

AFRP ロッドで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験

Impact loading tests of flexurally reinforced RC beams with AFRP rod

室蘭工業大学大学院	○学生員	佐藤 元彦 (Motohiko Sato)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
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	正 員	小室 雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐力向上法として、新素材繊維 (FRP) シート接着工法が広く採用されるようになってきた。一方で、最近では既設の耐衝撃用途構造物の経年劣化や耐力不足も報告されており、この種の構造物の耐衝撃性向上法の確立も喫緊の課題となっている。著者らは、これまで RC 部材の耐衝撃性向上法として、アラミド繊維 (AFRP) シート接着工法に着目し、同シートで曲げ補強した RC 梁の静的および衝撃荷重載荷実験を実施している。その結果、FRP シートを接着補強することにより、衝撃荷重載荷によって生じる変形量やひび割れ幅を抑制可能であることを明らかにしている。一方で、終局時には曲げひび割れ開口部を起点にシートが破断する傾向にあることも確認されている。これは、繊維シートの厚さが 0.4 mm 程度 (樹脂分を含まない) と極めて薄く、ひび割れ開口部に引張応力が集中することによって、シートが破断に至ることによるものと推察される。

このような実験結果を踏まえ、本研究ではひび割れ開口に伴う応力集中の影響を抑制する補強工法として、RC梁の下縁に溝を切り込みアラミド繊維製棒材 (AFRP ロッド) を埋設して接着する工法 (AFRP ロッド下面埋設工法) に着目した。図-1 には、シート補強とロッド補強の概念図を示している。AFRP ロッドは、アラミド繊維の素線を組紐状に編み樹脂で棒状に成形したものであり、その直径は一般的に 3 ~ 15 mm 程度である。そのため、シートに比べて応力集中時のロッド断面全体への影響度合いが小さく、破断抵抗性に優れているものと判断される。

既往の研究において、提案のFRP ロッド下面埋設工法は、FRP シート接着工法と同程度の耐力を得ることが明らかになっている。また、FRP ロッドのコンクリートとの付着性能は極めて高く、コンクリート片を伴って剥離

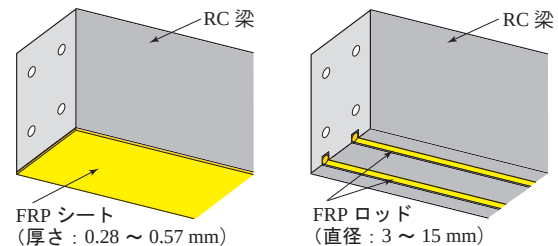


図-1 補強概念図

することを確認している。このように、FRP ロッド下面埋設工法の静的耐力向上効果がシート接着工法と同程度であることから、その耐衝撃性向上効果も同程度以上であるものと推察される。しかしながら、耐衝撃性向上効果に着目した研究は極めて少ないのが実状である。

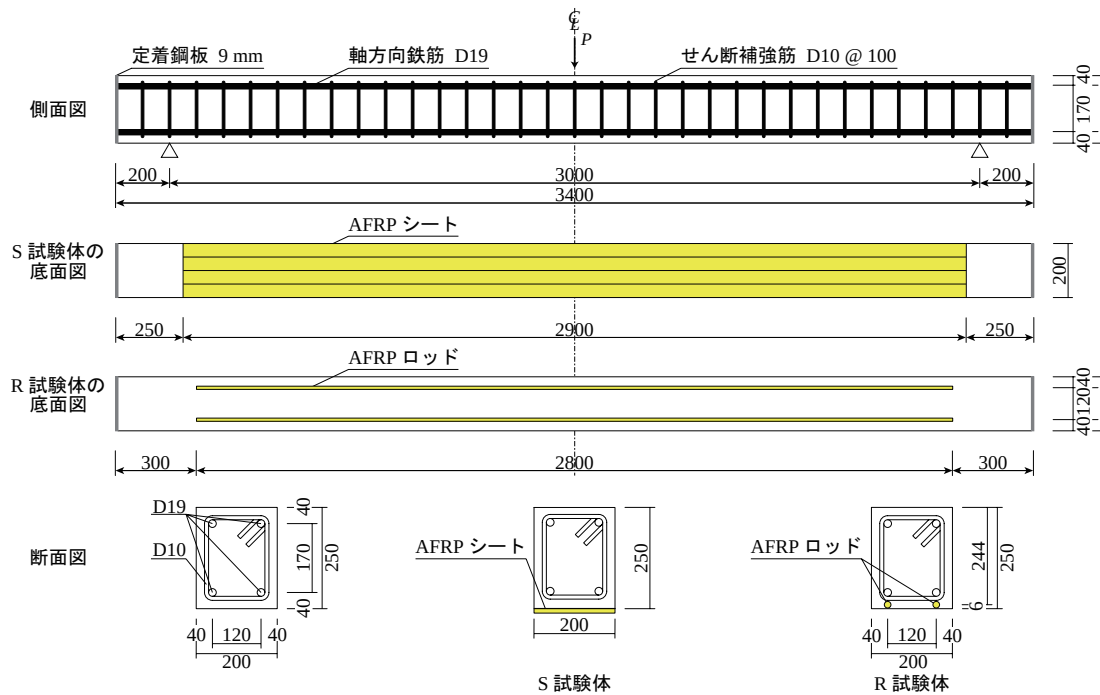
このような背景より、本研究では、AFRP ロッド下面埋設工法による RC 梁の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、無補強および AFRP シート接着や AFRP ロッドを下面埋設して曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

表-1には、本実験に用いた試験体を一覧にして示している。表中、試験体名の第1項目は補強法の種類(N:無補強, S:シート接着, R:ロッド下面埋設), 第2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は、実測重錘衝突速度に基づき換算した自由落下高さである。また、表には本実験に用いた各試験体のコンクリート強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示している。AFRPシートおよびロッドの引張剛性および引張耐力は概ね同等である。

表-1 試験体一覧

[illegible]



図－2 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

衝撃荷重载荷の場合には、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载荷方法により実験を行っている。重錘落下位置は梁のスパン中央部であり、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である。

図－2 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 200×250×3,000 mm であり、軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置しており、梁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。また、せん断補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。AFRP シートは梁底面の補強範囲にブラスト処理を施し、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接着を行っている。また、AFRP ロッドは、梁底面のロッド埋設位置に所定の深さで溝を切り、溝切部を清掃して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、パテ状接着樹脂を溝切部に塗布し、埋設・接着を行っている。なお、養生期間は、AFRP シートおよびロッド（総称して、AFRP 補強材と呼ぶ）共に 1 週間程度である。

表－2 には、本実験で用いた AFRP 補強材の力学的特性値を示している。本実験の測定項目は、载荷荷重、スパン中央点変位（以後、変位）および AFRP 補強材各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 梁のひび割れや AFRP 補強材の剥離および破断状況を高速度カメラを用いて撮影している。

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図－3 には、全試験体の各種時刻歴応答波形を示している。図－3(a) より、重錘衝撃力波形は、試験体の種類や

表－2 AFRP 補強材の力学的特性値（公称値）

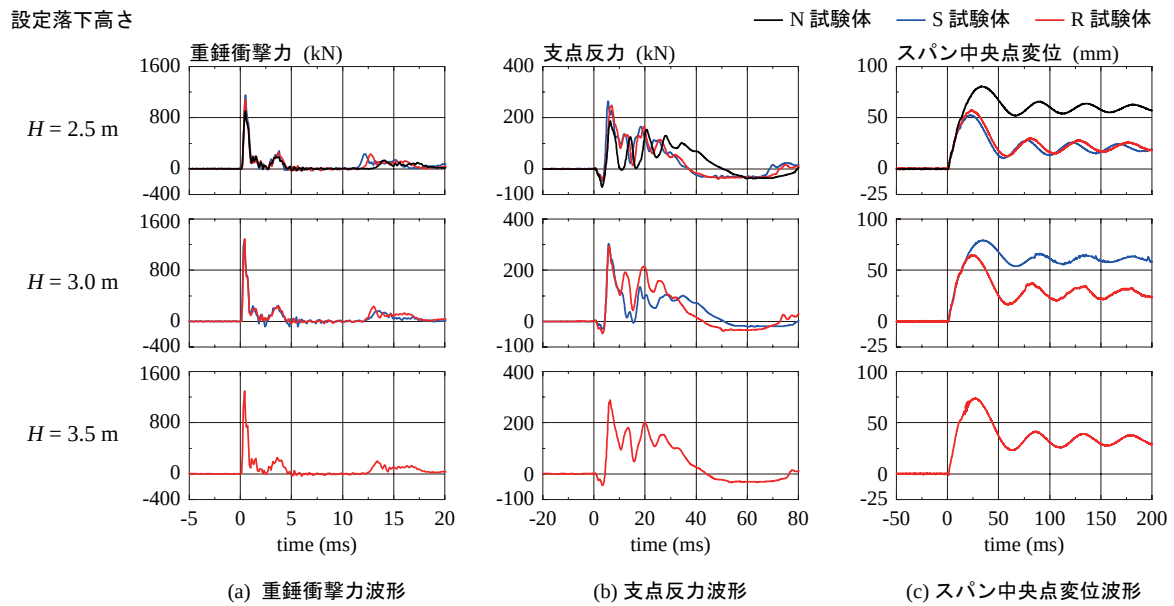
AFRP 補強材の種類	目付量 (g/m ²)	直径 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
シート	830	-	2.06	118	1.75
ロッド	-	11×2 本	1.18	68.6	1.72

設定落下高さ H によらず振幅が大きく継続時間が 1 ms 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。最大振幅は、補強試験体の場合が無補強の場合よりも大きい。

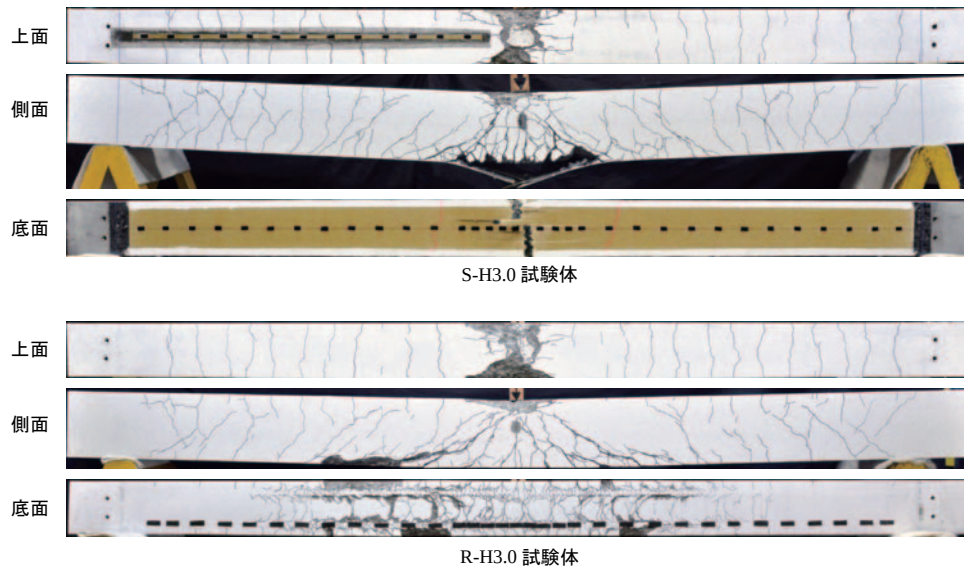
図－3(b) より、支点反力波形は、継続時間が 40～50 ms 程度の主波動に継続時間の短い高周波成分が合成された性状を示していることが分かる。設定落下高さ $H = 2.5$ m においては、S/R 試験体の主波動継続時間が N 試験体の場合よりも短い。これは、補強により RC 梁の曲げ剛性が向上したことによるものである。また、 $H = 3.0$ m においては、S 試験体の主波動継続時間が R 試験体の場合に比較して長い。これは、後述するように S 試験体の場合には、経過時間 $t = 10$ ms 程度においてシートが破断し、曲げ剛性が急激に低下したことによるものである。

設定落下高さ $H = 3.0, 3.5$ m において R 試験体の結果を S 試験体の場合と比較すると、両者ほぼ同一なことから $H = 3.5$ m の場合においても RC 梁の曲げ剛性は低下していないことが分かる。

図－3(c) より、载荷点変位は、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。設定落下高さ $H = 2.5$ m の場合には、S/R 試験体の最大変位が N 試験体よりも小さいことから、曲げ補強によって変形量の抑制効果が発揮されていることが分かる。 $H = 3.0$ m の場合には、シート破



図－3 重錘衝撃力、支点反力およびスパン中央点変位に関する時刻歴応答波形



写真－1 S/R-H3.0 試験体のひび割れ分布性状

断を生じた S 試験体の変位は、ロッド下面埋設補強である R 試験体の場合よりも大きいことが分かる。また、R 試験体の設定落下高さ $H = 3.5 \text{ m}$ の場合には、 $H = 3.0 \text{ m}$ の場合に比べて最大変位が大きく周期も多少長いことが分かる。しかしながら、増加傾向は顕著ではなく、 $H = 3.0 \text{ m}$ とほぼ同様な状態が保持されているものと推察される。

以上のことから、AFRP ロッドで下面埋設補強を施すことで、補強量が同程度のシート接着補強する場合より大きな入力エネルギーに対して、破断せずに曲げ剛性を保持することが明らかになった。

3.2 ひび割れ分布性状

写真－1 には、設定落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ の場合における S/R 試験体の実験終了後における梁上面、側面および底面のひび割れ分布を示している。写真－1 より、側面に着目すると両試験体とも梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、載荷点近傍から梁下縁に向かって進展する斜めひび割れが発生していることが分かる。また、R 試

験体の場合には、S 試験体に比べて斜めひび割れの発生領域が広い。次に、底面に着目すると、R 試験体の場合にはロッドに沿ったひび割れが広く分布しており、ロッド間にも亀甲状のひび割れが発生している。また、斜めひび割れの先端部周辺で下縁隅角部かぶりコンクリートが剥落している。

3.3 AFRP 補強材のひずみおよび側面ひび割れ分布の各時刻における推移状況

図－4 および 図－5 には、それぞれ、S/R-H3.0 試験体の AFRP 補強材のひずみ分布および側面ひび割れ分布の各時刻における推移状況を示している。図より、両試験体とも経過時間 $t = 0.5$ および 1.0 ms で、斜めひび割れが載荷点部から梁下縁まで進展するとともに、載荷点近傍において 0.5% 程度の引張りひずみが発生し、その両支点側では圧縮ひずみが発生している。これは、重錘衝突による応力波が梁全体に伝播する過程において、見かけ上の固定端が両支点側に推移する状況を示している。

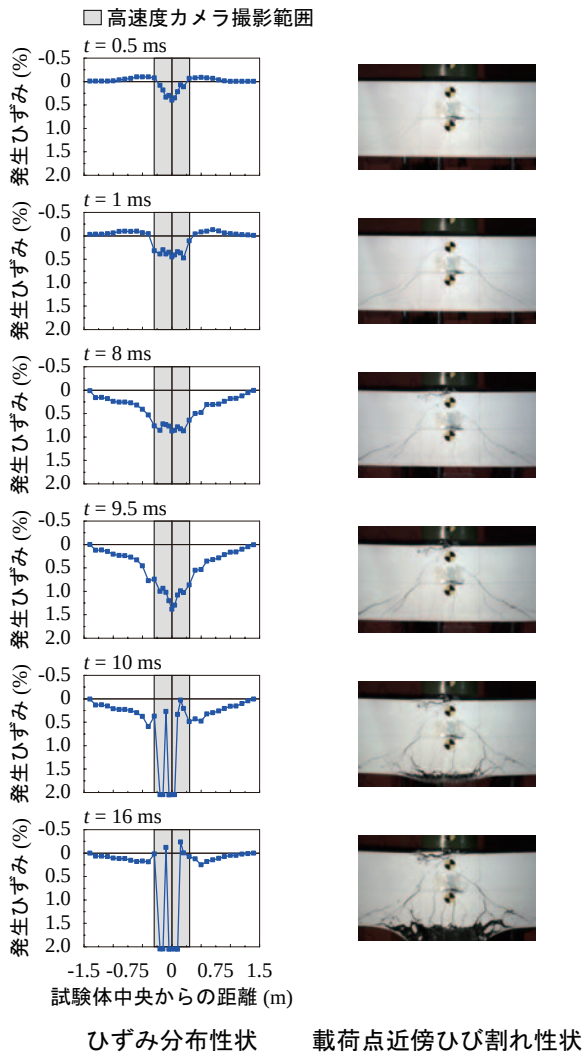


図-4 S-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ性状

$t = 8.0$ ms では、両試験体とも斜めひび割れが開口した後、斜めひび割れ内部に微細なひび割れが発生している。また、ひずみ分布を見ると、载荷点近傍において大きなひずみが発生しており、その範囲は上記の斜めひび割れ形成範囲に概ね対応している。このことから、斜めひび割れ形成部の AFRP シートおよびロッドにおいて大きなひずみが生じる傾向にあることが分かる。その後、 $t = 9.5$ ms 以降において、両試験体とも斜めひび割れ内部のひび割れが開口して、スパン中央部のひずみが急激に大きくなっている。

最終的には、 $t = 10$ ms で S 試験体の場合には 载荷点近傍においてシートの破断ひずみを超過するひずみが発生し、 $t = 16$ ms でそれ以外の部分ではひずみが低下していることが分かる。これは、载荷点近傍でシートが破断し、その周辺ではシートに作用する引張応力が開放されたことによるものである。これに対して、R 試験体の場合には、斜めひび割れ発生領域に対応して大きなひずみの発生領域も両支点側に拡大していることが分かる。また、梁中央部では、広範囲に渡って AFRP ロッドの破断ひずみを超過するひずみが多く測定点で発生している。実験終了後において、ロッドの損傷状況を目視確認したとこ

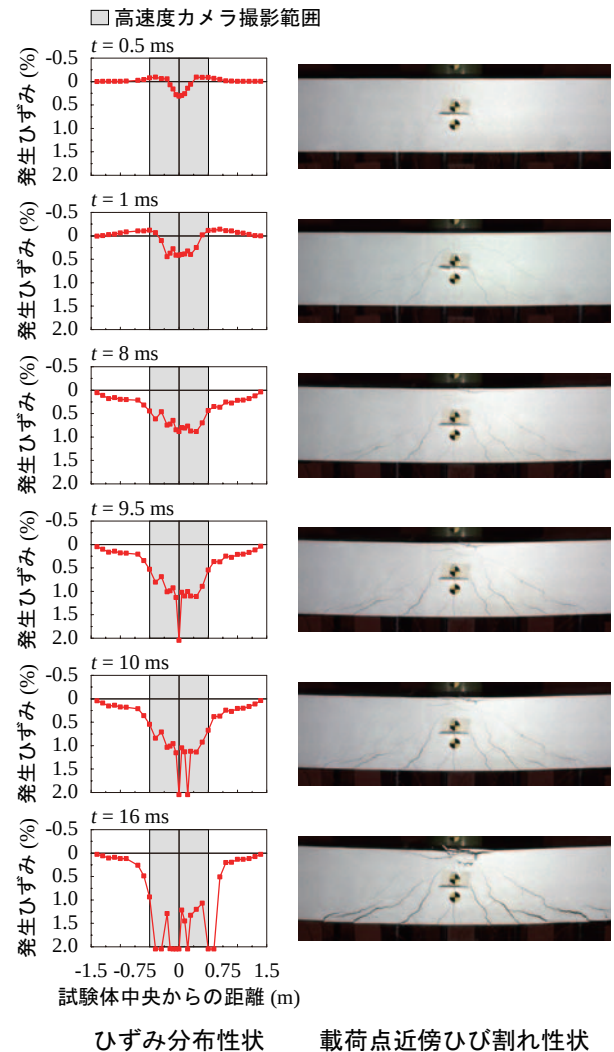


図-5 R-H3.0 試験体のひずみ分布とひび割れ分布

ろ、ロッドの破断や損傷は全く認められなかった。ただし、ひずみゲージの破断が認められた。これらの超過ひずみは、ロッド埋設・接着に用いたパテ状接着樹脂の割れによって発生したものと推察される。

4. まとめ

本研究では、AFRP 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 AFRP シート接着工法や AFRP 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。なお、AFRP シートおよび AFRP ロッドには、引張耐力および引張軸剛性が同程度の材料を用いている。本実験により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) AFRP ロッド下面埋設工法を適用することにより、衝撃荷重を受ける RC 梁の応答変位を抑制可能である。
- 2) AFRP ロッド下面埋設工法は、AFRP シート接着工法よりも、補強材料の破断抵抗性が高いため、耐衝撃性向上効果に優れている。この要因として、ロッド下面埋設の場合には梁に形成される斜めひび割れの発生範囲が広く、衝撃荷重に対しより広範囲で抵抗することが挙げられる。