

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760459

研究課題名(和文) 液状化地盤における杭の損傷が長周期構造物の地震時挙動に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of Pile Damage on Seismic Response of Long-Period Structure During Soil Liquefaction

研究代表者

肥田 剛典 (Hida, Takenori)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：60598598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：液状化地盤-杭-免震構造物系の動的遠心载荷実験を行い、入力地震動特性と杭の損傷が免震構造物の応答に及ぼす影響を検討した。免震周期に近い長周期成分が卓越する地震動を入力した場合、損傷杭のケースの免震建物の応答は健全杭のケースより大きくなった。

次に、杭基礎の損傷評価について検討するため、上述の遠心力载荷実験により得られた加速度データに対して部分空間法に基づくシステム同定手法を適用し、系の固有モードを求めた。地盤の振動が卓越するモードにおいて、健全杭と損傷杭のケースの基礎部の振幅が異なったことから、この手法により杭の損傷を評価出来る可能性があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The dynamic centrifuge tests of base-isolated structure supported by pile foundations were performed to evaluate the effects of damage to the pile and input ground motion characteristics on the seismic response of base-isolated structure.

In the case where the long-period ground motion was input, the response of the seismic isolation building of the case of damaged pile was larger than the case of undamaged pile.

Next, in order to study about the damage detection of the pile foundation, the system identification method based on subspace approach was applied to the acceleration data obtained by the centrifuge tests. The eigenmodes of the system were evaluated. In the mode of vibration of the ground is dominant, the amplitude of the footing of the damaged pile case was larger than that of the undamaged pile case. Thus, there is a possibility that can evaluate the damage to the pile by investigating the eigenmodes evaluated by this method.

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造 材料

キーワード：液状化 免震構造物 長周期地震動 杭基礎 損傷 システム同定 部分空間法 ヘルスモニタリング

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震時には、関東地方の平野部で大規模な液状化現象が発生し、広範囲に渡って多くの建物が被害を受けた。

液状化地盤では、地盤の強制変形によって杭が損傷する可能性がある。杭が損傷した場合、基礎部が液状化地盤の挙動に追従して振動する傾向が強くなる。その結果、長周期成分の卓越した振動が構造物に入力され、免震構造物や超高層建物等の長周期構造物の応答が過大となる可能性がある。

この問題に対し、杭の損傷が免震構造物の地震時挙動に及ぼす影響を実験的に検討した例は極めて少ない。そこで本研究では、遠心力载荷装置を用いた動的模型実験を行い、液状化地盤における杭の損傷が免震構造物の地震時挙動と免震層の変形に及ぼす影響を検討する。さらに、杭の損傷を簡便に評価する手法についても検討する。

2. 研究の目的

高層建物や免震構造物等の長周期構造物では、杭の損傷に伴って長周期成分の卓越した振動が上部構造物に入力され、構造物の応答が過大となる可能性がある。この場合、免震構造物の擁壁への衝突や免震部材の損傷が危惧される他、杭の損傷に伴う基礎の不同沈下に起因して上部構造物が傾斜し、免震部材の性能を低下させる可能性もある。

また、超高層構造物では、長周期の振動によって建物応答が過大となり、構造的被害や家具の転倒等による人的被害が発生する可能性も考えられる。

これらの問題に対し、杭の損傷が長周期構造物の地震時挙動に及ぼす影響を実験的に検討した例は極めて少ない。

そこで本研究では、液状化地盤 - 杭 - 長周期構造物系の動的遠心载荷実験を行い、液状化地盤における杭の損傷が長周期構造物の地震時応答に及ぼす影響を検討する。これにより、長周期構造物の杭が損傷した場合の問題点を検討し、地震時における地盤の液状化に伴う長周期構造物の被害低減に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

実験は杭が損傷したケースと損傷しないケースについて行い、それぞれの構造物の応答を比較することで、杭の損傷に伴う杭 - 構造物系の応答の差異について検討する。

実験は、京都大学防災研究所所有の遠心力载荷装置を用いて行う。実験模型を図1に示す。試験体は杭の損傷の有無をパラメータとした。杭模型を図2に、杭の曲げモーメントと曲率の関係を図3に示す。また、実験ケースを表1に示す。入力波は臨海波を用い、前震、本震、余震を想定した加振を行う。杭の損傷を想定したケースでは、本震で杭を塑性化させる。本震における各ケースの構造物の

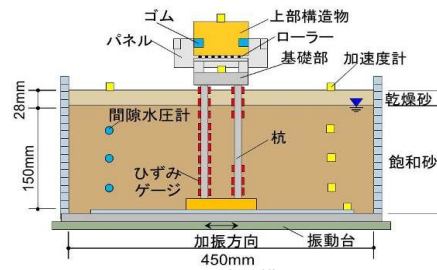


図1 実験模型

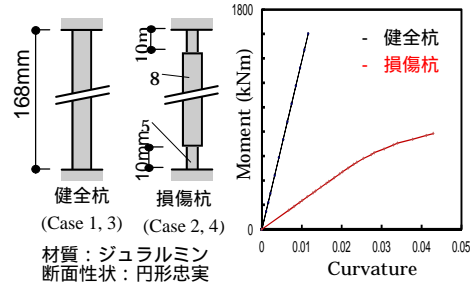


図2 杭模型

図3 杭のM-関係

表1 実験ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4
杭モデル	健全	損傷	健全	損傷
入力波	臨海波	臨海波	八戸波	八戸波

応答を比較することで、杭の損傷が長周期構造物の応答や免震層変位に及ぼす影響を検討する。

さらに、杭損傷の有無による構造物の応答の差異から、杭の損傷を評価する手法を検討する。杭が損傷した場合、基礎部が地盤に追従して振動する傾向が強くなり、健全な杭に比べ、地盤と基礎部の相対変位が小さくなることが予測される。これをふまえ、杭損傷の有無による免震構造物の挙動の差異を検討し、簡便な杭の損傷評価手法の構築を目指す。

4. 研究成果

基礎部、地表面および振動台加速度のフーリエスペクトルを図4に示す。臨海波入力時(Case 1, 2)の振動台加速度は0.6-1s付近で卓越し、八戸波入力時(Case 3, 4)のそれは0.3-0.6sおよび3s付近の振幅が大きい。両地震波入力時とも、周期3s程度から10sにおいて地盤増幅により地表面加速度の振幅は振動台加速度より大きくなった。

各入力波において、周期0.6-10sにおける

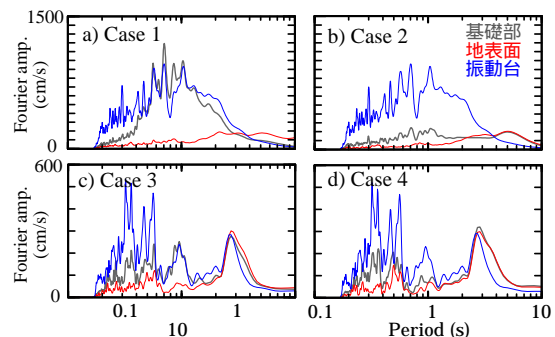


図4 加速度フーリエスペクトル

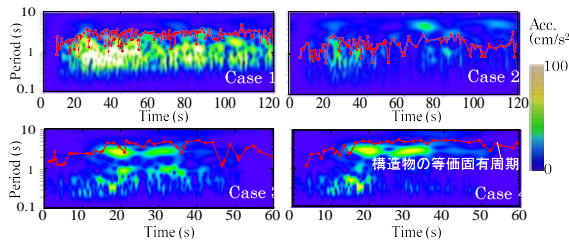


図5 基礎部加速度のウェーブレット変換と上部構造物の等価固有周期

健全杭モデル(Case 1, 3)の基礎部加速度の振幅は振動台加速度の振幅と同程度で、周期2-10sにおける損傷杭モデル(Case 2, 4)の基礎部加速度の振幅は地表面加速度の振幅と同程度である。健全杭モデルの基礎部は振動台と同様の挙動を示し、損傷杭モデルの基礎部は地表面付近と同様の挙動を示す。そのため、地盤増幅により地表面加速度の振幅が振動台加速度より大きくなる周期3s程度から10sにおいて、各地震波入力時における損傷杭モデルの基礎部加速度の振幅は健全杭モデルより大きい。

基礎部加速度のウェーブレット変換を図5に示す。図中には、上部構造物の復元力特性の割線剛性から求めた上部構造物の等価固有周期の経時変化も示した。臨海波入力時において、健全杭モデル(Case 1)の周期0.4-3sにおける基礎部加速度の振幅は損傷杭モデル(Case 2)より大きく、20s以降でCase 1の上部構造物の等価固有周期は4s程度に達する。Case 2の60-80sにおける周期6s付近の基礎部加速度の振幅はCase 1より大きい。この時間帯におけるCase 2の上部構造物の等価固有周期は2秒程度である。そのため、Case 2の免震層変位はCase 1より小さくなった。八戸波入力時の15s-35sにおいて、Case 3, 4の上部構造物の等価固有周期は4s程度となる。この時間帯におけるCase 4の基礎部加速度の振幅はCase 3より大きい。そのため、Case 4の免震層変位はCase 3より大きくなった。

次に、遠心力載荷実験に基づきシステム同定による杭基礎の損傷評価手法について検討した。振動台加速度を入力とし、地表面加速度、基礎部加速度、上部構造物加速度を出力としてシステム同定を行った。

同定された各次モードの固有振動数の経時変化を図6に示す。Case1では全ての時間帯で1.0~2.0Hz付近のモードが、60s~120sで0.2Hz~0.3Hzのモードが見られる。Case2では0~60sの時間帯では固有振動数が安定せず60s以降では1.0~2.0Hz付近および0.2~0.3Hz付近の固有振動数が認められる。

各振動数での代表的なモード形状を図7に示す。Case 1, Case 2とも、0.2 Hz 付近のモードは地盤の振動が卓越し、2 Hz 付近のモードは基礎部の振動が卓越している。2 Hz 付近のモードは健全杭と損傷杭で明瞭な差異は認められない。地盤の振動が卓越する0.2Hz 付近のモードにおいて、Case 1 (健全杭)での基礎部の振幅は地盤の1/2程度であ

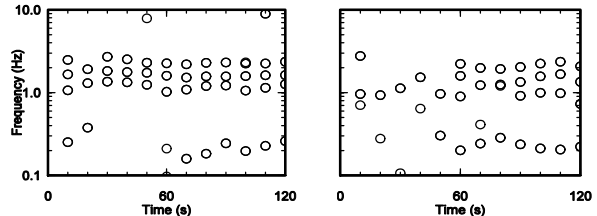


図6 固有振動数の経時変化(免震モデル)

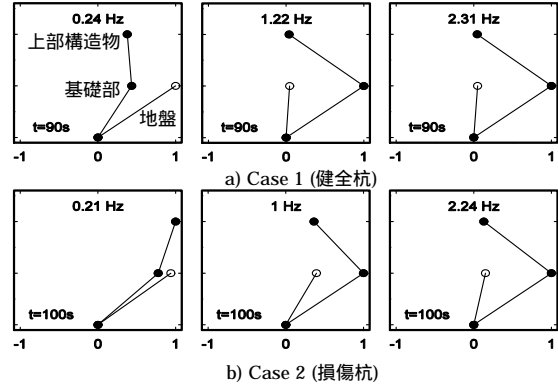


図7 固有モード(免震モデル)

るのに対し、Case 2 (損傷杭)における基礎部の振幅は地盤と同程度である。

以上のように、地盤の振動が卓越するモードにおいて健全杭のケースの基礎部の振幅は地盤より小さかったのに対し、損傷杭のケースの基礎部の振幅は地盤と同程度であった。これは杭が損傷して地盤の挙動に対する基礎部の抵抗が低下したためと考えられる。このことから、地盤-杭-構造物系の固有モードを検討することで、杭の損傷を評価できる可能性がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

肥田剛典, 永野正行: 部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第701号, 2014. 7 (採用決定)

〔学会発表〕(計8件)

Takenori HIDA, Shuji TAMURA, Masayuki NAGANO: Effects of Pile Damage and Input Motion Characteristics on Response of Base-isolated Structure Based on Centrifuge Tests, 13th World Conference on Seismic Isolation, Sendai, Japan, 2013. 9

肥田剛典, 永野正行, 佐藤利昭: 部分空間法に基づくシステム同定による建物の層剛性と減衰係数の推定精度に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 2014. 9 (掲載予定)

谷田貝淳, 吉田昂希, 肥田剛典, 田村修

次, 永野正行: 部分空間法によるシステム同定と有限要素法に基づく杭のヘルスマニタリングに関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 2014. 9 (掲載予定)

肥田剛典, 永野正行: 部分空間法を用いた建物の固有振動数と減衰定数の同定精度に関する基礎的検討 - N4SID 法と Ordinary MOESP 法の比較 -, 日本地震工学会第 10 回年次大会梗概集, pp. 287-288, 2013. 11

吉田昂希, 谷田貝淳, 肥田剛典, 田村修次, 永野正行: Penzien モデルに基づく遠心載荷実験のシミュレーション解析と建物種別による杭応力の違い, 日本地震工学会第 10 回年次大会梗概集, pp. 225-226, 2013. 11

谷田貝淳, 吉田 昂希, 肥田剛典, 田村修次, 永野正行: 液状化地盤における杭の損傷と波の振幅が免震構造物の応答に及ぼす影響, 日本地震工学会第 10 回年次大会梗概集, pp. 227-228, 2013. 11

吉田昂希, 谷田貝淳, 肥田剛典, 田村修次, 永野正行: 液状化地盤における杭の損傷が地震時応答性状に及ぼす影響 -その1 遠心実験の概要と応答変位法による検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造 , pp. 569-570, 2013. 8

谷田貝淳, 吉田昂希, 肥田剛典, 田村修次, 永野正行: 液状化地盤における杭の損傷が地震時応答性状に及ぼす影響 -その2 応答変位法による損傷杭の曲げ剛性の同定-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造 , pp. 571-572, 2013. 8

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

肥田 剛典 (HIDA, Takenori)

東京理科大学・理工学部建築学科・助教

研究者番号: 60598598