

論文 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

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・澤田 純之^{*4}

要旨：本研究では、既設 RC 構造物の補強法としての AFRP シート緊張接着工法の確立を目的として、ひび割れや残留変位等の損傷を与えた RC 梁を対象に、AFRP シート緊張接着による曲げ補強効果は無補強および無緊張の AFRP シート補強と比較する形で検討した。実験は、シート緊張率および事前載荷レベルをパラメータとして実施した。その結果、1) AFRP シートを RC 梁下面に緊張接着することにより、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、2) 事前載荷レベルが大きい場合、無緊張では上縁コンクリートの圧壊、緊張接着ではシートの破断が早期に発生する傾向にあること、などが明らかになった。

キーワード：載荷履歴、AFRP シート、緊張接着、曲げ剛性

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シート (以下、FRP シート と称する) 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、終局限界状態に着目すると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。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¹⁾。

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くあることから、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。

このような背景より、本研究では、既設 RC 構造物の補

強法としての AFRP シート緊張接着工法の確立を目的として、製作後に事前載荷を行いひび割れや残留変位等の損傷を与えた RC 梁を対象に、AFRP シート緊張接着による曲げ補強効果は無補強および無緊張の AFRP シート補強と比較する形で検討した。

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、事前載荷レベルが異なる 2 種類の RC 梁に対し、AFRP シートを無緊張および緊張接着した全 5 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、試験体名の第 1 項目の英文字 L に付随する数値は事前載荷レベルを示し、第 2 項目の英文字 T に付随する数値は AFRP シートの目標導入緊張率 (%) を示している。ここで、本研究では事前載荷レベル 1 および 2 をそれぞれ主鉄筋降伏時および主鉄筋降伏時と終局時 (上縁コンクリート圧壊) の中間変位時点まで載荷するものと設定

表-1 試験体一覧

試験体名	事前載荷レベル	目標導入緊張率*	実測導入緊張率*	実測初期導入ひずみ (μ)
N	-	無補強	-	-
L1-T0	レベル 1	0 %	0 %	0
L1-T40		40 % (141)	36.5 % (129)	6,205
L2-T0	レベル 2	0 %	0 %	0
L2-T40		40 % (141)	39.6 % (140)	6,732

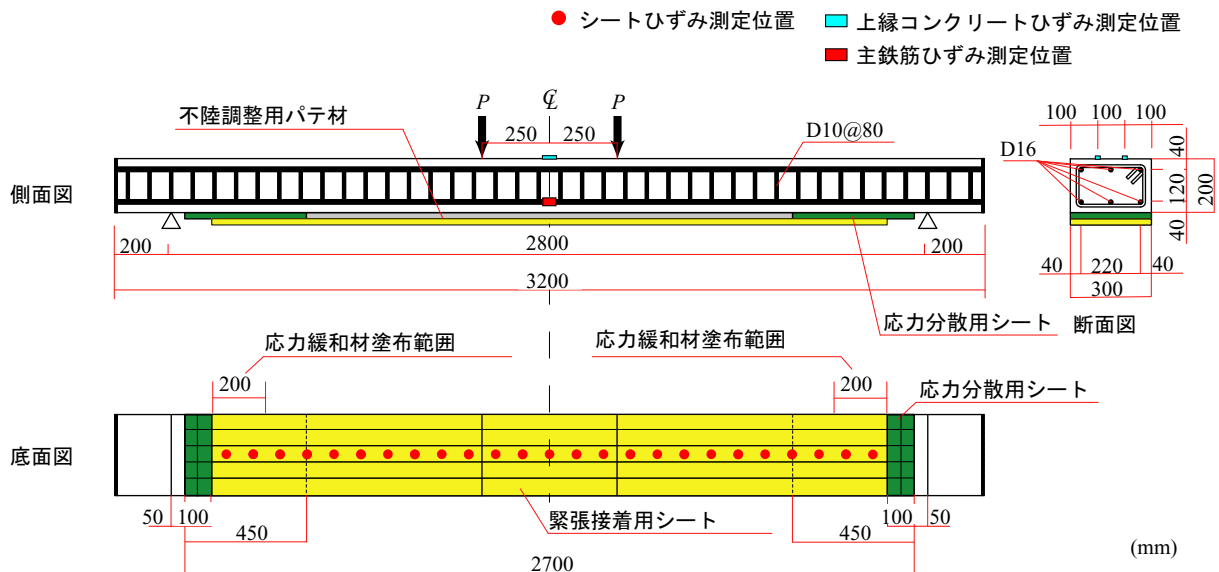
* () 内は導入緊張力 (kN)

*1 三井住友建設 (株) 技術開発センター 主席研究員 博 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 くらし環境系領域 工博 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 くらし環境系領域 博 (工) (正会員)

*4 (株) ハザマ 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)	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
435/435**	588/588	0.286/0.286			

*: 緊張接着用シート **: 応力分散用シート

した。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。また、表－１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。

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30×20 cm、純スパン長2.8 mの矩形RC梁である。上端鉄筋及び下端鉄筋にはD16を3本ずつ配置した。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150 mm手前までの範囲に接着した。表－２にはAFRPシートの力学的特性値を示している。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は31.6 MPa、主鉄筋の降伏強度は392 MPaであった。

2.2 緊張接着用シートの接着方法

緊張接着用シートの接着は、まず樹脂を含浸・硬化させたAFRPシートに油圧ジャッキを用いて緊張力を導入した状態でRC梁に接着し、接着用樹脂硬化後にジャッキを解放して梁に緊張力を導入する形で行った。このとき、緊張接着用シート両端部の接着界面にはジャッキを解放することによって全緊張力が面内せん断力の形で作用するため、緊張接着用シートの端部において応力集中によるシート剥離が想定される。

そのため、本研究では上述の面内せん断力を梁軸方向のみならず梁幅方向にも分散させるため無緊張の2方向AFRPシート(応力分散用シート)を緊張接着用シート端部周辺のコンクリート面に接着し、かつ導入時の応力勾配を緩和するために応力緩和材(伸び率150%で弾性係数はFRPシート接着用樹脂の1/60程度)を接着樹脂の代替として用いることとした。詳細な緊張接着作業工程については文献¹⁾を参照されたい。

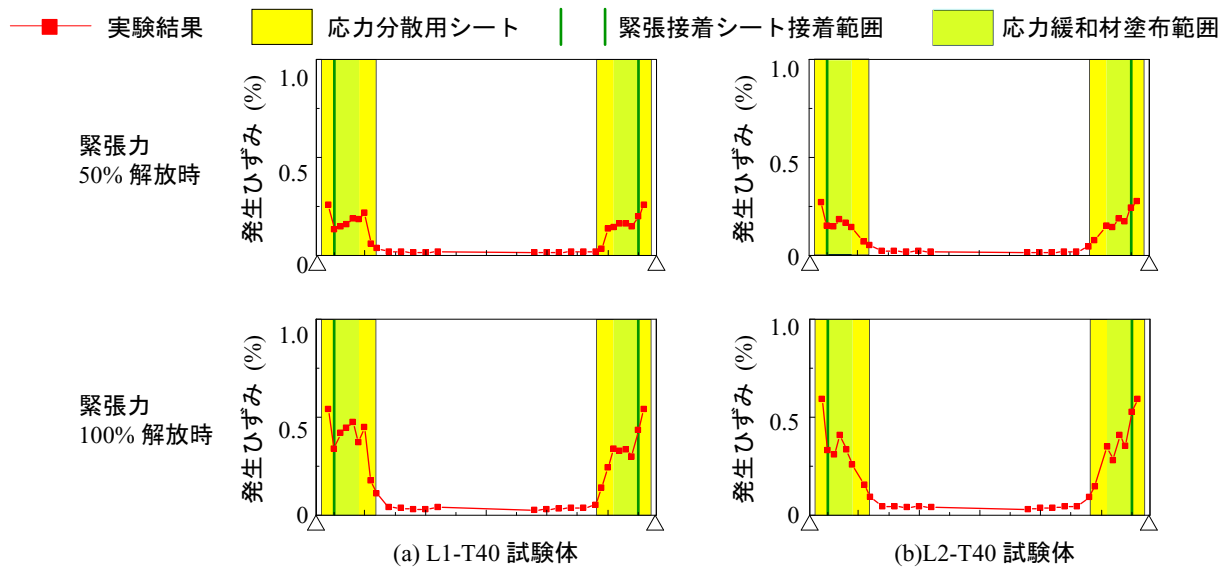
なお、後述するように事前載荷レベル2の場合には、スパン中央部において14 mm程度の残留変位を生じているため、緊張接着する場合にはパテ材を用いて接着面が水平になるように調整している。従って、パテ材の厚さは梁中央部が最も薄く、端部ほど厚くなっている。また、シートの接着作業はRC梁を反転させた後、シート接着面のブラスト処理およびプライマー塗布を行った後に行っている。そのため、事前載荷時に発生したひび割れにはプライマーが流し込まれている。なお、本研究では下向き施工で緊張接着したが、上向き施工でも緊張接着が可能なことを別途実験で確認している。

2.3 実験方法

本実験では、補強試験体の場合には補強前に前述の事前載荷レベルまで載荷し梁に損傷を与えている。事前載荷終了後、RC梁に所定の方法でシート補強を施し接着作業が完了した後、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、スパン中央点における変位、主鉄筋および上縁コンクリートひずみ、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。

表－３ 事前載荷時における実験結果

試験体名	最大荷重時				除荷後		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリートひずみ (μ)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリートひずみ (μ)
L1-T0	49.4	13.1	1,884	-1,075	2.6	312	-118
L1-T40	49.4	11.7	1,747	-769	2.2	285	-75
L2-T0	56.0	25.7	9,469	-2,210	13.8	7,664	-1,081
L2-T40	55.2	25.5	3,644	-2,135	13.7	2,256	-1,048



図－２ ジャッキ解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

3. 実験結果および考察

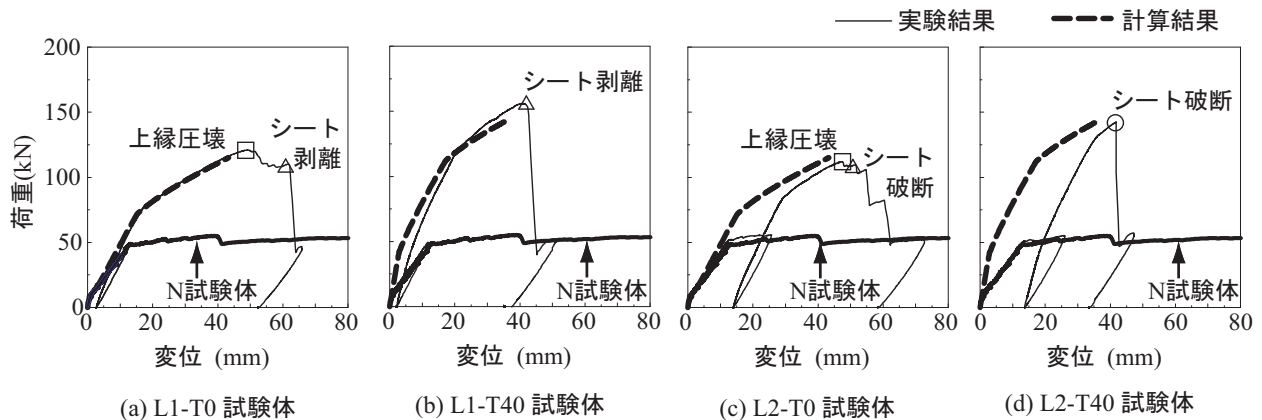
3.1 事前載荷時における実験結果

表－３には、事前載荷における最大荷重時および除荷後の実験結果を一覧にして示している。なお、補強試験体の事前載荷における荷重や変位は、無補強試験体の実験結果に対応する荷重および変位とした。すなわち、L1試験体では無補強試験体の実測降伏荷重を事前載荷し、L2試験体では無補強試験体の実測降伏変位と圧縮破壊により載荷荷重が多少低下した実測終局変位との中間変位になるまで事前載荷している。表より、L2試験体の主鉄筋ひずみを除きいずれの結果も事前載荷レベルが同じ場合には、ほぼ同様であることが分かる。また、事前載荷レベル２の結果は事前載荷レベル１の結果よりも全般的に大きく、その傾向は最大荷重時よりも除荷後において顕著である。これは、レベル１は主鉄筋降伏までの載荷であるのに対して、レベル２は主鉄筋が完全に降伏し塑性化が進行し、RC梁に極めて大きな残留変形を生じていることによるものと考えられる。

3.2 ジャッキ解放時における緊張接着用シートのひずみ分布

本研究では、事前載荷終了後、油圧ジャッキにより所定の緊張力を作用させた緊張接着用シートをRC梁に接着し、接着樹脂が十分に硬化した後ジャッキを解放してRC梁に緊張力を導入している。図－２には、ジャッキ解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布を示している。ここでは、緊張力を50および100%解放したときの結果を示している。

図より、いずれの試験体においてもジャッキ解放率の増加に伴って緊張接着用シートのひずみが増大していることが分かる。また、これらのひずみは緊張接着用シートの端部において最も大きな値を示し、応力分散用シート接着範囲内においては、スパン中央部に近いほど小さくなり徐々にスパン中央部の一定値に収束する傾向が認められる。また、ひずみ勾配は応力緩和材の塗布範囲において低減される傾向にある。これらのことより、前述の面内せん断応力は、主として応力分散用シート接着範囲内に発生し、応力緩和材塗布範囲において低減されていることが分かる。



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	降伏時			終局時			実験時における破壊性状
	計算結果	実験結果	荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算結果	実験結果	荷重比 P_{ue} / P_{uc}	
	荷重 P_{yc} (kN)	荷重 P_{ye} (kN)		荷重 P_{uc} (kN)	荷重 P_{ue} (kN)		
N	55.7	48.9	0.88	59.1	54.2	0.92	上縁コンクリート圧壊
L1-T0	71.9	77.5	1.08	115	121	1.05	上縁コンクリート圧壊
L1-T40	112	120	1.07	143	156	1.09	シート剥離
L2-T0	71.9	83.5	1.16	115	112	0.97	上縁コンクリート圧壊
L2-T40	112	131	1.17	143	142	0.99	シート破断

計算結果の終局状態は全てコンクリート圧壊

なお、本実験ではジャッキ解放後においてもシートやかぶりコンクリートの引き剥がれが生じていないことから、提案の工法により緊張接着用シートはその両端部において確実に定着されているものと判断される。

3.3 荷重－変位関係

図－３には、事前載荷および補強後の載荷時における各補強試験体の荷重－変位関係を事前載荷時の残留変位を考慮する形で、無補強試験体の結果と比較して示している。また、補強試験体に関する計算結果も併せて示している。計算結果は、コンクリート標準示方書²⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。なお、計算には事前載荷の影響を考慮していない。また、表－４には参考のため実験および計算結果の一覧を示している。なお、表中の破壊性状は目視および実験データにより判断したものである。

図－３より、事前載荷レベルによらずシート補強によって RC 梁の曲げ剛性、降伏および最大荷重が向上していることが分かる。また、これらの効果は緊張接着した試験体においてより顕著に示されている。補強試験体の実験結果を計算結果と比較すると、初期勾配、ひび割れ発

生後の勾配（第 2 勾配）および主鉄筋降伏後の勾配（第 3 勾配）がほぼ対応していることが分かる。

図－４には、荷重－変位関係を直接的に比較するため、事前載荷時における残留変位を考慮せず、各補強試験体の初期変位を零としてシート緊張率ごとに荷重－変位関係を再整理した。図より、各試験体の各勾配は計算結果とほぼ対応していることが分かる。

なお、最大荷重は L1 試験体では実験結果が計算結果を上回っているものの、L2 試験体ではいずれも L1 試験体の結果よりも小さく、計算結果とほぼ同程度か若干下回っている。これは、L2-T0 試験体では表－３に示しているように事前載荷後における上縁コンクリートの残留ひずみが $1,100 \mu$ 程度となっていることから、補強後の載荷において上縁コンクリートが早期に圧縮破壊したことによるものと考えられる。

一方、L2-T40 試験体ではシート緊張接着によって残留ひずみが軽減されるものの後述するように事前載荷時に発生したひび割れの影響により、緊張接着用シートに局所的に大きなひずみが発生してシート破断に至ったためと考えられる。

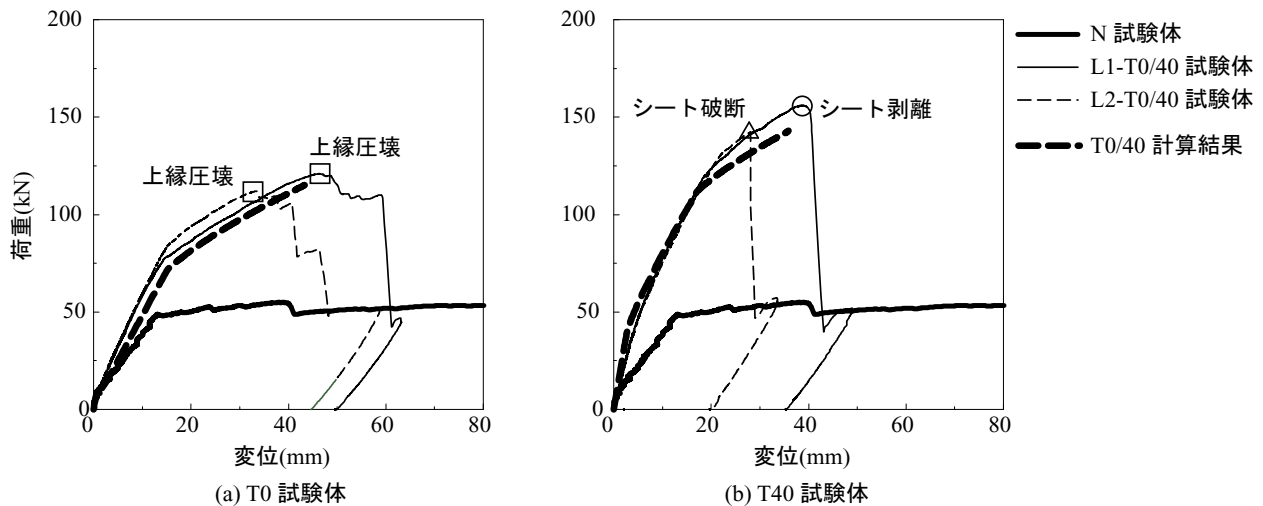


図-4 シート緊張率ごとの荷重-変位関係の比較

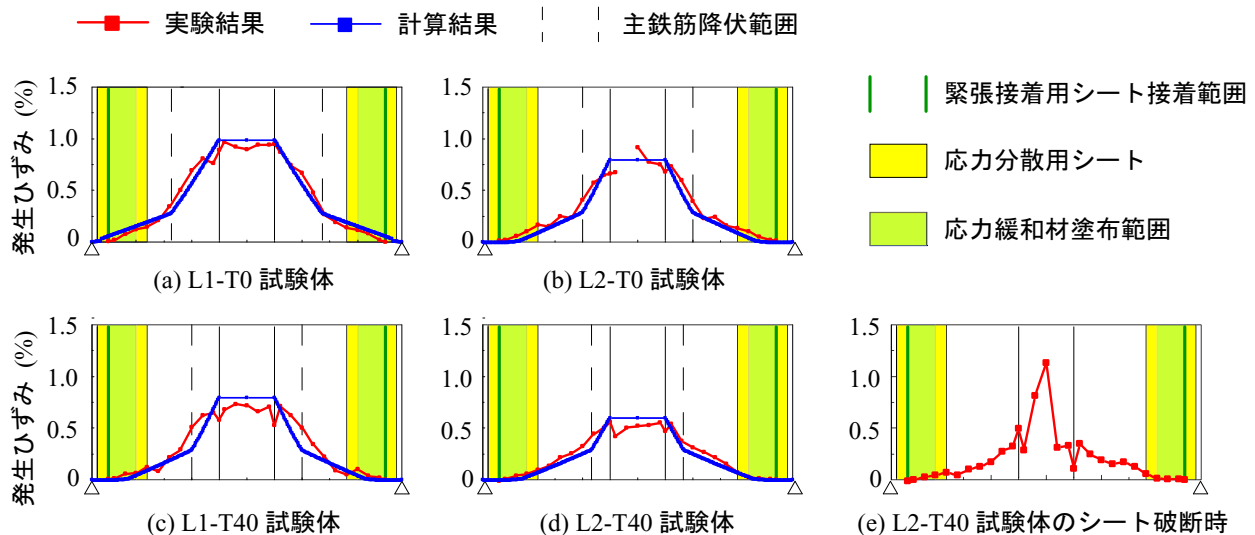


図-5 終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

3.4 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図-5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。なお、初期導入ひずみは考慮していない。計算結果は、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。なお、ここでは前述の図-4を参考にして、実験結果の終局変位が計算結果よりも小さい場合には、実測終局変位時の結果を用いて比較している。

図より、いずれの試験体においても実験結果は計算結果とほぼ対応していることが分かる。このことより、緊張力導入の有無によらずAFRPシートとコンクリートの付着は、終局時まで十分に確保されていることが明らかになった。

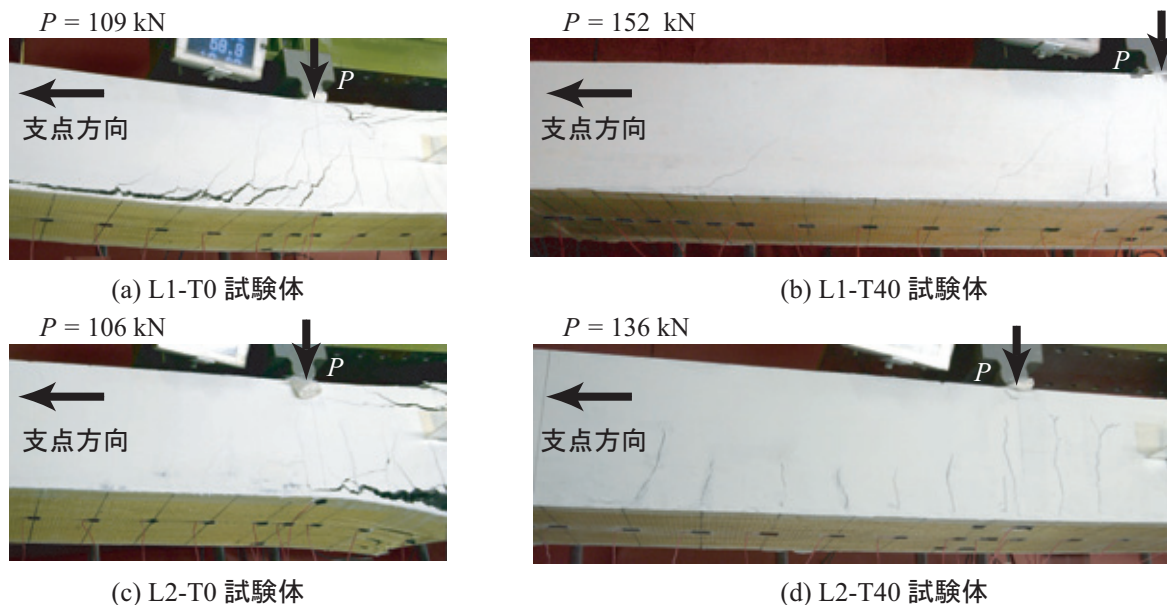
なお、L2-T40試験体では終局時において等曲げ区間のひずみが $5,000\mu$ （初期導入ひずみを加えると $12,000\mu$ ）程度であるにもかかわらず、シート破断に至っている。

これは、図-5(e)に示しているように、最大荷重到達直後において等曲げ区間に局所的に大きなひずみが発生していることから、事前載荷時に発生したひび割れがシートの破断に影響を及ぼしているものと推察される。

3.5 ひび割れ性状

写真-1には、各試験体の終局時近傍におけるひび割れ状況を示している。写真より、L1/L2-T0試験体では、上縁コンクリートが圧縮破壊に至った後、シート剥離もしくは破断に至っていることが分かる。特に、L1-T0試験体では、圧縮破壊後、載荷点近傍の等せん断スパンにおける下縁かぶりコンクリートに生じた斜めひび割れ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ってシート剥離に至っていることが分かる。

一方、L1/L2-T40試験体ではL1/L2-T0試験体よりも荷重レベルが大きいかかわらず、上縁コンクリートの圧壊や著しいひび割れの開口が見られない。これは、AFRPシート緊張接着により、上縁コンクリートの残留ひずみが



写真－１ 各試験体の終局時近傍におけるひび割れ性状

低減されるとともに、ひび割れの発生が抑制されていることによるものと考えられる。なお、L1-T40 試験体では写真－１の状況直後に下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れに起因するピーリング作用によるシート剥離が急激に進展したことを確認している。また、L2-T40 試験体では大きなひび割れの開口やピーリング作用の兆候は見られず、最大荷重到達後シート破断に至った。

4. まとめ

本研究では、既設 RC 構造物の補強法としての AFRP シート緊張接着工法の確立を目的として、荷重履歴を有する RC 梁を対象に緊張接着による曲げ補強効果を実験的に検討した。本実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) AFRP シートを RC 梁下面に緊張接着することにより、荷重履歴を有する RC 梁の曲げ剛性を大きく改善可能である。また、曲げ剛性の改善効果は、事前荷重レベルによらずほぼ同様である。

- 2) RC 梁に大きな残留変位が発生する荷重履歴を与えた場合においても、緊張接着用シートとコンクリートの付着は終局時まで十分に確保されている。
- 3) AFRP シートが無緊張の場合には、事前荷重時に生じた上縁コンクリートの残留ひずみの影響により、早期に圧縮破壊を生じる傾向にある。一方、緊張接着することで、事前荷重時に生じたひび割れの開口や発生が抑制され、圧縮の残留ひずみも軽減される。
- 4) 損傷が著しい場合には特にシートを緊張した試験体でシート破断しやすくなるため、シート補強前にひび割れ補修を丁寧に行う必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007