

シート目付量を変化させた AFRP シート曲げ補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験

Impact loading tests on RC beam reinforced with various volume of AFRP sheet

室蘭工業大学大学院 ○ 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
(独)寒地土木研究所 正会員 今野 久志 (hisashi konno)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の静的耐力向上法として、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、衝撃荷重に対する耐力向上法の確立も急務となっている。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たアラミド繊維製 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⁾。

既往の著者らの研究では、AFRP シート曲げ補強により RC 梁の耐衝撃性が向上することや、静載荷時にはシート剥離によって終局に至る RC 梁が衝撃荷重載荷時にはシート破断によって終局に至ることなどを明らかにしている。しかしながら、これらの知見は限定された目付量に対する結果であり、目付量が異なる場合等詳細な検討を行うまでには至っていない。

このような背景より、本研究では、AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響を検討することを目的に、既往の研究よりも目付量が大きい AFRP シートを用いて補強した RC 梁の衝撃荷重載荷実験を行い、その影響について検討を行った。

2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧にして示している。表中、試験体名の第 1 項目は補強の有無 (N: 無補強, A: シート補強)、第 2 項目は載荷方法 (S: 静的, I: 衝

撃)、第 3 項目の H に付随する数値は落下高さ (m) を示している。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。

衝撃荷重載荷の場合には、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自由落下させる単一載荷方法により実験を行っている。重錘落下位置は梁のスパン中央部であり、試験体の両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である。

静載荷の場合には、梁幅方向に 200 mm、スパン方向に 100 mm の鋼製載荷板を梁のスパン中央部に設置し、油圧ジャッキを用いて荷重を作用させた。また、衝撃荷重載荷実験において、終局状態は残留変位量が梁の純スパン長の 2% に達した状態になるか、またはシートが剥離もしくは破断した状態と定義している。

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 × 純スパン長) は 200 × 250 × 3,000 mm であり、軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置しており、梁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。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、本実験で用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。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) およびシート各点の軸方向ひず

表-1 試験体一覧

試験体名	補強の有無	載荷方法	計算 曲げ耐力 (kN)	計算 せん断耐力 (kN)	せん断 余裕度	落下 高さ H (m)	入力 エネルギー E (kJ)	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	主鉄筋 降伏強度 (MPa)
N-S	無	静的	50.2	283.5	5.65	-	-	23.4	358.1
N-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
N-I-H2.5						2.5	7.4		
A415-S	有	静的	73.7	283.5	3.85	-	-	23.4	358.1
A415-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
A415-I-H2.5						2.5	7.4		
A415-I-H3.0						3.0	8.8		
A830-S	有	静的	98.2	283.5	2.89	-	-	32.0	368.6
A830-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
A830-I-H2.5						2.5	7.4		
A830-I-H3.0						3.0	8.8		

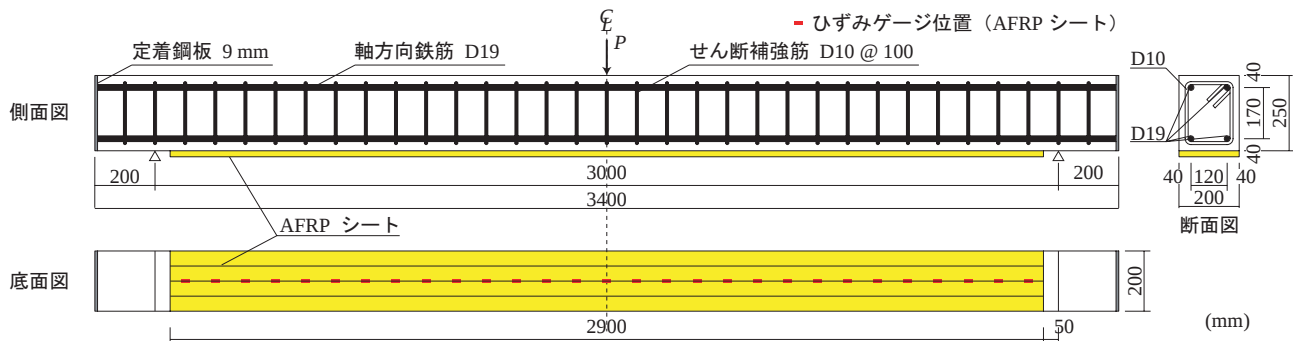


図-1 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

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 (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75
415	588	0.286			

みである。また、実験時には、RC 梁のひび割れや AFRP シートの剥離および破断状況を撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 静荷重実験結果

図-2 には、RC 梁の荷重-変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は土木学会コンクリート標準示方書²⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、コンクリートとシートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。

図より、各試験体の耐荷性状は、主鉄筋降伏時までは補強の有無によらず、ほぼ同様であることが分かる。一方、主鉄筋降伏後において、無補強の場合には荷重がほとんど増加しないのに対し、曲げ補強した場合には剛性勾配が大きくなるとともに、最大荷重も増加している。このような傾向は、シート目付量が多い A830-S 試験体の場合に顕著である。

また、実験結果と計算結果との比較から各試験体の破壊形式は、A415-S 試験体場合には実測荷重が計算耐力を上回り上縁コンクリートが圧壊した後シートが剥離していることから「曲げ圧壊型」、A830-S 試験体場合には実測荷重が計算耐力を下回る状況でシートが剥離して終局に至っていることから「剥離破壊型」に分類される。

3.2 衝撃荷重実験結果

(1) 各種時刻歴応答波形

図-3 には、全試験体の各種時刻歴応答波形を示している。図-3 (a) より、重錘衝撃力波形は、試験体によらず振幅が大きく継続時間が 1 ms 程度の第 1 波に振幅が小さい第 2 波目が後続する性状を示していることが分かる。また、最大振幅はいずれの試験体も 1,200 kN 程度でありほぼ同等である。

図-3 (b) より、支点反力は継続時間が 40 ~ 50 ms 程度の主波動に継続時間の短い高周波成分が合成された性状を示していることが分かる。最大振幅は、シート目付量の大きい A830-I 試験体の場合が最も大きい。また、主波

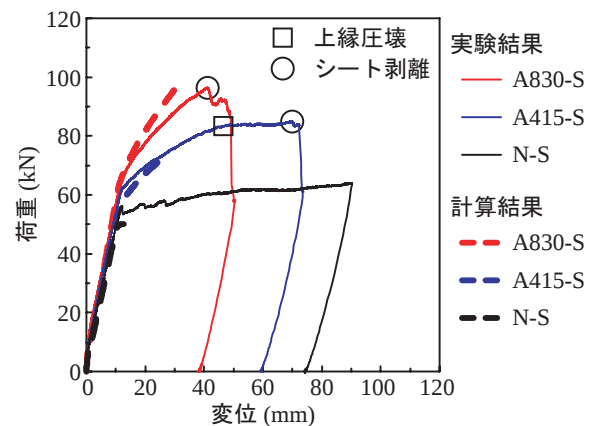


図-2 荷重-変位関係

動継続時間は無補強の場合よりも曲げ補強した場合が小さいものの、シート目付量による違いは見られない。

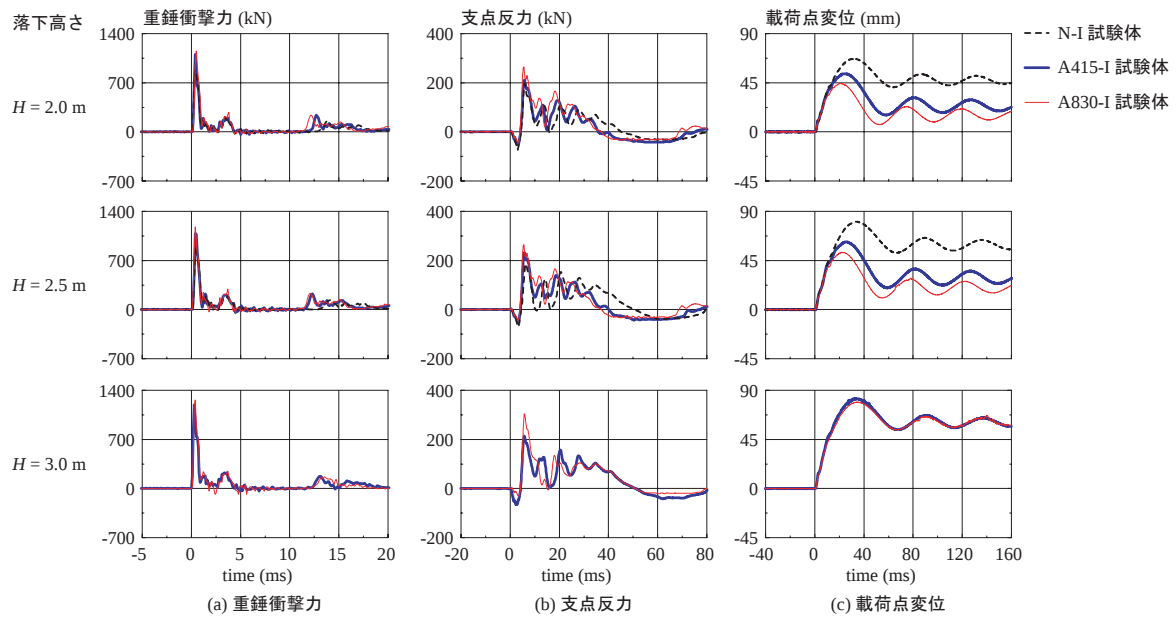
図-3 (c) より、載荷点変位は、いずれの試験体においても最大振幅を示す第 1 波が励起した後、減衰自由振動状態に至っていることが分かる。また、落下高さ $H = 3.0$ m の場合を除き、最大振幅およびその周期はシート目付量の大きい A830-I 試験体の場合が最も小さい。これは、A830-I 試験体の曲げ剛性が最も大きいことによるものと考えられる。なお、落下高さ $H = 3.0$ m において A415/830-I 試験体の載荷点変位波形がほぼ同様の性状を示しているのは、経過時間 10 ms 程度においてシートが破断したため、無補強と類似の挙動を示したことによるものと考えられる。

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、その効果はシート目付量の増加に伴って増大することが明らかになった。

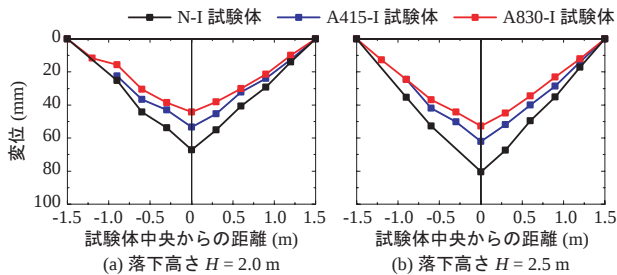
(2) 変位分布性状

図-4 および図-5 には、それぞれ各試験体の最大載荷点変位発生時の変位分布および残留変位分布を落下高さごとに整理して示している。なお、 $H = 3.0$ m の場合には、シートが破断して無補強と同様の状況となっているため、ここでは示していない。

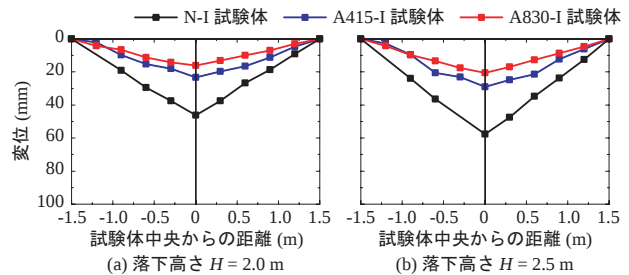
最大載荷点変位発生時の変位分布より、いずれの試験体においても落下高さの大きいほど変位量も大きくなることが分かる。また、同一落下高さにおける A415/A830-I 試験体の変位量は、無補強試験体の場合に比較してそれぞれ 25 および 40 % 程度抑制されていることが分かる。こ



図－3 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



図－4 最大載荷点変位発生時における変位分布



図－5 残留変位分布

のような傾向は、残留変位分布においても同様に認められるが、無補強試験体との差異は残留変位の方が顕著であり、残留変位の抑制効果が明瞭に現れている。これは、AFRPシートが完全弾性体に近い特性を有していることより、除荷状態においてその後天性能が発揮されたためと考えられる。

4. 衝撃荷重載荷時の破壊メカニズム

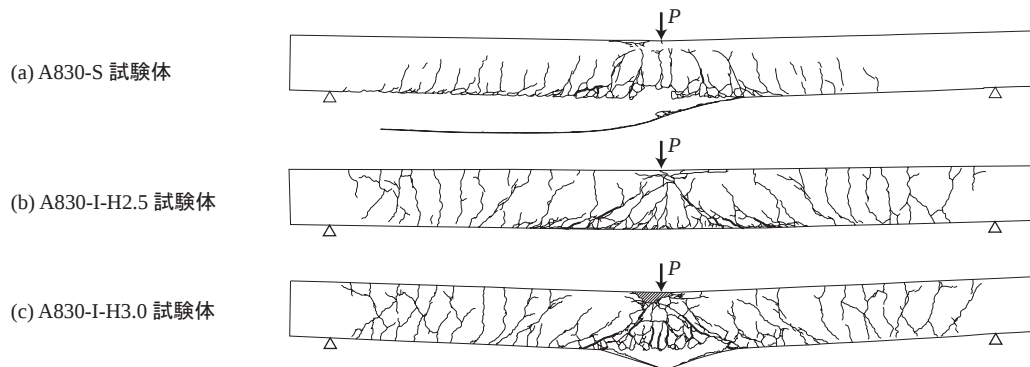
本実験結果において、AFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式は、シート目付量によらず静荷重載荷時にはシート剥離、衝撃荷重載荷時にはシート破断となっている。また、本実験の範囲では、RC梁の耐衝撃性に及ぼすシート目付量の影響は比較的小さいことが明らかになった。今後、さらに目付量を増加させた場合についても検討する必要があるものと判断される。ここでは、AFRPシート曲げ補強RC梁に衝撃荷重が作用する場合の破壊メカニズムについて検討する。

図－6には、A830-SおよびA830-I-H2.5/3.0試験体に関する実験終了後のひび割れ分布性状を示している。図より、静載荷したA830-S試験体の場合には、曲げひび割れと共に斜めひび割れが発生してそのピーリング作用によりシートが剥離して終局に至っていることが分かる。これに対して、衝撃荷重を載荷したA830-I試験体の場合には、載荷点から少し下方の点をピークにアーチ状とも取

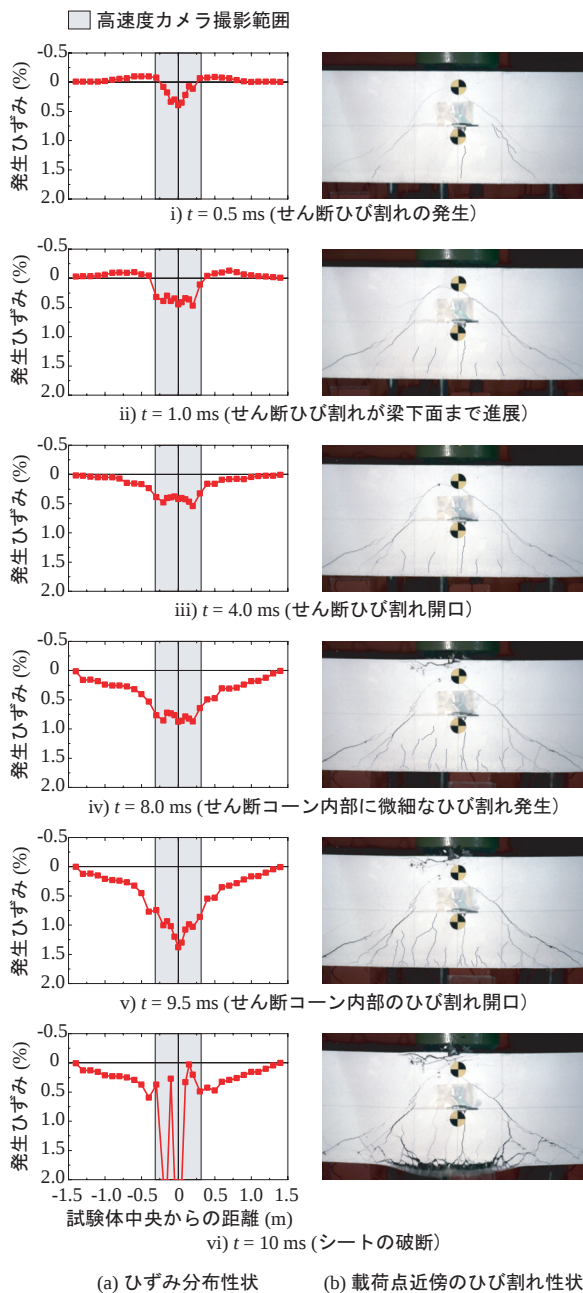
れる斜め下方に発生したひび割れ（以後、これをアーチ状ひび割れと呼ぶ）が卓越していることが分かる。また、落下高さ $H = 2.5\text{ m}$ の場合には、下縁のひび割れ先端部から両支点方向にシートの接着界面に沿った水平ひび割れが発生している。落下高さ $H = 3.0\text{ m}$ の場合には、アーチ状のひび割れ内部に多数の曲げひび割れが発生し、シートが破断するとともに下縁かぶりコンクリートが著しく消失している。このような傾向はA415-I-H3.0試験体でもほぼ同様に認められた。このことから、衝撃荷重載荷時には静荷重載荷時に比較して、載荷点近傍のアーチ状ひび割れが卓越する傾向にあることが明らかになった。

図－7には、上記のようなシート破断に至る過程を検討するために、A830-I-H3.0試験体に関するシートの軸方向ひずみ分布と高速度カメラで撮影したひび割れ性状を示している。ここでは、重錘衝突後、0.5, 1, 4, 8, 9.5 および 10 ms 経過後の状況について整理している。

図より、載荷点近傍の破壊過程は、1) 重錘衝突直後に斜め方向にひび割れが発生し (i), 2) そのひび割れが進展・開口してアーチ状のひび割れを形成する (ii, iii), 3) その後、アーチ内部に微細な曲げひび割れが多数発生し開口する (iv, v), 4) ひび割れ開口に伴いシートひずみが急増してシートが破断する (vi), であることが分かる。なお、このような状況はA415-I-H3.0試験体においても同様であった。



図－6 ひび割れ分布性状の比較



図－7 ひずみ分布と載荷点近傍のひび割れ性状

このように、AFRPシート曲げ補強RC梁のシート破断にはアーチの形成とアーチ内部に発生した曲げひび割れの開口が密接に関連していることが明らかになった。また、本実験でRC梁の耐衝撃性に及ぼすシート目付量の影響が強く現れないのは、梁の耐荷機構がアーチ構造の形成からアーチ基部の下方および水平移動に伴ってアーチクラウン部の角折れによる局所的な曲げに移行し、その曲げ作用がシートの引張り耐力よりも大きいことによりシート破断に至ったためと推察される。この破断を抑制するためには、さらなる目付量の増加を暗示している。なお、アーチ状のひび割れはスラブのスキヤングに類似した挙動によって発生し、かつそのアーチ構造はシート補強によって瞬間的に形成されたものと推察される。

5. まとめ

本研究では、AFRPシートで曲げ補強されたRC梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響を検討することを目的に、既往の研究よりも目付量が多いAFRPシートを用いて補強したRC梁の衝撃荷重載荷実験を行い、シート目付量の影響について検討を行った。本実験により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) AFRPシート曲げ補強により、衝撃荷重載荷時における載荷点変位や残留変位を抑制可能であり、その効果はシート目付量が多いほど大きい。
- 2) 衝撃荷重載荷時には静荷重載荷時に比較して、載荷点近傍にアーチ状のひび割れが卓越して発生する傾向にある。
- 3) RC梁の終局時耐衝撃性に及ぼすシート目付量の影響が強く現れないのは、載荷点近傍にアーチ構造が形成されるもののアーチ基部に相当するシート接着された梁下縁部の変動によりクラウン部を中心に角折れが生じ局所的な曲げの作用が顕在化するためと推察される。

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, pp.721-726, 2013.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007年制定