

二重槽円筒タンク模型の振動特性

Dynamic Characteristics of Annular and Cylindrical Tank Model

川口周作*1・水田洋司*2・荒巻祐輔*3・北原伸浩*1

Shusaku KAWAGUCHI, Yoji MIZUTA, Yusuke ARAMAKI, Nobuhiro KITAHARA

*1 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)

*2 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

*3 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)

There is a case in which a new tank is made in outside of water distribution tank in order to supplement capacity storage of the water distribution tank. That is to say, it is a method for planning the water distribution tank to be the annular tank. This paper describes a new knowledge then, it gets with shaking table test of carried out model in order to clarify dynamic characteristics of the annular and cylindrical tank. The experiment had been put into practical with concentric annular tank in which the center of the outer tank agrees in the internal tank and eccentricity annular tank in which the center of the outer tank does not agree in the internal tank, and it has been clarified on natural frequency, damping constant, sloshing and dynamic water pressure of the annular and cylindrical tank.

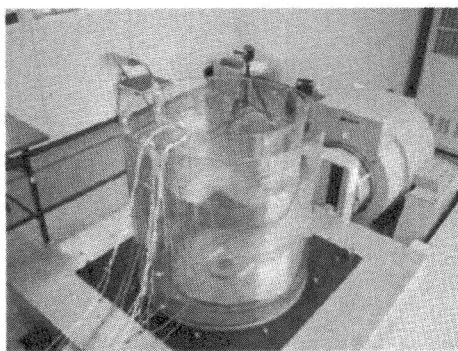
Key Words: dynamic characteristics, annular and cylindrical tank, natural frequency, damping constant, sloshing, dynamic water pressure

1. 序論

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としての重要な役割を担っている。阪神大震災を機に、日本水道協会「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説、1998」が改正された。このなかで、既設タンクの耐震性に関する記述をみると、昭和55年以前のPCタンクは耐震診断が必要とされている。現在、水道用タンクはPC製だけでも3500基以上あり、昭和55年以前に作られたものが約1500基存在する。一方、厚生労働省はゆとりのある安定的な給水を目指して、全国の事業体に水道用タンクの容量を増量するよう呼びかけ、タンクの容量増に向けた事業を推進している。容量増の施策に対して、新設では用地確保や経済的な問題等があり、既設タンクの耐震補強並びに維持管理性向上策に対してはタンクを空にする際に起こる断水といった問題を抱えている。これらの問題に対処するために、PC・RC製の既設タンク(一槽)の外周に鋼製のタンクを増設し、タンクを二重槽化することで増容量と維持管理性を向上させる方法が提案され、設計方法が検討されている。一般に既設タンクの近傍には流量計室などが建設されており、二重槽化にあたって、必ずしも同心円に配置できるとは限らない。

既設タンクは内面水による静水圧と動水圧によって構造の検討が行われている。それに対し、既設タンクを二重槽化する場合には既設壁面に内面水による圧力に加え、外面水による静水圧と動水圧が作用し、動水圧の取り扱いが課題となっている。静水圧は既知であるが、動水圧とその分布は設計基準化されていない。また、動水圧分布は内槽・外槽の直径比や外槽の偏心率によっても異なると考えられる。勿論、動水圧は地震の大きさや卓越振動数によって変化するであろう。

本論文は二重槽円筒タンク¹⁾の振動特性を把握するために、二重槽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。模型の縮尺は約1/20で、実験ケースは二重槽円筒タンクの内槽と外槽の中心が一致した同心の場合と一致しない偏心の場合について内容液の状況で区分した各4種類である。振動台は水平方向に正弦波加振し、加速度共振曲線、動水圧共振曲線を描いて固有振動数を求め、動水圧波形から内槽壁面に作用する動水圧の時間変動や最大動水圧を計測した。また、スロッシングについては波高と動水圧の両方を計測し、その振動数が同じになることを確認した。これらの値から、固有振動数、減衰定数、スロッシング特性や動水圧を求め、二重槽円筒タンクの振動特性を明らかにした。



2. 二重槽円筒タンク模型

二重槽円筒タンクは既製のアクリルパイプを用いて作成した。外槽は厚さ10mm、外径800mm、高さ800mm、内槽は厚さ10mm、外径600mm、高さ800mmである。タンク内の満水位は500mmとし、各槽の表面には満水位から上下100mmの範囲に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に入溶剤（内槽に緑色、外槽に紫色）を混入して着色した。内容液は水道水とした。

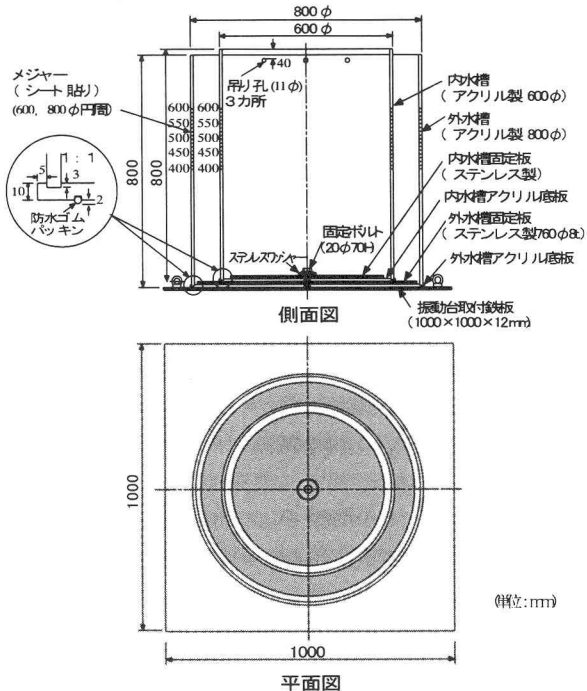


図-1 二重槽円筒タンクの概略図

二重槽円筒タンクの模型を写真－１に、概略図を図－１に示している。模型は振動台取付鉄板（図－１参照）を用いて、ボルトで振動台に固定されている。模型と振動台取付鉄板は固定ボルトで固定されている。実構造では、既設タンク（内槽）の底板と基礎を拡幅し、その上に新設タンク（外槽）を設けるが、本模型では内槽のみ加振方向に40mmまで偏心させるため、外槽の底板の上に内槽の底板を載せ偏心できる構造とした。

2. 1 タンクの弾性係数

振動台実験で用いる二重槽円筒タンク模型の弾性係数

を求めるため、アクリル樹脂試験片²⁾の引張試験を室温20℃前後の状況で行った。試験片には二重槽円筒タンクに用いたアクリルパイプの一部を使用し、JIS規格(5号試験片)にしたがって作成した。試験片の写真を写真-2に示している。作用荷重は実験時に壁面に生じる水圧(約1kPa)と同じになるような大きさとした。引張り試験で得られた値とメーカー値を表-1に記している。

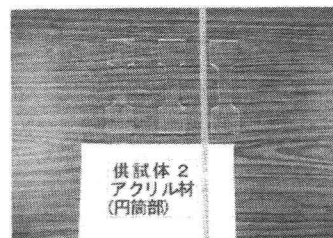


写真-2 5号試験片

表-1 アクリル樹脂の弾性係数

供試体番号	弾性係数(縦) k P a	ポアソン比
1	0.882×10^6	0.205
2	1.078×10^6	0.390
3	0.960×10^6	0.295
平均値	0.973×10^6	0.297
メーカー値	2.940×10^6	—

2. 2 実験ケースとその形状

振動実験に用いる二重槽円筒タンクは内容液の状態によりケースA～Dの4区分とした。ケースAは内槽・外槽共に空の状態であり、同モデルを図-2に示す。ケースB(図-3)は内槽の高さ500mmまで内容液を満たし、外槽を空とした。ケースC(図-4)は内槽・外槽共に高さ500mmまで内容液を満たした。ケースD(図-5)は内槽を空にし、外槽の高さ500mmまで内容液を満たした。

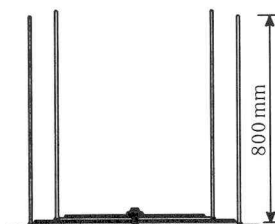


図-2 ケースA

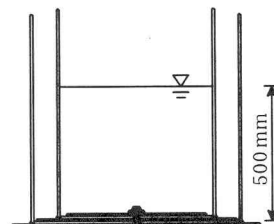


図-3 ケースB

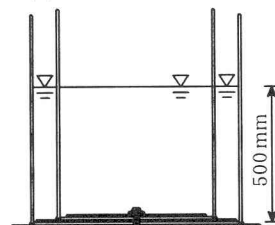


図-4 ケースC

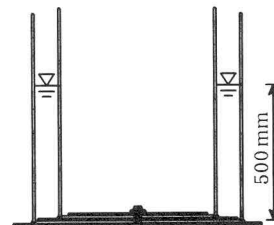


図-5 ケースD

図 2 ~ 5 は内槽と外槽の中心が一致した同心の場合であり、内槽と外槽の中心がずれた偏心についてはケース C, D の実験を実施した。偏心量は 10mm, 20mm, 30mm, 40mm の 4 種類である。

2. 3 計測機器の種類と設置位置

この振動実験では、防水型ひずみゲージを8箇所、加速

度計（容量2G）を最大14箇所、圧力変換器（水圧計、容量20kPa）を9箇所に設置した。水圧計と加速度計の計測個数は実験ケースに応じて変えた。

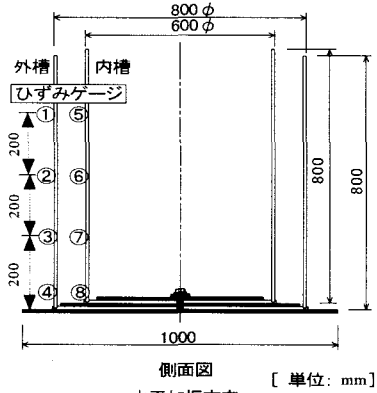


図-6 ひずみゲージの設置位置

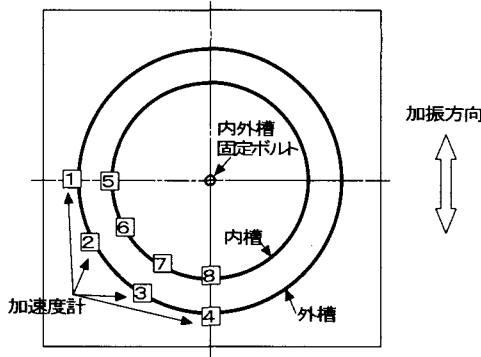


図-7 タンク上端部の加速度計の設置位置

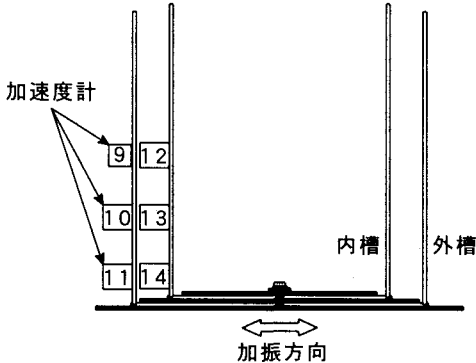


図-8 タンク壁面部の加速度計の設置位置

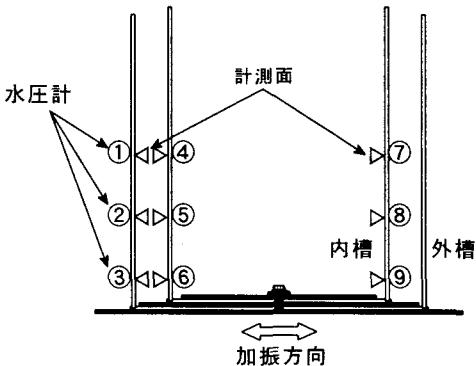


図-9 水圧計の設置位置

図-6 にひずみゲージの設置位置を示しており、計測方向は鉛直方向（タンク軸方向）である。図中の外槽部

のひずみゲージ①は外槽を固定する底板より 600mmの位置に設置し、以下②、③、④と200mm間隔で設置した。また、内槽部のひずみゲージ⑤～⑧は、図-6のように外槽と同じ位置に設置した。ケースAのタンクの振動状況を知るためにひずみゲージ式加速度計を円周方向に図-7のように設置した。タンク壁面の振動を抽出するために、図-8の⑨～⑭に加速度計を設置した。加速度計⑨はひずみゲージ②、加速度計⑩はひずみゲージ③、加速度計⑪はひずみゲージ④、加速度計⑫はひずみゲージ⑥、加速度計⑬はひずみゲージ⑦、加速度計⑭はひずみゲージ⑧の位置から、それぞれタンクに向かって右へ2cmの位置に設置した。加速度計①～⑧はその計測方向が加振方向と同じになるように設置し、⑨～⑭も計測方向が加振方向と同じになるように設置した。図-9は水圧計（No.1～9）の設置位置を示す図である。水圧計①はひずみゲージ②、水圧計②はひずみゲージ③、水圧計③はひずみゲージ④、水圧計④はひずみゲージ⑥、水圧計⑤はひずみゲージ⑦、水圧計⑥はひずみゲージ⑧の位置から、それぞれタンクに向かって左に2cmの位置に設置した。また、水圧計①～⑥は外槽の水圧を、水圧計⑦～⑨は内槽の水圧を計測した。図-9中の△印の底辺で計測面を表示している。計測に使用したひずみゲージ、加速度計と水圧計の種類を表-2に示している。波高は、デジタルビデオカメラ（SONY製）2台を設置し、撮影後の静止画像から5mm刻みの等高線との比較により読み取った。

表-2 ピックアップ

名称	型式	製造メーカー
防水型ひずみゲージ	KEW-5-120-C111L5M3R	共和電業
ひずみゲージ式加速時計	AS-2GB	共和電業
PSS型小型圧力センサー	PSS-02KBF	共和電業

3. 振動台の性能

二重槽円筒タンクの実験に使用した振動台（2軸同時振動試験装置：DS-200-15L、動電式、IMV社）の性能の概略を表-3に記している。なお、この振動台は平成10年度私立大学施設整備補助費（教育施設）によって九州産業大学に設置された。

表-3 振動台の性能

項目	稼働能力
加振力	垂直方向：19.6kN
	水平方向：19.6kN
最大加速度	14.7m/s ² （1.5G）
最大速度	垂直方向：速度領域なし（0.85m/s）
	水平方向：1.0m/s
最大変位	垂直方向：100mm p-p
	水平方向：150mm p-p
可動部質量	1300kg
最大搭載質量	1000kg
加振方式	2軸同時方式
振動台寸法	1500mm×1500mm
冷却方式	強制空冷方式
所要電力	3φAC200V±10%
	50/60Hz 80kVA

4. 同心二重槽円筒タンク^{3), 4), 5)}

各ケースで水平方向に正弦波の加振を行い、加速度振幅は100gal、振動数は5.0Hz～100.0Hzのスイープ試験(0.5Hz刻み、滞留時間20sec)を行い、内槽、外槽共にタンク頂部に取り付けた加速度計、及びタンク壁面に取り付けた加速度計、水圧計とひずみゲージにより、加速度応答、動水圧と動ひずみを計測し、得られたデータから共振曲線を作成した。また、スロッシング時の振動を調べるために、正弦波の加速度振幅 2gal、振動数0.5Hz～1.4Hzのスイープ試験(0.02Hz刻み、滞留時間20sec)も実施した。なお、ひずみゲージの値は他の計測値に比べて小さく、着目し難いことから本論文では詳述していない。

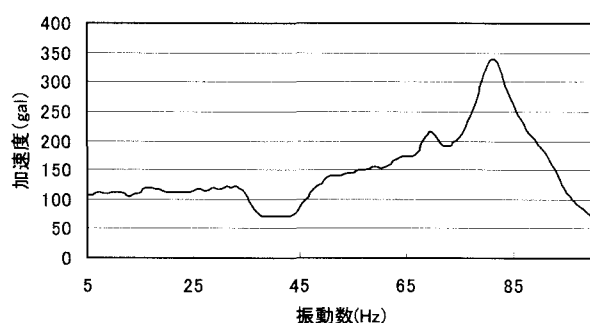


図-10 共振曲線 (ケースA, 外槽①)

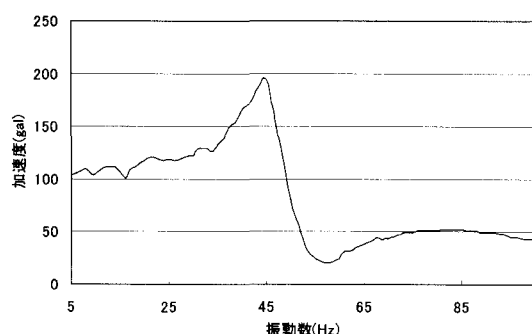


図-11 共振曲線 (ケースA, 内槽⑥)

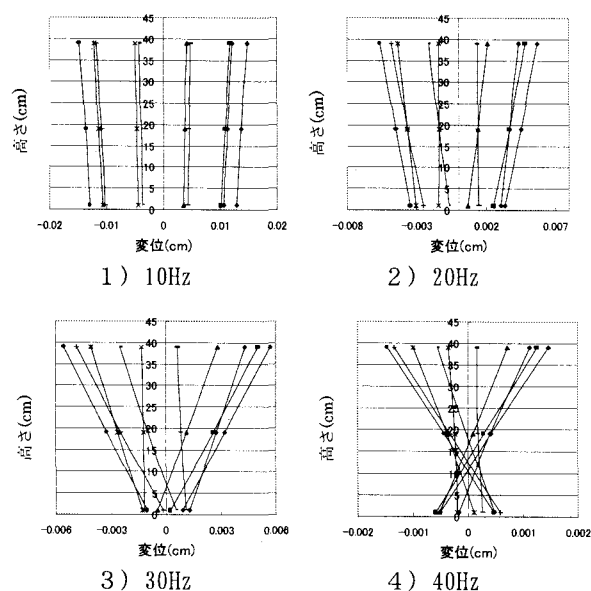


図-12 加振振動数と壁面変形図

表-4 加速度から求めた構造体の固有振動数と減衰定数

ケース	槽	固有振動数 (Hz)				減衰定数			
		1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次
A	内槽	33.5	42.6	—	—	0.02	0.04	—	—
	外槽	36.5	49.4	68.5	81	0.02	0.02	0.03	0.02
B	内槽	27	—	—	—	0.03	—	—	—
	外槽	—	—	—	—	—	—	—	—
C	内槽	20	—	—	—	0.02	—	—	—
	外槽	20	32	—	—	0.02	0.03	—	—
D	内槽	—	—	—	—	—	—	—	—
	外槽	21	—	—	—	0.03	—	—	—

表-5 動水圧から求めた構造体の固有振動数と減衰定数

ケース	槽	固有振動数 (Hz)		減衰定数	
		1次	2次	1次	2次
B	内槽	27.5	—	0.02	—
	外槽	27.5	—	0.02	—
C	内槽	19	32	0.02	0.02
	外槽	20	32	0.01	0.02
D	内槽	—	—	—	—
	外槽	21	—	0.03	—

4. 1 タンクの固有振動数と減衰定数

加速度共振曲線の一例を図-10, 11に示す。同心二重槽円筒タンクの固有振動数と減衰定数を表-4に表している。この値は加速度計で計測した二重槽円筒タンク構造体の固有振動数と減衰定数であり、加速度波形から求めた共振曲線のピーク値を示す振動数から抽出している。減衰定数は自由振動の振幅比より求めた。表-5は動水圧波形から求めた共振曲線のピーク値を示す振動数である。この表よりタンク構造体の振動数と内容液の入ったタンクの振動数は全く異なることが判る。また、ケースB, C, Dの固有振動数と減衰定数は、加速度、動水圧とも一致した値が得られている。加速度計⑨～⑭の時刻歴の挙動について、1周期を10分割したものを10Hz間隔で図-12に整理すると、20Hz程度から壁面の変形が確認でき、それ以下では剛体挙動と考えられる。

4. 2 動水圧

動水圧は衝撃圧、振動圧、変形圧の和として取り扱うことができる。

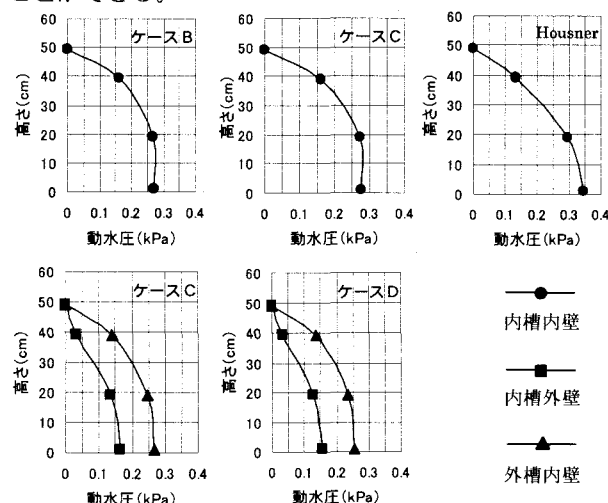


図-13 10Hz時の最大動水圧分布

衝撃圧は内容液固定重量の慣性力による圧力であり入力加速度のみに依存する。振動圧は内容液自由重量の振動（スロッシング）による圧力、変形圧は壁面の変形に伴う相互作用的な圧力である。

本実験においては各内容液のケースとも、10Hz加振時には側壁各点とも入力加速度のままタンク構造体が振動する剛体運動であるため変形圧の影響は無視でき、またスロッシング領域はさらに低い振動数であることから振動圧の影響も無視できる。すなわち10Hz加振時に発生する動水圧は衝撃圧とみなすことができ、図-13に示すように、ケースBとケースCの内槽動水圧、ケースCとケースDの外槽動水圧はよく一致する。また、内槽動水圧はタンク壁面を剛体と考えたHousnerの式(1)で求めた値とも良く一致する。

Housnerの動水圧の式

$$P_w(Z, \phi) = \sqrt{3} \cdot Kh \cdot \rho \cdot g \cdot H \left\{ \frac{(H-Z)}{H} - \frac{1}{2} \left(\frac{H-Z}{H} \right)^2 \right\} \cdot \tanh \left(\frac{\sqrt{3} \cdot D}{2H} \right) \cdot \cos \phi \quad (1)$$

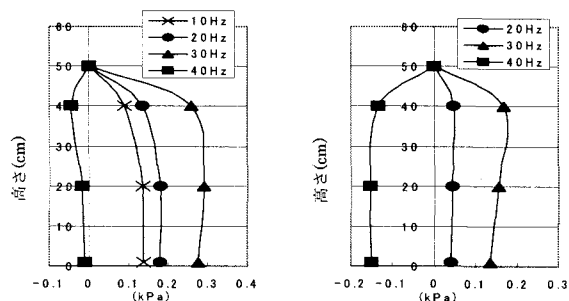
ここで、Z：タンク底面から側板の任意点高さ

ϕ ：振動方向と動水圧 P_w の作用方向のなす角

Kh：水平震度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度

H：水面高さ、D：タンク内径

振動数が高くなると壁面の変形が卓越してくるため変形圧の影響が無視できなくなる。壁面振動と入力加速度の位相ずれによって動水圧分布も計測各点で位相にずれが生じはじめ複雑な分布形状になる。図-14に全動水圧から衝撃圧を減じて求めた変形圧を示す。変形圧はタンク構造体の固有振動数で最大値となり、衝撃圧との位相ずれも小さく全動水圧は大きくなるが、さらに振動数が高くなると、衝撃圧を相殺する方向に変形圧が作用し、全動水圧は衝撃圧よりも小さくなることが理解できる。



1) 全動水圧 2) 変形圧 (全動水圧－衝撃圧)

図-14 ケースBの最大衝撃圧発生時の動水圧

4. 3 スロッシング

内容液の固有振動数周辺で加振を行い、水面の動揺をデジタルビデオカメラで撮影して最大波高を読み取った。また、そのときの動水圧も計測した。計測結果を図-15、16と表-6、7に示す。図-15は振動数と波高の関係を表した図であり、加振加速度2gal時の各振動数での最大波高を示す振動数をスロッシング振動数としている。図-16は振動数と動水圧の関係を表した図であり、動水圧

のピーク値に対応する振動数がスロッシング振動数である。表-6には波高と動水圧から得られた固有振動数の一覧を示している。表-6より、波高と動水圧から求めた固有振動数はよく一致していることが判る。また、内槽のスロッシング振動数はHousnerの式⁶⁾ (第(2a), (2b))から求めた値1.25Hzとよく一致している。

Housnerの振動数の式

$$\omega = \sqrt{\frac{1.84 g}{R} \tanh \left(1.84 \frac{H}{R} \right)} \quad (2a) \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2b)$$

ここで、 ω ：水面動揺の固有円振動、 g ：重力加速度

R：タンクの内半径、H：水面高さ

スロッシング波高は、どのパターンでも共振振動数で最大波高を示すと考えられるが、共振振動数から少しずれた振動数で最大波高を示す場合もある。これは、波の破碎、波の槽内での回転によって共振振動数での波高よりも大きくなったと考えられる。したがって、波高と動水圧のスロッシング振動数に少しの違いが見られるケースもある。表-7はスロッシング時の減衰定数である。この表より、本模型のスロッシング時における内容液の減衰定数は内槽0.002～0.003、外槽0.006～0.007と考えてよいであろう。

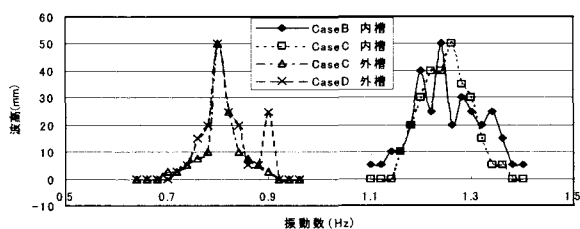


図-15 スロッシング波高 (加振加速度2gal)

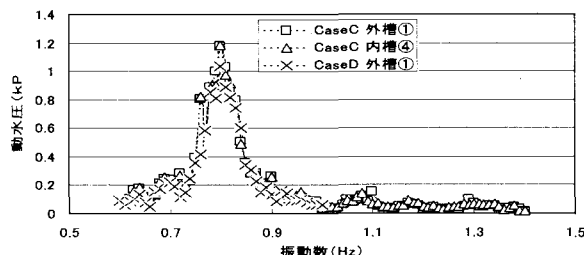


図-16 スロッシング動水圧 (加振加速度2gal)

表-6 スロッシング振動数 (Hz)

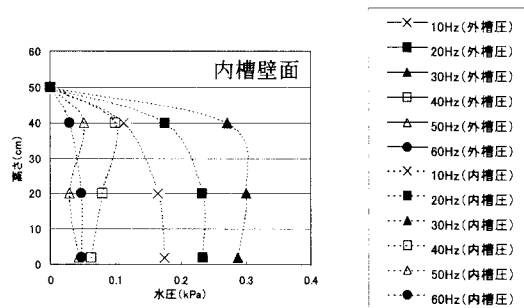
ケース	槽	波高より	動水圧より
B	内槽	1.24	1.24
	外槽	—	—
C	内槽	1.24	1.24
	外槽	0.80	0.82
D	内槽	—	—
	外槽	0.80	0.82

表-7 スロッシング時の減衰定数

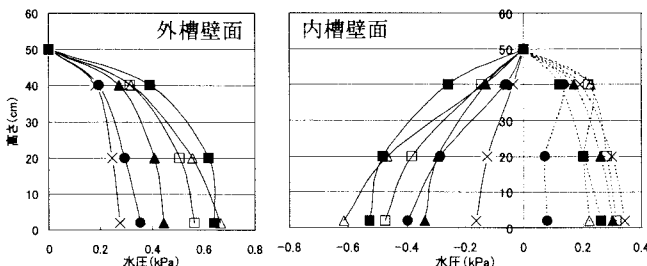
ケース	槽	減衰定数
B	内槽	0.002
	外槽	—
C	内槽	0.003
	外槽	0.006
D	内槽	—
	外槽	0.007

4. 4 内槽壁面に作用する動水圧

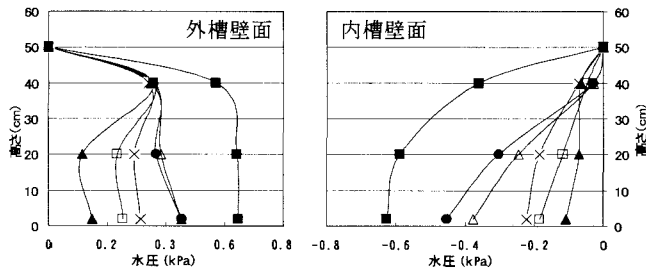
図-17は外槽、内槽の壁面に作用する最大動水圧を示している。図-18はケースCの⑤と⑧における加振振動数20Hz、30Hzの時の動水圧波形である。前述の表-4、5に示すように20Hz、30Hzは壁面の固有振動数付近のため、ほぼ逆位相になっている。したがって内槽壁面には壁面が剛体として運動する領域も含めて、外槽内の内容液による動水圧と内槽内の内容液による動水圧の向きは逆向きとなる。このことから内槽タンク壁面に働く動水圧の差による作用力は満水状態のケースCよりケースB、ケースDの場合に大きくなると推察される。



(a) ケース B



(b) ケース C (左: 外槽壁面, 右: 内槽壁面)



(c) ケース D (左: 外槽壁面, 右: 内槽壁面)

図-17 壁面に作用する最大動水圧

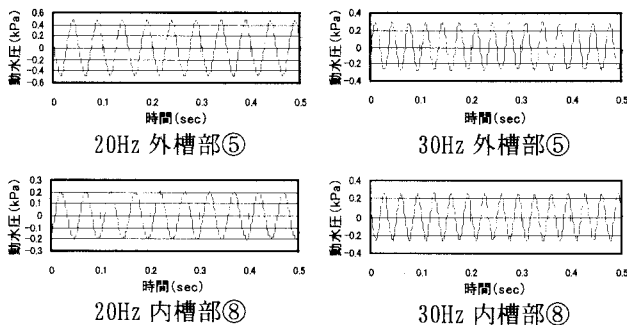


図-18 ケースC⑤と⑧の動水圧波形

5. 偏心二重槽円筒タンク

偏心A (図-19) は、図-8、9の外槽と内槽の壁面

間隔のうち、左側の間隔が広くなるように偏心させた場合で、+の偏心として表示している。偏心B (図-20) は左側の間隔が狭くなるように偏心させた場合で、-の偏心として表示している。偏心の場合も同心の場合と同様の振動台実験を行い、加速度、動水圧や動ひずみを計測し、得られたデータから共振曲線を求めた。

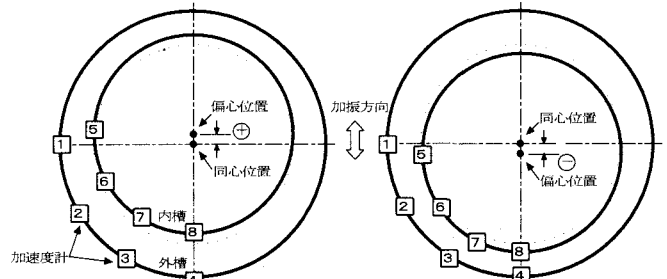


図-19 偏心A

図-20 偏心B

5. 1 タンクの固有振動数

内容液がない場合の構造体の固有振動数は同心二重槽円筒タンクと同じと考えられ、計測していない。また、ケースBも同心、偏心に関わらず同じ状況であり、両者の固有振動数、減衰定数は同じと考えられるため、偏心時の実験は実施していない。図-21はケースCでの加速度応答と動水圧の共振曲線の一例である。両者の共振振動数はよく一致していることが判る。

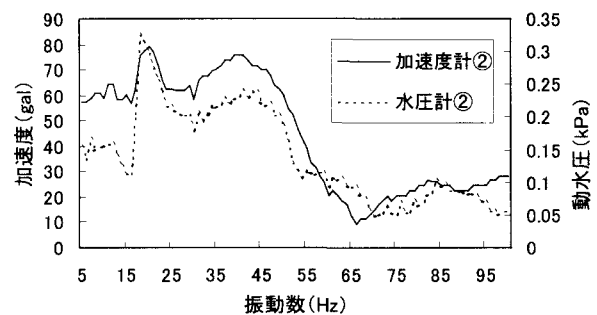


図-21 加速度と動水圧の共振曲線 (ケースC)

表-8、9はこれらの共振曲線から求めた固有振動数である。表-8は加速度応答から求めた固有振動数であり、表-9は動水圧から求めた固有振動数である。両者はよく似た値を示しているものの、固有振動数と偏心距離との相関は見られない。

表-8 加速度から求めた構造体の固有振動数

ケース	偏心距離 (mm)	外槽 (Hz)	
		1次	2次
C	20	21	47
	40	20	41
	-20	21	45
	-40	20	46
D	20	25	45
	40	24	49
	-20	19	46
	-40	20	54

表－9 動水圧から求めた構造体の固有振動数

ケース	偏心距離 (mm)	内槽 (Hz)		外槽 (Hz)	
		1次	2次	1次	2次
C	20	16	44	19	51
	40	17	41	18	42
	-20	15	46	19	46
	-40	16	46	18	42
D	20	—	—	19	52
	40	—	—	18	50
	-20	—	—	19	55
	-40	—	—	18	55

5. 2 動水圧

動水圧が衝撃圧，振動圧，変形圧の和として取り扱えることは，偏心の有無に関わらず同じと考えられる。しかし，外槽と内槽の壁面間隔の広い側と狭い側では動水圧分布が異なることが予想され，5.3で詳述する。

5. 3 スロッシング

表－10は最大偏心距離40mmにおけるスロッシング振動時の動水圧の共振曲線から求めた固有振動数と減衰定数である。表－11は，偏心距離(+)ごとに波高と動水圧それぞれの共振曲線から求めた固有振動数である。偏心時の外槽のスロッシング振動数は，偏心距離に応じて高くなっていることが判る。それに対し，減衰定数は偏心距離によって異なるが，偏心距離との関係は見られない。しかし，偏心時の減衰定数は同心の場合よりやや大きい値となっている。この理由は不明である。

表－10 スロッシング振動数と減衰定数

ケース	偏心距離 (mm)	槽	振動数 (Hz)	減衰定数
C	40	内槽	1.24	0.004
		外槽	0.83	0.007
	-40	内槽	1.24	0.005
		外槽	0.83	0.009
D	40	内槽	—	—
		外槽	0.83	0.006
	-40	内槽	—	—
		外槽	0.83	0.009

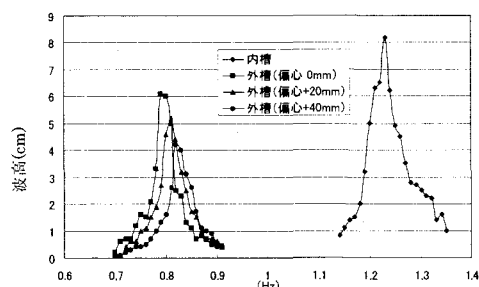
表－11 スロッシング振動数と偏心距離

	槽	偏心距離(mm)				
		0	10	20	30	40
波高	内槽	1.22	—	—	—	—
	外槽	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83
動水圧	内槽	1.23	—	—	—	—
	外槽	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83

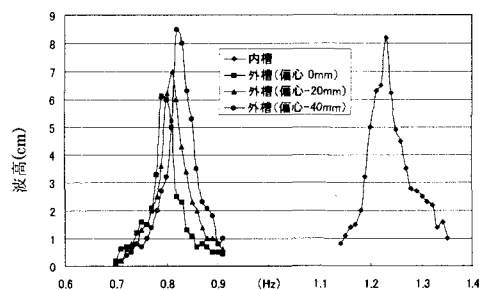
スロッシング波高は図－22，23に示すように，偏心距離により外槽と内槽の壁面間隔が広い側と狭い側で異なる結果となった。広い側は偏心距離に応じてピーク波高が減少し，狭い側はピーク波高が増加する傾向となった。この傾向は設計方法の検討に際し重要な知見である。

この偏心距離を外槽と内槽の半径の差で除したものを偏心率と定義し，偏心時の固有振動数を同心時のもので除したものを振動数比⁷⁾と定義し，それらの関係を図－24に示す。偏心率が0.1未満であれば，その固有振動数

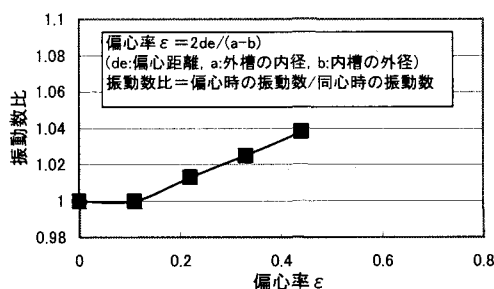
は同心の場合とほとんど変わらないといつてよい。0.1以上では，偏心距離に応じた検討が必要となってくる。



図－22 偏心量とスロッシング波高(加振加速度2gal)



図－23 偏心量とスロッシング波高(加振加速度2gal)

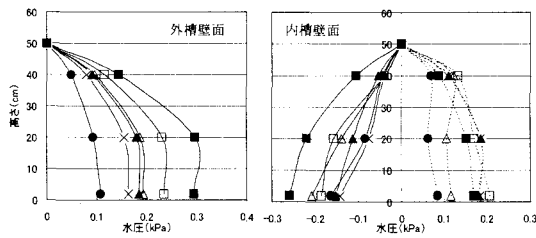


図－24 偏心率とスロッシング振動数比

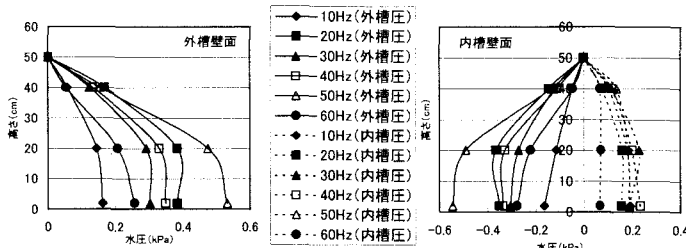
5. 4 壁面に作用する動水圧

図－25は偏心距離40mmの場合の各振動数におけるケースC，Dの外槽，内槽の壁面に作用する最大動水圧を図示している。偏心距離を+側と－側に入れ替えることにより，壁面間隔の広い側と狭い側の動水圧を計測している。ケースCでは内壁に作用する動水圧は内槽圧より外槽圧が大きい。これは同心の場合と同じ傾向であるが，動水圧の大きさは，壁面が広い側では同心の場合が大きく，壁面が狭い側では同心の場合とあまり差がない。外槽部では，壁面間隔が広い側では外壁に作用する動水圧が内壁の動水圧より大きく，狭い側では外壁に作用する動水圧が内壁の動水圧より小さい。ケースDでは20Hzのときに内壁に大きな動水圧が生じている。これは表－9に示す外槽の固有振動数に起因していると考えられる。他の振動数では外壁と内壁の動水圧に顕著な差は見られない。

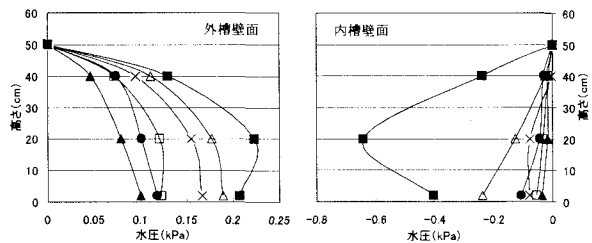
壁面間隔が広い側と狭い側を偏心量ごとに比較したものを図－26に示す。図から分かるように狭い側の動水圧が偏心量にしたがって大きくなる。これは，スロッシング波高と同じ傾向である。これは，広い側と狭い側に



1) ケースC (壁面間隔広い側)



2) ケースC (壁面間隔狭い側)



3) ケースD (壁面間隔広い側)

図-25 壁面に作用する動水圧

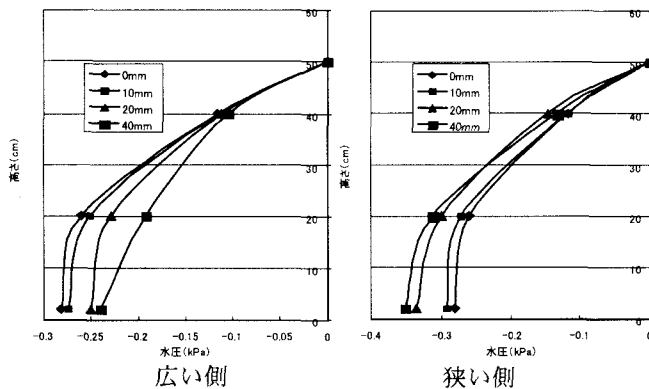


図-26 偏心量と壁面に作用する動水圧

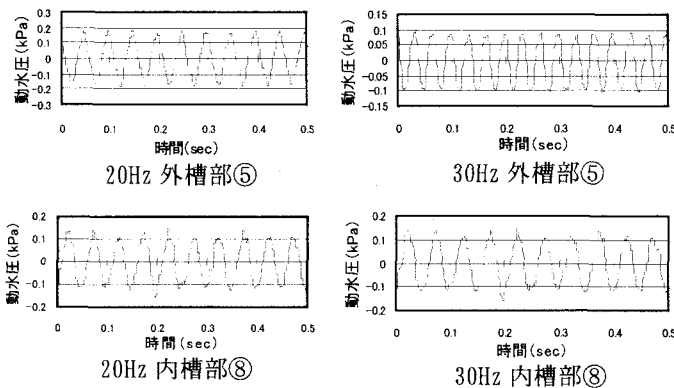


図-27 ケースC⑤と⑧の動水圧波形(偏心40mm)

互に振動エネルギーが与えられても壁面間隔の差からくる面積の差によって、狭い側が動水圧、スロッシング波高とも大きくなるものと考えられる。図-27はケースCの⑤と⑧における加振振動数20Hz, 30Hzのときの動水圧波形である。壁面の固有振動数付近のため、わずかながらの位相差は見られるが、ほぼ逆位相になっている。この状態は全ての振動数で観察される。したがって、同心の場合と同じように外槽内の内容液による動水圧と内槽内の内容液による動水圧の向きは逆向きとなる。このことから内槽壁面に働く動水圧による作用力はケースCよりケースDの場合に大きくなる。

6. 結論

二重円筒槽タンク模型の振動台実験から得られた知見は以下の通りである。

- ①固有振動数は内容液の質量に応じ、ケースA, ケースBまたはケースD, ケースCの順に小さくなる。
- ②スロッシング振動数は偏心率と共に大きくなり、偏心率が0.1未満では同心の場合と同じとして良い。
- ③満水時(ケースC)の内槽壁面に作用する動水圧は内槽部と外槽部で逆向きとなる。
- ④外槽壁面と内槽壁面に作用する動水圧はケースCの場合より、ケースB, ケースDの場合が大きい。
- ⑤同心時に外槽壁面と内槽壁面に作用する動水圧は偏心時のそれより大きい。
- ⑥偏心により外槽と内槽の壁面間隔に広い側と狭い側が形成され、偏心量にしたがい壁面間隔の狭い側の動水圧やスロッシング波高が広い側のそれより大きくなる。

参考文献

- 1) Mohammad Aslam, William G. Godden, D. Theodore Scalise: Earthquake Sloshing in Annular and Cylindrical Tanks, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, EM3, pp.371-389, June 1979.
- 2) K. Arakawa and K. Tanaka: Relationships between fracture parameters and fracture surface roughness of brittle polymers, International Journal of Fracture 48, pp.103-114, 1991.
- 3) 北原伸浩 他4名: 二重槽タンクの振動実験, 土木学会第56回年次学術講演会 I-B, pp.40-41, 2001.
- 4) 井上, 小田, 高橋: 二重槽タンクの振動台実験, 平成12年度九州産業大学工学部土木工学科卒業論文, 平成13年2月.
- 5) 水田洋司: 二重槽タンクの振動実験報告書, 平成13年3月.
- 6) G.W. Housner: Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.1, pp.15-35, 1957.
- 7) 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.

(2003年9月12日受付)