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

Effects of rebar ratio on Punching shear capacity of RC slabs bonded 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)
室蘭工業大学	正会員	澤田 純之	(Sumiyuki Sawada)
室蘭工業大学	〇学生員	近藤 雅俊	(Masatoshi Kondo)

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^{1),2)}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

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 <i>E・t</i> (MN/m)
R1-N	D13	-	-	-
R1-S1	@150	435/435	1	28.3
R1-S2	(0.69 %)	(二方向)	2	56.6
R2-N	D16	-	-	-
R2-S1	@200	435/435	1	28.3
R2-S2	(0.85 %)	(二方向)	2	56.6
R3-N	D13	-	-	-
R3-S1	@100	435/435	1	28.3
R3-S2	(1.00 %)	(二方向)	2	56.6
R4-N	D19	-	-	-
R4-S1	@200	435/435	1	28.3
R4-S2	(1.23 %)	(二方向)	2	56.6

表-1 試験体一覧

表-2 AFRP シートの力学的特性値

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

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 シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断耐 力は示方書式³⁾より得られる有効高さ部のせん断耐力に シート接着により有効断面となると仮定したかぶり部のせ ん断耐力を加算することにより評価が可能であること,3) 下縁かぶり部のせん断耐力負担は鉄筋比により異なり,補 強効果係数を適切に考慮する必要があること,などを明ら かにしている.

本研究では、既往の研究で提案した鉄筋比と補強効果係 数の関係式のデータ補間を目的として、鉄筋比の違いが シートの補強効果に与える影響を検討するため、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 RC 版を対象に AFRP シートを下面接着し、静的押し抜きせん 断実験を実施した.







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4種類、補強量を各々無補強試験体 およびシートを1、2層とした計3種類の全12体である. 表中、試験体名の第1項目は主鉄筋比(R1:鉄筋比0.69%, R2:鉄筋比0.85%, R3:鉄筋比1.00%, R4:鉄筋比1.23 %)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・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 R1, R3 試験体で D13 を 150,100 mm 間隔, R2 試験 体で D16 を 200 mm 間隔, R4 試験体で D19 を 200 mm 間 隔で下端のみに配置している. 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(処理深さ 1~2 mm 程度)を施している.

RC版の支持条件は四辺単純支持であり,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、R1,R4 試験

体で f'_c = 27.7 MPa, R2, R3 試験体で f'_c = 31.0 MPa, 鉄筋の 降伏強度は D13, D16, D19 でそれぞれ f_y = 380, 396, 382 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 部変位である.これらの出力は,連続的にデジタルメモリ 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) の関係を試験体シリーズごとに示している.図中には無 補強試験体の計算せん断耐力を併せて示している.図-2 (a)より、無補強のR1-N試験体は計算せん断耐力を大きく 上回る最大荷重を示した後荷重が急激に低下して押し抜 きせん断破壊に至っていることが分かる.一方、シートで 補強したR1-S試験体は、シート補強層数の増加に伴い剛 性勾配や最大荷重が大きくなる傾向にある.図-2(b)よ り、無補強のR2-N試験体は計算せん断耐力を多少下回る 荷重で押し抜きせん断破壊に至っている.シートで補強し たR2-S試験体はシート補強層数の増加に伴い最大荷重が 増大する傾向にある.図-2(c),(d)より、無補強のR3, R4-N試験体では最大荷重が計算せん断耐力を多少上回り

平成18年度	土木学会北海道支部	論文報告集	第63号

		計算	計算	実測	実測	せん断	耐力
試験体名	α2	せん断耐力	耐力增分	せん断耐力	耐力增分	耐力比	增分比
		(kN) (i)	(kN) (ii)	(kN) (iii)	(kN) (iv)	(iii)/(i)	(iv)/(ii)
R1-N	-	214.9	-	271.2	-	1.26	-
R1-S1	15.8	290.6	75.7	294.7	23.5	1.01	0.31 (1.05)*
R1-S2	20.5	303.4	88.5	305.0	33.8	1.01	0.38 (1.02)*
R2-N	-	243.4	-	230.6	-	0.95	-
R2-S1	16.4	322.5	79.1	318.6	88.0	0.99	1.11
R2-S2	18.6	339.4	96.1	354.9	124.3	1.05	1.29
R3-N	-	256.5	-	282.6	-	1.10	-
R3-S1	18.6	332.7	76.2	319.5	36.9	0.96	0.48
R3-S2	16.6	355.8	99.3	347.6	65.0	0.98	0.65
R4-N	-	260.0	-	291.6	-	1.12	-
R4-S1	14.9	337.0	77.9	319.5	27.9	0.95	0.36
R-S2	18.4	351.1	91.1	364.7	73.1	1.04	0.80
*:N 試験体の計算せん断耐力を実測せん断耐力とした場合							

表-3 実験結果一覧

押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる.シート補 強した R3, R4-S 試験体ではシート補強層数の増加に伴っ て最大荷重が増大する傾向にある.

3.2 **ひび割れ分布性状**

写真-1には、実験終了後に版中央部を切断し、その切 断面のひび割れ分布性状を示した。各試験体のかぶりコン クリート部のひび割れ角度(α2)を整理して**表-3**に示し ている。なお、表中のひび割れ角度は左右の平均値であり、 角度は切断面の写真を基に線形を仮定して決定した。写真 から、版上縁から下端鉄筋までのひび割れ角度(α1)と下縁 かぶりコンクリート部のひび割れ角度(α2)が異なってい ることが分かる。また、シート層数が増えるに伴ってα1 が大きくなり、45°に近づくことが分かる。同様に、α2 も 大きくなる傾向にある。これは、シート補強することで版 の曲げ剛性が増大し、変位が抑制されるためと考えられる。

3.3 押し抜きせん断耐力の評価

著者らは既往の研究において、コンクリート標準示方書 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、**写真-2**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、それに示方書式による有効高さ部分の押 し抜きせん断耐力算定式を、式(1)に、示方書の面部材 の押し抜きせん断耐力算定式を、式(2)に、かぶりコンク リートの押し抜きせん断耐力評価式を示す.式(1)は、押 し抜きせん断ひび割れが集中荷重載荷面の端部より下端鉄 筋位置まで斜め45°下方に進展すると仮定し、そのひび割 れの上面からの投影面積にコンクリートの引張強度や有効 高さなどの影響係数を乗じることにより押し抜きせん断耐 力を算定している.

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \tag{1}$$

$$CV_{pcd} = \alpha \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \tag{2}$$







図-3 押し抜きせん断性状のモデル化

$$\begin{split} f_{pcd} &= 0.20 \sqrt{f_{cd}'} ~(\text{N/mm}^2), \quad \beta_d = \sqrt[4]{1/d} ~(d:\text{m}) \\ \beta_p &= \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/\left(1 + 0.25u/d\right) \end{split}$$

ここで,式(2)中の各定数は, 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, $p(=n_f \cdot A_f/(b \cdot d))$: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)

式(2)は、実験終了後の切断面(写真-2参照)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行いそれに 基づいて算定している.すなわち、 α 1 = 45°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 α 2の角度でかぶりコンク



図-4 補強効果係数 α と主鉄筋比の関係

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α2,式 (1)と式(2)を加算して求めた計算せん断耐力,式(2)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α=1.0として算出してい る.また,R1-S 試験体の耐力増分比については,無補強試 験体の実測せん断耐力が計算せん断耐力を大きく上回った ため,計算せん断耐力を用いて耐力増分比を算出した結果 を()内に示している.

R1 試験体のせん断耐力比は,無補強の R1-N 試験体では 1.26 と実測せん断耐力が計算せん断耐力を大きく上回る ものの,シート補強した R1-S 試験体ではせん断耐力比が 1.01 とよく対応していることが分かる. R2-S 試験体では, せん断耐力比が 0.99 ~ 1.05 と計算せん断耐力と実測せん 断耐力が比較的良好に対応していることが分かる. R3-S, R4-S 試験体においてもせん断耐力比は 0.95 ~ 1.04 と対応 は比較的良好である.

以上のことより、既往の提案式を用い,実測のα2を考慮し,補強効果係数を1.0として計算したシート補強 RC 版の押し抜きせん断耐力は実測値と大略対応することが分かる.

3.4 補強効果係数 α と主鉄筋比の関係

図-4には、縦軸に補強効果係数 $\alpha \epsilon$ 、横軸に各試験体 の主鉄筋比を示している.なお、補強効果係数 α は **表**-3 に示す耐力増分比とした.また、R1-S 試験体における補強 効果係数の算出に計算せん断耐力を用いた結果を())付き で示している.図-4より、R1-S 試験体は提案式に比べ て補強効果係数 α が小さいことが分かる.これは、無補強 の R1-N 試験体の実測せん断耐力が計算せん断耐力を大き く上回ったためである.そのため、R1-N 試験体の実測せ ん断耐力の変わりに計算せん断耐力を用いると、提案式の 値を上回り多少安全側に評価することができる. R2-S 試験体の補強効果係数 α は提案式の値よりも大きく安全側 に評価でき,R3-S,R4-S 試験体の下限値は,ほぼ提案式 の補強効果係数に合致していることが分かる.以上より, 実験結果の下限値として設定した既往の補強効果係数 $\alpha =$ 0.54/ P_t (P_t :主鉄筋比)は,本実験結果とも比較的良好に対応することが明らかとなった.

なお, R2-S 試験体や R4-S2 試験体で補強効果係数 α が 大きく示されたのは,主鉄筋の配置間隔が 200 mm と広い ことに関連するものと考えられる.すなわち,主鉄筋間隔 が広いことでひび割れが発生しやすく,ひび割れ幅が拡大 しやすい状況においては,シートの下面接着によって上記 のひび割れが抑制され,シートの補強効果が大きく出現し たものと考えられる.

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および既往の提案式の妥当性を検討するため、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.

- 既往の提案式で実測のα2を用い、補強効果係数を1.0 としたシート補強RC版の計算押し抜きせん断耐力は 実測値と比較的良好に対応する.
- 2) 提案した補強効果係数 α = 0.54/P_i は、本実験結果の 下限値と比較的良好に対応する。また、補強効果係数 αは主鉄筋比が小さいほど、主鉄筋間隔が広いほど大 きくなる傾向にある。

参考文献

- 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
- 三上浩,岸徳光,藤田学,澤田純之: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、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1459-1464, 2006
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(構造性能照査編),2002