

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 補足-026-8 改0
提出年月日	2023年12月6日

復水貯蔵槽の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2023年12月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 設計及び工事の計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-5-5-1-2「復水貯蔵槽の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。なお、応力解析には解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

別紙 1 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 2 地震荷重の入力方法

別紙 3 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 4 鋼製ライナの検討

別紙 5 誘発上下動の検討

別紙1 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件 別紙 1-2

1. 概要

本資料は、復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方について示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。

- ・ 水平ばね

振動アドミッタンス理論に基づく水平ばねにより算出する。

- ・ 鉛直ばね

回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミッタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

- ・ シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重状態より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1：2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1：3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面版構造の場合は，平板要素や軸対象シェル要素の大きさは，集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10～20 分割すると適切な応力分布が求められ，構造物の半径（R）と板厚（t）が考慮されている。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1 復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件(1/5)

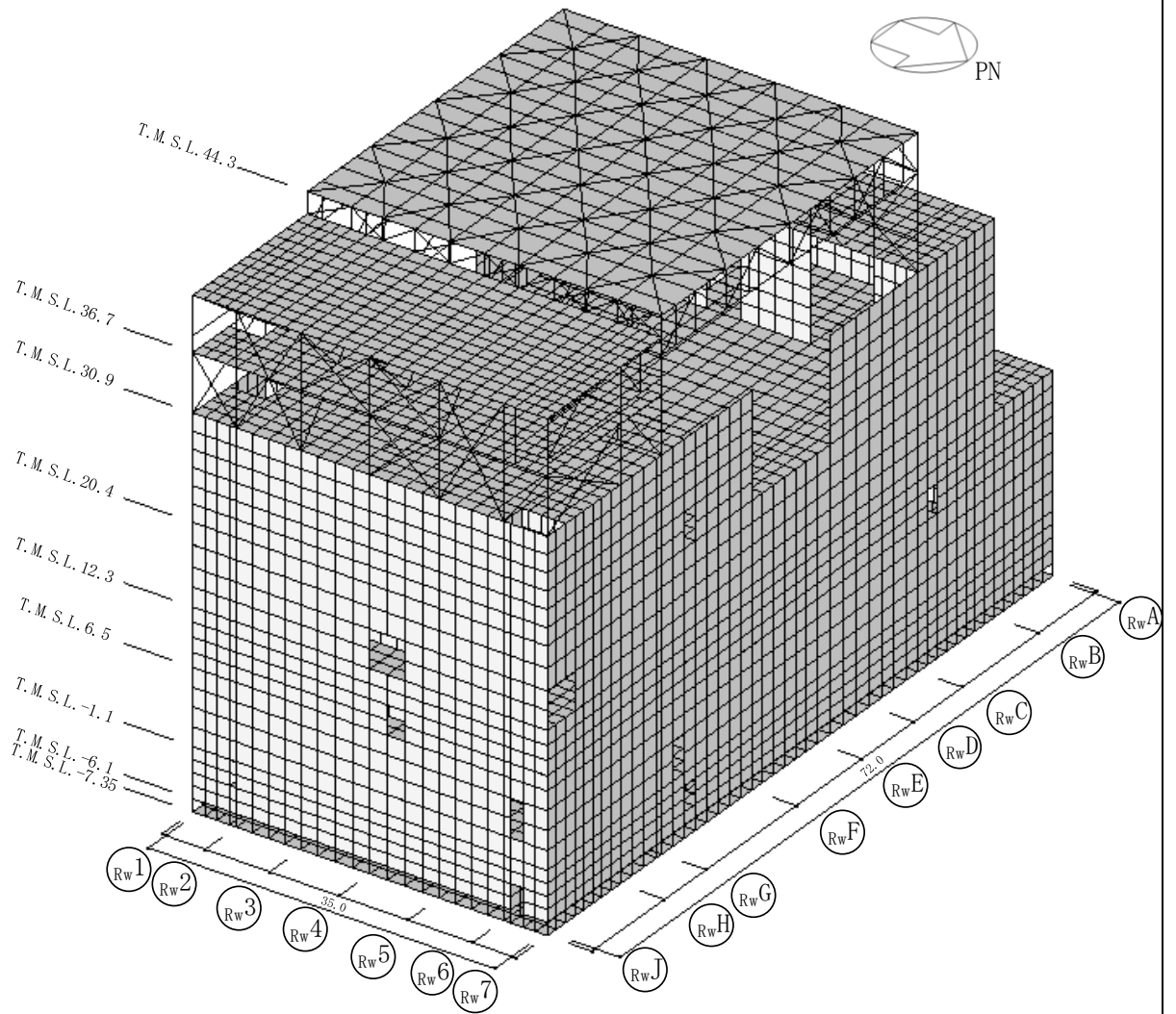
モデル化概要

○モデル化範囲

- ・基礎スラブ及び上部構造をモデル化する。

○使用要素

- ・基礎スラブ, スラブ及び壁: シェル要素
- ・柱, はり及びブレース: はり要素



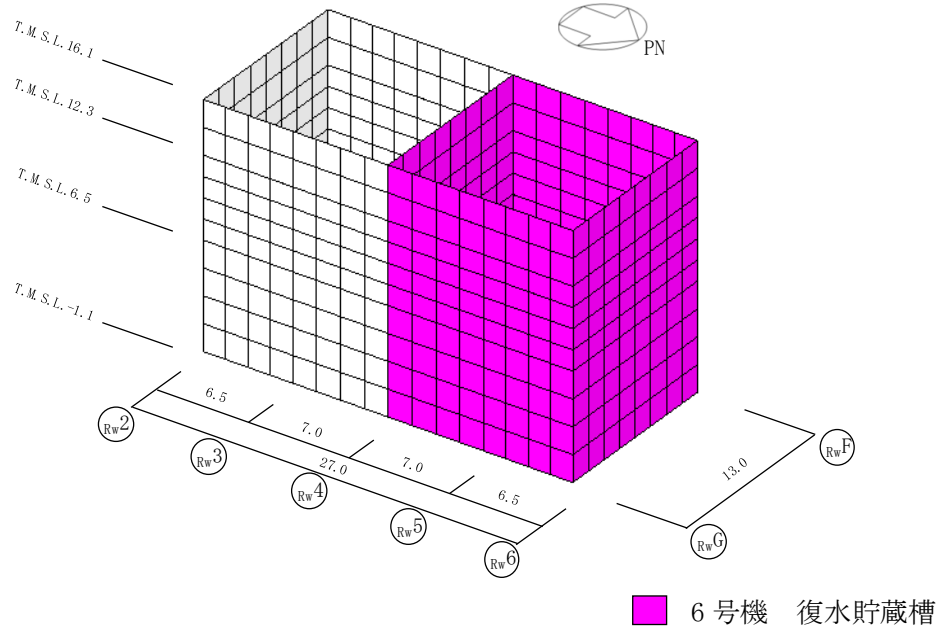
モデル概要 (全体図) (単位: m)

表 2-1 復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件(2/5)

モデル化概要

○要素分割

- ・要素一辺の長さを 1~2m 程度として分割する。



モデル概要 (復水貯蔵槽) (単位 : m)

表 2-1 復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件(3/5)

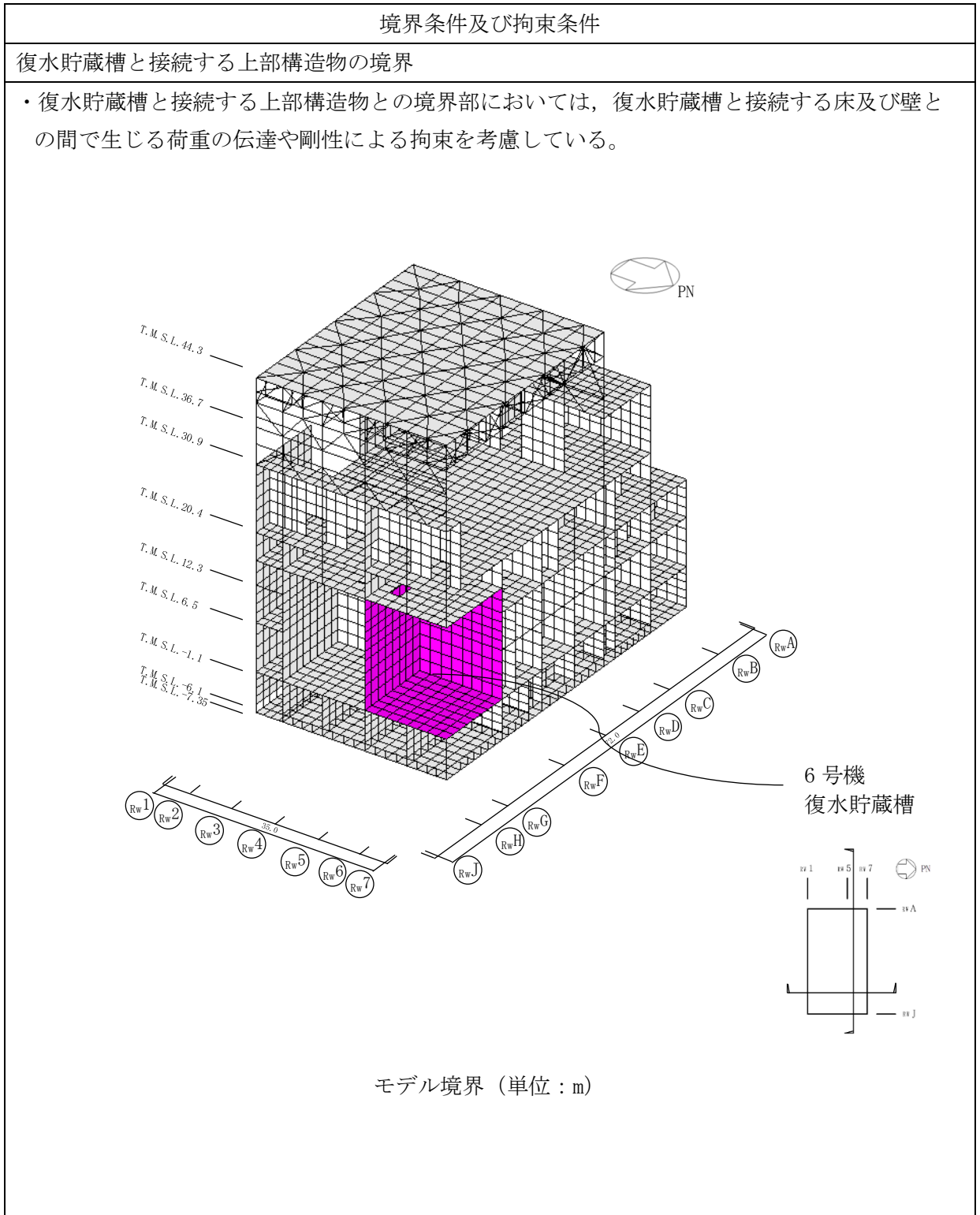


表 2-1 復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件(4/5)

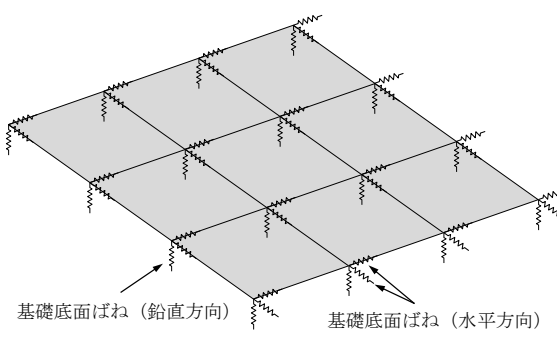
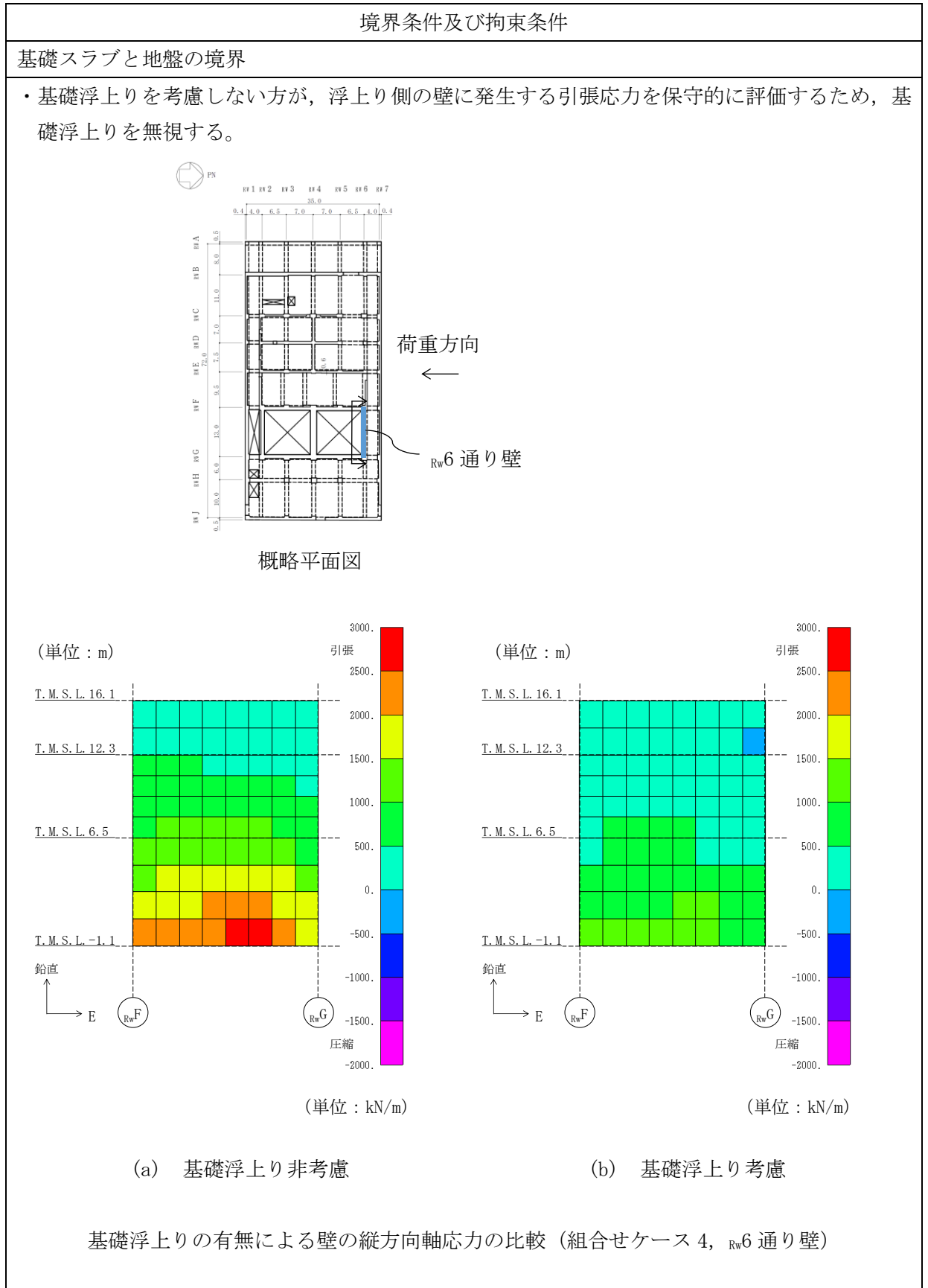
境界条件及び拘束条件
<p>基礎スラブと地盤の境界</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 側面地盤は無視する。 ・ 基礎スラブの節点には, 底面地盤を表現するばね要素を設ける。 ・ 水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 水平剛性: 振動アドミッタンス理論による水平ばね$K_{HNS(EW)}$を節点支配面積A_iで離散化。 $K_{HiNS(EW)} = (K_{HNS(EW)} / A) \times A_i \dots\dots\dots (2.1)$ A: 基礎スラブの底面積 ・ 鉛直剛性: 転倒モーメントが支配的となるため振動アドミッタンス理論による回転ばねK_Rを節点支配面積A_iで離散化。 $K_{Vi} = (K_{RNS} / I_{NS} + K_{REW} / I_{EW}) / 2 \times A_i \dots\dots\dots (2.2)$ I: 基礎スラブの断面二次モーメント
 <p style="text-align: center;">基礎底面ばね (鉛直方向) 基礎底面ばね (水平方向)</p>
<p>モデル概要</p>

表 2-1 復水貯蔵槽の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件(5/5)



別紙 2 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要 別紙 2-1

1. 概要

本資料は、復水貯蔵槽に作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

地震荷重の入力方法に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画の復水貯蔵槽の耐震性についての計算書に関する補足説明資料（KK7補足-026資料8）のうち別紙2「地震荷重の入力方法」による。

別紙 3 応力解析における断面の評価部位の選定

目 次

1. 概要 別紙 3-1
2. 断面の評価部位の選定 別紙 3-2

1. 概要

本資料は、復水貯蔵槽の応力解析における断面の評価部位の選定に関し、断面の評価要素の選定結果について示すものである。

2. 断面の評価部位の選定

復水貯蔵槽の荷重の組合せケースを表 2-1 に、復水貯蔵槽の配筋一覧を表 2-2～表 2-4 に、板厚及び配筋領域図を図 2-1～図 2-5 に示す。

各評価項目の検定値一覧を表 2-5、断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図 2-6～図 2-8 に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図を図 2-9 に示す。

表 2-1 荷重の組合せケース

ケース No.	水平：鉛直	鉛直震度	荷重の組合せケース
1	1.0 : 0.4	下向き	$(1.0+0.4K_v)VL + S_{SN}$ $+ (1.0+0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{SN}$
2		上向き	$(1.0-0.4K_v)VL + S_{SN}$ $+ (1.0-0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{SN}$
3		下向き	$(1.0+0.4K_v)VL + S_{NS}$ $+ (1.0+0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{NS}$
4		上向き	$(1.0-0.4K_v)VL + S_{NS}$ $+ (1.0-0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{NS}$
5		下向き	$(1.0+0.4K_v)VL + S_{WE}$ $+ (1.0+0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{WE}$
6		上向き	$(1.0-0.4K_v)VL + S_{WE}$ $+ (1.0-0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{WE}$
7		下向き	$(1.0+0.4K_v)VL + S_{EW}$ $+ (1.0+0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{EW}$
8		上向き	$(1.0-0.4K_v)VL + S_{EW}$ $+ (1.0-0.4K_v)H_{SL} + H_{WA} + Hd_{EW}$
9	0.4 : 1.0	下向き	$(1.0+K_v)VL + 0.4S_{SN}$ $+ (1.0+K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{SN}$
10		上向き	$(1.0-K_v)VL + 0.4S_{SN}$ $+ (1.0-K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{SN}$
11		下向き	$(1.0+K_v)VL + 0.4S_{NS}$ $+ (1.0+K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{NS}$
12		上向き	$(1.0-K_v)VL + 0.4S_{NS}$ $+ (1.0-K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{NS}$
13		下向き	$(1.0+K_v)VL + 0.4S_{WE}$ $+ (1.0+K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{WE}$
14		上向き	$(1.0-K_v)VL + 0.4S_{WE}$ $+ (1.0-K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{WE}$
15		下向き	$(1.0+K_v)VL + 0.4S_{EW}$ $+ (1.0+K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{EW}$
16		上向き	$(1.0-K_v)VL + 0.4S_{EW}$ $+ (1.0-K_v)H_{SL} + H_{WA} + 0.4Hd_{EW}$

VL : 鉛直荷重
S_SS_N : 水平地震荷重 (S→N 方向)
S_SN_S : 水平地震荷重 (N→S 方向)
S_SW_E : 水平地震荷重 (W→E 方向)
S_SE_W : 水平地震荷重 (E→W 方向)
K_v : 鉛直震度
H_SS_L : 静水圧荷重 (スラブ)
H_SW_A : 静水圧荷重 (壁)
H_dS_N : 動水圧荷重 (S→N 方向)
H_dN_S : 動水圧荷重 (N→S 方向)
H_dW_E : 動水圧荷重 (W→E 方向)
H_dE_W : 動水圧荷重 (E→W 方向)

表 2-2 復水貯蔵槽の配筋（壁）

領域	通り芯	T. M. S. L. (m)	板厚 (m)	配筋*		断面積 (mm ² /m)
				1 段目	2 段目	
領域A	R _w F 通り壁	12.3~16.1	0.90	D29@200	D29@200	6420
領域B	R _w G 通り壁	6.5~12.3	1.20	D32@200	D32@200	7940
	R _w 2 通り壁					
領域C	R _w 6 通り壁	-1.1~6.5	1.35	D35@200	D35@200	9570
領域D	R _w 4 通り壁	-1.1~16.1	1.60	D38@200	D38@200	11400

注記*：縦筋及び横筋並びに内側及び外側は，同一配筋。

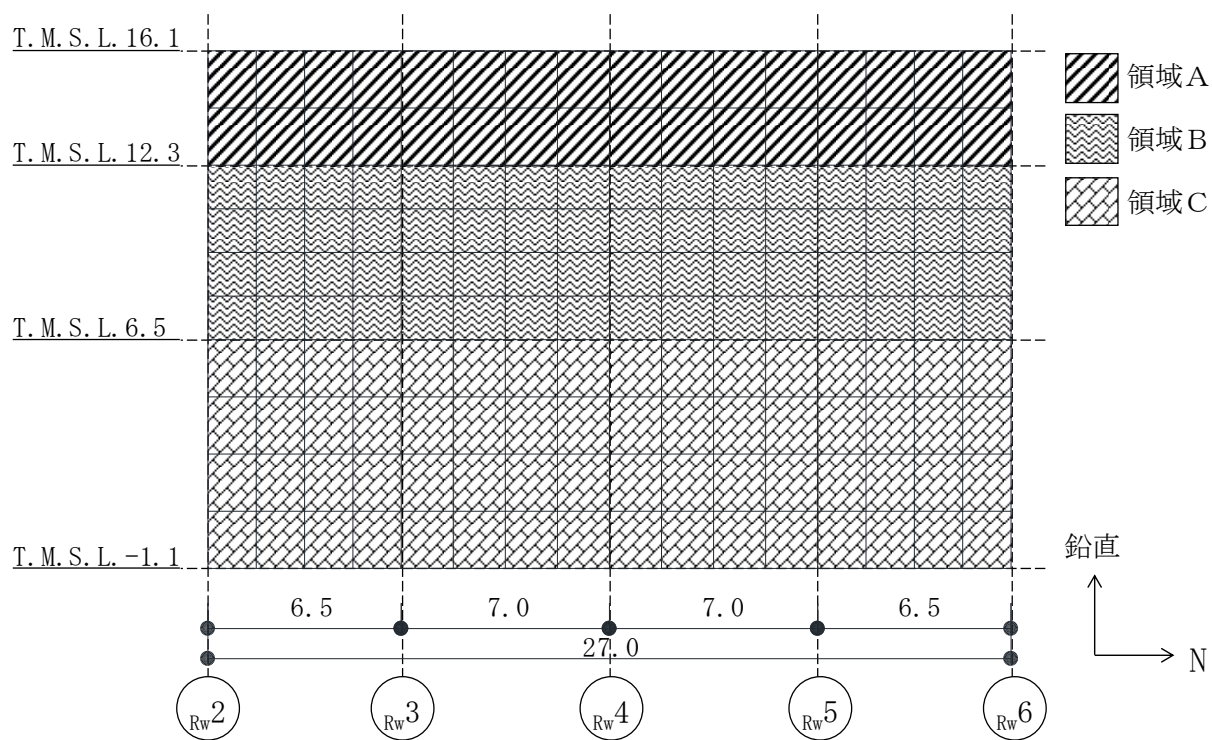


図 2-1 復水貯蔵槽の配筋領域図 (RwF 通り壁, RwG 通り壁) (単位 : m)

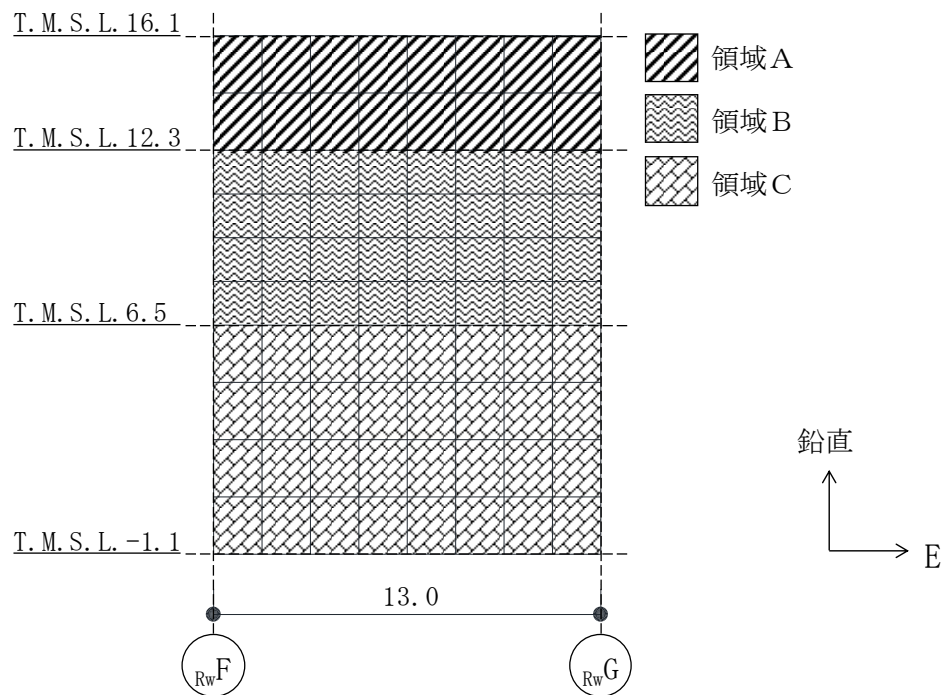


図 2-2 復水貯蔵槽の配筋領域図 (Rw2 通り壁, Rw6 通り壁) (単位 : m)

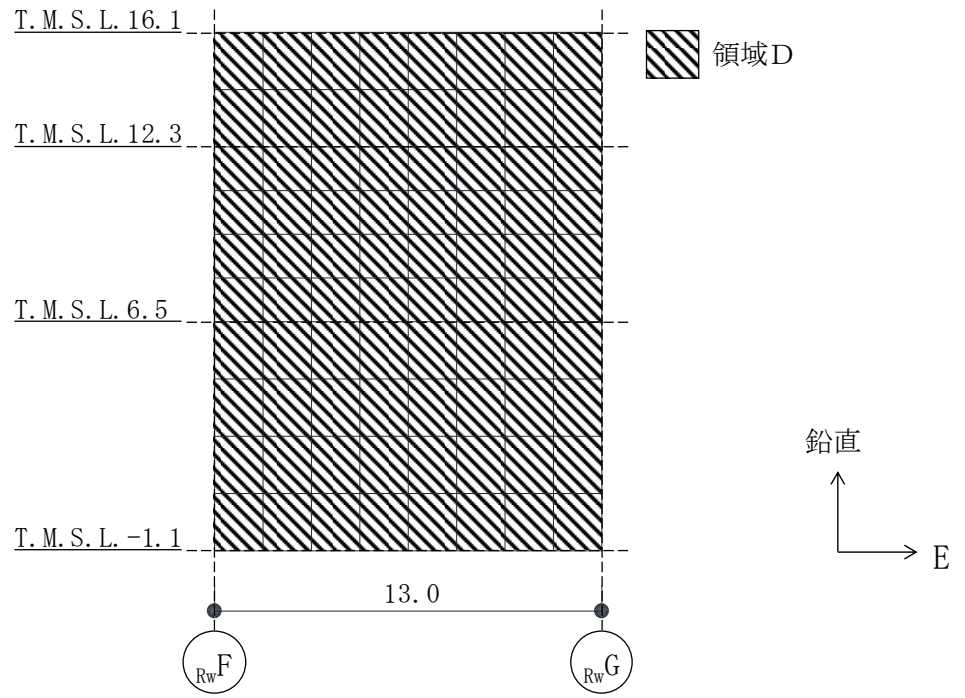


図 2-3 復水貯蔵槽の配筋領域図 (R_w4 通り壁) (単位 : m)

表 2-3 復水貯蔵槽の配筋（底面スラブ，主筋）

部位	板厚 (m)	配筋*		断面積 (mm ² /m)
		1 段目	2 段目	
領域E	1.50	D35@200	D35@200	9570

注記*：上ば筋及び下ば筋並びに NS 方向及び EW 方向は，同一配筋。

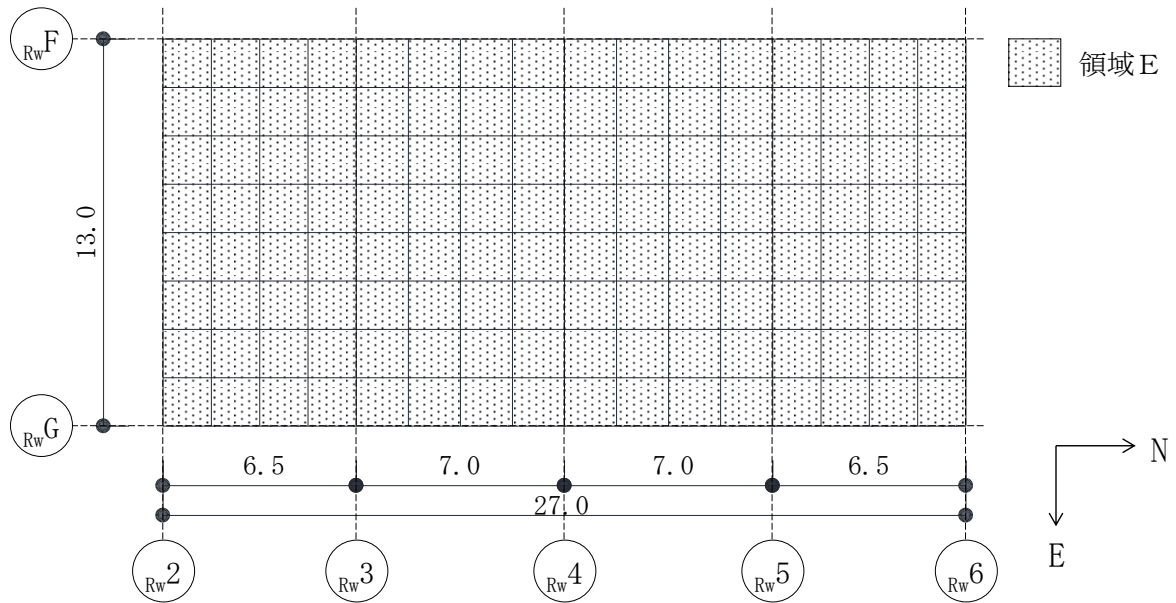


図 2-4 復水貯蔵槽の配筋領域図（底面スラブ，主筋）（単位：m）

表 2-4 復水貯蔵槽の配筋（底面スラブ，せん断補強筋）

領域	鉄筋	ピッチ	断面積 (mm ² /m)
領域F	D19	@200×@400	3588

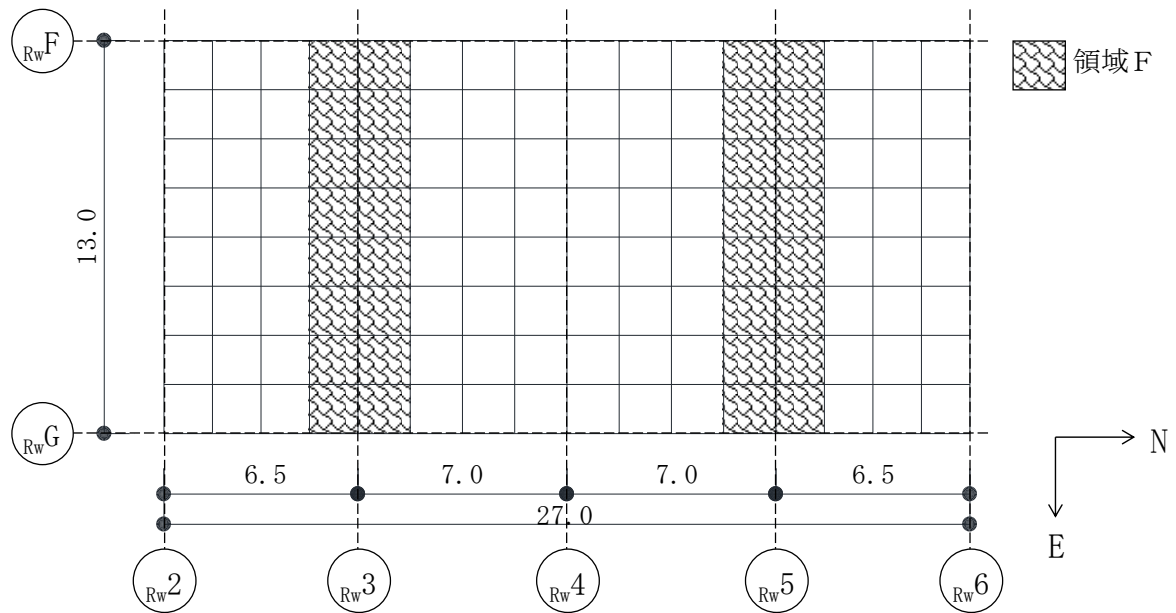
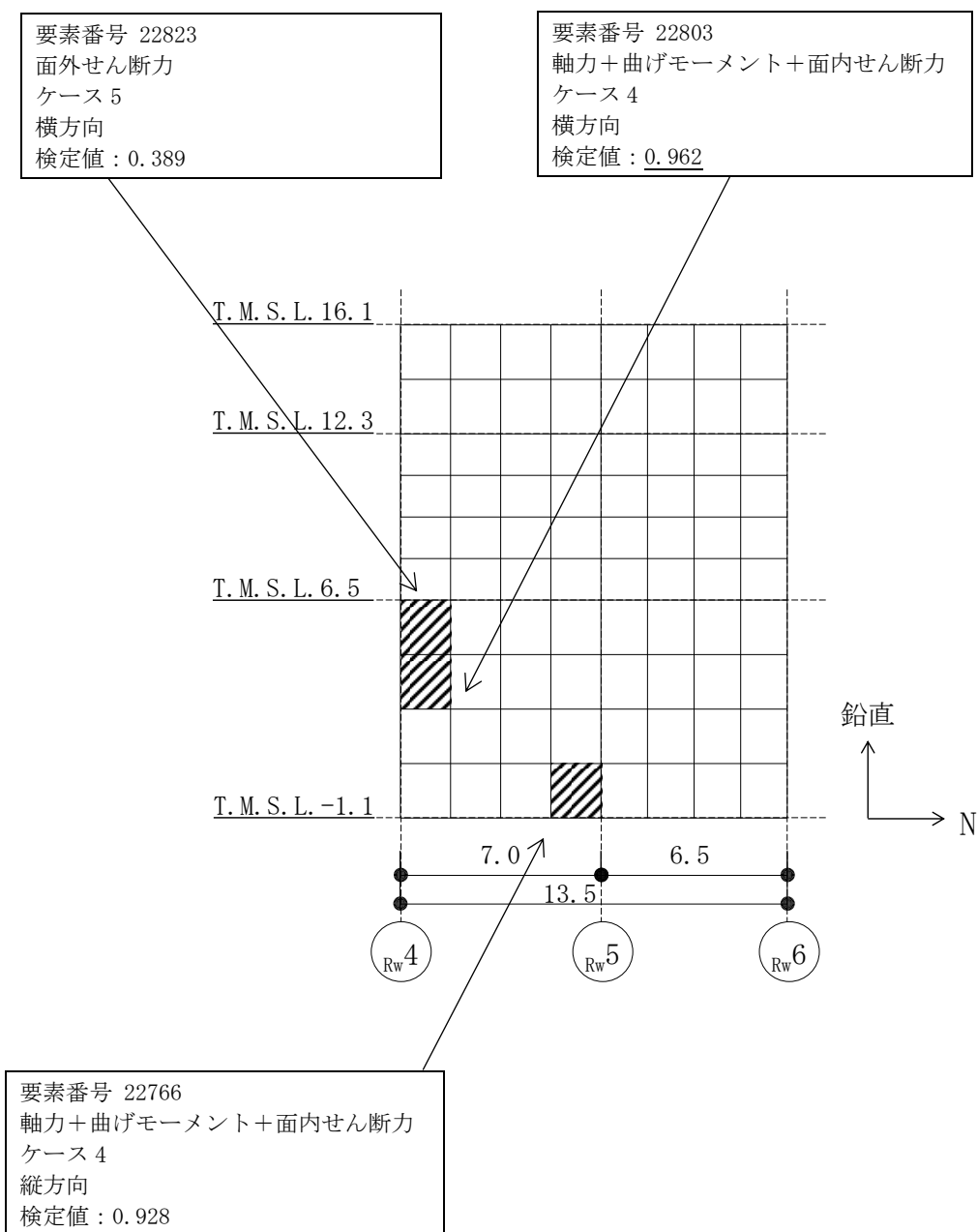


図 2-5 復水貯蔵槽の配筋領域図（底面スラブ，せん断補強筋）（単位：m）

表 2-5 各評価項目の検定値一覧

項目	部位	方向	要素番号	荷重 ケース	検定値
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	壁	縦	22766	4	0.928
		横	22803	4	<u>0.962</u>
	底面 スラブ	NS	10735	3	0.511
		EW	10810	5	0.551
面外せん断力	壁	縦	22359	7	0.343
		横	22823	5	0.389
	底面 スラブ	NS	10711	3	0.476
		EW	10814	5	0.497

注：下線部は、検定値が最大となる値を示す。



注：下線部は、検定値が最大となる値を示す。

図 2-7 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 (R_w G 通り壁) (単位 : m)

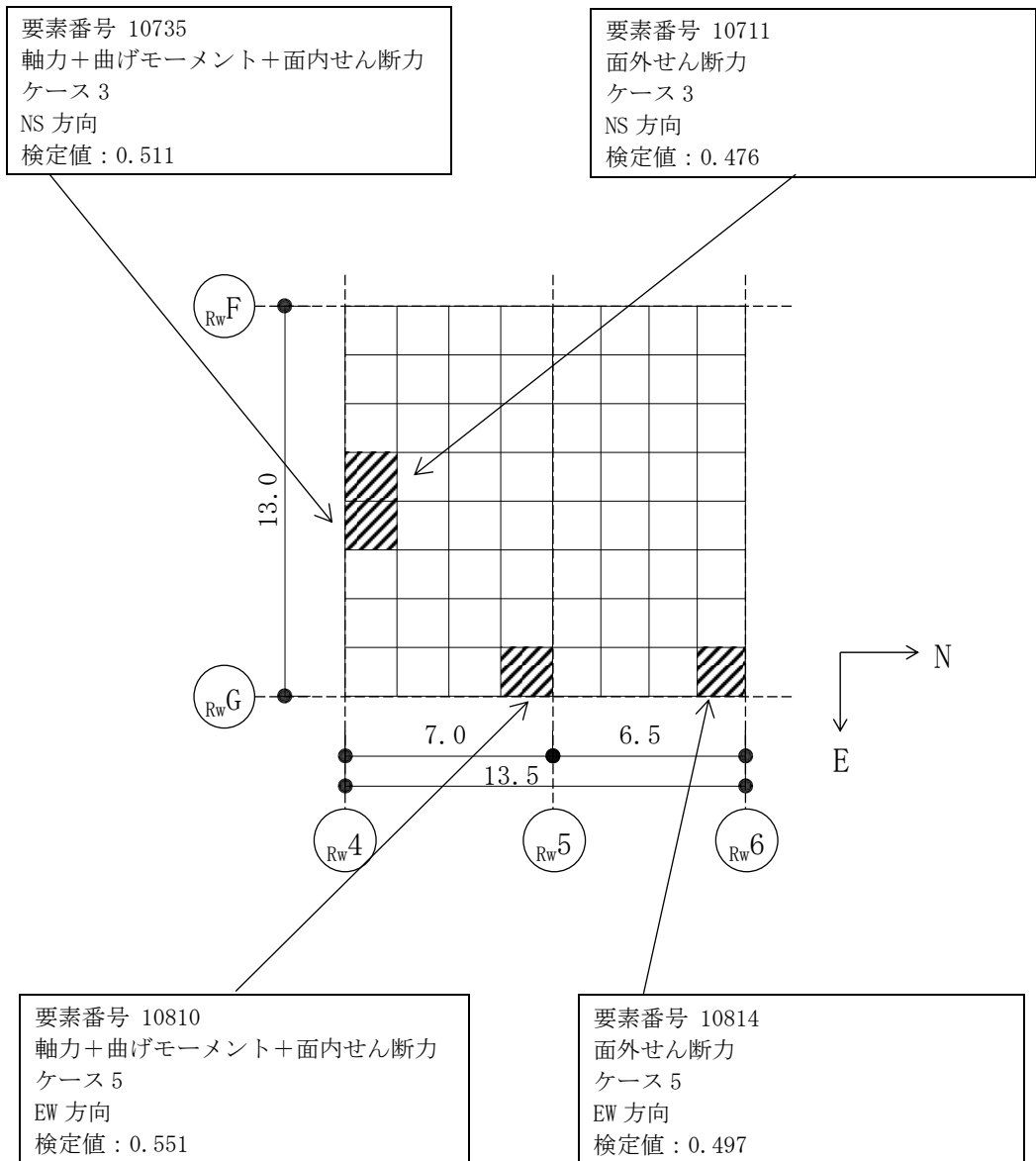
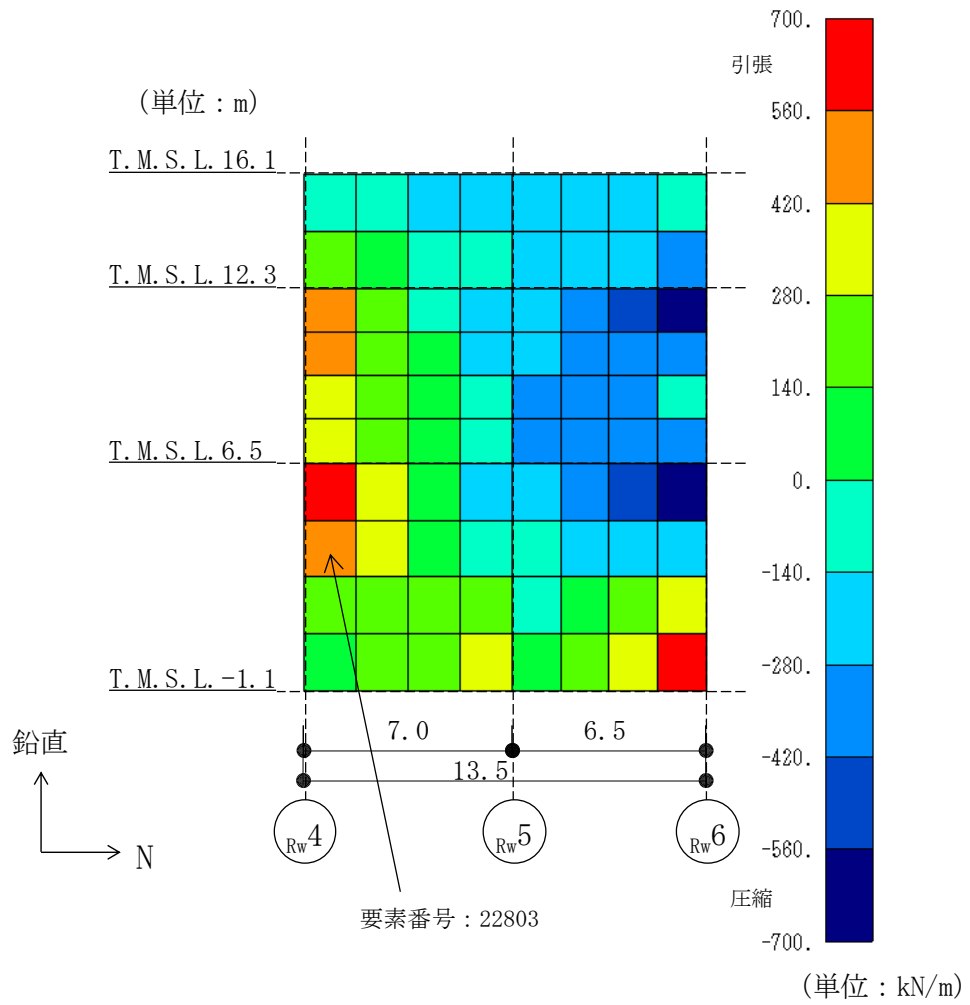


図 2-8 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 (底面スラブ) (単位 : m)



軸力 (横方向, ケース 4)

図 2-9 断面算定部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図(1/3)

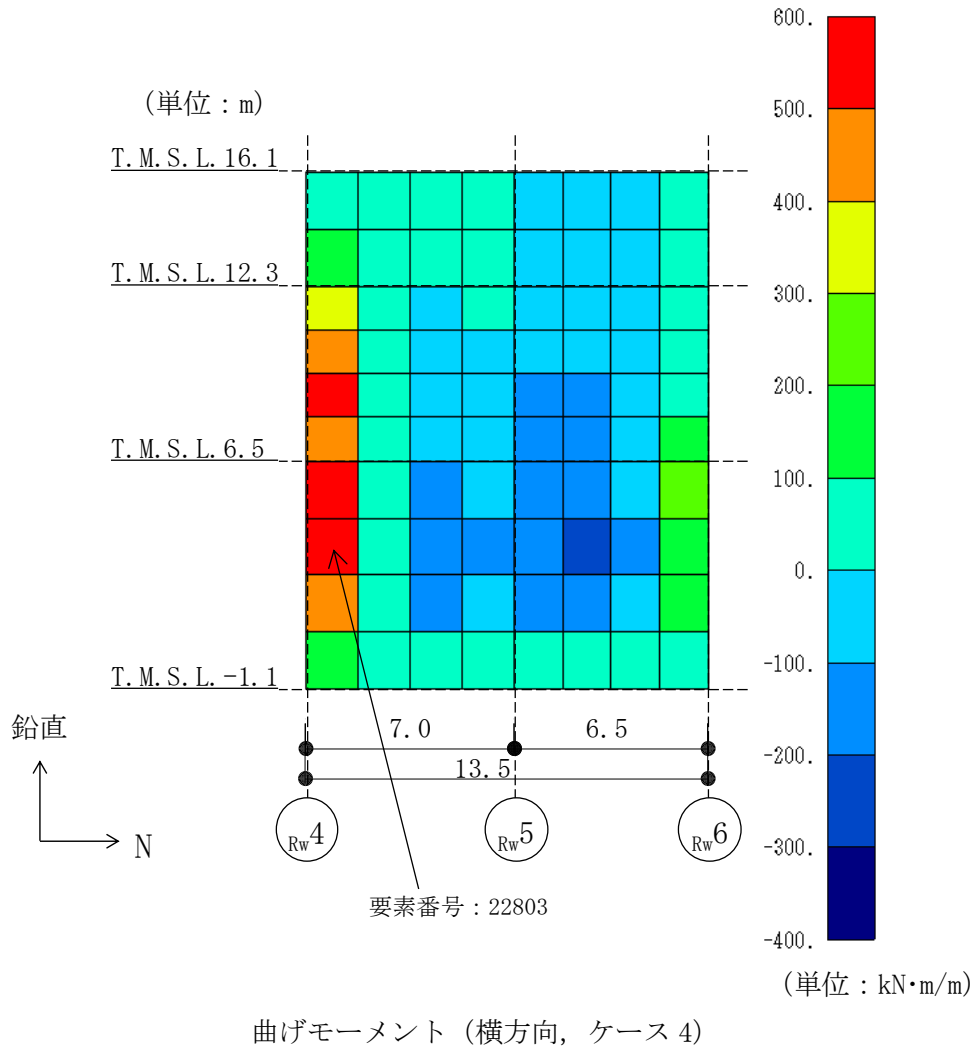
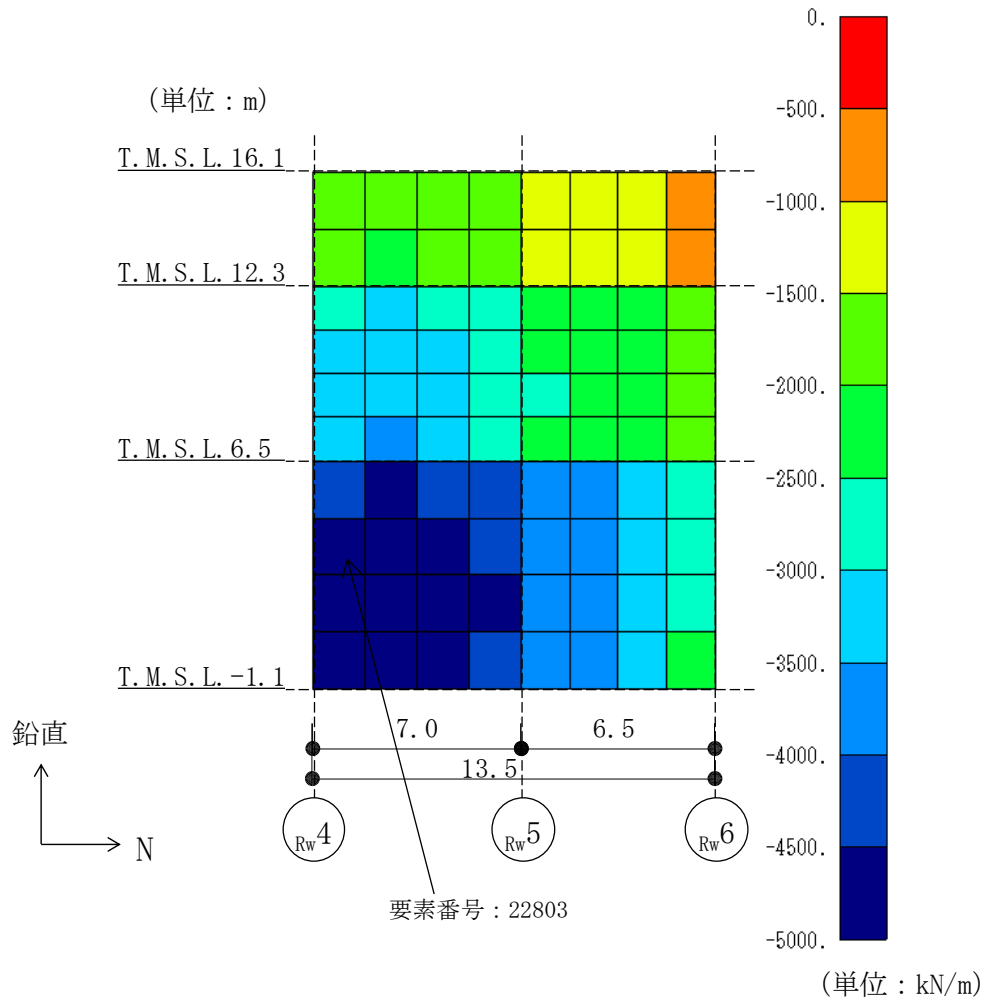


図 2-9 断面算定部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 (2/3)



面内せん断力 (横方向, ケース 4)

図 2-9 断面算定部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 (3/3)

別紙 4 鋼製ライナの検討

目 次

1. 概要	別紙 4-1
2. 復水貯蔵槽の鋼製ライナひずみの算出方法	別紙 4-1
2.1 ひずみの評価式	別紙 4-2
2.2 許容値の設定	別紙 4-2
3. ライナひずみの検討結果	別紙 4-3
4. まとめ	別紙 4-3

1. 概要

復水貯蔵槽はコンクリート躯体に鋼製ライナ（材質：SUS304，厚さ：4mm）を内張りしたもので，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しており，内張りの下のコンクリート躯体で強度を保持しているため，VI-2-5-5-1-2「復水貯蔵槽の耐震性についての計算書」では，鉄筋コンクリート部分の構造強度の確認による評価を実施している。

本資料は，復水貯蔵槽の内面における鋼製ライナひずみの検討の補足説明資料であり，VI-2-5-5-1-2「復水貯蔵槽の耐震性についての計算書」の補足説明をするものである。

2. 復水貯蔵槽の鋼製ライナひずみの算出方法

復水貯蔵槽のライナひずみは，VI-2-5-5-1-2「復水貯蔵槽の耐震性についての計算書」に示す応力解析結果を元に算出する。復水貯蔵槽内面の鋼製ライナについては，躯体に追従するため，鉄筋コンクリートのひずみを鋼製ライナに生じるひずみとみなして，ひずみの検討を行うことで，耐漏洩機能の確認を行う。

2.1 ひずみの評価式

ライナひずみは、下式により算出した鋼製ライナ側コンクリート表面の最大主ひずみ (ε_1) 及び最小主ひずみ (ε_2) の絶対値が大きい方の値とする。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma^2}$$

$$x \text{ 方向の垂直ひずみ} \quad \varepsilon_x = \frac{1}{E} \left(\frac{N_x}{A} + \frac{M_x}{Z} \right) - \frac{\nu}{E} \left(\frac{N_y}{A} + \frac{M_y}{Z} \right)$$

$$y \text{ 方向の垂直ひずみ} \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} \left(\frac{N_y}{A} + \frac{M_y}{Z} \right) - \frac{\nu}{E} \left(\frac{N_x}{A} + \frac{M_x}{Z} \right)$$

$$\text{せん断ひずみ} \quad \gamma = \frac{1}{G} \left(\frac{N_{xy}}{A} + \frac{M_{xy}}{Z} \right)$$

N_x, N_y : 軸力

M_x, M_y : 曲げモーメント

N_{xy} : 面内せん断力

M_{xy} : ねじりモーメント

A : 断面積

Z : 断面係数

E : ヤング係数

G : せん断弾性係数

ν : ポアソン比

2.2 許容値の設定

ライナひずみの許容値は、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 JSME S NE 1 - 2003）（日本機械学会 2003年12月）（以下「CCV規格」という。）を準用し、表 CVE-3611-1 ライナプレートの許容ひずみより、引張： 3.0×10^{-3} 、圧縮： 5.0×10^{-3} とする。

CCV規格の許容値は、コンクリート製原子炉格納容器の円筒部ライナプレートに限定されるものではなく、底部の平面のライナプレートにも適用されるものであるため、適用性について形状に依存するものではない。また、ライナプレートは鉄筋コンクリート部分の変形によるひずみに対し、漏洩を生じることなく追従できる変形性能を有していればよい（解説 CVE-3611）。よって、要求機能の観点からも、復水貯蔵槽は鉄筋コンクリートに強度を、鋼製ライナに耐漏洩性をもたせた構造となっているため、CCV規格におけるライナプレートの許容ひずみを準用することは、問題ないものとする。

3. ライナひずみの検討結果

ライナひずみの検討結果を表 3-1 に示す。また、図 3-1 に最大ひずみの要素位置を示す。

表 3-1 検討結果

検討項目	最大ひずみの発生要素	解析結果	許容値	備考
ひずみ	22785	0.214×10^{-3}	5.0×10^{-3}	S s 地震時

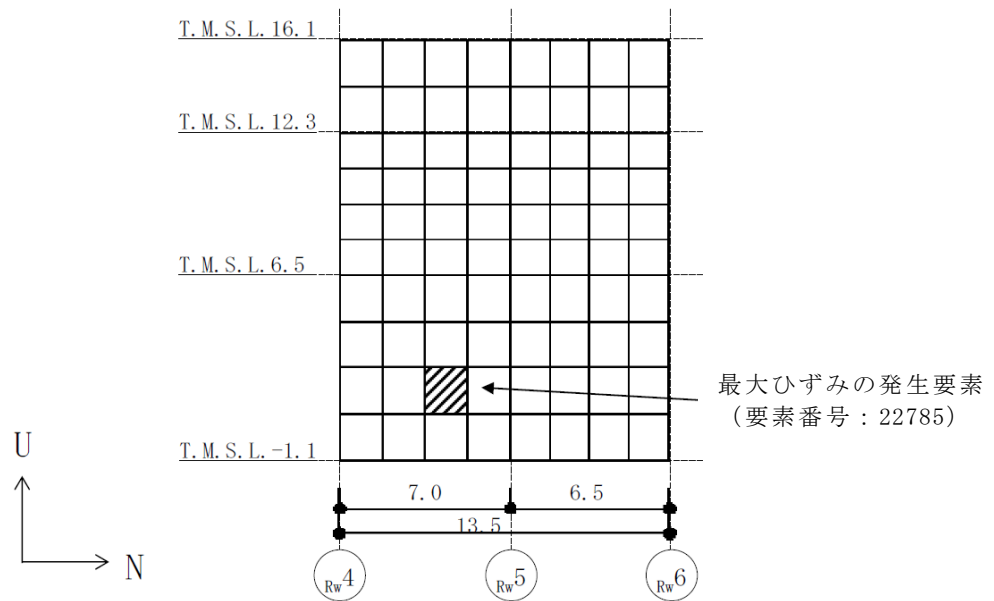


図 3-1 最大ひずみの要素位置図 (RwG 通り壁) (単位: m)

4. まとめ

復水貯蔵槽の内面の鋼製ライナについて、ひずみの検討を行った。その結果、最大ひずみは 0.214×10^{-3} であり、許容値 5.0×10^{-3} に対して十分小さいことを確認した。

別紙 5 誘発上下動の検討

目 次

1. 概要 別紙 5-1

1. 概要

本資料は、廃棄物処理建屋の復水貯蔵槽の耐震評価における誘発上下動を考慮しない
組合せ係数法の適用性について説明するものである。

誘発上下動に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可
された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画の復水貯蔵槽の耐震性につ
いての計算書に関する補足説明資料（KK7 補足-026 資料 8）のうち別紙5「誘発上下動
の検討」による。