

円筒タンクの地震応答に関する研究 (その2)

中 村 嶽 武 田 寿 一

Earthquake Response of Cylindrical Tank (Part 2)

Takashi Nakamura Toshikazu Takeda

Abstract

This report presents the results of testing of the earthquake response of a flexible cylindrical tank model and analysis considering the interaction between the tank wall and stored liquid. The model tank made of vinyl chloride resin (200 cm dia. \times 194 cm hgt \times 0.8 cm t), changing the height of the stored liquid, was subjected to harmonic and random waves using a shaking table. The main items of measurement in the tests were acceleration, displacement and strain of the tank, hydrodynamic pressure, and wave height.

In the case of liquid height of 170 cm, the natural period of the first sloshing mode was 1.5 sec and the first frequency of the combined liquid-elastic tank system (bulging) was 15.5 Hz, the second was 34.0 Hz, and the third 45.0 Hz, and they showed good agreement with values of shell theory and FEM analysis. In the earthquake response to harmonic waves of the FEM analysis, assuming the damping constant was 1% in each mode, the results of the first sloshing and first bulging showed good agreement with experiments. In the response to artificial waves, the analytical values were rather small compared with the experiments, but the distribution of maximum values and response waves showed good agreement and so it was confirmed that FEM analysis is effective.

概 要

柔な円筒タンクの振動実験を行ない、実験結果と液体-タンクの連成を考慮した固有値解析および地震応答解析との比較、検討を行なった。試験体は内径 200cm、高さ 194cm、厚さ 0.8cm の塩ビ製円筒タンクで、水深をパラメータにして、振動台により正弦波およびランダム波を入力を行なった。測定項目は水槽本体の加速度、変位、歪と動水圧および波高である。水深 170 cm の場合、スロッシング 1 次の固有周期は約 1.5 秒であり、流体とタンクの連成振動 (バルジング) 1 次の固有振動数は 15.5 Hz、2 次が 34.0 Hz、3 次が 45.0 Hz となり、シェル理論および FEM による固有値解析と良く一致している。各次減衰を一律 1% とした FEM 応答解析では、スロッシング 1 次およびバルジング 1 次の正弦波入力については実験値と良く一致している。人工地震波入力の応答解析については、解析結果は実験値よりも少し小さな値となるが、最大値分布や応答波形は実験と良く一致しており、本解析法の有効性が確かめられた。

1. はじめに

前報 (その1) では、直径に比べて背が低い、比較的剛な鋼製の円筒タンク (内径 4.0 m、高さ 1.5 m、水深 0.6 m) を用いて正弦波、衝撃波、ランダム波を入力した振動実験を行ない、液体の動水圧を測定して、慣用解析法である Housner 理論および速度ポテンシャル理論との比較、検討を行なった¹⁾。

剛なタンクに関しては、慣用解析法によって求めた地震動による衝撃圧、スロッシングの振動圧や波高などは実験値とほぼ合う。しかし、貯液とタンクの連成時 (バルジング) の動水圧などは、慣用解析法では評価ができ

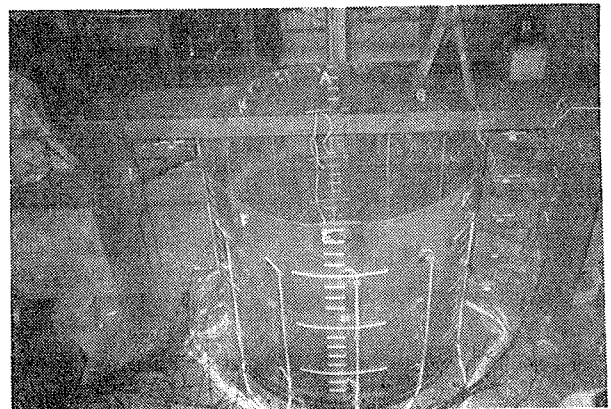


写真-1 振動実験

ない。本報では、貯液とタンクの連成が生じ易い柔な塩ビ製円筒タンクを用いて振動実験を行ない、その結果と、液体-タンクの連成を考慮した解析結果とを比較して検討を行なった。

2. 振動実験

2.1. 試験体

試験体は、写真-1に示す内径 200 cm、高さ 194 cm、厚さ 0.8 cm の塩ビ製円筒タンクである。塩ビ材の材料定数として、ヤング係数は $3.43 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、単位体積重量は 1.4 g/cm^3 、ポアソン比は 0.34 である。

2.2. 測定項目および実験方法

図-1に、実験概略図を、図-2に測定項目を示す。

(1) 測定項目

(i) 加速度計 (ACC): タンクの全体的な変形モードを把握することを主眼とし、高さ方向のモードを測定するため、加速度計 6 個を水槽の右側壁に取り付けている。また円周方向のモードを測定するため、高さ 114 cm の位置で、円周方向に 30° ピッチで、加速度計を半径方向と接線方向に対で 12 点 (計 24 個) 取り付けている。

(ii) 変位計 (DISP): タンクの高さ方向の変形モードを測定するため、測定用架台 (不動点) に 6 個取り付けている。

(iii) 水圧計 (WP): 動水圧の測定に、タンク側壁の内側に 6 個取り付けている。

(iv) 波高計 (WH): 測定用架台に 6 台取り付けている。

(v) 歪計 (S): タンクの高さ 38 cm の外周に 30° ピッチで取り付けている。

(2) 実験方法

図-2に示すように、水深をパラメータにして、以下に記す項目について実験を行なった。

(i) 正弦波入力実験 振動数を $5 \sim 50 \text{ Hz}$ に変化させた 50 gal 一定の正弦波入力の共振実験を行ない、固有振動数、減衰などを求める。また、長周期の正弦波を入力してスロッシングを生じさせ、波高計の波形記録より、スロッシングの固有周期、減衰などを求める。

(ii) ランダム波入力実験 変位 step 波 (振動台を瞬間的に動かして試験体に衝撃を与える)、人工地震波、El-Centro, Taft, 八戸地震波の入力を行なう。

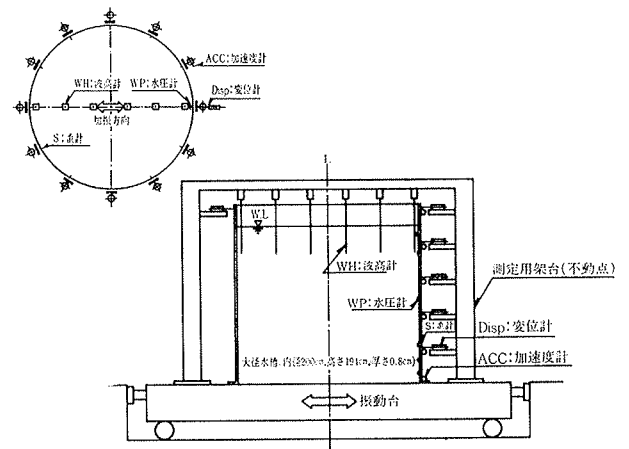


図-1 振動実験概略図

以上の測定項目はすべてデータレコーダに記録し、A/D変換を行なって、電算機にて処理をしている。

3. 実験および解析結果

3.1. 実験結果

(1) 正弦波入力

図-3に、水深 170 cm の正弦波入力共振実験における水圧計 WP-1の共振曲線を示す。液体とタンクの連成振動 (パルジング) の 1 次, 2 次, 3 次の固有振動数は、それぞれ 15.5 Hz, 34.0 Hz, 45.0 Hz である。(表-1 参照)

加速度計による各パルジングの固有モードにおいては、高さ方向の各モードは比較的明瞭に捉えられる。しかし、円周方向のモードにおいては、タンクの初期不整の影響にもよると思われるが、大略円周 1 次のモードに高次のモードが重なったやや複雑な変形モードとなっている。

波高より求めたスロッシング 1 次の減衰は 0.1% 程度

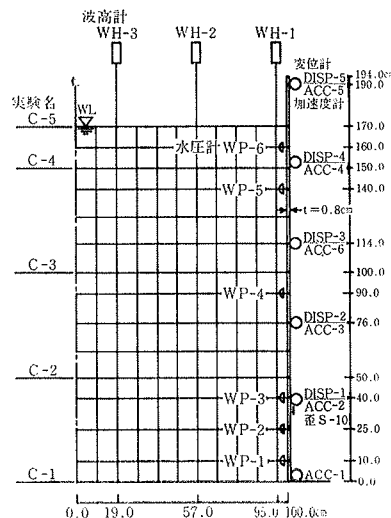


図-2 測定項目および解析モデル

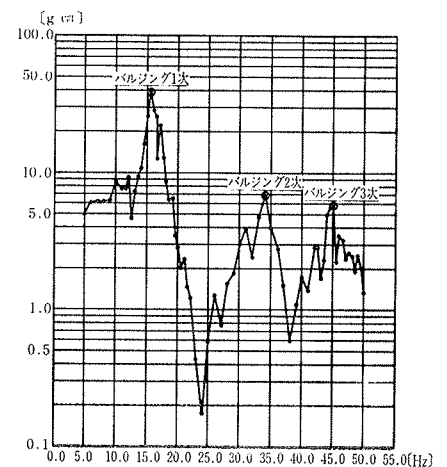


図-3 共振曲線 (C-5, 水圧計 WP-1)

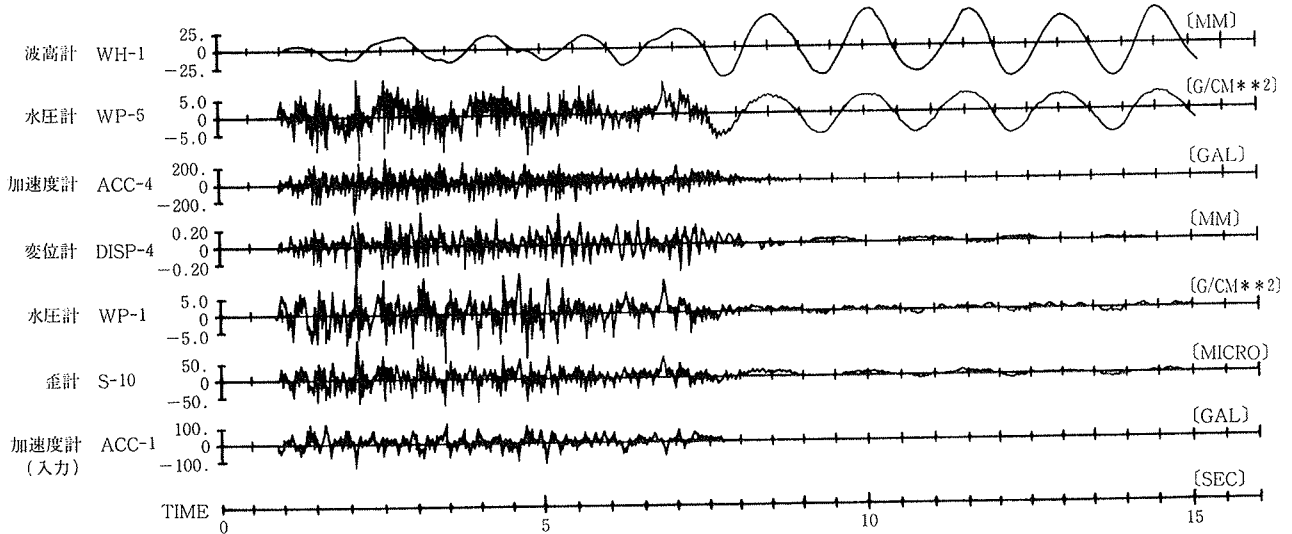


図-4 実測波形 (水深 170 cm, 人工地震波 150 gal 入力)

であり、加速度より求めたバルジング 1 次の減衰は 2 % 程度である。

(2) ランダム波入力

図-4 に、水深 170 cm のランダム波入力実験における人工地震波 150 gal 入力時の代表的な測点の実測波形を示す。これによれば、水槽底部近傍の側壁の動水圧 WP-1 と歪 S-10 は、入力加速度 ACC-1 の波形の上に、13~16 Hz のバルジング 1 次の固有振動数成分の波が増幅されている。また、水槽上部の側壁の動水圧 WP-5 は、入力開始直後は応答加速度 ACC-4 と類似した衝撃圧を示すが、波高 WH-1 に示すように、徐々に 1 次のスロッシングが生じるに従って振動圧が増大し、入力終了後には振動圧が卓越する。

水圧計 WP-5 と波高計 WH-1 によると、入力終了後の 1 次のスロッシングの固有周期は約 1.50 秒で、ポテンシャル理論の 1.48 秒、FEM の 1.49 秒と良く一致している。

図-5 に、人工地震波の入力加速度 ACC-1 のフーリエスペクトルを示す。これによると、入力加速度には約 40 Hz までの比較的高周波成分が多く含まれており、バルジングが誘起され易い波形である。

図-6 に、応答加速度 ACC-2 のフーリエスペクトルを、図-5 の入力加速度 ACC-1 のフーリエスペクトルで除して求めた伝達関数を示す。この伝達関数には数多くのピークが見られるが、15.5 Hz にバルジング 1 次のピークがある。30~36 Hz のピークはバルジング 2 次に相当し、45 Hz 近傍のピークはバルジング 3 次の固有振動数に相当する。

3.2. 解析結果

(1) 固有値解析

表-1 に、各水深をパラメータとした実験より得た固有振動数と解析値の結果を示す。

解析のシエル理論値とは、シエルの挙動に関しては、W. Flügge の微小弾性変位の円筒シエルの基礎方程式を、

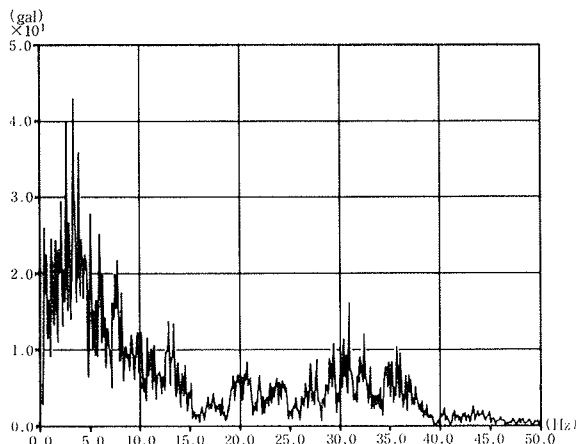


図-5 人工地震波フーリエスペクトル (ACC-1)

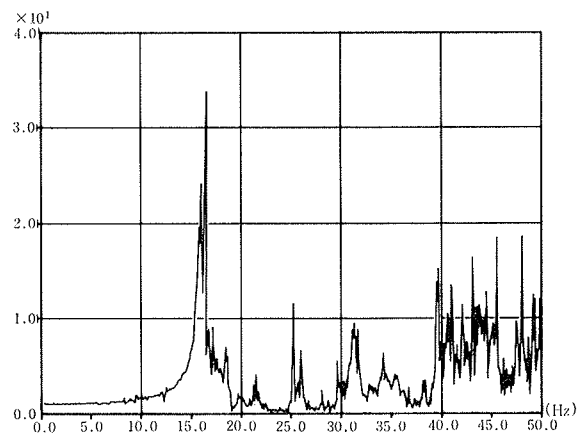


図-6 伝達関数 (ACC-2/ACC-1)

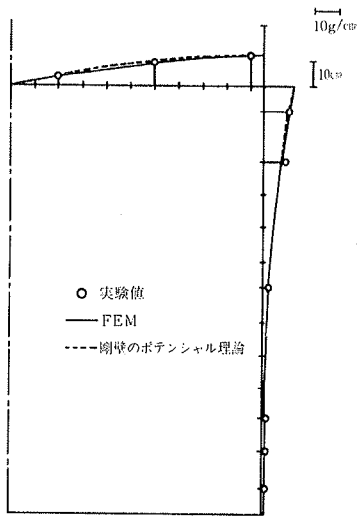


図-7 スロッシング1次 (動水圧, 波高)

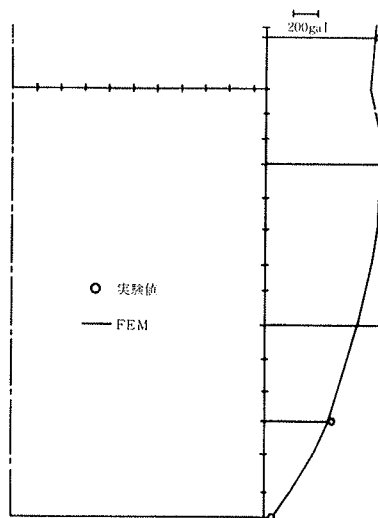


図-8 バルジング1次 (加速度)

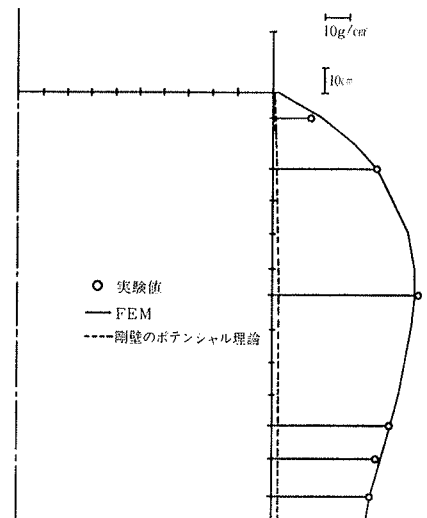


図-9 バルジング1次 (動水圧)

Donnell の近似理論を用いて解き、貯液の挙動に関しては、非粘性、非圧縮性液体(速度ポテンシャル理論)を仮定し、ベルヌーイ式より圧力分布を求め、これをシエルの基礎方程式の外力項に組み込んで、境界条件を考慮して解く方法である²⁾。

また、FEM とは、タンクには軸対称弾性薄肉理論を適用し、内部流体は非粘性、非圧縮性およびその運動の非回転性を仮定し、微小振幅波理論を適用した有限要素による液体—シエルの連成振動解析法である³⁾。

表-1の実験値の欄に固有振動数の値を示していない所は、固有振動数が 50 Hz 以上で、振動台の限界により加振ができないためである。

表-1において、実験値と解析値とは良く一致しており、また FEM の解は、シエル理論値より少し高目であることが分かる。

(2) 応答解析

最大水深 170 cm の場合の、正弦波およびランダム波入力の FEM による応答解析結果について述べる。

図-2に、FEM の解析モデルを示す。FEM 解析の減衰定数は、各モード一律 1%を採用した。

なお、比較のために、タンクを剛と仮定する慣用解析法である速度ポテンシャル理論による動水圧、波高の解析結果も、図-7, 9, 11に示す。剛壁の速度ポテンシャル理論でのスロッシングの減衰定数は、各モード一律 0.1%を採用した。

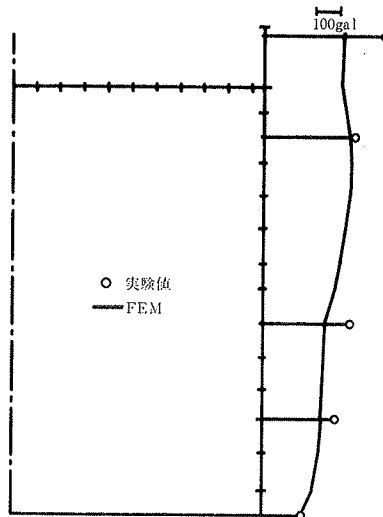


図-10 人工地震波 (加速度)

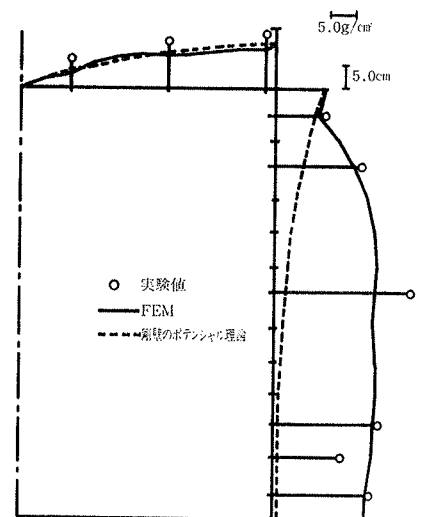
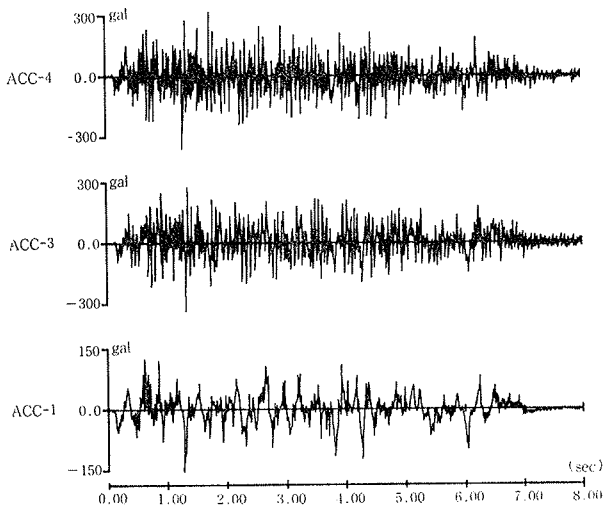


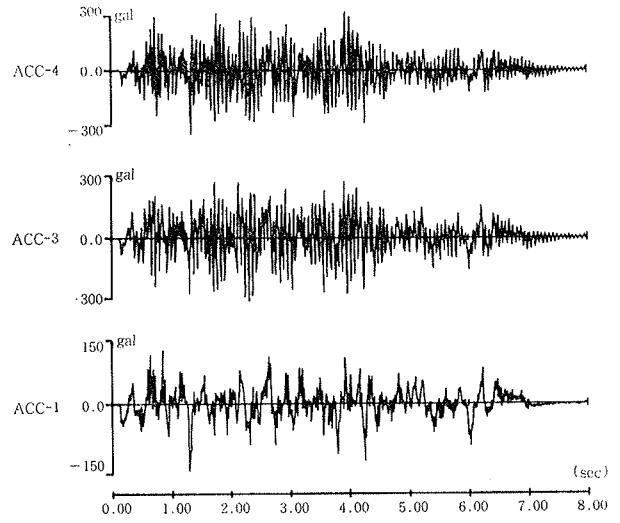
図-11 人工地震波 (動水圧, 波高)

実験名	水深(cm)	(Hz)			
		1次固有振動数	2次固有振動数	3次固有振動数	
C-1	0	実験値	—	—	
		シエル理論	72.5	187.0	221.0
		FEM	73.4	190.0	224.0
C-2	50	実験値	35.0	—	
		シエル理論	39.2	64.6	69.3
		FEM	45.8	77.2	89.8
C-3	100	実験値	25.5	44.3	
		シエル理論	21.6	43.8	57.9
		FEM	25.5	49.7	64.2
C-4	150	実験値	18.0	38.0	48.0
		シエル理論	15.4	37.3	46.0
		FEM	17.6	37.6	53.2
C-5	170	実験値	15.5	34.0	45.0
		シエル理論	13.7	33.0	43.6
		FEM	15.4	34.5	47.5

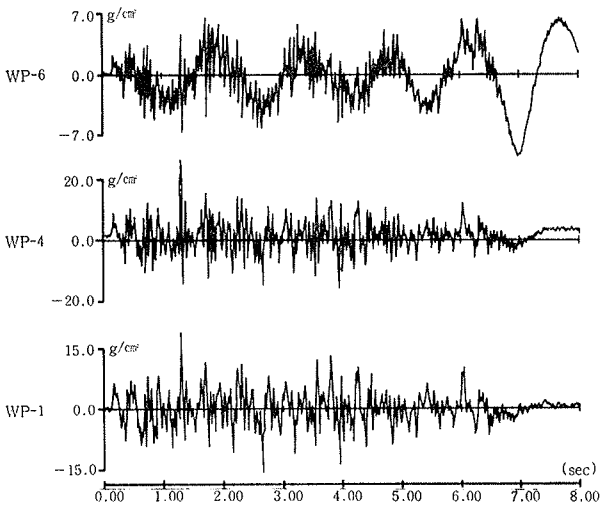
表-1 固有振動数



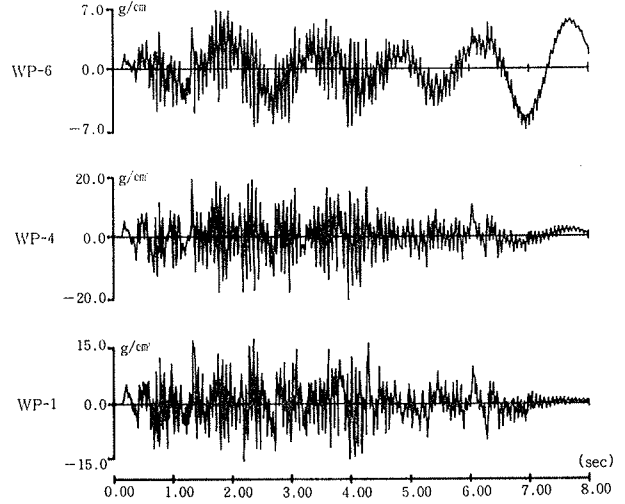
図一12 人工地震波加速度波形 (実験)



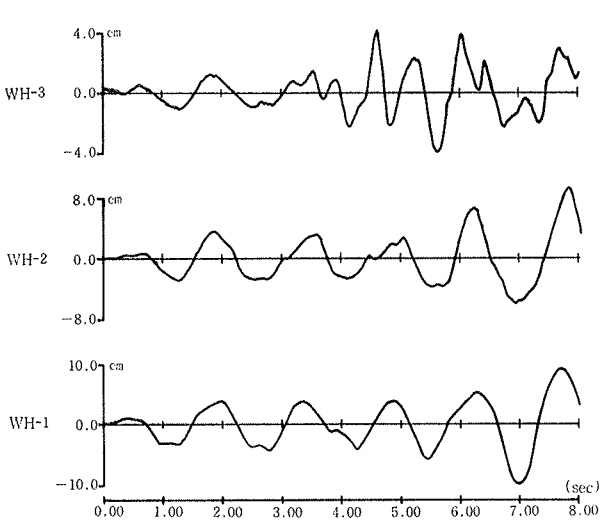
図一13 人工地震波加速度波形 (FEM 解析)



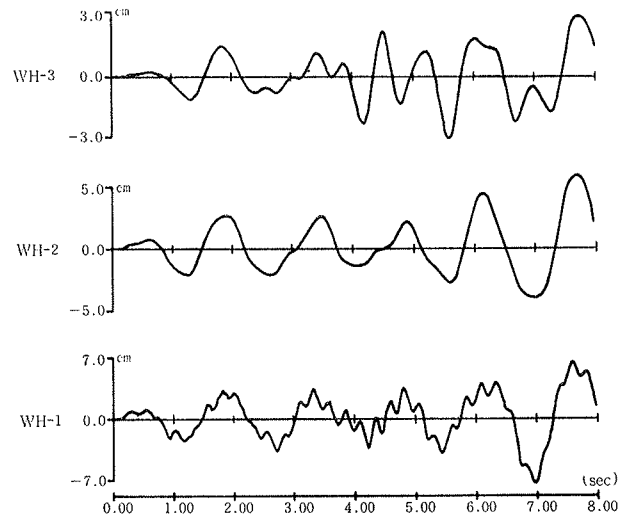
図一14 人工地震波動水圧波形 (実験)



図一15 人工地震波動水圧波形 (FEM 解析)



図一16 人工地震波 波高 (実験)



図一17 人工地震波 波高 (FEM 解析)

(i) 正弦波入力 図-7に、周期1.49秒、17.9 galの正弦波3波を入力した時のスロッシング1次の実験および解析の動水圧と波高の最大応答値を示す。

図-8, 9に、正弦波15.5 Hz、34.7 gal入力時のバルジング1次の定常応答時の実験および解析の加速度と動水圧分布を示す。

図-7のスロッシング1次においては、FEM(実線)と剛壁の速度ポテンシャル理論(破線)は良く一致するが、図-9のバルジング1次においては、タンク壁の弾性変形を考慮しない剛壁の速度ポテンシャル理論は、非常に小さな動水圧分布しか得られないことが分かる。

以上、図-7~9より、正弦波入力において、実験とFEMの解析結果が良く一致するのが分かる。

(ii) ランダム波入力 図-10, 11に、ランダム波実験において、人工地震波最大加速度150 galを入力時の、実験と解析の加速度の最大値応答および動水圧と波高の最大値応答を示す。FEMの解析値は、実験値より少し値は小さいが、分布は良く合っている。

図-11において、FEMと剛壁の速度ポテンシャル理論の解析値を比較すると、波高に関しては、両者はほぼ一致しているが、動水圧に関しては、剛壁の速度ポテンシャル理論値は非常に小さな値となり、動水圧分布も、FEMや実験の分布とは異なっていることが分かる。

図-12, 13に、人工地震波150 gal入力の実験およびFEM解析の代表的な加速度波形を示す。ACC-1は入力加速度、ACC-3, ACC-4は応答加速度である。

図-14, 15に、同じく実験およびFEM解析の代表的な動水圧の波形を示す。同様に、図-16, 17に、実験およびFEM解析の波高を示す。

図-12~17の波形において、水槽底部近傍の側壁の動水圧WP-1は、入力加速度ACC-1と類似している。また、水槽中央部の動水圧WP-4は、応答加速度ACC-3と類似している。これに対して、水槽上部の動水圧WP-6には、波高計WH-1に示すような、周期約1.5秒の1次のスロッシングの振動圧が増大しているのが分かる。

以上、図-10~17より、FEMによる解析は、ランダム波入力についても有効であることが分かる。

4. まとめ

液体一タンクの連成振動を調べる目的で、柔な円筒タ

ンクの振動実験を行ない、FEMなどの解析結果と比較した。以下、その結果をまとめる。

(1) 水深をパラメータとした液体一タンクの連成固有振動数は、水深が大きくなると低下し、実験結果と、タンク壁の弾性変形を考慮したシエル理論およびFEMによる固有値解析結果とは良く一致する。

(2) 水深170 cmの場合について、各次減衰を一律1%としたFEMによる応答解析では、正弦波入力については、スロッシング1次およびバルジング1次とも、実験値と良く一致する。人工地震波入力については、FEMの解析値は実験より少し小さな値となるが、最大値分布および応答波形は実験値と良く一致しており、本解析法の有効性が確められた。

(3) タンク壁を剛と仮定する慣用解析法である速度ポテンシャル理論は、スロッシングに関しては有効であり、スロッシング1次の波高や動水圧は柔なタンクの実験値とも良く一致する。また、人工地震波入力で生じたスロッシングによる波高についても実験値とはほぼ一致する。しかしながら、液体一タンクの連成による動水圧分布については、評価ができない。

以上より、貯液量が多くて、相対的に柔となるタンクや、細長い薄肉タンクなどにおいては、地震時には大きな応答加速度や動水圧が生じ易いため、貯液とタンクの連成を考慮する解析が必要となる。本報の実験モデルにおいて、タンクの弾性変形による液体一タンクの連成を考慮したシエル理論や、FEMの解析法の有効性が確認された。

参考文献

- 1) 武田, 中村: 円筒タンクの地震応答に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 18~23
- 2) C. I. Wu, T. Mouzakis, W. A. Nash and J. M. Colonell: Natural Frequencies of Cylindrical Liquid Storage Containers, Massachusetts Univ, (Jun. 1975)
- 3) 坂井, 迫田: 大型液体タンクの地震応答に関する研究, 第4回日本地震工学シンポジウム, (昭和50. 11), pp. 623~630