

論文 高弾性型炭素繊維シートによる RC 橋脚段落し部の耐震補強に関する実験的研究

櫻井 俊太*1・武田 健太*2・秀熊 佑哉*3・宮下 剛*4

要旨：RC 橋脚の耐震補強において、段落し部の降伏荷重を向上させるためには、弾性係数が高い高弾性型の炭素繊維シートを使用することで、積層数を減らすことができ、現場での施工性の向上や経済性の向上が期待できる。本研究では、RC 橋脚の段落し部補強において、高弾性型の炭素繊維シートの適用性を確認するため、炭素繊維種類と補強量をパラメータとして、軸力を加えた RC 橋脚供試体の正負交番載荷試験を実施した。その結果、段落し部の補強に高弾性型の炭素繊維を用いることで、段落し部において、炭素繊維のはく離、破断が生じることなく、鉄筋の降伏を抑制し、破壊を柱基部の曲げ破壊に移行できることが確認された。

キーワード：高弾性型炭素繊維シート, RC 橋脚, 段落し部, 耐震補強, 正負交番載荷試験

1. はじめに

近年、わが国では、首都直下型地震等の大規模地震発生リスクが高まっている。このような状況下で、既設橋梁の耐震補強対策は極めて重要な課題であり、現在、鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC 橋脚という）の耐震補強が進められている。

昭和 55 年の道路橋示方書改定前に設計された RC 橋脚には、経済性の観点から主鉄筋の段落し部が設けられており、現行の道路橋示方書で照査すると段落し部の耐力が不足する場合がある。段落し部からの破壊はせん断破壊へと移行し、急激な耐力の低下を引き起こすことが兵庫県南部地震の教訓などから明らかになった²⁾。そのため、大規模地震による大変形に対して、RC 橋脚のじん性を向上させ、ねばり強い構造とするためには、段落し部の補強とともに、RC 橋脚の損傷モードを柱基部の曲げ破壊先行型とする必要がある²⁾。

段落し部の補強工法として、鉄筋に比べ強度が高く、軽量で耐久性のある炭素繊維を用いた工法がある。本工法では、炭素繊維シートを樹脂を用いてコンクリート表面に接着して、既設部材を補強する。炭素繊維シートの種類として、物性の違いから高強度型や高弾性型があるが、本工法の設計要領が記載されている「設計要領第二集 橋梁保全編」³⁾では、高強度型を使用することが標準とされている。しかし、段落し部の補強では、基部曲げ破壊先行型とするために、段落し部が降伏するときの水平荷重を、基部が降伏するときの水平荷重よりも大きくする必要がある。段落し部の降伏荷重を向上させるためには、高強度型より弾性係数が高い高弾性型の炭素繊維シートを使用することで 1 層あたりの補強効果が大きく

なる。これにより、炭素繊維シートの積層数を減らすことができ、現場での施工性の向上や経済性の向上が期待できる。

そこで本研究では、RC 橋脚の段落し部補強において、

表－1 使用材料特性値

(a) 鉄筋

材料	項目	単位	D16	D13	D10
SD295	降伏強度	N/mm ²	352	368	365
	引張強度	N/mm ²	408	502	505
	弾性係数	N/mm ²	200,000		

(b) 炭素繊維シート

材料	項目	単位	値
高強度型炭素繊維シート	設計厚	mm	0.111 (繊維目付 200g/m ²)
	弾性係数	N/mm ²	268,000
	引張強度	N/mm ²	4,630
高弾性型炭素繊維シート	設計厚	mm	0.143 (繊維目付 300g/m ²) 0.286 (繊維目付 600g/m ²)
	弾性係数	N/mm ²	726,000
	引張強度	N/mm ²	3,060

(c) 樹脂材料

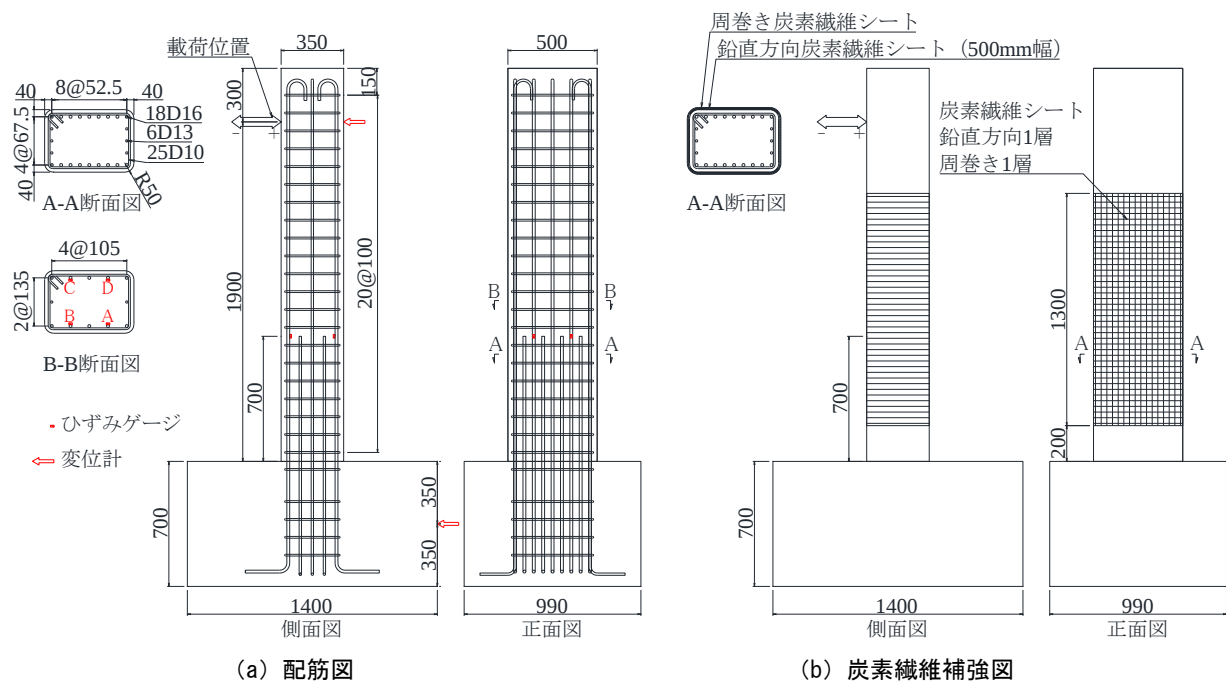
材料	項目	単位	値
不陸修正用エポキシ樹脂	圧縮弾性係数	N/mm ²	6,380
	圧縮強度	N/mm ²	92
含侵接着用エポキシ樹脂	引張強度	N/mm ²	48
接着用エポキシ樹脂	圧縮弾性係数	N/mm ²	6,130
	引張強度	N/mm ²	46

*1 日鉄ケミカル&マテリアル（株） コンポジット事業部 工修（正会員）

*2 名古屋工業大学 工学部社会工学類環境都市分野 助教 工博（正会員）

*3 日鉄ケミカル&マテリアル（株） コンポジット事業部 工博（正会員）

*4 名古屋工業大学 工学部社会工学類環境都市分野 特任教授 工博



図－1 供試体概要図（単位：mm）

表－2 供試体パラメーター一覧

供試体名	鉛直方向補強			周巻き補強			降伏荷重計算値（kN）		柱基部降伏時 水平変位解析値 δ_y （mm）	コンクリート 圧縮強度 （N/mm ² ）
	炭素繊維	繊維目付 （g/m ² ）	層数	炭素繊維	繊維目付 （g/m ² ）	層数	柱基部	段落し部		
N	無補強							97	26.0	22.0
HT200	高強度型	200	1	高強度型	200	1	106 （ $\times 1.2 = 128$ ）	106	17.5	22.4
HM600	高弾性型	600	1					156	13.4	22.1
HM300		300	1					126	14.5	23.0

高弾性型の炭素繊維シートの適用性を確認するため、炭素繊維種類と補強量をパラメータとして、軸力を加えた RC 橋脚供試体の正負交番載荷試験を実施した。

2. 使用材料

試験に使用した材料の特性値を表－1 に示す。表中の各値は材料試験から得られた試験値である。鉄筋は昭和 55 年以前に設計された段落し部がある RC 橋脚を想定し、SD295 を用いた。

炭素繊維シートは高強度型と高弾性型の 2 種類を用いた。高弾性型は高強度型より引張強度は低いが、弾性係数が大きい材料である。また、高弾性型の炭素繊維シートには、炭素繊維をあらかじめすだれ状の FRP に成形した炭素繊維ストランドシートを用いた⁴⁾。炭素繊維ストランドシートは通常の炭素繊維シートより 1 層あたりの繊維目付を多くすることが可能であるため、炭素繊維シートの積層数を減らすことができる。そのため、現場での施工性の向上や経済性の向上が期待できる。

炭素繊維シートの施工に必要な、不陸修正用、含侵接着用、接着用の樹脂はすべてエポキシ樹脂を用いた。通常の炭素繊維シートの接着には含侵接着用、ストランドシートには接着用エポキシ樹脂を用いた。

コンクリートは普通コンクリートを使用し、呼び強度 21N/mm² として供試体を製作した。

3. RC 橋脚の正負交番試験概要

3.1 供試体概要

供試体概要図を図－1 に示す。供試体の大きさは無補強状態で水平荷重を載荷したときに段落し部の破壊が先行するような形状、寸法とした。柱部の高さは 2,200mm であり、フーチング天端から 1,900mm 高さの位置に載荷点、基部から 700mm 高さの位置に段落し部を設けた。主筋には D16 と D13 を用いた。柱部のせん断補強筋には D10 を用い、柱部のせん断破壊が先行しないように配置した。フーチングコンクリートについても同様に、フーチングの破壊が先行しないように鉄筋を配置した。柱部

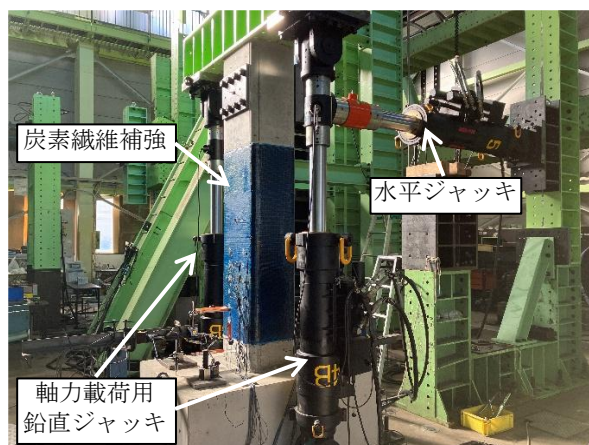


写真-1 試験状況

の断面は幅 500mm、高さ 350mm の長方形断面とし、角部は R50 の面取りを行った。

鉛直方向炭素繊維シートは基部から 200mm の位置から 1,300mm の長さとし、載荷面に対して正面と背面の 2 面に 500mm 幅で接着した。また、同範囲の全周を高強度型炭素繊維シートで周巻き補強した。

供試体パラメーター一覧を表-2 に示す。無補強供試体を 1 体、補強供試体を 3 体の計 4 体の試験を行った。補強供試体は鉛直方向補強の炭素繊維シートの種類（高強度型、高弾性型）、補強量をパラメータとし、補強したすべての供試体に高強度型の炭素繊維シートで周巻き補強した。

平面保持を仮定した RC 断面計算によって得られた各供試体の柱基部、段落し部それぞれの降伏荷重と、著者らによる既往の研究⁹⁾で実施した FEM 解析から得られた、柱基部降伏時の水平変位 δy を示す。コンクリートの圧縮強度は各供試体の試験日に行ったコンクリート円柱供試体の圧縮試験の結果である。

3.2 炭素繊維補強量の算定方法

炭素繊維シートの補強量は、HT200 供試体は既存の設計要領³⁾に示される算出方法で炭素繊維シートの必要厚さを算出した。高弾性型補強の供試体は段落し部降伏時の水平荷重が柱基部降伏時の水平荷重の 1.2 倍とすること⁹⁾を基準とし、HM600 供試体は 1.2 倍以上となるように、HM300 供試体は 1.2 倍以下でおよそ 1.2 倍となるような補強量とした。その結果、HM600 供試体では段落し部降伏時の水平荷重が柱基部降伏時の水平荷重の約 1.47 倍、HM300 供試体では約 1.19 倍となった。

補強時の降伏曲げモーメントは、文献⁷⁾を参考に、コンクリートの中立軸以下の引張応力を無視した RC 断面計算により算出した。鉄筋および炭素繊維シートは線形材料とし、平面保持の仮定のもと応力を負担するものとした。軸圧縮力を考慮して、鉄筋の応力度が降伏強度に達するときの曲げモーメントを降伏曲げモーメントとし

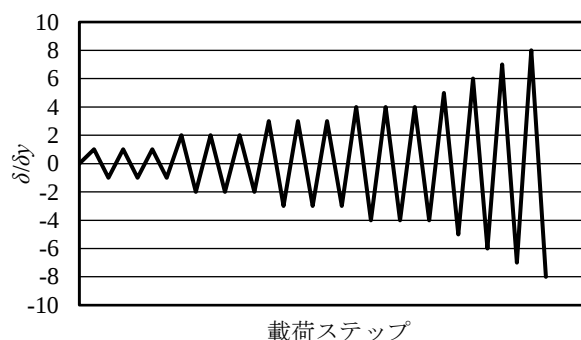


図-2 載荷サイクル

た。このとき、炭素繊維シートの応力度が引張強度に達していないことを確認した。各材料の弾性係数比はコンクリートの圧縮強度 21N/mm^2 から弾性係数を算出して $23,500\text{N/mm}^2$ とし⁸⁾、表-1 に示す各材料の弾性係数から除して求めた。降伏時の水平荷重は、降伏曲げモーメントを検討断面位置から水平荷重位置までの距離で除して求めた。

3.3 供試体補強手順

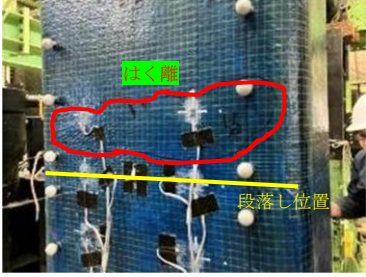
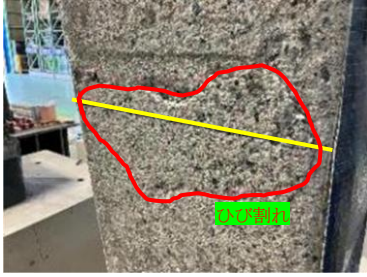
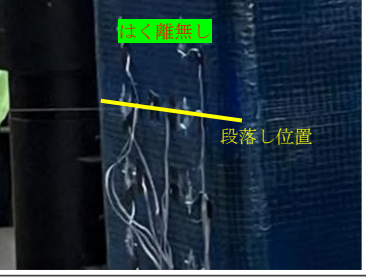
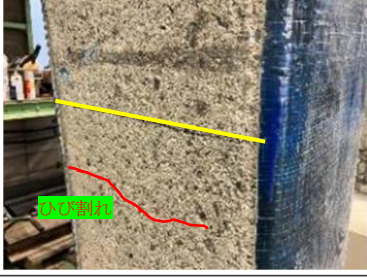
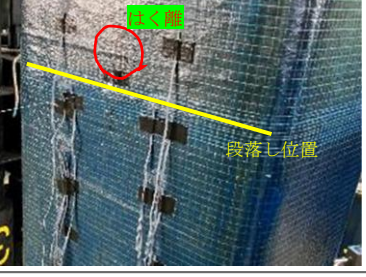
炭素繊維シート接着工法の施工手順として、はじめにディスクサンダーを用いて接着範囲のケレンを行った。次に、通常の炭素繊維シートが直接接着されるコンクリート面にエポキシプライマーを塗布し、プライマーの指触乾燥後に不陸修正用エポキシ樹脂で不陸修正を行った。その後、通常の炭素繊維シートは含浸接着用エポキシ樹脂、炭素繊維ストランドシートは接着用エポキシ樹脂を用いて鉛直方向シートを接着した。最後に周巻き方向シートを含浸接着用エポキシ樹脂を用いて接着した。

3.4 載荷方法

試験状況を写真-1 に示す。供試体のフーチングを、PC 鋼棒を用いて反力床に固定し、柱部末端には軸力載荷用の載荷桁を設置した。載荷は、既往の研究⁹⁾を参考に、上部工の死荷重に相当する軸力（柱部の平均圧縮応力 0.6N/mm^2 ）を載荷桁を介して鉛直ジャッキで与え、荷重を一定に保持しながら、水平変位を静的に正負交番繰り返し漸増させて行った。

載荷サイクルを図-2 に示す。表-2 に示す各供試体の柱基部降伏時水平変位解析値 δy を基準とし、変位制御で、 $1 \sim 4\delta y$ で各 3 回、 $4 \sim 8\delta y$ で各 1 回、それぞれ繰り返した。供試体の破壊による著しい荷重の低下、もしくは $-8\delta y$ まで載荷を行い、試験を終了した。試験時は水平荷重載荷位置に設置した変位計とフーチングに設置した変位計の差を制御変位として試験を行った。荷重は水平ジャッキが供試体を押す方向を正とした。また、各サイクルの 1 回目の載荷の後に、ひび割れスケッチおよび打音検査による炭素繊維シートのはく離の調査を行った。

表-3 破壊状況写真

case	段落し部		柱基部
	試験後	シート撤去後	
N		—	
HT200			
HM600			
HM300			

4. 試験結果および考察

4.1 破壊状況

試験後の供試体の試験状況を表-3に示す。また、補強した供試体は試験後に炭素繊維を撤去して、炭素繊維シート背面の損傷状態を確認した。ハンマドリル等を用いて炭素繊維シートを撤去したが、その際コンクリートの表層も一緒にはく離したため、ひび割れ幅の大きいひび割れのみしか目視で観察できなかった。

無補強のN供試体は段落し部に損傷が集中し、鉄筋の座屈により、コンクリートの破壊が生じた。一方、曲げ変形が段落し部に集中したため、柱基部のコンクリートの破壊は生じなかった。

HT200供試体は、無補強と比較し、段落し部の補強がされているため、段落し部の破壊が先行せずに、柱基部の鉄筋の座屈により、コンクリートが破壊したため、柱

基部に損傷が移行された。しかし、 $4\sim 5\delta_y$ の载荷時に段落し部付近で炭素繊維シートのはく離が確認された。また、シート撤去後、段落し部のかぶりコンクリートがブロック状にはく離しているようなひび割れが確認された。そのため、このはく離は段落し部の鉄筋が降伏し、交番载荷による圧縮力を受けたときに鉄筋の座屈によるはらみ出しが生じたことにより、接着面に対して法線方向の力が生じたためであると考えられる。

HM600、HM300供試体はHT200供試体と同様に、柱基部に損傷を移行できていた。HM600供試体は段落し部の炭素繊維ストランドシートのはく離、破断は生じておらず、シート撤去後の観察でも段落し部はかぶりコンクリートのブロック化はなく健全な状態であった。HM300供試体では水平変位が $7\delta_y$ の時に段落し部に小さい範囲で炭素繊維のはく離が生じたものの、シート撤去後の観

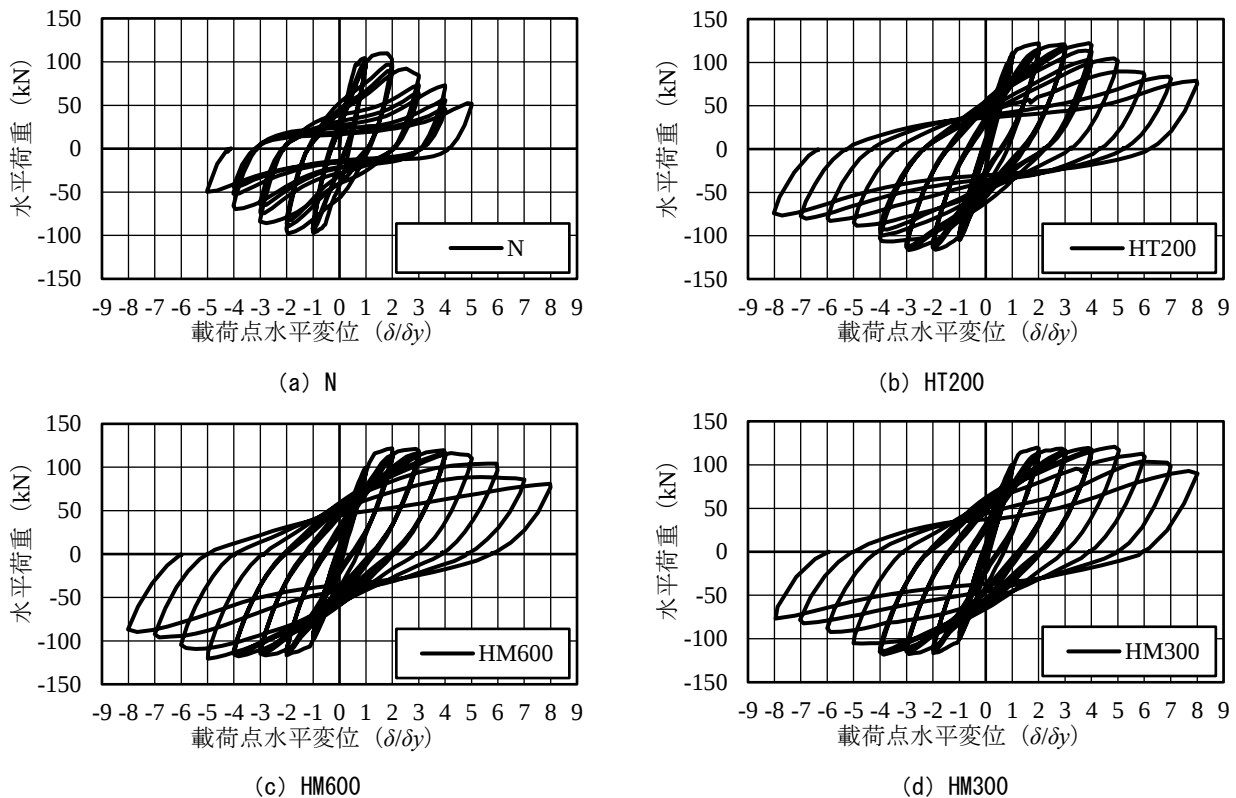


図-3 水平荷重 - 載荷点水平変位（無次元）関係

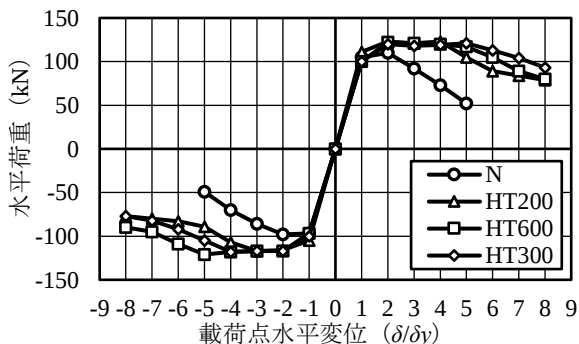


図-4 水平荷重 - 変位ピーク時包絡線

察では HM600 供試体と同様に健全な状態であった。したがって、炭素繊維で段落し部を補強することにより、炭素繊維種類によらず破壊を段落し部から柱基部に移行することができるが、高弾性型の炭素繊維ストランドシートを用いて、段落し部の降伏荷重が基部の降伏荷重の1.2倍程度以上となるように補強することで、段落し部の損傷を抑制できることが確認された。

4.2 水平荷重－載荷点水平変位関係

各供試体の水平荷重－載荷点水平変位関係を図-3に示す。載荷点水平変位は各供試体の柱基部降伏時の水平変位 δ_y で無次元化して示す。また、各供試体の荷重－変位ピーク時包絡線を図-4に示す。

各供試体載荷を繰り返すことで、コンクリートの損傷が進み、荷重が減少していく挙動であった。無補強である N 供試体の最大荷重は 110kN であり、段落し部の降

伏、損傷が生じたことで、 $3\delta_y$ から荷重が減少し始めた。その後、 $5\delta_y$ で荷重が最大荷重の半分以下となったため試験を終了した。

補強した供試体はすべて柱基部の降伏が生じたため、最大荷重はすべて同程度であり、HT200, HM600, HM300 供試体それぞれ 122kN, 122kN, 121kN であった。HT200 供試体は、正方向は $5\delta_y$ から、負方向は $-4\delta_y$ から荷重が減少しはじめた。これは、4～ $5\delta_y$ の時に段落し部の炭素繊維のはく離が生じたことに起因すると考えられる。HM600, HM300 供試体は、6～ $7\delta_y$ から荷重が減少しはじめ、HT200 供試体と比較して、大きい変形まで荷重の減少が生じなかったため、じん性能が向上することが確認された。これは高弾性型の炭素繊維ストランドシートで補強した場合は、段落し部の損傷が生じることなく、基部へ破壊を移行できたためであると考えられる。

4.3 段落し部鉄筋ひずみ

補強した各供試体の段落し部鉄筋ひずみ－載荷点水平変位関係を図-5に示す。ひずみゲージの設置位置は図-1に示すように、フーチング天端から 700mm 高さの段落し部の鉄筋に計4点である。図中の AB_ave., CD_ave. はそれぞれ段落し部断面の最下段、最上段の鉄筋に設置した2点のひずみの平均を示した。

図より HT200 供試体は $-1 \sim -2\delta_y$ にかけて鉄筋が降伏し、D16 の降伏ひずみ ($1,760 \times 10^{-6}$) を超えて大きくひずみが増加した、その後はひずみが約 $11,000 \times 10^{-6}$ ～

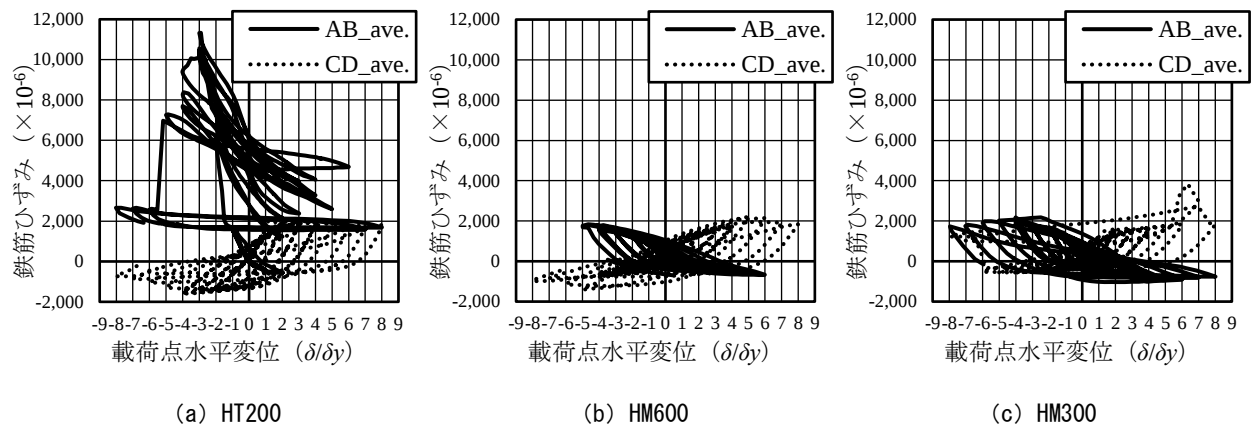


図-5 段落し部鉄筋ひずみー載荷点水平変位関係

3,000×10⁻⁶の範囲で交番する挙動を示した。HM600 供試体は、最大発生ひずみは約 2,000×10⁻⁶であり、鉄筋の降伏ひずみを超えるものの、HT200 供試体のようにひずみが大きく増加しなかった。HM300 供試体も HM600 供試体と概ね同様の挙動であったが、6～7δy 時に約 4,000×10⁻⁶までひずみが増加する挙動であった。これは 7δy 時に段落し部の炭素繊維シートの部分的なはく離が生じたためであると考えられる。

以上より、段落し部の補強に高弾性型の炭素繊維を用いることで、段落し部において、炭素繊維のはく離、破断が生じることなく、鉄筋の降伏を抑制し、破壊を柱基部の曲げ破壊に移行できることが確認された。

5. まとめ

本研究は、RC 橋脚の段落し部の補強に対する、高弾性型の炭素繊維シートの適用性を検証することを目的として、段落し部を有する RC 橋脚の正負交番載荷試験を行った。本試験によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 炭素繊維で段落し部を補強することにより、炭素繊維種類（高強度型、高弾性型）によらず、橋脚の破壊を段落し部から柱基部の曲げ破壊へ移行することができた。
- (2) 高弾性型の炭素繊維ストランドシートを用いて、段落し部の降伏荷重が基部の降伏荷重の 1.2 倍程度以上となるように補強することで、段落し部の鉄筋の降伏、コンクリートの損傷を抑制できることが確認された。
- (3) また、段落し部において、炭素繊維のはく離、破断が生じていなかった。そのため、高強度型で補強した場合と比較し、RC 橋脚のじん性能が向上することが確認された。

今後は高弾性型の炭素繊維シートの実用化に向け、さらなるデータの収集および設計手法の確立が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の実験は、愛知工業大学耐震実験センターのご協力のもと実施されたものである。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）、本州四国連絡高速道路（株）：高速道路の耐震補強 実施計画，2024.1
- 2) （財）海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，2005.4
- 3) 東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）：設計要領第二集 橋梁保全編，2023.10
- 4) 澤松俊寿，三田村浩，秀熊佑哉，塩畑英俊：炭素繊維ストランドシートによる基部曲げ補強を施した RC 橋脚の交番載荷実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 67 号，A-33，2010.
- 5) 武田健太，櫻井俊太，秀熊佑哉，宮下剛：高弾性型炭素繊維シートによる RC 段落し部の耐震補強に関する解析的研究，第 44 回地震工学研究発表会，2024.9
- 6) 長田光司，矢嶋尚彦，寺田光太郎，池田尚治：鉄筋コンクリート高橋脚の炭素繊維シートによる耐震補強，コンクリート工学論文集，第 11 巻第 3 号，2000.9
- 7) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018.7
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕，2023.3
- 9) 緒方紀夫，安藤博文，松田哲夫，小畠克朗，大野了：炭素繊維による段落し部を有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究，土木学会論文集，No.540/VI-31，85-104，1996.6