

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一検討

An experimental study on punching shear behavior of strengthened RC slabs having various rebar-ratio with AFRP sheet

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)
 三井住友建設(株) 正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
 室蘭工業大学 正会員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)

1. はじめに

近年、炭素繊維製やアラミド繊維製などの連続繊維シート（以後、FRP シートまたは単にシート）を既設鉄筋コンクリート（以後、RC）構造物に接着して補強する工法が盛んに適用されるようになった。道路橋床版を例にとると、押し抜きせん断耐力の増大には、上面増厚工法が有効であることが知られているが、施工のためには道路を一部占有する必要があるなどの課題があり、特に交通量の多い基幹道路では、その採用が困難な場合も見受けられる。

このような場合、床版下面からの吹き付けなどによる増厚工法、鋼板接着工法などが採用されてきたが、前者は既設 RC 構造物との界面における力の伝達の確実性、後者は鋼材の腐食という重大な課題を有している。一方、FRP シートによる床版下面補強工法には上述したような課題は少ないものの、補強効果に関する研究例は比較的少ない。

著者らは、既往の研究において、FRP シートによる道路橋床版などの面部材の下面補強を想定し、押し抜きせん断

性状を検討してきた。その結果、1) FRP シートで下面補強した RC 版の押し抜きせん断耐力の増大は、主としてかぶりコンクリートの押し抜きせん断抵抗が寄与すること、2) FRP シートの引張剛性（弾性係数 $E \times$ シート厚さ t ）を同等とすると、シートの材料特性に関わらずほぼ同等の押し抜きせん断耐力増分が期待できること、3) 二方向にアラミド繊維を配交した二方向 AFRP シートは一方 AFRP シートを直交して二方向に貼り付けた場合と同等程度以上の補強効果を有すること、などを明らかにしてきた。しかしながら、押し抜きせん断耐力の増大にかぶりコンクリートのせん断抵抗が寄与することは明らかになったものの、その程度は、補強する RC 版の特性、例えば版厚、鉄筋比、コンクリート強度および弾性係数などにも影響されると推察されるが、その影響に関しては未だ明らかにされていない。

このような観点より、本研究では下端鉄筋径や配筋間隔を変えることにより鉄筋比を変化させた 2 種類の RC 版に二方向 AFRP シートを下面接着し、押し抜きせん断性状に与える鉄筋比の影響をシート層数を 1 層から 4 層に変化させて検討することとした。

表-1 試験体一覧

試験体名	下端鉄筋 (鉄筋比)	繊維 目付量 (g/m ²)	シート 層数	引張剛性 $E \cdot t$ (MN/m)
A-N	D13 @200 (0.54 %)	435/435 (二方向)	-	-
A-S1			1	28.3
A-S2			2	56.6
A-S3			3	85.0
A-S4			4	113.3
B-N	D19 @150 (1.57 %)	435/435 (二方向)	-	-
B-S1			1	28.3
B-S2			2	56.6
B-S3			3	85.0
B-S4			4	113.3

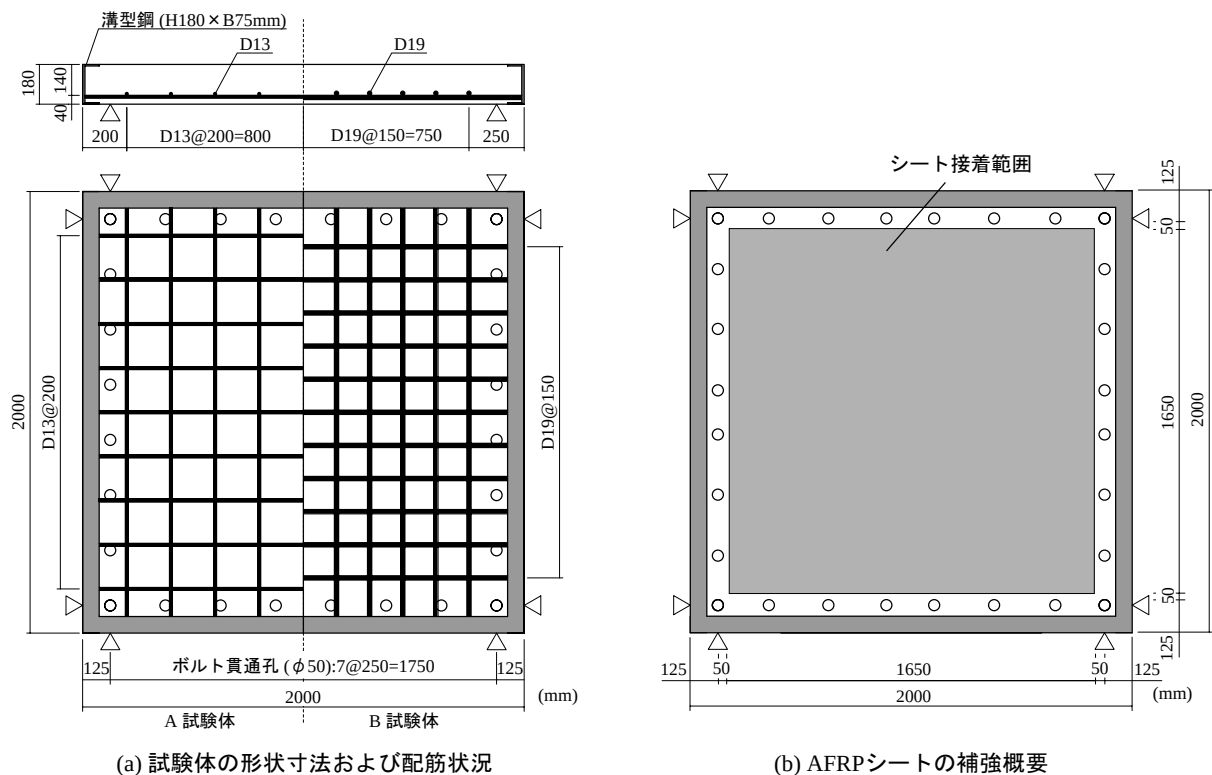
表-2 AFRP シートの力学的特性値

繊維 目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	弾性 係数 E (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 ひずみ (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75

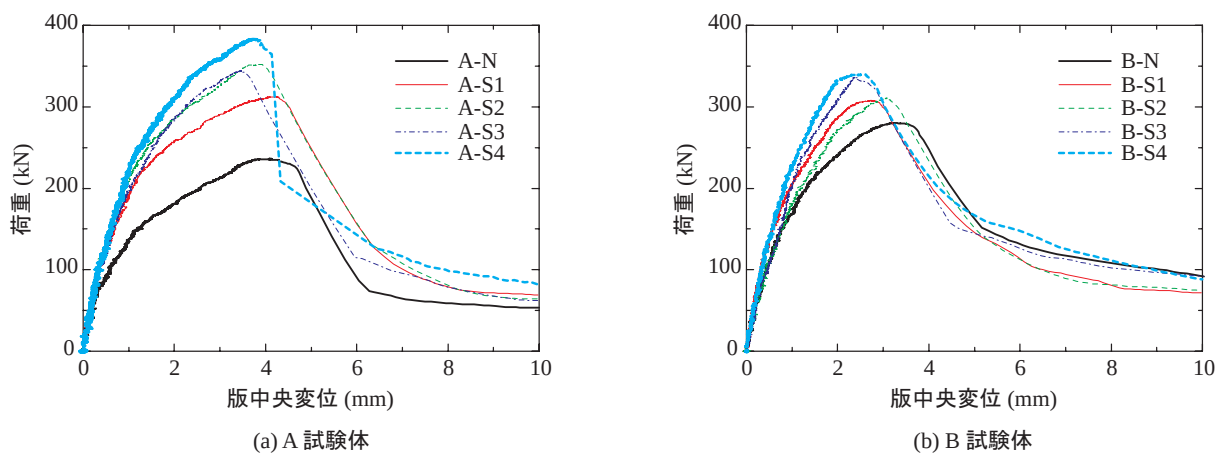
2. 試験体の概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、鉄筋比を 2 種類、補強量を各々無補強試験体およびシートを 1～4 層とした全 5 種類の計 10 体である。表中、試験体名の第 1 項目は主鉄筋比 (A: 鉄筋比 0.54 %, B: 鉄筋比 1.57 %) を示しており、第 2 項目の N は無補強を、S はシート補強を示し、S に付随する数値はシート補強層数を示している。なお、表中にはシートの単位幅当たりの引張剛性 $E \cdot t$ を併せて示した。

図-1 には、本実験に用いた RC 版の形状寸法、配筋状況および補強概要図を示している。RC 版の寸法は、2,000 × 2,000 × 180 mm で下端鉄筋の平均かぶりは 40 mm である。鉄筋は A 試験体で D13 を 200 mm 間隔、B 試験体で D19 を 150 mm 間隔で下端のみに配置している。なお、RC 版は正方形であり、支持条件も 4 辺支持と方向性がないため、最下端に配置した鉄筋を主鉄筋と称する。また、鉄筋は 4 辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し、定着長を削減している。下面接着シートには、目付量 435/435 g/m² の二方向 AFRP シートを用い、両支点の 50 mm 手前まで貼り付けた。なお、RC 版のシート接着部のコンクリート表面には、付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理



図－1 RC版の形状寸法および配筋状況



図－2 荷重－変位関係

(処理深さ 1～2 mm 程度)を施し、プライマーを塗布した後にエポキシ樹脂を用いてシートを接着した。

RC版の支持条件は4辺単純支持であり、支持間隔は1,750 mmである。支点部は回転を許容するが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。載荷板は直径が60 mmの鋼製厚肉円板とし、RC版中央部に設置した。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、 $f'_c = 34.2$ MPa、鉄筋の降伏強度はD13, D19でそれぞれ $f_y = 373, 370$ MPaであった。表-2に、二方向FRPシートの力学的特性値を示す。なお、力学的特性値はカタログ値である。本実験における測定項目は、静荷重測定用ロードセルによる載荷荷重、レーザ式変位計による版中央部変位、鉄筋およびシートに貼り付けたひずみゲージによる鉄筋およびシート各点のひずみである。これらの出力は、連続的にデ

ジタルメモリーに一括収録し、各物理量に変換している。なお、実験終了後には主鉄筋方向の版中央部を切断し、破壊面の観察を行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

図-2には、各試験体の荷重と版中央部変位(以後、変位)の関係をA, B試験体毎に示している。図-2(a)より、無補強のA-N試験体は約80 kNでひび割れの発生に伴い曲げ剛性が低下し、変位が増加傾向にあることが分かる。その後、最大荷重240 kN程度を越えた後、変位が4.6 mm程度で剛性勾配が急激に低下して押し抜きせん断破壊に至った。一方、シート補強をしたA-S試験体は、剛性勾配の低下する荷重がA-N試験体よりも大きく、全般的に剛性勾

表-3 実験結果一覧

試験体名	$\alpha 2^*$	計算 せん断耐力 (kN) (i)	計算 耐力増分 (kN) (ii)	実測 せん断耐力 (kN) (iii)	実測 耐力増分 (kN) (iv)	せん断 耐力比 (iii)/(i)	耐力 増分比 (iv)/(ii)
A-N	-	220.1	-	236.5	-	1.07	-
A-S1	16.8	302.6	82.5	312.8	76.3	1.03	0.92
A-S2	25.6	313.2	93.1	352.3	115.8	1.12	1.24
A-S3	25.4	326.9	106.8	344.2	107.7	1.05	1.01
A-S4	23.8	339.4	119.3	383.8	147.3	1.13	1.23
B-N	-	313.5	-	280.4	-	0.89	-
B-S1	16.1	397.0	83.5	307.6	27.2	0.77	0.33
B-S2	14.4	423.3	109.8	310.6	30.2	0.73	0.28
B-S3	12.7	443.8	130.3	336.2	55.8	0.76	0.43
B-S4	15.8	446.9	133.4	339.8	59.4	0.76	0.45

*: 左右の $\alpha 2$ の平均値

配や最大荷重がN試験体に比較して大きくなる傾向にあることが分かる。

図-2(b)より、無補強試験体のB-N試験体では150 kN程度で剛性勾配が低下し、その後最大荷重280 kN、変位3.8 mm程度で押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。一方、補強試験体はA試験体ほど顕著な剛性勾配の低下は見られず、シートの引張剛性 $E \cdot t$ の増加に伴い剛性勾配や最大荷重が大きくなる傾向にある。しかしながら、無補強試験体に対する耐力増分はA試験体よりも小さい。これは、既往の研究¹⁾で示されているように、シートの押し抜きせん断耐力向上効果には鉄筋の降伏の有無が大きく影響していることを示すものと考えられる。

3.2 押し抜きせん断耐力の評価

著者らは既往の研究¹⁾において、コンクリート標準示方書²⁾を基にしたFRPシート下面補強RC版の押し抜きせん断耐力評価式を提案している。評価式では、図-3の切断面に示されるように、シートで補強することによりかぶりコンクリートがより健全となり、押し抜きせん断耐力の向上に寄与するものとしてかぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力を算出し、それと示方書式による有効高さ部分の押し抜きせん断耐力を加算した。式(1)に、かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力の評価式を示す。

$$V_{pcd} = \alpha \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (1)$$

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad \beta_d = \sqrt[4]{1/d} \text{ (d:m)}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

α : 補強材の補強効果を示す係数

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度

u : 載荷面の周長, u_p : 設計断面の周長

d : かぶり厚さ, $p (=n_f A_f / (b \cdot d))$: 補強筋比

A_f : AFRPシートの断面積, b : 幅

$n_f (=E_f/E_s)$: 弾性係数比 (AFRPシート/鉄筋)

かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力は、実験終了後の切断面(図-3参照)から図-4に示すような押し抜

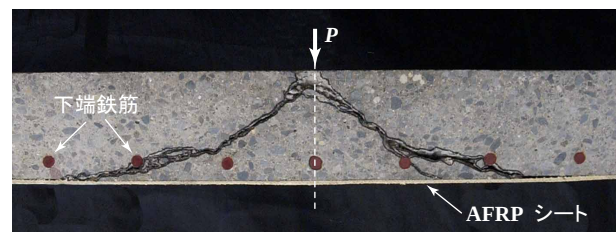


図-3 切断面の例 (B-S3試験体)

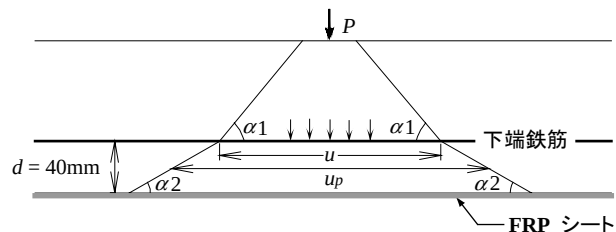
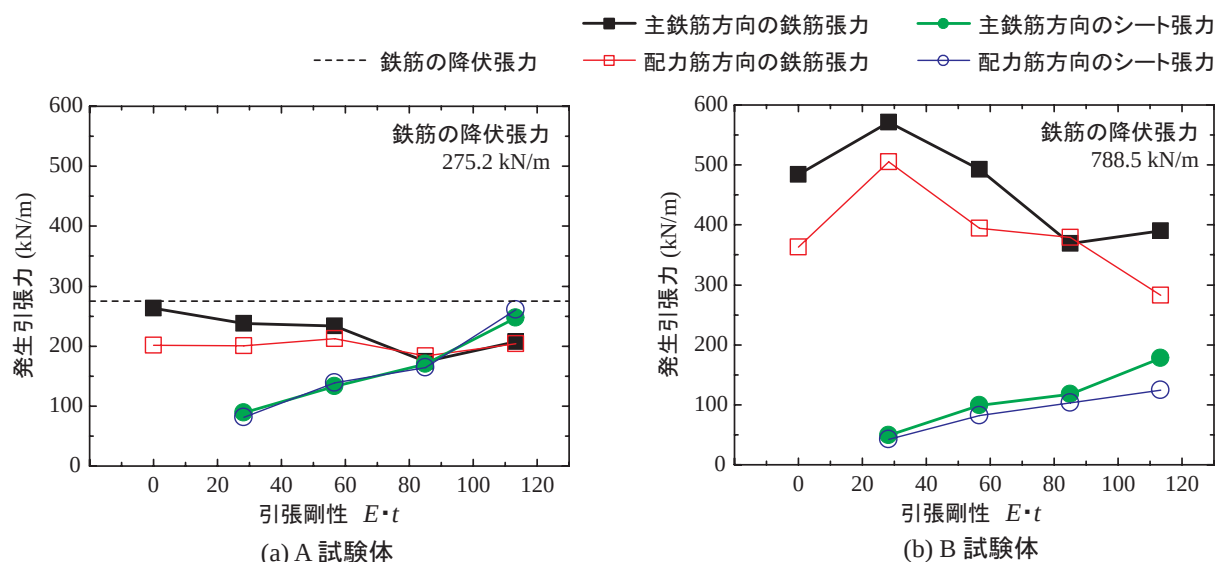


図-4 押し抜きせん断性状のモデル化

きせん断性状のモデル化を行いそれに基づいて算定している。すなわち、 $\alpha 1 = 45^\circ$ の角度で下端鉄筋位置までひび割れが進展した際の周長を載荷面の周長(u)とし、下縁かぶり部において $\alpha 2$ の角度でかぶりコンクリートに押し抜きせん断面が形成されるものとして設計断面の周長(u_p)を求めて評価することとしている。なお、版下面のAFRPシートは、鉄筋との弾性係数比を用いて補強筋比として考慮している。

表-3には、各々のRC版の切断面より得られた $\alpha 2$ 、提案式を用いて算出した計算せん断耐力、式(1)より得られるかぶり部が寄与する計算耐力増分、実験より得られた実測せん断耐力、無補強試験体に対する補強試験体の実測耐力増分、および実測値を計算値で除したせん断耐力比および耐力増分比を一覧にして示している。なお、かぶり部が寄与する計算耐力増分は $\alpha = 1.0$ として算出している。

図-5 シートの引張剛性 $E \cdot t$ と鉄筋およびシート張力の関係

鉄筋比の小さい A 試験体のせん断耐力比および耐力増分比は、A-S1 試験体の耐力増分比を除き、いずれも 1.0 以上であることより、提案式を用いることにより大略安全側に評価可能であることが分かる。一方、鉄筋比の大きい B 試験体では、せん断耐力比はいずれも 0.76 程度であり、実測耐力は計算耐力を下回っている。また耐力増分比は、0.28～0.45 と小さく示されている。このことから、鉄筋比が大きいほど降伏し難い状態にあるため、シートの補強効果が十分に発揮されないことが推察される。これらのことは、既往の研究結果と同様の傾向である。以上のことから、鉄筋比の大きい RC 版ほど、提案式中の係数 α を小さく設定する必要があると考えられる。

3.3 下端鉄筋および下面接着シートの張力分担性状

図-5 には、縦軸に各試験体の鉄筋およびシートの単位幅当たりの張力を、横軸にシートの引張剛性 $E \cdot t$ を示している。張力は、各試験体の最大荷重時における鉄筋およびシートの最大発生ひずみ値を用いて算出している。図-5(a)より、A 試験体ではシートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きくなるとともに、主方向、配力方向鉄筋ともに発生する張力が小さくなり、シートに発生する張力は両方向ともに大きくなる傾向にあることが分かる。これは補強量の増加とともにシートの補強効果が大きく発揮され、鉄筋の張力負担が軽減されたことを示している。また、鉄筋とシートの張力の大きさを比較すると両方向ともにほぼ同程度の張力を分担していることが分かる。

図-5(b)より、B 試験体においても A 試験体と同様にシートの引張剛性 $E \cdot t$ の増加に伴い両方向の鉄筋張力が軽減される傾向にあることが分かる。しかしながら、鉄筋とシートの負担する張力を比較すると鉄筋の張力がシートの張力に比較して 3～10 倍程度も大きい。なお、鉄筋とシートの張力の差はシートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きくなるにつれて小さくなるが、A 試験体と異なりシートの張力が鉄筋の張力を上回ることはない。

A 試験体と B 試験体のシートに発生する張力を比較す

ると、B 試験体の発生張力は A 試験体よりも全体的に小さい。このことから提案式における係数 α は、鉄筋比が大きいほど小さく設定する必要があることが分かる。本研究の範囲内では、下端鉄筋が降伏した A 試験体で $\alpha = 1.0$ 、下端鉄筋量が A 試験体の約 3 倍である B 試験体では α を 1/3 とし、0.33 程度と設定すれば実測値と比較的よく対応する。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に与える鉄筋比の影響を検討するため、鉄筋径および配筋間隔を変化させた AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断実験を実施した。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下の通りである。

- 1) FRP シート下面接着 RC 版の補強効果は、下面接着シートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きいほどシートの分担張力が増大し、補強効果が大きくなる傾向にある。しかしながら、鉄筋比が大きい場合にはシートの分担張力が小さくなり、補強効果も小さくなる傾向にある。
- 2) 既往の研究で提案している下縁かぶり部のせん断耐力寄与を仮定した押し抜きせん断耐力評価式を用いて耐力評価を行う場合、鉄筋比が大きい場合ほど補強材の補強効果を示す係数 α を小さく設定する必要がある。また、その係数 α を下端鉄筋が降伏する試験体の補強筋比との関係に基づいて設定すると実測値とほぼ対応する。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田 学, 澤田 純之: AFRP シート下面接着 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.1299-1307, 2005
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002