

論文 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

清田 雅量*¹・三橋 博三*²・閑田 徹志*³・川又 篤*⁴

要旨：この研究は高性能繊維補強セメント系複合材料における界面摩擦付着強度について、数種類の合成繊維を用いて検討を行ったものである。繊維の付着強度は単繊維の直接引張試験により測定した。その結果、PVA は特に優れた摩擦付着強度を有することが確認できた。また、低い水結合材比のマトリクスに対して高い摩擦付着強度が必ず得られるとは、一概には言えないということが示された。

キーワード：合成繊維, 単繊維, 付着強度, 摩擦付着

1. はじめに

コンクリートに代表されるセメント系材料はその優れた圧縮強度により、今日の土木・建築構造物における構成材料として幅広く利用されている。

コンクリートは引張抵抗力が圧縮抵抗力に対し、極めて小さいことから、構造物への利用には補強が必要である。これに対し、これまでに様々な新材料が開発されてきた。そのなかで補強材として繊維を混入した繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下 FRCC) が、トンネル覆工を中心に主要な構造部材として徐々に利用され始めている。¹⁾

FRCC に使用される繊維には炭素繊維やガラス繊維が挙げられるが、中でも合成繊維はその優れた引張強度のために注目を集めている。また合成繊維は鋼繊維に対しコストが低いということもあり、現在、多くの研究者によって合成繊維を用いた FRCC の高性能化が試みられている。

しかしながら、いまだ合成繊維を用いた FRCC の設計に対する明確な方法論は確立されていない。また、FRCC の性能は、繊維やマト

リクスの性質によって大きく異なることがよく知られているが、既往の FRCC に関する研究においては、同一のマトリクスに対する種々の繊維の評価を行ったものはあまり見られていない。つまり種々の繊維を横並びに評価したものは少なく、データの蓄積が待たれているというのが現状である²⁾。

設計方法の確立のために解決すべき課題として、界面特性の解明が挙げられる。界面特性を明らかにするためにはマトリクスに埋め込まれた単繊維の直接引張試験を行う必要がある。通常、合成繊維の多くは、その高い付着結合力と小さい断面径の結果、引き抜けよりもむしろ破断する傾向があるという問題を、本研究では埋め込み長さを小さくすることで解決している³⁾。

本研究では、数種類の繊維とマトリクスの組み合わせによる単繊維の直接引張試験を実施し、繊維-マトリクス間の付着特性を明らかにすると共に摩擦付着強度について定量的に検討した。

2. 繊維付着モデル^{1), 3), 4)}

繊維-マトリクス界面特性の解明には、単繊維をマトリクスから引き抜く実験から得られる荷重-変位関係が必要である。既往の研究から

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学教授 工学研究科都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*3 鹿島技術研究所建築技術研究部主任研究員 Ph.D. (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 工修 (正会員)

得られる典型的な荷重－変位曲線の概要を図-1に示した。この曲線は繊維の破断がないとの仮定の上で、摩擦付着強度よりも優れた化学付着強度を有する繊維、マトリクスの組み合わせに対して考案されたモデルによるものである。

図-1の曲線はその付着状態によって、付着剥離過程と繊維引き抜き過程の二つの領域に分けることができる。付着剥離過程においては化学付着が部分的に剥離して摩擦による抵抗に置き換わり、やがて埋め込み繊維の全長が剥離し、続いて繊維引き抜き過程へと移行する。初期ピーク荷重である P_a は繊維の全長が剥離する直前の状態を意味し、その直後の P_b への急激な荷重の減少は、繊維全長が剥離し、摩擦付着へと置き換わったことを示している。

荷重－変位曲線の上昇部分は付着剥離の状態が支配的に関与する。この部分の解明のために多くの剥離モデルが提案された。ここでは Li と Leung によって提案されたモデル⁴⁾を採用する。このモデルによって想定される、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を図-2に示す。図-2で、せん断力が剥離領域先端において限界値 τ_s 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 τ_i に置き換わる。すなわち、剥離過程における付着性能は摩擦付着力 τ_i と化学付着力 τ_c によって説明される。

ここで τ_i は単繊維引き抜き付着試験から測定される P_b の値から次のように決定することができる。

$$\tau_i = \frac{P_b}{\pi d_f L_f} \quad (1)$$

ここで d_f は繊維径であり、 L_f は繊維の埋め込み長さを示している。

図-1に示したモデルは、摩擦付着強度が常に一定という仮定から下降領域が直線的になっているが、実際は引き抜き過程では摩擦付着強度は変化し、これとは違った挙動を示すことを後述の実験結果において確認することができる。

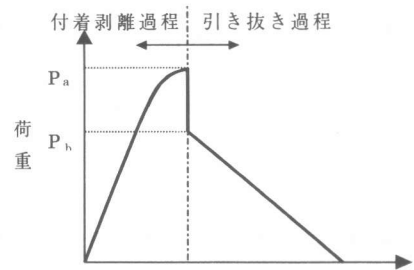


図1 引き抜き荷重－変位曲線の概要⁴⁾

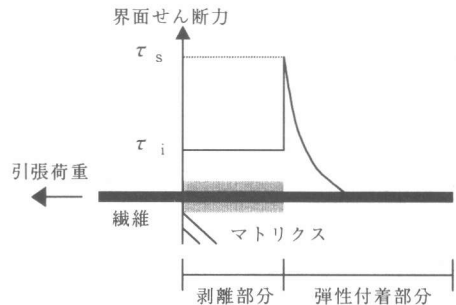


図2 埋め込み繊維の付着モデル

この研究では初期ピークの段階で付着剥離は完全に終了し、その後の挙動は繊維－マトリクスの相互作用による摩擦付着強度の変化によるものであると考える。しかしながら、FRCC 特有のマルチプルクラックが起こる時に問題となる変位は、初期ピーク前後であるということから、図-1に示されたとおりの初期ピーク直後の P_b を元に摩擦付着強度を算出した。

3. 単繊維引き抜き付着試験

3.1 実験概要

付着試験は、FRCC 中の繊維の荷重及び境界条件を模擬して行われる。マトリクスに埋め込まれた繊維が引張力を受けると繊維は付着を介してマトリクスに力を伝え、抵抗する。繊維－マトリクス間の付着は、化学付着と摩擦付着に大別されるといわれている。そこで本付着試験は各繊維における、これらの付着特性を調査することを目的としている。

3.2 使用材料

以下に本実験に使用した材料を示す。

- ・普通ポルトランドセメント (C) (比重: 3.16)
- ・シリカフューム (SF) (比重: 2.20)

- ・高性能 AE 減水剤 (SP) (比重：約 1.1, 主成分：芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物)
- ・増粘剤 (比重：1.2～1.3, 主成分：水溶性セルロースエーテル)

＜繊維＞

使用した繊維はアラミド (A), PVA-タイプ R (PVA-R), PVA-タイプ U (PVA-U), ポリエチレン (P) の 4 種である。それぞれの物性値を表-1 に示した。

3.3 調合

調合を表-2 に示した。マトリクスは 3 種類用意した。各々の水結合材比は 27, 42, 62% であり, 27% のものにはシリカフュームを加えた。シリカフュームを加えると, マトリクスが緻密になり, 繊維との界面摩擦が大きくなると言われている⁵⁾。また増粘剤の添加は主に水結合材比の高いマトリクスに対して繊維の分散性を向上させるためである。

3.4 試験体作製方法

練り混ぜにはオムニミキサー (容量：10 l) を用いた。セメント及び混和剤を入れ 1 分間空練りし, その後, 水及び減水剤を投入し 3 分間練り混ぜた。

練り混ぜ後, 単繊維をあらかじめ配置した内径 70×20×5 mm 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-3 に示すような試験体を作製した。打

表-1 使用した繊維の物性

繊維種類	比重	直径 (μm)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
A	1.39	12	3500	74
PVA-R	1.30	37	1620	42
PVA-U	1.30	38.2	1820	51.3
P	0.97	12	2770	88

表-2 調合(重量比)

W/B	C	SF	SP ^{※1}	増粘剤 ^{※2}
27%	0.8	0.2	0.020	—
42%	1	—	—	0.0015
62%	1	—	—	0.0060

※1：SP/(C+SF) ※2：増粘剤/(W+SP)

ち込み後, 養生室内 (温度 20℃, 相対湿度 94% 以上) にて 1 日湿空養生を行い, その後脱型して標準養生を行った。なお, 標準養生期間中に試験体を図-4 のような形になるようにカッティングした。載荷は, カッティングを施した試験体を用い, 打ち込み後 4 週間にて実施した。

3.5 試験方法

付着試験は, インストロン製万能試験機(最大能力 3tf)を用い, 0.2mm/min の載荷速度の変位制御試験を行い, 荷重-変位関係を測定した。載荷は図-5 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, 繊維の引き抜き荷重を荷重計にて測定した。変位は載荷板間距離を変位計によって計測した。また試験体と繊維固定用板の距離は

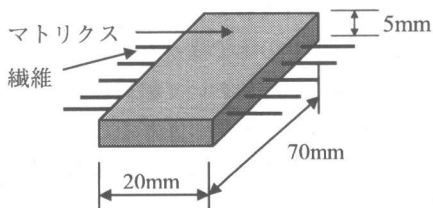


図-3 カッティング施工前の試験体

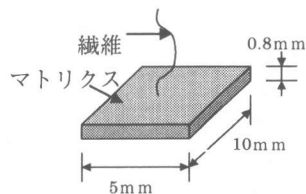


図-4 カッティング施工後の試験体

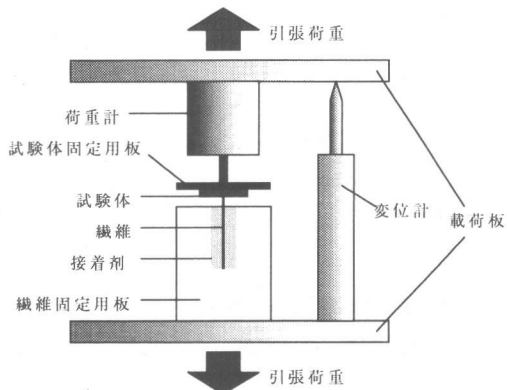


図-5 試験方法

1mm 前後となるように試験体を配置した。

4. 実験結果と界面特性に関する検討

4.1 実験結果と考察

付着試験によって得られた荷重-変位曲線を図-7に示す。図-7では、試験体の数が多く線の識別が困難となるのを避けるために、濃淡をつけて表した。図-7において、埋め込み長さの0.8mmを超える結果が出ているのは、試験体の厚さにばらつきがある事と、繊維の弾性変位が含まれていることに起因するものと考えられる。全ての場合において、図-1に示した曲線と同じように、荷重は初めほぼ直線的に増加し、初期ピークを経た後急激に低下する。しかしながら、更に変位が増したとき、図-1の曲線とは対照的に、荷重が再び増加するものがあることが分かる。これは、図-1でのモデルが、摩擦付着強度は一定という仮定の上で描かれているのに対し、実際は引き抜き過程において繊維表面がマトリクスとの摩擦によって荒らされることで界面摩擦強度が見かけ上増加するために荷重の再上昇

が起こるためと考えられる。図-6に引き抜けた繊維の先端部を光学顕微鏡にて観察した写真を示した。この図を見て分かるように、埋め込まれた部分には繊維方向に傷がつき、繊維が細くなっていることが観察できる。この荷重の増加は第2ピークを形成し、初期ピークを上回る抵抗力を示すものも確認することができる。

図-1では、荷重-変位曲線は初期ピーク荷重 P_a とその直後の荷重 P_b という二つのパラメータによって支配されている。それらを特にPVA-U とポリエチレン (P) のシリーズについてまとめたものを図-8に示す。ここで、図-8の横軸は埋め込み長さを表している。この埋め込み長さは試験体の厚さを測定したもので、プロットは試験体の厚さのばらつきも示している。図-

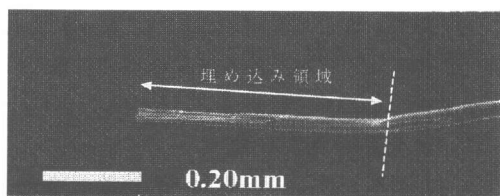


図-6 引き抜かれた繊維先端の状況

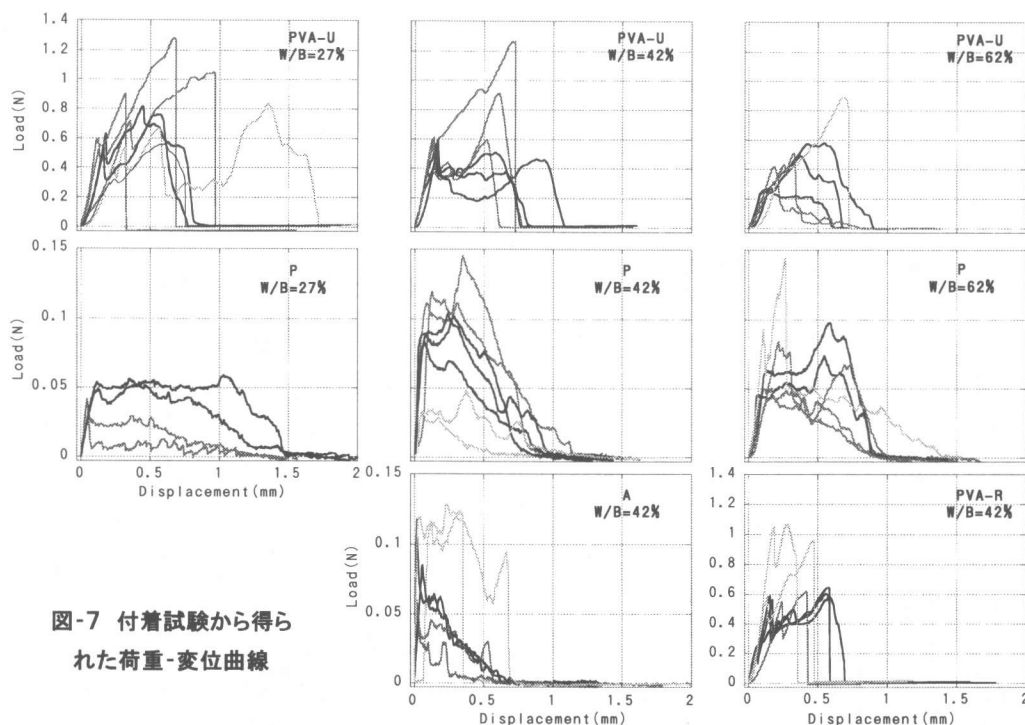


図-7 付着試験から得られた荷重-変位曲線

8によると基本的には埋め込み長さが長いほど P_a , P_b は高い値を示すことが見て取れる。特に P_b はその傾向が顕著である。図-8に示された直線は、各マトリクスに対する P_a , P_b の分布を直線によって近似したものである。まず PVA-U では、 P_a , P_b とともに $W/B=27$ 及び 42% のものが $W/B=62\%$ のものに比べて高い値を示している。そして P_b に関しては、マトリクスの W/B が低いほど、埋め込み長さの増加に伴う荷重の増加が急激であり、また $W/B=27$ 及び 42% のマトリクスに対する P_a/P_b は $W/B=62\%$ のマトリクスに対するそれより大きい値をとることが分かった。

一方、ポリエチレン (P) では PVA-U ほど明確な傾向は確認できない。これは、ポリエチレンが PVA-U と比較しても繊維径が約3分の1程度と極めて細く、また計測される荷重も極めて小さいため、結果がばらつきを伴い易い試験であり、ピーク荷重が大きくばらついたためと考えられる。しかしながら、後に述べる摩擦付着強度の値は、多数の試験から得られた値の平均値を用いているので、他と比較するのに十分な信頼性を持つと考えている。

実験で得られた P_b の値に式 (1) を用いて算定した界面摩擦付着強度の結果を図-9に示した。図-9は、付着試験によって得られた結果から試験体毎に算出した τ_i をシリーズごとに平均化してプロットしたものである。また、比較のため、繊維径 $14\mu\text{m}$ の PVA における同様の試験の結果を参考文献³⁾ から引用した。

図-9によると、PVA は特に高い摩擦付着強度を有することが見て取れる。また、その中でも繊維径の小さいものがより高い摩擦付着強度を有していることが分かる。

水結合材比について比べると、高い水結合材比のマトリクスに対しては、繊維種による影響や繊維径による影響があまり顕著に出ていないのに対し、水結合材比が低くなるのに伴い、違いが顕著になる様子が見て取れる。

また両方の繊維において、マトリクスの水結

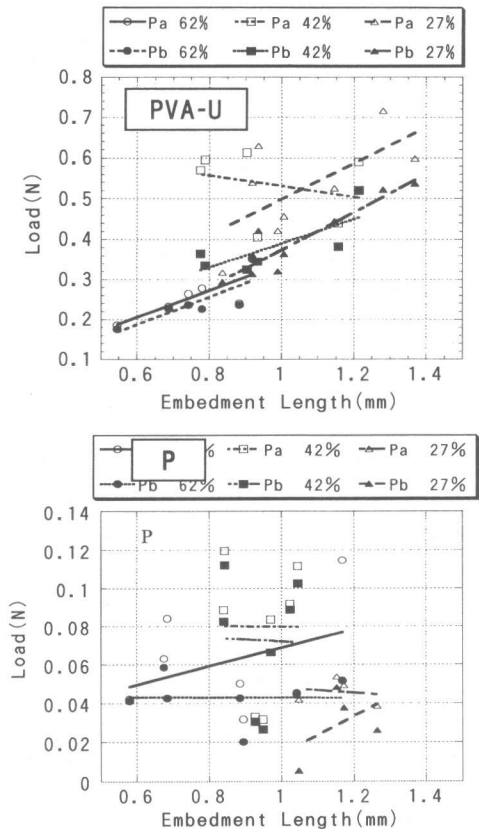


図-8 ピーク荷重と埋め込み長さの関係

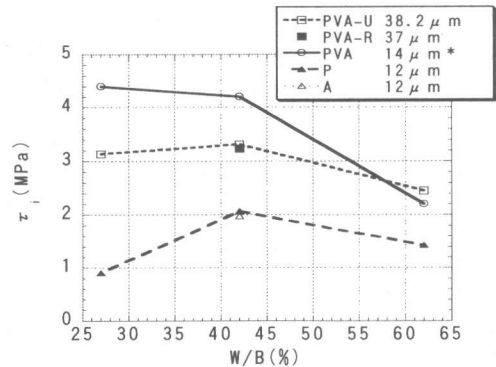


図-9 摩擦付着強度

(*は参考文献3)から引用)

合材比は 42% において最も高い値を示している。このことは、摩擦付着強度にはその最適な値を取るマトリクスの調合が存在することを示し、マトリクスが緻密であれば高い摩擦付着強度が得られるとは一概にはいえないということを表している。

次に PVA-U のシリーズについて図-7と図-9を比較すると、 $W/B=27$ 及び 42% では図-9に示される初期ピーク直後での摩擦付着強度にはそれほど大きな違いは見られないが、図-7における初期ピーク以降の挙動を見ると、 $W/B=27\%$ のマトリクスの方が、その後より高い2次ピークを有することが分かる。図-10 に実験を行った3種の W/B について、PVA-U の引き抜かれた繊維の先端を光学顕微鏡によって拡大した写真を示す。これらの写真を比較すると、 W/B の高いマトリクスに埋め込まれていた繊維は損傷が少なく、 W/B が低くなるのに伴い、損傷が顕著になる様子が見て取れる。繊維の損傷の程度を定量的に示すことは困難であるが、この観察により、PVA-U において W/B のより低いマトリクス、即ちより緻密なマトリクスほど繊維表面に与える損傷が顕著であり、見かけ上の摩擦付着強度の増加が大きいものと考えられる。

5 まとめ

この研究は、数種の合成繊維-マトリクスの組み合わせに対する付着特性を明らかにし、摩擦付着強度の定量化を目的として行われたものである。その結果、PVA は他の繊維に比べて優れた摩擦付着強度を有することが確認できた。また、マトリクスの水結合材比という観点では、最適なものが存在し、一概に低いものが良いとはいえないということが分かった。

FRCC 設計技術の確立という最終目標のためには、繊維-マトリクス界面特性の解明は必要不可欠な課題である。この研究で行われた付着特性の評価は、界面特性の解明に至る過程の一つであり、今後更なる研究が必要であると考えられる。即ちそれは、先に述べた最適なマトリクスの調合の検討であり、スナッピングによる摩擦付着強度への影響を始めとする、繊維-マトリクスの相互作用による付着強度への影響の解明や、繊維の破断に対する検討などである。そして、これらの研究成果は、複合体内での繊維の挙動を制御することも可能にするものと考え

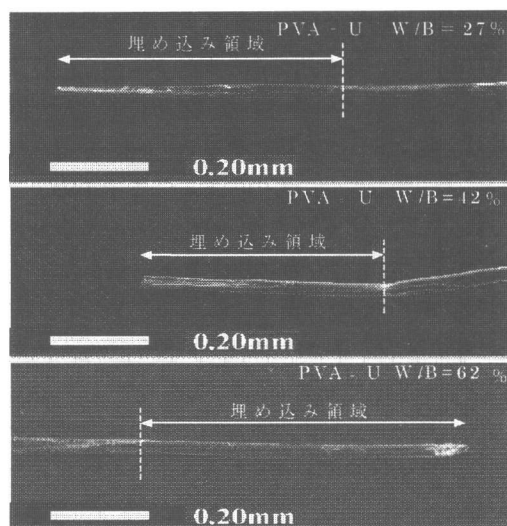


図 10 埋め込み繊維先端の状況

えている。

謝辞

本研究は日米共同研究-スマートストラクチャー技術調整委員会 エフェクター部会 セメント系複合材料WG (主査：松崎育弘・東京理科大学教授)の活動の一部として行ったものである。また、本研究費の一部は、平成12年度科学研究費補助金によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 閑田 徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状，コンクリート工学，Vol.38，No.6，pp.9-16，2000. 6
- 2) 中村 裕：セメント系複合材料の高性能化と材料設計方法に関する基礎的研究，東北大学学位論文，1998. 1
- 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) Chan, Y.W. and Li, V.C. : Effects of Transition Zone Densification on Fiber/Cement Paste Bond Strength Improvement, J. Advanced Cement Based Mat., Vol.5, No.1, pp.8-17, 1997