

矩形貯槽におけるスロッシング挙動とその抑制方法に対する検討

A Study on the sloshing behavior and its suppression method for the rectangular tank

則竹一輝*・鈴木森晶**・奥村哲夫***・佐口浩一郎****・倉橋奨*****

Kazuki NORITAKE, Moriaki SUZUKI, Tetsuo OKUMURA, Koichiro SAGUCHI, Susumu KURAHASHI

*修(工), 大有建設株式会社 (研究当時: 愛知工業大学大学院) (〒460-8383 名古屋市中区金山五丁目 14 番 2 号)

** 博(工), 愛知工業大学教授, 工学部都市環境学科土木工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

***工博, 愛知工業大学教授, 工学部都市環境学科土木工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

****(株)日本アムスコ 名古屋 CAE 技術室(〒460-0003 名古屋市中区丸の内 3-19-5)

*****博(工), (株)エーアイシステムサービス(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

The damages of water tank, which gives rise to sloshing motions during an earthquake with long-period, have been reported in the present study. Herein, experimental studies have been performed to investigate the sloshing behavior of rectangular tank with the different dimensional aspect ratios, under the different excitation angles. In addition, the behavior of tank with a special aspect ratio (i.e., near to 1) has been examined in detail. Also, the sloshing suppression methods using plastic filters have been developed based on the present experimental results. Finally, the effective variables, such as position of filter installation, depth, length and area for the wall of tank, have been proposed.

Key Words: rectangular tank, sloshing, sloshing suppression, aspect ratio, excitation angle
キーワード: 矩形貯槽, スロッシング, スロッシング抑制, 寸法比, 加振角度

1. 序論

我が国では, 地震によるスロッシング現象の被害が数多く報告されている. 古くは, 1964 年の新潟地震や 1983 年の日本海中部地震の際に被害が報告されている. 近年では, 2003 年に発生した十勝沖地震 (M8.0)¹⁾, 2007 年の新潟県中越沖地震 (M6.8), 2011 年の東北地方太平洋沖地震 (M9.0) が記憶に新しい.

新潟地震や, 1995 年の兵庫県南部地震においては, 小規模な円形タンクが傾斜することによって, 甚大な被害を被った事例が報告されている. また, 十勝沖地震では, 円形の石油タンクの浮屋根が大きく揺れ, 浮屋根が破壊された. その結果, 内容液が漏れ出し, 火災が発生した²⁾.

一方, 新潟県中越沖地震では, 柏崎刈羽原子力発電所 6 号機原子炉建屋 4 階の矩形型使用済み核燃料プールにスロッシング現象が発生し, 内容液が溢流するという事故が発生した³⁾. また, 東北地方太平洋沖地震では, 使用済み核燃料プールだけでなく, 病院やマンション等の屋上に設置されている, 貯水用の比較的小規模な貯槽についての被害も報告されている.

スロッシング現象を抑制する方法としては, 古くは Miles らの研究があり, タンク上部壁面の水面下

にリングを取り付けるなどの研究がなされている⁴⁾. 浮屋根式の円形貯槽に対しては, これに類似した, 水面下にいわゆる抵抗板を設置する検討は数多くなされている^{例えば 5), 6)}. 最近では, 浮き屋根の下にスクリーンや重錘を取り付ける方法, 浮屋根の外周に緩衝材を取り付ける方法などの研究が進められている^{例えば 7), 8), 9)}. また, 矩形貯槽に対しても同様に, 抵抗板 (隔壁) や金網を設置して液面揺動を抑制する研究などが行われている^{例えば 10), 11), 12)}. さらに, 矩形貯槽は円形貯槽と異なり, 加振される角度, 貯槽の奥行き・幅寸法比および反射波が影響し, 液面揺動に変化を及ぼすことが分かっている¹³⁾.

ところで, 抵抗板など, これら抑制手法の多くは, タンク内に抑制装置を設置するために多くのスペースを要する場合も有る. また, 既設のタンクにおいては, 内容液の抜き取りが難しい等, 抑制装置の設置が困難な場合も想定される.

したがって, 本研究は, これら抑制装置の設置に際して, 内容液を抜き取ることなく設置可能な場合や, たとえ内容液を抜き取ることができたとしても, 一部の壁面しか設置ができない場合など, 制約条件が有る環境下を想定し, スロッシング抑制対策の検討を行ったものである. 具体的には, 矩形貯槽の奥行き・幅寸法比, 加振される角度を変更し, 矩形貯槽におけるスロッシング現象の挙動を詳細に把握し,

その結果を基に、矩形貯槽におけるスロッシング現象の抑制方法を検討する。

2. 実験計画

2.1 実験条件および実験概要

本研究では、まず矩形貯槽におけるスロッシング現象の挙動を把握するために、表-1に示すような貯槽の寸法比および入射角をパラメータにして加振実験を行った。表-1中の貯槽の奥行き(D)と幅(L)の比を寸法比(D/L)とし、入射角(加振される角度) θ に対する説明を図-1および図-2に示す。

これらの図は、寸法比(D/L)が1:3および3:1の貯槽において、入射角(加振される角度)を変更した場合の、上から見た模式図である。図に示す通り、幅と奥行きが異なる寸法の場合には、加振軸と平行な貯槽の辺を幅と設定し、入射角 θ を 0° とした。そして、同じ形状の貯槽であっても、入射角 $\theta=0^\circ$ のときに長辺が幅となる場合と、短辺が幅となる場合があり、幅と奥行きを入れかえて2通りの寸法比で実験を行った¹³⁾。実際には入射角を変更する毎に各寸法比において、長辺が幅となる場合と短辺が幅となる場合が存在するので、それぞれの幅に対する固有振動数の理論値周辺の振動数を入力して加振を行い、2通りの実験を行った。ここでは、寸法比の影響を調べるため、水深Hは0.10mと0.15mに固定し、加振振幅は $\pm 0.50\text{mm}$ とした。そして、寸法比が1:1のときは特異な挙動をすることが容易に想像できるので、表-2に示すように、寸法比を1.09~0.92まで細かく変更し、実験を行った¹⁴⁾。ここで、水深比(H/L)とは、内容液の水深Hを貯槽の幅Lで除したものであり、詳細は2.5で述べる。

表-3は、寸法比D/L=1:1.3の矩形貯槽を用いて、スロッシング現象の挙動を把握した後に行った、波高抑制効果のある装置についての実験パラメータである。これまでに筆者らの行った研究では、円形貯槽にプラスチック繊維の装置を設置することにより、スロッシング現象発生時の波高を抑制できることが分かっている¹⁵⁾。本研究では、過去の実験結果を基に、プラスチック繊維を用いた装置を矩形貯槽の内壁に設置した。使用したプラスチック繊維を写真-1に示す。装置は、厚さ3mmの亚克力板に厚さ約25mmのプラスチック繊維を接着させたものである。

装置の設置箇所は、矩形貯槽の内壁4面に設置したものを4面型、加振軸に対して平行な内壁に設置したものを加振軸平行2面型(以下、平行型)、加振軸に対して直交な内壁に設置したものを加振軸直交2面型(以下、直交型)、貯槽の角に設置したものを4つ角型とし、本研究ではこれら4つの設置箇所で、効果の違いを検討した。

また、浸漬比とは、装置が内容液に浸かっている深さの比率のことであり、装置が内容液に対して底

表-1 矩形貯槽における実験パラメータ

寸法比 D/L	1:3, 1:2, 1:1.3, 1:1 1.3:1, 2:1, 3:1 計7ケース
入射角 θ	$0^\circ \sim 90^\circ$ (15° 刻み) 計7ケース
水深 H	0.10m, 0.15m
加振振幅	$\pm 0.50\text{mm}$
合計	49 ケース

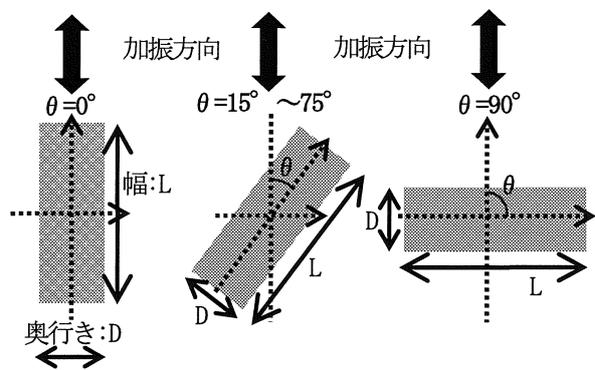
表-2 寸法比 1:1 近傍の矩形貯槽の実験パラメータ

寸法比 D/L	1.09, 1.04, 1.02, 1.01, 1.00 0.99, 0.98, 0.96, 0.92 計9ケース
水深比 H/L	0.094, 0.20, 0.54 計3ケース
入射角 θ	$0^\circ \sim 90^\circ$ (15° 刻み) 計7ケース
加振振幅	$\pm 0.55\text{mm}$
合計	189 ケース

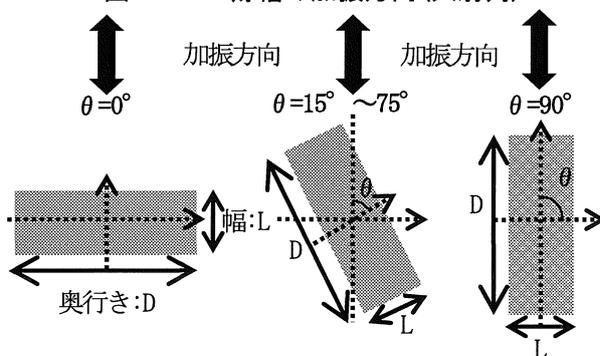
表-3 装置を設置した貯槽の実験パラメータ

設置箇所	4面型, 4つ角型(※), 加振軸平行2面型(平行型), 加振軸直交2面型(直交型),
加振振幅	$\pm 0.50\text{mm}$
浸漬比	1.0, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0
装置長	100%, 50%, 20%
寸法比 D/L=1:1.3	水深比 H/L=0.52

※全50ケース、ただし、4つ角型は装置長20%のみ実施



(a) 0° 時 (b) $15^\circ \sim 75^\circ$ 時 (c) 90° 時
図-1 1:3貯槽の加振方向(入射角)



(a) 0° 時 (b) $15^\circ \sim 75^\circ$ 時 (c) 90° 時
図-2 3:1貯槽の加振方向(入射角)

まで浸かっていたら 1.0 とし、半分だけ浸かっていたら 0.5 とする。同様に 0.0 は装置が浸かっていない状態であるが、本研究での浸漬比 0.0 とは、装置を内溶液水面に接するように設置したものとす。装置長は、D または L のうち長い方に対する装置の長さである。なお、水位については、 $H/L=0.52$ で一定に保ち、抑制装置の浸かっている長さを変化させた。

2.2 貯槽概要

本研究で実験に用いた矩形貯槽の寸法を表-4 に示す。表中の寸法比 (D/L) とは、貯槽の奥行きを幅で除した値である。なお、前節で述べた通り、奥行きと幅の寸法が異なる貯槽は、加振方向に対する幅を 2 通り設定し実験を行った。

表-4 に示した No. 1~4 の貯槽は表-1 の実験に使用した。No. 5 の貯槽は、表-2 に示した、 $D/L=1$ 近傍の実験に使用した。また、波高抑制効果の検討をした実験(表-3 の実験パラメータ)には、No. 3 の貯槽を用いた。実際に装置を設置した貯槽を写真-2 に、矩形貯槽の一例を、写真-3 および 4 に示す。なお、No. 5 に使用した貯槽(写真-4)は、貯槽内部に設置した亚克力板を移動させることで寸法比を変更することができ、実験を行った際には亚克力板が動かないように固定して実験を行った。

表中の No. 3 の貯槽は、長辺と短辺の比率が柏崎刈羽原発の使用済み核燃料プールと同じである。

2.3 加振方法

実験は、貯槽を振動台の上に載せ、油圧サーボ型試験機で正弦波を入力して加振した。図-3 に、加振方法の模式図を示す。ここで、水深を H 、最大波高を ΔH とし、波高の計測は貯槽の四隅にて行い、その中の最大値が更新されなくなるまで計測した。また、加振振幅と入力振動数の計測には、東京測器社製の変位計 DDP-10A ($0.01 \times 10\text{mm}$) を使用した。振幅は、それぞれの加振条件において、貯槽から溢流しない程度の振幅 ($\pm 0.50\text{mm}$ および $\pm 0.55\text{mm}$) を採用した。

2.4 固有振動数の理論値

矩形貯槽のスロッシング n 次モードの固有振動数 f (Hz) の理論値は水深 H (m)、重力加速度 g (m/s^2)、貯槽の幅 L (m) を用いて式(1)より求める¹⁶⁾。

本研究では、表-4 に示した貯槽について、固有振動数の理論値付近でスイープ試験を行った。各振動数において、貯槽の数点で加振時の最大波高を観測し、最も波高が高かった振動数を、実験より得られた固有振動数 f とした。

本研究では、最大波高が最も高くなり、溢流の危険性が最も高い 1 次モードで実験を行った。なお、式(1)より、貯槽の水深 H 、幅 L が変化すれば固有振動数の理論値も変化する。そのため、例えば寸法比 1:3 の場合においては、図-4 に示すように、幅方向

表-4 実験に用いた貯槽の寸法およびパラメータ

No.	寸法比(D/L)	奥行き D (m)	幅 L (m)	高さ (m)
1	1:3	0.283	0.884	0.45
2	1:2	0.287	0.536	0.36
3	1:1.3	0.437	0.588	0.45
4	1:1	0.438	0.438	0.45
5	0.92~1.00:1.00	0.980~0.900	0.900	0.75

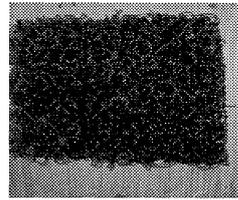


写真-1 プラスチック繊維の装置

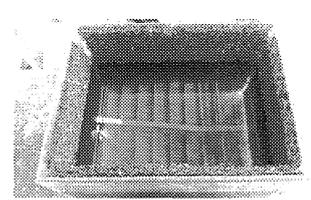


写真-2 装置を設置した貯槽

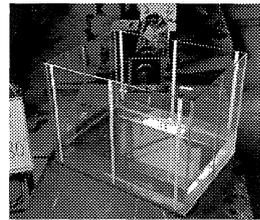


写真-3 寸法比 1:1.3 の貯槽 (No. 3)

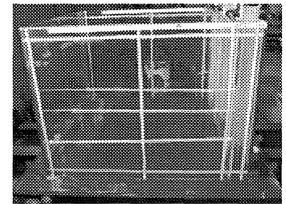


写真-4 寸法比 1:1 近傍の貯槽 (No. 5)

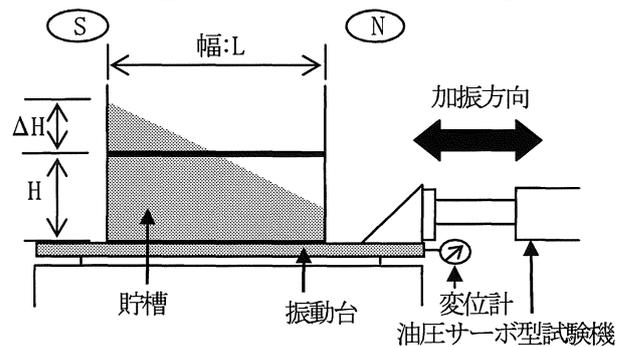


図-3 加振方法の模式図

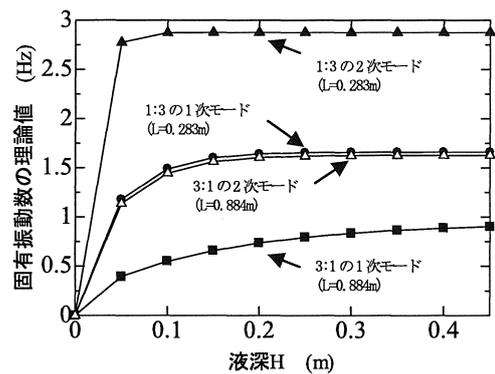


図-4 1:3 貯槽における水深-固有振動数の関係

(1:3 貯槽) の 1 次モードと、奥行き方向 (3:1 貯槽) の 2 次モードの固有振動数の理論値が重なりあう。このような場合には、液面揺動を注意深く観察した。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g \cdot \tanh\left(\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right)}{L}} \quad (1)$$

2.5 水深比による違い

図-5 に、貯槽幅(L)が 0.90m の場合の、水深比と固有振動数の理論値の変化を示す。実験では、水深比(水深 H/貯槽幅 L)を変化させて加振を行った。式(1)より、貯槽の水深(H)と貯槽幅(L)を変化させることによって、固有振動数の理論値も変化する。

図-5 より、H/L がある値以上では、固有振動数がほとんど変化しなくなることが分かる。そこで本研究では、図-5 中の印を付けた3箇所、すなわち、固有振動数が大きく変化している領域(H/L=0.094, f=0.50Hz), 固有振動数がほとんど変化しなくなる領域(H/L=0.54, f=0.90Hz), 2つの領域の中間部分(H/L=0.20, f=0.70Hz), の3種の水深比で実験を行い、水深比による違いを比較した。

その結果、加振時の最大波高には違いが見られたものの、どの水深比でも同じような液面揺動を示した。従って、以後は H/L=0.094 および H/L=0.20 を中心に論ずる。

3. 実験結果

3.1 固有振動数に沿った液面揺動

表-4 の No. 1~4 の貯槽を用いた実験結果について述べる。

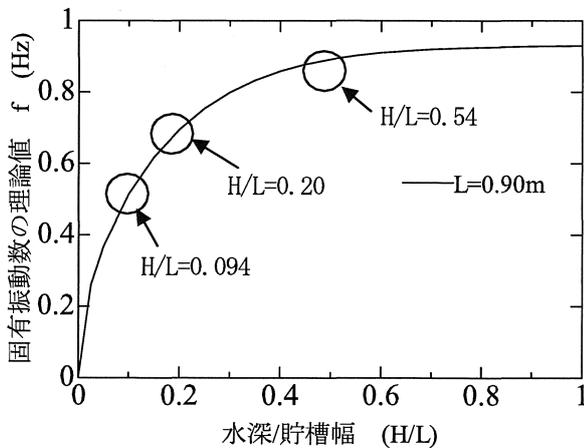


図-5 H/L-固有振動数の理論値の関係

矩形貯槽は円形貯槽とは異なり、幅方向と奥行き方向の2つの固有振動数が存在する。ここでは、さらに、矩形貯槽の入射角 θ を変化させていくことが、液面揺動にどのように影響するのかを調査した。図-6 に、3:1貯槽を例にとり、幅方向の振動数(0.66Hz)で加振した場合と、1:3貯槽の幅方向の振動数(1.60Hz)で加振した場合の模式図を示す。

加振振動数を幅方向の固有振動数に固定し、表-1 に示す入射角 θ にてそれぞれ加振した場合、図-6 のように、水深および入射角 θ が同じでも、入力振動数により、幅方向の液面揺動が支配的となった。

3.2 入射角を変化させたことによる影響

入射角 θ を変化させた場合の固有振動数は、 $\theta = 0^\circ$ の時の固有振動数の理論値周辺にあると推測し、理論値の前後の値で加振試験を行い、実験値の固有振動数を求めた。また、振動数の計測は、振動台に取り付けた変位計を用いて、10回振動する時間を5回計測し、その平均から周期を求め、加振時の入力振動数を算出した。入射角 θ を $0^\circ \sim 90^\circ$ まで変化させて行った試験により得られた、各貯槽の入力振動数-最大波高関係の一例を図-7~図-9 に示す。

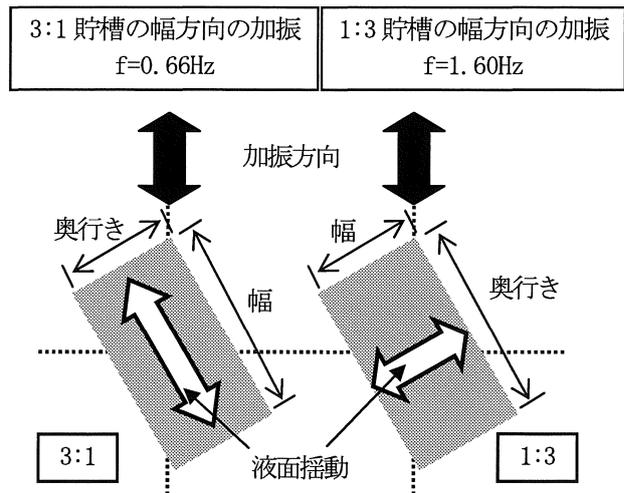


図-6 固有振動数に沿った動きとなる液面揺動 (水深 0.15m, 1:3貯槽と 3:1貯槽の場合)

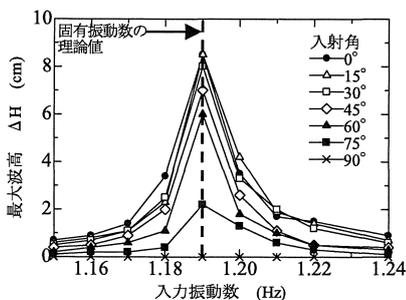


図-7 1:1.3貯槽の入力振動数-最大波高関係(水深 0.15m)

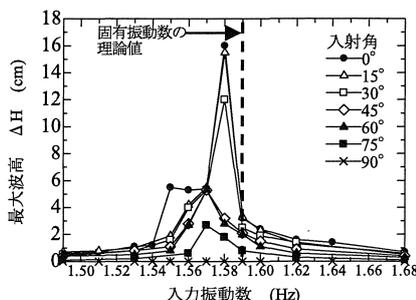


図-8 1:2貯槽の入力振動数-最大波高関係(水深 0.15m)

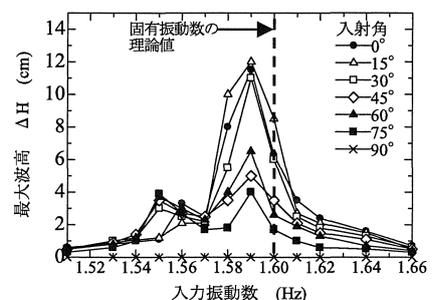


図-9 1:3貯槽の入力振動数-最大波高関係(水深 0.15m)

これらの図より、 $\theta=0^\circ$ におけるスロッシング 1 次モードの固有振動数は理論値とほぼ一致した。入射角を変化させた場合でも、 f の変化は $\theta=0^\circ$ に対し $0 \sim 0.02\text{Hz}$ であり、大きく変化はしなかった。また、入射角 θ を変化させるにつれて、波高は徐々に小さくなった。そして入射角 $\theta=75^\circ$ の場合であっても、波高は小さくなるものの、いずれも幅方向の固有振動数 f に沿った液面揺動が支配的であった⁶⁾。しかし、 $\theta=90^\circ$ になると幅と奥行きが完全に逆転するため、 $\theta=0^\circ$ の振動数では液面揺動が見られなかった。以上より、矩形貯槽は入射角 θ を変えた場合でも、 $\theta=0^\circ$ の時と固有振動数はほとんど変化しないということが分かった。

なお、図-9 に示す 1:3 貯槽の場合には、1:3 貯槽の 1 次モードの振動数の理論値周辺 ($f=1.60\text{Hz}$) に、3:1 貯槽の 2 次モードの振動数 ($f=1.56\text{Hz}$) が重なることにより波高が一部高くなる結果となった。

3.3 入射角-最大波高の関係

図-10 および図-11 に、水深 0.15m と水深 0.10m のときの各貯槽の最大波高 ΔH の変化の様子を示す。入射角が $\theta=0^\circ$ の状態から加振し、その都度最大波高を記録し、 90° まで θ を徐々に変化させた物である。各貯槽は寸法が異なるため、縦軸は最大波高 ΔH を貯槽の幅 L で無次元化した。ただし、貯槽の寸法比などが異なるため、 $\Delta H/L$ の大きさの変化で比較することは困難である。そのため、 $\theta=0^\circ$ 時の $\Delta H/L$ が 1 になるように正規化を行なった。こうすることで、 θ の変化による $\Delta H/L$ の変化がより明確になる。図中には参考として余弦曲線 ($\cos \theta$) を示す。

図-10 より、1:1 貯槽は奥行きと幅の寸法が同じであるため、他の矩形貯槽と挙動が異なり、1 つの固有振動数しか存在しない。そのため、入射角 θ を変化させた場合でも、 $\Delta H/L$ が他の貯槽のような変化をせず、液面が対角方向に揺れることが確認された。

また、図-11 より、1:1 貯槽は水深 0.10m の場合、入射角 $\theta=45^\circ$ のときに液面が貯槽の対角方向に大きく揺れ、 0° 時と比べて波高が 2 倍以上に高くなった。水深 0.15m の場合には、入射角 θ を 0° から大きくしていくと、一旦どちらかの壁面に沿った液面揺動を示すが、最終的に最大波高の出現位置が壁面に沿って回転するような現象が発生した。1:1 以外の寸法比の貯槽では、水深 0.10m および 0.15m のどちらにおいても、入射角 θ を 0° から大きくしていくことにより、 $\Delta H/L$ は余弦曲線に沿うような形で減少していく。これは、入射角 θ を変えた場合、幅方向の液面揺動と加振の方向が同じ方向ではないため、加振力が余弦成分のみとなるためと考えられる。なお、 $D/L=1.0$ 近傍の詳細な検討は次節で行う。

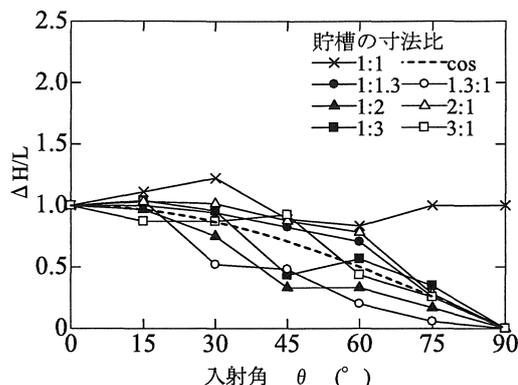


図-10 入射角-正規化した最大波高の関係 (水深 0.15m)

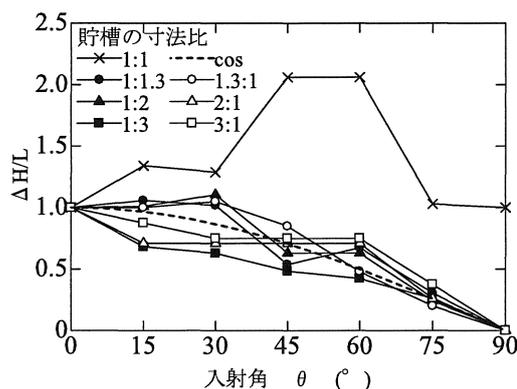


図-11 入射角-正規化した最大波高の関係 (水深 0.10m)

3.4 寸法比 1:1 近傍におけるスロッシング現象

これまでの実験結果より、貯槽の奥行きと幅の寸法が一致している寸法比 1:1 の場合においては、入射角 θ を変化させると、対角方向 (特に $\theta=45^\circ$ のとき) に大きな液面揺動が発生することが分かった。この原因としては、幅と奥行き方向の固有振動数が一致しているため、それぞれの方向に液面揺動が発生しようとした結果、波が合成されて液面揺動が大きくなったと推測される。

そこで、寸法比 1:1 の状態から、幅:L を一定とし、奥行き:D だけを幅:L に対して 10%以内で変化させて加振を行った場合の液面揺動について調査した。つまり、幅と奥行き固有振動数をわずかに異なるものにした場合において、寸法比が液面揺動に与える影響を調べた。なお、寸法比 1:1 近傍における加振実験では、表-4 に示した貯槽の No.5 を使用して実験を行った。

(1) 入力振動数-最大波高の関係

先に行った実験より、入射角 θ を変化させても、固有振動数の理論値はほぼ変化しないということが分かっている。そのため、貯槽の寸法比 1:1 近傍における実験でも、入射角 $\theta=0^\circ$ 時の理論値周辺で、 θ を 90° まで変化させ、各 θ で加振試験を行った。結果の

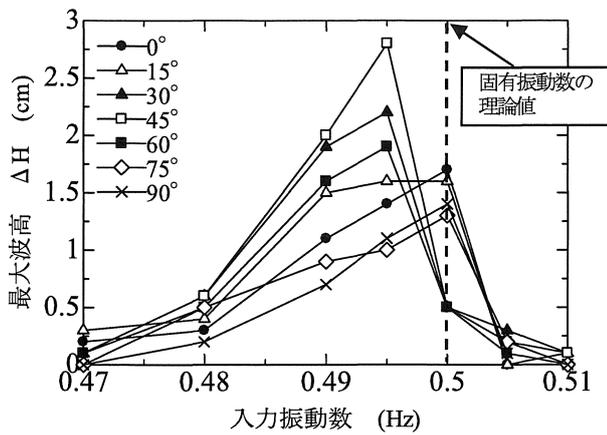


図-12 H/L=0.094 D/L=1.00 貯槽の
入力振動数- ΔH の関係

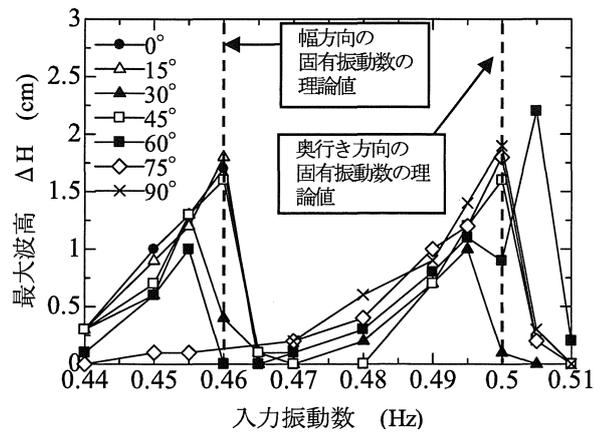


図-13 H/L=0.094 D/L=0.92 貯槽の
入力振動数- ΔH の関係

一例を、図-12 および図-13 に示す。横軸と縦軸には、それぞれ、入力振動数と最大波高 ΔH をとってある。ここで、 D/L の値が 1.00 の場合には、奥行き: D と幅: L の寸法が同一ということになり、値が 1.00 より大きいと奥行き: D が幅: L に対して長くなり、値が 1.00 より小さくなると奥行き: D が幅: L に対して短くなる。

図-12 および図-13 を見ると、3.2 節で述べた実験と同様、入射角 θ を変化させても固有振動数の理論値周辺で最大波高 ΔH が最も高く、理論値とほぼ一致する結果となった。

また、図-13 を見ると、 $D/L=0.92$ の場合には、幅方向と奥行き方向の固有振動数が 0.04Hz 異なる。そのような場合には、異なる 2 つの振動数において最大波高が高くなる明確な 2 つのピークが見られた。

(2) 寸法比 1:1 貯槽における入射角-最大波高の関係

図-14 に水深比 $H/L=0.094$ 、図-15 に水深比 $H/L=0.20$ の場合の各寸法比 D/L における最大波高 ΔH の変化の様子を示す。縦軸は理論値付近の最大波高 ΔH を水深 H で無次元化し、さらに $\theta=0^\circ$ 時の $\Delta H/H$ が 1 となるように正規化した。横軸は入射角での変化を見るため、入射角 θ とした。また、図中には参考として余弦曲線 (cos) を示す。

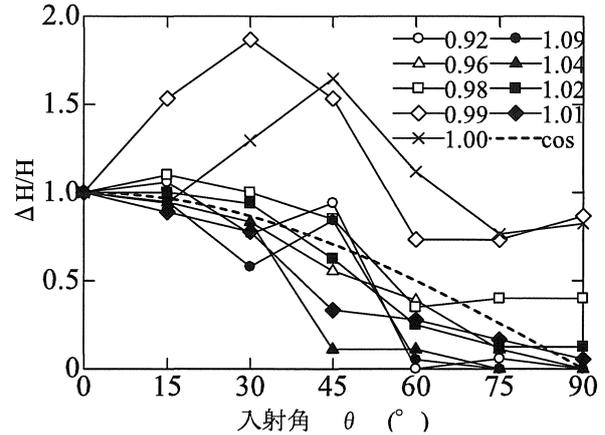


図-14 入射角-正規化した $\Delta H/H$ の関係 ($H/L=0.094$)

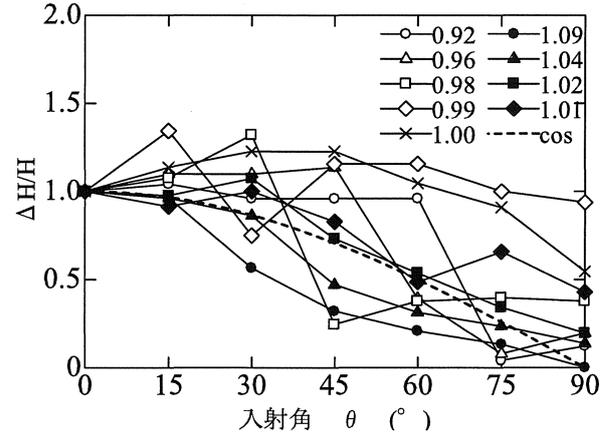


図-15 入射角-正規化した $\Delta H/H$ の関係 ($H/L=0.20$)

これらの図から、寸法比 D/L が 1.00 および 0.99 の場合は、入射角 θ を 0° から 90° まで変えていくと、 0° 時に比べて最大波高 ΔH が 2 倍程度になっている。一方で、寸法比 D/L を約 4% 以上変化させたケース ($D/L \leq 0.96$ および $D/L \geq 1.04$) では、 $\Delta H/H$ は 1 を大きく上回ることはなかった。

また、このケースの特徴として、入射角 θ が $0^\circ \sim 30^\circ$ までは $\Delta H/H=1$ 付近の値であるが、 $30^\circ \sim 60^\circ$ の間で波高が急激に減少する傾向が見られた。

ところで、実際の地震動はさまざまな振動数を含んでいるため、理論上の固有振動数とは異なる振動数で加振されることは十分に考えられる。言い換えると、図-12 に示すように、理論上の固有振動数とは異なる振動数において波高が最大となる場合があり、液面揺動が最大となる振動数で加振される可能性がある。今回の実験では、表-5 に示すように、寸法比を 1.09~0.92 まで変化させることにより、固有振動数は最大で 0.04Hz の差が生じた。そこで、ここでは固有振動数差と最大波高の変化に着目し整理する。図-16 および図-17 には、各固有振動数差 (Δf) における各入射角 θ での最大波高 ΔH をプロットした。

これらの図より、最大波高の変化は幅と奥行き固有振動数差 Δf が 0.01 以内 (D/L が 2% 以内) の場合は、入射角 $\theta=45^\circ$ を中心に、 0° 時よりも波高が高

表-5 寸法比の違いによる固有振動数差 Δf

寸法比: 奥行き/幅 (D/L)	幅:L(幅:D) (m)	奥行き:D (奥行き:L) (m)	固有振動数の差 Δf (Hz)
1.09 (0.92)	0.90	0.980	0.04
1.04 (0.96)	0.90	0.938	0.02
1.02 (0.98)	0.90	0.918	0.01
1.01 (0.99)	0.90	0.910	0.005
1.00	0.90	0.900	0

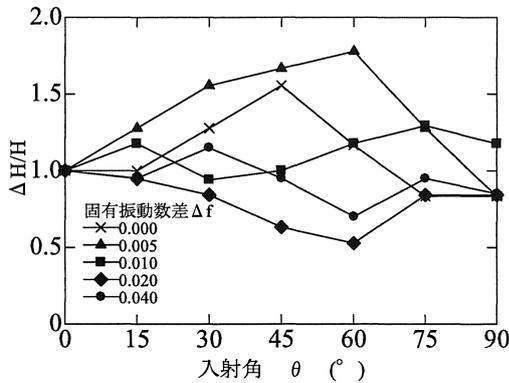


図-16 Δf の入射角-最大波高の関係 (H/L=0.094)

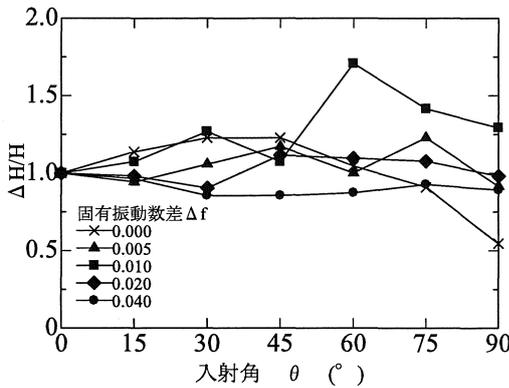


図-17 Δf の入射角-最大波高の関係 (H/L=0.20)

くなる可能性があることが分かる。しかし、固有振動数差 Δf が 0.01 を超えると、入射角 θ を変えても波高は著しく高くなり、 $30^\circ \sim 60^\circ$ の間では 0° のときと比べると、低い波高を示す場合もある。

以上より、寸法比 D/L が 0.98~1.02 の場合、 θ が $30^\circ \sim 60^\circ$ の間で、 $\Delta H/H$ が 2 倍近くとなる可能性があることが分かった。

4. 波高抑制装置を設置した実験結果

本研究では、矩形貯槽のスロッシング現象の性質を把握すること、および、抑制方法を検討することが目的である。矩形貯槽のスロッシング現象の挙動は、入射角 θ や寸法比 D/L に大きく左右されることが判明し、条件によっては波高が $\theta = 0^\circ$ の場合と比較して 2 倍程度となることも分かった。実際の矩形貯槽では、ほぼ満水近く貯水されていることがほとんどで、地震により固有周期に近い振動数で加振される

と、溢流、または、貯槽の天井を破壊する危険性が非常に高いと言える。

そこでここでは、これまでに得た矩形貯槽のスロッシング現象の結果を活かして、スロッシング現象の抑制方法を検討した。具体的には、先に述べたように貯槽の内壁に波高抑制効果がある装置を取り付け、その効果を検討した。実験パターンは表-3 に示す通りで、貯槽は、表-4 の No. 3 (1:1.3 貯槽) を使用した。既存の貯槽に取り付けることを想定し、設置条件の検討も行う。

4.1 固有振動数の変化

式(1)より求めた固有振動数の理論値付近で加振試験を行った。その結果の一例を図-18 に示す。横軸には入力振動数、縦軸には最大波高 ΔH をとり、図中には装置を設けないときの波高 (non) も表示する。

図-18 から分かるように、波高抑制装置を取り付けることによって、波高が最大 1/10 程度まで大きく抑えられていることが分かった。また、卓越振動数が高周波へ移動していることが分かる。

卓越振動数が高くなった原因としては、貯槽の内壁に装置を設置したことによって、貯槽の幅:L が狭まったことが考えられる。式(1)には、貯槽の幅:L が使用されており、L の値が小さくなる、つまり、貯槽の幅:L が狭まると、固有振動数の理論値は高い値を示すようになる。狭まった貯槽の幅:L を式(1)に代入し、理論値の算出を行うと、 $f=1.13\text{Hz}$ 付近となり、4 面型と直交型については卓越振動数が 1.11~1.13Hz となった実験結果とおおむね一致する。すなわち、理論値では貯槽の幅:L が支配的なパラメータとなっているので、固有振動数が変化したのではないかと推測できる。一方で平行型と四つ角型については、幅:L だけでは説明ができないが今後の課題としたい。

4.2 浸漬比による効果の違い

貯槽の水深が深く、貯槽の底まで装置を取り付けられない場合を考慮し、浸漬比を 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0 と変化させ実験を行った。図-19 に設置箇所ごとの最大波高を示す。ここで、装置を付けていない場合の最大波高を ΔH 、装置を付けた場合の最大波高を Δh と定義する。そして装置を取り付けた場合の最大波高 Δh を、装置を付けていない場合の最大波高 ΔH で除したものを $\Delta h/\Delta H$ として表し、無次元化を行い縦軸にプロットした。つまり、装置がない場合は $\Delta h/\Delta H$ が 100% となる。また、横軸は浸漬比とする。

図-19 から設置箇所、装置長によって差はあるが、装置を設置することで、装置がない状態と比べ、最大波高は 1/2 から 1/10 程度に抑えられている。また、例えば図-19 (c) に示すように、全体的な傾向として、設置箇所、装置長に関係なく、浸漬比が 0.2 以上で

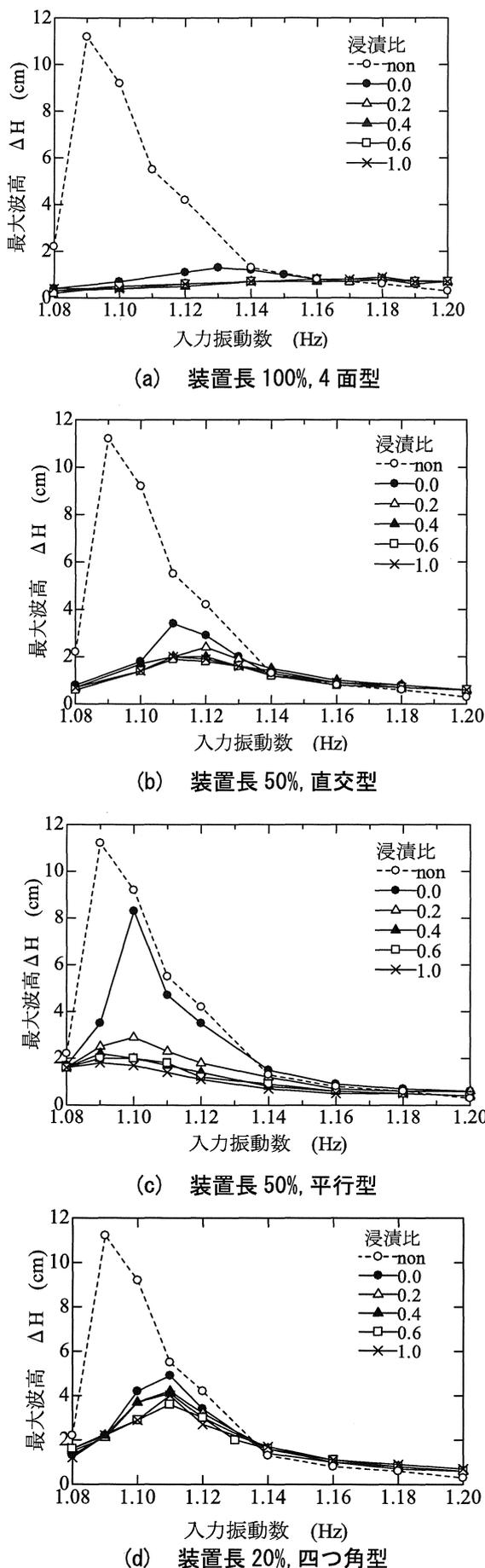


図-18 設置条件による結果の違い

あれば、0.0 の場合と比べて、波高抑制効果が大きいことが分かった。さらに、0.4 以上であれば、浸漬比をこれ以上大きくしても、波高抑制効果はほとんど変化しないことが分かった。

したがって、装置が内溶液にわずかでも浸かっている状態であれば、波高抑制効果を十分に得られることが分かった。内溶液に装置が沈んでいない浸漬比 0.0 の場合でも、装置を適切な位置、今回の場合であれば、4 面、加振軸直交 2 面(直交型)に配置することにより、装置を取り付けていない状態の最大波高と比べ、4 割程度まで抑制できることが分かった。さらに、加振軸平行 2 面(平行型)に配置した場合でも、装置長が 100%であれば、装置を取り付けていない状態の最大波高と比べて 1/3 程度に抑制することができ、十分に効果があることが分かった。

4.3 装置長による効果の違い

装置を全面に設置できない場合を考慮し、装置長を 100%, 50%, 20%と変化させ実験を行った。結果を図-20 に示す。

図-20 は図-19 と同様に、縦軸には無次元化した最大波高 $\Delta h / \Delta H$ を示した。横軸は装置長とする。また、浸漬比 0.2, 0.4, 0.6 では結果に有意な差が見られなかったため、浸漬比は 0.0, 0.2, 1.0 の場合のみ記載する。

図-20 から、全体的な傾向としては、装置が長くなるにつれて波高抑制効果が大きくなることが分かった。また、設置パターンが平行型かつ浸漬比が 0.0 の場合を除き、装置長が 20%以上であれば、装置を取り付けていない状態の最大波高と比べ、最低でも 4 割程度まで抑制できることが分かった。

以上より、装置が奥行き D に対して 20%という長さでも、適切な位置に装置を取り付けることにより、十分に波高を抑えられることが分かった(図-20(c) 参照)。

4.4 設置面積による評価

前節までの検討結果より浸漬比、装置長、設置箇所のパラメータから、内溶液に浸かっている装置の面積の比を用いて、スロッシング現象抑制効果について評価する。

1 面あたり装置が内溶液に浸かっている面積の比と波高の関係を図-21 に示す。縦軸には装置を付けた場合の最大波高 Δh を、装置がない場合の最大波高 ΔH で除した値をとり、横軸には内壁 1 面の面積を装置長に浸漬比を乗じた面積の比とする。なお、このときの面積は 100%の場合 0.135m^2 となり、設置位置はできる限り水面に近い位置とする。また、全データから最小二乗法を用いて求めた近似曲線を図中に実線で示す。しかし、データにはばらつきが多く見られたため、標準偏差分だけ上方へシフトした近似曲線を破線で示す。

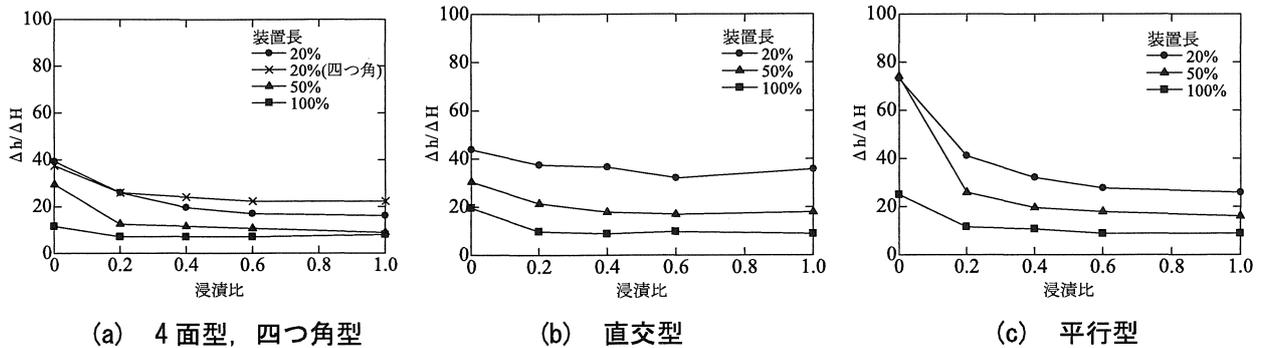


図-19 浸漬比ごとの最大波高の変化

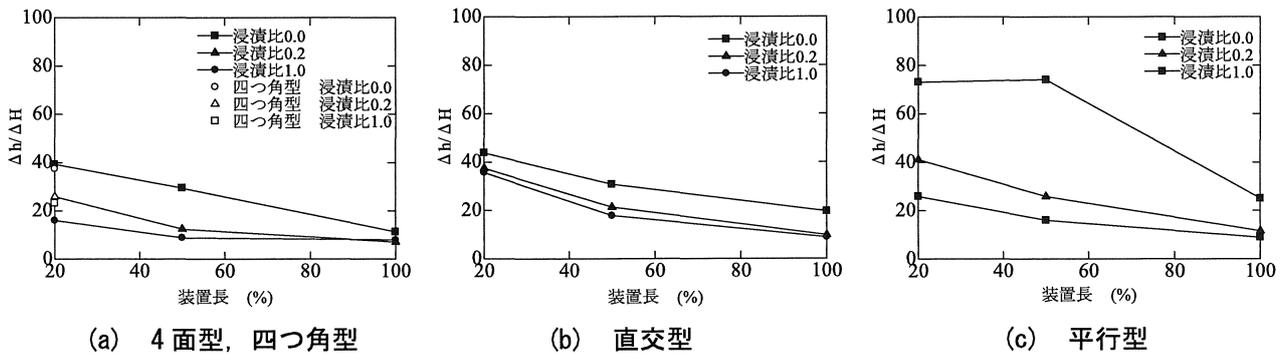


図-20 装置長ごとの最大波高の変化

図の近似曲線から分かるように、装置が1面に対して10%程度浸かっている状態であれば、設置箇所に関わらず、波高は半分程度に抑えられることができ、30%浸かっている状態であれば、波高は3割程度以下に抑制することが可能である。また、1面あたりの浸かっている面積が40%以上では、面積を大きくしても、抑制効果はほとんど変わらないことが分かった。

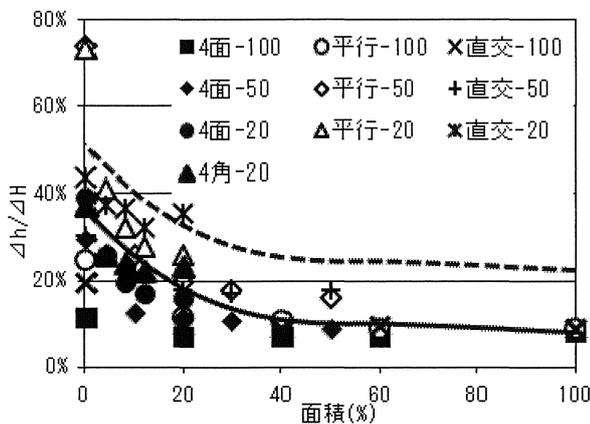


図-21 設置面積による近似曲線

5. 結論

本研究では、矩形貯槽のスロッシング現象の挙動把握、ならびに矩形貯槽の内壁部分に波高を抑制する装置を取り付け、スロッシング現象発生時の波高がどのように変化するかを調査し、その抑制効果に

ついて検討した。本研究の結果を下に示す。

- (1) 幅と奥行きで寸法が異なる矩形貯槽は、幅方向と奥行き方向で異なる固有振動数を持つため、それぞれの固有振動数で加振した際には、入射角を変更しても、入射角に関係なく、固有振動数に沿った動きとなる。
- (2) 寸法比が 1:3 という特異な寸法の矩形貯槽では、幅方向の 1 次モード固有振動数と、奥行き方向の 2 次モード固有振動数が重なり、固有振動数付近では液面揺動に変化が生じた。
- (3) 寸法比が 1:1 の矩形貯槽では、幅方向と奥行き方向の固有振動数が一致しており、入射角が 45° 付近においては幅方向と奥行き方向、双方に液面揺動が発生しようとして波が合成され、対角方向に波高が大きく出る結果となった。
- (4) 1:1 の寸法比の貯槽を、幅、奥行きのどちらかの寸法を 4%以上変化させることにより、入射角を変更しても、最大波高は著しく高くなるケースは見られなかった。
- (5) 矩形貯槽の内壁に、波高抑制効果のある装置を取り付けることによって、装置を取り付けていない状態の最大波高と比較し、最大で 1/10 程度に波高を抑制することができた。
- (6) 近似曲線より、装置が 1 面あたり 10%程度の設置面積でも、波高を半分以下にすることができる。また、波高を 1/5 程度以下に抑制したいのであれば、1 面あたりの装置の面積を 30%以上設置することが望ましい。

謝辞：本研究は科学研究費(基盤研究(C) 22560486 代表：平野廣和)の研究助成により行った。また、実験に際しては、愛知工業大学振動実験室により行った。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 堀郁夫, 川端鋭憲: 地震による石油タンク火災の技術的考察と社会問題, 社会技術研究論文集 Vol. 2, pp. 414-424, 2004. 10.
- 2) 山田實: 平成 15 年十勝沖地震による石油タンクの損傷について, 予防時報 219 号, 2004. 10.
- 3) 豊田幸宏, 田中伸和: 平成 19 年新潟県中越沖地震時に発生した使用済燃料貯蔵プールの溢流を伴うスロッシング挙動評価, 電力中央研究所 2008 年度研究年報, pp. 94-95, 2009. 6.
- 4) Miles, J. W.: Ring Damping of Free Surface Oscillations in a Circular Tank. Journal of Applied Mechanics, vol. 25, no. 2, pp. 274-276, 1958. 6.
- 5) 川口周作, 北原伸浩, 水田洋司, 菅付紘一, 高西照彦, 松浦一郎, 円筒タンクのスロッシング軽減に関する実験的研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, I-619, pp. 1235-1236, 2005. 9.
- 6) 吉住文太, 榎本洋二: 大型タンクにおける地震時のスロッシング応答-抵抗板によるスロッシング抑制効果を CFD と等価線形解析で予測-, 三井造船技法 No. 190, pp. 31-38, 2007. 3.
- 7) 高西照彦, 水田洋司, 川口周作: 一自由度振動系を設置した浮屋根による円筒タンクのスロッシング波高の低減, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1-10, 2009. 3.
- 8) 鈴木亨, 中山昭彦, 野田博: 地震動による石油タンク液面揺動抑制に関する研究, 建設工学研究所論文報告集, 第 51 号, pp. 143-152, 2009. 11.
- 9) 井田剛史, 平野廣和, 鈴木森晶, 坂東謙, 佐藤尚次: 浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策- ϕ 0.6m タンクモデルの振動実験, 土木学会論文集 A, Vol. 63(2007), No. 1, pp. 242-251, 2007. 3.
- 10) 渡辺昌宏, 小林信之, 本多智一, 大野克徳, 本井久之: 隔壁挿入による矩形容器内液体スロッシングの制振特性, 日本機械学会論文集(C編)67 巻 657 号, pp. 204-211, 2001. 5.
- 11) 浦田喜彦: 水平抑制板を用いたスロッシングの抑制法(長方形タンクにおける基本的検討), 日本機械学会論文集(C編)67 巻 657 号, pp. 50-57, 2009. 1.
- 12) 池田達哉, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次: 矩形断面容器におけるスロッシング対策に関する一提案, 土木学会第 64 回年次学術講演会, I-269, pp. 537-538, 2009. 9.
- 13) Tomotsuka TAKAYAMA: Theory of transient fluid waves in a vibrated storage tank, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 15, No. 2, pp. 3-53, 1976. 6.
- 14) 則竹一輝, 鈴木森晶, 田中直貴, 青木徹彦: 加振角度を変えた矩形型貯槽の寸法比と水深比による液面揺動に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, I-668, pp. 1335-1336, 2011. 9.
- 15) 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥野祐朗, 奥村哲夫: 矩形貯槽のスロッシング現象抑制方法に関する実験的研究, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, I-6, pp. 11-12, 2012. 3.
- 16) 酒井理哉, 東貞成, 佐藤清隆, 田中伸和: 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 597-604, 2007. 3.

(2012 年 3 月 8 日 受付)