

論文 円形柱の塑性ヒンジ部に設けた重ね継手の補強に関する実験的研究

伊吹 真一*1・石橋 忠良*2・大庭 光尚*3・岩田 道敏*4

要旨: 鉄筋コンクリート柱の付け根部に重ね継手を設けた場合、重ね継手は塑性ヒンジ領域となり、地震時の繰り返し応力作用によりかぶりコンクリートが剥落し十分な継手性能を発揮することが難しいとされている。しかし、円形柱は継手を高強度スパイラル筋で補強し十分な拘束を得ることができるので、地震時に塑性ヒンジ部に設けた重ね継手部の鉄筋が拔出さない構造を目指し、試験体を作成し水平交番載荷実験を行った。その結果をもとに、円形柱において塑性ヒンジ領域に設けた重ね継手の性能に影響を及ぼしているスパイラル筋量と重ね継手長について検討したので報告する。

キーワード: 円形柱, 重ね継手, 塑性ヒンジ, スパイラル筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚や柱が、地震時の作用によって正負交番繰返し荷重を受ける場合、く体作用する曲げやせん断により柱基部は損傷し、塑性ヒンジが形成される。重ね継手は、地震時の繰返し応力によりかぶりコンクリートが剥落すると十分な継手性能を発揮することができないため、塑性ヒンジ領域に用いないことが原則とされている¹⁾。

しかし円形断面においては円形帯鉄筋の優れた拘束効果が確認されている^{2),3)}ことから、塑性ヒンジ領域であっても円形スパイラル筋で重ね継手を取り囲み十分補強すれば、繰返し応力時の継手部の鉄筋の拔出を抑えることが可能と考えられる。重ね継手は、構造が簡便であることから構造物の分割施工や込入った配筋において柱の塑性ヒンジが形成される付け根部に重ね継手を設けることができれば、施工性を大幅に改善できる例も多く存在する。

そこで塑性ヒンジ内に設けることのできる重ね継手の構造を明らかにすることを目的とし、円形柱の塑性ヒンジ領域に重ね継手を設けた試験体により水平交番載荷試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 試験体諸元および試験方法

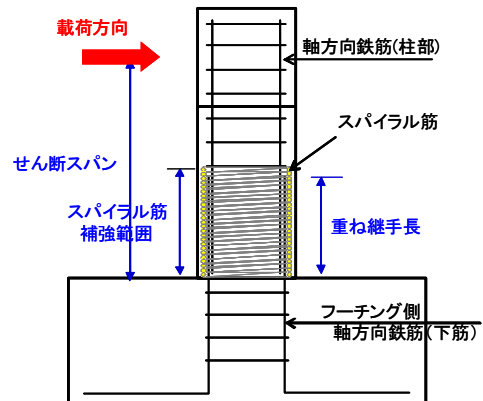
2.1 試験体諸元

試験体の形状を図1に示す。表1に今回の試験で用いた試験体の一覧を示す。柱基部には、軸方向鉄筋の重ね継手を設け、その周囲をスパイラル筋で取り囲んだ。スパイラル筋は降伏強度 1400N/mm² 以上の高強度鉄筋とした。スパイラル筋を配置した基部以外の範囲には、せ

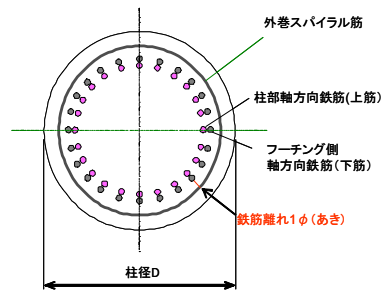
ん断破壊しないように D13 の帯鉄筋を 100mm ピッチで配置した。試験体の主なパラメータは、スパイラル筋量ならびに軸方向鉄筋の重ね継手長とした。

(1) 重ね継手

柱の軸方向鉄筋の重ね継手は塑性ヒンジ領域となる柱付け根部に配置した。図1に示すとおり、フーチングに定着した軸方向鉄筋（下筋）はスパイラル筋から 1φ 離隔した位置に円形状に配置し、柱の重ね継手部の軸方向鉄筋（上筋）は下筋の内側となるように配置した。



(a) 試験体側面



(b) 試験体断面

図1 試験体形状

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務所構造技術センター 課員 工修(正会員)
 *2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務所構造技術センター 所長 工博(正会員)
 *3 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所工事管理室 室長(正会員)
 *4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務所構造技術センター 課長 工修(正会員)

表 1 試験体一覧

No.	柱径D	せん断 スパンL	L/D	継手長	継手長/ 柱径	スパイラル 補強範囲	柱 f_{ck}	軸方向鉄筋		主鉄筋 断面積	引張軸 方向鉄 筋比 Pl	主鉄筋 降伏強度 f_{sy}	公称面積	スパイラル ピッチ s_s	スパイラル 降伏強度 f_{swy}	スパイラル 鉄筋比 Pw
	mm	mm		mm		mm		N/mm ²	径							
1	500	1150	2.30	570 (30φ)	1.14D	500	28.0	D19	12本	286.5	0.0044	387.8	64	29.0	1590.3	0.0104
2	500	1150	2.30	475 (25φ)	0.95D	500	29.2	D19	12本	286.5	0.0044	387.8	64	19.0	1590.3	0.0159
3	500	1150	2.30	480 (30φ)	0.96D	500	24.6	D16	16本	198.6	0.0040	437.6	30	34.2	1413.6	0.0041
4	500	1150	2.30	475 (25φ)	0.95D	500	29.5	D19	12本	286.5	0.0044	377.8	30	26.2	1413.6	0.0054
5	500	1150	2.30	380 (20φ)	0.76D	500	21.8	D19	12本	286.5	0.0044	427.4	30	26.2	1413.6	0.0054
6	500	1150	2.30	380 (20φ)	0.76D	500	21.9	D19	12本	286.5	0.0044	427.4	64	19.0	1590.3	0.0159

表 2 試験結果

No.	Mu	Vc	Vsd	Vyd	Vmu	耐力比 Vy/Vmu	最大水 平荷重 kN	δy	δu	$\mu =$ $\delta u / \delta y$	継手損傷 範囲 mm	破壊形態
	kN・m	kN	kN	kN	kN			(計算値) mm	(実験値) mm			
1	252.0	124.4	2272.2	2396.6	219.1	10.9	262.0	5.9	100.0	17.0	70	鉄筋破断
2	253.8	126.1	3466.8	3592.9	220.7	16.3	251.5	5.5	93.0	17.0	70	鉄筋破断
3	252.3	107.0	829.6	936.6	219.4	4.3	246.1	6.6	81.5	12.4	100	鉄筋拔出し
4	254.2	126.5	1047.8	1174.2	221.0	5.3	238.4	5.7	57.0	10.0	100	鉄筋拔出し
5	256.9	114.2	1047.8	1162.0	223.4	5.2	240.1	7.0	40.7	5.8	80	鉄筋拔出し
6	257.2	114.4	3466.8	3581.2	223.7	16.0	219.3	7.1	64.3	9.1	80	鉄筋拔出し

(2) スパイラル筋補強範囲

試験体は柱基部を高強度スパイラル筋で補強し、補強範囲としてはフーチング天端から1D区間を基本とした。重ね継手長が1Dを超える場合、スパイラル筋補強範囲は重ね継手長の範囲とした。

(3) スパイラル筋補強量

重ね継手部の高強度スパイラル筋は耐力比 5.2~16.3の範囲で設定した。

ここで、耐力比は以下のように定義した。

V_{yd}/V_{mu} : 耐力比

V_{yd} : 設計せん断耐力

$V_{yd}=V_{cd} + V_{sd}$

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 (主にコンクリートが受け持つせん断耐力で、有効高さ、軸方向鉄筋、軸力の影響を加味)

V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力 (スパイラル筋が受け持つせん断耐力)

V_{mu} : 部材が曲げ耐力に達する時のせん断力

$V_{mu}=M_u / L$

M_u : 曲げ耐力

L : せん断スパン

引張側軸方向鉄筋はフーチングに定着されている鉄筋のみとする。

2. 2 試験方法

試験は、フーチング天端から載荷点までの高さをせん断スパンとし静的に水平交番載荷試験を行った。軸力はコンクリートの圧縮応力度が $1N/mm^2$ となるように柱頭

部に鉛直ジャッキで載荷した。

載荷ステップは、フーチングに定着されている軸方向鉄筋のうち、最外縁の鉄筋が材料試験結果から求めた降伏ひずみに達したときの水平変位を 1δ とした。その後、降伏変位 δ の整数倍を正負に各1回ずつ繰返し水平載荷した。

3. 試験結果および考察

3. 1 損傷状況

水平交番載荷試験における損傷状況は概ね次のとおりであった。

- ①最初に発生する水平方向の曲げひび割れは重ね継手の上端もしくはスパイラル筋補強範囲上端に発生した。水平方向に曲げひび割れが発生した後、引張側の重ね継手下端のフーチングに定着した鉄筋が降伏した (写真1)。
- ②交番載荷の進行に伴い①で発生したひび割れが進行し、側面から見ると斜め状のひび割れとなる (写真2)。
- ③柱基部の圧縮側でコンクリートの圧壊がはじまり、最大荷重時を迎える (写真3)。
- ④圧縮側の圧壊が進行、柱基部のかぶりコンクリートが剥離し、柱基部付近のスパイラル筋内部のコアコンクリートが損傷し粉体化する。引張側ではフーチング表面のコンクリートが割れて浮いてくる (写真4)。
- ⑤試験終了時の破壊状況を写真5に示す。試験終了時の破壊形態は、フーチングに定着した軸方向鉄筋の一部が柱基部で破断して耐力が低下するタイプ、もしくは重ね継手部で軸方向鉄筋が拔出して耐力が低下するタイプの2種類に分類される。

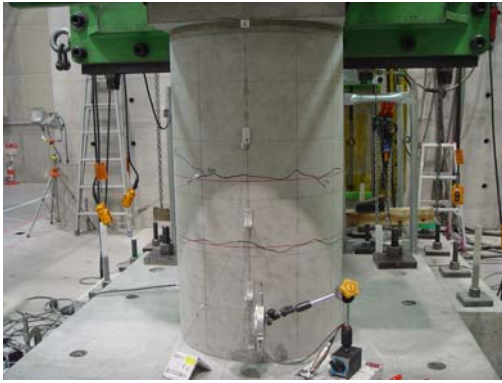


写真1 破壊性状①



写真4 破壊性状④

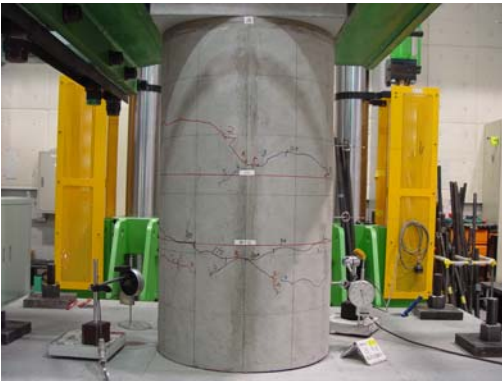


写真2 破壊性状②



写真5 破壊性状⑤



写真3 破壊性状③



写真6 No.2 軸方向鉄筋破断状況 (試験終了後)

継手部の鉄筋が拔出さず軸方向鉄筋の一部が破断することにより試験を終了した試験体の、柱付け根部の軸方向鉄筋の鉄筋破断部を拡大したものを写真6に示す。軸方向鉄筋が座屈し低サイクル疲労により鉄筋が破断したものと思われ、鉄筋破断時の変位はいずれも $17\delta y$ 程度であった。

3. 2 継手の損傷範囲について

重ね継手長のうち、コンクリートの粉体化により鉄筋がコンクリートとの付着を期待できなくなった区間の長さを継手損傷範囲長と定義する (写真7(b))。

耐力比 V_y/V_{mu} と継手損傷範囲長との関係を図2に示す。スパイラル筋量が大きくなり耐力比 V_y/V_{mu} が大きくなるに従い、継手損傷範囲長は小さくなる傾向が見

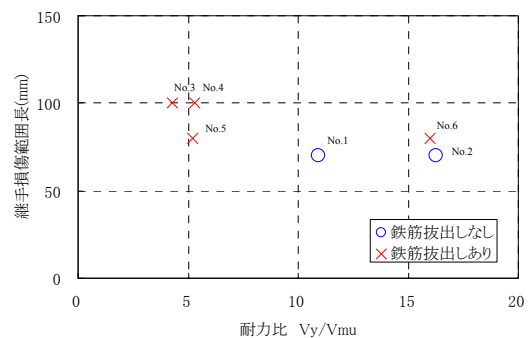
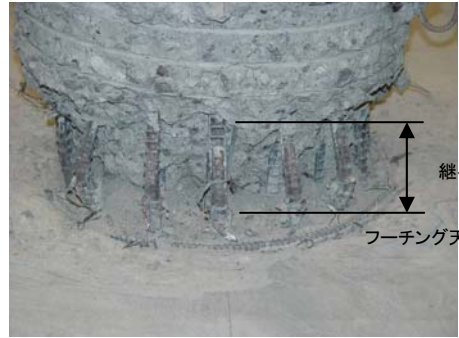


図2 耐力比と継手損傷範囲長の関係



(a) 試験終了時



(b) スパイラル筋撤去

写真7 試験体 No. 3 破壊状況

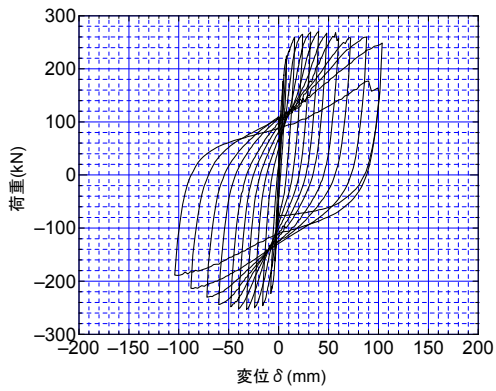


図3 荷重-変位曲線 (No. 1)

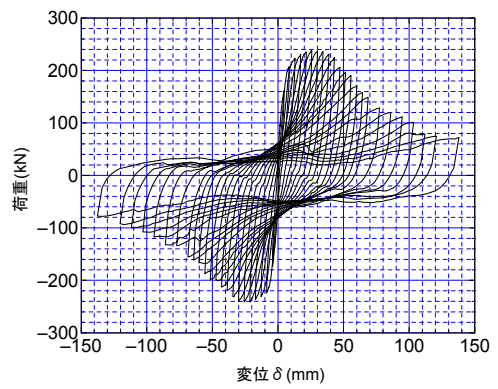


図6 荷重-変位曲線 (No. 4)

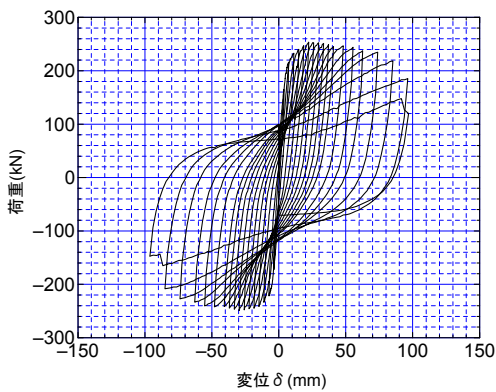


図4 荷重-変位曲線 (No. 2)

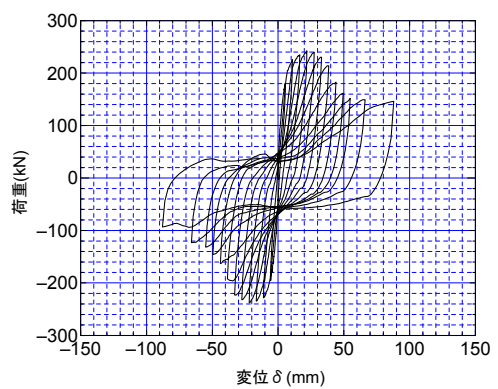


図7 荷重-変位曲線 (No. 5)

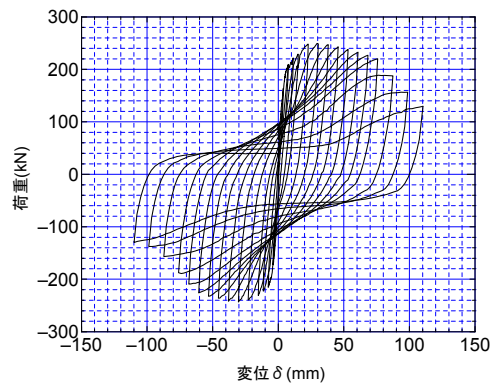


図5 荷重-変位曲線 (No. 3)

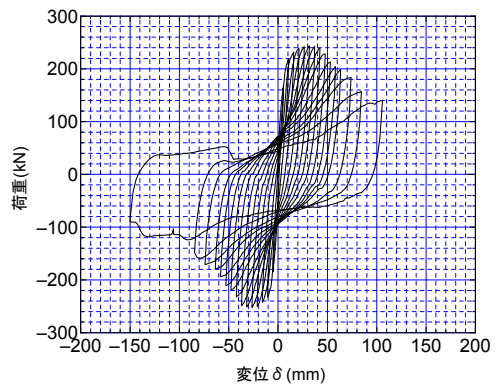
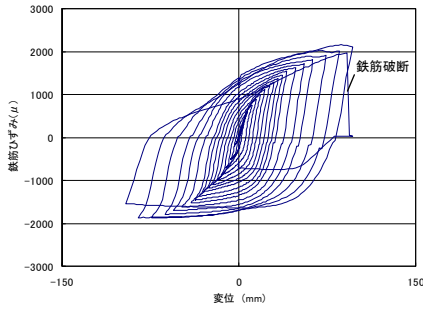


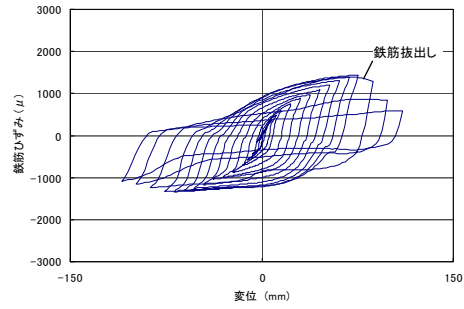
図8 荷重-変位曲線 (No. 6)

られるものの、ほぼ一定の範囲に収まる結果となった。また、今回実験を行った範囲では、かぶりコンクリートの剥落状況に相違はあるものの、柱付け根部の内部コン

クリートの粉体化に伴う継手損傷範囲長は 70mm から 100mm と、柱径および重ね継手長と比較して小さい。



(a) 鉄筋破断した試験体(No.2)



(b) 鉄筋が拔出した試験体(No.3)

図9 鉄筋ひずみ(フーチング天端下 300mm)の例

3. 3 荷重-変位曲線

(1) 損傷形態の分類

損傷形態として、フーチングに定着した軸方向鉄筋の一部が柱基部で破断するタイプと重ね継手部で軸方向鉄筋が拔出して耐力が低下するタイプの2種類に分類される。実験から得られた荷重-変位曲線を図3~8に示す。

重ね継手を設けた試験体の荷重-変位曲線は、いずれも降伏変位の4~8倍で最大荷重に到達し、その後、変位が増加しても水平荷重は最大荷重と同程度を維持する状態が続く。交番荷重が進むに従い、柱基部のコンクリートが損傷、粉体化することにより有効な重ね継手長が減少し、重ね継手部で鉄筋が拔出した、もしくは鉄筋破断により荷重低下を起こしている。

重ね継手部での鉄筋の拔出しの有無等の発生状況は、外観上からは判断がつかない。そこで、重ね継手部で鉄筋が拔出すと柱軸方向鉄筋の上筋と下筋相互の荷重の伝達が十分に行われなくなることから、フーチング内に定着された軸方向鉄筋の鉄筋ひずみに着目した。ここでは重ね継手部で鉄筋が拔出し荷重低下した試験体 No.3 のフーチング内(天端下 300mmの位置)の最外縁鉄筋ひずみを図9(b)に示す。降伏荷重である $1\delta_y$ の変位後においても、変位の増加に伴い鉄筋ひずみは増加していくが、途中で変位が増加しているにもかかわらず鉄筋ひずみが低下しており、その後の載荷ステップにおいても鉄筋ひずみが大きく低下している。この低下しはじめた点を重ね継手部で鉄筋の拔出しが開始した点と判定した。試験終了までに鉄筋の拔出しにより荷重低下したものは重ね継手部での鉄筋の拔出しと判定した。

(2) 継手部の鉄筋の拔出しに及ぼす重ね継手長の影響

耐力比を5程度と設定し、重ね継手長を変化させた。試験体(No.3,4,5)の荷重変位関係の包絡線を図10に示す。これらはいずれも重ね合わせ部で鉄筋の拔出しが生じたものである。

試験体 No.3,4,5 は 30ϕ 、 25ϕ 、 20ϕ となっている。ここで終局時の変位 (δ_u) を、荷重変位曲線の包絡線において降伏荷重の計算値を下回らない最大変位としたとき、

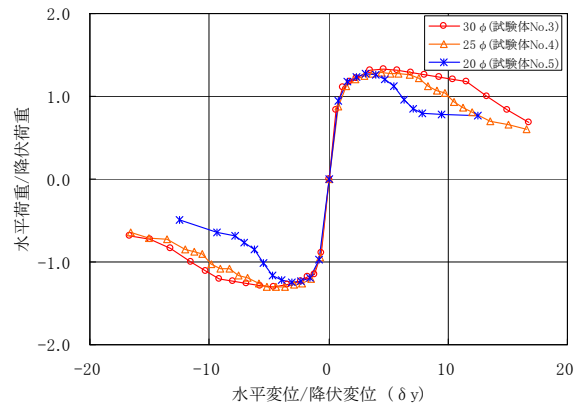


図10 荷重-変位包絡線

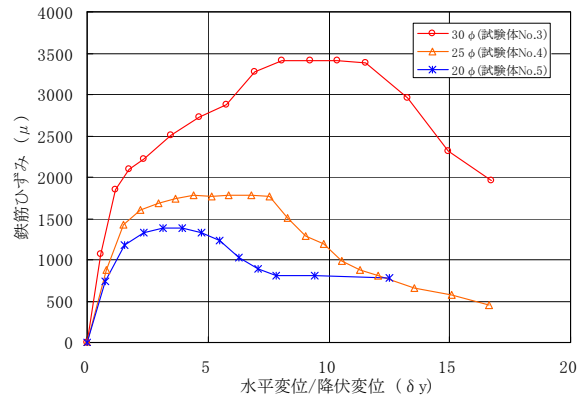


図11 鉄筋ひずみ (フーチング天端下 300mm)

これらの試験体の終局変位はそれぞれ $12.4\delta_y$ 、 $10.0\delta_y$ 、 $5.8\delta_y$ となっており、重ね継手長が長くなるほど変形性能が高い。

試験体 No.3,4,5 のフーチング天端下 300mm の軸方向鉄筋ひずみの推移を図11に示す。いずれの試験体も変位が増大しているにもかかわらずひずみは急激に減少しており、この時点で鉄筋の拔出しを起こしたものと考えられる。

これらのことから、同程度の耐力比においても重ね継手長が大きい試験体の方が、継手部で鉄筋の拔出しが生じにくい傾向にある。

(3) 継手部の鉄筋の拔出しに及ぼす耐力比の影響

重ね継手長が 25φ でコンクリート強度は約 29N/mm² とほぼ同等とし、スパイラル筋の径とピッチによりスパイラル筋量を変え、耐力比を変化させた試験体 No.2 および No.4 の荷重変位関係の包絡線を図 12 に示す。この場合、試験体 No.2 および No.4 の耐力比はそれぞれ 16.3、5.3 となっている。

試験体 No.2 は最大荷重を迎えた後、降伏荷重を下回らないうちに 17δ_y の変位で柱基部の軸方向鉄筋が破断したが、試験体 No.4 は最大荷重を迎えた後、重ね継手部の軸方向鉄筋が拔出し降伏荷重を下回る結果となった。

このことから同じ重ね継手長においても、耐力比が大きくスパイラル筋量が多い試験体の方が、継手部の鉄筋の拔出しは生じにくいと考えられる。

4. 変形性能について

図 13 は本実験における試験体の重ね継手長、耐力比と重ね継手部の鉄筋の拔出しの有無の関係を示したものである。重ね継手長 30φ の試験体において比較すると、耐力比 4.3 の試験体では継手部の鉄筋の拔出しが発生し、スパイラル筋量の大きい耐力比 10.9 の試験体では鉄筋の拔出しが生じなかった。

また、耐力比 15 程度とスパイラル筋による拘束力が大きい試験体においても、重ね継手長 25φ の試験体は継手部の鉄筋の拔出しが生じないが、重ね継手長 20φ の試験体は鉄筋の拔出しが生じた。

塑性ヒンジ領域に 1D 程度の継手長を有する重ね継手を設けた円形柱において、繰返し載荷時に継手部から鉄筋が拔出さず十分な変形性能を得ることは、重ね継手長を確保するとともに重ね継手部の範囲を高強度スパイラル筋により補強することで可能である。

5. まとめ

円形柱の塑性ヒンジ領域に重ね継手を設け、重ね継手長の範囲を高強度スパイラル筋で補強した試験体において、水平交番載荷試験を行い得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 円形柱の塑性ヒンジ領域に重ね継手を設け、高強度スパイラル筋で補強した試験体は、水平交番載荷することにより重ね継手部の鉄筋が拔出す、もしくは軸方向鉄筋の一部が破断することにより荷重が低下する。ただし、鉄筋破断した試験体は、いずれも 17δ_y 程度の変位で鉄筋破断した。
- (2) 円形柱において塑性ヒンジ領域に設けた重ね継手を設けた構造において、重ね継手長を大きく、また重ね継手部の高強度スパイラル筋量を大きくすること

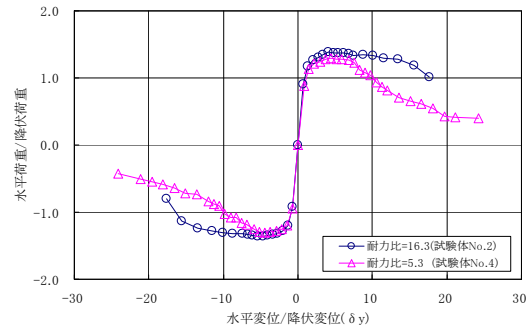


図 12 荷重-変位包絡線

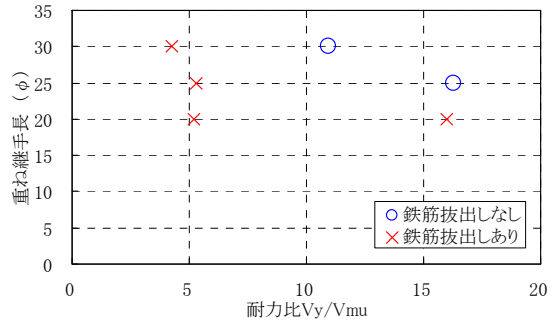


図 13 重ね継手長、耐力比と鉄筋の拔出しの有無の関係

により、繰返し荷重を受けても重ね継手部の鉄筋の拔出しが生じにくくなる。

- (3) 塑性ヒンジ領域に 1D 程度の継手長を有する重ね継手を設けた円形柱において、繰返し載荷時に継手部から鉄筋が拔出さず十分な変形性能を得ることは、重ね継手長を確保するとともに重ね継手部の範囲を高強度スパイラル筋により補強することで可能である。
- (4) 重ね継手長のうち載荷によりコンクリートが粉体化し附着を期待できなくなった継手損傷範囲は、柱径と比較して小さい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2008 年制定]，2008
- 2) 蔡健，鈴木計夫，蘇道遠：多量な円形補強鉄筋で横拘束された鉄筋コンクリート円柱の力学的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.695-700，1994
- 3) 渡辺一功，伊吹真一，大庭光商：円形断面を有する RC 柱の変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32，No.2，pp.781-786，2010
- 4) 石橋忠良，津吉毅，小林薫，吉田徹，海原卓也：大変形領域の交番載荷を受ける RC 脚柱の変形性能算定に関する研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.45-57，2002