

## FRP ロッド下面埋設補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強材料の影響

Effect of strengthening materials on impact resistance of NSM RC beams

岸徳光\*, 小室雅人\*\*, 三上浩\*\*, 瓦井智貴\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Masato Komuro, Hiroshi Mikami, Tomoki Kawarai

\*工博, 室蘭工業大学大学院特任教授, もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, もの創造系領域 (〒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)

\*\*\*\*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)

Key Words: FRP rod, RC beam, impact loading, failure behavior

キーワード: FRP ロッド, RC 梁, 衝撃荷重, 破壊挙動

## 1. はじめに

近年, コンクリート部材に関する耐震補強工法において, コンクリート増し厚工法や鋼板巻き付け工法と共に, 施工の容易さから新素材繊維 (FRP) 材料を用いた補強工法も定着しつつあり, 補強設計法も確立されている。

一方, 既設耐衝撃用途コンクリート構造物においても, 荷重強度の増大に伴う耐衝撃性向上に関する要請がある。この場合には, 2つの手法がある。一つは緩衝材の性能を向上させる手法であり, もう一方は構造物自体の耐衝撃性を向上させるものである。但し, 緩衝材あるいは装置を設置できない場合には, 直接的に構造物の耐衝撃性を向上させなければならない。

このような観点から, 本論文では既設耐衝撃用途コンクリート構造物の耐衝撃性を容易に向上させることを目的に, FRP 材料とりわけロッドをかぶりコンクリート表面に埋設させる下面埋設 (Near-Surface Mounted, NSM) 工法に着目し, 材料特性による耐衝撃性向上効果への影響について検討を行うこととした。本研究で対象とした材料は, アラミド繊維 (AFRP) とカーボン繊維 (CFRP) である。また, その性能検討は, RC 梁を対象に重錘落下衝撃荷重実験を実施することにより行うこととした。

## 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, AFRP / 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全 15 体である。表中の試験体のうち, 第一項目は FRP ロッドの材料

(N: 無補強, AR: AFRP ロッド, CR: CFRP ロッド) 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落下高さ (m) である。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, 表中の軸剛性は  $E_r A_r$  ( $E_r$ : FRP ロッドの公称値の弾性係数,  $A_r$ : 全断面積) を意味している。表より, 両者は概ね同程度の軸剛性を有しているが, CFRP ロッドが AFRP ロッドよりも若干大きいことが分かる。

各補強試験体に関する重錘落下衝撃実験の実験ケースは表に示されている通りであるが, 無補強試験体と FRP ロッド下面埋設補強を施した RC 梁の耐衝撃性に関する比較は, 落下高さ  $H = 2.5$  m の場合 (AR / CR-I-H2.5) で行うこととした。

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。

FRP ロッドの補強量に関しては, 引張軸剛性を過去に実施した AFRP シート下面接着補強時 (目付量が  $830 \text{ g/m}^2$  のシートを 1 層接着) と同程度にすることとし, AFRP ロッドと CFRP ロッド下面埋設の場合で, それぞれ直径が 11 mm, 8.5 mm のロッドを 2 本用いることとした (後述, 表-2 参照)。

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。

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 $E_r A_r$ (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	-	-	-	-	-	-
RA-S	AFRP ロッド	静的	-	13.0	35.7	406.7	101.0	315.9	剥離
AR-I-H0.5		0.50	0.52						-
AR-I-H1.0		1.00	1.08						-
AR-I-H1.5		1.50	1.58						-
AR-I-H2.0		2.00	2.19						-
AR-I-H2.5		2.50	2.52						-
AR-I-H3.0		3.00	3.24						-
AR-I-H3.5		3.50	3.62						剥離
CR-S	CFRP ロッド	静的	-	16.0	32.8	402.6	105.6	328.9	剥離
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

表－2 FRP 補強材の力学的特性値 (公称値)

種類	直径 $D$ (mm)	幅 $B$ (mm)	本数 (本)	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_r$ (GPa)	引張耐力 $f_{ru}$ (kN)	破断ひずみ $\epsilon_{ru}$ (%)
AFRP ロッド	11.0	-	2	-	68.6	224.0	1.72
CFRP ロッド	8.5	-	2	-	141.0	227.9	1.50
AFRP シート	-	200	-	830	118.0	235.7	1.75
CFRP シート	-	200	-	600	245.0	264.4	1.39



写真－1 衝撃荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況

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。

表－2には、本実験で用いた AFRP / CFRP ロッド

の静的力学特性値を一覧にして示している。なお、表には参考のために目付量が 830 g/m<sup>2</sup> の AFRP シート及び 600 g/m<sup>2</sup> の CFRP シートの特性値も示している。表より、ロッドの弾性係数  $E_r$  は共にシートの 60 % 程度であることが分かる。これは、ロッドの場合には全断面に占める含浸樹脂量がシートに比べて多く、繊維含有率がシートに対して単位面積当たり 60 % 程度であることによるものと推察される。ロッド間で弾性係数を比較すると、CFRP ロッドの場合が AFRP ロッドの場合に比して 2 倍以上大きいことが分かる。ただし、FRP ロッドの全引張耐力は、両者類似している。

### 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。静荷重載荷実験は、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



写真-2 静荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況

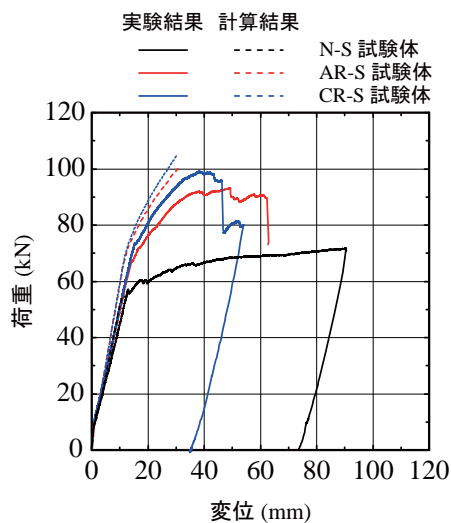


図-1 荷重-変位関係の比較

を用いて実施している。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、本研究では梁が荷重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、FRP ロッドを下面埋設して曲げ補強する場合には、いずれの場合においても最大荷重に到達した後ロッドが剥離して終局状態に至るまで載荷している。

図-1には、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<sup>1)</sup>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 FRP 補強材との完全付着を仮定して断面分割法により算出している。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た。

図より、N-S 試験体および AR / CR-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, AR, CR 試験体に対して、それぞれ 57.0, 66.8, 73.5 kN であり、最大荷重は 66.7, 93.1, 99.1 kN であった。なお、N-S 試験体の場合において、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、CR-S 試験体が 40 mm 程度の変位時点で最大荷重を示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、FRP 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 17~29 % 程度、最大荷重は 40~49 % 程度増加しており、CFRP ロッド埋設の場合が AFRP ロッド埋設の場合より増加率が大きいことが分かる。これは、CFRP ロッドの引張軸剛性が AFRP ロッドのそれよりも若干大きいことに起因しているものと推察される。

実験結果の荷重-変位分布を見ると、いずれのロッド埋設補強試験体も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。その後も主鉄筋降伏前の剛性勾配より小さい勾配で単調に増加し、最大値に到達後上縁圧壊とロッドの剥離によって除荷状態に至っている。

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、AR / CR 試験体の場合には、ひび割れ発生後から主鉄筋降伏荷重近傍までにおいて、実験結果の載荷荷重は計算結果よりも若干過小な値を示している。その後も、実験結果の載荷荷重は計算結果よりも過小な値を取り、かつ計算終局点(たわみが 30 mm 程度)よりも大きく変形(たわみが 40 mm)して最大荷重に到達後、ロッド剥離により除荷状態に至っている。

実験結果の荷重-変位曲線が計算結果のそれを下回ることは、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、ロッドが 2 本配置されているだけであるため有効幅の考え方と同様にロッドから離れた部分ではロッドの補強効果が低下し、荷重の増大と共に梁幅方向に一樣に挙動しないことによるものと推察される。

いずれの補強試験体においても、載荷荷重が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、ロッドとコンクリート間の付着は少なくとも計算終局時近傍まではある程度確保されているものと推察される。

しかしながら、補強試験体の計算結果に対する載荷荷重の減少の程度を見ると、主鉄筋降伏後には AFRP ロッド下面埋設の場合が CFRP ロッド下面埋設の場合よりも大きく、計算結果との差が 10 kN 程度に達することが分かる。これより、AFRP ロッド下面埋設の場合には、CFRP ロッド下面埋設の場合に比して多少剥離の進行が早いことが推察される。

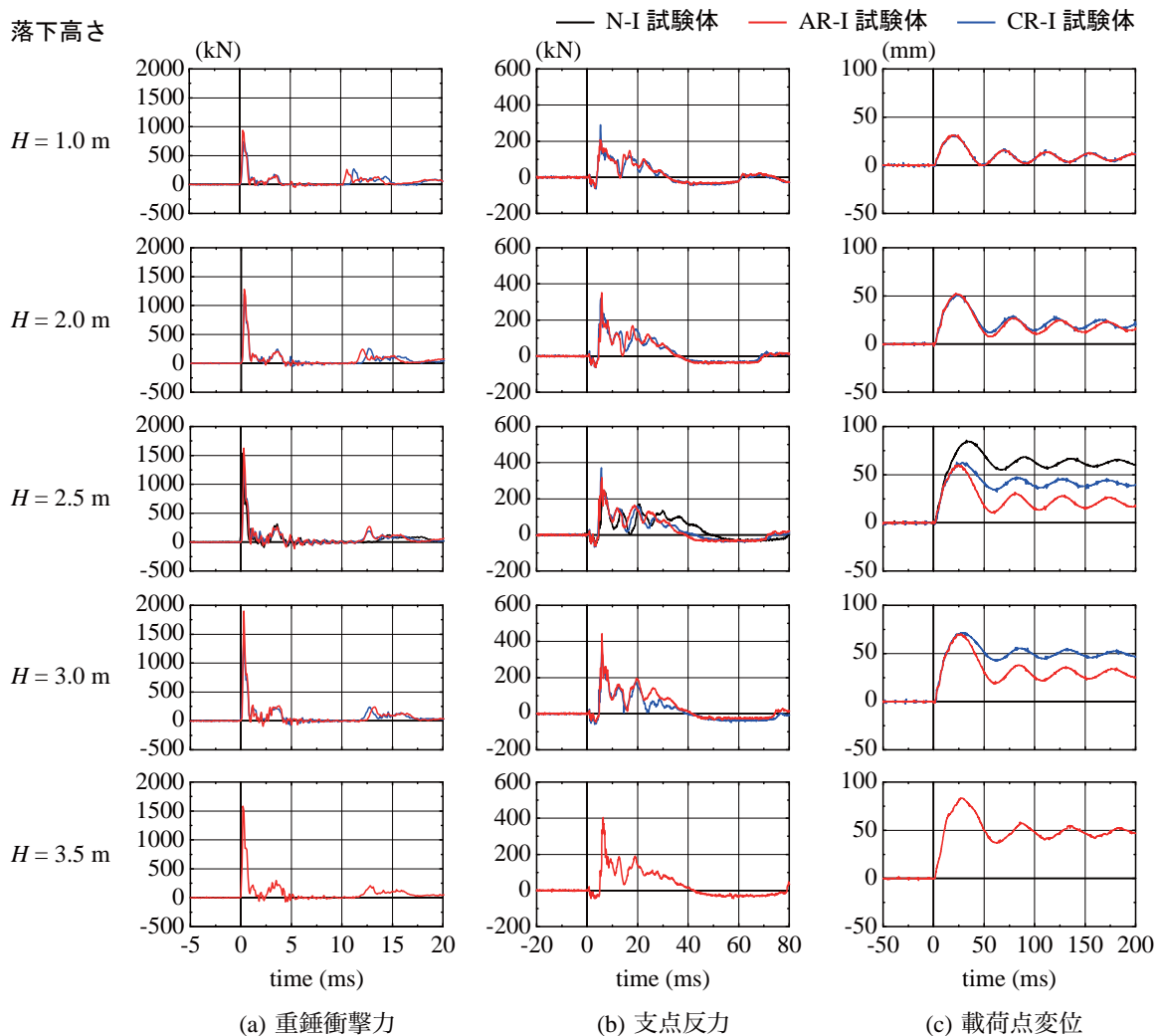


図-2 重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位に関する時刻歴応答波形

### 3.2 衝撃荷重載荷実験

#### (1) 各種時刻歴応答波形

図-2には、設定落下高さが  $H = 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5\text{ m}$  の場合における試験体の重錘衝撃力波形、支点反力波形、载荷点変位波形を比較して示している。

図-2 (a)において、重錘衝撃力波形は衝撃初期から 20 ms 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  $H$  にかかわらず、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。

設定落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  の場合における 3 試験体の波形分布を比較すると、12 ms 前後までは 3 試験体とも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、いずれの梁もコンクリートの圧縮強度が同程度であることより、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特性に依存していることを暗示している。

また、設定落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  の場合には、CR 試験体がロッド破断によって終局に至っているが、重錘

衝撃力波形ではその影響が現れず、他の試験体と類似な波形を示していることより、衝撃初期には未だロッド破断に至っていないことが窺われる。

図-2 (b)において、支点反力波形は衝撃初期から 80 ms 間の変動状況を示しているが、継続時間が 30 ~ 50 ms 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。これは、入力エネルギーの増加に対応してひび割れ等による損傷も大きくなり、かつ梁の曲げ剛性も低下することによるものと推察される。

設定落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  の場合における 3 試験体の波形分布を比較すると、補強試験体の場合には CR 試験体でロッドが破断しているにもかかわらず両者ほぼ類似の波形性状を示しているが、無補強試験体の場合には補強試験体の場合より波動継続時間が 10 ms 程度長いことが分かる。これは、補強を施していないことによりひび割れの発生によって損傷が進み、曲げ剛性が著しく低下したことによるものと推察される。ま



(a) 左側スパン底面の状況



(b) CFRP ロッド破断部の状況

図-3 CFRP ロッドの破断状況 (CR-I-H3.0 試験体)

た、CR 試験体の場合にはロッド破断に至っているが、この時点では支点反力波形に対する影響の小さいことが分かる。

設定落下高さ  $H = 3.0\text{ m}$  において、CR 試験体はロッド破断によって終局に至っているが、AR 試験体とは衝撃初期からの経過時間が  $25 \sim 40\text{ ms}$  において振幅が小さく示されている以外は、両者類似の波形分布を示している。継続時間は設定落下高さが  $H = 2.5\text{ m}$  時と類似している。

設定落下高さ  $H = 3.5\text{ m}$  の場合には、AR 試験体のみの波形であるが、最大振幅が  $H = 3.0\text{ m}$  の場合より若干小さい以外は波形継続時間も含めて類似の性状を示していることが分かる。

図-2(c)において、載荷点変位波形は、衝撃初期から  $200\text{ ms}$  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も長くなっていることが分かる。

設定落下高さ  $H = 1.0, 2.0\text{ m}$  の場合において、ロッド下面埋設補強の場合における両波形分布を比較すると、ロッドの軸剛性が若干異なるものの残留変位も含め類似の波形分布を示していることが分かる。これより、軸剛性が類似の条件下では、入力エネルギーが小さく損傷の程度も小さい場合には、ロッド材料に拘わらず類似の変位波形性状を示すことが明らかになった。

$H = 2.5\text{ m}$  において、CR 試験体の場合にはロッドが破断しているにも拘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共に小さく、未だ CFRP ロッド下面埋設による補強効果が現れていることが分かる。その程度は、最大変位が剥離や破断に至っていない AR 試験体と同程度となっている。ただし、残留変位は AR 試験体よりも大きい。

$H = 3.0\text{ m}$  において、CR 試験体の場合には  $H = 2.5\text{ m}$  と同様にロッドが破断して終局に至っているが、最

大変位はロッドが未だ剥離や破断に至っていない AR 試験体の場合と同程度の値を示し、CFRP ロッド下面埋設による補強効果が現れていることが分かる。ただし、AR 試験体に比して除荷後の減衰自由振動の固有振動周期は若干長く、残留変位は大きい。これより、 $H = 2.5, 3.0\text{ m}$  の場合には、共に CFRP ロッドは最大変位到達後に破断の傾向を示しているものと推察される。

$H = 3.5\text{ m}$  の場合には AR 試験体のみの波形を示しているが、 $H = 3.0\text{ m}$  の場合よりも最大変位及び残留変位が大きく示され、除荷後の減衰自由振動状態における固有振動周期も若干延びている。なお、この時点で試験体は AFRP ロッドが剥離し、終局に至っている。

以上のことから、FRP ロッド下面埋設曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性は、入力エネルギーがそれ程大きくない場合にはロッドの軸剛性が類似であることを条件に、AFRP 材と CFRP 材とで同程度であることが明らかになった。一方、入力エネルギーを増加させると、CFRP ロッドを下面埋設補強する場合には、早期にロッドが破断する傾向を示し、AFRP ロッドを用いる場合に比して耐衝撃性向上効果が低いことが明らかになった。これは、シート接着補強を施す場合には、両者同程度であることが明らかになっていることより、ロッド状に整形したことによって材料自体の脆性特性が顕在化したものと推察される。

## (2) CR 試験体におけるロッド破断の状況

図-3には、設定落下高さ  $H = 3.0\text{ m}$  における CR 試験体の CFRP ロッドの破断状況を示している。図より、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 材特有の脆性的な状態ではなく、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斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって、載荷点側のロッドが

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。

以上より、FRP 材をロッド状にして RC 梁に下面埋設補強を施す場合には、基本的に軸剛性を等価にすることにより、類似の耐衝撃向上効果が期待できる。しかしながら、入力エネルギーが大きく斜めひび割れによるピーリング作用が顕在化する場合には、ロッドを構成している繊維が解かれる可能性もあることから、高弾性で脆性的な材料は早期に破断に至る可能性があることが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究では、連続繊維 (FRP) 製ロッドを既設コンクリート構造物の引張部に下面埋設することによって耐衝撃を向上させる工法に着目し、補強材料の効果について実験的に検討を行った。本研究では、無補強試験体と共に、補強材料としてアラミド繊維 (AFRP) と炭素繊維 (CFRP) に着目し、RC 梁の下面に埋設補強を施して静荷重載荷実験と質量 300 kg の重錘を用いた重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。衝撃荷重載荷実験は、重錘落下高さを変化させた単一載荷法に基づいて実施した。なお、補強量は両者の軸剛性がほぼ等しくなるように決定している。

本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下のよう示される。

1) 衝撃荷重載荷実験と同様 3 点曲げによる静荷重載荷実験結果では、いずれの試験体もロッドの剥離により終局に至る。平面保持仮定の下に断面分割法によって得られる計算結果の荷重-変位分布と実験結果を比較すると、いずれの場合も実験結果は計算結果よりも小さく評価される。これは、FRP 材の軸剛性を 2 本のロッドに集約して配置したことにより、ロッドから離れた部分ではロッドの補

強効果が低下し、荷重の増大と共に幅方向に一樣に挙動しないことによるものと推察される。主鉄筋降伏後における計算結果との差は CFRP ロッドを下面埋設する場合は AFRP ロッドの場合より小さいことより、AFRP ロッドの場合には主鉄降伏後に剥離あるいは付着切れがより進行している可能性がある。

- 2) 衝撃荷重載荷実験結果より、AFRP ロッド下面埋設の場合には設定落下高さが  $H = 3.0$  m で斜めひび割れのピーリング作用によってロッド剥離で終局に至る。一方、CFRP ロッド下面埋設の場合には、設定落下高さが  $H = 2.5$  m で斜めひび割れ先端部でロッド破断により終局に至る。従って、AFRP ロッド下面埋設補強の場合が CFRP ロッド下面埋設の場合よりも RC 梁の耐衝撃性向上効果が大きい。
- 3) 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の波形分布は、補強の有無やロッド材料による影響は小さく、いずれも類似している。支点反力の主波動継続時間は、入力エネルギーの増加に対応して長くなる傾向を示す。変位波形に限定すると、ロッドの軸剛性が類似の場合において、入力エネルギーが小さく損傷が小さい場合には両者類似の波形性状を示す。CFRP ロッド下面埋設の場合において、ロッド破断は最大応答変位発生後に発生している。
- 4) CFRP ロッドの破断は、斜めひび割れのピーリング作用によって載荷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、梁が除荷状態で組紐状に編んで一体化されたロッドの繊維が解かれ、さらに下方に押し出されることにより、純せん断的に生じたものと推察される。従って、入力エネルギーが大きく斜めひび割れによるピーリングが顕在化する場合には、高弾性で脆性的な材料は早期に破断に至る可能性のあることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編], 2012 年制定