

AFRP シート補強 RC 版の押し抜きせん断性状に与える補強方法と補強量の影響

Influences of flexural strengthening method and volume of AFRPs on punching shear behavior of RC slabs

三井住友建設(株) ○フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 三井住友建設(株) 正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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。しかしながら、RC床版などの面部材を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^{1)~3)}は少なく、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程度とすることで、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)2方向アラミド繊維(AFRP)シートは、1方向シートを直交に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。一方、シートでRC版下面を全面補強した場合は、ひび割れの目視点検が不能となり、版内に滞水して耐疲労性能が低下する事が考えられる。そこで、1方向シートを格子状に接着する工法が提案され、輪荷重走行下での耐疲労性が検討されている。

しかしながら、既往の研究でも明らかのように、補強材の引張剛性によってRC版の補強効果は異なることから、本研究では2方向AFRPシートの補強層数がRC版

の押し抜きせん断耐力向上効果に与える影響および1方向AFRPシートを格子状に接着した場合の押し抜きせん断性状に着目して検討した。

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。試験体は、無補強試験体を含め、2方向シートを全面に補強した試験体4体、1方向シートで格子状に補強した試験体4体の全9体である。表中、試験体名の第一項目はNが無補強、Sが全面補強、CRが格子状に補強した試験体を示し、第二項目の数字は引張剛性の小さな順に1,2,3,4としている。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋状況をAFRPシートの補強概要とともに示している。RC版の寸法は、2,000×2,000×180mm、かぶり厚さは40mmである。鉄筋にはD16を用い、版中央部から150mm間隔で下端のみに配置している。シート貼り付け範囲は、S試験体では2方向シートを主鉄筋および配力鉄筋方向に両支点の50mm手前までとした。CR試験体では、幅250mmの1方向シートを先ず主鉄筋方向に版中央部から175mm間隔で両支点の50mm手前まで接着し、その後、同様にして配力鉄筋方向にシートを接着した。なお、シート接着部

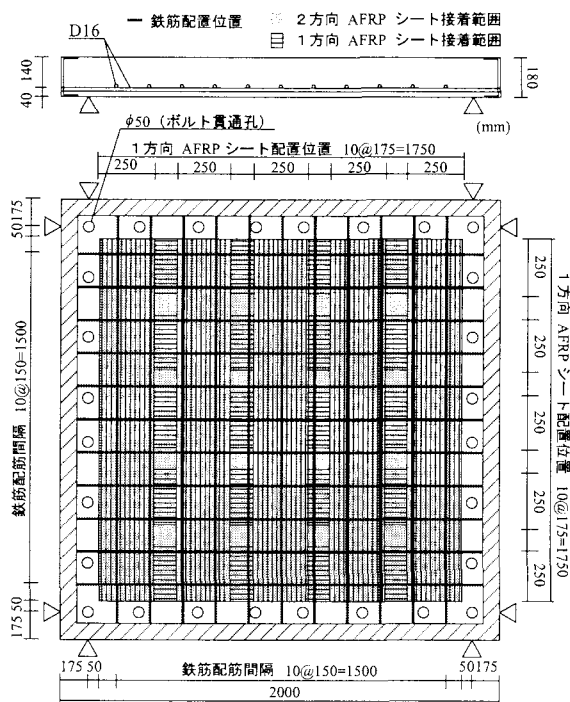


図-1 RC版の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の一覧

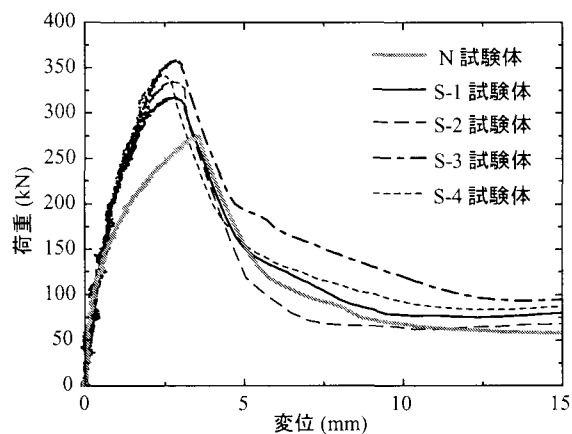
試験体名	シート目付量 (g/m ²)	シート層数	引張剛性 E·A(MN/m)
N	-	-	-
S-1	435/435 (2方向)	1	28.3
S-2		2	56.6
S-3		3	85.0
S-4		4	113.3
CR-1	415	1	24.1
CR-2	623	1	36.2
CR-3	830	1	48.2
CR-4	1246 (623×2)	2	72.5

表-2 2方向AFRPシートの力学的特性値

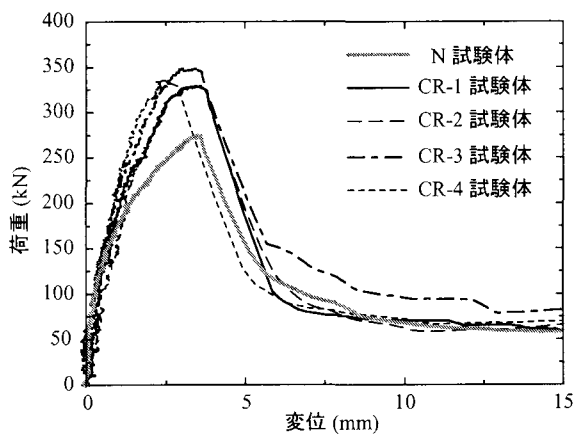
繊維目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	弾性係数 E (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ ε (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75

表-3 1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)	破断ひずみ ε (%)
415	0.286	118	2.06	1.75
623	0.430			
830	0.572			



(a) S 試験体



(b) CR 試験体

図-2 荷重-版中央変位関係

表-4 各試験体の実験値一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	引張剛性 $E \cdot A$ (MN/m)	耐力増分 (kN)
N	276.2	3.6	-	-
S-1	318.5	2.8	28.3	42.3
S-2	336.2	2.8	56.6	60.0
S-3	359.0	3.0	85.0	82.8
S-4	343.8	2.4	113.3	67.6
CR-1	329.8	3.5	24.1	53.6
CR-2	330.5	3.6	36.2	54.3
CR-3	349.1	3.1	48.2	72.9
CR-4	336.2	2.6	72.5	60.0

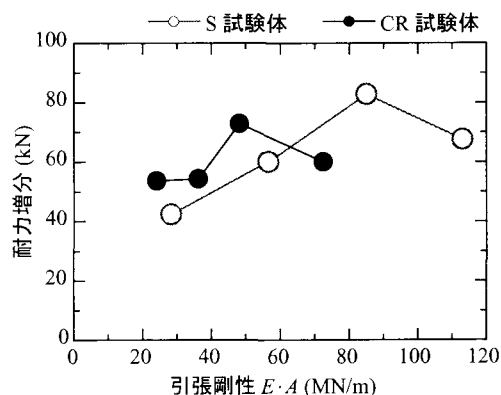


図-3 引張剛性と耐力増分の関係

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。

試験体の支持条件は、4辺単純支持で、支持間隔が1,650 mmであり、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た。なお、載荷版は直径60 mmの鋼製厚肉円板としRC版中央に設置した。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度は、 $f'_c = 34.9$ MPa, $f_y = 386.4$ MPaであった。表-2, 3には、2方向AFRPシートおよび1方向AFRPシートに関する力学的特性値を示している。本実験における測定項目は、載荷荷重、版中央部変位、鉄筋およびシートのひずみである。また、実験終了後には主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. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重-変位曲線

図-2には、各試験体の荷重と版中央部変位（以後、単に変位）の関係を試験体毎に比較して示している。また、表-4には、各試験体の最大荷重、最大荷重時変位および単位長さあたりのシートの引張剛性 $E \cdot A$ と荷重増分の一覧を示している。図より、シート補強を施していないN試験体は170 kN程度でひび割れが発生して版の剛性が低下し、変位が増加し始めていることが分かる。その後、変位が4 mm程度で押し抜きせん断破壊に至った。

一方、シートで補強したS/CR試験体は、N試験体のような剛性低下が顕著には見られず、荷重の増加とともに徐々に変位が増大して押し抜きせん断破壊に至っている。なお、いずれの補強試験体もシートが破断していな

いことを確認している。このように、シート補強することで剛性低下が抑制されるのは、シートを接着することによって、かぶりコンクリートにおけるひび割れの発生および拡大が抑制されるためと推察される。また、S/CR試験体の中では、S/CR-4試験体の最大荷重時変位が最も小さいことが分かる。同時に、S/CR-4試験体の補強による荷重増分は、S/CR-3試験体のそれよりも小さいことから、 $E \cdot A$ の増加と荷重増分は線形比例関係にないことが分かる。これは、補強量を増加させても補強効果には上限があることを示している。

図-3に、引張剛性と耐力増分の関係を示す。図より、S/CR試験体で引張剛性が同程度の場合には、ほぼ同等の補強効果が期待できることがわかる。しかし、耐力増分の最大値を示す引張剛性は1方向シートを格子状に接着した場合で小さく、2方向シートで補強した場合により大きいことが分かる。この様に、耐力向上効果は、引張剛性と補強方法の両者に影響されるものと考えられる。

3.2 押し抜きせん断性状

図-4には、主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。図から明らかのように、上縁から下端鉄筋までのひび割れ角度($\alpha 1$)とかぶりコンクリートのひび割れ角度($\alpha 2$)とが大きく異なっ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-5に示す。表より、 $\alpha 1$ はいずれの試験体においてもほぼ同程度であることが分かる。一方、 $\alpha 2$ はいずれの試験体においても $\alpha 1$ 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、 $\alpha 2$ も試験体間の差異

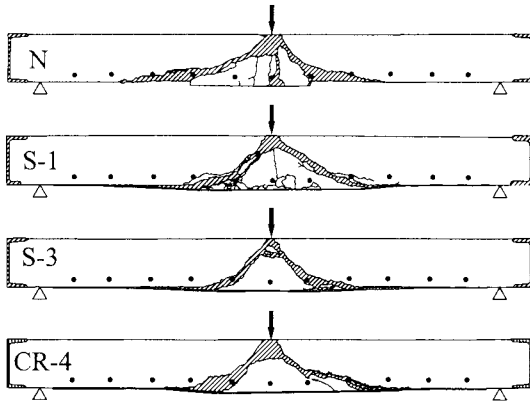


図-4 切断面のひび割れ性状

表-5 ひび割れ角度の一覧

試験体名	$\alpha 1$ (度)	$\alpha 2$ (度)
N	35	11
S-1	40	13
S-2	47	13
S-3	48	15
S-4	44	16
CR-1	46	15
CR-2	41	17
CR-3	44	16
CR-4	48	18

表-6 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)
N	-	-	-	276.2	273.0	1.01
S-1	42.3	88.1	0.48	318.5	361.1	0.88
S-2	60.0	111.0	0.54	336.2	384.2	0.88
S-3	82.8	121.2	0.68	359.0	394.1	0.91
S-4	67.6	130.7	0.52	343.8	403.7	0.85
CR-1	53.6	88.0	0.61	329.8	361.0	0.91
CR-2	54.3	97.0	0.56	330.5	370.0	0.89
CR-3	72.9	108.7	0.67	349.1	381.6	0.91
CR-4	60.0	120.2	0.50	336.2	393.2	0.86

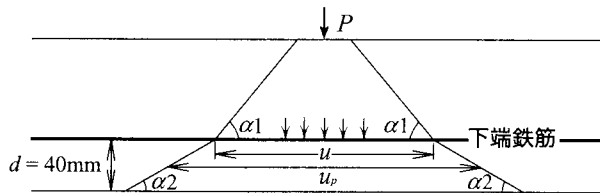


図-5 押し抜きせん断性状のモデル化

は小さい。

3.3 押し抜きせん断耐力

表-6には、かぶり部の耐力負担と押し抜きせん断耐力の関係を示している。ここでは、かぶりコンクリート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、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾(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。

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

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad \beta_d = \sqrt[3]{1/d} \text{ (d:m)}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

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)

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 $\alpha 2$ の角度でかぶり部に押し抜きせん断断面が形成さ

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。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手法として、著者らが既往の研究²⁾で提案した方式である。ただし、前述の方式は版厚15cm(かぶり4cm)で下端主鉄筋にD13を150mm間隔で配置したRC版の実験結果に基づいて提案されたものである。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-6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、押し抜きせん断断面の角度 $\alpha 1$ 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、実験値(i)の50~70%と小さいことが分かる。これは、本実験での版厚が18cm、下端主鉄筋がD16であるためと考えられる。なお、既往の研究³⁾でも、基準版厚を15cmから18cmに増大した場合や主鉄筋径を増加した場合に、実測値/計算値が0.5~0.7程度に低下していることから、本実験結果は既往の実験とも良好に対応していることが分かる。なお、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最大でも全体の約20%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。このように、シート補強による押し抜きせん断耐力の増加は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が、

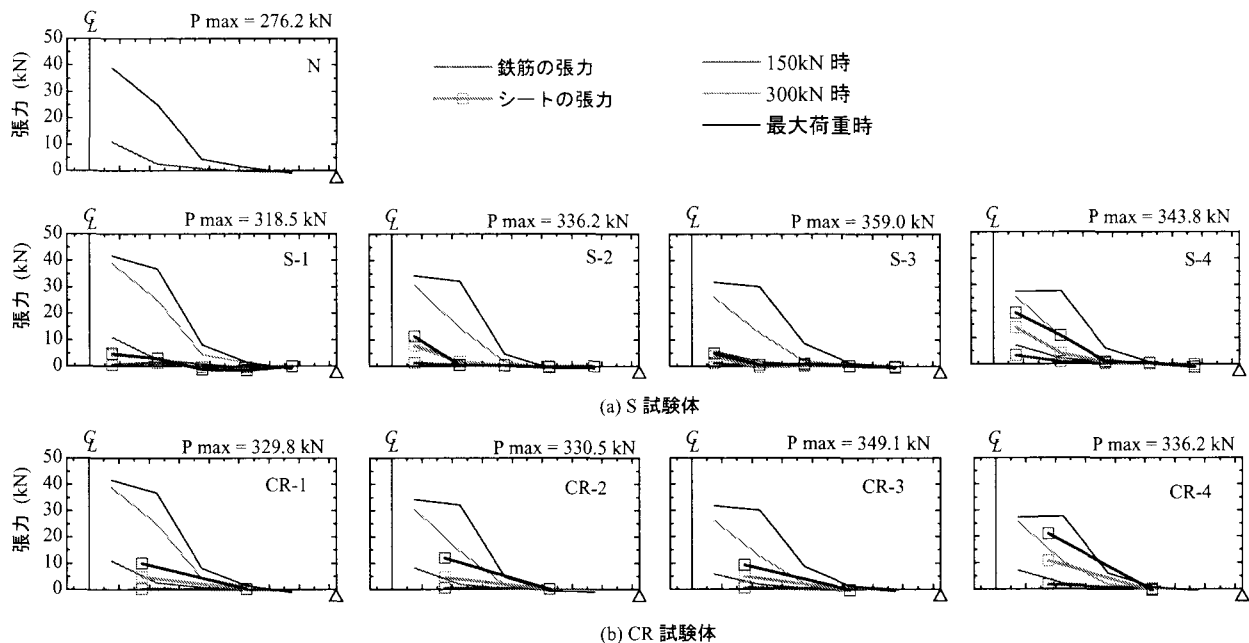


図-6 張力分担性状 (荷重レベル 150 kN, 300 kN, 最大荷重時)

版厚や主鉄筋量が大きい場合は、かぶり部の耐力寄与を計算結果は過大に見積もる傾向にある。これは、版厚や主鉄筋量が大きくなることで押し抜きせん断破壊時の変位量が小さくなることと密接に関連するものと推察される。今後は、RC版の版厚や主鉄筋量とシートの補強効果の関係を詳細に検討する必要がある。

3.4 張力分担性状

図-6に、各試験体の主鉄筋方向における版中央の鉄筋とシートの分担張力を示している。張力は鉄筋およびシートに貼り付けたひずみゲージの値を用いて算出した。なお、鉄筋の張力は1本あたり、シートの張力は鉄筋の配置間隔に合わせ、150 mmあたりの張力に換算した。

図より、主鉄筋張力は最大で40 kN程度を示していることが分かる。この値は、鉄筋の降伏張力の50%程度であることから、いずれの試験体も補強の有無にかかわらず、鉄筋は降伏せずに押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。N試験体では、荷重の増加とともに版中央部鉄筋が大きな張力を分担していることが分かる。鉄筋の張力分布は荷重の増加とともに支点側に広がる傾向にあるものの載荷点を頂点とする三角形状を示している。

一方、補強試験体の鉄筋の張力は、シート補強量の増加とともに減少する傾向にあることが分かる。また、シートの張力分布はいずれの試験体も載荷点を頂点とする三角形状を示している。ここで、荷重レベルが300 kN時の鉄筋の分担張力を比較すると、明らかに補強試験体の分担張力はN試験体よりも小さく、シート補強によって鉄筋の分担張力が軽減されていることが分かる。なお、最大荷重時の版中央部におけるシートの分担張力は、S/CR-4試験体を除いて鉄筋の半分程度以下である。また、S/CR-4試験体のシートの分担張力は鉄筋とほぼ同程度であることが分かる。この様に、シート補強量の増加とともに張力を大きく分担することが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、AFRPシートを下面に接着して補強したRC版の押し抜きせん断性状および補強効果を補強方法(2方向シート全面補強および1方向格子状補強)と補強量の影響に着目して検討した。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) 下面補強材の引張剛性 $E \cdot A$ を同等とすると、補強方法にかかわらず同程度の押し抜きせん断耐力の増加が期待できる。
- 2) シートの引張剛性 $E \cdot A$ を増大させることにより、最大荷重が増大し、最大荷重時変位は小さくなる傾向にある。しかしながら、耐力増加には上限があり、 $E \cdot A$ 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に形成された押し抜きせん断断面の角度は、載荷面から下端鉄筋位置までに形成される押し抜きせん断断面の角度よりも大幅に小さい。
- 4) かぶりコンクリートの耐力寄与を仮定した計算押し抜きせん断耐力は、多少危険側であるが実験値とほぼ対応する。

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.
- 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) 三上 浩, 岸 徳光, 田口史雄, 松岡健一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp. 1435-1440, 2002
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造照査編), 2002