

論文 補強部材の閉合による一面耐震補強工法の変形性能に関する実験的検討

中岡 宏一^{*1}・佐々木 尚美^{*2}

要旨：柱の一面からのみ補強を行う一面耐震補強工法は、鉄道 RC ラーメン高架橋の高架下に店舗等の設備がある箇所における耐震補強に用いられている。本稿では、曲げ破壊先行型の RC 柱を対象に、従来の一面耐震補強の補強材である直筋の代わりに、ワイヤーロープまたは異形鉄筋を U 字型に配置した試験体を用いて、正負交番載荷試験により実験的検討を行った。実験の結果、補強材として U 字型のワイヤーロープを配置することで、従来補強に比べ、コアコンクリートの損傷範囲を縮小することができ、変形性能を向上できる可能性があることを確認した。

キーワード：耐震補強, RC 柱, 鉄道ラーメン高架橋, 正負交番載荷, 変形性能, ワイヤーロープ

1. はじめに

都市部の RC ラーメン構造の鉄道高架橋などでは、高架下空間の有効活用として店舗や倉庫などに利用されていることが多く、補強工事をする際は、支障移転等が困難な場合に、一面耐震補強工法¹⁾が用いられている。本工法は、既設 RC 柱の一面（補強面）から異形鉄筋および鋼板を設置することによりせん断補強を行うものであり、補強面と平行方向の作用力に対しては補強鋼板が補強材として機能し、補強面と直角方向の作用力に対しては補強鉄筋が補強材として機能するよう設計している（図-1）。

せん断破壊先行型の柱を対象に本工法を用いて補強することで、曲げ破壊型に移行し、RC 柱の変形性能が向上することが確認されている^{2) 3)}。また、補強前の性能が曲げ破壊先行型の柱を対象として、同様に本工法を用いて補強した場合でも、変形性能が向上することが確認されている⁴⁾。曲げ破壊先行型の柱に対するさらなる変形性能の向上を目的として、既往の研究⁴⁾において、直筋の代わりにワイヤーロープを用いて、柱内部のコアコンクリートを囲う形で閉合する配置を検討した。結果、異形鉄筋を用いた従来の配置（以下、従来補強という）と比べ、変形性能が向上する結果を得ている。しかし、かぶりコンクリートの剥落や斜めひび割れが柱上面にまで達するなど、損傷範囲が大きかった。そこで本稿では、損傷範囲を基部に集中させること、また、ワイヤーロープの配置本数を削減することによって経済性を高めることを目的とし、静的正負交番載荷試験により検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体の諸元、図-2 に試験体側面図、図-3

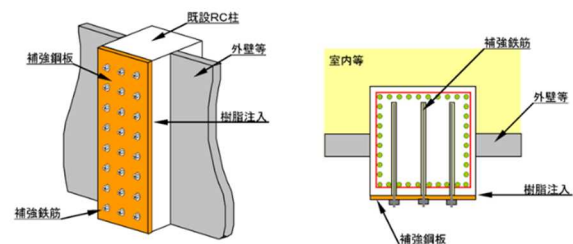


図-1 一面耐震補強工法概要

に試験体補強材配置断面図を示す。試験体寸法は実物のおよそ 1/2 スケールの 450mm×450mm とし、各試験体の軸方向鉄筋および帯鉄筋の種類、本数、配置、コンクリート設計基準強度、せん断スパンは共通としたうえで、補強方法の異なる 3 種の試験体を用いた。補強前の性能については、補強材による変形性能向上効果を確認するため、曲げ破壊先行型とし、耐力比 (V_{yd}/V_{mu}) を 1.05 に設定した。ここで、 V_{yd} ：部材のせん断耐力、 V_{mu} ：部材が曲げ耐力に達する時のせん断力である。なお、せん断補強筋のない棒部材のせん断耐力は、せん断スパン比 (a/d) を考慮した二羽ら及び石橋らの式^{5) 6)}を用いた。

試験体 No.1 は、従来補強で適用されている、異形鉄筋 (D13) を補強材として配置したものである。試験体 No.2 は、補強材に U 字型に加工した異形鉄筋 (D13) を用いて、コアコンクリートを囲うような形で補強材を配置した。施工性や経済性を考慮し、既往の研究⁴⁾における試験体よりも補強材の配置本数を減らしつつ、耐力比が 2.0 程度となるよう、補強鉄筋の配置間隔を 100mm ピッチとした。試験体 No.3 は、補強材にワイヤーロープを用いて、試験体 No.2 同様に U 字型に配置し、補強鋼板に固定したものである。ワイヤーロープの径は $\Phi 14$ で、材種は玉掛用の柔軟性に優れた高強度ケーブルレイドロープ⁷⁾を使用した。鉛直方向の配置間隔は、試験体 No.2 と同

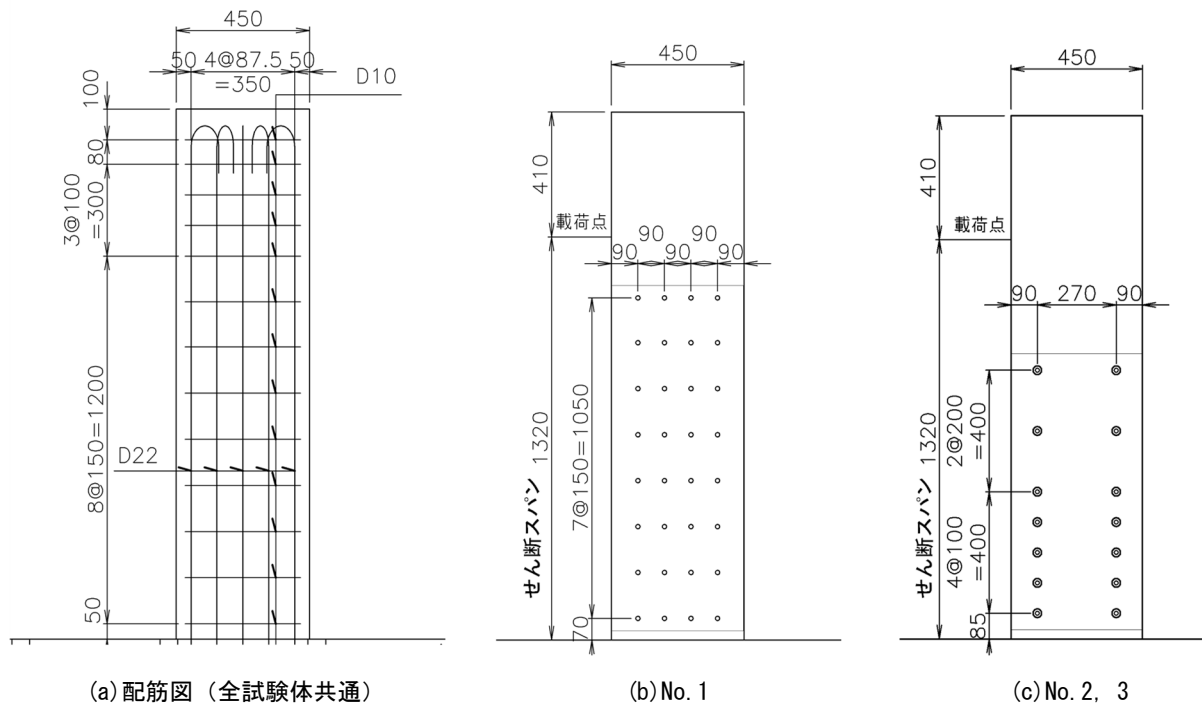
^{*1} 東日本旅客鉄道(株)JR 東日本研究開発センター 構造システムデザインユニット 研究員 (正会員)

^{*2} 東日本旅客鉄道(株)JR 東日本研究開発センター 構造システムデザインユニット マネージャー 博(工)(正会員)

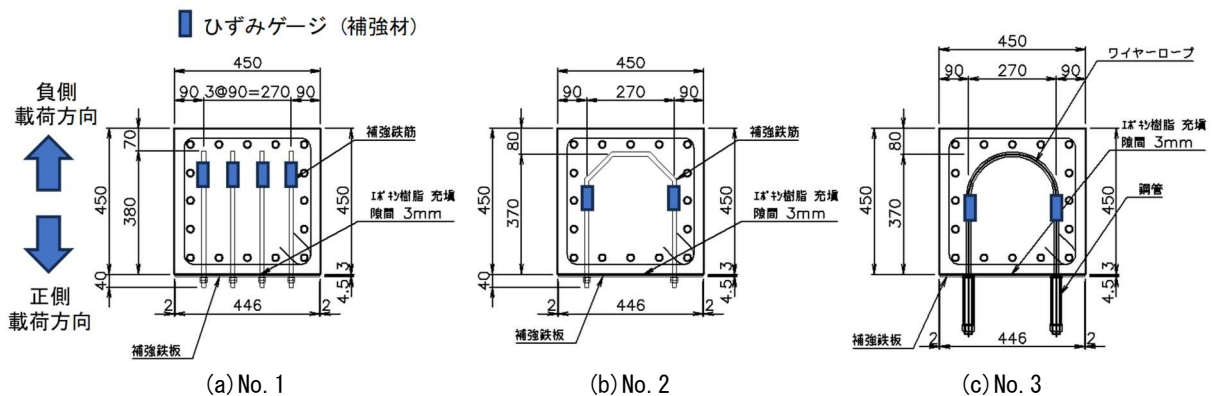
表－1 試験体諸元

試験体 No.	断面寸法 (mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋			帯鉄筋		補強鋼板		補強材			耐力比 (V _{yd} /V _{mu})
			径	ピッチ (mm)	最外縁鉄筋本数 (本)	径	ピッチ (mm)	板厚 (mm)	材質	径	材質	ピッチ (mm)	
1	450	24.0	D22	87.5	5	D10	150	4.5	SS400	D13	SD345	150	2.38
2	×									D13	SD295	1D 区間:100	1.91
3	450									Φ14	※	1D 区間外:200	－

※高強度ケーブルレイドロープ IWRC6×(IWRC6×S(13)) 破断荷重 123kN



図－2 試験体側面図



図－3 試験体補強材配置断面図

様の 100mm ピッチとした。なお、ワイヤーロープは降伏点が明確ではないため、試験体 No.3 については耐力比を記載していない。

図－3 に補強材に設置したひずみゲージの位置を示す。試験体 No.1 は補強鉄筋の補強面背面側の端部付近、試験

体 No.2, 3 は補強材の直線部にそれぞれひずみゲージを貼付けた。

補強鋼板は各試験体ともエポキシ樹脂により RC 柱と接着した。鋼板長さは、耐震補強設計施工マニュアル¹⁾より 2D 以上 (D: 柱幅) とした。また、各試験体ともに

表－2 材料強度試験結果

試験体 No.	柱	軸方向鉄筋		帯鉄筋		補強鉄筋	
	コンクリート 強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)	降伏強度 (N/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)	降伏強度 (N/mm ²)	降伏 ひずみ(μ)
1	23.8	369.4	1900	384.6	2076	389.2	2004
2	32.9	392.0	2005	384.9	1981	343.7	1640
3	33.1	366.7	1904	386.9	1981	－	－

表－3 正負交番載荷試験結果

(a) 正側載荷

試験体No.	実験値					計算値		実験値/計算値	
	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_u (mm)	じん性率	降伏荷重 P_y (kN)	最大荷重 P_u (kN)	降伏荷重 P_{yc} (kN)	最大荷重 P_{uc} (kN)	P_y/P_{yc}	P_u/P_{uc}
1	9.1	67.8	7.5	283.3	371.3	253.8	317.8	1.12	1.17
2	7.2	66.6	9.3	271.9	379.3	275.0	345.3	0.99	1.10
3	8.6	98.8	11.5	288.2	371.6	259.5	328.3	1.11	1.13

(b) 負側載荷

試験体No.	負側載荷					計算値		実験値/計算値	
	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_u (mm)	じん性率	降伏荷重 P_y (kN)	最大荷重 P_u (kN)	降伏荷重 P_{yc} (kN)	最大荷重 P_{uc} (kN)	P_y/P_{yc}	P_u/P_{uc}
1	7.3	56.1	7.7	263.2	352.0	253.8	317.8	1.04	1.11
2	6.8	59.2	8.7	264.8	364.6	275.0	345.3	0.96	1.06
3	7.8	56.1	7.5	285.5	354.7	259.5	328.3	1.10	1.08



図－4 No. 3 試験体外観

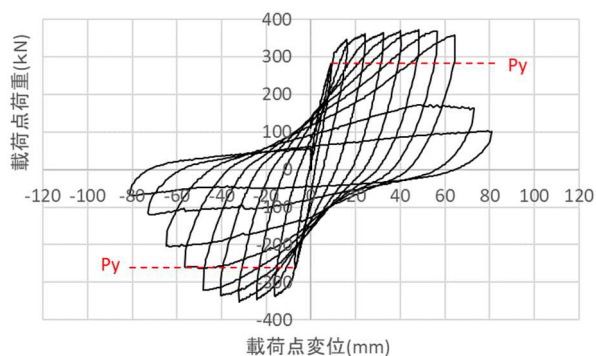
補強鉄筋及びワイヤーロープは、コンクリート打設前に設置を行い、コンクリート硬化後に補強鋼板の設置を行った。No.3については、ワイヤーロープの端部にΦ34の鋼管を被せ、内部に樹脂を充填して補強鋼板に固定した(図－4)。

なお、実施工にてワイヤーロープを挿入する際は、補

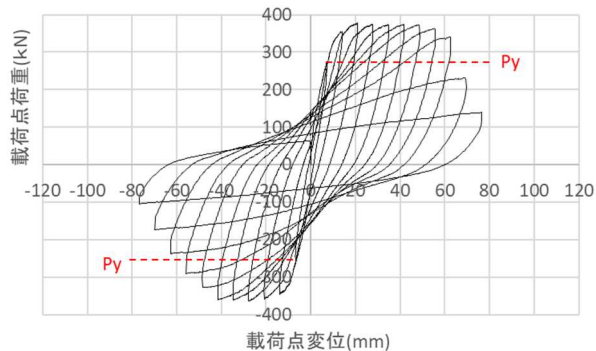
強面直角方向に従来補強同様のコア削孔を行い、補強面平行方向にウォータージェットによる削孔を行って、U字型に削孔する方法を検討している。

2.2 載荷方法

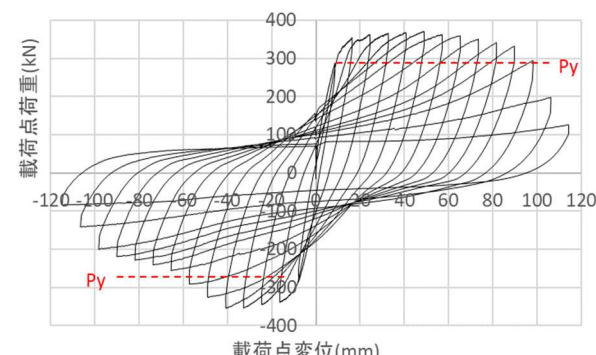
載荷位置は図－2に示す通り、いずれも柱基部より1320mmの高さとし、水平方向に3000kNまで載荷可能なアクチュエータを用いて試験を行った。軸力は鉛直アクチュエータにより、一般的なラーメン高架橋の柱の軸力を想定し、軸圧縮応力度0.98 N/mm²を一定に載荷した。載荷手順は、材料試験結果(表－2)をもとに、最外縁の軸方向鉄筋の測定ひずみが降伏ひずみに達するまで載荷を行い、その時の載荷点水平変位を降伏変位(δ_y)、載荷点荷重を降伏荷重(P_y)とした。以降、降伏変位の整数倍の水平変位ごとに、変位制御で各1サイクルずつ交番載荷を行い、荷重が降伏荷重の1/2程度に低下するまで載荷した。載荷方向は、図－3に示すように、いずれの試験体も補強面に対し直角方向とし、補強面を引く方向を正側載荷方向、押す方向を負側載荷方向とした。



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

図-5 荷重－変位曲線

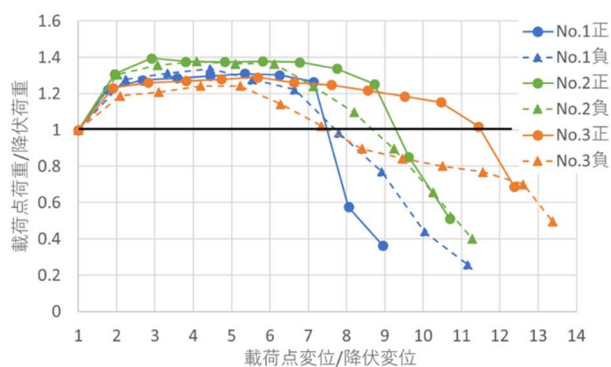
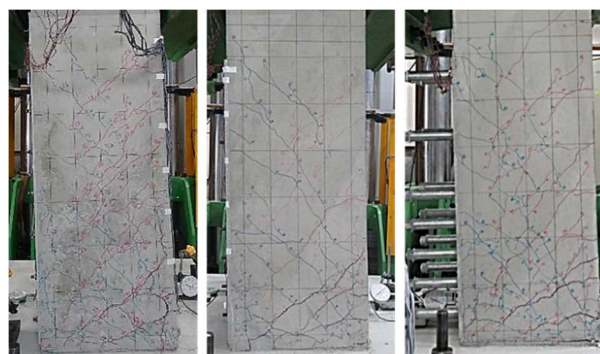


図-6 無次元荷重変位関係

3. 試験結果

3.1 荷重－変位関係

各試験体の正負交番載荷試験結果を表-3 に示す。ここで、表中に示す終局変位 (δ_u) は降伏荷重 (P_y) を下

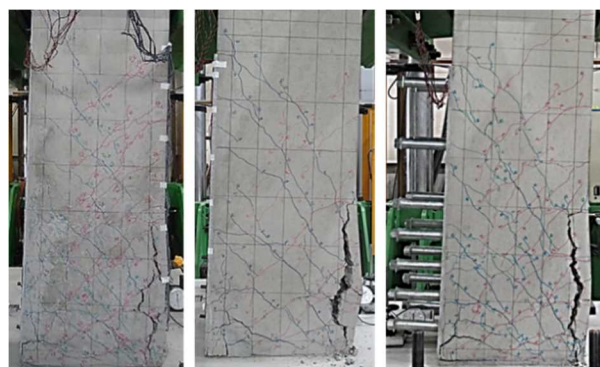


No. 1 (6δ)

No. 2 (7δ)

No. 3 (6δ)

(a) 正側



No. 1 (6δ)

No. 2 (7δ)

No. 3 (6δ)

(b) 負側

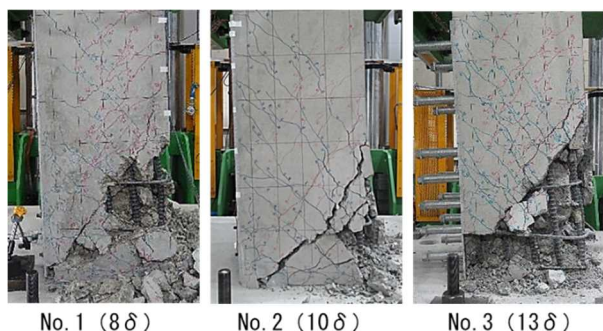
図-7 最大荷重時の損傷状況

回らない最大変位を示し、じん性率は終局変位 (δ_u) を降伏変位 (δ_y) で除したものである。終局変位については、実験結果より終局変位前後の測定点を抽出し、2 点間の線形近似により定めた。各試験体とも、降伏荷重 (P_y) および最大荷重 (P_u) は概ね同じ値を示している。試験体 No.1 および No.2 については、正負でじん性率の差異はほとんどなかったが、試験体 No.3 では正側のじん性率が 10 以上となり、正負で比較的大きな差異が見られた。

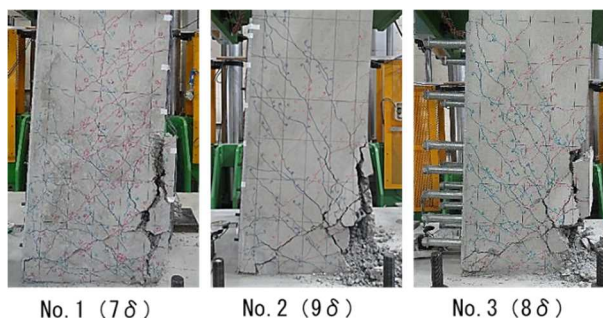
図-5 は各試験体の荷重－変位曲線、図-6 は荷重－変位曲線の包絡線を降伏荷重および降伏変位で無次元化したものである。各試験体とも、1 δ_y から終局までは荷重が概ね緩やかに推移しているが、正側については終局付近において荷重の低下が大きくなった。特に試験体 No.1 では降伏荷重の 6 割まで急激に低下した。負側については、各試験体ともに 5～6 δ_y 付近より荷重の低下が始まっている。試験体 No.3 は全体的に荷重の低下が緩やかな傾向にあり、負側の荷重低下が正側と比較してやや早いものの、終局以降も緩やかに低下した。

3.2 損傷状況

各試験体の最大荷重時の損傷状況を図-7 に示す。図-5 に示すように、各試験体ともに負側では、概ね 5～6



(a) 正側



(b) 負側

図-8 終局付近損傷状況

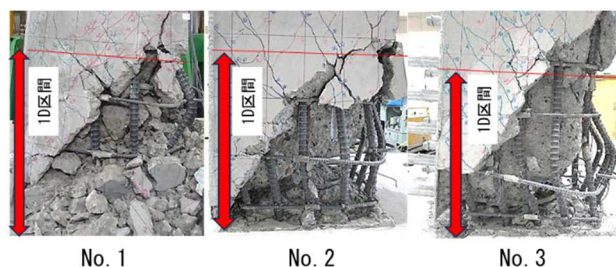


図-9 載荷終了後の損傷状況

δ_y より荷重低下が始まっており、最大荷重到達直後の6～7 δ_y において補強面背面側のかぶりコンクリートのひび割れが顕著に現れている。補強背面側が圧縮となる負側載荷時に、軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しに伴い、かぶりコンクリートが損傷したことによるものと考えられ、各試験体ともに同様の傾向を示している。

次に、終局付近の損傷状況を図-8に示す。補強面の基部と補強鉄筋2段目付近を結ぶ形で斜めひび割れが進展し、剥落箇所が補強面背面側から側面側にも拡大していった。負側の終局後は側面のかぶりコンクリートのひび割れが急激に進展し、正側の終局に至る形となった。試験体 No.2, 3についても曲げひび割れの位置、補強面背面かぶりの剥落範囲は概ね同様の傾向を示した。斜めひび割れの進展も、試験体 No.2 は柱基部から3段目の補強鉄筋（高さ285mm）付近、試験体 No.3 は柱基部から2段目のワイヤーロープ（高さ185mm）付近と補強面

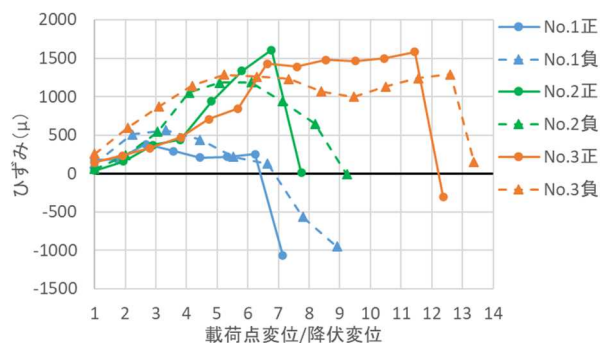


図-10 補強材1段目のひずみ履歴

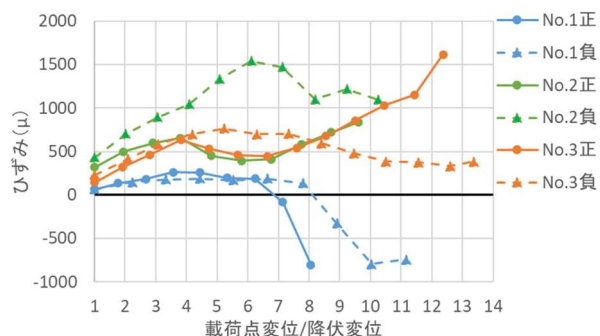


図-11 補強材2段目のひずみ履歴

の基部を結ぶラインで現れ、試験体 No.1 と同様の傾向を示した。

載荷終了後の損傷状況を図-9に示す。試験体 No.2, No.3についてはガラ撤去後の状態である。各試験体ともに概ね補強面の基部から補強面背面側1D区間の範囲でかぶりが剥落しており、同様の傾向を示した。しかし、コアコンクリートの損傷範囲を比較すると、試験体 No.1が1D区間全体でひび割れが生じているのに対し、補強材をU字型に配置した試験体 No.2, 3については、柱基部から1～2段目の補強材の間で損傷しているものの、2段目より上部はひび割れが見られず、健全な状態を保持していた。耐力低下の要因としては、補強材1～2段目間の損傷範囲がヒンジとなったためであると考えられる。

3.3 補強材のひずみ履歴

図-10は、各試験体の柱基部から1段目の補強鉄筋または補強ワイヤーロープの各サイクルにおけるピーク荷重時のひずみ履歴を示したものである。また、図-11は、同様に柱基部から2段目の補強材のひずみ履歴を示したものである。ここで、試験体 No.1の補強材1段目は柱基部より70mmの高さ、補強材2段目は220mmの高さ、試験体 No.2, 3の補強材1段目は85mmの高さ、補強材2段目は185mmの高さに配置されている。

1段目の補強材は、図-10に示すように、試験体 No.1, 2では7 δ_y 付近、試験体 No.3では12 δ_y 付近において引張ひずみの低下が見られ、特に正側で急激に低下している。このひずみの低下は、試験体 No.1, 2では概ね終局

付近で見られたが、試験体 No.3 の負側のみ、終局が $7.5 \delta_y$ であるのに対し、ひずみの低下が顕著になるのは $12 \delta_y \sim 14 \delta_y$ と乖離が見られた。 $7 \delta_y \sim 9 \delta_y$ においてもやや低下しているが、以降は微増しており、他試験体と挙動が異なっている。

各試験体の正負のひずみを比較すると、図-10 に示すように、各試験体ともに $1 \delta_y \sim 5 \delta_y$ 程度までは負側のひずみが大きくなっているが、以降は正側のひずみの方が大きくなっている。試験体 No.2, 3 では、負側のひずみが $6 \delta_y$ 付近をピークとする挙動を示しているのに対し、正側のひずみは終局付近までなだらかに上昇しており、正負のひずみで異なる挙動を示している。負側のひずみは、コアコンクリートの損傷が大きくなることにより低下すると考えられるが、正側は、コアコンクリートのひび割れの進展により、コアコンクリートのひび割れ部と柱全体が異なる挙動をすることで、ひずみが増加した可能性があると考えられる。

2 段目の補強材のひずみは、図-11 に示すように、試験体 No.1 が 1 段目の補強材のひずみと同様の挙動を示しているのに対し、試験体 No.2, 3 は大きく異なる挙動を示している。試験体 No.2, 3 の正側のひずみはほぼ同様に推移しているが、負側のひずみは全体的に試験体 No.2 のひずみが大きくなっている。

試験体 No.2, 3 は試験体 No.1 と比較して、全体的にひずみが大きい。ただし、図-3 に示すように、No.1 のひずみ計測位置が補強鉄筋の先端付近であるため、より内部で計測した場合は、No.1 のひずみの値が大きくなった可能性がある。試験体 No.2, 3 は、補強材を閉合させることでコアコンクリートを拘束する形となり、交番荷重によるコアコンクリートの変形に補強材が追従していると考えられる。このことより、補強材を閉合させた場合は従来補強と比較して、コアコンクリートが健全に残る範囲を大きくすることができると考える。

4. まとめ

本稿では、曲げ破壊先行型の鉄道 RC ラーメン高架橋の柱を一面から補強した部材を対象とし、補強材の材種および配置方法をパラメータとした試験体を用いて正負交番荷重試験を行った。本試験結果から得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 補強面背面および側面のかぶりコンクリートの剥落は、各試験体ともに 1D 区間において発生したが、補強材を閉合させる形で配置した場合、コアコン

クリートの損傷範囲は概ね補強材の柱基部から 1, 2 段目間（今回試験体では柱基部より 85mm～185mm の範囲）となり、柱上面まで達するような損傷は生じなかった。これは、補強材の配置を柱基部に集中させたことで、柱基部において塑性ヒンジが明確に形成され、損傷範囲を限定できたためであると考えられる。

- (2) 補強材にワイヤーロープを用いた場合、正側荷重においてじん性率が 10 以上となった。負側荷重についても終局以降の荷重低下が緩やかである。ワイヤーロープは異形鉄筋と比べて柔軟性が高く、付着切れによるコンクリートの損傷が起りにくいことから、変形性能を向上できる可能性があると考えられる。
- (3) 補強材のひずみを比較すると、従来補強と比べて、補強材を閉合させた試験体の引張ひずみが大きくなった。このことから、閉合した補強材はコアコンクリートを拘束する効果があると考えられる。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道（株）：維持管理マニュアルⅡ 補修・補強編 耐震補強設計施工マニュアル 鉄筋コンクリート構造物編，2007.12
- 2) 小林薫，石橋忠良：RC 柱の一面から施工する耐震補強工法の後挿入鉄筋の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.683，V-52，pp.91-102，2001.8
- 3) 小林薫，石橋忠良：RC 柱の一面から施工する耐震補強工法の鋼板の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.683，V-52，pp.75-89，2001.8
- 4) 細川良美，菅野貴浩，小林寿子：ワイヤーロープを使用した柱一面からの柱一面からの補強における変形性能に関する実験的検討，コンクリート工学会年次論文集，Vol42，No.2，2020
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372，V-5，pp167-176，1986.8
- 6) 石橋忠良，松田好史，斉藤啓一：少数本のくいを用いたフーチングのせん断設計について，土木学会論文集，No.337，V-5，pp197-204，1983.9
- 7) 東京製綱株式会社「柔-やわら-（玉掛用高強度ケーブルレイドロープ）」カタログ参照：
https://www.tokyoropeco.jp/product/catalog/pdf/product_catalog_yawara.pdf（閲覧日：2024 年 12 月 20 日）