

# 免震液体貯蔵タンクを対象としたサブストラク チャーハイブリッド振動台実験

# 五十嵐晃1·家村浩和2·鶴田大輝3

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町) E-mail: igarashi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>2</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町) E-mail:iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>3</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町) E-mail: turuta@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は、「サブストラクチャーハイブリッド振動台実験法」を用いて、液体貯蔵タンク全体を免震構 造とした場合の効果に関する基礎的な検討を行ったものである。その結果、サブストラクチャーハイブリ ッド振動台実験により、貯蔵液体の慣性力等により発生するタンク側板への水平作用力や、貯蔵液体のス ロッシングなど、免震液体貯蔵タンクの動的応答の検討が可能であることを示すとともに、免震支承の特 性の適切な選択により非常に大きな免震効果が得られることを実験的に明らかにした。

Key Words : liquid storage tank, dynamic response, shake table test, numerical computation, bilinear model

# 1. はじめに

大規模地震に対する液体貯蔵タンクの耐震性の問題は、Kocaeli地震による石油タンクの被害の例等からも示唆されるように、現在まで重要なものとなっている。液体貯蔵タンクの地震時安全性を高めるための方策として、タンク全体を免震支承で支持する形式により免震化をはかるものがあり、実施された例もある。

液体貯蔵タンク本体の地震被害は、次の三つに分 類することができる<sup>1)</sup>。

(1)地震動の長周期成分によるスロッシングを原因と するタンク天井部、側板上部の被害及び浮屋根式タ ンクの場合には内容物の溢流

(2)地震動の短周期成分によるバルジング(液体とタンク本体との連成振動)を原因とする側板座屈 (3)地盤の液状化による基礎の被害

このうち、振動による直接的被害には(1)と(2)が 該当し、液体貯蔵タンクの免震構造化は主に(2)の対 策である。タンクが免震化により長周期化される結 果、応答加速度が低下するため地震動によって生じ る慣性力が減少する。このことは、液体貯蔵タンク において、側板に作用する流体による水平力が減少 し、ベースシアや転倒モーメントの低減効果が期待 できることを意味している<sup>2)</sup>。しかしながら、液体 のスロッシングに対しては逆効果となる可能性もあ り、より詳細な検討を行い、その特性に関する知見 を得る必要がある。

本研究は、地震時の免震液体貯蔵タンクと内容液 体の挙動、ならびに免震構造としての効果を検討す るため、数値モデル解析・振動台実験を組み合わせ て同時に実行する「サブストラクチャーハイブリッ ド振動台実験」を行ったものである。液体貯蔵タン クの問題を、このような実験手法で検証するのは、 これまでになかった新しいアプローチであり、特に 様々な免震支承の復元力特性に関する検討を、数値 モデルの変更というソフトウェア上のみの対応によ り可能としたことにより、これまでに比べ大幅な多 様性を想定した実験的検証を実現できるという点に 大きな特徴がある。

# 2. サブストラクチャーハイブリッド振動台実 験法

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験法の 概念図を図1に示す。本実験手法は構造物の一部分 (サブストラクチャー)を取り出した供試体に対し て振動台実験を行い、同時に残りの部分の応答計算 を実験部分の計測データを取り込んでコンピュータ ーで行うことにより、構造物全体の応答を求める手 法である。



図-1 実験概念図

## (1) 実験アルゴリズム

具体的な実験アルゴリズムは次の通りである<sup>3</sup>。 各時間ステップにおいて(1)実験供試体のベースシア 及び絶対加速度を測定する。(2)得られた計測値と入 力波形、前ステップまでに得られた計算値を用いて、 計算部分の運動方程式から実験部分に隣接する節点 の相対応答を求め、これに入力波形を加えて絶対応 答を計算する。(3)上で求めた絶対応答に振動台の動 特性を補償するためのデジタルフィルターを適用し、 これを振動台への入力信号とする。(4)振動台を加振 する。(5)次のステップで(1)に戻る。このアルゴリ ズムにより、実験部分と直接結合された節点の応答 を振動台で再現し、実験と計算が同一の時間軸上で 行われるリアルタイムでの実験が可能となる。本研 究では、液体貯蔵タンクが実験部分、免震支承が計 算部分となる。

#### (2) 数值積分法

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験にお ける計算部分の応答計算は、構造物の動的応答解析 手法として最もよく用いられる逐次(step-by-step)数 値積分を用いる。実験における数値積分の決定にお いて考慮すべき要因は、主に安定性と精度である。 一般に、しばしば用いられる陽的解法では条件付き 安定となることが多く、計算時間刻みを大きく取っ た場合や、多自由度構造物の場合には不安定となる ことがある。本研究では、数値積分法として後退 Euler法を用いた。また、計算時間刻みを1msecとし、 数値積分法の信頼性と精度の向上を図った。

# (3) サブストラクチャーハイブリッド振動台実験法 の問題点

以下にサブストラクチャーハイブリッド振動台実 験の実現にあたっての問題点と、その対策について の考え方をまとめる。

#### a) 応答の不安定性

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験では、 計算部分の数値積分法、計算時間刻み、振動台の動 特性による位相のずれなどにより、応答が不安定に なることがある。前節で述べたように数値積分法と 計算時間刻みによっては応答が不安定になる。また、 Igarashiら<sup>3)</sup>によると、位相のずれにより実験対象に よっては応答が不安定になることが伝達関数解析を 用いて明らかにされている。具体的には、(1)構造物 の剛性が全体として高く剛なモデル (2)剛性の低い 計算部分の上に剛性の高い実験部分がある場合 (3) 構造物の減衰比が実験部分で小さい場合 (4)実験部 分の計算部分に対する質量比が大きい場合、等は不 安定になりやすい傾向がある。したがって、不安定 性が問題となった場合は、実験における全体モデル の設定が上記のような場合になることを可能な限り 避ける必要がある。

#### b)応答の精度および信頼性

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験の応答の精度と信頼性は、計算部分の数値積分法、振動台の動特性による振幅の誤差などにより影響を受ける。数値積分法に関しては、1ステップの誤差が小さくてもその誤差が何万ステップの間に累積し、応答の精度に大きく影響してくる。また、振動台に振幅の誤差が存在すれば、得られる応答は大きく異なる。実験において特に重要な振幅の誤差および位相のずれに対しては、変位制御により振動台を制御し、かつ、入力信号に対してデジタルフィルターを適用することによって補償を行う手法が開発されている

#### c) 実験誤差

実験誤差には、計測装置又は加振装置のキャリブ レーションミス、A/D変換による信号の切り捨て、 丸め、実験装置の振動の計測値への混入、電気ノイ ズ、測定遅れ等の計測誤差の他に、計算部分のモデ ル化による誤差、数値積分誤差、計算遅れ等の計算 手順に関する誤差、そして、位相のずれ、振幅の誤 差等の振動台の動特性による誤差が考えられる。い ずれの誤差も実験の目的に応じた十分な性能を有す る実験装置を用いること、実験装置の設定、調整を 正しく行う、ノイズ対策を行うなどにより低減する 必要がある。

## (4) 免震液体貯蔵タンクへの適用

免震液体貯蔵タンクの振動に関するサブストラク チャーハイブリッド振動台実験を行う際に、最も問 題となるのは実験の安定性である。免震液体貯蔵タ ンクは、実験部分の計算部分に対する質量比が大き く、また、実験部分の減衰比も小さいため、非常に 不安定になりやすい状態にある。したがって、計算 部分となる免震支承の特性によっては、不安定性の ために実験が困難になるおそれがある。そこで、本 研究では、モデルを想定する際に、タンクの支持底 面部分に存在する質量を数値積分部分に含めること により、実験部分の計算部分に対する質量比を小さ くしたものを対象として実験を行う工夫を行った。 免震液体貯蔵タンクにサブストラクチャーハイブリ ッド振動台実験法を適用することの利点としては以 下のようなものが挙げられる。



図-2 実験システム

- 免震支承の特性を比較的自由に設定できる。
- ・リアルタイムでの実験が可能である。
- 液体の挙動が非線形でも構わない

検討すべき事項は、ベースシア、スロッシングに よる液面上昇、転倒モーメント等が挙げられるが、 本研究では主にタンク側板に作用する力の大きさ、 すなわち水平力のうち内容流体のみによる寄与分で 免震の効果を評価するものとする。

## 3. 実験システム

本研究では、水平1成分電気油圧サーボ式振動台 をベースに構築した実験システムを用いた。構成と 振動台及びタンク模型の外観を図2および写真1に示 す。

実験システムの構築にあたっては、この油圧振動台 を制御するDSPシステムを組み合わせ、A/Dおよび D/Aインターフェースを通じて計測信号を元に振動 台への入力信号をリアルタイムで算出している。計 算・制御系に組み込んだ振動台動特性補償用のデジ タルフィルターは、4次FIRフィルタと、3次IIRフ ィルタの2段階のカスケードで構成したものを、振 動台の入出力関係の計測に基づいて決定した。

#### (1) 実験供試体

実験には図3に示すようなアクリル製の円筒形水 槽を用いる。この水槽の外径は600mm、厚さ6mm、高 さ500mmとなっている。これらの寸法は、実験で使 用する振動台の振動数特性、最大変位振幅を勘案し てスロッシング周期を1sec程度とすること、及び荷 重動力計の最大水平荷重容量が4500Nであることを 考慮して決定した。この水槽を取付け用の鋼板を介 して荷重動力計に取り付ける。水槽及び取付け用鋼 板の質量はそれぞれ16.15kg、38.2kgとなっており、 取付けの際に使用したボルト等の質量と合わせると 61.5kgになる。また、この水槽の半径は29.4cmとな っている。

# (2) 振動台

本研究で使用した、電気油圧サーボ式振動台の諸



写真1 振動台および実験供試体の外観



図-3 実験用水槽

元を表1に示す。振動台の制御は加速度、速度、変 位のいずれを用いても行うことが可能であるが、本 研究では変位による制御を行って、振動台を加振す る。

#### (3) 計測装置

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験において計算部分の応答を求めるために供試体のベース シアー、あるいは絶対加速度の計測値が必要である。 本研究ではベースシアーを計測するために荷重動力 計を用いた。また、供試体加速度を計測するため、 容量2Gの加速度ピックアップを用いている。また、 測定範囲30±10cmのレーザ変位計を用い、水を墨 汁により着色して水面レベルの変動を計測した。

#### (4) A/D・D/A変換器

#### 表-1 振動台諸元

台面積	1.5m × 1.5m	
最大積載重量	2tonf	
最大加振力	29.4kN	
加振方向	水平一方向	
最大振幅	±100mm	
周波数	30Hz 以下	
駆動方式	電気油圧サーボ式	

振動台制御を行うDSPシステムへの入出力はアナ ログ電圧信号を介して行われるため、コンピュータ ーからのデジタル信号をアナログ電圧信号に変換す る必要がある。また、動ひずみ計およびレーザ式変 位センサなどより得られたアナログ電圧信号をコン ピューターのハードディスク上に記録するため、デ ジタル信号に変換するインターフェースを必要とす る。本研究ではA/D変換器、D/A変換器のいずれに ついても分解能12bitのインターフェースを用いてい る。

## (5) 実験制御システム

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験で使 用する計算・制御系は計算部分の応答計算、計測値 の記録、振動台の制御のために利用し、それぞれの 処理を高速に行う必要がある。このため、本研究で はこれらの処理をDSP(Digital Signal Processor)及び その制御用パソコン(ホストコンピュータ)を組み合 わせたシステムにおいて行う。DSPはLSI(大規模集 積回路)の一つであり、デジタル信号処理に特化し た専用プロセッサである。DSPはデジタル信号の高 速演算と、高速並列処理が可能という二つの大きな 特徴を持っている。ホストコンピュータには計装用 パソコンを用いる。DSPとしてTI社製TMS320C44を 使用し、外部インターフェースモジュールに8チャ ンネル12ビットA/Dコンバータ、4チャンネル16ビ ットD/Aコンバータを搭載したDSPシステムボード をホストコンピューターに搭載した。また、実験シ ステムの制御ソフトウェアにはMicroSignal社製μpassを用いており、実験制御プログラムの作成には MATLAB/SIMULINK/Real-TimeWorkshopを用いてい る。

# 4. 実験モデルの設定

実験では、3(1)で述べた寸法の円筒形液体貯蔵タ ンクを免震構造としたものを想定した。なお、本研 究では液体として水を想定するものとする。水深は 20cm、免震支承の復元力特性は図4に示すバイリニ ア型履歴モデルとしている。水槽および基礎部分の 質量はいくつかのケースを想定したが、ここでは 500kgと仮定した場合について述べる。免震支承の バイリニアモデルの形状を決定するパラメータは以 下の組み合わせで決定した。

(1)降伏荷重:全重量(水+付加質量)の0%、0.5%、1%、2%

(2)剛性:二次剛性を用いて計算した固有周期が1sec、 1.4sec、2secとなるように二次剛性を定め、初期剛 性はその20倍

入力地震動にはEl Centro記録NS成分の振幅を1/10 にスケーリングしたものを用いた。これは、実験に 用いる振動台の性能上の制約によるものである。図



図−4 免震支承のバイリニア型履歴モデル

表-2 実験ケース

		固有周期			
		1.0sec	1. 4sec	2.0sec	
降伏荷重	ON	ケース1	ケース5	ケース9	
	27.16N	ケース2	ケース6	ケース10	
	54. 32N	ケース3	ケース7	ケース11	
	108.64N	ケース4	ケース8	ケース12	



図-5 入力波形

5に加速度波形及び変位波形を示す。入力地震動の 振幅が1/10となっていることを考慮すると、(1)の条 件はEl Centro記録NS成分の原波形に対して免震支承 の降伏荷重の全重量に対する比が0%、5%、10%、 20%とした場合に相当する。表2に実験条件(固有周 期、降伏荷重)をまとめて示す。

実験を行うに先立ち、実験に用いる液体貯蔵タン クの基本的な動特性を数値モデルにより検討する。 タンク部分のモデルは、Housner<sup>5</sup>によって提案され たものを用いた。モデルは図6に示すものとなり、



図-6 タンクの振動モデル

各パラメータは以下の式で与えられる。ここで、質 点 $M_1$ は、スロッシングを行う自由水に、質点 $M_0$ はタンクと一体となって運動する固定水に対応して いる。

$$M_{0} = M \frac{\tanh 1.7R / h}{1.7R / h}$$
(1)

$$M_{1} = M(0.6) \frac{\tanh 1.8h / R}{1.8h / R}$$
(2)

$$k_1 = 5.4 \frac{M_1^2}{M} \frac{gh}{R^2}$$
(3)

- M:水槽内の水の全質量
- **R** : 水槽の半径

h :水深

g : 重力加速度

スロッシングの固有周期をT。とおくと

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{M_1}{k_1}} \tag{4}$$

また、質点 $M_1$ の変位振幅を $A_1$ とおくと、スロッシング時の水面上下変動の振幅dは

$$d = \frac{0.63A_{\rm l}\left(\frac{k_{\rm l}R}{M_{\rm l}g}\right)}{1 - 0.85\frac{A_{\rm l}}{R}\left(\frac{k_{\rm l}R}{M_{\rm l}g}\right)^2}$$
(5)

となる。以上の式を用いると、質点 $M_0$ は21.44kg、 質点 $M_1$ は22.38kg、スロッシングの固有周期は 0.88secとなった。

# 5. 実験結果

非免震の設定で行った実験で得られた水平力及び 液面変動の時刻歴を図7に示すとともに、実験ケー ス2,5,6,7,8,10に対する実験結果をそれぞれ図8~13に 示す。ここで、図8~13の図は上から順に、タンク側









図-9 実験結果(ケース5)



図-10 実験結果(ケース6)





板に作用する水平力、振動台部分(タンク本体)の相 対変位、液面の上下変動の時刻歴応答となっている。 また、実線は実験結果、破線はシミュレーションに よる応答計算結果を示している。数値シミュレーシ ョンは、前述の液体貯蔵タンクの解析モデルにおい て、貯蔵液体のスロッシングの減衰定数を0.001と し、

免震支承部の復元力特性をバイリニアモデルとした 2自由度系の応答計算を行ったものである。

#### (1) 水平力及び相対変位

まず、タンク側板に作用する水平力の時刻歴応答 を見ると、いずれのケースもノイズの混入がみられ るが、時刻歴前半において波形、ピーク値とも実験 結果とシミュレーション結果がほぼ一致しているこ



図-12 実験結果(ケース8)



図-13 実験結果(ケース10)

とが分かる。また、時間が経つにつれて位相のずれ、 振幅の差が生じている。次に、相対変位応答を見る と、タンク側板に作用する水平力の場合と同様に、 時間が経つにつれて、実験結果とシミュレーション 結果のずれが大きくなっているが、時刻歴前半では 波形、ピーク値ともほぼ一致している。液面の変位 についても同様のことがいえる。なお、全般的な傾 向として、降伏荷重が増加するにつれて大きなずれ が生じていることが図9~12から読み取れる。実験結 果とシミュレーション結果のずれの原因としては、 振動台の動特性による誤差などが考えられるが、数 値モデルには最も単純なものを用いていることも要 因であると考えられる。特に液面の変位については、 実験における計測誤差やシミュレーションにおける 減衰定数の設定値が異なっていたために生じた誤差



図-14 実験結果(上:タンク側板に作用する水平力、下:振動 台部分(タンク本体)の相対変位)

の他に、液面の変位が大きくなると非線形性の影響 が出るために前述の単純なシミュレーションモデル では正確に表現できないなどの原因が考えられる。

## (2) 免震の効果

次に、免震の効果について検討する。各実験ケー スにおいてタンク側板に作用する水平力及び振動台 部分の相対変位の最大値をまとめたものを図14に示 す。実験ケース1,5,9を比較すると、予想通り固有周 期が長くなるにつれて、側板に作用する力は減少し、 タンクの相対変位は増加している。その他のケース についても、固有周期に関しては同様の傾向が見ら れる。一方、降伏荷重の影響をみると、図14に示さ れるように降伏荷重が増加するにつれて、タンクの 相対変位は減少している。しかし、側板に作用する 水平力に関してはケース1,2,3を比較すれば分かるよ うに、降伏荷重が増加しても側板に作用する水平力 が増加するとは言い切れない。非免震時の結果(図 7) と比較すると、ケース1はピーク値が非免震の場 合を越えているので免震の効果があるとはいえない が、それ以外の実験ケースにおいては免震の効果が 認められる。またケース5とケース6、ケース9とケ ース10を比べると、ケース6、ケース10は側板に作 用する力が十分に減少している上に、変位もかなり 減少している。これは、履歴によるエネルギー吸収 が大きいことによるためであると思われる。さらに 時刻歴をみると、減衰の効果がはっきりと見て取れ る。固有周期が1秒の場合を比較すると、ケース4に おける側板に作用する水平力が比較的大きくなって いる。これは、スロッシングの固有周期が0.88秒で あるためタンクの振動と同調したためであると思わ れる。以上の考察より、実験ケース10の場合に免震 の効果が最大となり、非免震時と比較すると、側板 に作用する水平力は約60%にまで低減されているこ とがわかる。これは、履歴によるエネルギー吸収が 最も効率的であったほか、入力エネルギー自身の低 減が大きいためであると考えられる。全般的に、応 答変位の抑制、および水平力の低減の両者の観点か ら見て、降伏荷重を総重量の0.5%または1%とした



## 図-15 解析結果(上:タンク側板に作用する水平力、下:振動 台部分(タンク本体)の相対変位)

場合に望ましい結果が得られている。

#### (3) 解析結果との比較

数値シミュレーションによって、免震支承の特性 と応答最大値(タンク側板に作用する水平力及びタ ンク本体の相対変位)の関係を求めた。免震支承の 剛性を実験の場合と同一とし、降伏荷重はゼロ(弾 性)の時を基準として変化させ、応答値との関係を 求めたものを図15に示す。これより、特に降伏荷重 の値が応答に大きな影響を与え、水平力と相対変位 の両者を勘案すると、総重量の1%に相当する 54.32N付近が最も適切な設定値であると考えられる。 また、このことは、実験より得られた免震支承の特 性と応答最大値の関係(図14)に符合している。

# 6. 結論

本研究では、十分な地震時性能が必要とされる液体貯蔵タンクについて、タンク全体を免震構造とした場合の効果を、特に流体による水平力に着目し、 サブストラクチャーハイブリッド振動台実験法を用いて検証した。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- 振動台上に模型水槽を設置し、計算部分にバイ リニアモデルを適用したサブストラクチャーハ イブリッド振動台実験を行った。シミュレーシ ョン結果と比較して、免震液体貯蔵タンクに関 する、側板に作用する液体による水平力や、タ ンク本体の相対変位及び液面変動の値の検証を 行えることが確認された。
- 免震支承の特性を変化させてサブストラクチャ ーハイブリッド振動台実験を行い、側板に作用 する水平力及びタンクの相対変位を比較、検討 した。その結果、降伏荷重が総重量の0.5%、 1%の場合に免震の効果が大きくなった。実験で は入力のスケールを1/10にしていることを考慮

すると、El Centro NS成分に対しては、降伏荷重 が総重量の10%前後となる時に免震効果が最大 となった。この結果は、Housnerのモデルを用い た数値シミュレーションと符合するものであっ た。

本研究により、サブストラクチャーハイブリッド 振動台実験が免震液体貯蔵タンクの検討開発にあた っての有力な手法となることが示されたものと考え られる。今後は、より具体的な問題への適用が期待 される。

## 参考文献

 大町達夫,谷田哲也:円筒形液体貯蔵タンクの振動特性 に関する基礎的研究,第10回日本地震工学シンポジウ ム, pp2425-2430, 1998.

- N.-S.Kim and D.-G.Lee:Pseudodynamic Test for Evaluation of Seismic Performance of Base-isolated Liquid Storage Tanks, Engineering Structures, Vol.17, No.3, pp.198-208, 1995
- Igarashi.A, H.Iemura, and T.Suwa : Development of Substructured Shake Table Test Method, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1775, 2000.
- 4) 五十嵐晃,家村浩和,田中創:サブストラクチャーハイブ リッド振動台実験システムの開発と振動制御デバイス の性能検証実験への適用,構造工学論文集, Vol.49A, 2003年.
- G.W.Housner: The Dynamic Behavior of Water Tanks, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol.53, No.2, pp.381-387. February, 1963.

(2003.7.10 受付)

# Investigation of the dynamic behavior of liquid storage tanks with seismic isolation system using substructure hybrid shake table tests

## Akira IGARASHI, Hirokazu IEMURA and Daiki TSURUTA

Application of the seismic isolation to the liquid storage tanks has been proposed to improve the seismic performance and safety of the liquid storage facilities. In this paper, the dynamic behavior of liquid storage tanks with seismic isolation system is examined by the substructure hybrid shake table test method based on the principle of the hybrid testing technique in order to evaluate the real-time dynamic response of test structures and structural components. This test method consists of the shake table test for the experimental substructure that is a part of the structural system and numerical computation for the numerical substructure. The capability of the test method is demonstrated by the test results showing good agreement with the numerical simulation.