

論文 AFRP シート緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究

澤田 純之^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・藤田 学^{*4}

要旨: 本研究では, RC 構造物の効率的な曲げ補強方法として, AFRP シートを緊張接着して曲げ補強する方法を提案し, その合理的な施工方法および曲げ補強設計手法を確立するための基礎資料収集を目的に, 緊張力を導入して接着した AFRP シート曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を実施した。本実験では, 実施工時にコンクリート表面の段差や不陸の調整にパテ材が使用されることから, パテ材での表面処理後に AFRP シートを緊張接着した RC 梁を用いて実験を行った。検討の結果, 表面処理後, RC 梁に AFRP シートを緊張接着した場合も RC 梁の曲げひび割れ発生荷重や曲げ耐力向上効果が期待できること, 等が明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP シート, パテ材, 曲げ補強, 緊張接着

1. はじめに

近年, 既設 RC 構造物の補修・補強工法として連続繊維 (FRP) シートを接着する工法が数多く採用されている。この工法を用いて 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, シートの曲げ補強効果は主として主鉄筋降伏後に発揮される¹⁾ことが明らかになっている。

最近では, FRP シートの曲げ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, 各種研究機関で実験・検討が行われている。既往の研究^{2),3)}より, FRP シートを緊張接着した RC 梁は, ひび割れ発生荷重, 降伏荷重および最大荷重が増大すること, 等が明らかになっている。

著者らも, RC/PC 構造物を対象にアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを緊張して接着する工法に着目し, 緊張接着するシート (以後, 緊張接着用シート) のコンクリート構造物への定着法⁴⁾や, AFRP シートを緊張して接着した RC 梁や PC 梁の耐荷性状や破壊性状⁵⁾に関する検討を実施してきた。これまでの, 既往の実験検討は, コンクリート表面に含浸接着樹脂を用いてシートを直接的に緊張接着していた。しかしながら, 実施工ではコンクリート表面に不陸や段差があり, 不陸調整用パテ材 (以後, パテ材) を用いて修正するのが一般的である。

このような背景から, 本研究では, 不陸調整用に塗布したパテ材の上に AFRP シートを緊張接着した RC 梁の耐荷性状や破壊形式の確認を目的に, 主鉄筋比および AFRP シートの緊張率を変化させた曲げ補強 RC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を行った。

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, 下端鉄筋を 2 種類に変化させた RC 梁を対象に, 無補強および AFRP シートの緊張率を 3 種類 (0, 20, 40 %) に変化させた全 8 体である。表中, 試験体名の第 1 項目は下端鉄筋の種類 (A: D13, B: D16), 第 2 項目は曲げ補強の有無 (N: 無補強, T: 補強) を示し, T に付随する数値は目標導入緊張率 (%) を示している。ここで, 導入緊張率とはシートの保証引張耐力に対

表-1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋 (主鉄筋比)	目標導入緊張率*	実測導入緊張率*	初期導入ひずみ (μ)
A-N	D13 (0.79 %)	-	-	-
A-T0		0 %	0 %	0
A-T20		20 % (70.6)	19.7 % (69.6)	3,439
A-T40		40 % (141.1)	37.2 % (131.3)	6,494
B-N	D16 (1.24 %)	-	-	-
B-T0		0 %	0 %	0
B-T20		20 % (70.6)	18.6 % (65.7)	3,247
B-T40		40 % (141.1)	39.2 % (138.2)	6,843

* () 内は導入緊張力 (kN)

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 博士研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部長 博(工) (正会員)

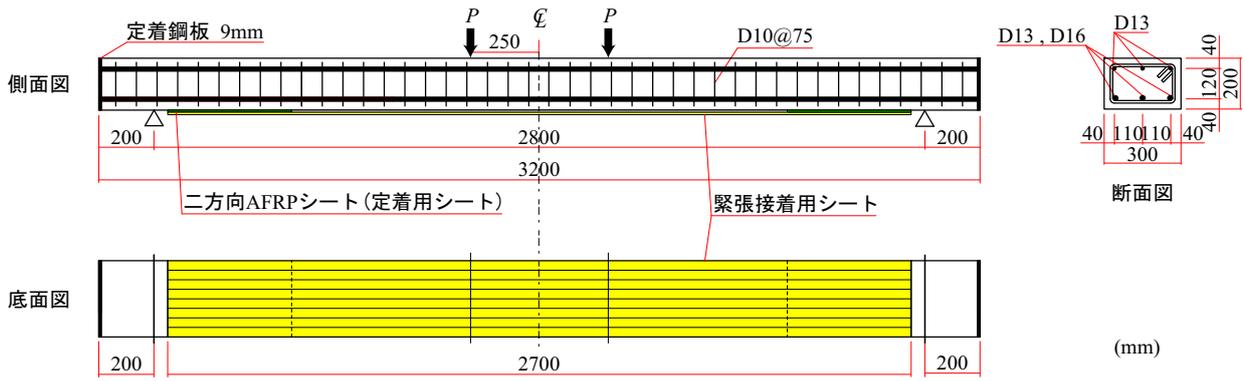


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表-2 鉄筋の力学的特性

鋼材種類	鉄筋径	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SD345	D13	377	551	206
	D16	380	553	

表-3 AFRP シートの力学的特性 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (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*	588*	0.286*			

* 繊維一方向当りの値

する導入緊張力の割合を示している。なお、本実験では曲げ補強シートに保証耐力 1,176 kN/m の AFRP シートを用いている。表には、目標導入緊張率の他、ロードセルより得られた緊張力導入直前の実測導入緊張率、および実測導入緊張率より算出した緊張力導入時に発生する初期導入ひずみを示している。

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 (梁幅 × 梁高) が 300 × 200 mm、純スパン長 2.8 m の複鉄筋矩形 RC 梁である。下端鉄筋には、D13 もしくは D16 を 3 本ずつ用い、上端鉄筋にはいずれの梁においても D13 を 3 本配置した。曲げ補強シートには、幅 300 mm のシートを用い、梁中央部から両支点の 50 mm 手前までの範囲に接着した。なお、シートを接着した試験体では、後述するように、緊張接着用シート端部での応力集中を緩和させるため、緊張接着用シート端部のコンクリート表面に二方向 AFRP シート (定着

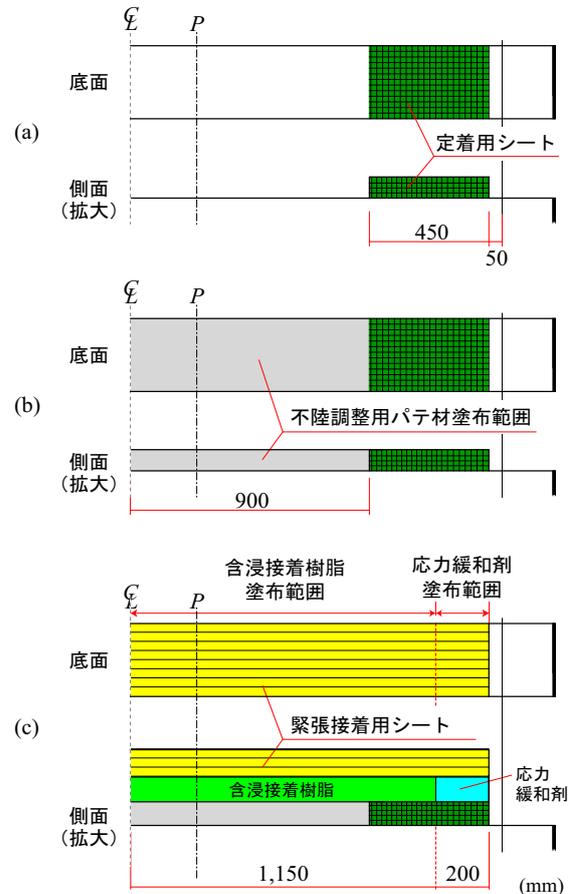


図-2 シート接着時における底面の状況モデル

用シート) を接着し、さらに、緊張接着用シートと定着用シートの接着には、弾性係数が含浸接着樹脂の 1/60 程度、伸び能力が 150 % の応力緩和剤も併用している。表-2、表-3 には 下端鉄筋および AFRP シートの力学的特性値を示している。また、コンクリートの圧縮強度は 35.8 MPa であった。

2.2 緊張接着用シートの接着方法

本実験に用いた試験体の緊張接着用シートは、以下

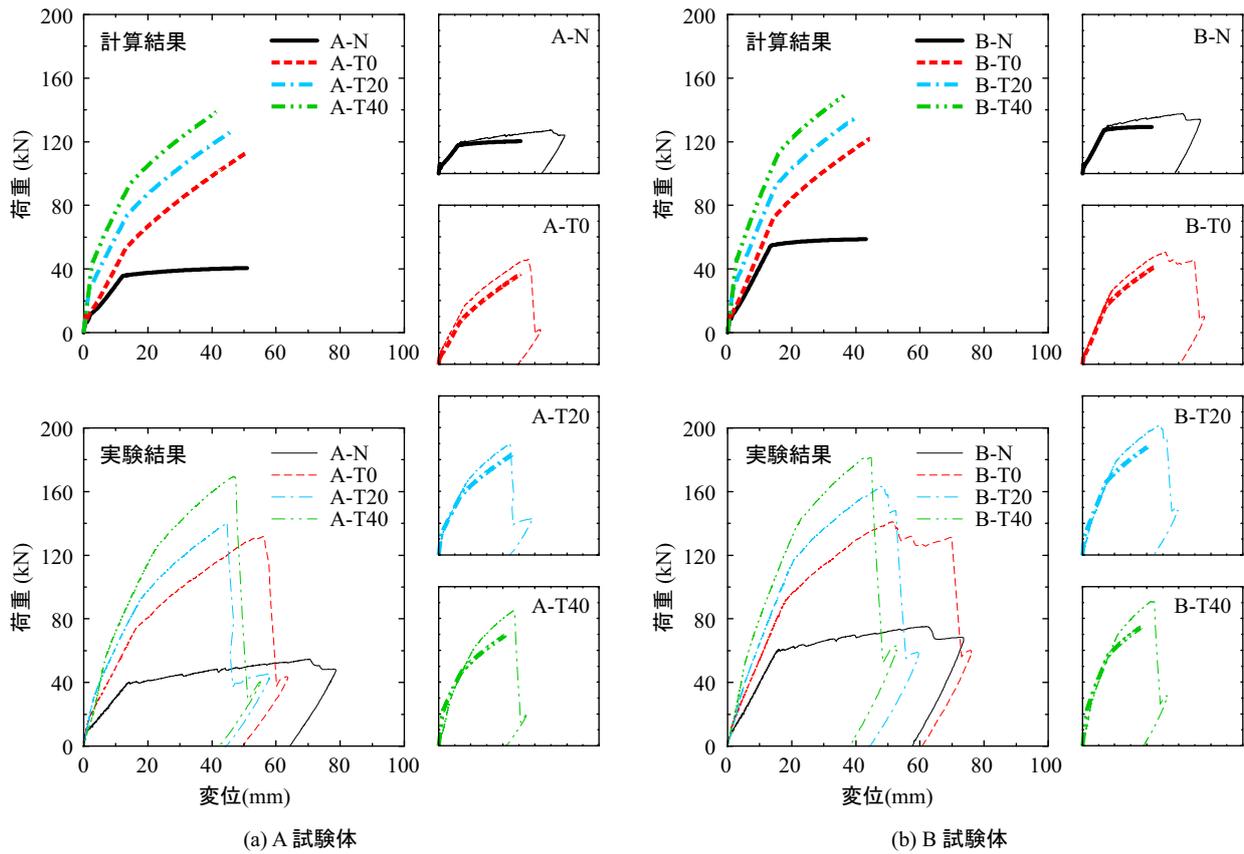


図-3 荷重-変位関係

の手順により接着している。また、既往の研究⁴⁾を参考に緊張接着用シートを RC 部材に確実に定着するため、定着用シートや応力緩和剤も併用している。なお、**図-2**には、シート接着工程における RC 梁底面の状況をモデル化した図を示している。

- (1) RC 梁底面のシート接着範囲にショットブラスト処理 (処理深さ 1~2 mm) を施し、プライマーを塗布する、
- (2) 緊張接着用シートの接着端部における応力集中を緩和するための定着用シートを RC 梁の両支点から 50~500 mm の範囲に接着する (**図-2** (a) 参照)、
- (3) 定着用シートとコンクリート表面の段差をパテ材を用いて埋め (厚さ約 7 mm)、定着用シートとの平滑化を行う (**図-2** (b) 参照)、
- (4) 緊張接着用シートを浸透接着樹脂 (以後、単に樹脂) を用いてプレキャスト化し、樹脂の硬化後に所定の緊張力を導入して約 1 日なじませる、
- (5) 緊張接着用シートの接着範囲に樹脂を塗布した後、緊張接着用シートに所定の緊張力を導入した状態で上面より圧着させる。なお、緊張接着用シートの接着範囲の両端部 200 mm には樹脂の代わりに応力緩和剤を用いる (**図-2** (c) 参照)、

- (6) 樹脂の硬化後、緊張力を解放することにより試験体に緊張力を導入する、

である。なお、本実験に用いたパテ材は市販の不陸調整用のエポキシ樹脂系のパテ材である。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-3には、各試験体の荷重-変位関係を示している。図には、計算結果および実験結果ごとの比較図、および各試験体に対する実験結果および計算結果の比較図を示している。図中の計算結果は、コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠し、平面保持を仮定した断面分割法により、上縁コンクリートが圧壊ひずみ (3500 μ) に達するまで行ったものである。計算結果はパテ材の厚さを考慮して算出し、パテ材の弾性係数を材料試験結果をもとに 1.1 GPa と設定した。なお、パテ材の引張強度は試験結果がなく、実験時にはパテ材の引張破壊が試験体の終局に影響を及ぼしていないことから、シートの引張強度と同等として設定した。

図-3 (a) における A 試験体の計算結果の比較図より、A-N 試験体は、載荷初期に曲げひび割れの発生に伴う剛性勾配の低下、および荷重 36 kN、変位 12 mm

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	曲げひび割れ発生時					降伏時					終局時					実験時の破壊性状
	実験結果		計算結果		荷重比	実験結果		計算結果		荷重比	実験結果		計算結果		荷重比	
	荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		
	P_{ce} (kN)	δ_{ce} (mm)	P_{cc} (kN)	δ_{cc} (mm)		P_{ye} (kN)	δ_{ye} (mm)	P_{yc} (kN)	δ_{yc} (mm)		P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)		
A-N	10.2	1.29	6.40	0.63	1.59	39.9	14.0	35.6	12.2	1.12	54.6	70.2	40.6	51.1	1.35	コンクリート圧壊
A-T0	18.4	1.87	8.13	0.59	2.26	74.7	16.6	52.5	13.0	1.42	131.8	55.6	113.5	51.1	1.16	シート剥離
A-T20	31.0	3.26	26.9	1.60	1.15	92.4	17.9	74.0	13.6	1.25	140.5	45.1	125.9	45.6	1.12	シート破断
A-T40	56.2	6.85	42.1	2.53	1.33	128.6	24.2	93.3	14.4	1.38	169.6	47.3	138.4	41.2	1.23	シート破断
B-N	6.63	0.77	7.98	0.64	0.83	60.3	16.1	54.7	13.5	1.10	75.2	61.0	58.7	43.2	1.28	コンクリート圧壊
B-T0	14.2	1.56	9.38	0.61	1.51	91.9	18.2	71.7	14.2	1.28	141.6	51.4	121.9	44.4	1.16	シート剥離
B-T20	38.8	5.16	26.4	1.47	1.47	117.9	21.0	91.3	14.7	1.29	163.6	48.2	135.3	40.2	1.21	シート破断
B-T40	52.3	5.43	43.7	2.54	1.20	143.6	23.1	112.5	15.7	1.28	181.5	43.0	148.8	36.4	1.22	シート破断

程度での主鉄筋降伏による剛性勾配の低下が見られる。また、降伏後は若干の勾配を保ち、荷重 40 kN、変位 50 mm 程度で終局に至っている。A-T0 試験体は、A-N 試験体と比較してひび割れ発生荷重は同程度であるものの、その後の勾配および荷重値が大きく示されている。なお、終局変位は同程度である。一方、緊張力を導入した A-T20、A-T40 試験体は、緊張力の増加とともにひび割れ発生時から終局時まで、全体的に荷重が大きく示されるものの、終局変位は小さくなる傾向にある。

実験結果の比較図を見ると、概ね計算結果と同様の傾向が見られる。すなわち、シートの補強効果は、特に曲げひび割れ発生後に大きいものの、緊張して接着することで曲げひび割れ発生荷重、降伏荷重および終局荷重が増大する傾向にあることが分かる。

次に、各試験体に対する実験および計算結果の比較図より、いずれの試験体も実験結果の降伏荷重が計算結果に比較して大きくなる傾向にあることが分かる。またその差は、無補強試験体よりも補強試験体で大きい。ここで、補強試験体で実験結果が大きく示されているのは、緊張接着用シート接着前に試験体に塗布したパテ材の影響があるものと考えられるが、詳細は今後の課題である。一方、図-3 (b) における B 試験体の結果から、鉄筋径が大きいために剛性勾配が大きく示されるものの A 試験体と同様の傾向が見られる。

以上のことから、実験結果は計算結果を上回っており、断面分割法により安全側に評価可能であることが分かる。

表-4 には、図-3 より得られる計算および実験結果を一覧にして示している。表には、曲げひび割れ発生時、主鉄筋降伏時および終局時の荷重、変位および各時点における荷重比(実測荷重/計算荷重)、実験時の破壊性状を示している。なお、実験時の破壊性状は上縁コンクリートの圧縮破壊(以後、圧壊)後の破壊性状であり、計算時の破壊性状は全ての試験体で上縁コンクリートの圧壊である。また、表中の各時点は、実験結果、計算結果ともに荷重-変位関係における剛性勾配変化点とした。

表より、B-N 試験体のひび割れ発生荷重を除き、いずれも荷重比が 1.1 以上の値を示していることから、計算結果は実験結果を安全側に評価していることが分かる。このことから、試験体と曲げ補強シートとの定着は十分に確保されていることが分かる。これより、パテ材を用いた RC 梁に AFRP シートで緊張接着を施す場合にも、その耐荷挙動は断面分割法を用いて大略評価することが可能であることが明らかになった。

3.2 シートのひずみ分布性状

図-4 には、曲げ補強試験体の計算終局変位時における軸方向ひずみ分布を計算結果と比較して示している。なお、A-T20 試験体の場合は、実測の終局変位が計算終局変位とほぼ同程度であることから各終局変位時の結果を比較して示している。

図より、等曲げ区間のひずみについては、いずれの試験体も実験値と計算値はほぼ対応していることが分かる。一方、等せん断力区間では、T0 試験体の載荷点近傍で計算値を超えるひずみが発生している。これは、

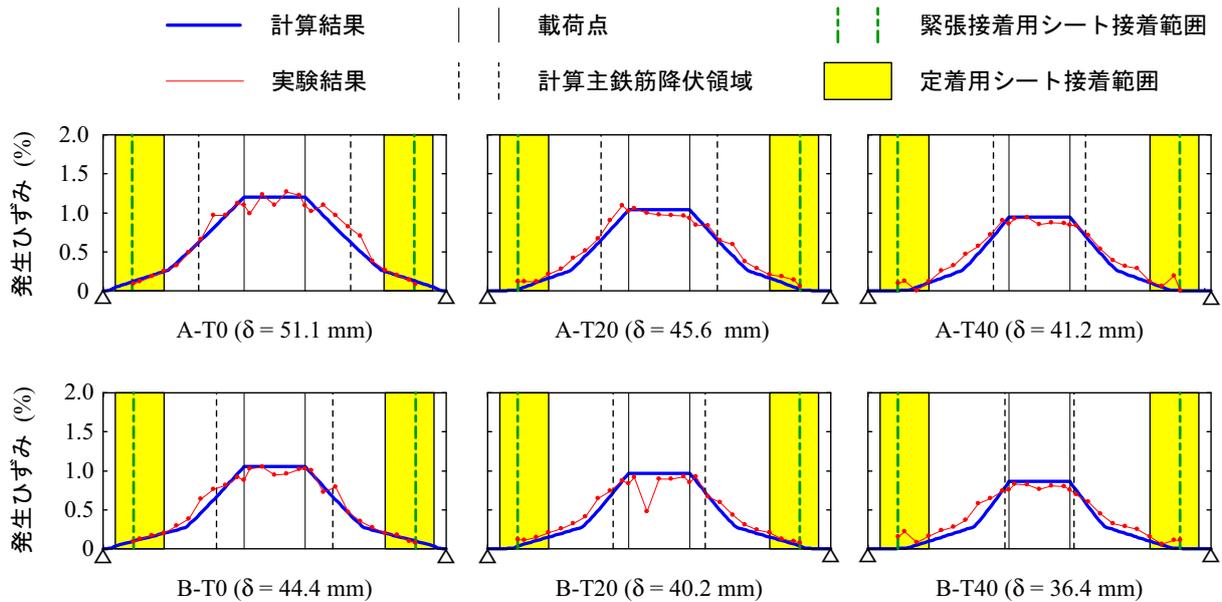


図-4 計算終局変位時における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

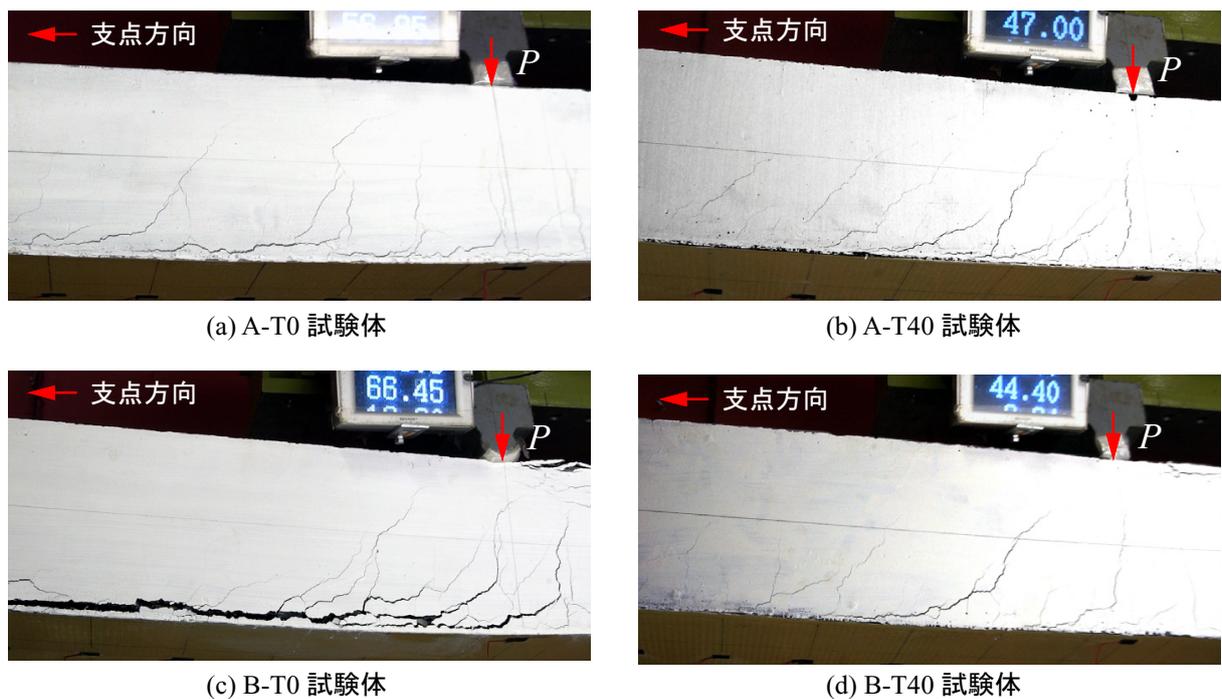


写真-1 各試験体の荷点近傍下縁かぶり部における終局直前の状況

既往の研究と同様、荷点近傍の下縁かぶり部に発生した斜めひび割れの開口に伴うピーリング作用によりシートが部分剥離しているためと考えられる。また、緊張力を導入した T20 / T40 試験体は、ひずみが等せん断力区間全体で計算値よりも大きく示されている。これは、斜めひび割れが開口し、シートと一体化しているパテ材ごと下方に押し出され、ピーリングが顕在化し、シート

が剥離しているためと考えられる。なお、T20/T40 試験体の樹脂接着範囲の端部で、 $2,000 \mu$ 程度のひずみが発生しているが、これは応力緩和剤部分に生じた引張力を含浸接着樹脂端部が負担するためと推察される。

3.3 AFRP シート緊張接着 RC 梁のシート剥離状況

写真-1 には、A/B-T0 および A/B-T40 試験体の終局直前の荷点近傍下縁かぶり部の状況を示している。



写真-2 シート剥離後の載荷点近傍下縁部の状況
(B-T0 試験体)

また、写真-2には、B-T0 試験体のシート剥離後の載荷点近傍下縁かぶり部の状況を示している。

写真-1より、いずれの試験体も既往の研究¹⁾と同様に載荷点近傍下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、その開口に伴ってひび割れが水平方向に進展していることから、ピーリングによるシート剥離が生じていることが分かる。また、その剥離進展位置はシートとパテ材の界面ではなく、パテ材とコンクリートの境界で進展している様子がうかがえる。また、写真-2より、シートの剥離面にはパテ材およびコンクリートが付着した状態で剥離していることが分かる。このことから、緊張接着時にパテ材を用いて接着する場合には、シートとパテ材は一体化し、最終的にはコンクリートの引張破壊によりシート剥離に至ることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、実施工に対応した AFRP シート緊張接着時における RC 梁の曲げ耐荷性状や破壊性状を検討することを目的として、パテ材を塗布した後に AFRP シートで緊張接着した RC 梁を用いて静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。本実験の範囲内で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

- 1) RC 梁に AFRP シートを緊張接着することで、ひび割れ発生荷重、降伏荷重および終局荷重を無緊張の場合より大きくすることが可能である。

- 2) AFRP シートを緊張して接着した RC 梁の耐荷性状は、パテ材を用いて不陸調整した場合においても、断面分割法で安全側に評価可能である。
- 3) AFRP シートの接着端部に、引き剥がれ防止用の定着用シートおよび応力緩和剤を用いることにより、試験体と緊張接着用シートの定着を十分に確保することが可能である。
- 4) AFRP シートの剥離は、載荷点近傍の下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの開口に伴うピーリング作用により発生する。ただし、パテ材を用いて不陸調整する場合には、AFRP シートとパテ材が一体化してシート剥離することに留意が必要である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: AFRP シートで曲げ補強 RC 梁のシートの曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.8
- 2) 呉 智深, 松崎 智優, 福沢 公夫, 神口 建: CFRP シート緊張接着した鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.2
- 3) 中島 規道, 三上 浩, 藤田 学, 田村 富雄: アラミド繊維シートを緊張接着した RC 梁の曲げ耐荷性状, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.619-620, 2004.9
- 4) 池田 聡, 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: RC 部材の AFRP シート緊張接着補強時の定着法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1501-1506, 2007.6
- 5) 澤田 純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: AFRP シートを緊張して接着した RC/PC 梁の耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1465-1470, 2006.6
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002.