

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-17
提出年月日	2022年11月21日

容器のスロッシングによる影響評価について

2022年11月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 評価対象の選定	1
3. 評価方法	2
3.1 評価方針	2
4. 影響評価	5
4.1 屋根への波高の到達について	5
4.2 水平面に対する屋根角度の有無について	7
5. 影響評価結果	8

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、3号復水貯蔵タンク、3号補助復水貯蔵タンク及び1号復水貯蔵タンクにおいては内包流体のスロッシングを考慮し、内包流体を有効質量（容器の内包流体が自由表面を有する場合、実際に地震荷重として付加される質量）でモデル化したうえで、別途算出したスロッシング荷重を考慮した評価を実施する。（参考資料（1）参照）。

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。

本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-5-7-1-4 原子炉補機冷却系サージタンクの耐震性についての計算書」
- ・「VI-2-5-7-2-4 高圧炉心スプレイ補機冷却系サージタンクの耐震性についての計算書」
- ・「VI-2-6-4-1-2 ほう酸水貯蔵タンクの耐震性についての計算書」
- ・「VI-2-10-1-2-3-4 ガスタービン発電機用軽油タンクの耐震性についての計算書」
- ・「VI-2-別添 2-2 溢水源としない耐震B，Cクラス機器の耐震性についての計算書」

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、Sクラス機器、溢水源としないB，Cクラス機器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-1-1-9 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

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)
原子炉補機冷却系 サージタンク	スカート支持 たて置円筒形 容器	S	常設／防止 (DB拡張)	2500	3500	2800	2060
高圧炉心スプレイ 補機冷却系 サージタンク	スカート支持 たて置円筒形 容器	S	常設／防止 (DB拡張)	1500	3100	1800	1339
ほう酸水 貯蔵タンク	平底たて置 円筒形容器	S	常設耐震／防止 常設／緩和	3000	3858	3840	3316
ガスタービン発電 機用軽油タンク	平底たて置 円筒形容器	—	常設耐震／防止 常設／緩和	9800	11503	10500	7438
3号復水貯蔵 タンク	追而						
3号補助復水 貯蔵タンク							
1号復水貯蔵 タンク							

3. 評価方法

3.1 評価方針

容器のスロッシングについては、地震動の増加により波高が大きくなり、波面が屋根に衝突することで屋根に荷重が作用するが、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。この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。

一方、スロッシングによる波は、衝突により砕けること及び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参考資料（2）（電力共同研究「円筒形タンクのスロッシング評価」）に示されている。

また、参考資料（3）（容器構造設計指針・同解説）より水平面に対する屋根の角度が より小さい場合、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とともに、参考資料（4）（固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第2報））においても、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もよいと示されている。

上記を踏まえ、下記の手順により容器のスロッシングによる影響について確認する。評価フローを図1に示す。

- ①屋根に波高が到達するか*1。
- ②水平面に対する屋根角度があるか*2。
- ③波高が屋根に到達する場合は、解析等による評価を実施。

なお、①における屋根への波高到達の有無は、評価に用いる応答加速度を考慮し、以下に示す速度ポテンシャル理論に基づき評価を実施する。

【速度ポテンシャル理論に基づく1次固有周期（T）及び波高（ ζ_s ）の算出方法】

・円筒形容器の場合

T : スロッシングの1次固有周期 [s]

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{1.841 \cdot g}{R} \operatorname{tanh}\left(1.841 \frac{H}{R}\right)$$

ζ_s : スロッシングの波高 [m]

$$\zeta_s = 0.837 R \cdot S_a$$

ここで、

g : 重力加速度 [m/s²]

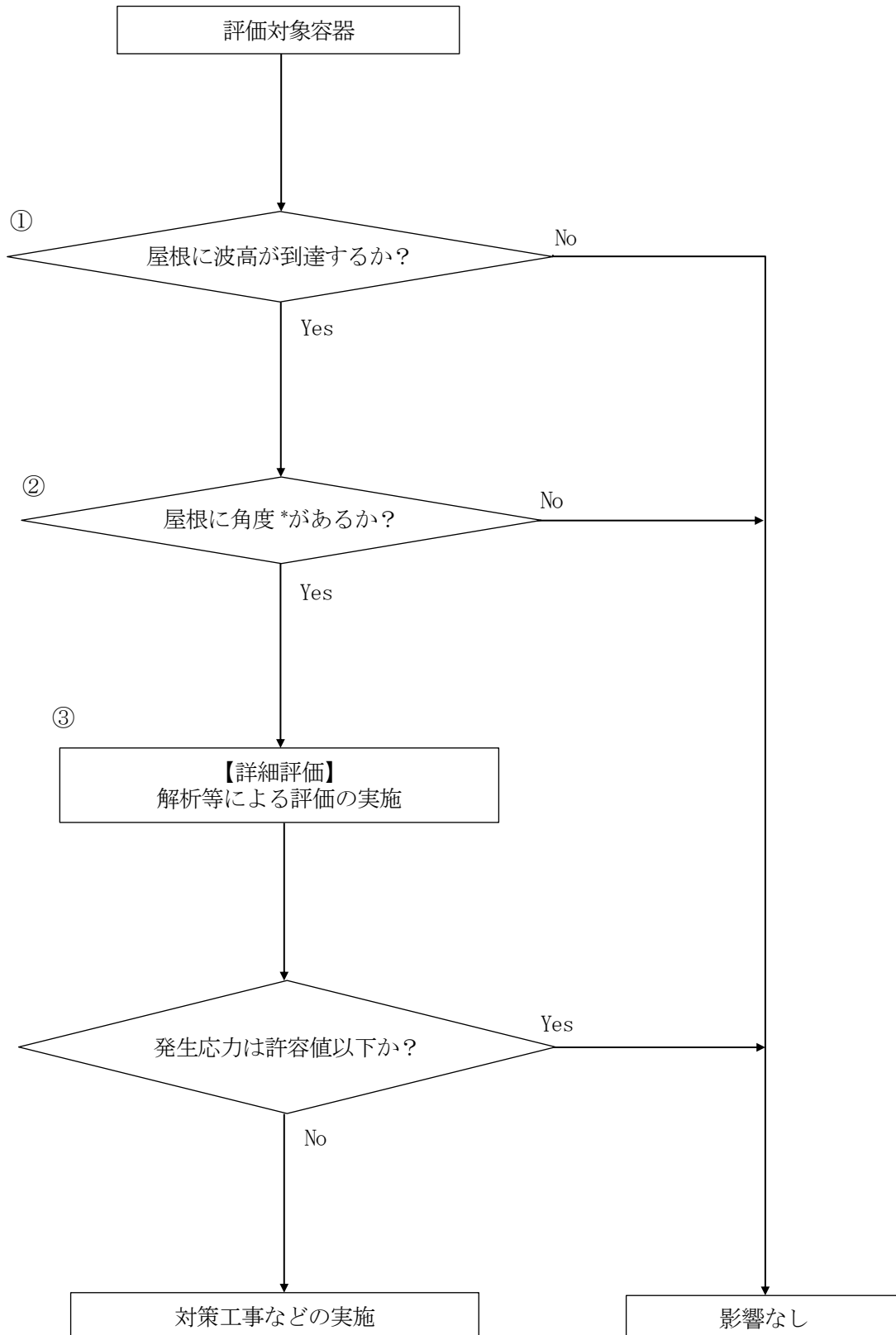
R : 円筒形容器内半径 [m]

H : 液位 [m]

S_a : 応答加速度 [G]

注記*1：屋根に波高が到達しない場合は、②以降の評価を対象外とする。

*2：水平面に対する屋根角度がない場合には、③以降の評価の対象外とする。



注記*：水平面に対する屋根の角度

図1 容器のスロッシングによる影響評価フロー

4. 影響評価

図 1 に示す評価フローに基づく各評価の結果を以下に示す。

4.1 屋根への波高の到達について（評価フロー①）

屋根への波高の到達の有無に係る評価結果を表 2 に示す。表 2 に示すとおり，ガスタービン発電機用軽油タンクについては屋根へ波高が到達しない。よって，ガスタービン発電機用軽油タンクについてはスロッシングによる影響はないと判断し，その他の容器について評価フローに基づき容器の屋根角度の有無について評価を実施する。

表2 屋根への波高の到達の有無に係る評価結果

	容器内半径 R [m]	液位 H [m]	応答加速度 S a [G]	スロッシングの 1次固有周期 T [s]	液位から屋根 までの高さ ζ [m]	スロッシング の波高 ζ_s [m]	屋根への波高 到達の有無 (有： $\zeta \leq \zeta_s$) (無： $\zeta \geq \zeta_s$)
原子炉補機冷却系 サージタンク	1.250	2.060	2.07* ¹	1.657	0.740	2.166	有
高圧炉心スプレイ補機冷却系 サージタンク	0.750	1.339	1.93* ¹	1.282	0.461	1.212	有
ほう酸水貯蔵タンク	1.500	3.316	2.04* ¹	1.812	0.524	2.562	有
ガスタービン発電機用 軽油タンク	4.900	7.438	0.53* ²	3.286	3.062	2.174	無
3号復水貯蔵タンク	追而						
3号補助復水貯蔵タンク							
1号復水貯蔵タンク							

注記*1：1次固有周期が1s以上の容器について、周期1s以上の応答加速度は単純減少であるため、保守的に周期1sの応答加速度を適用する。代表として、原子炉補機冷却系サージタンクの評価に用いた設計用床応答スペクトルを参考資料（5）に示す（設計用床応答スペクトルは、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答スペクトルの作成方針」の基準地震動S_sにおける原子炉建屋EL 42.800m（減衰定数0.5%）の地震応答解析による）。

*2：1次固有周期に対応した地震応答解析から得られる応答加速度を適用する。ガスタービン発電機用軽油タンクの評価に用いたスロッシング評価用床応答スペクトルを参考資料（6）に示す。

4.2 水平面に対する屋根角度の有無について（評価フロー②）

水平面に対する屋根角度の有無に係る評価結果を表3に示す。表3に示すとおり、評価対象とした全容器については、水平面に対する屋根角度がないことを確認した。よって、評価対象とした全容器については、スロッシングによる影響はないと判断する。

表3 水平面に対する屋根角度の有無に係る評価結果

名称	形状	屋根形状	水平面に対する屋根角度の有無
原子炉補機冷却系 サージタンク	スカート支持 たて置円筒形容器 (図2)	平板	無
高圧炉心スプレイ 補機冷却系サージ タンク	スカート支持 たて置円筒形容器 (図2)	平板	無
ほう酸水貯蔵 タンク	平底たて置円筒形容器 (図3)	平板	無

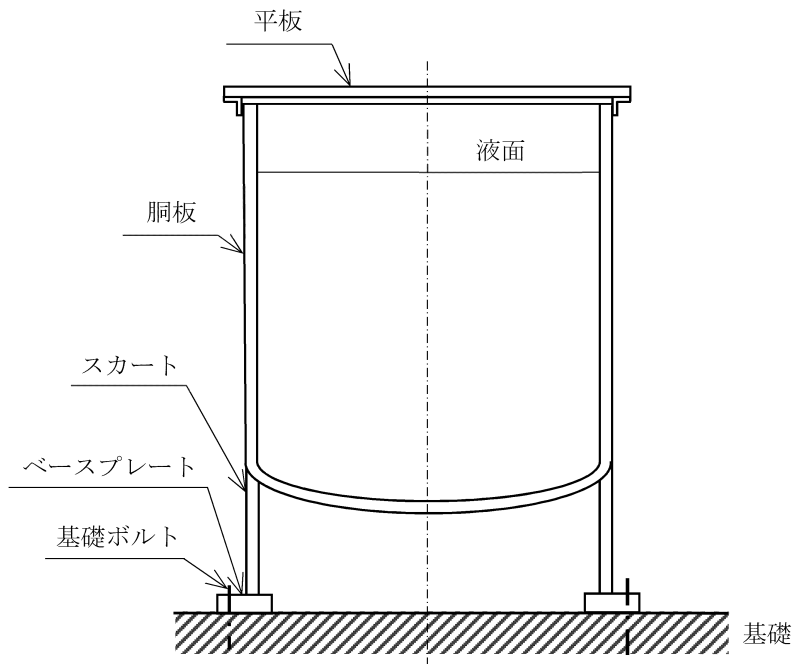


図2 構造概要図（スカート支持たて置円筒形容器）

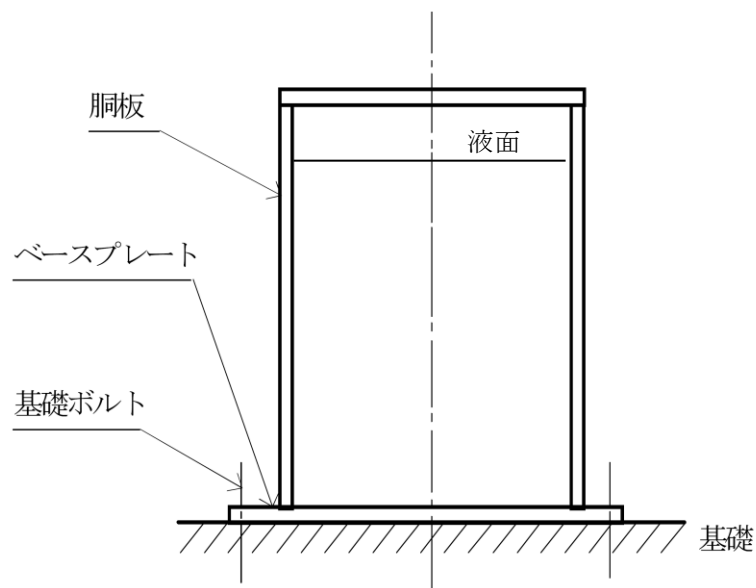


図3 構造概要図（平底たて置円筒形容器）

5. 影響評価結果

以上の結果から、評価の対象となる全容器についてスロッシングによる影響がないことを確認した。

参考資料

- (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
- (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 2010.7.15 予稿集）
- (3) 容器構造設計指針・同解説 抜粋（日本建築学会（2010））
- (4) 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）
- (5) 設計用床応答スペクトル（原子炉補機冷却系サージタンク）
- (6) スロッシング評価用床応答スペクトル（ガスタービン発電機用軽油タンク）

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。

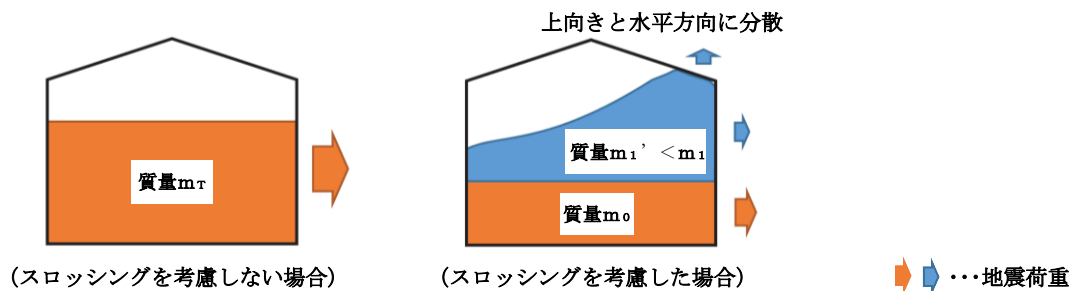
スロッシングが生じることで内包流体は上下方向にも動くことになり、内包流体に作用する地震エネルギーの一部が上下方向のエネルギーに変換され、タンク胴板に水平方向荷重として作用するエネルギーの総量が減少する。

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な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する、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 $m_T =$ 自由質量 $m_1 +$ 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' と見なす。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}' と見なし、スロッシングを考慮した重心高さは、

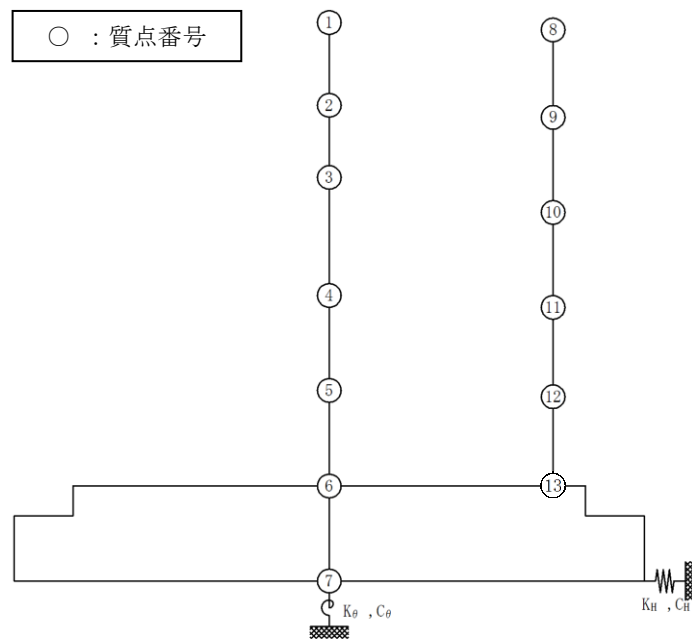
$$l_g' = (m_1' \times l_{g1}' + m_0 \times l_{g0}) / m_T \text{ となり、} l_g \text{ より低くなる。}$$

注：自由質量 m_i 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_o 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_i' 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なすことにより，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内包流体の有効質量の設定について

復水貯蔵タンク（3号復水貯蔵タンク，3号補助復水貯蔵タンク及び1号復水貯蔵タンク）の耐震評価においては，内包流体のスロッシングを考慮し，内包流体を有効質量でモデル化した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。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 3号復水貯蔵タンクの地震応答解析モデル
（3号復水貯蔵タンク基礎のモデル図（水平方向））

ここで参考図1に示す3号復水貯蔵タンクの解析モデルは，高さ方向で胴板の厚みが違うことから，胴板の厚さが変わる高さで質点を設けた多質点モデルとしている。各質点における内包流体の質量は有効質量を設定し，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。

円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋

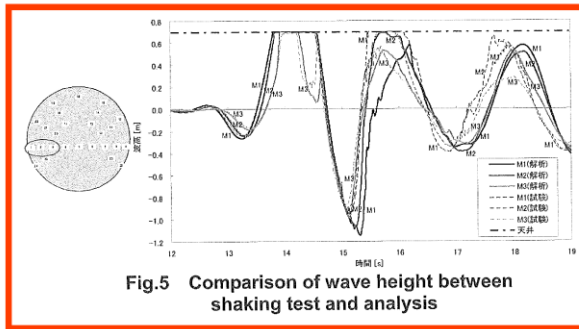


Fig.5 Comparison of wave height between shaking test and analysis

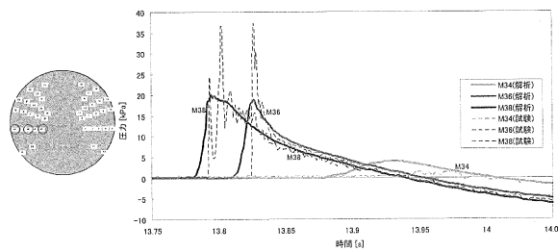


Fig.6 Comparison of pressure between shaking test and analysis

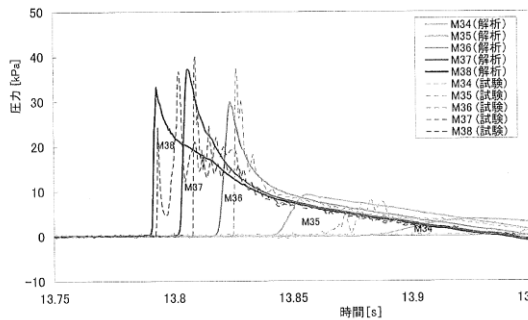


Fig.7 Analysis with segmentalized model

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。

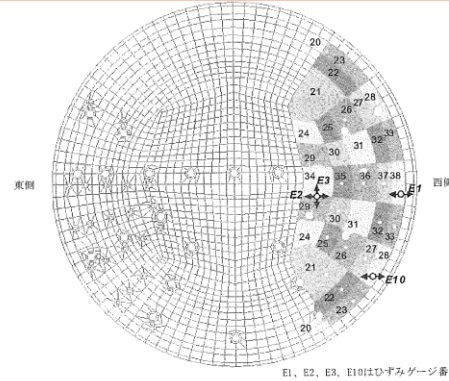


Fig.8 Analysis model to calculate strain on top board

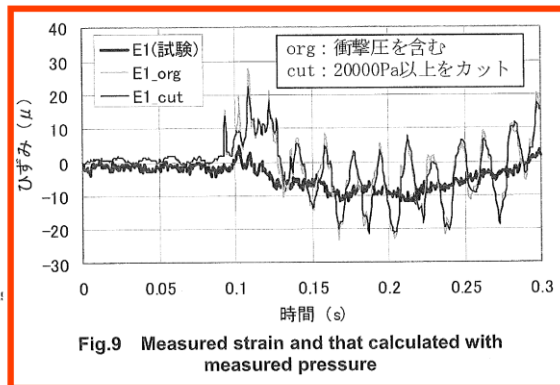


Fig.9 Measured strain and that calculated with measured pressure

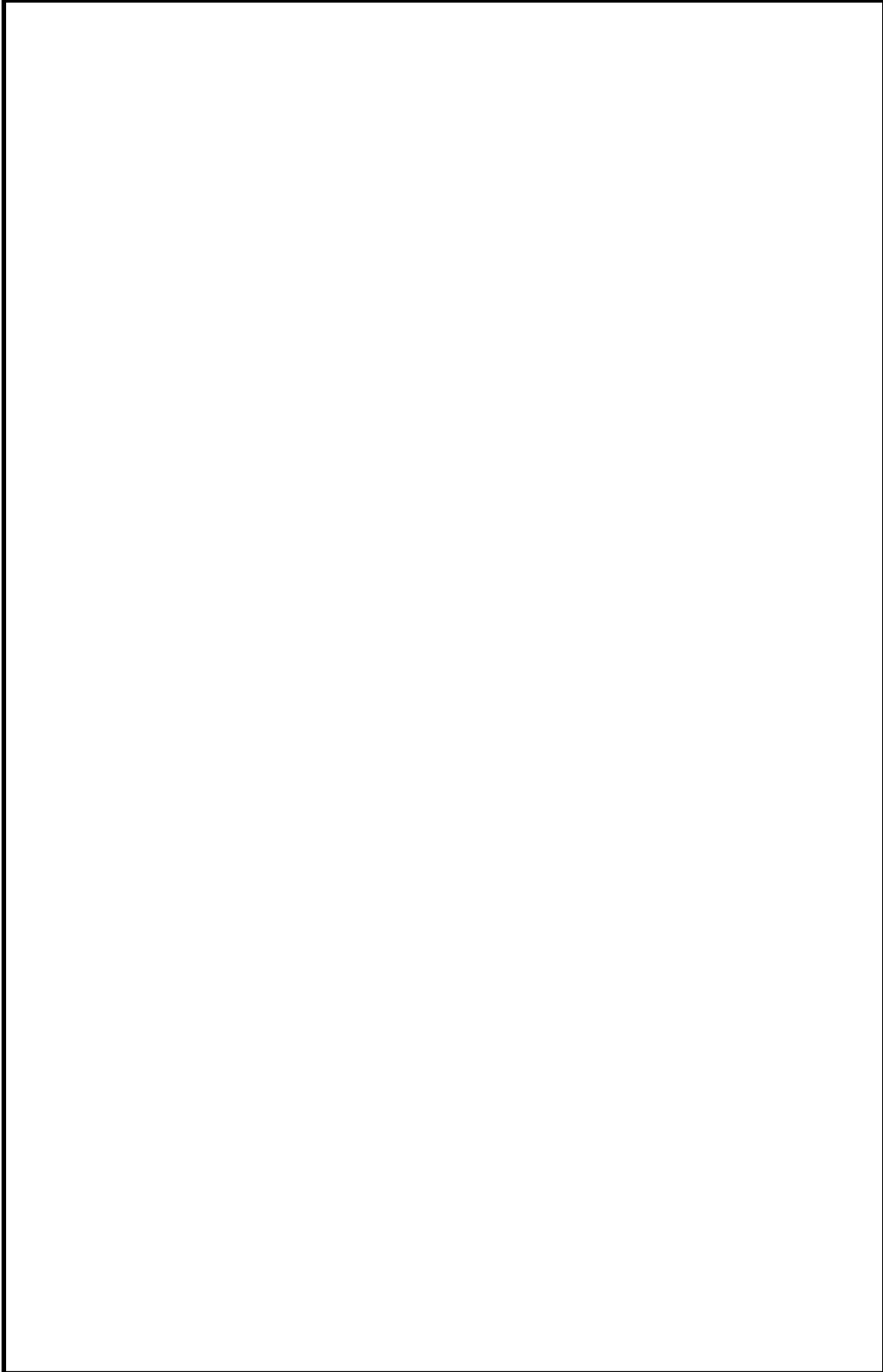
3.3 天板の健全性評価

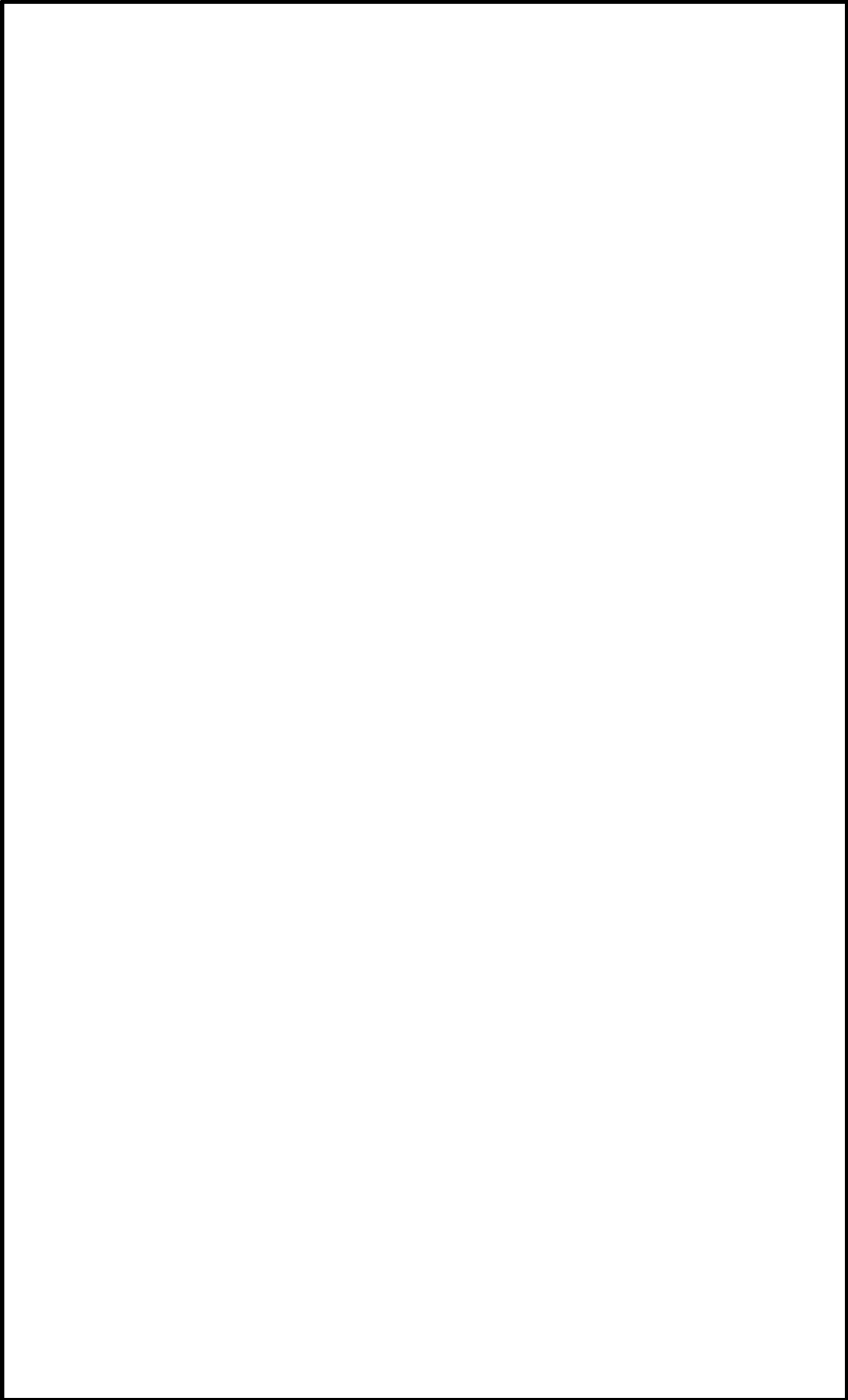
スロッシングによる波面衝突が天板強度へ与える影響を確認することにより、天板健全性の合理的な評価手法を検討した。

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。





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

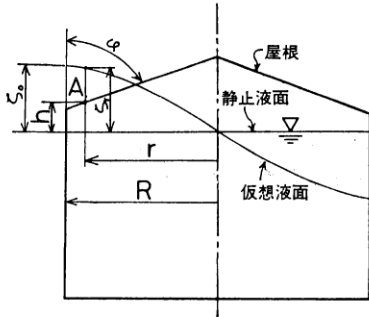


図1 衝撃圧力

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^{(4), (9)}を参考にして, 第3章にて実験式を考える。

腰掛圧 P_h 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。

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

平板及び平板に近い屋根の場合 P_h 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きまげられないときの円筒容器内のスロッシング波高 ζ は速度ポテンシャルから求められ^{(3), (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

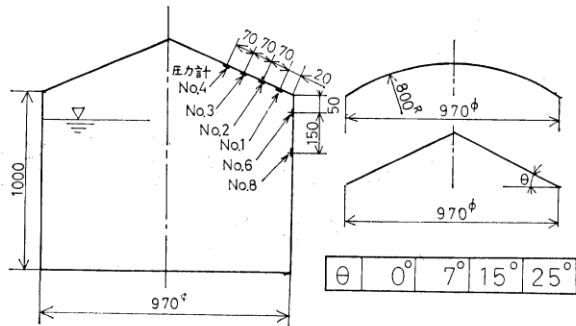


図2 円筒タンク, 圧力計配置図

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

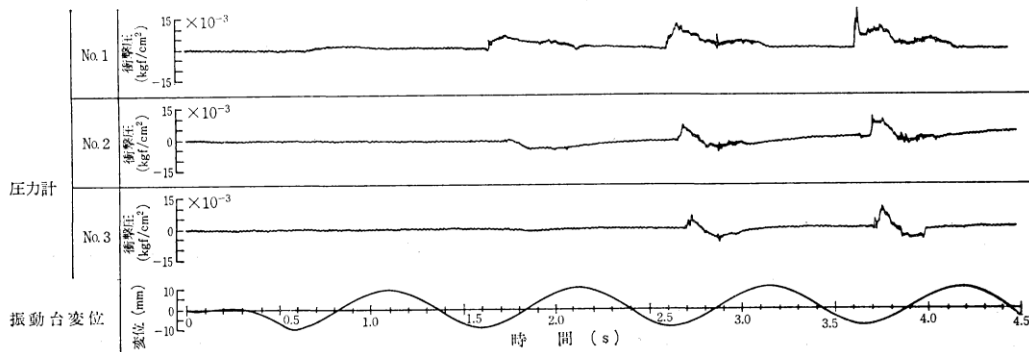


図3 ドーム屋根圧力波形

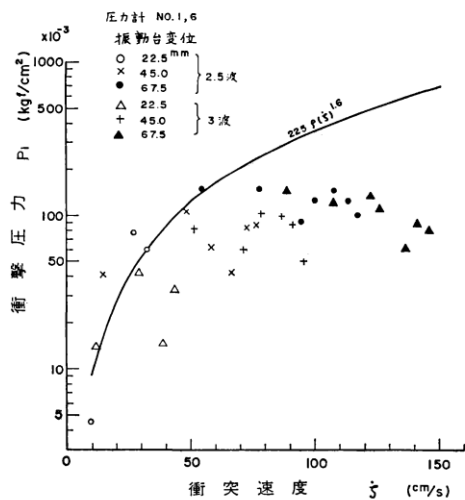


図 11 衝撃圧力と衝突速度（3波までの最大値）

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腰掛圧力の作用時間の違いである。

腰掛圧は、その圧力値としては衝撃圧より小さいことも多いが、作用時間が長いいため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、腰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、衝撃圧は屋根の局所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腰掛圧力がある。
 - 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) 腰掛圧力は、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) 腰掛圧は、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) 衝撃圧および腰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。

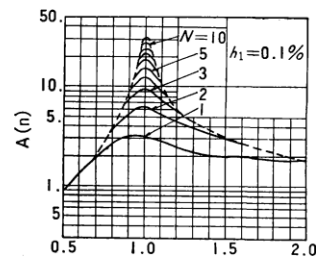


図 12 応答倍率

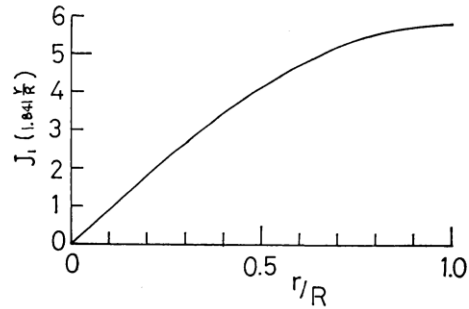


図 13 J₁ の値

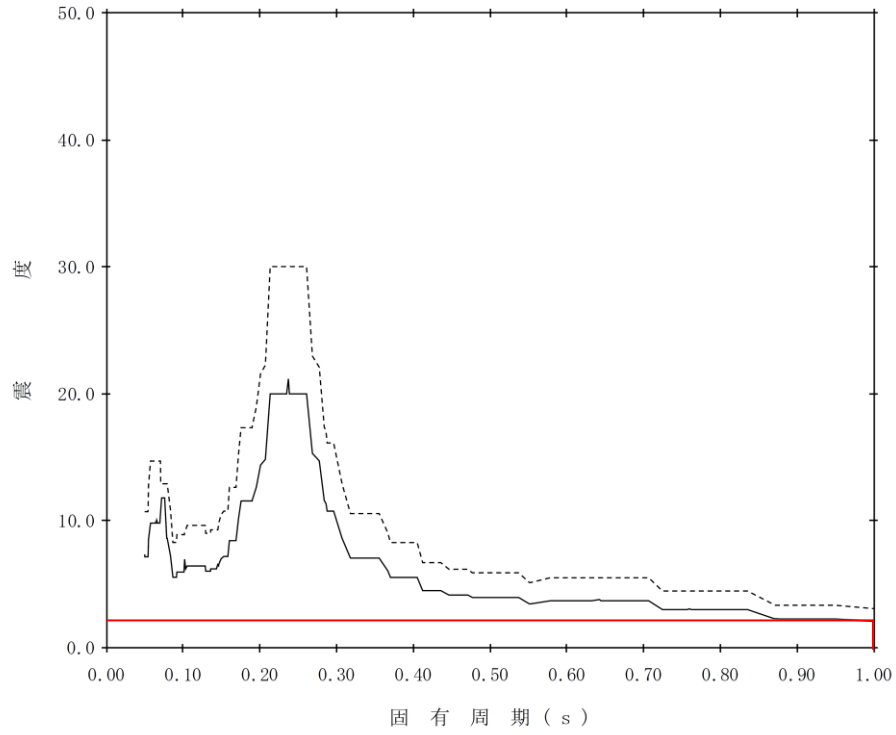
実際のタンクにおいて水と異なる貯蔵液の場合、空気の捲込み等が水と異なれば(9)式は若干の修正を要することも考えられる。これについては機会を見つけて確認したい。

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) 例えば 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, 藤田譲, 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

設計用床応答スペクトル (原子炉補機冷却系サージタンク)

構造物名：原子炉建物 標高：EL42.800m ——— 設計用床応答スペクトル I (NS方向)
 減衰定数：0.5% 波形名：基準地震動 S s - - - - - 設計用床応答スペクトル II (NS方向)



スロッシング評価用床応答スペクトル (ガスタービン発電機用軽油タンク)

