論文 軸方向鉄筋の途中定着部をせん断補強した橋脚の変形挙動の実験的 検討

森山 智明*1・小林 薫*2

要旨:軸方向鉄筋の途中定着部を有する既設橋脚の耐震補強工法として,橋脚の4隅をPC 鋼材により拘束力を与える工法を提案し,補強効果の確認を行うため交番載荷試験を行っ た。軸方向鉄筋の途中定着部を有する辺長比1:3の試験体により,PC鋼材の配置,拘束力 を変化させ試験を行い,損傷状況,変形性能に及ぼす影響について検討した。その結果, 補強により途中定着部の脆性的な破壊は起こらず,変形性能が向上する結果が得られた。

キーワード:耐震補強,途中定着,変形性能

1. はじめに

鉄道構造物の耐震補強工事は,兵庫県南部地震での被災状況を踏まえ,RC ラーメン高架橋柱を先行し行われてきた。鉄道高架橋柱ついては,実物規模の試験体による交番載荷試験等が行われ,各種の工法が開発され実用化されている。今後,補強工事の対象となるRC 橋脚は,鉄筋の途中定着を有するものがあること、壁式橋脚などでは断面高さと幅の辺長比が3~6の長方形となるなど,鉄道高架橋柱とは形状,配筋が異なるため,高架橋柱の技術をそのまま適用することはできない場合が考えられる。

特に鉄筋の途中定着を有する橋脚は,橋脚の高さ方向で断面内の引張鉄筋量が不連続となるため地震のような大きな交番繰り返し荷重が作用した場合の弱点となる。「このことから,RC巻き立て工法や鋼板巻き補強が行われているが,曲げ補強を行うことは基礎に対する負担や鋼板等の資材搬入のための通路等の仮設費の工事費に占める割合が大きく、工事費が高くなるといった問題点もある。

そこで,橋脚の外周に PC 鋼材を配置し,4 隅に拘束力を与える補強工法を考案した。既往の柱外周に鋼材を配置した耐震補強工法の実験²⁾ 3)は,1 m角程度の矩形柱を対象としており,

柱では段落しと呼ばれる主鉄筋の途中定着を有していない。今回,途中定着を有する長辺比1:3の試験体による静的正負交番載荷試験結果および変形性能に関する考察を報告する。

2. 実験概要

(1) 試験体概要

試験体緒元を表 - 1に示す。また,写真 - 1に補強状況,図 - 1に試験体側面および断面を図 - 2に PC 鋼棒定着部の概要を示す。試験体の縮尺は1/4程度で,断面の辺長比1:3,せん断スパン比3.4とした。実構造物の引張鉄筋比は,0.3~0.6%程度であり,既往の鋼板補強による実験⁴⁾において主鉄筋比が小さいケースでは



写真 - 1 試験体補強状況(No.2)

^{*1} 東日本旅客鉄道(株)研究開発センター フロンティアサービス研究所 主 席 工修 (正会員)

^{*2} 東日本旅客鉄道(株)研究開発センター フロンティアサービス研究所 副課長 博(工) (正会員)

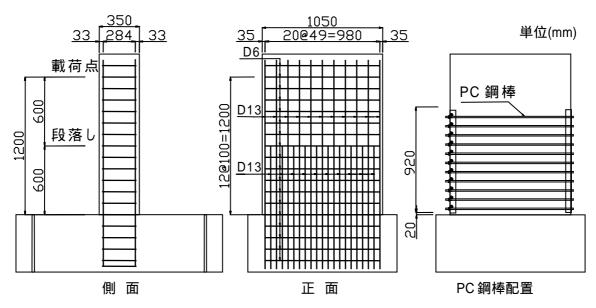


図 - 1 試験体形状

表 - 1 実験ケース一覧

試験体 番号	断面寸 法 (mm)	軸方向鉄 筋(径-本 (鉄筋比%)		補強方法 鋼棒 - ピッチ(cm)	PC鋼棒 緊張力 (kN)
No.1	350 × 1050	D13-21 (0.80)	D13-11 (0.42)	無補強	-
No.2				13mm - 16cm	0
No.3				13mm - 16cm	40
No.4				13mm - 8cm	40

PC 鋼棒 350

図 - 2 PC 定着部

段落し部の破壊が見られていない。このため,今回は引張鉄筋比 0.80% とし,鉄道構造物設計標準 5)により算出した段落し位置での曲げせん断耐力比(V_{yd}/V_{mu})をおよそ 1.0 に設定した。組立筋を兼ねた帯鉄筋は,D6($fwy=348N/mm^2$, $Aw=3.2mm^2$)を主鉄筋外周に矩形で定着には鋭角フックを用いたものを 100mm ピッチで配置した。

今回実験に用いた試験体の軸方向鉄筋の途中 定着部の効果の確認をするため,軸方向鉄筋の 段落しは,載荷点高さ 1/2(600mm)の位置で鉄筋 量 1/2 とし,基部と段落し部の軸方向鉄筋が計 算上同時に降伏するようにした。

No.1 試験体は比較のための無補強とし,No.2 試験体からは,PC 鋼棒による拘束力をパラメータとした。橋脚断面への拘束力は,断面の4隅にL型鋼(50mm×50mm×6mm)で加工されたPC 鋼棒定着冶具とL型鋼と鋼板を曲げ加工して製作したコーナー材を取り付け,PC 鋼棒を緊張し

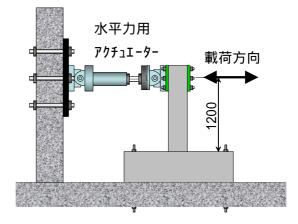


図-3 試験装置概要図

て導入した。定着冶具は、実橋において幅200mm 程度の L 型鋼を想定しており、PC 鋼棒の緊張 力で定着冶具の接するコンクリート部分が圧縮 破壊しない大きさとしている。使用した PC 鋼 棒は、 13mm の B 種 1号(SBPR980/1080)で、 鋼棒の配置間隔、緊張力を変化させ断面への拘 束力を変化させた。PC 鋼棒の緊張力は、降伏ひ

表 - 2 試験結果

試験体 番号	コンクリート 強度	主鉄筋 降伏強度	降伏 荷重	最大 荷重	降伏 変位
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN)	(kN)	(mm)
No.1	32.3		269	272	5.5
No.2	18.0	388	248	262	5.3
No.3	23.5	300	266	288	4.6
No.4	20.8		261	287	4.0

ずみの約 1/3 となる 40kN とした。PC 鋼棒の緊張は,トルクレンチにより行い,緊張力の管理は,PC 鋼棒に取り付けたひずみゲージおよびトルクレンチの値により管理した。

(2) 交番載荷試験概要

図 - 3 に試験装置の概要を示す。正負交番試験は,降伏変位の実験値(δ_{ytest})の整数倍を 1 回ずつ繰り返して行い, $10\delta_y$ 以降は $12\delta_y$, $14\delta_y$ ・・・ と偶数倍の載荷を行った。本来は軸力を考慮すべきであるが,今回は途中定着部でのせん断補強効果に主眼をおいたため,試験体の軸力は 0 とした。

3. 試験結果および考察

3.1 試験結果

表 - 2 に試験結果を示す。試験結果のうち, 降伏荷重,降伏変位,最大荷重は,正側載荷, 負側載荷の両側の平均の値である。No.1 ~ No.4 の降伏変位は,補強の増加により小さくなる傾向となった。これは,拘束力を大きくするとひ び割れ発生が抑えられ,剛性の低下が小さくな るためと考えられる。

3.2 試験体の損傷状況

写真 - 2 ~ 5 に試験終了時の各試験体の状況を示す。No.2 ~ 4 の試験体は、載荷終了後に PC 鋼棒等の補強鋼材を取り除いた状態である。

No.1 試験体では、 $1\delta_y$ までは躯体下端から段落し点上まで引張側全面に曲げひび割れが発生する。鉄筋の降伏は、段落し部の鉄筋が先行し降伏したが、この時下端部の鉄筋ひずみは 2000 μ に達しておりほぼ降伏に近い値を示していた。

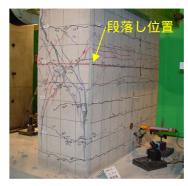


写真 - 2 No.1 載荷終了 (無補強)

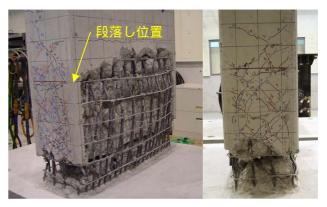


写真 - 3 No.2 載荷終了 (PC 鋼棒 13mm-16cm ピッチ Pe=0kN)

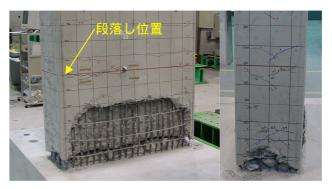


写真 - 4 No.3 載荷終了 (PC 鋼棒 13mm-16cm ピッチ Pe=40kN)



写真 - 5 No.4 載荷終了 (PC 鋼棒 13mm-8cm ピッチ Pe=40kN)

28y時になると段落し部の曲げひび割れが大きくなり斜めひび割れへと進展する。38yで段落し部の斜めひび割れが発達し,X状に交差して下側に伸びたひび割れが主鉄筋に沿って進展し,負側の載荷でカットオフ点より下側のかぶりコンクリート浮きがみられ急激に荷重が低下した。48yでは,段落し部の斜めひび割れがさらに大きくなり躯体のずれが生じ大きく耐力が低下した。

PC 鋼棒に緊張力を与えない補強を行った No.2 は, $2\delta_v$ までは無補強とほぼ同じひび割れ が発生し、38、以降に段落し部の斜めひび割れ幅 が大きく開くことは無く、段落し部より下側に 斜めひび割れが発生する。また,主筋に沿った ひび割れとかぶりコンクリートの浮きが確認さ れた。5δ,で段落し部のはらみ出しが大きくなり, 徐々にかぶりコンクリートの剥落が確認された。 フーチングから高さ 400~600mm の位置で途中 定着されていない鉄筋がはらみ出すとともにフー チング下端までのかぶりコンクリートが剥落し た。試験終了後の写真のように側面に多数のひ び割れが発生し,長辺方向中央の断面には,段 落し部から基部向かって60~70度の角度の浅い ひび割れとフーチングから高さ 150mm の位置 を中心とする X 状のひび割れが見られた。

PC 鋼棒による緊張を与えた No.3,では, $1\delta_y$ におけるひび割れが発生したが, $2\delta_y$ 以降は曲げひび割れが側面の PC 鋼棒を横切り斜めひび割れに進展することは無かった。 $5\delta_y$ でフーチングから 200mm の位置でかぶりコンクリートの浮きが発生し, $6\delta_y$ でフーチングから 200mm の位置で鉄筋がはらみ出し,かぶりコンクリートが剥落した。PC 鋼棒定着具で抑えられている 4 隅の角のコンクリートは基部付近において損傷は見られなかった。フーチングから高さ 150mmを中心とする斜めひび割れが交差して発生し,段落し部の斜めひび割れは発生しなかった。

PC鋼棒による緊張力が最も大きいNo.4では, NO.3 とほぼ同じ傾向であるが,試験終了後の側面のひび割れはほとんど無く,斜めひび割れの交差高さ,コンクリートの剥落位置も No.3 より

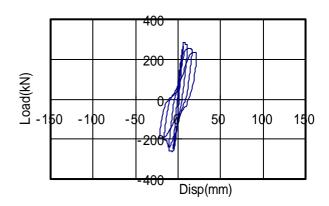


図 - 5 No.1 の荷重 - 変位曲線

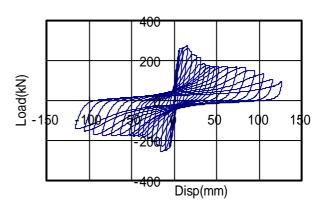


図 - 6 No.2 の荷重 変位曲線

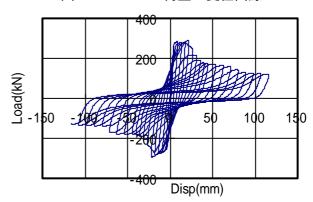


図 - 7 No.3 の荷重 変位曲線

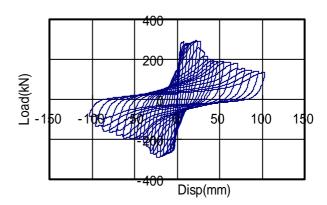


図 - 8 No.4 の荷重 変位曲線

若干低くなっている。

3.3 各試験体の荷重 - 載荷点変位履歴

図 - 5 ~ 8 に各試験体の荷重 - 載荷点変位曲 線をそれぞれ示す。

No.1 試験体では、 $3\delta_y$ の負側の載荷で段落し部のひび割れが大きくなり、急激に荷重が低下した。

PC 鋼棒に緊張力を与えない補強を行ったNo.2 は, $4\delta_y$ 目に降伏荷重を下回ったが,急激な荷重の低下とならなかった。 $5 \sim 8\delta_y$ の載荷では,徐々に各サイクルでのピーク荷重が低下した。 $9 \sim 14\delta_y$ の間は、降伏荷重の約7割程度でピーク荷重はほぼ一定で $14\delta_y$ 以降徐々に荷重が低下し, $20\delta_y$ で降伏荷重の1/2を下回った。

PC 鋼棒による緊張を与えた No.3 は $,6\delta_y$ で降 伏荷重を下回り $,5 \sim 8\delta_y$ で徐々に荷重が低下し た。 $9\delta_y$ 以降は ,No.2 と同様な傾向を示し $,9 \sim$ $14\delta_y$ 間は , 降伏荷重の約 7 割程度の値で荷重は ほぼ一定で $14\delta_y$ 以降徐々に荷重が低下している。

緊張力の大きい No.4 は ,降伏荷重を下回ったのは $8\delta_v$ で $9\delta_v$ 以降は No.3 とほぼ同じである。

補強を行った No.2~4 は,いずれも急激に荷 重が低下する脆性的な破壊は起こらず,変形性 能が向上していることが確認された。

3.3 補強効果による影響

図 - 9 に各試験体の正側の載荷点荷重 - 変位 曲線の包絡線を示す。

包絡線が降伏荷重を下回る変位は、No.2 から No.4 と補強の増加とともに大きくなっている。このとき、いずれもかぶりコンクリートの浮きや鉄筋の座屈による剥落が確認されている。9~ $14\delta_y$ の間は、降伏荷重の約7割程度の荷重で安定しており、拘束力が大きい No.4 が若干大きな値となっている。

図 - 10,11に No.3 試験体の途中定着された鉄筋の各サイクルの高さ方向のひずみ分布を示す。図 - 10は,長辺方向中央部の鉄筋,図 - 11は,長辺方向端部の鉄筋である。鉄筋ひ

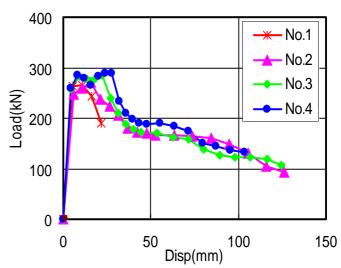


図-9 載荷点荷重-変位曲線の包絡線

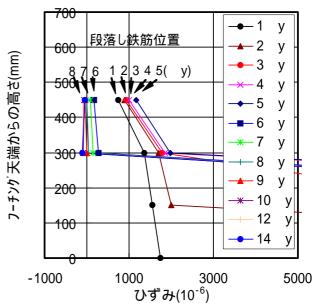


図 - 10 段落し鉄筋ひずみ分布(中央部)

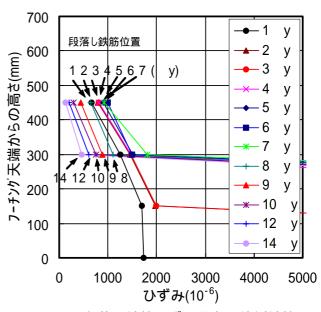


図 - 11 段落し鉄筋ひずみ分布(外側鉄筋)

ずみは、各サイクルの正側載荷における最大変 位時の引張鉄筋の値である。中央部では,26、 以降のフーチングから高さ 0mm,150mm の位置 の鉄筋ひずみは 20000 µ 以上となりグラフから 外れている。300mm,450mm の位置のひずみの 値は, $5\delta_v$ まで徐々に増加しているが, $6\delta_v$ でひ ずみの値は急激に小さくなり,途中定着された 鉄筋の付着が切れたことにより引張力を負担し なくなっており, No.3 の耐力が下がり始める載 荷サイクルと一致する。端部に位置する途中定 着された鉄筋(図-11参照)は, 300mm, 450mm の位置のひずみが 8δ_ν から徐々に小さく なり 付着の低下により引張力を負担しなくなっ ている。5δ、以降の荷重の緩やかな低下は,かぶ リコンクリートの剥落による有効断面の減少と 途中定着された鉄筋の付着切れによる耐力低下 と考えられる。また,PC 鋼棒による拘束力が大 きい試験体ほど,途中定着された鉄筋の付着切 れが起こりにくいので,水平荷重が降伏荷重よ り顕著に低下し始める載荷サイクル (変形量) が大きくなったと考えられる。

図 - 1 2 に試験体の載荷点変位と累積吸収エネルギーの関係を示す。累積吸収エネルギーは,各載荷サイクルの荷重 - 変位履歴ループの面積を求めたものである。PC 鋼棒による拘束力を与えた No.3,4 の累積吸収エネルギーは,降伏荷重を下回り荷重が減少し始める載荷サイクル(6~ $8\delta_v$)で一度減少するが、その後増加している。

累積吸収エネルギーも補強により増加することが確認された。

4. まとめ

軸方向鉄筋の途中定着部を有する辺長比 1:3 の試験体にPC鋼棒を外周に配置し4隅を拘束す る補強による正負交番載荷実験により得られた 知見を以下に示す。

- (1)補強により途中定着部の脆性的な破壊を防止し,変形性能を高めることができる。
- (2)橋脚の4隅を PC 鋼棒により拘束力を与えることにより,橋脚段落し部の損傷が見ら

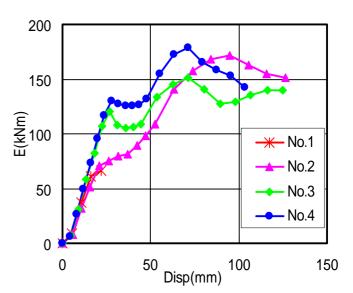


図 - 12 変位と累積吸収エネルギー

れなくなり,橋脚基部の損傷に移行することを確認した。

(3) 補強により累積吸収エネルギーの増加が確認された。

参考文献

- 1) 山本強,石橋忠良,大坪正行,小林晋爾:鉄 筋を途中定着した橋脚の耐震補強に関する 実験的研究,土木学会論文集, No.348/V-1,pp.61-70,1984.4
- 2) 富名腰 泉ほか: PC 鋼棒にプレストレスを 導入したR C 柱の耐震補強に関する実験的 研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vo21, No.3, pp.1645-1650, 2000.6
- 3) 津吉 毅ほか:鉄筋を外周に配置する既設 R C柱の耐震補強工法の断面外に配置した 鉄筋の効果に関する研究,土木学会論文集, No.676/V-51,pp.77-88,2001.5
- 4) 玉井真一ほか:鉄筋を途中定着した壁式橋 脚の鋼板巻立て補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vo21, No.3, pp.1315-1320, 1999.6
- 5) 運輸省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物設計標準・同解説 コンク リート構造物,丸善,1992年10月