

密閉円筒型水槽の内容水の振動特性と 底面反力の関係に着目した振動台実験

藤田亮一¹，家村浩和²，五十嵐晃³，重富祐⁴

¹ 日本技術開発株式会社 （〒531-0072 大阪市北区豊崎 5 丁目 6-10）

E-mail: fujitary@jecc.co.jp

² 近畿職業能力開発大学校 校長 （〒596-0103 大阪府岸和田市稲葉町 1778）

E-mail: h1.iemura@endo.go.jp

³ 京都大学大学院工学研究科 准教授 （〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

E-mail: igarashi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴ 西日本旅客鉄道株式会社 （〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4224）

本論文では、密閉円筒型水槽の内容水の振動特性と底面反力の関係に着目した振動台実験の結果について報告する。地上設置型タンクの基礎構造や高架水槽支持構造の耐震設計においては、内容水の運動によって水槽底面に生じる力が支配的となるため、この荷重の推定が重要である。本論文では、特に大地震時の内容水の挙動と底面反力の関係に着目し、基礎的な情報を得るために水槽模型を用いた振動台実験を行った。実験の結果、密閉された水槽では内容水のスロッシングの成長が屋根によって妨げられ、密閉されていない水槽に比べて底面反力が低減される現象が確認された。

Key Word: cylindrical water tank, shaking table, base reaction force

1. 背景と目的

地上設置型タンクや高架水槽のような貯水タンクの耐震設計にあたっては、内容水の動きによって生じる動水圧が構造物に及ぼす影響が大きく、しばしば構造諸元決定の支配要因となる。特に、地上設置型タンクの基礎構造や高架水槽の支持構造に対しては、動水圧によって生じるタンク本体のスウェイ・ロッキング挙動が大きく影響し、1995 年の兵庫県南部地震以降は、耐震設計に用いる地震力がそれ以前に比べて飛躍的に増大したことから、その傾向が顕著になっている。¹⁾²⁾したがって、内容水が構造物に及ぼす影響を精緻に評価することが設計の合理化につながることは明らかであるが、強震動作用時の密閉容器内の液体の挙動は大変複雑であるため、一般には速度ポテンシャル理論に基づく簡便な方法が適用されているのが実状である。³⁾⁴⁾

上記のような背景をふまえ、本研究では強震動作用時の密閉容器内の液体が構造物に及ぼす影響を把握するため、小型水槽を用いた振動台実験を行った。結果の評価にあたっては、特に内容水によって生じる水槽のスウェイ・ロッキング挙動に着目し、水槽底面の反力（≒水槽支持構造に地震時に作用する荷重）が加振レベルや振動数に応じて変化する様子を分析した。また、実験結果を設計計算で用いられる Housner モデルによるシミュレーションと対比して挙動の傾向を確認した。

2. 実験条件

(1) 振動台の概要

本実験では、油圧式振動台を使用した。この振動台は加振テーブルを水平 1 方向に電気油圧サーボ式アクチュエーターにより駆動させ入力波形を再

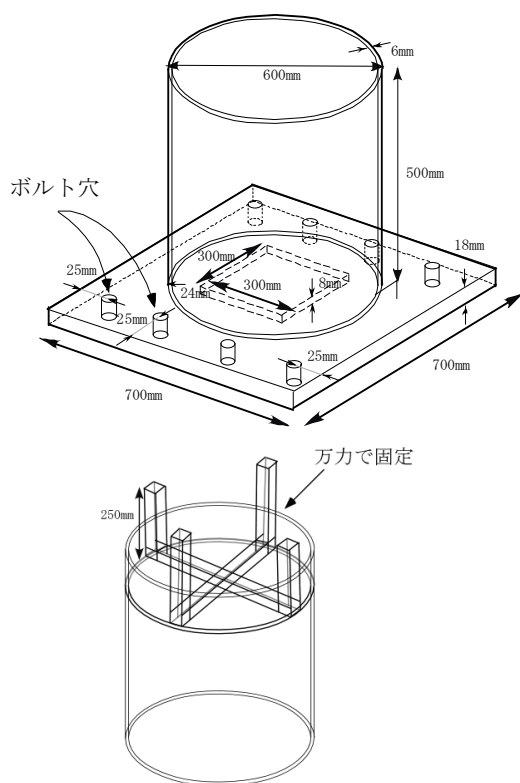
現するものである。振動台の主な性能を表－１に示す。

表－１ 振動台の諸元

振動台寸法	1.5m×1.5m
最大搭載重量	2 ton
最大加振力	3 ton-g
加振方向	水平 1 方向
最大振幅	±100mm
最大速度	40cm/sec
周波数範囲	0.5～30Hz
駆動方式	電気油圧サーボ式
振動台支持方式	油圧浮上方式

(2) 水槽模型の概要

本実験では、図－１に示すようなアクリル製の円筒型タンク模型を用いた。このタンク模型の外径は600mm、厚みは6mm、高さは500mmである。このタンク模型に同じくアクリル製の厚さ10mmのふたを万力で4箇所固定し、固定屋根式円筒型液体貯蔵タンクを再現する。なお、水深は200mmとした。表－２に水槽の諸元を示す。



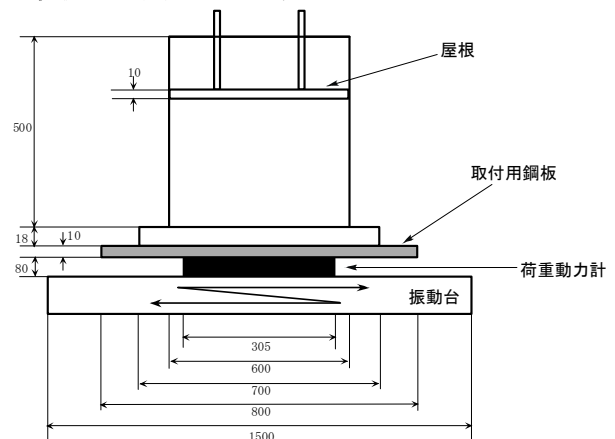
図－１ タンク模型概要

表－２ 水槽の諸元

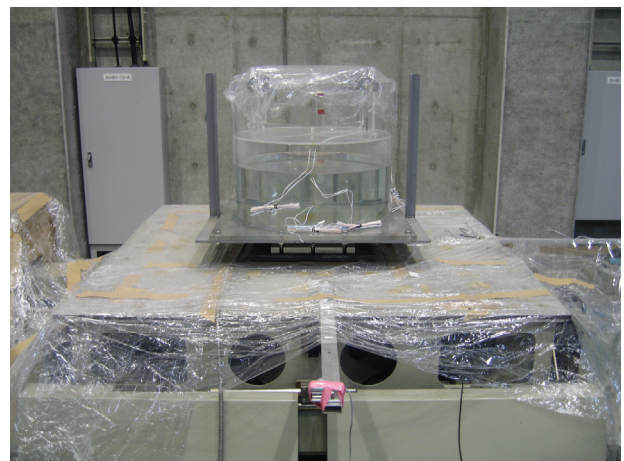
外径	600mm
内径	588mm
高さ	500mm
タンク本体重量	16.15kg
ふた重量	2.7kg
取付用鋼板重量	38.2kg
全体重量(取付治具含む)	64.7kg

(3) 実験システムと計測項目

実験システムの概要を図－２に示す。前述した振動台の上に荷重動力計を設置し、その上に取付用鋼板を介して水槽を設置した。荷重動力計による計測項目は、水槽底面のせん断力、転倒モーメントおよび鉛直反力であり、それ以外に振動台の変位と加速度を変位計および加速度計で計測した。実験装置の外観を写真－１に、振動台上に設置した荷重動力計の状況を写真－２に示す。



図－２ 実験システム概要



写真－１ 振動台と水槽模型



写真-2 荷重動力計

(4) 実験ケース

本論文では、実施した実験のうち表-3 に示す二つのケースについて報告する。⁵⁾

Case1 シリーズは、屋根の有無に着目して水槽の基本的な挙動を確認するための実験であり、振動台に振幅 4mm の正弦波を 10 波入力した後に自由振動させたものである。加振振幅 4mm という設定は、本実験で用いた屋根無しタンクにおいて液面がタンクを越えない範囲の最大の振幅である。加振振動数は、自由振動試験から導出した液面動揺の固有振動数 1.14Hz とした。Case1-0 では屋根を設置せず、Case1-1 では屋根を高さ 30cm (液面との距離は 10cm)、Case1-2 では 25cm (同 5cm) に固定した。

Case2 シリーズでは、加振振幅および加振振動数と内容水の応答の関係を把握するため、振幅が 2mm から 20mm まで 2mm 刻みで増加していくスイープ波を入力した。振動数は 0.5Hz から 2.5Hz まで変化させ、固有振動数をはさむ 0.5Hz から 1.5Hz までは 0.1Hz 刻み、1.5Hz から 2.5Hz までは 0.5Hz 刻みで加振を行った。Case1 シリーズ同様、Case2-1 では屋根を高さ 30cm に、Case2-2 では 25cm に固定した。

表-3 実験ケース概要

	Case1	Case2
入力波	正弦波	スイープ波
加振振幅 (mm)	4.0	2.0~20.0(2.0 刻み)
振動数 (Hz)	1.14	0.5~1.4(0.1 刻み) 1.5~2.5(0.5 刻み)
屋根高さ (cm)	無し, 30, 25	30, 25

3. 実験結果

(1) Case1 シリーズの実験結果

実験結果については、特に水槽底面に発生するせん断力とモーメントに着目して整理した。その際、内容水によって生じる底面反力を抽出するため、振動台の加速度に水槽や取付鋼板等の重量を乗じた水槽自身による慣性力を荷重動力計の計測データから差し引いて整理した。本節以降に示す実験から得られた底面反力は、このような処理を施した後のものである。

Case1 シリーズの実験において計測された底面反力の時刻歴波形を図-3~図-4 に示す。液面が屋根に達したのは、Case1-1 (屋根高 30cm) では 8 波目、Case1-2 (屋根高 25cm) では 4 波目であった。屋根が無いケースに比べて、屋根高 30cm、25cm のケースともに底面せん断力と底面モーメントの最大値が小さくなっており、屋根高 30cm では屋根無しの約 7 割、屋根高 25cm では約半分の値となっている。液面が屋根に達するまでは、屋根の有無や高さにかかわらずほぼ同じ応答を示しているが、液面が屋根に達するとその時点で応答振幅が頭打ちになっていることがわかる。

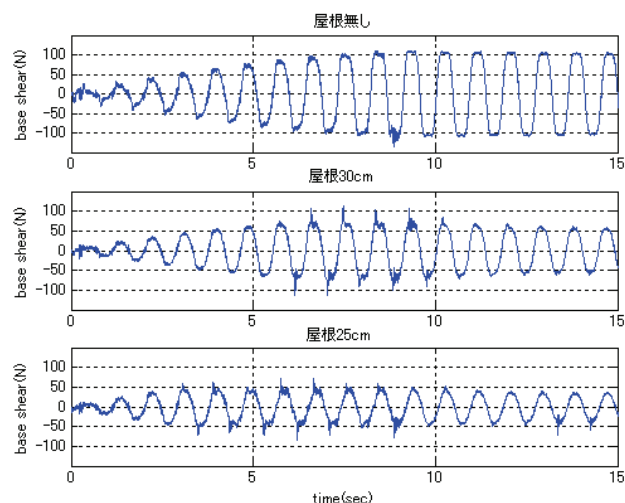
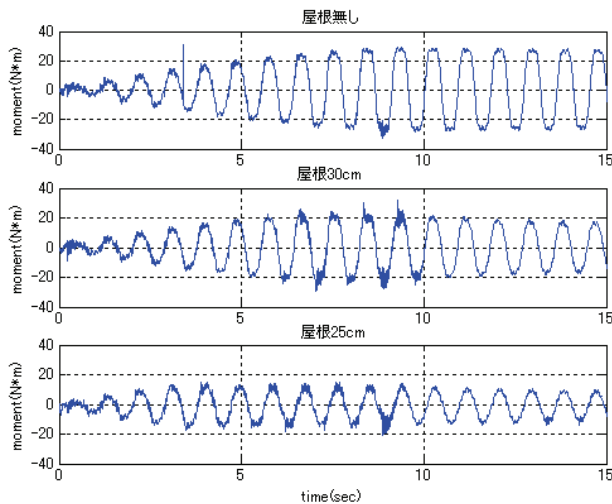
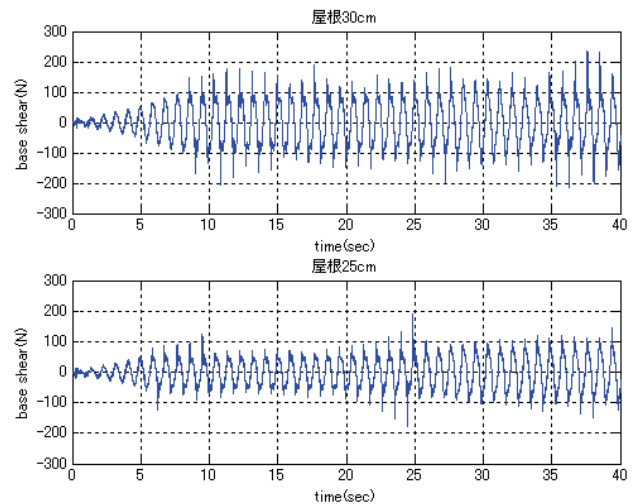


図-3 底面せん断力時刻歴波形 (Case1)



図－4 底面モーメント時刻歴波形 (Case1)

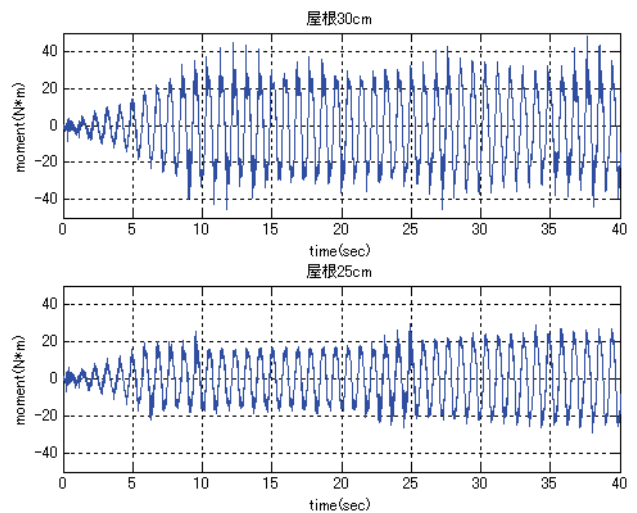


図－5 底面せん断力時刻歴波形 (Case2, 1.1Hz)

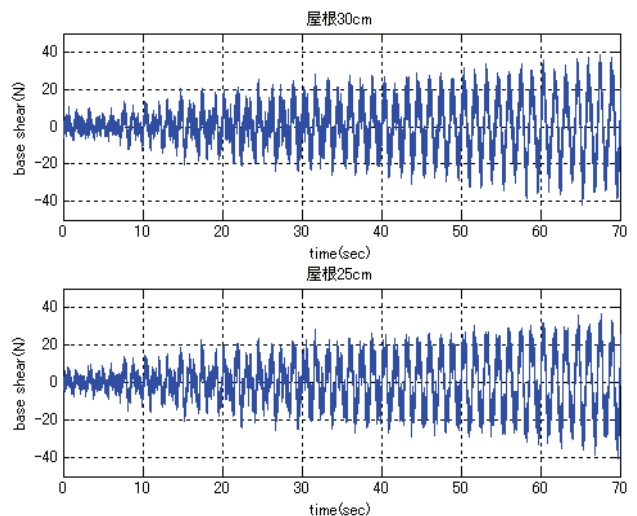
(2) Case2 シリーズの実験結果

Case2 シリーズでは、Case1 シリーズで着目した屋根の影響に加え、加振振幅と加振振動数をパラメータとして実験を行った。実験の結果、Case2-1(屋根高 30cm)、Case2-2(屋根高 25cm)ともに振動数 0.9Hz 以上のほぼ全ての振動数において液面が屋根まで達することが確認できた。各振動数での加振の中で、内容液の運動が最も大きい(固有振動数に近く、応答振幅が大きい)振動数 1.1Hz での底面せん断力と底面モーメントの時刻歴波形を図－5～図－6 に示す。同図より、時間の経過と共に加振振幅が増加しているにもかかわらず、底面反力がある一定のレベルで頭打ちになる傾向が確認できる。屋根の高さの違いに着目して対比すると、全般的に屋根が高い方が最大応答値は大きくなっており、Case2-1(屋根高 30cm)に比べて Case2-2(屋根高 25cm)は底面せん断力と底面モーメントがともに約 7 割～半分程度となっている。

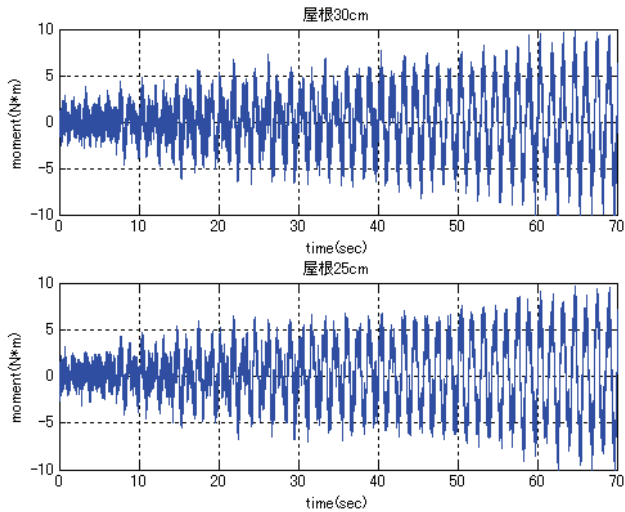
固有振動数 (1.14Hz) 付近からはずれた振動数領域においては、必ずしも振幅が頭打ちになるまで振動が成長しないケースも見られ、振動台の加振振幅が増加するにつれて底面反力も漸増する傾向が見られた。それらの結果の中から振動数 0.7Hz および 2.5Hz で加振したときの底面せん断力と底面モーメントの時刻歴波形を図－7～図－10 に示す。



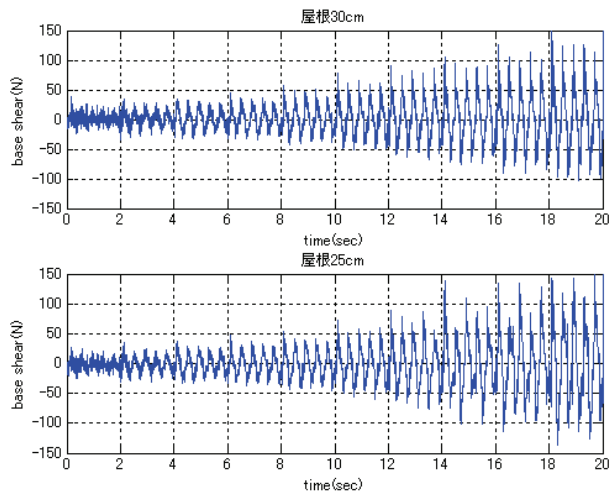
図－6 底面モーメント時刻歴波形 (Case2, 1.1Hz)



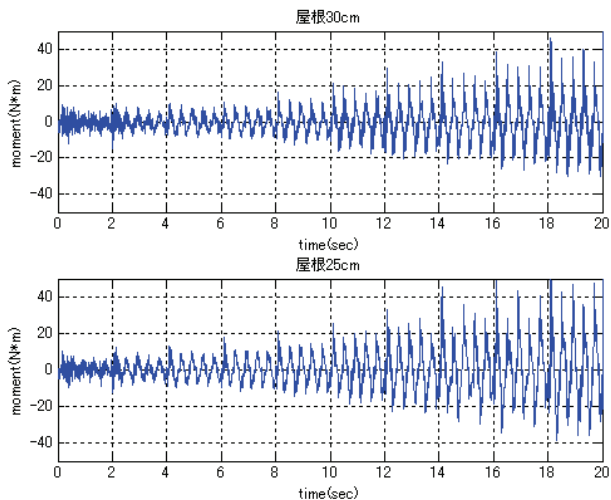
図－7 底面せん断力時刻歴波形 (Case2, 0.7Hz)



図－8 底面モーメント時刻歴波形 (Case2, 0.7Hz)



図－9 底面せん断力時刻歴波形 (Case2, 2.5Hz)



図－10 底面モーメント時刻歴波形 (Case2, 2.5Hz)

4. 内容水の挙動分析

(1) 検討条件

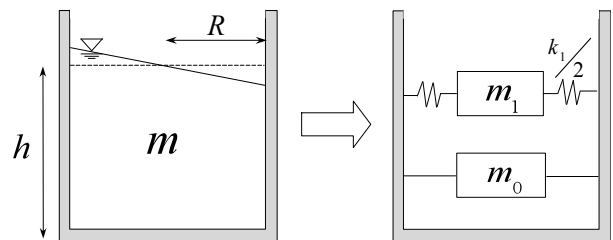
本章では、前章までに示した実験結果に基づき、内容水の応答特性について分析する。内容水の応答の振動数依存性と振幅依存性を把握するため、Case2 シリーズの実験から得られた底面反力をもとに、以下に示す方法にもとづいて応答倍率を計算した。

まず図－11 に示すように、内容水の挙動を表層の自由水 m_1 と深部の固定水 m_0 に分離して表現する

こととし (Housner のモデル化手法⁶⁾)、一自由度振動系にモデル化した。その上で、3.1 に示した方法により底面せん断力から自由水以外の慣性力の影響 (固定水に作用する慣性力を含む) を差し引き、自由水により発生する底面せん断力を抽出してこれを F とする。一方、自由水の質量に振動台加速度を乗じたものを F' とし、自由水の応答倍率を $|F/F'|$ で定義する。 F は、自由水部分に作用する慣性力に等しいため、底面せん断力の応答倍率は式 (1) のように変形できる。この際の x は、図－11 のように自由水を 1 質点とみなし、線形 1 自由度振動系として考えたときの質点 (自由水) の水平相対変位である (振動台の水平変位を z とした)。

$$\left| \frac{F}{F'} \right| = \left| \frac{F}{m_1 \ddot{z}} \right| = \left| \frac{F/m_1}{\ddot{z}} \right| = \left| \frac{\ddot{x} + \ddot{z}}{\ddot{z}} \right| \quad (1)$$

このようにして得られた応答倍率を加振振動数と加振振幅と関連づけて整理することで、一自由度振動系としての内容水の挙動を分析した。また、Housner モデルを用いた数値シミュレーション結果と実験結果の対比も行った。



図－11 Housner による内容水のモデル化

(2) 内容水の振動特性

ここでは、Case2 シリーズの実験結果を対象として内容水の振動特性を分析する。前節に示した方法により自由水の応答倍率を整理した結果を図－12

および図-13 に示す。

同図に示すとおり、全般的な傾向として 1.1Hz 付近で応答倍率のピークが生じており、一自由度振動系の伝達関数のような形状になっている。

屋根高 30cm のケースについて見ると、加振振幅が小さいところでは応答倍率にばらつきがあるものの、加振振幅が 6mm 以上になると応答倍率のピークが振幅の増加につれて減少していき 14mm 以上ではほぼ一定値になることがわかる。屋根高 25cm のケースでは、加振振幅が 4mm~12mm の範囲では応答倍率のピークがほぼ一定になっており、それ以上については振幅の増加にともなってピーク値が減少していく様子が確認できる。これらの結果から、全般的な傾向としては、振幅の増加につれてピークが低下しているといえる。また、屋根高 25cm のケースよりも 30cm のケースの方が大きな応答倍率となっている。屋根高が低い方が液面と屋根の衝突が生じやすく、内容水の動きが拘束されて振動が低減されているものと考えられる。

次に、各振幅の応答倍率のグラフに一自由度振動系の伝達関数を最小二乗法によりフィッティングし、自由水の固有振動数と減衰定数を同定した。その結果を図-14~図-17 に示す。

固有振動数について見ると、屋根高 30cm のケースでは、加振振幅にかかわらずほぼ一定の値となっているのに対し、屋根高 25cm のケースでは、ばらつきはあるものの傾向としては振幅の増加につれて振動数が減少している様子が確認できた。振幅が増すと液面と屋根の衝突が激しくなり、結果として見かけの減衰が増して振動数が低減されていると考えられる。

減衰定数については、屋根高 30cm、25cm のケースともに加振振幅の増加とともに増加する傾向が見られ、前述の固有振動数と同様に屋根との衝突により内容水の動きが低減されている効果が確認できる。減衰定数の大きさは屋根高 30cm のケースより屋根高 25cm のケースの方が大きく、液面と屋根の距離が小さい方が衝突による減衰効果が発揮されやすいことと整合する結果である。減衰定数の絶対値としては、屋根高 25cm の場合で数パーセントから 10 パーセントを超える値が示されており、速度ポテンシャル理論をベースとした FEM 解析等において内容水の減衰定数をほぼ 0 として設定することから考えると比較的大きな値であるといえる。

7)8)9)10)

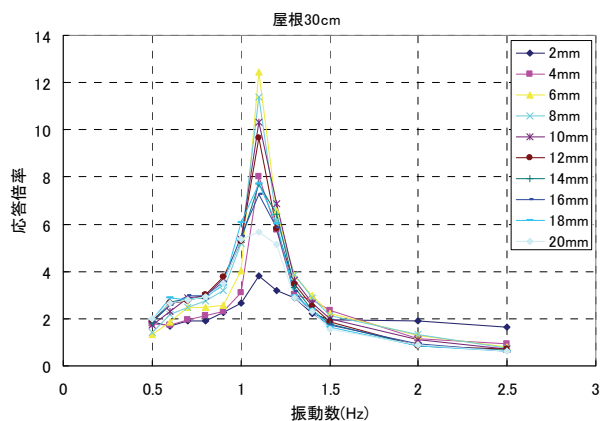


図-12 自由水の応答倍率 (Case2-1)

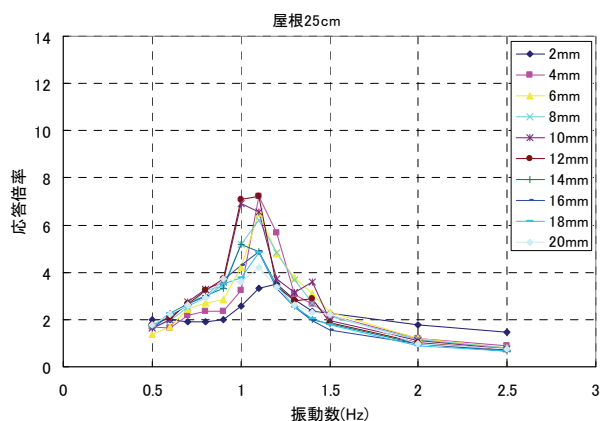


図-13 自由水の応答倍率 (Case2-2)

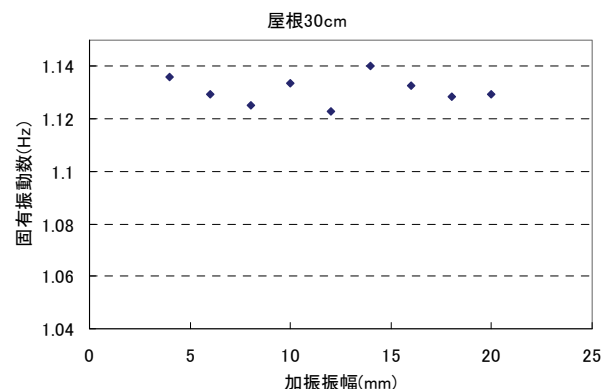


図-14 自由水の固有振動数 (Case2-1)

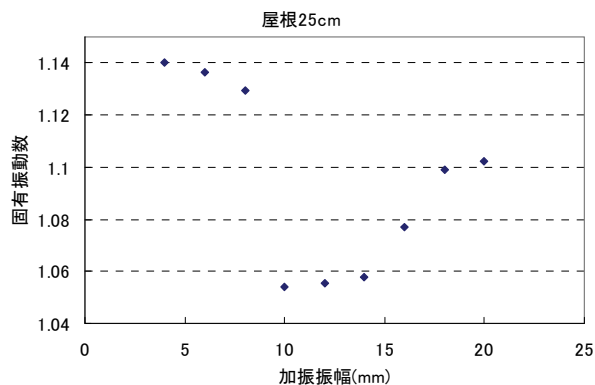


図-15 自由水の固有振動数 (Case2-2)

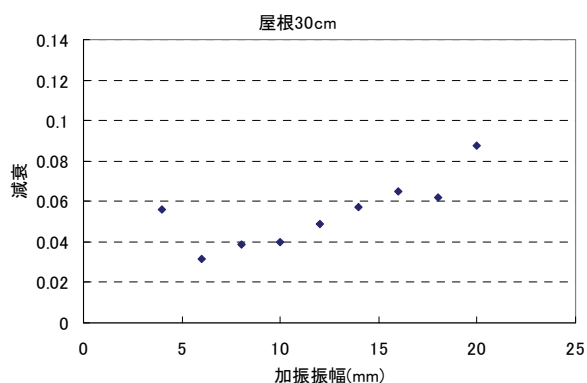


図-16 自由水の減衰定数 (Case2-1)

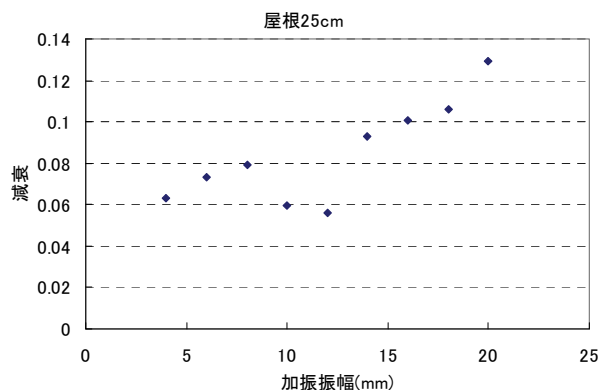


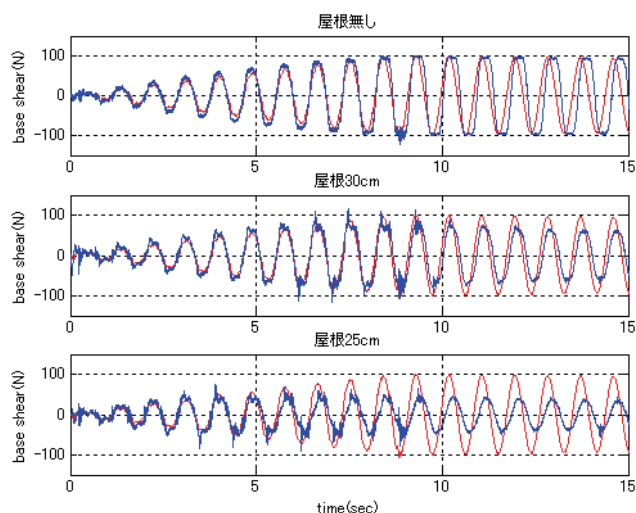
図-17 自由水の減衰定数 (Case2-2)

(3) 数値シミュレーションと実験結果の比較

前述の応答倍率算定に用いた Housner モデルに振動台の加速度を入力して応答解析を行い、計算結果と実験結果を対比した。対象とした実験は Case1 シリーズである。結果を図-18 に示す。

同図に示すとおり、屋根のない場合には Housner モデルと実験結果はほぼ一致しており、内容水の挙動を精度良く再現できているといえる。後半の自由振動では若干の位相のずれが見られるものの、構造物の設計という観点からみると、振幅・周期ともに

十分な精度で推定できていると考えられる。一方、屋根を設置して水槽を密閉した場合には、内容水と屋根(密閉容器)の相互作用により応答値が低減されるが、Housner モデルにはそのような影響が加味されていないため最大応答値が実験結果よりも大きくなる傾向が見られる。特に屋根が 25cm のケースではその傾向が顕著であり、実験値は計算値のほぼ半分になっている。



青線：実験結果

赤線：解析結果

図-18 実験結果とシミュレーションの比較

5. まとめと課題

本研究では、貯水タンクのような密閉容器構造の地震時挙動に着目し、内容水の動きが容器構造の底面反力に及ぼす影響を把握するために振動台と水槽模型を用いた振動実験を実施した。実験から得られた底面反力を振動数と振幅に着目して整理するとともに、簡便な数値解析を行って内容水と底面反力の関係を分析した。これらの分析をとおして得られた知見を以下にまとめる。

- ① 密閉容器内の液面が振動により屋根に衝突すると、容器構造の底面反力(せん断力、モーメント)が屋根の無い場合に比べて減少することが明らかになった。
- ② 上述の底面反力の低減効果は、屋根が低く液面と屋根の距離が短い場合により大きくなることが確認できた。
- ③ 加振振幅を大きくした方が、液面と屋根の衝突による底面反力の低減効果が大きくなる傾向が見られた。

- ④ Housner のモデルを実験結果に適用し、自由水に相当する部分の応答倍率を算定した結果、加振振幅の増加にともなって応答倍率が減少することが確認できた。
- ⑤ 上記応答倍率に一自由度振動系の伝達関数をフィッティングさせて自由水の減衰定数を同定した結果、10 パーセント前後の値を示すことがわかった。
- ⑥ Housner モデルによる数値解析と実験結果は、屋根のない場合にはほぼ一致するが、屋根と液面が衝突する場合には数値解析の方が大きい値を示すことが確認できた。

以上の結果から、密閉容器内の内容水が大きく加振されて屋根に衝突するような場合には、屋根がない状態に比べて水槽底面に作用するせん断力やモーメントが低減される傾向が確認できた。水槽底面の反力は、実構造物においては高架水槽の支持構造や地上水槽の基礎構造に作用する地震荷重であり、実験を通して確認された低減効果を考慮することでこれらの構造物の耐震性能照査の精度向上や耐震設計の合理化につながる可能性があると考えられる。

今回は限られた条件での実験結果から上記のような傾向を見出すことができたが、今後は実験パラメータの範囲を拡大して構造諸元や外力と底面反力の関係をより一般的な形で把握するとともに、底面反力低減効果を取り込んだ簡易な数値解析法を確立して容器構造の耐震設計の合理化につなげていきたいと考えている。

謝辞：本論文で報告した実験を実施するにあたり、豊岡亮洋氏（鉄道総合技術研究所、当時京都大学大学院助教）と竹岡将之氏（飛鳥建設株式会社）には多大なる御助力をいただきました。ここに記して心から感謝の意を表します。

付録 Housner モデル

半径 R の円筒水槽に水深 h の内容水がある場合、Housner モデルの各パラメータは以下の式で与えられる。

$$m_0 = m \frac{\tanh 1.7R/h}{1.7R/h} \quad (2)$$

$$m_1 = 0.6m \frac{\tanh 1.8h/R}{1.8h/R} \quad (3)$$

$$k_1 = 5.4 \frac{m_1^2 gh}{mR^2} \quad (4)$$

ここに、

m 内容水の全質量

m_0 固定水の質量

m_1 自由水の質量

k_1 自由水の剛性

である。本文で示した実験諸元を適用した場合の各パラメータの値は以下のとおりである。

表-4 Housner モデルのパラメータ

m	54.3kg
h	20cm
R	29.4cm
m_0	21.4kg
m_1	22.4kg
k_1	1129N/m

参考文献

- 1) 藤田亮一, 林雄一, 森敦, 磯山龍二：鋼製高架水槽の動的耐震診断手法について，水道協会雑誌, vol.68-5, 1999.
- 2) A. Mori, R. Fujita, K. Yasugi, R. Isoyama, Y. Hayashi and K. Niwa: A study on aseismic verification and retrofit methods for an elevated water tank against strong earthquakes: 12 th World Conference on Earthquake Engineering, No.1069, 2000.
- 3) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
- 4) (社)日本建築学会：容器構造設計指針・同解説, 1996.
- 5) 重富祐, 五十嵐晃, 藤田亮一, 家村浩和：円筒型タンクの固定屋根に液面が衝突する場合の底面せん断力に関する振動台実験，土木学会第 62 回年次学術講演会, 1-571, 2007.
- 6) G. W. Housner : THE DYNAMIC BEHAVIOR OF WATER TANK, Bulletin of the Seismological society of America. Vol.53, 1963.

- 7) 嶋田三朗, 山田善一, 家村浩和, 野田茂: 円筒タンクの非線形スロッシング解析に基づく長周期応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, 第 368 号 / I-5, pp383-392, 1986 年 4 月
- 8) 座間信作, 吉原浩, 亀井浅道: 大型円筒水槽におけるスロッシング観測, 消防研究所報告 第 61 号, pp1-8, 1986 年 3 月
- 9) 星谷勝, 辻田満, 檜出正人, 永田茂: 断層モデルを用いたスロッシング解析の確率論的評価法, 土木学会論文集第 350 号 I-2, pp311-319, 1984 年 10 月
- 10) Narioki AKIYAMA, Hiroki YAMAGUCHI, Yukio ENYA: DYNAMICS OF A LIQUID TANK PLACED ON AN ELASTIC FOUNDATION, Proc. Of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng. Vol. 3. No. 2, 447s-456s. October 1986