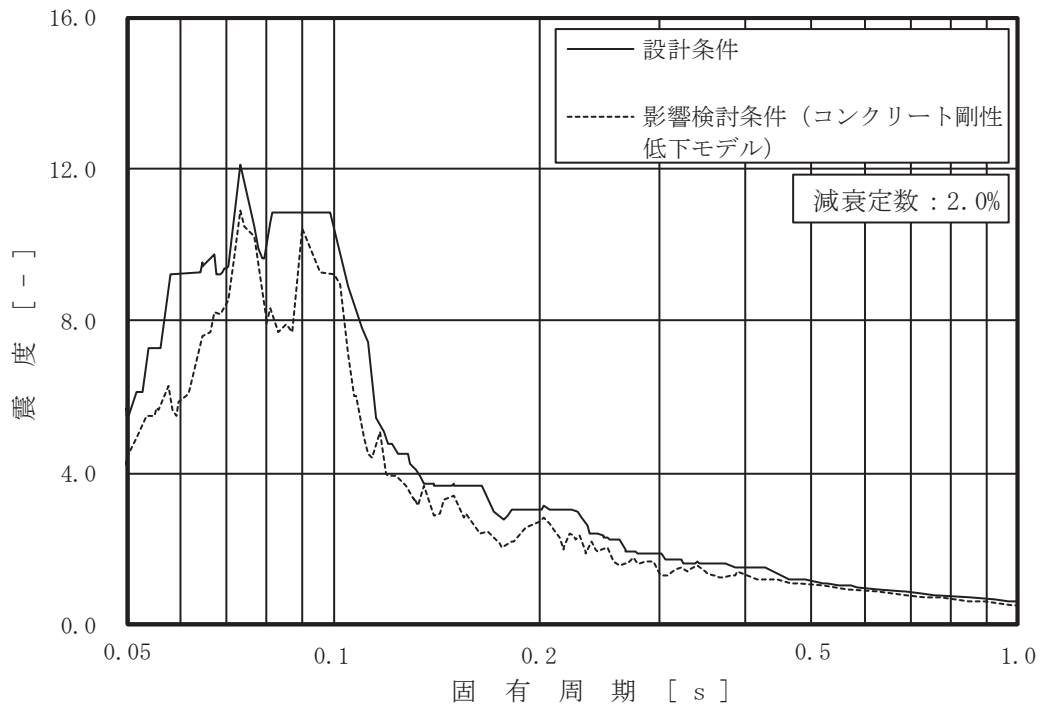


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (18/63)

(基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.2.250m , 鉛直)



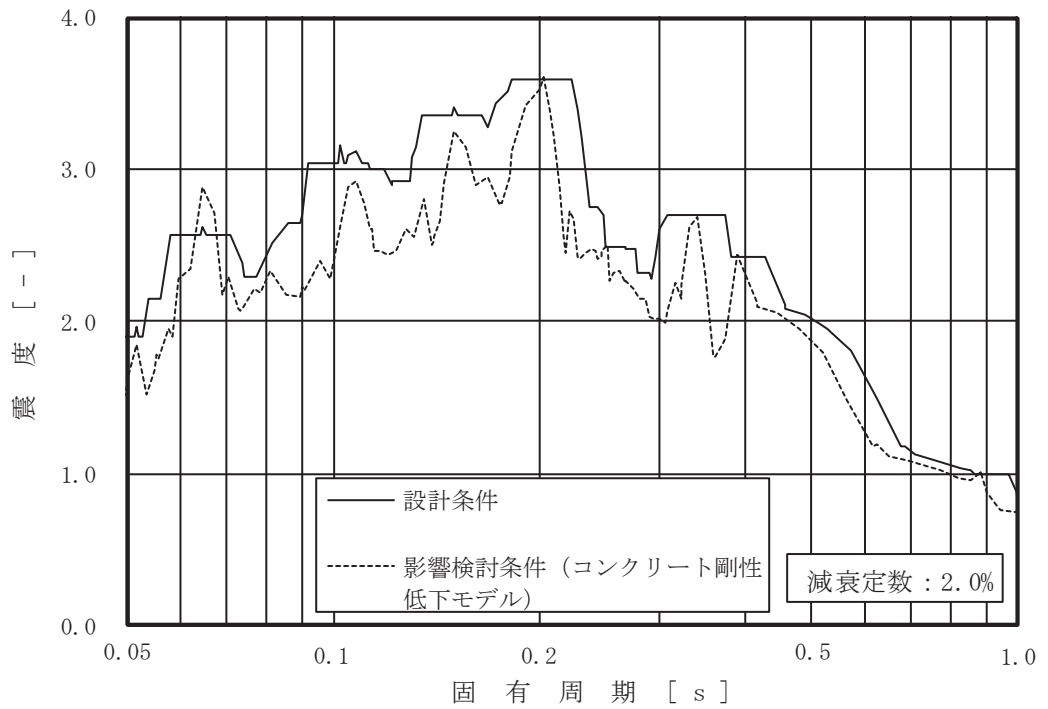


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (19/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.-0.550m , 水平 (NS))

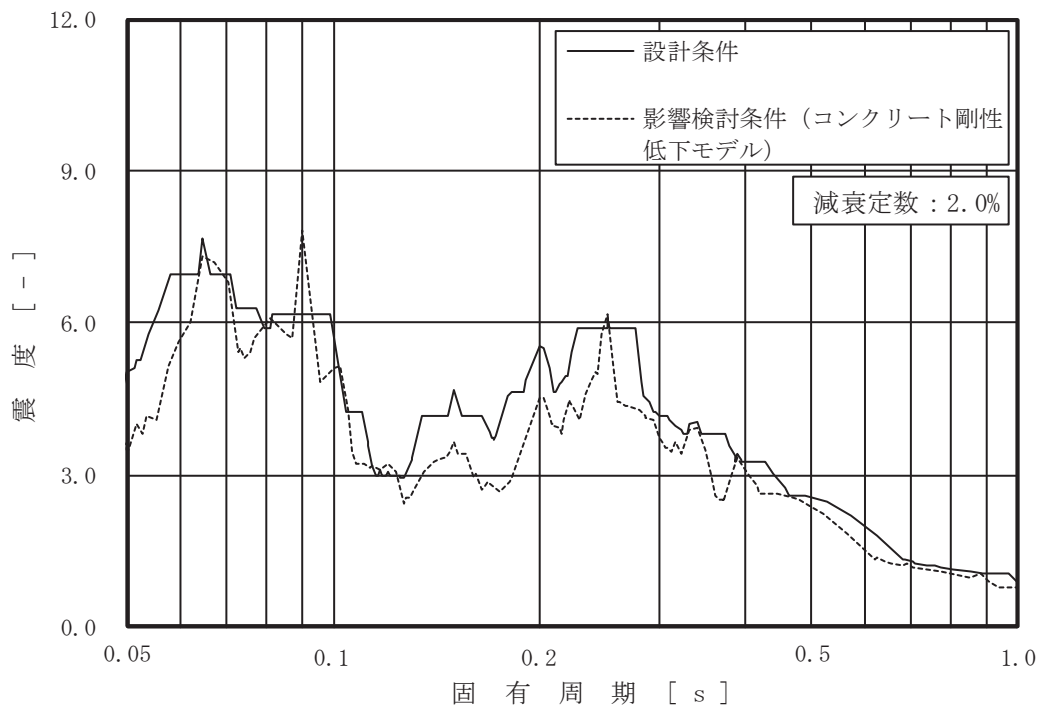


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (20/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 0.P.-0.550m , 水平 (EW))

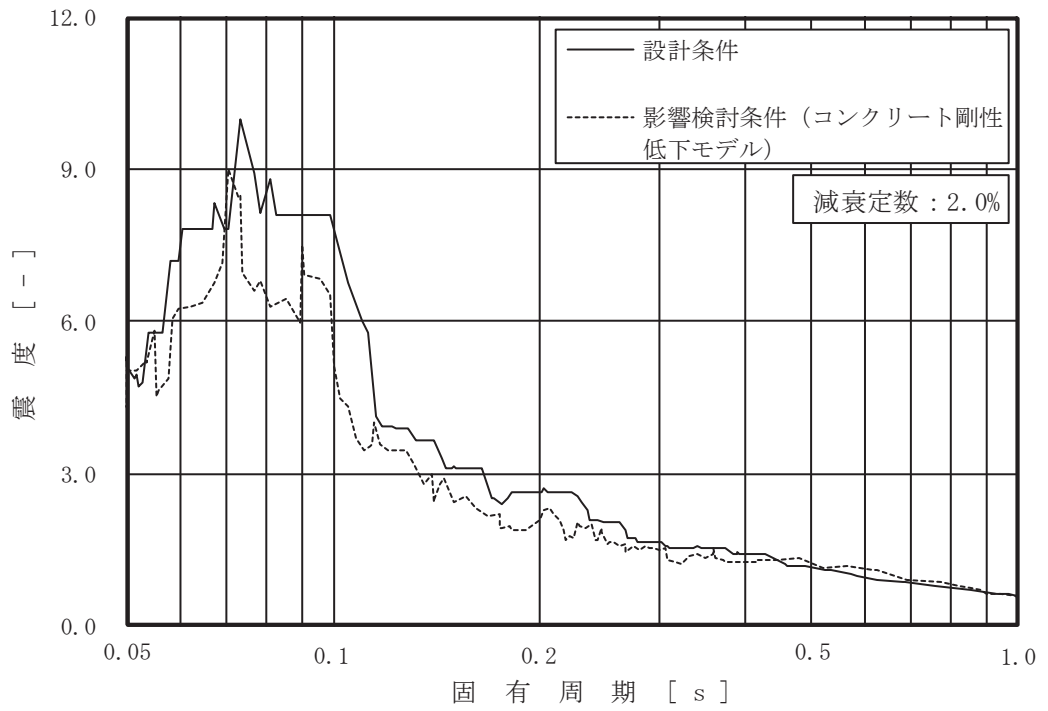


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (21/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 O.P. -0.550m , 鉛直)

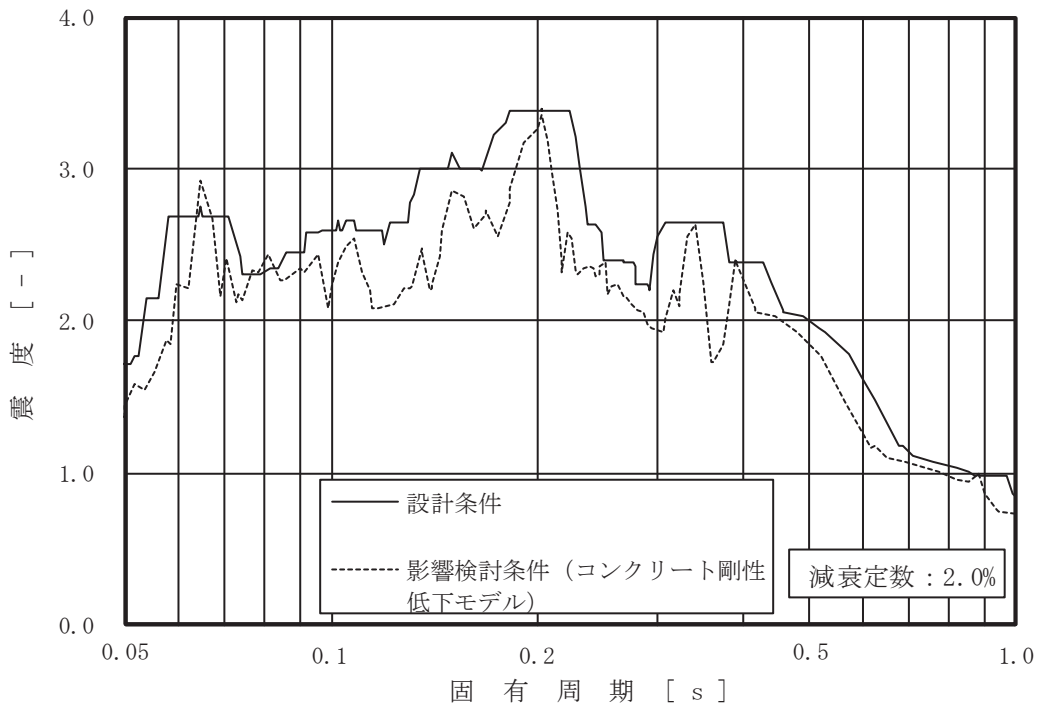


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (22/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 O.P. -6.400m , 水平 (NS))

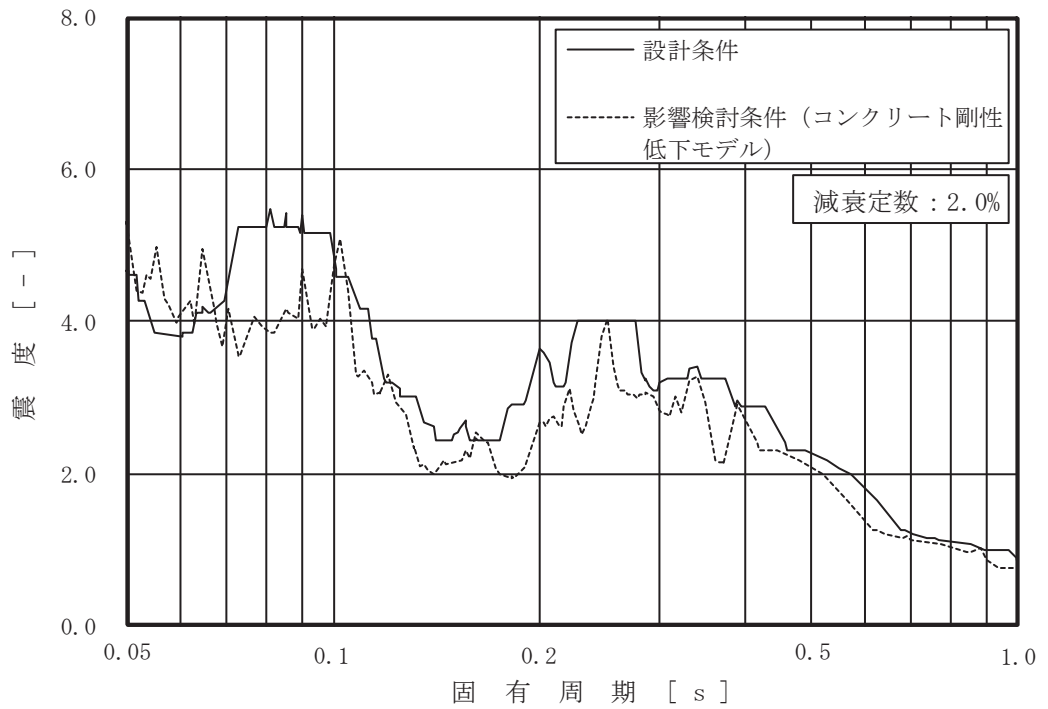


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (23/63)  
 (基準地震動 S s, 海水ポンプ室 O.P.-7.025m, 水平 (EW))

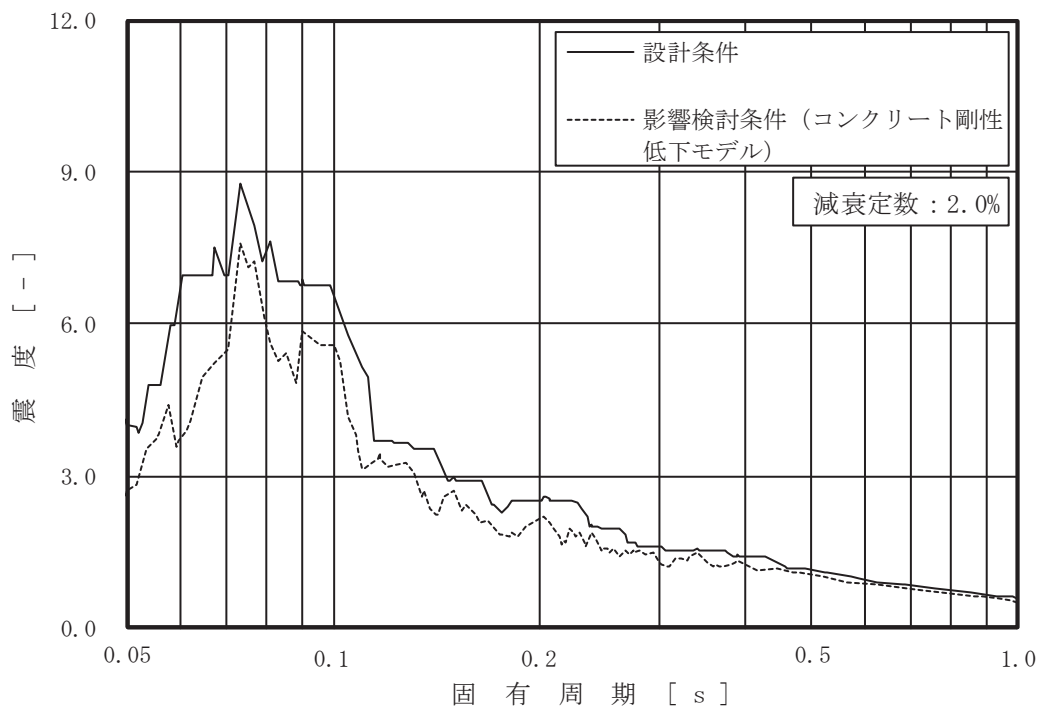


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (24/63)  
 (基準地震動 S s, 海水ポンプ室 O.P.-7.025m, 鉛直)

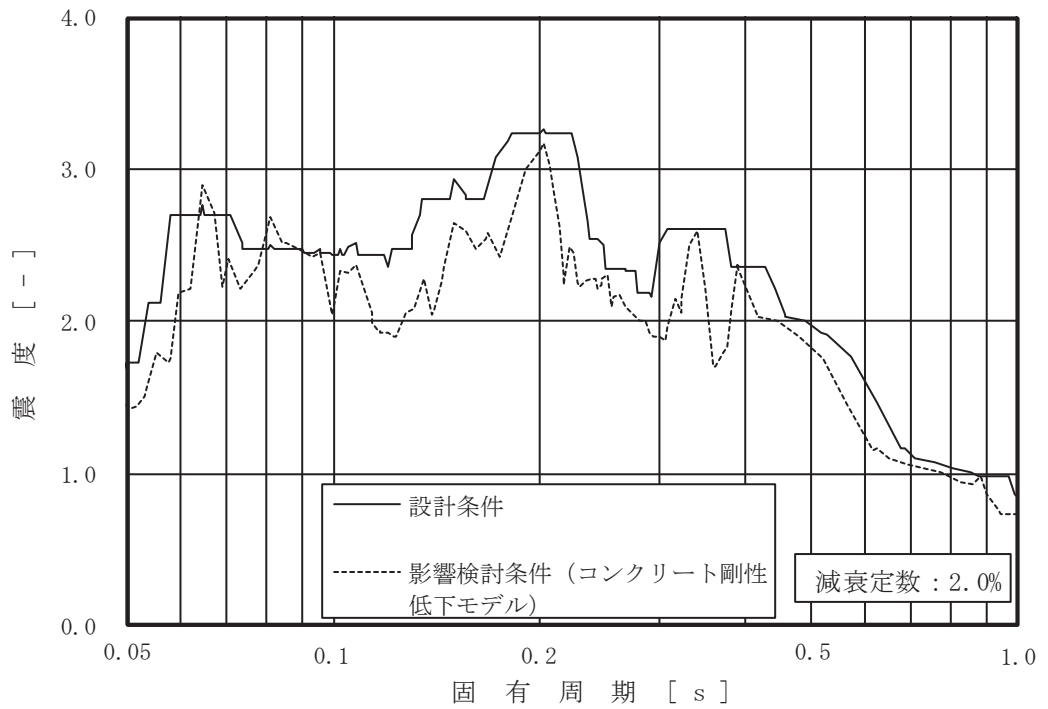


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (25/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 O.P. -9.800m , 水平 (NS))

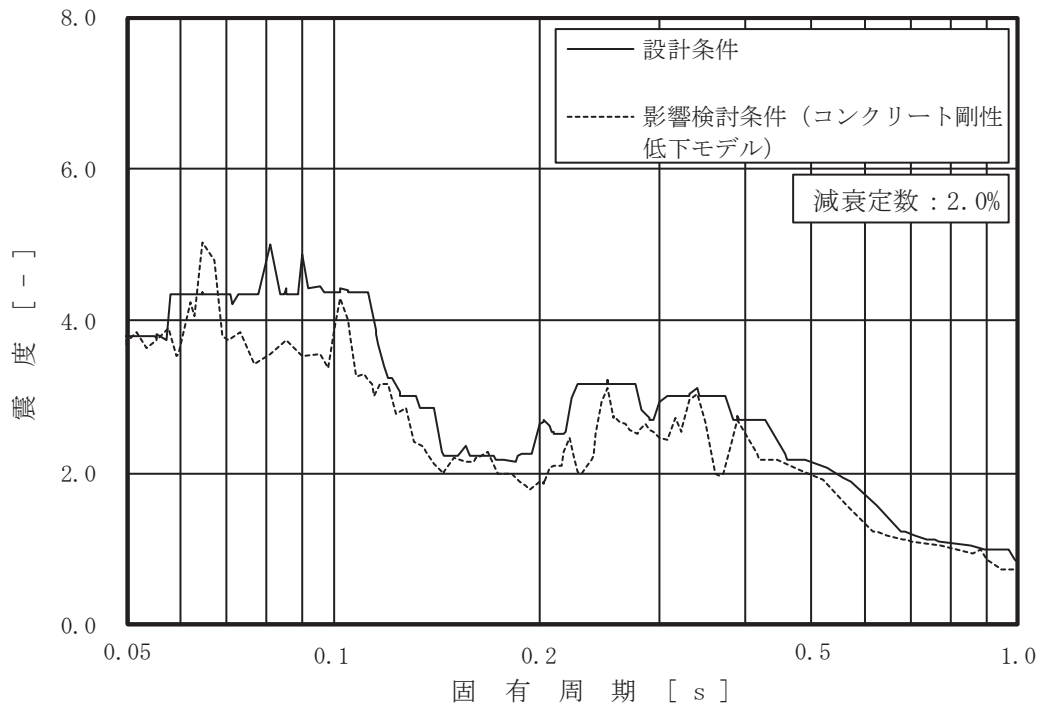


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (26/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 O.P. -9.800m , 水平 (EW))

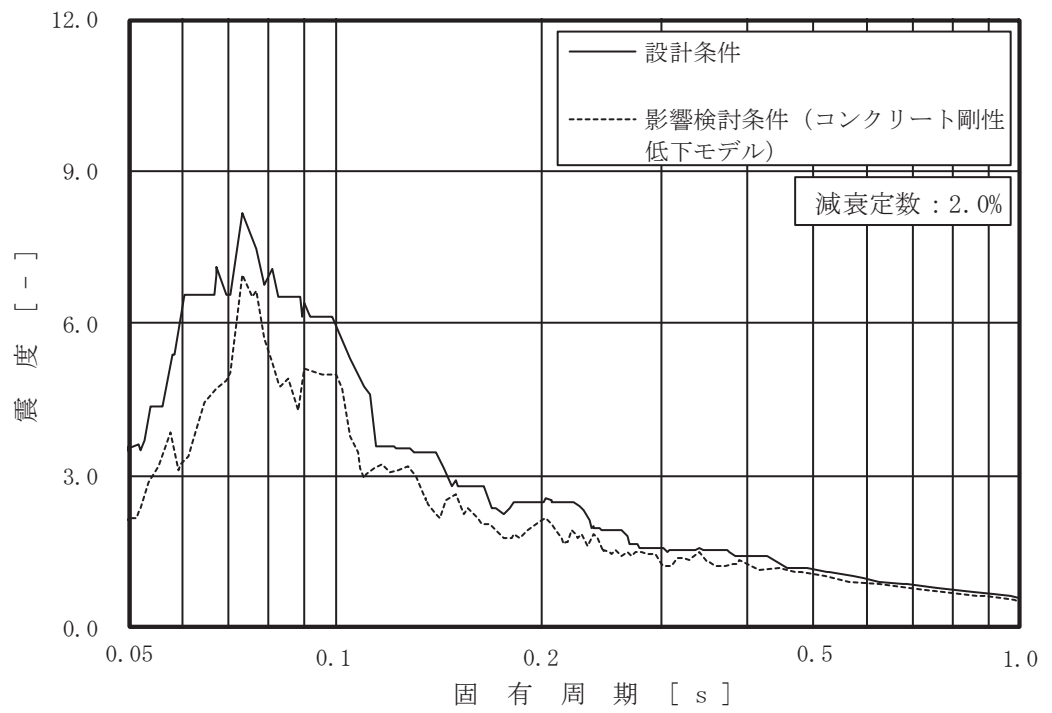


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (27/63)  
 (基準地震動 S s , 海水ポンプ室 O.P.-9.800m , 鉛直)

(3) 軽油タンク室

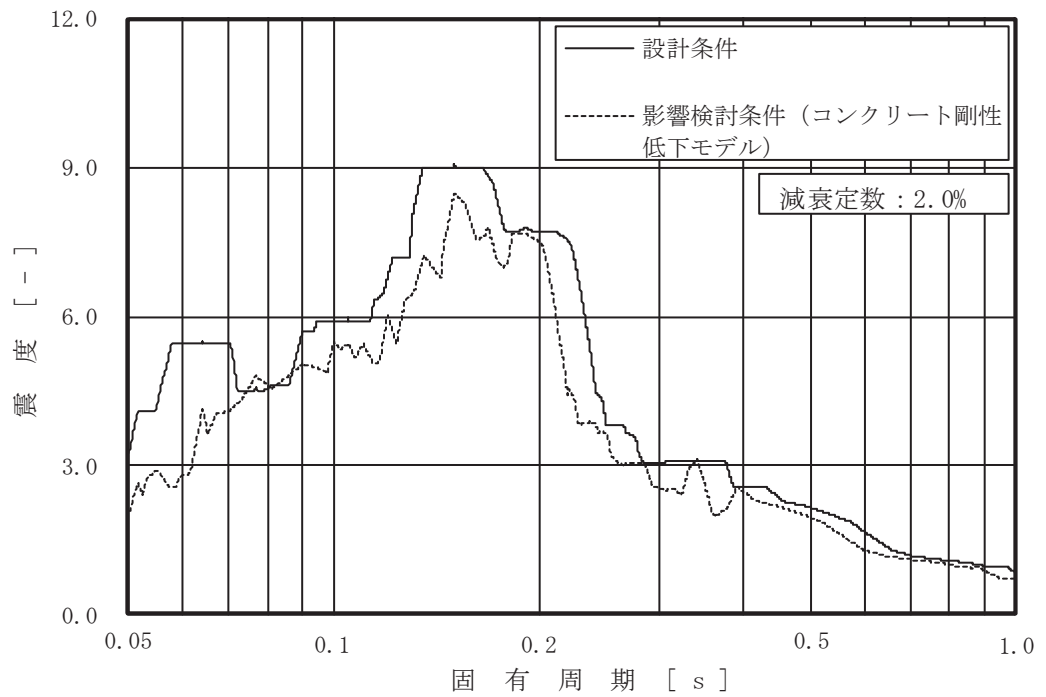


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (28/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (タンク室) 0.P.14.800m , 水平 (NS/EW 包絡))

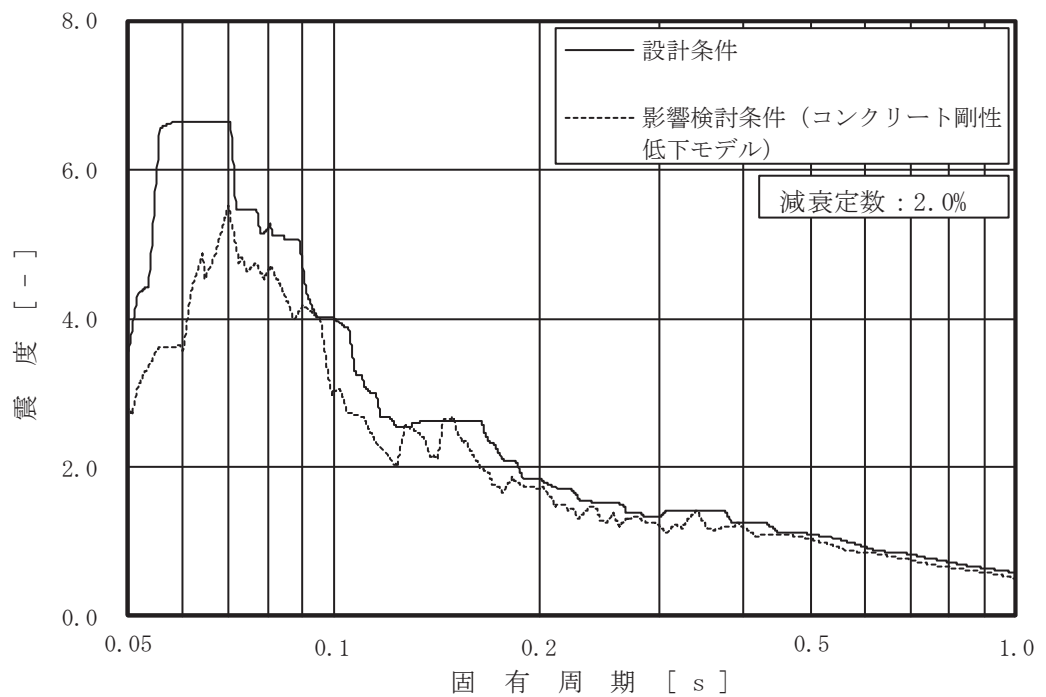


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (29/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (タンク室) 0.P.14.800m , 鉛直)

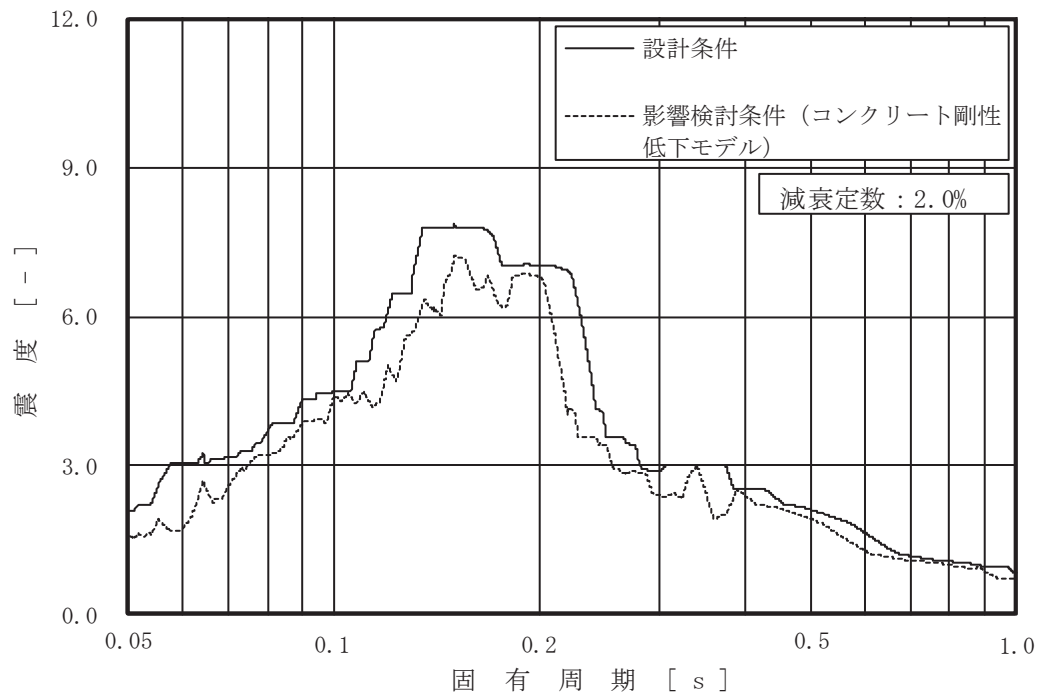


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (30/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (タンク室) 0.P.9.500m , 水平 (NS/EW 包絡))

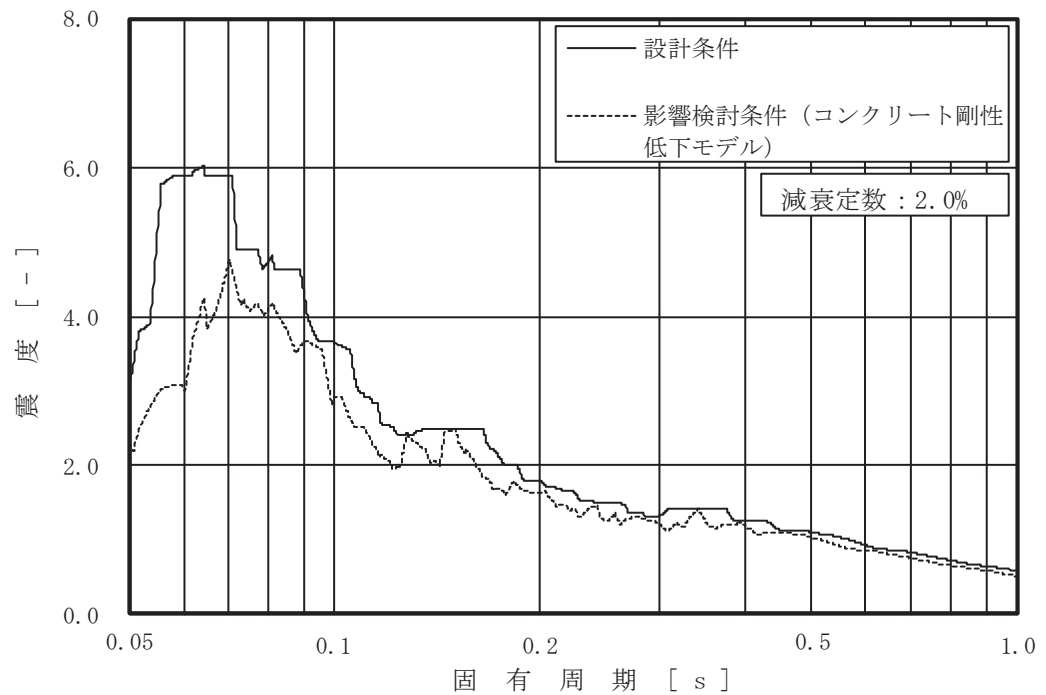


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (31/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (タンク室) 0.P.9.500m , 鉛直)

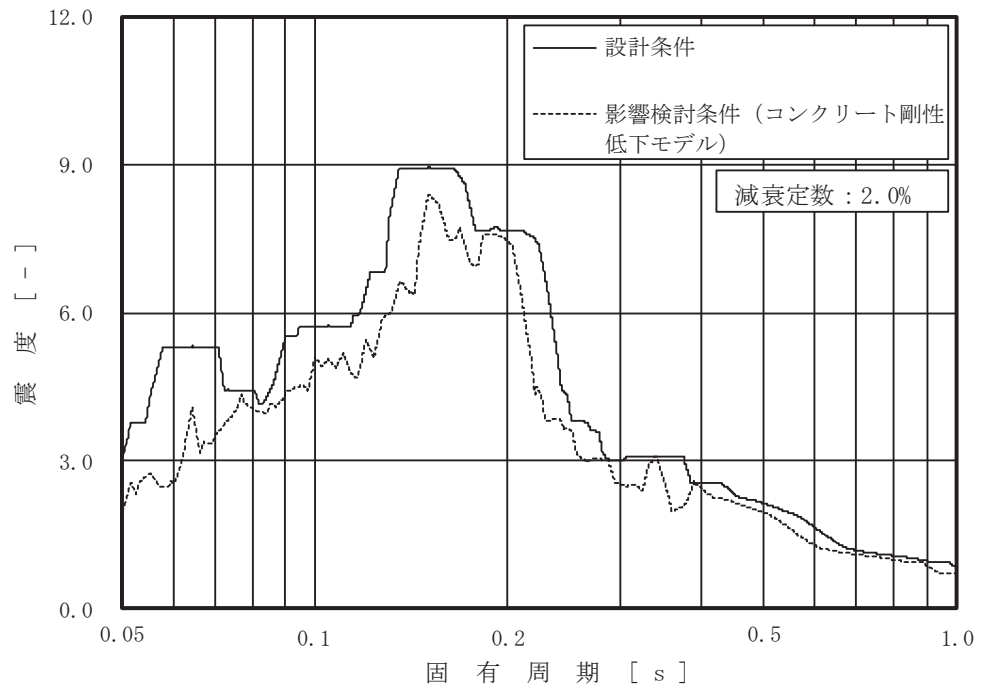


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (32/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (ポンプ室) O.P. 14.800m , 水平 (NS/EW 包絡))

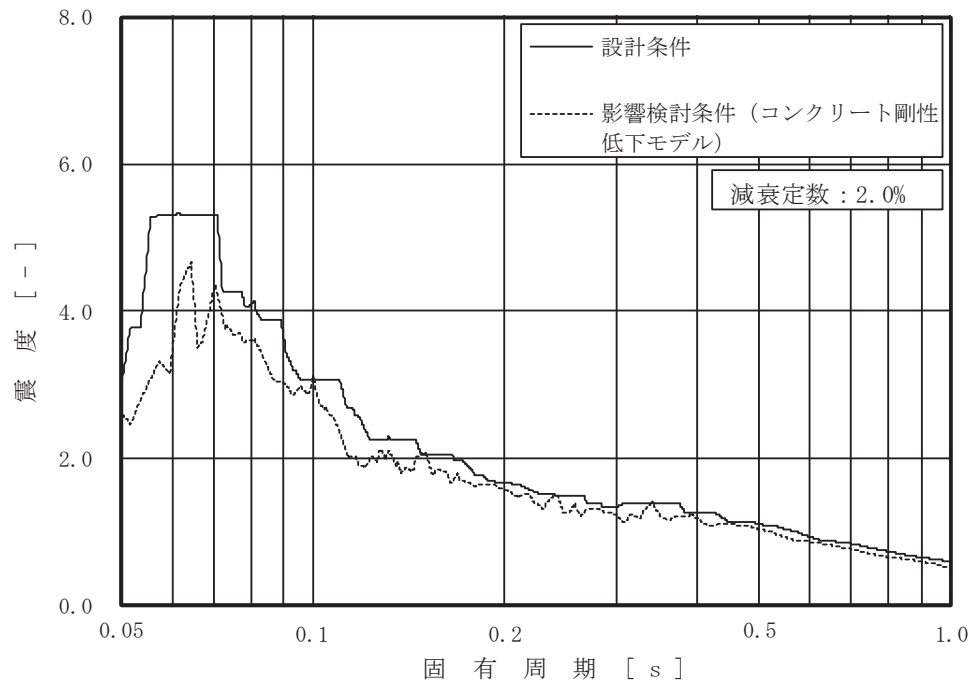


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (33/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (ポンプ室) O.P. 14.800m , 鉛直)



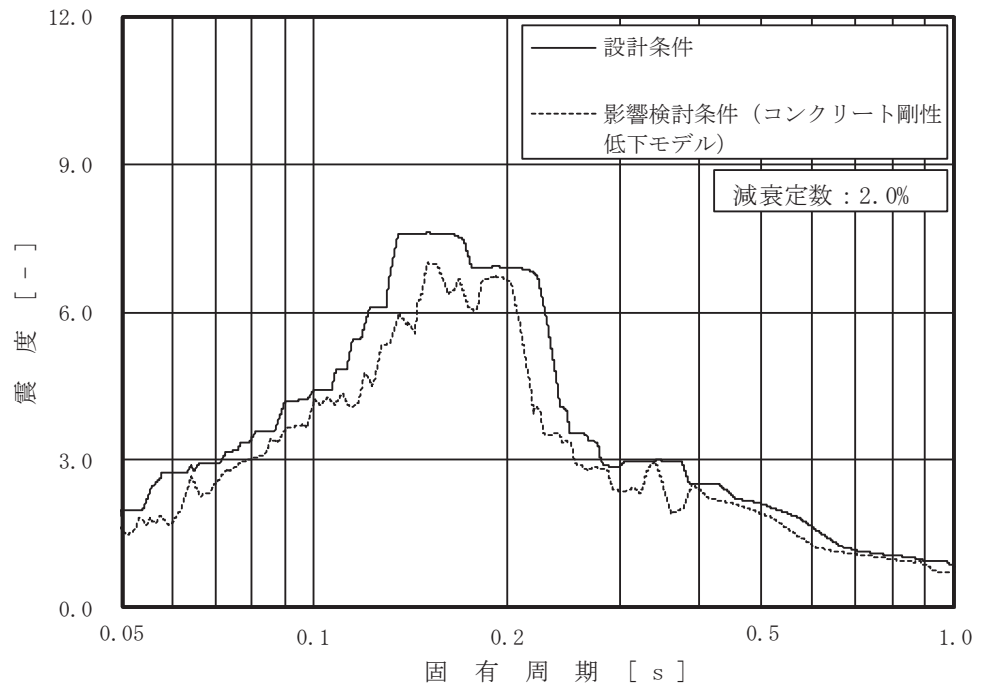


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (34/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (ポンプ室) 0.P.9.500m , 水平 (NS/EW 包絡))

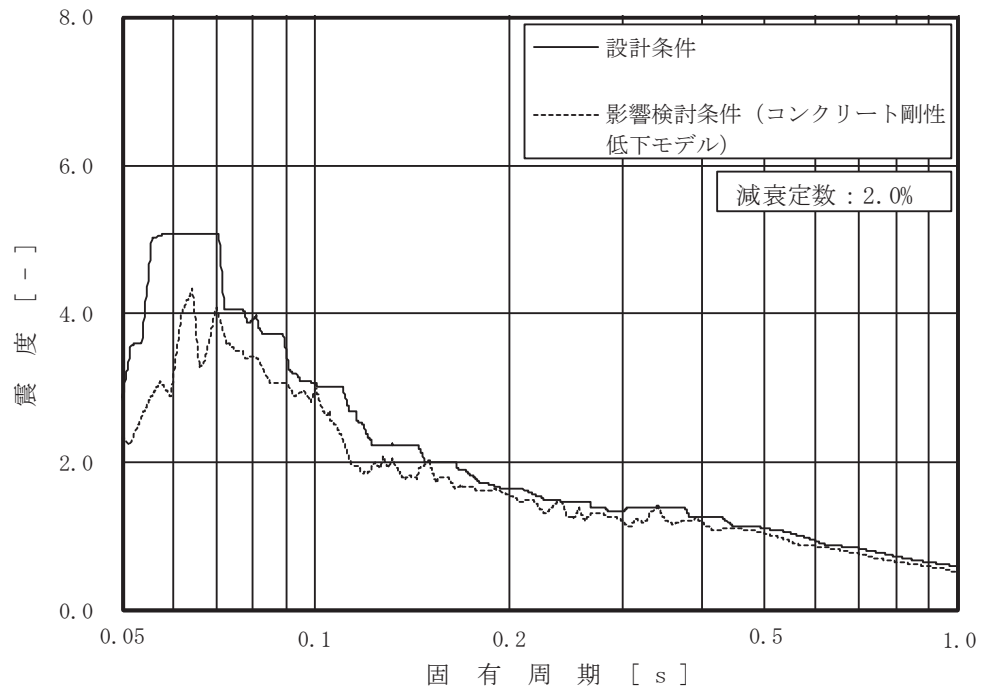


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (35/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (ポンプ室) 0.P.9.500m , 鉛直)

(4) 軽油タンク室 (H)

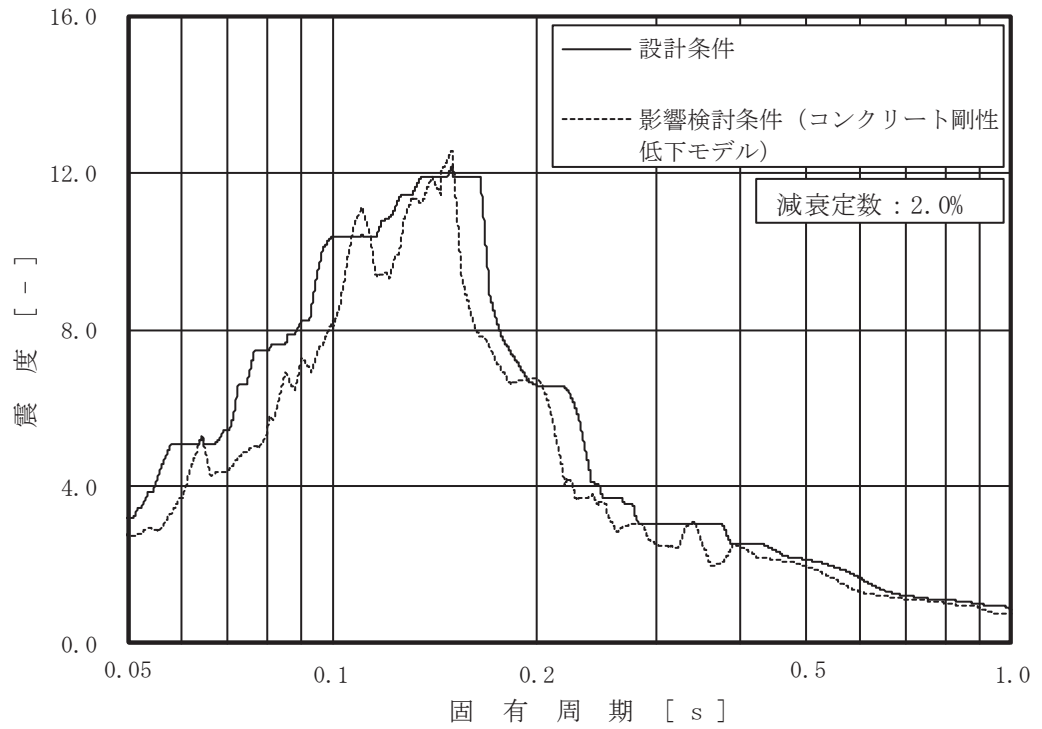


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (36/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (H) 0.P.14.800m , 水平 (NS/EW 包絡))

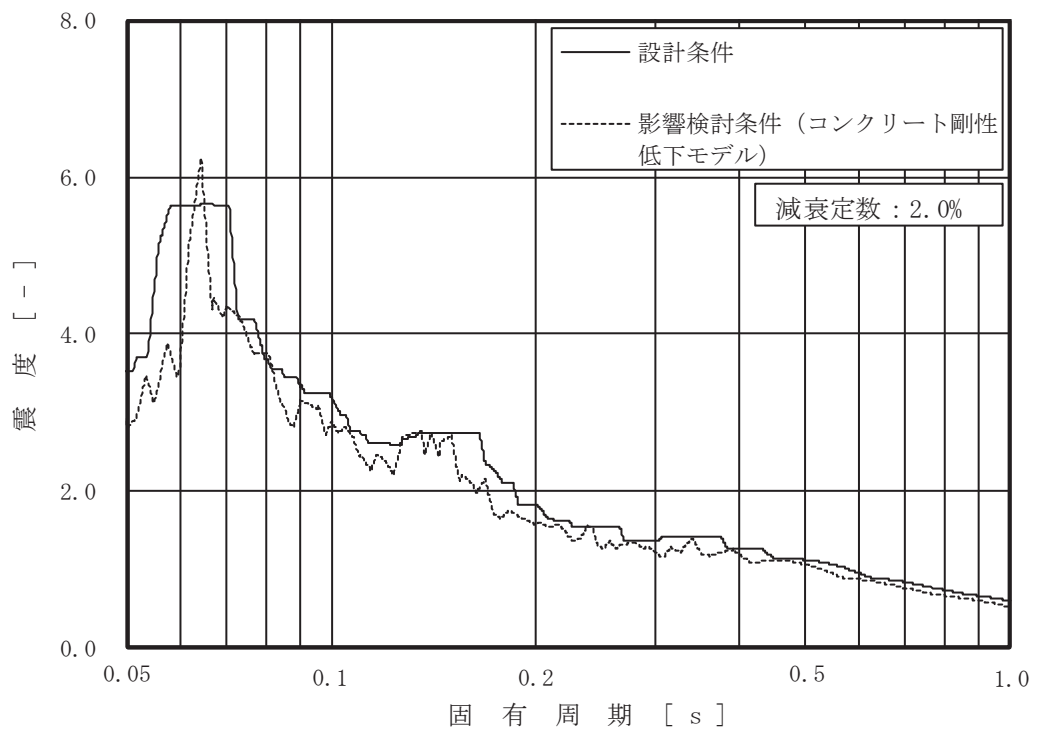


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (37/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (H) 0.P.14.800m , 鉛直)

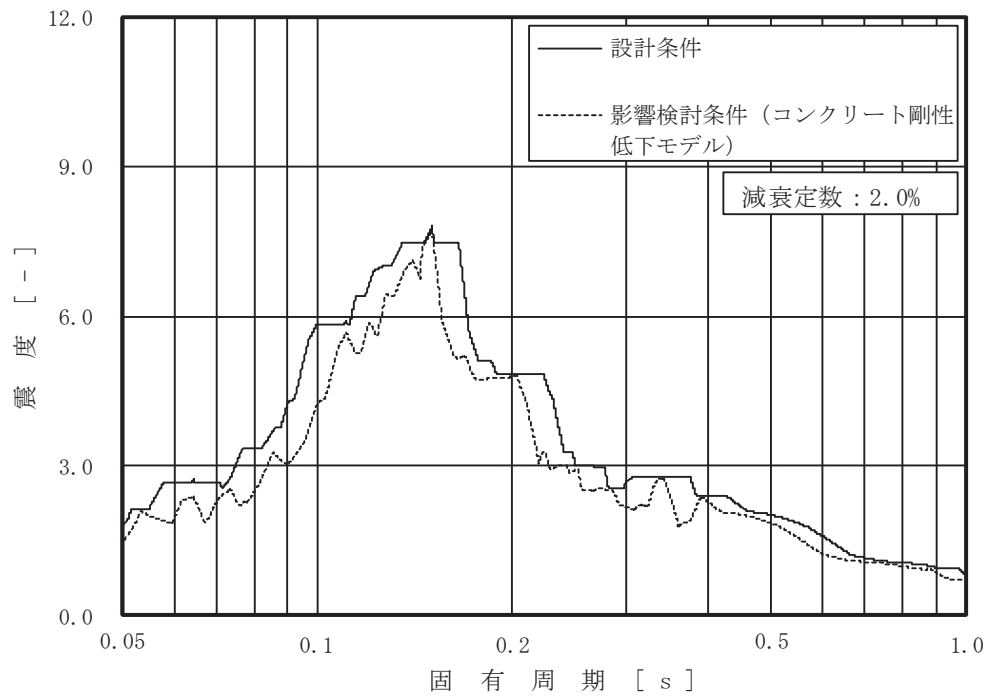


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (38/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (H) 0.P.6.400m , 水平 (NS/EW 包絡))

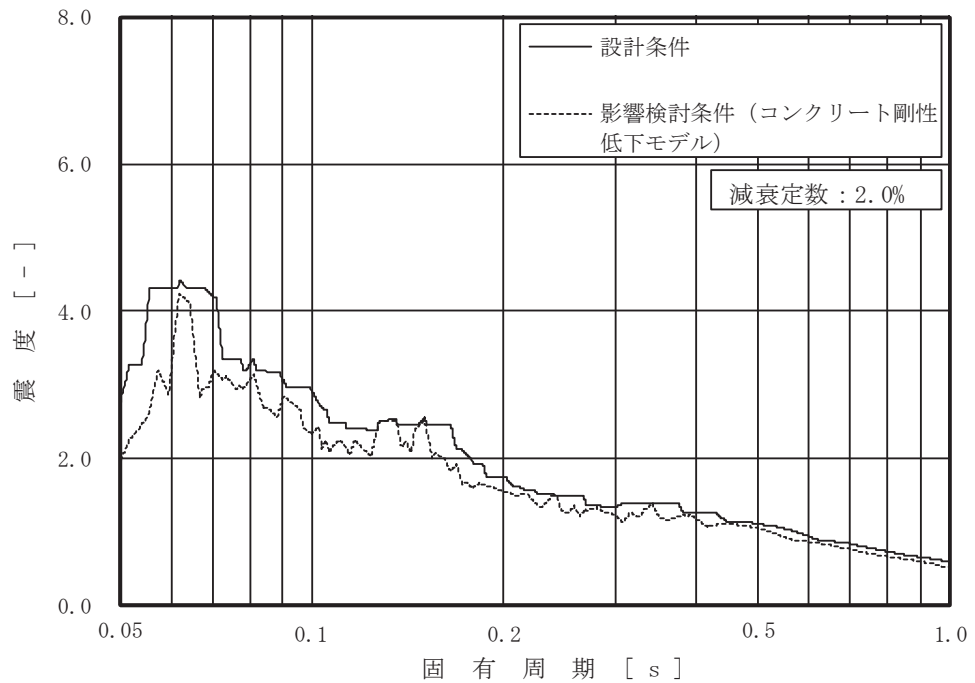


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (39/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク室 (H) 0.P.6.400m , 鉛直)

(5) ガスタービン発電設備軽油タンク室

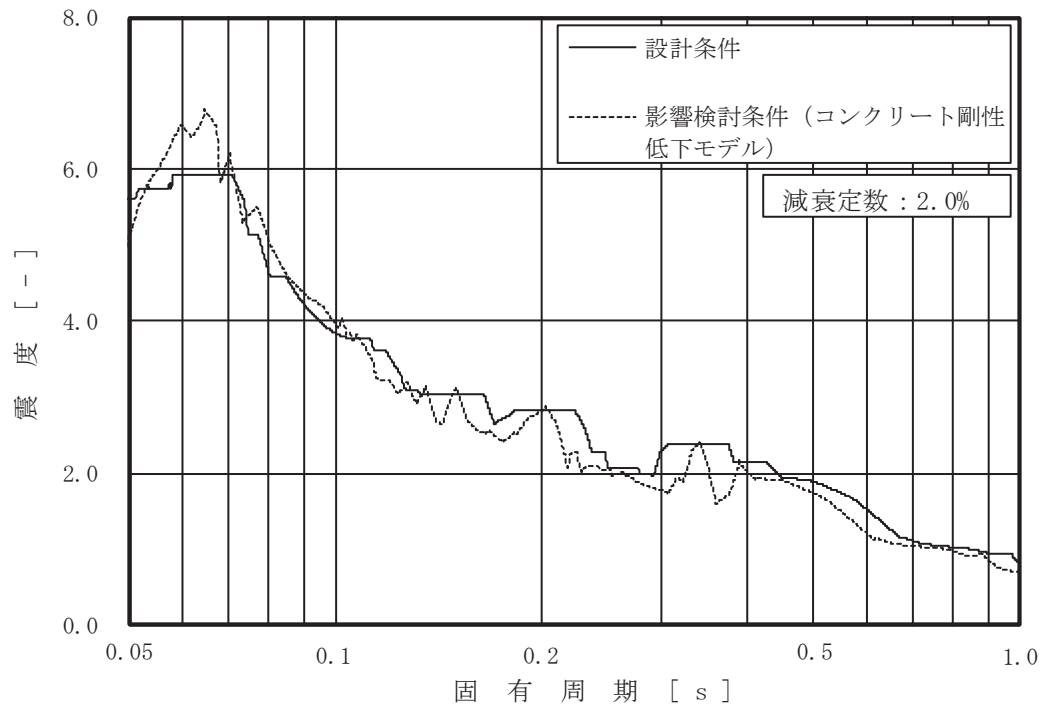


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (40/63) (基準地震動  $S_s$  , ガスタービン発電設備軽油タンク室 0.P.62.30m , 水平 (NS/EW 包絡))

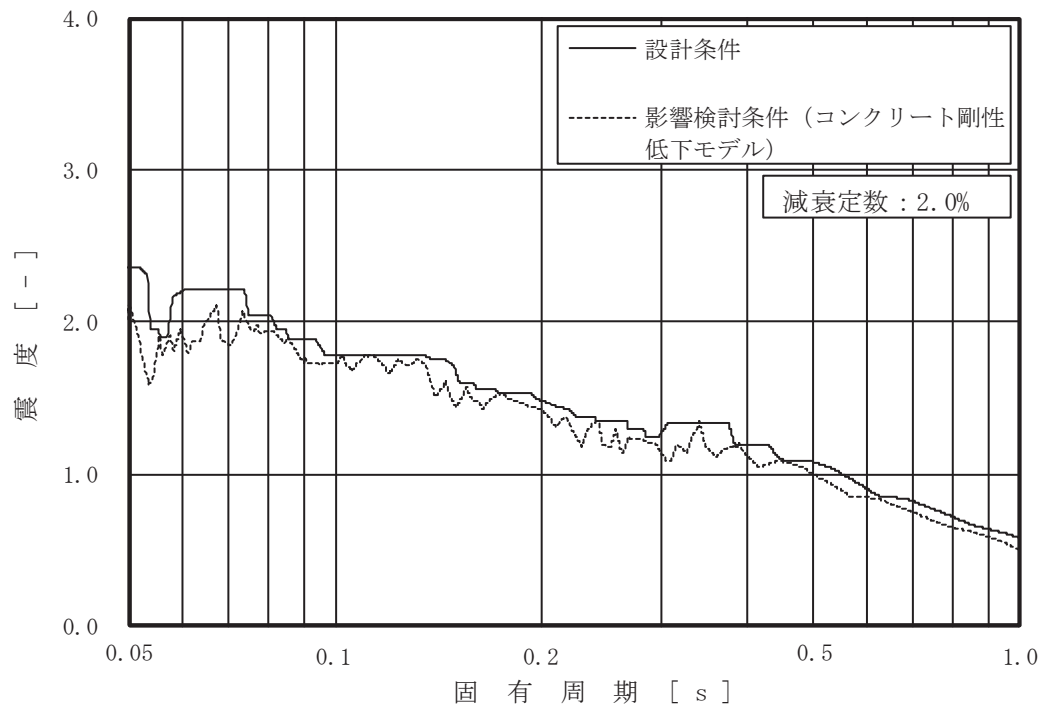


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (41/63)  
(基準地震動  $S_s$  , ガスタービン発電設備軽油タンク室 0.P.62.30m , 鉛直)

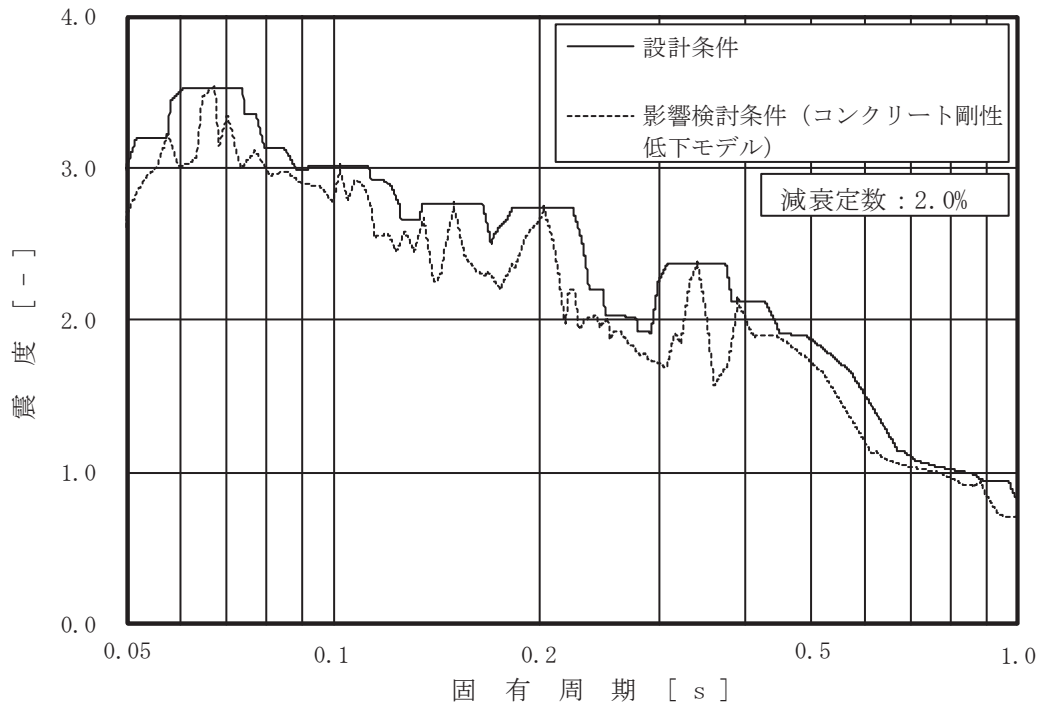


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (42/63) (基準地震動  $S_s$  , ガスタービン発電設備軽油タンク室 0.P.56.70m , 水平 (NS/EW 包絡))

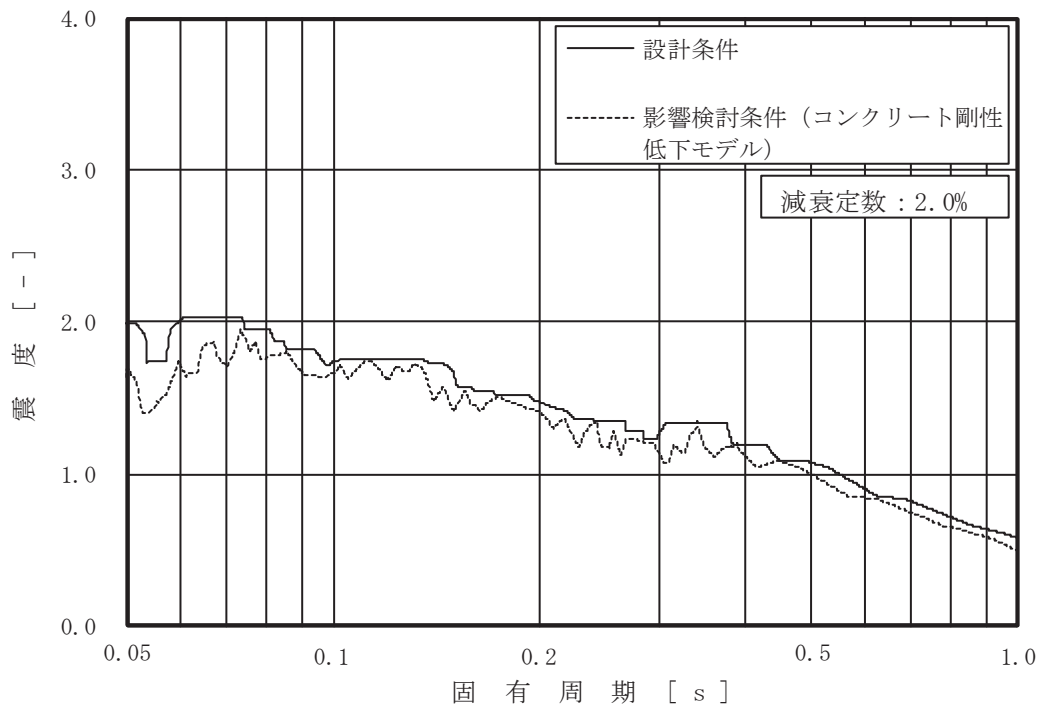


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (43/63)  
(基準地震動  $S_s$  , ガスタービン発電設備軽油タンク室 0.P.56.70m , 鉛直)

(6) 軽油タンク連絡ダクト

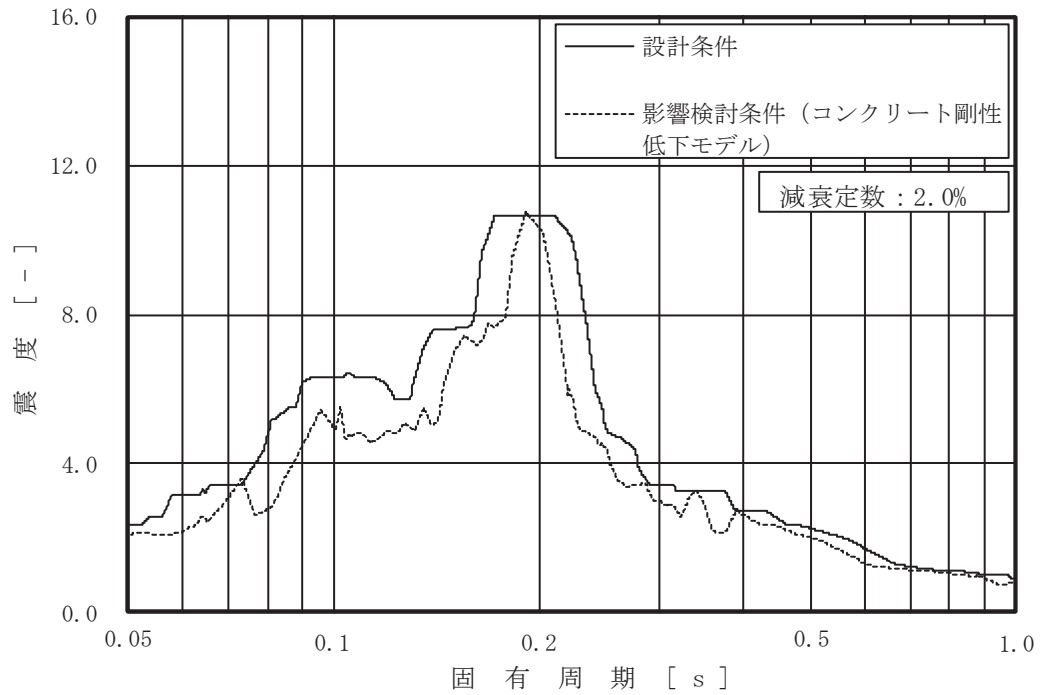


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (44/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.12.10m , 水平 (NS/EW 包絡))

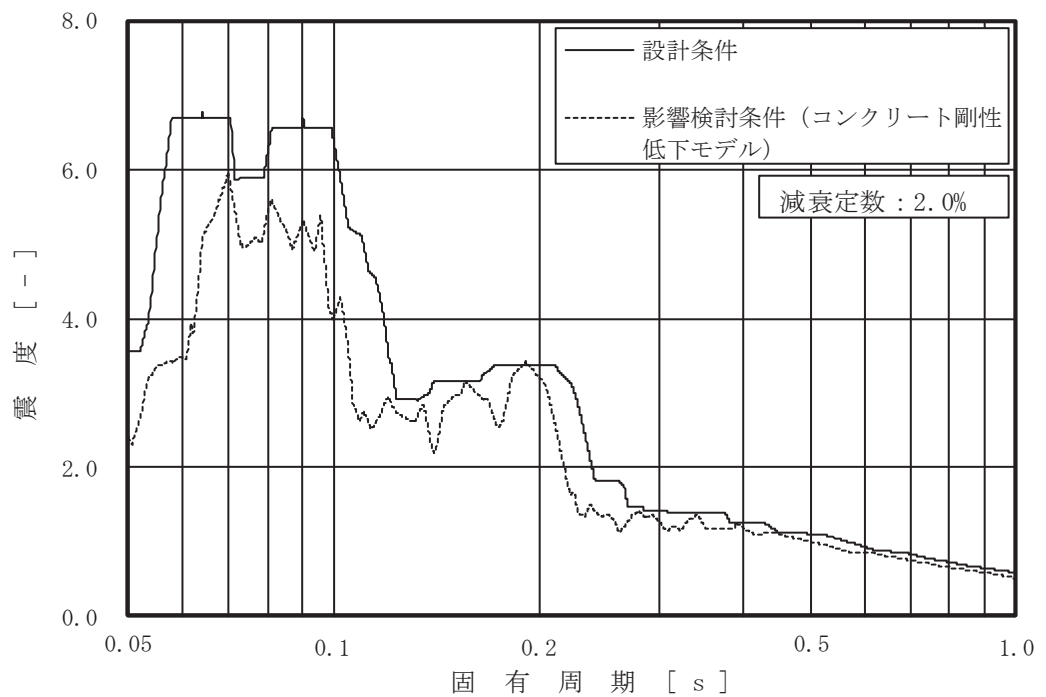


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (45/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.12.10m , 鉛直)

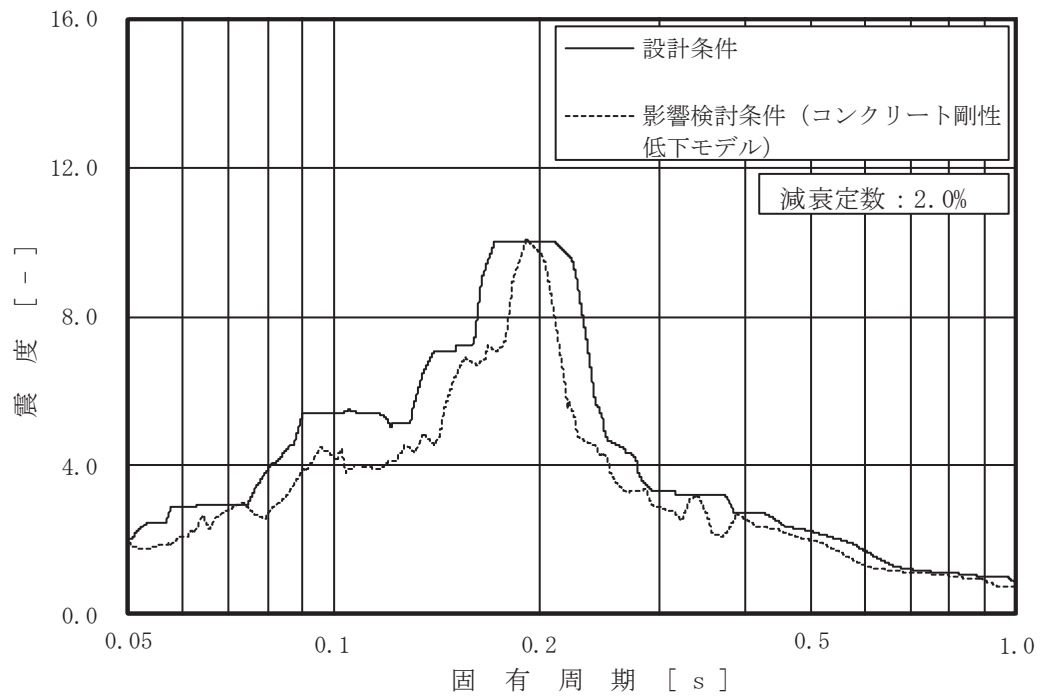


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (46/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.10.50m , 水平 (NS/EW 包絡))

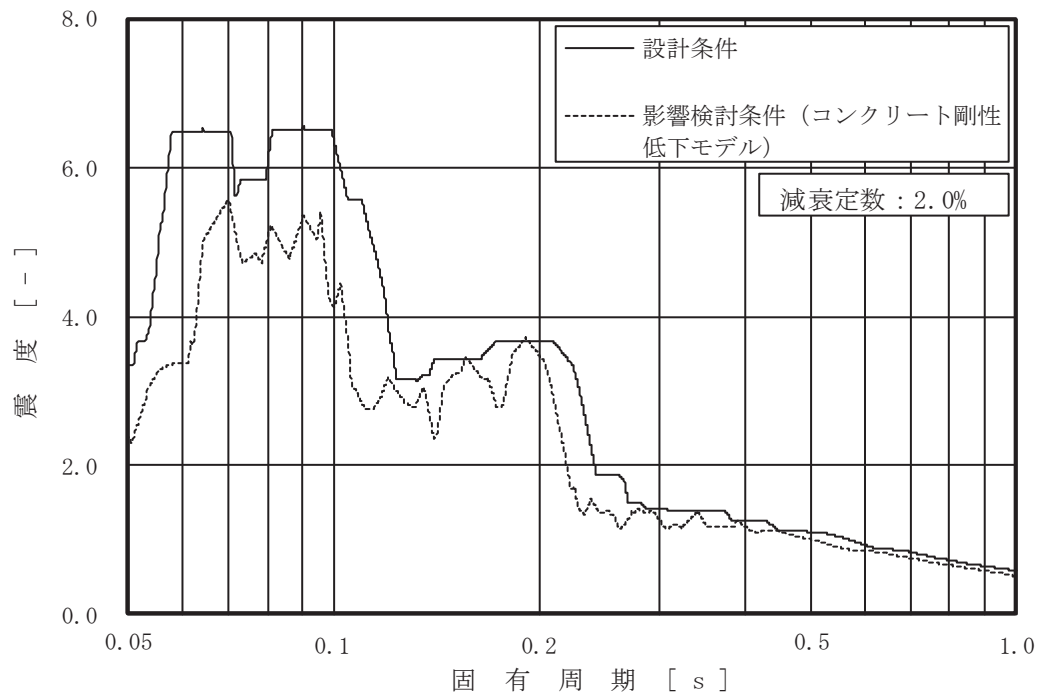


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (47/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.10.50m , 鉛直)

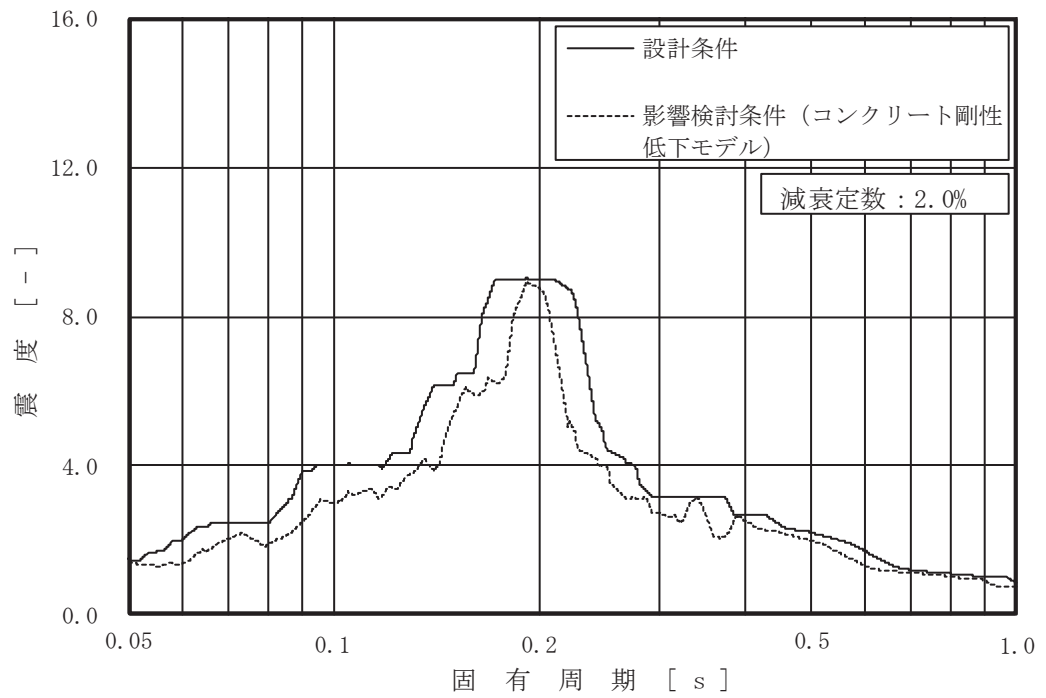


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (48/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.9.50m , 水平 (NS/EW 包絡))

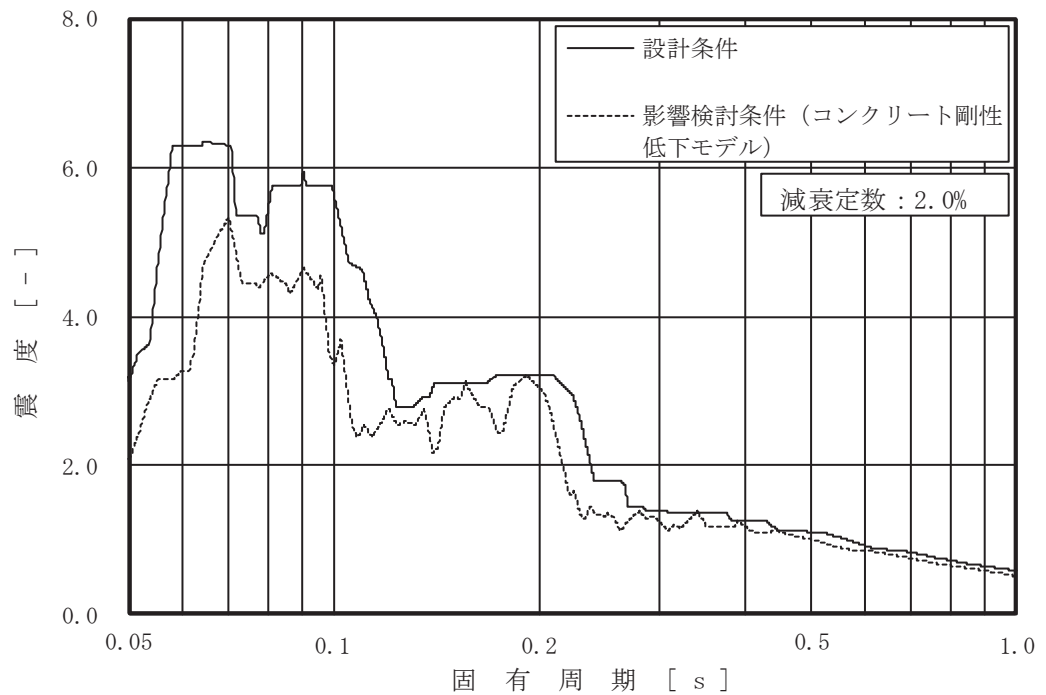


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (49/63)

(基準地震動  $S_s$  , 軽油タンク連絡ダクト 0.P.9.50m , 鉛直)



(7) 排気筒基礎

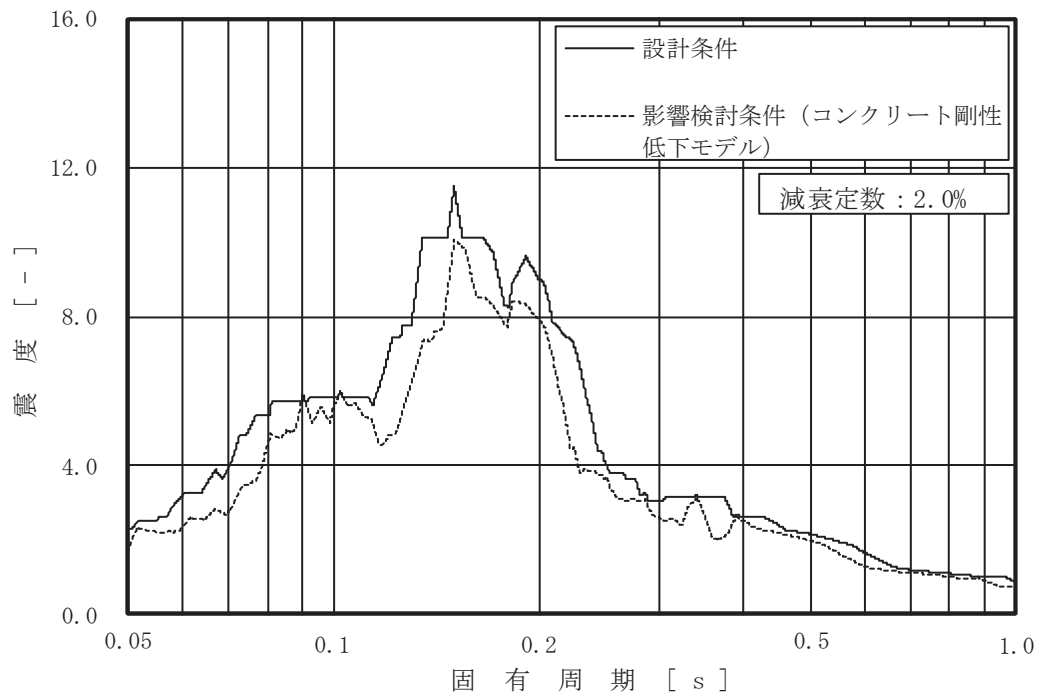


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (50/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒基礎 0.P.14.80m , 水平 (NS/EW 包絡))

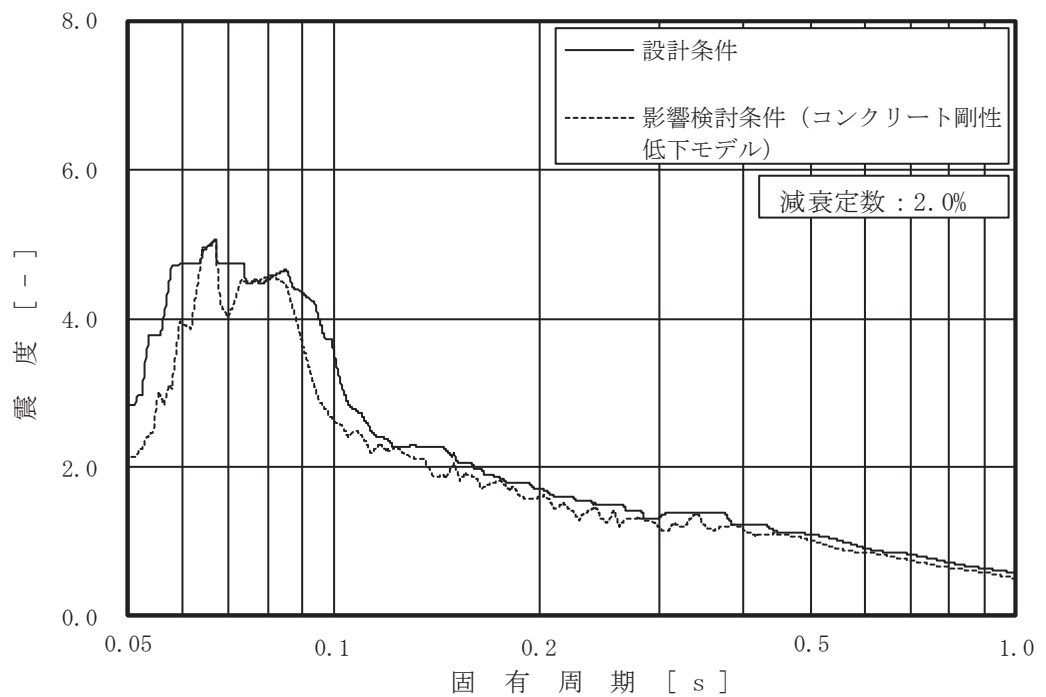


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (51/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒基礎 0.P.14.80m , 鉛直)

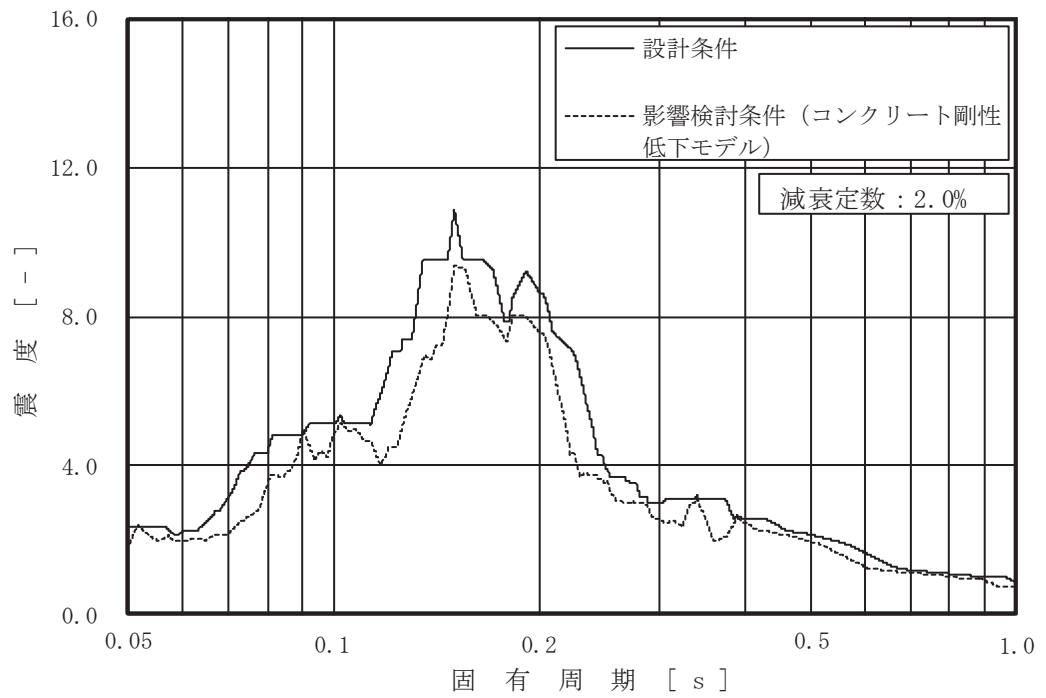


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (52/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒基礎 0.P.10.41m , 水平 (NS/EW 包絡))

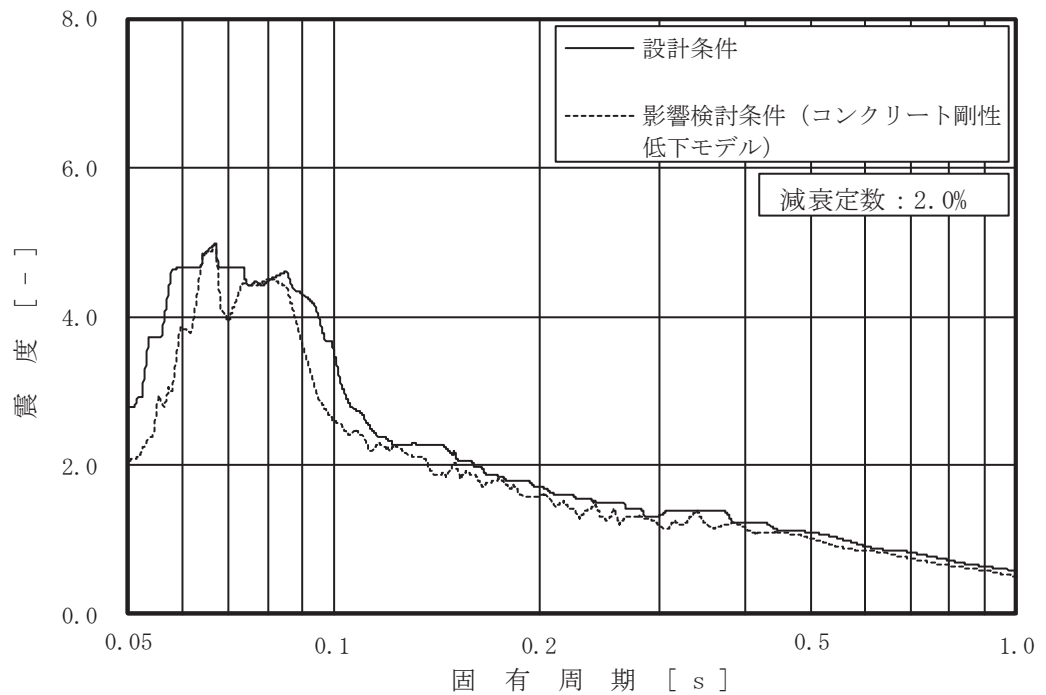


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (53/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒基礎 0.P.10.41m , 鉛直)

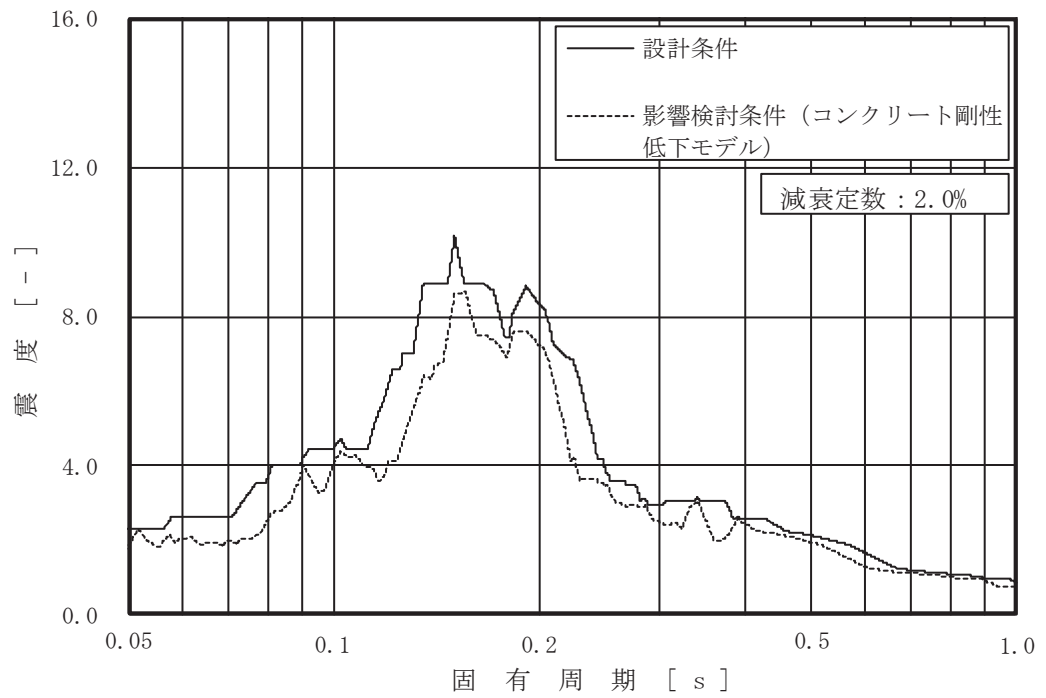


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (54/63)

(基準地震動 S s , 排気筒基礎 0.P.6.60m , 水平 (NS/EW 包絡))

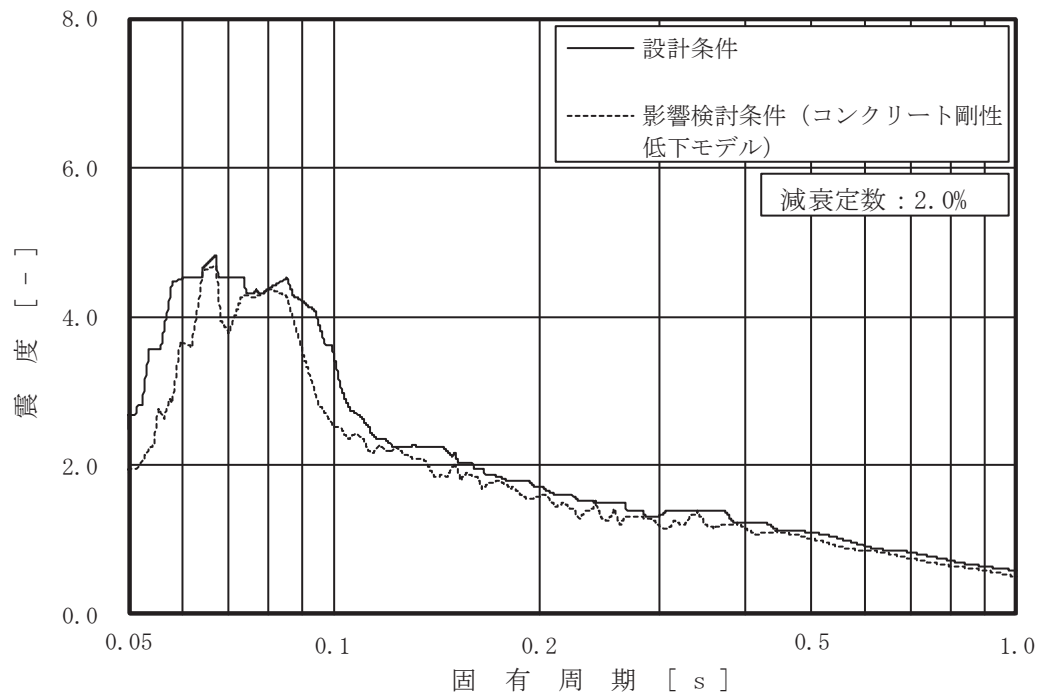


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (55/63)

(基準地震動 S s , 排気筒基礎 0.P.6.60m , 鉛直)

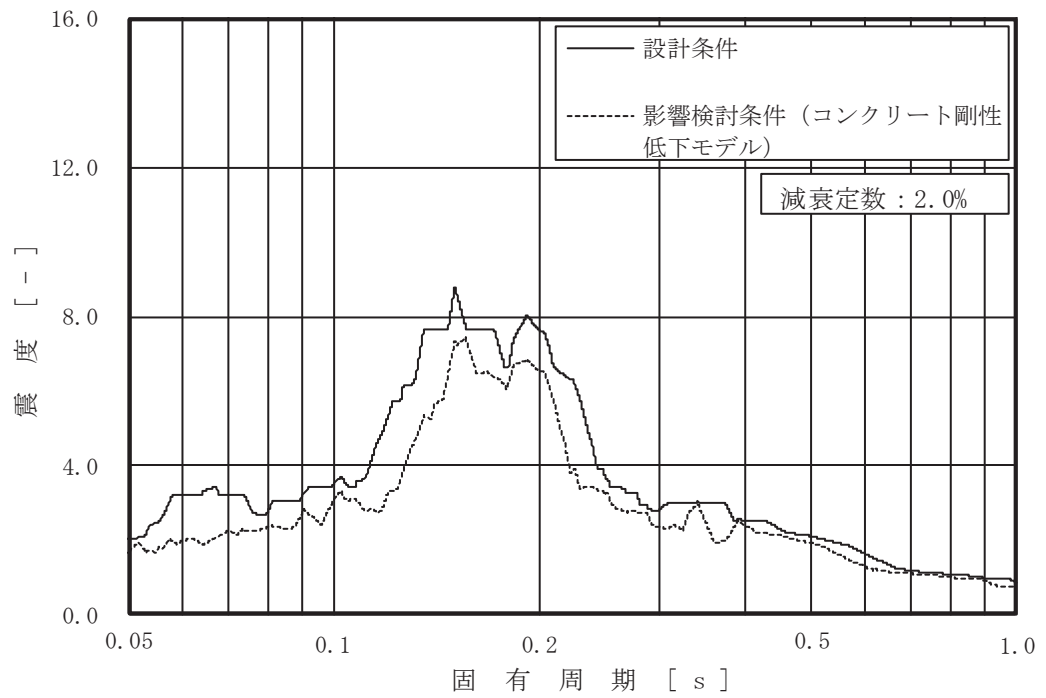


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (56/63)

(基準地震動 S s , 排気筒基礎 0.P.1.00m , 水平 (NS/EW 包絡))

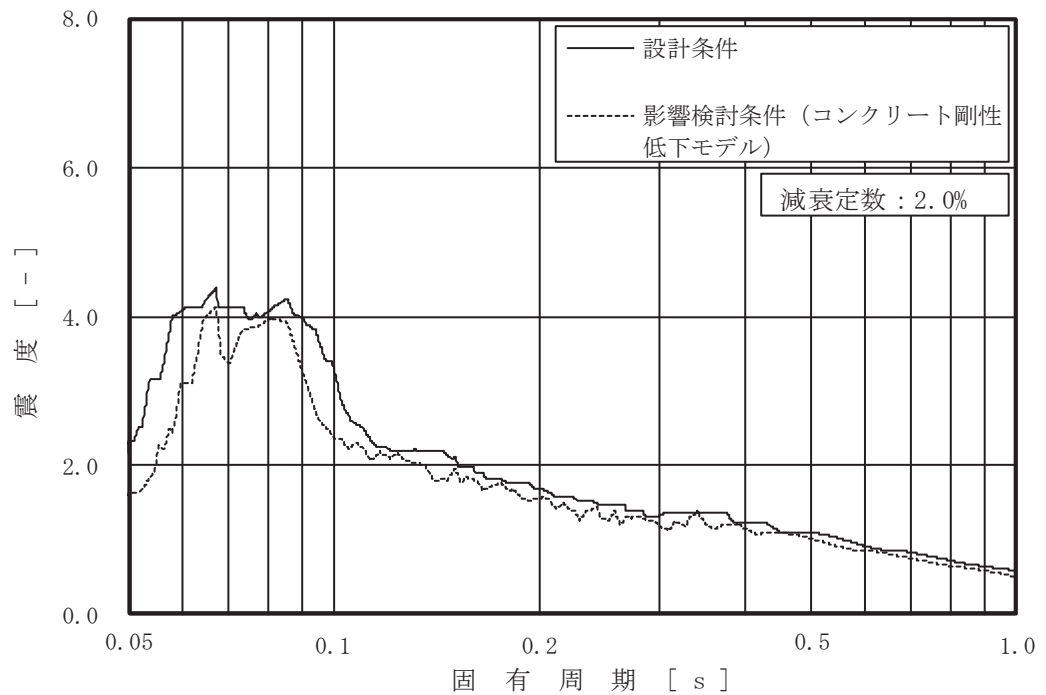


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (57/63)

(基準地震動 S s , 排気筒基礎 0.P.1.00m , 鉛直)

(8) 排気筒連絡ダクト

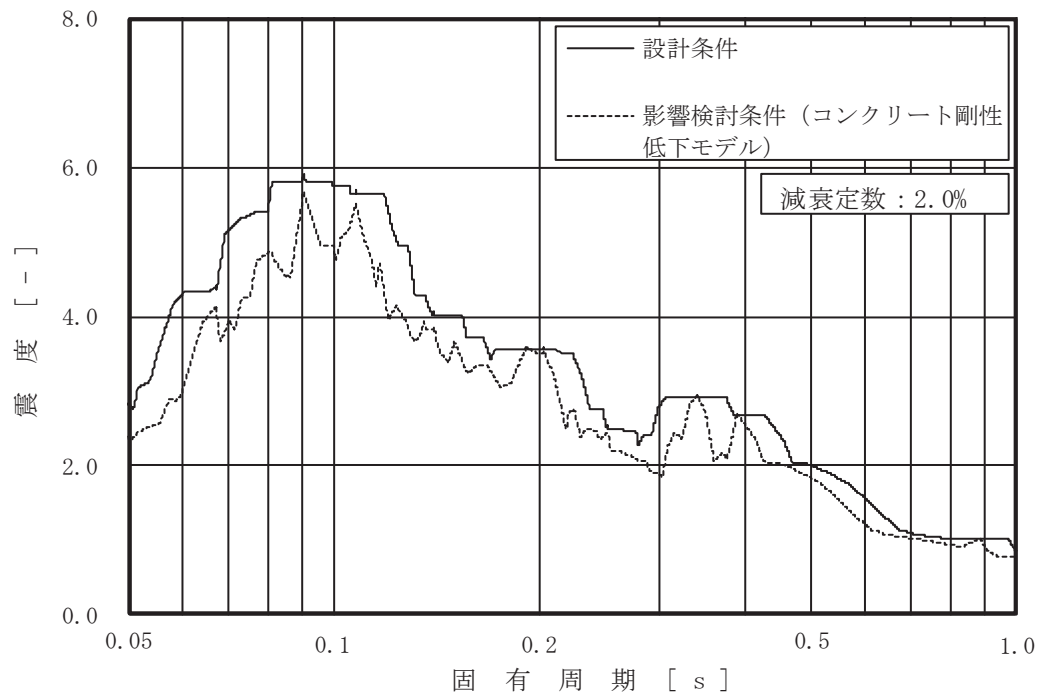


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (58/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 上床板 , 水平 (NS/EW 包絡))

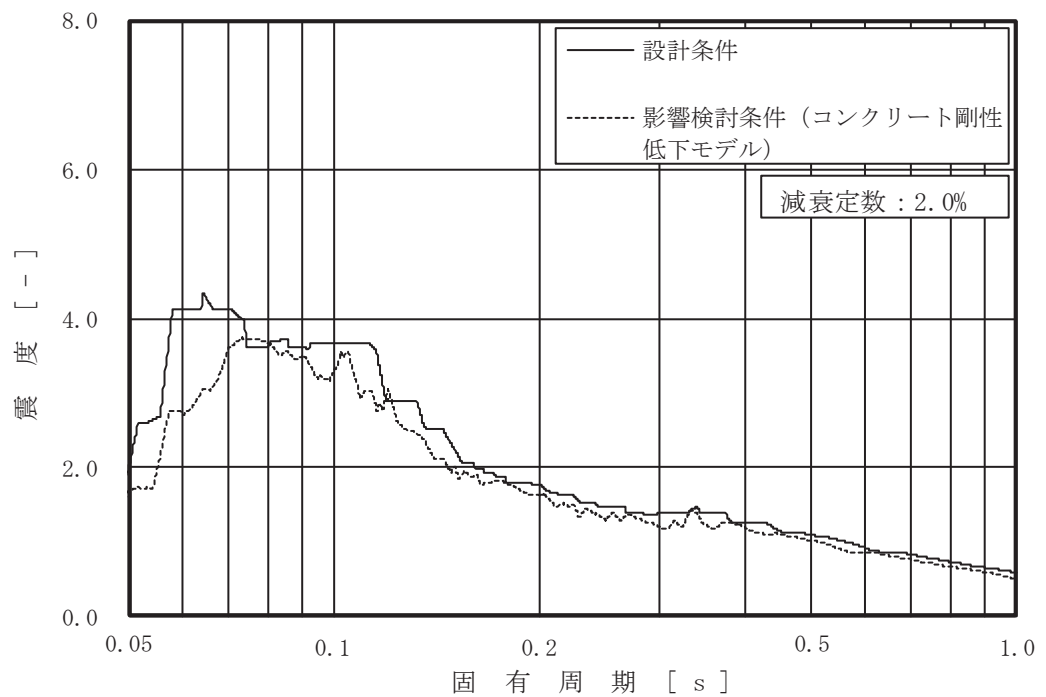


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (59/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 上床板 , 鉛直)

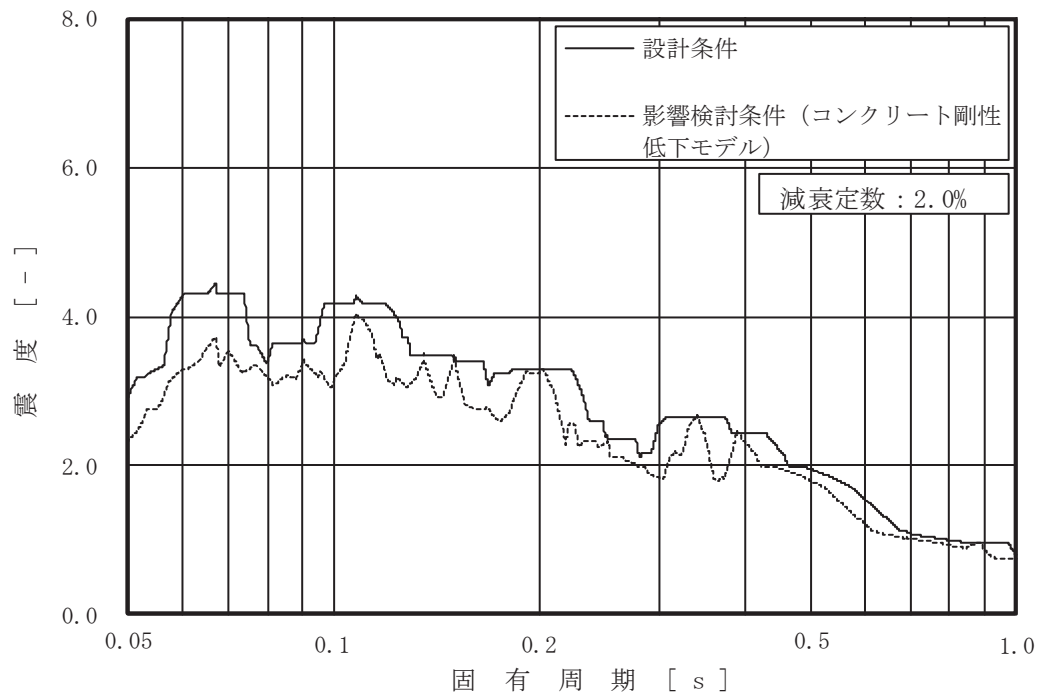


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (60/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 中間点 , 水平 (NS/EW 包絡))

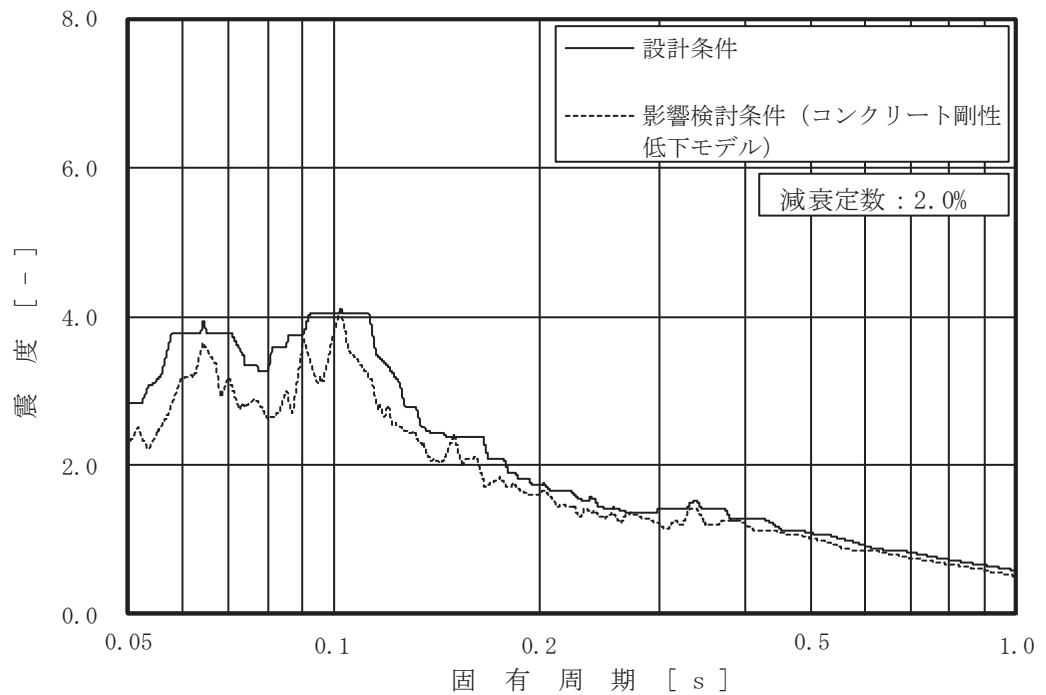


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (61/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 中間点 , 鉛直)

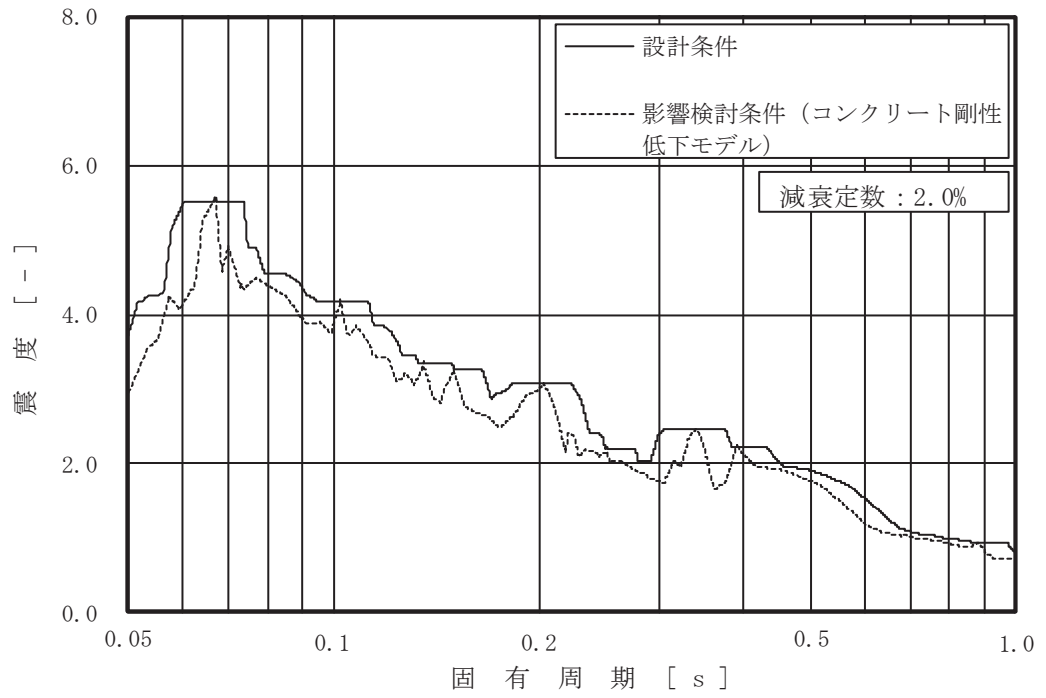


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (62/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 底板 , 水平 (NS/EW 包絡))

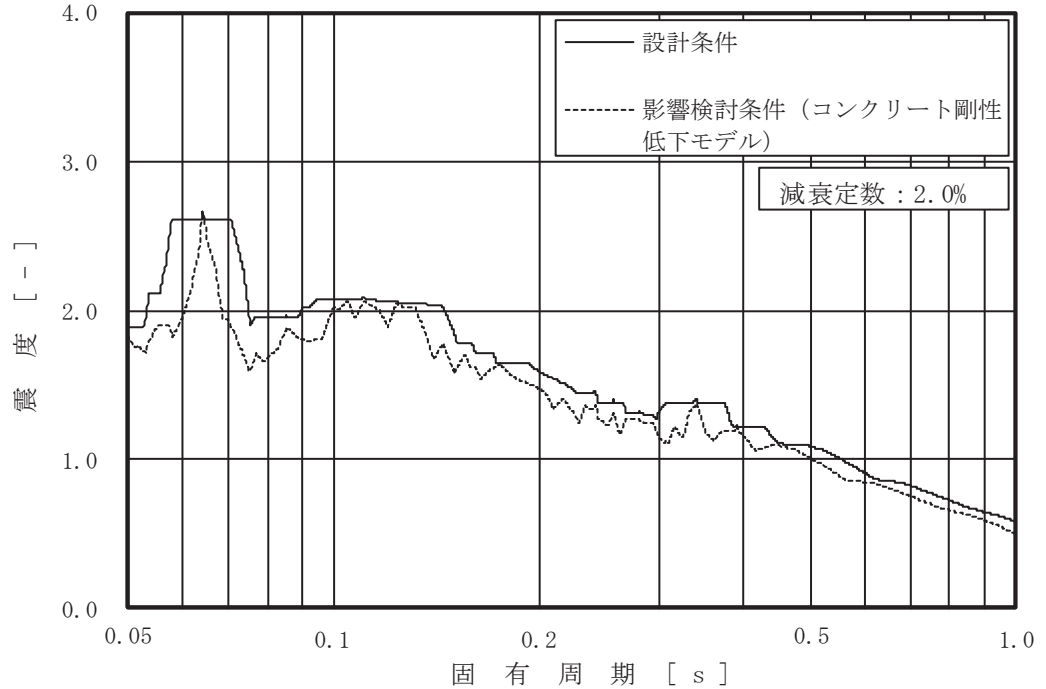


図 4-1 床応答スペクトルの比較 (63/63)  
 (基準地震動  $S_s$  , 排気筒連絡ダクト 底板 , 鉛直)

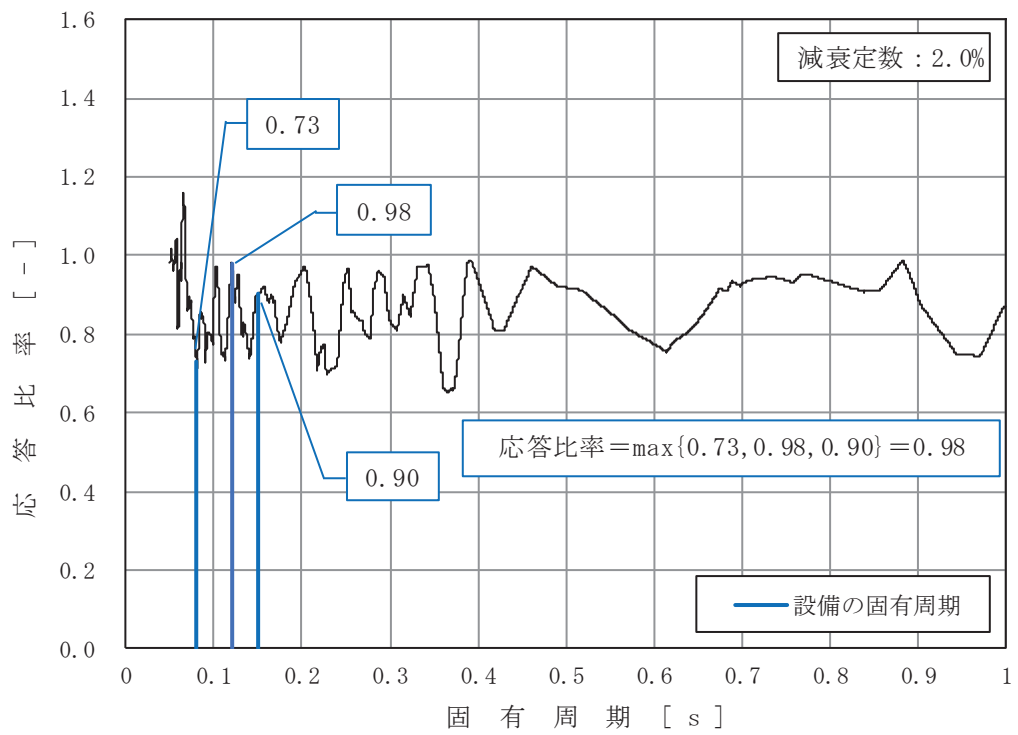


図 4-2 床応答スペクトルにおける応答比率の算定例  
 (基準地震動  $S_s$ , 海水ポンプ室 O.P. -9.800m, 水平 (NS/EW 包絡),  
 固有周期 : 0.08s, 0.12s, 0.15s)



#### 4.2 相対変位の影響

2. 項「検討方針」に示すように屋外重要土木構造物等にコンクリートの初期剛性低下（影響検討条件）を考慮した場合の機器・配管系への影響確認は、床応答曲線及び最大応答加速度を用いて行うこととしているが、機器・配管系の耐震性評価においては、各屋外重要土木構造物等の相対変位も考慮する必要があるため、その影響について確認した。

屋外重要土木構造物等のうち箱型構造物として海水ポンプ室、線状構造物として軽油タンク連絡ダクトを代表として、設備設計に用いている各方向、各標高の設計条件と影響検討条件の相対変位<sup>\*1</sup>の比較を表 4-10～11 に示す。

影響検討条件の相対変位を設計条件の相対変位と比較すると、方向によっては設計条件を上回る場合があるが、相対変位の差異は 1mm 未満であることから影響は軽微である。

したがって、屋外重要土木構造物等にコンクリートの初期剛性低下（影響検討条件）を考慮した場合の機器・配管系への影響確認は床応答曲線及び最大応答加速度を用いて実施する。

なお、5. 項に示す詳細評価を実施した配管系においては、影響検討条件の相対変位についても反映した評価<sup>\*2</sup>を実施し、算出値が許容値以下になることを確認した（結果は 5. 項 表 5-2 にて後述）。

注記\*1:



\*2: 影響検討条件の相対変位が設計条件の相対変位を下回った場合については、当該方向の設計条件の相対変位を適用。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(1) 海水ポンプ室－原子炉建屋間\*

表 4-10(1) 相対変位の比較（水平方向（NS））

標高 O. P. (m)		相対変位 (mm)		差異 (②-①)
海水ポンプ室	原子炉建屋	①設計条件	②影響検討条件	
				-0.2
				-0.2
				-0.1

表 4-10(2) 相対変位の比較（水平方向（EW））

標高 O. P. (m)		相対変位 (mm)		差異 (②-①)
海水ポンプ室	原子炉建屋	①設計条件	②影響検討条件	
				-2.9
				-2.3
				-1.4

表 4-10(3) 相対変位の比較（鉛直）

標高 O. P. (m)		相対変位 (mm)		差 (②-①)
海水ポンプ室	原子炉建屋	①設計条件	②影響検討条件	
				0.2
				0.2
				0.1

注記\*：詳細評価対象となる配管系の敷設ルートは、海水ポンプ室（原子炉機器冷却配管ダクト（鉛直部）含む）－原子炉機器冷却配管ダクト（水平部）－原子炉建屋であるが、原子炉機器冷却配管ダクト（水平部）には配管支持構造物を設置していないため、海水ポンプ室－原子炉建屋間の相対変位を考慮する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 軽油タンク連絡ダクトー原子炉建屋間

表 4-11(1) 相対変位の比較（水平方向（NS, EW 方向包絡））

標高 O. P. (m)		相対変位 (mm)		差 (②-①)
軽油タンク連絡 ダクト	原子炉建屋	①設計条件	②影響検討条件	
				0.9
				0.9

表 4-11(2) 相対変位の比較（鉛直方向）

標高 O. P. (m)		相対変位 (mm)		差 (②-①)
軽油タンク連絡 ダクト	原子炉建屋	①設計条件	②影響検討条件	
				-0.1
				-0.1

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 検討結果

「2. 検討方針」に示す影響検討フローに従った検討を行い、一部の設備（4設備）を除き、簡易評価の結果で裕度が応答比率を上回ることを確認した。

また、裕度が応答比率を下回った4設備の簡易評価結果を表5-1に、詳細評価結果を表5-2に示す。

簡易評価で裕度が応答比率を下回った4設備に対して、影響検討条件による耐震計算を行い、算出値が許容値以下になることを確認した。

表 5-1 裕度が応答比率を下回った4設備の簡易評価結果  
(コンクリート初期剛性低下を考慮した解析ケースの影響検討)

設備名称	評価部位	応力分類	今回工認の耐震評価 (基準地震動 S s)			応答比率	確認結果
			算出値 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度		
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-002)	配管本体	一次+二次 応力	457	482	1.05	1.25	×
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-012)	配管本体	一次+二次 応力	376	482	1.28	1.35	×
海水ポンプ室門型クレーン	クレーン 本体ガード	曲げ応力	263	280	1.06	1.42	×
燃料移送系配管 (DGD0-B008)	配管本体	一次+二次 応力	439	398	0.90	1.06	×
		疲労	0.4004*	1*	-		

注記\*：単位は無次元

表 5-2 簡易評価で裕度が応答比率を下回った 4 設備の詳細評価結果

(コンクリート初期剛性低下を考慮した解析ケースの影響検討)

対象設備	評価部位	応力分類	影響検討条件を用いた耐震計算 (基準地震動 S <sub>s</sub> )			確認結果	
			最大応答 加速度 (1.2ZPA)	床応答曲線	算出値 (MPa)		許容値 (MPa)
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-002)	配管本体	一次＋二次応力	水平：1.75 鉛直：1.30	海水ポンプ室 0.P.-0.550, -7.025 m 原子炉建屋 0.P.-0.8, -8.1 m (2%減衰)	402	482	○
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-012)	配管本体	一次＋二次応力	水平：2.60 鉛直：1.85	海水ポンプ室 0.P.7.250, 2.250, -0.550, -7.025 m 原子炉建屋 0.P.-0.8, -8.1 m (2%減衰)	371	482	○
海水ポンプ室門型クレーン	クレーン本体 ガード	曲げ	時刻歴応答解析による評価		246	280	○
燃料移送系配管 (DGD0-B008)	配管本体	一次＋二次応力	水平：1.97 鉛直：1.37	軽油タンク連絡ダクト 0.P.12.1, 10.5, 9.5 m 原子炉建屋 0.P.15.0, 6.0 m (2%減衰)	439	398	○
(配管系に対し影響検討条件の相対変位を適用した場合の評価結果)							
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-002)	配管本体	一次＋二次応力		上記と同じ	402	482	○
原子炉補機冷却海水系配管 (RSW-012)	配管本体	一次＋二次応力		上記と同じ	378	482	○
燃料移送系配管 (DGD0-B008)	配管本体	一次＋二次応力		上記と同じ	458	398	○

注記\*：単位は無次元

## 6. まとめ

屋外重要土木構造物等に対してコンクリートの初期剛性低下を考慮した場合の機器・配管系への影響評価について、一部の設備（4設備）を除き、簡易評価の結果で余裕が応答比率を上回ることを確認した。

また、余裕が応答比率を下回った4設備について影響検討条件による耐震計算を行い、算出値が許容値以下となることを確認した。

以上より、屋外重要土木構造物等に対してコンクリートの初期剛性低下を考慮した場合でも機器・配管系の耐震評価への影響はない。

## 資料2 軽油タンク連絡ダクトの耐震安全性評価

## 目 次

1. 評価方法	資料 2-1
2. 評価条件	資料 2-1
2.1 評価対象断面の方向	資料 2-1
2.2 評価対象断面の選定	資料 2-7
2.3 使用材料及び材料の物性値	資料 2-8
2.4 地盤物性値	資料 2-8
2.5 評価構造物諸元	資料 2-13
2.6 地下水位	資料 2-14
2.7 耐震評価フロー	資料 2-15
2.8 適用規格	資料 2-17
3. 地震応答解析	資料 2-19
3.1 地震応答解析手法	資料 2-19
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 2-22
3.2.1 解析モデル領域	資料 2-22
3.2.2 境界条件	資料 2-24
3.2.3 構造物のモデル化	資料 2-28
3.2.4 隣接構造物のモデル化	資料 2-28
3.2.5 地盤及び MMR のモデル化	資料 2-28
3.2.6 ジョイント要素の設定	資料 2-29
3.2.7 材料特性の設定	資料 2-32
3.3 減衰定数	資料 2-34
3.4 荷重の組合せ	資料 2-41
3.4.1 機器・配管荷重	資料 2-42
3.4.2 外水圧	資料 2-42
3.4.3 積載荷重	資料 2-42
3.5 地震応答解析の解析ケース	資料 2-43
3.5.1 耐震評価における解析ケース	資料 2-43
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	資料 2-50
4. 評価内容	資料 2-54
4.1 入力地震動の設定	資料 2-54
4.2 許容限界の設定	資料 2-83
4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	資料 2-83
4.2.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）	資料 2-85
4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）	資料 2-89
4.2.4 基礎地盤の支持性能に対する許容限界	資料 2-102
5. 評価結果	資料 2-103



5.1	地震応答解析結果	資料 2-103
5.1.1	解析ケースと照査値	資料 2-103
5.1.2	層間変形角時刻歴波形（曲げ・軸力系の破壊に対する照査）	資料 2-111
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査）	資料 2-112
5.1.4	最大せん断ひずみ分布	資料 2-114
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	資料 2-117
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	資料 2-117
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	資料 2-122
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	資料 2-153
5.3.1	基礎地盤（狐崎部層）	資料 2-153
5.3.2	MMR（既設）	資料 2-155
6.	まとめ	資料 2-163

 : 記載適正化範囲

参考資料

- 参考資料 1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース ..... 資料 2- (参考) 1-1
- 参考資料 2 静的地震力に対する評価結果 ..... 資料 2- (参考) 2-1

#### 4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

##### (1) 評価条件

図4-3のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

「4.2.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）」で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

表4-3及び表4-4に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書2017や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書2017において標準とされる以下の手法とする。

- ①鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ②鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用に当たっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

材料非線形解析においては、解析コード「UC-win/WCOMD」を使用する。

表 4-3 材料非線形解析の位置付け (土木学会マニュアル)

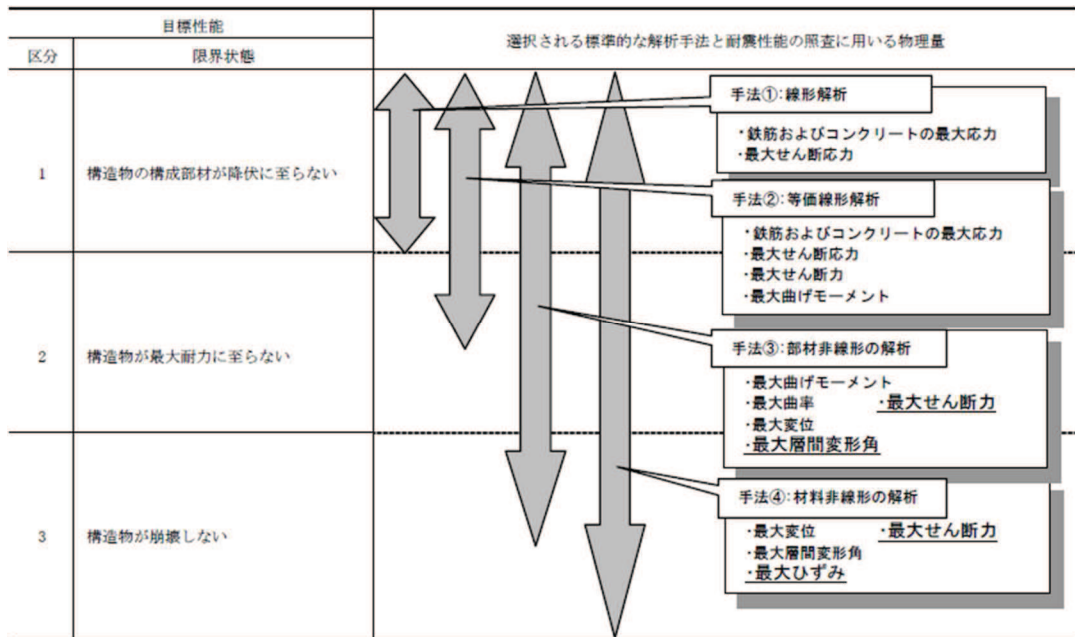


表 4-4 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モデル化	骨組モデル		有限要素	
解析次元	一次元		二次元	三次元
構成則	M- $\Phi$ , M- $\theta$ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性)	狭い ← → 広い		
	(解析時間)	短い ← → 長い		

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2017 等に基づき実施する。

表 4-5 に参考とする主な基準等を示す。

表 4-5 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	・コンクリート標準示方書2017 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 4-6 及び表 4-7 に示す。

表 4-6 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度 (20.5N/mm <sup>2</sup> ) ／材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	2000 μ	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ-せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を 1.3 として算出

表 4-7 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017
降伏 強度	主筋	2000 N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345 N/mm <sup>2</sup>	SD345

c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、図4-4に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とにならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル端部を固定境界とする。

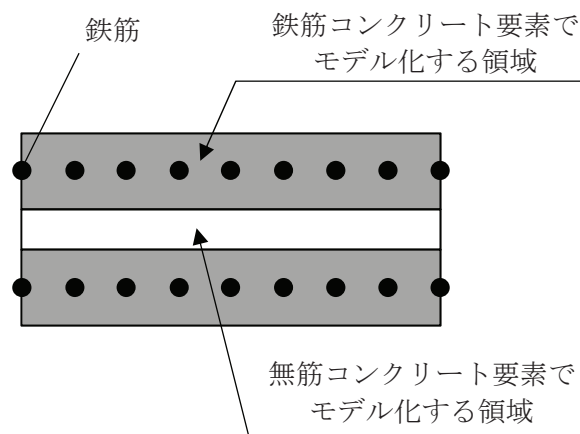


図4-4 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

d. コンクリートの非線形特性

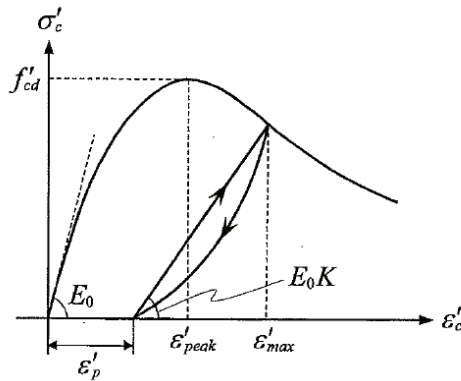
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 4-5 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を超えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 4-6 に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p)$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

ここに、

$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 4-5 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

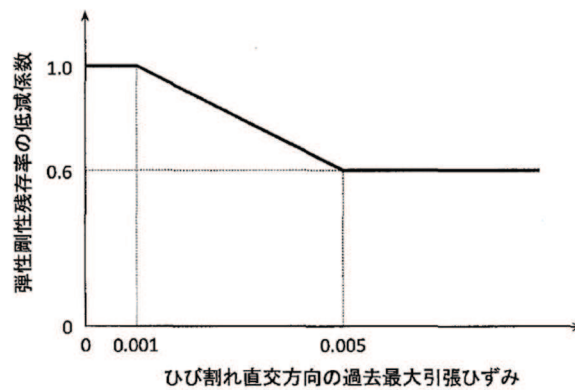
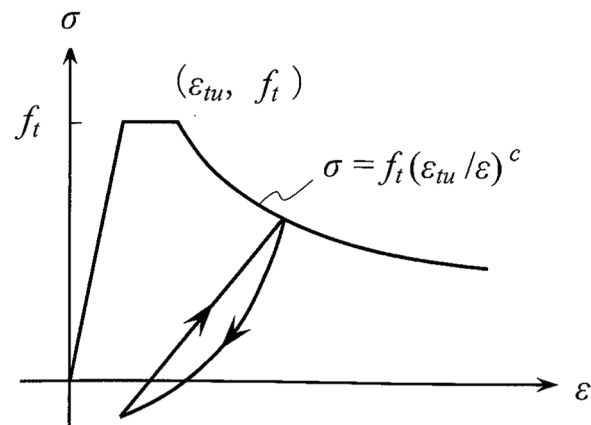


図 4-6 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-7 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、図 4-8 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f/Le$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。



- ここに、 $f_t$  : 引張強度  
 $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ  
 $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 4-7 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの  
付着効果を考慮した応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)



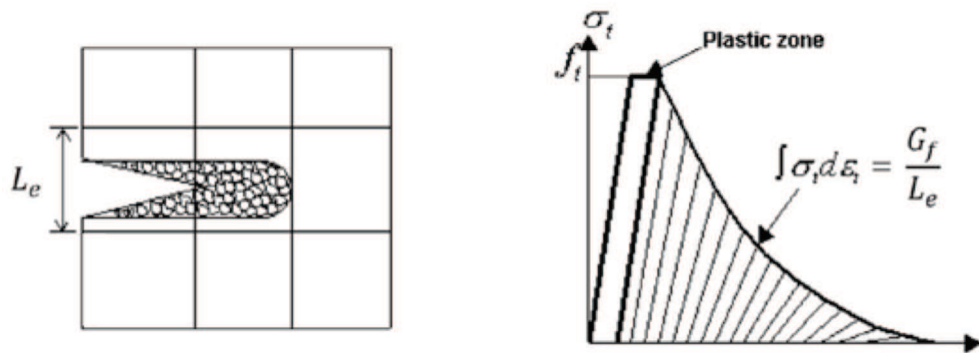
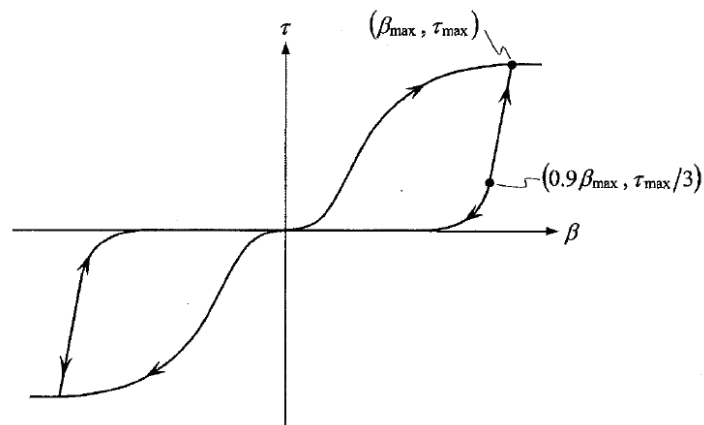


図 4-8 応力—ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-9 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比  
( $\gamma / \varepsilon$ )

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

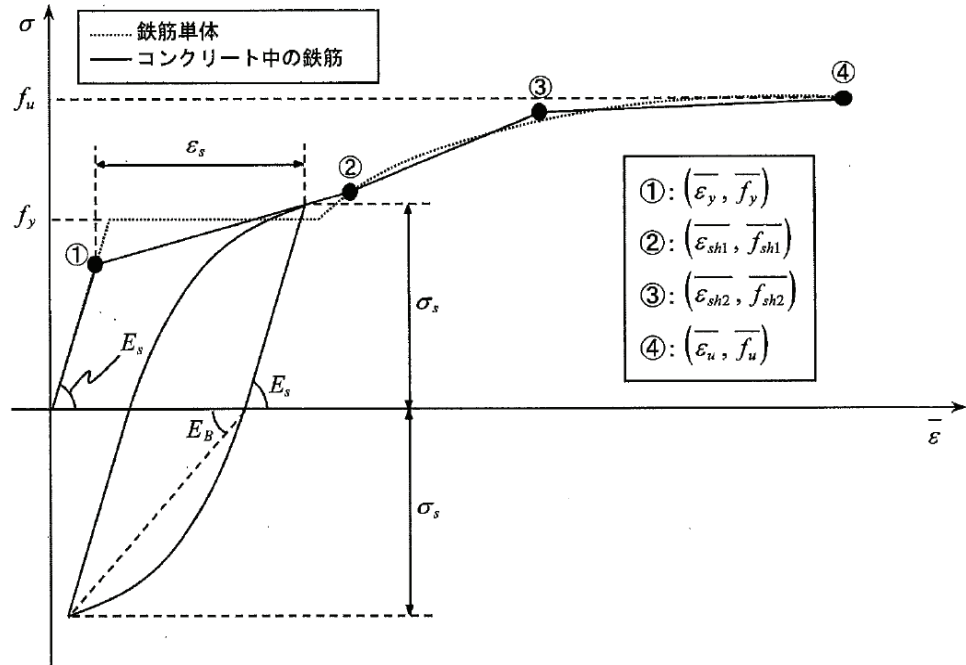
$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

図 4-9 ひび割れ面でのせん断伝達モデル  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図4-10に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- $f_y$  : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_u$  : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_y$  : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- $p$  : 鉄筋比
- $f_1$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図4-10 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\overline{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \overline{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \overline{\sigma}_C$$

ここに、 $\overline{\sigma}_S$ ,  $\overline{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ ,  $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積,  $A_{RC} = A_S + A_C$

g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析（部材非線形解析）により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価内容

a. 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを図4-11に示す。

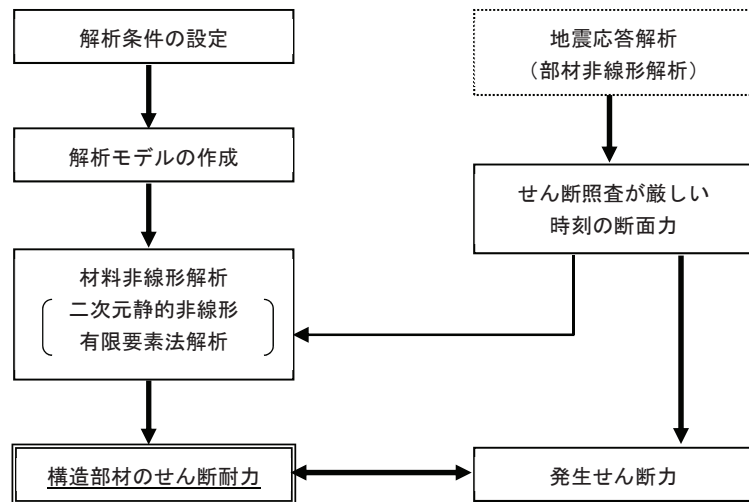


図4-11 材料非線形解析の耐震評価フロー

b. 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント，軸力，せん断力）を材料非線形解析モデルに図4-12に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図4-13に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

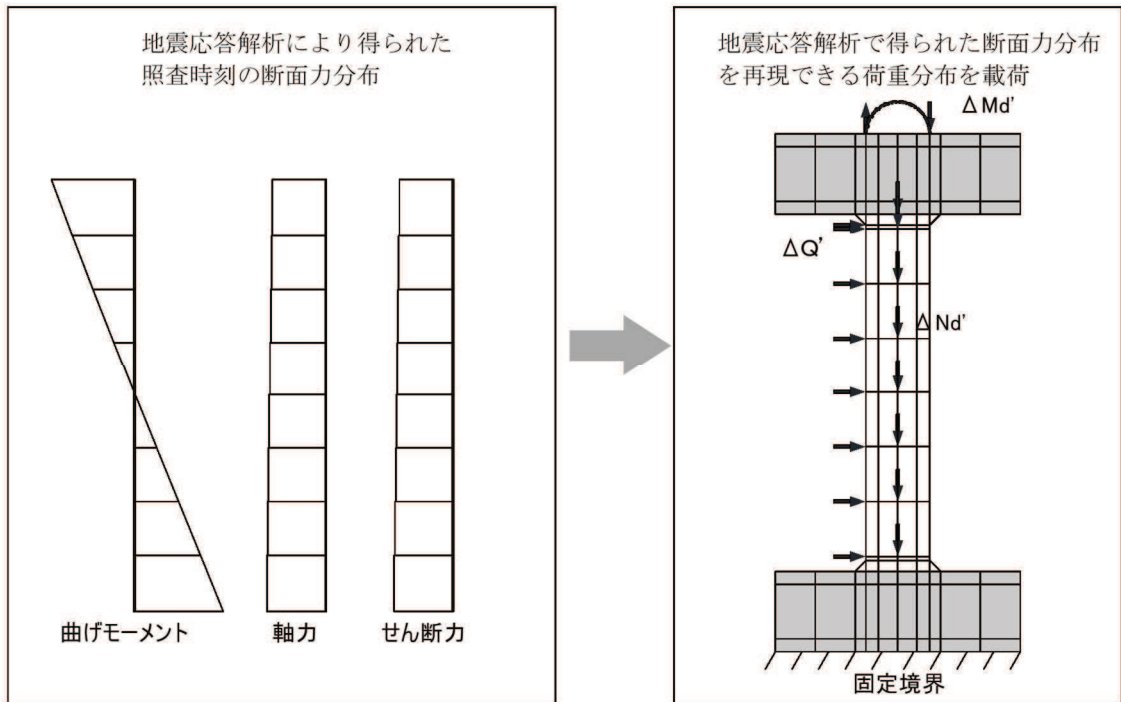


図 4-12 材料非線形解析における荷重状況

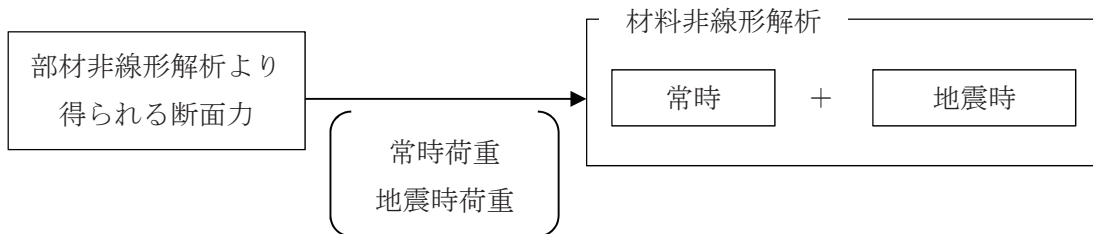


図 4-13 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係から設定する。具体的には、図 4-14 に示す例のとおり、固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係においてせん断力の増分に対して相対変位  $\delta$  が急増する直前の点を部材のせん断耐力と判断する。

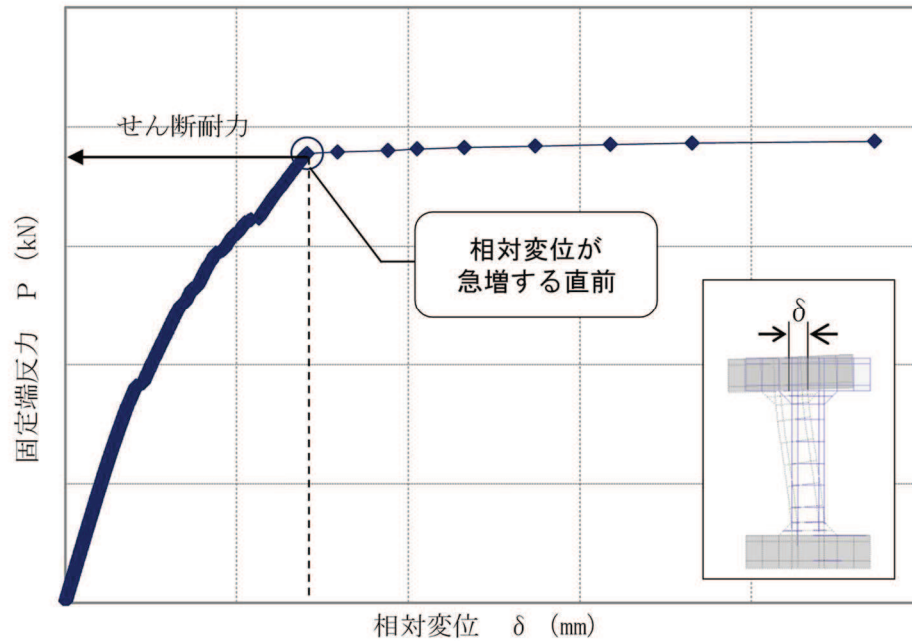


図 4-14 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、以下のとおり部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定結果を表 4-8 に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.14 を設定する（表 4-9）。

表 4-8 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.14	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_m$	1.3	文献に基づく標準的な値を設定

表 4-9 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定結果

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	427.5	0.90	
2	1187	1222.6	1.03	
3	324	359.6	1.11	
4	294	311.6	1.06	
5	581	517.1	0.89	
6	329	338.9	1.03	
7	1587	1809.2	1.14	最大値
8	350	395.5	1.13	
9	855	880.6	1.03	
10	165	104.0	0.63	
11	333	359.6	1.08	
12	127	99.1	0.78	
13	188	120.3	0.64	
14	163	117.4	0.72	
15	273	185.6	0.68	
16	356	320.4	0.90	
17	432	250.6	0.58	

## 5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

### (1) せん断耐力式による評価結果

せん断破壊に対する評価結果のうち、せん断耐力式による評価結果を表 5-9 に示す。

照査値は、せん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表中には、照査値が 1.0 を上回る解析ケース、部材があることから、次項「b. 材料非線形解析による評価結果」にて照査値が 1.0 を下回ることを確認する。



表 5-9(1) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力*3	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	
①	S s - D 1	++	頂版	3	162	150	1.08
			側壁	7	197	0	—
			隔壁	6	37	0	—
			底版	2	250	515	0.49
		-+	頂版	3	156	150	1.04
			側壁	7	205	0	—
			隔壁	6	42	0	—
			底版	2	244	515	0.48
	S s - D 2	++	頂版	3	162	150	1.08
			側壁	7	192	0	—
			隔壁	6	50	0	—
			底版	2	281	515	0.55
		-+	頂版	3	197	150	1.32
			側壁	7	204	0	—
			隔壁	6	44	0	—
			底版	2	269	515	0.53
	S s - D 3	++	頂版	3	200	150	1.34
			側壁	7	179	0	—
			隔壁	6	33	0	—
			底版	2	289	515	0.57
		-+	頂版	3	142	150	0.95
			側壁	7	158	0	—
			隔壁	6	31	0	—
			底版	2	244	515	0.48

注記\*1：評価位置を図 5-8 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

表 5-9(2) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力*3	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - F 1	++	頂版	3	167	188	0.89
			側壁	7	222	0	—
			隔壁	6	35	0	—
			底版	2	295	515	0.58
		-+	頂版	3	163	188	0.87
			側壁	7	211	0	—
			隔壁	6	32	0	—
			底版	2	308	515	0.60
	S s - F 2	++	頂版	3	222	278	0.80
			側壁	7	213	0	—
			隔壁	6	37	0	—
			底版	2	217	515	0.43
		-+	頂版	3	97	150	0.65
			側壁	7	166	0	—
			隔壁	6	29	0	—
			底版	2	211	515	0.41
	S s - F 3	++	頂版	3	164	188	0.88
			側壁	7	157	0	—
			隔壁	6	31	0	—
			底版	2	250	515	0.49
		-+	頂版	3	166	150	1.11
			側壁	7	193	0	—
			隔壁	6	40	0	—
			底版	2	271	515	0.53

注記\*1：評価位置を図 5-8 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

表 5-9(3) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力*3	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
①	S s - N 1	++	頂版	3	137	188	0.73
			側壁	7	176	0	—
			隔壁	6	31	0	—
			底版	2	268	515	0.53
		-+	頂版	3	206	309	0.67
			側壁	7	220	0	—
			隔壁	6	27	0	—
			底版	2	192	515	0.38
②	S s - D 2	-+	頂版	3	195	150	1.30
			側壁	7	219	0	—
			隔壁	6	42	0	—
			底版	2	272	515	0.53
③	S s - D 2	-+	頂版	3	199	150	1.33
			側壁	7	211	0	—
			隔壁	6	41	0	—
			底版	2	274	515	0.54
	S s - D 3	++	頂版	3	207	150	1.38
④	S s - D 2	-+	頂版	3	184	150	1.23
			側壁	7	212	0	—
			隔壁	6	45	0	—
			底版	2	304	515	0.60

注記\*1 : 評価位置を図 5-8 に示す。

\*2 : 照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3 : せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

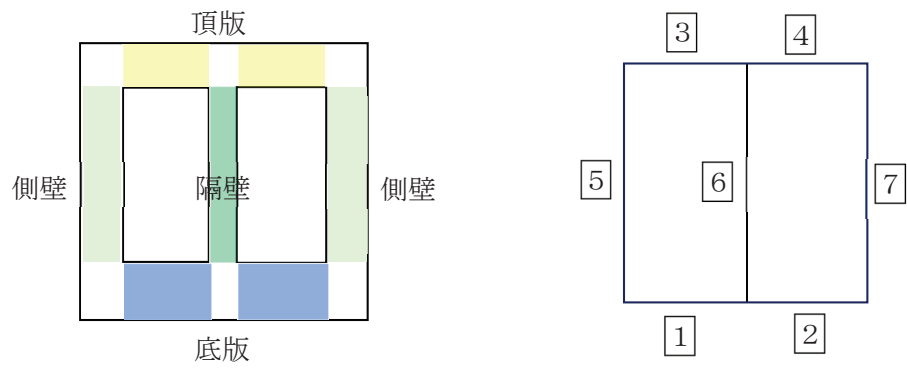


図 5-8 評価位置図

(2) 材料非線形解析による評価結果

a. 評価条件

前項「(1) せん断耐力式による評価結果」では、軽油タンク連絡ダクトの頂版、側壁、隔壁において、照査用せん断力がせん断耐力式によるせん断耐力を上回る結果となった。

せん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、ここでは、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断破壊に対する健全性を確認する。

図 5-9 に材料非線形解析によりせん断破壊に対する評価を実施する対象部材を示す。また、評価対象部材の要素分割図を図 5-10 に、要素プロパティ番号図を図 5-11 及び図 5-12、図 5-13 に、要素プロパティ条件を表 5-10 及び表 5-11、表 5-12 に示す。

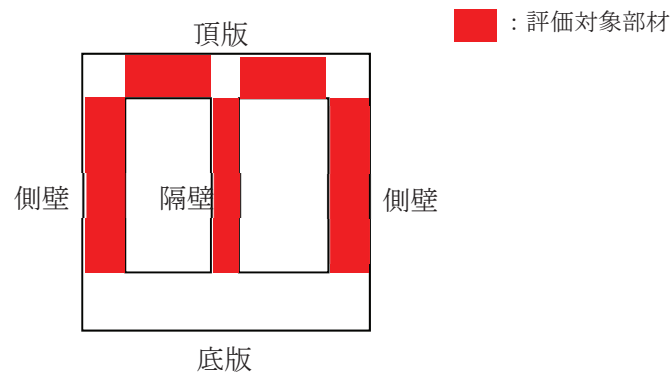
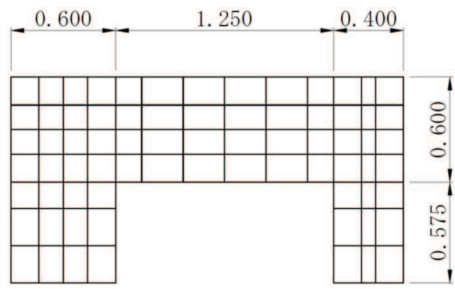
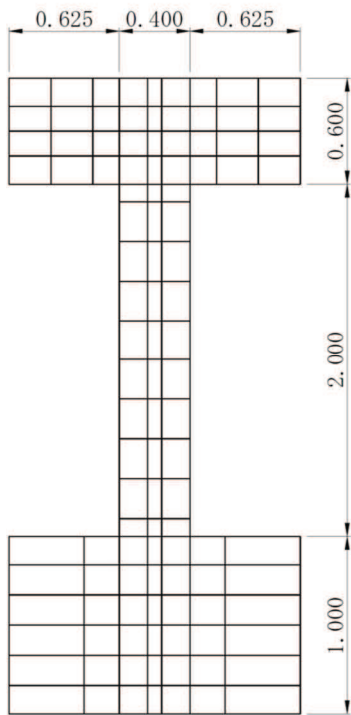


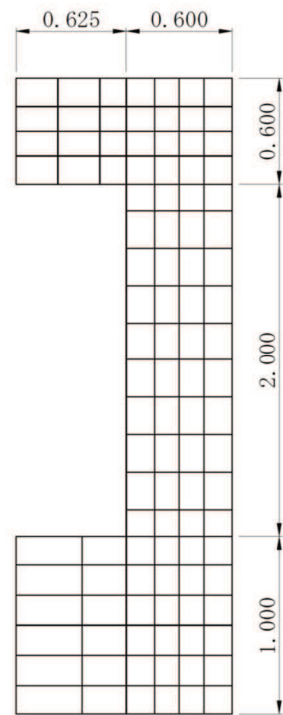
図 5-9 材料非線形解析における評価対象部材



(a) 頂版



(b) 隔壁



(c) 側壁

圖 5-10 要素分割圖

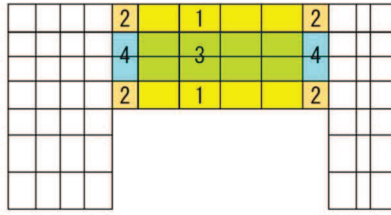


図 5-11 要素プロパティ番号図 (頂版)

表 5-10 要素プロパティ条件 (頂版)

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	R C	0.4	1.5
2	R C	0.4	1.5
3	無筋	1.9	1.5
4	無筋	1.5	1.5

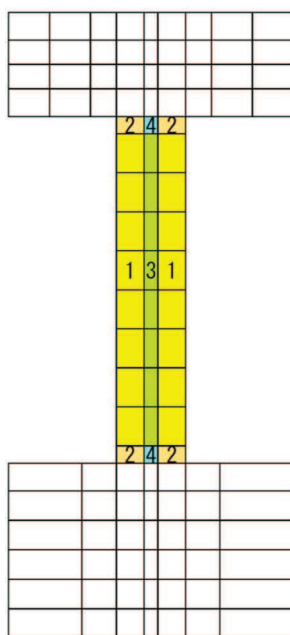


図 5-12 要素プロパティ番号図 (隔壁)

表 5-11 要素プロパティ条件 (隔壁)

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	R C	1.5	0.4
2	R C	1.5	0.4
3	無筋	1.1	1.9
4	無筋	1.1	1.2



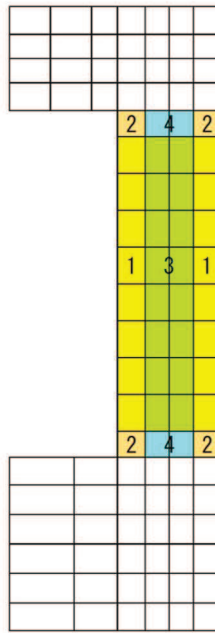


図 5-13 要素プロパティ番号図 (側壁)

表 5-12 要素プロパティ条件 (側壁)

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	R C	1.5	0.4
2	R C	1.5	0.4
3	無筋	1.5	1.8
4	無筋	1.5	1.5

材料非線形解析によるせん断耐力の算定において考慮する荷重は、地震応答解析から得られる荷重を考慮する。具体的には地震応答解析で評価対象部材のせん断照査が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 5-14 及び図 5-15、図 5-16 のように作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析から得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重を 100 分割したものを  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  とし、これらの比率を維持しながら漸増載荷する。

なお、作用荷重は、常時荷重（ $\Delta M_s$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta N_s$ ）及び地震時荷重（ $\Delta M_d$ 、 $\Delta Q_d$ 、 $\Delta N_d$ ）とし、図 5-17 に作用手順を示す。表 5-13 に代表例として、材料非線形解析による評価において最も照査値が厳しい解析ケースにおける  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  を示す。

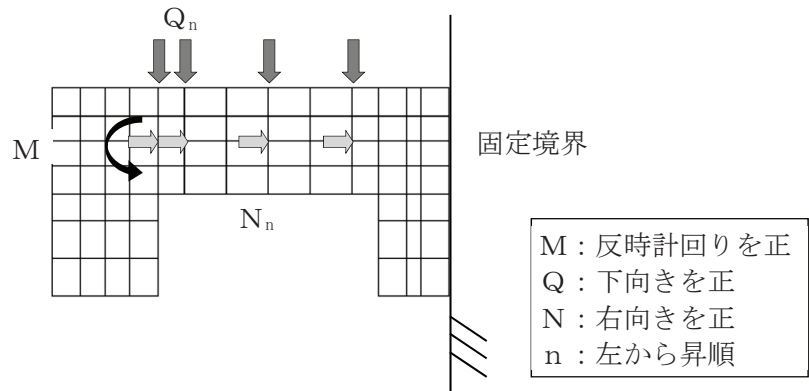


図 5-14 材料非線形解析における荷況 (頂版)

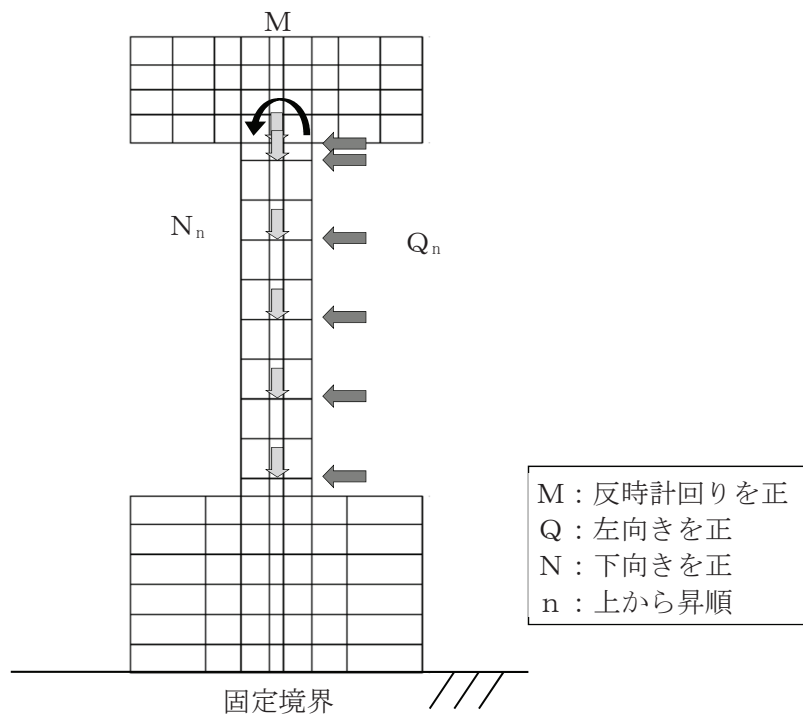


図 5-15 材料非線形解析における荷況 (隔壁)

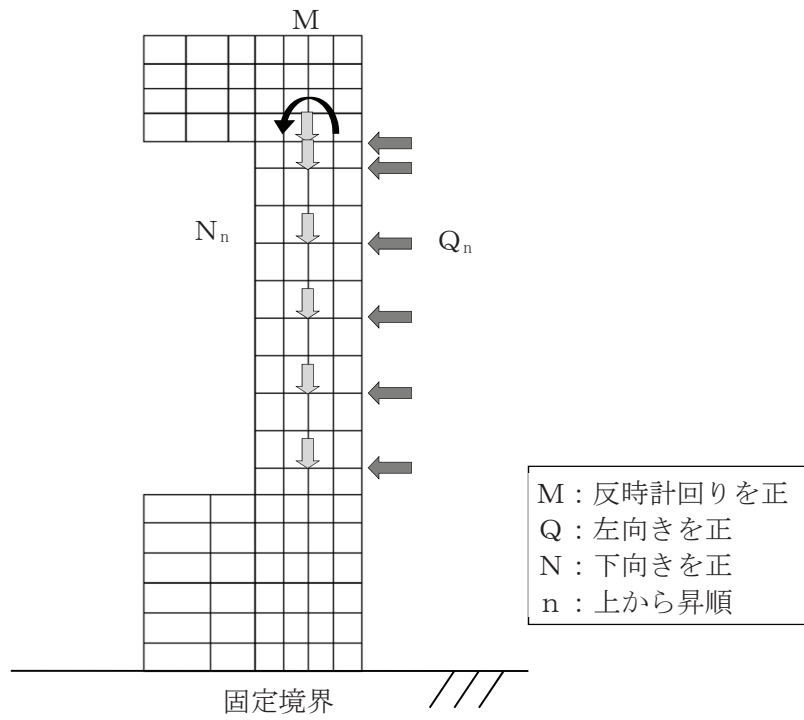


図 5-16 材料非線形解析における荷重状況（側壁）

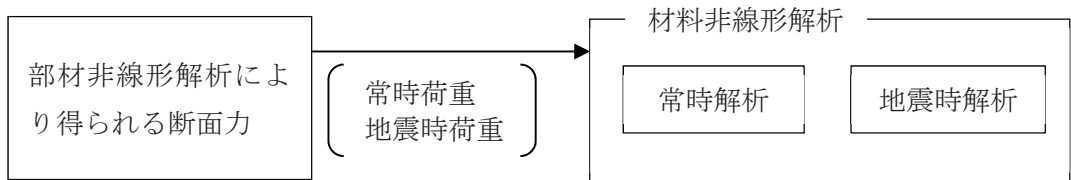


図 5-17 荷重の作用手順

表 5-13 材料非線形解析における作用荷重

部材		頂版	側壁	隔壁	
地震動		S <sub>s</sub> -D3 (++)	S <sub>s</sub> -D2 (-+)	S <sub>s</sub> -D2 (++)	
解析ケース		解析ケース③	解析ケース②	解析ケース①	
常時荷重	曲げモーメント (kN・m)	Δ M	0.1552	0.1609	-0.0092
	せん断力 (kN)	Δ Q <sub>1</sub>	-0.6338	-0.6046	0.0095
		Δ Q <sub>2</sub>	0.3042	0.1876	0.0000
		Δ Q <sub>3</sub>	0.3715	0.2479	0.0000
		Δ Q <sub>4</sub>	0.3031	0.2781	0.0000
		Δ Q <sub>5</sub>		0.3092	0.0000
		Δ Q <sub>6</sub>		0.2861	0.0000
	軸力 (kN)	Δ N <sub>1</sub>	0.7467	0.9084	1.0630
		Δ N <sub>2</sub>	-0.0008	0.0548	0.0435
		Δ N <sub>3</sub>	-0.0004	0.0643	0.0602
		Δ N <sub>4</sub>	-0.0012	0.0643	0.0602
		Δ N <sub>5</sub>		0.0643	0.0602
Δ N <sub>6</sub>			0.0548	0.0435	
地震時荷重	曲げモーメント (kN・m)	Δ M	-1.3602	-0.0970	-0.3549
	せん断力 (kN)	Δ Q <sub>1</sub>	1.8702	-1.4961	0.2976
		Δ Q <sub>2</sub>	0.0613	0.7577	0.0528
		Δ Q <sub>3</sub>	0.0913	0.8522	0.0698
		Δ Q <sub>4</sub>	0.1106	0.8285	0.0644
		Δ Q <sub>5</sub>		0.8208	0.0588
		Δ Q <sub>6</sub>		0.7036	0.0396
	軸力 (kN)	Δ N <sub>1</sub>	0.6881	-0.4929	-0.8311
		Δ N <sub>2</sub>	-0.4753	0.0352	-0.1037
		Δ N <sub>3</sub>	-1.0422	-0.2280	-0.1956
		Δ N <sub>4</sub>	0.9882	-0.1515	-0.1217
		Δ N <sub>5</sub>		-0.3238	0.2265
Δ N <sub>6</sub>			0.1011	0.1432	

b. 評価結果

(a) 頂版の評価結果

評価対象部材（頂版）における荷重－変位曲線を図 5-18 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース③，地震動 S s - D 3（++））の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。247 ステップ以降、変位の急増が認められる。

図 5-19 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、247 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、247 ステップ以降は、斜めひび割れが急激に進展する様相を示している。したがって、247 ステップ以降の変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材（頂版）に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、247 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、247 ステップにおけるせん断耐力 612. 2kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 537kN とする。

また、図 5-20 に、各ステップにおける変形図を示す。

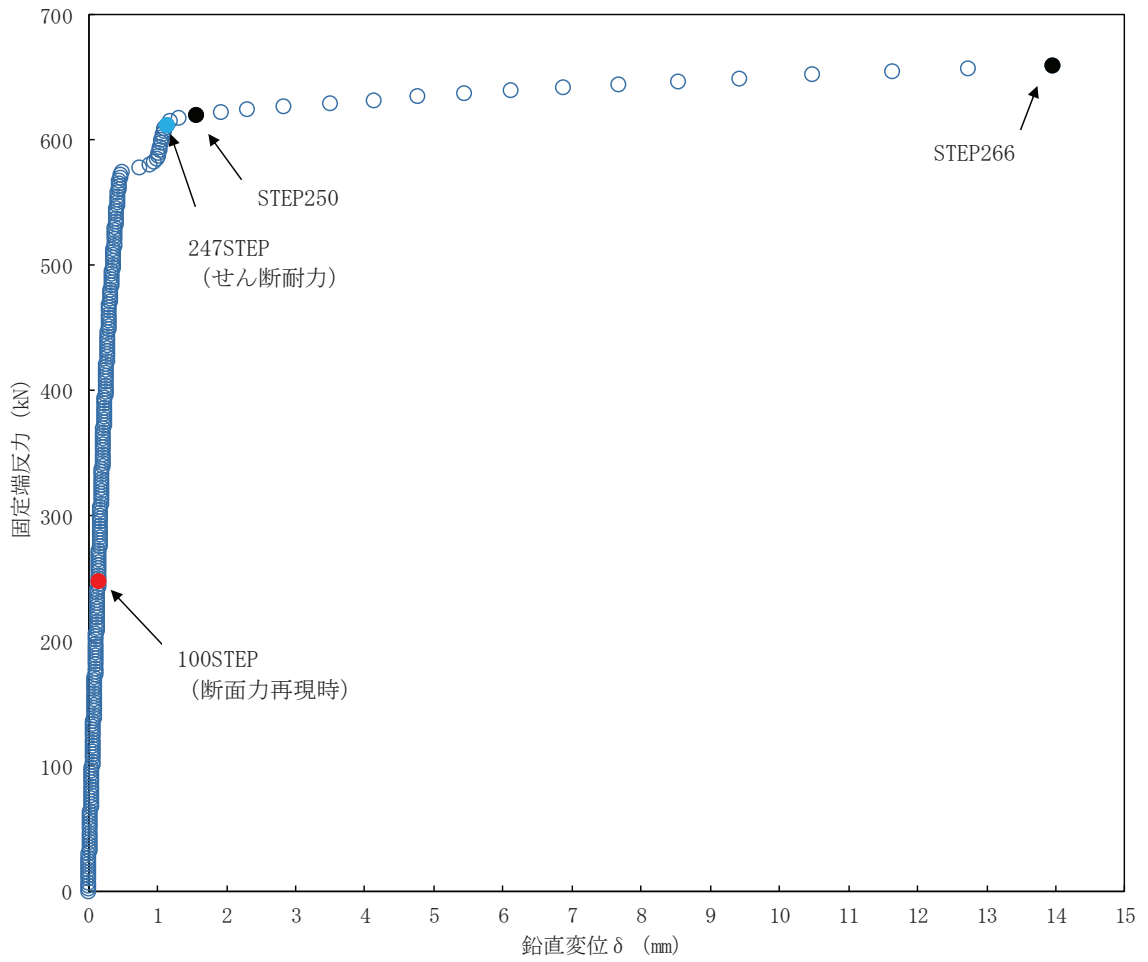
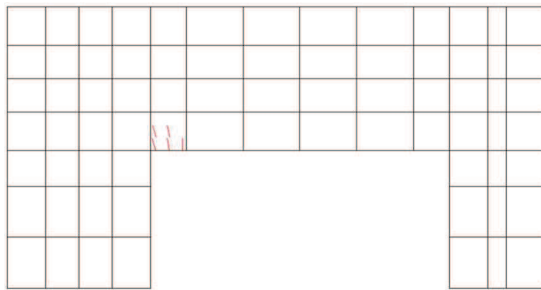
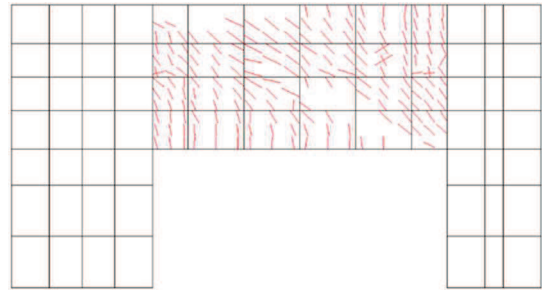


図 5-18 荷重-変位曲線  
 (頂版, 解析ケース③, S<sub>s</sub>-D3 (++) )



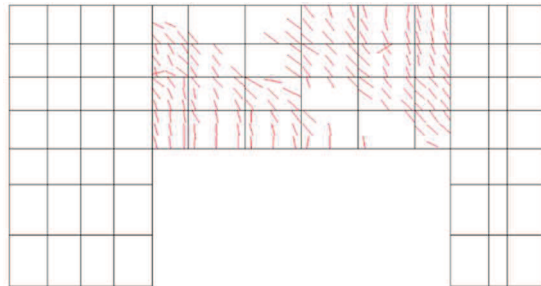
100STEP

断面力再現時



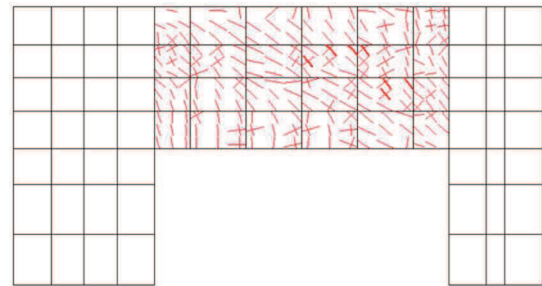
250STEP

斜めひび割れ進行



247STEP

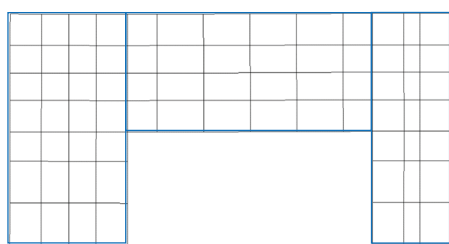
せん断耐力



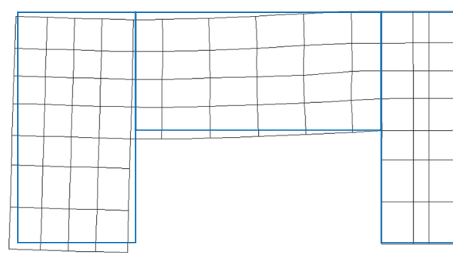
266STEP

図 5-19 各ステップにおけるひび割れ図  
(頂版, 解析ケース③,  $S_s - D3$  (++) )

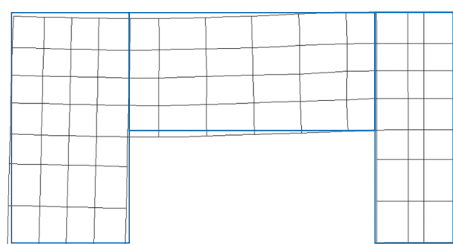




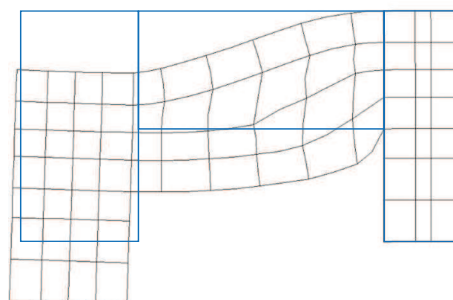
100STEP  
断面力再現時



250STEP  
斜めひび割れ進行



247STEP  
せん断耐力



266STEP

変形倍率 (×20)

図 5-20 各ステップにおける変形図  
(頂版, 解析ケース③, S<sub>s</sub>-D3 (++) )

(b) 側壁の評価結果

評価対象部材（側壁）における荷重－変位曲線を図 5-21 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース②，地震動 S s - D 2（-+））の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。305 ステップ以降、変位の急増が認められる。

図 5-22 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、305 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、305 ステップ以降は、斜めひび割れが急激に進展する様相を示している。したがって、305 ステップ以降の変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材（側壁）に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、305 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、305 ステップにおけるせん断耐力 967.2kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 848kN とする。

また、図 5-23 に、各ステップにおける変形図を示す。

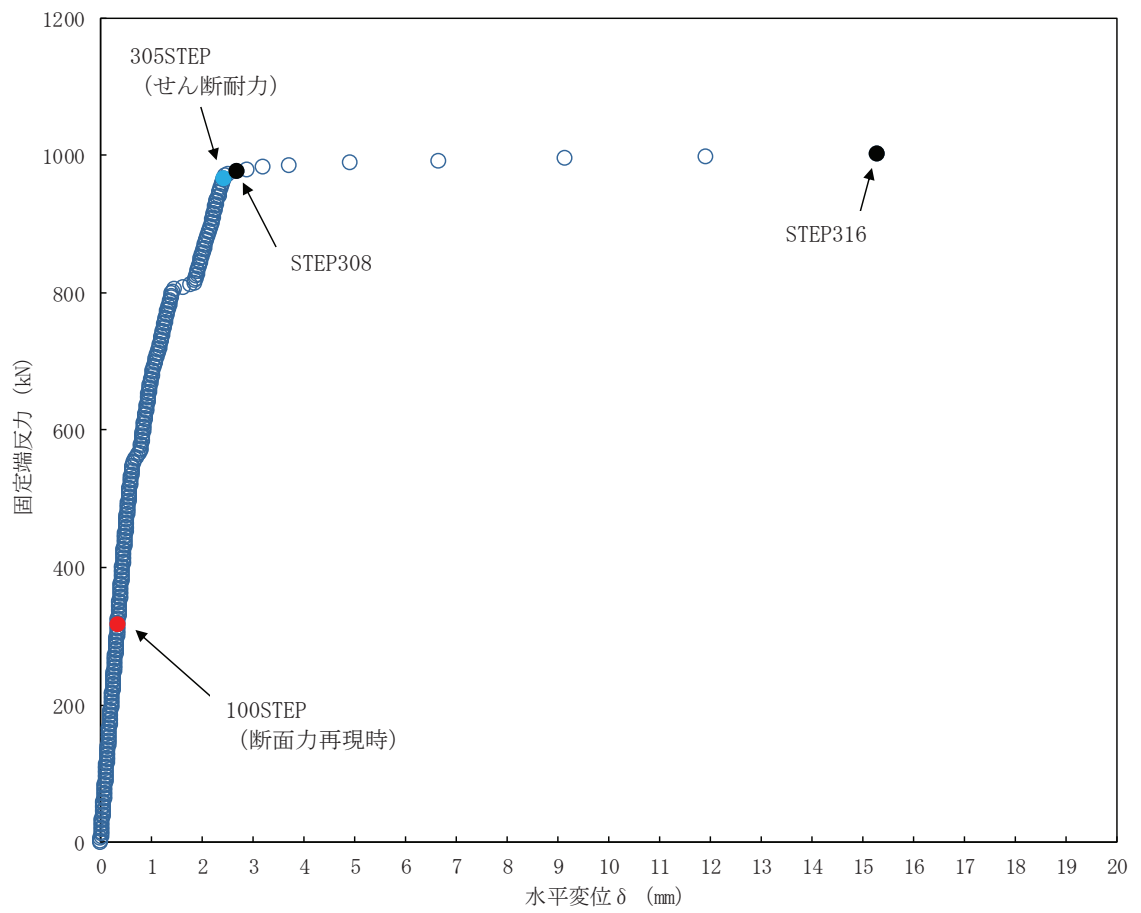
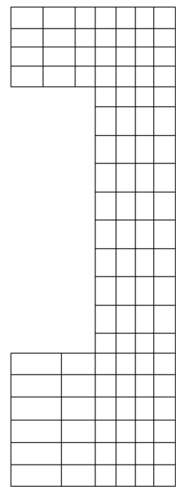


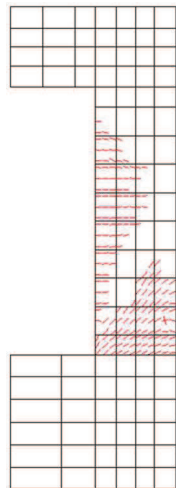
図 5-21 荷重-変位曲線  
 (側壁, 解析ケース②,  $S_s - D_2 (-+)$ )



100STEP  
断面力再現時



308STEP  
斜めひび割れ進行

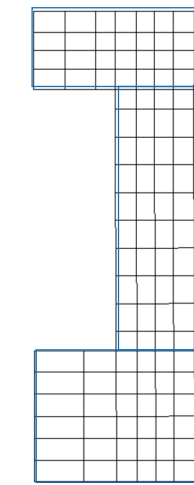


305STEP  
せん断耐力

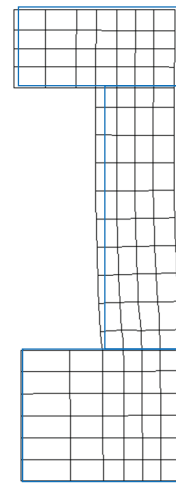


316STEP

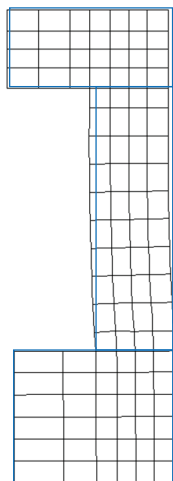
図 5-22 各ステップにおけるひび割れ図  
(側壁, 解析ケース②,  $S_s - D 2 (-+)$ )



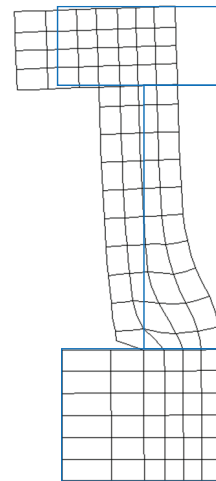
100STEP  
断面力再現時



308STEP  
斜めひび割れ進行



305 STEP  
せん断耐力



316 STEP

変形倍率 (×20)

図5-23 各ステップにおける変形図  
(側壁, 解析ケース②, S<sub>s</sub>-D2 (-+))

(c) 隔壁の評価結果

評価対象部材（隔壁）における荷重－変位曲線を図 5-24 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース①，地震動 S s - D 2（++））の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。437 ステップ以降、変位の急増が認められる。

図 5-25 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、437 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、437 ステップ以降は、斜めひび割れが急激に進展する様相を示している。したがって、437 ステップ以降の変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材（隔壁）に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、437 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、437 ステップにおけるせん断耐力 258.9kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 227kN とする。

また、図 5-26 に、各ステップにおける変形図を示す。

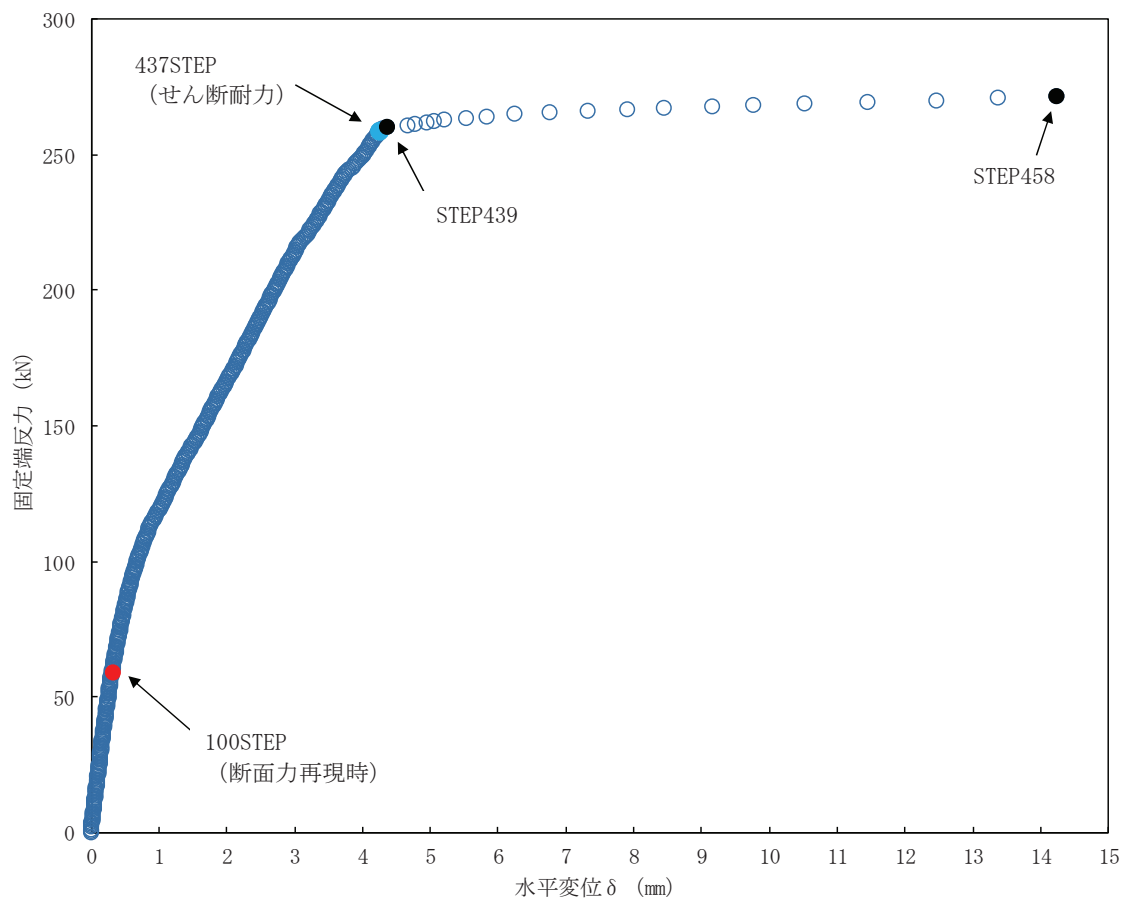
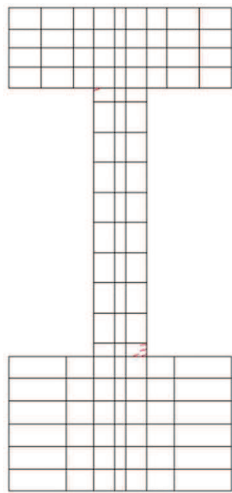
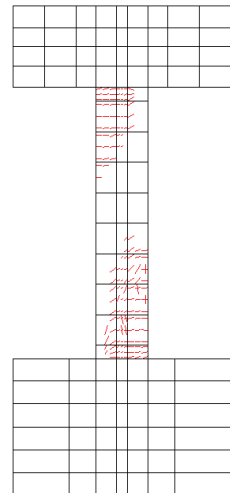


図 5-24 荷重-変位曲線  
 (隔壁, 解析ケース①,  $S_s - D_2$  (++))



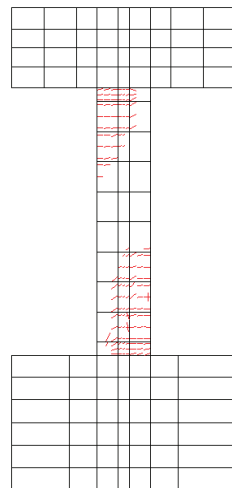
100STEP

断面力再現時



439STEP

斜めひび割れ進行



437STEP

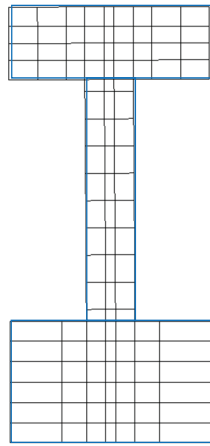
せん断耐力



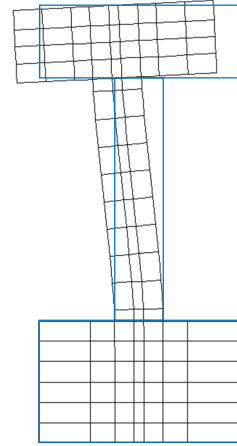
458STEP

図 5-25 各ステップにおけるひび割れ図  
(隔壁, 解析ケース①,  $S_s - D2$  (++) )

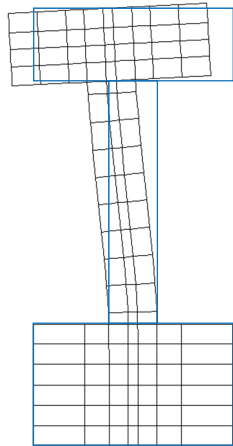




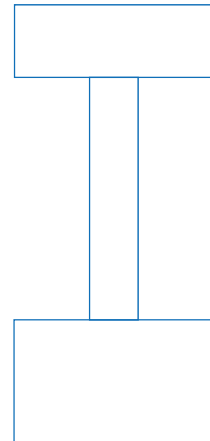
100STEP  
断面力再現時



439STEP  
斜めひび割れ進行



437STEP  
せん断耐力



458STEP

変形倍率 (×20)

図 5-26 各ステップにおける変形図  
(隔壁, 解析ケース①,  $S_s - D2 (+ +)$ )

(d) せん断力に対する評価結果

せん断耐力式及び材料非線形解析によるせん断破壊に対する評価結果を，表 5-14 に示す。

同表より，全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 5-14(1) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式及び材料非線形解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - D 1	++	頂版	3	208	554*3	0.38
			側壁	7	262	918*3	0.29
			隔壁	6	46	226*3	0.21
			底版	2	250	515	0.49
		-+	頂版	3	195	547*3	0.36
			側壁	7	277	872*3	0.32
			隔壁	6	52	224*3	0.24
			底版	2	244	515	0.48
	S s - D 2	++	頂版	3	208	575*3	0.37
			側壁	7	255	813*3	0.32
			隔壁	6	60	227*3	0.27
			底版	2	281	515	0.55
		-+	頂版	3	244	538*3	0.46
			側壁	7	277	903*3	0.31
			隔壁	6	46	202*3	0.23
			底版	2	269	515	0.53
	S s - D 3	++	頂版	3	240	532*3	0.46
			側壁	7	246	829*3	0.30
			隔壁	6	39	229*3	0.18
			底版	2	289	515	0.57
		-+	頂版	3	142	150	0.95
			側壁	7	218	952*3	0.23
			隔壁	6	33	226*3	0.15
			底版	2	244	515	0.48

注記\*1：評価位置を図 5-27 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-14(2) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式及び材料非線形解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - F 1	++	頂版	3	167	188	0.89
			側壁	7	301	827*3	0.37
			隔壁	6	36	203*3	0.18
			底版	2	295	515	0.58
		-+	頂版	3	163	188	0.87
			側壁	7	286	822*3	0.35
			隔壁	6	33	209*3	0.16
			底版	2	308	515	0.60
	S s - F 2	++	頂版	3	222	278	0.80
			側壁	7	282	808*3	0.35
			隔壁	6	40	208*3	0.20
			底版	2	217	515	0.43
		-+	頂版	3	97	150	0.65
			側壁	7	226	916*3	0.25
			隔壁	6	37	218*3	0.17
			底版	2	211	515	0.41
S s - F 3	++	頂版	3	164	188	0.88	
		側壁	7	211	950*3	0.23	
		隔壁	6	33	221*3	0.15	
		底版	2	250	515	0.49	
	-+	頂版	3	201	505*3	0.40	
		側壁	7	253	829*3	0.31	
		隔壁	6	42	211*3	0.20	
		底版	2	271	515	0.53	

注記\*1：評価位置を図 5-27 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-14(3) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式及び材料非線形解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - N 1	++	頂版	3	137	188	0.73
			側壁	7	236	831*3	0.29
			隔壁	6	33	216*3	0.16
			底版	2	268	515	0.53
		-+	頂版	3	206	309	0.67
			側壁	7	293	805*3	0.37
			隔壁	6	29	215*3	0.14
			底版	2	192	515	0.38
②	S s - D 2	-+	頂版	3	242	539*3	0.45
			側壁	7	318	848*3	0.38
			隔壁	6	44	206*3	0.22
			底版	2	272	515	0.53
③	S s - D 2	-+	頂版	3	247	539*3	0.46
			側壁	7	286	909*3	0.32
			隔壁	6	47	226*3	0.21
			底版	2	274	515	0.54
	S s - D 3	++	頂版	3	248	537*3	0.47
			側壁	7	285	805*3	0.36
④	S s - D 2	-+	頂版	3	236	561*3	0.43
			側壁	7	285	805*3	0.36
			隔壁	6	53	217*3	0.25
			底版	2	304	515	0.60

注記\*1：評価位置を図 5-27 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

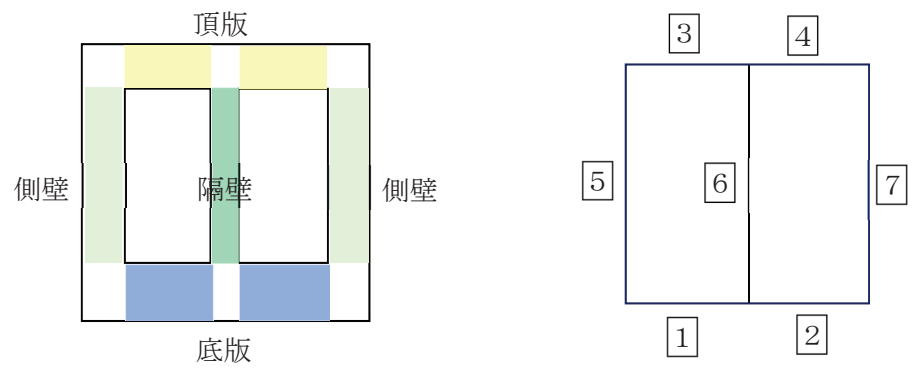


圖 5-27 評估位置圖

### 資料3 排気筒連絡ダクトの耐震安全性評価

## 目 次

1. 評価方法	資料 3-1
2. 評価条件	資料 3-1
2.1 構造概要	資料 3-1
2.2 評価対象断面の方向	資料 3-6
2.3 評価対象断面の選定	資料 3-7
2.4 使用材料及び材料の物性値	資料 3-10
2.5 地盤物性値	資料 3-10
2.6 評価構造物諸元	資料 3-16
2.6.1 土砂部 (断面①及び③)	資料 3-16
2.6.2 岩盤部 (断面⑤)	資料 3-17
2.7 地下水位	資料 3-18
2.8 耐震評価フロー	資料 3-20
2.9 適用規格	資料 3-22
3. 地震応答解析	資料 3-25
3.1 地震応答解析手法	資料 3-25
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 3-28
3.2.1 解析モデル領域	資料 3-28
3.2.2 境界条件	資料 3-30
3.2.3 構造物のモデル化	資料 3-36
3.2.4 地盤のモデル化	資料 3-38
3.2.5 ジョイント要素の設定	資料 3-38
3.2.6 材料特性の設定	資料 3-42
3.3 減衰定数	資料 3-45
3.4 荷重の組合せ	資料 3-59
3.4.1 機器・配管荷重	資料 3-60
3.4.2 外水圧	資料 3-60
3.4.3 積載荷重	資料 3-61
3.5 地震応答解析の解析ケース	資料 3-62
3.5.1 耐震評価における解析ケース	資料 3-62
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	資料 3-74
4. 評価内容	資料 3-81
4.1 入力地震動の設定	資料 3-81
4.2 許容限界の設定	資料 3-166
4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	資料 3-166
4.2.2 せん断破壊に対する許容限界 (せん断耐力式によるせん断耐力)	資料 3-169
4.2.3 せん断破壊に対する許容限界 (材料非線形解析によるせん断耐力)	資料 3-173



4.2.4	基礎地盤の支持性能に対する許容限界.....	資料 3-186
5.	評価結果 .....	資料 3-187
5.1	地震応答解析結果 .....	資料 3-187
5.1.1	解析ケースと照査値 .....	資料 3-188
5.1.2	層間変形角時刻歴波形（曲げ・軸力系の破壊に対する照査） .....	資料 3-202
5.1.3	断面力分布（曲げ・軸力系の破壊に対する照査） .....	資料 3-204
5.1.4	断面力分布（せん断破壊に対する照査） .....	資料 3-206
5.1.5	最大せん断ひずみ分布 .....	資料 3-212
5.1.6	過剰間隙水圧比分布 .....	資料 3-219
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果.....	資料 3-221
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果.....	資料 3-221
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果.....	資料 3-231
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果.....	資料 3-264
5.3.1	土砂部（断面①） .....	資料 3-264
5.3.2	岩盤部（断面⑤） .....	資料 3-267
6.	まとめ .....	資料 3-269

    5.2.2 : 記載適正化範囲

参考資料

参考資料 1	機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース .....	資料 3- (参考) 1-1
参考資料 2	静的地震力に対する耐震評価 .....	資料 3- (参考) 2-1
参考資料 3	断層交差部の影響評価 .....	資料 3- (参考) 3-1
参考資料 4	地下水位の設定による影響 .....	資料 3- (参考) 4-1
参考資料 5	非線形はり要素のモデル化方法に関する補足 .....	資料 3- (参考) 5-1
参考資料 6	軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について .....	資料 3- (参考) 6-1

#### 4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

##### (1) 評価条件

図4-3のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

「4.2.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）」で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

表4-5及び表4-6に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書2017や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書2017において標準とされる以下の手法とする。

- ①鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ②鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用に当たっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

材料非線形解析においては、解析コード「UC-win/WCOMD」を使用する。

表 4-5 材料非線形解析の位置付け (土木学会マニュアル)

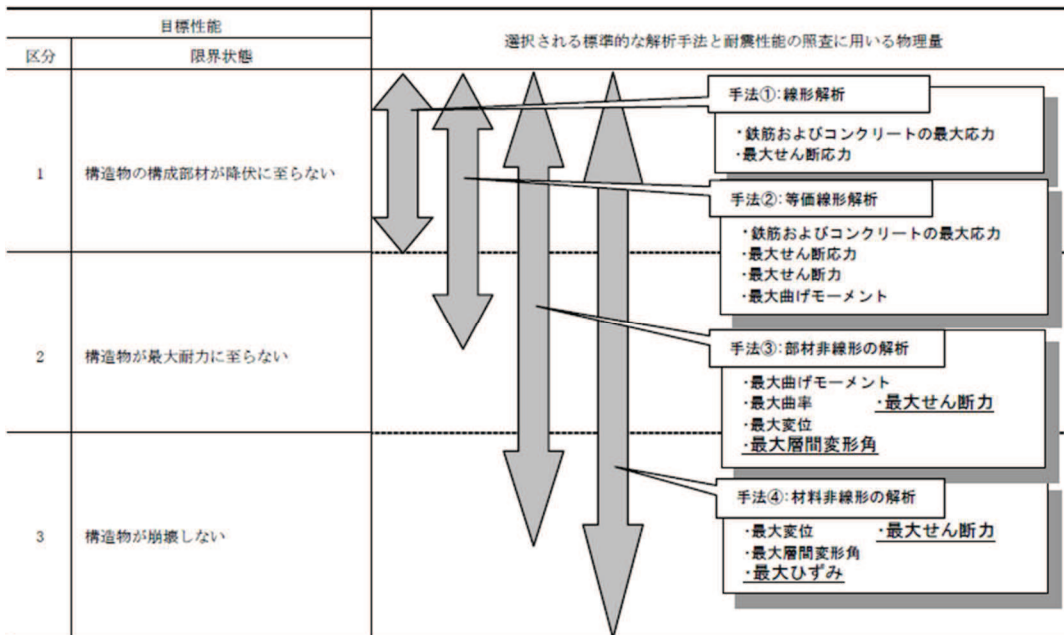


表 4-6 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モダリ化	骨組モデル		有要素	
解析次元	一次元		二次元	三次元
構則	M-Φ, M-θ等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	汎用性	狭い ← → 広い		
	解算時間	短い ← → 長い		

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2017 等に基づき実施する。

表 4-7 に参考とする主な基準等を示す。

表 4-7 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	・コンクリート標準示方書2017 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 4-8 及び表 4-9 に示す。

表 4-8 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度 (20.5 N/mm <sup>2</sup> ) ／材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	2000 μ	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ-せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を 1.3 として算出

表 4-9 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017
降伏 強度	主鉄筋	2000 N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345 N/mm <sup>2</sup>	SD345

c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、図4-4に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル端部を固定境界とする。

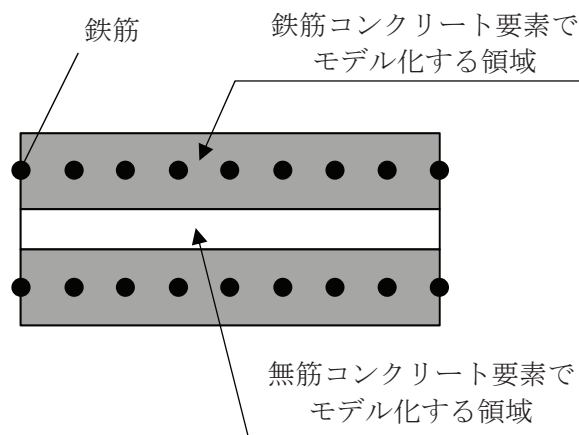


図4-4 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

d. コンクリートの非線形特性

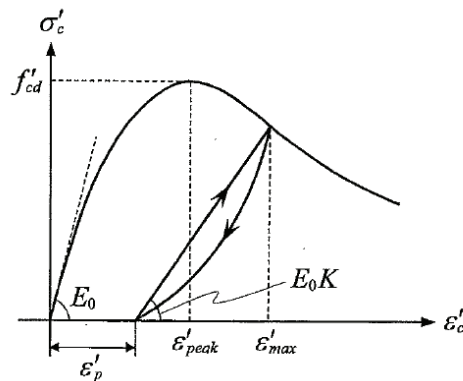
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図4-5に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を超えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図4-6に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図4-5 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

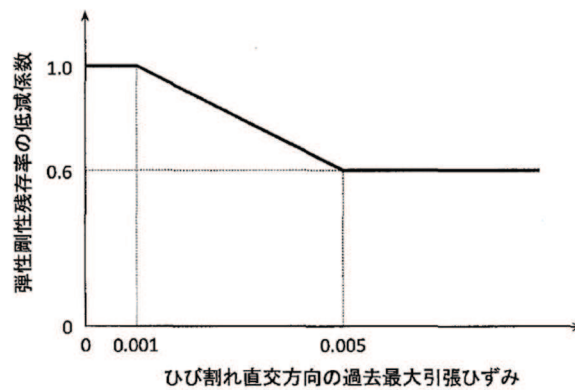
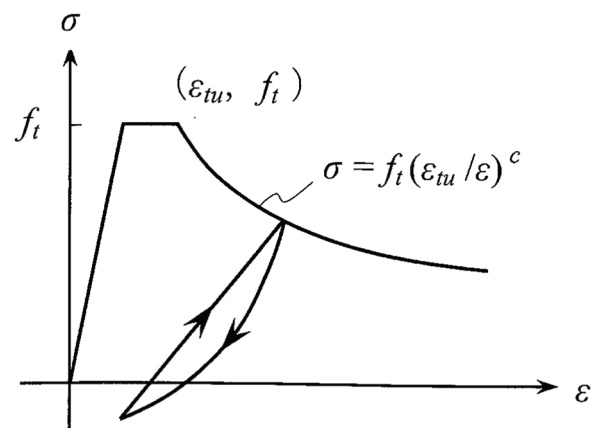


図 4-6 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-7 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、図 4-8 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f/Le$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $c$  を用いる。



- ここに、 $f_t$  : 引張強度  
 $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ  
 $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 4-7 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの  
付着効果を考慮した応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)



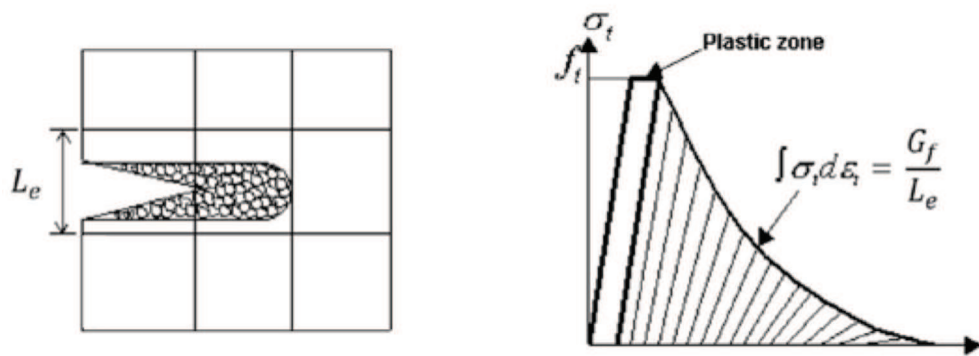
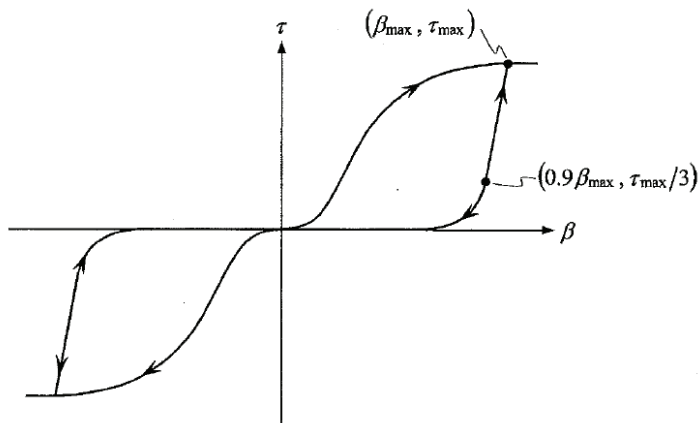


図 4-8 応力—ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-9 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比  
( $\gamma / \varepsilon$ )

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

図 4-9 ひび割れ面でのせん断伝達モデル  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)



f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \bar{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \bar{\sigma}_C$$

ここに、 $\bar{\sigma}_S$ 、 $\bar{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ 、 $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、 $A_{RC} = A_S + A_C$

g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析（部材非線形解析）により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価内容

a. 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを図4-11に示す。

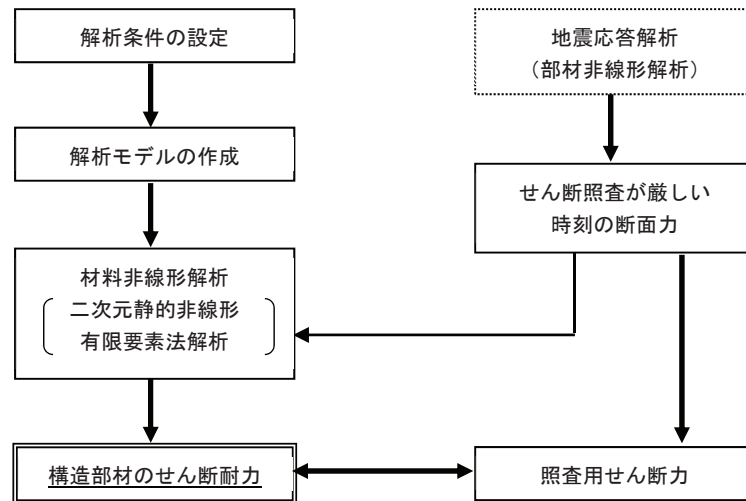


図4-11 材料非線形解析の耐震評価フロー

b. 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析及びび有効応力解析））から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図4-12に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図4-13に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

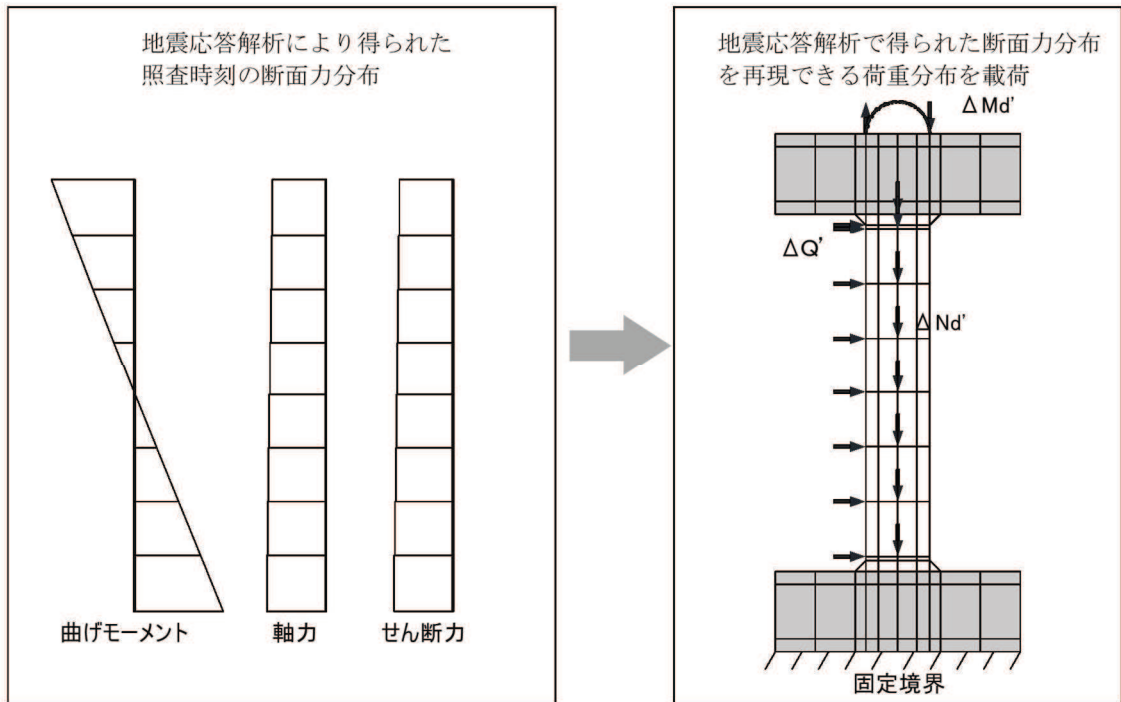


図 4-12 材料非線形解析における荷重状況

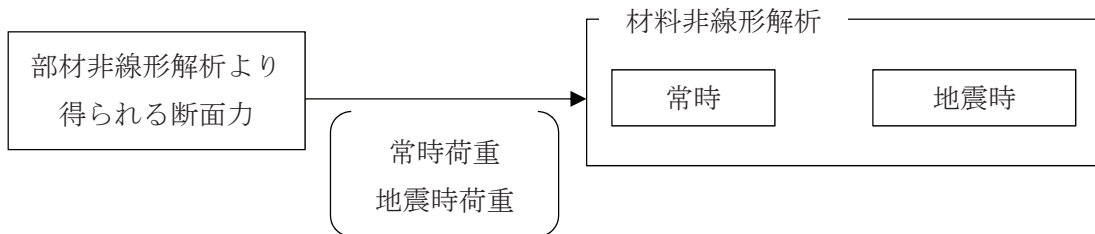


図 4-13 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係から設定する。具体的には、図 4-14 に示す例のとおり、固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係においてせん断力の増分に対して相対変位  $\delta$  が急増する直前の点を部材のせん断耐力と判断する。

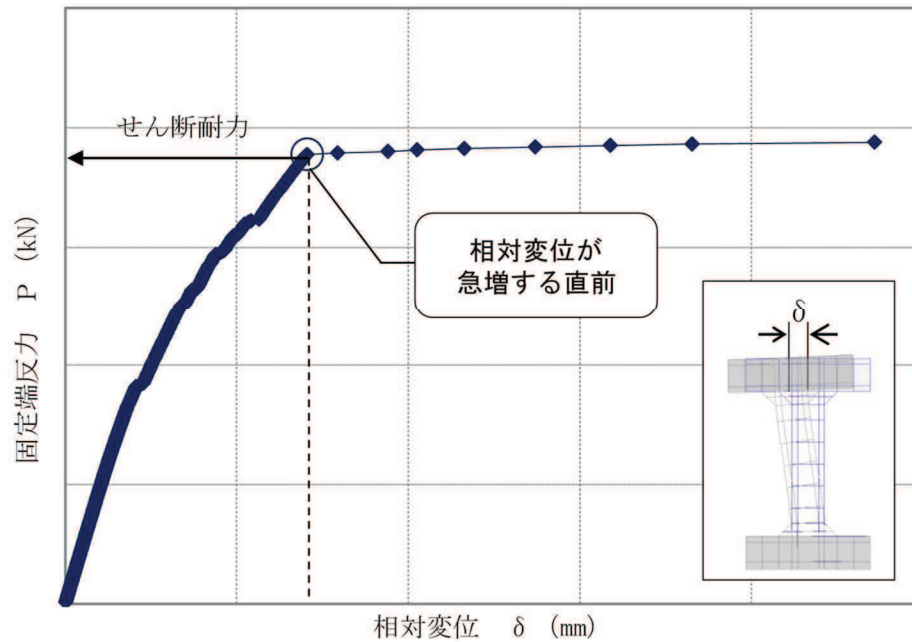


図 4-14 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析及び有効応力解析））で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力 $V$ と材料非線形解析で得られるせん断耐力 $V_y$ に、以下のとおり部材係数 $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数 $\gamma_a$ 、構造物係数 $\gamma_i$ を考慮し、照査用せん断力 $V_d$ 、設計せん断耐力 $V_{yd}$ を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定結果を表 4-10 に示す。ここで、部材係数 $\gamma_{b1}$ については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.14 を設定する（表 4-11）。

表 4-10 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.14	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_m$	1.3	文献に基づく標準的な値を設定

表 4-11 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定結果

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	427.5	0.90	
2	1187	1222.6	1.03	
3	324	359.6	1.11	
4	294	311.6	1.06	
5	581	517.1	0.89	
6	329	338.9	1.03	
7	1587	1809.2	1.14	最大値
8	350	395.5	1.13	
9	855	880.6	1.03	
10	165	104.0	0.63	
11	333	359.6	1.08	
12	127	99.1	0.78	
13	188	120.3	0.64	
14	163	117.4	0.72	
15	273	185.6	0.68	
16	356	320.4	0.90	
17	432	250.6	0.58	

## 5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

### (1) 土砂部（断面①）

#### a. せん断耐力式による評価結果

せん断破壊に対する評価結果のうち、せん断耐力式による評価結果を表 5-17 に示す。照査値は、せん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表中には、照査値が 1.0 を上回る解析ケース、部材があることから、次項「b. 材料非線形解析による評価結果」にて照査値が 1.0 を下回ることを確認する。



表 5-17(1) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式: 全応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	
①	S s - D 1	++	アーチ	1	935	1110	0.85
			側壁	3	1834	1090	1.69
			底版	4	2080	1531	1.36
		-+	アーチ	1	924	1110	0.84
			側壁	2	1842	1091	1.69
			底版	4	2189	1636	1.34
	S s - D 2	++	アーチ	1	911	1110	0.83
			側壁	2	1741	1083	1.61
			底版	4	2036	1649	1.24
		-+	アーチ	1	946	1110	0.86
			側壁	3	1678	1082	1.56
			底版	4	1880	1521	1.24
	S s - D 3	++	アーチ	1	836	1110	0.76
			側壁	3	1672	1078	1.56
			底版	4	1989	1641	1.22
		-+	アーチ	1	848	1110	0.77
			側壁	2	1648	1076	1.54
			底版	4	1980	1639	1.21
	S s - F 1	++	アーチ	1	833	1110	0.76
			側壁	3	1548	1071	1.45
			底版	4	1853	1524	1.22
		-+	アーチ	1	851	1110	0.77
			側壁	2	1555	1071	1.46
			底版	4	1803	1527	1.19
S s - F 2	++	アーチ	1	893	1110	0.81	
		側壁	3	1585	1071	1.48	
		底版	4	1799	1537	1.18	
	-+	アーチ	1	887	1110	0.80	
		側壁	2	1717	1074	1.60	
		底版	4	2033	1634	1.25	

注記\*1: 評価位置は図 5-13 に示す。

\*2: 照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

表 5-17(2) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式：全応力解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
①	S s - F 3	++	アーチ	1	645	1110	0.59
			側壁	2	1601	1091	1.47
			底版	4	1863	1639	1.14
		-+	アーチ	1	630	1110	0.57
			側壁	3	1507	1090	1.39
			底版	4	1780	1636	1.09
	S s - N 1	++	アーチ	1	892	1110	0.81
			側壁	2	1867	1074	1.74
			底版	4	2239	1640	1.37
		-+	アーチ	1	878	1110	0.80
			側壁	3	1850	1076	1.72
			底版	4	2204	1642	1.35
②	S s - D 2	++	アーチ	1	911	1110	0.83
			側壁	2	1736	1083	1.61
			底版	4	2030	1649	1.24
	S s - N 1	++	アーチ	1	880	1110	0.80
			側壁	2	1853	1075	1.73
			底版	4	2224	1641	1.36
③	S s - D 2	++	アーチ	1	908	1110	0.82
			側壁	2	1740	1082	1.61
			底版	4	2041	1642	1.25
	S s - N 1	++	アーチ	1	909	1110	0.82
			側壁	2	1883	1074	1.76
			底版	4	2257	1640	1.38
④	S s - D 2	++	アーチ	1	926	1110	0.84
			側壁	2	1753	1082	1.63
			底版	4	2044	1648	1.25
		-+	底版	4	1891	1528	1.24

注記\*1：評価位置は図 5-13 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

表 5-17(3) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式：全応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用 せん断力*2	せん断耐力	照査値
					$V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
④	S s - N 1	++	アーチ	1	905	1110	0.82
			側壁	2	1874	1074	1.75
			底版	4	2228	1639	1.36

注記\*1：評価位置は図 5-13 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 5-17(4) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式：有効応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
⑥	S s - D 1	++	アーチ	1	713	1110	0.65
			側壁	2	1313	1076	1.23
			底版	4	1661	1627	1.03
		-+	アーチ	1	705	1110	0.64
			側壁	3	1306	1076	1.22
			底版	4	1653	1627	1.02
	S s - D 2	++	アーチ	1	798	1110	0.72
			側壁	3	1413	1070	1.33
			底版	4	1566	1518	1.04
		-+	アーチ	1	805	1110	0.73
			側壁	2	1425	1069	1.34
			底版	4	1556	1516	1.03
	S s - D 3	++	アーチ	1	845	1110	0.77
			側壁	2	1413	1062	1.34
			底版	4	1619	1512	1.08
		-+	アーチ	1	843	1110	0.76
			側壁	3	1394	1060	1.32
			底版	4	1640	1510	1.09
	S s - F 1	++	アーチ	1	793	1110	0.72
			側壁	3	1352	1079	1.26
			底版	4	1485	1527	0.98
		-+	アーチ	1	801	1110	0.73
			側壁	2	1343	1065	1.27
			底版	4	1527	1513	1.01
S s - F 2	++	アーチ	1	739	1110	0.67	
		側壁	3	1260	1073	1.18	
		底版	4	1427	1503	0.95	
	-+	アーチ	1	736	1110	0.67	
		側壁	2	1259	1071	1.18	
		底版	4	1532	1616	0.95	

注記\*1：評価位置は図 5-13 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

表 5-17(5) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式：有効応力解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
⑥	S s - F 3	++	アーチ	1	559	1110	0.51
			側壁	3	1105	1081	1.03
			底版	4	1464	1611	0.91
		-+	アーチ	1	562	1110	0.51
			側壁	2	1154	1098	1.06
			底版	4	1417	1622	0.88
	S s - N 1	++	アーチ	1	802	1110	0.73
			側壁	2	1383	1082	1.28
			底版	4	1479	1514	0.98
		-+	アーチ	1	798	1110	0.72
			側壁	3	1376	1083	1.28
			底版	4	1581	1630	0.97
⑦	S s - D 3	-+	アーチ	1	848	1110	0.77
			側壁	3	1393	1060	1.32
			底版	4	1653	1511	1.10
⑧	S s - D 3	-+	アーチ	1	833	1110	0.76
			側壁	3	1388	1061	1.31
			底版	4	1626	1512	1.08

注記\*1：評価位置は図 5-13 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力 } V \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$

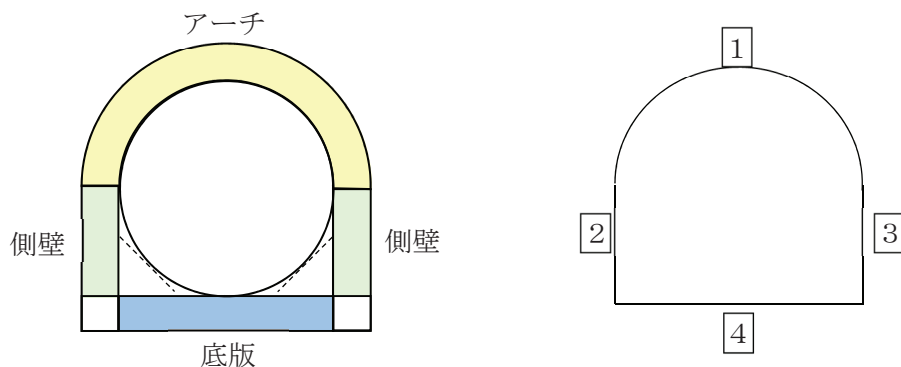


図 5-13 評価位置図（土砂部（断面①））

b. 材料非線形解析による評価結果

(a) 評価条件

前項「a. せん断耐力式による評価結果」では、排気筒連絡ダクトの側壁、底版において、照査用せん断力がせん断耐力式によるせん断耐力を上回る結果となった。

せん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、ここでは、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断破壊に対する健全性を確認する。

図 5-14 に材料非線形解析によりせん断破壊に対する評価を実施する対象部材を示す。また、評価対象部材の要素分割図を図 5-15 に、要素プロパティ番号図を図 5-16 及び図 5-17、要素プロパティ条件を表 5-18 及び表 5-19 に示す。材料非線形解析におけるハンチ部についても、図 3-8 に示すとおり、断面内部の円弧部を、部材の軸線に対して  $45^\circ$  傾斜し円弧部に接するハンチとみなしている。

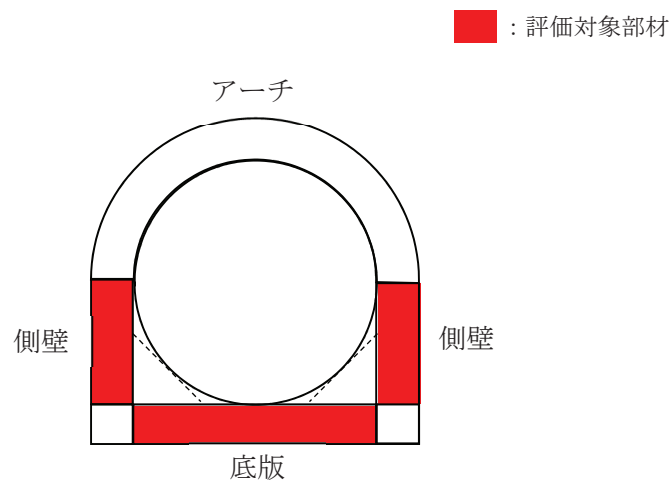
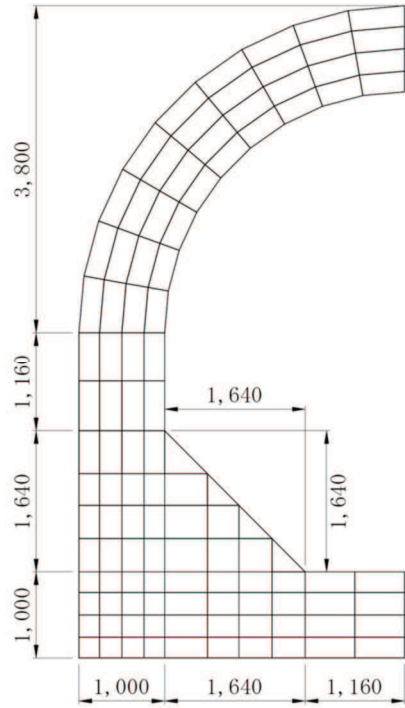
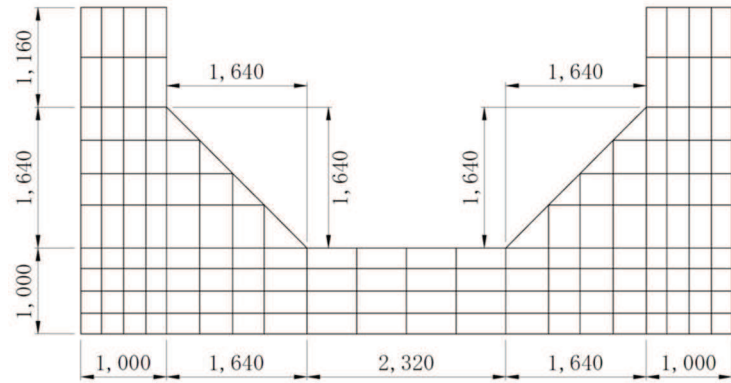


図 5-14 材料非線形解析における評価対象部材



(a) 側壁



(b) 底版

图 5-15 要素分割图

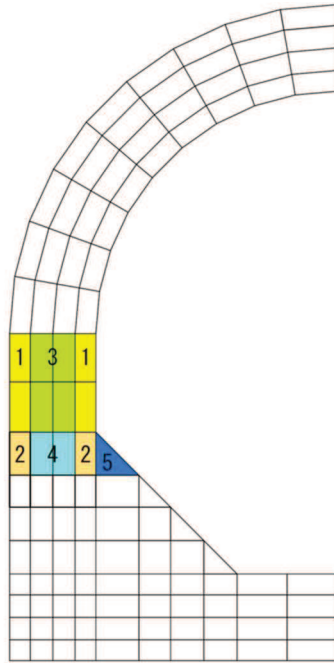


図 5-16 要素プロパティ番号図 (側壁)

表 5-18 要素プロパティ条件 (側壁)

番号	元要素			オーバーラッピング要素		
	材料	引張硬化軟化係数		材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y		C x	C y
1	RC	0.4	0.4	RC	1.9	0.4
2	RC	0.4	0.4	RC	1.9	0.4
3	RC	0.4	4.4	無筋	2.0	4.4
4	RC	0.4	3.6	無筋	2.0	3.6
5	無筋	2.6	2.6	—	—	—



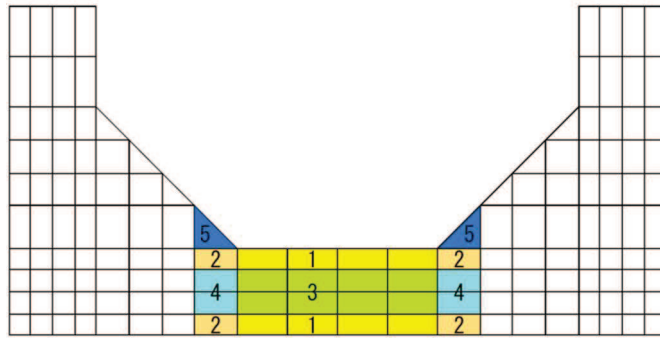


図 5-17 要素プロパティ番号図 (底版)

表 5-19 要素プロパティ条件 (底版)

番号	元要素			オーバーラッピング要素		
	材料	引張硬化軟化係数		材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y		C x	C y
1	RC	0.4	0.4	RC	0.4	1.9
2	RC	0.4	0.4	RC	0.4	1.9
3	RC	4.4	0.4	無筋	4.4	2.0
4	RC	3.6	0.4	無筋	3.6	2.0
5	無筋	2.6	2.6	—	—	—

材料非線形解析によるせん断耐力の算定において考慮する荷重は、地震応答解析から得られる荷重を考慮する。具体的には地震応答解析で評価対象部材のせん断照査が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 5-18 及び図 5-19 のように作用させる。排気筒連絡ダクトはアーチ部を持つ構造であり、一般的な矩形構造と異なることから、側壁における材料非線形解析による評価において最も照査値が厳しい解析ケースに対する地震応答解析による断面力と材料非線形解析モデルとの断面力の比較を図 5-20 に示す。なお、参考までに、排気筒連絡ダクトの底版における断面力の比較を図 5-21 に示す。

材料非線形解析では、地震応答解析から得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重を 100 分割したものを  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  とし、これらの比率を維持しながら漸増载荷する。

なお、作用荷重は、常時荷重（ $\Delta M_s$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta N_s$ ）及び地震時荷重（ $\Delta M_d$ 、 $\Delta Q_d$ 、 $\Delta N_d$ ）とし、図 5-22 に作用手順を示す。表 5-20 に代表例として、材料非線形解析による評価において最も照査値が厳しい解析ケースにおける  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  を示す。

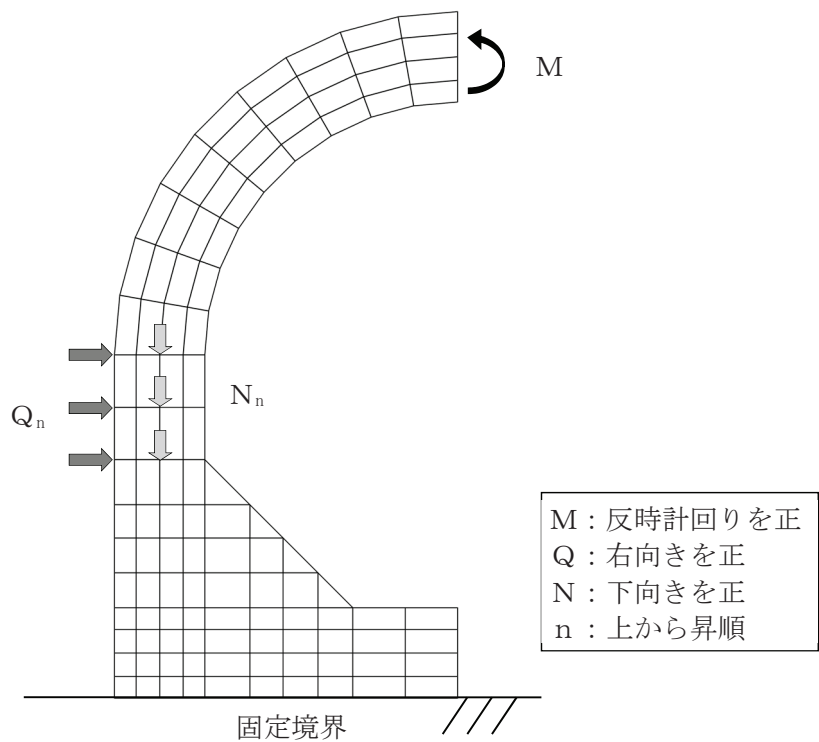


図 5-18 材料非線形解析における荷荷状況 (側壁)

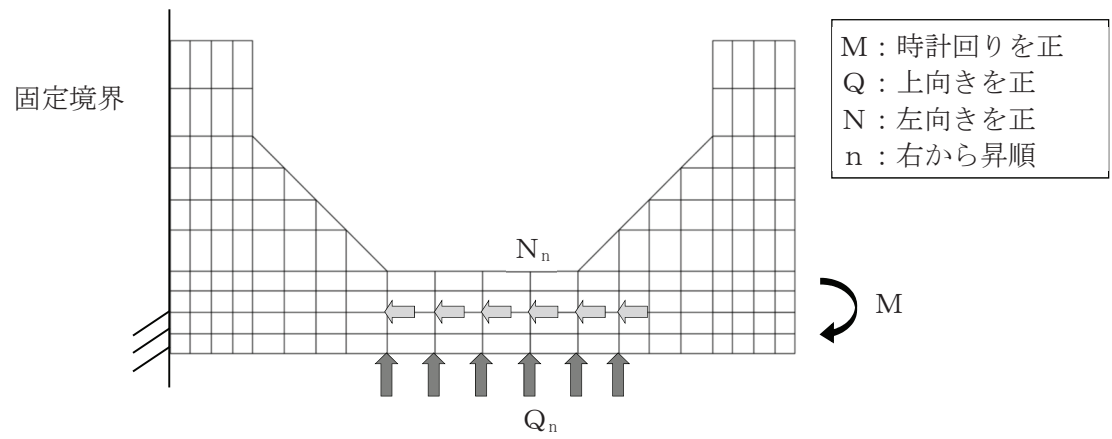
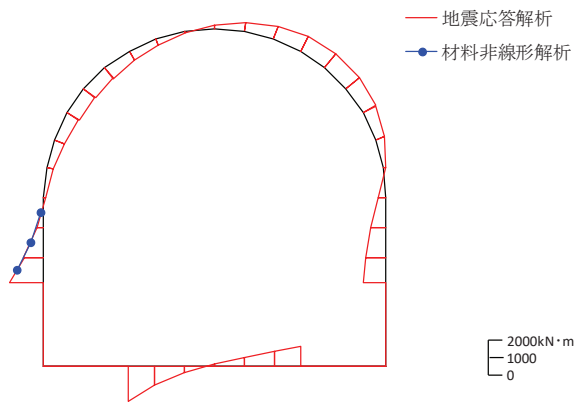
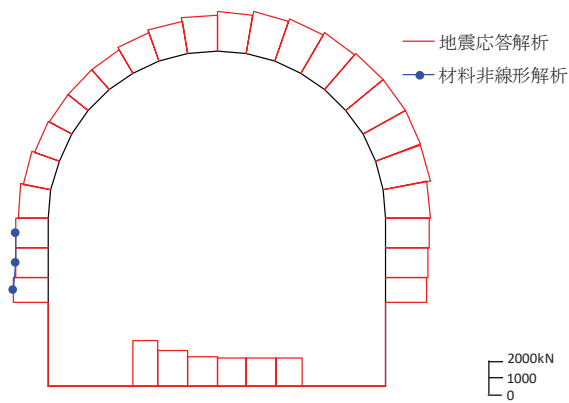


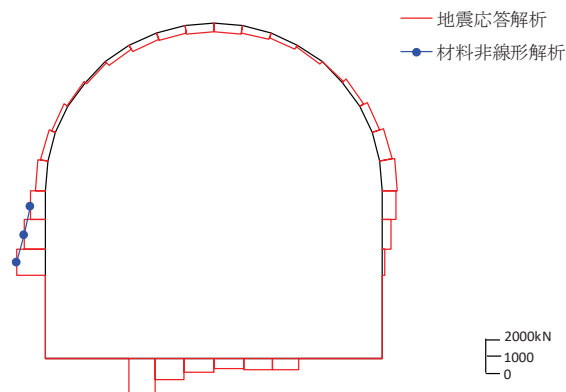
図 5-19 材料非線形解析における荷荷状況 (底版)



数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
(a) 曲げモーメント (kN・m)

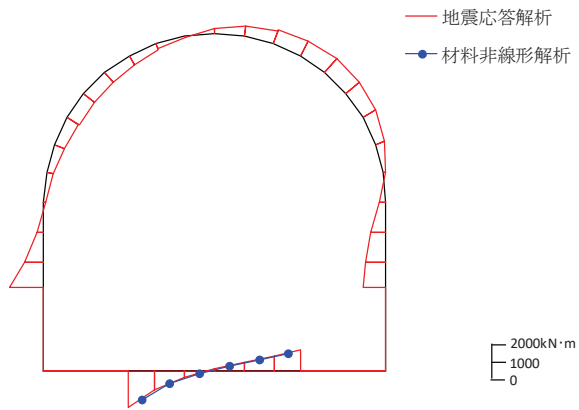


数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
(b) 軸力 (kN) (+ : 引張, - : 圧縮)

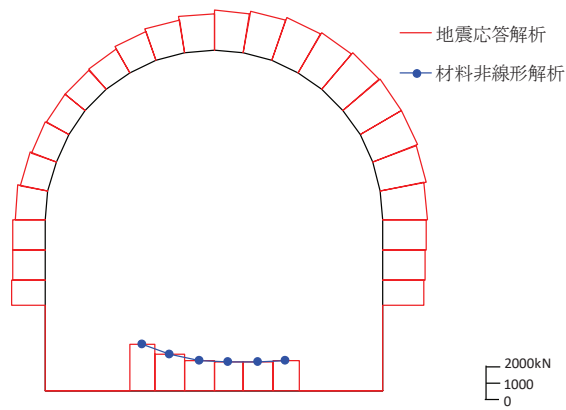


数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
(c) せん断力 (kN)

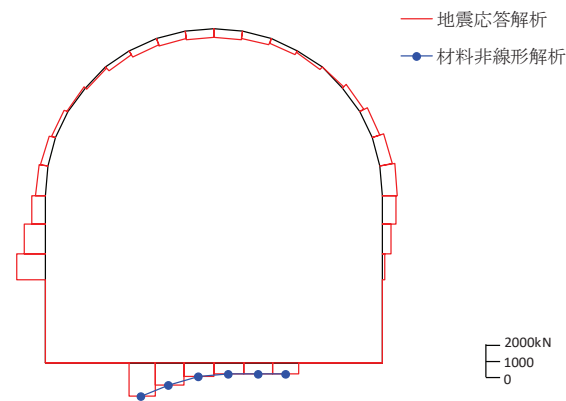
図 5-20 地震応答解析による断面力と材料非線形解析モデルにおける断面力の比較  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1 (+ +)$ )



数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
 (a) 曲げモーメント (kN・m)



数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
 (b) 軸力 (kN) (+ : 引張, - : 圧縮)



数値：材料非線形解析における評価対象部材の断面力  
 (c) せん断力 (kN)

図 5-21 地震応答解析による断面力と材料非線形解析モデルにおける断面力の比較  
 (底版, 解析ケース④,  $S_s - N1 (+ +)$ )

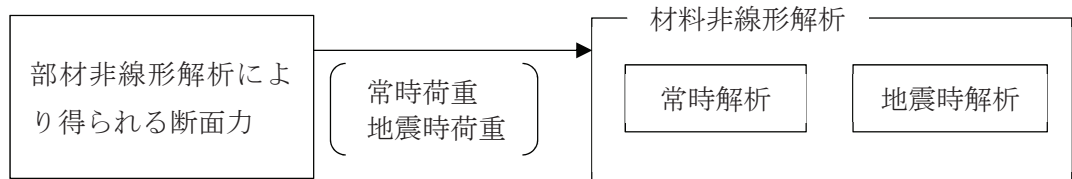


図 5-22 荷重の作用手順

表 5-20 材料非線形解析における作用荷重

部材			側壁	底板
地震動			$S_s - N1 (++)$	$S_s - N1 (++)$
解析ケース			解析ケース③	解析ケース④
常時荷重	曲げモーメント (kN・m)	$\Delta M$	0.4052	-1.9168
	せん断力 (kN)	$\Delta Q_1$	0.2923	-4.1078
		$\Delta Q_2$	2.1473	1.9423
		$\Delta Q_3$	2.0107	1.5002
		$\Delta Q_4$		1.2893
		$\Delta Q_5$		1.4918
		$\Delta Q_6$		1.9296
	軸力 (kN)	$\Delta N_1$	13.2967	9.1365
		$\Delta N_2$	0.1834	-0.2204
		$\Delta N_3$	0.1708	-0.1327
		$\Delta N_4$		-0.0190
		$\Delta N_5$		0.0949
$\Delta N_6$			0.1851	
地震時荷重	曲げモーメント (kN・m)	$\Delta M$	0.5289	14.4107
	せん断力 (kN)	$\Delta Q_1$	8.1882	11.0063
		$\Delta Q_2$	2.1794	-2.1653
		$\Delta Q_3$	1.9622	-1.7379
		$\Delta Q_4$		0.5889
		$\Delta Q_5$		3.3939
		$\Delta Q_6$		5.0979
	軸力 (kN)	$\Delta N_1$	6.1363	8.0032
		$\Delta N_2$	0.0542	-0.1259
		$\Delta N_3$	0.7234	-0.0036
		$\Delta N_4$		0.9697
		$\Delta N_5$		3.3634
$\Delta N_6$			5.7567	

(b) 評価結果

イ. 側壁の評価結果

評価対象部材（側壁）における荷重－変位曲線を図 5-23 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース③，地震動  $S_s - N1 (+ +)$ ）の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。169 ステップ以降、変位の急増が認められる。なお、168 ステップにおいて、せん断補強筋の降伏が発生している。せん断補強筋の初期降伏箇所を図 5-24 に示す。

図 5-25 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、169 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、169 ステップ以降は、斜めひび割れが進展する様相を示している。したがって、169 ステップ以降の変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材（側壁）に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、169 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、169 ステップにおけるせん断耐力 2835.8kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 2487kN とする。

また、図 5-26 に、各ステップにおける変形図を示す。

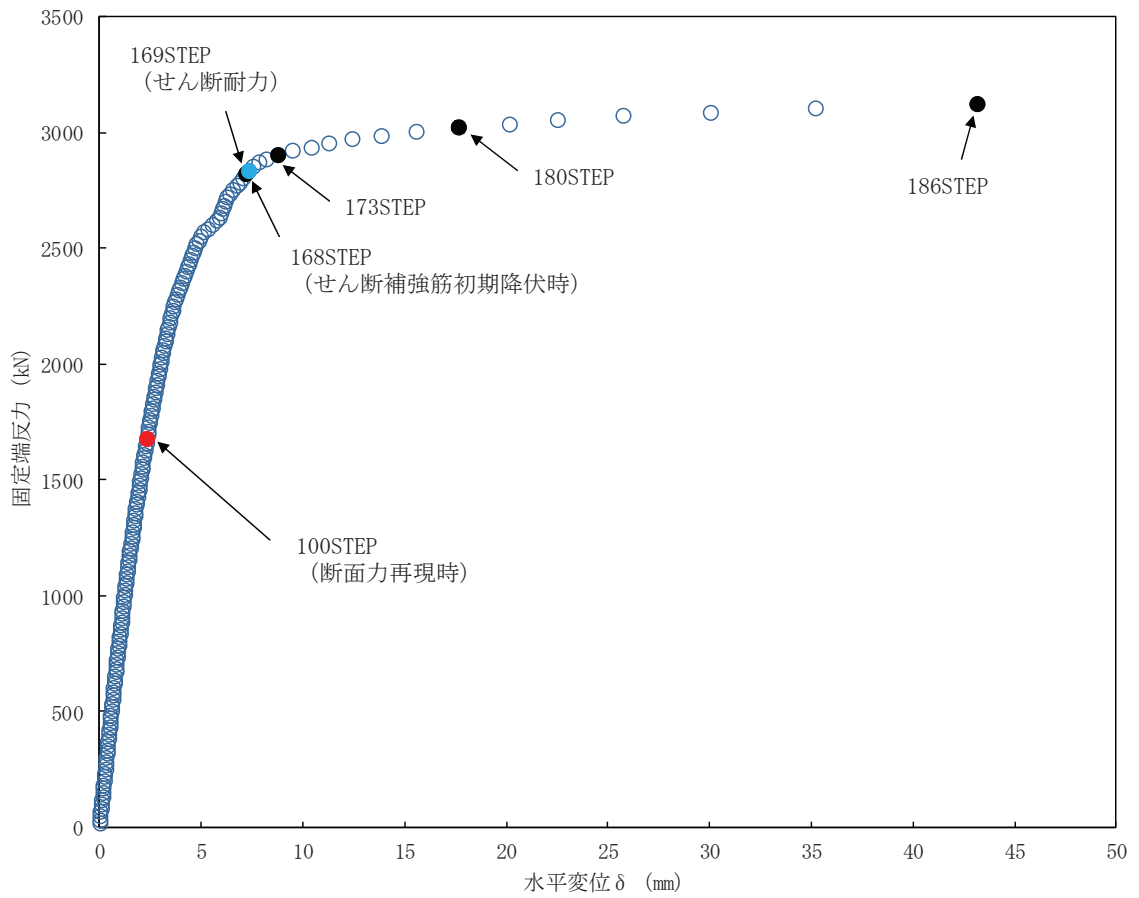


図 5-23 荷重-変位曲線  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++))

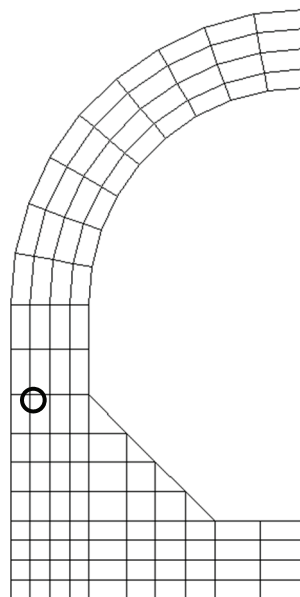
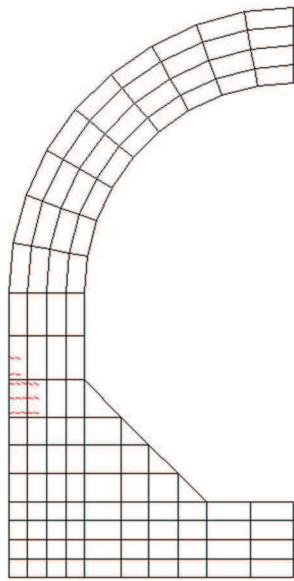
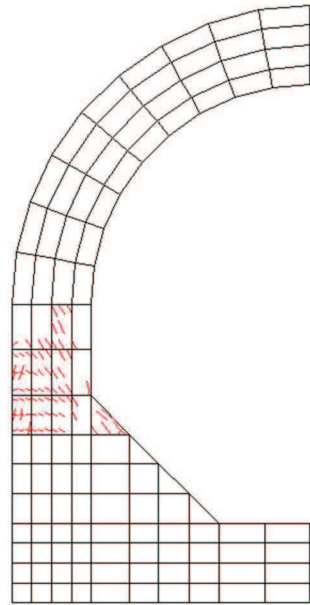


図 5-24 せん断補強筋の初期降伏箇所  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++) 168STEP)

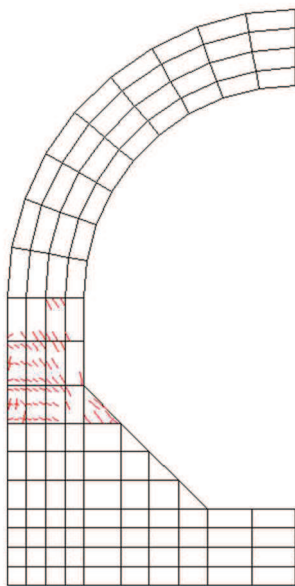




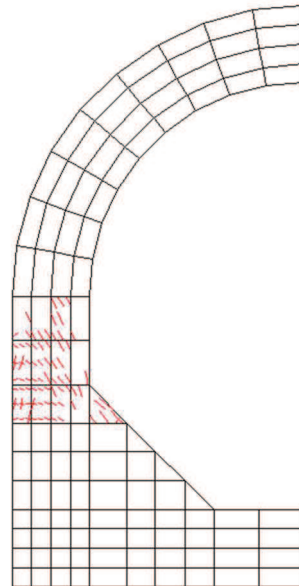
100STEP  
断面力再現時



169STEP  
せん断耐力

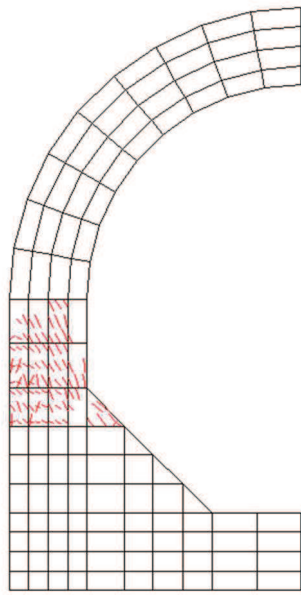


168STEP  
せん断補強筋初期降伏時

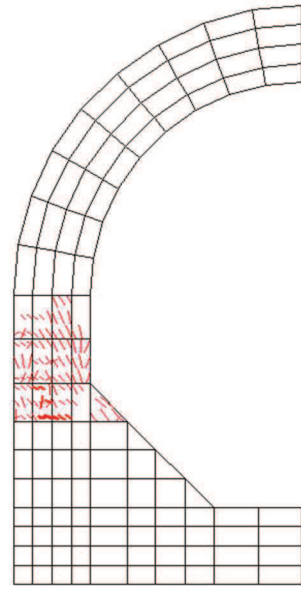


173STEP

図 5-25(1) 各ステップにおけるひび割れ図  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++) )

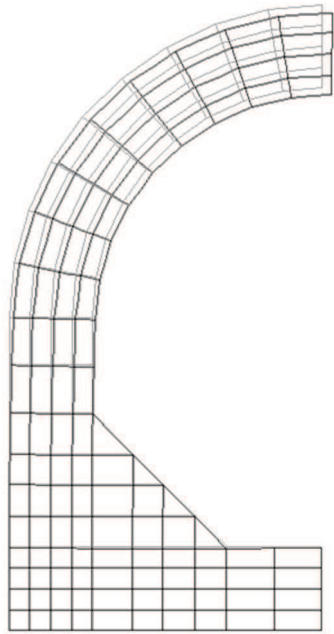


180STEP

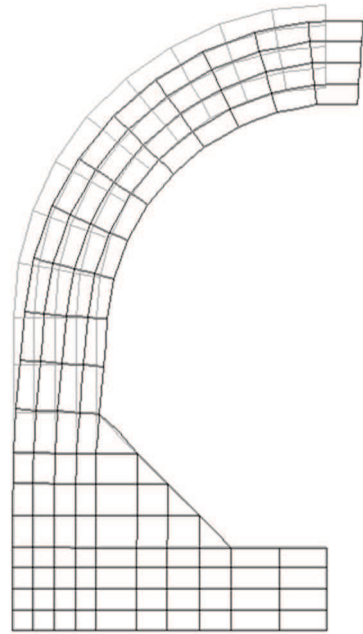


186STEP

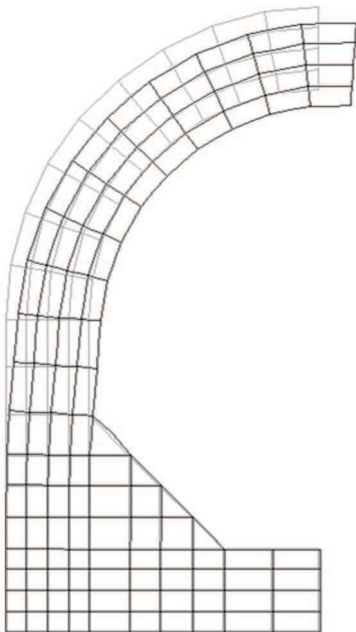
図 5-25(2) 各ステップにおけるひび割れ図  
 (側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++) )



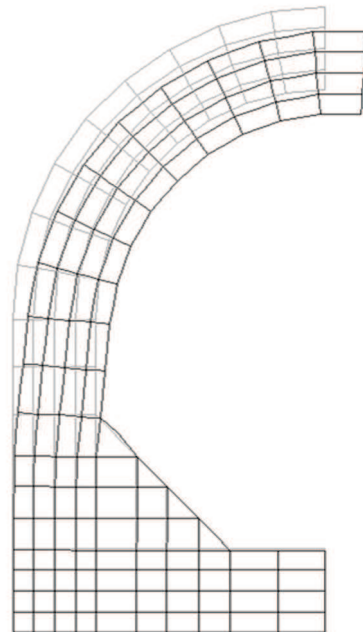
100STEP  
断面力再現時



169STEP  
せん断耐力



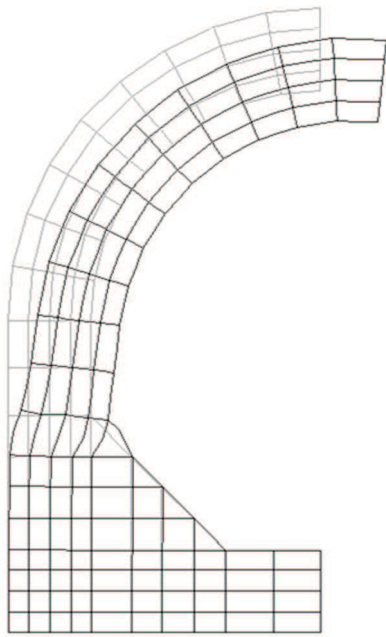
168STEP  
せん断補強筋初期降伏時



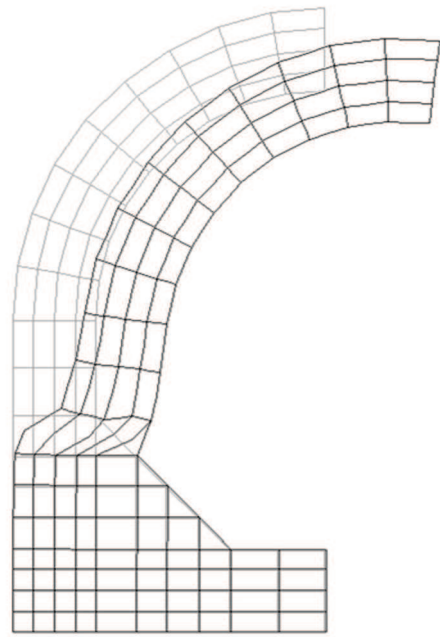
173STEP

変形倍率 (×20)

図 5-26(1) 各ステップにおける変形図  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++))



180STEP



186STEP

変形倍率 (×20)

図 5-26 (2) 各ステップにおける変形図  
(側壁, 解析ケース③,  $S_s - N1$  (++))

## ロ. 底版の評価結果

評価対象部材（底版）における荷重－変位曲線を図 5-27 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース④，地震動  $S_s - N1 (+ +)$ ）の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。143 ステップ以降、変位の急増が認められる。なお、155 ステップにおいて、せん断補強筋の降伏が発生している。せん断補強筋の初期降伏箇所を図 5-28 に示す。

図 5-29 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、143 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、143 ステップ以降は、斜めひび割れが急激に進展する様相を示している。したがって、143 ステップ以降の変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材（底版）に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、143 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、143 ステップにおけるせん断耐力 2892.8kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 2537kN とする。

また、図 5-30 に、各ステップにおける変形図を示す。

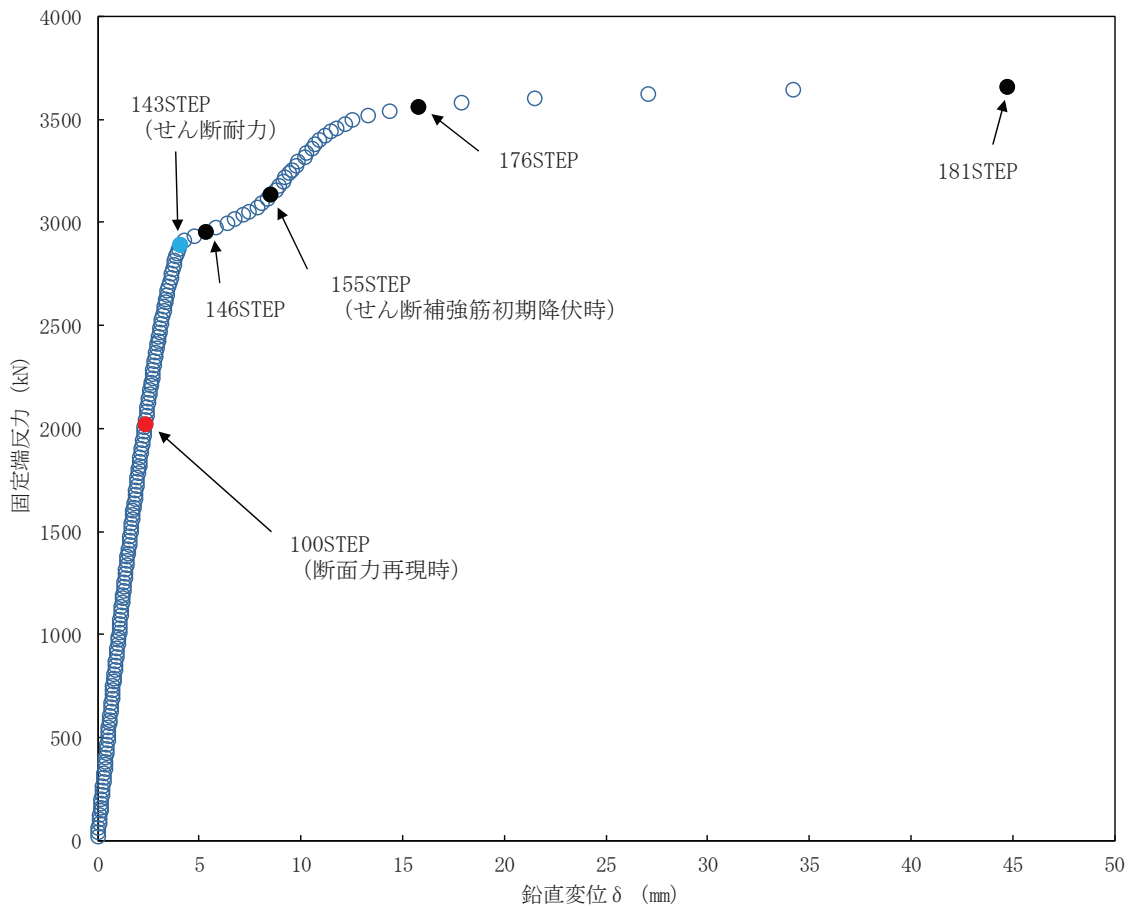


図 5-27 荷重-変位曲線  
(底版, 解析ケース④, S s - N 1 (++) )

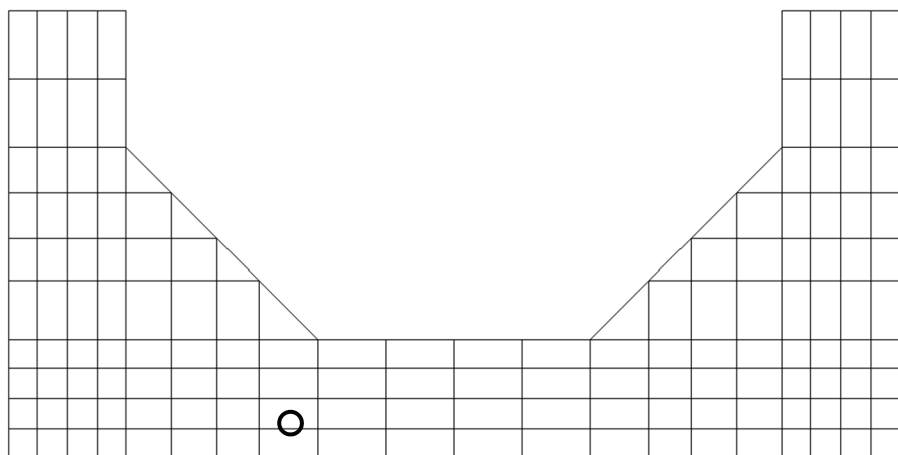
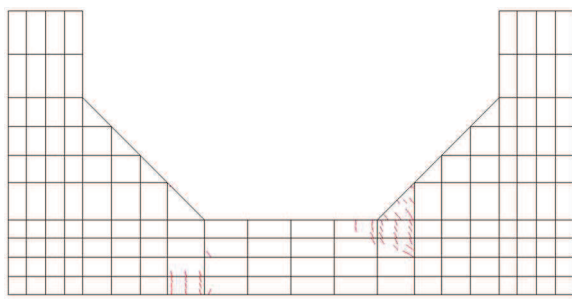
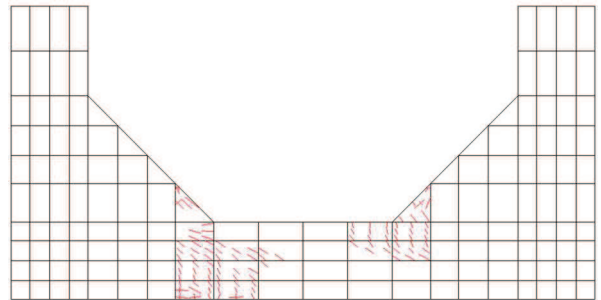


図 5-28 せん断補強筋の初期降伏箇所  
(底版, 解析ケース④, S s - N 1 (++) 155STEP)



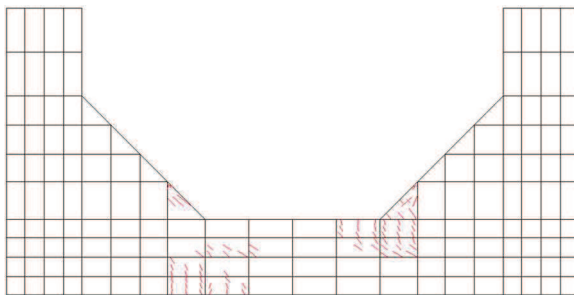
100STEP

断面力再現時



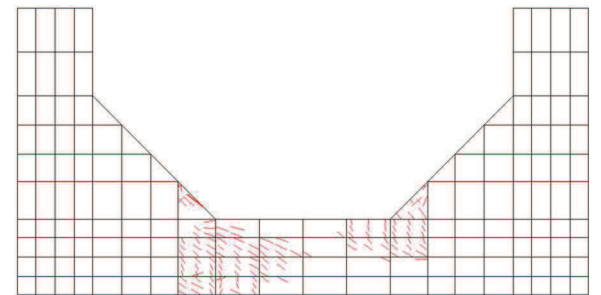
155STEP

せん断補強筋初期降伏時

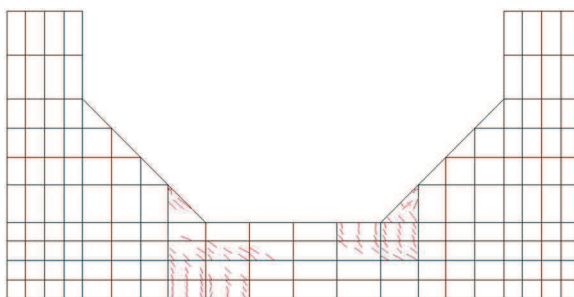


143STEP

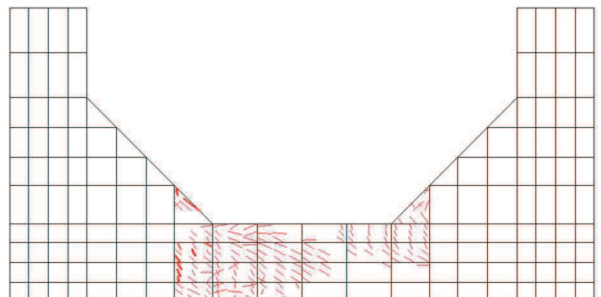
せん断耐力



176STEP

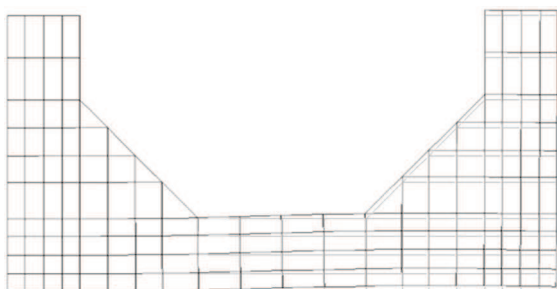


146STEP

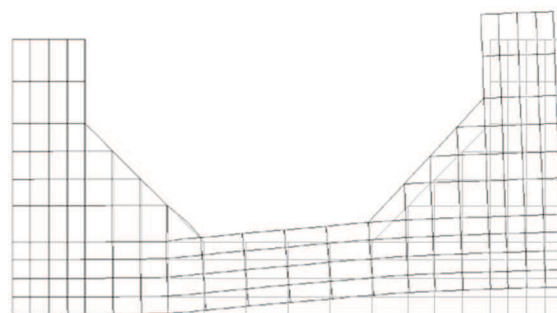


181STEP

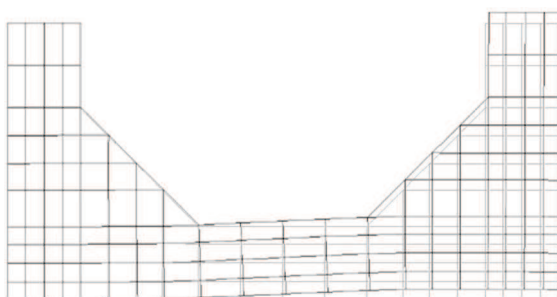
図 5-29 各ステップにおけるひび割れ図  
(底版, 解析ケース④,  $S_s - N1 (+ +)$ )



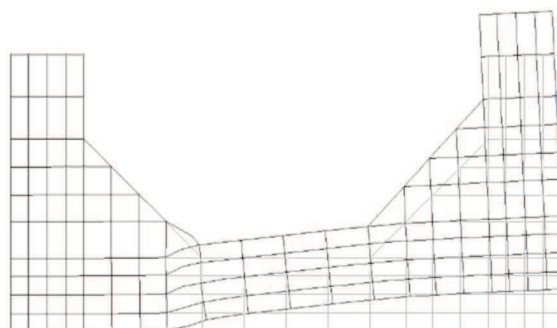
100STEP  
断面力再現時



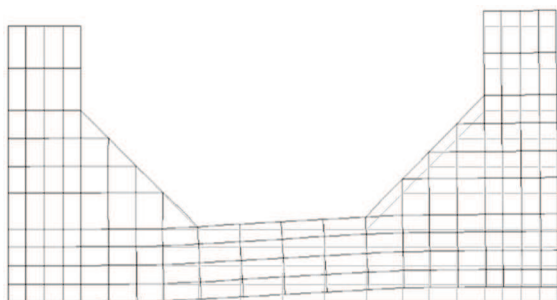
155STEP  
せん断補強筋初期降伏時



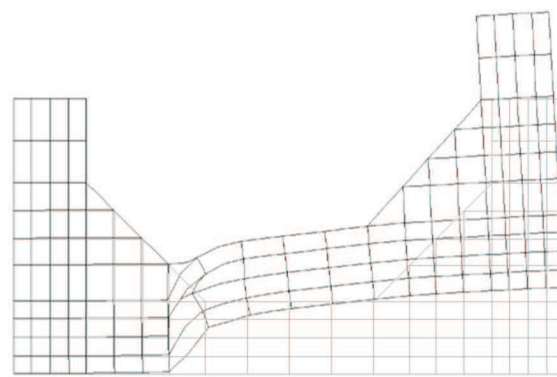
143STEP  
せん断耐力



176STEP



146STEP



181STEP

変形倍率 (×20)

図5-30 各ステップにおける変形図  
(底版, 解析ケース④, S<sub>s</sub>-N1 (++) )



ハ. せん断力に対する評価結果

せん断耐力式及び材料非線形解析によるせん断破壊に対する評価結果を、表 5-21 に示す。

同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 5-21(1) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析：全応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - D 1	++	アーチ	1	935	1110	0.85
			側壁	3	1834	3051*3	0.61
			底版	4	2080	2480*3	0.84
		-+	アーチ	1	924	1110	0.84
			側壁	2	1842	2990*3	0.62
			底版	4	2189	2680*3	0.82
	S s - D 2	++	アーチ	1	911	1110	0.83
			側壁	2	1741	2804*3	0.63
			底版	4	2036	2701*3	0.76
		-+	アーチ	1	946	1110	0.86
			側壁	3	1678	2856*3	0.59
			底版	4	1880	2193*3	0.86
	S s - D 3	++	アーチ	1	836	1110	0.76
			側壁	3	1672	2813*3	0.60
			底版	4	1989	2584*3	0.77
		-+	アーチ	1	848	1110	0.77
			側壁	2	1648	2718*3	0.61
			底版	4	1980	2624*3	0.76
	S s - F 1	++	アーチ	1	833	1110	0.76
			側壁	3	1548	2629*3	0.59
			底版	4	1853	2372*3	0.79
		-+	アーチ	1	851	1110	0.77
			側壁	2	1555	2510*3	0.62
			底版	4	1803	2451*3	0.74
S s - F 2	++	アーチ	1	893	1110	0.81	
		側壁	3	1585	2612*3	0.61	
		底版	4	1799	2414*3	0.75	
	-+	アーチ	1	887	1110	0.80	
		側壁	2	1717	2632*3	0.66	
		底版	4	2033	2512*3	0.81	

注記\*1：評価位置は図 5-31 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-21(2) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析：全応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - F 3	++	アーチ	1	645	1110	0.59
			側壁	2	1601	2838*3	0.57
			底版	4	1863	2725*3	0.69
		-+	アーチ	1	630	1110	0.57
			側壁	3	1507	2927*3	0.52
			底版	4	1780	2674*3	0.67
	S s - N 1	++	アーチ	1	892	1110	0.81
			側壁	2	1867	2625*3	0.72
			底版	4	2239	2589*3	0.87
		-+	アーチ	1	878	1110	0.80
			側壁	3	1850	2745*3	0.68
			底版	4	2204	2581*3	0.86
②	S s - D 2	++	アーチ	1	911	1110	0.83
			側壁	2	1736	2834*3	0.62
			底版	4	2030	2700*3	0.76
	S s - N 1	++	アーチ	1	880	1110	0.80
			側壁	2	1853	2693*3	0.69
			底版	4	2224	2600*3	0.86
③	S s - D 2	++	アーチ	1	908	1110	0.82
			側壁	2	1740	2804*3	0.63
			底版	4	2041	2645*3	0.78
	S s - N 1	++	アーチ	1	909	1110	0.82
			側壁	2	1883	2487*3	0.76
			底版	4	2257	2583*3	0.88
④	S s - D 2	++	アーチ	1	926	1110	0.84
			側壁	2	1753	2820*3	0.63
			底版	4	2044	2636*3	0.78
		-+	底版	4	1891	2188*3	0.87

注記\*1：評価位置は図 5-31 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-21(3) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析：全応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用 せん断力*2	せん断耐力	照査値
					$V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
④	S s - N 1	++	アーチ	1	905	1110	0.82
			側壁	2	1874	2559*3	0.74
			底版	4	2228	2537*3	0.88

注記\*1：評価位置は図 5-31 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-21(4) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析：有効応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2 $V_d$ (kN)	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
⑥	S s - D 1	++	アーチ	1	713	1110	0.65
			側壁	2	1313	2510*3	0.53
			底版	4	1661	2564*3	0.65
		-+	アーチ	1	705	1110	0.64
			側壁	3	1306	2605*3	0.51
			底版	4	1653	2523*3	0.66
	S s - D 2	++	アーチ	1	798	1110	0.72
			側壁	3	1413	2519*3	0.57
			底版	4	1566	2320*3	0.68
		-+	アーチ	1	805	1110	0.73
			側壁	2	1425	2484*3	0.58
			底版	4	1556	2292*3	0.68
	S s - D 3	++	アーチ	1	845	1110	0.77
			側壁	2	1413	2173*3	0.66
			底版	4	1619	2299*3	0.71
		-+	アーチ	1	843	1110	0.76
			側壁	3	1394	2129*3	0.66
			底版	4	1640	2271*3	0.73
	S s - F 1	++	アーチ	1	793	1110	0.72
			側壁	3	1352	2726*3	0.50
			底版	4	1485	1527	0.98
		-+	アーチ	1	801	1110	0.73
			側壁	2	1343	2241*3	0.60
			底版	4	1527	2222*3	0.69
S s - F 2	++	アーチ	1	739	1110	0.67	
		側壁	3	1260	2517*3	0.51	
		底版	4	1427	1503	0.95	
	-+	アーチ	1	736	1110	0.67	
		側壁	2	1259	2478*3	0.51	
		底版	4	1532	1616	0.95	

注記\*1：評価位置は図 5-31 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 5-21 (5) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析: 有効応力解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
⑥	S s - F 3	++	アーチ	1	559	1110	0.51
			側壁	3	1105	2625*3	0.43
			底版	4	1464	1611	0.91
		-+	アーチ	1	562	1110	0.51
			側壁	2	1154	2880*3	0.41
			底版	4	1417	1622	0.88
	S s - N 1	++	アーチ	1	802	1110	0.73
			側壁	2	1383	2698*3	0.52
			底版	4	1479	1514	0.98
		-+	アーチ	1	798	1110	0.72
			側壁	3	1376	2774*3	0.50
			底版	4	1581	1630	0.97
⑦	S s - D 3	-+	アーチ	1	848	1110	0.77
			側壁	3	1393	2207*3	0.64
			底版	4	1653	2275*3	0.73
⑧	S s - D 3	-+	アーチ	1	833	1110	0.76
			側壁	3	1388	2209*3	0.63
			底版	4	1626	2280*3	0.72

注記\*1: 評価位置は図 5-31 に示す。

\*2: 照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

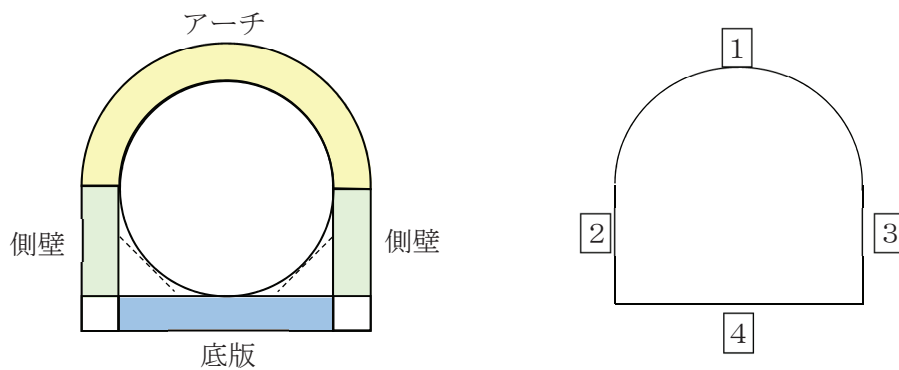


図 5-31 評価位置図 (土砂部 (断面①))

(2) 岩盤部（断面⑤）

構造強度を有することの確認及びSクラスの施設を支持する機能を損なわないこと  
の確認におけるせん断破壊に対する評価結果を表 5-22 に示す。照査値は、応力度を許容  
限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表より、全ケースにおいて発生応力度は短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 5-22 せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*		発生	発生	短期許容	照査値	
					せん断力 V (kN)	応力度 $\tau_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	応力度 $\tau_{a1}$ (N/mm <sup>2</sup> )		$\tau_d / \tau_{a1}$
①	S <sub>s</sub> -D 1	++	覆工部	1	67	0.20	0.63	0.32	
		-+	覆工部	1	69	0.20	0.63	0.32	
	S <sub>s</sub> -D 2	++	覆工部	1	73	0.22	0.63	0.35	
		-+	覆工部	1	74	0.22	0.63	0.35	
	S <sub>s</sub> -D 3	++	覆工部	1	62	0.18	0.63	0.29	
		-+	覆工部	1	67	0.20	0.63	0.32	
	S <sub>s</sub> -F 1	++	覆工部	1	53	0.16	0.63	0.26	
		-+	覆工部	1	55	0.16	0.63	0.26	
	S <sub>s</sub> -F 2	++	覆工部	1	69	0.20	0.63	0.32	
		-+	覆工部	1	73	0.21	0.63	0.34	
	S <sub>s</sub> -F 3	++	覆工部	1	53	0.16	0.63	0.26	
		-+	覆工部	1	50	0.15	0.63	0.24	
	S <sub>s</sub> -N 1	++	覆工部	1	50	0.15	0.63	0.24	
		-+	覆工部	1	44	0.13	0.63	0.21	
	②	S <sub>s</sub> -D 2	-+	覆工部	1	71	0.21	0.63	0.34
	③	S <sub>s</sub> -D 2	-+	覆工部	1	80	0.24	0.63	0.39
	④	S <sub>s</sub> -D 2	-+	覆工部	1	79	0.23	0.63	0.37

注記\*：評価位置は図 5-32 に示す。

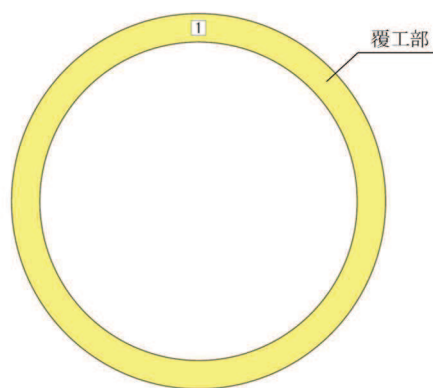


図 5-32 評価位置図 (岩盤部 (断面⑤))




#### 資料 4 原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）の耐震安全性評価

## 目次

1. 評価方法	資料 4-1
2. 評価条件	資料 4-1
2.1 構造及び補強の概要	資料 4-1
2.2 評価対象断面の方向	資料 4-6
2.3 評価対象断面の選定	資料 4-7
2.4 使用材料及び材料の物性値	資料 4-8
2.5 地盤物性値	資料 4-8
2.6 評価構造物諸元	資料 4-13
2.7 地下水位	資料 4-14
2.8 耐震評価フロー	資料 4-15
2.9 適用規格	資料 4-17
3. 地震応答解析	資料 4-19
3.1 地震応答解析手法	資料 4-19
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 4-22
3.2.1 解析モデル領域	資料 4-22
3.2.2 境界条件	資料 4-24
3.2.3 構造物のモデル化	資料 4-27
3.2.4 地盤及び MMR のモデル化	資料 4-27
3.2.5 ジョイント要素の設定	資料 4-28
3.2.6 材料特性の設定	資料 4-31
3.3 減衰定数	資料 4-33
3.4 荷重の組合せ	資料 4-39
3.4.1 機器・配管荷重	資料 4-40
3.4.2 外水圧	資料 4-40
3.4.3 積載荷重	資料 4-40
3.5 地震応答解析の解析ケース	資料 4-41
3.5.1 耐震評価における解析ケース	資料 4-41
3.5.2 機器・配管系に対する応答加速度抽出のための解析ケース	資料 4-48
4. 評価内容	資料 4-52
4.1 入力地震動の設定	資料 4-52
4.2 許容限界の設定	資料 4-81
4.2.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	資料 4-81
4.2.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）	資料 4-84
4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）	資料 4-91
4.2.4 基礎地盤の支持性能に対する許容限界	資料 4-104
5. 評価結果	資料 4-105
5.1 地震応答解析結果	資料 4-105

5.1.1	解析ケースと照査値	資料 4-105
5.1.2	層間変形角時刻歴波形（曲げ・軸力系の破壊に対する照査）	資料 4-113
5.1.3	断面力分布（せん断破壊に対する照査）	資料 4-114
5.1.4	最大せん断ひずみ分布	資料 4-116
5.2	構造部材の健全性に対する評価結果	資料 4-118
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	資料 4-118
5.2.2	せん断破壊に対する評価結果	資料 4-127
5.3	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	資料 4-145
5.3.1	基礎地盤（狐崎部層）	資料 4-145
5.3.2	MMR（既設）	資料 4-147
6.	まとめ	資料 4-152

 : 記載適正化範囲

参考資料

- 参考資料 1 機器・配管系の耐震評価に適用する影響検討ケース・・・・・・・・ 資料 4-（参考） 1-1  
参考資料 2 静的地震力に対する耐震評価・・・・・・・・・・・・・・・・ 資料 4-（参考） 2-1

#### 4.2.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

##### (1) 評価条件

図4-31のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

「4.2.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）」で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

表4-3及び表4-4に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書2017や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書2017において標準とされる以下の手法とする。

- ①鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ②鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用にあたっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

材料非線形解析においては、解析コード「WCOMD Studio」を使用する。

表 4-3 材料非線形解析の位置付け (土木学会マニュアル)

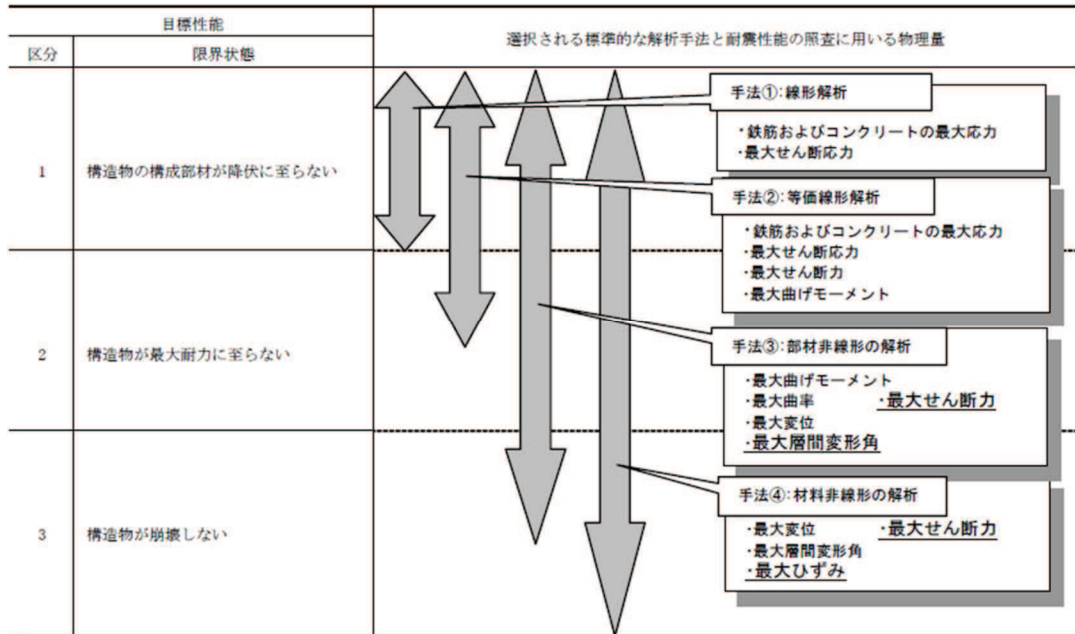


表 4-4 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析	材料非線形解析		
モデル化	骨組モデル	有限要素		
解析次元	一次元	二次元	三次元	
構成則	M- $\Phi$ , M- $\theta$ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性) (解析時間)	狭い ←	→ 広い	短い ← → 長い

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2017 等に基づき実施する。基準と異なる設定を用いる場合には、設定根拠の妥当性を確認する。

表 4-5 に参考とする主な基準・文献を示す。

表 4-5 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	・コンクリート標準示方書2017 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 4-6 及び表 4-7 に示す。

表 4-6 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度（設計図書20.5N/mm <sup>2</sup> ）／材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	0.2%	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ-せん断伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を 1.3 として算出

表 4-7 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017
降伏強度	主筋	2000 N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断補強筋	345 N/mm <sup>2</sup>	設計図書（SD345）

c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、図4-33に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル下端を固定境界とする。

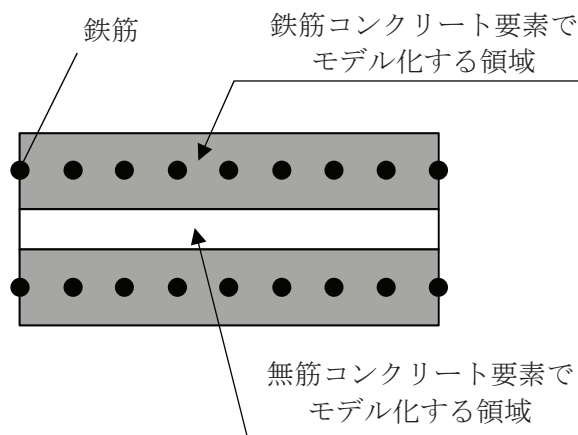


図4-33 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要



d. コンクリートの非線形特性

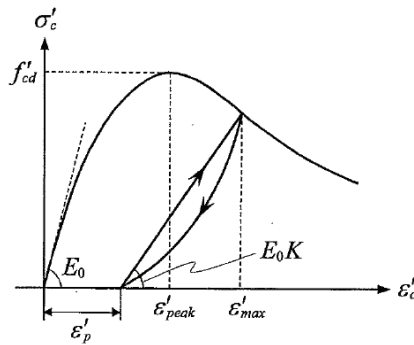
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図4-34に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図4-35に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002としてもよい)

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図4-34 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

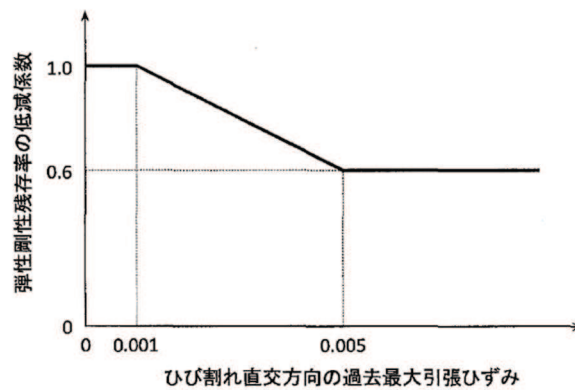
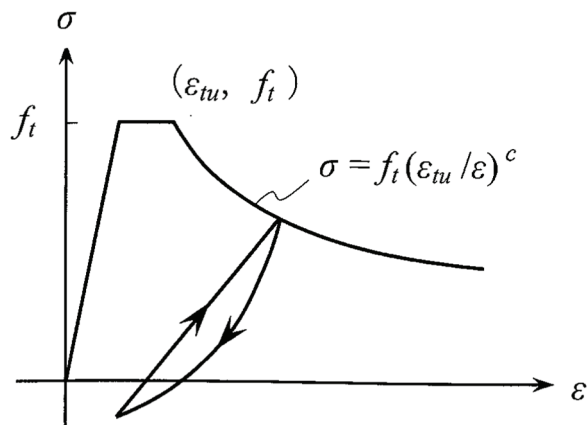


図 4-35 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-36 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮にあたっては、図 4-37 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f / L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。



- ここに、 $f_t$  : 引張強度  
 $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ  
 $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 4-36 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した  
 応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

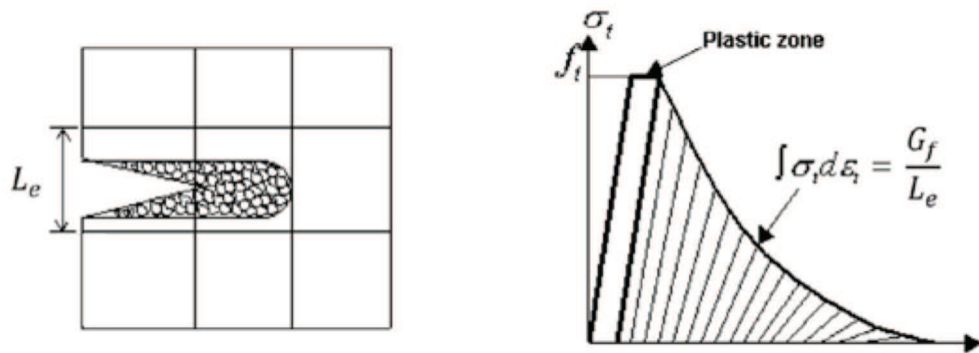
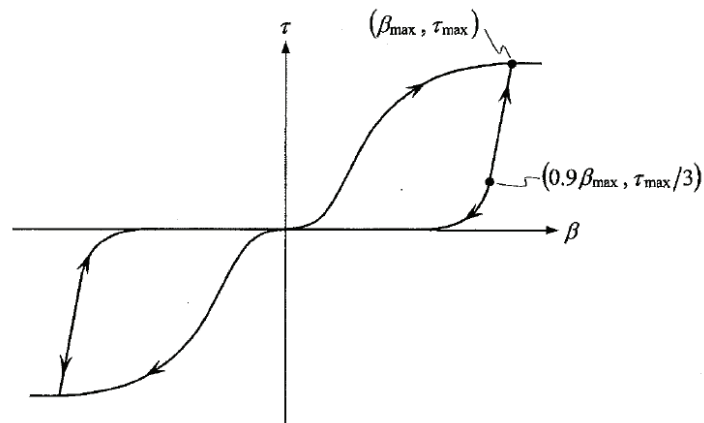


図 4-37 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-38 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比  
( $\gamma / \varepsilon$ )

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

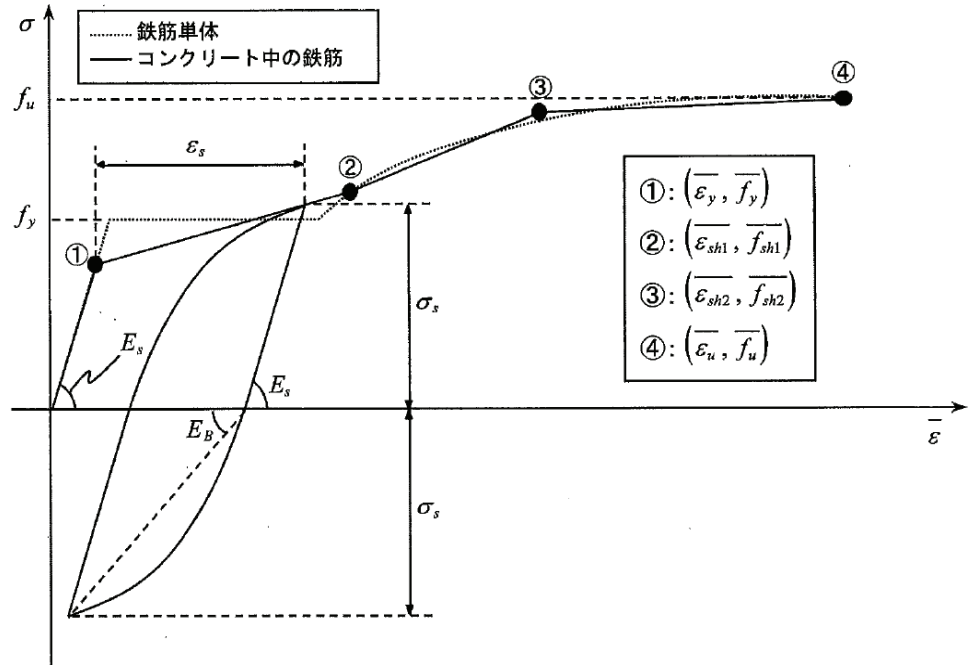
$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

図 4-38 ひび割れ面でのせん断伝達モデル  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図4-39に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- $f_y$  : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_u$  : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_y$  : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- $p$  : 鉄筋比
- $f_1$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図4-39 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションステイフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\overline{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \overline{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \overline{\sigma}_C$$

ここに、 $\overline{\sigma}_S$ 、 $\overline{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ 、 $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、 $A_{RC} = A_S + A_C$

g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析（部材非線形解析）により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価内容

a. 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力の評価フローを図 4-40 に示す。

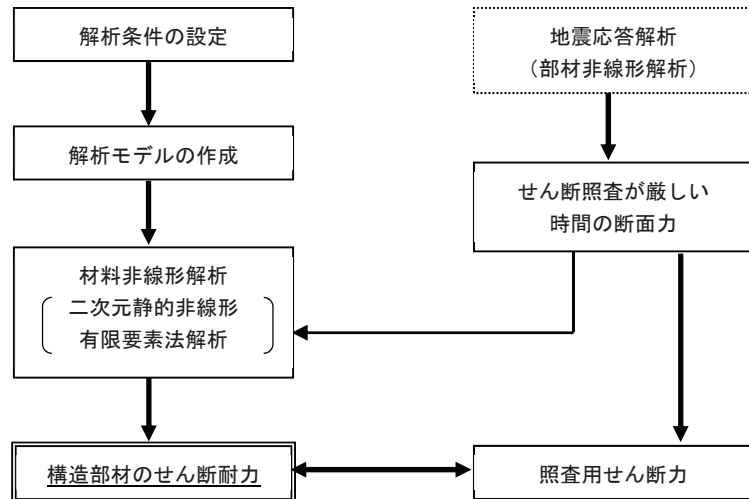


図 4-40 材料非線形解析の耐震評価フロー

b. 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント，軸力，せん断力）を材料非線形解析モデルに図 4-41 に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図 4-42 に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

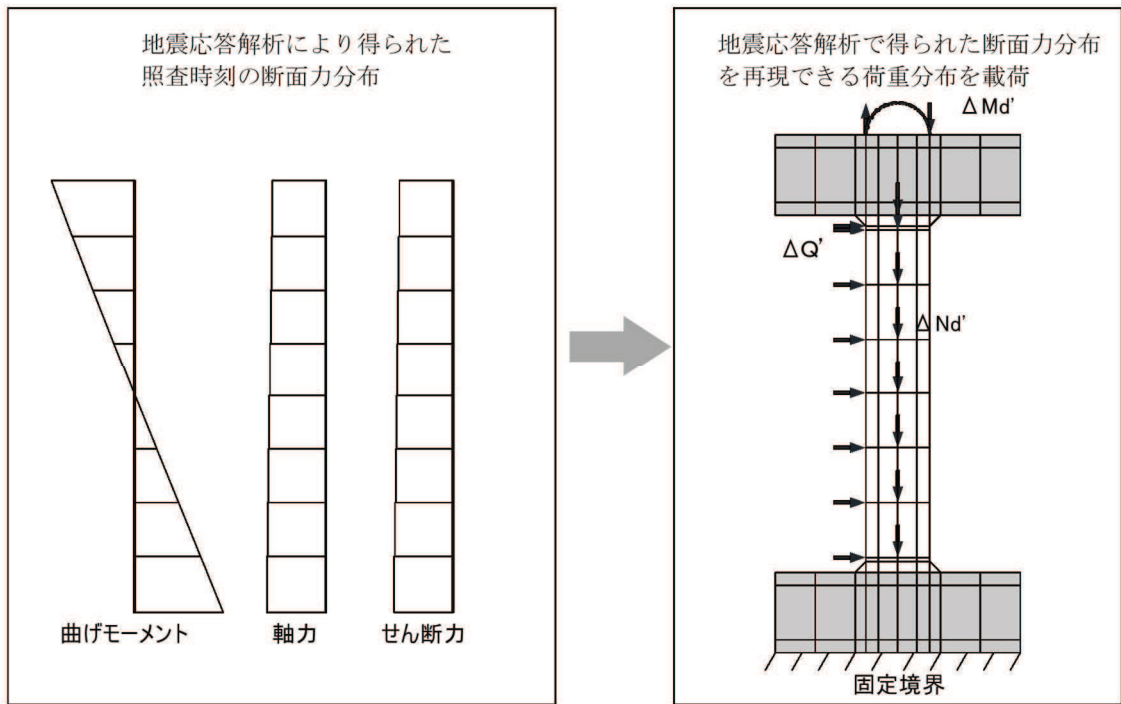


図 4-41 材料非線形解析における荷重状況

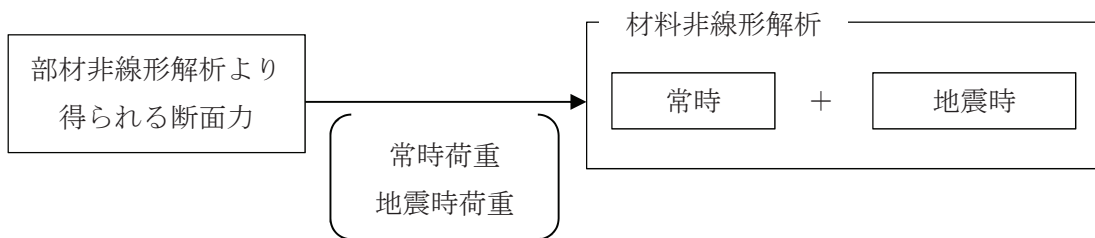


図 4-42 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  から設定する。具体的には、図 4-43 に示す例のとおり、固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係においてせん断力の増分に対して相対変位  $\delta$  が急増する直前の点又はせん断力が最大となる点を部材のせん断耐力と判断する。

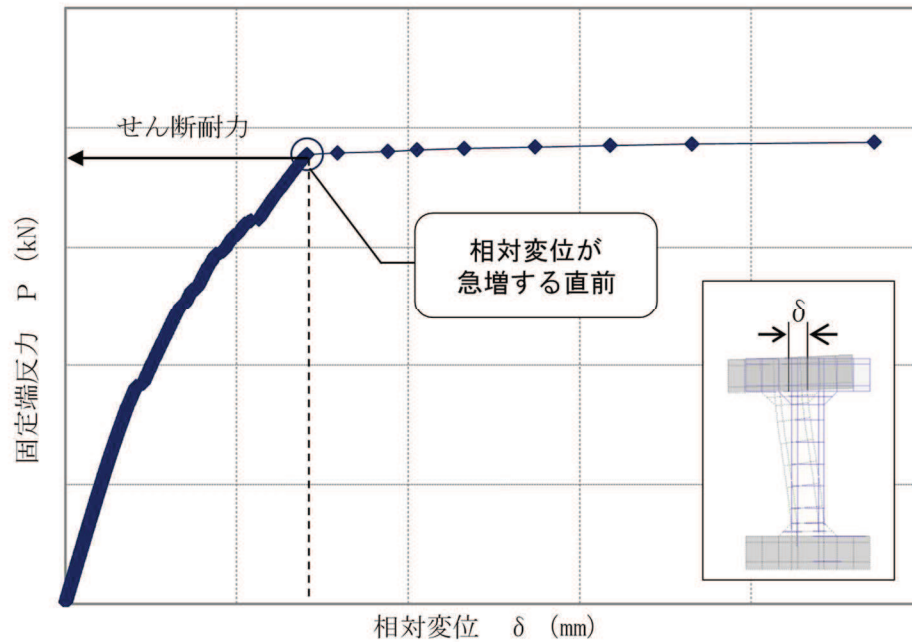


図 4-43 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、以下のとおり部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定結果を表 4-8 に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.13 を設定する(表 4-9)。



表 4-8 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.13	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_m$	1.3	文献に基づく標準的な設定

表 4-9 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定結果

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	422.8	0.89	
2	1187	1258.2	1.06	
3	324	356.4	1.10	
4	294	308.7	1.05	
5	581	511.3	0.88	
6	329	335.6	1.02	
7	1587	1793.3	1.13	最大値
8	350	392.0	1.12	
9	855	880.7	1.03	
10	165	102.3	0.62	
11	333	316.4	0.95	
12	127	100.3	0.79	
13	188	118.4	0.63	
14	163	117.4	0.72	
15	273	177.5	0.65	
16	356	291.9	0.82	
17	432	246.2	0.57	

## 5.2.2 せん断破壊に対する評価結果

### (1) せん断耐力式による評価結果

せん断破壊に対する評価結果のうち、せん断耐力式による評価結果を表 5-10 に示す。照査値は、せん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表中には、照査値が 1.0 を上回る解析ケース、部材があることから、次項「(2) 材料非線形解析による評価結果」にて照査値が 1.0 を下回ることを確認する。

表 5-10(1) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
①	S s - D 1	++	頂版	21	784	1308	0.60
			側壁	60	1162	2387	0.49
			隔壁	70	224	319	0.71
			底版	11	501	1188	0.43
		-+	頂版	21	782	1299	0.61
			側壁	60	1098	2515	0.44
			隔壁	70	209	311	0.68
			底版	11	474	1188	0.40
	S s - D 2	++	頂版	24	808	1348	0.60
			側壁	50	692	1386	0.50
			隔壁	70	194	292	0.67
			底版	11	491	1188	0.42
		-+	頂版	21	808	1310	0.62
			側壁	50	696	1473	0.48
			隔壁	70	189	282	0.68
			底版	11	513	1188	0.44
	S s - D 3	++	頂版	24	756	1320	0.58
			側壁	50	586	1441	0.41
			隔壁	70	170	281	0.61
			底版	11	471	1188	0.40
-+		頂版	21	734	1310	0.57	
		側壁	50	585	1460	0.41	
		隔壁	90	160	272	0.59	
		底版	11	472	1188	0.40	

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

表 5-10(2) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{yd}$ (kN)	$V_d / V_{yd}$
					$V_d$ (kN)	$V_{yd}$ (kN)	
①	S <sub>s</sub> -F 1	++	頂版	24	701	1349	0.52
			側壁	50	683	1392	0.50
			隔壁	90	183	296	0.62
			底版	11	447	1188	0.38
		-+	頂版	21	760	1314	0.58
			側壁	60	1013	2346	0.44
			隔壁	70	197	310	0.64
			底版	11	432	1188	0.37
	S <sub>s</sub> -F 2	++	頂版	21	719	1310	0.55
			側壁	60	1208	2439	0.50
			隔壁	70	173	270	0.65
			底版	11	457	1188	0.39
		-+	頂版	21	725	1288	0.57
			側壁	60	1037	2287	0.46
			隔壁	70	178	280	0.64
			底版	14	416	1188	0.36
S <sub>s</sub> -F 3	++	頂版	21	763	1304	0.59	
		側壁	50	607	1395	0.44	
		隔壁	90	175	286	0.62	
		底版	14	465	1188	0.40	
	-+	頂版	24	747	1365	0.55	
		側壁	50	659	1400	0.48	
		隔壁	70	176	282	0.63	
		底版	11	511	1188	0.44	

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 5-10(3) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力	照査値
					せん断力*2	$V_{y d}$ (kN)	$V_d / V_{y d}$
					$V_d$ (kN)		
①	S s - N 1	++	頂版	21	812	1322	0.62
			側壁	50	1078	2247	0.48
			隔壁	70	257	312	0.83
			底版	11	431	1188	0.37
		-+	頂版	24	755	1366	0.56
			側壁	60	1273	2283	0.56
			隔壁	90	229	302	0.76
			底版	11	454	1188	0.39
②	S s - N 1	++	頂版	21	722	1311	0.56
			側壁	50	964	2281	0.43
			隔壁	70	221	322	0.69
			底版	11	417	1188	0.36
③	S s - N 1	++	頂版	21	953	1329	0.72
			側壁	50	1482	2348	0.64
			隔壁	70	309	298	1.04
			底版	11	1361	3123	0.44
④	S s - N 1	++	頂版	21	879	1304	0.68
			側壁	50	1214	2216	0.55
			隔壁	70	287	299	0.96
			底版	11	533	1188	0.45

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d$  = 発生せん断力  $V$  × 構造解析係数  $\gamma_a$

(2) 材料非線形解析による評価結果

a. 評価条件

前項「(1) 部材非線形解析による評価結果」では、原子炉機器冷却海水配管ダクト（水平部）の隔壁において、発生するせん断力がせん断耐力式によるせん断耐力を上回る結果となった。

せん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、ここでは、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断破壊に対する健全性を確認する。

図 5-6 に材料非線形解析によりせん断破壊に対する評価を実施する対象部材を示す。また、評価対象部材の要素分割図を図 5-7 に、要素プロパティ番号図を及び図 5-8、要素プロパティ条件を表 5-11 に示す。

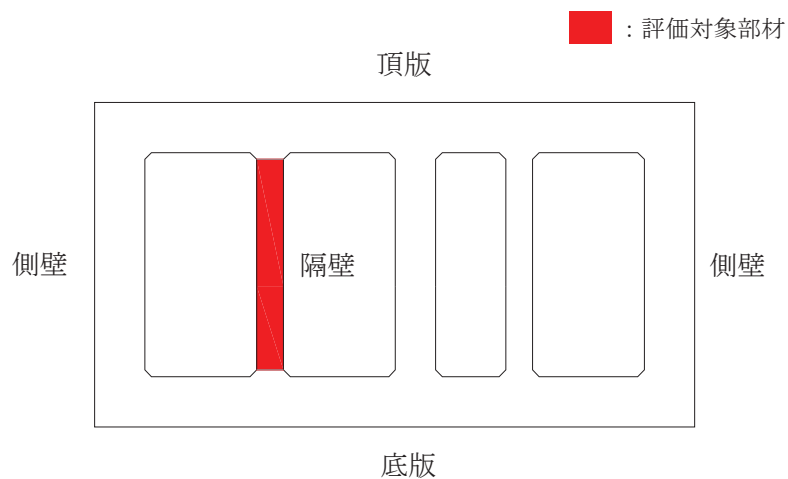


図 5-6 材料非線形解析における評価対象部材

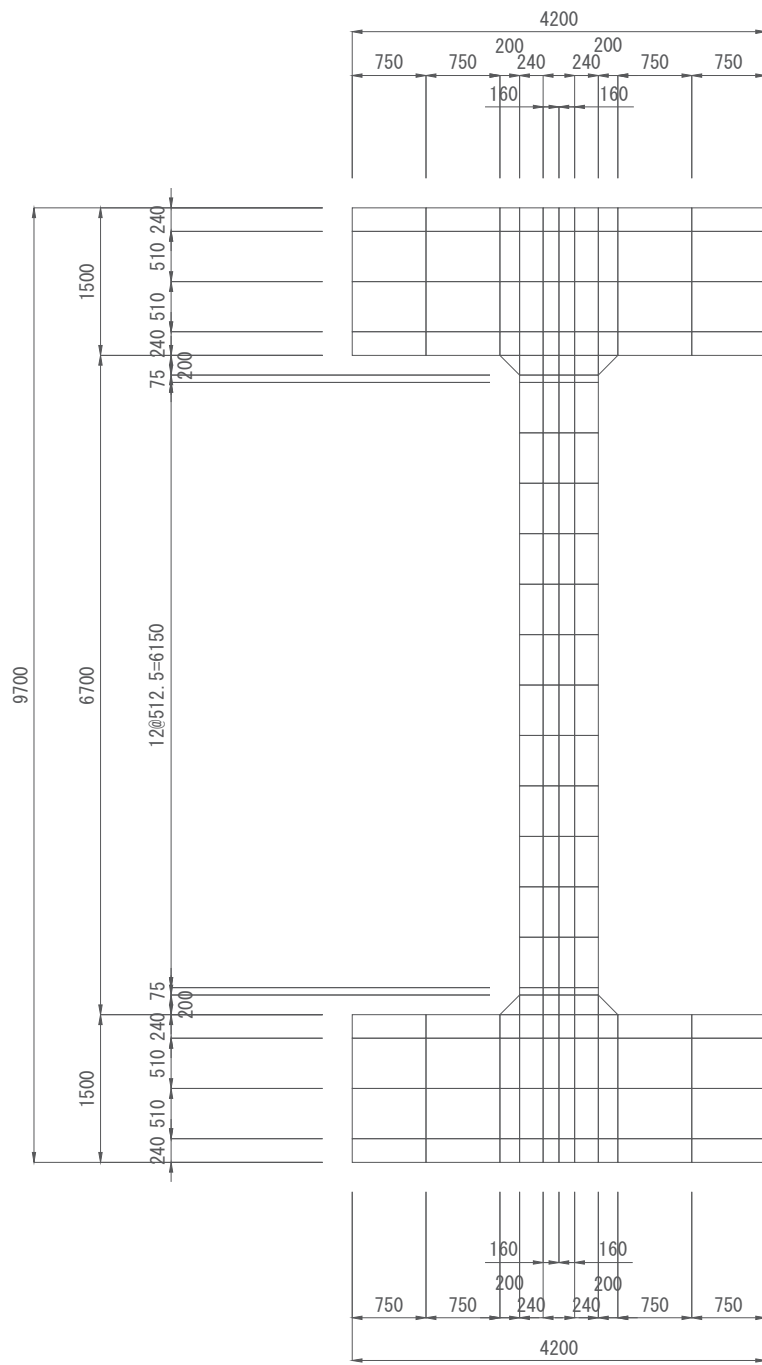


图 5-7 要素分割图

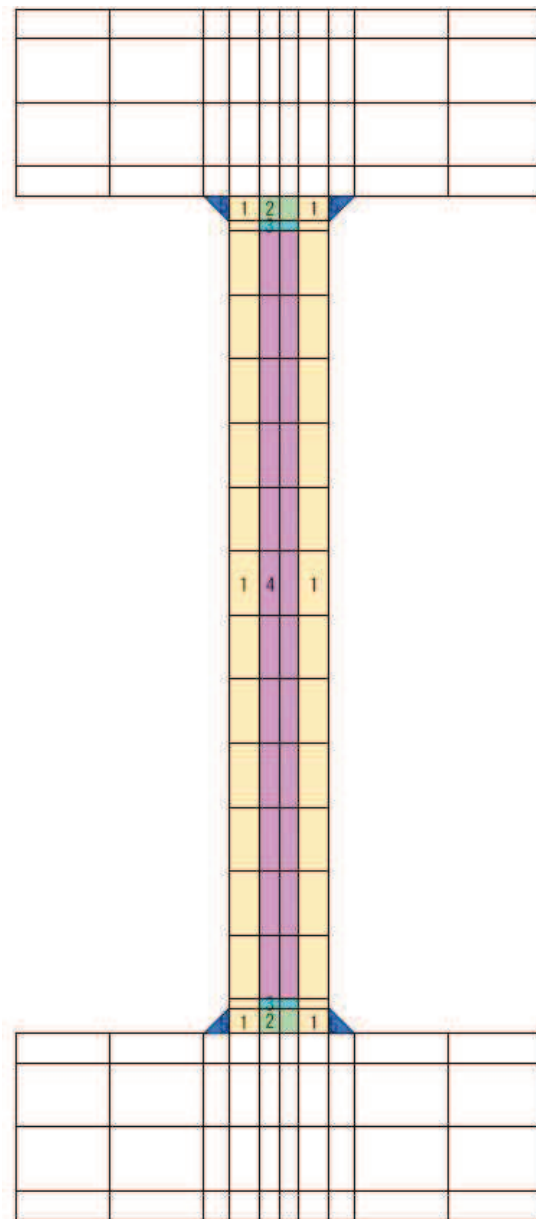


図 5-8 要素プロパティ番号図

表 5-11 要素プロパティ条件

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	RC	1.9	0.4
2	無筋	1.5	1.7
3	無筋	1.5	1.1
4	無筋	1.5	3.7
5	無筋	1.7	1.7



材料非線形解析によるせん断耐力の算定において考慮する荷重は、地震応答解析から得られる荷重を考慮する。具体的には地震応答解析で評価対象部材のせん断照査が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 5-10 のように作用させる。材料非線形解析では、地震応答解析から得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重を 100 分割したものを  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  とし、これらの比率を維持しながら漸増载荷する。

なお、作用荷重は、常時荷重（ $\Delta M_s$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta N_s$ ）及び地震時荷重（ $\Delta M_d$ 、 $\Delta Q_d$ 、 $\Delta N_d$ ）とし、図 5-11 に作用手順を示す。表 5-12 に代表例として、材料非線形解析による評価において最も照査値が厳しい解析ケースにおける  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  を示す。

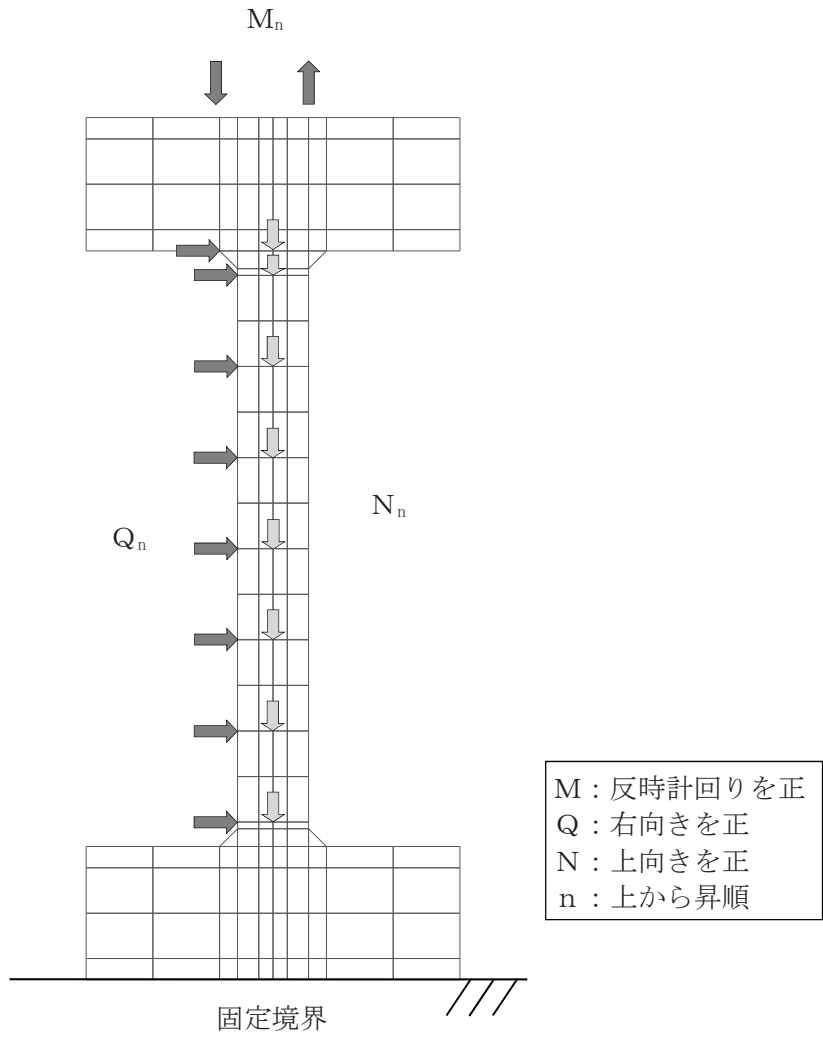


図 5-9 材料非線形解析における载荷状況

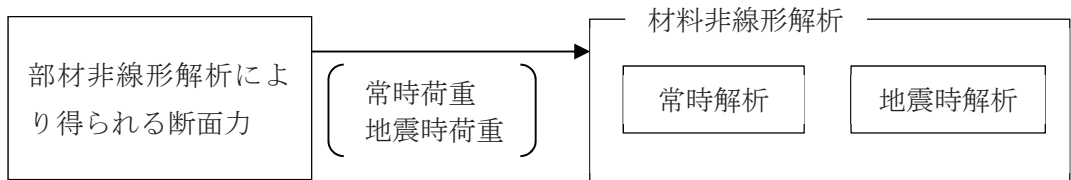


図 5-10 荷重の作用手順

表 5-12 材料非線形解析における作用荷重

部材		隔壁	
地震動		Ss-N1(++)	
解析ケース		解析ケース③	
常時荷重	曲げモーメント(kN・m)	$\Delta M$	2.2920
	せん断力(kN)	$\Delta Q_1$	-0.0185
		$\Delta Q_2$	0.0000
		$\Delta Q_3$	0.0000
		$\Delta Q_4$	0.0000
		$\Delta Q_5$	0.0000
		$\Delta Q_6$	0.0000
		$\Delta Q_7$	0.0000
		$\Delta Q_8$	0.0000
	軸力(kN)	$\Delta N_1$	-13.2931
		$\Delta N_2$	-0.1687
		$\Delta N_3$	-0.2661
		$\Delta N_4$	-0.2661
		$\Delta N_5$	-0.2661
		$\Delta N_6$	-0.2661
		$\Delta N_7$	-0.2661
$\Delta N_8$		-0.1688	
地震時荷重	曲げモーメント(kN・m)	$\Delta M$	5.6952
	せん断力(kN)	$\Delta Q_1$	1.9201
		$\Delta Q_2$	0.1401
		$\Delta Q_3$	0.2191
		$\Delta Q_4$	0.2152
		$\Delta Q_5$	0.2014
		$\Delta Q_6$	0.1828
		$\Delta Q_7$	0.1850
		$\Delta Q_8$	0.0806
	軸力(kN)	$\Delta N_1$	-9.0308
		$\Delta N_2$	-0.0098
		$\Delta N_3$	-0.0119
		$\Delta N_4$	-0.0081
		$\Delta N_5$	-0.0044
		$\Delta N_6$	-0.0005
		$\Delta N_7$	0.0033
$\Delta N_8$		0.0045	

b. 評価結果

(a) 隔壁の評価結果

評価対象部材（隔壁）における荷重－変位曲線を図 5-11 に示す。

同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース③，地震動 S s - N 1（++））の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、地震応答解析（部材非線形解析）において得られた断面力図を再現した状態である。189 ステップ以降、水平変位の急増が認められる。

図 5-12 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、189 ステップまでは、荷重の増加に伴って徐々にひび割れが進展していくが、189 ステップ以降は、斜めひび割れが圧縮縁側に進展する様相を示している。したがって、189 ステップ以降の水平変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、189 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、189 ステップにおけるせん断耐力 590.8kN を表 4-8 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 522kN とする。

また、図 5-13 に、各ステップにおける変形図を示す。

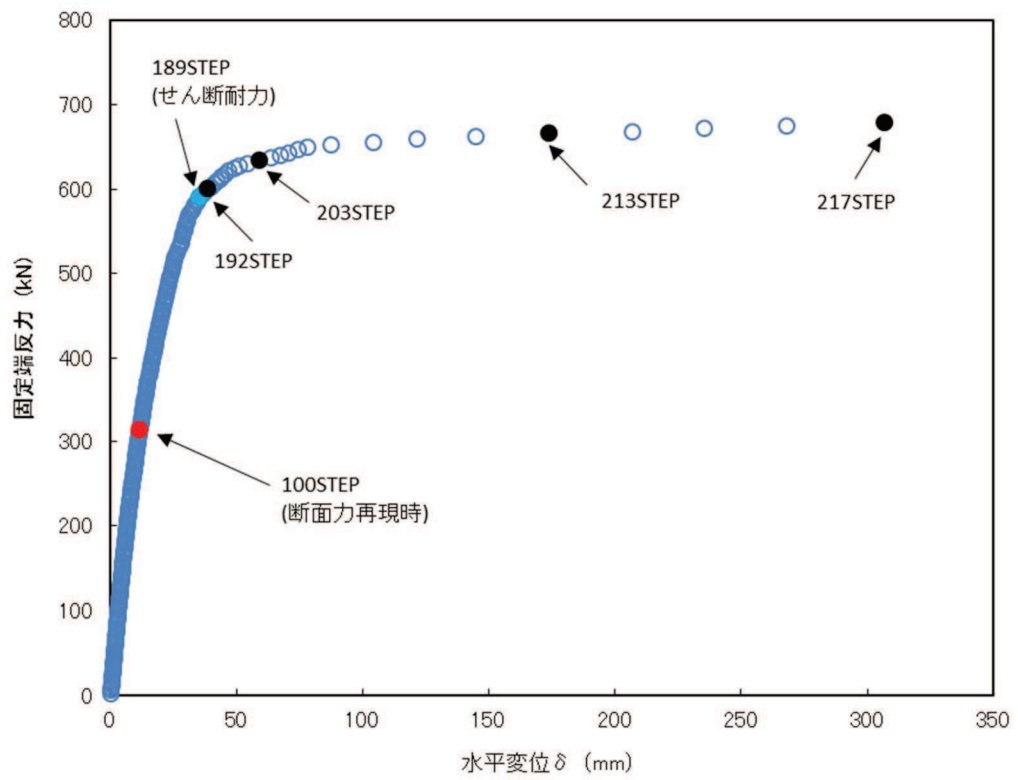


図 5-11 荷重-変位曲線  
 (隔壁, 解析ケース③ 地震動 S s - N 1 (++) )

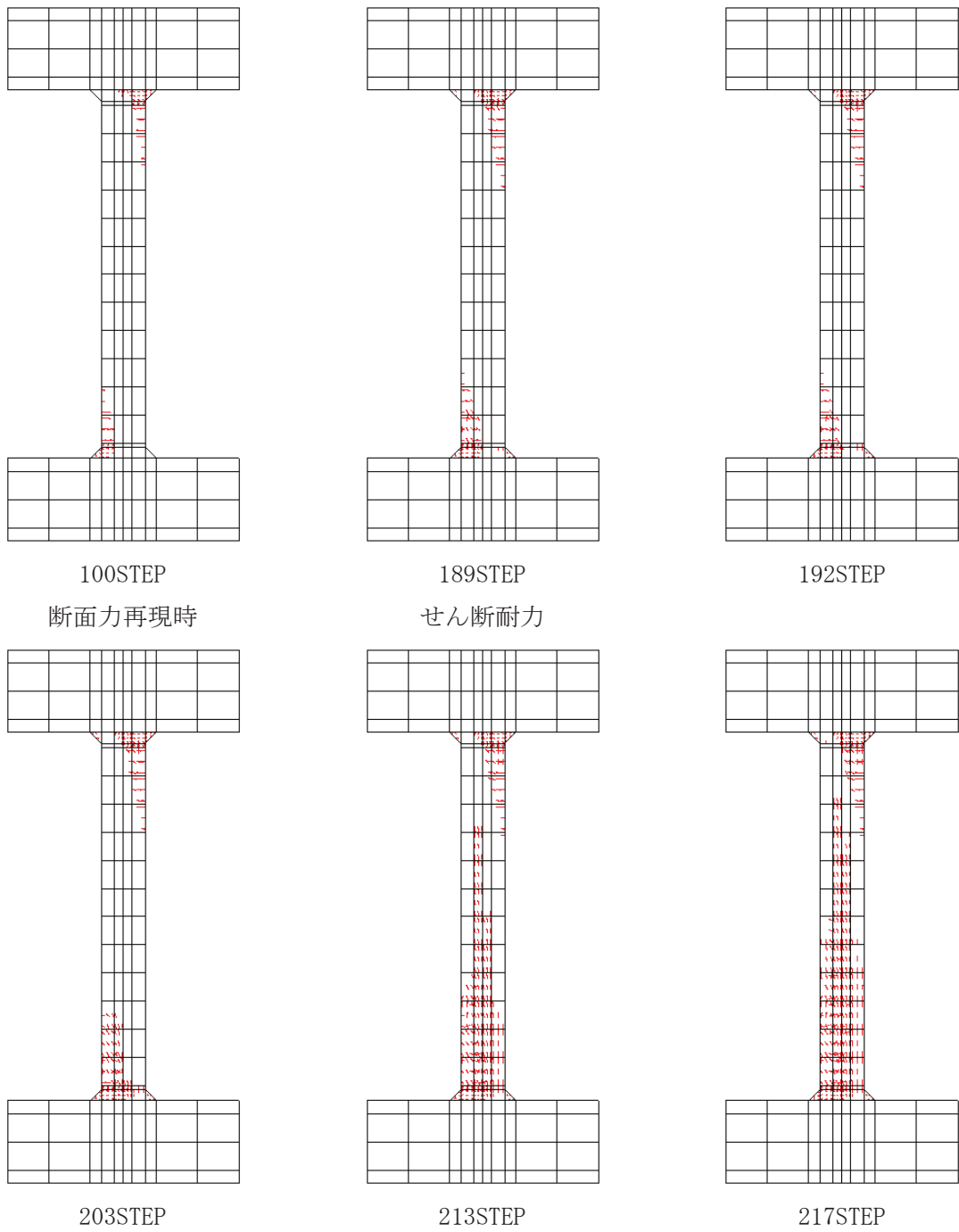
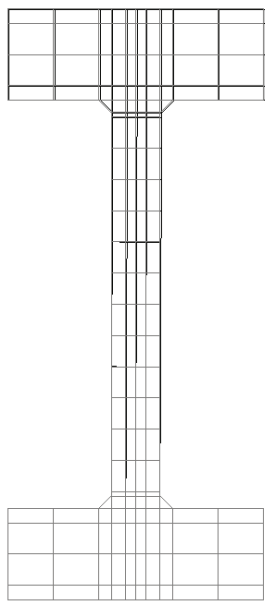
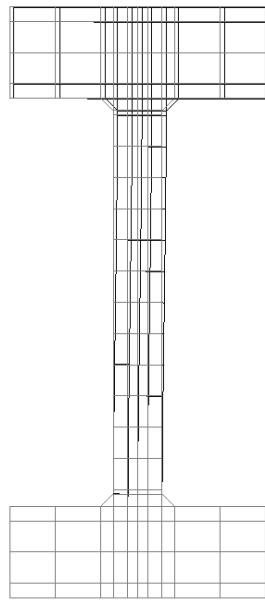


図 5-12 各ステップにおけるひび割れ図  
(隔版, 解析ケース③ 地震動 S s - N 1 (++) )



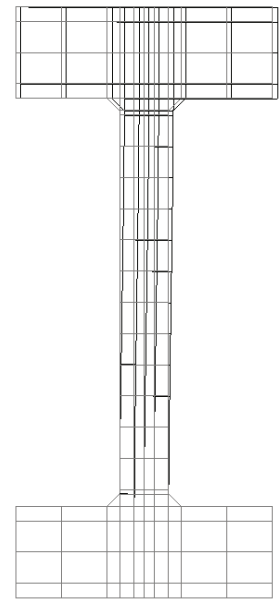
100STEP

断面力再現時

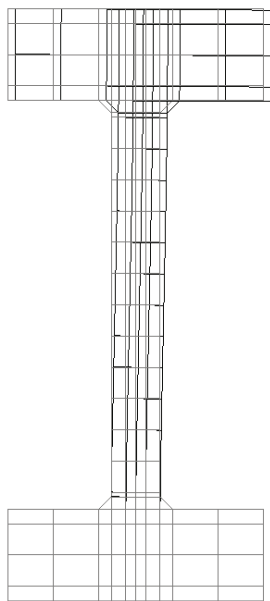


189STEP

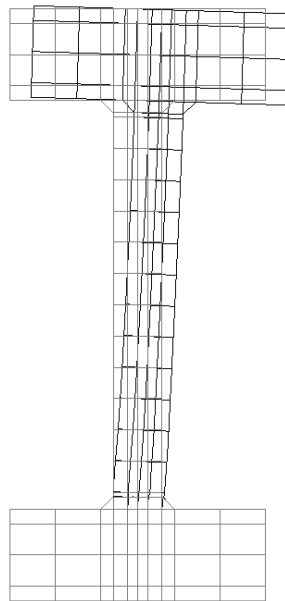
せん断耐力



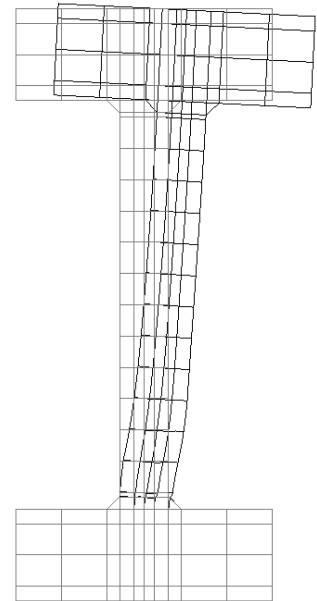
192STEP



203STEP



213STEP



217STEP

変形倍率 (×20)

図 5-13 各ステップにおける変形図  
(隔壁, 解析ケース③ 地震動 S s - N 1 (++) )

(b) せん断力に対する評価結果

せん断耐力式及び材料非線形解析によるせん断破壊に対する評価結果を，表 5-13 に示す。

同表より，全部材で発生するせん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。



表 5-13(1) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式及び材料非線形解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力 $V_{yd}$ (kN)	照査値 $V_d/V_{yd}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN)		
①	S s - D 1	++	頂版	21	784	1308	0.60
			側壁	60	1162	2387	0.49
			隔壁	70	224	319	0.71
			底版	11	501	1188	0.43
		-+	頂版	21	782	1299	0.61
			側壁	60	1098	2515	0.44
			隔壁	70	209	311	0.68
			底版	11	474	1188	0.40
	S s - D 2	++	頂版	24	808	1348	0.60
			側壁	50	692	1386	0.50
			隔壁	70	194	292	0.67
			底版	11	491	1188	0.42
		-+	頂版	21	808	1310	0.62
			側壁	50	696	1473	0.48
			隔壁	70	189	282	0.68
			底版	11	513	1188	0.44
	S s - D 3	++	頂版	24	756	1320	0.58
			側壁	50	586	1441	0.41
			隔壁	70	170	281	0.61
			底版	11	471	1188	0.40
		-+	頂版	21	734	1310	0.57
			側壁	50	585	1460	0.41
			隔壁	90	160	272	0.59
			底版	11	472	1188	0.40

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力 } V \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$

表 5-13(2) せん断破壊に対する評価結果 (せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN)		
②	S s - F 1	++	頂版	24	701	1349	0.52
			側壁	50	683	1392	0.50
			隔壁	90	183	296	0.62
			底版	11	447	1188	0.38
		-+	頂版	21	760	1314	0.58
			側壁	60	1013	2346	0.44
			隔壁	70	197	310	0.64
			底版	11	432	1188	0.37
	S s - F 2	++	頂版	21	719	1310	0.55
			側壁	60	1208	2439	0.50
			隔壁	70	173	270	0.65
			底版	11	457	1188	0.39
		-+	頂版	21	725	1288	0.57
			側壁	60	1037	2287	0.46
			隔壁	70	178	280	0.64
			底版	14	416	1188	0.36
S s - F 3	++	頂版	21	763	1304	0.59	
		側壁	50	607	1395	0.44	
		隔壁	90	175	286	0.62	
		底版	14	465	1188	0.40	
	-+	頂版	24	747	1365	0.55	
		側壁	50	659	1400	0.48	
		隔壁	70	176	282	0.63	
		底版	11	511	1188	0.44	

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

表 5-13(3) せん断破壊に対する評価結果（せん断耐力式及び材料非線形解析）

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d / V_{y d}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN)		
①	S s - N 1	++	頂版	21	812	1322	0.62
			側壁	50	1078	2247	0.48
			隔壁	70	257	312	0.83
			底版	11	431	1188	0.37
		-+	頂版	24	755	1366	0.56
			側壁	60	1273	2283	0.56
			隔壁	90	229	302	0.76
			底版	11	454	1188	0.39
②	S s - N 1	++	頂版	21	722	1311	0.56
			側壁	50	964	2281	0.43
			隔壁	70	221	322	0.69
			底版	11	417	1188	0.36
③	S s - N 1	++	頂版	21	953	1329	0.72
			側壁	50	1482	2348	0.64
			隔壁	70	313	522*3	0.60*3
			底版	11	1361	3123	0.44
④	S s - N 1	++	頂版	21	879	1304	0.68
			側壁	50	1214	2216	0.55
			隔壁	70	287	299	0.96
			底版	11	533	1188	0.45

注記\*1：評価位置は図 5-5 に示す。

\*2：照査用せん断力  $V_d =$  発生せん断力  $V \times$  構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

資料5 原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の耐震安全性評価

## 目 次

1. 評価方法	資料 5-1
2. 評価条件	資料 5-1
2.1 適用規格	資料 5-1
2.2 構造及び補強の概要	資料 5-4
2.3 耐震評価フロー	資料 5-16
2.4 地震時荷重算出断面の選定	資料 5-19
2.5 使用材料及び材料の物性値	資料 5-24
2.6 地盤物性値	資料 5-24
2.7 評価構造物諸元	資料 5-29
2.8 地下水位	資料 5-32
3. 地震応答解析	資料 5-34
3.1 地震応答解析手法	資料 5-34
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 5-37
3.2.1 解析モデル領域	資料 5-37
3.2.2 境界条件	資料 5-39
3.2.3 構造物のモデル化	資料 5-44
3.2.4 隣接構造物のモデル化	資料 5-45
3.2.5 地盤及び MMR のモデル化	資料 5-45
3.2.6 ジョイント要素の設定	資料 5-45
3.3 減衰定数	資料 5-51
3.4 荷重の組合せ	資料 5-59
3.4.1 機器・配管荷重	資料 5-60
3.4.2 外水圧	資料 5-64
3.4.3 積載荷重	資料 5-64
3.5 地震応答解析の解析ケース	資料 5-65
3.5.1 耐震評価における解析ケース	資料 5-65
4. 二次元構造解析	資料 5-71
4.1 評価対象部材	資料 5-71
4.2 解析方法	資料 5-73
4.3 解析モデルの諸元	資料 5-73
4.3.1 解析モデル	資料 5-73
4.3.2 使用材料及び材料の物性値	資料 5-76
4.4 入力荷重	資料 5-76
4.4.1 常時荷重	資料 5-77
4.4.2 慣性力	資料 5-83
4.4.3 地震時土圧及び周面せん断力	資料 5-86
5. 評価内容	資料 5-89

5.1	入力地震動の設定	資料 5-89
5.2	許容限界の設定	資料 5-118
5.2.1	鉄筋コンクリート部材の健全性に対する許容限界	資料 5-118
5.2.2	鋼材の健全性に対する許容限界	資料 5-143
5.2.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	資料 5-145
6	評価結果	資料 5-146
6.1	地震応答解析結果	資料 5-146
6.1.1	解析ケースと照査値	資料 5-146
6.1.2	作用荷重分布図	資料 5-166
6.1.3	最大せん断ひずみ分布	資料 5-168
6.2	二次元構造解析結果	資料 5-173
6.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する照査	資料 5-173
6.2.2	せん断破壊に対する照査	資料 5-190
6.3	構造部材の健全性に対する評価結果	資料 5-197
6.3.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	資料 5-197
6.3.2	せん断破壊に対する評価結果	資料 5-256
6.4	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	資料 5-306
7.	まとめ	資料 5-307

   : 記載適正化範囲

## 参考資料

- 参考資料 1 津波に対する止水機能を有する施設の評価について・・・・・・・・資料 5- (参考) 1-1
- 参考資料 2 静的地震力に対する評価結果・・・・・・・・資料 5- (参考) 2-1
- 参考資料 3 側壁新設部と既設部の接合方法について・・・・・・・・資料 5- (参考) 3-1
- 参考資料 4 地震応答解析モデルの検証について・・・・・・・・資料 5- (参考) 4-1
- 参考資料 5 頂版及び底版における側壁の端部モーメントの影響について・・資料 5- (参考) 5-1
- 参考資料 6 鋼材端部を固定境界とした場合の照査結果・・・・・・・・資料 5- (参考) 6-1
- 参考資料 7 防潮壁と海水配管ダクト（鉛直部）の相互影響・・・・・・・・資料 5- (参考) 7-1
- 参考資料 8 耐震評価における地震時荷重の設定の考え方・・・・・・・・資料 5- (参考) 8-1

## 5.2 許容限界の設定

### 5.2.1 鉄筋コンクリート部材の健全性に対する許容限界

#### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

##### a. 断面①及び断面⑥

鉄筋コンクリート部材を線形シェル要素によりモデル化を行う断面①の構造強度を有することの確認、止水機能を損なわないこと及びSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認における構造部材（鉄筋コンクリート）の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、表5-1及び表5-2に示す短期許容応力度とする。

なお、頂版に止水機能及びSクラスの施設を支持する機能を要求されるが、短期許容応力度により照査を行うため、構造強度を有することの確認と許容限界が同一となることから、全部材に対して構造強度を有することを確認することで、止水機能及びSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認も同時に行う。

また、断面①と同様に鉄筋コンクリート部材を線形シェル要素によりモデル化を行う断面⑥の構造強度を有することの確認における構造部材（鉄筋コンクリート）の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、表5-1及び表5-2に示す短期許容応力度とする。

表5-1 コンクリートの許容応力度及び短期許容応力度（断面①及び断面⑥）

設計基準強度	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		短期許容応力度* (N/mm <sup>2</sup> )
$f'_{ck} = 20.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	許容曲げ圧縮応力度 $\sigma'_{ca}$	7.8	11.7
	許容せん断応力度 $\tau_{a1}$	0.42	0.63

注記\*：コンクリート標準示方書[構造的性能照査編]（土木学会，2002年制定）により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

表5-2 鉄筋の許容応力度及び短期許容応力度（断面①及び断面⑥）

鉄筋の種類	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		短期許容応力度* (N/mm <sup>2</sup> )
SD345	許容引張応力度 $\sigma_{sa}$	196	294

注記\*：コンクリート標準示方書[構造的性能照査編]（土木学会，2002年制定）により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

##### b. 断面②～⑤

鉄筋コンクリート部材を非線形はり要素によりモデル化を行う断面②～⑤の構造強度を有することの確認における構造部材（鉄筋コンクリート）の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアルに基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ1.0%）とする。

曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態については、土木学会マニュアルではコンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされており、圧縮縁コンクリートひずみ1.0%の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構



造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性等が確保できるとして設定されたものである。

また、側壁及び隔壁のアンカー定着部に要求されるSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認においては、コンクリート標準示方書に基づき、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみについて、部材降伏に相当する限界ひずみ（コンクリート：2000 $\mu$ ，主筋：1725 $\mu$ ）とする。鉄筋コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表5-3に示す。

なお、後施工せん断補強工法（セラミックキャップバー工法）（以下「CCb工法」という。）を適用する部材について、CCb工法はおおむね弾性範囲となる状況下で使用することから、コンクリート及び鉄筋のひずみが、部材降伏に相当する限界ひずみ（コンクリートの圧縮ひずみ：2000 $\mu$ ，主筋ひずみ：1725 $\mu$ ）を下回ることを併せて確認する。

表5-3 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界（断面②～⑤）

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	限界ひずみ	圧縮縁コンクリートひずみ：1.0% (10000 $\mu$ )
Sクラスの施設を支持する機能を損なわないこと		コンクリート：2000 $\mu$ 主筋(SD345)：1725 $\mu$

(2) せん断破壊に対する許容限界（許容応力度）

鉄筋コンクリート部材を線形シェル要素によりモデル化を行う断面①の構造強度を有することの確認、止水機能を損なわないこと及びSクラスの施設を支持する機能を損なわないことにおける構造部材（鉄筋コンクリート）のせん断破壊に対する許容限界は、表5-1に示す短期許容応力度とする。

また、断面①と同様に鉄筋コンクリート部材を線形シェル要素によりモデル化を行う断面⑥の構造強度を有することの確認における構造部材（鉄筋コンクリート）のせん断破壊に対する許容限界は、表5-1に示す短期許容応力度とする。

(3) せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）

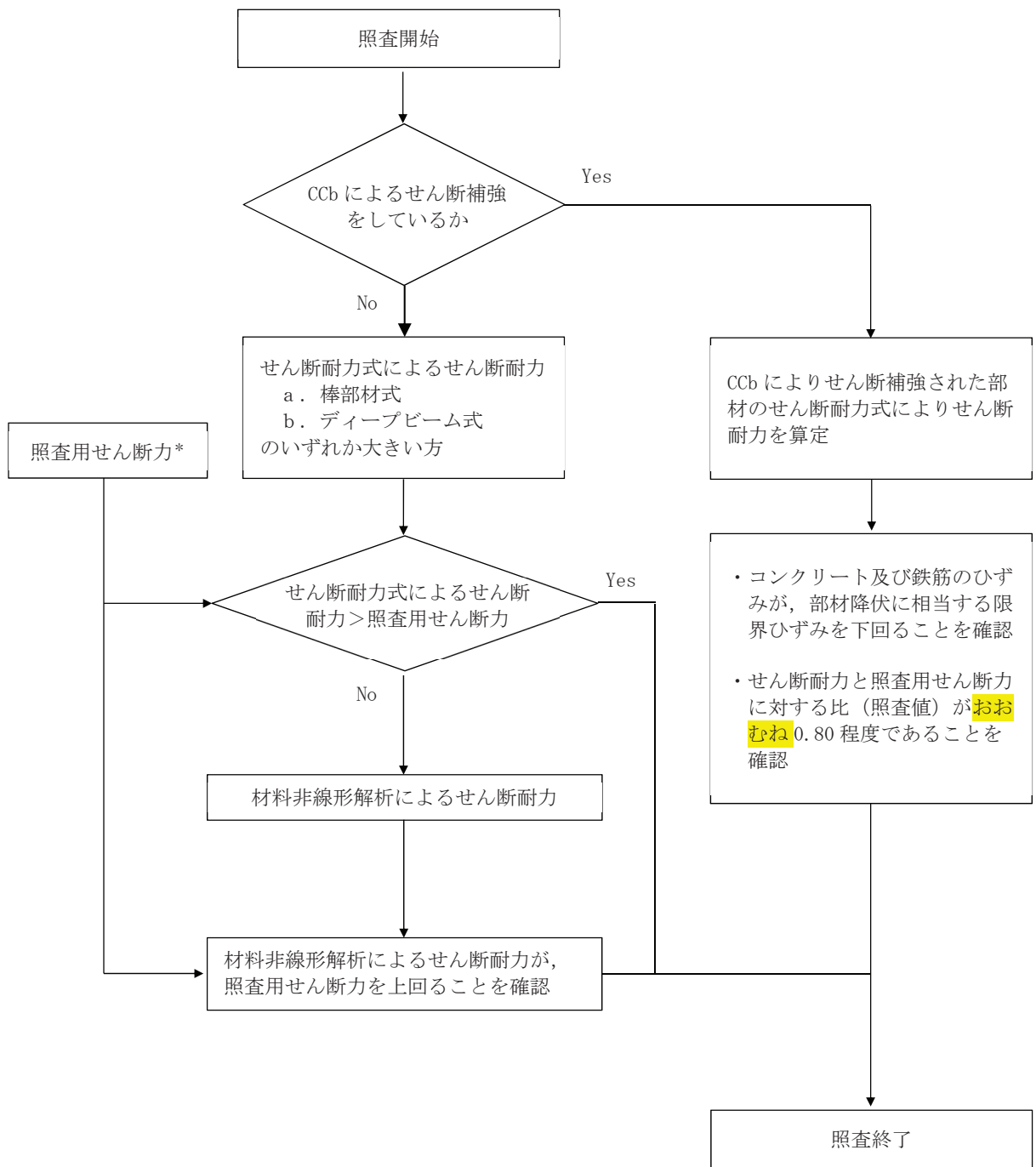
鉄筋コンクリート部材を非線形はり要素によりモデル化を行う断面②～⑤の構造強度を有することの確認及びSクラスの施設を支持する機能を損なわないことにおけるせん断破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアルに基づくせん断耐力とする。せん断耐力の評価式は部材の種類に応じて4種類を用いる。

せん断耐力を、土木学会マニュアルに基づき「a. 棒部材式」、「b. ディープビーム式」のせん断耐力式で求まるせん断耐力のうち、いずれか大きい方とする。

せん断耐力式による照査において照査用せん断力が上記のせん断耐力を上回る場合、材料非線形解析により部材のせん断耐力を求め許容限界とする。

また、CCb工法を用いる構造部材については「(4) CCbによりせん断補強された部材のせん断耐力式」によることとする。

各せん断耐力の評価式は、後述する。せん断破壊に対する照査のフローを図5-30に示す。



注記\*：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数} \gamma_a$

図 5-30 せん断破壊に対する照査フロー

a. 棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで,  $V_{y d}$  : せん断耐力

$V_{c d}$  : コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$  : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}} \quad \text{ただし, } f_{v c d} > 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{) となる場合は}$$

$$f_{v c d} = 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1 / d} \quad (d \text{ [m]}) \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + M_0 / M_d \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし, } \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 2M_0 / M_d \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし, } \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \quad \text{ただし, } \beta_a < 1.0 \text{ となる場合は } \beta_a = 1.0$$

ここで,  $f'_{c d}$  : コンクリート圧縮強度の設計用値(N/mm<sup>2</sup>)で設計基準強度  $f'_{c k}$  を

材料係数  $\gamma_{m c}$  で除したもの

$$p_v : \text{引張鉄筋比} \quad p_v = A_s / (b_w \cdot d)$$

$A_s$  : 引張側鋼材の断面積

$b_w$  : 部材の有効幅

$d$  : 部材の有効高さ

$N'_d$  : 設計軸圧縮力

$M_d$  : 設計曲げモーメント

$M_0$  :  $M_d$  に対する引張縁において, 軸方向力によって発生する応力を打ち

消すのに必要なモーメント（デコンプレッションモーメント）

$$M_0 = N'_d \cdot D/6$$

D : 断面高さ

a/d : せん断スパン比

$\gamma_{bc}$  : 部材係数

$\gamma_{mc}$  : 材料係数

$$V_{sd} = \left\{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \right\} z / \gamma_{bs}$$

$A_w$  : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{wyd}$  : せん断補強鉄筋の降伏強度を  $\gamma_{ms}$  で除したもので、400N/mm<sup>2</sup>以下と

する。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値  $f'_{ck}$  が 60N/mm<sup>2</sup>以上

のときは 800N/mm<sup>2</sup>以下とする。

$\alpha$  : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度

s : せん断補強鉄筋の配置間隔

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で d/1.15とする。

$\gamma_{bs}$  : 部材係数

$\gamma_{ms}$  : 材料係数

b. デイープビーム式

$$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$$

ここで、 $V_{ydd}$  : せん断耐力

$V_{cdd}$  : コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{sdd}$  : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc}$$

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

ここで、 $\gamma_{bc}$  : 部材係数

$$V_{sdd} = \phi \cdot V_{sd}$$

$$\phi = -0.17 + 0.3 a/d + 0.33/p_{wb} \quad \text{ただし } 0 \leq \phi \leq 1$$

ここで、 $p_{wb}$  : せん断補強鉄筋比 (%)

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式のうち棒部材式において等価せん断スパンにより設定可能な係数 $\beta_a$ を考慮している。これは、地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に曲げモーメントの反曲点が存在する等の载荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化したものである。

また、土木学会マニュアルにおけるせん断耐力式による評価においては、表5-4に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 5-4 セン断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{mc}$	1.0	1.3	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	$\gamma_s$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{bc}$	—	1.3	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	$\gamma_{bs}$	—	1.1	せん断補強筋が負担するせん断力を低減
構造解析係数		$\gamma_a$	1.05	—	応答値（断面力）の割り増し

注記\*：土木学会マニュアルでは、部材係数  $\gamma_b = \gamma_{b1} \times \gamma_{b2}$

$$\gamma_{b1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ (100R + 2)/3 & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：応答層間変形角  
とされている。

$\gamma_{b2}$ は層間変形角の値によらず、部材が降伏していない状態であれば、 $\gamma_{b2} = 1.0$ としてよいとされている。解析結果から原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の鉄筋コンクリート部材については降伏が認められなかったため、 $\gamma_{b2} = 1.0$ とする。

(4) Ccbによりせん断補強された部材のせん断耐力式

原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）において後施工せん断補強（セラミックキャップバー（CCb））を配置した構造部材については、「建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー（CCb）一般財団法人土木研究センター」」（以下「建設技術証明書」という。）に示されている以下の設計式により求める。

$$V_{p y d} = V_{c d} + V_{s d} + V_{C C b d} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$V_{C C b d} = \beta_{a w} \cdot V_{a w d} \\ = \beta_{a w} \cdot \left\{ A_{a w} \cdot f_{a w y d} (\sin \alpha_{a w} + \cos \alpha_{a w}) / S_{a w} \right\} z / \gamma_b \quad \dots \text{式(2)}$$

$$\beta_{a w} = \eta = 1 - \frac{\ell_y}{2S_{r b}} \quad \dots \text{式(3)}$$

ただし、 $\ell_y - d' \leq 0$ となる場合は $\ell_y - d' = 0$ とする。

ここに、 $V_{c d}$  : せん断補強鋼材を用いない壁部材の単位幅あたりのせん断耐力

$V_{s d}$  : 既存のせん断補強鋼材により受け持たれる壁部材の単位幅あたりのせん断耐力

$V_{C C b d}$  : セラミックキャップバー（CCb）により受け持たれる壁部材の単位幅あたりのせん断耐力

$V_{a w d}$  : セラミックキャップバー（CCb）を通常のスターラップと見なして求められる壁部材の単位幅あたりのせん断耐力

$\beta_{a w}$  : セラミックキャップバー（CCb）のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

$A_{a w}$  : 単位長さ当たりの区間 $S_{a w}$ におけるセラミックキャップバー（CCb）の総断面積

$f_{a w y d}$  : セラミックキャップバー（CCb）の設計降伏強度で $400\text{N}/\text{mm}^2$ 以下とする。

$\alpha_{a w}$  : セラミックキャップバー（CCb）が部材軸となす角度

$S_{a w}$  : セラミックキャップバー（CCb）の配置間隔

$z$  : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい。

$\gamma_b$  : 部材係数（一般に $1.10$ としてよい）

$\ell_y$  : セラミックキャップバー（CCb）の先端型定着体の定着長（ $5D$ としてよい）

$D$  : CCbの鉄筋径

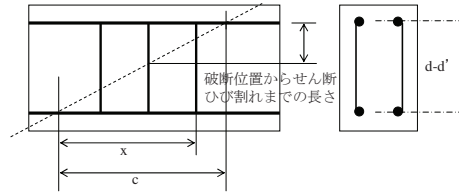
$S_{r b}$  : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔

$d$  : 補強対象部材の有効高さ

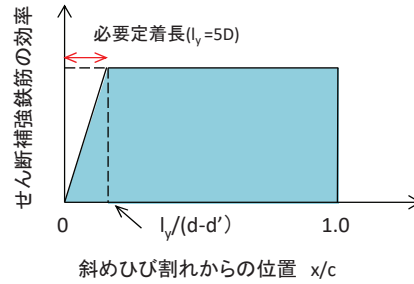


$d'$  : 差し込み側の部材表面から圧縮鋼材図心までの距離

セラミックキャップバー (CCb) が負担するせん断耐力は、先端型定着体の定着長が  $5D$  であることから、通常のせん断鉄筋に比べ補強効率が低下する。セラミックキャップバー (CCb) が負担するせん断耐力は同定着長と補強対象部材の主筋間隔から算出される有効率  $\beta_{aw}$  を通常のせん断補強鉄筋の負担分に乗じることにより考慮されている。図 5-31 に有効率算定における概念図を示す。



(a) 斜めひび割れ内に定着不良が生じたせん断補強鉄筋



(b) 標準型

図 5-31 セラミックキャップバー (CCb) の有効率算定の概念図

なお、設計上の保守的な配慮として、セラミックキャップバー (CCb) によるせん断補強を配置する場合は、対象とする構造部材の主筋の降伏以下の場合に適用することとし、せん断破壊に対する照査値は **おおむね** 0.80 程度とする。

(5) せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

a. 評価条件

図 5-30 のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

「(3) せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）」で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

表 5-5 及び表 5-6 に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90 年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書 2017 や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書 2017 において標準とされる以下の手法とする。

- ①鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ②鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用にあたっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

材料非線形解析においては、解析コード「WCOMD Studio Ver. 1.00.02」を使用する。

表 5-5 材料非線形解析の位置付け (土木学会マニュアル)

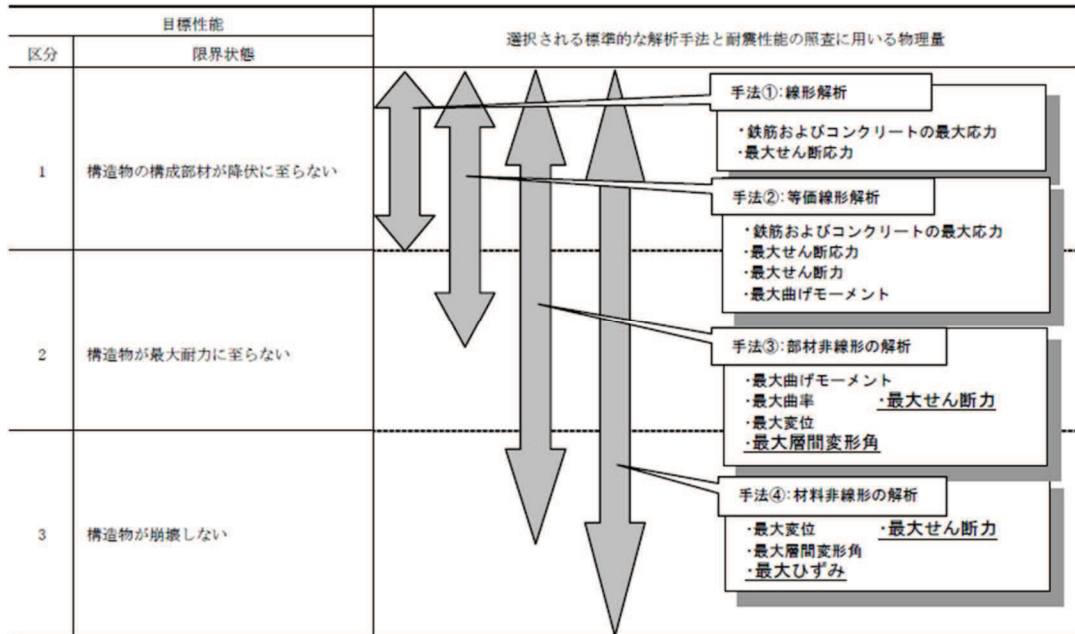


表 5-6 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モデル化	骨組モデル		有限要素	
解析次元	一次元		二次元	三次元
構成則	M-Φ, M-θ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性)		狭い ← → 広い	
	(解析時間)		短い ← → 長い	

(a) 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2017 等に基づき実施する。

表 5-7 に参考とする主な基準等を示す。

表 5-7 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	・コンクリート標準示方書2017 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

(b) 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 5-8 及び表 5-9 に示す。

表 5-8 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度 (20.5N/mm <sup>2</sup> ) ／材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	2000 μ	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ-せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を 1.3 として算出

表 5-9 鉄筋の材料定数

	設定値	諸元	
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない	
ヤング係数	200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017	
降伏 強度	主筋	2000 N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345 N/mm <sup>2</sup>	SD345

(c) 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、図5-32に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル下端を固定境界とする。

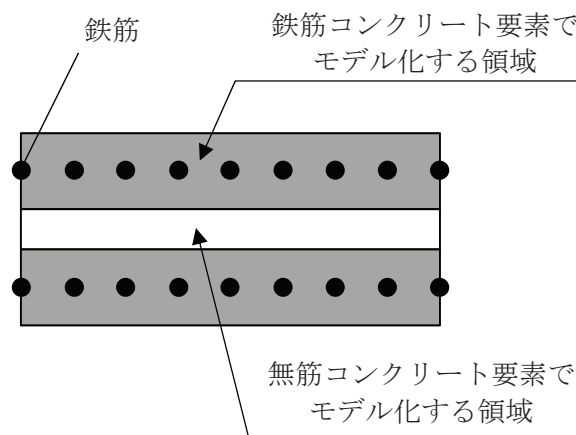


図5-32 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

(d) コンクリートの非線形特性

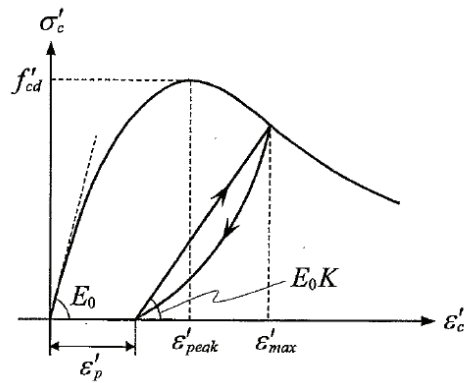
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

イ. 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 5-33 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 5-34 に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\epsilon'_c - \epsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\epsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\epsilon'_p = \epsilon'_{max} - 2.86 \cdot \epsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

ここに,

$\epsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に, 0.002 としてもよい)

$\epsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\epsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 5-33 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

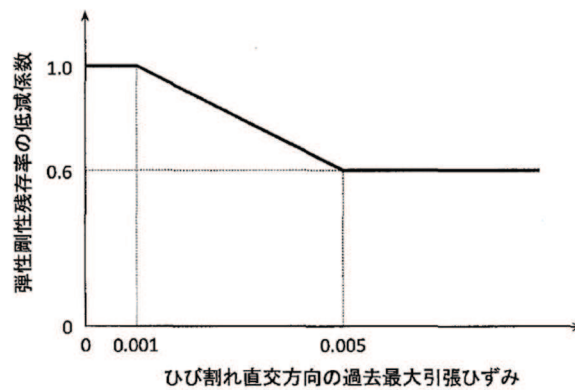


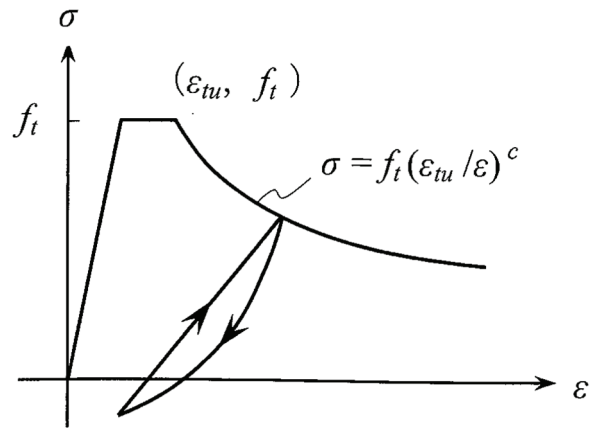
図 5-34 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

ロ. 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 5-35 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮にあたっては、図 5-36 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f / L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。





ここに,

- $f_t$  : 引張強度
- $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ
- $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 5-35 引張応力下における鉄筋とコンクリートの  
付着効果を考慮した応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

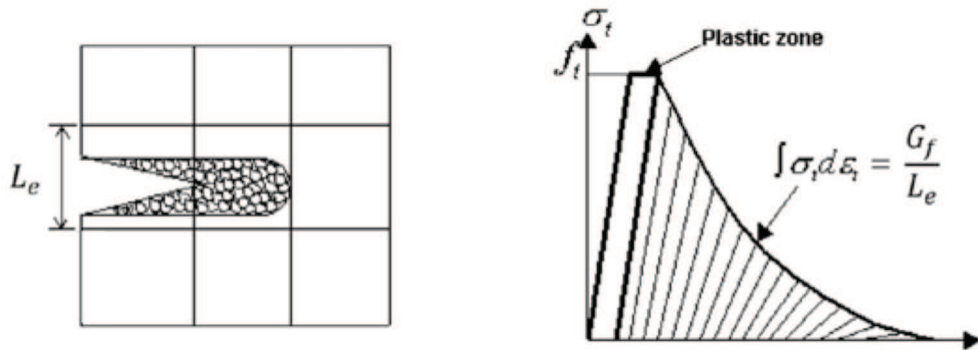
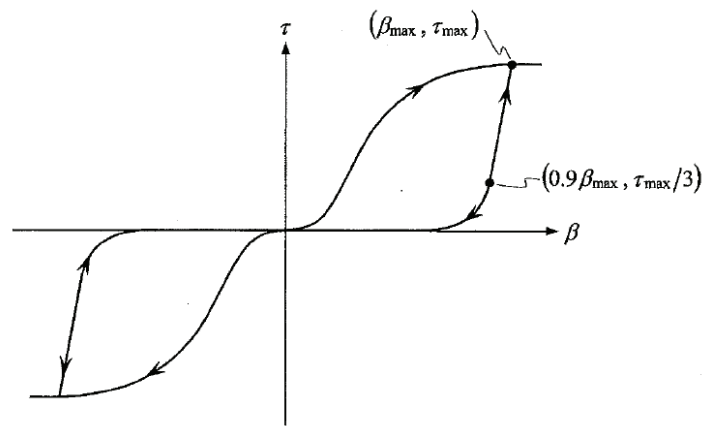


図 5-36 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

ハ. ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 5-37 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\epsilon$ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに,

$\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ  $\gamma$  とひび割れ開口ひずみ  $\varepsilon$  の比 ( $\gamma / \varepsilon$ )

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

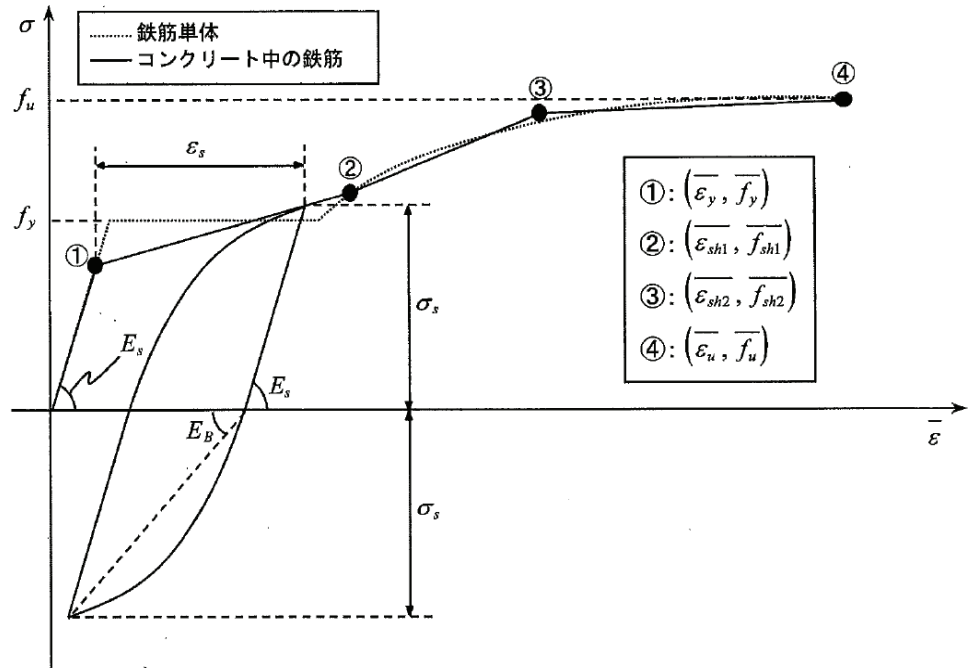
$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ  $\gamma$  とひび割れ開口ひずみ  $\varepsilon$  の比

図 5-37 ひび割れ面でのせん断伝達モデル  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(e) 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図 5-38 に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- $f_y$  : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_u$  : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_y$  : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- $p$  : 鉄筋比
- $f_1$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図 5-38 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(f) 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \bar{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \bar{\sigma}_C$$

ここに、 $\bar{\sigma}_S$ 、 $\bar{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ 、 $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、

$$A_{RC} = A_S + A_C$$

(g) 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

b. 評価内容

(a) 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力の評価フローを図 5-39 に示す。

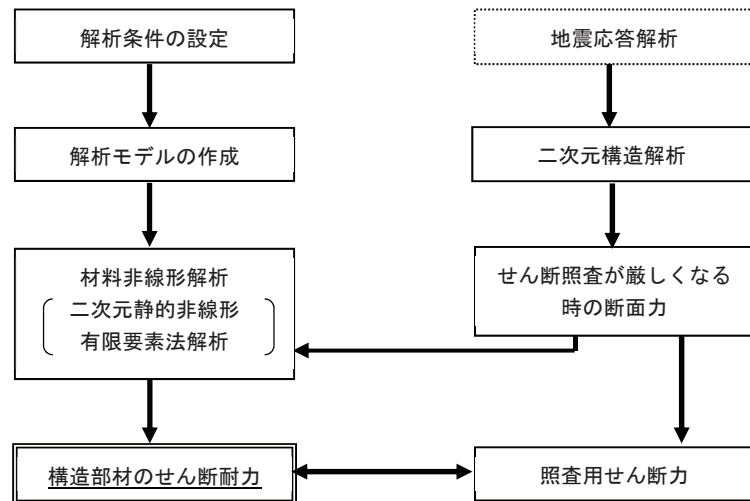


図 5-39 材料非線形解析の耐震評価フロー

(b) 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（二次元時刻歴応答解析（全応力解析））から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析で得られた荷重より二次元構造解析を行い、評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時の断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 5-40 に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、二次元構造解析で得られた断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図 5-41 に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

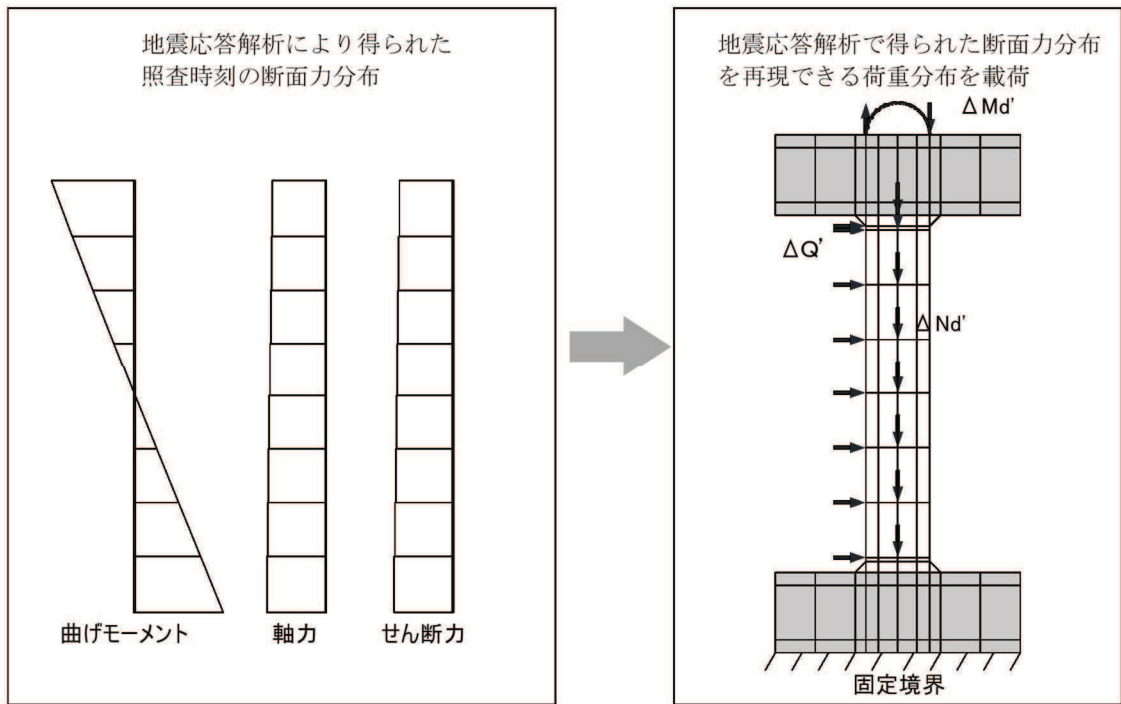


図 5-40 材料非線形解析における荷重状況

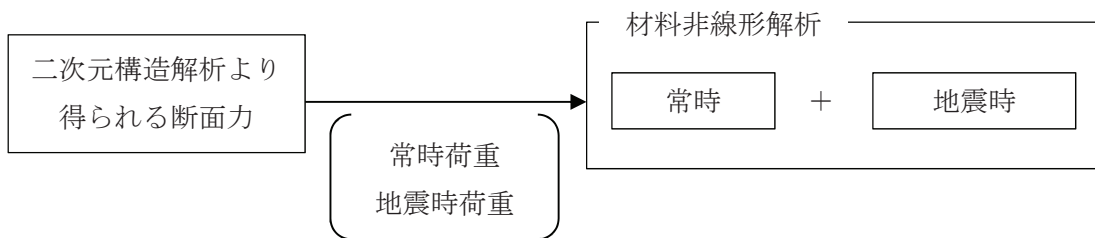


図 5-41 荷重の作用手順

(c) せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  から設定する。具体的には、図 5-42 に示す例のとおり、固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係においてせん断力の増分に対して相対変位  $\delta$  が急増する直前の点を部材のせん断耐力と判断する。

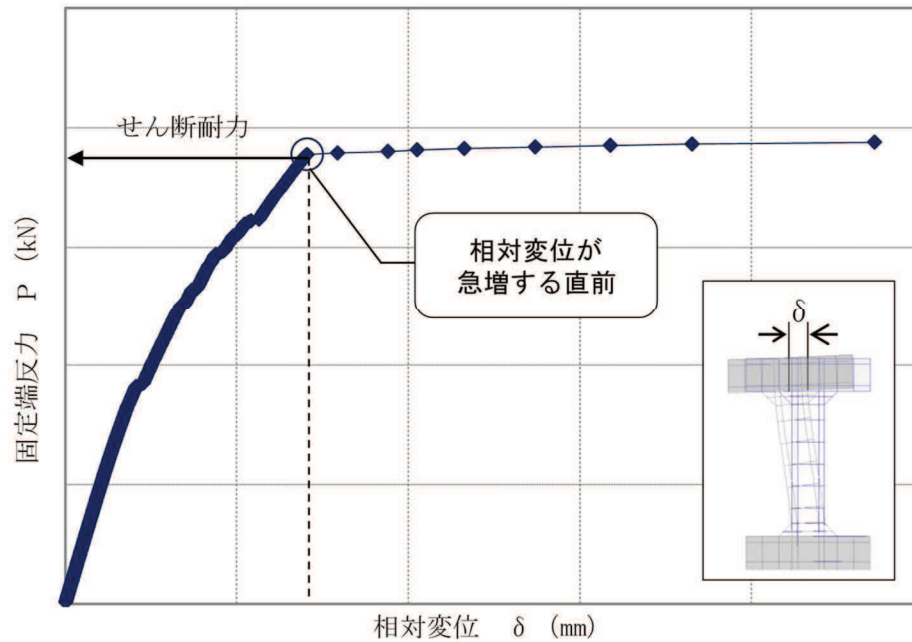


図 5-42 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

(d) 安全係数の設定

材料非線形解析では、二次元構造解析で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、以下のとおり部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定結果を表 5-10 に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.13 を設定する（表 5-11）。

表 5-10 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.13	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.0	地震応答解析による層間変形角等より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_m$	1.3	文献に基づく標準的な値を設定

表 5-11 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定結果

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	422.8	0.89	
2	1087	1258.2	1.06	
3	324	356.4	1.10	
4	294	308.7	1.05	
5	581	510.3	0.88	
6	329	335.6	1.02	
7	1587	1793.3	1.13	最大値
8	350	392.0	1.12	
9	855	880.7	1.03	
10	165	102.3	0.62	
10	333	316.4	0.95	
12	127	100.3	0.79	
13	188	108.4	0.63	
14	163	107.4	0.72	
15	273	177.5	0.65	
16	356	291.9	0.82	
17	432	246.2	0.57	



5.2.2 鋼材の健全性に対する許容限界

鋼材を線形はり要素によりモデル化している部材の構造強度を有することの確認は、「道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」に基づき，表5-12に示す短期許容応力度とする。

表5-12 鋼材の許容限界

鋼材	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		短期許容応力度* (N/mm <sup>2</sup> )
	SM490	局部座屈に対する許容応力度 $\sigma_{ca1}$	185

注記\*：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

鋼材の曲げ・軸力系の破壊に対する照査は、「道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）」に基づき，軸方向力と曲げの組合せに対して，(5.1)及び(5.2)に示す応力の照査及び座屈に対する安定の照査を行う。

$$\text{応力の照査：} \sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq \sigma_{ca1} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$\text{座屈に対する照査：} \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq 1 \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

ここに，

$\sigma_c$  : 照査する断面に作用する軸方向力による圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bcy}$ ， $\sigma_{bcz}$  : 強軸及び弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{caz}$  : 弱軸まわりの許容軸方向圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bagy}$  : 局部座屈を考慮しない強軸まわりの許容曲げ圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bao}$  : 局部座屈を考慮しない許容曲げ圧縮応力度の上限値 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ca1}$  : 局部座屈に対する許容応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{e a y}, \sigma_{e a z}$  : 強軸及び弱軸まわりの許容オイラー座屈応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{e a y} = 1,200,000 / \left(1 / r_y\right)^2$$

$$\sigma_{e a z} = 1,200,000 / \left(1 / r_z\right)^2$$

L : 有効座屈長 (mm)

$r_y, r_z$  : 強軸及び弱軸まわりの断面二次半径 (mm)

6.3.2 せん断破壊に対する評価結果

(1) 断面①

せん断破壊に対する評価結果を表 6-49 に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表のとおり、全ケースにおいて発生応力度が短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 6-49 せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*		発生 応力度	短期許容 応力度	照査値 $\tau_d / \tau_{a1}$
					$\tau_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{a1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
①	S <sub>s</sub> -D1	++	頂版	101	0.49	0.63	0.78
		-+			0.48	0.63	0.77
	S <sub>s</sub> -D2	++	頂版	101	0.53	0.63	0.85
		-+			0.55	0.63	0.88
	S <sub>s</sub> -D3	++	頂版	101	0.44	0.63	0.70
		-+			0.42	0.63	0.67
	S <sub>s</sub> -F1	++	頂版	101	0.35	0.63	0.56
		-+			0.35	0.63	0.56
	S <sub>s</sub> -F2	++	頂版	101	0.42	0.63	0.67
		-+			0.35	0.63	0.56
	S <sub>s</sub> -F3	++	頂版	101	0.50	0.63	0.80
		-+			0.43	0.63	0.69
	S <sub>s</sub> -N1	++	頂版	101	0.45	0.63	0.72
		-+			0.41	0.63	0.66
②	S <sub>s</sub> -D2	-+	頂版	101	0.52	0.63	0.83
③	S <sub>s</sub> -D2	-+	頂版	101	0.57	0.63	0.91
④	S <sub>s</sub> -D2	++	頂版	101	0.52	0.63	0.83
	S <sub>s</sub> -D2	-+	頂版	101	0.59	0.63	0.94

注記\*：評価位置は図 6-34 に示す。

(2) 断面②～⑤

a. せん断耐力式による評価結果

せん断破壊に対する評価結果のうち、せん断耐力式による評価結果を表 6-50～表 6-53 に示す。照査値はせん断力を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表中には、照査値が 1.0 を上回る解析ケース、部材があることから、次項「b. 材料非線形解析による評価結果」にて照査値が 1.0 を下回ることを確認する。

表 6-50(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S <sub>s</sub> -D1	++	側壁 (南北)	216	562	702	0.81
			側壁 (東西)	221	5140	7860	0.66
			隔壁 (南北)	244	31	0	-
			隔壁 (東西)	238	797	693	1.16
		-+	側壁 (南北)	212	786	904	0.87
			側壁 (東西)	222	5191	7860	0.67
			隔壁 (南北)	242	34	0	-
			隔壁 (東西)	238	776	693	1.12
	S <sub>s</sub> -D2	++	側壁 (南北)	216	588	702	0.84
			側壁 (東西)	221	5360	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	28	0	-
			隔壁 (東西)	238	812	693	1.18
		-+	側壁 (南北)	212	780	904	0.87
			側壁 (東西)	222	5106	7860	0.65
			隔壁 (南北)	242	26	0	-
			隔壁 (東西)	238	783	693	1.13
	S <sub>s</sub> -D3	++	側壁 (南北)	212	716	904	0.80
			側壁 (東西)	222	4511	7860	0.58
			隔壁 (南北)	242	26	0	-
			隔壁 (東西)	238	712	693	1.03
-+		側壁 (南北)	212	772	904	0.86	
		側壁 (東西)	222	4806	7860	0.62	
		隔壁 (南北)	242	26	0	-	
		隔壁 (東西)	238	700	693	1.02	

注記\*1: 評価位置は図 6-35 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が0となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「-」と記載する。

表 6-50(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S <sub>s</sub> -F1	++	側壁 (南北)	212	681	904	0.76
			側壁 (東西)	222	4562	7860	0.59
			隔壁 (南北)	242	18	0	—
			隔壁 (東西)	238	682	693	0.99
		-+	側壁 (南北)	212	586	904	0.65
			側壁 (東西)	222	4479	7860	0.57
			隔壁 (南北)	242	19	0	—
			隔壁 (東西)	238	636	693	0.92
	S <sub>s</sub> -F2	++	側壁 (南北)	212	712	904	0.79
			側壁 (東西)	222	4857	7860	0.62
			隔壁 (南北)	242	21	0	—
			隔壁 (東西)	238	696	693	1.01
		-+	側壁 (南北)	212	641	904	0.71
			側壁 (東西)	222	4785	7860	0.61
			隔壁 (南北)	242	20	0	—
			隔壁 (東西)	238	684	693	0.99
	S <sub>s</sub> -F3	++	側壁 (南北)	212	774	904	0.86
			側壁 (東西)	222	4722	7860	0.61
			隔壁 (南北)	242	26	0	—
			隔壁 (東西)	238	760	693	1.10
-+		側壁 (南北)	212	773	904	0.86	
		側壁 (東西)	222	4661	7860	0.60	
		隔壁 (南北)	242	33	0	—	
		隔壁 (東西)	238	767	693	1.11	

注記\*1: 評価位置は図 6-35 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が0となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

表 6-50(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{y d}$	$V_d / V_{y d}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	212	795	904	0.88
			側壁 (東西)	222	5214	7860	0.67
			隔壁 (南北)	242	20	0	—
			隔壁 (東西)	238	721	693	1.05
		-+	側壁 (南北)	216	487	702	0.70
			側壁 (東西)	221	5115	7860	0.66
			隔壁 (南北)	244	31	0	—
			隔壁 (東西)	239	27	0	—
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	216	585	702	0.84
			側壁 (東西)	221	5357	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	25	0	—
			隔壁 (東西)	238	808	693	1.17
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	212	774	904	0.86
			側壁 (東西)	222	5073	7860	0.65
			隔壁 (南北)	242	30	0	—
			隔壁 (東西)	238	772	693	1.12
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	216	660	702	0.95
			側壁 (東西)	221	5395	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	27	0	—
			隔壁 (東西)	238	875	693	1.27

注記\*1: 評価位置は図 6-35 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: せん断補強筋の無い部材については, 引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため, 照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し, 照査値は「—」と記載する。

表 6-50(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{y d}$	$V_d / V_{y d}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	473	804	0.59
			側壁 (東西)	221	5122	13047	0.40
			隔壁 (南北)	244	32	0	-
			隔壁 (東西)	239	28	0	-
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	489	804	0.61
			側壁 (東西)	221	5109	13047	0.40
			隔壁 (南北)	242	14	0	-
			隔壁 (東西)	239	27	0	-
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	469	804	0.59
			側壁 (東西)	221	5246	13047	0.41
			隔壁 (南北)	242	17	0	-
			隔壁 (東西)	238	735	793	0.93

注記\*1: 評価位置は図 6-35 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: せん断補強筋の無い部材については, 引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため, 照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し, 照査値は「-」と記載する。



表 6-51(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S <sub>s</sub> -D 1	++	側壁 (南北)	314	1078	693	1.56
			側壁 (東西)	321	5890	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	11	0	—
			隔壁 (東西)	338	882	693	1.28
		-+	側壁 (南北)	314	1269	693	1.84
			側壁 (東西)	322	5837	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	13	0	—
			隔壁 (東西)	338	884	693	1.28
	S <sub>s</sub> -D 2	++	側壁 (南北)	314	1191	693	1.72
			側壁 (東西)	321	6204	8851	0.71
			隔壁 (南北)	342	13	0	—
			隔壁 (東西)	338	905	693	1.31
		-+	側壁 (南北)	314	1231	693	1.78
			側壁 (東西)	321	5889	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	13	0	—
			隔壁 (東西)	338	885	693	1.28
	S <sub>s</sub> -D 3	++	側壁 (南北)	314	1125	693	1.63
			側壁 (東西)	321	5252	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	12	0	—
			隔壁 (東西)	338	797	693	1.16
-+		側壁 (南北)	314	1205	693	1.74	
		側壁 (東西)	322	5399	8851	0.61	
		隔壁 (南北)	342	13	0	—	
		隔壁 (東西)	338	794	693	1.15	

注記\*1: 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が0となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

表 6-51(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{y d}$	$V_d / V_{y d}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	314	1076	693	1.56
			側壁 (東西)	321	5029	8851	0.57
			隔壁 (南北)	342	10	0	—
			隔壁 (東西)	338	733	693	1.06
		-+	側壁 (南北)	314	884	693	1.28
			側壁 (東西)	322	5015	8851	0.57
			隔壁 (南北)	342	9	0	—
			隔壁 (東西)	338	704	693	1.02
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	314	1100	693	1.59
			側壁 (東西)	321	5392	8851	0.61
			隔壁 (南北)	342	11	0	—
			隔壁 (東西)	338	766	693	1.11
		-+	側壁 (南北)	314	1001	693	1.45
			側壁 (東西)	322	5264	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	10	0	—
			隔壁 (東西)	338	764	693	1.11
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	314	979	693	1.42
			側壁 (東西)	321	5264	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	11	0	—
			隔壁 (東西)	338	795	693	1.15
-+		側壁 (南北)	314	1174	693	1.70	
		側壁 (東西)	321	5274	8851	0.60	
		隔壁 (南北)	342	12	0	—	
		隔壁 (東西)	338	819	693	1.19	

注記\*1 : 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3 : せん断補強筋の無い部材については, 引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため, 照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し, 照査値は「—」と記載する。

表 6-51(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S <sub>s</sub> -N1	++	側壁 (南北)	314	1297	693	1.88
			側壁 (東西)	322	5636	8851	0.64
			隔壁 (南北)	342	13	0	—
			隔壁 (東西)	338	767	693	1.11
		-+	側壁 (南北)	314	975	693	1.41
			側壁 (東西)	321	5830	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	10	0	—
			隔壁 (東西)	338	826	693	1.20
②	S <sub>s</sub> -D2	++	側壁 (南北)	314	1316	693	1.90
			側壁 (東西)	321	6224	8851	0.71
			隔壁 (南北)	342	13	0	—
			隔壁 (東西)	338	929	693	1.35
③	S <sub>s</sub> -D2	++	側壁 (南北)	314	1215	693	1.76
			側壁 (東西)	321	5817	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	14	0	—
			隔壁 (東西)	338	855	693	1.24
④	S <sub>s</sub> -D2	++	側壁 (南北)	314	1313	794	1.66
			側壁 (東西)	321	6309	8851	0.72
			隔壁 (南北)	342	9	0	—
			隔壁 (東西)	333	499	351	1.43
		-+	隔壁 (東西)	333	477	354	1.35

注記\*1 : 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3 : せん断補強筋の無い部材については、引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため、照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し、照査値は「—」と記載する。

表 6-51(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力*3	
					$V_d$	$V_{y d}$	$V_d / V_{y d}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	314	1061	693	1.54
			側壁 (東西)	321	5847	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	11	0	-
			隔壁 (東西)	338	844	693	1.22
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	314	1191	693	1.72
			側壁 (東西)	321	5847	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	9	0	-
			隔壁 (東西)	338	863	693	1.25
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	314	1295	794	1.64
			側壁 (東西)	321	5926	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	9	0	-
			隔壁 (東西)	333	473	355	1.34

注記\*1：評価位置は図 6-36 に示す。

\*2：照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：せん断補強筋の無い部材については，引張軸力が発生する場合にせん断耐力が 0 となる。  
そのため，照査用せん断力は引張軸力が発生する部材のうち最大となる値と評価位置を示し，照査値は「-」と記載する。

表 6-52(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN/m)	耐力 $V_{y d}$ (kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	416	636	670	0.95
			側壁 (東西)	422	5653	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	175	696	0.26
			隔壁 (東西)	437	1259	920	1.37
		-+	側壁 (南北)	416	564	662	0.86
			側壁 (東西)	422	5805	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	187	705	0.27
			隔壁 (東西)	434	642	476	1.35
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	695	667	1.05
			側壁 (東西)	422	5732	8080	0.71
			隔壁 (南北)	442	171	695	0.25
			隔壁 (東西)	437	1280	920	1.40
		-+	側壁 (南北)	416	641	669	0.96
			側壁 (東西)	422	5586	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	171	707	0.25
			隔壁 (東西)	437	1241	920	1.35
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	416	529	661	0.81
			側壁 (東西)	422	5079	8080	0.63
			隔壁 (南北)	442	162	697	0.24
			隔壁 (東西)	437	1098	920	1.20
-+		側壁 (南北)	416	552	655	0.85	
		側壁 (東西)	422	5311	8080	0.66	
		隔壁 (南北)	442	171	710	0.25	
		隔壁 (東西)	434	586	483	1.22	

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-52(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN/m)	耐力 $V_{y d}$ (kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	416	509	652	0.79
			側壁 (東西)	422	4842	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	153	697	0.22
			隔壁 (東西)	434	534	483	1.11
		-+	側壁 (南北)	416	382	361	1.06
			側壁 (東西)	422	4790	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	141	695	0.21
			隔壁 (東西)	437	1036	920	1.13
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	416	525	638	0.83
			側壁 (東西)	422	5641	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	183	696	0.27
			隔壁 (東西)	434	613	472	1.30
		-+	側壁 (南北)	416	522	649	0.81
			側壁 (東西)	422	5366	8080	0.67
			隔壁 (南北)	442	173	706	0.25
			隔壁 (東西)	434	593	478	1.25
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	416	557	681	0.82
			側壁 (東西)	422	4845	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	149	706	0.22
			隔壁 (東西)	437	1104	920	1.20
-+		側壁 (南北)	416	558	667	0.84	
		側壁 (東西)	422	5174	8080	0.65	
		隔壁 (南北)	442	163	710	0.23	
		隔壁 (東西)	437	1146	920	1.25	

注記\*1：評価位置は図 6-37 に示す。

\*2：照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-52(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	416	478	626	0.77
			側壁 (東西)	422	5784	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	192	695	0.28
			隔壁 (東西)	434	621	463	1.35
		-+	側壁 (南北)	416	427	349	1.23
			側壁 (東西)	422	5486	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	163	698	0.24
			隔壁 (東西)	437	1205	920	1.31
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	774	677	1.15
			側壁 (東西)	422	5790	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	170	707	0.25
			隔壁 (東西)	437	1334	920	1.45
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	579	652	0.89
			側壁 (東西)	422	5685	8080	0.71
			隔壁 (南北)	442	180	696	0.26
			隔壁 (東西)	434	626	481	1.31
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	705	720	0.98
			側壁 (東西)	422	5814	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	183	698	0.27
			隔壁 (東西)	437	1351	920	1.47

注記\*1 : 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-52(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	441	349	1.27
			側壁 (東西)	422	5457	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	161	698	0.24
			隔壁 (東西)	437	1213	920	1.32
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	466	349	1.34
			側壁 (東西)	422	5801	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	174	698	0.25
			隔壁 (東西)	437	1269	920	1.38
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	665	708	0.94
			側壁 (東西)	422	5446	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	174	700	0.25
			隔壁 (東西)	437	1243	920	1.36

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$



表 6-53(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	513	921	1236	0.75
			側壁 (東西)	522	5588	8024	0.70
			隔壁 (南北)	542	102	669	0.16
			隔壁 (東西)	537	1077	851	1.27
		-+	側壁 (南北)	513	896	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5618	8024	0.71
			隔壁 (南北)	542	105	668	0.16
			隔壁 (東西)	537	1071	851	1.26
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	891	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5562	8024	0.70
			隔壁 (南北)	542	104	672	0.16
			隔壁 (東西)	537	1058	851	1.25
		-+	側壁 (南北)	513	953	1236	0.78
			側壁 (東西)	522	5354	8024	0.67
			隔壁 (南北)	542	102	671	0.16
			隔壁 (東西)	537	1063	851	1.25
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	513	833	1236	0.68
			側壁 (東西)	522	4784	8024	0.60
			隔壁 (南北)	542	87	668	0.14
			隔壁 (東西)	537	949	851	1.12
-+		側壁 (南北)	513	839	1236	0.68	
		側壁 (東西)	522	4889	8024	0.61	
		隔壁 (南北)	542	92	668	0.14	
		隔壁 (東西)	537	973	851	1.15	

注記\*1 : 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-53(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	513	746	1236	0.61
			側壁 (東西)	522	4608	8024	0.58
			隔壁 (南北)	542	84	668	0.13
			隔壁 (東西)	537	889	851	1.05
		-+	側壁 (南北)	513	773	1236	0.63
			側壁 (東西)	522	4503	8024	0.57
			隔壁 (南北)	542	82	668	0.13
			隔壁 (東西)	537	889	851	1.05
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	513	835	1236	0.68
			側壁 (東西)	522	5369	8024	0.67
			隔壁 (南北)	542	101	669	0.16
			隔壁 (東西)	537	1023	851	1.21
		-+	側壁 (南北)	513	860	1236	0.70
			側壁 (東西)	522	5459	8024	0.69
			隔壁 (南北)	542	107	668	0.17
			隔壁 (東西)	537	1047	851	1.24
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	513	795	1236	0.65
			側壁 (東西)	522	4419	8024	0.56
			隔壁 (南北)	542	83	671	0.13
			隔壁 (東西)	537	888	851	1.05
-+		側壁 (南北)	513	838	1236	0.68	
		側壁 (東西)	522	4998	8024	0.63	
		隔壁 (南北)	542	97	668	0.15	
		隔壁 (東西)	537	975	851	1.15	

注記\*1 : 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-53(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	513	770	1236	0.63
			側壁 (東西)	522	4586	8024	0.58
			隔壁 (南北)	542	94	668	0.15
			隔壁 (東西)	537	924	851	1.09
		-+	側壁 (南北)	513	975	1236	0.79
			側壁 (東西)	522	5262	8024	0.66
			隔壁 (南北)	542	91	672	0.14
			隔壁 (東西)	537	1059	851	1.25
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	941	1236	0.77
			側壁 (東西)	522	5750	8024	0.72
			隔壁 (南北)	542	107	673	0.16
			隔壁 (東西)	537	1096	851	1.29
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	852	1236	0.69
			側壁 (東西)	522	5400	8024	0.68
			隔壁 (南北)	542	102	668	0.16
			隔壁 (東西)	537	1033	851	1.22
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	960	1236	0.78
			側壁 (東西)	522	5433	8024	0.68
			隔壁 (南北)	542	104	673	0.16
			隔壁 (東西)	537	1207	851	1.42

注記\*1 : 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2 : 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

表 6-53(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	902	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5183	8024	0.65
			隔壁 (南北)	542	94	672	0.14
			隔壁 (東西)	537	1028	851	1.21
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	1052	1236	0.86
			側壁 (東西)	522	5733	8024	0.72
			隔壁 (南北)	542	98	670	0.15
			隔壁 (東西)	537	1153	851	1.36
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	1045	1236	0.85
			側壁 (東西)	522	5070	8024	0.64
			隔壁 (南北)	542	89	673	0.14
			隔壁 (東西)	537	1211	851	1.43

注記\*1: 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

b. 材料非線形解析による評価結果

(a) 評価条件

前項「a. せん断耐力式による評価結果」では、原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の隔壁及び側壁において、照査用せん断力がせん断耐力式によるせん断耐力を上回る結果となった。

せん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、ここでは、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断破壊に対する健全性を確認する。

図 6-39 に材料非線形解析によりせん断破壊に対する評価を実施する対象部材を示す。また、評価対象部材の要素分割図を図 6-40 に、要素プロパティ番号図を図 6-41、要素プロパティ条件を表 6-54 に示す。

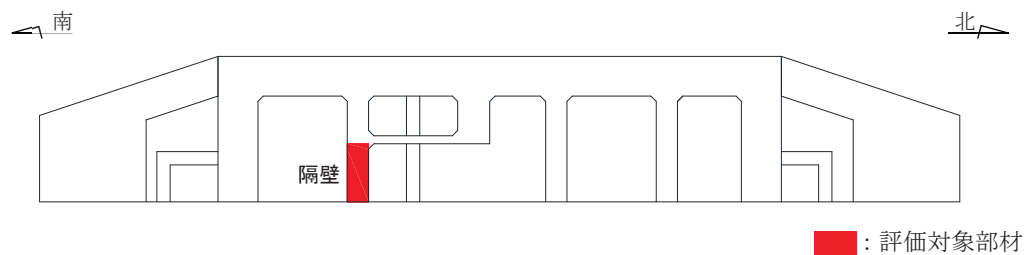


図 6-39(1) 材料非線形解析における評価対象部材（断面③）

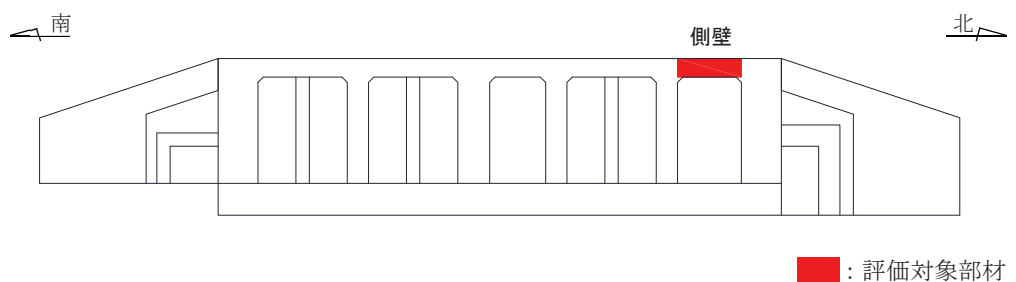


図 6-39(2) 材料非線形解析における評価対象部材（断面④）

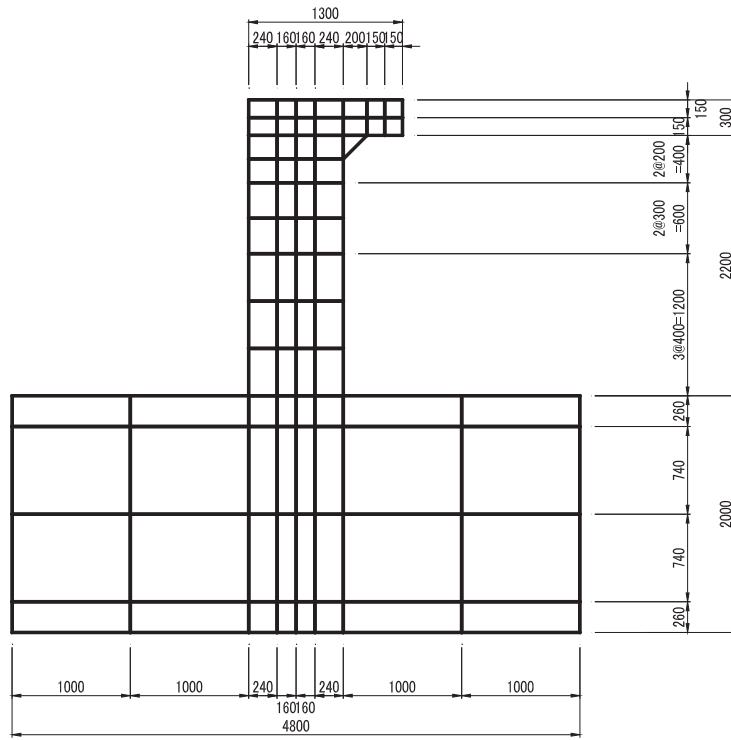


图 6-40(1) 要素分割图 (隔壁)

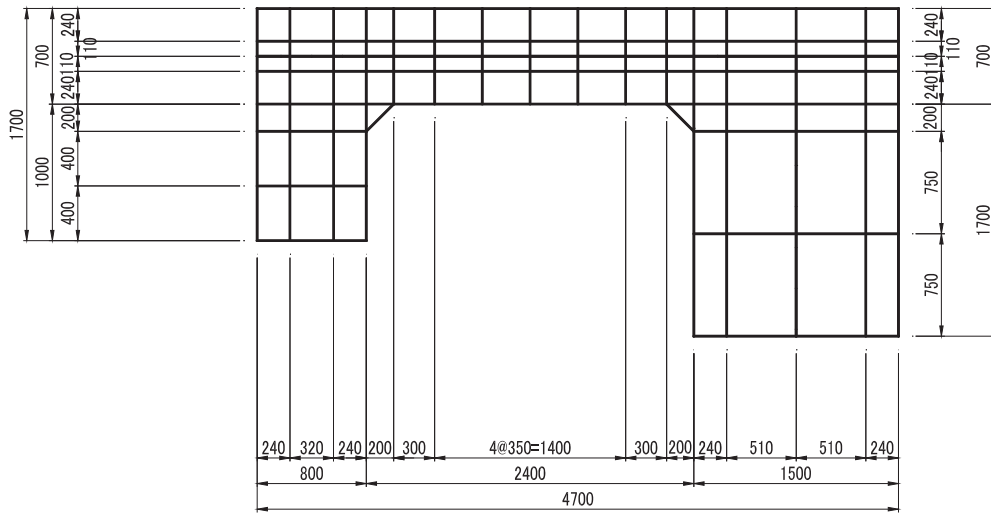


图 6-40(2) 要素分割图 (侧壁)

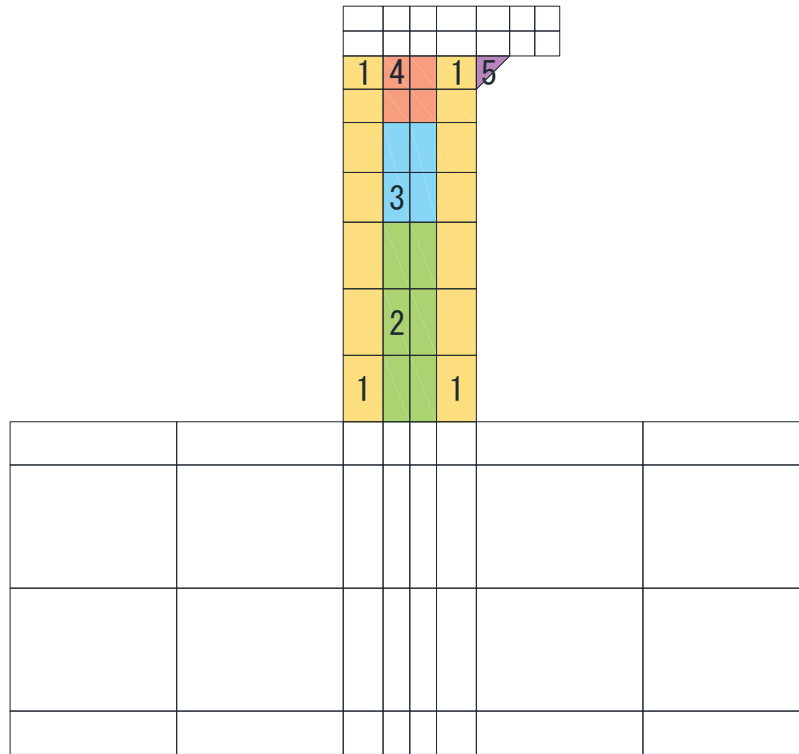


図 6-41(1) 要素プロパティ番号図 (隔壁)

表 6-54(1) 要素プロパティ条件 (隔壁)

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	RC	1.9	0.4
2	無筋	1.5	2.9
3	無筋	1.5	2.2
4	無筋	1.5	1.7
5	無筋	1.5	1.5

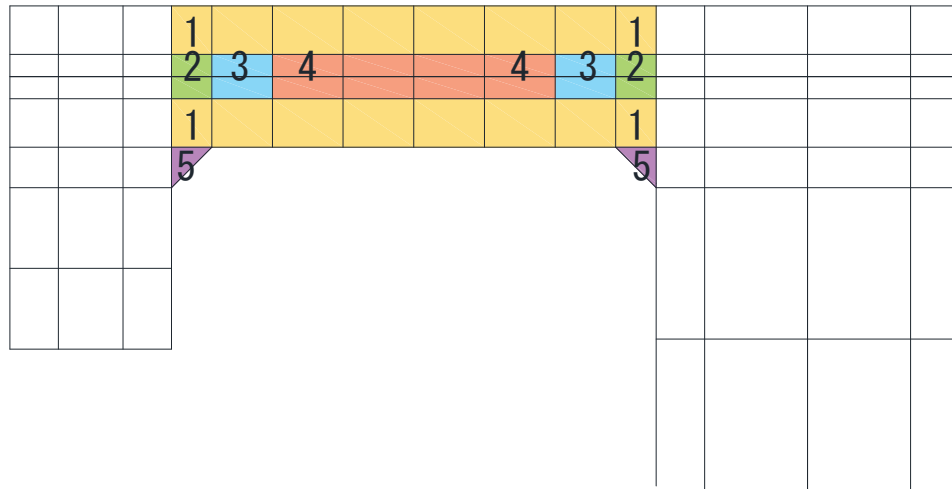


図 6-41(2) 要素プロパティ番号図 (側壁)

表 6-54(2) 要素プロパティ条件 (側壁)

番号	元要素			オーバーラッピング要素		
	材料	引張硬化軟化係数		材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y		C x	C y
1	RC	0.4	0.4	RC	0.4	1.9
2	RC	1.7	0.4	無筋	1.7	1.3
3	RC	2.2	0.4	無筋	2.2	1.3
4	RC	2.5	0.4	無筋	2.5	1.3
5	無筋	1.5	1.5	—	—	—



材料非線形解析によるせん断耐力の算定において考慮する荷重は、地震応答解析から得られる荷重を考慮する。具体的には地震応答解析で評価対象部材のせん断照査が厳しくなる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 6-42 のように作用させる。材料非線形解析では、二次元構造解析から得られた断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重を 100 分割したものを  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  とし、これらの比率を維持しながら漸増载荷する。

なお、作用荷重は、常時荷重（ $\Delta M_s$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta N_s$ ）及び地震時荷重（ $\Delta M_d$ 、 $\Delta Q_d$ 、 $\Delta N_d$ ）とし、図 6-42 に作用手順を示す。表 6-55 に代表例として、材料非線形解析による評価において隔壁及び側壁の最も照査値が厳しい解析ケースにおける  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  を示す。

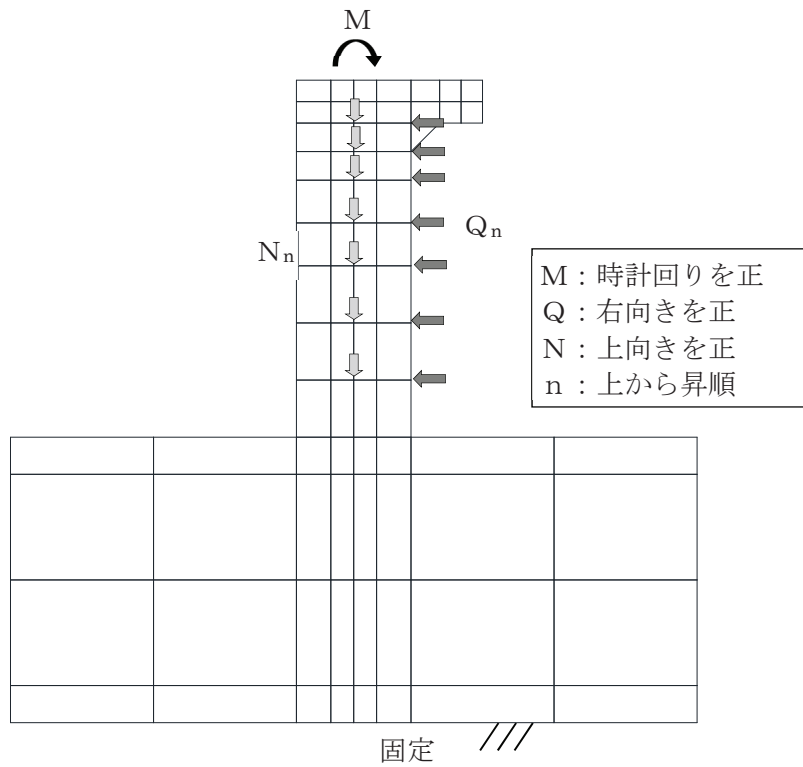


図 6-42 (1) 材料非線形解析における载荷状況（隔壁）

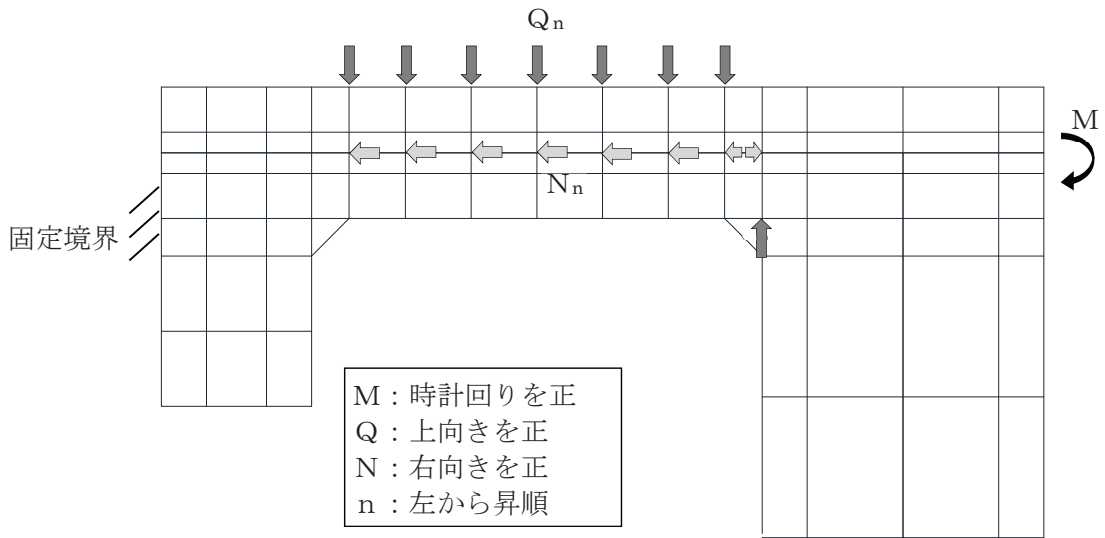


図 6-42(2) 材料非線形解析における荷重状況（側壁）

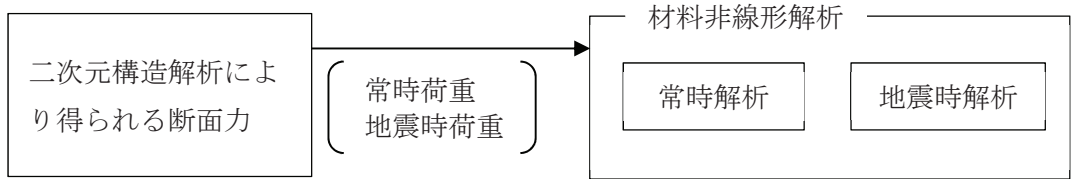


図 6-43 荷重の作用手順

表 6-55 材料非線形解析における作用荷重

部材		側壁	隔壁	
地震動		S s - N 1 (-+)	S s - D 2 (++)	
解析ケース		解析ケース③	解析ケース④	
常時荷重	曲げモーメント (kN・m)	$\Delta M$	51.304	12.837
	せん断力 (kN)	$\Delta Q_1$	-26.118	-15.301
		$\Delta Q_2$	-33.953	0.000
		$\Delta Q_3$	-36.565	0.000
		$\Delta Q_4$	-36.565	0.000
		$\Delta Q_5$	-36.565	0.000
		$\Delta Q_6$	-33.953	0.000
		$\Delta Q_7$	-26.117	0.000
		$\Delta Q_8$	111.948	
	軸力 (kN)	$\Delta N_1$	0.000	-387.558
		$\Delta N_2$	0.000	0.000
		$\Delta N_3$	0.000	0.000
		$\Delta N_4$	0.000	0.000
		$\Delta N_5$	0.000	0.000
		$\Delta N_6$	0.000	0.000
		$\Delta N_7$	0.000	0.000
$\Delta N_8$		-170.652		
地震時荷重	曲げモーメント (kN・m)	$\Delta M$	282.665	330.779
	せん断力 (kN)	$\Delta Q_1$	-190.894	-475.698
		$\Delta Q_2$	-248.163	-3.887
		$\Delta Q_3$	-267.251	-4.858
		$\Delta Q_4$	-267.251	-5.830
		$\Delta Q_5$	-267.251	-6.801
		$\Delta Q_6$	-248.163	-7.773
		$\Delta Q_7$	-190.894	-7.772
		$\Delta Q_8$	690.030	
	軸力 (kN)	$\Delta N_1$	-82.822	-2640.950
		$\Delta N_2$	-107.670	-3.780
		$\Delta N_3$	-115.952	-4.722
		$\Delta N_4$	-115.952	-5.664
		$\Delta N_5$	-115.952	-6.606
		$\Delta N_6$	-107.669	-7.548
		$\Delta N_7$	-82.823	-7.559
$\Delta N_8$		259.127		

(b) 評価結果

イ. 隔壁の照査結果

評価対象部材における荷重－変位曲線を図 6-44 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組合せ（解析ケース④，地震動  $S_s - D2 (+ +)$ ）の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、二次元構造解析において得られた断面力を再現した状態である。126 ステップ以降、水平変位の急増が認められる。

図 6-45 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、126 ステップまでは、荷重の増加に伴い軸方向の圧縮力による部材軸方向のひび割れとせん断力による部材直角方向のひび割れの両方のひび割れが徐々に進展し、126 ステップ以降は、圧縮力及びせん断力により、それぞれのひび割れが進展する様相を示している。したがって、126 ステップ以降の水平変位の発生は、圧縮力によるひび割れとせん断力によるひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材に対する材料非線形解析では、せん断ひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、126 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、126 ステップにおけるせん断耐力 633.4kN を表 5-10 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 560kN とする。

また、図 6-46 に、各ステップにおける変形図を示す。

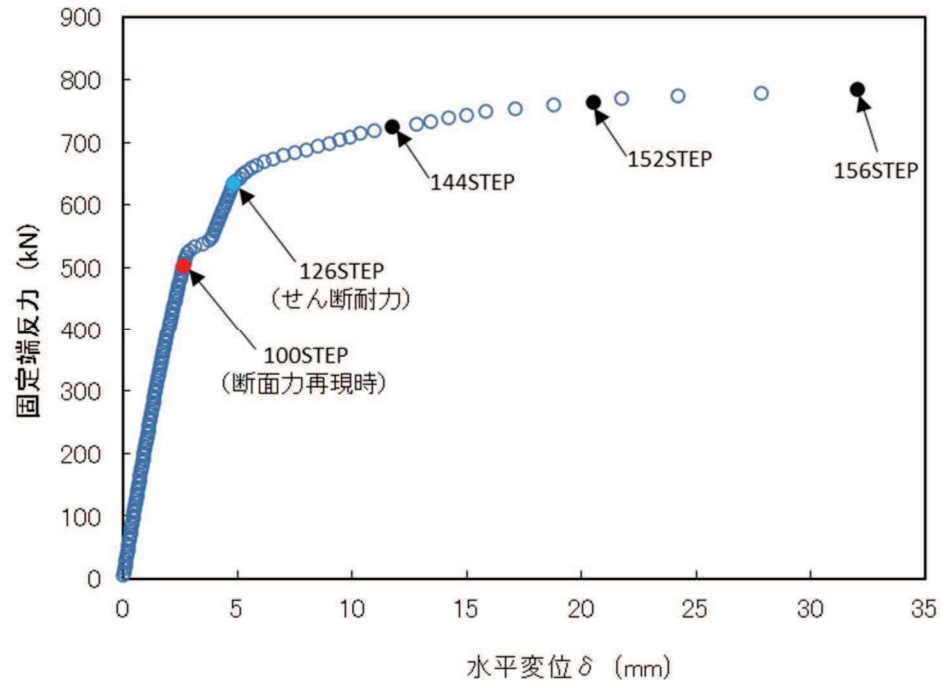
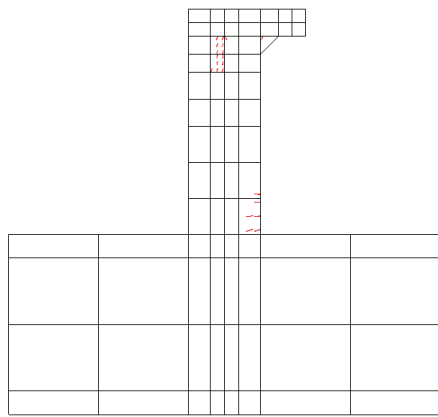
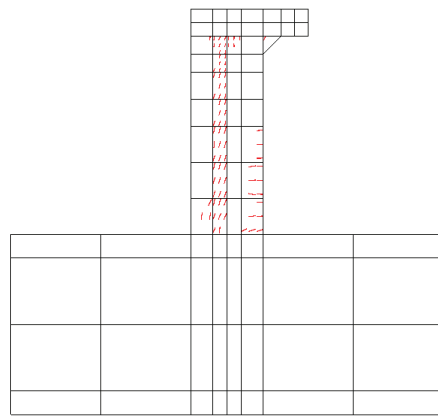


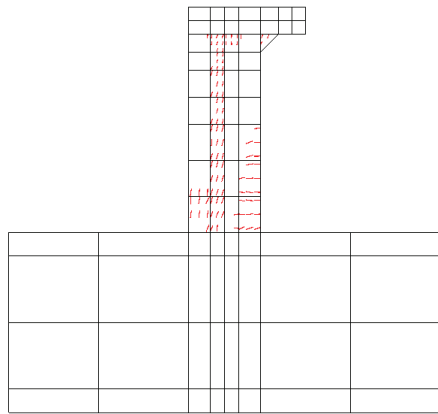
図 6-44 荷重-変位曲線  
(隔壁, 解析ケース④ 地震動 S s - D 2 (++) )



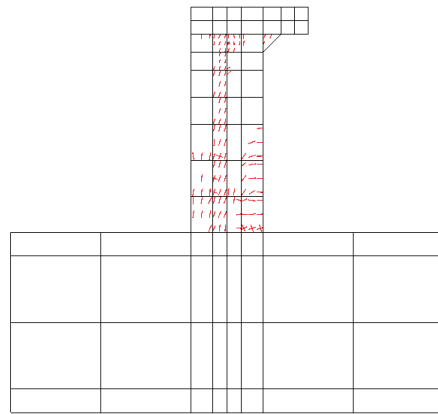
100STEP  
断面力再現時



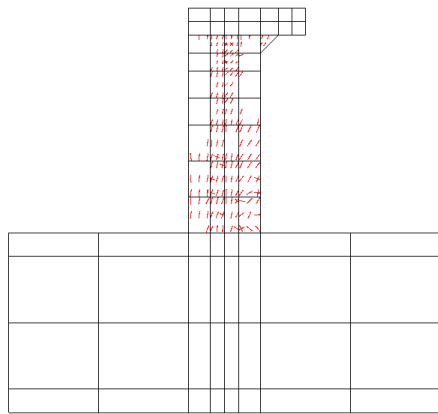
126STEP  
せん断耐力



144STEP

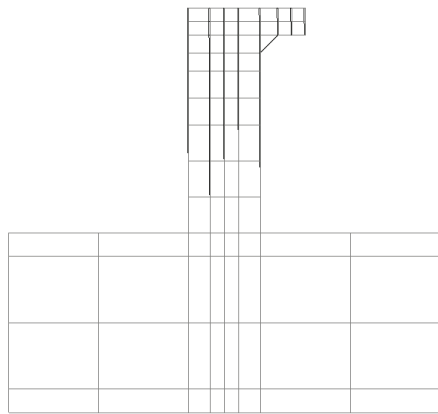


152STEP

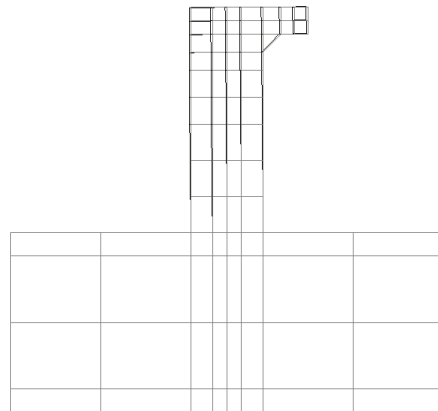


156STEP

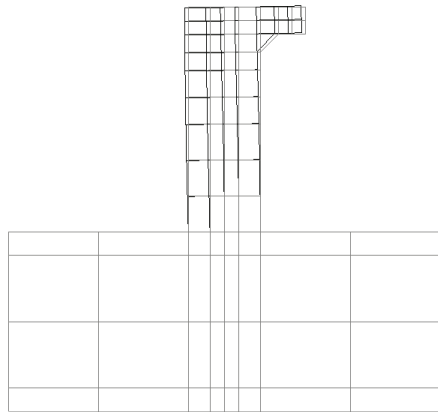
図 6-45 各ステップにおけるひび割れ図  
(隔壁, 解析ケース④ 地震動 S s - D 2 (++) )



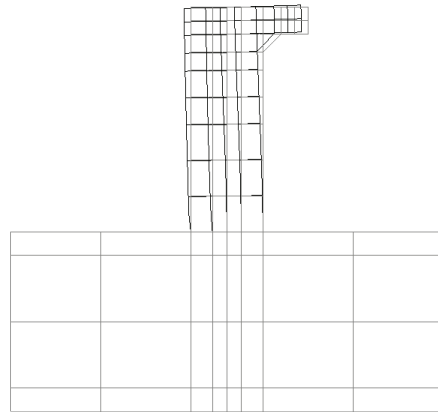
100STEP  
断面力再現時



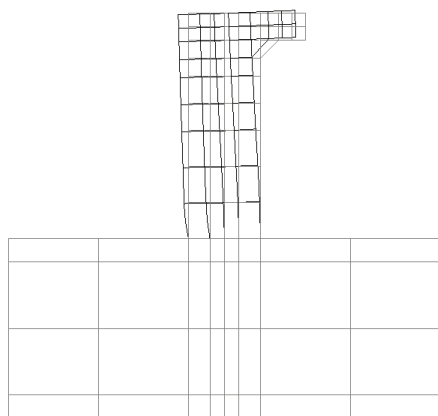
126STEP  
せん断耐力



144STEP



152STEP



156STEP

変形倍率 (×20)

図 6-46 各ステップにおける変形図  
(隔壁, 解析ケース④ 地震動 S<sub>s</sub>-D2 (++) )

ロ. 側壁の照査結果

評価対象部材における荷重－変位曲線を図 6-47 に示す。同図は、評価対象部材において最も厳しい照査値となる地震動と解析ケースの組み合わせ（解析ケース③，地震動 S s - N 1（-+））の結果を示している。

図中の赤丸で示した 100 ステップは、二次元構造解析において得られた断面力を再現した状態である。175 ステップ以降、水平変位の急増が認められる。なお、178 ステップにおいて、せん断補強筋の降伏が発生している。せん断補強筋の初期降伏箇所を図 6-48 に示す。

図 6-49 に、各ステップにおけるひび割れ図を示す。

ひび割れ図に着目すると、175 ステップまでは、荷重の増加に伴って中央及び両端で徐々にひび割れが進展していくが、175 ステップ以降は、斜めひび割れが圧縮縁側に進展する様相を示している。したがって、175 ステップ以降の水平変位の発生は、斜めひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のとおり、評価対象部材に対する材料非線形解析では、斜めひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、175 ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。

材料非線形解析による設計せん断耐力は、175 ステップにおけるせん断耐力 1698.7kN を表 5-10 に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$  及び  $\gamma_{b2}$ ）で除した 1503kN とする。

また、図 6-50 に、各ステップにおける変形図を示す。



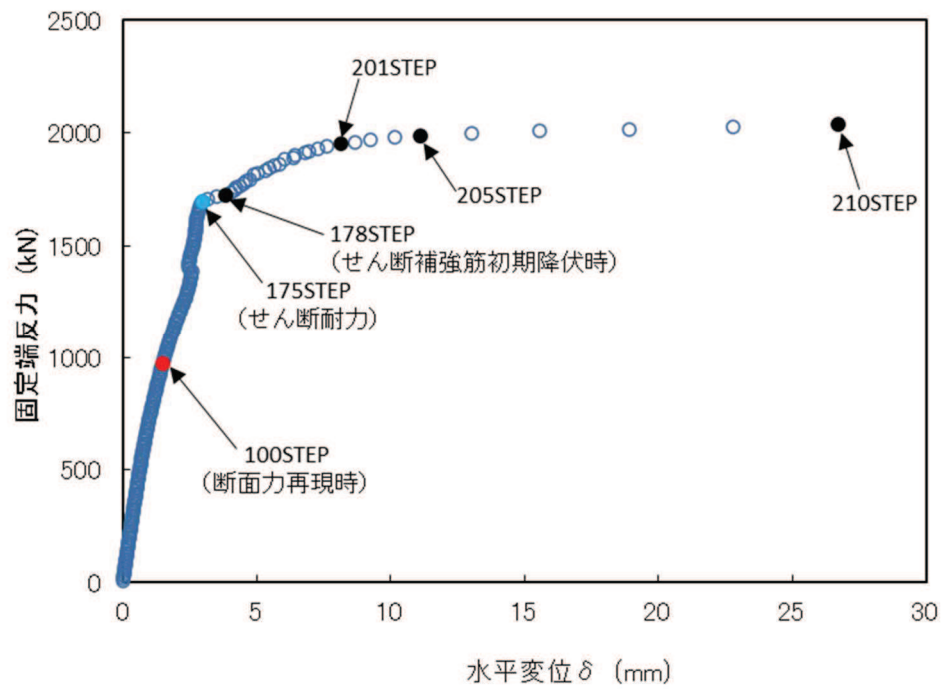


図 6-47 荷重-変位曲線  
(側壁, 解析ケース③ 地震動 S<sub>s</sub>-N1 (-+))

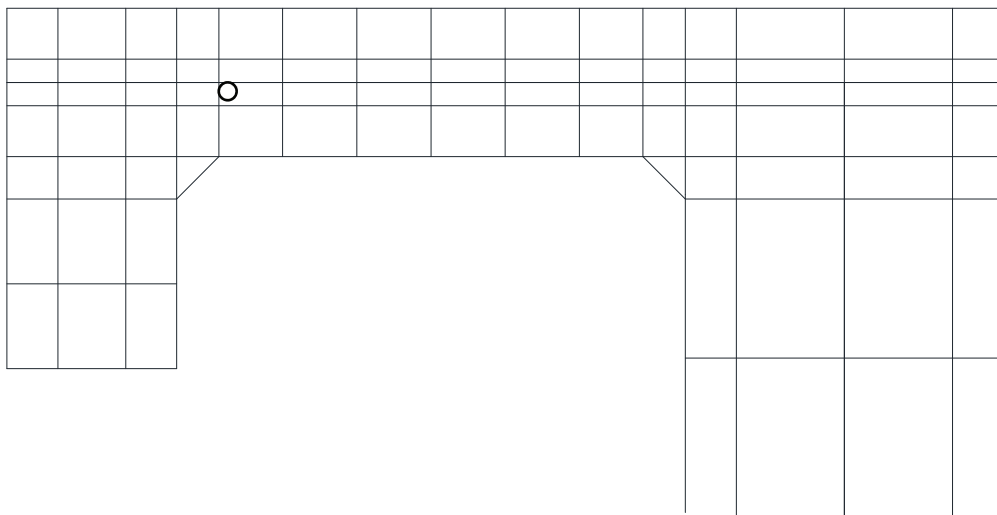


図 6-48 せん断補強筋の初期降伏箇所  
(側壁, 解析ケース③ 地震動 S<sub>s</sub>-N1 (-+)) 178STEP)

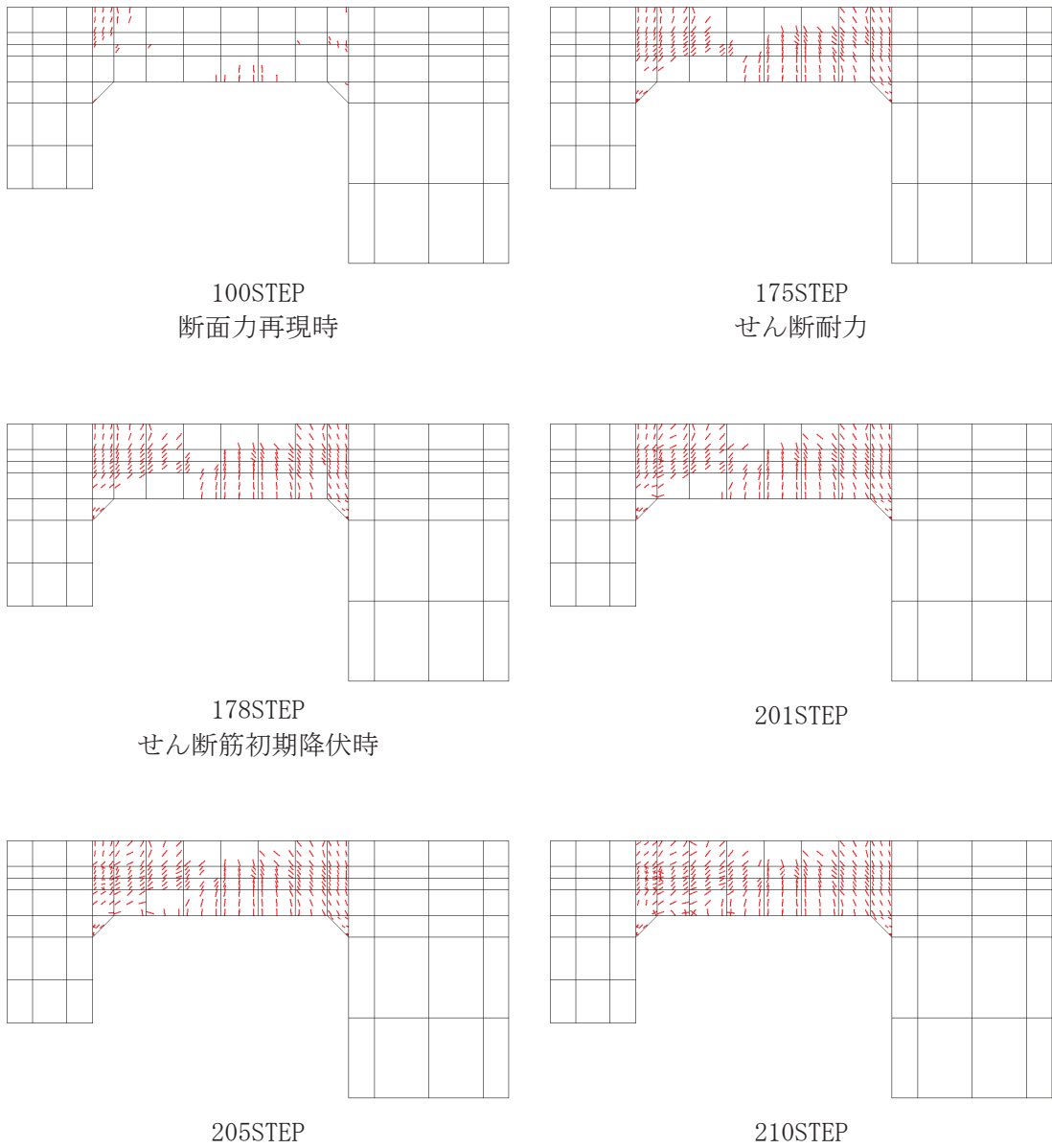
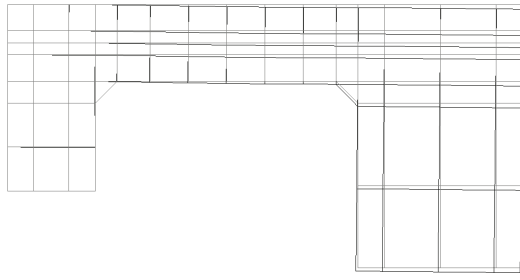
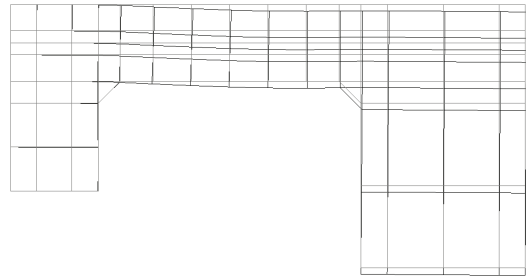


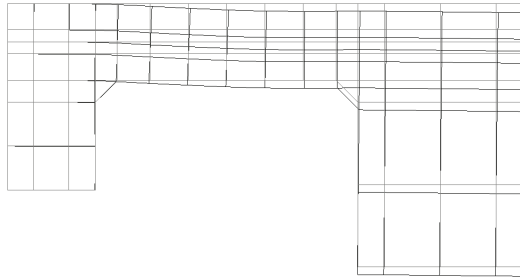
図 6-49 各ステップにおけるひび割れ図  
(側壁, 解析ケース③ 地震動  $S_s - N1 (-+)$ )



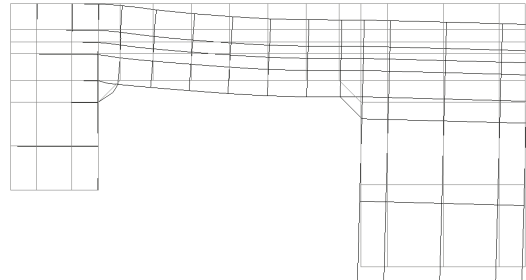
100STEP  
断面力再現時



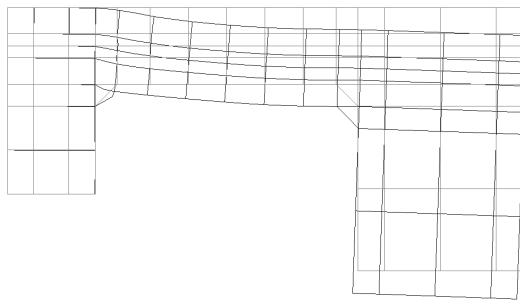
175STEP  
せん断耐力



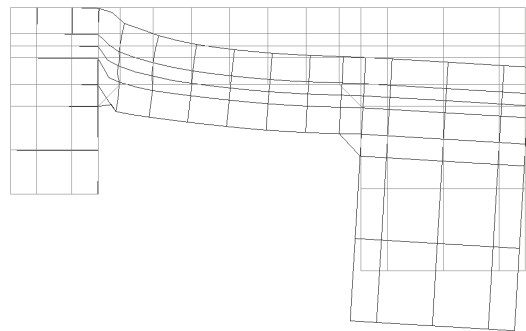
178STEP  
せん断筋初期降伏時



201STEP



205STEP



210STEP

変形倍率 (×20)

図 6-50 各ステップにおける変形図  
(側壁, 解析ケース③ 地震動 S<sub>s</sub>-N1 (-+))

ハ. せん断力に対する評価結果

せん断耐力式及び材料非線形解析によるせん断破壊に対する照査結果を、表 6-56～表 6-59 に示す。

同表より、全部材で照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 6-56(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値 $V_d/V_{y d}$
					せん断力*2 $V_d$ (kN/m)	耐力 $V_{y d}$ (kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	216	562	702	0.81
			側壁 (東西)	221	5140	7860	0.66
			隔壁 (南北)	242	32.980	78.509*3	0.43
			隔壁 (東西)	238	764	1553*3	0.50
		-+	側壁 (南北)	212	786	904	0.87
			側壁 (東西)	222	5191	7860	0.67
			隔壁 (南北)	242	51.389	101.867*3	0.51
			隔壁 (東西)	238	744	1599*3	0.47
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	216	588	702	0.84
			側壁 (東西)	221	5360	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	42.410	92.324*3	0.46
			隔壁 (東西)	238	770	1634*3	0.48
		-+	側壁 (南北)	212	780	904	0.87
			側壁 (東西)	222	5106	7860	0.65
			隔壁 (南北)	242	38.281	86.724*3	0.45
			隔壁 (東西)	238	745	1619*3	0.47
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	212	716	904	0.80
			側壁 (東西)	222	4511	7860	0.58
			隔壁 (南北)	242	37.875	93.178*3	0.41
			隔壁 (東西)	238	687	1646*3	0.42
-+		側壁 (南北)	212	772	904	0.86	
		側壁 (東西)	222	4806	7860	0.62	
		隔壁 (南北)	242	37.891	89.194*3	0.43	
		隔壁 (東西)	238	677	1569*3	0.44	

注記\*1：評価位置は図 6-35 に示す。

\*2：照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-56(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	212	681	904	0.76
			側壁 (東西)	222	4562	7860	0.59
			隔壁 (南北)	242	28.314	78.174* <sup>3</sup>	0.37
			隔壁 (東西)	238	682	693	0.99
		-+	側壁 (南北)	212	586	904	0.65
			側壁 (東西)	222	4479	7860	0.57
			隔壁 (南北)	242	22.702	68.707* <sup>3</sup>	0.34
			隔壁 (東西)	238	636	693	0.92
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	212	712	904	0.79
			側壁 (東西)	222	4857	7860	0.62
			隔壁 (南北)	242	33.383	83.309* <sup>3</sup>	0.41
			隔壁 (東西)	238	717	1998* <sup>3</sup>	0.36
		-+	側壁 (南北)	212	641	904	0.71
			側壁 (東西)	222	4785	7860	0.61
			隔壁 (南北)	242	24.502	68.950* <sup>3</sup>	0.36
			隔壁 (東西)	238	684	693	0.99
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	212	774	904	0.86
			側壁 (東西)	222	4722	7860	0.61
			隔壁 (南北)	242	37.794	88.966* <sup>3</sup>	0.43
			隔壁 (東西)	238	728	1610* <sup>3</sup>	0.46
		-+	側壁 (南北)	212	773	904	0.86
			側壁 (東西)	222	4661	7860	0.60
			隔壁 (南北)	242	48.895	106.009* <sup>3</sup>	0.47
			隔壁 (東西)	238	735	1606* <sup>3</sup>	0.46

注記\*1：評価位置は図 6-35 に示す。

\*2：照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-56(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	212	795	904	0.88
			側壁 (東西)	222	5214	7860	0.67
			隔壁 (南北)	242	30.495	75.290*3	0.41
			隔壁 (東西)	238	696	1569*3	0.45
		-+	側壁 (南北)	216	487	702	0.70
			側壁 (東西)	221	5115	7860	0.66
			隔壁 (南北)	242	20.715	61.227*3	0.34
			隔壁 (東西)	238	695	1578*3	0.45
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	216	585	702	0.84
			側壁 (東西)	221	5357	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	38.395	83.924*3	0.46
			隔壁 (東西)	238	764	1635*3	0.47
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	212	774	904	0.86
			側壁 (東西)	222	5073	7860	0.65
			隔壁 (南北)	242	45.002	97.172*3	0.47
			隔壁 (東西)	238	740	1615*3	0.46
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	216	660	702	0.95
			側壁 (東西)	221	5395	7860	0.69
			隔壁 (南北)	242	37.948	91.677*3	0.42
			隔壁 (東西)	238	833	1620*3	0.52

注記\*1：評価位置は図 6-35 に示す。

\*2：照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-56(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面②, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	473	804	0.59
			側壁 (東西)	221	5122	13047	0.40
			隔壁 (南北)	242	20.356	60.346*3	0.34
			隔壁 (東西)	239	23	473*3	0.05
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	489	804	0.61
			側壁 (東西)	221	5109	13047	0.40
			隔壁 (南北)	242	15.441	53.698*3	0.29
			隔壁 (東西)	239	23	490*3	0.05
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	216	469	804	0.59
			側壁 (東西)	221	5246	13047	0.41
			隔壁 (南北)	242	19.703	67.128*3	0.30
			隔壁 (東西)	238	735	793	0.93

注記\*1: 評価位置は図 6-35 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-57(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	314	559	1310*3	0.43
			側壁 (東西)	321	5890	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	2.722	8.285*3	0.33
			隔壁 (東西)	333	405	637*3	0.64
		-+	側壁 (南北)	313	239	440*3	0.55
			側壁 (東西)	322	5837	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	3.963	11.150*3	0.36
			隔壁 (東西)	333	411	551*3	0.75
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	313	218	430*3	0.51
			側壁 (東西)	321	6204	8851	0.71
			隔壁 (南北)	342	3.914	11.185*3	0.35
			隔壁 (東西)	333	437	568*3	0.77
		-+	側壁 (南北)	313	230	437*3	0.53
			側壁 (東西)	321	5889	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	3.024	8.803*3	0.35
			隔壁 (東西)	333	421	557*3	0.76
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	313	389	852*3	0.46
			側壁 (東西)	321	5252	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	2.895	9.348*3	0.31
			隔壁 (東西)	338	772	1625*3	0.48
-+		側壁 (南北)	313	228	441*3	0.52	
		側壁 (東西)	322	5399	8851	0.61	
		隔壁 (南北)	342	3.625	11.033*3	0.33	
		隔壁 (東西)	338	771	1596*3	0.49	

注記\*1: 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力



表 6-57(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	313	365	841*3	0.44
			側壁 (東西)	321	5029	8851	0.57
			隔壁 (南北)	342	1.025	3.417*3	0.30
			隔壁 (東西)	338	708	1596*3	0.45
		-+	側壁 (南北)	314	1189	2945*3	0.41
			側壁 (東西)	322	5015	8851	0.57
			隔壁 (南北)	342	2.031	7.241*3	0.29
			隔壁 (東西)	338	678	1600*3	0.43
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	313	376	854*3	0.45
			側壁 (東西)	321	5392	8851	0.61
			隔壁 (南北)	342	2.611	8.154*3	0.33
			隔壁 (東西)	333	381	562*3	0.68
		-+	側壁 (南北)	314	518	1306*3	0.40
			側壁 (東西)	322	5264	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	2.622	8.306*3	0.32
			隔壁 (東西)	333	367	564*3	0.66
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	314	513	1328*3	0.39
			側壁 (東西)	321	5264	8851	0.60
			隔壁 (南北)	342	3.625	12.026*3	0.31
			隔壁 (東西)	333	366	562*3	0.66
-+		側壁 (南北)	313	223	441*3	0.51	
		側壁 (東西)	321	5274	8851	0.60	
		隔壁 (南北)	342	2.367	7.391*3	0.33	
		隔壁 (東西)	338	788	1484*3	0.54	

注記\*1: 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-57(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	313	253	448*3	0.57
			側壁 (東西)	322	5636	8851	0.64
			隔壁 (南北)	342	2.913	8.169*3	0.36
			隔壁 (東西)	338	742	1463*3	0.51
		-+	側壁 (南北)	314	1311	2946*3	0.45
			側壁 (東西)	321	5830	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	2.844	9.386*3	0.31
			隔壁 (東西)	333	396	573*3	0.70
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	313	249	434*3	0.58
			側壁 (東西)	321	6224	8851	0.71
			隔壁 (南北)	342	2.156	5.799*3	0.38
			隔壁 (東西)	333	449	563*3	0.80
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	313	226	425*3	0.54
			側壁 (東西)	321	5817	8851	0.66
			隔壁 (南北)	342	4.011	11.782*3	0.35
			隔壁 (東西)	333	408	555*3	0.74
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	314	1665	2931*3	0.57
			側壁 (東西)	321	6309	8851	0.72
			隔壁 (南北)	342	3.945	12.879*3	0.31
			隔壁 (東西)	333	503	560*3	0.90
		-+	隔壁 (東西)	333	480	560*3	0.86

注記\*1: 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-57(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面③, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	314	552	1307*3	0.43
			側壁 (東西)	321	5847	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	3.197	10.465*3	0.31
			隔壁 (東西)	333	405	568*3	0.72
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	313	200	393*3	0.51
			側壁 (東西)	321	5847	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	0.430	1.302*3	0.34
			隔壁 (東西)	333	414	564*3	0.74
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	314	674	1352*3	0.50
			側壁 (東西)	321	5926	8851	0.67
			隔壁 (南北)	342	2.979	10.359*3	0.29
			隔壁 (東西)	333	476	559*3	0.86

注記\*1: 評価位置は図 6-36 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-58(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	416	636	670	0.95
			側壁 (東西)	422	5653	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	175	696	0.26
			隔壁 (東西)	437	1234	2051*3	0.61
		-+	側壁 (南北)	416	564	662	0.86
			側壁 (東西)	422	5805	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	187	705	0.27
			隔壁 (東西)	434	654	1006*3	0.66
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	883	1499*3	0.59
			側壁 (東西)	422	5732	8080	0.71
			隔壁 (南北)	442	171	695	0.25
			隔壁 (東西)	437	1249	2076*3	0.61
		-+	側壁 (南北)	416	641	669	0.96
			側壁 (東西)	422	5586	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	171	707	0.25
			隔壁 (東西)	437	1212	2058*3	0.59
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	416	529	661	0.81
			側壁 (東西)	422	5079	8080	0.63
			隔壁 (南北)	442	162	697	0.24
			隔壁 (東西)	434	565	1019*3	0.56
-+		側壁 (南北)	416	552	655	0.85	
		側壁 (東西)	422	5311	8080	0.66	
		隔壁 (南北)	442	171	710	0.25	
		隔壁 (東西)	434	595	1035*3	0.58	

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-58(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	416	509	652	0.79
			側壁 (東西)	422	4842	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	153	697	0.22
			隔壁 (東西)	434	541	1038*3	0.53
		-+	側壁 (南北)	416	555	1294*3	0.43
			側壁 (東西)	422	4790	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	141	695	0.21
			隔壁 (東西)	437	1015	2020*3	0.51
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	416	525	638	0.83
			側壁 (東西)	422	5641	8080	0.70
			隔壁 (南北)	442	183	696	0.27
			隔壁 (東西)	434	623	985*3	0.64
		-+	側壁 (南北)	416	522	649	0.81
			側壁 (東西)	422	5366	8080	0.67
			隔壁 (南北)	442	173	706	0.25
			隔壁 (東西)	434	604	1014*3	0.60
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	416	557	681	0.82
			側壁 (東西)	422	4845	8080	0.60
			隔壁 (南北)	442	149	706	0.22
			隔壁 (東西)	437	1081	2055*3	0.53
		-+	側壁 (南北)	416	558	667	0.84
			側壁 (東西)	422	5174	8080	0.65
			隔壁 (南北)	442	163	710	0.23
			隔壁 (東西)	437	1123	2055*3	0.55

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-58(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	416	478	626	0.77
			側壁 (東西)	422	5784	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	192	695	0.28
			隔壁 (東西)	434	633	945*3	0.67
		-+	側壁 (南北)	416	902	1500*3	0.61
			側壁 (東西)	422	5486	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	163	698	0.24
			隔壁 (東西)	434	610	1041*3	0.59
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	990	1549*3	0.64
			側壁 (東西)	422	5790	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	170	707	0.25
			隔壁 (東西)	434	655	1019*3	0.65
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	579	652	0.89
			側壁 (東西)	422	5685	8080	0.71
			隔壁 (南北)	442	180	696	0.26
			隔壁 (東西)	434	636	1017*3	0.63
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	416	705	720	0.98
			側壁 (東西)	422	5814	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	183	698	0.27
			隔壁 (東西)	434	621	824*3	0.76

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-58(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面④, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	922	1509*3	0.62
			側壁 (東西)	422	5457	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	161	698	0.24
			隔壁 (東西)	434	611	1021*3	0.60
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	971	1503*3	0.65
			側壁 (東西)	422	5801	8080	0.72
			隔壁 (南北)	442	174	698	0.25
			隔壁 (東西)	434	638	1010*3	0.64
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	416	665	708	0.94
			側壁 (東西)	422	5446	8080	0.68
			隔壁 (南北)	442	174	700	0.25
			隔壁 (東西)	434	664	1092*3	0.61

注記\*1: 評価位置は図 6-37 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-59(1) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - D 1	++	側壁 (南北)	513	921	1236	0.75
			側壁 (東西)	522	5588	8024	0.70
			隔壁 (南北)	542	102	669	0.16
			隔壁 (東西)	537	1096	2229*3	0.50
		-+	側壁 (南北)	513	896	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5618	8024	0.71
			隔壁 (南北)	542	105	668	0.16
			隔壁 (東西)	537	1047	2120*3	0.50
	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	891	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5562	8024	0.70
			隔壁 (南北)	542	104	672	0.16
			隔壁 (東西)	537	1083	2250*3	0.49
		-+	側壁 (南北)	513	953	1236	0.78
			側壁 (東西)	522	5354	8024	0.67
			隔壁 (南北)	542	102	671	0.16
			隔壁 (東西)	537	1035	2132*3	0.49
	S s - D 3	++	側壁 (南北)	513	833	1236	0.68
			側壁 (東西)	522	4784	8024	0.60
			隔壁 (南北)	542	87	668	0.14
			隔壁 (東西)	537	963	2198*3	0.44
-+		側壁 (南北)	513	839	1236	0.68	
		側壁 (東西)	522	4889	8024	0.61	
		隔壁 (南北)	542	92	668	0.14	
		隔壁 (東西)	537	955	2137*3	0.45	

注記\*1: 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力



表 6-59(2) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - F 1	++	側壁 (南北)	513	746	1236	0.61
			側壁 (東西)	522	4608	8024	0.58
			隔壁 (南北)	542	84	668	0.13
			隔壁 (東西)	537	870	2108*3	0.42
		-+	側壁 (南北)	513	773	1236	0.63
			側壁 (東西)	522	4503	8024	0.57
			隔壁 (南北)	542	82	668	0.13
			隔壁 (東西)	537	870	2122*3	0.41
	S s - F 2	++	側壁 (南北)	513	835	1236	0.68
			側壁 (東西)	522	5369	8024	0.67
			隔壁 (南北)	542	101	669	0.16
			隔壁 (東西)	537	998	2100*3	0.48
		-+	側壁 (南北)	513	860	1236	0.70
			側壁 (東西)	522	5459	8024	0.69
			隔壁 (南北)	542	107	668	0.17
			隔壁 (東西)	537	1024	2118*3	0.49
	S s - F 3	++	側壁 (南北)	513	795	1236	0.65
			側壁 (東西)	522	4419	8024	0.56
			隔壁 (南北)	542	83	671	0.13
			隔壁 (東西)	537	905	2218*3	0.41
-+		側壁 (南北)	513	838	1236	0.68	
		側壁 (東西)	522	4998	8024	0.63	
		隔壁 (南北)	542	97	668	0.15	
		隔壁 (東西)	537	993	2221*3	0.45	

注記\*1: 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2: 照査用せん断力=発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-59(3) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
①	S s - N 1	++	側壁 (南北)	513	770	1236	0.63
			側壁 (東西)	522	4586	8024	0.58
			隔壁 (南北)	542	94	668	0.15
			隔壁 (東西)	537	905	2129*3	0.43
		-+	側壁 (南北)	513	975	1236	0.79
			側壁 (東西)	522	5262	8024	0.66
			隔壁 (南北)	542	91	672	0.14
			隔壁 (東西)	537	1080	2207*3	0.49
②	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	941	1236	0.77
			側壁 (東西)	522	5750	8024	0.72
			隔壁 (南北)	542	107	673	0.16
			隔壁 (東西)	537	1062	2010*3	0.53
③	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	852	1236	0.69
			側壁 (東西)	522	5400	8024	0.68
			隔壁 (南北)	542	102	668	0.16
			隔壁 (東西)	537	1008	2113*3	0.48
④	S s - D 2	++	側壁 (南北)	513	960	1236	0.78
			側壁 (東西)	522	5433	8024	0.68
			隔壁 (南北)	542	104	673	0.16
			隔壁 (東西)	537	1175	2099*3	0.56

注記\*1: 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

表 6-59(4) せん断破壊に対する評価結果 (断面⑤, せん断耐力式及び材料非線形解析)

解析 ケース	地震動		評価位置*1		照査用	せん断	照査値
					せん断力*2	耐力	
					$V_d$	$V_{yd}$	$V_d/V_{yd}$
					(kN/m)	(kN/m)	
②	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	902	1236	0.73
			側壁 (東西)	522	5183	8024	0.65
			隔壁 (南北)	542	94	672	0.14
			隔壁 (東西)	537	1000	1911*3	0.53
③	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	1052	1236	0.86
			側壁 (東西)	522	5733	8024	0.72
			隔壁 (南北)	542	98	670	0.15
			隔壁 (東西)	537	1174	2201*3	0.54
④	S s - N 1	- +	側壁 (南北)	513	1045	1236	0.85
			側壁 (東西)	522	5070	8024	0.64
			隔壁 (南北)	542	89	673	0.14
			隔壁 (東西)	537	1183	2144*3	0.56

注記\*1: 評価位置は図 6-38 に示す。

\*2: 照査用せん断力 = 発生せん断力 × 構造解析係数  $\gamma_a$

\*3: 材料非線形解析によるせん断耐力

(3) 断面⑥

せん断破壊に対する評価結果を表 6-60 に示す。照査値は、応力度を許容限界で除した値として時々刻々求め、全時刻において最大となる照査値を記載する。

同表のとおり、全ケースにおいて発生応力度が短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 6-60 せん断破壊に対する評価結果

解析 ケース	地震動		評価位置*		発生 応力度	短期許容 応力度	照査値 $\tau_d / \tau_{a1}$
					$\tau_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{a1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
①	S <sub>s</sub> -D1	++	底版	601	0.41	0.63	0.66
		-+			0.40		0.64
	S <sub>s</sub> -D2	++	底版	601	0.44	0.63	0.70
		-+			0.43		0.69
	S <sub>s</sub> -D3	++	底版	601	0.40	0.63	0.64
		-+			0.42		0.67
	S <sub>s</sub> -F1	++	底版	601	0.38	0.63	0.61
		-+			0.34		0.54
	S <sub>s</sub> -F2	++	底版	601	0.36	0.63	0.58
		-+			0.37		0.59
	S <sub>s</sub> -F3	++	底版	601	0.41	0.63	0.66
		-+			0.43		0.69
	S <sub>s</sub> -N1	++	底版	601	0.49	0.63	0.78
		-+			0.36		0.58
②	S <sub>s</sub> -F2	++	底版	601	0.36	0.63	0.58
③	S <sub>s</sub> -F2	++	底版	601	0.36	0.63	0.58
④	S <sub>s</sub> -F2	++	底版	601	0.36	0.63	0.58
②	S <sub>s</sub> -N1	++	底版	601	0.48	0.63	0.77
③	S <sub>s</sub> -N1	++	底版	601	0.44	0.63	0.70
④	S <sub>s</sub> -N1	++	底版	601	0.49	0.63	0.78

注記\*：評価位置は図 6-39 に示す。

## 資料9 海水ポンプ室の耐震安全性評価

## 目 次

1. 評価方法	資料 9-1
2. 評価条件	資料 9-1
2.1 適用規格	資料 9-1
2.2 構造及び補強の概要	資料 9-4
2.3 耐震評価フロー	資料 9-14
2.4 地震時荷重算出断面の選定	資料 9-19
2.5 使用材料及び材料の物性値	資料 9-22
2.6 地盤物性値	資料 9-22
2.7 評価構造物諸元及び要求機能の考え方	資料 9-26
2.7.1 評価構造物諸元	資料 9-26
2.7.2 海水ポンプ室の要求機能の考え方	資料 9-29
2.8 地下水位	資料 9-33
3 地震応答解析	資料 9-35
3.1 地震応答解析手法	資料 9-35
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 9-38
3.2.1 解析モデル領域	資料 9-38
3.2.2 境界条件	資料 9-40
3.2.3 構造物のモデル化	資料 9-47
3.2.4 隣接構造物のモデル化	資料 9-54
3.2.5 地盤及び MMR のモデル化	資料 9-57
3.2.6 ジョイント要素の設定	資料 9-57
3.3 減衰定数	資料 9-62
3.4 荷重の組合せ	資料 9-77
3.4.1 機器・配管荷重	資料 9-78
3.4.2 竜巻防護ネット荷重	資料 9-79
3.4.3 原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）荷重	資料 9-80
3.4.4 外水圧	資料 9-82
3.4.5 内水圧	資料 9-84
3.4.6 積載荷重	資料 9-86
3.4.7 動水圧	資料 9-89
3.5 地震応答解析の解析ケース	資料 9-92
3.5.1 耐震評価における解析ケース	資料 9-92
3.5.2 機器・配管系の耐震評価に適用する解析ケース	資料 9-99
4. 三次元構造解析	資料 9-103
4.1 解析手法	資料 9-103
4.2 解析モデルの設定	資料 9-104
4.2.1 構造物のモデル化	資料 9-104
4.2.2 地盤ばね要素	資料 9-107

4.2.3	材料の非線形特性	資料 9-112
4.3	照査時刻の選定	資料 9-117
4.4	入力荷重	資料 9-121
4.4.1	常時荷重	資料 9-124
4.4.2	慣性力（機器）	資料 9-127
4.4.3	慣性力（配管）	資料 9-129
4.4.4	慣性力（躯体）	資料 9-130
4.4.5	慣性力（竜巻防護ネット反力）	資料 9-132
4.4.6	慣性力（原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部））	資料 9-136
4.4.7	内水圧・動水圧	資料 9-138
4.4.8	地震時土圧・水圧及び周面せん断力	資料 9-140
5	評価内容	資料 9-141
5.1	入力地震動の設定	資料 9-141
5.2	許容限界の設定	資料 9-198
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	資料 9-198
5.2.2	せん断破壊に対する許容限界	資料 9-203
5.2.3	壁部材の面内せん断に対する許容限界	資料 9-213
5.2.4	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	資料 9-215
6	評価結果	資料 9-216
6.1	地震応答解析結果	資料 9-216
6.1.1	各照査時刻における荷重抽出時刻の算定結果	資料 9-216
6.1.2	作用荷重分布図	資料 9-244
6.1.3	最大せん断ひずみ	資料 9-250
6.2	三次元構造解析結果	資料 9-257
6.2.1	解析ケースと照査値	資料 9-262
6.2.2	構造部材のひずみ分布（曲げ・軸力系の破壊に対する照査）	資料 9-277
6.2.3	構造部材の断面力分布（せん断破壊に対する照査）	資料 9-289
6.3	構造部材の健全性に対する評価結果	資料 9-302
6.3.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	資料 9-302
6.3.2	せん断破壊に対する評価結果	資料 9-361
6.3.3	壁部材の面内せん断に対する評価結果	資料 9-391
6.3.4	水平 2 方向載荷による評価結果	資料 9-411
6.4	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	資料 9-416
6.4.1	基礎地盤（狐崎部層）	資料 9-416
6.4.2	MMR（既設）	資料 9-420
7	まとめ	資料 9-440

参考資料

- 参考資料 1 主筋ひずみの平均化について・・・資料 9- (参考) 1-1
- 参考資料 2 止水機能が要求される部材に対する漏水量評価について・・・資料 9- (参考) 2-1
- 参考資料 3 増厚部における既設部材と補強部材の一体化設計・・・資料 9- (参考) 3-1
- 参考資料 4 静的地震力に対する耐震評価・・・資料 9- (参考) 4-1
- 参考資料 5 解析手法の選定について・・・資料 9- (参考) 5-1
- 参考資料 6 照査時刻の選定の妥当性について・・・資料 9- (参考) 6-1
- 参考資料 7 補強追加による非常用海水ポンプ取水への影響について・・・資料 9- (参考) 7-1
- 参考資料 8 補強部材の施工履歴が及ぼす耐震評価への影響について・・・資料 9- (参考) 8-1
- 参考資料 9 既設部材と新設部材のコンクリートの付着力について・・・資料 9- (参考) 9-1
- 参考資料 10 竜巻ネット反力他に対する海水ポンプ室の構造成立性について・・・  
・・・資料 9- (参考) 10-1
- 参考資料 11 海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁等の設計について・・・資料 9- (参考) 11-1

┌──┐ : 記載適正化範囲



## 参考資料 11 海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁等の設計について

### 1. 概要

海水ポンプ室の補機ポンプエリアには、原子炉補機冷却海水ポンプ（以下「RSWポンプ」という。）、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（以下「HPSWポンプ」という。）及びタービン補機冷却海水ポンプ（以下「TSWポンプ」という。）が設置されており、これらの系統について、安全設備の多重性や独立性確保のために鉄筋コンクリート部材で構成される隔壁等を設置している。

隔壁等には、Sクラスの配管を間接支持する支持機能と、溢水事象に対する止水機能が要求される。

本資料は、海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁等が基準地震動  $S_s$  による地震時に構造強度を有すること、Sクラスの施設を支持する機能を損なわないこと、また、機器の破損時における溢水に対して止水機能を損なわないことを確認するものである。

## 2. 基本方針

### 2.1 構造概要

海水ポンプ室の平面図を図 2-1 に、海水ポンプ室補機ポンプエリアの平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3 に示す。

図 2-4 のとおり、補機ポンプエリアは、鉄筋コンクリート構造の 6 つの隔壁と 3 つのトレンチが設置されており、隔壁及びトレンチにより 4 系統に分離されている。

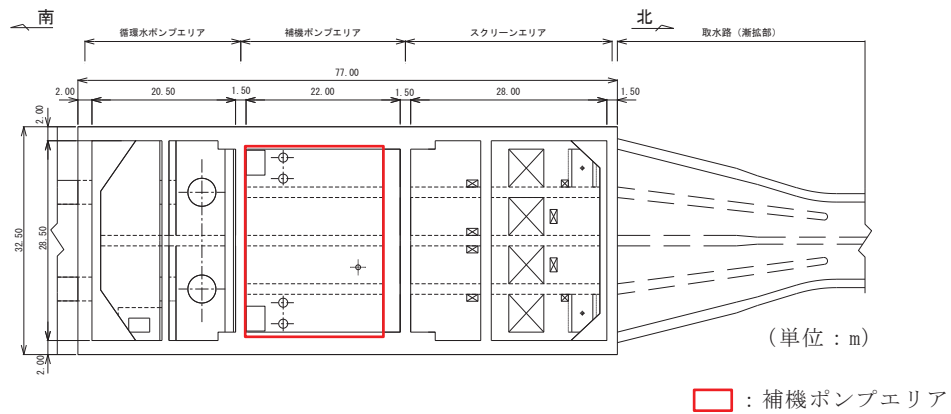


図 2-1 海水ポンプ室平面図

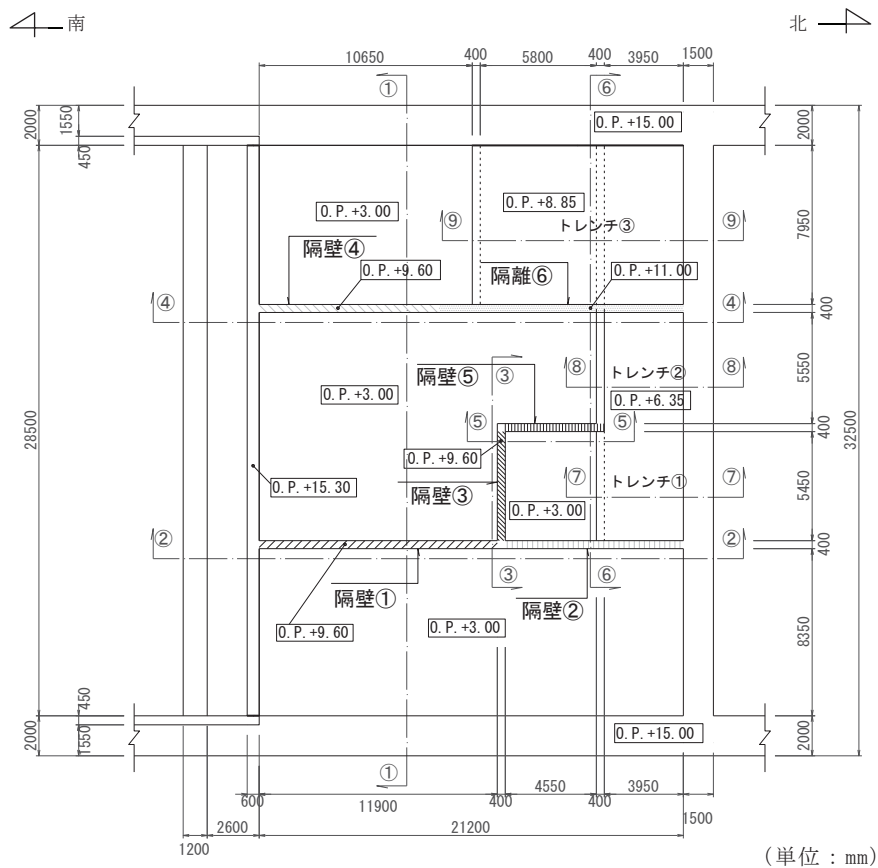


図 2-2 海水ポンプ室補機ポンプエリアの平面図

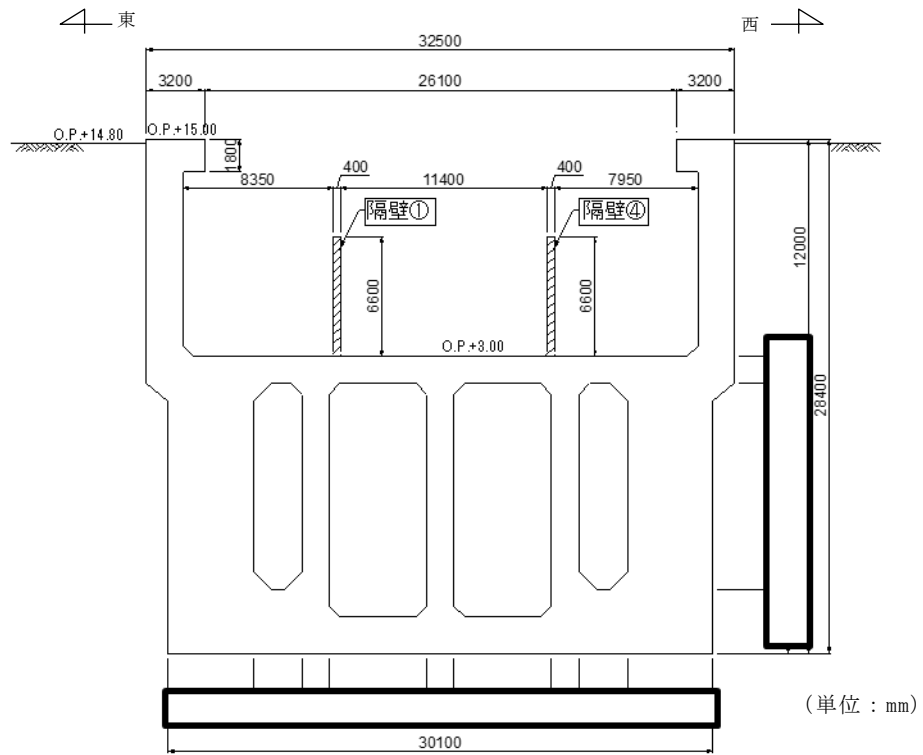


図 2-3(1) 補機ポンプエリア断面図 (①—①断面)

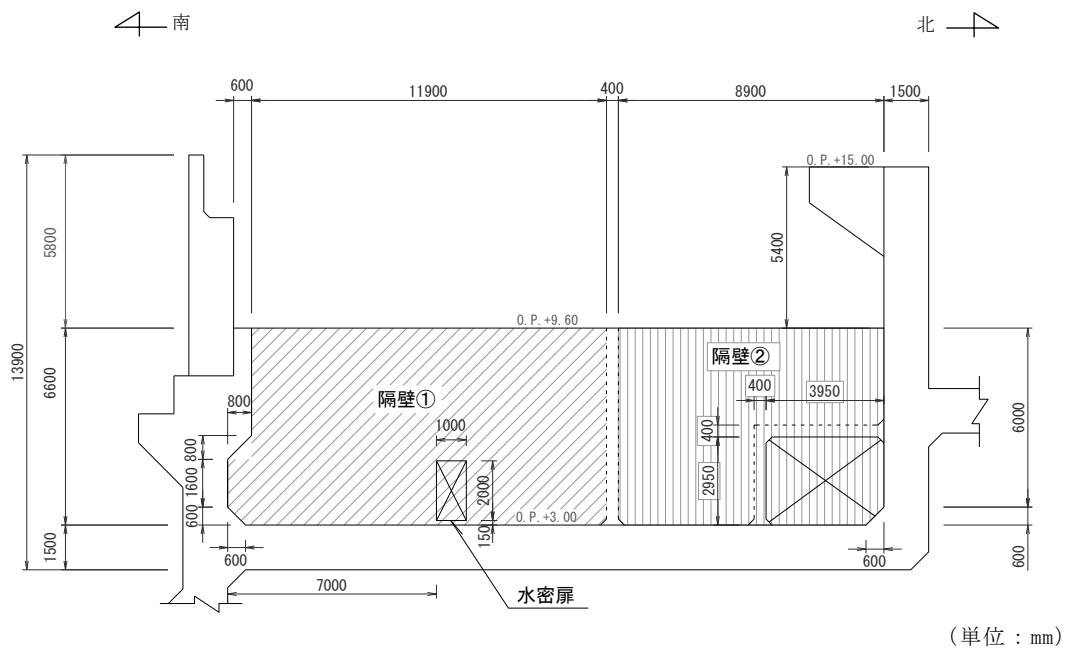


図 2-3(2) 補機ポンプエリア断面図 (②—②断面)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

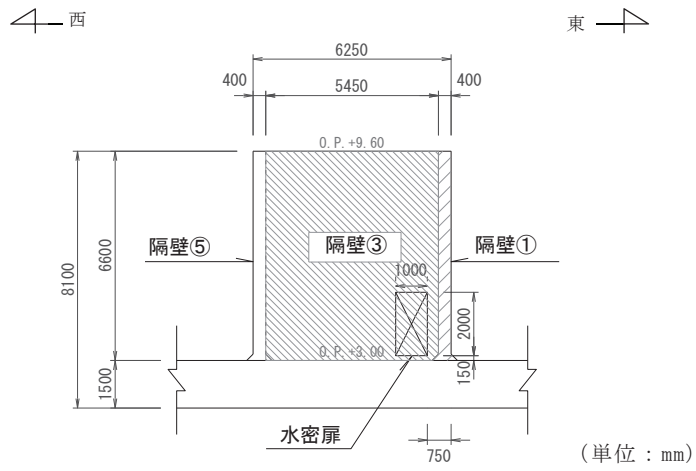


図 2-3(3) 補機ポンプエリア断面図 (③—③断面)

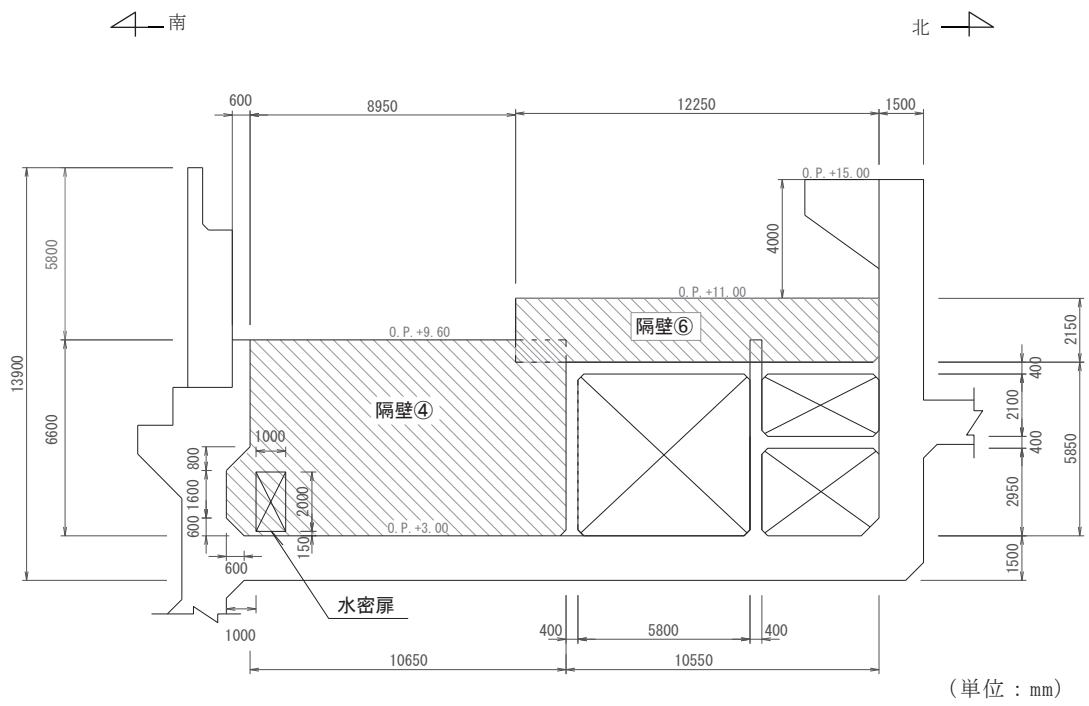


図 2-3(4) 補機ポンプエリア断面図 (④—④断面)

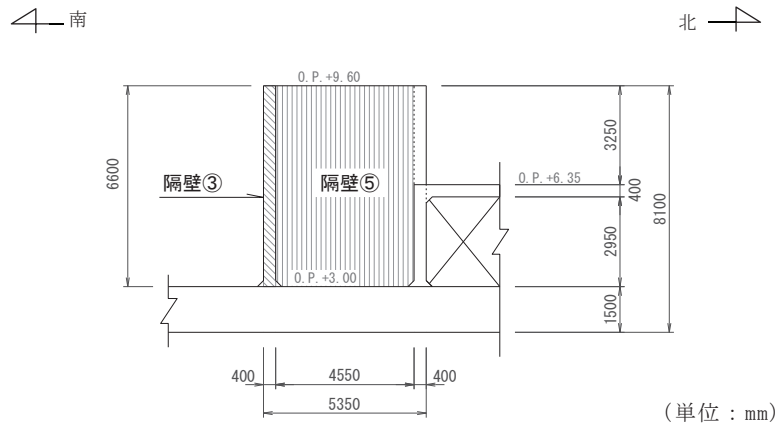


図 2-3(5) 補機ポンプエリア断面図 (⑤—⑤断面)

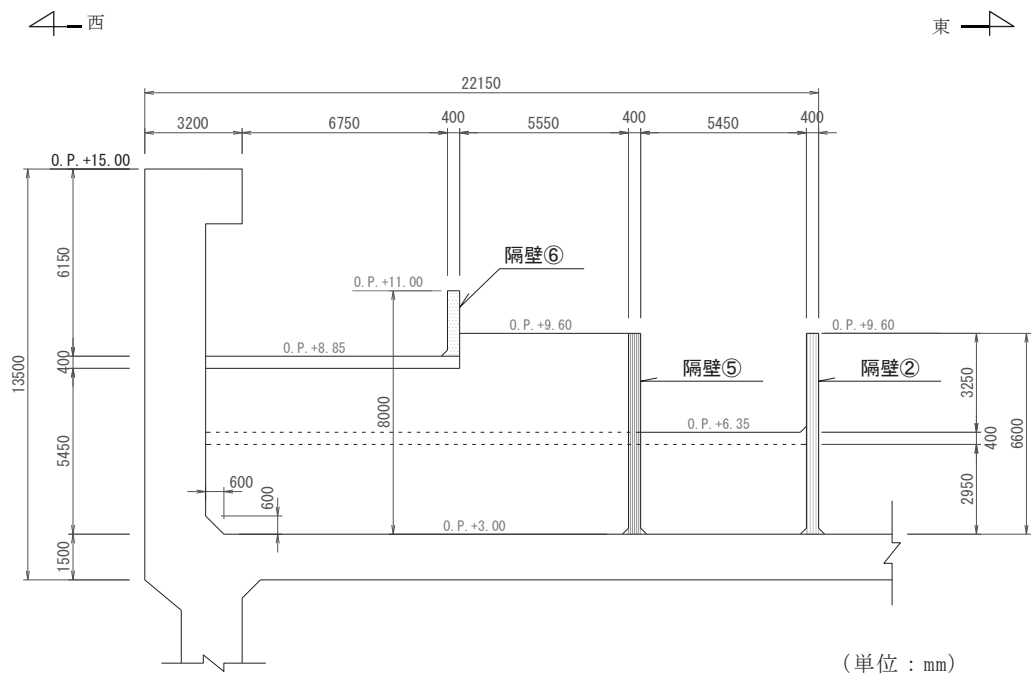


図 2-3(6) 補機ポンプエリア断面図 (⑥—⑥断面)

南

北

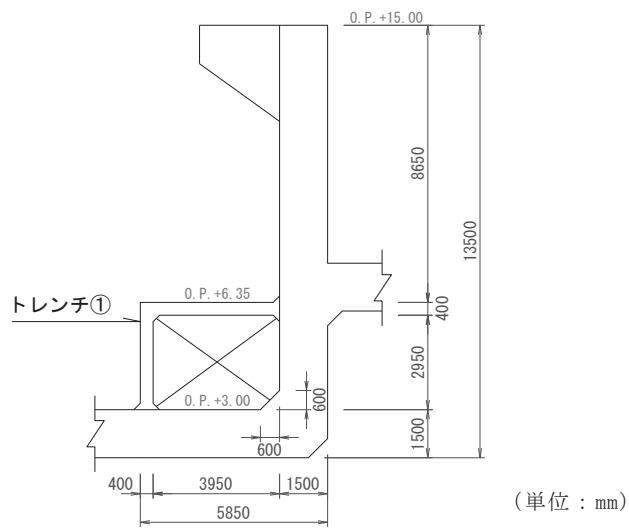


図 2-3(7) 補機ポンプエリア断面図 (⑦—⑦断面)

南

北

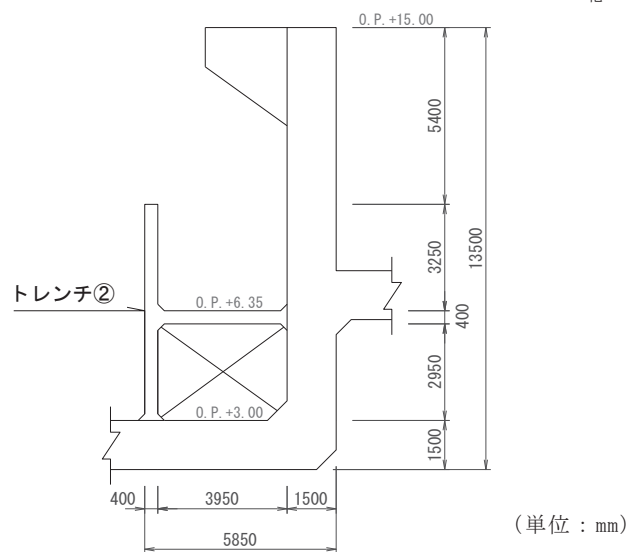


図 2-3(8) 補機ポンプエリア断面図 (⑧—⑧断面)

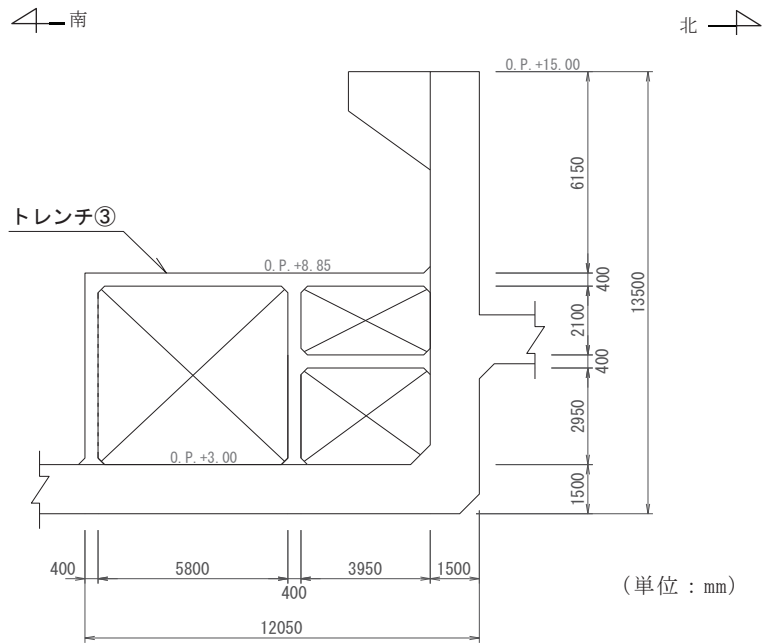


図 2-3(9) 補機ポンプエリア断面図 (⑨—⑨断面)

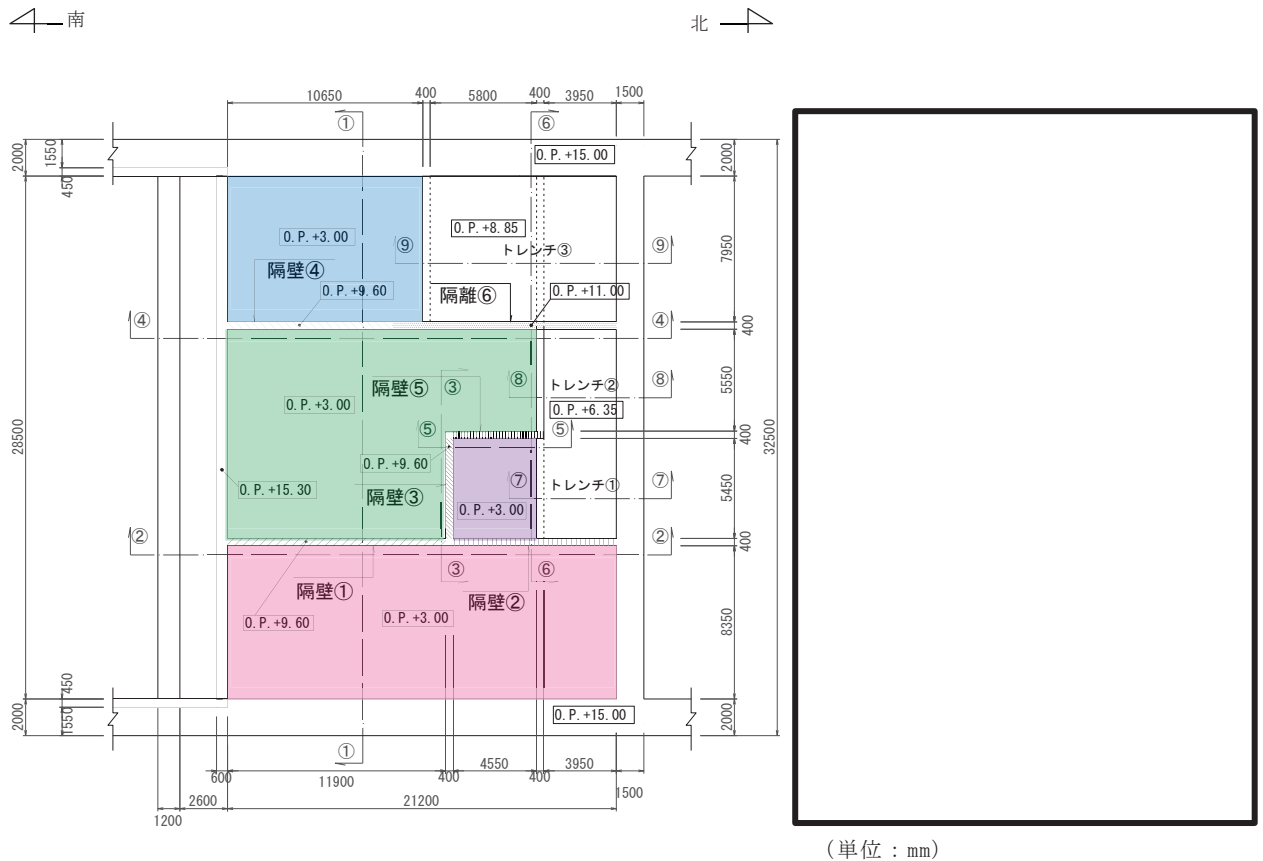


図 2-4 海水ポンプ室補機ポンプエリアの系統の分離図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

## 2.2 評価方針

海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁及びトレンチには、Sクラスの配管を間接支持する支持機能と、溢水事象に対する止水機能が要求される。

基準地震動  $S_s$  による地震時に支持機能を損なわないことの確認は、「資料9 3.地震応答解析」により得られる応答値を用いて、各部材の健全性評価を行う。隔壁は、壁部材を線形シェル要素でモデル化し三次元静的線形解析を行い、発生応力度及び発生せん断力が、許容限界を下回ることを確認する。トレンチは、非線形はり要素でモデル化し二次元静的非線形解析を行い、照査用ひずみ及び照査用せん断力が、支持機能に対する許容限界を下回ることを確認する。

止水機能を損なわないことの確認は、添付書類「VI-1-1-8 発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書」に示す溢水評価の内容を踏まえ、機器の破損等により生じる溢水（以下「想定破損による溢水」という。）に対して実施する。溢水源は「原子力発電所の内部溢水影響評価ガイド」に基づき単一機器の想定破損による溢水とし、各部材の健全性評価を行う。隔壁は、地震時と同様に、壁部材を線形シェル要素でモデル化し三次元静的線形解析を行い、発生応力度及び発生せん断力が、許容限界を下回ることを確認する。トレンチは、地震時と同様に非線形はり要素とした二次元静的非線形解析を行い、照査用ひずみ及び照査用せん断力が、止水機能を損なわないことの許容限界を下回ることを確認する。なお、補機ポンプエリア内の機器は基準地震動  $S_s$  による耐震性が確保されることから、地震に起因する機器の破損により生じる溢水は考慮しない。

以上のとおり、海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁及びトレンチの健全性評価は、基準地震動  $S_s$  による地震時と、単一機器の想定破損による溢水時の独立した事象に対して実施する。

地震時の評価フローを図2-5に、溢水時の評価フローを図2-6に示す。



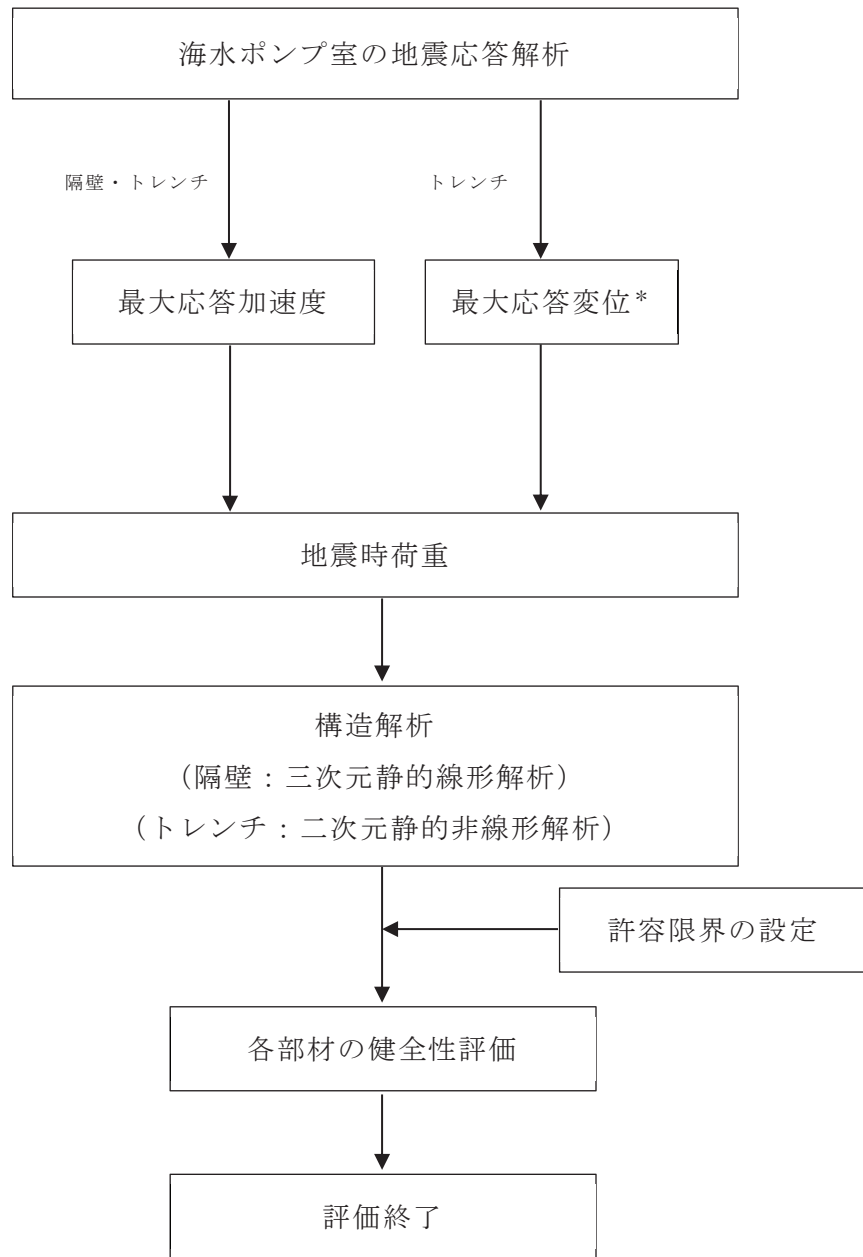


図 2-5 地震時の評価フロー

注記\*：トレンチの評価については、検討断面（弱軸断面）と海水ポンプ室隔壁が交わることから、慣性力（最大応答加速度）に加え、海水ポンプ室縦断方向の地震応答解析から算出される海水ポンプ室隔壁の最大応答変位を保守的に強制変位として考慮する。

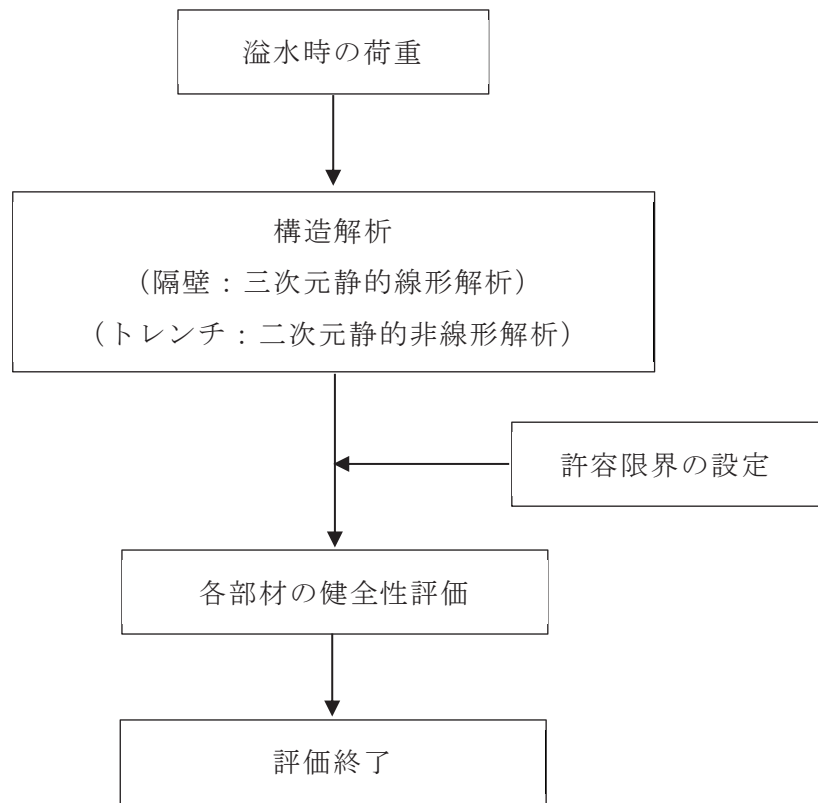


図 2-6 溢水時の評価フロー

### 2.3 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 2-1 に、材料の物性値を表 2-2 に示す。

表 2-1 使用材料

材料	仕様
コンクリート	設計基準強度 20.5N/mm <sup>2</sup>
鉄筋	SD345

表 2-2 材料の物性値

材料	項目	材料諸元
鉄筋コンクリート	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	24.0
	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	2.33×10 <sup>4</sup>
	ポアソン比	0.2

## 2.4 適用規格

適用する規格・基準等を以下に示す。

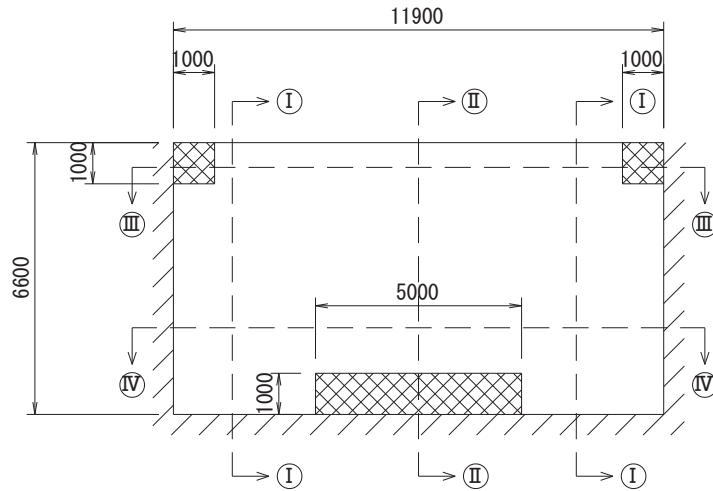
- ・コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会 2002年制定）（以下「コンクリート標準示方書」という。）
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（2005年6月土木学会 原子力土木委員会）（以下「土木学会マニュアル」という。）
- ・コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会 2017年制定）（以下「コンクリート標準示方書 2017」という。）

3. 隔壁の健全性評価

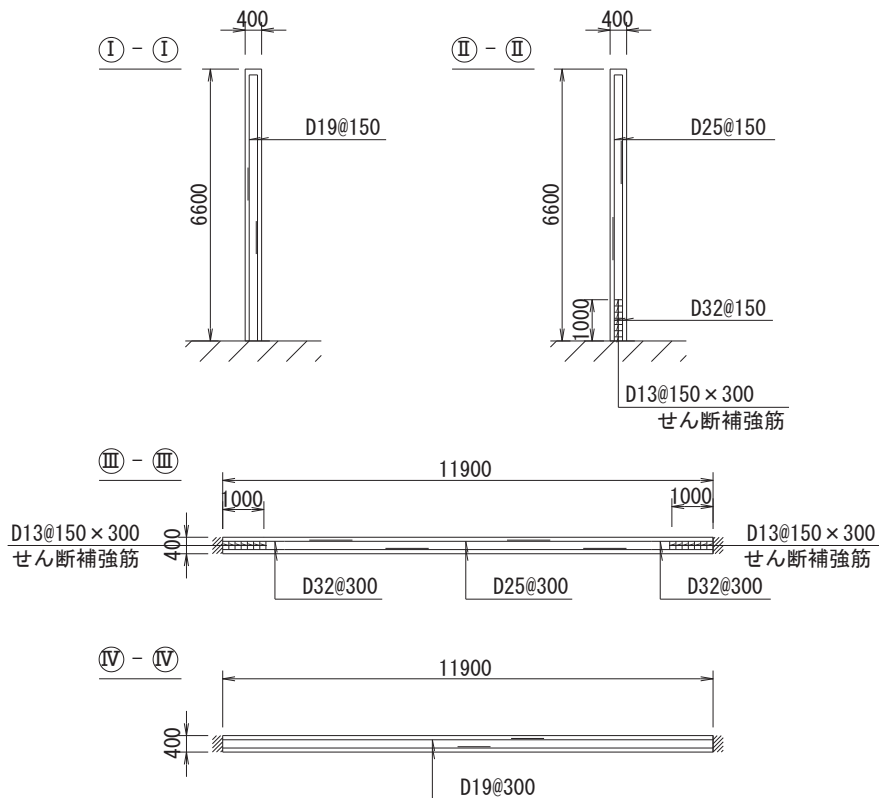
3.1 構造概要及び諸元

3.1.1 構造概要

補機ポンプエリアには、図2-2及び図2-3に示すとおり、6つの隔壁が設置されている。隔壁①～隔壁⑥の概略配筋図を図3-1に示す。

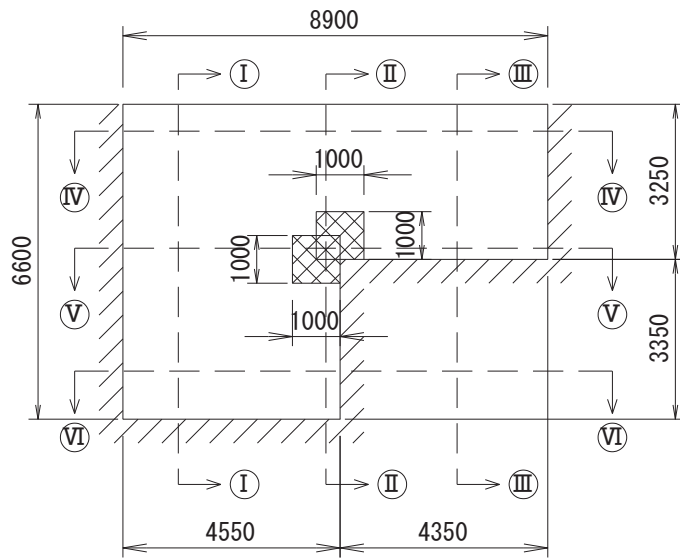


注：斜線部はせん断補強筋を有する箇所



(単位：mm)

図3-1(1) 概略配筋図(隔壁①)



注：斜線部はせん断補強筋を有する箇所

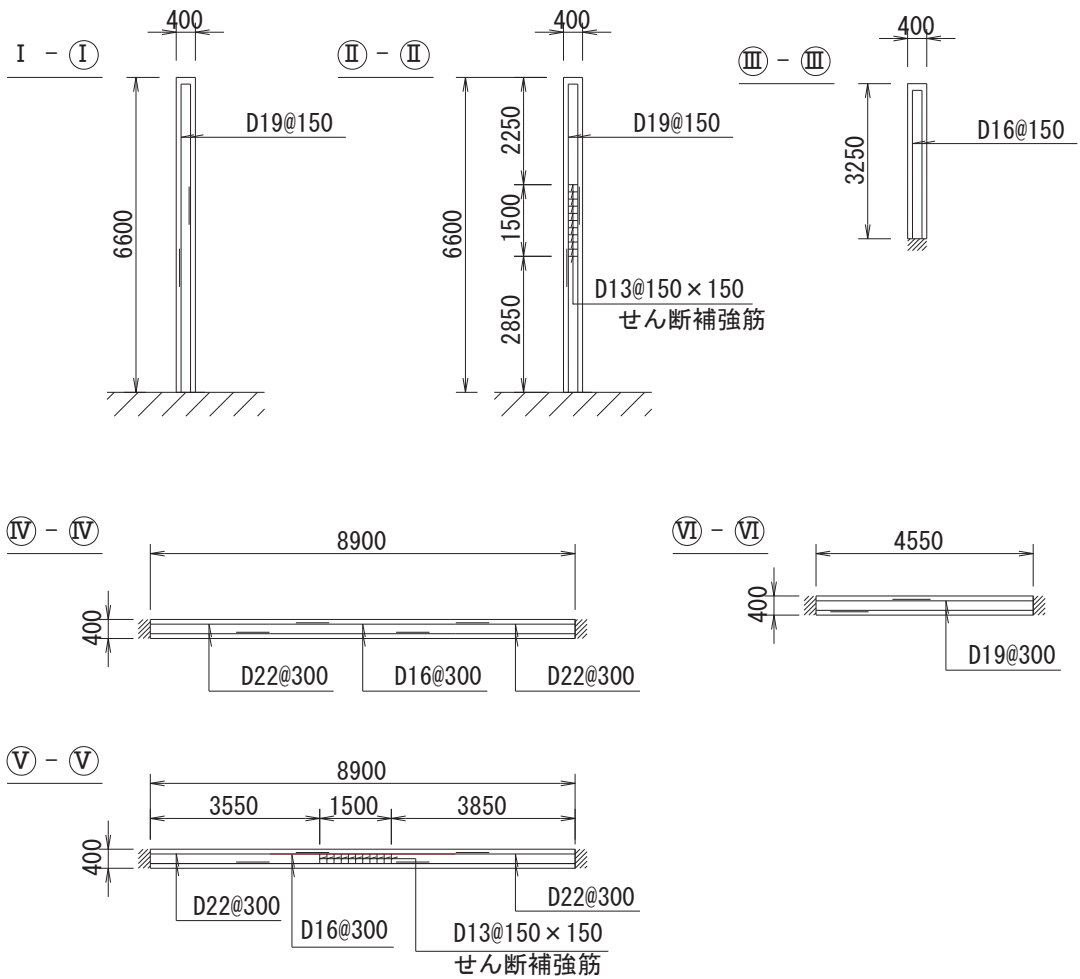


図 3-1(2) 概略配筋図 (隔壁②)

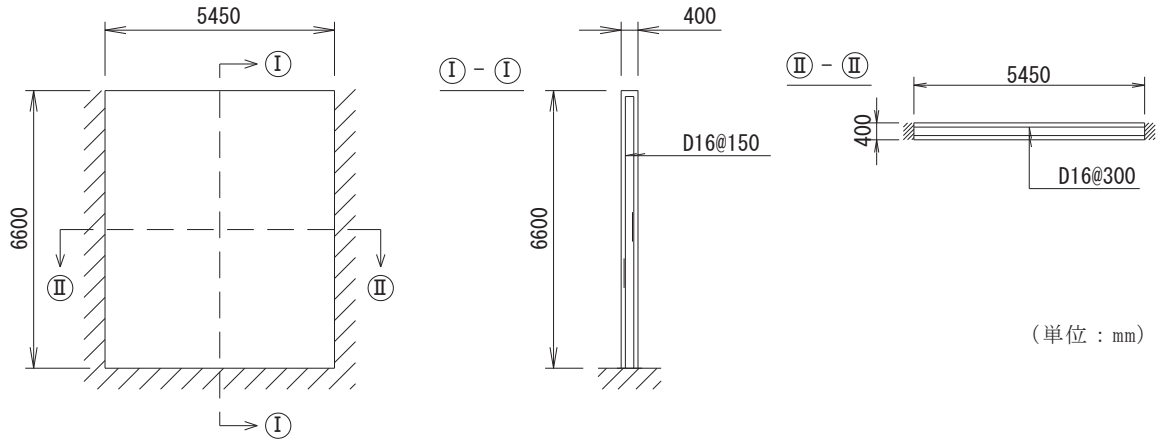
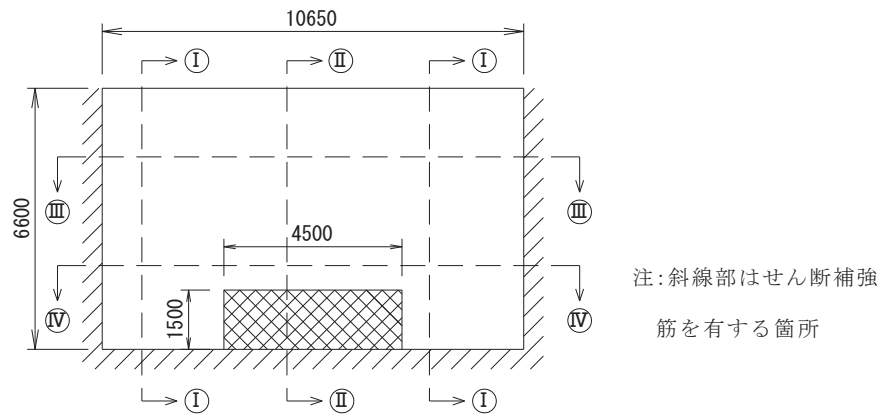


図 3-1(3) 概略配筋図 (隔壁③)



注: 斜線部はせん断補強筋を有する箇所

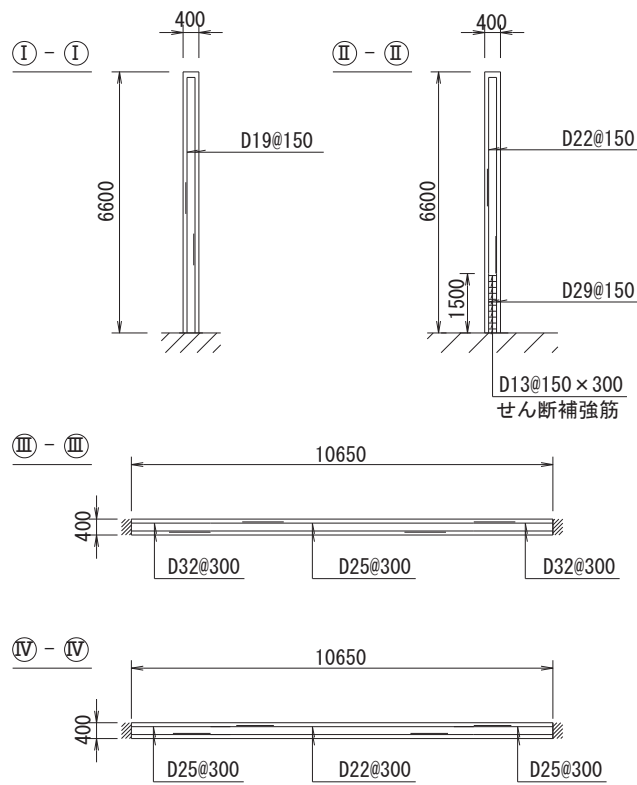


図 3-1(4) 概略配筋図 (隔壁④)

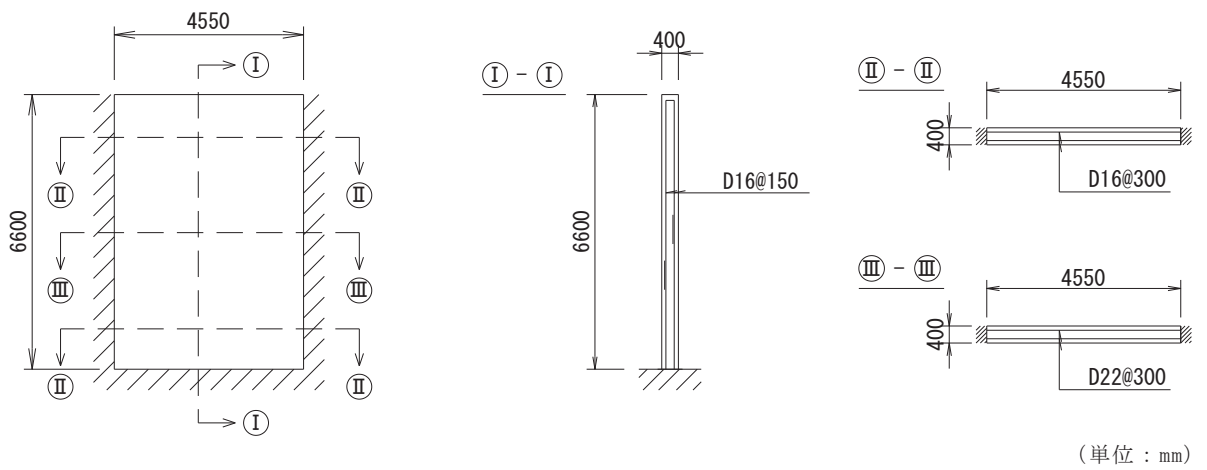


圖 3-1(5) 概略配筋圖 (隔壁⑤)

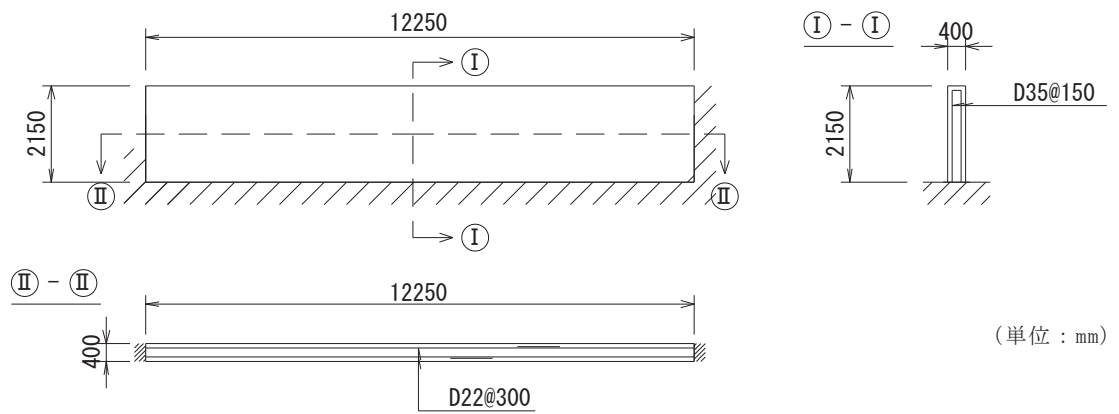


圖 3-1(6) 概略配筋圖 (隔壁⑥)



### 3.1.2 評価構造物諸元

隔壁の諸元を表 3-1 に示す。

表 3-1 評価部位とその仕様

部位	仕様			材料		要求機能	
	部材幅 (mm)	部材高 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 $f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋		
隔壁①	11900	6600	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能
隔壁②	8900	6600	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能
隔壁③	5450	6600	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能
隔壁④	10650	6600	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能
隔壁⑤	4550	6600	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能
隔壁⑥	12250	2150	400	20.5	SD345	地震時	支持機能
						溢水時	止水機能

### 3.2 荷重

#### 3.2.1 考慮する荷重

地震時及び溢水時の評価にて考慮する荷重を表 3-2 に示す。

表 3-2 考慮する荷重

種別	荷重		算定方法の概要
常時荷重	固定荷重	躯体自重	・対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。
		配管荷重	・配管重量に基づいて設定する。
地震時荷重	水平慣性力		・基準地震動 $S_s$ による水平・鉛直同時加振を考慮し，躯体及び配管に作用する慣性力を設定する。
	鉛直慣性力		
溢水時荷重	静水圧		・機器の想定破損時に生じる溢水による床面からの最大水位を考慮する。

### 3.2.2 地震時の荷重

地震時の評価において、考慮する荷重を以下に示す。

#### (1) 躯体自重

固定荷重として、躯体自重を考慮する。対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。

#### (2) 配管荷重

固定荷重として、配管荷重を考慮する。隔壁の側面には、配管荷重を部材全体に分布荷重として載荷する。

#### (3) 慣性力

基準地震動  $S_s$  による躯体及び配管に作用する慣性力を考慮する。

慣性力は、海水ポンプ室の地震応答解析モデルにおける鉄筋コンクリート部材の各節点の応答加速度から算定する。応答加速度の抽出位置の一例を図3-2に示す。水平方向及び鉛直方向の加速度の抽出位置は、鉄筋コンクリート部材位置に当たる全節点とする。基準地震動  $S_s$  波（7波）に水平動の位相反転を考慮した地震動（7波）を加えた14波を包絡させた応答加速度を作成し、このうち最も大きい加速度を震度換算して、保守的に躯体全体に一様に載荷する。

なお、荷重の載荷方向を考慮し、応答加速度は、隔壁①、②、④、⑤、⑥は海水ポンプ室（補機ポンプエリア）の東西断面（弱軸断面）、隔壁③は南北断面（強軸断面）の地震応答解析から算出する。

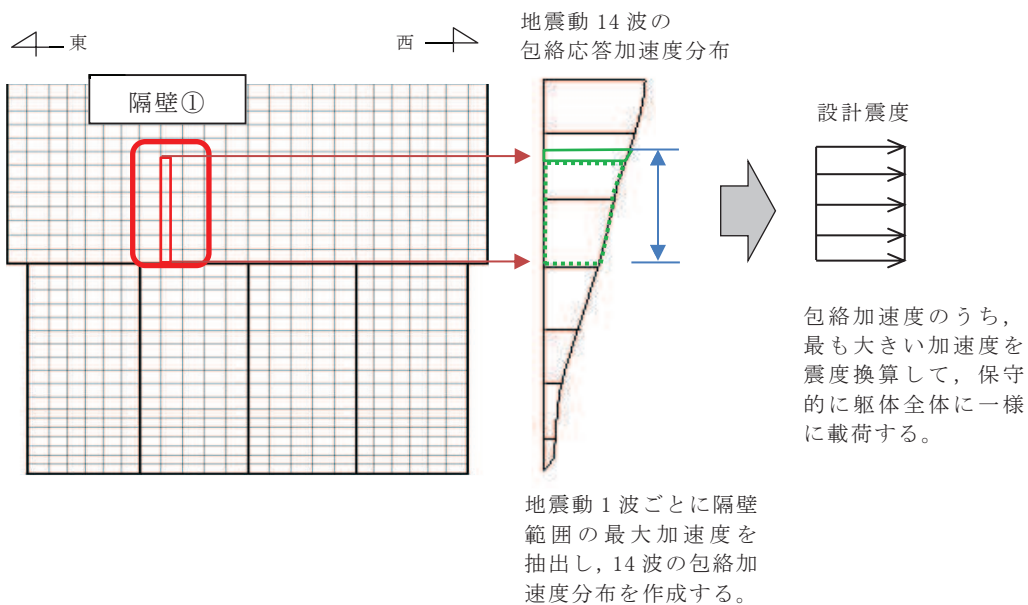


図 3-2(1) 応答加速度の抽出位置と設計震度の算出方法（隔壁①の例）

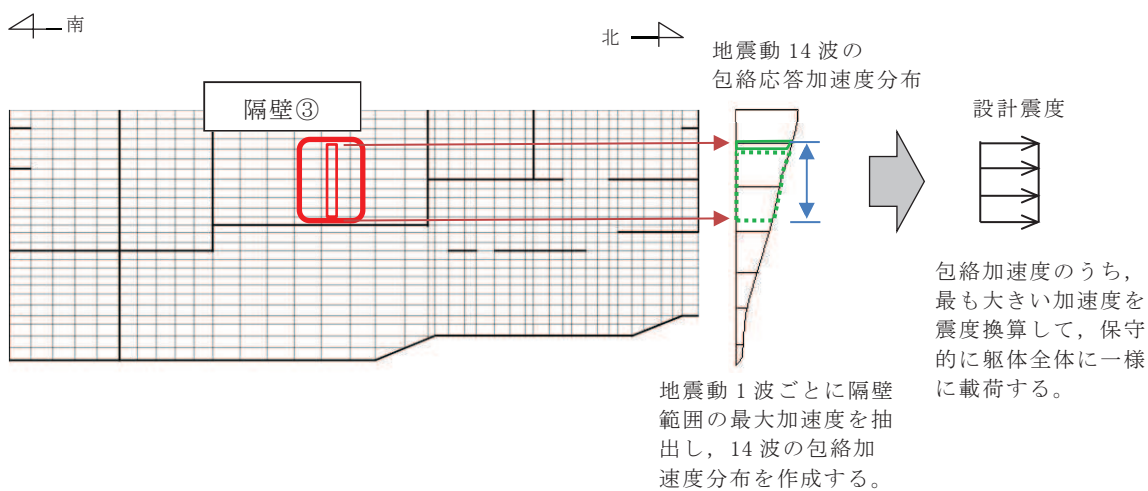


図 3-2(2) 応答加速度の抽出位置と設計震度の算出方法（隔壁③の例）

### 3.2.3 溢水時の荷重

溢水時の評価において、考慮する荷重を以下に示す。

#### (1) 躯体自重

固定荷重として、躯体自重を考慮する。対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。

#### (2) 配管荷重

固定荷重として、配管荷重を考慮する。隔壁の側面には、配管荷重を部材全体に分布荷重として載荷する。

#### (3) 静水圧

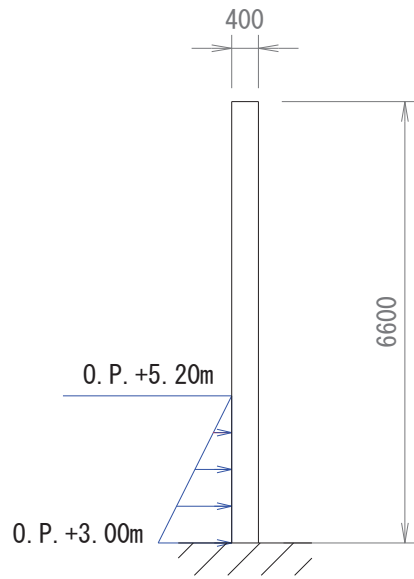
単一機器の想定破損に伴う溢水時の最大水位を、静水圧分布荷重として考慮する。各系統の機器の想定破損に伴う最大水位を表 3-3 に示す。

隔壁については、壁により系統が分離され、単一機器の想定破損に伴う溢水を対象とすることから、片側からの水圧を作用させる。作用荷重の概念図の一例を図 3-3 に示す。

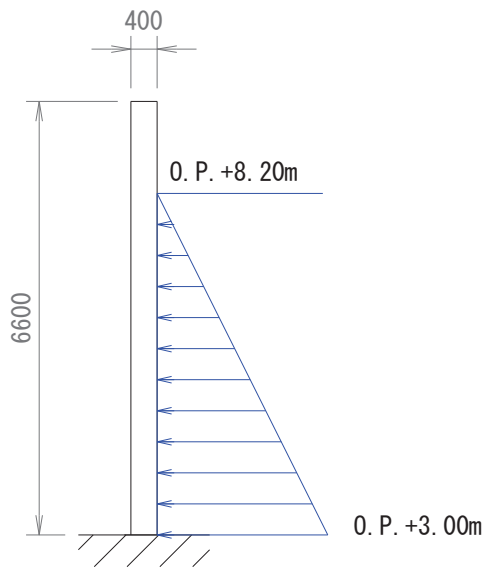
表 3-3 各系統の機器の想定破損に伴う最大水位

各系統*	最大水位	備考
RSW ポンプ室 (A 系)	静水面 0. P. +6. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 3. 20m
TSW ポンプ室	静水面 0. P. +5. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 2. 20m
HPSW ポンプ室	静水面 0. P. +8. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 5. 20m
RSW ポンプ室 (B 系)	静水面 0. P. +4. 60m	床面 (0. P. +3. 00m) から 1. 60m

注記\* : 海水ポンプ室補機ポンプエリアの系統の分離図は図 2-4 に示す。



荷重図 (TSW ポンプの溢水時ケース)



荷重図 (HPSW ポンプの溢水時ケース) (単位 : mm)

図 3-3 作用荷重の概念図 (静水圧 : 隔壁③の例)

### 3.2.4 荷重の組合せ及び解析ケース

#### (1) 地震時

地震時の荷重の組合せを表 3-4 に、入力荷重の一覧を表 3-5 に、解析ケースを表 3-6 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時	固定荷重＋地震時荷重

表 3-5 入力荷重の一覧（地震時）

入力荷重		地震応答解析から抽出する応答値	載荷位置
固定荷重	躯体自重，配管荷重	－	躯体全体
地震時荷重	慣性力	躯体の慣性力	躯体全体
		配管の慣性力	躯体全体

表 3-6 地震時の解析ケース

解析ケース	荷重条件
ケース 1	固定荷重＋水平慣性力＋鉛直慣性力（下向き）
ケース 2	固定荷重＋水平慣性力＋鉛直慣性力（上向き）

(2) 溢水時

溢水時の荷重の組合せを表 3-7 に、入力荷重の一覧を表 3-8 に、解析ケースを表 3-9 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
溢水時	固定荷重+溢水時荷重

表 3-8 入力荷重の一覧 (溢水時)

入力荷重		算出方法	載荷位置
固定荷重	躯体自重, 配管荷重	躯体自重は対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。配管荷重は、配管の重量に基づき設定する。	躯体全体
溢水時荷重	静水圧	各系統での単一機器の想定破損による最大水位	床面～最大水位

表 3-9 溢水時の解析ケース

部位	解析ケース	設定水位
隔壁①	ケース 1	RSW ポンプ室エリア (B 系) の水位
	ケース 2	TSW ポンプ室エリアの水位
隔壁②	ケース 1	RSW ポンプ室エリア (B 系) の水位
	ケース 2	HPSW ポンプ室エリアの水位
隔壁③	ケース 1	TSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	HPSW ポンプ室エリアの水位
隔壁④	ケース 1	TSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	RSW ポンプ室エリア (A 系) の水位
隔壁⑤	ケース 1	TSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	HPSW ポンプ室エリアの水位
隔壁⑥*	—	隔壁⑥には水圧は作用しない

注記\* : 隔壁⑥は、躯体下端が O. P. +8.85m であり、RSW ポンプ室 (A 系)、TSW ポンプ室、HPSW ポンプ室の各系統の溢水による最大水位より、標高が高いことから、止水機能に対する評価の対象外となる。



### 3.3 構造解析

#### 3.3.1 解析方法

隔壁は、線形シェル要素を用いた三次元静的線形解析により評価を行う。解析コードは「Soil Plus Ver. 2015 Build3」を使用する。

#### 3.3.2 構造物のモデル化

壁部材である隔壁は、構造部材を線形シェル要素でモデル化する。モデル概念図を図3-4に示す。

図2-3に示すとおり、隔壁①、隔壁③、隔壁④には水密扉が設置されているが、水密扉部分は重量が大きい鉄筋コンクリート壁としてモデル化することで、地震時の慣性力を保守的に評価する。なお、水密扉の周辺には開口補強筋を配置し、構造上の弱部とならないよう設計上の配慮を行っている。

#### 3.3.3 境界条件

隔壁の境界は、部材が厚く剛性が大きい海水ポンプ室本体（隔壁及び中床版）及び強軸方向で剛性の大きい壁部材に支持されていること、また、境界部は、鉄筋で一体化されていることから、各隔壁の境界は固定条件とする。

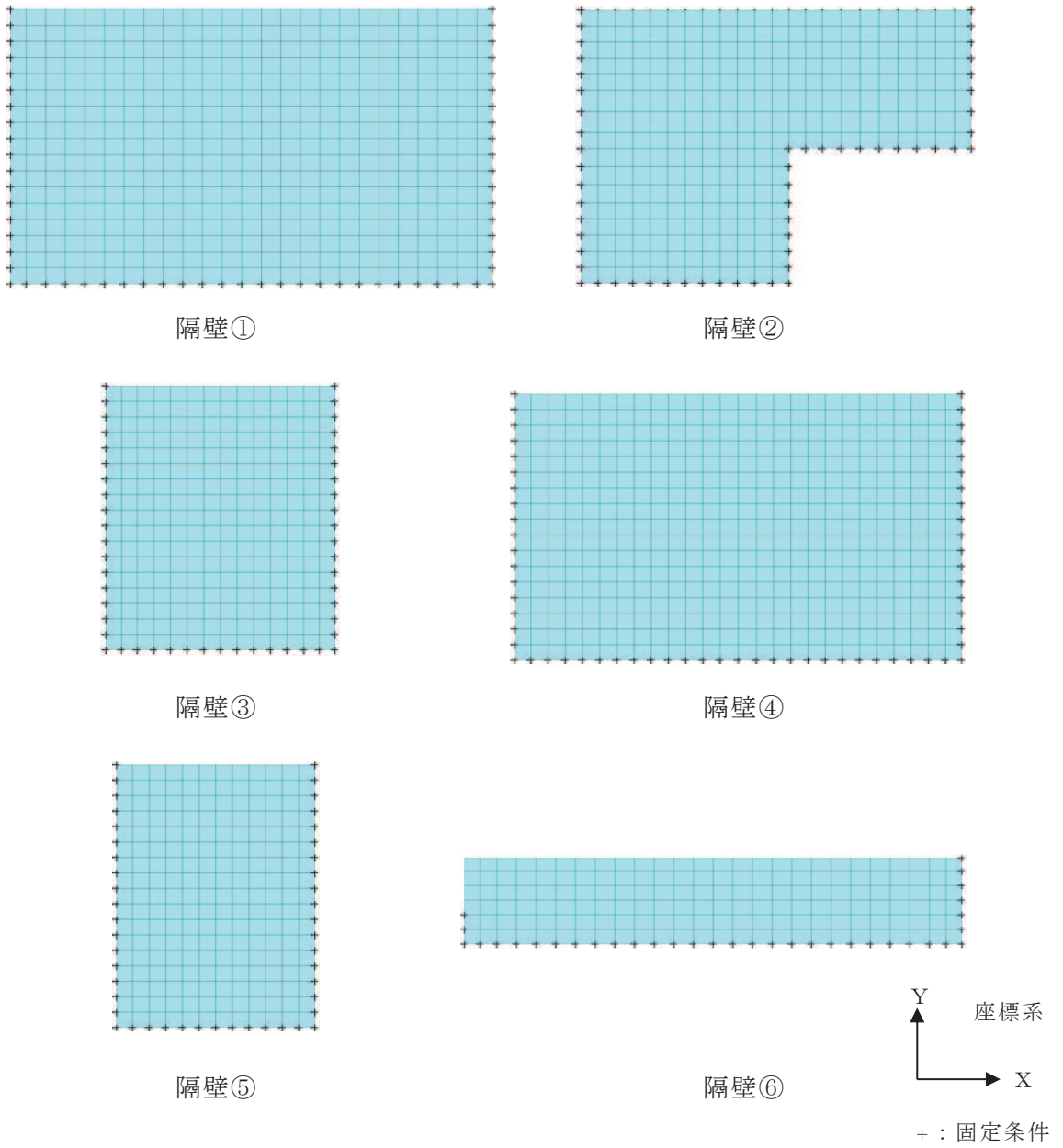


図 3-4 解析モデルの概念図

### 3.4 許容限界

#### 3.4.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

線形シェル要素によりモデル化する隔壁の構造強度を有することの確認，Sクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認，及び止水機能を損なわないことの確認における，曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は，表3-10及び表3-11に示す短期許容応力度とする。

なお，隔壁は，短期許容応力度により照査を行うため，地震時におけるSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認は，構造強度を有することの許容限界と同一となることから，すべての隔壁に対して構造強度を有することを確認することで，Sクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認も同時に行う。

表3-10 コンクリートの許容応力度及び短期許容応力度

設計基準強度	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		短期許容応力度* (N/mm <sup>2</sup> )
	f' <sub>ck</sub> = 20.5 (N/mm <sup>2</sup> )	許容曲げ圧縮応力度 $\sigma'_{ca}$	
許容せん断応力度 $\tau_{a1}$		0.42	0.63

注記\*：コンクリート標準示方書により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

表3-11 鉄筋の許容応力度及び短期許容応力度

鉄筋の種類	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		短期許容応力度* (N/mm <sup>2</sup> )
	SD345	許容引張応力度 $\sigma_{sa}$	

注記\*：コンクリート標準示方書により地震時の割り増し係数として1.5を考慮する。

#### 3.4.2 せん断破壊に対する許容限界

線形シェル要素によりモデル化する隔壁の構造強度を有することの確認，Sクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認，及び止水機能を損なわないことの確認における，せん断破壊に対する許容限界は，表3-10及び表3-11に示すコンクリートと鉄筋の短期許容応力度から算定した短期許容せん断力とする。

### 3.5 評価結果

#### 3.5.1 構造強度を有することに対する評価結果

##### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する照査について、各隔壁における最大照査値を表 3-12 及び表 3-13 に示す。コンクリート及び鉄筋に対する照査のうち、最大照査値となる隔壁②の断面力分布図を図 3-5 に示す。またシェル要素における断面力の方向を図 3-6 に示す。

同表より、コンクリート及び鉄筋の発生応力度が、全隔壁において短期許容応力度を下回ることを確認した。

表 3-12 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（コンクリート）（地震時）

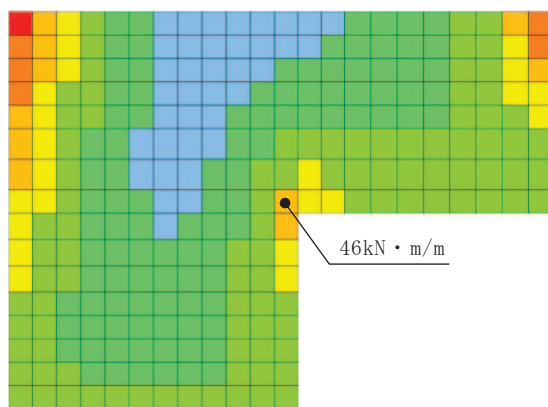
部位	解析ケース	曲げモーメント (kN・m/m)	軸力* (kN/m)	発生応力度 $\sigma'_{c}$ (N/mm <sup>2</sup> )	短期 許容応力度 $\sigma'_{c a}$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\sigma'_{c} / \sigma'_{c a}$
隔壁①	ケース 1	161	76	10.0	11.7	0.86
隔壁②	ケース 2	83	5	8.9	11.7	0.77
隔壁③	ケース 1	23	103	2.7	11.7	0.24
隔壁④	ケース 1	126	66	7.8	11.7	0.67
隔壁⑤	ケース 1	25	85	3.0	11.7	0.26
隔壁⑥	ケース 2	49	2	3.2	11.7	0.28

注記\*：軸力は引張が正

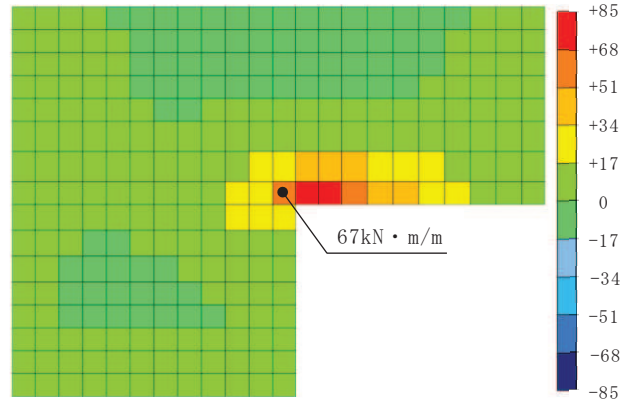
表 3-13 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（鉄筋）（地震時）

部位	解析ケース	曲げモーメント (kN・m/m)	軸力* (kN/m)	発生応力度 $\sigma'_{s}$ (N/mm <sup>2</sup> )	短期 許容応力度 $\sigma'_{s a}$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\sigma'_{c} / \sigma'_{s a}$
隔壁①	ケース 1	69	26	274.5	294	0.94
隔壁②	ケース 1	46	56	290.9	294	0.99
隔壁③	ケース 1	23	103	210.4	294	0.72
隔壁④	ケース 1	100	53	239.4	294	0.82
隔壁⑤	ケース 1	25	85	205.3	294	0.70
隔壁⑥	ケース 1	32	42	109.1	294	0.38

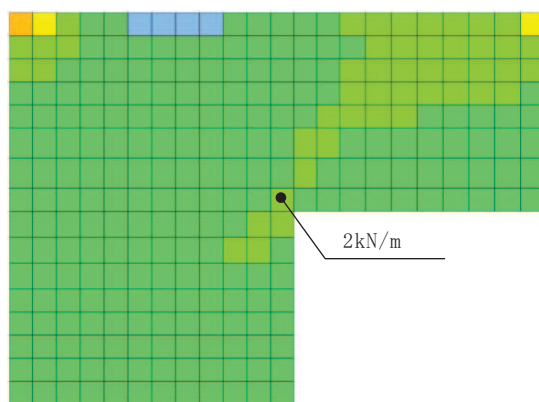
注記\*：軸力は引張が正



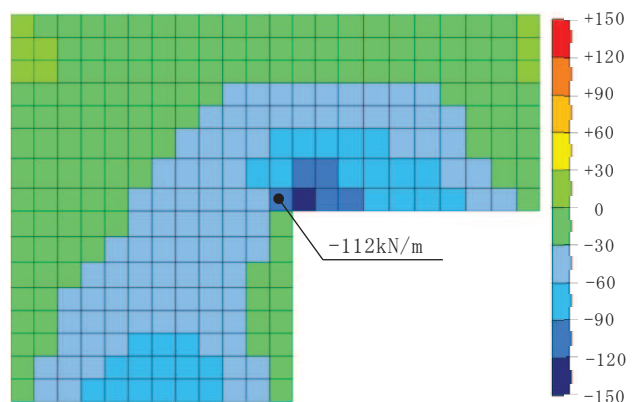
曲げモーメント (kN・m/m) :  $M_x$



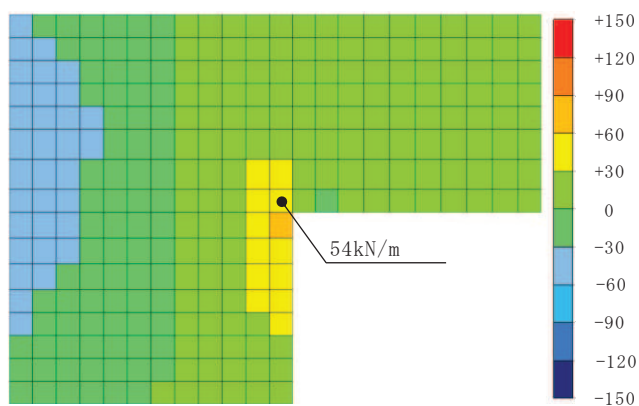
曲げモーメント (kN・m/m) :  $M_y$



軸力 (kN/m) :  $N_x$



軸力 (kN/m) :  $N_y$



面内せん断力 (kN/m) :  $N_{x y}$

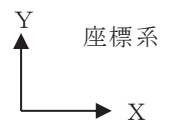


図 3-5 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値ケースの断面力分布図  
(地震時, 解析ケース 1, 隔壁②)

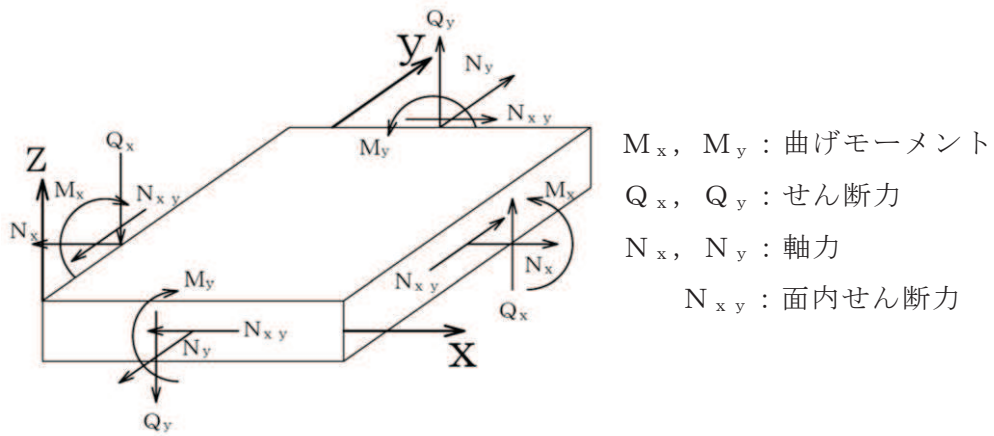


図 3-6 シェル要素における断面力の方向

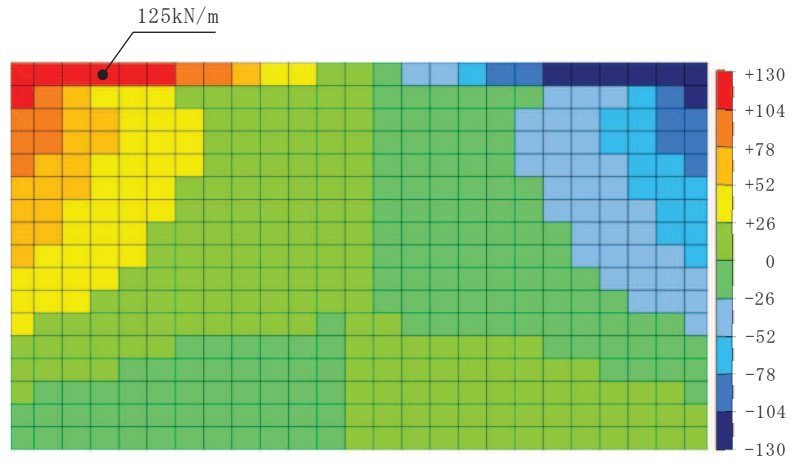
(2) せん断破壊に対する評価結果

せん断破壊に対する照査について、各隔壁における最大照査値を表 3-14 に、最大照査値となる隔壁①の断面力分布図を図 3-7 に示す。また、水密扉を有する隔壁③及び隔壁④の断面力分布図を図 3-8 に示す。

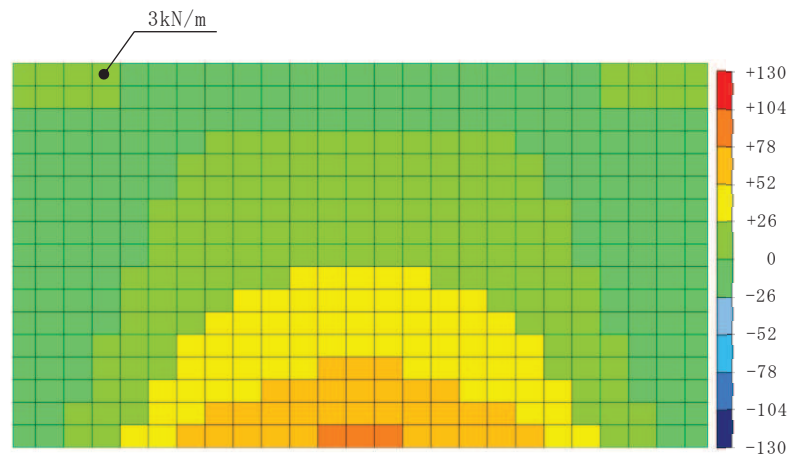
同表より、発生せん断力が、短期許容せん断力を下回ることを確認した。また、水密扉を有する隔壁①、隔壁③及び隔壁④について、最大照査値を示す箇所はいずれも壁面の左上端部付近であり、壁面下端に設置される水密扉の位置はいずれもせん断破壊に対する評価において、厳しくない箇所であることを確認した。

表 3-14 せん断破壊に対する照査（地震時）

部位	解析ケース	発生せん断力 V (kN/m)	短期許容せん断力 V <sub>a</sub> (kN/m)	照査値 V / V <sub>a</sub>
隔壁①	ケース 1	125	164	0.77
隔壁②	ケース 1	84	164	0.52
隔壁③	ケース 1	30	164	0.19
隔壁④	ケース 1	104	164	0.64
隔壁⑤	ケース 1	39	164	0.24
隔壁⑥	ケース 1	70	164	0.43



せん断力 (kN/m) :  $Q_x$



せん断力 (kN/m) :  $Q_y$

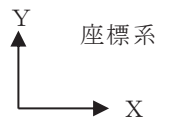


図 3-7 せん断破壊に対する最大照査値ケースの断面力分布図  
(地震時, 解析ケース 1, 隔壁①)



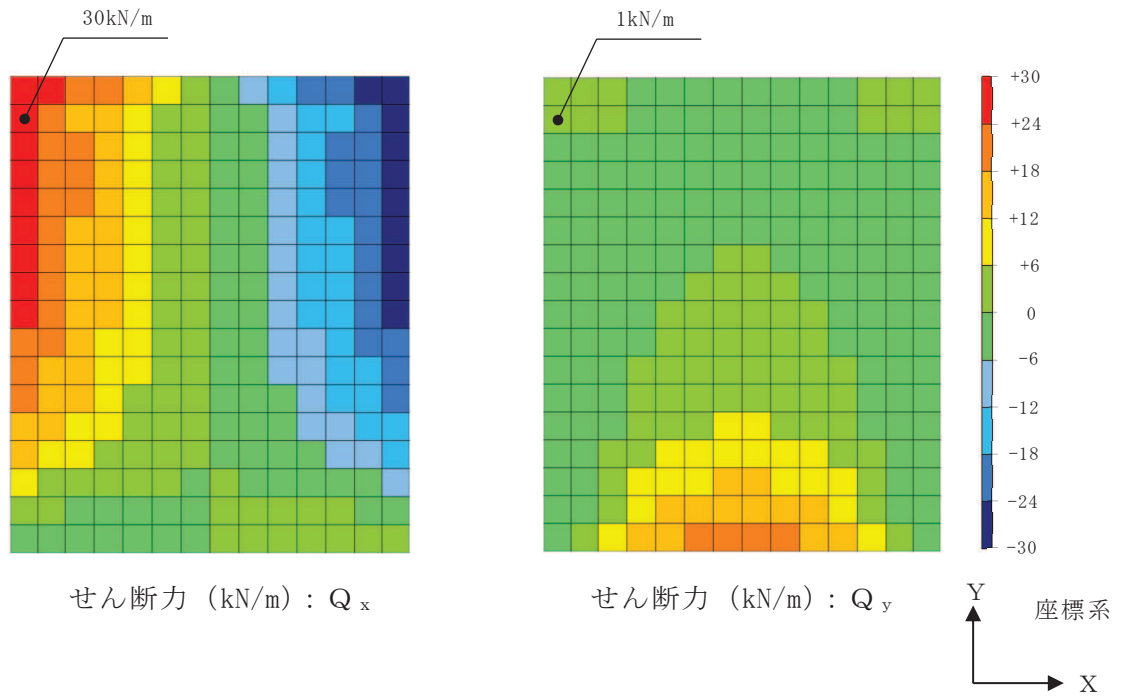


図 3-8(1) 水密扉を有する隔壁のせん断破壊に対する断面力分布図  
(地震時, ケース 1, 隔壁③)

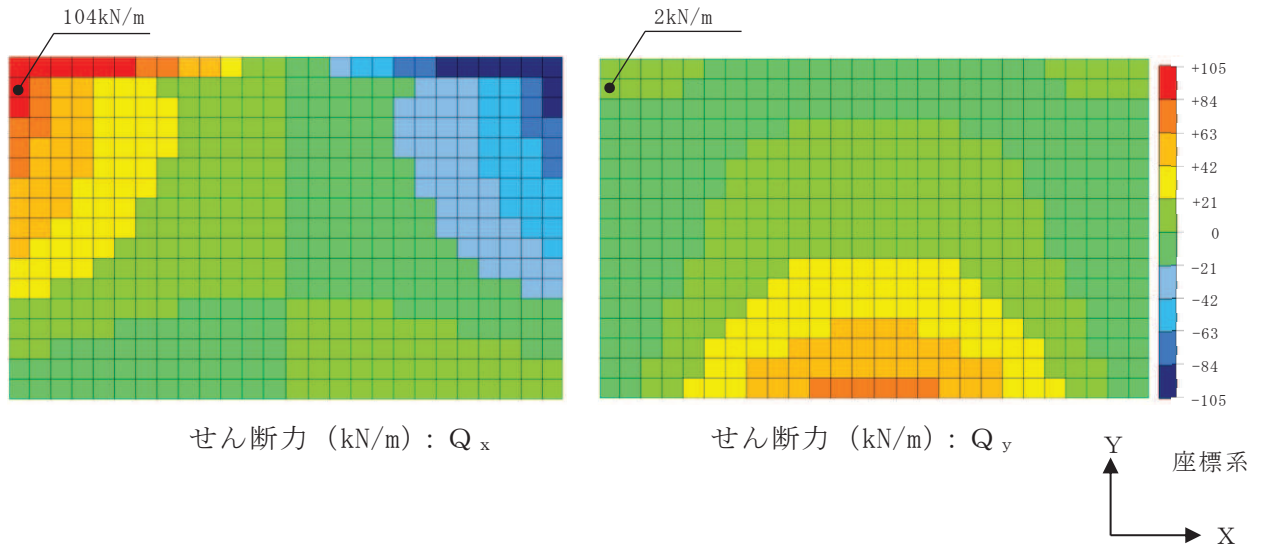


図 3-8(2) 水密扉を有する隔壁のせん断破壊に対する断面力分布図  
(地震時, ケース 1, 隔壁④)

### 3.5.2 Sクラスの施設を支持する機能に対する評価結果

#### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する照査について、隔壁は、短期許容応力度により照査を行うため、地震時におけるSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認は、構造強度を有することの許容限界と同一となることから、「3.5.1 構造強度を有することに対する評価結果」により、コンクリート及び鉄筋の発生応力度が、全隔壁において短期許容応力度を下回ることを確認した。

#### (2) せん断破壊に対する評価結果

せん断破壊に対する照査について、隔壁は、短期許容応力度により照査を行うため、地震時におけるSクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認は、構造強度を有することの許容限界と同一となることから、「3.5.1 構造強度を有することに対する評価結果」により、発生せん断力が、短期許容せん断力を下回ることを確認した。

### 3.5.3 止水機能に対する評価結果

#### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する照査について、各隔壁における最大照査値を表3-15及び表3-16に示す。コンクリート及び鉄筋に対する照査のうち、最大照査値となる隔壁③の断面力分布図を図3-9に示す。

同表より、コンクリート及び鉄筋の発生応力度が、全隔壁において短期許容応力度を下回ることを確認した。

表3-15 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（コンクリート）（溢水時）

部位	解析ケース	曲げモーメント (kN・m/m)	軸力*1 (kN/m)	発生応力度 $\sigma'_{c}$ (N/mm <sup>2</sup> )	短期 許容応力度 $\sigma'_{c a}$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\sigma'_{c} / \sigma'_{c a}$
隔壁①	ケース2	12	-64	0.8	11.7	0.07
隔壁②	ケース2	37	41	3.6	11.7	0.31
隔壁③	ケース2	43	-35	4.5	11.7	0.39
隔壁④	ケース2	26	-45	2.4	11.7	0.21
隔壁⑤	ケース2	-32	-30	3.3	11.7	0.29
隔壁⑥*2	-	-	-	-	-	-

注記\*1：軸力は引張が正

\*2：「3.2.4 荷重の組合せ及び解析ケース」に記載のとおり、水圧は作用しないため対象外。

表3-16 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（鉄筋）（溢水時）

部位	解析ケース	曲げモーメント (kN・m/m)	軸力*1 (kN/m)	発生応力度 $\sigma'_{s}$ (N/mm <sup>2</sup> )	短期 許容応力度 $\sigma'_{s a}$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\sigma'_{s} / \sigma'_{s a}$
隔壁①	ケース2	4	13	24.0	294.0	0.09
隔壁②	ケース2	27	27	166.2	294.0	0.57
隔壁③	ケース2	37	15	207.0	294.0	0.71
隔壁④	ケース2	26	-45	42.0	294.0	0.15
隔壁⑤	ケース2	-27	8	150.8	294.0	0.52
隔壁⑥*2	-	-	-	-	-	-

注記\*1：軸力は引張が正

\*2：「3.2.4 荷重の組合せ及び解析ケース」に記載のとおり、水圧は作用しないため対象外。

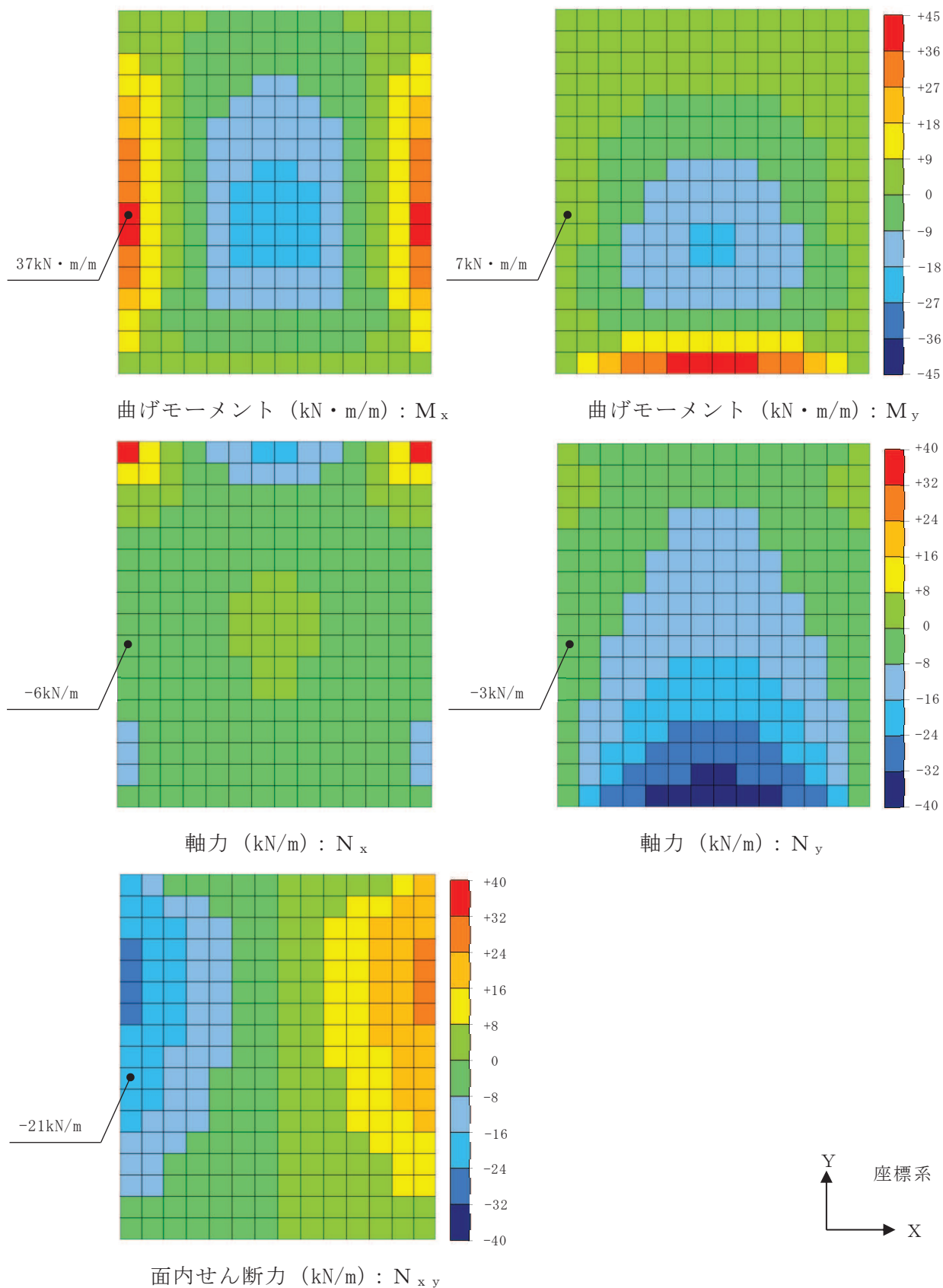


図 3-9 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値ケースの断面力分布図  
(溢水時, 解析ケース 2, 隔壁③)

(2) せん断破壊に対する評価結果

せん断破壊に対する照査について、各隔壁における最大照査値を表 3-17 に、最大照査値となる隔壁③の断面力分布図を図 3-10 に示す。

同表より、発生せん断力が、短期許容せん断力を下回ることを確認した。

表 3-17 せん断破壊に対する照査（溢水時）

部位	解析ケース	発生せん断力 V (kN/m)	短期許容 せん断力 V <sub>a</sub> (kN/m)	照査値 V / V <sub>a</sub>
隔壁①	ケース 2	22	164	0.14
隔壁②	ケース 2	72	164	0.44
隔壁③	ケース 2	83	164	0.51
隔壁④	ケース 2	44	164	0.27
隔壁⑤	ケース 2	73	164	0.45
隔壁⑥*	-	-	-	-

注記\*：「3.3.3 荷重の組合せ」に記載のとおり、水圧は作用しないため対象外。

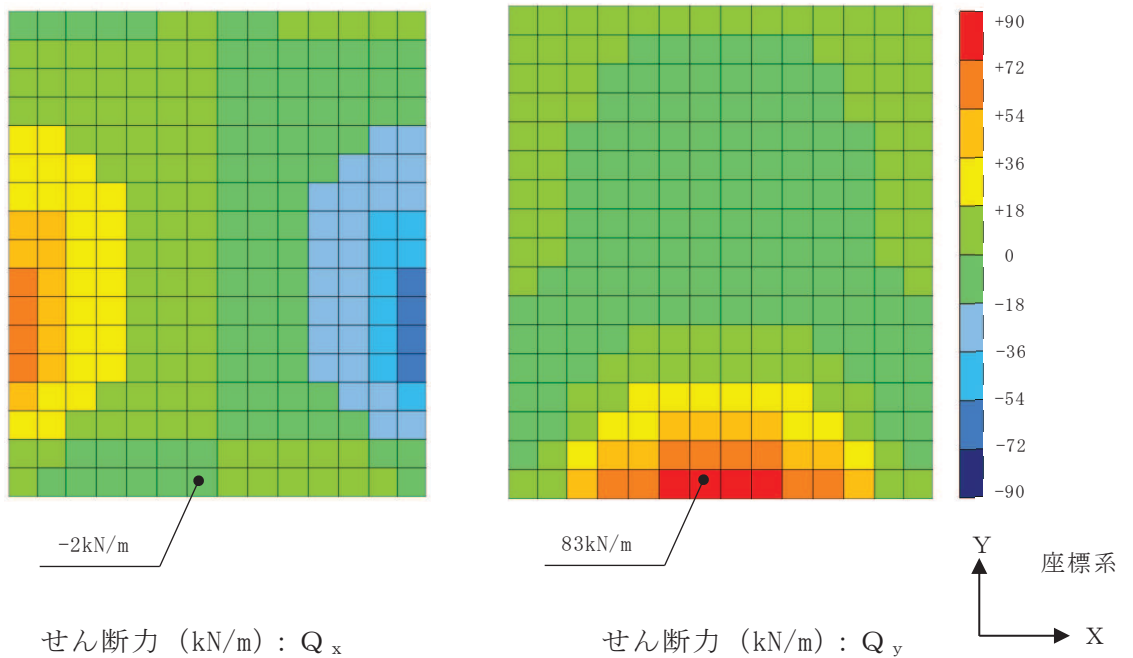


図 3-10 せん断破壊に対する最大照査値ケースの断面力分布図  
(溢水時, 解析ケース 2, 隔壁③)

#### 4. トレンチの健全性評価

##### 4.1 構造概要及び諸元

###### 4.1.1 構造概要

補機ポンプエリアには，図2-2及び図2-3に示すとおり，3つのトレンチが設置されている。トレンチ①～トレンチ③の概略配筋図を図4-1に示す。

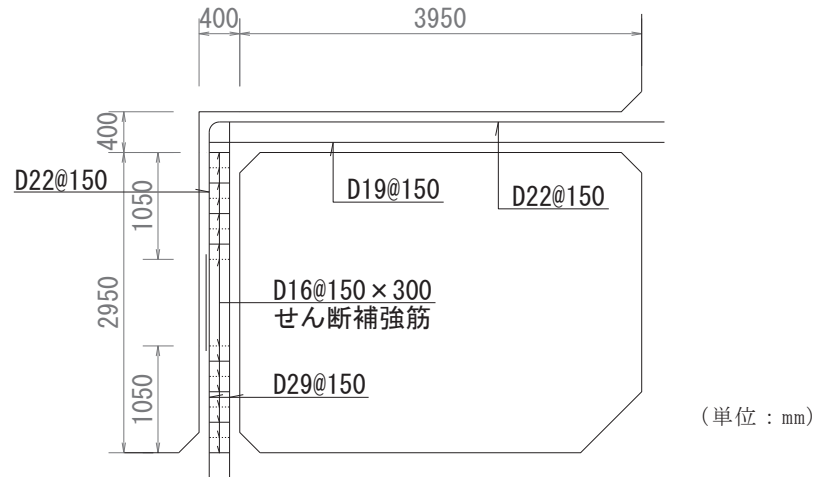


図 4-1(1) 概略配筋図 (トレンチ①)

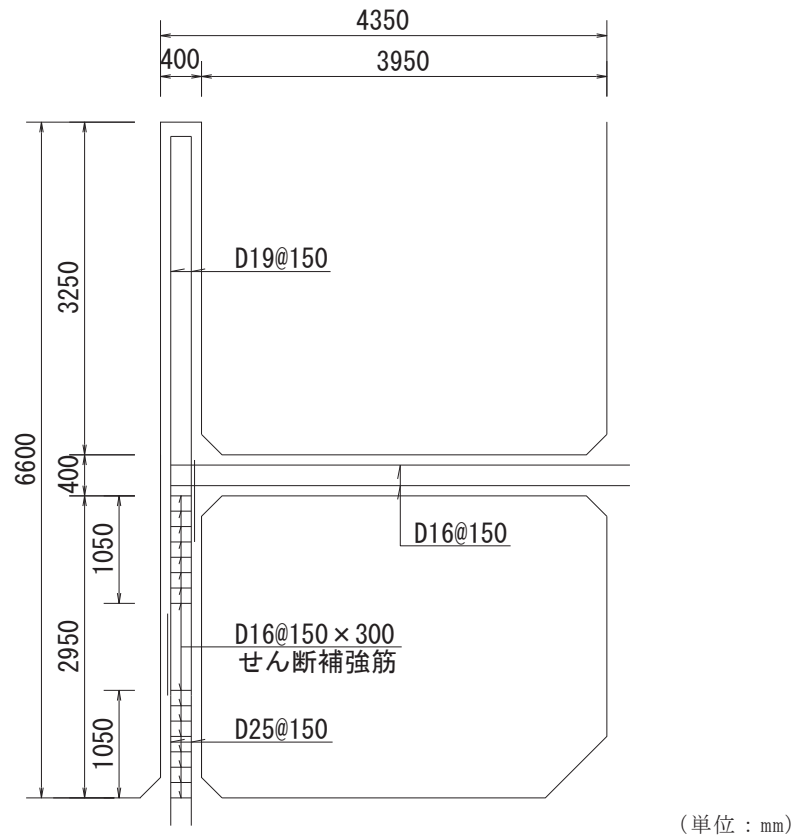


図 4-1(2) 概略配筋図 (トレンチ②)

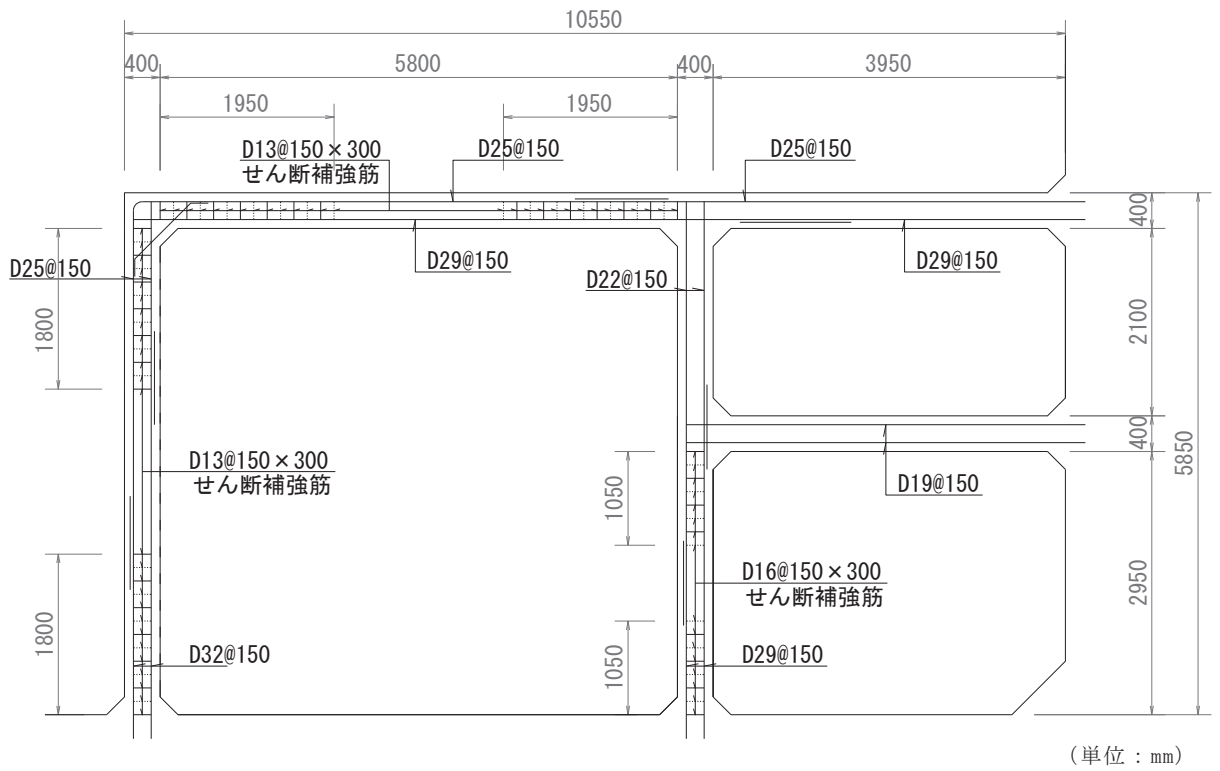


図4-1(3) 概略配筋図 (トレンチ③)

#### 4.1.2 評価構造物諸元

トレンチの諸元を表 4-1 に示す。

表 4-1 評価部位とその仕様

部位	仕様		材料		要求機能	
	部材高, 部材幅 (mm)	部材厚 (mm)	コンクリート 設計基準強度 $f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋		
トレンチ ①	3950 (床版)	400 (床版)	20.5	SD345	地震時	支持機能
	3350 (壁)	400 (壁)			溢水時	止水機能
トレンチ ②	3950 (床版)	400 (床版)	20.5	SD345	地震時	支持機能
	6600 (壁)	400 (壁)			溢水時	止水機能
トレンチ ③	10150 (上床版)	400 (上床版)	20.5	SD345	地震時	支持機能
	3950 (下床版)	400 (下床版)			溢水時	止水機能
	5450 (上流側壁)	400 (上流側壁)				
	5850 (下流側壁)	400 (下流側壁)				



## 4.2 荷重

### 4.2.1 考慮する荷重

地震時及び溢水時の評価にて考慮する荷重を表 4-2 に示す。

表 4-2 考慮する荷重

種別	荷重		算定方法の概要
常時荷重	固定荷重	躯体自重	・対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。
		配管荷重	・配管重量に基づいて設定する。
地震時荷重	慣性力	水平慣性力	・基準地震動 $S_s$ による水平・鉛直同時加振を考慮し、躯体及び配管に作用する慣性力を設定する。
		鉛直慣性力	
	強制変位		・海水ポンプ室隔壁の強制変位を考慮する。
溢水時荷重	静水圧		・機器の想定破損時に生じる溢水による床面からの最大水位を考慮する。

#### 4.2.2 地震時の荷重

地震時の評価において、考慮する荷重を以下に示す。

##### (1) 躯体自重

固定荷重として、躯体自重を考慮する。対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。

##### (2) 配管荷重

固定荷重として、配管荷重を考慮する。隔壁の側面には、配管荷重を部材全体に分布荷重として載荷する。

##### (3) 慣性力

基準地震動  $S_s$  による躯体及び配管に作用する慣性力を考慮する。

慣性力は、海水ポンプ室の地震応答解析モデルにおける鉄筋コンクリート部材の各節点の応答加速度から算定する。応答加速度の抽出位置の一例を図4-2に示す。水平方向及び鉛直方向の加速度の抽出位置は、鉄筋コンクリート部材位置に当たる全節点とする。基準地震動  $S_s$  波（7波）に水平動の位相反転を考慮した地震動（7波）を加えた14波を包絡させた応答加速度を作成し、このうち最も大きい加速度を震度換算して、保守的に躯体全体に一様に載荷する。

なお、荷重の載荷方向を考慮し、応答加速度は、海水ポンプ室の南北断面（強軸断面）の地震応答解析による応答値から算出する。

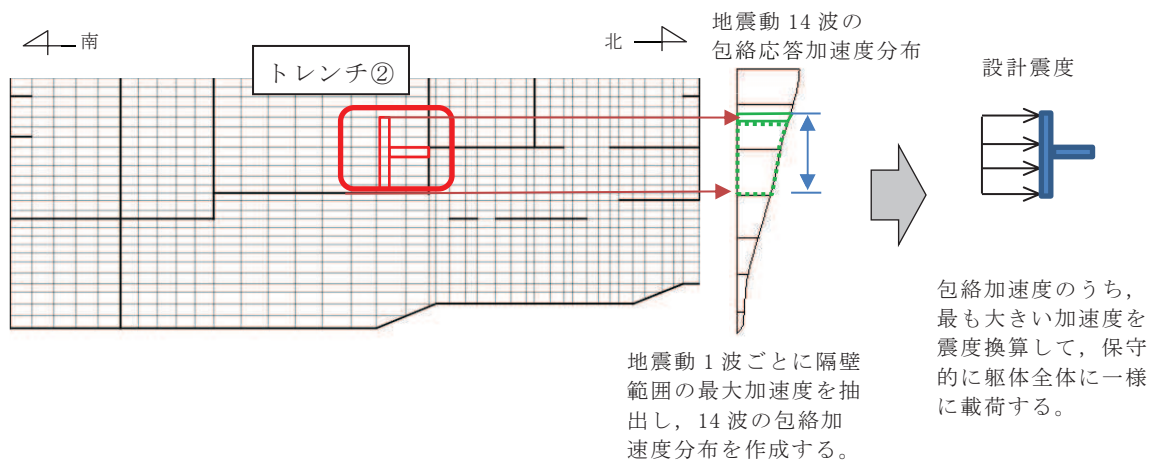


図 4-2 応答加速度の抽出位置と設計震度の算出方法（トレンチ②の例）

#### (4) 強制変位

トレンチは、ボックスカルバート状の構造であり、検討断面（弱軸断面）において、海水ポンプ室の隔壁と交わることから、慣性力に加え、保守的に海水ポンプ室隔壁の強制変位を考慮する。

具体的には、海水ポンプ室の地震応答解析（基準地震動  $S_s$  波（7 波）に水平動の位相反転を考慮した地震動（7 波）を加えた 14 波）における、トレンチと隔壁の交点における最大変位を、強制変位として交点に入力することとし、南北断面（強軸断面）の地震応答解析による応答値を用い、トレンチの下端位置と海水ポンプ室隔壁との交点高さ位置の相対変位を強制変位として考慮する。

強制変位の概念図を図 4-3 に示す。

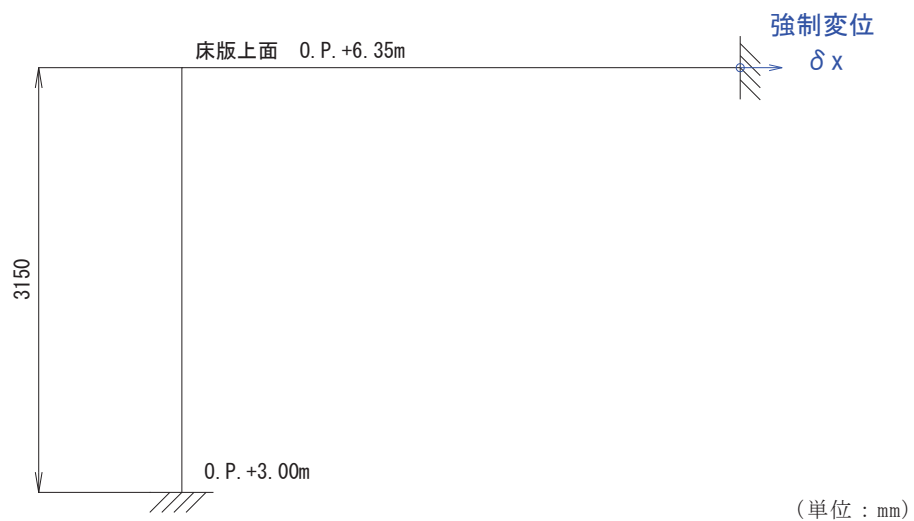


図4-3 強制変位の概念図（トレンチ①の例）

#### 4.2.3 溢水時の荷重

溢水時の評価において、考慮する荷重を以下に示す。

##### (1) 躯体自重

固定荷重として、躯体自重を考慮する。対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。

##### (2) 配管荷重

固定荷重として、配管荷重を考慮する。トレンチの側面には、配管荷重を部材全体に分布荷重として載荷する。トレンチの頂版には集中荷重として載荷する。

##### (3) 静水圧

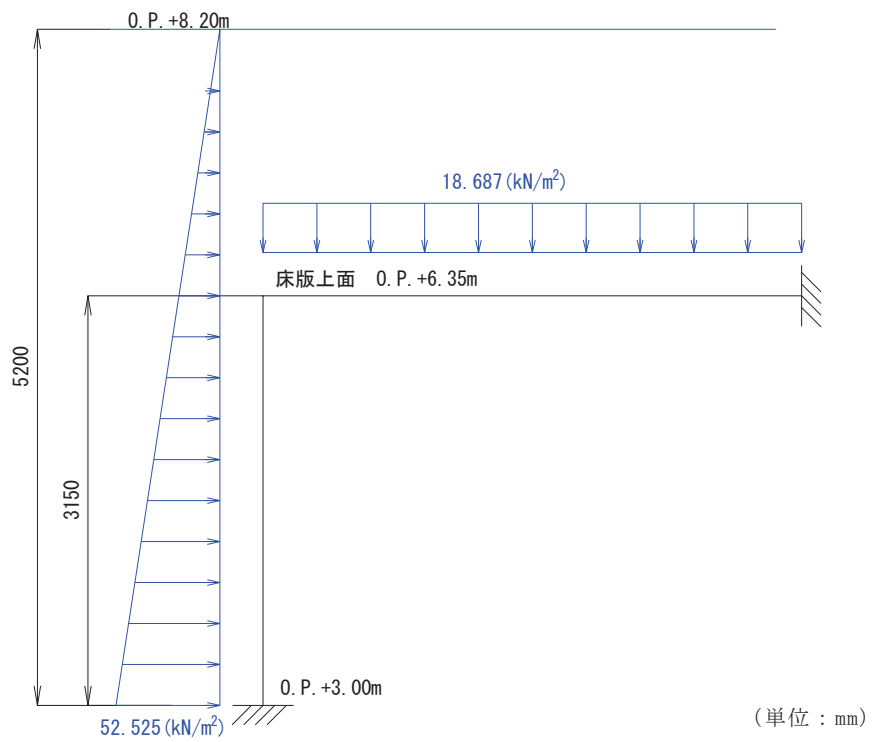
単一機器の破損に伴う溢水時の最大水位を、静水圧分布荷重として考慮する。各系統の機器破損に伴う最大水位を表 4-3 に示す。

トレンチについては、各系統での溢水ケースを別々に想定して、トレンチの各部材に水圧を作用させる。作用荷重の概念図の一例を図 4-4 に示す。

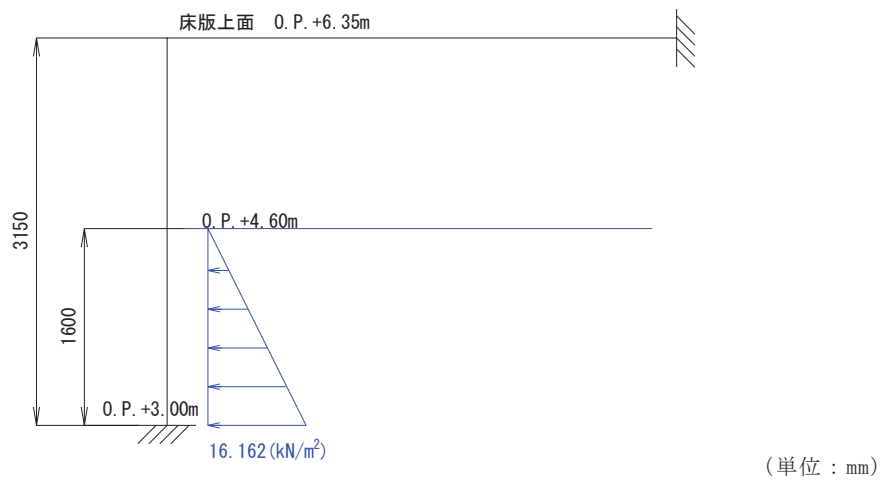
表 4-3 各系統の機器の想定破損に伴う最大水位

各系統*	最大水位	備考
RSW ポンプ室 (A 系)	静水面 0. P. +6. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 3. 20m
TSW ポンプ室	静水面 0. P. +5. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 2. 20m
HPSW ポンプ室	静水面 0. P. +8. 20m	床面 (0. P. +3. 00m) から 5. 20m
RSW ポンプ室 (B 系)	静水面 0. P. +4. 60m	床面 (0. P. +3. 00m) から 1. 60m

注記\* : 海水ポンプ室補機ポンプエリアの系統の分離図は図 2-4 に示す。



荷重図 (HPSW ポンプの溢水時ケース)



荷重図 (RSW ポンプ (B 系) 溢水時ケース)

図 4-4 作用荷重の概念図 (水圧 : トレンチ①の例)

#### 4.2.4 荷重の組合せ及び解析ケース

##### (1) 地震時

地震時の荷重の組合せを表 4-4 に、入力荷重の一覧を表 4-5 に、解析ケースを表 4-6 に示す。

表 4-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時	固定荷重＋地震時荷重

表 4-5 入力荷重一覧（地震時）

入力荷重		地震応答解析から抽出する応答値	載荷位置
固定荷重	躯体自重，配管荷重	—	躯体全体
地震時荷重	慣性力	躯体の慣性力	躯体全体
		配管の慣性力	躯体全体
	強制変位*		応答変位

注記\*：トレンチの評価については、検討断面（弱軸断面）と海水ポンプ室隔壁が交わることから、慣性力（最大応答加速度）に加え、海水ポンプ室縦断方向の地震応答解析から算出される海水ポンプ室隔壁の最大応答変位を保守的に強制変位として考慮する。

表 4-6 地震時の解析ケース

部位	解析ケース	入力荷重
トレンチ ①～③	ケース 1	水平慣性力（右向き）＋鉛直慣性力（下向き）＋強制変位*
	ケース 2	水平慣性力（右向き）＋鉛直慣性力（上向き）＋強制変位*
	ケース 3	水平慣性力（左向き）＋鉛直慣性力（下向き）＋強制変位*
	ケース 4	水平慣性力（左向き）＋鉛直慣性力（上向き）＋強制変位*

注記\*：強制変位は、水平慣性力と同方向に作用させる。

(2) 溢水時

溢水時の荷重の組合せを表 4-7 に、入力荷重の一覧を表 4-8 に、解析ケースを表 4-9 に示す。

表 4-7 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
溢水時	固定荷重+溢水時荷重

表4-8 入力荷重一覧（溢水時）

入力荷重		算出方法	載荷位置
固定荷重	躯体自重, 配管荷重	躯体自重は対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。配管荷重は、配管の重量に基づき設定する。	躯体全体
溢水時荷重	静水圧	各系統での単一機器の破損による最大水位	床面～最大水位

表 4-9 溢水時の解析ケース

部位	解析ケース	設定水位
トレンチ①	ケース 1	HPSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	RSW ポンプ室エリア (B 系) の水位
トレンチ②	ケース 1	HPSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	TSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 3	RSW ポンプ室エリア (B 系) の水位
トレンチ③	ケース 1	HPSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 2	TSW ポンプ室エリアの水位
	ケース 3	RSW ポンプ室エリア (A 系) の水位
	ケース 4	RSW ポンプ室エリア (B 系) の水位

### 4.3 構造解析

#### 4.3.1 解析方法

トレンチは、非線形はり要素であるファイバーモデルを用いて二次元静的非線形解析による評価を行う。解析コードは「TDAP 3.10.01」を使用する。

#### 4.3.2 構造物のモデル化

ボックスカルバート状の線状構造物であるトレンチは、構造部材を非線形はり要素でモデル化する。解析モデルの概念図を図4-5に示す。

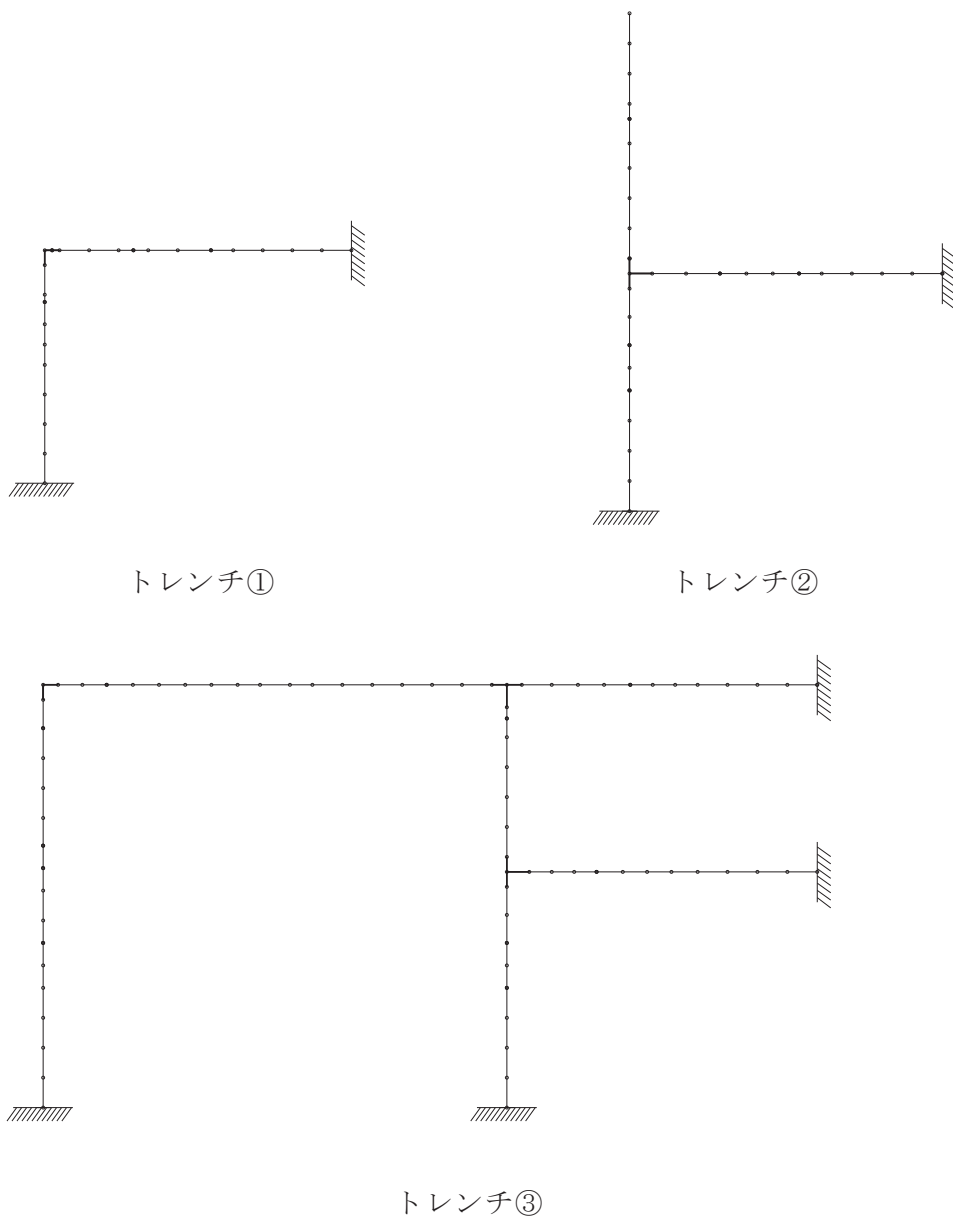


図4-5 解析モデルの概念図



#### 4.3.3 境界条件

トレンチの境界は、部材が厚く剛性の大きい海水ポンプ室本体（隔壁及び中床版）と交わり、トレンチとの境界は鉄筋で一体化されていることから、境界部は固定条件とする。

#### 4.3.4 材料の非線形特性

トレンチの評価において、非線形はり要素であるファイバーモデルを用いる材料の非線形特性は、コンクリート標準示方書に基づき設定する。

ファイバーモデルの概念図を図 4-6 に、ファイバーモデルに用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、及び鉄筋の応力-ひずみ関係を図 4-7 に示す。

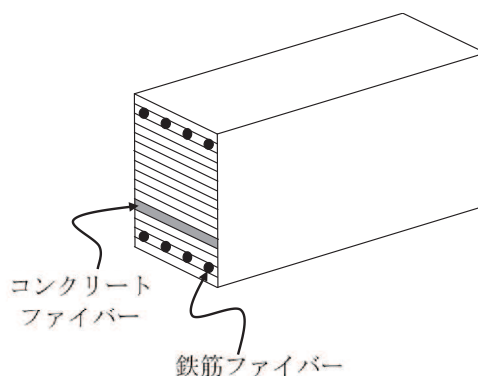


図 4-6 ファイバーモデルの概念図

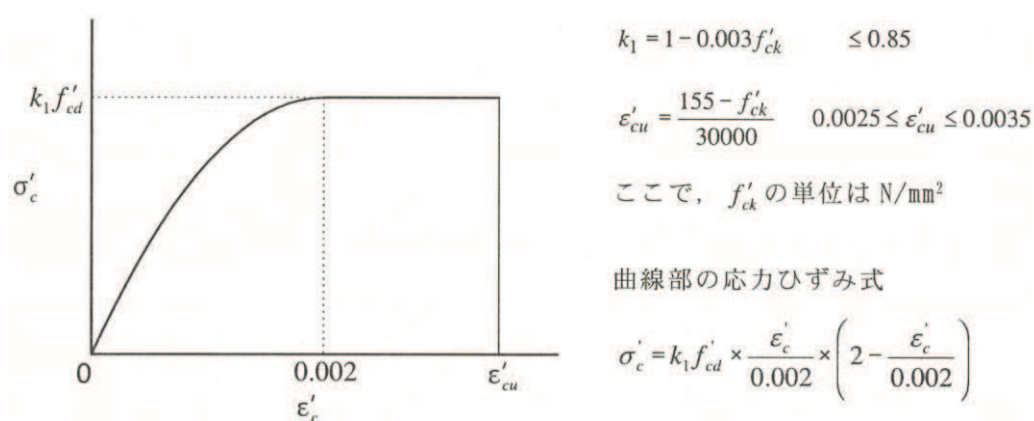


図 4-7(1) コンクリートの応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書より引用)

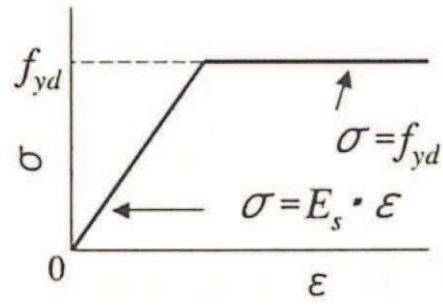


図 4-7(2) 鉄筋の応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書より引用)

#### 4.4 許容限界

##### 4.4.1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

非線形はり要素によりモデル化するトレンチの、地震時の構造強度を有することの確認における許容限界は、土木学会マニュアルに基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ：1.0%（10000 $\mu$ ））とする。

また、地震時のSクラスの施設を支持する機能を損なわないこと、及び溢水時の止水機能を損なわないことの確認における曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、コンクリート標準示方書に基づき、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみについて、部材降伏に相当するひずみ（コンクリートの圧縮ひずみ：2000 $\mu$ ，主筋ひずみ：1725 $\mu$ ）とする。

曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表4-10に示す。

表4-10 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	限界ひずみ	圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%（10000 $\mu$ ）*1
Sクラスの施設を支持する機能を損なわないこと		圧縮ひずみ：2000 $\mu$ *2 主筋ひずみ：1725 $\mu$ *2
止水機能を損なわないこと		圧縮ひずみ：2000 $\mu$ *2 主筋ひずみ：1725 $\mu$ *2

注記\*1： $\gamma_i \cdot \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_R} < 1.0$

ここで、

$\gamma_i$ ：構造物係数（ $\gamma_i=1.0$ ）

$\varepsilon_R$ ：限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ：10000 $\mu$ ）

$\varepsilon_d$ ：照査用ひずみ（ $\varepsilon_d=\gamma_a \cdot \varepsilon$ ）

$\gamma_a$ ：構造解析係数（ $\gamma_a=1.2$ ）

$\varepsilon$ ：圧縮縁の発生ひずみ

注記\*2： $\gamma_i \cdot \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_R} < 1.0$

ここで、

$\gamma_i$ ：構造物係数（ $\gamma_i=1.0$ ）

$\varepsilon_R$ ：限界ひずみ（圧縮ひずみ：2000 $\mu$ ，主筋ひずみ：1725 $\mu$ ）

$\varepsilon_d$ ：照査用ひずみ（ $\varepsilon_d=\gamma_a \cdot \varepsilon$ ）

$\gamma_a$ ：構造解析係数（ $\gamma_a=1.2$ ）

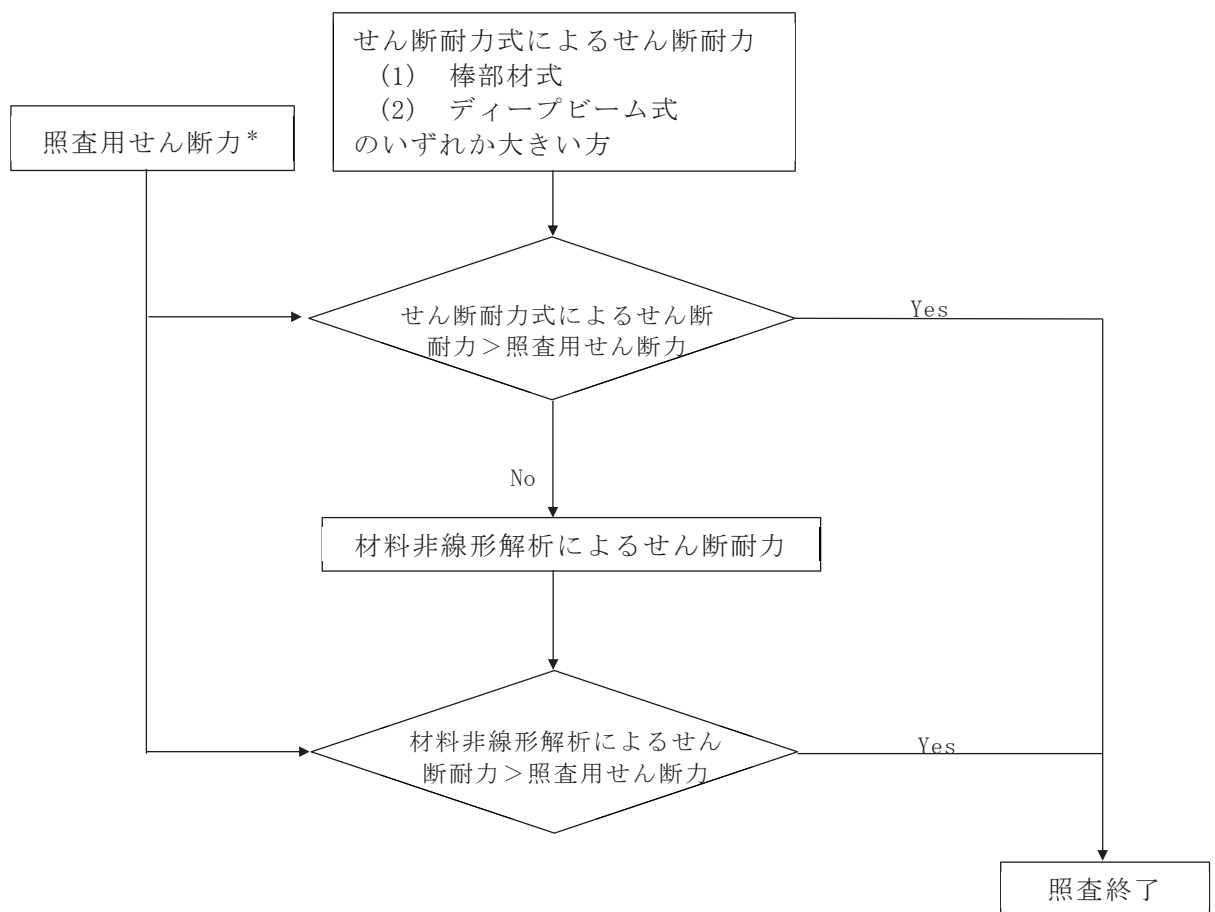
$\varepsilon$ ：発生ひずみ

#### 4.4.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）

非線形はり要素によりモデル化するトレンチの構造強度を有することの確認，Sクラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認，及び止水機能を損なわないことの確認における，せん断破壊に対する許容限界は，土木学会マニュアルに基づくせん断耐力とする。

せん断耐力は，土木学会マニュアルに基づき「(1) 棒部材式」，「(2) ディープビーム式」のせん断耐力式で求まるせん断耐力のうち，いずれか大きい方とする。

また，せん断耐力式による照査において照査用せん断力が上記のせん断耐力を上回る場合，材料非線形解析により部材のせん断耐力を求め許容限界とする。せん断破壊に対する照査フローを図4-8に示す。



注記\*：照査用せん断力  $V_d = \text{発生せん断力} V \times \text{構造解析係数}$

図4-8 せん断破壊に対する照査フロー

a. 棒部材式

$$V_{y d} = V_{c d} + V_{s d}$$

ここで、 $V_{y d}$  : せん断耐力

$V_{c d}$  : コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{s d}$  : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{c d} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{v c d} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{b c}$$

$$f_{v c d} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{c d}} \quad \text{ただし、} f_{v c d} > 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ となる場合は}$$

$$f_{v c d} = 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1 / d} \quad (d \text{ [m]}) \quad \text{ただし、} \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + M_0 / M_d \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 2 M_0 / M_d \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし、} \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a / d} \quad \text{ただし、} \beta_a < 1.0 \text{ となる場合は } \beta_a = 1.0$$

ここで、 $f'_{c d}$  : コンクリート圧縮強度の設計用値(N/mm<sup>2</sup>)で設計基準強度  $f'_{c k}$  を材料係数  $\gamma_{m c}$  で除したもの

$$p_v : \text{引張鉄筋比} \quad p_v = A_s / (b_w \cdot d)$$

$A_s$  : 引張側鋼材の断面積

$b_w$  : 部材の有効幅

$d$  : 部材の有効高さ

$N'_d$  : 設計軸圧縮力

$M_d$  : 設計曲げモーメント

$M_0$  :  $M_d$  に対する引張縁において、軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要なモーメント (デコンプレッションモーメント)

$$M_0 = N'_d \cdot D / 6$$

$D$  : 断面高さ

$a/d$  : せん断スパン比

$\gamma_{bc}$  : 部材係数

$\gamma_{mc}$  : 材料係数

$$V_{sd} = \left\{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \right\} z / \gamma_{bs}$$

$A_w$  : 区間  $s$  におけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{wyd}$  : せん断補強鉄筋の降伏強度を  $\gamma_{ms}$  で除したもので、 $400\text{N/mm}^2$  以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値  $f'_{ck}$  が  $60\text{N/mm}^2$  以上のときは  $800\text{N/mm}^2$  以下とする。

$\alpha$  : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度

$s$  : せん断補強鉄筋の配置間隔

$z$  : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で  $d/1.15$  とする。

$\gamma_{bs}$  : 部材係数

$\gamma_{ms}$  : 材料係数

b. デイープビーム式

$$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$$

ここで、 $V_{ydd}$  : せん断耐力

$V_{cdd}$  : コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{sdd}$  : せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc}$$

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

ここで、 $\gamma_{bc}$  : 部材係数

$$V_{sdd} = \phi \cdot V_{sd}$$

$$\phi = -0.17 + 0.3 a/d + 0.33/p_{wb} \quad \text{ただし } 0 \leq \phi \leq 1$$

ここで、 $p_{wb}$  : せん断補強鉄筋比 (%)

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式のうち棒部材式において等価せん断スパンにより設定可能な係数 $\beta_a$ を考慮している。これは、地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に曲げモーメントの反曲点が存在する等の载荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化したものである。

また、土木学会マニュアルにおけるせん断耐力式による評価においては、表4-11に示すとおり、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表4-11 せん断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{mc}$	1.0	1.3	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	$\gamma_s$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{bc}$	—	1.3	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	$\gamma_{bs}$	—	1.1	せん断補強筋が負担するせん断力を低減
構造解析係数		$\gamma_a$	1.05	—	応答値(断面力)の割り増し

注記\*：土木学会マニュアルでは、部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b1} \times \gamma_{b2}$

$$\gamma_{b1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ (100R + 2)/3 & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで、R：応答層間変形角とされている。

$\gamma_{b2}$ は層間変形角の値によらず、部材が降伏していない状態であれば、 $\gamma_{b2} = 1.0$ としてよいとされている。解析結果からトレンチの鉄筋コンクリート部材については降伏が認められなかったため、 $\gamma_{b2} = 1.0$ とする。



#### 4.4.3 せん断破壊に対する許容限界（材料非線形解析によるせん断耐力）

##### (1) 評価条件

図 4-8 のせん断破壊に対する照査フローに示すとおり、照査用せん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析によりせん断耐力を算定し、せん断耐力が照査用せん断力を上回ることを確認する。

「4.4.2 せん断破壊に対する許容限界（せん断耐力式によるせん断耐力）」で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

表 4-12 及び表 4-13 に材料非線形解析の概要を示す。

材料非線形解析は、90 年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、コンクリート標準示方書 2017 や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書 2017 において標準とされる以下の手法とする。

- ① 鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ② 鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③ 鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用に当たっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

材料非線形解析においては、解析コード「WCOMD Studio Ver.1.00.02」を使用する。

表 4-12 材料非線形解析の位置付け（土木学会マニュアル）

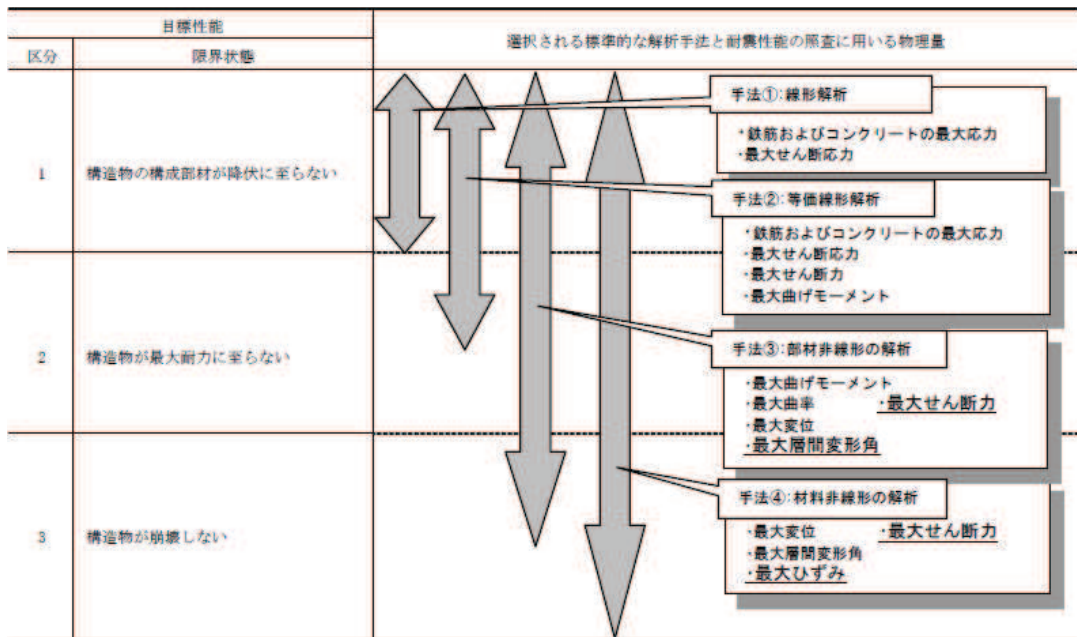


表 4-13 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モデル化	骨組モデル		有限要素	
解析次元	一次元		二次元	三次元
構成則	M- $\Phi$ , M- $\theta$ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性)		狭い ← → 広い	
	(解析時間)		短い ← → 長い	

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書2017等に基づき実施する。表4-14に参考とする主な基準等を示す。

表4-14 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 材料特性	・コンクリート標準示方書2017 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認。

b. 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表4-15及び表4-16に示す。

表4-15 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度 (20.5N/mm <sup>2</sup> ) / 材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 / 材料係数*
圧縮ピークひずみ	2000 μ	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ-せん断伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を1.3として算出

表4-16 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017
降伏強度	主鉄筋	2000 N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断補強筋	345 N/mm <sup>2</sup>	SD345

c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、構造部材の壁厚（400 mm）及び鉄筋径等の関係から、鉄筋の付着の影響が及ぶ2層の鉄筋コンクリート要素としてモデル化する。要素分割の概要を図4-9に示す。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル端部を固定境界とする。

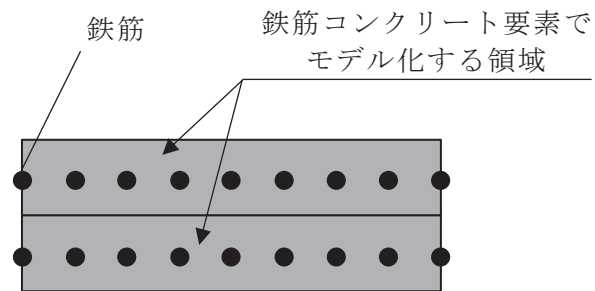


図4-9 要素分割の概要

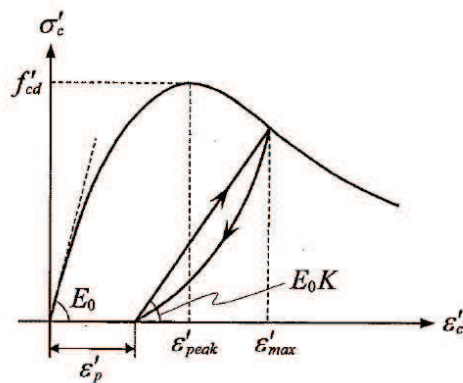
d. コンクリートの非線形特性

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 4-10 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 4-11 に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

ここに、

$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 4-10 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

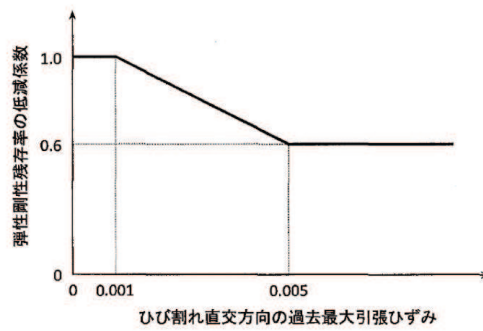
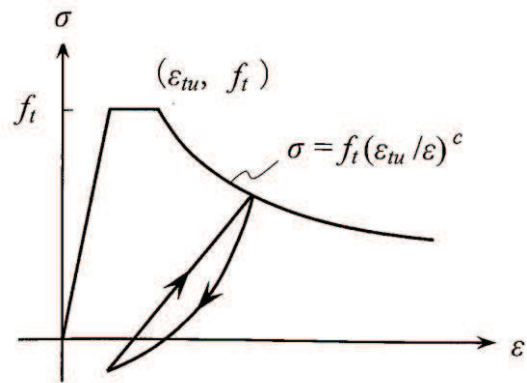


図 4-11 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 4-12 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、図 4-13 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f / L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $c$  を用いる。



ここに、 $f_t$  : 引張強度  
 $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ  
 $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 4-12 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの  
 付着効果を考慮した応力-ひずみ関係  
 (コンクリート標準示方書 2017 より引用)

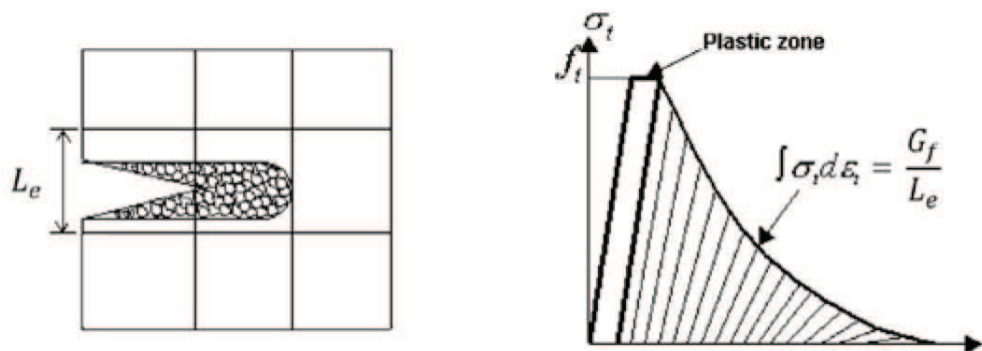
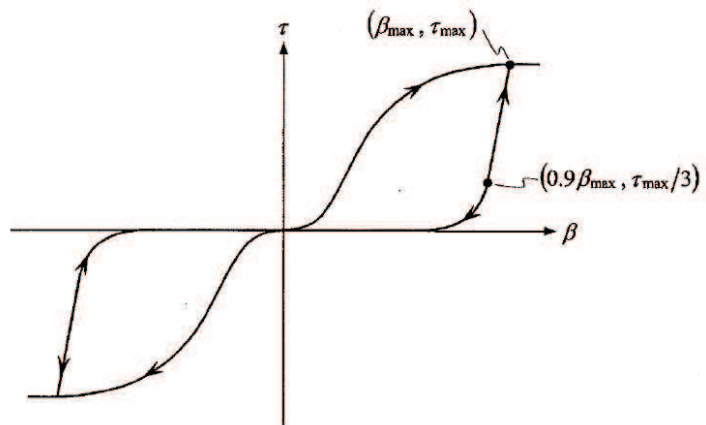


図 4-13 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 4-14 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ  $\gamma$  とひび割れ開口ひずみ  $\epsilon$  の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ  $\gamma$  とひび割れ開口ひずみ  $\varepsilon$  の比  
 $(\gamma / \varepsilon)$

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ  $\gamma$  とひび割れ開口ひずみ  $\varepsilon$  の比

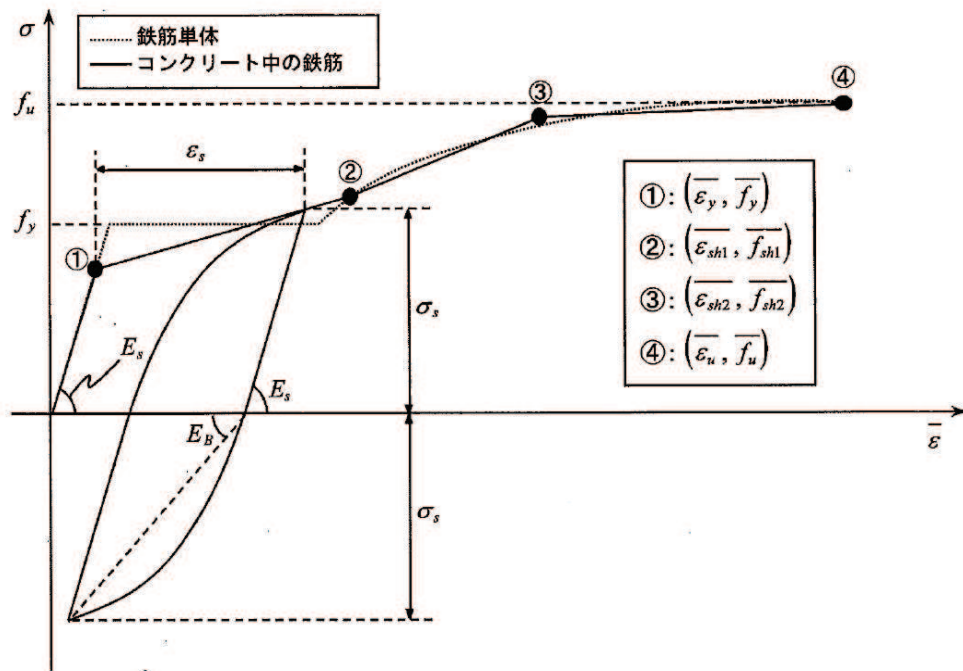
図 4-14 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)



e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係は，単体鉄筋の応力ーひずみ関係と異なり，図 4-15 に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- $f_y$  : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_u$  : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_y$  : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- $p$  : 鉄筋比
- $f_1$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図 4-15 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力ー平均ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \bar{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \bar{\sigma}_C$$

ここに、 $\bar{\sigma}_S$ ,  $\bar{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ ,  $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積,  $A_{RC} = A_S + A_C$

g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、二次元静的非線形解析（部材非線形解析）により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震時と同様である。

(2) 評価内容

a. 耐震評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを図 4-16 に示す。

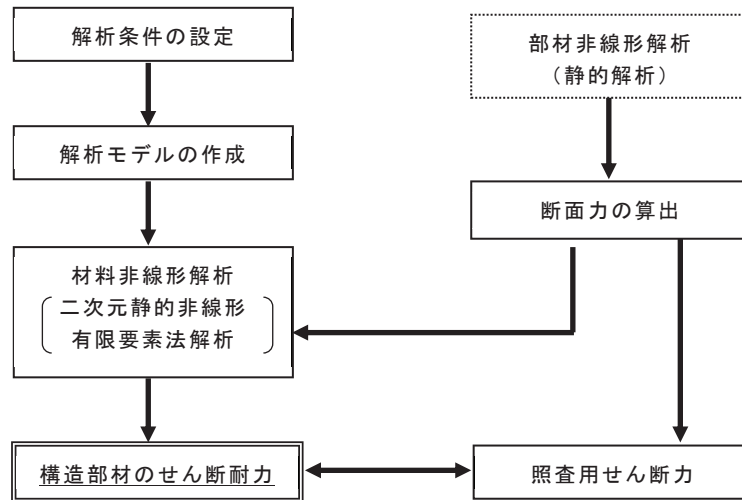


図 4-16 材料非線形解析の耐震評価フロー

b. 荷重の設定

材料非線形解析にて考慮する荷重は、部材非線形解析（静的解析）により得られる荷重を考慮する。具体的には、部材非線形解析で評価対象部材の断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 4-17 に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、部材非線形解析で得られる断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重を、図 4-18 に示すとおり载荷し材料非線形解析を実施する。

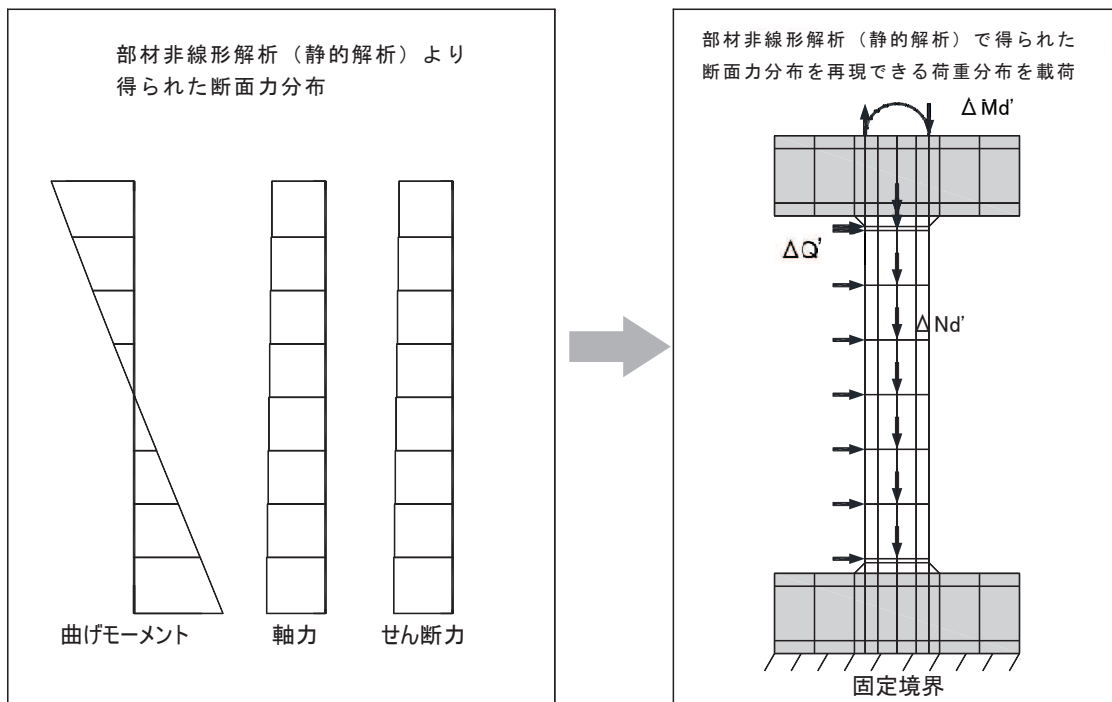


図 4-17 材料非線形解析における荷重状況

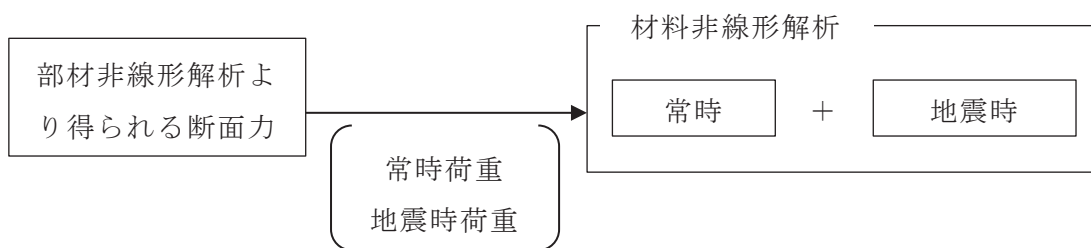


図 4-18 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析における固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係から設定する。具体的には、図 4-19 に示す例のとおり、固定端反力  $P$  - 相対変位  $\delta$  関係においてせん断力の増分に対して相対変位  $\delta$  が急増する直前の点を部材のせん断耐力と判断する。

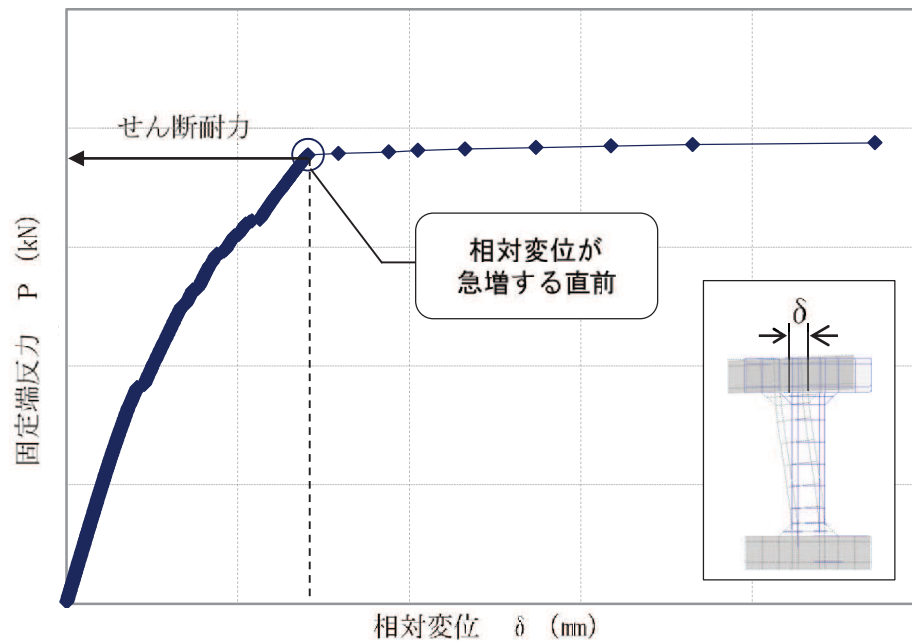


図 4-19 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、部材非線形解析（静的解析）で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、以下のとおり部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定結果を表 4-17 に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 7 の部材係数 1.13 を設定する（表 4-18）。

表 4-17 考慮する安全係数の設定結果

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.13	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.0	地震応答解析による層間変形角等より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_m$	1.3	文献に基づく標準的な値を設定

表 4-18 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定結果

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	422.8	0.89	
2	1087	1258.2	1.06	
3	324	356.4	1.10	
4	294	308.7	1.05	
5	581	510.3	0.88	
6	329	335.6	1.02	
7	1587	1793.3	1.13	最大値
8	350	392.0	1.12	
9	855	880.7	1.03	
10	165	102.3	0.62	
10	333	316.4	0.95	
12	127	100.3	0.79	
13	188	108.4	0.63	
14	163	107.4	0.72	
15	273	177.5	0.65	
16	356	291.9	0.82	
17	432	246.2	0.57	

#### 4.5 評価結果

##### 4.5.1 構造強度を有することに対する評価結果

###### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-19 に示す。また、最大照査値を示すトレンチ②について、コンクリートの圧縮縁ひずみの最大値の発生位置とその値を図 4-20 に、最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図を図 4-21 に示す。

すべてのトレンチにおいて、照査用ひずみが、許容限界（コンクリートの圧縮縁ひずみ：10000 $\mu$ ）を下回ることを確認した。

表 4-19 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（コンクリートの圧縮縁ひずみ）  
（地震時）

部位	解析ケース	照査用ひずみ* $\epsilon_d$	限界ひずみ $\epsilon_R$	照査値 $\epsilon_d / \epsilon_R$
トレンチ①	ケース 3	188 $\mu$	10000 $\mu$	0.02
トレンチ②	ケース 4	315 $\mu$	10000 $\mu$	0.04
トレンチ③	ケース 3	198 $\mu$	10000 $\mu$	0.02

注記\*：照査用ひずみ＝発生ひずみ×構造解析係数 $\gamma_a$

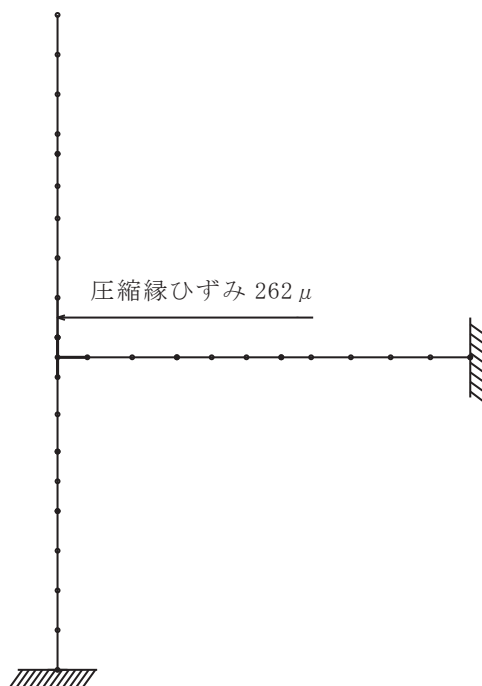


図 4-20 最大照査時におけるコンクリートの圧縮縁ひずみの発生位置  
（地震時，解析ケース 4，トレンチ②）

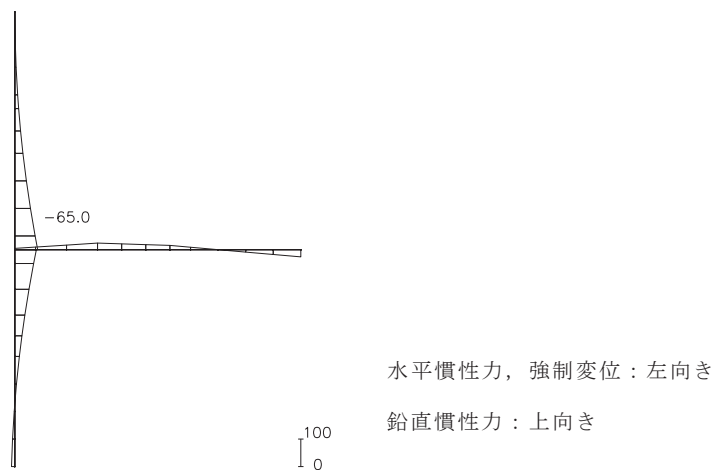


図 4-21(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
 (曲げモーメント (kN・m/m)) (地震時, 解析ケース 4, トレンチ②)

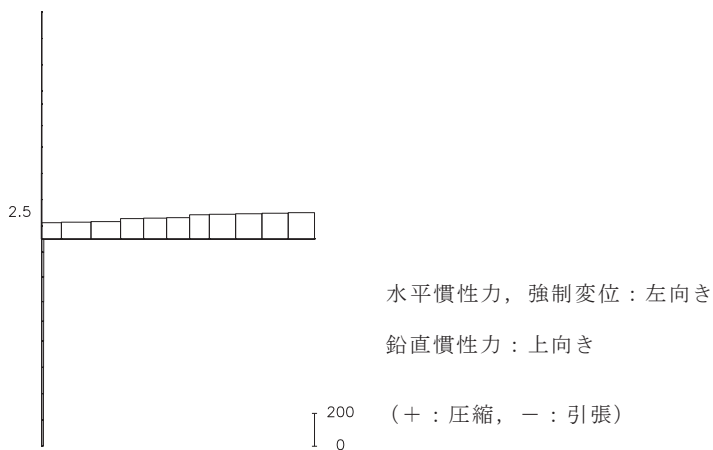


図 4-21(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
 (地震時, 解析ケース 4, トレンチ②)

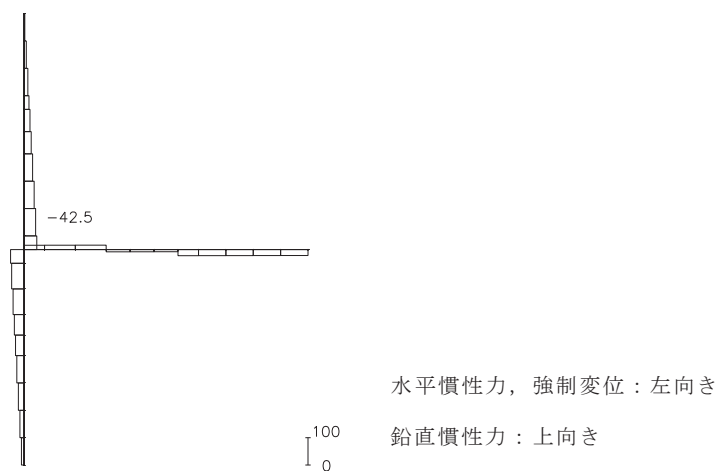


図 4-21(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
 (地震時, 解析ケース 4, トレンチ②)



(2) せん断破壊に対する評価結果

せん断破壊に対する照査について、各トレンチの各部材における最大照査値を表 4-20 に示す。また、トレンチ①～③について、最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図を図 4-22～図 4-24 に示す。

同表より、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 4-20 せん断破壊に対する評価結果（地震時）

部位	部材*1	解析ケース	照査用せん断力*2,*3 $V_d$ (kN/m)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN/m)	照査値 $V_d / V_{y d}$
トレンチ①	壁	ケース 4	27	589*4	0.05
	床	ケース 3	52	101*4	0.52
トレンチ②	床-1	ケース 3	43	66*4	0.66
	壁-1	ケース 2, 4	45	134	0.34
	壁-2	ケース 2	15	129*4	0.12
トレンチ③	床-1	ケース 4	3	13*4	0.24
	床-2	ケース 3	37	69*4	0.54
	床-3	ケース 3	35	94*4	0.38
	壁-1	ケース 3	24	233	0.11
	壁-2	ケース 2	14	138	0.11
	壁-3	ケース 3	34	296	0.12

注記\*1：部材名称は図 4-25 に示す。

\*2：照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析を実施したケースは、材料非線形解析時の照査用せん断力の値を示す。

\*4：材料非線形解析によるせん断耐力を示す。なお、材料非線形解析を実施した部材及び解析ケースはいずれも、せん断補強筋が配置されていない部材で引張軸力が発生したものであり、土木学会マニュアルに基づくせん断耐力式によりコンクリートが分担するせん断耐力が 0 となることから、材料非線形解析によりせん断耐力を算定した。

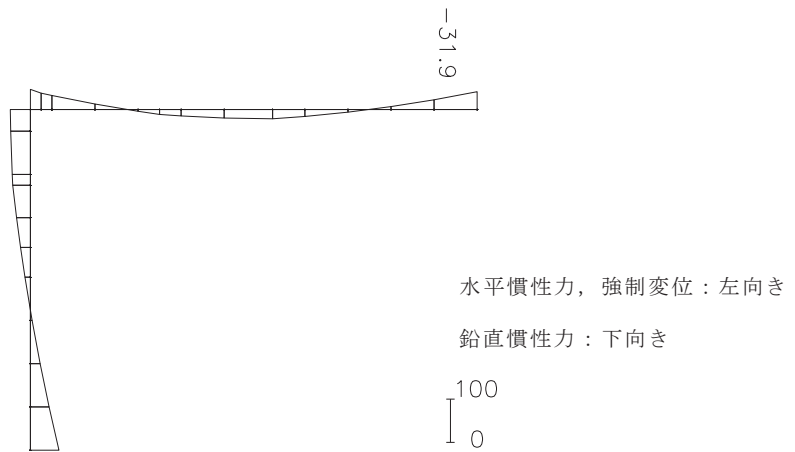


図 4-22(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
(曲げモーメント (kN・m/m)) (地震時，解析ケース 3，トレンチ①)

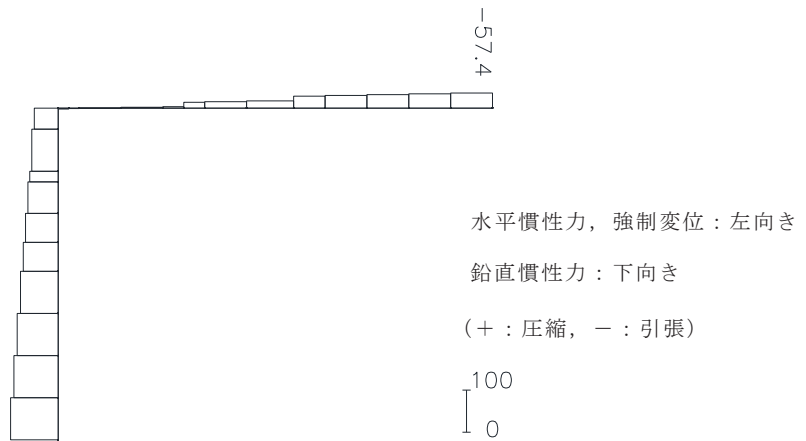


図 4-22(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ①)

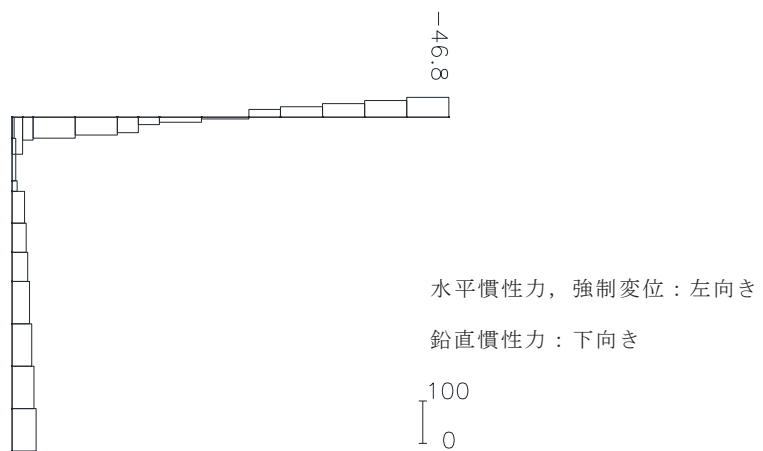
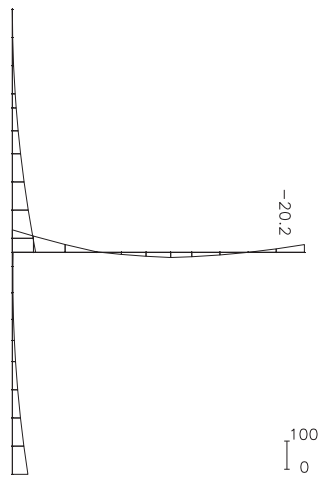
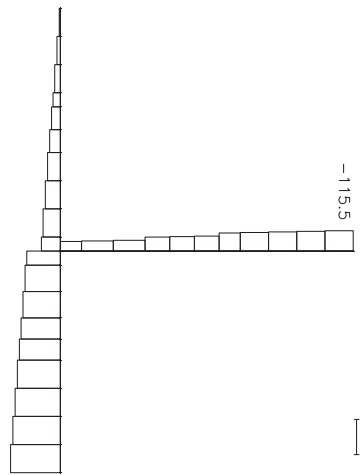


図 4-22(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ①)



水平慣性力，強制変位：左向き  
鉛直慣性力：下向き

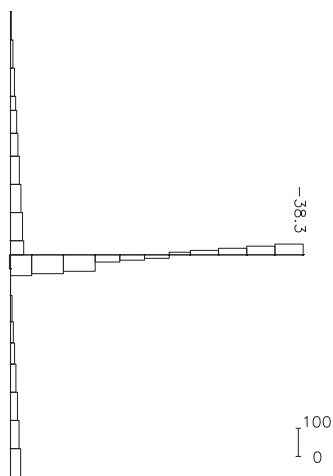
図 4-23(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
(曲げモーメント (kN・m/m)) (地震時，解析ケース 3，トレンチ②)



水平慣性力，強制変位：左向き  
鉛直慣性力：下向き

(+：圧縮，-：引張)

図 4-23(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ②)



水平慣性力，強制変位：左向き  
鉛直慣性力：下向き

図 4-23(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ②)

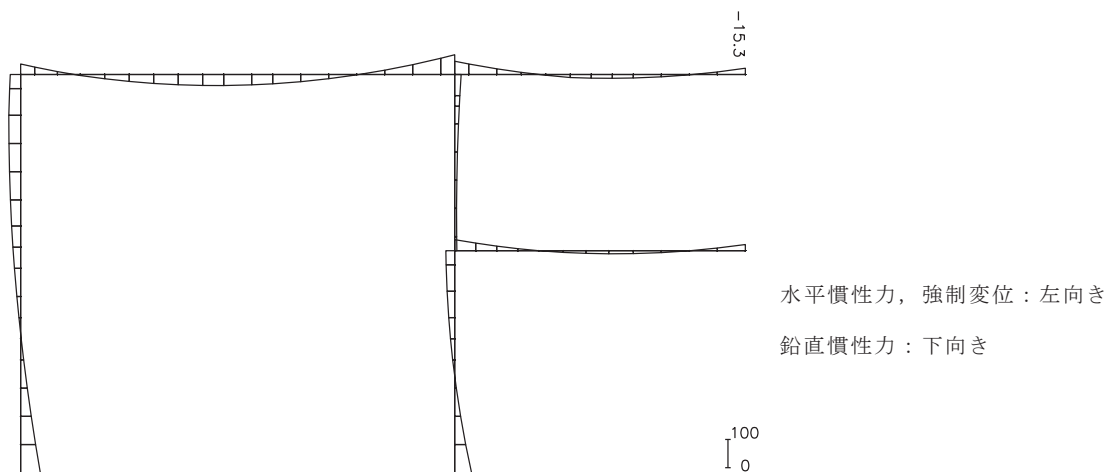


図 4-24(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
(曲げモーメント (kN・m/m)) (地震時, 解析ケース 3, トレンチ③)

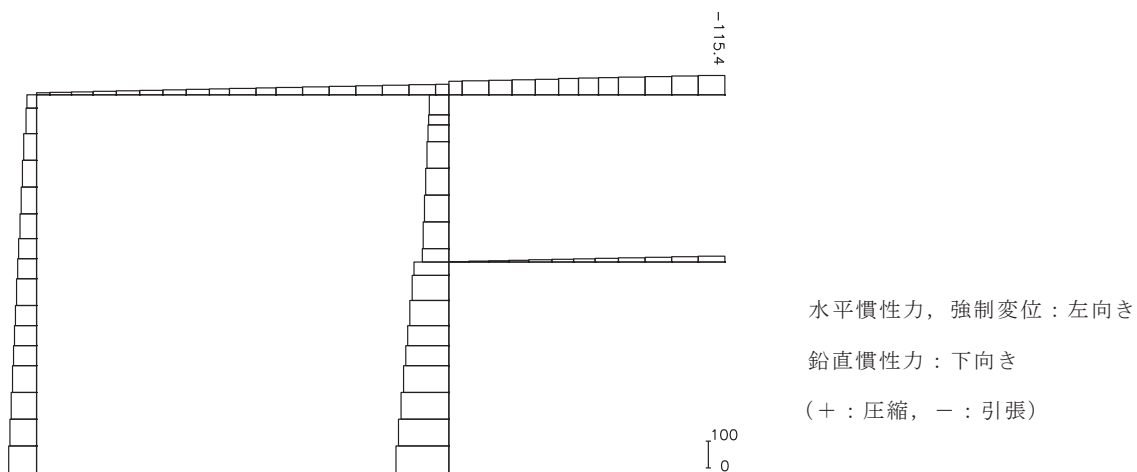


図 4-24(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
(地震時, 解析ケース 3, トレンチ③)

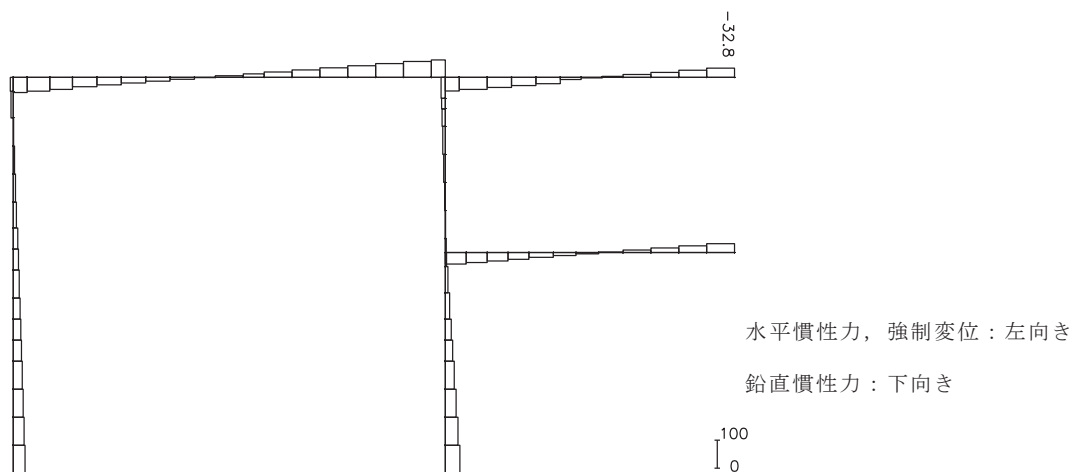


図 4-24(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
(地震時, 解析ケース 3, トレンチ③)

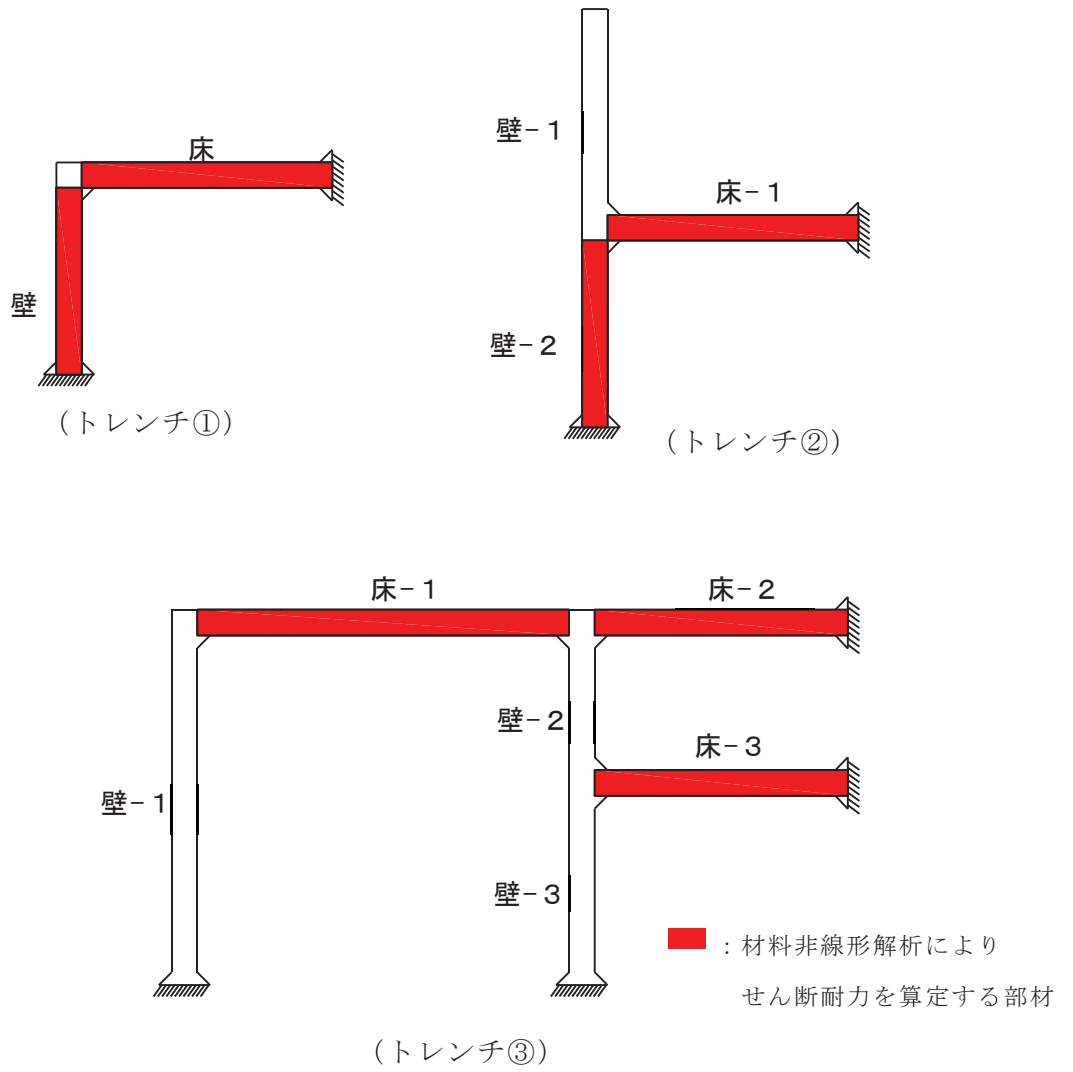


図 4-25 部材名称

(3) せん断破壊の評価における材料非線形解析結果

a. 評価条件

前項「(2) せん断破壊に対する評価結果」では、せん断補強筋の無い部材で引張軸力が発生し、土木学会マニュアルに基づき算出したせん断耐力が0となることから、材料非線形解析による評価結果を記載している。

せん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、ここでは、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断破壊に対する健全性を確認する。

材料非線形解析による評価結果は、いずれも引張軸力が発生し、せん断耐力式によるせん断耐力が0となったケースであることから、照査用せん断力が最大となったトレンチ①の床部材を対象に評価を記載する。評価対象部材の要素分割図を図4-26に、要素プロパティ番号図を図4-27に、要素プロパティ条件を表4-21に示す。

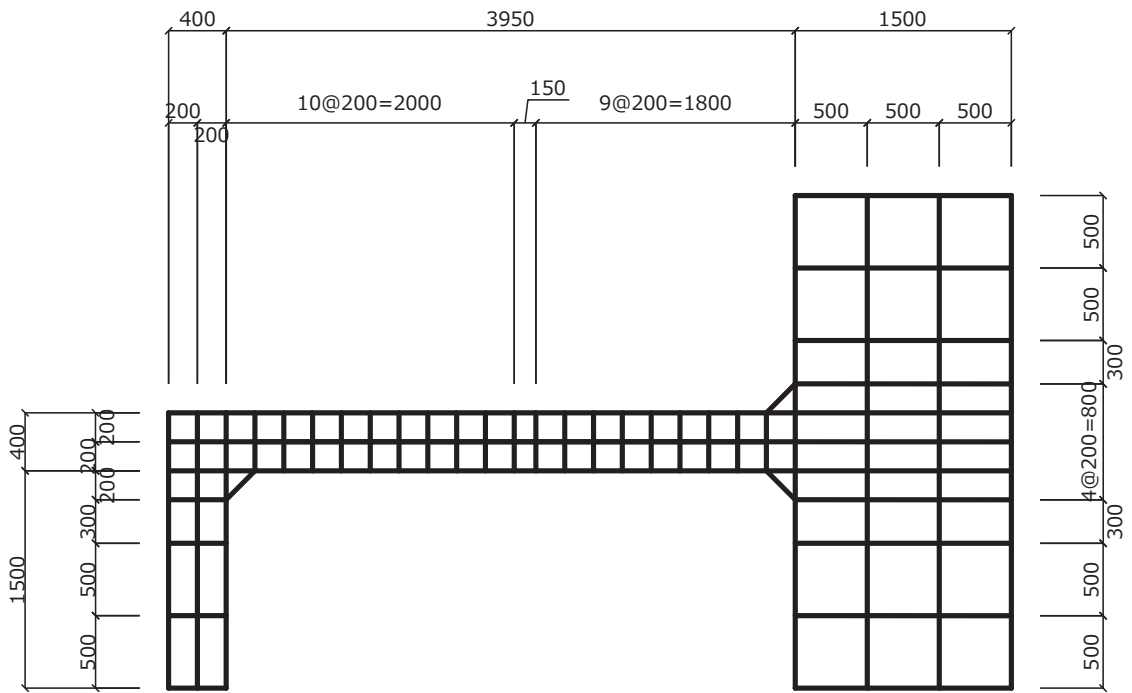


図 4-26 要素分割図

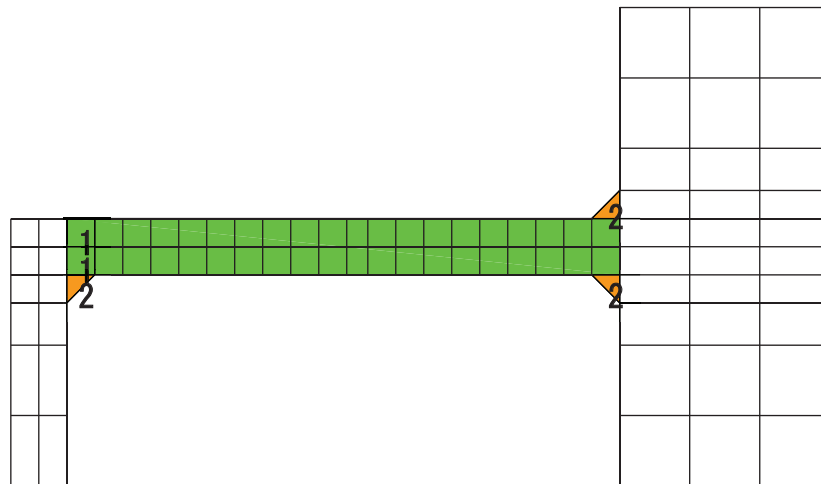


図 4-27 要素プロパティ番号図

表 4-21 要素プロパティ条件

番号	材料	引張硬化軟化係数	
		C x	C y
1	RC	0.4	1.7
2	無筋	1.5	1.5

材料非線形解析によるせん断耐力の算定において考慮する荷重は、部材非線形解析（静的解析）から得られる荷重を考慮する。具体的には部材非線形解析で評価対象部材のせん断照査が厳しくなる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに図 4-28 のように作用させる。材料非線形解析では、部材非線形解析から得られた断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重を 100 分割したものを  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  とし、これらの比率を維持しながら漸増载荷する。

なお、作用荷重は、常時荷重（ $\Delta M_s$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta N_s$ ）及び地震時荷重（ $\Delta M_d$ 、 $\Delta Q_d$ 、 $\Delta N_d$ ）とし、図 4-29 に作用手順を示す。表 4-22 に代表例として、材料非線形解析による評価において照査用せん断力が最も大きい解析ケースにおける  $\Delta M$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta N$  を示す。

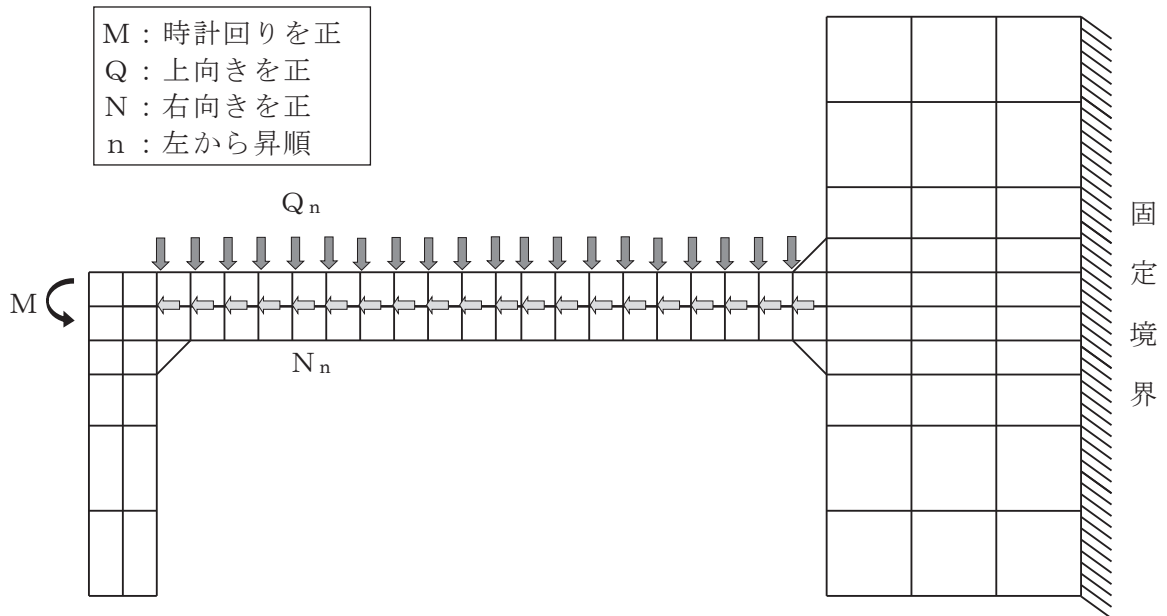


図 4-28 材料非線形解析における载荷状況

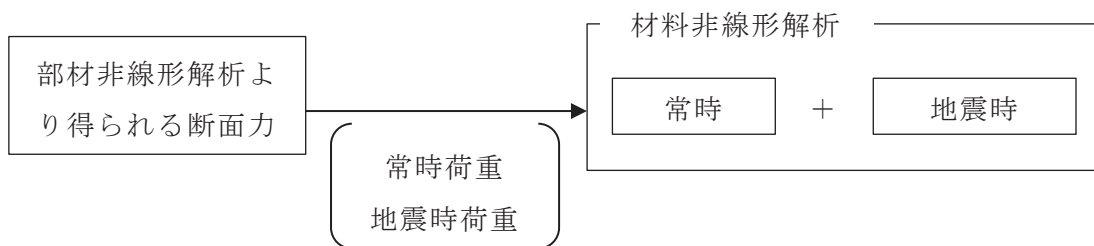


図 4-29 荷重の作用手順



表 4-22 材料非線形解析における作用荷重

部材		床	
解析ケース		ケース 3	
荷重状態		常時荷重	地震時荷重
曲げモーメント (kN・m)	$\Delta M$	-0.095	-0.334
せん断力 (kN)	$\Delta Q_1$	0.179	0.538
	$\Delta Q_2$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_3$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_4$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_5$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_6$	-0.024	-0.201
	$\Delta Q_7$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_8$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_9$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{10}$	-0.021	-0.071
	$\Delta Q_{11}$	-0.020	-0.110
	$\Delta Q_{12}$	-0.019	-0.088
	$\Delta Q_{13}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{14}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{15}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{16}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{17}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{18}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{19}$	-0.020	-0.039
	$\Delta Q_{20}$	-0.020	-0.039
軸力 (kN)	$\Delta N_1$	0.079	0.005
	$\Delta N_2$	0.000	-0.016
	$\Delta N_3$	0.000	-0.016
	$\Delta N_4$	0.000	-0.016
	$\Delta N_5$	0.000	-0.016
	$\Delta N_6$	0.000	-0.174
	$\Delta N_7$	0.000	-0.016
	$\Delta N_8$	0.000	-0.016
	$\Delta N_9$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{10}$	0.000	-0.048
	$\Delta N_{11}$	0.000	-0.088
	$\Delta N_{12}$	0.000	-0.067
	$\Delta N_{13}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{14}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{15}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{16}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{17}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{18}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{19}$	0.000	-0.016
	$\Delta N_{20}$	0.000	-0.016

b. 評価結果

評価対象部材における荷重－変位曲線を図4-30に示す。同図は、評価対象部材のトレンチ①の床において照査用せん断力が最大となる解析ケースの組合せ（地震時、解析ケース3）の結果を示している。各ステップにおけるひび割れ図及び変形図を図4-31に示す。

図中の赤丸で示した100ステップは、「4.3 構造解析」に示す非線形はり要素を用いた二次元構造解析において得られた断面力を再現した状態である。

ひび割れ図に着目すると、断面力再現時にはひび割れは発生していない。その後、荷重の増加に伴い部材右端にひび割れが発生し、さらなる荷重の増加に伴って、中央及び両端のひび割れが進展する様相を示している。224ステップ以降は鉛直変位の急増が認められる。したがって、224ステップ以降の変位の発生はひび割れの進展に伴うものであると判断される。

以上のおり、評価対象部材に対する材料非線形解析では、せん断ひび割れの進展によりせん断破壊に至ることを考慮し、224ステップ（図中の青丸）をせん断耐力発生時の状態として設定する。材料非線形解析による設計せん断耐力は、224ステップにおけるせん断耐力114.3kNを表4-17に示す部材係数（ $\gamma_{b1}$ 及び $\gamma_{b2}$ ）で除した101kNとする。

材料非線形解析によるせん断破壊に対する照査結果は、表4-20のおりであり、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

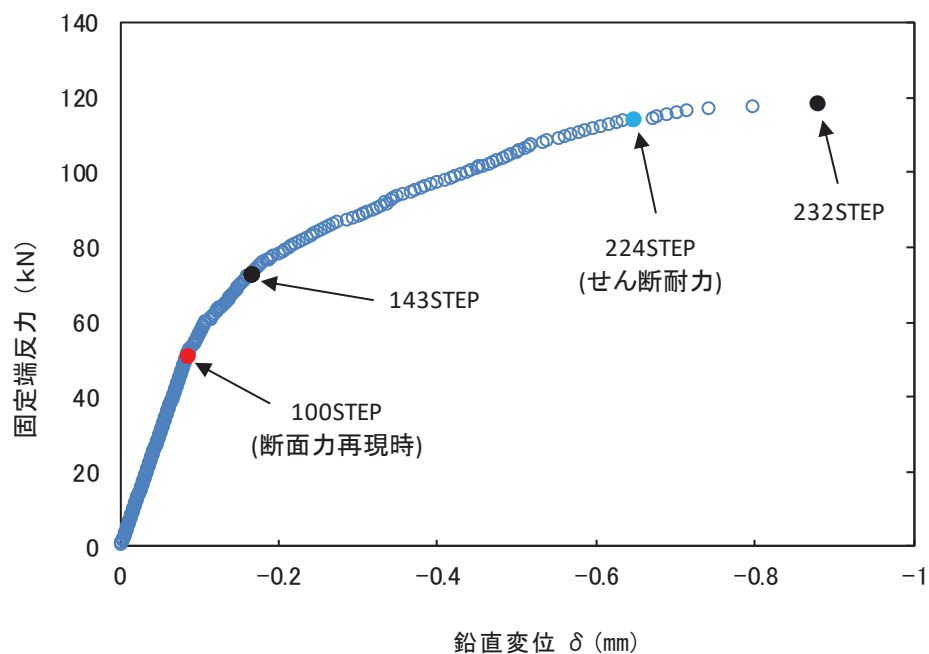


図4-30 荷重－変位曲線  
（地震時、解析ケース3、トレンチ①、床）

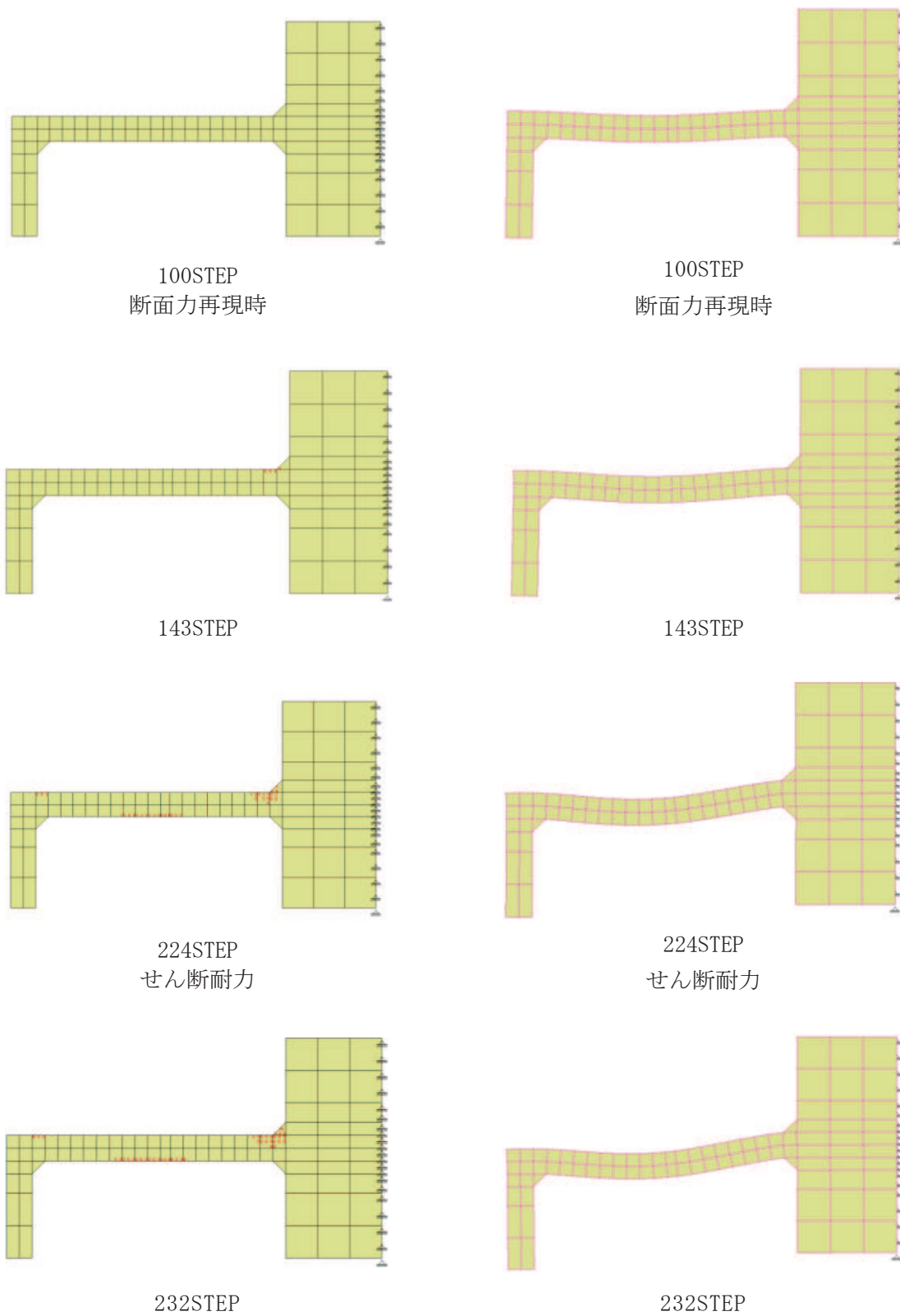


図 4-31 各ステップにおけるひび割れ図および変形図 (変形 300 倍)  
 (地震時, 解析ケース 3, トレンチ①, 床)

#### 4.5.2 Sクラスの施設を支持する機能に対する評価結果

##### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-23 及び表 4-24 に示す。

最大照査値を示すトレンチ②について、最大照査値を示す解析ケースにおける荷重図を図 4-32 に、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみの最大値の発生位置とその値を図 4-33 に示す。また、照査値最大時の断面力図を図 4-34 に示す。

表 4-23 及び表 4-24 により、すべてのトレンチにおいて、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみが、部材降伏に相当する限界ひずみ（コンクリートの圧縮ひずみ： $2000\mu$ ，主筋ひずみ： $1725\mu$ ）を下回ることを確認した。

表 4-23 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（コンクリートの圧縮ひずみ）（地震時）

部位	解析ケース	照査用ひずみ* $\epsilon_d$	限界ひずみ $\epsilon_R$	照査値 $\epsilon_d / \epsilon_R$
トレンチ①	ケース 3	$188\mu$	$2000\mu$	0.10
トレンチ②	ケース 4	$315\mu$	$2000\mu$	0.16
トレンチ③	ケース 3	$198\mu$	$2000\mu$	0.10

注記\*：照査用ひずみ＝発生ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

表 4-24 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（主筋ひずみ）（地震時）

部位	解析ケース	照査用ひずみ* $\epsilon_d$	限界ひずみ $\epsilon_R$	照査値 $\epsilon_d / \epsilon_R$
トレンチ①	ケース 3	$354\mu$	$1725\mu$	0.21
トレンチ②	ケース 3	$843\mu$	$1725\mu$	0.49
トレンチ③	ケース 3	$374\mu$	$1725\mu$	0.22

注記\*：照査用ひずみ＝発生ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

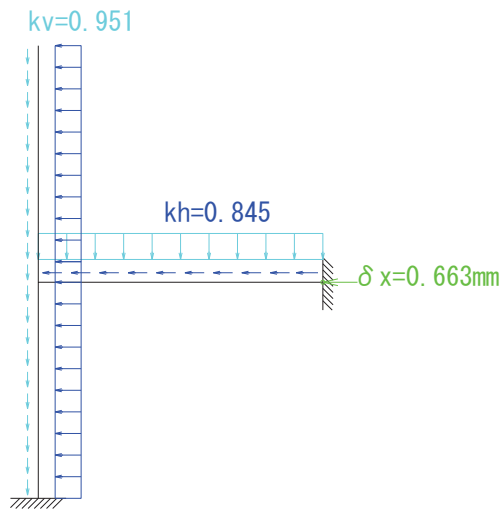


図 4-32 最大照査値を示す解析ケースにおける荷重図  
(地震時, 解析ケース 3, トレンチ②)

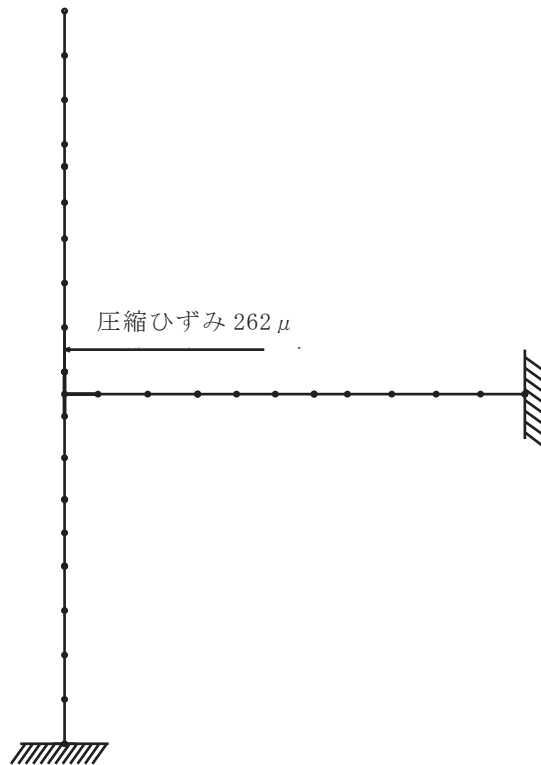


図 4-33(1) コンクリートの圧縮ひずみの最大値発生位置  
(地震時, 解析ケース 4, トレンチ②): 図 4-9 再掲

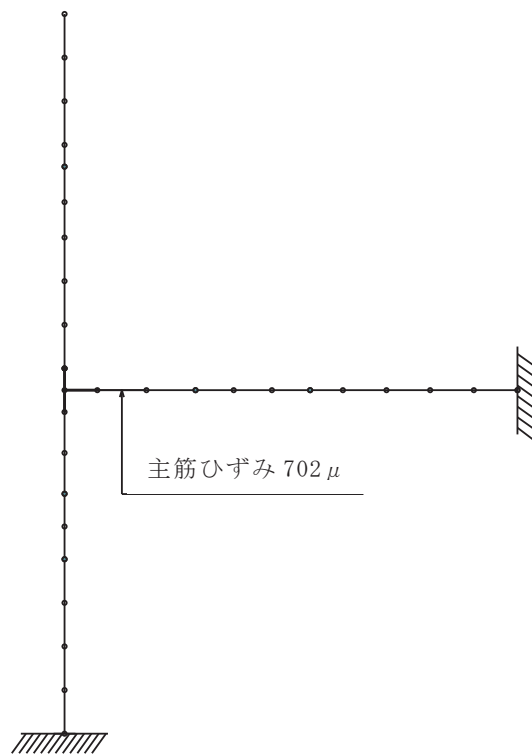


図 4-33(2) 主筋ひずみの最大値発生位置  
(地震時, 解析ケース 3, トレンチ②)

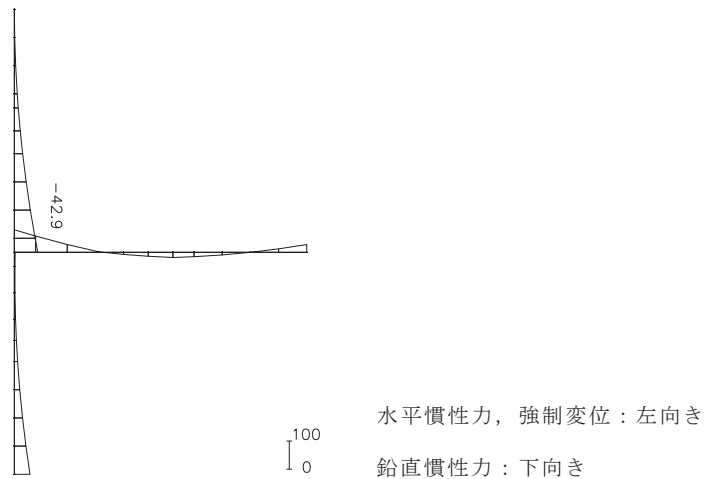


図 4-34(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
(曲げモーメント (kN・m/m)) (地震時，解析ケース 3，トレンチ②)

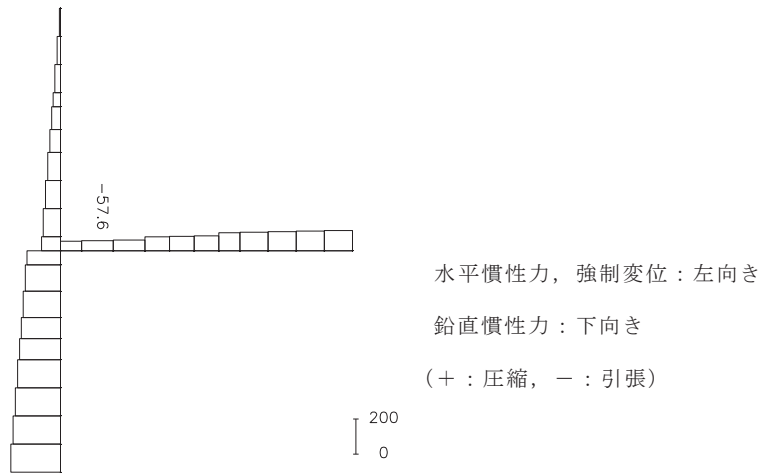


図 4-34(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ②)

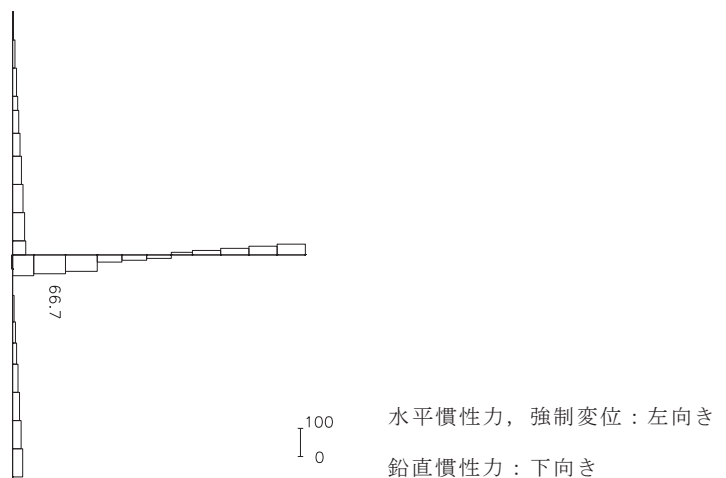


図 4-34(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
(地震時，解析ケース 3，トレンチ②)

(2) せん断破壊に対する評価結果

トレンチの地震時における S クラスの施設を支持する機能を損なわないことの確認における許容限界はせん断耐力であり、構造強度を有することの許容限界と同一となることから、「4.5.1 構造強度を有することに対する評価結果」により、照査用せん断力が、せん断耐力を下回ることを確認した。



#### 4.5.3 止水機能に対する評価結果

##### (1) 曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果

曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-25 及び表 4-26 に示す。

コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみのうち、最大照査値を示すトレンチ②について、最大照査値を示す解析ケースにおける荷重図を図 4-35 に、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみの最大値の発生位置とその値を図 4-36 に示す。また、照査値最大時の断面力図を図 4-37 に示す。

表 4-25 及び表 4-26 により、すべてのトレンチにおいて、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみが、部材降伏に相当する限界ひずみ（コンクリートの圧縮ひずみ： $2000\mu$ ，主筋ひずみ： $1725\mu$ ）を下回ることを確認した。

表 4-25 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（コンクリートの圧縮ひずみ）（溢水時）

部位	解析ケース	照査用ひずみ* $\epsilon_d$	限界ひずみ $\epsilon_R$	照査値 $\epsilon_d / \epsilon_R$
トレンチ①	ケース 1	$121\mu$	$2000\mu$	0.07
トレンチ②	ケース 1	$148\mu$	$2000\mu$	0.08
トレンチ③	ケース 1	$130\mu$	$2000\mu$	0.07

注記\*：照査用ひずみ＝発生ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

表 4-26 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（主筋ひずみ）（溢水時）

部位	解析ケース	照査用ひずみ* $\epsilon_d$	限界ひずみ $\epsilon_R$	照査値 $\epsilon_d / \epsilon_R$
トレンチ①	ケース 1	$184\mu$	$1725\mu$	0.11
トレンチ②	ケース 1	$431\mu$	$1725\mu$	0.25
トレンチ③	ケース 1	$302\mu$	$1725\mu$	0.18

注記\*：照査用ひずみ＝発生ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

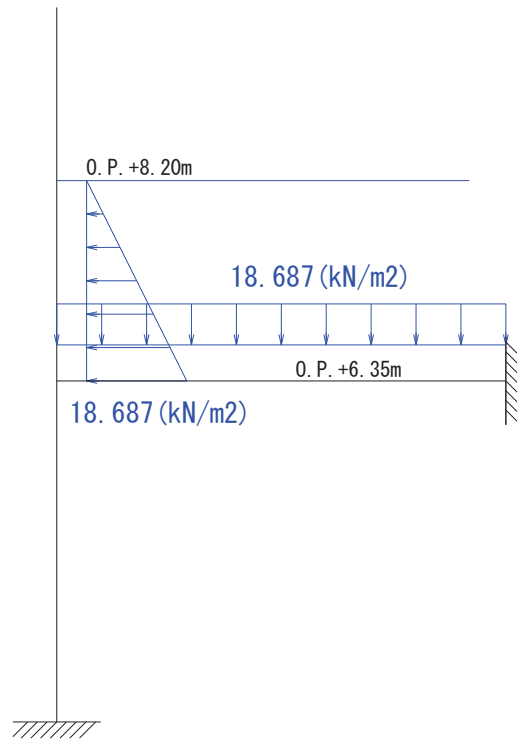


図 4-35 最大照査値を示す解析ケースにおける荷重図  
(溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

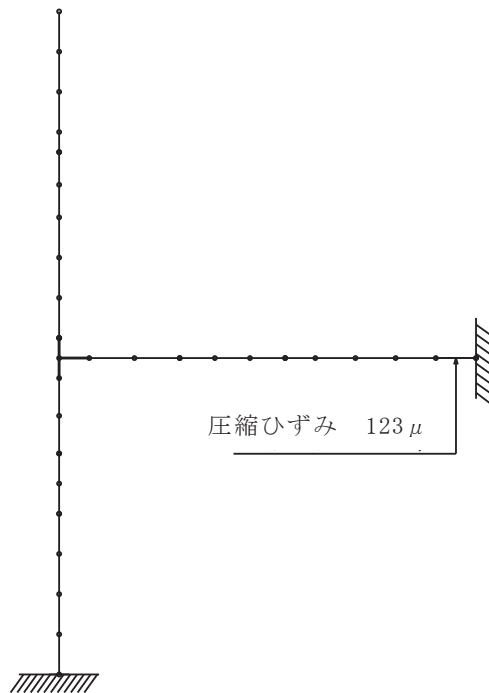


図 4-36(1) コンクリートの圧縮ひずみの最大値発生位置  
(溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

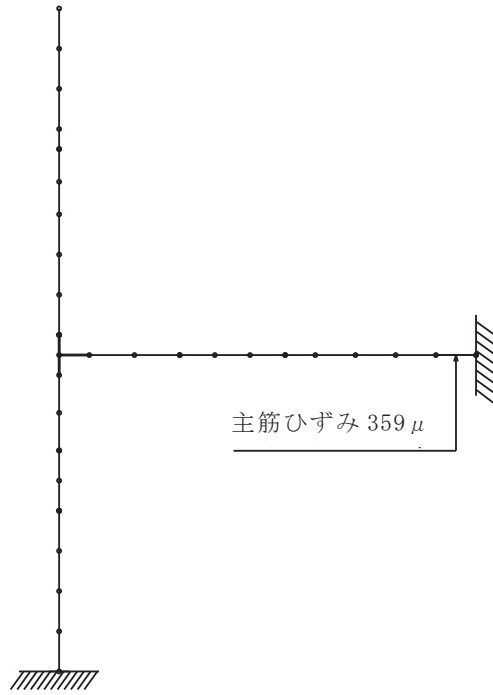


図 4-36(2) 主筋ひずみの最大値発生位置  
(溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

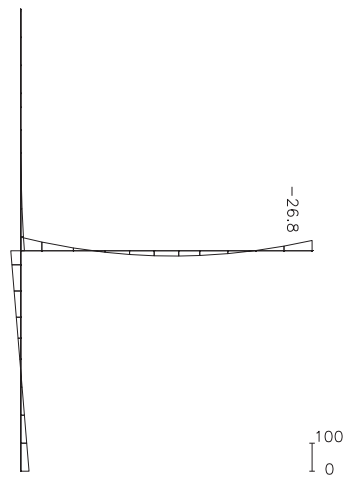


図 4-37(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
 (曲げモーメント (kN・m/m)) (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

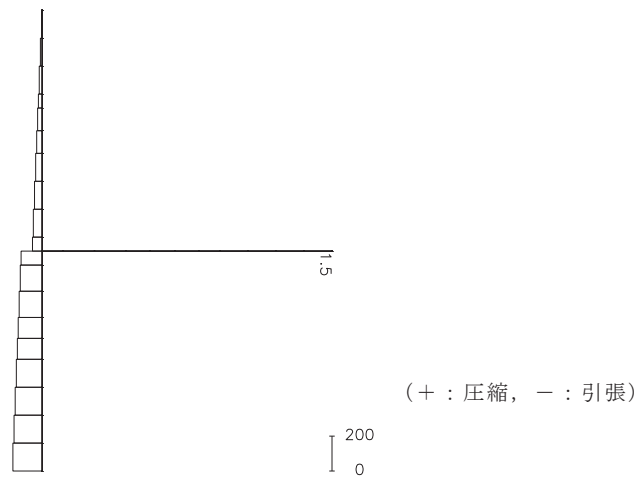


図 4-37(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

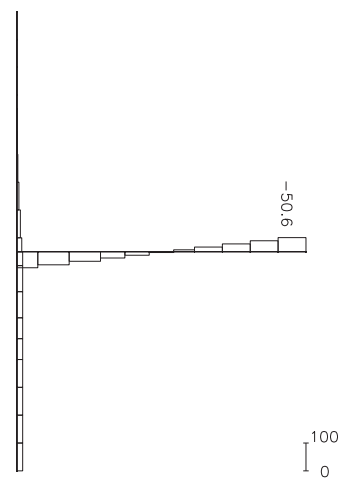


図 4-37(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②)

(2) せん断破壊に対する評価結果

せん断破壊に対する照査について、各トレンチの各部材における最大照査値を表 4-27 に示す。また、トレンチ①～③について、最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図を図 4-38～図 4-40 に示す。

同表より、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

表 4-27 せん断破壊に対する評価結果（溢水時）

部位	部材 <sup>*1</sup>	解析ケース	照査用せん断力 <sup>*2, *3</sup> V <sub>d</sub> (kN/m)	せん断耐力 V <sub>y d</sub> (kN/m)	照査値 V <sub>d</sub> /V <sub>y d</sub>
トレンチ①	壁	ケース 1	50	537	0.10
	床	ケース 1	55	167	0.33
トレンチ②	床-1	ケース 1	54	119	0.46
	壁-1	ケース 1	13	193	0.07
	壁-2	ケース 1	23	268	0.09
トレンチ③	床-1	ケース 1	31	394	0.08
	床-2	ケース 1	20	451 <sup>*4</sup>	0.05
	床-3	ケース 1	54	136	0.40
	壁-1	ケース 1	37	506	0.08
	壁-2	ケース 1	8	192	0.05
	壁-3	ケース 1	21	296	0.08

注記\*1：部材名称は図 4-23 に示す。

\*2：照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数  $\gamma_a$

\*3：材料非線形解析を実施したケースは、材料非線形解析時の照査用せん断力の値を示す。

\*4：材料非線形解析によるせん断耐力を示す。なお、材料非線形解析を実施した部材及び解析ケースは、せん断補強筋が配置されていない部材で引張軸力が発生したものであり、土木学会マニュアルに基づくせん断耐力式によりコンクリートが分担するせん断耐力が 0 となることから、材料非線形解析によりせん断耐力を算定した。

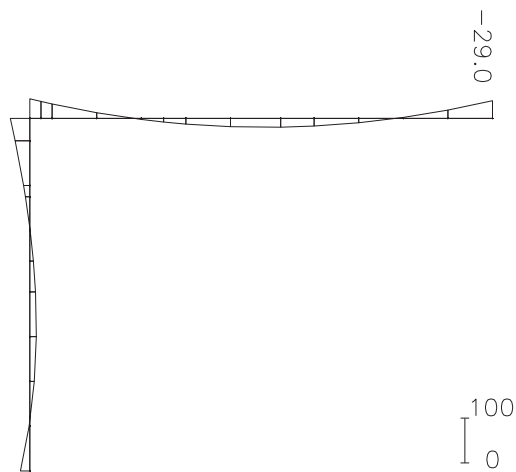


図 4-38(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
 (曲げモーメント (kN・m/m)) (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ①)

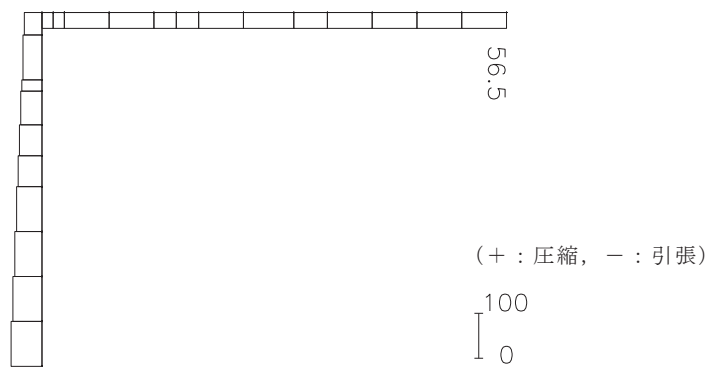


図 4-38(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ①)

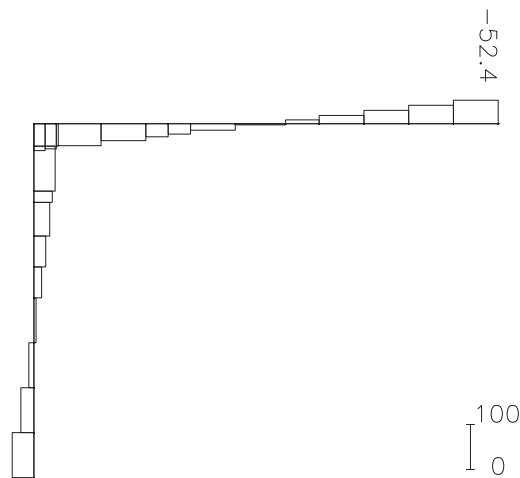


図 4-38(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ①)

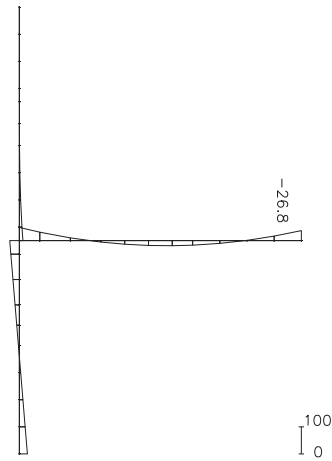


図 4-39(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図

(曲げモーメント (kN・m/m)) (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②) : 図 4-37 再掲

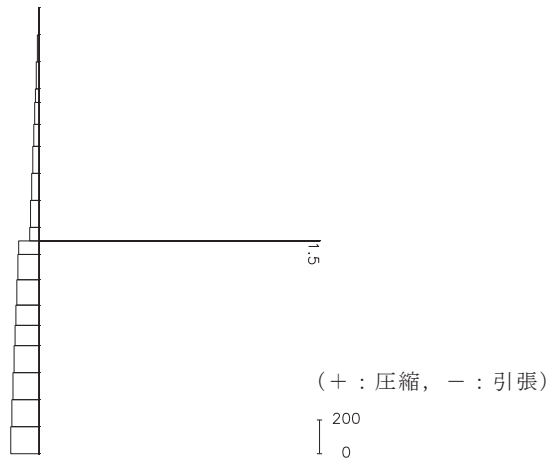


図 4-39(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))

(溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②) : 図 4-37 再掲

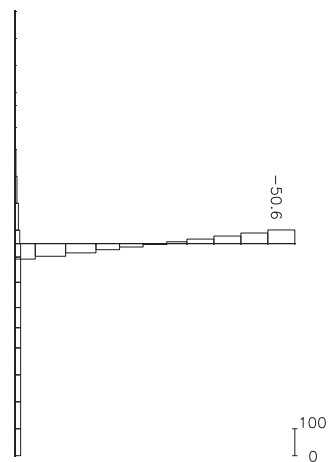


図 4-39(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))

(溢水時, 解析ケース 1, トレンチ②) : 図 4-37 再掲

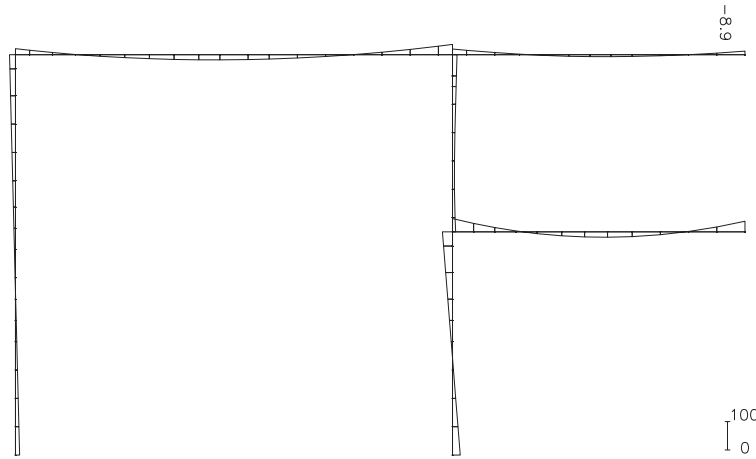


図 4-40(1) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図  
 (曲げモーメント (kN・m/m)) (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ③)

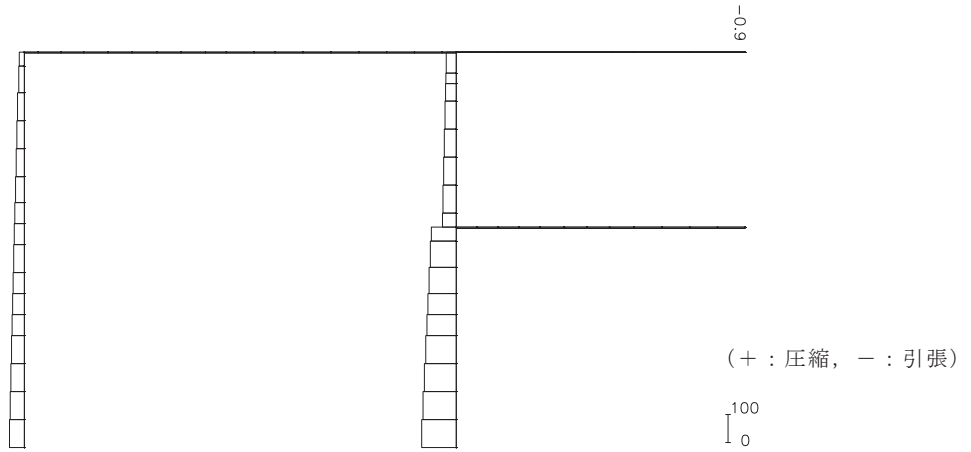


図 4-40(2) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (軸力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ③)

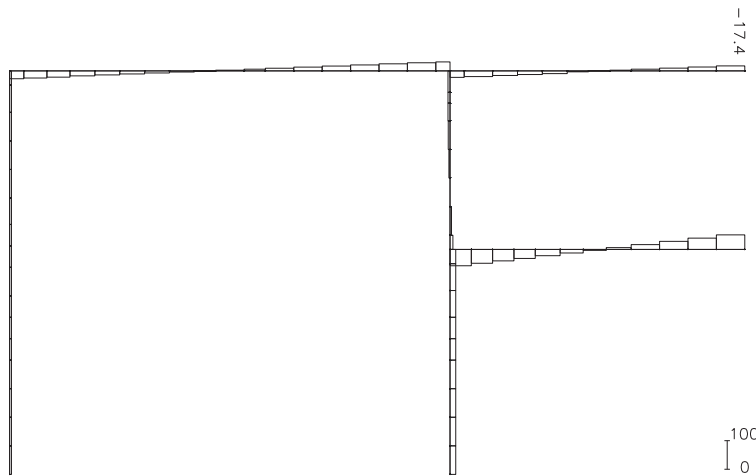


図 4-40(3) 最大照査値を示す解析ケースにおける断面力図 (せん断力 (kN/m))  
 (溢水時, 解析ケース 1, トレンチ③)



## 5. まとめ

海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁及びトレンチについては、Sクラスの配管を間接支持する支持機能と、溢水事象に対する止水機能が要求される。このことから、基準地震動  $S_s$  による地震時及び単一機器の破損を想定した溢水時のそれぞれについて曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊に対する評価を実施した。

隔壁について、地震時、溢水時ともに鉄筋及びコンクリートの発生応力、発生せん断力が許容限界を下回ることを確認した。また、トレンチについて、地震時、溢水時ともに照査用ひずみ及び照査用せん断力が要求機能に応じた許容限界を下回ることを確認した。

以上から、海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁及びトレンチは、基準地震動  $S_s$  による地震時に構造強度を有すること、Sクラスの施設を支持する機能を損なわないこと、また、機器の想定破損による溢水時に止水機能を損なわないことを確認した。

資料 11 取水路（標準部）の耐震安全性評価

## 目次


1. 評価方法	資料 11-1
2. 評価条件	資料 11-1
2.1 適用規格	資料 11-1
2.2 構造及び補強の概要	資料 11-4
2.3 耐震評価フロー	資料 11-10
2.4 地震時荷重算出断面の選定	資料 11-16
2.5 使用材料及び材料の物性値	資料 11-22
2.6 地盤物性値	資料 11-22
2.7 評価構造物諸元及び要求機能の考え方	資料 11-29
2.7.1 評価構造物諸元	資料 11-29
2.7.2 取水路（標準部）の要求機能の考え方	資料 11-31
2.8 地下水位	資料 11-33
3. 地震応答解析	資料 11-37
3.1 地震応答解析手法	資料 11-37
3.2 地震応答解析モデルの設定	資料 11-40
3.2.1 解析モデル領域	資料 11-40
3.2.2 境界条件	資料 11-42
3.2.3 構造物のモデル化	資料 11-51
3.2.4 隣接構造物のモデル化	資料 11-52
3.2.5 地盤及びマンメイドロック（MMR）のモデル化	資料 11-52
3.2.6 ジョイント要素の設定	資料 11-52
3.2.7 材料特性の設定	資料 11-58
3.3 減衰定数	資料 11-60
3.4 荷重の組合せ	資料 11-82
3.4.1 外水圧	資料 11-83
3.4.2 内水圧	資料 11-85
3.4.3 積載荷重	資料 11-87
3.4.4 動水圧	資料 11-87
3.5 耐震評価における解析ケース	資料 11-89
4. 三次元構造解析	資料 11-96
4.1 解析手法	資料 11-96
4.2 解析モデルの設定	資料 11-97
4.2.1 構造物のモデル化	資料 11-97
4.2.2 地盤ばね要素	資料 11-102
4.2.3 材料の非線形特性	資料 11-103
4.3 照査時刻の選定	資料 11-108

4.4	地震時荷重の載荷方法	資料 11-109
4.4.1	直線部	資料 11-114
4.4.2	曲線部	資料 11-116
4.5	入力荷重	資料 11-119
4.5.1	常時荷重	資料 11-122
4.5.2	慣性力	資料 11-123
4.5.3	動水圧	資料 11-125
4.5.4	地震時土圧・水圧及び周面せん断力	資料 11-126
5.	評価内容	資料 11-128
5.1	入力地震動の設定	資料 11-128
5.2	許容限界の設定	資料 11-213
5.2.1	曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界	資料 11-213
5.2.2	せん断破壊に対する許容限界	資料 11-217
5.2.3	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	資料 11-224
6.	評価結果	資料 11-226
6.1	地震応答解析結果	資料 11-228
6.1.1	各照査時刻における荷重抽出時刻の算定結果	資料 11-229
6.1.2	作用荷重分布図	資料 11-283
6.1.3	最大せん断ひずみ分布	資料 11-317
6.1.4	過剰間隙水圧比分布	資料 11-336
6.2	三次元構造解析結果	資料 11-343
6.2.1	解析ケースと照査値	資料 11-349
6.2.2	構造部材のひずみ分布（曲げ・軸力系の破壊に対する照査）	資料 11-390
6.2.3	構造部材の断面力分布（せん断破壊に対する照査）	資料 11-409
6.3	構造部材の健全性に対する評価結果	資料 11-435
6.3.1	曲げ・軸力系の破壊に対する評価結果	資料 11-435
6.3.2	せん断破壊に対する評価結果	資料 11-502
6.3.3	面内せん断に対する Ccb 工法の適用性の確認結果	資料 11-531
6.4	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	資料 11-547
6.4.1	基礎地盤（狐崎部層）	資料 11-547
6.4.2	MMR（既設）	資料 11-560
7.	まとめ	資料 11-592

参考資料

参考資料 1 静的地震力に対する評価結果・・・・・・・・・・資料 11- (参考) 1-1

参考資料 2 取水路 (標準部) の地盤剛性急変部における地盤拘束効果の影響について・・・・・・・・  
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・資料 11- (参考) 2-1

 : 記載適正化範囲

### 6.3.3 面内せん断に対する CCb 工法の適用性の確認結果

剛性急変部周辺等には、CCb 工法を適用している箇所があり、相対変位差による面内せん断が発生することから、面内せん断ひずみが CCb 工法の適用範囲内であることを確認した結果を示す。

#### (1) 直線部

直線部における CCb 工法を適用している箇所の各部材での面内せん断ひずみの最大値について、表 6-52 に解析ケース・地震動ごとに示す。

同表より、面内せん断ひずみは  $750\mu$  に至っておらず、CCb 工法の適用範囲内であることを確認した。

表 6-52(1) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
①	S s - D 1	++	頂版	120	15 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	11 $\mu$
		-+	頂版	120	13 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	11 $\mu$
	S s - D 2	++	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	12 $\mu$
		-+	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
	S s - D 3	++	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	9 $\mu$
		-+	頂版	120	9 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	9 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ＝発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-52(2) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
①	S s - F 1	++	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	10 $\mu$
		-+	頂版	120	9 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	8 $\mu$
	S s - F 2	++	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	9 $\mu$
		-+	頂版	120	9 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	8 $\mu$
	S s - F 3	++	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	11 $\mu$
		-+	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	11 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。



表 6-52(3) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
①	S s - N 1	++	頂版	120	14 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	12 $\mu$
		-+	頂版	120	16 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	14 $\mu$
②	S s - N 1	++	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
③	S s - D 2	++	底版	100	16 $\mu$
	S s - N 1	++	頂版	120	23 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	16 $\mu$
④	S s - N 1	++	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	9 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-52(4) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
⑥'	S s - D 1	++	頂版	120	15 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
		-+	頂版	120	13 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	8 $\mu$
	S s - D 2	++	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
		-+	頂版	120	13 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
	S s - D 3	++	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	11 $\mu$
		-+	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-52(5) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
⑥'	S s - F 1	++	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	9 $\mu$
		-+	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	8 $\mu$
	S s - F 2	++	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	8 $\mu$
		-+	頂版	120	11 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	9 $\mu$
	S s - F 3	++	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	10 $\mu$
		-+	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	-	-
			隔壁	-	-
			底版	100	9 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-52(6) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (直線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用 面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4
⑥'	S s - N 1	++	頂版	120	16 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
		-+	頂版	120	17 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	12 $\mu$
⑦'	S s - F 3	++	頂版	120	12 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	10 $\mu$
⑧'	S s - F 3	++	頂版	120	14 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	13 $\mu$
	S s - N 1	++	頂版	120	24 $\mu$
⑨'	S s - D 2	++	底版	100	8 $\mu$
	S s - F 3	++	頂版	120	10 $\mu$
			側壁	—	—
			隔壁	—	—
			底版	100	8 $\mu$

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ＝発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

(2) 曲線部

曲線部における CCb 工法を適用している箇所の内せん断ひずみの最大値について、表 6-53 に解析ケース・地震動ごとに示す。

同表より、内せん断ひずみは  $750\mu$  に至っておらず、CCb 工法の適用範囲内であることを確認した結果を示す。

表 6-53(1) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4	面内ひずみ*3 $\gamma_{xz}$ *5
①	S s - D 1	++	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	100 $\mu$
			底版	101	7 $\mu$	—
		-+	頂版	120	9 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	87 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
	S s - D 2	++	頂版	120	10 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	92 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
		-+	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	96 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
	S s - D 3	++	頂版	120	6 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	88 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
-+		頂版	120	8 $\mu$	—	
		側壁	—	—	—	
		隔壁	110	—	81 $\mu$	
		底版	101	8 $\mu$	—	

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

\*5： $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-53(2) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4	面内ひずみ*3 $\gamma_{xz}$ *5
①	S s - F 1	++	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	84 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
		-+	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	95 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
	S s - F 2	++	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	95 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
		-+	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	90 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
S s - F 3	++	頂版	120	7 $\mu$	—	
		側壁	—	—	—	
		隔壁	110	—	89 $\mu$	
		底版	101	8 $\mu$	—	
	-+	頂版	120	7 $\mu$	—	
		側壁	—	—	—	
		隔壁	110	—	104 $\mu$	
		底版	101	8 $\mu$	—	

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

\*5： $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-53(3) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4	面内ひずみ*3 $\gamma_{xz}$ *5
①	S s - N 1	++	頂版	120	9 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	85 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
		-+	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	93 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
②	S s - N 1	++	頂版	120	9 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	79 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
③	S s - N 1	++	頂版	120	15 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	102 $\mu$
			底版	101	11 $\mu$	—
④	S s - N 1	++	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	70 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—
		-+	底版	101	7 $\mu$	—

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

\*5： $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。



表 6-53(4) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4	面内ひずみ*3 $\gamma_{xz}$ *5
⑥'	S s - D 1	++	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	111 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
		-+	頂版	120	11 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	111 $\mu$
			底版	101	12 $\mu$	—
	S s - D 2	++	頂版	120	11 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	102 $\mu$
			底版	101	11 $\mu$	—
		-+	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	109 $\mu$
			底版	101	11 $\mu$	—
	S s - D 3	++	頂版	120	6 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	90 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
-+		頂版	120	10 $\mu$	—	
		側壁	—	—	—	
		隔壁	110	—	90 $\mu$	
		底版	101	10 $\mu$	—	

注記\*1 : 評価位置は図 6-47 に示す。

\*2 : Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3 : 照査用面内せん断ひずみ = 発生する面内せん断ひずみ  $\times$  構造解析係数  $\gamma_a$

\*4 :  $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

\*5 :  $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-53(5) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3 $\gamma_{xy}$ *4	面内ひずみ*3 $\gamma_{xz}$ *5
⑥'	S s - F 1	++	頂版	120	10 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	94 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
		-+	頂版	120	6 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	109 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
	S s - F 2	++	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	98 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
		-+	頂版	120	10 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	87 $\mu$
			底版	101	11 $\mu$	—
	S s - F 3	++	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	100 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
-+		頂版	120	9 $\mu$	—	
		側壁	—	—	—	
		隔壁	110	—	90 $\mu$	
		底版	101	11 $\mu$	—	

注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

\*5： $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

表 6-53(6) Ccb 工法を適用している箇所の面内せん断ひずみ (曲線部)

解析 ケース	地震動		評価位置*1, 2		照査用	照査用
					面内ひずみ*3	面内ひずみ*3
					$\gamma_{xy}$ *4	$\gamma_{xz}$ *5
⑥'	S s - N 1	++	頂版	120	10 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	122 $\mu$
			底版	101	11 $\mu$	—
		-+	頂版	120	8 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	112 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
⑦'	S s - N 1	-+	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	82 $\mu$
			底版	101	9 $\mu$	—
⑧'	S s - D 1	-+	隔壁	110	—	120 $\mu$
	S s - N 1	-+	頂版	120	11 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	122 $\mu$
			底版	101	10 $\mu$	—
⑨'	S s - N 1	++	頂版	120	8 $\mu$	—
		-+	頂版	120	7 $\mu$	—
			側壁	—	—	—
			隔壁	110	—	86 $\mu$
			底版	101	8 $\mu$	—

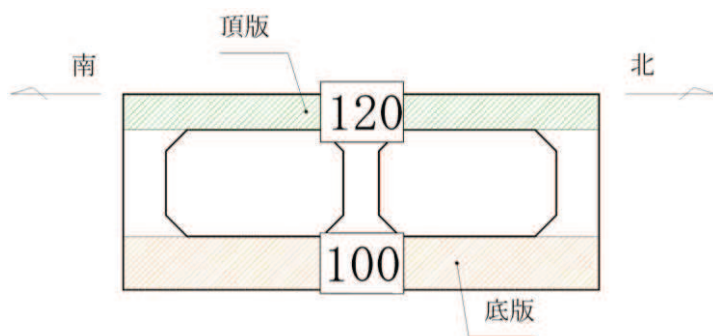
注記\*1：評価位置は図 6-47 に示す。

\*2：Ccb 工法を適用した部位は図 5-86 に示す。

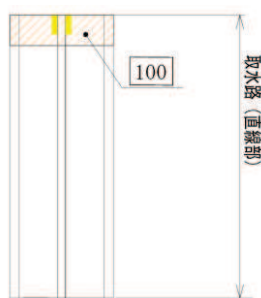
\*3：照査用面内せん断ひずみ=発生する面内せん断ひずみ×構造解析係数  $\gamma_a$

\*4： $\gamma_{xy}$  は図 6-48 に示す x-y 平面に対する面内せん断ひずみを示す。

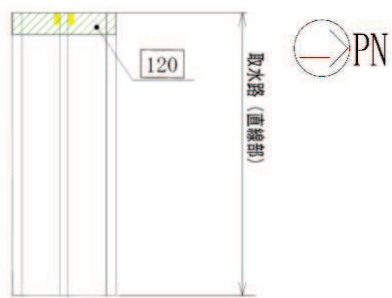
\*5： $\gamma_{xz}$  は図 6-48 に示す x-z 平面に対する面内せん断ひずみを示す。



(断面図)

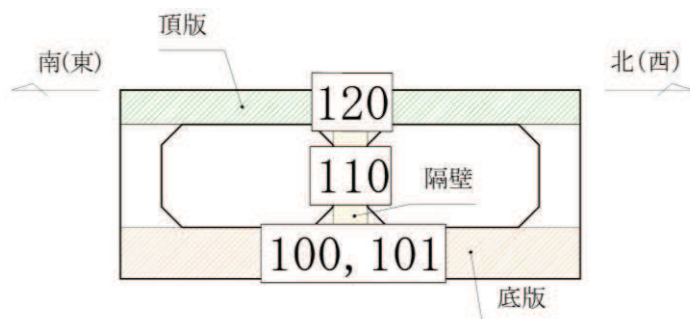


(平面図 (底版))

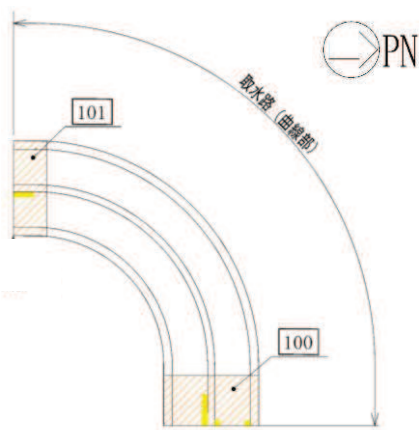


(平面図 (頂版))

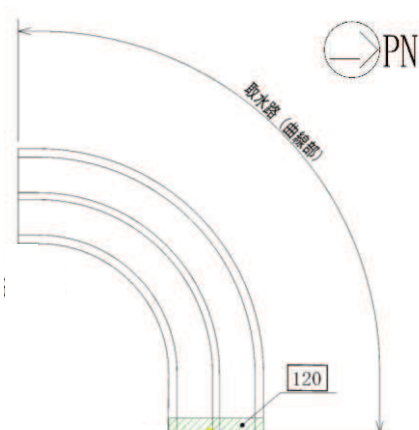
図 6-47(1) 評価位置図 (直線部)



(断面図)

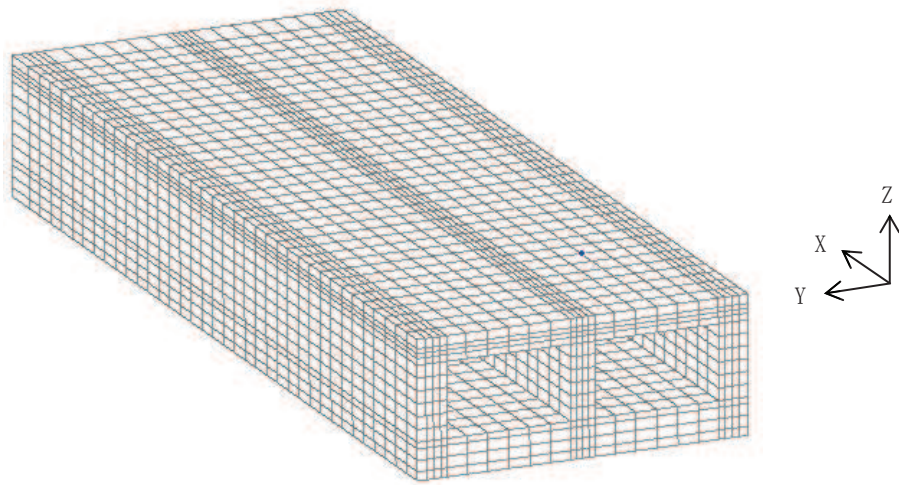


(平面図 (底版))

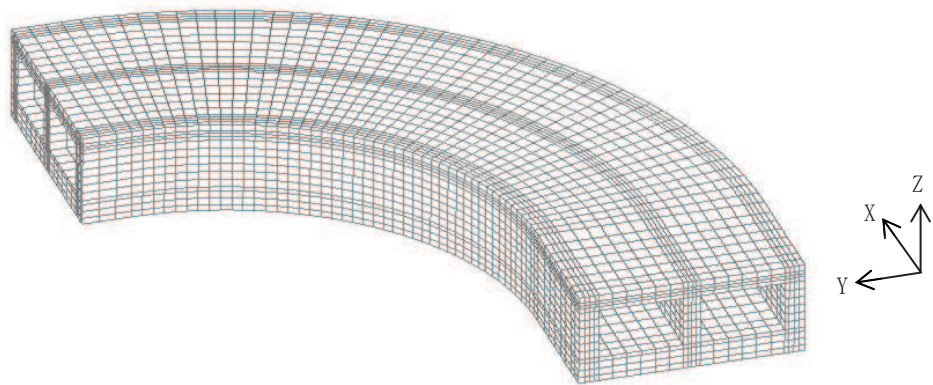


(平面図 (頂版))

図 6-47(2) 評価位置図 (曲線部)



(直線部)



(曲線部)

図 6-48 面内せん断ひずみ算出の座標軸