

論文 超高強度マトリクスに埋め込まれた有機系繊維の付着特性

小澤 国大^{*1}・国枝 稔^{*2}・関田 徹志^{*3}・中村 光^{*4}

要旨: 本研究では、超高強度マトリクスと3種類の有機系繊維の組み合わせによる単繊維引抜き付着試験を実施し、繊維-マトリクス間の付着特性について検討を行った。超高強度マトリクスとPE繊維の組み合わせは、他のマトリクスとの組み合わせに比べ、より高い付着特性が得られることを定量的に示した。また、蒸気養生を実施した場合、気中養生を実施したものと同程度の繊維-マトリクス間の付着特性となることを定量的に示した。さらに、本研究の範囲内では、埋込み長の違いによらず、ほぼ一定の付着応力-すべり関係が得られることを示した。

キーワード: 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料, 超高強度マトリクス, 有機系繊維, 付着強度

1. はじめに

近年、短繊維補強セメント系複合材料の高性能化（超高強度化、超高靱性化）が積極的に進められている。本研究室で開発された超高強度ひずみ硬化型セメント系材料¹⁾ (Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites, UHP-SHCC) は、従来のひずみ硬化型セメント系材料 (SHCC) に比べて高強度であり、透気係数が1/100程度以下と極めて緻密な材料であること、さらに引張応力下においてひび割れ幅が10 μ m程度と、従来のSHCCと比べて微細な複数ひび割れを生じるという特徴がある。この理由の一つとして、マトリクスの高強度化に伴いマトリクスと繊維との界面における付着特性が改善されたものと推察される。

界面の付着特性を明らかにするためには、モルタルマトリクス（以下、マトリクス）に埋め込まれた単繊維の直接引張試験（単繊維引抜き付着試験）を行う必要がある。繊維-マトリクス間の付着特性については、例えば清田ら²⁾のように繊維径の小さな有機系繊維を対象にマトリクスや繊維の組み合わせが付着特性に及ぼす影響等について実験的に検討がなされた事例があるが、未だ実験例は数少ない。特にUHP-SHCCに用いられるような超高強度で緻密なマトリクスと有機系繊維との付着特性について解明されていない点が多い。

単繊維引抜き付着試験で得られる引抜き荷重-変位関係は、マトリクスへの繊維の埋込み長が大きく寄与するものと考えられているが、材料特性としての付着応力-すべり関係が、埋込み長に依存するか否かについて検討された研究はないのが現状である。

本研究では、超高強度マトリクスと3種類の有機系繊維の組み合わせによる単繊維引抜き付着試験を実施し、

特に算定される付着応力-すべり関係をもとに、繊維-マトリクス間の付着特性について明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

本研究では、超高強度マトリクスとPE繊維および繊維径の異なる2種類のPVA繊維の組み合わせを対象としたもの、また超高強度マトリクスとPE繊維の組み合わせで、蒸気養生の実施の有無を検討対象としたものについて試験を行った。

2.1 使用材料

(1) マトリクス

本研究で使用したマトリクスの示方配合を表-1に示す。W/B=0.18とし、セメントには低熱ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³）を使用し、セメント質量の20%をシリカフューム（密度：2.2g/cm³）で置換した。細骨材は7号珪砂（密度：2.68g/cm³、平均粒径：0.2mm）を

表-1 マトリクスの示方配合

W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	SF	S	Ad ^{*1}	Ad ^{*2}
0.18	0.10	268	1359	340	170	34.0	7.48

*1: 高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

*2: 消泡剤

表-2 使用した繊維の物性値（公称値）

繊維種類	密度 (g/cm ³)	直径 (μ m)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
PE	0.97	12	2700	88
PVA-40	1.30	40	1600	40
PVA-200	1.30	200	1000	29

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士 (工) (正会員)

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所建築生産グループ上席研究員 Ph.D. (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士 (工) (正会員)

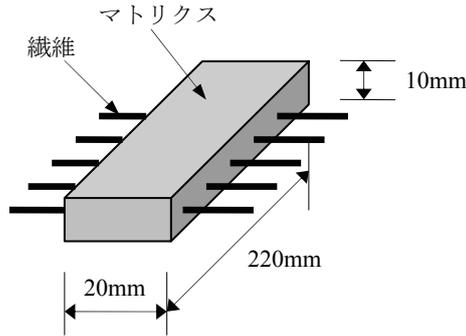


図-2 カutting施工前の試験体

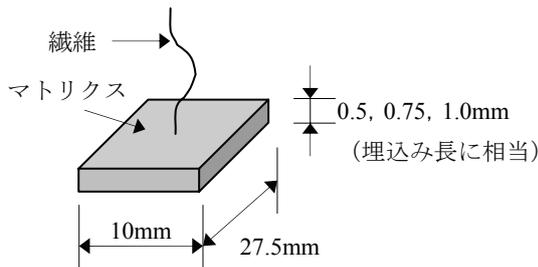


図-3 カutting施工後の試験体

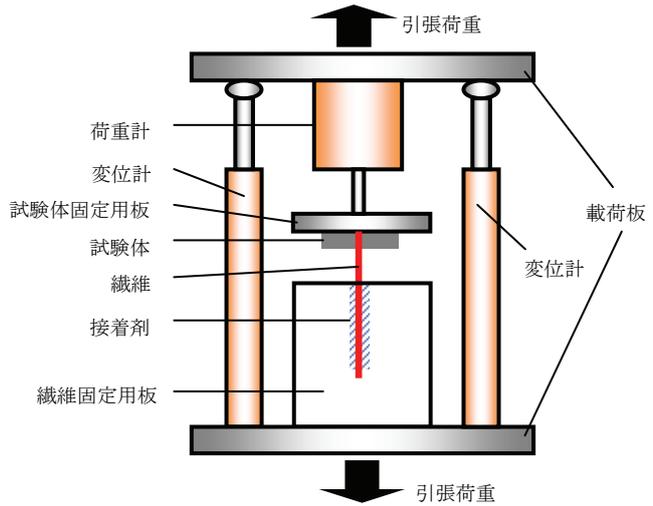


図-4 試験方法

用いた。混和剤には高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）と消泡剤を使用した。

(2) 繊維

使用した繊維（単繊維）は高強度ポリエチレン繊維（PE），および 2 種類のポリビニルアルコール繊維（PVA-40，PVA-200）である。それぞれの繊維の物性値を表-2 に示す。

2.2 試験体の作製方法

(1) 気中養生試験体

練混ぜにはモルタルミキサー（容量 1.5ℓ）を用いた。練り混ぜ後，単繊維をあらかじめ配置した内径 220×20×10mm の型枠に流し込み，気泡が含まれないようにするために振動を与えながら成形し，図-2 に示すような試験体を作製した。打設後，恒温室内（温度 20℃）にて静置し，材齢 2 日において脱型して湿布養生を行った。なお，養生期間中に試験体を図-3 のような形になるようにダイヤモンドカッターで Cutting を施し，この形状の試験体 5 体を作製した。有機系繊維には，高い付着結合力と小さい繊維径により，引抜き過程において破断する傾向のものとされている³⁾。本研究では，繊維の埋込み長を 0.5, 0.75 および 1.0mm と変化させた。載荷は，Cutting を施した試験体を用い，材齢 45～50 日にて実施した。

(2) 蒸気養生試験体

気中養生試験体と同様の手順で図-2 に示す形状の試験体を作製した後，材齢 7 日において蒸気養生を行った。蒸気養生条件は，開始から 3 時間経過まで温度上昇速度

5℃/h で昇温し，3 時間経過後は温度上昇速度 15℃/h で最高温度を試験体の表面温度 90℃まで昇温した。90℃到達から 48 時間 90℃を保持した後，90℃～50℃までは温度下降速度 3℃/h，50℃以降は温度下降速度 2℃/h で 20℃まで徐冷した。蒸気養生後の材齢の変化は少ないものと判断し，20℃の湿布養生で保存し，材齢 6 ヶ月にて載荷を行った。

2.3 試験方法

付着試験は，0.01mm/sec の載荷速度を目安に変位制御にて試験を行い，荷重－変位関係を測定した。載荷は図-4 に示すように，試験体を試験体固定用板に固定し，試験体に埋め込まれた繊維を繊維固定用板に接着剤を用いて固定し，引張荷重を与え，繊維の引抜き荷重をロードセル（容量 9.8N，精度 0.00095N）にて測定した。変位は，載荷板間距離を変位計（容量 5mm，精度 0.5μm）によって測定した。試験体と繊維固定用板との距離は 1mm 前後となるように試験体を設置した。

3. 実験結果

3.1 PE 繊維

PE 繊維を対象とした引抜き試験によって得られた引抜き荷重－変位関係について，繊維の埋込み長ごとにまとめたものを図-5 に示す。図中の結果は，試験を行った 5 体の試験体のうち計測できたものの結果である。実験結果において，それぞれの埋込み長を超える変位が測定されているのは，試験体の厚さにばらつきがあることに起因するものと考えられる。また，試験終了後において，繊維の引抜きに伴うマトリクスの損傷は目視においては確認されなかった。図-5 より，荷重は初めほぼ直線的に増加し，初期ピークを経た後，緩やかな荷重の低下を伴いながら引き抜かれる挙動が認められる。また，埋込み長の増大に伴い，引抜き荷重が大きくなることが

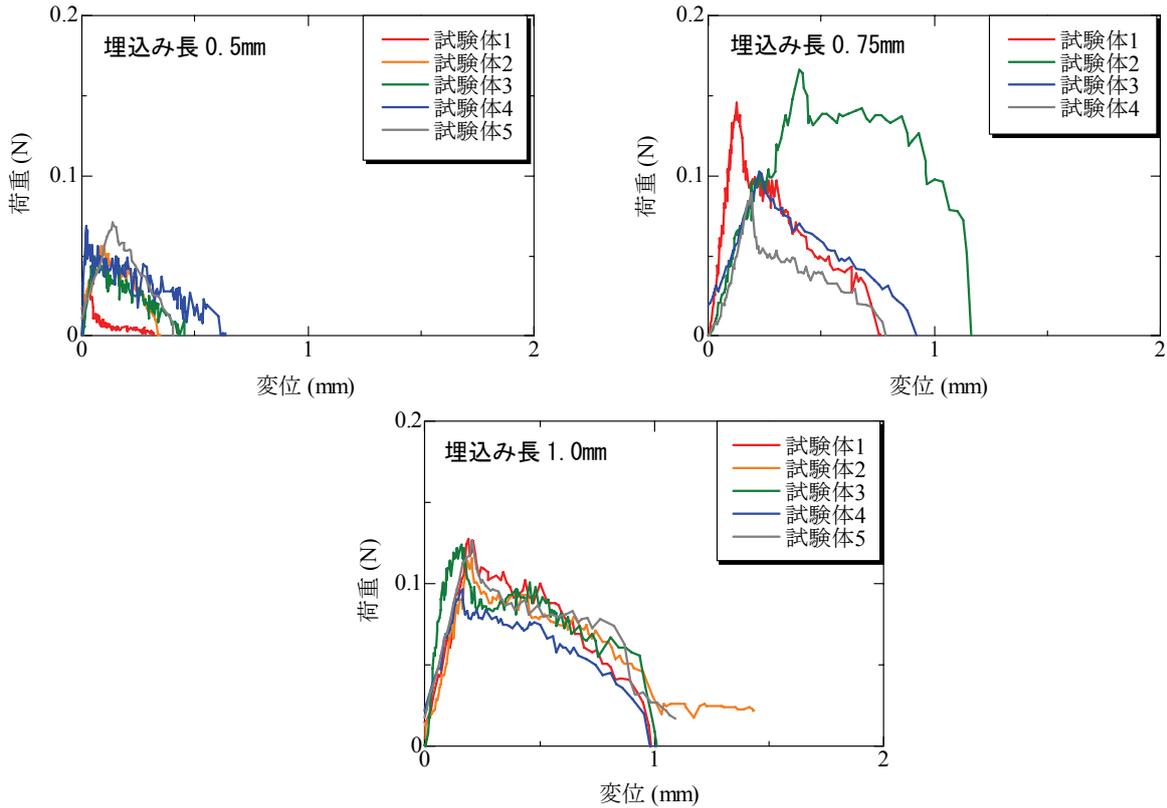


図-5 引抜き荷重-変位関係 (PE)

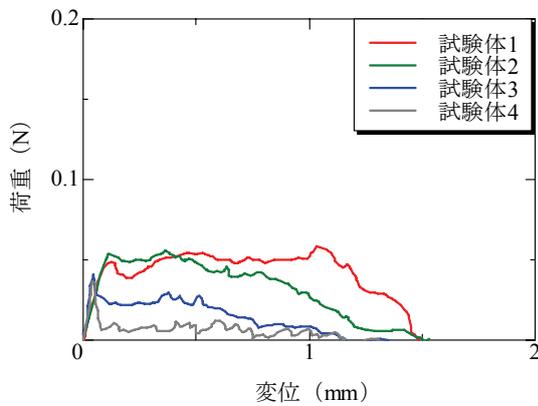


図-6 引抜き荷重-変位関係²⁾ (清田らの実験結果)

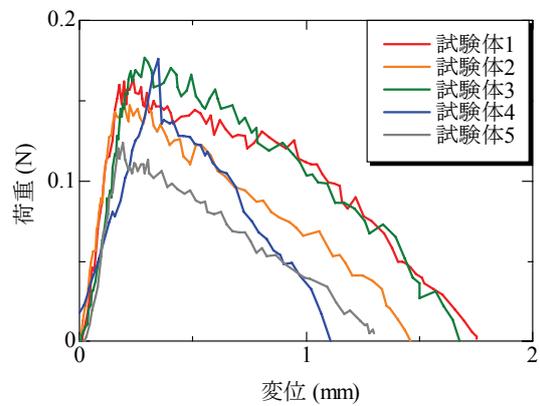


図-7 引抜き荷重-変位関係
(蒸気養生試験体, 埋込み長 1.0mm, PE)

確認される。

次に、マトリクスの性状が付着特性に与える影響について比較検討を行うために、清田らによる単繊維引抜き付着試験²⁾より得られた繊維径 12 μ m の PE 繊維における引抜き荷重-変位関係を引用して図-6 に示す。比較対象のマトリクスは、W/B=27%のセメントペーストであり、セメント質量の 20%をシリカフェームで置換している。また、繊維の埋込み長は 1.2mm 程度である。本研究において同程度の埋込み長である図-5(c)と比較すると、超高強度マトリクスを用いた場合、非常に大きな荷重が得られていることが分かる。

図-7 に、PE 繊維を用いて蒸気養生を実施した試験体の引抜き試験によって得られた引抜き荷重-変位関係

を示す。ここで、試験体の繊維の平均埋込み長は約 1.0mm である。気中養生試験体のうち同程度の埋込み長である図-5(c)と比較すると、蒸気養生試験体では、気中養生試験体に比べ、より高い引抜き荷重が認められた。しかし、ピーク後荷重が 0 になる変位が 1.0mm 以上のものが多く、埋込み長が大きいものが含まれていた可能性がある。本実験においては、少なくとも蒸気養生試験体は、気中養生試験体と同程度の付着を有していることが確認された。

3.2 PVA 繊維

2 種類の PVA 繊維 (PVA-40, PVA-200) を対象とした試験によって得られた引抜き荷重-変位関係について、

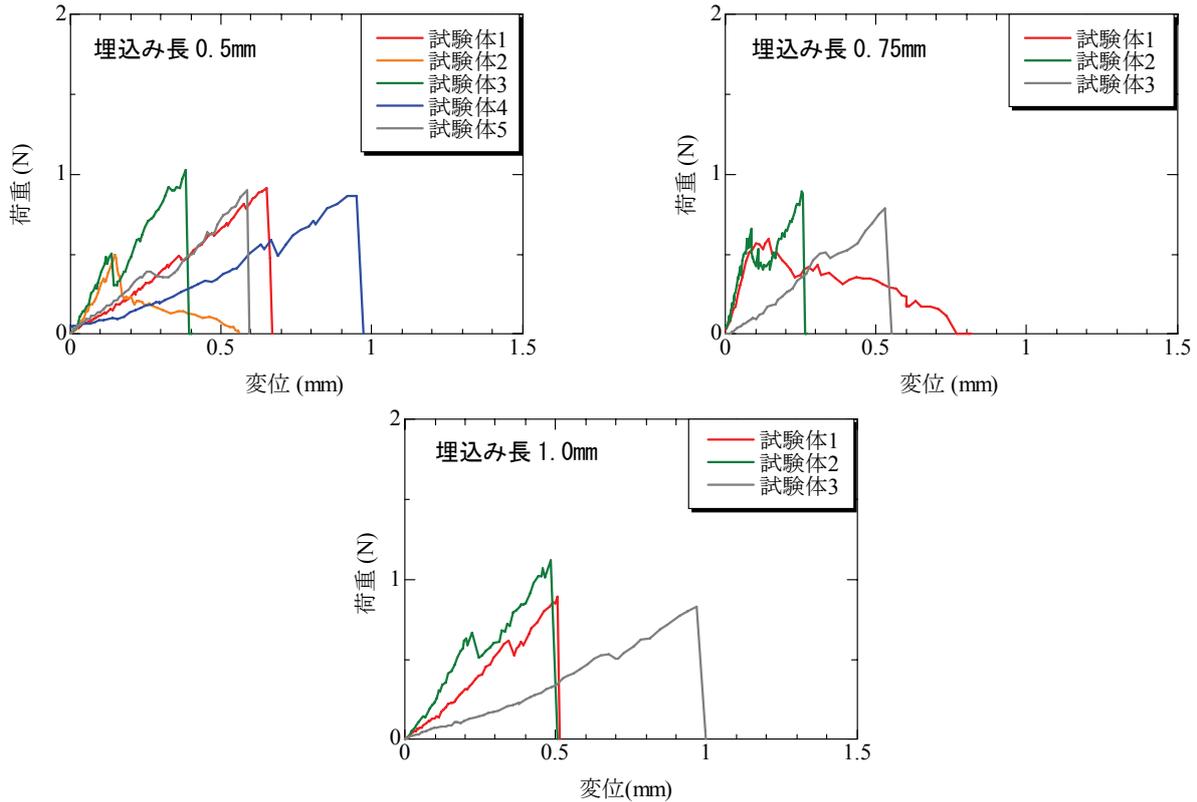


図-8 引抜き荷重-変位関係 (PVA-40)

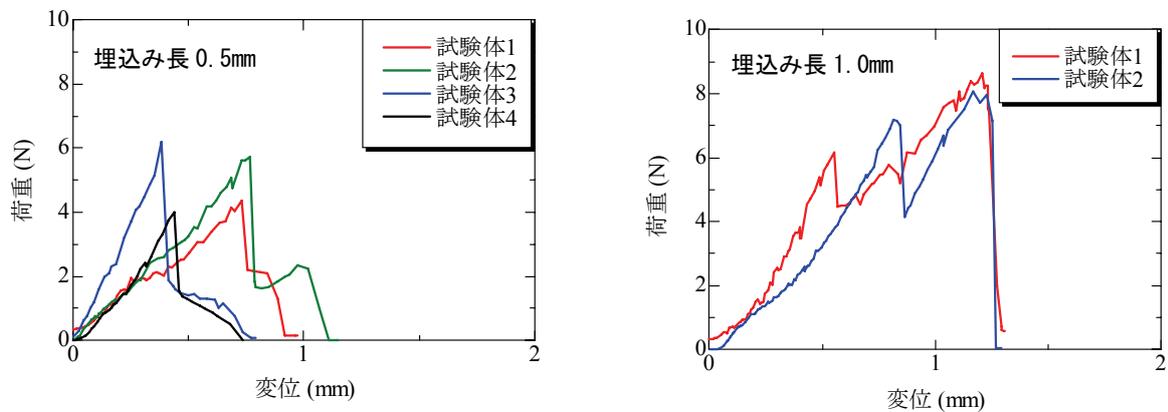


図-9 引抜き荷重-変位関係 (PVA-200)

繊維の埋込み長ごとにまとめたものをそれぞれ図-8 および図-9 に示す。PVA-40 の場合について、一部の試験体では荷重は初期ピーク後、急激に低下して緩やかな荷重の低下を伴う引抜け挙動が認められたが、いずれの埋込み長の試験体においても、初期ピーク後に荷重が低下し、さらに変位が増加したとき初期ピークを上回る荷重の増加を示し、最終的に繊維が破断する挙動が認められた。

PE 繊維および PVA 繊維において、両者の引抜き挙動に差異が認められた要因として、(1)PVA 繊維が親水性の有機系繊維であり、疎水性である PE などの繊維に比べ一般的に高い付着強度を示すこと、(2)PVA 等の柔らかい

ポリマー繊維では、抜け出すにつれて周囲のマトリクスにより繊維表面が荒らされ、見かけ上摩擦付着強度が大きくなること、が考えられる。また、埋込み長 0.5mm の試験体においてほとんどのもので繊維が破断していることから、本研究で用いた超高強度マトリクスが、既往の SHCC で用いられているマトリクスに比べより良好な付着をもたらしていると推察される。なお、本実験で使用した PVA 繊維 (PVA-40) と類似の繊維を用いた単繊維引抜き付着試験においても、1N 前後で繊維が破断しており³⁾、本実験結果も同様の結果を得ることができた。

また、PVA-200 の場合について、埋込み長が 0.5mm 程度のものでは初期ピーク後、荷重が急激に低下し、その

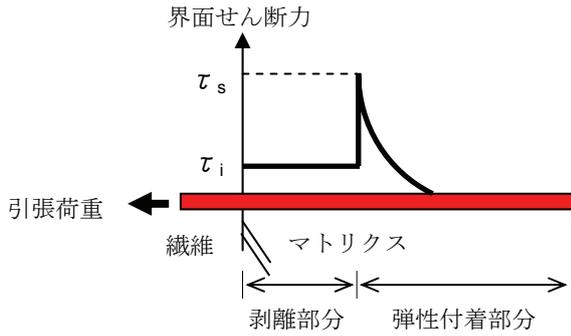


図-10 埋め込み繊維の付着モデル

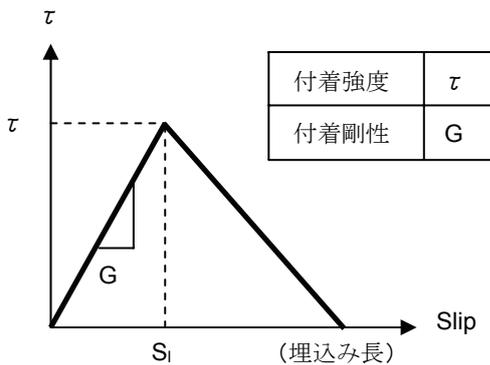


図-11 付着応力-すべり関係

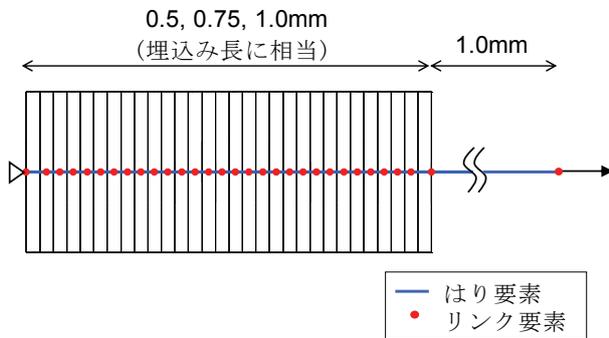


図-12 解析モデル

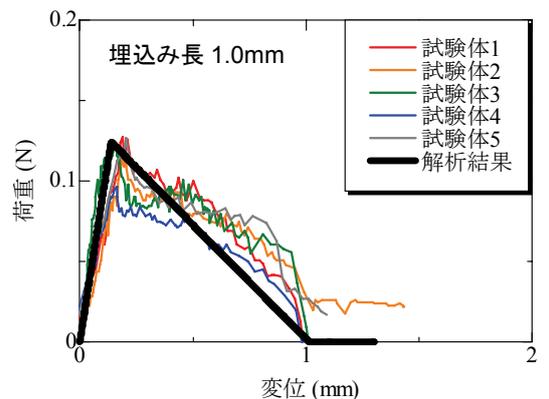
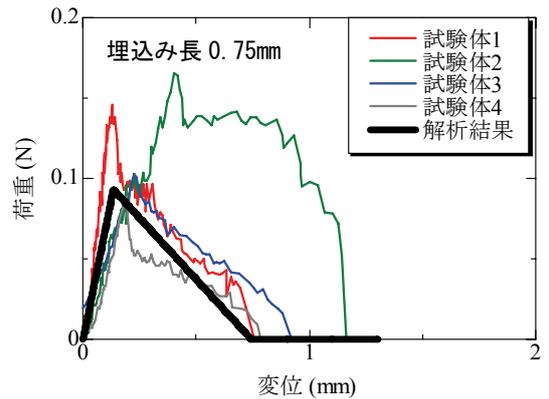
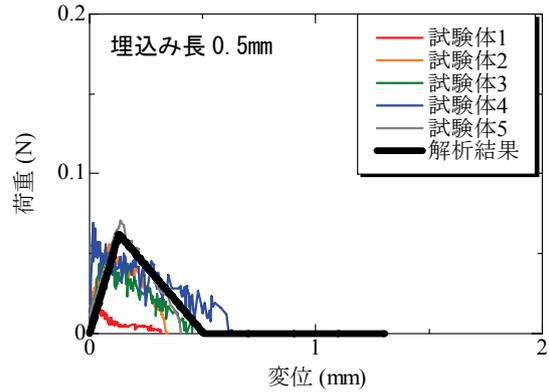


図-13 実験および逆解析による
引抜き荷重-変位関係 (PE)

後は変位の増大に伴い荷重が緩やかに低下しながら繊維が引き抜ける挙動が確認された。一方、埋込み長が1.0mm程度のもものでは、初期ピークを経た後、変位の増大に伴い荷重がさらに増大して第2ピークを形成し、最終的に繊維が破断する挙動が認められた。図-9から、このPVA繊維について、破壊形式が繊維の拔出から繊維自身の破断に変わる埋込み長さが、0.5~1.0mmの間であったことが確認される。

4. 単繊維引抜き付着試験の逆解析

4.1 繊維付着モデル

マトリクスに埋め込まれた単繊維の挙動は界面性状に大きく依存し、この挙動は主に繊維-マトリクス間の

付着特性および繊維の破断が支配する。LiとLeungによって提案されたモデル⁴⁾によると、剥離過程における繊維-マトリクス界面のせん断力の分布は図-10のように表される。図-10で、せん断力がはく離領域先端において限界値を超えたとき、剥離が進行し、剥離した部分は摩擦による一様なせん断力に置き換わる。すなわち、解析モデル剥離過程における付着特性は化学付着力 τ_s と摩擦付着力 τ_i によって説明される。

なお、図-10に示される界面せん断力の分布の形状は、PVAのように繊維-マトリクス間の付着性状が良好な場合において認められるが、一般にセメント水和物との付着強度が低いPE繊維の場合、剥離した部分の摩擦付着力が低いために、3.1節においても示したように、セ

ん断応力が限界値に到達後すぐに引き抜ける挙動が確認されている。本研究では、図-10 に示す τ_s および τ_i を等しいものと考え、図-11 に示す付着応力-すべり関係を仮定し、PE 繊維を対象とした単繊維引抜き付着試験の逆解析を実施した。付着特性パラメータ（付着強度 τ および付着剛性 G ）を同定し、付着特性の定量化を行った。また、モデルでは、ピーク後に付着応力が 0 になる点を埋込み長さと一致させた。

ここでは、繊維の埋込み長が付着特性に及ぼす影響について定量的に把握することを目的としており、実験結果に示したようにほとんどの埋込み長において繊維の破断が確認された PVA 繊維については、付着応力-すべり関係の同定が不可能であることから、逆解析は PE 繊維のみを対象として実施した。

4.2 解析概要⁵⁾

図-12 に解析モデルを示す。ここでは、繊維をはり要素の集合として離散的に扱い、マトリクスを表す剛体要素にリンク要素を介して結合させた。繊維とマトリクス間の付着応力-すべり関係は、リンク要素で表現した。境界条件は、左端のマトリクス要素を完全拘束とし、右端のリンク要素に強制変位を与えた。

4.3 解析結果

図-5 に示した引抜き荷重-変位関係を対象に実施した逆解析より得られた引抜き荷重-変位関係を図-13 に示す。ここで、付着特性パラメータの同定は、それぞれの埋込み長における引抜き荷重-変位関係のうち、極端にばらつきの大きいデータ以外で平均的な挙動を示すようなものを対象としており、同定された付着特性パラメータは $\tau=3.3\text{MPa}$ 、 $G=27.1\text{MPa/mm}$ である。図-13 より、いずれの埋込み長においても、実験より得られた引抜き荷重-変位関係とよく対応していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、超高強度マトリクスと有機系繊維の組み合わせによる単繊維引抜き付着試験を実施し、繊維-マトリクス間の付着特性について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高強度マトリクスと PE 繊維の組み合わせは、他のマトリクス（高水セメント比）との組み合わせに比べ、より高い付着特性が得られることを定量的に示した。超高強度マトリクスにおいても、PE 繊維に比べて PVA 繊維の方が付着が良好であることが明らかとなった。
- (2) 超高強度マトリクスと PE 繊維の組み合わせに対して蒸気養生を実施した場合、気中養生を実施したものと同程度の繊維-マトリクス間の付着特性となる

ことを定量的に示した。

- (3) 本研究では、付着応力-すべり関係を求めるにあたり、逆解析を行った。本研究の範囲内（繊維埋込み長 0.5~1.0mm）では、PE 繊維に関して、埋込み長の違いによらず、同一形状の付着応力-すべり関係が得られることが分かった。このことは、付着応力-すべり関係が材料（繊維とマトリクスの組み合わせ）固有の特性であることを意味する。さらに数多くのデータ（特に長い埋込み長）を取得し、本研究の結論を確認することで、短繊維補強セメント系複合材料の材料設計を行うにあたり、様々な埋込み長での試験を実施する手間が省略できるものと考えられる。今後、短繊維補強セメント系複合材料の材料設計手法の改善に役立てる予定である。

謝辞

本研究で用いた PE 繊維は東洋紡(株)に、PVA 繊維は(株)クラレに、混和剤は竹本油脂(株)にそれぞれご提供いただきました。また、蒸気養生は(株)安部日鋼工業に実施いただきました。本研究の一部は、平成 19 年度科学研究費補助金 若手研究 (B)「力学・耐久性のトレードオフに着目した超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発 (研究代表者: 国枝稔)」により実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国枝稔, Ahmed Kamal, 中村光, Eugen Brühwiler : 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.315-320, 2007
- 2) 清田雅量, 三橋博三, 閑田徹志, 川又篤 : セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.187-192, 2001
- 3) Kanda, T. and Li, V.C. : Interface Property and Apparent Strength of High - Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.5-13, 1998. 2
- 4) Leung, C.K.Y. and Li, V.C. : New Strength - Based Model for the Debonding of Discontinuous Fibers in an Elastic Matrix, J. Mat. Sci., Vol.26, No.11, pp.5996-6010, 1991
- 5) 小倉大季, 国枝稔, 上田尚史, 中村光 : メゾスケール解析による短繊維補強セメント系複合材料の力学特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.309-314, 2007