

論文 短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを併用して補強したRC版の押し抜きせん断耐力

栗橋 祐介^{*1}・田口 史雄^{*2}・岸 徳光^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：本研究では，短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを併用する補強工法を適用したRC版の耐荷性能向上効果を検討することを目的に，本工法により下面補強したRC版の静載荷実験を行った。その結果，本工法を適用することにより，RC版の押し抜きせん断耐力が向上すること，補強後の押し抜きせん断耐力はFRPシート下面補強RC版の耐力算定法を準用することで大略推定可能であること，などが明らかになった。

キーワード：RC版，短繊維混入吹付けコンクリート，AFRPメッシュ，下面補強

1. はじめに

近年，既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化対策や種々の設計指針の改定に伴う補修補強工事が盛んに行われている。従来，これらの補強工法としては，鋼板および連続繊維(FRP)シートの接着工法や，ポリマーセメントモルタル吹付け工法などが多く採用されている¹⁾。しかしながら，これらの工法の場合，1) 補強材として鋼材を用いる場合には定期的な防錆処理の必要があること，2) FRPシート接着工法の場合には，前処理としてエポキシ系パテ等による不陸修正やプライマー塗布などの表面処理工程が必要となること，3) FRPシート接着に用いる含浸接着剤やポリマーセメントモルタルが比較的高価であること等，が課題となっている。そのため，より施工性，経済性および耐久性に優れた補修補強工法の確立が強く望まれている。

このような背景より，本研究では既設コンクリート構造物の合理的な補修補強工法の開発を目的として，アラミド繊維(AFRP)メッシュを配置して，ビニロン短繊維混入コンクリー

トを吹付ける補強工法を提案し，RC版を対象に本工法による耐荷性能の向上効果について実験的に検討した。なお，本工法は，鋼材や特殊なセメントを使用せず施工も簡易であることより，従来の補強工法の問題点を解消できる優れた工法の1つであるものと考えられる。

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，無補強を含め，短繊維混入の有無やAFRPメッシュの層数を変化させた全5体の単鉄筋RC版である。試験体名のうち，第1項目は吹付け増し厚補強の有無(N: 無

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	吹付けコンクリートの種類	AFRPメッシュ (保証耐力)
N	-	-
SN-0	普通	-
S-0	短繊維混入	-
S-1		1層 (200 kN/m)
S-2		2層 (400 kN/m)

*1 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 研究員 博(工) (正会員)

*2 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 室長 (正会員)

*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*4 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

表 - 2 吹付けコンクリートの配合

V_f (vol. %)	G_{max} (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					SP (C × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SF	S	G			
0	10	43	80	185	387	43	1365	340	0.5	3.6	6.5
1.5									2.0	5.8	6.0

$B = C + SF$, V_f : 短繊維混入率, G_{max} : 粗骨材の最大寸法, SP 高性能減水剤

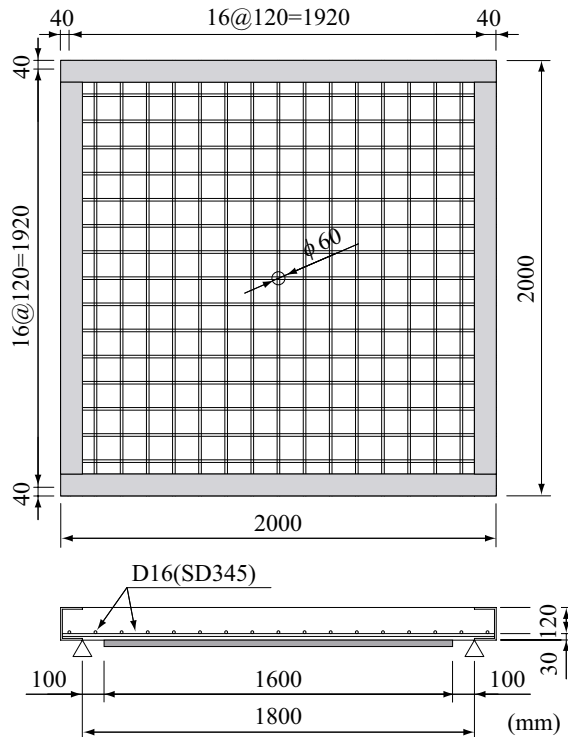


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

補強, S: 補強) を示し, 第 2 項目は AFRP メッシュの層数を示している。なお, 特別な場合として吹付けコンクリートに短繊維を混入しない場合についても検討することとし, 第 1 項目の末尾に N と付記している。

図 - 1 には, 本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示している。RC 版の寸法は, 2,000×2,000×150 mm である。鉄筋には D13 (SD345) を用い, 120 mm 間隔で格子状に配置している。また, 版の端部には, 溝型鋼を配置し鉄筋を溶接固定している。実験は, 純スパン長 1.8 m の 4 辺単純支持の下, RC 版の中央部に直径 60 mm, 高さ 200 mm の鋼製円柱を設置し, 油圧ジャッキを用いて加圧することにより行った。実験時におけるコンクリートの材

表 - 3 吹付けコンクリートの力学特性

V_f (%)	圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ靱 性係数 (MPa)
0	76.1	36.6	7.9	0.2
1.5	95.8	36.6	8.4	2.6

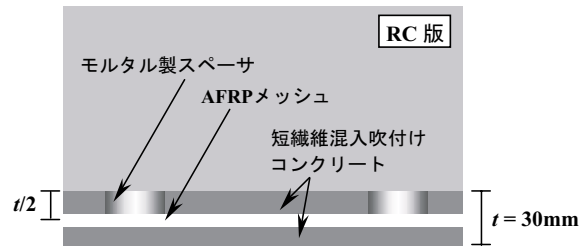


図 - 2 補強工法概念図

齢は 48 日であり, 圧縮強度は 24.3 MPa であった。また, 鉄筋の降伏強度は, 392 MPa であった。本実験の測定項目は, 載荷荷重 P , 載荷点変位 (以後, 単に変位 δ) である。また, 実験終了後には RC 版中央部を切断し, 切断面のひび割れ状況を観察している。

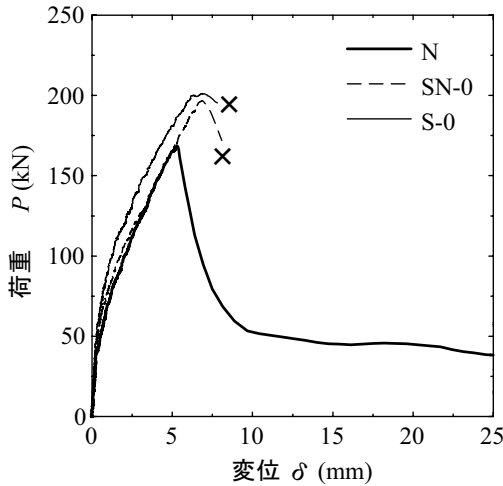
各試験体の補強は, 図 - 2 に示されているように, 1) 母材コンクリート表面の脆弱部の除去および吹付け材の付着力の向上を目的として, 吹付け施工面にブラスト処理 (深さ 1~2 mm) を施し, 2) AFRP メッシュを設定吹付け厚の 1/2 の位置にモルタル製スペーサを介して配置し, 3) コンクリートを吹付けてコテ仕上げすることにより行っている。なお, 補強範囲は, いずれの試験体の場合も版中央部から各支点の 10 cm 手前までの範囲としている。また, コンクリートの吹付けは, 土木学会コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準²⁾に

表 - 4 ビニロン短繊維の材料特性値

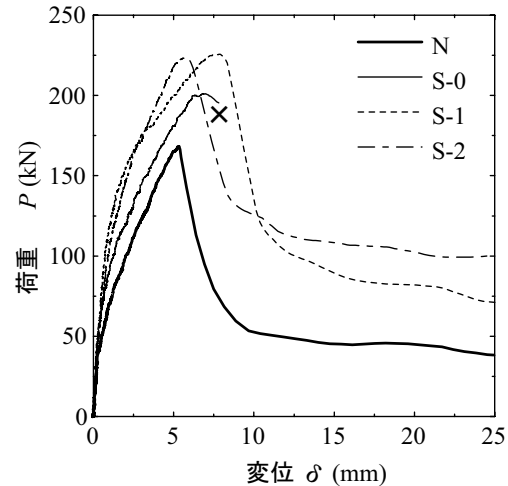
直径 (mm)	長さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪み (%)
0.66	30	29.4	0.88	7.0

表 - 5 AFRP メッシュの材料特性値

保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
100, 200	118	2.06	1.75



(a) 短繊維混入の影響



(b) メッシュ層数の影響

図 - 3 各試験体の荷重 - 変位関係

準拠して行った。表 - 2, 3 には、それぞれ吹付けコンクリートの配合および力学的特性値の一覧を示している。また、表 - 4, 5 には、それぞれビニロン短繊維および AFRP メッシュの材料特性値の一覧を示している。

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変位関係

図 - 3 には、RC 版の耐荷性状に及ぼす (a) 短繊維混入の有無や、(b) メッシュ補強量の影響について検討するため、各補強試験体の荷重 - 変位関係の実験結果を無補強試験体の結果と比較して示している。なお、SN-0 および S-0 試験体の場合には、最大荷重到達後、吹付けコンクリート部が剥落して変位の測定が不能となったため、最大荷重到達直後までの結果を示している。図 - 3(a) より、N 試験体の場合には、 $P = 50$ kN 程度でひび割れの発生による剛性勾配の低下を示した後、ほぼ線形に荷重が増大し、 $P = 160$ kN 程度で荷重が急激に低下して終局に至っていることが分かる。普通コンクリート吹付けのみを施した SN-0 試験体の場合には、

$P = 160$ kN 程度まで N 試験体とほぼ同様の耐荷性状を示した後、さらに荷重が増加して $P = 200$ kN 程度で終局に至っている。

短繊維混入コンクリート吹付けのみを施した S-0 試験体の場合には、 $P = 50$ kN 時においても剛性勾配の低下は見られず、 $P = 80$ kN 程度で徐々に勾配が低下し始め、 $P = 100$ kN 以降からは N や SN-0 試験体と同様の勾配でほぼ線形に荷重が増大していることが分かる。その後、SN-0 試験体よりも若干大きな荷重で終局に至っている。これらのことより、コンクリートの吹付けによって RC 版の耐力が向上し、さらに短繊維を混入する場合には、ひび割れ発生荷重および最大荷重が増大する傾向にあることが分かる。

図 - 3(b) より、メッシュを 1 層配置した S-1 試験体の結果を見ると、 $P = 130$ kN 程度までは剛性勾配の低下は見られず、その後徐々に勾配が低下し始め $P = 220$ kN で終局に至っている。一方、メッシュを 2 層配置した S-2 試験体の場合には、初期の剛性勾配は S-1 試験体の場合よりも若干小さいものの剛性勾配の低下は

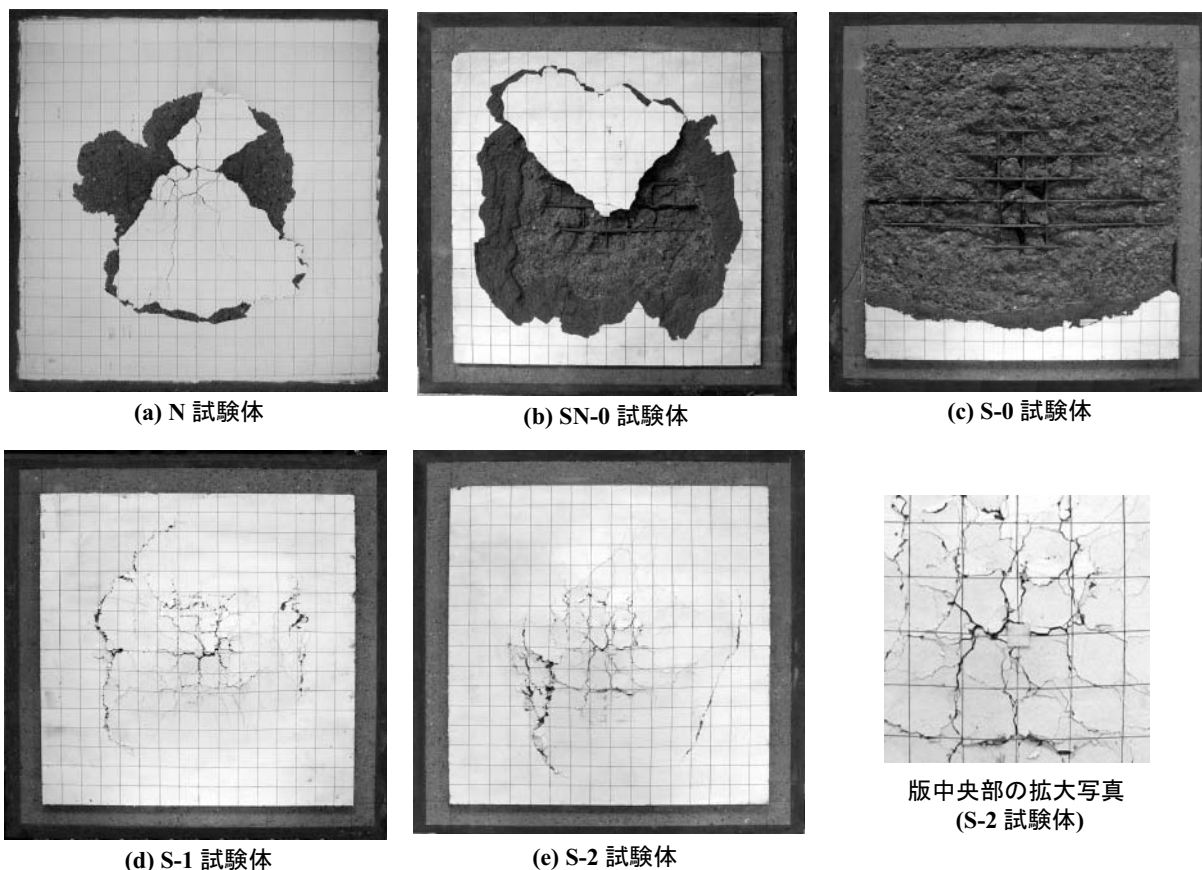


写真 - 1 実験終了後における RC 版裏面の破壊性状

顕著ではなく、最終的に S-1 試験体の最大荷重を若干下回る荷重で終局に至っている。これらのことより、メッシュを配置することにより、ひび割れの発生による剛性勾配の低下が抑制され、かつ押し抜きせん断耐力も向上することが明らかになった。ただし、本実験においては、メッシュの増加による耐力の向上効果は見られない。従って、本工法による RC 版の押し抜きせん断耐力の向上効果には、上限があるものと考えられる。

3.2 破壊性状

写真 - 1 には、実験終了後における RC 版裏面の破壊性状を示している。写真より、N 試験体の場合には、版中央部のコンクリートがほぼ円形状に押し抜かれ、かぶりコンクリートが部分的に剥落していることが分かる。SN-0 試験体の場合においても、N 試験体と同様、版中央部の吹付けコンクリートおよび RC 版のコンクリートがほぼ円形状に押し抜かれている。ただし、RC 版の押し抜きせん断ひび割れが吹

付けコンクリート内部にも進展しているため、N 試験体の場合よりも剥落範囲が大きく示されている。

S-0 試験体の場合には、吹付けコンクリートが RC 版のコンクリートとともに広範囲に剥落している。このことより、吹付けコンクリートと RC 版コンクリート間の付着は、コンクリートの引張強度以上に大きいものと考えられる。なお、実験時には、押し抜きせん断コーンの形成により荷重が急激に低下した後、吹付けコンクリートが RC 版のコンクリートとともに剥落していることを確認している。これは、短繊維の架橋効果により、吹付けコンクリート部のせん断耐力が増大し、RC 版に発生した押し抜きせん断ひび割れが吹付けコンクリート内部に進展せず、RC 版下縁部で水平方向に進展したことによるものと考えられる。

一方、S-1 および S-2 試験体の場合には、版中央部の吹付けコンクリートに微細なひび割れが多数発生し、かつ版中央部を中心とした円

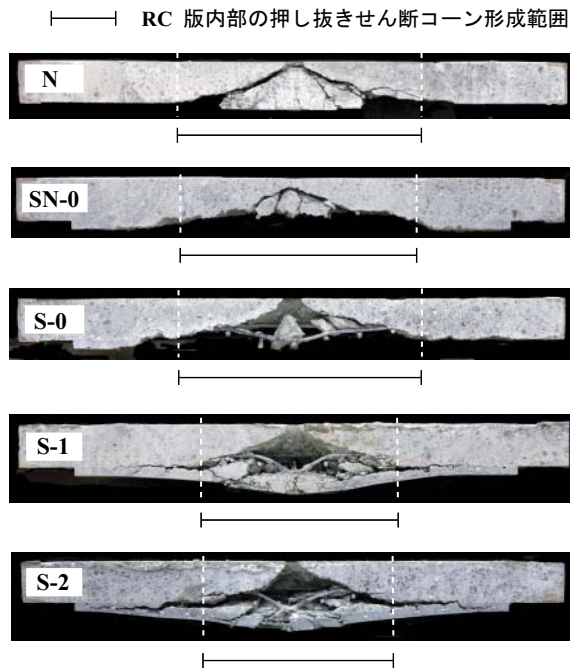


写真 - 2 切断面のひび割れ状況

形状のひび割れが発生していることが分かる。しかしながら、コンクリートの剥落は全く見られない。このことより、短繊維混入コンクリートとAFRPメッシュを併用することにより、押し抜きせん断破壊後においてもコンクリートの剥落を抑制可能であることが明らかになった。

写真 - 2には、版中央部切断面のひび割れ状況を示している。また、写真の下側には、RC版に発生した押し抜きせん断コーンの形成範囲も示している。写真より、N試験体の場合には、載荷点から両支点側に向かって押し抜きせん断ひび割れが発生し、一部でかぶりコンクリートの剥落が見られる。また、SN-0試験体の場合には、RC版から吹付けコンクリート部にかけて押し抜きせん断コーンが連続的に形成されており、その部分が大きく剥落している。S-0試験体の場合には、コーンの形成範囲は、SN-0試験体とほぼ同様であるものの、吹付けコンクリートは押し抜けずに広範囲に剥落していることが分かる。

一方、S-1およびS-2試験体の場合には、RC版に押し抜きせん断コーンの形成が見られるものの、吹付けコンクリートとAFRPメッシュ(以後、これらを合わせて補強材と呼ぶ)は剥落

していない。また、押し抜きせん断コーンの形成範囲は、NやSN-0、S-0試験体の場合よりも小さく示されている。これは、メッシュの配置によりRC版の曲げ剛性が向上したため、押し抜きせん断コーンの形成される角度が大きくなったことによるものと考えられる。このような性状は、FRPシート下面補強RC版の静載荷実験でも同様にみられた²⁾。また、補強材の全面的な剥離は、コーンの形成範囲が小さくなったために生じなかったものと考えられる。

3.3 押し抜きせん断耐力向上効果

前述のように、AFRPメッシュを配置した場合には、終局時においてもRC版のかぶりコンクリート部や吹付けコンクリート部が剥落していない。従って、両コンクリート部はメッシュの設置によって構造要素として機能し、押し抜きせん断耐力を分担しているものと考えられる。著者らのFRPシート下面補強RC版に関する研究³⁾においても、同様の現象が示され、かぶりコンクリート部の耐力寄与分(以後、耐力増分と呼ぶ)の算定式を提案している。ここでは、提案の算定式を準用して本工法による耐力増分を算出することとする。すなわち、

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

$$f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}, \quad \beta_d = \sqrt[4]{1/d}$$

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

ここで、 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 :鉄筋からメッシュまでの距離、 $p (=n_f \cdot A_f / (b \cdot d))$:補強筋比、 A_f :AFRPメッシュの断面積、 $n_f (=E_f / E_s)$:弾性係数比(メッシュ/鉄筋)、である。

これは、図 - 4に示しているように、1) $\alpha_1 = 45^\circ$ の角度で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、2)実験結果より得られるかぶりコンクリート部のひび割れ角度(α_2)で、かぶり部に押し抜きせん断断面が形成されるものと仮定して設計断面の周長(u_p)を求め、3)RC版の押し抜きせん断耐

表 - 6 ひび割れ角度とかぶり部の耐力負担および押し抜きせん断耐力

試験体名	ひび割れ角度		耐力増分		(i) / (ii)	押し抜きせん断耐力		(iii) / (iv)
	$\alpha 1$ (度)	$\alpha 2$ (度)	実測値 (i) (kN)	計算値 (ii) (kN)		実測値 (iii) (kN)	計算値 (iv) (kN)	
N	26	10	-	-	-	168.3	161.3	1.04
S-1	26	17	57.4	53.7	1.07	225.7	215.0	1.05
S-2	29	19	55.7	65.1	0.86	224.0	226.4	0.99

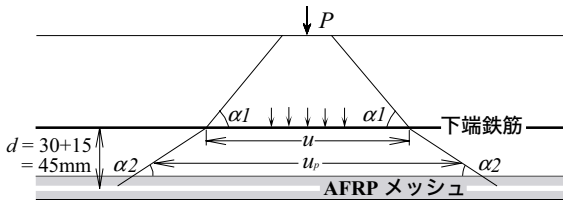


図 - 4 押し抜きせん断性状のモデル化

力算定式と同様の考え方で耐力増分を評価するものである。なお、版下面の AFRP メッシュは、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 - 6 には、N および S-1, S-2 試験体の増分耐力と押し抜きせん断耐力の実験値および計算値の一覧を示している。なお、表中の押し抜きせん断耐力の計算値 (iv) は、示方書によるかぶり部を無視した RC 版の計算値に AFRP メッシュとかぶりコンクリートおよび吹付けコンクリートによる増分耐力の計算値 (ii) を加えて算定したものである。

表より、S-1 試験体の場合には、耐力増分および押し抜きせん断耐力の計算値は、ともに実測値と良く対応していることが分かる。また、S-2 試験体の場合には、計算値が実測値よりも若干大きく示されている。これは、S-2 試験体の場合には、RC 版の耐力向上効果の上限に近い補強レベルに達しているためと推察される。なお、式 (1) のように、本補強法による RC 版の押し抜きせん断耐力向上のメカニズムは、かぶり部および吹付けコンクリート部がメッシュの配置によって押し抜きせん断力に抵抗することによるものである。従って、補強効果の上限はかぶり部および吹付けコンクリート部の厚さと強度に大きく依存するものと考

えられる。

以上の結果より、本工法により下面補強した RC 版の押し抜きせん断耐力は、FRP シート下面補強 RC 版の場合と同様の算定式を用いることにより推定可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、短繊維混入吹付けコンクリートと AFRP メッシュを併用する補強工法による RC 版の耐荷性能向上効果を検討することを目的に、本工法により下面補強した RC 版の静載荷実験を行った。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本工法を適用することにより、RC 版の押し抜きせん断耐力が向上すると共に、かぶりコンクリートの剥落が抑制される。
- 2) 本実験に用いた吹付けコンクリートと RC 版コンクリート表面との付着強度は、コンクリートの引張強度以上に大きい。
- 3) 補強後の RC 版の押し抜きせん断耐力は、FRP シート下面補強 RC 版の耐力算定法を準用することで大略推定可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針 (案)，コンクリートライブラリ - 95，1999.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [標準編] 土木学会規準，2002.
- 3) 三上 浩，岸 徳光，栗橋祐介，松岡健一：FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp. 847-852，2001