

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760415

研究課題名（和文） 地盤のせん断ひずみ履歴を考慮した杭の地盤反力バネ剛性評価手法の構築

研究課題名（英文） Investigation on subgrade reaction of pile with taking effects of cyclic shear strain of soil into account

研究代表者

鈴木 比呂子（SUZUKI HIROKO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60401527

研究成果の概要（和文）：

設計に反映できる杭の地盤反力バネ剛性評価指標の構築を目的とし、液化地盤における地盤のせん断ひずみ履歴が地盤反力変位関係に与える影響を検討し、以下を明らかにした。（1）液化後において杭と地盤の相対変位が増大すると有効応力が回復することにより、地盤反力のバネ剛性が大きくなる。地盤のせん断ひずみが蓄積されると有効応力の回復が見られなくなり、地盤剛性が低下する。その傾向は密度の低い地盤でより顕著である。（2）地盤のせん断応力の振幅の繰返しを損傷度と定義することで、間隙水圧の上昇過程から、間隙水圧が上昇した後の地盤反力のバネ剛性の変化を連続的に再現することができる可能性がある。（3）繰返し荷重により地盤剛性が低下すると、水平地盤反力だけでなく周面摩擦力も小さくなることから、繰返し荷重が作用する際は、水平荷重だけでなく鉛直荷重の釣り合いも含めた十分な検討が必要と考えられる。

研究成果の概要（英文）：

To propose guideline of scaling factors for subgrade reaction of pile in liquefied ground, effects of cyclic shear strain of soil on subgrade reaction of pile are investigated. The following conclusions may be made: 1) With increasing the relative displacement between piles and soil, the subgrade reaction increases due to recovery of effective stress. With cyclic shear strain of soil, the recovery of effective stress is insignificant and then the subgrade reaction decreases. The decrease in subgrade reaction due to cyclic shear strain is more significant in loose soil than in dense soil; 2) The scaling factor for subgrade reaction might be defined by cyclic number and amplitude of shear stress. The estimated subgrade reaction is in good agreement with the observed one both before and after liquefaction; 3) A decrease in subgrade reaction induces a decrease in shaft friction of piles. This suggests that it is important to consider the equilibrium of vertical load as well as that of horizontal load.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			0
年度			0
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：基礎構造 杭基礎、地盤剛性、繰返し履歴、液状化

1. 研究開始当初の背景

現在の日本では、強震記録観測網が高密度に整備されており、地震時に観測された強震記録から、有益な情報を得ることができる。それらの記録およびその分析から、大地震時の繰返しせん断ひずみによる地盤のせん断剛性低下、および、その非線形挙動が指摘されている。このような地盤剛性の変化は地盤の上に位置する構造物等の地震時の応答、被害にも多大な影響を及ぼすと考えられる。構造物が杭で支持される場合、地盤剛性の変化は、地盤-杭-構造物連成系の応答だけでなく、地盤から杭に作用する荷重にも影響を与える可能性がある。

地震時の杭応力を算定する簡便法として、杭を弾性支承梁とし、地盤から杭へ作用する荷重を地盤と杭を結んだバネを介して与える手法が用いられている。この際、地盤の局所的非線形性は、地盤と杭の相対変位に応じて定義される。また、液状化により地盤剛性が低下する場合は、局所的な非線形性に加え、バネ剛性に低減係数を乗じることで、大局的に地盤の剛性低下を考慮することが多い。しかし、乾燥地盤や、過剰間隙水圧比が完全に1に達しない非液状化地盤では、上記のような大局的非線形性が考慮されることは少ない。また、液状化地盤における杭の地盤バネにおいては、建築基礎構造設計指針等では、N値に応じた低減係数を乗じることが示されている。しかし、同程度のN値（地盤密度）の地盤であっても、地盤のせん断ひずみの履歴、増加によって、ダイレイタンスにより剛性が回復する場合、側方流動地盤に代表されるように剛性が著しく低下する場合などが想定される。そのため、設計者の判断に委ねられる点が多く、低減係数の統一的な指標の構築が求められている。

2. 研究の目的

杭応力算定の簡便手法で用いられる地盤と杭をつなぐバネの剛性は、液状化・側方流動地盤においては、間隙水圧の上昇にともなう地盤の剛性低下を考慮するため、バネ剛性に低減係数を乗じるなど、大局的非線形性が考慮されている。しかし、低減係数の設定は設計者に委ねられる。地盤の剛性の変化は、繰返しせん断ひずみの履歴に起因すると考えられることから、これらの値に着目することで、液状化・側方流動地盤、さらには非液

状化地盤における杭の地盤反力バネ低減係数を評価できる可能性があると考えられる。しかし、このような観点で、杭の地盤バネ（地盤剛性）に着目し、整理した研究例はない。

本研究は、杭の地盤バネ定数と地盤のせん断ひずみ履歴・増大にともなう剛性変化の関係を明らかにし、設計に取り込める指標を確立するものである。近年の建物の高層化にともなう、杭基礎構造物が増加する中で、地盤からの荷重を的確に評価するための資料は重要であり、杭基礎の効率的な耐震設計のための有用性は極めて高いと考えられる。

3. 研究の方法

杭の地盤バネ定数と地盤のせん断ひずみ履歴・増大にともなう剛性（地盤反力変位関係）変化を明らかにするために、以下の項目にそって研究を推進した。

(1) 地震における杭基礎被害事例の精査
過去の地震における杭基礎構造物の被害事例の資料を収集する。また、被害事例をもとに、杭応力算定の簡便手法である応答変位法を用いて杭の応力、変形の算定を行い、現状の指針等における問題点を精査する。

(2) せん断ひずみ履歴が杭の水平地盤反力変位関係に与える影響の検討

地盤-杭-構造物系振動台実験結果より、地盤のせん断ひずみを算出し、その履歴が、地盤の過剰間隙水圧、杭の水平地盤反力変位関係に与える影響を評価する。さらに、せん断ひずみ履歴から、地盤反力の低減係数を算定する手法を検討する。

(3) 大ひずみの繰返しが杭の水平地盤反力変位関係に与える影響の検討

側方流動地盤における杭基礎振動台実験結果より、大ひずみが生じる時の杭の水平地盤反力変位関係、地盤の過剰間隙水圧の変化を評価する。また、(2)で検討した地盤反力の低減係数の算定手法を大ひずみが生じる場合にも拡張し、精査を行う。

(4) 杭の水平地盤反力低減係数の評価手法の構築と応答変位法への適用

(2)(3)の成果を統合し、杭の地盤バネ評価指標を構築し、応答変位法に組み込む。振動台実験結果をシミュレーションすることで、本手法の妥当性の検証を行う。

(5) 水平および鉛直の繰返し荷重を受ける杭に作用する地盤反力および周面摩擦力の検討

2011年の東北地方太平洋沖地震では、津波の被害が甚大であった三陸地方沿岸で、杭基礎が引き抜けた状態で建物が転倒した例が報告された。水平だけでなく、鉛直の繰返し履歴が杭基礎被害に影響を及ぼすと考えられることから、水平、鉛直方向の外力を同時に受ける場合の杭の水平地盤反力、周面摩擦力の特性について検討する。

4. 研究成果

地震時における地盤反力のバネ剛性低減係数と地盤の繰返しせん断履歴にともなう剛性の変化の関係を明らかにし、設計に取り込める指標を構築するため、以下を示した。

(1) 周辺地盤が激しく液状化した場合の地盤剛性について検証するために、2007年新潟県中越沖地震時に液状化による被害を受けた杭基礎の事例をもとに、簡便法を用いた杭応力の算定を行った(例、図1)。パラメータスタディとして、地盤の剛性を変化させて杭の応力を算定し、被害の傾向と比較した。



図1 杭基礎被害により生じた建物の相対変位および対策工事の様子

(2) 液状化地盤における杭基礎構造物モデルを用いた振動台実験より、地盤のせん断ひずみを算出し、杭に作用する地盤剛性、杭の相対変位との関係を整理した。その結果、液状化後において相対変位が増大すると有効応力が回復することにより、地盤剛性が大きくなること、地盤のせん断ひずみが蓄積されると地盤剛性が低下し、その傾向は密度の低い地盤でより顕著であることを示した。これらの変化を評価するため、せん断ひずみの振幅の大きさと繰返し回数をを用いた指標を作成し、液状化過程における地盤剛性の評価を試みた。

指標に基づき算定した地盤反力は、実験で計測された値を概ね再現できた。

(3) (2)に用いたせん断ひずみは、間隙水圧上昇後では、上昇前に比べて著しく増大するため、間隙水圧上昇前と上昇後を同一の指標で評価することができなかった。そこで、間隙水圧の蓄積を検討する際に用いられる累積損傷度の考え方に習い、せん断応力を算出し、せん断応力の繰返し回数で地盤剛性低下の評価を試みた。実験では地盤のせん断応力を直接計測することが難しいため、地盤の加速度からせん断応力を算出した。せん断応力の振幅の繰返しを損傷度と定義し、損傷度が大きくなると、地盤の剛性が低下するものとした。なお、損傷度に応じて、無次元化相対変位と剛性の低減が表せ、また、その密度によっても異なる。せん断応力の繰返しとして定義することで、間隙水圧の上昇過程から間隙水圧が上昇した後、液状化に至った後に剛性が低下するまで、変化する地盤反力係数を連続的に再現することができた(図2)。

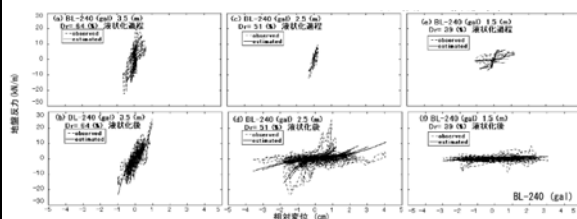


図2 地盤反力変位関係の算定値と実験値の比較

(4) 提案した指標を用いて簡便法による杭応力の算定を試みた。液状化後の繰返し履歴により地盤剛性が低下することで、構造物慣性力が主体的に作用する場合は、地盤からの抵抗が小さくなるため杭応力は大きく、地盤変位が主体的に作用する場合は、地盤からの加力が小さくなるため杭応力は小さくなる傾向が見られる。提案したモデルにおいても、その傾向が再現できることを確認できた(図3)。また、側方流動地盤など、地盤の変形が進み、地盤剛性が著しく低下するような場合においても、統一的に評価することができた。

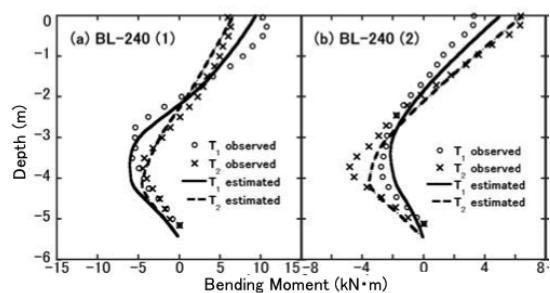


図3 杭の曲げモーメント分布

(5) 杭基礎構造物が繰返し載荷を受けると、せん断ひずみの履歴にともなう水平地盤反力の低下だけでなく、杭表面に作用する周面摩擦にも影響を及ぼすことが予想される。そこで、地盤-杭-構造物系の振動台実験より、杭に作用する水平地盤反力と周面摩擦の関係を検討した。その結果、次のことを示した。①群杭における水平荷重は、前方杭で大きく、後方杭で小さくなる。水平荷重分担の差は、杭と地盤の相対変位に影響を受け、相対変位が大きくなると群杭における分担の差が大きくなる。②前方杭と後方杭の水平地盤反力に差が生じると、押し込み杭、引抜き杭での周面摩擦力に違いが生じる。前方杭となる時、水平地盤反力、周面摩擦力は大きくなるのに対し、後方杭となる時、水平地盤反力、周面摩擦力は小さくなる(図4)。このことは、周面摩擦力は地盤のせん断変形によって生じるが、その特性が水平方向の拘束に影響を受けていることを示唆している。一方、杭と地盤の相対変位が小さく、群杭効果が顕著でない場合は、前方杭、後方杭となった時の周面摩擦力に顕著な差は見られなかった。③②より、繰返し載荷によって地盤剛性が低下すると、水平地盤反力だけでなく、周面摩擦力も小さくなることが推察される。このことから、繰返し荷重が作用する際は、水平荷重だけでなく、鉛直荷重の釣り合いも含めた十分な検討が必要と考えられる。

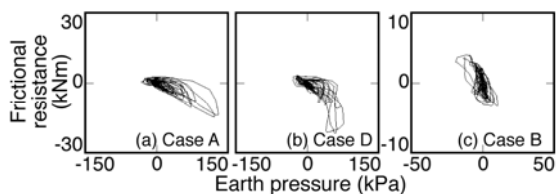


図4 杭に作用する地盤反力と周面摩擦

(6) 鉛直繰返し載荷が杭の支持力特性に与える影響を検討し、次のことを示した。①正負交番載荷では、載荷変位振幅が杭径の10%程度以上になると、引抜き時の抵抗力が低下するのに対し、押し込み時の支持力が増加する。これは、繰返しにより周面摩擦力は押し込み、引き込み時に低下するが、先端抵抗力が押し込み時に増加するためである。②杭の周面摩擦力は繰返しの影響により押し込み側で単調載荷時の5割程度、引抜き側で2割程度まで低減する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

①時松孝次, 稲村溪, 鈴木比呂子, 和田昌敏, 眞野 英之: 正負交番鉛直荷重が直杭および羽根付杭の鉛直支持力・引抜き抵抗力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 681, 1683-1689, 2012.

<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.77.1683>

[学会発表] (計10件)

①鈴木比呂子, 時松孝次: 群杭の水平および鉛直荷重の分担に影響を及ぼす要因の検討, 2013年度日本建築学会大会, 2013.8.31, 北海道大学(北海道)(発表予定).

②Hiroko Suzuki, Kei Inamura, Kohji Tokimatsu, Masatoshi Wada and Hideyuki Mano: Estimation of Bearing Capacity and Pull-out Resistance of a Pile with or without a Wing Plate in Alternately Cyclic Loading based on Centrifugal Model Tests, Proc. of 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013.3.2, Tokyo Institute of Technology (Tokyo).

③稲村溪, 鈴木比呂子, 時松孝次: 繰返しせん断による飽和地盤の剛性低下を評価した地盤反力の推定, 2011年度日本建築学会大会, 2011.8.25, 早稲田大学(東京都).

④稲村溪, 鈴木比呂子, 時松孝次: 液状化地盤の剛性低下が杭の応力に与える影響, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.18, 愛媛大学(愛媛県).

⑤渡辺幸大, 鈴木比呂子, 時松孝次: 2007年新潟県中越沖地震における杭基礎構造物の被害, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.18, 愛媛大学(愛媛県).

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 比呂子 (SUZUKI HIROKO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 60401527