

論文 AFRP ロッドを下面埋設して補強した RC 版の押し抜きせん断性状

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・今野 久志^{*3}・田村 富雄^{*4}

要旨：本研究では、AFRP ロッドを下面埋設して補強した RC 版の押し抜きせん断性状および補強効果を検討するため、直径の異なる 3 種類の AFRP ロッドを用いて押し抜きせん断実験を行った。また、2 方向 AFRP シートを用いて補強した場合と比較し、補強材の耐荷性状に与える影響も併せて検討した。その結果、かぶりコンクリート部の耐力寄与を仮定した計算押し抜きせん断耐力は、シート補強 RC 版と同様、ロッドを用いる場合も実測値とほぼ対応し、押し抜きせん断耐力の向上が期待できること等が明らかとなった。

キーワード：RC 版、AFRP ロッド、AFRP シート、押し抜きせん断

1. はじめに

近年、新活荷重の対応策および劣化部補強対策として、上面増厚工法や下面補強工法の一つである FRP シート接着工法などによる道路橋鉄筋コンクリート (RC) 床版の補強工事が盛んに行われている。しかしながら、既往の床版下面補強工法では、コンクリート表面を完全に補強材で被覆してしまうため、1) コンクリートに発生したひび割れの目視点検が不能になること、2) コンクリートからの排水が困難であり部材内部に滞水して床版コンクリートの疲労耐久性が低下すること、等の問題点を有している。

このような背景より、本研究では道路橋 RC 床版などの版状構造物の新しい補強方法として、組紐状アラミド繊維製ロッド (以後、AFRP ロッド) を RC 部材のかぶりコンクリートに埋設する工法を提案し、その補強効果を RC 版の押し抜きせん断実験によって検討した。なお、本実験では、3 種類の直径を有する AFRP ロッドを埋設した RC 版と、過去に実施した 2 方向 AFRP シートを下面接着した RC 版¹⁾を比較し、押し抜きせん断性状に与える補強材の種類および補強量の影響に着目して検討を行った。

2. 実験の概要

表-1に本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体は、打設時期が異なるためロッド、シート補強で各 1 体の無補強試験体を用い、ロッド補強試験体 3 体、シート補強試験体 2 体の全 7 体である。表中、試験体名の第一項目は、補強材の種類 (R: ロッド, S: シート) を示し、第二項目は補強材の単位幅あたりの引張剛性 $E \cdot A$ (MN/m) の概略値を示している。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋状況を、AFRP ロッドおよび AFRP シートの補強概要とともに示している。RC 版の寸法は、R/S 試験体ともに $1,650 \times 1,650 \times 150$ mm、かぶり厚さ

表-1 試験体の一覧

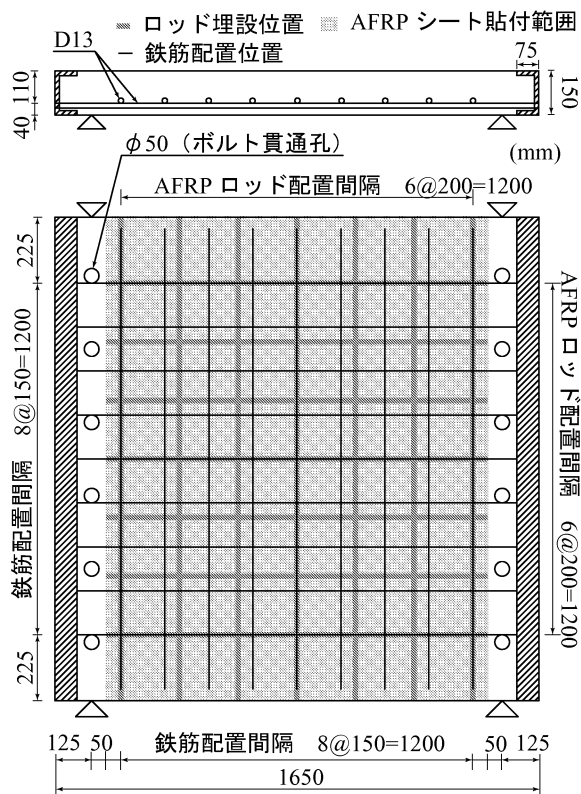
試験体名	補強材	補強量	引張剛性 $E \cdot A$ (MN/m)
R-0	-	無補強	-
R-7	AFRP ロッド	ϕ 5.0 mm	7.4
R-16		ϕ 7.3 mm	15.8
R-24		ϕ 9.0 mm	23.6
S-0	-	無補強	-
S-38	2 方向 AFRP シート	1 層	38.0
S-76		2 層	76.0

*1 三井住友建設 (株) 室長 技術研究所土木構造研究室 博 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 (独) 北海道開発土木研究所 主任研究員 構造研究室 博 (工) (正会員)

*4 ファイベックス (株) 代表取締役 博 (工) (正会員)



図－１ 試験体概要図

は 40 mm である。主鉄筋および配力鉄筋には D13 (SD295A) を用い、150 mm 間隔で下端のみに配置している。

R 試験体製作にあたり、先ず配力鉄筋方向のロッドを埋設するために直径の 2 倍強の深さおよびロッド径を多少上回る幅の溝をカッターで掘削し、その後、主鉄筋方向のロッドを埋設するための溝を、直径を多少上回る幅および深さで掘削した。その溝内にエポキシ樹脂系パテ材を充填した後、配力鉄筋方向、主鉄筋方向の順にロッドを埋設し、再度、パテ材を充填した。またロッド埋設後、ロッドの浮き上がりが生じないように鋼製の刃型治具で押さえ込み所定の位置にロッドを配置した。ロッドの配置位置は、版中央部から配力鉄筋方向には全面、主鉄筋方向には両側支点の 50 mm 手前までとし、それぞれ版中央部から 200 mm 間隔で配置している。また、S 試験体の場合には、シート接着部のコンクリート表面に付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理を施した後、エポキシ系含浸樹脂を用いてシートを接着している。

表－２ AFRP ロッドの力学的特性値

ロッド 径 ϕ (mm)	公称 断面積 A (mm ²)	弾性 係数 E (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 歪 ε (%)
5.0	19.6	62.5	1.45	2.00
7.3	42.0			
9.0	63.0			

表－３ ２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 歪 ε (%)
435/435	0.3/0.3	126.5	2.48	2.00

シートの接着範囲は、R 試験体と同様に配力鉄筋方向には全面、主鉄筋方向には両側支点の 50 mm 手前までとしている。

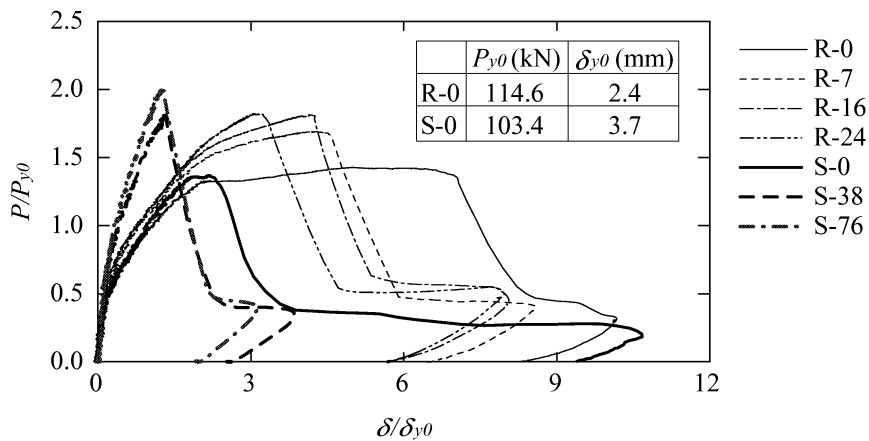
試験体の一对辺は支持間隔が 1,400 mm で支点部は回転を許容するがボルト締めで浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造とし、他対辺は自由とした。なお、載荷板は直径 60 mm の鋼製厚肉円板とし版中央に設置した。

実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度および鉄筋の降伏強度は、R/S 試験体でそれぞれ $f'_c = 31.6, 16.7$ MPa, $f_y = 362, 355$ MPa であった。表－2, 3 には、AFRP ロッドおよび 2 方向 AFRP シートの力学的特性に関する公称値の一覧を示している。本実験における測定項目は、載荷荷重、版中央部変位、鉄筋、ロッドおよびシートの主鉄筋方向の歪である。また、実験終了後には配力鉄筋方向の版中央部を切断して破壊面の観察を行っている。

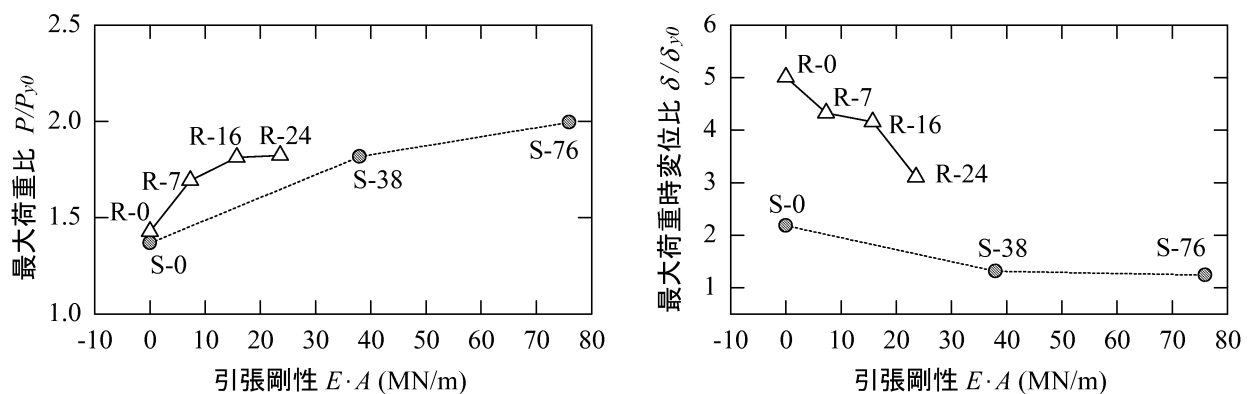
3. 実験結果及び考察

3.1 無次元荷重－変位関係

図－2 には、各試験体の荷重と版中央部変位（以後、単に変位）の関係を比較して示している。ここで、R および S 試験体のコンクリート強度が大きく異なることより、R/S-0 試験体の主鉄筋降伏荷重 P_{y0} および変位 δ_{y0} でそれぞれ無次元化して示している。



図－２ 無次元荷重－変位関係



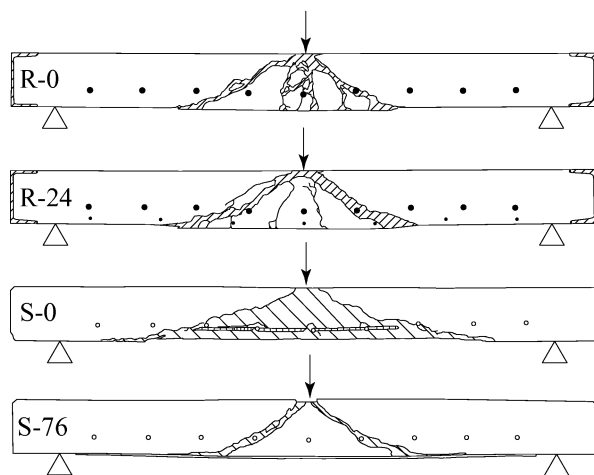
図－３ R/S-0 試験体の降伏荷重および変位に対する最大荷重比および最大荷重時変位比

図より、無補強試験体 R/S-0 は、無次元荷重 $P/P_{y0} = 0.4 \sim 0.6$ 程度で曲げひび割れが発生し、版の曲げ剛性が大きく低下していることが分かる。その後、 $P/P_{y0} = 1.4$ 、 $\delta/\delta_{y0} = 2.0$ 程度までは線形に荷重と変位が増加している。しかしながら、R-0 試験体は $\delta/\delta_{y0} = 7.0$ 程度まで荷重を保持し、S-0 試験体は 2.2 程度で押し抜きせん断破壊に至った。これは、R-0 試験体はコンクリート強度が高く、主鉄筋降伏の影響が出現したためと考えられる。

一方、補強材の引張剛性が大きな S-38/76 試験体は、無補強試験体やロッド補強試験体に比べて剛性低下が顕著ではない。また、ロッド補強試験体の曲げひび割れ発生後の剛性勾配は無補強試験体と大差がない。しかし、最大荷重は引張剛性（ロッド径）の増加に対応して増大し、R-16/24 試験体は S-38 試験体と同程度の最大荷重を示している。このように、ロッド補強

は、シート補強のように剛性低下を抑制する効果は小さいものの、耐力の向上効果を見込めることが分かる。これは、かぶり部での補強は、耐力の向上効果とともにひび割れの発生やひび割れ幅の拡大を抑制する効果があり、このひび割れ抑制効果はシート補強の方でより顕著であるためと考えられる。なお、いずれの補強試験体も押し抜きせん断破壊したが、補強材は破断していないことを確認している。

図－３には無補強試験体の降伏時を基準とした各試験体の最大荷重比および最大荷重時変位比と補強材の引張剛性 $E \cdot A$ との関係を整理して示している。図より、ロッドおよびシート補強にかかわらず、最大荷重比は引張剛性の増加に対応して増大する傾向にあることが分かる。しかし、両補強材ともに荷重の増加傾向は剛性と線形関係ではなく頭打ちになる傾向を有していることから、耐力の増大効果には限界がある



図－４ 切断面のひび割れ性状

ものと考えられる。なお、同一引張剛性で両者を比較すると、ロッド補強の方がより低い引張剛性でも最大荷重比が大きく、耐力向上効果に関してはロッド補強の方が効率的であると考えられる。

一方、最大荷重時変位比は、補強材の種類にかかわらず引張剛性の増加に対応して減少する傾向を示しているが、変位比はシート補強に比べてロッド補強の方が大きい。これは、前述したように、ロッド補強のひび割れ抑制効果がシート補強よりも小さいためと考えられる。

3.2 押し抜きせん断性状

図－４には配力鉄筋方向の版中央部の切断面におけるひび割れ性状の一例を示している。図から明らかなように、上縁から下端鉄筋までのひび割れ角度(α_1)とかぶりコンクリートのひび割れ角度(α_2)とが異なり、これらは試験体によっても変化していることが分かる。各試験体のひび割れ角度を整理して表－４に示す。表より、 α_2 はいずれの試験体においても α_1 を下回っており、かぶり部において押し抜きせん断面が緩やかとなり、広がりをもつ傾向にあることが分かる。なお、補強試験体の α_2 はR-7試験体で 30° と大きいものの、その他は平均的に 20° 程度である。

3.3 押し抜きせん断耐力

かぶりコンクリートがロッドおよびシート補強によってより健全となり、押し抜きせん断耐

表－４ ひび割れ角度の一覧

試験体名	α_1 (度)	α_2 (度)
R-0	36	22
R-7	34	30
R-16	36	17
R-24	37	16
S-0	23	12
S-38	41	22
S-76	37	22

力の向上に寄与するものと仮定して、土木学会コンクリート標準示方書²⁾(以後、示方書)に基づいてかぶり部の押し抜きせん断耐力を計算した。式(1)に耐力算定式を示す。

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

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

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

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

u : 載荷面の周長 (mm), u_p : 設計断面の周長 (mm)

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

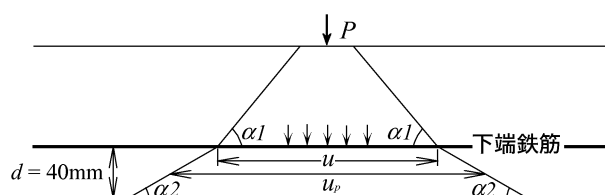
A_f : 補強材の断面積 (mm²), b : 幅 (mm)

$n_f (=E_f/E_s)$: 弾性係数比 (補強材/鉄筋)

すなわち、図－５に示す押し抜きせん断性状のモデル化を参考に、 $\alpha_1 = 45^\circ$ 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、前述した α_2 の実測値でかぶり部に押し抜きせん断面が形成されるものと仮定して、設計断面の周長(u_p)を求め評価することとした。なお、版下面のロッドおよびシートは、鉄筋との弾性係数比を用いて補強筋比として考慮した。なお、本手法はFRPシートを下面接着したRC版の押し抜きせん断耐力を比較的良好に評価できる方式として、著者らが既往の研究¹⁾で提案した方式である。上記に基づいて算出したかぶり部の押し抜きせん断耐力を表－５に示している。表には、かぶり部の計算押し抜きせん断耐力(ii)に、無補強試験体の計算耐力をそれぞれ加算した計算押し抜きせん断耐力(iv)を実測耐力(iii)と比較して示している。ここで、耐力増分の実験値(i)は補強

表－５ かぶり部の耐力負担と押し抜きせん断耐力

試験体名	耐力増分			押し抜きせん断耐力		
	実験値 (kN) (i)	計算値 (kN) (ii)	(i) / (ii)	実験値 (kN) (iii)	計算値 (kN) (iv)	(iii) / (iv)
R-0	-	-	-	163.7	161.6	1.01
R-7	30.3	33.6	0.90	193.9	195.2	0.99
R-16	44.1	46.6	0.95	207.8	208.2	1.00
R-24	45.3	51.4	0.88	209.0	213.0	0.98
S-0	-	-	-	141.5	109.4	1.29
S-38	46.3	48.6	0.95	187.8	158.0	1.19
S-76	64.9	60.8	1.07	206.4	170.2	1.21



図－５ 押し抜きせん断性状のモデル化

試験体の押し抜きせん断耐力から無補強試験体の耐力をそれぞれ差し引いた耐力である。なお、無補強試験体の計算値は示方書に基づいて下端鉄筋より上側の断面を対象に、押し抜きせん断面の角度 α_1 を 45° と仮定して算出した値である。

表より、かぶり部の耐力負担として算出した計算値(ii)は、S-76試験体を除き、実験値(i)に比べて多少大きいものの両者はほぼ対応していることが分かる。また、押し抜きせん断耐力の計算値(iv)は、かぶり部の耐力負担が全体の15～30％程度と小さいことから、実測の耐力と比較的良好に対応している。従って、ロッド補強による押し抜きせん断耐力の増加は、シート補強同様、主としてかぶりコンクリートが押し抜きせん断耐力の向上に寄与するためと考えられる。なお、今後はロッドやシートの剥離を考慮したより精度の高い耐力算定式を提案したいと考える。

3.4 張力分担性状

図－6には、各試験体の主鉄筋方向における鉄筋、ロッドおよびシートの分担張力を示している。張力は、各点に貼り付けた歪ゲージの値を用いて算出した。なお、鉄筋の配置間隔は

150 mm、ロッドの場合は200 mmであるため、ここではロッドおよびシートの張力は鉄筋間隔に合わせ、150 mmあたりの張力に換算した。

(a) 図より、R試験体の主鉄筋の張力は最大で45 kN程度を示していることが分かる。この値は鉄筋の降伏張力に対応していることから、R試験体は補強の有無にかかわらず、版中央部が降伏して押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。また、無補強試験体が降伏する $P/P_{y0} = 1.0$ において、補強試験体はいずれも降伏張力には至っていない。このことより、ロッド補強によって主鉄筋の分担張力が軽減されていることが分かる。その後、荷重の増加とともに主鉄筋の大きな張力を分担する範囲が版中央部から支点側に大きく拡大している。また、ロッドの張力分布は、荷重の増加とともに載荷点を頂点とする三角形状を形成し、ロッドの場合も張力分担範囲が支点側に拡大する傾向が示されている。しかしながら、ロッドの分担張力は最大でも鉄筋の半分程度以下と小さい。これは、ロッド径を増加させても剥離が生じるため、ある張力以上を負担することはできないことを示している。このため、R-16試験体とR-24試験体の押し抜きせん断耐力に大差が無かったものと推察される。

(b) 図より、R試験体同様、S試験体においても主鉄筋が降伏して終局に至っていることが分かる。また、S-0試験体の主鉄筋降伏時($P/P_{y0} = 1.0$)では、補強試験体の主鉄筋の分担張力はS-0試験体の半分程度以下と小さく、シート補

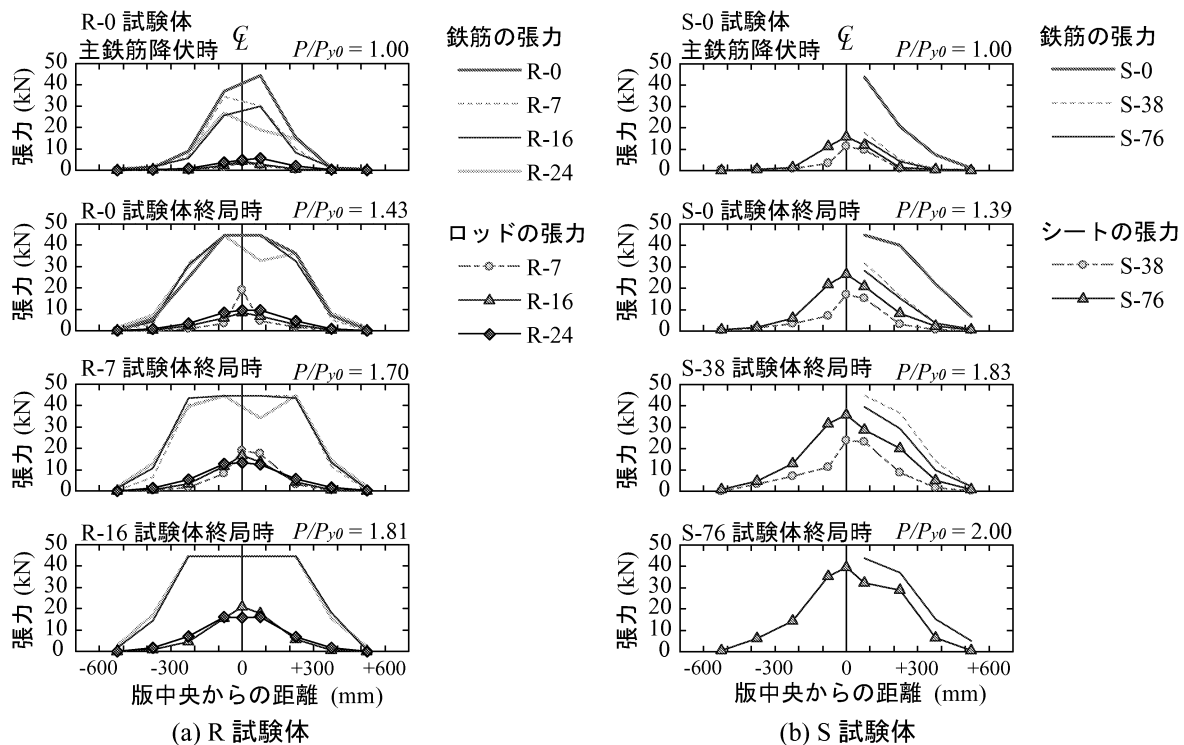


図-6 鉄筋、AFRP ロッドおよび2方向AFRP シートの分担張力の比較図

強の場合も主鉄筋の分担張力が軽減されていることが分かる。また、引張剛性 $E \cdot A$ が最も大きい S-76 試験体では、S-38 試験体に比べ、鉄筋の分担張力が小さく、シートのそれが大きく示されていることが分かる。このことから、 $E \cdot A$ を大きくすることで主鉄筋の分担張力がより軽減され、大きな押し抜きせん断耐力を示したものと考えられる。なお、 P/P_{y0} が同程度の状況で R/S 試験体の補強材の分担張力を比較すると、シートの方がロッドよりも全般的に大きいことが分かる。これは、シート補強の方がロッド補強よりも引張剛性が大きいためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、AFRP ロッドを下面埋設して補強した RC 版の押し抜きせん断性状および補強効果を検討するため、直径の異なる3種類の AFRP ロッドを用いて押し抜きせん断実験を行った。また、2方向 AFRP シートを用いて補強した場合と比較し、補強材の耐荷性状に与える影響も併せて検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると下記の通りである。

- (1) RC 版下面に AFRP ロッドを埋設して補強することにより、2方向 AFRP シートを用いる場合と同様に押し抜きせん断耐力の増加が期待できる。ただし、剛性低下の抑制効果はシート補強に比べて小さい。
- (2) ロッドおよびシートの引張剛性 $E \cdot A$ を増大させることにより、最大荷重比が増大し、最大荷重時変位比は小さくなる。しかしながら、いずれの補強材でも $E \cdot A$ の増加と耐力の向上効果は線形比例関係にはない。
- (3) かぶりコンクリート部の耐力寄与を仮定した計算押し抜きせん断耐力は、シート補強した RC 版と同様、ロッドを用いる場合も実測値とほぼ対応する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (平成 8 年制定) 設計編, 1996