

## 論文 配合条件が高じん性セメント複合材料の基礎的物性に与える影響

稲岡 和彦<sup>\*1</sup>・上田 隆雄<sup>\*2</sup>・水口 裕之<sup>\*3</sup>

**要旨**：高じん性セメント複合材料 (DFRCC) は、セメントモルタルに高性能有機短繊維を混入することで曲げ応力下において多数の微細ひび割れが分散し、曲げ・引張じん性の大幅な向上が実現できる新しい材料であるが、繊維の種類や配合条件の変化が DFRCC の力学的性能に与える影響など、基礎的データが不足しているのが現状である。そこで本研究は、混入繊維の種類や混入率、モルタルの W/C などの配合条件の変化が、DFRCC の力学的特性に与える影響を実験的に検討した。この結果、W/B が 30% の DFRCC は PE 繊維を用いた場合に大きな曲げじん性が得られ、45% の場合には PVA 繊維でも大きな曲げじん性が得られた。

**キーワード**：DFRCC, PVA 繊維, PE 繊維, 曲げ試験, 両引試験, ひび割れ分散性

## 1. はじめに

高じん性セメント複合材料 (DFRCC) は、セメントモルタルにポリエチレン (PE) 繊維やビニロン (PVA) 繊維などの高性能有機短繊維を混入することで、曲げひび割れ発生後も応力の低下が無いみかけのひずみ硬化特性や、多数の微細ひび割れが分散するマルチプルクラック特性が特徴として挙げられている<sup>1)</sup>。DFRCC は従来のコンクリートが持つ脆性的な特性を大幅に改善できることから、コンクリート構造物の構造性能や耐久性能の向上が可能な新しい材料として注目され、その実用化に向けた検討が国内外において積極的に進められてきた<sup>1)</sup>。また、本材料は吹付け施工が可能であるため、表面保護材や断面修復材など、高性能なセメント系補修材としての利用が有望視されている<sup>2)</sup>。

しかし、今後、この材料を様々な用途で製造し、用いていくためには、繊維の種類や配合条件の変化が DFRCC のフレッシュ性状や力学的性能に与える影響など、基礎的データをさらに蓄積する必要がある。そこで本研究は、混入繊維の種類や混入率、モルタルの W/C などの配合条件の変化が、DFRCC の力学的特性に与える影

響を実験的に検討するため、異なる配合の DFRCC について、圧縮試験、曲げ試験、および、両引試験を実施した。

## 2. 実験概要

## 2.1 DFRCC の配合条件

本実験で用いた DFRCC の示方配合を表 1 に、用いた 2 種類の繊維の基本諸元と物性値を表 2 に示す。これらの配合条件は既往の検討<sup>1)</sup>を参考にして決定した。水結合材比 (W/B) は 45% を基準とし、より高強度の 30% との 2 レベルを設定した。なお、ここで結合材とは、セメントとフライアッシュ (結合材全質量の 20% 置換混入) を合わせたものとする。繊維体積率 (VF) は、W/B=45% の場合に 1.5% と 2.0% の 2 レベル、W/B=30% の場合は 1.5% とした。S/C は DFRCC については 0.5 で一定とし、比較用の普通モルタルについては 2.5 とした。セメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3280 cm<sup>2</sup>/g), フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ (密度: 2.35 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3700 cm<sup>2</sup>/g, SiO<sub>2</sub>: 56.9 %, 強熱減量: 1.6 %) を用い、細骨材は DFRCC 用には 7 号珪砂

\*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教授 工博(正会員)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博(正会員)

表-1 DFRCCの示方配合

繊維 種類	W/B (%)	S/C	Vf (%)	配合 記号	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					C	W	S	FA	繊維	増粘剤	SP剤
なし(普通)	45	2.5	—	N45	464	261	1160	116	—	—	—
PVA	30	0.5	1.5	V30-1.5	893	335	447	223	19.5	1.17	7.82
	45	0.5	1.5	V45-1.5	750	422	375	188	19.5	1.48	0.94
		0.5	2.0	V45-2.0	747	420	373	187	26	1.47	0.93
PE	30	0.5	1.5	E30-1.5	893	335	447	223	15	1.17	7.82
	45	0.5	1.5	E45-1.5	750	422	375	188	15	1.48	0.94
		0.5	2.0	E45-2.0	747	420	373	187	20	1.47	0.93

(密度: 2.59 g/cm<sup>3</sup>) を、普通モルタル用には徳島県那賀川産川砂(表乾密度: 2.61 g/cm<sup>3</sup>, F.M.: 2.79) を用いた。また、DFRCCは、セルロース系の増粘剤を単位水量の0.35%、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(SP剤)を単位粉体量の0.1% (W/B=45%の場合) または0.8% (W/B=30%の場合) 添加した。なお、3.以降で示す実験結果の凡例は、表-1に示した配合記号を用いる。

## 2.2 供試体の作製および養生

既往の検討<sup>1)</sup>を参考にして、DFRCCの練混ぜ方法は以下の通りとした。なお、練混ぜには30リットルモルタルミキサーを用いた。

- ①水とSP剤および増粘剤を混ぜた溶液中にあらかじめ繊維を浸しておく。
- ②セメントと珪砂を投入し3分間空練りする。
- ③①で作成した繊維入り溶液を投入し、さらに3分間練り混ぜる。
- ④羽に付着した繊維等を掻き落とし、さらに3分間練り混ぜる。

練混ぜ終了後に、テーブルフロー値と空気量の測定を行い、型枠にモルタルを流し込んだ。

作製した供試体は、圧縮試験用にφ100×200mmの円柱、曲げ試験用に100×100×400mmの角柱、両引試験用に50×50×760mmの角柱の正方形断面中心に異型鉄筋D13 SD295Aを1本配したものとした。なお、曲げ試験用供試体は、長手方向中心位置に深さ30mm、幅3mmの切欠きを入れたものと、入れないものの2種類を用

表-2 繊維の諸元と物性値

繊維	長さ (mm)	直径 (μm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
PVA	12	40	1600	4.0×10 <sup>4</sup>
PE	12	12	2500	8.8×10 <sup>4</sup>

意した。同一要因の供試体は3体ずつ作製した。

打設日翌日に脱型し、20℃の恒温室で28日間の水中養生を行った後に、各種試験を実施した。

## 2.3 載荷試験

載荷試験はすべて2000kN容量の万能試験機を用いて行った。圧縮試験では、圧縮荷重の他に縦ひずみと横ひずみを測定した。切欠きの無い供試体を用いた曲げ試験は、3等分点載荷とし、荷重とスパン中央変位を測定した。切欠きの有る供試体を用いた曲げ試験は、中央1点集中載荷とし、荷重とスパン中央変位を測定するとともに、切欠きの開口変位を容量5mmのクリップゲージで測定した。両引試験は鉄筋の引張荷重とともにπ型ゲージによりひび割れ幅を測定した。π型ゲージは、基長50mm、容量2mmのゲージを合計12個連続でコンクリート長手方向に設置した。

## 3. フレッシュ性状および圧縮試験

普通モルタルおよび各種DFRCCのフレッシュ時における試験結果と材齢28日における圧縮強度の一覧を表-3に示す。なお、各種DFRCC

表-3 フレッシュ性状と28日強度一覧

配合記号	テーブルフロー (mm)	空気量 (%)	28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
N45	196	0.7	48
V30-1.5	139	2.5	67
V45-1.5	196	10.0	29
V45-2.0	179	13.0	25
E30-1.5	127	9.0	56
E45-1.5	160	18.0	15
E45-2.0	141	16.0	16

の練り上がり状態を観察した結果、いずれの配合においても繊維は良好に分散しており、大きなダマなどは見られなかった。

表-3によると、普通モルタル N45 と同程度のフロー値が得られているのは V45-1.5 および V45-2.0 であり、これ以外の DFRCC はフロー値が低下している。特に W/B が 30% の V30-1.5 および E30-1.5 については、多量の SP 剤を添加したにもかかわらず、大幅に流動性が低下した。また、繊維の種類では PVA 繊維を用いた場合の方が PE 繊維の場合よりも大きな流動性を示した。これは、表-2 に示したように、PE 繊維の方が繊維径が小さいことから、練混ぜ水の拘束効果が大きかったものと考えられる。さらに、繊維体積率は小さい方が大きな流動性が得られている。

V30-1.5 を除いた DFRCC の空気量は、顕著に大きい値を示している。これは、繊維の分散性を確保するために添加した増粘剤の影響で練混ぜ時に内包する空気が極度に抜けにくくなったためと考えられる。空気量を低下させるためには、増粘剤の使用量を調整するとともに、消泡剤の使用も検討する必要がある。

各種 DFRCC の 28 日圧縮強度を N45 の結果と比較すると、W/B が 30% の 2 配合を除いて顕著に小さな値を示している。これらの配合はいずれも空気量が大きかったことから、DFRCC 内の空隙が欠陥となって早期に破壊した可能性があ

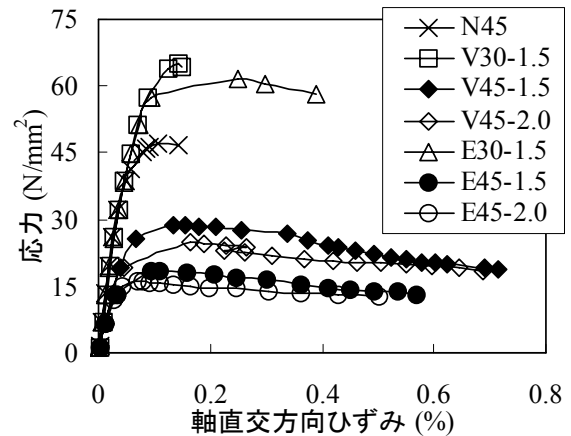


図-1 圧縮試験における  
応力-軸直交方向ひずみ曲線

る。また、繊維の混入により圧縮強度が低下するとの報告<sup>2)</sup>もあることから、繊維の混入がモルタルマトリックスの圧縮耐力を低下させた可能性もある。ただし、W/B が 30% の場合については、比較的大きな強度が得られていることから、45% という W/B の値が圧縮強度を得るという観点からは大きすぎた可能性がある。

圧縮試験時の圧縮応力と軸直交方向ひずみの関係を図-1 に示す。なお、これ以降のグラフでは、各配合供試体の代表例のデータを示すこととする。図-1 によると、N45 および V30-1.5 は 0.2% 未満の引張ひずみが軸直交方向に発生した時点で供試体が破壊しているのに対して、E30-1.5 は 0.4% 程度、W/B が 45% の DFRCC に関しては、0.6~0.7% 程度まで引張ひずみが大きくなっている。DFRCC に混入した短繊維が軸方向圧縮に伴って発生する軸直交方向の引張応力に抵抗することで、ピーク後の圧縮応力が緩やかに低下する破壊挙動を示したものと考えられる。また、W/B が 30% の場合、モルタルマトリックスが高強度となるため、短繊維が引抜けずに破断しやすい状況が考えられるが、表-2 に示したように、PE 繊維は PVA 繊維の約 1.5 倍の引張強度を有していることから、高強度モルタルマトリックスのひび割れ進展を抑制する架橋効果が得られたものと考えられる。

表-4 曲げ試験における最大荷重一覧

配合記号	切欠き無し (kN)	切欠き有り (kN)
N45	8.3	4.0
V30-1.5	30.1	15.1
V45-1.5	33.6	11.5
V45-2.0	36.0	10.4
E30-1.5	43.5	17.9
E45-1.5	29.6	11.3
E45-2.0	23.4	11.1

#### 4. 曲げ試験

普通モルタルおよび各種 DFRCC を用いて実施した曲げ試験で得られた最大荷重の一覧を表-4に、切欠き無し供試体の荷重-中央変位曲線を図-2に、切欠き有り供試体の荷重-中央変位曲線と荷重-切欠き開口変位曲線をそれぞれ図-3と図-4に示す。なお、図-2~図-4においてN45の曲線を示すと分かりにくいため、破壊の最終点のみ☆印で示した。

##### 4.1 普通モルタル N45 と DFRCC との比較

普通モルタル N45 は切欠きの有無にかかわらず、曲げひび割れが発生した時点で脆性的に破壊した。これに対して、今回作成した DFRCC 供試体はすべて曲げひび割れ発生後も荷重と中央変位が増加するたわみ硬化性を示した。これにより、表-4に示したように DFRCC 供試体の最大荷重は N45 の場合よりも顕著に増加している。また、図-2および図-3に示したように最大荷重後の荷重低下も緩やかであり大きな曲げじん性が得られていることがわかる。表-3で示したように、W/B が 45% の DFRCC の圧縮強度は N45 の場合よりも大幅に低下していたが、曲げ強度や曲げじん性は大幅に改善している。これは、圧縮荷重を受けた場合にはモルタルマトリックス中の空隙が強度低下の直接的原因となりやすいが、曲げ荷重を受けた場合には、引張応力に対する抵抗性能が強度やじん性の支配要因となるため、モルタルマトリックス中に空隙があっても、短繊維による曲げひび割れ架橋効

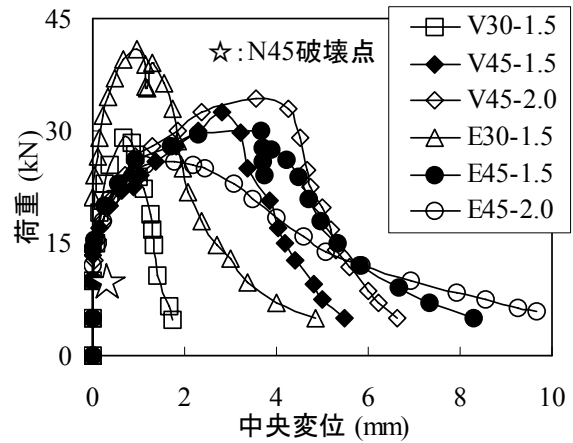


図-2 曲げ試験における荷重-中央変位曲線  
(切欠き無し供試体)

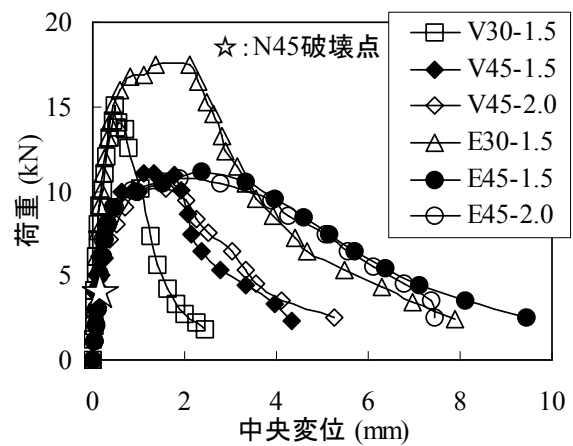


図-3 曲げ試験における荷重-中央変位曲線  
(切欠き有り供試体)

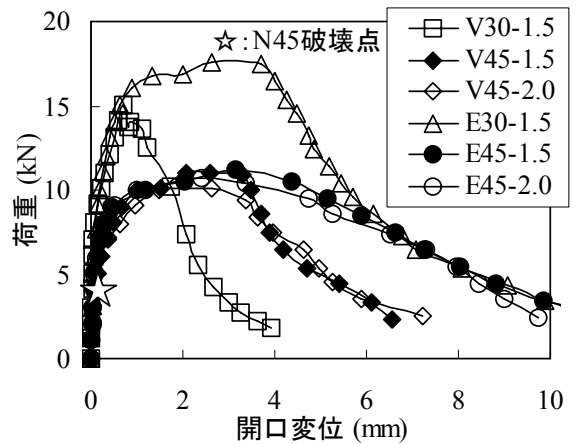


図-4 曲げ試験における荷重-開口変位曲線  
(切欠き有り供試体)

果が発揮されれば大きな曲げ強度や曲げじん性

が得られたものと考えられる。

#### 4.2 DFRCC の配合条件の影響

曲げじん性向上効果は配合条件によって異なり、V30-1.5 の曲げじん性は比較的小さくなっている。DFRCC が大きな曲げじん性を得るためには、曲げひび割れを跨いだ短繊維がモルタルマトリックスから徐々に引抜けつつひび割れの進展に抵抗する架橋効果が発揮される必要がある。これに対して V30-1.5 の場合は、前述したように PVA 繊維の引張強度に対してモルタルマトリックスの強度が大きすぎたために、ひび割れを跨いだ PVA 繊維がモルタルマトリックスから引抜けずに破断したことで曲げじん性が小さくなったものと考えられる。

PE 繊維は PVA 繊維よりも高強度である一方、引抜けに対する付着力は PVA 繊維に劣ることが指摘されている<sup>り</sup>。これに対して、E30-1.5 は高強度のモルタルマトリックスによって PE 繊維の引抜けを抑えることで繊維の高引張強度が有効に利用され、V30-1.5 より高い曲げじん性が得られたものと考えられる。

切欠きの無い DFRCC で微細ひび割れの発生が顕著に多かったのは、W/B が 45% で PVA 繊維を用いた供試体であった。表-4 および図-2 からも V45-1.5 や V45-2.0 は高い曲げ強度および曲げじん性が確認できる。これは、付着力が大きいという PVA 繊維の特性が発揮された結果と考えられる。これに対して、切欠きがある場合には、図-3 および図-4 に示すように、PVA 繊維よりも PE 繊維を用いた場合の方が曲げじん性が大きくなっている。これは破壊が切欠き先端部分に局所化するため、前述したような PVA 繊維の特性が発揮できなかつたためと考えられる。また、PE 繊維は PVA 繊維よりも繊維径が小さいため、荷重降下域での減少勾配が小さくなったものと推察される。

繊維体積率の影響は、切欠きが無い供試体で見られ、PVA 繊維の場合には 1.5% の場合よりも 2.0% の場合の方が大きな曲げ強度および曲げじん性が得られているが、PE 繊維の場合には逆の

表-5 両引試験供試体に発生したひび割れ本数一覧

配合記号	局所ひび割れ (本)	微細ひび割れ (本)
N45	14	5
V30-1.5	4	8
V45-1.5	3	53
V45-2.0	3	60
E30-1.5	4	19
E45-1.5	2	50
E45-2.0	3	8

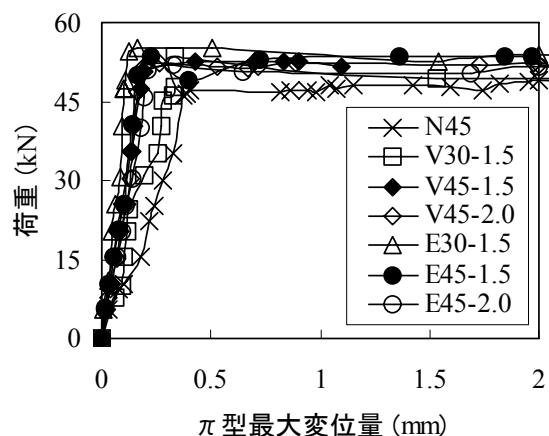


図-5 両引試験における荷重- $\pi$ 型最大変位量曲線

結果が得られている。今回の配合条件の場合には、PE 繊維の繊維体積率として 2.0% は過剰であったために、混入繊維量の増加が性能向上につながらなかったものと考えられる。

#### 5. 両引試験

普通モルタルおよび各種 DFRCC で作製した供試体を用いて実施した両引試験で供試体に発生したひび割れ状況を表-5 に、荷重- $\pi$ 型最大変位量曲線を図-5 に、荷重- $\pi$ 型平均変位量曲線を図-6 に示す。なお、表-5 に示した局所ひび割れとは、万能試験機のクロスヘッドストローク値が 30 mm の時点において供試体に発生しているひび割れの内、鉄筋直上位置にお

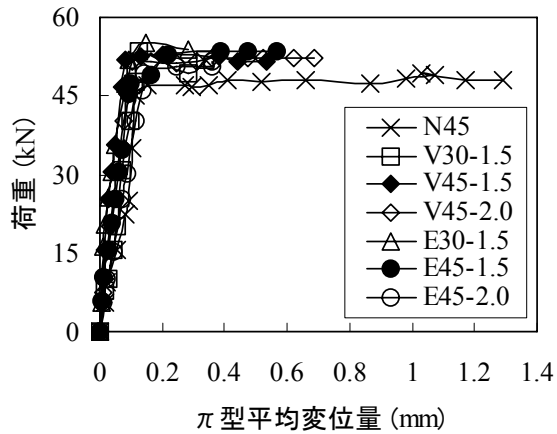


図-6 両引試験における  
荷重- $\pi$ 型平均変位量曲線

けるひび割れ幅が 0.4 mm 以上のものとし、微細ひび割れとは、0.4 mm 未満のひび割れとした。目視で確認可能なこれらのひび割れの本数を確認し、コンクリート 1 面あたりの平均値を表-5 に示した。図-5 に示した  $\pi$  型最大変位量とは、供試体に貼り付けた 12 個の  $\pi$  型ゲージの変位量の内、ある荷重レベルにおいて測定された最大値とする。また、図-6 に示した  $\pi$  型平均変位量とは、12 個の  $\pi$  型ゲージの内、ひび割れを跨いだ  $\pi$  型ゲージに関してある荷重レベルにおいて測定された変位量の平均値とする。

表-5 によると、普通モルタル N45 は局所ひび割れが 14 本と最も多く、微細ひび割れは 5 本と最も少ない。また、ひび割れ間隔はほぼ一定であった。これに対して、DFRCC は局所ひび割れが 2~4 本程度と少ないのに対して多数の微細ひび割れが観察された。特に、曲げ試験において、大きなじん性が得られた DFRCC ほど、微細ひび割れの本数が多い傾向が見られ、V30-1.5 と E45-2.0 は微細ひび割れの本数が少なくなっていることから、混入した繊維がひび割れの分散に対して有効に機能していないことがわかる。

図-5 より、鉄筋が降伏するまでの荷重に対する  $\pi$  型最大変位量は N45 が最も大きいことがわかる。各種 DFRCC は微細なひび割れが多数発生することで、変位の局所化を防いでいると言える。ただし、図-6 によると、 $\pi$  型平均変位

量は N45 が最も大きな値に達している。この平均変位量は、12 個の  $\pi$  型ゲージの内、どれか一つが 2 mm に達するまで求めていることから、各種 DFRCC は平均的な変位量が小さい内に、どこかのひび割れが急速に開いたことがわかる。一方、N45 は荷重初期段階のひび割れ幅は大きいものの、その後は大き目のひび割れが供試体全体に様に発生することで、各ひび割れの幅が急速に開くことを防いだと言える。

## 6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) W/B が 45% の DFRCC は、普通モルタルと比較して圧縮強度は低下したが、曲げ強度および曲げじん性は大幅に増加した。
- (2) PVA 繊維を混入した DFRCC は W/B が 30% の場合より 45% の場合の方が多数の微細ひび割れが分散し、曲げじん性が大きかった。
- (3) PE 繊維を混入した W/B が 30% の DFRCC は、PVA 繊維を用いた場合よりも大きな曲げ強度および曲げじん性が得られた。ただし、W/B が 45% で繊維体積率が 2.0% の場合には、1.5% の場合より微細ひび割れ本数が減少し、曲げじん性も低下した。
- (4) 両引試験の結果、曲げ試験で大きなじん性が得られた DFRCC ほど多数の微細ひび割れが発生した。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって、名古屋大学 国枝 稔 助教授から貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書（II），2004.5
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ 64，2005.7