

## 軌道構造に適用する繊維補強セメント複合材料に関する基礎的研究

川又 篤\*1・松岡 茂\*2・松尾 庄二\*1

## 概 要

本研究では、軌道構造に適用する繊維補強セメント複合材料について、マトリックスの種類、繊維の種類、形状および混入量をパラメータにとり、フレッシュ性状と力学的性状に関して実験的検討を行った。その結果、コンクリートマトリックスの場合では、PP 繊維より PVA 繊維を使用した方が高い靱性を示した。モルタルマトリックスの場合においても、PVA 繊維を使用したケースが高い靱性と良好なワーカビリティを示した。HTPE 繊維を使用したケースではワーカビリティが著しく低下した。靱性指標とスランプフロー変動比の関係により繊維補強セメント複合材料の性能を良く評価できることが確認できた。

キーワード：短繊維，靱性，ワーカビリティ，定量評価，軌道構造

**Fundamental study on the fiber-reinforced cementitious composites used for railroad track structures**

Atsushi KAWAMATA\*1 Shigeru MATSUOKA\*2 Shouji MATSUO\*1

## Abstract

Experimental studies were made on the fresh properties and mechanical characteristics of the fiber reinforced cementitious composites used for railroad track structures. The parameters of the tests were the type of matrix, and type, shape and mixed volume of fibers. Results for the concrete matrix showed that the specimens containing the PVA (polyvinyl alcohol) fibers had higher ductility than the specimens containing the PP (polypropylene) fibers. Also in the case of the mortar matrix, the specimens containing the PVA fibers showed comparatively high ductility and workability. On the other hand, the slump was lost significantly by adding HTPE (high tenacity polyethylene) fibers. Finally, it was confirmed that the performance of fiber reinforced cementitious composites could be evaluated quantitatively by comparing the relationship between the ductility index and the ratio of slump flow after adding fibers to that of base matrix.

Keywords: short fibers, ductility, workability, quantitative evaluation, track structure

---

\*1 Material/Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

\*2 Deputy General Manager, Engineering Technology Center, Engineering Division

## 軌道構造に適用する繊維補強セメント複合材料に関する基礎的研究

川又 篤\*1・松岡 茂\*2・松尾 庄二\*1

## 1. 目的

繊維補強セメント複合材料はひび割れに対して高い性能を有していることから、近年、トンネル覆工をはじめとする土木構造物に適用される事例が増加している。本研究では、軌道構造における配筋作業の簡略化・耐久性の向上を目的に、軌道構造に適用する繊維補強セメント複合材料について検討を行った。

繊維補強セメント複合材料では、コンクリートやモルタル等のセメント系母材(マトリックス)に発生したひび割れを繊維が補強することによって、ひび割れの進展を抑制するため高い靱性を示す。軌道構造に繊維補強セメント複合材料を適用した場合、配筋作業の縮減による工期短縮、鉄筋量の減少やひび割れの微細化による鉄筋腐食に対する耐久性の向上、高靱性化による疲労耐久性の向上等が期待できる。適用場所としては、軌道スラブ、道床、路盤等を想定している。特に、道床では配筋によってコンクリートが充填し難いこともあり、鉄筋量を減少できる繊維補強セメント複合材料の適用は有効であると考えられる。

一般に、HPFRCC(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites)や DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious

Composites)等の高靱性材料<sup>1)</sup>を製造するには、繊維のみならず混和材、混和剤および骨材等に特殊な材料を使用することがほとんどであり、プラントからの供給が困難であるためコストが高くなるという問題点がある。そこで、本研究では、繊維補強セメント複合材料の経済化を図るための一環として、骨材に一般的な材料を用いることでプラントからの供給を念頭に置いた繊維補強セメント複合材料の基礎的性状を把握することを目的とした。ここでは、マトリックスの種類、繊維の種類、形状および混入量をパラメータとして、空気量やスランプ等のフレッシュ性状と、圧縮特性、引張特性および曲げ特性等の力学的性状を確認する実験を行った。なお、本研究は(財)鉄道総合技術研究所、鉄建建設(株)および(株)クラレの共同研究として実施したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料及び配合

マトリックスにおける使用材料を表-1に示す。プラントでの供給を念頭に置いているため、骨材には硅砂や人工骨材の使用を避けた。使用した繊維の物性を表-2に示す。繊維には、繊維補強セメント複合材料の分野で一般的に使用

表-1 マトリックスの使用材料

材料	略号	種類	物性
セメント	C	普通ポルトランド	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	陸砂	表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率2.47
	S2	砕砂	表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率3.23
粗骨材	G	碎石	表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率6.48
混和剤	SP	高性能AE減水剤	主成分：ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE剤	主成分：変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	VA	増粘剤	主成分：水溶性セルロースエーテル

\*1 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ

\*2 エンジニアリング本部 技術センター 副所長

表-2 繊維物性

繊維種類	略号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	断面 (mm)	長さ (mm)	アスペ クト比	引張強度 (MPa)	引張弾性 率(GPa)
ポリプロピレン	PP	0.91	0.5×1.0	30	37.6	530	10.5
ポリビニルアルコール	PVA1	1.30	φ0.660	30	45.5	880	29
	PVA2	1.30	φ0.100	12	120	1100	25
高強度ポリエチレン	HTPE	0.97	φ0.012	12	1000	2770	88

表-3 マトリックスの配合

略号	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	S1	S2	G	SP	AE	VA
C30	47	180	383	452	452	750	4.98	0.0306	-
M30	45	360	800	399	399	-	1.2	0.64	0.18
M60	32	256	800	534	534	-	11.2	0.032	-

されているポリプロピレン(Polypropylene : PP)繊維, ポリビニルアルコール(Polyvinyl Alcohol : PVA)繊維 2 種類, 高強度ポリエチレン(High Tenacity Polyethylene : HTPE)繊維の合計 4 種類を選択した。表中のアスペクト比は繊維の直径に対する長さの比である。PP 繊維については, 断面積を円形換算することで直径を算出してアスペクト比を求めた。表-3 にマトリックスの配合を示す。目標圧縮強度 30MPa のコンクリートと目標圧縮強度 30MPa および 60MPa のモルタルの合計 3 種類を用意した。また, 繊維混入前のスランブフローは 500~600mm 程度, 空気量は 7~8% 程度を目標とした。各マトリックスにおける使用繊維としては, コンクリートの場合では PP 繊維および PVA1 繊維を主に使用して, モルタルの場合では PVA2 繊維および HTPE 繊維を主に使用した。実験ケースを表-4 に示す。

## 2.2 試験方法

### (1) フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験では, 繊維混入前後において JIS A 1128 に準拠して空気量を, JIS A 1150 に準拠してスランブフローを測定した。また, 繊維混入後に著しくワーカビリティが低下したものは JIS A 1101 に準拠してスランブを測定した。

### (2) 力学的性状試験

圧縮試験は, JIS A 1108 に準拠して, φ 100mm×200mm の供試体を使用して行った。

表-4 実験ケース

略号	マトリックス (目標強度)	繊維	
		種類	混入率(%)
C30	コンクリート (30MPa)	-	-
C30-PP-1.0		PP	1.0
C30-PP-1.5			1.5
C30-PP-2.0			2.0
C30-PVA1-1.0		PVA1	1.0
C30-PVA1-1.5			1.5
C30-PVA1-2.0			2.0
C30-PVA2-0.5		PVA2	0.5
M30	モルタル (30MPa)	-	-
M30-PVA2-1.0		PVA2	1.0
M30-PVA2-1.5			1.5
M30-PVA2-2.0			2.0
M30-HTPE-1.0		HTPE	1.0
M60	モルタル (60MPa)	-	-
M60-PVA1-1.0		PVA1	1.0
M60-PVA1-2.0			2.0
M60-PVA2-1.0		PVA2	1.0
M60-PVA2-1.5			1.5
M60-PVA2-2.0			2.0
M60-HTPE-1.0		HTPE	1.0

曲げ試験では, 100×100×400mm の供試体を使用して, 「繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準」<sup>2)</sup>に準拠して図-1 に示すようなスパン 300mm の 3 等分点曲げ試験を行った。載荷速度は 0.2mm/min.とした。測定した変位から補正中央変位<sup>3)</sup>を算出して, 曲げ荷重-補正中央変位曲線を求めた。

引張試験は, 図-2 に示される 100×100×300mm の供試体の両端部にエポキシ樹脂で取り付けた鋼製の治具を引っ張って実施する直接引張試験<sup>4)</sup>を行った。この試験方法では, ひび割れ位置を特定して一断面における繊維の架橋

力を確認することを目的に、供試体中央部 4 面に深さ 10mm 程度の切り欠きを設けた。各面の切り欠き部にはクリップ型変位計を取り付けることにより変位を測定して、それらの平均値を開口幅として算出した。また、引張荷重を切り欠き部の断面積で除した値を引張応力として、引張応力-開口幅曲線を求めた。载荷速度は 0.2mm/min.とした。また、繊維を混入していないプレーンコンクリートでは、JIS A 1113 の割裂引張強度試験に準拠して割裂引張強度を算出した。試験は各試験ケース 3 体ずつ実施した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 フレッシュ性状

##### (1) 空気量

図-3 に空気量の変動比(=繊維混入後/繊維混入前)と繊維混入率の関係を示す。繊維を混入すると空気が巻き込まれるため、繊維混入率の増加に伴って空気量も増加する傾向がみられた。なお、その傾向は、コンクリートの場合と比較してモルタルの場合の方が顕著である。ただし C30 および M60 のケースでは、繊維の混入率を 1.5%以上になると空気量が低減傾向に変わった。原因として、繊維混入率の増加にともなうスランプの低下により、練り上がり後の状態がばさついた状態となったため連行空気が破損したものと考えられる。

##### (2) スランプフローおよびスランプ

図-4 にスランプフローの変動比(=繊維混入後/繊維混入前)と繊維混入率の関係を示す。

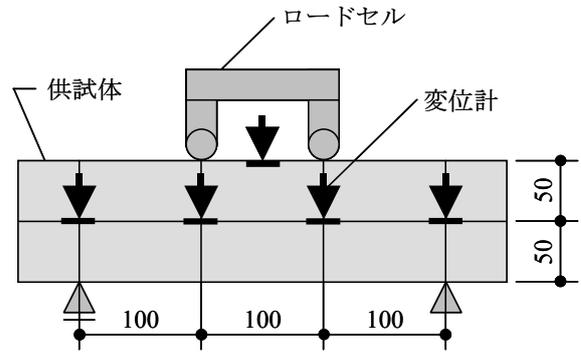
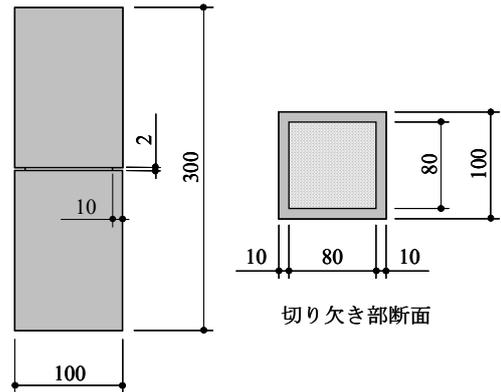


図-1 3等分点曲げ試験概略図



引張供試体寸法

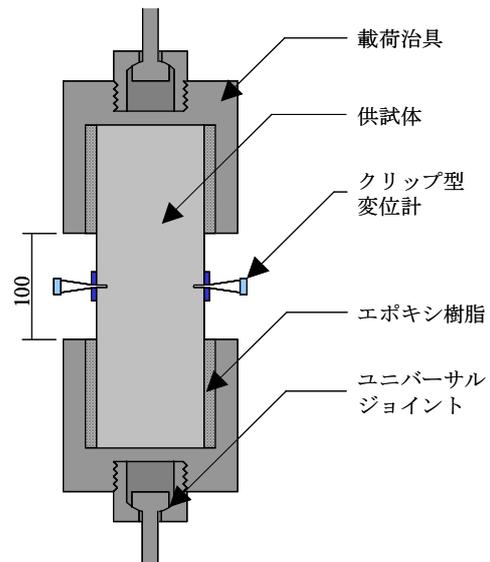


図-2 直接引張試験概略図

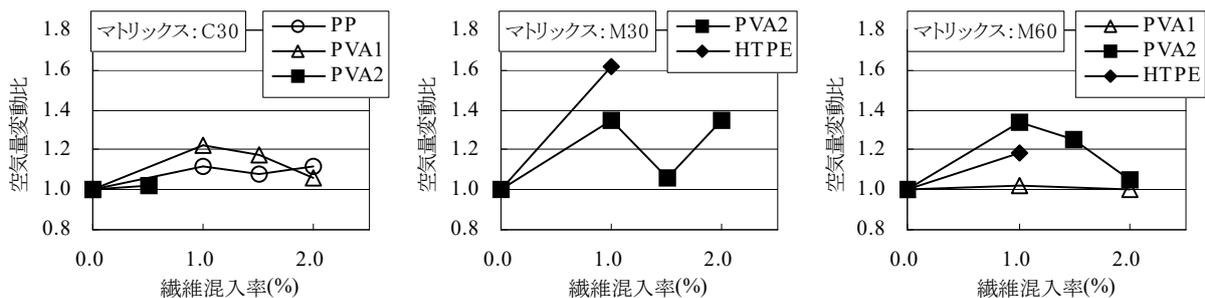


図-3 空気量変動比と繊維混入率の関係

ここで、繊維混入後において大幅にスランプが低下してスランプのみを測定したケースについては、本実験で得られた図-5のスランプフロー変動比とスランプの関係により回帰的にスランプフロー変動比を算出した。図-4において回帰的に求めたスランプフローを○印で示す。図-4より、概して繊維混入率が増加するに従ってスランプフローは低下する傾向がみられ、本実験では、HTPE 繊維を使用した場合に最もスランプロスが大きくなった。スランプロスの程度は繊維のアスペクト比が大きな要因として考えられ、アスペクト比が大きいほどスランプロスは大きくなる傾向があった。ここで、M60 のケースでは、PVA1 繊維において繊維混入後スランプフローが増大する結果となった。これは、繊維形状に対して最大骨材寸法が十分に小さいために繊維と骨材の噛み合いによるスランプロスがなかったためと推察される。逆に、PVA2 繊維を混入したコンクリートでは、混入率が 0.5%にも関わらず大幅なスランプロスを示したことから、繊維形状と最大骨材寸法の関係がスランプロスの程度に影響を与えていることがわかる。

### 3. 2 力学的性状

#### (1) 圧縮強度

図-6 に圧縮強度と繊維混入率の関係を示す。一般に AE コンクリートの場合では、空気量が増加すると圧縮強度は低下する傾向にあると言われている<sup>5)</sup>。ここでは、前記したように繊維を混入することにより空気量の変動したことから、空気量の変動に伴い圧縮強度もおおよそ対称的な変動傾向を示した。このことから、繊維混入後の圧縮強度を管理する際は、繊維混入による空気量の変動を把握しておき、圧縮強度の増減の程度により繊維混入前の圧縮強度を定めておく必要がある。

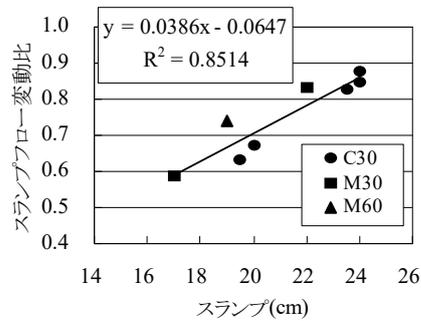


図-5 スランプフロー変動比とスランプの関係

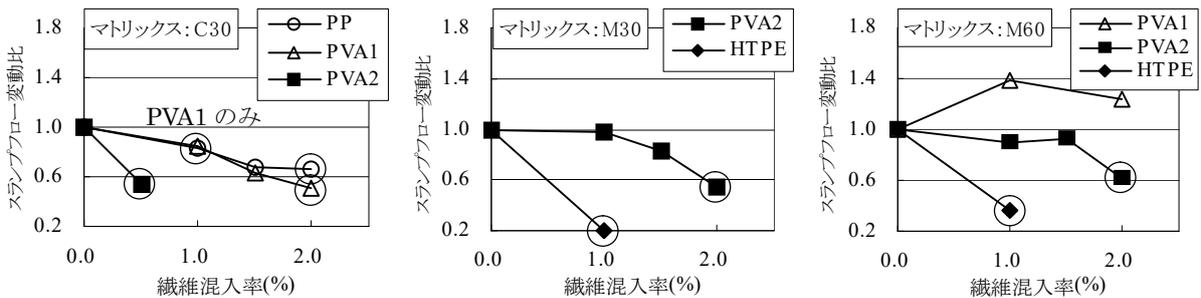


図-4 スランプフロー変動比と繊維混入率の関係

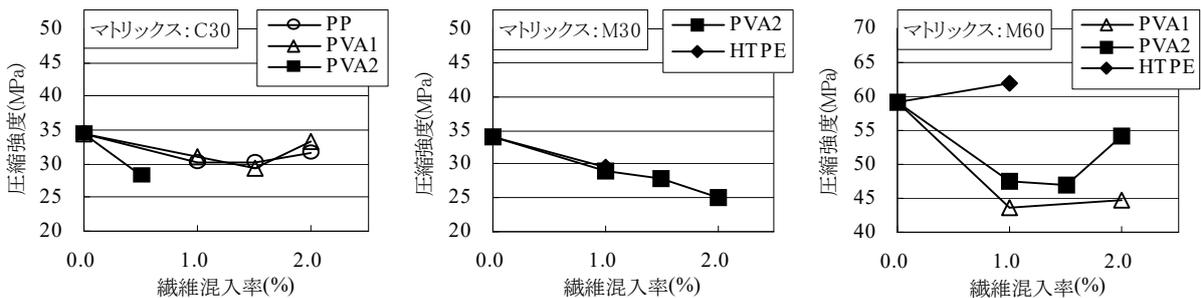


図-6 圧縮強度と繊維混入率の関係

## (2) 曲げ特性

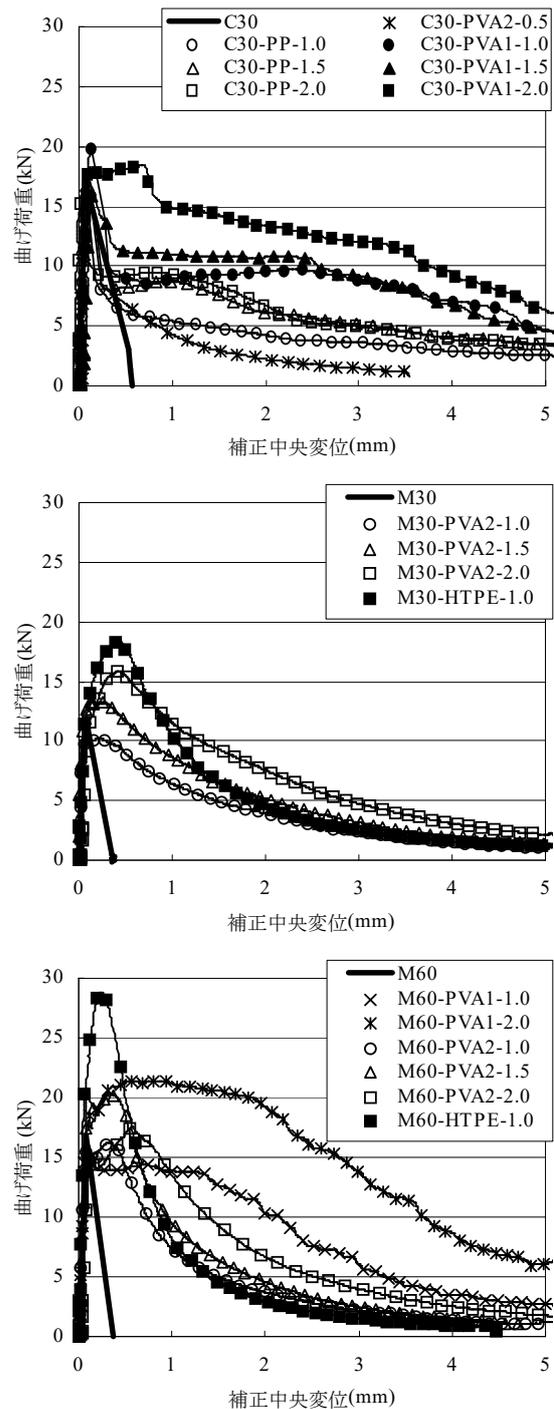
曲げ試験により得られた荷重－補正中央変位曲線の中で、各ケースにおいて平均的な挙動を示した曲線を図－7に示す。いずれの繊維においても繊維混入率の増加に伴って、初期ひび割れ以降で保持している荷重が増加していることが確認できる。コンクリートマトリックスの場合について見てみると、PP 繊維と比較して PVA1 繊維を使用した方が初期ひび割れ以降で大幅に高い荷重を保持していることから、高い曲げ靱性を得るために有効な繊維であることがわかる。一方、形状の小さい PVA2 繊維では繊維混入率が 0.5%と低いこともあり、曲げ靱性は比較的低い挙動を示したが、プレーンのコンクリートと比較すれば靱性は著しく向上していることが確認できる。

モルタルマトリックスの場合について見てみると、M30 のケースでは、PVA2 繊維では繊維混入率の増加に伴って最大曲げ荷重が増大していることが確認できる。また、最大曲げ荷重のみならず、それ以降も緩やかな挙動を示しており、繊維混入率を増加させることにより靱性が向上していることが確認できる。逆に HTPe 繊維の場合では、最大曲げ荷重は PVA2 繊維を使用した場合より高いものの、その後比較的急勾配で荷重が低下した。

M60 のケースでは、M30 のケースと比較して、最大曲げ荷重は 2～3 割程度高くなるが、その後の荷重の低下も大きなものとなった。これはマトリックス強度が高いためにひび割れ発生時に損傷を受ける繊維が多いためと考えられる。PVA 繊維を使用したケースでは、M30 のケースと同様に繊維混入率の増加に伴う靱性の向上が確認できた。特に、PVA1 繊維を使用したケースでは、最大曲げ荷重以降も高い荷重を維持しており、繊維混入率 2.0% の場合では 2.0mm 程度まで保持することが確認できた。

## (3) 引張特性

引張試験により得られた引張応力－開口幅曲線の中で、各ケースにおいて平均的な挙動を示



図－7 曲げ荷重－補正中央変位曲線

した曲線を図－8に示す。ひび割れ発生後、急激に引張応力が低下したものの、その後は曲げ試験の結果とほぼ同様の傾向を示した。

モルタルマトリックスにおいて、HTPe 繊維のケースについては、初期ひび割れ発生後に若干の硬化現象が起きており高い架橋力を発現していることがわかる。また、PVA1 繊維を 2.0% 混入したケースでは、初期ひび割れ直後

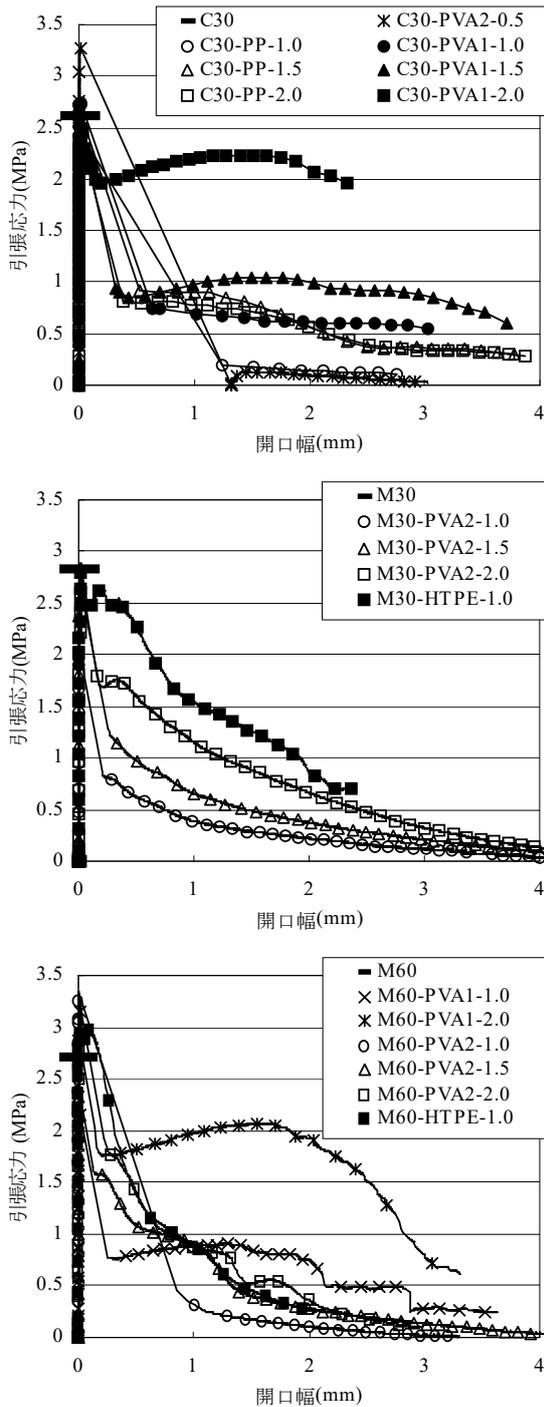


図-8 引張応力-開口幅曲線

に急激に引張応力が低下するものの、その後、応力が増大し維持することで高い破壊エネルギーを示す結果となった。そのため初期ひび割れ応力を超える程の硬化挙動を示さなくとも、比較的靱性的な性状が得られることがわかった。

### 3.3 定量評価

各ケースの靱性を定量的に比較検討するために、曲げ荷重-補正中央変位曲線の補正中央変

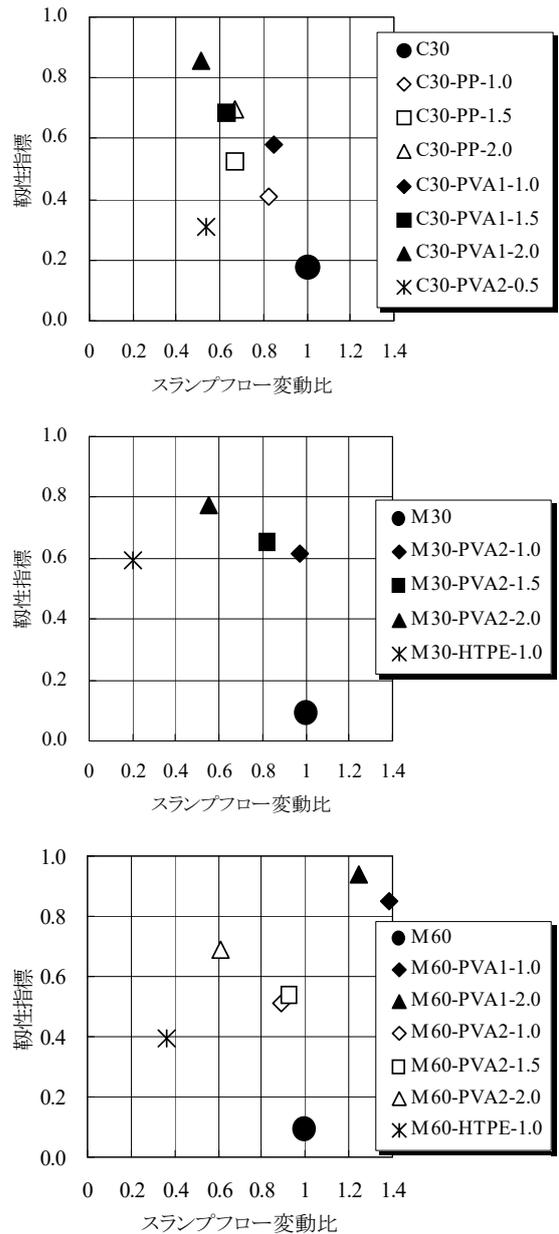


図-9 靱性指標とスランプフロー変動比の関係

位 2mm までの曲線下の面積を曲げタフネス<sup>2)</sup>として算出した。しかしながら、靱性が低くても最大曲げ荷重が高ければ、曲げタフネスは高い値を示すことがある。そこで、文献<sup>6)</sup>を参考に、曲げタフネスを最大曲げ荷重と評価変位 2mm で除した値を靱性指標と定義して算出した。この指標は、最大曲げ荷重と評価変位である 2mm の線で囲まれる四角の面積を、曲線下の面積が占める割合を示す指標となっている。ここでは、各ケースを靱性とワーカビリティの点から総合評価するために、上記した靱性指

標と前記したスランプフロー変動比をそれぞれ縦横軸にとった図-9を作製した。この図では、上にプロットされるほど靱性が高く、右にプロットされるほどワーカビリティが良い。

コンクリートマトリックスの場合では、PP繊維のケースの方がPVA1繊維のケースよりも若干ワーカビリティが良いものの、靱性の面ではPVA1繊維のケースの方が高い値を示している。PVA2繊維のケースでは靱性とワーカビリティ共に大幅に低い値となった。

モルタルマトリックスの場合では、PVA2繊維を使用したケースが比較的右上の方にプロットされており、高い性能を示していることが定量的に確認できる。一方、HTPE繊維を使用したケースではワーカビリティに難があることが見てとれる。PVA1繊維を使用したケースでは、最も右上に位置しており非常に高い性能を有していることが定量的に確認できた。

ここで提案した靱性指標とスランプフロー変動比の二つの指標による評価法は、使用する部材や施工方法等に応じて、繊維補強セメント複合材料における繊維の種類や混入量等を選択するツールとして利用できるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、軌道構造に適用する繊維補強セメント複合材料の基礎的研究として、マトリックスの種類、繊維の種類および混入量をパラメータにとり、フレッシュ性状と力学的性状を実験的に確認した。結論を以下にまとめる。

- (1) 繊維混入後の空気量はおよそ増加傾向にあった。その傾向は、コンクリートマトリックスの場合よりモルタルマトリックスの場合の方が顕著であった。繊維混入後のスランプフローは、概して低下傾向にあった。その傾向は繊維のアスペクト比が大きいくほど顕著であった。また、スランプロス程度は、繊維形状と最大骨材寸法の関係に影響されることが確認できた。
- (2) コンクリートマトリックスの場合では、PP

繊維を使用したケースよりもPVA1繊維を使用したケースの方が高い靱性を示すことがわかった。形状の小さいPVA2繊維を使用したケースは靱性、ワーカビリティ共に性能が低い結果となった。

- (3) モルタルマトリックスの場合では、PVA2繊維を使用したケースが比較的高い靱性と良好なワーカビリティを有していることが確認できた。HTPE繊維を使用したケースでは、ワーカビリティに難があり施工の際には十分な注意が必要であることがわかった。また、PVA1繊維を使用したケースでは、靱性、ワーカビリティ共に非常に高い性能を示した。

#### 謝辞

最後に、本研究を進めるにあたりアドバイスを受けた北武コンサルタント(株)の渡邊忠朋氏に深謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，2002.1
- 2) 日本コンクリート工学協会編：繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準 JCI-SF, pp.11-17, 1982.2
- 3) 益田彰久，松岡茂，柳博文，松尾庄二：鋼繊維補強コンクリート品質管理についての一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部，Vol.55, pp.642-643, 2000
- 4) 松尾庄二，松岡茂，益田彰久，柳博文：SFRCの引張軟化曲線の推定法に関する一研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.457-462, 1995
- 5) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002
- 6) 川又篤，三橋博三，金子佳生，福山洋：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靱性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, pp.235-240, 2001