# AFRP シート接着による曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃性向上効果

Impact resistant capacity of flexural-failure type RC beams reinforced with AFRP sheet

○ 学生会員	中野	雄哉	(Yuya Nakano)
正会員	今野	久志	(hisashi konno)
正会員	栗橋	祐介	(Yusuke Kurihashi)
フェロー	三上	浩	(Hiroshi Mikami)
フェロー	岸	徳光	(Norimitsu Kishi)
	<ul> <li>学生会員</li> <li>正会員</li> <li>アェロー</li> <li>フェロー</li> </ul>	<ul> <li>○学生会員 中野</li> <li>正会員 今野</li> <li>正会員 栗橋</li> <li>フェロー 三上</li> <li>フェロー 岸</li> </ul>	<ul> <li>学生会員 中野 雄哉</li> <li>正会員 今野 久志</li> <li>正会員 栗橋 祐介</li> <li>フェロー 三上 浩</li> <li>フェロー 岸 徳光</li> </ul>

## 1. はじめに

近年,劣化した既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の補 修・補強工法として連続繊維シート(FRPシート)接着工 法が用いられている.また,FRPシートをRC部材の引 張作用面に接着して曲げ補強する場合は,FRPシートと コンクリート界面の付着性能が補強効果に大きな影響を 及ぼす.そのため,諸研究機関ではFRPシートとコンク リートの付着性状やFRPシートをRC梁の下面に接着し て曲げ補強する場合の補強効果等に関する研究が行われ ている.特に著者らは,FRPシート曲げ補強RC梁に関す るシートの剥離予測式を提案している<sup>1)</sup>.一方,FRPシー ト曲げ補強RC梁の耐衝撃性については,研究事例が極 めて少ないのが現状である.落石防護覆工や壁高欄など の耐衝撃用途構造物の補修・補強に耐食性に優れるFRP シートを活用することにより,この種の構造物の維持管 理を効率的に推進できるものと考えられる.

このような背景より、本研究では、FRPシート接着工 法による RC 梁の耐衝撃性向上効果の検討を目的として、 FRPシート補強の有無、重錘落下高さを変化させた RC 梁 の衝撃荷重載荷実験を行った.なお、FRPシートにはし なやかで高伸び特性を有するアラミド繊維 (AFRP)シート を用いた.

#### 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、FRPシート補強の有無や載荷方法を変化さ せた全10体である. 載荷方法は静的および衝撃荷重載荷 の2種類であり、衝撃荷重載荷の場合には、質量300kg、 先端直径200mm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より実験を行った. 重錘落下位 置はスパン中央部であり、梁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.

静載荷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作用させる形で実施した.また,衝撃荷重載荷実験では終局状態を残留変位量が純スパン長の2% に達した状態になるか,もしくはシートが 剥離・破断に達した状態と規定している.表中の試験体 名のうち,第一項目は補強の有無 (N: 無, A: 有)を示し, 第二項目は載荷方法 (S: 静的, I: 衝撃),第三項目は重錘 落下高さを示している.

図-1 には, 試験体の形状寸法および配筋状況を示している.本実験に用いた試験体の形状寸法(梁幅 × 梁高 ×

純スパン長)は 200 × 250 × 3000 mm である。軸方向鉄筋 には D19 を用い、上下端に複鉄筋配置とした。また、せ ん断補強鉄筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋した。 また、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼 板に溶接している。FRP シートには保証耐力 588 kN/m の AFRP シートを用いた。AFRP シートの接着は、RC 梁底 面の補強範囲にブラスト処理(処理深さ 1 mm 程度)を施 し、プライマーを塗布し指触乾燥状態にあることを確認 した後、含浸接着樹脂を用いて実施した。養生は 20°C 程 度の環境下で7日間以上行った。

**表**-2 には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。また、実験時におけるコンクリートの 圧縮強度は 23.4 MPa であり、鉄筋の降伏強度は、D10 で 359 MPa, D19 で 355 MPa であった。測定項目は重錘衝撃 力(静載荷の場合は載荷荷重)*P*,スパン両端の合支点反力 (以後、支点反力)*R*,載荷点変位(以後、変位)δである。 また、実験終了後には、RC 梁の側面を撮影し、ひび割れ 性状を観察している。

## 3. 実験結果

### 3.1 静載荷実験における荷重-変位関係

図-2には, RC 梁の荷重-変位関係に関する実験結果 および計算結果を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>2)</sup>に準拠して各

試験 体名	補強の 有無	載荷 方法	計算 曲げ耐力 (kN)	落下 高さ <i>H</i> (m)	入力 エネルギー <i>E</i> (kJ)
N-S	無	静的		-	-
N-I-H1.0		衝撃	50.2	1.0	2.9
N-I-H1.5				1.5	4.4
N-I-H2.0				2.0	5.9
N-I-H2.5				2.5	7.4
A-S	有	静的		-	-
A-I-H1.5		衝撃	73.7	1.5	4.4
A-I-H2.0				2.0	5.9
A-I-H2.5				2.5	7.4
A-I-H3.0				3.0	8.8

表-1 試験体のケース一覧

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m <sup>2</sup> )	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75



図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



図-2 静載荷実験における荷重-変位関係



#### 図-3 静的および衝撃荷重載荷実験終了後における RC 梁側面のひび割れ分布性状

材料の応力-ひずみ関係を設定し、コンクリートとシートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した.図より、N-S および A-S 試験体を比較すると、AFRP シート曲げ補強により無補強の場合よりも主鉄筋降伏荷重が10kN 程度向上し、その後の曲げ剛性及び最大荷重が増大していることが分かる.

また、A-S 試験体の実験結果と計算結果を比較すると計 算終局時まで実験結果は計算結果とほぼ対応しているこ とが分かる.したがって、シートとコンクリートの付着 は計算終局時まで十分確保されていると判断される.ま た実験では、計算終局変位到達後も荷重が低下せず、変 位 $\delta = 50 \text{ mm 近傍で上縁コンクリートが圧壊し、変位<math>\delta =$ 70 mm 近傍でシートが全面剥離に至った.

#### 3.2 **ひび割れ分布性状**

図-3は、静的および衝撃荷重載荷実験終了後における 各RC梁側面のひび割れ分布性状を示している.図より、 静載荷時におけるひび割れ分布性状はいずれの試験体も 曲げ変形が卓越し、ほぼ左右対称のひび割れ分布となっ ていることが分かる.なお、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いるが、A-S 試験体の場合には曲げひび割れが梁全体に分布している. また, A-S 試験体の場合には梁下縁コンクリート部に斜 めひび割れが発生している.この斜めひび割れは上縁コ ンクリート圧壊後に発生したものであり,最終的には斜 めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き剥 がすピーリング作用によりシートが剥離したことを確認 している.

衝撃荷重載荷時におけるひび割れ分布性状は,いずれ の試験体もスパン全域にわたって梁の上下縁から鉛直方 向に進展する曲げひび割れや,載荷点部近傍から梁下縁に 向かって約45°の角度で進展する斜めひび割れとなって いる.なお,上縁から曲げひび割れが進展するのは,衝 撃初期に発生する曲げの主波動が支点に向かって伝播す る場合において,支点近傍が固定端と類似の変形状態に なることによるものと推察される.

A 試験体に着目すると、静載荷時にはシートの剥離に よって終局に至っているのに対し、衝撃荷重載荷時には H=3.0 m でシートの破断によって終局に至っている.こ れは静載荷時には、上縁コンクリート圧壊後シートの部 分剥離範囲が逐次的に進展し、やがて全面剥離に至るの に対し、衝撃荷重載荷の場合には上縁コンクリート圧壊 後、載荷点近傍の曲率が急激に増大するとともにひび割



図-4 重錘衝撃力,支点反力および載荷点変位に関する応答波形

れが大きく開口したため AFRP シートが破断したためと 考えられる.

## 3.3 時刻歴応答波形

図-4には、各種時刻歴応答波形を示している. 図-4 (a)より、重錘衝撃力波形は、補強の有無に関わらず類似 の性状を示していることが分かる.すなわち、振幅が大 きく継続時間が3ms程度の第1波に振幅の小さい第2波 および第3波が後続する性状を示している.

図-4(b)より,支点反力波形は,いずれの試験体も重 錘落下高さHによらず,継続時間の長い主波動に高周波 成分が合成された波形性状を示していることが分かる. ただし,主波動継続時間は,A試験体の場合の方が短い. これは、シート補強することによって曲げ剛性が増大し たことによるものと考えられる.

図-4(c)より,載荷点変位波形は,いずれの試験体も 類似の性状を示していることが分かる.すなわち,衝撃荷 重載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起した 後,減衰自由振動状態に至り,変位が残留している.ま た変位量は,重錘落下高さHによらずA試験体の方がN 試験体よりも小さい.このことから,AFRPシート補強に より衝撃荷重作用時における最大応答変位量や残留変位 量を抑制できることが明らかになった.

## 3.4 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-5には、(a) 重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、(b) 最大支点反力  $R_{ud}$ および(c) 残留変位  $\delta_{rs}$  と入力エネルギー E との関係を示 している. 図-5(a) より、重錘衝撃力  $P_{ud}$  は N 試験体に 比べ、A 試験体の方が大きな値を示す傾向にある. これ はシート補強によって曲げ剛性が増加することに関係す るものと考えられる. また、補強の有無に関わらず入力 エネルギーの増加に伴って増大する傾向にある.

図-5(b)より,最大支点反力 R<sub>ud</sub>は,入力エネルギー に関わらず N 試験体よりも A 試験体の方が大きな値を示 している.これは、シート補強することにより RC 梁の曲 げ耐力が増大することに関係するものと考えられる.な お,最大支点反力 R<sub>ud</sub>は,補強の有無に関わらず入力エ ネルギーの増加に伴い増大する傾向にあるものの,最大 値を示した後は減少する傾向にある.これは重錘衝突に よって RC 梁が激しく損傷し耐衝撃性能が低下したこと によるものと考えられる.なお,N 試験体の最大支点反 力は入力エネルギーが 5.9 kJ で 200 kN 程度,A 試験体の 最大支点反力は入力エネルギーが 7.4 kJ で 232 kN 程度で ある.以上から、シート補強によって最大支点反力は 1.2 倍程度,最大支点反力を示す入力エネルギーも 1.2 倍程度 に増大することが分かる.

図-5(c)より,残留変位 $\delta_{rs}$ は,入力エネルギーに関わらずA試験体の場合が,N試験体の場合よりも小さな値を示していること分かる.これは、シート補強することによって,RC梁の曲げ剛性が増大し変形量が抑制されたことによるものと推察される.また,A試験体はE = 8.8 kJ で変位が大きく残留している.これは、シートが破断したことによるものである.

なお、 図-5(c) に示した直線は入力エネルギーと残留 変位との関係を近似して求めたものであり、残留変位 $\delta_{rs}$ は近似直線の勾配を $\alpha$ として式(1)で示すことができる.

$$\delta_{rs} = \alpha \cdot E \tag{1}$$

ここに, *δ<sub>rs</sub>*:残留変位 (mm), *E*:入力エネルギー (kJ) である.



図-5 各種応答値と入力エネルギーの関係



#### 3.5 既提案の性能照査型耐衝撃設計法の適用性の検討

ここでは、無補強の曲げ破壊型 RC 梁を対象として著者 らが提案した性能照査型耐衝撃設計法<sup>3)</sup> への AFRP シー ト曲げ補強 RC 梁の適用性について検討する. **図**-6には 静的曲げ耐力  $P_u$  と直線勾配  $\alpha$  の関係を文献<sup>3)</sup> から引用 して示している.また図中には本実験結果も示している. なお、既往の文献では静的曲げ耐力  $P_u$  と  $\alpha$  との関係は、 式 (2) で近似的に示すことが可能であることを明らかにし ている.

$$\alpha = \frac{420}{P_u} \tag{2}$$

図より,本実験結果は AFRP シート曲げ補強の有無に よらず式 (2) にほぼ対応していることが分かる.なお,式 (2) を式 (1) に代入して,静的曲げ耐力 *Pu* を求める式に整 理すると式 (3) が得られる.

$$P_u = 420 \cdot \frac{E}{\delta_{rs}} \tag{3}$$

従って、想定する入力エネルギー Eに対して、対象部 材のスパン中央部の残留変位  $\delta_{rs}$ を設定することにより 耐衝撃設計用の設計静的曲げ耐力  $P_u$ を算出可能であり、 このことは本実験に用いた AFRP シート曲げ補強 RC 梁 に対しても十分に適用可能であることが明らかとなった. なお、AFRP シートの付着性状は RC 梁の断面形状寸法や AFRP シート補強量に大きく影響されることより、今後は これらの項目をパラメータとした検討を行う必要がある ものと考えられる.

## 4. まとめ

本研究では、AFRPシートを用いて曲げ補強した RC 梁 の耐衝撃性を検討することを目的に、静的および衝撃荷 重載荷実験を行った.本実験の範囲内で得られた結果を まとめると以下の通りである.

- RC 梁を AFRP シートで曲げ補強することにより,耐 衝撃性を向上可能である.すなわち,最大支点反力 は 1.2 倍程度,最大支点反力を示す入力エネルギーも 1.2 倍程度に増大する.
- 2) AFRPシート曲げ補強 RC 梁の破壊性状は、静載荷時にはシート剥離であるのに対し、衝撃荷重載荷時にはシート破断で終局に至る.
- 3) 既提案の曲げ破壊型 RC 梁を対象とした性能照査型 耐衝撃設計式は, AFRPシート曲げ補強 RC 梁に対し ても適用可能である.

## 参考文献

- 岸 徳光,三上 浩,栗橋祐介:AFRPシートで曲げ 補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編],2007 年 制定
- N.Kishi and H. Mikami : Empirical formulas for deasigning reinforced concrete beams under impact loading, ACI Structural Journal, Vol.109, No.4, 2012.
- 4)岸徳光,三上浩:衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越 する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提 案,構造工学論文集,土木学会,Vol.53A,pp.1251-1260, 2007.3
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 安藤 智啓: 静載荷時 に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関す る一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4