

AFRP シート下面補強 RC 版の押し抜きせん断性状に関する一考察

A study on punching shear behavior of RC slabs reinforced with AFRPs

三上 浩*, 岸 徳光**, 藤田 学***, 澤田純之****

Hiroshi Mikami, Norimitsu Kishi, Manabu Fujita and Sumiyuki Sawada

*博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

**工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 土木研究開発部長(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

****修(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 建設工学専攻(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to investigate the upgrading effects of punching shear capacity for RC slabs reinforced with AFRPs, static loading tests for the RC slabs were conducted taking reinforcing way and tensile stiffness of AFRPs as variable. Here, two reinforcing ways were applied which are of bonding cross-directional AFRPs and of bonding unidirectional one in a cross at certain intervals. The results obtained from this study are as follows; 1) when a magnitude of tensile stiffness of AFRPs is large, reinforcing effects in case using cross-directional sheet are superior to those in case using unidirectional one, 2) the larger the tensile stiffness of AFRPs, the larger the punching shear capacity is, 3) however, the capacity intends to be a maximum value and then to be decreased with increasing in its tensile stiffness; and 4) the capacity estimated by using proposed method corresponds to experimental one very well.

Key Words : AFRP sheet, RC slab, punching shear capacity, sheet debonding

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

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適用されるようになった。道路床版を例にとると, 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などによる増厚工法, 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。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^{1)~3)}は比較的少ない。

著者らは, 既往の研究^{2)~3)}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, 押し抜きせん断性状を検討してきた。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, シートの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 AFRP 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^{2)~3)}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 シートを隙間を設けて格子状に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, 輪荷重走行実験によって補強効果に関する検討が進められて

表-1 試験体の一覧

試験体名	繊維目付量 (g/m ²)	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	1246 (623 × 2)	2	72.5

表-2 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
415	0.286			
623	0.430			
830	0.572			

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

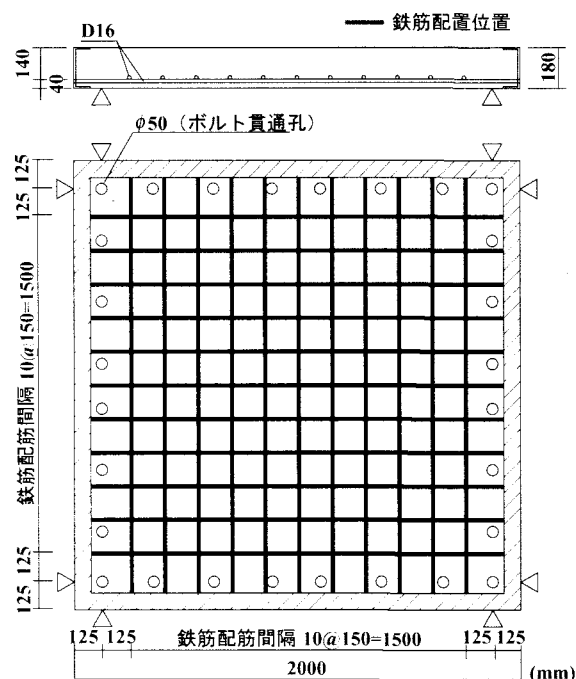


図-1 RC版の形状寸法および配筋状況

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に試験体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、主鉄筋のかぶり厚は40 mmである。用いた鉄筋はD16で、主鉄筋、配力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した。また、本RC版では圧縮側に鉄筋を配置していない。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

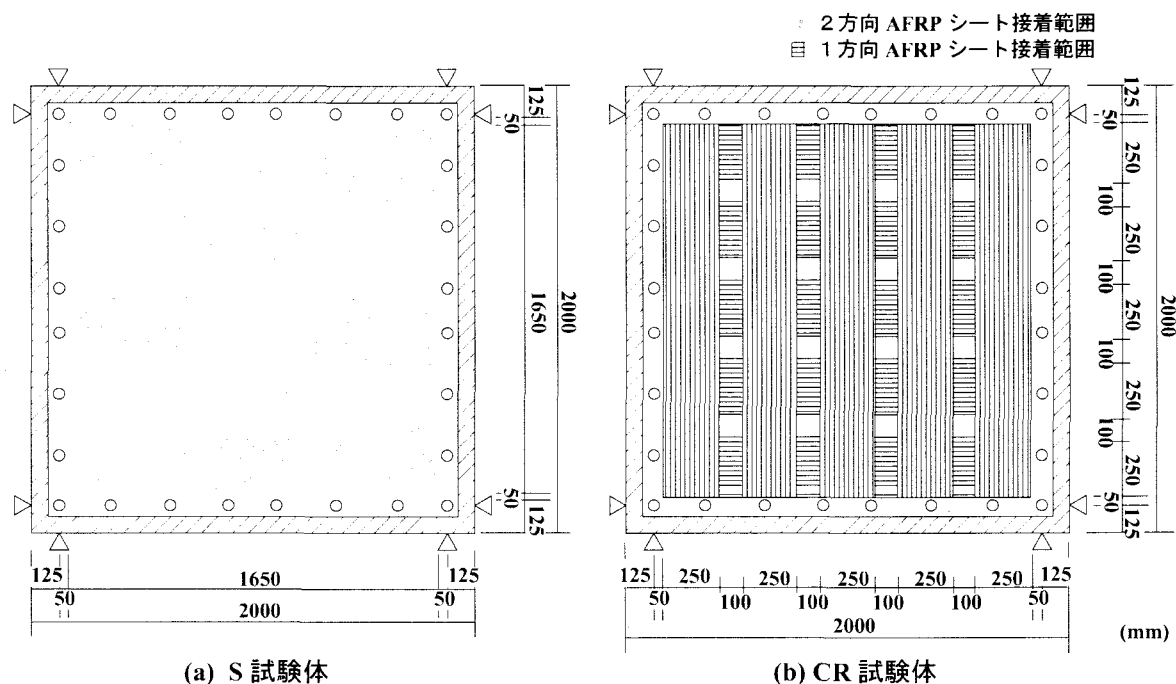


図-2 AFRP シート補強概要

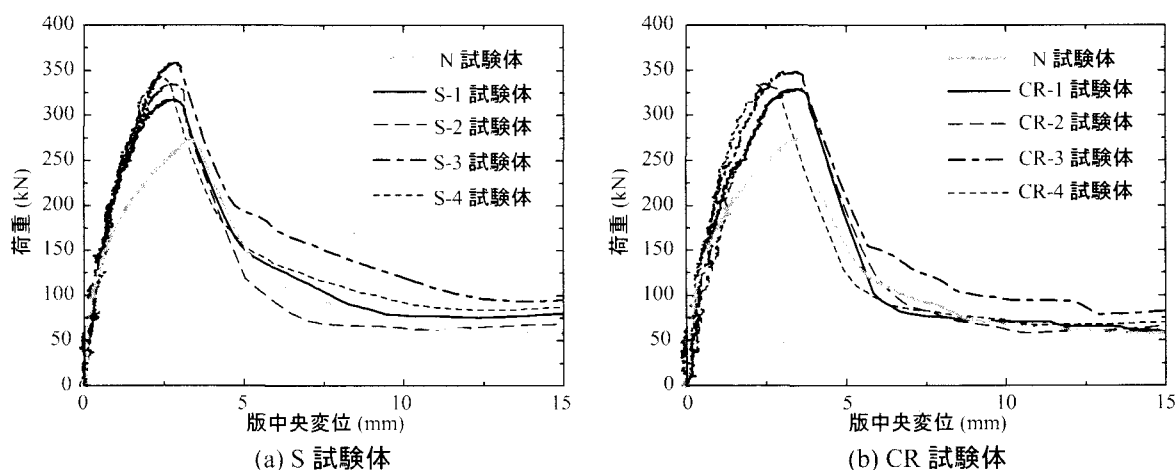


図-3 荷重－版中央変位関係

ト 2 層を貼り付ける場合は、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た。

RC 版の支持条件は 4 辺単純支持で、支持間隔は 1750 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。

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。

3. 実験結果及び考察

3.1 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 試験体毎に比較して示した。また、表-3 には各試験体の最大荷重（押し抜きせん断

表-3 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 $E \cdot t$ (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

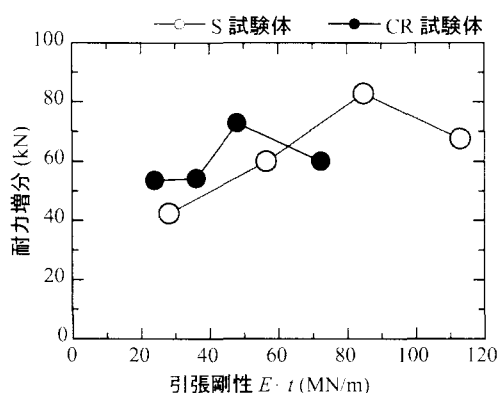


図-4 引張剛性と耐力増分の関係

耐力), 最大荷重時変位, 補強材の単位幅あたりの引張剛性および耐力増分の一覧を示している。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。

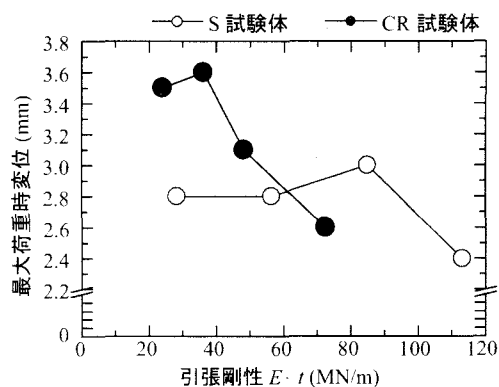
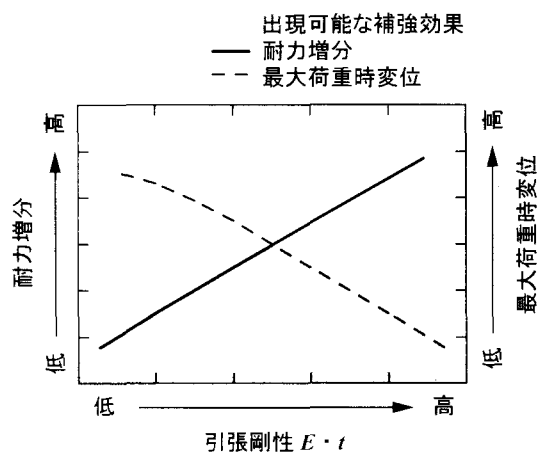


図-5 引張剛性と最大荷重時変位の関係

図-6 引張剛性と耐力増分
および最大荷重時変位の関係

3.2 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

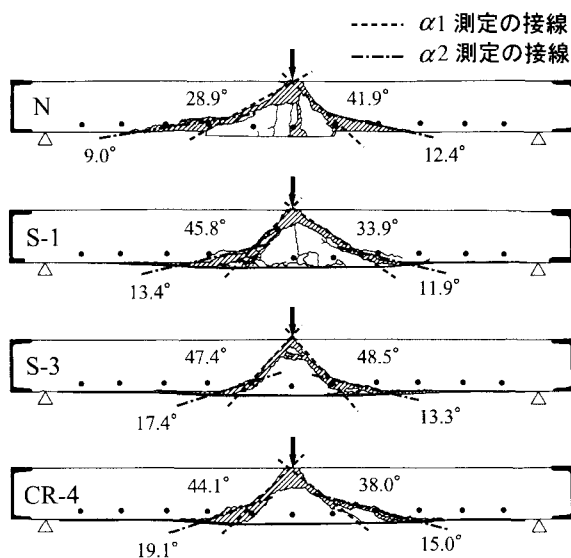


図-7 切断面のひび割れ性状

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には密接な関連があ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

表-4 ひび割れ角度の一覧

試験体名	α_1 (度)	α_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

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、 Φ)が、出現可能な補強効果の領域を示すものと考えられる。

3.3 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(α_1)とかぶりコンクリートのひび割れ角度(α_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 α_1 は35°程度と45°を大きく下回り、補強することで α_1 は45°程度に近づくことがわかる。これは、既往の研究結果^{2)~3)}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 α_1 は45°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 α_1 は大きくなり45°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 α_1 に与える影響は顕著でなく、大略同等である。

一方、 α_2 はいずれの試験体でも α_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 α_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。

3.4 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

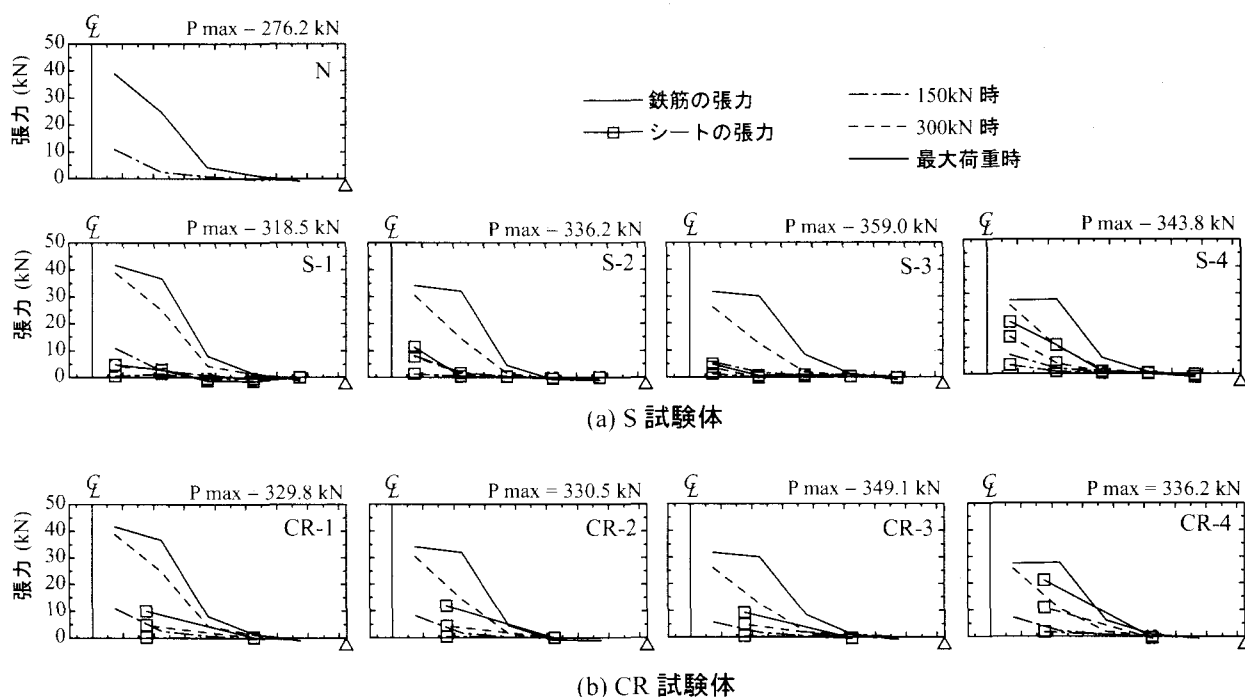


図-8 張力分担性状 (荷重レベル 150 kN, 300 kN, 最大荷重時)

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。なお、鉄筋の張力は1本あたり、シートの張力は、鉄筋の配置間隔にあわせて 150 mm あ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

表-5 実験値と計算値の比較

試験体名	押し抜きせん断耐力 (kN)				
	実験値 (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

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、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、著者等の既往の研究⁵⁾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に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。

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	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

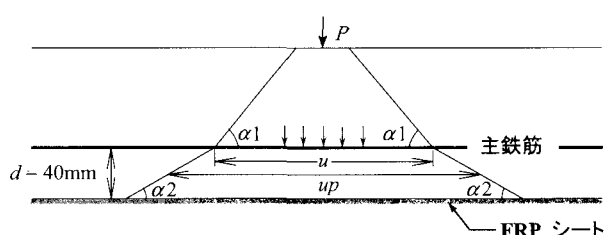


図-9 押し抜きせん断性状のモデル化

3.5 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⁵⁾ (以後、示方書式) の他に松井等の提案した式¹⁾ (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 : 床版の有効幅 (mm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断強度 (N/mm²)

X_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ (mm)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張強度 (N/mm²)

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、著者等は既往の研究^{2)~3)} 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。

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

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

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

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)

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、前述した α_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に実験値と松井式及び旧提案法 (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、実験値 / 計算値は 1.2 ~ 1.4 程度である。また、無補強のN試験体で実験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、実験値/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^{2)～3)}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⁴⁾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。そこで本文では、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、 α 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。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きせん断耐力の計算値は、実測値と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が高く、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できることから、本式は、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であるものと考えられる。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^{2)～3)}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、本式の適用範囲を把握するとともに、係数 α の定式化につい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、松井等による提案式および著者等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の様に示され、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、必ずしも耐力増分の大きな試験体で大きくならない。
- 4) RC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) 松井等の提案式は、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、設計式としては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等の修正提案式は実験値と精度良く対応する。また、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でも、その押し抜きせん断耐力をほぼ妥当に評価可能である。

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) 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
 - 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002
- (2004 年 9 月 17 日受付)

- 1) 森 成道, 若下藤紀, 松井繁之, 西川和廣: 炭素繊維