

# アラミド繊維シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断性状に 及ぼす補強方法と補強層数の影響

## The Influence of Varying Reinforcement Methods and Amounts on the Punching Shear Behavior of RC Slabs Reinforced with AFRPs

三上 浩 HIROSHI MIKAMI  
藤田 学 MANABU FUJITA  
中島 規道 NORIMICHI NAKAJIMA  
篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI  
田村 富雄 TOMIO TAMURA

ファイベックス (株)

アラミド繊維シートを下面接着した 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に着目して、9 体の試験体を用いて実験的に検討した。補強法は、2 方向シートを貼り付ける方法と 1 方向シートを一定の間隔で直交して貼り付ける方法とした。実験の結果、1) 補強材の引張剛性が大きい場合は、2 方向シートの方が 1 方向シートを用いる場合よりも効果的であること、2) 補強材の引張剛性に対応して補強効果は増大する傾向にあること、3) ただし、補強効果には上限があること、4) 著者らの提案式で比較的精度良く押し抜きせん断耐力の評価が可能であること、などが明らかになった。

キーワード：AFRP シート、RC 版、押し抜きせん断耐力、シート剥離

To investigate the effect on strengthening the punching shear capacity of AFRP reinforced RC slabs a series of nine static loading tests were conducted with varying application methods of reinforcement and AFRP tensile stiffness. The following two reinforcing methods were applied; bonding of cross-directional AFRPs and bonding of unidirectional orthogonal AFRPs. The following results were obtained; 1) When the magnitude of AFRP tensile stiffness is large, the reinforcing effects of using a cross-directional sheet are superior to those of using a unidirectional one, 2) The greater the tensile stiffness of the AFRPs, the larger is the punching shear capacity, 3) however, the capacity tends to have an ultimate value and can be decreased by increasing the tensile stiffness from a certain point; and 4) The capacity estimated with the proposed formula corresponds very closely to the experimental results.

**Key Words:** AFRP Sheet, RC Slab, Punching Shear Capacity, Sheet Debonding

### 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適用されるようになった。道路橋床版では、押し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。しかし、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などによる

増厚工法や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。一方、FRP シートによる床版下面補強工法には上述したような課題は少ないものの、補強効果に関する研究例<sup>1)-5)</sup>は比較的少ない。

著者らは、既往の研究<sup>4),5)</sup>において、FRP シートによる道路床版などの面部材の下面補強を想定し、静的押し抜きせん断性状を実験的に検討してきた。その結果、1) FRP シートで下面補強した RC 版の押し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し抜きせん断抵抗が寄与すること、2) FRP シートの引張剛性

(弾性係数  $E \times$  シート厚さ  $t$ ) を同等とすると、炭素やアラミド繊維など、材料特性に関わらずほぼ同等の押し抜きせん断耐力増分が期待できること、3) 2 方向にアラミド繊維を配交した 2 方向 AFRP シートは 1 方向シートを直交して 2 方向に貼り付けた場合と同等程度以上の補強効果を有すること、などを明らかにしてきた。

しかしながら、既往の研究<sup>4),5)</sup>における補強材の引張剛性は最大でも 60 MN/m 程度であり、それ以上の引張剛性においても補強効果の増大が期待できるかは明らかになっていない。また、押し抜きせん断耐力の増大にかぶりコンクリートの押し抜きせん断抵抗が寄与することは明らかになったものの、その程度は、補強する RC 版の特性、例えば版厚、主鉄筋量、コンクリート強度および弾性係数などにも影響されると推察されるが、それらの影響に関しては未だ明らかにされていない。

一方、FRP シートで床版全面を補強する工法には、1) ひび割れの目視観察が不可能となり維持管理が困難となること、2) 床版内部が滞水すると疲労耐久性が低下するため上面防水が確実に実施されていることが必要である、などの欠点も指摘されている。そのため、最近では 1 方向 FRP シートを格子状に一定の間隔で直交して貼り付けることで、上記の課題を解消する方法も提案され、輪荷重走行実験<sup>6)</sup>によって疲労耐久性に関する検討が進められている。

このような背景から、本研究では 2 種類の補強方法、すなわち、2 方向 AFRP シートによる全面補強および 1 方向 AFRP シートによる格子状補強に着目し、さらに補強材の引張剛性を最大で 110 MN/m 程度まで引き上げて、補強方法および補強材の引張剛性が補強効果に与える影響を 4 辺単純支持 RC 版の静的押し抜きせん断実験によって検討した。また、FRP シート補強した床版の押し抜きせん断耐力の評価式として、松井他が提案した評価式の適用性について検討を行った。併せて、著者らの既往の提案式の妥当性を検証し、RC 版の特性、主に RC 版主鉄筋の降伏が補強材の押し抜きせん断耐力向上効果に与える影響に着目して提案式を一部修正し、実験結果との対応性を比較検討した。

## 2. 試験体の概要

表-1 に本実験で用いた試験体の一覧を示す。試験体数は、無補強試験体を含め、補強方法を 2 種類、補強量を 4 種類に設定した合計 9 体である。補強方法は、2 方向 AFRP シートによる全面補強と、1 方向 AFRP シートによる格子状補強の 2 種類である。また、補強材の引張剛性は、最小 24 MN/m 程度から最大 113 MN/m 程度と

表-1 試験体の一覧

試験体名	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	シート層数	引張剛性 $E \cdot t$ (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	1,246(623×2)	2	72.5

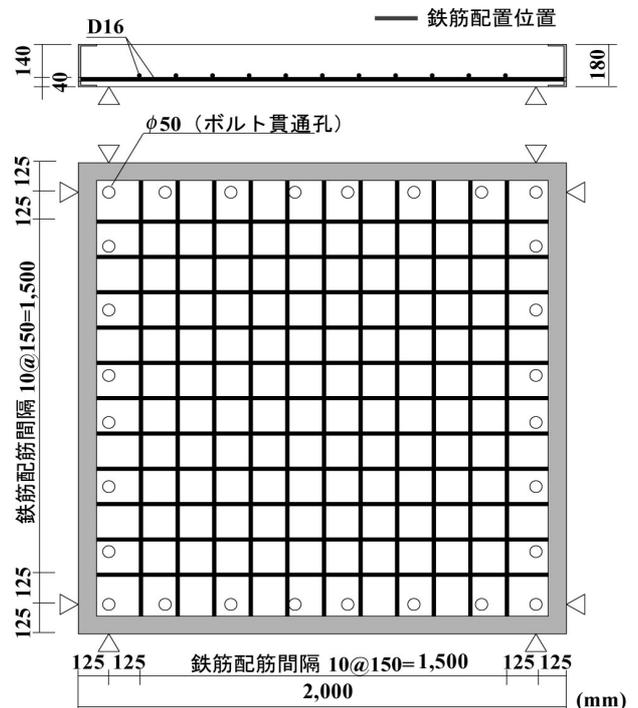


図-1 RC 版の形状寸法および配筋状況

した。なお、格子状補強では、隙間をあけてシートを貼り付けることから、引張剛性は隙間も含めた換算引張剛性で示した。そのため、格子状補強における引張剛性は、全面補強に比べて全般的に小さく設定されている。表中、試験体名の第 1 項目は N が無補強、S が全面補強、CR が格子状補強を示し、第 2 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 RC 版の形状寸法と配筋状況を示す。RC 版の寸法は、2,000×2,000×180 mm で、主鉄筋のかぶりは 40 mm である。用いた鉄筋は D16 で、主鉄筋、配筋筋ともに版中央部から 150 mm 間隔で配筋した。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こととした。また、本 RC 版では圧縮側に鉄筋を配置してい

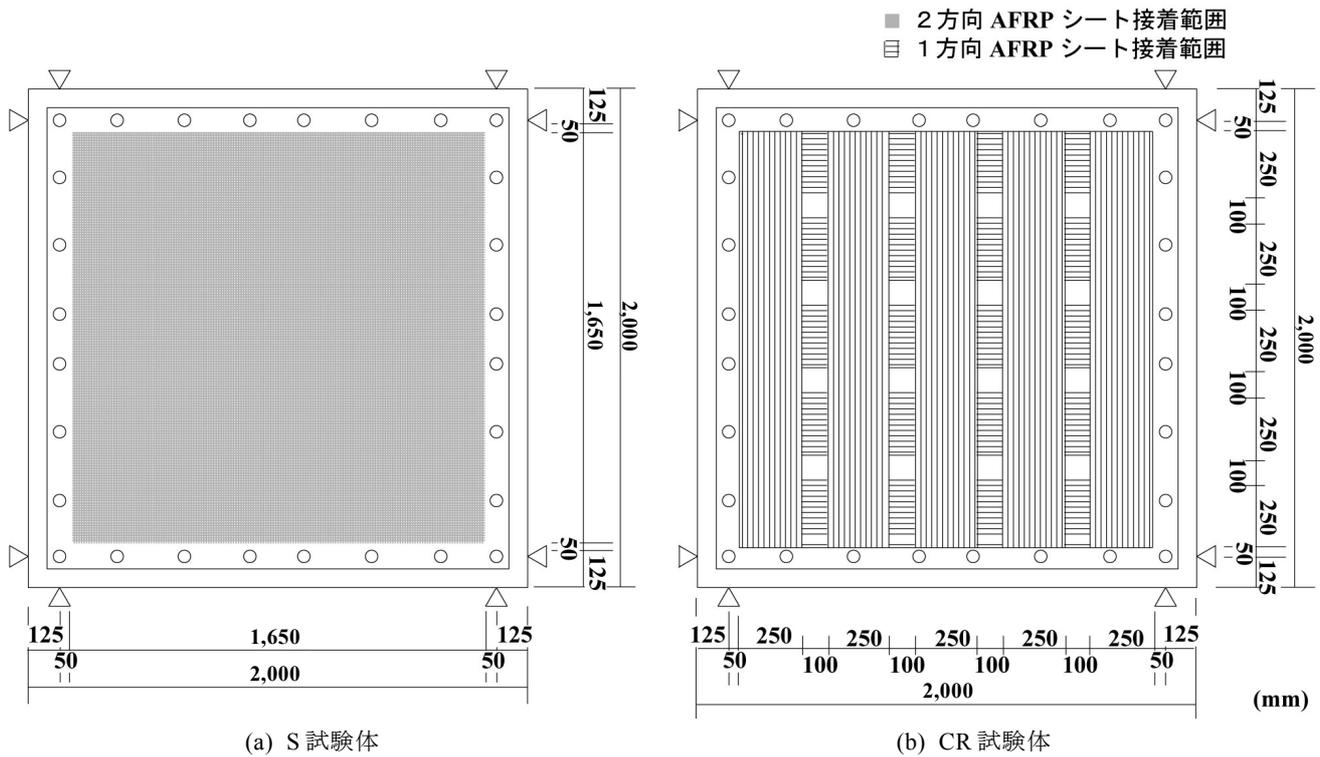


図-2 AFRP 補強概要

ない。鉄筋は、4 辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接定着し、定着長を削減している。なお、図中○印は、試験体の浮き上がり防止用ボルトを挿入するための貫通孔を示している。

図-2 に RC 版下面の FRP シート補強概要を示す。S 試験体では、2 方向 AFRP シートを両支点の 50 mm 手前まで貼り付けた。なお、2 層以上貼り付ける場合は、1 層ずつ上記施工を繰り返した。一方、CR 試験体では、始めにシート接着位置を墨出しし、幅 250 mm の 1 方向 AFRP シートを先ず主鉄筋方向（図の左右方向）に版中央部から 350 mm 間隔（隙間 100 mm）にて両支点の 50 mm 手前まで貼り付けた。その後、配力筋方向のシートを貼り付ける前に、当該貼り付け範囲における主鉄筋方向シート上面と版表面までの段差をエポキシ樹脂パテ材を用いて修正した。また、100×100 mm の無補強範囲には、エポキシ樹脂が回らないようにマスキングを施し、その後、配力筋方向のシートを貼り付けている。したがって、格子状補強では、100×100 mm の隙間が合計 16 カ所設けられている。また、シートを 2 層貼り付ける場合は、上記施工を繰り返した。なお、いずれの RC 版もシート接着部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（処理深さ 1～2 mm 程度）を施し、プライマーを塗布した後にエポキシ樹脂を用いてシートを接着している。

RC 版の支持条件は 4 辺単純支持で、支持間隔は 1,750

表-2 AFRP シートの力学的特性値

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ <i>t</i> (mm)	弾性係数 <i>E</i> (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ $\epsilon$ (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75
415	0.286	118	2.06	1.75
623	0.430			
830	0.572			

mm である。支点部は回転を許容するが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。載荷板は直径が 60 mm の鋼製厚肉円板とし、RC 版中央部に設置した。なお、載荷板の直径は、押し抜きせん断破壊時の破壊面が支点をよぎらないように選定した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、 $f'_c = 34.9$  MPa、弾性係数は 25.2 GPa であり、鉄筋の降伏強度は  $f_y = 386.4$  MPa であった。表-2 に 2 方向 AFRP シートおよび 1 方向 AFRP シートの力学的特性値を示す。なお、力学的特性値はいずれもカタログ値である。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、レーザ式変位計による版中央部変位、鉄筋およびシートに貼り付けたひずみゲージによる鉄筋およびシート各点のひずみである。これらの出力は、連続的にデジタルメモリーに一括収録し、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。

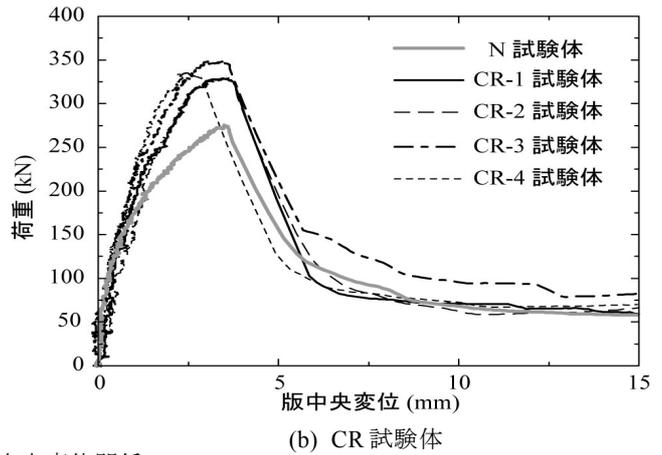
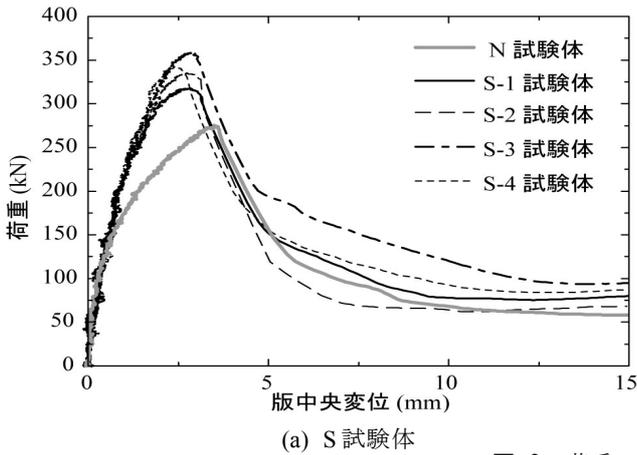


図-3 荷重—版中央変位関係

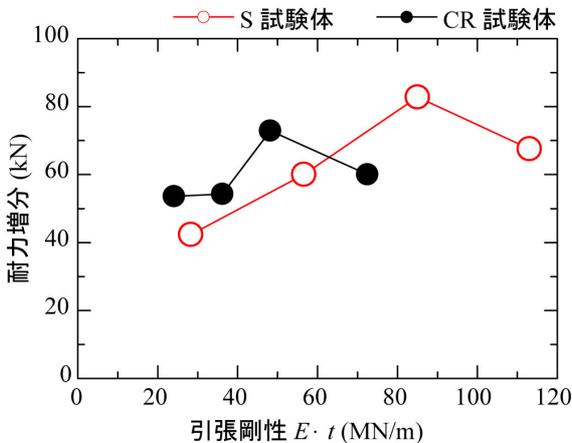


図-4 引張剛性と耐力増分の関係

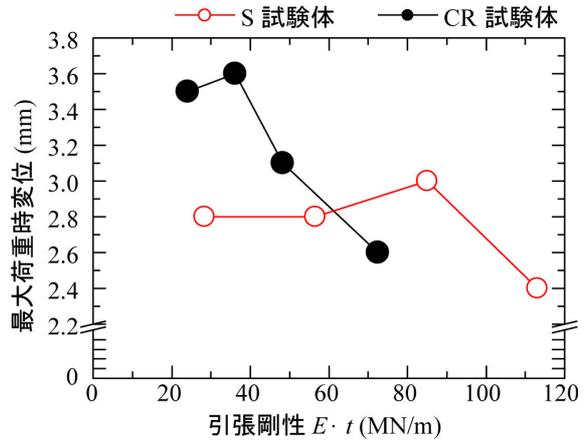


図-5 引張剛性と最大荷重時変位の関係

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 荷重—変位曲線

図-3 に各試験体の荷重と版中央部変位（以後、変位）の関係を S, CR 試験体ごとに比較して示した。また、表-3 には各試験体の最大荷重（押し抜きせん断耐力）、最大荷重時変位、補強材の単位幅当たりの引張剛性および耐力増分の一覧を示した。ここで、耐力増分とは補強試験体の最大荷重から N 試験体のそれを差し引いた荷重である。

図-3 から、無補強の N 試験体は 170 kN 程度でひび割れが発生して版の曲げ剛性が低下し、変位が増加し始めていることがわかる。その後、3.6 mm 程度の変位で押し抜きせん断破壊に至った。一方、シート補強した S/CR 試験体には、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変位が徐々に増大した後、急激に荷重が低下して押し抜きせん断破壊に至っていることがわかる。なお、いずれの補強試験体もシートは破断していないことを確認している。

このように、シート補強を施すことで剛性低下が抑制されるのは、シートを床版下面に接着することでコン

クリートのひび割れの発生および開口が抑制されるためと考えられる。また、いずれの補強方法においても補強材の引張剛性が最も大きい S/CR-4 試験体の最大荷重時変位が最も小さいことがわかる。同時に、S/CR-4 試験体の耐力増分は S/CR-3 試験体のそれよりも小さいことから、補強材の引張剛性  $E \cdot t$  の増加と補強効果、すなわち耐力増分は線形比例関係にないことがわかる。これは、補強材の量や弾性係数、すなわち引張剛性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。

#### (2) 引張剛性と耐力増分、最大荷重時変位の関係

図-4 に補強材の引張剛性と耐力増分の関係を示す。図より、引張剛性が 60 MN/m 程度までは、CR 試験体の耐力増分は S 試験体に比べて多少大きく、それ以上の剛性では逆の傾向を示すことがわかる。これは、後述するように引張剛性が比較的小さい場合は、CR 試験体に無補強部分があるため最大荷重時変位が S 試験体に比べて大きくなり、曲げのモードがより卓越してシートの補強効果が大きく出現したためと考えられる。また、前述したように S/CR-4 試験体の耐力増分は S/CR-3 試験体のそれよりも小さく、補強材の引張剛性  $E \cdot t$  の増加

と耐力増分は線形比例関係にないことがわかる。なお、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貼り付けた CR 試験体の方が小さく、また、耐力増分の最大値も CR 試験体の方が小さい。

これは、CR 試験体には無補強の領域があること、S 試験体は全面が補強されていることと密接に関連するものと考えられる。すなわち、CR 試験体では、無補強領域においてひび割れの発生や開口が顕在化しやすく、耐力増分や最大荷重時変位に与えるシートの引張剛性の影響が S 試験体に比べて顕著なため、補強効果の上限がより低引張剛性で出現し、同時に耐力増分の最大値も小さくなったものと考えられる。なお、60 MN/m 程度までの引張剛性で補強する場合は、1 方向シート格子貼りの方が補強効果は多少大きく、それ以上の剛性では 2 方向シート全面補強の方が効果的である。以上から、補強の要求性能に対応して両者を選択することが合理的と思われる。このように、押し抜きせん断耐力の向上効果は、補強方法および補強材の引張剛性に影響されることが明らかとなった。

図-5 に引張剛性と最大荷重時変位の関係を示す。図より、いずれの補強方法でも、ある引張剛性以上において、最大荷重時変位が大きく低下する傾向にあることがわかる。また、引張剛性が 60 MN/m 程度までは、CR 試験体の最大荷重時変位が S 試験体のそれよりも大きく、最大荷重時変位の低下も CR 試験体の方が S 試験体に比べてより小さな引張剛性で生じている。ここで、上記引張剛性において CR 試験体の最大荷重時変位が S 試験体のそれに比べて大きいのは、CR 試験体では無補強の領域があるため、その領域内でのひび割れの発生および、ひび割れ幅の開口を抑制できないためと考えられる。また、CR 試験体の変位が S 試験体に比べてより小さな引張剛性で低下するのは、CR 試験体のシート接着面積が S 試験体よりも小さく、シートがより部分剥離しやすいためと推察される。

なお、耐力増分および最大荷重時変位は、ともに引

表-3 各試験体の実測値一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	引張剛性 $E \cdot t$ (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

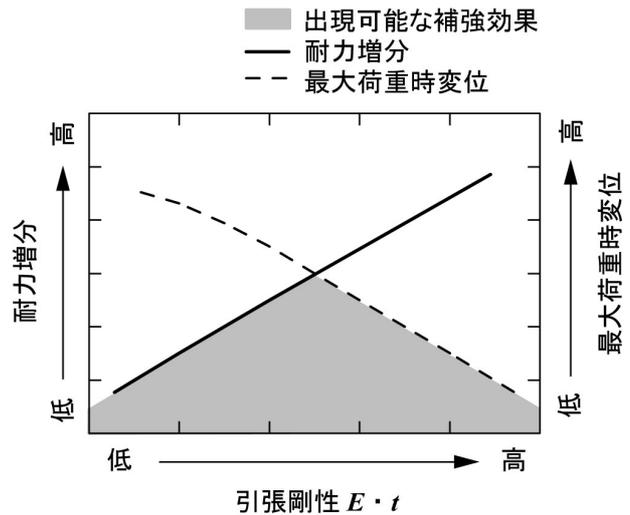


図-6 引張剛性と耐力増分および最大荷重時変位の関係

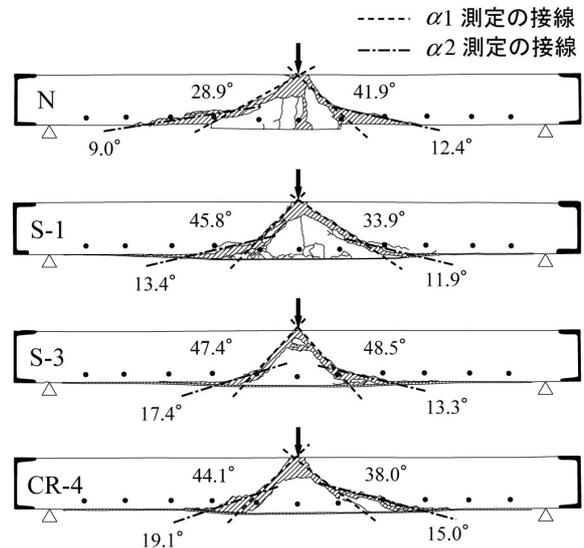


図-7 切断面のひび割れ性状

張剛性がある程度以上で低下する類似の傾向を示すことから、引張剛性と耐力増分およびシートが部分剥離して押し抜きせん断破壊する時の変位量、すなわち最大荷重時変位は密接に関連するものと推察される。

図-6 に上記関係を模式的に示した。図中、左側縦軸は耐力増分、右側縦軸は最大荷重時変位である。なお、図中の耐力増分および最大荷重時変位を示す曲線は、大略の傾向を示す概念的な曲線である。すなわち、耐力増分を右上がり、最大荷重時変位を右下がりとする、両曲線を上限とする領域の重複部分（図中、網掛け部分）が、出現可能な補強効果の領域を示すものと考えられる。

### (3) 押し抜きせん断性状

図-7 に主鉄筋方向の版中央部切断面におけるひび割れ性状の一例を示す。図より、版上端から主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

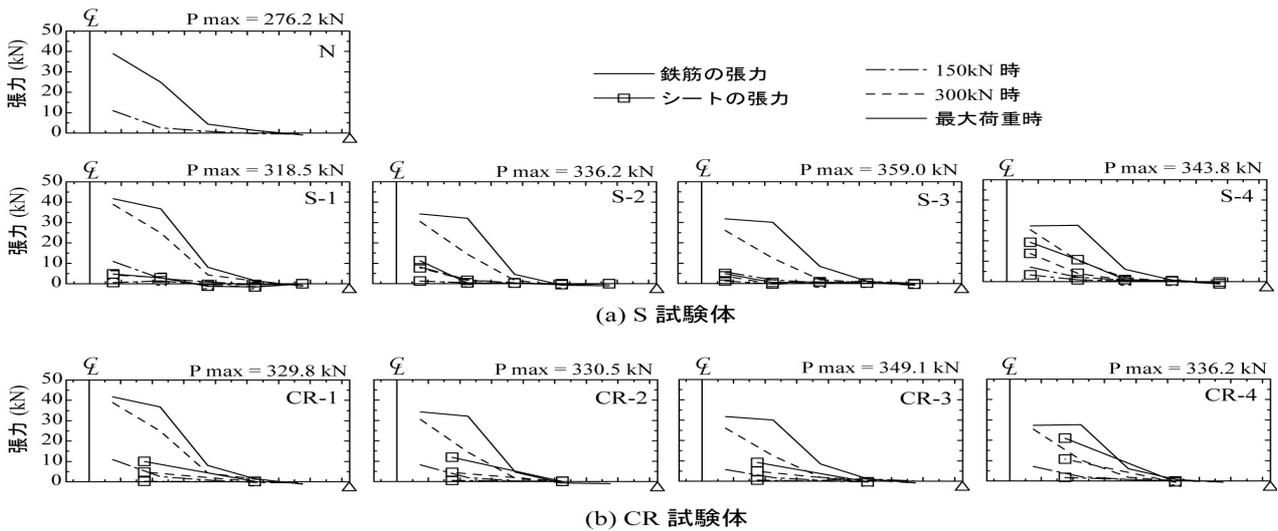


図-8 張力分担性状 (荷重レベル 150, 300kN, 最大荷重時)

角度 ( $\alpha 2$ ) が大きく異なっていることがわかる。各試験体のひび割れ角度を整理して表-4 に示す。なお、表中のひび割れ角度は左右の平均値であり、角度は切断面の写真を基に線形を仮定して測定した。表より、無補強試験体の  $\alpha 1$  は  $35^\circ$  程度と  $45^\circ$  を大きく下回り、補強することで  $\alpha 1$  は  $45^\circ$  程度に近づくことがわかる。これは、既往の研究結果<sup>4),5)</sup>と良好に対応している。すなわち、曲げ剛性の小さな変形しやすい試験体の  $\alpha 1$  は  $45^\circ$  よりも小さく、補強によって版の曲げ剛性が増大し、変位が抑制されることで  $\alpha 1$  は大きくなり  $45^\circ$  程度に近づくものと考えられる。なお、補強方法や補強材の引張剛性が  $\alpha 1$  の大きさに与える影響は顕著でなく、大略同等である。一方、 $\alpha 2$  はいずれの試験体でも  $\alpha 1$  を大きく下回り、かぶり部において押し抜きせん断面が緩やかに形成され、広がりをもつ傾向にあることがわかる。なお、補強試験体の  $\alpha 2$  は CR 試験体で多少大きくなる傾向にあるものの大略同等である。

(4) 張力分担性状

図-8 に各試験体の主鉄筋方向における版中央の鉄筋および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ひずみゲージの値を用いて算出した。

表-4 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	44	16
CR-3	48	18
CR-4	41	17

なお、鉄筋の張力は 1 本当たり、シートの張力は、鉄筋の配置間隔にあわせて 150 mm 当たりの張力に換算している。

図より、主鉄筋の張力は最大で 40 kN 程度であることがわかる。この値は、鉄筋の降伏時張力の 50 % 程度であることから、補強の有無にかかわらず、いずれの試験体も主鉄筋が降伏せずに押し抜きせん断破壊に至ったことがわかる。N 試験体では、荷重の増加とともに版中央の鉄筋張力が増大し、張力の分担範囲も支点側に拡大する傾向にあることがわかる。

一方、補強試験体の最大荷重時における鉄筋張力は、補強方法の違いによらず、シートの引張剛性の増加に対応して多少減少する傾向にあることがわかる。また、N 試験体の最大荷重時 (276.2 kN) における鉄筋張力と補強試験体の 300 kN 時におけるそれを比較すると、明らかに補強試験体における鉄筋の分担張力は N 試験体の張力よりも小さく、両者の差異は特に引張剛性が大きい場合に顕著である。以上から、シート補強によって鉄筋の分担張力が軽減されること、その度合いは引張剛性の増加に対応して大きくなること、が明らかとなった。これは、シートによる曲げ補強効果が引張剛性に対応して出現することを示すものである。

一方、シートの分担張力は、いずれの試験体も版中央近傍を頂点とする三角形の分布を示している。また、シートの分担張力は、S/CR-4 試験体を除いて、鉄筋の分担張力の半分程度以下と小さい。なお、S/CR-4 試験体のシートの分担張力は、鉄筋の分担張力とほぼ同程度と大きい。前述したように、S/CR-4 試験体の耐力増分は S/CR-3 試験体のそれに比べて小さい。このことと、S/CR-4 試験体でシートの分担張力が特に大きいことは矛盾するものと考えられる。これは、著者らの既往の研

究<sup>7)</sup>結果と同様に、RC 梁底面に接着した曲げ補強用シートの部分剥離進展時において、等せん断力区間のシートひずみがひび割れ近傍におけるせん断ずれに起因して大きくなることに対応するものと考えられる。また、S/CR-4 試験体では、シートの引張剛性が大きいため、張力を大きく分担して鉄筋張力を軽減する傾向にあり、一方で接着面積は不変であることから、シートはより剥離しやすい状況にあるものと考えられる。

(5) 押し抜きせん断耐力

RC 版の押し抜きせん断耐力評価式として、コンクリート標準示方書式<sup>8)</sup> (以後、示方書式) の他に、松井らの提案した式 (1)<sup>1)</sup> (以後、松井式) がある。松井式は示方書式と異なり、かぶりコンクリートのせん断抵抗も考慮した評価式であるため、FRP シートで補強した RC 版の押し抜きせん断耐力評価が可能であるものと考えられる。そこで、式 (1) に示す松井式を用いて、本実験で用いた試験体の押し抜きせん断耐力を計算した。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (1)$$

ここに、

- $P_{sx}$  : 押し抜きせん断耐力 (N)
- $B$  : 床板の有効幅 (mm)
- $\tau_{smax}$  : コンクリートの最大せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $X_m$  : 主鉄筋断面の中立軸深さ (mm)
- $\sigma_{tmax}$  : コンクリートの最大引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $C_m$  : 下側主鉄筋のかぶり (mm)

なお、式 (1) において、シート補強は曲げ設計による  $X_m$  (主鉄筋断面の中立軸深さ) に考慮されるものの、かぶりコンクリートの押し抜きせん断抵抗分である

$\sigma_{tmax} \cdot C_m$  には考慮されない。

一方、著者らは既往の研究<sup>4),5)</sup>において、示方書式を基にした FRP シート下面補強 RC 版の押し抜きせん断耐力評価式を提案している。すなわち、シート補強によってかぶりコンクリートがより健全となり、押し抜きせん断耐力の向上に寄与するものとして、かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力を計算し、それと示方書式による有効高さ部分の押し抜きせん断耐力を累加する方法である。式 (2) に、かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力の評価式を示す。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (2)$$

$$f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \beta_d = \sqrt[4]{1/d} \text{ (d : m)}$$

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

ここに

- $f'_{cd}$  : 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)

表-5 実測値と計算値との比較

試験体名	押し抜きせん断耐力 (kN)				
	実測値 (i)	松井式 (ii)	(i)/(ii)	旧提案法 (iii)	(i)/(iii)
N	276.2	233.9	1.18	280.3	0.99
S-1	318.5	242.0	1.32	370.8	0.86
S-2	336.2	249.7	1.35	394.3	0.85
S-3	359.0	256.7	1.40	404.7	0.91
S-4	343.8	263.5	1.30	414.5	0.83
CR-1	329.8	243.6	1.35	370.6	0.89
CR-2	330.5	248.9	1.33	391.8	0.84
CR-3	349.1	252.4	1.38	403.6	0.86
CR-4	336.2	260.8	1.29	418.3	0.80

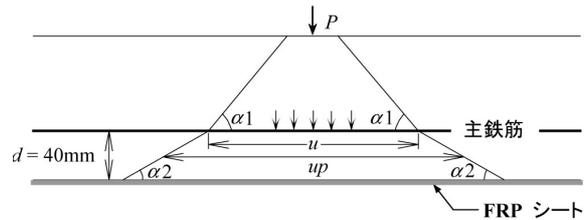


図-9 押し抜きせん断性状のモデル化

かぶりコンクリートの押し抜きせん断耐力は、図-9 に示す押し抜きせん断性状のモデル化を参考に、 $\alpha 1 = 45^\circ$  の角度で主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、表-4 に示した  $\alpha 2$  の角度でかぶりコンクリートに押し抜きせん断面が形成されるものとして設計断面の周長 ( $u_p$ ) を求めて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-5 に実測値と松井式および旧提案法 (式 (2) と RC 示方書式の累加) による計算値を取りまとめた。表から明らかなように、松井式は全般的に安全側の評価を与え、実測値 / 計算値は 1.2~1.4 程度である。また、無補強の N 試験体で実測値と計算値の対応が最も良く、補強した試験体に対してはより安全側の評価を与えていることがわかる。これは、松井式では、補強材の引張剛性が主鉄筋断面の中立軸深さに影響を与えるのみで、補強によるかぶりコンクリートのせん断抵抗の増大は考慮されないためと考えられる。なお、実務的な観点では、松井式で十分安全側の設計が可能と考えられる。

一方、旧提案法は全般的に危険側の評価を与え、実

測値 / 計算値はシート補強した試験体で 0.8~0.9 程度である。既往の研究<sup>4),5)</sup>から、旧提案法は、比較的曲げ剛性の小さい RC 版 (版厚: 15 cm, 主鉄筋比: 約 0.9 %, コンクリート強度: 16.7 MPa) を AFRP シート補強した場合には、押し抜きせん断耐力を良好に評価できることが明らかになっている。なお、この場合には、補強後も主鉄筋が降伏して押し抜きせん断破壊に至っている。一方、本実験では版厚も厚く、主鉄筋量も多く、用いたコンクリートの圧縮強度も高いことから、より変形しにくく、主鉄筋の降伏を伴わないで押し抜きせん断破壊に至っている。

既往の RC 梁に関する FRP シート曲げ補強実験<sup>7)</sup>から、シートの曲げ補強効果は、鉄筋が降伏した後に顕著に出現することが明らかになっている。すなわち、RC 版においても、主鉄筋が降伏する場合と降伏しない場合では、シートの補強効果は大きく異なるものと推察される。本文では、シート補強後の主鉄筋の最大張力が降伏時張力の 40 ~ 50 % 程度であったことから、主鉄筋が降伏しない RC 版での補強効果を降伏時張力との比に対応させて 0.5 として評価することとした。すなわち、式 (2) を式 (3) のように修正する。

$$V_{pcd} = \alpha \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (3)$$

ここに、 $\alpha$  は版の曲げ剛性などによって変動する補強材の補強効果を示す係数で、主鉄筋が降伏する場合には 1、降伏しない場合には 0.5 とする。

修正した提案式 (3) を用いて計算したかぶりコンクリートの耐力負担と押し抜きせん断耐力の一覧を表-6 に示す。なお、 $u_p$  は表-4 に示した実測値を用いて計算している。表より、かぶりコンクリートの耐力負担の計算値は、ほぼ実測の耐力増分に対応することがわかる。また、有効高さ部分の計算押し抜きせん断耐力に、かぶりコンクリートにおける計算耐力負担を加算した押し抜

表-6 提案式 (3) によるかぶりコンクリート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		
	実測値 (kN) (i)	計算値 (kN) (ii)	i/ii	実測値 (kN) (iii)	計算値 (kN) (iv)	iii/iv
N	-	-	-	276.2	280.3	0.99
S-1	42.3	45.3	0.93	318.5	325.6	0.98
S-2	60.0	57.0	1.05	336.2	337.3	1.00
S-3	82.8	62.2	1.37	359.0	342.5	1.05
S-4	67.6	67.1	1.01	343.8	347.4	0.99
CR-1	53.6	45.2	1.19	329.8	325.5	1.01
CR-2	54.3	55.8	0.97	330.5	336.1	0.98
CR-3	72.9	61.7	1.18	349.1	342.0	1.02
CR-4	60.0	69.0	0.87	336.2	349.3	0.96

きせん断耐力の計算値は、実測値と比較的精度良く対応していることがわかる。

なお、本提案法では、主鉄筋降伏が有効高さ部分の押し抜きせん断耐力に与える影響は考慮していない。これは、無補強時に主鉄筋が降伏する RC 版でもシート補強によって変形が抑制され、有効高さ部分の押し抜きせん断角度が 45° 近くになるため、主鉄筋降伏の有無はシート補強時には有効高さ部分の押し抜きせん断耐力に大きな影響を与えないものと考えられるからである。

以上から、AFRP シートで補強した RC 版の押し抜きせん断耐力の増分は、補強する RC 版の曲げ剛性などにも依存し、補強後も鉄筋が降伏する場合の方が補強効果は高く、降伏を伴わないで押し抜きせん断破壊する場合には小さくなると考えることは妥当であるものと判断される。

なお、引張剛性が最大で、小さな変位においてシートが部分剥離し、押し抜きせん断破壊に至った S/CR-4 試験体の実測値も本修正式でほぼ評価可能である。ただし、多少危険側の評価を与えていることから、本式を RC 版の剛性や補強材の引張剛性の大きさに関わらず適用可能とするためには更なる改善が必要と思われる。

一方、本式を設計式として使用するためには、シート補強後のかぶりコンクリートにおけるひび割れ角度を定める必要があるが、既往の実験<sup>4),5)</sup>および本実験結果から、大略 15° 程度と評価することが可能であると思われる。今後は、RC 版の曲げ剛性や補強材の引張剛性を種々変化させた実験を行い、係数  $\alpha$  の定式化や設計式として有すべき安全率などについても併せて検討する予定である。

#### 4. まとめ

本研究では、AFRP シートを下面に接着した RC 版の押し抜きせん断性状を補強材の引張剛性 (弾性係数 × シート厚さ) および補強方法、すなわち、2 方向シートを全面に貼り付ける方法と 1 方向シートを格子状に隙間を設けて貼り付ける方法、の影響に着目して実験的に検討した。実験は 4 辺単純支持条件の下、直径 6 cm の載荷板を版中央に設置して行った。また、FRP シート補強 RC 版の押し抜きせん断耐力の評価式として、松井らによる提案式および著者らの修正提案式を用いて実験結果との対応性を検討した。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- ①補強材の引張剛性と耐力増分は線形比例関係になく、補強効果には上限がある。これは、押し抜き

せん断破壊時の変位が補強材の引張剛性の増加とともに小さくなるためと考えられる。この引張剛性と耐力増分および最大荷重時変位の関係は図-6のように示され、引張剛性と最大荷重時変位は、出現可能な補強効果に大きな影響を及ぼす因子であることがわかる。

- ②引張剛性が比較的低い領域では 1 方向格子貼り補強が、引張剛性が大きい領域では 2 方向シート全面補強が効果的であり、補強の要求性能に応じて両者を選択するのが合理的である。
- ③シートの引張剛性が大きいほど、鉄筋の分担張力は軽減される。しかし、シートの分担張力はシート剥離の影響を受けるため、耐力増分の大きな試験体で必ずしも大きくはならない。
- ④RC 版主鉄筋の降伏の有無はシートの補強効果に大きな影響を与え、主鉄筋が降伏しない場合はシートの補強効果がより小さく、押し抜きせん断耐力の増分は降伏する場合の半分程度と小さい。そのため、既往の提案式では、押し抜きせん断耐力を過大に評価する傾向にある。
- ⑤松井らの提案式は、実験値を安全側に評価している。特に、補強材の効果がかぶりコンクリートのせん断抵抗に反映されていないため、補強した試験体に対してより安全側の評価を与えている。ただし、設計式として考えると十分に安全で使用可能であるものと判断される。
- ⑥主鉄筋降伏の有無を考慮した著者らの修正提案式は実測値と比較的精度良く対応する。しかし、高引張剛性下において早期にシート剥離が生じて耐力増分が小さくなる場合は、その押し抜きせん断耐力を多少過大に評価する傾向にある。

**謝辞：**本研究成果は、室蘭工業大学建設システム工学科岸研究室との共同研究によるものであり、適切なるご指導を頂いた岸徳光教授に感謝の意を表します。また、構

造力学研究室の大学院生、学部生諸君には、実験、データ整理などで大変お世話になりました。紙面を借りて御礼申し上げます。

#### 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, 柑本哲哉, 鍋島益弘, 堀川都志雄: 二方向ケブラー繊維シートで下面補強した損傷床版の疲労耐久性, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.83-88, 2002
- 3) 三上 浩, 田村富雄, 角田 敦, 廣瀬清泰, 堀川都志雄: 二方向アラミド繊維シート接着補強床版の疲労耐久性評価の一手法, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.169-174, 2003
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 岡田昌澄, 大西弘志, 松井繁之, 小林 朗: 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.175-180, 2003
- 7) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002