AFRP シート下面接着によるせん断破壊型 RC 梁のせん断耐力向上効果

Upgrading effects on shear load-carrying capacity of RC beams due to bonding AFRP sheet to bottom on surface

三井住友建設（株）　○フェロー　三上　浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学　フェロー　岸　徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学　正会員　栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)
（株）構研エンジニアリング　正会員　鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)

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 (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部がせん断力に抵抗することで押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，現行設計法においては，FRP シートを RC 梁の下面に接着して曲げ補強する場合におけるせん断耐力の向上効果については考慮しないのが一般的である．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，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，計算曲げ耐力の場合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より，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するため，無補強の A/B-S 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 本用いている．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．

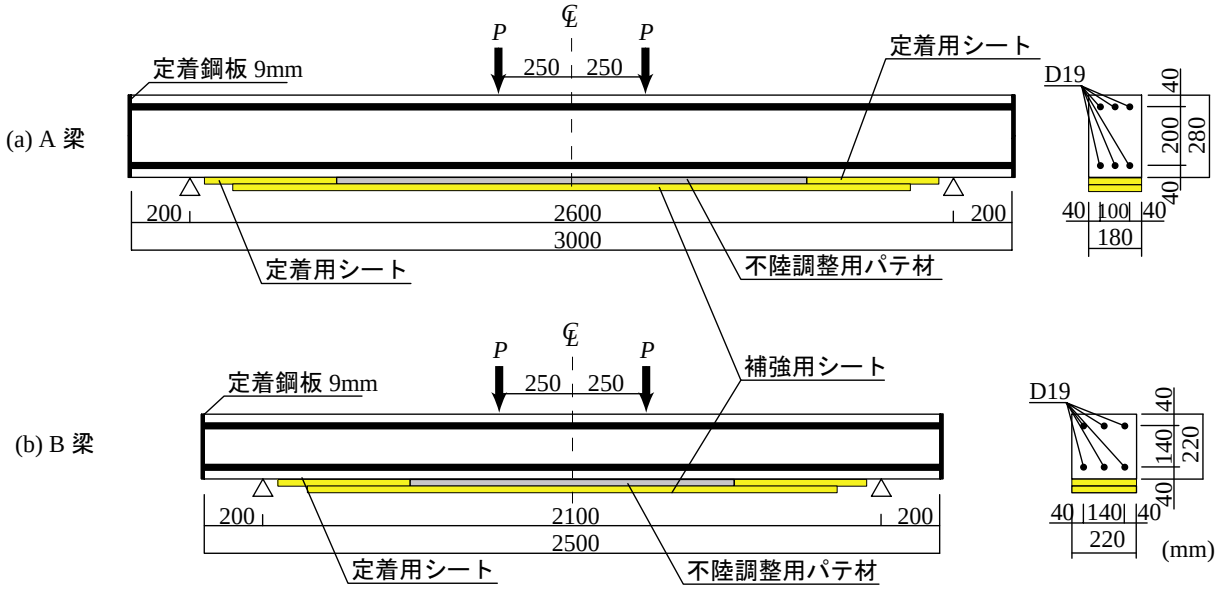
FRP シートには，保証耐力 1,176 kN/m のアラミド繊維製 FRP(AFRP) シートを 1 層用いた．なお，シート幅は梁

表－２ AFRP シートの材料特性値 (公称値)

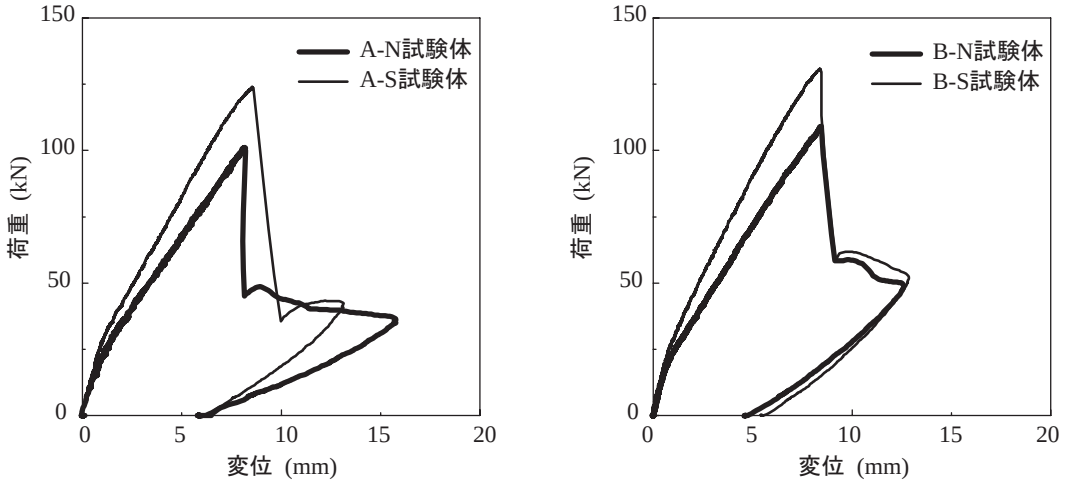
繊維目付量 (g/m^2)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

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



図－1　試験体の概要



(a) A 梁　　(b) B 梁

図－2　荷重－変位関係

幅と同様である．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部として実施していることより，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]．

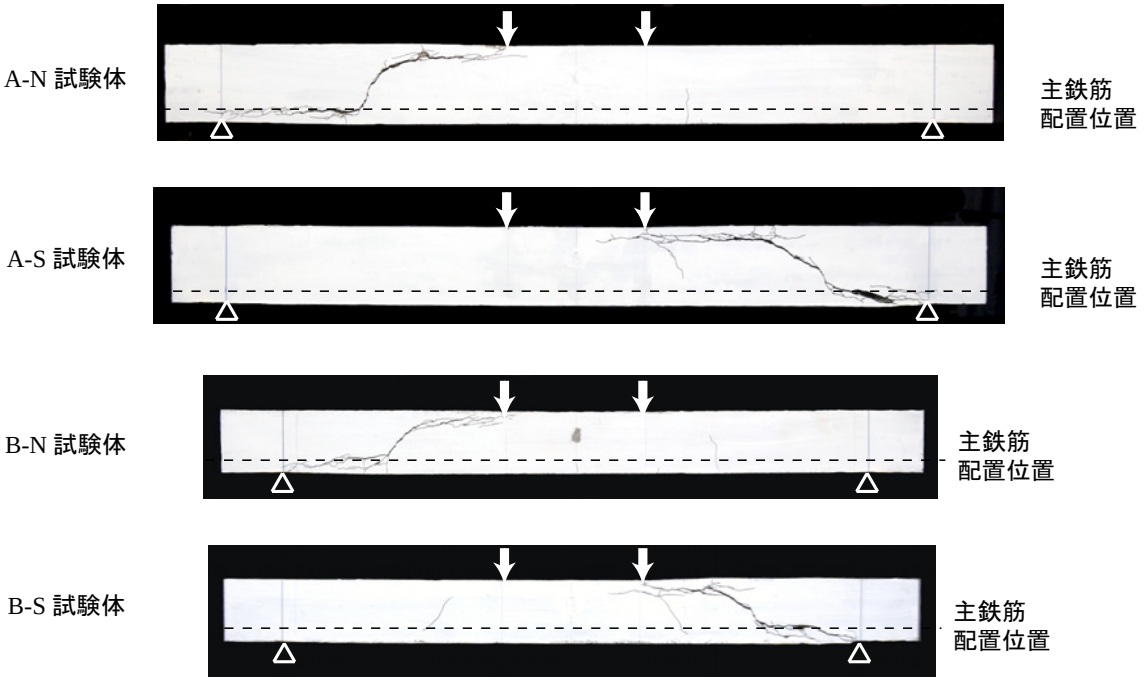
実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 31.6 MPa，鉄筋の降伏強度は 392 MPa であった．**表－2** には，AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している．また，本実験における測定項目は，荷重および載荷点変位 (以後，変位) であり，それぞれ，静荷重測定用ロードセルおよび非接触式レーザ変位計により測定している．なお，これらのセンサーからの出力データは，デジタルメモリに一括収録している．実験終了後には，各試験体側面のひび割れ状況を撮影し観察している．

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，せん断破壊に至っているものと考えられる．また，シート補強の有無によらず，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曲げ剛性が大きく示されており，最大荷重も増大している．なお，本実験で



写真－1　実験終了後における RC 梁側面のひび割れ状況

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－1 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．

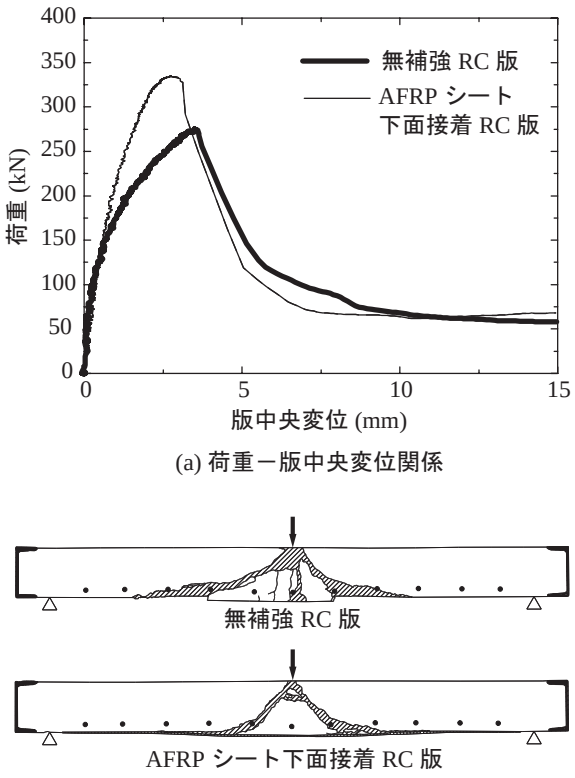
下縁かぶりコンクリートのひび割れ状況に着目すると，無補強試験体の場合には，下端鉄筋に沿うひび割れが支点側に向かって水平に進展する傾向にあるのに対し，シート補強試験体の場合には，シート端部近傍において斜めひび割れが梁下縁まで進展し，大きく開口していることが分かる．これは，RC 版の場合と同様に，FRP シートを下面接着することにより，下縁かぶりコンクリートがせん断力に抵抗することを示すものと考えられる．

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－3 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状況を，無補強 RC 版の場合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 18 cm，純スパン長 1.75 m，鉄筋比 1 % の単鉄筋 RC 版であり，AFRP シートには 1 方向あたりの保証耐力が 588 kN/m の 2 方向 AFRP シートを 2 層用いている．

荷重－版中央変位関係より，無補強 RC 版の場合には，荷重 P = 50 kN 程度において，曲げひび割れの発生により



(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－3　AFRP シート下面接着 RC 版の静載荷実験結果 [2)]

剛性勾配が低下していることが分かる．これに対し，シート補強した RC 版の場合には，P = 50 kN 程度において剛性勾配が低下するものの，無補強の場合よりも大きい．補強した RC 版の終局耐力は，無補強の場合よりも 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

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

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荷性能の向上効果は，本実験における RC 梁の場合と類似の性状を示していることが分かる．

中央部切断面のひび割れ性状を見ると，無補強 RC 版の場合には，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．これに対し，補強した RC 版の場合には，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には至っていない．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，本節では，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とする．

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にして示している．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．

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

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

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

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

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

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で推定可能であることが明らかになった．

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，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) FRP シートの下面接着により RC 梁のせん断耐力を向上可能である．
2) 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．
3) FRP シートを下面接着した RC 梁のせん断耐力は，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．

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.