

PC橋脚におけるPC鋼材の配置方法に関する実験的研究

横浜国立大学名誉教授 正会員 工博 ○池田尚治
横浜国立大学助手 正会員 修(工) 林 和彦

1. はじめに

橋脚の新しい構造形式として鉛直方向にプレストレス力を導入した橋脚(以下、PC橋脚)が提案され、優れた耐震性能を有することが確認されている。また、実構造物への適用を目指し経済性や施工性を考慮して、PC鋼材を柱の途中で定着し基部のみプレストレスを導入する方法¹⁾や高強度鉄筋の併用による方法²⁾が著者らにより提案されている。

これら既往の研究においては、PC鋼材は柱の周囲に配置されていたため、大変形時にPC鋼材が降伏や破断する例も見られた。本研究では、断面耐力が多少低下するものの、PC橋脚の利点である鉛直プレストレスを地震後も維持できるようにすることを目的とし、PC鋼材を柱断面の中央付近に配置した供試体を作製し、耐荷挙動を実験的に調べた。また、コンクリートにポリプロピレン繊維を混入してコンクリート剥落に対する効果も確認した。

2. 実験供試体

2-1 実験要因

既往の研究¹⁾と同様に基部付近にのみ鉛直プレストレスを導入し、さらにPC鋼材を断面中心付近に配置した。実験供試体の一覧を表-1に示す。軸方向鉄筋に普通強度鉄筋を用いた供試体(N)、高強度鉄筋を用いた供試体(H)、さらにそのコンクリートにポリプロピレン繊維を混入した供試体(HF)の合計3種類の供試体とし、各2体に対しそれぞれ静的正負繰返し载荷(ST)と準動的载荷(PD)を行った。

2-2 供試体の形状とPC鋼材の配置方法

供試体の形状を図-1に、使用鋼材の力学的特性を表-2にそれぞれ示す。供試体はフーチング付き独立一本柱形式、断面は1辺400mmの正方形中実断面、フーチング上面から载荷点までの高さは1500mmでせん断スパン断面高さ比を3.75とした。

PC鋼材は従来では柱断面の周囲に配置されることが多いが、本研究では図-1に示すようにPC鋼材を柱断面の中央付近に集中させて配置した。コンクリートの有効プレストレスは4MPaとし、PC鋼より線SWPR7Bφ12.7mmを6本使用した。鋼材1本の有効緊張力は107kN(降伏荷重175kN)である。

軸方向鉄筋にはD13の普通強度のSD345または高強度のSD785相当を使用し、1段16本配置した。帯鉄筋は40mmまたは60mm間隔でD10のSD345を配置し、曲げ破壊を誘導するように設計した。

2-3 自動定着具による基部へのプレストレス導入

使用した自動定着具¹⁾はバネによりクサビが固定される仕組みで、コンクリート中に埋め込んで使用する。写真-1に外形を示す。緊張位置が定着位置と異なるため、任意の位置で緊張を行い、少量の鋼材で限定した範囲に効率よくプレストレスを導入することができる。

本研究では、柱基部から上方2D(D:断面高さ)より下の範囲に限定してプレストレスを導入するために、2Dの高さに自動定着具を配置し、柱上部から緊張を行った。本供試体のPC鋼材の緊張長さに対して自動定着具のプルイン量が相対的に大きいため、自動定着具側のみの緊張では所定のプ

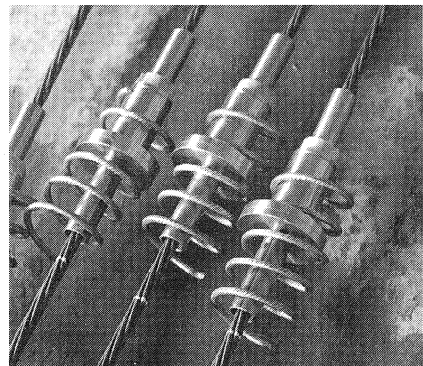


写真-1 自動定着具

表-1 供試体一覧

供試体名	軸方向鉄筋	PC鋼材	緊張範囲	ポリプロピレン繊維	載荷方法	計算曲げ耐力 (kN)
P-N-ST	SD345 D13×16本	SWPR7B φ12.7×6本	2D区間 (Dは断面幅)	なし	静的正負 繰り返し載荷	228
P-H-ST	SD785 D13×16本			あり		359
P-HF-ST	SD785 D13×16本			なし	準動的載荷	228
P-N-PD	SD345 D13×16本			あり		359
P-H-PD	SD785 D13×16本			なし		
P-HF-PD	SD785 D13×16本			あり		

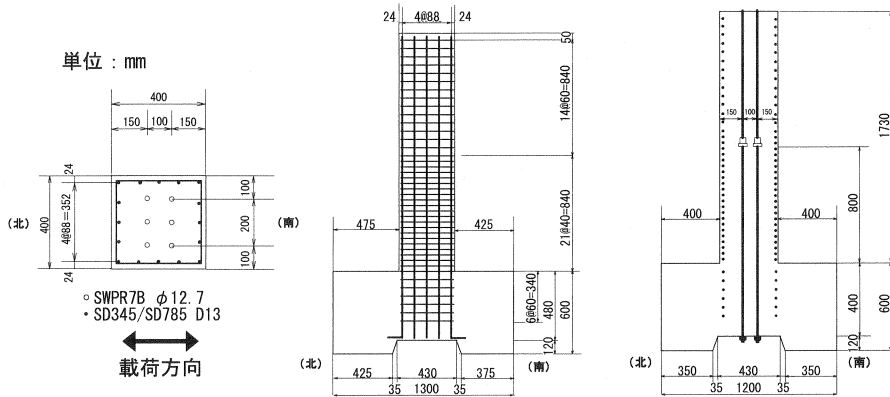
表-2 鋼材の力学的特性

鋼材種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	適用
SD345D10	382	508	163	帯鉄筋
SD345D13	384	549	162	主鉄筋
SD785D13	1002	1145	178	主鉄筋
SWPR7B φ12.7	1381	1539	190	PC鋼材

表-3 コンクリートの力学的特性

供試体名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
P-N-ST	43.1	4.62	6.38	25.5	0.179
P-H-ST	57.7	4.12	6.06	25.3	0.212
P-HF-ST	51.8	3.58	5.92	22.2	0.211
P-N-PD	40.8	3.73	6.19	25.9	0.188
P-H-PD	46.2	3.96	5.94	25.5	0.219
P-HF-PD	49.7	4.24	6.72	27.7	0.196

図-1 供試体の形状



レストレスが導入できないため、フーチング下面からネジ式の定着具で不足分を再緊張している。2D区間より上方のPC鋼材が柱の耐力に寄与しないようにするため、自動定着具より上方にはグラウトを行わずコンクリートとPC鋼材との付着を切っている。

2-4 コンクリートとポリプロピレン繊維

粗骨材の最大寸法は10mmとし、早強ポルトランドセメントを使用し、目標強度は50MPaとした。コンクリートの力学特性を表-3に示す。部材の大変形時のコンクリート剥落を防止する目的で、供試体HFにポリプロピレン繊維(繊維長54mm, 体積比0.2%)を混入したコンクリートを使用した。

3. 実験方法

載荷には2本のアクチュエーターを使用し、上部工重量を想定して柱頭部に一定の軸圧縮力160kN(コンクリートの軸圧縮応力1MPa)を常時載荷しながら水平力を作用させた。

3-1 静的正負繰返し載荷実験

静的正負繰返し載荷実験においては、載荷の繰返しは管理変位ごとに正負1回行った。管理変位は部材回転角(水平変位/載荷点高さ)が1/200radの整数倍となるようにした。載荷は目視によりひび割れ

表-4 準動的載荷実験の入力初期値

供試体名	固有周期 (sec)	初期剛性 (kN/mm)	終局荷重 (kN)	仮想質量 (ton)	倍率
P-N-PD	0.6	48.8	223	444	0.073
P-H-PD		52.0	364	474	0.112
P-HF-PD					

発生を確認するまでは荷重制御で、それ以降は変位制御で行い部材耐力が最大時の80%を下回った時点を終局として実験を終了した。

3-2 準動的載荷実験

準動的載荷実験においては、1995年の兵庫県南部地震でJR鷹取駅にて記録された地震波のNS成分³⁾(最大加速度642gal)を、時間間隔0.01秒として15秒間入力した。供試体の実験当時の道路橋示方書⁴⁾にしたがって設計されたものとして地震波の倍率および初期値の設定を行った。表-4に入力した初期設定値を示す。PC橋脚の降伏は単に最外縁鉄筋の降伏時期では判断できないため、今回は地震波の設定に用いた部材の終局荷重は静的実験で得られた最大耐力を採用した。そのため、供試体に対して危険側の載荷を行ったこととなる。準動的載荷実験にはビデオを組み込んだ動的映像撮影システムを用い、地震波の時間軸に即した地震被災挙動の映像を同時に撮影した。

4. 実験結果

4-1 静的正負繰返し載荷実験

実験結果を表-5に示す。各供試体の荷重-変位関係を図-4に示す。また、写真-2に最大耐力付近の+8/200rad時のひび割れ状況を示す。

(1) P-N-ST

+1/200rad載荷中に、荷重+80kN、変位2.07mmで基部にひび割れが発生した。±1/200rad載荷中における最大ひび割れ幅は0.06mmであった。また、ひび割れは約50mmの間隔で基部に発生していた。+2/200radに載荷中、PC鋼材の途中定着位置やその上方に幅0.04mmのひび割れが発生した。+3/200radに載荷中、PC鋼材の途中定着位置付近のひび割れ幅が0.10mm程度に広がり、斜めひび割れへと発展した。+4/200rad以降、斜めひび割れはそれ以上進展しなかった。+5/200radへの載荷途中から圧壊の傾向が見られ、+7/200radに載荷途中に基部が完全に圧壊した。+9/200rad載荷後の除荷において、圧縮側鉄筋が座屈し、コンクリートが剥落した。+13/200radに向かう途中、+67mmで軸方向鉄筋が破断した。-13/200rad時で残存耐力が最大耐力の80%を下回ったため載荷を終了した。

(2) P-H-ST

+1/200radに向かって載荷中に、荷重+60kN、変位1.36mmで南側基部にひび割れが発生、荷重+100kN、変位3.01mmで南側基部のひび割れ深さが大きく伸びた。+1/200rad時にPC鋼材の途中定着位置付近の曲げひび割れが200mmの深さになった。-1/200rad載荷中に、荷重-60kN、変位-0.64mmで北側基部にひび割れが発生し、荷重-70kN、変位-1.28mmで途中定着位置付近にひび割れが発生した。+2/200radへ載荷中、高さ1000mmから斜めひび割れが発生し、高さ400mm以上のひび割れは200mm間隔で発生し断面中央付近まで進展していた+3/200radへ載荷中、高さ400mm以上の曲げひび割れが斜めひび割れに進展した。+5/200radに向かって載荷中、圧縮側の基部が圧壊した。+6/200radに向かって載荷中、圧縮側の基部コンクリートが剥落した。+8/200radでフーチング上面のコンクリートが盛り上がり、西面のコンクリートも落下した。+9/200radに向かって載荷途中、柱基部が膨らみ座屈の兆しが見られた。

(3) P-HF-ST

+1/200radに向かって載荷途中、荷重60kN、変位1.37mmで南側基部にひび割れが発生した。その後の挙動はP-H-STと比較してほとんど変化はなく、+5/200radの時点で南側基部に鉛直ひび割れが発生した。

表-5 静的繰返し載荷実験の結果一覧

供試体名	ひび割れ発生荷重	降伏荷重	最大耐力	最終載荷
P-N-ST	80kN	145kN	222kN	-13/200Rad
			+8/200Rad	
P-H-ST	60kN	317kN	364kN	+11/200Rad
			-8/200Rad	
P-HF-ST	60kN	318kN	-365kN	-12/200Rad
			-8/200Rad	

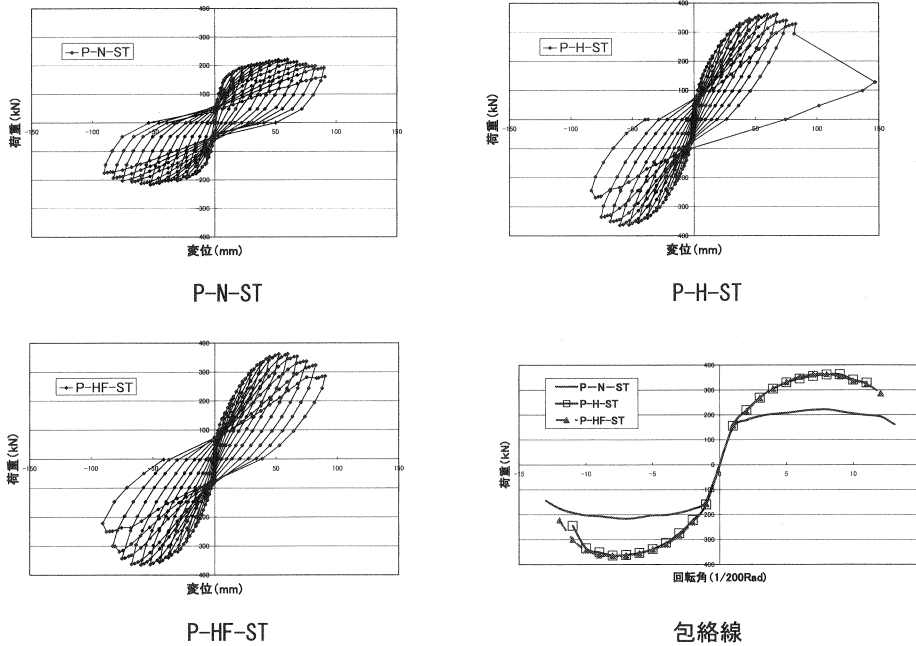


図-4 荷重-変位曲線

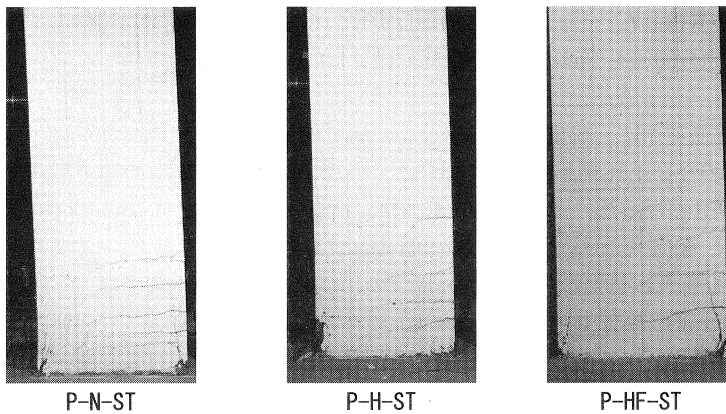


写真-2 最大耐力付近のひび割れ状況 (+8/200rad時)

+7/200radの時点で基部に大きく縦ひび割れが入るが、剥落はなかった。+10/200radからの除荷時、北側基部が膨らみ座屈の兆しが見られた。-10/200radを過ぎて、基部は膨らんではいないが、コンクリートの剥落はなかった。-11/200radに向かって載荷中に軸方向鉄筋が1本破断した。+12/200radへの載荷

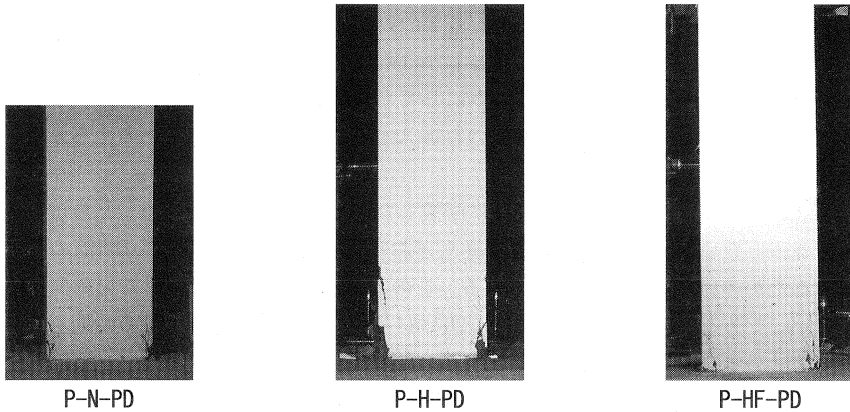


写真-3 準動的載荷終了後のひび割れ状況

途中2本目の軸方向鉄筋が破断した。また、 $-12/200\text{rad}$ に向かって載荷途中、軸方向鉄筋が2本破断した。この時点で残存耐力は最大耐力の80%を下回ったため載荷終了とした。

4-2 準動的載荷実験

得られた時刻歴応答変位曲線を図-6に、全供試体の荷重-変位関係を図-7に示す。写真-3に実験終了時の破壊状況を示す。

P-N-PDは、載荷により部材の降伏はしたものの、プレストレスの効果により載荷終了後の残留変位は9.5mmとなり、道路橋示方書の基準である $1/100\text{rad}$ である15.0mmを大きく下回った。

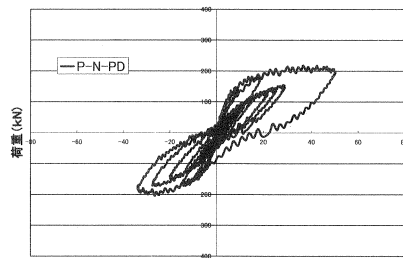
P-H-PDの載荷後の残留変位は16.2mmで $1/100\text{rad}$ を多少超えているものの、危険側の条件での載荷後にもかかわらず残留変位が抑制されている。載荷終了時には、ひび割れはほとんど閉じていた。

P-HF-PDは、載荷終了後にはP-H-PDと同様にひび割れも閉じており、コンクリートの剥落はほとんど認められなかった。残留変位は16.3mmであった。

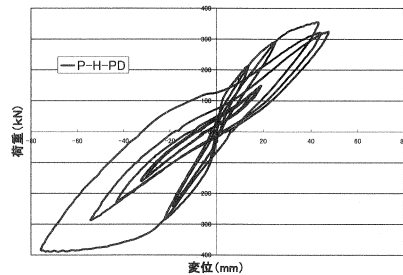
4-3 既往の実験供試体¹⁾との比較

(1) プレストレス導入区間の違いによる比較

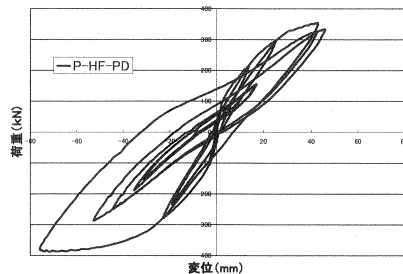
軸方向鉄筋に普通強度鉄筋を用い、基部にのみプレストレスを導入したP-N-STと、PC鋼材を周囲に配置し柱全高に渡りプレストレス導入したP-N13¹⁾を比較する。コンクリートの導入プレストレス力は同じだが前者はPC鋼材量が少なく中心に配置されているため後者に比べ最大耐力は小さい。前者の途中定着部ではひび割れが目立っていたが、徐荷時にはひび割れは閉じ柱としては同様の挙動を示している。



P-N-PD



P-H-PD



P-HF-PD

図-6 荷重-変位曲線

軸方向に高強度鉄筋を使用したP-H-ST (中心部, 基部のみプレストレス導入) とP-H-2¹⁾ (周囲, 柱全高にプレストレス導入) との比較においては両者ともひび割れ状況や柱の耐荷挙動に大きな変化はなかった。よって, プレストレスの導入区間を基部のみにしても橋脚として十分機能を果たすことから, 経済性を考慮すると, 軸方向プレストレスを基部にのみ導入することは有効であると考えられる。

(2) PC鋼材の配置位置の違いについて

断面中心にPC鋼材を配置したP-N-STと柱の周囲に配置したP-NH-A2¹⁾の比較を行う。どちらも基部にのみプレストレスを導入した供試体である。後者は従来どおり柱の周囲に8本配置し, 断面の曲げ耐力の不連続性を緩和するための付加鉄筋を配置している。この2つの供試体では最大耐力を発揮する回転角が, 後者では5/200radであるのに対し, 前者では8/200radと遅くコンクリート圧壊の時期も遅れた。この差は, 後者はPC鋼材が早期に降伏し最大荷重を迎えたためだと考えられる。PC鋼材を断面の中心付近に配置することにより, 付加鉄筋を用いなくても柱の耐荷性能は大きく損なわれることはなかった。

5. まとめ

PC鋼材を断面中心付近に配置し基部付近のみに鉛直プレストレスを導入した橋脚について載荷実験を行った結果から次に示す知見が得られた。

- (1) PC鋼材を断面の中央に集中配置した場合においても, 直下型の激しい地震波を危険側の条件で作用させた後も復元力を有し, その機能を保持できることが示された。
- (2) PC鋼材を中央に配置することにより最大耐力の発生時期が遅れるという特徴が現れた。
- (3) プレストレスの導入範囲が基部のみの場合, 普通強度の軸方向鉄筋を用いるとPC鋼材の途中定着部にひび割れが目立ったものの, 高強度鉄筋を用いることにより徐荷時にひび割れは閉じて健全であることが示された。
- (4) PC橋脚の軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いたところ部材の耐力が大幅に上昇することが確認できた。
- (5) ポリプロピレン繊維をコンクリートに混入させることにより, 部材の耐力に変化は見られなかった。正負繰返し実験の大変形時には繊維の有無により剥落状況に差は見られなかったものの, 準動的載荷実験による地震波作用後のコンクリートの剥離, 落下は十分防ぐことが確認された。

謝辞

本論文は, プレストレストコンクリート技術協会 高強度鉄筋PPC構造研究委員会 (委員長: 池田尚治, 幹事長: 出雲淳一) の支援を得て2001年度に行った実験結果から得た知見を元にとりまとめたものである。実験の実施にあたり横浜国立大学森下 豊 技官および多田 寛 学部生(当時)にお世話になった。自動定着具は極東鋼弦コンクリート振興(株)より提供を受けたものである。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 野中聡, 藤原武彦, 山口隆裕, 池田尚治: 基部にプレストレスを導入したコンクリート橋脚の研究, 第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2001. 11, pp. 881-886
- 2) 林和彦, 藤原武彦, 野中聡, 池田尚治: 高強度鉄筋の併用によるPC橋脚の耐震性の向上, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, 2003年6月, pp. 733-738
- 3) (財)鉄道総合技術研究所: 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR地震情報 No. 23d, 1996. 3
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996. 12