

# 論文 高靱性セメント複合材料の断面修復への適用に関する基礎的研究

松尾 庄二<sup>\*1</sup>・川又 篤<sup>\*2</sup>・西脇 敬一<sup>\*3</sup>

**要旨**：引張あるいは曲げ応力下において優れた破壊靱性を示す高靱性セメント複合材料の実用化にあたり、断面修復材への適用を前提とした研究開発を行った。対象とする高靱性セメント複合材料が、断面修復材としての適切な性能を有するかを確認するために、3等分点載荷の曲げ試験やRC部材を用いた載荷実験を行った結果、断面修復材への適用が有望なことを確認できた。今後は、断面修復材としての必要性能の定量的評価や、耐久性能の照査を行うことにより、DFRCCの断面修復材への適用を実用化することが課題となる。

**キーワード**：高靱性セメント複合材料、断面修復、曲げ靱性、ひび割れ分散性

## 1. はじめに

高靱性セメント複合材料（以下、DFRCCと表記する）は、セメント系材料を短繊維で補強したもので、引張あるいは曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張および圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料である<sup>1)</sup>。近年、DFRCCの実構造物への適用に関する研究が活発に進められており、一部では既に実用化されている<sup>2)</sup>。しかしながら、通常のセメント複合材料（プレーンコンクリート、従来型の繊維補強コンクリートなど）と比較すると割高であり、また製造・施工に関しても専用の製造設

備を必要とする（生コンプラントを普通コンクリートと共用できない）、あるいは特殊なノウハウが要求されるなどの技術的な問題点を有する。そのため、現場での大量打設が必要とされるような構造物本体への適用は必ずしも有利とはいえない。したがって現段階では、小ロットで対応でき、なおかつ既存製品に対して価格面でも対抗可能と思われる、断面修復や表面保護工など薄肉部材への適用が有望と考えられる。

本論文は、DFRCCを断面修復材として適用することを目的として行った一連の実験について、途中経過を報告するものである。

表-1 断面修復材に求められる性能および基準値

項目	規格 種類 試験方法	JIS A 6203	JH	首都高	鉄道総研	DFRCCの必要性能の 基準値
		(ポリマセメント)	(モルタル)	(左官モルタル)	(左官モルタル)	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	JIS R 5201	15以上	24以上	20~40	コンクリートと同等以上	30, 45
曲げ強さ(N/mm <sup>2</sup> )	JIS R 5201	5以上	—	5以上	—	5以上
ひび割れ分散性	JSCE-G 552	—	—	—	—	複数ひび割れの発生
コンクリートとの一体化	—	—	—	—	初期ひび割れ荷重が同等以上、たわみは同等以下	初期ひび割れ荷重が同等以上、たわみは同等以下
収縮率(長さ変化)	JIS A 1129	0~0.15%	0.05%以下	0.05%以下	—	0.05%以下
熱膨張係数(°C)	JIS A 1129	—	2.0×10 <sup>-5</sup>	—	1~5×10 <sup>-5</sup>	コンクリートと同程度
温冷繰り返し	JIS A 6906	—	均一、割れ、剥がれ無し	ふくれ、割れ、剥がれ無し	—	ふくれ、割れ、剥がれ無し
付着強さ(N/mm <sup>2</sup> )	標準	JIS A 6910	1.0以上	—	コンクリートと同等以上	1.5以上
	温冷	—	—	1.5以上	—	1.5以上
遮蔽性	—	—	—	—	—	ポリマセメントモルタルと同等以上

\*1 鉄建建設(株) 技術センター材料・構造グループ主任研究員 (正会員)

\*2 鉄建建設(株) 技術センター材料・構造グループ 工博 (正会員)

\*3 鉄建建設(株) 東北支店 (正会員)

## 2. 断面修復材の必要性能

断面修復材に求められる性能は、種々の規格<sup>3)</sup>により独自に定められており、これらを整理すると表-1 (中列)のように示される。断面修復材は、基本的には修復対象となるコンクリート母材と同等以上の物性値が要求されている。特に、熱膨張係数や収縮率など耐久性に関する項目については、コンクリート母材とできるだけ同等の性能が必要とされる。

本研究では、断面修復材としてのDFRCCの必要性能として、これらを参考に表-1 (右列)のように基準値を設定した。DFRCCは、引張靱性に優れた材料であり、中でも高いひび割れ分散性能を有することが材料断面修復材への適用を期待される場所である。ただし、ひび割れ分散性能の定量的評価は、現時点では確立されたものはない。したがって、ひび割れ分散性については、目視による複数ひび割れの確認にとどめた。

## 3. 実験の概要

### 3.1 使用材料

DFRCCに使用される短繊維としては、ポリビニルアルコール(PVA)繊維、ポリエチレン(PE)繊維、ポリプロピレン(PP)繊維などの有機繊維や鋼繊維が一般的である。例えば、代表的なDFRCCとして知られるECCの場合、繊維径が0.01~0.04mmと非常に細かいPVA繊維やPE繊維が用いられている。このような細径の有機繊維は、補強用繊維として高い性能を発揮するが、その反面、練混ぜ時の取り扱いが難しく、また高価な材料でもある。本研究は、DFRCCとしての特性を発揮し、なおかつ施工性およびコスト面においてより有利な断面修復材を開発することを目的としており、補強用繊維に関してもそのような条件を満たす必要がある。使用する繊維としては、表-2に示す3種類(ただし、すべてPVA繊維)を選択した。各繊維を

表-2 使用繊維の諸元

略号	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	引張破断伸び (%)
A	0.037	12	1600	40	6
B	0.037	6	1600	40	6
C	0.100	12	1100	25	10

単独で使用した場合および2種類の繊維を混合した場合について、後述する事前試験を行い、適切な配合を決定した。なお、繊維の混合比については文献<sup>4)</sup>を参考にして決定した。繊維以外の材料としては、早強ポルトランドセメントおよび7号珪砂を使用し、高性能AE減水剤等の混和剤を適宜用いた。

### 3.2 実験方法

本研究では、適切な配合を選定するための事前試験、DFRCC(高靱性セメント複合材料)としての性能および母材との一体性を確認するための部材実験を行った。

#### (1) 事前試験

A~Cの各繊維を単独で使用した場合および2種類の繊維を混合した場合について、マトリックス強度(30N/mm<sup>2</sup>, 45N/mm<sup>2</sup>の2レベル)、砂セメント比(0.333, 0.5, 0.75, 1.0の4レベル)および繊維混入率(1.5%, 2.0%, 2.5%の3レベル)をパラメータとした実験を行った。実験では、試験練り時にスランプフロー、空気量の測定および目視、触感による繊維分散状況の確認を行った。なお、この段階でフレッシュ性状が著しく劣るものについては、試験を打ち切った。また、硬化後に直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用いた圧縮試験、100×100×400mmの角柱供試体を用いた3等分点载荷の曲げ試験を行い、強度、曲げ靱性能、ひび割れ分散性状等を確認した。

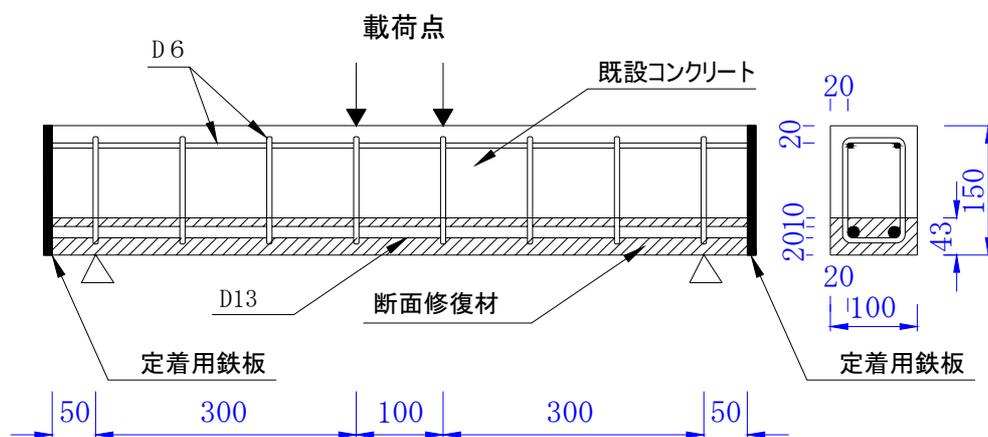
#### (2) 部材実験

事前試験により、フレッシュ性状および硬化後の性状が良好と確認された配合(表-3中のc~k)について部材実験を行った。また、比較試験体として、補修を行わない健全な部材(表-3のa)や断面修復工として通常用いられる

表－3 部材実験試験体一覧

試験体	配合条件				W/B (%)	air (%)	単位量						
	材齢7日 目標圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	繊維 の種類	V <sub>f</sub> (%)	S/C			W (kg)	C (kg)	S (kg)	ad			VF <sup>**3</sup> (kg)
										SP (B*%)	AE (B*%)	Vi (W*%)	
a	30 <sup>**1</sup>	断面修復無し			60.0	4.5							
b	30 <sup>**2</sup>	市販断面修復材			—	—							
c	45	A	2	0.5	40.0	6.5	410.6	1026.6	513.3	0.15	0.008	0	26.0
d		AB	2	0.5			410.6	1026.6	513.3	0.15	0.01	0	
e		AC	2	0.333			441.7	1104.3	368.1	0.3	0.018	0.1	
f		C	2	1			339.0	847.6	847.6	0.2	0.014	0	
g	45	AB	1.5	0.5	40.0	6.5	410.6	1026.6	513.3	0	0.015	0	19.5
h		AC	1.5	0.5			410.6	1026.6	513.3	0	0.018	0	
i	30	A	2	0.333	50.0		493.8	987.7	329.2	0	0.01	0.7	26.0
j		AB	2	0.333	52.5		505.2	962.3	320.7	0	0.015	0.8	
k		AC	2	0.333	51.5		500.8	972.4	323.8	0	0.014	0.8	

<sup>\*\*1</sup>: 材齢14日, <sup>\*\*2</sup>: メーカー指定配合のカタログ値, <sup>\*\*3</sup>: 外割



図－1 部材実験試験体断面

ポリマーセメントモルタル（以下、ポリマーと表記）で補修を行った部材（表－3のb）もそれぞれ作製した。なお、表－3中の繊維種類A、B、ACは2種類の繊維を混合比率7:3で併用したことを意味する。

本実験は、断面修復材として必要と考えられる母材との一体性を確認すること、また補修後の部材の耐力、剛性およびひび割れ発生状況を確認することを目的に行うもので、図－1に示す断面を有するRC部材（軸方向鉄筋は、両端部に配置した定着用鉄板に固定した）を用いた载荷実験である。試験体の作製は、既設コンクリートの打継面をチッピングした後に断面修復材をコテ塗りする方法で行った。なお、打継面の処理については、ポリマーで断面修復を行った

試験体bの場合、通常の施工方法にしたがってEVA系のプライマーを塗布した。一方、DFRCCによる試験体c～kでは、塗布直前に打継面に少量の水を散布するのみとした。

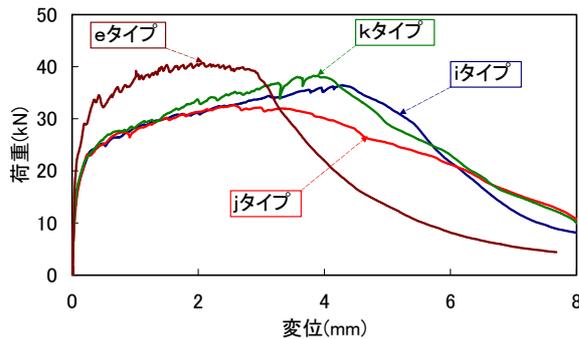
また、RC部材試験体作製時に、強度試験（圧縮試験、3等分点载荷の曲げ試験：供試体寸法は事前試験と同様）用の供試体を各3体作製し、RC部材の载荷実験と同材齢で強度試験を行った。

RC部材実験の载荷は、2000kN万能試験機を用いて変位制御により行い、試験体の鉛直変位、引張鉄筋のひずみ、コンクリートひずみ、载荷スパン部の曲げひび割れ幅および打継部の目開き量について計測を行った。また、载荷実験中および終了後に、ひび割れの観察を行った。

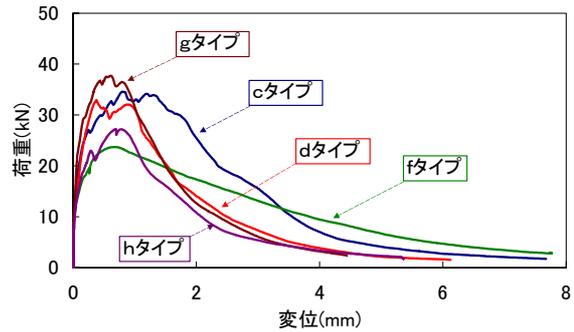
表－４ フレッシュ試験および強度試験結果

試験体 タイプ	配合条件				試験結果				
	強度 レベル (N/mm <sup>2</sup> )	繊維 の種類	V <sub>f</sub> (%)	S/C	フレッシュ時			硬化後	
					モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	※繊維の 分散状況	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ試験 ひび割れ の平均本数 (本/スパン)
a	断面修復無し							34.0	
b	市販断面修復材				153	11.0	—	45.5	1
c	45	A	2	0.5	169	8.8	△	44.8	6.3
d		AB	2	0.5	167	9.3	○△	46.3	4.7
e		AC	2	0.333	177	9.9	○	42.5	17.0
f		C	2	1	146	8.5	○	42.9	2.0
g	45	AB	1.5	0.5	169	7.4	◎	47.2	6.7
h		AC	1.5	0.5	174	8.1	◎	47.0	7.0
i	30	A	2	0.333	172	9.1	◎	32.9	53.0
j		AB	2	0.333	174	8.6	◎	29.2	28.3
k		AC	2	0.333	175	8.5	○	31.2	50.3

※◎：マトリックス中に繊維の塊がない状態  
 ○：マトリックス中に繊維の塊が僅かにある状態  
 △：マトリックス中に繊維の塊がある状態  
 ○△：○と△の中間の状態



図－２ 曲げ試験結果(1)



図－３ 曲げ試験結果(2)

#### 4. 部材実験結果

##### 4.1 フレッシュ試験および強度試験

フレッシュ試験および強度試験（圧縮試験，3等分点荷重の曲げ試験）の結果を表－４に示す。ただし，強度試験に用いた供試体は，RC部材試験体作製時に同一バッチの繊維補強モルタルから3体ずつ作製したものである。

目標強度を45N/mm<sup>2</sup>に設定した供試体c～hでの繊維の分散性は，V<sub>f</sub>=2%になると低下するものの，高性能AE減水剤を若干添加することにより改善が見られた。一方，目標強度を30N/mm<sup>2</sup>とした供試体i～kでは，水セメント比が大きく粘度が小さいために，2%の繊維を分散させる

ことは当初不可能であった。しかしながら，増粘剤を多量に添加し粘度を増大させることにより分散が可能となった。

事前試験からの一連の試験で見られた傾向としては，繊維径が細くなるほど，また繊維長が長くなるほど繊維の分散性が低下することである。また，繊維の分散性はマトリックスの粘度(W/Cに関連する)やS/Cに強く影響を受ける。ただし，S/Cの影響は繊維径によりかなり異なった傾向を示した。すなわち，細径の繊維ではS/Cが小さいほど，逆に太径の繊維ではS/Cが大きいほど分散性が高くなる傾向が見られた。

3等分点荷重の曲げ試験における荷重－変位



写真-1 複数ひび割れ発生状況

の関係を図-2および図-3に示す。図-2に示した供試体はたわみ硬化が顕著な例である。圧縮強度レベルが  $30\text{N/mm}^2$  の供試体 i ~ k および  $45\text{N/mm}^2$  の供試体 e がこれに該当する。このような荷重-変位曲線を示す供試体の場合、試験終了後の供試体の底面を写した写真-1に見られるように、目視確認が困難な微細ひび割れが複数発生した。一方、圧縮強度を  $45\text{N/mm}^2$  とした供試体 c ~ h (e を除く) では、繊維の種類や混入率でひび割れ発生本数(スパン 300mm 間に発生した全てのひび割れ数を測定した)は大きく異なって(表-4 参照)おり、その荷重-変位関係も図-3のようにたわみ硬化がほとんど見られない。これは、強度レベル  $45\text{N/mm}^2$  の場合、マトリックス-繊維間の付着強度からさだまる繊維架橋性能に対して、PVA 繊維の引張強度が小さいため、DFRCC としての性能を発揮できにくくなるためと考えられる。しかし、この場合でも、供試体 e のように径や長さが異なる繊維を組み合わせることにより、曲げ靱性やひび割れ分散性を向上させることができる。

#### 4.2 断面修復部材の載荷実験

##### (1) 荷重と変位の関係

図-4に、DFRCCにより断面修復を行ったRC部材の曲げ試験における荷重と変位の関係を示す。ただし、変位としてはスパン中央の鉛直変位を示した。なお、比較のために修復無しおよびポリマーにより修復した部材の実験結果もあわせて示した。

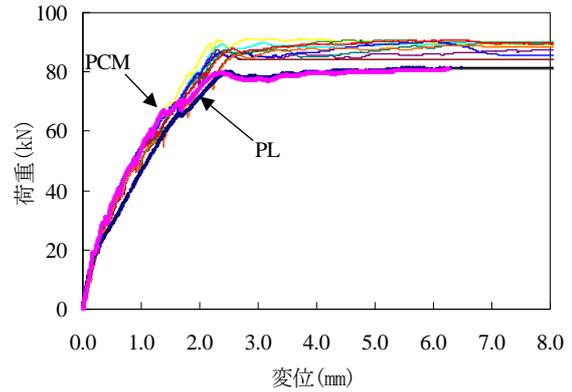


図-4 断面修復部材の曲げ試験結果

無修復(PL)およびポリマー修復部材(PMC)は、ひび割れ発生後の剛性は異なるものの、最終的な耐力は引張鉄筋で決まるため、ほとんど同じであった。これに対して、DFRCCにより修復した部材については、いずれのケースもPL部材より最終的な耐力は上回った。これは、短繊維補強による曲げ靱性向上の効果で、引張鉄筋が負担する引張力を、DFRCC部材が一部分担することによるものと考えられる。なお、荷重-変位関係あるいは最終耐力の増大に関しては、DFRCCの種類によらずほぼ一定であった。

##### (2) ひび割れ発生状況

写真-2に、載荷実験終了時のひび割れ発生状況の例を示す。DFRCCによる断面修復を行った試験体c~kは、鉄筋降伏後も複数のひび割れが発生し、最終的には一本のひび割れが進展・開口する(ひび割れの局所化)ことにより破壊に至った。

表-5には、部材降伏時に測定したひび割れの本数および平均のひび割れ間隔、ひび割れ幅を示した。ただし、平均ひび割れ間隔は、スパン全長に発生したひび割れ本数をスパン長(700mm)で除したものである。また、平均ひび割れ間隔は、試験体下面の曲げスパンでパイ型変位計(計測区間100mm)により測定した開口変位を、曲げスパン内に発生したひび割れ本数で除したものである。

曲げスパンにおける平均ひび割れ幅を見ると、DFRCCにより断面修復を行った試験体は最大で

表－５ ひび割れ発生状況：部材降伏時

試験体	スパン全長 (700mm)		曲げスパン (100mm)	
	ひび割れ本数	平均ひび割れ間隔(mm)	ひび割れ本数	平均ひび割れ幅(mm)
a	4	175	1	0.46
b	5	140	1	0.40
c	13	53.8	4	0.15
d	18	38.9	7	0.08
e	18	38.9	5	0.12
f	16	43.8	4	0.11
g	17	41.2	5	0.11
h	16	43.8	4	0.06
i	19	36.8	6	—
j	20	35.0	6	0.06
k	23	30.4	6	0.06

も 0.15mm で、コンクリート標準示方書に規定する鋼材の腐食に関する許容ひび割れ幅（一般環境下の異型鉄筋、かぶり厚 30mm の場合 0.15mm）以下である。また、PL あるいは PCM 部材と比較するとかなり小さい値となっている。

### (3) 打継面の開口状況

打継面の開口変位は、試験体による顕著な違いは見られなかった。また、いずれの場合も、ひび割れの進展にともなう断面修復部の剥落などは見られなかった。

### 4.3 部材実験のまとめ

DFRCC によって断面修復を行った部材は、強度レベルや繊維混入量に関わらず、健全な部材あるいはポリマーセメントモルタルによる断面修復部材と同等以上の剛性を有し、降伏荷重や最大荷重も大きくなった。また、複数ひび割れの発生により、ひび割れ間隔あるいは個々のひび割れ幅の減少が確認され、耐久性面でも有利なことが確認された。

### 5. まとめおよび今後の課題

高靱性セメント複合材料(DFRCC)が断面修復材としての性能を有することが確認できた。ただし、ひび割れ分散性能などについては、定性的な評価に留まっており、定量的評価方法の確立が今後の課題として残された。また、要素試験段階で曲げ靱性能に大きな差異が見られる場合でも、部材実験ではあまり違いが見られなかった。これについては、試験体の諸元や試験方法などの見直しが必要かもしれない。



写真－２ ひび割れ発生状況の一例

断面修復材に必要な性能である耐久性に関しては、今回は検討を行っていない。今後は、断面修復材自体の耐久性および修復された構造体の耐久性の双方に関して、検証を行うことが、DFRCC の断面修復材への適用を実用化する上での課題となる。

### 参考文献

- 1) 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：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，日本コンクリート工学協会，2002.1
- 2) 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：委員会報告書（II），日本コンクリート工学協会，2004.5
- 3) 例えば，日本道路公団：コンクリート片はく落防止対策マニュアル，2000.11
- 4) 綾野克紀他：形状寸法の異なるビニロン繊維の混合効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.213-218，2002.6