

遠心載荷実験に基づく液状化地盤における杭基礎の損傷評価

遠心実験 杭基礎 損傷

正会員 ○肥田 剛典* 同 田村 修次**
同 栗木 周***

1. はじめに

地震時における液状化地盤では、杭基礎が破壊する可能性がある。杭の健全性評価には多大な労力と費用が必要となる場合もあるため、簡便な杭の損傷評価手法が望まれている。そこで本研究では、液状化地盤—杭—構造物系の遠心載荷実験を行い、杭の損傷が構造物の地震時応答に及ぼす影響を検討する。さらに、平均相互情報量を用いた杭の損傷評価手法について検討する。

2. 実験概要

実験は京都大学防災研究所の遠心載荷装置を用いて50g場で行った。実験模型を図1に、杭模型を図2に示す。杭は直径8mmのジュラルミン製の棒である。Case 1は杭が損傷しない(以下、健全杭)場合を想定し、Case 2は杭頭と杭先端の損傷を想定し(以下、損傷杭)、杭頭と杭先端の直径を5mmとした。健全杭および損傷杭における杭の曲率と曲げモーメントの関係を、実大スケールに換算して図3に示す。損傷杭は、杭径5mmの部分のものを示している。健全杭は曲率0.02付近まで線形である。損傷杭は曲率が0.05程度を超えると塑性化する。健全杭の曲げ剛性は $1.38 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ 、損傷杭の初期曲げ剛性は $0.23 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ である。基礎部を4本の杭で支持し、杭頭と杭先端は剛接合とした。基礎部の質量は0.4kg、上部構造物の質量は2.0kgである。

上部構造物を板ばねで支持した。上部構造物の基礎固定時の固有周期は0.4秒(実大スケール)である。地盤は豊浦砂を用い、空中落下法で相対密度を40%として作成した。これを脱気槽に入れて脱気し、水の50倍の粘度を持つメトロゾ溶液を土槽下部から注入した。杭にひずみゲージを貼付した。入力最大加速度を 800 cm/s^2 程度(実大スケール)に調節した臨海波を用いた。実験結果は全て実大スケールに換算して示す。

3. 実験結果

健全杭、損傷杭におけるGL-6.7mの過剰間隙水圧比、上部構造物加速度、地表面加速度、杭頭曲率、杭先端曲率および入力加速度の時刻歴を図4、5に示す。両ケースとも

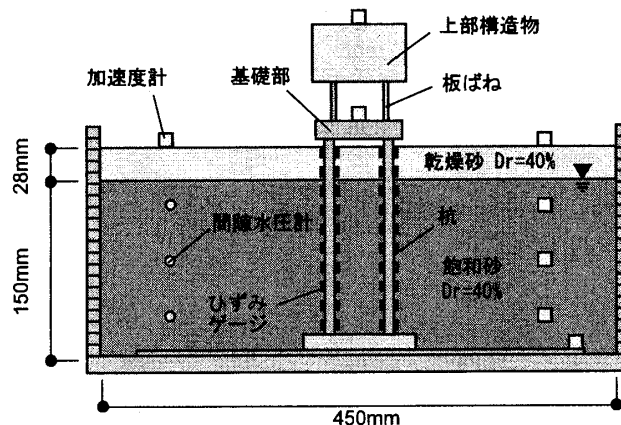


図1 実験模型

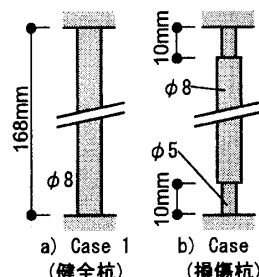


図2 杭模型

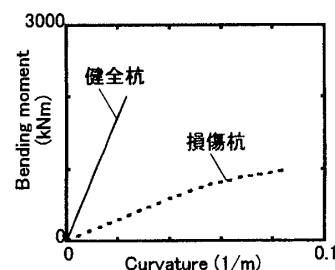


図3 杭のM-φ関係

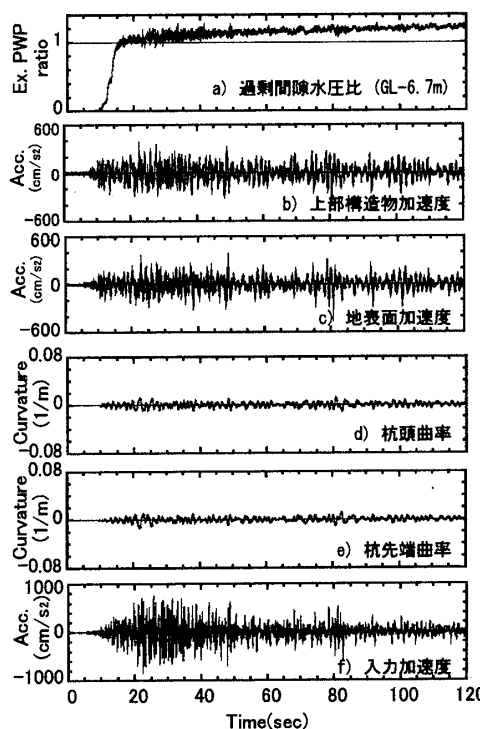


図4 地盤、杭、上部構造物の応答 (健全杭)

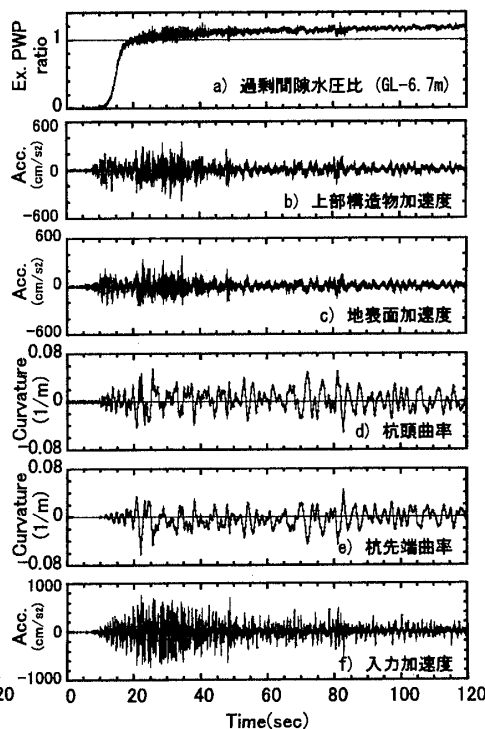


図5 地盤、杭、上部構造物の応答 (損傷杭)

10秒付近から間隙水圧が上昇し、15秒付近で液状化した。両ケースの上部構造物加速度および地表面加速度の振幅は同程度である。損傷杭の杭頭および杭先端の曲率は、健全杭のそれらより大きい。損傷杭のケースにおいて、20秒付近で杭頭・杭先端とも曲率が0.05に達し、塑性化したと考えられる。

上部構造物加速度と地表面加速度のフーリエスペクトル比を図6に示す。両ケースとも、0.06秒付近でピークとなっており、杭の損傷に起因する差は認められない。

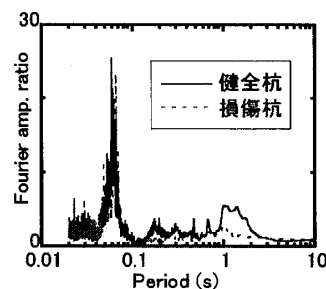


図6 上部構造物加速度と地表面加速度のフーリエスペクトル比

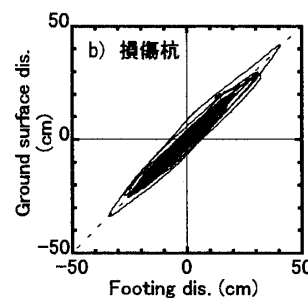
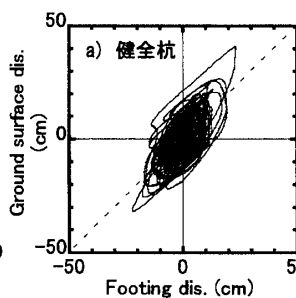


図7 基礎部変位と地表面変位の関係

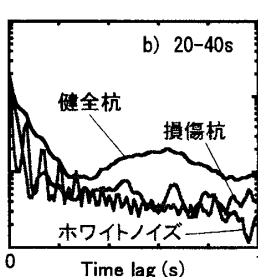
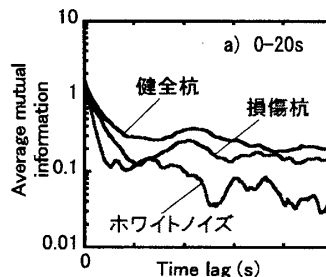


図8 遅れ時間と平均相互情報量の関係

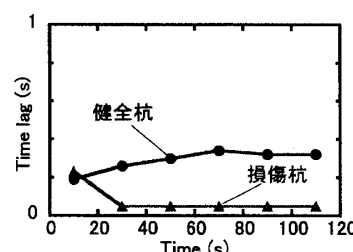


図9 平均相互情報量が最初に極小となる遅れ時間

基礎部変位と地表面変位の関係を図7に示す。健全杭では、地表面変位は基礎部変位より大きく、両者の間に位相差が生じている。これに対し、損傷杭では、地表面変位と基礎部変位の大きさは同程度で、ほぼ同位相となっている。これは、損傷杭の杭頭および杭先端の曲げ剛性が健全杭のそれらより低く、杭頭と杭先端が塑性化し、基礎部が地盤に追従して変位する傾向が強くなったためと考えられる。

4. 平均相互情報量を用いた杭の損傷評価

杭が損傷した場合の上部構造物は、健全な杭のそれに比べ、複雑な挙動を示す可能性がある。本研究では、上部構造物の挙動の複雑さを評価する指標として、上部構造物加速度の時間経過に伴う相関を、次式で表される平均相互情報量 $I(\tau)$ ¹⁾で検討した。

$$I(\tau) = - \sum_{x_i, x_{i+\tau}} P(x_i, x_{i+\tau}) \ln \left(\frac{P(x_i, x_{i+\tau})}{P(x_i)P(x_{i+\tau})} \right) \quad (1)$$

ここで、 x_i は i 秒における上部構造物加速度、 τ は遅れ時間、 $P(x_i)$ は x_i の確率密度関数、 $P(x_i, x_{i+\tau})$ は x_i と $x_{i+\tau}$ の同時確率密度関数である。確率密度関数は、加速度値の頻度分布から推定した。0秒から20秒および20秒から40秒における遅れ時間と平均相互情報量の関係を図8に示す。複雑な挙動を示す確率過程の例と比較するため、位相特性を疑似乱数としたホワイトノイズの平均相互情報量の算出結果も示す。0秒から20秒において、健全杭、損傷杭とも、0.2秒付近で最初に極小値となる。これに対し、ホワイトノイズでは、遅れ時間の増大に伴って急激に平均相互情報量が減少し、0.1秒付近で最初に極小値となる。20秒から40秒において、健全杭では0.3秒付近で極小値となるのに対し、損傷杭では遅れ時間の増大に伴って急激

に平均相互情報量が減少し、0.04秒付近で最初に極小値となる。損傷杭の遅れ時間と平均相互情報量の関係は、ホワイトノイズのそれと類似した傾向となっている。このことは、損傷杭の杭頭と杭先端が塑性化した20秒以降において、上部構造物が確率論的に挙動する傾向が強くなったことを示している。

さらに検討するため、20秒毎に平均相互情報量を算出し、各時間帯における平均相互情報量が最初に極小値となる遅れ時間を図9に示す。健全杭では、時間の経過とともに遅れ時間が若干増大するものの、急激な変化は認められない。これに対し、損傷杭では、0秒から20秒における遅れ時間は健全杭と同程度であるものの、杭頭および杭先端が塑性化する20秒以降、遅れ時間が極めて小さくなる。このことは、構造物加速度の平均相互情報量が最初に極小値となる遅れ時間は、杭の損傷を検出する指標となる可能性を示唆している。

5. まとめ

遠心載荷実験を行い、液状化地盤における杭の損傷が構造物の応答に及ぼす影響を検討した。健全杭では基礎部変位が地表面変位より小さくなったのに対し、損傷杭では基礎部変位が地表面変位と同程度となった。さらに、損傷杭における上部構造物加速度の平均相互情報量が最初に極小となる遅れ時間は、杭の塑性化後に急激に小さくなった。これから、液状化地盤において、構造物加速度の平均相互情報量を検討することで、杭の損傷を検出できる可能性がある。

参考文献

- 1) A. Fraser and H. L. Swinney: Independent coordinates for strange attractors from mutual information, Physical Review A, Vol. 33, No. 2, pp. 1134-1140, 1986. 2

* 東京理科大学
** 京都大学防災研究所
*** 京都大学大学院工学研究科

Tokyo University of Science
DPRI, Kyoto University
Kyoto University, Graduate School of Engineering