

論文 繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己修復機能に関する実験的研究

本間 大輔^{*1}・三橋 博三^{*2}・西脇 智哉^{*3}

要旨：既往の研究に於いて、水中コンクリートに発生するひび割れは、炭酸カルシウム結晶カルサイトが付着することにより時間の経過と共に自己修復されることが確認されている。本研究においては、様々な繊維補強セメント系複合材料を用い、繊維の種類によるひび割れ自己修復能力の性能差について比較検討を行った。その結果、合成繊維を多く混入する繊維補強セメント系複合材料ほど、ひび割れに架橋する繊維、及び、ひび割れ内部での複雑さが増すことにより、自己修復量が大きくなることが確認された。

キーワード：自己修復、繊維補強セメント系複合材料、透水係数、強度回復率

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、建物の性能低下に影響を与え、ひび割れを通してコンクリート内部に水や塩化物イオンなどの劣化因子が浸入することで、更なる性能低下をもたらす。一方、土木工学分野でよく知られていることであるが、ダムなどの水理構造物のコンクリートに発生するひび割れは、時間の経過と共に自己修復されることが確認されている。この現象の発生機構は、近年まではほとんど解明されておらず、Edverdson らの研究¹⁾によって、初めてX線回折分析結果から炭酸カルシウム結晶系の一形態であるカルサイトが自己修復原因物質であることが確認された。そこで、本研究では、様々な繊維を含んだ繊維補強セメント系複合材料に関して、ひび割れ自己修復能力の性能差について比較検討を行った。

2. 自己修復の原因

水理構造物に使用されるコンクリートに自己修復が起きる原因是、炭酸カルシウム結晶が付着すること、未反応セメント粒子が水和すること、水中の不純物及びコンクリート破片が付着することなど考えられるが、その中でも炭酸カルシウム結晶の付着が主な原因として報告されている¹⁾。

3. 実験概要

本研究では、ひび割れ自己修復の性能比較を、マイクロスコープ画像、及び透水試験、自己修復前後の引張試験の3点により評価を行う。

3.1 使用材料

本研究の試験体に用いた使用材料を表-1に示し、試

験体に用いた各シリーズの調合を表-2に示す。補強繊維にはポリエチレン繊維、及びスチールコード繊維を採用し、調合には、当研究室で開発中の力学的特性が優れると判断されたハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（以下 HFRCC と略称）と、合成繊維、または鋼繊維を単独で用いた単繊維のみの繊維補強セメント系

表-1 使用材料

Cement	High-early-strength portland cement	$\rho=3.14$			
Aggregate	Silica sand no.7	$\rho=2.61$ Diameter: 180 μm			
Mixing Materials	Silica fume	$\rho=2.2$ Diameter: 0.15 μm			
Viscous Agent	Water-soluble cellulose	$\rho=1.1$			
Fiber	Polyethylene (PE) Steelcode (SC)	under mention under mention			
Bar	Screw bar	Nominal diameter: 6mm(M6)			
Types of Fiber	Length (mm)	Diameter (mm)	Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Density (gm/cc)
PE fiber	6	0.012	73	2580	0.97
SC fiber	32	0.4	200	2850	7.84

表-2 各シリーズの調合

Types of Mix	Water/Binder	Sand/Binder	Silica fume/Binder	SP/Binder	PE fiber (Vol. %)	SC fiber (Vol. %)
MORTAR	0.45	0.45	0.15	-	-	-
FRCC(SC)				-	-	0.75
FRCC(PE)				0.09	1.5	-
HFRCC					0.75	0.75

Note: Binder = Cement + Silica fume; SP = Superplasticizer (Polycarboxylate)

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 山形大学 地域教育文化学部 准教授 工博 (正会員)

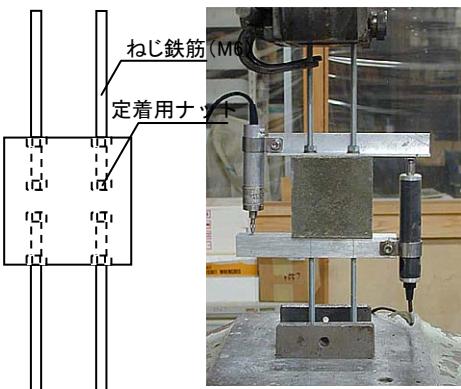


図-1 引張試験装置

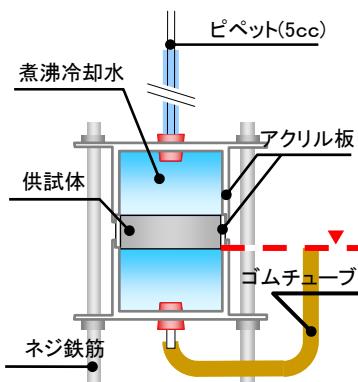


図-2 透水試験装置

複合材料（以下それぞれ FRCC(PE), FRCC(SC)と略称）を使用する。

3.2 引張試験

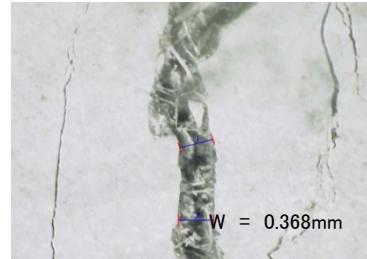
寸法 $75 \times 75 \times 25\text{mm}$ の平板試験体（図-1）に対して、打設後、1週間水中養生し、アムスラー型万能試験機を使用し引張試験を行う。試験体には二本のネジ鉄筋(M6)を埋設し、ネジ鉄筋を引っ張ることで、ひび割れを均等に発生させる。各シリーズにおいて、ひび割れ幅を変化させた試験体を複数用意し、水中に浸し4週間自己修復した後に、再度引張試験を行う。

3.3 マイクロスコープによる測定

マイクロスコープを用いて、載荷直後、及び、水中養生3日目、2週間目、4週間目の試験体表面の最大ひび割れ幅、及び炭酸カルシウム結晶の付着幅を計測し、自己修復の様子を調べる。

3.4 透水試験

引張試験直後、ひび割れ無しの試験体と、載荷によりひび割れを発生させた試験体に対して、当研究室で製作した図-2に示す実験装置を使用し透水試験を行う²⁾。ひび割れ有りの試験体に関しては、養生室にて水中に浸し、水中養生3日目、2週間目、4週間目にも、透水試験を行う。



載荷直後のひび割れ



3日のひび割れ

図-3 マイクロスコープ写真

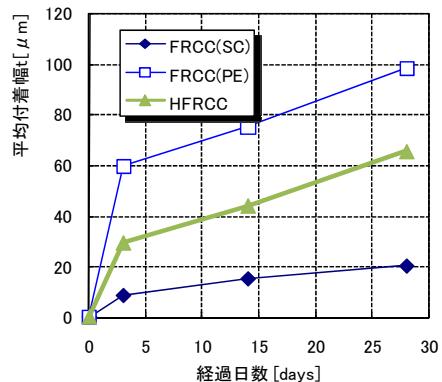


図-4 平均付着幅と養生日数

3.5 ラマン分光分析

上記とは別に、ひび割れを発生させ、自己修復した試験体に対して、ラマン分光分析を行う。ラマン分光分析は、水分を保持した物質を、その場測定できるという利点がある。

4. 実験結果

4.1 マイクロスコープによる測定結果

マイクロスコープにより、載荷直後及び、3日目、2週間目、4週間目の自己修復の様子を確認した。図-3に載荷直後及び、水中養生3日目のマイクロスコープ写真を示す。載荷直後はひび割れが明瞭であり、炭酸カルシウム結晶が付着していないことが見て取れ、水中養生を3日間行うことでき結晶が付着していることが確認できた。付着は、特にFRCC(PE), HFRCCの繊維の多い部分で多く、FRCC(PE)ではひび割れ幅が $100\mu\text{m}$ に達している個所でも修復が確認された。一方、繊維の架橋が少ない部

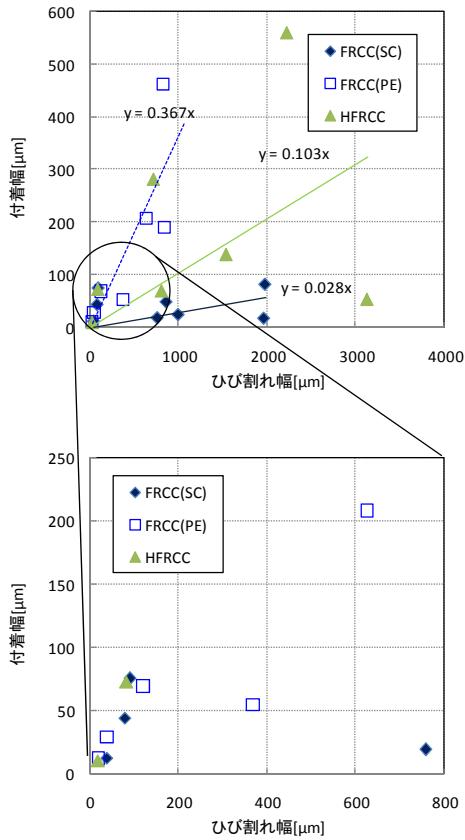


図-5 付着幅と最大ひび割れ幅

分、特に FRCC(SC)の大部分では、結晶の付着がほとんど見られず、また、ひび割れ幅が大きくなりすぎ纖維が抜けてしまっている箇所でも、付着はあまり見られなかった。3日目以降は、3日目程ではないが、結晶の付着が続き、ひび割れは徐々に塞がっていった。また、スチールコード纖維を混入した FRCC(SC), HFRCC に関しては、3日目の段階でスチールコード纖維に発錆、及び体積膨張が確認された。スチールコード纖維の錆は3日目以降も拡大していった。図-4にマイクロスコープにより計測した各シリーズの炭酸カルシウム層の平均付着幅と養生日数の関係を示す。付着速度は水中養生3日目までが最も早く、それ以降は、3日目までのよう急速な付着は見られなかった。これは、ひび割れ表面に結晶の層が形成され、カルシウムイオンの拡散性が低下したためだと思われる。また、3日目の段階で、付着量は、FRCC (PE) が最も多く、次いで HFRCC, FRCC(SC)の順に多かった。これは、体積あたりの纖維混入本数の順

(FRCC(SC) : HFRCC : FRCC(PE)= 0 : 1 : 2) と一致しており、ひび割れに架橋する纖維の量が多くなり、炭酸カルシウム結晶が付着しやすくなつたため、この結果に至つたと考えられる。従つて、体積あたりの纖維混入本数、つまり、ひび割れに架橋する纖維量が、ひび割れの修復作用に影響を与えていることが確認された。ま

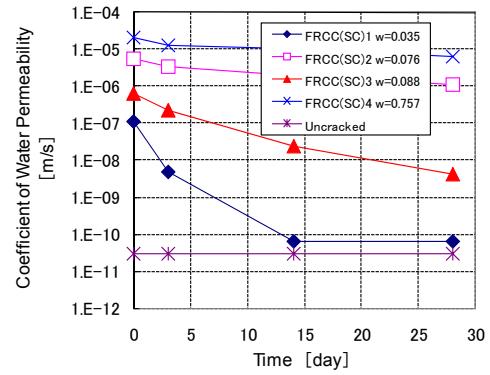


図-6 FRCC(PE)の経過日数と透水係数

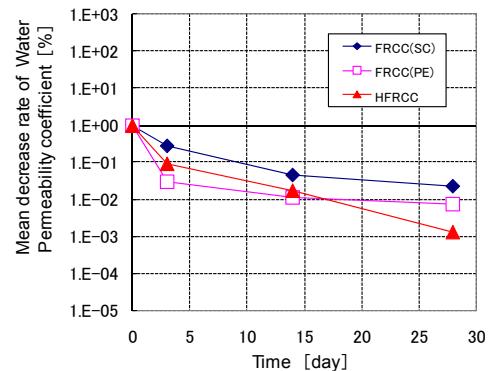


図-7 各シリーズの透水係数減少率

た、最大ひび割れ幅と付着幅の関係を図-5 に示す。この図においては、回帰直線の傾きが 1 の場合、ひび割れに付着した付着幅がひび割れの幅に達したと考えることができ修復したとみなすことが出来るが、各シリーズひび割れ幅が 0.1mm 以下と小さい場合は傾きがほぼ 1 に近くほとんど修復していたが、0.1mm 以上とひび割れ幅が大きい場合は修復しづらい結果となった。しかし、この場合もポリエチレン纖維を多く入れた FRCC(PE)において、近似直線の傾きが最も大きく、ひび割れが多く修復されていることが確認された。

4.2 透水試験結果

(1) 透水係数

透水係数は以下のようにして求める。ダルシーの法則より、単位時間あたりの透水量は透水係数 K を用いて式(1)で表される。 K は、この式より定義される透水性を表す物理量で、単位は[m/s]である。

$$\frac{dQ}{dt} = K \frac{h}{L} A \quad (1)$$

ここに Q : 液体の透過量 [m^3]

t : 時間 [s]

h : 水柱の高さ [m]

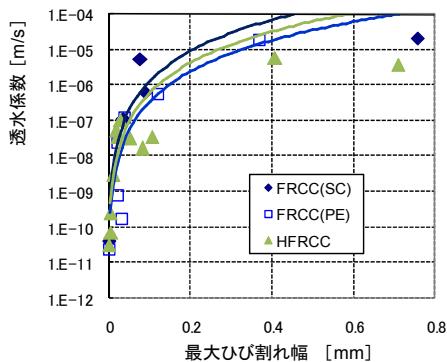


図-8 透水係数と最大ひび割れ幅

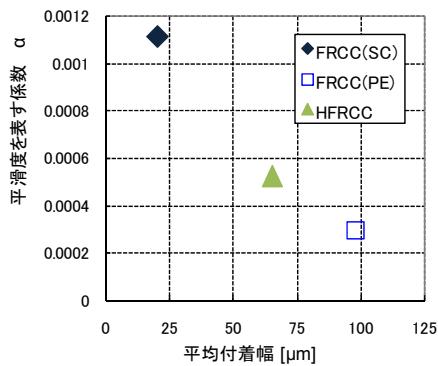


図-9 ひび割れの平滑度と付着幅

L : 水流方向のコンクリートの厚さ[m]

A : 水流の断面積[m²]

式(1)は微小時間当たりの水の流量を表す式と考えられ、ピペットの断面積を A'[m²]とすれば、以下のように書き換えられる。

$$\frac{dQ}{dt} = -A' \frac{dh}{dt} = K \frac{h}{L} A \quad (2)$$

この式をさらに変形して

$$-\frac{dh}{h} = -K \frac{hA}{A'L} dt \quad (3)$$

h_0 から h_1 まで積分し

$$K = \frac{A'L}{At} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (4)$$

ここに Q : 水の透過量[m³]

t : 透過時間[s]

h : 水柱の高さ[m]

L : 水流方向のコンクリートの厚さ[m]

(ここでは試験体の厚さ)

A : 水流の断面積[m²]

(ここでは透水装置と試験体の接触面積)

h_0 : 試験開始時の水柱の高さ[m]

h_0 : 測定時の水柱の高さ[m]

この式(4)により、各試験体の透水係数 K を算出する。

(2) 自己修復

図-6 に、FRCC(SC)シリーズの水中養生を行った経過日数と透水係数の関係を示す。また、図-7 に 1 日目を基準にした各シリーズの透水係数の平均減少率を示す。水中養生を 3 日間行った後は、どのシリーズの試験体も透水係数の低下がみられ、自己修復が確認された。しかし、3 日目以降は、ばらつきはあるものの、ひび割れ幅の大きさに従って、透水係数が減少している試験体と減少していない試験体が存在した。ひび割れ幅が小さい試験体では透水係数が減少し、ひび割れ幅が大きい試験体では透水係数がほとんど減少していなかった。また、各シリーズの比較を行うと、図-7 より、3 日目までの透水係数の減少量（自己修復の量）は、FRCC(PE)が最も大きく、次いで HFRCC, FRCC(SC)の順であった。

図-8 に透水係数と最大ひび割れ幅の関係について示す。透水係数とひび割れ幅の関係は、流体力学の 2 枚の平行な板の理論より、以下の関係式が成り立つといわれている^{2),3)}。

$$K = \frac{\alpha g}{12v} w^3 \quad (5)$$

ここに w : ひび割れ幅[mm]

α : ひび割れ内部の平滑度を表す係数、値が大きいほど平滑な 2 枚の板に近づく

v : 液体の動粘性[m²/s] g : 重力加速度

式(5)により、透水係数 K は、ひび割れ幅の 3 乗、及びひび割れ内部の平滑度 α に比例する。図-9 に透水試験より求めた各シリーズのひび割れ内部の平滑度を表す係数と 28 日時点での付着幅を示す。図より、平滑度が大きいシリーズほど付着量が小さいという結果が得られており、これはミクロ纖維であるポリエチレン纖維をあまり混入しなかったため、ひび割れ発生時にひび割れ内部の平滑度が増し、炭酸カルシウム結晶が付着しづらくなつたためと思われる。従って、ひび割れ内部の平滑度が自己修復に影響を与えるものと考えられる。

4.3 ラマン分光分析結果

図-10 に、ラマン分光分析の結果を示す。ラマン分光分析は、自己修復後のひび割れ部分とひび割れのない部分に関して、炭酸カルシウム結晶カルサイト波形との比較によって行った⁴⁾。その結果、ひび割れ個所の波形は、炭酸カルシウム結晶カルサイト波形と一致しており、ひび割れのない個所は一致していなかった。従って、既往の研究と同様、本研究においても自己修復の原因物質が炭酸カルシウム結晶カルサイトであることが確認された。

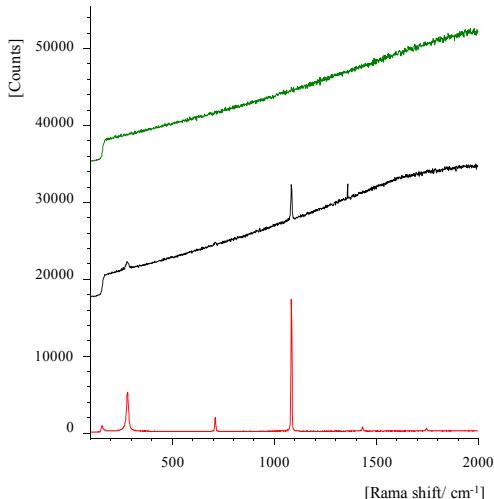


図-10 ラマン分光分析

4.5 引張試験結果

4週間水中養生し、炭酸カルシウム結晶が付着し、一定程度自己修復したとみなせる試験体に対して、再度引張試験を行い力学的特性の変化を調べた。試験体の中には、ひび割れ幅が大きくなりすぎて、埋設しておいた鉄筋が腐食し、2度目の試験が行えない試験体も存在した。各シリーズの引張試験結果を図-11に示す。一般的に、自己修復前後の変位応力曲線は図-12のようになり、ここで強度回復率cを次のように定義することによって、各シリーズの力学的回復の比較検討を行う^{5), 6), 7)}。

$$c = \frac{\sigma_2 - \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \times 100 \quad [7]$$

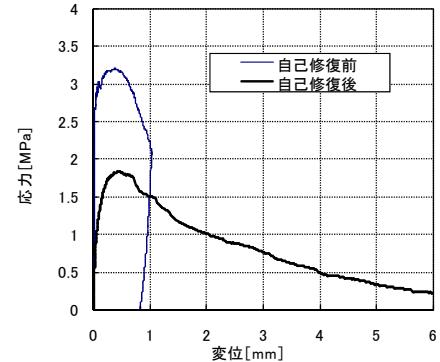
ここに σ_0 : ひび割れ導入試験での除荷時の応力

σ_1 : ひび割れ導入試験での引張強度

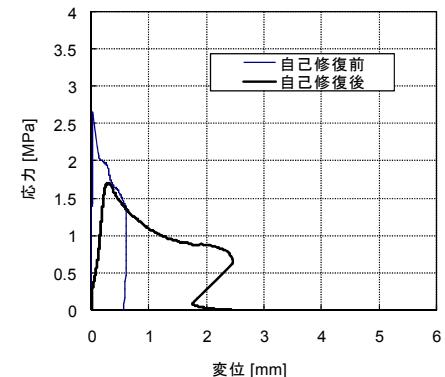
σ_2 : 自己修復後の引張強度

強度回復率cを導入することにより、cが100以上であれば、完全に回復し、0から100の間であれば、一定程度回復、0のままであれば回復しておらず、0以下の場合は劣化しているということができる。図-13に強度回復率と残留ひずみの関係を示す。

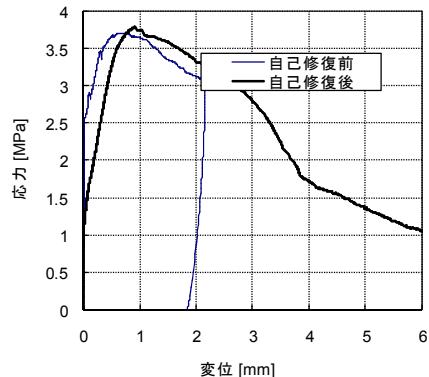
FRCC(SC)については、ひび割れ作製時の試験で、ひずみ軟化途中、若しくは延性を示している時、載荷を停止した。その後、水中養生をした試験では、どの試験体も、初期載荷での除荷時の強度を上回るものなく、強度回復率が0以下であった。FRCC(SC)に関しては、マイクロスコープ写真から4週目の試験体には、炭酸カルシウム結晶の付着がほとんど見られず、また、スチールコード繊維に錆が発生してしまったため、この結果につながったものと考えられる。



(1) FRCC(SC)



(2) FRCC(PE)



(3) HFRCC

図-11 自己修復前後の引張試験結果

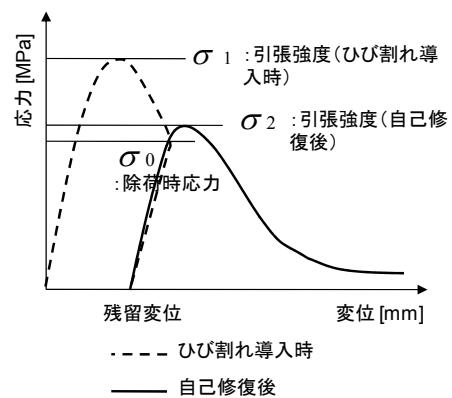


図-12 自己修復前後の変位応力関係

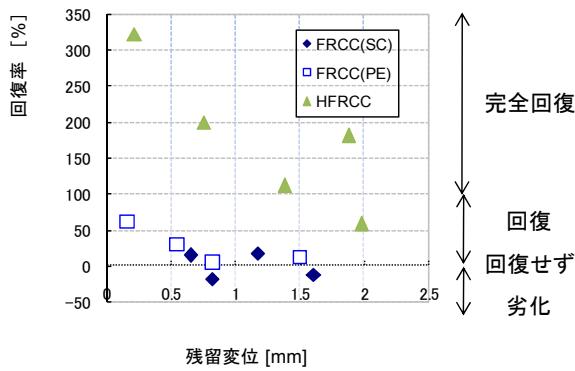


図-13 強度回復率と残留変位

次に FRCC(PE)については、1回目の試験でひずみ軟化中に載荷を停止した。2回目の試験における引張強度は、初期の引張強度までは達することはなく、除荷時の強度を下回ることもなかった。つまり、強度回復率が0から100%の間に位置した。強度の回復は、残留ひずみが小さい試験体ほど大きく、つまり、ひび割れ幅が小さいものほど、自己修復しやすかった。以上より、ひび割れ面に炭酸カルシウムが付着することによって、ある程度、引張強度の回復が期待できることが確認された。

次に、HFRCCに関しては、FRCC(SC)と同様、初期載荷では延性を示している時、または、ひずみ軟化が緩やかに起きている時に載荷を停止した。自己修復後の試験では、引張強度はすべての試験体で除荷時の強度より高くなり、また試験体6体のうち5体が初期載荷時の引張強度を上回った。これは FRCC(PE)と同様、炭酸カルシウム結晶が付着したことによるものと考えられる。また、初期載荷で残留ひずみが大きかった試験体に関しては、2回目の試験で延性が見られず、すぐにひずみ軟化が生じた。一方で、残留ひずみが小さかった試験体では、2回目の試験でも延性が確認された。

また、破断後のひび割れ面を確認した結果、FRCC(SC)に関しては、スチールコード繊維の錆が、ひび割れ表面だけではなく、ひび割れ内部にも確認されたが、HFRCCに関しては、炭酸カルシウム結晶が多く付着し自己修復したため、ひび割れ内部のスチールコード繊維に錆が見られることはなかった。

5. 結論

繊維補強セメント系複合材料を用いた場合のひび割れ自己修復の様子を、マイクロスコープ画像、及び、透

水試験により確認し、また、自己修復後の試験体に対して、引張試験を再度行い、力学的特性の変化を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) FRCC(PE), HFRCC, FRCC(SC)の順に炭酸カルシウム結晶の付着量が大きいことが確認され、ひび割れに架橋する繊維の量、ひび割れ面の平滑度が、炭酸カルシウム結晶の付着量に影響を与えることが確認された。
- (2) 炭酸カルシウムによる自己修復現象において、合成繊維と鋼繊維を組み合わせた HFRCC が最も力学的強度の回復につながることが確認された。

謝辞

本研究は平成 18 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)：課題番号 18206058 及び若手研究(B)：課題番号 18760412）の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Edvardsen, C.: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Materials Journal, vol.96, No.96-M56, pp.448-454, 1999
- 2) 西脇智哉, 三橋博三：コンクリートのひび割れ画像解析と劣化度に関する研究, セメントコンクリート論文集、No.58、pp.140-145, 2004
- 3) Tsukamoto, M., Woener, J.D.: Permeability of cracked fibre-reinforced concrete, Darmstadt Concrete, Vol.6, pp.123-135, 1991
- 4) A. El-Turki, R.J. Ball, G.C. Allen.: The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime, cement and concrete research, Vol.37, pp1233-1240, 2007
- 5) 三橋博三, 金子佳生, 西脇智哉：セメント粒子の自己カプセル化によるコンクリート強度の自己回復機能に関する基礎的研究, 建設用原材料, vol.10, No.1, pp.10-14, 2000
- 6) 清崎里恵, 松下博通, 陶佳宏：強さ 32.5 クラスのセメントを用いたモルタルにおける初期ひび割れの強度回復特性, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.1, pp605-610, 2003
- 7) 内藤哉良, 松下博通, 鶴田浩章, 佐川康貴：初期ひび割れ導入モルタルの自己修復特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.26, No.1, pp627-632, 2004