# 論文 鋼繊維で補強されたセメント系複合材料の押出成形

山田寬次<sup>\*1</sup>•石山 智<sup>\*2</sup>•田中敏嗣<sup>\*3</sup>•徳岡昭夫<sup>\*4</sup>

要旨: RPCM (Reactive powder composite material)は、通常、鋼繊維と共に打込成形される高流動材料である。本研究では、これに増粘剤を添加して押出成形用の高粘度調合とし、真空脱気室つきの成形機で4cm x 4cmおよび4cm x 1.5cmに押出成形した。9mm長の鋼繊維を混入したRPCMは押出成形が可能で、成形された材料は、形状に対応して特異な繊維配向状況を示した。表面に突出する繊維はなく、当材料は押出成形にも対応可能と考えられる。

キーワード: 短繊維補強, 押出成形, 曲げ挙動, 鋼繊維, 繊維配向

1. はじめに

反応性セメント系粉体をマトリックス相とする 繊維補強複合材料(RPCM<sup>1)</sup>)は、高強度、高 流動性、高靭性を兼ね備えた新材料として注 目を浴びている<sup>2)、3)</sup>。この材料は高流動調合プ レミックスとして実用化され、これまで全て打込 成形と蒸気養生により製作されている。

一方,このような高品質材料の用途としては, 押出成形とオートクレーブ養生を併用して製作 した薄板プレファブ工場製品も可能性が大きい と考えられる。しかし,脱気のための減圧室を持 つスクリュー式押出成形機を用いて成形する場 合,機械中で材料が閉塞することを恐れて,長 さ6mm程度で直径が数十μmの柔軟な細い繊 維を用いるのが一般的である。

バレル径が50mm~75mmの実験室規模の 押出機を用いた実験では、無機鉱物以外に、 馬場、守<sup>4)</sup>による長さが6mmまでのアラミド繊維 (径5 $\mu$ m)、炭素繊維(径7 $\mu$ m)、ポリプロピレン (PP)繊維(幅0.4mm)、眞方山ら<sup>5)</sup>による親水性 ポリプロピレン繊維(径18~48 $\mu$ m)、著者<sup>6)</sup>によ る耐アルカリガラス繊維(長6mm,径18 $\mu$ m)が 見られる。また、閉塞しにくいラム式押出機でも、 Shah<sup>7)、8)</sup>らのポリビニールアルコール繊維(長 2mm,径14 $\mu$ m), PP繊維(長13mm,径50 $\mu$ m), ガラス繊維(長6mm, 径14~20 $\mu$ m), アクリル 繊維(長6mm, 径37 $\mu$ m), セルロース繊維(長 3mm, 径15 $\mu$ m)である。

しかし、RPCMのように圧縮強度が200MPa以 上の高強度マトリックスでは、ひび割れ部をブリ ッジして伝達できる繊維応力と剛性は大きい方 が好ましく、既往の研究で試験された上記繊維 では性能不足と考えられる。また、微粉体の多 いRPCMでは、急激なオートクレーブ養生によ って自己収縮ひび割れが発生する懸念もある。

本論文では,RPCMを用いた部材の製造方 法を広げることを目的に,長さ9mmの鋼繊維を 混入したRPCMを押出成形し,160℃のオートク レーブ養生した試験体から基礎的物性を調査 する。

- 2. 実験
- 2.1 材料と調合

実験に用いた調合をTable 1に示す。ここで,

Table 1 Mix proportions

Tuble I with proportions							
Mix	В	SF	Ad	MC	W	W/B	
	g/litre	g/litre	g/litre	g/litre	g/litre	%	
DE0	2101	0.0	35.0	21.3	218.3	10.4	
DE1	2020	89.3	33.8	21.4	236.4	11.7	
DE2	1988	177.8	33.1	21.8	236.5	11.9	
DC0	2089	0.0	34.8	0.0	240.6	11.5	
DC2	2023	178.6	34.7	0.0	240.8	11.9	

\*1 秋田県立大学・教授 建築環境システム学科 工博 (正会員)

\*2 秋田県立大学・助手 建築環境システム学科 工修 (正会員)

\*3 太平洋セメント株式会社 中央研究所 工博 (正会員)

\*4 川田建設株式会社 技術部開発課 工修 (非会員)

調合に用いた材料は下記のとおりである。B: 最密充填を取るように粒度と構成比を調整した, セメント,シリカフューム,珪石粉末,珪砂から なるプレミックス粉体,SF:長さ9mmのカットワイ ヤーで,直径は0.2mm,0.2%耐力が2.5GPaの 鋼繊維,Ad:ポリカルボン酸系高性能減水剤, MC:メチルセルローズで,20℃,2%濃度の水 溶液粘度が15Pa・Sのもの,W:水道水であ る。

なお、DE調合は押出調合で、DE0がSFを 含まないもの、DE1、DE2はそれぞれSFを体 積割合で1%、2%含むものである。また、DC 調合は比較に用いた打込成形調合であり、 DC0はSFを含まないもの、DC2はSFを体積割 合で2%含むものである。MCは押出調合だけに、 重量の1%添加している。また、水量は押出成 形性に決定的な影響を与えるため、混練後の 硬度(ISO-7619: ゴムポケット硬度計による硬さ 試験方法による)が15程度になるように試し練り をして決定した。

#### 2.2 押出成形

10Lホバートミキサーを用い,乾式で1分,湿 式で3分間混練した。その後,繊維を投入しな がら,更に2分間混練して粘土状にした。

混練後,直ちに押出成形を行った。Fig.1に
示す押出成形機の先端に,Fig.2に示すダイを
取り付けた。最初は、ダイAとダイBの両方を取
り付けた状態で平板(W40mm,H15mm)を成形
し、その後ダイBをはずして角柱(W40mm,H40mm)を成形した。

当初, Fig.1に示すマテリアルシール部にはシ ールA (Fig.3 (a)) を用いたが閉塞した。シール Aは開口端部間距離がSF長さの9mmよりも小さ く, SFが隣接する二つの開口にまたがって堆積 したためである。その後,開口端部間距離と開 口幅がほぼ等しいシールB (Fig.3 (b))を用いる ことで閉塞を回避した。

# 2.3 打込成形

混練は10Lホバートミキサーを用いて10分間 実施し高流動状態にした後、繊維を投入して、 更に2分間混練した。モルタルの0打フロー値



Fig.1 Extruder equipped with depressurized room



Fig.2 Two dies attached at the end of extruder



(a) Seal A (b) Seal B Fig.3 Two types of material seal

(JIS R 5201)は繊維の有るもの262mm, 無いも ので, 268mmであまり差がなかった。

モルタル三連枠に混練後の材料を注ぎなが ら往復し,SFができるだけ二次元配向するよう にして所定の厚み(15mm,40mm)に成形した。

#### 2.4 養生·試験体製作

成形後,温度20℃,相対湿度98%の湿空室 に24時間静置した。その後,脱枠し,オートクレ ーブ釜に挿入して,160℃まで3時間で昇温し, 160℃で5時間の温度保持をし,その後は自然 放冷を行った。養生の完了した成形体から長さ 160mmの試験体を切り出し,厚みと幅が揃うよ うに研磨した。準備した試験体はTable 2に示 すとおりで,繊維観察試験体は各1体,曲げ試 験体は各3体,準備した。

#### 3. 実験結果

## 3.1 繊維観察

押出成形試験体中の繊維の状況を観察した。Fig. 4(a), (b)は養生が済んだばかりの表面の状況を示すが、表面にはSFが露出していない。しかし、表面から0.7mm研磨した状態ではFig. 4(c)~(e)に示すように多数の繊維が観察された。特徴的なのは、角柱と平板では繊維配向状態がかなり異なっていることである。

(c)では繊維が171本,(d)では繊維が120本 観察されたが,この写真から繊維の長さと方向 とを測定した。方向に関する頻度分布はFig.5 に示すとおりで,押出方向からの平均配向角は, 角柱が16度,平板が2.2度となった。また平均 配向係数は角柱が0.720,平板が0.927となり, ダイBによって絞られ繊維が配向することが分か る。

また、繊維の長さを3mm毎にまとめて頻度を 算出したのがFig. 6である。比較的長いものは、 両者とも同様な頻度分布であるのに比べ、角 柱では短いものが多いことが分かる。

断面に現れる繊維分布を示すのがFig. 4(f), (g)で,(f)では繊維が512本,(g)では繊維が121 本観察された。繊維が押出方向から角度を持 つに従ってこの写真上で繊維の断面は長円か ら長い繊維へとなっていく。断面内で繊維の体 積含有率がどのようにばらついているかを次の ように確認した。写真を約3.5mmメッシュになる ように分割し,その中の繊維数をもとに,単純 に繊維の断面積をかけて体積含有率に換算し た。この結果を示すのがFig. 7である。両方とも 断面の表層側に多く,芯

部分は少ない。

## 3.2 曲げ挙動

曲げ試験体および結果 の概要をTable 3に, ひび 割れ強度が中間値を示す 代表的試験体の曲げ挙動 をFig. 8に示す。ひび割れ 強度,曲げ弾性率とも押 出成形の方が大きくなった。 これは、水-粉体比は押出成形の方が若干低 く,また押出成形時の脱気が好影響を及ぼした ためと推察される。

Table 2 Specimens for this study

Test	Specimen	Mix	W	Н	L	
			mm	mm	mm	
Bending	DE0-B	DE0				
	DE2-B	DE2	28.0	13.5	160	
	DC0-B	DC0	38.0			
	DC2-B	DC2				
Tension softening	DE0-T	DE0				
	DE2-T	DE2	28.0	28.0	160	
	DC0-T	DC0	38.0	38.0	100	
	DC2-T	DC2				
Fiber observation	DE1-B	DE1	38.0	13.5	160	
	DE2-T	DE2	38.0	38.0	160	



Fig. 5 Frequency distribution of fiber orientation



Fig. 6 Frequency distribution of fiber length





Fig. 4 (a) Surface of extrusion molded square specimen



Fig. 4 (b) Surface of extrusion molded plate specimen



Fig. 4 (c) Polished surface of square specimen in the depth of 0.7mm



Fig. 4 (d) Polished top surface of plate specimen in the depth of 0.7mm



Fig. 4 (e) Polished side surface of plate specimen in the depth of 0.7mm





Fig. 4 (f) Section of square specimen Fig. 4 (g) Section of plate specimen

また, SFの長さが短かったため十分な引抜抵抗 がなく, DE2-B試験体ではひび割れ時に荷重が 低下した。

しかし, DC2-B試験体ではひび割れ強度が 低く, ひび割れが多数分散し, なめらかで靭性 に富む曲げ挙動を示した。打込成形試験体の ひび割れ強度が低い理由には, DC0では単 位水量が多い点, DC2では表面に多数の繊維 が突出した影響, 打込時の空気混入などが考 えられる。また, SFの引抜が支配する曲げ挙動 後半において, 打込成形では保持している荷 重が押出成形に比して低い。これは, 繊維の配 向が押出成形よりも悪く, また外周に選択的に 分布することもないためであると推察される。

#### 4. 考察

### 4.1 繊維の配向

スクリューによってダイに供給されるモルタル はFig. 9に示すスクリューの谷の深さ7.5mmの 部分にあり、繊維もスクリューの傾き(40度)に沿 っていると考えられる。繊維はダイの中を流れな がら徐々に押出方向に配向すると考えられるが、 ダイA~ B間で大きく絞られている結果、ダイA の出口では16.0度であった配向角度が、ダイB の出口では2.2度となり、急激に押出方向に平 行に近づいたと推察される。

#### 4.2 繊維の分布

繊維が表層側に多く分布することは, Fig.10 に示す平板試験体の透過X線写真からも分か る。ここで注目すべきは,中央下に写っている 表層に突き刺さるような状態の繊維である。この 繊維は板厚方向に配向しているのは間違いな



Fig.8 Bending behaviors of specimens

Table 3 Bending test specimens and result

			Flexural	Modulus of
Specimen	W	Η	strength	elasticity
	mm	mm	MPa	GPa
DE0-B	38.58	13.91	20.50	37.07
DE2-B	38.55	13.91	23.40	38.68
DC0-B	39.58	11.40	13.10	34.03
DC2-B	40.08	11.50	17.77	35.53



Fig. 9 Detail of screw

いが,全長の幾分かは押出成形中にダイ壁で 曲げられて,その折れ曲がった部分が表面に 現れていると考えられる。もしこれらが,塑性材 料でなければ,表面から突出する可能性がある と推定される。

表層に多く分布する主要な原因は、繊維が 分離したためと考えられる。つまり、ダイにモル タルが供給される時、スクリューの谷は中心から 外れているため外周部から充填される。その時、 モルタル中の繊維が分離気味となり、外周に多 めに残ったと考えられる。

なお,外周に繊維が多い事は曲げモーメント に対して有利で,曲げ試験結果も押出成形試 験体の方が高い荷重を保持した。

#### 4.3 曲げ強度

同一のプレミックスを用いた試験体では、曲 げ強度が45MPaに達することが報告されている



Fig.10 X-ray photo of the plate specimen

<sup>9)</sup>が,今回の実験ではその半分 程度の強度となった。両者の主要 実験条件を比較すると**Table 4**の とおりである。養生条件が大幅に 違い,本研究の総養生時間は 1/3以下,マチュリティも1/4程度で あるが,初期ひび割れ強度は両 者とも20MPa程度である。

従って、両者の差は繊維長さの違いと試験 体のせん断スパン比の違いによるところが大き いと推察される。

# 5. 結論

通常は打込成形で製作される鋼繊維(長さ 9mm)入りRPCMを,初めて押出成形した。養 生には,押出成形と通常,組み合わせて利用 されるオートクレーブ養生(160℃)を採用した。 その結果,下記の知見を得た。

(1) 真空押出成形機マテリアルシール部の 開口端部距離を繊維長さより長くすることで, 鋼繊維入りRPCMの押出成形が可能となった。

(2) 押出成形試験体中の鋼繊維の平均配 向角度は、ダイの絞りによって小さくなり、押出 成形方向に近づいた。また,鋼繊維の分布は表 層側に多くなったが、繊維が周囲から分離気 味に充填されつつ押出成形されたことに依ると 考えられる。

(3) 鋼繊維が短かったためひび割れ後の曲 げ強度は低かったが、160℃のオートクレーブ養 生でも自己収縮クラックは生じないで、ひび割 れ時の曲げ強度は20MPa以上になった。

## 参考文献

- 森 大介, 鵜澤正美, 片桐 誠, 下山善秀: RPCMの塩化物浸透に関する拡散理論によ る考察, 第56回セメント技術大会講演要旨, pp.176-177, 2002
- S. Maehori, H. Hyodo, N. Ueda, et al: Tensile behavior of reactive powder composites, Proceedings of JCI

Table 4 Comparison of test conditions with a reference study

Reference	Shear span ratio	Fiber length		Cure		Maturity
	-	mm	Pre-cure C		Cure	Hr-
Yamada	5.3	9	20	24Hr 160	5Hr	990
Tanaka <sup>9)</sup>	1.0	15	20	48Hr 90	48Hr	4320

International workshop on DFRCC, pp.113-120, 2002

- 3) 佐川康貴ほか: 鋼繊維補強高強度モルタル の力学的性状, コンクリート工学年次論文 集, Vol.23, No.2, pp.199-204, 2001.
- 4) 馬場明生,守明子:新素材繊維を混入した セメント系材料の押出成形による緻密化と曲 げ強度,日本建築学会構造系論文集,第 486号,pp.1-8,1996.8
- 5) 石山智,山田寛次:耐アルカリガラス繊維 を混入した押出成形セメント材料の引張軟 化挙動,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp. 243-248, 2002
- 6) 眞方山美穂,馬場明生,守明子ほか:親水性化加エポリプロピレン短繊維を混入した高靭性化セメント系部材の押出成形のための材料条件最適化技術に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第557号, pp.7-13,2002.7
- Alva Peled, Michele F. Cyr, Surendra P. Shah: High Content of fly ash (class F) in extruded cementitious composites, ACI materials journal, Vol.97, No.5, pp.509-517, 2000
- Michele F. Cyr, Alva Peled, Surendra P. Shah: Improving performance of glass fiber reinforced extruded composites, Proceedings of GRC Congress 2001, pp.163-172, 2001
- 9)田中良弘,武者浩透,大竹明朗,下山善秀:超高強度繊維補強コンクリートによる歩道橋の設計施工法,コンクリート工学年次 論文集,Vol.24, No.2, pp.1603-608, 2002