

AFRPシート曲げ補強RC梁のシート破断抑制法に関 する静載荷実験

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2017-03-23
	キーワード (Ja):
	キーワード (En): RC beam, AFRP sheet, Flexural
	reinforcing, Falling-weight impact test, Rupture control
	method
	作成者: 栗橋, 祐介, 小室, 雅人, 三上, 浩, 岸, 徳光
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009172

AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシート破断抑制法 に関する静載荷実験

祐介*1, 小室 雅人*1, 三上 浩*2, 岸 徳光*3 栗橋

Static loading tests on rupture control of AFRP sheet for flexural strengthening of RC beam

Yusuke KURIHASHI, Masato KOMURO, Hiroshi MIKAMI and Norimitsu KISHI

(原稿受付日 平成 28 年 11 月 10 日

論文受理日 平成 29 年 2 月 10 日)

Abstract

In this study, in order to propose the effective rupture control method of Aramid FRP (AFRP) sheet for flexural strengthening of RC beam, falling-weight impact loading tests for the strengthened RC beams were conducted. In these experiments, the followings were investigated; 1) effect of the unit mass of the flexural strengthening AFRP sheet; 2) effect of the horizontally bonded AFRP sheet to the side surface of the beam; and 3) effect of the U-shaped bonding AFRP sheet. The results obtained from these experiments were as follows: 1) rupture of the flexurally reinforcing AFRP sheet can be effectively controlled by increasing the sheet volume; 2) effect of the horizontally bonded sheet was not much; and 3) shear cracks can be restrained by the U-shaped bonding sheet, however rupture of the sheet for flexural reinforcing cannot be restrained.

Keywords: RC beam, AFRP sheet, Flexural reinforcing, Falling-weight impact test, Rupture control method

1 はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐力向上法として、連続繊維 (FRP) シート接着工法が広 く採用されるようになってきた。一方で、最近では既設の耐衝撃用途構造物の経年劣化や耐力不足も報 告されており、この種の構造物の耐衝撃性向上法の確立も喫緊の課題となっている。著者らは、これま で耐衝撃用途 RC 構造物の耐衝撃性向上法として FRP シート接着工法を提案している。また、FRP シ ートには耐衝撃性に優れるアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを採用することとし、その適用性につい ても検討を行っている⁽¹⁾。なお、これらの検討は、RC 構造物の最も基本的な構造要素である RC 梁を 対象に行っている。その結果、AFRP シートで曲げ補強を施すことにより RC 梁の変形量やひび割れ幅 を低減可能であることや、シート目付量を増加させることにより RC 梁の耐衝撃性を向上させることが 可能であること等を、明らかにしている⁽²⁾。

^{*1} 室蘭工業大学 くらし環境系領域

^{*2} 三井住友建設(株)技術研究所

⁽独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校 *3

試験 体名	シート 目付量 (g/m ²)	補強方法	設定 落下 <i>H</i> (m)	実測 落下 高さ <i>H</i> (m)	コンク リートの 圧縮強度 (MPa)	主鉄筋 降伏 強度 (MPa)	計算 曲げ 耐力 (kN)	計算 せん断 耐力 (kN)	せん 断裕 度 α	シート 破断 の 有無
N-H2.5 ⁽³⁾	_	無補強	2.5	2.43	23.4	359	56.6	277	4.89	_
A830-H2.5 ⁽³⁾	820	曲げ補強	2.5	2.37	32.0	369	98.0	285	2.90	無
A830-H3.0 ⁽³⁾	830	のみ	3.0	2.75						有
A1245-H3.0 ⁽³⁾	1 245	曲げ補強	3.0	2.61	22.4	359	112.8	287	2.54	無
A1245-H3.5 ⁽³⁾	1,245	のみ	3.5	3.05	55.4					無
A830S-H3.0	820	曲げ補強+	3.0	2.61	22.4	359	100.1	287	2.86	無
A830S-H3.5	830	側面補強	3.5	3.05	33.4					有
A830U-H2.5	830	曲げ補強+	2.5	2.27	33.4	359	98.2	287	2.92	無
A830U-H3.0		U 字型補強	3.0	2.61						有

表1 試験体一覧

しかしながら、入力エネルギーが大きい場合には、斜めひび割れに囲まれた領域においてひび割れが 大きく開口するとともに上縁コンクリートの圧壊が顕在化するため、静荷重載荷の場合よりも載荷点近 傍のAFRP シートに応力が局所的に集中しシートが破断して終局に至る傾向にあることが明らかになっ ている。従って、FRP シートを用いた RC 部材の適切な耐衝撃性向上法を確立するためには、シートの 破断メカニズムを解明し、その抑制法や予測法の提案に向けた検討を推進することが肝要である。その ため、著者らはこれまで高目付量のAFRP シートを使用した場合や、AFRP シートより低弾性であるポ リエチレンテレフタラート繊維製 FRP (PFRP) シートを併用して曲げ補強を施した場合について検討を 行った⁽³⁾。その結果、AFRP シートの目付量を増加させることにより、斜めひび割れの発生角度が浅く なるとともに、大きなひずみの発生領域が拡大するため、シートに発生する応力集中が緩和され、シー ト破断が抑制されることが明らかになった。また、PFRP シートを用いて曲げ補強し、さらに AFRP シ ートを積層することで、AFRP シートに局所的に伝わる応力が緩和され、シート破断が抑制されること

なお、AFRP シートの破断を抑制するためには、上記のように曲げ補強シートの目付量を増加させる 方法や異なる材質のシートを用いる方法の他、梁側面にシートを接着することによってシート破断の要 因となるひび割れの発生・開口を抑制する方法も効果的であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制策を 提案することを目的に、シート破断の起因となる斜めひび割れや曲げひび割れの開口を抑制する方法と して、梁両側面に軸方向に AFRP シートを接着する方法 (以後、側面補強法) や梁両側面と底面に AFRP シートを U 字型に巻き付ける方法 (以後、U 字型補強法) を提案し、RC 梁の衝撃荷重載荷実験により 提案補強法の効果を検討した。また、側面補強法および U 字型補強法による破断抑制効果と曲げ補強シ ートの目付量増加による効果との差異を比較検討するため、高目付量の AFRP シートを用いた文献⁽³⁾ の実験結果も用いて検討することとした。

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る。試験体は、AFRP シート補強の有無や補強方法、落下高さを変化させた全9 体である。表中の試験体名のうち、第一項目は AFRP シート曲げ補強の有無 (N: 無、A: 有) を示し、補強有りの場合には曲げ補強に用いた AFRP シート (以後、曲げ補強シート) の目付量 (g/m²) を併せて示している。また、付随する英文字 S、U はそれぞれ側面補強法および U 字型補強法を併用した梁を示している。このうち、N/A830/A1245 試験体は、文献⁽³⁾の結果の一部を引用したものである。





なお、A830 試験体は、既往の文献⁽³⁾において設定落下高さ H=3.0 m で曲げ補強シートが破断したこ とから、本研究では曲げ補強シートの破断抑制法として 1) 梁両側面に部材軸方向に AFRP シートを接 着して斜めひび割れや曲げひび割れの発生・開口を抑制する方法 (側面補強法、A830S 試験体)、および 2) 梁両側面および底面に AFRP シートを U 字型に巻き付けて、斜めひび割れの発生・開口を抑制する 方法 (U 字型補強法、A830U 試験体) を提案した。また、文献⁽³⁾より、曲げ補強シートの目付量を増加 させた試験体の結果 (A1245 試験体) も引用し、曲げ補強シートの破断抑制効果を比較検討することと した。また、表には本実験に用いた各試験体のコンクリート強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示し ている。静的計算曲げ耐力とせん断耐力は、コンクリート標準示方書⁽⁴⁾に準拠し、前述の材料強度を用 いて算出した。曲げ耐力は AFRP シートとコンクリートの完全付着を仮定し、断面分割法によって梁上 縁が圧縮破壊 (終局圧縮ひずみ 3,500 µ) に至った時点を終局として算定した。せん断耐力は、シートの 補強効果を考慮せずに算出した。なお、表中の実測落下高さは、重錘の実測衝突速度から自由落下高さ を評価して求めている。

図1 には、試験体の形状寸法と配筋および補強状況を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法 (梁幅×梁高×スパン長)は200×250×3,000 mm であり、軸方向鉄筋は上下端にそれぞれ D19 を各 2 本配置し、梁の端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接している。また、せん断補強筋には D10 を 用い、100 mm 間隔で配筋している。AFRP シートは、梁底面の補強範囲にブラスト処理を施し、エポ キシ系プライマーを塗布して指触乾燥状態であることを確認の後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて接 着を行っている。

目付量	保証耐力	設計厚	引張強度	弾性係数	破断ひずみ	
(g/m^2)	(kN/m)	(mm)	(GPa)	(GPa)	(%)	
415	600	0.286	2.10	100	1.8	
830	1,200	0.572	2.10	100		

表2 AFRP シートの力学的特性値



また、A1245 試験体の場合には、目付量 415 および 830 g/m² のシートを重ねて接着し補強した。 A830S 試験体の場合には、曲げ補強シートを接着した後、目付量 415 g/m² の AFRP シートを梁両側面 に軸方向に接着した。A830U 試験体の場合には、曲げ補強シートを接着した後、目付量 415 g/m² の AFRP シートを梁両側面と底面に巻き付けて U 字型に接着した。なお、養生は気温が 20 ℃ 程度の環 境で 7 日間以上行った。表 2 には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。

重錘落下衝撃実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ落下させ る単一載荷法により実施している。重錘落下位置はスパン中央部である。試験体の支点部は回転を許容 し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。なお、衝撃荷重載荷実験における重錘衝 撃力および支点反力は、それぞれ重錘および支点治具に内蔵された衝撃荷重測定用ロードセルを用いて 計測した。また、既往の研究成果^{(2),(5)}に基づき、重錘落下衝撃実験における梁の終局状態は、残留変位 が梁のスパン長の 2% に達した状態に至るか、またはシートが剥離もしくは破断した状態とした。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力と合支点反力(以後、単に支点反力)、載荷点変位およびシート各点の軸方向ひずみであり、それぞれ、衝撃荷重測定用ロードセル、非接触式レーザ変位計および箔ひずみ ゲージ(検長 10 mm)を用いて測定した。これらのセンサーによる計測値は増幅器を介して、メモリレ コーダにより一括収録した。また、実験時には、RC梁のひび割れやFRPシートの剥離および破断状況 を高速度カメラを用いて連続撮影した。高速度カメラのフレームレートは 2,000 枚/秒である。

3 実験結果

3.1 時刻歷応答波形

図2には、各種時刻歴応答波形を示している。図2(a)より、重錘衝撃力波形は、補強の有無に関わら ず類似の性状を示していることが分かる。すなわち、振幅が大きく継続時間(応答波形が励起してから 零レベルに戻るまでの時間)が2ms程度の第1波に、振幅の小さい第2波および第3波が後続する 性状を示している。

図 2(b) より、支点反力波形は継続時間が 40~50 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された波形性 状を示していることが分かる。落下高さ H=2.5 m においては、A830/830U 試験体の主波動継続時間が N 試験体の場合よりも短い。これは、シート補強により RC 梁の曲げ剛性が向上したことによるもので ある。また、H=3.0 m においては、A830 試験体の主波動継続時間が A1245/A830S/A830U 試験体の場 合に比較して長い。これは、A830 試験体の場合には、後述するように経過時間 t=10 ms 程度において シートが破断し、曲げ剛性が急激に低下したことによるものである。なお、A830U 試験体の場合も曲げ 補強シートが破断し、載荷点近傍の U 字型補強シートも一部剥離しているが、シートの破断や剥離が部 分的であったため主波動継続時間が A1245/A830S 試験体の場合とほぼ同等であったと考えられる。

H=3.5 m において、A1245 および A830S 試験体の結果を比較すると、A830S 試験体の主波動継続時間は A1245 試験体の場合に比べて長いことが分かる。これは、後述するように A830S 試験体の場合には、経過時間 t = 14 ms 程度において曲げ補強シートが破断し、曲げ剛性が急激に低下したことによるものである。

図 2(c) より、載荷点変位波形は、いずれの試験体においても最大振幅を示す第1波が励起した後、減 衰自由振動状態に至っていることが分かる。落下高さ H=2.5 m の場合には、A830/830U 試験体の最大 変位が N 試験体よりも小さいことから、シート補強によって変形量の抑制効果が発揮されていること が分かる。H=3.0 m の場合には、シート破断を生じた A830 試験体の変位が A1245/A830S 試験体より も大きいことが分かる。なお、A830U 試験体の載荷点変位は、測定不良のため検討から除外している。 これは、実験時において、レーザ式変位計から照射されるレーザの標点として U 字型補強シートに取 り付けた L 字アングルが U 字型補強シートの剥離とともに移動したためである。H=3.5 m の場合に は、シート破断を生じた A830S 試験体の変位が A1245 試験体の場合よりも大きいことが分かる。

以上のことから、AFRP シート曲げ補強を施すことにより、衝撃荷重載荷時の変形量を抑制できるこ とや、シート目付量の増加に伴ってその効果が大きくなることが明らかになった。また、側面補強や U 字型補強を併用することによっても、曲げ剛性の低下を抑制可能であることが明らかになった。

3.2 破壞性状

写真1 には、実験終了後における各 RC 梁側面および底面に関する載荷点近傍のひび割れ性状を示している。なお、AFRP シートに記されている斜線部分は剥離領域を示している。また、A830U-H3.0 試験体に関しては、破壊後の写真ではひび割れやシート剥離の状況が把握しにくいことから、U 字型補強シート剥離前の高速度カメラ画像(経過時間 *t*=8 ms 時)も併せて示している。

写真より、設定落下高さ H=2.5 m の場合に着目すると、A830-H2.5 試験体の側面には斜めひび割れ が約 45°の角度で発生しているのに対し、A830U-H2.5 試験体の場合は、U 字型補強シートに発生した 斜めひび割れの角度が約 60°と大きくなり、曲げひび割れが狭い領域に集中的に発生するため、曲げひ び割れが卓越するような性状を示していることが分かる。また、底面に着目すると、A830U-H2.5 試験体 の方が A830-H2.5 試験体よりも曲げ補強シートの剥離範囲が小さくなっていることが分かる。これは、 U 字型補強により曲げ補強シートの剥離が抑制されたことによるものと考えられる。

設定落下高さ H = 3.0 m において、A830/830U-H3.0 試験体の場合には、曲げ補強シートの破断によって終局に至っていることが分かる。また、A830-H3.0 試験体の場合には、上縁コンクリートが著しく 圧壊するとともに、斜めひび割れや曲げひび割れが大きく開口している。A830U-H3.0 試験体の場合に



写真1 実験終了後の載荷点近傍破壊状況

は、A830U-H2.5 試験体の場合と同様に、角度が 60°程度の斜めひび割れが発生し、曲げが卓越するような性状を示した。また、最終的には、載荷点近傍において曲げ補強シートが破断するとともに、U 字型補強シートが全面的に剥離した。なお、U 字型補強シートの突き合わせ部が開口したことにより、曲げ補強シートの破断が助長された可能性があるものと考えられる。

A830S-H3.0 試験体の場合には、梁側面において A830U-H3.0 試験体の場合よりも角度が小さい斜め ひび割れが発生し、特に右側せん断スパン内において広範囲に渡って側面補強シートが剥離している。 なお、剥離範囲は底面の曲げ補強シートの方が側面補強シートの場合よりも小さい。A1245-H3.0 試験体 の場合には、A830-H3.0 試験体の場合よりも斜めひび割れ角度が小さい。また、斜めひび割れの先端部 においては、曲げ補強シートが部分的に剥離している。実験時には、これらの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り、曲げ補強シートの部分剥離範囲が拡大した ことを確認している。



図 3 A830-H3.0 試験体のひずみ分布。 ひび割れ性状

図 4 A830U-H3.0 試験体のひずみ分布と ひび割れ性状

設定落下高さ H=3.5 m の場合に着目すると、A830S-H3.5 試験体の側面補強シートには多数の斜めひ び割れが発生しており、梁下縁部では側面補強シートが破断していることが分かる。また、底面の状況 より、曲げ補強シートも破断していることが分かる。A1245-H3.5 試験体は、A1245-H3.0 試験体よりも 上縁コンクリートの剥落領域や斜めひび割れの開口幅が大きい傾向にあるものの、概ね同様のひび割れ 分布性状を示している。

以上のことから、U 字型補強を併用することにより、落下高さが低い場合には斜めひび割れやシート の剥離領域を抑制できることが明らかになった。また、側面補強を併用することで、曲げ補強シートの 破断および剥離領域をある程度抑制できることが明らかになった。本論文においては、曲げ補強シート の目付量を増加させる方法が、曲げ補強シートの破断抑制に最も有効であることが明らかになった。

3.3 曲げ補強シートのひずみ分布と梁の損傷に関する経時変化

図3、図4、図5および図6には、それぞれ、A830/A830U/A830S/A1245-H3.0 試験体における曲げ補 強シートの軸方向ひずみおよび側面ひび割れ性状の時刻歴推移状況を示している。図より、いずれの試 験体も経過時間 *t* =1.0 ms まではほぼ同様の性状を示していることが分かる。すなわち、せん断ひび割 れが載荷点部から梁下縁まで進展するとともに、載荷点近傍において 0.5% 程度の引張ひずみが発生し、 その両支点側では圧縮ひずみが発生している。これは、重錘衝突により波動が梁全体に伝播する過程に おいて、見かけ上の固定端が両支点側に推移する状況を示している。



ひび割れ性状

図 6 A1245-H3.0 試験体のひずみ分布と ひび割れ性状

経過時間 t = 4.0 ms および 8.0 ms では、A830-H3.0 試験体の場合には、載荷点近傍のひずみがほぼ 一定値を示す台形状のひずみ分布を示している。これは、写真からも分かるように斜めひび割れが開口 し、それらのひび割れの間の領域に微細な曲げひび割れが発生したことによるものと考えられる。一方、 A830U-H3.0 試験体の場合には、スパン中央部を頂点とする三角形状のひずみ分布を示している。これ は、U 字型補強により斜めひび割れの開口が抑制され、曲げひび割れが卓越する傾向を示したことによ るものと判断される。また、写真より、載荷点近傍において U 字型補強シートの剥離領域 (写真の薄黄 色に変色した領域)が集中していることが分かる。

A830S/A1245-H3.0 試験体の場合には、t = 4.0 ms および 8.0 ms において、共に載荷点近傍を最大値 とする滑らかなひずみ分布を示している。このことから、これらの試験体の場合には、曲げ補強シート のひずみ分布に顕著な影響を及ぼす明瞭なひび割れは発生していないものと推察される。また、 A830S-H3.0 試験体の写真より、斜めひび割れの発生に伴う側面補強シートの剥離領域が広く支点側に進 展していることが確認できる。

経過時間 t = 8.0 ms 以降においては、A830-H3.0 試験体の場合には、t = 9.5 ms で曲げ補強シートが 破断している。また、A830U-H3.0 試験体の場合には、t = 20 ms 以降において U 字型補強シートと曲げ 補強シートが破断している。なお、t = 20 ms において、載荷点近傍の複数点の曲げ補強シートのひずみ が破断ひずみを超過していることより、曲げ補強シートが破断した後、載荷点近傍の U 字型補強シート が剥離したものと考えられる。

A830S-H3.0 試験体の場合には、t = 12 ms 以降において載荷点近傍の曲げ補強シートひずみが増大し、 一部で破断ひずみを超過するひずみが発生している。実験では曲げ補強シートの破断は見られなかった ものの、極めて破断に近い状況に至っていたものと推察される。また、側面補強シートは、右側せん断 スパン内おいて広範囲に渡って剥離していることから、側面補強シートによる曲げ補強効果は大きく低 下しているものと考えられる。

A1245-H3.0 試験体の場合には、*t* = 12 ms 時点で載荷点近傍の曲げ補強シートひずみが増大するものの、その後、*t* = 20 ms において、大きなひずみの発生範囲が両支点側に進展している。そのため、破断ひずみを超過するひずみは全く発生していない。これは、写真から分かるように、曲げ補強シートが部分的に剥離し、その範囲が両支点側に進展したことによるものと推察される。

このように、設定落下高さ H=3.0 m においては、A830-H3.0 試験体の場合には曲げ補強シートが破断したのに対し、側面補強法を併用した A830S-H3.0 試験体および曲げ補強シート目付量を増加させた A1245-H3.0 試験体の場合には、曲げ補強シートの破断が抑制されたことが明らかになった。また、U 字型補強を併用した A830U-H3.0 試験体の場合には、斜めひび割れの抑制効果は確認できたものの、曲げ補強シートの破断を抑制するには至らなかった。

以上のことから、本実験の範囲内においては、曲げ補強シートの破断抑制法として最も有効なのは曲 げ補強シートの目付量を増加させる方法であり、次が側面補強法を併用する方法であった。U 字型補強 を併用する方法は曲げ補強シートの部分剥離抑制効果は見られたものの、シートの破断抑制効果を発揮 するには至らなかった。

4 まとめ

本研究では、AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制策を提案することを目的に、 斜めひび割れや曲げひび割れの開口を抑制する方法として、梁両側面に軸方向に AFRP シートを接着す る側面補強法や梁両側面と底面に AFRP シートを U 字型に巻き付ける U 字型補強法を提案し、RC 梁 の衝撃荷重載荷実験により提案補強法の効果を検討した。また、側面補強法および U 字型補強法による 破断抑制効果と曲げ補強シートの目付量増加による効果との差異を比較検討するため、高目付量の AFRP シートを用いた実験結果も用いて検討した。本実験の範囲内で得られた結果を整理すると以下のとおり である。

- (1) 側面補強法を適用することにより AFRP シート曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷時におけるシートの 破断を抑制可能である。ただし、曲げ補強シートの目付量を増加する場合の方がその効果は大きい。
- (2) U 字型補強法を適用する場合には、梁の斜めひび割れや曲げ補強シートの剥離を抑制可能であるものの、曲げ補強シートの破断を抑制する効果は低い。
- (3) 曲げ補強シートの目付量を増加することによりシートの破断が抑制されるものの、シートは広範囲 に渡って剥離する傾向を示す。

参考文献

- (1) 今野久志, 西弘明, 栗橋祐介, 岸徳光, AFRP シート接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動, コンクリート工 学年次論文集, vol. 35, 2013.7, p. 721-726.
- (2) 三上浩, 今野久志, 栗橋祐介, 岸徳光, AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響, コンクリート工学年次論文集, vol. 36, 2014.7, p. 523-528.
- (3) 佐藤元彦, 栗橋祐介, 三上浩, 岸徳光, AFRP および PFRP シートで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, vol. 37, no. 2, 2015.7, p. 1153-1158.
- (4) 土木学会, コンクリート標準示方書[設計編], 2012 年制定.
- (5) 岸徳光,三上浩,衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案,構造 工学論文集,土木学会, Vol.53A, 2007.3, p. 1251-1260.