# AFRP ロッド下面埋設工法により曲げ補強した RC 梁の衝撃載荷実験

Impact loading tests for RC beams strengthened with NSM-AFRP rods

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 船木隆史 (Takashi Funaki) 室蘭工業大学大学院 正 員 小室雅人 (Masato Komuro) 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)

# 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,連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く採用される ようになってきた.

著者らは、耐衝撃性に優れるアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートに着目してその適用性について検討を行っている<sup>1)</sup>. その結果、AFRPシート曲げ補強により RC 梁の耐衝撃性 が向上することを明らかにしている<sup>2)</sup>.しかしながら、入 力エネルギーが大きい場合には、載荷点直下近傍部のひび 割れによりシートに応力集中が発生して、シート破断に至 ることが明らかになっている.

これに対して、シートを全軸剛性が等しい数本のロッド に置き換えて下面埋設することにより、ロッドはその埋設 近傍部のひび割れの開口に対して相対的に剛性も大きく十 分抵抗できるため、ロッド破断を抑制しかつ梁の耐衝撃性 も向上可能であるとして、著者らは FRP ロッド下面埋設工 法の適用も提案している<sup>3)</sup>.また、重錘落下衝撃実験を実 施して、その概念的な妥当性も確認している.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 現状である.

このような背景から,本研究ではAFRPロッドを用いて 曲げ補強した RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し, AFRPロッド下面埋設 RC 梁の耐衝撃特性に関する検討を 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、AFRPロッド埋設曲げ補強の有無や、落下高さ を変化させた全8体である.表中の試験体のうち、第一項 目はアラミド繊維を用いた補強の有無(N:無補強、RA: ロッド下面埋設工法)を示し、第二項目の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.表には、本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧



図-1 試験体の形状寸法, 配筋および補強状況

縮強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示している.

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、200×250×3,000 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。AFRP ロッドの埋設工程は、以下のとおりである。すなわち、1)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)エポキシ系パテ状接着樹脂を溝切部に塗布して埋設・接着する、である。なお、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 AFRP ロッドの力学的特性値一覧を示している。

AFRP ロッドの補強量に関しては,引張軸剛性や引張耐 力が目付量が 830 g/m<sup>2</sup> の AFRP シートを1 層接着した場合

試験	設定重錘	実測重錘	補強材の	コンクリート	主鉄筋	計算	計算
体名	落下高さ	落下高さ	引張剛性	圧縮強度	降伏強度	曲げ耐力	せん断耐力
	$H(\mathbf{m})$	$H'(\mathbf{m})$	EA (MN)	$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$P_u$ (kN)	$V_u$ (kN)
N-H2.5	2.5	-	-	32.4	381.7	55.0	329.0
RA-H0.5	0.50	0.52		35.7	406.7	101.0	315.9
RA-H1.0	1.00	1.08		35.4	381.7	98.6	331.6
RA-H1.5	1.50	1.58	13.0	35.7	406.7	101.0	315.9
RA-H2.0	2.00	2.19	15.0				
RA-H2.5	2.50	2.52					
RA-H3.0	3.00	3.24		35.4	381.7	98.6	331.6
RA-H3.5	3.50	3.62					

表-1 試験体一覧



図-2 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

表-2 AFRP ロッドの力学的特性値 (公称値)

種類	直径	弾性係数	引張耐力	破断ひずみ
	D	$E_r$	fru	$\varepsilon_{ru}$
	(mm)	(GPa)	(kN)	(%)
ロッド	11	68.6	112.0	1.72

と同程度となるように直径 11 mm のロッドを 2 本用いている.

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 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 AFRP 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.

#### 3. 実験結果

### 3.1 各種時刻歴応答波形

図-2には,設定重錘落下高さが*H*=1.0,2.0,2.5,3.0, 3.5 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,載荷点変位波形を比較して示している.

図-2(a)より,重錘衝撃力波形は設定落下高さ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.

図-2(b)より,支点反力波形は継続時間が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とが分かる.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が 進行し,梁の曲げ剛性も低下することによるものと推察さ れる.

N-H2.5 試験体と AFRP ロッドで補強した試験体の波形 分布を比較すると、ロッド補強の場合には無補強の場合よ り波動継続時間が 10 ms 程度短いことが分かる.これは、 AFRP ロッドを用いて曲げ補強したことによって、梁の曲 げ剛性が向上したことによるものと推測される。

図-2(c)より,載荷点変位波形は,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.また、入力エネルギーの 増加と共に残留変位も増加していることが分かる.

N-H2.5 試験体と AFRP ロッドで補強した試験体の波形分 布を比較すると,無補強の場合には,ロッド補強よりも最 大変位と残留変位が大きく示されており,減衰自由振動状 態における固有振動周期も延びていることが分かる.これ より, AFRP ロッドで曲げ補強を施すことにより,効率的 に最大変位及び残留変位を抑制可能であることが分かる.

## 3.2 実験終了後におけるひび割れ分布

図-3には実験終了後の無補強試験体および補強試験体 における梁側面および底面のひび割れ分布を示している. まず,側面のひび割れ分布に着目すると,補強の有無にか かわらずいずれの梁においても,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,かつ載荷点近傍 下縁部には斜めひび割れが発生していることが分かる.

また、底面のひび割れ分布をみると、無補強試験体は平 面保持に基づいた幅方向に一様なひび割れ分布をしている のに対して、補強試験体の場合にはロッド埋設近傍部のひ び割れが周辺部のそれよりも支点側に進展しており、2本 のロッド間のひび割れはスパンセンターを中心にU字状に 分布していることが分かる.さらに、U字状のひび割れの 発生範囲は落下高さが大きくなると広範囲に分布する傾向 があることがわかる.これは、梁に生ずる主曲げによって AFRPロッドと周辺のコンクリートの間には付着応力が生 じるが、ロッド間中央部や側面近傍部では作用する付着応 力の影響が減少するため、ひび割れはU字状に分布するも のと推察される.

**写真-1**には、実験終了後における(a) RA-H3.0 試験体と(b) RA-H3.5 試験体のロッドの剥離の状況を示している.

**写真-1**(a)より,載荷点近傍部より斜めひび割れが発 生していることがわかる.また,その先端部は大きく開口 しているのでロッドを下方に押し出すピーリング作用を示 していることが分かる.

写真-1 (b) より, AFRP ロッドはかぶりコンクリート を伴って剥離していることがわかる. これは, ひび割れ先 端部がロッドを押し下げるピーリング作用によって, ロッ ドに付着したかぶりコンクリートも下方に押し出されるこ とによるものと推察される.

このことは、梁はロッド埋設近傍部を中心に補強強化されることになるため、梁下縁側面等周辺コンクリートの損傷が進行するものの致命的な損傷には至らず、逆にコンクリート片の剥落によるエネルギー吸収効果も期待でき、結果として耐衝撃性が向上するものと推察される.



(a) 梁側面のひび割れ分布性状

(b) 梁裏面のひび割れ分布性状

図-3 実験終了後のひび割れ分布性状



(b) RA-H3.5 試験体

写真-1 実験終了後のロッドの剥離状況

## 3.3 AFRP ロッドのひずみの時間的な推移状況

図-4 には、補強試験体に関する AFRP ロッドの軸方向 ひずみ分布の時間的な推移状況を示している.

図より,経過時間 t = 0.5 ms においては,AFRP ロッド のひずみ値はいずれの場合も載荷点中央部で 0.25 % 以上 の引張ひずみが発生している.また,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.圧縮ひずみの発生 は,重錘衝突によって曲げ波が梁全体に伝播する過程にお いて,前述の見かけ上の固定端が形成され両支点側に推移 していることを裏付けている.

t = 1.0 ms では,正曲げ部分と負曲げ部分が共に支点の 方向に向かって進展している状況が示されている.また, 載荷点部のひずみ分布は,丸みを帯びた分布となっており, 等分布荷重載荷時の分布性状に類似している.最大ひずみ は,0.5%程度まで増加している.

t=5.0 msでは、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. 各試験体の最大ひずみが 0.2 ~ 0.5 % 程度発生しているこ とより,主鉄筋も降伏しているものと推察される.しかし ながら,ひずみ分布は全体的になめらかな分布性状を示し ていることから,この時点では塑性化が大きく進展してい ないものと判断される.

t = 10 ms 時点では,各試験体の最大ひずみが 0.5 ~ 1.0 % 程度発生し,中央部でひずみ分布勾配が急変していること から,主鉄筋の塑性化が進行し梁の変形曲率が大きくなっ ていることが推察される.

各ケースにおける最大変位時点では、梁中央部でほぼ一様なひずみ分布を示していることから、梁中央部はほぼ一様な等曲げの変形曲率を呈しており、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.なお、各試験体の最大ひずみが1.0~1.5%程度であることから、ロッド破断まで0.3~0.5%程度の余裕があると推察される.

各ケースにおける残留ひずみは,最大で0.5%程度であり最大変位発生時と比べると最大で1.0%程度復元していることがわかる.

以上より, AFRP ロッド補強を行い曲げ補強することに より, ロッド配置部近傍ではひび割れの開口やピーリング 作用に対して十分に抵抗することができる.また,過大な 入力エネルギーに対しても, ロッドの破断抵抗性は高いも のと推察される.

#### 3.4 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図-5には、無補強試験体および補強試験体に関する実験結果の(a)最大載荷点変位および(b)残留変位と入力 エネルギーとの関係を示している.図-5(a)より、最大 変位は最大重錘衝撃力や最大支点反力よりもばらつきが少 なく、線形な分布性状を示していることが分かる.また、 AFRP ロッドが剥離した設定落下高さ H = 3.5 m 落下時に おける値も線形分布上に推移していることより、剥離は最 大応答時以降に生じていることが窺われる.

## 平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号



図-4 RA 試験体における補強材のひずみ分布

図-5(b)より、ロッドが剥離に至った設定落下高さH= 3.5 m 落下時における値を除くと、全ての値は、ほぼ原点 からの線形分布を示すことが分かる.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が可能性であるこものと推察 される.

また、補強試験体の残留変位は、剥離したH = 3.5 mの場合を除いた全ての補強試験体で最大変位の半分以下の値を示していることがわかる.これより、AFRPロッド補強することで復元力が大きくなり残留変位の抑制効果が発揮されるということが明らかになった



図-5 入力エネルギーと最大/残留変位の関係

# 4. まとめ

本研究では、AFRP ロッド下面埋設工法で曲げ補強した RC 梁に対して、単一載荷による重錘落下衝撃実験を行った.本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下の通りである.

- 重錘衝撃力波形より,各種応答波形の波形分布は,補 強の有無よる影響は小さく,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。
- ロッド下面埋設補強の場合には、軸剛性を集中させていることより、ロッドが配置されていない下縁側面かぶり部のひび割れや剥落が発生するものの、ロッド配置部近傍ではひび割れの開口やピーリング作用に対しても十分に抵抗することができ、耐衝撃性が向上するものと判断される。
- 3) AFRP ロッドで補強することにより最大変位を抑制することが可能である。また、ロッドが剥離しない場合は復元力が大きく、残留変位および残留ひずみも抑制可能であることが明らかになった。

#### 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

- 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, pp.721-726, 2013.7
- 三上浩,今野久志,栗橋祐介,岸徳光:AFRPシート 曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響、コンクリート工学年次論文集,Vol.36, pp.523-528, 2014.7
- 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