

# 論文 PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材料の基礎的特性

関田徹志\*1・斉藤忠\*2・坂田昇\*3・平石剛紀\*4

**要旨:** 変形追従性に優れ、大変形を受けた場合でもひび割れ幅を小さいレベルに抑制できる高靱性 FRC は、コンクリート構造物の補修用途に活用されることが期待されている。本研究では PVA 繊維を用いた高靱性 FRC の吹付け補修用途への適用を目指して、湿式吹付け施工により供試体を成形し材料力学試験を実施した。実験の結果、吹付け高靱性 FRC は良好な吹付け施工性を示し、極めて靱性に富む引張挙動（終局引張ひずみ 2%以上）を示した。

**キーワード:** 補修材料, 繊維補強, 短繊維, 靱性, 引張

## 1. はじめに

数パーセントの引張ひずみに耐えることができ、ひずみ硬化型引張挙動を示す短繊維補強セメント材料である Engineering Cementitious Composite<sup>1)</sup> (ECC と通称されるが<sup>2)</sup>, 以下高靱性 FRC と呼ぶ) が実現されている。ひずみ硬化型とは、引張載荷時に微細な複数ひび割れを生じることにより、ひずみ増加に対して応力が漸増する擬似延性的挙動とここでは定義し、従来型 FRC の単独ひび割れによる擬似脆性挙動とは大きく異なるものである<sup>2)</sup>。高靱性 FRC は、変形追従性に優れ、大変形時でもひび割れ幅を小さく抑制できる特性から、コンクリート構造物の補修用途への適用が期待される<sup>3)</sup>。

従来型 FRC の吹付け工法は、トンネル覆工を中心として広く適用されており、鋼繊維等を用いた研究報告も多い<sup>4,5)</sup>。これに対して、高靱性 FRC はこれまで流し込みによる研究例のみで、吹付け施工化の報告はこれまでにない。

本研究では、汎用繊維である PVA 繊維を用いた高靱性 FRC を対象として、湿式吹付け施工により供試体を成形し材料力学試験を実施する。これらの実験をもとに、高靱性 FRC の吹付け施

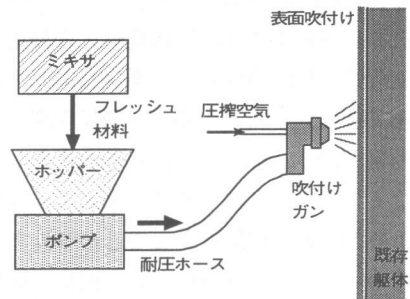


図-1 吹付けシステム概要

工化を実現し、硬化後には流し込みと同等の引張および曲げ力学的性能を実現することを目指す。

## 2. 実験計画

### 2.1 吹付けシステムおよび吹付け方法

本実験では、図-1に示すシステムを用いた吹付け施工を行う。ミキサは、容量 70 l のオムニおよび容量 100 l の強制 2 軸である。練り混ぜた材料はポンプで圧送され、吹付けガン先に送られる。材料はこのガンの内部に導入される圧搾空気により霧状にガン先から吐出される。ポンプは最大吐出量 6 m<sup>3</sup>/hr のスクイーズ式で、耐圧ホースはφ40 mm, 長さ 10 m の組合せとする。

\*1 鹿島 技術研究所 建築技術研究部 生産・材料グループ 主任研究員 Ph.D. (正会員)

\*2 (株)クラレ 東京産資開発部 工修 (正会員)

\*3 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ グループ長 工博 (正会員)

\*4 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ 研究員 (正会員)

吹付け高靱性 FRC は急結材を含んでいないため、一度に大きな吹付け厚の施工はできない。しかし、10mm程度の吹付け層を10分程度の間隔を置いて重ねていくことが可能で、80mm程度の厚さまでは垂直面およびスラブ下面への吹付けが容易に可能となることを確認している。補修および補強用途ではこの程度の吹付け厚さで多くの場合には対応可能と想定される。

## 2. 2 実験要因および吹付け材料

本実験では、表-1に示すように練上がり空気量、セメント種類、およびミキサの種類を実験要因とし、材料①～④の合計4材料を練り混ぜて吹付けにより供試体を成形し材料力学試験を実施する。実験要因の選定理由を以下に述べる。

本研究の高靱性 FRC には、流動性と分離抵抗性の両立を図る目的でウレタン系保湿剤（主成分 R-NHCOO-R'）を添加する。この保湿剤に空気連行効果があり、練混ぜにより20%以上の空気量となること、およびアルコール系空気量調整剤により空気量を抑制できることが予備実験により分かった。この練上がり時空気量を実験要因とし、空気量調整剤を添加しない調合（空気量 25%）、および添加して空気量を抑制する調合（空気量 15%）について検討する。

セメント種類は、普通ポルトランドセメントに加え、夏期の高温時における可使時間延長が期待される低熱セメントを対象とする。また、ミキサ種類は、これまで高靱性 FRC 用に使用されてきたオムニミキサを中心として、実際の現場における練り混ぜが可能となるコンクリート用強制2軸ミキサを実験に加える。

各吹付け材料の調合は、水結合材比 W/B、単位水量 W および繊維体積率  $V_f$  を共通とし、その概略について表-2に表す（空気量は外割）。結合材は、セメント重量に対してフライアッシュ (JIS A 6201 に規定する II 種) を内割で30%添加した。単位水量の一部に置換して、対結合材重量比で高性能 AE 減水剤を 1.1%、保湿剤を 0.8%添加する。また、材料②以外には空気量調整剤を結合材重量比 0.1%加える。繊維は、繊維

表-1 実験要因

実験要因	練上がり時空気量(%)		
	水準	15	25
セメント	普通	①、④	②
種類	低熱	③	-

①～③：オムニミキサを使用

④：強制2軸ミキサを使用

表-2 調合表

材料	水結合材比 W/B (%)	*砂結合材比 S/B	*単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	*繊維体積率 $V_f$ (%)
①②④	0.32	0.41	382	2.1
③	0.32	0.42	382	2.1

\*空気量は外割計算

径 0.04mm、長さ 12mm、繊維引張強度 1600 MPa の PVA 繊維を使用する。

## 2. 3 試験方法

本実験では、空気量等のフレッシュ性状について、圧送や吹付けによる変化を把握するため、練上がり時および容器に吹付けて採取した吹付け後について試験を実施する。

力学性能は一軸引張試験を中心として評価を行う。供試体は平置きした鋼製型枠に上から直接吹き付け、図-2のように試験区間のゲージ長さ 80mm、幅 30mm、厚さ 13mm に成形し、材齢 2 日で脱型した後に封緘して 20℃、60%RH の条件で養生、材齢 4 週で試験する。引張試験では、図-2に示すように供試体両側に取り付けた変位計 2 本の平均でひずみを評価する。①～③の材料では、流し込みで成形した供試体を作製し比較のため試験を行う。引張試験結果は原則として3本以上の供試体の平均で評価する。

成形方法および吹付け厚さの影響を調べるため、40 x 40 x 160 mm 供試体を用いた曲げ強度試験を材料①～③について実施する。本試験は、流し込みおよび吹付け供試体の他に、吹付けコンクリートの強度試験用供試体の作製方法を定めた土木学会規準 JSCE-F-561 に従い、500 x 500 x 150 mm の吹付けパネルからカットした切出し供試体を対象として行う。切出し供試体は、150 mm 厚パネルの底型枠面からカットした切出し

下部供試体，中心部の中部供試体，上部こて均し面の上部試験体の3種類とする。曲げ強度試験は，曲げスパン 100 mm の中央点で載荷し，荷重と載荷点直下における供試体下面の変位をレーザー変位計により計測し，曲げ変位の代替値とする。ただし，この値は支点における材料の局部変形を含む。これを補正するため，計測された曲げ荷重-変位曲線の初期曲げひび割れ荷重のそれぞれ 0.9 および 0.6 倍に相当する 2 つの計測点を結ぶ割線を算出し，この割線の延長が変位軸と交わる点を原点として計測データを修正する。曲げ試験結果は 3 本の供試体の平均で評価を行う。試験材齢および試験までの養生条件は引張試験の場合と同様とし，切出し供試体のカットは試験の直前に実施する。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 練混ぜおよび吹付け

オムニキサーによる場合，粉体，液体，繊維の順番で材料を投入し，それぞれの材料投入後に 0.5 分，2.5 分，3.5 分の練混ぜを行った。強制 2 軸ミキサの場合には，オムニキサーと同じ方法を用いるとモルタルの粘度が低く，ファイバボールの生成が観察された。そのため，液体成分を 8:2 の割合で分割添加とし，液体投入から繊維投入までの練混ぜ時間を 15 分間と大幅に延長してモルタル分の粘性を上げ，目視による繊維分散がオムニキサーの場合と同等となるよう工夫した。各材料の練上がり時フレッシュ性状を表-3に示す

吹付けは吹付けガン口径 8mm を使い，3 リットル/分程度の圧送量で，一度の吹付け厚は 10mm を目安とした。写真-1 に垂直なコンクリートパネル裏面に対して吹付けを行った施工状況を示すが，①～④の 4 種類の材料とも 10mm 程度の吹付け厚さの場合にはだれがなく，良好な吹付け施工性を示した。吹付け後のフレッシュ性状を表-3に示すが，吹付け後には低熱セメントを用いた③を除いた材料でフローが練上がり時と比べ低下している。吹付け後のフローの

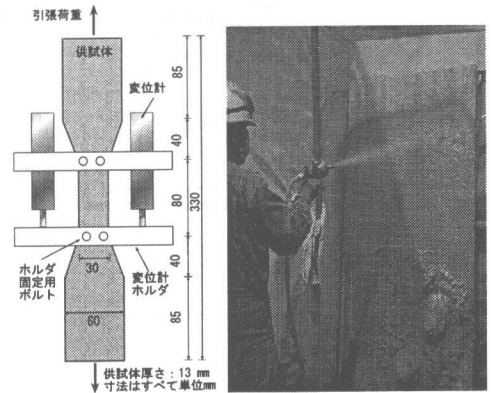


図-2 引張供試体



写真-1 吹付け施工状況

表-3 フレッシュ試験結果

材料 No.	試料採取	温度 (°C)	フロー (mm)	単重 (g/cm <sup>3</sup> )	空気量 (%)
①	練上がり	24.1	181/173	1.85	14.5
	吹付け	17.9	163/160	1.98	7.8
②	練上がり	23.1	181/177	1.66	25.0
	吹付け	19.0	165/162	1.98	8.4
③	練上がり	23.3	177/171	1.84	15.0
	吹付け	20.7	173/175	2.01	7.0
④	練上がり	20.5	184/181	1.87	12.5
	吹付け	16.2	168/163	2.00	6.6

低下は，吹付け面上の材料のだれ防止の観点から望ましいと考えられる。また，吹付け後の空気量は，各材料間ではほぼ同じレベルまで低下しており，練上がり時空気量の影響は小さいことが分かる。これは，ポンプ圧送および吹付けの工程の影響が大きく作用していると推察される。

#### 3. 2 力学性状

引張試験を実施した各材料の吹付け供試体は，高靱性 FRC 特有の多数の微細ひび割れを発生して大きなひずみ能力を示した。図-3(a)および(b)はそれぞれ吹付け供試体と流し込み供試体の引張試験結果の一例である。図-3(a)から，全ての材料で初期ひび割れ点後も応力を維持し，図中に□で表される応力が連続して低下する点でのひずみ（終局ひずみ）が 2% を超える大きな値が計測されている。したがって，本研究で対象とした①～④の材料は，吹付け施工においてもひずみ硬化型の優れた引張特性を有する初めての例であると言える。特に，材料④は既往の研究で実績のなかったコンクリート用強制 2

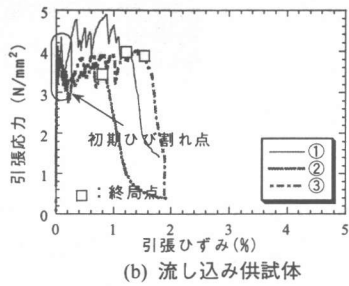
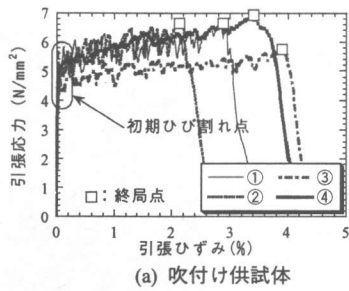


図-3 引張試験結果

軸ミキサにより練り混ぜた材料である。この材料が高い引張性能を示したことは高韌性 FRC 吹付け材料の実用性の向上に大きく寄与すると考えられる。また、図-3(b)は流し込み供試体の結果であり、各材料はひずみ硬化型の挙動を示しているが、終局点の応力およびひずみとも吹付けよりも小さくなる傾向が見られる。

材料①～③の吹付け供試体の曲げ試験結果の代表例について図-4(a)に示す。同図に示すように、①～③の材料間に曲げ挙動の相違は小さく、ひび割れにより剛性が大きく低下した後も変形の増加とともに荷重が増加し、荷重低下するまで大きな変形を保持するひずみ硬化型の挙動となった。同様に、図-4(b)は流し込み、(c)は切出し下部供試体の結果の一例で、吹付け供試体の挙動と大きな差異は見られなかった。

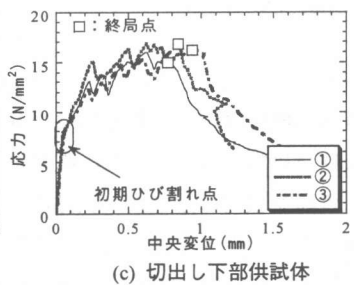
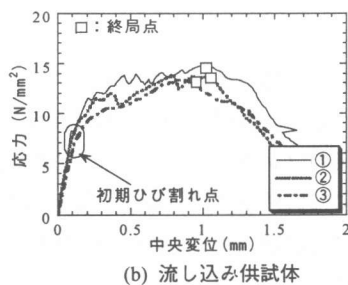
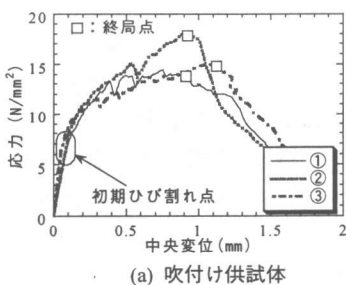


図-4 曲げ試験結果

## 4. 考察

### 4.1 引張性能

引張性能の特性値である初期ひび割れ強度、引張強度、および終局ひずみを引張試験結果より読み取り、実験条件の影響を考察する。3つの特性値のうち、初期ひび割れ強度は、最初に剛性が大きく変化する応力—ひずみ曲線上の点で定義した。高韌性 FRC の場合には、安定ひび割れ (steady-state cracking)<sup>6)</sup> と呼ばれる荷重の増加を伴わないひび割れとなるため、初期ひび割れの発生による剛性の変化は顕著であり、容易に初期ひび割れ点を特定できる。

図-5(a), (b), (c)は、材料の違いがそれぞれ初期ひび割れ強度、引張強度、および終局ひずみに与える影響を表している。図-5(c)の終局ひずみは各材料間で差異が比較的大きいが、図-5(a)の初期ひび割れ強度および(b)の引張強度とも材料間の違いは明確でない。したがって、本実験で対象とした材料の範囲では、練上がり時の空気量、セメント種類、ミキサ種類が引張性能に与える影響は小さいといえる。この理由として以下のことが考えられる。

材料①と②に設定した空気量の違いの影響が小さかった結果は、練上がり時の空気量に関わらず、ポンプ圧送および吹付けにより空気量が減少し、表-3に示したように吹付け後の空気量が両者でほぼ同じ値に収束する傾向が本研究の範囲では見られ、硬化体中の空気量に差が少ないと推察されることが原因と考えられる。事実、比重の計算が容易な吹付け曲げ供試体の重量と寸法をもとに硬化後の比重を推定してみると、材料①と②でそれぞれ1.98および1.97とほとんど

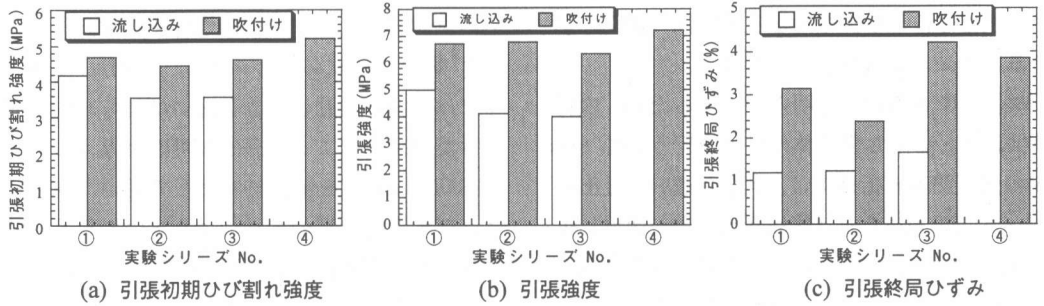


図-5 引張性能に与える実験要因の影響

ど差異が認められなかった。また、材料①と③の比較によるセメント種類の影響については、セメントの化学的な成分の違いは特に繊維とマトリクスの付着に現れると考えられるが、今回の実験では同一の繊維種類および水結合材比を用いたためその影響が小さかったと推察される。さらに、材料①と④の比較によるミキサー種類の影響については、練混ぜ方法を両者で変えることで少なくとも目視上は繊維分散に違いがない材料としたため、硬化体への影響が少なかったと考えられる。

また、図-5各図から、流し込みと吹付けによる成形方法の違いが与える影響が分かる。この影響として、図-5では3つの特性値とも吹付け供試体の値が流し込みを上回る傾向を示している。これは、引張供試体の厚さが13mmと比較的小さく、吹付けにより繊維の配向が流し込みの場合の3次元から2次元に近い状態になることが原因と推測される。

#### 4. 2 曲げ性能

曲げ性能に与えるセメント種類、空気量、供試体成形方法、および吹付け厚さの影響につい

て述べる。曲げ性能を表す特性値として、曲げ初期ひび割れ強度、曲げ強度、曲げ終局変形を用いた。曲げ初期ひび割れ強度は、曲げ応力-変位曲線で、応力の立ち上がり以降で大きく剛性が変化した最初の点で定義した。終局変位は、連続した曲げ応力の低下が始まる点で表した。

材料の違いの影響を検討するため、初期ひび割れ、曲げ強度、曲げ終局変位の各特性値について、それぞれ図-6(a), (b), (c)に材料①~③の結果をまとめた。セメント種類および空気量の違いが与える影響は、各曲げ特性値ともそれほど顕著ではないことが図-6各図から読み取れ、引張性能の結果と同様の傾向となった。

供試体成形方法による影響に関しては引張とやや異なる傾向も見られる。吹付け供試体の結果を流し込みと比較してみると、引張性能の場合と異なり、図-6の曲げ性能の場合にはその違いが顕著ではない。図-6(c)の終局変形については、材料①と②で吹付け供試体の値が流し込みよりも劣る結果となっている。この原因として、引張供試体(厚さ13mm)よりも吹付け厚さが大きい曲げ供試体(厚さ40mm)では、先に述

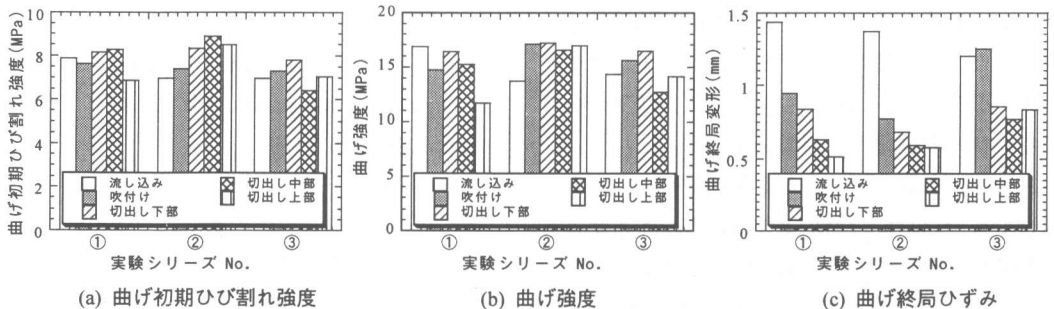


図-6 曲げ性能に与える実験要因の影響

べた吹付けによる繊維の2次元配向の傾向が弱まることによる影響が考えられる。

吹付け厚さの影響を明らかにするため、吹付け供試体と切出し供試体の比較を行う。図-6(a)、(b)の強度関連の指標では、大きな違いは見出せないが、図-6(c)の曲げ終局変形では、切出し供試体は吹付けと比較して値が小さくなる傾向が見られる。これは、吹付け供試体の吹付け厚さ40mmに対して、切出し供試体の場合には切出す前のパネルの150mm厚を一気に吹き付けており、吹付け厚の影響が出たとも考えられる。

しかし、図-4(a)および(c)の比較から分かるように、吹付け供試体と比較して切出し供試体の変形性能が小さい傾向は見出せるが、両者の全体的な曲げ挙動には顕著な差異がない。また、高韌性FRCを用いると想定される実際の補修工事では、垂直面や水平下面への施工がほとんどで、この場合には2.1節で述べたように10mm程度の薄い層を時間間隔を置いて吹付けていくことが現実的である。これらのことから、吹付け厚さが大きくなると変形能力が小さくなる傾向に注意が必要ではあるが、吹付け高韌性FRCの曲げ性能を把握するためには、本実験における吹付け厚さ40mmの吹付け供試体による評価が可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、PVA繊維を用いた高韌性FRCの吹付け補修用途への適用を目指して、湿式吹付け施工により供試体を成形し材料力学試験を実施した。その結果次の結論を得た。

1) 吹付け高韌性FRCは、一度の吹付け厚さが10mm程度の場合には良好な吹付け施工性を有し、セメント種類および練上がり空気量に依らず、引張ひずみ2%でも荷重抵抗の低下が生じないひずみ硬化型引張挙動を示す。

2) 強制2軸ミキサによる練り混ぜを行った場合でも、吹付け高韌性FRCはオムニミキサによる材料と同等以上の引張性能を示す。

3) 型枠に直接施工する吹付け供試体は、流し

込み供試体よりも高い引張性能を示す。

4) 吹付け供試体とパネルより切出した供試体では、曲げ挙動に大きな違いは見られず、曲げ性能は前者によって評価が可能と考えられる。

高韌性FRCを補修材料として用いた場合には、ひずみ硬化型の挙動により高い変形追従性やひび割れ幅の抑制効果が発揮され、補修部材の耐久性向上に寄与することが期待される。この補修部材の耐久性については今後検討して行く予定である。

謝辞 昭和ライト(株)および二瀬窯業(株)には施工実験にあたり多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Li, V.C., and Kanda, T.: Engineered Cementitious Composites for Structural Application, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 2, pp. 66-69, 1998
- 2) 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
- 3) Lim, Y.M., and Li, V.C.: Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites, J. Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 4, pp. 373-385, 1997
- 4) 魚本健人: 吹付けコンクリートの特性と技術の現状, コンクリート工学, Vol. 37, No. 8, pp. 3-13, 1999
- 5) 田村富雄ほか: 各種繊維補強を用いた吹付けコンクリートの研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 1065-1068, 1990
- 6) Li, V.C. and Leung, K.Y.: Steady-State Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118, No. 11, pp. 2246-2263, 1992