

論文 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

天野 元樹^{*1}・平石 久廣^{*2}・渋谷 圭祐^{*3}・二宮 大樹^{*1}

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、杭頭の主筋の伸びにより基礎が回転し、そ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損傷が生じない構造である。しかし本構造は地震時の鉛直加速度の影響や基礎回転後の着地による衝撃の影響が懸念される。そこで本論文では、鉛直加速度の低減及び着地の衝撃緩和を想定し、著者等が開発した半剛接杭の杭頭に緩衝材を設置した杭頭浮き上がり基礎回転系構造の耐震実験を行った。結果として、緩衝材を設置することは基礎回転系構造の耐震性能にほとんど影響を及ぼさないことを示した。

キーワード：基礎回転系, 杭頭浮き上がり, 架構, 緩衝材, 杭頭挿入型, 芯鉄筋

1. はじめに

本論文では、杭頭浮き上がり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に杭頭浮き上がりによる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。この杭頭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いベースシアで済む。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^{1),2),3),4)}。

しかしながら、浮き上がりを許容した構造では、地震動上下成分が上部構造の応答に及ぼす影響や浮き上がり後の着地による衝撃の影響が懸念される。高橋, 平石等は基礎回転系構造の地震動上下成分の影響について、図-2に示すようにゴム製緩衝材(解析上はコンクリートばね剛性に対して 1/5 の剛性の緩衝材ばね)を杭頭部に設けることが地震時の鉛直方向加速度の低減に有効であることを明らかにしている⁵⁾。

そこで本論文では、地震時の鉛直加速度の低減及び浮き上がり後の着地時の衝撃緩和を想定し、杭頭部に緩衝材を設置した基礎回転系構造の二方向加力による静的載荷実験を行い、緩衝材を設けた場合の基礎回転系の構造性能について検討を行った。

尚、杭頭にゴムを配する杭基礎に関する研究は、宮崎等⁶⁾や清等⁷⁾のゴムを利用した杭頭の半剛接化の研究が

あるが、浮き上がりを対象とした構造の鉛直方向加速度の影響について論じたものではない。

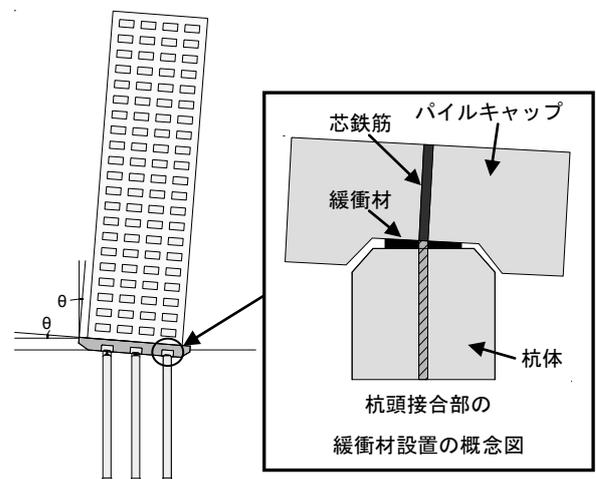
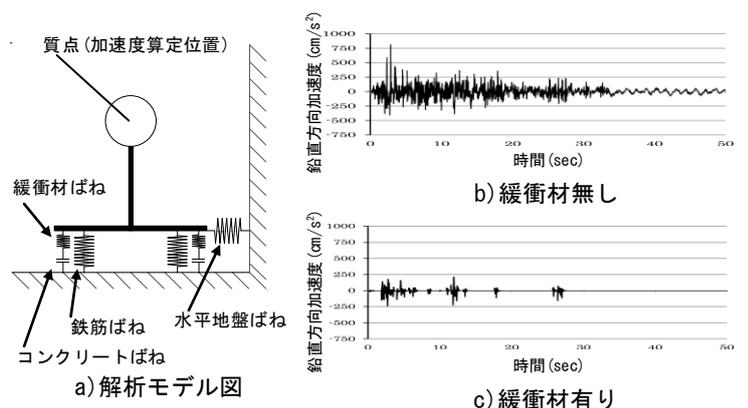


図-1 杭頭浮き上がり基礎回転系構造の概念図



※解析モデル：20階建RC造高層住宅 上部構造剛体 1質点系モデル
入力地震動：第2種地盤の設計用応答スペクトルを基に作成した告示波

図-2 緩衝材の有無による基礎回転系構造建物の鉛直方向加速度の比較

*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)
*3 明治大学理工学部建築学科

2. 工法概要

2.1 緩衝材を用いた杭頭工法

図-3に緩衝材として杭頭部にゴムを設置した試験体図を示す。本論文では、図-3のような杭頭接合面周辺に緩衝材を設置したディテールを計画した。また、杭頭接合面にはゴムシートを配した。これにより建物自重が作用した際に、ゴムシートと杭頭主筋(本論文では芯鉄筋)が同時に圧縮力を受け、杭頭主筋には初期段階で圧縮応力が生じる。このことから、図-4に示すような鉄筋の見かけ上の耐力上昇効果が期待できる。尚、コンクリートとゴムのポアソン比の違いを考慮して、圧縮時にコンクリートが過度の横方向力を受けないようにゴムシートにはスリットを設けた。

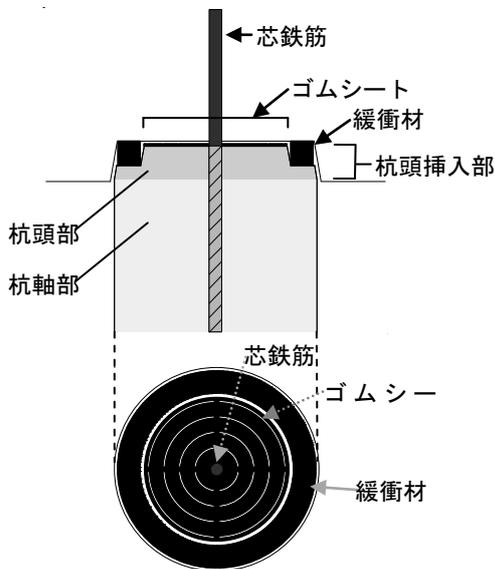


図-3 緩衝材及びゴムシート配置図

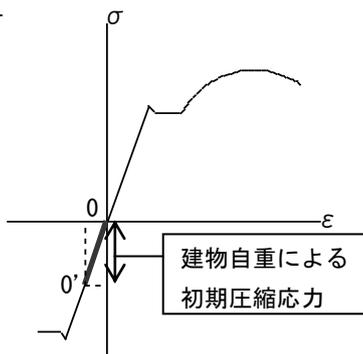


図-4 初期圧縮応力による芯鉄筋の耐力上昇概念図

2.2 杭頭挿入型

杭頭部に緩衝材を設置することで大変形時にズレが生じ、せん断力を伝達できなくなることが懸念される。そのため、杭頭挿入型は図-5のように杭頭部をパイルキャップに挿入した。また、杭頭部の抵抗モーメントを低減し、杭頭部の圧壊を防止するため、杭頭部にはテーパ加工を施した。緩衝材を有する試験体は、緩衝材が圧縮軸力により最大で 3mm 孕むことのできるスペースを

作り、緩衝材の圧縮変形を阻害しないディテールとした。

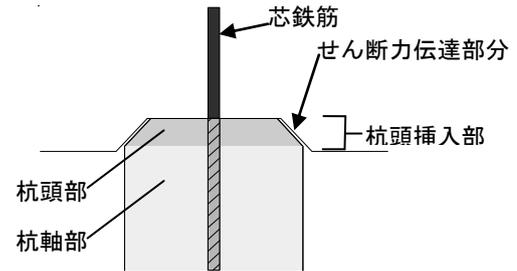


図-5 杭頭部挿入型(緩衝材無し)詳細図

2.3 付着除去を行った芯鉄筋

図-6に付着除去を行った芯鉄筋の配筋図を示す。基礎回転系構造は杭頭の伸びにより基礎が回転する構造である。本論文では、杭体に配した芯鉄筋の付着除去区間の伸びにより基礎回転を生じさせる。また、回転角 $R=1/33(\text{rad})$ の浮き上がりによる芯鉄筋の伸び量(歪量)が付着除去区間の 2%程度となるように付着除去区間を杭頭接合面から杭体に向かって 700mm 設けた。

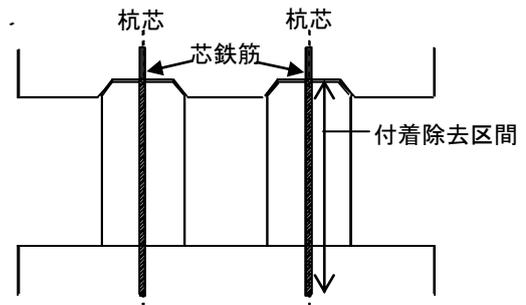


図-6 芯鉄筋配筋詳細図

3. 試験体概要

図-7に試験体形状、図-8に部材断面図、表-1に試験体概要、表-2にクリアスパンと試験体全長を示す。

試験体は2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、杭頭接合部径 176.8mm、杭軸部の径 250mm、杭芯間距離 500mm、杭頭挿入部長さ 50mm、芯鉄筋の付着除去区間 700mm である。杭頭部と杭軸部の各々が曲げ及びびせん断に抵抗できるように杭頭部主筋を杭体内側に、杭軸部主筋を杭体外側に並列配筋方式とし、それぞれ下スタブ及び杭体に定着させた。また杭軸部でのせん断破壊を防止するため、本論文では杭軸部のせん断補強筋比を 2.1%とした。以下に各試験体の特徴について記す。

1) 試験体 No.1 (緩衝材有り)

緩衝材としての機能を目的とした外径 241mm、内径 185mm のゴムを杭頭部の接合面から 3mm 高くなるように杭頭接合面の外周に設置した。さらに接合面に厚さ 3mm のゴムシートを配した。杭頭部とパイルキャップに緩衝材の圧縮変形を阻害しないようなテーパ加工を施した。また杭頭接合面から 700mm にわたって芯鉄筋と杭体の付着を除去した。

表-1 試験体概要

試験体名	No.1		No.2	
	緩衝材有り		緩衝材無し	
試験体特徴	杭頭部	杭軸部	杭頭部	杭軸部
径	176.8	250	176.8	250
※付着除去区間(mm)	700		700	
コンクリート強度(N/mm ²)	24	24	24	24
芯鉄筋	D16-SD295		D16-SD295	
主筋	8-D6-SD295	12-D13-SD345	8-D6-SD295	12-D13-SD345
せん断補強筋	D4-SD295@30	D10-SD295@30	D4-SD295@30	D10-SD295@30
引張鉄筋比pt(%)	0.4	1.5	0.4	1.5
せん断補強筋比pw(%)	0.7	2.1	0.7	2.1
せん断スパン比	3	2.25	3	2.25

※危険断面からの距離

表-2 クリアスパン及び試験体全長

	※1(クリアスパン)	※2(試験体全長)
試験体No.1	453	2903
試験体No.2	450	2900

表-3 コンクリート材料試験結果

使用部分	養生方法	圧縮強度
		σ_c (N/mm ²)
上スタブ	気乾	38.6
杭体	気乾	23.7
下スタブ	気乾	33.3

表-4 鉄筋材料試験結果

種別	降伏強度	引張強度	降伏歪	伸び率
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
D4(SD295)	387	472	0.19	14.6
D6(SD295)	393	553	0.21	16.5
D10(SD295)	333	457	0.18	17.8
D13(SD345)	380	518	0.22	14.6
D16(SD295)	384	559	0.22	14.6

表-5 ゴム性能諸元

用途	素材	硬度	外径(mm)	内径(mm)	ゴム厚(mm)	1次形状係数
緩衝材	クロロプレンゴム	65°	241	185	30	0.467
ゴムシート	クロロプレンゴム	45°	176.8	16	3	2.916

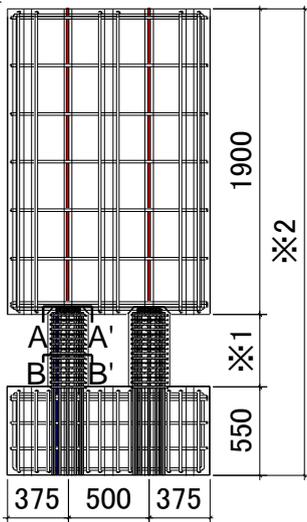


図-7 試験体形状

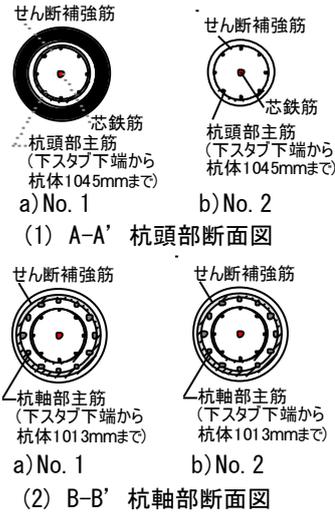


図-8 杭体断面配筋図

2) 試験体 No.2 (緩衝材無し)

試験体 No.2は、面外方向へのスリップを抑制するために杭頭挿入型とした。杭頭部とパイルキャップが互いに平行となるようなテーパ加工を施し、試験体 No.1 と同様に芯鉄筋と杭体の付着を 700mm にわたり除去した。

表-3, 表-4, 表-5 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とゴムの性能諸元を示す。

4. 荷重方法

加力装置図を図-9に、加力時の軸力一覧を表-6に示す。なお、軸力比の算出には、杭頭接合面の断面積を用いた。荷重方法は、基礎浮き上がり時の圧縮側杭に作用する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荷重とした。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-9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、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, 800(rad)では正負 1 回ずつ繰り返しを行い、R=1/400, 200, 100, 50, 33(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

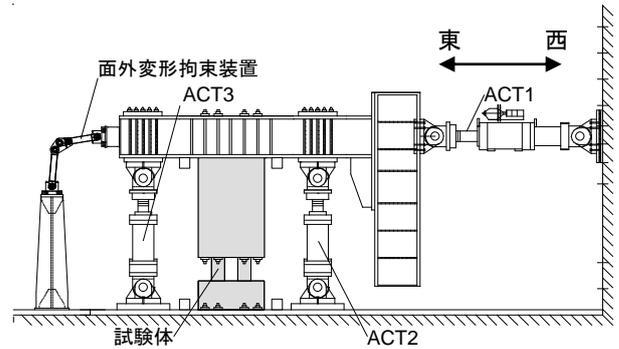


図-9 加力装置図

表-6 軸力比及び軸力一覧

試験体名	軸力比	軸力(kN)
No.1	0.2	236
	0.3	353
	0.4	471
	0.5	589
No.2	0.2	236
	0.3	353
	0.4	471
	0.5	589

ルとする。基本サイクル後は、No.1,2共に軸力を0.3, 0.4, 0.5 と随時増加させて R=1/33(rad)を正負加力で 2 回ずつ行った。尚、本論文の R=1/33(rad)は文献⁵⁾で用いられている大地震時の基礎回転系構造建物(杭芯間距離 12m)の基礎の最大回転角 1/150(rad)時の浮き上がり量 80mm に対応するものとした。(縮尺 1/5 より実験では 16mm)

5. 履歴性状

図-10に各試験体の曲げモーメント-回転角関係を、基本サイクル及び軸力増加サイクル毎に示す。尚、基本サイクルの履歴では、実験結果より得られた初期回転剛性 K_0 (kN・m/rad)を併せて示す。

1)試験体 No.1(緩衝材有り) : 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、 $R=1/33(\text{rad})$ のピークに至る途中で最大曲げモーメント $M_{\text{max}}=187.3(\text{kN} \cdot \text{m})$ となった。 $R=1/33(\text{rad})$ の荷重では、軸力を上げる毎に耐力は増加した。

2)試験体 No.2(緩衝材無し) : 試験体 No.1 と同様に回転角 $R=1/33(\text{rad})$ で軸力比を変動させて実験を行った。軸力比 0.5 における $R=1/33(\text{rad})$ まで安定した履歴を示し、 $R=1/33(\text{rad})$ のピークに至る途中で最大曲げモーメント $M_{\text{max}}=174.4(\text{kN} \cdot \text{m})$ となった。 $R=1/33(\text{rad})$ の荷重では、軸力を上げる毎に耐力は増加した。

3)各試験体の初期回転剛性を比較すると、試験体 No.1 の回転剛性が試験体 No.2 よりも小さいことがわかる。これは試験体 No.1 の杭頭に設置した緩衝材が、本論文で想定した鉛直加速度の低減に有効な剛性の緩和をもたらしたと考えられるが、その定量的な検討は今後の課題である。

6. 諸強度

表-7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、緩衝材を設置していない試験体 No.2 の抵抗モーメント 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、(6-1)式から求めた。

$$M_r = N \cdot B/2 + \sigma_y \cdot a_{gt} \cdot B \quad \dots(6-1)$$

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、 σ_y は芯鉄筋主筋の降伏強度、 a_{gt} は芯鉄筋の断面積とした。一方、緩衝材を設置した試験体 No.1 の抵抗モーメントはゴムシートにより芯鉄筋に作用する初期圧縮応力を考慮して(6-2)式から求めた。

$$M_r = N \cdot B/2 + (1 + \varepsilon / \varepsilon_y) \cdot \sigma_y \cdot a_{gt} \cdot B \quad \dots(6-2)$$

ε は杭頭部分の芯鉄筋の圧縮ひずみ、 ε_y は芯鉄筋の降伏ひずみとした。 ε の値は表-8の軸力比 0.2 入力時の杭頭部分の芯鉄筋の圧縮ひずみを用いた。軸力比 0.3 以降

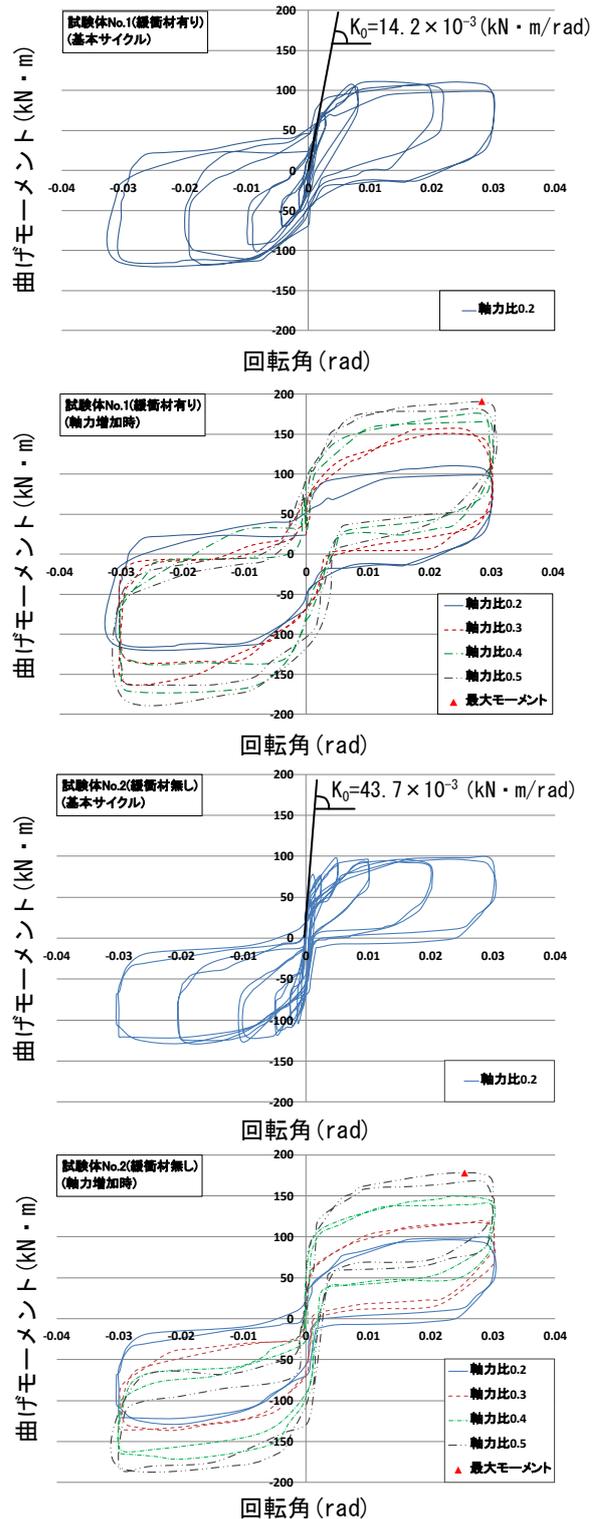


図-10 履歴性状

表-7 実験値と理論値

試験体名	軸力比	軸力(kN)	実験結果		抵抗モーメント		せん断終局強度	
			Mmax(kN·m)	Qmax(kN)	Mr(kN·m)	Mmax/Mr	Qsu(kN)	Qmax/Qsu
No.1 (緩衝材有)	0.2	117.8	109.3	52.3	104.3	1.05	152.5	0.34
	0.3	176.8	156.9	57.7	133.8	1.17	161.3	0.36
	0.4	235.7	174.7	67.7	163.2	1.07	170.2	0.40
	0.5	294.6	187.3	78.2	192.7	0.97	179.0	0.44
No.2 (緩衝材無)	0.2	117.8	95.2	49.4	97.0	0.98	152.5	0.32
	0.3	176.8	119.8	56.0	126.5	0.95	161.3	0.35
	0.4	235.7	149.5	68.2	156.0	0.96	170.2	0.40
	0.5	294.6	174.4	79.9	185.4	0.94	179.0	0.45

表-8 軸力比 0.2 入力時における芯鉄筋の圧縮ひずみ

軸力比	ひずみ ϵ (μ)
0.2	417

は軸力を上げたことによる耐力増加のみを考慮した。せん断終局強度は Mattock の提案式⁸⁾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。しかし、耐力上昇効果を考慮した試験体 No.1 においては、芯鉄筋に貼り付けたひずみゲージが実験早期に測定不可能となったため、耐力上昇効果の定量的な検討は今後の課題である。

7. 破壊性状

図-11に各試験体の軸力比 0.2, 0.5 における回転角 $R=1/33(\text{rad})$ の時のひび割れ状況と、各回転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、西側杭共に圧縮時のみひび割れが生じた。

試験体 No.1 は回転角 $R=1/50(\text{rad})$ 、試験体 No.2 は $R=1/200(\text{rad})$ において杭軸部にひび割れが生じた。各試験体ともに $R=1/33(\text{rad})$ の浮き上がりを経験した後も杭軸部のひび割れは少なく、残留ひび割れも長期的使用に問題がない程度に収まっている。ひび割れ幅からわかるように、杭体に生じたひび割れは小さく、杭体の変形はほとんど生じていない。また軸力比を 0.5 まで上げて杭軸部に生じたひび割れは非常に軽微なものである

8. 架構の変形特性

写真-1に各試験体の軸力比 0.3 ピーク時の架構の変形状況、写真-2に各試験体の軸力比 0.3 の回転角 $R=1/33(\text{rad})$ ピーク時及び軸力比 0.3, 0.5 の $R=1/33(\text{rad})$ 終了時の杭頭部を示す。

写真-1より各試験体ともに上スタブの回転が架構の変形の大部分を占めていた。試験体 No.1 は上スタブが回転変形する際に上スタブにズレが生じ、写真-2の(1)の a) に示すように架構内側において圧縮側杭の杭頭挿入部と杭体が接触しながら回転した。試験体 No.1 はこの接触部分から杭体にせん断力を伝達していたと考えられる。接触部分からせん断力が伝達されていることは、接触部分付近のせん断補強筋に貼り付けたひずみゲージが他の杭頭のせん断補強筋のひずみゲージよりも大きい値を示していたことから確認している。また写真-1の(2)の a) に示すように、軸力比 0.3 においては挿入部の接触による杭体の損傷は見られないが、(3)の a) では軸力比 0.5 で損傷が生じ、杭体のコンクリートの剥離が確認できる。この損傷による急激な耐力低下は見られないことから、損傷の範囲はかぶりコンクリートに限定されていると考

えられる。

一方、試験体 No.2 では写真-2の(1)の b) のように軸力比 0.3 の回転角 $R=1/33(\text{rad})$ ピーク時に変形時に架構外側で挿入部と杭体が接触し、ひび割れが生じ、 $R=1/33(\text{rad})$ 終了時にはひび割れが大きくなっている。試験体 No.1 とは異なり、上スタブがズレを生じずに回転変形したことが原因だと考えられる。但し、実大の基礎回転系構造建物の大地震時に想定される $1/150(\text{rad})$ の変形に対して、この損傷は影響ないものであると考えられる。また(3)の b) では軸力比 0.5 で杭体のコンクリートが剥離していることが確認されたが、耐力には影響を及ぼさなかった。

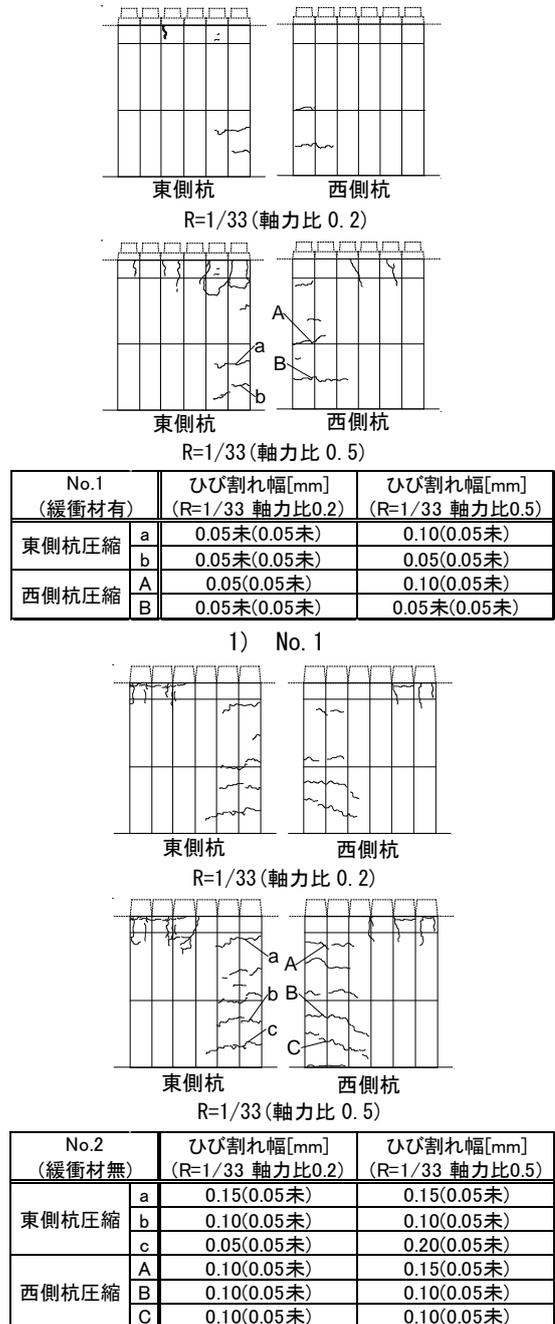


図-11 ひび割れ図とひび割れ幅

