

衝撃荷重载荷によって損傷した RC 梁の AFRP シート曲げ補強 による耐衝撃性向上効果

Strengthening effects of AFRP sheet bonding on impact resistant capacity of
RC beams damaged due to impact loading

栗橋祐介*, 今野久志**, 三上 浩***, 岸 徳光****

Yusuke Kurihashi, Hisashi Konno, Hiroshi Mikami, and Norimitsu Kishi

*博 (工), 室蘭工業大学大学院講師, 暮らし環境系領域, 社会基盤ユニット (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博 (工), 寒地土木研究所総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

***博 (工), 三井住友建設 (株) 上席研究員, 技術開発センター (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

****工博, 釧路工業高等専門学校長 (〒 084-0916 釧路市大楽毛西 2-32-1)

Key Words : RC beam, repairing cracks, epoxy resin, impact resistant capacity, AFRP sheet

キーワード : RC 梁, ひび割れ補修, エポキシ樹脂, 耐衝撃性, AFRP シート

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路網には, 落石災害から人命や道路交通の安全を確保するための落石防護構造物が数多く建設されている。これらの構造物の一つである RC 製ロックシェッドは現在, 許容応力度法によって断面設計が行われている。近年, さまざまな構造物の設計法が許容応力度法から性能照査型に移行してきており, ロックシェッドにおいても, 同様に性能照査型設計法の確立が求められている。

このような背景のもと, 著者らはロックシェッドに対する性能照査型耐衝撃設計法を確立するための研究を継続的に実施してきており, その基礎的な取り組みとして, RC 梁や RC 版, ラーメン等の小型模型の他, 敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁や大型 RC 版, 実 RC アーチ構造, 2/5 および 1/2 縮尺ロックシェッド模型に対する重錘落下衝撃実験を実施し, 終局に至るまでの耐衝撃挙動について詳細に検討している^{1)~3)}。

一方, 性能照査型設計法への移行を考慮した場合には, 対象となる設計落石条件も大きくなることが想定され, 耐荷力不足と判断された場合の既設構造物の補強や損傷を受けた部材の補修補強に関する研究についても今後重要となってくるものと考えられる。このことから, 筆者らは上記問題に対応するための基礎的な取り組みとして, 衝撃荷重を受けた RC 梁のひび割れ補修前後の残存衝撃耐力に関する検討を実施している⁴⁾が耐衝撃補強対策に関する研究事例はまだ少ないのが現状である。

以上より, 本研究では損傷を受けた RC 製ロックシェッドの耐衝撃補強設計法を確立することを最終的な目的に, その基礎的な取り組みとして衝撃载荷により損傷を受け

た RC 梁を対象とした AFRP シート接着補強による耐衝撃補強効果について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

図-1 には, 試験体の形状寸法, 配筋状況および AFRP シート接着状況を示している。本実験に用いた試験体は, 前述の参考文献 4) と同一の仕様であり, 形状寸法 (梁幅 × 梁高 × 純スパン長) は 200 × 250 × 3,000 mm である。軸方向鉄筋には D19 を用い, 上下端に複鉄筋配置としている。また, せん断補強鉄筋には D10 を 100 mm 間隔で配筋している。軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接している。表-1 には, RC 梁の静的設計値一覧を示している。表中, 静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は, 土木学会コンクリート標準示方書に基づき算定している。

表-2 には, 本実験に使用した AFRP シートの力学的特性値を示している。また, 実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 23.4 MPa であり, 鉄筋の降伏強度は, D10 で 359 MPa, D19 で 355 MPa であった。

2.2 実験方法および実験ケース

载荷方法は静的および衝撃荷重载荷の 2 種類である。静载荷の場合には梁幅方向に 200 mm, 梁長さ方向に 100 mm の载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ることにより行っている。载荷は, 油圧ジャッキのストロークの制約から試験体の最大変位が 90 mm 程度に達した時点で強制的に除荷している。

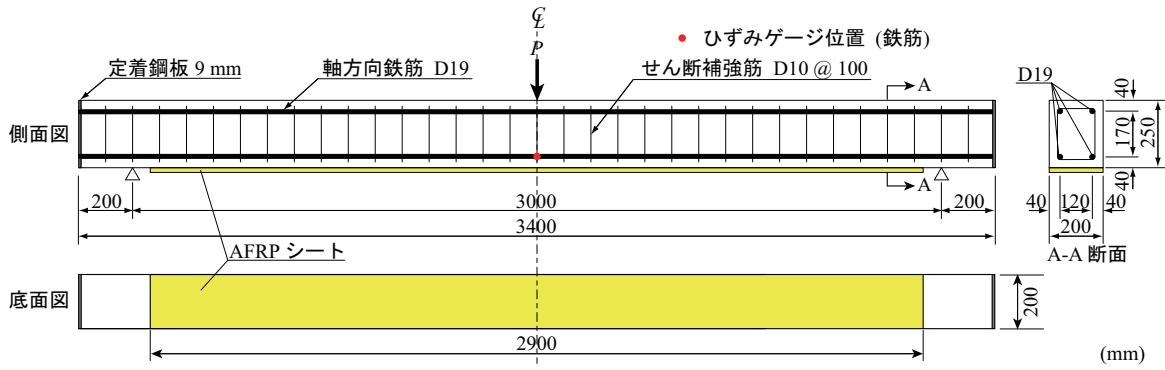


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 RC梁の静的設計値一覧

| 主鉄筋比 P_t | せん断 スパン比 a/d | 曲げ 耐力 P_{usc} (kN) | せん断 耐力 V_{usc} (kN) | せん断 余裕度 α |
|---------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 0.011 | 7.14 | 50.2 | 289.5 | 5.77 |

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) | ひずみ (%) |
|--------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------------|------------|
| 415 | 588 | 0.286 | 2.06 | 118 | 1.75 |

衝撃荷重重載荷の場合には、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから試験体スパン中央部に自由落下させることにより行っている。重錘底部は、2 mm のテーパを有する球面状となっている。RC 梁は、浮き上がり防止治具付きの支点上に設置しており、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっている。衝撃荷重重載荷実験における RC 梁の終局状態は、AFRP シートによる補強を行わない場合については、既往の研究と同様に残留変位量が純スパン長の 2% 程度に達した状態⁴⁾、AFRP シートにより補強を行った場合についてはシートが破断に至った状態を目安としている。

測定項目は重錘衝撃力(静荷荷の場合は荷重) P 、スパン両端の合支点反力(以後、支点反力) R 、荷重点変位(以後、変位) δ 、である。また、実験終了後には、RC 梁の側面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

2.3 実験ケース

表-3 には実験ケース一覧を示している。実験は、AFRP シート補強の有無、損傷の有無および荷重方法をパラメータとしている。表中の試験体名のうち、1次荷重のみ実施した試験体については、第一項目は補強の有無(N: 無, A: 有)を示し、第二項目は荷重方法(S: 静的, I: 衝撃)を示している。また、衝撃荷重重載荷実験の場合には、Iの後ろに重錘落下高さ(m)を付して示している。1次荷重により損傷を与え補強後に2次荷重を実施している試験体については、第一項目は補修補強実験を示すRと1次荷

表-3 実験ケース一覧

| 試験体名 | AFRP 補強の 有無 | 1次 荷重 方法 | 落下 高さ H_1 (m) | ひび割れ 補修および AFRP 補強 | 2次 荷重 方法 | 落下 高さ H_2 (m) |
|-----------|-------------------|----------------|-----------------------|--------------------------|----------------|-----------------------|
| N-S | 無 | 静的 | - | - | - | - |
| N-I1.0 | | 衝撃 | 1.0 | - | - | - |
| N-I1.5 | | | 1.5 | - | - | - |
| N-I2.0 | | | 2.0 | - | - | - |
| N-I2.5 | | | 2.5 | - | - | - |
| A-S | 有 | 静的 | - | - | - | - |
| A-I1.5 | | 衝撃 | 1.5 | - | - | - |
| A-I2.0 | | | 2.0 | - | - | - |
| A-I2.5 | | | 2.5 | - | - | - |
| A-I3.0 | | | 3.0 | - | - | - |
| R1.0-S | 無 | 衝撃 | 1.0 | 有 | 静的 | - |
| R1.0-I1.5 | | | 1.0 | | 1.5 | |
| R1.0-I2.0 | | | 1.0 | | 2.0 | |
| R1.0-I2.5 | | | 1.0 | | 2.5 | |
| R1.5-S | 無 | 衝撃 | 1.5 | 有 | 静的 | - |
| R1.5-I1.5 | | | 1.5 | | 1.5 | |
| R1.5-I2.0 | | | 1.5 | | 2.0 | |
| R1.5-I2.5 | | | 1.5 | | 2.5 | |

荷時の重錘落下高さ(m)を、第二項目は荷重方法(S: 静的, I: 衝撃)を示している。また、衝撃荷重重載荷実験の場合にはIの後ろに2次荷重時の重錘落下高さ(m)を付して示している。

衝撃荷重重載荷実験における1次荷重および2次荷重の落下高さは以下の検討により決定した。N試験体については、参考文献4)を参考に、終局までの耐衝撃挙動データが取得できるように落下高さ $H = 1.0$ m から 0.5 m 刻みで $H = 2.5$ m までの4ケースとした。

A試験体については、AFRPシートによる補強効果を考慮し、 $H = 1.5$ m から 0.5 m 刻みで $H = 3.0$ m までの4ケースとしている。

R試験体については、N試験体の衝撃荷重重載荷実験結果により、1次荷重の落下高さを決定している。すなわち、落下高さ $H = 2.5$ m における残留変位量が破壊の目安とした純スパン長の2%程度に達していることから、補修対応する場合の残留変位量として終局の場合の50%程度以下と仮定し、1次荷重の落下高さとして $H = 1.0$ m と $H = 1.5$ m の2段階を設定した。

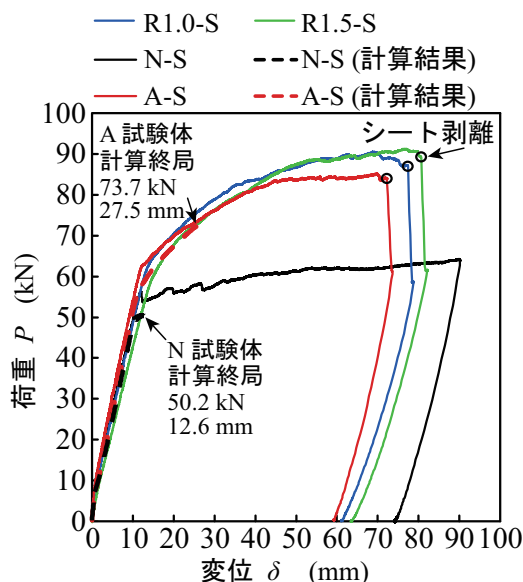


図-2 静載荷実験における荷重-変位関係

2.4 ひび割れ補修およびAFRPシート補強

1次荷重によって損傷を受けたRC梁の補修は、長期耐久性に対して有害であるとされる0.2mm以上のひび割れ部を対象にエポキシ樹脂を注入することにより行っている。補修の手順を概説すると、1)0.2mm以上開口しているひび割れ部を対象として、エポキシ樹脂が表面に漏れないようにするためにパテを用いて密封する。2)注入針を介してエポキシ樹脂をひび割れ部に注入する。3)エポキシ樹脂がひび割れ部に十分浸透し、かつ固化したことを確認後、パテを除去し、ひび割れスケッチ用のポスターカラーを塗布する。以上により、補修の一連の作業が終了する。なお、補修に用いたエポキシ樹脂は圧縮強度および引張強度の公称値はそれぞれ60MPa以上および30MPa以上となっている。

ひび割れ補修後に補強対策として使用したAFRPシートの接着は、RC梁底面のブラスト処理面(処理深さ1mm程度)に対してプライマーを塗布し、指触乾燥状態にあることを確認した後、含浸接着樹脂を用いて実施した。養生は20℃程度の環境下で7日間以上行った。なお、ブラスト処理は作業性等を考慮し、実験対象試験体に対して1次荷重前にあらかじめ実施している。

3. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

(1) 荷重-変位関係

図-2には、RC梁の荷重-変位関係に関する実験結果およびN-S試験体およびA-S試験体の計算結果を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。

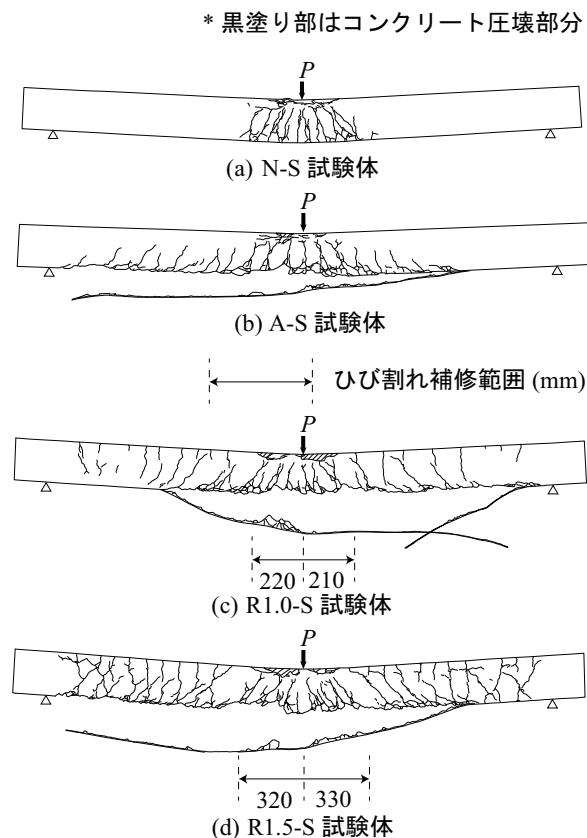


図-3 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

図より、N-SおよびA-S試験体を比較すると、AFRPシート曲げ補強により無補強の場合よりも主鉄筋降伏荷重が10kN程度向上し、その後の剛性勾配および最大荷重が増大していることが分かる。また、A-S試験体の実験結果と計算結果を比較すると計算終局時まで実験結果は計算結果とほぼ対応していることが分かる。したがって、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 $\delta = 50$ mm近傍で上縁コンクリートが圧壊し、変位 $\delta = 70$ mm近傍でシートが全面剥離に至った。

また、1次荷重により損傷を与えひび割れ補修後にAFRPシート補強を施したR1.0-SおよびR1.5-S試験体をA-S試験体と比較すると、最大荷重はR1.0-SおよびR1.5-S試験体の方が大きな値を示している。これは、1次荷重後の静載荷の場合には、1次荷重時の除荷経路を經由して載荷されることより、主鉄筋の歪硬化による効果等によってA-S試験体の載荷時に比較して耐力が向上するものと推察される。

(2) ひび割れ分布性状

図-3は、静載荷実験終了後における各RC梁側面のひび割れ分布性状を示している。図より、静載荷時におけるひび割れ分布性状はいずれの試験体も曲げ変形が卓越し、ほぼ左右対称のひび割れ分布となっていることが

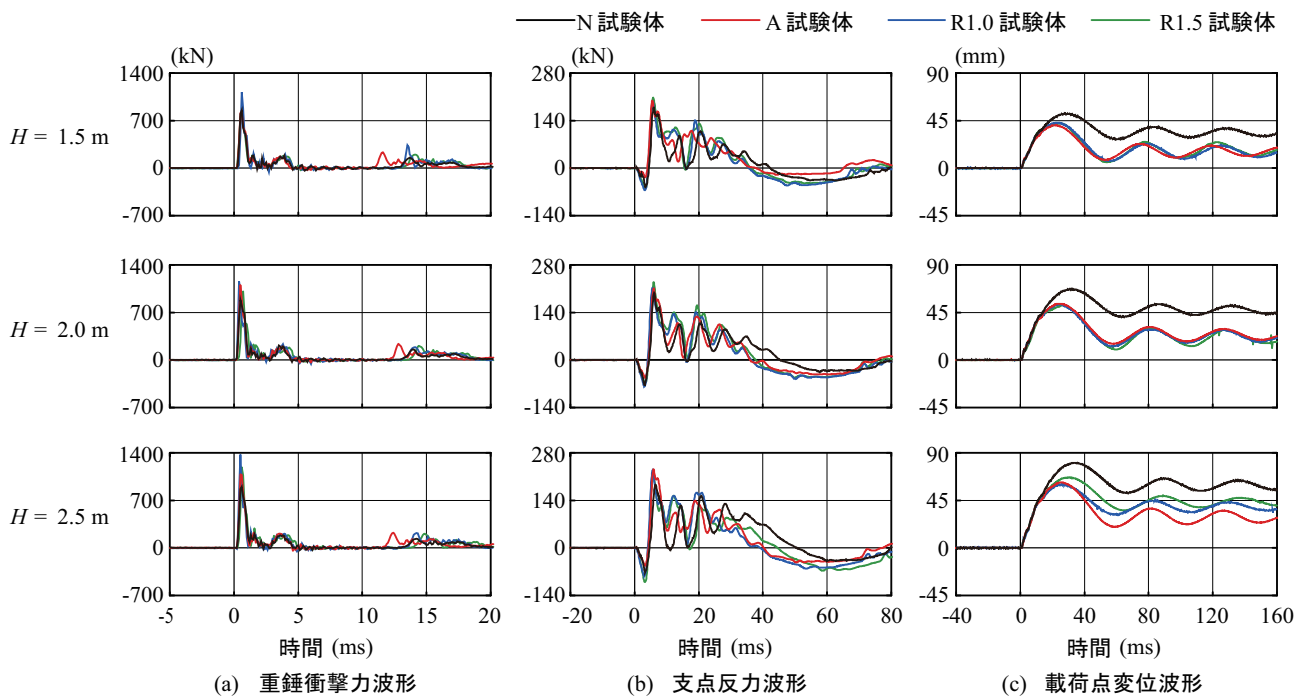


図-4 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する応答波形

分かる。なお、N-S 試験体の場合には載荷点部近傍に曲げひび割れが集中して発生しているが、A-S 試験体の場合には曲げひび割れが梁全体に分散分布している。

また、A-S 試験体の場合には梁下縁コンクリート部に斜めひび割れが発生している。この斜めひび割れは上縁コンクリート圧壊後に発生したものであり、最終的には斜めひび割れの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シートが剥離したことを確認している。一方、R1.0-S および R1.5-S 試験体の場合には、A-S 試験体と同様の性状を示し、斜めひび割れの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シートが剥離したことを確認している。

3.2 衝撃荷重実験結果

(1) 時刻歴応答波形

図-4 には、各種時刻歴応答波形を示している。図-4 (a) より、重錘衝撃力波形は、いずれの試験体も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が 3 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。また、重錘衝突後 10 ms 以降に励起されている波形は初回の重錘衝突後に RC 梁から一旦離れた重錘が再度 RC 梁に衝突することにより発生したものであることを高速度カメラの映像により確認している。この 2 度目の重錘衝突時刻は (c) 図の載荷点変位波形における初期の立ち上がり勾配の変曲点の時刻に対応している

図-4 (b) より、支点反力波形は、いずれの試験体も重錘落下高さによらず、変位波形の第 1 波目に対応する

継続時間の長い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。ただし、上記波動の継続時間は、A 試験体および R1.0/R1.5 試験体の方が N 試験体と比較して短い。これは、シート補強することによって主鉄筋降伏荷重の増加やその後の剛性勾配および曲げ耐力が増加し、後述する変位量の低下とそれに伴い変位波形の周期が短くなることに対応している。

図-4 (c) より、載荷点変位波形は、いずれの試験体も類似の性状を示していることが分かる。すなわち、衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起した後、減衰自由振動状態に至り、残留変位が発生している。変位量は、重錘落下高さ H によらず A 試験体および R1.0/R1.5 試験体の方が N 試験体よりも小さく、波動の周期も短くなっており、AFRP シートの補強効果が示されている。

AFRP シートで補強した 3 試験体について比較すると、落下高さ $H = 2.0\text{ m}$ までは初期損傷の有無や損傷程度にかかわらずほぼ同様の変位波形を示しているが、 $H = 2.5\text{ m}$ では R1.0/R1.5 試験体において AFRP シートが破断したことにより最大変位および残留変位ともに A 試験体よりも大きく示されている。また、AFRP シートは最大変位発生以前に破断していることから、R1.0/R1.5 試験体の最大変位発生以降の減衰自由振動波形の周期は N 試験体とほぼ同様となっている。

以上より、ひび割れ補修後に AFRP シートにより補強した試験体は、AFRP シートが破断に至るまでは、無損傷 RC 梁の AFRP シート補強試験体と同様な耐衝撃挙動を示し、最大応答変位量や残留変位量を抑制できることが明らかになった。

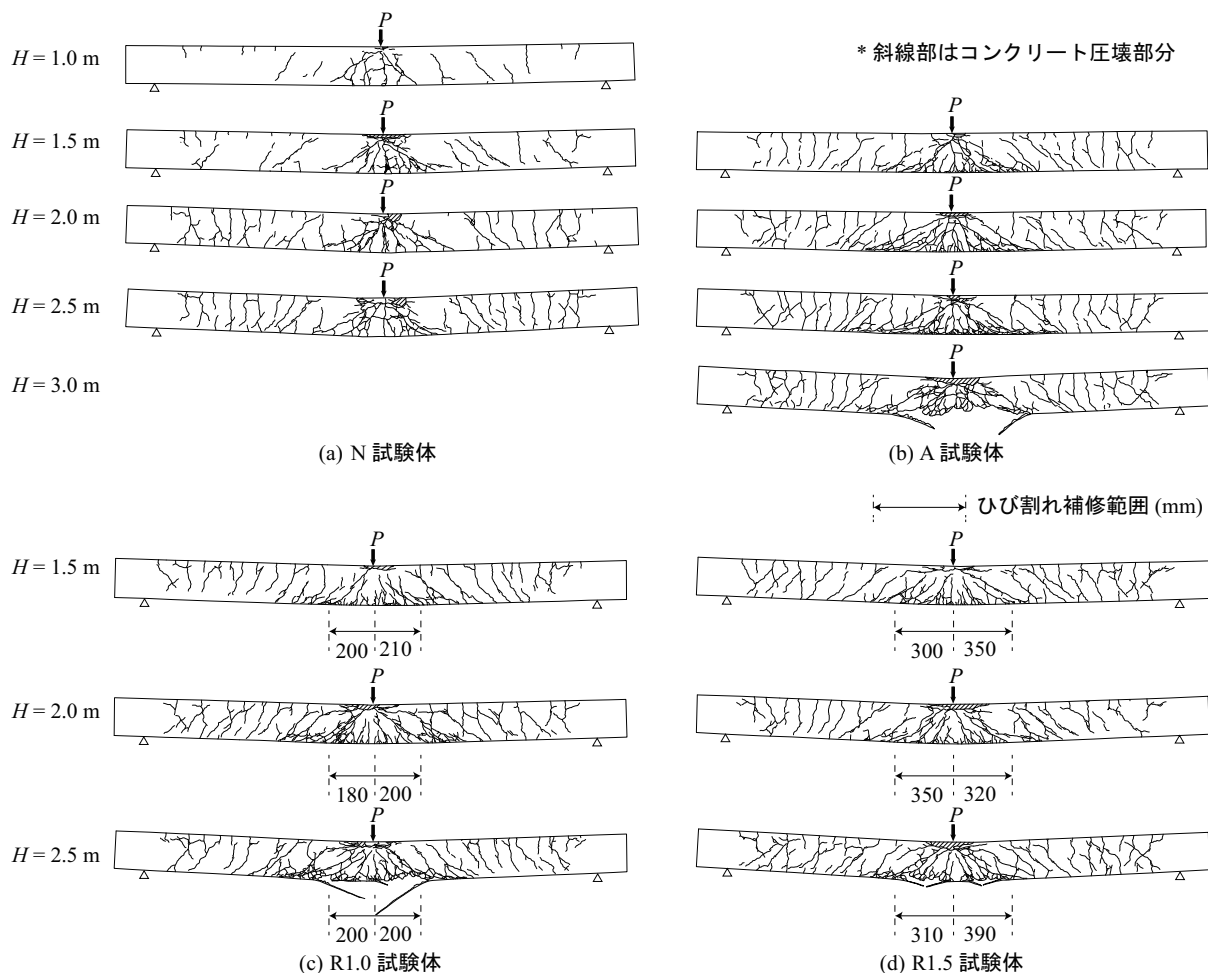


図-5 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状

(2) ひび割れ分布性状

図-5は、衝撃荷重実験終了後における各RC梁側面のひび割れ分布性状を示している。図より、衝撃荷重時におけるひび割れ分布性状は、いずれの試験体もスパン全域にわたって梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、荷重点近傍から梁下縁に向かって約45°の角度で進展する斜めひび割れとなっている。なお、上縁から曲げひび割れが進展するのは、衝撃初期に発生する曲げの主波動が支点に向かって伝播する場合において、支点近傍が固定端と類似の変形状態になることによるものと推察される。

A試験体に着目すると、静荷時にはシートの剥離によって終局に至っているのに対し、衝撃荷重時にはH=3.0mでシートの破断によって終局に至っている。これは静荷時には、上縁コンクリート圧壊後シートの部分剥離範囲が逐次的に進展し、やがて全面剥離に至るのに対し、衝撃荷重の場合には上縁コンクリートが圧壊してその抵抗力が消失し引張縁のAFRPシートに引張力が急速に作用したためと考えられる。R試験体に関しては、1次荷の影響により荷重点直下のコンクリートの圧壊範囲がA試験体に比較して大きくなっているものの、全体的なひび割れ性状については同様となっている。

また1次荷の影響によってAFRPシートはH=2.5mにおいて破断している。

(3) 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-6には、(a)最大重錘衝撃力 P_{ud} 、(b)最大支点反力 R_{ud} 、(c)残留変位 δ_{rs} と入力エネルギー E との関係を示している。入力エネルギーは重錘重量と落下高さの積により算出しており、落下高さH=1.0, 1.5, 2.0, 2.5および3.0mはそれぞれ入力エネルギー $E=2.9, 4.4, 5.9, 7.4$ および8.8kJに対応している。図-6(a)より、最大重錘衝撃力 P_{ud} はN試験体に比べ、AFRPシート補強したA試験体およびR試験体の方が大きな値を示す傾向にある。また入力エネルギーに対する最大重錘衝撃力の増加割合も後者の試験体が大きくなっている。これはシート補強によって主鉄筋降伏荷重の増加やその後の剛性勾配および曲げ耐力が増加することに関係するものと考えられる。

図-6(b)より、最大支点反力 R_{ud} は、入力エネルギーに関わらずN試験体よりもA試験体およびR試験体の方が大きな値を示している。これは、シート補強することによりRC梁の曲げ耐力が増大することに関係するものと考えられる。なお、最大支点反力 R_{ud} は、補強の有無に関わらず入力エネルギーの増加に伴い増大する傾向にあるものの、最大値を示した後は減少する傾向にある。

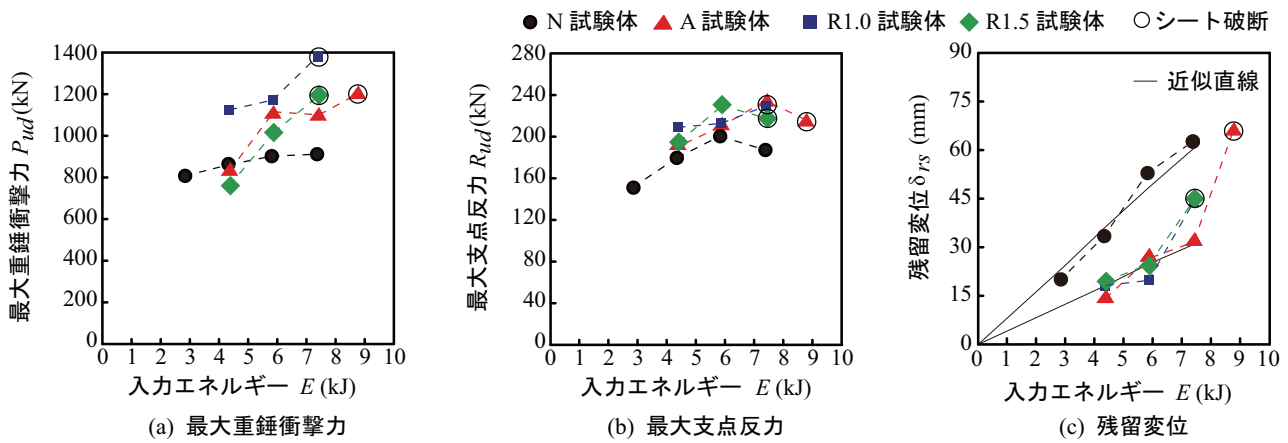


図-6 各種応答値と入力エネルギーの関係

これは重錘衝突によって RC 梁が激しく損傷し耐衝撃性能が低下することによるものと考えられる。なお、N 試験体の最大支点反力は入力エネルギーが 5.9 kJ で 200 kN 程度、A 試験体の最大支点反力は入力エネルギーが 7.4 kJ で 232 kN 程度である。以上から、シート補強によって最大支点反力は 1.2 倍程度、最大支点反力を示す入力エネルギーも 1.2 倍程度に増大することが分かる。

図-6 (c) より、残留変位 δ_{rs} は、入力エネルギーに関わらず A 試験体および R 試験体の場合が、N 試験体の場合よりも小さな値を示していることが分かる。これは、シート補強することによって、RC 梁の曲げ耐力が増大し変形量が抑制されたことによるものと推察される。また、N 試験体と AFRP シートが破断しない場合の A 試験体および R 試験体の残留変位は、入力エネルギーの増加に対してほぼ線形に増加しており、後者の残留変位は前者の 1/2 程度となっている。

R 試験体に着目して考察すると、N 試験体の終局入力エネルギー $E = 7.4$ kJ に対して、1 次載荷で $E = 2.9$ kJ (終局エネルギーの 40%) および $E = 4.4$ kJ (終局エネルギーの 60%) の入力エネルギーにより損傷を与えてひび割れ補修し AFRP 補強した R1.0 および R1.5 では、AFRP シートが破断に至らない入力エネルギー範囲において無損傷 RC 梁に AFRP シート補強した A 試験体と同様の耐衝撃性能を示している。ただし $E = 7.4$ kJ においては N 試験体よりも残留変位は小さいものの AFRP シートが破断していることから、N 試験体の当初の終局入力エネルギーに対応させるためにはさらに AFRP シートの補強量を増加させる必要があるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、衝撃荷重載荷により損傷を受けた RC 梁を対象とした AFRP シート接着補強による耐衝撃補強効果について実験的に検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると以下の通りである。

・ 静載荷実験より

- 1) 損傷を与えた RC 梁に対して AFRP シート補強した RC 梁の荷重-変位関係は、無損傷 RC 梁に AFRP シート補強した場合とほぼ同様の性状を示す。
- 2) 損傷 RC 梁にシート補強した場合の最大耐力は、鉄筋のひずみ硬化の影響により無損傷 RC 梁にシート補強した場合よりも若干増大する。

・ 衝撃荷重載荷実験より

- 1) AFRP シート補強 RC 梁の破壊性状は、静載荷時にはシート剥離であるのに対して、衝撃荷重載荷時にはシート破断で終局に至る。
- 2) AFRP シートが破断に至らなければ、初期損傷の有無にかかわらず AFRP シート補強 RC 梁は同様の耐衝撃挙動を示す。
- 3) AFRP シート補強により残留変位量が抑制されることから損傷した RC 梁の耐衝撃補強対策として有効である。

今後は、さらに AFRP シート補強量を変化させた場合の衝撃荷重載荷実験を実施し、損傷程度の異なる場合における補強量算定手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志, 牛渡裕二, 保木和弘: 2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1181-1193, 2011.3
- 2) 岡田慎哉, 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志: RC ラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討および数値解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1388-1398, 2009.3
- 3) 西 弘明, 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 川瀬良司: 敷砂緩衝材を設置した 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1173-1180, 2011.3
- 4) 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明, 三上 浩: 衝撃荷重を受けた RC 梁のひび割れ補修前後における残存衝撃耐力, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1251-1260, 2005.3