

静的に曲げ圧壊型で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の 一定繰り返し衝撃荷重載荷実験

Consecutive and constant low-velocity drop-weight impact loading tests for statically flexural compression failure-type RC beams strengthened with AFRP sheet

瓦井智貴[†], 小室雅人^{*}, 岸徳光^{**}, 三上浩^{***}, 田野順也^{****}

Tomoki Kawai, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Junya Tano

[†]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)

^{*}博(工), 室蘭工業大学大学院教授, 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)

^{***}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)

^{****}室蘭工業大学大学院, 工学研究科博士前期課程 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to establish an impact resistant upgrading method for RC members, consecutive and constant low-velocity drop-weight impact loading tests for statically flexural compression failure-type RC beams strengthened in flexure with Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) sheet were conducted. A 300 kg weight was consecutively dropped until the beams reach the ultimate state. Two kinds of drop height were selected: $H = 0.5$ m; and 1.0 m. The results obtained from this study were as follows: (1) time histories of the dynamic responses of the beams are almost similar irrespective of number of loading times; and (2) even though the RC beams reached ultimate state due to sheet rupture under a single loading with high energy, the beams reached ultimate state due to compression failure at the upper concrete cover of the beam under consecutive and low-velocity impact loading.

Key Words: FRP sheet, RC beams, consecutive impact loading, sheet rupture

キーワード: FRP シート, RC 梁, 繰り返し衝撃荷重載荷, シート破断

1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対する耐震補強方法の一つとして, 連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く普及している. 一方で, 既設の耐衝撃用途土木構造物においては, 異常気象や斜面の経年劣化などにより, 設計当初の想定落石荷重を上回る荷重が作用する場合も確認されている.

このような状況に鑑み, 著者らは既設 RC 構造物の合理的な耐衝撃性向上法の確立を最終目的として, 写真-1 に示すアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いた新設あるいは損傷を受けた既設 RC 梁に対する接着工法について種々の低速度重錘落下衝撃実験を実施している¹⁾⁻³⁾.

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載荷実験や, 梁が終局に至るまで落下高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載荷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) 静載荷時に曲げ圧壊型⁴⁾で終局に至るような比較的目付量が小さく, 鉄筋の降伏領域が載荷点近傍のみに限定される場合には, FRP シートが破断し終局に至ること, 3) 漸増繰り返し



写真-1 AFRP シート

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: 18096003@mmm.muroran-it.ac.jp

表－１ 試験体一覧

| 試験体名 | シート 目付量 (g/m ²) | 設定重錘 落下高 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_{usc} (kN) | 計算せん断 耐力 V_{usc} (kN) | せん断 余裕度 α | 終局状況 |
|--------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------|
| N-S | - | - | - | - | - | 32.4 | 381.7 | 461.9 | 55.0 | 329.0 | 5.98 | 上縁圧壊 |
| A415-S | 415 | - | - | - | - | 33.7 | 371.0 | 401.9 | 81.0 | 298.8 | 3.69 | シート剥離 |
| N-CI-H0.5 | - | 0.5 | 6 | 3.19 | 1.53 | 34.3 | 393.7 | 373.1 | 57.1 | 284.3 | 4.98 | 上縁圧壊 |
| N-CI-H1.0 | | 1.0 | 3 | 4.59 | 3.15 | | | | | | | |
| A415-CI-H0.5 | | 0.5 | 9 | 3.14 | 1.48 | | | | 83.6 | 284.3 | 3.40 | 上縁圧壊 |
| A415-CI-H1.0 | | 1.0 | 4 | 4.48 | 3.01 | | | | | | | |

し衝撃荷重が作用する場合には、累積入力エネルギーと最大変位の関係がほぼ線形となり、単一載荷時と同様な挙動を示すこと、などが明らかとなっている^{1)~3)}。

また、既往の研究では主に FRP 補強 RC 梁が衝撃荷重載荷によって終局に至るような場合や鉄筋が降伏し、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、既設耐衝撃用途構造物の取り巻く環境を考えると、より一層の安全性を考慮して鉄筋が降伏しないあるいは比較的塑性変形が小さく、単一載荷時に終局に至る場合の 1/6~1/3 程度の入力エネルギーが繰り返し作用する場合も想定されることから、このような条件下での耐衝撃挙動を検討することは必要不可欠であるものと判断される。

このような観点から、本研究では FRP 材で曲げ補強を施した RC 部材の合理的な耐衝撃性向上法の確立を最終目的として、静載荷時に曲げ圧壊型で終局に至る比較的シート補強量が少ない場合における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に、単一載荷時に終局に至る場合の 1/6 あるいは 1/3 程度と入力エネルギーが小さい場合における一定繰り返し重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。また、既往の漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験結果³⁾との比較を行い、累積入力エネルギーと FRP 補強 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、鋼製の 300 kg 重錘を用い、落下高が 0.5 m と 1.0 m 場合に関する繰り返し載荷実験を行っているが、FRP シートが剥離あるいは破断に至らない場合には、載荷点部コンクリート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。比較のため無補強試験体についても同様に実験を実施している。

2. 実験概要

2.1 試験体形状寸法および材料の力学的特性

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²⁾と同一とし、静載荷時に曲げ圧壊型で終局に至り、かつ単一衝撃荷重載荷時にシート破断で終局に至った目付 415 g/m² 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載荷実

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 |

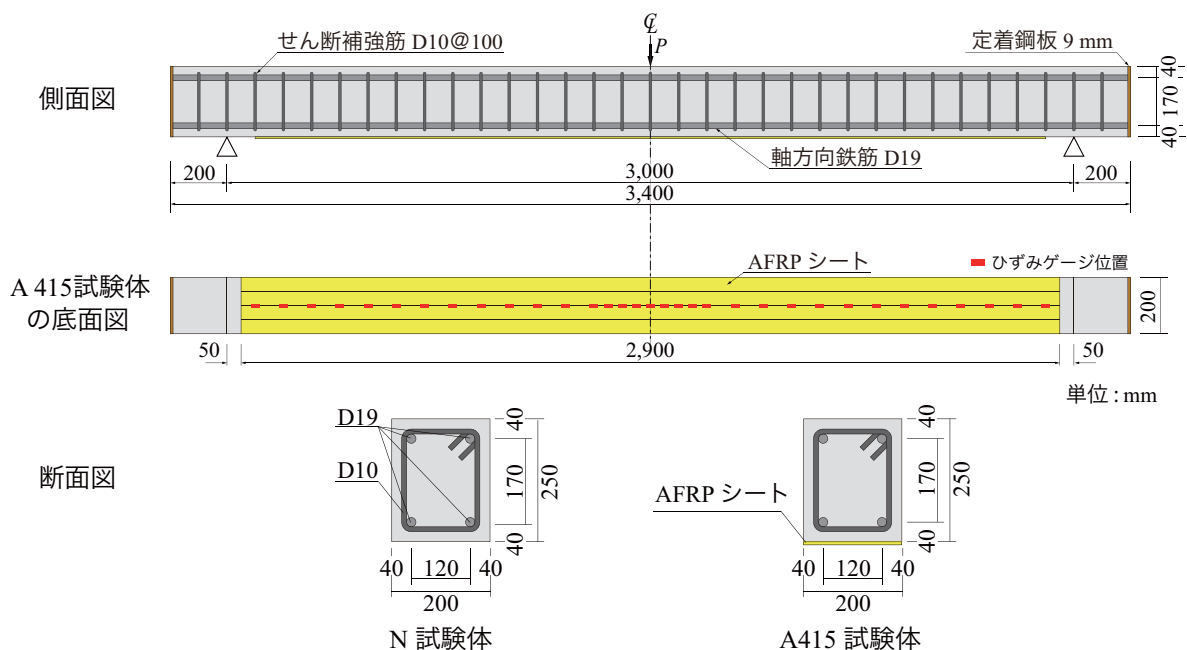
験を行うこととした。

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、載荷方法や、AFRP シート接着曲げ補強の有無および落下高を変化させた全 6 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 シート下面接着補強) 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：静的載荷，CI：衝撃載荷)、第三項目の H に付随する数値は設定落下高 (m) を示している。なお、本研究では RC 梁の基本的な特性を把握するために、衝撃実験と併せて静的載荷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向シートを用いることとし、その目付量は 415 g/m² 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。

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⁵⁾に準拠して各材料の応力ひずみ関係を設定し、平面保持仮定とコンクリートと AFRP シート間の完全付着を仮定して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 μ 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⁵⁾に準拠して算定している。また、詳細については文献 4), 6) を参照されたい。

図－１には、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



図－１ 試験体の形状寸法，配筋および補強状況

下端に D19 を各 2 本配置し，定着長節約のため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行っている。なお，養生期間は 1 週間程度である。



写真－２ 静的荷重実験状況

2.2 実験方法および測定項目

写真－２には，静荷重荷重時における荷重装置と試験体の設置状況を示している。静荷重荷重の場合には，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。なお，N-S 試験体の場合において，主鉄筋降伏後，荷重点近傍部上縁コンクリートに圧壊が生じるが，荷重は主鉄筋降伏後も鉄筋の塑性硬化によって漸増することより，本研究では梁が荷重点部で角折れし変位が 90 mm 前後に至るまで荷重している。一方，AFRP シートを下面接着して曲げ補強する場合には，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－３には，衝撃荷重時における実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃荷重荷重実験は，質量 300 kg，先端直径 200 mm の鋼製重錘を落下高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 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，その 1/6，1/3 の入力エネルギーを設定することとし，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，試験体の両支点部は，回転を許容し，矩形状鋼製梁によって浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造となっている。

衝撃荷重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 静荷重荷重実験結果

(1) 荷重－変位関係

図－２には，N-S 試験体および A415-S 試験体の荷

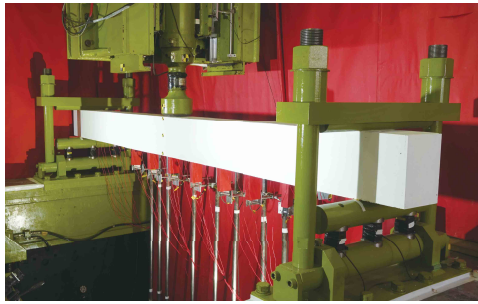


写真-3 衝撃载荷実験状況

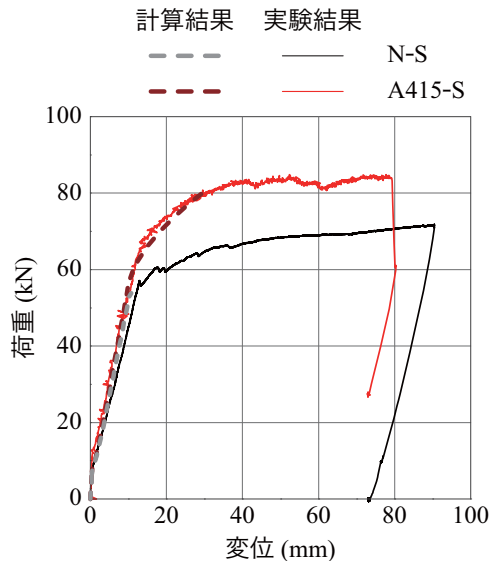
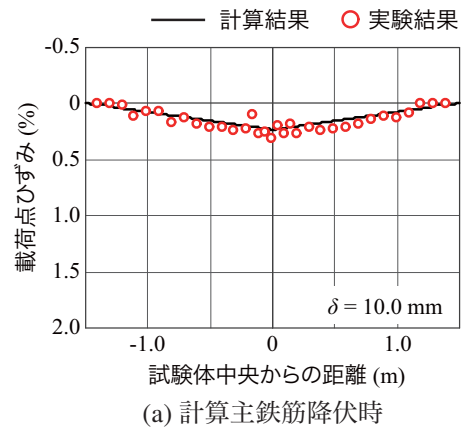


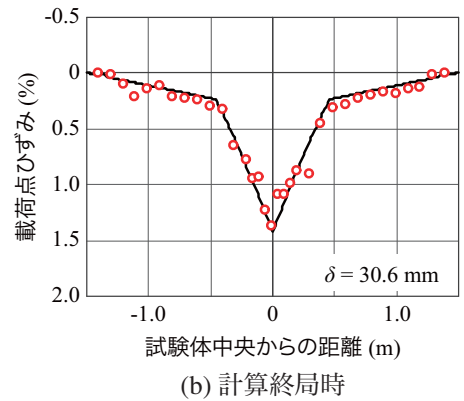
図-2 荷重-変位関係の比較

重-変位関係について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、以下のようにして算定した。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断面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変位としての曲げモーメントを求める、である。なお、断面分割法における梁の分割数は、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、N-S、A415-S試験体に関する実験結果の主鉄筋降伏荷重は、それぞれ57.0、71.5 kNであり、最大荷重は66.7、88.6 kNであった。これより、RC梁にAFRPシート下面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25%程度、最大荷重は33%程度増加していることが分かる。なお、N-S試験体の場合には、主鉄筋降伏後の荷重が鉄筋の塑性硬化の影響によって単調増加の傾向を示している。そのため、本論文では、A415-S試験体の計算終局変位よりも若干大きい40 mmに達した時点における荷重を最大荷重として評価することとした。なお、こ



(a) 計算主鉄筋降伏時



(b) 計算終局時

図-3 A415-S試験体のAFRPシートの軸方向ひずみ分布の比較

の時のスパン長に対するたわみの割合は1.3%程度である。

実験結果と計算結果を比較すると、N-S試験体の場合における計算結果は、主鉄筋降伏直後に上縁コンクリートが $3,500 \mu$ に到達し、圧壊の傾向を示して終局に至っている。

一方、A415-S試験体の場合には、ひび割れ発生後から主鉄筋降伏荷重を越えた時点まで、実験結果は計算結果にほぼ対応していることが分かる。これより、本補強試験体は静載荷時には曲げ圧壊型で計算終局の状態に至ることが実験的にも示された。なお、計算結果ではシートとコンクリートを完全付着と仮定しているため上縁コンクリートの圧壊により終局に至るが、実験結果では計算終局点の2倍以上変位した後、シート剥離に至っている。

(2) ひずみ分布性状

図-3には、A415-S試験体について、計算主鉄筋降伏時および計算終局時におけるAFRP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。

図-3(a)の計算主鉄筋降伏時(到達時変位: $\delta = 10.0$ mm)のひずみ分布に着目すると、両者ほぼ対応しており、シートとコンクリートの完全付着仮定が成立し

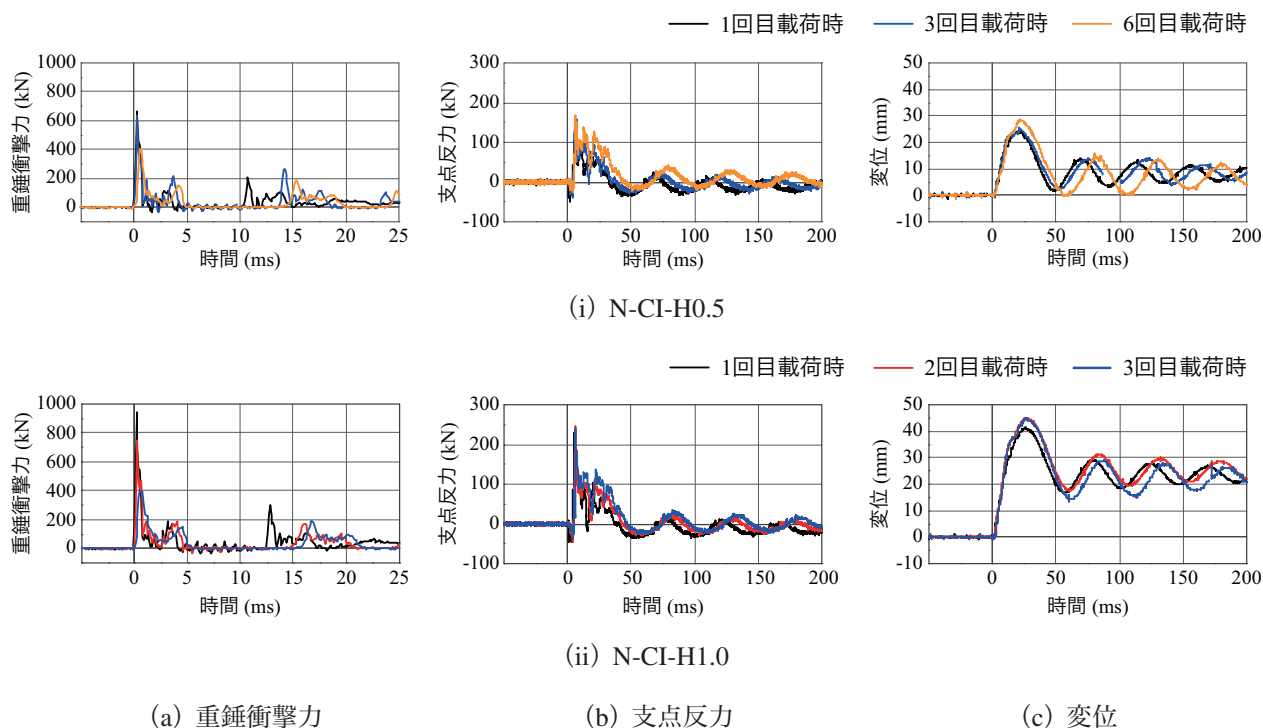


図-4 N 試験体に関する各種時刻歴応答波形

ていることが分かる。

一方、図-3(b)の計算終局時(到達時変位： $\delta = 30.6$ mm)のひずみ分布に着目すると、載荷点近傍中央部の実測ひずみ分布も計算結果とほぼ対応していることが分かる。なお、載荷点中央部のひずみ値は最大1.4%程度まで達しており、鉄筋は大きく塑性化していることが推察される。終局時点においても両者がよく対応し、未だ曲げひび割れが先行して進展しており、シートとコンクリートの付着が保たれているものと判断される。なお、計算結果において、最大値が1%以上を示す中央部の三角形のひずみ分布は、主鉄筋が降伏し大きく塑性化していることを示している。

3.2 衝撃載荷実験結果

(1) 各種時刻歴応答波形

図-4には、N試験体の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 $H = 0.5, 1.0$ mにおいて、終局に至るまでの繰り返し載荷回数はそれぞれ、6、3回である。ここでは、N-CI-H0.5試験体に関しては1、3、6回目載荷時、N-CI-H1.0試験体に関しては全ての載荷時における結果について示している。なお、波形は実験毎の応答波形であり、繰り返しによる累積値は考慮されていない。

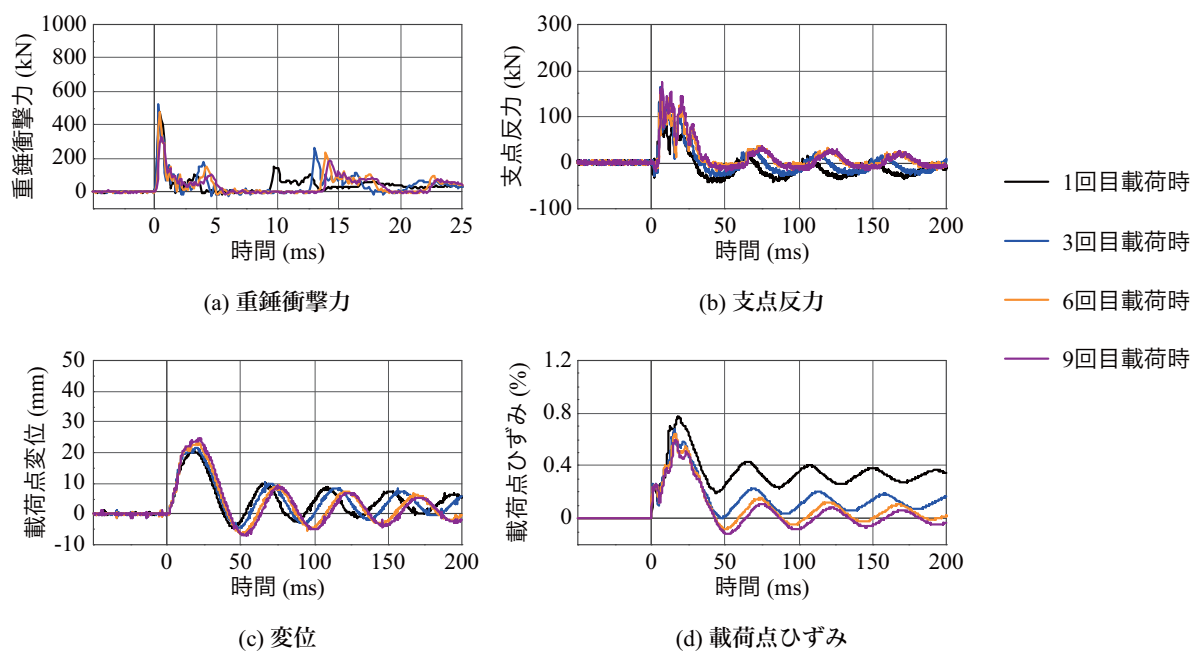
図-4(i)の落下高 $H = 0.5$ mにおける一定繰り返し衝撃載荷結果に着目すると、重錘衝撃力波形において、最大重錘衝撃力は1、3、6回目載荷時でそれぞれ

約660、635、400 kN程度であり、6回目載荷時が最も小さい。また、10～15 ms付近の第二波目の立ち上がり時間に着目すると、繰り返し載荷回数の増加に伴い、数msずつ遅れていることが分かる。これは、繰り返し載荷によって載荷点部に損傷が累積され、載荷点近傍部におけるコンクリートの剛性低下が進行していることによるものと推察される。

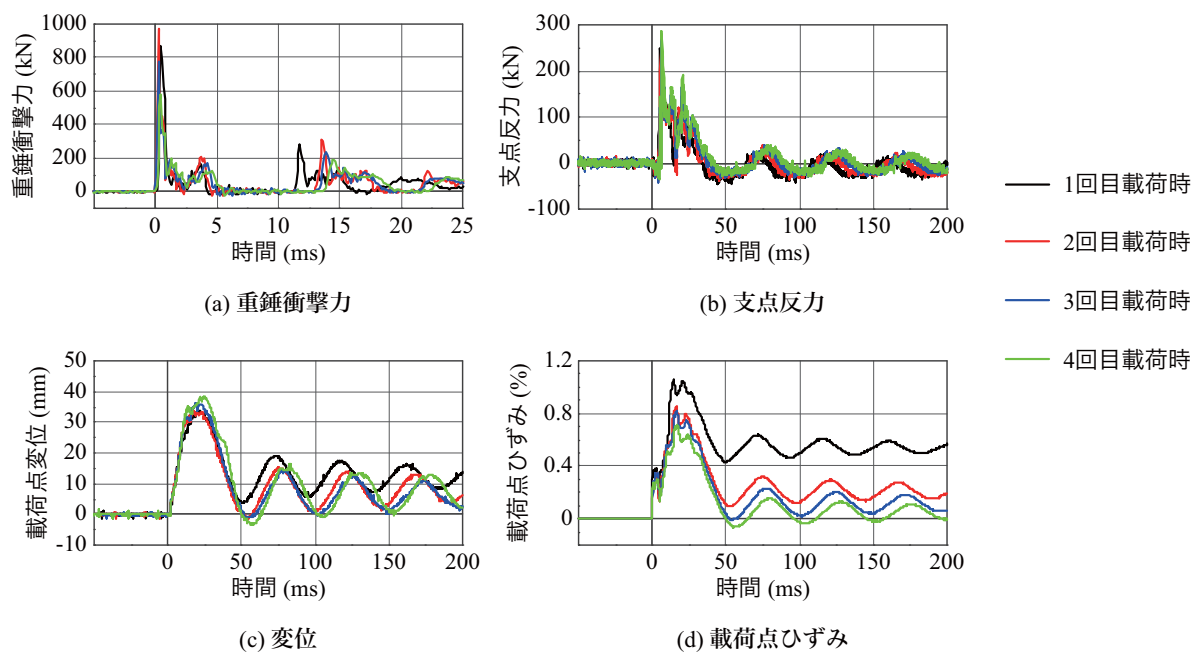
支点反力波形の場合には、最大値が繰り返し載荷回数毎でそれぞれ105、155、170 kN程度であり、繰り返し載荷回数に対応して大きくなっている。主波動の継続時間を見ると、6回目載荷時には1回目載荷時と比較して10 ms程度延びており、載荷点部が大きく損傷していることが窺える。

変位波形の場合には、最大値が繰り返し載荷回数毎でそれぞれ約24、26、29 mm程度であり、残留変位は、約9、9、10 mm程度である。なお、残留変位は、重錘を取り除いた後に計測を行った値である。最大変位は繰り返し載荷回数に対応して増加傾向にあるのに対して、残留変位はほぼ一定値を取っていることが分かる。

図-4(ii)は、N試験体における落下高 $H = 1.0$ mの場合における一定繰り返し載荷実験結果を示している。 $H = 0.5$ mの場合と波形性状を比較すると、重錘衝撃力波形、支点反力波形、変位波形の概形は、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周期を除き、各ケースによって著しい差のないことが分かる。



(i) A415-CI-H0.5



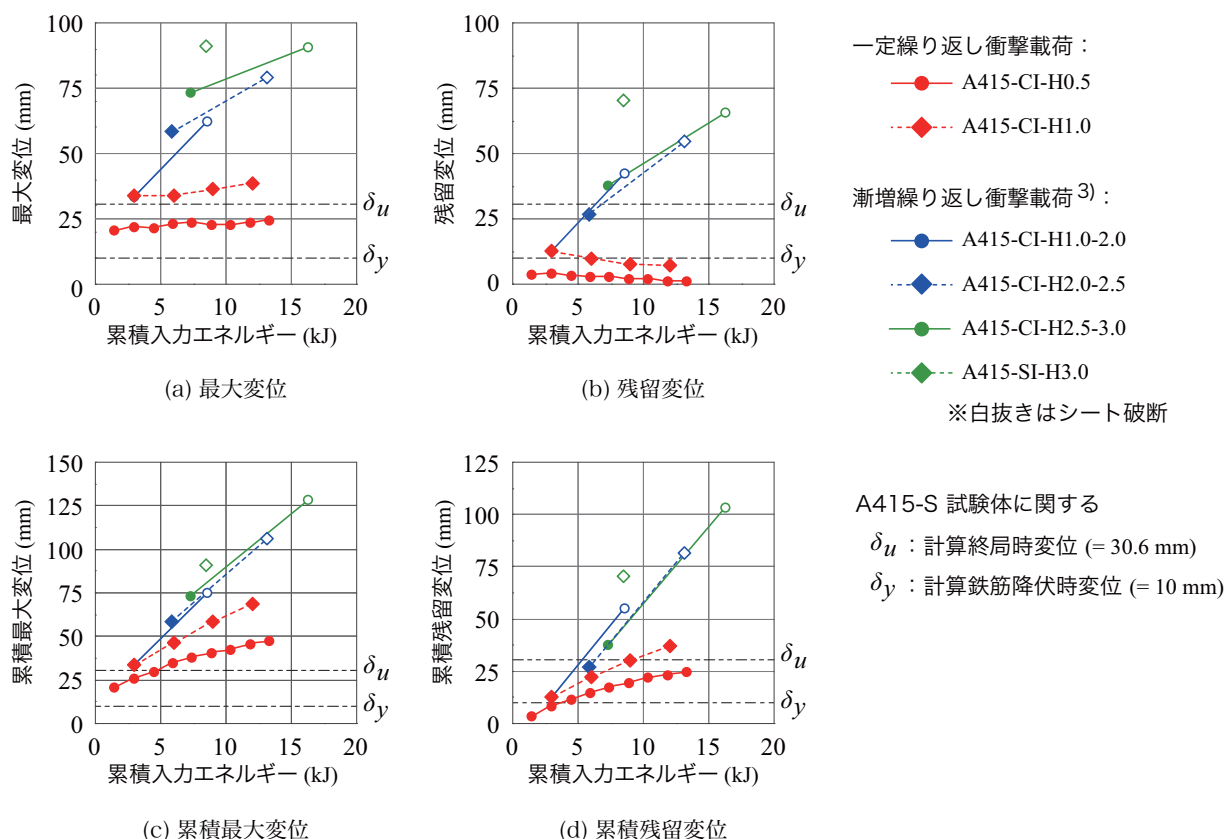
(ii) A415-CI-H1.0

図-5 A415 試験体に関する各種時刻歴応答波形

図-5 には、A415 試験体の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、変位および载荷点直下のひずみ(以下、単に载荷点ひずみ)の各時刻歴応答波形を示している。重錘落下高 $H = 0.5$ 、 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。

図-5 (i) は、A415 試験体における落下高 $H = 0.5$

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 回目の場合の $1/2$ 程度に低下しており、繰り返し載荷回数が 9 回目に至るまでに载荷点部コンクリートが大きく損傷していることが窺われる。また、図-4 (i) の N 試験体に関する実験結果と比較すると、最大値や継続時間等は同様な波形性状を示していることが分かる。これは、圧縮強度が同程度のコンクリートであることより、重錘衝撃力は衝突部コン



図－8 累積入力エネルギーと最大変位および残留変位の関係

のように繰り返し衝撃荷重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、シート破断に至ったケースに着目すると、残留変位は 40 mm 以上に達していることが分かる。

図－8 (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 FRP 補強試験体の場合には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－8 (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 δ_u に着目すると、図－8(a) において一定繰り返し荷重の場合には、第 1 回目荷重時も含め変位が計算終局時変位 δ_u と同程度となっている。一方で、漸増繰り返し荷重において最大変位が計算終局時変位 δ_u を大きく上回るような場合にシート破断に至っていることが分かる。すなわち、本研究の範囲内では、FRP 補強 RC 梁の最大変位が、計算終局時変位と同程度となる場合には、シートが剥離や破断せず、いずれも荷重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、衝撃荷重荷重を受ける既設 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た。また、無補強 RC 梁とともに、静的に曲げ圧壊型で終局に至る場合を想定し、既往の研究と同一断面試験体を用いて目付量が 415 g/m² のアラミド繊維 (AFRP) シートを下面に接着補強した RC 梁を対象に、単一荷重時に終局に至る場合の 1/6 および 1/3 の低入力エネルギーで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。実験は、荷重点部上縁コンクリートが圧壊によって終局に至るまで継続して行った。

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。すなわち、

- 1) 入力エネルギーを一定とした繰り返し衝撃荷重荷重実験から、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破断によって終局に至る FRP 補強 RC 梁においても、その 1/6~1/3 程度の入力エネルギーが繰り返し作用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) また、FRP 接着補強 RC 梁において、繰り返し衝撃荷重載荷の最大変位が静的な計算終局変位と同程度である場合には、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。

今後は、目付量を変化させた場合や、単一載荷時にシート剥離によって終局に至る場合においても検討を行い、合理的な FRP シート補強 RC 梁に関する耐衝撃設計式の確立に向け研究を推進する予定である。

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。なお、本論文の取りまとめにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の石橋和也君を始めとする学生諸君に多大なるご支援を頂いた。ここに記して、感謝する次第である。

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: 衝撃荷重載荷時における 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) 田野順也, 岸 徳光, 小室雅人, 三上 浩: 静的に曲げ圧壊で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の繰り返し衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 685-690, 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: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.
- 6) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シート緊張接着曲げ補強 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 E2, Vol. 72, No. 2, pp. 165-180, 2016.

(2019 年 9 月 20 日受付)

(2020 年 2 月 1 日受理)