論文 FRCC のひび割れ面におけるせん断伝達特性に関する研究

藤村 将治*1·上田 尚史*2

要旨:本研究では FRCC のマトリクスや繊維の種類および混入率をパラメータとし,直接せん断試験を行う ことでひび割れ面のせん断伝達特性にそれらがどのように影響を及ぼすかを実験的に明らかにすることを試 みた。その結果、マトリクスの違いに依らず、繊維の混入率の増加に伴い繊維によるひび割れ幅抑制効果で 骨材の噛み合いを助長させ、せん断伝達特性が向上することが確認された。また、マトリクスの違いに依ら ず、繊維はひび割れ面のせん断変位に抵抗しないことを確認した。一方で、ひび割れ面に多量の繊維がある 場合は、繊維はひび割れ面のせん断変位に対してある程度抵抗することを明らかにした。 キーワード:FRCC、せん断伝達特性、引張軟化曲線、破壊エネルギー

1. はじめに

近年,様々な性能を有する繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite,以下,FRCC とする)が開発されており,その優れた性能を活かすこ とで,構造部材への適用が試みられている。FRCCの構 造利用を考える際,せん断力に対する安全性の評価が重 要となる。FRCC部材のせん断耐力の評価法については, これまで土木学会より3つのせん断耐力評価式^{1),2),3)} が提示されているものの,それぞれ異なった考え方に基 づくとともに,その適用範囲は限定されたものである。 加えて,それらのせん断耐力評価式は従来のRC部材の せん断耐力評価式を基にしており,必ずしもFRCC部材 のせん断耐荷機構に立脚したものではない。

FRCC 部材のせん断耐荷機構を考える上では、斜めひ び割れの発生や進展に加えて、ひび割れ面における応力 の伝達(以下, せん断伝達とする)機構を明らかにする 必要がある。例えば、松永ら⁴⁾は PVA 短繊維補強コンク リートを対象とした直接せん断試験により、繊維はひび 割れ面のずれ変形には影響を及ぼさず、ひび割れ幅の抑 制効果により骨材のかみ合い作用を増加させる効果があ ることを示している。また、清水ら⁵は PVA-ECC を対象 とした一面せん断試験を行い、マトリクスのかみ合いが 生じる前では、繊維の引張力がせん断力に抵抗しており、 その応力の大きさ(引張せん断強度)は引張強度の 1/2 程度であると考察している。これらの研究より、繊維が FRCC のせん断伝達特性に及ぼす影響はある程度明らか にされているものの, あくまでも限られた範囲内での評 価に留まっている。マトリクスや繊維の種類の違いによ る影響を定量的に評価することができれば FRCC のせん 断伝達特性の統一的な評価が可能になると考える。

そこで、本研究では FRCC のマトリクスや繊維の種類 および混入率をパラメータとし、直接せん断試験を行う ことでひび割れ面のせん断伝達特性にそれらがどのよう に影響を及ぼすかを実験的に明らかにすることを試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究では、マトリクスと繊維の種類および混入率の 違いをパラメータとして、ひび割れ面における直接せん 断試験を行った。マトリクスにはコンクリート(粗骨材 最大寸法 20mm)とモルタルを使用した。繊維には寸法 がほぼ同一であり力学特性が異なるポリビニルアルコー ル(以下, PVAとする)短繊維と鋼繊維(以下, SFとす る)を使用した。さらに、マトリクスがモルタルの場合 においては、ひび割れ面における繊維本数の増加を目的 として、SFと比較して密度が同一であり直径が小さく長 さが短いミクロ鋼繊維(以下, MSFとする)を使用した。 PVA 短繊維や MSF は直線形状であるのに対して、SF は 両端部がフック加工されている。使用した繊維の物性値 を表-1に示す。

表-2 に FRCC の配合を示す。マトリクスがコンクリ ートの場合は、ひび割れ面における骨材のかみ合い作用 が変化しないように単位粗骨材体積は一定とし、繊維は 細骨材置換した。繊維混入率は 0.5, 1.0, 1.5% とした。

コンクリートのスランプおよび空気量はそれぞれ 2.5 ~6.0cm および 1.9~3.5%, モルタルのモルタルフローお

表-1 使用した繊維の物性値

	PVA	SF	MSF
直径 (mm)	0.66	0.62	0.20
長さ (mm)	30	30	13
密度 (g/cm ³)	1.3	7.85	7.85
引張強度 (N/mm ²)	900	1080	2000
弾性係数 (kN/mm^2)	23	210	210
繊維形状	直線	両端フック	直線

*1 関西大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 (学生会員) *2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 FRCC の配合



よび空気量はそれぞれ 0 打 102~108mm, 15 打 153~ 178mm および 3.2~4.1%であった。

2.2 FRCC の力学特性

FRCC の力学特性を把握するため圧縮強度と引張軟化 曲線を求めた。圧縮強度は寸法 φ100×200mmの円柱供試 体を用いて求めた。また、引張軟化曲線は、中央に切欠 き(深さ 30mm,幅 2mm)を中央に有する寸法 100×100×400mmの角柱供試体の三等分点曲げ試験によ り荷重-CMOD 関係を計測し、多直線近似法⁶により求 めた。各試験はそれぞれ3体ずつ実施した。 図-1にそれぞれの FRCC の引張軟化曲線を示す。なお、軟化域の測定点不足により引張軟化曲線を得ることができなかったものは記載していない。図中には、それぞれの圧縮強度を記載している。圧縮強度はコンクリートでは40.9~47.6N/mm²、モルタルでは49.2~58.3N/mm²とばらつきが見られたが、繊維混入による圧縮強度の違いは見られなかった。図より、繊維を混入することで、ある程度の引張応力を保持しながら仮想ひび割れが進展していることがわかる。いずれの場合においても、繊維混入率が増えるにつれ、引張応力が大きくなることが確

認された。また、マトリクスがコンクリートの場合は、 PVA 短繊維よりも SF を混入した方が引張応力が大きく なる傾向にあった。一方、マトリクスがモルタルの場合 は、SF を混入したものは、仮想ひび割れ幅が進展するに つれて引張応力が低下していく傾向にあるのに対して、 PVA 短繊維を混入したものは、より大きな仮想ひび割れ 幅においても残存応力を保持できる傾向にあった。

3 直接せん断試験によるせん断伝達特性の評価

3.1 実験方法

既往の研究4)を参考にして供試体の中央上下にノッチ を設けた矩形供試体(寸法150×200×400mm)に対して直 接せん断試験を行った。直接せん断試験の手順は以下の 通りである。まず、丸鋼をノッチに当てがい、割裂載荷 を行うことで供試体中央に一本のひび割れを導入すると ともに、所定のひび割れ幅となるように荷重を加えた。 その後,図-2のように三等分点でせん断載荷を行った。 その際に、供試体に予め空けておいた直径 30mm の 2 つ 穴に φ21mmの PC 鋼棒を挿入しセンターホールジャッキ を取り付けることで、ひび割れ面に作用する圧縮力を制 御した。せん断応力 τは、ひび割れ面位置に作用するせ ん断力を断面積で除することで求めた。圧縮応力σは, ひび割れ面に作用する圧縮力を断面積で除することで求 めた。また、供試体側面の上下に取り付けた2つのπ型 変位計で軸方向変位を計測し、その平均値をひび割れ幅 wとした。また、供試体側面の中央に取り付けた二軸変 位計によりせん断変位δを計測した。

本研究では繊維が FRCC のせん断伝達特性に及ぼす影響を明らかにするため,既往の研究⁴⁾を参考にして,2 つの境界条件で試験を行った。一方は,せん断変位に対 する繊維の影響を明らかにすることを目的として,ひび 割れ幅を一定に制御したものであり,もう一方は,部材 中のせん断ひび割れの挙動を模擬することを目的として, ひび割れ面に作用する圧縮応力を可能な限り小さな値で



制御(ひび割れの開口を許容)したものである。

3.2 ひび割れ幅を一定に制御した直接せん断試験

供試体端部に取り付けたセンターホールジャッキに より圧縮力を加えることでひび割れ幅を一定に制御した せん断載荷を行った。なお,本研究ではひび割れ幅を 0.5mm(許容誤差±1%)で制御した。また、軸圧縮によ る割裂破壊を避けるため, 圧縮応力が 20MPa 以下の範囲 で載荷を行った。試験により得られたせん断応力とせん 断変位の関係(τ---δ関係)を図-4(a)(b)に示す。図 より、繊維なしの供試体に着目すると NC は NM と比較 して、 $\tau - \delta$ 関係の傾き(以下、せん断剛性)が大きいこ とがわかる。これは粗骨材の混入によりコンクリートの ひび割れ面がモルタルに対して粗であることに起因する と考える。また、繊維を混入した場合であってもコンク リートの方がモルタルよりもせん断剛性は大きくなる傾 向が認められた。また、 $\tau - \delta$ 関係においてせん断変位が 0.2mm 毎のせん断剛性(以下,接線剛性)を算出したと ころ、接線剛性はマトリクスの違いに依らずせん断変位 があるせん断変位δ(本研究では0.5~0.7mm 程度)まで 増加し、それ以降は低下することが確認できた。このよ うな,非線形挙動は既往の研究^のでも確認されており, 本試験でも適切にせん断伝達特性を評価できているもの と考える。なお, SF1.5M は他のモルタル供試体と比較





して大きなせん断剛性を示している。これは供試体に図 -6(a)のような2本のひび割れが生じたため1本あた りのひび割れ幅が 0.5mm 以下になったためであると考 える。

図-4(a)より、マトリクスがコンクリートの場合は、 いずれの FRCC もせん断剛性は NC と同程度であること が確認できる。このことは既往の研究4)と同様の傾向を 示しており,本試験結果は繊維の種類の違いに依らず, ひび割れ面のせん断変位に対しては繊維はほとんど抵抗 しないことを示唆するものである。図-4 (b) より,マ トリックスがモルタルの場合は PVA 短繊維や SF を混入 したものは MN と同程度のせん断剛性をとなっているこ とがわかる。すなわち、コンクリートと同様にモルタル においても繊維はせん断変位に対して抵抗しないものと 推察される。しかし、MSFを混入した供試体では NM と 比較して高いせん断剛性を示すことが認められた。すな わち, MSF はせん断変位に対してある程度抵抗している と考えることができる。これは、MSF は PVA 短繊維や SFと比較して細くて短いため、ひび割れ面に存在する繊 維本数が格段に増えて、ひび割れ面における繊維の架橋 力の総和が増大したことが要因であると考えられる。

また、試験により得られた圧縮応力とせん断変位の関係 ($\sigma-\delta$ 関係)を図—5 (a) (b) に示す。図より、繊維 なしの供試体に着目するとNCはNMと比較して、圧縮 応力が大きいことがわかる。これはひび割れ幅を固定す るためにはモルタルよりもコンクリート方がより大きな 圧縮力を必要とするためであると考える。図—5 (a) に 着目すると図-4 (a)の $\tau-\delta$ 関係の接線剛性が増加して いる範囲(δ が0.5~0.7mm程度以下の範囲)においては、繊維の種類の違いに依らず、繊維混入率が大きいほど圧 縮応力が小さくなる傾向にあることがわかる。すなわち、 せん断変位の増加に従い、ひび割れ幅 wが開口する作用 に対して繊維が抵抗することで、圧縮応力が小さくなっ



たものと考える。しかし、せん断変位がある程度大きく なると、繊維の影響は明確に認められなくなった。この 原因としては、ひび割れ面の塑性変形⁷⁰や、それに伴う 耐荷機構の変化が考えられるが、必ずしも明確ではない ため、今後、更なる検討が必要であると考える。

マトリクスがモルタルの場合は、コンクリートとは異 なり、繊維の影響は明確に見られなかった。これはコン クリートに対してモルタルのひび割れ面が滑らかなこと から、せん断変位に対するひび割れ幅の開口が小さいた め、繊維によるひび割れ開口に対する抵抗作用が相対的 に小さかったためであると考えられる。

3.3 ひび割れの開口を許容した直接せん断試験

初期のひび割れ幅を 0.5mm とし、せん断変位に伴うひ び割れの開口を許容したせん断載荷を行った。ひび割れ の開口に伴いひび割れ面には反力が生じるため、センタ ーホールジャッキで除荷することで、ひび割れ面に圧縮 応力が生じないように制御した。ただし、ひび割れが急 激に開口することを抑制するために、常時 0.1MPa 程度 の圧縮応力は作用させた。それぞれのマトリクスにおけ るせん断応力とせん断変位ならびにひび割れ幅の関係($\tau -\delta \cdot w$ 関係)を図—7に示す。図よりマトリクスや繊維 の種類および混入率の違いにより FRCC のせん断伝達挙 動は変化することが確認できる。いずれの FRCC におい ても、NC あるいは NM よりも最大のせん断応力(せん 断強度)が増加している。また、せん断強度以降は軟化 挙動を呈することがわかる。試験終了時のひび割れ面を 観察したところ、マトリクスの違いに依らず PVA 短繊維





は破断しており, SFや MSF は抜けていることが確認さ れた。なお, SF1.5M のみ図-6(a) のひび割れ幅を一 定に制御した直接せん断試験の SF1.5M と同様に2本の ひび割れが発生し、ひび割れが開口しやすい状態にあっ たため、他の FRCC と比較してせん断強度が小さくなっ たもの考えられる。SF1.5M を除き,いずれの場合にお いても、繊維混入率が増加するほどせん断強度が増加す ることがわかる。せん断強度以降に着目すると、いずれ の FRCC においても、ひび割れ幅が急激に増加すること で、せん断応力が低下していることがわかる。すなわち、 FRCC のせん断強度の向上は繊維のひび割れ幅抑制効果 により,骨材同士のかみ合い作用が助長されたことに起 因すると考えられる。この傾向はマトリクスの違いに依 らず、PVA 短繊維よりも SF の方が顕著に見られた。つ まり今回対象とした FRCC においては SF の方が PVA 短 繊維よりもひび割れ幅の低減効果が高く,また, MSF は さらに大きなひび割れ幅低減効果を有していると考えら れる。なお、マトリクスの違いに依らず、PVA 短繊維は SF よりもせん断変位に対する応力の低下量が大きいが, これはひび割れ幅の開口により PVA 短繊維が破断し, ひ び割れ幅低減効果が急激に低下したためであると考える。

図—8にひび割れ幅とせん断変位の関係(σ-w関係) を示す。図より、SF0.5Cを除いてマトリクスや繊維の種 類および混入率が変化しても概ね同様の結果となった。 すなわち, せん断変位に伴うひび割れ幅の開口には, 繊 維は影響せず, ひび割れ面の粗度が支配的であると考え られる。なお, SF0.5C がその他と同様の傾向を示してい ないのは, 図-6 (b) のようにひび割れがまっすぐ入ら なかったためであると考える。

3.4 繊維が FRCC のせん断伝達特性に及ぼす影響

前節までの検討から FRCC のせん断伝達特性において 繊維は主としてひび割れ幅を低減することに対して影響 を及ぼすことが確認された。そこで、繊維がせん断強度 に及ぼす影響を定量的に評価することを試みた。まず、 繊維の混入によるせん断強度の増加を把握するため、 FRCC と繊維なしの供試体 (NC あるいは NM)のせん断 強度の差を求めた。また、上述の通り FRCC のせん断強 度の増加は、ひび割れ面において繊維がひび割れの開口 を抑制する働きに影響を受けることから、ひび割れ開口 に伴い消費されたエネルギーを算出した。ここで、直接 せん断試験結果と対応させるため、本研究では引張軟化 曲線において仮想ひび割れ幅 0.5mm から、直接せん断試 験におけるせん断強度時のひび割れ幅で囲まれる面積を 消費破壊エネルギーと定義した。

図-9, 10 に FRCC の繊維混入率と荷重増加量ならび に消費破壊エネルギーの関係を示す。図-9 より,マト リクスの違いに依らず PVA 短繊維や SF の混入率の増加 に伴いせん断強度の増加は, SF を混入した場合の方がよ り顕著に現れるものの, 概ね同程度であることが確認さ れた。また, MSF を混入した場合は PVA 短繊維や SF を 混入した場合以上の強度増加が認められた。一方, 図ー 10においても図-9 で見られる傾向と同様に, PVA 短繊 維や SF の混入率の増加に伴う消費破壊エネルギーの増 加は, マトリクスの違いに依らず概ね同程度であること が確認された。ただし,若干ではあるものの繊維の種類 により,強度増加や消費破壊エネルギーに違いがあった。 強度増加を繊維の種類に依らない統一的な指標により評 価するために消費破壊エネルギーに着目して整理した。 図-11 に破壊エネルギーと強度増加の関係を示す。図よ

り、 PVA 短繊維は SF と比較して消費破壊エネルギーが 直接せん断試験のせん断強度に対して影響している可能 性があるが、今回対象とした FRCC の全体を通して、概 ね同程度の傾向にあることが確認された。

なお、対象とした直接せん断試験は引張とせん断が混 在した変形モードである。本研究の範囲内では PVA 短繊 維と SF はせん断変形に抵抗しないのに対して、 MSF は せん断変位に抵抗することが示された。したがって、本 検討で用いた消費破壊エネルギーによる整理の妥当性や 適用範囲については、今後更なる検討が必要であると考 えられる。

4 結論

本研究では繊維やマトリクスの違いが FRCC のせん断 伝達特性に及ぼす影響を実験的に明らかにするため、各 種 FRCC のひび割れ面のせん断伝達挙動試験を行った。 以下に本研究の範囲内で得られた知見を示す。

- ひび割れ幅を一定に制御した直接せん断試験の結果, PVA 短繊維やSFを用いた場合はマトリクスの違いに 依らずひび割れ面のせん断変位に繊維は抵抗しない ことを確認した。一方、マトリクスがモルタルの場 合は、MSF はひび割れ面のせん断変位にある程度抵 抗することが明らかにした。
- 2) ひび割れの開口を許容した直接せん断試験の結果, マトリクスや繊維の種類の違い依らず,FRCCのせん 断強度は、繊維の混入率に伴い増大することが明ら かとなった。
- 3) FRCC のせん断強度は消費破壊エネルギーにより整理できる可能性が示されたが、妥当性や適用範囲については今後更なる検討が必要である。

参考文献

 1) 土木学会:鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計 指針(案), コンクリートライブラリー97, 1999.



図-11 消費破壊エネルギーと強度増加の相関図

- 2) 土木学会:超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案),コンクリートライブラリー113,2004.
- 3) 土木学会:複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合 材料設計・施工指針(案),コンクリートライブラリ -127,2007.
- 4) 松永たかこ・脇坂文恵・鈴木士郎・牧剛史:ひび割れ 面のせん断伝達特性に基づく PVA 短繊維補強コンク リート梁のせん断耐力評価,コンクリート工学年次 論文集, Vol.30, No.3, 2008.
- 5)清水克将・金久保利之・閑田徹志・永井覚: PVA-ECC のひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐 力評価,日本建築学会構造系論文集,Vol.619, pp133-139,2007.9
- JCI 規準・指針:切欠きはりを用いたコンクリートの 破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003
- 7) 李宝禄・前川宏一:接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式,コンクリート工学 論文, No.88-1, Vol.26, No.1, pp123-137, 1988.