

論文 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

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・藤田 学^{*3}・澤田 純之^{*4}

要旨：本研究では、アラミド繊維 (AFRP) シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断性状に及ぼす鉄筋比の影響を検討することを目的として、鉄筋径および配置間隔を変化させた RC 版を用いて押し抜きせん断実験を実施した。また、著者らが提案している下縁かぶり部の耐力寄与を考慮した AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断耐力算定式の妥当性を併せて検討した。その結果、算定式内に含まれる補強材の補強効果を表す係数 α を鉄筋比に対応させて適切に設定することにより、本算定式が適用可能となることが明らかになった。

キーワード：RC 版, AFRP シート, 鉄筋比, 押し抜きせん断耐力

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には、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、シートの材料特性がか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、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 3 種類の RC 版を対象に二方向 AFRP シートを 1 層から 4 層下面接着し、押し抜きせん断性状に与える鉄筋比の影響をシートの引張剛性を変化させて検討することとした。

*1 三井住友建設 (株) 技術研究所 主席研究員 博 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 土木研究開発部長 博 (工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 建設システム工学科 研究員 博 (工) (正会員)

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		-	-	-
A-S1	D13 @200 (0.54%)	435/435 (二方向)	1	28.3
A-S2			2	56.6
A-S3			3	85.0
A-S4			4	113.3
B-N		-	-	-
B-S1	D16 @150 (1.09%)	435/435 (二方向)	1	28.3
B-S2			2	56.6
B-S3			3	85.0
B-S4			4	113.3
C-N		-	-	-
C-S1	D19 @150 (1.57%)	435/435 (二方向)	1	28.3
C-S2			2	56.6
C-S3			3	85.0
C-S4			4	113.3

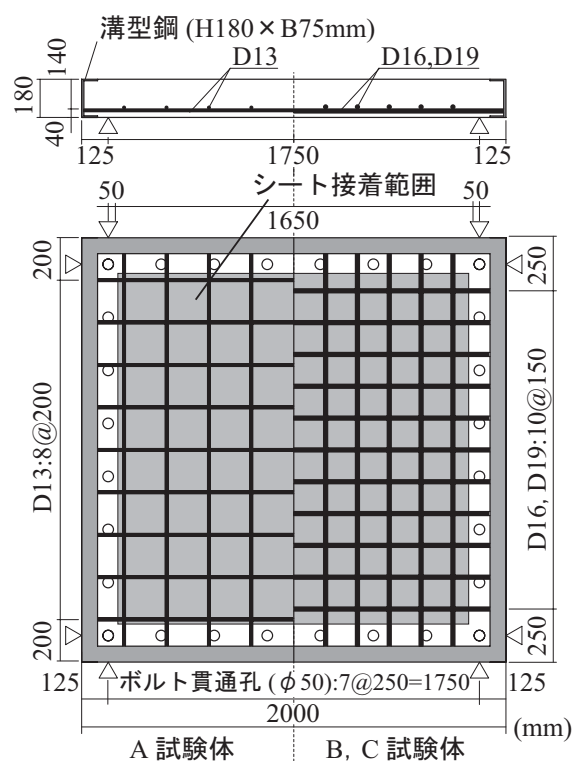
表－2 二方向 AFRP シートの力学的特性値

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3種類、シートの補強層数を各々無補強および1～4層とした全5種類の計15体である。表中、試験体名の第1項目は鉄筋比(A:0.54%, B:1.09%, C:1.57%)を示しており、第2項目のNは無補強、Sはシート補強試験体を示し、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を示している。RC版の寸法は、2,000×2,000×180mmで下端鉄筋の平均かぶりは40mmである。鉄筋はA試験体でD13を200mm間隔、B,C試験体ではそ



図－1 RC版の形状寸法、配筋状況および補強概要

れぞれD16, D19を150mm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、各支点の50mm手前まで貼り付けた。

RC版の支持条件は4辺単純支持であり、支持間隔は1,750mm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60mm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、A, C試験体で $f'_c = 34.2$ MPa, B試験体で $f'_c = 34.9$ MPa, 鉄筋の降伏強度はD13, D16, D19でそれぞれ $f_y = 373, 386, 370$ MPaであった。表－2に、二方向AFRPシートの力学的特性値を示す。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。

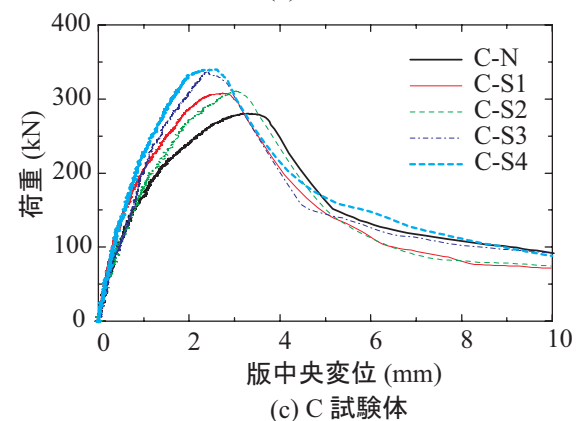
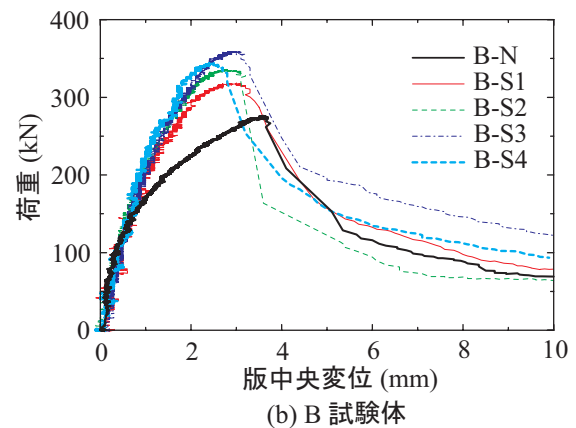
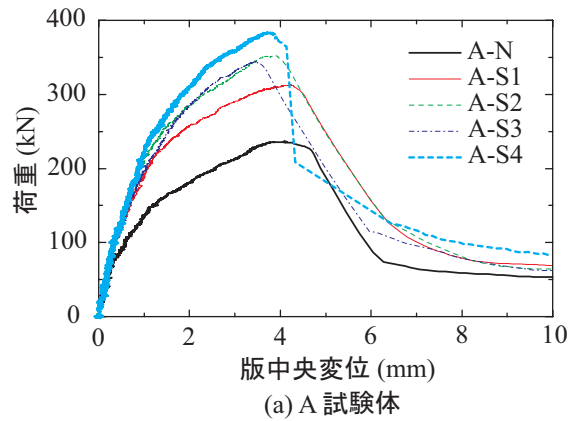
3. 実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

図－2には、各試験体の荷重と版中央変位(以後、変位)の関係を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80kNでひび割れの発生に伴う曲げ剛性の低下が見られ、変位が増加傾向にあることが分かる。その後、最大荷重が240kN程度、変位が4.6mm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、シートで補強した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、無補強のB-N試験体は150kN程度でひび割れが発生して版の曲げ剛性が低下し、変位が増加し始めていることが分かる。その後、最大荷重が280kN程度、変位が3.6mm程度で押し抜きせん断破壊に至った。シートで補強したB-S試験体は、B-N試験体のような剛性低下が顕著に見られず、荷重の増加に伴い変位が徐々に増大した後、急激に低下して押し抜きせん断破壊に至っている。

図－2(c)より、無補強のC-N試験体では170kN程度で剛性勾配が低下し、その後最大荷重280kN、変位3.8mm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、補強試験体の剛性勾配の低下はC-N試験体に比べて顕著ではなく、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。なお、図－2(a)、(b)、(c)の比較から、シート補強試験体の無補強試験体に対する耐力増分は鉄筋比が大きいほど小さくなる傾向にあることが分かる。これは、既往の研究¹⁾に示されてい



図－2 荷重－変位関係

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ためと考えられる。

3.2 押し抜きせん断耐力

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シート下面接着RC版の押し抜きせん断耐力算定式を提案している。算定式では、写真－1の切断面の例に示されるように、シートで下面補強した場合には、かぶりコンクリートがより健全となること

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	17	302.6	82.5	312.8	76.3	1.03	0.92
A-S2	26	313.2	93.1	352.3	115.8	1.12	1.24
A-S3	25	326.9	106.8	344.2	107.7	1.05	1.01
A-S4	24	339.4	119.3	383.8	147.3	1.13	1.23
B-N	-	280.3	-	276.2	-	0.89	-
B-S1	13	370.8	90.5	318.5	42.3	0.86	0.47
B-S2	13	394.3	114.0	336.2	60.0	0.85	0.53
B-S3	15	404.7	124.4	359.0	82.8	0.89	0.67
B-S4	16	414.5	134.2	343.8	67.6	0.83	0.50
C-N	-	346.7	-	280.4	-	0.81	-
C-S1	16	430.4	83.7	307.6	27.2	0.71	0.32
C-S2	14	456.8	110.1	310.6	30.2	0.68	0.27
C-S3	13	475.9	129.2	336.2	55.8	0.71	0.43
C-S4	16	479.5	132.9	339.8	59.4	0.71	0.45

*: 左右の $\alpha 2$ の平均値

から、かぶり部のコンクリートが押し抜きせん断耐力の向上に寄与するものと仮定している。すなわち、計算押し抜きせん断耐力は、かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力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ものである。式(1)に、示方書式を基にしたかぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力算定式を示す。

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

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

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

α : 補強材の補強効果を示す係数 (補強効果係数)

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, $p (=n_f \cdot A_f / (b \cdot d))$: 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 (写真-1 参照) から 図-3 に示すような押し抜きせん断性状のモデル化を

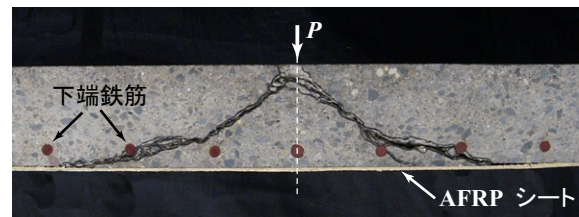


写真-1 切断面の例 (C-S3 試験体)

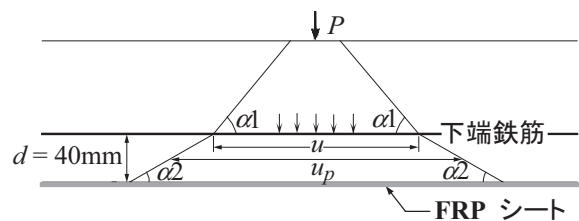


図-3 押し抜きせん断性状のモデル化

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版の計算押し抜きせん断耐力，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押し抜きせん断耐力，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、各試験体の押し抜きせん断耐力は部材係数を1.0として算出した。また、計算耐力増分は各 α_2 を用いて算出した u_p および補強効果係数 α を1.0として算出している。

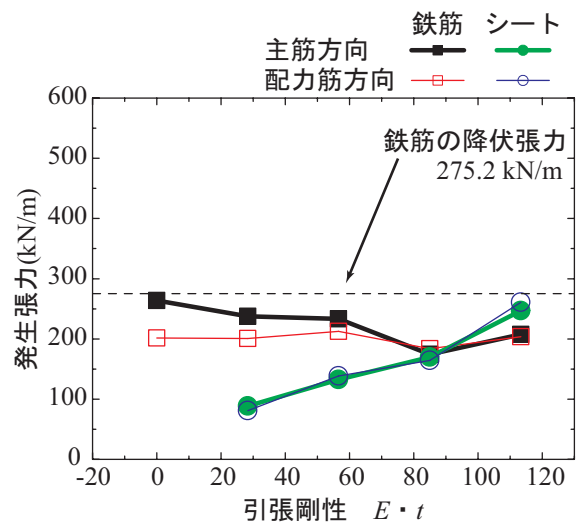
鉄筋比の小さいA試験体のせん断耐力比および耐力増分比は、A-S1試験体の耐力増分比を除きいずれも1.0以上であることから、提案式を用いることにより大略安全側に評価可能であることが分かる。A試験体よりも鉄筋比の大きいB試験体では、せん断耐力比は0.83~0.89であり、実測耐力は計算耐力を下回っている。また、耐力増分比は0.47~0.67と小さく示されている。さらに、鉄筋比の最も大きいC試験体のせん断耐力比は0.68~0.81程度であり、実測耐力は計算耐力を大きく下回っている。また、耐力増分比は0.27~0.45とB試験体と比較しても小さい。

以上のことより、鉄筋比が大きいほど降伏し難い状態にあるため、シートで曲げ補強した場合の補強効果が鉄筋の降伏後に大きく出現するのと同様に、シートの補強効果が十分に発揮されないものと推察される。これらの傾向は、既往の研究結果と同様であり、鉄筋比の大きいRC版ほど、算定式中の補強効果係数 α を小さく設定する必要があると考えられる。

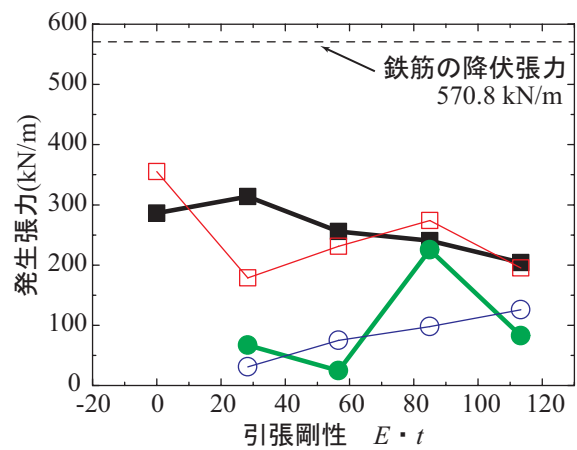
3.3 下端鉄筋および下面接着シートの張力分担性状

図-4には、縦軸に各試験体の鉄筋およびシートの単位幅当りの張力を、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を用いて算出している。

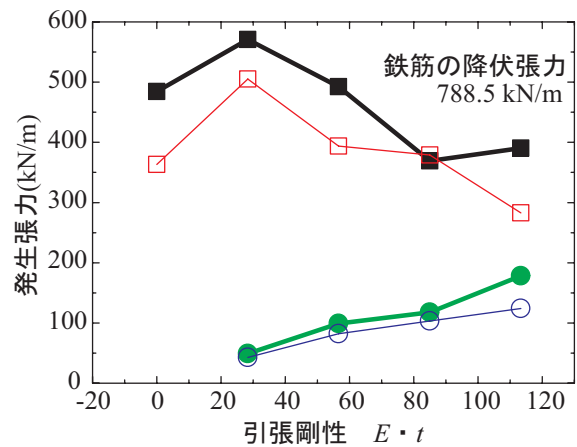
図-4(a)より、A試験体ではシートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きくなるとともに、主筋、配力筋に



(a) A 試験体



(b) B 試験体



(c) C 試験体

図-4 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

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。これはシート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同程度から最大でも3倍程度の差であり、全体的には大略同程度の張力を分担していることが分かる。

図-4 (b), (c) より、B, C 試験体ともに 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 B 試験体では同程度から最大で6倍程度、C 試験体では3~10倍程度も大きく、鉄筋比が大きいほど鉄筋の張力がシートの張力を大きく上回ることが分かる。

また、鉄筋の降伏応力に単位幅当たりの鉄筋断面積を乗じて求めた鉄筋の降伏張力と実験より得られた発生張力を比較すると、A 試験体では鉄筋の降伏張力と最大発生張力が同程度であるものの、鉄筋比が大きくなると、最大発生張力は鉄筋の降伏張力を下回ることが分かる。このように、主鉄筋の降伏の有無は補強効果に大きな影響を与えているものと考えられる。

3.4 補強効果係数 α と鉄筋比の関係

図-5 には、縦軸に補強効果係数 α を、横軸には各試験体の鉄筋比を示している。なお、図中の補強効果係数 α は 表-3 に示す耐力増分比とした。図-5 より、鉄筋比の増加に伴い補強効果係数 α がほぼ一定の割合で低下する傾向にあることが分かる。このことから、算定式における補強効果係数 α は、鉄筋比が大きいほど小さく設定する必要があると言える。本研究の範囲内では、鉄筋比が最も小さく鉄筋が降伏する A 試験体で $\alpha = 1.0$ 、鉄筋比が A 試験体の約2倍である B 試験体では α を $1/2 (= 0.5)$ 程度、約3倍である C 試験体では α を $1/3 (= 0.33)$ 程度と設定することにより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

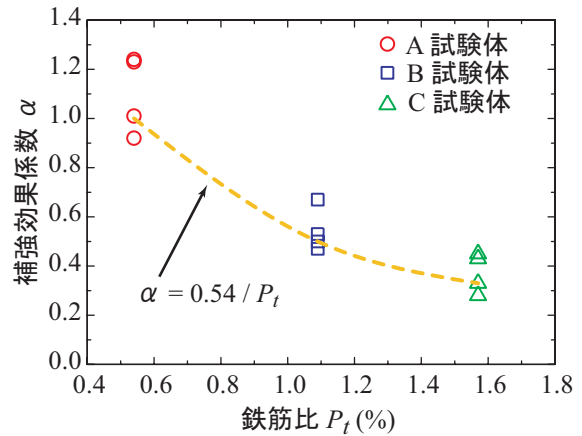


図-5 補強効果係数 α と鉄筋比の関係

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、多少のばらつきがみられるもののシートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きいほどシートの分担張力が增大し、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は鉄筋張力に比べて大幅に小さくなり、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た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算定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効果係数 α を小さく設定する必要がある。また、補強効果係数 α を鉄筋が降伏する試験体の鉄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】, 土木学会, 2002