

# 論文 杭頭浮上り基礎回転系対応型杭の開発研究

佐古 智昭\*1・平石 久廣\*2・二宮 大樹\*1

**要旨：**杭頭の主筋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に対応した構造詳細を有する杭（降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭）の実験・開発研究を行った。実験では基礎回転時の浮上りを想定し、最大 20mm の浮上りを杭に付与した。結果として、浮上り回転系に対して降伏機構分離型構造杭が対応できること、杭頭部とパイルキャップ間のせん断ずれ（スリップ）の抑制のために配した鉄筋（ずれ防止筋）や杭頭部挿入型が有効であることを示した。  
**キーワード：**基礎回転系、降伏機構分離型構造、スリップ、ずれ防止筋、杭頭部挿入型、鋼管補強

## 1. はじめに

建築物の杭は損傷が生じた場合、補修、修復に多額の費用がかかる。そのため、鉄筋コンクリート造杭は塑性化を避けるべく、杭頭部とパイルキャップとを剛接合とし、剛強な杭とするのが一般的である。しかしながら、剛強な杭は基礎梁の断面の拡大や配筋の過密化等の問題を招く。このような背景から、近年では基礎梁の合理化のため、杭頭部の塑性化を許容する杭頭半剛接の開発が行われ、一部の建築物に実用化されている（例えば 1）。

そこで著者らは梁で開発した降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の技術を杭に応用し、杭頭断面積を縮小しても、高圧縮軸力下において損傷抑制機能を有し、かつ良好なエネルギー吸収能を有する杭の開発を進めてきた 2), 3), 4)。

本論文はこのような損傷抑制機能を有する杭を用いて、図-1 に示すような杭頭浮上り基礎回転系構造を実現するために改良を加えた杭の構造実験について報告したものである。ここで杭頭浮上り基礎回転系構造とは上部構造が損傷を生じる以前の荷重で、杭頭の主筋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ほとんど損傷が生じない構造を目標としたものである。この構造の杭には基礎回転時、高圧縮軸力に耐えうる性能とともに高引張軸力下でも杭体に損傷を生じず、大きな主筋の伸びに耐えうる性能が要求される。

実験では変動軸力を想定し、高引張軸力及び浮上りを付与した。また杭頭部については既往の研究では杭頭部断面積を杭軸部断面積の 1/2 としたが、基礎梁をより合理化するため、杭頭部断面積を 1/3 まで縮小した。

本構造の課題としてはこの他、引張軸力下・浮上り時の杭頭部とパイルキャップの接合面でのずれ（スリップ）が挙げられる<sup>5)</sup>。スリップ変形は主筋の座屈、コンクリートの破壊等を誘発する要因となるため、これを抑制するような杭頭ディテール及び配筋を採用した。

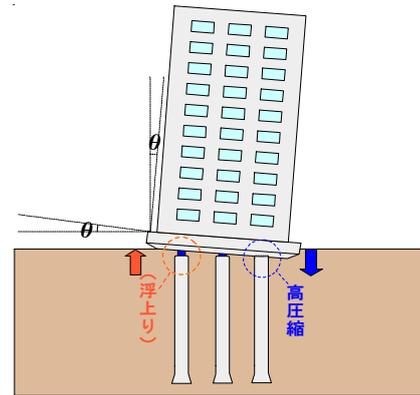


図-1 杭頭浮上り基礎回転系構造概念図

## 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の付着を切るととも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）を配したものを言う。従来の鉄筋コンクリート造は大きな変形を強制されるとヒンジ部が大きな損傷を受けるのに対して、PHIS では部材は大変形時にいたるまでコンクリートに損傷をほとんど与えることなく良好なエネルギー吸収能を有し、また曲げ戻し効果により接合部のコンクリートへの曲げモーメントによる応力を低減する。

### 2.2 杭頭部の形状

損傷低減に対して効果があるとされる錐体形状（以下、テーパ形状と略称）とより施工の合理化を考えた円柱形状（以下、PHIS 接合部と略称）を用いた。

### 2.3 ずれ防止筋

ずれ防止筋とはスリップを抑制するための鉄筋であり、スリップに対して部材の引張力及び定着部分のコンクリートとの支圧で抵抗する。また基礎回転系の引張側杭に想定される浮上り時でもずれ防止筋が弾性変形するように、鉄筋降伏歪(約 0.2%)を超えない鉄筋長さとした。

\*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 杭試験体概要

試験体名	No.1 (PHIS標準型)		No.2 (ずれ防止筋・テーパ形状)		No.3 (杭頭部挿入型)		No.4 (挿入部鋼管補強型)	
	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部
部材断面								
※1付着除去区間(mm)	300	-	300	-	300	-	300	-
コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )	24	24	24	24	24	24	24	24
主筋	8-D13(SD345)	12-D16(SD345)	8-D13(SD345)	12-D16(SD345)	8-D13(SD345)	12-D16(SD345)	8-D13(SD345)	12-D16(SD345)
添え筋	8-D10(SD345)	-	8-D10(SD345)	-	8-D10(SD345)	-	8-D10(SD345)	-
せん断補強筋	D6(SD295)@60	D6(SD295)@90	D6(KSS785)@30	D6(KSS785)@45	D6(SD295)@60	D6(SD295)@90	D6(SD295)@60	D6(SD295)@90
減圧鉄筋	-	-	D29(SD390)	-	-	-	-	-
ずれ防止筋	-	-	4-D10(SD345)	-	-	-	-	-
鋼管	-	-	-	-	-	-	SS400(t=3.2mm)	-
鋼管拘束筋	-	-	-	-	-	-	-	4-D10(SD345)
引張鉄筋比 $\rho_t$ (%)	1.1	0.6	1.1	0.6	1.1	0.6	1.1	0.6
せん断補強筋比 $\rho_w$ (%)	0.6	0.3	1.1	0.6	0.6	0.3	0.6	0.3
軸力比(圧縮時)	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2
軸力比(引張時)	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1
せん断スパン比(圧縮時)	3.5	1.9	3.5	1.8	3.5	1.8	3.5	1.8
せん断スパン比(引張時)	1.8	1.0	1.8	1.4	1.8	0.9	1.8	0.9

※1:危険断面から主筋の付着を除去している距離

## 2.4 杭頭部のパイルキャップ挿入型

挿入型は挿入された杭頭部がパイルキャップと接触することにより水平せん断力に抵抗する。杭頭部とパイルキャップの付着はなく、圧縮・引張抵抗は持たない。ただし回転ができるように回転角 1/50 に対応した空隙を設けた。また挿入された杭頭部のせん断破壊が懸念されたので、杭頭部を鋼管補強した試験体も計画した。

## 3. 実験概要

### 3.1 試験体概要

表-1 に杭試験体概要、図-2 に試験体断面概略図を示す。試験体は 4 体で、共通因子は実大の 1/4、両端スタブ付きの長さ 800(mm)、杭軸部径 400(mm)、杭頭部断面積は杭軸部の 1/3 とした。また PHIS を採用した。

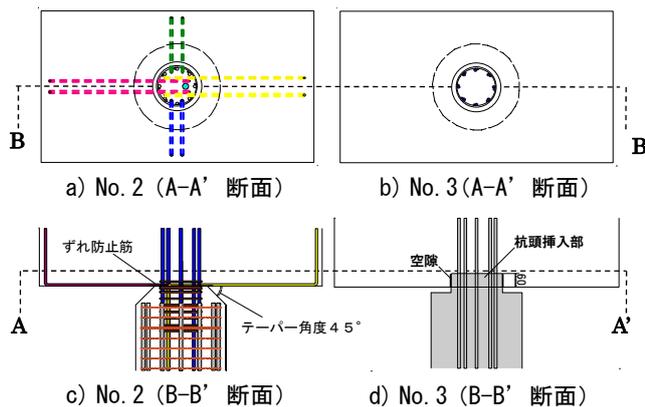


図-2 試験体断面概略図

以下に各試験体の特徴について記す。

- 1) No.1 (標準試験体)：杭頭部を PHIS 接合部とした標準試験体。
- 2) No.2 (ずれ防止筋・減圧鉄筋を配した試験体)：杭頭部を角度 45° のテーパ形状とし、ずれ防止筋と高圧縮軸力下に対応するために軸方向圧縮力を負担させる鉄筋

(以下、減圧鉄筋と略称)を配筋した。

3) No.3 (杭頭部挿入型試験体)：杭頭部を挿入型とした試験体。PHIS 接合部の長さを 85mm とし、そのうちの 60mm をパイルキャップ内に挿入した。

4) No.4 (挿入部鋼管補強型試験体)：パイルキャップに挿入した杭頭部を鋼管で補強した試験体。また鋼管が杭軸部と一体となってせん断力に抵抗できるように杭軸部では鋼管と主筋を連結する鉄筋を配した。

表-2, 3 に試験体に使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。

表-2 材料試験結果 (コンクリート)

設計基準強度	養生方法	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
FC24	気乾	32.23	2.27

表-3 材料試験結果 (鉄筋)

試験体記号	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪(%)	伸び率(%)
SD295-D6	344.3	530.4	1.85	0.34	15.16
KSS785-D6	985.2	1244.5	1.84	0.63	7.61
SD345-D10	415.5	561.9	1.87	0.37	18.44
SD345-D13	344.3	555.3	2.11	0.26	14.53
SD345-D16	393.8	602.6	1.92	0.24	15.89
SD390-D29	459.6	651.7	1.98	0.41	16.80

### 3.2 荷重方法

加力装置を図-3 に示す。試験体は杭体を基礎との位置関係を逆にした状態で設置した。荷重は部材角制御で行い、一定軸力下における正負繰返しとした。2 基の鉛直アクチュエーター(ACT2 及び ACT3)を用いて軸力 N を与え、水平アクチュエーター(ACT1)によりせん断力を作させた。また ACT2 と ACT3 の軸力は等しくなるように加力を行った。正加力では軸力比 0.6、負加力では軸力  $-0.8 \sigma_{yag}$  とした。加力サイクルは  $R=1/1600$ ,  $1/800$  では正負加力 1 回ずつ,  $R=1/400$  以降では正負加力 2 回ずつ繰返しで行った。ただし  $R=1/33$  では正負 2 回繰返し後、部材角  $R=0$  で杭頭部をパイルキャップから 10mm 浮かした後、軸力を  $-0.8 \sigma_{yag}$  に戻して負加力の水平加力を行っ

た。同様に 20mm も行い、それぞれ正負 2 回ずつ繰返した。浮上り量は 10・20・30 階の梁間方向 (スパン 12m) を研究対象とした文献<sup>6)</sup>で用いられている大地震時の基礎回転系構造建物の基礎の最大回転角 1/150 に対応する 20mm (縮尺 1/4 より実大では 80mm) とした。

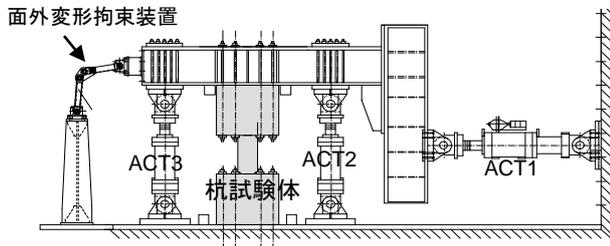


図-3 加力装置

### 3.3 諸強度

各試験体の理論値を表-4 に示す。理論値の計算については円形断面を断面積が等しく、かぶり厚さの等しい正方形に置換した。

終局曲げモーメントは略算式より求めた。せん断終局耐力は修正荒川式により求めた。また杭頭部の拘束効果を考慮し、コンクリート強度を $\sqrt{3}$ 倍して計算した。

### 4. 履歴性状

図-4 に各試験体の曲げモーメント-部材角関係を示す。本実験では載荷方法の都合上、反曲点が移動するため、せん断力に変化する。一方、本構造は曲げ性状が卓越する構造のため縦軸にはせん断力ではなく、杭頭部の曲げモーメントを用いた。

PHIS を用いて、杭頭部断面積を杭軸部の 1/3 まで縮小した全ての試験体で高引張軸力を受けた後も安定した履歴性状を示した。また浮上り後では、耐力低下が見られるものの、安定した履歴を保持した。以下に各試験体の履歴について述べる。

- 1) No.1 (標準試験体) は部材角  $R=1/50$  の 1 回目ピーク時に最大曲げモーメント  $M_{max}=47.6(kN \cdot m)$  となった。圧縮軸力下での  $R=+1/33$  時、杭頭部の縁部のかぶりコンクリートが圧壊した。この圧壊に起因する断面欠損により耐力が低下したと考えられる。
- 2) No.2(ずれ防止筋・減圧鉄筋を配した試験体)は  $R=1/50$  の 1 回目ピークに至る途中で  $M_{max}=63.3(kN \cdot m)$  となった。10mm 浮上り時にずれ防止筋が杭頭部とパイルキャップの境界面のコンクリートを破壊した。よってせん断伝達機能が劣化し、耐力が低下したと考えられる。また負加力時の耐力が他の試験体に比べて高いのは、減圧鉄筋が引張鉄筋の役割を果たしていることによる。
- 3) No.3 (挿入型) は  $R=1/33$  の 1 回目ピーク時に  $M_{max}=50.8(kN \cdot m)$  となった。10mm 浮上り経験後の負加力時に挿入した杭頭部がせん断破壊し、耐力が低下した。

4) No.4 (鋼管補強) は  $R=1/50$  の 1 回目のピーク時に  $M_{max}=49.1(kN \cdot m)$  となった。No.4 は他の試験体と違い、部材角 1/50 までで実験を終了した。これは回転角 1/50 を想定し、鋼管とパイルキャップの間に設けた空隙の幅に起因するもので、想定を越える部材角加力時に鋼管がパイルキャップのコンクリートに引っかかり、回転が阻害され急激に耐力が上昇したためである。若干の耐力低下は見られるが、浮上り後も安定した履歴を保持している。

表-4 理論値

試験体	軸力(kN)	終局曲げモーメント $M_{mu}$ (kN・m)	終局せん断強度 $Q_{SU}$ (kN)
No.1	正側(577.7kN)	61.9	566
	負側(-280.4kN)	4.7	383.2
No.2	正側(577.8kN)	76.2	566
	負側(-280.5kN)	20.2	566
No.3	正側(577.9kN)	61.9	566
	負側(-280.6kN)	4.7	383.2
No.4	正側(577.10kN)	61.9	566
	負側(-280.7kN)	4.7	383.2

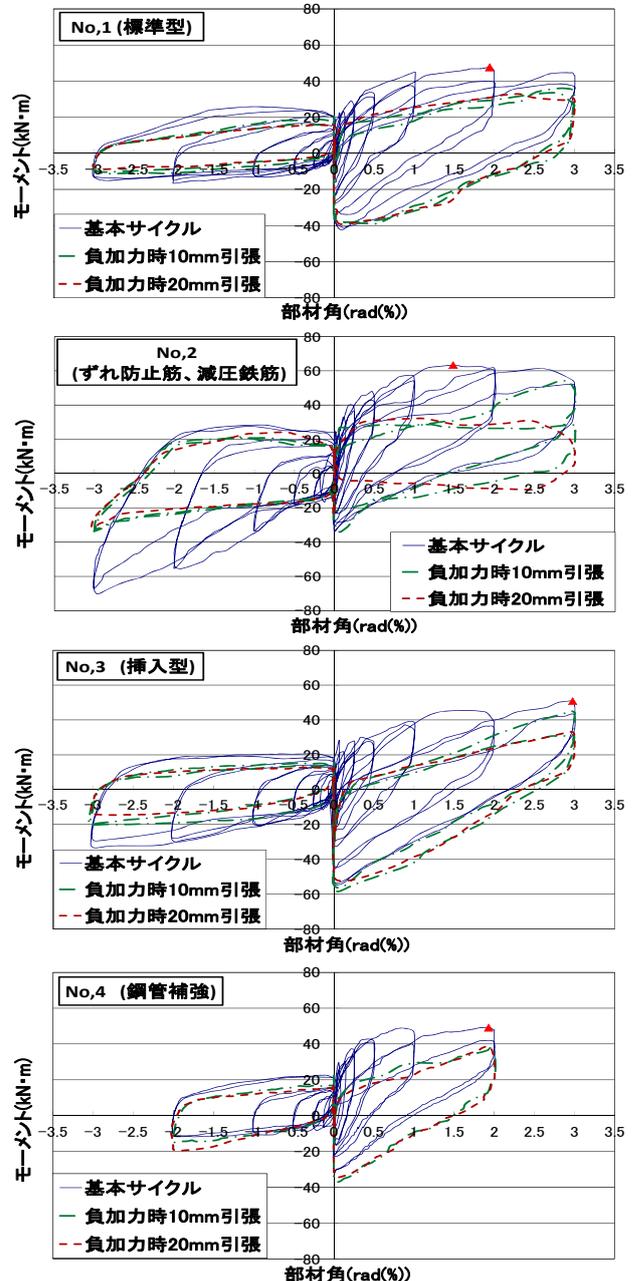


図-4 曲げモーメント - 部材角関係

## 5. 曲率分布

曲率分布の測定は図-5に示す5区間で行った。図-6にNo.1(標準試験体)の各サイクルの曲率分布を示す。なお、正加力時の曲率を正として表した。

曲率分布からも、杭頭部とパイルキャップの接地面に変形が集中していることが分かる。試験体に用いたPHISの特徴的な曲率分布となっている。この特徴は他の全ての試験体においても同様に確認できた。

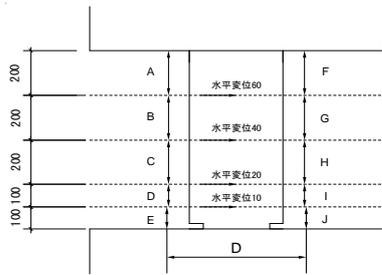


図-5 曲率分布の測定区間および変位計位置

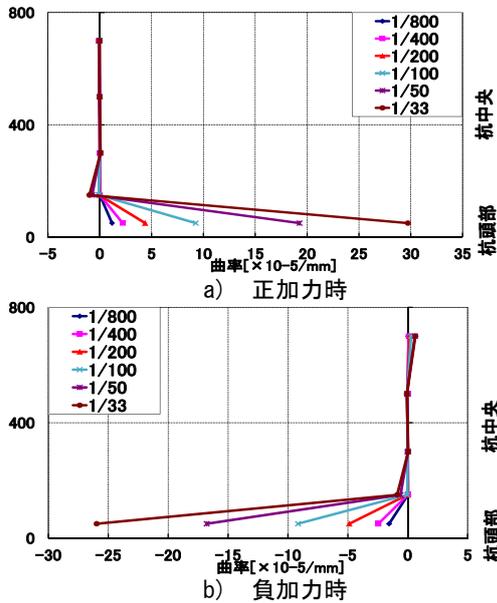


図-6 曲率分布 (No.1)

## 6. スリップ

### 6.1 スリップ評価方法について

以下では本実験に採用したスリップを抑制するためのディテールの効果を検討し、評価した。

図-5に変位計名称と変位計測定位置を示す。スリップ変形量を以下の(1)式により算定した。

$$\delta_s = \delta_{10} - 100 \times r \quad (1)$$

$\delta_s$  : スリップ変形量

$\delta_{10}$  : 水平変位 10 の測定値

$r$  : 鉛直変位計 E 及び J による回転角

$$r = (\delta_E - \delta_J) / D$$

$D$  : 鉛直変位計 E と J との距離

なお(1)式において杭頭部、杭軸部は剛体と仮定した。これは前述した曲率分布より試験体の変形は杭頭部とパイルキャップとの接合面の開きが大部分を占め、その他の部分がほぼ剛体的な変形をしていることに起因する。

## 6.2 スリップ変形量の推移

図-7に実験から得られたスリップ変形量の推移を示す。ここで縦軸は負加力ピーク時におけるスリップ変形量の全変形量に対する割合を示している。

図-7に示すように高引張軸力下ではスリップの対策をしていないNo.1は変形の1割以上がスリップ変形とわかる。しかし対策をした他の試験体はNo.1のスリップ変形量の6割以下に抑制されている。特にずれ防止筋を配したNo.2は最大でNo.1の2割以下にスリップ変形が抑制されている。

浮上り後では、No.1はスリップ変形量の割合が増加した。またNo.3も浮上り後に挿入した杭頭部がせん断破壊したため、大きくスリップが進行した。しかしずれ防止筋を配したNo.2と挿入型鋼管補強のNo.4では浮上り後もスリップ変形量は増加せず、No.1の約3割のスリップに抑制されている。よってずれ防止筋、鋼管補強した杭頭部を挿入するディテールがスリップ変形量を軽減する上で、有効であると言える。

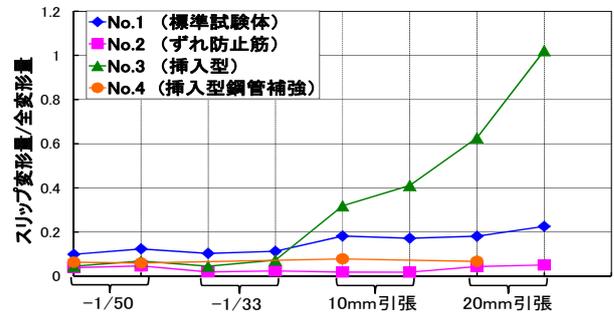


図-7 スリップ変形量の推移

## 7. 歪分布

### 7.1 主筋の歪分布

図-8に歪測定位置図を、図-9にNo.1の正加力時に圧縮歪が最も大きくなる杭頭部主筋(A1主筋)の歪分布をそれぞれ示す。

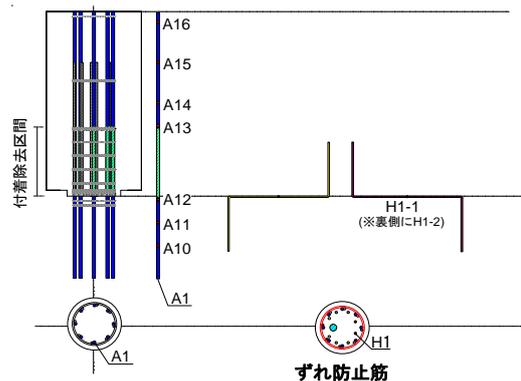


図-8 歪測定位置図

図-9 から、付着除去区間(0~200mm)付近で主筋の歪が大きくなっていることがわかる。部材角が大きくなるにつれてその特徴が顕著にあらわれ、変形が部材端部に集中する傾向が見られた。10, 20mm 浮上りのサイクルにおいても同様な特徴が確認できた。他の3体の試験体においても同様な特徴が確認できた。

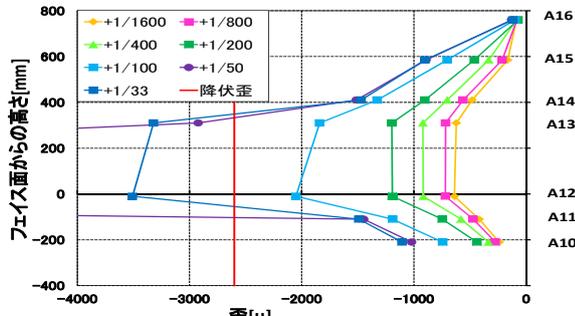


図-9 歪分布 (No. 1, A1 主筋)

## 7.2 ずれ防止筋の歪分布

図-10 に No.2 のずれ防止筋歪-部材角関係を示す。ずれ防止筋は鉄筋の両面に歪ゲージが取り付けられているため、平均したものをグラフに示した。負加力時のスリップに抵抗するずれ防止筋 H1 は引張軸力下で部材角が増大することによって歪も増加することから、高引張軸力下および浮上り時に起こるスリップ変形を抑制していると言える。なお対称に配したずれ防止筋からは引張軸力下で部材角 R=0 に戻る際のスリップに対して抑制効果を有することが確認されている。

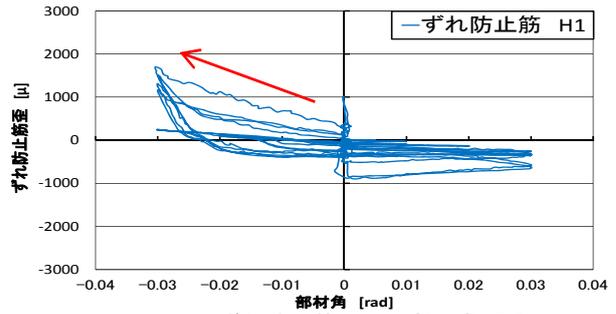


図-10 ずれ防止筋の歪 - 部材角関係

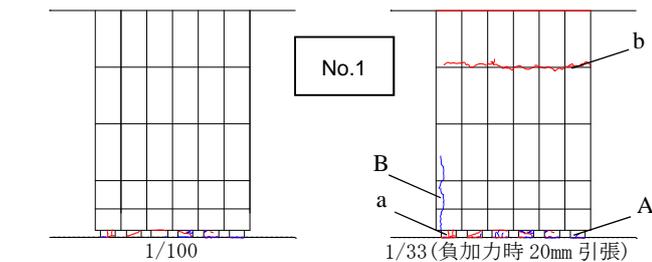
## 8. ひび割れ性状・破壊性状

図-11 に各試験体のひび割れ状況とピーク時及び除荷後のひび割れ幅を示す。表の ( ) 内に除荷後の残留ひび割れ幅を示している。

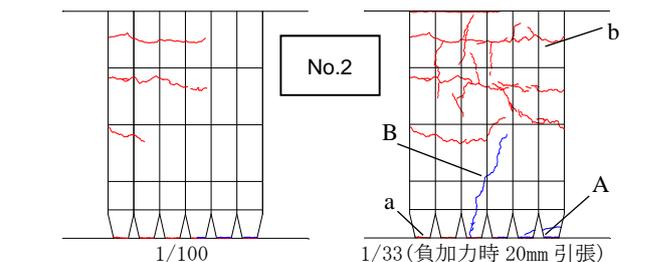
各試験体ともに杭頭部とパイルキャップの接合面のひび割れ幅が大きかった。これは PHIS の特徴であり、杭端部の開きによる変形が杭全体の変形の大部分を占める。また付着除去区間付近には曲げひび割れがほとんど生じていない。

中規模をかなり上回る地震動で想定されるような部材角 R=1/100 において杭軸部の残留ひび割れは、全ての試験体で 0.15mm 以下にとどまっている。

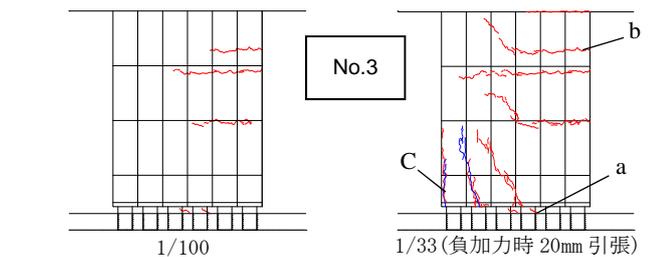
写真-1 に No.1 の浮上り前と 20mm 浮上り後の杭頭部を示す。浮上り前では、PHIS 接合部は縁部に圧壊が生じているものの、急激な耐力低下が生じなかったことからコンクリートの圧壊はかぶり部分のみに限定されていると考えられる。しかし浮上り後では、損傷がコア部まで進展し、耐力が低下した。



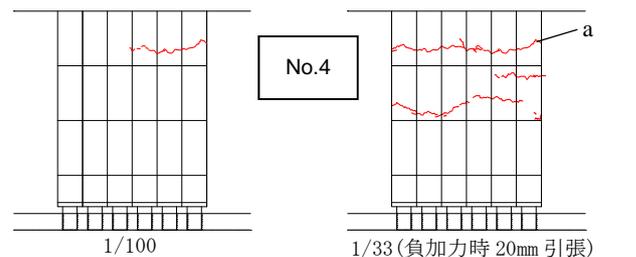
No.1	ひび割れ幅[mm]		ひび割れ幅[mm]	
	(R=1/400)	(R=1/100)	(R=1/33 負加力時10mm引張)	(R=1/33 負加力時20mm引張)
正加力	A 0.05(0.05未満)	0.50(0.15)	測定不能	—
	B —	—	0.15(0.15)	—
負加力	a 0.95(0.65)	1.80(1.40)	測定不能	測定不能
	b —	—	0.05(0.05)	0.05(0.05)



No.2	ひび割れ幅[mm]		ひび割れ幅[mm]	
	(R=1/400)	(R=1/100)	(R=1/33 負加力時10mm引張)	(R=1/33 負加力時20mm引張)
正加力	A 0.05(0.05未満)	1.40(0.05)	5.00	5.00(5.00)
	B —	—	0.10	0.15(0.15)
負加力	a 0.50	2.50(1.90)	11.00(10.00)	22.00(20.00)
	b —	0.05(0.05)	0.15(0.15)	0.20(0.20)



No.3	ひび割れ幅[mm]		ひび割れ幅[mm]	
	(R=1/400)	(R=1/100)	(R=1/33 負加力時10mm引張)	(R=1/33 負加力時20mm引張)
正加力	C —	—	0.05(0.05)	1.10(0.90)
	a 0.05(0.05未満)	0.10(0.10)	5.00(5.00)	13.00(12.00)
負加力	b 0.15(0.05)	0.15(0.10)	0.10(0.10)	0.15(0.10)



No.4	ひび割れ幅[mm]		ひび割れ幅[mm]	
	(R=1/400)	(R=1/100)	(R=1/50 負加力時10mm引張)	(R=1/50 負加力時20mm引張)
正加力	—	—	—	—
負加力	a —	0.05(0.05未満)	0.10	0.15

図-11 ひび割れ状況



a) 浮上り前 (R=+1/33)      b) 浮上り後 (20mm 浮上り時)  
写真-1 No. 1 (標準試験体) の杭頭部

写真-2 に No.2 の浮上り前後の杭頭部を示す。杭頭部をテーパ形状とした No.2 は浮上り後も杭頭部にはほとんど損傷がないことから、損傷抑制にテーパ形状は有効であると言える。ずれ防止筋は有効に働き、スリップを抑制しているが、写真-2 に示すように浮上り時に杭頭部とパイルキャップの境界面のコンクリートを破壊した。結果、その後の圧縮軸力下においてせん断力伝達機能を失ったと考えられる。



a) 浮上り前 (R=+1/33)      b) 10mm 浮上り後 (R=-1/33)  
写真-2 No. 2 (ずれ防止筋) の杭頭部

写真-3 に 10mm 浮上り後の No.3 と No.4 の杭頭部を示す。写真-3 に示すように、No.3 は浮上り後に杭頭部がせん断破壊した。これは挿入型の場合、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たためと考えられる。しかし No.4 のように杭頭部を鋼管補強することでせん断破壊を防止することが出来た。



a) No. 3 (挿入部補強なし)      b) No. 4 (鋼管補強)  
写真-3 補強の有無による杭頭部の比較 (10mm 浮上り後)

## 9. まとめ

- PHIS を用いて、杭頭部を縮小した全ての試験体が部材角  $R=1/33$  まで安定した履歴性状を示したことから、降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭は高引張軸力下においても高い性能を有することを明らかにした。浮上り時についても、安定した履歴を保持することが出来た。
- PHIS 接合部は浮上り前では、圧壊が生じたものそれ

はかぶりコンクリート部分にとどまった。ただし、浮上り後では損傷がコア部まで達した。テーパ形状は浮上り後でもかぶりコンクリート部分にもほとんど損傷が生じておらず、損傷抑制に有効であると言える。

3) スリップの対策をしていない No.1 は浮上り時、スリップ変形量が著しく増加した。また損傷がコア部まで進展した。よって浮上りを想定する場合、杭頭部にスリップを抑制する構造詳細を採用する必要がある。

4) ずれ防止筋はスリップに対して有効に働き、浮上り時でもスリップ変形量を 1 割以下にとどめている。しかしずれ防止筋は浮上り時に杭頭部とパイルキャップの境界面のコンクリートを破壊した。浮上りを想定する場合、コンクリートを破壊しないようなずれ防止筋のディテールの検討が必要である。

5) 杭頭部挿入型は挿入部がパイルキャップにぶつかる事によってせん断力が上昇し、挿入した杭頭部がせん断破壊した。しかし鋼管補強することでせん断破壊及びスリップ変形を防ぐことが出来た。

## 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。

## 参考文献

- 青島一樹・安田聡・石崎定幸・島田博志・小室努・川端一三：杭頭半剛接合構法『F.T.Pile 構法』の開発，大成建設技術センター報，第 37 号，2004
- 平石久廣・山田宗徳・斉藤亮平：重ね継ぎ手方式による降伏機構分離型鉄筋コンクリートの開発，日本建築学会構造系論文集，No.592，pp.159-165，2005.6
- 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
- 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
- 小林勝巳・高森直樹・福島泰之・大西靖和・寺岡勝：杭頭半剛接合法を用いた場所打ちコンクリート杭のせん断耐力，構造工学論文集，Vol.48，2002.3
- 鈴木彩香・平石久廣・杉岡洋克・梁川幸盛・斉藤光広：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講演梗概集 (関東)，pp.681-682，2001.8