

# 論文 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

二宮 大樹\*1・平石 久廣\*2・佐古 智昭\*1

**要旨:** 本論文で開発目標としている構造は、地震動などが作用した際、杭頭の主筋の伸びにより起き上がりこぼしのように基礎が回転する構造である。この杭頭部分で地震のエネルギーを吸収することで、大地震時においても上部構造及び杭には損傷が生じない構造である。本論では、この構造を可能とするため損傷低減機構を有する杭（降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭）を用い、杭頭浮き上がりによる基礎回転系架構の構造実験を行った。結果として、降伏機構分離型杭を用いた基礎回転系構造が極めて優れた耐震性能を有することを示した。

**キーワード:** 基礎回転系, 降伏機構分離型構造, 杭頭浮き上がり, 架構, テーパー, 減圧鉄筋

## 1. はじめに

現在の建築構造は耐震, 制振, 免震に大別される。耐震構造は、大地震時には損傷を許容した構造と言える。また制振構造は、コストとともに意匠上の制約が伴う。免震構造はコスト、敷地上の制約が伴う。

図-1に杭頭が浮き上がりによる基礎回転系の概念図を示す。本論文で開発目標とする構造は、上部構造に損傷が生じる以前に杭頭部の主筋の伸びにより起き上がりこぼしのように基礎が回転する構造である(以下、基礎回転系と略称)。この構造では、上部構造の変形は基礎の回転による剛体的な回転が支配的なので通常の耐震構造とは異なり、上部構造はかなり小さいベースシアーでも大地震に耐えることが可能である。また、浮き上がりに伴う主筋のエネルギーの吸収により優れた減衰を有することから、地震時の応答も少ない。さらに地震後、上部構造が自重により戻ること、建物自体に残留変形はほとんど生じず、地震後も大きな修復を必要としない。また、制震, 免震構造のような付加的な装置を必要とせず、これらの構造に対してコスト、意匠面において極めて大きなメリットを有する。

このような基礎回転系の実現には、要求性能を満たす杭の開発が必要不可欠である。主な要求性能は、基礎の浮き上がり時、圧縮側杭に加わる高圧縮力に耐えうる性能である。また、高引張力下においても杭体に損傷が生じず、十数センチにも及ぶ主筋の伸びに耐えうる性能である。著者等は、このような基礎の浮き上がりに対応する杭の研究・開発を既に行い、開発した杭は 高圧縮・高引張力下においても杭体に損傷がほとんど生じず、良好なエネルギー吸収能を有していることを明らかとしている<sup>1),2),3),4),5)</sup>。

本論文では、このような基礎回転系に対応した杭を用いた架構の構造実験を行い、その構造性能について検討を行った。

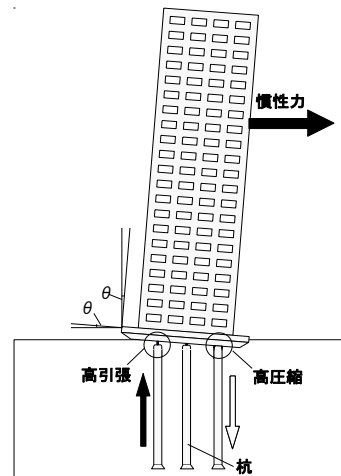


図-1 杭頭浮き上がり基礎回転系構造概念図

尚、基礎回転系構造に関する研究としては、岩下ら<sup>6),7)</sup>の研究や藤堂ら<sup>8)</sup>の研究があるが、本構造のように杭頭の主筋の伸びによるものはない。

## 2. 工法概要

### 2.1 降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭

降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭(以下、PHIS と略称)とは、部材端部の主筋とコンクリートの付着を切ると共に、その部分の曲げ及びせん断に対する抵抗機構を形成するための補助主筋(添え筋)を配したものである。詳しい内容に関しては文献9)を参照されたい。

### 2.2 減圧鉄筋

図-2に減圧鉄筋を配した試験体例を示す。圧縮側となる杭の杭頭部には浮き上がりが生じる以前の段階で軸方向力と曲げが同時に生じ、浮き上がり後は高圧縮軸力が作用するため、杭頭部が圧壊する可能性がある。これらの軸方向力に抵抗するため、軸力の一部を負担する鉄筋(以下、減圧鉄筋と略称)を配した。ここで、変形とともに圧縮軸力の合力の作用位置は変化するが、本論文

\*1 明治大学大学院博士前期課程 (学生会員)

\*2 明治大学理工学部建築学科 教授・博士(工学) (正会員)

表-1 試験体概要

試験体名	No.1	No.2		No.3	
試験体特徴	従来(剛接)型	降伏機構分離型構造		減圧鉄筋配筋	
径(mm)	250	杭頭部 176.8	杭軸部 250	杭頭部 176.8	杭軸部 250
※1付着除去区間(mm)	-	400		400	
コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )	24	24	24	24	24
主筋	12-D10(SD295)	8-D6(SD295)	12-D10(SD295)	-	12-D10(SD295)
添え筋	-	8-D6(SD295)	-	-	-
せん断補強筋	D6(SD295)@25	D4(SD295)@30	D6(SD295)@25	-	D6(SD295)@25
減圧鉄筋	-	-	-	D16(SD345)	-
引張鉄筋比pt(%)	0.7	0.4	0.7	-	0.5
せん断補強筋比pw(%)	1	1.2	1	-	1
せん断スパン比	1	3	2.25	3	2.25

※1危険断面からの距離

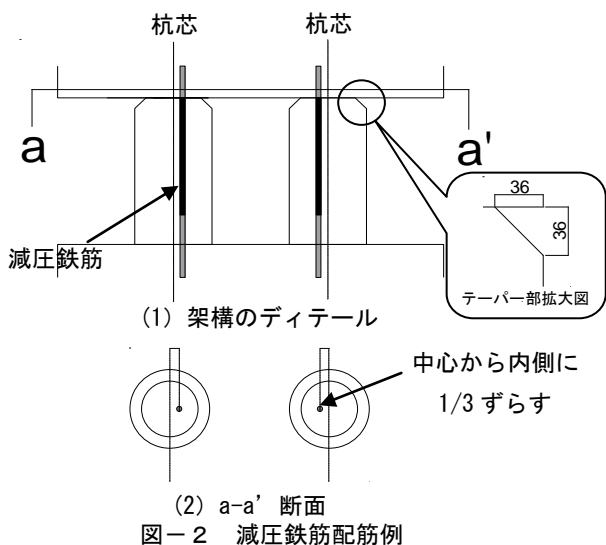


図-2 減圧鉄筋配筋例

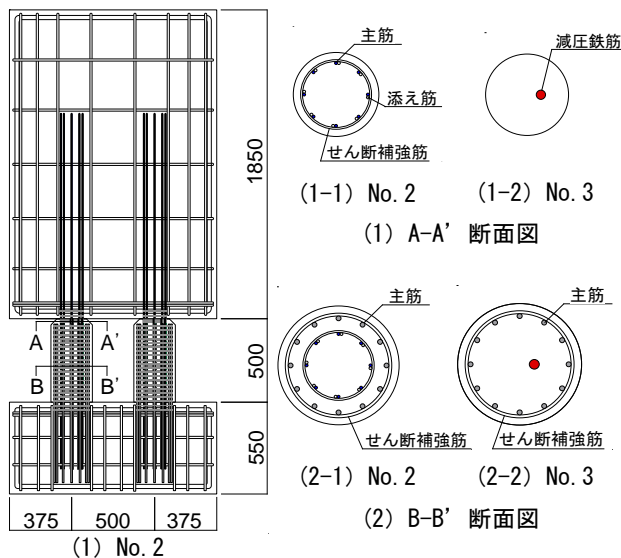


図-3 試験体形状 (単位: mm)

図-4 部材断面図(単位: mm)  
注) 左右の杭の配筋は対称である

では、杭頭部の中心から片側半分のほぼ図心にあたる半径の 1/3 だけ内側にずらした位置にこの減圧鉄筋を配した。また、ヒンジ領域では付着を除去した。

### 3. 試験体概要

図-3 に試験体形状、図-4 に部材断面図、表-1 に試験体概要を示す。

試験体は3体計画した。実大の 1/5 で、杭2本と上部構造からなる架構を構成している。共通因子は、杭長 500mm、杭軸部の径 250mm、杭芯間距離 500mm である。コンクリート強度は 24N/mm<sup>2</sup> である。以下に各試験体の特徴について記す。

#### 1) 試験体 No.1 従来(剛接)型杭

杭体と上部構造を剛接合とした従来型の試験体(以下、従来型と略称)である。杭頭部と杭軸部の径が 250mm と一様な試験体である。

#### 2) 試験体 No.2 降伏機構分離型杭

降伏機構分離型構造を用いた試験体で、付着除去区間は杭頭から 400mm である。また杭頭部をテーパ形状とし、杭頭接合部断面積を杭軸部の 1/2 となるように設計した。

#### 3) 試験体 No.3 減圧鉄筋杭

減圧鉄筋を配した試験体で、杭頭部から 400mm にわ

表-2 コンクリート材料試験結果

使用部分	養生方法	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )
上スタブ	気乾	31.8
杭体	気乾	28.9
下スタブ	気乾	26.3

表-3 鉄筋材料試験結果

種別	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 (%)	伸び (%)
D4(SD295)	306	488	0.2	7.6
D6(SD295)	323	494	0.22	18.8
D10(SD295)	365	512	0.2	17.4
D16(SD345)	386	600	0.3	13.7

たり減圧鉄筋とコンクリートとの付着を除去した。また、杭頭部は試験体 No.2 と同様にテーパ形状を採用した。表-2、表-3 に試験体で使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。

### 4. 荷重方法

加力装置を図-5 に、加力時の軸力一覧を表-4 に示す。なお、軸力比の算出には、杭頭接合部の断面積を用

いた。載荷方法は、変動軸力を想定した軸力における東側杭圧縮方向、西側杭圧縮方向の繰り返し載荷とした。2基の鉛直アクチュエーター(ACT2及びACT3)を用いて所定の軸力を加え、水平アクチュエーター(ACT1)を用いせん断力を加えた。ACT2の軸力とACT3の軸力は等しくなるように加力した。ただし、図-5の東側杭圧縮時を正加力方向とし、西側杭圧縮時を負加力方向とする。

加力サイクルは、 $R=1/1600, 800(\text{rad})$ では正負1回ずつ繰り返しを行い、 $R=1/400, 200, 100, 50(\text{rad})$ では正負加力を2回ずつ繰り返した。ただし、 $R=1/50(\text{rad})$ の基本サイクル後、No.1では軸力を上げて正負加力を2回ずつ、No.2は軸力を変えず正負ともに $R=1/33(\text{rad})$ を2回ずつ、No.3では軸力を上げて正方向を $R=1/33(\text{rad})$ 、負方向を $R=1/100(\text{rad})$ の正負加力を2回ずつ行った。なお本実験であるが、No.1試験体は危険断面が下スタブ接地面であり、この部分が杭頭に相当する。No.2, No.3試験体では危険断面を杭と上スタブ接地面とした。

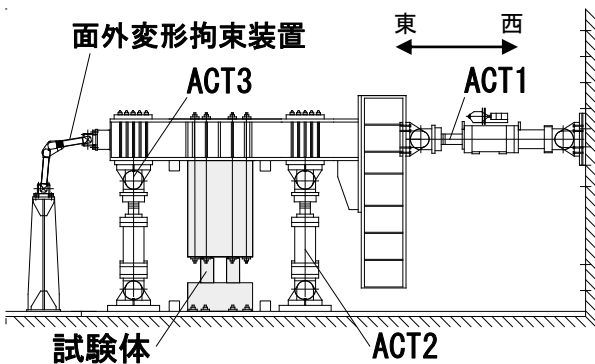


図-5 加力装置

表-4 軸力一覧

試験体名	軸力比	軸力(kN)
No.1	0.1	236
	0.15	353
	0.25	589
	0.3	707
	0.4	942
No.2	0.2	236
No.3	0.3	353
	0.4	471
	0.5	589

## 5. 履歴性状

図-6に各試験体の曲げモーメント-部材角関係を示す。

### 1)No.1(従来型試験体)

部材角  $R=1/50(\text{rad})$ で圧縮側杭に対して軸力比を0.1, 0.15, 0.25, 0.3, 0.4と変動させて実験を行った。繰り返しにより若干の耐力の低下が見られたが、軸力比0.4における部材角  $R=1/50(\text{rad})$ まで安定した履歴を示した。部

材角  $R=1/50(\text{rad})$ のピークに至る途中で最大曲げモーメント  $M_{\text{max}}=483.6(\text{kN}\cdot\text{m})$ となった。 $R=1/50(\text{rad})$ において軸力を上げる毎に耐力は増加したが、杭頭部のかぶり部分の圧壊が進行した。他の試験体に比べ杭頭部の圧壊が顕著であり、曲げひび割れも多く見られた。

### 2)No.2(降伏機構分離型構造を用いた試験体)

軸力比0.2で部材角  $R=1/33(\text{rad})$ まで実験を行った。部材角  $R=1/50(\text{rad})$ まで安定した履歴を示し、良好なエネルギー吸収能を示した。 $R=1/50(\text{rad})$ の2回目のピークの途中で最大曲げモーメント  $M_{\text{max}}=190.0(\text{kN}\cdot\text{m})$ となった。部材角  $R=1/33(\text{rad})$ に向かう途中で主筋が座屈し、座屈後の伸びで破断したため、 $R=1/33(\text{rad})$ を1回繰り返した後、実験を終了した。なおこの鉄筋破断は、主筋に小径のD6を用いたことが主たる要因であると考えられる。

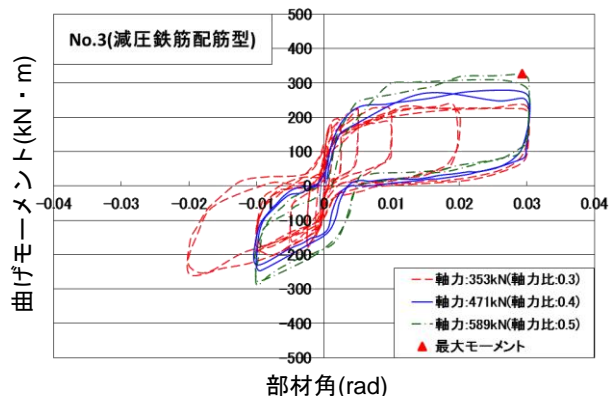
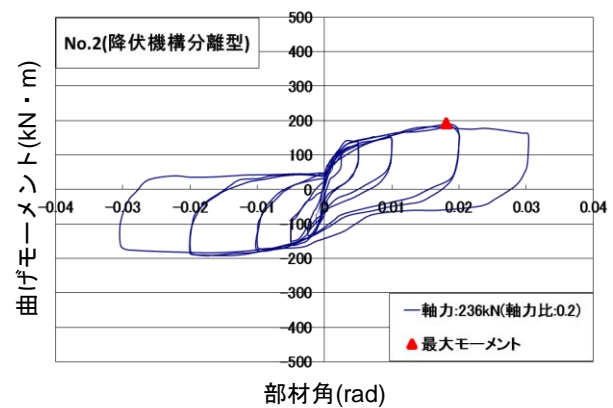
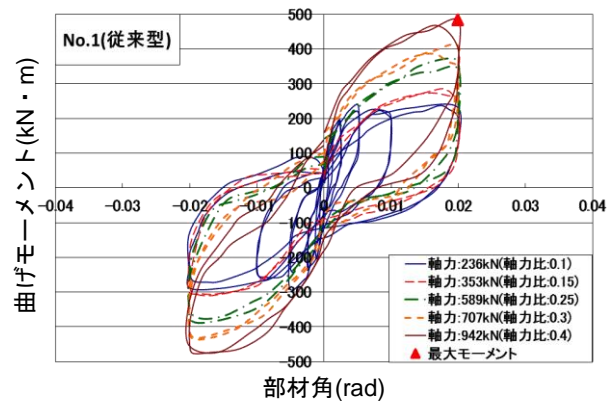


図-6 曲げモーメント-部材角関係

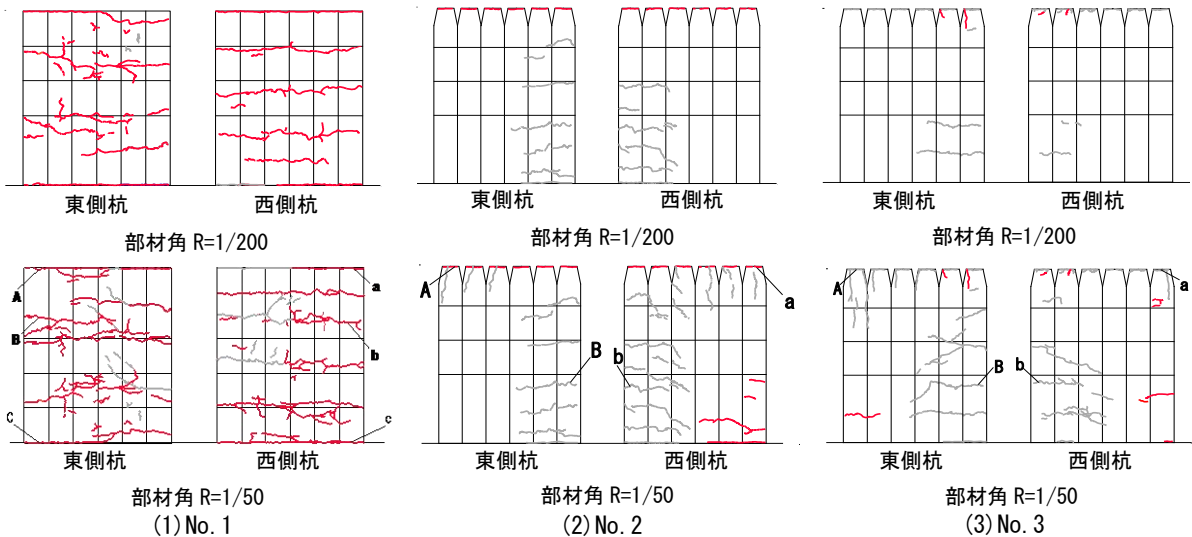


図-7 ひび割れ図

表-5 ひび割れ幅

(1) No. 1

No.1	ひび割れ幅 [mm]	
	(R=1/200)	(R=1/50)
軸力比 0.10※1		
東側杭圧縮	a	0.90(0.45) 4.00(2.50)
	b	0.50(0.15) 2.50(2.00)
	c	0.60(0.40) 1.20(1.10)
西側杭圧縮	A	0.15(0.10) 0.85(0.25)
	B	— 1.60(0.70)
	C	0.60(0.25) 1.20(1.20)

(2) No. 2

No.2	ひび割れ幅 [mm]	
	(R=1/200)	(R=1/50)
軸力比 0.20		
東側杭圧縮	a	2.50(1.10) 16.00(13.00)
	b	0.05(0.05未) 0.15(0.10)
西側杭圧縮	A	3.00(0.25) 17.00(12.00)
	B	0.05(0.05未) 0.15(0.10)

(3) No. 3

No.3	ひび割れ幅 [mm]	
	(R=1/200)	(R=1/50)
軸力比 0.30		
東側杭圧縮	a	2.50(1.10) 11.00(3.00)
	b	0.10(0.05) 0.20(0.05)
西側杭圧縮	A	2.00(0.70) 13.00(9.00)
	B	0.20(0.10) /

※1 半剛接合の軸力比0.20と等しい

注) —はまだひび割れが発生していないことを、斜線部は測定不能を表す

### 3)No.3(減圧鉄筋を配した試験体)

部材角  $R=1/33(\text{rad})$  で軸力比を 0.3, 0.4, 0.5 と変動させて実験を行った。加力装置の不具合により、部材角  $R=1/33(\text{rad})$  は東側杭圧縮方向のみ行い、負側は部材角  $R=1/100(\text{rad})$  として行った。部材角  $R=1/33(\text{rad})$  のピーク時に最大曲げモーメント  $M_{\text{max}}=324.8(\text{kN}\cdot\text{m})$  となった。軸力を変動させてもほとんど耐力低下することなく、安定した履歴を描き、良好なエネルギー吸収能を示した。

## 6. 架構の変形メカニズム

### 6.1 架構の変形特性

図-7 に各試験体の部材角  $R=1/200(\text{rad})$ ,  $1/50(\text{rad})$  の時のひび割れ状況を、表-5 に各部材角ピーク時及び除荷後のひび割れ幅を示す。

ひび割れ状況では東側杭、西側杭いずれにおいても、圧縮時に生じたひび割れを薄い線で、引張時に生じたひび割れを濃い線で表している。なお、従来型杭を用いた No.1 は、下スタブとの接地面を上とし危険断面となる杭頭が上となる図としている。

従来型杭を使用した No.1 では、引張側の杭軸部にひび割れが多数見られ、部材角が大きくなるにつれそのひび

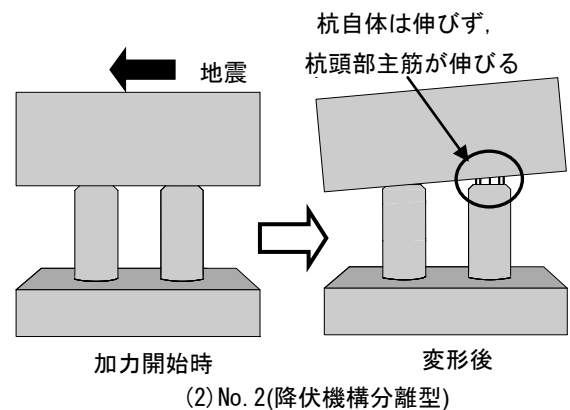
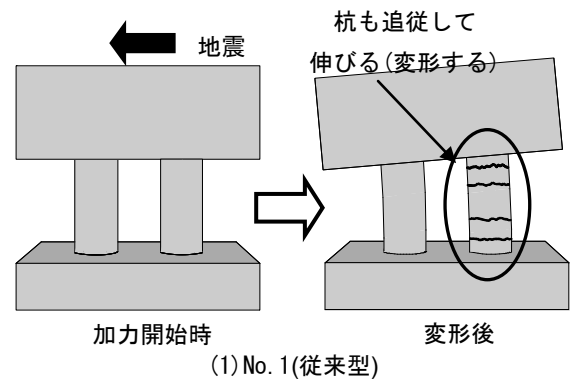


図-8 架構の変形図(No.1, No.2)

表－6 理論値と実験値（修正前）

試験体No.	最大軸力 [kN]	軸力比	実験結果		抵抗モーメント		せん断終局強度	
			$M_{max}$ [kN・m]	$Q_{max}$ [kN]	$M_r$ [kN・m]	$M_{max}/M_r$	$Q_{su}$ [kN]	$Q_{max}/Q_{su}$
No.1	942	0.4	483.9	156.0	328.3	1.47	170.8	0.91
No.2	236	0.2	190.0	77.0	92.3	2.06	255.7	0.30
No.3	589	0.5	324.8	127.2	179.9	1.80	346.4	0.37

表－7 理論値と実験値（修正後）

試験体No.	最大軸力 [kN]	軸力比	実験結果		抵抗モーメント
			$M_{max}$ [kN・m]	$M_{ru}$ [kN・m]	$M_{max}/M_{ru}$
No.1	236	0.10	237.3	261.3	0.91
	353	0.15	285.5	325.1	0.88
	589	0.25	372.4	380.6	0.98
	707	0.30	412.3	421.5	0.98
	942	0.40	483.9	479.7	1.01
No.2	236	0.20	190.0	193.3	0.98
No.3	353	0.30	236.1	222.2	1.06
	471	0.40	277.7	264.5	1.05
	589	0.50	324.8	298.9	1.09



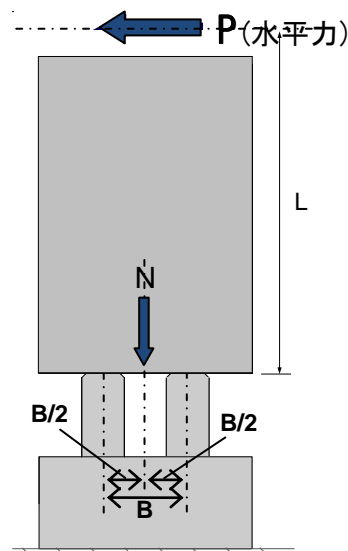
写真－1 圧縮側杭杭頭部

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 No.2、及び一部付着を切った減圧鉄筋を配した No.3 の杭軸部では、杭頭と上スタブの接地面のひび割れのみ大きくなり、部材角  $R=1/50(\text{rad})$  の大変形に至るまで杭軸部にはひび割れはほとんど生じていない。また、図－8 に部材角  $R=1/50(\text{rad})$  における No.1、No.2 の変形図を示す。（ただし、変形量は実際の3倍としている）こちらも図－7 と同様に、No.1 は危険断面となる杭頭と下スタブの接地面を上とした図としている。

(1)の変形後のように、No.1 では基礎に回転が生じた際に引張側の杭が追従して変形している。一方で No.2 や No.3 は、(2)の変形後のように、杭頭部の主筋の伸びが顕著であり、杭自体の変形は抑制されていることが分かる。

### 6.2 杭の圧縮軸力の中心位置の移動

写真－1 に試験体 No.2 における部材角  $R=1/50(\text{rad})$  時の圧縮側杭の杭頭部を示す。架構内側から圧縮側杭の杭頭部を見ると、杭頭部と上スタブの接地面に 1.5mm 程度



図－9 試験体に作用する力

の開きが生じていることがわかる。このことから、部材角が大きくなるにつれ、圧縮力を受けていた領域の一部が、引張領域へ変化していると考えられる。結果として、圧縮側杭の杭頭部主筋の内、架構内側に配されている主筋は引張応力を負担していると考えられる。No.3 においても同様な特徴が確認できた。

### 7. 抵抗モーメントの算定

図－9 に試験体に作用する力を示す。P は ACT1 による水平力、N は 2 本の杭に作用する軸力の和である。表－6 に各試験体の理論値と実験値を、表－7 に終局時の理論値と実験値を示す。基礎回転系構造は圧縮側杭の杭頭部を中心に基礎が回転する構造であるため、抵抗モーメント  $M_r$  は上部構造の回転に対して軸力と引張側杭の杭頭部主筋の引張応力により抵抗するモーメントとして、(5-1)式から求めた。

$$M_r = N \cdot B/2 + \sigma_y \cdot a_{gt} \cdot B \quad \dots(5-1)$$

ただし、N は 2 本の杭に作用する軸力の和、B は杭芯間距離、 $\sigma_y$  は杭頭部の主筋の降伏強度、 $a_{gt}$  は引張側杭の杭頭部の全主筋断面積とした。せん断終局強度は杭頭部より算出し、No.1 は修正荒川式、No.2 および No.3 は



Mattock の提案式より求めた。

表-6 に示すように、各試験体共に抵抗モーメントの値が過小評価であると考えられる。これは、部材角が大きくなるにつれ、写真-1 のように圧縮側の杭頭部に開きが生じ、圧縮重心位置が変化し、圧縮側杭においても引張応力を負担していることが原因と考えられる。また、杭頭部の鉄筋強度として降伏点を用いたことが原因である。このため圧縮重心位置を検討し、鉄筋の強度として材料試験の引張強度を用い、架構の終局時の抵抗モーメント  $M_{ru}$  を(5-2)式のように修正して求めた。

$$M_{ru} = N \cdot (B/2+x) + \sigma_u \cdot a_{gt} \cdot (B+x) + \sigma_u \cdot a_{gc} \cdot D \quad \cdots(5-2)$$

ここで、 $x$  は圧縮軸力の中心位置の変化量で、圧縮側コンクリートの応力を  $\sigma_B$  として、軸力比の式と圧縮軸力を受ける部分の断面積における断面一次モーメントより算定した。また、 $\sigma_u$  は杭頭部の主筋の引張強度、 $a_{gc}$  は圧縮側杭内で引張応力を負担している杭頭部主筋の断面積、 $D$  は圧縮側杭内における引張応力重心から圧縮重心までの距離である。この結果を表-7 に示す。各試験体で、最大曲げモーメントと終局時の抵抗モーメントとの値が概ね一致していることが分かる。なお、圧縮側となる杭の内側の軸方向鉄筋が降伏ひずみを超えている事は、鉄筋に貼り付けた歪ゲージの値からも確認している。

## 8. まとめ

- 1) 全ての試験体において、部材角  $R=1/50(\text{rad})$  の大変形時で、杭が圧縮と浮き上がりを繰り返し経験した後も良好なエネルギー吸収能かつ安定した履歴性状を示した。
- 2) 従来型試験体である No.1 は、杭が上部構造に追随するような変形をしたため、引張側の杭の軸部に大きなひび割れが生じた。また圧縮側杭にも圧壊が顕著に見られた。これに対し、降伏機構分離型試験体である No.2 は、上スタブと引張側杭の接地面における開きが変形の大半を占めており、引張側杭の軸部には損傷がほとんど生じなかった。このことから、架構においても降伏機構分離型構造は、その特有の構造性能を有していることが確認できた。
- 3) 減圧鉄筋を配した試験体である No.3 も、No.2 と同様に変形は引張側杭の杭頭部の鉄筋の伸びに集中していた。また、引張側の杭の軸部にはほとんど損傷が生じず、No.2 とほぼ同様な構造性能を有している。

以上のことから No.2、No.3 については、想定した通りひび割れを杭頭と上スタブ接地面に集約し、杭体にはほ

とんど損傷を生じなかった事、および架構としても優れたエネルギー吸収能を保持し、安定した復元力特性を示したことから、耐震性能上杭頭浮き上がりによる基礎回転構造は極めて優れた構造と言える。なお試験体 No.2 に使用した D6 の主筋が、座屈後の伸びで破断したが、実際の構造においてはできるだけ太径の軸方向筋を用い、かつ附着除去長さも十分とることが重要であると言える。また減圧鉄筋については、想定する変形量に応じてその配筋位置を定める必要がある。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究[B])(代表 平石久廣 明治大学教授)により行った。また、本研究にご協力いただいた明治大学大学院 升谷桂輔氏、明治大学 天野元樹氏、同 蟹慎太郎氏、同 田中亜海氏に深く謝意を表します。

## 参考文献

- 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，Vol.20，No.3，pp.59-66，2009.9
- 2) 平石久廣・南谷知輝・平岡太一・藤原章弘：杭頭に接合部を設けた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，Vol.22，No.1，pp.23-31，2011.1
- 3) 平岡太一ほか：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発(その1~3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.773-778，2010.9
- 4) 升谷桂輔ほか：杭頭浮上り基礎回転系対応型杭の開発(その1~2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.775-778，2011.8
- 5) 鈴木彩香，平石久廣，杉岡洋哉，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，日本建築学会大会学術梗概集(関東)，2011.8
- 6) 岩下敬三，木村秀樹，春日康博，鈴木直幹：基礎浮き上がりを伴う鉄骨架構の振動台実験，日本建築学会構造系論文集，No.561，pp.47-54，2002.11
- 7) 岩下敬三，谷口元，木村秀樹，春日康博：建築構造物の地震応答に及ぼす基礎浮き上がりの影響，日本建築学会構造系論文集，No.567，pp.33-40，2003.5
- 8) 藤堂正喜ほか：アフリフト制震構造の開発研究(その1~3)，日本建築学会大会学術梗概集(北海道)，pp.151-156，2004.8
- 9) 平石久廣：損傷低減機構を有する鉄筋コンクリート造，コンクリート工学，Vol.46，No.3，pp.5-6，2008.3