

# 論文 沈み込みを伴う基礎回転系架構の構造性能に関する実験的研究

渋谷 圭祐\*1・平石 久廣\*2・劉 詩琦\*3

**要旨:** 本論文で開発目標としている構造は、地震動が作用した際、杭頭部の主筋の伸びにより基礎が回転し、その部分でエネルギーを吸収する構造である。しかし本構造は、着地時の衝撃や浮き上がりに伴う鉛直加速度が生じることが懸念される。天野、平石等は、それらの対策として杭頭部に緩衝材を設けた工法を提案している<sup>1)</sup>が、緩衝用ゴムの厚さの影響や工法の詳細については更なる検討の余地がある。そこで本論文では、杭頭部の工法を改良すると共に、沈み込みが本構造に及ぼす影響を検討するため、ゴムの厚みをパラメータとした構造実験を行い、杭頭部で沈み込みが生じた場合でも本構造は優れた構造性能を有することを示した。

**キーワード:** 基礎回転系, 沈み込み, 緩衝材, 付着除去

## 1. はじめに

本論文では、基礎回転系構造を開発目標としている(以下、基礎回転系と略称)。図-1に基礎回転系の概念図を示す。本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基礎が回転する構造である。この部分で地震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と考えられる。上部構造の変形は剛体的な基礎回転が主体となるため、従来の構造とは異なり、上部構造はかなり小さなベースシアで済む。また付加的な装置を必要とせず、コスト面や意匠・計画上の制約に対しても大きなメリットを有する。著者等は、このような基礎回転系に対応した杭を用いた基礎回転系架構を開発し、卓越した耐震性能を有することを構造実験により明らかにしている<sup>2),3),4),5)</sup>。

しかしながら、本構造のように意図的に浮き上がりを発生させる場合、浮き上がり時に圧縮側杭が高軸力状態になることから、杭体が沈み込むことが示唆される。さらに、本構造においては、浮き上がりに伴う鉛直加速度の低減及び着地時の衝撃緩和を目的とした緩衝材を用いることを検討しており、この緩衝材の素材や形状によっては、杭頭部での顕著な沈み込みが生じることが十分に考えられる。沈み込みが卓越した場合、基礎回転系は浮き上がりが卓越した場合と比較して、鉄筋の早期の圧縮降伏によるエネルギー吸収能力が大きいと期待される。

また、天野、平石等の研究<sup>1)</sup>では、緩衝用ゴムの形状がリング状のゴムと円盤のゴムからなる複雑な形状をしており、杭頭部の構造詳細には改良の余地がある。

そこで本論文では、緩衝用ゴムを円盤状の単材に簡易化すると共に、杭頭部に厚みの異なる緩衝用ゴムを用いて、基礎回転系架構の二方向加力による静的載荷実験を行い、杭頭部での沈み込みが及ぼす基礎回転系の構造性能に対する影響についての検討を行なった。

## 2. 工法概要

### 2.1 緩衝材

図-2に緩衝用ゴムを有する杭頭部の詳細図を示す。基礎回転系は、緩衝材を設けることで杭頭部での沈み込みが生じることが考えられる。そこで、本論文では、基礎回転系における沈み込み量の影響を検討するために、20mmと10mmの厚さの異なるゴムを杭頭部に設けた。

### 2.2 杭頭部挿入型及び鋼管内挿入型

基礎回転系は、緩衝材としてゴムを設けることで、その部分のせん断剛性が減少し、大きく水平移動してしまうことが懸念される。そこで、水平移動を一定量に抑えるために、図-2(a)のように杭頭部を上部構造に挿入した。これにより、大変形時は、挿入部と杭頭部が接触することで上部構造のせん断力を杭に伝達し、面外方向へのスリップを抑制する。同様の目的で、図-2(b)のように上部構造に設置された鋼管内に杭頭部を挿入する鋼管内挿入型を考案した。鋼管を上部構造に設置することで、杭頭部挿入型よりも施工面で優れていると考えられる。

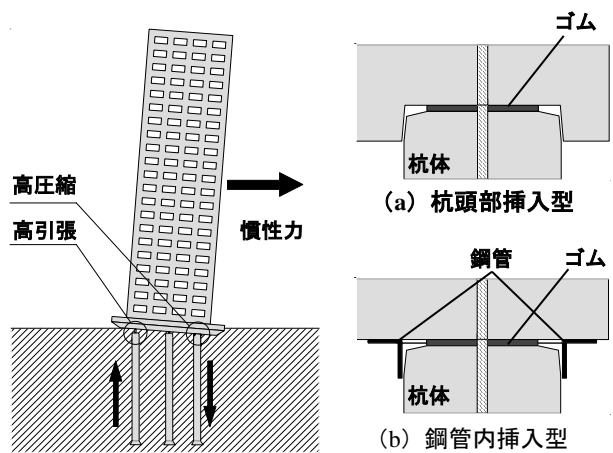


図-1 基礎回転系概念図

図-2 杭頭部詳細図

\*1 明治大学大学院博士前期課程 (正会員)  
 \*2 明治大学理工学部建築学科 教授・博士(工学) (正会員)  
 \*3 明治大学大学院博士前期課程

### 2.3 付着除去を施した芯鉄筋

基礎回転系は、杭頭部の主筋の伸びにより基礎が回転する構造である。そこで本研究では、杭体の中央に配した鉄筋を芯鉄筋とし、芯鉄筋と杭体のコンクリートの付着を700mm除去することによって、変形時に芯鉄筋のみを伸ばし、基礎回転を生じやすくする。これにより、鉄筋の伸びに伴うコンクリートの損傷を避け、且つ一定の伸び量の確保を図った。

### 3. 試験体概要

図-3に試験体形状、表-1に試験体概要、表-2に各試験体のクリアスパン、上スタブ、試験体長さを示す。

試験体は3体計画した。実大の1/5のスケールで、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、杭頭接合部径176.8mm、杭軸部の径250mm、杭芯間距離500mm、杭の上端から下に700mmの範囲を芯鉄筋の付着除去区間とした。それぞれ下スタブ及び杭体に定着させた。また、杭頭部とパイルキャップに杭頭部の回転を阻害しないようなテーパ加工を施した。以下に各試験体の特徴について記す。

#### 1) 試験体 No.1 (ゴム厚 20mm, 杭頭部挿入型)

緩衝材としての機能を目的とした外径176.8mm、内径17mm、厚みを20mmのクロロプレングムを杭頭部に配した。また上部構造から杭へのせん断力伝達及び、面外方向へのスリップの抑制を目的として、杭頭部をパイルキャップに挿入する杭頭部挿入型とした。

#### 2) 試験体 No.2 (ゴム厚 10mm, 杭頭部挿入型)

試験体 No.2 は、緩衝材ゴムの断面形状は試験体 No.1 のものと同様とし、厚みを10mmとした。また、試験体 No.1 と同様に、杭頭部挿入型とした。

#### 3) 試験体 No.3 (ゴム厚 10mm, 鋼管内挿入型)

試験体 No.3 は、緩衝材ゴムの形状を試験体 No.2 と同様のものを配し、パイルキャップに設置した鋼管内に杭頭部を挿入する鋼管内挿入型とした。

表-3、表-4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。

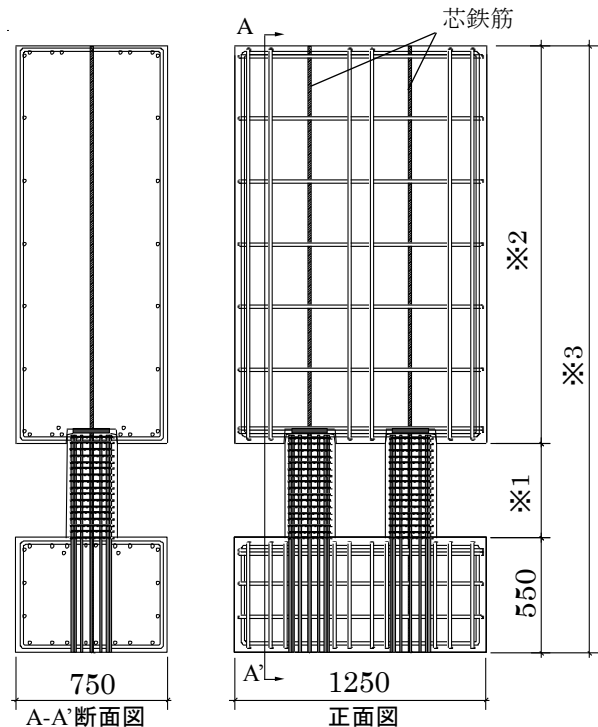


図-3 試験体形状 (※1※2※3は表-2を参照)

表-2 クリアスパン、上スタブ及び、試験体長さ

	※1クリアスパン	※2上スタブ	※3試験体全長
試験体No.1	452 (mm)	1900 (mm)	2903 (mm)
試験体No.2	452 (mm)	1900 (mm)	2903 (mm)
試験体No.3	500 (mm)	1840 (mm)	2900 (mm)

表-3 コンクリート材料試験結果

使用部位	養生方法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
上スタブ	気乾	24.8
杭	気乾	24.9
下スタブ	気乾	24.9

表-4 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 (%)
D6-KSS785	1039.64	1244.06	0.37
D13-SD345	519.84	696.39	0.27
D16-SD297	470.25	619.08	0.27

表-1 試験体概要

試験体名	試験体No. 1		試験体No. 2		試験体No. 3	
	杭頭部挿入型		杭頭部挿入型		鋼管内挿入型	
試験体特徴	杭頭部挿入型		杭頭部挿入型		鋼管内挿入型	
ゴムの種類	クロロプレングム					
ゴム厚 (mm)	20		10		10	
ゴムの鉛直バネ定数 (kN/mm)	10.3		65.3		65.3	
径 (mm)	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部
	176.8	250	176.8	250	176.8	250
付着除去区間 (mm)	700		700		700	
コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	24		24		24	
芯鉄筋	D16-SD295		D16-SD295		D16-SD295	
主筋	12-D13-SD295		12-D13-SD295		12-D13-SD295	
せん断補強筋	D6-KSS@30		D6-KSS@30		D6-KSS@30	
引張り鉄筋比 (%)	1.5		1.5		1.5	
せん断補強筋比 (%)	1.0		1.0		1.0	
せん断スパン比	2.25		2.25		2.25	
終局せん断強度 (kN)	141.2		141.2		141.2	

#### 4. 載荷方法

加力装置図を図-4に示す。なお、軸力比の算出には、杭頭部の断面積を用いた。載荷方法は、一定軸力下での繰り返し載荷とし、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)を用いてせん断力を加えた。ACT2の軸力とACT3の軸力は等しくなるように加力した。以下では、図-4の西側杭圧縮時を正加力方向とし、東側杭圧縮時を負加力方向とする。

加力サイクルは、軸力比0.2の軸力を加え、上スタブ単体の回転角をRとし、 $R=1/1600, 1/800(\text{rad})$ では正負1回ずつ繰り返しを行い、 $R=1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33(\text{rad})$ では正負加力を2回ずつ繰り返した。これを基本サイクルとする。基本サイクル後は、軸力を0.3, 0.4, 0.5と随時増加させて $R=1/33(\text{rad})$ を正負加力で2回ずつ行った。尚、鈴木、平石等の研究<sup>6)</sup>では、上部構造の損傷を防止するために、大地震時に、10階~20階を対象とした基礎回転系構造物(上部構造を剛体とし、杭芯間距離12m)の基礎回転は最大で $1/150(\text{rad})$ 、浮き上がり量80mm程度になると想定されている。本論文の $R=1/33(\text{rad})$ での浮き上がり量は、実建物の基礎回転 $R=1/150(\text{rad})$ での浮き上がり量(縮尺1/5より実験では16mm)に対応する。

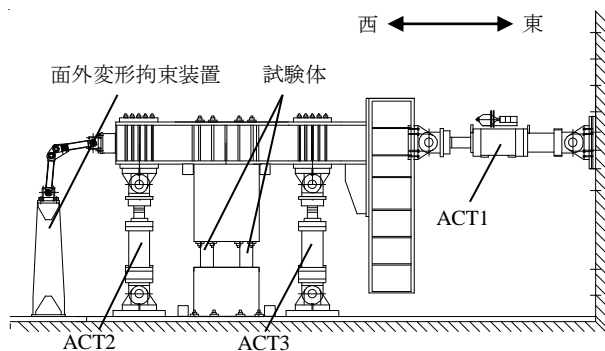


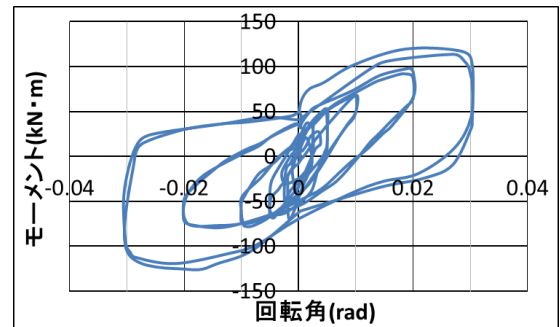
図-4 加力装置図

#### 5. 履歴性状

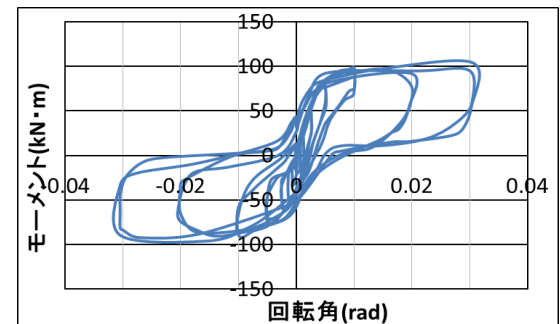
図-5に各試験体の基本サイクルの曲げモーメント-回転角関係を、図-6に軸力増加サイクル毎の履歴性状を示す。各試験体は、基本サイクルでの加力後、回転角 $R=1/33(\text{rad})$ で軸力比を0.2, 0.3, 0.4, 0.5と変動させて実験を行った。軸力比0.5における回転角 $R=1/33(\text{rad})$ まで安定した履歴を示し、軸力を上げる毎に耐力は増加した。

また、各試験体とも軸力比0.5における回転角 $R=1/33(\text{rad})$ のピークに至る途中で最大曲げモーメントとなり、試験体No.1は $M_{\max}=206.6(\text{kN}\cdot\text{m})$ 、試験体No.2は $M_{\max}=177.8(\text{kN}\cdot\text{m})$ 、試験体No.3は $M_{\max}=178.8(\text{kN}\cdot\text{m})$ となった。

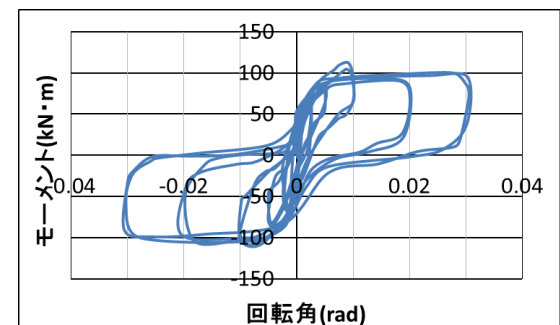
試験体No.1と試験体No.2、No.3を比較すると、ゴム材の厚い試験体No.1は、抵抗モーメントが高くなっており、履歴吸収面積も試験体No.1の方が大きくなっていることが分かる。このことから、基礎回転系において、杭頭部での沈み込みが卓越する場合、芯鉄筋が早期圧縮降伏するため、そうでない場合よりも優れたエネルギー吸収能を有すると言える。



(a) 試験体 No.1

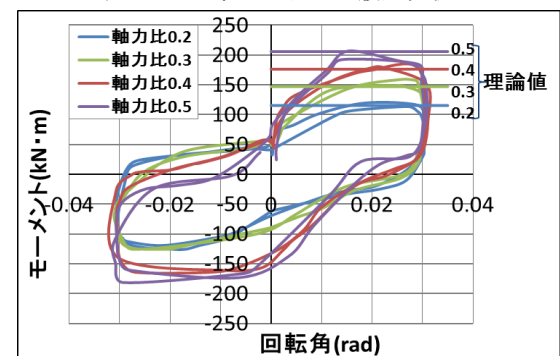


(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3

図-5 基本サイクルの履歴性状

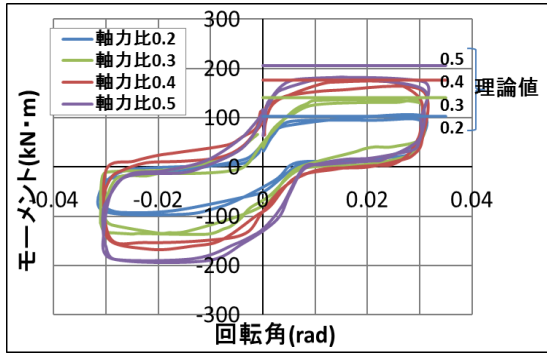


(a) 試験体 No.1

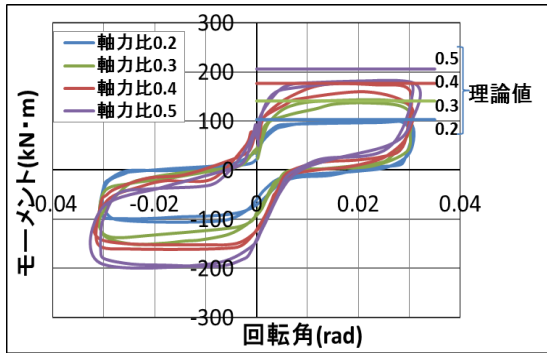
図-6 (a) 軸力比0.2~0.5での履歴性状

表-6 各試験体の実験値と理論値

試験体名	軸力比	一本の杭に作用する軸力 (kN)	実験結果		抵抗モーメント	
			Mmax(kN・m)	Mr(kN・m)	Mmax/Mr	
No.1 (緩衝材20mm)	0.2	117.8	119.7	115.4	1.04	
	0.3	176.8	158.9	147.0	1.08	
	0.4	235.7	178.9	176.4	1.01	
	0.5	294.6	206.6	205.9	1.00	
No.2 (緩衝材10mm)	0.2	117.8	97.5	102.8	0.95	
	0.3	176.8	137.1	140.7	0.97	
	0.4	235.7	174.4	176.4	0.99	
	0.5	294.6	177.8	205.9	0.86	
No.3 (緩衝材10mm) 鋼管内挿入型	0.2	117.8	100.1	102.8	0.97	
	0.3	176.8	141.1	140.7	1.00	
	0.4	235.7	174.2	176.4	0.99	
	0.5	294.6	178.8	205.9	0.87	



(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3

図-6 (b) (c) 軸力比 0.2~0.5 での履歴性状

## 6. 諸強度

表-6に各試験体の実験値と理論値を示す。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。このため、抵抗モーメント  $M_r$  は上部構造の回転に対して軸力と芯鉄筋の引張応力により抵抗するモーメントとして、式(1)から求めた。

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

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、 $\sigma_y$  は芯鉄筋主筋の降伏強度、 $a_{gt}$  は芯鉄筋の断面積、 $\varepsilon$  は杭頭部分の芯鉄筋の軸力のみを載荷した時の初期圧縮ひずみ、 $\varepsilon_y$  は芯鉄筋の降伏ひずみとする。また、 $(1 + \varepsilon / \varepsilon_y)$  の上限値を芯鉄筋が圧縮降伏した時の 2 とする。

せん断終局強度は Mattock の提案式<sup>7)</sup>より求めた。尚、上スタブを剛強に設計しているため、入力せん断力が全て杭体に伝達され、負担するものとした。

表-7に示すように、各試験体の最大曲げモーメントと抵抗モーメントは概ね一致していた。

## 7. 破壊性状

写真-1に各試験体の軸力比 0.2 における回転角  $R=1/100$  (rad) 及び軸力比 0.5 における  $R=1/33$  (rad) の杭頭部の写真、図-7に軸力比 0.2, 0.5 における回転角  $R=1/33$  (rad) の時のひび割れ図及び各回転角ピーク時及び除荷後のひび割れ幅を示す。ただし、ひび割れ図において圧縮側となる杭に生じたひび割れを青色、引張り側となる杭に生じたひび割れを赤色で示す。

本構造は、大地震時に  $R=1/150$ (rad)程度の変形を想定しており、全ての試験体においてその想定を超える  $R=1/100$ (rad)の変形でも、損傷は見られなかった。



(a) 軸力比 0.2 R=1/100



(b) 軸力比 0.5 R=1/33

(1) 試験体 No. 1



(a) 軸力比 0.2 R=1/100



(b) 軸力比 0.5 R=1/33

(2) 試験体 No. 2



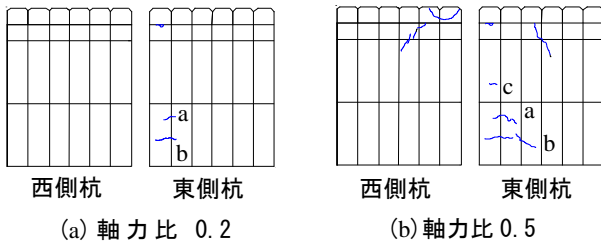
(a) 軸力比 0.2 R=1/100



(b) 軸力比 0.5 R=1/33

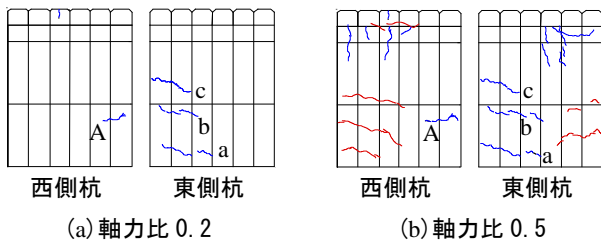
(3) 試験体 No. 3

写真-1 各試験体の杭頭部写真



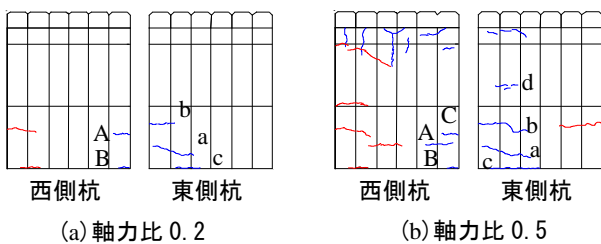
試験体No.1		ひび割れ幅(mm)	
		R=1/33	
		軸力比0.2	軸力比0.5
東側杭圧縮	a	0.05未満(0.05未満)	0.15(0.05未満)
	b	0.05未満(0.05未満)	0.05(0.05未満)
	c	無	0.05未満(0.05未満)

※括弧内は除荷後のひび割れ幅  
(c) ひび割れ幅  
(1) 試験体 No. 1



試験体No.2		ひび割れ幅(mm)	
		R=1/33	
		軸力比0.2	軸力比0.5
西側杭圧縮	A	0.05未満(0.05未満)	0.05(0.05未満)
東側杭圧縮	a	0.15(0.05未満)	0.15(0.05未満)
	b	0.05(0.05未満)	0.05(0.05未満)
	c	0.05(0.05未満)	0.05(0.05未満)

※括弧内は除荷後のひび割れ幅  
(c) ひび割れ幅  
(2) 試験体 No. 2



試験体No.3		ひび割れ幅(mm)	
		R=1/33	
		軸力比0.2	軸力比0.5
西側杭圧縮	A	0.05(0.05未満)	0.05未満(0.05未満)
	B	0.15(0.05未満)	0.1(0.05未満)
	C	無	0.05未満(0.05未満)
東側杭圧縮	a	0.05(0.05未満)	0.05(0.05未満)
	b	0.05(0.05未満)	0.05(0.05未満)
	c	0.1(0.05未満)	0.2(0.05)
	d	無	0.05未満(0.05未満)

※括弧内は除荷後のひび割れ幅  
(c) ひび割れ幅  
(3) 試験体 No. 3

図一 各試験体のひび割れ図及びひび割れ幅

杭頭部に緩衝材の厚さ 20mm のゴムを設けた試験体 No.1 は、 $R=1/33(\text{rad})$  軸力比 0.2 において圧縮側杭の杭軸部に曲げひび割れが生じた。 $R=1/33(\text{rad})$ 以降は、軸力比を増加させるにつれて、ひび割れも増加した。また、 $R=1/33(\text{rad})$ 軸力比 0.5 において東側杭圧縮時、西側杭の杭頭部にせん断ひび割れが生じた。

杭頭部に緩衝材の厚さ 10mm のゴムを設けた試験体 No.2 は、 $R=1/50(\text{rad})$ において圧縮側杭の杭軸部に曲げひび割れが生じ、 $R=1/33(\text{rad})$ 以降は、軸力比を増加させるにつれて、ひび割れも増加した。 $R=1/33(\text{rad})$ 軸力比 0.4 において圧縮側杭の杭軸部に縦ひび割れが生じ、引張側杭にひび割れが生じた。また、 $R=1/33(\text{rad})$ 軸力比 0.5 において、せん断ひび割れが生じた。

パイルキャップに設置した鋼管に杭頭部を挿入する鋼管内挿入型を採用し、杭頭部に緩衝材の厚さ 10mm のゴムを設けた試験体 No.3 は、 $R=1/50(\text{rad})$ において曲げひび割れが生じた。 $R=1/33(\text{rad})$ 以降は、軸力比を増加させるにつれてひび割れも増加し  $R=1/33(\text{rad})$ 軸力比 0.2 において圧縮側杭の下端に圧壊によるひび割れが生じた。

図一 7 の各試験体のひび割れ図を見ても分かるように、ゴム厚の大きい試験体 No. 1 は他の二つと比較すると、損傷が軽微である。これは、試験体 No.2, 3 は、芯鉄筋の浮き上がりの伸びによる変形が支配的なのに対し、試験体 No.1 は浮き上がりによる伸びだけではなく、杭頭部での沈み込みによる変形が架構の変形を負担しているため、杭体のコンクリートに対する負荷が軽減されているためであると考えられる。

写真一 2 に試験体 No.3 の実験後の杭頭部写真を示す。試験体 No.3 は、大変形時に、上部構造からのせん断力を杭体に伝達させるため、杭頭部と鋼管が接触し、その部分で圧壊が生じていた。しかし、杭頭部には接触面を大きくするためにテーパ加工を施しており、損傷はかぶり厚部分にとどめることができ、杭体の構造性能を著しく低下させるようなものではなかった。また、杭頭部をパイルキャップに挿入した試験体 No. 2 と比較して、損傷状況に大きな違いがないことから、施工性に大きなメリットを有する鋼管内挿入型は、本構造に有効な工法であると言える。



(a) 鋼管取り外し前 (b) 鋼管取り外し後  
写真一 2 試験体 No. 3 実験後杭頭部写真

## 8. まとめ

本論文では、緩衝材を用いた杭頭部の構造詳細の改良を図ると共に、緩衝材の厚さによる履歴性状・架構の変形・損傷の違いを比較、検討することで緩衝材による杭頭部での沈み込みが及ぼす基礎回転系架構の構造性能への影響を明らかにすることを目的とし、基礎回転系対応型杭を用いた架構の構造実験を行った。実験は、実建物を模擬した架構の杭が圧縮と浮上りの繰り返しを受けることを想定した正負繰り返し載荷実験をし、基本性状の検討をした結果、以下の結論が得られた。

- 1) 緩衝材の厚さに関わらず全ての試験体において、基礎回転系構造建物が大地震時において経験すると想定される基礎の回転角  $R=1/150$  (rad) 以上の変形を繰り返し経験しても、圧縮側の杭体にはほとんど損傷は生じなかった。その後も、軸力比 0.5 において回転角  $R=1/33$  (rad) の変形を繰り返し経験しても杭体の構造性能を著しく低下させるような損傷は発生せず、良好なエネルギー吸収能を有し、安定した履歴性状を示した。
- 2) 杭頭部に設ける緩衝用ゴムの形状を円盤状に簡易化した場合においても、遜色ない構造性能を示した。
- 3) 全ての試験体において、最大曲げモーメントの実験値と軸力による抵抗と初期圧縮歪を考慮した芯鉄筋による抵抗から算出した抵抗モーメントの理論値が概ね一致した。
- 4) ゴムの厚い試験体 No.1 は、杭頭部での沈み込みが卓越した変形のため、試験体 No.2, 3 と比較し、杭体に損傷がすくなかった。また、試験体 No.1 において、 $R=1/100$  (rad) の段階で圧縮降伏をしているため、試験体 No.2 及び試験体 No.3 より明らかに面積が大きい履歴ループを描いており、優れたエネルギー吸収能を有していた。また、試験体 No.1 の履歴性状は、耐力に占める圧縮降伏した鉄筋の負担する割合が大きいため、バイリニア型の履歴特性の特徴も表れている。
- 5) ゴム材を厚くすると残留変形は大きくなるが、逆加力では圧縮降伏していた鉄筋が引張降伏することと、ゴム自体が弾性であるため、残留変形の累積は生じていない。
- 6) 杭頭部を鋼管に挿入している鋼管内挿入型を採用している試験体 No.3 は、パイルキャップ内に杭頭部を挿入している杭頭部挿入型の試験体 No.2 と比較しても、損

傷状況に大きな違いはなく、杭体へのせん断力伝達機構として施工面やメンテナンス面に優れている鋼管内挿入型は、本構造に適用可能であると言える。

以上のことより、各試験体は、大地震時に想定される大変形を繰り返し経験しても杭体に損傷は少なく、安定した履歴性状を示した。特に、緩衝材ゴムの厚い試験体 No.1 は、杭頭部での沈み込みが卓越しているため、他の二つと比較して、杭体の損傷は軽微なものであり、より優れたエネルギー吸収能を有している。

## 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。

## 参考文献

- 1) 天野元樹ほか：緩衝材を有する杭頭浮き上がり基礎回転系構造の構造システムに関する耐震実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.331-336，2013
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 升谷桂輔ほか：杭頭浮き上が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) 升谷桂輔ほか：杭頭浮き上がり基礎回転系架構の耐震性能に関する実験的研究(その 1～4)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，pp.699-706，2012.9
- 6) 鈴木彩香ほか：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，第 78 巻，第 683 号，pp.165-172，2013.1
- 7) A.F.shaikh : Proposed Revision to Shear-Friction Provisions, ASCE, Vol.107, ST10, October1981