

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760417
 研究課題名（和文） 液状化・側方流動地盤における非線形挙動時の
 杭の変形・破壊モードの解明
 研究課題名（英文） Deformation and failure mode of piles under non-linear condition
 during liquefaction and laterally spreading
 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：

地盤-杭-構造物系振動台実験結果に基づき、地震時の異なる条件下で、杭の曲げモーメント、せん断力、軸力に影響を及ぼす要因を検討した。また、液状化・側方流動時を含む非線形挙動時の地盤変位の増大が杭に作用する荷重に与える影響を評価し、杭応力再現のための数値解析を実施するとともに、地盤の大変形時における杭の形状の違いによる変形・破壊モードの違いを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	240,000	3,640,000

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：地震，液状化，側方流動，杭基礎，耐震設計，破壊

1. 研究開始当初の背景

地震被害調査およびその後の解析等より、地震時の地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭基礎被害に大きな影響を与える場合があることが知られている。特に、地盤の液状化が生じると、地盤変形の増大による加力側の荷重の増加だけでなく、地盤の剛性が低下することによる杭の拘束状態の変化により、杭の曲げモーメント、せん断力、軸力の増大が

生じる。液状化地盤における杭の曲げモーメント、せん断力については従来から議論されてきているものの、軸力は見過ごされがちであった。軸力の増大は杭の座屈を誘発させる可能性もあり、その変形・破壊モードに大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし、杭にとってどの段階がもっとも厳しくなるかは地盤条件、荷重条件、入力条件、さらに杭の剛性や配置などによって変化する構造物慣性力と地盤変位の杭応力増大への寄与度に

よって異なり、また、それらの条件の組み合わせによって破壊モードが異なる可能性がある。

上記に加え、液状化・側方流動地盤では、地盤の大変形が生じ、地盤から杭に作用する荷重をどのように評価するかが重要である。地盤から杭に作用する荷重は、変位に依存するバネ反力、速度に依存する粘着力、または極限土圧とする考え方があり、また、杭周辺地盤の間隙水圧の変動、地盤のせん断ひずみの増大などにより、地盤の剛性は変化することから、既往の水平地盤反力変位関係のモデルでは統一的に説明できない可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、液状化・側方流動地盤で杭に作用する外力を適切に評価し、杭の曲げモーメント、せん断力、軸力、および変形・破壊モードを評価する手法を構築するために、以下の項目を明らかにすることを目的としている。

- (1) 地震時の異なる条件下で、杭の曲げモーメント、せん断力、軸力に影響を及ぼす要因を明らかにする。
- (2) 液状化地盤、側方流動地盤における液状化の進行・繰り返しの変形・側方流動の増大にともなう杭の水平地盤反力の変化が杭の曲げモーメント、せん断力、軸力に与える影響を評価する。
- (2) 液状化地盤・側方流動地盤における杭の変形・崩壊モードに影響を及ぼす要因を明らかにする。また、杭の破壊モード評価手法構築のための資料を蓄積する。

3. 研究の方法

地盤-杭-構造物系モデルの遠心載荷実験を実施する。遠心載荷装置では試験体に遠心力を作用させることで相似則を満足でき、また大型振動台実験と比較して小規模であることから、多くのパラメータを変化させて実験を行うことが可能である。一方、過去に実施した大型振動台実験は実験のパラメータは遠心実験と比較して少ないものの、計測が密に行えるため液状化時、側方流動時の杭周辺地盤の応力状態を詳細に検討することができる。また、杭にも多数の歪みゲージ、土圧計、水圧計を設置でき、杭に作用する荷重と周辺地盤の応力状態の関係を明らかにすることができる。このように詳細なデータが得られている実大大型実験結果と新たに実施

する遠心実験結果を比較することにより、液状化・側方流動地盤における杭の崩壊メカニズムおよび崩壊メカニズムに影響を及ぼす要因を明らかにする。以上の成果をもとに、杭の破壊モードを算定する評価手法を構築する。したがって、以下の手順で研究を推進する。

(1) 水平地盤における杭-構造物系モデルの遠心載荷実験の実施

水平地盤において杭に作用する外力、杭の変形・崩壊モードに影響を及ぼす要因を検討するため、入力地震動、入力加速度、液状化発生の有無、基礎根入れ部の有無、上部構造物の有無、上部構造物の固有周期をパラメータとした地盤-杭-構造物系振動台実験を実施する。実験は実大の1/30スケールとし、土槽内に地盤-杭-構造物モデルを設置する。また、実験の相似則を満足させるため間隙流体にはシリコンオイル (30cst) を用い、30gの遠心場で行う。

(2) 水平地盤における杭に作用する地盤外力の評価

遠心載荷実験結果および、大型振動台実験結果より、入力地震動、入力加速度、地盤密度、液状化発生の有無、杭剛性、杭の配置、基礎根入れ部の有無、上部構造物の有無・固有周期などの異なる条件下で、杭の曲げモーメント、せん断力、軸力に影響を及ぼす要因を明らかにする。また、群杭の場合は、その群杭内の応力分担を明らかにし、破壊時の変形モードを検討する。

(3) 側方流動地盤における杭-構造物系モデルの遠心載荷実験の実施

杭の強度、杭の配置、基礎根入れ幅をパラメータとした地盤-杭-構造物系振動台実験を実施する。実験は実大の1/30スケールとし、30gの遠心場で行う。側方流動を発生させるため、土槽内に矢板モデルを作成し、矢板背後の地盤に杭-構造物モデルを設置する。

(4) 側方流動地盤における杭に作用する地盤外力の評価

遠心載荷実験結果および、大型振動台実験結果より、液状化直後および側方流動が著しく進行した後の地盤反力と地盤密度、杭周辺の間隙水圧変動および地盤の歪み度との関係を評価することで、側方流動の進行にともなう地盤反力の変化を把握する。また、地盤の小変形時から大変形時に至るまでの地盤反力の変化を把握し、その発生メカニズムを明らかにする。

(5) 評価手法のためのデータ蓄積

(1) - (4) の成果をもとに、液状化地

盤・側方流動地盤における杭の水平地盤反力（地盤変形）と構造物慣性力の作用が杭の曲げモーメント、せん断力、軸力の変化に与える影響を検討する。また、杭が崩壊に至るまでの曲げモーメント、せん断力、軸力の変化を評価し、外力の条件による杭の破壊モードの違いを明らかにする。さらに、破壊モード評価手法を構築するための資料を蓄積する。

4. 研究成果

液状化・側方流動地盤における杭の変形・破壊モードを解明するために、遠心実験結果、大型振動台実験結果をもとに研究を推進し、以下の結論を得た。

(1) 杭応力に影響を及ぼす要因の抽出

入力地震動の固有周期によって地盤変位の増大が異なる。すなわち、入力地震動に短周期成分が多く含まれ、その卓越周期が地盤の固有周期より短い場合は、乾燥地盤だけでなく、飽和地盤においても地盤変位は小さくなる。一方、入力地震動に長周期成分が多く含まれ、その卓越周期が地盤の固有周期より長い場合は、地盤変位が大きくなり、特に飽和地盤で液状化が生じると地盤変位の増大は著しくなる。

上記の結果、短周期成分が卓越する入力地震動の場合は、杭の応力の増大に地盤変位が与える影響は小さくなる。一方、長周期成分が卓越する入力地震動の場合は、地盤変位、地盤変位の増大によって生じる土圧が杭の曲げ応力、せん断応力、軸応力に与える影響を考慮する必要がある。

杭に作用する地盤変位、構造物慣性力、土圧の作用の組み合わせは、液状化発生の有無によらず入力地震動卓越周期、地盤と上部構造物の固有周期の関係で整理できる。また、それらの作用の組み合わせにより、非液状化地盤においても杭頭以外の箇所でも最大値が発生する可能性がある。

非液状化地盤においては、杭の軸力は深度方向に小さくなる傾向がある。これは、杭表面に作用する摩擦が影響していると考えられる。一方、液状化地盤では、軸力は深度方向にほぼ一定であり、大きな軸力が深部まで伝達される。このことから、液状化地盤では、杭-構造物系のつり合いが非液状化地盤の場合と大きく異なり、上部構造物慣性力の変動によって生じる軸力も大きくなることを確認できる（図1）。

(2) 地盤変位の増大が杭の変形・破壊モードに与える影響

乾燥地盤においても、入力繰り返しに

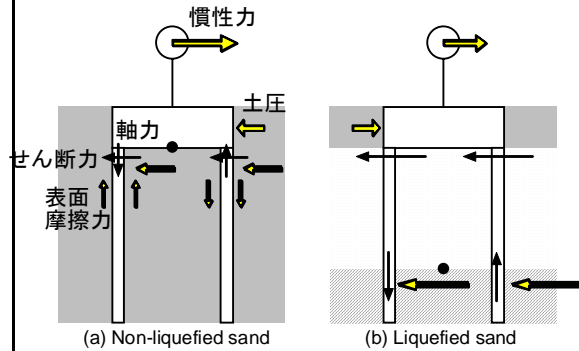
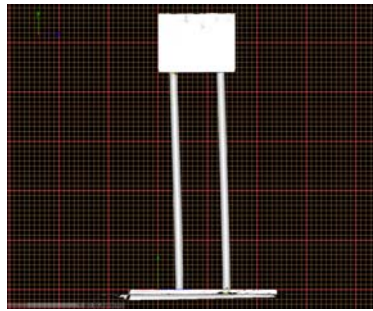


図1 杭-構造物系に作用する力の釣り合い

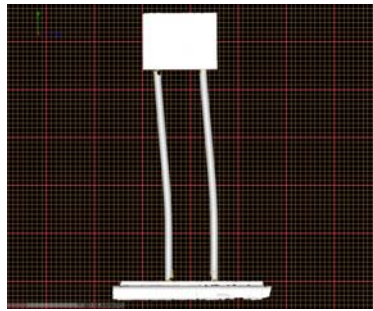
もない地盤のひずみが大きくなると、地盤の固有周期が長周期化するとともに地盤反力（地盤剛性）は低下する。このことは、地盤反力モデル化には、液状化進行の指標となる過剰間隙水圧の上昇と地盤歪みの増大の両方を考慮する必要があることを示唆している。また、地盤の固有周期の変化から算定される地盤剛性の低下と地盤反力の低下を比較すると、地盤反力の低減係数は剛性低下の2倍程度であった。

側方流動地盤において地盤変形の増大にともない、杭の曲げひずみは大きくなる。しかし、高剛性杭の曲げひずみは最大値を取った後に小さくなるのに対し、低剛性杭ではそのような傾向は見られなかった。これは、地盤の側方流動進行過程において、地盤変形の増大、変形の繰り返し等により地盤反力係数、および地盤反力極限值が低下し、この影響が高剛性杭で顕著になるためと考えられる。すなわち、高剛性杭は、地盤に抵抗するため地盤との相対変位が大きく、降伏に至る前に地盤反力が極限值に達する。一方、低剛性杭は、地盤に追従するため相対変位が小さく、極限地盤反力に達する前に降伏に至ると考えられる。

同じ剛性を持つ高強度杭、低強度杭の挙動は、弾性範囲内であれば、大きな差は見られなかった。しかし、地盤変形が増大すると、高強度杭は杭頭でのみ降伏したのに対し、低強度杭は杭頭および液状化層下端で降伏し、その結果、両者は異なる変形モードを示した（図2）。また、高強度杭は陸側杭より海側杭で歪みが大きくなったのに対し、低強度杭は陸側杭、海側杭のひずみは同レベルだった。これは、高強度杭は、相対変位が大きくなり、地盤のダイレイタンス特性に群杭の海側と陸側で差が生じるのに対し、低強度杭は、2点ヒンジができたことで地盤に追従して変形し、相対変位が小さくなるため、杭の両側地盤でのダイレイタンス特性に差が生じなかったと考えられる。



(a) 高強度杭



(b) 低強度杭

図2 杭の変形モード

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 5 件)

- ① Hiroko Suzuki, Kohji Tokimatsu and Ross W. Boulanger: Effects of ground displacement on piles with different strength during laterally spreading in centrifuge test Proc. of International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 2009, (accepted).
- ② Hiroko Suzuki and Kohji Tokimatsu: Effects of ground displacement on piles with different strength during laterally spreading in centrifuge test, Proc. of Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 549-554, 2009, 査読なし.
- ③ Hiroko Suzuki and Kohji Tokimatsu: Effects of shear strain increase on p-y spring for pile foundations in non-liquefied ground, Proc. of Fifth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 347-351, 2008, 査読なし.
- ④ Hiroko Suzuki and Kohji Tokimatsu: Horizontal load distribution within

pile group in liquefied ground, Proc. of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 8pp., 2007, 査読なし.

- ⑤ Kohji Tokimatsu, Hiroko Suzuki, Masayoshi Sato and Kentao Tabata: Soil-pile-structure interaction during multi-dimensional shaking through physical model tests using E-Defense facility, Proc. of Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 841-848, 2007, 査読なし.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 杉本良介, 藪和健太郎, 鈴木比呂子, 時松孝次: 入力地震動が地盤と杭基礎構造物の動的相互作用に与える影響, 2008年度日本建築学会大会, 2008.9.20, 広島.
- ② 杉本良介, 時松孝次, 鈴木比呂子, 藪和健太郎: 入力地震動が地盤-杭基礎構造物相互作用に与える影響の実験的検討, 第43回地盤工学研究発表会, 2008.7.10, 広島.
- ③ 杉本良介, 鈴木比呂子, 時松孝次: 入力地震動が乾燥及び液化地盤と杭・構造物の動的相互作用に与える影響, 日本建築学会2007年度大会, 2007.8.31, 福岡.
- ④ 鈴木比呂子, 時松孝次, 奥村豪悠: 乾燥地盤および飽和地盤における群杭内の水平荷重分布に関する検討, 第42回地盤工学研究発表会, 2007.7.5, 名古屋.
- ⑤ 時松孝次, 鈴木比呂子, 杉本良介, 浜本聖: 側方流動地盤遠心載荷実験における杭の耐力がその変形・破壊モードに与える影響, 第42回地盤工学研究発表会. 2007.7.5, 名古屋.
- ⑥ 杉本良介, 鈴木比呂子, 時松孝次: 入力地震動が液化過程での地盤と杭・構造物の動的相互作用に与える影響, 第42回地盤工学研究発表会. 2007.7.4, 名古屋.

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

(2) 研究分担者

—

(3) 連携研究者

—