

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22360233

研究課題名（和文）杭頭浮き上がりによる基礎回転系損傷回避構造の開発と性能評価・設計指針の作成

研究課題名（英文）DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION / DESIGN GUIDELINE OF DAMAGE SELF-CONTROL STRUCTURES WITH ROTATIONAL FOUNDATION DUE TO UPLIFT AT PILE HEADS

研究代表者

平石 久廣 (HIRAISHI HISAHIRO)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号：40113211

研究成果の概要（和文）：上部構造が損傷を生じる以前の荷重で、起き上がりこぼしのように杭頭の伸びによる基礎回転を生じ、その部分で地震エネルギーを吸収することにより大地震時においても損傷が生じない構造（基礎回転系構造）に対応する杭及び架構の開発を行った。また、構造実験及び地震応答解析の結果を総合し、基礎回転系構造の耐震設計指針、構造詳細、設計・施工マニュアルを作成した。

研究成果の概要（英文）：The new type of structures whose foundation rotates due to the elongation of longitudinal reinforcing bars at the pile heads prior to occurrence of damages in structures has been developed. The seismic energy is dissipated by that elongation of the bars, so the structures scarcely suffer damage. The seismic design guideline, the manual for structural details and design /construction manuals have been also developed, based on the experimental and analytical results of this rotational structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料、構造・地震工学、耐震・制震、損傷制御、コスト削減、鉄筋コンクリート造、基礎回転、杭

1. 研究開始当初の背景

現在の建築構造は、耐震、制震、免震構造に大別される。このうち耐震構造は、大地震

時には損傷を許容した構造といえる。また制震構造はコストとともに意匠上の制約が伴う。免震構造はコスト、敷地上の制約、長周

期地震動など想定外の荷重に対する安全性の問題など、建設にあたり配慮すべき課題も多い。本研究で開発目標とする構造は、上部構造が損傷を生じる以前の荷重で、起き上がりこぼしのように杭頭の伸びによる基礎回転を生じ、その部分で地震エネルギーを吸収することにより大地震時においても損傷が生じない構造である。また意匠上の制約がほとんどなく、コスト的にも従来の構造に比べ最も廉価な構造になりうる。主たる研究課題は、基礎回転系を可能にする損傷を生じない杭の開発、基礎回転系の構造特性の解明、設計法の開発である。

2. 研究の目的

本研究は、平成19年度～平成21年度科学研究費補助金(基盤研究 B)で開発した高軸力下でも大変形までほとんど損傷が生じない杭にさらに改良を加え、

- (1)基礎回転系構造の地震応答解析を行い、その耐震性能及び杭頭に要求される構造性能を解明。
 - (2)基礎回転系の杭に要求される、十数 cm にもおよぶ引張時の浮き上がり、圧縮時の高い軸力及びそれらの状態におけるせん断に対する構造性能、さらに大地震時においても損傷が生じない健全性、このような要件を見たす杭の開発実験の実施と構造詳細の提示。
 - (3)(1)で得られた杭と上部構造からなる一体架構の構造実験とその構造性能の確認。
 - (4)研究成果を総合した基礎回転系損傷回避構造の耐震設計法の開発。
- を目的としている。

3. 研究の方法

(1)基礎回転系構造の地震時応答の解明

①基礎回転系構造建物の地震応答解析

解析対象建物は鉄筋コンクリート造集合住宅とし、解析モデルは図1に示すように上部構造を1質点系モデルに置換し、下部構造は3種類のばねで浮き上がりを表現した。

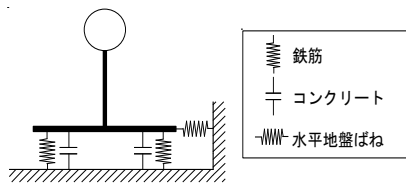


図1 基礎回転系構造の解析モデル

検討項目は以下の通りとする。

- ・杭頭浮き上がり基礎回転系構造の地震時応答特性の把握
- ・水平地震動と鉛直地震動を同時入力したときの応答特性の把握と、杭頭部に緩衝材を設けたモデルの応答低減効果の検証
- ・等価減衰定数の算定式を誘導し、その算定

式を用いた応答評価式の提案

②変動軸力を考慮した杭基礎建物の基本的性状に関する研究

極稀に発生する地震動に対して、杭基礎を有する建物の応答性状把握を目的とした。変動軸力を考慮するために杭にファイバーモデル、地盤と構造物の相互作用モデルにペンジェン型のモデルを採用し時刻歴応答解析を行うことで検討した。

(2)基礎回転系構造に要求される構造性能を有する健全な杭の開発

基礎回転系の杭に要求される構造性能を有する杭を開発するために杭試験体4体の構造実験を行った。平成22年度の試験体は計4体である。実験では大きな浮き上がり変形と高軸力を交互に载荷した。

図2に加力装置を示す。载荷は部材角制御で行い、2基の鉛直アクチュエーター(ACT2およびACT3)を用いて軸力を与え、水平アクチュエーター(ACT1)によりせん断力を与えた。

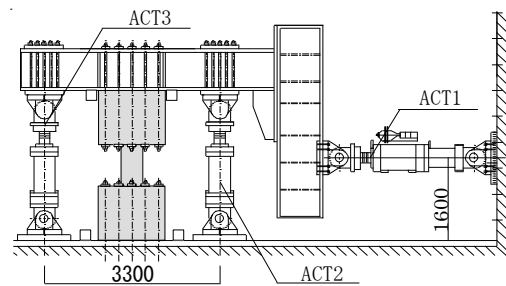


図2 加力装置(単位:mm)

(3)基礎回転系構造の架構実験とその構造特性の解明

平成22年度までの構造実験の成果を受け、基礎回転系の架構実験の詳細を決定し、構造実験を行った。平成23年度の試験体は計3体、平成24年度は計2体である。

図3に加力装置を示す。载荷は部材角制御で行い、2基の鉛直アクチュエーター(ACT2およびACT3)を用いて軸力を与え、水平アクチュエーター(ACT1)により杭頭で浮き上がりを生じさせるために転倒モーメントを加える方法を採用した。

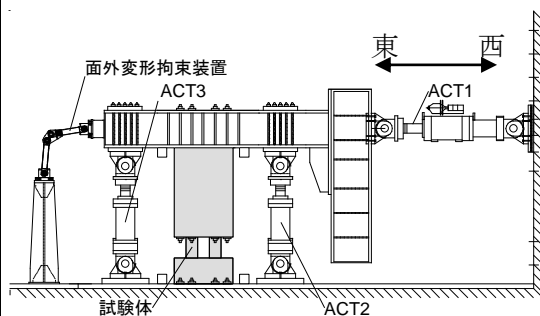


図3 加力装置図

(4) 基礎回転系構造の耐震設計法の開発

(1)~(3)の研究成果を総合し、基礎回転系構造の耐震設計指針の作成を行う。

4. 研究成果

(1) 基礎回転系構造の地震時応答の解明

① 基礎回転系構造建物の地震応答解析

地震応答解析結果として、図4に上部構造の履歴を示す。また参考として、一般的な構造（基礎固定）とした場合の上部構造の履歴もあわせて示す。これより、基礎固定に比べて基礎回転系構造の応答が小さくなること

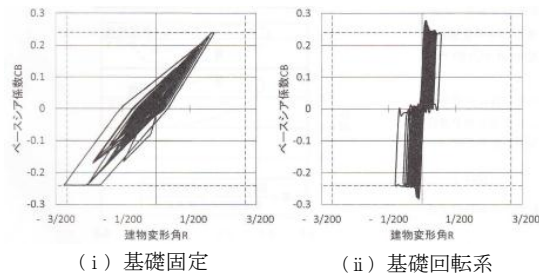


図4 上部構造の履歴

水平地震動と鉛直地震動を同時入力したときの上部構造履歴と上部構造の加速度時刻歴を図5、図6に示す。鉛直地震動が基礎回転系構造の水平方向応答に与える影響は小さいが、上部構造の鉛直方向応答に与える影響は見られる。

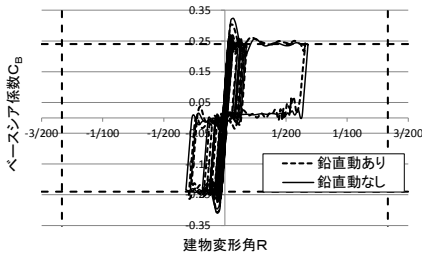


図5 鉛直地震動の影響(水平方向)

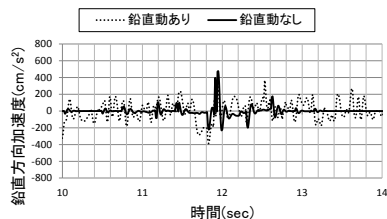


図6 鉛直地震動が鉛直方向に与える影響

また、杭頭部に緩衝材を設けることで上部構造の鉛直方向の加速度応答を低減する効

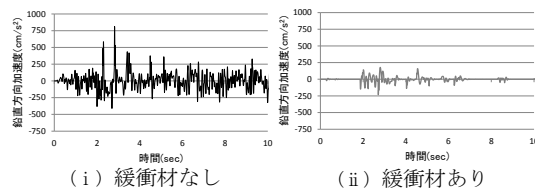


図7 緩衝材の低減効果

果が得られることがわかった(図7)。

表1に応答評価式と等価減衰定数の算定式を示す。この式を用いて算出した理論値と解析値は概ね良い対応を示したことから、このような手法により基礎回転系構造の応答評価が可能であることを示した。

表1 応答評価式一覧

応答評価式		
$0.16 \leq T_e < 0.864$	$C_b = 1.224 F_b$	$F_b = \sqrt{\frac{1 + 25h_0}{1 + 25h_{eq}}}$
$0.864 \leq T_e$	$C_b = \frac{0.278}{\delta} F_b^2$	
等価減衰定数算定式		
浮き上がりのみ	$h_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s \cdot C_{B.L.}}{C_{B.L.}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) + \alpha \cdot \frac{R_0}{R_{max}}$	
浮き上がり沈み込み 沈み込みのみ	$h_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s \cdot C_{B.L.}}{C_{B.L.}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2\mu}\right) + \alpha \cdot \frac{R_0}{R_{max}}$	

② 変動軸力を考慮した杭基礎建物の上部構造の応答

集合住宅建築物に多く適用されている板状タイプの杭基礎を有する建築物を解析対象とした。解析は張間方向とし、階数は5階、14階の二つとした。

以下では、14階建モデルについてその成果の概要を示す。

図8に上部構造の各階における最大層せん断力係数を示す。14階建モデルの高さ方向の最大層せん断力係数分布は杭の浮き・沈みを考慮した場合と浮き・沈みを無視した場合は大きく異なる(図8参照)。沈み込みのみを無視した場合、浮き・沈みを考慮した場合と比べ、最大ベースシア係数はほぼ一致しているものの、上層階では最大層せん断力係数分布が著しくトップヘビーの傾向となった(図8参照)。浮き・沈みを無視したもの、浮きのみ無視したもの、基礎固定モデルは浮き・沈みを考慮したものと比べ高さ方向の最大層せん断力係数分布が一樣に大きくなった(図8参照)。

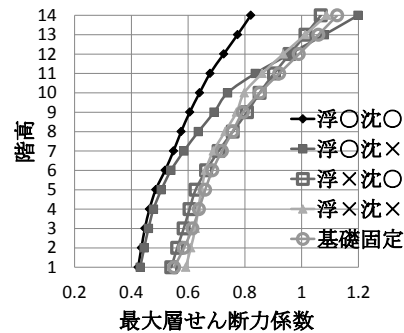


図8 最大層せん断力係数(14階)

図9に頂部の水平変位が最大になった場合における建物変形 δ_{ss} 、スウェイ変形 δ_{sw} 、ロッキング変形 δ_{ro} の変形割合を示す。

全体のロッキング変形が占める割合が小さくなるにつれ建物変形の占める割合が大

きくなっていることがわかる(図9参照)。これよりロッキング挙動を抑制したことによって上部構造の挙動が卓越したことがわかる。浮き・沈みを考慮した場合ロッキングが変形の約半分、上部構造の変形とスウェイの変形が各々1/4程度の値となった(図9参照)。

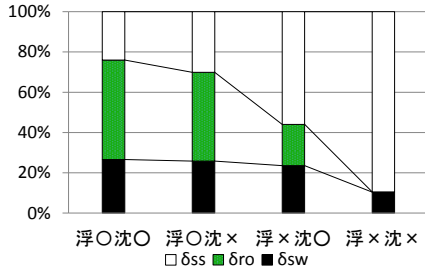


図9 変形割合(14階)

(2) 基礎回転系構造に要求される構造性能を有する健全な杭の開発

基礎回転系の力学的モデル及び性能評価法・杭の設計マニュアル作成のため、構造詳細及び作用応力のレベルが異なる試験体においての実験を行った。

図10に試験体形状、図11に部材断面図を示す。ここでは例として、平成22年度の試験体を示す。

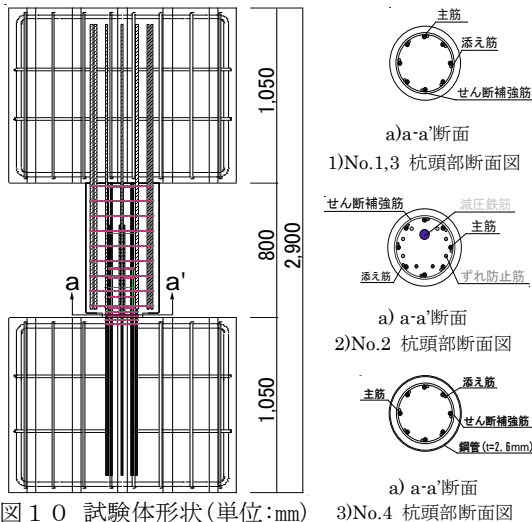


図10 試験体形状(単位:mm)

図11 部材断面図

以下に実験による成果の概要を示す。

① 良好なエネルギー吸収能

図12は部材角—モーメント関係である。図より明らかなように部材角3%まで高引張軸力を受けた後でも、安定した履歴性状を示している。浮き上がり時についても、安定した履歴を保持している。

② 杭頭部挿入型の有効性

図13は実験から得られたスリップ変形量の推移である。図に示すように、ずれ防止筋、鋼管補強した杭頭部を挿入するディテール

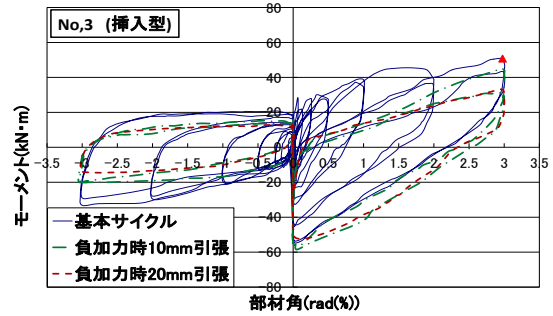


図12 部材角—曲げモーメント関係

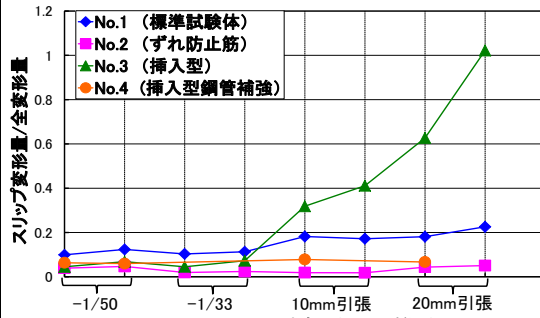


図13 スリップ変形量の推移

ルがスリップ変形量を軽減する上で有効であることを示している。

③ ずれ防止筋

図14はずれ防止筋の歪—部材角関係である。負加力時のスリップに抵抗するずれ防止筋は引張軸力下で部材角が増大するに伴って歪も増大することから、高引張軸力下及び浮き上がり時に起こるスリップ変形を抑制していると言える。

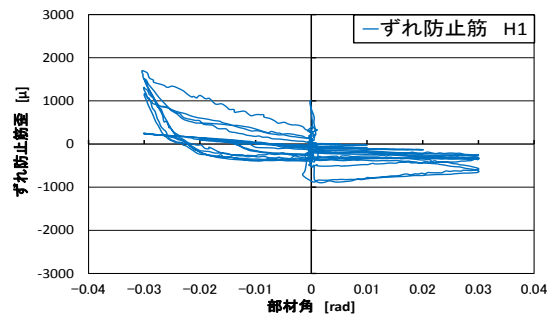


図14 ずれ防止筋の歪—部材角関係

④ 鋼管補強

写真1は10mm浮上がり後の鋼管補強の有無による杭頭部挿入型試験体の比較である。



a)No.3 (挿入部補強なし) b)No.4 (鋼管補強)

写真1 補強の有無による杭頭部の比較

鋼管補強をしていない杭頭部挿入型は杭頭部がパイルキャップにぶつかりその拘束のためせん断入力が増大し、せん断破壊している。しかし、杭頭部を鋼管補強した試験体はせん断破壊を防止できている。

(3) 基礎回転系構造の架構実験とその構造特性の解明

平成22年度までの構造実験の成果を受け、基礎回転系の架構実験の詳細を決定し、構造実験を行った。

図15に試験体形状、図16に部材断面を示す。ここでは例として、平成23年度の試験体を示す。

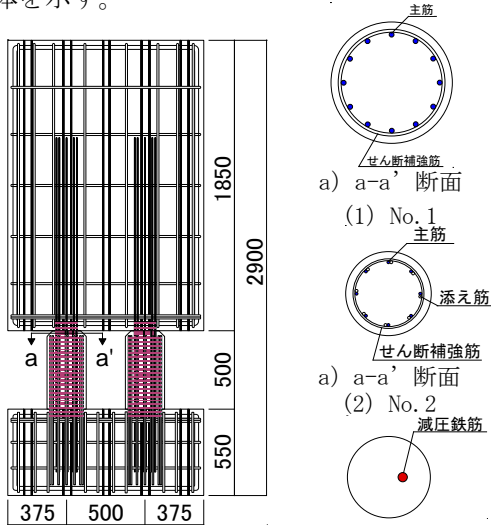


図15 試験体形状(単位:mm) a) a-a' 断面

図16 部材断面図

以下に実験による成果の概要を示す。

① 変形メカニズム

図17に架構の変形図を示す。従来型杭を使用した試験体は引張側の杭軸部にひび割れが多数みられ、部材角が大きくなるにつれ、ひび割れ幅は大きくなった。一方で、降伏機構分離型構造を用いた試験体、一部付着を切った減圧鉄筋を配した試験体の杭軸部では杭頭部と上スタブの接地面のひび割れのみ大きくなり、杭軸部にひび割れは生じていない。

② 緩衝材

平成24年度の試験体においては図18のように杭頭部に緩衝材を有する構造実験を行った。杭頭部に緩衝材を有する試験体においても、想定した浮き上がりを繰返し経験した後も杭体の損傷は軽微だったこと、良好なエネルギー吸収能を示したことから、基礎回転系構造に緩衝材を設置することは耐震性能上遜色がないことを明らかにした。

(4) 基礎回転系構造の耐震設計法の開発

(1)の最終成果物である耐震性能・部材の

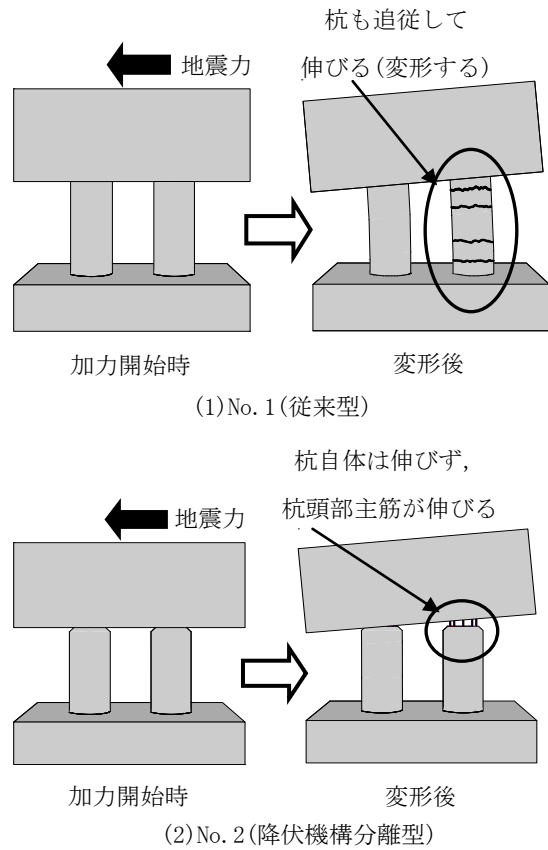


図17 架構の変形図(No.1, No.2)

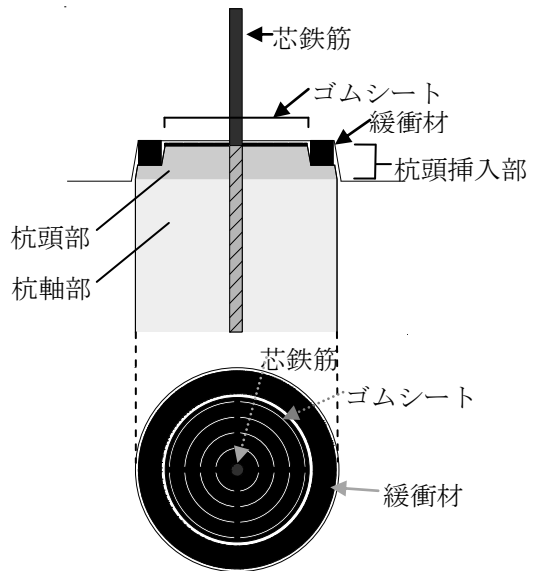


図18 緩衝材及びゴムシート配置図

要求性能の資料、(2)の最終成果物である力学特性モデルおよび性能評価法・杭の設計マニュアル、(3)の最終成果物である架構の復元力モデルを総合し、損傷軽減機構を有する杭頭浮き上がり基礎回転系構造の耐震設計指針の作成を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- ① 鈴木彩香、平石久廣、高橋加南、杭頭浮き上がり及び沈み込みによる基礎回転系構造の応答評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、683号、2013、165-172
- ② 平石久廣、杉田裕行、金澤和誉、秋田知芳、杭の浮き・沈みが上部構造の応答に与える影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、685号、2013、549-557
- ③ 平石久廣、鈴木彩香、杭頭浮き上がりによる基礎回転系構造の応答評価法に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、674号、2012、619-626
- ④ 平石久廣、雨宮達也、金澤和誉、応答変位法を応用した杭頭ヒンジ杭の設計用応力に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、679号、2012、1455-1462
- ⑤ 二宮大樹、平石久廣、佐古智昭、杭頭浮き上がり基礎回転系架構の構造性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、34巻、2号、2012、325-330
- ⑥ 佐古智昭、平石久廣、二宮大樹、杭頭浮き上り基礎回転系対応型杭の開発研究、コンクリート工学年次論文集、34巻、2号、2012、745-750
- ⑦ 小林正人、下田卓、西村拓也、端部回転を有する免震用積層ゴムの水平剛性と取付け部材の設計用応力に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、682号、2012、1873-1880
- ⑧ 平石久廣、高橋加南、鈴木彩香、鉛直地震動が基礎回転系構造の耐震性能に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、684号、2012、369-375

〔学会発表〕(計 88 件)

- ① 升谷桂輔、平石久廣、高木仁之、澤井布兆、都祭弘幸、藤原章弘、佐古智昭、二宮大樹、杭頭浮き上り基礎回転系対応型杭の開発：その1実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2011.8.23-25、早稲田大学
- ② 鈴木彩香、平石久廣、杉岡洋堯、梁川幸盛、斎藤光広、杭頭浮き上がりによる基礎回転系構造の設計法に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、2011、早稲田大学
- ③ 鈴木彩香、平石久廣、高橋加南、基礎回転系構造の応答評価法に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ④ 高橋加南、平石久廣、鈴木彩香、杉田裕行、仇遠、鉛直地震動が基礎回転系構造

の耐震性能に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学

- ⑤ 升谷桂輔、平石久廣、佐古智昭、二宮大樹、天野元樹、蟹慎太郎、杭頭浮き上り基礎回転系架構の耐震性能に関する実験的研究(その1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ⑥ 杉田裕行、平石久廣、金澤和誉、仇遠、高橋加南、杭の浮き・沈みを考慮した地盤・杭・建物の一体地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ⑦ 杉岡洋堯、平石久廣、雨宮達也、金澤和誉、杉田裕行、仇遠、杭頭接合条件の異なる杭の設計用応力に関する研究(その1:解析概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ⑧ 仇遠、平石久廣、杉岡洋堯、杉田裕行、高橋加南、杭頭ヒンジを有する建物の偏心挙動に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ⑨ 藤田貴央、吉原将大、高木仁之、石本貞夫、品川肇、白石一郎、高靱性セメントボードの構造利用に関する基礎的研究(その1)研究概要及び圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学
- ⑩ 下田卓、浅野宏一、小林正人、端部回転を有する積層ゴムの取付け部に生じる曲げモーメント、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012.9.12-14、名古屋大学

〔その他〕

ホームページ等

①個人ホームページ

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~arch/lab0/hiraishi.htm>

②研究室ホームページ

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~kohzoul/contents/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

平石 久廣 (HIRAISHI HISAHIRO)
明治大学・理工学部・教授
研究者番号：40113211

(2)研究分担者

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIRO)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号：50373022
高木 仁之 (TAKAGI HITOYUKI)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号：70130820