

論文 繊維補強セメント系複合材料のせん断伝達モデルに関する解析的研究

上田 尚史*1・Phamavanh Kongkeo*2

要旨: 本研究では、繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) のせん断伝達モデルについて、ひび割れ面における繊維の架橋効果の影響を力学的に考慮することで構築した。また、提案したせん断伝達モデルを用いて、繊維の架橋効果が FRCC のせん断伝達挙動に及ぼす影響について解析的な検討を行った。その結果、繊維混入によるせん断応力の増加や、繊維の種類や混入率の違いによるせん断伝達挙動の変化等を定性的に評価できることを示した。

キーワード: 繊維補強セメント系複合材料, せん断伝達モデル, 繊維の架橋効果

1. はじめに

繊維補強セメント系複合材料 (以下, FRCC とする) は、繊維の架橋効果により引張応力下において荷重を保持する性能を有しており、コンクリートの脆性挙動を改善した材料として位置づけることができる。さらに近年では、高強度化や高靱性化など、従来のコンクリートとは力学的に大きく異なる特徴を持った材料が開発されている。これらの FRCC を構造部材として適切に利用することができれば、合理的な構造設計に寄与できるものと考えられる。

FRCC の構造部材への適用を考えた場合、せん断破壊挙動に対する配慮が重要となる。土木学会においては、これまで各種 FRCC を対象としたせん断耐力評価式^{1), 2), 3)}が提案されているが、適用範囲が限定されており必ずしも一般性のあるものではない。また、それらせん断耐力評価式は、斜め引張破壊をするはり部材を対象としたものであるが、その他の構造部材の挙動や破壊挙動を評価するためには、有限要素法などによる数値解析による評価ができることが望ましい。

これまでに、有限要素解析により FRCC のせん断挙動を評価した研究事例はあるものの、ひび割れ面のせん断伝達モデルに対する検討は、必ずしも十分ではないと考えられる。例えば米澤ら⁴⁾は、HPFRCC はりのせん断破壊挙動の評価において、せん断補強鉄筋を有さない場合には、せん断伝達モデルを考慮しないことで実験結果を良好に再現できるとしている。また、Zhang ら⁵⁾は、ひずみ硬化型セメント系材料を用いたはりのせん断破壊挙動の評価において、ひび割れ面形状を考慮することで、せん断伝達を小さくするとともに、ひずみ硬化域におけるひび割れ分散性とひずみ軟化域におけるひび割れの局所化を考慮したモデルを提案している。ひび割れの分散性と局所化に対するモデル化を考慮することで、ひずみ

硬化型セメント系材料を用いたはりのせん断破壊挙動を概ね妥当に評価できるとしている。しかし、米澤らや Zhang らの研究では、それぞれの FRCC における骨材のかみ合わせが期待できない現象は考慮しているものの、繊維がせん断伝達挙動に及ぼす影響については言及されていない。

また、Suryanto ら⁶⁾は、R/ECC のせん断伝達モデルとして、せん断強度を普通コンクリートの 0.25 倍とすることでひび割れ面が平滑になる現象を考慮するとともに、せん断応力-ひずみ関係において軟化挙動をモデル化することで、ひび割れ面における繊維の引張抵抗を考慮している。しかしながら、Suryanto らのモデルは実験結果を参考にしてパラメータを同定したものであり、一般性のあるモデルであるとはいえない。

以上のように、ひび割れ面に存在する繊維は、せん断伝達挙動に対して影響を及ぼすと考えられているものの、その影響を力学機構に基づいて取り入れたせん断伝達モデルは少ないのが現状である。本研究では、ひび割れ面における繊維の引張抵抗を直接モデル化したせん断伝達モデルについて、その基本的な考え方を提示するとともに、繊維やマトリクスの異なる FRCC のせん断伝達挙動について、解析的な検討を行った。

2. 繊維の影響を考慮したせん断伝達モデル

2.1 格子等価連続体モデル

繊維の影響を考慮したせん断伝達モデルの構築にあたり、本研究ではコンクリートの構成モデルとして格子等価連続体モデル⁷⁾を採用した。

格子等価連続体モデルは、コンクリートと補強筋による耐荷機構をモデル化した Main Lattice 成分と、ひび割れ面におけるせん断伝達機構をモデル化した Shear Lattice 成分を、ひび割れ面座標系に想定することにより

*1 関西大学 環境都市工学部助教 博(工) (正会員)

*2 Mekong Consultants Co., Ltd Director 修(工)

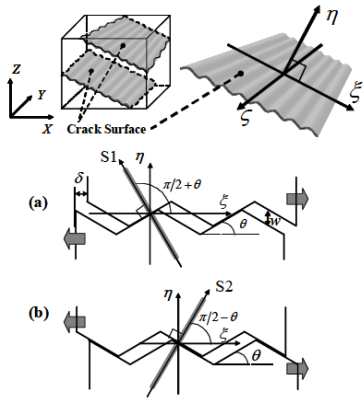


図-1 ひび割れ面のモデル化

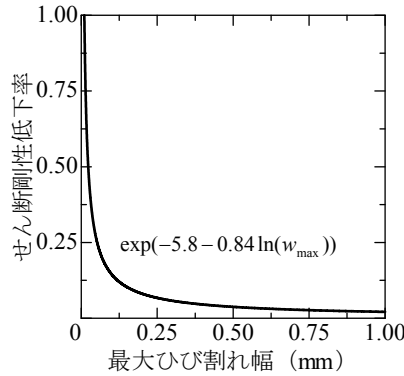


図-2 せん断剛性低下率

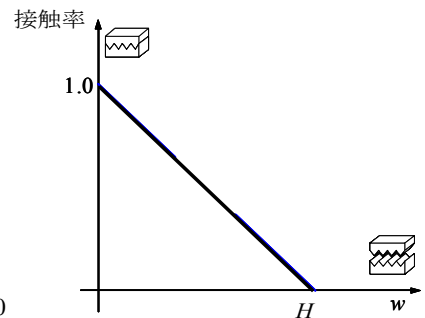


図-3 接触領域の変化

構築するものである。なお、本構成モデルの定式化等の詳細については、参考文献7)を参照されたい。

2.2 ひび割れ面におけるせん断伝達モデル

格子等価連続体モデルでは、図-1に示すようにひび割れ面をモデル化し、せん断変位 δ およびひび割れ幅 w の変化に伴うひび割れ面の凹凸の接触という観点から、せん断伝達モデルを構築している⁷⁾。

ひび割れ面の凹凸の接触により発生する応力は、接触面に垂直な方向(図-1中のS1とS2方向)にShear Latticeを想定することで算定される。

$$\Delta\sigma_{Si} = \frac{\partial E_{shi}}{\partial \epsilon} \cdot \Delta\epsilon_{Si} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{Si}$ および $\Delta\epsilon_{Si}$ は、それぞれ Shear Lattice における応力増分およびひずみ増分であり、 $\partial E_{shi} / \partial \epsilon$ は、Shear Lattice の接線剛性である。ただし、添え字 i は $i=1, 2$ である。このとき、Shear Lattice の応力-ひずみ関係は圧縮に対して完全弾塑性モデルとして、引張に対しては応力を負担しないものとしてモデル化される。ただし、損傷を受けたコンクリートにおけるせん断伝達性能の低下を考慮するために、Shear Lattice の剛性は、過去に経験した最大ひび割れ幅の大きさにより低減するものとしており、図-2に示すせん断剛性低下率が考慮されている。

また、本せん断伝達モデルでは、ひび割れ面における接触領域を考慮することでひび割れ幅の増加に伴うせん断伝達の低下が表現される。すなわち、図-1に示すひび割れ面の凹凸の高さ H よりもひび割れ幅 w が大きい場合には、せん断変形が生じてせん断伝達しない。接触面領域は、図-3に示すようにひび割れ幅の開閉により線形的に変化するようにモデル化されている。

上述したように、本せん断伝達モデルにおいては、ひび割れ面の凹凸の高さ H とひび割れ面の傾斜角 θ がパラメータとなる。既往の研究⁸⁾から、普通コンクリートに対しては、ひび割れ面の凹凸の高さ H は粗骨材最大寸法の半径として、ひび割れ面におけるひび割れ傾斜角 θ は、 50° としてモデル化される。また、高強度コンクリート

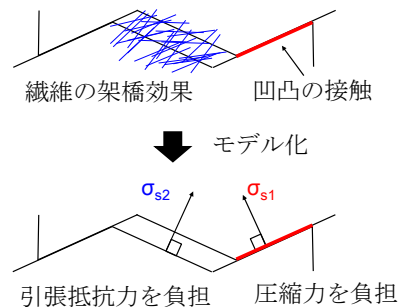


図-4 ひび割れ面における繊維の架橋効果とモデル化

に対しては、コンクリートの骨材自体が割裂することが考慮され、ひび割れ面の凹凸の高さ H およびひび割れ面傾斜角は、それぞれ 2.5mm と 35° としてモデル化される。

2.3 ひび割れ面における繊維の影響のモデル化

(1) Shear Lattice における繊維の架橋力の考慮と定式化

前述のように、ひび割れ面におけるせん断伝達は、せん断変位応力に伴う凹凸の接触により生じるものと仮定している。一方、繊維が混入した場合においては、ひび割れ面のせん断変位に対して、繊維の架橋力によりせん断応力が生じることが考えられる。そこで本研究では、ひび割れ面における繊維の架橋効果を、図-4に示すようにひび割れ面の凹凸が離れる際の引張抵抗力として考慮することとした。すなわち、Shear Lattice において引張応力を評価することにより繊維の架橋力は考慮される。

一般に、繊維の架橋力においては、繊維とマトリクスの付着挙動の影響が大きい。そこで、繊維の架橋力は、繊維とマトリクスの付着応力-すべり関係を Shear Lattice に仮定することで考慮する。すなわち、式(1)は次式のように修正される。

$$\Delta\sigma_{Si} = \begin{cases} \frac{4}{D} \int_{\ell/2} \Delta\tau_{Si} d\ell = \frac{4}{D} \cdot \Delta\tau_{Si} \cdot \frac{\ell}{2} & (\Delta\varepsilon_{Si} \geq 0) \\ \frac{\partial E_{shi}}{\partial \varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon_{Si} & (\Delta\varepsilon_{Si} < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{Si} = \frac{\partial G_{shi}}{\partial s} \cdot \Delta s_{Si} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\tau_{Si}$ は付着応力増分、 Δs_{Si} はすべり増分であり、 $\partial G_{shi} / \partial s$ は付着応力-すべり関係の接線剛性である。添え字 i は $i=1, 2$ である。また、 D および ℓ は繊維の直径および長さであり、式(2)にあるように付着応力増分を繊維軸方向に積分することで軸応力増分へ変換することとなる。ただし、本研究では簡易的に繊維の埋込長は繊維長 ℓ の $1/2$ であるとし、また繊維軸方向に付着応力は等しいものと仮定した。これらの仮定は実際の状況とは異なると考えられるが、モデル構築上の簡便さから適用した。なお、 Δs_{Si} は要素の等価長さ L_{eq} を用いて、次式で算出される。

$$\Delta s_{Si} = \Delta\varepsilon_{Si} \cdot L_{eq} \quad (4)$$

従来のモデルにおいては、Shear Lattice の応力は、座標変換を経てひび割れ座標系（局所座標系）における直応力とせん断応力に変換される⁷⁾。一方、提案モデルにおいては、ひび割れ開口に対する引張応力が二重に評価されることを避けるために、式(2)から算出される Shear Lattice の応力はせん断応力のみに寄与するものと仮定し、ひび割れ開口に伴う引張応力は Main Lattice により独立に評価するものとした。

(2) Shear lattice の付着応力-すべり関係

近年、繊維の引抜き試験などにより繊維とマトリクスの付着応力-すべり関係を明らかにする試みが行われている。例えば、椿ら⁹⁾は、鋼繊維をコンクリートの不連続面に垂直に配置した供試体を用いた引抜き試験を行い、繊維 1 本あたりの引張力と引抜け変位の関係を実験的に求めている。また国枝ら¹⁰⁾は、はり要素と付着リンク要素を用いた解析を行うことで、PVA 繊維ならびに PE 繊維のそれぞれに対して、繊維 1 本の付着応力-すべり関係を同定している。

本研究では、これらの知見を参考にして、繊維 1 本の引抜き試験から得られた付着応力-すべり関係に対して、ひび割れ面に存在する繊維量を乗ずることで、Shear Lattice に用いる付着応力-すべり関係を仮定した。ひび割れ面に存在する繊維量に相当する面積率 A_f は、繊維が一樣に分散していると仮定すれば、繊維混入率 V_f を用いて次式のように表される。

$$A_f = (V_f)^{2/3} \quad (5)$$

したがって、Shear Lattice の付着剛性ならびに付着応力は次式の通り求められる。

表-1 付着応力-すべり関係のパラメータ

| | G_{ini} (N/mm ³) | τ_{max} (N/mm ²) | β |
|---------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------|
| Model A | 15.0 | 3.0 | 0.1 |
| Model B | 30.0 | 6.0 | 1.0 |

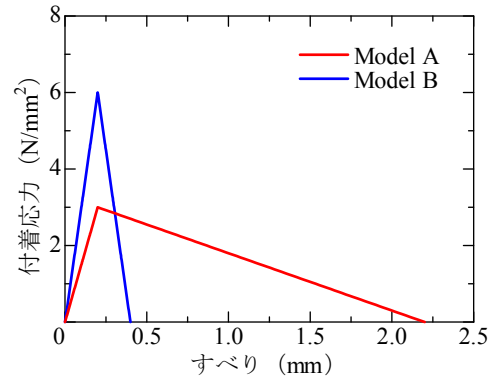


図-5 繊維 1 本あたりの付着応力-すべり関係

$$\frac{\partial G_{shi}}{\partial s} = A_f \cdot \frac{\partial G}{\partial s} = (V_f)^{2/3} \cdot \frac{\partial G}{\partial s} \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{shi} = A_f \cdot \Delta\tau = (V_f)^{2/3} \cdot \Delta\tau \quad (7)$$

ここに、 $\Delta\tau$ ならびに $\partial G / \partial s$ は、それぞれ繊維 1 本あたりの付着応力増分ならびに付着剛性である。式(6)中の G も含めて、繊維 1 本の付着応力-すべり関係は繊維種類や繊維形状、あるいはマトリクス強度に依存するものである。したがって、Shear Lattice に用いる付着応力-すべり関係も、FRCC に応じて異なったものとなる。繊維 1 本の付着応力-すべり関係の具体的なモデル化については、次章において示す。なお、FRCC の架橋力は、繊維の配向性の影響を受けるとともに、配向角度を有することで繊維の付着特性は変化することが知られている¹¹⁾が、せん断伝達挙動に対する影響の詳細は不明であるため、本研究ではそれらの影響については考慮しないこととした。ただし、繊維の配向が引張性能に及ぼす影響については、別途 Main Lattice で考慮することとなる。

3. 提案モデルによる FRCC のせん断伝達特性の評価

本章では、異なる付着特性を有する 2 種類の繊維を仮定し、マトリクスがコンクリートあるいはモルタルの場合のせん断伝達挙動について、2 章で提案したせん断伝達モデルを用いた検討を行う。なお、粗骨材の有無により、ひび割れ面における繊維の配置や配向は異なることが考えられるが、その違いを定量的に表現することは必ずしも容易ではないため、本検討ではコンクリート、モルタルともに、同一の配置や配向であると仮定した。

3.1 繊維 1 本の付着応力-すべり関係のモデル化

繊維 1 本の付着応力-すべり関係は、式(8)に示す軟化

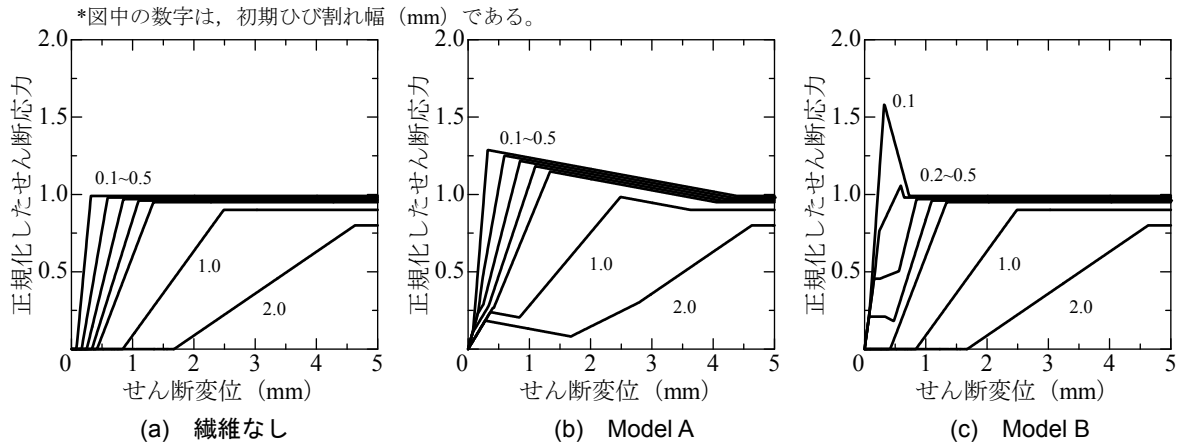


図-6 繊維補強コンクリートにおける繊維の架橋効果の影響 (ひび割れ幅一定、繊維混入率 1.0%)

挙動を含む 2 直線でモデル化することとし、図-5 および表-1 に示すように異なる 2 つのモデル (Model A, Model B) を仮定した。

$$\tau = \begin{cases} G_{ini} \cdot s & (0 \leq s \leq s_{max}) \\ -\beta \cdot G_{ini} \cdot s & (s_{max} \leq s) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 G_{ini} は初期付着剛性、 β は軟化勾配に関する係数である。また、 s_{max} は付着強度 τ_{max} 時のすべりであり、 $s_{max} = \tau_{max} / G_{ini}$ である。

Model A は Model B のそれぞれの特徴は、Model A は付着剛性や付着強度は小さいものの、付着強度以降に緩やかに応力が低下するモデルであり、Model B は付着剛性や付着強度は大きいものの、付着強度以降に急激に応力が低下するモデルである。それぞれ、剛性や強度等については定量的な裏付けはないものの、Model A は緩やかに引抜ける挙動を示す繊維 (例えば鋼繊維) を、Model B は強固な付着力を有しているが比較的急激に応力が低下する挙動を示す繊維 (例えば PVA 短繊維) を想定している。なお、以降の検討では、Model A, Model B とともに、繊維長 30mm、繊維径 0.66mm の短繊維であると仮定して検討を行うものとする。

3.2 繊維の架橋効果がせん断伝達挙動に及ぼす影響

(1) 繊維補強コンクリートの場合

マトリクスに普通コンクリートを用いた場合のせん断伝達挙動について検討を行った。普通コンクリートの材料特性には、圧縮強度 30N/mm^2 、引張強度 3.0N/mm^2 、弾性係数 $25.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$ を仮定した。せん断伝達モデルにおけるパラメータ H および θ は、既往の研究を参考にしてそれぞれ 10mm および 50° とした。また、繊維の混入率は 1.0% を仮定した。

解析では、まず所定のひび割れ幅 (初期ひび割れ幅、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0mm) となるまで引張力を作用させた後、ひび割れ幅を一定とした状態でせん断変位を与えた。

図-6 に解析より得られたせん断応力-せん断変位関

係を示す。図中のせん断応力は普通コンクリートにおいてひび割れ幅を 0.0mm と固定した際の最大せん断応力で正規化している。図-6(a)に示すように、繊維がない場合は、初期ひび割れ幅の増加に伴い、せん断応力が生じるせん断変位は大きくなるとともに、せん断剛性が低下する傾向となる。一方、繊維を混入した場合は、繊維種類によりせん断伝達挙動が異なることがわかる。すなわち、Model A では、初期ひび割れ幅 2.0mm の場合であっても、せん断変位初期から応力を負担するのに対して、Model B では、初期ひび割れ幅 0.5mm 程度を超えると、繊維なしの場合と同様のせん断伝達挙動となる。これには、それぞれのモデルにおける付着応力-すべり関係の軟化勾配が影響しており、Model A においては、軟化勾配が緩やかであるため、初期ひび割れ幅が大きい場合であっても繊維の架橋効果が有効となるのに対して、Model B においては架橋効果が早期に失われているためである。

最大せん断応力に対しても、同様に説明することができる。Model A においては、付着強度以降も応力を負担できるため、初期ひび割れ幅 1.0mm の場合であっても、繊維なしの場合よりも大きな最大せん断応力となる。一方、Model B においては、繊維の付着応力が大きいため、初期ひび割れ幅が 0.1mm 程度であれば、Model A よりも大きなせん断応力を負担することができるものの、付着応力が急激に低下するため、最大せん断応力以降は急激にせん断応力が低下する結果となる。

また、以上の結果から、本研究で提案したせん断伝達モデルにおいては、繊維の付着応力-すべり関係に係わらず、繊維の架橋効果はせん断変位が小さい領域においてせん断伝達に影響を及ぼし、繊維の付着応力が 0 となって以降は、骨材のかみ合わせが支配的になることが確認された。このようなひび割れ面におけるせん断伝達機構は、既往の実験¹²⁾で指摘されたものと定性的には同様であるといえる。ただし、繊維の架橋効果が負担するせ

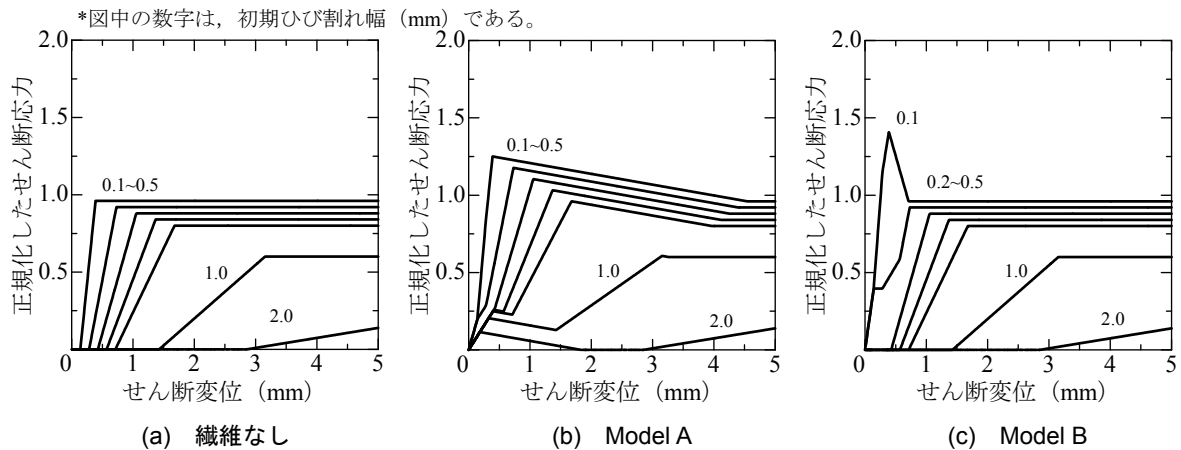


図-7 繊維補強モルタルにおける繊維の架橋効果の影響 (ひび割れ幅一定, 繊維混入率 1.0%)

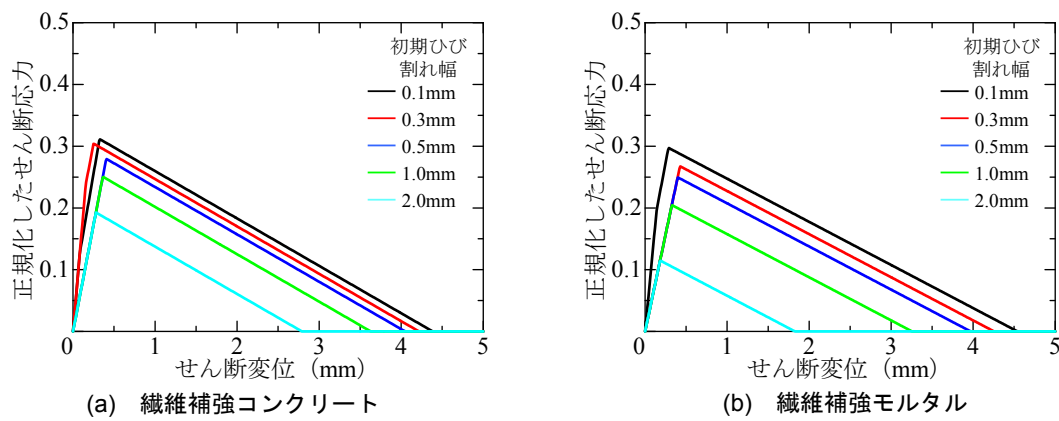


図-8 せん断伝達に対する繊維の架橋効果の寄与 (Model A)

せん断応力の大きさなどについては、今後より詳細に検討する必要がある。

(2) 繊維補強モルタルの場合

マトリクスにモルタルを用いた場合のせん断伝達挙動について検討を行った。モルタルの材料特性は、前項の普通コンクリートと同様であるとし、圧縮強度 30N/mm^2 、引張強度 3.0N/mm^2 、弾性係数 $25.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$ を仮定した。また、せん断伝達モデルにおけるパラメータ H および θ は、既往の研究より高強度コンクリートのそれと同等であるとしていることから、それぞれ 2.5mm および 35° とした。繊維の混入率は 1.0% を仮定した。

図-7 に解析より得られたせん断応力-せん断変位関係を示す。図中のせん断応力はモルタルにおいてひび割れ幅を 0.0mm と固定した際の最大せん断応力で正規化している。図より、前項の繊維補強コンクリートと同様に、繊維の架橋効果により、Model A の方が、Model B よりもせん断応力は大きくなる結果となった。

ここで、マトリクスの違いにより、繊維の架橋効果がせん断伝達にどの程度寄与しているのかについて検討する。図-8 に、せん断伝達に対する繊維の架橋効果の寄与の一例として、Model A における繊維なしからのせん断応力の増加量を示す。図より、繊維補強コンクリート

と比較して、繊維モルタルの場合の方が繊維の架橋効果の寄与分が小さく、その傾向は、初期ひび割れ幅が大きいほど顕著となっていることが確認できる。すなわち、本研究で提案したモデルにおいては、繊維の架橋力によるせん断伝達は、繊維補強コンクリートの方が期待できるということになる。これは、提案したせん断伝達モデルの特性上の、ひび割れ面の凹凸が滑らかになるほどせん断伝達が小さくなるためである。この結果の妥当性については、実験等を通して十分に精査する必要があると考えている。

3.3 繊維量の違いによる繊維の架橋効果

繊維混入率の違いにより、せん断伝達挙動がどの程度変化するかを確認するため、Model A を対象とした繊維補強コンクリートにおいて、繊維混入率を $0.0, 0.5, 1.0, 1.5\%$ と変化させた解析を行った。なお、初期ひび割れ幅は、 $0.1, 0.3, 0.5\text{mm}$ として、前節と同様にひび割れ幅を一定とした状態でせん断変位を与えた。

図-9 に解析より得られたせん断応力-せん断変位関係を示す。図中のせん断応力は、これまで同様にひび割れ幅を 0.0mm と固定した際の最大せん断応力で正規化している。初期ひび割れの大きさに係わらず、繊維混入率が増加することで、せん断剛性やせん断応力が増加す

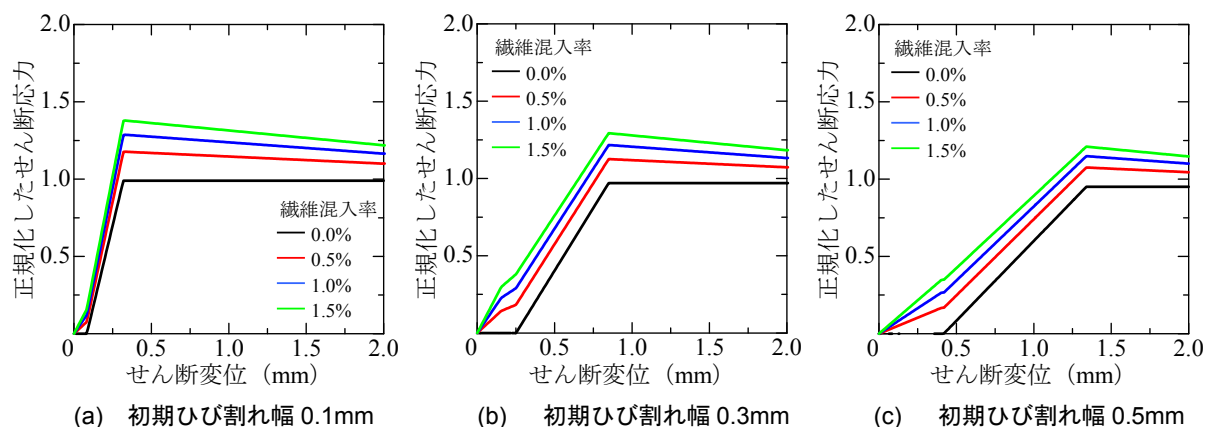


図-9 繊維混入率の異なる繊維補強コンクリートのせん断伝達挙動 (Model A)

る傾向が得られていることがわかる。このように、本研究で提案したせん断伝達モデルでは、繊維混入率をパラメータとすることができるため、繊維量が増加した際のせん断伝達挙動の変化を容易に評価することができる。ただし、繊維量の増加に伴うせん断伝達の変化については、あくまでも定性的な評価であるため、今後はより定量的な評価を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では、ひび割れ面に存在する繊維の架橋効果に着目し、力学機構に基づいたFRCCのせん断伝達モデルを提案した。また、繊維やマトリクスの異なるFRCCのせん断伝達挙動について解析的な検討を行った。その結果、定性的ではあるものの、繊維混入によるせん断応力の増加や、繊維の付着応力-すべり関係の違いや繊維混入率の違いによりせん断伝達挙動が変化すること等、繊維の架橋効果がせん断伝達に及ぼす影響を評価できることを示した。

今後は、繊維の付着特性やFRCCの1面せん断伝達挙動に対するより詳細な検討や定量的な評価などを行うことで、構成モデルの高度化を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)若手研究(B)(課題番号:25820205)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表します。

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。
- 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

ラリー127，2007。

- 4) 米澤健次，平田隆祥，渡辺哲，岡野素之：HPFRCCを用いた構造部材の非線形挙動に対するFEM解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1255-1260，2009。
- 5) Zhang, Y. X., Ueda, N., Umeda, Y., Nakamura, H. and Kunieda, M. : Evaluation of Shear Failure of Strain Hardening Cementitious Composite Beams, Journal of Structural Engineering, Vol.57A, pp.908-915, 2011.
- 6) Suryanto, B., Nagai, K. and Maekawa, K. : Smear-crack Modeling of R/ECC membranes Incorporating an Explicit Shear Transfer Model, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.3, pp.315-326, 2010.
- 7) 田辺忠顕編：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，2004。
- 8) Kongkeo PHAMAVANH, 中村光，桜田道博，西垣義彦：超高強度モルタルを使用したRC・PC梁のせん断破壊解析に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.61-66，2008。
- 9) 椿龍哉，田中健二郎：鋼繊維の引抜け特性に及ぼす付着長の影響，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.2，pp.83-92，2001。
- 10) 国枝稔，小澤国大，小倉大季，上田尚史，中村光：短繊維を離散化した3次元メゾスケール解析手法によるひずみ硬化型モルタルの引張破壊解析，土木学会論文集E，Vol.66，No.2，pp.193-206，2010。
- 11) 例えば，日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会報告書，JCI-C82，2012。
- 12) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井寛：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，pp.133-139，2007。