

(82) 三次元6自由度振動台による杭基礎模型の動的挙動

横浜村組築波研究所耐震研究課 正員○古川正昭 荒野政信

1. はじめに

構造物—基礎周辺の砂地盤は、自然地盤の液状化現象のような地盤の塑性化による材料非線形性による現象のほかに、地盤と構造物の連成振動により、浮き上りやはく離、滑動などによる幾何学的非線形性が加わる。相互作用領域の複雑な三次元応力状態は三軸試験をはじめとする砂の要素試験で再現するのは難しいため、模型を用いた振動台実験が行われている。模型振動実験は縮小模型を同じ重力場で行うため、模型は原地盤より、時間、透水係数、有効上載荷重などの物理量を小さくする必要がある。しかし、原地盤と同じ砂と水を用いると、模型地盤の深さの有効上載荷重は、原地盤での応力状態を模型で再現したことになる。原地盤より小さなひずみで、過剰間隙水圧が有効応力に達しやすく、液状化しやすいが、地表への距離が原地盤より短いため、過剰間隙水圧は消散しやすい状態にある。そのため、粒状構造骨格にポリエチレンの原料に使われる粒状体、水の代りにサラダ油を用いた人工模型地盤により、非線形動的相互作用により生じる現象を考察した^{1), 2)}。しかし、全応力法として取り扱ったことにより、間隙水圧の挙動を求めていないため、砂と水を用い、模型振動台実験を実施した。三次元6自由度加振が可能な電気油圧サーボ制御方式の振動台と軽量な正方形枠を積み重ねて、せん断振動を生じやすくした土槽(せん断土槽と称する)を用いている。まず、水平単独加振時、模型地盤(単一系)の液状化現象の特徴を求めた。その結果、地盤の破壊モードは液状化の進行につれて、よく振動する部分が地表から地中へ移動し、液状化を完成すると変位を示さなくなるなどの特徴を把握できた。次に、模型杭基礎を用いて、水平単独加振時の液状化地盤と杭基礎の現象を求めた。その結果、地盤単一系では過剰間隙水圧が最大値に達すると同時に応答加速度、せん断ひずみはゼロに近づくのに対し、杭基礎近傍地盤ではすぐにゼロにならない。杭と地盤の相互作用、すなわち制振効果により生じる現象としてこの領域を液状化抵抗領域と称した。さらに、上下・水平同時加振による杭基礎—地盤全体系の振動台実験を行い、水平単独加振時の応答特性と比較した。その結果、上下動が加わると水平単独加振時より、液状化を完成する時刻と消散を始める時刻とも早くなるなど非線形動的相互作用により生じる現象の把握に有益な示唆を得た。

2. 実験の目的と方法

(1) 実験の目的

対象構造物は図-1に示すように群杭基礎(4本杭)としている。フーチング形状は縦30m、横30m、厚さ3m、場所打ち杭は杭径5m、杭長27m、杭間隔は直径の4.4倍の22mとし、4本を正方形に配置したものを想定した。上部構造は剛性が大きく、フーチングと同一挙動をする単純構造とし、杭先端は支持層に根入れされた支持杭とする。本実験の目的を次に示す。

- i. 模型地盤の振動特性を求めるため、過剰間隙水圧の上昇、蓄積、消散過程、破壊形態などを比較する。
- ii. 杭基礎—地盤全体系の液状化完成直前の動的挙動を求めるため、自然地盤と近傍地盤の応答加速度、復元力特性などを比較する。
- iii. 上下・水平同時入力による液状化現象時の動特性を求めるため、水平単独加振時の杭基礎—地盤の時刻歴応答特性と比較する。

(2) 模型材料および模型と実物の相似則

対象地盤は地下水位の高い軟弱な埋立地とした。実物想定値と模型

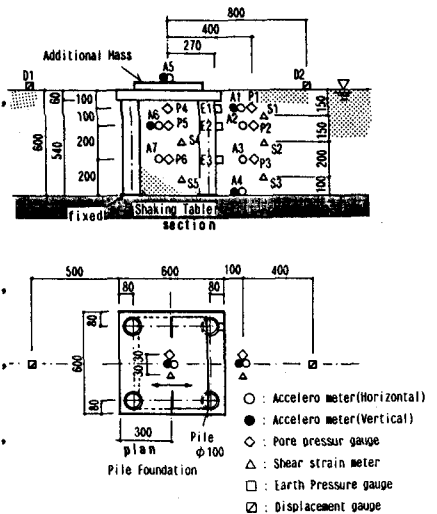


図-1 地盤—杭基礎全体系模型

目標値を表-1に示す。相似則は表-2に示したように、模型と実物の物理現象に関連する主要 π 値^{1), 2)}が等しいとして求め、これにより求めた模型目標値を表-1に併記した。

重要な目標値の一つであるせん断波速度 v_s を、板たたき法により求めると、 D_r が約30%の模型飽和地盤の v_s は約70m/sとなる。

(3) 実験条件と実験設備

測定位置は図-1に示すように、せん断土槽³⁾の中央に設置した杭基礎に対し、地表と地中部に加速度計A1~A7、間隙水圧計P1~P6、せん断ひずみ計S1~S3、杭に土圧計E1~E3と地表面に変位形を配置した。入力波は水平単独加振時、加速度振幅100ガルの正弦波を用い、正弦波数を50波とした。一方、上下と水平同時の正弦波の加速度振幅をそれぞれ、50ガルと100ガルとし、両者の位相を同位相とした。上下の加速度を水平加速度成分の半分としたのは、観測地震による上下成分と水平成分の比が0.3から0.7の間でばらつくことや道路橋の耐震設計指針で、上下動は水平動の半分としていることなどによる。上下と水平動の最大振幅は同時刻で発生するとは限らないが、上下と水平動を同位相、同振動数で入力すると、振動台は上下と水平動による合力約112ガルで、水平面から約26度傾いた角度で杭基礎-地盤全体系を振動させることになる。観測波による両方向の位相特性が不明確である現状では、第1近似観点から、上下と水平動の同位相・同振動数入力は有効であると考えた。入力正弦波の振動数を10Hz、15Hz、25Hzの3種類とした。入力振動数25Hzの水平単独加振時⁴⁾、過剰間隙水圧が有効上載圧に至らず、液状化を完成するときの特徴を求められない。一方、10Hzと15Hz入力時の過剰間隙水圧は加振中に有効上載圧に至り、液状化を完成する。本研究ではこの状態を液状化完成と称した。応答加速度などの各物理量が最大値を生じ、液状化に至る傾向は、両者の応答時間と応答量の絶対値が相違する点を除いて、顕著な差が求められない。そこで、主として、入力振動数15Hz時の水平単独と上下・水平同時加振時の実験結果を比較した。次に、水平・上下動と各軸の回転を含む三次元6自由度のねじり振動を再現できる振動台(定格重量20tf、最大加速度3G)を図-2に示した。電気油圧サーボ方式の駆動による振動台の支持方式は静圧継手を用い、制御用ソフトの開発により、上下と水平方向それぞれのクロストークを小さくすることで入力波形の再現性を良くした。

3. 実験結果

(1) 地盤単一系

各深さの加速度、せん断ひずみと過剰間隙水圧の経時変化を図-3に示す。過剰間隙水圧が一定値を示す時刻をT_{PIH}($i=1, 3$)とし、矢印で示し、一定の過剰間隙水圧曲線が減少を開始する時刻をカッコで示した。

(2) 杭基礎-地盤全体系

水平単独と上下・水平同時加振時のフーチング頂部と近傍地盤の各深度別の応答加速度、地表面の沈下と各深さの振動土圧、せん断ひずみ、過剰間隙水圧の経時変化を図-4に示す。

Prototype	Model Aim						
PILE FOUNDATION							
Length 27(m)	54(cm)						
Diameter 5	6						
	(conversion wide)						
Footing 30, 30, 3	60, 60, 6						
Viaduct 28, 28, 10	Additional mass						
Young's Modulus (GPa) 20.6	70.6						
Poisson's Ratio 0.17	0.34						
SOIL SYSTEM							
Reclaimed Sand	SAND						
V_s (m/s) 200	<table border="1"> <tr> <th>Aim</th><th>Execution</th></tr> <tr> <td>28</td><td>70</td></tr> <tr> <td>12</td><td>10</td></tr> </table>	Aim	Execution	28	70	12	10
Aim	Execution						
28	70						
12	10						
f_g (Hz) 1.7	60(cm)						
Depth(m) 30							
$\rho_{d, min, max}$ (g/cm ³)	1.5, 1.7						
D_{50} (mm)	0.46						
U_c	2.5						
Poisson's Ratio	0.45						

表-1 実物想定値と模型目標値

Function	Similarity	Scale Factor
Length	l_m/l_p	1/50
Stress	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)$	1/50
Cohesion	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)$	1/50
Time(Period)	$(l_m/l_p)^{1/2}$	1/7.1
Frequency	$(l_m/l_p)^{-1/2}$	7.1
Displacement	(l_m/l_p)	1/50
Velocity	$(l_m/l_p)^{1/2}$	1/7.1
Modulus	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\nu_m/\nu_p)$	1/50
Mass Density	ρ_m/ρ_p	1
Acceleration	a_m/a_p	1
Internal	ϕ_m/ϕ_p	1
Friction Angle		
Damping	k_m/k_p	1
Constant		
Strain	ϵ_m/ϵ_p	1
Poisson's Ratio	ν_m/ν_p	1

表-2 相似則と相似比

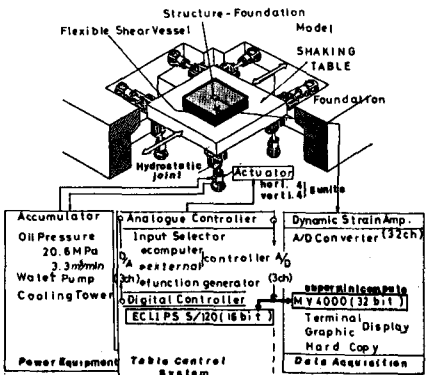


図-2 3次元6自由度振動台

4. 考察

単一系地盤の破壊形態を求めるため、100ガル入力、10Hz時の時間経過に対するモードを図-5に示す。経時変化に対するモードを示す。経時変化に対する液状化現象のモードの特徴は、最大過剰間隙水圧を生じる時間T1、最大応答加速度を生じる時間T2、応答加速度が振動しなくなる時間T3などで現わされる。同図から、液状化の進行につれて

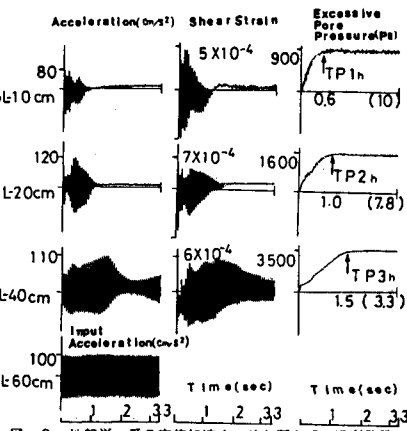


図-3 地盤単一系の応答加速度、せん断ひずみ過剰間隙水圧（水平単独加振、入力 100ガル、15Hz時）

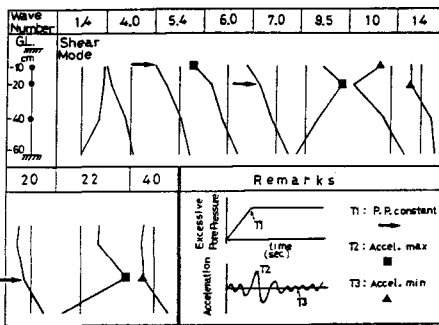


図-5 破壊モード（入力 100ガル、10Hz時）

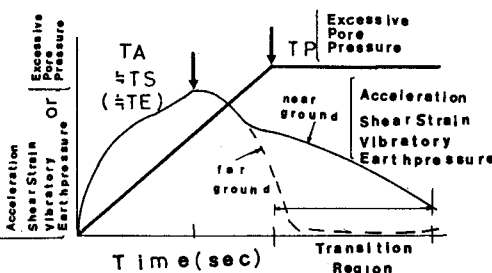


図-6 液状化抵抗領域（模式図）

よく振動する部分が、地表から地中へと移動し、40波目以上では全層が液状化を生じ、変位を示さなくなることなどがわかる。

次に、杭基礎-地盤全体系の水平単独加振による経時変化図-4から、杭基礎近傍地盤と地盤単一系との過剰間隙水圧、応答加速度とせん断ひずみの経時変化の顕著な相違点は次のようである。全体系では、杭基礎近傍地盤各層の液状化完成に至る時刻TP1h、TP2h、TP3hから、約1秒程度遅れて各地層の応答加速度、せん断ひずみはゼロに近づく。地盤単一系では、過剰間隙水圧が有効上載圧に至ると、応答加速度、せん断ひずみがすぐにゼロになるのに対し、杭基礎-地盤全体系ではこの状態ですぐに液状化に至らず、地盤がせん断低抗力を有する領域が存在する。本研究では、この領域を液状化抵抗領域と称し、図-6に模式図を示す。液状化抵抗領域の応答加速度波形⁴⁾前半の振幅はピーク値を有し、ひずみ硬化の現象が現れる。後

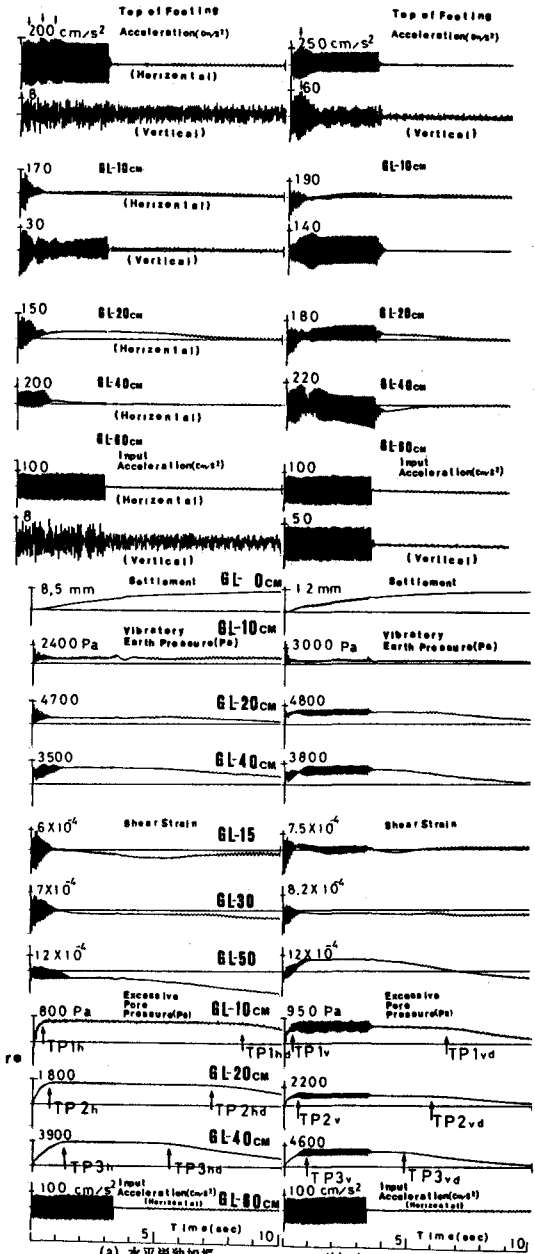


図-4 全体系の応答加速度、沈下、振動土圧、せん断ひずみ、過剰間隙水圧（入力 100ガル、15Hz時）

半は次第に波形が崩れてゼロに至る。同位相で杭に作用していた地盤は、軟化現象のため地盤の共振周期が伸び、杭と地盤間に位相差を生じ、杭に大きな曲げが作用すると考えられる。

さらに、水平単独加振と上下・水平同時加振時の過剰間隙水圧、振動土圧の入力加速度に対する位相差を調べるため、両加振による相違を図-7に示す。水平単独加振による過剰間隙水圧の入力加速度1波に対応する表層部の時刻歴波形は、せん断振動により過剰間隙水圧のピークが2回生じるため、2回の増減がみられる。一方、上下・水平同時加振ではこの現象は現れず、入力加速度の繰り返しと過剰間隙水圧のピークが対応する。すなわち、液状化完成後に、入力加速度に追従して過剰間隙水圧が増減を繰り返し、これに対応して有効応力が増減を繰り返す。上下方向の振動が加わると土粒子自重と間隙水圧の増減を繰り返すため、地表面への排水を促進し、液状化時に締固めを促進することがわかる。一方、杭側面の振動土圧拡大図によると、地中、地中深部の振動土圧には、上下動が加わると一度ゼロに近づいたあと再び回復する。次に、地盤単一系と近傍地盤の復元力特性が入力波数に対し変化する様相を比較し、動的相互作用により生じる液状化時の特徴を考察する。復元力特性曲線から求めた等価せん断剛性率 G と履歴減衰定数 h の各入力波数に対する変化を求めて図-8に示す。同図に液状化完成時の時刻を矢印で示す。地盤単一系の G は、同時の方が単独加振より小さいのは表層部で、地中、地中深部では逆に同時加振の方が大きい。 h は全層とも同時加振より水平単独加振の方が大きい。入力波数の増加に対し、水平単独加振の場合 G は減少、 h は増加する。同時加振では、表層部の G を除いて逆に増加し、 h も7から8波を境に増加から減少に向う。杭基礎近傍地盤では、同時加振時、単一系地盤に比べて、地中、地中深部における G が入力波数に伴い増加し、逆に h は減少する。上下動が加わることで、杭基礎近傍地盤は液状化時に締固め現象を促進する。

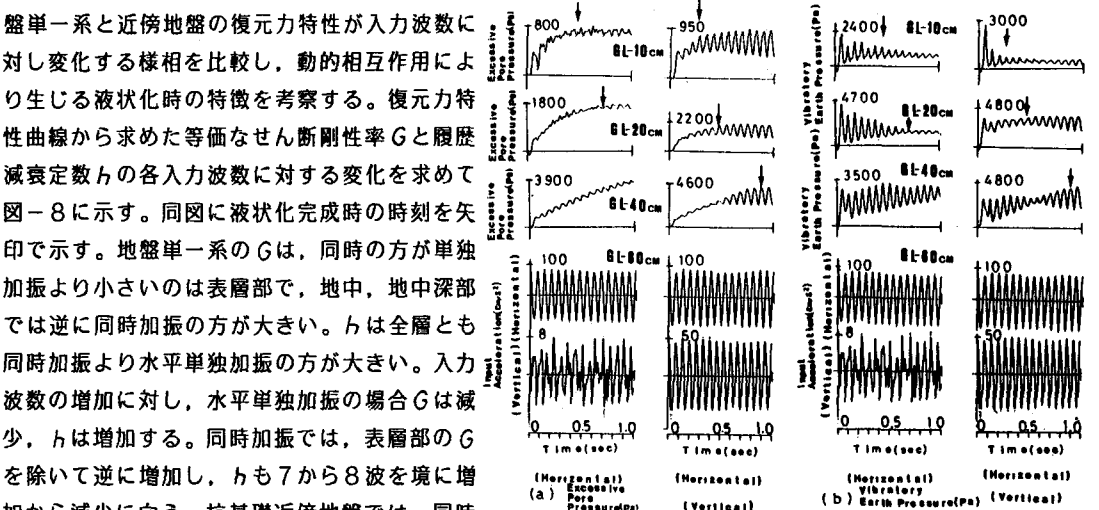


図-7 過剰間隙水圧と振動土圧（両加振時の比較）

5. まとめ
(1) 地盤単一系、すなわち自然地盤では過剰間隙水圧が最大値に達すると同時に応答加速度、せん断ひずみはゼロに近づくのに対し、杭基礎近傍地盤ではすぐにゼロならず、液状化抵抗領域が生じる。
(2) 上下動が加わると、水平単独加振に比べて、液状化を完成する時刻と消散を始める時刻の両者とも早くなる。上下動により、地表面への排水と、締固め現象が促進され、 G は増加する。

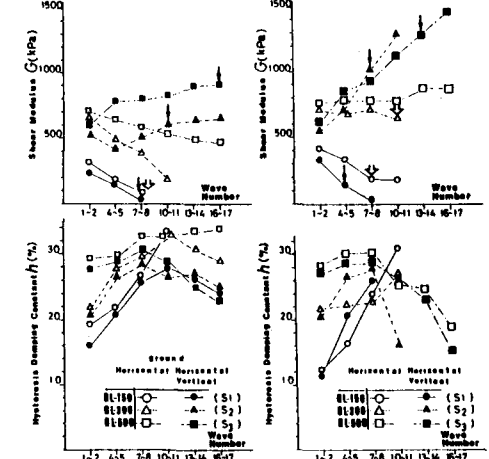


図-8 G 、 h と波数（両加振時の比較）
(a) 地盤単一系 (b) 地盤全体系

参考文献

- 古川正昭, 山田善一(1983): 模型地盤を用いた鉄塔-杭基礎-地盤の非線形形成振動に関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第 334号, pp. 53~61
- 古川正昭, 家村浩和(1984): 円筒地下タンクの非線形動的相互作用に関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第 350号/1-2, pp. 243~252
- 古川正昭, 荒野政信, 山田善一(1986): 模型砂層地盤の液状化現象, 「土と基礎」VOL. 34-12, pp. 45~52
- 古川正昭, 荒野政信, 山田善一(1987): 模型杭基礎と液状化現象, 「土と基礎」, VOL. 35-4, pp. 31~36