

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7添-2-035-2 改2
提出年月日	2020年6月10日

V-2-4-2-1 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

V-2-4-2-1 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	7
2.4 適用規格・基準等	10
3. 応力解析による評価方法	11
3.1 評価対象部位及び評価方針	11
3.2 荷重及び荷重の組合せ	13
3.2.1 荷重	13
3.2.2 荷重の組合せ	25
3.3 許容限界	26
3.4 解析モデル及び諸元	28
3.4.1 モデル化の基本方針	28
3.4.2 解析諸元	33
3.4.3 材料構成則	34
3.5 評価方法	36
3.5.1 応力解析方法	36
3.5.2 断面の評価方法	43
4. 評価結果	51
4.1 S d 地震時	51
4.2 S s 地震時, (異常+S d 地震) 時及び (異常+S s 地震) 時	51
5. 引用文献	70

別紙 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット）

1. 概要

本資料は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、応力解析による評価により行う。

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備」及び「常設重大事故緩和設備」に分類される。

以下、それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 基本方針

2.1 位置

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは原子炉建屋の一部を構成している。使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

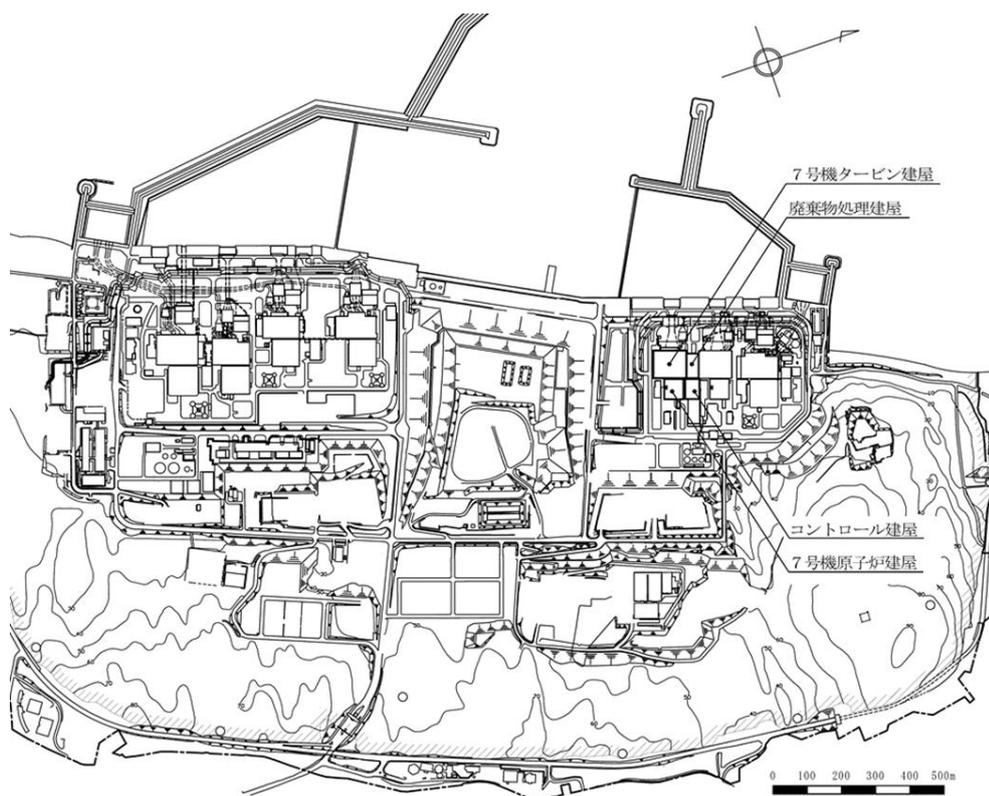


図 2-1 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の設置位置

2.2 構造概要

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは原子炉建屋の燃料取替床（T.M.S.L.* 31.7m）付近に位置する鉄筋コンクリート構造物で、使用済燃料、制御棒及び使用済燃料輸送容器が収容される。

使用済燃料貯蔵プール内には、収容される機器の遮蔽及び冷却のため常時水が張られている。

使用済燃料貯蔵プール内面はステンレス鋼でライニングされており、漏水を防ぐとともに、保守、点検についても考慮されている。なお、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987（（社）日本電気協会）に基づき、鋼製ライナは耐漏洩機能を、鉄筋コンクリート部分は支持機能を有する。

また、原子炉ウェルをはさんで使用済燃料貯蔵プールの反対側には、燃料交換時に蒸気乾燥器と気水分離器を仮置きする蒸気乾燥器・気水分離器ピットがある。（以下、使用済燃料貯蔵プール、キャスクピット、原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットのすべてを示す場合は、これを「プール部」という。）

プール部は、鉄筋コンクリート製原子炉格納容器（以下「RCCV」という。）及び外壁に支持された一体構造物である。なお、プール部の床面及び壁面の一部は RCCV と共有するが、当該部分については、V-2-9-2-1「原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書」に示す。

使用済燃料貯蔵プールの大きさは、内面寸法で平面 17.9m×14.0m、深さ 11.82m、壁厚 2.0m、底面スラブ厚 2.3m であり、キャスクピットの平面寸法は 3.2m×3.2m、壁厚 0.6m で、底面スラブ及び壁の一面はそれぞれ使用済燃料貯蔵プール底面及び壁面と共有する。

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 2-2 及び図 2-3 に、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット周りの概略平面図及び概略断面図を図 2-4 及び図 2-5 に示す。

注記*：東京湾平均海面（以下「T.M.S.L.」という。）

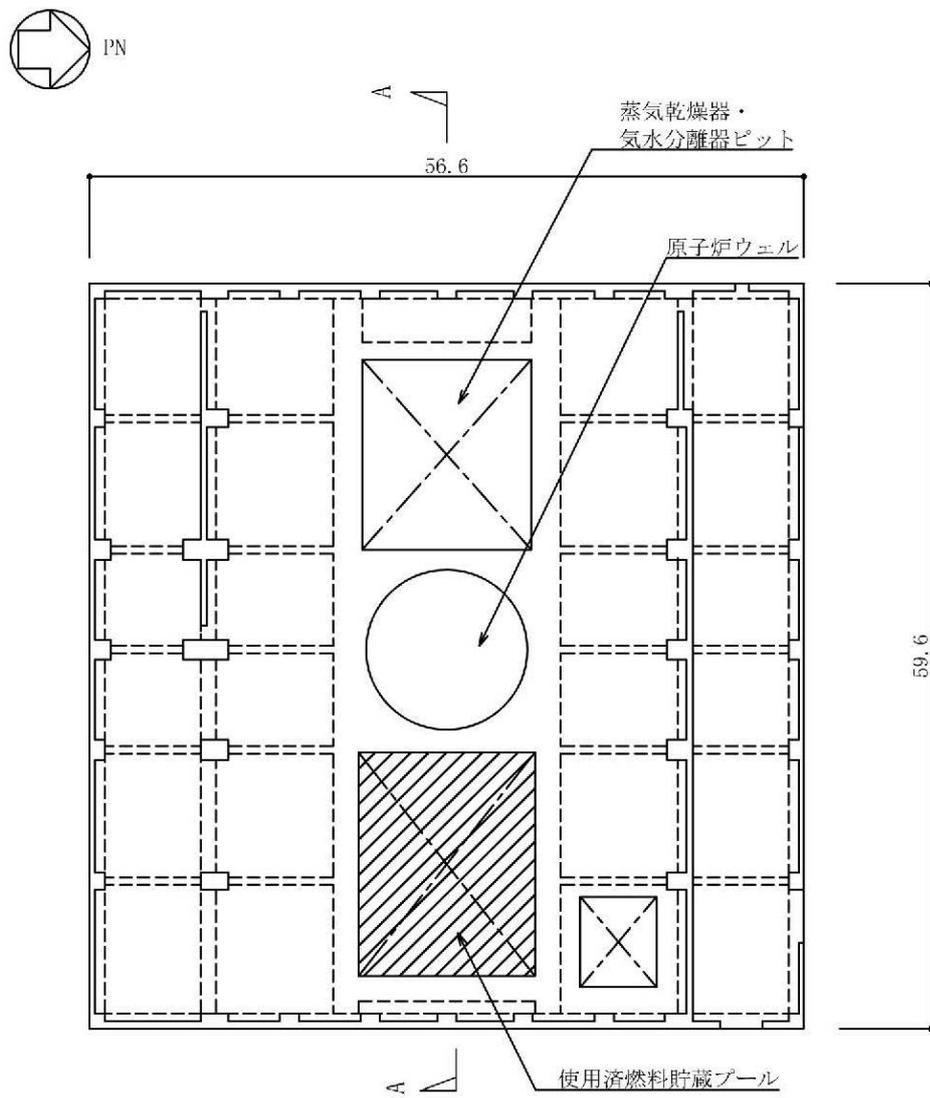
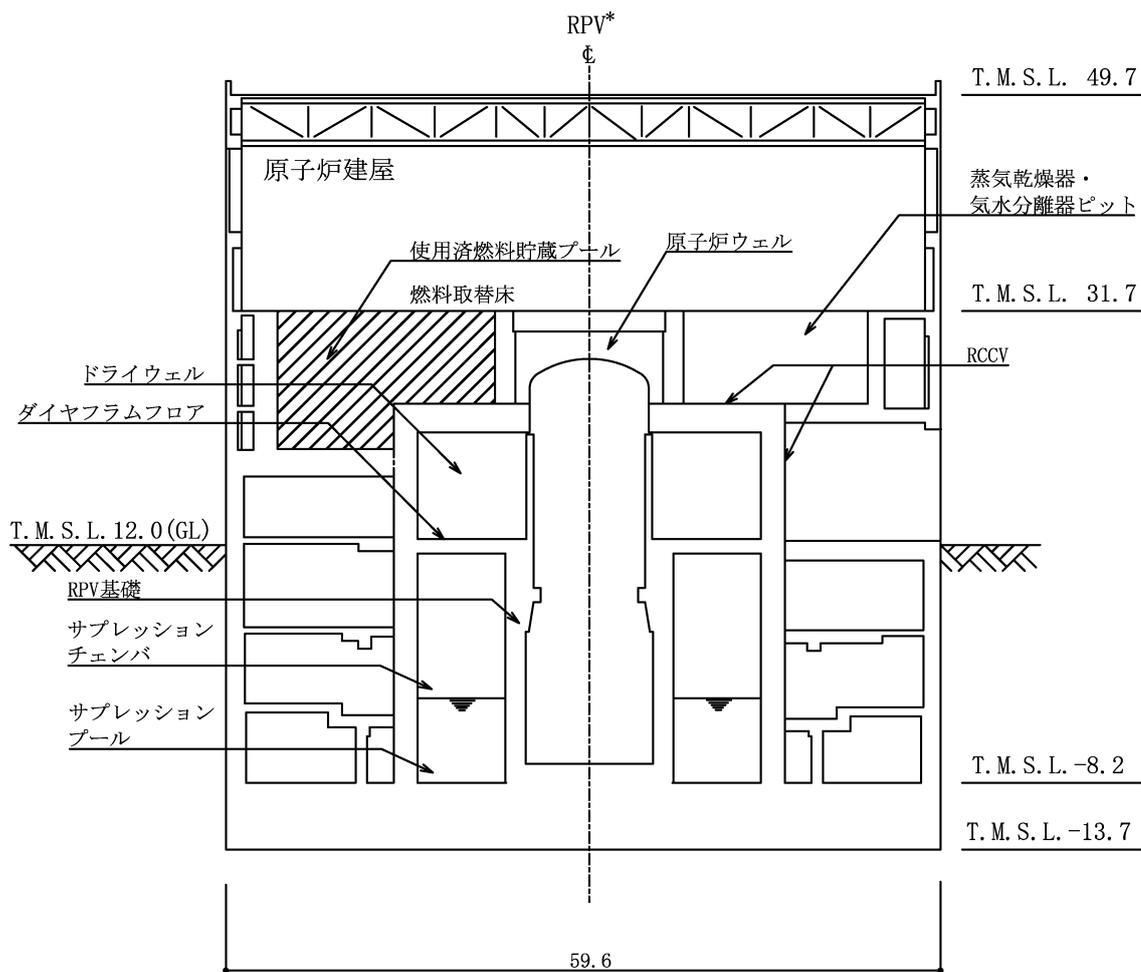


図 2-2 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略平面図
(T. M. S. L. 31.7m) (単位 : m)



注記*：原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）

図 2-3 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略断面図
(A-A 断面) (単位：m)

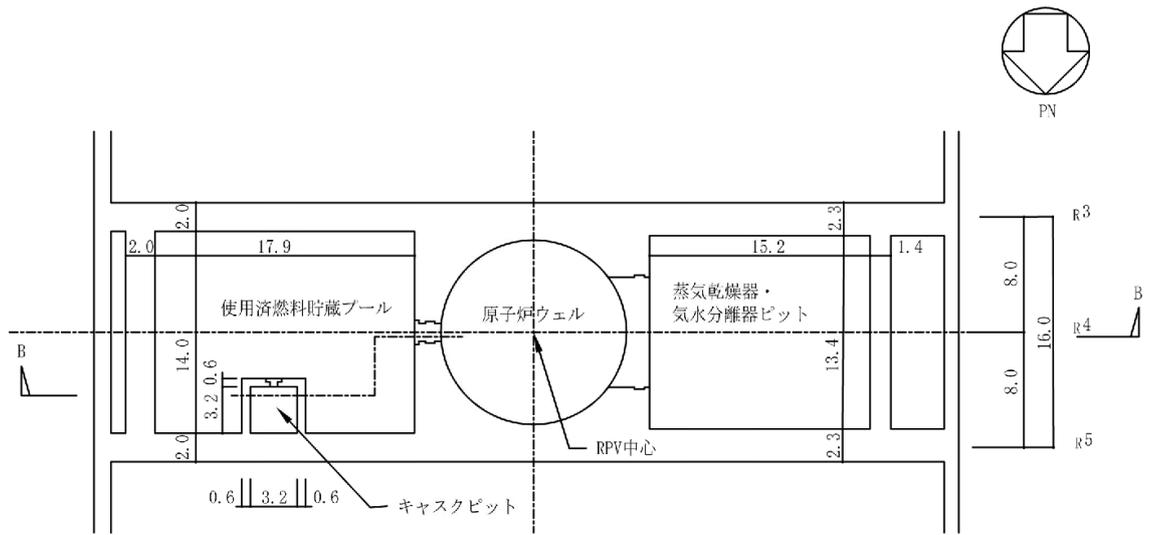


図 2-4 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット周りの概略平面図（単位：m）

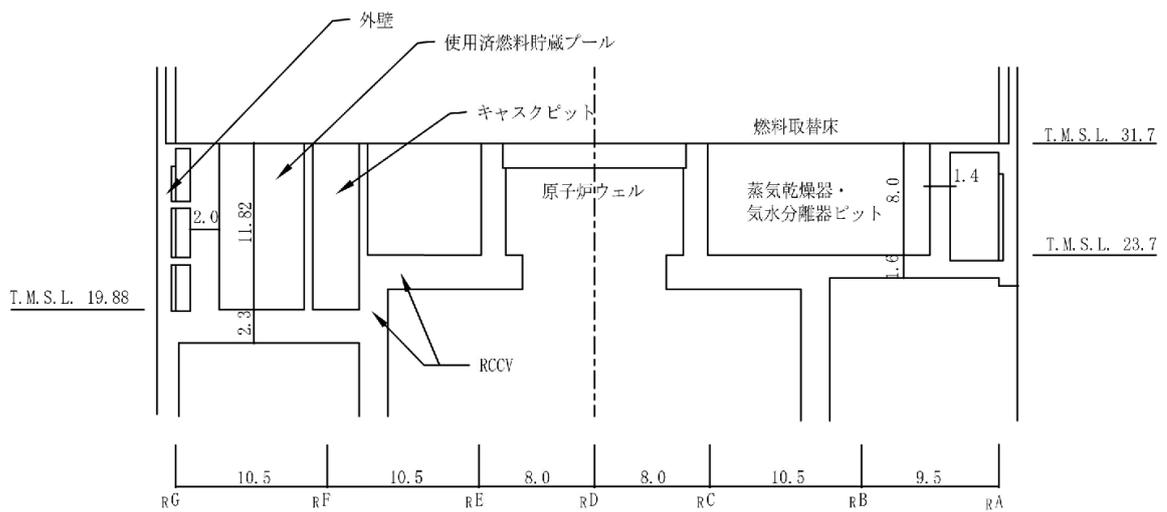


図 2-5 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット周りの概略断面図
（B-B 断面）（単位：m）

2.3 評価方針

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備」及び「常設重大事故緩和設備」に分類される。

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの設計基準対象施設としての評価においては、弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力（以下「 S_d 地震時」という。）に対する評価及び基準地震動 S_s による地震力（以下「 S_s 地震時」という。）に対する評価を行うこととし、それぞれの評価は、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの評価は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、以下の3つの荷重の組合せに分類し、応力解析による評価において断面の評価を行うことで、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの地震時の構造強度の確認を行う。

- (1) S_d 地震時
- (2) S_s 地震時
- (3) (異常+ S_d 地震)時

なお、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの地震時の構造強度の確認には、地震応答解析による評価においてせん断ひずみ及び保有水平耐力の評価が必要であるが、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットが原子炉建屋の一部であることを踏まえ、原子炉建屋全体としての評価結果をV-2-2-2「原子炉建屋の耐震性についての計算書」に示すこととする。評価にあたっては、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」による材料物性の不確かさを考慮する。表2-1に材料物性の不確かさを考慮する解析ケースを示す。

また、重大事故等対処施設としての評価においては、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、上記の(2)及び(3)に以下の(4)を加えた3つの荷重の組合せに分類し、応力解析による評価において断面の評価を行うことで、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの地震時の構造強度の確認を行う。

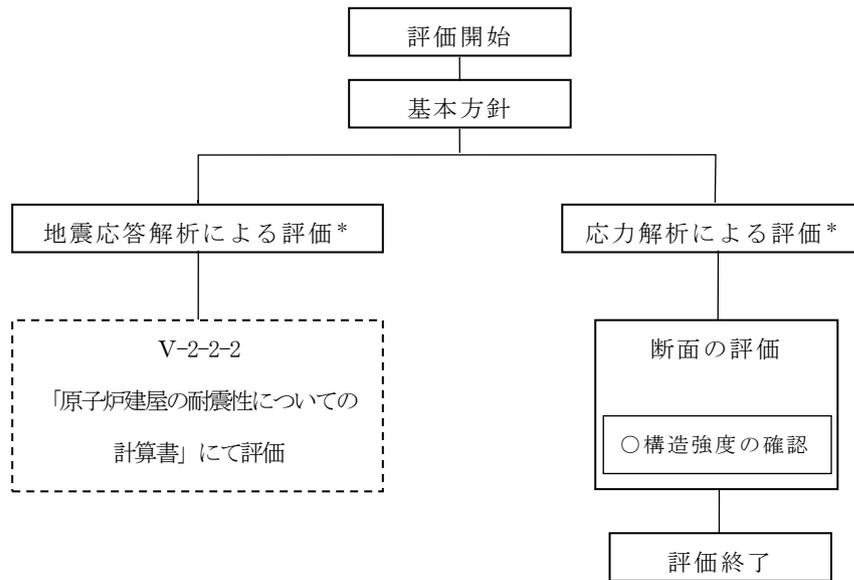
- (4) (異常+ S_s 地震)時

ここで、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットにおける(2)及び(3)の荷重の組合せでは、運転時、設計基準事故時の状態において、温度の条件が異なるが、コンクリートの温度が上昇した場合においても、コンクリートの圧縮強度の低下は認められず、剛性低下は認められるがその影響は小さいと考えられる（別紙「鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット）」参照）こと、また、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」では部材内の温度差及び拘束力により発生する熱応力は自己拘束的な応力であり十分な塑性変形能力がある場合は終局耐力に影響しないこととされていることから、

重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設としての評価と同一となる。
 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの評価フローを図 2-6 に示す。

表 2-1 材料物性の不確かさを考慮する解析ケース

検討ケース	コンクリート 剛性	回転ばね 定数	地盤剛性	備考
①ケース1 (工認モデル)	実強度 (43.1N/mm ²)	100%	標準地盤	基本ケース
②ケース2 (建屋剛性+ σ , 地盤剛性+ σ)	実強度+ σ (46.0N/mm ²)	100%	標準地盤+ σ (砂層+13%, 古安田層+25%, 西山層+10%)	地盤剛性の変化 に伴い、回転ば ね定数が変化
③ケース3 (建屋剛性- σ , 地盤剛性- σ)	実強度- σ (40.2N/mm ²)	100%	標準地盤- σ (砂層-13%, 古安田層-25%, 西山層-10%)	地盤剛性の変化 に伴い、回転ば ね定数が変化
④ケース4 (建屋剛性コア平均)	実強度 (コア平均) (55.7N/mm ²)	100%	標準地盤	
⑤ケース5 (建屋剛性-2 σ)	実強度-2 σ (37.2N/mm ²)	100%	標準地盤	
⑥ケース6 (回転ばね低減)	実強度 (43.1N/mm ²)	50%	標準地盤	



注記* : V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-6 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの評価フロー

2.4 適用規格・基準等

本評価において、適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説　－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，1999 改定）（以下「RC 規準」という。）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）（以下「RC-N 規準」という。）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針　重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補－1984（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 －1987（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1 －1987」という。）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 －1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ 発電用原子力設備規格　コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）（以下「CCV 規格」という。）

3. 応力解析による評価方法

3.1 評価対象部位及び評価方針

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの応力解析による評価対象部位は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットを構成する壁及び底面スラブとし、3次元FEMモデルを用いた応力解析により評価を行う。3次元FEMモデルを用いた応力解析にあたっては、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」及び平成5年6月17日付け4資庁第14562号にて認可された工事計画の添付資料IV-2-4-2-1「使用済燃料貯蔵プール（キャスクピットを含む。）の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）による荷重を用いて、荷重の組合せを行う。

「2.3 評価方針」に示した4つの荷重の組合せに対しては、以下の(1)～(3)の方針に基づき断面の評価を行う。また、応力解析による評価フローを図3-1に示す。

(1) S d 地震時に対する評価

S d 地震時に対する評価は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットについて、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、CCV規格に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

また、断面の評価については、材料物性の不確かさを考慮した断面力に対して行うこととする。

(2) S s 地震時及び（異常＋S d 地震）時に対する評価

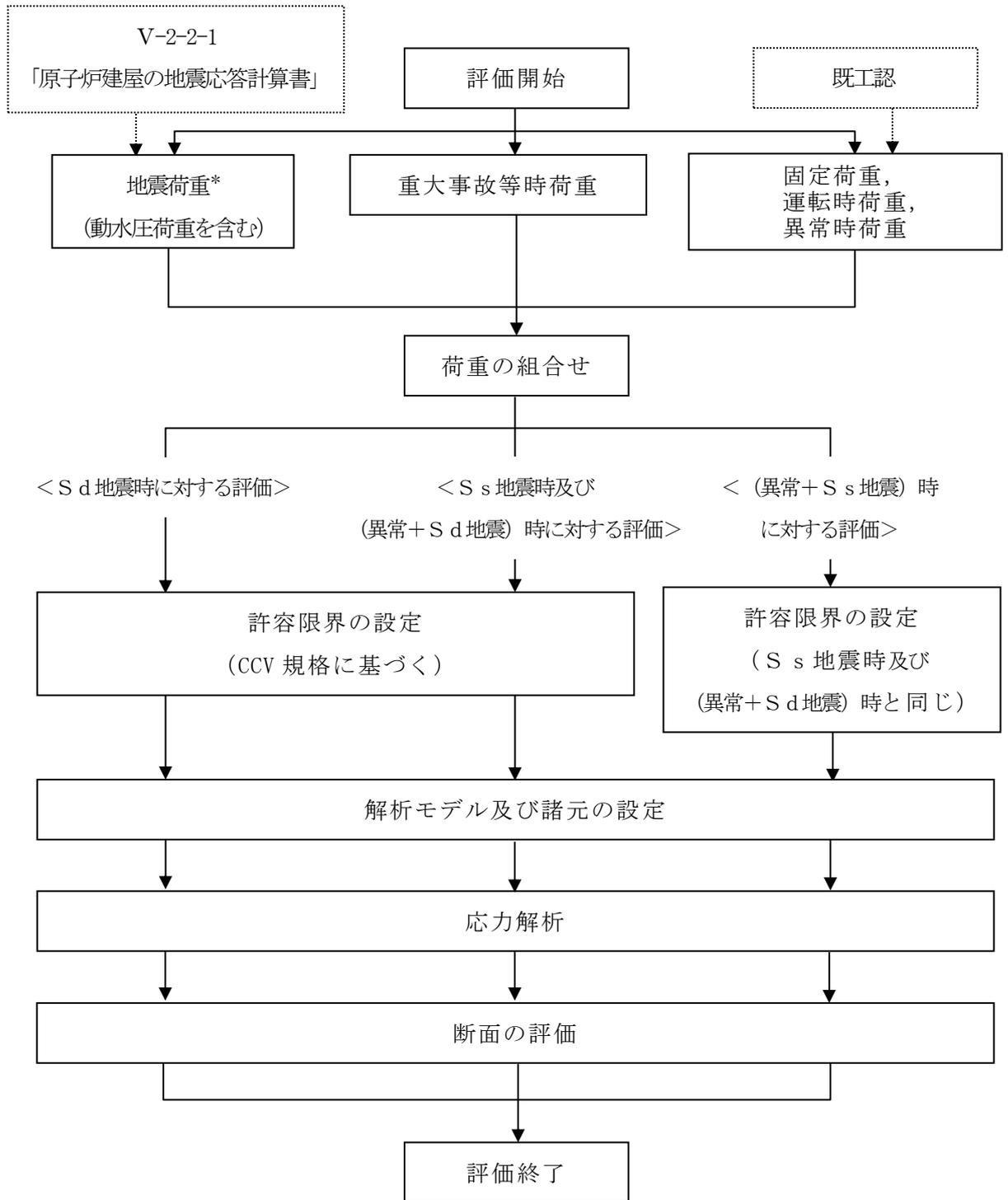
S s 地震時及び（異常＋S d 地震）時に対する評価は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットについて、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力又はひずみが、CCV規格に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

また、断面の評価については、材料物性の不確かさを考慮した断面力に対して行うこととする。

(3) （異常＋S s 地震）時に対する評価

（異常＋S s 地震）時に対する評価は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットについて、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力又はひずみが、(2)と同じものとして設定した許容限界を超えないことを確認する。

また、断面の評価については、材料物性の不確かさを考慮した断面力に対して行うこととする。



注記* : 材料物性の不確かさについては、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」に基づき設定する。

図 3-1 応力解析による評価フロー

3.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 固定荷重

固定荷重として次のものを考慮する。

a. 死荷重及び活荷重 (DL)

死荷重及び活荷重は、既工認に基づき、次のものを考慮する。

- ・鉄筋コンクリート構造体の自重・・・23.5kN/m³
- ・使用済燃料貯蔵プールに格納される使用済燃料及びその他の機器重量・・・153kN/m²
- ・使用済燃料貯蔵プールの内容水による静水圧（水面を T.M.S.L. 31.7m より 0.31m 下りとする。）・・・113kN/m²

(2) 運転時荷重

運転時の状態で作用する荷重として次のものを考慮する。各荷重については、既工認に基づき設定する。

a. 運転時圧力 (P₁)

運転時において、RCCV の内部と外部の圧力差によって生じる荷重で、次の値とする。

$$P_1 = \pm 13.7 \text{ kPa}$$

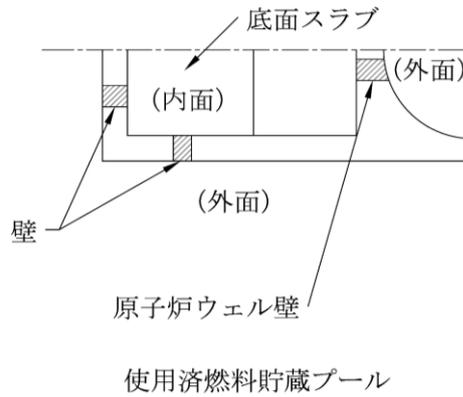
b. 運転時温度荷重 (T₁)

運転時において、プール部に生じる温度変化による荷重及びプール部の内部と外部との温度差によって生じる荷重で、内外表面の温度を表 3-1 のとおり設定する。

表 3-1 運転時内外表面温度

(単位：℃)

	季節	位置	使用済燃料貯蔵プール		
			壁	底面 スラブ	原子炉 ウェル壁
運転時	夏	内面	52.0	52.0	52.0
		外面	42.3	42.0	54.8
	冬	内面	52.0	52.0	52.0
		外面	18.0	17.1	54.6



c. 逃がし安全弁作動時荷重 (H_1)

逃がし安全弁作動時において、サプレッションプールに考慮する水力学的動荷重は、次の値とする。

$$H_1 = \boxed{}$$

(3) 異常時荷重

異常発生後、長時間継続する状態における荷重で、次のものとする。各荷重については、既工認に基づき設定する。

a. 異常時圧力 (P_2)

異常時において、RCCV の内部と外部との圧力差によって生じる荷重で、表 3-2 に示す値とする。

表 3-2 異常時圧力 (P_2)

(単位：kPa)

異常発生後の経過時間	記号	ドライウエル	サプレッションチェンバ
直後	P_{21}	248	177

(4) 重大事故等時荷重

重大事故等時の状態で施設に作用する荷重のうち長期的な荷重として次のものを考慮する。

a. 重大事故等時圧力 (P_{SALL})

重大事故等時において、RCCV の内部と外部の圧力差によって長期的に生じる荷重で、V-1-8-1「原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」の「5.2 荷重の組合せ」より、次の値とする。

$$P_{SALL} = 150\text{kPa}$$

(5) 地震荷重

a. S_d地震荷重 (K_d)

水平地震力は、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び静的地震力より設定する。

鉛直地震力は、鉛直震度として設定する。鉛直震度は、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される鉛直震度及び震度 0.3 を基準とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮した高さ一定方向の鉛直震度より設定する。

S_d地震荷重を表 3-3～表 3-5 に示す。

b. S_s地震荷重 (K_s)

水平地震力及び鉛直地震力は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び鉛直震度より設定する。

S_s地震荷重を表 3-6～表 3-8 に示す。

表 3-3 地震荷重 (K_d) (せん断力)

(a) NS 方向

T. M. S. L. (m)	せん断力 (×10 ³ kN)	
	S d	静的地震力
31.7	20.9	66.2
23.5	81.8	119
18.1	86.6	152
12.3	111	164
4.8	137	169
-1.7	137	183
-8.2		

(b) EW 方向

T. M. S. L. (m)	せん断力 (×10 ³ kN)	
	S d	静的地震力
31.7	44.4	77.1
23.5	129	148
18.1	97.8	161
12.3	113	167
4.8	124	188
-1.7	138	195
-8.2		

表 3-4 地震荷重 (K_d) (曲げモーメント)

(a) NS 方向

T. M. S. L. (m)	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)	
	S d	静的地震力
31.7	7.20	4.90
23.5	21.3	54.3
	100	77.2
18.1	145	118
	204	138
12.3	263	207
	328	218
4.8	416	330
	459	330
-1.7	527	439
	527	439
-8.2	608	558

(b) EW 方向

T. M. S. L. (m)	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)	
	S d	静的地震力
31.7	61.6	44.9
23.5	90.6	63.3
	-116	-95.1
18.1	-58.3	-31.2
	-79.7	-56.3
12.3	128	78.6
	197	126
4.8	293	204
	348	213
-1.7	449	327
	484	327
-8.2	578	453
回転ばね*	240	158

注記* : プール壁が RCCV の曲げ変形を拘束する影響を考慮した回転ばね。

表 3-5 地震荷重 (K_d) (鉛直震度)

T. M. S. L. (m)	鉛直震度	
	S d	静的地震力
31.7	0.47	0.24
23.5	0.46	0.24
18.1	0.45	0.24
12.3	0.43	0.24
4.8	0.42	0.24
-1.7	0.41	0.24
-8.2	0.41	0.24

表 3-6 地震荷重 (K_s) (せん断力)

(a) NS 方向

T. M. S. L. (m)	せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)
	S s
31.7	77.7
23.5	161
18.1	182
12.3	254
4.8	279
-1.7	246
-8.2	

(b) EW 方向

T. M. S. L. (m)	せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)
	S s
31.7	73.4
23.5	223
18.1	194
12.3	268
4.8	299
-1.7	268
-8.2	

表 3-7 地震荷重 (K_s) (曲げモーメント)

(a) NS 方向

T. M. S. L. (m)	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)
	S s
31.7	13.7
23.5	64.4
	153
18.1	217
	313
12.3	419
	510
4.8	679
	786
-1.7	911
	911
-8.2	1069

(b) EW 方向

T. M. S. L. (m)	曲げモーメント ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}$)
	S s
31.7	126
23.5	163
	-349
18.1	-219
	-158
12.3	181
	301
4.8	466
	573
-1.7	746
	806
-8.2	960
回転ばね*	518

注記* : プール壁が RCCV の曲げ変形を拘束する影響を考慮した回転ばね。

表 3-8 地震荷重 (K_s) (鉛直震度)

T. M. S. L. (m)	鉛直震度
	S_s
31.7	0.95
23.5	0.93
18.1	0.90
12.3	0.87
4.8	0.83
-1.7	0.83
-8.2	0.84

c. 地震時配管荷重 (R_d , R_s)

地震時において、配管貫通部には、表 3-9 に示す地震時配管荷重を同時に考慮する。

表 3-9 地震時配管荷重 (R_d , R_s)

記号	配管	N (kN)	Q (kN)	M_t (kN·m)	M (kN·m)
R_d	主蒸気配管	2950	940	1320	2990
	給水配管	1100	446	590	1510
R_s	主蒸気配管	3900	1340	1810	4150
	給水配管	1470	606	749	2060

注 1: N, Q, M_t , Mは、下図に示すとおりである。

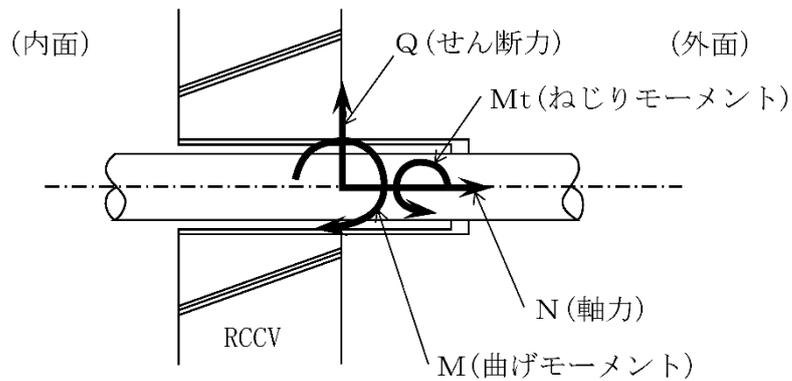
注 2: 数値は、1 本当たりの絶対値を示す。

注 3: 開口部の位置、開口径はV-2-9-2-1「原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書」による。

注 4: R_d は、 S_d 地震荷重と同時に作用するものとする。

注 5: R_s は、 S_s 地震荷重と同時に作用するものとする。

注 6: M (曲げモーメント) については、せん断力による効果も併せて考慮した。

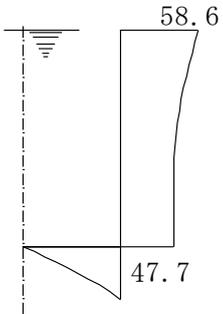
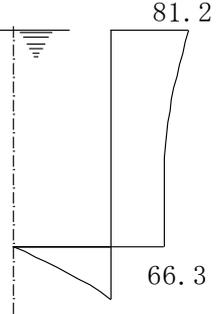
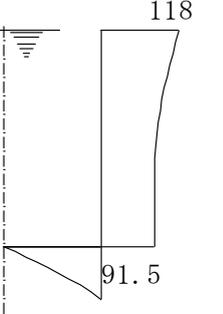
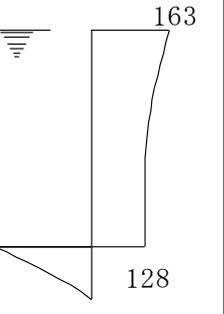


d. 地震時動水圧荷重 (KH)

使用済燃料貯蔵プールに作用する地震時動水圧荷重は、J E A G 4 6 0 1 - 1987 における Housner 理論に基づき、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」に示す弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s による応答解析結果から衝撃圧及び揺動圧を算定する。地震時動水圧荷重を表 3-10 に示す。

表 3-10 地震時動水圧荷重 (KH)

(単位 : kN/m²)

KH _d *1		KH _s *2	
NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
			

注記*1 : KH_dは、S_d地震荷重と同時に作用するものとする。

*2 : KH_sは、S_s地震荷重と同時に作用するものとする。

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-11 に示す。

表 3-11 荷重の組合せ

外力の状態	荷重 番号	荷重の組合せ
S _d 地震時*	1	$DL + P_1 + T_1 + H_1 + K_d + R_d + KH_d$
S _s 地震時	2	$DL + P_1 + H_1 + K_s + R_s + KH_s$
(異常 + S _d 地震) 時	3	$DL + P_{21} + K_d + R_d + KH_d$
(異常 + S _s 地震) 時	4	$DL + P_{SALL} + K_s + R_s + KH_s$

注記* : 温度荷重がない場合も考慮する。

- DL : 死荷重及び活荷重
- P₁ : 運転時圧力
- T₁ : 運転時温度荷重
- H₁ : 逃がし安全弁作動時荷重
- P₂₁ : 異常時圧力 (直後)
- P_{SALL} : 重大事故等時圧力
- K_d, K_s : 地震荷重
- R_d, R_s : 地震時配管荷重
- KH_d, KH_s : 地震時動水圧荷重

3.3 許容限界

応力解析による評価における使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの許容限界は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限の方針に基づき、表3-12及び表3-13のとおり設定する。

また、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表3-14及び表3-15に、コンクリート及び鉄筋の許容ひずみを表3-16に示す。

表3-12 応力解析による評価における許容限界
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	外力の状態	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	S _d 地震時	壁及び底面スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	CCV規格に基づく荷重状態Ⅲの許容値
		S _s 地震時	壁及び底面スラブ	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	CCV規格に基づく荷重状態Ⅳの許容値
		(異常+S _d 地震)時	壁及び底面スラブ		

表3-13 応力解析による評価における許容限界
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	外力の状態	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	S _s 地震時	壁及び底面スラブ	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	CCV規格に基づく荷重状態Ⅳの許容値
		(異常+S _d 地震)時	壁及び底面スラブ		
		(異常+S _s 地震)時	壁及び底面スラブ		(異常+S _s 地震)時の許容値*

注記* : S_s地震時及び(異常+S_d地震)時の許容限界と同じ許容限界を適用する。

表 3-14 コンクリートの許容応力度

(単位：N/mm²)

外力の状態	設計基準強度 $F_c = 32.3$			
	応力状態1* ¹		応力状態2* ²	
	圧縮	せん断	圧縮	せん断
S d 地震時	21.4	1.21	24.2	1.21
S s 地震時 (異常 + S d 地震) 時 (異常 + S s 地震) 時	21.4* ³	1.21	—	—

注記*1：「応力状態1」とは、各荷重状態において温度荷重により生じる応力を除いた応力が生じている状態をいう。

*2：「応力状態2」とは、各荷重状態において温度荷重による応力が生じている状態をいう。

*3：軸力の検討に用いる許容圧縮応力度を示す。

表 3-15 鉄筋の許容応力度

(単位：N/mm²)

外力の状態	引張及び圧縮	面外せん断補強
S d 地震時	SD35 (SD345 相当)	SD35 (SD345 相当)
	345	345

表 3-16 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ

外力の状態	コンクリート (圧縮ひずみ)	鉄筋 (圧縮ひずみ及び引張ひずみ)
S s 地震時 (異常 + S d 地震) 時 (異常 + S s 地震) 時	0.003	0.005

3.4 解析モデル及び諸元

3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 基本方針

S d 地震時における応力解析は、3次元 FEM モデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。S s 地震時、(異常+S d 地震) 時及び(異常+S s 地震) 時における応力解析は、3次元 FEM モデルを用いた弾塑性応力解析を実施する。解析には、解析コード「Abaqus」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

応力解析モデルは、プール部のほか、RCCV、ダイヤフラムフロア及び基礎スラブを一体としたモデルである。応力解析における評価対象部位は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの壁及び底面スラブであるが、各部の荷重伝達を考慮するために周辺部を含むモデルを用いることとした。なお、本解析モデルは、V-2-9-2-1「原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書」と同一である。解析モデル概要図を図 3-2 に示す。

S d 地震時における熱応力の解析に用いるコンクリートの弾性係数は、1/3 に低減した値を用いる。

(2) 使用要素

S d 地震時における解析モデルに使用する FEM 要素は、シェル要素とする。使用する要素は四辺形及び三角形で、この要素は均質等方性材料によるシェル要素である。

S s 地震時、(異常+S d 地震) 時及び(異常+S s 地震) 時における解析モデルに使用する FEM 要素は、積層シェル要素とする。使用する要素は四辺形及び三角形で、この要素は鉄筋層をモデル化した異方性材料による積層シェル要素である。

各要素には、板の曲げと軸力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。

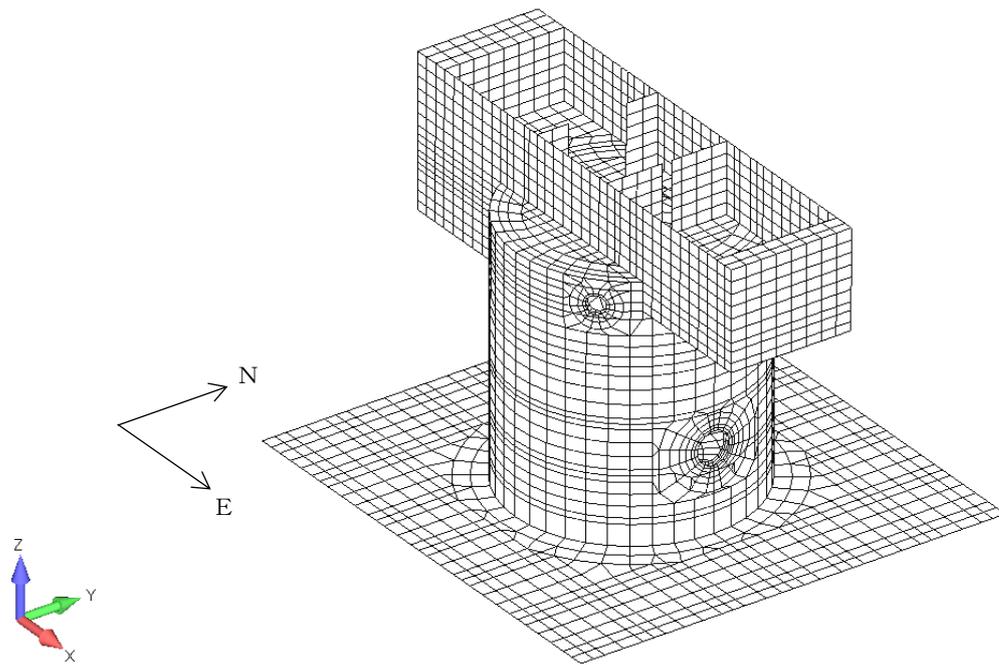
解析モデルの節点数は 7805、要素数は 11024 である。

(3) 境界条件

3次元 FEM モデルの基礎スラブ底面及び側面に、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」に示す地盤ばねを離散化して、水平方向及び鉛直方向のばねを設ける。3次元 FEM モデルの水平方向のばねについては、地震応答解析モデルのスウェイばね及び側面水平ばねを、鉛直方向のばねについては、地震応答解析モデル

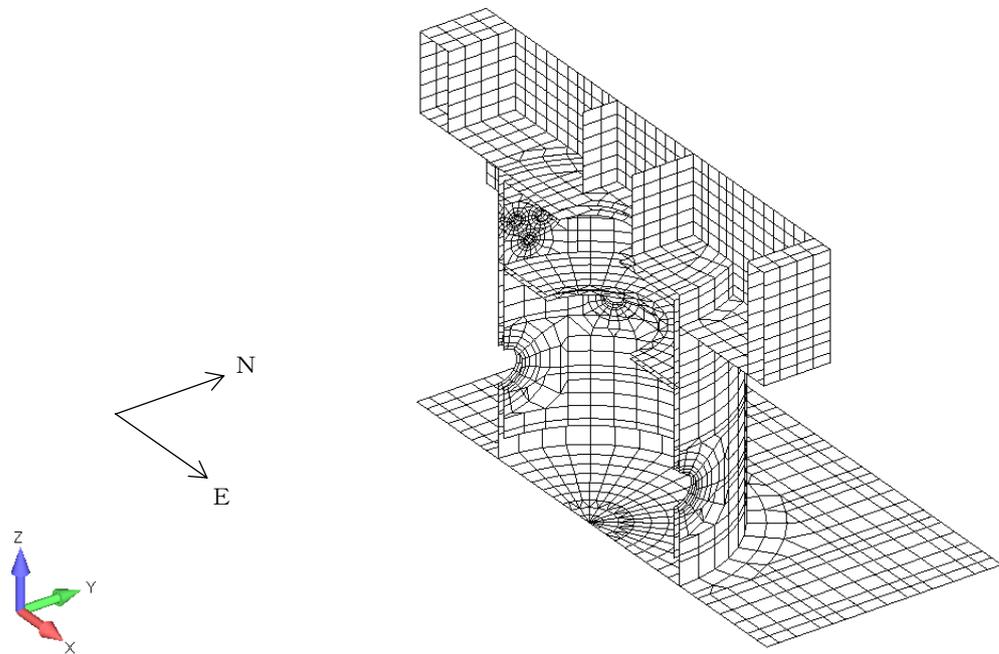
のロックンクばね及び側面回転ばねを基に設定を行う。なお、基礎スラブ底面の地盤ばねについては、引張力が発生したときに浮上りを考慮する。

また、3次元 FEM モデルの上部構造物に対する周辺床及び外壁の剛性並びに基礎スラブに対する上部構造物の剛性を考慮する。



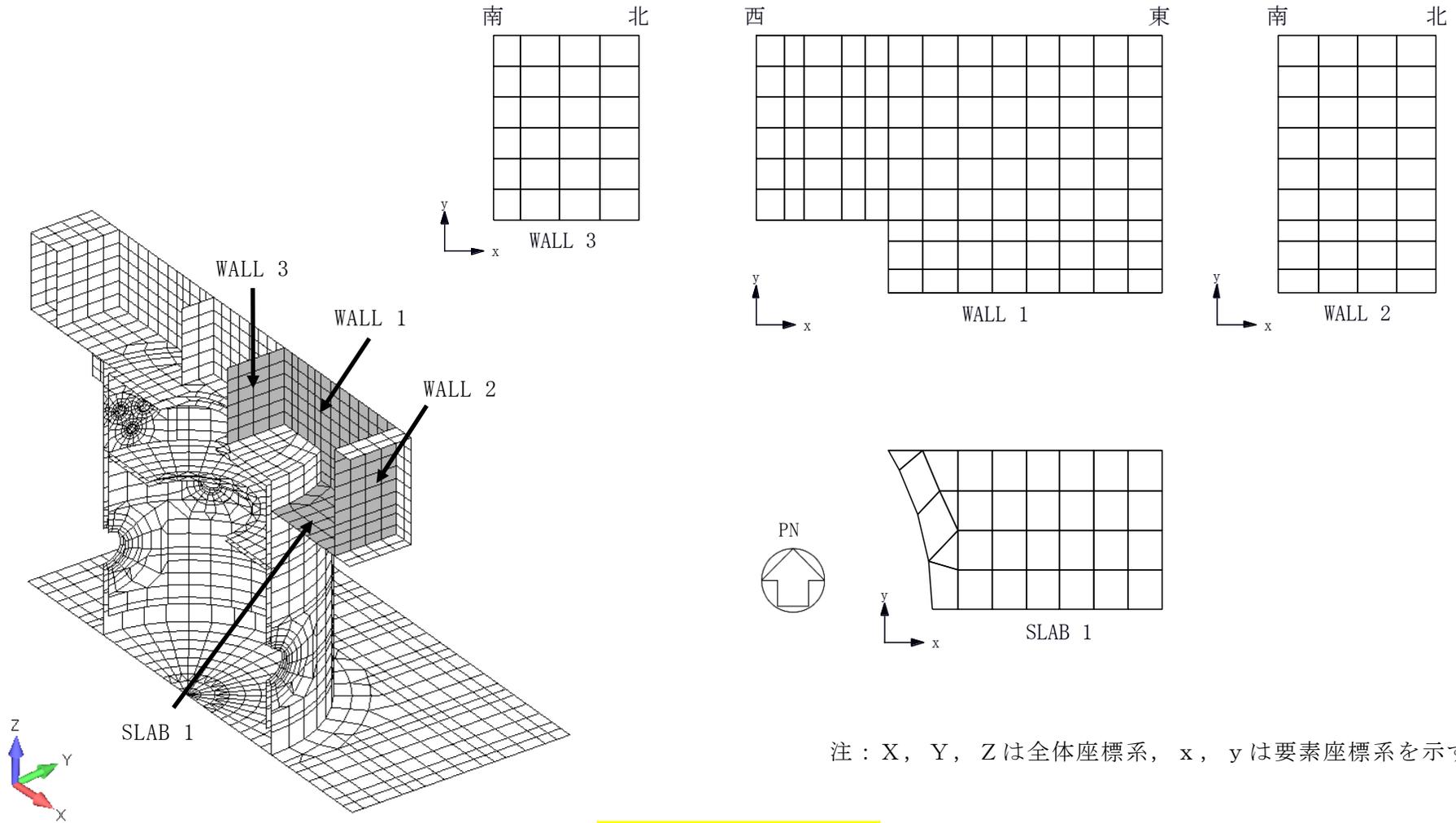
(a) 全体鳥瞰図

図 3-2 解析モデル (1/4)



(b) 全体断面図 (EW 方向断面)

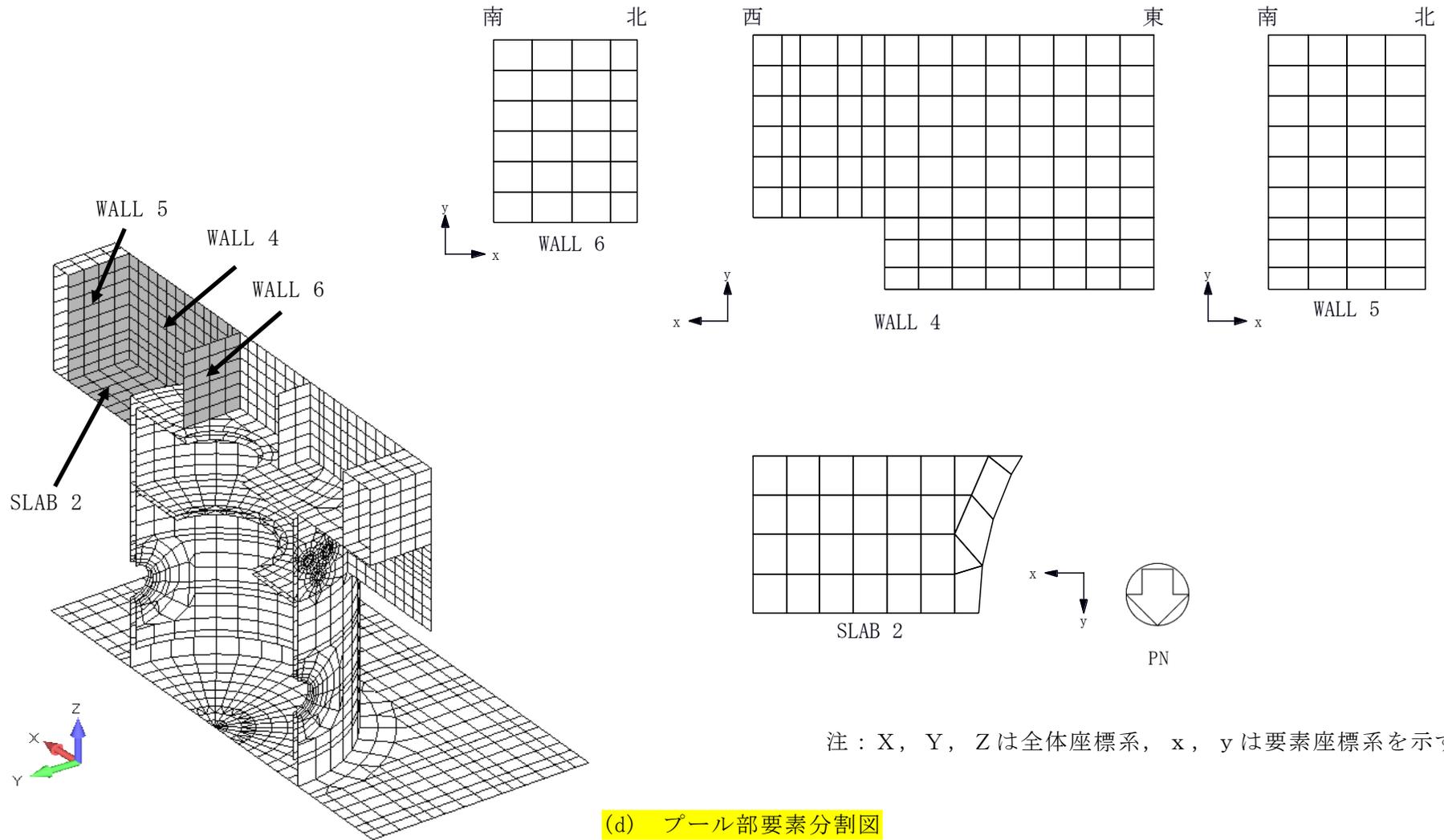
図 3-2 解析モデル (2/4)



注：X，Y，Zは全体座標系，x，yは要素座標系を示す。

(c) プール部要素分割図

図3-2 解析モデル(3/4)



注：X，Y，Zは全体座標系，x，yは要素座標系を示す。

(d) プール部要素分割図

図 3-2 解析モデル (4/4)

3.4.2 解析諸元

使用材料の物性値を表 3-17 及び表 3-18 に示す。

表 3-17 コンクリートの物性値

諸元	物性値	
	上部構造物	基礎スラブ
ヤング係数 (N/mm ²)	2.88×10 ⁴ *1	2.79×10 ⁴ *2
ポアソン比	0.2	0.2

注記*1：剛性はコンクリートの実強度（43.1N/mm²）に基づく。

*2：剛性はコンクリートの実強度（39.2N/mm²）に基づく。

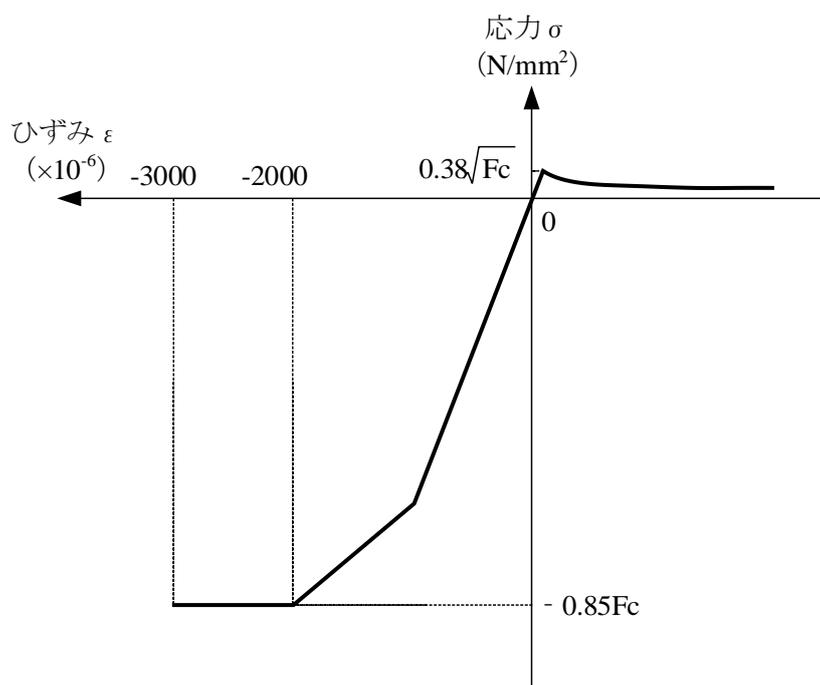
表 3-18 鉄筋の物性値

諸元	物性値
鉄筋の種類	SD40 (SD390 相当) SD35 (SD345 相当)
ヤング係数 (N/mm ²)	2.05×10 ⁵

3.4.3 材料構成則

S s 地震時，（異常＋S d 地震）時及び（異常＋S s 地震）時に対する評価で用いる材料構成則を図 3-3 に示す。

なお，ヤング係数は実強度に基づく値とし，コンクリートの圧縮強度は設計基準強度に基づく値とする。



F_c : コンクリートの設計基準強度

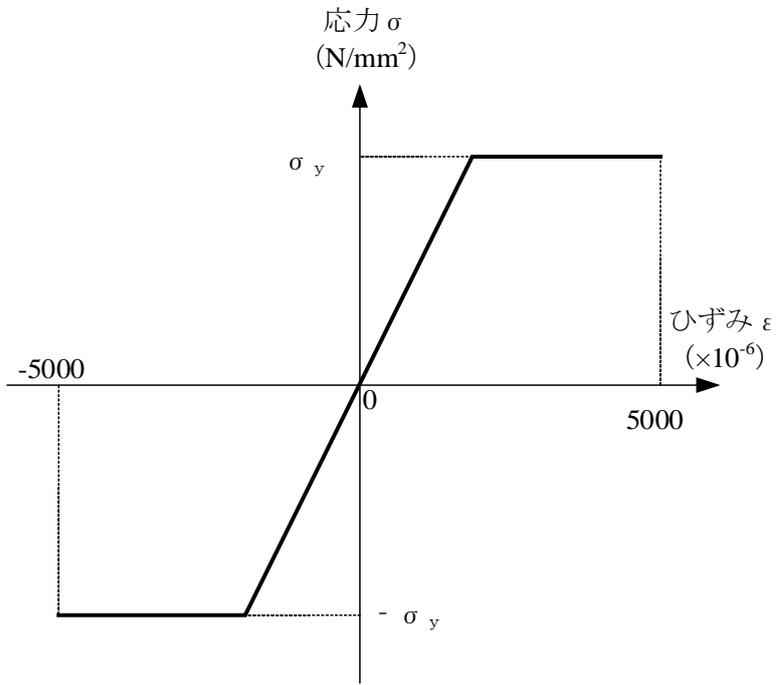
項目	設定
圧縮強度	$-0.85 F_c$ (CCV 規格)
終局圧縮ひずみ	-3000×10^{-6} (CCV 規格)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(1)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか (1987) による式 ($c = 0.4$) (引用文献(2)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38 \sqrt{F_c}$ (RC 規準)

注：引張方向の符号を正とする。

(a) コンクリートの応力-ひずみ関係

図 3-3 材料構成則 (1/2)

- ・ 鉄筋の構成則：バイリニア型
- ・ 終局ひずみ： $\pm 5000 \times 10^{-6}$ （CCV規格）



σ_y : 鉄筋の降伏強度

注：引張方向の符号を正とする。

(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図 3-3 材料構成則 (2/2)

3.5 評価方法

3.5.1 応力解析方法

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットについて、S_d地震時に対して3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施し、S_s地震時、(異常+S_d地震)時及び(異常+S_s地震)時に対して3次元FEMモデルを用いた弾塑性応力解析を実施する。

(1) 荷重ケース

それぞれの外力の状態の応力は、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

DL	: 死荷重及び活荷重
P ₁	: 運転時圧力
T ₁	: 運転時温度荷重
H ₁	: 逃がし安全弁作動時荷重
P ₂₁	: 異常時圧力 (直後)
P _{SALL}	: 重大事故等時圧力
K _{d1SN} *	: S→N 方向 S _d 地震荷重 (動的地震力)
K _{d1WE} *	: W→E 方向 S _d 地震荷重 (動的地震力)
K _{d1DU} *	: 鉛直方向 S _d 地震荷重 (動的地震力)
K _{d2SN} *	: S→N 方向 S _d 地震荷重 (静的地震力)
K _{d2WE} *	: W→E 方向 S _d 地震荷重 (静的地震力)
K _{d2DU} *	: 鉛直方向 S _d 地震荷重 (静的地震力)
K _{sSN} *	: S→N 方向 S _s 地震荷重
K _{sWE} *	: W→E 方向 S _s 地震荷重
K _{sDU} *	: 鉛直方向 S _s 地震荷重
R _d	: S _d 地震時配管荷重
R _s	: S _s 地震時配管荷重
KH _{dWE} *	: W→E 方向 S _d 地震時動水圧荷重
KH _{dSN} *	: S→N 方向 S _d 地震時動水圧荷重
KH _{sWE} *	: W→E 方向 S _s 地震時動水圧荷重
KH _{sSN} *	: S→N 方向 S _s 地震時動水圧荷重

注記* : 計算上の座標軸を基準として、EW 方向は W→E 方向の加力、NS 方向は S→N 方向の加力、鉛直方向は上向きの加力を記載している。

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-19 に示す。

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 - 2008 ((社) 日本電気協会)」を参考に、組合せ係数法 (組合せ係数は 1.0 と 0.4) を用いるものとする。

表 3-19 荷重の組合せケース (1/4)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S d 地震時	1-1	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d1SN} + 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	1-2	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d1WE} + 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	1-3	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d1SN} + 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	1-4	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d1WE} + 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	1-5	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d1SN} - 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	1-6	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d1WE} - 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	1-7	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d1SN} - 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	1-8	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d1WE} - 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	1-9	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 0.4K_{d1SN} + 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dSN}$
	1-10	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 0.4K_{d1WE} + 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dWE}$
	1-11	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 0.4K_{d1SN} + 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dSN}$
	1-12	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 0.4K_{d1WE} + 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dWE}$
	1-13	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 0.4K_{d1SN} - 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dSN}$
	1-14	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 0.4K_{d1WE} - 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dWE}$
	1-15	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 0.4K_{d1SN} - 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dSN}$
	1-16	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 0.4K_{d1WE} - 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dWE}$
	1-17	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d2SN} + 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	1-18	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d2WE} + 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	1-19	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d2SN} + 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	1-20	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d2WE} + 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	1-21	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d2SN} - 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	1-22	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 + 1.0K_{d2WE} - 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	1-23	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d2SN} - 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	1-24	$DL + P_1 + [T_1] + H_1 - 1.0K_{d2WE} - 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$

注：[]は応力状態 2 に対する荷重を表す。

表 3-19 荷重の組合せケース (2/4)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S s 地震時	2-1	$DL + P_1 + H_1 + 1.0K_{sSN} + 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sSN}$
	2-2	$DL + P_1 + H_1 + 1.0K_{sWE} + 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sWE}$
	2-3	$DL + P_1 + H_1 - 1.0K_{sSN} + 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sSN}$
	2-4	$DL + P_1 + H_1 - 1.0K_{sWE} + 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sWE}$
	2-5	$DL + P_1 + H_1 + 1.0K_{sSN} - 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sSN}$
	2-6	$DL + P_1 + H_1 + 1.0K_{sWE} - 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sWE}$
	2-7	$DL + P_1 + H_1 - 1.0K_{sSN} - 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sSN}$
	2-8	$DL + P_1 + H_1 - 1.0K_{sWE} - 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sWE}$
	2-9	$DL + P_1 + H_1 + 0.4K_{sSN} + 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sSN}$
	2-10	$DL + P_1 + H_1 + 0.4K_{sWE} + 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sWE}$
	2-11	$DL + P_1 + H_1 - 0.4K_{sSN} + 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sSN}$
	2-12	$DL + P_1 + H_1 - 0.4K_{sWE} + 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sWE}$
	2-13	$DL + P_1 + H_1 + 0.4K_{sSN} - 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sSN}$
	2-14	$DL + P_1 + H_1 + 0.4K_{sWE} - 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sWE}$
	2-15	$DL + P_1 + H_1 - 0.4K_{sSN} - 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sSN}$
	2-16	$DL + P_1 + H_1 - 0.4K_{sWE} - 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sWE}$

表 3-19 荷重の組合せケース (3/4)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
(異常 + S d 地震) 時	3-1	$DL + P_{21} + 1.0K_{d1SN} + 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	3-2	$DL + P_{21} + 1.0K_{d1WE} + 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	3-3	$DL + P_{21} - 1.0K_{d1SN} + 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	3-4	$DL + P_{21} - 1.0K_{d1WE} + 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	3-5	$DL + P_{21} + 1.0K_{d1SN} - 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	3-6	$DL + P_{21} + 1.0K_{d1WE} - 0.4K_{d1DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	3-7	$DL + P_{21} - 1.0K_{d1SN} - 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	3-8	$DL + P_{21} - 1.0K_{d1WE} - 0.4K_{d1DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	3-9	$DL + P_{21} + 0.4K_{d1SN} + 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dSN}$
	3-10	$DL + P_{21} + 0.4K_{d1WE} + 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dWE}$
	3-11	$DL + P_{21} - 0.4K_{d1SN} + 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dSN}$
	3-12	$DL + P_{21} - 0.4K_{d1WE} + 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dWE}$
	3-13	$DL + P_{21} + 0.4K_{d1SN} - 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dSN}$
	3-14	$DL + P_{21} + 0.4K_{d1WE} - 1.0K_{d1DU} + R_d + 0.4KH_{dWE}$
	3-15	$DL + P_{21} - 0.4K_{d1SN} - 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dSN}$
	3-16	$DL + P_{21} - 0.4K_{d1WE} - 1.0K_{d1DU} + R_d - 0.4KH_{dWE}$
	3-17	$DL + P_{21} + 1.0K_{d2SN} + 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	3-18	$DL + P_{21} + 1.0K_{d2WE} + 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	3-19	$DL + P_{21} - 1.0K_{d2SN} + 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	3-20	$DL + P_{21} - 1.0K_{d2WE} + 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$
	3-21	$DL + P_{21} + 1.0K_{d2SN} - 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dSN}$
	3-22	$DL + P_{21} + 1.0K_{d2WE} - 1.0K_{d2DU} + R_d + 1.0KH_{dWE}$
	3-23	$DL + P_{21} - 1.0K_{d2SN} - 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dSN}$
	3-24	$DL + P_{21} - 1.0K_{d2WE} - 1.0K_{d2DU} + R_d - 1.0KH_{dWE}$

表 3-19 荷重の組合せケース (4/4)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
(異常 + S _s 地震) 時	4-1	$DL + P_{SALL} + 1.0K_{sSN} + 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sSN}$
	4-2	$DL + P_{SALL} + 1.0K_{sWE} + 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sWE}$
	4-3	$DL + P_{SALL} - 1.0K_{sSN} + 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sSN}$
	4-4	$DL + P_{SALL} - 1.0K_{sWE} + 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sWE}$
	4-5	$DL + P_{SALL} + 1.0K_{sSN} - 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sSN}$
	4-6	$DL + P_{SALL} + 1.0K_{sWE} - 0.4K_{sDU} + R_s + 1.0KH_{sWE}$
	4-7	$DL + P_{SALL} - 1.0K_{sSN} - 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sSN}$
	4-8	$DL + P_{SALL} - 1.0K_{sWE} - 0.4K_{sDU} + R_s - 1.0KH_{sWE}$
	4-9	$DL + P_{SALL} + 0.4K_{sSN} + 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sSN}$
	4-10	$DL + P_{SALL} + 0.4K_{sWE} + 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sWE}$
	4-11	$DL + P_{SALL} - 0.4K_{sSN} + 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sSN}$
	4-12	$DL + P_{SALL} - 0.4K_{sWE} + 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sWE}$
	4-13	$DL + P_{SALL} + 0.4K_{sSN} - 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sSN}$
	4-14	$DL + P_{SALL} + 0.4K_{sWE} - 1.0K_{sDU} + R_s + 0.4KH_{sWE}$
	4-15	$DL + P_{SALL} - 0.4K_{sSN} - 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sSN}$
	4-16	$DL + P_{SALL} - 0.4K_{sWE} - 1.0K_{sDU} + R_s - 0.4KH_{sWE}$

(3) 荷重の入力方法

a. 地震荷重

水平地震力については，各階のせん断力及び曲げモーメントを各床レベルの節点に離散化して節点荷重として入力する。

鉛直地震力については，モデル上の各節点における鉛直震度により支配面積に応じた節点力として入力する。

b. 温度荷重

S d 地震時における熱応力については，CCV 規格に基づき，部材の剛性を一律に低減する一律低減法により評価する。

c. 地震荷重及び温度荷重以外の荷重

地震荷重及び温度荷重以外の荷重については，FEM モデルの各節点又は各要素に，集中荷重又は分布荷重として入力する。

3.5.2 断面の評価方法

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの断面の評価に用いる応力は、3次元 FEM モデルを用いた応力解析により得られた各荷重による応力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）とする。壁及び底面スラブの断面力成分を図 3-4 に示す。

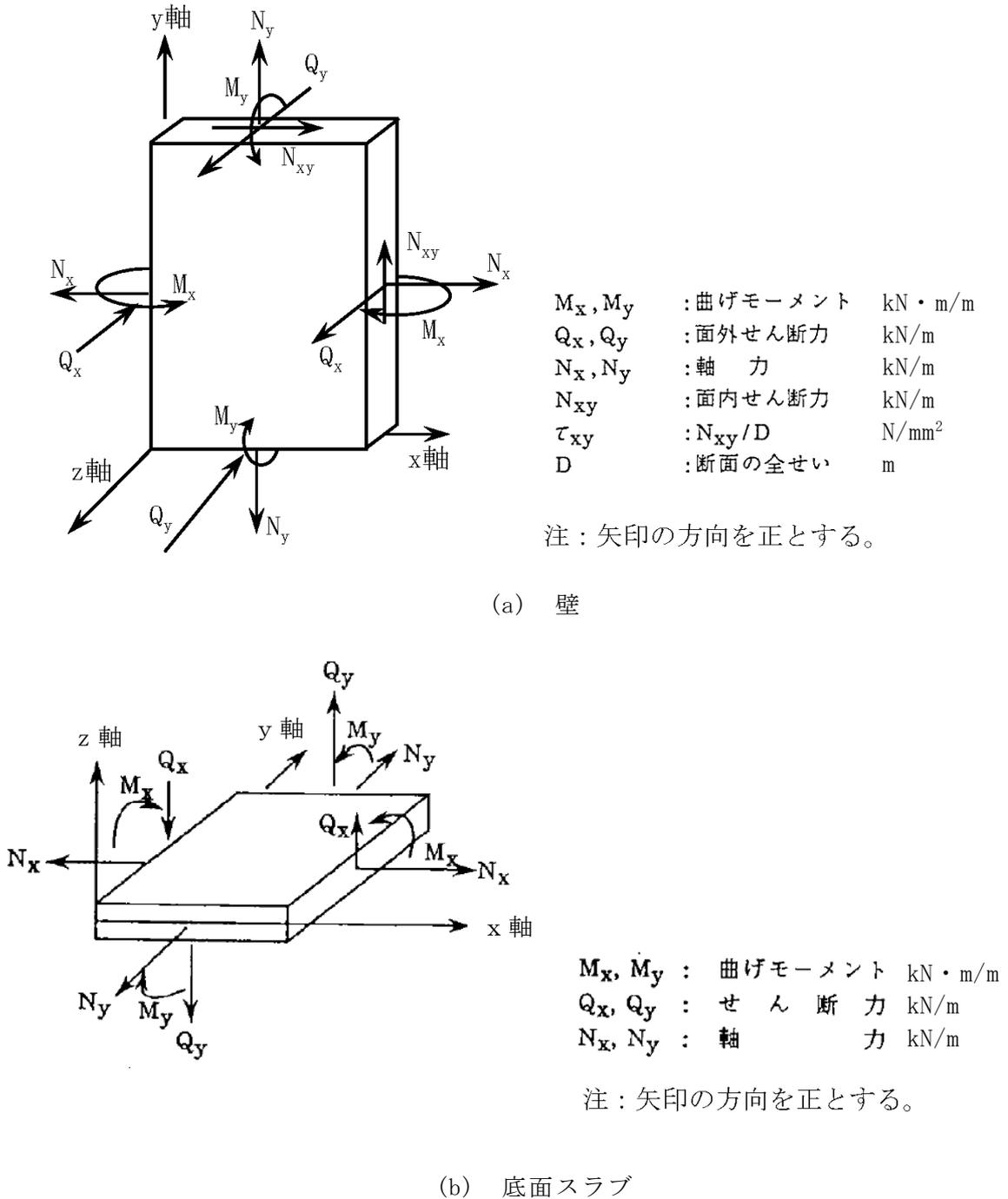


図 3-4 壁及び底面スラブの断面力成分

(1) S d 地震時

a. 壁

軸力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度，面内せん断力並びに面外せん断力を算定し，CCV 規格に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

(a) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

各断面は，子午線方向及び円周方向各々について，膜力及び曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート造長方形仮想柱として算定する。この場合，膜力は同時に作用する面内せん断力の影響を考慮して，CCV 規格の CVE-3511-1 及び CVE-3511-2 に示す等価膜力として評価する。

膜力と面内せん断力の関係図を図 3-5 に示す。

等価膜力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度については，表 3-14 及び表 3-15 に示す許容応力度を超えないことを確認する。

$$N_{\phi}^* = N_{\phi} \pm |N_{\phi\theta}| \dots\dots\dots (CVE-3511-1)$$

$$N_{\theta}^* = N_{\theta} \pm |N_{\phi\theta}| \dots\dots\dots (CVE-3511-2)$$

ここで，

- N_{ϕ}^*, N_{θ}^* : ϕ, θ 方向の等価膜力
- N_{ϕ}, N_{θ} : ϕ, θ 方向の膜力
- $N_{\phi\theta}$: 面内せん断力

(ϕ 方向は子午線方向， θ 方向は円周方向とする)

上記のうち，「膜力」は「軸力」に読み替えることとする。また，「子午線方向」は「縦方向」に，「円周方向」は「横方向」にそれぞれ読み替えることとする。

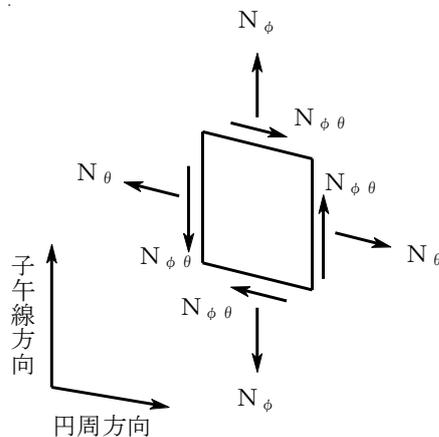


図3-5 膜力と面内せん断力の関係図

(b) 面内せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、CCV規格のCVE-3512.1に準拠して行う。

面内せん断応力度が、CVE-3512.2-1及びCVE-3512.2-2より計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の値の0.75倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_u = 0.5 \left\{ (p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{o\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{o\theta}) \right\} \quad (\text{CVE-3512.2-1})$$

$$\tau_u = 1.10 \sqrt{F_c} \dots\dots\dots (\text{CVE-3512.2-2})$$

ここで、

- τ_u : 終局面内せん断応力度(N/mm²)
- $p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比
- $p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比
- $\sigma_{o\phi}$: 外力により生じる子午線方向の膜応力度(N/mm²) (引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- $\sigma_{o\theta}$: 外力により生じる円周方向の膜応力度(N/mm²) (引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表3-15に示す値(N/mm²)
- F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

上記のうち、「子午線方向主筋」は「縦方向主筋」に、「円周方向主筋」は「横方向主筋」にそれぞれ読み替えることとする。また、「子午線方向の膜応力度」は「縦方向の軸応力度」に、「円周方向の膜応力度」は「横方向の軸応力度」にそれぞれ読み替えることとする。

(c) 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、CCV 規格の CVE-3513.1 に準拠して行う。

面外せん断応力度が、CVE-3513.2-1 及び CVE-3513.2-2 より計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値の 0.75 倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_R = \Phi \left\{ 0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5 \cdot p_w \cdot f_y + 0.235 \sqrt{F_c} \right\} \quad (\text{CVE-3513.2-1})$$

$$\tau_R = 1.10 \sqrt{F_c} \quad \dots\dots\dots (\text{CVE-3513.2-2})$$

ここで、

τ_R : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)

p_t : 主筋の鉄筋比

σ_0 : 外力による膜応力度 (N/mm²) (引張の符号を正とする)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値

$$p_w = a_w / (b \cdot x) \quad \dots\dots\dots (\text{CVE-3513.2-3})$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

b : 断面の幅 (mm)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

Φ : 低減係数であり、次の計算式により計算した値

(1を超える場合は1, 0.58未満の場合は0.58とする)

$$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)} \quad \dots\dots\dots (\text{CVE-3513.2-4})$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表3-15に示す値 (N/mm²)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

上記のうち、「外力による膜応力度」は「外力による軸応力度」に読み替えることとする。

b. 底面スラブ

軸力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度並びに面外せん断力を算定し、CCV 規格に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

(a) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

各断面は、軸力及び曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート造長方形仮想柱として算定する。

軸力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度については、表 3-14 及び表 3-15 に示す許容応力度を超えないことを確認する。

(b) 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、CCV規格のCVE-3522に準拠して行う。

面外せん断力が、CVE-3522-1又はCVE-3522-2より計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot c f_s \quad \dots\dots\dots (CVE-3522-1)$$

ここで、

- Q_A : 許容面外せん断力(N)
- b : 断面の幅(mm)
- j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの7/8倍の値(mm)
- $c f_s$: コンクリートの許容せん断応力度で、表3-14に示すS d地震時の値(N/mm²)

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot c f_s + 0.5 \cdot w f_t (p_w - 0.002) \} \dots\dots\dots (CVE-3522-2)$$

ここで、

- p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であり、次の計算式により計算した値(0.002以上とし、0.012を超える場合は0.012として計算する)

$$p_w = a_w / (b \cdot x) \quad \dots\dots\dots (CVE-3522-3)$$

- a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積(mm²)
- x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔(mm)
- $w f_t$: 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度であり、表3-15に示す値(N/mm²)
- α : 割増し係数であり、次の計算式により計算した値(2を超える場合は2, 1未満の場合は1とする。また、引張軸力が2N/mm²を超える場合は1とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1} \quad \dots\dots\dots (CVE-3522-4)$$

- M : 曲げモーメント(N・mm)
- Q : せん断力(N)
- d : 断面の有効せい(mm)

(2) S s 地震時，（異常＋S d 地震）時及び（異常＋S s 地震）時

a. 壁

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ，軸力による圧縮応力度，面内せん断力並びに面外せん断力を算定し，CCV 規格に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

(a) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみは，縦方向及び横方向各々について算定し，CCV 規格の CVE-3511.2 に基づき，表 3-16 に示す許容ひずみを超えないことを確認する。

(b) 軸力に対する断面の評価方法

軸力による圧縮応力度については，CVE-3511.3 に準拠してコンクリートの設計基準強度の 2/3 倍を超えないことを確認する。

(c) 面内せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は，CCV 規格の CVE-3512.2 に準拠して行う。

面内せん断応力度が，CVE-3512.2-1 及び CVE-3512.2-2 より計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の値を超えないことを確認する。このとき，鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度 f_y は，表 3-15 に示す S d 地震時の値とする。

(d) 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は，CCV 規格の CVE-3513.2 に準拠して行う。

面外せん断応力度が，CVE-3513.2-1 及び CVE-3513.2-2 より計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値を超えないことを確認する。このとき，鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度 f_y は，表 3-15 に示す S d 地震時の値とする。

b. 底面スラブ

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力を算定し，CCV 規格に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

(a) 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみが，CCV 規格の CVE-3521.2 に準拠して，表 3-16 に示す許容ひずみを超えないことを確認する。

(b) 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は，CCV 規格の CVE-3522 に準拠して行う。

面外せん断力が，CVE-3522-1 又は CVE-3522-2 より計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において，FEM 要素に応力集中等が見られる場合については，RC-N 規準に基づき，応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行う。

4. 評価結果

「3.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。また、3次元FEMモデルの配筋領域図を図4-1に、配筋一覧を表4-1に示す。

4.1 S d 地震時

断面の評価結果を記載する要素を以下のとおり選定する。

壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による引張応力度及び圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図4-2に、評価結果を表4-2に示す。

S d 地震時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による引張応力度及び圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。また、底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる引張応力度及び圧縮応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

4.2 S s 地震時，（異常＋S d 地震）時及び（異常＋S s 地震）時

断面の評価結果を記載する要素を以下のとおり選定する。

壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図4-3～図4-5に、評価結果を表4-3～表4-5に示す。

S s 地震時，（異常＋S d 地震）時及び（異常＋S s 地震）時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。また、底面スラブについては、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

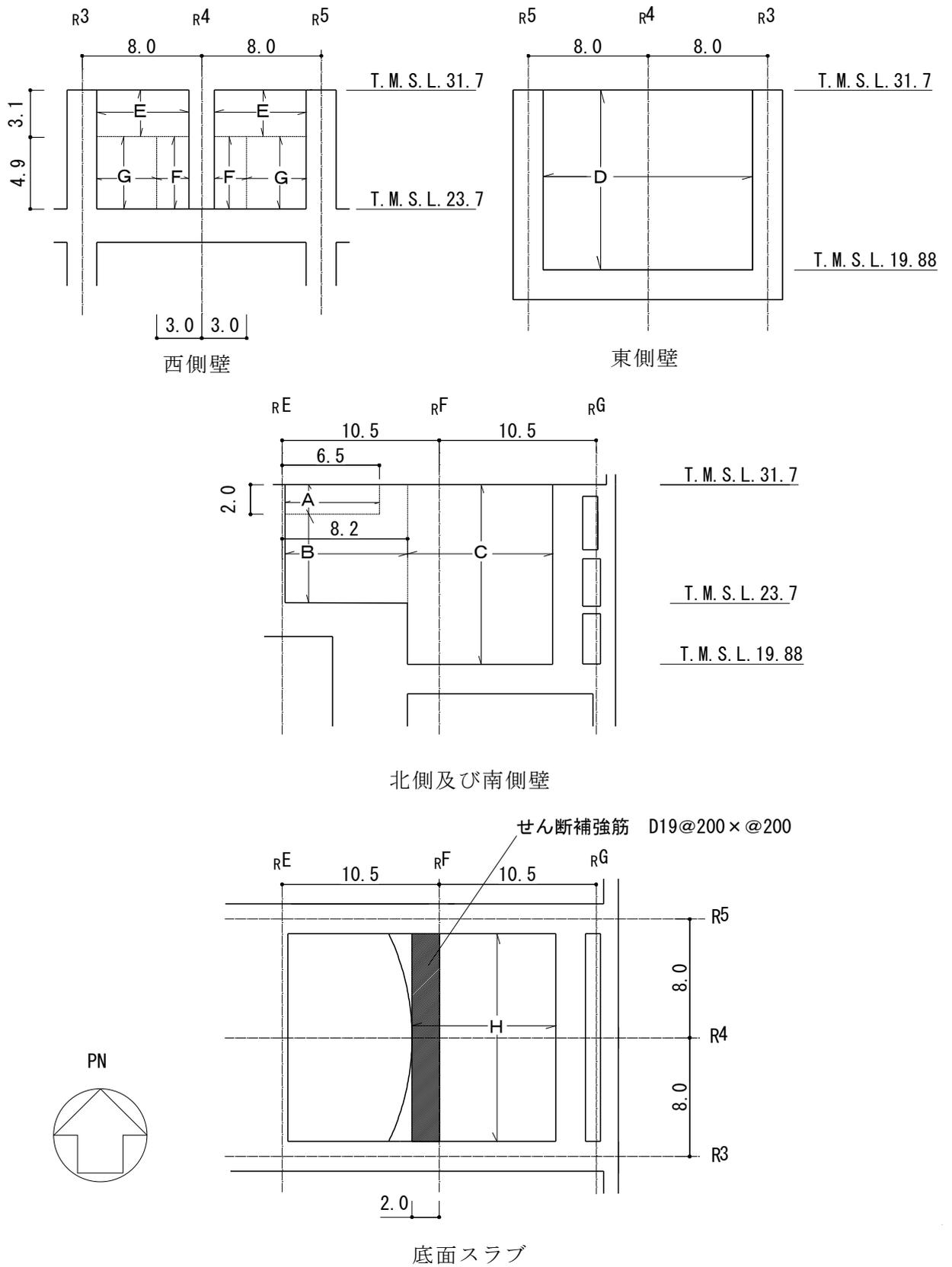


図 4-1 配筋領域図 (単位 : m)

表 4-1 使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの配筋一覧

(a) 北側及び南側壁

区分	タテ方向	ヨコ方向
A	2-D38@200	5-D38@200
B		3-D38@200
C	3-D38@200	

(b) 東側壁

区分	タテ方向	ヨコ方向
D	2-D38@200	2-D38@200

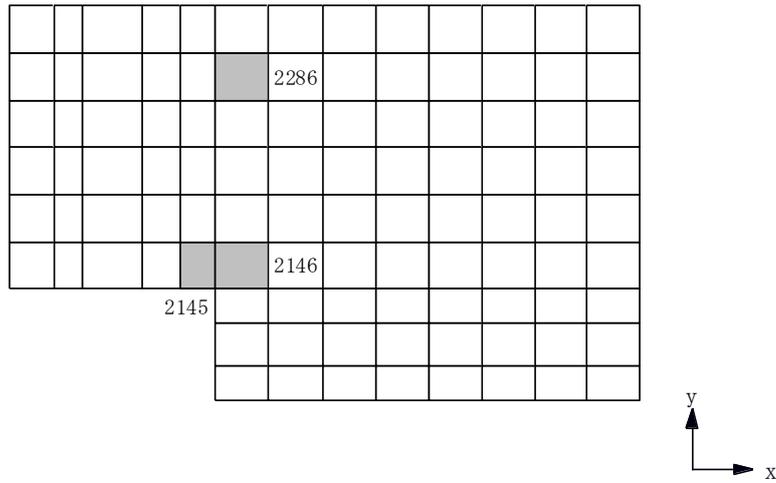
(c) 西側壁

区分	タテ方向	ヨコ方向
E	2-D38@200	2-D38@200
F	4-D38@200	3-D38@200
G	2-D38@200 +D38@400	

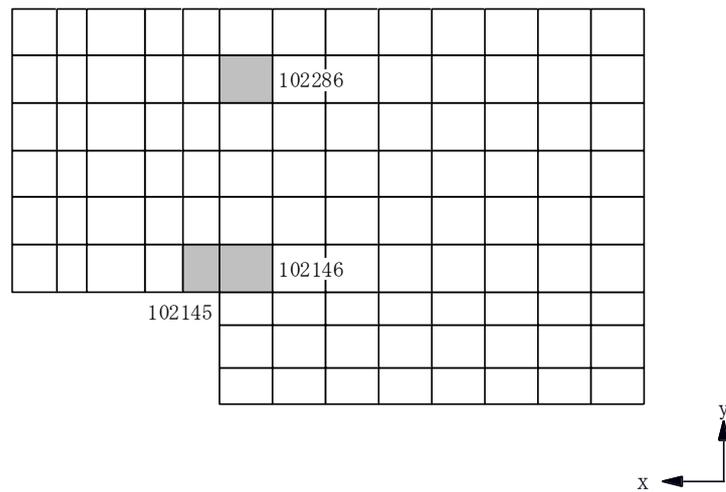
(d) 底面スラブ

区分	EW 方向	NS 方向
H	4-D38@200	3-D38@200

注：配筋は片側を示す。

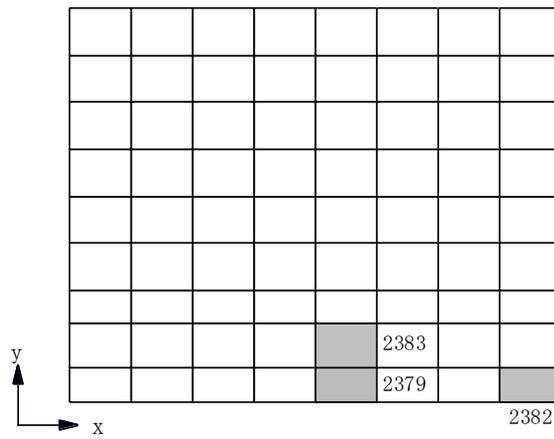


(a) 北側壁

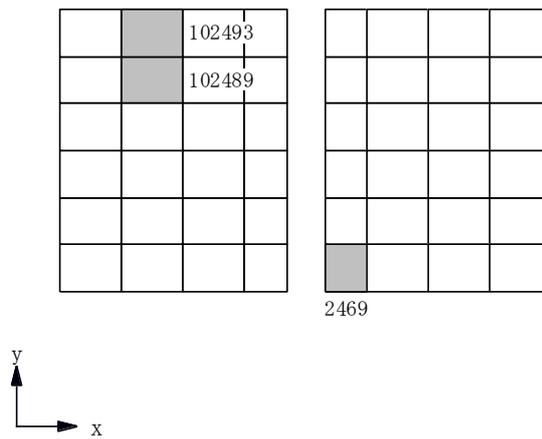


(b) 南側壁

図 4-2 選定した要素の位置 S d 地震時 (1/3)

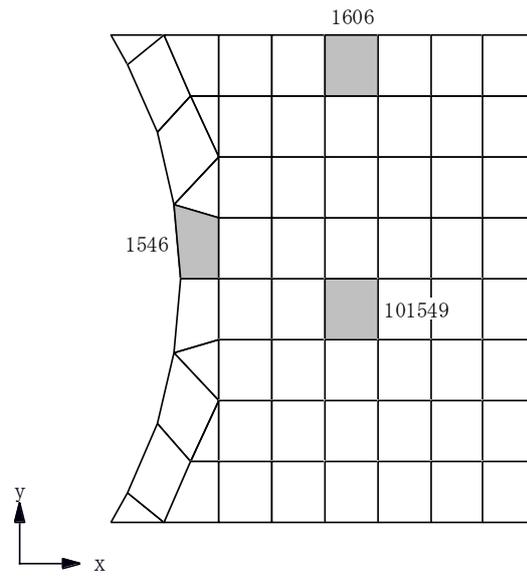


(c) 東側壁



(d) 西側壁

図 4-2 選定した要素の位置 S d 地震時 (2/3)

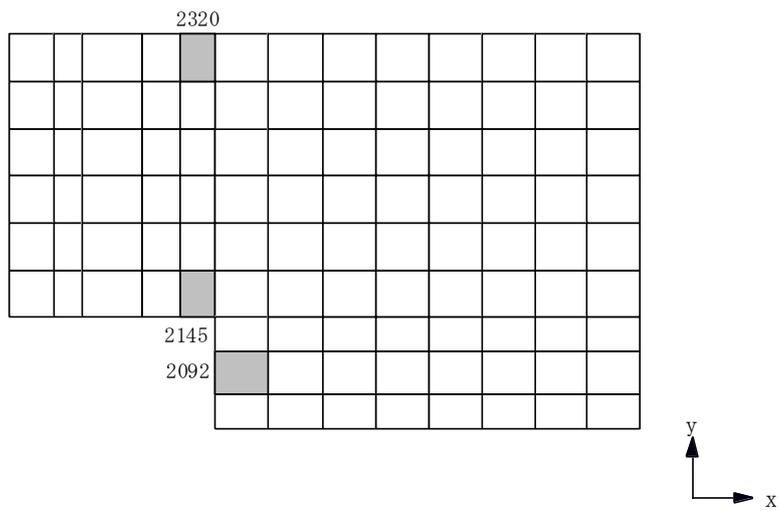


(e) 底面スラブ

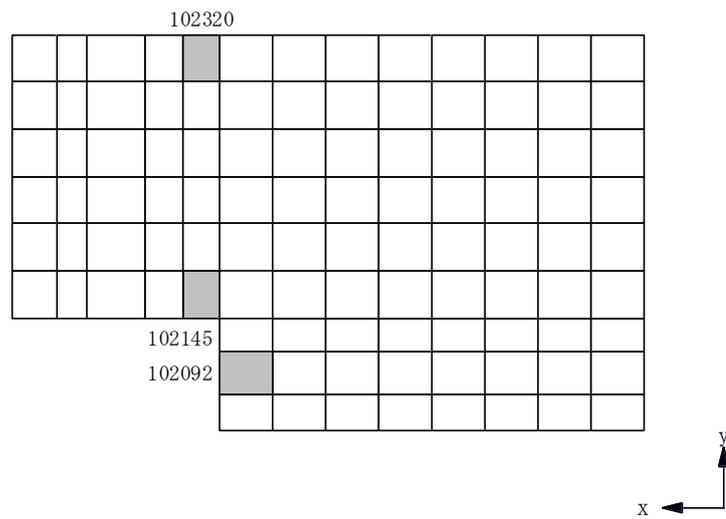
図 4-2 選定した要素の位置 S d 地震時 (3/3)

表 4-2 評価結果 S d 地震時

部位	評価項目	方向	要素番号	組合せ ケース	発生値	許容値	
北側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度 (N/mm ²)	鉛直	2146	1-8	9.17	24.2
		鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	水平	2286	1-8	223	345
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm ²)	-	2146	1-8	2.24	3.68
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	鉛直	2145	1-19	0.586	0.960
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度 (N/mm ²)	鉛直	102146	1-8	9.20	24.2
		鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	水平	102286	1-8	228	345
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm ²)	-	102146	1-8	2.28	3.68
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	鉛直	102145	1-17	0.579	0.960
東側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度 (N/mm ²)	鉛直	2379	1-6	8.54	21.4
		鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	鉛直	2379	1-6	227	345
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm ²)	-	2382	1-21	1.01	2.94
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	鉛直	2383	1-6	0.508	1.18
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度 (N/mm ²)	鉛直	2469	1-23	5.63	21.4
		鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	水平	102493	1-23	258	345
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm ²)	-	102489	1-23	0.808	1.42
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	水平	102493	1-8	0.161	1.15
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮応力度 (N/mm ²)	EW	101549	1-14	8.59	24.2
		鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	NS	1546	1-2	236	345
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	NS	1606	1-14	1.05	1.21

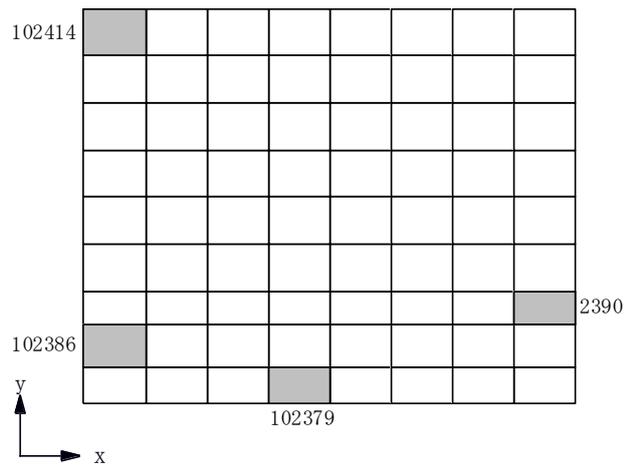


(a) 北側壁

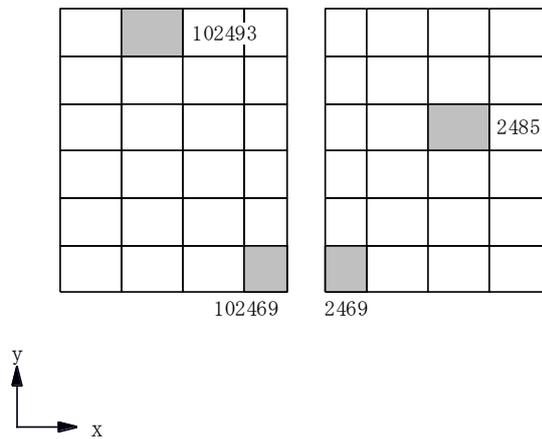


(b) 南側壁

図 4-3 選定した要素の位置 S s 地震時 (1/3)

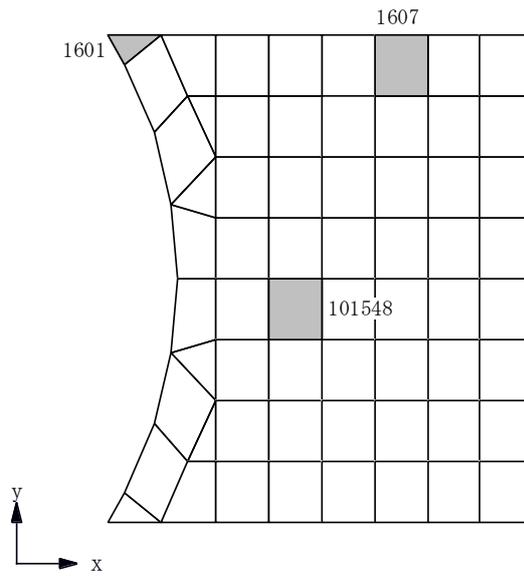


(c) 東側壁



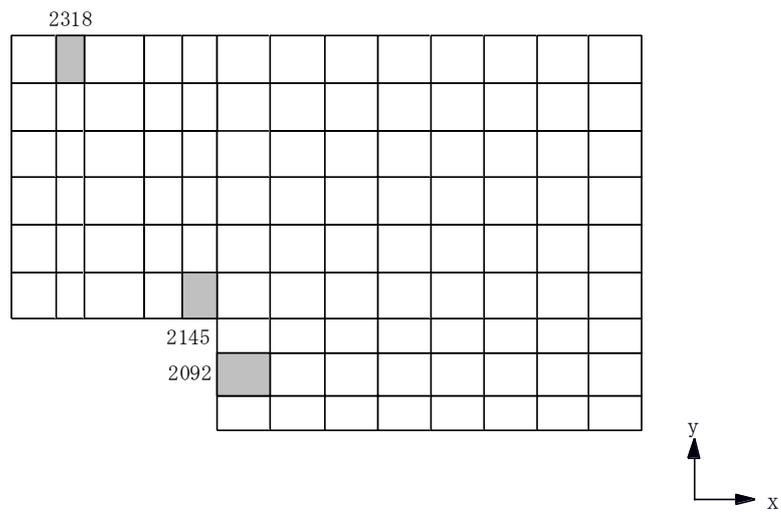
(d) 西側壁

図 4-3 選定した要素の位置 S s 地震時 (2/3)

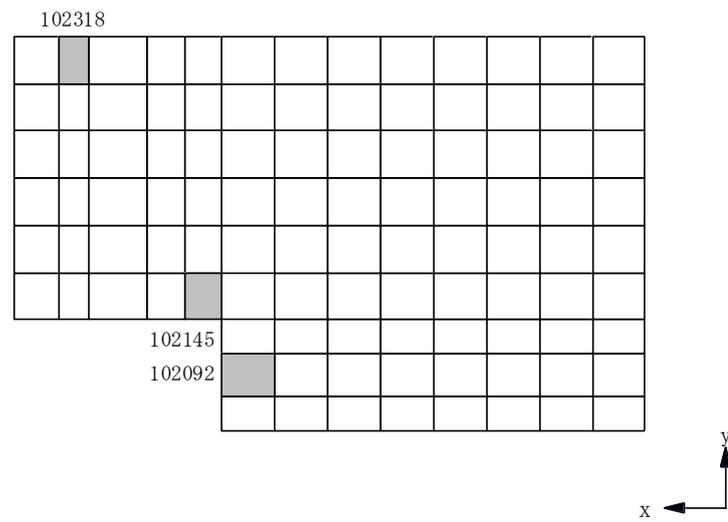


(e) 底面スラブ

図 4-3 選定した要素の位置 S s 地震時 (3/3)

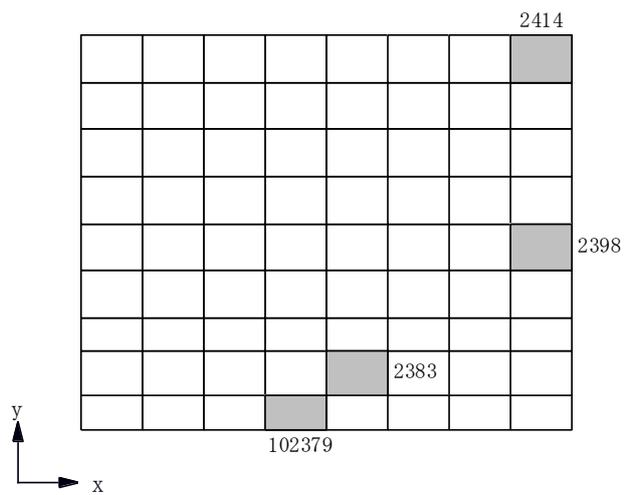


(a) 北側壁

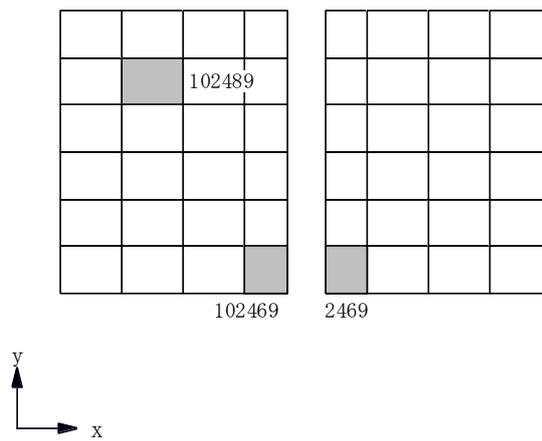


(b) 南側壁

図 4-4 選定した要素の位置 (異常 + S d 地震) 時 (1/3)

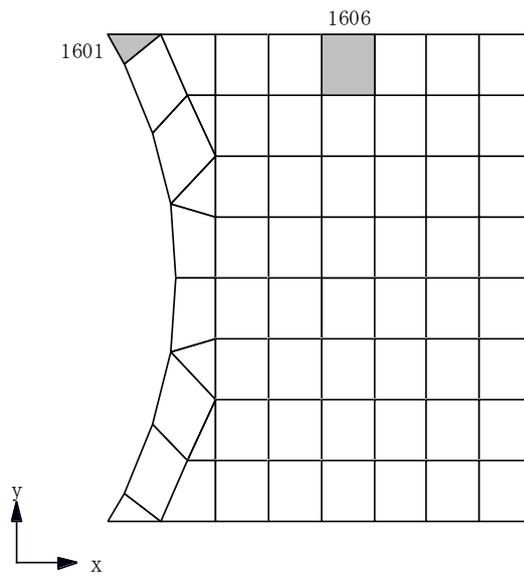


(c) 東側壁



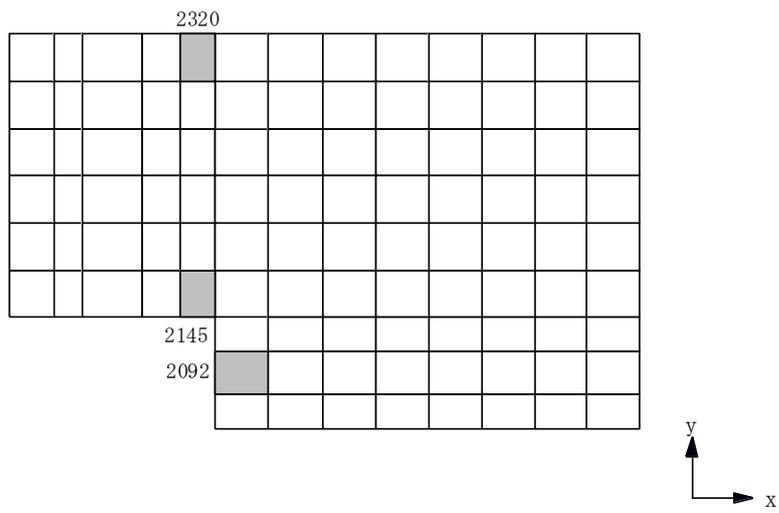
(d) 西側壁

図 4-4 選定した要素の位置 (異常 + S d 地震) 時 (2/3)

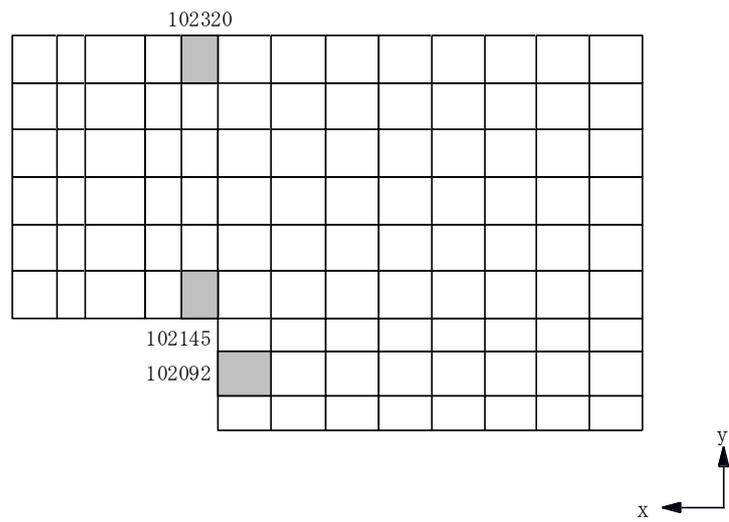


(e) 底面スラブ

図 4-4 選定した要素の位置 (異常+S d 地震) 時 (3/3)

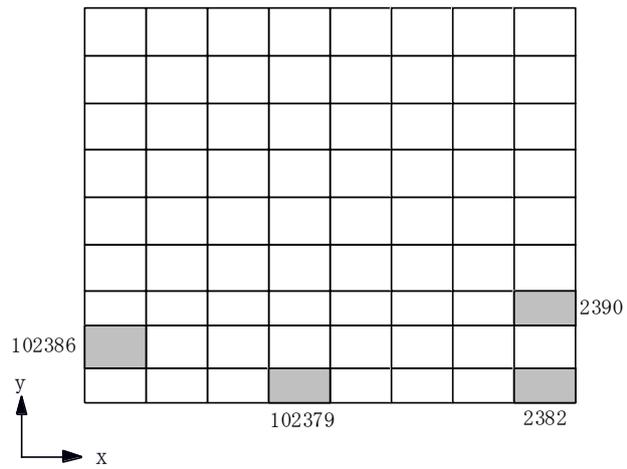


(a) 北側壁

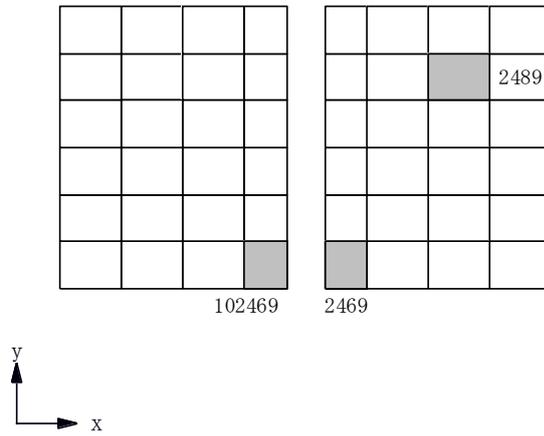


(b) 南側壁

図 4-5 選定した要素の位置 (異常 + S s 地震) 時 (1/3)

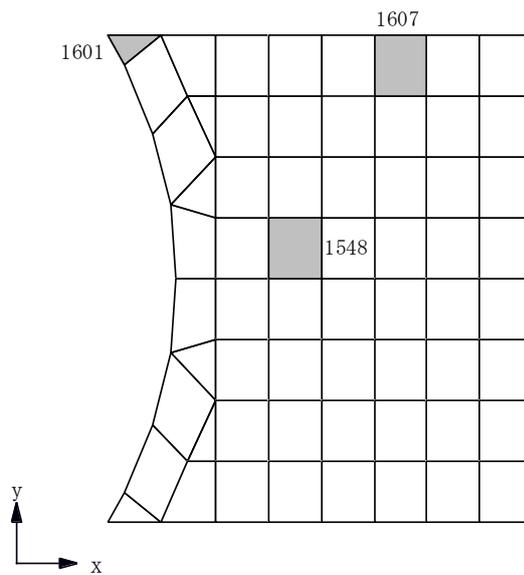


(c) 東側壁



(d) 西側壁

図 4-5 選定した要素の位置 (異常 + S s 地震) 時 (2/3)



(e) 底面スラブ

図 4-5 選定した要素の位置 (異常 + S s 地震) 時 (3/3)

表 4-3 評価結果 S s 地震時

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	発生値	許容値
北側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2145	2-5	0.282	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	水平	2320	2-8	0.506	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	水平	2320	2-2	7.37	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2092	2-16	2.76	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	2145	2-5	0.914	2.08
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102145	2-7	0.282	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	水平	102320	2-8	0.504	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	水平	102320	2-2	7.37	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	102092	2-16	2.74	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102145	2-7	0.912	2.08
東側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	2-6	0.391	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	2-6	0.742	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	水平	102414	2-5	1.13	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2390	2-5	1.00	3.87
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102386	2-6	0.926	1.75
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102469	2-5	0.207	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102469	2-3	0.500	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	2469	2-7	5.90	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2485	2-5	0.974	2.33
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	水平	102493	2-8	0.291	1.54
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	1601	2-8	0.475	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	101548	2-6	0.436	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	1607	2-14	1.03*	1.21

注記*：応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

表 4-4 評価結果 (異常+Sd地震) 時

部位	評価項目	方向	要素番号	組合せケース	発生値	許容値	
北側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2145	3-21	0.177	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	水平	2318	3-4	0.185	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	2145	3-8	2.24	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2092	3-8	1.67	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	2145	3-21	0.748	1.87
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102145	3-23	0.176	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	水平	102318	3-4	0.184	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	102145	3-8	2.24	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	102092	3-8	1.66	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102145	3-23	0.745	1.87
東側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	3-6	0.159	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	3-6	0.173	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	2398	3-6	0.257	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2414	3-17	0.611	3.27
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	2383	3-6	0.426	1.71
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2469	3-19	0.198	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2469	3-17	0.395	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	102469	3-21	5.04	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	102489	3-17	0.756	2.26
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	2469	3-20	0.391	2.04
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	1601	3-8	0.221	3.00
		鉄筋圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	1601	3-8	0.152	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	1606	3-14	0.934	1.21

表 4-5 評価結果 (異常 + S s 地震) 時

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	発生値	許容値
北側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2145	4-5	0.248	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2145	4-2	0.720	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	水平	2320	4-2	7.42	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2092	4-8	2.61	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	2145	4-1	0.892	1.82
南側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102145	4-7	0.248	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102145	4-2	0.721	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	水平	102320	4-2	7.42	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	102092	4-8	2.60	4.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102145	4-3	0.890	1.82
東側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	4-6	0.384	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102379	4-6	0.736	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	2382	4-6	0.763	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2390	4-5	0.966	3.87
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102386	4-6	0.905	1.76
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	2469	4-3	0.207	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	鉛直	102469	4-3	0.488	5.00
	軸力	圧縮応力度 (N/mm^2)	鉛直	102469	4-5	6.03	21.4
	面内せん断力	面内せん断応力度 (N/mm^2)	-	2489	4-5	0.736	1.91
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	鉛直	102469	4-4	0.407	2.17
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	1601	4-8	0.441	3.00
		鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	1548	4-6	0.420	5.00
	面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	1607	4-14	1.02*	1.21

注記* : 応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

5. 引用文献

- (1) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), 1993
- (2) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9

別紙 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響

(使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピット)

目 次

1. 概要	別紙-1
2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査	別紙-1
2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性	別紙-1
2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性	別紙-2
3. 施設を構成する部材の構造特性	別紙-4
4. まとめ	別紙-4

1. 概要

原子炉建屋の燃料貯蔵設備である使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは、主要構造体を鉄筋コンクリート造の壁と床で構成する。使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの冷却機能や注水機能を喪失する重大事故等時において、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの水温は高温状態が一定期間継続すると推定される。

よって、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットについて、既往の文献・規格等に基づき、高温時の健全性を確認する。

2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査

2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性

鉄筋コンクリートは、コンクリートと鉄筋で構成され、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック（（社）日本建築学会，2009）」によると、一般に、コンクリート・鉄筋は、温度の上昇と共に強度・剛性は劣化し、ひずみが大きくなる傾向にあるとされている。

コンクリートについては、セメント水和物及びその吸着水、水和物で構成される細孔内に存在する毛管水、毛管より大きな空隙に存在する自由水から成る多孔体である。一般的にコンクリートの温度が70℃程度では、コンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼすような自由水の逸散は生じず、100℃以下では圧縮強度の低下は小さいとされる。また、コンクリートの温度が大気圧において100℃を超すと自由水が脱水し始め、その温度作用時間が長期間になると結晶水も脱水し始める。コンクリート温度が190℃付近では結晶水が解放され始め、更に高温になると脱水現象が著しくなるため、コンクリートの特性に影響が出始めるとされる。

鉄筋については、「構造材料の耐火性ガイドブック（（社）日本建築学会，2009）」によると、強度及び剛性は、概ね200℃から300℃までは常温時の特性を保持するとされている。

2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性

使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットは、ステンレス鋼によりライニングされており、また、重大事故等時には、代替注水設備によりプールへの注水が行われるため、高温によるコンクリートからの水分逸散のないシール状態にある。それを踏まえ、シール状態で高温加熱を受けたコンクリートの文献収集を行った。高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献を表 2-1 に示す。

文献 No. 1 及び No. 2 では、加熱温度 175℃ のコンクリートへの影響について検討されている。文献 No. 1 では、シール状態において強度は熱水反応により一様な変化は示さないとされており、加熱期間 91 日までは、概ね加熱前と強度は同等と考えられる。アンシール状態では加熱期間 28 日までの低下率は 10% 以内に収まるとされている。文献 No. 2 では、シール状態においては、加熱期間 91 日まで強度の低下は認められない。

また、文献 No. 3～No. 7 は、加熱温度 110℃ のコンクリートへの影響について検討されている。No. 4 は加熱期間 50 日について検討されており、強度低下は認められない。また、No. 3 は加熱期間 3.5 年間、No. 5～No. 7 は加熱期間 2 年間について検討され、いずれも強度の低下傾向は認められないとされている。

それぞれの加熱温度における剛性に着目すると、加熱温度 175℃ において、アンシールの条件下では、加熱期間 1 日でも急激に低下する場合があるとされており、水分の逸散と高い相関があると考えられる。一方、シール状態では大きな低下はなく、加熱温度 110℃ では加熱後ごく初期に剛性の変化は収束するとされている。

以上より、175℃ 程度までの高温環境ではコンクリート強度への影響は小さい。また、コンクリートの剛性については、高温環境による水分逸散の影響が大きく、シール状態においても剛性の低下の傾向は認められるが、加熱後ごく初期に収束するため影響はない。

表 2-1 高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献一覧

No.	文献名 (出典)	著者	試験条件		
			温度	加熱期間	水分
1	高温 (175 °C) を受けたコンクリートの強度性状 (セメント・コンクリートNo. 449, July 1984)	川口 徹, 高橋久雄	175°C	1~91日	シール アンシール
2	高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究 (日本建築学会構造系論文集 第457号, 1994年3月)	長尾覚博, 中根 淳	40 ~ 175 , 300 , 600°C	1~91日 (~175°C) 7日 (300, 600°C)	シール アンシール
3	熱影響場におけるコンクリートの劣化に関する研究 (第48回セメント技術大会講演集, 1994)	長尾覚博, 鈴木智巳, 田渕正昭	①65, 90, 110°C の 一定加熱 ②20~110°C のサイ クル加熱	1日~3.5年間	シール アンシール
4	長期高温加熱がコンクリートの力学特性に及ぼす影響の検 討 (日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2010年9月)	木場将雄, 山本知弘, 久野通也, 島本 龍, 一瀬賢一, 佐藤 立	①20°Cの一定加熱 ②110°Cのサイクル 加熱	①50日 ②1~50サイクル (1サイクル: 1日) 注: 110°Cの期間: 9h	シール アンシール
5	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験 的研究 (その1 実験計画と結果概要) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月)	藪田 敏, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 池内俊之, 大池 武			
6	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験 的研究 (その2 普通コンクリートの力学特性試験結果) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月)	池内俊之, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 藪田 敏, 大池 武	①20, 110, 180, 325°Cの一定加熱 ②~110°C, ~180°C ~325°Cのサイク ル加熱	①1日~24か月 ②1~180サイクル (1サイクル: 72時間) 注: 高温保持時間: 24時間	シール アンシール
7	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験 的研究 (その3 耐熱コンクリートの力学特性試験結果) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月)	大池 武, 池内俊之, 北野剛人, 長尾覚博, 藪田 敏, 守屋正裕			

3. 施設を構成する部材の構造特性

部材内の温度差及び拘束により発生する熱応力は、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの壁が周囲の壁、床に比べて厚く、更に取り付く床が少ないため、拘束応力のレベルが低いことに加え、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）」では、自己拘束的な応力であることから、十分な塑性変形能力がある場合、終局耐力に影響しないこととされている。

以上を踏まえ、施設を構成する部材の構造特性については、高温時においても設計基準状態との相違は小さい。

4. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の高温時の健全性について、既往の文献・規格等に基づき評価を行い、使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの重大事故等時における高温状態に対しても、鉄筋コンクリート構造物の強度及び剛性への影響は小さいことを確認した。

計算機プログラム（解析コード）の概要

別紙1 MSC NASTRAN

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-1	使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-9-2-1	原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎スラブの耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1

2. 解析コードの概要

2.1 MSC NASTRAN Ver.2016.1.1

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾性）
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver.2016.1.1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは、使用済燃料貯蔵プール、原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、3次元有限要素法による応力解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

	<ul style="list-style-type: none">・日本原子力発電東海第二発電所工事計画認可申請書において、原子炉建屋の使用済燃料プール、基礎盤及び原子炉格納容器底部コンクリートマット、緊急時対策所建屋、格納容器圧力逃がし装置格納槽の3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析に使用された実績がある。・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認している。・今回の工事計画認可申請において、使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。・検証の内容のとおり、応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
--	--

別紙 27 A B A Q U S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-1	使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6
V-2-9-2-1	原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎スラブの耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	A B A Q U S
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾塑性）
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6. 14-6
コードの概要	<p>本解析コードは、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS 社）で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流束、温度、集中荷重、分布荷重、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは、使用済燃料貯蔵プール、原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・面外集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の実験についてシミュレーション解析を行い、実験結果の荷重－変位関係と解析結果の比較をすることにより、本解析コードの当該解析機能の妥当性を確認している。 ・基礎浮上りに関する例題解析を実施し、解析結果と理論モデルによる理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示

	<p>された要件を満足していることを確認している。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（積層シェル要素）による応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証内容のとおり、鉄筋コンクリートの応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
--	--

3. ABAQUS Ver. 6.14-6 の解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、有限要素法による汎用非線形構造解析プログラムである。材料非線形性、幾何学的非線形性及び接触問題を含む境界非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析、動的解析、熱伝導解析、音響解析機能等が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造－流体連成等）も解析可能である。本解析コードは、使用済燃料貯蔵プール、原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析（弾塑性）に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料及び幾何学的非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素及び材料構成則が提供されており、多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

また、今回の解析における本解析コードの使用要素は複合シェル要素（積層シェル要素）、はり要素、トラス要素（ロッド要素）及びギャップ要素である。

3.3 解析手法

3.3.1 有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行う。

- ① 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

$\{u\}$: 要素内任意点の変位
 $[N]$: 形状関数マトリックス
 $\{u_e\}$: 節点変位

- ② 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

$\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[B]$: ひずみマトリックス

- ③ 材料物性から求められる応力とひずみの関係式である(3.3)式より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを(3.4)式より計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (3.4)$$

ここで、

$\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
 $[D]$: 材料の応力-ひずみ接線マトリックス
 $[K_e]$: 要素剛性マトリックス

- ④ 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動の変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [M]\{\ddot{\gamma}\} + [K]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} U_{e1} \\ U_{e2} \\ \vdots \\ U_{en} \end{Bmatrix}$$

$U_{e1}, U_{e2}, \dots, U_{en}$: 各節点の節点変位
 $\{\ddot{\gamma}\}$: 構造全体の加速度
 $[M]$: 質量マトリックス
 $[K]$: 剛性マトリックス

- ⑤ 変位が決まれば、(3.2)式、(3.3)式より各要素の応力が求められる。

3.3.2 基礎浮上りの評価

原子炉建屋基礎スラブの応力解析モデルは、基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け、基礎スラブと底面地盤との間の剥離（基礎スラブの浮上り）を考慮している。

ギャップ要素は、図 3-1 に示すように仮定する。図 3-1(a)は地盤面に垂直な方向である鉛直ばね、図 3-1(b)は地盤面に平行な方向である水平ばねの特性である。垂直方向は、引張りの場合は力の伝達は行われず、圧縮の場合には鉛直ばね係数 k_n を介して構成関係は線形関係にあるものとする。

また、垂直方向に剥離が生じた場合には、せん断応力も伝達されない。

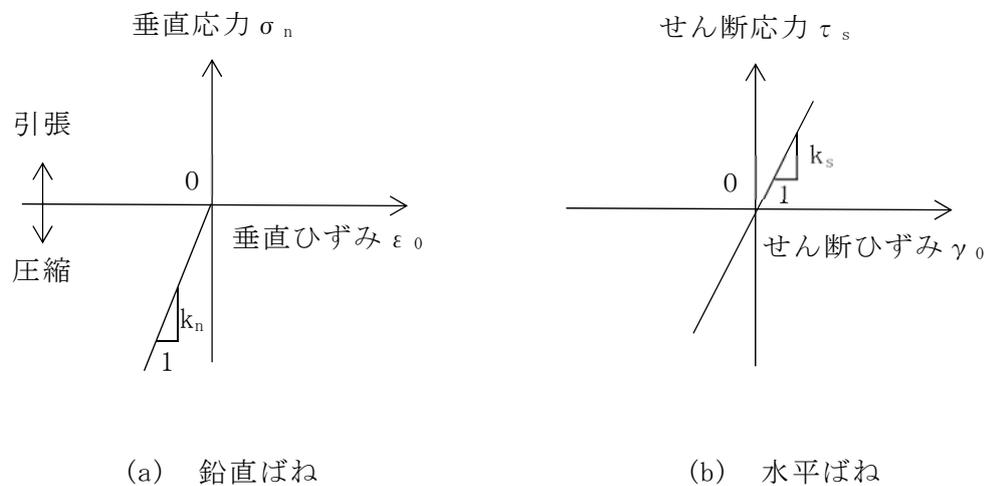


図 3-1 ギャップ要素の復元力特性

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図3-2に示す。

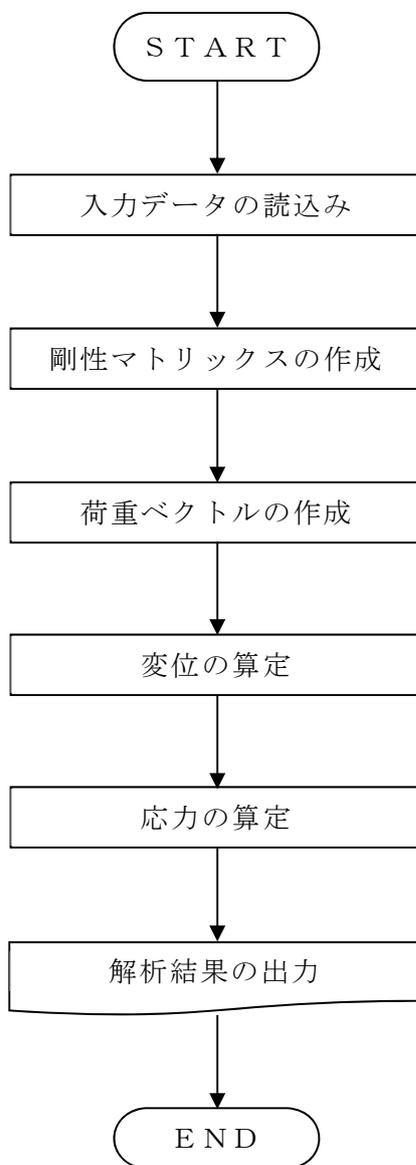


図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 実験結果とシミュレーション解析の比較による検証

(1) 検証概要

本解析コードが静的非線形解析において妥当であることを検証する。

文献 (引用文献(1)参照) に示される面外方向集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の崩壊問題を, 鉄筋の層を埋め込んだシェル要素でモデル化し静的非線形解析を行い, 実験結果の荷重-変位関係と解析結果の整合を確認する。

(2) 検証モデル

図 3-3 に解析モデルを示す。正方形の鉄筋コンクリート造平板は 4 隅で鉛直方向に支持されており, 中央に集中荷重を受ける。スラブは厚さ方向の 75% の位置で, 2 方向に配筋されている。鉄筋比 (鉄筋の体積/コンクリートの体積) は, 各方向に対し 8.5×10^{-3} である。

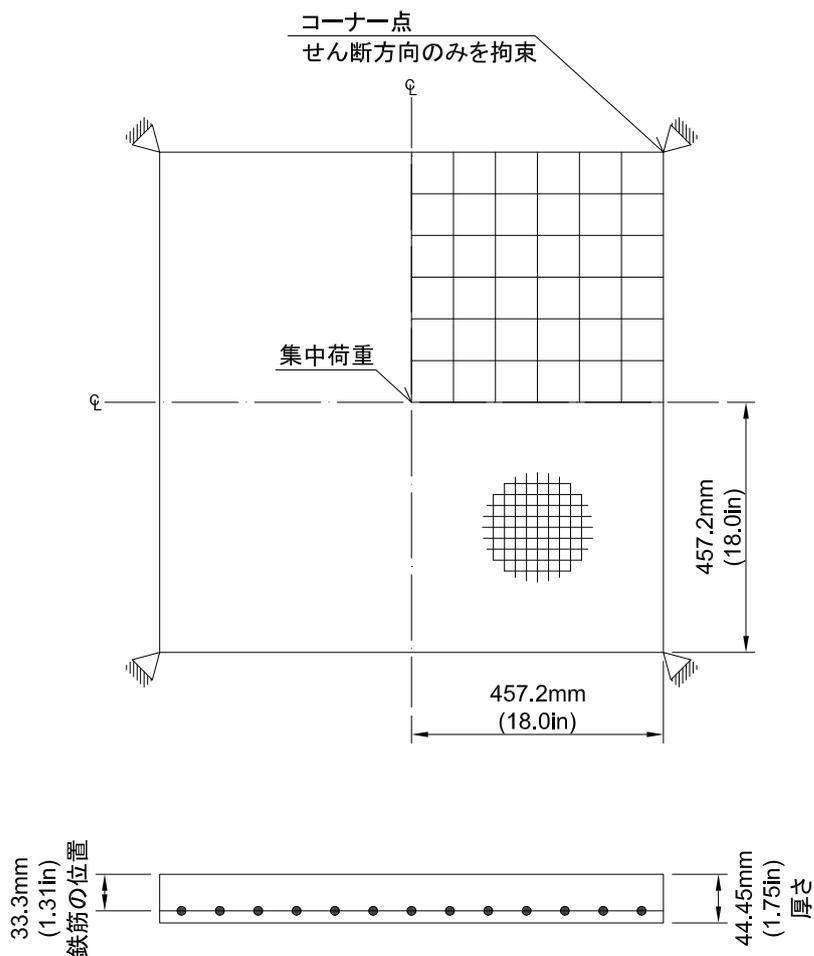


図 3-3 解析モデル

(3) 材料物性値

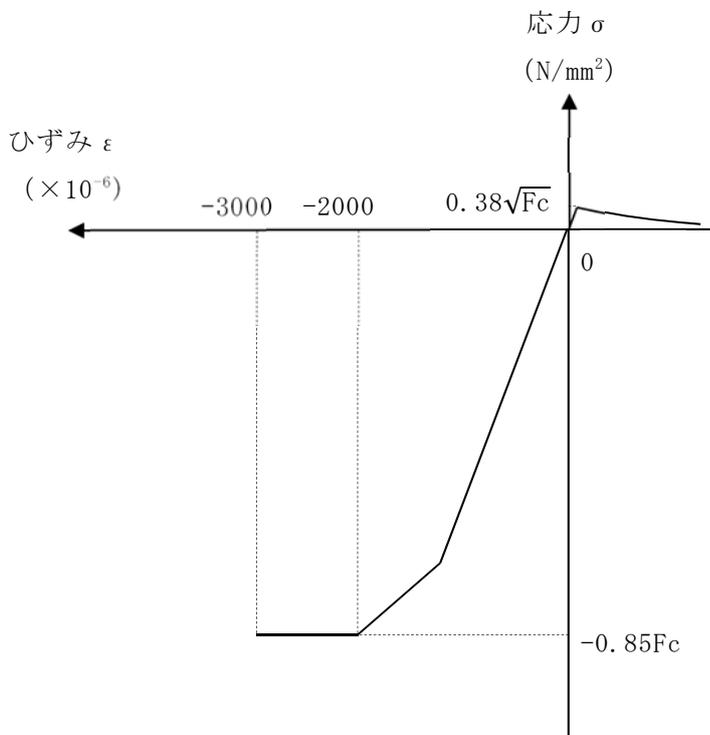
表 3-1 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として文献（引用文献(1)及び引用文献(2)参照）に記載の値を用いる。

表 3-1 解析に用いる材料物性値

諸元		物性値
コンクリート	設計基準強度 F_c	37.92 N/mm ² (5500 lb/in ²)
	ヤング係数	2.86×10^4 N/mm ² (4150000 lb/in ²)
	ポアソン比	0.15
鉄筋	降伏強度 σ_y	345 N/mm ² (50000 lb/in ²)
	ヤング係数	2.00×10^5 N/mm ² (29000000 lb/in ²)

(4) 材料構成則

図 3-4 に材料構成則を示す。



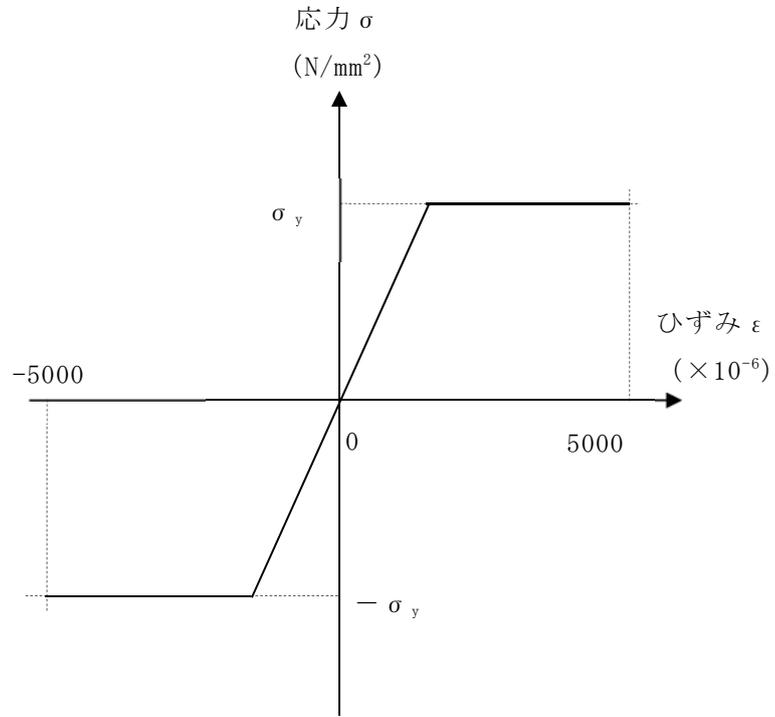
F_c : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$0.85F_c$ (CCV 規格)
終局圧縮ひずみ	-3000μ (CCV 規格)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(3)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか(1987)による式 ($c=0.4$) (引用文献(4)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38\sqrt{F_c}$ (「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 1999 改定) 」)

(a) コンクリートの応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(1/2)

- ・鉄筋の構成則：バイリニア型
- ・終局ひずみ： $\pm 5000 \mu$ （CCV規格）



σ_y : 鉄筋の降伏強度

(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(2/2)

(5) 解析結果

解析結果の荷重－変形関係を文献の図（引用文献(1)参照）に重ねて図 3-5 に示す。図より両者は概ね一致していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

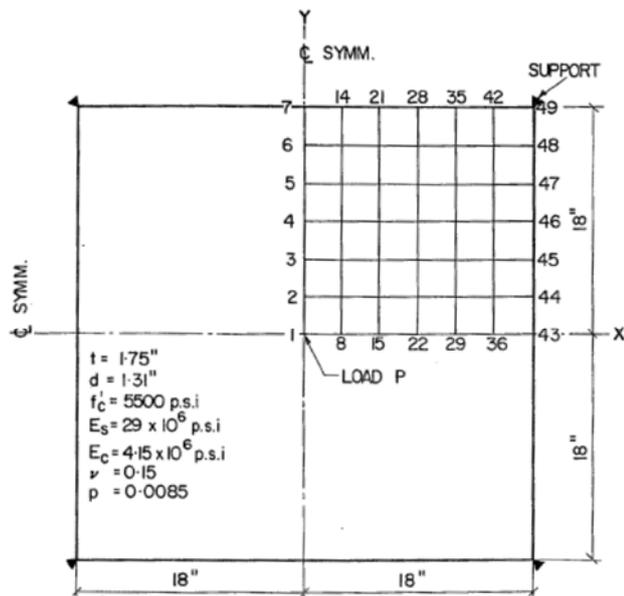
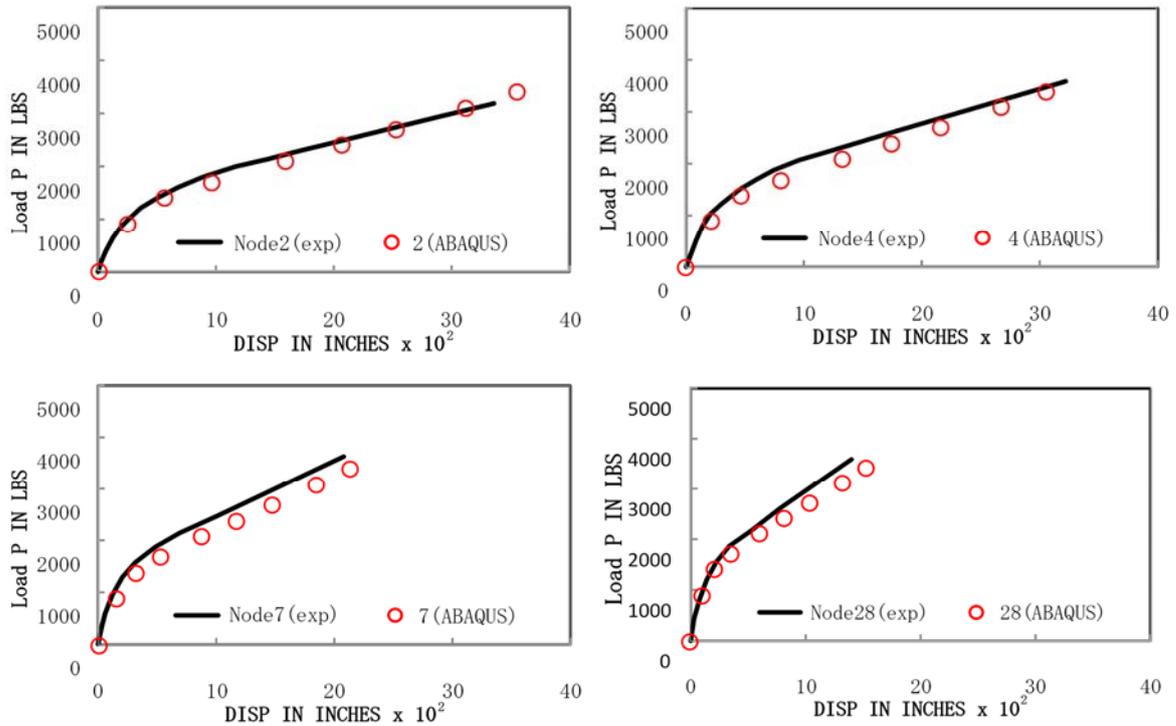


FIG. 7.—CORNER SUPPORTED TWO-WAY SLAB

図 3-5 検証解析結果

3.5.2 基礎浮上りの評価の検証

剛はりを用い、「3.2 解析コードの特徴」に示す手法による地盤ばねで固定点と連結した図3-6のモデルに対して、鉛直力Nを作用させた状態で、転倒モーメントMを漸増させ、接地率を評価し、理論解と比較する。ここで鉛直力Nは5(kN)とする。

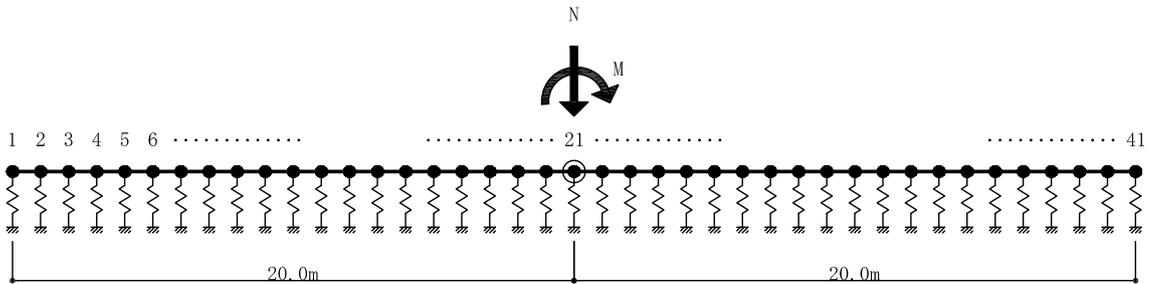


図3-6 解析モデル

(1) 理論解による接地率の評価

浮上り限界モーメント M_0 及び接地率 η は、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）」に基づき下式により算定する。

$$M_0 = \frac{N \cdot L}{6}$$

$$\eta = 3 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{N \cdot L} \right)$$

ここで、

M_0 : 浮上り限界モーメント (kN・m)

N : 鉛直力 (kN)

L : 建屋基礎幅 (m)

η : 接地率

M : 転倒モーメント (kN・m)

また、接地率 $\eta = 0$ となる転倒モーメントMは、以下となる。

$$M = \frac{1}{2} \cdot N \cdot L = \frac{1}{2} \times 5 \times 40 = 100 \text{ (kN・m)}$$

(2) A B A Q U S による接地率の評価

本解析コードによる接地率の解析結果と理論解の比較を図 3-7 に示す。図 3-7 より、転倒モーメント M と接地率 η の関係は、理論解と一致することが確認できる。

本解析コードによる接地率は、荷重増分ステップ毎に浮き上がった（軸剛性及びせん断剛性が 0 の状態）地盤ばねのギャップ要素を確認し、その要素の総支配面積を計算することで算定した。

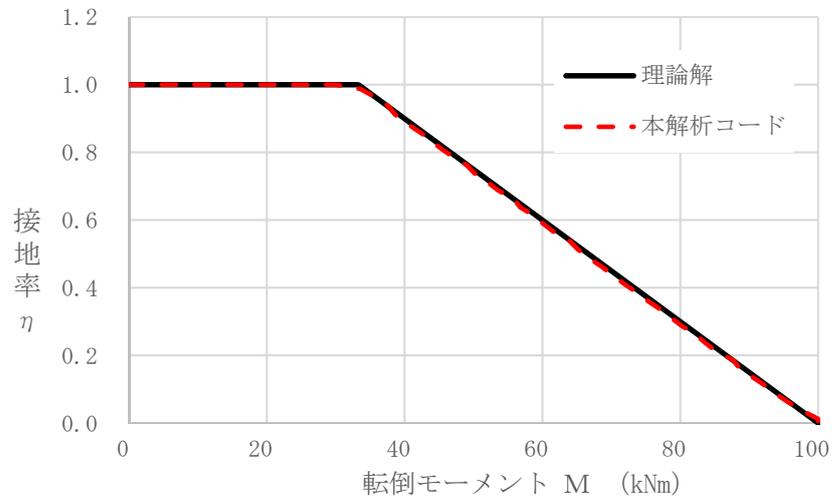


図 3-7 解析結果と理論解の比較

3.5.3 妥当性確認

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
- ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（積層シェル要素）による応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。
- ・検証内容のとおり、鉄筋コンクリートの応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.5.4 評価結果

3.5.1, 3.5.2及び3.5.3より、本解析コードを使用状況一覧に示す解析に用いることは妥当である。

4. 引用文献

- (1) Jofriet J. C. & G. M. McNeice: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1971, Vol. 97, No. ST3
- (2) Gilbert R. I. & R. F. Warner: Tension Stiffening In Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1978, Vol. 104, No. ST12
- (3) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), 1993
- (4) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9