

矩形断面容器におけるスロッシング複数モードの対策案に関する検討

Research on Sloshing Measures of Multiple Modes on Rectangular Section Container

池田 達哉*・井田 剛史**・平野 廣和***・佐藤 尚次****

Tatsuya IKEDA, Tsuyoshi IDA, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

*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)

**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)

****工博 中央大学理工学部土木工学科 教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The sloshing phenomenon might be caused by long-period ground motion. As a result of it, the storage liquid might overflow. The pool of the nuclear waste storage overflowed due to the Niigata Chuetsuoki Earthquake is the recent case. In this paper, shaking experimentation was conducted by setting up small tank of rectangular section on shaking table to make this cause clear. In addition, the effect of setting the net in small tank inside as one of sloshing measurement is explained.

Key Words : sloshing, noncontact measures, rectangular section, long-period ground motion

1. はじめに

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)で、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プール水が、オペレーティングフロア(管理区域)の全域にわたり溢れ出した。この状況が3号機に設置されているビデオカメラの映像記録より確認され、地震発生時に使用済み核燃料貯蔵プール水が大きく波打ち、水面と床の高さが30cmあったが、この高さを越える勢いで放射線管理区域外へ溢流した¹⁾。幸いにも発電所外及び発電所内における放射性物質の影響はなかったと報告されている。この原因の一つとして、地震動によりスロッシング現象が生じたのではないかと推定されている。

スロッシング現象による被害は、1964年新潟地震などにおいて度々発生しており、1983年の日本海中部地震でもタンクの浮き屋根や周辺設備等に被害の発生が確認²⁾されている。さらに、2003年の十勝沖地震では石油タンク火災2基、浮屋根沈没7基などの甚大な被害を被った。地震時に発生した第一火災では、リング火災、タンクヤード、タンク直近配管の3カ所で火災があった³⁾。

一方、地震発生が近いと言われている宮城県沖

地震、東海地震、東南海地震、南海地震等の海溝型地震、いつ起きても不思議でない直下型の活断層型地震などの地震は2~20秒のやや長周期の地震を強く励起する可能性が高いと予測されている。その際、大型容器の内部溶液が放射性物質や汚染物質であれば、溢流した場合には甚大な被害が生じる可能性が高い。そのため、円筒形である石油タンク、核燃料貯蔵プールなどの矩形水槽をはじめとして、各種大型容器におけるスロッシング現象の把握⁴⁾、さらにはスロッシング対策の必要性が挙げられ、浮き屋根の減衰対策⁵⁾や溢流の把握⁶⁾に代表される各種の研究がなされている。

これを受けて我々研究グループ⁷⁾では、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールの縮尺約1/20に相当する矩形断面容器を用いて、スロッシングの1次モードを中心に検討を行ってきた。この成果の一つでスロッシング対策案として、金網を容器内水槽中心部に設置することで、起振中の波高を抑制することができ、かつ減衰も増大することを確認した。具体的にはスロッシング1次モードにおいて最大波高は40%程度の低減が、減衰定数は3倍程度の増加である。

しかしながら実際に使用済み核燃料貯蔵プールで発生したスロッシングと思われる現象は、各種

映像や解析結果より1次ならびに2次モードが複合的に生じたと推定されるに至った⁸⁾。そこで本論文では、最大応答波高を示す1次モードに加えて、1次モードよりも砕波しやすく、かつ溢流する可能性が高い2次モードまで対応させる検討を行うこととする。具体的には、水槽の大きさを従来の研究の2倍の縮尺約1/10とし、さらに2次モードに対応させるために容器内に金網を複数枚設置して実験を行うこととする。

また、液体挙動把握及び応答波高算出の一つの方法として、デジタルビデオカメラ(以下DVC)を用いた非接触計測から、水槽側壁端部での液体の振動特性把握を行い、スロッシング減衰対策に関して検討を行う。さらに、縮尺の影響を把握するため、約1/10、1/20縮尺での加振実験結果の比較を行い、縮尺による影響がないことを確認し、本論文で提案する対策案の有効性の確認を行うものである。

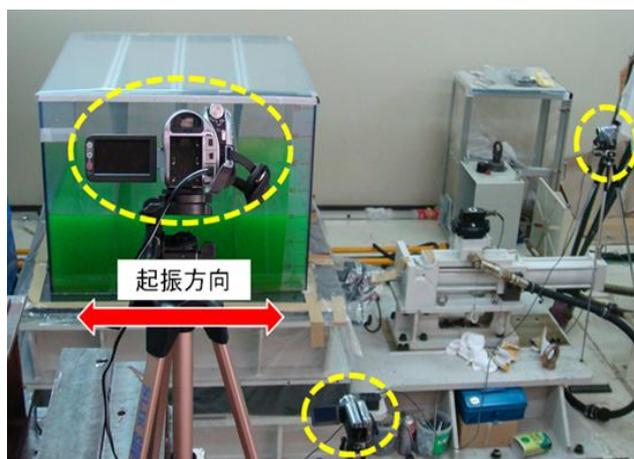


写真-1 実験状況 (約 1/10 縮尺モデル)

表-1 使用した金網の諸元

	type1	type2	type3
線径(mm)	2.0	1.6	1.4
目合い(mm)	4.4	4.8	5.0
開口率(%)	46.9	56.0	60.8

2. 実験概要

2.1 矩形水槽モデル

本実験に用いた矩形水槽モデルは、溢流した使用済み核燃料貯蔵プールの約1/10縮尺の水槽である。内側部1,100×1,000mm、高さ750mm、厚み10mmのPVC製であり、水を300mmまで満たしている。これらの水槽を振動台にボルトで固定する。実験状況を写真-1に示す。

なお、縮尺影響の比較のために既に研究結果⁷⁾として示した約1/20縮尺モデルは、内側部寸法580×280mm、高さ330mm、厚み10mmの小型矩形断面容器を採用している。これに220mmまで水を満たす。

2.2 金網による減衰機構

大型容器におけるスロッシング対策には、これまで様々な検討が行われてきた。この中で自由表面を有する矩形断面では、抵抗板を利用する方法が代表的な方法である。この方法は、流れ場を直接コントロールする方法で、機械的な要素が無く単純であり、安定した制振効果が期待できる。例えば自由表面付近に側壁から水平に抵抗板を設置したもの⁹⁾、鉛直方向に抵抗板を配置してここで生じる渦により減衰効果を得るもの¹⁰⁾などがある。しかし、これらは新設の構造物には設置し易いが、既存の構造物に設置する場合は、プールの水を抜くなどの施工上十分検討しなくてはならな

い課題が残っている。

これに対して、本論文で提案する方法は、プール内に金網を設置する方法である。この方法は、やや長周期の固有振動数を有する構造物の卓越した振動方向の制振装置として開発されたスロッシングダンパーの考え方¹¹⁾を応用したものである。本法は構造がシンプルであり、機械的な摩擦が無いので微振動から効果を発揮する特徴を有している。また、既存のプールなどに設置する場合は、一つの設置方法としてフレームに設置した状態で天井クレーン等を用いて水中へ降ろし、側壁などに固定する方法など簡単な施工ができる。この方法により期待できる効果は、スロッシングにより液体揺動が生じた時、液体が金網を通過するとき抵抗力が生じ、水の粘性が見掛け上大きくなることである。これにより、減衰が大幅に付加され、流速を抑えて波高を低減することができる。

本論文で用いた金網は、十分な剛性を有する亜鉛引織金網であり、広く入手可能なものである。表-1に金網の諸元を示す。ここで、開口率は各々46.9%、56.0%、60.8%とする。金網をL字アングルで固定して、起振方向に対して垂直に水槽を4等分する形で3枚設置する。

2.3 計測項目

水槽端部における応答波高を算出するために、水槽から1,200mm離れた所にDVCを設置する。そして、水槽端部を撮影した映像データをパソコ

ンに取り込み、1 コマ 1/30 秒のコマ送り機能を用いて、実単位での応答波高を算出する。さらに全体の水面形を把握するために、水槽から 2,300mm、側壁から 1,600mm 離れた所にも別途 DVC を設置する。

2.4 固有振動数の確認

一般に矩形水槽のスロッシング n 次の固有振動数 f (Hz) は、水深 H (m) と起振方向の幅 L (m) の関係から算出することができ、式(1)の理論式¹²⁾で表せられる。

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

式(1)より、実験で用いた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 0.76Hz、1.52Hz である。

表-3(1)に式(1)で示される理論値と比較のための加振条件を示す。加振実験は、矩形水槽をボルトで固定した振動台に、変位制御の正弦波加振で行う。式(1)より、1 次は 0.76Hz、2 次は 1.52Hz の ± 0.15 Hz の範囲で、加振回数を 20 回と統一して、片振幅 1.0、2.0、3.0mm、加振する。ここで複数の振幅を選んだのは、研究⁷⁾で論じた振幅依存性が無いことを再度確認するためである。

2.5 対策を施した実験の条件設定

前節での実験値との確認を行った上で、対策案である金網設置による加振実験を行い、対策無との比較を行う。ここで表-3(2)に示すように、対策案有無での加振条件は、1 次モード振動数は 0.73~0.79Hz、2 次モードは 1.49~1.55Hz までを 0.01Hz 刻みで、加振回数は 20 回に統一して行う。なお振幅は、波高の差が生じ易かつこの矩形容器での溢流限界を考慮して片振幅 3.0mm とする。

3. 実験結果

3.1 スロッシング挙動の確認

スロッシングの 1、2 次モード振動数(理論値)との確認をするため、制御可能で、波高の差異が確認しやすい表-3(1)に示す起振条件で正弦波加振を行う。加振振幅 2.0mm の時の振動数と発生する最大応答波高の関係を図-1 に示す。水深は 300mm で行い、この時の理論値はそれぞれ 0.76Hz、1.52Hz であるのに対し、最大応答波高が生じた固

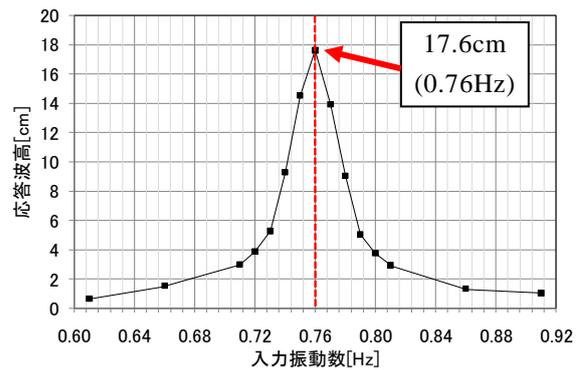
表-2 スロッシング 1,2 次モードの振動数理論値

起振方向の幅(mm)	水深(mm)	1次モード(Hz)	2次モード(Hz)
1100	300	0.76	1.52

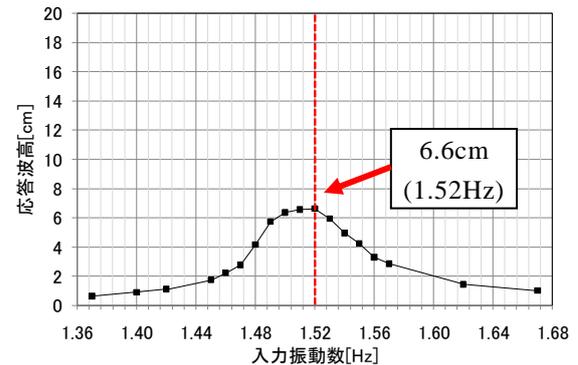
表-3 振動装置の加振条件

(1) 理論値との比較 (2) 対策案有無での比較

振動数(Hz)	0.61~0.91 1.37~1.67	振動数(Hz)	0.73~0.79 1.49~1.55
振幅(mm)	±1.0,2.0,3.0	振幅(mm)	±3.0
加振回数(回)	20	加振回数(回)	20



スロッシング 1 次モード共振域



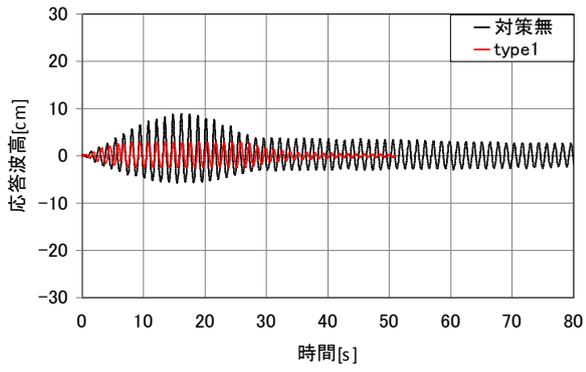
スロッシング 2 次モード共振域

図-1 最大応答波高と入力振動数の関係(加振振幅 2.0mm)

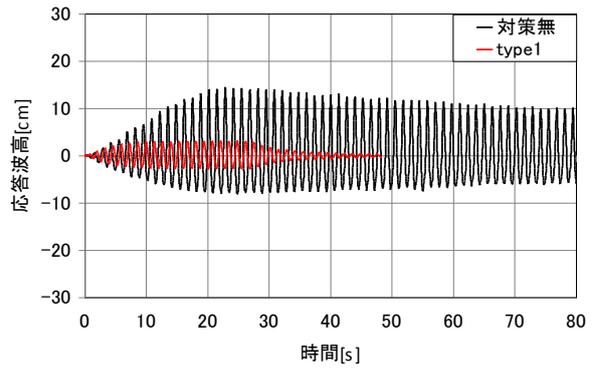
有振動数は 1 次、2 次それぞれ 0.76Hz、1.52Hz である。これより理論値と実験値が一致していることが確認できる。

1 次モードに関して、入力振動数 0.76Hz では最大応答波高 17.6cm を示したが、0.73Hz では 3.9cm、0.79Hz では 5.0cm を示した。これより、理論値である 0.76Hz とこの前後の振動数域を比較すると、1 次モードの場合、発生応答波高が大きく異なっていることが確認できる。

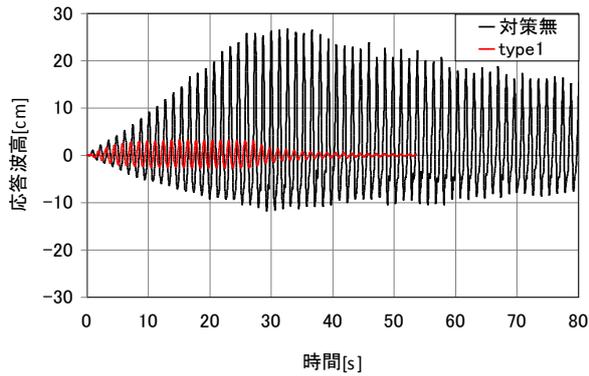
一方、2 次モードでは最大応答波高を示した振動数は 1.52Hz ではあるが、1 次モードと比較すると鋭いピークを示さず、1.52Hz を中心として ± 0.03 Hz でほぼ同等の応答波高を示している。さら



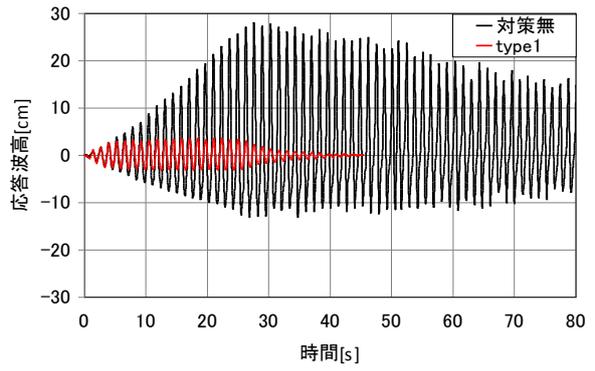
(1) 0.73Hz($f/f_0=0.961$)



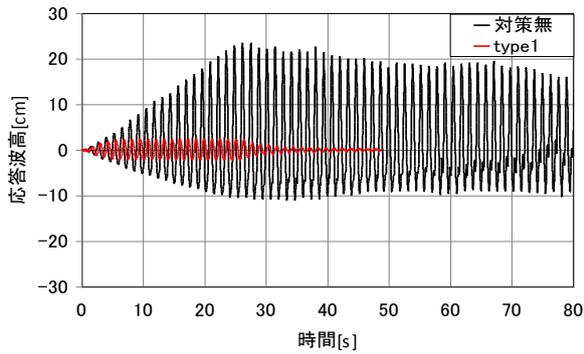
(2) 0.74Hz($f/f_0=0.974$)



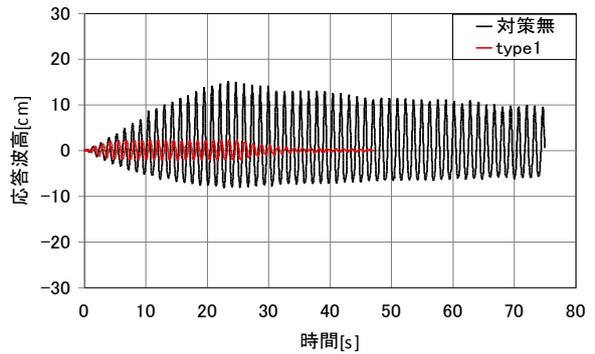
(3) 0.75Hz($f/f_0=0.987$)



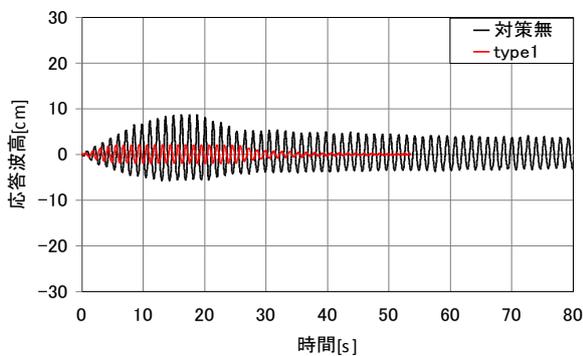
(4) 0.76Hz($f/f_0=1.000$)



(5) 0.77Hz($f/f_0=1.013$)



(6) 0.78Hz($f/f_0=1.026$)



(7) 0.79Hz($f/f_0=1.039$)

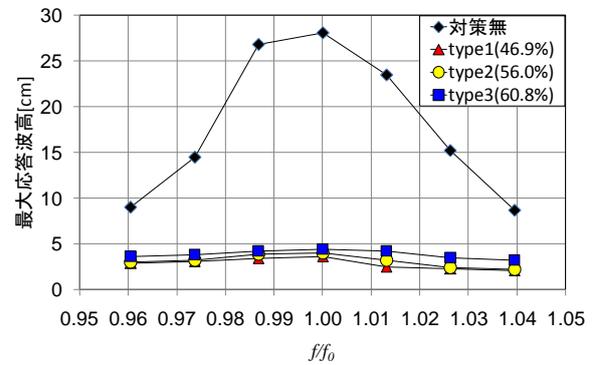
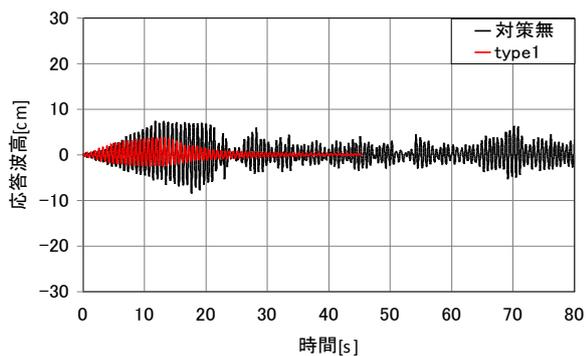
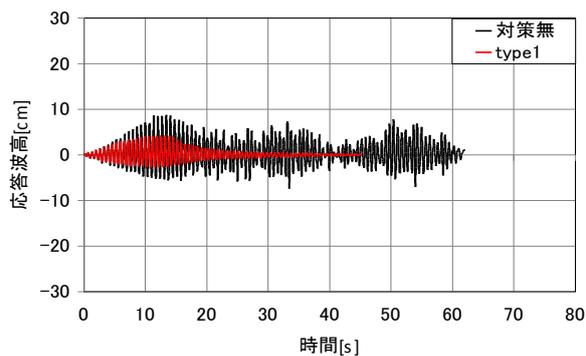


図-3 1次モード共振域における最大応答波高

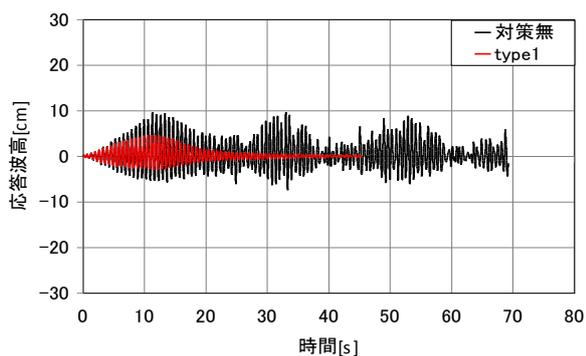
図-2 対策有無による応答波高波形
(1次モード共振域 $f=0.73\sim 0.79$ Hz, 加振振幅 3.0mm)



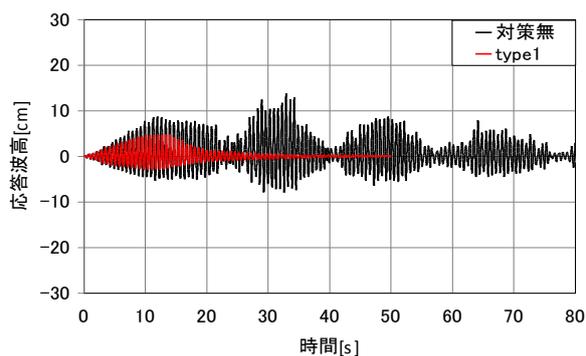
(1) 1.49Hz($f/f_0=0.980$)



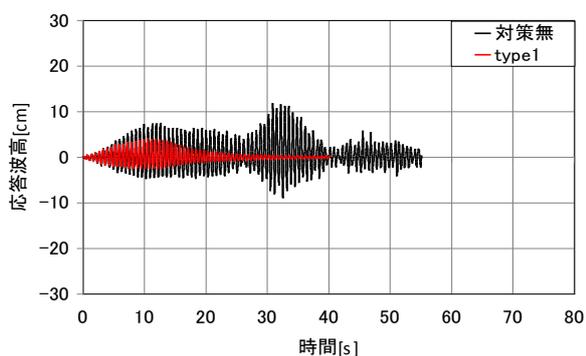
(2) 1.50Hz($f/f_0=0.987$)



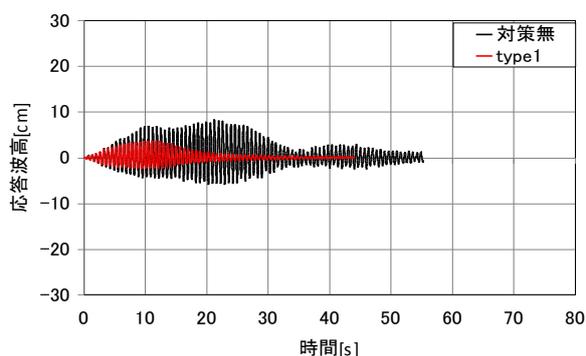
(3) 1.51Hz($f/f_0=0.993$)



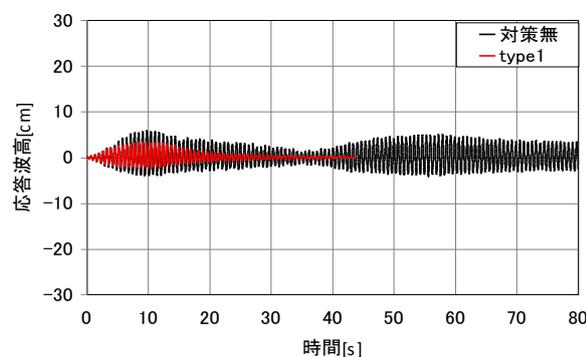
(4) 1.52Hz($f/f_0=1.000$)



(5) 1.53Hz($f/f_0=1.007$)



(6) 1.54Hz($f/f_0=1.013$)



(7) 1.55Hz($f/f_0=1.020$)

図-4 対策の有無による応答波高波形
(2次モード共振域 $f=1.49\sim 1.55$ Hz, 加振振幅 3.0mm)

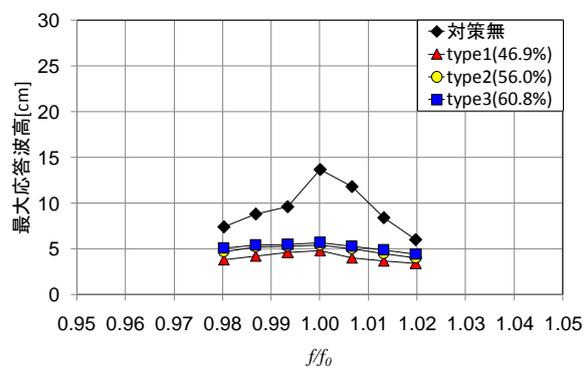


図-5 2次モード共振域における最大応答波高

に式(1)から水深を変化させても顕著な差がないことを考慮すると、2次モードの場合は、共振振動数を特定するのではなく、ある範囲の共振振動数を見出してからモード形状に対する対策を講じることが得策と考える。

3.2 1次モードにおける応答波高の比較

図-2(1)～(7)に1次モード共振域における対策有無の加振振幅 3.0mm の応答波高波形を示す。対策案として type1 の応答波高波形を示す。対策無、type1 とともに起振開始から徐々に波高が増加している。

理論値である図-2(4)の入力振動数 0.76Hz において、対策無は起振終了後自由振動となってから 60 秒経過したにも関わらず、 $-10\sim+20\text{cm}$ 程度の波高が生じており、さらに一度揺動し始めると容易に減衰しないことが確認できる。type1 では、起振開始から 8 秒程度経過した時の応答波高は 3.3cm であり、その後上昇時の勾配が対策無と比較すると緩やかで、起振中から波高を抑制している。さらに、10 秒程度で液面挙動がほぼ終息していることがわかる。

次に図-3に1次モード共振域での最大応答波高を示す。ここで、横軸は最大応答波高を示した入力振動数 f_0 (0.76Hz) で各入力振動数を除して無次元化したものを採用する。対策無の場合は、 $f/f_0=1.0$ における最大応答波高は 28.1cm であったのに対して、金網設置による最大応答波高は type1 では 3.6cm, type2 は 4.0cm, そして type3 では 4.4cm となった。type1 における波高低減率は 87% である。

3.3 2次モードにおける応答波高の比較

図-4(1)～(7)に2次モード共振域における対策有無の加振振幅 3.0mm 応答波高波形を示す。対策案として type1 の応答波高波形を示す。対策無の場合は、起振中に波高が徐々に増加し、自由振動となってからはビート状態になりながら減衰していき、この挙動は理論値に近い入力振動数において顕著に見られた。理論値である図-4(4)の入力振動数 1.52Hz において、最大応答波高は起振終了前後ではなく、起振終了後 20 秒経過した所で示した。これは、自由振動へ移行してから回転挙動が見られ、かつ計測ポイントを水槽側壁端部での応答波高を算出したためである。一方、type1 は起振終了後ビート状態ではなく、20 秒程度で液面挙動がほぼ停止していることがわかる。

図-5に2次モード共振域での最大応答波高を示

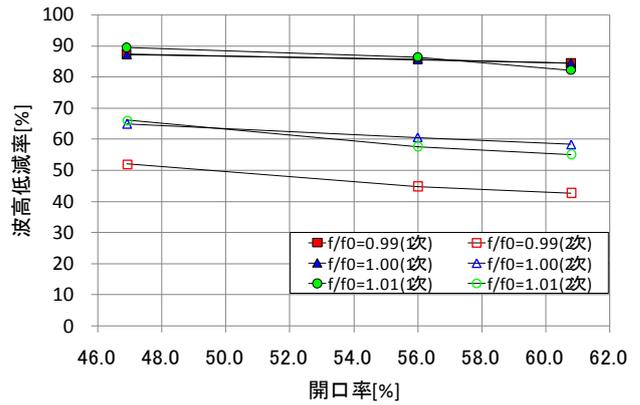
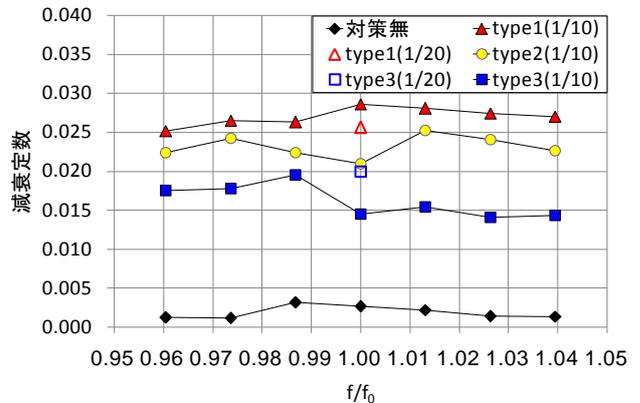
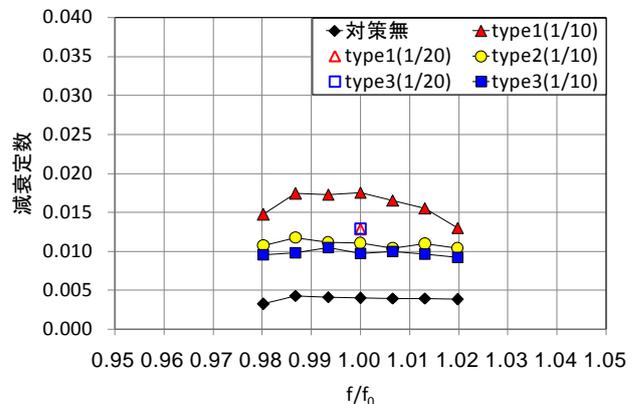


図-6 開口率と波高低減率の関係



(1) スロッシング 1次モード共振域



(2) スロッシング 2次モード共振域

図-7 各入力振動数における減衰定数

す。図-3 同様に横軸は、 $f_0(1.52\text{Hz})$ で除して無次元化している。対策無の場合は $f/f_0=1.0$ における最大応答波高は 13.7cm を示した。一方、金網設置による最大応答波高は、type1 では 4.8cm, type2 は 5.4cm, そして type3 では 5.7cm であり、対策無と type1 を比較すると波高低減率は 65% である。

ここで、座間らの研究⁶⁾によれば、スロッシング発生時の溢流現象は、20%程度の波高減少でも大きな効果が期待されると論じられている。その

ため本論文で得られたことから、十分な波高低減効果があると判断できる。さらに応答波高が大きい共振時ほど波高低減効果が顕著に表れることがわかる。

次に、図-6に金網の開口率と波高低減率の関係を示す。1次、2次モードともに開口率と波高低減効果の関係は、開口率が小さくなるに応じて波高が低減されており、この傾向はほぼ直線関係となっていることがわかる。

3.4 減衰定数の比較

図-7(1), (2)に非接触計測から算出した1次、2次モードのそれぞれの応答波高データから算出した減衰定数を示す。横軸は最大応答波高を示した入力振動数 f_0 で各入力振動数を除して無次元化したものを採用する。減衰定数の算出方法は、応答波高に固有振動数の $\pm 20\%$ の範囲でバンドパスフィルターをかけて算出した減衰波形を用い、式(2)からシンプレックス法による非線形最適化により算出した。

$$\eta(t) = Ae^{-\sigma_0 t} \cos(\omega_q t - \theta_0) \quad \cdot \cdot \cdot (2)$$

ただし、 ω_q は減衰角固有振動数、 h は減衰定数、 A は振幅、 θ_0 は位相差、 ω_0 は固有角振動数である。

対策無における減衰定数は、振動装置の入力振動数、波高や振動モード形状に依存せず、0.1~0.4%と一定の値を示している。この値は、従来から論じられている自由表面でのスロッシングの減衰定数として妥当な値であり¹³⁾、図-2、図-4に示す応答波高波形からも一度揺動すると液面挙動停止まで相当な時間を要することがわかる。一方、金網設置時においては、1次モード共振域である $ff_0=1.0$ では、type1 のとき減衰定数は 2.86%であり、対策無の 0.26%と比較すると約 10 倍程度増加している。

次に、2次モード共振域である入力振動数 $ff_0=1.0$ の場合は、type1 では減衰定数が 1.75%であり、対策無の 0.4%と比較すると 4 倍以上の増加が得られている。

これより、金網を設置することで減衰定数は全ての領域においても増加しており、かつ開口率が小さいほど増加している。これは液体が金網を通過するときの抵抗力が金網の開口率が小さいほどより大きくなるためであると考えられる。

3.5 水槽モデルの縮尺による振動特性の影響

図-7(1), (2)に、使用済み核燃料プールの起振方向における 1/20 縮尺時でかつ振幅 3.0mm の減

衰定数を比較として示す。ここで、1/20 縮尺モデルで用いた金網は、表-1 に示す type1 と type3 と同諸元の 46.9%, 60.8%である。1次モード共振域の $ff_0=1.0$ における減衰定数は、type1 において 1/10 で 2.86%, 1/20 で 2.56%, type3 では 1/10 で 1.45%, 1/20 で 1.99%である。2次モード共振域においても、 $ff_0=1.0$ における減衰定数は、type1 において 1/10 で 1.75%, 1/20 で 1.28%, type3 では 1/10 で 0.97%, 1/20 で 1.29%である。これより 1/20 縮尺モデルに比較して、起振方向 2 倍、奥行 3.6 倍となった 1/10 縮尺モデルと 1/20 縮尺モデルの減衰定数を比較すると、減衰定数と縮尺の依存性は少ないと考えられる。また、開口率でみると、1次モード共振域における $ff_0=1.0$ における減衰定数は、type1 では 2.86%, type2 で 2.10%, type3 で 1.45%であり、減衰定数に寄与するのは、金網の開口率であることがわかる。

4. おわりに

本論文で提案したスロッシング現象の減衰対策は、起振中から波高の増加を抑制し、かつ自由振動となつてからの減衰定数が増加することを目的としている。さらに、水槽内に金網を 3 枚設置したことで、1次モードに加えて、1次よりも碎波しやすいために 2次モードにも対応させたスロッシング減衰対策案の有効性を検証した。以下、得られたことをまとめて示す。

- (1) 1次モードにおける最大応答波高は、スロッシング共振域である $ff_0=1.0$ において、対策無と type1 を比較すると約 87%の波高低減が確認できた。減衰定数では、同入力振動数の時に約 10 倍程度増加した。
- (2) スロッシング 2次モード共振域である $ff_0=1.0$ においても、対策無と type1 を比較すると、約 65%の波高低減効果が確認でき、減衰定数は約 4 倍の増加が見られた。
- (3) スロッシング 2次モード共振域では、1次モード共振域ほどの波高低減率や減衰定数の増加は見られなかった。これは、金網設置によって流体の回転挙動を抑制したこと起因していることが、加振実験での挙動確認により検証できた。
- (4) スロッシング 1, 2次モード共通して、共振時における流体運動が大きくなり、金網を通過するときの抵抗も大きいため、顕著な減衰効

果が確認できる。さらに開口率が小さいほど波高低減効果も大きく、減衰定数の増加も得られた。開口率の差異に関しては、開口率の変化にほぼ対応して波高および減衰定数が増減することが確認できた。また、開口率と波高低減効果の関係は、ほぼ直線関係にあることを確認した。

以上により、本論文で提案した対策案によって、地震時に発生する容器内貯蔵液のスロッシングを抑制する効果が得られ、ここで提案する対策案は有用な工法であると考えられる。

次に柏崎刈羽原子力発電所内の核燃料貯蔵プールの 1/10, 1/20 縮尺モデルでの加振実験を行い、縮尺の差での減衰定数の比較を行い、次のことが得られた。

加振実験より、縮尺を 2 倍にしても、減衰定数はほぼ等しい値となることが確認できた。具体的に、1 次モード共振域における $f/f_0=1.0$ における減衰定数は、type1 において 1/10 で 2.86%、1/20 で 2.56%、type3 では 1/10 で 1.45%、1/20 で 1.99% であった。このことから、縮尺の影響による減衰定数の変化は小さく縮尺依存性は小さいと考えられる。これは、設計上有益と判断する。

今後の課題としては、実構造物に適用するために金網が受ける流体力を計測して適用可能か検証する必要がある。また、コストパフォーマンスを考慮した場合、金網を水面から底面まで挿入するのではなく、金網のサイズや種類についても検討する必要がある。定量的な評価を試みる必要がある。

謝 辞

本研究の一部は(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)及び中央大学理工学研究所共同研究助成の給付を受けたことを付記する。

参考文献

1) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所 1～7 号機 原子炉建屋オペレーティングフロアにおける溢水について、健全委第 10-5 号、参考資料 1、2008.9.

- 2) 坂井藤一：2003 年十勝沖地震における浮き屋根子規タンクの被害について、日本鋼構造協会、JSSC, No.52, 2004.4
- 3) 消防研究所：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震に際して発生した出光興産(株)北海道製油所原油タンク火災に係わる火災原因調査報告書、2004.3.
- 4) 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, pp.597-604, 2007.3.
- 5) 井田剛史, 平野廣和, 有田新平, 佐藤尚次, 奥村哲夫:スロッシング発生時の貯槽浮屋根挙動の一考察-φ4000 タンクモデルでの振動実験,土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.444-453, 2007.6.
- 6) 座間信作, 山田實, 西晴樹, 廣川幹浩, 平野廣和, 鈴木森晶:石油タンクのスロッシングによる内溶液の溢流の算定,消防研究所報告,第 101 号, pp.14-20, 2006.9.
- 7) 池田達哉, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次:矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討,応用力学論文集,vol.11,pp549-556,2008.8
- 8) 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評価,(財)電力中央研究所環境科学研究所研究概要 2007 年度版
- 9) K. Muto, Y. Kasai, M. Nakahara, and Y. Ishida: Experimental tests on sloshing response of a water pool with submerged blocks, in S.J. Brown, editor, proceedings of the 1985 Pressure Vessels and Piping Conference 98-7 (Fluid Structure Dynamics). ASME, pp.209-214, 1985.
- 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.1422-1429, 2001.5.
- 11) 萩生田弘, 平野廣和, 野路利幸, 立見栄司:スロッシングを利用した制振装置の研究,土木学会第 43 回年次学術講演会第 I 部門, 1988.10.
- 12) 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.
- 13) 廣川幹浩, 座間新作, 山田實, 西晴樹, 畑山健:石油タンクのスロッシング減衰定数,消防研究所報告,第 98 号, pp.66-73, 2004.9.

(2010 年 3 月 9 日 受付)