

実機貯水槽を用いたスロッシング挙動の把握

Research on Sloshing Behavior on Real Scale Water Tank

遠田豊*, 曾根龍太**, 小野泰介***, 井田剛史****, 平野廣和*****
Yutaka ENDA, Ryuta SONE, Taisuke ONO, Tsuyoshi IDA and Hirokazu HIRANO

*中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）
**中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）
***中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）
****博士（工学）（株十川ゴム 研究開発部（〒599-8244 大阪府堺市中区上之 516）
*****工博 中央大学総合政策学部 教授（〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1）

キーワード：スロッシング，正方形断面容器，加振方向角，実機貯水槽
(sloshing, square section, direction angle, real scale water tank)

1. はじめに

我国では、数秒から数十秒のやや長周期地震動による各種の地震被害が懸念されている¹⁾。その一例として、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)において、被害地域内の上水道配水施設での矩形タンクの破損被害や、震源から遠く離れた地方においても正方形タンクの破壊被害が多数報告された。東日本大震災ではこのように貯水タンクの被害により病院、学校の避難所でライフラインである水が十分に配給されず甚大な被害をもたらした。

このような種のタンク被害は、やや長周期地震動によりスロッシング現象（液面揺動の励起）の発生によるものと推定されている。これらの背景から、矩形断面容器におけるスロッシング挙動の把握ならびに対策の検討が必要とされている。

これを受けて本論では、まず矩形断面容器の中でも断面の各辺の長さが等しいことが特徴である正方形断面容器について、アクリル製の小型容器を用いてスロッシング挙動の把握を行う²⁾。そして、小型実験の結果を参考に実機の実機正方形ステンレス製パネル式タンクを用いて、加振方向角の変化がスロッシング挙動に与える影響に関して検討を行ったので、ここで報告する。

2. 貯水タンクの耐震仕様の現状

表-1 に給水貯水槽タンク耐震仕様法令変遷を示す³⁾。これによれば、1978年の宮城県沖地震と1995年の兵庫県南部地震の影響により、現在までに2度の改定が行われている。しかし、2度の改定後も水平方向の割増荷重

表-1 給水貯水槽タンク耐震仕様法令変遷

■1980年以前 水平震度:0.3G(鉛直震度は含まず)

■1980年 建築基準法施行令による設計水平震度

上層階・屋上及び塔屋	1.0G	1.5G
地下及び1階	2/3G	

■1997年 建築設備耐震設計・施工指針による設計水平震度

設置場所	耐震安全性の分類			
	特定の設備		一般の設備	
	重要水槽	一般水槽	重要水槽	一般水槽
上層階・屋上及び塔屋	2.0G	1.5G	1.5G	1.0G
中間階	1.5G	1.0G	1.0G	0.6G
地下及び1階	1.5G	1.0G	1.0G	0.6G



写真-1 仙台医療センターの被害状況



写真-2 つくば市における被害状況

といった静的な荷重の組み合わせで設計されており、動的な荷重を考慮した設計は行われていない。

上記で示した最新の設計指針が適用されたタンクにおいても東日本大震災で多数の破壊が報告されている。写真-1 に仙台市医療センター屋上での貯水タンク被害、写真-2 につくば市高エネルギー研究機構での貯水タンク被害の写真を示す。これらの被害は、地震の規模が大きかったこと、タンクの劣化や疲労が進行していたことが原因であると

されているが、根本の原因究明がなされていない。最新の設計指針においても「やや長周期地震動」によりタンクの中で発生するスロッシング挙動に関して、具体的な対処規定はなされていない現状となっている。

近い将来発生が予想される南海トラフでの巨大地震や首都圏直下型地震等で生じるやや長周期地震動により、タンクの中で発生するスロッシング挙動、さらにはタンク自体の破壊を防ぐべきである。これにより、災害時に最も重要なライフラインの一つである水を守るができる。そのためにも、実機のタンクを用いたスロッシング挙動の把握が必要とされる。

3. 正方形断面容器モデルのスロッシング挙動の把握

3.1 実験の概要

本実験には、図-1 に示す内側部 438×438×394mm のアクリル製容器を正方形断面容器モデルとして用いる。この正方形断面容器モデルに 120mm まで水を満たし、加振実験を行う。

応答波高の計測は、デジタルビデオカメラ（以下、DVC）を用いた非接触計測で行い、撮影したデジタル画像を元に画像処理を行うことで水面の応答波高を算出する。容器の左端部から 20mm 内側を計測ポイントとし、容器から 900mm 離れたところに DVC を設置する。その状況を写真-3 に示す。また、全体の水面形を把握できるように、容器から 2400mm 離れたところにも別の DVC を設置する。さらに、入力振動数の確認と容器と振動台が同調しているか確認するために、振動台と容器側面にそれぞれ一軸加速度計を設置する。加速度計設置状況、ならびに加振方向を写真-4 に示し、実験の全体の様子を写真-5 に示す。

一般に、スロッシング発生時に応答波高が最も大きくなるのは、入力振動数とスロッシング固有振動数が一致して共振した場合である。そのため、矩形水槽のスロッシング n 次モード振動数を式(1)の理論式⁴⁾で表すことができる。

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

ここで、 f はスロッシング固有振動数、 g は重力加速度、 L は容器の幅、 H は水深である。式(1)より、実験で用いる正方形断面容器のスロッシング 1 次、2 次モード振動数の理論値は、表-2 に示すようにそれぞれ 1.11Hz、2.30Hz である。

ところで、振動装置で設定できるパラメータは、振動数 [Hz]、振幅 [mm]、Wave count [回] の 3 つとなっている。加振実験の設定条件を表-3 に示す。応答波高が大きくなるスロッシング 1, 2 次モードの液面挙動に着目しているため、入力振動数は 1.1Hz、2.3Hz で加振実験を行なう。どちら

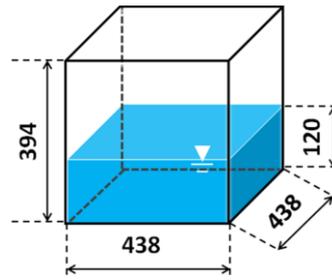


図-1 容器の寸法

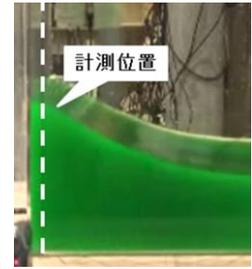


写真-3 波高計測位置

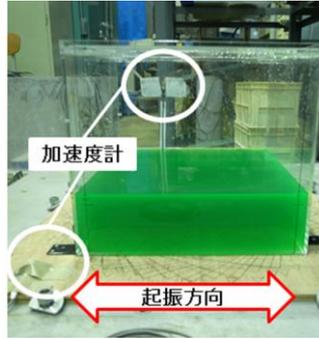


写真-4 加速度計設置状況

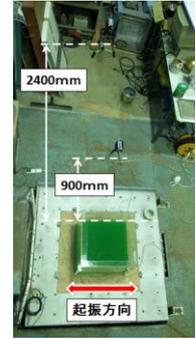


写真-5 実験状況

表-2 スロッシング n 次モード振動数理論値

水深 [mm]	容器の幅 [mm]	1次モード [Hz]	2次モード [Hz]
120	438	1.11	2.30

表-3 振動装置の設定条件

振動数 [Hz]	振幅 [mm]	加振時間 [s]
1.1, 2.3	±3.0	5.0

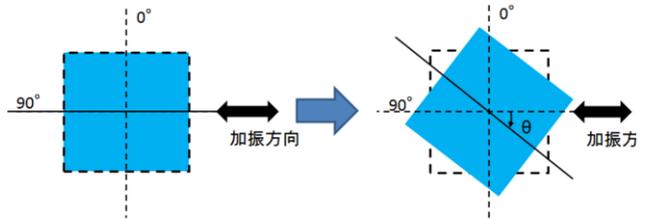


図-2 加振方向角の設定方法

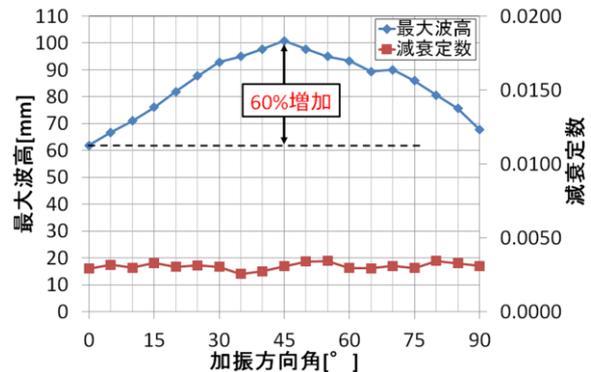


図-3 1 次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数

の入力振動数においても加振時間は 5 秒に統一し、振幅も ±3mm に統一する。

また、正方形断面容器を加振する方向角 θ を図-2の様に定義して、 $\theta=0^\circ\sim 90^\circ$ の間で 5° 間隔で設定する。加振方向角を変化させながら加振実験を行い、最大波高を計測してスロッシング挙動の違いを調べる。

3.2 実験結果

(1) 1次モードの検討 (1.1Hz 加振)

1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を図-3に示す。図-3より、1次モードでは、加振方向角を変化させていくと徐々に最大波高が増大し、加振方向角 45° の場合に最大波高が 101mm となり、加振方向角が 0° の場合に比べて、最大波高が約60%増加している。加振方向角 45° を超えると、最大波高が徐々に減少していき、加振方向角 90° の場合には最大波高が 68mm となり、加振方向角が 0° もしくは 5° の場合の最大波高と同等の値となっている。

図-4の(a)に加振方向角 0° 、(b)に加振方向角 45° の場合の加振から50秒間の応答波形を示す。加振方向角が 45° の場合には、最大波高を観測した後に約10秒間にわたって応答波高がほとんど減衰せず、一定の波高を示している。この様に、加振方向角が変化することで、スロッシング挙動に影響を与えることがわかる。

一方、減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず $0.0025\sim 0.0035$ と比較的に小さい一定の値となる。

(2) 2次モードの検討 (2.3Hz 加振)

図-5に2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。2次モードでは、加振方向角が $30^\circ\sim 75^\circ$ の場合に最大波高の値が50%程度増加している。加振方向角が 65° の場合に最大波高が 88mm と最も大きい値となっている。

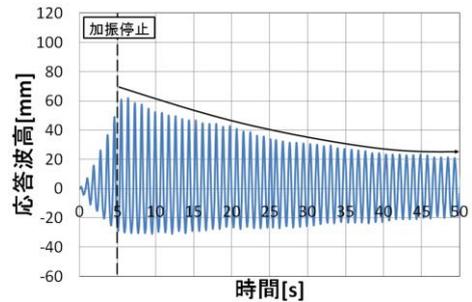
図-6の(a)に加振方向角 0° 、(b)に加振方向角 65° 場合の加振から50秒間の応答波形を示す。図-6より、加振方向角が 0° と 65° の場合を比較すると、加振方向角が 65° の場合の方が加振中に応答波高が大きくなっている。また、加振開始から約5秒後と約10秒後の2回にわたって応答波高が卓越していることがわかる。

以上のように、加振方向角が変化し液面形状、スロッシング挙動に影響を及ぼすことで、応答波高が増大することが考えられる。さらに、加振方向角が変化したことにより、回転する挙動が促されることも応答波高が増大した原因の一つと考えられる。

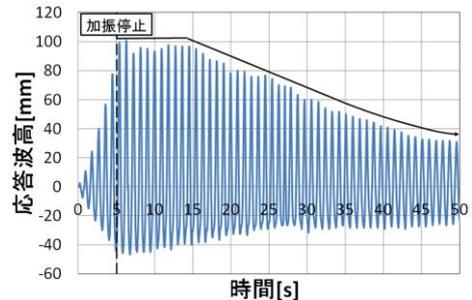
減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず $0.0030\sim 0.0050$ とほぼ一定の値をとることがわかる。

(3) 正方形断面容器の特徴

1, 2次モードそれぞれのモード形状において、加振方向角が変化することにより応答波高が増大することが見られた。そこで1, 2次モードの応答波形に着目したところ、加振方向角が変化したことにより、応答波形に影響を



(a)加振方向角 0°



(b)加振方向角 45°

図-4 1次モードの加振から50秒間の応答波形

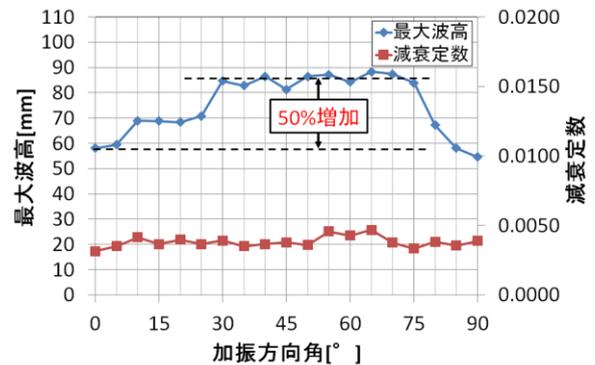
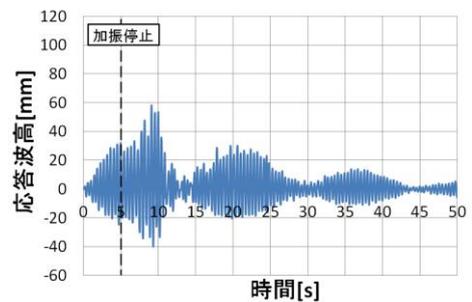
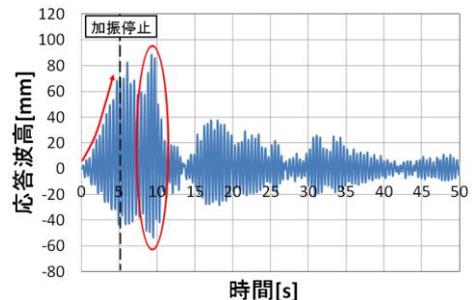


図-5 2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角 0°



(b)加振方向角 65°

図-6 2次モードの加振から50秒間の応答波形

与えることを確認した。また、2次モードでは、加振方向角により液面形状が変化することがわかった。

図-7に1次モード、2次モードの場合の各加振方向角におけるピーク振動数を示す。ここで理論値とは式(1)より求めた加振方向角 0° におけるスロッシング固有振動数であり、この値は容器の幅と水深に依存している。ところが、図-7に示すように、加振方向角が変化することで、加振軸上の容器の幅は変化するが、スロッシング固有振動数は加振軸上の容器の幅に依存せず、ほぼ一定の値を取っていることが確認できる。

4. 実機の貯水槽タンクのスロッシング挙動の把握

4.1 実験の概要

本実験には、図-8に示す様な内側部 $3000\text{mm} \times 3000\text{mm} \times 3000\text{mm}$ の正方形断面のステンレス製パネル式タンク（以下、タンク）を用いる。このタンクは、実際に上水の貯水に用いられるものと同一の仕様である。このタンクに 2700mm まで水道水を満たし、加振実験を行う。加振実験には、愛知工業大学が所有している大型振動装置を用いる。写真-6に実験全体の状況を示す。

波高計測には、レーザー変位計（以下、変位計）を1～4の4台用い、図-9に示す様に実タンクの上面に設置する。変位計の設置の狙いは、変位計1は隅角部での波高、変位計3は壁面付近での波高、変位計2、4は2次モードでの腹（山と谷）になる部分の波高を把握するために設置した。また、タンク内部のスロッシング挙動を把握するために、図-9に示す様にタンクの中心から壁面方向と隅角部方向をwebカメラで撮影する。

一般に最も波高が大きくなるのは入力振動数とスロッシングの固有振動数が一致して共振した場合であるので、矩形断面容器のスロッシング n 次モード振動数を式(1)の理論式⁴⁾より算出する。式(1)より、水深は 2700mm と統一し実験を行うので、スロッシング1次、2次モード振動数の理論値は、それぞれ 0.50Hz 、 0.88Hz である。そこで本研究では、1次モードは $0.47\sim 0.52\text{Hz}$ 、2次モード $0.86\sim 0.88\text{Hz}$ の範囲において、入力振動数を 0.01Hz 刻みで変化させながら加振実験を行うことで、実験に用いるタンクのスロッシング固有振動数の把握を行う。また、スロッシング挙動により内容液がタンクの天井に当たることで減衰が付加されてしまうことを防ぐために、いずれ振動数においても振幅は $\pm 3.0\text{mm}$ とする。加振装置の設定条件の緒元を表-4に示す。

また、前節で確認したように正方形断面容器は、加振方向角が変化することで、応答波高が著しく増大する。そこで本実験においてもタンクを加振する方向角 θ を図-2の様に定義し、 $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ の間で設定する。そして、加振方向角を 15° 間隔で設定し、加振方向角を変化させながら加振実験を行い、最大波高等を計測してスロッシ

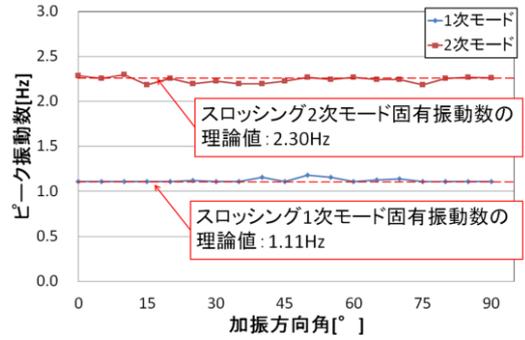


図-7 各加振方向角におけるピーク振動数

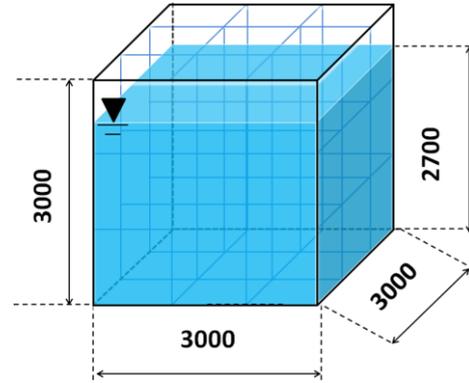


図-8 実験に用いるタンクの寸法



写真-6 実験全体の状況

表-4 加振装置の設定条件

	加振条件	入力振動数 [Hz]	振幅 [mm]	設定加振時間 [s]
1次モード	正弦波	0.47~0.52	±3.0	10
2次モード		0.86~0.88		

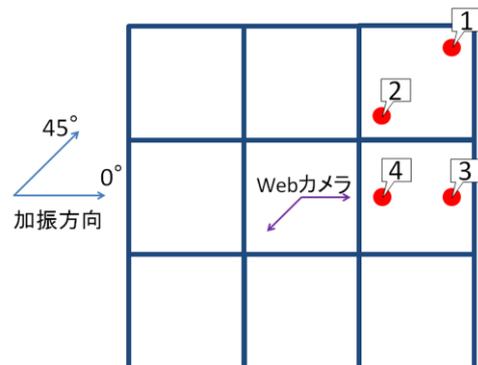


図-9 レーザー変位計とwebカメラの設置位置

ング挙動の違いを調べる。

4.2 実験結果

(1) スロッシング固有振動数の確認

図-10の(a)に1次モード、(b)に2次モードの各加振方向角における入力振動数と最大波高の関係を示す。いずれの加振方向角においても最大の値を示した変位計のデータを使用している。

図-10より、いずれの加振方向角においても1次モードでは0.49Hz、2次モードでは0.87Hzにおいて最大波高が卓越している。スロッシング固有振動数の理論式から得られたタンクの1次、2次モードの理論値はそれぞれ0.50Hz、0.88Hzであるので、タンクのスロッシング固有振動数は理論値とほぼ一致している。

(2) 1次モードの検討 (0.49Hz 加振)

図-11に1次モード0.49Hz加振の各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の変位を示した変位計の値を用いた。

図-11より、1次モードでは、加振方向角を増加させていくと徐々に最大波高が増大し、加振方向角45°の場合に最大波高が247mmとなり、加振方向角0°の場合の最大波高169mmと比べて、最大波高が約45%増加している。これは加振方向角の変化により実タンクの隅角部に内溶液が集中した結果、最大波高が大きくなったと考えられる。また、前節の実験結果より、加振方向角が45°を超えると最大波高が徐々に減少していき、加振方向角が90°の場合には加振方向角0°の場合と同等の値になると考えられる。

一方、減衰定数に関しては、加振方向角に依存せず0.0045~0.0055とほぼ一定の値を示した。

写真-7の(a)に加振方向角が0°の場合、(b)に加振方向角が45°の場合の隅角部の設定加振時の静止面を示す。

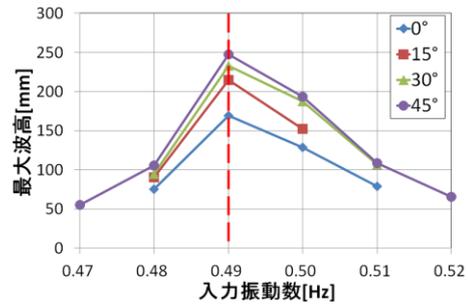
写真-7からも加振方向角が増加することで、タンクの対角線上で揺動し、加振軸上の隅角部で集中的に波高が大きくなっていることがわかる。

(3) 2次モードの検討 (0.87Hz 加振)

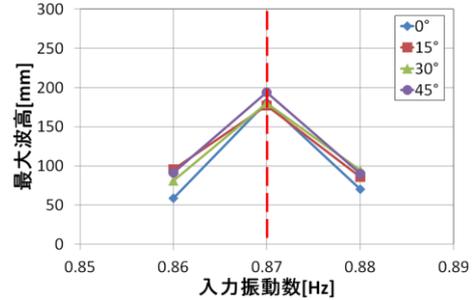
図-12に2次モード0.87Hz加振の各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。最大波高の値は、いずれの加振方向角においても最大の変位を示した変位計の値を用いた。

図-12より、2次モードの場合には、1次モードの様に加振方向角の変化が加振方向角の増加に顕著に繋がらなかったが、加振方向角45°の場合に最大波高が194mmと最大の値をとっている。

減衰定数に関しては、1次モードと同様に加振方向角に依存せず、0.001~0.002とほぼ一定の値を示した。加振



(a)1次モード



(b)2次モード

図-10 入力振動数と最大波高の関係

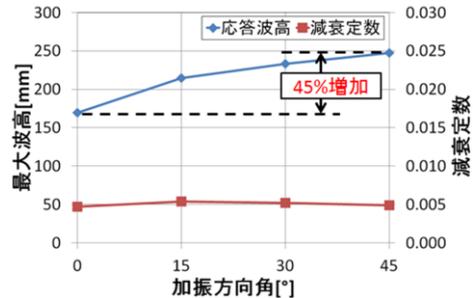
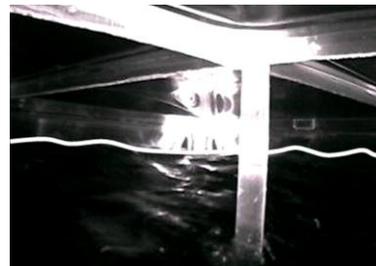


図-11 1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角 0°



(b)加振方向角 45°

写真-7 1次モードの隅角部の液面挙動 (設定加振中)

実験より、一度共振するとなかなか減衰せず、約20分間スロッシング挙動が継続することを確認した。

写真-8の(a)に加振方向角が0°の場合、(b)に加振方向角が45°の場合の隅角部の最大波高到達時の静止面を示す。写真-8より、2次モードでは加振方向角に関わらず、内容液が隅角部で砕波していることがわかる。このように2次モードでは内容液が砕波することによって、変位計でスロッシング挙動を計測することが困難になるため、いずれの加振方向角においても最大波高が200mm以上の値にならなかったと考えられる。さらに、タンク内部の映像より、いずれの加振方向角においても内容液が回転している挙動を確認することができた。

5. おわりに

本論文は、小型の正方形断面容器モデルを用いて、加振方向角を変化させながら加振実験を行うことで、加振方向角の変化によるスロッシング挙動の違いを検討した。そして、実機の正方形断面のステンレス製パネル式タンクを用いて同様の加振実験を行うことで、実機貯水槽におけるスロッシング挙動の把握を行うことを目的としてきた。まず、正方形断面容器モデルにおいては以下のことが得られた。

- (1) 1次モードは、加振方向角45°の場合に隅角部で集中的に波高が大きくなり、ここで最大波高が0°と比較し60%程度大きな値となった。
- (2) 2次モードは、加振方向角が30°~75°の場合に最大波高の40%程度の増加が見られた。
- (3) 正方形断面容器は、加振方向角が変化してもスロッシング固有振動数がほぼ一定である。
- (4) 減衰定数は、モード形状や加振方向角に関わらず0.0025~0.0050とほぼ一定の小さい値となった。

次に、実機貯水槽に関して、以下のことが得られた。

- (1) 1, 2次モードのスロッシング固有振動数は、理論値とほぼ一致した。
- (2) 1次モードは、加振方向角45°の場合に隅角部で集中的に波高が大きくなり、最大波高が0°と比較し約45%増加した。
- (3) 2次モードは、加振方向角の変化が加振方向角の増加に顕著に繋がらなかったが、加振方向角45°の場合に応答波高が最大の値を示した。
- (4) 2次モードでは、いずれも加振方向角においても砕波し、回転する挙動を確認した。
- (5) 減衰定数は、モード形状や加振方向角に関わらず小さい値となり、一度共振するとなかなか減衰しないことを確認した。

以上より、本論では正方形断面容器のモデル実験と実機貯水槽を用いた加振実験を行うことで、正方形断面容器におけるスロッシング挙動の特徴を把握することができた。モデル実験と実機貯水槽を用いた加振実験ともに加振方向角を変化させることで、スロッシング挙動に影

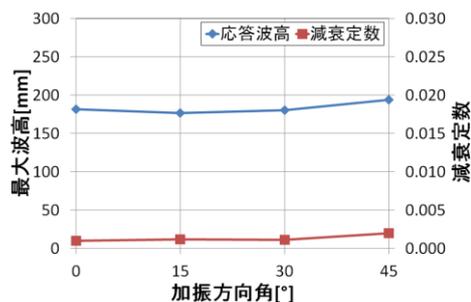


図-12 2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角0°



(b)加振方向角45°

写真-8 2次モードの隅角部の液面挙動（最大波高到達時）

響を与えることを把握した。特に加振方向角45°、1次モード加振時に隅角部で波高が著しく増大することを確認した。そのためスロッシング対策等を実施する場合には、隅角部での十分な注意と検討が必要である。今後の課題として、スロッシング挙動によって貯水槽に生じる動液圧やひずみなどを検討することで、貯水槽の性能限界の把握を行う予定である。

参考文献

- 1) 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. 53, 2007. 3.
- 2) 鈴木森晶, 奥村哲夫: 加振方向角を変えた矩形型貯水槽のスロッシング現象に関する基礎的実験, 土木学会第65回年次学術講演会, I-646, 2010. 9.
- 3) 一般社団法人リビングアメニティ協会 HP
- 4) 葉山眞治, 有賀敬治, 渡辺辰郎: 長方形容器におけるスロッシングの非線形応答, 日本機械学会論文集, 49巻 437号, 1983. 1.