

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

※なお、本資料は抜粋版のため、公開できない箇所はありません。

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-19-0620-1_改5
提出年月日	2021年6月21日

補足-620-1 【東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について】

目次

1. 概要	1
2. 初期剛性が設計より低下している要因の検討	7
2.1 検討概要	7
2.2 3.11地震等に対する主要建屋のシミュレーション解析	8
2.3 地震等による構造的影響	12
2.3.1 検討概要	12
2.3.2 実機の3.11地震等に対する建屋の振動特性の把握	15
2.3.3 3.11地震等における構造的損傷の有無の確認	18
2.3.4 3次元FEMモデルによるオペフロ上部の剛性低下（大架構）	31
2.3.5 繰返し試験体（耐震実験[1]）による確認	34
2.3.6 地震等による構造的影響に関する検討結果のまとめ	37
2.4 コンクリートの乾燥収縮の影響	38
2.4.1 検討概要	38
2.4.2 乾燥収縮の影響に関する文献レビュー	39
2.4.3 実機の乾燥収縮状態等の把握	43
2.4.4 乾燥試験体（耐震実験[3]）による確認	47
2.4.5 コンクリートの乾燥収縮の影響に関する検討結果のまとめ	51
2.5 その他の要因影響	52
2.5.1 支持地盤の剛性低下の有無の確認	52
2.5.2 実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較	57
2.5.3 その他の要因影響に関する検討結果のまとめ	60
2.6 初期剛性が設計より低下している要因の検討のまとめ	61
3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響	62
3.1 検討概要	62
3.2 地震による事前損傷が終局耐力等に与える影響	63
3.2.1 事前損傷試験体（耐震実験[2]）による確認	63
3.3 乾燥収縮が終局耐力等に与える影響	66
3.3.1 乾燥試験体（耐震実験[3]）による確認	66
3.3.2 乾燥収縮の影響に関する文献レビュー	72
3.4 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響のまとめ	74
4. 原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事	75
4.1 耐震補強工事の概要	75
4.2 耐震補強工事の有効性確認	76
4.3 耐震補強工事の地震応答特性への影響検討	77
5. 設計体系への反映	79

5.1	地震応答解析モデルの策定	79
5.1.1	基本モデル策定の考え方	79
5.1.2	原子炉建屋の基本モデルの諸元	82
5.1.3	設計用地震力の評価方針	85
5.2	地震応答解析モデルに考慮する不確かさに関する検討	89
5.3	原子炉建屋の代表性	95
5.3.1	オペフロ上部の検討を踏まえた原子炉建屋の代表性	95
5.3.2	原子炉建屋以外の既設建屋への水平展開の考え方	95
5.3.3	新設建屋への初期剛性低下の考慮方針	97
5.4	部材評価における評価方針	98
5.5	設備評価への反映方針	99
5.6	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた各条文の要求機能 に対する機能維持の方針の整理	115
5.6.1	影響検討方針	115
5.6.2	影響検討結果 (1)	116
5.6.3	影響検討結果 (2)	117
5.6.4	乾燥収縮ひび割れ等による鉄筋コンクリート躯体の止水性について	118
5.6.5	原子炉建屋原子炉棟屋根の使用済燃料プールへの落下防止対策	122
5.6.6	外部火災の耐熱性 (熱影響評価) への影響について	124
5.6.7	裏面剥離評価への影響について	128
6.	まとめ	130
6.1	検討結果の概要	130
6.2	剛性低下を踏まえた建屋解析手法の高度化	131
別紙 1 東北地方太平洋沖地震等に対する主要建屋のシミュレーション解析		
別紙 1-1 原子炉建屋地震応答解析に係る事前検討結果		
別紙 1-2 地震応答解析モデルにおける床の柔性の考慮について		
別紙 2 各建屋の剛性低下 (固有振動数低下) の地震観測記録による傾向分析		
別紙 3 東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価 (点検結果)		
別紙 3-1 原子炉建屋のひび割れ分布		
別紙 3-2 原子炉建屋屋根トラスの点検結果		
別紙 4 東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価 (追加評価に係る点検結果)		
別紙 4-1 オペフロ上部の柱の点検結果		
別紙 4-2 シェル壁 (ベント管開口部周り) の点検結果		
別紙 4-3 基礎版 の点検結果		
別紙 5 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析 (原子炉建屋)		
別紙 5-1 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析と点検結果の比較		

別紙 6	3次元 FEM 非線形モデルによるシミュレーション解析（原子炉建屋オペフロ上部）
別紙 6-1	分散ひび割れモデル（前川モデル）
別紙 7	3次元立体架構モデルによる屋根トラスのシミュレーション解析（原子炉建屋）
別紙 7-1	サブトラス及び水平ブレース（仮設部材）の評価
別紙 7-2	加速度応答スペクトルの比較
別紙 8	建屋の3次元的なねじれの影響について
別紙 9	オペフロ上部変位計測システムと計測変位について
別紙 10	床等の面外応力に対する影響確認
別紙 11	原子炉建屋オペフロ上部の剛性と耐力に関する検討
別紙 11-1	変形分離方式について
別紙 11-2	25cm 耐震壁応力低下の原因について
別紙 11-3	25cm 耐震壁の FEM モデルのせん断力変形関係の部分的低下の考察
別紙 12	耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討（耐震実験[1]）
別紙 13	乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について
別紙 14	実機の乾燥収縮の状況に関する検討
別紙 14-1	乾燥収縮の調査研究及びその統計分析に関する文献について
別紙 15	耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討（耐震実験[3]）
別紙 15-1	コンクリートの乾燥収縮迅速評価システム
別紙 16	建屋支持地盤の剛性低下に関する検討
別紙 17	建屋コンクリートの圧縮強度の確認
別紙 17-1	乾燥収縮ひび割れ箇所から採取したコア試験体による圧縮強度試験結果
別紙 18	耐震実験による事前損傷が終局耐力に与える影響検討（耐震実験[2]）
別紙 18-1	耐震実験 [2] の補足検討
別紙 19	原子炉建屋オペフロ上部の耐震補強
別紙 19-1	耐震補強による地震応答特性への影響について
別紙 20	地震応答解析モデルの基本ケースと不確かさケースの設定
別紙 20-1	建屋初期剛性の不確かさケースの剛性低下量の設定
別紙 20-2	原子炉建屋の観測記録の分析例
別紙 20-3	床ばねの初期剛性低下に関する影響検討
別紙 21	乾燥収縮ひび割れによる機器アンカーへの影響検討
別紙 22	床応答スペクトルの拡幅率について
別紙 23	鉄筋コンクリート躯体のひび割れ（乾燥収縮・地震）による影響評価が必要となる対象条文の抽出について
別紙 24	鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理
別紙 25	耐震実験に関する補足説明資料

別紙 26 第 3 号機海水熱交換器建屋と地中土木構造物の構造計画の違いについて

 : 本日の説明範囲

別紙 20-1 建屋初期剛性の不確かさケースの剛性低下量の設定

1. 不確かさケースの設定の考え方

基本モデルを用いた基準地震動 S_s による応答結果は、多くのフロアでせん断スケルトンの折点（第一，第二折点）を超え非線形化が進むため，初期剛性の違いが応答結果に及ぼす影響は小さいと考えられるが，基準地震動 S_s を経験するまでに最大限低下する場合を初期剛性低下の不確かさケースとして考慮する。

2. 設定方法

基準地震動 S_s 時の不確かさケースに設定する剛性低下量は，基準地震動 S_s 入力後の 1 次ピーク振動数の比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$) から算定した剛性比を基本ケースの初期剛性に掛けることによって算定する。

基準地震動 S_s 入力前の 1 次ピーク振動数 $f_{S_s \text{ 前}}$ は，基本ケースに $1/2 \times S_d$ を入力した際の基礎版から各階の伝達関数の 1 次ピーク振動数の平均より求める。基準地震動 S_s 入力後の 1 次ピーク振動数 $f_{S_s \text{ 後}}$ は，基本ケースに各基準地震動 S_s を入力した後に $1/2 \times S_d$ を入力した際の基礎版から各階の伝達関数（各階／基礎版）の 1 次ピーク振動数の平均より求める。ここで $1/2 \times S_d$ を使っているが，初期剛性を確認するために小振幅の地震動として入力したものである。

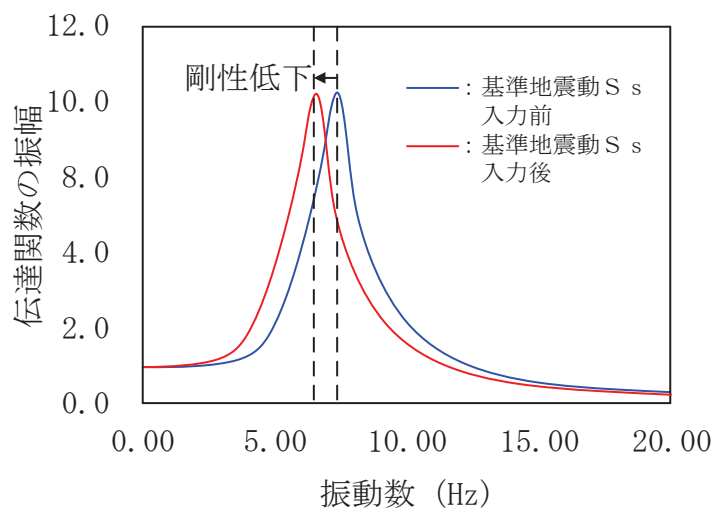


図 2-1 各階／基礎版の伝達関数イメージ

3. 各建屋の基準地震動 S_s 入力前後の剛性比

3.1 原子炉建屋

表 3-1 に原子炉建屋の基準地震動 S_s 入力前後の 1 次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-1 原子炉建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	3.90	4.43	0.88	0.78
S _s -D2	3.90	4.42	0.88	0.78
S _s -D3	4.23	4.41	0.96	0.92
S _s -F1	4.40	4.42	1.00	0.99
S _s -F2	4.12	4.39	0.94	0.88
S _s -F3	4.19	4.42	0.95	0.90
S _s -N1	4.00	4.42	0.91	0.82

(EW 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	4.06	4.58	0.89	0.79
S _s -D2	4.08	4.59	0.89	0.79
S _s -D3	4.38	4.57	0.96	0.92
S _s -F1	4.57	4.58	1.00	0.99
S _s -F2	4.29	4.62	0.93	0.86
S _s -F3	4.45	4.57	0.97	0.95
S _s -N1	4.26	4.60	0.93	0.86

注 1：網掛け部分は各方向、各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注 2：剛性比は 1 次ピーク振動数の比の 2 乗として算定する。

3.2 制御建屋

表 3-2 に制御建屋の基準地震動 S_s 入力前後の 1 次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-2 制御建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	4.31	4.60	0.94	0.88
S _s -D2	4.22	4.63	0.91	0.83
S _s -D3	4.48	4.60	0.97	0.94
S _s -F1	4.62	4.62	1.00	1.00
S _s -F2	4.44	4.66	0.95	0.91
S _s -F3	4.48	4.60	0.97	0.94
S _s -N1	4.56	4.63	0.99	0.97

(EW 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	4.39	5.00	0.88	0.77
S _s -D2	4.16	4.98	0.83	0.70
S _s -D3	4.44	5.00	0.89	0.79
S _s -F1	4.85	4.98	0.97	0.95
S _s -F2	4.95	4.99	0.99	0.98
S _s -F3	4.43	5.00	0.88	0.78
S _s -N1	4.92	4.97	0.99	0.98

注 1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注 2：剛性比は 1 次ピーク振動数の比の 2 乗として算定する。

3.3 第3号機海水熱交換器建屋

表3-3に第3号機海水熱交換器建屋の基準地震動S_s入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表3-3 第3号機海水熱交換器建屋の基準地震動S_s前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	6.44	7.54	0.85	0.73
S _s -D2	6.26	7.54	0.83	0.69
S _s -D3	6.70	7.54	0.89	0.79
S _s -F1	7.25	7.52	0.96	0.93
S _s -F2	6.92	7.53	0.92	0.84
S _s -F3	6.62	7.52	0.88	0.78
S _s -N1	7.55	7.55	1.00	1.00

(EW 方向)

基準地震動	S _s 後の一次ピーク (f _{S_s後}) (Hz)	S _s 前の一次ピーク (f _{S_s前}) (Hz)	S _s 前後の一次ピークの比 (f _{S_s後} /f _{S_s前})	剛性比
S _s -D1	5.45	6.88	0.79	0.63
S _s -D2	5.01	6.92	0.72	0.53
S _s -D3	5.52	6.91	0.80	0.64
S _s -F1	6.52	6.91	0.94	0.89
S _s -F2	6.11	6.91	0.88	0.78
S _s -F3	5.03	6.90	0.73	0.53
S _s -N1	6.53	6.92	0.94	0.89

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動S_sのうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

3.4 タービン建屋

表 3-4 にタービン建屋の基準地震動 S_s 入力前後の 1 次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表 3-4 タービン建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.92	4.26	0.92	0.85
Ss-D2	3.89	4.23	0.92	0.84
Ss-D3	4.12	4.25	0.97	0.94
Ss-F1	4.20	4.24	0.99	0.98
Ss-F2	3.94	4.25	0.93	0.86
Ss-F3	3.98	4.24	0.94	0.88
Ss-N1	4.07	4.25	0.96	0.92

(EW 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.27	3.52	0.93	0.86
Ss-D2	3.19	3.54	0.90	0.81
Ss-D3	3.35	3.53	0.95	0.90
Ss-F1	3.49	3.55	0.98	0.97
Ss-F2	3.48	3.51	0.99	0.98
Ss-F3	3.37	3.53	0.96	0.91
Ss-N1	3.42	3.52	0.97	0.95

注 1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注 2：剛性比は 1 次ピーク振動数の比の 2 乗として算定する。

3.5 補助ボイラー建屋

表3-5に補助ボイラー建屋の基準地震動 S_s 入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表3-5 補助ボイラー建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	9.03	11.89	0.76	0.58
Ss-D2	8.47	11.89	0.71	0.51
Ss-D3	8.54	11.91	0.72	0.51
Ss-F1	10.88	11.94	0.91	0.83
Ss-F2	10.52	11.90	0.88	0.78
Ss-F3	9.46	11.91	0.79	0.63
Ss-N1	11.88	11.88	1.00	1.00

(EW 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	5.94	9.33	0.64	0.41
Ss-D2	5.72	9.33	0.61	0.38
Ss-D3	6.36	9.32	0.68	0.47
Ss-F1	7.49	9.34	0.80	0.64
Ss-F2	6.71	9.32	0.72	0.52
Ss-F3	5.86	9.32	0.63	0.39
Ss-N1	8.84	9.34	0.95	0.89

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。

3.6 第1号機制御建屋

表3-6に第1号機制御建屋の基準地震動 S_s 入力前後の1次ピーク振動数の比から算定した剛性比を示す。

表3-6 第1号機制御建屋の基準地震動 S_s 前後の建屋剛性比

(NS 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	3.99	4.30	0.93	0.86
Ss-D2	4.01	4.28	0.94	0.88
Ss-D3	4.20	4.28	0.98	0.96
Ss-F1	4.27	4.29	1.00	0.99
Ss-F2	4.05	4.28	0.95	0.90
Ss-F3	4.16	4.29	0.97	0.94
Ss-N1	4.13	4.28	0.96	0.93

(EW 方向)

基準地震動	S_s 後の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 後}}$) (Hz)	S_s 前の一次ピーク ($f_{S_s \text{ 前}}$) (Hz)	S_s 前後の一次ピークの比 ($f_{S_s \text{ 後}}/f_{S_s \text{ 前}}$)	剛性比
Ss-D1	4.31	4.82	0.89	0.80
Ss-D2	4.17	4.81	0.87	0.75
Ss-D3	4.40	4.83	0.91	0.83
Ss-F1	4.76	4.82	0.99	0.97
Ss-F2	4.72	4.81	0.98	0.96
Ss-F3	4.41	4.81	0.92	0.84
Ss-N1	4.74	4.87	0.97	0.95

注1：網掛け部分は各方向，各基準地震動 S_s のうち最も小さい値を示す。

注2：剛性比は1次ピーク振動数の比の2乗として算定する。