

矩形プールを対象としたスロッシング発生時の挙動評価技術

染川大輔 飯田有未
後藤 暁

Wave Height Evaluation Method of the Sloshing Phenomenon in Swimming Pools

Daisuke Somekawa Yumi Iida
Satoru Goto

Abstract

Designers planning a swimming pool on the upper floors of a building are required to consider the sloshing phenomenon. This is because the water of the pool significantly affects the building by the sloshing resonance phenomenon. Some existing estimation formulas for a rectangular tank are the formulas of the sloshing natural frequency and maximum wave height. In this study, the validity of the formulas is examined using tank experiments and computational fluid dynamics. We found that the experimental and analytical results are roughly equivalent to the values estimated from the formulas. However, the formula may overestimate the maximum wave height in some cases. The sloshing resonance phenomenon is relatively sensitive to the pool and building natural frequency ratio. Therefore, computational fluid dynamics is required for a detailed study.

概要

高層建物の上層フロアにプールを計画する際には、設計の時点でスロッシングに対する検討が要求される。建物の固有振動数とプールのスロッシングの固有振動数が一致すると、共振が発生しプールの水がこぼれ、プール周辺のフロアに影響するだけでなく、外装ガラスへの影響も懸念されるためである。スロッシングの固有振動数や最大波高の推定式としては矩形タンクを対象とした推定式がある。ここではタンクに比べて水深の浅いプールに対する適用可能性の検討を、水槽実験と数値流体解析を用いて行った。その結果、既存式の適用が可能であることを示した。一方で、推定式では最大波高を過大評価してしまう可能性も示した。スロッシングの共振現象は、プールと建物の固有振動数の比に敏感な現象であるため、ここで示した式は概略の検討時には有効であるが、詳細な検討には数値流体解析を行う必要がある。

1. はじめに

近年、建物の高級感の演出や集客を目的として、ホテルやマンションの高層フロアにプールの計画がしばしば採用される。こうしたプールの多くは眺望の良いインフィニティプールとなっていることが多い。インフィニティプールは水盤や外縁を水で覆い、外縁が存在しないかのように見せかけたプールであり、屋上の外部、屋内を問わずプールが窓際に計画される傾向にある。

一方、地震発生時にはビルの揺れによりプールの水がこぼれることが懸念される。プールのような自由表面を持つ液体の振動をスロッシングと呼び、プールの形状に応じた固有振動数を有している。一般にスロッシングは地震動の長周期成分により発生し、高層建物では長周期地震動の応答を特に増幅させる性質があるため、ビルの固有振動数とプールのスロッシングの固有振動数が一致する場合に、共振現象が発生し被害が大きくなることが考えられる。

2019年4月23日にフィリピンで発生した地震の際の画



Photo 1 高層ビルから流れ出すプールの水¹⁾
Water Flowing out of a Tall Building

像をPhoto 1に示す。マニラのBinondo地区で高層ビルの屋上から水があふれ出している様子が確認できる。この写真では水だけが落下しているが、屋内の場合には、水の衝撃荷重によってガラスが割れ、ガラス片と共に水が降り注ぐ可能性もある。最悪の場合には、プールに入っている人が投げ出されることも考えられる。そのため、高層フロアにプールが計画される場合には、スロッシング

に対する検討が必要である。

しかしこれまで、スロッシングは船舶やコンビナートのタンクを対象としていることが多く、プールを対象とした例はほとんど見られない。矩形のタンクを対象とした固有振動数の算定式や、波高の推定式も報告²⁾されているが、適用範囲が明記されておらず、タンクに比べて比較的浅い容器と言えるプールへの適用が可能であるかは不明である。

そこで本報では、高層フロアに計画されたプールを対象として、既往のスロッシングの固有振動数と最大波高の算定式の適用可能性を、水槽実験と数値流体解析の結果を用いて検討した。

2. 評価の概要

2.1 水槽実験概要

水槽実験は大林組所有のゆれジャッジ(振動台)を用いて行った。振動台は最大振幅10cm, 最大加振加速度100galまで加振可能である。実験に用いた水槽(プール)は幅6.2cm, 奥行き16.1cm, 高さ5cmで、実験では水深, 加振方向, 加振振動数, 加振加速度を様々に変化させた。加振時間は設定した加振加速度に到達後30秒間とした。

実験の状況はビデオカメラで撮影し、プールの左側端部の水面の挙動を画像解析により測定した(Photo 2)。画像による処理を行いやすいよう食用色素で水に色を付けている。実際には表面張力により端部の水面は全体の水面高さより高くなるため、固有振動数の評価では中央部の波高に近いやや内側の水面高さ(評価ライン2)、水の最大波高では最も端部の高さ(評価ライン1)で評価することとした。カメラのフレームレートは30fpsであり、画像解析もフレームごとに行っているため、評価の間隔は1/30秒となる。また、水面高さの計算はプールの高さを画面上のピクセル数で割って計算しているため、高さ方向の解像度は約0.09mmである。

得られた波高の時系列波形の例をFig. 1に示す。ここでは最初の端部より少し内側の水面高さ(3cm)を0としている。プールの端部では、少し内側よりも約4mm高くなっている。また、データの欠測や対象となる水面を見失うということも発生しておらず、全加振時間にわたって波高が測定できており、この方法により波高の評価が可能であると考えられる。

2.2 数値流体解析概要

解析(CFD)はオープンソースの流体解析ソフトウェアであるOpenFOAM-4.1を用いた。使用した乱流モデルはOpenFOAMに実装されているRNG $k-\epsilon$ モデルであり、ソルバーはinterDyMFoamを用いた。従来の算定式は渦無し流のシンプルなポテンシャル理論をもとに構築されている。本研究では粘性や渦など考慮したナビエーストークスの式を基礎式とし、有限体積法による数値流体解析を行う。計算に際しては、水と空気の物性値としてそれぞ

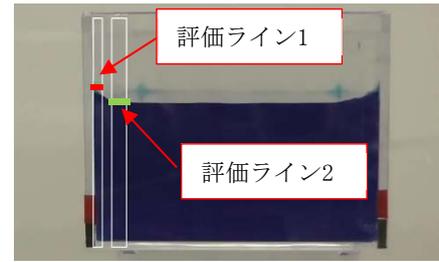


Photo 2 水槽実験での水面高さ
Wave Height in the Experiment

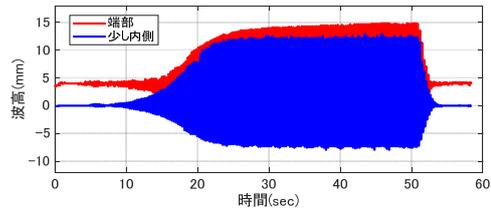


Fig. 1 波高の時系列波形の例

Time-series Waveform of a Wave Height

Table 1 数値流体計算に用いた物性値
Physical property values used for CFD

	水	空気
密度 (kg/m ³)	998.2	1.225
粘性係数 (kg/m·s)	1.005×10^{-3}	1.461×10^{-5}
表面張力係数 (N/m)	0	0

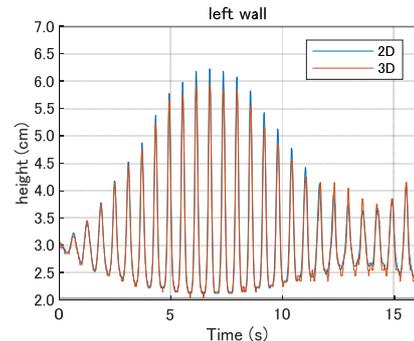


Fig. 2 2次元と3次元の解析結果の比較

Comparison of 2D and 3D Analysis Results

れTable 1の値を用いた。メッシュサイズは、模型実験を再現する場合は0.5mm, 実大スケールのプールの解析をする場合には10mmとした。解析の時間刻みは模型実験で 1.0×10^{-4} 秒, 実大スケールで 1.0×10^{-3} 秒である。波高は、水槽実験とは異なりプールの左側壁面での水の高さを計算ステップごとにサンプリングすることとした。

2.3 流れの3次元性

矩形プールの場合、加振方向と水面の最大波高の間には相関があり、斜めから加振するよりも正対する方向に加振する場合に最大波高は大きくなる³⁾。そのため検討の際には正対する方向の加振のみを考えることとした。

また、数値流体解析においては、メッシュの数が計算の負荷に直結することから計算負荷の低減のために、2次元的にプールを表現することが期待される。

そこでプールの奥行きを無くした場合、全体を計算した場合を比較した。得られた波高の時系列波形をFig. 2に示す。いずれも断面形状は同じであり、加振方向、加振加速度も同じである。2つの波形は同じスロッシングの固有振動数に沿った振動数で変動しており、2次元的な解析でもスロッシングの検討には問題ないと考えられる。最大波高に関しては2次元的な解析の方がやや大きくなっており、3次元的な解析よりも安全側の検討を行えると考えることができる。したがって、以降の検討においては2次元的な解析のみを行った。

3. プールのスロッシングの固有振動数

3.1 固有振動数の算定式

矩形タンクのスロッシングの固有振動数の算定式として以下の式がある²⁾。

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

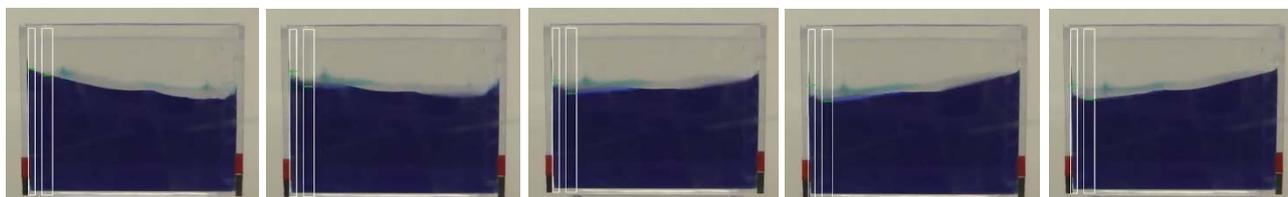
- f_n : n 次の固有振動数 [Hz]
- L : プールの幅 [m]
- g : 重力加速度 9.8 [m/sec²]
- H : プールの深さ [m]

式(1)は、プールの水が非圧縮・非粘性で、その運動は渦なし運動と仮定したときに、理論式から導き出されたものであるため、容器(プールやタンク)の形状によらず適用は可能であると考えられる。

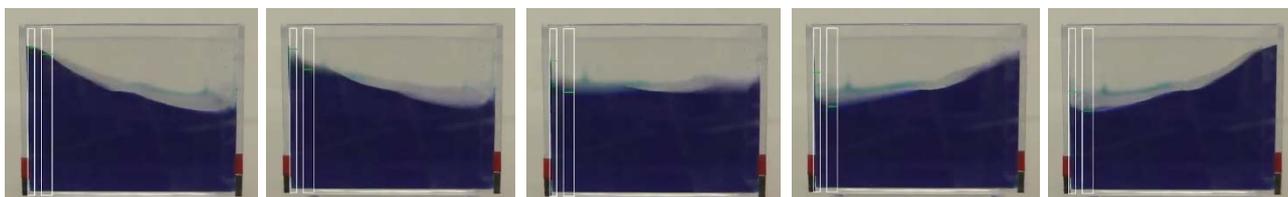
実際には、非圧縮であることは問題なく成立するが、非粘性についてはスロッシングの振動の系の中に減衰が存在するため成立しない。しかし、振動数の評価に関しては影響を与えないことからここでは無視できると考えられる。

3.2 水槽実験との比較

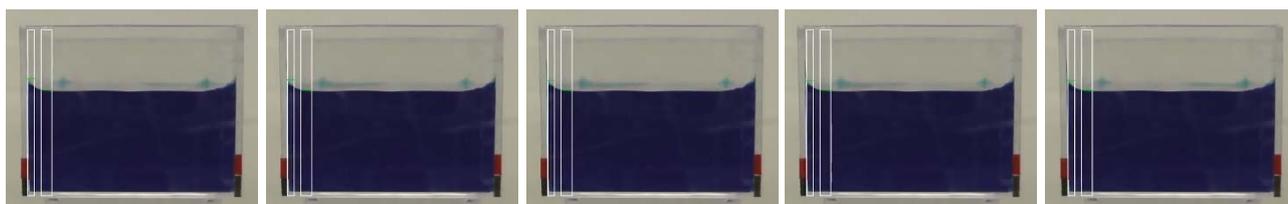
式(1)の精度を確認するため、加振振動数を変化させた実験を行った。実験に用いたプールは2.1節に示したものであり、水深は3cm、式(1)で得られた1次の固有振動数は3.38Hzである。そこで加振振動数を1.58Hzから4.98Hzまで0.2Hzずつ、3.38Hz付近では0.1Hzずつ変化させることとした。加振加速度は25galで一定で、加振時間はそれぞれ30秒である。加振時の水面の挙動をPhoto 3に示す。スロッシングの固有振動数に相当する3.38Hzでの加振時(Photo 3 (b))では、プールの中央に節(振動しない点)があり、プールの両端で大きく水面が振動している。これは横スロッシングと呼ばれる現象のうち1次モードでの振動パターンといえる。一般に、2次モード以降ではプール両端の変動は小さくなっていくことから、本報で対象としたいプールからの水のこぼれを検討する上では、この1次モードが特に重要であるといえる。スロッシングの固有振動数から少しずれた3.28Hzでの加振時(Photo 3 (a))では、1次モードに近い振動となるものの、プール端部での変動は小さく、加振振動数のわずかなずれが、波高に大きく影響する。また、固有振動数から外れた場合(Photo 3 (c))では水面はほとんど振動しない。



(a) 加振振動数 3.28Hz



(b) 加振振動数 3.38Hz



(c) 加振振動数 4.98Hz

Photo 3 加振時の水面の挙動

Behavior of Water Surface During Oscillation

実験で得られた最大水面高さとして式(1)で得られた1次の固有振動数(3.38Hz)の比較をFig. 3に示す。実験により得られた水面高さが最も大きくなる振動数は式(1)で得られた固有振動数と概ね一致しており、式(1)によって矩形のプールであってもスロッシングの固有振動数を求めることができる。Photo 3で見られたように加振振動数がスロッシングの固有振動数から外れた場合には、ほとんど水面は振動しないため、水面高さはほぼ変わらない。

プールの幅と深さをパラメータとして1次の固有振動数を求めた結果をFig. 4に示す。プールの幅が大きくなるに従い、固有振動数は低くなる傾向にある。また、プールの水深が浅い方が固有振動数は低くなる。高さ100～150m程度の高層建築物では、1次の固有振動数は概ね0.3Hz(1/0.02H～1/0.03H)となることから、プールの幅が3～4m程度の時にスロッシングが発生する可能性が高いといえる。通常のプールの形状ではプールの長辺方向は10mを超えることが多いことから、どちらかと言えば短辺方向の方が建物とプールのスロッシングの固有振動数が共振する可能性が高いといえる。

4. 最大水位の推定

4.1 最大水位の推定式

矩形タンクの両端でのもの水面高さからの上昇量は以下の式で推定される²⁾。

$$\eta = \frac{a}{g} \cdot (l + \sigma) \tag{2}$$

$$\sigma = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\alpha f}{f_k}\right)^2}{1 - \left(\frac{\alpha f}{f_k}\right)^2} \cdot \frac{8l}{k^2 \pi^2} \cdot (-1)^{(k-1)/2} \cdot \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \tag{3}$$

- η : 元の水面からの上昇量 [m]
- l : プールの幅の半分の長さ [m]
- H : プールの深さ [m]
- f : 加振振動数 [Hz]
- a : 加振加速度 [m/sec²]
- f_k : k 次のスロッシングの固有振動数
ただし、 $k=1, 3, 5, \dots$
- g : 重力加速度 9.8 [m/sec²]
- α : 振動の伝達ロスを表す係数

式(2), (3)についても、式(1)と同様に非圧縮・非粘性、渦なし運動といった仮定に基づいた式であり、プールへの適用は可能であると考えられる。 σ については、加振振動数 f が一つの値に定まる場合、 f と f_k の差が大きくなると急激に値が小さくなるため、比較的収束は早い。波高は高次モードでは小さくなり、建屋に入力された地震動の高周波成分はフィルターされて小さくなる傾向にあるため概ね $k=3$ 程度まで計算すればよい。

α は線形理論的に求められた式には含まれないが、その場合 $f=f_k$ の時には σ が発散することになる。しかし、実際にはFig. 1に示したような程度の波高で概ね定常

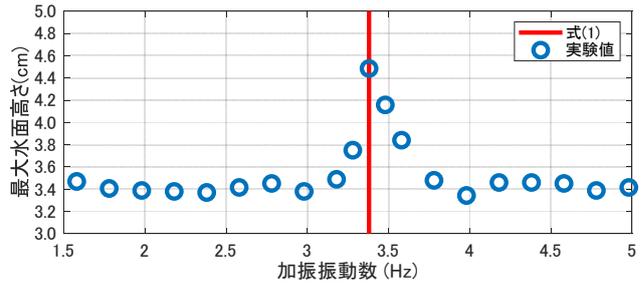


Fig. 3 加振振動数による最大水面高さの変化
Maximum Wave Height at Each Oscillation Frequency

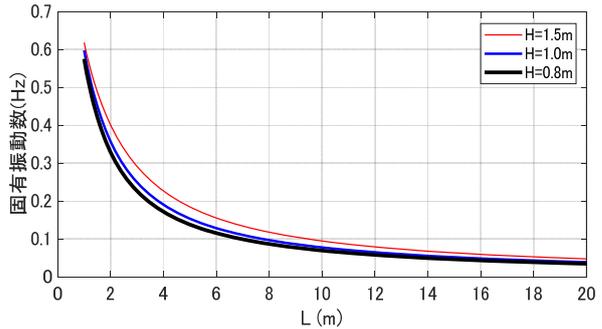


Fig. 4 プールの形状と1次の固有振動数の関係
First-order Natural Frequency in Various Pool Shape

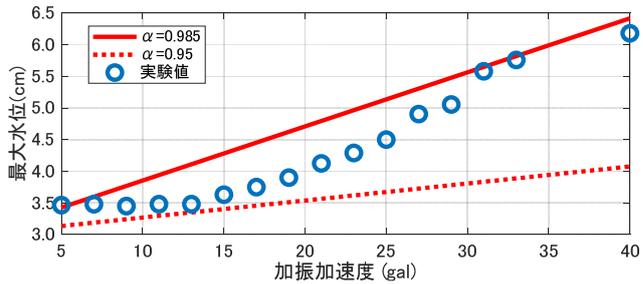


Fig. 5 加振加速度による最大水位の変化
Maximum Wave Height at Each Oscillation Acceleration

状態に近い状況となる。これを加振による振動がプールの水に伝達されるまでのロスによるものと考え、加振振動数に一定の係数 α をかける方法が提案された⁴⁾。なお、大きい加振加速度の場合にはプールの水がこぼれ、固有振動数が変化することにより共振が発生しなくなるため、やはりある一定の波高以上にはならない。

こうして得られた η を用いると、最大水位は $H + \eta$ [m]として推定される。

4.2 水槽実験との比較

式(2)で得られた最大水位の精度を確認するため加振加速度のみを変えた実験を行った。3.2節と同様に加振振動数は式(1)から得られた3.38Hzとし、加振加速度を5galから40galまで2galずつ変化させた。実験で得られた最大水位と式(2)により求めた最大水位をFig. 5に示す。図中の直線は $\alpha=0.985$ と $\alpha=0.95$ の時の推定値である。

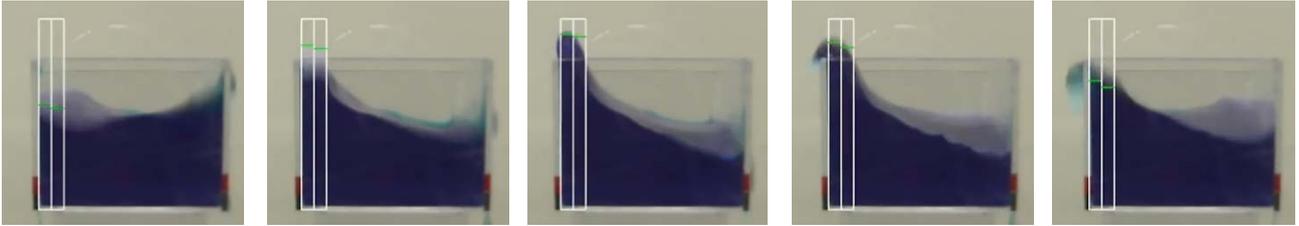


Photo 4 水のこぼれる様子
Water Spills

実験結果は加振加速度を大きくするにつれて、最大波高が滑らかに大きくなるが、式(2)ではプールの形状が一定であれば加振加速度に比例するため、直線的に最大波高が大きくなる。また、 α は既往の研究⁴⁾に比べてやや大きい0.985~0.95の範囲に収まっている。なお、実験結果のうち加振加速度を35gal以下では水はこぼれず、40galとしたときのみ水がこぼれている。また非線形現象である砕波が生じているので、振動エネルギーのロスが大きくなっている。そのためこの結果のみ加振加速度に対する最大水位の増加がやや小さめとなっていると考える。

加振加速度が40galの時の水のこぼれる様子をPhoto 4に示す。Photo 3で見られたものと同様、水はプールの壁面に沿って上向きに運動する成分が多いように見られる。プールの上端を超えた部分の一部が、プールの外部に沿って真下にこぼれるような挙動となっている。Photo 1においても、水が外部側に勢良く飛び出すのではなく、どちらかといえば真下にこぼれているのも、このような水の挙動の結果であると考えられる。

4.3 数値流体解析との比較

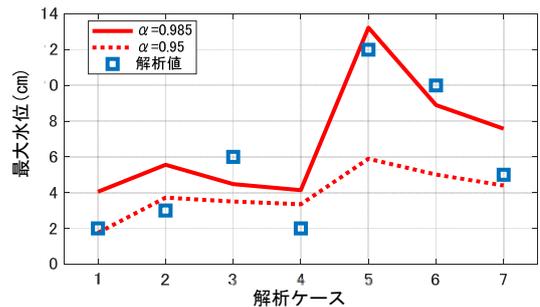
水槽実験ではプールの大きさや形状、加振加速度に制限があるため、より実際のプールに近い形状や、様々な形状のプールについて検討を行うため、数値流体解析を行った。解析に用いた各パラメータをTable 2に示す。ケース1から7までは、水槽実験の模型程度の大きさを仮定した場合であり、ケース8から15までは実スケールのプールを対象とした場合である。実スケールのプールについては他の条件を一定として、加振加速度を大きくした。またいずれも加振振動数は式(1)を用いてスロッシングの1次の固有振動数を算出し、その振動数で加振した。

解析により得られた最大水位と式(2)で求めた最大水位の比較をFig. 6に示す。模型スケールのプールを対象とした場合(Fig. 6(a))では、解析のケースによっては多少過大評価あるいは過小評価となっているが、概ね式(2)で最大水位を評価できると考えられる。ところが、実スケールのプールを対象とした場合(Fig. 6(b))では、解析で得られた最大水位が概ね $\alpha=0.95$ の推定値よりも小さい結果となった。

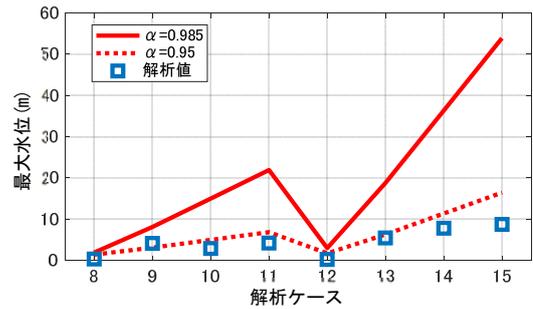
そこで、解析ケース11の時の水面の様子をFig. 7に示す。この解析では水がこぼれないようプールの壁を極端に高く設定している。Photo 4と同様に水は壁に沿って上に上がっていくが、最大水位となるときには(中央の図)さら

Table 2 解析時のパラメータ

Parameters for CFD				
ケース	加振振動数 [Hz]	加振加速度 [gal]	水槽の幅 [m]	水深 [m]
1	0.97	10	0.16	0.01
2	1.60	10	0.16	0.03
3	2.06	10	0.12	0.03
4	2.84	10	0.08	0.03
5	1.60	40	0.16	0.03
6	2.06	40	0.12	0.03
7	2.84	40	0.08	0.03
8	0.38	10	4	1.2
9	0.38	100	4	1.2
10	0.38	200	4	1.2
11	0.38	300	4	1.2
12	0.11	10	16	1.2
13	0.11	100	16	1.2
14	0.11	200	16	1.2
15	0.11	300	16	1.2



(a) 模型スケールのプールの場合



(b) 実スケールのプールの場合

Fig. 6 解析で得られた最大水位
Maximum Wave Height Estimated by CFD

に上に上がるための水の量が足りず、プールの床面が見える状況となっている。加振加速度が大きい場合、理論的には水位はどこまでも大きくなるが、実際には水の総量に依存しており、そのため式(2)の推定値より小さくなったと考えられる。また、Fig. 5で見られたように非線形性が強く出ていることも考えられ、そのため α が他のケースよりも小さくなっていると思われる。

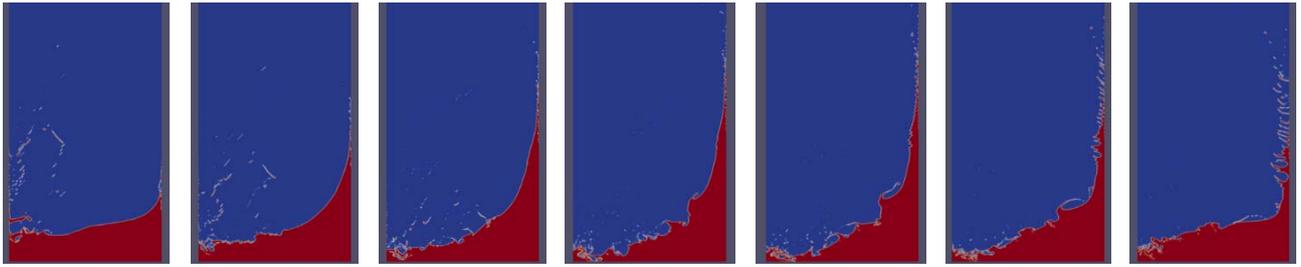


Fig. 7 水の挙動(解析ケース11)

Behavior of Water Surface During Oscillation (case11)

なおケース14, 15では最大水位が10m程度となっており、設計上現実的なケースではない。そのため、設計で検討する範囲では $\alpha=0.95$ が下限値と考えられる

4.4 溢流量の推定式

Photo 4で見られたように、プールから水がこぼれる場合には、プールの壁の高さよりも高い部分の水が外にこぼれることとなる。スロッシング発生時のプールの揺れを加振方向から観察したものをPhoto 5に示す。この時の水面は加振の直交方向に対し、ほぼ様な挙動となっていることがわかる。そこで、プールの壁よりも高い範囲の水量を三角柱で仮定することを考える(Photo 6)。通常、元の水面の高さとプールの壁面の高さは同じであることから、三角柱の高さは元の水面からの上昇量 η として表すことができる。したがって、プールからこぼれる水の量(溢流量)の最大値 $W[m^3]$ は以下の式で表される。また、この W をプールの総水量で割ればプールの規模に合わせた排水計画に有効となる溢流量の割合を求めることができる。

$$W = \frac{\eta \cdot l}{2} \cdot B \quad (4)$$

- η : 元の水面からの上昇量 [m]
- l : プールの幅の半分の長さ [m]
- B : プールの奥行き [m]

5. まとめ

建物の高層フロアに計画された矩形のプールを対象として、そのスロッシングの固有振動数と最大水位を、矩形タンクの式を用いて推定できるか検討を行い、以下の知見を得た。

- ・ 水槽実験と数値流体解析の結果と、既往の矩形タンクでの推定式の結果を比較し、矩形タンクの式を用いて評価することが可能であることを示した。
- ・ プールから溢流する水の挙動やその最大量について、予測する式を提案した。
- ・ スロッシングの共振現象は、プールと建物の固有振動数の比に対して敏感な現象であることが明らかとなった。
- ・ プールの固有振動数はプールの形状に依存するため、ここで示した算定式は、概略の検討の際に用

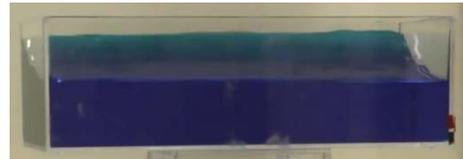


Photo 5 加振直交方向からみた水の挙動

Behavior of Water Surface Viewed from the Orthogonal Direction of Oscillation

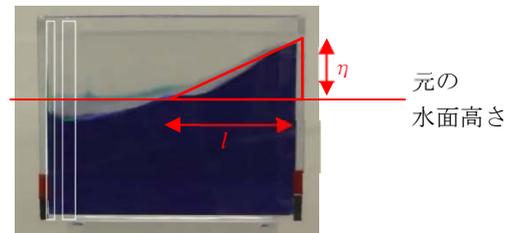


Photo 6 溢流する範囲の仮定
Assumption of Overflowing Area

いるだけにとどめ、実施設計の際など、詳細な検討を行うためには数値流体解析を行うこと。

謝辞

本検討を進めるにあたって、大阪市立大学の重松考昌教授から様々な示唆をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Skyscraper's Rooftop Pool Spills Everywhere as Earthquake Rocks Manila, <https://gizmodo.com/skyscrapers-rooftop-pool-spills-everywhere-as-earthquake-1834215176>, 2019.7.16閲覧
- 2) 藤田勝久：タンクのスロッシング(その2：矩形タンク)、三菱振動マニュアル、1976.7
- 3) 遠田豊、他：矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol. 68, No. 2, pp. 637-644, 2012
- 4) Dongming Liua, Pengzhi Lin : A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks, Journal of Computational Physics 227, pp. 3921-3939, 2008