

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04698

研究課題名(和文) 地盤の影響を考慮した杭基礎の大地震後の残存軸耐力の評価方法

研究課題名(英文) Estimation of residual axial load Capacity of Pile Foundations considering ground resistance after severe earthquakes

研究代表者

金子 治 (Kaneko, Osamu)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：80824135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：杭基礎が損傷を受けた後の地盤への荷重負担も評価した支持能力である残存軸耐力を、大地震に対する設計や耐震診断における判定指標とすることを目的として、載荷実験および有限要素法による解析を行った。

大型土槽を用いた実験では、半数の杭が破損しても、負担荷重が地盤へ移行して最終的に基礎構造全体で支持力が失われなければ沈下や傾斜は抑制され、上部構造の転倒や崩壊に至らないことを確認した。さらに、基礎スラブ形状や破損した杭配置が異なる場合の荷重負担の移行過程についてのパラメータ解析を行い、基礎スラブの荷重分担や沈下量や傾斜量について把握し、杭の残存軸耐力を定量的に評価する手法の確立につながるデータを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重要度が高い建物や地震後も機能維持が要求される建築物などでは、現行技術基準では義務付けられていないとしても大地震時の基礎構造の耐震性について検討が必要である。杭基礎建築物では杭体の損傷後に周囲の地盤に荷重負担が移行している状態を終局状態と考えることもできるが、杭体単体の耐震性能に関する研究は進められているものの、地盤を含む支持メカニズムの評価には至っていない。本研究により杭の損傷後の地盤も含む支持性能である残存軸耐力についてのデータを取得し、大地震に対する設計や耐震診断のための基礎構造の耐震指標としての確立につなげられれば、より合理的に建物全体としての安全性確保や機能維持が可能になる。

研究成果の概要(英文)： Loading tests and analyses by Finite Element Method were conducted with the aim of using the bearing capacity of the building foundations considering the effect on the superstructure as index in seismic design against severe earthquakes or seismic evaluations.

According to the results of loading tests, it was confirmed that even if half of the piles were damaged settlement and inclination leading to fall or collapse of the superstructure would not be large unless the load was transferred to the ground and the bearing capacity of the entire foundation structure was finally lost. Parameter analysis was carried for the process of load transfer when the shape and pile arrangement were different, data on subsidence, inclination and the load sharing ratio of the ground and foundation slabs were obtained.

These results will lead to the establishment of a method for quantitatively evaluating the residual axial load capacity of pile foundations.

研究分野：工学

キーワード：建築構造 建築基礎構造 地盤工学 杭基礎 支持力 残存軸耐力 載荷試験 有限要素法

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

基礎構造については大地震時に対する設計や耐震診断、耐震補強は必要条件になっておらず、基礎構造の終局限界に関する研究も被害調査の分析や基礎部材の構造性能確認の段階に留まっている。過去の地震被害では、上部構造の被害は軽微であるにもかかわらず杭の破壊が原因となり建物全体の傾斜・沈下が生じ、地震後に使用できなくなった建築物は過去の地震被害でも多く見られている。上部構造について、地震後に機能維持が必要な庁舎や病院などのように重要度を考慮して設計された施設あるいは耐震補強された建物であっても、基礎構造の耐震性が確保されていなければ地震後の継続使用は保証されない。

一方で、杭体が激しい被害を受けてたとしても人命にかかわる被害に至った例は報告されていないが、その要因としては、基礎構造が地盤と接して一部の杭体が破壊しても基礎スラブ（周囲の地盤）に荷重が再配分されることで基礎全体として軸力保持性能が確保されていて建築物の倒壊が防止できていることが考えられる。

しかしながら、このような荷重の再配分のメカニズムに関する研究成果はほとんどなく、耐震設計や診断で考慮されることはない。たとえば、2019年に改定された本会「建築基礎構造設計指針」では性能グレード¹⁾として上部構造の崩壊・転倒防ぐことも終局限界状態の要求性能とする考え方が提案されているものの、具体的な評価手法は示されていない。そのために、既存の基礎構造に関しては実現象に対応した安全性や継続使用性が確保されていなかったり、逆に要求性能に対して過剰な設計となっていたりする可能性もあると考えられる。

2. 研究の目的

基礎構造を含む建築物全体の要求性能について検討するためには、基礎構造の軸力保持性能を適切に評価することが必要である。杭体の終局状態や限界曲率²⁾についての研究は進められてきているが、杭体単体が脆性的に破壊しても基礎構造全体の軸力保持性能の喪失に直結するとは限らず、上部構造の耐震診断で考慮される柱の残存軸耐力³⁾に相当する軸力の再配分を考慮する必要があると思われる。

ただし、基礎構造の鉛直支持性能は上部構造の考え方をそのまま適用はできず、地盤も考慮した評価が必要と考えられる。即ち、杭基礎の残存軸耐力の評価にあたっては、杭体の軸方向耐力や変形性能と同時に、杭体が破損した後に被害の少ない他の杭だけでなく基礎スラブを介して周囲の地盤にも負担荷重が移行することを考慮に入れる必要がある。

そこで本研究では、鉛直支持性能を失った杭基礎から周囲の地盤への荷重の移行について、大型実験土槽を用いた載荷試験により移行のメカニズムを確認した上で実験のシミュレーション解析および様々なパターンを考慮したパラメータ解析を行って、耐震設計や耐震診断のための評価方法を検討する。

3. 研究の方法

(1)破損した杭の負担軸力が基礎スラブを介して地盤に移行し、残った杭と地盤で荷重分担する現象の確認と破損した杭の配置の違いによる沈下や傾斜の挙動への影響を把握するため室内大型土槽を用いた載荷試験を実施する。

実験土槽、基礎スラブの形状を図1に示すが、支持層（砂質土、相対密度 $D_r=90\%$ ）および表層（ $D_r=60\%$ ）を想定した地盤中に杭を埋め込む。試験体は2種類（実験1：張間方向の杭の破損を想定、実験2：桁行方向の杭の破損を想定）で、杭は鋼管を用いて地震による破損を模擬するために4本中2本の断面の1/2を欠損させた上で方向を変えて配置する。実験では油圧ジャッキによる鉛直載荷を行い、基礎スラブの鉛直変位（沈下・傾斜）および杭の負担荷重・基礎スラブ（地盤）の負担荷重を測定する。また、欠損した杭単体の荷重-変位関係を把握するための試験を要素試験として実施する。さらに、作業性の良い小型土槽を別途製作し、杭および基礎スラブそれぞれの荷重-沈下関係の確認を行う。

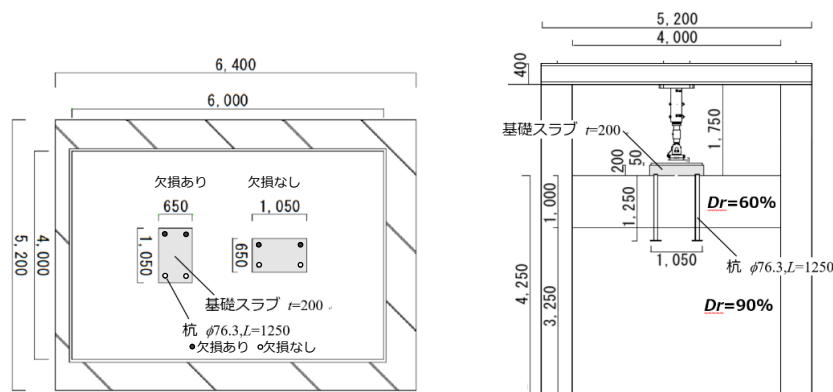


図1 室内大型土槽および試験体

(2)解析による検討として、3次元有限要素法を用いて様々な建物の平面形状や地盤条件に対して杭の被害パターンを想定し、杭の破損後の荷重の移行とそれに伴う沈下・傾斜の挙動を調べる。

最初に室内大型土槽を用いた載荷実験をシミュレーションすることで地盤定数の設定方法や荷重の与え方など解析手法の妥当性の確認を行う。次に、基礎スラブの平面形状（長さとの幅の比：辺長比）および破損した杭の配置をパラメータとした解析を実施し、杭が破損した後の沈下量・傾斜量に及ぼす影響について把握する。

(3)実験および解析結果から、杭が破損した後に負担軸力が地盤へ移行するメカニズムを把握し、杭の残存軸耐力を定量的に評価する手法を検討し、大地震時の耐震設計、耐震診断指標として用いる可能性について確認する。

4. 研究成果

(1) 図2に基礎スラブの平均沈下量4本の杭の軸力の関係を示す。初期段階では鉛直荷重を加えることで沈下量が増加しすべての杭の軸力もほぼ同等に増加して行く。欠損させた杭（図中の赤・オレンジの線）が座屈して鉛直荷重の負担ができなくなった後は、基礎スラブの負担荷重（土圧）が増え荷重が移行することは確認できたが、残った杭（青・水色の線）の軸力負担は、破損した杭の配置が違う実験1と2で異なっていた。また、傾斜量も桁行方向の破損を想定した実験2の方が大きかった。

これらの実験結果から、破損した杭から周囲の地盤に荷重負担が移行することで、直ちに建物の転倒あるいは崩壊につながる支持力の喪失には至らないことを確認できた。さらに、破損した杭と残った杭の割合が同じであっても基礎の形状や杭の配置によって軸力負担や傾斜量などが異なり、杭の残存軸耐力に影響していることがわかった。

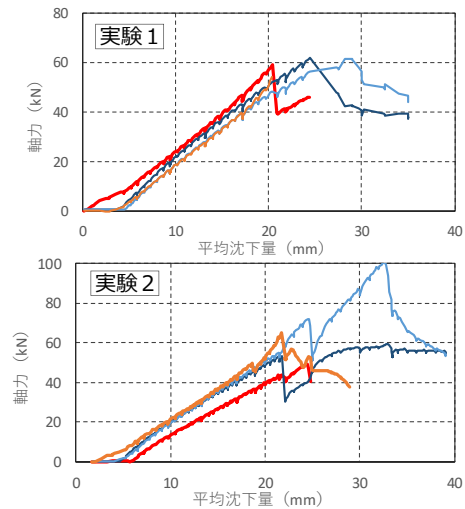


図2 沈下量と杭軸力の関係

(2)3次元 FEM 解析により室内大型土槽を用いた載荷実験のシミュレーション解析を行い、作成した解析モデルにおいて実験地盤作成時の調査に基づく値に深さ方向のひずみの違いを考慮して地盤定数を設定することで、杭軸力の負担や杭配置による傾斜の違いなど実験結果と概ね対応する結果を得ることができた。

このモデルを用いて破損する杭の割合（0～2/3）、破損する杭の配置（張間方向、桁行方向）および建物の辺長比（破損する杭が並ぶ方向を長辺、直行方向を短辺とした場合の短辺/長辺、1/1～1/3）をパラメータとして組み合わせた解析を行い、杭が破損した後の傾斜量や沈下量および残った杭の負担率について算出した。

(3) 実験結果およびパラメータ解析から、破損した杭の軸力が移行した後の傾斜量の違いは荷重負担する地盤が塑性化する幅の違いによるものと判断し、この幅について、杭近傍地盤のみ、基礎スラブの中央まで、隣接する杭まで、辺長比に応じた範囲、の4ケースを想定し、傾斜角との関係を比較検討した。

これらの検討結果のうち、荷重を負担する地盤を杭が破損した側の端から辺長比の1/2乗の幅とし、これを短辺幅で正規化した値と実験および解析から得られた傾斜角の関係を図3に示すが、ばらつきは大きいものの相関が確認できた。

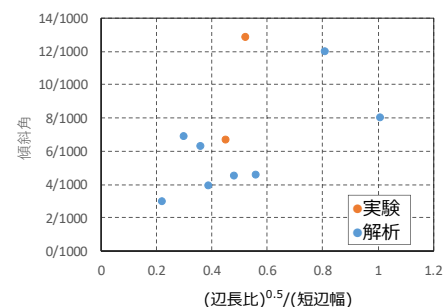


図3 荷重負担幅と傾斜角の関係

ここから、辺長比に応じた地盤の塑性化範囲を設定することで、杭が破損した後に地盤が負担できる荷重を求めることが可能であることが示された。実用化のためには今後さらに多くの実験、解析データの蓄積が必要であるものの、このような手法により地盤への荷重の移行を考慮した杭の残存軸耐力を耐震設計、耐震診断の指標として用いることの可能性を確認できた。

<引用文献>

- 1) 日本建築学会，建築基礎構造設計指針，2019，19-21
- 2) 日本建築防災協会，既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，2017，111-115
- 3) 日本建築学会，基礎部材の強度と変形性能，2022，28-60

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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 金子 治	4. 巻 68-3
2. 論文標題 建築物における杭の耐震性能	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 30-31
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 無
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 金子 治	4. 巻 48-2
2. 論文標題 建築分野におけるコンクリート系杭の構造性能評価の現状	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 基礎工	6. 最初と最後の頁 80-83
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 無
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 Subedi Naresh, Thusoo Shreya, Obara Taku, Kono Susumu, Kaneko Osamu, Hayakawa Tetsuo, Watanabe Hidekazu, Mukai Tomohisa	4. 巻 174
2. 論文標題 Flexural performance of cast-in-place concrete-filled steel tube piles under varying axial load	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Thin-Walled Structures	6. 最初と最後の頁 109130 ~ 109130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tws.2022.109130	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松林正也, 金子治, 佐野大作, 福田健
2. 発表標題 杭基礎の残存軸耐力に関する模型実験
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子治, 今井康幸
2. 発表標題 場所打ち鋼管コンクリート杭の使用実態に関する調査
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口智也, 金子治, 佐野大作, 松林正也
2. 発表標題 杭基礎の残存軸耐力に関する研究(その1 鉛直載荷試験)
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松林正也, 金子治, 田口智也, 福田健
2. 発表標題 杭基礎の残存軸耐力に関する研究(その2 シミュレーション解析)
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田健, 佐野大作, 田口智也, 金子治
2. 発表標題 杭基礎の残存軸耐力に関する模型実験
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松林正也, 金子治
2. 発表標題 上部構造を耐震補強した建築物の基礎構造の耐震診断
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松林正也, 金子治
2. 発表標題 2016年熊本地震における杭基礎の被害における杭頭固定度の影響に関する解析的検討
3. 学会等名 2019年度日本建築学会中国支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井康幸, 宮本和徹, 田中昌史, 堀川剛, 荻田成也, 森島洋一, 田中幸芳, 矢田哲也, 金子治
2. 発表標題 場所打ち鋼管コンクリート杭の継手部曲げ実験結果とその評価
3. 学会等名 2019年度日本建築学会中国支部研究会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------