

論文 繊維の素材および形状が高流動繊維補強コンクリートの物性に及ぼす影響

堀田 新之介*1・牛田 耕悟*2・上原 匠*3・梅原 秀哲*4

要旨：素材および形状の異なる短繊維を対象に引抜き試験を行い、引抜き特性に及ぼす影響について検討を行うとともに、繊維混入率 1%の高流動繊維補強コンクリートに用いた場合のフレッシュおよび硬化後の物性に及ぼす影響について実験を基に検討した。実験から、繊維の付着特性の向上を目的に施される機械的加工は高流動繊維補強コンクリートの空気量に影響を及ぼすことが明らかとなった。繊維形状の違いは、繊維の引抜き特性に大きく影響し、繊維の破断の有無を支配することを提示するとともに、個々の繊維の特性を明らかにした。

キーワード：繊維補強, 高流動コンクリート, 繊維形状, 引抜き試験, 曲げ試験

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、繊維の持つ引張抵抗抗力がコンクリート全体に比較的均一に与えられ、引張や曲げ、せん断強度が上昇し、ひび割れが生じにくい性能を有する。また、ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により、大きな靱性を持つ構造材料である。しかし、普通コンクリートと比べ施工性が劣るため、その高機能性に比べ一般には利用しにくい構造材料となっている。その改善策として、製造と施工の合理化、繊維の均一な分布を目的とする繊維補強コンクリートの高流動化が試みられている¹⁾。繊維補強コンクリートの性能はマトリクスと繊維の特性に大きく影響される。したがって、高流動化を目的に配合設計を行う上では、繊維の素材および形状がフレッシュコンクリートの物性に及ぼす影響を把握することも重要となる。

ところで、繊維補強コンクリートに用いる短繊維には、素材および形状の異なる多様な種類が存在することから、用途に応じた繊維の選定が重要となる。

そこで本研究では、繊維の引抜き試験に基づいて、繊維の素材および形状の違いが、繊維の

引抜き特性に及ぼす影響について検討を行うとともに、高流動繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化後の物性に及ぼす影響について実験を基に検討した。

2. 使用材料

表-1に使用材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は東海地方で一般的に使用されている材料である。

表-2に繊維の諸特性を示す。繊維は、形状等の異なる5種類の鋼繊維、およびエンボス加工

表-1 使用材料

材料	記号	種類、主成分等
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度: 3.13g/cm ³ 、比表面積4520cm ² /g
細骨材	S	山砂 密度: 2.56g/cm ³ 、粗粒率: 2.83
粗骨材	G	碎石(Gmax=15mm) 密度: 2.69g/cm ³ 、粗粒率: 6.45
短繊維	SF	鋼繊維 密度: 7.85g/cm ³
	PP	ポリプロピレン繊維 密度: 0.91g/cm ³
混和剤	SP	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系
	AE	AE助剤 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

- *1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 工修 (正会員)
 *3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博 (正会員)
 *4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

の施されたポリプロピレン繊維の合計 6 種である。長さは、全ての繊維において 30mm に統一し、換算直径は SF1～SF4 が 0.6mm、SF5 が 0.5mm、PP が 0.81mm である。また、SF1 は水溶性接着剤により繊維同志が結束されている。

3. 繊維の引抜き試験

3.1 試験方法

繊維の引抜き試験は、日本コンクリート工学会の繊維の付着試験方法 (JCI-SF8) に準拠して行った。図-1 に試験方法を示す。供試体は、ドックボーン型の鋳型に、繊維を二分する位置にプラスチックセパレーターを組み込んだ後、その中にモルタルを慎重に打ち込み、各繊維と

も 3 本作製した。モルタルの配合は、水セメント比を 35%、セメント細骨材比を 63%、SP 添加率 $C \times (\%)$ を 1.4% に設定した。載荷速度は 0.35mm/分 で、すべり量が 15mm に達するまで荷重-すべり曲線を計測した。

3.2 試験結果

(1) 荷重-すべり曲線

図-2 に引抜き荷重-すべり曲線を示す。SF2 および SF4 は、各一体の供試体が欠測となった。全ての繊維において、荷重は初めほぼ直線的に増加しているが、その後は、繊維の引抜けと破断に分類される。引抜けは SF1, SF2 および PP であり、破断は SF3, SF4 および SF5 である。引抜け後の繊維の目視観察によると、

表-2 繊維の諸特性

種類	記号	形状	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
鋼繊維 (両端フック型)	SF1		1100	206×10^3
鋼繊維 (両端フック型)	SF2		1100	
鋼繊維 (インデント型)	SF3		1100	
鋼繊維 (ドックボーン型)	SF4		780	
鋼繊維 (ストレート型)	SF5		780	
ポリプロピレン (エンボス加工)	PP	扁平断面(表面親水性加工)	450	10×10^3

※繊維長: 30mm 繊維径: SF1～SF4 0.6mm SF5 0.5mm
PP 7100d(真円とした場合の径0.81mm)

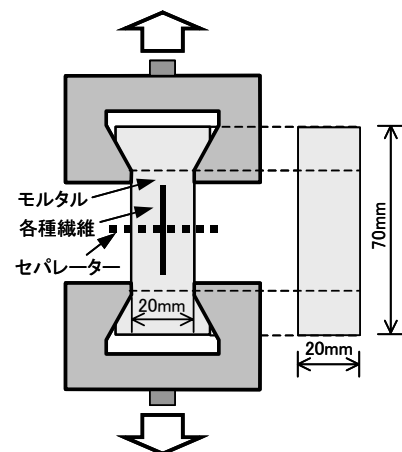


図-1 引抜き試験

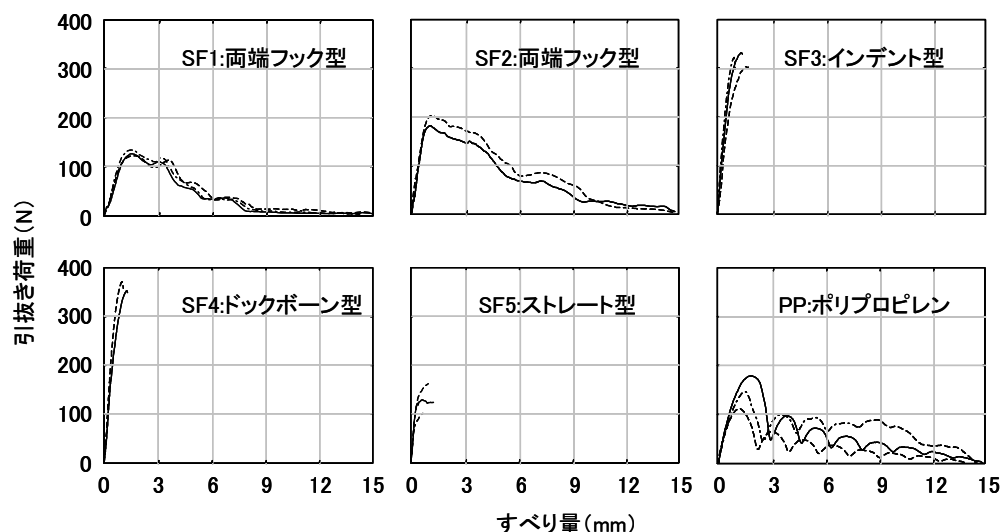


図-2 引抜き荷重-すべり曲線

SF1, SF2 は、完全な直線ではないが両端のフック加工部がほぼ伸展していた。また、PP はエンボス加工された表面の凹凸が滑らかになっていた。したがって、SF1, SF2 の場合は繊維の伸展のために、また PP の場合は繊維の凹凸が削られるために、繊維の引張強度よりも引抜き抵抗力が小さくなり、最終的には繊維が引抜かれたと考えられる。一方、SF3, SF4 および SF5 は、繊維の付着能力が高く、ひび割れ界面に応力が集中し、破断したと考えられる。したがって、ひび割れ後のコンクリートの曲げ耐力保持能力は繊維の破断に伴い低下することが考えられる。ひび割れ界面における繊維の架橋効果は、繊維が破断せず、塑性変形に伴い付着が緩やかに低下することが望ましいと言えよう。

(2) 靱性評価

靱性評価には、変形性能によるエネルギー吸収性能をより良く評価することを目的に、和地らにより示された $A_{2.5\text{mm}}/P_{\text{max}}$ を用いた²⁾。 $A_{2.5\text{mm}}/P_{\text{max}}$ は、すべり量 2.5mm までの荷重-すべり曲線下の面積をそれぞれの最大荷重で除した値であり、その値が大きいほどエネルギー吸収性能が大きく評価される。図-3 に各繊維に対する $A_{2.5\text{mm}}/P_{\text{max}}$ の平均値を示す。 $A_{2.5\text{mm}}/P_{\text{max}}$ は、繊維の破壊状況が引抜き型と破断型で明確に異なり、引抜き型は破断型の 2 倍程大きな値を示した。この結果から、破断型の繊維は引抜き型と比べ、コンクリートの靱性付与能力は小さいと言える。

4. 高流動繊維補強コンクリート

4.1 配合設計

コンクリートに繊維を混入することにより、流動性に寄与すべきモルタルが繊維に付着するために繊維混入後には、所定のコンシステンシーが確保できない。そのため、繊維補強コンクリートの高流動化においては、硬化後の強度特性が同程度で、かつ流動性を保持すべきモルタル量が十分であるように、

各単位量を算定する必要がある。そこで、高流動コンクリートを基本配合に、粗骨材の一部を鋼繊維と等価表面積置換し、細骨材および混和剤量を調整することにより配合設計を行った。基本となる高流動コンクリートの配合は目標スランプフローを 65.0 cm、目標空気量を 4.5% に設定し、試し練りを基に決定した。表-3 にコンクリートの配合を示す。高流動繊維補強コンクリートの繊維混入率は 1% に設定した。形状寸法から算定されるコンクリート 1m³ に投入される繊維の本数は、概算で SF1~SF4 が約 100 万本、SF5 が約 170 万本、PP が約 30 万本となる。なお、繊維形状に着目することから、配合は 1 水準とし、混和剤による調整は行わなかった。

4.2 試験項目

練混ぜは容量 50ℓ のパン型強制練りミキサを使用し、モルタル、繊維、粗骨材の順に練混ぜた。全材料投入後の練り混ぜ時間は 1 分間である。供試体は各繊維ごとに円柱供試体 (φ10×20cm) を 3 本、曲げ供試体 (10×10×40cm) を 4 本製作し、材齢 14 日までは標準水中養生を行った。なお、コンクリートの締め固めは行わず、型枠の側面を軽く木づちでたたくのみとした。

フレッシュコンクリートの試験項目は、スラ

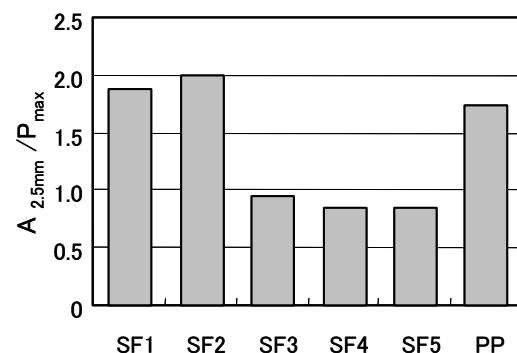


図-3 $A_{2.5\text{mm}}/P_{\text{max}}$ の比較

表-3 配合

	W/C (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)				SP C× (%)	AE C× (%)
			繊維	W	C	S		
BASE	35	0.310	—	175	500	794	1.4	0.008
SF		0.199	78.5			1053	2.1	0.006
PP			9.1					0.004

ンブフロー試験および空気量試験である。硬化コンクリートの試験項目は、圧縮強度試験、弾性係数試験および曲げ試験である。曲げ試験は日本コンクリート工学協会の繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法（JCI-SF4）に準拠して行った。曲げタフネスの指標として、スパン300mmの1/150のたわみの2mmまでの曲げタフネスを求め、それから計算される換算曲げ強度（N/mm²）を求めた。

4.3 フレッシュコンクリート

表－4にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。スランブフロー試験結果の目視よりSF1, SF2, SF4 および PP は、フレッシュコンクリートの状態は「良好」と判断した。一方、SF3 およびSF5はスランブ中央付近に一部粗骨材の留まりが見られ、その程度によりSF3が「やや不良」、SF5が「不良」と判断した。写真－1にSF5のスランブフロー試験結果を示す。SF5の流動性が低下したのは、繊維本数の多いことが原因と考えられる。繊維本数が少ないPPは、良好な状態を示したが、スランブフローは小さな値を示した。これは空気量が小さいことに加え、スランブフローが自重によるコンクリートの変形量を示すことから、PPの密度が小さいことも原因と考えられる。

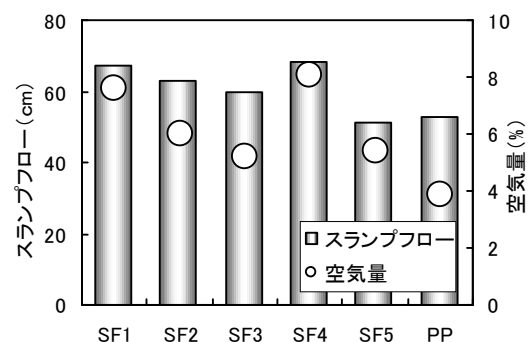
図－4に各繊維のスランブフローと空気量の関係を示す。繊維の加工形状に着目すると、スランブフローは空気量の増加に従い増加する傾向を示し、両端に加工がある繊維（SF1, SF2, SF4）を混入したコンクリートの方が、スランブフローおよび空気量は大きくなった。両端に加工がある繊維は、練混ぜ時において、空気を巻き込みやすい性状を有しているため、繊維表面に付着するモルタル量が少なくなる。その結果、相対的に流動性に寄与すべきモルタル量が多くなり、スランブフローが大きくなると考えられる。SF1の空気量が増大した原因については、繊維同志を結束する水溶性接着剤による影

表－4 フレッシュコンクリートの実験結果

	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	500mm フロー (s)	フロー 停止 (s)	空気量 (%)	単位容 積質量 (t/m ³)	状態
BASE	27	67.5×67.0	9	63	5.5	2.21	良好
SF1	26.5	68.0×66.0	9	75	7.6	2.29	良好
SF2	26.0	65.0×61.0	13	103	6.0	2.32	良好
SF3	24.5	60.0×59.0	16	110	5.2	2.35	やや不良
SF4	27.0	69.0×68.0	7	62	8.1	2.28	良好
SF5	23.0	52.0×50.0	82	98	5.4	2.36	不良
PP	25.5	53.0×53.0	28	54	3.9	2.32	良好



写真－1 スランブフロー試験結果（SF5）



図－4 スランブフローと空気量の関係

響も考えられる。しかし、今回の結果からは、水溶性接着剤を使用していないSF2, SF4の空気量も増大したことから、繊維の両端に施される加工は高流動繊維補強コンクリートの空気量に影響を及ぼすと言えよう。なお、繊維の混入により増加する空気はエントラップドエアであると考えられる。

4.4 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度および弾性係数試験

図－5に圧縮強度および弾性係数の平均値を示す。今回の結果では、圧縮強度および弾性係数は、フレッシュコンクリートの空気量にバラ

ツキが生じているため、その結果を反映するものとなった。しかし、SF5 は空気量のバラツキを考慮しても、最も大きな圧縮強度を示した。この原因として、単位容積当たりの繊維本数が多いため、繊維の分散がより密になったことが考えられる。また、弾性係数は SF5 と PP を除き、圧縮強度に比例する関係を示した。SF5 と PP が、他の繊維に比べ弾性係数が小さく現れた原因として、PP は繊維自体の弾性係数が小さいことが考えられるが、SF5 については実験結果からは解明できなかった。

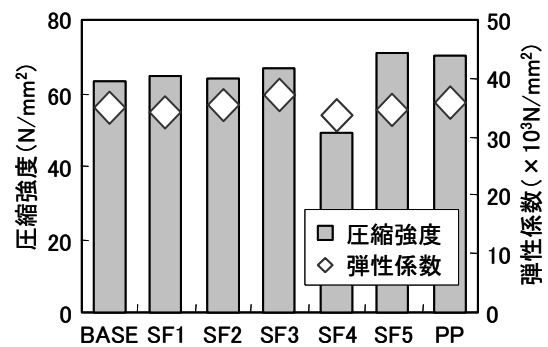
(2) 曲げ試験

表－５に曲げ強度および換算曲げ強度の平均値を、図－６に荷重－たわみ曲線を示す。SF2 および SF5 は、各一体の供試体が欠測となった。各繊維において、荷重－たわみ曲線にバラツキは見られるが、素材、形状に起因する有意な関係は確認されなかった。また、曲げ試験後の破断面の目視観察によると、SF1、SF2 および PP は一部の繊維に破断が見られたものの、ほとんどの繊維が引抜かれており、SF3、SF4 および SF5 ではほとんどの繊維が破断しており、破壊状況は、繊維の引抜き試験における結果と同様の傾向が見られた。

ひび割れ発生による荷重低下までの挙動に着目すると、SF1、SF2 および SF3 は荷重低下が

小さく、SF1 の場合、荷重低下が確認されなかった供試体もある。PP は SF よりも弾性係数が小さいために、ひび割れ発生直後の荷重低下が著しい。

鋼繊維のひび割れ発生後の荷重増加に着目すると、SF1 および SF2 の補強効果が最も大きく



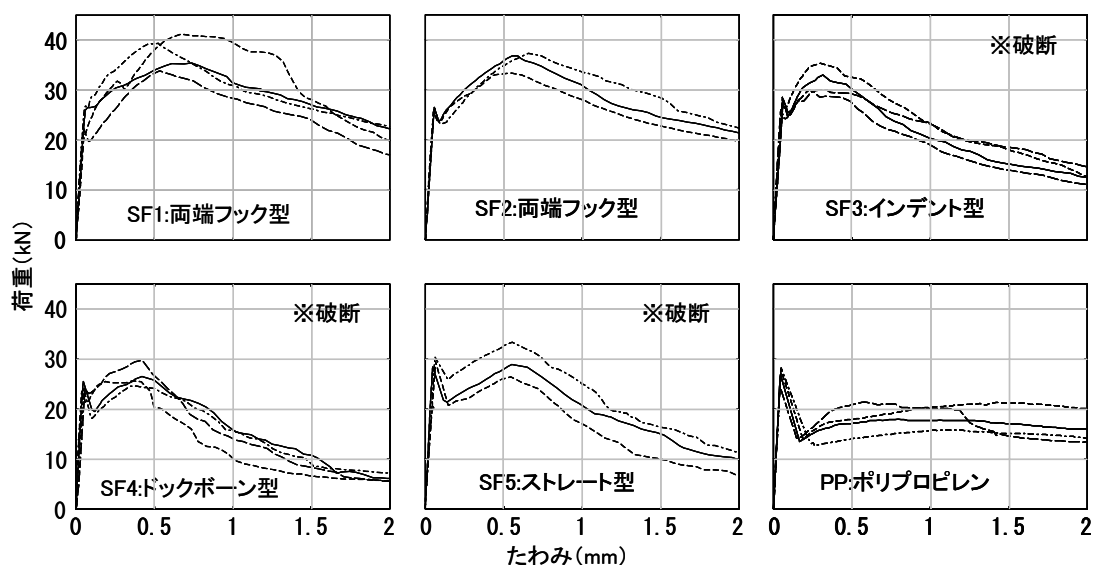
図－５ 圧縮強度および弾性係数

表－５ 曲げ強度および換算曲げ強度

	最大荷重時の たわみ ^{※1} (mm)	曲げ強度 ^{※2} (N/mm ²)	換算曲げ強度 (N/mm ²)
SF1	0.62	11.2	9.1
SF2	0.60	10.6	8.5
SF3	0.30	9.6	6.7
SF4	0.40	8.0	5.4
SF5	0.55	8.8	6.3
PP	0.04	8.0	5.5

※1: SFはひび割れ発生後を対象とした

※2: BASEの曲げ強度は6.5N/mm²



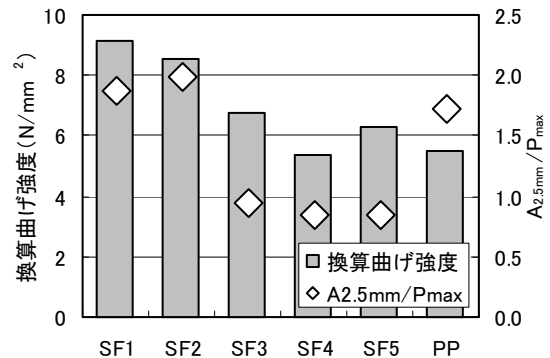
図－６ 荷重－たわみ曲線

なった。また、最大荷重までのたわみ量は、SF1 および SF2 が 0.6mm、SF3 が 0.3mm、SF4 が 0.4mm 程度となり、繊維形状の違いにより、異なることが確認された。SF5 の最大荷重までのたわみ量は 0.55mm 程度であり、繊維本数が最大荷重までの補強効果に大きく影響したと考えられる。PP は、繊維本数が最も少ないことに加え、素材の影響もあり、ひび割れ発生後の荷重増加が低く現れたと考えられる。

最大荷重以後の挙動に着目すると、SF1 および SF2 は、良好な耐力保持能力を示している。しかし、破断した SF3、SF4 および SF5 は最大荷重後の荷重低下が大きく現れた。この原因には、繊維の破断により繊維の受け持つ全耐力が小さくなり、ひび割れ界面の架橋効果が低下したことが考えられる。SF5 は繊維本数が最も多いが、破断することにより、耐力保持能力が低下したと考えられる。したがって、繊維形状は繊維の引抜き特性に大きく影響し、破断の有無を支配し、荷重－たわみ曲線、すなわち、ひび割れ発生後の耐力保持性能に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。なお、PP はひび割れ発生による荷重低下後は、繊維の架橋により荷重は増加し、非常になだらかな曲線を示し、大変形領域における耐力保持能力を有すると言えよう。鋼繊維とポリプロピレン繊維の素材の観点から、荷重－たわみ曲線を考察すると、最大荷重およびひび割れ後の荷重増加は、素材の弾性係数が大きく影響し、ひび割れ後の耐力保持能力は素材の靱性、すなわち、破断の有無が大きく影響していることが実験から推察される。

SF3 の場合もインデント加工の付着性能付与の効果を低減し、破断せずに引抜けるように加工することで、SF1、SF2 と同程度の耐力保持能力が期待できると思われる。

図－7 に換算曲げ強度と $A_{2.5mm}/P_{max}$ の関係を示す。PP の場合を除き、換算曲げ強度は $A_{2.5mm}/P_{max}$ と相関関係が認められる。すなわち、繊維の引抜き試験における状況が引抜け型の SF1、SF2 は換算曲げ強度が大きく、破断型の繊



図－7 換算曲げ強度と $A_{2.5mm}/P_{max}$ の関係

維は小さく現れた。しかし、換算曲げ強度は、PP の結果から、素材の影響を適切に表しているとはいえないと判断した。以上の結果より、繊維の素材および形状は、繊維の破断に関係し、最大荷重以後の耐力の保持能力に大きな影響を及ぼし、個々の特徴が実験より明らかとなった。

5. まとめ

本実験で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 繊維の両端に施される加工は高流動繊維補強コンクリートの空気量に影響を及ぼす。
- (2) フック型鋼繊維は繊維の伸展のために、またポリプロピレン繊維は表面の凹凸が削られるために、破壊時には繊維が引抜かれる。
- (3) 繊維の素材および形状は、繊維の破断に関係し、最大荷重以後の曲げ耐力の保持能力に大きな影響を及ぼすことを提示するとともに、個々の繊維の特性を実験より明らかにした。

参考文献

- 1) 上原 匠ほか：高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計に関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集第 5 部門，pp.991-992，2002.9
- 2) 和地 正浩ほか：ハイブリット型繊維補強セメント系複合材料におけるコード繊維の付着特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.229-232，2001.6