論文 AFRP シート下面接着 RC 版の押抜きせん断耐力評価に関する一考察

三上 浩*1・岸 徳光*2・澤田 純之*3・栗橋 祐介*4

要旨:本研究では,既設鉄筋コンクリート(RC)床版等の面部材を対象に連続繊維(FRP)シートを下面 接着して補強することを想定し,FRPシートで補強した RC版の押抜きせん断耐力評価法を確立するため, アラミド繊維製FRP(AFRP)シートを下面接着補強した RC版に関する押抜きせん断実験を実施した。 本実験では,鉄筋径および配筋間隔を変化させることにより鉄筋比を変化させた5種類のRC版を対象に シート補強量を変化させて静載荷実験を行った。その結果,鉄筋比の異なるRC版に対しても,かぶり部が 耐力増分に寄与するとした既往の提案式を用いて耐力評価が概ね可能であること,等が明らかになった。 キーワード:RC版,AFRPシート,下面接着補強,押抜きせん断耐力

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 する工法が盛んに採用されている。道路橋床版を例にと ると、押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等の 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。FRP シートによる床版下面接着補強工法は前述の課題を解決 する一つの工法であると思われる。しかしながら、本工 法に関する研究事例は比較的少なく, FRP シート下面 接着 RC 版に関する押抜きせん断耐力の評価法確立には 至っていないのが現状である。

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,RC 版の押抜きせん断耐荷性状に関する検討を実施してき た。その結果,1)FRPシートで下面接着補強したRC 版の押抜きせん断耐力の増大は,主としてかぶりコンク リートの押抜きせん断抵抗が寄与すること,2)下縁かぶ り部のせん断耐力増分は提案式により算定可能であるも のの,RC版の鉄筋比の影響を受けるため,補強効果に 関する係数(以後,補強効果係数)を適切に設定する必 要があること,また,3)その補強効果係数は鉄筋比*P*_i と反比例の関係があること,等を明らかにしている。し かしながら,既往の提案式は鉄筋比が 0.54 ~ 1.57 %, 鉄筋径が 13 ~ 19 mm を用いた試験体の結果に基づい た式である。

そこで本研究では,鉄筋種を D10, D16, D19, D22 と し,鉄筋比を 0.56 % から最大で 2.25 % に変化させた RC 版を用いて,より汎用性の高い耐力評価式提案のた めに押抜きせん断実験を行った。

試験	下端鉄筋	コンクリ	繊維	シート	引張剛性
休夕	(主鉄筋比)	ート強度	目付量	層数	$E \cdot t$
г т ~Ц		(MPa)	(g/m^2)	(層)	(MN/m)
A-N	D10		-	-	-
A-S1	@100	36.7	435/435	1	28.3
A-S2	(0.56 %)		(二方向)	2	56.6
B-N	D16	32.9	-	-	-
B-S1	@100	367	435/435	1	28.3
B-S2	(1.56 %)	50.7	(二方向)	2	56.6
C-N	D22		-	-	-
C-S1	@200		435/435	1	28.3
C-S2	(1.66 %)	36.6	(二方向)	2	56.6
D-N	D22	50.0	-	-	-
D-S1	@150		435/435	1	28.3
D-S2	(2.12 %)		(二方向)	2	56.6
E-N	D19		-	-	-
E-S1	@100	32.9	435/435	1	28.3
E-S2	(2.25 %)		(二方向)	2	56.6

表-1 試験体一覧

*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 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 博士研究員 博(工) (正会員)

*4 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 博(工) (正会員)



図-1 RC 版の形状寸法. 配筋状況および補強概要

繊維	亘さ	弾性	引張	破断	
目付量)] -C	係数	強度	ひずみ	
(g/m^2)	<i>t</i> (mm)	E (GPa)	(GPa)	(%)	
435/435	0 24/0 24	118	2.06	1 75	

	長一 2	表·	- 2	二方向	AFRP	シート	·の力学	的特性	(公称值	直
--	------	----	-----	-----	------	-----	------	-----	------	---

2. 試験体概要

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、鉄筋径および配筋間隔を変えることによ り鉄筋比を5種類に変化させた RC 版である。試験体数 は、各 RC 版に対してシートの補強層数を無補強および 1,2層の3種類とした全15体である。表中、試験体名 の第1項目は鉄筋比(A: 0.56%, B: 1.56%, C: 1.66%, D: 2.12%, E: 2.25%)を示しており、第2項目のNは 無補強、Sはシート補強を示している。なお、Sに付随 する数値はシート補強層数を示している。実験時におけ るコンクリートの圧縮強度は 32.9 ~ 36.7 MPa であっ た。また,鉄筋の降伏強度は D10, D16, D19, D22 それ ぞれ,401,395,408,402 MPa であった。 表-2 に は、二方向 AFRP シートの力学的特性値を示している。

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 版の形状寸法は、 2,000 × 2,000 × 180 mm であり、下端鉄筋を平均芯か ぶりが 40 mm となるように配置した。鉄筋は A, B, E 試験体で D10, D16, D19 をそれぞれ 100 mm 間隔, C, D 試験体で D22 をそれぞれ 200, 150 mm 間隔で版中央 より格子状に配置している。また、鉄筋は4辺の外縁 に配置した溝型鋼に溶接定着し、定着を確保している。 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。下面接着シートには、目付量 435/435 g/m² の二



写真-1 実験状況

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 版下面のシート接着部のコンク リート表面には、シートの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1~2mm 程度) を施 している。

写真-1には、本実験の実験状況を示している。RC 版の支持条件は四辺単純支持であり、支持間隔は 1,750 mm である。支点部は回転を許容し、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。載荷盤には直径 が 60 mm の鋼製厚肉円盤を用い, RC 版中央部に設置 した。

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, 非接触式レーザ変位計による版中央部 変位、および鉄筋、シートに貼付したひずみゲージによ るひずみである。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)の関係を試験体ごとに示している。図-2より、 鉄筋比の最も小さい A 試験体の場合、無補強の A-N 試 験体で載荷初期にひび割れ発生に伴う曲げ剛性の低下が 見られ、その後最大荷重約 250 kN、変位約 5 mm で押 抜きせん断破壊に伴う急激な荷重低下が見られる。一 方、シート補強した A-S1, S2 試験体は、A-N 試験体と 比較して全体的に剛性勾配や最大荷重が大きく示されて いることが分かる。また、シート層数の増加に伴う荷 重の増加も大きい。なお、A-S1 試験体では他の試験体 に比較して変位が小さい状態で破壊しているが、これは 写真-2 に示すように押抜きせん断面に片寄りが生じ、 他の試験体と比較して早期にシートが部分剥離したため と考えられる。

A 試験体を除く鉄筋比が 1.5% 以上の N 試験体を見 ると, A-N 試験体に比較して剛性勾配は大きく示され るものの,全体的な性状は同様であることが分かる。ま た, A 試験体を除く各試験体の S1, S2 試験体は,補強 層数にかかわらず剛性勾配や最大荷重はほぼ同程度であ ることが分かる。同時に,各 N 試験体に対する S1, S2 試験体の耐力増分は鉄筋比の小さい A 試験体に比較し て小さく示されているが,これは既往の研究結果^{1),2)} と同様の傾向である。

3.2 **ひび割れ分布性状**

写真-2には、実験終了後における版下面および版中 央部切断面のひび割れ性状を示している。なお、写真に は鉄筋比が最小の A 試験体と最大の E 試験体の結果を

示している。

写真-2より,A試験体の場合,シート補強の有無に かかわらず版下面には載荷点を中心とする円形状のひび 割れが発生しており,切断面では載荷点より斜め下方に 発生したひび割れがシート補強位置まで進展しているこ とより,押抜きせん断破壊により終局に至っていること が分かる。また,シート補強した試験体の下縁かぶり部 における押抜きせん断ひび割れ角度は,補強層数の増加 とともに増大し,押抜きせん断コーンは小さくなる傾向 にある。このことより,押抜きせん断ひび割れ角度は, 既往の研究^{1),2)}と同様に無補強試験体で最も緩やかで あり,補強層数が多くなるほど角度が大きくなる傾向に あることが分かる。

E 試験体の場合,無補強の E-N 試験体の版下面には 主鉄筋に沿う格子状のひび割れの発生およびコンクリー トの剥落が認められる。また、切断面を見ると,載荷点 より下端鉄筋位置までほぼ直線の斜めひび割れの進展・ 開口が見られ、下端鉄筋に沿う割裂ひび割れも進展して いることが分かる。これは、鉄筋比が大きく、下端鉄 筋のダウエル作用によって押抜きせん断力に抵抗するた め、かぶり部全体が下方に押出されたことによるものと 推察される。

一方, E-S1, E-S2 試験体の版下面にはシートの剥離 範囲が載荷点を中心とする円形状で示されており,切断 面からも有効高さ部および下縁かぶり部において斜めひ び割れが開口していることが分かる。このことから,鉄 筋比の大きい RC 版においてもシートを下面接着補強す ることにより,下縁かぶり部が有効断面となって押抜き せん断力に抵抗するため,せん断耐力が増加するものと







図-3 最大荷重時におけるシートおよび鉄筋の張力分布 (A, E 試験体)

考えられる。

3.3 シートおよび鉄筋に発生する張力分布

図-3には, A, E 試験体のひずみゲージ値より求めた最大荷重時におけるシートおよび鉄筋の張力分布を示

している。なお、図中の値は、鉄筋は1本当たりに発 生する張力を示しており、シートは鉄筋1本分が分担 する領域、すなわち鉄筋間隔分の張力を分担するものと して算出した。

封脸	実測せん	実測耐		計算せん	計算耐力増分	計算耐力増分	補強効果	せん断	耐力
武殿	断耐力	力增分	α2*	断耐力 (iii)	$(\alpha = 1.0)$	(α を考慮)	係数	耐力比	增分比
14-13	(kN) (i)	(kN) (ii)		(α を考慮)	(kN) (iv)	(kN)	α	(i)/(iii)	(ii)/(iv)
A-N	257.9	-	-	228.2	-	-		1.13	-
A-S1	315.0	57.1	16.2	310.6	85.6	82.4	0.964	1.01	0.67
A-S2	367.3	109.4	23.5	322.1	97.5	93.9		1.14	1.12
B-N	320.9	-	-	306.9	-	-		1.05	-
B-S1	346.1	25.2	11.7	344.8	109.6	37.9	0.346	1.00	0.23
B-S2	361.1	40.2	11.7	353.4	134.5	46.5		1.02	0.30
C-N	292.4	-	-	327.7	-	-		0.89	-
C-S1	336.5	44.1	10.5	360.1	99.5	32.4	0.325	0.93	0.44
C-S2	342.6	50.2	10.4	368.7	125.9	41.0		0.93	0.40
D-N	292.1	-	-	355.6	-	-		0.82	-
D-S1	351.6	59.5	9.8	381.6	102.3	26.1	0.255	0.92	0.58
D-S2	357.3	65.2	17.0	382.6	106.2	27.1		0.93	0.61
E-N	347.0	-	-	346.8	-	-		1.00	-
E-S1	390.9	43.9	9.2	370.9	100.5	24.1	0.240	1.05	0.44
E-S2	394.8	47.8	11.5	374.6	115.7	27.8		1.05	0.41

表-3 実験結果一覧

*: 左右の α2 の平均値

図-3のA試験体の結果から,無補強のN試験体で は載荷点近傍を上底とする台形状の分布性状を示してい ることが分かる。また、シート補強した試験体では、N 試験体の鉄筋の分担張力が全体的に低下する性状を示 し、シートの分担張力が鉄筋の張力減少分を補う傾向に ある。なお、A-S2 試験体では載荷点近傍の鉄筋および シートの分担張力がほぼ同程度を示しており、シートの 補強効果が十分に発揮されている状況にあるものと考え られる。

一方, E 試験体では,全体的な性状は A 試験体と同様であるものの,鉄筋の分担張力はシートのそれに比較して大幅に大きい。このことから,鉄筋比が比較的大きい場合は鉄筋の張力分担に対してシートの分担張力が小さく,シートの補強効果が大きく出現しにくいことが分かる。またこれは,図-3に示すように,A 試験体では載荷点近傍の鉄筋が降伏しているのに対して,E 試験体では降伏していないことに対応するものと考えられる。

3.4 押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³⁾を基にした FRP シート下面接着 RC 版の押抜きせ ん断耐力評価式を提案している。

式(1)に,著者らが提案するかぶりコンクリートの押 抜きせん断耐力(本文での耐力増分)評価式を示す。

$$CV_{pcd} = \alpha \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u'_p \cdot d' \tag{1}$$



図-4 押抜きせん断性状のモデル化

 $\alpha = 0.54/Pt, \quad f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}} \ (\text{N/mm}^2)$ $\beta_d = \sqrt[4]{1/d'} \ (d':\text{m})$ $\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u'/d')$

ここで,式(1)中の各定数は,

 α :補強効果係数, Pt:主鉄筋比 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)

なお、式(1)は、実験終了後の切断面から $\mathbf{2}$ -4 に 示すような押抜きせん断性状のモデル化を行い、示方書 ³⁾に基づいて構成している。すなわち、 α 1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の角度で押抜



図-5 補強効果係数 α と鉄筋比 P_t の関係

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、さらに鉄筋比の影響を考慮した補強効果係数 α = 0.54/*P*_t を乗じることで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、切断面より得られた $\alpha 2$ 、計算せん断耐力、式(1) より得られる $\alpha = 1.0$ とした場合のかぶり部が寄与する 計算耐力増分、 α を考慮した計算耐力増分、補強効果係 数 α 、および実測値を計算値で除したせん断耐力比、耐 力増分比を一覧にして示している。なお、本計算にお ける $\alpha 1$ は 45°と仮定し、 $\alpha 2$ は実測値を用いている。 また、計算せん断耐力は、各無補強試験体の計算せん断 耐力に補強効果係数を考慮した計算耐力増分を加算した ものである。

表-3より, せん断耐力比は鉄筋比の小さい A 試験 体で1.0程度を示しており,本提案式で耐力の算定が可 能であることが分かる。また,鉄筋比の比較的大きい試 験体を見ると, B, E 試験体で概ね 1.0程度と提案式と 良く一致しているものの, C, D 試験体では 0.9程度と 危険側の結果となっている。これは,無補強の C, D 試 験体の耐力比が 0.82~0.89であることから,示方書式 による N 試験体の計算せん断耐力が実測値を大きく上 回っていることが要因と考えられる。

以上のことから、シート補強後における提案の押抜き せん断耐力評価式による計算耐力は、無補強試験体の実 測耐力と計算耐力がほぼ一致する場合は、鉄筋比が 2.2 % 程度と高い場合にも実測値と概ね対応することが明 らかとなった。

3.5 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、横軸に各試 験体の主鉄筋比 P_t を示している。また、図中には提案 式の補強効果係数 $\alpha = 0.54/P_t$ も併せて示している。な お、本実験における補強効果係数 α と **表**-3 に示す耐 力増分比は同義である。

図-5より、A,B 試験体で提案式($0.54/P_t$)を一部 下回っているものの、全体的に補強効果係数 α が提案 式と同等、あるいは上側に位置し、大略安全側に評価し ていることが分かる。

4. まとめ

本研究では,既往の研究で提案した FRP シート下面 接着 RC 版の押抜きせん断耐力評価式の適用範囲を検討 するため,鉄筋径と配筋間隔を変化させた RC 版を対象 に静的押抜きせん断実験を実施した。本研究の結果をま とめると以下の通りである。

- 鉄筋比が小さい場合には、シートの補強効果は大 きく現れるのに対して、鉄筋比の大きい場合には、 シートの補強効果は小さく、シートの補強層数を 増やしても耐力の増加は微小である。
- 2)鉄筋比が 1.5% 程度以下の場合には、提案式を用いた計算押抜きせん断耐力と実測値は比較的良好に対応する。
- 3) 提案の補強効果係数 α = 0.54/P_t とすることにより,鉄筋比やシート層数にかかわらず,本実験結果を大略安全側に評価できる。

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, 2005.3
- 2) 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, 2006.7
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(構造性能照 査編),2002