

衝撃荷重を受ける AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する一検討

A consideration on failure mode of RC beams strengthened in flexure with bonded AFRP sheet under impact loading

三上浩*, 小室雅人**, 岸徳光***, 瓦井智貴****

Hiroshi Mikami, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Tomoki Kawarai

*博(工), 三井住友建設(株), 技術研究所上席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

**博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***工博, 室蘭工業大学大学院特任教授, もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

****修(工), 室蘭工業大学大学院, 工学研究科博士後期課程(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Key Words: AFRP sheet, RC beam, impact loading, failure mode

キーワード: AFRP シート, RC 梁, 衝撃荷重, 破壊形式

1. はじめに

著者らは、既設耐衝撃用途構造物の合理的な耐衝撃性向上法の確立を目的として、簡易に施工可能な FRP シート接着工法に着目し、新設や損傷を受けた既設 RC 梁を対象に FRP 材を用いて曲げ補強を施した場合の重錘落下衝撃実験を実施している^{1),2)}。

その結果、RC 梁に FRP シート接着曲げ補強を施すことで、耐衝撃性が向上し、かつ、シートの目付量を増加させることによって、耐衝撃性がさらに向上することなどを明らかにしている。しかしながら、既往の研究では主に補強の有無あるいは補強量の大小が RC 梁の耐衝撃性に与える影響について検討することを目的とし、入力エネルギーが比較的小さい範囲での検討を主としていた。

また、静荷重載荷(以後、静載荷)の場合には、計算終局曲げモーメント M_u と計算降伏曲げモーメント M_y の比 M_y/M_u (以後、計算曲げモーメント比) からシート補強 RC 梁の破壊形式を予測可能であることが明らかになっている³⁾ものの、衝撃荷重載荷(以後、衝撃載荷)における終局時に関する破壊性状については、未だ詳細には検討されていない。

このような背景から、本研究では静載荷時と衝撃載荷時の FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式の関係を明らかにすることを目的に、目付量を 3 種類(415, 830, 1660 g/m²)に変化させた曲げ補強 RC 梁を対象に、静載荷および重錘落下衝撃載荷実験を実施した。なお、基準試験体として無補強試験体に関しても同様に比較検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要および材料の力学的特性

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 シート接着曲げ補強の有無や、シート目付量および落下高さを変化させた全 11 体である。表中の試験体のうち、第一項目は AFRP シートを用いた曲げ補強の有無(N: 無補強, A: AFRP シート接着工法)を示し、A に付随する数値はシート目付量(g/m²)を表している。第二項目は載荷方法(S: 静載荷, I: 衝撃載荷)、第三項目の H に付随する数値は設定落下高さ(m)を示している。AFRP シートに関しては、目付量 415 g/m² および 830 g/m² をそれぞれ 1 層接着した場合と、830 g/m² を 2 層接着した場合(1,660 g/m²)の 3 種類とした。なお、表-2 には本実験で用いた AFRP シートの力学的特性を一覧にして示している。引張強度および弾性係数はそれぞれ 2.06 GPa, 118 GPa である。

表中の実測重錘落下高さ H' は実測重錘衝突速度 V' から換算した自由落下高さである。また、表には、本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度も併せて示している。

図-1 には、シート補強試験体(A 試験体)の形状寸法と配筋およびシート接着による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 である。また、軸方向鉄筋は上下端に 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

表－1 試験体一覧

| 試験体名 | 曲げ補強シート目付量 (g/m ²) | 設定重錘落下高さ H (m) | 実測重錘落下高さ H' (m) | 実測重錘衝突速度 V' (m/s) | 実測入力エネルギー E (kJ) | コンクリート圧縮強度 f _c (MPa) | 主鉄筋降伏強度 f _y (MPa) | せん断筋降伏強度 f _{sy} (MPa) | 計算曲げ耐力 P _{usc} (kN) | 計算せん断耐力 V _{usc} (kN) | せん断余裕度 α | シートの破壊性状 | | | | | | |
|--------------|--------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|----------|--------------------|-------|-------|-------|------|------|
| N-S | - | 静的 | - | - | - | 32.4 | 381.7 | 461.9 | 55.0 | 329.0 | 8.97 | - | | | | | | |
| A415-S | 415 | | | | | | | | 81.0 | | | | 298.8 | 5.53 | | | | |
| A830-S | 830 | | | | | | | | 99.9 | | | | | | 4.49 | | | |
| A1660-S | 1660 | | | | | | | | 126.1 | | | | | | | 3.55 | | |
| N-I-H2.5 | - | 2.5 | 2.29 | 6.70 | 6.74 | 32.4 | 381.7 | 461.9 | 55.0 | 329.0 | 8.97 | - | | | | | | |
| A415-I-H2.5 | 415 | | 2.49 | 6.99 | 7.33 | | | | 33.7 | | | | 371.0 | 401.9 | 81.0 | 298.8 | 5.53 | |
| A830-I-H2.5 | 830 | | | | | | | | | | | | | | 99.9 | | | 4.49 |
| A1660-I-H2.5 | 1660 | | | | | | | | | | | | | | 126.1 | | | |
| A415-I-H3.0 | 415 | 3.0 | 2.89 | 7.53 | 8.50 | 33.7 | 371.1 | 401.9 | 81.0 | 298.8 | 5.53 | 破断 | | | | | | |
| A830-I-H3.0 | 830 | | 3.04 | 7.72 | 8.95 | | | | 99.9 | | | 4.49 | 部分剥離 ^{*)} | | | | | |
| A1660-I-H3.0 | 1660 | | | | | | | | 126.1 | | | | 3.55 | 剥離 | | | | |

* 載荷点近傍の斜めひび割れの先端から支点部手前 30～40 cm までの剥離を確認

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

mm 間隔で配筋している。

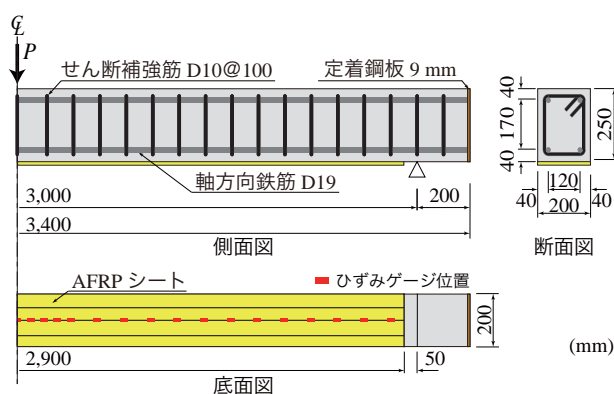
AFRP シート接着工法の場合には、梁底面の補強範囲にブラスト処理を施してエポキシ系プライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認の後エポキシ系含浸接着樹脂を用いてシート接着を行っている。なお、養生期間は 1 週間程度である。

2.2 実験方法および測定項目

写真－1 には、静載荷時における実験装置と試験体の設置状況を示している。静載荷の場合には梁幅方向に 400 mm、梁軸方向に 100 mm の載荷板をスパン中央部に設置し、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて荷重を作用させた。なお、N-S 試験体の場合には、主鉄筋降伏後に鉄筋の塑性硬化によって荷重が漸増することより、本研究では梁が載荷点部で角折れ状態を呈し、変位が 90 mm 前後に至るまで載荷している。一方、AFRP シートで曲げ補強する場合には、最大荷重に到達し AFRP シートが剥離して終局状態に至るまで載荷している。

写真－2 には、衝撃載荷時における実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃載荷実験は、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。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、合支点反力 (以



図－1 A 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

後、単に支点反力)、およびスパン中央点変位 (以後、単に変位) 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ている。また、変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測している。さらに、実験時にはひび割れ分布や AFRP シートの破断および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 静載荷実験における荷重－変位関係

図－2 には、AFRP シート下面接着曲げ補強試験体と無補強試験体の荷重－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。実線が実験結果、点線が計算結果である。なお、計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾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 μ に到達した時点と定義している。

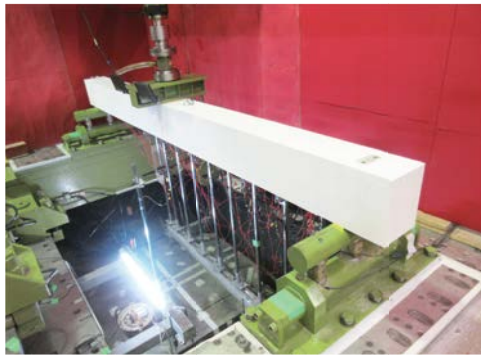


写真-1 静载荷実験状況

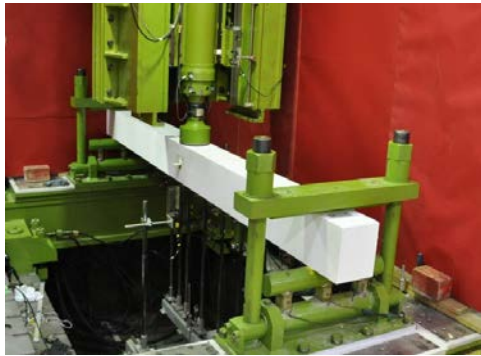


写真-2 衝撃载荷実験状況

図より、各試験体の各荷重レベルに着目すると、N-S, A415-S, A830-S, A1660-S 試験体に関する主鉄筋降伏荷重は、それぞれ 57.0, 67.8, 71.5, 85.5 kN であり、最大荷重は 66.7, 84.8, 88.8, 112.7 kN である。これより、AFRP シートを下面接着して曲げ補強を施すことによって、降伏荷重および最大荷重はそれぞれ 1.2 ~ 1.5 倍, 1.3 ~ 1.7 倍程度増大することが分かる。また、N-S 試験体の場合において、主鉄筋降伏後の荷重は、鉄筋の塑性硬化の影響によって単調増加の傾向を示すことが明らかになっている。このため、本論文では、曲げ補強試験体がいずれも 40 mm 前後の変位時点で最大荷重を示していることより、中央点変位が 40 mm に達した時点の値を最大荷重として評価することとした。

曲げ補強試験体に関して実験結果と計算結果を比較すると、A415-S 試験体の場合には計算結果は計算終局時まで実験結果と概ね対応していることが分かる。従って、AFRP シートとコンクリートの付着は計算終局時まで十分確保されているものと判断される。また、実験では計算終局変位到達後も荷重が低下せず、変位が $\delta = 80$ mm 近傍で AFRP シートが剥離し終局に至っている。一方で、A830-S, A1660-S 試験体の場合には、実測最大荷重が計算耐力を下回っており、計算終局時には実験結果と計算結果が一致していない。すなわち、目付量が大きい場合には計算結果よりも早期に AFRP シートの剥離が生じる傾向を示しているこ

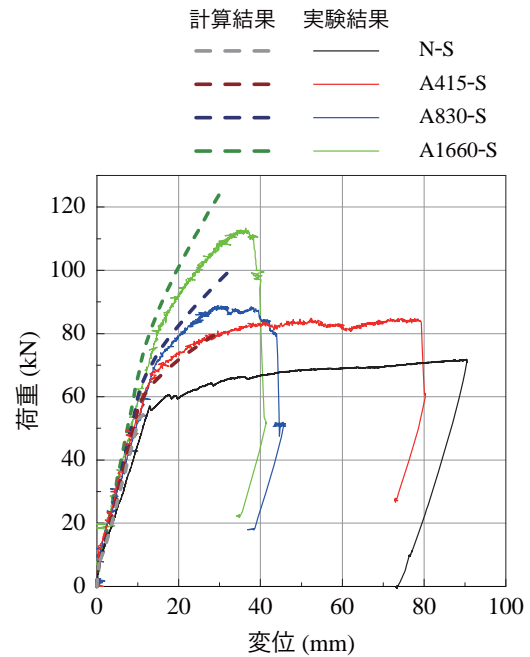


図-2 荷重-変位関係の比較

とが分かる。

既往の研究³⁾より、静载荷時には前述の断面分割法によって算定された計算曲げモーメント比 M_y/M_u が 0.70 以上の場合には「曲げ圧壊型」、0.70 以下の場合には「剥離破壊型」として破壊形式を推定可能であることが明らかになっている。ここで、A415/A830/A1660-S 試験体の計算曲げモーメント比 M_y/M_u を求めてみるとそれぞれ 0.69, 0.59, 0.55 となり、A415-S 試験体のみが「曲げ圧壊型」として推定される。一方で、実験結果の破壊形式は、A415-S 試験体の場合には上縁コンクリートが圧壊した後にシートが剥離していることから「曲げ圧壊型」、A830-S, A1660-S 試験体の場合には上縁コンクリートの圧壊前に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」として分類され、既往の研究³⁾に即して推定した結果に対応していることが確認される。

3.2 衝撃载荷実験

(1) 各種時刻歴応答波形

図-3には、設定重錘落下高さが $H = 2.5$ m の場合における無補強および曲げ補強試験体の重錘衝撃力波形、支点反力波形、載荷点変位波形を比較して示している。

図-3(a)において、重錘衝撃力波形は衝撃初期から 25 ms 間の変動状況を示しているが、補強の有無や目付量の大小によらず、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、重錘衝突時から 5 ms 時点まで 4 試験体とも類似の波形性状を示し

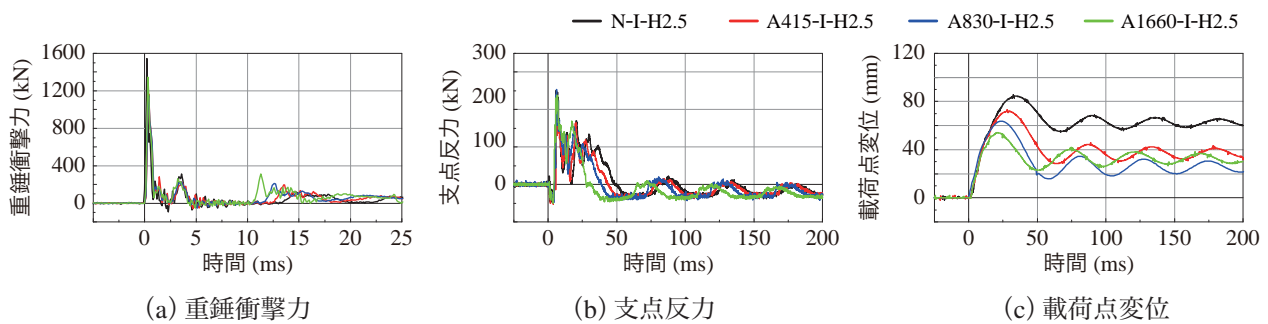


図-3 重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形（落下高さ $H = 2.5$ m）

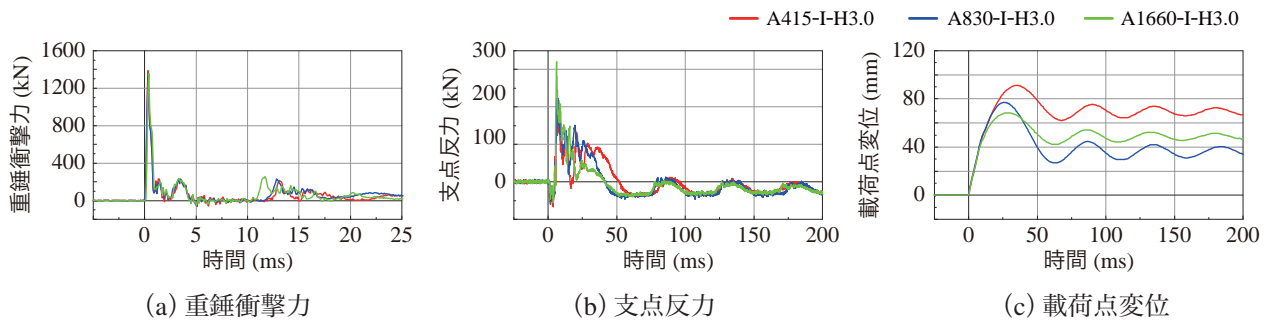


図-4 重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形（落下高さ $H = 3.0$ m）

ている。これは、いずれの試験体も圧縮強度が同程度のコンクリートであることより、衝撃初期の重錘衝撃力波形は衝突部コンクリートの材料物性に依存していることを暗示している。また、後述のようにA1660-I-H2.5試験体の場合には、シート剥離によって終局に至っている。シート剥離が生じた場合には梁の剛性が低下し、最大重錘衝撃力も小さくなることが考えられるが、シートが破断あるいは剥離に至っていないA415/830-I-H2.5試験体と同様の性状を示していることより、衝撃初期には未だ剥離が進行していないものと推察される。

図-3(b)において、支点反力波形は衝撃初期から200 ms 間の変動状況を示しているが、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。また、目付量の増加に対応して試験体の曲げ剛性が増大することより、目付量が多いほど継続時間は短くなる傾向にあることが読み取れる。ただし、A1660-I-H2.5試験体の場合には、シート剥離によって終局に至っていることより、曲げ剛性の低下が想定されるが、支点反力波形の場合にはその影響は小さいことが分かる。

図-3(c)において、載荷点変位波形は、衝撃初期から200 ms 間の変動状況を示している。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、無補強試験体およびA415/A830/A1660-I-H2.5試験体を比較すると、最大変位はそれぞれ85.8, 73.1, 63.7,

54.2 mm と目付量の増大に対応して減少しており、残留変位も抑制されていることが分かる。なお、A1660-I-H2.5試験体に関しては、曲げ補強試験体の中で最も最大変位が小さいものの、残留変位はA415-I-H2.5試験体と同程度となっている。これは、最大変位到達後にシートが剥離したことによるものと考えられる。

図-4には、設定重錘落下高さが $H = 3.0$ m の場合における曲げ補強試験体の重錘衝撃力波形、支点反力波形、載荷点変位波形を比較して示している。

図-4(a)において、図-3(a)と比較すると、いずれの場合においても波形性状はほぼ同様であり、上述のように重錘衝撃力波形は目付量によらず、衝突部コンクリートの材料物性に依存することが確認できる。

図-4(b)において、図-3(b)と比較すると、A415/A1660-I-H3.0試験体の場合には第1波の継続時間が10 ms 程度延びていることが分かる。これは、後述のようにA415-I-H3.0試験体の場合にはシート破断、A1660-I-H3.0試験体の場合にはシート剥離に至っていることより、試験体の曲げ剛性が低下したことによるものと推察される。なお、A830-I-H3.0試験体の場合には、載荷点直下を除き、両支点の手前まで剥離していることを確認しているものの、継続時間がA830-I-H2.5試験体とほぼ同等であることより、シートの補強効果は完全に消失するまでには至っていないことが推察される。

図-4(c)において、図-3(c)と比較すると、入力エネルギーの増加によっていずれの曲げ補強試験体にお

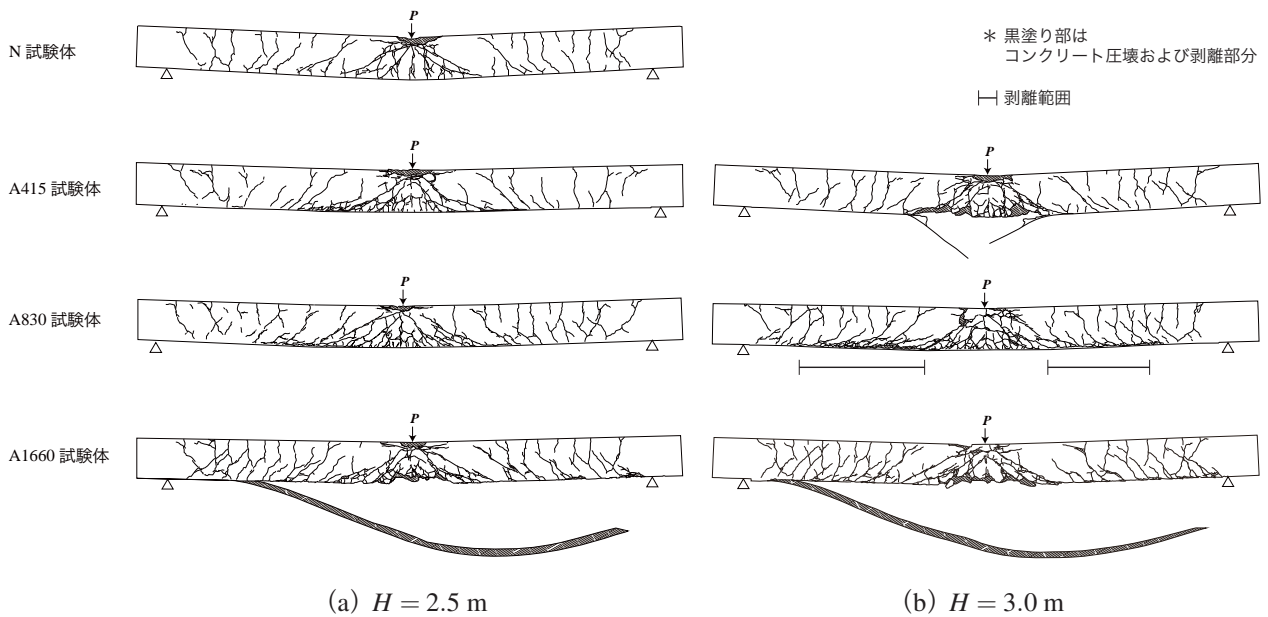


図-5 衝撃荷重実験終了後の各試験体のひび割れ分布性状

いても最大変位および残留変位が増大していることが分かる。また、A1660-I-H3.0 試験体の場合には、シートが完全に剥離して終局に至っている。これより、残留変位は A830-I-H3.0 試験体よりも大きく示されている。

以上より、AFRP シートを接着して曲げ補強を施した RC 梁の耐衝撃性は、シートとコンクリートの付着が保たれている場合には目付量に対応して向上することが明らかとなった。また、目付量が大きいほどシートの剥離も顕在化する傾向にあり、前述の静的な計算曲げモーメント比 M_y/M_u 値の傾向に対しても対応していることが明らかになった。

(2) 実験終了後におけるひび割れ分布

図-5には、衝撃荷重実験終了後の各試験体側面におけるひび割れ分布を示している。なお、部分剥離にて終局に至ったと判断される A830-I-H3.0 試験体には明確に剥離と判断できる範囲も図に示している。まず、静荷重時におけるひび割れ分布¹⁾と比較すると、静荷重時には上述のように荷点近傍を中心に曲げひび割れが下縁から上縁に向かって発生しているが、特に曲げ補強試験体の場合にはひび割れが広く分布している。一方、衝撃荷重時には、補強の有無や目付量の大小によらずいずれの梁においても、スパン全長に渡って下縁のみならず上縁から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おり、ひび割れ分布性状は静荷重時と大きく異なることが分かる。衝撃荷重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したものと推察

される。また、荷点部近傍の著しい斜めひび割れは静荷重時には発生せず、衝撃荷重によってせん断破壊型のひび割れが顕在化することが分かる。

図-5(a)に示す落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$ において、曲げ補強試験体の場合には、シート接着を施していることより、無補強試験体と比較してひび割れが分散する傾向にあり、また荷点部近傍においてもひび割れの数が多い傾向にある。曲げ補強試験体間で比較すると、A830 試験体の場合には A415 試験体よりも斜めひび割れの進展範囲が若干広いことが分かる。なお、A1660 試験体の場合には、早期に全面剥離に至っている。これは、1) A1660 試験体は、本実験で対象としたシート補強の中では最も目付量が大きいことにより、静的な計算曲げモーメント比 M_y/M_u が最も小さく、2) 従って、主鉄筋降伏領域も広くなることにより、斜めひび割れの分布角度がより小さくなるため、3) 斜めひび割れ先端部のシートを剥がすピーリング作用がより顕著に現れ、早期にシート剥離に至る傾向にあるため、と推察される。

図-5(b)に示す落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ において、A415 試験体の場合には、落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$ の場合と比較して、荷点部近傍のひび割れ領域が狭いことから、上縁荷点部の圧壊が顕在化し、梁が角折れの傾向を示してシート破断に至ったものと推察される。

また、A830 試験体の場合には、シートの全面剥離には至っていないものの、 $H = 2.5 \text{ m}$ の場合と比較して、図に示すように支点の手前 30 cm 程度まで剥離領域が広がり、ほぼ終局に近い状態に至っていることが分かる。なお、これ以上の耐衝撃性の向上は見込めないとし、本文ではこの状態を終局状態と判断した。

表-3 各曲げ補強試験体の破壊形式一覧

| 試験体名 | 目付量 (g/m ²) | 曲げモーメント比 M_y/M_u | 静荷重載荷時 | 衝撃載荷時 | |
|-------|-------------------------|--------------------|--------|-----------|-----------|
| | | | | H = 2.5 m | H = 3.0 m |
| A415 | 415 | 0.69 | 曲げ圧壊型 | - | 破断 |
| A830 | 830 | 0.59 | 剥離破壊型 | - | 部分剥離 |
| A1660 | 1660 | 0.55 | 剥離破壊型 | 剥離 | 剥離 |

A1660 試験体に着目すると、落下高さ $H = 2.5$ m の場合とほぼ同様なひび割れ分布性状を示しており、シートの全面剥離で終局に至っている。

以上より、曲げ補強試験体に関しては、A415 試験体の場合にはシート破断、A830/A1660 試験体の場合には剥離によって終局に至ることが明らかとなった。なお、A1660 試験体のみが、落下高さ $H = 2.5$ m においてシートが剥離して終局に至っている。

(3) 各曲げ補強試験体の破壊形式

表-3 には、本実験で対象とした各曲げ補強試験体の静載荷実験および衝撃載荷実験終了時の破壊形式を一覧にして示している。また、前述の静載荷時における破壊形式推定³⁾に用いる計算曲げモーメント比 M_y/M_u も併せて示している。

静載荷時の場合には、前述のように既往の研究³⁾と同様に計算曲げモーメント比 M_y/M_u から破壊形式を推定可能であり、全曲げ補強試験体で実験結果と一致した。一方で、表より、静載荷時に推定される破壊形式が「曲げ圧壊型」である場合には衝撃載荷時には「シート破断」に至り、静載荷時に「剥離破壊型」と推定される場合には衝撃載荷時には「シート剥離」で終局に至ることが明らかとなった。特に、「曲げ圧壊型」での「シート破断」の現象は、主鉄筋の降伏領域が小さく上縁圧縮破壊が先行することにより、梁が角折れの兆候を示すことに起因しているものと推察される。また、A1660 試験体に着目すると、A415/830 と比較して落下高さ $H = 2.5$ m の場合にシート剥離が生じ終局に至っていることより、目付量が大きい場合であっても、耐衝撃性は必ずしも向上しない可能性が示唆される。

4. まとめ

本研究では、FRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の衝撃載荷時における破壊形式を予測することを目的に、AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の静載荷および重錘落下衝撃載荷実験を実施した。ここでは、シート補強の有無や目付量の違いが破壊形式に及ぼす影響を明らかにするため、無補強試験体および目付量を 3 種類に変化させた AFRP シート接着曲げ補強試験体を対象として実験的に検討を行った。本研究の

範囲で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 静載荷実験結果より、その破壊形式は既往の研究³⁾と同様に、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、圧壊前にシートが剥離して終局に至る「剥離破壊型」に分類される。
- 2) 衝撃載荷実験結果より、AFRP シートを用いて曲げ補強を施すことにより、無補強の場合と比較して、最大変位は 15 ~ 35 % 程度抑制可能である。
- 3) 衝撃載荷実験結果の破壊形式は目付量が比較的小さく静載荷時に「曲げ圧壊型」に分類される梁は「シート破断」によって、また目付量が大きく静載荷時に「剥離破壊型」に分類される梁は「シート剥離」によって終局に至る。
- 4) 従って、AFRP シートの目付量が比較的大きい場合であっても、その耐衝撃性向上効果が必ずしも顕著に示されない可能性がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K06527 の助成により行われたものである。また、研究で使用した AFRP シートはファイベックス (株)、接着剤は住友ゴム工業 (株) からご提供頂いた。ここに記して、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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, pp. 523-528, 2014.7
- 2) 栗橋祐介, 三上 浩, 今野久志, 佐藤元彦, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 1043-1052, 2016.3
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp. 91-109, 2002.8
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2017 年制定