

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12501  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K04709  
研究課題名(和文) 鉄筋コンクリート杭を用いた基礎構造の終局耐力算定法と地震後の健全度評価法の提案

研究課題名(英文) Ultimate Strength and Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Pile Foundation

研究代表者  
林 和宏 (Hayashi, Kazuhiro)  
千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40725636  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート杭を用いた基礎構造の終局耐力算定法と地震後の健全度評価法の提案に向けて、遠心場静的載荷実験を実施するとともに、実験結果を精度良く追跡する数値解析モデルを提案した。実験では、直径25mmの小型RC杭模型を用い、地盤-RC杭基礎-上部構造物連成系の動的および静的載荷実験を実施し、極大地震下での連成系の非線形挙動と杭部材の破壊性状を明らかにした。また、実験結果を精度良く追跡できる数値解析モデルの構築法を示した。さらに、実大建物の実地震動を観測し、そのデータを自動で集約・評価するシステムを構築・運用した。当該システムでは、最大震度6弱の実地震波形を観測した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の巨大地震では、社会基盤である大型建築物を支える杭部材の損傷が多数みられるようになっており、地震後の事業継続性に大きな影響を及ぼすことが示唆されている。本研究成果は、災害後の事業継続の根幹を支える建物の損傷制御を前提とした設計法構築の基盤となるものである。また、目視確認が難しい地中の構造物である杭部材について、地震時の記録からその損傷を判定する技術の開発をめざし、その端緒となる破壊時応答を記録から同定する方法を提案した。当該成果は、速やかな事業復旧・継続に資するものである。

研究成果の概要(英文)：This study targets the ultimate state of reinforced concrete pile foundation structures. The details are as follows; 1. Centrifugal loading tests of dry sand-RC pile foundation interaction were conducted to clarify the nonlinear behavior of the system and the fracture properties of the RC pile members.  
2. A numerical analysis model capable of reproducing the nonlinear behavior of dry sand-RC pile foundation interaction system was proposed and compared with the experimental results.  
3. An observation system was constructed and operated to collect earthquake wave data at the real buildings.

研究分野：地震工学

キーワード：鉄筋コンクリート杭 巨大地震 損傷 耐力評価 遠心場実験 連成系 数値解析 地震観測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本では長年に亘って、建物に用いられる下部構造(基礎や杭部材)に対して、許容応力度に基づく一次設計が必要条件として課せられてきた。しかし、近年の巨大地震災害では、杭部材の損傷に伴う建物の沈下や傾斜の被害が多数みられるようになり、現在は建物下部構造に損傷を想定した二次設計法を導入すべく検討が進められている。

杭基礎構造を対象とした二次設計導入に向けた検討は、杭部材や接合部単体としての耐震性能検証と、建物-杭-地盤連成系において一部の杭部材が部分的に損傷した状態での地震応答評価を対象としている。しかし、震度7クラスの極大地震下では杭部材の損傷がさらに進展し、連成系が終局耐力を発揮する状態に至る。杭基礎構造建物の連成系を対象とし、極大地震下での終局耐力(極限応答)を検証した事例は少なく、特に大型建物に用いられる大径の鉄筋コンクリート杭に関する実験的研究は極めて稀である。建物-杭-地盤連成系における極大地震時の損傷位置と程度を、設計者が評価・制御できる上下構造一貫設計体系を構築するためには、下部構造の極限応答評価法および終局耐力算定式の提案と、その際の上部構造の地震応答性状説明が不可欠である。

また、近年は、地震後の建物継続使用可否を速やかに判定し、災害による損失を最小限に止める事業継続計画BCPの重要性が再認識されている。これに対し、建物に配したセンサから構造物の健全度を即座に同定する手法(SHM)に関する研究が盛んであるが、既往研究の多くは上部構造を対象としている。地震被害による損傷が直接目視できない下部構造を対象とした事例では、傾斜計や光ファイバひずみ計などのセンサを杭部材等に直接取り付けの手法が主であり、既存建物への適用には地盤掘削など多額の費用と長い工期を要する点で実施を躊躇う建物所有者が多い現状にある。

今後、発生が確実視される南海トラフの巨大地震では、東日本大震災をも上回る広域被害が予測されている。被災地域の迅速な復旧・復興活動においては、被災後も継続使用が可能な地域防災拠点(行政庁舎・消防施設・病院・学校等)を即座に同定し、人・もの・情報をそこに集約することが必要不可欠である。被災後、長期間に亘って専門家による技術的支援が見込めない広域災害に備え、建物の健全性、特に地中にある下部構造の損傷度を、周辺地盤を掘削することなく簡便かつ即時に判定する技術の構築が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、大型建物で用いられる大径の鉄筋コンクリート杭部材を対象とし、当該杭部材の損傷までを考慮した極大地震時の建物挙動解明と、下部構造の二次設計法確立に向けた終局耐力算定式の誘導を目的とする。さらに、地中にある当該杭部材の損傷度を、地上部に設置したセンサから即座に同定する手法の提案をめざす。本研究の成果に基づく損傷センシングシステムの社会実装は、建物管理者が担うBCP策定や極大地震被災後の建物継続使用可否判定を、科学的知見に基づいてより効率的に実施することを可能とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、極大地震に対する杭基礎構造の次世代耐震設計法確立と、地震後の杭部材健全度に関する判定法の構築をめざすもので、下記の検討項目群を解決する。

杭部材の損傷を考慮した極大地震時の建物挙動解明と下部構造の終局耐力算定法誘導

項目[a] 杭基礎構造の極大地震応答性状解明のための遠心場振動実験

項目[b] 杭部材損傷による終局耐力算定式の提案と上下構造一貫設計体系に向けた検討  
地中杭部材の損傷を地上部に設置したセンサから同定する手法の提案

項目[a] 杭部材損傷と上部構造の地震応答性状関係の一般化

項目[b] 杭部材の健全度評価システム構築と継続使用可否判断における閾値の決定

検討項目 では、50G遠心場での動的および静的載荷試験によって、砂地盤-RC杭基礎-上部構造連成系の地震時応答を実験的に検証する。実験では、RC部材の破壊性状を模擬するため、細鋼棒とモルタルから成る直径25mmの杭模型を用いる。当該杭模型は、RC部材の曲げ破壊およびせん断破壊挙動を再現することが可能であり、連成系の終局挙動が杭部材の破壊で決まる場合の地震時応答を検証することができる。その上で、各破壊挙動に準じた水平方向終局耐力算定法を誘導することで、杭基礎構造の2次設計法誘導に資する知見を取りまとめる。

検討項目 では、 の実験を精度良く再現可能な数値解析モデルを構築し、種々のパラメータスタディの知見を加えることで、杭部材損傷と上部構造の地震応答性状関係の一般化を図る。その上で、杭部材の健全度評価方法を提案するとともに、建物の継続使用可否判断における閾値を議論する。また、知見の一般展開を見据え実在する建物での地震観測を行い、収集した実地震記録に提案手法が適用可能かを検討する。

#### 4．研究成果

鉄筋コンクリート杭を用いた基礎構造の終局耐力算定法と地震後の健全度評価法の提案に向けて、遠心場静的載荷実験を実施するとともに、実験結果を精度良く追跡する数値解析モデルを提案した。実験では、極大地震下での連成系の非線形挙動と杭部材の破壊性状を明らかにした。RC杭モデルは、曲げ破壊およびせん断破壊の呈し、それによって上部構造物の地震応答が頭打ちとなる挙動を確認した。当該応答（終局耐力）については、既往の設計法を拡張する形で簡便に評価可能な算定式を提案した。

また、実験結果を精度良く追跡できる数値解析モデルの構築法を示した。解析モデルは、地盤の水平反力にクーロンの受働土圧を用いる必要があること、極限状態における杭部材の地中損傷深さが既往の評価法では過大評価になる可能性があることを明らかにした。

さらに、実大建物の実地震動を観測し、そのデータを自動で集約・評価するシステムを構築・運用した。当該システムでは、最大震度6弱の実地震波形を観測した。当該データについて、提案手法による損傷評価が可能か否かを検討している。

以上の研究成果は、6編の査読付き論文および5編の査読付き国際会議論文として発表されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 林和宏・宮地祐一・木村祥裕・田村修次・齊藤大樹	4. 巻 773
2. 論文標題 遠心載荷装置を用いた液状化地盤中の鉄筋コンクリート杭振動座屈実験	5. 発行年 2020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 911-920
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.85.911	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 高橋周平・林和宏・宮地祐一・齊藤大樹	4. 巻 67B
2. 論文標題 強震動と複数回の余震動を受ける飽和砂地盤-RC杭-建物連成系の振動応答	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 437-444
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 K. Hayashi, S. Takahashi, T. Saito	4. 巻 145
2. 論文標題 Dynamic response of the saturated soil-reinforced concrete pile-superstructure interaction under repeated shaking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ELSEVIER	6. 最初と最後の頁 No.106685
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.soildyn.2021.106685	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------