論文 2方向AFRPシートを下面接着した各種RC版の押し抜きせん断性状

三上 浩*1・岸 徳光*2・田口 史雄*3・松岡 健一*2

要旨:本研究では,2方向 AFRP シートを下面接着した各種 RC 版の押し抜きせん断実験を 行い,シート補強 RC 版の押し抜きせん断性状に与える RC 版の特性の影響を検討した。実 験は,かぶりコンクリート厚さ,鉄筋比および RC 版の有効高さに着目し,基準となる試験 体を含む4種類の RC 版に対して,無補強および2方向 AFRP シート1層もしくは2層を下 面接着した全12体の RC 版を用いて実施した。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実測値とほぼ対応するが,鉄筋比や有効高さが大き い場合には危険側の評価を与える傾向にあること等が明らかとなった。

キーワード: 2方向 AFRP シート, RC 版, 押し抜きせん断性状

はじめに

近年,既存鉄筋コンクリート (RC)構造物を 各種連続繊維シート (FRP シート) で補強する 工法が施工の簡便性,工期短縮,高耐久性など の観点から盛んに適用されている。しかしなが ら,RC 版などの面部材を FRP シートで補強し た際の押し抜きせん断性状に関する研究例は少 なく^{1), 2)}, 未だ十分には明らかになっていない。 著者らは既往の研究²⁾において,1) FRP シート 補強 RC 版の押し抜きせん断耐力の増大は,主 としてかぶり部コンクリートの押し抜きせん断 抵抗に起因すること, 2) FRP シートの引張剛 性をほぼ同等とすることでほぼ同等の押し抜き せん断耐力の向上が期待できること,3)アラミ ド繊維シートを直交2方向に織り上げた2方向 シート (2方向 AFRP シート) は, 1方向シー トを直交して貼り付けた場合と同等以上の補強 効果が期待できること,などを明らかにした。

しかしながら,既往の研究¹⁾でも明らかなよう に,FRP シートによる RC 版の補強効果はひび 割れの発生やひび割れ幅拡大の抑制に基づくも のであることから,RC 版の特性によっても FRP シートの補強効果は異なることが予想され る。そこで本研究では,かぶり厚さ,鉄筋比, 有効高さが異なる各種 RC 版下面に2方向 AFRP シートを1層もしくは2層接着し,押し 抜きせん断性状を検討した。

2. 実験の概要

表 - 1に試験体の一覧を示す。表中,A- 試験 体は基準試験体²⁾であり,B- 試験体はかぶり厚 さを,C- 試験体は鉄筋比を,D- 試験体は有効 高さを,各々 A- 試験体に対して変化させた試 験体である。なお,C- 試験体は鉄筋径を基準試 験体の D13 から D16 に変更して鉄筋比を増 大させている。また,D- 試験体は有効高さを基 準試験体よりも 30 mm 高くしたが鉄筋比はほ ぼ同等としている。各断面種類の試験体は,無 補強試験体とその下面に2方向 AFRP シート を1層もしくは2層接着した3種類で試験体の 総数は12体である。

図 - 1 に試験体の形状寸法と配筋状況および 鉄筋に貼り付けた歪ゲージの位置を B- 試験体 を例に示す。なお,シートの貼り付け範囲は配 力鉄筋方向に全面,主鉄筋方向には両側支点の 50 mm 手前までとした。試験体の一対辺は支持

^{*1} 三井建設(株)主席研究員 技術研究所 博(工) (正会員)

^{*2} 室蘭工業大学教授 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 室長 材料研究室 (正会員)

表 - 1 試験体の一覧

試験 体名	断面 種類	版厚 (mm)	かぶり 厚さ (mm)	有効 高さ (mm)	配筋 (mm) (鉄筋比)	2 方向 シート 層数
A-N	А		40	110	D13@150	-
A-1		150				1層
A-2					(0.88%)	2層
B-N	В		25		D13@150 (0.88%)	-
B-1		135		110		1層
B-2						2層
C-N					D1(@150	-
C-1	C	150	40	110	110 D16@150 (1.38%)	1層
C-2						2 層
D-N	D	D 180	40 1	140	D16@200 (0.85%)	-
D-1						1層
D-2						2層

間隔が 1,400 mm で支点部は回転を許容するが 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。表 - 2 に実験に用いたコンクリート,鉄筋および2方 向 AFRP シートの力学的特性を示す。シートの 接着にあたり,RC 版下面にはショットプラスト 処理を行い,かつプライマーを2度塗りしてシ ートの接着が良好に行われる様にした。本実験 では,試験体の載荷荷重,変位,鉄筋および AFRP シートの歪を動的に計測し,実験終了後 には主鉄筋方向に版中央を切断して破壊面の観 察を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重 - 版中央变位関係

図 - 2 に荷重と版中央変位の関係を示す。(a) 図は無補強 RC 版,(b) 図は2方向 AFRP シー ト1層補強時,(c) 図は2層補強時の結果である。 (a) 図のかぶり厚さが異なる無補強 RC 版の結 果より,かぶり厚さが押し抜きせん断耐力に与 える影響は小さいものの,かぶり厚さが薄くな ることにより小さな変位で荷重が急減して押し 抜きせん断破壊することが分かる。また,鉄筋 比や有効高さが大きい無補強 RC 版では,曲げ



図 - 1 試験体の形状寸法と歪ゲージ位置

表 - 2 材料の力学的特性

コンクリート

試験体名	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
A-試験体	16.7	13.9	0.23
B,C,D- 試験体	19.8	20.2	0.28

鉄筋

試験体名	材質	鉄筋径	降伏強度 (MPa)
A-試験体		D13	354.5
B , C , D-	SD295A	D13	376.6
試験体		D16	388.3

2方向 AFRP シート

繊維 目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 <i>E</i> (GPa)	引張剛性 <i>E・t</i> (kN/mm)	
435 / 435	0.3 / 0.3	2.48	126.5	38.0 / 38.0	



図-2 荷重-版中央変位の関係

ひび割れ発生後の剛性低下が抑制され,押し抜 きせん断耐力が増大していることが分かる。し かし,押し抜きせん断破壊時の変位は基準 RC 版に比べて小さい。(b)図より,2方向 AFRP シート1層補強時には,かぶり厚さを薄くする ことや鉄筋比を増大することは押し抜きせん断 耐力を多少変化させる一方で押し抜きせん断破 壊時の変位には顕著な影響を与えていないこと が分かる。なお,有効高さを高くすることで押 し抜きせん断耐力は大きく増大するが,押し抜 きせん断破壊時の変位は他の試験体と大差がな い。

(c) 図より,2方向 AFRP シート2層補強時 には,1層補強時よりもかぶり厚さや鉄筋比が 曲げひび割れ発生後の版の剛性や押し抜きせん 断耐力に与える影響が大きいものの,この場合 も押し抜きせん断破壊時の変位には大差がない ことが分かる。一方,有効高さが押し抜きせん 断耐力に与える影響は1層補強時と同様に顕著 であるが,この場合も押し抜きせん断破壊時の 変位は他の試験体と大差がない。以上を要約す ると,シート補強による RC 版の剛性低下の抑 制効果や押し抜きせん断耐力の向上効果は RC 版の特性によって多少異なるものの,押し抜き せん断破壊時の変位はほぼ同等である。

3.2 押し抜きせん断性状

図 - 3 に版中央の切断面におけるひび割れ性 状を B- および D- 試験体について示す。図か



図 - 3 切断面のひび割れ性状

ら明らかな様に,版上部から下端筋までのひび 割れ角度(α1)とかぶりコンクリート部のひび 割れ角度(α2)が異なり,これらはまた試験体に よっても変化していることから,ひび割れ角度 を表-3に取りまとめた。α1 はいずれの断面種 類の RC 版でも無補強に比べてシート補強した 方が大きくなる傾向にある。これは,無補強試 験体に比べてシート補強することで剛性低下が 抑制されることに関連するものと考えられる。 ただし,鉄筋比や有効高さが大きい場合は,D-2



図-4 押し抜きせん断性状のモデル化

試験体を除いてシート補強による α1 の増大は 顕著ではない。これは,上記試験体は基準試験 体に比べて無補強での α1 が大きく,もともと 曲げひび割れ発生後の剛性低下が基準試験体に 比べて小さいためであると考えられる。なお, かぶり厚さのみが異なる B- 試験体の α1 は A- 試験体と大略同等である。

一方, $\alpha 2$ はかぶり厚さが薄い場合に小さくな る傾向にあり、また,鉄筋比や有効高さが大きい 場合にも基準試験体に比べて全般的に小さくな る傾向にある。なお,A- 試験体に比べて他の試 験体のシート補強による $\alpha 2$ の増加傾向は顕著 ではない。この様に,シート補強によるひび割 れ角度 $\alpha 1, \alpha 2$ の変化状況は RC 版の特性によ って大きく変化している。

3.3 押し抜きせん断耐力

表 - 3 にかぶり部の耐力負担と押し抜きせん 断耐力の関係を示す。ここでは,既往の研究²⁾ と同様にかぶりコンクリート部がシート補強に よってより健全となり,押し抜きせん断耐力の 向上に寄与するものと仮定してかぶり部の押し 抜きせん断耐力を計算した。式(1)に耐力算定 式を示す。

$$\begin{split} V_{pcd} &= \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \qquad (1) \\ f_{pcd} &= 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad (N/mm^2), \quad \beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d:m) \\ \beta_p &= \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d) \\ f'_{cd} : \exists \mathcal{V} \mathcal{D} \mathcal{U} - \mathcal{F} \mathcal{O} \mathcal{E}$$
縮強度
 $u: 載荷面の周長, \quad u_p : 設計断面の周長 \\ d: かぶり厚さ, \quad p(=n_f \cdot A_f/(b \cdot d)) : 補強筋比 \end{split}$

 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)

すなわち,図-4に示すようにコンクリート標 準示方書³⁾に準拠して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,実測のα2でかぶり部に押し 抜きせん断面が形成されるとして設計周長を求 める。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た。 このように計算したかぶり部の押し抜きせん断 耐力を表-3中の(ii)に示した。なお,表-3 中の(iv)に示す押し抜きせん断耐力の計算値 は,-N 試験体の計算耐力に(ii)の計算値を加算 した耐力である。ここで,A-試験体は他と異な るコンクリート強度であるため,圧縮強度の1/2 乗で実験結果を補正している。

表より,実験でのシート補強による押し抜き せん断耐力の増分(i)はA-試験体で最も大き く,かぶり厚さが薄い場合や鉄筋比が大きい場 合により小さくなる傾向にあることが分かる。 特にかぶり厚さが薄い場合はシート層数による 差異も小さい。シート補強による押し抜きせん 断耐力の増分がかぶりコンクリート部の耐力負 担によるものと考えると,かぶり厚さが薄いこ とと耐力増分が小さくなることは対応している。

一方,有効高さの増加によっても A- 試験体 に比べて耐力増分は小さくなっているが,その 傾向は鉄筋比を増加した場合ほどは顕著ではな い。鉄筋比や有効高さを増加することで RC 版 の剛性が増大する。しかし,RC 版の剛性は荷 重-変位関係より明らかな様に,鉄筋比よりも 有効高さを増加する方が顕著に増大する。従っ て,シートの耐力向上効果は RC 版の剛性に影 響されるものの,RC 版の剛性のみで一義的に は決まらないことが分かる。なお,A,B- 試験 体では耐力増分の実測値と計算値がほぼ対応し ているものの,鉄筋比や有効高さが増大した場 合の計算値は耐力増分を過大に見積もる傾向に あることが分かる。

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2~3割程度と小さいこ とから,ほぼ実測の耐力と対応している。ただ

試験体名	ひび割れ角度		耐力増分			押し抜きせん断耐力		
	α1 (度)	α2 (度)	実測値 (i) (kN)	計算值 (ii) (kN)	(i) / (ii)	実測値 (iii) (kN)	計算値 (iv) (kN)	(iii) / (iv)
A-N	23	12	-	-	-	155.3	120.1	1.29
A-1	41	22	50.8	53.3	0.95	206.1	173.4	1.19
A-2	37	22	71.3	66.8	1.07	226.6	186.9	1.21
B-N	26	10	-	-	-	141.7	120.1	1.18
B-1	42	11	36.7	39.6	0.93	178.4	159.7	1.12
B-2	37	12	41.6	49.1	0.85	183.3	169.2	1.08
C-N	29	18	-	-	-	168.3	139.5	1.21
C-1	36	14	30.6	61.8	0.50	198.9	201.3	0.99
C-2	35	18	49.3	71.2	0.69	217.6	210.7	1.03
D-N	34	12	-	-	-	203.2	182.6	1.11
D-1	34	13	43.1	70.4	0.61	246.3	253.0	0.97
D-2	45	16	58.7	83.7	0.70	261.9	266.3	0.98

表 - 3 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

し,鉄筋比や有効高さが増大した場合は,かぶ り部の耐力寄与分を計算値は過大に見積もって いるため,実測耐力/計算耐力は 1.0 を下回り 多少危険側になる傾向にある。以上を要約する と,シート補強による押し抜きせん断耐力の増 加は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ものの,そ の程度は鉄筋比や有効高さに影響される。これ は,鉄筋比や有効高さの変化に対応してかぶり コンクリートに生じるひび割れの性状が大きく 変化するためと推察され,かぶり部のひび割れ 角度を含め今後より多くのデータを収集する必 要がある。

3.4 張力分担性状

図 - 5 に各試験体の主鉄筋方向における鉄筋 とシートの分担張力を示す。張力は,鉄筋およ びシートに貼り付けた歪ゲージの値を用いて算 出した。鉄筋張力は1本あたり,シート張力は 鉄筋の配置間隔に対応させて15 cm (A, B, C-試験体) および20 cm (D- 試験体) 幅として算 出した。A-N, B-N 試験体の主鉄筋 (D13) の張 力は版中央部位置において44 ~ 48 kN 程度 を示しており,これは鉄筋の降伏時張力にほぼ 対応している。一方, C-N, D-N 試験体の主鉄 筋(D16)の張力も 80 kN 弱を示しており,これ も鉄筋の降伏時張力に対応している。すなわち, 各無補強試験体は版中央部位置の主鉄筋の降伏 をともなって押し抜きせん断破壊に至っている ことが分かる。

A- 試験体ではシート補強層数の増大に対応 してシートの分担張力は増大し,特に2層補強 時には版中央部位置で主鉄筋と同等程度の張力 を分担していることが分かる。なお,この場合 のシートの分担張力は最大で 40 kN 程度であ る。かぶりを 25 mm に低減した B- 試験体の張 力分担性状は大略 A- 試験体と同様であるが, 版中央でのシートの分担張力は1層,2層補強 試験体ともに A- 試験体に比べて若干小さい。 鉄筋比を増加した C- 試験体のシートの張力レ ベルは A, B- 試験体と大差はない。すなわち, 1 層補強時で 25 kN, 2 層補強時で 40 kN 弱で あるが,鉄筋の分担張力はシートの分担張力を 大幅に上回り,鉄筋の分担張力の方が1層補強 時で約3倍,2層補強時で約2倍大きい。有効 高さを高くした D- 試験体の張力分担性状は大 略 C- 試験体と同様であるが,シートの張力レ



図 - 5 主鉄筋方向における分担張力

ベルは全般的に C- 試験体よりも大きく,張力 分担領域も広がっている。

このように,版中央付近の鉄筋に対するシー トの張力分担割合は C- 試験体で最も小さく, A- 試験体で最も大きい。これは,C- 試験体で 最も耐力増分の実測値 / 計算値が小さく,A- 試 験体で最も大きいことに対応するものと考えら れる。既往の研究¹⁾によれば,シートによる補強 効果はかぶり部のひび割れ性状と密接に関連し ている。本研究では,鉄筋比を鉄筋径を増大さ せることで増加させ,また,有効高さの高い RC 版では鉄筋比を同等とするために配筋間隔を 150 mm から 200 mm に増加させている。すな わち,これらのことによってかぶり部に発生す るひび割れ幅やひび割れ間隔が拡大したため, かぶり部の押し抜きせん断耐力向上効果が低下 したものと推察される。

4. まとめ

2 方向 AFRP シートを各種 RC 版下面に接 着して押し抜きせん断性状を実験的に検討した。 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) AFRP シート補強 RC 版のひび割れ発生後の剛性低下抑制効果や押し抜きせん断耐力

向上効果は RC 版の特性によって異なるが, 押し抜きせん断破壊時(最大耐力時)の変位 量は大略同等である。

- 2) 押し抜きせん断面の角度はシート補強する ことで大きく変化するが,その性状は RC 版の特性によって異なる。
- 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実測値とほぼ対応するが,鉄筋比や有効高さが大きい場合には危険側の評価を与える。これは,ひび割れ幅や間隔が鉄筋比や有効高さの増大にともなって拡大することに関連するものと推察される。

参考文献

- 1)森 成道,若下藤紀,松井繁之,西川和廣: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に 関する研究,橋梁と基礎, Vol. 25, No. 3, pp. 25-32, 1995.
- 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.
- 3) 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.