

報告 塑性ヒンジ部に重ね継手を有する RC 矩形柱の交番載荷試験

羅 姍姍^{*1}・小林 将志^{*2}

要旨：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物¹⁾（以下、RC 標準）によると、軸方向鉄筋の継ぎ手は、部材接合部から断面高さの 1.5 倍の範囲の塑性ヒンジ領域には、原則、設けてはいけないこととなっている。しかし、構造物の段階施工時などにおいては、塑性ヒンジ領域に軸方向鉄筋の継手を設けなければならない場合が想定される。そこで、塑性ヒンジ領域に軸方向鉄筋の重ね継手を設け、高強度帯鉄筋で囲繞した場合の変形性能を確認するため、縮小モデル試験体による水平交番載荷試験を行った。その結果、高強度帯鉄筋の配置形状およびせん断耐力比とじん性率との間に、一定の相関関係があることがわかった。

キーワード：重ね継手、塑性ヒンジ、耐力比、付着破壊、高強度帯鉄筋

1. はじめに

鉄道高架橋の構築において、スラブの高さを仮設時と本設時で変化させる工法が採用される場合がある。このような場合、鉄筋コンクリート（以下、RC という）柱の軸方向鉄筋を重ね継手から突合わせの機械式継手等に変更する場合が想定される。

RC 標準では、軸方向鉄筋の継手は部材接合部から断面高さの 1.5 倍の範囲に原則、設けないこととされている。しかし、やむを得ず、その範囲に軸方向鉄筋の継手を設ける場合には、交番応力により軸方向鉄筋の母材が塑性化しても所要の強度、剛性等を確保できる場合には、この限りではないとされている。

そこで、RC 矩形柱基部の塑性ヒンジ区間に重ね継手を設けることを想定し、縮小モデル試験体を構築して水平交番載荷試験を実施したので、その概要について以下に報告する。

2. 載荷試験概要

2.1 試験体概要

試験体の諸元および材料試験結果を表-1 に、試験体の形状を図-1 に示す。

試験体はすべて、650mm×650mm の矩形柱とそれを支持するフーチングで構成されている。柱基部には、軸方向鉄筋の重ね継手部を設け、その周囲を引張強度 1275N/mm² 以上の細径異形 PC 鋼棒 φ7.1mm（以下、SP 筋という）で取り囲んだ。SP 筋の加工形状を図-2 に示す。SP 筋は A パターンはらせん形状とし、B パターンは一筆書き形状、C パターン、D パターンは帯形状とし端部

を 135 度の標準フックとした。

試験体のパラメーターは、SP 筋の形状以外に、SP 筋の配置範囲、それに伴う柱基部の耐力比、および軸方向鉄筋の重ね継手長とした。せん断耐力比は、次の式で算出した²⁾。なお、せん断耐力の算出には材料試験により得られたコンクリート強度および鉄筋強度を用いた。

V_y/V_{mu} ：せん断耐力比

ここに、 V_y ：設計せん断耐力

$$V_y = V_c + V_s$$

V_c ：せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力

V_s ：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（SP 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

試験体のせん断耐力比は 5～10 の範囲内に設定し、SP 筋の配置パターンにおいて、設置可能な範囲内で最大の耐力比を設定した。

軸方向鉄筋の重ね継手は、柱周方向に芯間隔 1φ を確保して設けた。これは、柱基部において軸方向鉄筋に沿って断面平行方向の付着破壊が最も生じやすい条件を再現したものである。重ね継手長は No.3 を 50φ とし、それ以外を 25φ とした。軸方向鉄筋の芯かぶりは 50mm とした。

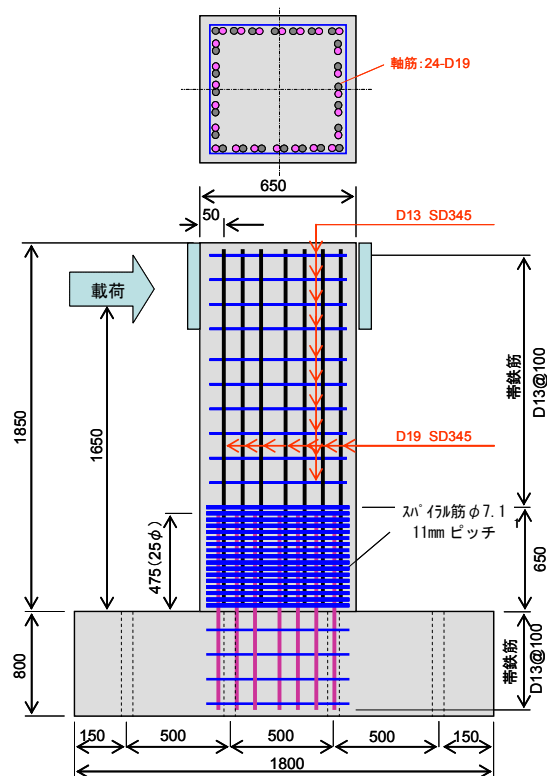
SP 筋は、No.3 には柱基部の 1.5D(D は断面高さ)の範囲、それ以外には基部の 1.0D の範囲に配置した。SP 筋を配置した基部以外の範囲には、せん断耐力比が 2.8 程度と

*1 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所工事管理室（正会員）

*2 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所工事管理室副課長（正会員）

表－1 試験体の諸元と材料試験値

試験体 No.	断面寸法 (mm)	せん断 スパン比	軸力 (N/mm ²)	コンクリート強度 (N/mm ²)		スパイラル(SP)筋						軸方向鉄筋				
				柱	フーチング	配置範囲 (mm)	配置 パターン	ピッチ (mm)	帯鉄筋 (SP筋)比	降伏強度 (N/mm ²)	1断面の SP筋本数	鉄筋径	本数	重ね 継手長	継手の 空き	降伏強度 (N/mm ²)
1	650×650	2.75	0.98	32.0	30.8	1D	A	11	1.11	1,402	2	D19	24	25φ	1φ	381
2	650×650	2.75	0.98	33.5	31.5	1D	B	15	1.64	1,402	4	D19	24	25φ	1φ	381
3	650×650	2.75	0.98	31.6	33.4	1.5D	B	15	1.64	1,402	4	D19	24	50φ	1φ	381
4	650×650	2.75	0.98	32.0	33.8	1D	C	23	1.61	1,402	6	D19	24	25φ	1φ	381
5	650×650	2.75	0.98	25.4	28.7	1D	C	43	0.86	1,402	6	D19	24	25φ	1φ	381
6	650×650	2.75	0.98	25.9	24.7	1D	D	63	0.78	1,402	8	D19	24	25φ	1φ	381



図－1 試験体一般図 (No. 1)

なるように、SD345のD13を100mmピッチで配置した。

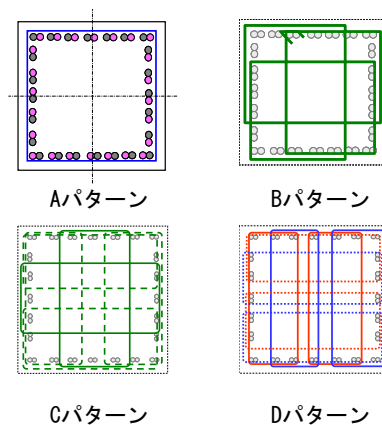
コンクリートのスランプは15cm、粗骨材の最大寸法は20mmとし、高密度な配筋に配慮した。

2.2 荷重方法

試験体はフーチング部分と反力床とをPC鋼棒で固定した。試験体の柱頭部に鉛直ジャッキにより0.98N/mm²の軸方向圧縮力を荷重し、フーチング天端から高さ1,650mmの荷重点にて水平交番荷重を行った。荷重状況を写真－1に示す。

荷重時の降伏変位1δyは、最外縁の軸方向鉄筋のいずれかが降伏ひずみに達したときの水平変位とした。なお、降伏ひずみには表－2に示す、材料試験から得られた値を用いた。

荷重サイクルを表－2に示す。荷重サイクルは降伏変位1δyの整数倍とし、正負に各1回ずつ繰り返した。水平荷重を行った。



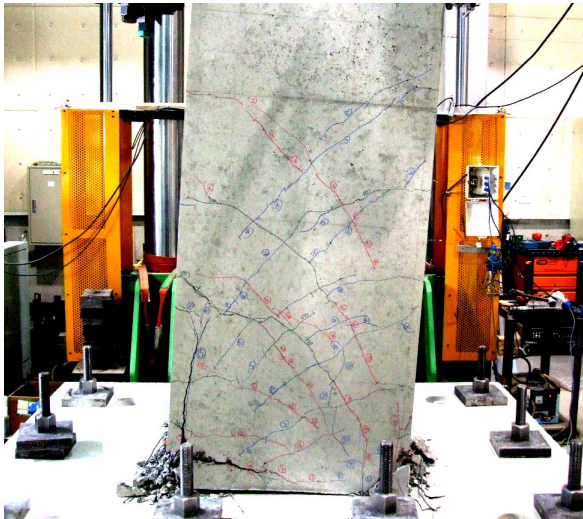
図－2 SP筋の補強筋形状パターン



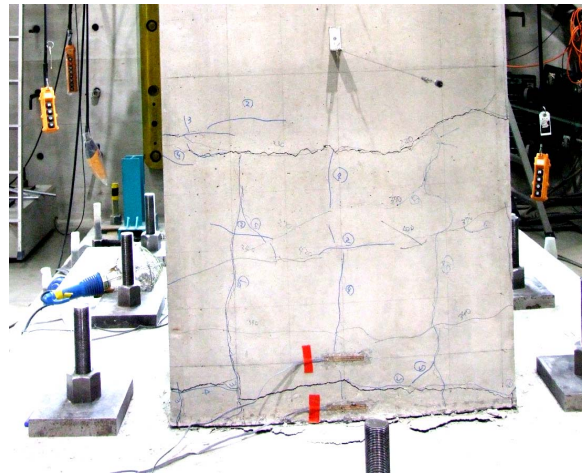
写真－1 荷重状況 (全景：側面)

表－2 各試験体の荷重サイクル

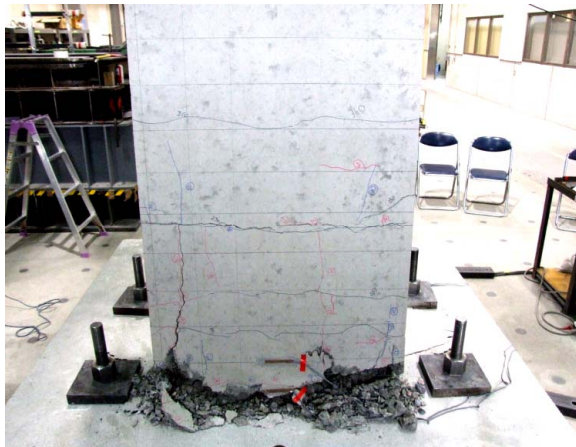
試験体 No.	荷重サイクル (× δy)
1	1,2,3,4,6,8, 10,12
2	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16
3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16
4	1,2,3,4,5,6,8,10,12,15,18
5	1,2,3,4,5,6,8,10
6	1,2,3,4,6,8,10,13,16,20



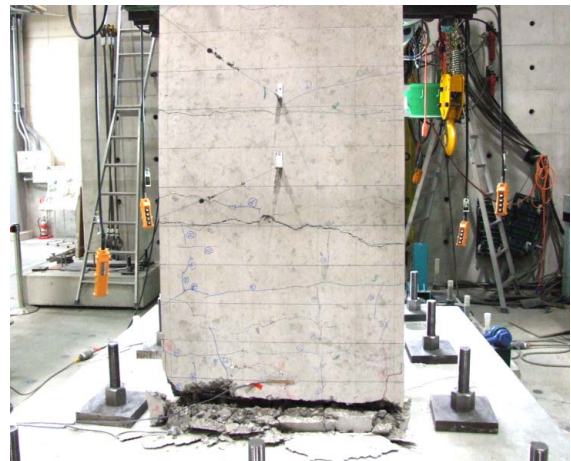
写真—2 載荷状況（側面側）



写真—3 載荷状況（載荷面）



写真—4 破壊状況（載荷面：圧縮側）



写真—5 破壊状況（載荷面：引張側）



写真—6 試験終了後の軸方向鉄筋の状況
（載荷面：SP筋切断後）

計測項目は、軸方向鉄筋、SP筋およびコンクリート表面のひずみ、軸方向鉄筋の抜け出し長さ、載荷点の水平変位および載荷荷重とした。

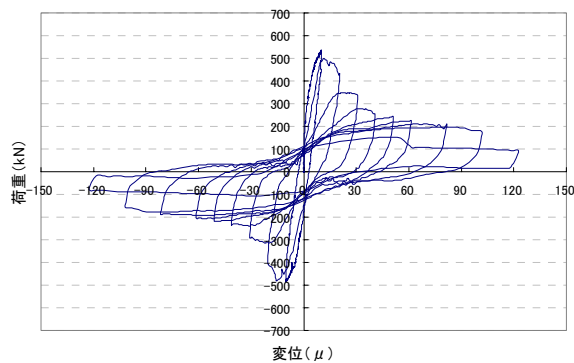
3. 試験結果

3.1 損傷状況

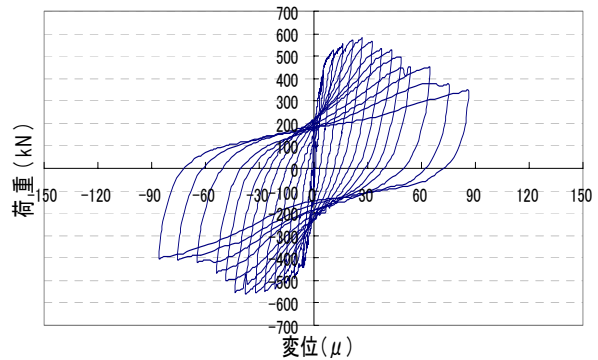
水平交番載荷試験における試験体のひび割れの進展状況および破壊状況を No.5 試験体を例として、以下に示す。

(1) 載荷試験中の状況（側面）

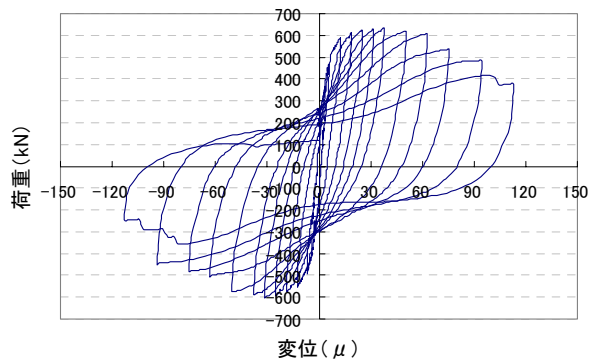
柱側面には、基部から 2D の高さの範囲に斜めひび割れが多く発生した（写真—2）。特に、基部と下方からの軸方向鉄筋の定着端部（以下、重ね継手上端という）である 475mm の高さの位置、70mm 付近の高さの位置を結ぶ斜めひび割れが顕著であった。また、引張側の軸方向鉄筋に沿って、基部から鉛直上方へ伸びるひび割れも見られた。載荷とともに、載荷方向の引張側に発生した横方向の曲げひび割れが進行し、塑性ヒンジを想定した部位において、ひび割れが交差することが確認できた。



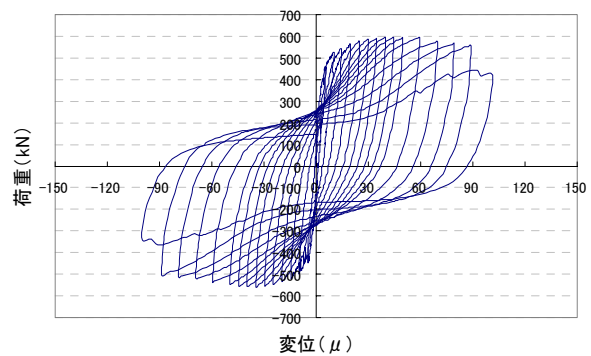
図—3 荷重—変位曲線 (No. 1)



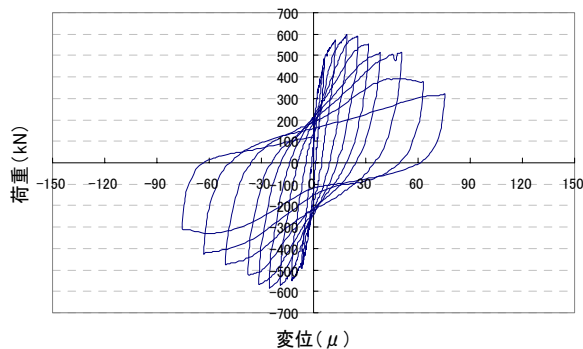
図—4 荷重—変位曲線 (No. 2)



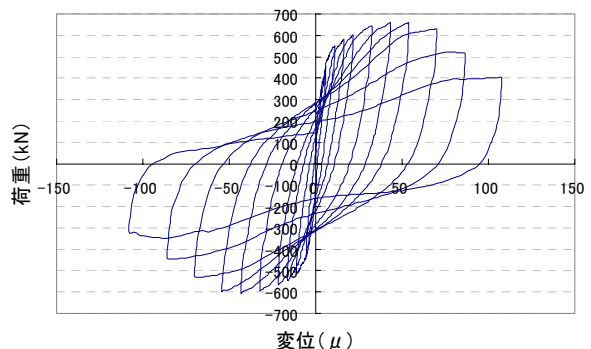
図—5 荷重—変位曲線 (No. 3)



図—6 荷重—変位曲線 (No. 4)



図—7 荷重—変位曲線 (No. 5)



図—8 荷重—変位曲線 (No. 6)

(2) 載荷試験中の状況（載荷面）

載荷面には、重ね継手上端と基部から 70mm 付近の高さの位置に水平方向のひび割れが見られた。また、軸方向鉄筋に沿うような垂直方向のひび割れも多くみられた。垂直方向のひび割れ幅の拡大とともに、表面打音時にかぶりコンクリートの浮きを確認できた（写真—3）。

(3) 試験終了時の状況（外観）

試験終了時には、載荷面側基部のかぶりコンクリートが断面幅全長にわたって剥落した（写真—4, 5）。圧縮側は基部のごく近傍のコンクリートの圧縮破壊から剥落が生じ、引張側は基部から重ね継手定着端の位置までの

広い範囲でかぶりコンクリートが剥離し、基部付近が剥落していた。

(4) 試験終了後の状況（内部）

耐力の明確な低下は、No.1 および No.5 は軸方向鉄筋の付着切れ、No.3 は基部の圧縮破壊とその後の軸方向鉄筋の破断により生じた。

鉄筋の付着切れが見られた試験体は、かぶりコンクリートが剥落した区間より上方においてもかぶりコンクリートの浮きが見られた。試験終了後にかぶりコンクリートを除去して SP 筋を切断して観察したところ、軸方向鉄筋の付着が劣化し上下に移動していたことが確認できた（写真—6）。また、鉄筋の破断により試験を終了

表—2 降伏荷重・最大荷重とじん性率

試験体 No.	計算値			降伏荷重(kN)		最大荷重(kN)		じん性率
	Vy(kN)	Vmu(kN)	耐力比	押側	引側	押側	引側	
1	2967	498	5.96	486	538	486	538	1
2	4573	496	9.22	385	437	551	579	12
3	4573	496	9.22	449	462	557	597	18
4	3612	496	7.30	493	467	603	629	12
5	2530	496	5.11	493	487	586	590	8
6	2328	465	5.00	433	454	604	660	6

した試験体では、軸方向鉄筋が座屈し、低サイクル疲労により破断したと思われる。

3.2 荷重－変位関係

各試験体の荷重－変位曲線を図—3～図—8 に示す。No.1 以外は比較的安定した履歴ループを描き、最大荷重後も緩やかに荷重が減少した。

表—2 に、降伏荷重と最大荷重およびじん性率の試験値を示す。表—2 の計算値は、材料強度試験の結果を用いて算出した。

いずれの試験体も最大荷重はせん断耐力の計算値 V_y より低く、せん断破壊による損傷とはならなかった。SP 筋に貼付したひずみゲージの値も、いずれの試験体においても降伏には至らなかった。

4. 考察

表—3 に、各試験体を比較する上での固定項目と変動項目（パラメーター）を示す。以下に、各比較項目について考察する。

4.1 せん断耐力比が同程度で SP 筋の配置パターンを変化させたときの比較 (No. 1, 5, 6)

No.1, 5, 6 の試験体のせん断耐力比は 5.00～5.96 とほぼ同程度で、SP 筋の配置パターンが異なる。いずれも、軸方向鉄筋の付着破壊が生じた試験体である。

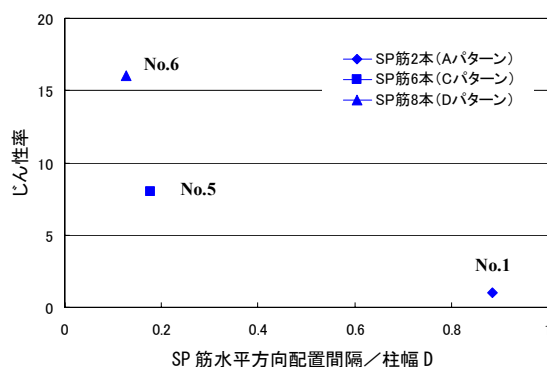
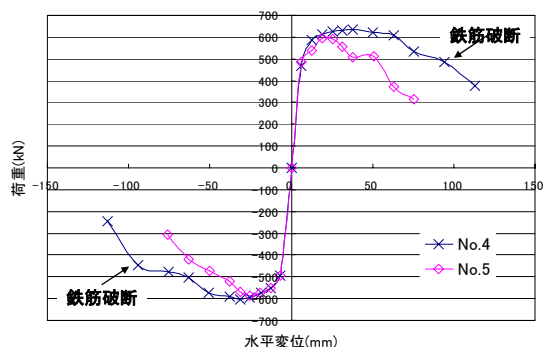
水平方向の SP 筋平均配置間隔を柱幅 D で除した値と、じん性率の関係を図—9 に示す。図—9 より、一断面に配置する SP 筋本数が多いほど、じん性率が高い結果となった。これは、一断面に配置するせん断補強鉄筋が多い方が、付着破壊に対する拘束効果が高いことを示していると考えられる。

また、No.1, No.5, No.6 試験体は、せん断耐力比が同程度であるため、水平方向の配置間隔が小さいほど縦方向の配置間隔すなわち SP 筋の配置ピッチは大きくなるが、このような傾向が見られたことから、SP 筋の配置ピッチに関する依存性は低いと思われる。

4.2 SP 筋の配置パターンが同じでせん断耐力比を変化させたときの比較 (No. 4, 5)

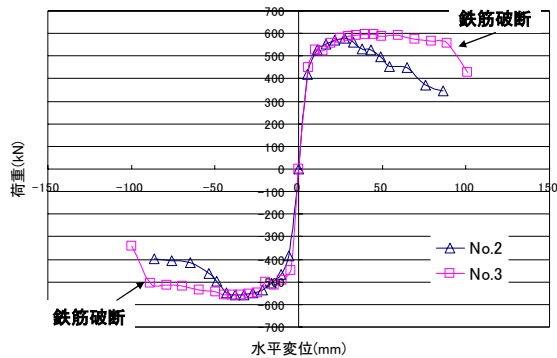
表—3 試験体における比較項目

比較項目 No.	固定項目	変動項目 (パラメーター)	試験体 No.
(1)	せん断耐力比	SP 筋配置パターン	1, 5, 6
(2)	SP 筋配置パターン	せん断耐力比	4, 5
(3)	SP 筋配置パターン	重ね継手長	2, 3

図—9 SP 筋水平方向配置間隔／柱幅 D とじん性率との関係

図—10 荷重－変位包絡線（せん断耐力比の違い）

No.4, 5 試験体は、SP 筋の配置パターンがいずれも B パターンで、せん断耐力比がそれぞれ 7.3 と 5.1 で異なる試験体である。せん断耐力比の低い No.5 試験体は付着破壊、No.4 試験体は基部の圧縮破壊および軸方向鉄筋の破断で耐力が低下した。No.4, No.5 試験体の荷重－変位包絡線を図—10 に示す。



図—11 荷重-変位包絡線（重ね継手長の差異）

No.5 試験体では、付着破壊が発生する瞬間に、荷重が約 100kN 程度落ちた。一方、No.4 試験体では、軸方向鉄筋の破断までは、ゆるやかな荷重の低下であった。

以上のことから、一段に同じ本数の SP 筋を配置した場合、せん断耐力比の大きい方が変形性能が優れることがわかった。

4.3 SP 筋の配置パターン・せん断耐力比が同程度で重ね継手長を変化させたときの比較（No. 2, 3）

No.2, 3 は、せん断耐力比が 9.22 で同じで、SP 筋配置パターンも同じ試験体である。重ね継手長を No.2 では 25ϕ 、No.3 では 50ϕ とした。No.2, No.3 試験体の荷重—変位包絡線を図—11 に示す。

No.2 試験体では、最大荷重に達した後すぐに荷重が低下し始めるのに対し、No.3 試験体では、最大荷重後も荷重の低下が遅く、軸方向鉄筋の破断によって明確な荷重の低下に至った

軸方向鉄筋の塑性ヒンジ部の重ね継手においても、重ね継手長を延ばすことで変形性能が向上することがわかった。

5. まとめ

塑性ヒンジ区間に軸方向鉄筋の重ね継手を設けて周囲を高強度帯鉄筋で囲繞した縮小模型試験体を作製し、水平交番載荷試験を行った。その結果、今回の試験の範囲において、高強度帯鉄筋の配置パターンおよびせん断耐力比とじん性率との間に、一定の相関関係があることがわかった。

- (1)高強度帯鉄筋の鋼材量を同じにし、断面内の配置本数を増加させると、軸方向鉄筋の付着損傷に対する拘束を高め、より大きい変形性能が得られる。
- (2)高強度帯鉄筋の水平方向の配置間隔を小さくさせることは、鉛直方向の配置間隔を小さくさせる場合よりも、

変形性能の向上に与える影響が大きい。

(3)適切な水平方向間隔で高強度帯鉄筋を配置すれば、鉛直方向間隔が小さいほど、変形性能が向上する傾向にある。

(4)塑性ヒンジ区間においても、重ね継手長を大きくするほど、変形性能が向上する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所；鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，2004.4
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2007.12