

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06667

研究課題名(和文) 実被害事例に基づいた杭基礎建物の地震後継続使用に対する意思決定指標の提案

研究課題名(英文) Study on indicators to evaluate post earthquake functional use of buildings supported by piles based on earthquake damage

研究代表者

柏 尚稔 (Kashiwa, Hisatoshi)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号：40550132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：実被害事例に基づいて大地震時の杭基礎建物の地震応答を評価するための方法を検討すると共に、杭基礎の健全性を迅速に把握するための簡便な健全性評価指標を検討することを目的とした研究を実施し、次に示す成果を得た。まず、杭基礎に地震被害を受けた建物のシミュレーション解析を実施し、杭基礎の被害を評価可能な解析モデルを構築した。さらに、同モデルを用いたパラメトリックスタディにより、強震観測記録から杭基礎の被害を推定できる可能性を示した。また、地震後の杭基礎建物の継続使用性を確保するために有用な工法に対する模型実験を実施し、杭と建物が連結していない状態でも地盤中の杭が建物の傾斜防止に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、上部構造の耐震性能の向上に伴って顕在化してきた基礎構造の地震被害について、目視により容易に確認できない被害情報を強震観測等の間接的な情報により簡易かつ安価に得るための技術開発に貢献するものであり、激甚災害への対応力とレジリエンス向上の観点で社会的意義を有するものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, Evaluation method of seismic responses of the building supported by piles during large earthquake and indicators for post earthquake functional use of the building are investigated based on earthquake damage cases. The main results are as follows; First, simulation analyses of the building that was damaged at the pile foundation by earthquakes are conducted and the analysis model that can evaluate the damage of the pile foundation is built. Next, the parametric studies based on the model that is well simulated the earthquake damage shows the possibility of estimating the damage of the pile foundation using the information obtained from the strong motion observation records. Finally, model tests are conducted on useful repair method to ensure the post earthquake functional use of a building supported by piles, and it is confirmed that piles in ground is effective in preventing the inclination of the building.

研究分野：建築構造

キーワード：基礎構造 地震応答解析 強震観測記録 模型実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

経済的に重要な建物や災害拠点に指定されている建物では地震後の継続使用が不可欠である。地震による建物の機能喪失の問題は、2011年東北地方太平洋沖地震で顕在化した。上部構造については、都市部集合住宅で構造設計に考慮されない非構造壁が損傷したことによって継続的な居住が不可能となった事例が多く見られた。一方、基礎構造については、液状化の被害が大きかった浦安地域において住宅の不同沈下により、構造的には健全であっても建物の機能性が著しく損なわれた例が多くみられ、上部構造だけでなく基礎構造の被害が建物の継続使用に大きく影響することを強く認識させられることになった。建築基準法は大地震に対する人命の確保を目標としているが、人命さえ失われない壊れ方であれば大地震に対して建物の損傷を許容している。すなわち、建築基準法のみ満足している建物の多くは、大地震を受けることによって損傷が生じ、地震後の建物の継続使用に支障が生じる可能性がある。

平地面積の狭い我が国では軟弱地盤上に建物を建てることが多いため、基礎形式として杭基礎を用いることが多いが、地震による杭基礎の損傷は建物の継続使用性に直結することが指摘されている。例えば、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震では、上部構造は健全に見える一方で、杭に損傷が生じたために、建物が傾斜した事例が確認されている。ここで、建物の傾斜が生じれば杭基礎の損傷が疑われるために杭頭の掘削調査の実施を検討する可能性が高いが、建物の沈下のみの場合等、建物の傾斜が確認できない場合は、杭基礎の損傷を調査することなく、地震直後には継続使用可の判断をされる可能性が高い。ところが、この判断は杭基礎の損傷を無視することに相当するため、建物の残余耐震性能の誤評価に繋がり、大きな余震に対応できない事態にも繋がりがかねない。これらの問題を解決するためには、杭基礎建物の地震時の被害様相をあらかじめ想定し耐震対策を計画しておくこと、地震後に迅速に杭基礎の耐震残余性能を評価できること、が重要となる。ただし、現行の設計基準では杭基礎建物の大地震時挙動を想定されておらず、それに関わる実証データも少ないために、耐震対策手法や杭基礎のヘルスマニタリングの手法が確立しているとは言い難い。将来の発生が懸念される巨大地震に対する対応として、これらの課題は重点的に検討すべきと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、実被害事例に基づいて大地震時の杭基礎建物の地震応答を評価するための方法を検討すると共に、杭基礎の健全性を迅速に把握するための簡便な健全性評価指標を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 2016年熊本地震において杭基礎に被害を受けた建物のシミュレーション解析を実施し、杭基礎の被害を評価可能な解析モデルを構築するとともに、同モデルを用いたパラメトリックスタディによって杭基礎の被害が建物の加速度応答に及ぼす影響を検討した。

(2) 地震後の継続使用の意思決定には、損傷した杭の補修による原状復帰以外に建物を安定的に支持できる技術の有無が左右することから、杭と地盤が複合的に建物を支持する機構(杭頭絶縁基礎)に着目し、杭頭絶縁基礎の地震時挙動を把握するための重力場振動実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 被害建物のシミュレーション解析とパラメトリックスタディ

本検討の対象建物は、2016年熊本地震において杭基礎に被害を受けた益城町庁舎とする。対象建物の立面図と平面図を図1に示す。対象建物は1980年建設のRC造3階建ての杭基礎建物であり、熊本地震前には建物の南構面にプレキャスト外フレームによる耐震補強が実施済みとなっている。建物はPC杭(径400mm)、耐震補強部は羽根付き鋼管杭(径318.5mm)で支持されており、ほとんどのフーチングは2~6本の群杭で構成されている。庁舎1階の南東部には震度計が設置されている。本震後に実施された被災度区分判定により、上部構造の被害は中破と判定されている。また、被災度区分判定では北東、南西、南東の3ヶ所の隅角部で杭頭目視調査結果が実施されており、杭頭部の破壊が確認されている。

図2に示すように、図1(b)に示す群杭のフーチングの中から最も数の多い4本群杭(杭中心間距離は杭径の2.5倍)のフーチングを抽出して1本の杭として集約し、上部構造と杭を一本の梁ばねモデルにモデル化して、地盤-建物連成系の地震応答解析を行う。上部建物は設計図書を参照し、弾性の多質点系でモデル化する。杭部材は梁要素でモデル化し、曲げ変形特性(曲げモーメント-曲率関係)の非線形性をファイバーモデルで考慮する。杭頭は基礎版に剛接合し、杭先端はピンローラで支持する。杭周地盤ばねの地盤反力-変形関係は、杭-地盤間の剥離を考慮するためのスリップ型の履歴特性を有する多折れ点の非線形モデルとする。入力地震動は役場付近で得られている強震観測記録(KiK-net 益城)から推定した露頭基盤波(せん断波速度700m/sの地層上面)とし、震度7を記録した前震(2016年4月14日21:26に発生)と本震(2016年4月16日01:25に発生)を連続入力する。

図3にシミュレーション解析の結果を示す。図3(a)、(b)に前震と本震のそれぞれについて、解析結果として基礎版の加速度応答時刻歴波形(図中の(BF))を庁舎1階で得られた強震観測記録のそれと比較して示す。解析結果の波形は強震記録のそれに見られる特徴を概ね捉えている。

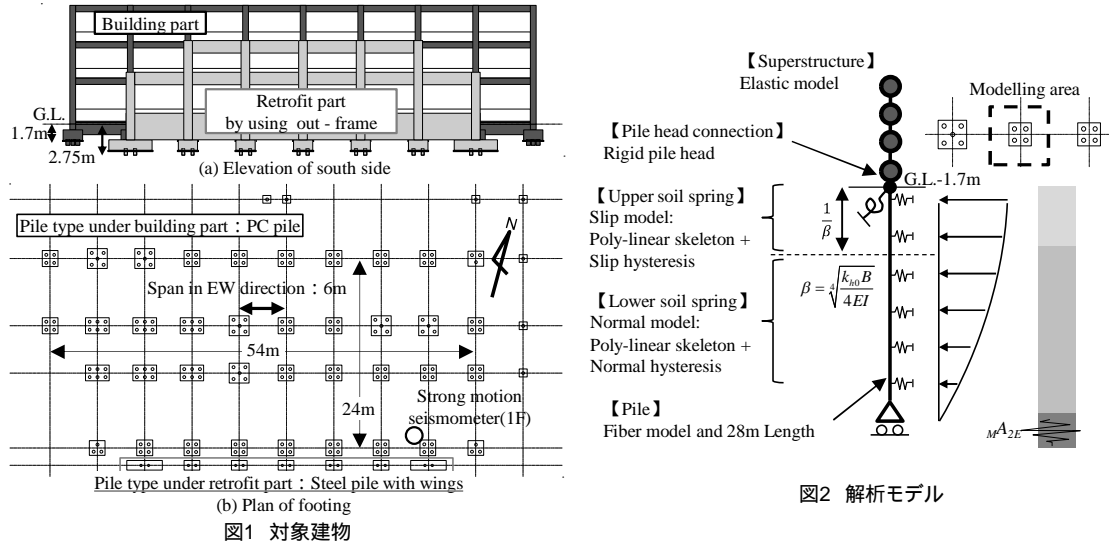


図2 解析モデル

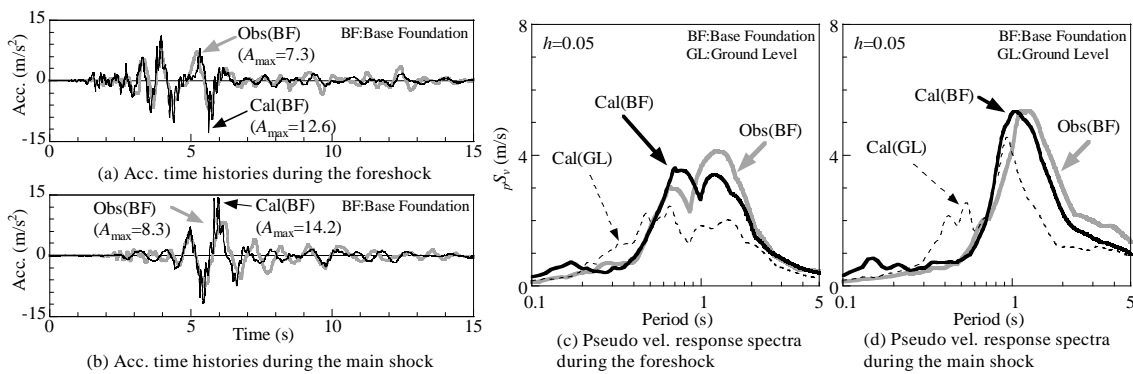


図3 シミュレーション解析の結果

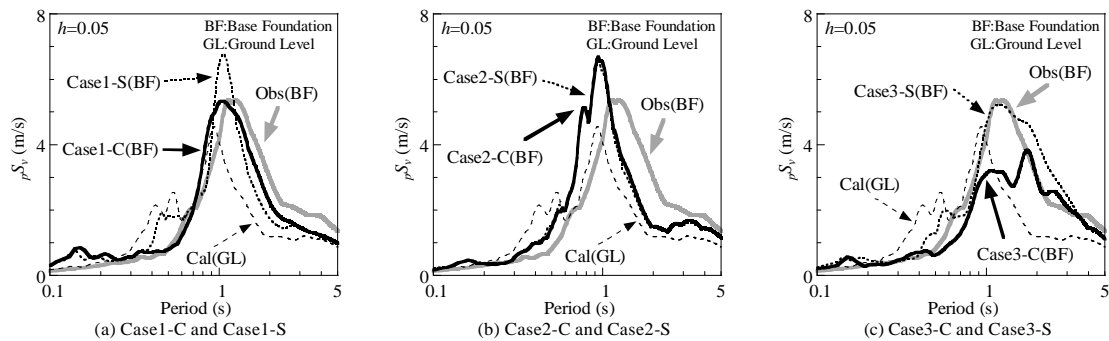


図4 パラメトリックスタディによる基礎応答の変化

図 3(c)、(d)に前震と本震のそれぞれについて、解析結果として地表の推定地震動および基礎版の加速度応答から計算した擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を庁舎 1 階で得られた強震観測記録のそれと比較して示す。前震と本震共に、基礎版の擬似速度応答スペクトルは強震記録のそれに見られる特徴を概ね捉えている。本震では、基礎版の擬似速度応答スペクトルにおける周期 1~3 秒の成分は強震観測記録のそれより若干小さいものの、地表のそれに比べると大きい。すなわち、庁舎 1 階で得られた本震記録には地盤と建物の動的相互作用効果の影響が大きく表れている。

地盤と建物の動的相互作用効果が大きい場合、上部構造の地震応答に杭基礎の損傷状態が反映される可能性が高い。ゆえに、杭周地盤ばねの履歴特性（スリップ特性を考慮するか否か）、杭頭接合条件（固定条件か自由条件か）、前震の有無（本震のみ入力するか前震と本震を連続入力するか）をパラメータとして、1 階床上の地震応答に対する感度解析を実施する。図 4 にパラメトリックスタディによる基礎応答（擬似速度応答スペクトル）の変化を示す。特に、図 4(a)と(c)において、杭頭接合条件を自由とすることにより、加速度応答スペクトルのピーク周期およびピーク値が変化しており、地震により杭頭が損傷して杭頭部の耐力が極めて低下した場合には、上部構造の強震観測記録から杭頭の損傷を検知できる可能性を指摘できる。

(3) 地震後の復旧に利用可能な建物支持機構の検討

図5に実験装置全体図を示す。重力場の振動台に固定土槽を設置して、固定土槽に杭模型、地盤模型を設置したのち、地表面上に建物模型を設置して正弦波の加速度を入力する。固定土槽の内法寸法は1038×738×368mmであり、基礎版 - 杭頭間の地震時挙動に焦点を当て、基礎幅と同程度の深さの地盤をモデル化する。地盤模型には気乾状態の豊浦砂を用いて固定土槽に設置し、タンピングして全層厚(350mm)と相対密度(60%程度)を管理している。実験では地盤模型中に杭を有するケース(ExP)と杭無しのケース(NoP)の2ケースを実施する。杭模型は4×4の群杭であり、杭中心間隔を杭径の3倍としている。土槽底から杭頭までの距離は330mmであり、杭は地表面から20mmの深さに埋められている状態である。建物模型は上部質点と基礎版からなる2質点系で上部質点は4つの板ばねで支持されている。基礎固定時の建物模型の固有振動数は12Hzである。基礎版の下部には接地反力を計測するためのロードセルが設置されており、加振方向に底面積の1/5の分解能で接地反力を計測できる。入力動は正弦波で立ち上がり・立ち下がり1波、主要動5波で構成されている。加振振幅は1, 2, 4m/s²の3種類で、各振幅で2Hzごとに4~20Hzの加振振動数で加振する。

図6に加振後の基礎の残留沈下量と残留傾斜角を示す。図6(a)より、加振振幅1, 2, 4m/s²のそれぞれについて、加振振動数8Hz付近で残留沈下量が増大している。また、ExPとNoPの残留沈下量はほとんど変わらない。一方図6(b)より、NoPの残留傾斜角は加振振幅4m/s²の加振振動数4~8Hzにおいて増大しているが、ExPのそれでは加振振幅4m/s²の加振振動数4~6Hzにおいて増大するものの、その後はほぼ一定値となる。すなわち、地盤中に杭を有する場合には、杭が無い場合に比べて基礎の残留傾斜角が小さくなり、基礎版と杭頭が接合されていない条件でも、地盤中に杭が存在する場合には振動に伴う建物の傾斜が生じにくくなる可能性があることが示唆される。

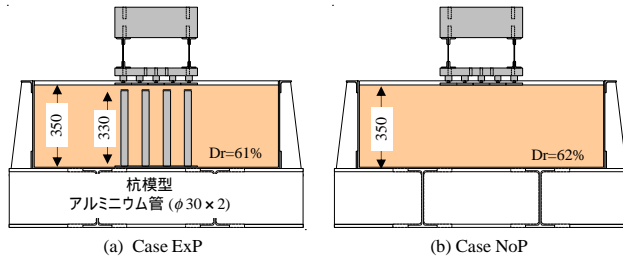


図5 実験ケース(unit:mm)

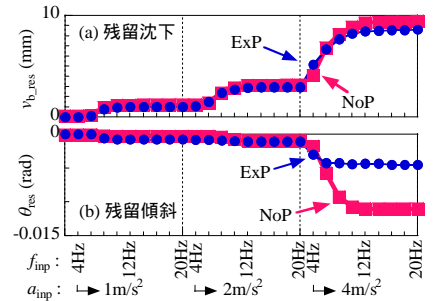


図6 加振後の基礎の残留沈下量と残留傾斜角

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 柏 尚稔, 新井 洋, 中川 博人	4. 巻 Vol.84, No.756
2. 論文標題 2016年熊本地震における益城町庁舎の強震記録に含まれる動的相互作用効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 183-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.84.183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 柏 尚稔, 小林 俊夫, 宮本 裕司	4. 巻 56
2. 論文標題 繰返し水平載荷実験における羽根付き鋼管杭の水平抵抗評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 99-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijt.24.99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H.Kashiwa, H.Arai and H.Nakagawa
2. 発表標題 Evaluation of Local Nonlinear Effect around Pile Foundation on Seismic Response of Building during Very Large Earthquakes
3. 学会等名 16th European Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏尚稔, 新井洋, 中川博人
2. 発表標題 2016年熊本地震における益城町役場の地震応答の動的相互作用効果
3. 学会等名 日本地震工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔
2. 発表標題 微動アレイ観測から推定した益城町中心部の地盤S波速度構造
3. 学会等名 日本地震工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川博人, 柏尚稔, 新井洋
2. 発表標題 益城町中心部における表層地盤の動的変形特性と地震動増幅特性
3. 学会等名 日本地震工学会大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中川 博人 (Nakagawa Hiroto) (80713007)	国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・研究員 (82113)	