

# 論文 静的に剥離破壊型で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の一定繰り返し衝撃荷重実験

田野 順也<sup>\*1</sup>・小室 雅人<sup>\*2</sup>・岸 徳光<sup>\*3</sup>・三上 浩<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文では、静的に「剥離破壊型」で終局に至るアラミド繊維製FRP (AFRP) シート下面接着曲げ補強RC梁を対象に、比較的小さい衝撃荷重を繰り返し受ける場合の耐衝撃性を把握することを目的として、一定繰り返し重錘落下衝撃荷重実験を実施した。その結果、過大な入力エネルギーを受けた場合にシート剥離によって終局に至るFRP補強RC梁においても、入力エネルギーが終局に至る場合の1/3以下である衝撃荷重を繰り返し受ける場合には、荷重点部上縁コンクリートの圧壊によって終局に至ることが明らかとなった。

**キーワード:** RC梁, AFRPシート, 耐衝撃性, 繰り返し衝撃荷重実験

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート (RC) 製構造物の補修補強工法の一つとして、連続繊維 (FRP) シート接着工法が多く採用されるようになってきた。一方で、既設の落石防護RC構造物においても、コンクリートの経年劣化や落石規模の大型化による衝撃荷重の増大に伴って耐衝撃性向上が要求さ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構造物の耐衝撃性向上を目的としてFRPシート接着あるいはFRPロッド下面埋設工法に着目し、RC梁を対象とした種々の低速度重錘落下衝撃実験を実施してきた<sup>1)~3)</sup>。

これら一連の検討では、重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一荷重実験や、梁が終局に至るまで落下高さを増加させて繰り返し衝撃荷重を作用させる漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施してきた。その結果、1) FRPシート接着工法を用いることでRC梁の衝撃耐力が向上すること、2) 静荷重荷時に剥離破壊型<sup>4)</sup>で終局に至るようなシートの目付量が比較的大きい場合には、衝撃荷重荷時においてもFRPシートが剥離し終局に至ること、などが明らかになっている。

また、既往の研究では主にFRP補強RC梁が衝撃荷重荷によって終局に至るような場合や鉄筋が降伏し、過大に塑性変形が生じるような場合を想定して、その耐衝

撃挙動を検討してきた。しかしながら、既設落石防護構造物の取り巻く環境を考えると、鉄筋が降伏しないあるいは塑性変形が小さくなるような、比較的小さい衝撃荷重が繰り返し作用する場合も想定されることから、より安全な耐衝撃設計手法を見据えた場合には、このような条件下での耐衝撃挙動を検討することは肝要であるものと判断される。

以上の観点から、静荷重荷時に剥離破壊型で終局に至るアラミド繊維製FRP (AFRP) シート接着曲げ補強RC梁を対象に、入力エネルギーが単一荷重時に終局に至る場合の1/6あるいは1/3程度の一定繰り返し重錘落下衝撃荷重実験を実施した。また、既往のエネルギー漸増繰り返し衝撃荷重実験結果<sup>3)</sup>との比較を行い、累積入力エネルギーとRC梁の終局状態の関係について検討を行った。なお、本研究では、FRPシートが剥離・破断で終局に至らない場合には、荷重点近傍部が激しく圧壊した段階を終局状態として実験を終了することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究では、試験体の形状寸法や鉄筋の配筋状況を既往の研究<sup>3)</sup>と同一とし、静荷重荷時に剥離破壊型で終局に至り、かつ単一衝撃荷重荷時にシート剥離で終局

表-1 試験体一覧

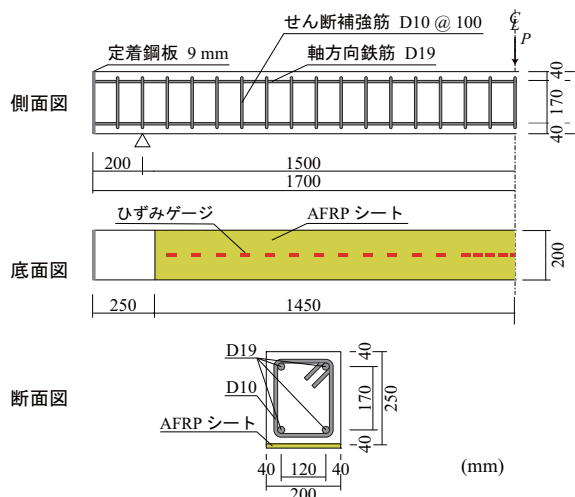
試験体名	設定重錘落下高さ H (m)	終局時重錘落下回数	平均実測衝突速度 V' (m/s)	平均実測入力エネルギー E (kJ)	コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	主鉄筋降伏強度 $f_y$ (MPa)	せん断筋降伏強度 $f_{sy}$ (MPa)	計算曲げ耐力 $P_{asc}$ (kN)	計算せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha$	終局状況
A830-S	-	-	-	-	33.7	371.0	401.9	99.9	298.8	2.99	シート剥離
A830-CI-H0.5	0.5	9	3.14	1.48	34.3	393.7	373.1	102.2	284.3	2.78	上縁圧壊
A830-CI-H1.0	1.0	4	4.50	3.04							

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

\*4 三井住友建設(株) 技術研究所 上席研究員 博(工) (フェロー会員)



図－１ 試験体概要

に至った目付 830 g/m<sup>2</sup> の AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象として、一定繰り返し衝撃荷重実験を行うこととした。

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、荷重方法や落下高さを変化させた全 3 体である。表中の試験体名のうち、第一項目は AFRP シートを用いた曲げ補強を示し、A に付随する数値はシート目付量(g/m<sup>2</sup>)を表している。第二項目は荷重方法(S: 静荷重、CI: 衝撃荷重), 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。なお、本研究ではシート補強 RC 梁の基本的な特性を把握するために、衝撃荷重実験と併せて静荷重実験も実施している。

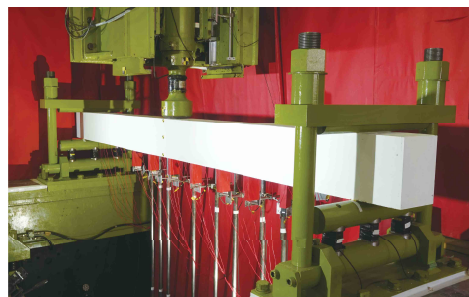
AFRP シートに関しては、製品として流通している一方シートを用いることとし、その目付量は 830 g/m<sup>2</sup> である。なお、表－２には本実験で用いた AFRP シートの力学的特性を一覧にして示している。表中の全引張耐力は、シート幅 200 mm に対する値である。

表－１に示されている計算曲げ耐力  $P_{usc}$  は、表－２に示す AFRP シートの物性値を用い、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>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 AFRP シート間を完全付着として平面保持を仮定した断面分割法により算定した。なお、計算時の梁の終局状態は、上縁コンクリートの圧縮ひずみが 3,500  $\mu$  に達した時点とした。計算せん断耐力  $V_{usc}$  は同コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に準拠して算定している。また、表には、本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度  $f_y$ 、 $f_{sy}$  も併せて示している。

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×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

表－２ AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

幅 B (mm)	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (GPa)	全引張耐力 $f_{ru}$ (kN)	破断ひずみ $\epsilon_{ru}$ (%)
200	830	118.0	235.7	1.75



写真－１ 衝撃荷重実験の状況

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 シート接着は、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、指乾状態であることを確認した後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。なお、養生期間は 1 週間程度である。

## 2.2 実験方法

静荷重実験の場合には、梁幅方向に 400 mm、梁軸方向に 100 mm の荷重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ている。また実験は、最大荷重に到達した後シートが剥離して終局状態に至るまで荷重した。

写真－１には、衝撃荷重実験時における実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃荷重実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を落下高さを一定にし終局に至るまで繰り返し自由落下させることにより行っている。落下高さ  $H$  は、前述のように単一荷重時に終局に至った  $H = 3$  m 落下を基本にして、入力エネルギーをその 1/6、1/3 に設定することとし、それぞれ  $H = 0.5, 1.0$  m とした。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、両支点下端部は回転を許容するピン支持となっており、試験体は矩形鋼製治具を用いナットで締め付けることによってその浮き上がりを防止している。

衝撃荷重実験における測定項目は、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ている。また、変位はレーザ式非接触型変位計

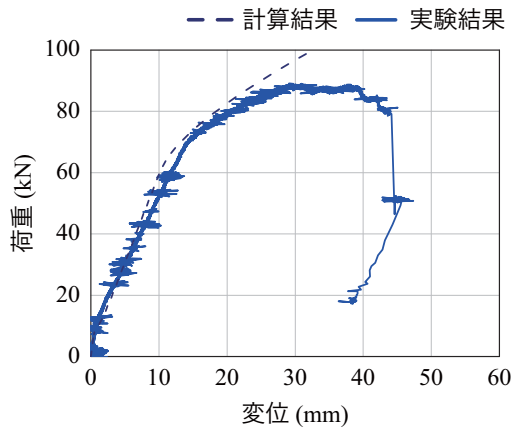


図-2 荷重-変位関係

を用いて計測した。さらに、実験時にはひび割れ分布やAFRPシートの破断状況の他、変位計のバックアップとしての高速度カメラ撮影も行っている。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 静荷重載荷実験結果

##### (1) 荷重-変位関係

図-2には、本研究で対象としたAFRPシート接着曲げ補強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。計算結果の荷重-変位曲線は、以下のようにして求めた。すなわち、(1) 終局荷重までの各荷重レベルに対する梁軸方向の曲げモーメント分布を求める、(2) 各曲げモーメントに対応する変形曲率を断面分割法により算定する、(3) 梁軸方向の曲げモーメント分布に対応する曲率分布を求め、それを弾性荷重として与え、弾性荷重法を適用して曲げモーメントを求める、である。なお、本研究では、断面分割法における梁の分割数を、断面方向には50、軸方向には半スパン当たり150としている。

図-2より、実験結果の荷重-変位分布を見ると、載荷荷重はひび割れ発生後から主鉄筋降伏点近傍まではほぼ線形に増加しており、主鉄筋降伏荷重は71.5 kNであった。その後、主鉄筋降伏後線形的な増加傾向を示しているが、変位が30 mm前後からは単調に増加できずに停滞した状態でシート剥離に至っている。なお、最大荷重は88.6 kNであった。

また、断面分割法に基づいた計算結果と比較すると、ひび割れ発生後から主鉄筋降伏荷重を越える近傍までは、計算結果よりも若干過小な値を示しつつも、ほぼ対応していることが分かる。しかしながら、それ以降は計算結果に対応できずにシート剥離に至っている。実験結果が主鉄筋降伏後計算終局耐力に至らなかった要因は、シート補強割合が大きく斜めひび割れの開口とともにピーリング作用によって、徐々に剥離が進行したことによるも

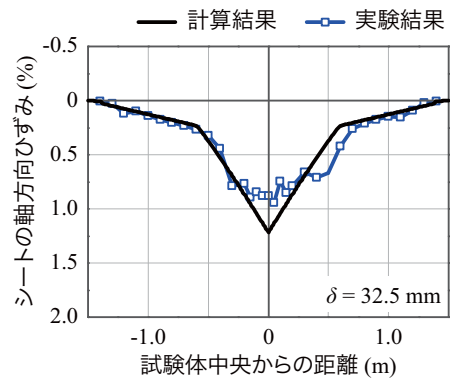


図-3 シートの軸方向ひずみ分布の比較(計算終局時)

のと推察される。

ここで、静荷重載荷時の破壊モードに着目すると、既往の研究<sup>4)</sup>より、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0.65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となっている。本試験体の場合には計算曲げモーメント比 $M_y/M_u = 0.625$ となることから「剥離破壊型」と推定でき、かつ実験結果と対応していることが確認できる。

##### (2) ひずみ分布性状

図-3には、計算終局時におけるシートの軸方向ひずみ分布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、計算結果はAFRPシートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出している。

図-3より、載荷点部の実測ひずみ分布はほぼ一律な値を示しており、等曲げ状態であることが推察される。また、載荷点から若干離れた部分では計算結果よりも大きく示され剥離傾向にあることが推察される。一方で、鉄筋が弾性域である中央部から離れた部分の実測ひずみは、計算結果とよく対応している。なお、計算結果において、中央部の三角形の範囲は主鉄筋降伏領域であり、鉄筋は塑性化していることが推察される。

#### 3.2 衝撃荷重載荷実験結果

##### (1) 各種時刻歴応答波形

図-4には、一定繰り返し衝撃荷重載荷実験結果に関する重錘衝撃力、支点反力、変位の各時刻歴応答波形を示している。重錘落下高さ $H = 0.5, 1.0$  mにおける終局に至るまでの繰り返し載荷回数はそれぞれ、9, 4回である。ここでは、 $H = 0.5$  m落下の場合には1, 3, 6, 9回目、 $H = 1$  m落下の場合には全ての載荷時における結果について示している。なお、波形は実験毎に初期化しており、繰り返しによる累積値は考慮されていない。

図-4 (i)は、落下高さ $H = 0.5$  mの一定繰り返し載荷時における結果を示している。重錘衝撃力波形を見ると、9回目載荷時における最大重錘衝撃力は、1回目と比較して200 kN程度小さい値を示していることから、繰り返し載荷回数が9回目に至るまでに載荷点部コンクリート



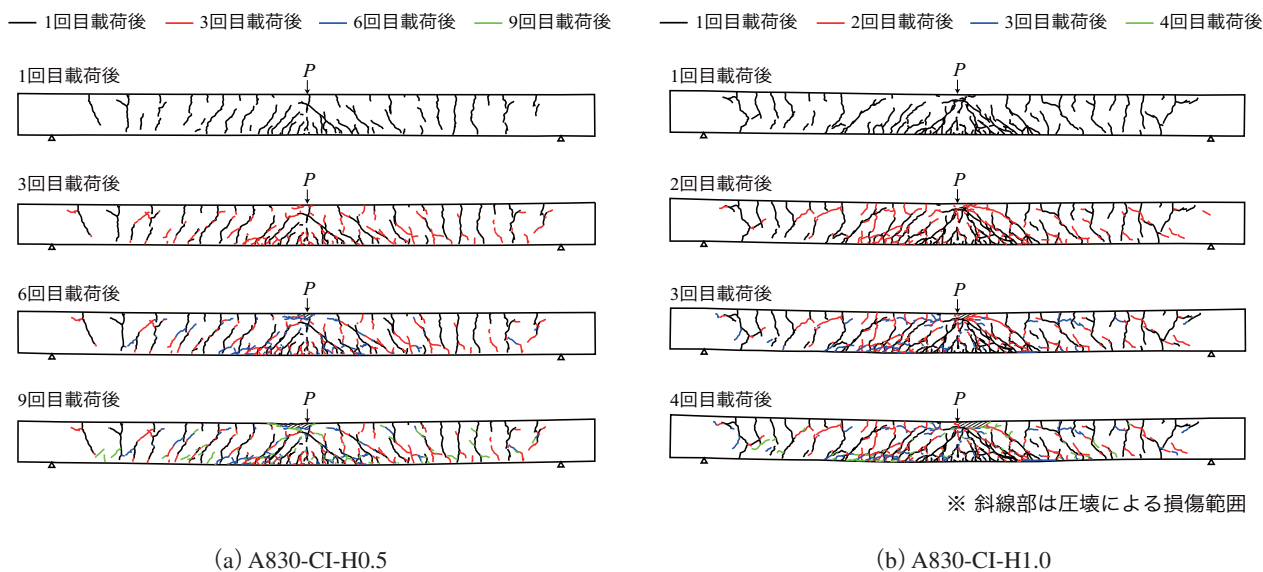


図-5 衝撃荷重繰り返し実験終了後のひび割れ分布の比較

ず、梁は荷重点部上縁コンクリートの圧壊により終局に至っている。ただし、終局に至るまでの繰り返し荷重回数はほぼ 1/2 となっている。

### (3) 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図-6 には、本研究で実施した実験結果における最大変位、残留変位、繰り返し荷重による累積値を考慮した累積最大変位および累積残留変位について、実測累積入力エネルギー（以下、単に累積入力エネルギー）を横軸に取り比較して示している。

ここでは一定繰り返し衝撃荷重とエネルギー漸増（以下、単に漸増）繰り返し衝撃荷重の違いによる梁の耐衝撃性を検討するため、既往の検討結果<sup>3)</sup>も記載している。試験体寸法やシート目付量は本研究の試験体と同様であり、コンクリート圧縮強度などの材料特性値に関しても同程度である。重錘落下高さは 1, 2, 2.5, 3 m を基準として各落下高さを 1 回目荷重時の設定落下高さとした全 4 体の漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施している。

なお、試験体名の H に続く数値は 1 回目荷重時の設定落下高さを示しており、さらに数字が続いている場合には繰り返し荷重時の落下高さを示している。1 回目荷重時の落下高さが  $H = 3.0$  m の場合には、シート剥離が発生し繰り返し荷重は実施していない。なお、シート剥離に至ったケースは白塗りで示した。その他、詳細については文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

さらに、ここでは静的耐荷性状との関係を検討するため、図-2 に示した断面分割法により得られる計算結果に基づき、A830-S 試験体に関する計算主鉄筋降伏変位  $\delta_y$  および計算終局変位  $\delta_u$  についても併せて記載している。

図-6 (a) より、最大変位の分布性状を見ると、一定繰

り返し荷重の場合には、累積入力エネルギーに対して若干の勾配があるものの、大きな増加傾向は示していない。一方で漸増繰り返し荷重の場合には、入力エネルギーの増加に伴い大きく増加する傾向を示している。すなわち、最大変位は実験毎の入力エネルギーに大きく依存し、入力エネルギーが小さい場合には累積値の影響は小さいものと推察される。

図-6 (b) より、残留変位の分布性状に着目すると、一定繰り返し荷重の場合には、累積入力エネルギーの増加に伴ってその値が若干の減少傾向にある。これは、前述のように繰り返し衝撃荷重によって荷重点部の損傷も累積し重錘衝撃力も低下するが、未だ FRP シートは剥離に至らず十分補強効果が発揮されていることによるものと推察される。また、シート剥離に至ったケースに着目すると、残留変位は 40 mm 程度以上に達していることが分かる。

図-6 (c) より、累積最大変位の分布性状を見ると、漸増繰り返し荷重の場合にはいずれのケースにおいても増加勾配は同程度であるが、一定繰り返し荷重の場合にはエネルギーの増加とともに増加勾配が減少傾向にあることが分かる。これは、上述のように累積入力エネルギーの増加に伴って、残留変位が徐々に減少していくことが一要因として考えられる。また、この傾向は、図-6 (d) の累積残留変位においても同様である。

ここで、計算終局時変位  $\delta_u$  に着目すると、図-6 (b) において一定繰り返し荷重の場合には、1 回目荷重時も含めて、変位が計算終局時変位  $\delta_u$  よりも小さい値を示している。一方で、漸増繰り返し荷重において残留変位が計算終局時変位  $\delta_u$  を大きく上回るような場合には、シート破断に至っていることが分かる。すなわち、本研究の

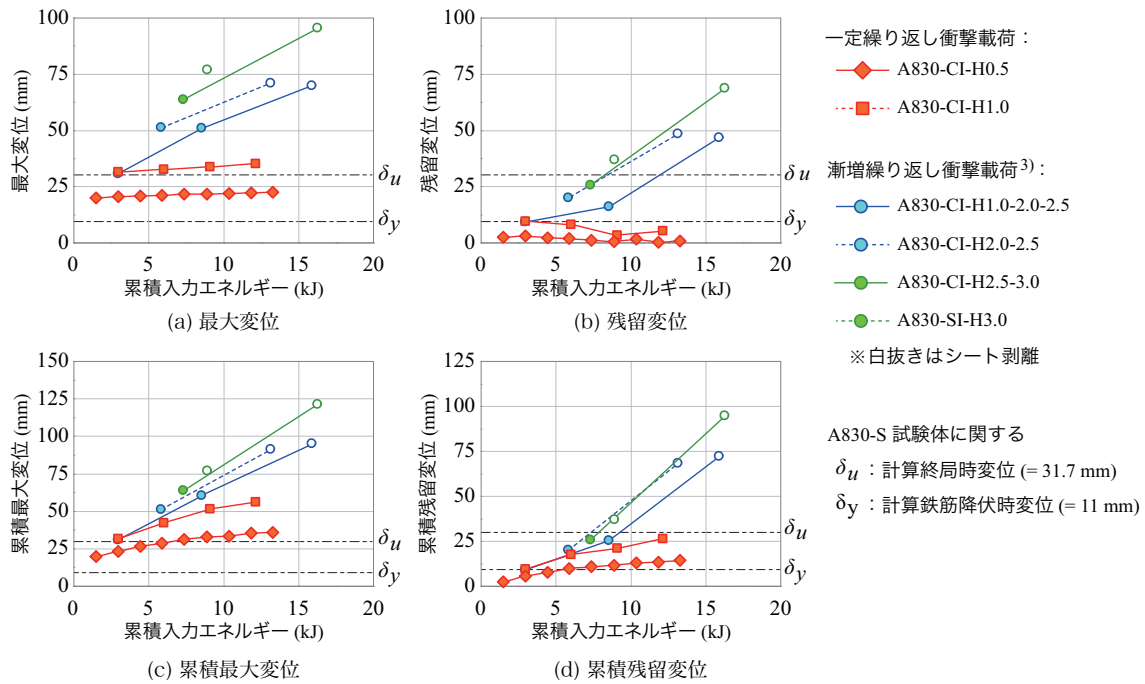


図-6 累積入力エネルギーと最大変位および残留変位の関係

範囲内では、FRP 補強 RC 梁の残留変位が計算終局時変位よりも小さい場合には、シートが剥離や破断に至らず、梁はいずれにおいても載荷点部上縁コンクリートの圧壊により終局に至ることが明らかとなった。

#### 4. まとめ

本研究では、衝撃荷重荷を受ける既設 RC 構造物の耐衝撃性向上法の確立に向けて、その引張部に連続繊維 (FRP) 製シートを接着して曲げ補強を施す手法に着目し検討を行った。すなわち、静的に剥離破壊型で終局に至るアラミド繊維 (AFRP) シート下面接着 RC 梁を対象に、入力エネルギーを単一載荷時に終局に至る場合の 1/6 および 1/3 として重錘を繰り返し落下させる衝撃荷重荷重実験を実施した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 重錘衝撃力、支点反力、変位の各応答波形の概形は、主波動の最大振幅や継続時間、除荷後の減衰自由振動状態における固有振動周期を除き、繰り返し衝撃荷重荷重による著しい差がない。
- 2) 単一載荷時にシート剥離によって終局に至る FRP 補強 RC 梁においても、入力エネルギーがその 1/6~1/3 程度で繰り返し載荷する場合には、載荷点部上縁コンクリートの圧壊で終局に至る。
- 3) 一定およびエネルギー漸増繰り返し衝撃荷重荷重時における残留変位が静荷重荷重時の計算終局変位よりも小さい場合には、梁はシート剥離や破断に至らず載荷点近傍部の圧壊により終局に至る。

#### 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。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, Le Huy Sinh: 衝撃荷重荷重時における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.
- 3) 岸 徳光, 小室雅人, 瓦井智貴, 三上 浩: 繰り返し衝撃荷重荷重時における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 65A, No. 2, pp. 964-974, 2019.
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 47-64, 2001.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2017 年制定