

論文 AFRP シート緊張接着 RC 梁のシート剥離性状に及ぼすシート導入緊張率の影響

栗橋 祐介^{*1}・AbdelAziz Mohamed Ali^{*2}・岸 徳光^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨: 本研究では, AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状に及ぼすシート導入緊張率の影響を検討することを目的として, シート導入緊張率が異なる曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を行った。その結果, 1) AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は, シート導入緊張率の増大に伴い剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行する傾向にあること, 2) 無緊張の FRP シート曲げ補強 RC 梁の実験結果に基づいて提案した破壊形式予測式は, AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁にも適応可能であること, 3) 緊張力導入によるシートの剥離抑制効果には, 緊張力の導入に伴う主鉄筋降伏領域の縮小などが影響を及ぼしていること, などが明らかになった。

キーワード: AFRP シート緊張接着, 曲げ補強, 導入緊張率, ピーリング作用, シート剥離

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。著者らは, これまで FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状やシートの剥離性状を検討するため, 数多くの 4 点曲げ静載荷実験を行ってきた¹⁾。その結果, 1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊性状は, 平面保持を仮定した断面分割法による計算耐力到達後, 上縁コンクリートが圧壊した後にシートが剥離する「曲げ圧壊型」と, 計算耐力到達前にシートが剥離する「剥離破壊型」に分類できること, 2) シート剥離は等せん断力区間における載荷点近傍の下縁かぶりコンクリートに発生し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り生じること, 3) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は, 計算終局曲げモーメント M_u に対する計算降伏曲げモーメント M_y の比 M_y/M_u を用いることにより推定可能であること, を明らかにしている。

一方, 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, 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⁾。また, 緊張接着することでピーリング作用によるシートの部分剥離が抑制される傾向にあることを明らかにしている。しかしながら, 緊張接着曲げ補強 RC 梁のシートの剥離性状に関する検討は十分でなく, 特に導入緊張率とピーリング作用の抑制効果との関係は明確になっていないのが現状である。

このような背景より, 本研究では AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状を含めた曲げ耐荷性状に及ぼすシートへの導入緊張率の影響を検討することを目的として, AFRP シートへの導入緊張率を変化させた緊張接着曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を実施した。

2. 実験概要

表-1 には, 本実験に用いた試験体の一覧を示してい

表-1 試験体一覧

試験体名	目標 導入緊張率*	実測 導入緊張率*	実測初期導入 ひずみ (μ)	M_y/M_u
N	無補強	-	-	-
T0	0 %	0 %	0	0.55
T20	20 % (52)	22.2 % (58)	3,892	0.65
T40	40 % (104)	40.1 % (104)	7,009	0.72
T50	50 % (129)	50.8 % (131)	8,883	0.76

* () 内は導入緊張力 (kN) M_y : 計算降伏モーメント M_u : 計算終局モーメント

*1 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 建設工学専攻 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)

*4 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)

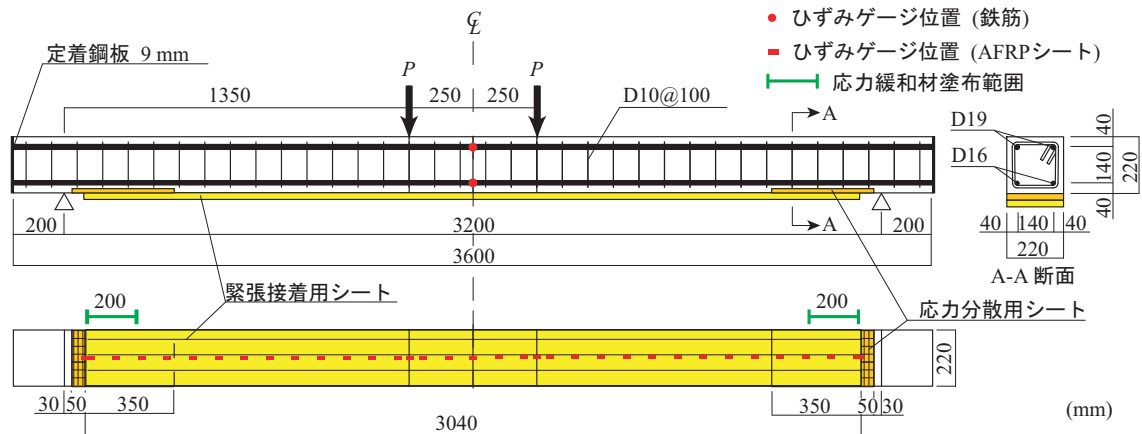


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

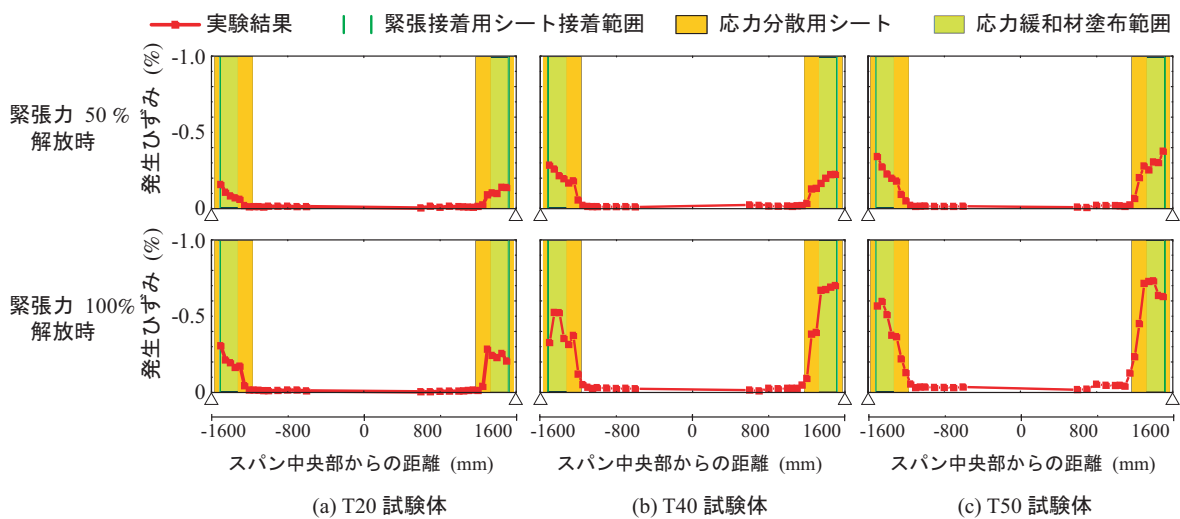


図-2 緊張力解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

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

る。試験体数は、無補強試験体の他、AFRPシートを無緊張および3種類の導入緊張率で緊張接着した全5体である。

表中、試験体名の英文字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。なお、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り、目標導入緊張率の算定においては、コンクリートの弾性変形やクリープ・乾燥収縮による緊張力の減少、および引張鉄筋の拘束等は考慮していない。

表中の実測導入緊張率および実測初期導入ひずみは、

緊張力解放時におけるロードセルからの出力結果に基づいた値である。また、 M_y/M_u は断面分割法によって求めた計算降伏曲げモーメント M_y と計算終局曲げモーメント M_u の比であり、FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測の指標となる値である。著者らによる既往の無緊張FRPシート曲げ補強RC梁の静載荷実験の結果¹⁾から、 $M_y/M_u < 0.70$ の場合には剥離破壊型、 $M_y/M_u \geq 0.70$ の場合には曲げ圧壊型となることが明らかになっている。

従って、表-1より緊張接着する場合においても提案の破壊形式予測式が適用できるものと仮定すると、T0/20試験体は剥離破壊型、T40試験体は曲げ圧壊型、T50試験体は計算上シート破断により終局に至るシート破断型に分類することができる。表-2にはAFRPシートの力学的特性値を示している。実験時のコンクリートの圧縮強度は29.4 MPa、主鉄筋の降伏強度は383 MPaであった。

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

表-3 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					破壊性状
	計算結果		実験結果		荷重比	計算結果		実験結果		荷重比	計算結果		実験結果		荷重比	実験結果
	荷重 P_{cc} (kN)	変位 δ_{cc} (mm)	荷重 P_{ce} (kN)	変位 δ_{ce} (mm)		P_{ce} / P_{cc}	荷重 P_{yc} (kN)	変位 δ_{yc} (mm)	荷重 P_{ye} (kN)		変位 δ_{ye} (mm)	P_{ye} / P_{yc}	荷重 P_{uc} (kN)	変位 δ_{uc} (mm)		
N	6.63	0.71	5.98	0.80	0.90	34.8	15.2	32.8	16.0	0.94	37.7	47.9	43.2	64.8	1.15	上縁コンクリート圧壊
T0	6.63	0.71	8.25	1.24	1.24	45.8	16.1	50.6	20.9	1.10	83.2	56.6	76.8	55.0	0.92	シート剥離
T20	19.5	2.05	17.3	2.53	0.89	61.5	17.0	68.6	21.1	1.12	94.2	50.6	95.5	48.6	1.01	圧壊後、シート剥離
T40	30.1	31.9	25.6	4.11	0.85	74.0	17.8	81.1	23.1	1.10	103	46.7	107	46.8	1.04	圧壊後、シート剥離
T50	35.8	3.86	33.4	6.42	0.93	81.5	18.5	88.8	27.5	1.09	107	42.5	109	45.4	1.02	シート破断

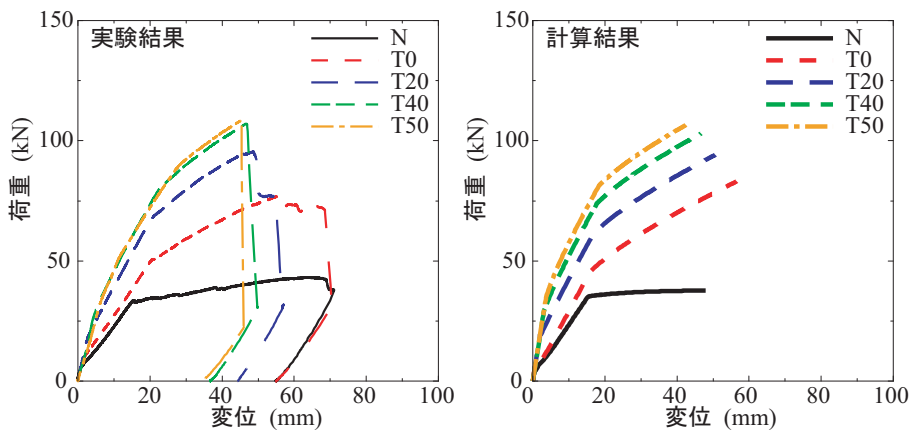


図-3 各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果および計算結果

鉄筋にはD19を2本、下端鉄筋にはD16を2本配置した。なお、本実験では、T0/20試験体の破壊形式を剥離破壊型とするため、上端鉄筋にD19を用い上縁コンクリートの圧壊がシート剥離に先行して生じないように断面設計を行った。緊張接着用シートには、幅220mmのシートを用い、梁中央部から両支点の80mm手前までの範囲に接着した。なお、緊張接着した補強試験体は後述するように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(以後、応力分散用シート)、および弾性係数が含浸接着樹脂の1/60程度、伸び能力が150%の応力緩和材を使用している。なお、緊張接着時におけるシートへの導入緊張力の反力は、RC梁を介さずに鋼製架台を設置して取ることにした。その他の詳細な緊張接着作業工程については、文献²⁾を参照されたい。

静荷重実験は、容量500kNの油圧ジャッキを用いて4点曲げ荷重により行った。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)、鉄筋ひずみ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

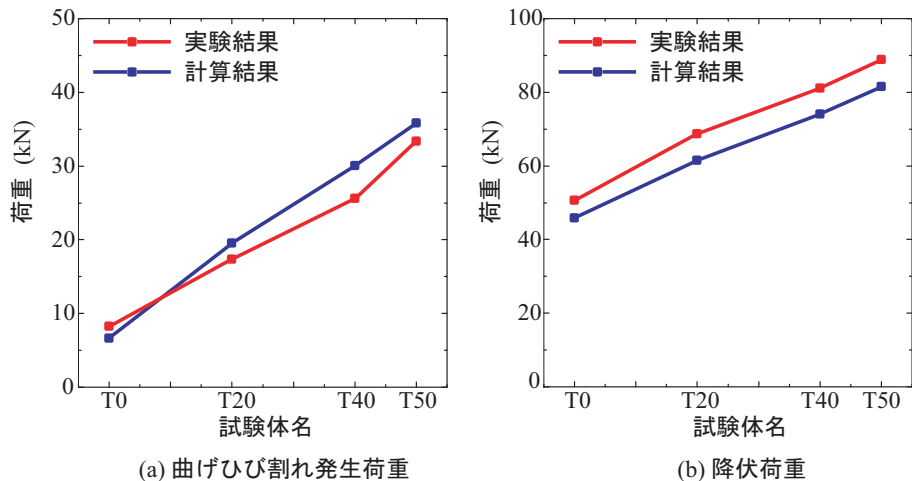
況を連続的に撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 緊張力解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

本研究では、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、接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間が経過した後、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、緊張力解放前のシートひずみを零とし、緊張力を50および100%解放した時のひずみ分布を示している。

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端部の圧縮ひずみが増大していることが分かる。また、そのひずみ勾配は応力緩和材の塗布範囲においてほぼ零レベルに低減されていることが分かる。これらのことより、緊張力の解放により緊張接着用シートとコンクリートの接着界面に生じるせん断応力は、緊張接着用シートの両端部における応力緩



(a) 曲げひび割れ発生荷重 (b) 降伏荷重

図-4 曲げひび割れ発生荷重および降伏荷重

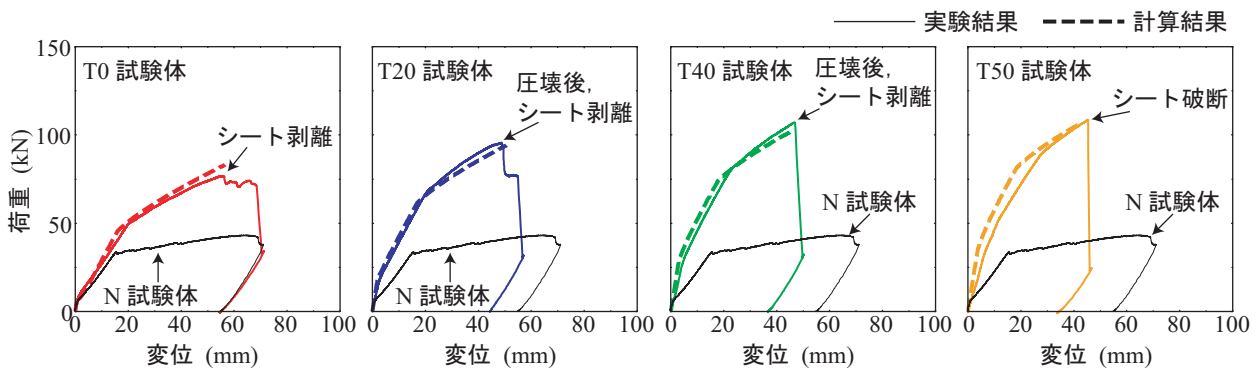


図-5 荷重-変位関係に関する実験結果と計算結果の比較

和材塗布範囲で除々に緩和され、シートの定着が確保されていることが分かる。

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。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、計算では、表-1に示した実測導入緊張率を適用するとともに、シートとコンクリートの完全付着を仮定している。また、表-3には、参考のために曲げひび割れ発生時、降伏時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の実験結果より、シート緊張率が大きいほど無補強RC梁よりも曲げ剛性や曲げ耐力が向上していることが分かる。特に、ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生後の剛性勾配は、緊張接着することにより大きく向上している。なお、実験結果において、T40およびT50試験体の曲げ耐荷性状には大きな差異が認められない。これは、両試験体の緊張率の違いが25%程度と小さいことや、後述するようにT40試験体が上縁コンクリート圧壊により終局に至っているのに対し、T50試験体は圧壊に先行してシート破断により終局に至ったためと考えられる。

図-4には、曲げひび割れ発生荷重および降伏荷重に関する実験結果を計算結果と比較して示している。図より、AFRPシート緊張接着補強により曲げひび割れ発生荷重や降伏荷重が増大し、その効果は導入緊張率が高いほど大きいことが分かる。導入緊張率を20~50%とすることにより、曲げひび割れ発生荷重は無緊張の場合と比較して2~4倍程度に増大していることが分かる。また、降伏荷重は、無緊張の場合と比較して35~75%程度増大している。なお、曲げひび割れ発生荷重に関する実験結果は計算結果とほぼ同程度であるのに対して、降伏荷重はいずれの試験体も実験結果が計算結果を1割程度上回っている。

図-5には、荷重-変位関係に関する実験と計算結果を比較して示している。なお、計算結果は、図-3の場合と同様に断面分割法により算出したものである。図より、T0試験体の場合には、主鉄筋降伏後、実験結果の剛性勾配が計算結果のそれを下回り、最終的には実測耐力が計算耐力を下回る状態でシート剥離により終局に至っている。従って、T0試験体は剥離破壊型で終局に至ったといえる。

一方、緊張力を導入したT20/40試験体の場合には、主

表-4 破壊形式

試験体名	M_y/M_u	予想される破壊形式	実験結果における破壊形式
T0	0.55	剥離破壊型	剥離破壊型
T20	0.65	剥離破壊型	曲げ圧壊型
T40	0.72	曲げ圧壊型	曲げ圧壊型
T50	0.76	シート破断型	シート破断型

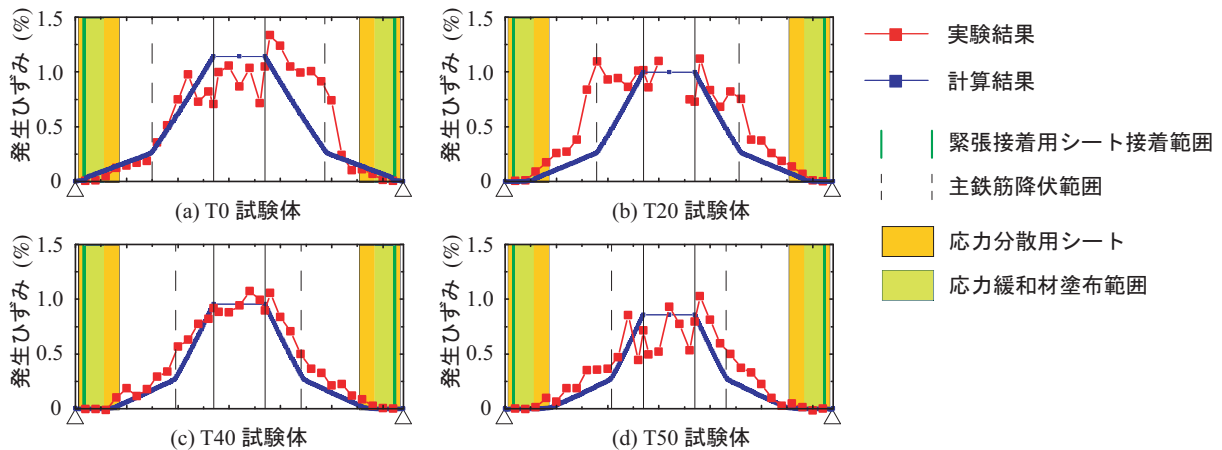


図-6 終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

鉄筋降伏後においてもその剛性勾配が計算結果より大きく、かつ実測荷重が計算耐力に到達し、上縁コンクリートが圧壊した後シート剥離により終局に至っている。従って、T20/40 試験体は曲げ圧壊型で終局に至ったものと判断できる。また、T50 試験体は計算上シート破断により終局に至る試験体であり、実験においても実測荷重が計算荷重を上回った後圧壊することなくシート破断により終局に至っている。以上より、耐荷性能および破壊性状に関する計算結果は実験結果と良好に対応しているといえる。

表-4には、各試験体の M_y/M_u 、予想される破壊形式および実験結果における破壊形式を一覧にして整理している。なお、予想される破壊形式は、前述のとおり著者らの既往の無緊張FRPシート曲げ補強RC梁に関する静載荷実験の結果に基づいた提案式¹⁾より判定したものである。表-4より、T20試験体を除いた3試験体に関しては、予想される破壊形式は実験結果と対応していることが分かる。また、T20試験体の場合は、予想される破壊形式が剥離破壊型であるのに対し、実験結果は曲げ圧壊型となっている。従って、破壊形式予測式は、T20試験体に対して安全側の評価を与えているものと考えられる。このことから、既往の破壊形式予測式はAFRPシート緊張接着RC梁にも適用可能であ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-6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。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。なお、ここでは、前述の図-5を参考にして、実測終局変位が計算値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、T0/20試験体の場合には、等曲げ区間の実験および計算結果がほぼ対応しているものの、等せん断力区間においては、実験結果が計算結果を大きく上回っている箇所が見受けられる。これは、荷重点近傍の等せん断力区間における下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れ先端部が、シートを押し下げて引き剥がすピーリング作用により部分剥離が発生していることを示すものである。なお、T20試験体は実測の荷重-変位関係からは曲げ圧壊型と判定されているにもかかわらず、ピーリング作用による部分剥離の傾向が現れている。このことは、T20試験体が破壊形式予測式では剥離破壊型と予測されていることと対応している。

一方、T40/50試験体の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、T40/50試験体における緊張接着用シートとコンクリートとの付着は、終局時まで十分に確保され、ピーリング作用による部分剥離が生じていないことが分かる。

3.4 ひび割れ性状

写真-1には、各試験体の終局時近傍のひび割れ進展状況を示している。写真より、T0/20試験体の場合には、

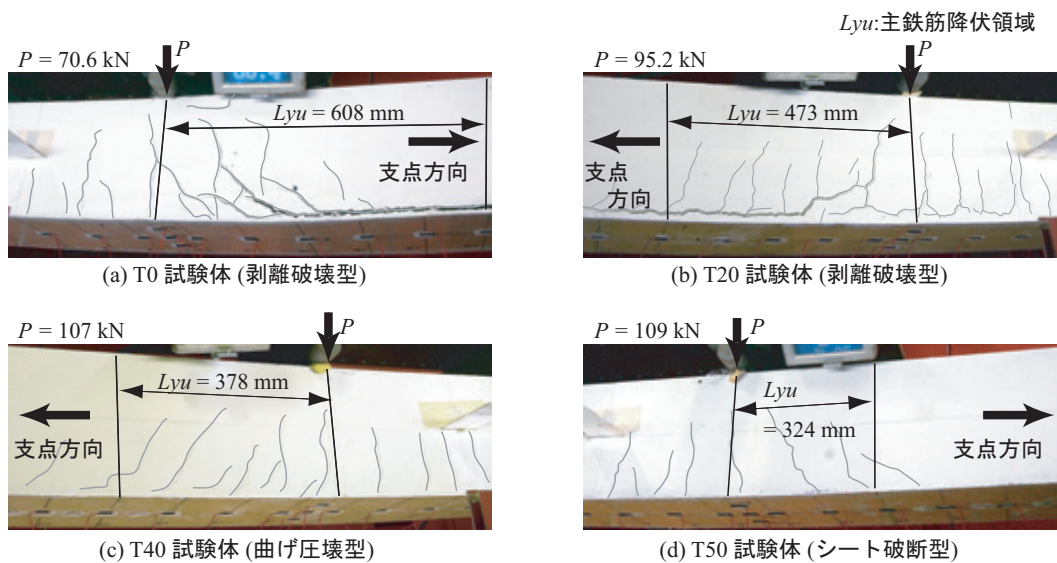


写真-1 各試験体の終局時近傍におけるひび割れ性状

ピーリング作用によるAFRPシートの部分剥離が発生していることが分かる。このような性状は、前述のAFRPシートのひずみ分布性状に関する実験結果と対応している。一方、T40/50試験体の場合には、曲げおよび斜めひび割れの発生が見られるものの、T0/20試験体に見られたピーリング作用による部分剥離の兆候はほとんど見られない。

以上のことより、シートの導入緊張力が高いほど、ひび割れの開口やピーリング作用によるAFRPシートの部分剥離が抑制される傾向にあることがわかる。

3.5 緊張力導入によるシート剥離抑制効果の影響要因

前節までの検討により、AFRPシートの導入緊張率が大きいほど、ピーリング作用によるシート剥離が抑制される傾向にあることが明らかになった。本節では、剥離抑制効果の影響要因について検討する。

著者らによる既往の研究¹⁾では、計算終局時における等せん断力区間の主鉄筋降伏領域(以後、主鉄筋降伏領域 L_{yu})内の下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れが、ピーリング作用によるシート剥離の要因になることを明らかにしている。写真-1より、この傾向は本実験のT0/20試験体においても同様に認められることが分かる。

一方、T40/50試験体の場合には、T0/20試験体よりも主鉄筋降伏領域が小さく、かつ下縁かぶりコンクリートには斜めひび割れの発生が見られるものの、ひび割れの開口やピーリング作用によるシートの部分剥離は認められない。

以上のことより、緊張力導入によるシートの剥離抑制効果には、緊張接着による主鉄筋降伏領域の縮小が影響を及ぼしているものと考えられる。なお、その他の剥離抑制の影響要因としては、シートへの緊張力導入に伴うデコンプレッションモーメントによるせん断耐力の増大

も考えられる。これらのメカニズムについては、今後、数値解析的な検討を併用して解明していく必要がある。

4. まとめ

本研究では、AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁のシート剥離性状を含めた曲げ耐力性状に及ぼすシート導入緊張率の影響を検討することを目的として、AFRPシートの導入緊張率を変化させたAFRPシート緊張接着RC梁の静荷重実験を実施した。本実験により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) シートの導入緊張率が大きい場合ほど曲げひび割れ発生荷重、降伏荷重および終局荷重が大きくなる。
- 2) AFRPシートに緊張力を導入して接着することによって、ピーリング作用によるシート剥離が抑制される。
- 3) 無緊張のFRPシート曲げ補強RC梁の実験結果に基づいて提案した破壊形式予測式は、AFRPシート緊張接着RC梁にも適用可能である。
- 4) 緊張力導入によるシートの剥離抑制効果には、緊張力の導入に伴う主鉄筋降伏領域の縮小などが影響を及ぼしている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐力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) 澤田純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1543-1548, 2008.7
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2007