

CFRP ロッド下面埋設補強 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact loading for RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP rods

(独) 高専機構 釧路高専 ○ フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院 学生会員 船木 隆史 (Takashi Funaki)

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き付け工法やコンクリート増し厚工法の他に、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、鋼板巻き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。部材の耐衝撃性向上法には、耐震性向上法と類似の補強法が上げられる。このような状況下、著者らはこれまでアラミド繊維 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おり、特に AFRP ロッド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が大きいことが明らかになっている。

土木構造物の補修補強法に通常良く適用される FRP 材料には、アラミド繊維材の他カーボン繊維 (CFRP) 材がある。CFRP 材の場合には高強度や高弾性率の材料があり、最近では軽量高強度材料として航空機材料としても用いられている。本論文では、CFRP 材に着目し、RC 梁に CFRP ロッドを下面埋設した場合における耐衝撃性について、実験的に検討を行うこととした。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重錘落下衝撃実験時と同一な条件下で行うこととした。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一とし、FRP 補強材の軸剛性を同程度に設定している。

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 ロッド埋設曲げ補強の有無や落下高さを変化させた全 7 体である。表中の試験体のうち、第一項目は CFRP ロッド埋設補強の有無 (N: 無補強, RC: ロッド埋設補強) を示し、第二項目は載荷方法 (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の場合の 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-1 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 を使い、100 mm 間隔で配筋している。

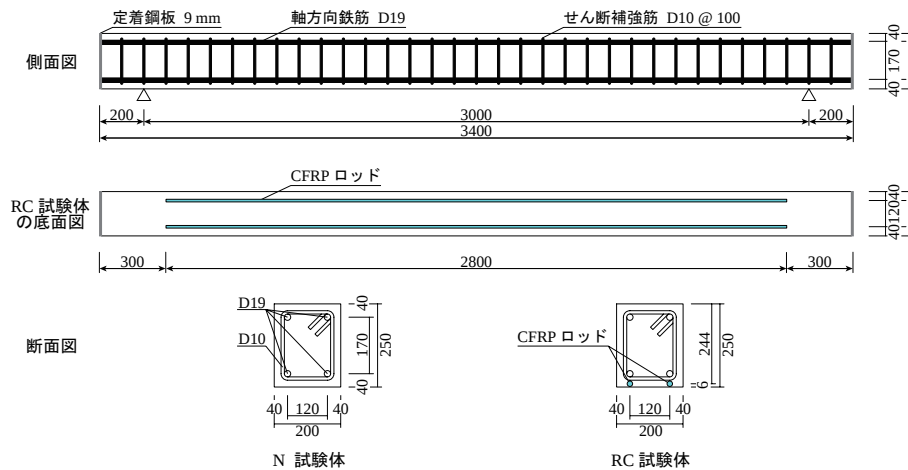
CFRP ロッド下面埋設工法の場合には、梁下面のロッド埋設位置に所定の深さで溝を切り込み、溝切部を清掃してエポキシ系プライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認した後エポキシ系パテ状接着樹脂を溝切部に充填して埋設・接着を行っている。なお、養生期間は 1 週間程度である。

CFRP ロッドの補強量は、前述のように AFRP ロッドやシートの軸剛性と同程度になるように決定している。ロッドの力学的特性値 (公称値) は、直径 $D = 8.5$ mm、弾性係数 $E_r = 141.1$ GPa、引張耐力 $f_{ru} = 115$ kN、破断ひずみ $\epsilon_{ru} = 1.5\%$ である。

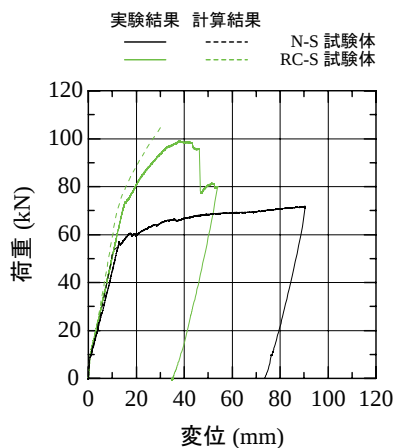
衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載

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 引張剛性 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 剥離/破断 の有無	
N-S	-	静的	-	-	32.4	381.7	55.2	286.8	-	
N-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-H1.0		1.00	1.0						無し	
RC-H2.0		2.00	2.0			406.7	106.0		無し	
RC-H2.5		2.50	2.4						破断	
RC-H3.0		3.00	3.1			402.6	105.6		破断	



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況及び補強状況



図－2 静載荷における荷重－変位曲線の比較

荷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、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 静載荷実験

静載荷実験の場合には、梁幅方向に 200 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載荷した。なお、N-S 試験体の場合には、主鉄筋降伏後に鉄筋の塑性硬化によって荷重が漸増することより、本研究では梁が載荷点部で角折れ状態になり、変位が 90 mm 前後に至るまで載荷している。一方、CFRP ロッド埋設を施して曲げ補強する場合

に載荷している。

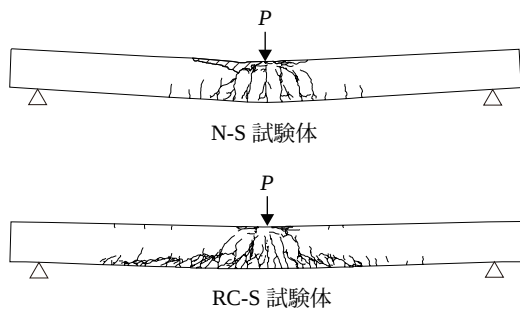
(1) 荷重－変位関係

図－1 には、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－2 より、N-S 試験体および RC-S 試験体の各荷重時に着目すると、N-S, RC-S 試験体に関する主鉄筋降伏荷重は、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分かっている。このため、本論文では、最大荷重として中央点変位が 40 mm に達した時点の値を用い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り、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り除荷状態に至っていることが分かる。主鉄筋降伏後の荷重分布は、計算結果よりは最大 10 kN 程度小さい値を示している。これは、3 点曲げ載荷であるために軸方向に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 2 本配置されているだけであるため、有効幅の関係により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



図－3 静載荷時におけるひび割れ分布図

は十分確保されているものと推察される。

(2) ひび割れ分布性状

図－3には、静載荷実験終了後における各RC梁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、ロッドは剥離している。下縁かぶり部のひび割れはかぶり上縁で連結状態になっており、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

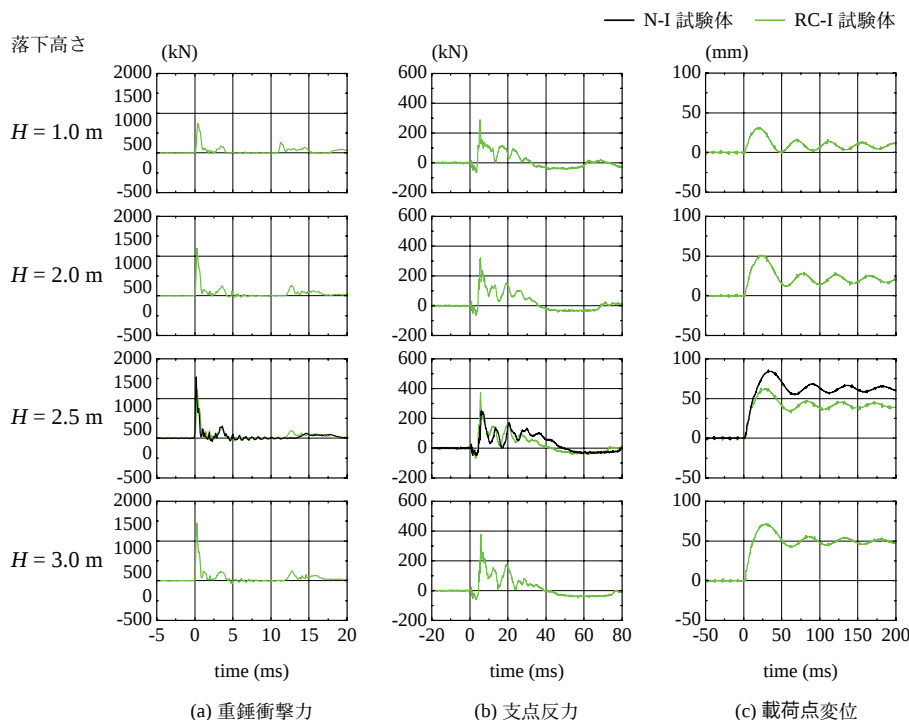
(1) 各種時刻歴応答波形

図－4には、全試験体に関する重錘衝撃力波形、支点反力波形、載荷点変位波形を一覧にして示している。図－4

(a)において、重錘衝撃力波形は衝撃初期から20ms間の変動状況を示しているが、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 $H=2.5$ mの場合における両試験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)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が、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。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、 $H=2.5$ 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、 $H=2.5$ mの場合における無補強試験体との比較を行うと、ロッド埋設補強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－4(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 $H=2.5$ 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



図－4 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

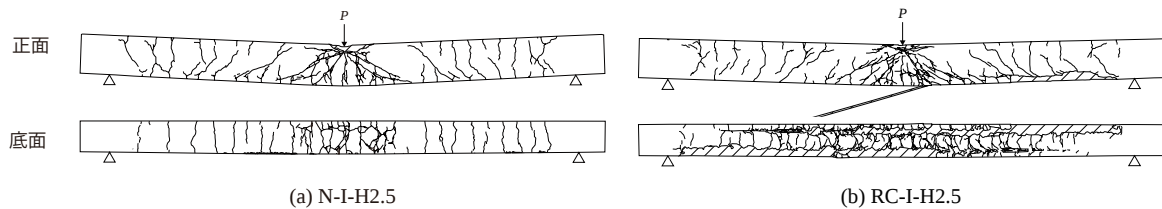


図-5 H2.5の場合におけるひび割れ分布の比較



図-6 CFRP ロッドの破断状況

かる。また、 $H = 3.0$ m の場合においてもロッドが破断しているが、 $H = 2.5$ m の場合と比較して最大変位が約 8.4 mm 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成りとも補強効果が発揮されているものと推察される。荷重除荷後の減衰自由振動状態における減衰の程度は、 $H = 2.5$ m の場合に比して大きく、ロッド破断によって大きくエネルギーが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-5 には、重錘落下高さが $H = 2.5$ m の場合における両試験体の実験終了後のひび割れ分布を比較して示している。図-5 (a) の無補強試験体のひび割れ分布を見ると、載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。また、載荷点部は圧壊しており、角折れの状態になっていることが分かる。また、曲げひび割れは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ひび割れが発生している。これは、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。一方、CFRP ロッド下面埋設補強の場合には、梁側面部のひび割れ分布は無補強試験体と類似していることが分かる。但し、ロッドが剥離と共に最終的には破断と共に剥離していることにより、その影響で右側支点近傍部の下縁かぶりが剥落している。また、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と共にかぶりコンクリートと一緒に剥落した為であり、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、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。破断に関しては、斜めひび割れ先端部がロッドを下方に押し下げる作用によって、ロッドが純せん断破壊状態に至った為と推察される。また、図-6 より、ロッドが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によってロッドが下方に押し下げられるピーリン

グ作用によって剥離が先行し、後に純せん断作用によりちぎれるように破断したものと推察される

4. まとめ

本研究では、CFRP ロッド下面埋設補強 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、無補強 RC 梁に関する実験結果と比較する形で、耐衝撃性向上効果について検討を行った。検討の結果、以下の事項が明らかになった。

- 1) 静荷重実験結果より、ロッド下面埋設補強を施すことによって、静的耐力を約 1.5 倍程度向上可能である。
- 2) 重錘落下衝撃実験結果より、衝撃初期には重錘衝撃力波形、支点反力波形共に、落下高さによらず、最大応答値を除き、類似の波形形状を示す。
- 3) 落下高さ $H = 2.5$ m 時点から、ロッドは剥離と破断が混在した状況を示し、耐衝撃性の向上はそれ程期待できない。
- 4) ロッドの剥離と破断は、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や、純せん断的作用によって発生するものと推察される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K06199 の援助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) 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
- 2) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: 衝撃荷重により損傷した扁平 RC 梁の AFRP シート曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 763-768, 2016.7
- 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