

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 補足-028-10-23 改6
提出年月日	2020年9月14日

容器のスロッシングによる影響評価について

2020年9月

東京電力ホールディングス株式会社

容器のスロッシングによる影響評価について

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固定質量と揺動質量を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を全て固定質量で評価する方が保守的な評価結果となる。**〈参考1〉**したがって、容器の耐震強度評価においては、内包流体を全て固定質量で評価している。

一方、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際に荷重が作用する。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整理する。この屋根への影響評価でも内包流体を全て固定質量で評価する保守的な評価方法を用いる。

2. 評価対象の選定

スロッシングによる影響評価の対象として、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。**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	内径 (mm)	全高 (mm)	胴高さ (mm)	液位 (mm)
軽油タンク A (7号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,392	9,500	7,495
軽油タンク B (7号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,344	9,500	7,495
軽油タンク A (6号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,344	9,500	7,495
軽油タンク B (6号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,392	9,500	7,495
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	3,300	4,200	4,194	3,771
復水貯蔵槽	ライニング槽	たて:11,500 横:11,850	16,600	16,544	11,860

3. 評価方法

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（揺動質量）が屋根に沿って上昇することによるものである。そこで、本評価においては、流体力として、容器内包液の全質量 m に内包液の**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、鉛直方向にそのまま作用するものと保守的に仮定する。内包液の**スロッシングによる**水平方向応答加速度 α_H は、速度応答スペクトルから求める。減衰定数は、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数（液体の揺動0.5%）を用いる。

評価対象部位は、最弱部である屋根と胴板の溶接部または、屋根の設計弱部（以下「屋根の接続部」と

いう。)とし、荷重Fを屋根の接続部の全周断面積Aで除した応力 σ が評価基準値を下回ることを確認することで、屋根の接続部の応力評価（以下「保守的な評価」という。）を行う。

なお、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荷重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、屋根の質量は容器内包液の全質量mに比べて十分小さく、屋根の鉛直方向地震力による荷重として考えた場合には「保守的な評価」の荷重Fに包絡される。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、瞬間的な荷重が、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）に示されており、内包流体の全質量を屋根に付加することは、保守的な評価であると言える。

評価部位の概略図を図1に、評価に用いる記号の説明を表2に示す。

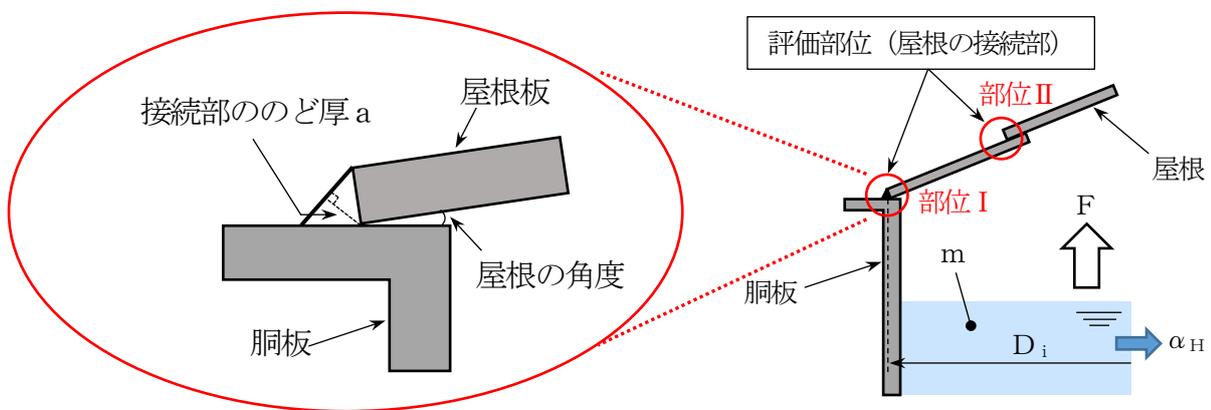


図1 評価部位の概略図

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	容器内包液の質量	kg
α_H	容器内包液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

評価式を以下に示す。

$$\text{発生応力 } \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\text{ここで, } F = m \alpha_H$$

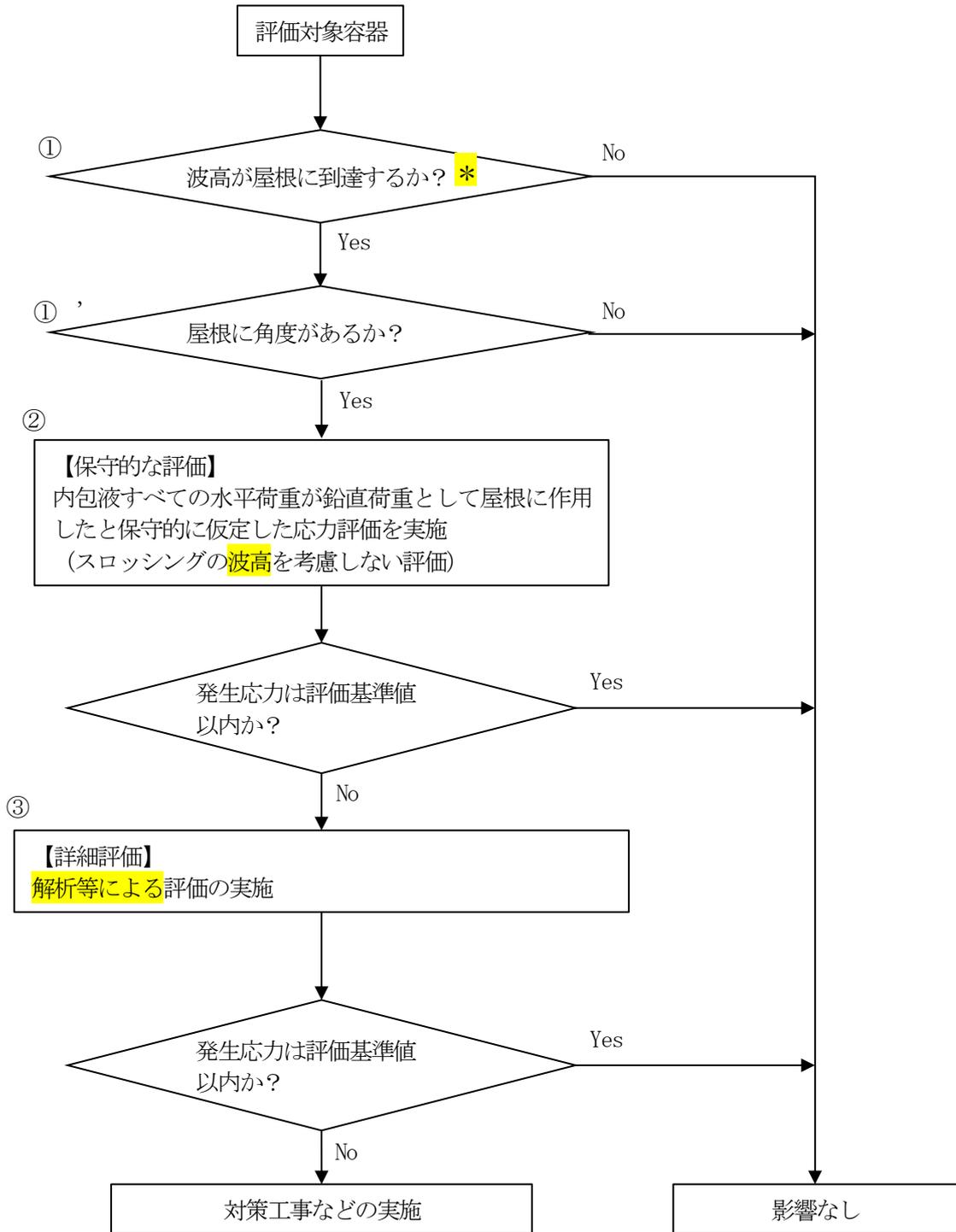
$$A = \pi a D_i$$

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2に示す。

- ① 屋根に内包液が到達するか。

- ①' 屋根に角度があるか*1。
- ② 内包液が到達する場合は、「保守的な評価」で屋根の接続部の発生応力が評価基準値以内か。
- 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。

*1 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液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大略等しいので、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。



* : 柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号機は長周期の地震動が大きいため、スロッシングによる波高は屋根に到達するものとして評価を行う。

図2 柏崎刈羽原子力発電所 6/7 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フローについて

図2に示す評価フローにおいて、①にて波高は容器屋根に到達するものとして評価し、①'にて容器の屋根に角度がある場合には、「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2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に示す。

軽油タンクは、図2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。ほう酸水注入系貯蔵タンク及び復水貯蔵槽は、図2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。

表3 容器の評価手法の選定結果

名称	形状	屋根形状 (角度)	選定結果
軽油タンク A (7号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク B (7号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク A (6号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク B (6号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	平板	—
復水貯蔵槽	ライニング槽	平板	—

5. 屋根の接続部の耐震強度評価におけるスロッシングの影響

3項で示す②の評価式を用いて軽油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が評価基準値以内であることを確認した。内包液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、内包液の荷重が一部上方向に逃げてしまうが、「保守的な評価」を用いる場合、内包液の全荷重が一方向に作用し、保守的な評価となる。

軽油タンクにおける最弱部は図1における部位Ⅱ（屋根の設計弱部である防爆部）であり、それぞれの軽油タンクについて、表4に評価諸元を示す。また、評価に用いるスロッシングの水平応答加速度は内包液の1次固有周期が1秒以上であることから、図3に示す基準地震動S_sのスロッシング評価用速度応答スペクトルの固有周期が1秒以上の範囲で最大となる応答加速度を用いる。

評価結果を表5に示す。発生応力は評価基準値を下回っており、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。

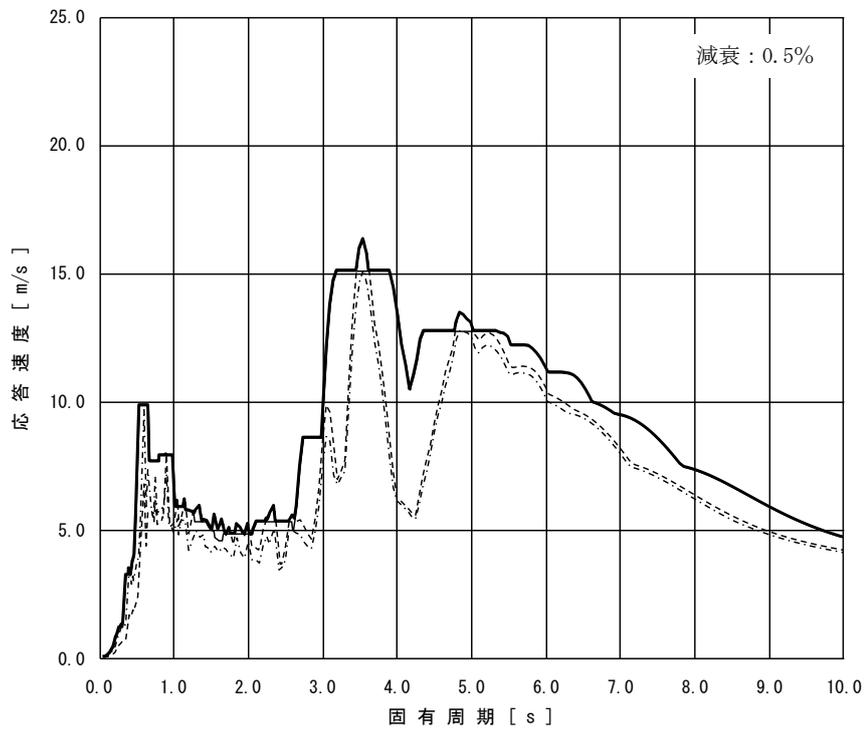
表4 評価諸元（軽油タンク，部位II）

記号	記号の説明	7号機		6号機		単位
		A	B	A	B	
m	容器内包液の質量					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
T	固有周期					s
S _v	速度応答スペクトル					m/s
α _H	容器内包液の水平方向最大 応答加速度 (固有周期1秒以上の範囲 の最大)					m/s ²

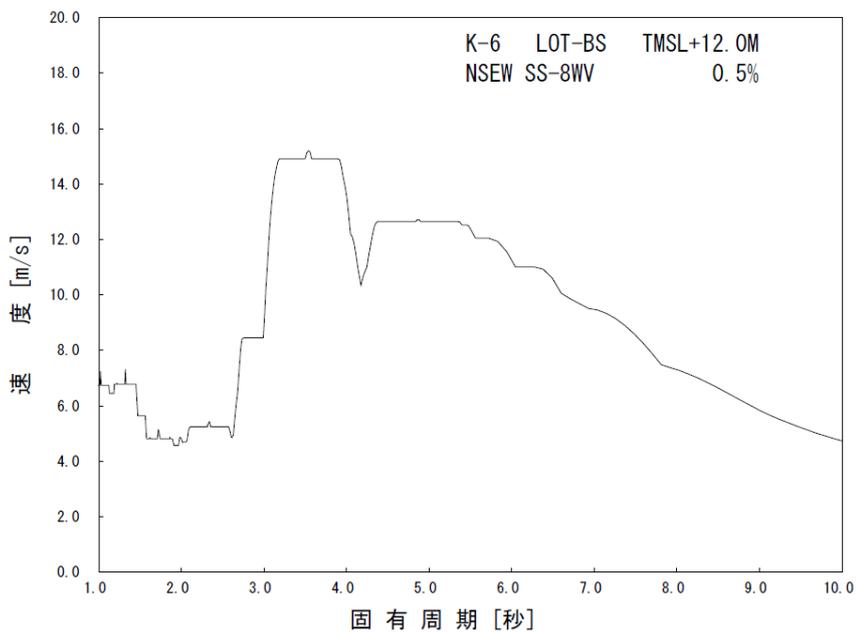
$\alpha_H = S_v \cdot 2\pi / T$

表5 評価結果

名称	発生応力 [MPa]	評価基準値 [MPa]
軽油タンクA (7号機)	85	
軽油タンクB (7号機)	85	
軽油タンクA (6号機)	85	
軽油タンクB (6号機)	84	



7号機



6号機

図3 スロッシング評価用速度応答スペクトル (S s)

参考資料

〈参考1〉 スロッシングを考慮した場合の内包液の挙動について

〈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1〉 スロッシングを考慮した場合の内包液の挙動について

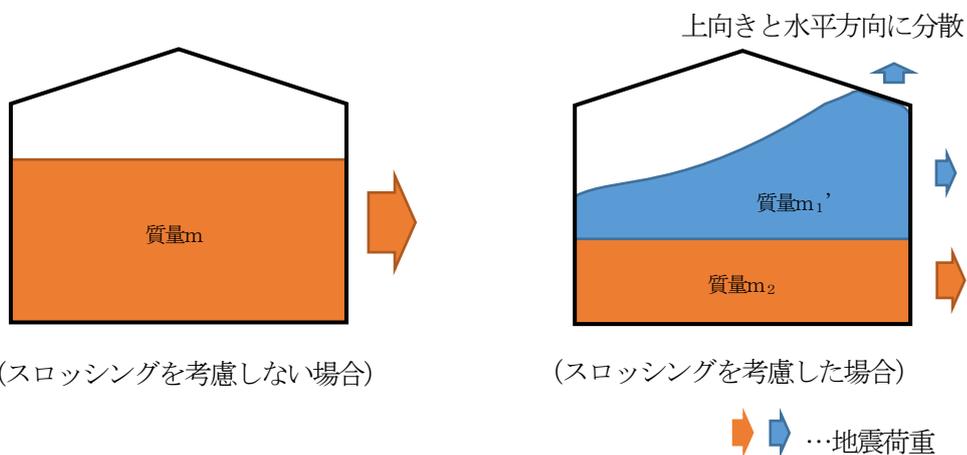
タンクに地震荷重が作用した際に、内包液にスロッシングが生じる。

スロッシングが生じることで内包液は上下方向にも動くことになり、内包液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、内包液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、内部流体に対する荷重作用点の重心高さが、全ての内包液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。



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

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

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

内包液を揺動液と固定液に分けて考えた場合、質量 $m = \text{揺動液質量} m_1 + \text{固定液質量} m_2$ となる。

スロッシングを考慮した場合、揺動液質量 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質量 m_1 が小さくなるものとして、等価質量 m_1' と見做す。次に、重心高さ l_g は、

$$l_g = (m_1 \times m_1 \text{の重心高さ} l_{g1} + m_2 \times m_2 \text{の重心高さ} l_{g2}) / \text{全体質量} m \text{ により求まる。}$$

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、

$$l_g' = (m_1 \times l_{g1}' + m_2 \times l_{g2}) / m \text{ となり, } l_g \text{ より低くなる。}$$

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の低減となる。また、揺動液質量部分の荷重低減を等価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。

〈参考2〉円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋

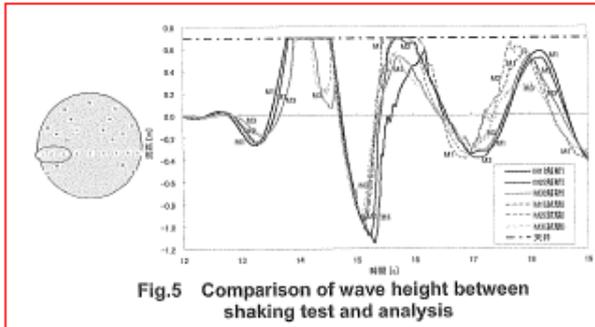


Fig.5 Comparison of wave height between shaking test and analysis

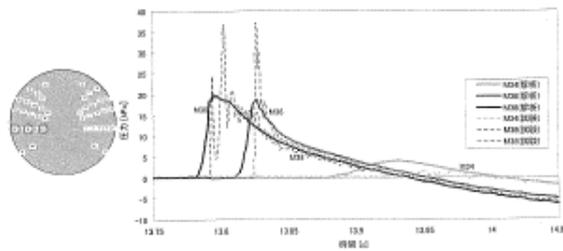


Fig.6 Comparison of pressure between shaking test and analysis

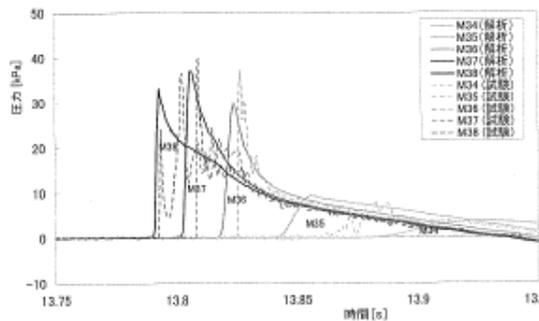


Fig.7 Analysis with segmentalized model

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。

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。

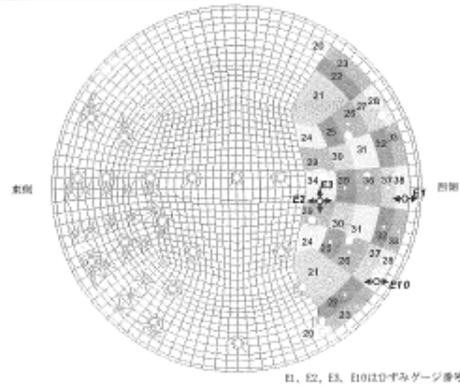


Fig.8 Analysis model to calculate strain on top board

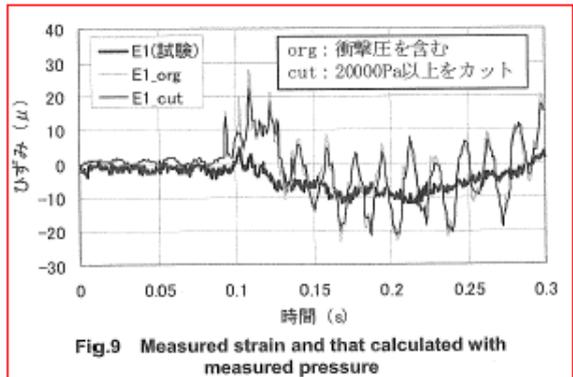


Fig.9 Measured strain and that calculated with measured pressure

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。

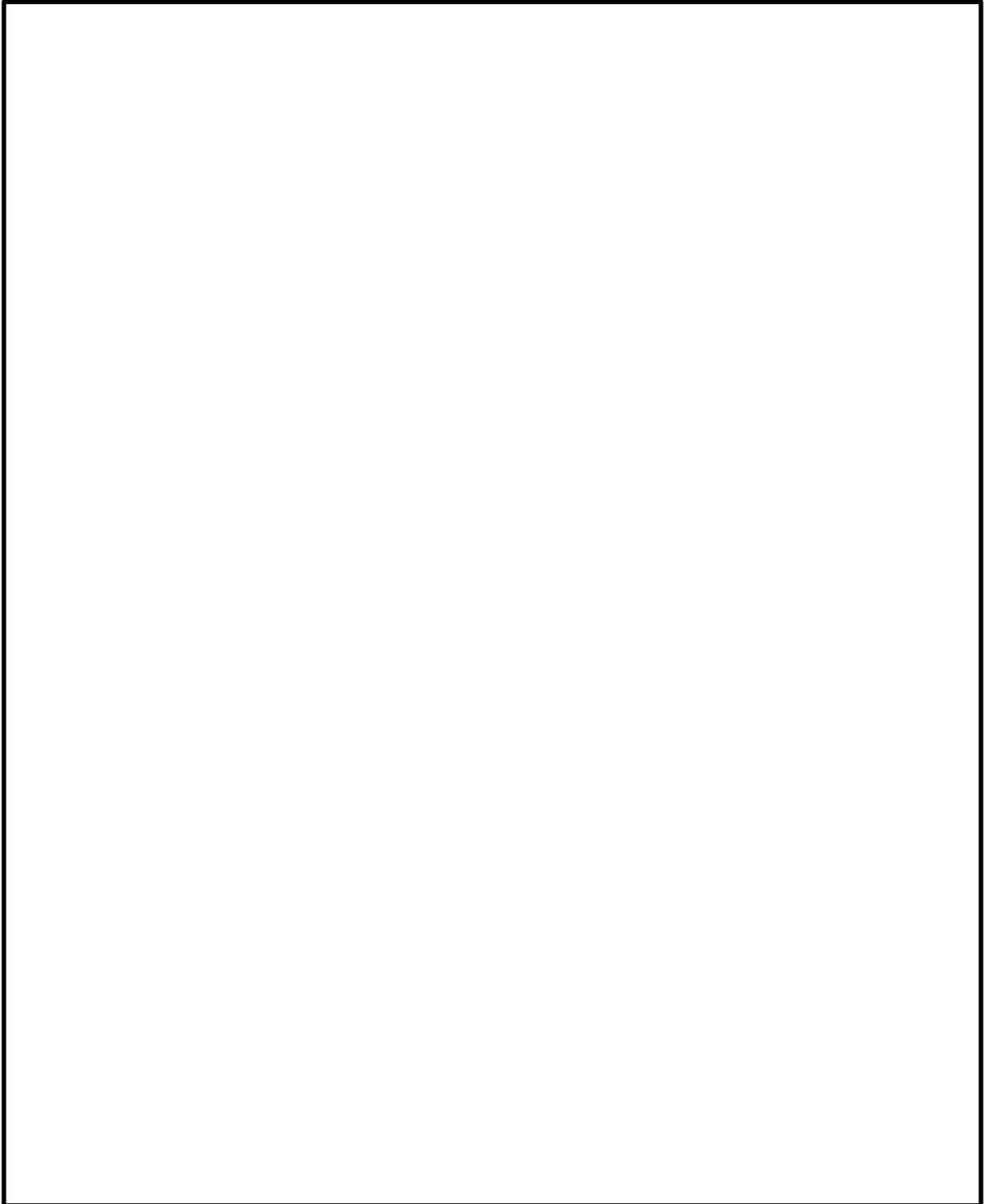
- ・屋根の板厚は、4.5 mm 以上であること。
- ・(屋根と胴板の) すみ肉溶接部が4.5 mm を超える場合は、過圧力時の逃がし装置を設けること。

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。

軽油タンクは、平底たて置円筒形容器に該当し、屋根の板厚を22 mm、屋根と胴板のすみ肉溶接部を22 mm として設計し、加圧力時に圧力を逃がす設計として、屋根と胴板の接続部よりタンク中心側に、4.5 mm 未満のすみ肉溶接部(設計弱部)を設けている。

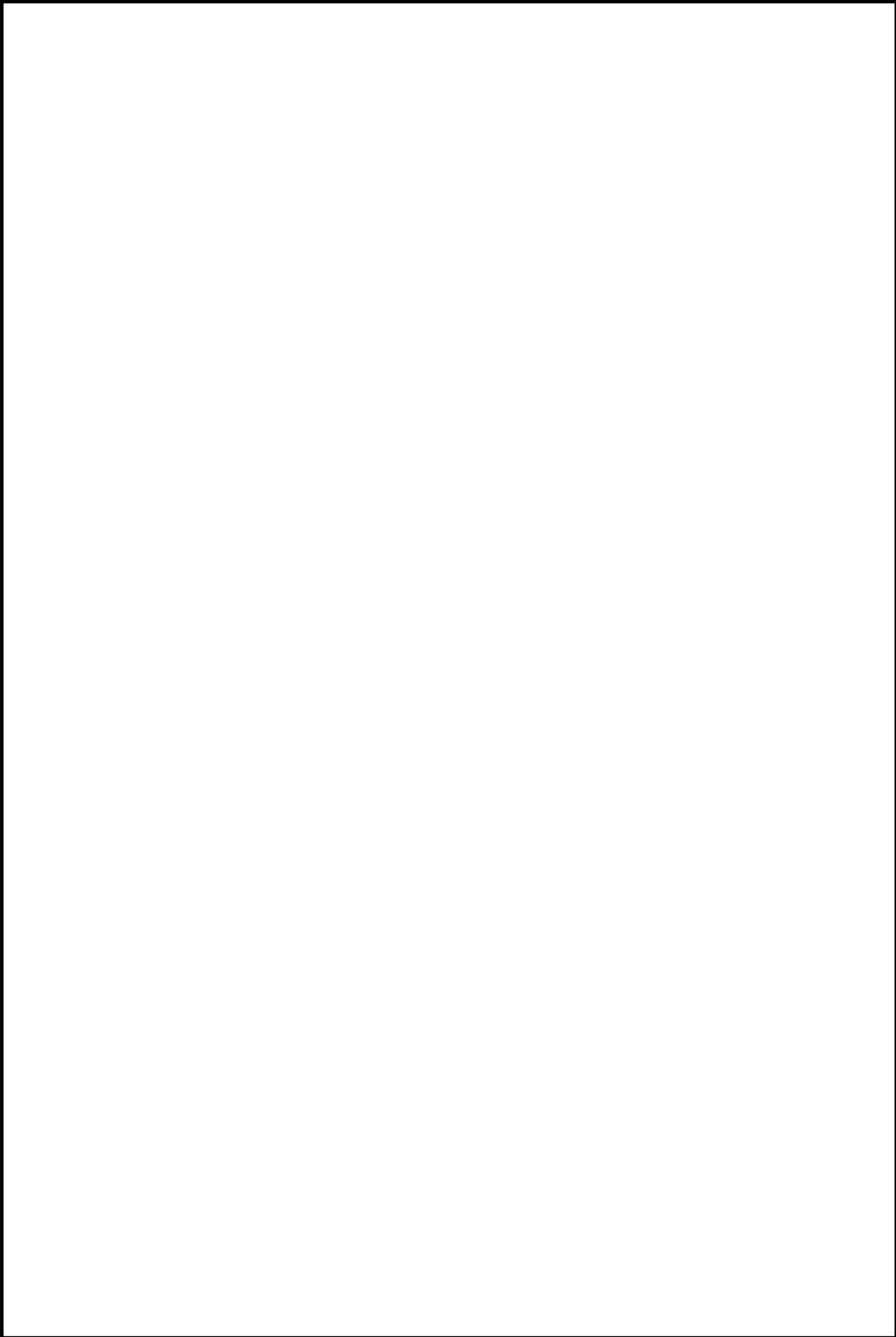
スロッシングによる荷重は、屋根と胴板の接続部(図1の部位Ⅰ)に最も大きな荷重が作用する。

一方の設計弱部である屋根の接続部(図1の部位Ⅱ)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、防爆部として設計したすみ肉溶接部としており、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。



〈参考4〉 容器構造設計指針・同解説 抜粋





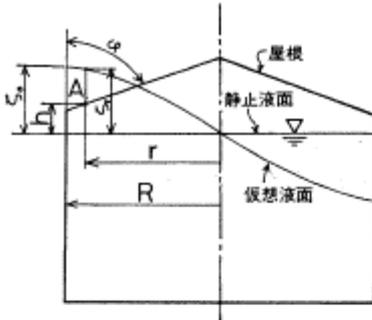


図1 衝撃圧力

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^{(8), (9)}を参考にして, 第3章にて実験式を考える。

屋根掛圧 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 $\dot{\zeta}_r$ 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 ζ_0 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/sec^2)

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

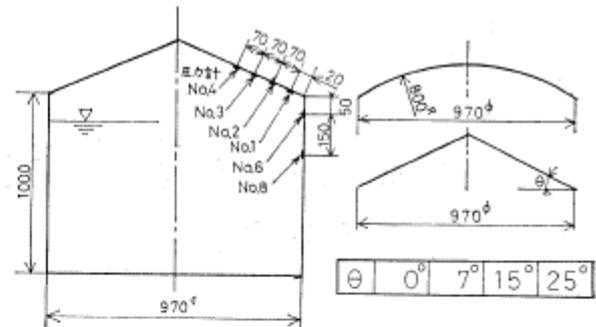


図2 円筒タンク, 圧力計配置図

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

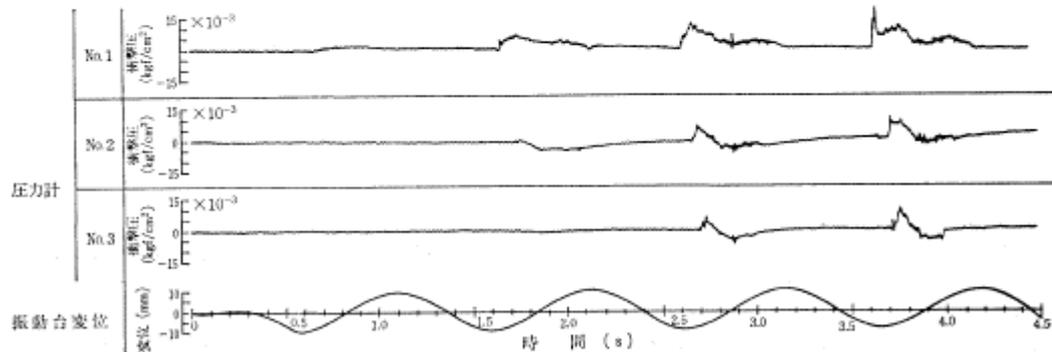
H : 液位 (cm)

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

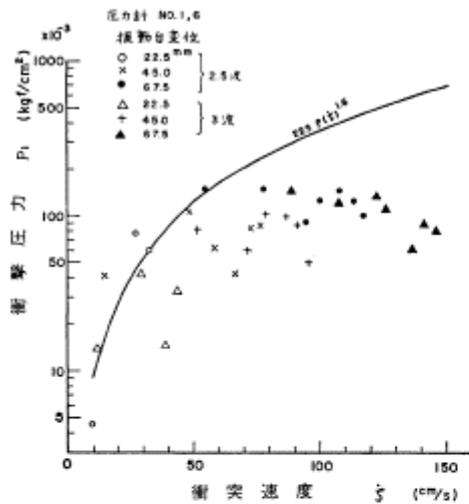


図 11 衝撃圧力と衝突速度 (3波までの最大値)

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、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。

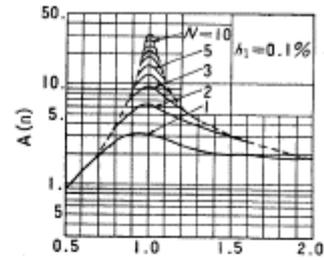


図 12 応答倍率

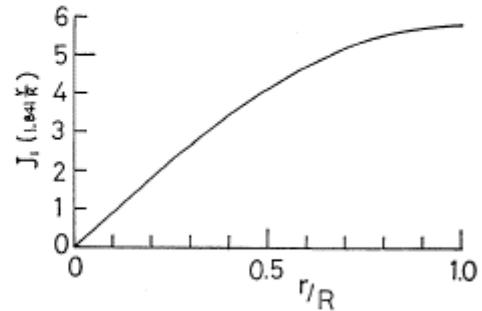


図 13 J_1 の値

実際のタンクにおいて水と異なる貯蔵液の場合、空気の流れ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 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

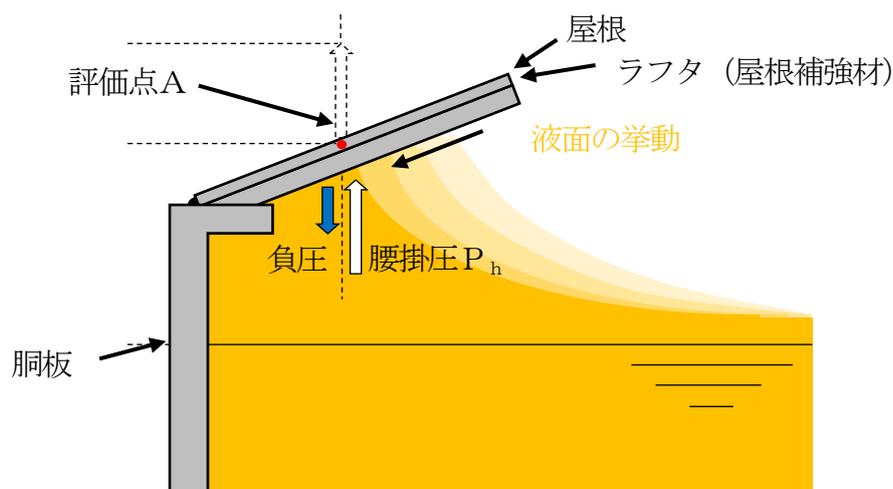
〈参考6〉 スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について

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、内包流体の全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1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、屋根と液面の間に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。



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られる。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、内包流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られる。