

FRP シート補強 RC 版の押し抜きせん断性状

Punching Shear Behavior of RC Slabs Strengthened with FRP Sheet

三井建設(株) ○フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
北海道開発局 正 員 佐藤 昌志 (Masashi Sato)
室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

1. はじめに

各種連続繊維シート(以後、FRP シート)を用いて既存鉄筋コンクリート(RC)構造物を補強する方法は施工の簡便性、工期短縮、高耐久性などの観点から今後も様々な構造物に適用されるものと考えられる。著者らは、RC 梁下面に FRP シートを接着した際のシートの曲げ補強効果や剝離性状を詳細に検討するなど、合理的曲げ補強設計法確立のための研究報告^{1),2)}を行ってきた。しかし、面部材に FRP シートを接着した際の押し抜きせん断性状に関する研究例^{3),4)}は極めて少なく、未だ十分には明らかになっていない。また、従来の FRP シートは1方向強化材料であり、壁や版などの面部材を補強するためには直交して最低2回の貼り付けを行う必要があるため、さらなる工費縮減、工期短縮が望まれていた。

そこで、本研究ではアラミド繊維を直交2方向に織り上げた2方向シートの補強効果を比較検討するため、各種 FRP シートを RC 版下面に接着した試験体の押し抜きせん断実験を行った。用いた FRP シートは、アラミド繊維(AFRP)および炭素繊維(CFRP)製の1方向シートと AFRP 2方向シートであり、繊維材料の特性やシートの強化方向(貼り付け方法)および2方向シート層数の影響に着目して検討を行った。

2. 実験の概要

表-1に試験体の一覧と実験結果を示す。また、図-1に RC 版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示す。試験体は無補強 RC 版とその下面に表-2に示す各種 FRP シートを接着した合計5体である。A1,C1試験体は各々 AFRP または CFRP 1方向シートを直交して1層ずつ接着したもので、A2-1, A2-2 試験体は AFRP 2方向シートを各々1層、2層接着した試験体である。なお、シートの貼り付け範囲は配筋筋方向に全面、主鉄筋方向には両側支点の50mm手前までとした。各試験体のシートの引張剛性($E \cdot t$)は A1, C1, A2-1 試験体ではほぼ同等であり、A2-2 試験体は他の約2倍である。RC 版の寸法は1,650×1,650×150mmで下端主鉄筋および配筋筋としてD13を150mmピッチで配筋した。なお、一対辺は支持間隔が1,400mmで支点部は回転を許容するが浮き上がり拘束したピン支持に近い構造とし、他対辺は自由とした。また、載荷板は直径60mmの鋼製厚肉円板として版中央に設置した。用いたコンクリートの実験時の材令における圧縮強度は16.7MPa、弾性係数;13.9GPa、ポアソン比;0.23である。また、鉄筋はSD295Aで降伏強度は354.5MPaであった。シートの接着にあたり、RC版下

表-1 試験体の一覧と実験結果

試験体名	補強方法	最大荷重(kN)	荷重の増分(kN)	荷重比率
N	無補強	141.5	—	1.00
A1	AFRP 1方向シート直交	186.4	44.9	1.32
C1	CFRP 1方向シート直交	183.4	41.9	1.30
A2-1	AFRP 2方向シート1層	187.8	46.3	1.33
A2-2	AFRP 2方向シート2層	206.4	64.9	1.46

表-2 FRP シートの力学的特性

名称	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)
AFRP 1方向シート	415	0.286	2.48	126.5	36.2
CFRP 1方向シート	300	0.167	4.07	230.4	38.5
AFRP 2方向シート	435/435	0.3/0.3	2.48	126.5	38.0/38.0

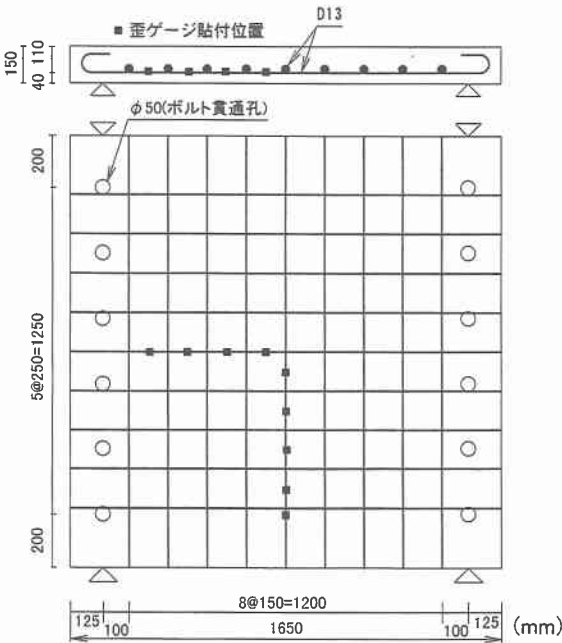


図-1 試験体の形状寸法と歪ゲージ位置

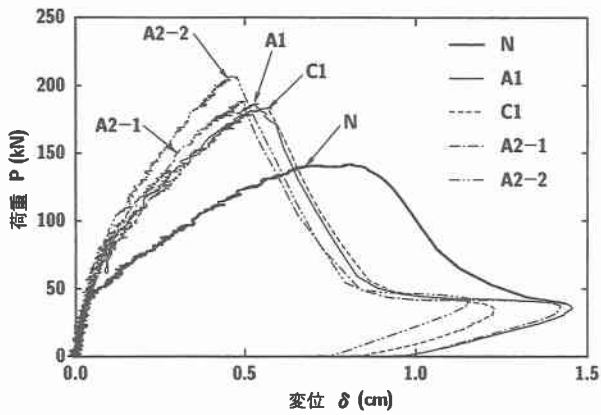


図-2 荷重-版中央変位関係

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、RC版の変位、鉄筋のひずみ、FRPシートのひずみを動的に計測し、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。N試験体は40 kN程度で主筋方向に曲げひびわれが発生し、版の曲げ剛性が大きく低下して変位が急増した。その後、版中央変位が7 mm程度までほぼ線形に荷重は増加し、荷重がほぼ140 kN程度と一定でたわみが1 mm程度増加した後、押し抜きせん断破壊に至って荷重が急激に低下した。一方、FRPシート補強試験体は、N試験体の様な急激な剛性の低下がみられず、荷重増加とともに徐々に変位が増加し、版中央変位が5 mm程度になったときに押し抜きせん断破壊に至った。破壊時の変位が最も小さい試験体はA2-2であり、また剛性低下が最も少ないのもA2-2試験体であった。表-1に示す様にシートの $E \cdot t$ (引張剛性) がほぼ同等のA1, C1, A2-1試験体の最大荷重はシートの種類、補強方法に関わらずN試験体の1.3倍程度を示している。一方、シートの $E \cdot t$ が他試験体の約2倍であるA2-2試験体の最大荷重はN試験体の1.46倍であり、 $E \cdot t$ の増加によって最大荷重が増加していることが分かる。ただし、補強による荷重増加は64.9 kNであり、他が42 ~ 46 kNであることから、 $E \cdot t$ の増加と荷重増加は線形比例関係にないことがわかる。

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押し抜きせん断性状を示す。図から明らかな様に、版上部から下端筋までのひびわれ角度(α_1)とかぶりコンクリート部のひびわれ角度(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、ひびわれ角度を表-3にとりまとめた。表より、 α_1 , α_2 ともに無補強のN試験体で最も

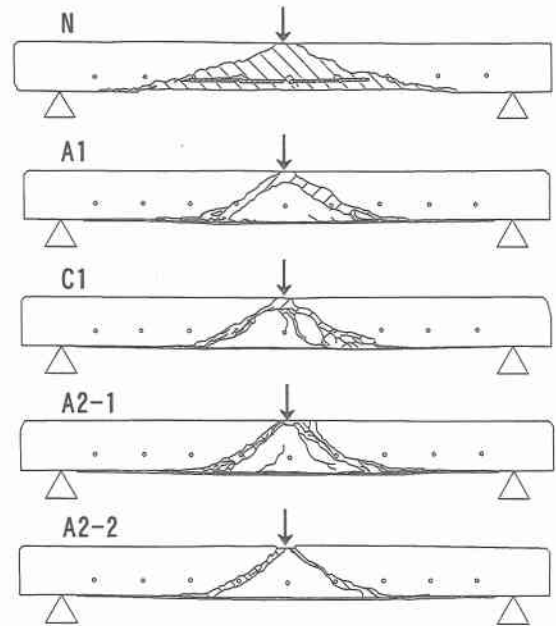


図-3 切断面のひびわれ図

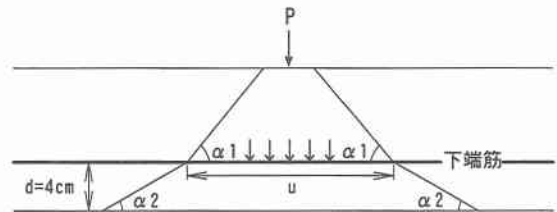


図-4 押し抜きせん断性状のモデル化

表-3 ひびわれ角度の一覧

試験体名	α_1 (度)	α_2 (度)
N	23.0	11.5
A1	34.5	25.3
C1	34.3	24.5
A2-1	41.3	21.8
A2-2	37.0	22.3

小さいことが分かる。これは、N試験体が同一荷重において剛性低下が最も著しく、変形しやすい状態になっているためと考えられる。N試験体の α_1 は 45° の約半分であり、補強試験体の α_1 はN試験体の1.5 ~ 1.8倍である。N試験体の α_2 は α_1 の半分であり、シート補強試験体の α_2 は α_1 の50 ~ 70%で、N試験体の α_2 の2倍程度である。このように、シート補強によってひびわれ幅が抑制されることなどで剛性低下が少なくなるため、押し抜きせん断面の角度が大きくなるものと考えられる。一般的には、ひびわれ角度がゆるくなると押し抜きせん断面の設計周長が長くなり、押し抜きせん断耐力は増加すると考えられるが、本実験では最も耐力の小さいN試験体で最も設計周長が長くなっている。これは、角度がゆるい場合はコンクリートのせん断強度が十分に発揮されないためと考えられる。また、より設計周長の短いシート補強試験体で剛性低下が少なく押し抜きせん断耐力が大きいことから、シート補強試験体で

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
N	—	—	—	141.5	(109.4)	(1.29)
A1	44.9	45.9	0.98	186.4	187.4	0.99
C1	41.9	47.2	0.89	183.4	188.7	0.97
A2-1	46.3	48.6	0.95	187.8	190.1	0.99
A2-2	64.9	60.8	1.07	206.4	202.3	1.02

表－５ 上部、かぶり部の耐力負担と押し抜きせん断耐力

試験体名	上部 ① (kN)	かぶり部 ② (kN)	計算耐力 ③ (kN)	実測耐力 ④ (kN)	④/③
N	175.3	0	175.3	141.5	0.81
A1	114.1	49.2	163.3	186.4	1.14
C1	115.0	53.4	168.3	183.4	1.09
A2-1	113.0	53.2	166.2	187.8	1.13
A2-2	114.6	65.6	180.2	206.4	1.15

はかぶりコンクリートが耐力増加に寄与している可能性が考えられる。

３．３ 押し抜きせん断耐力

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に示す様に 45° の角度で下端筋位置までひびわ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。また、版下面の FRP 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する。このように、コンクリート標準示方書⁵⁾を基に計算したかぶり部分の押し抜きせん断耐力を表－４の②に示した。なお、表－４中の④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。

表－４より、補強試験体の耐力から N 試験体の耐力を差し引いた耐力①をかぶり部の耐力負担と考えると、計算値②は最大 10 % 程度の差で実験値を評価できることが分かる。また、押し抜きせん断耐力値として、N 試験体の実測値に計算耐力増分を加算した計算耐力④は、実験値とほぼ対応している。一方、３．２で示した様に、版上部から下端筋まで進展する押し抜きせん断面の角度は、補強の有無で大きく異なっている。そこで、 α_1 、 α_2 を基に載荷面の周長や設計断面の周長を再評価し、コンクリート標準示方書式に準拠して押し抜きせん断耐力を計算した。すなわち、押し抜きせん断耐力は下端筋までの版上部の耐力にかぶり部の耐力を加算したものとした。表－５に計算結果と実験結果を取りまとめた。表より、N 試験体では計算耐力が実測耐力を大幅に上回るものの、シート補強試験体では計算耐力は実測耐力を安全側に評価していることが分かる。なお、設計式を提案するためには、今後、版の剛性や支持条件を変化させた実験を多数行いデータを集積する必要があると考えられる。

３．４ 張力分担

図－５に鉄筋とシートの分担張力を主筋方向、配力筋方向について示す。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、シートは鉄筋の配置間隔に対応させて 15 cm 分の張力とした。なお、シートには歪ゲージを版の中央と中央から四方に 7.5 cm の位置から 15 cm ピッチで貼り付けている。主筋方向の鉄筋張力は最大荷重時において全試験体中央で最大 44 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。すなわち、本試験体では補強の有無に関わらず、最大荷重時に版中央付近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。N 試験体中央では荷重が 98 kN ですでに中央部主鉄筋は降伏し、荷重の増加とともに大きな張力を分担する範囲が中央から支点方向に拡大していることが分かる。

一方、A1 試験体の中央およびその近傍の主鉄筋も最大荷重時にほぼ降伏時張力を分担している。なお、シートの張力分布は載荷点を中心とする台形状を示し、最大荷重時の中央部シートの張力は主鉄筋の半分程度である。C1 試験体では、A1 試験体と異なり主鉄筋の張力が載荷点直下に集中する傾向にあるが、シートの張力分担性状は A1 試験体とほぼ同様である。また、２方向シートを１層補強した A2-1 試験体の鉄筋およびシートの張力分担性状は A1 試験体とほぼ同様である。一方、２方向シートを２層補強した A2-2 試験体の同一荷重でのシートの張力レベルは他の試験体よりも大きく、主鉄筋の張力負担を軽減していることがわかる。これは、A2-2 試験体が最も大きな押し抜きせん断耐力を示したことに関連するものと考えられる。

N 試験体の配力筋の張力は主鉄筋に比べてより版中央に集中する傾向がみられ、この場合も最大荷重時の版中央配力筋の最大張力はほぼ降伏時張力となっている。一方、A1 試験体の配力筋の張力分布は台形状を呈し、最大

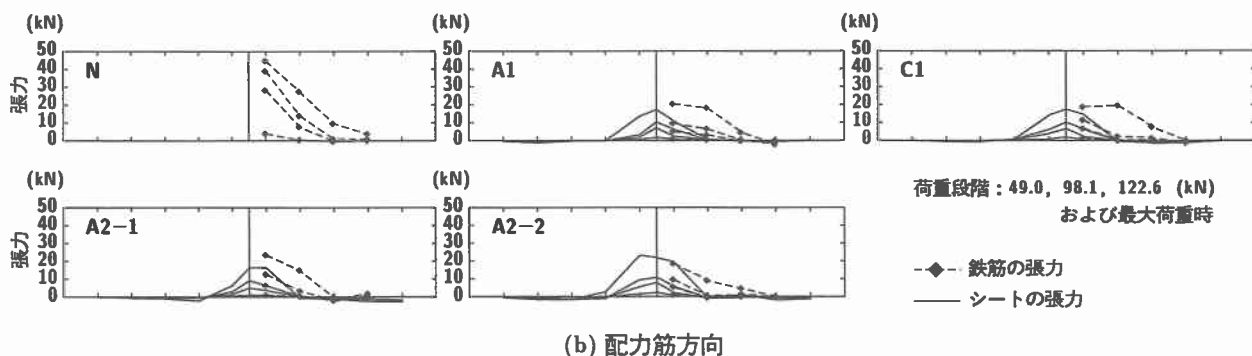
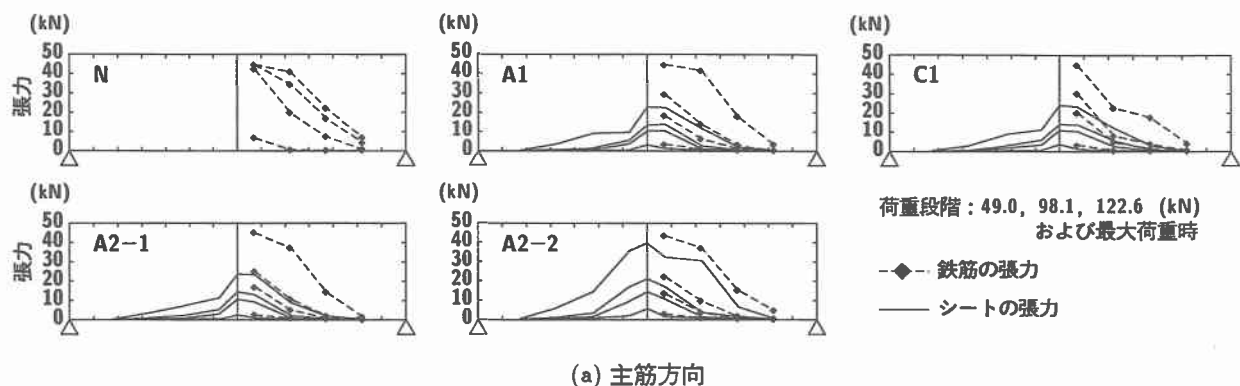


図-5 張力の比較

荷重時でも 20 kN 程度である。一方、シートの張力分布は載荷点を中心とする三角形形状を示し、張力分担範囲が配筋筋よりも載荷点近傍に集中していることが分かる。C1 試験体の張力分担性状は概ね A1 試験体と同様であり、最大荷重時の版中央配筋筋の張力とシートのそれはほぼ同等である。A2-1 試験体は A1, C1 試験体と大略同様な張力分担性状を示しているが、他に比べて配筋筋の張力が多少版中央に集中している。なお、シートの張力分布は台形状を示し、配筋筋よりもシート張力の方が若干小さい。A2-2 試験体は他と比べて配筋筋の張力レベルが小さく、一方でシートの張力レベルが大きい。このように、A2-2 試験体では他に比べてシートの張力分担が大きく、主鉄筋、配筋筋の張力分担を軽減するためより大きな押し抜きせん断耐力を示したものと考えられる。

4. まとめ

RC 版下面に各種 FRP シートを接着した試験体を用い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) 下面補強材の引張剛性をほぼ同等とするとシートの材質 (AFRP と CFRP) やシートの種類 (1 方向シート直交と 2 方向シート) に関わらずほぼ同等の押し抜きせん断耐力の増加が期待できる。
- 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なる。これはシート補強によって剛性低下が抑制され、同一荷重時の変位が小さくなるためと考えられる。

- 3) かぶりコンクリートがシート補強によって押し抜きせん断に抵抗すると仮定して、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比較的良好に対応する。
- 4) A2-2 試験体の押し抜きせん断耐力が最も大きかったが、耐力増加は $E \cdot t$ の増加に比例するほど大きくない。A2-2 試験体ではシートの張力分担が他よりも大きく、鉄筋の張力増加を抑制していることが押し抜きせん断耐力増加の要因であると考えられる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp. 1399-1410, 1999.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 池田憲二, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁のスパン方向偏心載荷時における耐荷性状, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1175-1182, 2000.
- 3) 中島規道, 三上 浩, 角田 敦, 鍋島益弘: 二方向アラミド繊維シートによる RC スラブの押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp. 1465-1470, 1999.
- 4) 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.
- 5) 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.