

【論文】

円筒タンク模型のスロッシング波高に関する一考察

水田洋司*¹ 川口周作*² 白地哲也*¹ 菅付紘一*³ 松浦一郎*³A Consideration concerning a Sloshing Wave Height of a Cylindrical Tank's Model
Yoji MIZUTA, Shusaku KAWAGUCHI, Tetsuya SHIRACHI, Koichi SUGATSUKE, Ichiro MATSUURA

After the Tokachi-Oki earthquake, earthquake proofing of cylindrical tanks are demanded. In particular, the measure against a sloshing is demanded. However, there is not a method obtaining effective result in an actual tank. In this paper, we propose a wave height reduction method and explain about effects of it. This proposed method is used a support and a flat board as an instrument. At first, we performed an experiment of a shaking table using the cylindrical tank's model. We examined the wave height and the wave pressure of the sloshing. When we used the proposing method, we measured the wave height and the wave pressure too. Next, in numerical analysis, we calculated sloshing wave height in a condition same as an experiment and examined the propriety of numerical analysis.

Key Words; sloshing, cylindrical tank's model, wave height, wave height reduction method

1. 序論

2003年9月26日午前4時50分頃、マグニチュード8.0 (M8.0) の十勝沖地震が発生した。この地震では石油タンクの浮き屋根がスロッシングにより破壊され、二次災害として火災が起きた。土木学会では「巨大地震災害への対応検討」特別委員会が発足し、長周期地震動とこれに対する大型貯槽のスロッシングが主要課題として取り上げられた。スロッシングによる石油タンクからの油漏れやタンクの火災は、タンク施設の破壊と共に環境破壊や経済破綻等国民への影響が大である。また、大都市の石油備蓄タンクは堆積層上に多く建設されているため、長周期地震動の問題にも晒されている。すなわち、大型タンクのスロッシングは長周期振動であり、堆積層の地盤振動も長周期振動を卓越振動として含むため共振しや

すい状況にある。しかも、地盤の長周期振動は長時間減衰せずに振動するため大型タンクのスロッシングを誘発しやすい。大型石油タンクは一箇所に複数機設置されていることが多く、一機の火災が大惨事を引き起こす可能性を秘めている。一方、水道用タンクは配水量の時間変動を調整する機能に加え、地震時や渇水時などの緊急時の給水拠点、さらに消火用水としての重要な役割を担っている。厚生労働省の「水道ビジョン」¹⁾によれば浄水場、水道用タンク等の基幹施設のうち現状で耐震化されている施設は全国で23%程度と発表されている。一般に、水道用タンクは自然流下を利用し蛇口まで水を送るため、標高の高い、地盤の良い所に建設されている場合が多い。

以上のような背景から、石油備蓄タンクや配水池等の円筒タンクのスロッシング制御²⁾のために様々な方法が提案されてきた。例えば、浮き屋根の円周にゴムを装着しゴムの減衰でスロッシング現象を低減させる方法³⁾、タンク内部にバフフルプレートを

* 1 九州産業大学 工学部 都市基盤デザイン工学科

* 2 九州産業大学大学院 工学研究科 社会開発・環境システム工学専攻 (新日本製鐵株式会社)

* 3 九州産業大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

設置し液面挙動を沈静化させる方法⁴⁾などがある。しかし、実機化で効果的な成果をあげている方法は無く、簡易で実用的なスロッシング制御法が求められている。本論文では円筒タンク模型実験で得られたスロッシング特性と支柱・平板を組み合わせたスロッシング波高低減法の波高低減効果について述べている。まず、円筒タンク模型を用いて振動台実験を行い、スロッシング時の波高、波圧を調べ、次に波高低減法を用いた時の波高・波圧を計測し、両者を比較検討した。また、数値解析においても実験と同一条件でスロッシング波高を計算し、数値解析の妥当性についても検討した。

2. 円筒タンク模型の概要

振動台実験で用いた円筒タンク模型はアクリル樹脂製で、厚さ 1cm、外径 60cm、高さ 80cm である。写真-1 には円筒タンク模型と振動台 (IMV 社: DS-2000-15L) を示す。模型は写真のように振動台取り付け鉄板を用いて、ボルトで振動台に固定されている。波高を計測するための計測メジャーを模型の外壁に貼り付けている。メジャーは底面から高さ 60cm~40cm の位置にあり、目盛り間隔は 5mm である。円筒タンク模型を図-1 に示す。模型裏面に水漏れ防止のためのゴムパッキングを装着している。図-2 にゴムパッキング配置図を示す。図-3 にはスロッシング時の波圧を計測するための水圧計設置位置を示している。この波圧計測によりスロッシング時の波圧や減衰を知ることができる。写真-2 には水圧計から得られたデータをオンラインで増幅 (動ひずみ計)・確認 (オシロスコープ)・記録 (データレコーダー)・解析 (コンピュータ) する装置を示している。

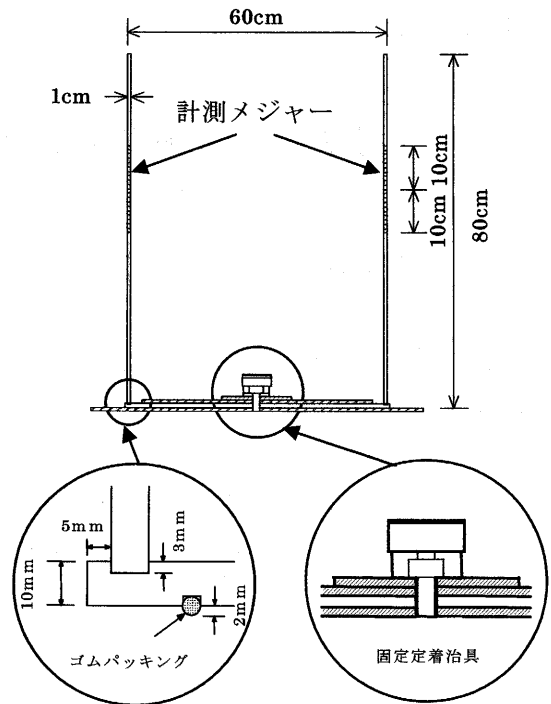


図-1 円筒タンク模型

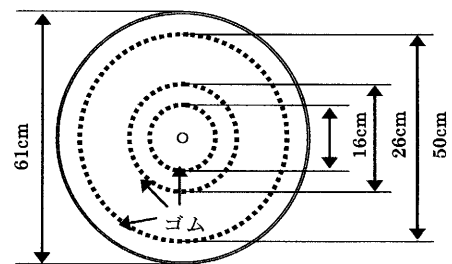


図-2 ゴムパッキング

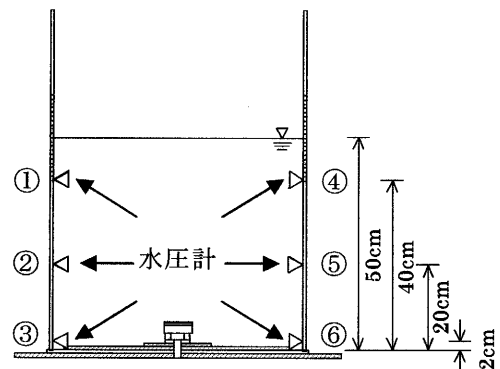


図-3 水圧計の設置位置

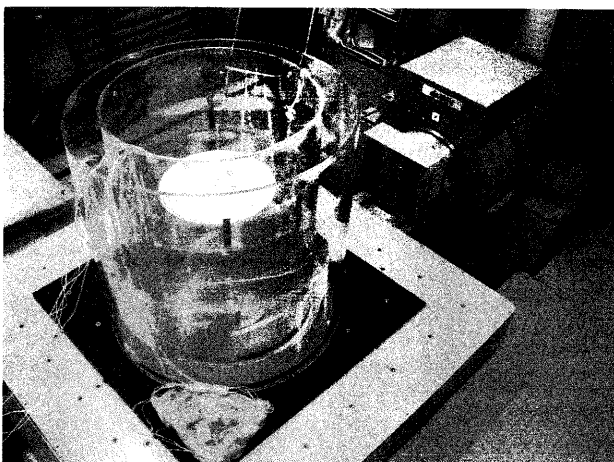


写真-1 円筒タンク模型と振動台

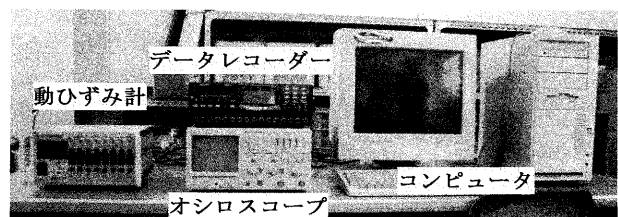


写真-2 水圧計測装置

3. スロッシング

タンク模型内に高さ 50cm まで内容液を満たし、加振振動数 1.15~1.35Hz の範囲で 0.01Hz 刻みの正弦波加振によるスイープ加振並びにスポット加振の振動台実験を行った。加速度は、スロッシング時の水面動揺が線形性を確保するように 2gal とした。さらに、スロッシング時の最大波高と共振振動数を明確にするため 1.243~1.245Hz において 0.001Hz 刻みのスポット加振を行った。その結果、スロッシングによる最大波高は 6.7cm であり、その時の加振振動数は 1.244Hz であった。実測された動水圧波形から、FFT 解析によりピーク振動数を求めたところ、いずれも 1.246Hz となった。減衰定数は各振動数で加振後の自由振動時の動水圧より求めた。表-1 にスポット加振によるスロッシング時の諸値を示す。

スロッシング振動数は水道施設耐震工法指針⁵⁾ (以下「指針」) に採用されている速度ポテンシャル理論の式 (式(1a)、(1b)) により求めた値 1.25Hz とほぼ一致している。

表-1 スロッシング時の諸値

加振振動数 (Hz)	波高 (cm)	FFT振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
1.243	6.5	1.246	0.38
1.244	6.7	1.246	0.34
1.245	6.5	1.246	0.34

・速度ポテンシャル理論による振動数

$$\omega = \sqrt{\frac{1.841g}{R} \tanh(1.841 \frac{H}{R})} \quad (1a), \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1b)$$

ここで、 ω : 水面動揺の固有円振動、
 f : 固有振動数、 g : 重力加速度、
 H : 水面高さ、 R : タンクの内半径

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$ $H = 0.5 \text{ m}$ $R = 0.29 \text{ m}$ を代入して

$$\omega = \sqrt{\frac{1.841 \times 9.8}{0.29} \times \tanh(1.841 \times \frac{0.5}{0.29})} \\ = 7.87 \text{ (rad/sec)} \quad (1c)$$

$$f = \frac{7.87}{2\pi} \\ = 1.25 \text{ (Hz)} \quad (1d)$$

指針では、最大波高の算出式として幾つかの提案式が掲載されており、そのうちの Housner の式並びに速度ポテンシャル理論による式との比較を行った。どちらの式も速度応答スペクトルを用いて加振加速

度を、次のように速度スペクトルに換算した。

振動台による正弦波加振実験を 1 自由度系の強制振動と考え、下式により応答倍率を求め、加振加速度を固有円振動数で除して速度とした。表-1 から減衰定数は 0.34%、振動台の振動数 1.244Hz、内容液固有振動数 1.246Hz を用いて、式 (2a) から応答倍率を求めると 133 倍となった。式 (2b) から速度スペクトルは 34.0cm/sec となった。

・応答倍率による速度スペクトルへの換算

$$M = \frac{1 + (2h \frac{\omega_0}{\omega})^2}{\sqrt{\left\{1 - (\frac{\omega_0}{\omega})^2\right\}^2 + (2h \frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad (2a)$$

$$Sv = \frac{A}{\omega_0} \times M \quad (2b)$$

ここで、 M : 応答倍率、 h : 減衰定数、
 ω_0 : 振動台の円振動数、
 ω : 内容液の固有円振動数、
 Sv : 速度スペクトル、 A : 加振加速度

$h = 0.0034$ $\omega_0 = 7.82 \text{ (rad/sec)}$

$\omega = 7.83 \text{ (rad/sec)}$ $A = 0.02 \text{ m/sec}^2$ を代入して

$$M = \frac{1 + (2 \times 0.0034 \frac{7.82}{7.83})^2}{\sqrt{\left\{1 - (\frac{7.82}{7.83})^2\right\}^2 + (2 \times 0.0034 \frac{7.82}{7.83})^2}} \\ = 133 \quad (2c)$$

$$Sv = \frac{0.02}{7.82} \times 133 \\ = 0.34 \text{ (m/sec)} \quad (2d)$$

上記の速度スペクトルを用いて、Housner の式から求めたスロッシング波高は 8.5cm、速度ポテンシャル理論から求めたスロッシング波高は 6.6cm となった。これらの関係を図-4 に示す。

・Housner の式による波高

$$\eta = \frac{0.408R \cdot \coth(1.841 \frac{H}{R})}{\frac{g}{\omega^2 \cdot \theta_h \cdot R} - 1} \quad (3a)$$

$$\theta_h = 1.534 \frac{Sv}{R \cdot \omega} \tanh(1.841 \frac{H}{R}) \quad (3b)$$

ここで、R：タンクの内半径、H：水面高さ、
g：重力加速度、 ω ：水面動揺の固有円
振動、 θ_h ：水面における自由振幅の最
大角振幅、 S_v ：速度スペクトル

$R=0.29\text{m}$ $H=0.5\text{m}$ $g=9.8\text{m/s}^2$
 $\omega=7.83(\text{rad/sec})$ $S_v=0.34\text{m/sec}$ を代入して

$$\eta = \frac{0.408 \times 0.29 \times \coth(1.841 \times \frac{0.5}{0.29})}{\frac{9.8}{7.83^2 \times \theta_h \times 0.29} - 1}$$

= 0.085(m) (3c)

$$\theta_h = 1.534 \times \frac{0.34}{0.29 \times 7.83} \times \tanh(1.841 \times \frac{0.5}{0.29})$$

= 0.23(rad) (3d)

・速度ポテンシャル理論の波高

$$\eta = 0.245T \cdot \tanh(1.841 \frac{H}{R}) S_v \quad (4)$$

ここで、R：タンクの内半径、H：水面高さ、
T：一次固有周期、 S_v ：速度スペクトル

$R=0.29\text{m}$ $H=0.5\text{m}$ $T=0.8\text{sec}$
 $S_v=0.34\text{m/sec}$ を代入して

$$\eta = 0.245 \times 0.8 \times \tanh(1.841 \times \frac{0.5}{0.29}) \times 0.34$$

= 0.066m (4a)

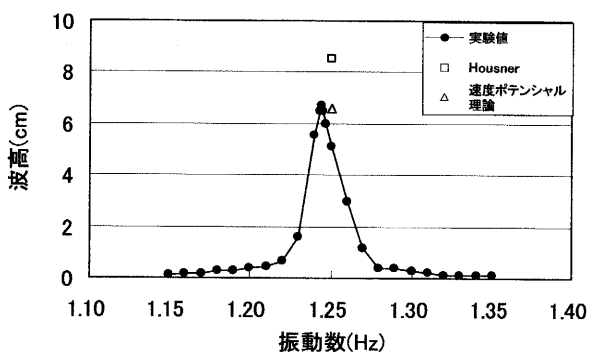


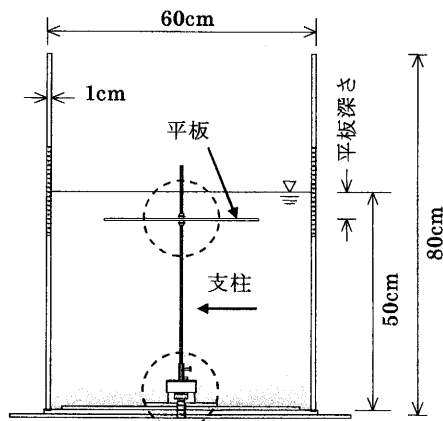
図-4 スロッシング振動数と波高

スロッシング振動数は 1.244Hz と低い振動数領域であることから、スロッシング時のタンク構造体 (32.24Hz、81.58Hz) ⁶⁾ は剛体運動と考えることができ、タンクの変形の影響を無視できると考えられる。

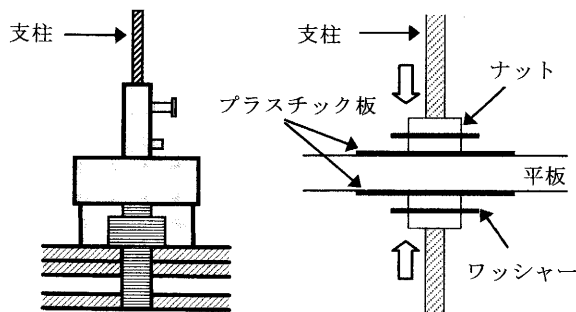
4. スロッシングの低減法とその効果

4. 1 スロッシング低減法

低減装置の設置状況を図-5 (a) に示し、その治具を図-5 (b) と写真-3 に示す。支柱の材質は軟鋼、長さは 50cm、全長にねじが切っており上下からナットが通るようになっている。支柱の根元は完全固定され、平板は上と下からナットとワッシャーと薄いプラスチック板で挟んで固定されている (図-5 (b))。写真-3 に示すように、支柱の材質はすべて同じで直径 ϕ が 3、4、5、8、10mm の 5 種類、平板の材質は塩化ビニル、直径が 25、34.5、45cm の 3 種類である。



(a) 低減装置 (治具)



(b) 詳細図

図-5 低減装置の設置状況

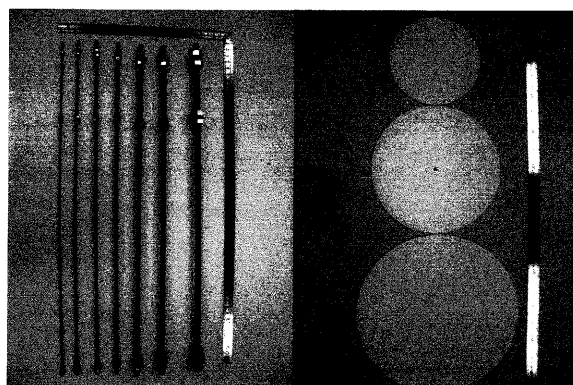


写真-3 支柱と平板

4. 2 支柱の径と低減効果

図-6には平板φ34.5、支柱直径φをパラメータとし、平板深さと最大波高の関係を図示している。支柱φ3、8、10は平板深さ2cmで最も低減効果が見られるのに対して、φ4は平板深さ0cm、φ5は平板深さ6cmで最も低減効果があり、傾向が異なっている。この結果を見ると支柱の直径と平板深さが変わることによって低減効果の傾向が違ってくる。

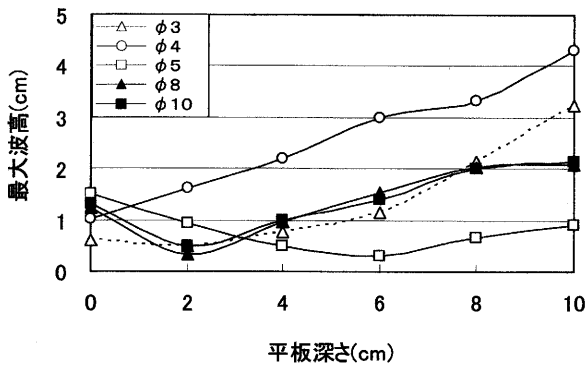


図-6 平板設置深さと最大波高

図-7には平板φ34.5、平板の設置深さをパラメータとして、支柱直径と最大波高の関係を図示している。平板深さ0cm以外は類似した傾向を示しており、φ5で最大波高は最も小さくなっている。

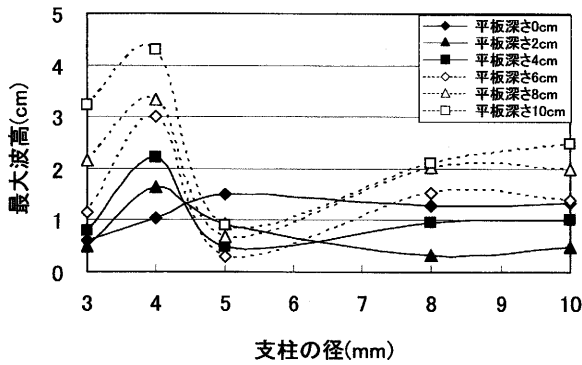


図-7 支柱の径と最大波高

図-8には平板φ34.5、平板深さ2cm、支柱直径φをパラメータとして、加振振動数と波高の関係を図示している。支柱φ3、4、5でφが大きくなるに従い波高のピークを表わす振動数が大きくなっているが、φ8、10では小さくなっている。最大波高はφ4で最も大きくなり、φ8で最も小さくなっている。支柱の直径と波高のピーク値、その時の振動数には一定の傾向は見られない。

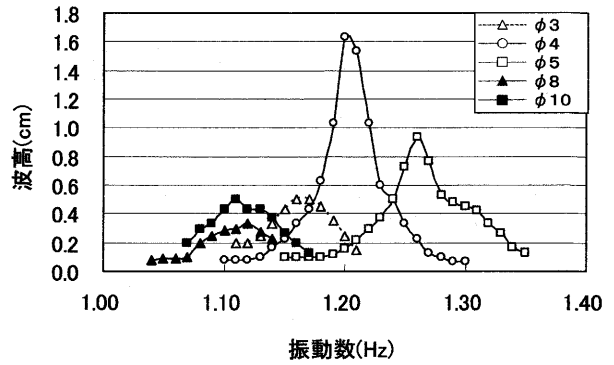
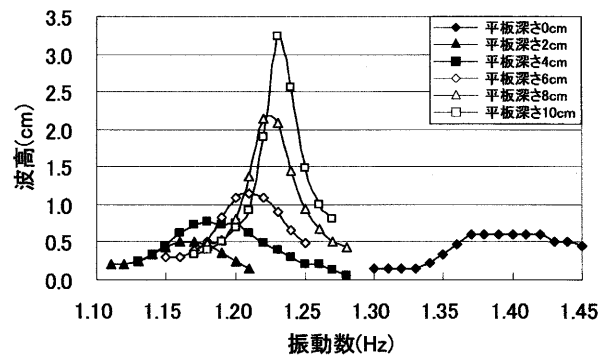


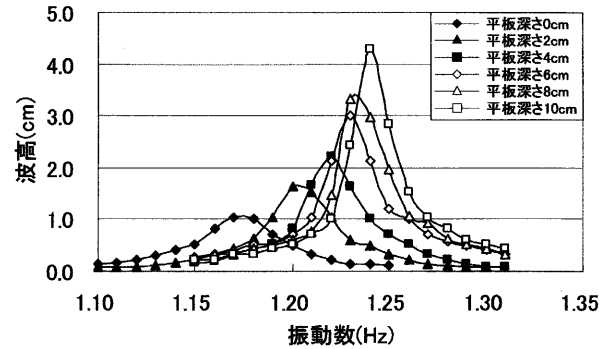
図-8 支柱の径による加振振動数と波高

4. 3 平板深さによる特性と低減効果

図-9、10には平板φ34.5、支柱φ3、4、5、8、10の平板深さを0~10cmに変えた時の共振曲線を示している。支柱φ4は平板深さが深くなるにつれ、共振振動数が大きくなり波高も大きくなっている。支柱φ3、8、10は、支柱φ4の傾向とほぼ同じになるが、平板深さ0cmだけが違う結果となっている。支柱φ5は他の支柱と違い、平板深さ0cmが最大波高になることや、共振振動数にも傾向が見られず特異な結果となっている。

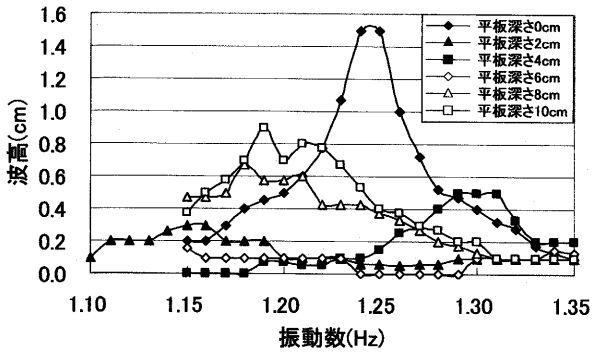


(a) 支柱φ3

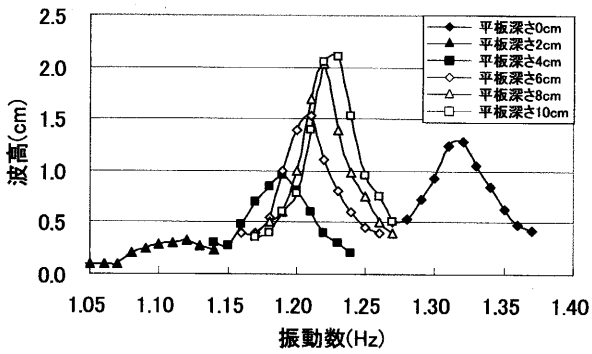


(b) 支柱φ4

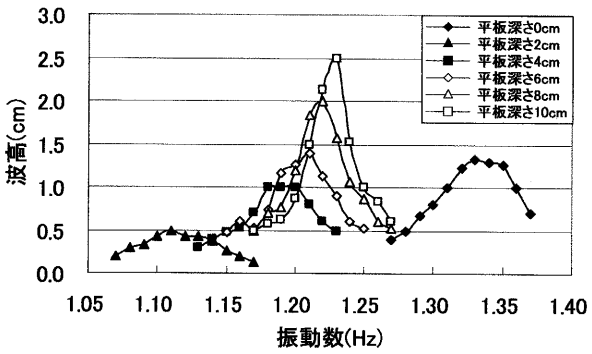
図-9 平板深さによる加振振動数と波高 (φ3、φ4)



(a) 支柱φ5



(b) 支柱φ8



(c) 支柱φ10

図-10 平板深さによる加振振動数と波高 (φ5、φ8、φ10)

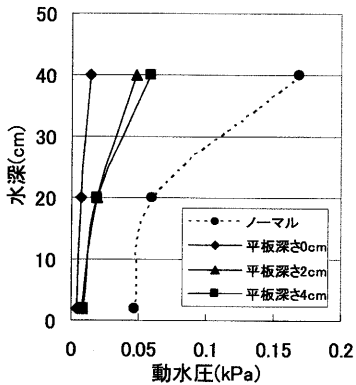


図-11 低減効果 (波圧)

図-11には支柱φ4、平板φ34.5、平板深さをパラメーターにした時の動水圧分布図を示している。ノーマルと比較すると波圧からも低減効果が確認できる。平板深さを深くするにつれ、波高と同じく波圧も大きくなっている。

4.4 減衰と波高

図-12にはノーマルと支柱φ4、平板深さを変えていった時の減衰定数と最大波高を示している。この図から、減衰が小さくなると波高は大きくなる傾向が読み取れる。

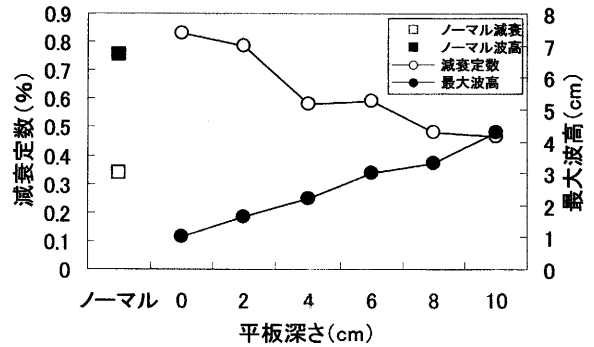


図-12 減衰定数と最大波高

4.5 平板の径と低減効果

表-2には内容液の内径面積に対する平板の占有率を示している。図-13には支柱φ5、平板深さ2cm、平板φをパラメーターとして、振動数と波高の関係を図示している。この図から、平板φ25でもφ34.5の場合と同様の低減効果が期待できる。これは実機に適用する場合にも、内容液内に設置する構造物を小型化できることを意味している。

表-2 平板の占有率

直径(cm)	面積(cm ²)	占有率(%)
45	1,590	60
34.5	935	35
25	491	19

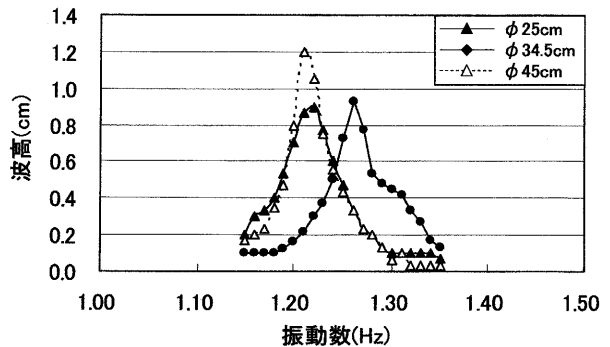


図-13 平板の径と共振振動数

5. 数値解析

数値解析には株式会社アーク情報システム社製の TDAP III を用い、スロッシング解析とスロッシング低減モデルの解析を行った。解析では入力加速度振幅を 2gal の定常振動、振動数範囲を 1.10Hz~1.35Hz とし、0.001Hz 刻みで波高を求めた。図-14 に入力波形を示す。加振時間は応答が定常状態となるまでの時間を考慮して 240sec とした。

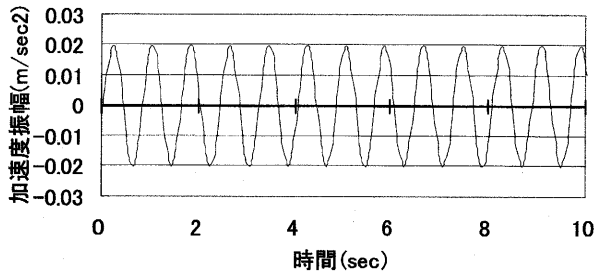


図-14 入力波形

5.1 スロッシング

スロッシング領域の振動数は低く、アクリル模型のような剛体模型は連成振動を起こさないため、模型壁面のモデル化を考慮していない。そのため液体のみをモデル化し振動させている。このモデル化には軸対称要素を用いており、不要なモデル化を行わないことで解析時間短縮とデータ量の減少に繋がる。軸対称液体要素の底面は完全固定、要素全体は加振直角方向 (Ty) に動かないように拘束している。液体のモデル化を図-15 に示している。

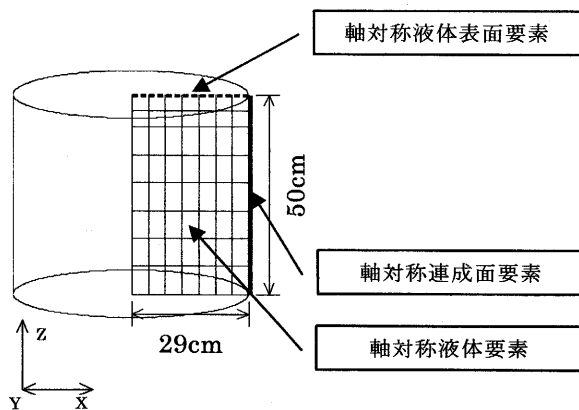


図-15 液体のモデル化

スロッシング波高を求める際の減衰定数は実験から得られた動水圧の波形から求めた減衰定数 (0.34%) を使用した。図-16 にはノーマルモデルの応答波形の一例を示している。定常状態での振幅を求め、加振振動数と波高の関係を図-17 に図示している。図には実験値も示している。波高は 1.25Hz で 7.36cm となり、実験値 (6.7cm) に近い

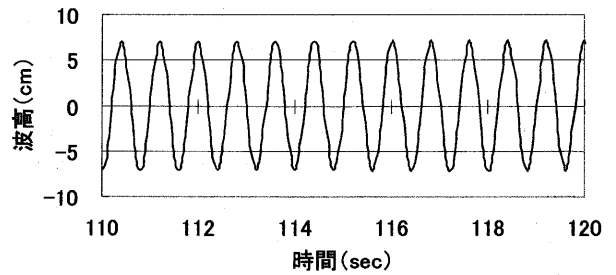


図-16 ノーマルの応答波形 (1.25Hz)

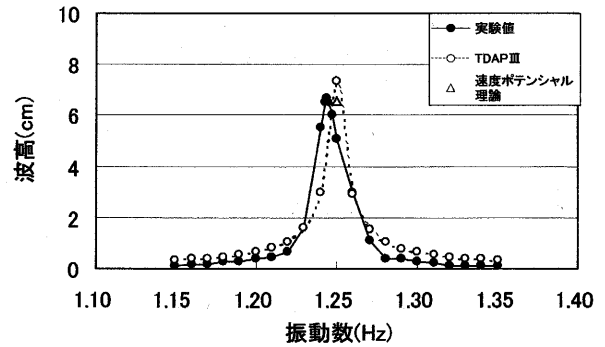
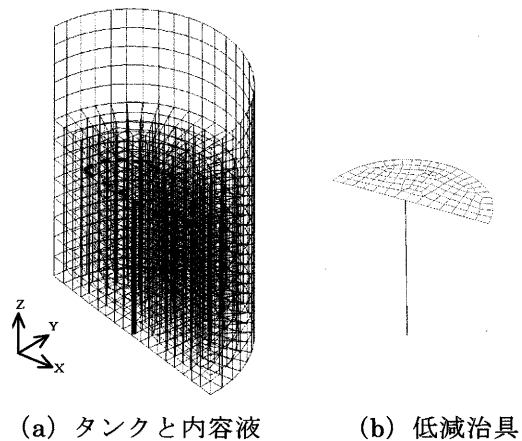


図-17 ノーマルの波高比較

値となっている。速度ポテンシャル理論では、1.25Hz で波高 6.6cm が得られた。

5.2 スロッシング低減モデル

スロッシング低減モデルは 3次元モデルとし、模型壁面と平板をシェル要素、支柱は 3次元はり要素、模型壁面の底部と支柱定着部は完全固定としている。液体、平板、支柱の要素は加振直角方向 (Ty) に動かないように拘束している。シェル要素と液体要素の間にはそれぞれを認識させる液体連成面要素を、液体表面にはスロッシング波高を出力するための液体表面要素を設けている。スロッシング低減モデルを図-18 に図示している。同図 (a) の中に (b) を挿入した状態で解析している。



(a) タンクと内容液 (b) 低減治具

図-18 スロッシング低減モデル

図-19には平板φ34.5、平板深さ6cm、支柱φ5の低減治具を用いた時の応答波形を示している。図-20(a)は平板φ34.5、平板深さ6cm、支柱φ5の場合、同図(b)は平板φ34.5、平板深さ6cm、支柱φ10の場合のスロッシング波高共振曲線である。スロッシング波高を求める際に用いた減衰定数は実験の動水圧波形から求めており、支柱φ5には1.19%、支柱φ10には0.57%を使用した。支柱φ5の最大波高は1.241Hzで2.1cm、支柱φ10では1.241Hzで4.4cmとなった。これらの図からTDAPⅢによる解析値と実験値の波高共振曲線に大きな差のあることが分かる。また、図-21には平板φ34.5、支柱φ5、平板深さ6cmにおける1.241Hzでの波高と支柱頂部の動きの時刻歴を図示している。位相差が少しあるが、同じ振動数で揺れることが判る。

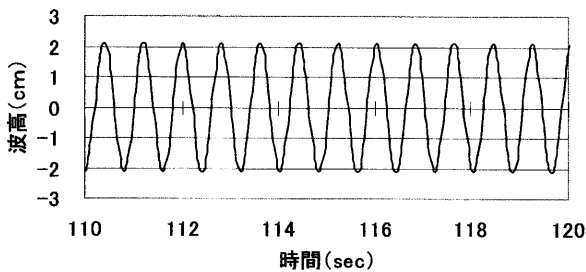
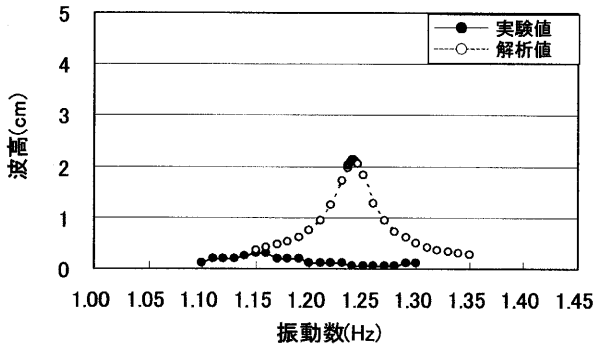
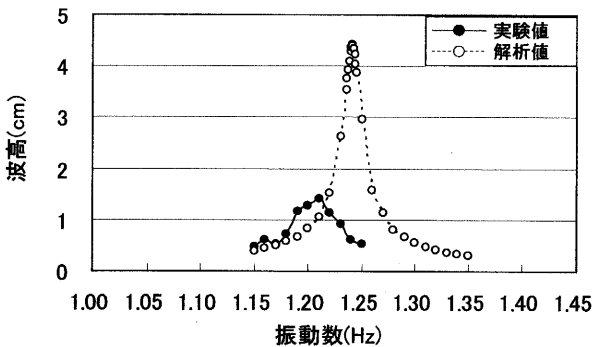


図-19 支柱φ5の応答波形(1.241Hz)



(a) 支柱φ5



(b) 支柱φ10

図-20 波高共振曲線の比較

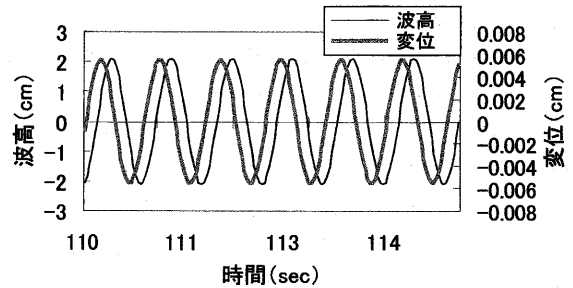


図-21 波高と支柱の動き

6. 結論

円筒タンク模型実験から、提案のスロッシング波高低減法はスロッシング時の波高・波圧を低減できることが分かった。以下にその知見をまとめる。

- ① 平板φ34.5cmにおける低減効果は支柱φ5mm、平板深さ2cmで最も大きい。
- ② 支柱φ3、4、8、10mmでは、平板深さ0cmを除いて、平板深さが大きくなるにつれ共振振動数も大きくなっている。
- ③ 平板の占有率19%でも波高の低減効果がみられる。

TDAPⅢを用いた解析では以下のことが判明した。

- ① スロッシング現象は実験値と同じ結果を得ることができた
- ② スロッシング波高低減に関する解析については実験結果と異なる値が得られており、今後更なる研究が必要である。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局：水道ビジョン、平成16年6月
- 2) 坂井藤一：大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術の現状と展望、大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集、pp.1-9、2005年7月
- 3) 井田、坂東、連、平野：浮屋根式タンクのスロッシング減衰方法の検討、大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集、pp.35-36、2005年7月
- 4) Abramson, H. N (ed.) : The Dynamic behavior of Liquids in Moving containers, NASA Rep. SP-106, Southwest Research Institute, 1966.
- 5) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、1977年
- 6) 水田、高西、川口、菅付：円筒タンク構造体の固有振動数と固有モード特性について、土木構造・材料論文集 第21号 2005年12月