

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：82115

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2017

課題番号：25709049

研究課題名(和文)大地震時における建物機能維持を目指した既存杭基礎への耐震補強法の開発

研究課題名(英文) Development of retrofit method for existing pile foundation to maintain building function during large earthquake

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) 15,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では建物の機能継続の性能を確保するために、耐震性の低い既存杭基礎を対象として、耐震診断法とモニタリング手法、および効果的な補強手法を提案するための基盤となる実験データを収集し、次の成果を得た。1)地盤-建物連成系の一体解析と構造実験により、地震時における杭頭接合部の耐震性能と損傷過程を明らかにした、2)杭の原位置水平載荷実験により杭周地盤抵抗に対する地盤改良の影響を評価した、3)既存杭基礎建物に適用する杭頭絶縁基礎の有効性を模型振動実験により示した。

研究成果の概要(英文)：In order to ensure the performance continuity of building function, experimental data sets are organized, the data sets are the basis for proposing seismic diagnostic methods and monitoring methods and effective retrofit methods for existing pile foundation with low earthquake resistance performance. In this research, the following results are obtained; 1) the seismic performance and damage process of a pile cap joint during the large earthquake are analyzed by push over analyses by using 3D-flame models considering with soil structure interaction and structural experiment of a pile cap joint, 2) the lateral cyclic loading tests of the pile are conducted and the influence of ground improvement on lateral resistance of the pile head are evaluated, 3) the effectiveness of pile head insulation foundation applied to existing pile foundation building are indicated by shaking table tests of building models and analyses by using 3D-FEM.

研究分野：建築構造

キーワード：建築基礎構造 杭基礎 既存建物 耐震補強 新工法 動的相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は建物に甚大な被害をもたらした。基礎構造の被害に着目すると、特に液状化の被害が大きかった浦安地域では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、基礎構造の耐震性能の重要性を改めて認識させられることになった。建築の耐震工学においては、人命を守ることが第1の命題である。しかし、今までの地震被害を鑑みると、今後は建物を建てる側の責任として、建物の安全性だけでなく、機能性を含めて、建物の保有する性能を使用者に対して十分に説明する義務がある。

平地面積の狭い我が国においては、軟弱地盤上に建物を建てるが多く、基礎形式として杭基礎がよく用いられているため、杭基礎建物の耐震性能を精度よく評価することが急務となっている。しかし、杭基礎が破壊されても建物が倒壊した例は極めて少なく、現行の耐震設計法では杭基礎については中地震において損傷度合いを確認することのみに留められており、杭基礎の耐震設計レベルは高くない。最近になって、大規模な建物では大地震における杭基礎の地震応答を評価されている例も挙げられ、少しずつ杭基礎の耐震設計レベルは高まっていると言えるが、既存の中小規模の杭基礎建物については大地震時の安全性の確認がされておらず、使用者のみならず、設計者も、杭基礎の耐震性能を理解できないまま、既存杭基礎建物は放置されているのが現状である。よって、建物の機能性確保の観点から、杭基礎の耐震性能を把握した上で、必要に応じて杭基礎に耐震補強を施す必要性は多分にあると考える。

一方、実物建物の耐震性能を把握するためには、信頼性の高い耐震診断法が必要不可欠である。また、常に一定の耐震性能を確保するためには、精度の高いモニタリング手法が必要である。上部構造においては、今までに蓄積された柱・梁・耐震壁の水平載荷実験やレベルの高い設計図書に基づいて、有効な耐震診断評価法が確立されている。また、常時微動計測など、実測に基づく方法も見られる。しかし、杭基礎においては、設計のレベルが高くないこと、地中に埋まっているため大掛かりな掘削作業をしなければ杭の状態を確認できないこと、杭基礎に対する振動性状の実測調査例がほとんどないことなどが理由で、既存の杭に対する健全性の評価方法はあるものの、地震時の耐震性能評価法は無いに等しく、耐震補強法に加えて、簡便で精度よく評価できる既存杭の耐震診断法の確立が望まれる。

## 2. 研究の目的

本研究では建物の機能継続の性能を確保することを旨として、耐震性の低い既存杭基礎を対象として、耐震診断法とモニタリング

手法、および効果的な補強手法の確立を目的とする。本研究課題では、1) 地盤-建物連成系の一体解析と構造実験による既存杭基礎の耐震性能の把握、2) 杭の原位置水平載荷実験による杭周地盤抵抗に対する地盤改良の影響評価、3) 既存杭基礎建物に適用する杭頭絶縁基礎の模型振動実験、の3つの課題を実施する。それぞれの課題の目的は次のとおりである。

### 1) 既存建物の杭基礎の耐震性能評価

既往の被害地震における杭基礎の被害事例を見ると、杭頭部に損傷を生じた事例が多い。一方、近年では非構造壁の有効活用を目的とする研究や既存建物に対する耐震補強事例が増えており、上部構造の耐力は増大していると考えられる。すなわち、大地震時に杭頭部が損傷する可能性が、以前に増して高まっていると言える。一般に、杭頭部にはパイルキャップが設けられ、柱と基礎梁が接合される。杭頭接合部と接続する柱、杭や基礎梁の応力・変形性状は相互に影響し合うため、杭頭部の地震被害を考える場合には杭頭接合部の地震時挙動を考慮することが必要不可欠である。そこで本課題では、大地震時の杭頭接合部の挙動を把握すること、および地震後における杭頭接合部の状況判断に繋がる基礎データを得ることを目的として、杭頭接合部の部分架構実験を実施する。

### 2) 地盤抵抗に対する地盤改良の影響評価

既存の杭基礎を取り換えることは容易ではないため、建物の機能継続の性能を高めるためには杭体を補強する、もしくは不同沈下を生じさせにくい機構を適用する等の対策を講じる必要がある。その対策の一つとして、地盤改良を併用する機構が考えられ、データの蓄積次第で技術的な発展が期待できる。本課題では、杭周囲地盤に対する地盤改良が杭の水平抵抗性状に及ぼす影響を実証することを目的として、実地盤における鋼管杭の静的水平載荷実験を実施する。

### 3) 杭頭絶縁基礎の地震時挙動の把握

杭頭とフーチングの間を非接合とする杭頭絶縁基礎は、地震時の上部構造物の応答と杭の曲げ応力の両者を低減でき、建物の機能継続性の観点において脆弱と考えられる既存杭に対しても応用できる可能性がある。ただし、杭頭を非接合することで構造物の地震時挙動が複雑になり、杭に生じる応力状態が変化することが想定されるため、現象と応答の関係を実証研究により明確化しておく必要がある。本課題では、杭頭絶縁基礎の地震時杭応力の性状把握を目的とした重力場における杭基礎模型振動実験を実施する。

## 3. 研究の方法

3つの課題に対しては、実験および解析の両面から研究を実施する。

### 1) 既存建物の杭基礎の耐震性能評価

本課題では、1995年兵庫県南部地震で基礎梁および杭頭接合部に被害が生じた実大建

物を対象とする。建物は神戸市東灘区に位置する地上 8 階建(高さ 23.7m)の集合住宅で、1979 年竣工のため、旧耐震基準(1981 年 6 月に新耐震基準が施行)に準じて建てられた建物である。対象建物は兵庫県南部地震の震度 7 地域内に立地しており、基礎梁、杭頭接合部に被害が生じたため、被害の程度は大破と判定された。本課題では、構造計算書に基づいて対象建物を 2 次元フレームモデルにモデル化し、静的荷重増分解析により構造特性を分析することにより、被害が生じた杭頭接合部への地震外力を解析的に評価する。さらに図 1 に示すように、評価された地震外力を忠実に作用させる外柱 - 基礎梁 - 杭の部分架構実験を実施することにより、杭頭接合部の損傷過程の詳細を明らかにする。

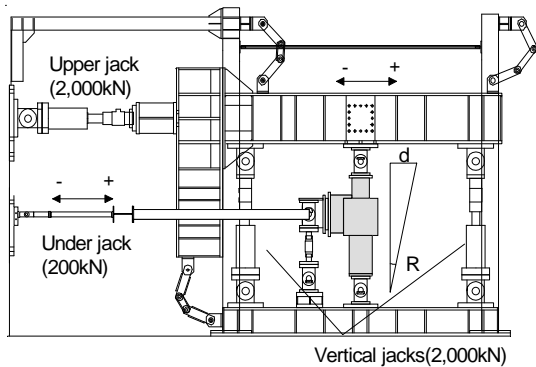


図 1 杭頭接合部の部分架構実験の概要

## 2) 地盤抵抗に対する地盤改良の影響評価

本課題では杭の原位置水平載荷実験により、地盤抵抗に対する地盤改良の影響評価を実施する。実験装置の概要を図 2 に示す。試験杭は全て杭径 190.7mm、厚さ 7.0 mm の鋼管杭である。試験杭の杭頭は回転自由条件として、杭頭に対して漸増繰返し水平載荷する。実験ケースとして、杭先端における羽根の有無で 2 ケース、試験杭の杭周地盤を地盤改良する場合で、改良地盤の物性、地盤改良の範囲をパラメータとした 4 ケースの合計 6 ケースを実施する。改良地盤には、強度が 0.5MPa の低強度セメント系改良地盤、強度が 2.0MPa の一般的に用いられているセメント系改良地盤、強度が 0.5MPa の複合改良地盤の 3 種類を用いる。ここで、セメント系改良地盤とは、建設発生土と水とセメントで構成された

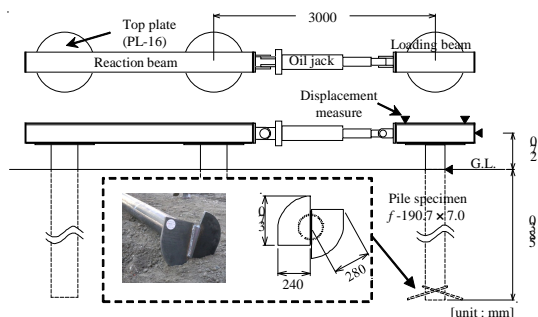


図 2 杭の原位置水平載荷実験の概要

固化処理土であり、複合改良地盤とは、この固化処理土に繊維材(ポリプロピレン系短繊維)を、体積 1m<sup>3</sup> あたり 3% 添加したものである。

## 3) 杭頭絶縁基礎の地震時挙動の把握

本課題では杭頭絶縁基礎を適用した模型建物の振動実験により、その地震時挙動を把握する。図 3 に実験装置全体図を示す。杭基礎建物模型は 16 本杭と 4 本杭の 2 試験体とし、杭頭接合方法の異なる 2 ケース(杭頭絶縁基礎と杭基礎)を実験する。2 体の試験体の重量は杭の平均長期軸力が概ね同じになるように試験体重量を決定している。各実験ケースでは正弦波加振 地震波加振の順に漸増振幅で連続的に加振する。連続加振に伴う模型地盤の物性変化を極力抑えるために、模型地盤は相対密度 80% 程度を目標として製作する。さらに、実験結果に対しては有限要素解析によるシミュレーションを実施する。

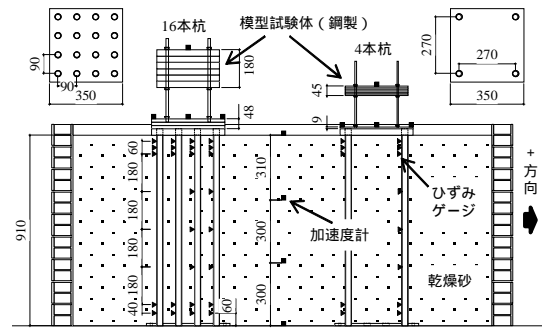


図 3 杭頭絶縁基礎の振動実験の概要

## 4. 研究成果

各設定課題で得られた成果を以下に示す。

### 1) 既存建物の杭基礎の耐震性能評価

- ・検討対象とした杭基礎建築物に対する上部構造 - 杭基礎一体モデルの静的荷重増分解析より、外柱直下の杭頭には柱せん断力の半分以上の基礎版慣性力が作用すると算定され、杭頭接合部の損傷過程を正確に把握するためには基礎版慣性力を適切に考慮する必要があることを示した。

- ・外柱に作用するせん断力および軸力と同時にパイルキャップに作用する基礎版慣性力を模擬するために、基礎梁端部から水平力を載荷する載荷手法を提案した。

- ・壁なし試験体の正載荷側では基礎梁の曲げひび割れの拡幅が顕著であったのに対して、壁あり試験体の正載荷側では杭上部コンクリートの圧壊が確認された。一方、負載荷側では壁なし試験体および壁あり試験体ともに杭上部において曲げひび割れの拡幅が顕著であった。

- ・研究対象とした被災建物では、パイルキャップにせん断ひび割れおよびコンクリートの剥落などの被害が確認された。一方、被害建物を想定した試験体では、パイルキャップにせん断ひび割れの発生が確認されたもの

の、被災建物ほどの顕著な損傷は確認されなかった。

・杭頭を対象とした曲げ解析の結果は最大耐力到達後の大変形域の骨格曲線を比較的精度良く評価した。

・壁あり試験体における杭頭の曲げ破壊時に着目し、杭頭と接続する基礎梁主筋のひずみ挙動を分析した。結果、基礎梁は壁により変形が拘束されているものの、杭頭の耐力低下に伴い主筋のひずみが低下する挙動が観察された。将来的に杭頭の損傷検出に有効な指標となる可能性を指摘した。

・以上より、杭基礎の耐震診断法とモニタリング手法の構築に資する基礎データを収集することができた。これまでに、杭頭接合部に関する既往の構造実験は極めて少ない上に、本実験は実被害を受けた杭頭接合部に対する被害シミュレーションの位置付けも含まれており、実験のインパクトは高いと考えられる。

## 2) 地盤抵抗に対する地盤改良の影響評価

・ストレート杭および羽根付き杭の両方において、杭頭への漸増振幅繰返し载荷に伴い、杭周地盤の地盤変状と共に杭 - 地盤間に剥離が生じることを示した。さらに、羽根付き杭の杭頭荷重 - 変位関係の剛性はストレート杭に比べて小さく、履歴形状は原点付近ですばむ傾向が顕著に見られることを示した。

・常時微動観測を実施したところ、杭周地盤抵抗の違いがピーク振動数の変化として表されることを示し、常時微動観測により杭頭における基礎の水平抵抗の変化を検知できる可能性を示した。

・地盤反力 - 変位関係は地盤深さによって形状が異なり、地表面近くではスリップ特性が現れることを示した。このとき、羽根付き杭のスリップ特性はストレート杭に比べて強く、羽根付き杭の杭頭荷重 - 変位関係の履歴形状に影響することを指摘した。

・杭頭荷重 - 変位関係の情報のみから弾性支承梁の解を用いて地盤反力 - 杭変位関係を推定する簡略法は、推定対象となる深さ付近であれば、繰返し载荷を受ける杭の水平地盤抵抗を概ね推定可能であることを示した。また、簡略法では羽根付き杭の地盤反力係数の低減率を大きめに評価する傾向があるが、杭変位がある程度大きくなると手法による低減率の差が小さくなるため、簡略法を用いて低減率を概ね評価できることを示した。

・羽根付き杭の周辺地盤を地盤改良することによって、ストレート杭と同等以上に杭頭における地盤抵抗が増大することを示した。このとき、改良地盤を複合地盤材料とすることによって、杭頭変位の増大に伴う杭頭荷重の低下をある程度抑制することができることを示した。

・以上より、杭頭の水平抵抗に対して、杭周地盤抵抗の違いが与える影響を明らかにする中で、杭周地盤への地盤改良が与える影響についても実験的に明らかにしたことによ

り、杭基礎に対して地盤改良を併用する機構を構築するための基盤となるデータを得ることができた。本実験は鋼管杭で実施したが、既存杭として数多く見られるコンクリート製の既製杭に対しても、杭周辺地盤への改良地盤の影響は同様と考えられる。既製杭は脆性的に破壊することが多く、建物の不同沈下に直結するため、改良地盤を併用する場合には杭頭絶縁基礎などの杭頭処理を実施する必要がある。

## 3) 杭頭絶縁基礎の地震時挙動の把握

□杭頭絶縁基礎は、上部建物の地震応答と杭頭に生じる曲げ応力の両方を低減できることを示した。特に、上部建物の地震応答については、加速度応答を低減させるだけではなく、ロッキング率が増大することにより上部建物のせん断変形量を大きく低減できることを示した。

□杭頭に作用する上部構造慣性力は、加振力によって変化する可能性があることを示した。

・杭頭絶縁基礎の地震時挙動を把握するために実施した振動台実験に対するシミュレーション解析を行い、上部構造の振動特性および杭頭絶縁基礎の杭頭応力が杭基礎と比較して大きく低減されることを確認した。

・以上より、模型実験を通じて、既存杭の地震時応力の低減に対して杭頭絶縁基礎が効果的であることを示した。実建物に対して杭頭絶縁基礎を適用する場合には、建物に対する杭と地盤の支持性能を確保するために、改良地盤を併用する必要性が生じると考えられる。2)と3)の課題の成果を合わせることによって、既存杭基礎に対する有効な補強手法を構築できる可能性が高い。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

柏尚稔, 小林俊夫, 宮本裕司 : 繰返し水平载荷実験における羽根付き鋼管杭の水平抵抗評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, pp.99-104, 2018.2. 査読有

柏尚稔, 真田靖士, 鈴木卓, 市川覚, 倉本洋: 地震時の外力分布を考慮した外柱 - 基礎梁 - 場所打ち杭接合部の部分架構実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.735, pp.653-662, 2017.5. 査読有

[学会発表](計 11 件)

柏尚稔, 中川博人, 中井正一, 小山信 : 杭頭絶縁基礎構造物の地震時挙動評価実験 その1: 実験計画と実験結果, 日本建築学会大会, 2016.8. (福岡)

中川博人, 柏尚稔, 中井正一, 小山信 : 杭頭絶縁基礎構造物の地震時挙動評価実験 その2: 3次元FEMによるシミュレーション解析, 日本建築学会大会, 2016.8. (福岡)

山田浩貴，弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：原位置載荷実験に基づく3D-FEMによる地盤反力係数評価法の有効性の検証，日本建築学会大会，2016.8.（福岡）  
山田浩貴，弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：非線形3D-FEMを用いた地盤反力-変位関係の評価方法，日本建築学会近畿支部研究報告会，2016.6.（大阪）  
弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：杭周地盤を地盤改良した鋼管杭の水平載荷実験に対するシミュレーション解析，日本建築学会大会，2015.9.（神奈川）  
市川覚，鈴木卓，柏尚稔，真田靖士，倉本洋：既存建物の外柱-杭-基礎梁接合部の部分架構実験，日本建築学会大会，2015.9.（神奈川）  
弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：鋼管杭の水平載荷実験に対するシミュレーション，日本建築学会近畿支部研究報告会，2015.6.（大阪）  
高田光真，柏尚稔，宮本裕司：原位置載荷実験のシミュレーション解析に基づく羽根付き鋼管杭の水平抵抗，日本建築学会大会，2014.9.（神戸）  
弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：兵庫県南部地震で杭頭接合部が損傷した杭基礎建物のシミュレーション解析，日本建築学会大会，2014.9.（神戸）  
柏尚稔，宮本裕司：振動台実験における地盤改良併用杭基礎建物の地震応答性状，日本建築学会近畿支部研究報告会，2014.5.（大阪）  
弾健太郎，柏尚稔，宮本裕司：兵庫県南部地震で杭頭接合部が損傷した杭基礎建物のシミュレーション解析，日本建築学会近畿支部研究報告会，2014.5.（大阪）

## 6. 研究組織

### (1) 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