

# 混和材を用いた繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性評価

ライフサイクル工学分野

清水耕史

繊維補強セメント系複合材料 自己治癒 テラヘルツ透過計測  
吸水試験

## 1 研究の背景と目的

コンクリートなどのセメント系材料において、ひび割れの発生は、中性化や塩害などより重大な劣化に繋がる。そのため、ひび割れを抑制することはコンクリート構造物の長寿命化に不可欠である。通常のコンクリートにおいても、ひび割れ幅が 0.1 mm 程度までであれば、水分が供給される環境では自然に閉塞する場合がある。ひび割れの脆性的な進展を抑制することのできる繊維補強セメント系複合材料(以下 FRCC)に対して、極性基である OH 基を持つポリビニルアルコール (以下 PVA) 繊維を用いることで、0.3 mm 程度のひび割れ幅の自己治癒が可能であることが既往研究において示されている<sup>1)</sup>。

また、セメントより水和反応の遅い混和材を用いることで、自己治癒性能が向上するという研究があるが、FRCC での各種混和材の利用による自己治癒効果を検討した事例は少ない。

そこで、本研究では PVA 繊維を使用し、各種混和材を混入させた FRCC の自己治癒性能評価を行う。ここでは、吸水試験、テラヘルツ透過計測を用いて、混和材が FRCC のひび割れ自己治癒性能に与える影響について検討する。

## 2 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(C、密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)、細骨材は珪砂 6 号(S、密度 2.6 g/cm<sup>3</sup>、平均粒径 212 μm)、混和材はシリカフェューム(SF、密度 2.2 g/cm<sup>3</sup>、平均粒径 0.15 μm)、フライアッシュ(FA、II 種相当、密度 2.23 g/cm<sup>3</sup>、比表面積 4170 cm<sup>2</sup>/g)、高炉スラグ微粉末(GB、密度 2.91 g/cm<sup>3</sup>、比表面積 4230 cm<sup>2</sup>/g)、高性能減水剤(SP、比重 1.05 g/cm<sup>3</sup>、主成分ポリカルボン酸コポリマー)を用いた。補強繊維には PVA(繊維径 40 μm、繊維長 12 mm、密度 1.3 g/cm<sup>3</sup>、引張強度 1560 MPa)を使用した。実験は結合材を C のみとした CO、単一の混和材で置換した SF、FA、GB、および、3 種の混和材で計 50 %置換した TE の 5 シリーズで行った。本実験で使用した調合を表 1 に示す。ここで、B は結合材を示す。

### 2.2 物理的特性

表 1 の各シリーズについて、圧縮強度、割裂引張強度、密度の測定を行った。いずれの試験も半径 50 mm、高さ 100 mm の円柱試験体を用いた。試験は材齢 28 日で実施し、3 体の平均値を代表値とした。圧縮・割裂引張試験の载荷には 1000 kN 万能

表 1 調合表 (PVA を除き Wt.%)

	B				S/B	W/B	SP/B	PVA (Vol.%)
	OPC	SF	FA	GB				
CO	100	—	—	—	40	40	0.9	2
SF	90	10	—	—				
FA	80	—	20	—				
GB	80	—	—	20				
TE	50	10	20	20				

試験機を用いた。圧縮試験は JIS A 1108 および JIS A 1149 を参考に行い圧縮強度  $F_c$  とヤング率  $E$  を求めた。割裂引張試験は JIS A 1113 に則り、同じ万能試験機で実施し、割裂引張強度  $F_t$  を求めた。密度測定は乾燥状態の円柱試験体の質量を測定後、真空ポンプによって減圧吸水させ飽水状態の質量を気中・水中で測定し空隙率  $\phi$ 、かさ密度  $\rho_b$  および真密度  $\rho_m$  を求めた。

### 2.3 自己治癒性状

#### 2.3.1 吸水試験 (Sorptivity test)

予め 5 日間 60°C で乾燥させた半径 50 mm、高さ 100 mm 円柱試験体を用い、ASTM C 1585<sup>2)</sup> に示される吸水試験を実施した。ひび割れを導入する前(ひび割れ前)、ひび割れを導入した直後(ひび割れ後)、ひび割れ導入後、28 日間の水中養生を施した後(自己治癒後)の 3 状態において試験を実施した。ひび割れは、材齢 28 日にて割裂引張試験と同様に導入した。この際には、ひび割れ開口変位(以下 CMOD)を計測し、CMOD が 0.3 mm となるように制御した。吸水試験では、試験体の下面が水に 1~2 mm 浸かるよう水槽内に配置し、吸水量の経時変化を吸水開始から 100 分間まで計測した。この結果を、単位底面積あたりの吸水量  $W$  と時間の平方根  $\sqrt{t}$  の関係として整理した。

#### 2.3.2 テラヘルツ透過計測

テラヘルツ波とは、周波数約 0.1~10 THz の電磁波を指す。発生エネルギーが小さく人体に安全である一方、非極性物質に対する透過性が高く極性物質に対する吸収性が高い特徴を持つ。この特徴を用いて、コンクリート内のひび割れを、水を増感剤として検出する<sup>3)</sup>。ここでは、自己治癒前後のひび割れをテラヘルツ波透過計測し自己治癒効果を検出画像から比較する。発振器に周波数 90 GHz の GUNN ダイオードを用い、直径 50 mm、厚さ 5 mm に加工した試験体で縦 10 mm、横 20 mm の範囲を測定幅 0.25 mm で測定した。

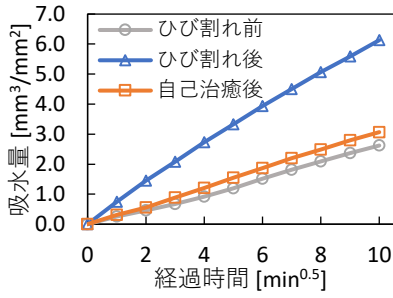


図1 吸水試験の一例 (CO)

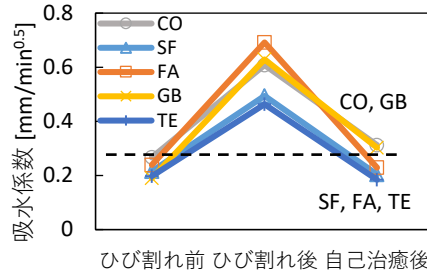


図2 吸水係数の推移

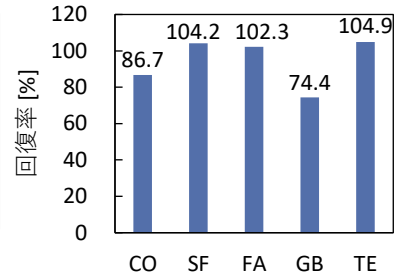


図3 各調合の回復率

表2 物理的特性

	$F_c$ [MPa]	$E$ [GPa]	$F_t$ [MPa]	$\Phi$ [%]	$\rho_b$ [g/cm³]	$\rho_m$ [g/cm³]
CO	60.6	34.4	4.52	28	1.80	2.49
SF	68.0	30.3	5.91	25	1.77	2.37
FA	53.2	28.4	5.94	28	1.76	2.43
GB	50.8	28.3	5.67	29	1.74	2.45
TE	63.2	28.9	6.86	23	1.75	2.29

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 物理的特性

表2に各シリーズの物理的特性を示す。表2から材齢28日時点でCOに対してFA、GBの圧縮強度が10~15%程度低いことが分かる。割裂引張強度は混和材を混入してもCOよりも大きい。また空隙率はシリカフェームが混入されているSFとTEが小さく、シリカフェームによるマイクロファイラー効果で緻密な構造が形成されているためと考えられる。

#### 3.2 自己治癒性

##### 3.2.1 吸水試験

図1に、吸水試験の結果の一例を示す。図1から吸水量はひび割れ後で大きくなり、自己治癒後で小さくなる事が分かる。吸水試験の結果は、吸水曲線の傾きを評価指標として用いることがASTM C 1585に示されている<sup>2)</sup>。この傾きは吸水係数として定義される。図2に吸水係数の推移を示す。図2より吸水係数はひび割れ前と比較して、ひび割れ後で大きくなり、自己治癒後で低下することが分かる。また、自己治癒後の吸水係数をひび割れ前の吸水係数と比べたとき、SF、FA、TEはひび割れ前と同水準であるが、COとGBはひび割れ前の吸水係数よりも大きい。ここで、吸水試験による自己治癒性状を定量的に評価するために回復率を定義する。回復率は、自己治癒後の吸水係数がひび割れ前の吸水係数にどの程度近づいたかを示す値で、強度回復率の算出式を参考に以下の式(1)で定義した<sup>4)</sup>。

$$R = \frac{S_c - S_h}{S_c - S_u} [\%] \quad (1)$$

ここで、R：回復率[%]、 $S_u$ ：ひび割れ前の吸水係数、 $S_c$ ：ひび割れ後の吸水係数、 $S_h$ ：自己治癒後の吸水係数を示す。

図3に示す各シリーズの回復率からは、SF、FA、TEの回復率が100%を超えていることが分かる。これは回復性能が高いことに加え、28日間の2次水中養生で水和反応が進行し、より緻密な構造へと変化したことが原因だと考えられる。

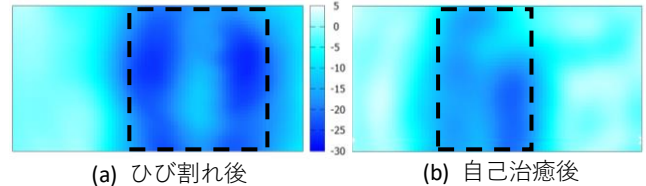


図4 水による透過率の変化 (CO)

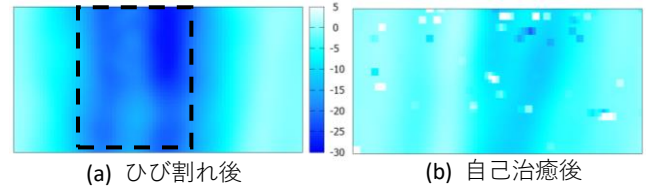


図5 水による透過率の変化 (TE)

#### 3.3 テラヘルツ透過計測

図4および図5にテラヘルツ透過計測の結果を示す。これらの図は水を滴下する前後の透過率の差分をとった、水分の影響による透過率変化を示している。図4に点線枠で示したように、ひび割れから内部に侵入・拡散した水分の範囲が自己治癒後で縮小していることが分かる。また、図5ではひび割れ後で見えていた水分の影響範囲が自己治癒後で見えなくなっていることが分かる。このことから、TEではひび割れが治癒し試験体内部への水の浸入が抑えられたと考えられる。

### 4 まとめ

PVA繊維を混入し、各種の混和材を用いたFRCCについて、物理的特性に関する実験と吸水試験、テラヘルツ透過計測を実施し自己治癒性能を確認した。シリカフェームを用いた調合において自己治癒性能が高いことを確認した。また、テラヘルツ波を用いてひび割れの検出・ひび割れの自己治癒性状の確認ができることを示した。

#### 【参考文献】

- 1) 国府田まりな他：合成繊維を用いたFRCCのひび割れ自己修復に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol. 76, No. 667, pp. 1547-1552, 2011
- 2) ASTM C 1585-04: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- 3) 田邊匡生他：社会インフラのテラヘルツ非破壊検査、レーザー研究、Vol. 47, pp. 6-10, 2019
- 4) X.F. Wang et al.: Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: A review, Construction and Building Materials, Vol. 212, pp. 400-421, 2019.