

# PVA 繊維混入によるコンクリートの 複合的自己治癒の性能評価に関する基礎的研究

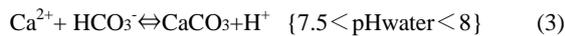
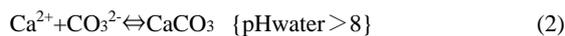
The Fundamental study on the performance evaluation of composite self-healing of concrete using PVA fiber

北見工業大学 工学部 社会環境工学科 ○学生員 芳賀 匠 (Takumi Haga)  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科 正 員 崔 希燮 (Choi Heesup)  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科 正 員 井上真澄 (Masumi Inoue)

## 1. はじめに

一般に寒冷地環境にあるコンクリート構造物は、凍害単独または凍害と塩害との複合劣化を受けやすい非常に厳しい環境下に曝されている。また、一般的なコンクリートに発生する乾燥収縮や中性化などで発生したひび割れが凍害などの作用により進展する可能性もある。さらに、これらの環境作用が繰返し作用することによりひび割れ幅が拡大し、このひび割れからコンクリート内部へ  $\text{CO}_2$  や  $\text{Cl}^-$  などといった劣化因子の浸透が進展されることでコンクリート構造物の致命的な損傷に至ることが懸念される。

一方で、水分供給を受ける環境下において、コンクリートのひび割れを自然に修復する自己治癒現象がみられる<sup>1)</sup>。修復のメカニズムは、コンクリート中の  $\text{Ca}^{2+}$  が水に溶けた  $\text{CO}_3^{2-}$  と反応することで  $\text{CaCO}_3$  となり、これによりひび割れが修復するとされている<sup>2)</sup>。以下に、カルサイトの結晶の反応式 (1) ~ (3) を示す。



この現象を利用し、ひび割れを自律的に修復することができれば、コンクリート構造物の維持管理の負担軽減や長寿命化、環境負荷の低減に大きく寄与しうる。既存の研究で、一般的なコンクリートでは、0.1mm 程度のひび割れを自己修復することを確認されている<sup>2)</sup>。これに対して、コンクリート中に短繊維を混入してひび割れを分散させひび割れ幅を小さくすることにより、効率的に自己治癒機能を促進する方法が考案されている<sup>3) 4)</sup>。特に極性基である  $\text{OH}^-$  基を持つポリビニルアルコール繊維 (以下、PVA) を用いることで、より良好な自己治癒性能を示すことが明らかにされている<sup>4) 5)</sup>。このメカニズムは、 $\text{OH}^-$  が  $\text{CO}_2$  と反応することで  $\text{HCO}_3^-$  となり、これが  $\text{H}^+$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  に分解され、 $\text{CO}_3^{2-}$  がコンクリートの  $\text{Ca}^{2+}$  と反応して  $\text{CaCO}_3$  になることでひび割れの修復が可能であると考えられている。以下に、PVA の  $\text{OH}^-$  基によるカ

ルサイトの結晶の反応式 (4) ~ (5) を示す。



本研究では、凍害によって発生・進展するひび割れに対して、極性基 ( $\text{OH}^-$ ) を持つ PVA を用い、コンクリートの自己治癒と共に PVA による複合的自己治癒性能を把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び繊維特性

本実験における配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (C、密度：3.16g/cm<sup>3</sup>、平均粒径10 $\mu$ m)、細骨材はけい砂5号 (S、表乾密度：2.61g/cm<sup>3</sup>、平均粒径180 $\mu$ m)、混和剤には高性能減水剤 (SP、密度：1.05 g/cm<sup>3</sup>、主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物) を用いた。補強繊維にはPVA (繊維径100 $\mu$ m、繊維長12mm、密度1.3 g/cm<sup>3</sup>)、ポリプロピレン (以下、PP) (繊維径300 $\mu$ m、繊維長12mm、密度0.91 g/cm<sup>3</sup>) を使用した。

表-1 モルタル配合表

Type	S/C (Wt.%)	W/C (Wt.%)	SP/C (Wt.%)	Fiber (Vol.%)
PVA	40	30	0.25	1.2
PP				

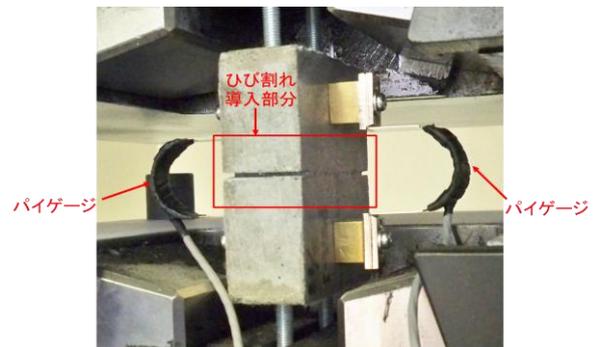


図-1 引張載荷試験時の試験体

## 2.2 試験体概要

試験体形状は、85×80×30mm (L×B×H) 形状のものを用い、各シリーズ2本ずつ作製した。打設後28日間、20℃の養生槽内での水中養生の後、万能試験機を用いて引張荷重試験を行うことで、試験体に幅0.3mmのひび割れを導入した。図-1に試験体の引張荷重試験状況を示す。

## 2.3 実験方法

表-2に実験の手順を示す。まず手順Aでは、引張荷重試験によるひび割れを導入後に、透水係数を測定する。次に手順Bでは、試験体を自己治癒させた後、透水係数を測定した。なお、自己治癒は、水(水道水)および水酸化カルシウム(以下、Ca(OH)<sub>2</sub>)水溶液を溜めた水槽を用意し、ここに試験体を浸漬することにより各々の自己治癒性能を評価した。ここでCa(OH)<sub>2</sub>水溶液を使用するのは、既存の研究において飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液のCa<sup>2+</sup>が自己治癒を促進させることが報告されており<sup>6)</sup>、本研究でも自己治癒機能を極大化させるために使用した。自己治癒期間は7日間と設定し、水温は20℃、pH濃度については、水が6.1で、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液は12.0に調整したものを使用した。手順Cでは、手順Bでの1次自己治癒を経た試験体を用いて凍結融解の繰返しを作用させ、凍害によるひび割れを導入した。凍結融解試験はJIS A 1148に準拠したが、本実験では100サイクルで試験を終了し、その後透水係数を測定した。最後に手順Dでは、手順Bと同じ方法を用いて自己治癒を行い、その後透水係数を測定した。

その他、モルタル内部の自己治癒の進展を確認するために、マイクロフォーカスX線CTスキャンを用いてひび割れ表面の変化を確認した。また、ひび割れ部分に存在する繊維に起因する自己治癒物質の析出を確認するために、SEM観察を行った。

表-2 実験内容

手順	実験項目	評価項目
A	荷重試験時によるひび割れ導入	透水係数(K)による自己治癒性能の評価
B	1次自己治癒	
C	凍害によるひび割れ導入	
D	2次自己治癒	

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 透水試験

表-3および図-2から図-6に透水試験の結果を示す。なお、図-2から図-4は自己治癒方法による各々の繊維シリーズの透水係数を示し、図-6は各々の繊維シリーズにおいて手順Aの透水係数を基準として算出した透水係数比を示す。PVAの場合、図-2と図-3のように水に浸漬したケースでは、手順Aに対して手順Bでは約10倍透

水性が回復し、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液のケースでは約100倍回復する傾向を示した。手順Cでは、凍結融解作用によってすべてのPVA試験体が手順Bに比べ透水性が低下したが、手順Dにおいて、水のケースは手順Aに比べ約100倍、手順Cに比べ約10倍の透水性が回復し、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液のケースは手順Aに比べ約1000倍、手順Cに比べ約100倍の透水性が回復する傾向を示した。一方、PPの場合、図-4と図-5のように、水とCa(OH)<sub>2</sub>水溶液のいずれのケースにおいても手順Aから手順Bに比べ約10倍透水性が回復し、手順Cではすべて手順Bに比べ透水性が低下した。しかし、手順Dでは、水のケースは透水係数の変化は小さく、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液のケースでも約10倍の透水性の回復にとどまった。図-6の各繊維シリーズの透水係数比に着目すると、水のケースの自己治癒性能は、手順Bにおいては、PVAがPPに比べ約3倍の透水性が回復し、手順Dにおいては、約56倍の透水性が回復する傾向を示した。これに対してCa(OH)<sub>2</sub>水溶液のケースの自己治癒性能は、手順Bにおいては、PVAがPPに比べ約12倍の透水性が回復し、手順Dにおいては、約370倍の透水性が回復する傾向を示した。

上記の自己治癒方法と繊維種類別の比較・評価より、PVAがPPに比べ効果的な自己治癒性能を発揮し、また、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液のケースが水のケースより自己治癒性能を向上させることができると判断される。すなわち、0.3mm程度のひび割れについて、OH<sup>-</sup>基を持つPVA繊維の使用と共にCa(OH)<sub>2</sub>水溶液中のCa<sup>2+</sup>によって、自己治癒物質の生成が促進されたものと推定される。

表-3 透水試験結果

Type	透水係数 (m/sec)			
	手順A	手順B	手順C	手順D
PVA-Water	3.09×10 <sup>-5</sup>	2.48×10 <sup>-6</sup>	2.68×10 <sup>-6</sup>	4.38×10 <sup>-7</sup>
PVA-Ca(OH) <sub>2</sub>	5.96×10 <sup>-5</sup>	2.80×10 <sup>-7</sup>	3.17×10 <sup>-6</sup>	5.40×10 <sup>-8</sup>
PP-Water	1.69×10 <sup>-5</sup>	4.99×10 <sup>-6</sup>	6.34×10 <sup>-5</sup>	1.35×10 <sup>-5</sup>
PP-Ca(OH) <sub>2</sub>	2.59×10 <sup>-5</sup>	1.47×10 <sup>-6</sup>	3.96×10 <sup>-5</sup>	8.77×10 <sup>-6</sup>

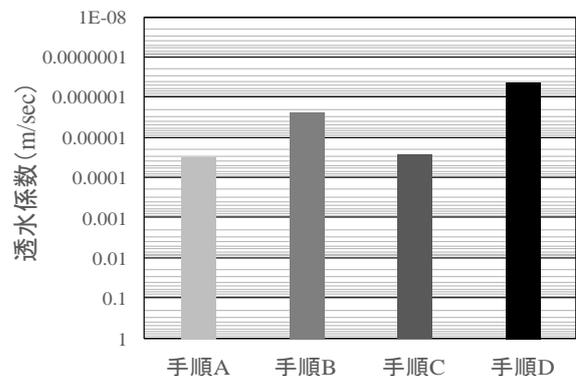


図-2 PVA-Water

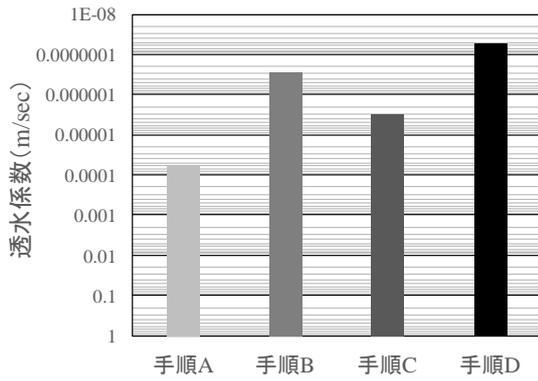


図-3 PVA- Ca(OH)<sub>2</sub>

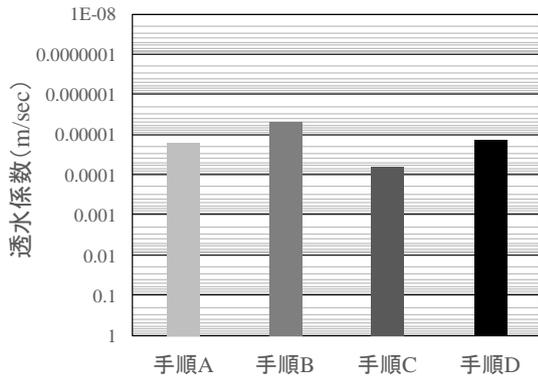


図-4 PP-Water

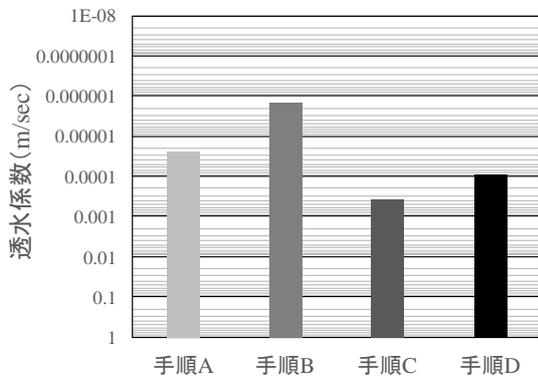


図-5 PP- Ca(OH)<sub>2</sub>

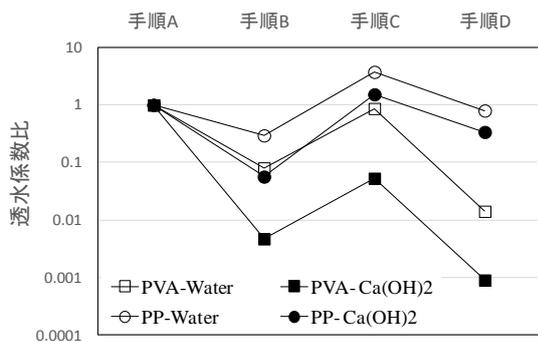


図-6 Permeability ratio (K)

### 3.2 自己治癒性能のミクロ的考察

図-7に、ひび割れ導入時と自己治癒後のひび割れ状況を示す。PVAを用いてCa(OH)<sub>2</sub>水溶液に浸漬したケースでは、手順Aで発生させたひび割れが手順Dを終えた段階で修復していることが目視で確認された。図-8と図-9には、マイクロフォーカスX線CTスキャンを用いた試験体内部の解析結果を示す。解析画像では、各材料の密度差によって色が変化し、密度が低いほど黒く表示され、高いほど白く表示される。PVA-Water試験体では、黒く表示されるひび割れ面がはっきりと確認される。これに対して、自己治癒後(手順D)のPVA- Ca(OH)<sub>2</sub>試験体では、ひび割れ面とみられる密度差は確認されなかった。ここで、密度が高いほど白くなるが、図-9のように、自己治癒によって修復した部分のみを確認するため、その部分を緑色に表示した。

つまり、ひび割れ部分に自己治癒物質が生成・付着したことによりひび割れ部が充填されたものと考えられる。図-8と図-9では試験体の種類が違っているが、図-7の観察結果を踏まえると、ひび割れは表面だけでなく内部も修復できていると考えられる。さらに、図-10に示すひび割れ面におけるPVA繊維のSEM観察結果より、PVA繊維表面に自己治癒物質が付着していることが確認できた。したがって、3.1の物理的な実験結果と共にPVA繊維表面における自己治癒物質の観察結果より、PVAを用いることで自己治癒がより促進できると考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、凍害によるひび割れを受けたコンクリートを繊維補強により分散させ、0.1mm以上のひび割れを自己修復することで、補修材モルタル部分からコンクリート構造物内部への劣化因子の侵入を抑制することを目的とした。ひび割れの自己治癒性能を、透水試験及びマイクロフォーカスX線CTスキャン観察によって、比較・評価を行った。以下、本研究における知見を示す。

1) 凍害によるひび割れをいずれの繊維体であっても修復することが可能であるが、PVAの方がPPに比べより修復することが確認できた。

2) 自己治癒方法ではCa(OH)<sub>2</sub>水溶液の方が水に比べ、効率的にひび割れを修復できることを確認した。

この結果より、繊維補強によってひび割れを修復し、劣化因子の侵入を抑制できると考えられる。本研究では、透水試験によって、劣化因子の侵入の評価を行っているが、実際には空気によって劣化因子が浸入することの方が多いため、今後の課題として、通気性試験を行うことで劣化因子を含む空気の抑制可能性の調査が必要である。

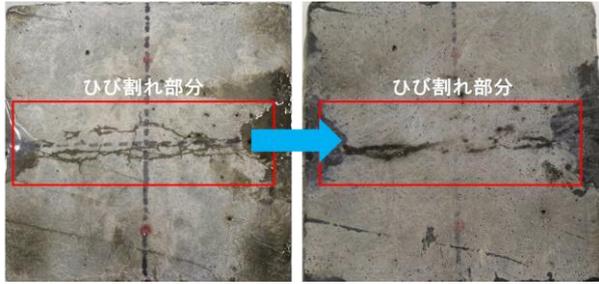


図-7 PVA- Ca(OH)<sub>2</sub>試験体の修復状態  
(左：手順A後、右：手順D後)

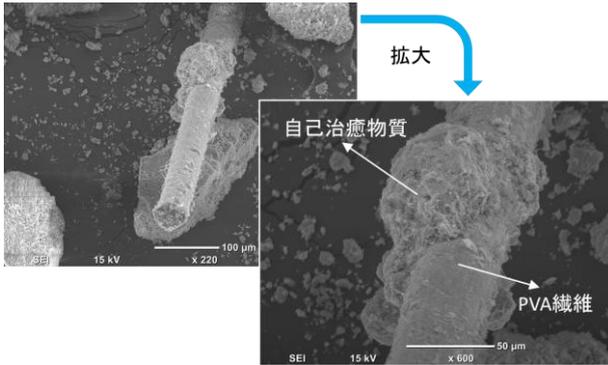


図-10 PVA繊維の表面 (SEM観察)

参考文献

- 1) Neville A.M. : Properties of Concrete、Person Education Limited、p.328、1995
- 2) Edvardsen、C. : Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete、ACI Materials Journal、Vol.96、No.96-M56、pp.448-454、1999
- 3) 柳博文他：鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.20、No.3、pp.1225-1230、1998
- 4) 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
- 5) 佐々木悠他：養生条件の違いが繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己治癒に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、2014
- 6) Haoliang Huang、Guang Ye : Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca<sup>2+</sup> ions in the healing agent、Journal of intelligent Material Systems and Structures、1-12、2014.03

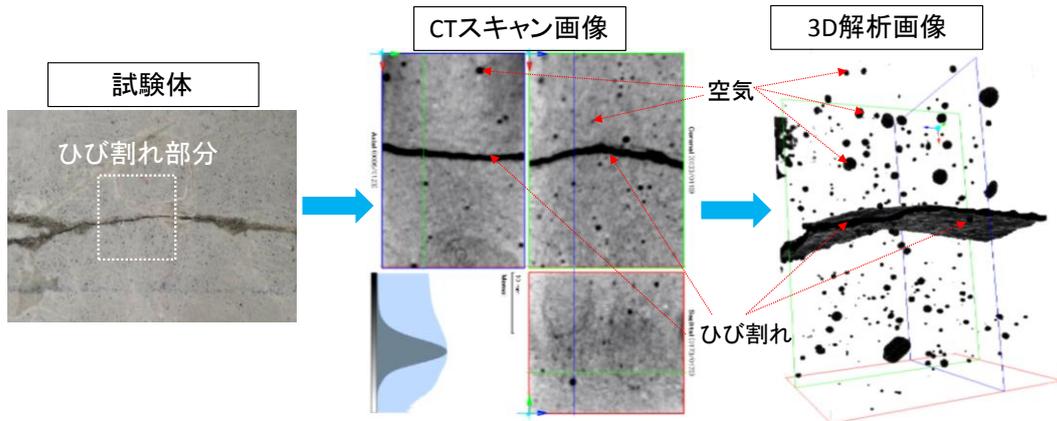


図-8 PVA-Water (手順A後)

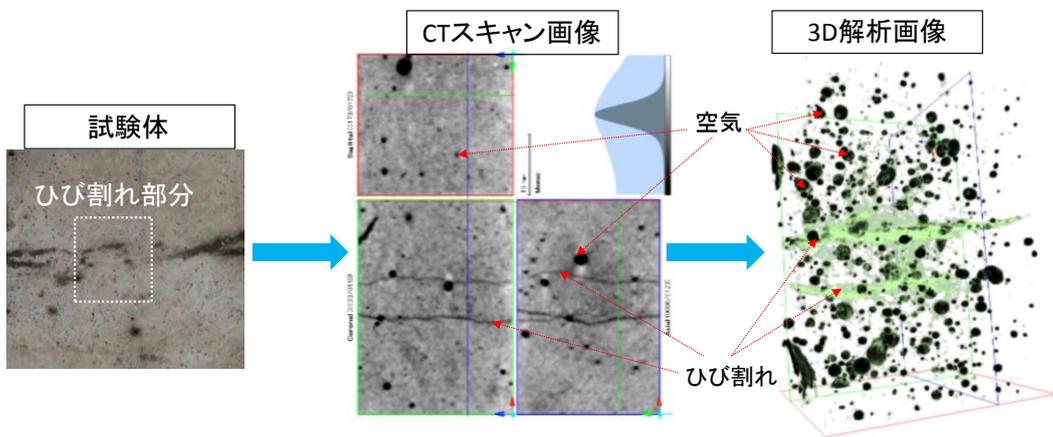


図-9 PVA- Ca(OH)<sub>2</sub> (手順D後)