

# 論文 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

岸 徳光<sup>\*1</sup>・栗橋 祐介<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・船木 隆史<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では, CFRP 材を用いた補強工法が RC 梁の耐衝撃性向上効果に及ぼす影響を検討することを目的に, 無補強や CFRP シート接着工法およびロッド下面埋設工法によって曲げ補強した RC 梁の静荷重および衝撃荷重載荷実験を実施した。その結果, 1) 静載荷実験の場合には, 補強工法によらずほぼ同程度の曲げ補強効果を発揮し, いずれの試験体も補強材の剥離によって終局に至る, 2) シート接着工法による耐衝撃性向上効果はロッド下面埋設工法に比較して優れている, 3) ロッド下面埋設補強の場合には, シート接着補強の場合よりも斜めひび割れが狭い範囲に発生し, ロッドが破断する傾向を示す, 等が明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, CFRP シート, CFRP ロッド, 曲げ補強, 耐衝撃性

## 1. はじめに

FRP 補強材は, 軽量で高強度かつ耐食性に優れており, 鋼板巻付け工法のように重機を必要とせず, 現場合わせも容易であること等の利点があることより, 近年, 広く採用されるようになって来た。特に, 連続繊維 (FRP) シート接着工法は, RC 構造物の耐震補強工法のみならず道路橋の床版補強工法としても広く適用されている。

また, ロックシェッドのような落石防護構造物においては, 地山の経年劣化や異常気象等によって落石エネルギーの増大化が指摘され, 緩衝材の性能向上あるいは部材の耐衝撃性向上が要求される事案も多く発生している。このような状況下, 著者らはこれまでアラミド繊維補強 (AFRP) 材を用いたシート接着工法やロッド下面埋設工法の耐衝撃性向上効果について実験的に検討を行っている<sup>1)</sup>。その結果, これらの工法の耐衝撃性向上効果を確

認しているが, 特にロッド下面埋設工法の場合は, シート接着工法に比較してその効果が大きいことが明らかになっている。

一方, 土木構造物の補修補強工法に広く適用される FRP 材料には, AFRP 材の他にカーボン繊維補強 (CFRP) 材がある。著者らは, 先に CFRP ロッド下面埋設工法を適用して曲げ補強した RC 梁の耐衝撃性向上効果を実験的に検討している。その結果, 補強材の軸剛性を同程度に設定した場合には, CFRP ロッドは AFRP ロッドよりも早期に終局に至ることが明らかになっている<sup>2)</sup>。しかしながら, CFRP 材を用いたシート接着補強工法やロッド下面埋設補強工法が, RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響についての詳細な比較検討は, これまで行われていない。

このような背景より, 本研究では CFRP 材を用いた補強工法が RC 梁の耐衝撃性向上効果に及ぼす影響を検討

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材の種類	設定重錘落下高さ $H$ (m)	実測重錘落下高さ $H'$ (m)	補強材の軸剛性 $E_r A$ (MN)	コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	主鉄筋降伏強度 $f_y$ (MPa)	計算曲げ耐力 $P_u$ (kN)	計算せん断耐力 $V_u$ (kN)	補強材剥離/破断の有無
N-S	-	静的	-	-	32.4	381.7	55.0	329.0	-
N-I-H2.5	-	2.50	2.29	-	-	-	-	-	-
SC-S	CFRP シート	静的	-	16.3	32.4	381.7	106.0	329.0	剥離
SC-I-H1.0		1.00	1.12						-
SC-I-H2.0		2.00	1.77						-
SC-I-H2.5		2.50	2.29						-
SC-I-H3.0		3.00	3.07						剥離
CR-S		CFRP ロッド	静的						-
CR-I-H1.0	1.00		0.99	-					
CR-I-H2.0	2.00		2.01	-					
CR-I-H2.5	2.50		2.40	破断					
CR-I-H3.0	3.00		3.07	破断					

\*1 (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (正会員)

\*3 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)

\*4 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)

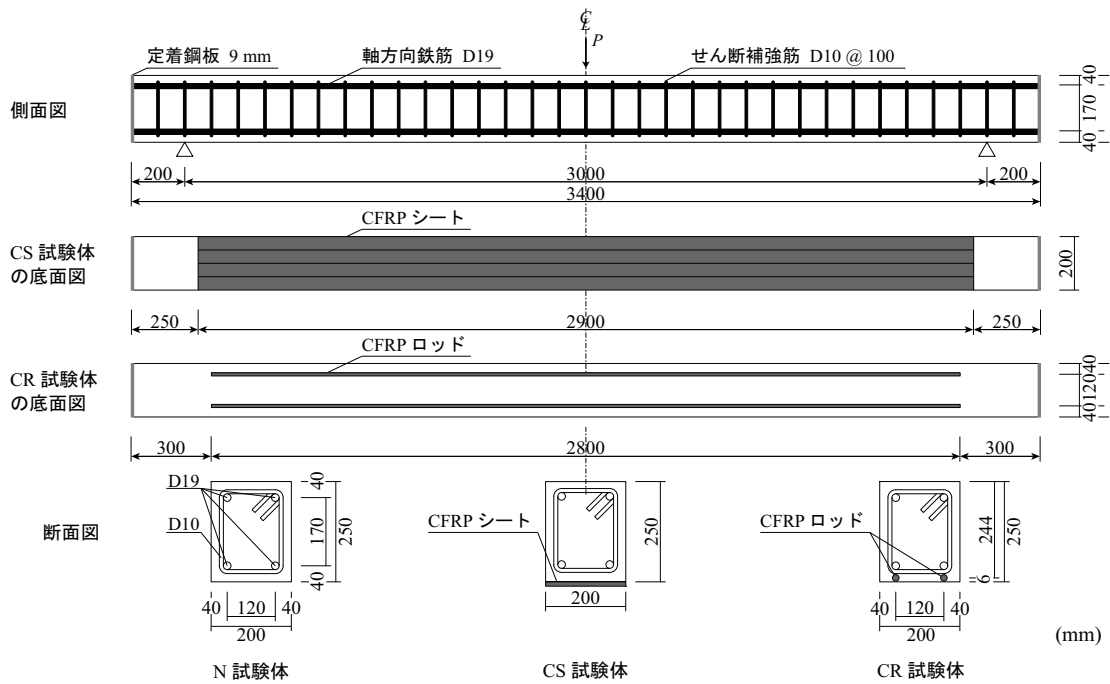


図-1 試験体および補強概要

表-2 CFRP材の力学的特性値(公称値)

補強材の種類	幅 $B$ (mm)	目付量 ( $g/m^2$ )	厚さ (mm)	直径 $D$ (mm)	本数 (本)	弾性係数 $E$ (GPa)	引張耐力 $f_{ru}$ (kN)	破断ひずみ $\epsilon_{ru}$ (%)
CFRPシート	200	600	0.333	-	-	245.0	226.4	1.39
CFRPロッド	-	-	-	8.5	2	141.1	228.2	1.50

することを目的に、CFRPシート接着補強工法とロッド下面埋設補強工法を取り上げ、曲げ補強したRC梁を対象に静荷重載荷と重錘落下衝撃荷重載荷実験を行った。

## 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、補強の有無や、重錘落下高さを変化させた全12体である。表中の試験体名の第一項目は曲げ補強の有無(N:無補強, CS:CFRPシート接着補強, CR:CFRPロッド下面埋設補強)を示し、第二項目は荷重方法(S:静荷重載荷, I:衝撃荷重載荷)、第三項目のHに付随する数値は設定重錘落下高さ(m)を示している。なお、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。

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、 $200 \times 250 \times 3,000$  mmであり、せん断余裕度も大きく補強後も曲げ破壊型の試験体である。なお、CFRPロッドの埋設工程は、以下のとおりである。すなわち、1)梁を反転させ、梁下面のロッド埋設位置に所定の深さで溝を切り込み、2)溝切部を清掃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

した後、3)エポキシ系パテ接着樹脂を溝切部に充填して埋設・接着する、である。養生期間は、1週間程度である。また、表-2には、本実験で用いたCFRP材の力学的特性値の一覧を示している。

CFRPシートとロッドの補強量は、目付量 $830 g/m^2$ のAFRPシートを1層接着した場合の引張軸剛性や引張耐力を基本にし、それらが同程度になるように設定した。すなわち、CFRPシートの場合には目付量 $600 g/m^2$ のシートを1層接着することとし、CFRPロッドの場合には直径8.5 mmのロッドを2本を埋設補強することとした。

静荷重実験は、梁幅方向に400 mm、梁長さ方向に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行った。また、衝撃荷重載荷実験は、質量300 kg、先端直径200 mmの鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一荷重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、1)重錘衝撃力、2)合支点反力(以後、単に支点反力)、3)スパン中央点変位(以後、単に変位)、および4)CFRP材各点の軸方向ひずみ(以後、単にひずみ)である。

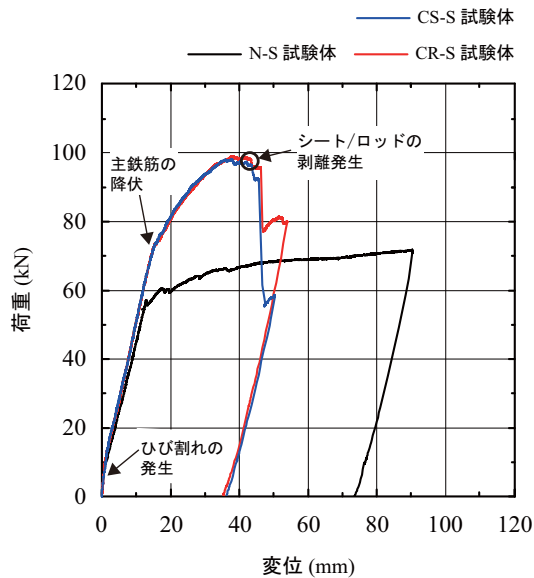


図-2 荷重-変位関係

### 3. 実験結果

#### 3.1 静載荷実験

##### (1) 荷重-変位関係

図-2には、補強試験体と無補強試験体に関する実験結果の荷重-変位関係を示している。図より、補強試験体に着目すると、載荷荷重はひび割れ発生後から主鉄筋降伏点近傍まで線形に増加していることが分かる。その後、主鉄筋降伏前の勾配よりも小さい勾配で単調に増加し、最大荷重到達後にCFRPシート/ロッド共にかぶりコンクリートを伴った剥離によって終局に至っている。

無補強試験体と比較すると、CFRP材で曲げ補強を施すことにより、主鉄筋降伏荷重は30%程度、最大荷重は47~49%程度増加していることが分かる。また、CFRP材は補強工法によらず剥離によって終局に至ることが明らかになった。

##### (2) 静載荷実験後のひび割れ分布性状

図-3には、静載荷重実験終了後における試験体側面のひび割れ分布を示している。図より、無補強試験体の場合には、載荷点近傍部に曲げひび割れが集中して発生しており、上縁部が著しく圧壊し角折れ状態にあることが分かる。一方、補強試験体の場合には、曲げひび割れの発生範囲が無補強試験体に比べて梁全体に広く分布しており、補強材は斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって剥離に至っていることを実験時に確認している。

#### 3.2 衝撃荷重実験

##### (1) 各種時刻歴応答波形

図-4には、衝撃荷重実験時に設定重錘落下高さ  $H = 2.5$  mの場合における各試験体の重錘衝撃力波形、支点反力波形、変位波形を比較して示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力波形は、補強の有無や補強工法によらず、振幅が大きく継続時間が1ms程度の第1

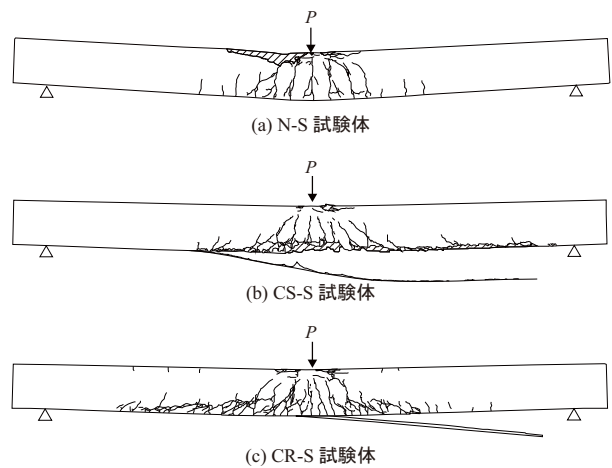


図-3 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

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。全体の波形分布を比較すると、12.5ms時点までは類似の波形性状を示しており、曲げ剛性の影響が小さいことが分かる。これは、いずれの梁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。

図-4(b)より、支点反力波形は、継続時間が30~50ms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。補強試験体に着目すると、両者類似した波形性状を示している。また、無補強試験体よりも主波動継続時間が10ms程度短いことから、補強によって曲げ剛性が増加した効果が現れていることが分かる。なお、CR試験体の場合にはロッド破断に至っているが、主波動終了時点では支点反力波形に対する影響が小さいことが窺われる。

図-4(c)より、変位波形は、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。補強試験体に着目すると、最大変位および残留変位ともに無補強試験体の場合よりも小さく補強効果が発揮されていることが分かる。また、CSおよびCR試験体の結果を比較すると、最大変位が同程度であるものの残留変位はCR試験体の場合が大きい。このことから、CFRPロッドの破断は最大変位到達以降に発生したものと推察される。

以上のことから、CFRP材を用いてRC梁に曲げ補強を施すことによって、RC梁の耐衝撃性は向上可能であることが明らかになった。ただし、設定落下高さ  $H = 2.5$  mにおいてCFRPロッドが破断するのに対しCFRPシートは破断していないことから、CFRPロッドの耐衝撃性向上効果はCFRPシートを用いる場合に比して低いことが明らかになった。これは、静載荷実験の場合には共に剥離によって終局に至ることが明らかになっていることよ

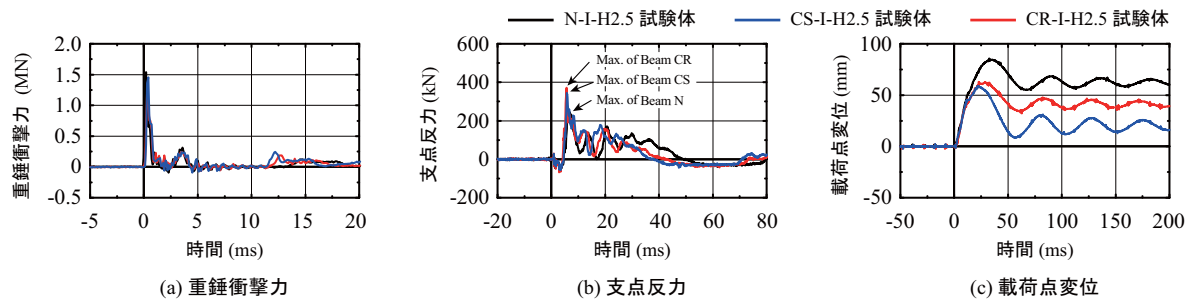


図-4 N/CS/CR-I-H2.5 試験体の重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

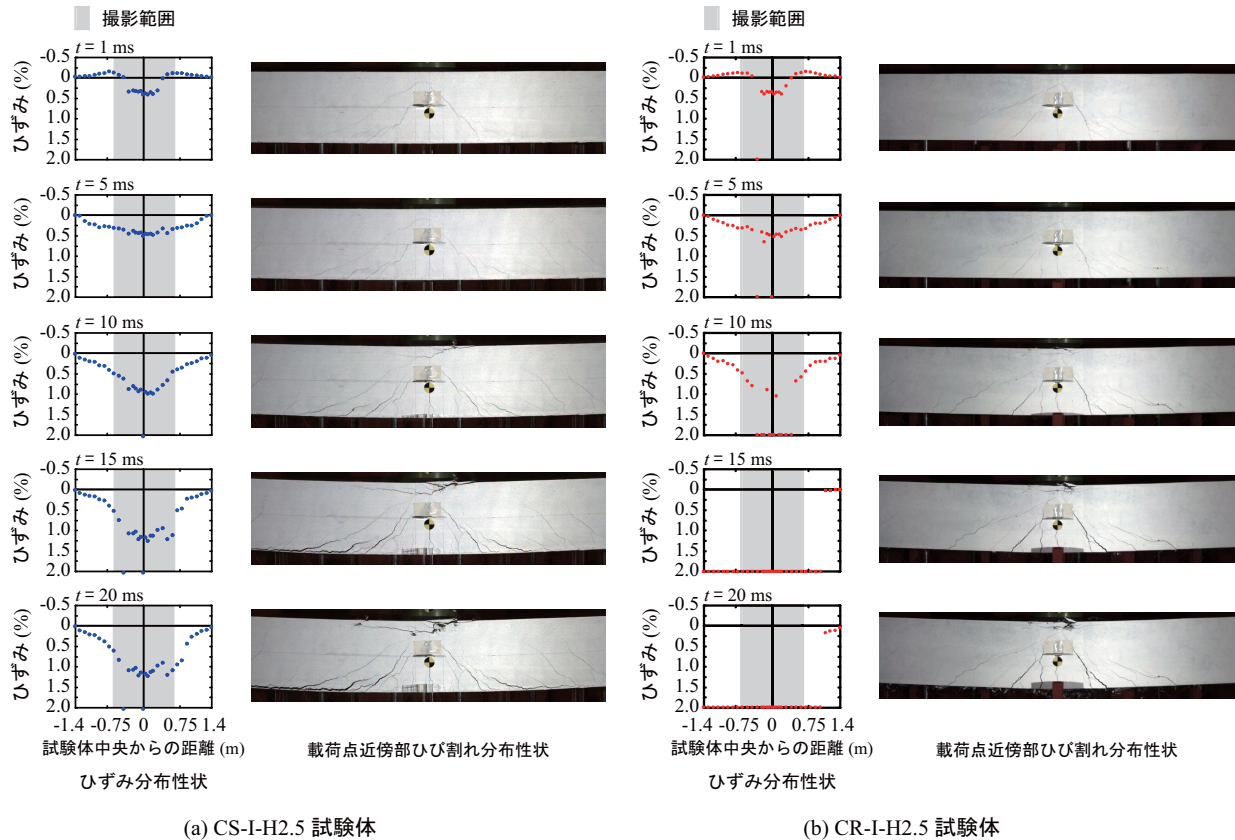


図-5 CS/CR-I-H2.5 試験体の CFRP 材のひずみ分布と梁側面におけるひび割れ分布の時間的な推移状況

り，衝撃荷重載荷時には CFRP 材をロッド状に成形したことによって軸力成分と共に局部的な曲げ成分も励起され，材料自体の脆性特性が顕在化したものと推察される。

## (2) CFRP 材のひずみおよび梁側面ひび割れ分布の

### 時間的な推移状況

図-5 には，設定落下高さ  $H = 2.5$  m の場合の補強試験体に関する CFRP 材のひずみ分布と梁中央部側面に発生するひび割れ分布の時間的な推移状況を比較して示している。

$t = 1.0$  ms において，両試験体ともに載荷点部を中心に上縁に達しない連続した斜めひび割れが発生しており，内側のひび割れはキャップ状に分布している。補強材のひずみはいずれの場合も載荷点中央部で 0.5 % 程度の引張ひずみが発生しており，その両支点側では圧縮ひずみ

が発生していることが分かる。

$t = 5.0$  ms において，ひずみ分布は両梁共にスパン全体に渡って正曲げの状態を示しており，低次の曲げモードを呈していることが窺える。最大ひずみが 0.5 % を越えていることより，主鉄筋も降伏しているものと推察される。

$t = 10$  ms において，両試験体とも載荷点近傍上縁部の圧壊が進行し，斜めひび割れが開口の傾向を示している。また，CR 試験体の斜めひび割れの発生範囲は，CS 試験体の場合よりも狭く，より局所的であることが分かる。ひずみ分布を見ると，CR 試験体の場合には，載荷点近傍部で 2.0 % の値を示している箇所が見受けられる。これは，上述のように斜めひび割れの発生に伴いロッドの局所的な変形等によってひずみゲージが損傷したことによるものと推察される。一方，CS 試験体の場合には，載荷

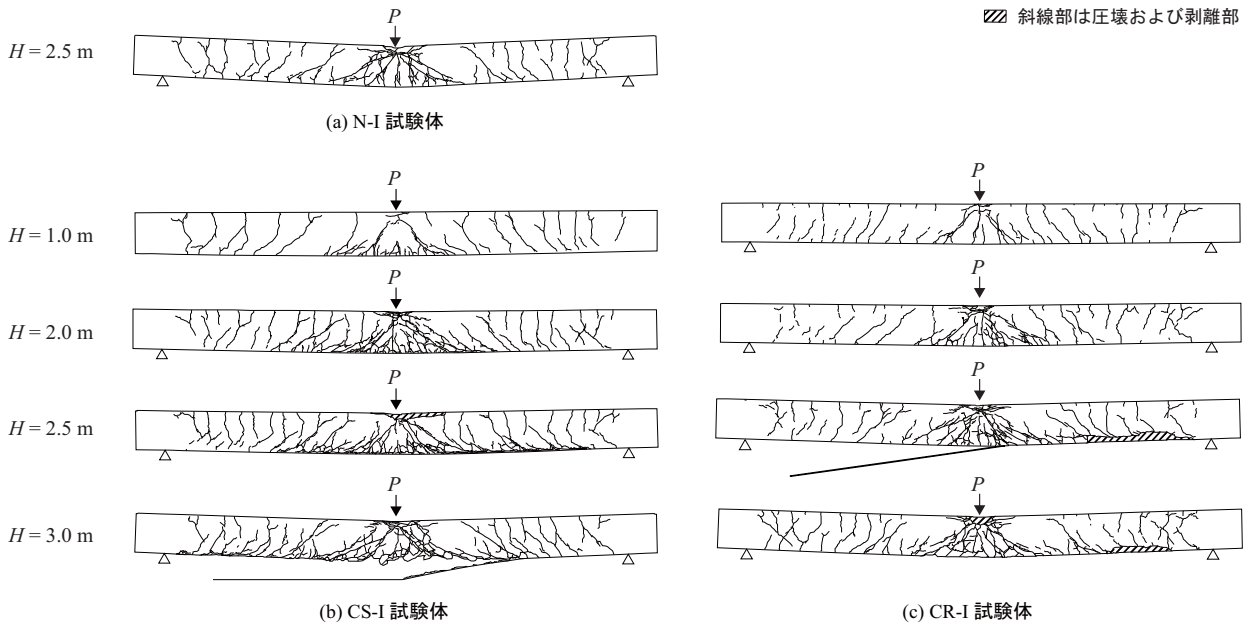


図-6 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状

点近傍部では1.0%程度の一様な分布性状を示しており、CR試験体に比較して安定的に補強効果を発揮していることが分かる。

$t = 15 \sim 20$  ms 時点では、CS試験体の場合には斜めひび割れの開口が認められるものの、梁中央部では未だほぼ一様なひずみ分布を示していることから、一様な変形曲率を呈しているものと推察され、ピーリング作用による剥離が抑制されていることが確認できる。一方、CR試験体の場合には、右側の一部を残してほぼ全域に渡って2.0%のひずみを示していることや、荷点近傍部の斜めひび割れが大きく開口していることより、ロッドは斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって剥離すると共にその先端部近傍で破断(後述の写真-1)する傾向を示しているものと推察される。

### (3) 実験終了後におけるひび割れ分布性状

図-6には、全試験体に関する実験終了後の梁側面のひび割れ分布を比較して示している。前述の図-3の静荷重実験時におけるひび割れ分布を見ると、上述のように荷点近傍を中心に曲げひび割れが下縁部から上縁部に向かい、やがて荷点方向に進展している。一方、衝撃荷重実験の場合には、重錘落下高さや補強の有無にかかわらず、いずれの試験体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、静荷重実験時とは大きく異なっている。衝撃荷重実験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。

図-6 (b) のCS試験体と図-6 (c) のCR試験体について比較すると、荷点近傍部を除いた領域では両者類似のひび割れ分布を示していることが分かる。荷点近傍部では、CR試験体の場合における斜めひび割れの角度がCS試験体に比して大きく、より局所的なひび割れ分布を示している。また、CS試験体の場合には、設定落下高さ  $H = 3.0$  m において斜めひび割れ先端部がシートを下方に押し出すピーリング作用によって剥離に至っている。これは、斜めひび割れの勾配が緩やかで斜めひび割れ先端部と共に荷点近傍部が全体としてシートを下方に押し出すこと等によって、剥離の傾向を示したものと推察される。

一方で、CR試験体の場合には、設定落下高さ  $H = 2.5, 3.0$  m 落下時にCFRPロッドが斜めひび割れ先端部で破断に至っている。これは、斜めひび割れの角度が大きいため、鉛直に近い斜めひび割れを介して衝撃力が直接的にロッドに作用したことが大きな要因であるものと推察される。また、重錘落下高さの増加に伴い、下端側面かぶり部が剥落していることが分かる。このような剥離現象は、CFRPシート下面接着した場合には現れないロッド下面埋設特有の性状であり、これによっても入力エネルギーの一部が吸収されているものと推察される。

### (4) 実験終了後におけるCFRPロッド破断の状況

写真-1には、設定重錘落下高さ  $H = 2.5$  m におけるCR試験体の実験終了後のCFRPロッド破断の状況を示している。写真より、ロッドは斜めひび割れ先端部で破断に至っていることや、その破面はCFRP材特有の脆的な状態ではなく、繊維がばらけた状態で破断に至っていることが分かる。これは、以下のように推察される。す

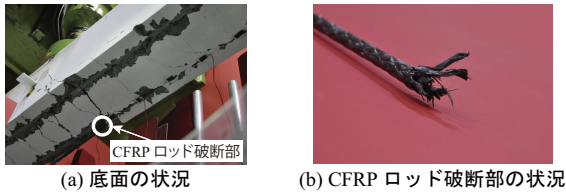


写真-1 実験終了後における CFRP ロッド破断の状況

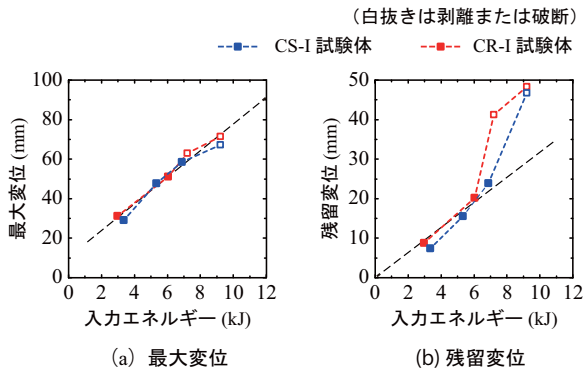


図-7 入力エネルギーと各種応答変位の関係

なわち、1) CFRP ロッドは繊維を組紐状に編みかつエポキシ樹脂を含浸させて一体化させているが、2) ロッドとコンクリート間の付着が良好な状態で、鉛直に近い斜めひび割れを介して衝撃力が直接的にロッドに作用したことにより、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって、荷重点側のロッドが下方に押し下げられて一部剥離の傾向を示すと共に、3) 除荷状態になった時点で組紐状に編んで一体化された繊維がばらばらに解かれ、4) そのような状態下で、さらに斜めひび割れ先端部が下方に押し出すことにより、各繊維が純せん断的に破断に至った。このような結果は、FRP ロッドにおいて一体化された繊維が解かれるような場合には、CFRP 材のように高弾性で脆性的な材料は破断の傾向にあることを暗示している。

これより、CFRP シート補強の場合には、設定重錘落下高さ  $H = 3.0\text{ m}$  においてシートが剥離し終局に至るのに対し、CFRP ロッド補強の場合には、設定重錘落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  でロッドが破断し終局に至ったものと考えられる。

#### (5) 入力エネルギーと各種応答変位の関係

図-7には、補強試験体に関する入力エネルギーと最大/残留変位の関係を示している。

図-7(a)より、最大変位は両試験体ともに入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加していることが分かる。また、CFRP シートが剥離した設定重錘落下高さ  $H = 3.0\text{ m}$  や CFRP ロッドが破断した  $H = 2.5, 3.0\text{ m}$  の場合における最大変位の値も線形に分布していることから、CFRP 補強材の剥離や破断は最大変位到達後に発生しているものと判断される。

図-7(b)より、残留変位は CFRP シート/ロッドが剥離

や破断に至った場合を除くと、両試験体で同一の勾配を有しほぼ原点からの線形分布を示していることが分かる。この傾向は、無補強 RC 梁に関する著者等の研究成果<sup>3)</sup>と同様の特性を示しており、入力エネルギーと残留変位、補強後の梁の静的耐力を用いた耐衝撃設計法の定式化の可能性を示唆している。

#### 4. まとめ

本研究では、CFRP シート下面接着および CFRP ロッド下面埋設工法を適用した場合における RC 梁の耐衝撃性向上効果に関する詳細な検討を行うため、静荷重および単一荷重による衝撃荷重実験を行った。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) 静荷重実験の場合には、CFRP 材の補強工法にかかわらずほぼ同程度の曲げ補強効果を発揮し、いずれの試験体も補強材の剥離によって終局に至る。
- 2) 衝撃荷重実験において、CFRP ロッド下面埋設補強の場合には、設定重錘落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  でロッドが破断し終局に至った。これに対し、CFRP シート接着補強の場合には、設定重錘落下高さ  $H = 3.0\text{ m}$  でシート剥離により終局に至っている。このことから、CFRP 材を用いて曲げ補強を施す場合において、シート接着補強による耐衝撃性向上効果は、ロッド下面埋設補強を施す場合に比較して優れていることが明らかになった。
- 3) これは、CFRP ロッド補強の場合には CFRP シート補強の場合よりも斜めひび割れが狭い領域に発生しその角度も大きいことから、斜めひび割れのピーリング作用も大きく、ロッド破断の主たる要因になったものと推察される。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K06199 の助成により行われたものである。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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, 2017-03
- 2) 岸 徳光, 栗橋祐介, 小室雅人, 三上 浩: CFRP ロッドを用いて下面埋設曲げ補強を施した 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. 39, No.2, pp. 1147-1152, 2017-03
- 3) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重荷重時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007-03