

高レベル地震動を対象とした地上式タンク基礎の遠心振動実験

樋口 俊一 森 拓雄
松田 隆 後藤 洋三Shaking Table Tests on Liquid Storage Tank Foundations
during a Severe Earthquake using the Centrifuge Earthquake SimulatorShunichi Higuchi Takuo Mori
Takashi Matsuda Yozo Goto

Abstract

Shaking table tests has been carried out on pile foundations on reclaimed land using a large centrifuge earthquake simulator. A series of tests were carried out under 50g ($1g=981\text{cm/sec}^2$) centrifugal acceleration on a 1/50 scaled tank structure with a piled foundation constructed on a multi-layered ground model. Seismic responses of multi-layered grounds and pile foundations of liquid tank structures were obtained from a series of these tests. Strong nonlinear ground responses were observed during a strong earthquake event as well as post-yield responses of piles. It was found that the residual deformation of the pile cap was small, although pile damages was observed during a strong event. In addition, numerical simulations based on both the equivalent linear theory and the effective stress theory were performed on these test results to confirm the applicability of these analyses to the soil-structure interaction problem during a severe earthquake.

概 要

本研究は、埋立地に建設されることが多いLNG地上式タンクの群杭基礎に対して、その高レベル地震時の耐震性を検証するために実施した、遠心模型振動実験結果について述べたものである。実験では32本の鋼管杭により支持されたタンク模型を砂と粘土の互層地盤上に作製し、遠心重力50gのもとで最大加速度800gal相当の入力地震動を用いて加振試験を実施した。実験の結果、地盤の強非線形応答並びに杭の非線形応答が確認されるとともに、高レベル地震時のタンク群杭基礎の損傷形態が明らかとなった。

遠心実験に引き続き、実験結果に対して等価線形化FEM並びに逐次積分型非線形FEMによるシミュレーションを実施し、高レベル地震動に対する解析手法の適用性を検討した。解析の結果、等価線形化法でも、適切な材料定数を設定することで高レベル地震動に対して実用的な結果を得ることが出来ることがわかった。逐次非線形FEMによる解析では、地盤の過剰間隙水圧の上昇の影響を取り入れることで地盤内の杭の曲げひずみ分布や振動特性を等価線形化解析より良好に再現できた。

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は土木・建築構造物等に甚大な被害をもたらした。土木・建築構造物杭基礎の被害については、地震後の調査によって臨海部の埋立地盤での被災度が大きいことが明らかになった。その理由として、埋立地盤に特徴的な、飽和砂地盤の液状化による地盤変位や、沖積粘土層境界における地盤剛性の急激な変化による大きなせん断力の発生が指摘されている¹⁾。このような背景のもと、本研究ではLNG地上式タンク基礎及びタンク配管基礎の高レベル地震時の挙動と、損傷モードの確認を目的として遠心模型振動実験を実施した。本論文はその成果とそれに引き続いて実施した事後解析についてまとめたものである。

2. 遠心模型振動実験の概要

遠心模型実験は、模型地盤に遠心重力を作用させることにより、地盤材料の力学挙動の拘束圧依存性を満足させることができる実験手法である。本研究では世界最大級の遠心模型実験装置²⁾を用いて、遠心重力50gにおいて遠心模型振動実験を実施した。実験に先立ち実施したLNG地上式タンクの実態調査より、内容量80,000kl級タンクが代表的な寸法であることが分かったが、実験装置の寸法の制約上、1対1の相似則(長さの縮尺1/50)を満足させるため1,000kl級のタンクをプロトタイプとして設定した(Fig. 1)。実際のLNGタンクでは、地震時のタンク本体と内容液の連成振動の影響を考慮する必要が指摘されるが、ここでは現象を単純化するために、タンク模型は

剛体運動のみを考慮した剛体モデルとした。一方模型杭については、地盤と杭基礎の相互作用と高レベル地震時の基礎の耐震性と損傷モードを確認する必要があることから、相似則及び材料非線形性が満足されるように、Table 1 に諸元を示す鋼製ミニチュア模型杭を作製した。模型地盤は埋立地盤を想定して、砂層と粘土層の互層構造とし、海底支持層を締め固めた砂層で、沖積粘土層を正規圧密粘土層で、埋め土を中密砂層で作製した。Fig. 2 に模型地盤とタンク模型を示す。

実験では遠心重力載荷開始後、粘土層の沈下が終了するのを確認してから、加振試験を実施した。入力地震動には、高レベル地震動（以下L2とする）の他、最大加速度20gal相当のランダム波と、El Centro NS波を最大加速度150gal相当に振幅調整した地震波（以下L1とする）を用いた。加振は地盤及び構造物に与える加振履歴が小さ

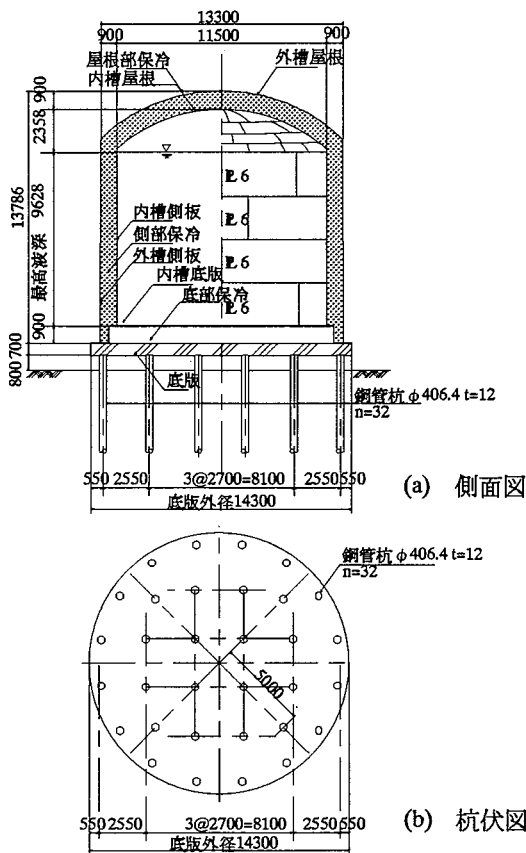


Fig.1 1,000kl級LNGタンク（プロトタイプ）

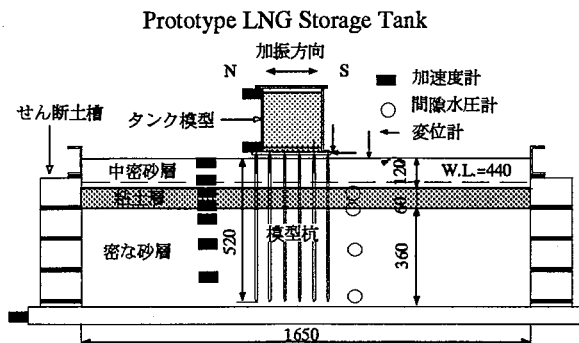


Fig. 2 タンク模型と模型地盤（遠心実験模型） unit:mm
Model Setup for Centrifuge Test

Table 1 模型杭の諸元
Properties of Miniature Model Pile

	実杭	模型杭
外径 (mm)	400	7.98***
肉厚 (mm)	12	0.29***
鋼材規格	SKK400	STK M11
I (mm ⁴)	2.76x10 ⁸	4.63x10 ²
E (MPa)	205,800	224,000***
σ _y (MPa)	235*	360***
ε _y (μ)	1,142**	1,600***

*規格値 **規格値より算定 ***実測値

いように、入力加速度が小さい地震波から順にL2地震動まで段階的に実施した。

遠心実験はタンク基礎の他に、地盤のみを対象とした地盤モデルと、杭本数が4本の配管基礎モデルについて実施したが、ここでは紙面の都合上タンク基礎モデルのみの結果を示す。

3. 実験結果

3.1 入力加速度に対する地盤の非線形性

埋立地盤を想定した砂と粘土の互層地盤に、最大加速度振幅の異なる地震動を入力した時の地盤の応答特性をFig. 3及びTable 2に整理した。Fig. 3に示す地盤の伝達関数からは、ランダム波加振で90Hz付近、L1加振で70Hz付近にピークが読みとれ、地盤応答の入力加速度振幅に対する非線形性が現れている。L2加振の伝達関数からは明瞭なピークは読みとれない。またTable 2に示したように、加速度の時刻歴より読みとった地盤の応答倍率（最大入力加速度に対する地表面最大応答加速度の比）は、入力加速度が大きくなるほど小さくなることがわかり、L2加振の場合は、増幅率がほぼ1.0となった。

Table 2 模型地盤の非線形応答特性
Non-linear Response of the Model Ground

入力	固有振動数 (Hz)	応答倍率
ランダム波	90	3.84
L1	70	1.87
L2	-	0.98

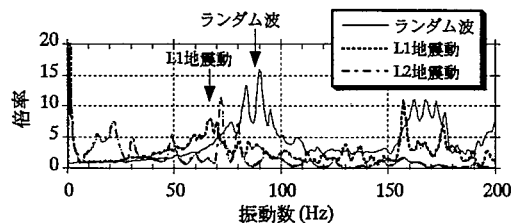


Fig. 3 模型地盤の伝達関数（モデルスケール）
Transfer Function of the Model Ground

3.2 地盤内加速度分布

ここでは地盤の増幅特性の入力加速度振幅に依存した差異を、地盤内の加速度分布より考察する。Fig. 4はL1及び

L2加振における模型地盤内の最大加速度分布を示したものである。L1加振においては下部砂層、粘土層双方で加速度の増幅が見られるのに対し、L2加振では粘土層で加速度が減少していることがわかる。このような現象は、兵庫県南部地震の際にも埋立地域の軟弱地盤において生じたことが指摘されている³⁾。この理由は、粘土層での地盤のせん断応力がせん断強度近くになり、それ以上のせん断力が上方に伝達されなくなるからである。

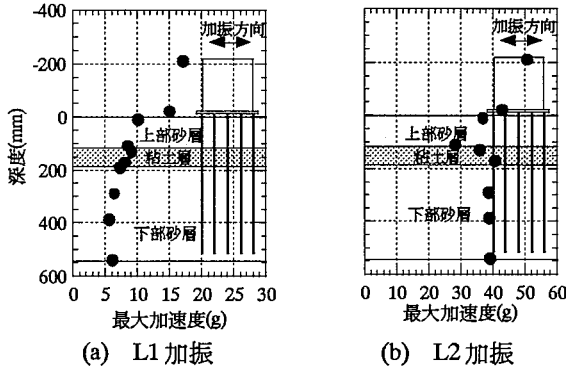


Fig. 4 模型地盤内の最大加速度分布 (モデルスケール)
Max. Acceleration Distribution throughout the Model

3.3 杭の曲げひずみ分布

タンク群杭基礎には、基礎底版の外縁部に配置されている杭と内側に配置されている杭にひずみゲージを設置し、杭の曲げひずみ分布を計測した。

Fig. 5にL1加振及びL2加振の曲げひずみの深度分布をを整理した。L1加振の場合は、杭頭部(基礎底版接合部)で700 μ 程度の曲げひずみの発生が見られる。また、地盤内部でも粘土層と砂層境界部で300 μ 程度の曲げひずみが発生している。Table 1に示した模型杭の材料特性より、この時杭の応答は弾性範囲にあることがわかった。一方L2加振の場合は、杭頭部で4,000 μ 程度の曲げひずみが発生し、杭が降伏して非線形領域に入ったことがわかる。ここには示していないが、曲げひずみの時刻歴からは、加振後に数百 μ の残留ひずみが認められた。これは、LNGタンク基礎底版が高床式であり、基礎底版が接地していないため、タンクの慣性力がすべて杭頭に作用するからである。また、地盤内部の地層境界部でも大きな曲げひずみが発生

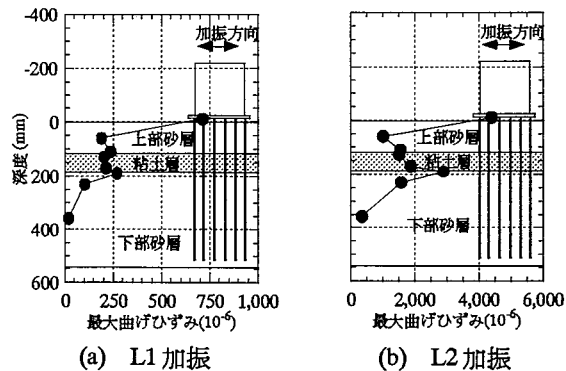


Fig. 5 外側杭の最大曲げひずみ分布
Max. Bending Strain Distribution on the the Outer Pile

し、粘土層と下部砂層の境界部では、3,000 μ の値となった。これは地盤の応答特性でも触れたように、砂層に挟まれた粘土層で大きなせん断ひずみが発生し、杭に大きな強制変位を与えたからである。

3.4 曲げひずみ応答に対する杭位置の影響

本研究ではFig. 6に示すタンク基礎底版平面位置に配置された杭のひずみを計測した。その結果、杭の位置によって発生する曲げひずみの大きさが異なることがわかった。

Fig. 6においてF杭は加振方向に並んだ杭列であり、(1)で触れた外側杭と内側杭に相当する。L杭はF杭列から加振直角方向にはずれた杭で、加振方向と杭の配置からわかるように、加振時に前後の杭の影響が最も小さい杭であると考えられる。

Fig. 7は杭位置と杭頭部の杭の最大曲げひずみの関係を示したものである。F杭同士を比較すると外側杭(F1, F2)の曲げひずみはL1, L2加振とも内側杭(F3)より大きくなっていることがわかる。これは、上部構造物と地盤との相互作用によって地盤に伝えられる慣性力が、地盤反力が比較的大きい外側杭に集中したためであると考えられる。一方加振直角方向にはずれたL杭の曲げひずみは、F杭よりも大きくなることがわかった。この理由は、L杭に影響を及ぼす杭が、加振方向に1本しか存在しないため、最も地盤反力が大きいためであると考えられる。

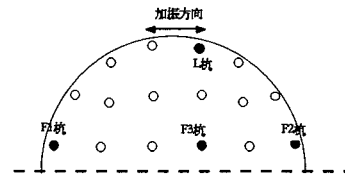


Fig. 6 計測杭の位置とタンク基礎底版
Location of Instrumented Piles on the Pile Cap

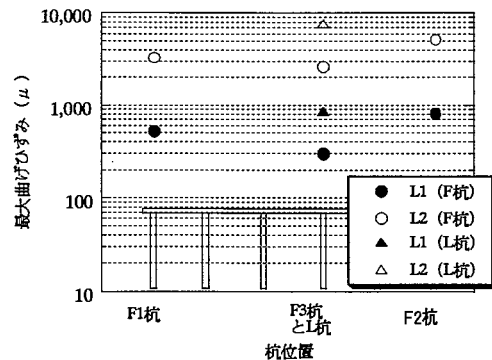


Fig. 7 杭の位置と杭頭部の最大曲げひずみの関係
Location of the Pile and Max. Bending Strain at the Pile Cap

3.5 タンクの応答変位

地震時及び地震後のタンクの安定性を把握するために、各加振におけるタンク基礎底版と地盤地表面の動的相対変位と、地表面及びタンク基礎底版の残留沈下量を調べた。動的相対変位の最大値はL1加振で1.2mm(実機換算60mm)、L2加振で4.5mm(同225mm)となることがわかった。一方Table 3より、タンク基礎底版は地表の1/4~1/

10程度しか沈下してない。特にL2加振では多くの杭頭部が塑性化したと考えられるが、それでもタンク基礎底版の沈下量は実機換算しても最大でも1cm程度の沈下に留まり、タンクの安定性が保たれることがわかった。

Table 3 タンク及び地表面残留変位 (単位: mm)
Residual Deformation of the Ground and the Pile Cap

加振地震波	地表鉛直	底版水平	底版鉛直
L1	0.20	0.05	0.08
L2	2.00	1.20	0.18

3.6 タンク-地盤の非線形変位応答

タンク基礎底版と地盤表面の動的相対変位とタンク上部構造物の慣性力の関係を整理したのがFig. 8である。Fig. 8より、振幅の大きさに対して荷重-変位曲線のヒステリシスが明らかに異なっていることがわかる。すなわち、荷重-変位曲線の割線剛性と面積の変位依存性が認められる。

Fig. 9に、Fig. 8より読みとった変位-荷重曲線の割線剛性k (バネ)と減衰定数hの関係を示したが、変位に依存したバネ、減衰の非線形性が明瞭に現れている。変位が大きくなると剛性が小さくなり、減衰が大きくなるという特徴は、地盤材料の動的変形特性と杭頭の塑性ヒンヂ化の影響であり、タンク本体-基礎構造物-地盤の動的非線形応答に地盤と杭頭の影響が強く反映していることが示された。

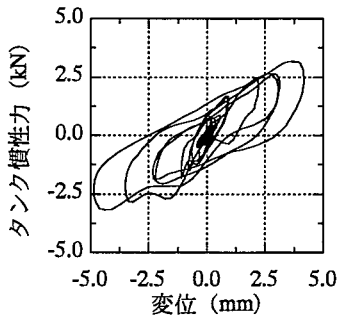


Fig.8 タンク底版と地盤地表面の相対変位とタンク上部構造物の慣性力の関係
Force-Displacement Relation of Tank-Ground Relative Displacement and Inertia Force of the Tank Structure

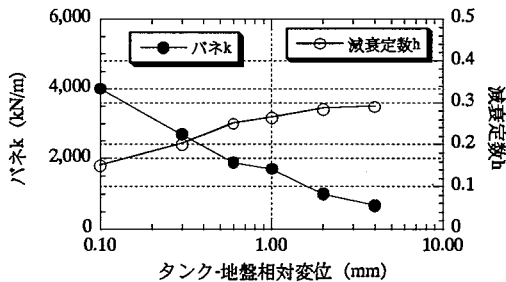


Fig. 10 タンク動的変位-荷重曲線の割線剛性k (バネ)と減衰hの関係
Displacement Dependent Relation of the Secant Shear Modulus and the Damping Factor of the Force-Displacement Curve

4. 遠心模型振動実験の事後解析

地盤・配管基礎連成模型と地盤・タンク基礎連成模型の実証試験において振動台で達成された振動台加振波形を用いた事後解析を実施した。タンク基礎の解析には、回転体等価線形化FEMを、配管基礎の解析には2次元等価線形化FEMを用いた。また、杭の応答に対する周辺地盤の液状化の影響及び杭体の非線形化の影響を検討するために、逐次非線形有効応力FEM解析を用いた解析を実施した。

4.1 地盤定数の設定

この解析で用いた地盤定数は、小型遠心模型実験装置を用いた地盤材料単体の振動試験結果より設定した。Fig. 10に小型遠心模型実験により求めた砂のG- γ , h- γ 曲線を示す。

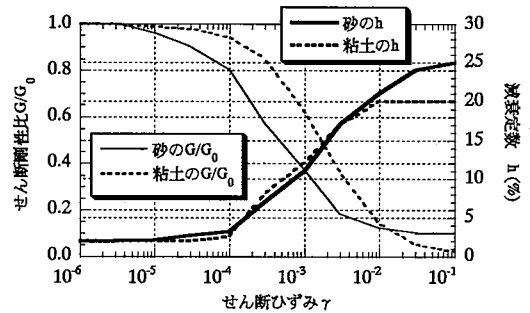
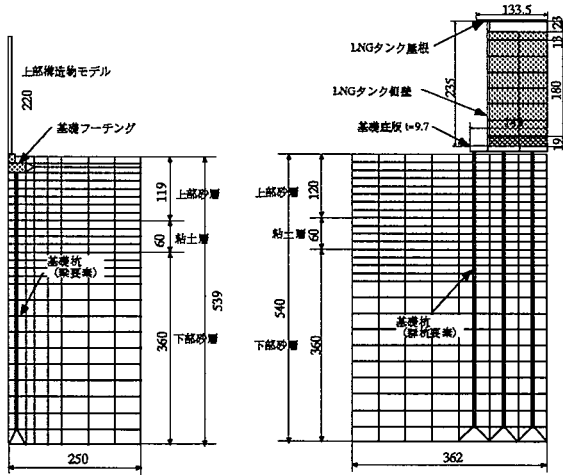


Fig. 10 小型遠心実験による砂のG- γ , h- γ 曲線
Strain Dependent Relation of the Shear Modulus and the Damping Factor of the Sand Obtained by the Centrifuge test

4.2 等価線形化FEM

この解析の目的は、地盤の非線形化が比較的小さいと考えられる通常の地震動(L1)に対する等価線形化手法の適用性を確認するとともに、地盤が強非線形化する高レベル(L2)地震動に対し、等価線形化手法が適用出来るかを実験結果と比較し、手法の適用限界を把握することである。Fig. 11に解析モデルを示す。

Fig. 12に配管基礎のL2加振時の地盤及び構造物の応答加速度の最大値分布について、解析結果と模型実験結果を比較して示した。地盤内の最大応答加速度分布は、下部砂層、粘土層においては解析と実験はほぼ一致している。粘土層においては実験、解析ともわずかながら加速度が減少している。一方、上部砂層においては実験では加速度の増幅がほとんどないのに対し、解析ではかなりの増幅が認められる。すなわち地盤の最大加速度の増幅率は実験が1.0に対し、解析は1.4である。上部構造物の最大加速度は実験値が解析値よりかなり大きい。Fig. 13~Fig. 14に地盤及び構造物の代表的な測点での応答加速度時刻歴波形と伝達関数それぞれについて、解析結果と模型実験結果を比較して示した。上部構造物では、応答加速度の最大値が実験値と解析値ではかなり異なっているが、地盤地表面と構造物の伝達関数では、実験値のほうが伝達倍率が多少大きいものの、ほぼ同様の伝達特性

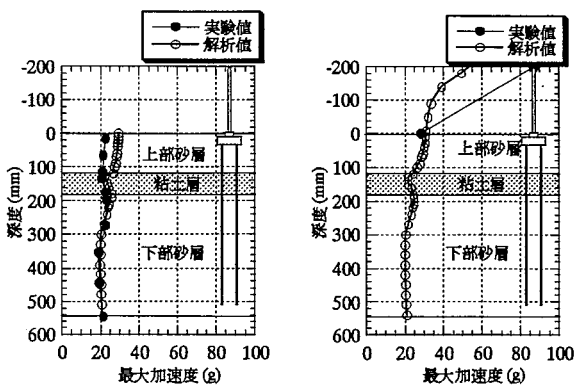


(a) 配管基礎モデル (2次元) (b) タンクモデル (軸対称)
Fig. 11 等価線形解析モデル

2D and 3D FEM Models for the Equevalent Linear Analyses

を示している。したがって上部構造物の加速度応答の差異は、構造物の3次元性と地盤の非線形性を等価線形化手法で考慮していることが原因と考えられる。

Fig. 15にL2加振時の模型杭の曲げひずみの最大値分布について、解析結果と実験結果を比較して示した。地盤内の杭の曲げひずみ分布は、実験では上部砂層と粘土層、下部砂層と粘土層の境界部で2,000~3,000 μst であるのに対し、解析では5,000 μst 程度と2~2.5倍大きな曲げひずみとなった。ただし、実験値はひずみゲージで測定されたものであり、模型作製時の杭の施工精度によりゲージの位置が地層境界部に一致しているとは限らないことに留意する必要がある。実験、解析とも上部砂層と粘土層の境界よりも下部砂層と粘土層の境界のほうが大きなひずみが生じている。Fig. 16に模型杭の代表的な測点での応答ひずみ時刻履歴波形を、解析結果と実験結果を比較して示した。曲げひずみの最大値は、杭頭では実験値のほうがやや大きな最大値を示すのに対し、地層境界部では解析値のほうがかなり振幅が大きい。しかし、主要動以降の後半部においては振幅、形状、位相とも解析と実験はよく一致している。



(a) 自由地盤 (b) 構造物と杭間地盤
Fig. 12 L2加振時の配管基礎模型と地盤の最大加速度
Max. Acceleration Distribution Throughout the Model

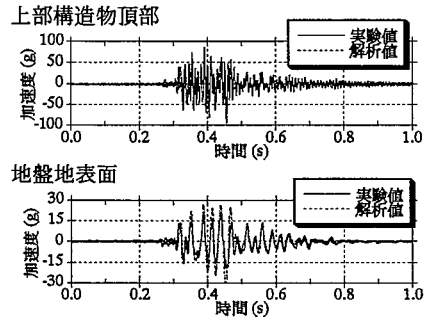


Fig. 13 L2加振時の加速度時刻歴
Acceleration Time Histories

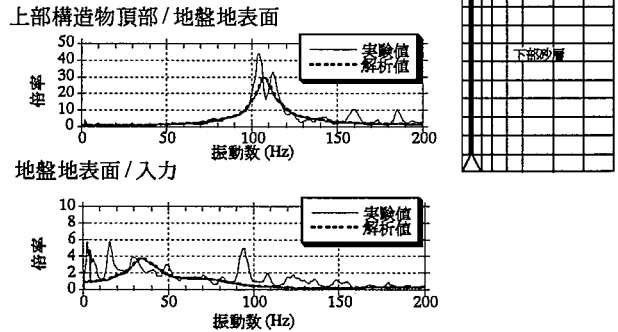


Fig. 14 L2加振時の加速度伝達関数
Transfer Functions of the Ground and the Structure

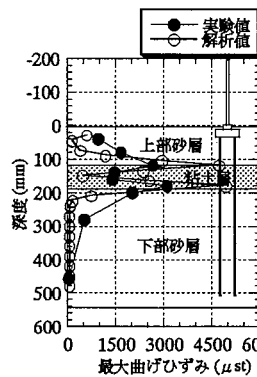


Fig. 15 L2加振時の杭の最大
曲げひずみ分布
Max. Bending Strain Distribution
of the Pile

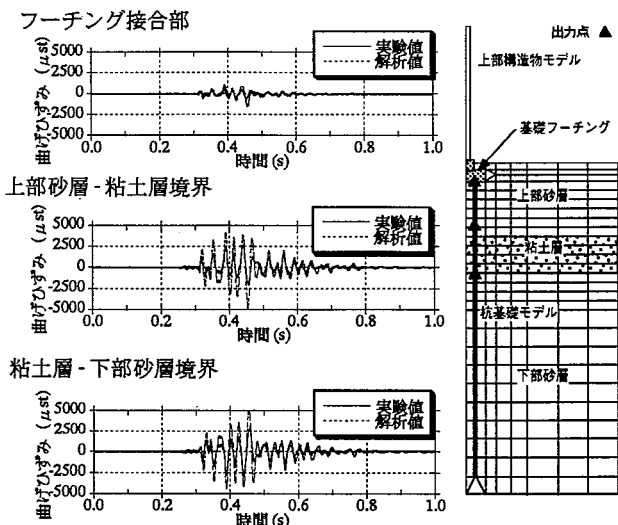


Fig. 16 L2加振時の杭の曲げひずみ時刻歴
Time Histories of Bending Strain of the Pile

タンクモデルを対象とした解析による加速度応答を Fig. 18~20 に示す。地盤内の最大応答加速度分布は、下部砂層においては実験ではほとんど変化がないものの、解析値では中間部で減少した後上部で増幅し、粘土層境界部では解析と実験でほぼ同じ値となっている。粘土層においては解析、実験とも加速度が減少する。上部砂層においては、両者はほぼ同じ増幅特性を示す。地盤表面の最大加速度の増幅率は実験、解析ともほぼ1である。地表面とタンク底板間の増幅率は1.1倍程度で、実験と解析はほぼ一致している。応答波形については、振幅は実験値よりも解析値のほうが若干大きい場合があるものの、波形の形状や位相はよくシミュレートされている。入力地震動に見られた高い振動数成分は地盤上部では消失し、応答振幅がより大きく正弦波的になった。地盤の伝達関数は、解析では35Hz付近にピークがあり、応答倍率はおよそ3倍であるが、実験では明確なピークはなかった。

Fig. 21にL2加振時の模型杭の曲げひずみの最大値分布について、解析結果と実験結果を比較して示した。地盤内の杭の曲げひずみ分布は、実験では基礎底板接合部と下部砂層と粘土層の境界部で大きな曲げひずみが発生しているのに対し、解析ではこれらに加えて上部砂層と粘土層の境界部でも大きな曲げひずみが発生している。外側杭では解析値が実験値を上回る傾向があり、内側杭では中間粘土層を除き実験値のほうが大きくなる傾向がある。外側杭の底板接合部では曲げひずみが集中し、実験で最大4,000 μst 、解析でおよそ5,000 μst である。底板接合部の外側杭の曲げひずみは内側杭のそれと比較してもかなり大きく、実験では1.5倍、解析ではおよそ2.5倍となっている。一方杭-底板接合部より深部の杭に発生する曲げひずみは、下部砂層と粘土層の境界部では外側杭において実験値が最大3,000 μst 、解析値は4,000 μst である。内側杭と外側杭の最大曲げひずみの差異は、実験では1.5倍程度であるのに対し、解析では1.8倍程度である。Fig. 22に模型杭の代表的な測点での曲げひずみ時刻歴波形を示した。杭-底板接合部では解析値のほうが大きな最大値を示すものの、各杭の時刻歴波形は形状、位相とも解析と実験でよく一致していることがわかる。一方地盤内部の杭の曲げひずみ波形は、上部砂層-粘土層境界

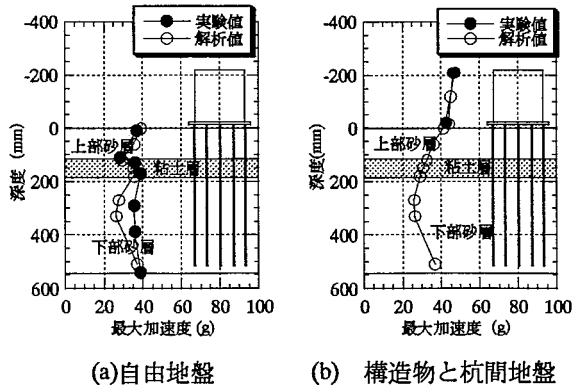


Fig. 17 L2加振時の配管基礎模型と地盤の最大加速度 Max. Acceleration Distribution throughout the Model

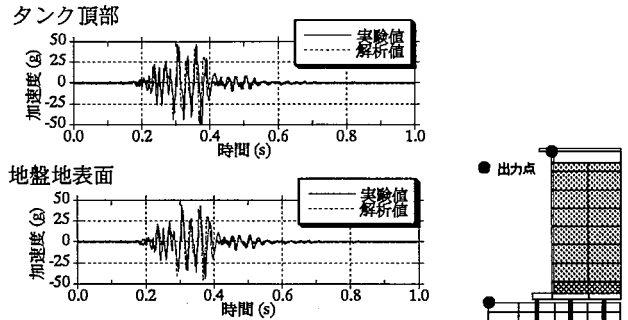


Fig. 18 L2加振時の加速度時刻歴 Acceleration Time Histories

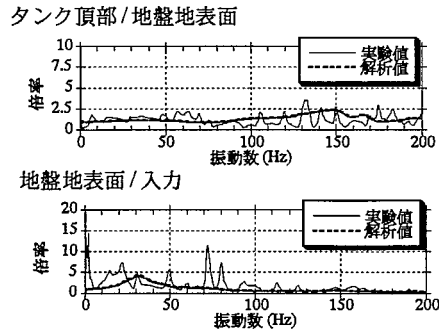


Fig. 19 L2加振時の加速度伝達関数 Transfer Function of the Ground and the Structure

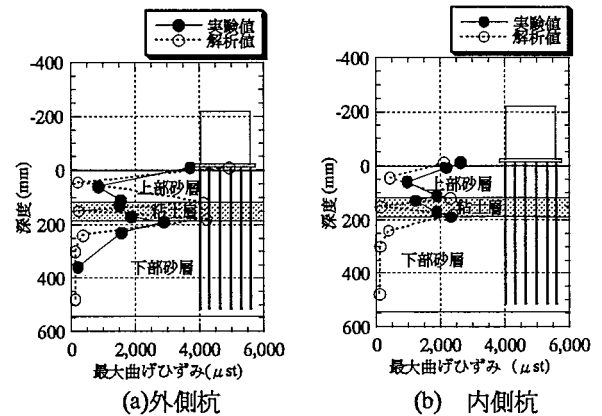


図 20 L2加振時の模型杭の最大曲げひずみ分布 Max. Bending Strain Distribution of the Pile

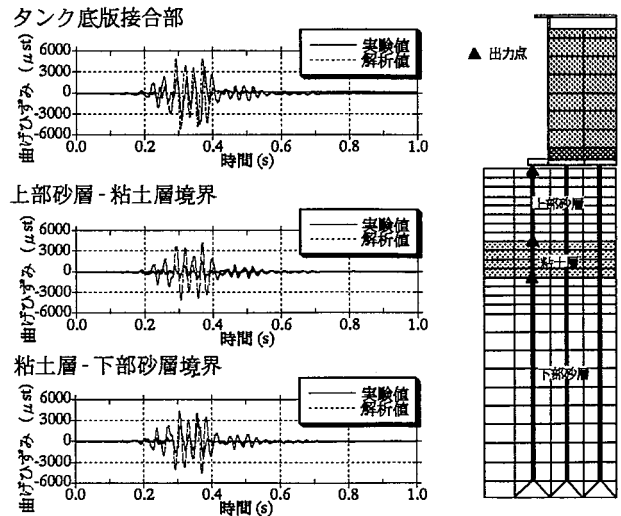


Fig. 21 L2加振時の杭の曲げひずみ時刻歴 Time Histories of Bending Strain of the Pile

部で実験と解析の応答波形が異なっている。その理由の
として、杭と地盤のすべりや剥離、杭近傍における地盤
の局所的な破壊による、地盤剛性の低下が考えられる。

4.3 逐次非線形 FEM

実証試験における、配管基礎ケース及びタンク基礎
ケースのL2加振時に対し、2次元有効応力解析によるシ
ミュレーション解析を実施した。本解析の目的は、地盤
特に下部砂層の過剰間隙水圧の上昇が、杭の応答にどの
ような影響を及ぼすか、及び地盤の局所的な非線形性の
影響を明らかにすることである。解析は遠心振動実験モ
デルの加振方向全断面とし、せん断土槽についても、質
点(土槽柱)とバネ(土槽柱間を連結するゴム)によるモ
デル化を実施し、影響を考慮した。解析に用いた地盤の
土質定数は、前述した小型遠心実験結果をシミュレー
ションして設定した。本論文では、配管基礎モデルの解
析結果について述べることにする。これは、応答が比較
的単純で理解し易く、かつ地盤内部の杭の応答はタンク
基礎の場合とほぼ同等と考えられるからである。Fig. 22
に配管基礎ケースの解析モデルを示す。

Fig. 23に地盤及び構造物の加速度の最大値分布を比較
して示した。地盤の最大応答加速度分布は、下部砂層下
部においては解析値が実験値より大きく、下部砂層上部
より粘土層にかけては解析値が実験値より小さくなっ
ているが、下部砂層中での増幅は、実験、解析ともほぼ
1.0である。粘土層の加速度は、両者とも層の上部でわず
かに減少している。Fig. 24~25に、地盤及び構造物の代
表的な位置における加速度時刻歴と伝達関数を示した。上
部構造物の最大加速度は解析値は実験値の70%程度で
あったが、上部構造物と地盤地表面の伝達関数では両者
は105Hzでほぼ同じ伝達倍率を示している。これは、有
効応力解析が逐次非線形解析であるため、加速度振幅が
小さな時刻では地盤剛性が低下せず、高い振動数成分が
伝達されるためである。地盤の伝達関数も実験値と解析
値は良く一致しており、等価線形解析とは異なる結果と
なった。即ち、大きな入力加速度を有する地震動を用
いた地盤の強非線形現象の解析には、有効応力解析のよ
うな逐次非線形解析が振動数特性をよりの確に表現で
きる事がわかった。

Fig. 26に地盤内の杭の曲げひずみの分布を示す。実験
解析とも上部砂層と粘土層、粘土層と下部砂層の境界部
で大きな曲げひずみの発生が見られる。それぞれの最大
値は実験では2,500~3,000 μ stであったのに対し、解
析では3,500~4,000 μ stと、解析値のほうが大きくな
った。また、粘土層の中間部では実験、解析とも杭の曲
げひずみが小さい。上部砂層では実験値よりも解析値の
ほうがひずみが小さく、分布形状も異なっている。基礎
フーチング接合部の曲げひずみは地層境界部のひずみよ
りかなり小さく、実験値と比較しても小さな値である。
これは等価線形解析結果と同様の結果であり、解析を2
次元モデルとしたことで、基礎フーチング及び上部構
造物の加速

度応答が実験値と比較して小さくなったことによるもの
と考えられる。Fig. 27は、代表的な測点の杭の曲げひ
ずみ応答波形である。ここでは杭-基礎フーチング接合部
、上部砂層-粘土層境界部、粘土層-下部砂層境界部に
加えて、下部砂層内部での応答波形を示した。杭-基礎
フーチ

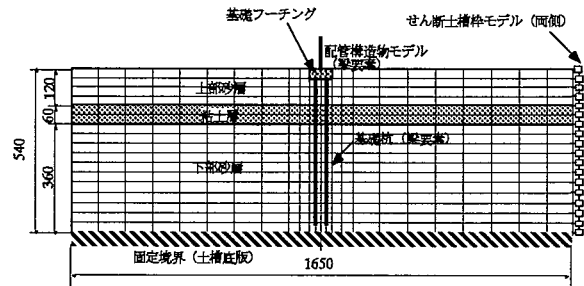


Fig. 22 配管基礎ケース解析モデル
2D FEM Model for the Effective Stress Analysis

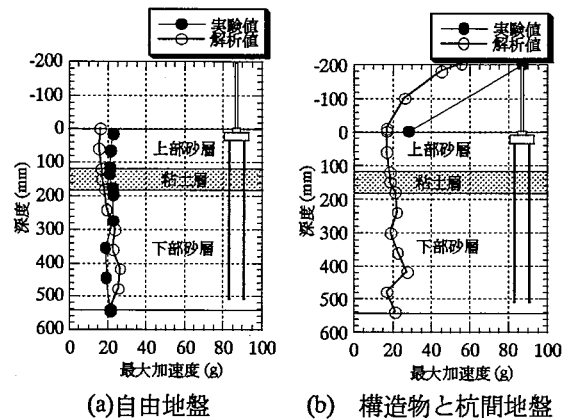


Fig. 23 L2加振時の配管基礎模型と地盤の最大加速度
Max. Acceleration Distribution throughout the Model

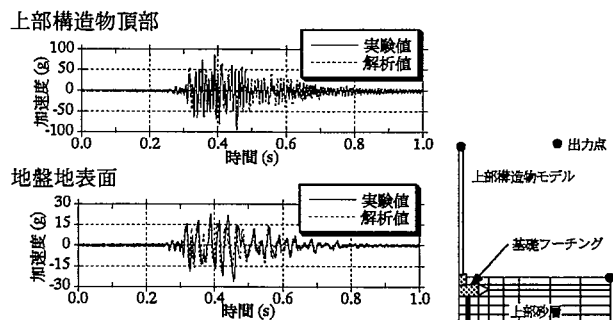


Fig. 24 L2加振時の加速度時刻歴
Acceleration Time Histories

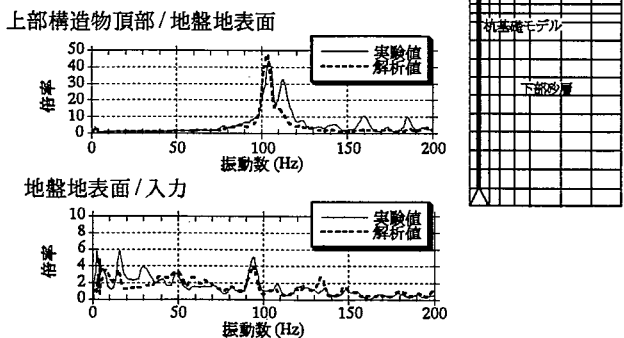


Fig. 25 L2加振時の加速度伝達関数
Transfer Function of the Ground and the Structure

ング接合部においては解析値は実験値を下回っている。これは解析において基礎フーチング及び地盤上部の加速度応答が小さいことに起因する。地層境界部の曲げひずみ応答は、最大値において解析値が実験値を上回るもの、位相については両者は良い一致を示している。

4.4 杭の非線形応答

ここでは杭体に材料非線形特性 (M- ϕ 関係) を取り入れた解析結果について述べる。大部分のLNG地上式貯槽には鋼管杭が使われていること、計算の実用性を考慮して単純なパイリニヤー則で杭の非線形応答特性をモデル化し、前述の配管基礎の解析を実施した。Fig. 28に杭を線形及び非線形とした場合の杭の最大曲率分布を示した。杭体への非線形性の導入により、地盤境界部での最大曲率は線形解析の場合よりも大きくなった。上部砂層-粘土層境界部での最大曲率はおよそ1.4(1/m)で、杭体の載荷試験より明らかとなった降伏曲率0.4の3倍を超え、粘土層-下部砂層境界部でも最大曲率1.0程度となった。Fig. 29に示した上部砂層-粘土層境界部の杭要素の、モーメント-曲率関係は紡錘形のループを描いており、杭が降伏している。

5. まとめ

L2地震を対象にしたタンク基礎-地盤模型の遠心振動実験と事後解析の結果、以下の知見を得た。

- ①埋立地盤の地盤の応答倍率は入力加速度が大きくなるほど小さくなり、L2加振の場合は、増幅率がほぼ1.0となった。
- ②L2加振時は杭頭部で塑性率2~3程度、地層境界部で同1.5~2程度の曲げひずみが発生し、杭が降伏して非線形領域に入った。
- ③上部構造物と地盤との相互作用により、杭頭に発生する曲げひずみは内側杭よりも外側杭のほうが大きくなるのがわかった。
- ④L2加振においてもタンク基礎底版の沈下量は実機換算で最大1cm程度の沈下に留まった。
- ⑤等価線形化法でも、適切な材料定数を設定することで高レベル地震動に対する地盤と構造物の動的相互作用解析は、実用的な結果を得ることが出来るのがわかった。
- ⑥逐次非線形FEMでは、地盤の過剰間隙水圧の上昇の影響を取り入れることで、地盤内の杭の曲げひずみ分布や動的応答特性を等価線形化解析より良好に再現できた。

謝辞

本研究は(財)発電設備技術検査協会が国の委託を受けて実施した、「発電設備耐震信頼性実証試験」の一部として実施されたものである。ここに記し、関係各位に謝意を表す。また、本試験の計画、実施および評価にわたりご指導頂いた発電設備耐震信頼性実証試験委員会委員長 柴田碧東京大学名誉教授、タンク分科会主査秋山宏

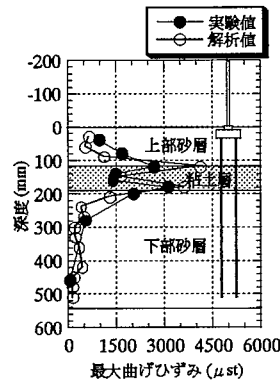


Fig. 26 L2加振時の杭の最大曲げひずみ分布
Max. Bending Strain Distribution of the Pile

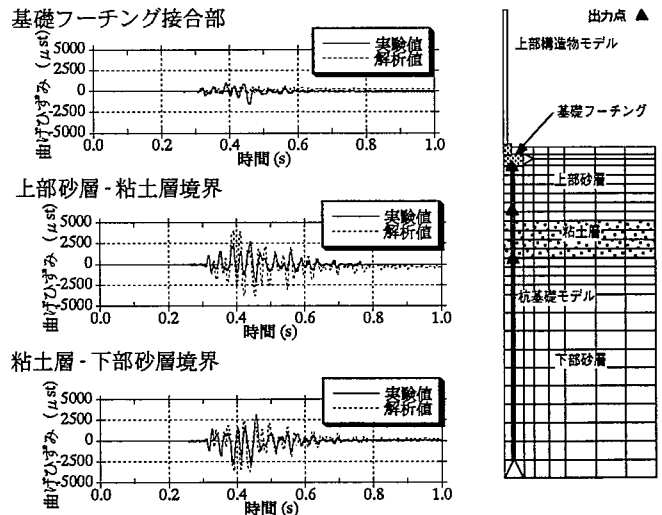


Fig. 27 L2加振時の杭の曲げひずみ時刻歴
Time Histories of Bending Strain of the Pile

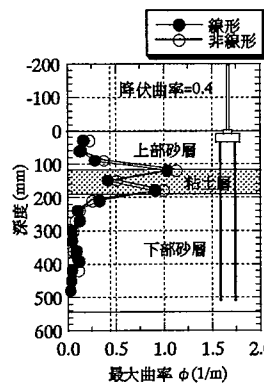


Fig. 29 杭の非線形性を考慮したときの杭の最大曲率分布

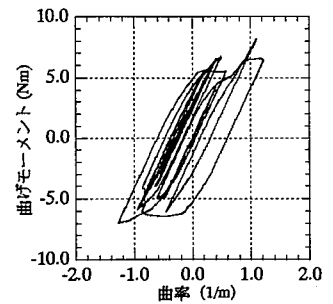


Fig. 30 杭の応答した場合の杭の最大曲率分布 (M- ϕ 曲線)

日本大学教授、ならびに委員各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 地盤工学会・阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)，平成8年3月。
- 2) Kutter, B.L. et.al: Design of a Large Earthquake Simulator at UC Davis, Proc. Int. Conf. Centrifuge 94, Singapore, Leung, Lee and Tan, Balkema, Rotterdam, pp.169-175,1994.
- 3) 吉田ら：兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.117-124, 1996.