

AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の衝撃載荷実験

Impact loading tests on flexural strengthened RC beam with AFRP sheet

室蘭工業大学
釧路工業高等専門学校
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
三井住友建設(株)

○ 学生員 大柳 朋裕 (Tomohiro Ohyanagi)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

阪神大震災を契機に、橋脚等既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対する耐震補強が行われており、その補強法の一つとして、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、耐衝撃用途土木構造物の一つであるロックシェッド (落石覆工) の場合には、地山の経年劣化によって落石規模が大型化する傾向にあり、対応してシェッドの衝撃耐力の向上あるいは緩衝材の性能向上が求められる事例も発生している。

著者らは、このような状況に鑑み、既設 RC 構造物の耐衝撃性を向上させる工法として、上記の FRP シート接着工法や FRP ロッド埋設工法を提案し、これらの工法により補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施している。その結果、FRP シートや FRP ロッドの補強による RC 梁の耐衝撃性向上効果を確認している^{1),2)}。

しかしながら、これらの実験は、材料強度や重錘衝突速度および高速度カメラの撮影方法などのデータ処理方法が異なるため、RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強材料の力学特性の影響を直接比較することが困難であった。そこで、著者らは、RC 梁の材料強度や重錘衝突速度が極力同等な条件の下、アラミド繊維 (AFRP) シート/ロッド、および炭素繊維 (CFRP) シート/ロッドを補強材料として用いた統一的な補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。

本論文では、しなやかに耐衝撃性に優れる AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験結果について整理し、その耐衝撃挙動やシートの耐衝撃性向上効果について検討する。

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。表中の試験体名のうち、第一項目は AFRP シート補強の有無 (N: 無補強, SA: シート補強) を示し、第二項目の H に付随する数値は設定重錘落下高さ (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

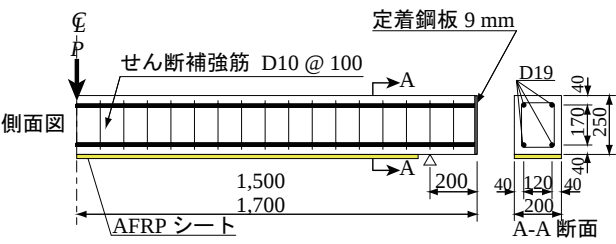


図-1 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

の圧縮強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示している。なお、各補強試験体に関する実験ケースは、表に示されている通りであるが、無補強とシート補強した場合における RC 梁の耐衝撃性に関する比較は、設定落下高さ $H = 2.5$ m の場合で行うこととした。

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、 $200 \times 250 \times 3,000$ mm である。また、軸方向鉄筋には上下端に D19 を各 2 本配置し、梁軸方向端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。

AFRP シート補強は、梁底面の補強範囲にブラスト処理を施して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。なお、養生期間は 1 週間程度であり、目付量が 830 g/m^2 の AFRP シートを 1 層接着することとした。

衝撃荷重載荷実験は、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自由落下させる単一載荷法に基づいて行っている。なお、重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。また、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となっている。

表-2 には、本実験で用いた AFRP シートの力学的特性値を一覧にして示している。

表-1 試験体一覧

試験体名	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	引張剛性 EA (MN)	コンクリート強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	計算曲げ耐力 P_u (kN)	計算せん断耐力 V_u (kN)
N-S	静的	-	-	32.4	381.7	55.0	329.0
N-H2.5	2.50	2.29					
SA-S	静的	-	13.5	35.4	381.7	102.1	331.6
SA-H1.0	1.00	1.12					
SA-H2.0	2.00	2.19					
SA-H2.5	2.50	2.40					
SA-H3.0	3.00	3.24					

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 E_r (GPa)	引張強度 f_{ru} (MPa)	破断ひずみ ε_{ru} (%)
830	0.572	118	2,060	1.75

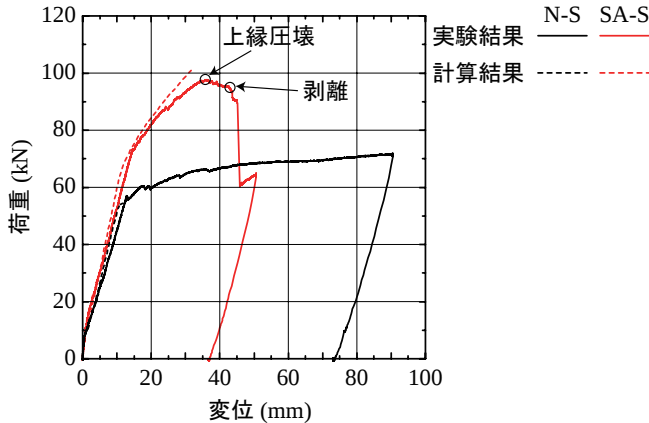


図-2 荷重-変位関係の比較

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、合支点反力 (以後、単に支点反力)、スパン中央点変位 (以後、単に変位) および AFRP シート軸方向各点の軸方向ひずみ (以後、単にひずみ) である。なお、重錘衝撃力と支点反力は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測し、変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測している。また、実験時にはひび割れ分布や AFRP シートの剥離状況を高速カメラを用いて撮影している。

3. 実験結果

3.1 静荷実験

図-2には、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。なお、計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持およびコンクリートと AFRP シートとの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。また、計算時における終局状態は、梁上縁コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみである $3,500 \mu$ に至った時点と定義している。

図より、N-S 試験体、SA-S 試験体の実測主鉄筋降伏荷重は、それぞれ 57.0、73.6 kN であり、実測最大荷重は 66.7、97.7 kN である。これより、AFRP シート接着を施すことによって、主鉄筋降伏荷重は無補強の場合に比較して 30 % 程度、最大荷重は 45 % 程度増加していることが分かる。

また、実験結果と計算結果を比較すると、N-S 試験体の計算値は実測値と異なっており、主鉄筋降伏直後に上縁が圧壊して終局に至っていることが分かる。一方、SA-S 試験体の場合には、実験結果は主鉄筋降伏点近傍までは計算結果とほぼ対応していることが分かる。その後、実験結果は計算結果よりも若干小さめの値を示し、計算終局点に到達後上縁圧壊にともなうシート剥離により除荷状態に至っている。これより、AFRP シートとコンクリートの付着は計算終局変位時まで概ね確保されているものと推察される。

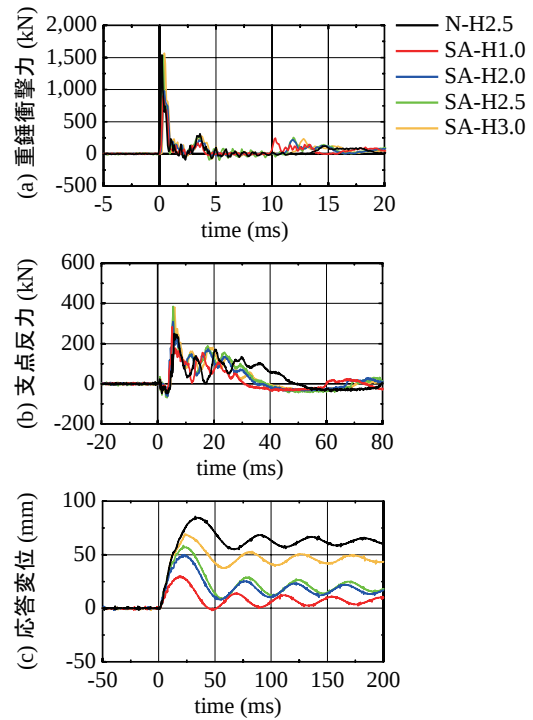


図-3 各種時刻歴応答波形

3.2 衝撃荷重実験

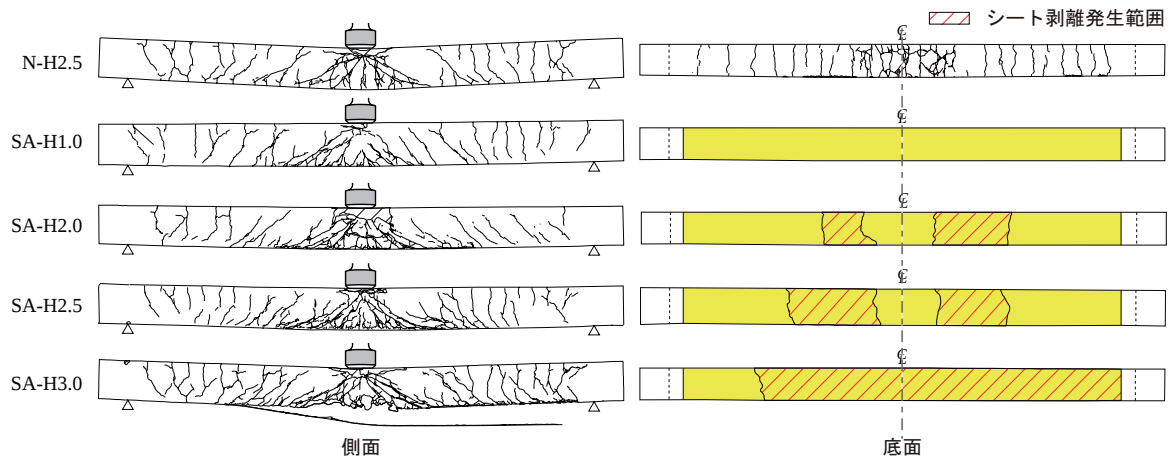
(1) 各種時刻歴応答波形

図-3には、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、試験体の種類や設定落下高さ H 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。

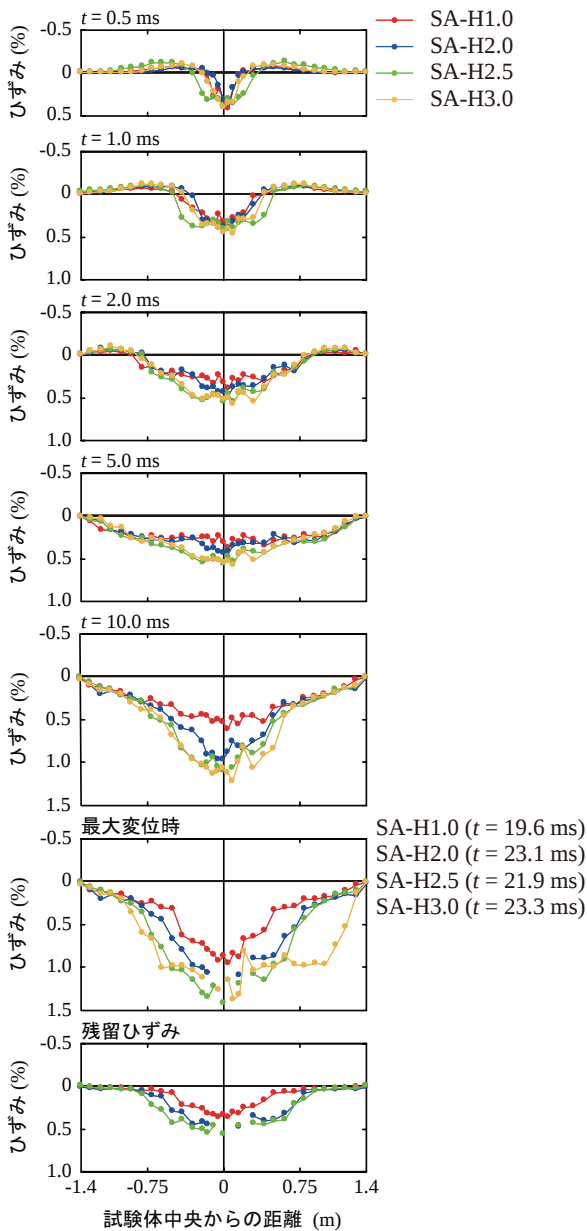
図-3 (b) より、支点反力波形は、継続時間が 30 ~ 50 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示していることが分かる。全体を見ると、入力エネルギーの増加と共に継続時間も長くなる傾向にあることが分かる。これは、入力エネルギーの増加に対応してひび割れ等による損傷が進行し、梁の曲げ剛性も低下することによるものと推察される。設定落下高さ $H = 3.0$ m において、SA 試験体はシート剥離により終局に至っているが、支点反力波形では継続時間が数 ms 程度延びているのみであり、その影響は未だ小さいことが分かる。

設定落下高さ $H = 2.5$ m において、N/SA-H2.5 試験体の支点反力波形を比較すると、N-H2.5 試験体の場合 SA-H2.5 試験体よりも最大振幅が小さくかつ継続時間が長い。これは、N-H2.5 試験体の曲げ剛性が SA-H2.5 試験体よりも小さいためである。

図-3 (c) により、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。また、入力エネルギーの増加と共に残留変位も増加していることが分かる。設定落下高さ $H = 2.5$ m において、N 試験体の場合には SA 試験体の場合に比較して、最大変位と残留変位が大きく、減衰自由振動状態における固有振動周期も延びていることが分かる。これより、AFRP シートで曲げ補強を施すことにより、RC 梁の剛性低下を抑制し、効率的に最大変位及び残留変位を抑制可能であることが分かる。



図－4 衝撃実験終了後におけるひび割れ分布性状



図－5 AFRP シートのひずみ分布の推移

(2) 実験終了後におけるひび割れ分布

図－4には、各試験体の側面および底面のひび割れ分布

性状およびシートの剥離状況を示している。図より、補強の有無や設定落下高さ H によらず、梁側面にはスパン全長に渡って下縁のみならず上縁にもひび割れが進展し、かつ荷点近傍下縁部には斜めひび割れが発生していることが分かる。衝撃荷重載荷時における上縁からのひび割れの進展は、衝撃初期に曲げ波が見かけ上両端固定梁のような状態で支点側に伝播することにより発生し、下縁からのひび割れは主曲げの伝搬により発生するものと推察される。

梁底面においては、N 試験体の場合には、荷点近傍に曲げひび割れと主鉄筋配置位置に軸方向ひび割れが多数発生している。SA 試験体の場合には、設定落下高さ $H = 1.0$ m では、シートの剥離等の損傷は見受けられないが、 $H = 2.0$ m 以降において、徐々に部分剥離領域が形成され、両支点側に拡大する傾向にある。最終的には $H = 3.0$ m において右側スパンで全面的なシート剥離に至った。シートの剥離は、後述の写真－1に示しているように、下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの先端がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用によって発生したことを確認している。

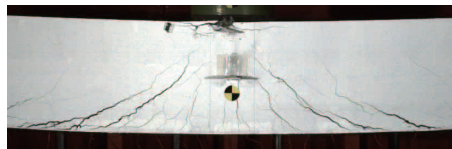
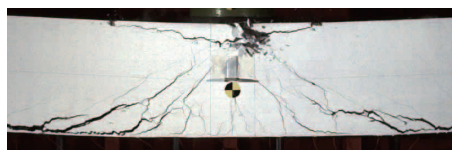
(3) AFRP シートのひずみ分布の時間的な推移状況

図－5には、各設定落下高さにおける SA 試験体に関する AFRP シートの軸方向ひずみ分布を比較して示している。

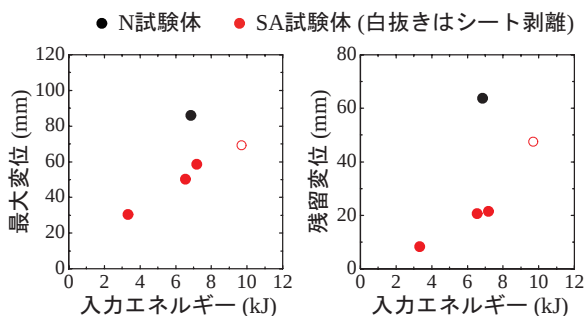
図より、経過時間 $t = 0.5$ ms において、シートのひずみ値はいずれの場合も荷点中央部で 0.25 % 以上の引張りひずみが発生しており、下縁にはひび割れが発生していることが窺える。また、その両支点側では圧縮ひずみが発生していることが分かる。圧縮ひずみの発生は、重錘衝突によって曲げ波が梁全体に伝播する過程において、前述の見かけ上の固定端が形成され両支点側に推移していることを裏付けている。

$t = 1.0$ ms のひずみ分布を見ると、いずれの場合においても正曲げ部分と負曲げ部分が共に支点の方向に向かって進展している状況が示されている。また、荷点部部のひずみ分布は、平坦な分布となっており、局部的に剥離の傾向を示している。また、 $t = 2.0$ ms のひずみ分布を見ると、未だ両端固定梁に類似したひずみ分布を示しており、主曲げが支点部に到達していないことが分かる。

$t = 5.0$ ms のひずみ分布を見ると、全梁共にスパン全体に渡って正曲げの状態を示しており、低次の曲げモードを呈している。設定落下高さ $H = 2.5, 3.0$ m の場合には、荷点部

SA-H1.0 ($t = 19.6$ ms)SA-H2.0 ($t = 23.1$ ms)SA-H2.5 ($t = 21.9$ ms)SA-H3.0 ($t = 23.3$ ms)

写真－1 載荷点近傍ひび割れ分布性状



図－6 各種応答値と入力エネルギーの関係

近傍のひずみが0.5%を超過しており、この部分の主鉄筋が降伏しているものと推察される。

$t = 10.0$ ms のひずみ分布より、設定落下高さ H が大きい場合ほど0.5%以上の大きなひずみの分布範囲が広がる傾向にあることが分かる。特に、 $H = 2.5, 3.0$ m の場合には、いずれの場合も最大ひずみが1.0%を超過し、中央部近傍でひずみ分布勾配が急変していることから、主鉄筋の塑性化が進行し梁の変形曲率が大きくなっていることが推察される。

最大変位時のひずみ分布を見ると、 $H = 1.0$ m の場合においても、載荷点近傍で0.5%以上のひずみが発生していることから、主鉄筋が降伏に至っていることが分かる。また、いずれの試験体においても、大きなひずみの分布範囲が両支点側に拡大している。これは、主鉄筋の塑性化にともない変形曲率が增大する範囲が拡大したことを示している。ただし、 $H = 3.0$ m の場合には、右側スパンにおいて1.0%程度のひずみが支点部近傍まで分布していることから、シートの部分剥離が進展しているものと考えられる。

残留ひずみの分布より、シート剥離した SA-H3.0 試験体

を除き、いずれの試験体も、シートひずみが0.5～1.0%程度復元しており、 H が大きいほどひずみの復元量が大きいことが分かる。これは、AFRPシートが破断に至るまでは完全弾性体に近い力学特性を示すため、シートが剥離していない試験体に対しては大きな復元力を発揮したことによるものと考えられる。

写真－1には、最大変位時における載荷点近傍のひび割れ分布性状を示している。写真より、いずれの試験体においてもスパン中央部には曲げひび割れが発生し、上縁から両支点側下縁に向かって斜めひび割れが進展していることが分かる。また、 H が大きい場合ほど、上縁コンクリートの圧壊が顕在化するとともに、ひび割れ幅が拡大する傾向にある。特に、 $H = 3.0$ m の場合には、前述のピーリング作用によるシートの部分剥離が発生していることが分かる。

(4) 各種応答値と入力エネルギーの関係

図－6より、補強試験体の最大変位および残留変位は、ともに入力エネルギーの増大に伴って増加する傾向にあることが分かる。なお、SA-H3.0試験体の場合には、シートが剥離したため、残留変位が急激に大きくなっている。また、無補強のN試験体と比較すると、SA試験体の方が最大変位および残留変位ともに小さくなっている。この傾向は、残留変位においてより顕著に示されていることから、AFRPシート補強による変位の復元効果が発揮されていることが分かる。

4. まとめ

- 1) AFRPシートで曲げ補強することによりRC梁の耐衝撃性が向上する。特に、残留変位の抑制効果が顕著に発揮される。これは、AFRPシートが破断に至るまでは完全弾性体に近い力学特性を示すためである。
- 2) 入力エネルギーが最も大きな場合には、AFRPシート曲げ補強RC梁は、衝撃荷重の作用により、シートが剥離して終局に至った。また、シートの剥離は、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下げるピーリング作用によって発生した。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP15K06199の援助により行われたものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: AFRPシート曲げ補強RC梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 953-962, 2014.3
- 2) 三上 浩, 栗橋祐介, 今野久志, 岸 徳光: 衝撃荷重によって損傷を受けたRC梁のAFRPシート曲げ補強による耐衝撃性向上効果, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 990-1001, 2015.3
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2012年制定