論文　載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート緊張接着補強効果に及ぼすひび割れ補修の影響

青坂　真也[*1]・岸　徳光[*2]・三上　浩[*3]・栗橋　祐介[*4]

要旨：本研究では，載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート緊張接着補強効果に及ぼすひび割れ補修の影響を検討することを目的に，載荷履歴，ひび割れ補修の有無を変化させた AFRP シート緊張接着 RC 梁の曲げ載荷実験を行った。また，無緊張の AFRP シートを用いる場合についても併せて検討を行った。その結果，1) AFRP シート緊張接着により載荷履歴を有する RC 梁の曲げ耐力を飛躍的に向上可能であること，2) 事前載荷時に発生したひび割れを補修することにより，既存のひび割れの開口およびそれに伴うシートの局所的な大ひずみの発生が抑制されてシート破断が防止されること，などが明らかになった。

キーワード：載荷履歴，ひび割れ補修，AFRP シート，緊張接着

1. はじめに

近年，既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維 (FRP) シートを接着する方法が数多く採用されている。しかしながら，FRP シートを RC 部材の引張力作用面に接着して曲げ補強を行う場合，シートの補強効果は主として主鉄筋降伏後に発揮される。最近では，FRP シートの補強効果をより効率的に発揮させる方法として，シートに緊張力を導入して接着 (以後，緊張接着) する工法が提案されている [1)]。著者らは，これまで緊張接着用シート端部にアンカー等の定着治具を用いずに施工可能なアラミド繊維製 FRP (AFRP) シート緊張接着工法を開発し，その補強効果を確認している [2)]。

一方，既設 RC 構造物には，ひび割れや残留変位を生じている場合も多いことから，既設構造物の損傷を模擬した検討も重要であるものと判断される。特に，緊張接着工法の場合には，曲げ剛性および曲げ耐力の向上のみならずひび割れ幅の低減およびひび割れ抵抗性の向上効果も期待できることから，既設構造物の耐久性向上にも寄与する工法であると考えられる。

著者らはこれまで，載荷履歴を有する RC 梁の緊張接着工法による曲げ耐力向上効果について実験的な検討を行ってきた [3)]。その結果，提案の緊張接着工法により載荷履歴を有する RC 梁の曲げ剛性を大きく改善可能であること等を明らかにしている。しかしながら，載荷履歴によるひび割れを補修しない場合には，ひび割れ近傍の緊張接着用シートに大ひずみが発生し，計算終局耐力に到達する前にシート破断するケースが確認された。このような早期に発生するシート破断は，緊張接着を施す前にひび割れ部を確実に補修することにより防止できるものと考えられる。

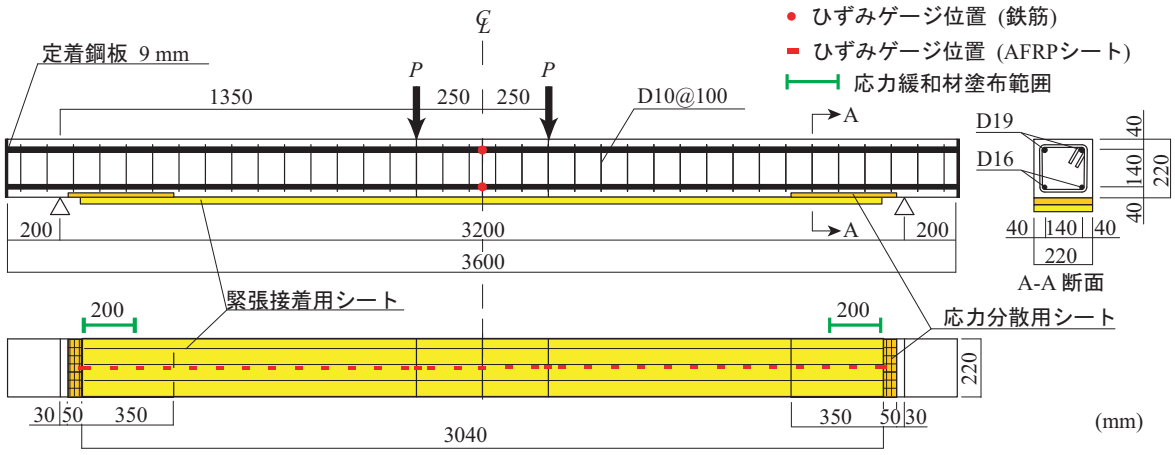
このような背景より，本研究では載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート緊張接着補強効果に及ぼすひび割れ補修の影響を検討することを目的に，載荷履歴，ひび割れ補修の有無を変化させた AFRP シート緊張接着 RC 梁の

表－1　試験体一覧

試験体名	載荷履歴の有無	ひび割れ補修の有無	目標導入緊張率 * (%)	実測導入緊張率 * (%)	実測初期導入ひずみ (μ)
無補強	-	-	-	-	-
N-N	無	-	無緊張		
D-N	有	無			
DR-N		有			
N-P	無	-	40% (104)	40.1% (104)	7,008
D-P	有	無		30.5% (78.9)	5,337
DR-P		有		34.8% (89.9)	6,081

* ( ) 内は導入緊張力 (kN)

*1　ホクレン農業協同組合連合会　工修　(正会員)
*2　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　社会基盤ユニット　教授　工博　(正会員)
*3　三井住友建設 (株) 技術開発研究本部　技術開発センター　主席研究員　博 (工)　(正会員)
*4　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　社会基盤ユニット　講師　博 (工)　(正会員)



図－1　試験体の形状寸法，配筋状況および補強概要

表－2　AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m^2)	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830*	1,176	0.572	2.06	118	1.75
435/435**	588/588	0.286			

*: 緊張接着用シート　　**: 応力分散用シート

曲げ載荷実験を行った。また，無緊張の AFRP シートを用いる場合についても併せて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表－1 には，本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は，無補強試験体の他，載荷履歴の有無およびひび割れ補修の有無を変化させた RC 梁に対し，AFRP シートを無緊張および緊張接着した全 7 体である。AFRP シートには保証耐力が 1,176 kN/m のものを用いた。なお，本論文では緊張力導入の有無によらず各補強試験体に用いた AFRP シートを緊張接着用シートと呼ぶこととする。

表中の試験体名において，補強試験体の第 1 項目は載荷履歴の有無およびひび割れ補修の有無を示しており，N は載荷履歴なし， D は載荷履歴有り，DR は載荷履歴有りでひび割れ補修したことを示している。第 2 項目は AFRP シートの緊張力導入の有無を示しており， N は無緊張，P は緊張力を導入したことを示している。なお，本研究では載荷履歴を与えるための事前載荷として，計算主鉄筋降伏変位と計算終局変位の中間時点まで載荷する場合を設定することとした。これは， RC 梁に主鉄筋降伏以上でかつ上縁コンクリート圧壊以下の比較的大きな損傷を与えるためである。

また， **表－1** には，目標導入緊張率の他，ロードセルから得られた緊張力を基にした各試験体の実測導入緊張率およびシートの実測初期導入ひずみを併せて示している。なお，表中の導入緊張率はシートの保証引張耐力に対する導入緊張力の割合である。 **表－2** には AFRP シートの力学的特性値を示している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 30.2 MPa，主鉄筋の降伏強度は 383 MPa であった。

2.2 補強概要

図－1 には，本実験に用いた試験体の形状寸法，配筋状況および補強概要を示している。試験体は，断面寸法が 22 × 22 cm，純スパン長 3.2 m の矩形 RC 梁である。上端鉄筋には D19 を 2 本，下端鉄筋には D16 を 2 本配置した。緊張接着用シートには幅 220 mm の AFRP シートを用い，梁中央部から両支点の 80 mm 手前までの範囲に接着した。なお，緊張接着する場合には緊張接着用シートの定着を確保するため，同シートの両端部に応力分散用の 2 方向 AFRP シートおよび応力緩和材を使用している。

緊張接着用シートは，プレテンション方式によるプレストレストコンクリート (PC) 梁の製作と同様に，シート緊張用架台を設置し，油圧ジャッキによりシートに緊張力を導入した状態で RC 梁に接着している。接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間を経過した後，油圧ジャッキを解放し，RC 梁に緊張力を導入している。なお，導入緊張力はひずみゲージによる測定を行い，実験時まで十分確保されていることを確認している。また，載荷実験は緊張力導入後，1 週間程度以内に実施することとしている。その他，緊張接着工法の詳細については文献 [2] を参照されたい。

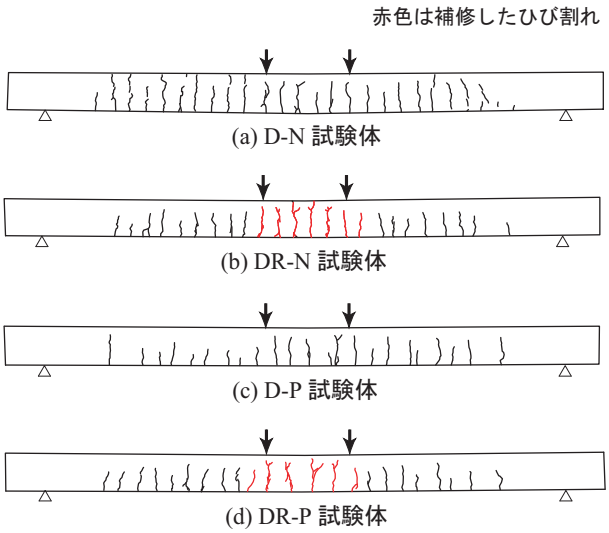
2.3 接着面の処理およびひび割れ補修

事前載荷した RC 梁は，後述のようにスパン中央部で 17 mm 程度の残留変位を生じているため，緊張接着時に接着面が水平になるようにパテを用いて調整している。従って，パテ材の厚さは梁中央部が最も薄く，端部ほど

表－3　事前載荷時における最大変位時，除荷後およびシート補強後の結果一覧

試験体名	最大変位時				除荷後			シート補強後
	荷重 (kN)	変位 (mm)	上縁コンクリートひずみ (μ)	主鉄筋ひずみ (μ)	変位 (mm)	上縁コンクリートひずみ (μ)	主鉄筋ひずみ (μ)	変位 (mm)
D-N	37.8	31.6	-2,014	5,066	17.1	-950	3,846	17.1
DR-N	35.8	31.4	-2,038	2,272	16.9	-995	383	16.9
D-P	37.6	31.6	-2,359	2,645	17.2	-1,274	1,737	5.2 (12.0)
DR-P	37.0	31.3	-1,725	3,113	16.5	-796	1,924	10.5 (6.0)

* ( ) 内の数値は緊張接着による変位の復元量



図－2　事前載荷終了後のひび割れ性状

厚くなっている。なお，シートの接着作業は， RC 梁を反転させた後，シート接着面のブラスト処理およびプライマー塗布を行った後に行っている。

ひび割れ補修は，プライマー塗布前に低圧のひび割れ注入工法により実施した。なお，ひび割れ補修は緊張接着用シートの破断に影響を及ぼす等曲げ区間およびその近傍に発生したひび割れ幅 0.2 mm 以上のひび割れ箇所を対象に行った。また，ひび割れ補修をしない箇所では，ひび割れ部にプライマーが多少流入している。

2.4 実験方法

本実験において，載荷履歴を与える場合には無補強の RC 梁を前述の事前載荷レベルまで載荷して損傷を与えている。事前載荷終了後，RC 梁に所定の方法でひび割れ補修やシート補強を施し，十分に養生した後，再度 RC 梁を実験装置に設置し終局に至るまで載荷している。なお，これらの載荷実験は容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて行った。

本実験の測定項目は，載荷荷重，スパン中央点変位 (以後，変位) および緊張接着用シート各点の軸方向ひずみである。また，実験時には RC 梁のひび割れやシートの剥離および破断状況を連続的に撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 事前載荷およびシート補強後の状況

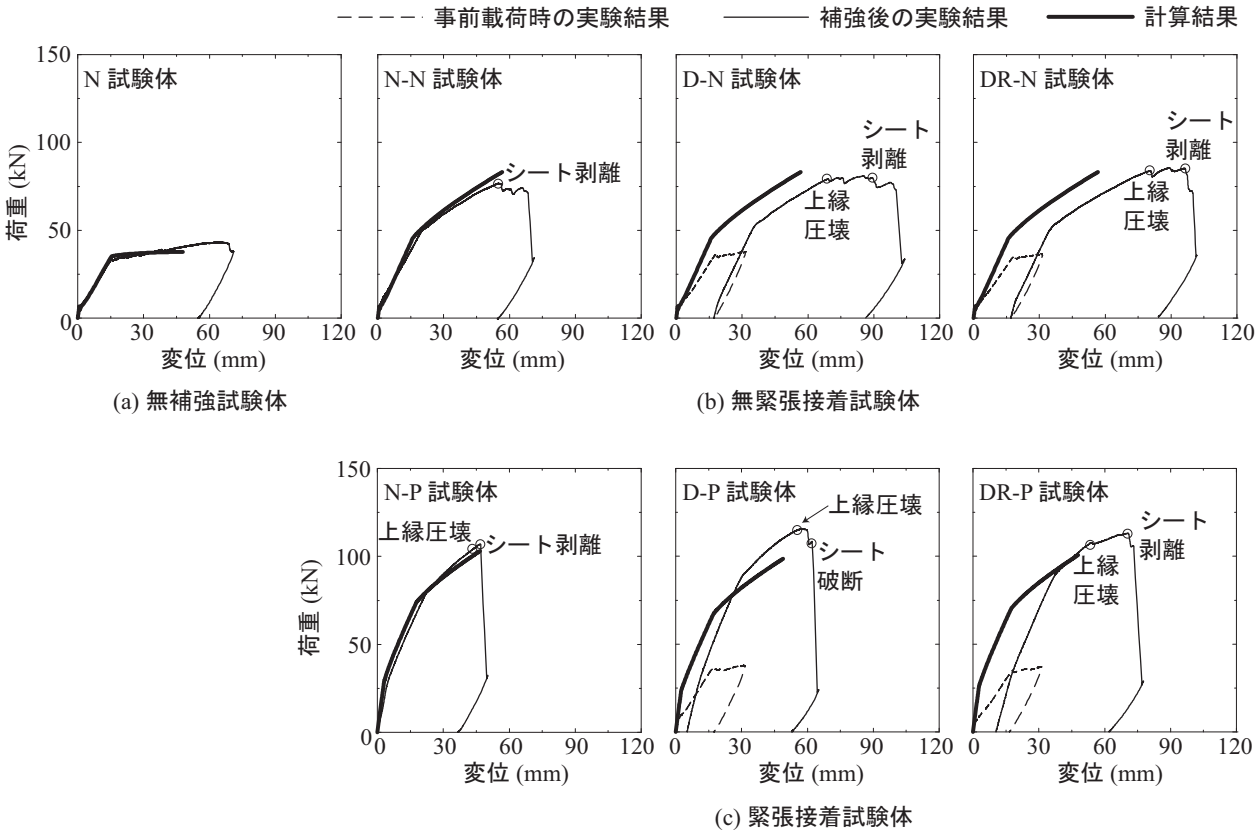
表－3 には，事前載荷時における最大変位時，除荷後およびシート補強後の実験結果を一覧にして示している。事前載荷は，前述の載荷方法に準拠し無補強時の RC 梁の変位が 31.5 mm 程度となるまで行った。表より，最大変位時において，上縁コンクリートには 2,000 μ 程度，主鉄筋には降伏ひずみ (1,859 μ) を超える大きなひずみが生じていることが分かる。また，除荷後の残留変位は 17 mm 程度となっており，上縁コンクリートには 1,000 μ 程度の圧縮ひずみが残留していることが分かる。

緊張接着試験体の場合には，シート補強後に変位が復元している。これは， RC 梁の下面に AFRP シートを介してプレストレス力が導入されたためである。ただし，その復元量は D/DR-P 試験体でそれぞれ 12.0 および 6.0 mm であり，ひび割れ補修した場合の方が小さい。これは，ひび割れ補修する場合には，ひび割れ注入材が充填されることによるものと推察される。

図－2 には，事前載荷終了後における各 RC 梁のひび割れ性状を示している。図より，いずれの試験体もほぼスパン全域に渡って曲げひび割れが発生していることが分かる。なお，等曲げ区間に発生した最大ひび割れ幅は 0.7 mm 程度であった。

3.2 荷重－変位関係

図－3 には，各試験体の荷重－変位関係に関する実験および計算結果を示している。事前載荷を行った試験体に関しては，事前載荷時の結果を示すとともに，事前載荷後の残留変位を考慮して補強後の実験結果を示している。計算結果は，コンクリート標準示方書 [3] に準拠して断面分割法により算出したものである。なお，計算には事前



図－3　各試験体の荷重－変位関係

表－4　計算結果および実験結果の一覧

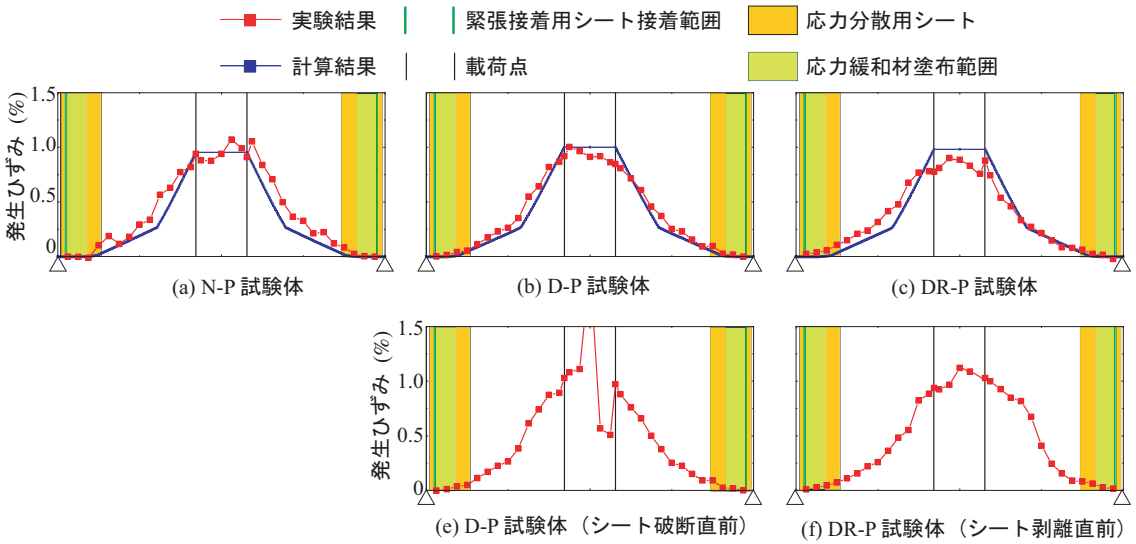
試験体名	曲げひび割れ発生時			主鉄筋降伏時			終局時			実験時の破壊性状
	計算結果	実験結果		計算結果	実験結果		計算結果	実験結果		
	荷重 P_{cc} (kN)	荷重 P_{ce} (kN)	荷重比 P_{ce}/P_{cc}	荷重 P_{yc} (kN)	荷重 P_{ye} (kN)	荷重比 P_{ye}/P_{yc}	荷重 P_{uc} (kN)	荷重 P_{ue} (kN)	荷重比 P_{ue}/P_{uc}	
無補強	6.63	5.98	0.90	34.8	32.8	0.94	37.7	43.2	1.15	上縁コンクリート圧壊
N-N	6.63	8.25	1.24	45.8	50.6	1.10	83.2	76.8	0.92	シート剥離
D-N	6.63	6.85	1.03	45.8	51.9	1.13	83.2	81.0	0.97	圧壊後，シート剥離
DR-N	6.63	6.85	1.03	45.8	51.1	1.12	83.2	85.5	1.03	圧壊後，シート剥離
N-P	30.1	25.6	0.85	74.0	81.1	1.10	103	107	1.04	圧壊後，シート剥離
D-P	24.8	32.9	1.33	71.9	85.5	1.19	109	116	1.06	圧壊後，シート破断
DR-P	26.9	32.3	1.20	73.2	86.9	1.19	107	113	1.06	圧壊後，シート剥離

計算結果の破壊性状は全て上縁コンクリート圧壊

載荷および前述のパテ材の影響は考慮していない。また，**表－4** には，参考のために曲げひび割れ発生時，降伏および終局時における実験および計算結果と破壊性状を一覧にして示している。

図－3 より，各試験体の実験結果を見ると，事前載荷の有無によらず，AFRP シート補強することにより，RC 梁の曲げ剛性，降伏および終局荷重などの曲げ耐荷性能が無補強の場合に比較して向上していることが分かる。また，無緊張および緊張接着試験体の実験結果を比較すると，緊張接着することにより，さらに曲げ耐荷性能が向上していることが分かる。

無緊張接着試験体の内，載荷履歴を有しない N-N 試験体の場合には，上縁コンクリート圧壊前にシートが剥離して終局に至っている。一方，載荷履歴を有する D/DR-N 試験体の場合には，N-N 試験体よりも降伏荷重および終局荷重が大きく，かつ上縁コンクリート圧壊後シート剥離



図－4　終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

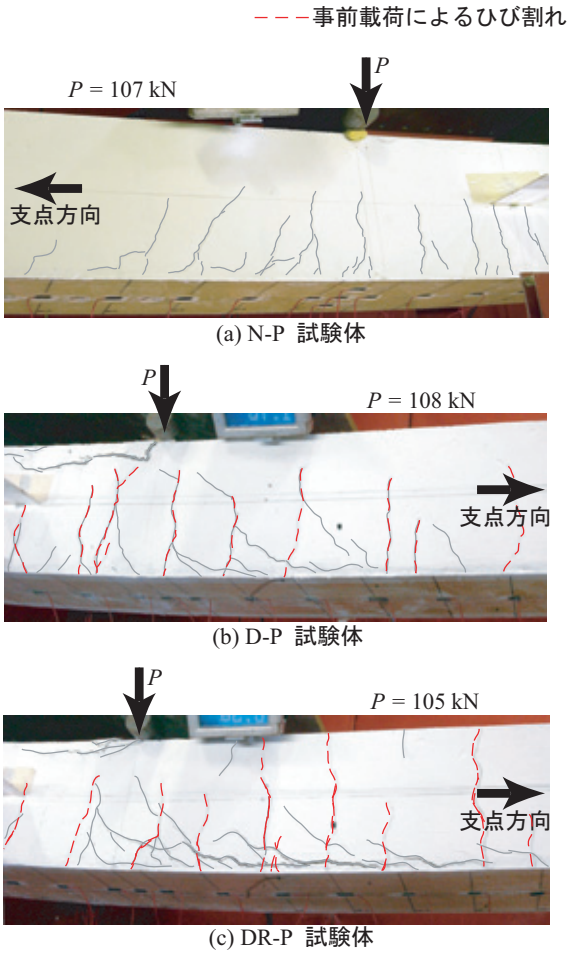
により終局に至っている。これは，事前載荷による主鉄筋の塑性硬化により主鉄筋降伏荷重が大きくなるものの，上縁コンクリートには圧縮ひずみが残留しているため，計算結果と同程度かもしくは若干下回る荷重レベルで上縁コンクリートが圧壊に至ったためと考えられる。また，D/DR-N 試験体の荷重－変位関係は，ほぼ同様の性状を示していることより，無緊張接着の場合には，ひび割れ補修の有無が曲げ耐荷性状に及ぼす影響は小さいと言える。

緊張接着試験体の実験結果より，載荷履歴およびひび割れ補修の有無によらず，いずれの試験体も主鉄筋降伏後剛性勾配が低下するものの，荷重は上縁コンクリート圧壊まで増加し，計算耐力を上回った後終局に至っていることが分かる。このことより，本実験で設定した事前載荷レベル程度の載荷履歴を有する場合においても，緊張接着することにより，載荷履歴を考慮していない計算耐力以上の耐荷性能を期待できることが明らかになった。

D/DR-P 試験体の荷重－変位関係を比較すると，曲げ耐荷性状はほぼ同様であるものの，D-P 試験体は上縁コンクリート圧壊後シートが破断しているのに対し，DR-P 試験体は上縁コンクリート圧壊後シートが剥離している。これは，後述のひずみ分布性状からも分かるように，ひび割れ補修することにより既存ひび割れの開口および局所的な大ひずみの発生が抑制され，シート破断が防止されたことによるものと考えられる。

3.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図－4 には，計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。ここでは，緊張接着試験体の結果について示している。計算結果は，緊張接着用シートとコンクリートの完全付着を仮定して算出した断面分割法の結果に基づいて求めている。また，縦軸は AFRP シートに緊張力が導入された状態からの増分ひずみを示している．なお，



写真－1　緊張接着試験体の終局時近傍のひび割れ性状

D/DR-P 試験体に関しては，終局時の実測ひずみ分布も併せて示している。

図より，いずれの緊張接着試験体も計算終局変位時における実験結果は計算結果と良く対応しており，緊張接着用シートの付着は計算終局変位時まで十分に確保され

ていることが分かる。また，D/DR-P 試験体の終局時における実測ひずみ分布から，D-P 試験体の等曲げ区間において 15,000 μ を超えるひずみが局所的に発生していることが分かる。ここで，D-P 試験体は緊張接着時における実測導入ひずみが 5,337 μ であることより，実験時においては等曲げ区間のシートがほぼ破断ひずみに至っているものと判断される。

一方，DR-P 試験体の等曲げ区間には 10,000 μ 程度のひずみが発生している。このことより，DR-P 試験体では，ひび割れ補修により緊張接着用シートの局所的に大きなひずみの発生が抑制され，シート剥離に至ったものと考えられる。

3.4 ひび割れ性状

写真－1 には，緊張接着試験体の終局時近傍におけるひび割れ性状を示している。写真より，いずれの試験体も等曲げ区間には曲げひび割れ，等せん断力区間では下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れ先端部がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によるシートの部分剥離の兆候が見られる。載荷履歴を有する D/DR-P 試験体は，N-P 試験体よりもひび割れの本数が多く，等曲げ区間の上縁コンクリートが圧壊していることが分かる。これは事前載荷によって RC 梁上縁に圧縮ひずみが大きく残留した影響によるものである。

また，D-P 試験体の場合には，事前載荷時に発生した既存のひび割れが開口する傾向を示し，終局時にはそのひび割れが大きく開口し，局所的に大きなひずみが発生してシートが破断した。これに対し，ひび割れ補修した DR-P 試験体の場合には，事前載荷時に発生したひび割れは開口せず，異なる箇所に新しいひび割れが発生していることが確認された。

以上のことより，緊張接着前における既存ひび割れの補修は，シートの早期破断抑制に有効である。従って，実施工においては，既存ひび割れが開口しないように補修することが重要であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では，載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート緊張接着による曲げ補強効果に及ぼすひび割れ補修の影響を検討するため，載荷履歴，ひび割れ補修の有無を変数に取って，無緊張および緊張接着 RC 梁の静載荷実験を行った。本研究により得られた知見をまとめると，以下の通りである。

1) AFRP シート緊張接着により，載荷履歴を有する RC 梁の曲げ耐荷性能を飛躍的に向上可能である。
2) 載荷履歴およびひび割れ補修の有無によらず，緊張接着用シートとコンクリートの付着は，計算終局変位時まで十分に確保されている。
3) 事前載荷時に発生したひび割れを補修することにより，既存のひび割れの開口およびそれに伴うシートの局所的な大ひずみの発生が抑制され，シート破断が防止される。従って，実施工においては，シート破断防止のため，緊張接着前に既存ひび割れが開口しないように補修することが重要である。

謝辞

本実験を行うにあたり，ショーボンド建設（株）には RC 梁のひび割れ注入作業においてご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 濱田　譲，井上真澄，小林　朗，高木宣章，児島孝之：緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究，土木学会論文集，No.711/V-56, pp.27-44, 2002.8
2) 栗橋祐介，岸　徳光，三上　浩，澤田純之：AFRP シートを緊張接着した PC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告書，vol.8，pp.257-264，2008.10
3) 三上　浩，岸　徳光，栗橋祐介，澤田純之：AFRP シート緊張接着により曲げ補強した載荷履歴を有する RC 梁の曲げ耐荷性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp. 1375-1380, 2009.6
4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2007.