報告　繊維補強コンクリートにおける繊維の配向がひび割れ面のせん断挙動に及ぼす影響

堀田　翔司[*1]・内田　裕市[*2]

要旨：繊維補強コンクリートを対象として一軸圧縮試験および梁供試体を用いた直接せん断試験を行い，繊維の配向がひび割れ面のせん断挙動に及ぼす影響について検討した。一軸圧縮試験では，ひび割れ面に対する繊維の交差角度が 100°を越えるとせん断強度が低下し，直接せん断試験では，繊維の交差角度が 60~80°の範囲でせん断強度が高くなり，せん断強度に対して繊維の配向が影響することが示された。

キーワード：繊維補強コンクリート，せん断強度，繊維の配向，交差角度

1. はじめに

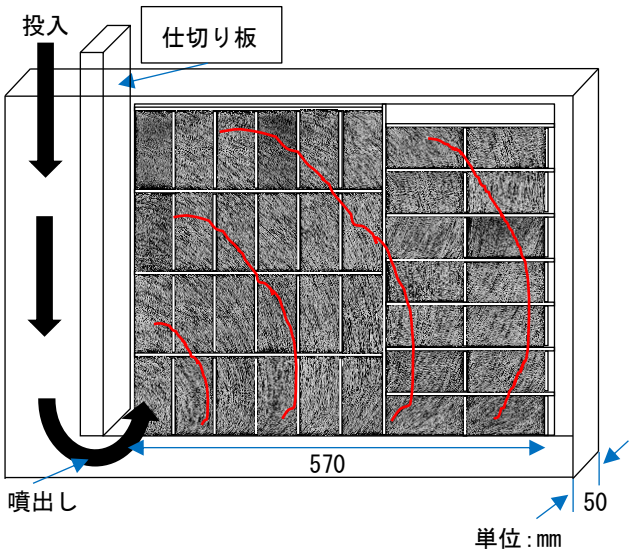
短繊維補強コンクリート(FRC)の引張，あるいは曲げ挙動に対して繊維の配向が影響することが知られており重要な課題となっている。一方，圧縮挙動やせん断挙動に対する繊維の影響については，強度と靭性が向上することはよく知られているが[1), 2), 3)]，繊維の配向がどのように影響するかはほとんど検討されていない。そこで、本研究では FRC の圧縮供試体の破壊がせん断破壊によって生じると仮定した一軸圧縮試験とはり供試体を用いた直接せん断試験[4)]を実施し，そのときの荷重と変形挙動に対する繊維の配向の影響について検討した。

2. 繊維の配向が一軸圧縮供試体のせん断挙動に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 供試体

繊維の配向が FRC の破壊挙動に及ぼす影響を検討する場合，1 本の繊維のみを対象としてその配向と応力を計測する方法も考えられるが，供試体が微小となり供試体の作製，載荷，計測が困難となるばかりでなく，ばらつきも大きくなることかが予想される。そこで，本研究では繊維の配向が一様な FRC 供試体を用いて試験を行うこととした[5)]。繊維の配向が一様な供試体を作製するために**図－1** に示すように厚さ 50mm のパネル状の型枠を用いて，底部から噴出すように打込んだ。コンクリートは供試体の寸法が小さいことから，粗骨材は用いずに**表－1** に示す配合の鋼繊維補強モルタル(繊維長 15mm，径 0.2mm，引張強度 2700 N/mm^2，混入率 1%）とした。目標の圧縮強度は 90N/mm^2 とした。硬化後にコンクリートカッターで**図－2** に示すような断面 50mm×50mm，高さ 120mm の供試体を計 70 本切出した。



図－1　コンクリートの打込み

(2) X 線マイクロ CT による繊維の配向の評価

供試体にせん断面を誘発するため，**図－2** に示すように供試体の高さ中央 100mm の位置の相対する二面の対角線上に深さ 7.5mm の切欠きを設けた。**図－1** に X 線マイクロ CT で得られた繊維の配向の状況を示す。図中で白く映るものが鋼繊維であり，赤線で示すように噴出し口を中心とした同心円状の規則的な配向になっており，切り出した各供試体内で繊維は概ね一様な配向であることを確認した。

(3) 載荷方法

試験には耐圧試験機を用い，通常の圧縮強度試験と同様の方法で載荷した。変位挙動を確認するため，鉛直方向の載荷板変位を高感度変位計により計測し，切欠き面において，ずれ変位と開口変位は切欠きを設けた両面中央 60mm の位置にクリップゲージを設置し計測した。

(4) 交差角度

図－3 に切欠き面に対する繊維の交差角度の規定を示す。平面投影による画像解析を行い，解析角度のヒストグラムから平均配向角度を算出し，交差角度と定義した。

*1 岐阜大学　自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻　(学生会員)
*2 岐阜大学　工学部社会基盤工学科　教授　博士（工学）　(フェロー会員)

なお，図－１の X 線画像より供試体内では繊維は一様な配向であることを確認し，ヒストグラムにおいて解析角度のばらつきが小さいことも確認された。供試体の切欠き面を 0° とし，時計回りを正として交差角度を定義した。

2.2 実験結果

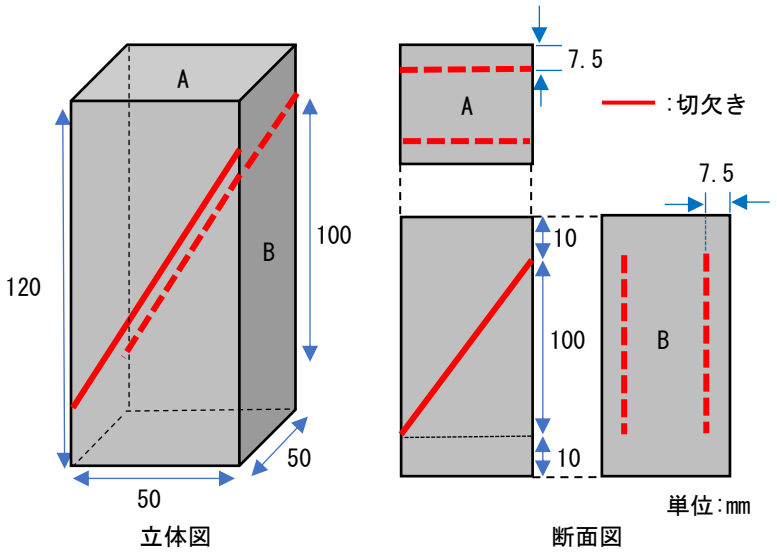
(1) 繊維の配向とせん断強度の関係

図－4 に切欠き面に対する繊維の交差角度とせん断強度の関係を示す。ここで，せん断強度は最大荷重時の切欠き面の切欠き深さ分を除いたせん断応力の値である。パネルから切出した供試体であるため，同一配向の供試体を複数切り出すことができずばらつきのある結果ではあるが，定性的には交差角度が 0～100° および 160～180° の範囲ではせん断強度は 25～35N/ mm^2 でほぼ一定であるのに対して，100～150° の範囲では交差角度が大きくなるにつれてせん断強度が減少する傾向が見られた。

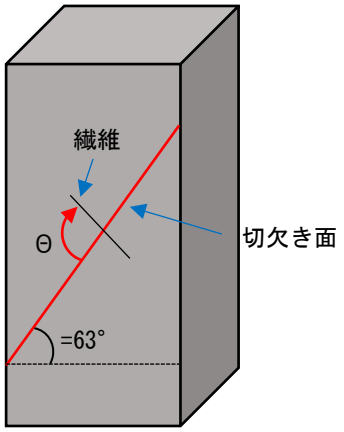
表－1　FRC の配合

(%)	単位量 (kg/m^3)				(C×%)		(%)
W/C	W	C	S	増粘剤	Ad	Ma	F
32.4	259.3	800	1068	1.0	4.0	0.04	1.0

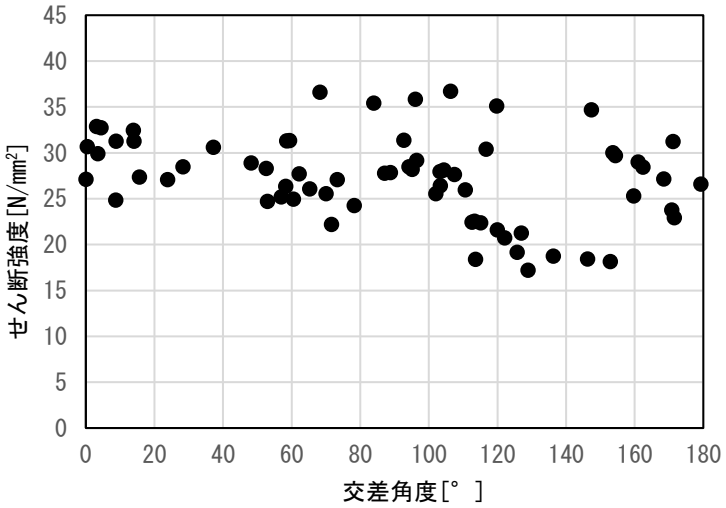
C：早強ポルトランドセメント　S：6 号珪砂　Ad：高性能減水剤　Ma：消泡剤　F：鋼繊維



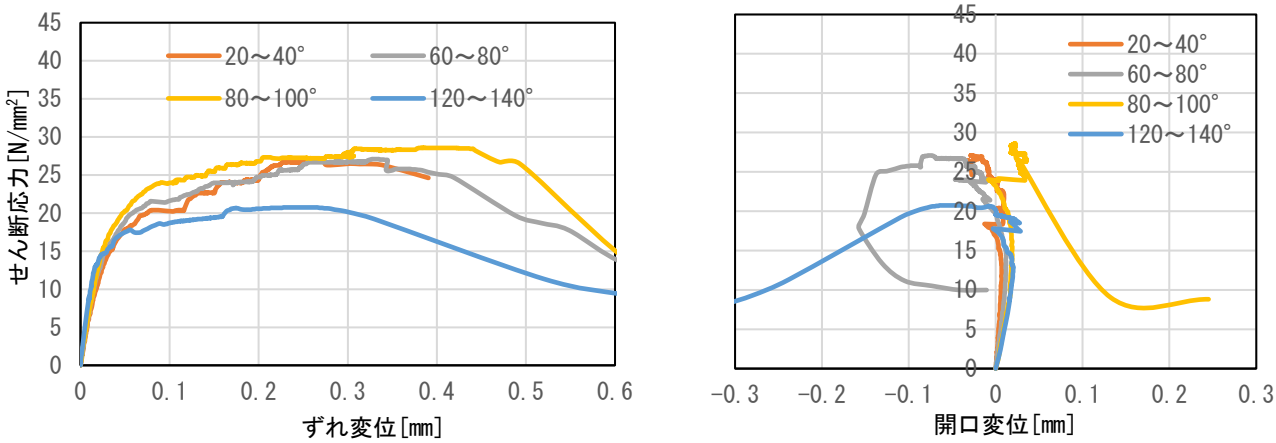
図－2　一軸圧縮供試体



図－3　切欠き面における繊維の交差角度



図－4　一軸圧縮供試体のせん断強度



(a)　せん断応力-ずれ変位関係　　(b)　せん断応力-開口変位関係

図－5　一軸圧縮供試体のせん断応力-変位の関係

(2)　繊維の配向と変位の関係

図-5 に代表的な 4 本の供試体のせん断応力-すべり変位とせん断応力-開口変位の関係を示す。応力-すべり変位の関係ではせん断応力が 15~20N/ mm² 程度からすべり変位が生じ，0.3mm 程度で最大応力に達した。

応力 - 開口変位関係では，載荷初期は微少ではあるが閉口する傾向にあり，せん断応力が 20N/mm^2程度に達すると応力 - 開口変位曲線は開口する方向に転じている。すなわち，すべりが生じ始めるとせん断面は開口し始めた。

3. 繊維の配向が直接せん断挙動に及ぼす影響

前項の一軸圧縮試験では，せん断面にせん断応力に比例した直応力(圧縮力)が負荷されている。ここでは，直接せん断試験を行い，繊維の配向と直応力の有無がせん断挙動に及ぼす影響を検討した。

3.1 直応力のない直接せん断試験

(1) 供試体

前項 2.1(1) と同様の方法で供試体を作製した。コンクリートの配合及び目標圧縮強度は前項 2.1(1) と同様である。コンクリートの硬化後にコンクリートカッターで断面 50mm×50mm, 長さ 120mm の供試体を計 35 本切出した。せん断面のみに破壊が生じるようにするため，供試体中央の断面に深さ 12.5mm の切欠きを 4 面に設けた。そのため，せん断面の面積は 25×25mm である。

(2) 載荷方法

載荷には精密万能試験機を用いた。**図－6** に一面せん断試験の概要を示す。変位挙動を検討するためせん断面に対し，平行に変位するずれ変位と垂直に変位する開口変位をそれぞれクリップゲージとパイ型変位計を用いて計測した。開口変位を計測するパイ型変位計においては，ずれ変位による影響を低減するため，片端のみ固定し，片端はずれ変位が吸収できるようにした。また、開口変位による軸方向の拘束力を除くため，載荷版と供試体の間にテフロンシートを挿入した。

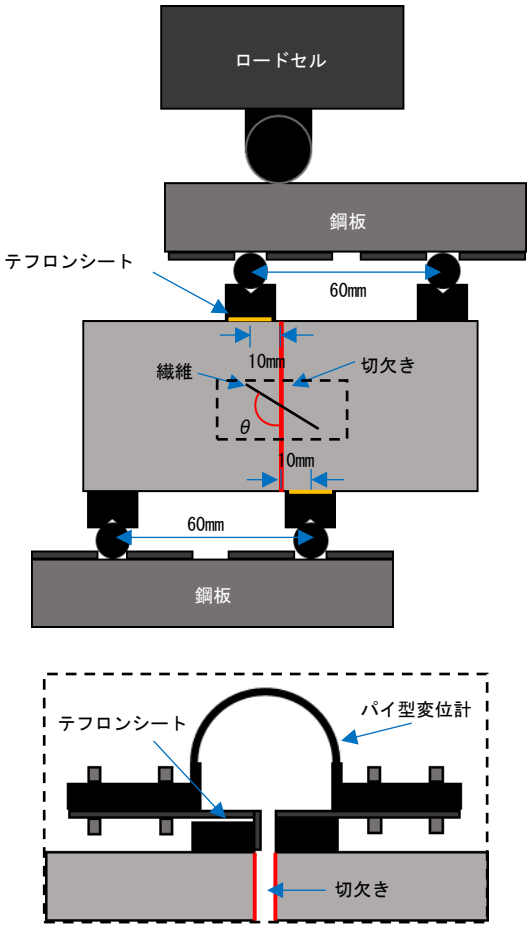


図-6　直接せん断試験の概要

(3) 実験結果

(a) 繊維の配向とせん断強度の関係

切欠き面に対する繊維の交差角度の定義は前項 2.1(4) と同様である。**図－7** に切欠き面に対する繊維の交差角度とせん断強度の関係を示す。ここで，せん強度

は最大荷重時におけるせん断面の作用せん断力をせん断面の面積で除した値である。

交差角度 0～80° の範囲では、交差角度が大きくなるにつれてせん断強度が増加しており，一軸圧縮供試体の場合と異なる挙動が見られた。交差角度 60～80° でせん断強度は最大となり，80° 以上になると一軸圧縮供試体の場合と同様にせん断強度が低下した。

交差角度が 60~80° のときのせん断強度は一軸圧縮供試体のせん断強度と同程度，もしくは若干高くなった。また，せん断強度が最も低くなる交差角度 140~180° でのせん断強度は，一軸圧縮供試体の場合の 1/2 程度となり，これは直応力の影響と考えられる。以上のことより，せん断強度に及ぼす直応力の影響は，交差角度によってせん断強度が変化する領域(0~60° と 100~180°)で現れるものと推察される。

(b) 繊維の配向と変位の関係

図－8 に代表的な 4 本の供試体のせん断応力-ずれ変位とせん断応力-開口変位の関係を示す。せん断応力-ずれ変位では載荷直後から変位し始め，0.3mm 程度で最大応力に達した。これは，一軸圧縮供試体でせん断強度に達するときのずれ変位と同程度である。せん断応力-開口変位においては，せん断応力が 5~10N/mm^2 程度に達すると開口し始め，0.15mm 程度で最大応力に達した。

3.2 直応力を加えた直接せん断試験

(1) 供試体

前項 2.1(1)同様の方法で試験体を作製した。コンクリートの配合及び目標圧縮強度，切欠きの導入は前項 3.1(1)と同様である。

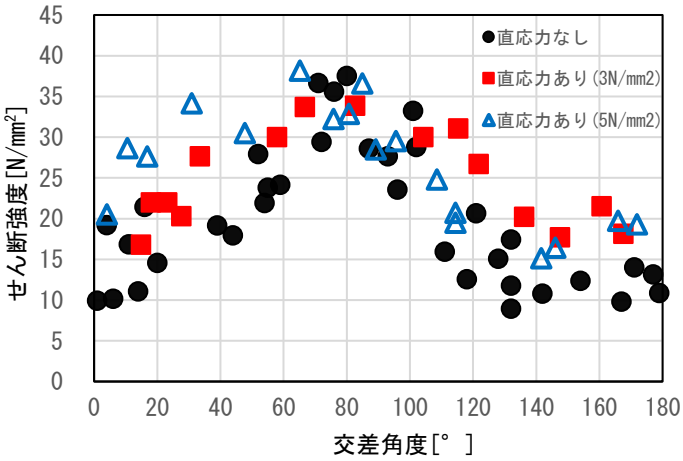
(2) 載荷方法

図－9 に直応力を加える直接せん断試験の概要を示す。供試体軸方向にボルトで締め付けることで直応力を作用させ，片側のボルトにひずみゲージを貼り付け，ボルトの軸力を計測した。試験中の直応力の変動を防ぐため，拘束鋼棒にバネを挿入した。直応力は 3N/mm^2 と 5N/mm^2 の 2 ケースで試験を行った。

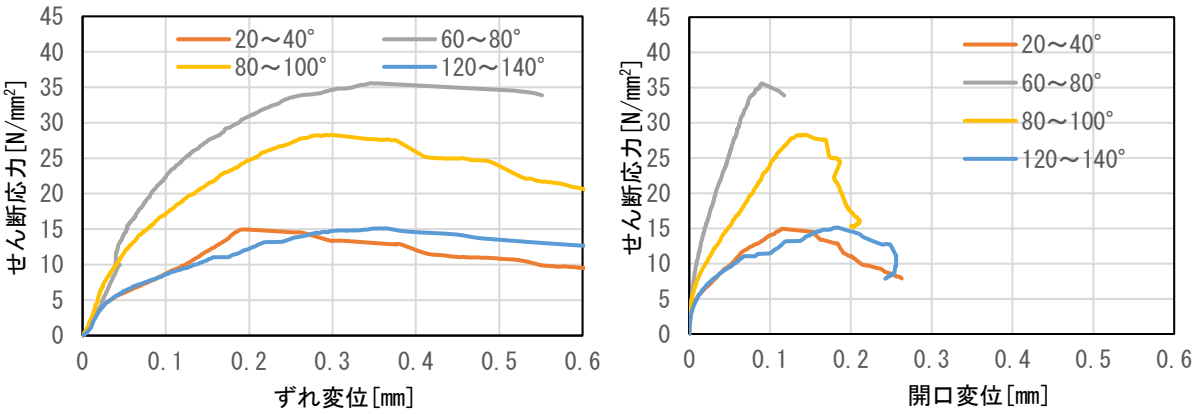
(3) 実験結果

(a) 繊維の配向とせん断強度の関係

図－7 に繊維の交差角度とせん断強度の関係を示す。直応力が作用する場合，前項 3.1 の直応力のない場合と同様，交差角度 0~60° の範囲では交差角度が大きくなる



図－7　直接せん断供試体のせん断強度



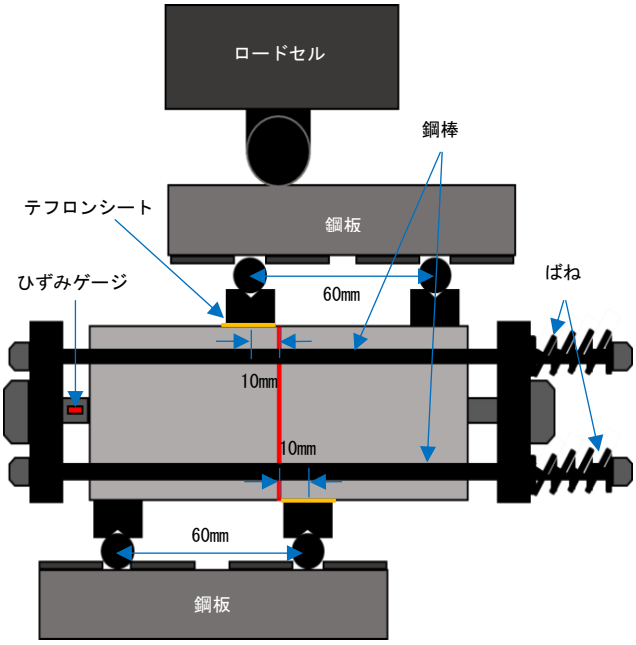
(a)　せん断応力-ずれ変位関係　　(b)　せん断応力-開口変位関係

図－8　直応力のない直接せん断供試体のせん断応力-変位の関係

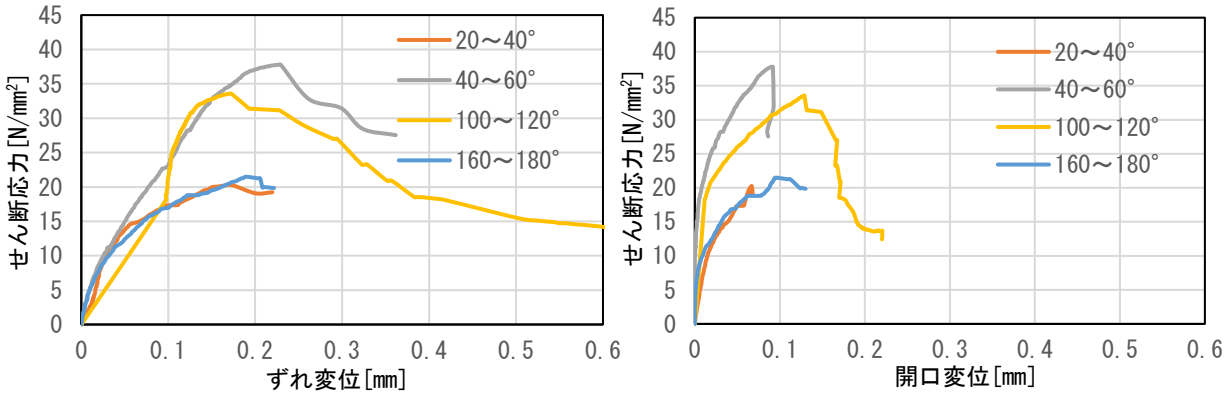
につれてせん断強度が増加し，交差角度 60~80° の範囲で最大となった。その後は交差角度 140° 程度までは交差角度とともにせん断強度が低下した。直応力 3N/mm² と 5N/mm² の場合では，交差角度とせん断強度の関係に顕著な差は見られなかった。なお，せん断強度が低い交差角度 0~40° 及び 140~180° のときのせん断強度は直応力のない場合より大きくなっており，直応力の影響が見られた。

(b) 繊維の配向と変位の関係

図－11 と図－12 に直応力 3N/mm²，5N/mm² の代表的な 4 本の供試体のせん断応力-ずれ変位とせん断応力-開口変位の関係を示す。前項 3.1 の直応力のない場合と同様にずれ変位は載荷直後から変位し始め，0.2mm 程度で最大応力に達した。開口変位も載荷直後は開口せず，せん断応力が 10~15N/mm² 程度に達すると開口し始め，0.1mm 程度で最大応力に達した。直応力のない場合に比べ，最大応力時の開口変位は小さくなる傾向が見られた。

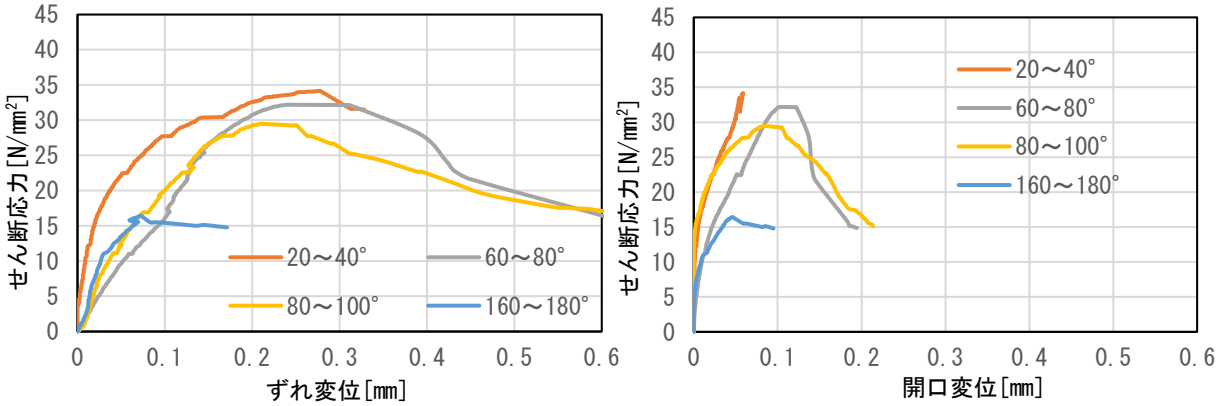


図－9　直接せん断試験の概要



(a)　せん断応力-ずれ変位関係　　(b)　せん断応力-開口変位の関係

図－10　直応力 3N/mm² が作用するせん断応力-変位の関係



(a)　せん断応力-ずれ変位の関係　　(b)　せん断応力-開口変位の関係

図－11　直応力 5N/mm² が作用するせん断応力-変位の関係

4 まとめ

本研究においてひび割れ面のせん断強度に対して繊維の配向が影響することが示された。せん断強度は繊維の交差角度が 60~80°のときに最大となり，交差角度がそれ以上になると低下した。ただし，一軸圧縮供試体の場合には，交差角度が 100°以下では交差角度の影響を受けず，ほぼ一定であった。

せん断強度に繊維の配向が影響するメカニズムに関しては，今後の課題ではあるが，交差角度が 60～100°程度でせん断強度が最大になることから，繊維が架橋効果によってせん断面の開口を抑制することで，せん断強度が高くなることと推察される。

5 参考文献

1) 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

2) 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，pp.1465-1470，2008

3) 児玉圭，上田尚史：せん断破壊する RC はりの耐荷機構に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1333-1338，2016

4) 小林一輔，魚本健人，峰松敏和：鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法に関する実験的研究，生産研究，32 巻，4 号，pp.299-232，1980

5) 石河義希，伊藤穂高，内田裕市：超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向と引張軟化曲線，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，p273-278，2018