

群杭基礎の液状化時の挙動に関する模型実験と解析

佐藤 正義
(技術研究所)社本 康広
(技術研究所)

§ 1. はじめに

ウォーターフロント開発が注目を集め、港湾の埋立地盤にオフィスビル・住宅などの種々の大規模な建造物の建設が計画されている。東京港湾の埋立地盤などでは支持層までが、数十メートルの厚い軟弱層地盤であることが多く、建造物の基礎形式としては杭基礎が多く用いられており、今後も増加するものと考えられる。

1987年12月の千葉県東方沖地震の調査結果でも、埋立地では砂地盤の液状化が非常に発生しやすいことが大きな問題点として指摘されており、杭基礎に支持された建造物の液状化に対する耐震安全性の評価は重要課題である。過去の模型振動実験による研究から、岩崎ら¹⁾、矢作ら²⁾、時松ら³⁾は杭基礎の液状化時の挙動が地盤震動に大きく支配されることを述べている。また、群杭基礎の地震観測による研究からも、大平ら⁴⁾は同様の結果を得ている。このことは、通常の杭の耐震設計で行なわれている上部構造の慣性力を杭頭に作用させる方法だけでは、不十分であることを示唆していると考えられる。

地盤の液状化を考慮した建造物の耐震安全性を評価手法として、二次元有限要素法、有効応力解析法^{5)~11)}などを用いた有力な手法が種々提案されている。これらの数値解析手法には種々の仮定が含まれており、非線形挙動を伴う建造物—地盤系の挙動をどの程度評価できるかは明らかになっていないように思われる。したがって、実建造物の挙動に関する数値シミュレーションによりその解析手法の妥当性を前もって検証しておくことが必要であるが、実地盤や実建造物の強震時における観測事例が極めて少ないことから、解析手法の妥当性の検証ができていないというのが現状である。模型振動実験は、重力場(1G場)の実験では相似則に問題を残すため、低拘束圧下の現象としての評価にとどまるが、地盤の弾性時から液状化時までのデータを得ることが可能であり、現状では有力な研究方法であると考えられる。

このような背景から、本研究は群杭基礎の耐震設計を

行なうための実用的な設計法を検討することを目的として、模型振動実験と数値解析によるシミュレーションを実施したものである。具体的には、せん断土槽中に飽和させた模型砂地盤を作成して、群杭基礎を有する建造物の液状化模型実験を実施し、静的三次元有限要素法により実験結果との比較検討を行なった。

§ 2. 模型振動実験の概要

2.1 せん断土槽

図—1に試験体の外観を示す。せん断土槽¹²⁾は50mmのアルミ角パイプを18段積み重ね、角パイプの間に厚さ約5mmの平型のボールベアリングを取り付けたもので、土槽の内寸法は長さ1.2m(加振方向)、幅0.8m、高さ1.0mである。本実験では1方向のみの加振としたため、せん断土槽の側面に加振直角方向の振動を押えるためのローラー式ガイドを設置し、せん断土槽の頂部には土槽のロッキングを抑制するための押しローラーを設置した。また、せん断土槽の内側には飽和砂の防水性を確保するため、厚さ1mmのゴムメンブレンを取り付けた。

2.2 加振装置とデータ収録装置

実験に用いた加振装置は、三次元6自由度振動台¹³⁾であり、本振動台は最大96チャンネルの同時計測・データ収録装置を保持している。加振後には収録データの解析も可能であるが、実験結果を詳細に検討するため磁気テープに出力し、大型計算機による収録データの解析を行なった。

2.3 模型地盤

模型地盤は、千葉県浅間山砂($D_{50}=0.1\text{mm}$, $F_c=1.3\%$)を乾燥状態で空中落下法により作成し、密な地盤とするため最大加速度200Gal、加振周波数5Hzの正弦波によって締め固めた。その後、空気を CO_2 で約24時間か

けて置換した。さらに、土槽下部の給排水口より水を注入して約7時間かけて地盤を飽和させた。模型地盤全体の単位体積重量および相対密度は、それぞれ $\gamma_t=2.0 \text{ tf/m}^3$ 、 $D_r=90\%$ である。なお、模型地盤の弾性時の固有振動数を把握するため、常時微動測定を行なった。基盤に対する地表の周波数伝達関数から求めた模型地盤の固有振動数は、 $f=14.9 \text{ Hz}$ であった。

2.4 上部構造物および群杭基礎模型

上部構造物および群杭基礎型の諸元を表-1に示す。上部構造物は、重量 $W=36.4 \text{ kgf}$ の重錘を4枚の板ばねで支持したせん断変形が卓越する構造になっており、板ばねの下端を固定したときの固有振動数は $f_1=21 \text{ Hz}$ である。群杭基礎模型は9本(3列×3列)のアルミパイプ製であり、杭先端は土槽底板に固定し、杭頭はフーチングに剛結した。

なお、振動実験の模型を作成するに当たっては、上部構造物の固有振動数・杭配置(群杭としての形状)・杭ピッチ・杭長・杭径および地盤剛性など多くのパラメータがあるが、上部構造物、群杭基礎、地盤の系としての固有振動数について分類すると、

- ① $f_{\text{ground}} < f_{\text{interaction}}$
- ② $f_{\text{ground}} = f_{\text{interaction}}$
- ③ $f_{\text{ground}} > f_{text{interaction}}$

の3ケース¹⁴⁾の試験体が考えられる。本研究では①のケースについての実験を対象にしている。ここに、 f_{ground} は地盤の1次固有振動数であり、 $f_{\text{interaction}}$ は上部構造物-杭-地盤系の相互作用による固有振動数である。

2.5 計器配置

計器配置を図-1に示す。測定計器はひずみゲージ式加速度計を一般地盤(AG-1~AG-8)およびフーチング(AG-9~AG-11)・上部構造物(AG-12~AG-14)に、ひずみゲージ式間隙水圧計を杭間地盤(PW-1~PW-2)および一般地盤(PW-3~PW-7)に設置した。ここで、一般地盤とは群杭基礎の振動の影響を受けない地盤の意味であるが、本実験では群杭基礎から土槽境界までの距離が短いので、群杭基礎の振動の影響を多少受けていると考えられる。土槽外枠には、基盤との相対変位(D-1~D-5)を測定するためインダクタンス式変位計を設置した。また、杭の曲げひずみ分布と軸ひずみを測定するため、加振方向であるX方向の+側と-側に、ひずみゲージを中心杭(G-1~G-10)と端部杭(G-11~G-20)の2本の杭に貼った。

2.6 加振波および加振ケース

加振方法は、水平1方向のランダム波加振であり、入力地震波は1968年十勝沖地震の八戸港で観測されたEW成分を時間縮尺1/4としたものである。加振ケースは、地震波の最大加速度を35 Gal (Case-1) および 186 Gal (Case-2) とした2ケースである。入力地震波のフーリエスペクトルを図-2に示す。図より、入力地震波の周波数成分はほぼ同じであり、Case-2はCase-1を約5.5倍にしたものであることが分かる。

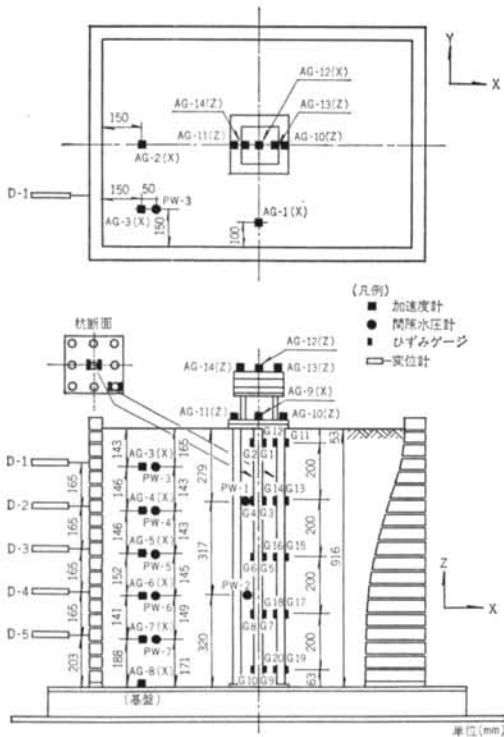


図-1 試験体および計器配置

上部構造物	重量 固有振動数	$W=36.4 \text{ kgf}$ $f=21.0 \text{ Hz}$
フーチング	重量 鋼製箱	$W=10.4 \text{ kgf}$ $240 \times 240 \times 32 \text{ mm}$
杭基礎	杭本数: 9本 (3×3列) 杭間隔: 75mm	
	材質	アルミニウム
	長さ 外径 厚さ ヤング係数	900mm 30mm 1mm $7.4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$

表-1 上部構造物および群杭基礎の模型諸元

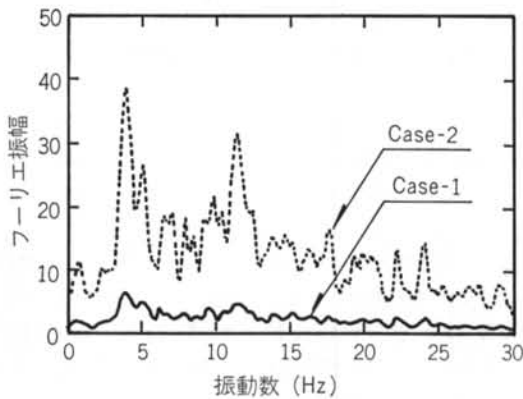


図-2 入力地震波のフーリエスペクトル

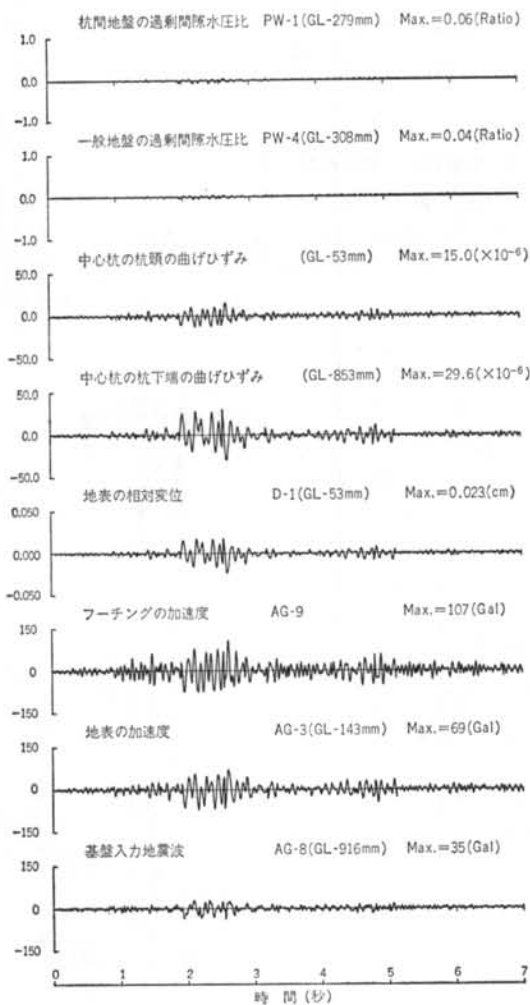


図-3 入力地震波および応答波 (Case-1)

§ 3. 実験結果と考察

3.1 応答波形

最大加速度 35 Gal (Case-1) における, 入力地震波および杭間地盤・一般地盤の過剰間隙水圧比, 杭頭・杭下端の曲げひずみ, 地表変位, フーチング加速度, 地表加速度の応答波形をそれぞれ図-3 に示す. 同様に, 最大加速度 186 Gal (Case-2) における入力地震波および応答波形を図-4 に示す.

図-3 と図-4 を比較すると, Case-2 は 3 秒前後に応答が大きくなって, 地盤に大きなひずみが発生している. そのため地盤のせん断剛性が低下し, 曲げひずみ, 変位, 加速度の応答波に長周期化の傾向が見られる. また, Case-2 は Case-1 よりも 3 秒以後の地表およびフー

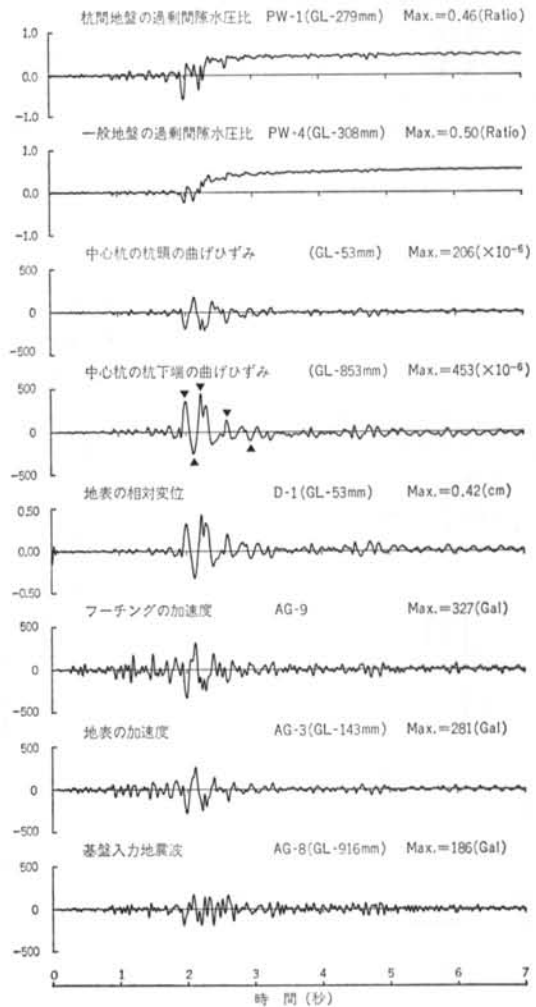


図-4 入力地震波および応答波 (Case-2)

チングの加速度において、入力に対する加速度応答が小さくなっている。この原因は、過剰間隙水圧の上昇により地盤の拘束圧が低下するが、これによって地盤のせん断剛性が低下するためであると考えられる。

図-4において、杭間地盤と一般地盤の過剰間隙水圧比の波形には、2.0~2.3秒にサイクリックモビリティの影響が現われており、杭間地盤は杭の拘束効果のため一般地盤よりもその影響が大きくなっている。杭間地盤と一般地盤の過剰間隙水圧比の上昇において、両者とも最大値は約0.5であり、大きな差は認められない。一般に、杭間地盤は杭の拘束効果のため、過剰間隙水圧比の上昇は一般地盤よりも小さくなる。本実験では、上部構造物の振動により杭間地盤に発生している加速度は一般地盤よりもやや大きくなっており、両者の効果が打ち消しあったためではないかと考える。

図-4の杭頭と杭下端の曲げひずみと地表変位、フーチング加速度、地表加速度を比較すると加速度波形には短周期成分がみられるものの、波形自体はそれぞれ良く似ている。これは、上部構造物、群杭基礎を含めた全体が地盤震動に支配されているためと考えられる。この傾向は、図-3 (Case-1)の加速度レベルが小さい場合でも同様である。

3.2 地盤変位、杭ひずみ、過剰間隙水圧比の分布

地盤変位、中心杭の曲げひずみ、過剰間隙水圧比の分布を図-5(a)~(c)に示す。これは、図-4 (Case-2)の杭下端曲げひずみ (GL-53mm)の波形に▼印で示すように、曲げひずみがピークとなった5つの時刻に対する分布である。

この図から判断すると、地盤の変位分布は sine 波に近い形をしており、地盤のひずみは下層から上層にゆくに

伴って小さくなる傾向を示していることが分かる。

中心杭の曲げひずみ分布は、杭下端のほうが杭頭よりも大きく、符号が逆転している。杭下端でひずみが大きくなっているのは、下端固定の杭に対して地盤下層のひずみが大きいためである。このことは、硬い層と軟かい層との境界や、液状化した層と液状化していない層の境界などの地盤の剛性が大きく異なる部分に、地震時の杭ひずみが集中することを示している。

過剰間隙水圧比の分布において $t=2.000$ 秒、 $t=2.123$ 秒はサイクリックモビリティが発生して過剰間隙水圧が負になった状態、 $t=2.225$ 秒は過剰間隙水圧がゼロの状態である。 $t=2.608$ 秒は過剰間隙水圧の上昇過程であり、 $t=2.960$ 秒は過剰間隙水圧が上昇してしまった状態である。図-5(c)より、過剰間隙水圧比は1.0までは上昇しておらず、本液状化実験では完全液状化にまでは至っていないことが分かる。また、過剰間隙水圧比の分布は下部で大きく、上部で小さい。これは、地盤のひずみ分布に対応している。

3.3 実験後の群杭基礎模型の変形

実験終了後に模型地盤の解体を行なったところ、群杭基礎模型には写真-1に示すような永久変形が生じていた。永久変形は、群杭模型の下部に集中して発生しており、この原因として一般的には以下に示す二つの理由が考えられる。

(1)吉田ら¹⁵⁾、龍岡ら¹⁶⁾の実験に見られるように、地盤の液状化によって地盤パネが大きく剛性低下し、杭基礎・上部構造物が片持ち梁に近い挙動をしたため、

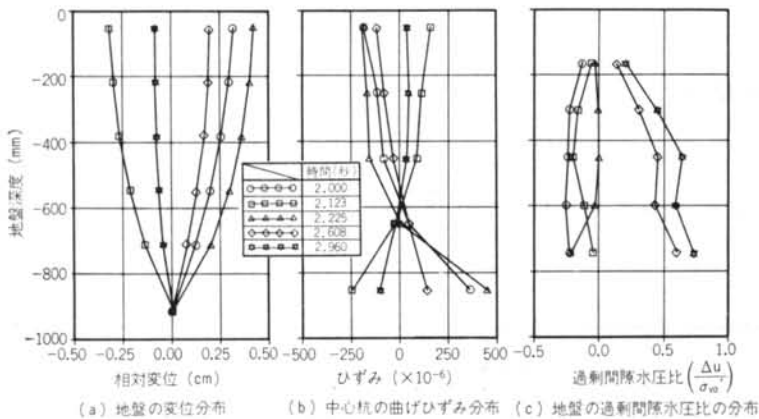


図-5 地盤変位、杭の曲げひずみ、過剰間隙水圧比の分布図

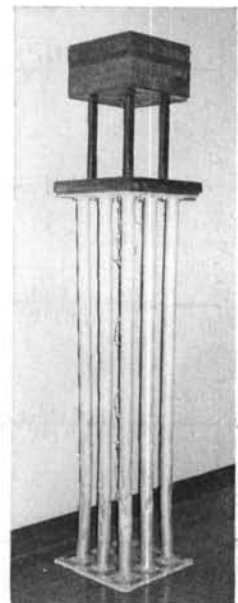


写真-1 実験終了後の群杭基礎模型の外観

杭下端に大きな曲げモーメントが生じた。

(2)大きな地盤ひずみが地盤下層に発生して、地盤の変形に伴って杭も変形した。

本実験の場合は、(2)が原因であると考えられる。その理由は、図-4の応答波形によれば液状化によって過剰間隙水圧が上昇したのは約2.5秒以後であり、これ以後杭の曲げひずみは大きくない。これに対し、約2.0秒前後における杭の曲げひずみは大きい。3.2の地盤の変位分布で示したように、このときの地盤下層のひずみは大きい。そのため、下端を固定された杭に大きなひずみが発生したと考えられる。

本実験は模型実験であり、重力場(1G場)の相似則が成り立たない状態において、この実験結果を現実の杭基礎構造物に適用することは議論の余地がある。しかし、過去の杭基礎の地震被害例にも同様な杭の被害が見られ、このような現象は実際に発生していると考えられる。

§ 4. 数値解析

4.1 解析方法

実験結果を評価するため、群杭基礎—地盤系の静的な三次元有限要素法による弾性解析を行なった。荷重の載荷方法は、3.2および3.3に示したように、杭に発生しているひずみが地盤の変位に大きく支配されているとの検討結果を考慮し、応答変位法¹⁷⁾¹⁸⁾を用いた。すなわち、実験により得られた変位計の測定結果を、せん断土槽の積層枠との境界の地盤に静的な強制変位として作用させた。杭頭荷重は、実験により得られたフーチングおよび上部構造物の加速度から求めた慣性力とした。

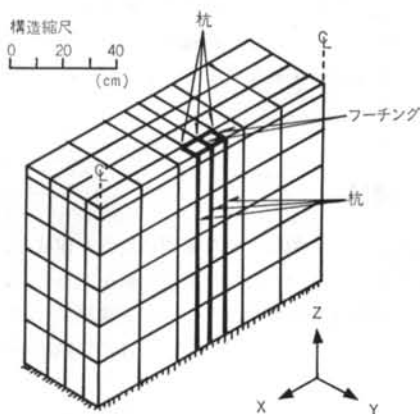


図-6 解析モデル図

4.2 解析モデルと解析定数

解析モデルを図-6に示す。解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとした。モデル化に当たっては、地盤は8節点ソリッド要素、杭は梁要素、フーチングは剛な梁要素とした。杭の境界条件は、杭下端は固定、杭頭はフーチングに剛結とした。

解析定数の一覧を表-2に示す。解析に必要な定数は表-1に示した杭の諸元以外は、地盤のヤング係数 E_0 とポアソン比 ν だけである。地盤の非線形震動によってせん断ひずみが増加し地盤のせん断剛性が低下するが、それに伴って地盤のヤング係数も低下するものとした。図-5(a)に示した地盤変位によると、各時刻の地盤の平均せん断ひずみのうち大きいものは約 5×10^{-3} であり、このときの地盤のせん断剛性の低下率 G/G_0 は約1/5である。したがって、本解析では地盤のヤング係数を、 $E_0 = 2(1+\nu)G_0$ の関係式より $\nu=0.3$ として算定される初期ヤング係数 E_0 の1/5とした。解析に用いる地盤のヤング係数の決定法に関しては、ここに示した実験のみならず乾燥砂地盤の正弦波加振実験・地震波加振実験も行っており、今後検討する予定である。なお、初期せん断剛性 G_0 は、以下に示す方法によりせん断波速度 V_s から $G_0 = \rho V_s^2$ (ρ : 地盤の密度) の関係式を用いて算出した。

①板たたき法による地盤各層のS波速度の測定結果

②常時微動測定による地盤の固有振動数 f_0 から、 $V_s = 4Hf_0$ (H : 地盤高さ) の関係式を用いて求めた地盤全体の平均S波速度

ポアソン比は、杭の曲げひずみにはほとんど影響しない定数であり、ここでは曲げひずみに注目したため0.3と仮定した。

4.3 解析結果と考察

図-7(a)は、中心杭における曲げひずみの実験と解析の比較であり、同様に図-7(b)は端部杭に関するものである。なお、解析は図-5に示した分布図の5つの時刻を対象とした。

GL±0.0 mm	S波速度 V_s (m/s)	解析に用いた定数	
		E_0 (tf/m ²)	ν
GL-53 mm	40	164	0.3
GL-218 mm	45	207	0.3
GL-383 mm	50	255	0.3
GL-548 mm	52	279	0.3
GL-713 mm	55	309	0.3
GL-916 mm	58	344	0.3

表-2 解析定数の一覧

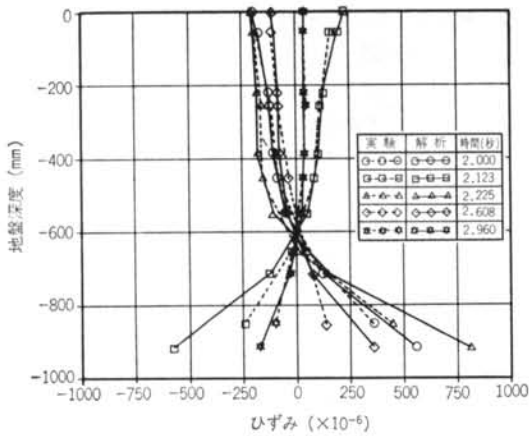


図-7(a) 中心杭の曲げひずみの実験と解析の比較

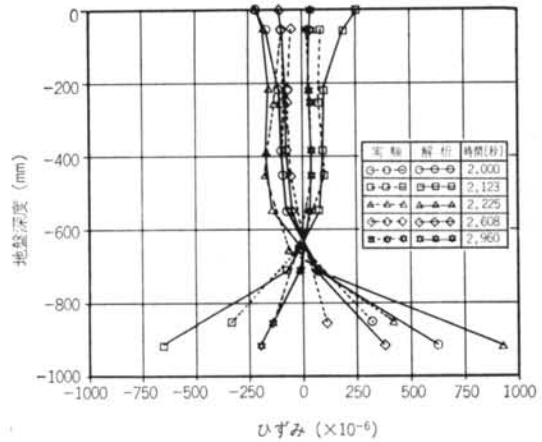


図-7(b) 端部杭の曲げひずみの実験と解析の比較

おむね表現できることが分かる。

おな、解析結果の一例として、図-7(b)の $t=2.123$ 秒における群杭基礎-地盤系の変形を図-8に示す。

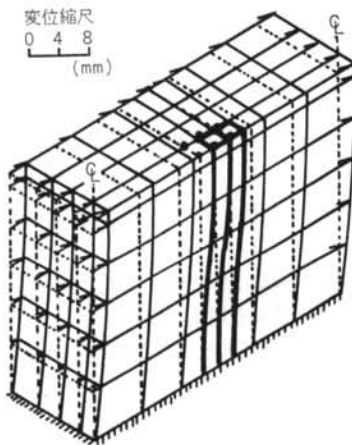


図-8 群杭基礎・地盤系の変形図

図-7(a), (b)の両図とも、杭の上部については解析と実験はおおむね一致している。杭下部は、解析の方が実験よりも大きな値を示しているように見える。この理由としては、有限要素法の要素分割の方法によって生じたことが考えられる。すなわち、本解析では地盤に強制変位を与えるため、有限要素法の要素分割を変位計の設置位置に合わせた。その地盤および杭の下部は大きな要素分割になっている。地盤下部の杭は基礎に固定されているため、曲げひずみはこの要素の中で大きく変化していると予想される。解析結果では、この区間を直線で結んでいるため、実験と異なったように見えるのではないかと考える。

以上より、液状化時の杭の曲げ変形特性は、本実験結果のように群杭基礎-地盤系の1次固有振動数が地盤によって定まる場合は、加速度応答のピーク時の一般地盤の変位を静的に作用させることによって、杭ひずみをお

§ 5. 応答変位法の適用について

以上の実験結果および解析結果により、群杭基礎を有する構造物の液状化時の挙動が地盤震動に支配される場合には、杭に発生する曲げひずみは地盤変形に大きく影響され、応答変位法により検討することが可能であると考える。したがって、群杭基礎の耐震性の検討を行なう場合、次のような方法が考えられる。

一次元有効応力解析法^{19)~21)}により、地震時の地盤変位、せん断剛性の変化を求める。応答のピークごとに得られたせん断剛性からヤング係数を求め、静的三次元有限要素法を用いて応答のピーク時の杭の曲げひずみを求める。応答変位法により杭のひずみ分布をできるだけ精度よく予測するためには、強制変位として作用させる地盤変位の推定精度が重要なポイントとなる。

§ 6. 結論

せん断土槽中に飽和させた模型砂地盤を作成し、群杭基礎を有する構造物の液状化模型実験を実施した。さらに、静的三次元有限要素法を用いて実験結果に基づく数値解析を行なった。この結果、以下に示す結論が得られた。

(1)実験結果より、液状化時における杭ひずみの主な発生原因は地盤震動による地盤変形である。これは、既往

の実験結果と同様である。

(2)実験結果では杭下端で大きな曲げひずみが生じていた。このことは、硬い層と軟かい層との境界などの地盤の剛性が大きく変化する部分に、地震時のひずみが集中することを示しており、設計的に留意すべき点であると考える。

(3)実験結果に基づいて実施した静的三次元有限要素法を用いた応答変位法で、一般地盤の変位分布を強制変位として作用させることにより、液状化時に発生する杭ひずみ分布をおおむねシミュレートできる。

なお、ここに示した結論は以下の条件の下で実施した模型実験、および実験に基づく数値解析により得られた結果である。

①上部構造物、群杭基礎、地盤の系としての固有振動数は $f_{\text{ground}} < f_{\text{interaction}}$ のケースの実験である。

②群杭基礎の液状化実験として、完全液状化には至っていない。

③入力地震波は1種類のみであり、周波数成分の違いによる群杭基礎の応答の違いは検討していない。

したがって、群杭基礎の合理的な耐震性評価手法を確立するためには、さらに上述の条件とは異なった実験を含めた実験的研究および解析的研究を行なう必要があると考える。

謝辞 三次元有限要素法による数値解析を実施するに当たって、土木本部技術第1部の川崎氏にご支援を頂きました。ここに、記して感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 坂場義雄: “砂層中の杭の動的挙動に関する 模型振動実験” 第14回地震工学研究発表会講演概要集 (1981年)
- 2) 矢作枢, 飯島啓秀, 佐藤誠一: “流動化する砂層中の杭の応力について—杭基礎の模型振動実験—” 第34回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-254 (昭和54年10月)
- 3) 時松孝次, 吉見吉昭, 上紺屋好行: “液状化過程における杭の動的挙動” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和62年10月)
- 4) 大平彰, 田蔵隆, 中松新, 清水勝美: “軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究” 土木学会論文集 第362号 (1985年10月)
- 5) 福武毅芳, 大槻明, 竹脇尚信: “任意応力条件下の土の構成式と液状化解析” 第7回日本地震工学シンポジウム論文集 (1986年)
- 6) 近藤司, 楠本太: “有効応力法に基づく軟弱地盤—構造物系の動的応答解析手法に関する研究” 清水建設研究報告 Vol. 48 (1988年10月)
- 7) 砂坂善雄, 奥村総, 鈴木輝一: “地盤と構造物の動的相互作用を考慮した地盤の液状化解析” 第19回地震工学研究発表会講演概要集 (昭和62年7月)
- 8) 田中芳行, 塩見忠彦, 鈴木善雄: “有効応力解析における土の構成式に関する研究 (その3)” 第23回土質工学研究発表会講演集 (昭和63年6月)
- 9) 利波宗典, 柳沢栄司, 青木照幸: “二層系地盤モデルによる砂層の液状化解析” 同上 (昭和63年6月)
- 10) 安部勇, 森尾敏: “2次元液状化解析によるグラベル・ドレーンの効果について” 奥村組技術研究年報 No. 10 (1984年)
- 11) 藤井, 後藤, 吉田, 辻野, 梅田, 鈴木, 塚谷, 渡辺: “マルチメカニズムモデルによる液状化実験シミュレーション” 第23回土質工学研究発表会発表講演集 (昭和63年6月)
- 12) 社本康広, 佐藤正義, 石川 裕: “せん断土槽による模型地盤の振動実験” 同上 (昭和63年6月)
- 13) 柴慶治, 横田治彦: “稼働状態のコンピュータ・ユニットを搭載したフリーアクセス床の耐震試験” 清水建設研究報告 Vol. 46 (1987年10月)
- 14) 水野二十一, 飯場正紀: “建物—杭—地盤系の動的相互作用に関する実験的研究” 第7回日本地震工学シンポジウム論文集 (1986年)
- 15) 吉田常松, 植松幹夫: “液状化砂中の杭の動的挙動” 第5回日本地震工学シンポジウム論文集 (1978年)
- 16) F. Tatuoka, K. Tokita, S. Yoshida & I. Maruyama: “Shake Table Tests on Dynamic Behaviors of Pile Foundation Model in Liquefying Sand Layers” 第7回日本地震工学シンポジウム論文集 (1986年)
- 17) 河村壮一: “20年後の発掘調査で分かった液状化による杭の被害”, 日経アーキテクチャ 7月29日号 (1985年)
- 18) 西村昭彦: “地盤振動と杭の挙動” 基礎工 Vol. 15, No. 8 (1987年)
- 19) 社本康広: “サイクリックモビリティを考慮した砂の有効応力モデル” 第1回地盤工学における数値解析シンポジウム論文集 (昭和61年6月)
- 20) 社本康広, 清水勝美: “サイクリックモビリティを考慮した一次元有効応力解析手法とその地盤への適用性” 第7回日本地

震工学シンポジウム論文集（1986年）

- 21) 石川裕，社本康広，佐藤正義，若原敏裕：“密な砂の液状化模型振動実験と解析” 第23回土質工学研究発表会発表講演集
（昭和63年6月）