杭頭加振実験に基づく液状化過程における 杭の水平地盤反力のメカニズム

MECHANISM OF HORIZONTAL SUBGRADE REACTION OF PILE DURING SOIL LIQUEFACTION BASED ON PILE TOP VIBRATION TESTS

田村 修次*1, 小林 健一*2

Shuji TAMURA and Ken'ichi KOBAYASHI

Horizontal subgrade reaction of a pile during soil liquefaction is investigated based on pile top vibration tests using a large-scale shear box. The subgrade reaction was resolved into elastic force and viscous force by back analysis using the Voigt model. It is shown that (1) the elastic force and the viscous force are independent of frequency under conditions which the displacement amplitude and the excess pore water pressure are constant; (2) as the excess pore water pressure increases, the modulus of elasticity decreases much more than the coefficient of viscosity; (3) the contribution of the elastic force to the horizontal subgrade reaction decreases with an increase in the excess pore water pressure.

Keywords: Soil liquefaction, Horizontal subgrade reaction, Pile foundation, Pile top vibration test, Elastic force, Viscous force

液状化、水平地盤反力、杭基礎、杭頭加振実験、弾性力、粘性力

1. はじめに

杭基礎を設計するうえで、水平地盤反力の評価は重要である。そのため、被害事例分析^{1), 2)}、大型振動台実験³⁾⁻⁵⁾、遠心載荷実験^{6), 7)}、水平載荷実験^{8), 9)}、杭頭加振実験^{4), 9)}が行われ、液状化地盤における水平地盤反力の検証が進められている。動的な水平地盤反力は、杭と地盤の相対変位に依存する成分(弾性力)と相対速度に依存する成分(粘性力)の和として考えることができる。一般的に弾性力は粘性力より大きく、地盤反力は相対変位に依存すると考えられている。そこで、多くの既往の研究は、相対変位と地盤反力の関係($p-y$ 曲線)に着目している。一方、液状化地盤における水平地盤反力が、相対速度に依存することが指摘¹⁰⁾されている。このことは、液状化地盤の場合、粘性力が地盤反力に大きな影響を及ぼす可能性を示唆している。しかし、粘性力に着目した研究例は極めて少なく、粘性力の周波数依存性や過剰間隙水圧が粘性力に及ぼす影響等、粘性力の基本的性質は明らかでない。また、地盤反力に対する弾性力と粘性力の寄与も十分な検討がされていない。

以上の背景から、筆者らは、杭頭加振実験で得られた水平地盤反力を弾性力と粘性力に分離する手法を提案した¹¹⁾。さらに本研究では、過剰間隙水圧の消散過程における杭頭加振実験に基づいて、地盤反力に対する弾性力と粘性力の寄与、弾性力と粘性力の周波数依存性およ

び過剰間隙水圧が弾性係数と粘性係数に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

実験は、科学技術庁(現:独立行政法人)防災科学技術研究所で行った。図-1に実験モデルを示す。せん断土槽は幅12m、奥行き3.5m、高さ6mである。パイルキャップは幅2.5m、奥行き1.8m、高さ0.6m、質量1.7tonである。杭は直径165.2mm、肉厚3.7mm、長さ5.3m、 $EI=1259\text{kNm}^2$ の鋼管杭4本とした。パイルキャップと杭頭は剛結合、杭先端はピン結合とした。地盤は2層モデルとし、土槽底面から高さ1.5mまでを砂

図-1 実験モデル

*1 信州大学工学部社会開発工学科 助教授・博士(工学)

*2 北陸セキスイハイム 修士(工学)
(元 信州大学 大学院生)

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Shinshu University, Dr. Eng.
Hokuriku Sekisui Heim Co., M. Eng.
(Former Graduate Student, Shinshu University)

礫層、その上部を4mの飽和砂層とした。飽和砂層は霞ヶ浦砂を用いて、水中落下法で作成した。自由地盤の卓越周期から換算される飽和砂層のS波速度は75m/s程度、砂礫層のS波速度は230m/s程度である。杭体に歪みゲージ、加速度計、間隙水圧計を設置し、杭から2m離れた自由地盤に間隙水圧計を設置した。

砂礫層上面からのボーリングで液状化を再現し、その前後で、パイルキャップ上に設置した起振機で杭頭加振実験を行った。加振モーメントは一定(98kNm)、入力波はsin波スウィープ波形とした。加振周波数は4~10Hzである。ボーリング前の加振をEx0、ボーリング直後の加振をEx1、ボーリングから2分30秒後の加振をEx2、4分後の加振をEx3とした。杭の水平地盤反力は、杭の曲げ歪みから算定した曲げモーメントの2階微分で求めた。また、杭加速度の1階積分で杭速度、2階積分で杭変位を求めた。本実験では地盤が振動しないため、杭速度が地盤と杭の相対速度、杭変位が地盤と杭の相対変位に相当する。

3. 水平地盤反力と杭変位・杭速度

3.1 実験結果の概要

図-2に、杭頭曲げ歪みが最大時における杭周辺の過剰間隙水圧(PWPB)および自由地盤の過剰間隙水圧(PWL1)の深度分布を示す。Ex0では、高さ3~5mの杭周辺地盤で過剰間隙水圧が発生している。自由地盤で過剰間隙水圧が発生していないことから、杭周辺地盤の過剰間隙水圧は、杭の振動によって励起されたと考えられる。ボーリング直後のEx1では、杭周辺、自由地盤ともに高さ3m以上で過剰間隙水圧が有効上載圧に達し、ボーリングによって砂層が液状化状態になったことが分かる。ただし、砂層下部は液状化していない。Ex2では、杭周辺、自由地盤ともに高さ3m以上における過剰間隙水圧比は0.7~0.9程度に低下している。Ex3では、杭周辺、自由地盤ともに過剰間隙水圧の消散が進み、高さ3mにおける杭周辺地盤の過剰間隙水圧比は0.3程度である。

図-3に、杭頭曲げ歪みが最大時付近における杭変位の深度分布を示す。液状化していないEx0の場合、主に高さ3.5m以上で杭が変位

図-2 自由地盤および杭周辺の過剰間隙水圧の深度分布

図-3 杭変位の深度分布

図-4 曲げ歪みの深度分布

図－5 過剰間隙水圧比、杭変位、杭速度および水平地盤反力の時刻歴（高さ4.0m）

している。すなわち、杭変位は概ね杭頭付近に限定される。それに対し、ボーリング直後のEx1の場合、主に高さ2m以上で杭が変位している。液状化地盤では、深い位置まで杭が変位することが分かる。過剰間隙水圧の消散が進むEx2、Ex3の場合、杭がEx1に比べて浅い位置で変位している。

図－4に、杭頭曲げ歪み最大時における曲げ歪みの深度分布を示す。曲げ歪みは、杭頭および地中部で大きくなる。地中部の曲げ歪みピークの高さは、加振ケースによって異なる。例えば、Ex0では、地中部曲げ歪みピークが高さ3.75m付近に現れるのに対し、Ex1では、高さ3m付近に現れる。Ex2、Ex3では、地中部曲げ歪みピークが高さ3.2mおよび3.7m付近に現れ、過剰間隙水圧が消散するに従って曲げ歪みピークの位置が浅くなることから分かる。

水平地盤反力を議論する際、Ex1で液状化していること、かつ精度の高い水平地盤反力を得るため杭の曲げ歪みおよび杭変位が大きいたことが望まれる。また、実地盤との対応を考えると、ある程度深い位置における水平地盤反力を議論したい。それらをふまえ本論文では、全ての加振ケースで曲げ歪みおよび杭変位がある程度大きく、かつEx1で完全に液状化したと考えられる高さ4m（深さ1.5m）について議論を進める。

図－5に、高さ4mにおける杭周辺の過剰間隙水圧比(u/σ'_v)、杭変位(D)、杭速度(V)、杭の水平地盤反力(P)の時刻歴を示す。Ex0の場合（図－5、a-d）、杭変位振幅が大きくなると過剰間隙水圧比が増加し、0.5程度に達する。過剰間隙水圧が短周期で振動しているのは、間隙水圧計を杭に設置していることから動水圧の影響と考えられる。7秒

から11秒にかけて、杭変位は徐々に増加するのに対し、杭速度はほぼ一定である。このように杭変位と杭速度で、その振幅の時間変動はやや異なる。地盤反力の時間変動は、杭変位のそれと概ね対応する。Ex1の場合（図－5、e-h）、過剰間隙水圧比は概ね1であり、液状化していることが分かる。4～15秒にかけて、杭変位は徐々に減少するのに対し、杭速度は増加する。地盤反力は増加する傾向であり、その振幅の時間変動は杭速度と概ね対応する。Ex2の場合（図－5、i-l）、過剰間隙水圧比は0.85～0.95である。地盤反力の時間変動は加振前半で杭速度と、加振後半で杭変位と概ね対応する。Ex3の場合（図－5、m-p）、過剰間隙水圧比は0.5～0.8である。地盤反力の時間変動は、杭変位と概ね対応する。

3.2 水平地盤反力と杭変位・杭速度の関係

地盤反力と杭変位・杭速度の関係を検討するため、図－6に5～10秒における杭変位と地盤反力の関係および杭速度と地盤反力の関係を示す。Ex0の場合、杭変位と地盤反力の関係（図－6 a）は、傾いた扁平な楕円のループを描く。地盤反力のピークは杭変位のピークと対応し、地盤反力は杭変位に概ね依存することが確認できる。一方、杭速度と地盤反力の関係（図－6 b）は、円形に近いループを描き、地盤反力のピークは杭速度のピークと対応しない。Ex1の場合、杭変位と地盤反力の関係（図－6 c）は、ほぼ円形のループを描く。一方、杭速度と地盤反力の関係（図－6 d）は、傾いた扁平な楕円のループを描き、地盤反力のピークが杭速度のピークと対応する。すなわち、地盤反力は杭速度に依存する。Ex2の場合、地盤反力は杭速度に概ね依存

図-6 水平地盤反力と杭変位、杭速度

するのに対し、Ex3の場合、地盤反力は杭変位に概ね依存する。以上から、地盤反力と杭変位・杭速度の関係は、過剰間隙水圧比によって異なることが分かる。

4. 水平地盤反力の発生メカニズム

4.1 水平地盤反力のモデル化

水平地盤反力と杭変位・杭速度の関係をさらに検討するため、図-7に示すVoigtモデルで地盤反力をモデル化し、地盤反力を弾性力、粘性力に分離する¹¹⁾。図-8に、杭変位と水平地盤反力(P)の関係を模式図で示す。傾いた楕円である杭変位と地盤反力の関係は、傾いた直線と傾きを持たない楕円に分けることができる。前者が変位依存の地盤反力である弾性力(P_d)、後者が速度依存の地盤反力である粘性力(P_v)である。Voigtモデルによると、地盤反力は次式で与えられる。

$$P = \mu \cdot D + \mu' \cdot \frac{dD}{dt} \quad (1)$$

ここに、 D は杭変位、 μ は弾性係数、 μ' は粘性係数である。(1)式の右辺第1項が弾性力 P_d 、第2項が粘性力 P_v に対応する。弾性係数および粘性係数は、次式で算定される。

$$\mu = \frac{P_1}{D_a} \quad (2)$$

$$\mu' = \frac{P_2}{\omega \cdot D_a} \quad (3)$$

ここに、 D_a は杭変位の振幅、 P_1 は杭変位 D_a における地盤反力、 P_2 は杭変位ゼロにおける地盤反力、 ω は円振動数である。なお、本実験では加振周波数が変化しているため、弾性係数および粘性係数を杭変位波形の半周期ごとに算定した。

提案手法の妥当性を検討するため、式(1)～(3)で地盤反力を算定した。図-9に非液化化地盤のEx0と液化化地盤のEx1における水平地盤反力の実験値と推定値を示す。Ex0、Ex1ともに推定値は実験値と良

図-7 Voigtモデル 図-8 杭変位と水平地盤反力（模式図）

図-9 水平地盤反力の実験値と推定値

図-10 弾性力と粘性力

図-11 杭変位、弾性力と粘性力、地盤反力に占める弾性力の割合

く対応し、提案手法で杭の水平地盤反力を精度良く再現できることが分かる。さらに、推定された地盤反力を弾性力と粘性力に区別して図-10に示す。Ex0では、弾性力が粘性力より大きいのにに対し、Ex1では、粘性力が弾性力より大きい。

4.2 水平地盤反力に対する弾性力と粘性力の寄与

地盤反力に対する弾性力と粘性力の寄与を検討するため、図-11に杭変位ピークの絶対値、地盤反力ピーク時における弾性力(P_d)と粘性力(P_v)、地盤反力に占める弾性力の割合(P_d/P)の時刻歴を示す。Ex0の場合(図-11, a-c)、弾性力は粘性力に比べてつねに大きく、地盤反力に占める弾性力の割合は概ね80%である。Ex1の場合(図-11, d-f)、杭変位が概ね一定である8~26秒では、弾性力は極めて小さく、地盤反力に占める弾性力の割合は数%程度である。ただし、杭変位が増加する1~4秒、26~30秒では、弾性力も増加して粘性力と同程度になる。その後、杭変位が減少すると弾性力も減少する。Ex2の場合(図-11, g-i)、地盤反力に占める弾性力の割合は、加振開始から30秒付近まで40%程度であるが、34秒付近で50%を超える。これは、過剰間隙水圧の消散にともなって弾性力が増加したためと考えられる。Ex3の場合(図-11, j-l)、弾性力は粘性力に比べてつねに大きく、地盤反力に占める弾性力の割合は60~70%程度である。以上から、地盤反力に占める弾性力の割合は、過剰間隙水圧比の影響を受けることが分かる。

図-12に、過剰間隙水圧比と地盤反力に占める弾性力の割合の関係を示す。なお、杭変位が小さいと地盤反力の精度が期待できないため、杭変位0.1mm以上を検討対象にした。過剰間隙水圧比が0.9程度より低いと、地盤反力に占める弾性力の割合は70~90%程度である。し

図-12 過剰間隙水圧比と地盤反力に占める弾性力の割合

たがって、地盤反力は杭変位に依存する。それに対し、過剰間隙水圧比が0.9程度より高くなると、地盤反力に占める弾性力の割合が急激に低下して50%以下になる。さらに液状化が進行し、過剰間隙水圧比がほぼ1になると、地盤反力に占める弾性力の割合は数%程度になり、地盤反力は杭速度に依存することが分かる。

4.3 弾性力および粘性力の周波数依存性

弾性力の周波数依存性を検討するため、図-13に杭振動数と弾性力振幅の関係を示す。なお、杭変位、過剰間隙水圧の変動は弾性力に影響を及ぼすため、杭変位振幅が概ね一定(± 0.02 mm)かつ過剰間隙水圧比が概ね一定(± 0.01)の区間を用いた。弾性力の大きさは、加振ケースによって異なる。ただし、同じ加振ケースでは、地盤反力は振動数によらず概ね一定である。すなわち、過剰間隙水圧比が一定の条

図-13 弾性力の周波数依存性

図-14 粘性力の周波数依存性

図-15 粘性係数の周波数依存性

件では、弾性力の周波数依存性は小さい。なお、杭変位および弾性力が一定であるため、弾性係数も(1)式右辺第1項から振動数によらず一定と考えられる。

粘性力の周波数依存性を検討するため、図-14に杭振動数と粘性力振幅の関係を示す。なお、弾性力のケースと同様、杭変位および過剰間隙水圧比が概ね一定の区間を用いている。どの加振ケースも、粘性力は振動数によらず概ね一定であり、粘性力の周波数依存性は小さい。さらに検討を進めるために、図-15に杭振動数と粘性係数の関係を示す。どの加振ケースも、振動数が増加すると粘性係数が減少することが分かる。すなわち、杭変位振幅が一定で杭振動数が増加すると杭速度も増加するものの、粘性係数が減少したため、(1)式右辺第2項から粘性力は概ね一定になったと考えられる。以上のように、弾性力、粘性力ともに周波数依存性は認められなかった。ただし、本研究で検討した周波数帯は限られており、今後、さらに検討が必要と考えられる。

図-16 過剰間隙水圧比と弾性係数

図-17 過剰間隙水圧比と粘性係数

4.4 過剰間隙水圧比が弾性係数、粘性係数に及ぼす影響

過剰間隙水圧比が地盤反力の発生メカニズムに及ぼす影響を検討するため、図-16に過剰間隙水圧比と弾性係数の関係を示す。なお、杭変位の変動は弾性係数に影響を及ぼすため、どの加振ケースも、杭変位振幅0.28~0.32mmの範囲を対象にした。過剰間隙水圧の増加に伴って弾性係数が減少していることが分かる。低減係数 r_d を(4)式および(5)式とし、それぞれ実線および破線で図中に示す。

$$r_d = 1 - u/\sigma_v' \quad (4)$$

$$r_d = \sqrt{1 - u/\sigma_v'} \quad (5)$$

弾性係数と過剰間隙水圧比の関係は(4)式と概ね対応が良い。すなわち、弾性係数は概ね有効応力比 $(1 - u/\sigma_v')$ に比例することが分かる。

さらに検討を進めるため、図-17に過剰間隙水圧比と粘性係数の関係を示す。杭変位と杭振動数の変動が粘性係数に影響を及ぼすため、どの加振ケースも、杭変位は0.28~0.32mm、杭振動数は8.5~9.5Hzの範囲を対象にした。弾性係数のケースと同様に過剰間隙水圧の増加に伴い、粘性係数が減少していることが分かる。過剰間隙水圧比と粘性係数の関係は(5)式と概ね対応が良い。したがって、粘性係数は概ね有効応力比の平方根 $(1 - u/\sigma_v')^{0.5}$ に比例することが分かる。以上のように、過剰間隙水圧が上昇すると、弾性係数、粘性係数ともに低下する。ただし、粘性係数の低下率が弾性係数のそれに比べて小さいため、相対的に地盤反力に占める粘性力の割合が大きくなったと考えられる。

5. まとめ

過剰間隙水圧の消散過程において実大スケールの杭頭加振実験を

行い、得られた水平地盤反力を弾性力と粘性力に分離し、地盤反力に対する弾性力と粘性力の寄与を検討した。さらに、弾性力と粘性力の周波数依存性および過剰間隙水圧が弾性係数と粘性係数に及ぼす影響を検討し、以下の結果を得た。

(1) 過剰間隙水圧比が0.9程度より高くなると、地盤反力にしろめる弾性力の割合が急激に低下して50%以下になる。さらに液状化が進行し、過剰間隙水圧比がほぼ1になると、地盤反力にしろめる弾性力の割合は数%程度になり、地盤反力は相対速度に依存する。

(2) 杭変位振幅および過剰間隙水圧比が一定の場合、振動数が増加すると粘性係数は減少し、粘性力は周波数によらずほぼ一定になる。一方、弾性係数および弾性力の周波数依存性は小さい。

(3) 過剰間隙水圧が増加すると、弾性係数は概ね有効応力比 $(1-u/\sigma_v')$ に比例して減少する。それに対し、粘性係数は概ね有効応力比の平方根 $(1-u/\sigma_v')^{0.5}$ に比例して減少する。過剰間隙水圧が上昇すると、粘性係数の低下率が弾性係数のそれに比べて小さいため、地盤反力にしろめる粘性力の割合が大きくなる。

なお、本研究の結果は、限られた実験条件のものであり、地盤の相対密度、杭変位、加振周波数等によって、水平地盤反力の発生メカニズムが本研究結果と異なる可能性がある。より定量的な評価をするためには、さらに実験データの蓄積が必要と考えられる。

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、東京瓦斯の共同で行ったものである。また、図作成において、信州大学大学院生 ZHAO XIN 君の協力を得た。関係者に記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Fujii, S., Iseimoto, N., Satou, Y., Kaneko, O., Funahara, H., Arai, T. and Tokimatsu, K.: Investigation and Analysis of a Pile Foundation Damaged by Liquefaction

during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake, No. 2, pp. 179-192, 1998. 9

- 2) 小林勝巳, 八幡夏恵子, 難波伸介, 仙頭紀明, 小林恒一, 白濱正芳, 林理: ポートアイランド内陸部における建築基礎杭の被害の解析, 第5回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.187-192, 1998. 5
- 3) Kagawa, T., L.M. Kraft: Lateral Pile Response during Earthquake, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.1713-1731, 1981.12
- 4) 水野二十一, 杉本三千雄, 飯場正紀, 森利弘, 平出努: 液状化過程における杭基礎の動的挙動, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, pp.1635-1640, 1998. 11
- 5) 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第553号, pp.57-64, 2002. 5
- 6) Miyamoto, Y., Miura, K., Scott, R. F. and Hushmand, B.: Pile Foundation Response in Liquefiable Soil Deposit during Strong Earthquakes, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp.49-63, 1992. 9
- 7) Sato, M., Shamoto, Y. and Zhang, J.-M.: Soil Pile-structure during Liquefaction on Centrifuge, Proc., 3rd Inter. Conf. on Rec. Adv. in Geotech. Earthq. Engrg & Soil Dyn., 1, pp. 135-142, 1995
- 8) 難波伸介, 富永晃司, 山本春行, 徐挺: 地震時有効応力低下地盤内の単杭に作用する水平地盤反力, 日本建築学会構造系論文報告集, 第551号, pp.81-86, 2002. 1
- 9) 吉澤陸博, 土屋富男, 福田秀樹, 田村修次, 船原英樹, 八幡夏恵子: R C 杭の大型せん断土槽実験による液状化地盤の地盤反力係数, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.43-48, 1998. 11
- 10) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No.596/Ⅲ-43, pp.189-208, 1998. 6
- 11) 田村修次, 小林健一: 大型せん断土槽を用いた杭頭加振実験による杭の水平地盤反力の評価, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1229-1235, 2002. 11

(2003年6月10日原稿受理, 2003年12月16日採用決定)