# 合成繊維補強セメント系複合材料の自己治癒による

# コンクリートのひび割れ制御に関する実験的考察

The experimental study of the crack control of concrete by self-healing of synthetic fiber reinforced cementitious composites

北見工業大学	工学部	社会環境工学科	○学生員	武智愛	(Ai Takechi)
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)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正 員	岡田包儀	(Kaneyoshi Okada)

# 1. はじめに

ー般にコンクリートやセメント系材料は建築物及び土 木構造物において非常に重要な材料である。しかし、コ ンクリートは圧縮強度に比べ引張強度が小さい材料であ り、さらに、凍害・塩害などの環境作用が起こる環境下 に曝されていることが多いため、コンクリート構造物に おいてひび割れ発生は不可避である。我が国では、許容 ひび割れ幅以上のひび割れは構造物の耐久性または防水 性の面で問題があるとされており<sup>1)</sup>、そのひび割れから CIや CO<sub>2</sub>といった劣化因子が浸透する<sup>2)</sup>。それが繰り 返されることでひび割れ幅が拡大、コンクリート劣化が 加速度的に進展し、最終的には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。したがって、コン クリート構造物においてひび割れ発生時点で予防するこ とは非常に重要である。

一方、水分供給を受ける環境下にあるコンクリートの ひび割れの一部は独自の水和または再水和反応から生成 された析出物の充填によって減少し、このような現象を 自己治癒という<sup>3)</sup>。修復のメカニズムは、コンクリート 中の Ca<sup>2+</sup>が水中に溶けた CO<sub>3</sub><sup>2</sup>と反応することで CaCO<sub>3</sub> となり、これによりひび割れを修復するとされている。 既往の研究では 0.1mm 程度のひび割れを治癒すること が確認されている<sup>4)</sup>。以下に自己治癒の反応式(1)~(3) を示す。

$H_2O+CO_2 \Leftrightarrow H_2CO_3 \Leftrightarrow H^++H_2$	$CO_3 \leftrightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$	(1)
$Ca^{2+}+CO_3^{2-} \Leftrightarrow CaCO_3$	(PHwater>8)	(2)
$Ca^{2+}+HCO_{3} \leftrightarrow CaCO_{3}+H^{+}$	$(7.5 \le PHwater \le 8)$	(3)

この現象によってコンクリートのひび割れを減少させ、 CIや CO<sub>2</sub> などの劣化因子の侵入を遅延することができ、 ひび割れによって増加した透水性をある程度回復させる ことが可能である。また、この現象によってひび割れを 自律的に修復することができれば、コンクリート構造物 の維持管理の面において負担軽減や構造物の長寿命化に 大きく寄与しうる。また、コンクリート中にポリビニル アルコール (PVA) やポリプロピレン (PE) などの合成 繊維を混入することによりコンクリートに発生するひび 割れを分散させ、ひび割れ幅を小さくすることでより効 率的に自己治癒を促進させる方法が提案されている<sup>5)</sup>。 特に極性基である OH 基をもつ PVA 繊維を用いること 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。

本研究では、既往の研究では評価されていない、コン クリートと合成繊維との複合的自己治癒によるひび割れ 内部の自己治癒性能の把握を目的とし、最適な自己治癒 条件の検討を行った。

# 2. 実験概要

# 2.1 使用材料

使用材料は、普通ポルトランドセメント (C、密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>)、けい砂 5 号 (S、密度: 2.61g/cm<sup>3</sup>)、高性能 減水剤 (SP、密度: 1.05g/cm<sup>3</sup>)を用いた。混入する繊維 には極性基をもつ PVA および PE を、比較対象として極 性がない PP を用いた。本実験における配合を表-1 に示 す。

Туре	S/C (Wt.%)	W/C (Wt.%)	SP/C (Wt.%)	Fiber (vol.%)
PVA			0.4	
PE	40	30	0.45	1.2
PP			0.3	

#### 表-1 モルタル配合表

### 2.2 試験体概要

試験体は 85×85×25mm (L×B×H) の形状のものを 用い、打設後 1 日間恒温恒湿で養生し、脱型後材齢 28 日まで水中養生を行った。その後、万能試験機を用いて 引張載荷試験を行い、コンクリートと合成繊維との複合 的自己治癒の機能を確認するため試験体に幅 0.3mm 程 度のひび割れを導入した。

#### 2.3 実験方法

表-2 に本実験における手順および評価項目を示す。 手順 A では、引張載荷によるひび割れ導入直後(自己 治癒前)の透水係数、X 線 CT を用いたひび割れ内部の 観察、熱重量 - 示差熱同時分析 (TG-DTA) 測定を用い た自己治癒前の水和物の分析を行った。手順 B では、 自己治癒による透水性能の変化、ひび割れ内部の組織変 化および自己治癒析出物質を定量的に評価するため、手 順 A と同じ方法で比較・評価を行った。表-3 に本実 験における因子および条件を示す。本実験の自己治癒条 件は、既往の研究<sup>n</sup>より、CO<sub>2</sub>マイクロバブルを供給し た水 (以下、W+MB)および Ca(OH)<sub>2</sub> 水溶液 (以下、 Ca+MB)の2水準を採用し、水温は20°C、pH は各々 6.0と8.5に設定し、7日間の自己治癒期間による自己治 癒性能評価を行った。ここで、Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液は、水溶 液中のCa<sup>2+</sup>が自己治癒を促進させ<sup>8)</sup>、CO<sub>2</sub>マイクロバ ブルは、自己治癒時のCO<sub>3</sub><sup>2</sup>の供給量の増大により修復 が促進されること<sup>9)</sup>が報告されており、本研究でも自己 治癒機能を極大化させるため使用した。

# 表-2 実験内容

手順	実験項目	評価項目			
		ひび割れ 表面部	ひび割れ 内部	自己治癒 析出物質	
А	自己治癒前	透水係数	X線CT	TG-DTA	
В	自己治癒後	(K)			

#### 表-3 実験因子および条件

実験因子			実験条件
繊維			PVA, PE, PP
自己治癒	Water + Micro-bubble (W+MB)		рН 6.0
条件	Ca(OH) <sub>2</sub> + Micro-bubble (Ca+MB)		рН 8.5
水温			20°C
ひび割れ導入方法 (目標ひび割れ幅 0.3mm)			引張載荷
自己治癒期間			7日間

#### 実験結果および考察

# 3.1 ひび割れ表面部の自己治癒評価

図-1から図-3 に透水試験の結果を示す。なお、図 -1 と図-2 は自己治癒条件による自己治癒前後の各繊 維シリーズの透水係数を示し、図-3 は各繊維シリーズ 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。実験結果より、W+MB のケースでは、 PVA は手順 A に比べ、手順 B では約 40 倍の透水性が 回復し、PE は約 3.5 倍、PP は約 1.5 倍回復する傾向を 示した。また、Ca+MB のケースでは、PVA は手順 A に 比べ、手順 B では約 460 倍の透水性が回復し、PE は約 60 倍、PP は約 6.0 倍回復する傾向を示した。一方、図 -3 の透水係数比の比較においては、PVA では W+MB のケースに比べて、Ca+MB は約 15 倍の透水性が回復し、 PE では約 17 倍、PP では約 4.0 倍を回復する傾向を示 した。

以上より、自己治癒性能は PVA>PE>PP の順番で、特 に OH 基を持つ PVA がより効果的な自己治癒性能を発 揮すること、Ca+MB が W+MB より自己治癒性能をよ り向上させることが確認された。0.3mm 程度のひび割 れに対しては、PVA 繊維の使用とともに CO<sub>2</sub> マイクロ バブルを含む Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液を用いた自己治癒条件が自 己治癒物質生成の促進に有効と考えられる。

# 3.2 ひび割れ内部の自己治癒評価

# 3.2.1 ひび割れ内部のミクロ的考察

自己治癒によるひび割れ内部の閉塞進行状況を把握す るため、本実験では X線 CT スキャンによって試験体の 内部を観察した。実験条件として、200kV、100μAの X 線を照射し、図-4のように、X線 CT スキャンの画像 解析領域を設定した。また、X線 CT スキャンで解析を した 3D 画像はボクセルで構成されており、ボクセルを



用いて実際のひび割れ幅を算出した<sup>10</sup>(図-5参照)。 また、図-6 に三次元画像における輝度と頻度のヒスト グラムを示す。各ピークの正規分布を取ることで空隙と 物質(セメントマトリクス)の輝度の境界を明確に区分 した。その後、自己治癒前は、ひび割れ部と空隙部の密 度は等しいとして空隙部体積を算出し、自己治癒前後で の析出物とひび割れ部の密度差を用い、自己治癒前後の 空隙体積比を比較・評価した。

図-7から図-9に各試験体のひび割れ幅および自己 治癒条件による各繊維シリーズの自己治癒前後の空隙体 積の結果を示す。また、図-10に各繊維シリーズにお いて手順 A の空隙体積を基準として算出した空隙体積 比を示す。図-7の PVA シリーズの場合、W+MB では 手順 A に比べ、手順 B は 62%程度、Ca+MB では 67% 程度の空隙体積が減少した。図-8の PE シリーズの場 合、W+MB では手順 A に比べ、手順 B は 44%程度、 Ca+MB では 67%程度の空隙体積が減少した。また、図 -9の PP シリーズの場合、W+MB では手順 A に比べ、 手順 B は 44%程度、Ca+MB では 46%程度の空隙体積が 減少する傾向を示した。一方、図-10の各繊維シリー ズの空隙体積比(手順 A の空隙体積の基準)の結果よ り、W+MB のケースでは、PE と PP の空隙体積差はほ ぼないが、PVA は PE と PP に比べ、約 1.5 倍の空隙体 積比が減少する傾向を示した。また、Ca+MB のケース では、PVA と PE は PP に比べ、約 1.5 倍の空隙体積比 が減少し、PVA と PE の空隙体積差はほぼない傾向を示 した。以上のように X 線 CT スキャンによる自己治癒前 後の空隙体積比を比較した結果、自己治癒性能は PVA  $\geq$  PE>PP の順に優位であることがわかった。特に OH 基を持つ PVA 繊維の使用と共に自己治癒に必要な Ca<sup>2+</sup> と CO<sub>3</sub><sup>2</sup>を供給する Ca+MB 条件を適切に併用すること で自己治癒性能の極大化ができると判断される。





図-6 ヒストグラムおよび閾値の概要





# 3.2.2 自己治癒析出物の化学的評価

ひび割れ内部の自己治癒による析出物の化学的評価の ため、熱重量 - 示差熱同時分析 (TG-DTA) による各繊 維シリーズの自己治癒前後の Ca(OH)2 と CaCO3 の量的 変化の比較・評価を行った。図-11 に各繊維および自 己治癒条件の自己治癒前 (Before)、自己治癒後のひび割 れがない健全な部分 (Non-crack)、自己治癒後のひび割 れ部分 (Crack)に対する分析結果を示す。全ての繊維シ リーズにおいて、自己治癒前 (Before) と健全な部分 (Non-crack) に比べ、ひび割れ部 (Crack) の Ca(OH)2 量 は減少し、CaCO3量は増加する傾向を示した。自己治癒 による析出物として推定される CaCO3 量は、 PVA>PE>PP の順番で増加した。特に PVA の場合、(c) W+MB では自己治癒前に比べ、ひび割れ部の Ca(OH)2 量は約 7%減少、CaCO3 量が約 6%増加するとともに、 健全な部分よりも Ca(OH),量は減少し、CaCO,は増加す る傾向を示した。また、(f) Ca+MB では(c) W+MB に比 べ、CaCO3の増加量が PP や PE を使用した場合よりも 大きくなっており、より自己治癒が促進されていると判 断できる。従って、上記の自己治癒による析出物の量的 比較より、各々の繊維シリーズ (PVA、PE、PP) では、 Ca+MB の条件が W+MB の条件より効果的に自己治癒 析出物の生成ができ、この析出物はほぼ CaCO3 である

ことと判断される。また、極性をもつ合成繊維はひび割 れ部分の Ca(OH)<sub>2</sub>を自己治癒物質である CaCO<sub>3</sub> に変化 させ、特に OH 基をもつ PVA は複合的自己治癒により 0.3mm 程度のひび割れに対してより効果的な自己治癒 性能が期待される。

# 4. まとめ

本研究では、繊維補強によりひび割れを分散させ、 0.3mm 程度のひび割れを内部から自己修復することで、 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。ひび割れ自己治癒性能を透水係数や X 線 CT を用いたひび割れ内部の観察、析出物質量によって 比較・評価を行った。以下に本研究における知見を示す。

 コンクリート単独あるいはコンクリートと合成繊維 との複合的自己治癒は、ひび割れ表面だけでなく内部も 自己治癒が行われていることが確認できた。

2) ひび割れ表面部および内部ともに CO<sub>2</sub>マイクロバブ ルを供給した Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液の自己治癒条件が、より効 果的に自己治癒性能を発揮することが確認できた。

3) 極性をもつ合成繊維を混入することによって、より 効果的に自己治癒を進められることが確認でき、特に OH基をもつ PVA 繊維は最も効果的に自己治癒を進め られることが確認できた。

以上の結果より、コンクリートと合成繊維との複合材 料による自己治癒によってひび割れを内部から修復し、 劣化因子の侵入を抑制することが可能と考えられる。

#### 参考資料

 日本コンクリート工学会:コンクリートのひび割れ調査、 補修・補強指針、2013 2) Stefan Jacobson (1996a) Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.6, pp.869-881.

3) NevilleA.M. : Properties of Concrete, Person Education Limited, p.328, 1995

4) Edvardsen, C. : Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Materials Journal, Vol.96, No.96-M56, pp.448-454, 1999

5) 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

6) 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

7) Heesup Choi, etc. : The Fundamental Study of the Performance Evaluation of Composite Self-healing of Concrete Using PVA Fiber, Proceedings of The International Conference on Environmental and Civil Engineering Innovation 2015, TA5018, 2015.11

8) Haoliang Huang, Guang Ye : Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca2+ ions in the healing agent, Journal of intelligent Material Systems and Structures, 1-12, 2014.03

9) Han-sic Kim, etc. : Fundamental Study on Recycling of Lowquality Recycled Fine Aggregateusing Carbonated Nanobubble Water, Proceedings of first international Conference on concrete sustainability, S3-1-4, 2013

10) 谷口聡他:X線 CT を用いたアスファルト舗装材料の新しい評価手法に関する研究、土木学会舗装工学論文集、Vol.15、 pp.41-48、2010

