

繰り返し衝撃荷重載荷時における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

Experimental study on impact resistance behavior of flexural strengthened RC beams with AFRP sheet under consecutive impact loading

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

Norimitsu Kishi, Masato Komuro, Tomoki Kawarai, Hiroshi Mikami

[†]工博, 室蘭工業大学大学院特任教授, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

^{*}博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, 暮らし環境系領域 (〒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)

^{***}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)

In order to establish a rational impact resistant upgrading method for RC members, consecutive falling-weight impact loading tests of flexural strengthened RC beams with Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) sheet were conducted. Impact load was subjected by falling a 300 kg steel weight from the predetermined height. The height was increased in order of 1, 2, 2.5, and 3 m up to reach the ultimate state of the beam. The results obtained from this study were as follows: (1) strengthening effects of the sheet under the impact loading may be more than twice that under static loading; and (2) the accumulated impact energy for strengthened RC beams with AFRP sheet can be expected more than twice that for not strengthened ones.

Key Words: AFRP sheet, RC beam, flexural strengthening, consecutive impact loading

キーワード: AFRPシート, RC梁, 曲げ補強, 繰り返し衝撃荷重載荷

1. はじめに

近年, 阪神大震災を契機に鉄筋コンクリート(RC)製橋脚に関する耐震補強やRC製床版の補修・補強には, コンクリート増し厚工法や鋼板巻き付け工法等の他, 高強度重量比で現場合わせが容易な連続繊維シート接着工法が多く採用されるようになってきた¹⁾. 一方で, 耐衝撃用途RC構造物において, 特にロックシェッド等の場合には, 地山の経年変化によって落石規模が大型化し, 衝撃力のより一層の緩和あるいはシェッド自体の耐衝撃性向上が要求される事例も発生している. また, 世界的にはRC橋脚への車両や船舶の衝突に対する耐衝撃性向上に関する課題も指摘されている.

このような状況を鑑み, 著者らは我が国で唯一既設RC構造物の耐衝撃性向上法に着目して, 静載荷時に対する補強法と同様に簡易に施工可能なFRPシート接着工法やロッド下面埋設工法を提案し, 新設や損傷を受けた既設RC梁を対象にアラミド繊維(AFRP)や炭素繊維(CFRP)製シート/ロッドを適用した場合における重錘落下衝撃実験を実施している^{2)~11)}.

なお, 図-1には, 著者等が実施しているFRPシート接着工法とロッド下面埋設工法を比較して示している.

これらの実験結果は, 載荷履歴のない矩形断面RC梁を対象に落下高さを变化させた単一載荷法に基づく重錘落下衝撃実験結果に基づいたものである. 一方で, 実構造物の場合には, 単一載荷の事象はまれであり, 通常は落石のように複数回の載荷状態が想定される. FRP材を接着あるいは埋設してRC部材に曲げ補強を施す場合には, 部分剥離を生じた箇所が繰り返し載荷によって進展することが想定されることから, RC部材の挙動は単

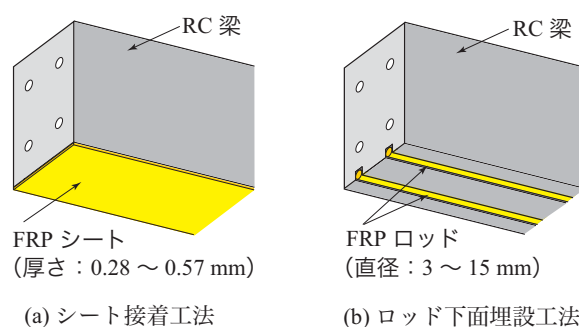


図-1 各補強工法の概念図

[†] 連絡著者 / Corresponding author

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

表－１ 試験体一覧

試験体名	実験 ケース名	設定重錘 落下高さ H (m)	実測重錘 落下高さ H' (m)	実測入力 エネルギー E_i (kJ)	累積実測入力 エネルギー E_{ai} (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	補強材 剥離の 有無
N-S	N-S	静的	-	-	-	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	6.0	
N-CI-H1	N-CI-H1-1	1.00	1.01	2.97	2.97							
	N-CI-H1-2	2.00	1.99	5.85	8.82							
N-CI-H2.5	N-CI-H2.5-2.5	2.50	2.29	6.73	6.73	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	6.0	
AS-S	AS-S	静的	-	-	-							剥離
AS-CI-H1	AS-CI-H1-1	1.00	1.01	2.97	2.97							-
	AS-CI-H1-2	2.00	1.91	5.62	8.59							-
	AS-CI-H1-2.5	2.50	2.49	7.32	15.91							剥離
AS-CI-H2	AS-CI-H2-2	2.00	1.99	5.85	5.85	33.7	371.0	401.9	99.9	298.8	2.99	-
	AS-CI-H2-2.5	2.50	2.49	7.32	13.17							剥離
AS-CI-H2.5	AS-CI-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.32	7.32							-
	AS-CI-H2.5-3	3.00	3.04	8.94	16.26							剥離
AS-CI-H3	AS-CI-H3-3	3.00	3.04	8.94	8.94							剥離

一載荷時とは大きく異なることが推察される。従って、FRP 材を用いて RC 部材の耐衝撃性を向上させるためには、単一載荷時の挙動性状把握は勿論のこと、繰り返し載荷時の性状についても把握することが肝要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 部材の耐衝撃性向上法の確立を最終目的に、AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に、入力エネルギー漸増繰り返し重錘落下衝撃実験を実施し、RC 梁の耐衝撃挙動について実験的に検討を行った。

本研究では、静荷重載荷実験と共に、300 kg 重錘を用いて落下高さを 1, 2, 2.5, 3 m に順次増加させることを基本にし、シートが全面剥離に至った時点で梁が終局に至ったものと判断し、実験を終了することとした。また、処女載荷の落下高さを順次増加させた場合についても実施している。RC 梁の耐衝撃性向上効果の基本となる無補強試験体についても実験を行っているが、試験体製作に限りがあることから、処女載荷時の落下高さが $H = 1$ m の場合と $H = 2.5$ m の場合に限定した。

なお、本研究では、過去の研究実績を踏襲して、同一断面寸法の RC 梁試験体を用い、補強材として目付 830 g / m² を有する AFRP シートに限定して実験を行うこととした。

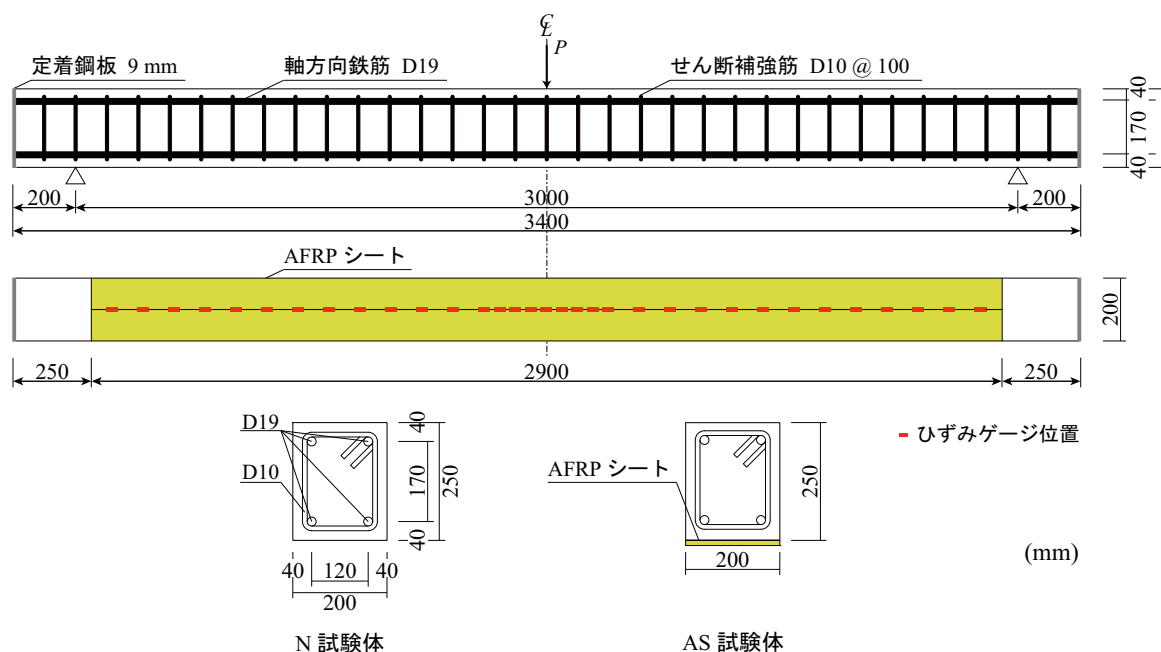
また、一般技術者にとっては、FRP 材料を用いた補強工法の水分による補強力やシート剥離への影響が気になる処である。しかしながら、施工時に以下のように十分な水分対策を行うことにより、FRP 材の補強材としての機能を失うことはない。すなわち、1) プライマーやパテ材の塗布時には、コンクリート表面が乾燥していることが大前提であり、表面含水率を 8 % 以下にすること。2) プライマーやパテ材塗布後に湿度の影響で樹脂表面に水分が付着する場合もあることより、シート接着時には樹脂表面を十分に乾燥させること。3) コンクリート床版補強等の場合のように、ひび割れの開口が懸念される場合には、接着界面に水分の浸入がないように十分な防水対策を行うこと、である。

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。試験体は、AFRP シート下面接着曲げ補強の有無や、落下高さを変化させた全 8 体である。表中の試験体のうち、第一項目は AFRP シート下面接着の有無 (N : 無補強, AS : AFRP シート下面接着補強) を示し、第二項目は載荷方法 (S : 静荷重載荷, CI : 繰り返し衝撃荷重載荷)、第三項目の H に付随する数値は処女載荷時の設定落下高さ (m) である。また、実験ケース名には、試験体名に続けて第四項目目として実際に載荷する時の設定落下高さ (m) を設けている。

表中の実測落下高さ H' は実測衝突速度から換算した自由落下高さである。表より、実測落下高さ H' は、設定落下高さ H とは必ずしも一致していないことが分かる。これは、以下の理由による。すなわち、本実験では、重錘衝突速度は、重錘部に取り付けた長さ 30 mm の白色マーカーが重錘ガイド塔に設置した光センサーを通過する時間を計測して評価している。また、重錘はガイド塔に取り付けられたリニアウェイレール上をスライドユニットを介して落下させているが、多少の摩擦を有することにより設定した通りの衝突速度が得られない。そのため、可能な限り設定衝突速度と同一の速度を得るために較正曲線を求め実験を行っている。しかしながら、落下速度は落下高さで自乗の関係にあるため落下高さに対する速度の感度が高く、落下高さが高くなると速度への影響が大きく、較正曲線から微妙に異なることとなる。

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 および主鉄筋とせん断補強筋の降伏強度 f_y, f_{sy} も併せて示している。また、計算曲げ耐力 P_{usc} は、これらの値および後述の 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¹²⁾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



図－２ 試験体の形状寸法，配筋および補強状況

表－２ AFRP シートの静力学的特性値（公称値）

種類	幅 B (mm)	目付量 (g/m^2)	弾性係数 E_s (GPa)	全引張耐力 f_{su} (kN)	破断ひずみ ϵ_{su} (%)
AFRP シート	200	830	118.0	235.7	1.75

た．計算せん断耐力 V_{usc} は同コンクリート標準示方書¹²⁾に準拠して算定している．

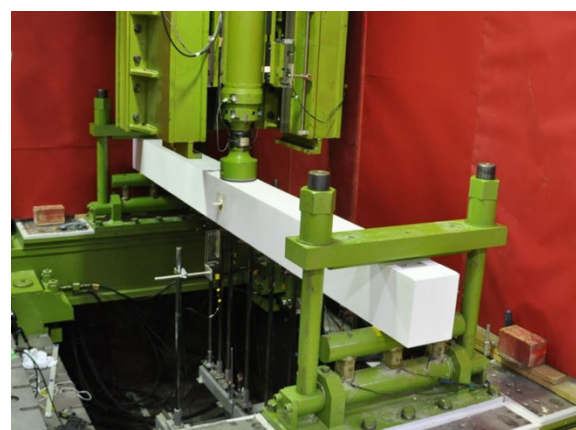
図－２には，試験体の形状寸法と配筋および AFRP シートの接着位置を示している．本実験に用いた試験体の形状寸法（梁幅 × 梁高 × 純スパン長）は，200 × 250 × 3,000 mm である．また，軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置し，梁軸方向端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している．さらに，せん断補強筋には D10 を用い，100 mm 間隔で配筋している．

AFRP シートは，以下のようにして梁に接着した．すなわち，(1) RC 梁下面の AFRP シート接着部に深さ 1 mm 程度のチップング処理を施す，(2) その後，プライマーを塗布し，指触乾燥状態であることを確認した後，(3) エポキシ系接着材を塗布してシートを接着させる，である．養生期間は 1 週間程度である．

AFRP シートは，過去の著者等の研究と同様に目付量が 830 g/m^2 のシートを 1 層接着することとした．

表－２には，本実験で用いた AFRP シートの静力学的特性値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．

衝撃荷重載荷実験は，質量 300 kg，先端直径 200 mm の鋼製重錘を落下高さを増加させて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．落下高さは，



写真－１ 衝撃荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況

1.0, 2.0, 2.5, 3.0 m に設定している．繰り返し載荷においては，処女載荷の落下高さ H を 1 段階ずつ増加させる場合についても実施した．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，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．写真－１には，衝撃荷重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．

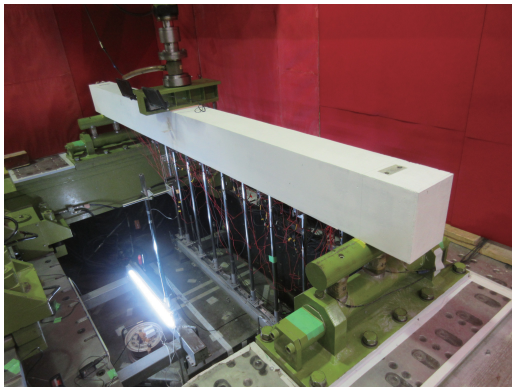


写真-2 静荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況

本実験の測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、単に支点反力)、スパン中央点変位 D (以後、単に変位) およびシート各点の軸方向ひずみ ε (以後、単にひずみ) である。なお、重錘衝撃力 P と支点反力 R 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 D 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シートの剥離状況の他、変位計のバックアップとして2,000 fps の高速度カメラを用いて撮影した。

3. 実験結果

3.1 静荷重載荷実験

写真-2 には、静荷重載荷時における載荷装置と試験体の設置状況を示している。静荷重載荷の場合には、梁幅方向に400 mm、梁長さ方向に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ている。なお、N-S試験体の場合において、主鉄筋降伏後載荷点近傍部上縁に圧壊が生じるが、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、本研究では梁が載荷点部で角折れし変位が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載荷している。

(1) 荷重-変位関係

図-3 には、無補強試験体 (N-S試験体) と AFRP シートで曲げ補強を施した試験体 (AS-S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。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曲げモーメントを求めると変位を得る、

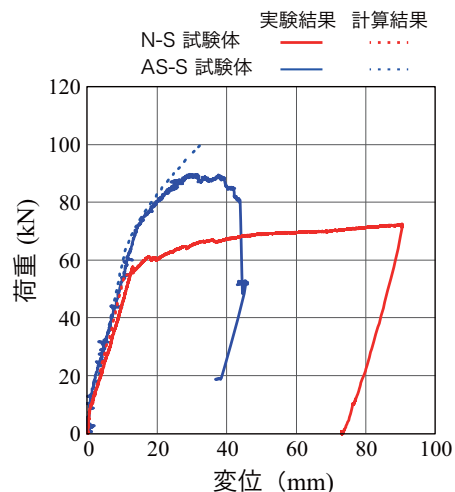


図-3 荷重-変位関係の比較

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。

図より、N-S試験体およびAS-S試験体の各荷重レベルについて比較すると、主鉄筋降伏荷重は、N, AS試験体に対して、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。なお、N-S試験体において、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、AS-S試験体が40 mm 程度の変位時点で最大荷重に達していることに着目し、N-S試験体においても変位が40 mm 時点の荷重を最大荷重として評価することとした。なお、こ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。

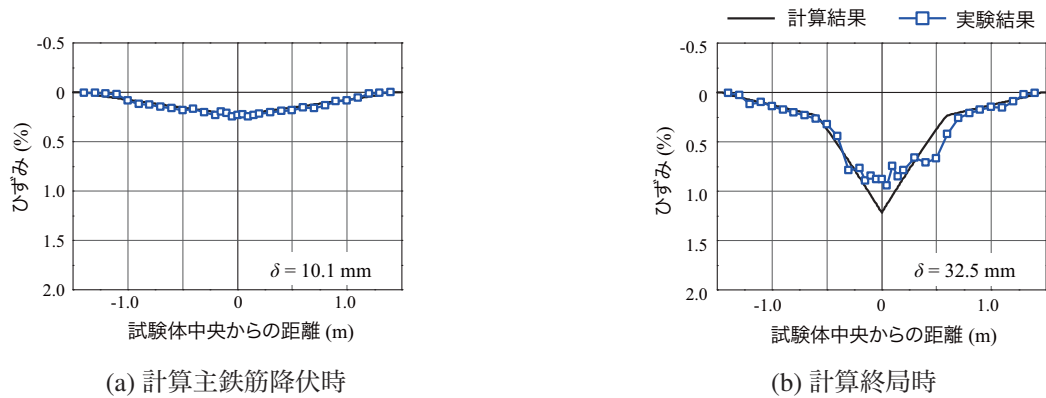
これより、RC梁にAFRPシート下面接着を施すことによって、主鉄筋降伏荷重は無補強の場合に比較して25%程度、最大荷重は33%程度増加していることが分かる。

実験結果の荷重-変位分布を見ると、補強の有無にかかわらず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いることが分かる。その後、無補強の場合には主鉄筋が降伏するため、変位が40 mm 前後まで曲線状に漸増しているが、その後はほぼ線形に増加していることが分かる。この線形的な増加は、主鉄筋の塑性硬化によるものと推察される。

一方、AFRPシート補強の場合には、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。

実験結果と計算結果を比較すると、N-S試験体における計算結果は、主鉄筋降伏直後に上縁が圧壊の傾向を示し、終局に至っていることが分かる。

一方、AS-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あたりまでは、計算結果



図－４ AS-S 試験体の AFRP シートの軸方向ひずみ分布に関する実験結果と計算結果の比較

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シート剥離に至っている。既往の研究¹²⁾より、静荷重載荷時の破壊モードを推定すると、計算主鉄筋降伏荷重 P_{ysu} が62.5kN、計算曲げ耐力 P_{usc} が99.9kN（表－1参照）であることより、計算結果の M_y/M_u は $M_y/M_u = 0.625 < 0.65$ となり、剥離破壊型として規定され、実験結果と対応していることが分かる。これより、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共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のと推察される。

(2) ひずみ分布性状

図－4には、AFRPシートを下面接着して曲げ補強したAS-S試験体に対して、計算主鉄筋降伏時および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。

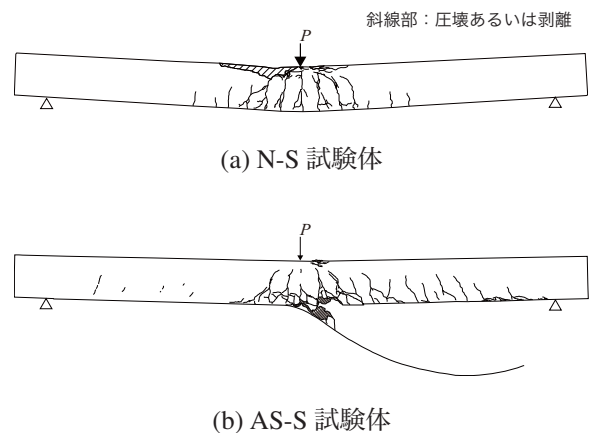
(a) 図の計算主鉄筋降伏時のひずみ分布を見ると、両者はほぼ対応しておりシートとコンクリートの完全付着仮定が成立していることが分かる。

一方、(b)図の計算終局時のひずみ分布を見ると、スパン中央載荷点近傍部の実測ひずみ分布が計算結果に対応できずに類似の値を示しており、シートは剥離傾向にあることが推察される。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、最大値が1%以上を示す中央部の三角形のひずみ分布は、主鉄筋が降伏していることを示している。

(3) ひび割れ分布性状

図－5には、静荷重載荷実験終了後における各試験体側面のひび割れ分布を示している。図より、いずれの試験体も載荷点部を中心に下縁から曲げひび割れが発生し、載荷点に向かって上方に進展していることが分かる。

N-S試験体の場合には載荷点近傍部に曲げひび割れが集中して発生しており、載荷点近傍上縁部が著しく圧壊



図－５ 静荷重載荷後におけるひび割れ分布

し、角折れ状態にあることが分かる。

一方、AFRPシート補強を施したAS-S試験体の場合には、ひび割れは無補強試験体の場合より広く分布し、かつ下縁かぶりが広く剥落していることが確認できる。剥離したシートにはかぶりコンクリートが付着しており、シートとかぶりコンクリート間の付着状態は良好であったことが窺える。

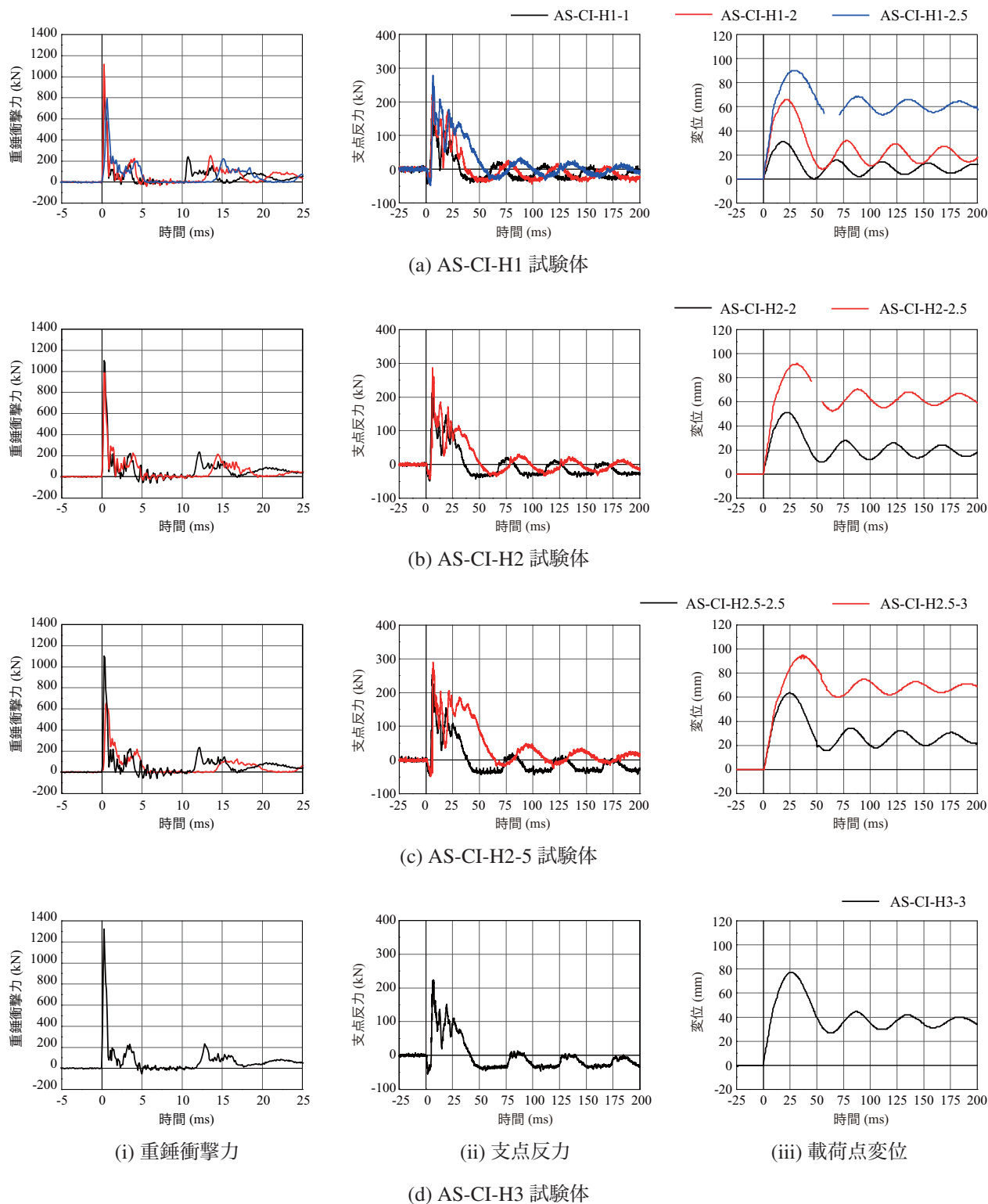
3.2 衝撃荷重載荷実験

(1) 各種時刻歴応答波形

図－6には、AFRPシート接着曲げ補強を施した全試験体に関する繰り返し載荷時の重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R 、載荷点変位波形 D を処女載荷時の落下高さ毎に比較して示している。なお、波形は各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。

各実験ケースの波形性状を見ると、重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R 、変位波形 D 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、繰り返し載荷によって著しい差のないことが分かる。

図－6 (a) は処女載荷時の設定落下高さ（以後、単に落



図－6 繰り返し载荷時における各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および载荷点変位 D に関する時刻歴応答波形の比較

下高さ)が $H=1\text{ m}$ の場合である。図より、重錘衝撃力波形 P において、最大重錘衝撃力は $H=1, 2, 2.5\text{ m}$ でそれぞれ約830, 1120, 790 kN程度であり、 $H=2\text{ m}$ 落下時の場合が最も大きく、 $H=2.5\text{ m}$ 落下時の場合が最も小さい。これは、繰り返し载荷によって载荷点部が損

傷し高周波成分が若干緩和されたことによるものと推察される。一方、支点反力波形の場合には、重錘衝撃力波形と類似した高周波成分が励起せず、最大値がそれぞれ150, 230, 280 kN程度であり、落下高さ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、

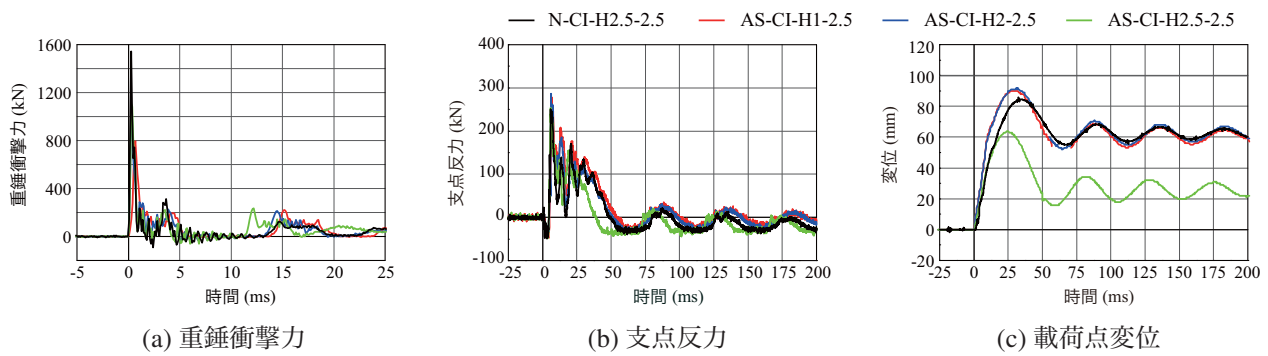


図-7 $H = 2.5$ m 落下時における時刻歴応答波形の比較

$H = 2.5$ m 落下時には2 m 落下時に比較して15 ms 程度延びており、载荷点部が大きく損傷していることが窺える。

変位波形を見ると、 $H = 2.5$ m 落下時に波形が一部抜けている。これは、かぶりコンクリートの剥落によってレーザー光線が遮ぎられたことによるものである。最大変位及び残留変位は重錘落下高さに対応して大きくなっていることが確認できる。また、荷重除荷後の減衰自由振動状態における固有振動周期も落下高さに対応して延びている。落下高さ $H = 2.5$ m の時点でAFRPシートは剥離に至っているが、波形分布を見る限りではその傾向を確認できない。最大変位値は、落下高さ毎にそれぞれ約30, 65, 90 mm 程度であり、残留変位は約9, 20, 60 mm である。これより、落下高さが $H = 2.5$ m 時には、残留変位が $H = 2$ m 時の3 倍の値を示しており、シートが剥離していることが示唆される。

図-6 (b) は処女载荷時の重錘落下高さが $H = 2$ m の場合である。この場合は、落下高さが $H = 2.5$ m で終局に至っている。また、 $H = 2.5$ m 落下時における変位波形に抜けが生じているが、これも前述の処女载荷が $H = 1$ m 落下時の場合と同様の要因であると推察される。最大重錘衝撃力は $H = 2$ m 落下の場合が $H = 2.5$ m 落下の場合よりも大きい、最大支点反力は前述の処女载荷が $H = 1$ m の場合と同様の傾向を示している。

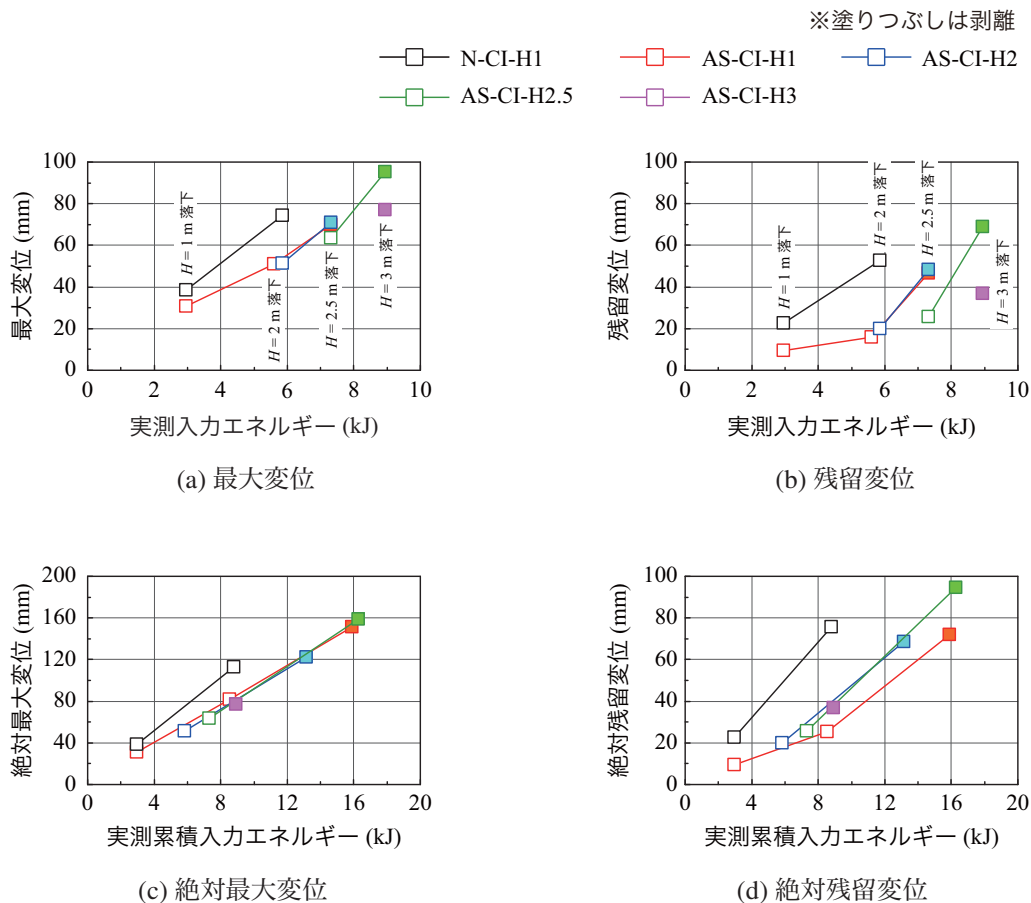
最大変位及び残留変位を調べると、最大変位はそれぞれ約50, 90 mm、残留変位は約20, 60 mm である。これらを前述の処女载荷が $H = 1$ m の場合と比較すると、残留変位は両方で類似しているが、最大変位は処女载荷が $H = 2$ m の場合が15 mm 程度小さい値を示しており、シート補強を施す場合においても繰り返し载荷によって損傷が進行していることが窺える。また、 $H = 2.5$ m の場合には、最大変位と残留変位は処女载荷が $H = 1$ m の場合と等しい値を示しており、いずれの場合も最大変位到達前後にシート剥離に至っていることが推察される。

図-6 (c) は処女载荷時の重錘落下高さが $H = 2.5$ m の場合である。この場合は、 $H = 2.5$ m 落下時にはシート剥離に至らず、 $H = 3$ m でシート剥離により終局に至っている。重錘衝撃力波形を見ると、 $H = 3$ m 落下時にお

ける最大衝撃力値は $H = 2.5$ m の場合の1/2 程度に低下しており、処女载荷で大きな損傷を受けていることが窺われる。支点反力波形に関しては、前述同様に最大重錘衝撃力波形とは逆の傾向を示している。一方で、主波動継続時間は、 $H = 2.5$ m の場合に比して25 ms 程度延びており、処女载荷が $H = 1$ m の場合の $H = 2.5$ m 落下時よりも長い。変位波形を見ると、最大変位は $H = 2.5$ m、3 m 落下時でそれぞれ約65, 95 mm、残留変位は26, 69 mm であり、 $H = 2.5$ m 落下時の場合には未だシート剥離段階に達していないことより、最大変位と残留変位は上述の载荷履歴がある場合に比して格段に減少していることが分かる。但し、 $H = 3$ m 落下の場合にはシート剥離に至っており、入力エネルギーも大きいことから、最大変位および残留変位共に処女载荷時の落下高さ $H = 1, 2$ m の $H = 2.5$ m 落下時よりも大きい値を示している。

図-6 (d) は処女载荷時の重錘落下高さが $H = 3$ m の場合である。処女载荷時の段階で载荷点近傍部を除いた広い領域でシートがほぼ剥離していることが確認されたことより、この時点で実験は終了した。重錘衝撃力波形において、最大重錘衝撃力は約1300 kN に達している。一方で、最大支点反力は約220 kN 程度で比較的小さく、処女载荷時の落下高さが $H = 2.5$ m 時における $H = 2.5$ m 落下時と同程度であることより、シート剥離の影響が窺われる。最大変位及び残留変位は、約77, 36 mm 程度であり、処女载荷時の重錘落下高さが $H = 2.5$ m における $H = 2.5$ m 落下時より若干大きい程度の値を示している。

以上より、本実験の範囲内では、以下の事項が明らかになった。すなわち、(1) 繰り返し载荷の状態では重錘落下高さが $H = 2.5$ m の時点でシート剥離によって終局に至る。(2) 但し、単一载荷の状態では、未だ終局に至らず、 $H = 3$ m で終局に至る。(3) また、処女载荷時の落下高さが $H = 3$ m の場合には、処女载荷時に終局に至る。(4) これより、累積入力エネルギーの観点からは、処女载荷時の落下高さが $H = 3$ m の場合における実測入力エネルギー(8.94 kJ)が処女载荷時の落下高さが $H = 1$ m で $H = 2$ m 落下時の実測累積入力エネルギー



図－8 入力エネルギーと各種最大および残留変位の関係

(8.59 kJ) より大きいことから、本補強試験体は累積入力エネルギーが8.94 kJ 以上で終局に至ることが推察される。

なお、累積入力エネルギーは繰り返し载荷時における全入力エネルギーを意味している。但し、音波等によるエネルギー逸散は無視することとし、重錘の跳ね返りによる効果についても運動量保存の観点から考慮しないこととした。

図－7には、各繰り返し载荷時における重錘落下高さ $H = 2.5$ m の場合と無補強試験体における $H = 2.5$ m 落下時の各応答波形を比較して示している。図より、処女载荷時の場合である AS-CI-H2.5-2.5 試験体の場合には、他の繰り返し载荷試験体に比して支点反力の主波動継続時間が短く、かつ最大変位及び残留変位が小さいことが分かる。一方で、その他の繰り返し载荷試験体の応答波形は、重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R 、変位波形 D 共に類似しており、かつ無補強試験体の結果と大略類似の結果を示していることが分かる。

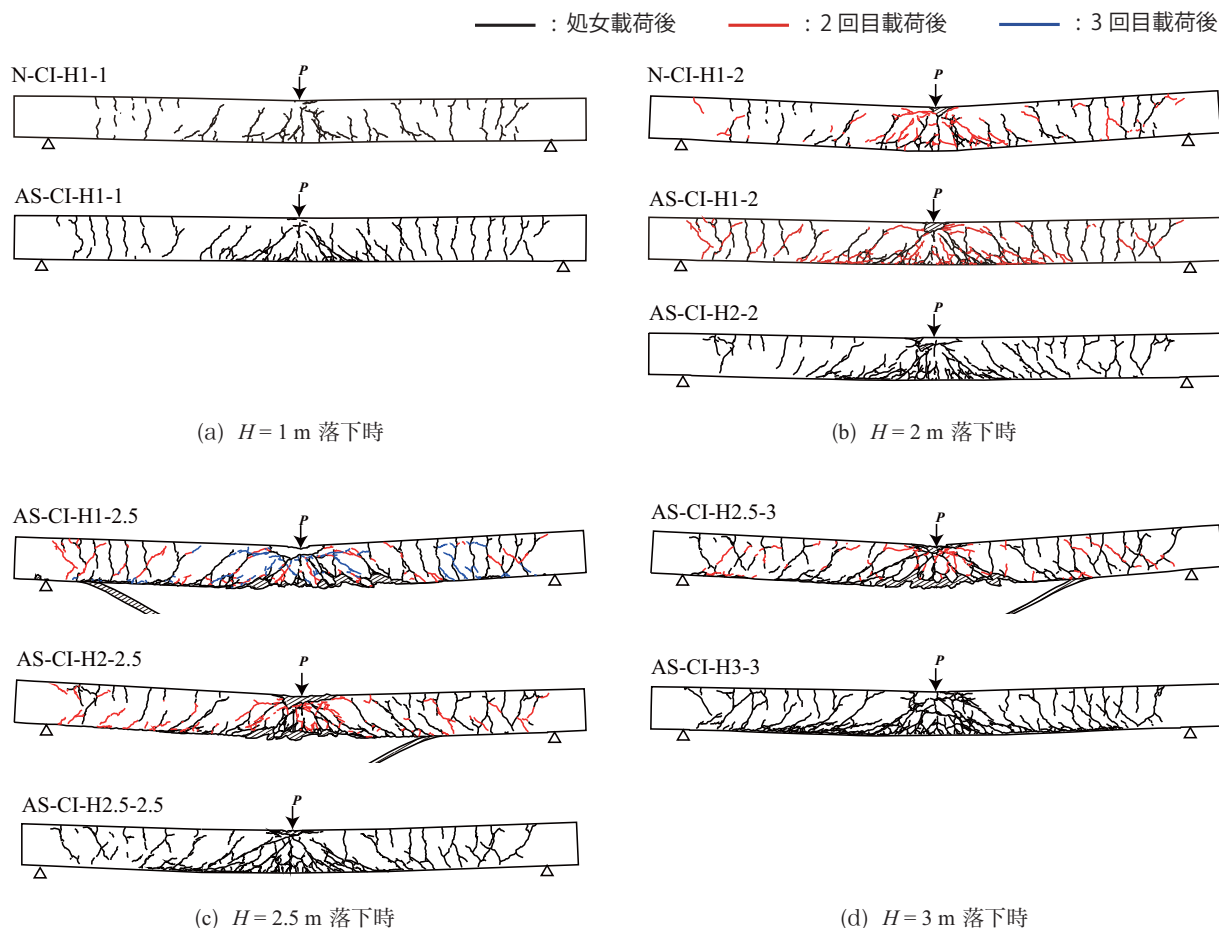
これは、類似の波形を示している試験体が、いずれも最大変位到達前にシートが剥離に至っていることに起因しているものと推察される。これより、AFRP シートはシート剥離に至るまでは繰り返し载荷においても RC 梁の耐衝撃性向上に十分寄与していることが分かる。

(2) 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図－8 は、全試験体について最大変位および残留変位や繰り返し载荷による残留変位を考慮した絶対的な値について、実験毎の実測入力エネルギーあるいは実測累積入力エネルギーを横軸に取って比較して示している。

(a) 図より、各実験毎の最大変位の分布性状を見ると、処女载荷時の落下高さが $H = 1$ m (AS-CI-H1 試験体) の場合には、無補強試験体 (N-CI-H1 試験体) の場合と同様に入力エネルギーに対してほぼ線形に類似の増加勾配で増加していることが分かる。また、処女载荷時の落下高さが $H = 2$ m (AS-CI-H2 試験体) の場合には、前述の処女载荷時の落下高さが $H = 1$ m の場合 (AS-CI-H1 試験体) とほぼ等しい入力エネルギーで終局に至っており、最大変位の増加勾配は若干大きい程度である。一方で、処女载荷時の落下高さが $H = 2.5$ m (AS-CI-H2.5 試験体) の場合には、最大変位は処女载荷時の落下高さが $H = 1$ m や 2 m の場合 (AS-CI-H1/H2 試験体) の $H = 2.5$ m 落下時よりも若干小さい値を示しているが、 $H = 3$ m 落下時までの増加勾配は処女载荷時の落下高さが $H = 2$ m (AS-CI-H2 試験体) より若干大きい程度である。従って、終局時における最大変位は、処女载荷時の落下高さが $H = 1$ m の場合より大きい。

(b) 図より、残留変位の分布性状を見ると、落下高さ



図－9 衝撃荷重載荷実験終了後のひび割れ分布の比較

が $H = 2 \text{ m}$ 以上の場合において、各試験体の増加勾配は同程度の性状を示していることが分かる。特に、処女載荷時の落下高さが $H = 1 \text{ m}$ の場合と $H = 2 \text{ m}$ の場合における、 $H = 2 \text{ m}$ 落下以降での残留変位が類似している。その値は無補強試験体の場合と同程度の値を示しており、前述のようにいずれの試験体もシート剥離によって終局に至っていることを示唆している。また、処女載荷時の落下高さが $H = 2.5 \text{ m}$ の場合における落下高さ $H = 3 \text{ m}$ の場合には、無補強試験体よりも大きな残留変位を示しており、試験体はシート剥離によって終局に至っていることが明白に示されている。なお、処女載荷時の落下高さが $H = 1 \text{ m}$ で $H = 2 \text{ m}$ 落下までは、残留変位の増加勾配が著しく小さく、シート剥離等の損傷の程度が軽微であることが類推される。

(c) 図より、絶対最大変位は、処女載荷時における落下高さが $H = 1 \text{ m}$ で $H = 1 \text{ m}$ 落下の場合も含め、いずれの試験体においても同様の増加勾配を有していることが分かる。無補強試験体の場合も類似の増加勾配を有しているが、シート補強を施している場合よりも大きい傾向を示していることが分かる。また、静荷重載荷時の場合と比較すると、静荷重載荷時には変位が 40 mm 前後でシート剥離に至っている。しかしながら、衝撃荷重載荷時には処女載荷時の落下高さが $H = 1 \text{ m}$ の場合

で 80 mm 以上の変位でもシートが剥離せずに終局に至っていないことが分かる。これは、AFRPシートの曲げ補強効果は、静載荷時よりも衝撃荷重載荷時の場合が2倍以上大きいことを意味している。

(d) 図の絶対累積残留変位を見ると、処女載荷時の落下高さが $H = 1 \text{ m}$ で $H = 1 \text{ m}$ から $H = 2 \text{ m}$ 落下の場合を除き、3試験体の増加勾配は類似している。いま、無補強試験体の絶対残留変位が累積入力エネルギーに対して線形に増加するものと仮定して、曲げ補強試験体の絶対残留変位と比較すると、曲げ補強試験体の場合には累積入力エネルギーが $E = 6 \text{ kJ}$ 以上の場合で 30 mm 以上低減しており、シート剥離の状態下においても補強効果の著しいことが分かる。また、累積残留変位の制限を静載荷時の終局である 40 mm 程度に設定すると、最大累積入力エネルギーは無補強試験体の場合で $E = 5 \text{ kJ}$ 程度であるのに対して、AFRPシート補強の場合でいずれの試験体においても $E = 9 \text{ kJ}$ 以上となっており、1.8倍以上の向上効果を期待できることが分かる。

(3) 実験終了後におけるひび割れ分布

図－9には、図－6に示された各試験体の各載荷実験終了後における梁側面のひび割れ分布を、各落下高さ毎に比較して示している。繰り返し載荷におけるひび割れの進展が分かるように、処女載荷時から順に黒、赤、青

線で示している。

まず、図-5の静荷重載荷時におけるひび割れ分布と比較すると、静載荷時には前述のように載荷点近傍を中心に曲げひび割れが下縁部から上端に向かって発生し、やがて載荷点方向に進展している。一方、重錘落下衝撃荷重載荷の場合には、AFRPシート接着補強の有無にかかわらず、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、かつ載荷点近傍下縁部には斜めひび割れが発生しており、静荷重載荷時と大きく異なっていることが分かる。その程度は、落下高さが増す毎に密になることは勿論である。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播によって発生したものと推察される。また、載荷点近傍部の著しい斜めひび割れは静荷重載荷時には発生せず、衝撃荷重載荷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。これは、衝撃載荷時に載荷点近傍部を中心に主鉄筋が大きく塑性化することによるものと推察される。

図-9 (a) 図の落下高さ $H = 1\text{ m}$ の場合について、無補強試験体と補強試験体間で比較すると、補強試験体の場合が曲げ及びせん断ひび割れが無補強試験体の場合より多いことが分かる。これは、AFRPシート接着によって梁の曲げ剛性が増加したことによるものと推察される。

(b) 図の落下高さ $H = 2\text{ m}$ の場合について比較すると、まず無補強試験体の場合には載荷点部を中心にひび割れが密に発生し、梁は角折れの傾向を示している。一方、AFRPシート曲げ補強試験体の場合には、処女載荷時の落下高さに関わらず未だ角折れの状態には至っていない。また、AS試験体で処女載荷時の落下高さが異なる場合について両者を比較すると、処女載荷時の落下高さが $H = 1\text{ m}$ の場合 (AS-CI-H1-2) にはほぼ左右対称なひび割れ分布を呈しているが、 $H = 2\text{ m}$ の場合 (AS-CI-H2-2) には右辺部に多くの曲げひび割れが発生している。これは、試験体据え付け等による実験誤差であるものと推察される。しかしながら、中央部載荷点近傍部のひび割れによる損傷の程度は同程度に見受けられ、斜めひび割れが開口しピーリング現象が発生する傾向を示している。

(c) 図の落下高さ $H = 2.5\text{ m}$ の場合について比較すると、処女載荷時の落下高さが $H = 1\text{ m}$ と 2 m の場合で斜めひび割れのピーリング作用によってシートが剥離に至り、梁は若干角折れの傾向を示していることが分かる。処女載荷時の落下高さが $H = 1\text{ m}$ の場合には左辺部、 $H = 2\text{ m}$ の場合には右辺部の斜めひび割れ先端部がシートを押し出すピーリング作用によって剥離したことを確認している。一方、処女載荷時の落下高さが $H = 2.5\text{ m}$ の場合 (AS-CI-H2.5-2.5) には、載荷履歴がないことより載荷点部の圧壊損傷の程度も少なく、未だシート剥離には至っていないことが分かる。

(d) 図の落下高さが $H = 3\text{ m}$ の場合について比較すると、処女載荷時の落下高さが $H = 2.5\text{ m}$ の場合 (AS-CI-H2.5-3) には、右辺部斜めひび割れのピーリング作用によってシート剥離に至っている。著しい圧壊も生じており、梁は角折れの傾向を示している。一方、処女載荷時における落下高さが $H = 3\text{ m}$ の場合 (AS-CI-H3-3) には、載荷点を中心に両側の斜めひび割れ先端部がシートを押し下げるピーリング作用によって、シートは載荷点近傍を除いて剥離状態に至っており、この段階で終局と判断した。従って、単一載荷状態では $H = 3\text{ m}$ 落下が入力エネルギー的に限界であることが分かる。

4. まとめ

本研究では、衝撃荷重載荷を受ける既設コンクリート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、より実現象に近い形での耐衝撃性向上効果について検討を行うために、曲げ破壊で終局に至る矩形 RC 梁を対象に、入力エネルギーを漸増させる繰返し衝撃荷重載荷実験を実施して、その耐衝撃挙動について検討を行った。

本研究では、無補強試験体と共に、補強材料として目付が 830 g/m^2 のアラミド繊維 (AFRP) シートをを用い、RC 梁の下面に接着補強を施して静荷重載荷実験と共に質量 300 kg の重錘を用いた繰返し載荷による重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本実験では、落下高さを $1, 2, 2.5, 3\text{ m}$ に設定し、シート剥離によって終局に至るまで順次落下高さを増加させて実験を行った。また、処女載荷時の落下高さも順次増加させた実験も行っている。

本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のよう示される。すなわち、

- 1) 静荷重載荷実験から、無補強試験体の場合には載荷点近傍部に損傷が集中し、梁は角折れの状態に至る。これに対して、AFRPシート接着曲げ補強を施す場合にはひび割れが梁全体に発生し、角折れは発生しない。また、梁は斜めひび割れ先端部がシートを押し下げるピーリング作用によってシートが剥離し、終局に至る。
- 2) シートとコンクリートの完全付着を仮定して求めた計算結果と比較すると、本研究で採用した補強量の場合には、主鉄筋降伏後計算終局耐力を確保できずに終局に至る剥離破壊型である。既往の研究で示された破壊モード推定式は、本実験結果と対応している。
- 3) 落下高さ漸増繰返し衝撃荷重載荷実験から、重錘衝撃力、支点反力、載荷点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、繰返し載荷によって著しい差がない。
- 4) 繰返し載荷回数に関係なく、RC 梁は斜めひび割

れ先端部のピーリング作用によって全てシートが剥離し、終局に至っている。

- 5) 残留変位を考慮した絶対最大変位は、処女載荷時の重錘落下高さにかかわらず、累積入力エネルギーに対して同様の増加勾配を有している。
- 6) 処女載荷時の落下高さが $H=1\text{ m}$ の場合において、繰り返し載荷時における最大変位は、シート剥離が発生しない状況下で静載荷時の終局変位の2倍以上の値を示している。これより、AFRPシートの曲げ補強効果は、衝撃荷重載荷時の場合が静荷重載荷時に比して2倍以上有していることが明らかになった。
- 7) 累積残留変位は、落下高さが $H=1\text{ m}$ の場合のような入力エネルギーが小さい場合を除き、累積入力エネルギーに対して処女載荷時の落下高さやシート剥離にかかわらず、類似の増加勾配を有している。
- 8) 累積残留変位の限界値を大略静荷重載荷時の終局変位に設定する場合には、無補強試験体に比較して1.8倍以上の累積入力エネルギーが期待できる。
- 9) 以上、AFRPシートは剥離に至るまで耐衝撃補強効果を発揮することが明らかになった。これより、FRPシート接着曲げ補強によるRC梁の耐衝撃性向上効果法を確立するためには、繰り返し載荷時におけるシート剥離の予測法や、シート剥離制御法を確立することが肝要であるものと判断される。

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)、接着剤等は住友ゴム工業(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田口将大君、澤田恵佑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) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101号，2000.7
- 2) 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
- 3) 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，No. 2，pp. 523-528，2014.7

- 4) 三上 浩，栗橋祐介，今野久志，岸 徳光：衝撃載荷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
- 5) 佐藤元彦，栗橋祐介，三上 浩，岸 徳光：AFRPおよびPFRPシートで曲げ補強したRC梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 2，pp. 1153-1158，2015.7
- 6) 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
- 7) 岸 徳光，栗橋祐介，三上 浩，佐藤元彦：AFRPロッド下面埋設曲げ補強RC梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 2，pp. 1375-1380，2016.7
- 8) 岸 徳光，小室雅人，栗橋祐介，三上 浩，船木隆史：AFRPロッド下面埋設曲げ補強RC梁の耐衝撃性向上効果に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol. 63A，pp. 1188-1200，2017.3
- 9) 船木隆史，岸 徳光，栗橋祐介，三上 浩：CFRPシート接着工法を用いて曲げ補強したRC梁の衝撃載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 2，pp. 577-582，2017.7
- 10) 岸 徳光，小室雅人，栗橋祐介，三上 浩，船木隆史：2種類のRC梁下面埋設FRPロッドの耐衝撃性向上効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 64A，pp. 875-888，2018.3
- 11) 岸 徳光，栗橋祐介，三上 浩，船木隆史：CFRPシート／ロッドを用いて曲げ補強したRC梁の静的および衝撃荷重載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 2，pp. 709-714，2018.7
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012年制定
- 13) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐力性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 683/V-52，pp. 47-64，2001.8

(2018年9月21日受付)

(2019年2月1日受理)