

円筒タンクのスロッシング軽減策について

A Method of Sloshing Reduction for Cylindrical Tank

水田洋司*1・川口周作*2・高西照彦*3・菅付紘一*4・松浦一郎*4・北原伸浩*2

Yoji MIZUTA, Shusaku KAWAGUCHI, Teruhiko TAKANISHI, Koichi SUGATSUKE, Ichiro MATSUURA
Nobuhiro KITAHARA

*1 工博 九州産業大学教授 工学部都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

*2 新日本製鐵株式会社 水道施設部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2丁目6-3)

*3 工博 九州工業大学名誉教授 (〒805-0035 北九州市八幡東区山路2丁目4-8)

*4 九州産業大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

In this paper, the following are described: The method of sloshing reduction for cylindrical tank and the mechanism. Cylindrical tank model made of acrylic resin was set to the vibrating table, and it was horizontally shaken in the sine wave. The scale of the cylindrical tank model is about 1/20. In the cylindrical tank, the disk for reducing the sloshing was installed. The water depth which installed the disk in the cylindrical tank was tested as a parameter, and wave height and dynamic water pressure in the resonance were examined. From these values, the degree of the reduction of the sloshing wave height is clarified, and the method of sloshing reduction for the cylindrical tank is proposed.

Key Words: dynamic characteristics, cylindrical tank, sloshing, sloshing reduction, natural frequency, dynamic water pressure, damping constant

1. 序論

現在、土木学会では「巨大地震災害への対応検討」特別委員会¹⁾において、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ている。石油タンクについては2003年の十勝沖地震で、苫小牧地区の製油所において貯槽の内容液がスロッシングを生じ、そのうち2基の浮き屋根が炎上破壊し、被害分析や耐震対策等について検討が行われている。

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」²⁾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%程度と発表された。水道用タンクの耐震補強として、側壁部は鋼板巻きやPC鋼線巻き、コンクリート巻きなどの実績がある。固定屋根部は、炭素繊維を貼りつける方法や架け替える方法が用いられている。固定屋根への地震荷重には内容液のスロッシングによる波頭衝撃圧もあり、巨大地震の長周期地震動により、構造体への影響が増している。加えて水道水に含まれる塩素が揮発して屋根内面において濃縮され、コンクリート屋根の中

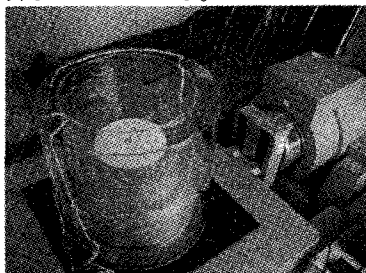
性化による劣化が生じており、対策が求められている。

このような現状から、タンクの耐震性を高めるには、耐震補強という考え方だけではなく、スロッシングそのものを軽減することにより、固定屋根への波頭衝撃圧軽減の施策も必要と考えられる。

2005年7月に土木学会関東支部にて、スロッシングに関する耐震・制振・免振技術のミニシンポジウムが開催された。そのなかで従来のスロッシング防止策³⁾が紹介されており、1960年頃のAbramsonによるバップルプレートや金田・小川による浮き屋根を用いたものなどが挙げられているが、タンクに実機化されたものは見当たらない。本研究で提案する方法⁴⁾は、図-1に示す支柱で支えられたことを特徴とする平板からなる構造物をタンク内に設置してスロッシングを軽減させようとするものである。この方法は、軽減策の一つとして、その効果と実機化についての議論と技術開発の推進が期待されている。

これまでに著者らは二重円筒タンクの耐震設計法の確立に向け、アクリル樹脂製二重円筒模型を用いた実験と数値解析を実施し、内容液の動的挙動^{5), 6)}を明らかにしてきた。本論文は円筒タンクのスロッシング軽減策とそのメカニズムの解明を目標として、前述のアクリル樹脂製円筒タンク模型を用いた振動台実験とそれから得られ

る知見について述べている。円筒タンク模型には二重円筒タンクの振動台実験のために作製した写真－1に示す二重円筒タンクの内槽を用いており、その縮尺は約1/20である。平板を設置する深さ（以下「平板深さ」）や剛性などをパラメータとして実験を重ね、共振時の波高、動水圧を調べた。これらの値から、スロッシング波高の軽減の度合いを明らかにし、提案するスロッシング軽減策の有効性を明らかにしている。



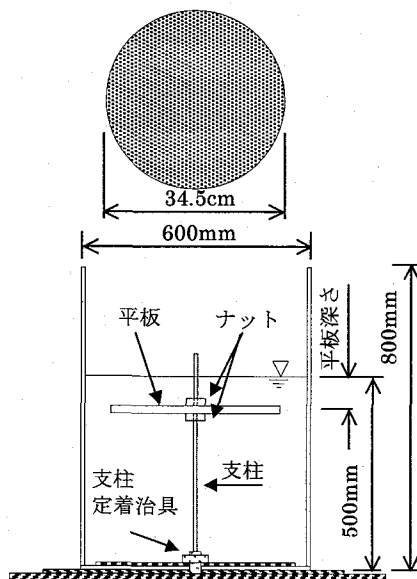
写真－1 振動台と円筒タンク模型

2. 円筒タンク模型

円筒タンク模型（以下「模型」）は既製のアクリル樹脂製のパイプを用いて作成されている。外径600mm、高さ800mm、厚さ10mmである。模型は底板の下に設けられた鋼板のセンターボルトによって固定され、その鋼板は四辺をボルトによって振動台に固定されている。タンク内の満水位は500mmとし、模型側面には5mm刻みで等高線を記入した透明なシートを貼り、水位と波高の確認ができるようにした。また、水位変動が明確に目視できるように内容液の水道水を入浴剤で緑色に着色した。

2. 1 模型の形状と実験ケース

振動台実験に用いる模型は、支柱定着治具によって支柱を模型の中心に設置できる構造とした。支柱は全ネジ加工を施し、上下のナットにより平板を任意の深さに設置できる構造とした。円筒タンク模型を図－1に示す。

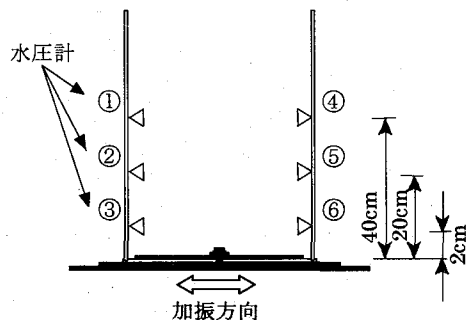


図－1 円筒タンク模型

平板はプラスチック製で、諸寸法として厚さは5mm、直径はφ25cm、φ34.5cm、φ45cmの3種類とし、支柱は鋼棒のφ3mm、φ5mm、φ8mm、φ10mmの4種類を準備し、剛性を変化させた。平板は支柱の変形により内径580mmの円筒タンク壁面と衝突しないことを確認している。

2. 2 計測機器の種類と設置位置

この振動実験では圧力変換器（水圧計、容量20kPa、PSS-02KDF、共和電業）を6箇所に設置した。図－2は水圧計6個の設置位置を示す図である。水圧計①～⑥は模型の中心に対して対称な位置にあり、水平方向に正弦波加振されたときの動水圧を計測した。波高は、デジタルビデオカメラ（DCR-TRV10、SONY）で撮影した画像の静止画像を用いて5mm刻みの等高線との比較により読み取った。振動台は、2軸同時振動試験装置（DS-200-15L、動電式、IMV社）である。



図－2 水圧計の設置位置

3. 模型の動的挙動

3. 1 模型の振動数特性

振動台を用いた5～100Hzにおける1Hz刻みの正弦波加振によるスィープ試験の結果から、本模型は20Hz以上において模型壁面に変形が発生し、それ以下の振動数において模型は剛体挙動を示すことがこれまでの実験⁶⁾で明らかになっている。

3. 2 内容液の動的挙動

タンク模型内に満水位500mmまで内容液を満たし、1.15～1.35Hzにおける0.01Hz刻みの正弦波加振によるスィープ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、1.243～1.245Hzにおいて0.001Hz刻みのスポット加振を行った結果、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。

スロッシング振動数は水道施設耐震工法指針⁷⁾（以下「指針」）に採用されている速度ポテンシャル理論（式(1a)、(1b)）により求めた値1.25Hzとほぼ一致している。

表－1 スロッシング特性

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の振動数

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

ここで、 ω ：水面動揺の固有円振動数，
 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

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の理論並びに速度ポテンシャル理論による式との比較を行う。どちらの式も速度応答スペクトルを用いていることから加振加速度を、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より減衰定数は0.34%，振動台の振動数1.244Hzと内容液固有振動数1.246Hzから円振動を求めると、応答倍率は133倍となり、求める速度スペクトルは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

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

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

上記の速度スペクトルを用いて、Housnerの理論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により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－3に示す。

・Housnerの理論の波高

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

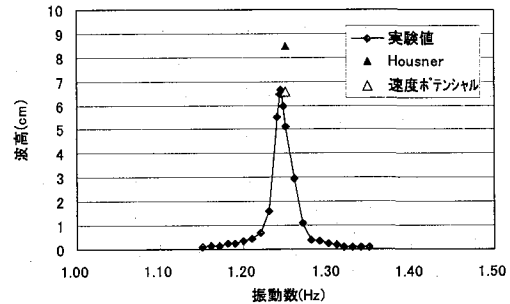
$$\theta h = 1.531 \frac{Sv}{R \cdot \omega} \tanh(1.841 \frac{H}{R}) \quad (3b)$$

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，
 θh ：水面における自由振幅の最大角振幅，
 Sv ：速度スペクトル

・速度ポテンシャル理論の波高

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

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



図－3 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、タンク構造体は剛体運動と考えることができ、振動台実験でも剛体であることが確認⁶⁾できている。

4. スロッシング軽減策

模型内に平板が無い状態（以下「ノーマル」）と平板と支柱からなる構造（以下「平板構造」）を設置した場合とでそれぞれ振動台実験を行って、両者の結果を比較することによってスロッシング軽減の効果を調べた。

振動台により水平方向への正弦波加振を行い、加速度振幅2gal、振動数1.15Hz～1.35Hzまでの0.01Hz刻みのスポット加振による振動台実験を実施した。水面の動揺はデジタルビデオカメラで撮影して最大波高を読み取り、そのときの動水圧も動ひずみ計で計測した。

4. 1 平板深さとスロッシング軽減効果

平板深さがスロッシング波高の軽減に与える影響を確認するために、平板深さをパラメータにして実験を行った。実験条件は、平板の厚さ5mm、直径φ34.5cm、支柱φ5mmである。

平板深さとスロッシングによる最大波高の関係を図－4に示す。同図にはノーマルの最大波高6.7cmを点線で示している。軽減効果の高い平板深さは0～15cm程度となっており、このことから、平板を水面から2波高（波高±波高）程度の水深に設置すればスロッシングの影響を軽減できると考えられる。

また、軽減効果の最も高い平板深さは6cmとなり、波高はこの深さを中心に対称な傾向となった。なお、平板深さが25cmを超えると波高の軽減効果は見られなかった。

図－5は平板深さ2cm、4cm、6cm、8cm、10cmの共振曲線である。平板深さ2cm、4cm、8cm、10cmではスロッシングの振動数1.244Hzより僅かにずれた振動数で

ピークを有しているが、平板深さ6cmでは、やや振動数を低い方に広げた階段状の緩やかなピークが認められた。

ノーマルでは振動数1.15Hz～1.35Hzにおいて肉眼で認められる(1mm以上)波高が確認されている。平板構造を設置した実験のうち、平板深さ6cmにおいてはノーマルで肉眼でも認められる波高を生じる振動数の下限1.15Hz付近に緩やかなピークを有し、他の平板深さはノーマルのスロッシング振動数1.244Hzに近いほど波高が大きい傾向となっている。

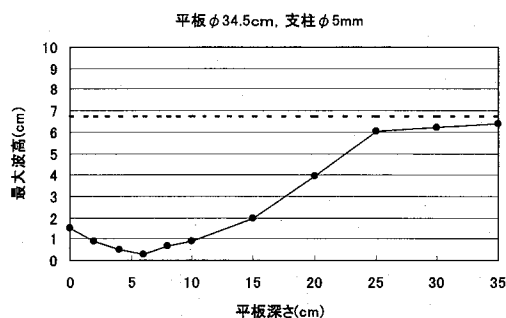


図-4 平板深さと最大波高

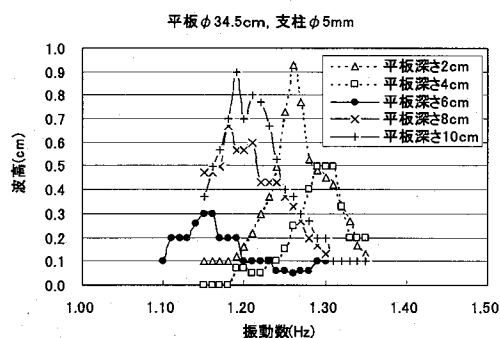


図-5 平板深さと波高の共振曲線

図-4, 5では、スロッシング波高の軽減効果の最も大きい平板深さは6cmであり、平板深さ4cmと8cm, 平板深さ2cmと10cmは同程度の軽減効果を示している。これらの平板深さにおける動水圧の分布について、動水圧の1例を図-6に示している。動水圧でも軽減効果の大きい平板深さは波高の場合と同様に6cmである。波高の軽減効果が同レベルの4cmと8cm, 2cmと10cmは同程度の動水圧分布曲線となっており、平板構造が設置されても、動水圧は波高に支配されていることが分かる。

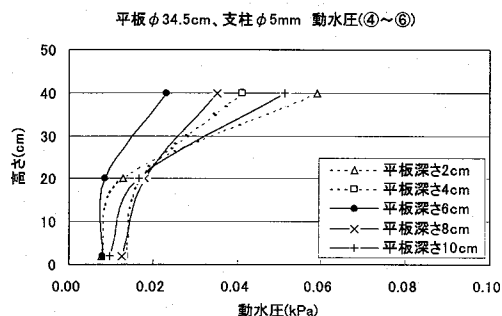


図-6 平板深さと動水圧分布

指針では、自由水の水深を求める方法として、水深が槽の水面の径に対してある程度大きいときに下式が成立するとしている。

$$H_F = 0.3D \quad (5)$$

ここで、D：タンクの水面の径

模型の内径が58cmであることから、式(5)によると自由水の水深は水面から17.4cmとなる。自由水の水深より深い水深は固定水の領域と考えられ、この領域に平板を設置しても、図-4から分かるようにスロッシング波高を軽減する効果は小さくなるようである。これらのことから、水位変動を伴うタンクであっても平板を水面から式(5)で示される範囲内の水深に設置すればスロッシングの影響を軽減できると考えられる。

波高が軽減されている場合(平板深さ6cm)とノーマル並びに平板深さが固定水領域となっている場合(30cm)について、動水圧の分布を比較したものを図-7にまとめた。平板構造により波高が軽減されている場合は、動水圧も軽減されていることが分かる。また、平板が固定水領域に設置されると波高は軽減されず、動水圧も軽減されておらず、ノーマルと同じ状態であることが分かる。従って、一般に固定水領域に平板構造が設置された場合でも、動水圧分布は波高に支配されるものと考えられる。

加えて、ノーマルの1.27Hzの波高は1.13cmであり、平板を設置して波高が1cm程度となる平板深さ2cm(波高0.93cm)並びに平板深さ10cm(波高0.90cm)の動水圧分布も図-7に示している。波高が同程度であれば、平板の有無に関係なく同程度の動水圧で相似形の分布となっていることが分かる。

これらのことから、平板を設置した場合でも波高が分かれば、求める動水圧はノーマル時のタンクから推定できる。従って、タンク構造体の設計は従来の方法で設計可能と考えられる。

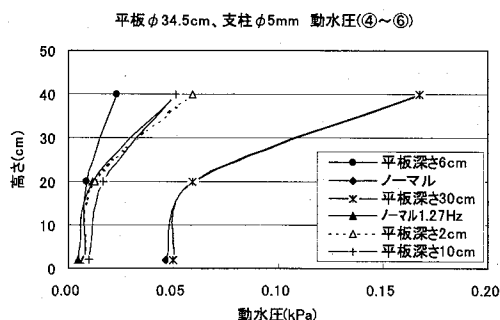


図-7 ノーマルと平板深さによる動水圧分布

4. 2 支柱の剛性とスロッシング軽減効果

図-4に示すように、平板を水面(水深=0cm)に設置しても波高を軽減する効果がみられた。本実験に先立ち、平板を水面に浮かべた状態(支柱無し、浮き屋根)

では軽減効果は見られなかったことから、平板を支柱のようなもので支えることがスロッシング軽減に寄与していると考えられる。この影響を確認するために、支柱の径を変えて、支柱の剛性とスロッシング波高の関係を調べた。実験に用いた支柱の径は $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 、平板は厚さ 5mm 、直径 $\phi 34.5\text{cm}$ のプラスチック製である。その結果を図-8に示す。

同図に示すように、支柱の径が波高の軽減に及ぼす影響は小さいものの、支柱 $\phi 5\text{mm}$ は特異な傾向を示している。支柱の径 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ では、効果的な平板深さが 2cm であるが、 $\phi 5\text{mm}$ だけは 6cm となっている。グラフの軸を変えたものを図-9に示す。平板深さが $0\sim 4\text{cm}$ 程度であれば支柱の径の影響は小さいようである。平板深さが $6\sim 10\text{cm}$ 程度であれば、支柱の径 $\phi 5\text{mm}$ が最も効果的となっている。

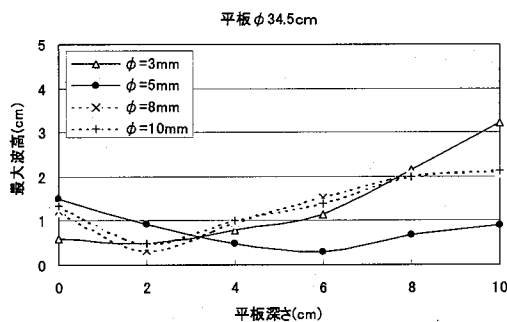


図-8 支柱の径と最大波高

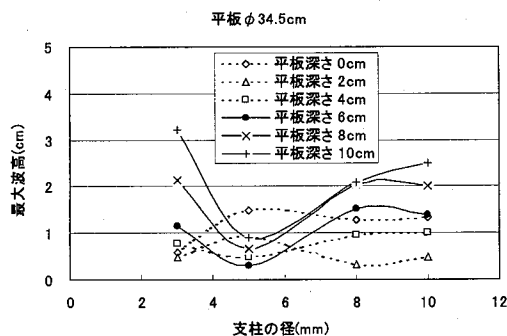


図-9 支柱の径と最大波高 (平板深さ)

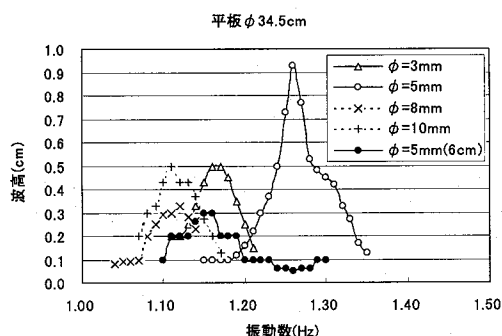


図-10 支柱の径と波高の共振曲線

そこで、支柱の径 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ は平板深さ 2cm 、 $\phi 5\text{mm}$ は平板深さ 2cm と 6cm の場合の共振曲線を図-10に

まとめた。支柱の径を変えた場合も図-5と同様にスロッシングの振動数 1.244Hz から僅かにずれた振動数でピークを有している。 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ は、ノーマルにおいて肉眼で波高(1mm 以上)を確認できた実測振動数範囲 $1.15\text{Hz}\sim 1.35\text{Hz}$ より低振動数側に、 $\phi 5\text{mm}$ の平板深さ 6cm の場合に比べて大きな波高が確認された。これらのことから平板構造の設置により、振動数が変化することがスロッシング波高の軽減における主たる要因ではないと考えられる。

4. 3 平板の径とスロッシング軽減効果

平板の径を変えて同様に実験を行い、平板の径がスロッシング波高に与える影響を調べた。実験に用いた平板は厚さ 5mm で、径は $\phi 25\text{cm}$ 、 $\phi 34.5\text{cm}$ 、 $\phi 45\text{cm}$ 、支柱 $\phi 5\text{mm}$ である。平板の径 $\phi 25\text{cm}$ 、 $\phi 45\text{cm}$ は平板深さ 2cm 、 $\phi 34.5\text{cm}$ は平板深さ 2cm と 6cm の場合の共振曲線を図-11に示す。平板の径を変えた場合も図-5、10と同様にスロッシングの振動数 1.244Hz から僅かにずれた振動数でピークを有している。また、 $\phi 25\text{cm}$ と $\phi 45\text{cm}$ は、ピーク値は異なるものの、ピークの両側においてほぼ同様の分布曲線となっている。

内径 58cm のタンクのなかに直径 25cm の平板を設置しても、面積では 19% を占めるに過ぎないが、この程度でも波高を軽減する効果が十分にあることが分かる。

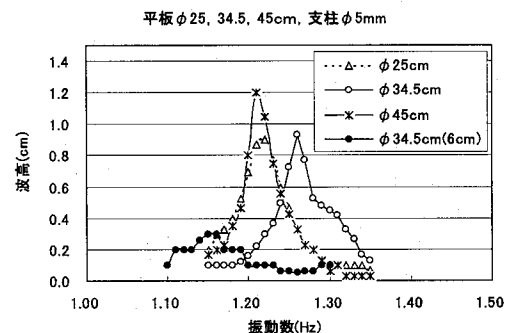


図-11 平板の径と波高の共振曲線

5. スロッシング軽減のメカニズム

スロッシング軽減のメカニズムを把握するために、平板構造による軽減効果を撮影したビデオの「コマ送り」を利用して波高、支柱、平板の動きを確認した。その結果、平板構造と波の動きを着目点と考え、スロッシングの波の動きを動水圧計、平板構造の動きを支柱上の加速度計で計測する実験を行った。また、平板深さは図-8よりスロッシング軽減効果の大きい 2cm と 6cm に着目した。

5. 1 スロッシングと支柱の位相差

実験条件は、平板の厚さ 5mm 、直径 $\phi 34.5\text{cm}$ 、支柱は $\phi 5\text{mm}$ であり、平板深さ 2cm である。振動台上にタンク模型を設置し、加速度振幅 2gal 、振動数 1.25Hz のスポット加振による水平方向への正弦波加振実験を実施した。加速度計(AS-2GB:共和電業)の設置位置は支柱の上端とした。

図-2に示す水圧計①の動きと加速度計の動きを同時

刻の時刻歴で図化したものを図-12に示す。この図では動水圧の値は計測値通りに示しているが、加速度は水圧計との位相差が分かることを目的としているため、加速度の値に係数を乗じて図示している。水圧計の正は水圧計設置側の水面上昇を表わし、加速度計の正は支柱が④側(図-2)へ移動していることを表わす。この図より、波と支柱の加速度の位相が逆位相となっていることから、波と支柱の変位は同位相となっていると理解される。支柱と平板は直交の関係を保持していることから、波と平板の傾きが逆になっていることが分かる。

このことから平板深さ2cmにおけるスロッシング軽減のメカニズムは、位相の関係から生ずるスロッシングの波と平板の勾配の差によるものと推察される。

続けて、波高軽減効果の大きい平板深さ6cmについても同じ実験を行った。その結果を図-13に示す。こちらは水圧計が $\pi/2$ 程度の位相遅れを示しており、この位相差が波高軽減の効果に差をもたらしているものと考えられる。

ここで用いた加速度計は質量25gであり、その質量が平板構造の挙動に影響を与えるかどうかを確認するために、加速度計の有無による比較を行った結果、軽減される波高や動水圧に差はみられなかった。

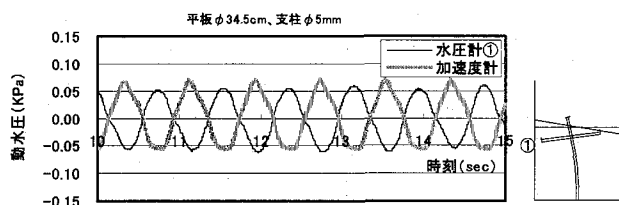


図-12 スロッシングと支柱の位相 (平板深さ2 cm)

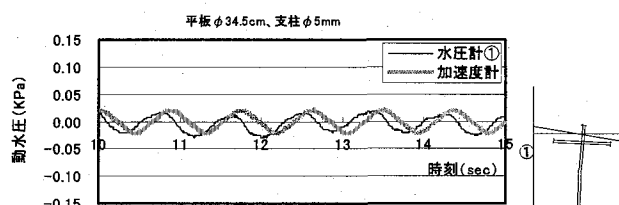


図-13 スロッシングと支柱の位相 (平板深さ6 cm)

平板によって波高が軽減されていく効果を減衰定数で表わすことを試算した。加振後における自由振動時の支柱の加速度より減衰定数を算出したところ、平板深さが2cmの場合0.99%, 6cmの場合1.19%となり、波高軽減効果の大きい平板深さ6cmの方が大きな減衰定数となった。

ノーマルの内容液の減衰定数はスロッシング後の自由振動における動水圧の計測結果から表-1に示すように0.34%であった。ノーマルのスロッシング波高を6.7cm, 減衰定数を0.34%とすると、平板設置時との共振倍率の比は、 $0.34/(0.99 \text{ または } 1.19) \approx 1/3$ となる。これより平板設置時の波高は $6.7/3 = 2.2\text{cm}$ 程度と推定されるが、実験の波高は平板深さ2cmの場合0.93cm, 6cmの場合0.30cmであり開きがある。

指針では水の減衰定数を0.5%以下としており、この値と比較しても、平板の設置により減衰定数が大きくなることが確認できたが、減衰定数という要因だけでは波高の軽減効果を表現できないことが分かった。

5. 2 平板構造の振動数

図-5のように平板の厚さ5mm, 直径 $\phi 34.5\text{cm}$, 支柱 $\phi 5\text{mm}$ における挙動は、他の支柱の径と異なり、緩やかな階段状のピークを示しており、この支柱の特徴を確認するために固有振動数を確認する実験を行った。指先で支柱を水平方向へ変位させ、加速度計は支柱の上端に設置した。

平板深さを変えて、内容液無し状態と内容液有り状態で計測した値を表-2に示す。その結果、内容液無しの振動数は片持ち梁の状況を呈し、平板深さにより変化する。内容液有りでは平板深さの影響をほとんど受けておらず、ノーマルのスロッシング振動数に近い1.244Hz近傍の値となっていた。

表-2 平板 $\phi 34.5\text{cm}$ と支柱 $\phi 5\text{mm}$ の振動特性

平板深さ cm	最大波高時		固有振動数 Hz		
	波高 cm	振動数 Hz(A)	内容液 無	内容液有	
				1次(B)	2次
0	1.5	1.25	1.59	1.34	1.95
2	0.9	1.26	1.71	1.22	1.83
4	0.5	1.30	1.83	1.34	2.08
6	0.3	1.15	1.95	1.34	2.08
8	0.7	1.18	2.20	1.22	2.08
10	0.9	1.19	2.32	1.22	1.47

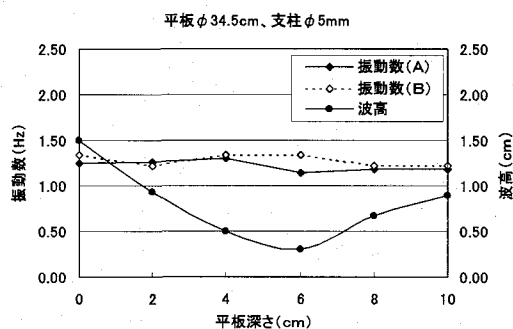


図-14 平板深さと振動数

表-2の内容液有りの結果を図-14に示す。波高の軽減効果が大きい平板深さ6cmを除いて、共振時と自由振動時における支柱の固有振動数は同程度となっている。平板深さ6cmではスロッシング時と自由振動時の振動数に開きがあるのは、平板深さ6cmにおいて明確な振動数のピークが見られないことによるものと考えられる。

次に、平板の径を変え、平板深さ2cmにおける振動数の計測を行った。その結果を表-3に示す。

表-3より、内容液無しでは、平板が大きくなる(質量が増える)ほど長周期化しており、内容液有りでも同様の結果となった。平板の径による波高軽減効果は図-11に示すように、 $\phi 34.5\text{cm}$ が最も効果的であったことか

ら、平板構造の振動数がスロッシングの振動数1.244Hzに近い支柱を選択すれば、最も効果的な波高軽減となり、動水圧も軽減されると考えられる。

表-3 支柱φ5mmの振動特性

平板 直径 c m	平板深さ 2cm : 固有振動数 Hz		
	内容液無	内容液有	
		1次	2次
25	2.44	2.20	2.56
34.5	1.71	1.22	1.83
45	1.22	0.43	1.22

内容液有りでの固有振動数は模型内での計測であり、支柱に変位を与えるとスロッシングが生じるため、その連成により1.244Hz周辺の振動数となっている可能性も考えられる。スロッシングの影響を回避できるように、大きく振動数の異なる水槽での実験についての検討も必要であると考えている。

5. 3 平板深さ

式(5)に示すように、指針では自由水の水深を0.3D程度としている。仮に平板によって内容液の動きが阻害され、平板上部の内容液だけが自由振動できる領域となっていないか確認を行った。確認法は、平板深さ=内容液の水深と考えて、平板を設置せずに水深だけを変えて最大波高を確認する実験を行い、併せて式(4)にて波高を求めた。その結果を図-4に書き加えたものを図-15に示す。

固定水の領域と考えられる平板深さまたは水深では、平板の有無に関わらず、波高6.7cm付近となっており、速度ポテンシャル理論の式(4)とも波高がほぼ一致する。しかし、自由水の領域になると波高に差が見られ、単に平板が内容液の動きを阻害し、見かけ上の水深が平板より上部のみとなることで、波高を軽減しているわけではないことが分かる。

指針で規定されている自由水の水深を式(5)で求めると17.4cmである。図-15においてこの水深をみると波高が小さくなり始めており、式(5)は妥当と考えられる。また、この平板深さの最大波高をみると約3cmで、ノーマルの水深における波高約6.5cmに比べて約1/2の波高であり、かなり軽減されている。

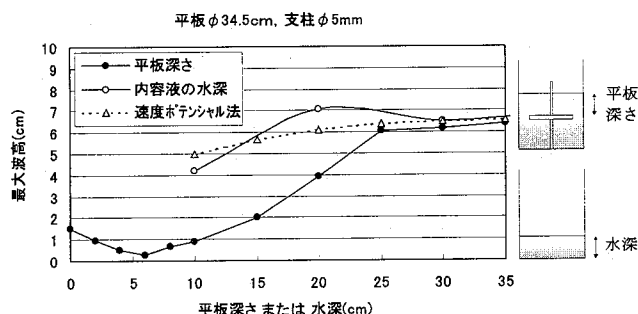


図-15 平板深さまたは水深と最大波高

これらの結果から、波頭衝撃圧に対する固定屋根の耐

震性確保の方策として、内容液の水深を下げることも効果的ではあるが、その場合には容量不足の解消のため別途増容量が求められることとなり、平板構造を設置する方が経済的と考えられる。

6. 結論

円筒タンク模型の振動台実験から得られたスロッシング軽減に関する知見は以下の通りである。

- ① 模型タンク内に平板構造を設置することにより、スロッシングによる波高と動水圧を軽減できる。
- ② 平板深さによりスロッシング軽減の效果に差が見られ、自由水領域への設置が有効であった。
- ③ スロッシングの固有振動数は、平板を設置してもあまり変化しない。
- ④ スロッシングによる動水圧分布の形状は、平板を設置しても大きな変化は見られない。
- ⑤ 平板深さは水面から2波高(平板深さ0~15cm)程度であれば、スロッシングの軽減効果がみられ、水位変動を伴うタンクでも軽減効果が期待できる。
- ⑥ スロッシングの軽減には平板を支えるものが必要であり、スロッシング振動数と共振できれば、軽減効果が大きく、明確な波高のピークを持たなくなる。
- ⑦ 平板構造によるスロッシング軽減のメカニズムは波と平板の動きによる傾きの差や位相差によるものと推定される。
- ⑧ 平板によるスロッシング軽減効果を減衰定数で表わすと約1%となり、減衰だけでは波高の軽減効果を評価しきれない。
- ⑨ 平板の大きさはタンクの面積に対して19%程度でも軽減の效果がある。

スロッシング軽減のメカニズム解明の取組み並びに実設計への足がかりとして、数値解析を試みている。TDAPIIIにより、平板構造なしの解析モデルでは、内容液は速度ポテンシャル理論を用い、内容液の変位は小さく線形理論を適用でき、非圧縮、非粘性、非回転であるとした。内容液は軸対称液体要素、構造体はシェル要素、両要素間には連成面要素を用い、水面には液体表面要素を用いた。減衰定数は実験結果より0.34%を用いて、スロッシングの固有振動数は1.25Hz、波高は7.36cmとなり、実験値とほぼ一致した。しかし、平板構造ありのモデルでは、内容液を3次元液体要素としているが、実験結果を表現できていない。今後、浮き屋根の解析⁸⁾などを参考に、さらなる数値解析に取組む予定である。

参考文献

- 1) 濱田政則：巨大地震災害への対応，土木学会誌vol. 89 no. 9, pp11-15, 2004. 9.
- 2) 厚生労働省健康局：水道ビジョン，平成16年6月
- 3) 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. 7.
- 4) 川口，水田，高西：円筒タンクのスロッシング軽減に関する実験的研究，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. 31，2005. 7.
- 5) 高西，水田，川口：水平加振を受ける偏心二重円筒タンク内容液の動的挙動，構造工学論文集 Vol. 49A，pp. 57-64，2003.
- 6) 川口，水田，荒巻，北原：二重槽円筒タンク模型の振動特性，構造工学論文集 Vol. 50A，pp. 9-16，2004.
- 7) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997
- 8) 例えば，長沼寛樹，松田宏：浮き屋根式タンクのスロッシング解析手法に関する基礎的研究，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. 19-22，2005. 7
- (2005年9月10日受付)