

論文 AFRP シートを下面接着したせん断破壊型 RC 梁の耐荷性状

鈴木 健太郎^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 本研究では, AFRP シート下面接着による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として, 梁の形状寸法やシート補強の有無を変化させたせん断破壊型 RC 梁の静載荷実験を実施した。また, 既提案の AFRP シート下面接着 RC 版の耐力算定法を参考にして, RC 梁に対応した算定法の提案を試みた。その結果, AFRP シート下面接着によって下縁かぶりコンクリートがせん断に抵抗して RC 梁のせん断耐力が向上することや, その耐力増分はかぶりコンクリートの耐力寄与を考慮した提案式により安全側に評価可能であること, などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP シート, 下面接着, せん断耐力

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として, 連続繊維シート (以下, FRP シート) 接着工法が多く適用されている。通常, FRP シートを RC 部材の引張力作用面に接着すること (以後, 下面接着) により, 曲げ破壊型 RC 梁の場合には曲げ耐力が向上し¹⁾, また RC 版部材の場合には押し抜きせん断耐力が向上することが明らかになっている。

著者らは, これまで RC 版の下面に FRP シートを接着することにより, かぶりコンクリートがせん断力に抵抗することで押し抜きせん断耐力が向上することを明らかにし, その算定式を提案している²⁾。このような抵抗メカニズムは, 梁部材の場合にも同様に出現するものと考えられるものの未だ検討されていないのが現状である。

また, 現行の設計法においては, FRP シートを RC 梁の下面に接着した場合のせん断耐力向上効果は考慮されていない。そのため, FRP シートを下面接着した RC 梁のせん断耐力は過小評価されている可能性がある。従って, FRP シート下面接着による RC 梁のせん断耐力向上効果を適切に評価することにより, 実状に即したより合理的な設計が可能になるものと考えられる。

このような背景より, 本研究では, FRP シート下面接

着による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として, 梁の形状寸法やシート補強の有無を変化させたせん断破壊型 RC 梁の静載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1 には, 本研究に用いた試験体とコンクリート圧縮強度および計算耐力の一覧を示している。試験体数は, 梁の形状寸法およびシート補強の有無を変化させた全 4 体である。試験体名は, 梁のタイプ (A, B) およびシート補強の有無 (N, S) の組み合わせとしている。

なお, 計算曲げ耐力は, 後述するコンクリート, 鉄筋および FRP シートの材料特性値を用いて土木学会コンクリート標準示方書 (以下, 示方書³⁾) および連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針⁴⁾ に準拠して算出している。また, 計算せん断耐力は, 計算曲げ耐力と同様に示方書に準拠して算定したが, FRP シートの効果は考慮していない。表より, いずれの試験体においてもせん断余裕度が 1.0 以下となっていることから, FRP シートによるせん断補強効果を考慮しない場合には, 設計上せん断破壊により終局に至ることが分かる。また, FRP シート補強した A/B-S 試験体は計算曲げ耐力が増大

表-1 試験体および計算耐力の一覧

試験体名	梁タイプ	シート補強の有無	圧縮強度 (MPa)	計算曲げ耐力 P_{uc} (kN) (1)	計算せん断耐力 V_{uc} (kN) (2)	せん断余裕度 α (2)/(1)
A-N	A	なし	31.6	131	96.5	0.74
A-S		あり		195		0.49
B-N	B	なし		125	95.6	0.76
B-S		あり		188		0.51

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 修 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博 (工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博 (工) (正会員)

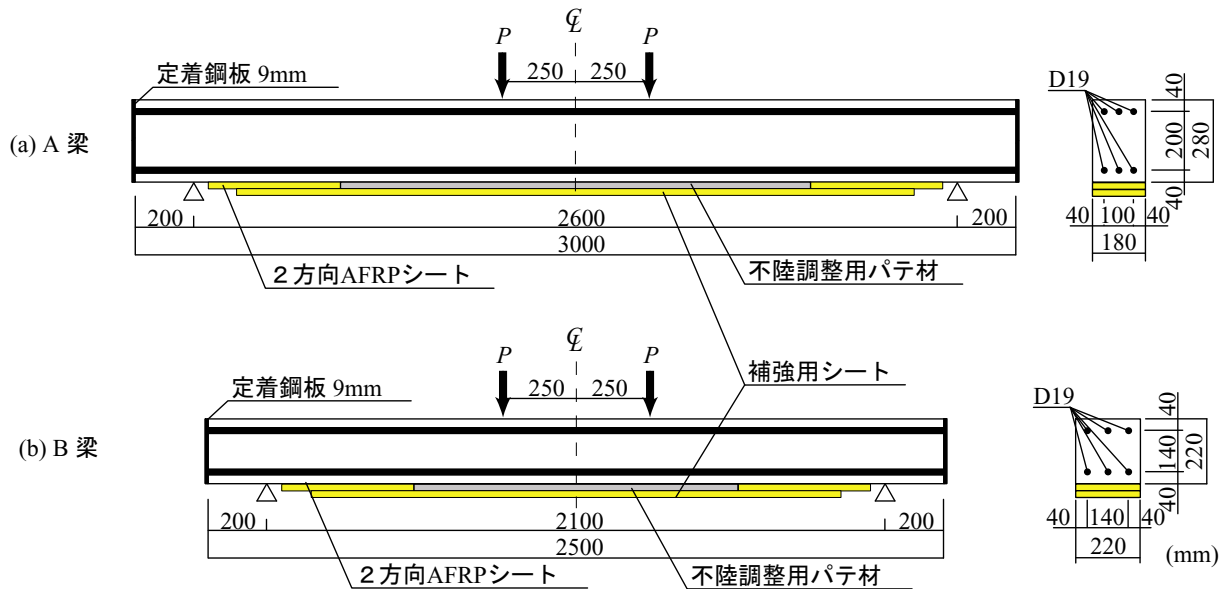


図-1 試験体の概要

表-2 AFRP シートの材料特性値 (公称値)

繊維 目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

するため、無補強の A/B-N 試験体よりもせん断余裕度が小さくなっていることがわかる。

図-1 には、試験体の概要を示している。本実験に用いた試験体は、A および B タイプの 2 種類であり、それぞれ断面寸法 (幅 × 高さ) が 180 × 280, 220 × 220 mm、純スパン長が 2.6, 2.1 m の複鉄筋 RC 梁である。両試験体ともに、上下端の軸方向鉄筋には SD345 D19 を 3 本用いており、主鉄筋比は A, B 梁でそれぞれ 1.99 および 2.17 % である。また、軸方向鉄筋の定着長を節約するため、試験体の両端面には厚さ 9 mm の定着鋼板を配置し、軸方向鉄筋を溶接固定している。なお、せん断補強筋は配置していない。

FRP シートには、保証耐力 1,176 kN/m のアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いた。なお、シート幅は梁幅と同様であり、シート層数は 1 層とした。また、本実験は AFRP シート緊張接着補強に関する実験研究の一環として実施しているため、両支点近傍には定着部補強用の 2 方向 AFRP シートを接着し、同シートの接着による段差を不陸調整用パテ (厚さ約 2 ~ 3 mm) を用いて平坦化している⁵⁾。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 31.6 MPa、鉄筋の降伏強度は 392 MPa であった。表-2 には、AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している。本実験にお



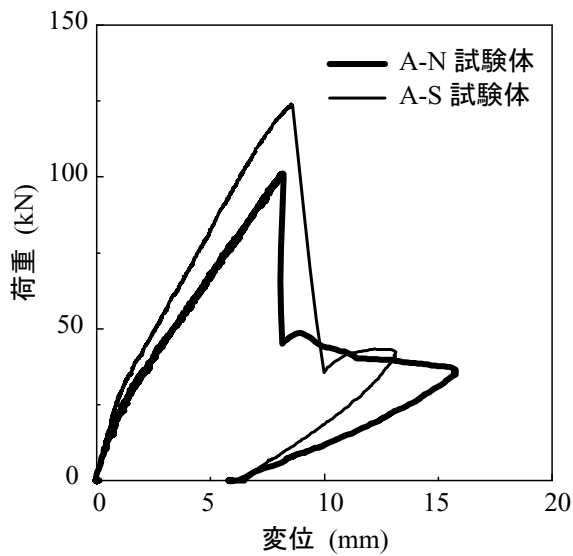
写真-1 実験状況

ける測定項目は、荷重および載荷点変位 (以後、変位) であり、それぞれ、静荷重測定用ロードセルおよび非接触式レーザ変位計により測定している。なお、これらのセンサーからの出力データは、デジタルメモリに一括収録している。実験終了後には、各試験体側面のひび割れ状況を撮影し観察している。写真-1 には、実験状況を示している。

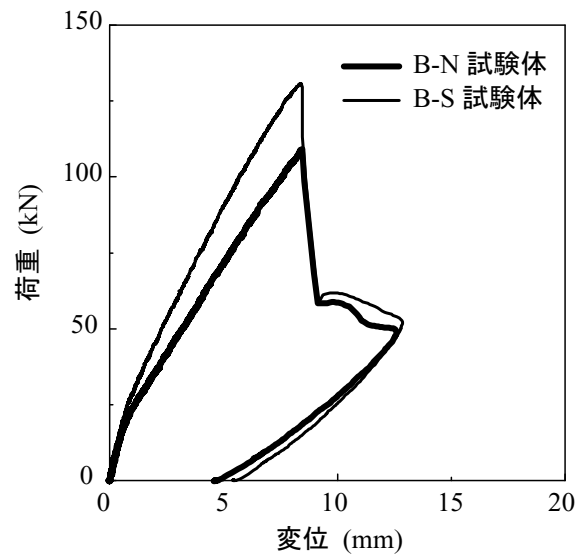
3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-2 には、各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果を A および B 梁ごとに示している。図より、いずれの試験体においても、荷重 $P = 25$ kN 程度において、曲げひび割れの発生により曲げ剛性が若干低下し、その後最大荷重時までほぼ線形に荷重が増大していることが分かる。終局時には荷重が急激に大きく低下していることより、せん断破壊したことが伺われる。また、シート補強



(a) A 梁



(b) B 梁

図-2 荷重-変位関係

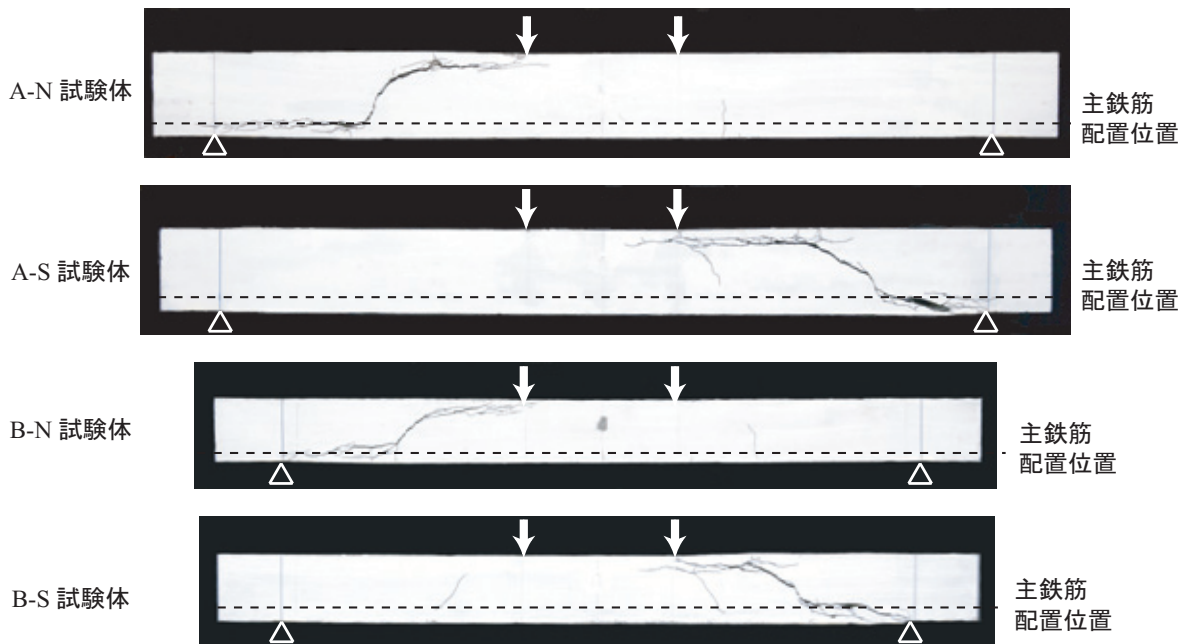


写真-2 実験終了後における RC 梁側面のひび割れ状況

の有無によらず、RC 梁がせん断破壊に至る変位はほぼ同様であることが分かる。このような耐荷挙動は、AFRP シートを下面接着した RC 版が押し抜きせん断破壊する場合と同様である。

AFRP シート補強した A/B-S 試験体は、無補強の A/B-N 試験体に比較して曲げひび割れ発生後の剛性低下が小さく、最大荷重も増大している。なお、本実験での AFRP シート下面接着による RC 梁の曲げ剛性および最大荷重の増加割合は 20% 程度となっている。

3.2 ひび割れ状況

写真-2 には、実験終了後における各試験体側面のひ

び割れ状況を示している。写真より、いずれの試験体も右もしくは左側せん断スパン中央付近においてアーチ状のひび割れが大きく開口しせん断破壊に至っていることが分かる。これらのひび割れは、載荷点および支点近傍においては、それぞれ上端および下端鉄筋に沿う形で進展している。なお、実験時には、まずアーチ状のひび割れがわずかに開口し、その後、水平ひび割れが一気に発生するとともに、大きく開口したことを確認している。

下縁かぶりコンクリートのひび割れ状況に着目すると、無補強試験体では下端鉄筋に沿うひび割れが支点側に向かって水平に進展する傾向にあるのに対し、シート補強

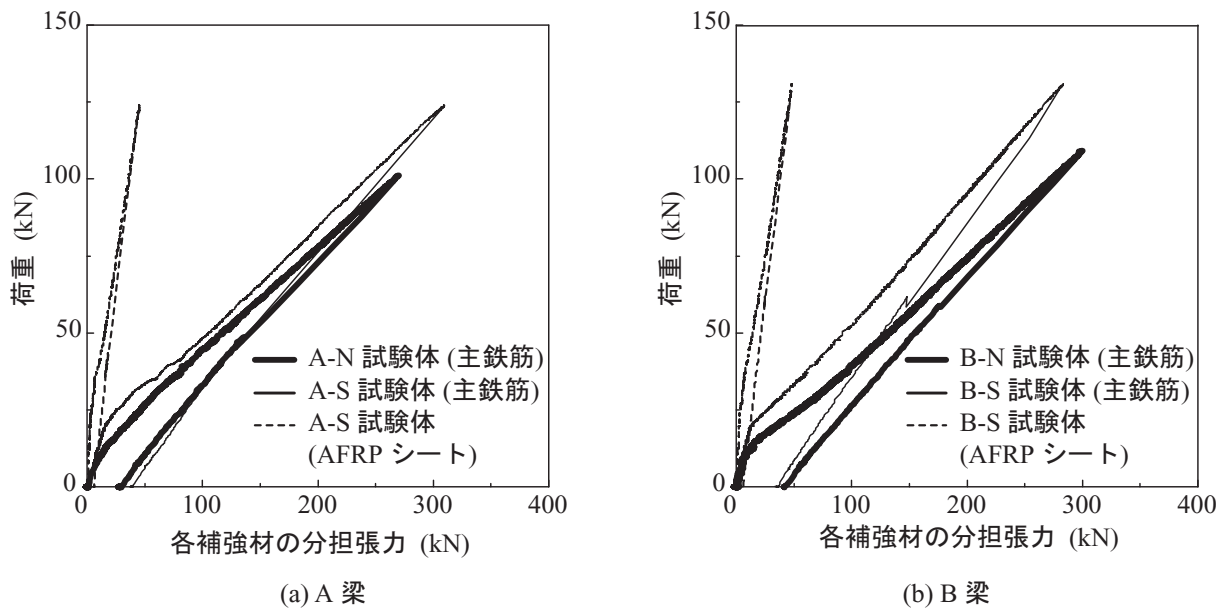


図-3 荷重-各補強材の分担張力関係

試験体ではシート端部近傍において斜めひび割れが梁下縁まで進展し、大きく開口していることが分かる。これは、RC版の場合と同様に、FRPシートを下面接着することにより、下縁かぶりコンクリートがせん断力に抵抗することを示すものと考えられる。

3.3 主鉄筋およびAFRPシートの分担張力

図-3には、各試験体の荷重と主鉄筋およびAFRPシートの分担張力との関係を示している。なお、これら分担張力は、主鉄筋およびAFRPシートの場合において、それぞれスパン中央部における主鉄筋ひずみおよび等曲げ区間におけるシートひずみの平均値に、各補強材の弾性係数と断面積を乗じることにより算出している。

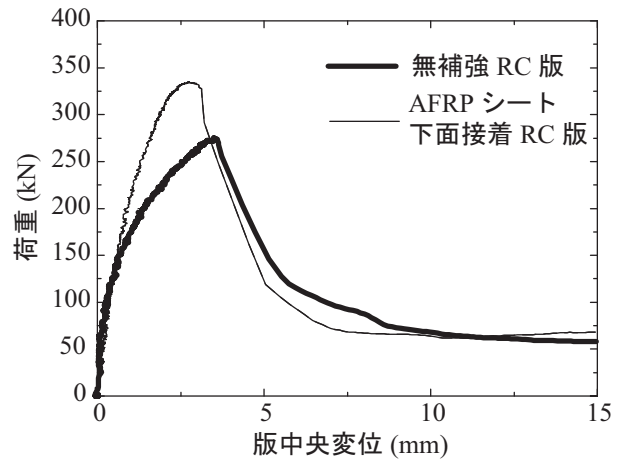
図より、いずれの補強材も最大荷重到達後、荷重時の勾配とほぼ同様の勾配で除荷していることより、未だ弾性域にあることが分かる。また、A、B梁ともに同一荷重時における主鉄筋の分担張力は、AFRPシート下面接着によって軽減されていることが分かる。なお、この傾向はB梁でより顕著である。これは、両梁の主鉄筋量は同一であるものの、B梁はA梁よりも梁高が小さく断面剛性がA梁の2/3程度であり、シートによる曲げ補強効果が出現しやすいためと考えられる。

以上のことより、AFRPシートは、RC梁がせん断破壊に至るまで主鉄筋と同様に弾性的な挙動を示し、その曲げ補強効果は断面剛性の小さなB梁でより顕著に出現することが明らかとなった。

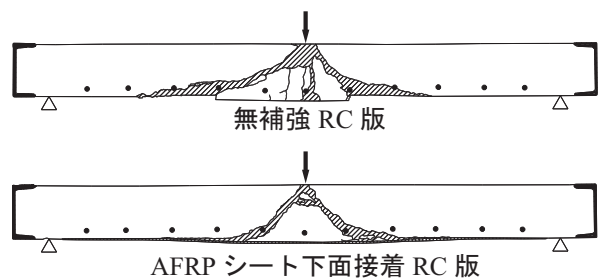
4. AFRPシート下面接着によるせん断耐力増分の評価

4.1 AFRPシート下面接着RC版の耐荷性状²⁾

図-4には、著者らが過去に実施した4辺支持AFRPシート下面接着RC版の静載荷実験²⁾により得られた荷重-版中央変位関係およびRC版中央部切断面のひび割れ



(a) 荷重-版中央変位関係



(b) 版中央部切断面のひび割れ状況

図-4 AFRPシート下面接着RC版の静載荷実験結果²⁾

状況を、無補強RC版と比較して示している。なお、この実験に用いたRC版は、版厚18cm、純スパン長1.75m、鉄筋比1%の単鉄筋RC版であり、1方向あたりの保証耐力が588kN/mの2方向AFRPシートを2層接着している。

荷重-版中央変位関係より、無補強RC版では、荷重 $P = 50$ kN程度において曲げひび割れの発生により剛性勾配

表-3 実験および計算結果の一覧

試験体名	実験結果		計算結果			(ii) / (iii)	(i) / (iv)
	最大耐力 (kN) (i)	シート補強による耐力増分 (kN) (ii)	無補強試験体のせん断耐力 V_c (kN)	シート補強による耐力増分 V_{cf} (kN) (iii)	$V_u (= V_c + V_{cf})$ (kN) (iv)		
A-N	101	-	97	-	97	-	1.04
A-S	124	23		13	110	1.78	1.13
B-N	109	-	96	-	96	-	1.14
B-S	131	22		16	112	1.38	1.17

が低下していることが分かる。これに対して、シート補強した RC 版では、 $P = 50$ kN 程度において剛性勾配が低下するものの無補強 RC 版よりも大きい。シート補強した RC 版の終局耐力は、無補強に比べて 25 % 程度大きく、両試験体の終局変位はともに 4 mm 程度である。なお、これらの試験体は最大荷重到達後、荷重が急激に低下していることより、押し抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる。このように、無補強およびシート下面接着 RC 版の耐荷性状および補強による耐力向上効果は、本実験における RC 梁の場合とほぼ同様であることが分かる。

中央部切断面のひび割れ性状から、無補強 RC 版では、押し抜きせん断ひび割れの発生に伴って下縁かぶりコンクリートが剥落していることが分かる。これに対して、補強した RC 版では、版上縁から下縁にかけて斜めひび割れが開口するものの、下縁かぶりコンクリートは剥落していない。従って、AFRP シートの下面接着により下縁かぶりコンクリートもせん断力に抵抗していることが分かる。

これらのことより、次節では、RC 梁も RC 版の場合と同様のメカニズムによってせん断耐力が向上するものと考え、AFRP シート下面接着による RC 梁のせん断耐力増分の推定を試みることにする。

4.2 せん断耐力増分算定法の提案

表-3 には、各試験体のせん断耐力に関する実験および計算結果を一覧して示している。ここで、シート補強によるせん断耐力増分 V_{cf} は、示方書³⁾による棒部材のせん断耐力算定式をかぶり部分に適用して下式により算出している。

$$V_{cf} = 2 \cdot (\beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f'_{vcd} \cdot b_w \cdot d) \quad (1)$$

$$f'_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (d : \text{mm})$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_v}$$

$$\beta_n = 1.0 \text{ (軸方向圧縮力 } N'_d = 0 \text{ より)}$$

ここに、 f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度、 d : かぶり厚さ、

$p_v (= n_f \cdot A_f / (b \cdot d))$: 補強筋比、 A_f : AFRP シートの断面積、 b : 梁幅、 $n_f (= E_f / E_s)$: 弾性係数比 (AFRP シート/鉄筋) である。

表より、シート補強による耐力増分に関する実験結果は、計算結果を 4~8 割程度上回っており、設計的に安全側に評価していることが分かる。また、実測の最大耐力は、梁の形状寸法や補強の有無によらず、計算せん断耐力 V_u を 4~17 % 上回っていることが分かる。

以上のことより、FRP シート下面接着による RC 梁のせん断耐力向上効果は、RC 版と同様に示方書式をかぶり部分に適用することで安全側に評価可能であることが明らかになった。

なお、著者らは既往の研究において、AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果が RC 版の主鉄筋比に依存し、主鉄筋比が大きいほど補強効率 (耐力増分の実測値/計算値) が低下することを明らかにしている⁶⁾。本実験で用いた RC 梁の主鉄筋比は B 梁の方が A 梁よりも 2 割ほど大きく、補強効率 (表-3 中 (ii)/(iii)) は B 梁の方が 2 割ほど小さくなっている。すなわち、RC 梁にも RC 版と同様に主鉄筋比の増加による補強効率の低下傾向が認められるが、実験データが少なく補強効率の定量的把握は今後の課題である。また、RC 梁の下面接着シートによる曲げ補強効果は、断面剛性の小さな梁でより効率的に出現する一方で、せん断補強効率は主鉄筋比に大きく影響されることに留意が必要である。

5. まとめ

本研究では、FRP シート下面接着による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として、梁の形状寸法やシート補強の有無を変化させたせん断破壊型 RC 梁の静載荷実験を実施した。本実験により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) RC 梁も RC 版と同様に AFRP シート下面接着によって、下縁かぶりコンクリートがせん断力に抵抗してせん断耐力が向上する。
- 2) RC 版と同様に FRP シートを下面接着した RC 梁のせん断耐力増分は、かぶりコンクリートの耐力寄与

を示方書式に準じて算定することで安全側に評価可能である。

- 3) RC 梁下面に接着したシートの曲げ補強効率は RC 梁の断面剛性に依存する。一方、せん断補強効率は RC 版と同様に主鉄筋比の影響を強く受ける。

参考文献

- 1) 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) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田 学, 澤田純之: AFRP シート下面補強 RC 版の押し抜きせん断性状に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1299-1308, 2005.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007.
- 4) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.
- 5) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田純之: AFRP シートを緊張接着した PC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告書, Vol.8, pp.257-264, 2008.
- 6) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田 学, 澤田 純之: 鉄筋比の異なる AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1459-1464, 2006.