

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

Punching Shear Behavior of various RC Slabs Strengthened with AFRP Sheet

三井建設(株)

室蘭工業大学

北海道開発土木研究所

室蘭工業大学

○フェロー

正員

正員

学生員

三上 浩 (Hiroshi Mikami)

岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

田口 史雄 (Fumio Taguchi)

栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. 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, RC 版などの面材を 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向上は, 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とほぼ同等の押し抜きせん断耐力の増加が期待できること, (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 (AFRP 2 方向シート) 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, 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 版に AFRP 2 方向シートを 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.

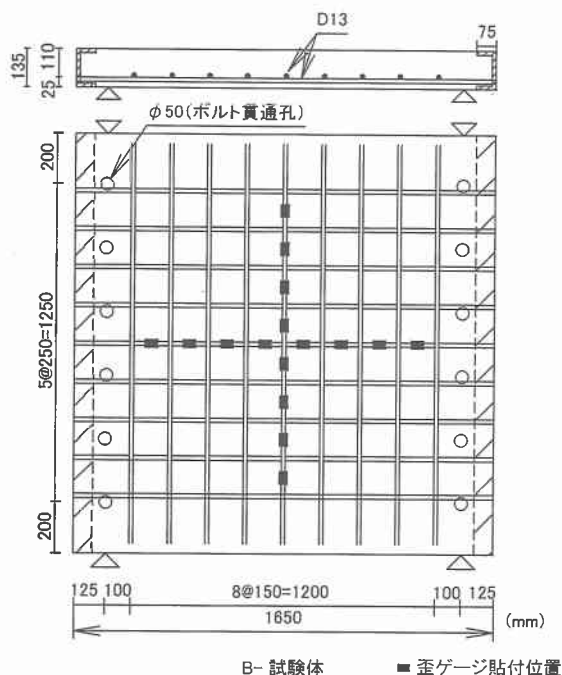


図-1 試験体の形状寸法と歪ゲージ位置

2. 実験の概要

表-1 に試験体の一覧を示す. 表中, A- 試験体は基準となる試験体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. また, 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. 各断面種類の試験体は無補強試験体とその下面に AFRP 2 方向シートを 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. なお, シートの貼り付け範囲は配筋方向に全面, 主鉄筋方向には両側支点の 50 mm 手前まで

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	A	150	40	110	D13@150 (0.88%)	—
A-1						1層
A-2						2層
B-N	B	135	25	110	D13@150 (0.88%)	—
B-1						1層
B-2						2層
C-N	C	150	40	110	D16@150 (1.38%)	—
C-1						1層
C-2						2層
D-N	D	180	40	140	D16@200 (0.85%)	—
D-1						1層
D-2						2層

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	SD295A	D13	354.5
B,C,D- 試験体		D13	376.6
		D16	388.3

AFRP 2 方向シート

繊維目付け量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 E (GPa)	引張剛性 E·t (kN/mm)
435/435	0.3/0.3	2.48	126.5	38.0/38.0

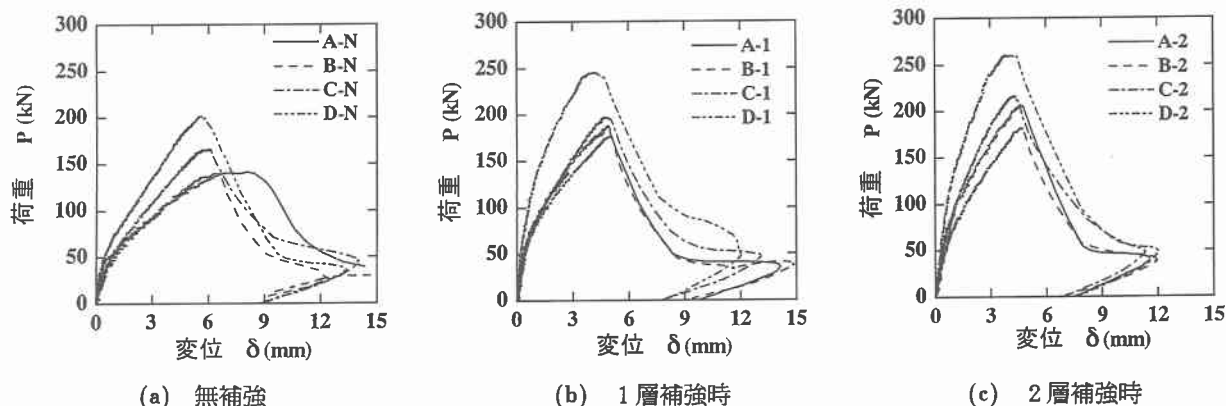


図-2 荷重-版中央変位の関係

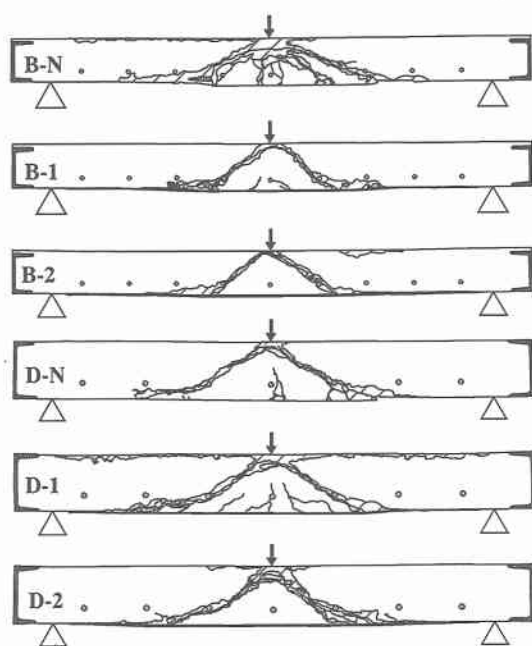


図-3 切断面のひび割れ図

表-3 ひび割れ角度の一覧

試験体名	$\alpha 1$ (度)	$\alpha 2$ (度)
A-N	23.0	11.5
A-1	41.3	21.8
A-2	37.0	22.3
B-N	25.6	9.9
B-1	41.6	11.4
B-2	37.2	12.0
C-N	28.7	17.8
C-1	35.5	14.0
C-2	35.1	18.1
D-N	33.6	11.9
D-1	34.0	13.1
D-2	44.7	15.6

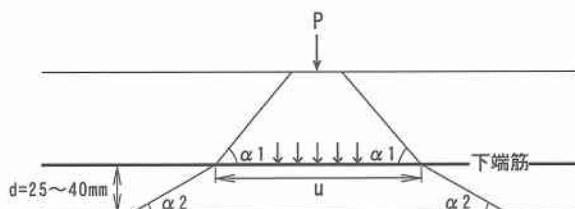


図-4 押し抜きせん断性状のモデル化

とした。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接置した。表-2 に実験に用いたコンクリート、鉄筋、AFRP 2 方向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ブラスト処理を行い、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、鉄筋の歪、FRP 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. 実験結果および考察

3.1 荷重-版中央変位関係

図-2 に荷重と版中央変位の関係を示す。(a)は無補強 RC 版、(b)は AFRP 2 方向シート 1 層補強時、(c)は 2 層補強時の結果である。(a)より、無補強 RC 版では、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とより小さな変位で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 RC 版では、曲げ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するものの押し抜きせん断破壊時の変位は基準 RC 版に比べて小さくなる事が分かる。(b)より、AFRP 2 方向シート 1 層補強時には、かぶり厚さが薄いことや鉄筋比が増大したことは押し抜きせん断耐力を多少変化させるものの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。一方、有効高さを増大させることで押し抜きせん断耐力は大きく増大するが、せん断破壊時の変位は他と大差がない。

(c)より、AFRP 2 方向シート 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。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と比べて大差がない。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各種 RC 版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。

表－４ 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 実験値①(kN)	耐力増分 計算値②(kN)	①/②	押し抜きせん断耐力 実験値③(kN)	押し抜きせん断耐力 計算値④(kN)	③/④
A-N	-	-	-	155.3	(120.1)	1.29
A-1	50.8	53.3	0.95	206.1	208.6	0.99
A-2	71.3	66.8	1.07	226.6	222.1	1.02
B-N	-	-	-	141.7	(120.1)	1.18
B-1	36.7	39.6	0.93	178.4	181.3	0.98
B-2	41.6	49.1	0.85	183.3	190.8	0.96
C-N	-	-	-	168.3	(139.5)	1.21
C-1	30.6	61.8	0.49	198.9	230.1	0.86
C-2	49.3	71.2	0.69	217.6	239.4	0.91
D-N	-	-	-	203.2	(182.6)	1.11
D-1	43.1	70.4	0.61	246.3	273.5	0.90
D-2	58.7	83.7	0.70	261.9	286.9	0.91

() は示方書に基づいて算定した値

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押し抜きせん断性状を B- および D- 試験体について示す。図から明らかな様に、版上部から下端筋までのひび割れ角度 (α_1) とかぶりコンクリート部のひび割れ角度 (α_2) 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。 α_1 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 試験体を除いてシート補強による α_1 の増大は顕著ではない。これは、上記試験体はもともと無補強でも基準試験体に比べて曲げひび割れ発生後の剛性低下が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 α_1 は A- 試験体と大略同等である。また、鉄筋比や有効高さが大きい C、D- 試験体は A- 試験体に比べて無補強での α_1 が大きい。一方、 α_2 はかぶり厚さが薄い場合は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 α_2 が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 α_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 α_1 , α_2 の変化状況は RC 版の特性によっても大きく変化している。

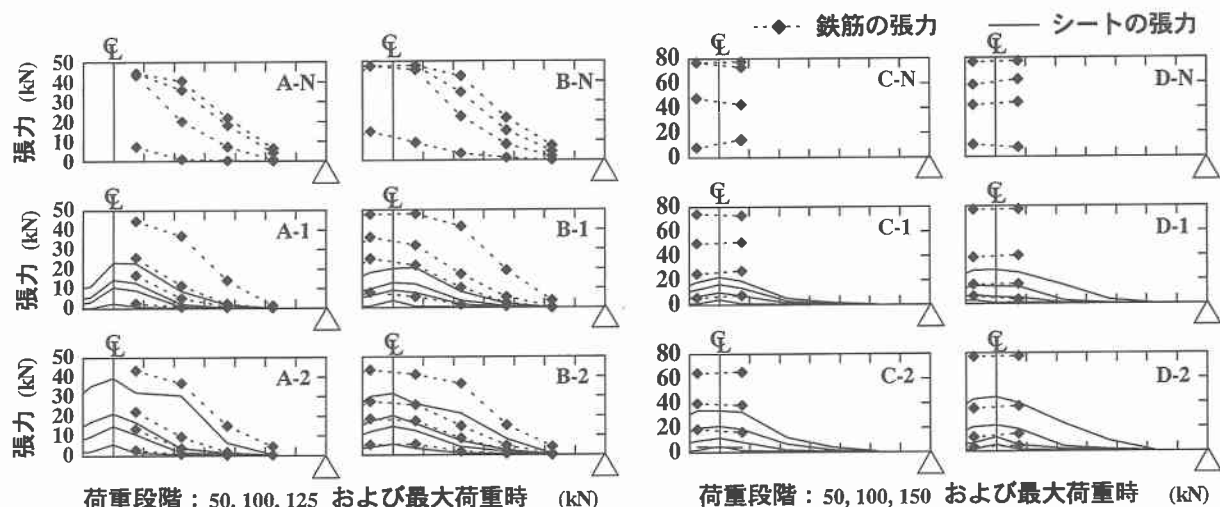
3. 3 押し抜きせん断耐力

表－４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。すなわち、図－４に示すように 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とし、前述した α_2 の角度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、コンクリート標準示方書³⁾を基に計算したかぶり部の押し抜きせん断耐力を表－４中の②に示した。なお、表－４の④に示す押し抜きせん断耐力の

計算値は N 試験体の実測耐力に②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、圧縮強度で実験結果を補正している。

表より、シート補強による押し抜きせん断耐力の増分は 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および有効高さが高い場合に A- 試験体よりも小さいことが分かる。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既往の研究²⁾で示した様にかぶりコンクリートの耐力増分に対応すると考えると、かぶり厚さが薄い場合に耐力増分が小さくなることと合致している。一方、鉄筋比を 0.88 % から 1.38 % に増加させることでシート補強による押し抜きせん断耐力の増分は小さくなっている。また、有効高さを 11 cm から 14 cm に増大させることによって耐力の増分が小さくなっているが、その低下傾向は鉄筋比を増加させた場合ほどは顕著ではない。鉄筋比や有効高さを増加させることは RC 版の剛性を増大させることに対応する。一方、剛性の増加は図－２の荷重－変位関係より明らかな様に有効高さを増大させた方が顕著である。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ず、配筋の影響が大きいと考えられる。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するものの、鉄筋比や有効高さが増大した場合の計算値は耐力を過大に見積もる傾向にあることが分かる。

一方、押し抜きせん断耐力の計算値④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、ほぼ実測の耐力に対応している。ただし、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 0.86～0.91 程度と多少危険側になっている。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よっ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考えられる。



図ー5 主鉄筋方向における分担張力

3. 4 張力分担

図ー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) とした。なお、シートには歪ゲージを版の中央と中央から7.5 cm およびその位置から 15 cm ピッチで貼り付けている。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 2.5 cm 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-試験体よりも若干小さい。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。有効高さを増大した 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、シートの張力レベルは全般的に C-試験体よりも大きい。

このように、版中央位置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。これらが、かぶり部に発生するひび割れ間隔の増大やひび割れ幅の拡大をもたらしたため、かぶり部が押し抜きせん断耐力の向上に寄与する効果を低減させたものと推察される。

4. まとめ

AFRP 2方向シートを各種 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の変位量は大略同等である。
- 2) 押し抜きせん断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考慮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は危険側の評価を与える。これは、ひび割れ間隔や幅が鉄筋比や有効高さの増大にともなって拡大するためと推察される。

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, 1995.
- 2) 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.