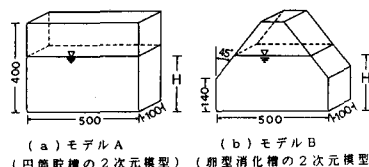


(116) 模型貯槽内容液の動的応答特性

九州共立大学 工学部 小 坪 清 真
九州工業大学 工学部 ○高 西 照 彦
九州工業大学 工学部 多 田 浩

1. まえがき 一般に、液体貯槽がその基礎に地震などによる強制変位を受けると、液面動揺（スロッシング）が生じる。実際に、新潟地震（1964.6）や日本海中部地震（1983.5）において、石油タンク等にスロッシングが原因と思われる被害が生じたことはよく知られている。このことは、液体貯槽の合理的な耐震設計を考える上で、スロッシング現象を解明することが重要な問題であることを示唆している。液体貯槽の形状が円筒形や球形である場合に対するスロッシング現象に関しては、現在までに数多くの理論的・実験的研究がなされている¹⁾。しかし、近年合理的な污水处理装置として西ドイツで開発され、ヨーロッパを中心に広く使用されている卵型消化槽（我国では横浜市、北九州市等に建設されている）のような特殊な形状を有する液体貯槽に対しては、その振動特性および地震時挙動、特にスロッシング現象に関する研究は非常に少ないようである^{2)~6)}。本論は、地震を受けた卵型消化槽の内容液に

生ずるスロッシング現象を解明するための第一歩として、次に述べるような基礎的な実験と数値計算とを行い、得られた結果について2, 3の考察を行ったものである。すなわち、まず図-1に示すように、円筒形貯槽および卵形消化槽の頭部を2次元的にモデル化した模型（モデルAおよびB）を作製し、これを振動台上に設置して、正弦波および不規則波強制変位を突然加えたときのモデルA, Bの



(a) モデルA (円筒形貯槽の2次元模型) (b) モデルB (卵型消化槽の2次元模型)

図-1 液体貯槽の2次元模型（単位mm）

液面変位の時刻歴応答を計測した。得られた結果を比較することによって、モデルBにおける液面変位応答の特徴を明らかにした。つぎに、模型の内容液を完全流体とし、微小振動を仮定して導かれた線形解法とV O F法⁷⁾による非線形解法とを用いて、模型内容液のスロッシングによる液面変位および動水圧の時刻歴応答を算出した。さらに、数値計算によって求めた結果と実験結果とを比較・検討して若干の考察を行った。

2. 振動実験 2.1 実験装置 実験に用いた模型を図-1に示す。

模型は厚さ10mmの透明なアクリル樹脂製である。実験を行った振動数と加速度の範囲内では、模型は剛体であると考えてもよい。実験装置の概略を図-2に示す。模型は振動台上に固定した。台上には加速度計を取り付けて、模型に対する入力加速度が計測できるようにした。模型から約1.5m離れたところに、その光軸を加振方向に、高さを静止水面位置に固定してビデオカメラを設置し、液面変位の時刻歴応答を記録した。また、加振直角

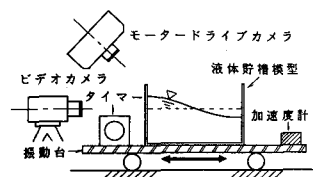


図-2 実験装置

方向にモータードライブカメラを設置し、スロッシングに対する液面波形を撮影した。内容液としては水道水を用いた。液面変位を明瞭にビデオ装置に記録するために、内容液に二酸化チタンの粉末を重量比で約1/10000 加えた。分散剤としてメタリン酸ナトリウムを用いた。さらに、表面張力を小さくして、液面変位を精度よく読み取ることができるよう、少量の界面活性剤を加えた。常温における内容液の比重および粘度は、水のそれらと測定誤差の範囲で一致していた。 2.2 実験概要と実験結果 一定の水深を有するモデルAおよびBを振動台上に固定し、水面が静止状態にあるとき (i) 模型内容液のスロッシングの第1次固有振動数に等しい振動数を有する加速度一定の水平方向正弦波入力および(ii) 不規則波入力をそれぞれ模型に急に加えつづけたときの、模型左壁の液面変位をビデオ装置に、振動台加速度を電磁オシログラフに、液面変位が極値を取る瞬間を中心にその前後数分の1秒間における各時刻の液面波形をモータードライブカメラにそれぞれ記録した。カメラには同時に、タイマーの時刻(1/100 秒)も記録した。実験はいろいろの

水深に対して、正弦波入力については入力加速度を、不規則波入力については不規則波の種類とその最大加速度をそれぞれいろいろ変えた場合について行った。ビデオ装置に記録された液面変位はビデオモーションアナライザーを用いて、1/30秒/コマの間隔でディスプレイ上に出し、これを模型の壁面に刻んであるスケールによって読み取り、刻々の液面変位の値を定めた。正弦波入力に対する結果の一例を、モデルAの場合を図-3中の○印で、モデルBの場合を図-4に示す。不規則波入力の場合については、まず入力波の一例を図-5に、そのフーリエスペクトルを図-6に示す。つぎに、上記の入力波に対する液面変位の時刻歴応答をモデルAの場合を図-7中の太実線で、モデルBの場合を図-8に示す。模型の内容液がスロッシングを生じているときの刻々の液面波形については、次のようにしてこれを図化した。すなわち、カメラで記録した液面波形のフィルム像をスライドプロジェクターを用いて白紙上に拡大して写し、模型の壁面に刻まれたスケールを用いて液面波形の像曲線上の各点の座標値を読み取り、スロッシング時の表面波形図を得た。正弦波入力に対する結果の一例を、モデルAの場合を図-9中の太実線で、モデルBの場合を図-10に示す。不規則波入力に対するそれを図-11(モデルAの場合)、図-12(モデルBの場合)に示す。

2.3 結果に対する考察 (a) 液面変位の時刻歴応答について (i) 正弦波入力の場合 モデルAについては図-3からわかるように、液面変位の極大値(上昇時)および極小値(下降時)はそれぞれほぼ原点を通る直線に沿って増大していくことがわかる。また、波高が発達するに従って、極大値の方が極小値の絶対値より大きくなっている。このことはスロッシング現象の非線形性を示すものである。ここでは図示しなかったが、モデルAでは水深の如何にかかわらず、入力加速度が大きくなるに従って液面変位の極値を結ぶ直線の勾配は大きくなる。モデルBについては図-4からわかるように、液面変位の極大値と極小値は、初期にはモデルAの場合と同様にそれぞれ原点を通る直線に沿って増大していくが、ある時刻から液面変位の極値は増大しなくなり、終にそれはそれぞれほぼ一定値に達して、液面変位は定常振動を行うようになる。また、波高が等しければ、液面変位の極大値と極小値の絶対値との差は、モデルBの方がモデルAに比べてより大きいといえる。上記の2つの現象は、いずれもモデルBにおいて、その左右の側壁が上部で内側に45°傾斜しているために生ずるものである。(ii) 不規則波入力の場合 図-6のフーリエスペクトル図から、入力波(図-5)は0.5, 1.0, 3.0Hzを中心とした周波数成分を比較的多く含んでいることがわかる。一方水深が15cmのときのモデルAおよび

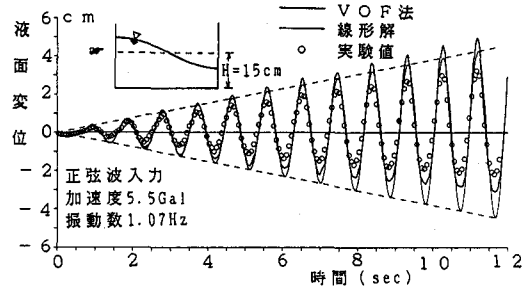


図-3 液面変位の時刻歴応答(モデルA)

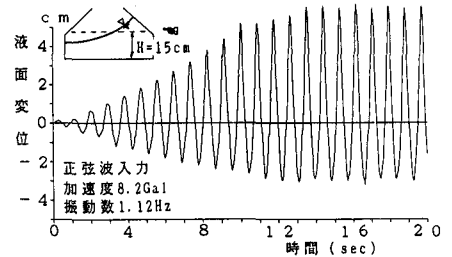


図-4 液面変位の時刻歴応答
(モデルBにおける実験値)

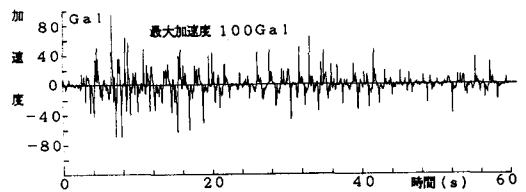


図-5 不規則波入力加速度波形

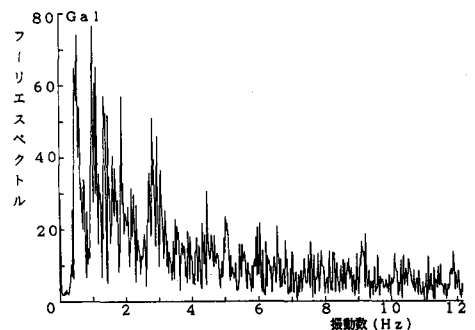


図-6 不規則波入力加速度のフーリエスペクトル

図-6のフーリエスペクトル図から、入力波(図-5)は0.5, 1.0, 3.0Hzを中心とした周波数成分を比較的多く含んでいることがわかる。一方水深が15cmのときのモデルAおよび

では図示しなかったが、そのフーリエスペクトルが高次の振動数成分を多く含むような入力波を用いた実験においては、スロッシングの第2次モードが優勢な表面波形を生ずる場合があった。

3. 数値計算結果 1. で述べたように、完全流体と微小変位を仮定して導いた理論解（線形解と呼ぶ）とVOF法による非線形数値解法（VOF法と呼ぶ）とを用いて、モデルAを対象として、スロッシングによる液面変位および動水圧の時刻歴応答を算出した。VOF法では液体の表面張力は考慮していない。なお、粘性については試算の結果、その影響は高々5%であったので、数値計算においては粘性項は省略した。VOF法で採用した差分メッシュを図-14に示す。数値計算に必要な諸元および諸定数値は個々の実験に対応してその実験条件に一致するように定めた。線形解およびVOF法による液面変位の時刻歴応答の一例を図-3, 7に、液面波形の一例を図-9, 11に示す。

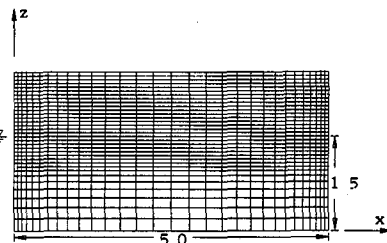


図-14 異形差分メッシュ（単位cm）

4. 実験値と理論値との比較並びに考察 (a) 液面変位応答について (i) 正弦波入力の場合 図-3から、線形解とVOF法による非線形解とは、時間の初期の段階ではほとんど差がみられないが、時間が経過するに従って両者間の差が大きくなることがわかる。同時刻における左右両側壁面上の液面変位の極値を比べると、非線形解では時間の経過に伴って、極大値の方が極小値の絶対値より大きくなっていくが、それは実験結果とよく一致している。非線形解と実験値との間には多少の差が生じているが、それはモデルの側壁と内容液との間に摩擦が存在すること、入力が完全な正弦波とはいえないこと等にその原因があるのではないと思われる。(ii) 不規則波入力の場合 この場合についても、図-7からわかるように、正弦波入力の場合とほぼ同様なことがいえる。すなわち、入力の最大加速度が大きくなって応答波高が発達してくると（図-7の場合、最大波高のモデル幅に対する比は約0.12）液面変位応答は非線形性を示し、線形解と実験結果との差が大きくなる。(b) 液面波形について (i) 正弦波入力の場合 図-9をみると、線形解では液面波形は逆対称になっているが、非線形解では波形の逆対称性が乱れていることがわかる。さらに後者では、液面変位0の位置が容器の鉛直対称面から液面変位の正側に存在している。このことは実験結果についてもいえることであり、波形に関しても非線形解は実験結果をよく説明しているといえよう。(ii) 不規則波入力の場合 この場合についても、図-11からわかるように、正弦波入力の場合とほぼ同様なことがいえる。

- 1) 坂井 藤一：液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題、土木学会論文集、第362号/I-4, 1985. 10.
- 2) 清水勝美・田蔵隆・若原敏裕：杭基礎形式の卵型消化槽の地震応答解析手法、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、第I部、1986. 11.
- 3) 藤井不二也・阿部宗人・原千里：消化タンク基礎の地震応答解析、プレストレストコンクリート、Vol. 28, No. 4, 1986. 7.
- 4) 中村 嶽・伊東雅保・武田寿一：コンクリート製卵型消化槽の解析手法の検討、大林組技術研究所報、No. 28, 1984.
- 5) 片桐 晃・吉清孝・山本徹：PC卵形消化タンクの耐震性の検討、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集、第I部、1985. 9.
- 6) 小坪清真・高西照彦・吉岡民夫・鳥野清：卵型消化槽中の内容液による地震時壁面衝撃圧の一解法、土木学会論文集、第356号/I-3, 1985. 4.
- 7) Nichols, B. D., Hirt, C. W. and Hotchkiss, R. S.: SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-8355, 1980. 8.
- 8) 小坪清真・高西照彦・木下貴夫・田中英紀：卵型消化槽内壁に対するスロッシング圧の共振曲線、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1986. 3.

Bのスロッシングの第1次固有振動数は1.07Hzと1.12Hzであるから、この場合には模型の内容液の固有振動数が入

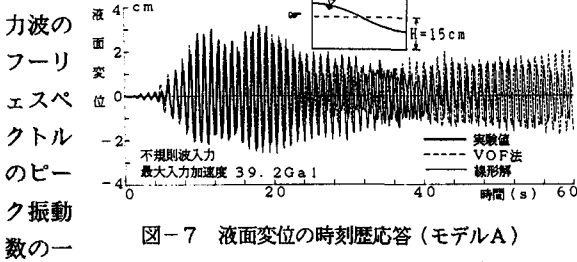


図-7 液面変位の時刻歴応答 (モデルA)

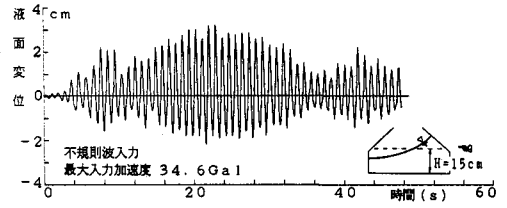


図-8 液面変位の時刻歴応答
(モデルBにおける実験値)

つに非常に近いといえる。図-7の太実線および図-8から、モデルA、Bのいずれの場合にも、それらが不規則波入力を受けたとき、液面変位はそれぞれスロッシングの第1次固有振動数にほぼ等しい振動数で振動していることがわかる。また、入力が大きくなれば、正弦波入力の場合と同様に、液面変位応答の極大値は極小値の絶対値よりも大きくなる。この傾向は入力と水深が等しい場合には、モデルBの方がより著しい。さらに、モデルA、Bのいずれの場合にも、その液面変位応答にはうなりの現象が生じているように見える。(b) 液面波形について

(i) 正弦波入力の場合 図-9の太実線は、加振開始から11.52秒後のモデルAにおける液面波形を示したものであるが、この図をみると、この時点で既に波形の逆対称性が乱れており、左右の壁面における液面変位の極値の絶対値が互いに異なり、しかも液面変位0の位置が容器の鉛直対称面から液面変位の正側に移動していることがわかる。時間が経過するに従ってこの傾向は益々助長される。モデルBの場合もモデルAの場合と同様な現象を示すが、水深と入力加速度が等しい場合には、一般に前者の方が後者に比べて現象の非対称性が著しいといえる。それは、モデルBが上部で内側に45°傾斜した側壁を有しているためである。特にモデルBでは、図-13に示すように、ある程度波高が発達すると、側壁に沿って上昇しつづけた波が、内側に傾斜した側壁部分に出会って途中で砕波を生じ、自由液面に落下するという現象が発生するようになる。このような現象が生ずるようになると、液面変位は水深および加速度によって定まる一定の高さ以上には成長しないことになる。それは図-4に示されているように、モデルBでは波高が発達していくと、あるところで液面変位の極値が最大に達し、それ以後はその値をそのまま保って定常振動を行うようになることと符合している。

結局、モデルAとモデルBとを比べると、内容液にスロッシング現象が生じる場合、両者でその発達の様子が途中から異なってきて、上部に内側に傾斜した側壁を有するモデルBでは、一般に波高がモデルAのそれより低いある一定の高さ以上には発達しないようになるといえよう。

(ii) 不規則波入力の場合 液面波形については図-11の太実線と図-12から、モデルA、Bともそれぞれ正弦波入力に対するそれとほとんど変わらないといってもよいことがわかる。このことは、図-5に示すような入力波に対しては、いずれのモデルにおいても液面の応答波形はスロッシングの基本モードが非常に優勢であることを示している。ここ

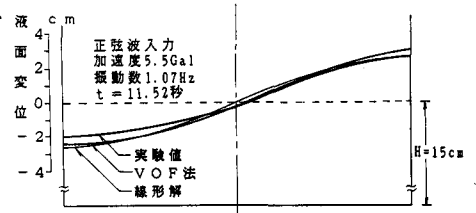


図-9 液面波形 (モデルA)

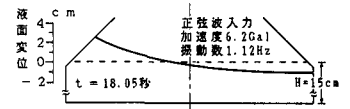


図-10 液面波形
(モデルBにおける実験値)

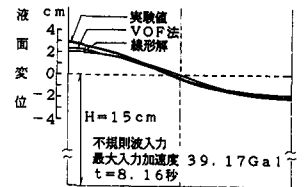


図-11 液面波形 (モデルA)

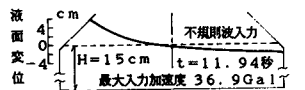


図-12 液面波形
(モデルBにおける実験値)

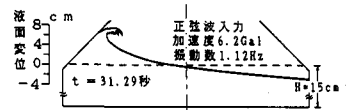


図-13 砕波の発生
(モデルBにおける実験結果)