

建築研究資料

Building Research Data

No. 195

October 2019

大地震後の継続使用性を確保するための コンクリート系杭基礎構造システムの 構造性能評価に関する研究

Study on Structural Performance Evaluation for Concrete Pile
Sub-assemble System with Post-earthquake Functional Use

向井智久, 平出務, 渡邊秀和, 中村聡宏, 毎田悠承,
河野進, 岸田慎司, 小林勝巳, 金子治, 福田健, 今井康幸, 木谷好伸,
石川一真, 早川哲生, 長澤和彦, 平尾一樹, 浅井陽一

*Tomohisa MUKAI, Tsutomu HIRADE, Hidekazu WATANABE, Akihiro NAKAMURA,
Yusuke MAIDA, Susumu KONO, Shinji KISHIDA, Katsumi KOABAYASHI,
Osamu KANEKO, Takeshi FUKUDA, Yasuyuki IMAI, Yoshinobu KIYA,
Kazuma ISHIKAWA, Tetsuo HAYAKAWA, Kazuhiko NAGASAWA,
Kazuki HIRAO, Yoichi ASAI*

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

はしがき

近年の大地震の特徴的被害の一つとして、建築物の杭基礎、特に既製コンクリート杭の被害が顕在化し、それが原因で傾斜した上部建築物そのものの構造被害は小さくても、地震後継続使用できなくなる事例が複数報告されています。建築基準法における杭基礎に関する構造基準は、中小地震に対する損傷制御のための設計が必要ですが、大地震に対する終局限界状態を確保するための設計は義務づけられていないため、大地震時における杭被害を軽減し、地震後継続使用を確保することは難しい状況です。上記の杭基礎被害を軽減するためには、現行基準で求める構造性能を上回る設計や損傷軽減できる杭基礎の技術開発等が必要な状況にあります。

そのような問題意識の下、建築研究所では 2013 年から 3 カ年実施した研究課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築」や基準整備促進事業課題である「基礎ぐいの地震に対する安全対策の検討」において、杭体やパイルキャップなどからなる杭基礎構造システムの大地震時における損傷評価を目的とした検討を行ってきました。具体的には大学や民間企業と連携して東日本大震災における地震被害の収集・分析並びに被害再現のための構造実験に加え、日本建築構造技術者協会と連携して地震後継続使用性を確保するための構造設計法についての検討です。それらの成果は 2016 年 1 月に報告を行っており、その時点における評価技術に関する基礎的検討を実施して参りました。

上記背景に加え、2016 年には熊本地震が発生し、杭基礎部材の被害が散見される状況にあることも踏まえ、建築研究所では 2016 年より 3 カ年で、指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」の中でコンクリート系杭基礎構造システムを対象とした比較的大規模の構造実験を実施し、これまでの取組みをさらに推進すべく、ここにその成果を取り纏めました。

2018 年 6 月より、建築研究開発コンソーシアムにおいて「建築基礎・地盤研究開発推進のためのロードマップ作成」研究会を設置し、ロードマップの作成も同時に行ってきました。ここで取り纏める技術資料の成果を活用して、大地震後の継続使用性を確保できる基礎構造システムが普及することに加え、将来の基礎構造に関する研究のより一層の活性化を願います。

令和元年10月

国立研究開発法人 建築研究所
緑川 光正（理事長）

大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系 杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究

概要

2011年の東日本大震災では、建築物の杭基礎に発生した被害が原因で上部構造物が傾き、当該建築物が地震後継続使用できなくなる事例が報告されている。現行基準における杭基礎は、中小地震における損傷制御を目的とした設計が行われているものの、大地震後の継続使用性を確保するための終局限界状態の構造性能に基づく設計はほとんど行われていない。そのような中、建築研究所では2013年から3年間実施した研究課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築」や基準整備促進事業課題である「基礎ぐいの地震に対する安全対策の検討」において、杭体やパイルキャップなどからなる杭基礎構造システムの大地震時の損傷評価を目的として、東日本大震災における地震被害の収集・分析や被害再現のための構造実験、地震後継続使用性を確保するための構造計算方法について検討を行ってきた。その検討において、既製コンクリート杭の大きな軸力を負担した場合の構造性能評価やパイルキャップ部分の終局強度評価、場所打ちコンクリート杭の補修補強後の構造性能等に関して課題を残していた。

そこで建築研究所では2016年より3年間で、指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性能評価技術の開発」の中でコンクリート系杭基礎構造システムを対象とした構造実験を実施し、大地震後の継続使用性を確保するための部材の構造性能評価に資する技術資料の収集を行った。具体的に本課題では、前課題で問題となった上記の課題についての検討を実施するとともに、靱性のある終局状態の確保の実現に向けて杭頭接合面破壊に着目した検討を実施した。

本資料では、大きな軸力を負担した既製コンクリート杭の構造性能評価のための構造実験を実施し、その結果を2、3章に示した。また、大きな軸力を負担した場所打ち鋼管コンクリート杭の構造性能評価のための構造実験を実施し、その結果を6章に示した。4章では、場所打ちコンクリート杭の補修補強後の構造性能の把握を目的とした実験を行った結果を示した。また、5章ではパイルキャップ部分の終局強度評価としてト形部分架構試験体を用いた実験結果を示した。7、9章では靱性のある終局状態の確保のための基礎検討として、杭頭接合面破壊に着目した杭基礎構造システムのト形部分架構試験体を用いた実験の結果を示した。8章では、杭頭接合面におけるコンクリートの支圧強度および圧縮靱性確保のための要素実験を実施した結果を示した。10章では、2章～9章で実施した実験および検討結果をまとめて、本研究で得られた成果と今後の研究課題を示した。

Study on Structural Performance Evaluation for Concrete Pile Sub-assembly System with Post-earthquake Functional Use

Summary

In the 2011 Tohoku Earthquake, some buildings were tilted due to pile damage. Therefore, it was difficult that these buildings were used continuously after the earthquake. Under Japanese building code, concrete pile foundation system is required to design based on the allowable stress concept under medium level earthquake. However, structural design based on ultimate limit state for the post-earthquake functional use is not generally required. The Building Research Institute (BRI) has conducted research for concrete pile system in priority research project “Development on seismic performance evaluation methods for government office buildings and evacuation facilities with post-earthquake functional use (2013-2015)” and Building Standard Provision Promotion Research Project “Investigation on safety limit state of concrete pile foundation under severe earthquake” in order to evaluate structural performance of concrete pile system. In these previous projects, some structural tests were conducted in order to analyze factors of pile foundation damaged due to 2011 Tohoku earthquake. Furthermore, structural design method of concrete pile system with post-earthquake functional use was shown. However, some issues remained in the project. First issue is structural performance evaluation for pre-cast concrete pile under high axial load. Second one is evaluation method for ultimate strength of pile cap and third one is structural performance evaluation for a repaired and retrofitted cast-in-place concrete pile.

In order to solve these issues, next research project “Development on seismic performance evaluation techniques for existing buildings with post-earthquake functional use (2016-2018)” had been conducted. In this project, more structural tests were conducted for the above issues. Furthermore, ultimate behavior of pile-pile cap interface section is focused to develop ductile foundation structural system with pre-cast concrete piles.

In this report, static loading tests of pre-cast concrete piles were shown in chapter 2 and 3. Static loading tests of cast-in-place concrete piles were shown in chapter 6. Pre-cast concrete piles or cast-in-place concrete piles were tested under high axial load in order to evaluate structural performance of each pile, respectively. Structural performance evaluation for a repaired and retrofitted cast-in-place concrete pile is shown in chapter 4. The column-beam-pile joint specimens were tested in order to evaluate ultimate strength of the pile cap; the results are shown in chapter 5. Static loading tests of column-beam-pile joints were shown in chapter 7 and 9 to understand ductile behavior of foundation structural system with pre-cast concrete piles. The column-beam-pile joint specimens were tested for ultimate behavior of pile-pile cap interface section. Static loading tests for bearing concrete stress of pile-pile cap interface section were shown in chapter 8 to develop ductile foundation structural system with pre-cast concrete piles. Finally, the conclusions were summarized in chapter 10.

目次

第1章 序論

1.1.	はじめに	1-1
1.2.	杭基礎構造システム	1-2
1.3.	各章の構成	1-3
	参考文献	1-5

第2章 既製杭（SC 杭，PRC 杭，PHC 杭）の曲げ破壊実験

2.1	はじめに	2-1
2.1.1	研究背景	2-1
2.1.2	研究目的	2-2
2.2	既往研究	2-3
2.3	実験概要	2-6
2.3.1	実験の目的	2-6
2.3.2	試験体の概要	2-6
2.3.3	設計耐力の算出	2-13
2.3.4	材料特性	2-15
2.3.5	載荷方法	2-18
2.3.6	計測方法	2-24
2.4	実験結果	2-28
2.4.1	荷重－変形角関係	2-28
2.4.2	モーメント－曲率関係	2-53
2.4.3	変形性能	2-78
2.4.4	破壊性状	2-80
2.4.5	プレストレスによる初期ひずみ	2-85
2.4.6	ひずみの推移	2-89
2.4.7	軸方向変形	2-106
2.4.8	残留変形	2-115
2.4.9	まとめ	2-117
2.5	断面解析	2-118
2.5.1	解析モデルの概要	2-118
2.5.2	解析結果	2-123
2.5.3	まとめ	2-176
2.6	結論	2-177
2.6.1	まとめ	2-177
2.6.2	今後の課題	2-177
	参考文献	2-178
	謝辞	2-179

第3章 既製コンクリート杭（PHC杭，PRC杭）のせん断破壊実験

3.1	はじめに	3-1
3.1.1	研究背景	3-1
3.1.2	研究目的	3-1
3.1.3	既往の評価式	3-2
3.2	実験概要	3-9
3.2.1	実験の目的	3-9
3.2.2	試験体の概要	3-9
3.2.3	材料特性	3-12
3.2.4	載荷方法	3-13
3.2.5	計測計画	3-15
3.3	実験結果	3-19
3.3.1	せん断力 - 代表変形角関係	3-19
3.3.2	損傷の進展状況と最終破壊性状	3-24
3.3.3	変形分離	3-35
3.3.4	ひずみの推移	3-39
3.3.5	PC鋼材および異形鉄筋の平均付着応力	3-54
3.3.6	破壊モードの考察	3-61
3.4	考察	3-62
3.4.1	弾性剛性の計算値と実験値の比較	3-62
3.4.2	既往の設計法による計算耐力値と実験耐力値の比較	3-65
3.4.3	軸方向ひび割れ耐力の計算値と実験値の比較	3-72
3.5	結論	3-76
3.5.1	まとめ	3-76
3.5.2	今後の課題	3-77
	参考文献	3-77
	謝辞	3-77

第4章 場所打ちRC杭の杭頭部曲げせん断実験

4.1	はじめに	4-1
4.2	実験概要	4-1
4.2.1	試験体概要	4-1
4.2.2	杭体の補修・補強概要	4-3
4.2.3	使用材料	4-7
4.2.4	載荷方法	4-8
4.2.5	計測方法	4-10
4.3	実験結果	4-12
4.3.1	試験体N-3L	4-12

4.3.2	試験体 N-2S	4-18
4.3.3	試験体 N-2L	4-22
4.3.4	試験体 V-2	4-26
4.3.5	試験体 N-1.75-S-1	4-30
4.3.6	試験体 N-1.75-S-C	4-33
4.3.7	試験体 V-1.75	4-36
4.3.9	試験体 N-1.4S-H	4-40
4.3.10	補修試験体 N-3L-R	4-41
4.3.11	補修・補強試験体 N-2S-R	4-43
4.3.12	補修・補強試験体 N-2L-R	4-44
4.4	考察	4-45
4.4.1	最大耐力の評価	4-45
4.4.2	杭体の復元力特性の評価	4-46
4.4.3	杭頭部の補修補強効果	4-47
4.5	結論	4-47
4.4.1	まとめ	4-47
4.4.2	今後の課題	4-47
	参考文献	4-48

第5章 杭基礎部分架構を用いたパイルキャップせん断実験

5.1	はじめに	5-1
5.1.1	研究背景と目的	5-1
5.1.2	既往研究	5-3
5.2	実験概要	5-19
5.2.1	試験体概要	5-19
5.2.2	材料特性	5-49
5.2.3	載荷方法	5-87
5.2.4	測定方法	5-89
5.3	実験結果	5-107
5.3.1	実験結果一覧	5-107
5.3.2	ひび割れ状況	5-147
5.3.3	荷重 - 変位関係	5-377
5.3.4	各鉄筋のひずみ分布	5-552
5.4	考察	5-815
5.4.1	各変形成分の検討	5-815
5.4.2	モールのひずみ円	5-820
5.4.3	接合部パネルにおける変形性状	5-850
5.4.4	破壊性状の考察	5-874
5.4.5	等価粘性減衰定数	5-880

5.4.6	最大耐力後の破壊性状	5-886
5.4.7	破壊形式の分類	5-894
5.4.8	基礎梁の剛域長さ及び危険断面位置の検討	5-894
5.4.9	柱の剛域長さ及び危険断面位置の検討	5-900
5.4.10	接合部入力せん断力の検討	5-912
5.4.11	実験に基づいたパイルキャップを有する接合部せん断耐力式の検討及び提案	5-914
5.4.12	トラス・アーチ理論に基づいたパイルキャップを有する 接合部せん断耐力式の検討及び提案	5-925
5.4.13	パイルキャップせん断強度式の実験結果に基づく検討及び提案	5-939
5.4.14	パイルキャップひび割れ強度の検討	5-953
5.5	結論	5-955
5.5.1	まとめ	5-955
5.5.2	今後の課題	5-958
	参考文献	5-959
第6章	変動軸力を受ける場所打ち鋼管コンクリート杭の曲げ破壊実験	
6.1	はじめに	6-1
6.2	文献調査	6-2
6.2.1	場所打ち鋼管コンクリート杭実態調査	6-2
6.2.2	場所打ち鋼管コンクリート杭の既往曲げ実験	6-4
6.3	実験概要	6-5
6.3.1	試験体仕様	6-5
6.3.2	試験体製作	6-13
6.3.3	載荷方法	6-16
6.3.4	計測方法	6-20
6.4	実験結果	6-22
6.4.1	特性点の定義	6-22
6.4.2	実験結果（特性点と曲げモーメント - 変形角関係）	6-23
6.4.4	鋼管ひずみ分布および鉄筋ひずみ分布	6-27
6.4.5	特性点におけるデータまとめ	6-27
6.4.6	実験結果（モーメント - 曲率関係）	6-27
6.4.7	実験結果（残留変形角、コンクリート残留ひずみ）	6-37
6.4.8	破壊性状	6-39
6.4.9	コア抜きコンクリート強度試験結果	6-42
6.5	実験結果の検討	6-43
6.5.1	既往評価式の終局曲げ耐力計算値と実験値の比較	6-43
6.5.2	断面解析による曲げモーメント - 曲率関係の計算値および実験値との比較	6-48
6.6	まとめ	6-55
	参考文献	6-55

謝辞	6-55
----	------

第7章 既製 SC 杭を用いた実大杭基礎部分架構実験

7.1	はじめに	7-1
7.1.1	研究背景	7-1
7.1.2	研究目的	7-1
7.2	実験概要	7-2
7.2.1	試験体の構成と寸法, 配筋	7-2
7.2.2	材料特性	7-7
7.2.3	載荷計画	7-8
7.2.4	計測計画	7-14
7.3	試験体の設計	7-29
7.4	実験結果	7-42
7.4.1	荷重変形関係 (2P-R)	7-42
7.4.2	杭頭接合面曲げモーメント M_R 杭頭回転角 θ 関係 ($M-\theta$)	7-45
7.4.3	杭体-パイルキャップ接合部間の変形分離	7-51
7.4.4	ひび割れ進展状況とひび割れ幅の拡幅状況	7-57
7.4.5	各種鉄筋の降伏状況	7-62
7.4.6	杭頭接合部の抵抗機構	7-65
7.5	考察	7-67
7.5.1	杭頭曲げモーメントの計算値との比較	7-67
7.5.2	杭頭回転角 θ の計算値との比較	7-69
7.5.3	剛域長さの検討	7-72
7.5.4	等価粘性減衰定数 h_{eq}	7-75
7.6	結論	7-77
7.6.1	まとめ	7-77
7.6.2	今後の研究課題	7-79
付録1	Channel List	7-80
付録2	杭側支持点鉛直反力 RR①, ②	7-83
付録3	OPTOTRAK の動作確認	7-84
付録4	ひび割れ図の一覧	7-87
付録5	各種鉄筋の降伏状況の一覧	7-101
	参考文献	7-121

第8章 杭頭接合面を模擬した支圧試験

8.1	はじめに	8-1
8.2	既往の研究	8-1
8.2.1	支圧強度について	8-1
8.2.2	標準パイルキャップ寸法	8-5

8.2.3	パイルキャップの配筋	8-6
8.3	実験概要	8-6
8.3.1	試験体仕様	8-6
8.3.2	試験体製作	8-14
8.3.3	載荷方法	8-16
8.3.4	計測方法	8-17
8.4	実験結果	8-19
8.4.1	支圧強度比～支圧面積比関係	8-19
8.4.2	荷重～めり込み変位関係	8-19
8.4.3	埋込みゲージ分布	8-22
8.4.4	荷重～帯筋・中子筋ひずみ関係	8-29
8.4.5	破壊状況	8-32
8.5	実験結果の検討	8-36
8.5.1	支圧強度の算定式と試験結果との比較	8-36
8.5.2	荷重～めり込み変位関係	8-38
8.6	実験概要（シリーズ2）	8-42
8.6.1	試験体仕様	8-42
8.6.2	試験体製作	8-47
8.6.3	載荷方法	8-49
8.6.4	計測方法	8-49
8.7	実験結果（シリーズ2）	8-53
8.7.1	支圧強度比～支圧面積比関係	8-53
8.7.2	荷重～めり込み変位関係	8-53
8.7.3	埋込みゲージ分布	8-55
8.7.4	荷重～帯筋・中子筋のひずみ関係	8-59
8.7.5	荷重～コンクリート側面ひずみ関係	8-61
8.7.6	破壊状況	8-62
8.8	実験結果の検討（シリーズ2）	8-63
8.8.1	支圧強度の算定式と試験結果との比較	8-63
8.8.2	荷重～めり込み変位関係	8-66
8.9	結論	8-69
8.9.1	まとめ	8-69
8.9.2	今後の研究課題	8-69
	参考文献	8-69

第9章 場所打ち鋼管コンクリート杭を用いた実大杭基礎部分架構実験

9.1	はじめに	9-1
9.2	実験概要	9-2
9.2.1	試験体概要	9-2

9.2.2	材料特性	9-8
9.2.3	載荷方法	9-9
9.2.4	各部材の耐力計算	9-12
9.2.5	計測方法	9-14
9.3	実験結果	9-20
9.3.1	荷重-変形関係	9-20
9.3.2	杭体および杭頭接合部に作用する曲げモーメント	9-24
9.3.3	各部の損傷状況	9-25
9.3.4	変形分離	9-40
9.4	考察	9-51
9.4.1	実験で得られた耐力と既往評価式による耐力計算値の比較	9-51
9.4.2	断面解析による M- ϕ 関係の検討	9-54
9.4.3	杭頭接合部危険断面 M- θ 関係と既往算定式の比較	9-57
9.4.4	剛域長さの検討 (試験体 No. 1 について)	9-59
9.4.5	等価粘性減衰定数 (Heq) の算定	9-63
9.4.6	フレームによるモデル化	9-64
9.5	まとめ	9-67

第 10 章 結論

10.1	まとめ	10-1
10.1.1	既製コンクリート杭 杭体の曲げ挙動	10-1
10.1.2	既製コンクリート杭 杭体のせん断挙動	10-1
10.1.3	場所打ちコンクリート杭 杭体の曲げせん断挙動	10-2
10.1.4	場所打ち鋼管コンクリート杭 杭体の曲げ挙動	10-2
10.1.5	杭基礎部分架構 パイルキャップせん断挙動	10-2
10.1.6	杭基礎部分架構 杭頭接合部の地震時挙動	10-4
10.1.7	杭頭接合面の支圧強度	10-6
10.2	今後の課題	10-8
10.2.1	既製コンクリート杭 杭体の曲げ挙動	10-8
10.2.2	既製コンクリート杭 杭体の曲げ挙動	10-8
10.2.3	場所打ちコンクリート杭 杭体の曲げせん断挙動	10-8
10.2.4	場所打ち鋼管コンクリート杭 杭体の曲げ挙動	10-8
10.2.5	杭基礎部分架構 パイルキャップせん断挙動	10-8
10.2.6	杭基礎部分架構 杭頭接合部の地震時挙動	10-9
10.2.7	杭頭接合面の支圧強度	10-9

執筆者一覧

第1章：向井智久（建築研究所），渡邊秀和（建築研究所）

第2章：渡邊秀和（建築研究所），石川一真（COPITA），河野進（東京工業大学）

第3章：渡邊秀和（建築研究所），河野進（東京工業大学）

第4章：毎田悠承（建築研究所），中村聡宏（建築研究所）

第5章：岸田慎司（芝浦工業大学）

第6章：今井康幸（耐震杭協会），早川哲生（耐震杭協会），河野進（東京工業大学）

第7章：長澤和彦（COPITA），平尾一樹（COPITA），河野進（東京工業大学）

第8章：木谷好伸（COPITA），浅井陽一（COPITA），平尾一樹（COPITA）

第9章：早川哲生（耐震杭協会），福田健（戸田建設），河野進（東京工業大学）

第10章：向井智久（建築研究所），渡邊秀和（建築研究所），平出務（建築研究所），小林勝己（フジタ），金子治（広島工業大学）

本資料では、使用した記号の定義がそれぞれの章ごとで異なります。そのため、記載された記号の定義や意味は、章ごとの説明をご参照ください。