

液状化地盤中の杭挙動に関するオンライン地震応答実験

On Line Pseudo-Dynamic Response Test concerning the Behavior of Pile Foundations in Liquefied Ground

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
三上 博 HIROSHI MIKAMI

液状化地盤中における杭基礎の挙動を精度良く評価することを目的とし、杭・構造物-地盤連成系の質点系モデルにオンライン地震応答実験を導入した。本報告では、まず、システムの概要について示した後に、杭基礎に対する液状化模型振動台実験に対するシミュレーションを実施し、液状化地盤中の杭の応答に関して実験結果との比較から、システムの適用性について考察する。

キーワード：オンライン地震応答実験、液状化、杭基礎、質点系モデル

An on-line pseudo-dynamic response test combined with a lumped mass model analysis which represented the coupling behavior of ground, piles and overlying structures was conducted to study the behavior of piled foundations in liquefied ground. An overview of this simulation system and also the relationship between the results of the simulation and the results obtained from tests utilizing a shaking table test of a piled foundation are described. The applicability of the system is subsequently discussed based on a comparison of the pile responses.

Key Words: Pseudo-Dynamic Test, Liquefaction, Pile Foundation, Spring-Mass Model

1. はじめに

液状化時の杭基礎挙動に関してはまだ不明確な点が多く、杭・構造物-地盤連成系における動的相互作用を精度良く評価し、設計に反映させることが重要な課題となっている。

杭・構造物系と地盤の動的相互作用を評価する手法の一つに Penzien ら¹⁾のモデル（以下、Penzien モデル）を代表とする質点系モデルがある。1960年代以降、このモデルを基礎とした研究が多くなされていくが、その中で河村²⁾は Penzien モデルにおける有効質量が実体のない捉え難いものであるとの認識に立ち、周辺地盤を実態のあるせん断土柱とするという新たなモデルを提案³⁾した。このモデルは、「格子モデル」の杭近傍地盤部分を杭1列系に集約していることから「集約型モデル」と呼ばれ、地震観測による妥当性の確認⁴⁾とともに、解析事例⁵⁾が示されている（以下、修正 Penzien モデル）。1980年代以降、Penzien 型モデルを用いた杭基礎の動的挙動に及ぼす液状化の影響に関する研究^{6),7)}が着目されるようになり、森ら^{8),9),10)}は Penzien 型モデルでは分離されていた自由地盤系と杭・構造物系を一体とした新た

なモデルを提案している。

本研究では、液状化地盤中における杭基礎の挙動を精度良く評価することを目的とし、修正 Penzien モデルにオンライン地震応答実験を導入した。本報告では、まず、システムの概要について示し、次に杭基礎模型振動台実験のシミュレーション結果から、システムの適用性について考察する。

2. 模型振動台実験の概要

図-1 に模型振動台実験での計測器の配置および振動台の断面図を示す。実験は、幅 1.2m×奥行き 0.8m×高さ 1.0m のせん断土槽を用いて重力場で行っている^{11),12)}。模型地盤は、相対密度 $D_r=80\%$ の非液状化層である下層部と、 $D_r=30\%$ の液状化層である上層部からなる。地盤試料には浜岡砂（ $\rho_s=2.699\text{g/cm}^3$ ， $e_{max}=0.933$ ， $e_{min}=0.593$ ）を用いた。杭基礎模型は、3×3 計 9 本の杭頭をフーチングに剛結させ、その先端部は土槽底面とピン結合とした。

計測は、地盤の挙動を把握するために地盤中に加速度計と間隙水圧計を、杭の挙動を把握するために杭に加

速度計とひずみゲージを設置して行った。また、上部構造物とせん断枠の挙動を確認するために、加速度計とレーザー変位計を設置した。

3. オンライン地震応答実験の概要

(1) オンライン地震応答実験の概念

オンライン地震応答実験の概念を図-2 に示す。本手法は日下部ら¹³⁾により開発されたものであり、そのアルゴリズムは次のとおりである。まず、解析対象地盤を質点系にモデル化し、基盤面から地震動を入力する。次にコンピュータにより質点系の振動方程式を解き、各質点の応答変位を求める。そして、得られた変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体に与え、そのとき自動計測された復元力を用いて次のステップの応答変位を計算する。すなわち、本手法はこれらの過程を地震動が継続する間繰り返すことにより、時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素実験の供試体から直接求め、それをオンラインで応答解析に結びつけて地震時の地盤の挙動をシミュレートするものである。

なお、要素実験部分には日下部ら¹⁴⁾により試作された簡易直接せん断試験機を用いた。また、多層からなる地盤のすべてをオンライン実験することは、システムが高価になるばかりでなく作業も煩雑化する。そこで、本実験では液状化や大変形が予想され数値モデル化が困難な地盤要素部分の復元力を要素実験で求め、その他の部分は修正 Ramberg-Osgood (以下、修正 R-O) モデルで復元力を求めるサブストラクチャ法を採用した。

(2) 杭・構造物 - 地盤連成系オンライン地震応答実験

図-3 に、修正 Penzien モデルにオンライン地震応答実験を組み込んだ連成系モデルを示す。本モデルは、図-1 に示した模型振動台実験を、1g 場における井合の相似側¹⁵⁾を適用し実物大に合わせてモデル化したものである。

液状化層である S3 層～S5 層の復元力は、自由地盤系 A_f および付加地盤系 A_a 共に、相対密度 $D_r=30\%$ の供試体を用いた要素試験により実測した。なお、試料には模型振動台実験と同一の浜岡砂を用いた。一方、S6 層～S7 層の復元力は修正 R-O モデルにより算定した。修正 R-O モデルの解析パラメータは、 $\alpha=2.451$ 、 $\beta=2.293$ であり、初期せん断剛性 G_0 は、Meyerhof¹⁶⁾が示した D_r と N 値との関係から所定の D_r に対応した N 値を求め、その N 値を用いて $G_0=98 (144N^{0.68})$ (kPa) として算定¹⁷⁾した。杭は簡略化するために群杭を1本の集約杭とし、集約杭の耐力は模型振動台実験における単杭の単純和と

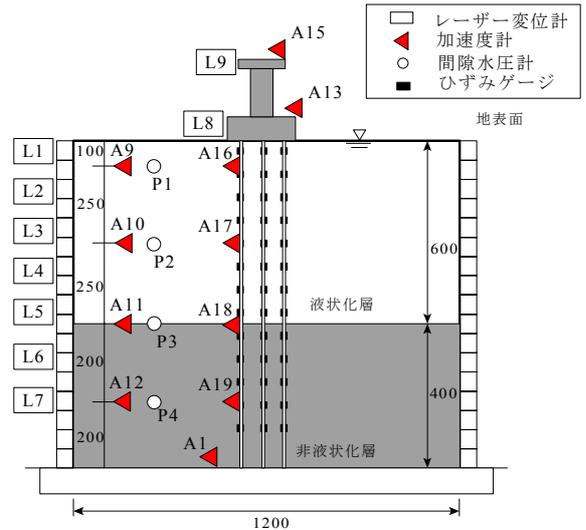


図-1 模型振動台実験の概要

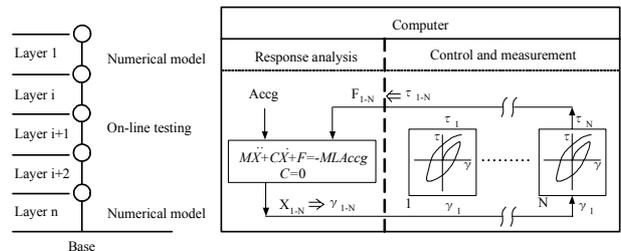


図-2 オンライン地震応答実験の概念

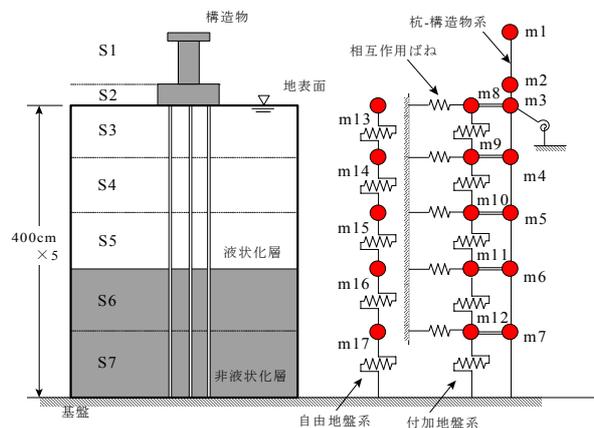


図-3 連成系オンライン地震応答実験モデル

して与えた。また、構造物とともに曲げせん断系としてビーム要素でモデル化し、材料特性は線形とした。

初期相互作用ばね K_{i0} は、建築基礎構造設計指針¹⁸⁾に準じて算出した。また、せん断中の相互作用ばね K_i は、液状化による地盤剛性の低減を考慮し、自由地盤系 A_f における過剰間隙水圧比 u/σ'_v を用い、式 (1) により逐次変化させた。

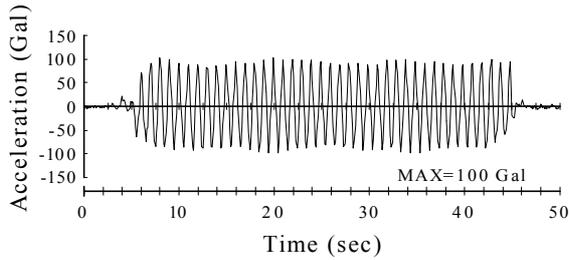


図-4 入力波

各質点の質量は、自由地盤系 A_f ・付加地盤系 A_a ・杭・構造物系 A_s いずれも 1×1 の単位断面積当たりの質量を集中質量法により決定した。付加地盤の質量に関しては現在様々な知見⁴⁾が得られているが、本研究では、 $A_s = 1$ に対して A_a の断面積を種々に変化させて実験を行った結果、 $A_a = 30$ までは結果に大きな違いが見られなかったこと、また $A_a = 30$ 以上とした場合、過剰に杭系に質量が付加されることを考慮し、付加地盤系 A_a は他系と同様に $A_a = 1$ とした。

実験手順は、まずオンライン地震応答実験により自由地盤系 A_f の実験を行い、次に杭・構造物系 A_s のオンライン地震応答実験を行った。その際、自由地盤系 A_f で得られた応答変位を付加地盤系 A_a との相対変位とし相互作用ばね K_i により外力として入力地震動に加え杭・構造物系 A_s に作用させた。

入力波は、図-4 に示す模型振動台実験で使用された最大加速度 100Gal、周波数 1Hz の正弦波である。加振はこれを 40 波とした。

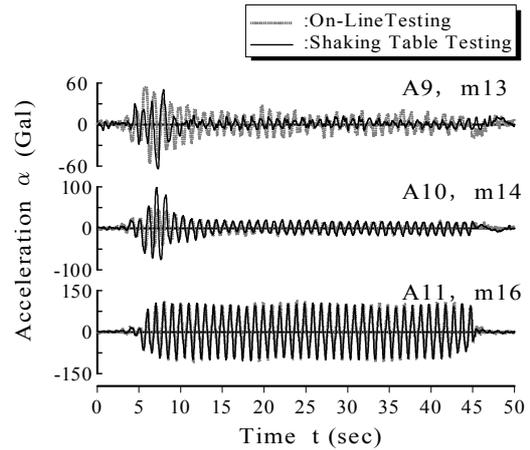
$$K_i = K_{i0} \left(1 - \frac{u}{\sigma'_c} \right)^{0.5} \quad (1)$$

- ここに、 K_i : 相互作用ばね (kN)
- K_{i0} : 初期相互作用ばね (kN)
- σ'_c : 平均有効拘束圧 (kPa)
- u : 過剰間隙水圧 (kPa)

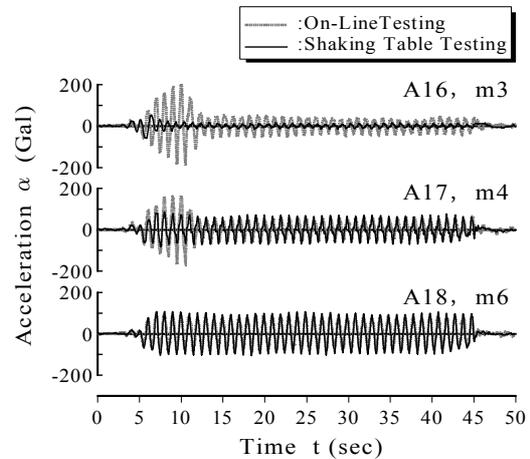
4. 実験結果

図-5 は、自由地盤および杭における応答加速度の時刻歴を模型振動台実験と連成系オンライン実験のそれぞれ同深度で比較したものである。

自由地盤の結果に関して、模型振動台実験の上層部における波形 (A9 および A10) は、振動に伴って減衰して長周期化していることが認められる。これは、液状化により地盤の剛性が著しく低下し、上層への地震動の伝播が抑制されたためである。一方、層境界位置の A11 の波形にはそのような減衰傾向は認められない。連成系



(a) 自由地盤



(b) 杭

図-5 応答加速度の時刻歴

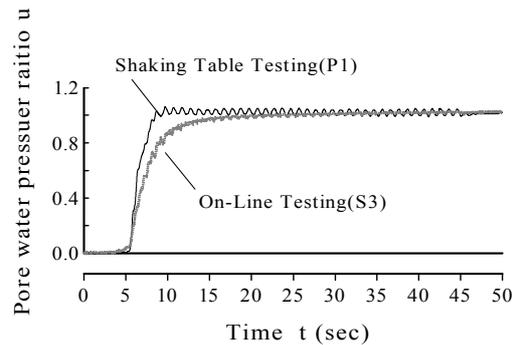


図-6 過剰間隙水圧比の時刻歴

オンライン実験の m13 および m14 における結果も波形が振動に伴って減衰しており、模型振動台実験結果と良い一致を示している。また、A11 と m16 との波形の比較からも、連成系オンライン実験結果と模型振動台実験結果との対応は非常に良いと言える。

杭に関して、連成系オンライン実験における m3 の波形は 5sec~12sec 付近で応答が著しく大きくなっている

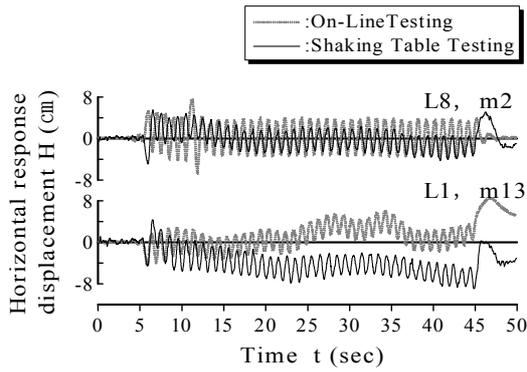


図-7 水平変位の時刻歴

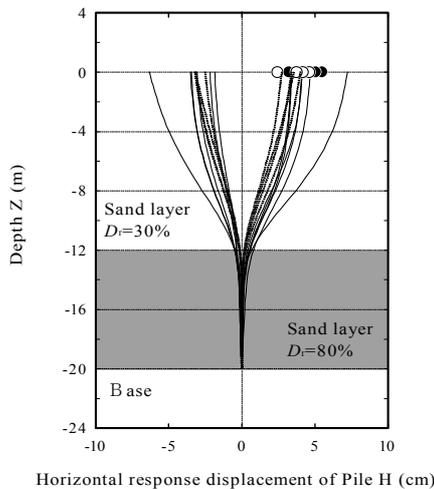


図-8 杭水平変位の時刻歴

のに対して、模型振動台実験の A16 の波形にはその傾向が認められない。これは、図-6 に示す過剰間隙水圧比の時刻歴から、模型振動台実験における P1 位置では加振後 7sec 程度で過剰間隙水圧比が 1.0 に達しているのに対し、連成系オンライン実験における S3 層は 12sec 付近で 1.0 に達しており、7sec~12sec 間の地盤剛性が模型振動台実験と比較して高いことに起因するものと推察される。すなわち、連成系オンライン実験における相互作用は、自由地盤系における過剰間隙水圧を用いて低減させているため、間隙水圧の発生過程の相違が杭系における応答の違いを生んだものと考えられる。ただし、12sec 以降ではいずれの深度においても両波形は良く一致している。

図-7 にフーチング部 (L8, m2) と地表 (L1, m13) の水平変位の時刻歴を示す。フーチング部の結果をみると、連成系オンライン実験の結果は 12sec 付近で一時的に変位が若干大きくなっているものの、変形量は模型振動台実験の結果と同程度であることがわかる。また、地表変位は両結果ともゼロ線から互いに逆にシフトしてい

るが、いずれの結果も変形量は同程度であることから、両者の対応は良いと考えられる。

図-8 は連成系オンライン実験における杭の変形量の深度分布を示したものである。図中に示す実線は加振から自由地盤系での液状化層の過剰間隙水圧比が 1.0 になるまでを、破線は液状化後の値を示す。また、●は模型振動台実験における上層部が液状化に至るまで、○は液状化後の杭頭変位量を示したものである。模型振動台実験と連成系オンライン実験のいずれの結果も、杭の変形量は過剰間隙水圧の上昇に伴って増大し、過剰間隙水圧比が 1.0 となる付近で最大となり、その後徐々に減少して定常状態に至るといった傾向となった。

5. まとめ

液状化地盤中における杭基礎の挙動を精度良く評価することを目的とし、杭・構造物-地盤連成系の質点系モデルにオンライン地震応答実験を導入した。

杭基礎模型振動台実験のシミュレーションを実施した結果、杭の応答加速度と変位の時刻歴変化の比較から、本システムの結果は模型振動台実験のそれに良く対応しており、システムの適用性が確認された。

謝辞：本報告の振動台実験は、三井住友建設（株）、（株）フジタおよび山口大学地盤地震工学研究所の共同研究として実施したものです。ご指導戴いた山口大学兵動正幸教授ならびに三浦房紀教授、共同研究メンバーである（株）フジタ 岸下崇裕主任研究員の諸氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges Long Piles, J. of the Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE, Vol.90, No.EM3, pp.223-254, 1964.
- 2) 河村壯一：埋立層上 RC 建物の振動論，東京大学工学部学位論文，p.385, 1974.
- 3) 梅村 魁，大澤 胖，河村壯一：軟弱地盤に建つ杭支持建物の地震動観測，関東地震 50 周年記念地震工学シンポジウム論文集，pp.125-132,1973.
- 4) 河村壯一：埋立軟弱地盤に建つ杭支持建物の地震動観測と解析（その 7）Penzien 型モデルと集約型モデル，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.415-416, 1975.
- 5) 高木政美，河村壯一：3-(5)修正 Penzien 型モデルによる解析，構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム，日本建築学会，pp.87-88,1985.

- 6) Kagawa, T. and Kraft, L.M.J.: Lateral load-deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.4, pp.19-36, 1980.
- 7) 森尾敏, 安倍勇, 兵動正幸, 山内豊聡: 液状化過程における地盤および杭・構造物系の応答解析, *土と基礎*, Vol.29, No.9, pp.19-26, 1981.
- 8) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 地盤-構造物連成系に対する有効応力液状化解析の適用性, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.801-806, 1990.
- 9) Mori, S., Ikeda, T., Takimoto, Y., Muto, M. and Takayuki, T.: Influence of soil liquefaction on dynamic response of structure on pile foundation, *Proc. of 10th WCEE*, pp.1777-1780, 1992.
- 10) 森伸一郎: 杭基礎構造物に対する質点ばね系モデルの提案とその実被害への適用, *応用力学論文集*, Vol.3, pp.609-620, 2000.
- 11) 岸下崇裕, 山本陽一, 高橋直樹, 兵動正幸, 三浦房紀: 液状化地盤中の杭挙動について(その1: 模型振動台実験と考察), *地盤工学研究発表会概要集*, pp.1855-1856, 2002.
- 12) 山本陽一, 岸下崇裕, 高橋直樹, 兵動正幸, 三浦房紀: 液状化地盤中の杭挙動について(その2: 有効応力解析によるシミュレーション), *地盤工学研究発表会概要集*, pp.1857-1858, 2002.
- 13) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: オンライン地震応答実験による2層系砂質地盤の液状化挙動, *土質工学会論文報告集*, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.
- 14) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 藤井照久, 兵動正幸: 簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用, *土木学会論文集*, No.617/III-46, pp.299-304, 1999.
- 15) 井合進: 1 g 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似側, *港湾技術研究所報告*, 第27巻, 第3巻, 1988.
- 16) Meyerhof, G.G.: Discussion of Session 1, *Proc. 4th ICSMFE*, Vol.3, p.10, 1957.
- 17) Imai, T. and Tonouchi, K.: Correlation of N value with S wave velocity and shear Modulus, *Proc., 2nd ESOPT*, pp.57-72, 1982.
- 18) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針