

論文 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

岸 徳光^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・小室 雅人^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：本研究では、CFRP ロッドを用いて下面埋設曲げ補強を施した RC 梁の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、無補強および CFRP ロッドを用いて下面埋設曲げ補強を施した RC 梁の静荷重実験及び重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) CFRP ロッドを下面埋設して曲げ補強を施すことによって、静的耐力を十分向上可能であることや、2) 重錘落下衝撃実験結果より、無補強試験体に比較してある程度の変位抑制効果が期待できるものの、ロッドは剥離と破断が混在した状況を呈し、AFRP ロッドを用いる場合に比較して大きな耐衝撃性向上効果は期待できないこと、などが明らかになった。

キーワード：RC 梁, CFRP ロッド, 下面埋設工法, 耐衝撃性

1. はじめに

RC 部材の耐震補強工法や道路橋の床版補強工法には鋼板巻付工法やコンクリート増厚工法の他に、連続繊維 (FRP) シート接着工法がある。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、近年は施工実績も伸びている。

また、ロックシェッドに代表される落石防護構造物においても、地山の経年変化によって落石規模の大型化が指摘され、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発生している。RC 部材の耐衝撃性向上法には、一般的には上述の耐震性向上法と類似の補強法が想定される。このような状況下、著者らはこれまでアラミド繊維製 FRP (AFRP) を用いたシート接着工法やロッド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きた^{1)~3)}。その結果、いずれの工法においても耐衝撃性向上効果を確認している。特に、AFRP ロッド

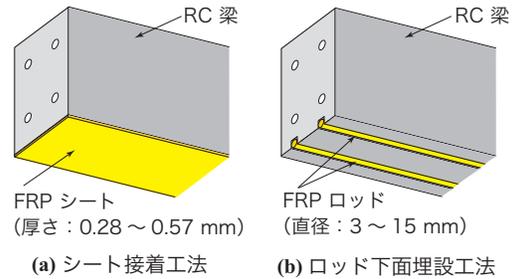


図-1 補強概念図

埋設工法の場合には、シート接着工法に比較してその効果の大きいことが明らかになっている。図-1には、各工法の概念図を示している。

一方で、土木構造物の補修・補強法に適用される FRP 材料には、アラミド繊維製他カーボン繊維製が挙げられ、実用に供されている。

これまでの検討結果、静荷重載荷時における AFRP シート接着/ロッド下面埋設による補強効果は、補強材の軸剛

表-1 試験体一覧

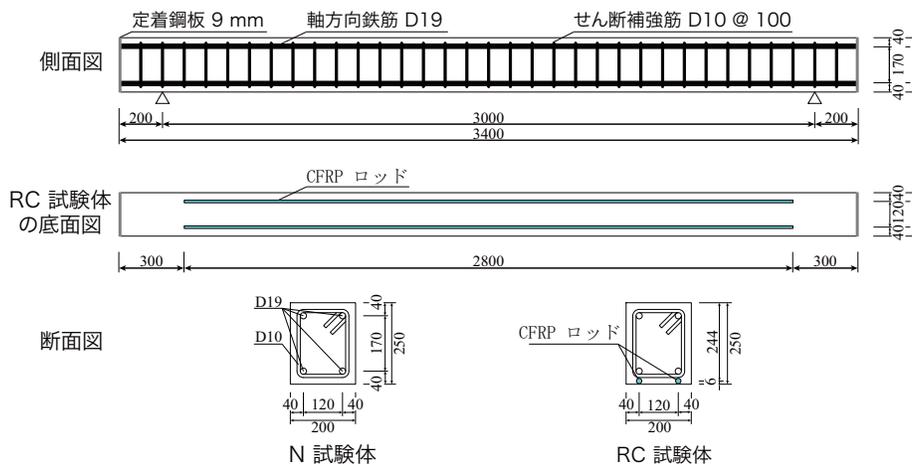
試験体名	補強材の種類	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	補強材の軸剛性 EA (MN)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	計算曲げ耐力 P_u (kN)	計算せん断耐力 V_u (kN)	補強材の剥離/破断の有無
N-S	-	静的	-	-	32.4	381.7	55.2	286.8	-
N-I-H2.5		2.5	2.3	-					-
RC-S	CFRP ロッド	静的	-	16.0	32.8	402.6	105.6	286.6	剥離
RC-I-H1.0		1.00	1.0						無し
RC-I-H2.0		2.00	2.0						無し
RC-I-H2.5		2.50	2.4						破断
RC-I-H3.0		3.00	3.1						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 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (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－2 試験体の形状寸法，配筋状況及び補強状況

表－2 FRP ロッドの力学的特性値(公称値)

補強材の種類	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
CFRP ロッド	8.5 × 2本	56.7	2.01	141.1	1.50
AFRP ロッド	11 × 2本	95.0	1.18	68.6	1.72

性を等しくすることによって両者類似していることが明らかになっている⁴⁾。しかしながら、AFRPシート/ロッドの場合には弾性係数が鋼材の1/2程度であるものしなやかであることや、カーボン繊維製FRP(CFRP)シート/ロッドの場合には高強度や高弾性材料であるものの繊維が細いことにより破損し易く毛羽となったり、短繊維の場合にはフライや粉塵となって飛散しやすい等、材料によって特性が大きく異なることが知られている。これより、FRP材料の衝撃荷重に対する補強効果に関しては、詳細な検討が必要であるものと判断される。

このような観点から、本論文ではCFRP材に着目し、RC梁にCFRPロッドを下面埋設補強した場合における耐衝撃的な補強効果について検討を行うこととし、重錘落下衝撃実験を行った。なお、本実験では今後における他の補強材料や補強法を適用した場合との比較検討を容易にするために、これまで実施してきたAFRPシート接着/ロッド下面埋設補強の場合と同一条件下で実験を行うこととした。すなわち、設計時のRC梁試験体の形状寸法や鉄筋量、コンクリート強度を同程度とし、CFRPロッドの軸剛性をAFRPロッド/シートと同程度に設定している。なお、本研究で用いたCFRPロッドは、カーボン繊維を組紐状に編み、エポキシ樹脂を含浸させたものである。

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、CFRPロッド下面埋設曲げ補強の有無や

落下高さを変化させた計7体である。表中の試験体のうち、第一項目はCFRPロッド下面埋設補強の有無(N：無補強、RC：ロッド埋設補強)を示し、第二項目は荷重方法(S：静荷重荷重、I：衝撃荷重荷重)、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、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。また、無補強とCFRPロッド下面埋設補強した場合におけるRC梁の耐衝撃性に関する比較は、H2.5の場合で行うこととした。

図－2には、試験体の形状寸法と配筋及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。

CFRPロッド下面埋設試験体は、以下のようにして施工を行った。すなわち、1) 梁下面のロッド埋設位置に、後述のようにロッド直径が8.5 mmであることより、9.5×9.5 mmの矩形状に溝を切り込み、2) 溝切削部を清掃してエポキシ系プライマーを塗布する。3) 指触乾燥状態であることを確認した後、エポキシ系パテ状接着樹脂を溝切部に充填してロッドを埋設・接着する、である。なお、養生期間は1週間程度である。

表－2には、本実験で用いたCFRPロッドと過去の実験³⁾で用いたAFRPロッドの力学的特性値を一覧にして示している。CFRPロッドの補強量は、前述のようにAFRPロッドの軸剛性と同程度になるように決定している³⁾。CFRPロッドの引張強度はAFRPロッドに比較して1.7倍程度大きいものの、破断ひずみは1.50%でAFRPロッドよりも小さいことが分かる。

実験方法に関しては、静荷重荷重実験の場合には、梁幅方向に200 mm、梁長さ方向に100 mmの荷重板をスパ



写真-1 衝撃荷重載荷時の実験装置と試験体設置状況

ン中央部に設置し、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて載荷している。なお、N-S 試験体の場合において、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。また、CFRP ロッドを下面埋設して曲げ補強する場合には、最大荷重に到達しロッドが剥離して終局状態に至るまで載荷している。

一方、衝撃荷重載荷実験の場合には、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載荷法に基づいて実施している。載荷位置は梁のスパン中央部に限定している。なお、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、試験体の設置状況と実験装置を示している。

本実験の測定項目は、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 CFRP 補強材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、また変位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 CFRP 補強材の剥離および破断状況を高速度カメラにて撮影している。

3. 実験結果

3.1 静荷重載荷実験

図-3には、静荷重載荷実験における CFRP ロッド下面埋設補強 RC 梁と無補強 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。なお、計算曲げ耐力は、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、平面保持およびコンクリートと CFRP ロッドとの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。また、計算時における終局状態は、梁上縁コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみである $3,500 \mu$ に至った時点と定義している。

図-3より、N-S 試験体および RC-S 試験体の各荷重レベルに着目すると、N-S, RC-S 試験体に関する主鉄筋降伏

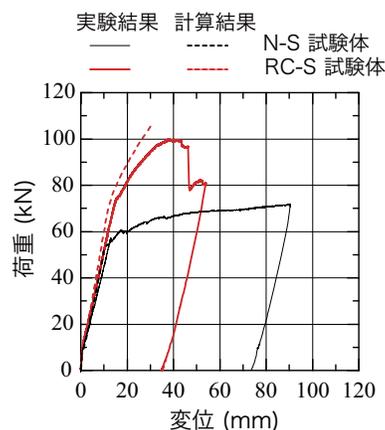


図-3 静荷重における荷重-変位曲線の比較

荷重は、それぞれ 57.0, 73.5 kN であり、最大荷重は 66.7, 99.1 kN である。なお、N-S 試験体の場合には、鉄筋降伏後、鉄筋の塑性硬化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、RC-S 試験体の最大荷重到達点近傍である 40 mm に到達した時点の値を最大荷重として評価することとした。これより、ロッド下面埋設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 30% 程度、最大荷重は 49% 程度増加していることが分かる。

また、実験結果と計算結果を比較すると、N-S 試験体の場合には、主鉄筋降伏直後に上縁が圧壊の傾向を示し、計算結果は終局に至っていることが分かる。一方、RC-S 試験体の場合における荷重分布は、主鉄筋降伏点近傍まではひび割れ発生後線形に増加するものの、主鉄筋降伏荷重は計算主鉄筋降伏荷重よりは小さい値を示している。その後も、主鉄筋降伏前の剛性勾配よりは小さい勾配で単調に増加し、最大値に到達後上縁圧壊と共にロッドの剥離によって除荷状態に至っていることが分かる。

なお、主鉄筋降伏後における実験結果の荷重値は、同一変位時における計算結果より最大 10 kN 程度小さい。これは、3点曲げ載荷であるために載荷点から支点方向に向かって均等な曲げひび割れの発生が期待できないことや、シート補強の場合と異なりロッドが試験体下面に2本配置されているだけであるため、有効幅の概念と同様に梁幅方向に一樣な補強効果が期待できないこと等によるものと推察される。

載荷荷重は、上述のように主鉄筋降伏後も最大荷重近傍まではほぼ線形に増加し、除荷状態には至っていないことより、計算終局時近傍まではロッドとコンクリートの付着は十分確保されているものと判断される。

図-4には、静荷重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

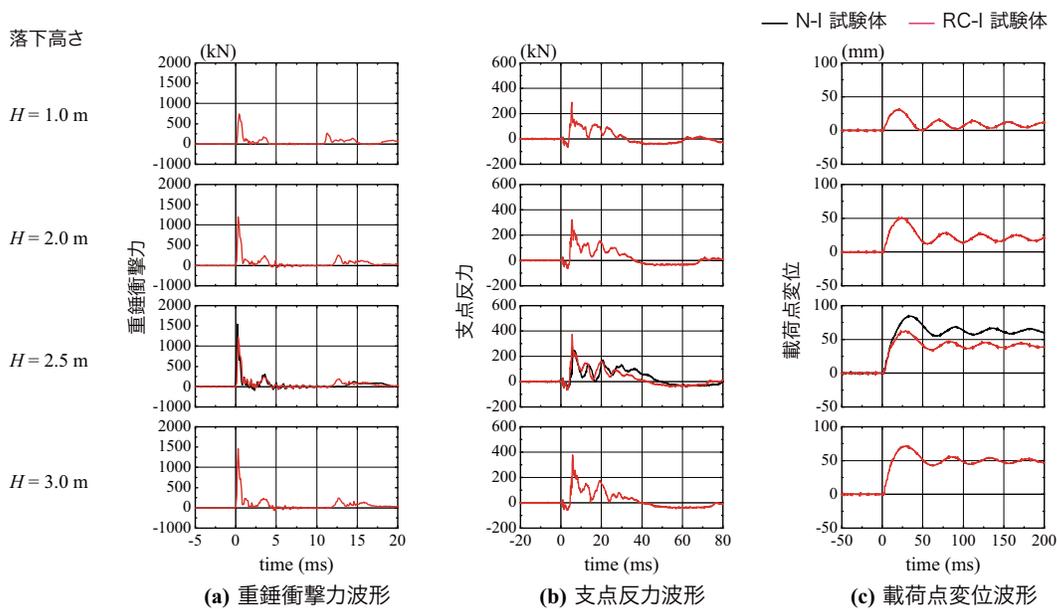


図-5 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する時刻歴波形分布

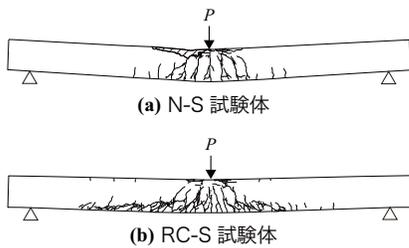


図-4 静載荷時におけるひび割れ分布図

験体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おり、載荷点近傍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、RC-S試験体の場合には、曲げひび割れがN-S試験体に比べて梁全体に広く分布しており、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部分剥離に至っている。下縁かぶり部のひび割れは主鉄筋配置位置近傍部で連結した状態になっており、剥落の傾向を示していることが分かる。これより、CFRPロッドとコンクリートとの付着は良好であることが窺える。

3.2 衝撃荷重載荷実験

(1) 各種時刻歴応答波形

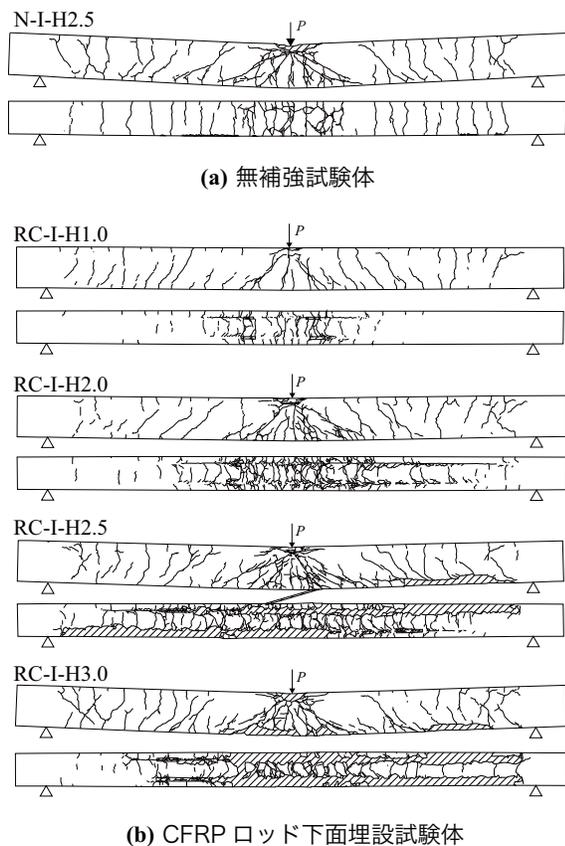
図-5には、衝撃荷重載荷実験に供した全試験体に関する重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の各波形を一覧にして示している。図-5(a)において、重錘衝撃力波形は、衝撃初期から20ms間における変動状況を示している。図より、試験体の種類や設定落下高さ H によらず、振幅が大きく継続時間が1ms程度の第1波に振幅が小さい第2波目が後続する性状を示していることが分かる。設定落下高さ $H = 2.5\text{ m}$ の場合における無補強とCFRPロッド下面埋設補強した試験体の波形分布を比較すると、12ms前後の時点までは類似の波形性状を示しており、ロッド

下面埋設による曲げ剛性の影響は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が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-5(b)において、支点反力波形は、衝撃初期から80ms間の変動状況を示している。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。全体を見ると、入力エネルギーの増加と共に継続時間も長くなる傾向にあるが、 $H = 2.5\text{ m}$ の場合と3.0mの場合におけるロッド補強RC梁の波動継続時間は類似している。一方、 $H = 2.5\text{ m}$ の場合における無補強試験体との比較を行うと、ロッド下面埋設RC梁の場合にはロッドが破断しているものの、無補強試験体の場合よりも波動継続時間が短く、この時点では補強効果が出現していることが推察される。

図-5(c)において、載荷点変位波形は、衝撃初期から200ms間の変動状況を示している。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。また、入力エネルギーの増加と共に残留変位が増加し、かつ減衰自由振動の固有振動周期が長くなっている。設定落下高さ $H = 2.5\text{ m}$ の場合において、無補強試験体の場合と比較すると、ロッド下面埋設補強RC梁の場合には、ロッドが破断しているにもかかわらず、無補強試験体の場合よりも最大変位及び残留変位とも小さく、未だ若干成りとも補強効果が現れていることが分かる。

$H = 3.0\text{ m}$ の場合においてもロッドが破断しているが、 $H = 2.5\text{ m}$ の場合と比較して最大変位が約8.4mm程度増加している程度であり、この場合においても未だ若干なりとも補強効果が発揮されているものと推察される。荷



(b) CFRP ロッド下面埋設試験体

図-6 衝撃荷重実験終了後のひび割れ分布の比較

重除荷後の減衰自由振動状態における減衰の程度は、 $H = 2.5\text{ m}$ の場合に比して大きく、ロッド破断によって衝撃エネルギーが大きく吸収されたことが窺われる。

(2) 実験終了後におけるひび割れ分布の比較

図-6には、全試験体に関する衝撃実験終了後の側面及び梁下面のひび割れ分布を比較して示している。図-6(a)には、無補強試験体の $H = 2.5\text{ m}$ 落下時におけるひび割れ分布を示している。図より、1) 荷点近傍部には曲げひび割れと共に斜めひび割れが発生していること、2) 荷点部が圧壊しており、梁全体が角折れの状態に至っていること、3) 曲げひび割れがスパン全体に分布しており、下縁からのみならず上縁からも発生していること等が、分かる。前述の3)に関しては、衝撃初期に曲げ波の先端部が固定端に類似した状態で支点方向に伝播することによるものと推察される。

図-6(b)には、CFRPロッド下面埋設補強試験体に関するひび割れ分布を示している。 $H = 1\text{ m}$ 落下時のひび割れ分布を見ると、入力エネルギーが本実験中で最も小さい場合であるが、中央部に斜めひび割れと共に無補強試験体の場合と同様に梁全体に上下縁からの曲げひび割れが発生していることが分かる。梁下面のひび割れ分布を見ると、ひび割れは梁中央部に集中しており、ロッド埋設線に沿ってひび割れが確認できる。

$H = 2\text{ m}$ 落下時のひび割れ分布を見ると、スパン中央部

を除いて $H = 1\text{ m}$ 落下時と類似している。スパン中央部は、斜めひび割れの角度が $H = 1\text{ m}$ 落下時に比して緩くなっており、その内部には荷点に向かう斜めひび割れと共に曲げひび割れも多く発生している。また、荷点部は圧壊の傾向を示していることが見て取れる。梁下面部では、ロッド埋設部に沿ったひび割れが梁の右側半スパンでは支点近傍部まで伸びている。スパン中央部では、梁幅方向に連続した密なひび割れが発生しており、ロッド間中央部のひび割れは荷点を中心に支点に向かってU字状に分布している。これは、1) ロッドで補強された部分の曲げ剛性が大きいのにに対して、2) ロッドから離れたロッド間中央部ではロッドの補強効果が小さく、3) 対応して曲げ剛性も向上しないために曲げモーメントの小さいレベルでひび割れが発生し、4) 曲げモーメントの増大と共に、ひび割れが支点方向かつ曲げ剛性の大きいロッド方向に推移することによるもの、と推察される。従って、この時点では、CFRPロッドの補強効果が十分発揮されているものと判断される。

$H = 2.5\text{ m}$ 落下時において、梁側面部のひび割れ分布は、スパン中央部の斜めひび割れの角度がより緩やかな傾向を示している以外は、 $H = 2\text{ m}$ 落下時と類似している。但し、ロッドがかぶりコンクリートを伴って剥離すると共に最終的には破断に至っていることにより、その影響で右側半スパン部の下縁かぶりが剥落している。梁下面のひび割れ分布を見ると、ロッド埋設線に沿ってコンクリートが剥落している。これは、ロッド剥離時にロッドに付着したかぶりコンクリートが剥落した為であり、ロッドとコンクリートの付着強度がコンクリートの引張あるいはせん断強度よりも大きいことが窺われる。これより、本実験におけるロッドとコンクリートとの接着状況は良好であったことが明らかになった。

なお、CFRPロッドは斜めひび割れ発生部近傍において破断しているが、その他の部分では剥離も生じている。また、図-7より、ロッドが鋭利な刃物で切断されたような脆性的な破断に至っていないことが分かる。これより、まずは斜めひび割れ先端部がロッドを下方に押し下げるピーリング作用によって剥離の傾向を示しかつ組紐状のロッドが除荷時にほのかれた状態になった後、斜めひび割れ先端部がさらに下方に押し下げることによって細い繊維が連鎖的に破断したものと推察される。

$H = 3\text{ m}$ 落下時における梁側面部のひび割れ分布を見ると、ほぼ $H = 2.5\text{ m}$ 落下時と類似しており、ひび割れは梁全体に発生していることが分かる。但し、 $H = 2.5\text{ m}$ 落下時に比較して、荷点部の圧壊の程度も大きく下縁かぶりコンクリートが広範囲に剥落していることから、入力エネルギーが大きいことにより損傷の程度も大きくなっていることが窺われる。梁下面の状態を見ると、ロッド



図-7 CFRP ロッドの破断状況 (RC-I-H3.0 試験体)

が2本とも剥落と共に途中で破断しており、斜めひび割れ発生部を中心にかぶりコンクリートが剥落している他、下縁側面部は両面共にかぶりコンクリートが広い領域で剥落していることが分かる。

3.3 FRP 材料による梁の耐衝撃性向上効果に関する比較

ここでは、AFRP ロッド下面埋設 RC 梁に関する実験結果³⁾と比較する形で、ロッド材料の違いによる RC 梁の耐衝撃性向上効果について検討を行うこととする。

実験に用いられた A FRP ロッド下面埋設試験体は、ロッドの軸剛性が $EA = 13.0 \text{ MN}$ 、梁の静的計算曲げ耐力が $P_u = 90.2 \text{ kN}$ であり、いずれも本実験における試験体と類似であるものの、若干小さい値となっている。また、重錘の設定落下高さ H に対する実測落下高さ H' は、 $H = 2.5, 3.0, 3.5 \text{ m}$ に対して、 $H' = 2.21, 2.68, 3.13 \text{ m}$ であった。

AFRP ロッドを用いる場合の実験結果は、実測落下高さが $H' = 3.13 \text{ m}$ の場合においても、ロッドは剥離や破断に至っていないことが明らかになっている。これに対して、本実験の場合には、実測落下高さ $H' = 2.4 \text{ m}$ (設定落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$) において、既にロッドが破断に至っている。

これより、CFRP ロッドを下面埋設して曲げ補強する場合の耐衝撃性向上効果は、AFRP ロッドを用いる場合に比較して小さいことが明らかになった。その要因には、ロッドの軸剛性 EA や梁の静的計算曲げ耐力 P_u が類似の大きさであることより、ロッドの材料特性が大きく影響していることが推察される。すなわち、CFRP 材料を組紐状のロッドに加工したことにより脆性的な破断には至っていない。しかしながら、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって一部剥離と共にロッドが除荷時にほどかれ、斜めひび割れ先端部がさらに下方に押し下げることにより、繊維が連鎖的に破断したものと推察される。

4. まとめ

本研究では、CFRP ロッド下面埋設工法による RC 梁の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、無補強および CFRP ロッドで下面埋設曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。本実験によって得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) CFRP ロッド下面埋設した RC 梁に関する静載荷実験結果より、無補強試験体に比較して主鉄筋降伏荷重

や最大荷重を向上可能である。本実験では、それぞれ 30%, 49% 程度向上した。なお、RC 梁は、CFRP ロッドが斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって剥離し、終局に至っている。

- 2) 重錘落下衝撃実験結果より、設定落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$ (実測落下高さ $H' = 2.4 \text{ m}$) において、CFRP ロッド下面埋設補強を施すことによって最大変位や残留変位を抑制することができた。但し、実験終了後、CFRP ロッドは一部剥離と共に斜めひび割れ先端部近傍において破断していることを確認している。
- 3) これは、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によってロッドが一部剥離の傾向を示し、かつ組紐状のロッドが除荷時にほどかれた状態になり、再度斜めひび割れ先端部が下方に押し出すことによって、繊維が連鎖的に破断に至ったものと推察される。
- 4) FRP ロッドの軸剛性や梁の計算曲げ耐力が類似の条件下において、CFRP ロッドを下面埋設する場合には、AFRP ロッドを適用する場合に比較して梁の耐衝撃性向上効果が小さいことが明らかになった。
- 5) これは、CFRP 材料が高強度かつ高弾性であるものの、繊維が細いことにより、素線に近い状態になった時には破断し易くなることが、特に衝撃荷重載荷時に顕在化するためと推察される。

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) 今野久志, 西 弘明, 栗橋祐介, 岸 徳光: AFRP シート接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.721-726, 2013.7
- 2) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP シート補強 T 形 PC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強方法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1147-1152, 2015.7
- 3) 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
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, 田村富雄: AFRP ロッドを埋設した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1783-1788, 2003.7
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2012 年制定