

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360251
 研究課題名（和文） 損傷軽減機構を有する健全な杭の開発とその制震効果に関する研究
 研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF SOUND PILES WITH DAMAGE MITIGATION SYSTEM AND RESEARCH ON THEIR RESPONSE REDUCTION EFFECT
 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）：構造物の応答や杭・基礎梁の合理化に適しかつ大地震以後の長期の使用に対しても支障を生じない鉄筋コンクリート造杭の開発を行った。またその杭の構造詳細設計マニュアル、設計指針並びに応答低減効果に関する評価法、評価資料を作成した。

研究成果の概要（英文）：This research developed reinforced concrete piles which are appropriate for structural rationalization of foundation, and are able to be used without trouble for a long time period even after severe earthquakes. The research also drew up a design manual for structural details and structural design guidelines of the piles, and evaluation frameworks of their response reduction effect on buildings and foundations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

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：鉄筋コンクリート造杭、制震、耐震、損傷軽減、杭頭ヒンジ、コスト縮減

1. 研究開始当初の背景

杭は大きな応力を負担し、平面的にも極めてバランスよく配置される。したがって杭の塑性化により地震時におけるエネルギー吸収を図れば良好な建物の制震効果が得られることが想定される。ただし、このような杭の塑性化は兵庫県南部地震以降、原則的には認めないとの認識が急速に広がりつつある。

これは杭が地中部にあるため損傷が生じてもその発見が困難であり、たとえ損傷が発見されても補修工事に多額の費用を要するとの認識によるところが大きい。従って損傷を生じさせないために一般的には剛強な杭が用いられているが、杭の耐力を大きくすることは、基礎梁の不必要な断面の拡大、配筋の過密化を招くことから、最近では、杭頭ピン

や半剛接の開発が行われ、すでに一部の建物で実際に適用されている。しかしながら、これら既往の工法では、大地震時におけるエネルギー吸収能や大地震後の損傷制御についてはほとんど関心が払われていないため、構造物の応答への影響や地震後の再利用についても検討すべき課題が多い。また各工法で特異なディテールが採用されているためコスト的にも検討の余地がある。

2. 研究の目的

本研究は、平成17年度～平成18年度科学研究費補助金（基盤研究C）で開発した損傷軽減機構を有する梁の技術を杭に応用し、

(1) 構造物の応答や杭、基礎梁の合理化に適した降伏モーメントと良好なエネルギー吸収能および大地震時でも損傷を生じない性能を有し、大地震以後の長期の使用に対してもほとんど支障を生じない杭の開発。

(2) 杭頭にヒンジを有する杭の制震効果に着目し、その効果による上部構造および下部構造の損傷の軽減、設計合理化をはかることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発に関する研究

降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の梁の技術を杭に応用すると共に、かつ杭特有の応力・変形の境界条件に対応しうる構造詳細を明らかにするため杭の耐震実験を行った。平成19年度の試験体は計5体、20年度は4体、21年度は3体である。

図1に加力装置を示す。載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N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。

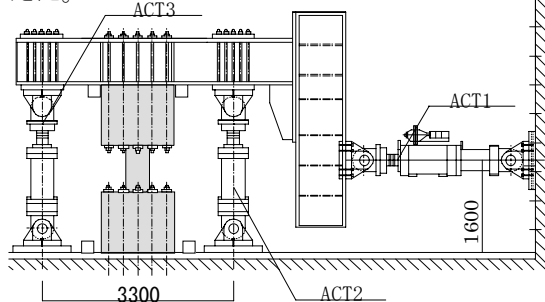


図1 加力装置(単位: mm)

(2) 連成系解析モデルによる杭の制震効果に関する研究

極稀に発生する地震動に対して、杭頭ヒンジを有する杭の制震効果を修正ペンゼンモデルを用いた時刻歴応答解析により検討した。図2に修正ペンゼンモデルを示す。

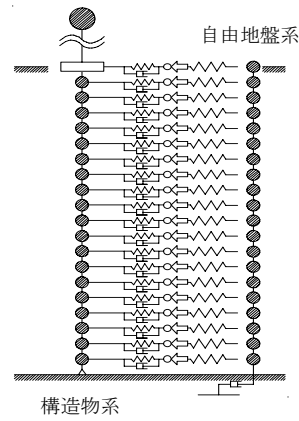


図2 修正 Penzien モデル

(3) 杭頭ヒンジを有する杭の設計用応力の算定に関する研究

杭の設計用応力を算定するために、応答変位法を応用した静的解析を行い、時刻歴応答解析の結果との整合性について検討した。

4. 研究成果

(1) 降伏機構分離型杭の開発に関する研究

設計指針作成のため構造詳細およ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3に試験体形状、図4に部材断面図を示す。ここでは例として2008年度の試験体4体を示す。

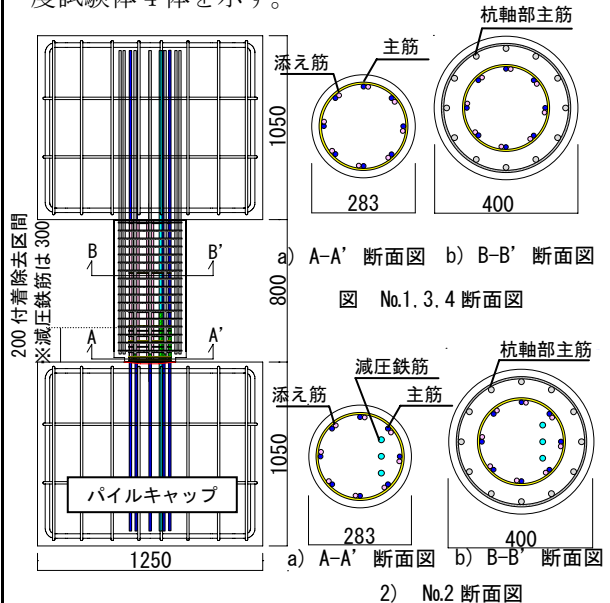


図3 試験体形状 (単位: mm)

図4 部材断面図 (単位: mm)

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5は部材-モーメント関係である。図より明らかなように、部材角4%ほどの大変形に至っても安定した変形性能を保持する杭の開発に成功した。繰り返し載荷に対しても大きな耐力低下もなくエネルギー吸収能に優れた構造特性を示している。

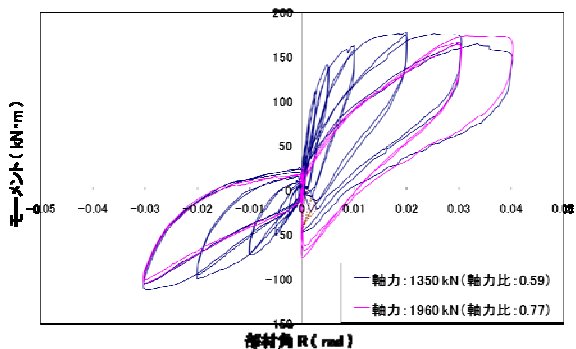


図5 部材角-モーメント関係

②優れた損傷低減機能

2009年度試験体である3体を例として本構造の優れた損傷低減機能について示す。表1は部材角Rが1/400, 1/200, 1/100のときのピークでのひび割れ幅、写真1は部材角R=2%時の写真である。

表1 ひび割れ幅

No.1		ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]
		(R=1/400)	(R=1/200)	(R=1/100)
正加力時	A	0.05未満	0.25(0.05未満)	0.95(0.05)
	B	-	-	-

No.2		ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]
		(R=1/400)	(R=1/200)	(R=1/100)
正加力時	A	0.05未満	0.15(0.05未満)	0.85(0.10)
	B	-	0.05(0.05未満)	0.15(0.15)

No.3		ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]	ひび割れ幅[mm]
		(R=1/400)	(R=1/200)	(R=1/100)
正加力時	A	-	0.25(0.05未満)	0.35(0.05未満)
	B	-	0.05(0.05未満)	0.05(0.05)

ここで、ひび割れAとは杭体とパイルキャップとの接地面での曲げひび割れである。ひび割れBは杭軸部において生じたひび割れの内、最も顕著であった縦ひび割れを表す。また、表中括弧の中に示したものが除荷後のひび割れ幅である。中規模地震もしくはそれをかなり上回るような地震で想定されるような部材角でも除荷後は長期的な使用に支障のない0.2mm以下に収まっている。また、写真1示すように杭体及び杭頭接合部にはほとんど損傷が見られず、降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭が優れた損傷低減機能を有していることが分かる。



①R=2.0%時(杭頭接合部) ②R=2.0%時(テーパ)

写真1 破壊状況(降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭)

③減圧鉄筋の有効性

2008年度試験体においては図6のように減圧鉄筋を配する実験を行った。

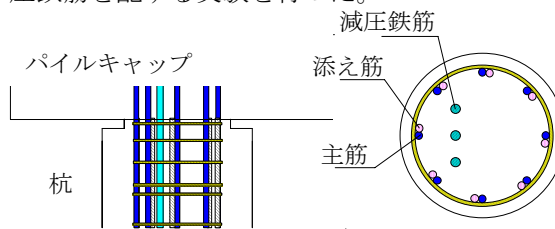


図6 杭頭及び杭頭接合部

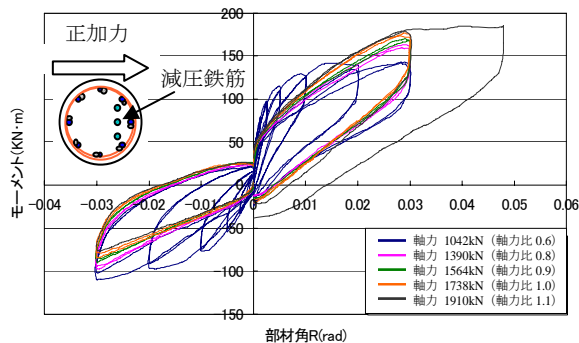


図7 部材角-曲げモーメント関係(減圧鉄筋)

図7にその部材角-曲げモーメント関係を示す。

減圧鉄筋は杭頭接合部および杭頭では付着を切っているためこれらの部分のコンクリートに影響を与えることなく、軸方向力をパイルキャップから杭体へ伝達しうることから軸力比1.1という高軸力まで耐力低下せずに良好なエネルギー吸収能を示している。地震時に高圧縮軸力となる隅柱などでは、この減圧鉄筋が極めて有効に機能すると言える。

④施工の多様化

本構造では基礎梁の合理化を図るため杭頭接合部で断面を縮小している。この杭頭接合部を2007年度ではテーパ、2008年度では円筒形の接合部とした実験を行った。(図8参照)これはプレキャスト化等による施工の合理化に配慮したものである。いずれの形状も目的とした優れた損傷低減機能及び良好なエネルギー吸収能を示した。

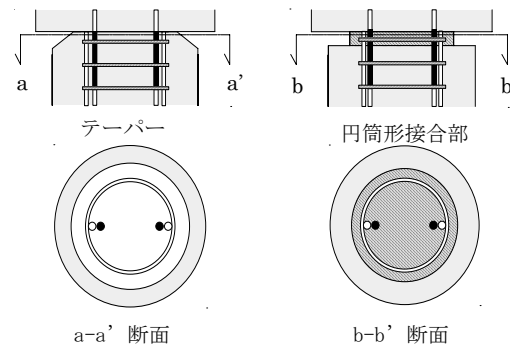


図8 テーパと円筒形接合部

⑤設計・施工指針

以上の実験結果を基に降伏機構分離型杭の構造詳細、設計・施工マニュアル及び解説を作成した。設計マニュアルは総則、使用材料、設計、施工要領、施工管理から成る。また、降伏機構分離型杭の復元力モデル及び性能評価法も作成した。

この降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭構法の接合方法を適用することにより、大地震動を受けた後でも長期荷重や地震荷重に対して安全な構造とすることが出来る。

(2)杭頭ヒンジによる制震効果

以下のような様々なパラメータを用いて解析を行い、系統的に制震効果を検討した。

- ・建物高さ：3階建、10階建、18階建
- ・敷地地盤（N値）：N5地盤、N10地盤
- ・地盤性状：ノーマル、スリップ
- ・上部構造：弾性、弾塑性
- ・杭頭接合条件：固定、ピン、ヒンジ

以下では、18階建モデルについてその成果の概要を示す。

図9に上部構造を弾性としたモデルの杭頭モーメントとベースシアの関係を示す。ヒンジ杭とした場合には、ベースシアが顕著に低減しており、杭頭をヒンジとすることの効果分かる。図11にはこの場合の各部分における累積消費エネルギーを示す。杭頭ヒンジとしたものはヒンジで顕著なエネルギー吸収がなされており、このことが応答低減の要因となっていることがわかる。

図10に上部構造を弾塑性としたモデルの杭頭モーメントと最大応答変形角の関係を示す。図より、上部構造の塑性化を許容すると、応答低減はあまりみられないことがわかる。図12にこの上部弾塑性モデルにおける各部分における累積消費エネルギーを示す。図より、杭頭をヒンジとしたものは、ヒンジでエネルギー吸収がみられる一方で、それとほぼ等価な総エネルギー量すなわち入力エネルギーの増大が見られる。上部構造を弾塑性とした場合はこのことが上部構造の応答の低減を生じさせない要因となっている。

図13に上部構造を弾塑性としたモデルにおける各深さ位置における杭の最大応答を示す。図より、上部弾塑性とした場合にでも答が顕著に低減していることがわかる。

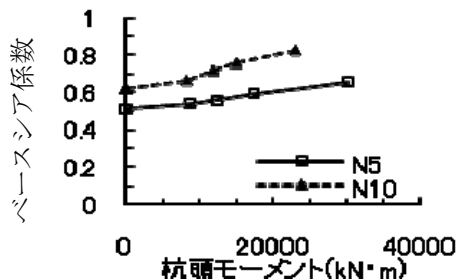


図9 杭頭モーメントとベースシアの関係 (18階建 上部弾性モデル)

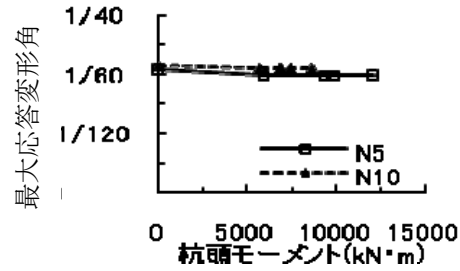


図10 杭頭モーメントと最大応答変形角の関係 (18階建 上部弾塑性モデル)

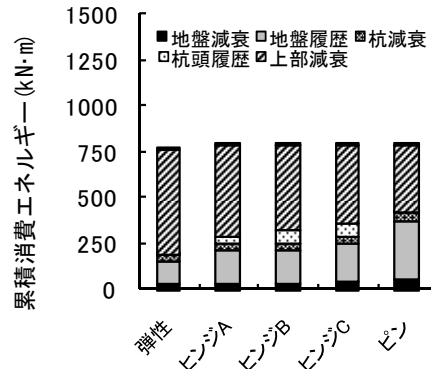


図11 各部累積消費エネルギー (18階建 上部弾性モデル)

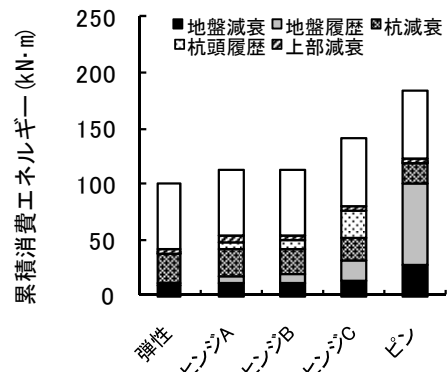


図12 各部累積消費エネルギー (18階建 上部弾塑性モデル)

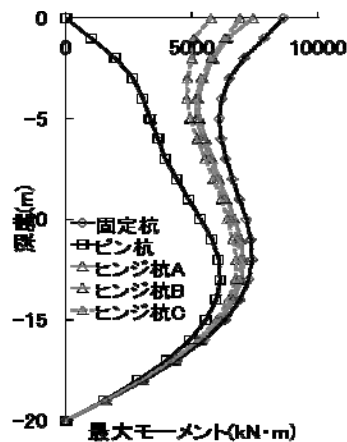


図13 各深さ位置における杭最大応答モーメント (18階建 上部弾塑性モデル)

(3) 杭の設計用応力

超高層建物の設計では杭の設計用応力を算定する場合、一般的に杭頭慣性力と地盤変位を考慮して解析が行われている。ここではこの方法の杭頭ヒンジとした本構造への適用性について検討した。

図 14 にヒンジ杭の各深さ位置における最大応答モーメントを示す。図中には杭自身の慣性力を考慮した結果も示している。杭頭慣性力と地盤変位を考慮した静的解析は動的解析と良い対応を示すことがわかる。杭自身の慣性力も考慮した静的解析は動的解析とさらに良好な対応を示している。

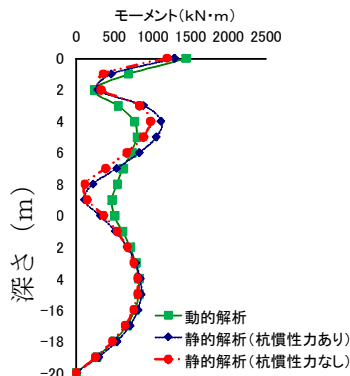


図 14 ヒンジ杭最大応答モーメント

(4) まとめ

以下に研究の主要成果をまとめて示す。

- ① 開発目的とした損傷がなくエネルギー吸収に優れた構造特性を有する杭を開発した。
- ② 実験結果を分析し、杭の応力伝達メカニズムを解明し、それに基づく性能評価法を構築した。
- ③ 降伏機構分離型杭の構造詳細、設計・施工マニュアル及び解説を作成した。
- ④ 建物-地盤-杭連成系の解析モデルによる応答低減効果に関する評価事例を示した。
- ⑤ エネルギー分析により、杭頭条件が建物及び杭の応答に及ぼす影響の算定手法を明らかにし、定量評価を行った。
- ⑥ 本構造を用いた杭の設計用応力の算定方法を示した。

以上のように、本研究は当初の研究目的を十分に達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- ① 平石久廣、武争也、南谷知輝、平岡太一、降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発、コンクリート工学論文集、査読有、3 巻、2009、59-65
- ② 平石久廣、金子雅之、平塚高弘、地盤増幅特性の影響を考慮した建築物の地震応答予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、641 巻、2009、1303-1309
〔学会発表〕(計 31 件)

- ① 斉藤元嗣、平石久廣、小林正人、時本和則、平塚高弘、杭頭接合条件が鉄筋コンクリート造杭基礎建物の地震応答に与える影響に関する研究、学術講演便概集(東北)、2009
- ② 藤原章弘、平石久廣、高木仁之、井上芳生、都祭弘幸、平岡太一、南谷知輝、降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発(その 1 実験概要)、学術講演便概集(東北)、2009

〔産業財産権〕

出願状況(計 3 件)

名称: 鉄筋コンクリート部材の接合構造およびそれを用いた建物

発明者: 平石久廣、大林組他

権利者: 平石久廣、大林組他

種類: 特許

番号: 特許出願 2008-184953

出願年月日: 2008 年 7 月 16 日

国内外の別: 国内

名称: 構造材と固定端の接合構造

発明者: 平石久廣、大林組他

権利者: 平石久廣、大林組他

種類: 特許

番号: 特許出願 2008-184954

出願年月日: 2008 年 7 月 16 日

国内外の別: 国内

名称: 梁端部を PC 造とする複合構造梁を用いた建物構造

発明者: 高木仁之、斎藤啓一他

権利者: ダイワハウス工業、黒澤建設

種類: 特許

番号: 特許出願 2008-134734

出願年月日: 2008 年 5 月 22 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

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

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

高木 仁之 (TAKAGI HITOYUKI)

明治大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70130820

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIRO)

明治大学・理工学部・准教授

研究者番号: 50373022