

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-30_改0
提出年月日	2021年8月17日

補足-600-40-30 容器のスロッシングによる影響評価について

2021年8月

東北電力株式会社

1. 概要

容器の内包流体には、水平方向の地震によりスロッシングが発生し、地震のエネルギーが分散される。そのため、容器胴板及び基礎ボルトの耐震強度評価は、スロッシングを考慮して内包流体を地震により揺動しない部分（固定質量）と揺動する部分（自由質量）に分けて評価するより、スロッシングを考慮せずに内包流体全てを固定質量で評価する方が保守的な評価結果となる。したがって、今回工認において申請している容器の多くは、内包流体を固定質量として評価しているが、復水貯蔵タンクは内包流体を自由質量と固定質量に分けてスロッシング荷重を算出している（参考1）。

さらに、容器の屋根においては、スロッシングで内包流体が屋根に到達する場合、スロッシングによる荷重が作用する。そこで、スロッシングで内包流体が容器の屋根に与える影響について評価する。この屋根への影響評価でも内包流体を保守的に考慮した評価方法を用いる。

2. 評価対象の選定

スロッシングによる影響評価の対象は、耐震重要度分類 S クラス及び重大事故等対処設備から、スロッシングによる溢水等のおそれがあるものを選定する。なお、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」において、地震時に溢水源とする容器（基準地震動 S_s に対する耐震性を確認していない機器）は、本評価の対象外とする。表 1 に影響評価の対象とした容器を示す。

表 1 影響評価の対象容器 (1/2)

名称	形状	耐震重要度分類	設備分類	内径 (mm)	全高 (mm)	胴高さ (mm)	液位 (mm)
原子炉補機冷却水サージタンク (A) (B)	平底たて置き円筒形容器	S	常設耐震/防止 常設/緩和 常設/防止 (DB 拡張) 常設/緩和 (DB 拡張)	2500	3171	3147	2955
高圧炉心スプレイ補機冷却水サージタンク	平底たて置き円筒形容器	S	常設/防止 (DB 拡張)	1200	2041	2017	1835
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	S	常設耐震/防止 常設/緩和	2750	3690	3669	3405
復水貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	B	常設耐震/防止 常設/緩和 常設/防止 (DB 拡張)	20000	12433	11800	10100
ほう酸水注入系テストタンク	四脚たて置き円筒形容器	C	—	965	1356	1350	1260.8

表1 影響評価の対象容器 (2/2)

名称	形状	耐震重要度分類	設備分類	内径 (mm)	全高 (mm)	胴高さ (mm)	液位 (mm)
CUW プリコートタンク	平底たて置き 円筒形容器	B	—	965	1409	1397	1169.3
FPC プリコートタンク	平底たて置き 円筒形容器	B	—	965	1409	1397	1169.3
HNCW サージタンク	四脚たて置き 円筒形容器	C	—	1400	1678.5	1660.5	1508
所内温水系サージタンク	平底たて置き 円筒形容器	C	—	1200	1839	1821	1643
DG 燃料油ドレンタンク (A) (B)	平底たて置き 円筒形容器	C	—	600	712	700	650
HPCSDG 燃料油ドレンタンク	平底たて置き 円筒形容器	C	—	600	712	700	650
HPCSDG 潤滑油補給タンク	平底たて置き 円筒形容器	C	—	1200	1760.5	1748.5	1591.5
RW 制御室 HVAC 冷水供給設備膨張タンク	平底たて置き 矩形容器	C	—	矩形 1100×1100	1207	1200	1100
ガスタービン発電設備 燃料小出槽	平底たて置き 円筒形容器	—	常設耐震/防止 常設/緩和	1009	810	800	860
緊急時対策所軽油タンク	平底たて置き 円筒形容器	—	常設耐震/防止 常設/緩和	2200	3041	3020	2820

3. 評価方法

3.1 評価方針

容器のスロッシングによる波面が屋根に衝突することで、屋根に荷重が作用する。スロッシングによる波高は地震動の増加により大きくなるが、波面衝突によってスロッシング形状の乱れが大きくなり、衝突圧力が抑えられる傾向がある。一方、波面衝突による荷重は、内包流体の上部（自由質量）が屋根に沿って上昇することによるものである。

本評価ではスロッシングによる流体力として、内包流体の質量 m に、内包流体のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H が作用した際の荷重 F が、側壁や重力の影響を受けずに、屋根に対して鉛直上向き方向に全て作用するものと保守的に仮定し評価（以降「保守的な評価」と称す。）を行う。保守的な評価の概略図（復水貯蔵タンクの例）を図1に示す。

内包流体をスロッシングにより生じる動液圧荷重として考慮した場合、内包流体の荷重は一部が上方向に逃げてしまうが、「保守的な評価」を用いる場合、内包流体に作用する荷重の全てが一方向に作用するものと扱うことから、保守的な評価となる。また、スロッシングによる波は、衝突により砕けること、発生する荷重のうち瞬間的な荷重は、屋根の変形に与える影響は限定的であることが電力共同研究「円筒形タンクのスロッシング評価」〈参考2〉に示されている。

なお、スロッシングによる波が屋根に衝突し離れる際の負圧の影響は参考6に示すとおり軽微である。

また、評価に用いる荷重については、屋根の鉛直方向地震力による慣性力とスロッシングによる荷重Fとの組合せが考えられるが、参考8に示すとおり女川原子力発電所第2号機での屋根の質量は容器内包流体の質量mに比べて十分に小さいため、本評価ではスロッシングによる荷重Fのみを評価する。

3.2 応力評価方法

本評価ではスロッシングによる流体力として、タンクを上方から見たときの屋根の接続部より内側の面積（水平投影面積）で液位の高さの内包流体の自由質量mに、内包流体のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H が作用した際の荷重Fが、側壁や重力の影響を受けずに、鉛直上向き方向に全て作用するものとする。

スロッシングによる荷重が、屋根全面に均一に作用するものとした場合、屋根に負荷される荷重を設計弱部である屋根の接続部で負担すると仮定し、屋根の健全性を屋根の接続部に対して確認する。評価部位の妥当性を参考3に示す。

評価部位は、屋根と胴板の溶接部（部位Ⅰ）及び屋根と屋根の溶接部（部位Ⅱ及び部位Ⅲ）（以下、部位Ⅰ、部位Ⅱ及び部位Ⅲを合わせ「屋根の接続部」という。）とする。評価部位を図1に示す。

屋根の接続部は円周方向に一様の断面であり、荷重が均等かつ一様に引張荷重として上向き一方向にのみ作用し、せん断破壊は想定されないことから、屋根の接続部に作用する応力は、せん断応力ではなく膜応力として扱う。応力評価モデルを図2に示す。なお、設計・建設規格において、溶接部の継手効率に関する要求は、屋根部に対して規定されていない。

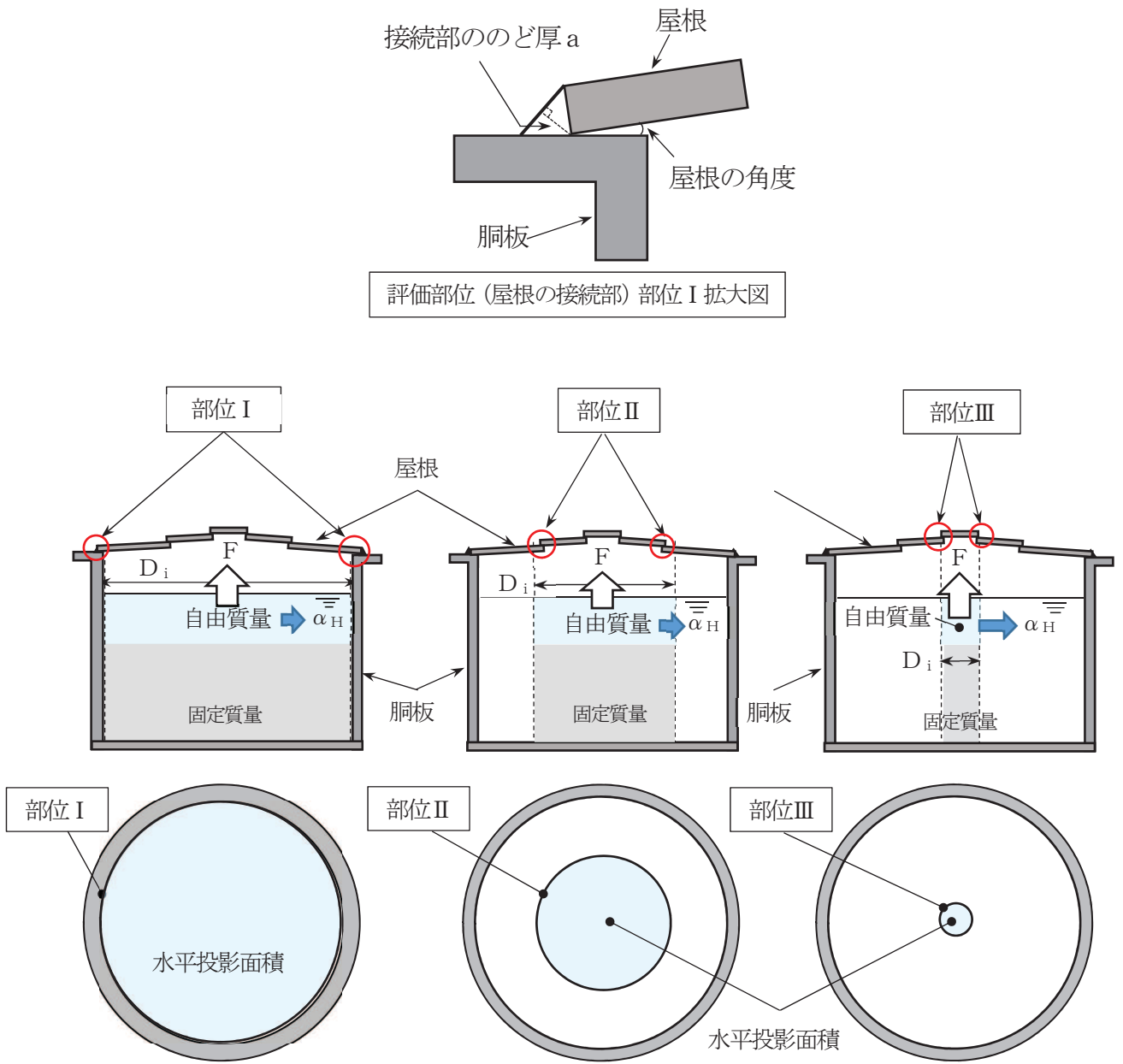


図1 保守的な評価の概略図 (復水貯蔵タンクの例)

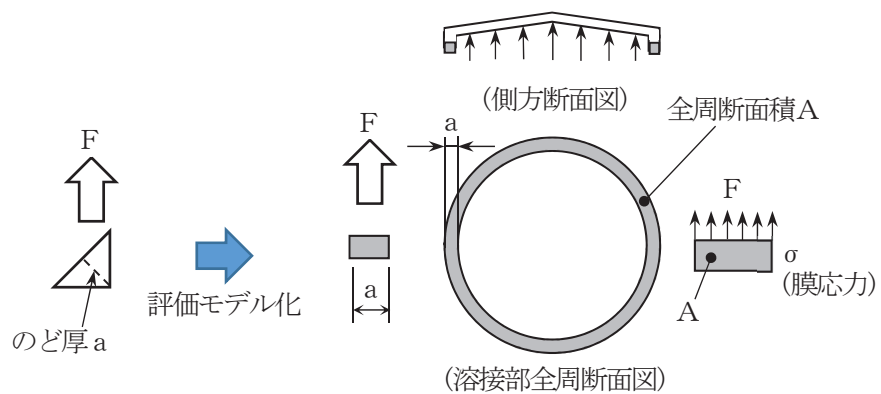


図2 応力評価モデル図

荷重Fを、屋根の接続部の全周断面積Aで除した応力 σ が許容値以下となることを確認することで、屋根の接続部の応力評価を行う。スロッシングによる評価に用いる評価式を以下に、記号の説明を表2に示す。

内包流体のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H は、添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」に記載した復水貯蔵タンク基礎のモデル図のうち、内包流体の自由質量に相当する節点から得られる水平方向の最大加速度を用いる。なお、内包流体の自由質量の設定については、参考1に示す。

$$\text{発生応力 } \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\text{ここで, } F = m \alpha_H$$

$$A = \pi a D_i$$

表2 評価に用いる記号

記号	記号の説明	単位
F	スロッシングによる荷重	N
m	内包流体の自由質量	kg
α_H	内包流体（自由質量）の水平方向応答加速度	m/s ²
a	屋根の接続部ののど厚	mm
D_i	屋根の接続部の平均直径	mm
A	屋根の接続部の全周断面積	mm ²

3.3 評価フロー

容器について、屋根の接続部の強度を下記の手順で評価し、スロッシングの影響が無いことを確認する。評価フローを図3に示す。

- ① 屋根に内包流体が到達するか。
- ①' 屋根に角度があるか*。
- ② 内包流体が到達する場合は、「保守的な評価」で屋根の接続部の発生応力が許容値以下か。
- ③ 屋根の接続部の発生応力について、「詳細評価」が必要な場合は、解析等による評価を実施。

注記*：参考資料（容器構造設計指針・同解説〈参考4〉）より容器の屋根の角度が小さい場合、固定屋根によるスロッシングの影響が拘束され、スロッシングを起こした内包流体が上昇できず腰掛圧が生じないことが示されている。また、参考資料（固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第2報）〈参考5〉）にも、腰掛圧は受圧点における最高液位からの静水圧におおよそ等しいので、平板及び平板に近い屋根の場合は無視してよいと示されている。よって、平板屋根の場合には、②以降の評価の対象外とする。

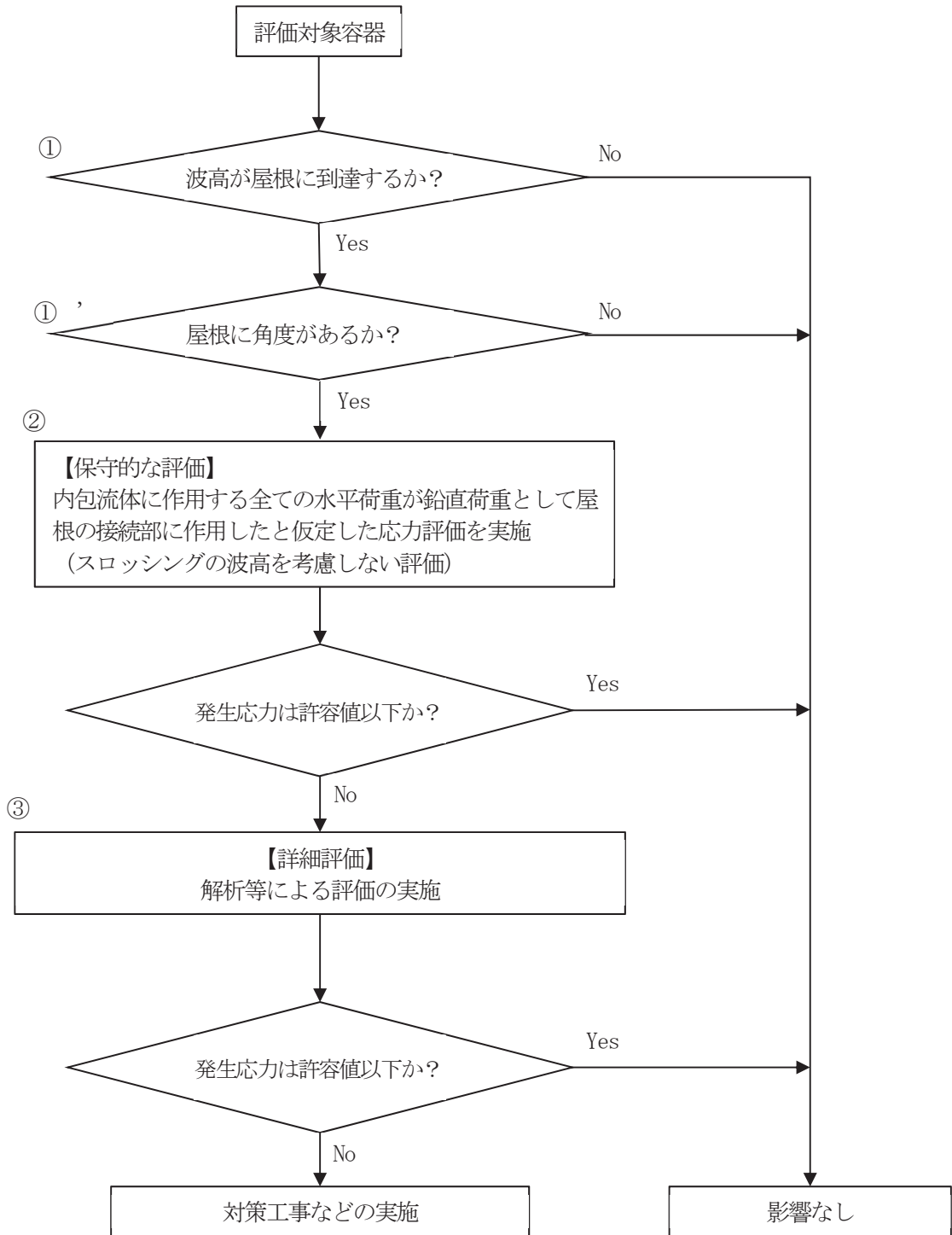


図3 女川原子力発電所第2号機の屋根の接続部に対する耐震評価フロー

4. 屋根の接続部に対する評価手法の選定について

図3に示す評価フローにおいて、①にて波高が容器屋根に到達するか否かを判定し、波高が到達するものうち容器の屋根に角度がある場合には（フロー①'）、②【保守的な評価】を実施し、判定を満足しない場合はフローにより「③【詳細評価】」の評価を行う。

図3の評価フローによる各容器の評価手法の選定結果を表3に、構造概要図を図4から図6に示す。

復水貯蔵タンクは、図3の評価フローにて①' 屋根に角度があることから、②「保守的な評価」を行う。それ以外の容器は、図3の評価フローにて①' 屋根に角度がないことから、影響なしとして評価を終了する。

スロッシングによる波高算出結果を参考7に示す。

なお、参考資料（容器構造設計指針・同解説〈参考4〉）において、容器の屋根が5°より小さい角度の場合には、腰掛圧が生じないことが示されているが、ここでは保守的に評価対象として選定している。

表3 容器の評価手法の選定結果(1/2)

名称	形状	屋根形状（角度）	選定結果
原子炉補機冷却水サージタンク (A) (B)	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
高圧炉心スプレイ補機冷却水サージタンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
復水貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器 (図5)	支持形円すい (約3.6°)	②「保守的な評価」
ほう酸水注入系テストタンク	四脚たて置き円筒形容器 (図6)	平板	①' 「影響なし」
CUW プリコートタンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
FPC プリコートタンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
HNCW サージタンク	四脚たて置き円筒形容器 (図6)	平板	①' 「影響なし」
所内温水系サージタンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
DG 燃料油ドレンタンク (A) (B)	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
HPCSDG 燃料油ドレンタンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
HPCSDG 潤滑油補給タンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」

表3 容器の評価手法の選定結果(2/2)

名称	形状	屋根形状(角度)	選定結果
RW 制御室 HVAC 冷水供給設備膨張タンク	平底たて置き矩形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
ガスタービン発電設備燃料小出槽	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」
緊急時対策所軽油タンク	平底たて置き円筒形容器 (図4)	平板	①' 「影響なし」

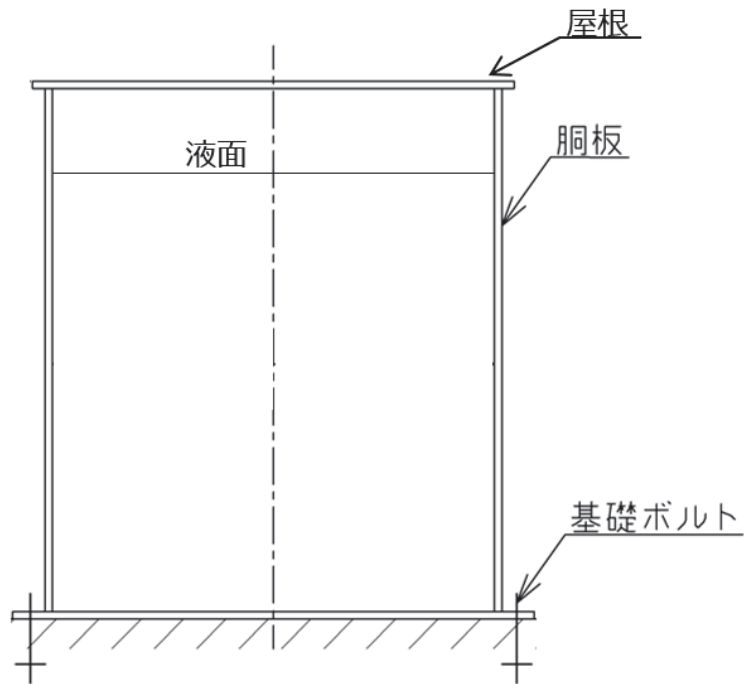


図4 構造概要図(平底たて置き円筒形容器及び平底たて置き矩形容器)

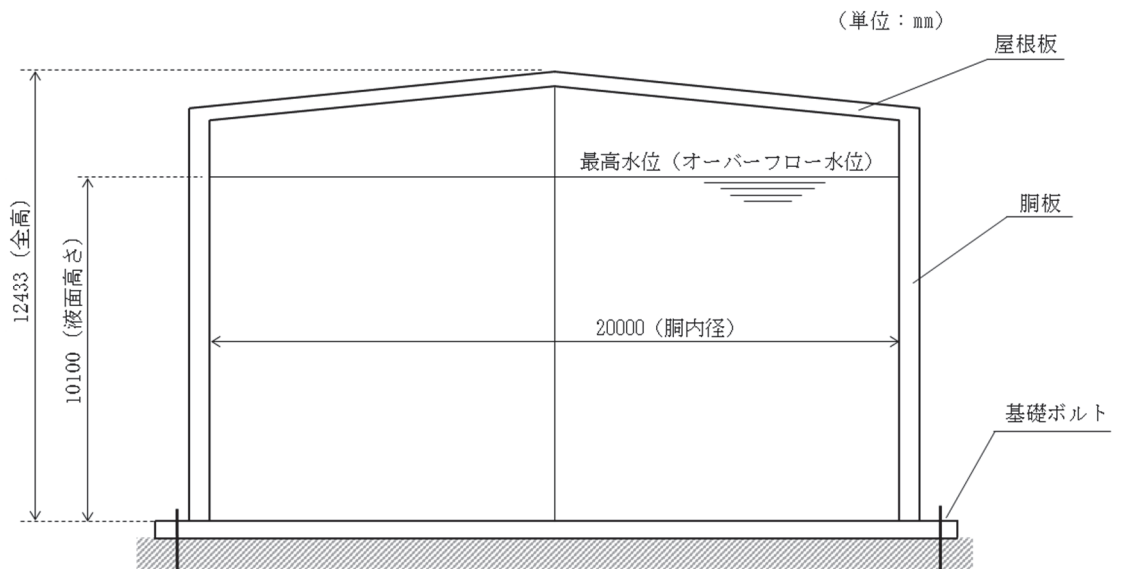


図5 構造概要図(復水貯蔵タンク)

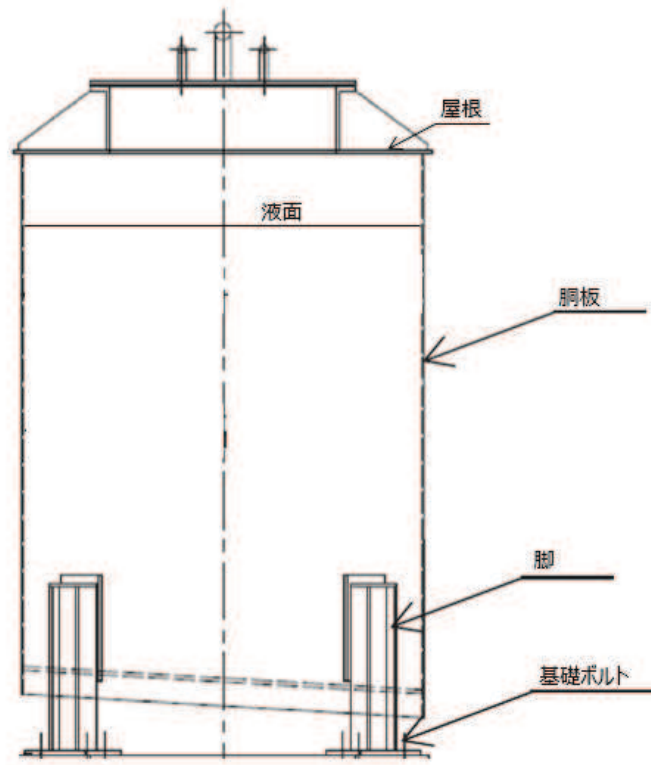


図6 構造概要図（四脚たて置き円筒形容器）

5. 屋根の接続部に対するスロッシングの影響評価結果

5.1 評価対象

4項の選定結果から復水貯蔵タンクの評価を行った。

5.2 評価条件

復水貯蔵タンクについて、評価諸元を表4に、評価条件を表5に示す。

容器内包流体の揺動質量は、参考1に示すとおり、ハウスナーのモデルを適用して算出した値を用いる。さらに同モデルにより算出した揺動質量を添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」の復水貯蔵タンク基礎モデルから得られる最大応答加速度を用いる。

表4 評価諸元

記号	記号の説明	単位	復水貯蔵タンク		
			部位Ⅰ	部位Ⅱ	部位Ⅲ
m_1	内包流体の自由質量*	kg			
a	屋根の接続部ののど厚	mm			
D_i	屋根の接続部の平均直径	mm			
α_H	内包流体の水平方向応答加速度	m/s^2	1.838		

注記*：部位Ⅱ及び部位Ⅲの自由質量は、屋根の接続部の平均直径比を踏まえて算出。

表5 評価条件

名称	材料	温度条件 [°C]	許容応力状態	許容限界*
復水貯蔵タンク	SUS304	66	V_{AS}	$0.6 \cdot S_u$

注記*：許容限界は、発生応力を全周にわたる溶接部に一様に作用する荷重を全断面積にて除して求めることから、膜応力に対する許容限界として、J E A G 4601・補-1984における第3, 4種容器（クラス2, 3容器）の一次一般膜応力の許容応力を適用した。

5.3 評価結果

評価結果を表6に示す。3項で示す評価式を用いて復水貯蔵タンク屋根について「保守的な評価」を行った結果、屋根の接続部の発生応力は許容応力を下回っており、スロッシングで内包流体が容器の屋根に与える影響については、構造強度上問題がないことを確認した。

表6 評価結果（復水貯蔵タンク）

評価部位	発生応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
部位Ⅰ	7	287
部位Ⅱ	4	287
部位Ⅲ	1	287

参考資料

- 〈参考1〉スロッシングを考慮した場合の内包流体の挙動について
- 〈参考2〉円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋（日本保全学会第7回学術講演会2010.7.15予稿集）
- 〈参考3〉スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について
- 〈参考4〉容器構造設計指針・同解説 抜粋
- 〈参考5〉固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第2報） 抜粋（圧力技術17巻（1979）4号）
- 〈参考6〉スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について
- 〈参考7〉速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法
- 〈参考8〉屋根における地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳について

〈参考1〉 スロッシングを考慮した場合の内包流体の挙動について

1. スロッシングを考慮した内包流体における荷重とモーメントの低減について

タンクに地震荷重が作用した際に、内包流体にスロッシングが生じる。

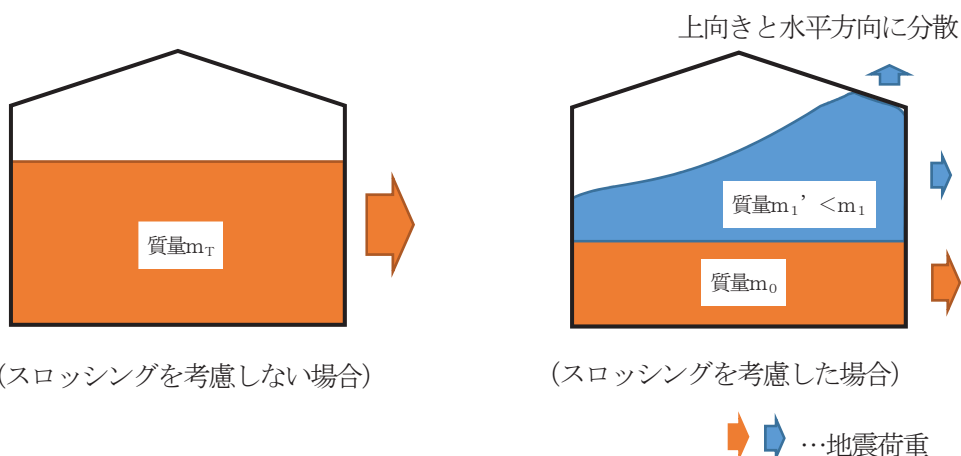
スロッシングが生じることで内包流体は上下方向にも動くことになり、内包流体に作用する地震エネルギーの一部が上下方向のエネルギーに変換され、タンク胴板に水平方向荷重として作用するエネルギーの総量が減少する。

また、内包流体がスロッシングにより揺動することで荷重の作用方向が逸散し、内部流体に対する水平方向荷重作用点の重心高さが、内包流体を揺動しない固定質量と見做した場合に比べ低くなる。

それらを考慮することで、水平方向に作用するエネルギー総量の減少及び荷重作用点の低下となり、タンク本体及び基礎ボルトに作用する地震荷重（水平方向荷重及び転倒モーメント）が低減される。

スロッシングによる重心高さ及び荷重低減のイメージを以下に示す。

スロッシングによる波高は地震動の増加により大きくなるが、波面衝突によってスロッシング形状の乱れが大きくなり、衝突圧力が抑えられる傾向である。したがって、地震動が大きいときのスロッシングによる内包流体の挙動に対しても考え方は同様である。



モーメントを水平方向荷重で除したものが重心高さとなると、重心高さ l_g は以下の式で表される。

$$\text{モーメント} M = \text{水平方向荷重} F \times \text{重心高さ} l_g \text{ より, } l_g = M / F$$

$$\text{ここで, 水平方向荷重} F = \text{水平方向加速度} \alpha_H \times \text{質量} m$$

内包流体の全質量を自由質量と固定質量に分けて考えた場合、内包流体の全質量 $m_T = \text{自由質量} m_1 + \text{固定質量} m_0$ となる。

スロッシングを考慮した場合、自由質量 m_1 は揺動により荷重作用方向が分散することから、水平方向荷重が減少するが、加速度は変化していないため自由質量 m_1 が小さくなるものとして、等価自由質量 m_1' と見做す。次に、重心高さ l_g は、

$$l_g = (m_1 \times m_1 \text{の重心高さ} l_{g1} + m_0 \times m_0 \text{の重心高さ} l_{g0}) / \text{全質量} m_T \text{ により求まる。}$$

スロッシングを考慮することにより、 m_1 が等価自由質量 m_1' として小さくなることで、 m_1' の重心高さも等価重心高さ l_{g1}' と見做し、スロッシングを考慮した重心高さは、

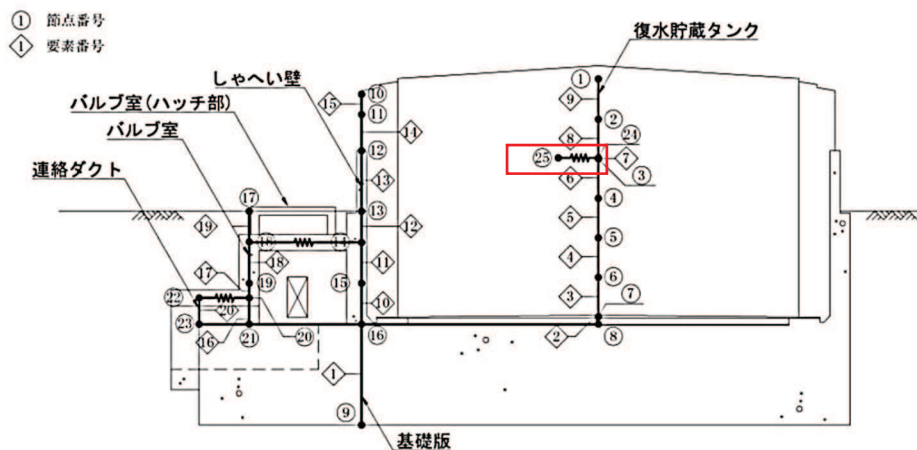
$$l_{g'} = (m_1' \times l_{g1}' + m_0 \times l_{g0}) / m_T \text{ となり, } l_g \text{ より低くなる。}$$

注：自由質量 m_1 はスロッシングにより揺動すると仮定する内包流体の質量を、固定質量 m_0 はスロッシングにより揺動しないと仮定する内包流体の質量として、質量 m_T を分けたそれぞれの質量を示す。また、等価自由質量 m_1' は揺動することによる荷重分散を質量が低減するものとして表したものである。

以上より、スロッシングを考慮した場合、上下方向へのエネルギーの分散が生じることにより、水平方向の地震荷重は低減される。さらに、自由質量部分の荷重低減を等価自由質量として質量低減と見做すことにより、荷重作用点である重心高さが低くなり、水平方向モーメントも低減される。

2. 復水貯蔵タンクにおける自由質量の設定について

建設時から復水貯蔵タンクの耐震評価においては、内包流体の自由質量を考慮して地震応答解析を実施し、水平方向の応答加速度を求めている。添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」に示した水平方向における地震応答解析モデルを参考図1に示す。

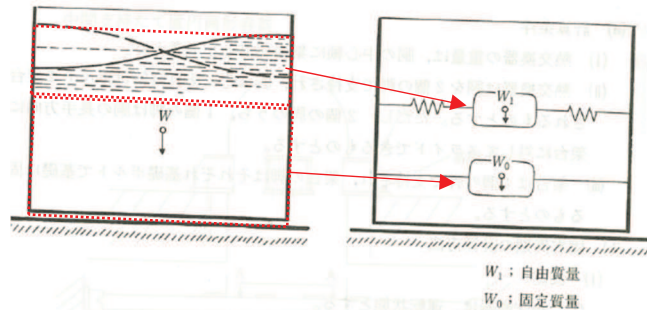


参考図1 復水貯蔵タンクの地震応答解析モデル

(添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」図3-4 復水貯蔵タンク基礎のモデル図 (南北方向) 引用)

ここで参考図1に示す節点番号25を揺動する内包流体としてモデル化しており、このモデル化については、単純円筒モデルのハウスナー理論 (USAEC, Nuclear Reactors and Earthquakes, TID-7024, Chapter 6, Appendix F, 1963.8) に基づいて設定している。

なお、ハウスナー理論はスロッシングを考慮するための方法としてJ E A G 4 6 0 1-1987にも引用されている (参考図2参照)。



参考図2 ハウスナー理論による液体揺動の解析モデル

(J E A G 4 6 0 1-1987 図6.5.2-42引用)

復水貯蔵タンクの内包流体の自由質量 m_1 とばね定数 k_1 は以下の式により算出する。式に用いる記号の説明を参考表 1 に示す。

参考表 1 記号の説明

記号	記号の説明	値	単位
m_1	内包流体の自由質量	—	t
m_T	内包流体の全質量	3173	t
R	胴の内半径	10	m
H	内包流体の最高水位	10.1	m
g	重力加速度	9.80665	m/s ²
ω	自由質量の固有円振動数	—	rad/s
k_1	自由質量のばね定数	—	t/m

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 0.318 \cdot \frac{m_T \cdot R}{H} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{H}{R}\right) \\
 &= 0.318 \cdot \frac{3173 \cdot 10}{10.1} \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{10.1}{10}\right) \\
 &= 951.6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= \sqrt{\frac{g}{R} \cdot 1.84 \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{H}{R}\right)} \\
 &= \sqrt{\frac{9.80665}{10} \cdot 1.84 \cdot \tanh\left(1.84 \cdot \frac{10.1}{10}\right)} \\
 &= 1.311
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{m_1 \cdot \omega^2}{g} \\
 &= \frac{951.4 \cdot 1.719}{9.80665} \\
 &= 166.8
 \end{aligned}$$

以上のとおり、算出した値を参考図 1 に示す解析モデルに設定し、地震応答解析を実施している。

なお、復水貯蔵タンクは高さ方向で胴板の厚みが違うことから、固定質量についても、胴板の厚さが変わる高さで節点を設けた多質点モデルとしている。自由質量から得られるスロッシング荷重と胴板厚さの違いを考慮した地震応答解析モデルによって、各胴板の断面力（せん断力及びモーメント）を算出し、構造強度評価に用いている。

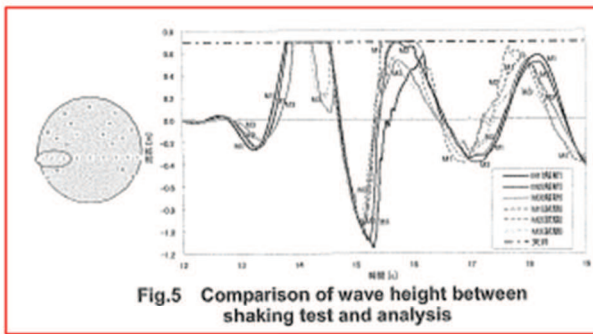


Fig.5 Comparison of wave height between shaking test and analysis

それぞれのひずみの時刻歴結果を Fig.9 に示す。応答解析結果は周期的な振動が発生しているが平均的には試験結果をほぼ再現している。また、20000Pa 以上をカットした応答解析結果においては、振動の各ピークで若干小さくなっているものの、衝撃圧を含む結果とほとんど変わらない。よって瞬間的な衝撃圧が変形に与える影響は限定的であり全体的なひずみはそれ以外の圧力の影響が支配的であると言える。

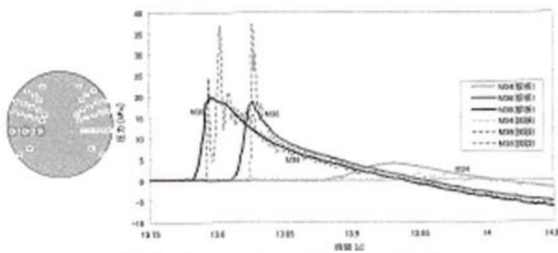


Fig.6 Comparison of pressure between shaking test and analysis

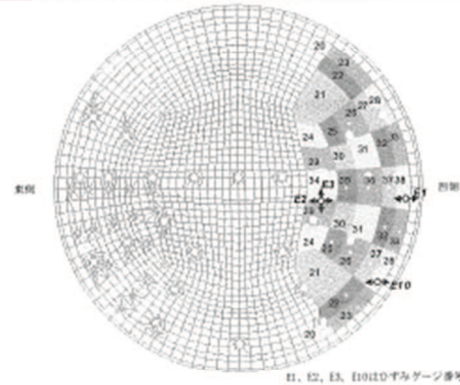


Fig.8 Analysis model to calculate strain on top board

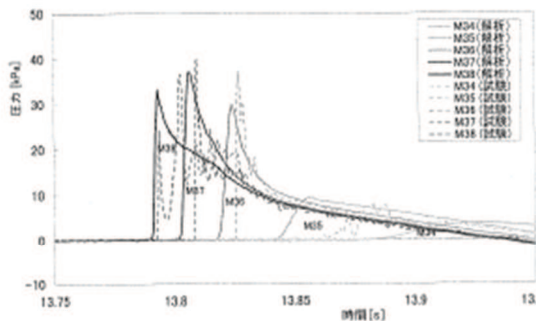


Fig.7 Analysis with segmentalized model

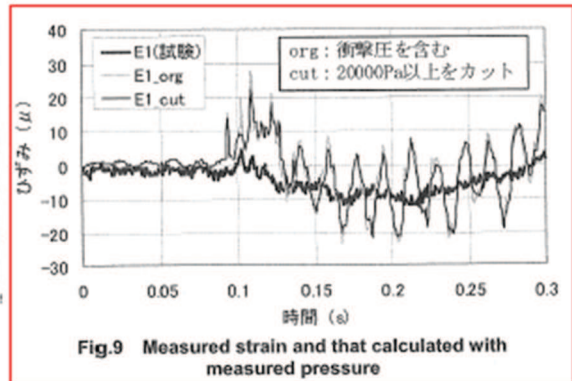


Fig.9 Measured strain and that calculated with measured pressure

3.3 天板の健全性評価

スロッシングによる波面衝突が天板強度へ与える影響を確認することにより、天板健全性の合理的な評価手法を検討した。

天板の健全性評価に必要な変形量は、振動試験においてひずみデータとして取得している。また先述のとおり天板の圧力データも得られているため、Fig.8 に示すように天板をモデル化し、各圧力計の周囲の領域に圧力時刻歴を与えて応答解析を実施し、発生するひずみを試験により計測されたひずみと比較した。さらに、瞬間的な圧力のピークが天板の変形に与える影響を評価するため、20000Pa 以上の衝撃圧をカットした圧力時刻歴による応答解析結果も合わせて確認した。

また、流動解析により得られた圧力時刻歴を用いたひずみを Fig.10 に示す。衝撃圧に相当する部分はないが、全体として試験圧力による応答解析およびひずみを模擬しており、流動解析で得られた圧力時刻歴を用いた天板の動的応答解析によっても、天板の変形挙動を模擬できることが分かった。

最後に、試験で計測された圧力時刻歴および、流動解析で得られた圧力時刻歴それぞれの最大値を静的に加えた結果を Fig.11 に示す。いずれの結果も試験で計測されたひずみに対し大きく、これらの評価が安全側の評価であることが分かった。

〈参考3〉 スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について

平底たて置円筒形容器を含む開放型タンクの屋根については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005/2007年追補版) JSME S NC1-2005/2007」のうち、クラス2容器に係る要求事項である「PVC-3930 屋根がない場合の形状規定」及び同解説 (別紙参照) に基づき、以下のとおり設計を行っている。

- ・屋根の板厚は、4.5 mm 以上であること。
- ・(屋根と胴板の) すみ肉溶接部が4.5 mm を超える場合は、過圧力時の逃がし装置を設けること。

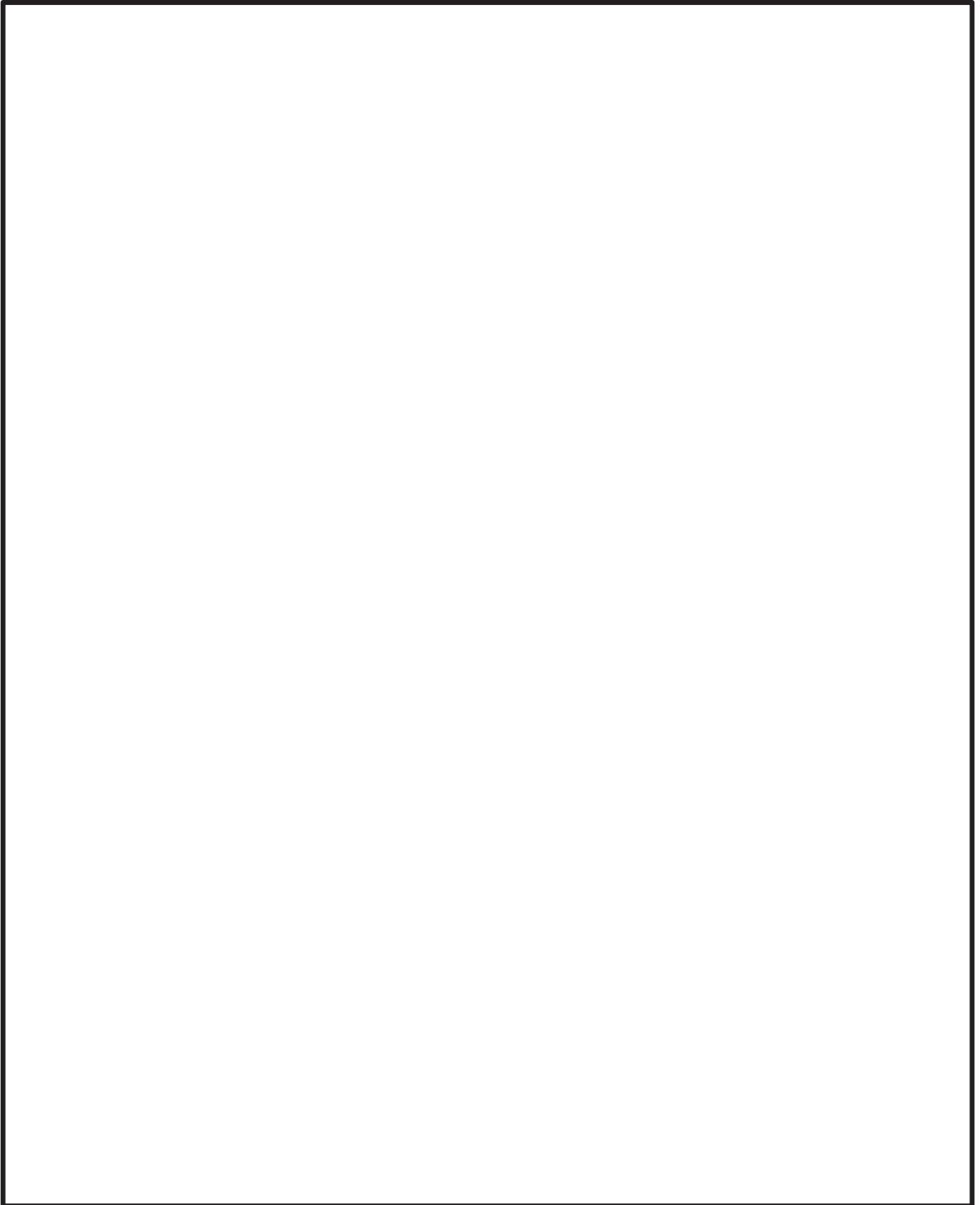
上記2点から、すみ肉溶接部を4.5 mm 未満と設計する場合は、当該部位が最弱部となり、過圧時にここから圧力を逃がすような設計となっている。

復水貯蔵タンクは、平底たて置円筒形容器に該当し、

スロッシングによる荷重は、屋根と胴板の接続部 (図1の部位I) に最も大きな荷重が作用する。

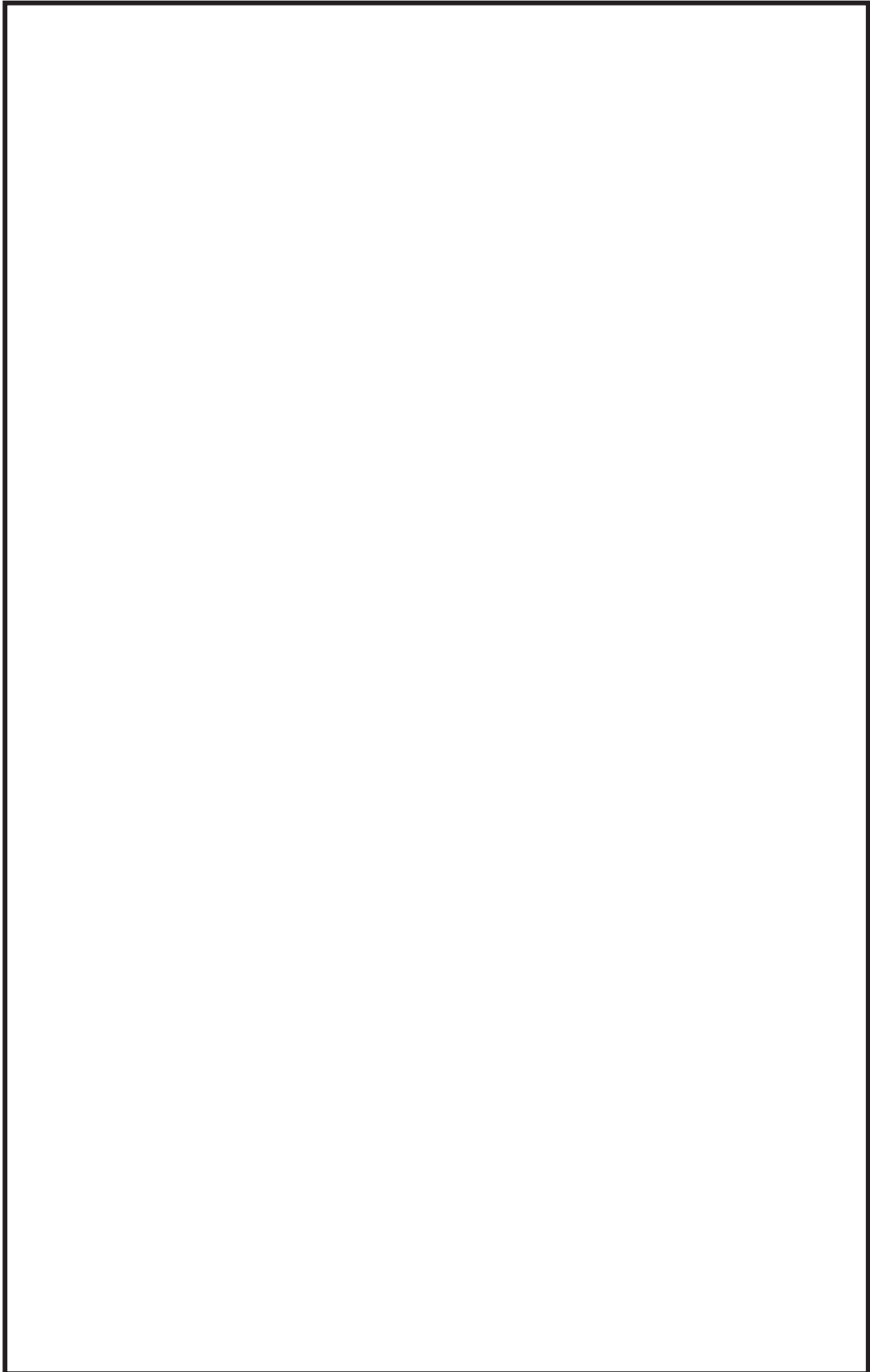
一方の屋根と屋根の接続部 (図1の部位II及び部位III) は、評価点が屋根と胴板の接続部に比べ内側にあるため、スロッシング時に作用する荷重も屋根と胴板の接続部に比べ小さいが、荷重を負担する断面積が小さいことから、当該すみ肉溶接部 (「屋根の接続部」) を評価対象部位に設定し、当該屋根の接続部の水平投影面に対する内包流体の質量を考慮して評価を行うことは妥当であると考えられる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

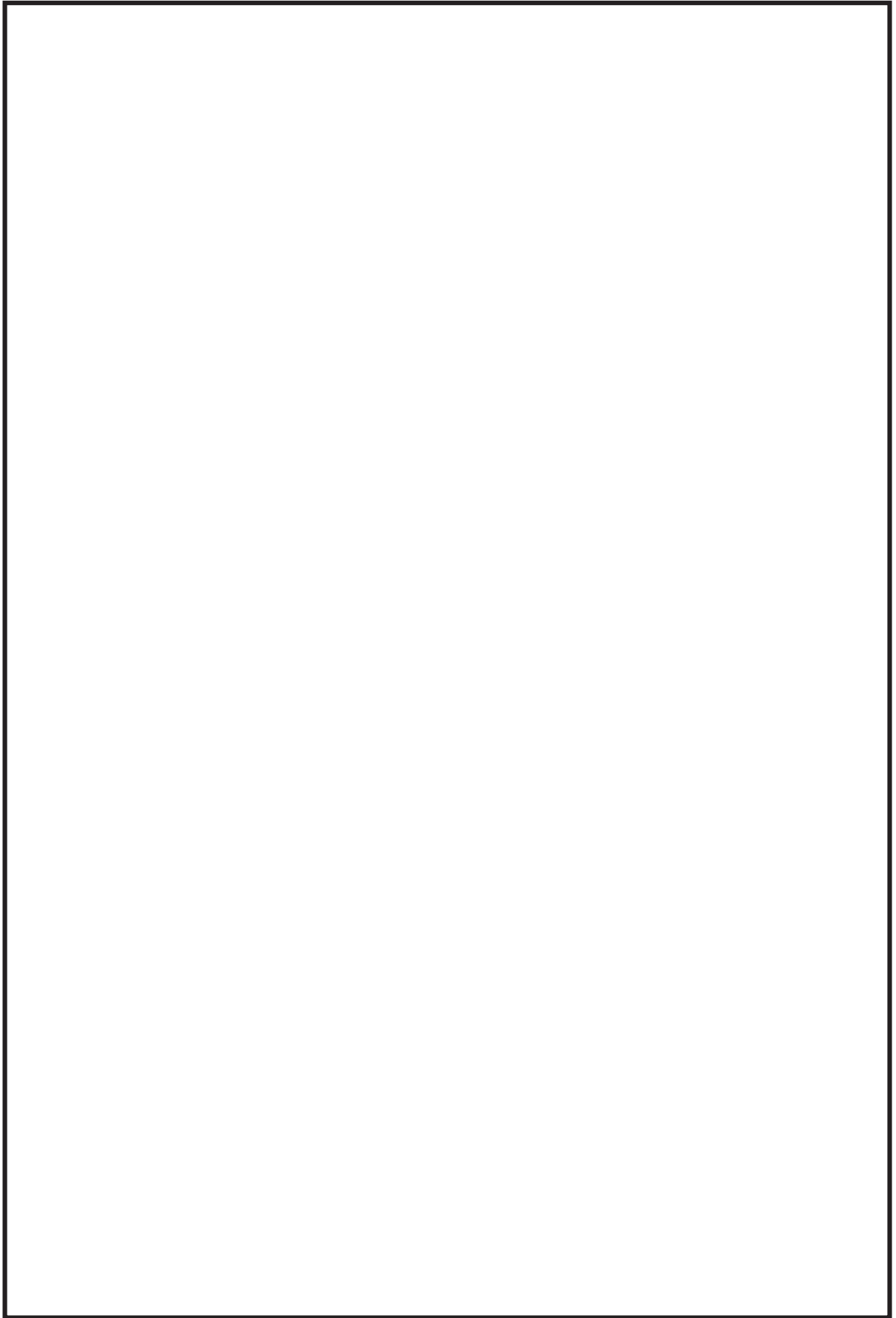


枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

〈参考4〉 容器構造設計指針・同解説 抜粋



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

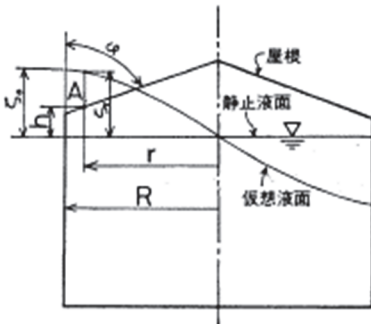


図1 衝撃圧力

る。文献(6)ではこの問題について充分検討を加えていない。平板の落下衝撃に関する2, 3の研究例^{(8), (9)}を参考にして、第3章にて実験式を考える。

屋根圧 P_A は、図1の受圧点Aにおける最高液位からの静水圧に大略等しいので、(2)式から求められる。

$$P_A = \rho g (\zeta_0 - h) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

平板及び平板に近い屋根の場合 P_A は無視してよいと考えられる。

又、 ζ_0 及び ζ_r は次のようにして求められる。

屋根により波高の成長がさまたげられないときの円筒容器内のスロッシング波高は速度ポテンシャルから求められ^{(1), (4), (5)}、特に正弦波過渡応答については簡略計算式がある。 n 波目の応答波高 $\zeta_r(n)$ は

$$\zeta_r(n) = \frac{\alpha}{g} R A_{(n)} \beta_p \frac{J_1(1.841 \frac{r}{R})}{J_1(1.841)} \quad (\text{cm}) \quad (3)$$

となる。ここで

- α : 加振加速度 (cm/sec²)
- R : タンク半径 (cm)
- r : タンク中心からの距離 (cm)
- $A_{(n)}$: n 波目の応答倍率 (図12)
- J_1 : 第1種1次の Bessel 関数 (図13)
- β_p : 刺激係数 0.8371

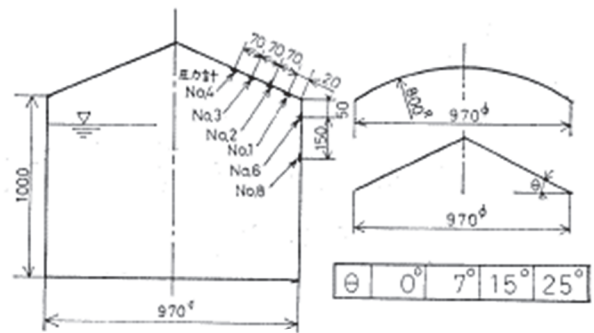


図2 円筒タンク、圧力計配置図

ζ_0 は(3)式で $r=R$ とおけば求まる。 ζ_r は加振力と同じ振動数で正弦振動しているので、その円振動数を ω_f 、静止液面と屋根の受圧点Aの間隔を h とすれば

$$h = \zeta_r \sin \omega_f t \quad (\text{cm}) \quad (4)$$

と近似できるから、タンク屋根に到達した時の液面速度 $\dot{\zeta}_r$ は(5)式で示される。

$$\dot{\zeta}_r = \zeta_r \omega_f \cos^{-1} \left(\sin \frac{h}{\zeta_r} \right) \quad (\text{cm/sec}) \quad (5)$$

(5)式で、 r を変えて液面速度を計算することにより、衝撃圧の分布は定まる。

共振時の ω_f は次式で示される。

$$\omega_f = \sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh 1.841 \frac{H}{R}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (6)$$

ここで

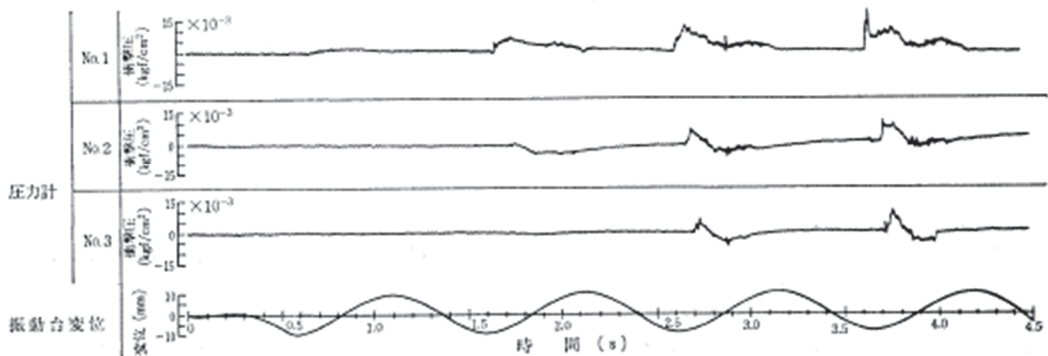
H : 液位 (cm)

3. 実験

3.1 ドーム及び円錐屋根

スロッシング時、タンク屋根に作用する荷重を調べるため、アクリル製の直径1m×高さ1mの円筒模型タンクによる実験を行った。⁽⁶⁾ 模型タンク及び圧力計配置を図2に示す。

実験はタンク内容液の一次固有振動数にて、変位振巾



液位 100 cm: 変位 10 mm

図3 ドーム屋根圧力波形

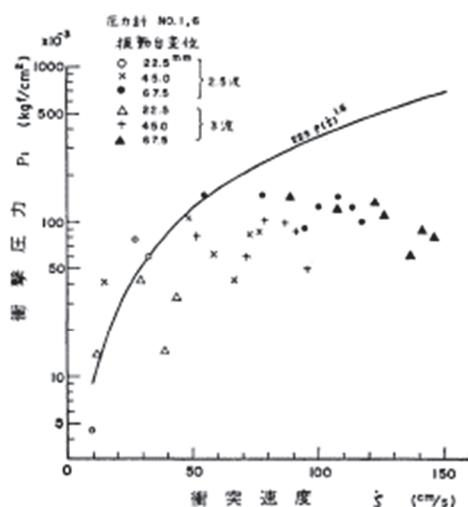


図 11 衝撃圧力と衝突速度 (3波までの最大値)

4. 応答計算

3章までの実験結果を用いて応力計算をする上での留意すべきことは衝撃圧力と膜掛圧力の作用時間の違いである。

膜掛圧は、その圧力値としては衝撃圧より小さいことも多いが、作用時間が長いので静的な力として取り扱って良い。他方、衝撃圧は、圧力値としては大きい、作用時間が短いため、力積としては小さい。そこで、この場合は動的な応答を考えてやる必要がある。

又、作用時間の特性から、膜掛圧はタンクの全体応力解析の荷重として用いるべきであり、衝撃圧は屋根の局部的な応力解析に用いるべきであろう。

5. 結言

地震時、円筒形液体タンクが受ける流体力のうち、スロッシング時に固定屋根に作用する力について実験を行い、次のことを明らかにした。

- 1) 固定屋根に作用する圧力には衝撃圧力と膜掛圧力がある。
- 2) 衝撃圧力は圧力値は大きいことが多いが、作用時間は短い。
- 3) 膜掛圧力は、ある程度角度がある屋根で発生し、平板又は平板に近い屋根では発生しない。
- 4) 膜掛圧は、圧力値は衝撃圧より小さいことが多いが作用時間が長い。
- 5) 衝撃圧および膜掛圧力の簡略計算式を提案した。なお、本報告の実験には、内容液として水を用いた。

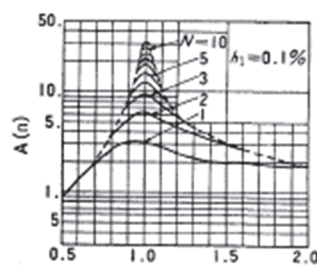


図 12 応答倍率

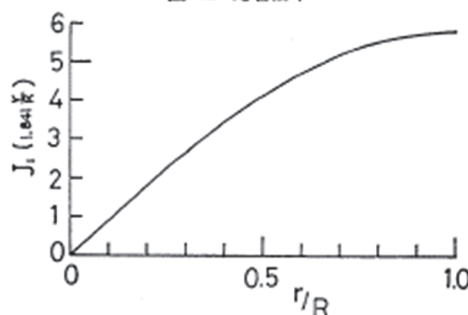


図 13 J_1 の値

実際のタンクにおいて水と異なる貯蔵液の場合、空気の捲込み等が水と異なれば (9) 式は若干の修正を要することも考えられる。これについては機会を見つけて確認したい。

参考文献

- (1) 浅井修, 内藤潔, 石田和雄, 越智義夫, 小林信之, “固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計 (その1)” 圧力技術, Vol. 17, No3 (1979)
- (2) 例えは 曾我部潔, 柴田碧, “円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第2報”, 生産研究, 第26巻4号, (1974.4) pp 22~25
- (3) K. Senda & K. Nakagawa, “On the Vibration of an Elevated Water Tank (I)” Tech. Rep. of Osaka Univ. Vol. 4 No 17 (1954)
- (4) 曾我部潔, 柴田碧, “円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第3報” 生産研究, 第26巻8号, (1976.8) pp 1~4
- (5) 山本鎮男, “貯槽類 (円筒) の耐震設計”, コンビナート保安防災技術指針 (資料編) (1974)
- (6) 越智義夫, 小林信之, “円筒形タンクのスロッシング実験”, 石川島播磨技報, 17巻6号 (1977) pp 607~615
- (7) 山本善之, “地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力”, 高圧力, 3巻1号 (1965) pp 370~376
- (8) S. L. Chuang, “Investigation of Impact of Rigid and Elastic Bodies with Water” Naval Ship Research and Development Center AD 702 727 (1970)
- (9) 安藤良夫, 藤田鏡, 山口勇男, “平板の水面衝撃について”, 造船協会論文集, 90号 (1956) pp 69~75

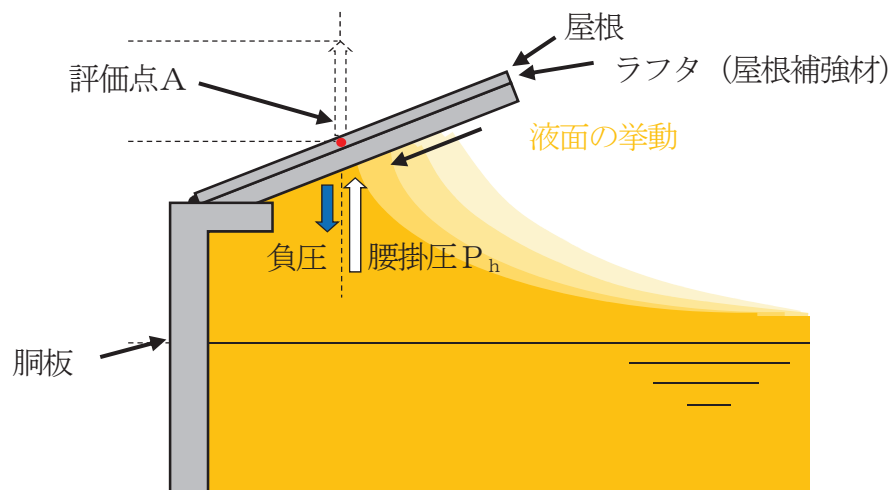
〈参考6〉スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について

1. はじめに

地震時のタンクの内包流体のスロッシングによって発生する液面の変位によって、内包流体が屋根に衝突することを考慮した場合の屋根の健全性について評価を行っている。評価に用いる荷重は、「保守的な評価」として、内包流体の自由質量に水平方向加速度が作用したものをを用いている。この過程で、内包流体が屋根から離れる際に、負圧が作用することが懸念されるため、屋根の評価に与える負圧の影響について検討する。

2. 屋根への荷重の作用形態

スロッシングによって発生する液面の変位（最大波高以降で内包流体が元に戻る状態）の挙動は参考図3に示すとおりであり、内包流体と接している部分（評価点A）には、腰掛圧 P_h が作用している。ここで、液面が低下する際に、屋根と液面の間を負圧が発生することが懸念されるが、液面は屋根に沿って連続的に下がることから、速やかに負圧が解消され、大きな負圧が発生するまでに至らないと考えるため、影響は軽微である。また、負圧によって作用する荷重は、屋根とラフタで負担することになるため、屋根の強度評価上影響は軽微である。



参考図3 スロッシングによる荷重の作用形態

3. 屋根の応力評価における負圧の取扱い

2.で示すように液面低下による負圧の影響は軽微であると考え。また、仮に負圧によって作用する荷重（鉛直下向き）を考慮すると、内包液体と屋根が接している部分には腰掛圧 P_h （鉛直上向き）も同時に作用することから、屋根に作用する荷重が減少することとなり、非保守的な評価と考える。

以上のことから、屋根の応力評価においては腰掛圧 P_h を包絡する「保守的な評価」を用いた評価を行うことが妥当であると考え。

〈参考7〉速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法

参考として速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高を参考表2に示す。ここで速度ポテンシャル理論におけるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法は以下のとおりである。なお、復水貯蔵タンクについては、ハウスナーの理論に基づいて算出しており、スロッシングの1次固有周期及び波高については、添付書類「VI-2-5-6-2-2 復水貯蔵タンクの耐震性についての計算書」に示す。

・円筒形容器の場合

$$T : \text{スロッシングの1次固有周期[s]} \quad ((2\pi/T)^2 = 1.841g/R \cdot \tanh(1.841H/R))$$

$$\zeta : \text{スロッシングの波高[m]} \quad (\zeta = 0.837R/Sa)$$

・矩形形容器の場合

$$T : \text{スロッシングの1次固有周期[s]} \quad ((2\pi/T)^2 = 1.571g/L \cdot \tanh(1.571H/L))$$

$$\zeta : \text{スロッシングの波高[m]} \quad (\zeta = 0.811L/Sa)$$

参考表2 速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出結果 (1/2)

	容器内半径 R [m]	液位 H [m]	加速度応答 スペクトル S a [G]	スロッシングの1 次固有周期 T [s]	スロッシング の波高 ζ [m]
原子炉補機冷却水 サージタンク (A) (B)	1.25	2.955	1.58	1.65	1.65
高圧炉心スプレイ 補機冷却水サージ タンク	0.6	1.835	1.55	1.15	0.78
ほう酸水注入系 貯蔵タンク	1.375	3.405	1.55	1.73	1.78
ほう酸水注入系 テストタンク	0.4825	1.2608	1.55	1.03	0.62
CUW プリコート タンク	0.4825	1.1693	1.48	1.03	0.60
FPC プリコート タンク	0.4825	1.1693	1.52	1.03	0.61
HNCW サージ タンク	0.7	1.508	1.59	1.24	0.93
所内温水系サージ タンク	0.6	1.643	1.58	1.15	0.79
DG 燃料油ドレン タンク (A) (B)	0.3	0.65	1.95	0.81	0.49
HPCSDG 燃料油 ドレンタンク	0.3	0.65	1.95	0.81	0.49
HPCSDG 潤滑油 補給タンク	0.6	1.5915	1.52	1.15	0.76
緊急時対策所軽油 タンク	1.1	2.353	1.30	1.55	1.20

参考表2 速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出結果 (2/2)

	矩形タンク振 動方向辺長さ の1/2 L [m]*	液位 H [m]	加速度応答 スペクトル S a [G]	スロッシングの1 次固有周期 T [s]	スロッシング の波高 ζ [m]
RW 制御室 HVAC 冷 水供給設備膨張 タンク	0.55	1.1	1.52	1.19	0.68

〈参考8〉 屋根における地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳について

1. 概要

スロッシング評価において許容値に対して最も厳しい値となった復水貯蔵タンクの部位 I に関して地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳による復水貯蔵タンクの屋根への影響について検討を行った。地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳により屋根に作用する荷重は、胴板と屋根の接続部に同時に作用するものとして評価する。

2. 評価条件

復水貯蔵タンクの屋根に作用する地震動による荷重は、床面における地震動がタンク胴部を經由して屋根に伝達する。屋根は支持部であるラフタにより支えられている構造であり、上向きと下向きで振動挙動が異なるため、固有周期を算出することは難しい。一方、地震時慣性力のうち水平方向慣性力については、タンク胴部と屋根が溶接により固定されており、これらが一体で振動し屋根部は胴部との接続部でのみ固定されていることから、互いの変形による有意な荷重が生じない。したがって、屋根の接続部には、本評価で想定している鉛直上向き一方向の荷重に対し、屋根の構造強度に影響を与えるような、重畳させるべき水平方向慣性力はない。このことから、水平方向慣性力を考慮する必要はない。そのため、地震時の慣性力は、鉛直方向のみ考慮し、屋根に作用する地震時の荷重は、復水貯蔵タンク基礎の設計用床応答曲線の最大震度から算出する。

復水貯蔵タンクの屋根における地震時の慣性力の評価条件を参考表 3 に示す。参考図 4 に鉛直方向の設計用床応答曲線を示す。

参考表 3 地震時慣性力の評価条件 (復水貯蔵タンク 部位 I)

記号	記号の説明	値	単位
m_r	屋根の全質量		kg
C_v	鉛直方向震度	6.39	—
g	重力加速度	9.80665	m/s^2
F_v	地震荷重		N

C_v : 基準地震動 S_s における設計用床応答 (減衰定数 1.0%) における震度

$$F_v = m_r \times (C_v - 1) \times g$$

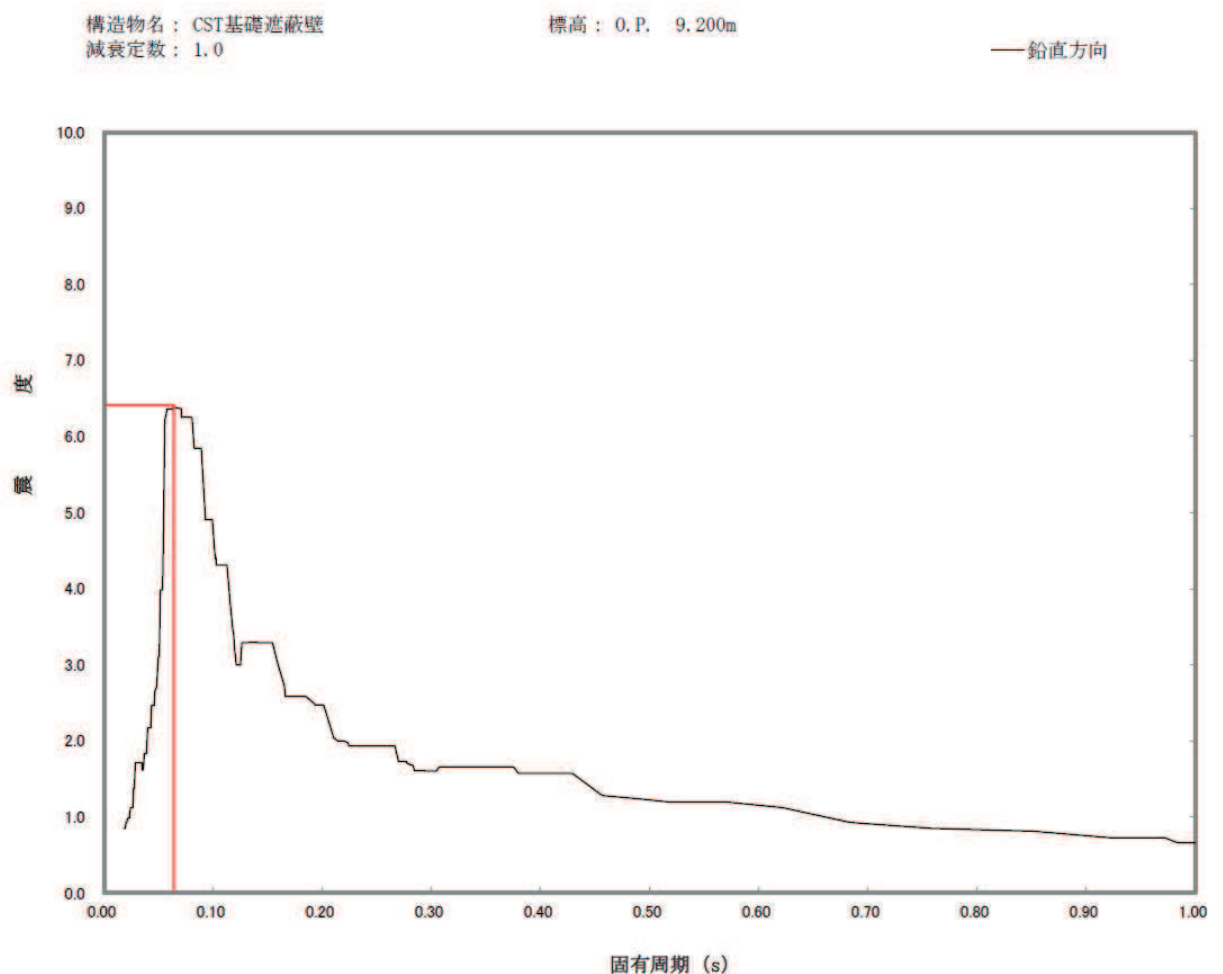
スロッシングによる荷重は、内包流体の質量にスロッシングによる水平応答加速度を乗じた荷重が鉛直方向荷重として屋根に作用するものとして算出する（「保守的な評価」）。なお、スロッシングによる水平応答加速度は、添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」の解析モデルによって得られた値を用いる。評価条件を参考表4に示す。

参考表4 スロッシングの評価条件（復水貯蔵タンク、部位I）

記号	記号の説明	値	単位
m_1	内包流体の自由質量	951,600	kg
α_H	内包流体の水平方向応答加速度*	1.838	m/s^2
F_s	スロッシング荷重	1.75×10^6	N

注記*：添付書類「VI-2-2-5 復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書」の解析モデルで得られた値。

$$F_s = m_1 \times \alpha_H$$



参考図4 CST基礎 基準地震動 S_s 設計用床応答曲線（減衰定数1.0%）

3. 評価結果

評価結果を参考表 5 に示す。屋根の接続部に地震時の慣性力とスロッシングによる荷重が同時に作用した場合においても、発生応力は許容応力を大きく下回っており、問題ない。

参考表 5 評価結果（復水貯蔵タンク，部位 I）

記号	記号の説明	値	単位
F_v	地震荷重		N
F_s	スロッシング荷重	1.75×10^6	N
F	荷重		N
σ	発生応力	9	MPa
f	許容応力	287	MPa

$$F = F_v + F_s$$

$$\sigma = F / A$$

$$A = \pi \times a \times D_i$$