



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



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: jpn 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

栗橋 祐介*¹, 小室 雅人*¹, 三上 浩*², 岸 徳光*³

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 暮らし環境系領域

*2 三井住友建設 (株) 技術研究所

*3 (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校

表 1 試験体一覧

試験体名	シート目付量 (g/m ²)	補強方法	設定落下高さ H (m)	実測落下高さ H (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)	せん断余裕度 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⁾	830	曲げ補強のみ	2.5	2.37	32.0	369	98.0	285	2.90	無
A830-H3.0 ⁽³⁾			3.0	2.75						有
A1245-H3.0 ⁽³⁾	1,245	曲げ補強のみ	3.0	2.61	33.4	359	112.8	287	2.54	無
A1245-H3.5 ⁽³⁾			3.5	3.05						無
A830S-H3.0	830	曲げ補強+側面補強	3.0	2.61	33.4	359	100.1	287	2.86	無
A830S-H3.5			3.5	3.05						有
A830U-H2.5	830	曲げ補強+U字型補強	2.5	2.27	33.4	359	98.2	287	2.92	無
A830U-H3.0			3.0	2.61						有

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レート繊維製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も明らかにしている。

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。

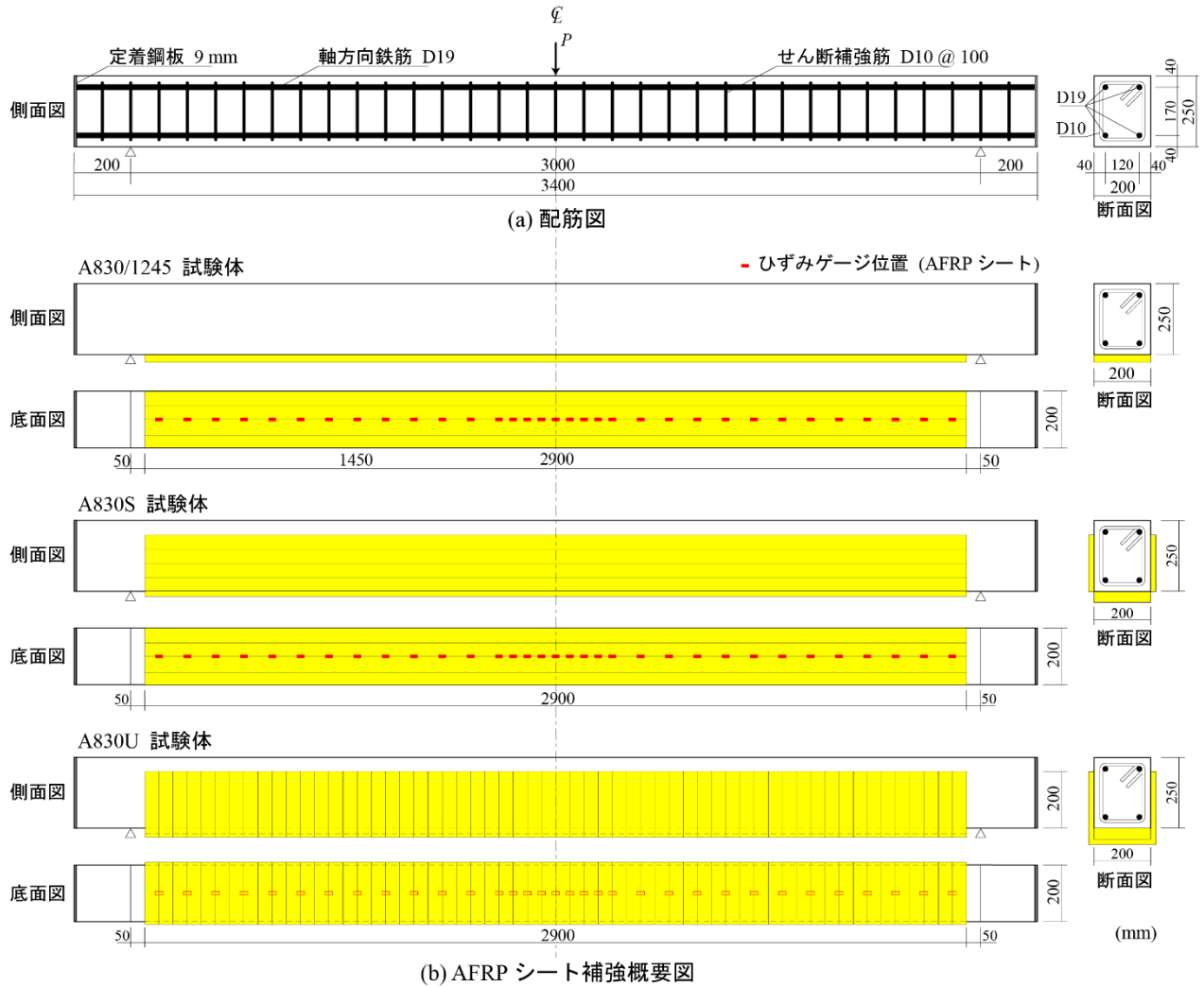


図 1 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

なお、A830 試験体は、既往の文献⁽³⁾において設定落下高さ $H=3.0\text{ m}$ 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 $3,500\ \mu$) 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 $200\times 250\times 3,000\text{ mm}$ 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。

表 2 AFRP シートの力学的特性値

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 (%)
415	600	0.286	2.10	188	1.8
830	1,200	0.572			

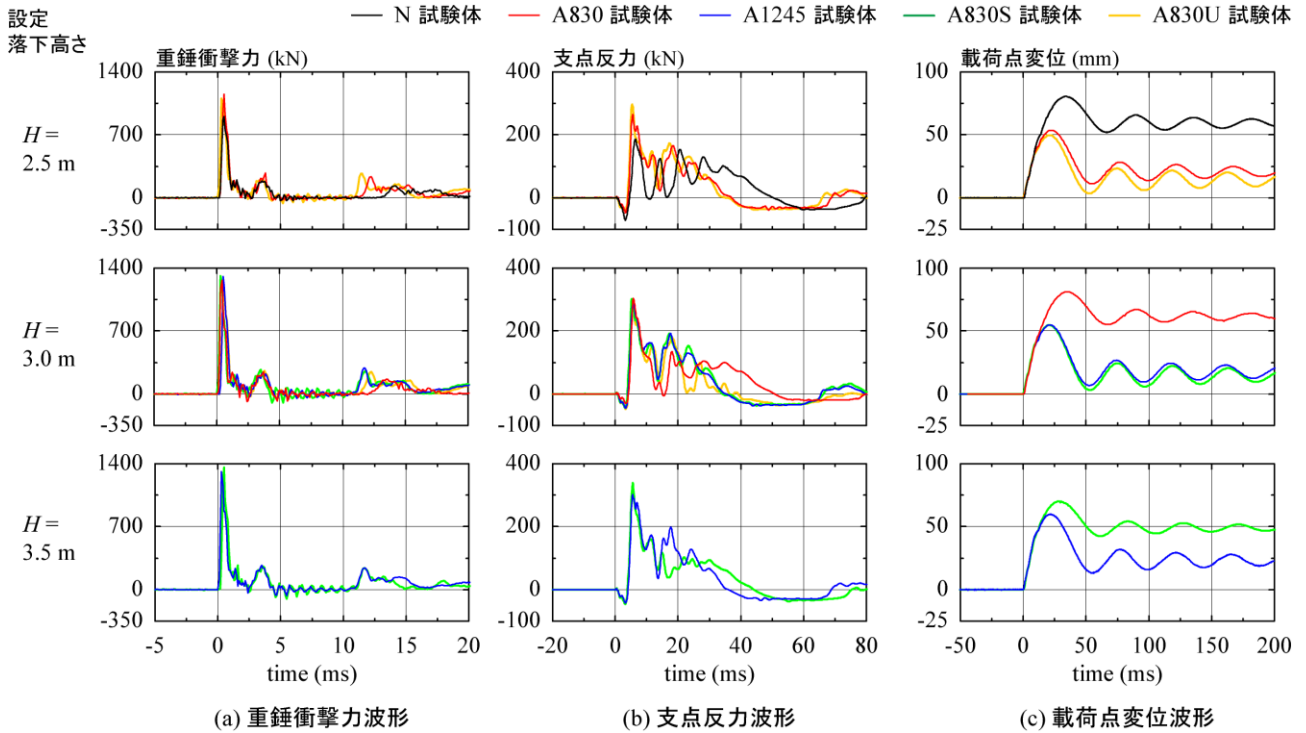


図 2 重錘衝撃力, 支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

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 °C 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 時刻歴応答波形

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 2 ms 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 破壊性状

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 の場合に注目すると、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、底面に注目すると、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

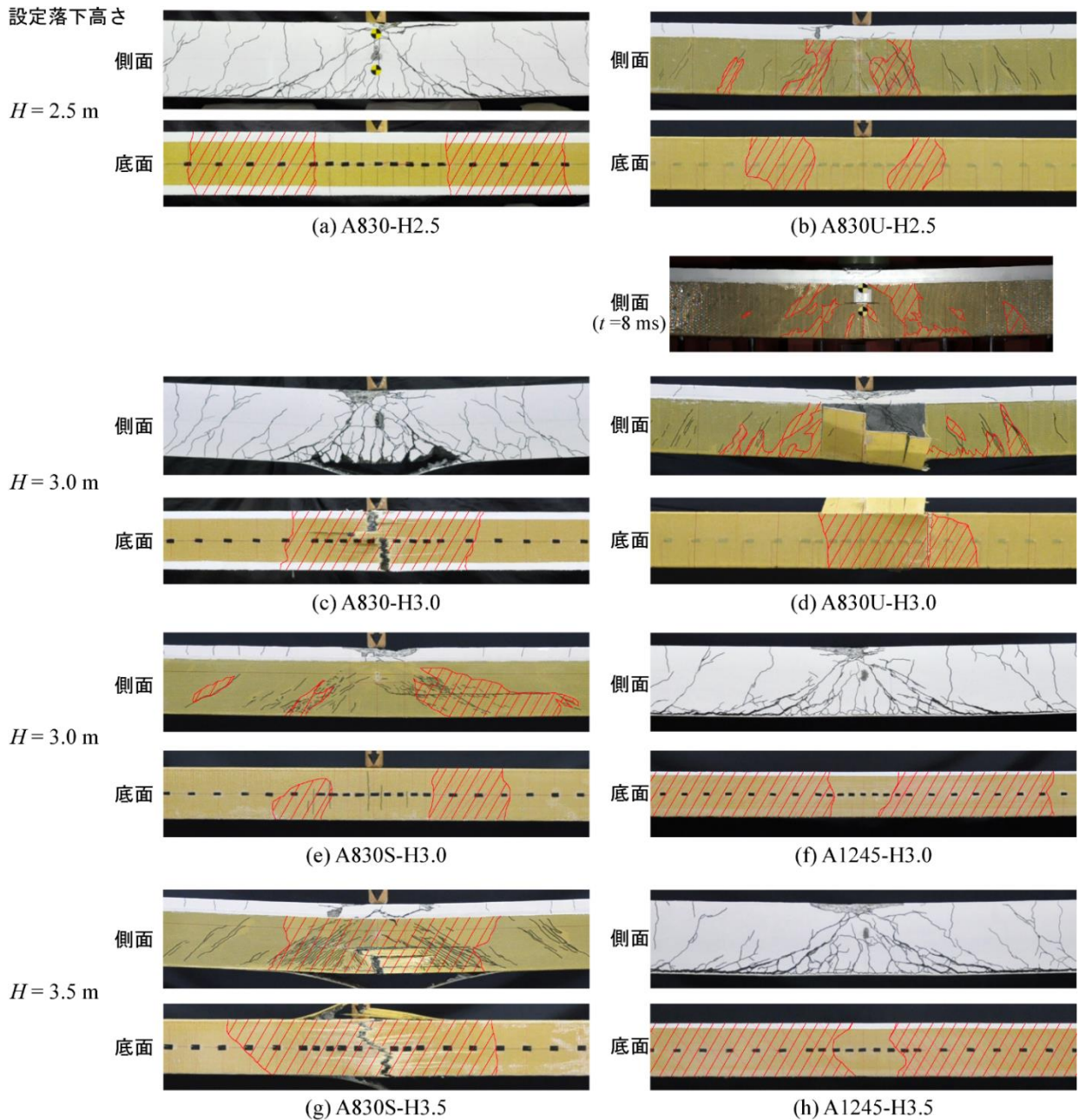


写真 1 実験終了後の載荷点近傍破壊状況

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。

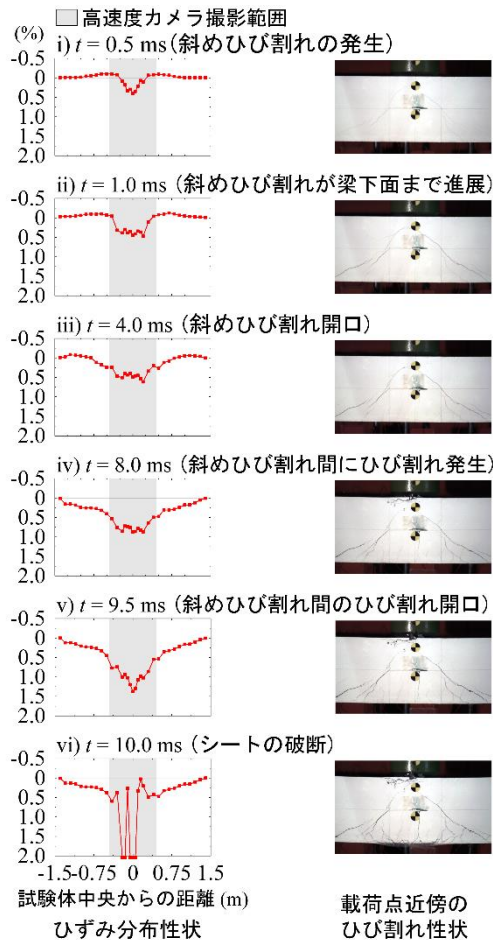


図3 A830-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ性状

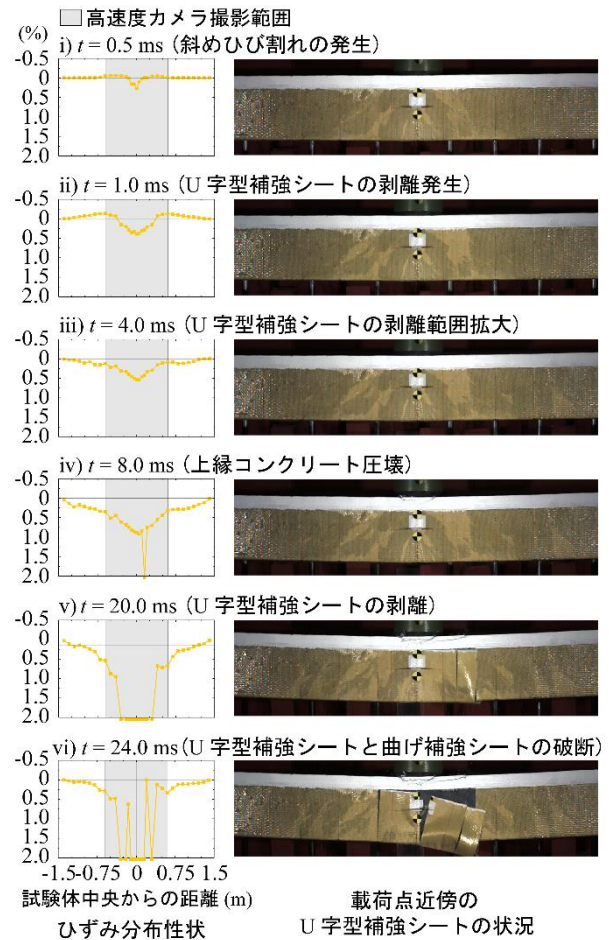


図4 A830U-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ性状

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、せん断ひび割れが荷点部から梁下縁まで進展するとともに、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。

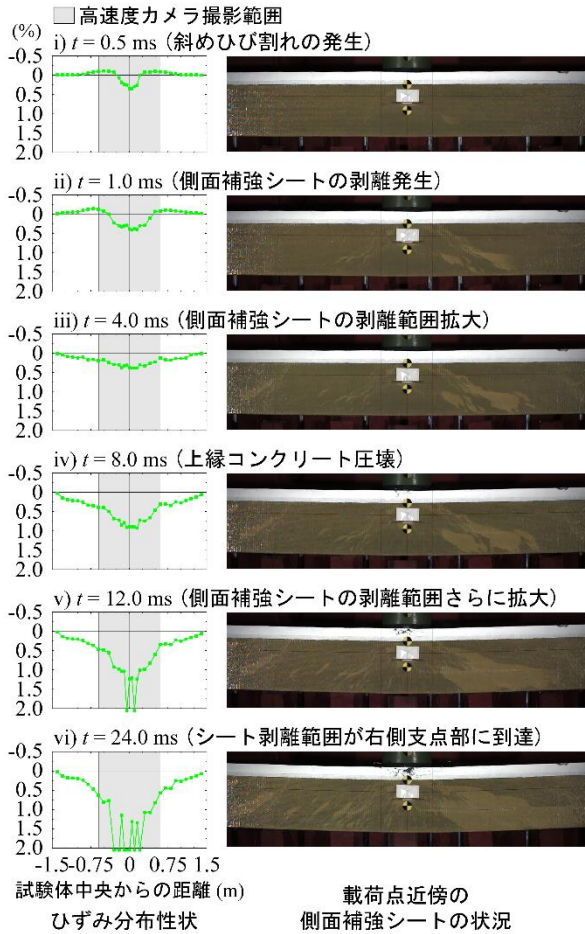


図5 A830S-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ性状

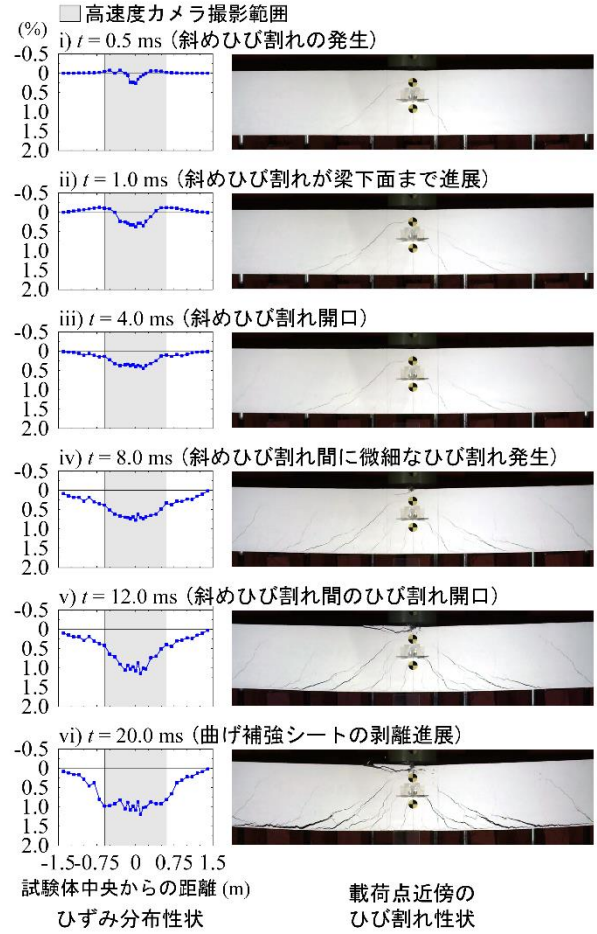


図6 A1245-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ性状

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、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中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、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、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、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に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、 $t = 12 \text{ ms}$ 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、 $t = 20 \text{ ms}$ 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 $H = 3.0 \text{ m}$ 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.