

センシング技術に基づく極大地震被災建物杭部材の健全度評価および継続使用可否判定支援システムの構築

Development of Health Monitoring Technique at a Pile Member under the Strongly Earthquake and Decision Support System on Re-occupancy of Earthquake-Affected Buildings

豊橋技術科学大学 助教 林和宏

1. はじめに

2011年の東日本大震災では、臨海地区を中心に首都圏広域で地盤液状化が発生した。液状化による建物被害は、地盤の鉛直支持力喪失に伴う直接基礎建物の沈下や、液状化層のせん断剛性喪失に伴う杭部材の過大変形・損傷が確認されている。この内、前者は目視による被害同定が容易であるのに対し、後者は被害部位が地中に存在するため検知が難しく、過去には20年近く被災建物が使用され続けた事例もある。

本研究では、都市部の社会的基盤を成す既存の大型建物で用いられている場所打ちの鉄筋コンクリート杭部材を対象とし、建物に配したセンサによる地震時観測を中核とするセンシング技術によって、地中の杭部材の健全性を即時判定する技術の開発をめざす。これは、地域復旧・復興の核となる既存の大型拠点施設等に対して、地震後の継続使用可否判断を支援することを目的とする。従って、本研究では既存建物の杭部材を評価対象とし、さらに杭体自体に新たなセンシングデバイスを取り付けない条件を課す点を特色とする。これは、デバイスの施工に掛かる費用と時間を押さえた簡便な評価技術の構築をめざすもので、提案システムの普及・展開を念頭に置いている。

本報告では、地上部センサの地震応答に基づく地中杭部材の健全度推定をめざし、地震時の両者の関連性解明に向けて実施した小型模型実験の成果を中心に述べる。

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。遠心力載荷実験は相似則によって、試験体に大きな加速度を付与することで、縮小模型から実大相当の地震応答性状が検証できる利点がある。

2.1 縮小杭模型

杭模型の概要を図1に示す。大断面の鉄筋コンクリート杭を模擬した杭模型は、杭径 $D = 25\text{mm}$ （実大スケールで1.25m）とし、断面は4本の鋼材主筋（径1.2mm，降伏応力427MPa）とモルタル（圧縮強度7.25MPa）から成る。また、せん断補強筋（径0.8mm）は15mmピッチのスパイラル筋とした。本論の杭模型は多数の主筋を4本の鋼棒に、コンクリートをモルタルに置換している。これは、径25mmの断面内に多数の主筋やせん断補強筋を配し、砂利を含むコンクリートを充填することが困難なためである。表1は本論の杭模型と、建築基礎構造設計例集¹⁾に記載のある実大の大径鉄筋コンクリート杭例題断面の比較を示す。杭模型は主筋比がやや例題断面より低いものの、帯筋比はほぼ等しく、概ね実大の大径鉄筋コンクリート杭を再現できている。

杭模型の変形性能把握のため、50G場における静的曲げ圧縮載荷試験を実施した。図2は、杭模型の静的載荷システムの概要を示す。載荷はその下端を反力治具に剛接合、上端はピン治具と鉛直

ローラー治具を介して水平荷重装置と接続する片持ち梁形式とした。杭模型の危険断面位置では、50G 場で作用軸力 N が 1,126N (降伏軸力比 $N/N_0 = 0.206$) となるよう治具の重さ等を調整した。危険断面から 200mm 上方には、水平方向にレーザー変位計を設置した。また、危険断面位置の杭模型表面にひずみゲージを添付し、荷重中の圧縮側縁と引張側縁の軸方向ひずみを計測した。

図 3 に、実大スケールに換算した曲げモーメント-変形角関係を示す。縦軸は曲げモーメント、横軸は変形角をとる。図中の点線は算定全塑性モーメントを示す。杭模型は算定全塑性モーメントを上回る曲げ耐力を発揮した後、劣化挙動に転じており、概ね実大 RC 杭の塑性変形挙動が模擬できている。

平面保持を仮定した杭模型断面の曲率増分解析では、曲げ耐力が算定全塑性モーメントの 95%に達する際の断面曲率が $2.60 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ (以後、全塑性モーメント発揮曲率 ϕ_u と称す) であった。図 3 中の●は、危険断面位置のひずみゲージ値で評価した杭模型の断面曲率が ϕ_u に達した点を示す。 ϕ_u 到達時の曲げ耐力が算定全塑性モーメントを上回っていることから、本報では当該状態において杭模型に塑性ヒンジが形成されたと評価する。

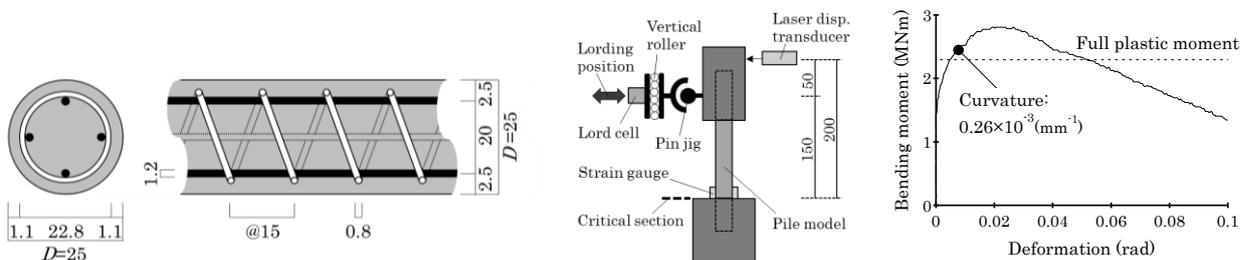


図 1 杭模型概要

図 2 杭模型の静的荷重システム

図 3 曲げモーメント-変形角関係

表 1 縮小杭模型と実大 RC 杭の比較

		Pile Model (Prototype scale)	Typical RC Pile ¹⁾
Diameter: D		25 mm (1,250 mm)	1,800 mm
Axial force	Strength: N_0	$5.46 \times 10^3 \text{N}$ ($1.37 \times 10^7 \text{N}$)	$6.12 \times 10^7 \text{N}$
	Act. : N	$1.13 \times 10^3 \text{N}$ ($2.83 \times 10^6 \text{N}$)	$1.05 \times 10^7 \text{N}$
	N/N_0	0.206	0.171
Main rebars	Rebar	4- ϕ 1.2 (4- ϕ 60)	45-D29
	Ratio	0.92%	1.13%
Hoops	Rebar	ϕ 0.8@15 (ϕ 40@750)	D13@150
	Ratio	0.27%	0.26%

2.2 液状化地盤-RC 杭-建物連成系遠心場振動実験モデル概要

振動実験に用いる飽和砂地盤-杭基礎構造建物の実験モデル概要を図 4 と表 2 に示す。上部構造物は一つの質量と板バネで再現した。基礎部は杭長 200mm の前述の杭模型 4 本で支持し、杭頭および杭先端を剛接合とした。上部構造物の質量は 7.42kg、基礎部の質量は 1.77kg であり、上部構造物の固有周期は 0.013 秒 (実大スケールで 0.63 秒) である。実験モデルの杭模型 1 本に作用する軸力は、50G 場で 1,126N となり前節の要素試験と等しい。上部構造物の 1 次固有周期と杭模型の作用軸力は、10 階建て鉄筋コンクリート造建物 (建物高さ約 35m、柱スパン 5~6m 程度) 相当を模擬している。地盤は豊浦砂を用い、空中落下法で相対密度 40% として作製した後、水の 50 倍の粘性をもつメトロゾ溶液を注入し飽和させた。本実験モデルはせん断土槽を用いている。

振動実験における計測は、上部構造物、基礎部、地表面、土槽底部の水平加速度に加え、地中 50mm（実大スケールで 2.5m）ごとの過剰間隙水圧、上部構造物の水平変位、鉛直変位、傾斜角を対象とし、図 4 に示すように加速度計、レーザー変位計、間隙水圧計を設置した。また、加振中の杭模型の深度方向曲率分布を計測するため、杭模型の表面にひずみゲージを 2 枚 1 組で添付し、圧縮側縁と引張側縁の軸方向ひずみを計測した。以後は、実大スケールで記述する。

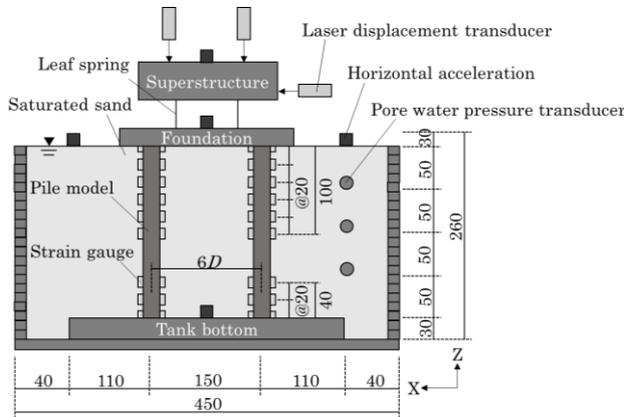


図 4 連成系実験モデル概要

表 2 実験モデル諸元

		Sym.	Unit	Model	Prototype
Pile	Length	L	m	0.2	10
	Diameter	D	mm	25	1,250
	Stiffness	EI	Nmm ²	1.64×10^8	1.02×10^{15}
Footing	Mass	M_f	Kg	1.77	2.21×10^5
Structure	Mass	M_s	Kg	7.42	9.28×10^5
	Natural period	T_s	sec.	0.013	0.63

2.3 加振計画

振動実験の加振は全て水平 1 方向とし、計 3 波の臨海波を入力した。実験では、まず最大加速度を 600gal 程度とした本震相当の臨海波（以後、本震加振と称す）を入力した。その後、最大加速度を 350gal 程度とした余震相当の加振を 2 回（以後、余震加振①、②と称す）実施した。

3. 振動実験結果

図 5 に、全加振終了後の杭模型損傷状況を示す。4 本の杭模型はいずれも杭頭が大きく曲げ破壊しており、内 1 本は図 5(b)のように曲げせん断破壊を呈していた。また、深さ 4m 付近と杭先端付近にも、多数の曲げひび割れ（図 5(c), (d)）が生じていた。実験モデルは、基礎部および上部構造物に水平方向の残留変形、および残留傾斜が発生している。図 5(a)に示すように、水平方向の残留変形は、杭模型が傾いている（特に深さ 4m までの傾きが大きい）ことに起因する。残留傾斜に関しては、曲げせん断破壊した杭模型が軸縮みしたことに伴い、基礎部が傾いていた。

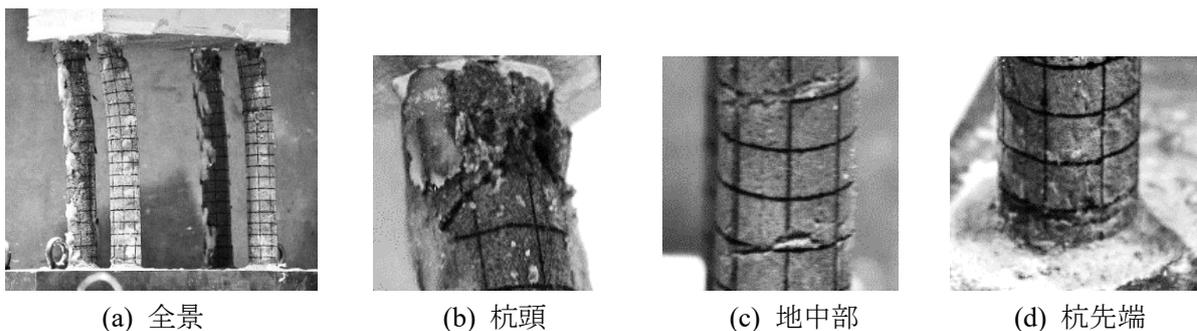


図 5 実験モデルの損傷性状

図6と7は、本震加振と余震加振②について50秒間の主要時刻歴を示す。図は、(a)上部構造物水平応答加速度、(b)基礎部水平応答加速度、(c)地表面水平応答加速度、(d)入力加速度、(e)基礎部一土槽底部間の水平方向相対変位、(f)過剰間隙水圧比である。

本震加振では、地盤内の過剰間隙水圧が加振10秒前後で急激に上昇し、液状化が発生した。加振中の上部構造物の最大応答加速度は257gal、基礎部は350galで、それぞれ最大入力加速度621galの0.41倍と0.56倍であった。地表面の最大応答加速度は408galであったが、過剰間隙水圧比が概ね1.0に達した後の振幅では100gal以下に収束している。一方、基礎部の水平方向変位の振幅は、過剰間隙水圧比の上昇に伴って大きくなり、加振17秒で最大を記録した。

余震加振②では、地盤深部の過剰間隙水圧比の上昇が浅部に比べてやや鈍く、本震加振1ほど急激には地盤全層が液状化していない。しかし、加振20秒以降は深部の過剰間隙水圧比も概ね1.0に達し、最終的に地盤は全層で完全に液状化した。余震加振2の最大入力加速度は390galと、本震加振1の0.63倍である。一方、上部構造物の最大応答加速度は299galで、本震加振1の1.16倍となった。これは、本震加振および余震加振①で地盤が占め固まり、液状化が発生しにくくなったことに起因する。余震加振②における過剰間隙水圧比の上昇が鈍いことも、これを裏付けている。

杭表面に添付したひずみゲージに基づけば、本震加振では杭頭と杭先端付近に塑性ヒンジが形成された。図8は、本震加振における杭模型曲率の主要時刻歴を示す。図は縦軸に曲率、横軸に加振時間を取り、(a)が杭頭、(b)が深さ4m、(c)が深さ9m(杭先端相当)の履歴を示す。図中の破線は全塑性モーメント発揮曲率 ϕ_u である。図8(a)と(c)は正負逆対称の挙動を示しており、杭模型の深度方向曲率分布は深さ4m付近を反曲点とするZ形であった。余震加振②における深度方向曲率分布も、本震加振と同様の傾向を示した。しかし、地盤深部の過剰間隙水圧比の上昇が鈍かったことに伴い、ひずみゲージに基づく杭先端の曲率最大値(曲げ損傷度)は本震加振より僅かに大きくなった。

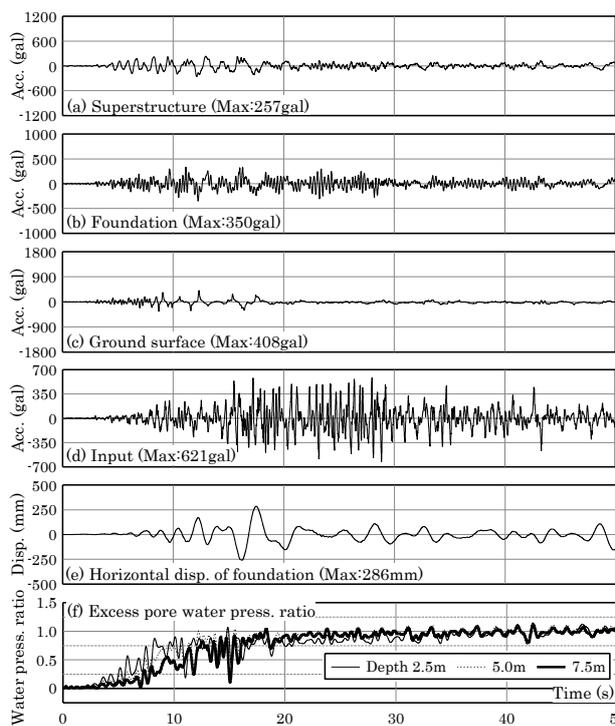


図6 本震加振の主要時刻歴

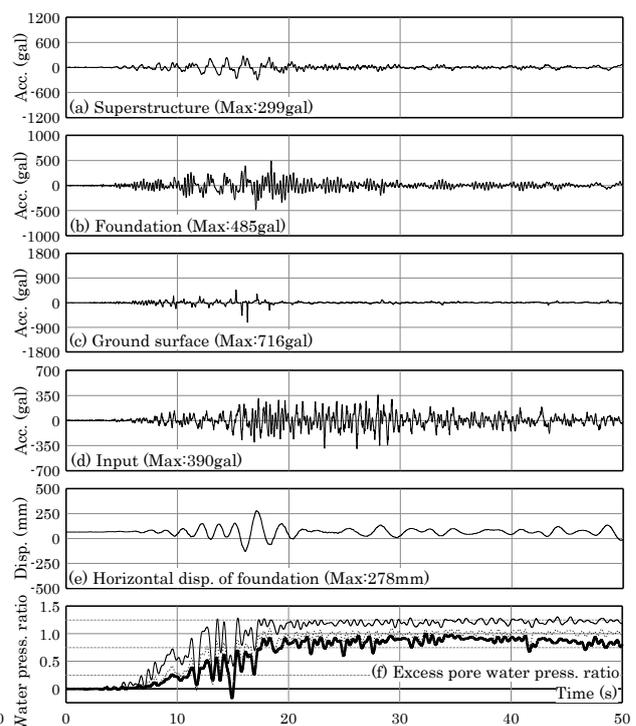


図7 余震加振②の主要時刻歴

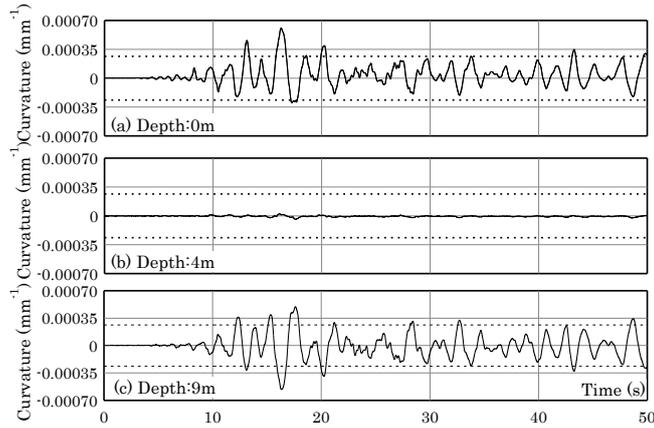


図 8 本震加振における杭断面曲率時刻歴

4. 地中杭部材の損傷検知

加振時の杭損傷に伴う建物基礎部の振動特性変化を検討するため、図 9 に加振前後の振幅スペクトル比の比較を示す。図は、縦軸に土槽底部と建物基礎部の振幅スペクトル比を、横軸に周波数を取り、図(a)が水平方向、図(b)が鉛直方向を示す。図は、杭が健全な状態である本震加振前、杭頭と杭先端が曲げ破壊した本震加振後、杭先端の曲げ破壊がさらに進展した余震加振②後、の 3 つの状態を比較する。

図 9(a)に示す水平方向のスペクトル比では、実線で示す杭が健全な状態のスペクトル比ピーク周波数が 1.514Hz、点線で示す本震加振後（杭頭と杭先端に曲げ破壊発生）のピーク周波数が同じく 1.514Hz、破線で示す余震加振②後（杭先端の曲げ破壊がさらに進行）が 1.501Hz となっており、ほぼ変化が見られない。構造物の損傷は固有周波数の低下に繋がるはずであるが、本報の実験結果はこれに則していない。これは、建物基礎部の水平方向振動特性が、杭の水平移動を拘束する周辺地盤の影響を大きく受けることに起因すると考えられる。図 9 の振動特性確認は、実験モデルへの加振終了後、過剰間隙水圧が 0 近くまで収束した後に行っている。そのため、加振時に発生した杭周辺地盤の液状化は収束してしまっており、加振前とそれほど差異がない地盤反力を杭体に対して発揮するため、地盤－杭－建物連成系としての水平方向剛性はそれほど顕著に変化しない。もちろん、杭部材自体は曲げ損傷により剛性が低下しているが、連成系の水平剛性に及ぼす影響が周辺地盤の拘束（剛性）の方が大きいため、建物基礎部の水平方向振動特性に顕著な変化が発生しなかったものと考えられる。

これに対して、図 9(b)に示す鉛直方向のスペクトル比では、加振毎に変化がみられる。杭が健全な本震加振前は 2.063Hz、本震加振後は 1.862Hz、余震加振②後は 1.855Hz と、杭が損傷するたびにピーク振動数が低下していることがわかる。大径の RC 杭の場合、鉛直支持力の大半は杭先端の支持層に依存しており、杭の周面摩擦が及ぼす影響はそれほど大きくない。本論の実験モデルは杭先端が土槽底部に剛接合されているため、よりその傾向が強くなる。結果として、杭部材の損傷が軸方向剛性の低下に繋がり、それが建物基礎部の鉛直方向振動特性に顕著な変化となって表れた。弾性理論解に準じれば、構造物の固有振動数は剛性の平方根に比例する。余震加振②後のピーク振動数が健全状態の 0.90 倍であることから、一連の加振によって実験モデルの杭部材の軸方向剛性は、初期値の 81%まで低下していることになる。

以上をまとめれば、地中の杭部材が損傷しても、建物基礎部の水平方向振動特性からその性状を判定することは難しい。しかし、鉛直方向の振動特性では、杭損傷によって振幅スペクトルが如実に変化し、その度合いをピーク振動数の変化から推定できる可能性が高い。

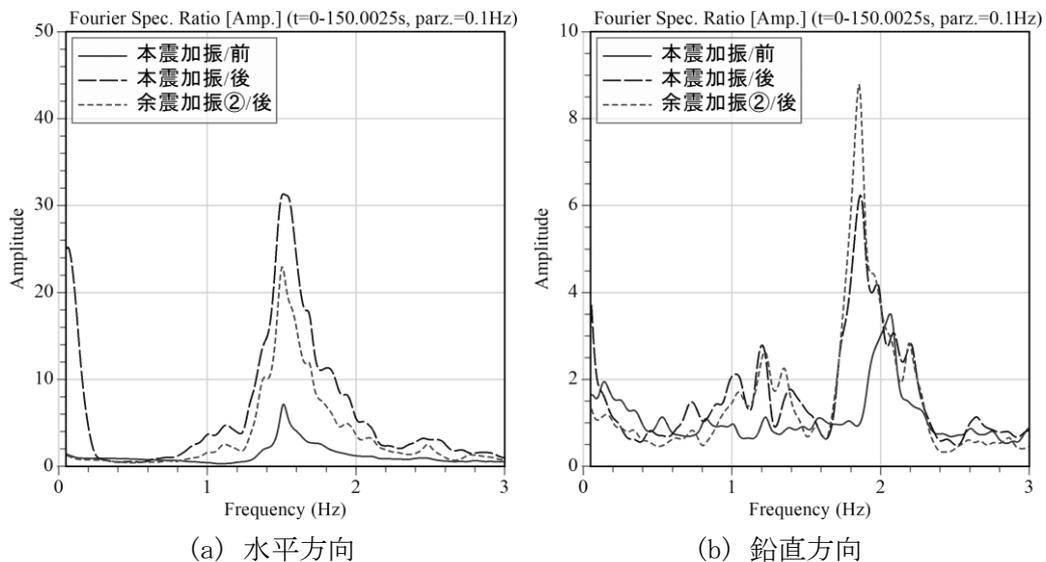


図9 杭模型損傷に伴う建物基礎部の振動特性変化

5. まとめ

本研究は、地盤掘削を伴わない場所打ちの鉄筋コンクリート杭の簡易損傷判定法の確立という命題に対し、建物基礎部の鉛直方向加速度スペクトルのピーク周期を指標とした評価が可能であることを示した。今後は、実建物に用いられている杭部材の断面諸量や、公表されている杭部材の変形性能の情報を基に、ピーク周期の変化率と杭の損傷度合を関連付けることで、汎用性を持つ健全度判定法を確立させる。当該技術は、東日本大震災や2016年の熊本地震など、広域に液状化が発生した湾岸地区の大型建物に対して、次の大地震が来る前に適切な補修・補強工事を促すきっかけとなりえるものであり、今後のレジリエンス向上に資する。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築基礎構造設計例集, pp.294, 2004.02.

(発表論文)

- [1] K. Hayashi, S. Kaneda : Nonlinear Response and Damage Monitoring of a Concrete Pile as a Result of Soil Liquefaction, Structural Engineering International, IABSE, accepted, 2018.12.