大型振動台実験に基づく液状化過程での杭の水平地盤反力変位関係のモデル化

MODELING OF HORIZONTAL SUBGRADE REACTION OF PILE DURING SOIL LIQUEFACTION BASED ON LARGE SHAKING TABLE TESTS

時松 孝次*, 鈴木 比呂子**, 佐伯 英一郎***

Kohji TOKIMATSU, Hiroko SUZUKI and Eiichirou SAEKI

The coefficient of subgrade reaction of pile during soil liquefaction is back-calculated based on large shaking table tests. The effects of soil density, relative displacement and pore water pressure ratio on the p-y relation between subgrade reaction and relative displacement are examined, and a simplified procedure to estimate time history of p-y relation is presented. The p-y relations computed by the proposed method are in good agreement with the experimental ones, irrespective of depth, level of input motion and soil density, indicating that the proposed method is promising for estimating p-y relations during soil liquefaction.

Keywords: Shaking table test, Liquefaction, Pile, Subgrade reaction, Relative Displacement, Pore water pressure

振動台実験, 液状化, 杭基礎, 地盤反力, 相対変位, 間隙水圧

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震をはじめとする近年の地震では、液状化地盤の変形による杭基礎被害が多数報告されている。このような地盤変形に起因する杭応力を推定するには、地表から地中部までの地盤変形に加え、杭の水平地盤反力変位関係を適切に評価することが重要である。しかし、液状化時の地盤反力変位関係を精度良く得ることは難しく、これを実測した研究や、実測にもとづいて地盤反力変位関係のモデル化を試みた研究はほとんど見あたらない。

1999年に(現独立行政法人)防災科学技術研究所では、各深度の地盤反力変位関係を精度良く得ることを目的に、ひずみゲージおよびセンサーを深度方向に多数配置して、地盤-杭-構造物系の大型振動台実験¹⁾が行われている。前報²⁾では、その実験結果にもとづき、杭の水平地盤反力、杭と地盤の相対変位の時刻歴を求め、地盤反力変位関係に影響を与える要因について検討している。本報では、実験結果と前報にもとづいて、各要因の影響を定量的に評価するとともに、地盤反力変位関係をモデル化し、その有効性を検討する。

2. 大型土槽の振動実験から求めた地盤反力係数の支配要因

2.1 実験概要と杭の水平地盤反力変位関係の推定

振動実験¹²⁾は、表1に示すように、基礎の根入れの有無、上部構造物の有無とその固有周期をパラメータとした計6ケースの地盤-杭-構造物系に対し、入力地震動の振幅を段階的に大きくして行われている。本報では、表1に示す実験のうち、前報²⁾で実験結果が

詳細に述べられているA1シリーズ120Gal入力(A1-120)、BLシリーズ120Gal入力(BL-120)、240Gal入力(BL-240)、B1シリーズ120Gal入力(B1-120)の4ケースを検討対象とする。

図1に、BLシリーズの実験で用いた大型せん断土槽、地盤-杭-構造物模型、センサー配置例を示す。土槽は、高さ6m、幅12m、奥行き3.5mで、29段のフレームで構成されている。地盤は、表層の乾燥砂層、液状化の可能性のある飽和砂層、下部の密な砂礫層の3層からなる。杭は、直径16.52cm、板厚0.37cmの鋼管杭4本を用い、杭の先端はピン支持され、頭部は基礎部に剛結されている。基礎および上部構造物の質量はそれぞれ2.1t、14.2tである。

振動実験¹²⁾で用いた入力加速度は、南関東地震を想定して作られた臨海波(図2(e))の最大加速度振幅を調整した波である。実験の間、上部構造物及び基礎の加速度と変位、杭の曲げ歪みと間隙水圧、地盤及び杭の加速度が測定されている。なお、実験詳細は文献¹²⁾に詳しい。

各実験開始前に測定されたコーン貫入値および次式³⁴⁾を用いて推定した標準貫入試験N値、相対密度(D_r)を表2に示す。

表1 実験シリーズ

シリーズ	根入れ	構造物(固有周期)	検討対象
A1	なし	なし	120Gal入力
AL	なし	あり(0.8s)	
AS	なし	あり(0.2s)	
BS	あり	あり(0.2s)	
BL	あり	あり(0.8s)	120, 240Gal入力
B1	あり	なし	120Gal入力

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生

*** 新日本製鐵建築事業部 部長・工博

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
General Manager, Nippon Steel Corp., Building Construction Div., Dr. Eng.

$$q_c = 0.98ND_{50}^{0.22} \approx 0.76N \quad (1)$$

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{98N}{\sigma_v' + 68.6}} \quad (2)$$

ここで、 q_c はコーン貫入値(kN/m²)、 σ_v' は有効上載圧(kN/m²)を示す。表より、A1, BL, B1の順に密度が高くなっていることがわかる。

なお、前報²⁾と同様に、以下の検討における杭の水平地盤反力は、杭の実測曲げ歪みを曲げモーメントに変換した後、深度方向に微分して推定し、地盤と杭の相対変位は、両者の実測加速度記録を時間で2回積分し差分をとることで推定している。

図2に、BL-240深度2.5mでの相対変位、地盤反力、地盤反力係数と間隙水圧と入力加速度の時刻歴を示す。地盤反力係数は、1秒間ごとに、地盤反力の最大値を相対変位の最大値と杭径で除して求め、区間中央の時刻に対応させて示している。

図2より、10秒前後から相対変位の増加と過剰間隙水圧比の上昇が認められ、20秒前後で地盤が完全に液状化していることが分かる。これにともなって、地盤反力係数は、10~40秒の間に10⁴以上から10³以下へ大きく低下している。以上のことは、地盤反力係数が、間隙水圧、地盤と杭の相対変位に影響を受けていることを示している。また、前報より、間隙水圧や相対変位は地盤密度や入力加速度に依存することがわかっている。以下ではこれらの影響の定

量的評価を試みる。

2.2 間隙水圧比と地盤反力係数の関係

図3に、BL-240深度2.5mの0~80秒での地盤反力係数と間隙水圧比 U の関係に対応する相対変位 y ごとに示す。なお、相対変位が0.02cm以下となる区間のデータは、地盤反力係数の精度が期待できないため除いている。図より、地盤反力係数は、間隙水圧比が大きいほど低下するが、同じ間隙水圧比に対して相対変位が大きいほど小さくなる傾向があるため、地盤反力と間隙水圧の関係を一義的に定義することが難しい。

そこで図3において、同程度の相対変位 y ごとに、地盤反力係数と間隙水圧比 U の関係を直線回帰して $U=0$ での地盤反力係数 $k_h(0,y)$ を求め、この値で任意の間隙水圧比における地盤反力係数 $k_h(U,y)$ を無次元化する。図4に、このようにして求めた無次元化地盤反力係数と間隙水圧比の関係を全時刻歴について示す。図より、無次元化地盤反力係数は、 $(1-U)^{\alpha}$ に比例($\alpha=0.5\sim 1.0$)し、両者の関係が、液状化前後にわたって、相対変位によらず一義的に定義できる可能性が示唆される。Liu and Dobry⁵⁾は、遠心載荷実験より、液状化時の地盤反力係数が有効応力に比例することを示した。上記の結果は、この遠心載荷実験結果と対応する。

図1 地盤-基礎-構造物模型

表2 地盤の物性値

実験ID	深度(m)	q_c (MN/m ²)	N	D_r (%)	k_{h1} (MN/m ³)
A1	1.0	1.5	2	30	11.7
	2.5	1.0	1	25	7.2
	4.5	8.0以上	10以上	65以上	69.4
BL	1.0	2.0	2	35	14.2
	1.5	2.5	3	40	22.0
	2.0	4.0	5	45	34.0
	2.5	4.5	6	50	39.8
	3.0	6.0	8	55	52.0
	3.5	8.0	10	65	69.4
	4.0	8.0以上	10以上	65以上	69.4以上
B1	1.0	2.5	3	40	22.3
	2.5	8.0	10	65	69.4
	4.5	8.0以上	10以上	65以上	69.4以上

図2 入力波形とBL-240深度2.5mでの相対変位、地盤反力、間隙水圧比および地盤反力係数の時刻歴

図3 地盤反力係数と間隙水圧比の関係

2.3 相対変位と地盤反力係数の関係

図5に、BL-240 深度2.5mでの地盤反力係数と相対変位の関係に対応する間隙水圧比ごとに示す。地盤反力係数は、相対変位の増大にともなって低下するが、同程度の相対変位に対して、間隙水圧比が大きいほど小さくなる傾向を示す。そこで図6に、地盤反力係数の実験値を有効応力比 $(1-U)$ で除した値と相対変位の関係を示す。図より、有効応力比で正規化した地盤反力係数が、間隙水圧比の値にかかわらず、相対変位の増加にともなって低下する傾向が認められ、両者の関係が一義的に評価できることがわかる。

2.4 地盤密度と地盤反力係数の関係

図7は、地盤密度の異なる3ケースの実験(A1-120, BL-120, B1-120)の深度2.5mの地盤反力係数と相対変位の関係を示している。地盤密度が低いほど、同じ相対変位に対する地盤反力係数が小さくなっていることがわかる。そこで各実験結果から、相対変位と間隙水圧比が同程度の時の地盤反力係数と各実験前に測定された対応深度のコーン貫入抵抗値の関係を求め、図8に示す。図より、地盤反力係数は、相対変位と間隙水圧比が同じであれば、コーン貫入抵抗値にはほぼ比例して増加する傾向を示すことがわかる。

3. 地盤反力変位関係のモデル化

前章の考察にもとづき、既往の推定式を改善した液状化過程での地盤反力変位関係の推定モデルを提案する。

3.1 既往の地盤反力変位関係

建築基礎構造設計指針⁶⁾において、杭の水平地盤反力 (p) と杭と地盤の相対変位 (y) の関係は、次式で与えられる。

$$p = k_h B y \quad (3)$$

ここに、 B は杭径、 k_h は地盤反力係数を表す。液状化にともなう間隙水圧の上昇と変位の増大の影響を考慮するため、建築基礎構造設計指針では地盤反力係数を次式で表す。

$$k_h = \beta k_{h1} (y/y_1)^{-0.5} \quad (4)$$

ここで、 y_1 は基準相対変位($y_1=1\text{cm}$)、 k_{h1} は基準地盤反力係数、 β は液状化による k_h の低減係数を表し、 $y=1\text{cm}$ を代入すると $k_h=\beta k_{h1}$ となる。なお、 k_{h1} は次式で与えられる。

$$k_{h1} = 80 E_0 B_0^{-0.75} \quad (5)$$

$$E_0 = 0.7 N \quad (6)$$

ここで、 E_0 は変形係数(MN/m^2)、 B_0 は1cmに対して無次元化した杭幅、 N は標準貫入試験N値である。

図4の考察にもとづき、 β を間隙水圧比 (U) を用いた関数で表し、 $\beta=(1-U)^a$ とする。(4)式を(3)式に代入して次式を得る。

$$p = k_{h1} (y/y_1)^{-0.5} (1-U)^a B y \quad (7)$$

(4)式において、 y 、 U は実験値から、 k_{h1} を実測コーン貫入抵抗値から(1)、(5)、(6)式より求め(表2)、さらに $a=1.0$ として、BL-240 深度2.5mの地盤反力係数を推定し、図9に実験値(○印)と比較して示す(×印)。図より、既往モデルより推定した地盤反力係数は、実

図4 無次元化した地盤反力係数と間隙水圧比の関係

図7 異なる地盤密度での地盤反力係数と相対変位の関係

図5 地盤反力係数と相対変位の関係

図8 コーン貫入値と地盤反力係数の関係

図6 正規化した地盤反力係数と相対変位の関係

図9 実験値と建築基礎設計指針による推定値の比較

測地盤反力係数より大きい値をとる。これは、(4)式で $k_h = \beta k_{hi}$ となる基準相対変位 y_1 が、杭径 B に関わらず 1.0cm であることから、実験のような小さな杭径に対して、対応する杭周辺のひずみレベル (y_1/B に比例) が大きくなるためと考えられる。

3.2 提案モデル

本報告では既往モデルの問題点を解消するために、地盤反力係数を次式でモデル化する。

$$k_h = k_{hi} \frac{2}{1 + |y/y_1|} (1-U)^\alpha \quad (8)$$

(8)式に、 $y=0$, $U=0$ を代入すると $k_h = 2k_{hi}$ となり、 $y=y_1$ を代入すると $k_h = k_{hi}(1-U)^\alpha$ となる。(3), (8)式より、地盤反力変位関係は次式で与えられる。

$$p = \frac{2k_{hi}}{1 + |y/y_1|} (1-U)^\alpha B y \quad (9)$$

(9)式中の y を無限大にすると、地盤反力最大値 (p_{max}) は次式となる。

$$p_{max} = 2k_{hi}(1-U)^\alpha B y_1 \quad (10)$$

(8)式において、 k_{hi} および α は既往モデルと同様に定め、 y_1 は、前節の考察と既往の文献⁷⁾を参考に、杭径の約 1% (杭径 16.52cm で $y_1=0.2$ cm) として BL-240 深度 2.5m の地盤反力係数を推定し、図 10 に実験値と比較して示す。推定地盤反力係数は、実験結果の傾向を

よくとらえている。

(7), (9)式の違いを確認するため、両式から無次元化変位 (y/y_1) に対する地盤反力を推定し、図 11 に比較して示す。両式による推定地盤反力は、 $y/y_1 < 3$ では大きな違いは見られない。したがって、(7)式(既往モデル)でも $y_1=0.01B$ とすれば、実験値と整合性がとれるものと考えられる。しかし、無次元化変位がさらに大きくなると、(7)式による推定地盤反力に比べ、(9)式(提案モデル)による推定地盤反力はやや低い値となり、(10)式の地盤反力最大値に収束することがわかる。このため、提案モデルでは、(9)式を(10)式で除することで、無次元化した地盤反力変位関係の骨格曲線を次式で定義できる。

$$\frac{p}{p_{max}} = \frac{y/y_1}{1 + |y/y_1|} \quad (11)$$

(11)式により、間隙水圧が変化する際の地盤反力変位関係の履歴曲線の設定が容易になる。

履歴曲線には、スケーリングパラメータを導入することで減衰を調節できるように修正した Masing 則⁹⁾を適用する。履歴曲線の最大減衰は 20% とする。なお、(7)式では、地盤反力の最大値が定義できないため、以上のような無次元化骨格曲線と減衰を調節した履歴曲線の設定が難しい。

図10 実験値と提案モデルによる推定値の比較

図11 推定地盤反力と変位の関係

図12 BL-240での地盤反力係数の実験値と推定値

4. 提案モデルの妥当性の検討

実験結果のうち相対変位と間隙水圧比が既知として、地盤反力係数および地盤反力変位関係の時刻歴を推定し、実験結果と比較する。

4.1 BL シリーズでの実験値と推定値の比較

図 12 に、BL-240 深度 2.0~4.5m の推定地盤反力係数の時刻歴を実験値と比較して示す。地盤反力係数の実験値は、地盤の間隙水圧が上昇する 10~30 秒にかけて、地表に近いほど小さくなる傾向がある。推定値は、以上の傾向をとらえている。

図 13, 14 に、BL-240 深度 2.0~4.5m の推定した地盤反力変位関係を実験結果と比較して示す。図より、深度 2.0m, 2.5m の間隙水圧上昇過程(0~20 秒)において(図 13(a), (d)), 変位がある値を越えると実測地盤反力が急激に大きくなるため、地盤反力変位関係が逆 S 字型になる傾向を示す。しかし、液状化後(20~80 秒)では(図 13(b), (c), (e), (f)), 地盤反力が急激に小さくなる結果、地盤反力変位関係が逆 S 字型になる傾向は消失する。また、その他の深度におい

ても、間隙水圧が上昇した 20 秒後においては、繰り返し履歴により地盤反力変位関係の傾きが徐々に小さくなる。図 14 より、推定された地盤反力変位関係は、以上のような実験結果の傾向をよく再現している。

入力レベルが異なる場合でも、モデル化が妥当であるか確認するため、図 15 に、BL-120 深度 2.5m, 4.5m の推定地盤反力係数の時刻歴を実験値と比較して示す。いずれの深度でも、入力が大きいの BL-240 (図 12)と比較して、実測地盤反力係数の低下が抑えられている。推定地盤反力係数はその傾向を捉えている。

図 16, 17 に、BL-120 深度 2.5m, 4.5m の推定した地盤反力変位関係を実験結果と比較して示す。図より、深度 2.5m の実測地盤反力変位関係(図 16(a), (b), (c))は、逆 S 字型になる傾向が見られ、液状化後も同様の傾向を示す。一方、入力の大い BL-240 深度 2.5m の実測地盤反力変位関係(図 13(d), (e), (f))は、液状化後に逆 S 字型の傾向が消失し、傾きが小さくなる。深度 4.5m の実測地盤反力

図13 BL-240の実測地盤反力変位関係

図14 BL-240の推定地盤反力変位関係

変位関係(図 16(d), (e), (f))も, 間隙水圧上昇の前後での傾きの低下がほとんど見られない。一方, 入力の大い BL240 深度 4.5m の実測地盤反力変位関係(図 13(p), (q), (r))の傾きは, 間隙水圧上昇後に低下している。図 17 より, 推定地盤反力変位関係は, 以上の傾向をよく捉えている。

4.2 異なるシリーズでの実験値と推定値の比較

図 18 に, 地盤密度が異なる A1-120, B1-120 深度 2.5m での推定

地盤反力係数の時刻歴を実験値と比較して示す。実測地盤反力係数は, 地盤密度が低いほど小さく, また液化化後に大きく低下する傾向がある。推定地盤反力係数は以上の傾向をよくとらえている。

図 19, 20 に, A1-120, B1-120 深度 2.5m の推定した地盤反力変位関係を実験結果と比較して示す。図より, BL-120 の同深度(図 16(a), (b), (c))と比較して, 地盤密度が低いと(図 19(a), (b), (c)), 変位が大きくなっても地盤反力はほとんど生じず, 実測地盤反力変位関係

図15 BL-120での地盤反力係数の実験値と推定値

図18 A1-120, B1-120での地盤反力係数の実験値と推定値

図16 BL-120の実測地盤反力変位関係

図19 A1-120, B1-120の実測地盤反力変位関係

図17 BL-120の推定地盤反力変位関係

図20 A1-120, B1-120の推定地盤反力変位関係

の傾きが極めて小さい。一方、地盤密度が高いと(図 19(d), (e), (f)), わずかな変位で地盤反力が急激に大きくなり、実測地盤反力変位関係が逆 S 字型を示し、その傾きが大きくなる。図 20 より、推定された地盤反力変位関係は以上の傾向をよく再現している。

5. まとめ

地盤-杭-構造物系に対する大型振動台を用いた液状化実験結果にもとづいて、杭の水平地盤反力係数および地盤反力変位関係を推定するモデルを提案した。モデルの妥当性を検討するために、実験におけるこれらの時刻歴を推定し、実験結果と比較した結果、以下の結論を得た。

- (1) 基礎構造設計指針にもとづいて液状化過程の地盤反力係数を推定する際、基準変位を $y_1=1\text{cm}$ とすると実験結果を過大評価する。これを改善するためには、 $y_1=0.01B$ とすることが有効と考えられる。
- (2) 提案モデルによる推定地盤反力係数および推定地盤反力の時刻歴は、深度、入力レベル、地盤密度にかかわらず、実験結果と同様の傾向を示す。以上より、提案モデルは、液状化過程での地盤反力係数および地盤反力変位関係を推定するうえ

で有望である。

謝辞

本実験は、防災科学技術研究所、東京工業大学、鹿島建設、大成建設、竹中工務店、新日本製鐵、東京ソイルリサーチの共同で行ったものである。関係者に記して感謝します。

参考文献

- 1) 田村修次、土屋富男、鈴木康嗣、藤井俊二、佐伯英一郎、時松孝次：大型せん断土槽を用いた鋼管杭の液状化実験(その 1 概要)、第 35 回地盤工学研究発表会、pp.1907-1908, 2000.6
- 2) 時松孝次、鈴木比呂子、鈴木康嗣、藤井俊二：大型振動台実験に基づく液状化過程における杭の水平地盤反力の評価、日本建築学会論文報告集、No. 553, pp.57-64, 2002.3
- 3) 山田清臣、鎌田彰司、吉野広司、増田幸政：標準貫入試験の N 値とコーン貫入試験の q_c との相関性、土と基礎、Vol.40, No.8, pp.5-10, 1992.8
- 4) Meyerhof, G. G. : Discussion, Proceedings Fourth ICSMFE, Vol.3, pp.110, 1957.8
- 5) Liu, L. and Dobry, R. : Effect of liquefaction on lateral response of piles by centrifuge model tests, National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) Bulletin, Vol.9, No.1, pp.7-11, 1995.1
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.262-296, 2001.10
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、共通編・下部構造編、1996.12
- 8) 鈴木比呂子、時松孝次、佐伯英一郎：実大杭鋼管杭の水平地盤反力変位関係のモデル化、2002 年度日本建築学会大会(北陸)、B-1, pp.571-572, 2002.8
- 9) 井合進、松永康男、亀岡知弘：サイクリックモビリティのハラメータ同定、港湾技術研究所報告、第 29 巻、第 4 号、pp.58-83, 1990.12

(2002年3月10日原稿受理, 2002年7月1日採用決定)