

振動台を用いた地上式タンク基礎の液状化実験

Liquefaction Tests for Pile Foundation of An Oil Tank Using Shaking Table

新井 寿昭**	萩原 敏行***
Toshiaki Arai	Toshiyuki Hagiwara
武内 義夫**	阿世賀 宏*
Yoshio Takeuchi	Hiroshi Asega
高井 茂光**	浅沼 裕之**
Shigemitsu Takai	Hiroyuki Asanuma

要 約

本研究は、杭基礎で支持された地上式タンク基礎の大規模地震時挙動と有効な液状化対策法を検討するために、大型振動台実験を実施した結果について述べている。実験は、9本の杭基礎により支持されたタンク模型を非液状化層と液状化層からなる模型地盤内に設置し、入力加振レベルを変化させた振動実験を行った。また、タンク基礎直下の液状化層を改良した場合の液状化対策実験も行い、その効果について検討した。実験結果から、2層地盤における液状化無対策および液状化対策を施した杭基礎の応力特性を定量的に明らかにした。解析的検討では、動的軸対称 FEM および静的解析により実験結果をシミュレートし、解析方法の妥当性および問題点について検討した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 振動台実験の概要
- § 3. 実験結果ならびに考察
- § 4. シミュレーション解析
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

1995年に甚大な被害をもたらした兵庫県南部地震以降、仕様設計から性能設計へ移行しつつあり、今後は地震被害や解析的および実験的研究成果などを積極的に踏まえた耐震性の検討を要求される場合が多くなると考えられる。特に軟弱な地盤に建設される杭基礎建物では、従来の一次設計法では十分に考慮することができない、地盤と基礎構造および上部構造物との相互作用が存在するために、地盤－杭基礎－構造物連成系の動的特性を検討して、地盤や構造物の変形などを適切に評価する必要がある。

本研究では、軟弱地盤に建つ杭基礎で支持された地上式タンクを対象とし、兵庫県南部地震で観測された地震

波を用いた大型振動台による液状化実験を実施して、入力加振レベルや地盤の液状化が杭基礎の挙動に及ぼす影響について検討した。また、杭基礎に締固め工法を想定した地盤改良を施すことにより、大規模地震に対する液状化対策効果を検討した。これらの実験結果と動的解析および静的解析によるシミュレーション解析結果とを比較し、各要素のモデル化および解析方法の妥当性について検証した。

§ 2. 振動台実験の概要

2-1 実験装置および実験模型

実験システムを図-1に示す。本実験では、愛川衝撃振動研究所の大型振動台（寸法 5.5m×5.5m）上に、あらかじめ模型を設置した円筒形せん断土槽を搭載して、振動実験を実施した。模型地盤として上層液状化層（相対密度 60～65%）、下層非液状化層（相対密度 80～85%）からなる2層地盤を想定した。模型地盤には豊浦標準砂（ $D_{50}=0.18\text{mm}$, $e_{\max}=0.979$, $e_{\min}=0.606$ ）を用い、水位は地表面に一致させた。また、地盤改良を施した実験では、締固め工法を想定してモデル化した。

本実験では、直径 10m の地上式タンクを想定し、模型の長さの相似比は 1/33 とした。他の相似比は、重力場での実験であること、模型砂として豊浦標準砂を用いることを制約条件として、次元に従って決定した。タン

* 技術研究所技術研究部

** 技術研究所技術研究部建築技術研究課

*** 技術研究所技術研究部土木技術研究課

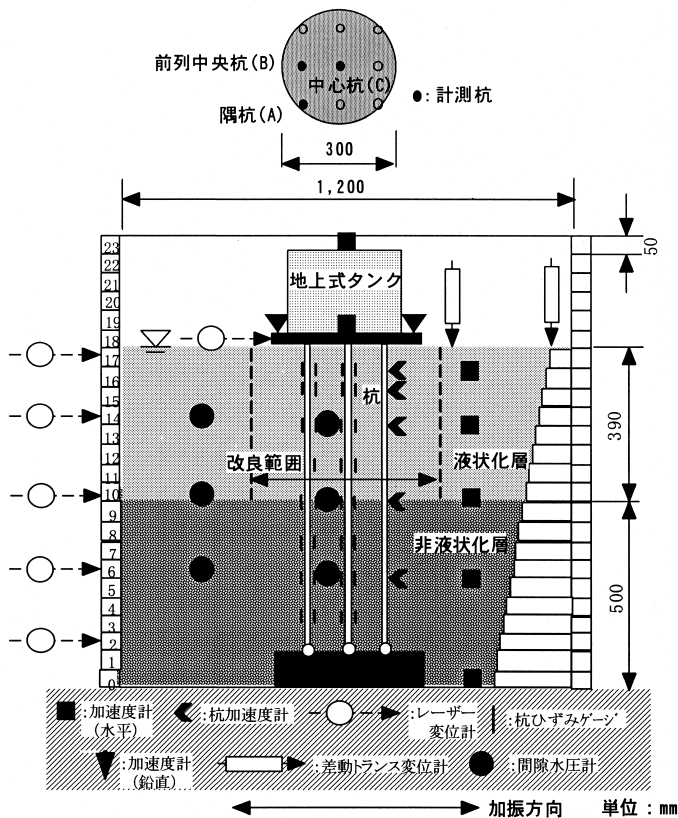


図-1 実験システム

ク模型は、直径300mm、側面高さ220mmの亚克力製円筒形であり、重量136.5Nとなるよう鉛散弾をタンク模型内に設置した。杭は鋼管杭を想定し、群杭の曲げ剛性が等価となるように杭本数および杭径を決定した。模型杭には杭外径8mm、長さ790mmのアルミニウムパイプを使用した。杭の結合条件は、杭頭はタンク基礎と剛結、杭先端は土槽底部と振動方向に対してヒンジ結合とした。また、基礎底面と地盤間には、杭と地盤の相互作用が明確となるように間隙を設けた。

加振中は、図-1に示すように地盤内、杭およびタンクに生じる加速度、過剰間隙水圧、地表面沈下、タンク基礎およびせん断土槽樁の水平変位、杭ひずみを測定した。なお、杭ひずみは9本杭のうち3本の杭（隅杭A、前列中央杭B、中心杭C）で計測した。

2-2 実験内容

実験ケースの模式図を図-2に、実験ケースを表-1に示す。CASE 1-1～1-2は地盤条件とタンク模型を一定とし、入力加振レベルを2段階に変化させて応答特性の相違を検討した。また、締固め工法を想定したCASE 2-1～2-3では、タンク直下地盤の改良径を変化させて液状化対策効果について検討した。なお、改良深さは全て同一の下層表面までの390mmとした。

入力地震動には、兵庫県南部地震で観測された地中観測波（GL-32m、NS成分、最大加速度544cm/sec²）に0.2～50Hzのバンドパスフィルターを施した波形を用いた。入力地震動の一例として、CASE 1-2におけ

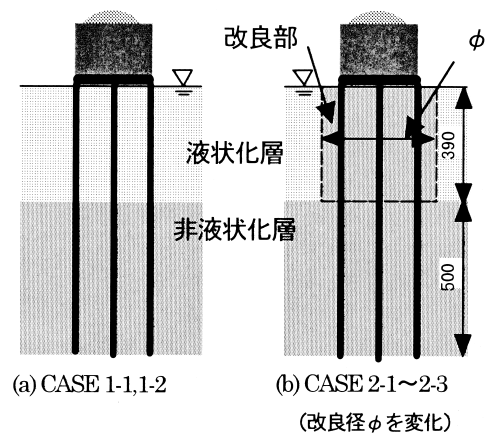


図-2 実験ケースの模式図

表-1 実験ケース

実験ケース名	液状化対策	入力加振レベル	相対密度
CASE 1-1	なし	100cm/sec ²	上層：62% 下層：80%
CASE 1-2		455cm/sec ²	上層：67% 下層：82%
CASE 2-1	全改良 (ϕ 500mm)	455cm/sec ²	上層：68% 下層：81% 改良部：82%
CASE 2-2	全改良 (ϕ 400mm)		上層：58% 下層：86% 改良部：84%
CASE 2-3	全改良 (ϕ 320mm)		上層：50% 下層：82% 改良部：85%

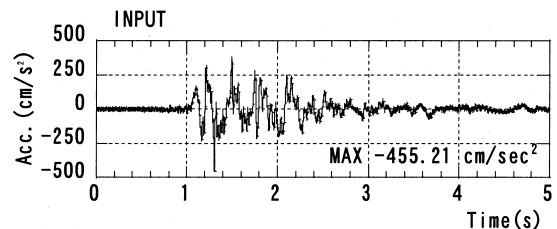


図-3 入力地震動

る加速度時刻歴波形を図-3に示す。

§ 3. 実験結果ならびに考察

3-1 入力加振レベルによる応答特性 (液状化無対策：CASE 1-1～CASE 1-2)

CASE 1-1およびCASE 1-2の加振中の地盤の過剰間隙水圧比分布、せん断ひずみおよび杭-タンク系の応答加速度分布、杭の曲げモーメント分布を時系列的な変化として、図-4、5に示す。

CASE 1-1では、入力加振レベルが100cm/sec²と比較的小さいために過剰間隙水圧比もほとんど発生していない。また、せん断土槽樁を計測している変位計から求めた地盤のせん断ひずみは最大で約0.06%であり、概ね線形範囲内の挙動であることを示している。杭に生じる曲げモーメントは杭頭部で最大値を示しており、その

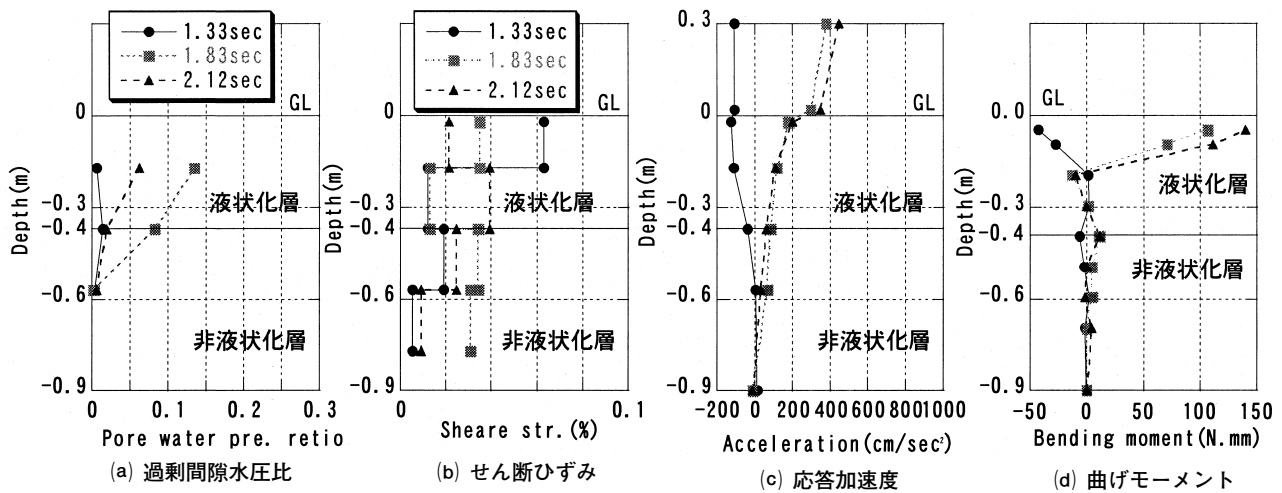


図-4 CASE 1-1

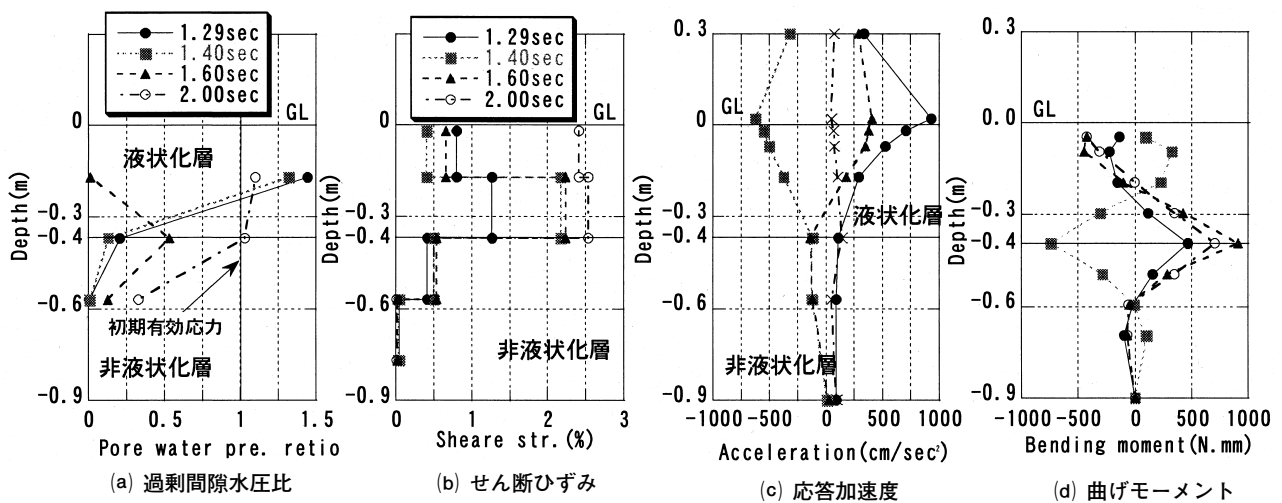


図-5 CASE 1-2

要因としてタンクの慣性力による影響が支配的であることを、杭-タンク系の応答加速度分布からも推察される。

CASE 1-2 では、過剰間隙水圧の上昇過程で増減が著しく(図-6)、地盤のせん断ひずみは下層の非液化化層と上層の液化化層の層境界部で最大値を示している。杭に生じる曲げモーメントは、層境界部で最大値を示しており、地盤のせん断ひずみと対応した結果が得られている。これは、層境界部に及ぼす曲げモーメントの要因として地盤変形の影響が支配的であることを示唆している。

以上示した杭の曲げモーメント分布では、深さ方向の応力特性は CASE 1-1 と CASE 1-2 では大きく異なっている。すなわち、CASE 1-1 では杭頭部で、CASE 1-2 は液化化層と非液化化層の層境界部でそれぞれ応力集中が認められる。このことは、今回の実験範囲において、入力レベルが小さい場合にはタンクの慣性力が卓越し、従来の設計で検討されているように杭頭に静的荷重を作用させる弾性支承上の梁理論によって説明することができる。これに対して、入力レベルが大きく地盤の液

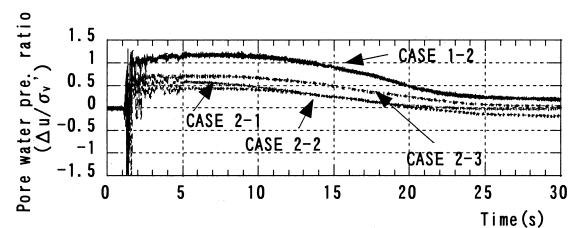


図-6 過剰間隙水圧比 (GL.-0.2m)

状化が著しい場合には、上下層の地盤変形状の相違を考慮する必要があることが示唆される。

3-2 液状化対策工法の効果

図-6 は、CASE 1-2 と CASE 2-1～2-3 のタンク直下地盤 (GL.-0.2m) の過剰間隙水圧比波形を比較したものである。タンク直下地盤を全改良した CASE 2-1～CASE 2-3 では、無対策の CASE 1-2 と比較して過剰間隙水圧の上昇が約 50%～80% に抑制されており、顕著な液状化対策効果が認められる。改良径 $\phi 500\text{mm}$ の CASE 2-1 と改良径 $\phi 400\text{mm}$ の CASE 2-2 はほぼ一致しており、相違は認められない。しかし、改良径 ϕ

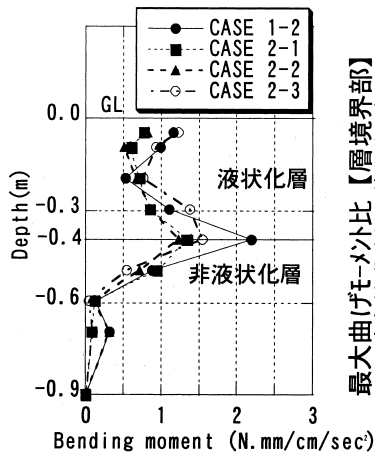


図-7 杭の最大曲げモーメント分

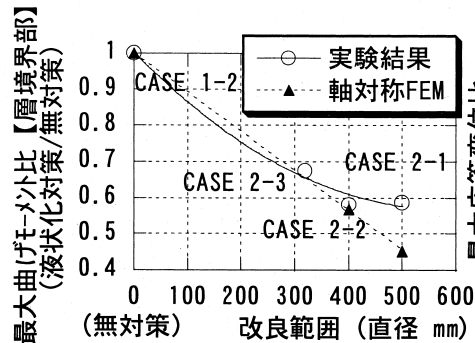
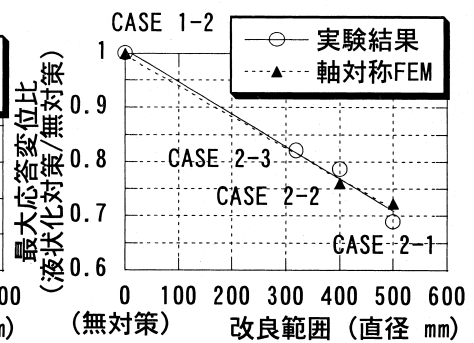


図-8 最大曲げモーメント比

図-9 最大応答変位比
(タンク基礎部)

320mm の CASE 2-3 では CASE 2-1, 2-2 よりも過剰間隙水圧比が上昇している。また、ここでは示していないが層境界部 (GL - 0.4m) では、GL - 0.2m ほど顕著な対策効果は認められないものの、各実験ケース間では概ね同様の傾向を示している。

隅杭 (A) の最大曲げモーメント分布を図-7 に示す。ここでは、最大曲げモーメント値を入力加速度の最大値で基準化している。タンク直下を全改良した CASE 2-1 ~ CASE 2-3 では無対策の CASE 1-2 と比較して、杭に生じる最大曲げモーメントが層境界部で約 60% まで抑制されていることがわかる。

無対策を基準とした層境界部に生じる曲げモーメント比を図-8 に示す。今回の実験範囲では、層境界部の曲げモーメントの低減率を 2 次曲線で概ね近似することができ、改良径 $\phi 400\text{mm}$ 程度までは改良径が大きくなるほど曲げモーメントの抑制効果が認められる。また、改良径 $\phi 400\text{mm}$ と $\phi 500\text{mm}$ の抑制効果は同程度であり、このことはタンク基礎幅相当の改良でも十分な対策効果が期待できることを示唆している。

無対策を基準としたタンク基礎部の最大応答水平変位比を図-9 に示す。タンク直下地盤を全改良した場合には改良径が大きいほど、タンク基礎部の応答変位を抑制することができる。今回の実験では、無対策に比べて最大 70% 程度までタンク基礎の応答変位が抑制されている。

§ 4. シミュレーション解析

4-1 動的軸対称 FEM

(1) 解析方法

液状化が著しい大規模地震時の杭基礎の応答特性および液状化対策効果について、軸対称 FEM により解析的検討を行った。ここでは、液状化無対策の CASE 1-2 およびタンク直下全改良の CASE 2-1, 2-2 を解析対象とした。

解析モデルを図-10 に示す。地上式タンクは剛体質

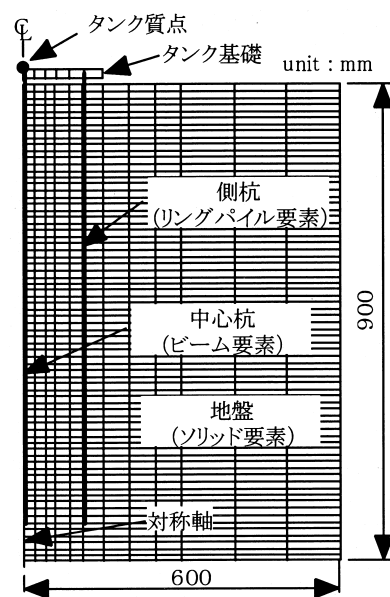


図-10 軸対称 FEM 解析モデル

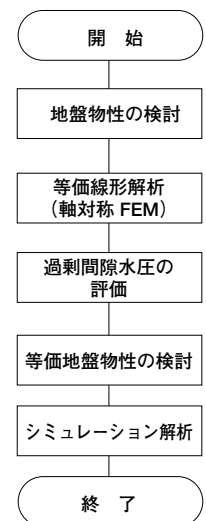


図-11 解析フロー

点として、重量を基礎中央位置に集中質量で与えた。また杭については、中心杭をビーム要素で、周辺杭をリングパイル要素でモデル化した。リングパイル要素の半径は、8 本の杭の矩形配置と断面二次モーメントが等価となるように設定した。杭頭は模型タンクに剛接されていると仮定して固定条件として、杭先端は模型と同様にピンとして取り扱った。せん断土槽のモデル化は底面を固定境界とし、対称軸位置は水平ローラー支持、土槽の円周は自由境界とし、ここでは土槽枠を無視した。地盤はソリッド要素でモデル化し、液状化層 ($Dr = 50\%$) の地盤物性は文献 5) を参考に設定した。また、非液状化層 ($Dr = 85\%$) の地盤物性は、間隙比を 0.75 と仮定し、せん断剛性 G_0 は

$$G_0 = 700 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^{0.5} \quad (\sigma'_0: \text{有効拘束圧})$$

により決定した。ここで、改良体の地盤物性は非液状化層と同様の物性として取り扱い、地盤の動的変形特性は

H-D モデルで評価した。

解析手法は、周波数領域による複素応答法を用い、地盤の非線形性を等価線形化法で考慮した。本研究で実施した振動台実験は液状化が著しいことから、せん断応力の作用による過剰間隙水圧を評価して図-11 に示すフローに沿ってシミュレーション解析を実施した。なお、過剰間隙水圧の計算に関する液状化パラメータは、文献5) を参考に設定した。

過剰間隙水圧評価後の等価地盤物性の検討では、せん断ひずみの増加による剛性低下と有効応力の減少に伴う剛性低下を考慮して、地盤の等価せん断剛性を再評価して、再度シミュレーション解析を実施した。

(2) 解析結果ならびに考察

解析結果と実験結果を比較した CASE 1-2 の代表的な計測点 (GL -0.2m) の過剰間隙水圧波形を図-12 に示す。解析結果は、実験結果の水圧上昇途中の増減を模擬できていないが、全体的に良く一致している。

解析結果と実験結果 (CASE 1-2, CASE 2-1) を比較した杭の最大曲げモーメント分布を図-13 に示す。液状化無対策の CASE 1-2 では、解析結果の側杭 (A) が層境界部で実験結果の 1.4 倍程度大きな値を示しているが、深さ方向分布は良く一致している。中心杭 (C) の解析結果は、応力集中が認められる層境界部の曲げモーメント値および深さ方向分布とも実験結果と良く一致している。液状化対策を施した CASE 2-1 では、解析結果の中心杭 (C) は層境界部で実験結果に比べて 80% 程度の値であるが、深さ方向の分布性状はほぼ一致している。側杭 (A) は、層境界部の値および深さ方向分布とも実験結果と概ね一致している。

解析結果の液状化無対策を基準としたタンク直下全改良の層境界部に生じる隅杭 (側杭) の最大曲げモーメント比を、図-8 中に▲で示している。CASE 2-1 では、実験結果に比較して解析結果の液状化対策効果が顕著であるが、CASE 2-2 も含めて改良範囲に対する傾向は概ね捉えられている。また、解析結果では層境界部の曲げモーメントの低減率を線形で近似することができる。

実験結果と比較した解析結果の最大応答変位比は、図-9 に示すように CASE 2-1 および CASE 2-2 とともに良く一致しており、解析結果からも実験結果と同程度の液状化対策効果が得られている。

4-2 静的解析

入力加振レベルの相違による応答特性について検討した結果、入力加速度が大きく地盤の液状化が著しい場合には地盤変形の影響を考慮する必要があることがわかった。ここでは、杭頭に静的な慣性力を作用させる方法 (Chang の方法) と地盤変形の影響を考慮した応答変位法による解析を実施し、実験結果との比較を行った。

(1) Chang の方法

杭を弾性支承上の梁とし、杭頭を固定、無限長の杭と

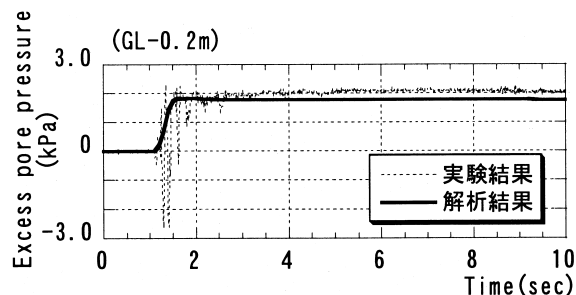


図-12 過剰間隙水圧波形

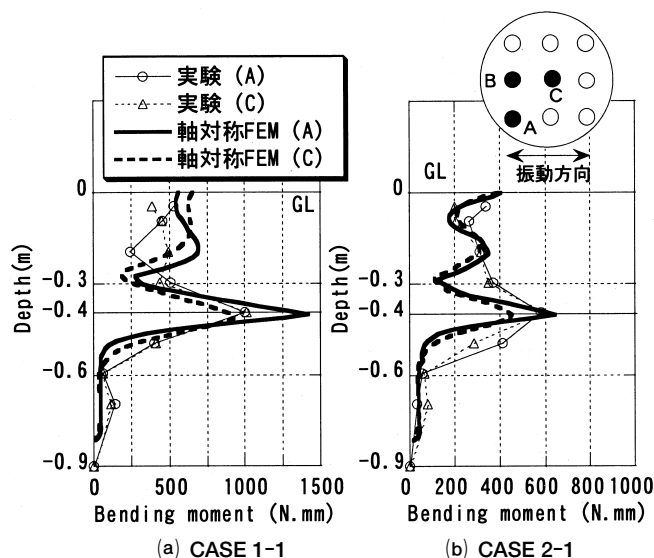


図-13 杭の最大曲げモーメント分布

して応力を算定した。杭頭に作用させる慣性力は、タンクの質量と加速度を用いて算定した。地盤反力係数は、表層地盤の最大加速度発生時の曲げモーメント分布を、多項式 (5 次) で近似した曲線を 2 回微分して得られた地盤反力をさらに杭径および杭と地盤の相対変位で除すことにより求めた。ここでは、地盤反力係数を深さ方向によらず一定であると仮定した。

(2) 応答変位法

杭を 2.5cm ごとの地盤ばねに支持される梁にモデル化し、一次元有効応力解析 (YUSAYUSA) によって得られた地盤変形分布を地盤ばねを介して強制変位として杭全長にわたって作用させ、質量と加速度から算定したタンクからの慣性力を杭頭の節点に水平荷重として与えた。杭頭は、タンク基礎をモデル化した梁要素に剛接させた。杭は弾性とし、地盤ばねは上層の液状化層を考慮して有効応力比に比例するものとした。有効応力比 $(1 - \Delta u / \sigma'_v)$ は、実験結果を参考に 0.1 とした。

(3) 解析結果と考察

Chang の方法による解析結果と CASE 1-1 の最大曲げモーメント分布 (隅杭 A) との比較を図-14(a) に、応答変位法による解析結果と CASE 1-2 の最大曲げモーメント分布 (隅杭 A) との比較を同図 (b) に示す。なお、(b) には軸対称 FEM (側杭 A) による解析結果

も併記した。

図-14(a)に示した入力加振レベルが小さい場合の杭応力は、地中部では解析結果が大きな値を示しているが、最大値を示す杭頭付近では良く一致しており、解析方法は概ね妥当であると考えられる。図-14(b)に示した入力加振レベルが大きく、地盤の著しい液状化が認められたCASE 1-2とChangの方法による杭応力は、杭頭付近では良く一致しているが、層境界部付近では大きく異なり、応力集中を模擬できていないことがわかる。また、CASE 1-2と応答変位法との比較では、応答変位法は実験結果に比べ杭頭部では大きく、層境界部では低めの値を与えている。軸対称FEMほど実験結果を模擬できていないが、応答変位法は、地盤変形を考慮することにより、入力加振レベルの大きい場合の杭に生じる曲げモーメント分布を定性的に捉えうるといえよう。

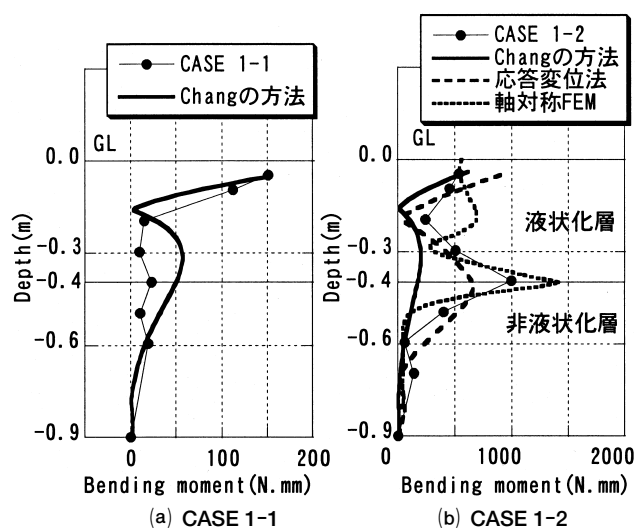


図-14 最大曲げモーメント分布の比較

§ 5. おわりに

本研究より得られた主要な結論は、以下の通りである。

(1) 深さ方向に生じる杭の応力特性は、入力加振レベルにより大きく異なる結果を示した。特に兵庫県南部地震でも見られたように、大規模地震時には液状化による地盤変形の影響が卓越する場合があります。今回の実験では地盤剛性の異なる層境界部付近で杭に生じる応力が急増する特徴を示した。

(2) 杭基礎に締固め工法を想定した液状化対策を施すことにより、層境界部付近で応力集中を示す杭応力を無対策に比べて約60%まで抑制できる対策効果の有効性が確認された。

(3) 等価線形解析手法に基づく軸対称動的FEMは、過剰間隙水圧の上昇を適切に考慮することにより、液状化が著しい地盤中の杭応力についても実験結果を良好にシミュレーションできることが示された。

(4) 入力加振レベルが 100cm/sec^2 程度と小さい場合には、地盤変形よりもタンクの慣性力が卓越するためにChangの方法の妥当性が検証された。しかし、入力加振レベルが 500cm/sec^2 程度と大きく、地盤が著しく液状化するような場合には地盤変形の影響を考慮する必要があり、簡易的に液状化効果を考慮した応答変位法でも概ね傾向を捉えることができた。

本実験では、実地盤の水平方向の変形を再現することが可能な大型のせん断土層を用いている。しかし、今回の液状化対策実験では、特に液状化対策範囲（改良径）を変化させて実験を実施しているために、場合によっては、改良径と土槽径の関係（土槽の境界条件）が液状化対策効果に影響を及ぼしていることも考えられる。今後

は、解析を通してせん断土層の境界条件が液状化対策効果に及ぼす影響を検討する予定である。

謝辞：本実験の遂行にあたり、日本大学理工学部建築学科 安達俊夫教授、同 山田雅一助手ほかNN研究会（日本大学理工学部と西松建設の耐震構造に関する共同研究グループ）委員の方々に貴重なご意見、ご討議を頂いた。ここに、関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、建築基礎における液状化・側方流動に関する検討報告書、2000。
- 2) 萩原他：大型せん断土槽による地上式タンク基礎の液状化実験，第26回地震工学研究発表会講演論文集第2分冊，pp. 853-856，2001。
- 3) 石原他：土質特性と地盤の挙動，土木学会誌，Vol. 80，No. 7，pp. 50-53，1996。
- 4) 鈴木他：液状化時の地盤の大変形を再現可能なせん断土槽の開発，日本建築学会技術報告集，第11号，pp. 57-60，2000。
- 5) 西他：地震時における基礎地盤の安定性評価（その1）動的解析に基づく砂・砂礫地盤の安定性評価手法の開発，電力中央研究所報告，研究報告：U86002，1986。
- 6) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1984。
- 7) 安達他：液状化地盤における杭の地盤反力に関する実験的検討（その1）～（その2），第35回地盤工学研究発表会，pp. 1917-1920，2000。
- 8) 後藤他：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，大林組技術研究所報，No. 61，pp. 81-88，2000。