

橋梁部材のコンクリートに生じたひび割れ自己治癒に関する研究

神戸市立工業高等専門学校都市工学科 教授 水越睦視

1. はじめに

道路橋床版の伸縮装置の取り替え時に施工した超速硬コンクリートにセメントの水和熱や温度差による膨張伸縮が原因でひび割れが発生する事例がみられる。また、高欄コンクリートでも、膨張材の添加や誘発目地を施工しているにも関わらず誘発目地間でも、ひび割れの発生が認められる。そこで、これらのひび割れを自己治癒させることを考えた。わが国でもコンクリートの自己治癒に関する技術として、炭酸化合物や膨張材などの混和材を添加したもの、バクテリアが生成する炭酸カルシウムを利用した技術、短繊維を混入し、ひび割れ界面に架橋した繊維に析出物を固定化させ修復する技術などがある。

本研究は、道路橋床版の伸縮目地部の取り替え時に施工した超速硬コンクリートにおよび高欄部のコンクリートに発生したひび割れを自己治癒させ、床版内部への水の浸入を防ぎ耐久性の向上を図ることを目的とする。これまでの報告の多くは、ひび割れ断面は完全に水中に浸漬、あるいはひび割れ断面の片面から水分が吸収される状況においての自己治癒効果の検証がほとんどである。橋梁部材のように常時、水分が供給されない状況において、ひび割れの自己治癒効果を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

超速硬コンクリートに用いた使用材料および物理的性質を表 1 に示す。セメントは、道路橋床版の伸縮装置取替時のコンクリート配合を対象としており、超速硬セメントを用いた。自己治癒材は混和材型(AD)と繊維型(MC)の 2 種類を用いた。AD はカルシウムサルフォアルミネート(CSA)系膨張材、ジオマテリアル、炭酸基系化学添加材を混合したセメント組成物である。MC は細径で異形断面を有するため一般的なポリプロピレン繊維に比べて比表面積が大きく、繊維の表面に改質処理を施していることから、炭酸カルシウムの析出しやすい状況を形成し、セメント粒子も捕捉しやすい。

高欄コンクリートに用いた使用材料および物理的性質を表 2 に示す。自己治癒材としてポリビニルアルコール繊維 (PVA 繊維) を用いた。極性基である OH-基を持つ 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¹⁾。PVA 繊維を用いたモルタルでは、0.3mm 程度までのひび割れが自己治癒されることが確認されており、特に PVA 繊維を用いることで良好な自己治癒性能を示すことが明らかにされている²⁾。また、フライアッシュ(FA)を用いたコンクリートにおいて、ポゾラン反応による自己治癒効果が確認されている³⁾。自己治癒現象のメカニズムは、ポゾラン反応による反応析出物の生成や CaCO_3 の析出などが挙げられるが、最も影響が大きいとされるのは CaCO_3 であることが確認されている⁴⁾。

2.2 コンクリートの配合

超速硬コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表 3 に示す。高欄コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表 4 に示す。

2.3 試験項目および試験方法

スランブ試験は、JIS A 1101 に準拠し、空気量試験は、JIS A 112 に準拠して実施した。

自己治癒効果を評価するために透水試験を行った。透水試験用の供試体は、VU 菅(呼び径 ϕ 100mm)を長さ 50mm に切断したものを型枠として使用して作製した。供試体数は 1 配合あたり 10 個とした。供試体には貫通ひび割れを導入した。ひび割れ幅をクラック幅測定器にて表面 3 点、底面 3 点の計 6 点にて測定し、ひび割れ幅の平均値が $0.15 \pm 0.05\text{mm}$ になるようひび割れを導入した。次に、50mm の水頭が確保できるように ϕ 10mm 程度の穴を開けた VU 菅を使用し、供試体と VU 菅および下部 VU 菅はビニルテープでシールし、漏水のないことを確認した。水頭 50mm の条件下でひび割れ部に 1 分以上通水させてから測定を開始した。養生条件は、水中養生(W)、半水中養生(HW)、わが国に気候を考慮した 7 日のうち 1 日を水中、6 日を気中とする乾湿繰返し養生(DW)とした。なお、養生温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。透水試験の状況を図 1 に示す。

自己治癒によりひび割れ部を埋めた析出物の分析は、走査型電子顕微鏡(SEM)による形態観察およびエネルギー分散型 X 線分光器(EDS)による元素組成分析を実施した。

表 1 超速硬コンクリートに用いた使用材料および物理的性質

水	W	水道水(密度: $1.00\text{g}/\text{cm}^3$)
セメント	C	超速硬セメント(密度: $2.98\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材	S	硬質砂岩砕砂(表乾密度: $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 2.88, 吸水率: 2.01%)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 6.78, 吸水率: 1.00%)
凝結遅延剤	SET	セメントメーカー指定品
高性能減水剤	SP	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
自己治癒混和材	AD	カルシウムサルフォアルミネート(CSA系膨張材), ジオマテリアル(Geo-Materials), 炭酸基系化学添加材を混合したセメント組成物
自己治癒繊維材	MC	細径異形ポリプロピレン短繊維, 密度: $0.91\text{g}/\text{cm}^3$, 繊維長: 15mm, 繊維直径: 0.028mm, 繊度: 5.4dtex, 水分率 34.8%

表 2 高欄コンクリートに用いた使用材料および物理的性質

W	水道水(密度: $1.00\text{g}/\text{cm}^3$)
C	普通ポルトランドセメント(密度: $3.15\text{g}/\text{cm}^3$)
FA	JIS II 種(密度: $2.25\text{g}/\text{cm}^3$)
S	硬質砂岩砕砂(表乾密度: $2.63\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 2.81, 吸水率: 1.67%, 骨材の微粒分量: 3.5%)
G	硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: $2.66\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 6.77, 吸水率: 1.14%, 骨材の微粒分量: 0.2%)
PVA	ポリビニルアルコール繊維(密度: $1.3\text{g}/\text{cm}^3$, 直径: $660\mu\text{m}$, 繊維長: 30mm, ヤング係数 $23.0\text{kN}/\text{mm}^2$, 引張強度: $900\text{N}/\text{mm}^2$, 切断伸度: 9.0%)
SP	ポリカルボン酸系(標準形)
AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤(I 種)

表 3 速硬コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

自己治癒材の種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP C×(%)	SET C×(%)	フレッシュ試験結果		
			W	C	S	G	自己治癒材			スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
AD	35.6	39.7	155	425	689	1075	10(内割)	2.0	0.7	8.0	1.1	28.7
MC	35.6	45.0	185	520	718	900	3(外割)	2.5	0.7	10.0	1.1	27.0
PL	35.6	39.7	155	435	394	1080	-	2.0	0.7	7.0	1.4	29.4

表 4 高欄コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの種類	W/B (%)	s/a (%)	PPF (vol.%)	(kg/m ³)						B×(%)	外割(kg/m ³)	フレッシュ試験結果		
				W	C	FA	EX	S	G			スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
PVA	50	46	0.3	165	330	-	-	828	984	1.0	3.9	13.0	5.6	23.0
PVA-FA	50	46	0.3	165	297	33	-	823	979	1.0	3.9	13.0	5.5	26.0
PVA-EX	50	46	0.3	165	310	-	20	831	984	1.0	3.9	10.0	5.8	23.8



図 1 透水試験の状況

3. 実験結果および考察

3.1 超速硬コンクリートの自己治癒性能

初回ひび割れ導入直後のひび割れ幅と透水量の関係を図 2 に示す。図より、ひび割れ幅が大きくなるほど透水量が多くなる傾向がうかがえる。同じひび割れ幅でも透水量に差があるのは、ひび割れ形状や粗骨材の位置の影響と考えられる。初回ひび割れ導入 38 日後の透水試験において、MC, AD, PL の W 養生, HW 養生における全ての供試体で透水量は 0 となった。自己治癒材なしの PL でさえも自己治癒効果が認められた。図 3 に透水量 0 となった供試体の自己治癒状況例を示す。

図 4 に 3 種類の養生の中で 38 日後の透水が認められた DW 養生における透水比(ひび割れ導入後の透水量/ひび割れ導入直後の透水量)とひび割れ幅の関係を示す。図より、透水が抑制されている供試体もあるが、MC, AD でも透水抑制ができない供試体が認められ、ひび割れ幅が 0.2mm を超えると、その傾向が顕著となっている。また、PL では 0.14mm でも透水比が大きいものも幾つかあり、自己治癒材配合である MC, AD に比べると自己治癒効果は小さいといえる。

再度ひび割れを導入し、ひび割れ幅を大きくした後 29 日で透水試験を実施した。図 5 に再びひび割

れ導入 29 日後の DW 養生における透水比とひび割れ幅の関係を示す。図より、MC、AD においても完全に透水を抑制できていないものの、AD では、PL よりも透水比が小さくなっている傾向がうかがえる。MC については、PL と同程度の透水比の供試体が多く、PL と同程度の自己治癒性能となっている。

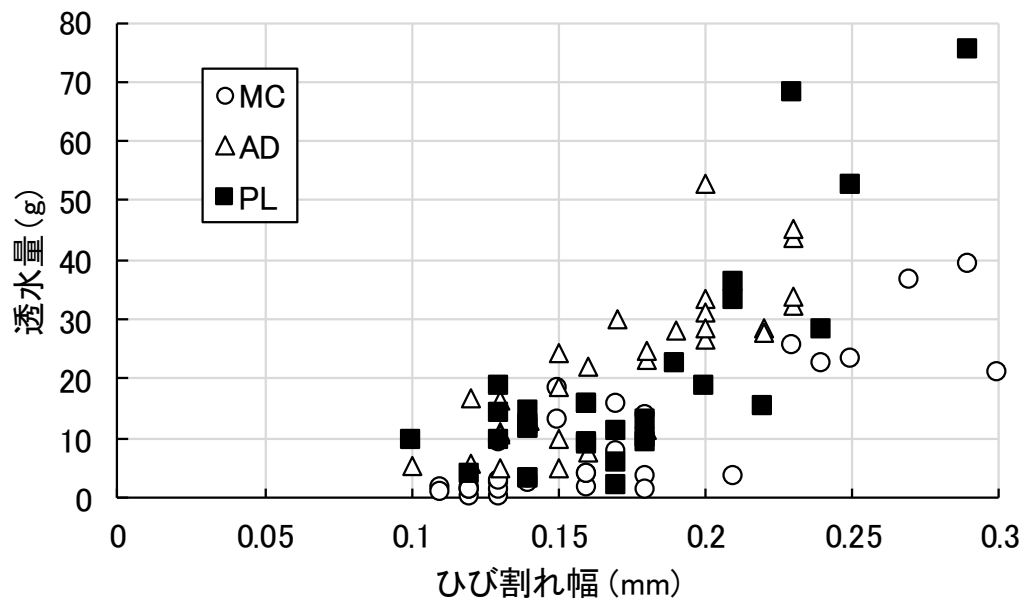
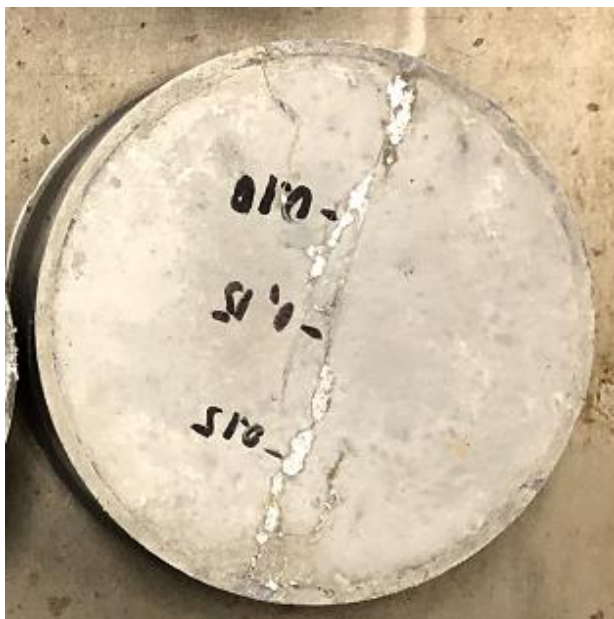


図 2 初回ひび割れ導入直後のひび割れ幅と透水量の関係



自己治癒材 AD 配合 (HW 養生)



自己治癒材 MC (HW 養生)

図 3 AD および MC の自己治癒状況例 (透水量 0)

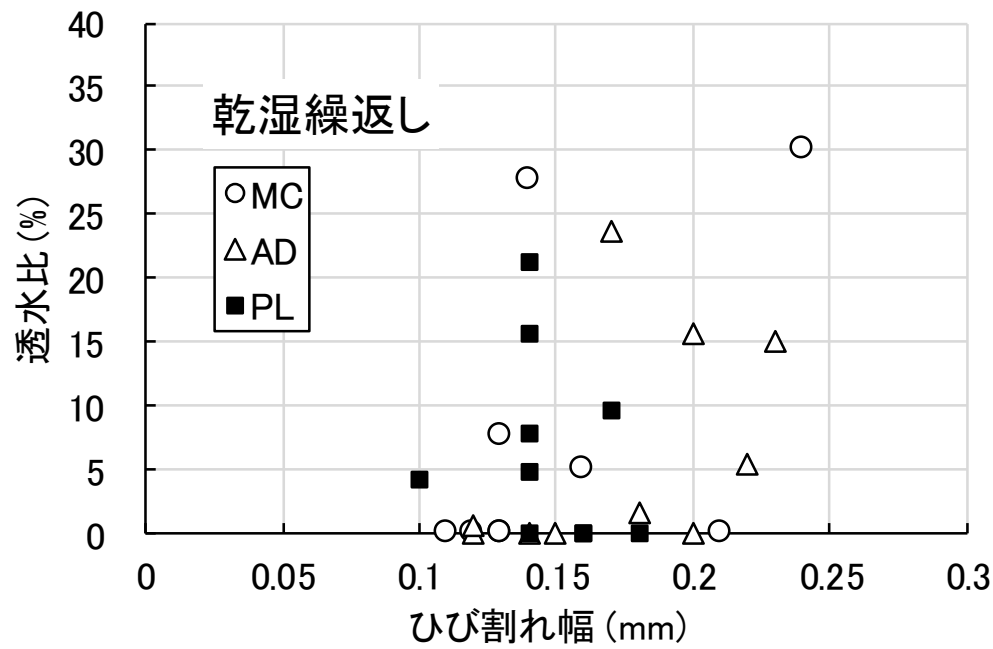


図 4 透水比とひび割れ幅の関係 (DW 養生, ひび割れ導入 38 日後)

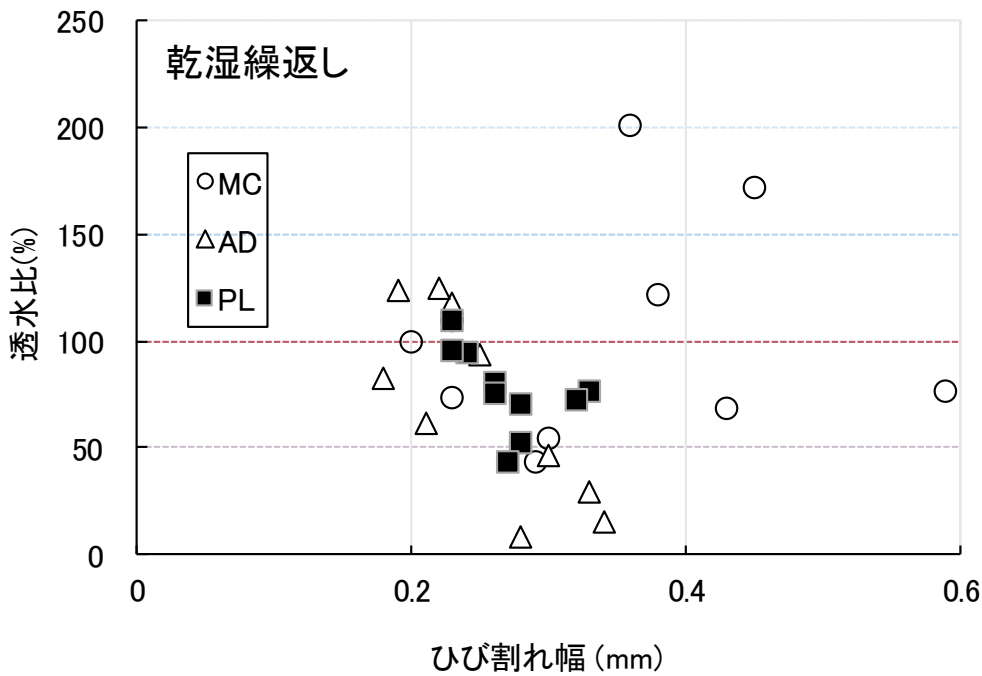


図 5 再びび割れ導入 29 日後の DW 養生における透水比とひび割れ幅の関係

3.2 高欄コンクリートの自己治癒性能

高欄コンクリートでは、初回ひび割れ導入 70 日後の透水試験の結果において、PVA-FA の 1 体のみで僅かな透水が認められたが、その他の全ての供試体で透水量は 0 となった。

橋梁高欄の置かれている状況に近い、乾湿繰返し養生(DW 養生)について以下に考察する。超速硬コンクリートと同様に、ひび割れ導入から 28 日後の透水比((測定した透水量 w)/(ひび割れ導入直後の透水量 w_0))により評価することとした。ひび割れ導入後 28 日および 63 日後のひび割れ幅と透水比の関係を PVA について図 6 に、PVA-FA を図 7 に、PVA-EX は図 8 に示す。これらの図より、ひび割れ導入後 28 日、63 日の透水比から、自己治癒材料の自己治癒効果を判断すると PVA が最も効果があると判断できる。ひび割れ幅 0.15~0.2mm の範囲では、他の配合に比べて透水比は小さく、ひび割れ幅が 0.2~0.25mm の範囲でも、PVA-FA に比べて透水比は小さいことがわかる。

以上より、PVA に FA を追加し、ポズラン反応による生成物によるひび割れ充填を期待したが、乾湿繰返し養生においては、FA の効果は認められなかった。また、PVA に EX を追加し、膨張材に含まれる酸化カルシウム (CaO) が水 (H_2O) と反応して、水酸化カルシウム (CaOH_2) になる過程で、水酸化カルシウム結晶が成長し、ひび割れを充填する効果を期待したが、ひび割れ幅 0.15mm 以下において、PVA に比べて効果があると思われたが、顕著な自己治癒効果の差は認められなかった。

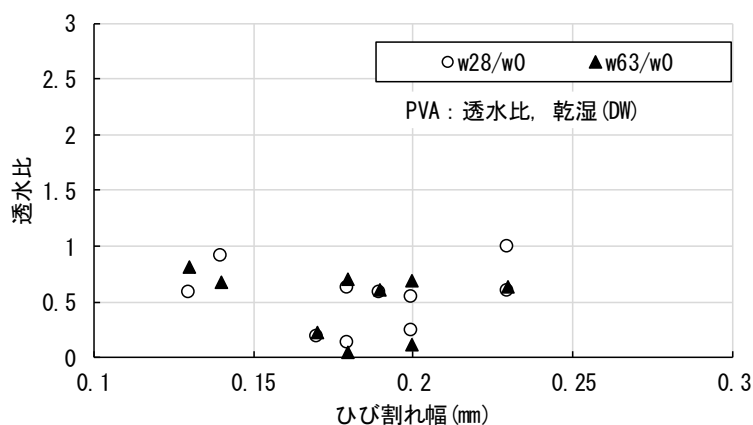


図 6 PVA の透水比とひび割れ幅の関係

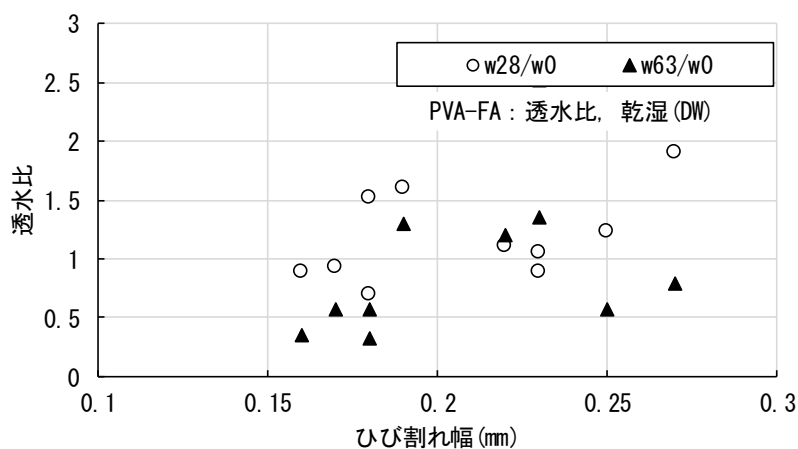


図 7 PVA-FA の透水比とひび割れ幅の関係

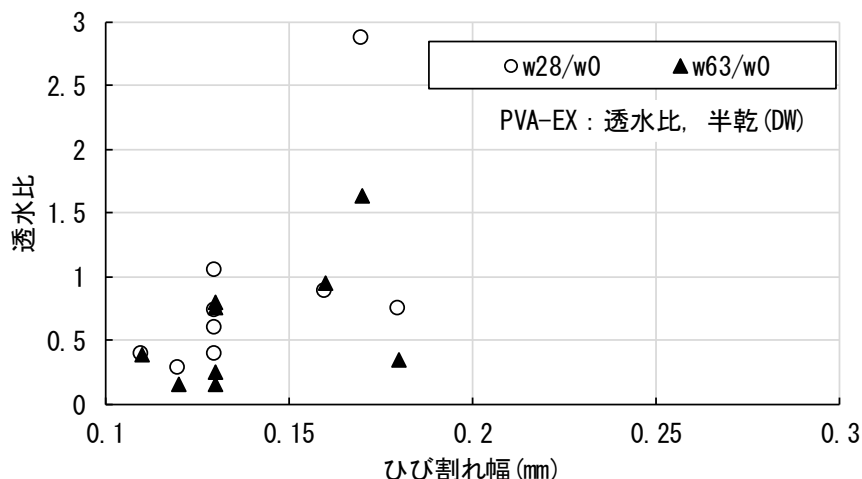


図8 PVA-EX の透水比とひび割れ幅の関係

3.3 自己治癒によるひび割れ充填部分における析出物の形態観察

超速硬コンクリートの AD 配合および MC 配合のひび割れ充填部分の SEM 写真を各々図 9, 図 10 に示す。これらより, AD と MC では, ひび割れ部を充填していた白色物質の結晶の形態に大きな差異はなかった。一部では細長い繊維状組織の生成も認められ, これの生成組織が自己治癒に寄与したものと考えられる。

高欄コンクリートの PVA 配合の SEM 写真(300 倍)を図 11 に, 1000 倍を図 12 に示す。白色物質は, 立方体をはじめとした角張った形状の結晶が認められ, 結晶同士が融合したような組織も確認された。PVA 配合と PVA-FA 配合, PVA-EX 配合の形態にも SEM 観察からは大きな差異はなかった。

EDS による元素組成分析から, 超速硬コンクリートと高欄コンクリートでは, 成分に違いがみられたが, 同一コンクリート間では配合による大きな違いはなかった。超速硬コンクリートでは, 主に Al を主成分とし, 副成分として, C, Na, Si, S, K, Ca が確認された。高欄コンクリートでは, 主成分として Ca と C を含み, 副成分として Na, Mg, Al, Si, K が確認された。



図9 SEM写真(超速硬 AD, 1000 倍)

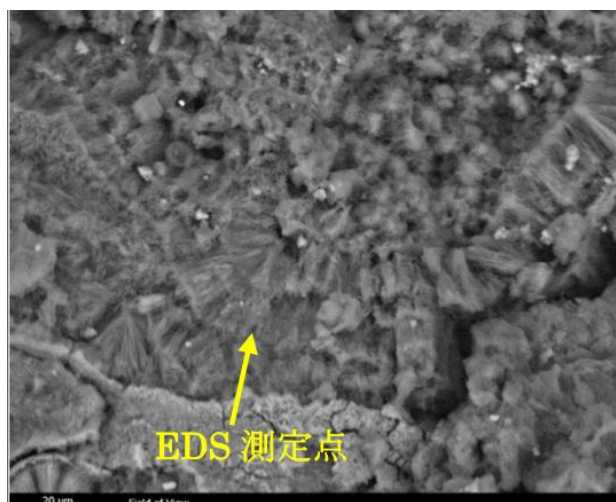


図10 SEM写真(超速硬 MC, 1000 倍)

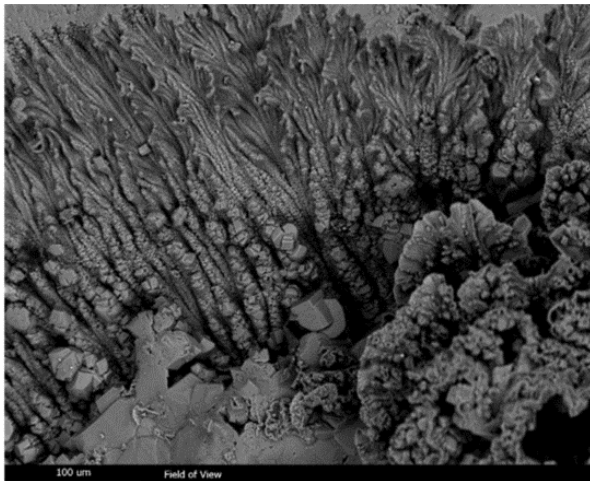


図 11 SEM写真（高欄 PVA，300 倍）

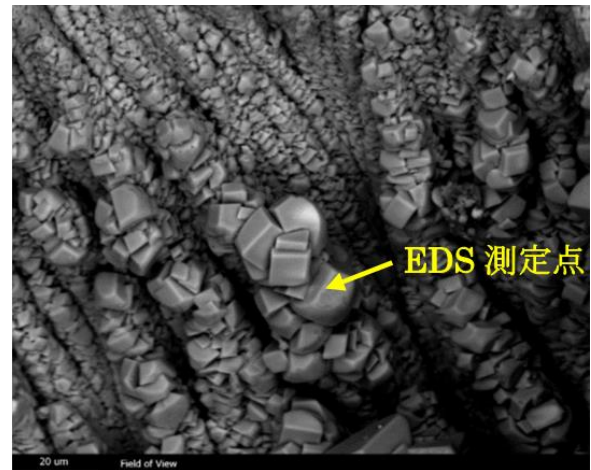


図 12 SEM写真（高欄 PVA，1000 倍）

4. 結論

超速硬コンクリートでは、AD、MC、PL とともにひび割れ導入 28 日後で水中養生，半水中養生では，全供試体でひび割れの自己治癒が確認されたが，わが国の気候を考慮した乾湿繰返し養生では，AD、MC でもひび割れからの透水を遮水することはできなかった。ただし，PL に比べると自己治癒効果は高い傾向がうかがえた。再ひび割れ導入から 29 日後では，DW 養生において，自己治癒材料を混和した MC、AD においても完全に透水を抑制できていないものの，AD では，PL よりも透水比が小さくなることがわかった。課題として，AD を添加した場合は強度発現が遅延すること，MC を添加した場合は，PL 配合と同じ単位水量ではスランプが小さくなり，単位水量を 30kg/m^3 増加しなければならない結果となった。

高欄コンクリートでは，超速硬コンクリート同様に，水中養生，半水中養生のように常に水分の供給がある状態に比べて，現場環境を想定した乾湿繰返し養生では自己治癒性能は劣ることがわかった。しかしながら，ひび割れの発生から材齢が経過するに伴って自己治癒効果が発揮されることが確認された。また，PVA 繊維に加えてフライアッシュあるいはカルシウムサルフォネート系膨張材を混和しても，自己治癒性能の向上に乾湿繰返し養生では効果が確認されなかった。

自己治癒によるひび割れ充填部分における析出物の形態観察から，結晶組織が生成され，ひび割れを充填していることが確認された。

参考文献

- 1) 芳賀匠，崔希燮，井上真澄：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，平成26年度土木学会北海道支部論文報告集，第71号，E-12，2014.
- 2) 国府田まりな，三橋博三，西脇智哉，菊田貴恒：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.
- 3) 濱幸雄ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの自己修復効果，セメント・コンクリート，Vol.782，pp.38-43，2012.
- 4) 佐々木 悠，寺田 健悟，五十嵐 豪，西脇 智哉：PVA繊維を用いたFRCCの耐凍害性と自己治癒性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol37，No.1，pp.1321-1326，2015.