

論文 補強繊維の種類と混入量を変化させた重量コンクリートの自己治癒性能に関する研究

井川 秀樹^{*1}・横室 隆^{*2}・橘高 義典^{*3}・江口 秀男^{*4}

要旨：放射性物質格納容器に用いる重量コンクリートのひび割れ自己治癒性能に着目し、補強繊維の種類と混入量を変化させた場合の自己治癒性能に関する研究を行った。今回の研究の範囲内では、補強繊維を混入すると自己治癒性能は高まる結果が得られ、補強繊維の特性値によって自己治癒性能に差が見られた。しかし、その混入量を増やしても必ずしも効果的ではなかった。補強繊維の混入の効果は、早期に自己治癒を促し、ひび割れ幅と透水速度を少なくした上で、その後のセメント水和物であるカルサイトの付着を促して自己治癒性能を高めるものと考えられる。

キーワード：自己治癒性能、重量コンクリート、フライアッシュ、膨張材、透水試験、繊維補強

1. はじめに

原子力発電所での放射能漏れ事故が起きた場合、汚染された廃棄物や汚染水の保管が重要な課題となる。安全な保管には放射性物質の確実な封じ込め技術が要求され、重量コンクリートの高密度特性が放射線の遮蔽に有効と考えられ様々な研究がなされている¹⁾²⁾。

従来は重量コンクリートの使用実績として、貨物船のバランスウエイトや原子力発電所の遮蔽壁など、限られた場所への使用事例しかなかった。しかし近年では、放射性物質の一時保管容器などへの使用例も見られる。その場合、容器を地上に設置しているケースが多く、乾燥によるペーストの収縮、温度による体積変化などによってひび割れが生じる危険性が高まり、ひび割れた場合には汚染物質の流出などの危険性が懸念される。

そこで、ひび割れを自己修復する技術について着眼した。これらの研究では、混和材としてフライアッシュや膨張材、粘土鉱物を混和したもの、造粒技術を用いたもの等、様々な研究^{3),4),5),6)}がなされているが、いずれも重量コンクリートについてなされたものはない。

既報⁷⁾では、重量コンクリートにおいてもフライアッシュと膨張材を混合使用すると自己治癒性能が高くなること、透水試験により自己治癒性能を定量評価できること、ひび割れ幅を一定として初期の透水速度をコントロールする供試体の作製方法を提案した。また、初期透水水量が多い場合でも、繊維補強することで効果的な自己治癒性能が得られることも報告した。

本報は、補強繊維の種類と混入量を変化させた場合の、重量コンクリートにおける自己治癒性能について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

本研究で使用した材料を表－１に、繊維の特性値を表－２に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。骨材には細骨材、粗骨材ともに重量骨材として、鉄分を多く含むダストと還元スラグを混合溶融し、破碎、粒度調整したものをそれぞれ用いた。いずれも重量コンクリート用骨材として国内で流通しているものである。補強繊維にはポリプロピレン短繊維（PP）、ビニロン短繊維（PVA①、PVA②）を用いた。

表－１ 使用したコンクリートの材料

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³ 比表面積 3,332cm ² /g
膨張材	EX	エトリンガイト系、密度3.01 g/cm ³
フライアッシュ	FA	JISⅡ類品、密度2.20g/cm ³
重量骨材（細骨材）	S	金属スラグ骨材5-0 表乾密度4.20g/cm ³ 、 吸水率1.67%、粗粒率3.83
重量骨材（粗骨材）	G	金属スラグ骨材20-05 表乾密度4.27g/cm ³ 、 吸水率0.45%、粗粒率6.52
補強繊維	PP	ポリプロピレン短繊維 密度0.91g/cm ³
	PVA①	ビニロン短繊維 密度1.30g/cm ³
	PVA②	ビニロン短繊維 密度1.30g/cm ³
水	W	上水道
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
空気量調整剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表－２ 補強繊維の特性値

記号	密度 (g/cm ³)	繊維長さ (mm)	繊維径 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
PP	0.91	12	0.065	185	530	5,000
PVA①	1.3	8	0.040	200	1,400	36,000
PVA②	1.3	30	0.660	45	900	23,000

*1 日本ヒューム(株) 技術研究所 所長（正会員）

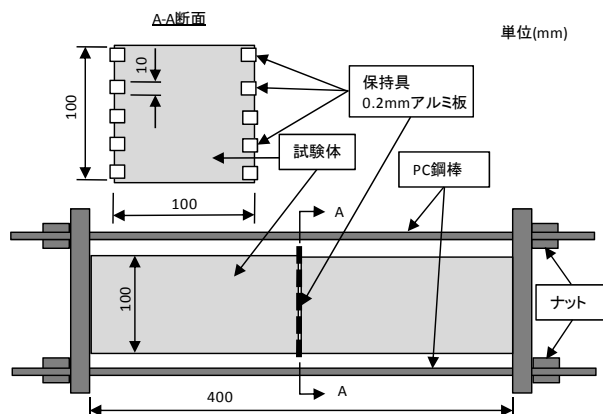
*2 足利工業大学 工学部創生工学科建築・社会基盤学系教授 博士（工）（正会員）

*3 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科教授 工博（正会員）

*4 日本ヒューム(株) 技術研究所 研究員

表－3 コンクリートの調合

試験体 記号	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	水結合材 比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						補強繊維 (Vol. %)	
						水 W	セメント C	膨張材 EX	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
												SP	AE
PL	500±100	4.5±1.5	32.0	21.5	52.0	144	450	60	160	1,075	1,377	7.65	0.068
PP0.05												7.65	0.225
PP0.1												8.55	0.293
PP0.2												9.45	0.270
PVA①0.05												9.45	0.293
PVA①0.1												9.45	0.257
PVA①0.2												9.90	0.248
PVA②0.05												9.00	0.270
PVA②0.1												9.45	0.270
PVA②0.2												9.00	0.293



図－1 透水試験用供試体

調合条件を表－3に示す。コンクリートの目標とする密度（乾燥単位容積質量）は 3.2t/m^3 以上とし、設計基準強度は 50N/mm^2 とした。混和材は、過去の研究⁷⁾で自己治癒性能に効果的であったエトリンナイト系膨張材とフライアッシュの混合使用とし、セメントの外割とした。補強繊維はそれぞれコンクリートの容積に対する割合とした。繊維を混練するためにコンクリートはスランブフローが 500mm となるように設定し、目標空気量が 4.5% となるように、それぞれ高性能減水剤および空気量調整剤にて調整した。補強繊維はコンクリートの体積比で、調合上は外割として添加した。なお、PLについては今回実施していないため、既報⁷⁾の数値を示し、以下圧縮強度試験結果、透水試験結果についても同様とした。

2.2 混練方法および養生条件

重量コンクリートの混練は、強制二軸型ミキサで1バッチの容積を 35L とした。最初に水以外の材料をミキサに投入して空練りを1分間行ない、水を加えてから補強繊維がファイバーボールにならないように分散させながら入れ、高性能減水剤でフロー調整した。その後、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times \text{L}400\text{mm}$ の角柱型枠に打込みをした。透水試験用の供試体は、調合毎に2本作製した。成型方法は2層詰めとし、振動により各層20秒程度締め固めた。また、各層締め固め後には、モルタルナイフで型枠側面をスパーキングして気泡を取り除いた。

養生は、プレキャストコンクリートを想定したため蒸気養生を施した。蒸気養生条件は、脱型時強度（ 35N/mm^2 以上）を満足するものとし、前置き4時間、昇温 20°C/h 、最高温度 40°C で3時間保持し、翌日まで自然降温で徐冷（約12時間）とした。最高温度を低く抑えたのは、自己治癒現象はコンクリート中に未反応のまま残っていたセメントが、ひび割れの発生に伴い水分と接触し、再び水和反応を生じる事で微細なひび割れを閉じる⁸⁾とされているためである。脱型後は、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $60\pm 5\%\text{R.H.}$ 環境下で気中養生を材齢14日まで実施した。

3. 自己治癒性能の評価試験

3.1 透水試験用供試体作製方法

透水試験用の供試体は、気中養生14日間後の角柱供試体の中央部を曲げ試験治具により割裂し、模擬ひび割れを作製した。この際、ひび割れ幅を保持するために、図－1に示すように、厚さ 0.2mm のアルミニウム板（以下保持具）を割裂部の両側に挟み込み、供試体の両端から、鋼製治具と鋼棒を用いてトルクレンチで $40\text{N}\cdot\text{m}$ 一定として仮固定した。また、保持具を挟み込んだ両側部分はシーリング加工を施し、一方向に透水させる構造とした。また既報⁷⁾では、模擬ひび割れ作成時には試験体を割裂して分離させ、その両側に 0.2mm のプラスチック板を入れてひび割れ幅を固定した。しかし、それでは内部の補強繊維が分断され、架橋されていない状態となり、実際とは異なってしまう。そこで、ひび割れ導入時にひび割れ幅が $0.5\sim 1.0\text{mm}$ 程度になった段階で保持具を数か所入れ、次に反対側のひび割れについても同様に保持具を挿入してひび割れ幅を固定した。なおこの時、ひび割れを1ヶ所に集中させるため、事前に計測面以外の3面にひび割れ誘導目地（幅約 $1\text{mm}\times$ 深さ約 5mm ）をダイヤモンドカッターにて施した。図－2は、模擬ひび割れの両側に挿入した保持具の数量と、初透速度を治具の締め付けによって変化させた時の、ひび割れの幅を示した。保持具4枚までは締め付け力によってひび割れ幅は変わるが、5枚を入れると変化しなくなった。そこで、模擬ひび割れ幅固定のための保持具は5枚挿入とした。

3.2 ひび割れ透水試験

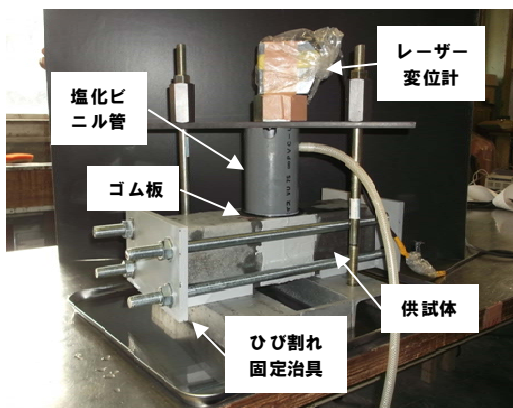
ひび割れ透水試験は、模擬ひび割れ部分のひび割れの閉塞状態を定量評価するために実施した。写真－1に透水試験装置を示す。装置は、供試体の試験面上（供試体作製時の側面）に平滑なゴム板（内径80mm, 外形90mm, 厚さ2mm）、その上に塩化ビニル管（内径80mm, 外形88mm, 高さ130mm）を置き、塩化ビニル管の中に浮体部（φ70×厚さ10mmの発泡スチロール）を入れて、その上にレーザー変位計を設置した。注水後、透水による水位変動に伴う浮体部の変動をレーザー変位計により計測した。なお、コンクリート面、ゴム板、塩ビ管の間にはシリコン材を薄く塗り、塩ビ管を上部からボルトによって押さえつけ、装置からの漏水が無いようにした。

試験は、塩化ビニル管内の水位が透水により10mm下降した時間を3回繰り返して計測し、1秒間当たりの透水速度（ cm^3/s ）を求めて、その平均値を試験値とした。なお、本試験では恒温室（ $20\pm 2^\circ\text{C}$, $60\pm 5\%\text{R.H.}$ ）の一定環境下の中に水槽（80L程度）を置いて供試体すべてを水中に浸せき（写真－2）し、24時間浸せき後の透水速度を初期値とした。ここで、透水試験および供試体の浸せきには全て上水道水を使用した。以降、7日、14日、21日および28日の浸せき日数で評価した。水槽の水は、水和による結晶物の析出を多く生じさせるため、透水試験後に入れ替えをした。

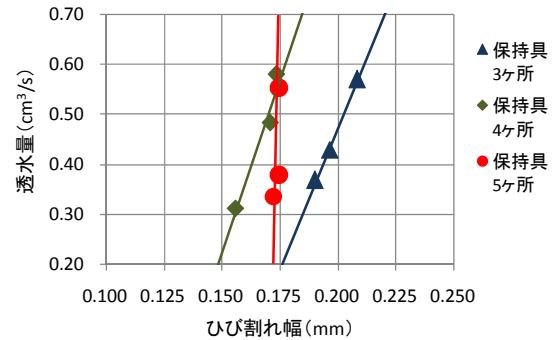
初期透水速度（以下初透速度）は同じひび割れ幅でも大きく異なり、その初期値の違いによって自己治癒性能も異なる。そこで、供試体の両端から、鋼製治具とPC鋼棒を用いて締め付ける力を加減し、初透速度が $0.25\pm 0.05\text{cm}^3/\text{s}$ と、 $0.55\pm 0.05\text{cm}^3/\text{s}$ となるように調整した。

3.3 マイクロスコープによる観察

透水試験面のひび割れ部をクラックスケールで計測し、0.15～0.2mm幅の部分に目印をつけて、観察箇所とした。以降、7日、14日、21日および28日の浸せき日数で観察した。写真－3に示したように、観察方法は、



写真－1 ひび割れ透水試験装置



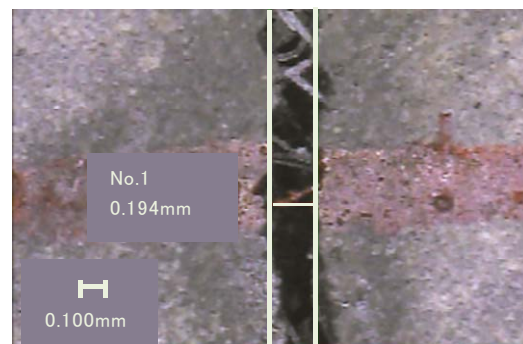
図－2 保持具の枚数とひび割れ幅



写真－2 恒温室水槽内での水中浸漬状況



写真－3 マイクロスコープによる観察



写真－4 ひび割れの状況

水中から取り出した供試体のひび割れ部をドライヤーで乾燥させてから、マイクロスコープでひび割れの閉塞状況を確認し、その状況を記録した（写真－４）。

4. 実験結果

4.1 コンクリートの物性

表－４にコンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度について示す。なお、スランブフローの目標値は $500\pm 100\text{mm}$ 、空気量は $4.5\pm 1.5\%$ とした。フライアッシュをセメント量の35%混入しているため、空気量調整剤の効きが悪く、空気量は設定値の下限ぎりぎりのものもあった。PLは既報の値であるが、それと比べて空気量調整剤の添加量が多くなった。これは、PLの混練時期が10月であったのに対し、本研究は8月の実施であり、コンクリート温度が高かったためとも考えられる。また、コンクリートの調合強度を 50N/mm^2 とし、水セメント比を32%に設定したが、自己治癒機能を持たせるために混和した膨張材とフライアッシュをセメントの外割で調合したため、水結合材比（以下W/P）が21.5%と小さくなり、その結果材齢14日の圧縮強度は 80N/mm^2 を越す高強度となった。

4.2 透水試験結果

繊維補強が自己治癒に効果的な理由は、繊維周りを中心に自己修復物質が付着し修復するため⁹⁾と言われ、写真－５に示すように今回のSEMの二次電子像でもそれが確認できた。

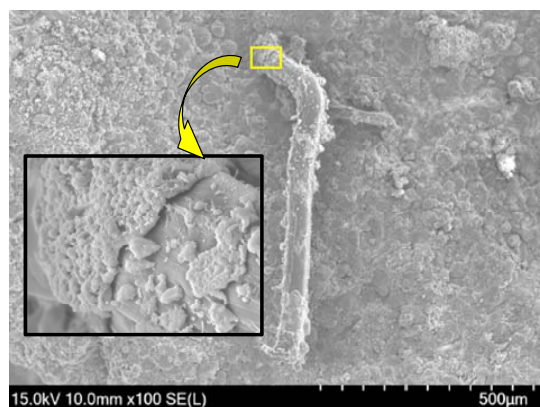
図－３～８に初透速度 $0.25\text{cm}^3/\text{s}$ と $0.55\text{cm}^3/\text{s}$ の、浸漬日数と透水率の関係を示す。なお、初透速度が比較的控制できていたため、透水速度を透水率として表した。ここで言う透水率とは、各浸漬日数の透水速度を初透速度の百分率で示したものである。PPでは繊維を混入していないPLに比べ、透水率は低下傾向にあったが、PVAではPLに比べて低下傾向にないものもあった。特にその傾向は、PVA①の方に多く見られた。

透水率が小さくなるほど自己治癒性能は高いので、今

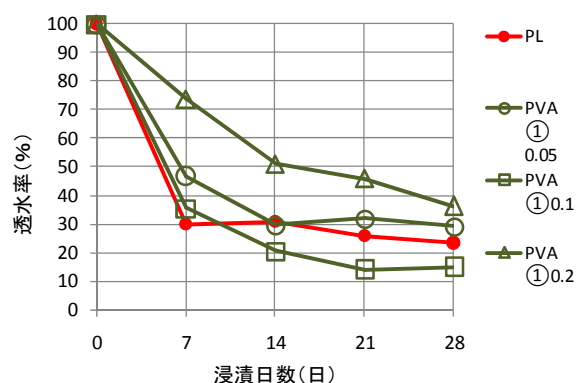
表－４ コンクリートの物性

試験体記号	コンクリート温度(°C)	スランブフロー(mm)	空気量(%)	圧縮強度(N/mm ²)	
				1d	14d
PL*	23.1	410×400	3.0	58.5	92.5
PP0.05	31.4	420×400	3.0	64.4	88.7
PP0.1	31.6	425×400	5.0	59.3	81.7
PP0.2	31.6	490×480	4.7	68.0	92.5
PVA①0.05	33.4	425×430	5.5	50.6	73.8
PVA①0.1	33.4	495×495	4.7	53.4	76.8
PVA①0.2	33.1	510×510	5.3	51.6	76.8
PVA②0.05	30.8	445×445	3.9	60.3	80.8
PVA②0.1	30.5	430×425	3.1	64.9	86.6
PVA②0.2	31.4	410×400	3.0	60.0	81.3

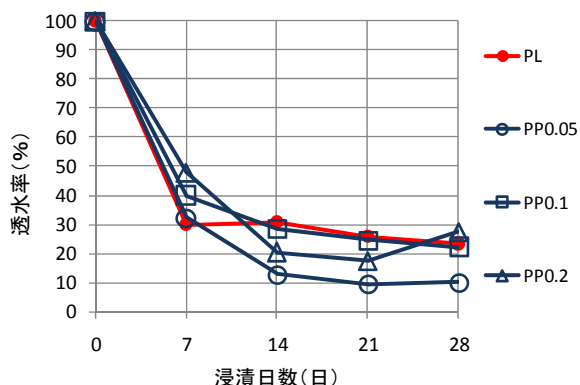
* PLは既報の値を示した。



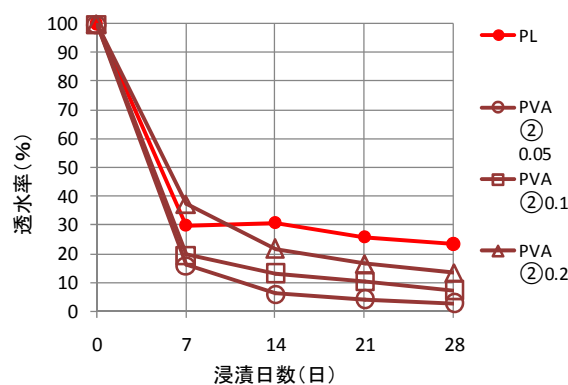
写真－５ SEMの二次電子像（PVA①）



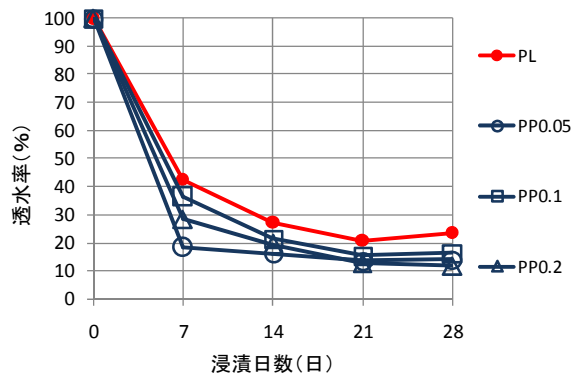
図－４ 透水試験結果 PVA①（初透速度 $0.25\text{cm}^3/\text{s}$ ）



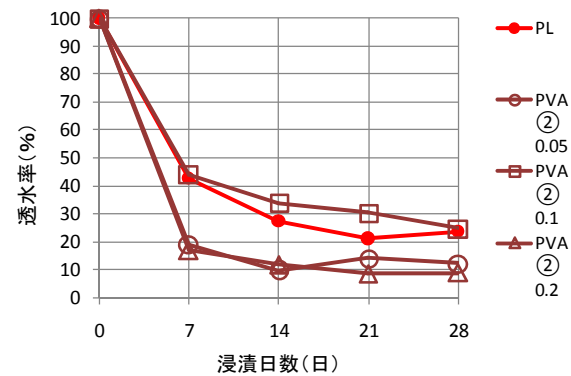
図－３ 透水試験結果 PP（初透速度 $0.25\text{cm}^3/\text{s}$ ）



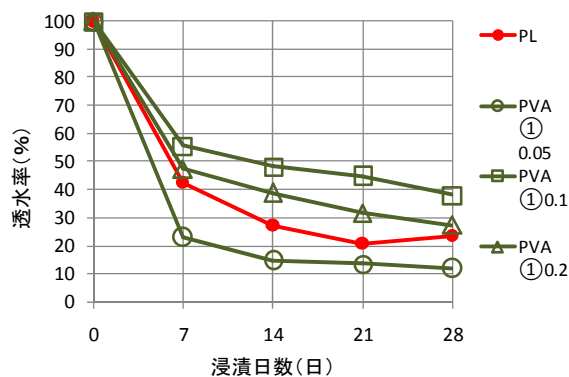
図－５ 透水試験結果 PVA②（初透速度 $0.25\text{cm}^3/\text{s}$ ）



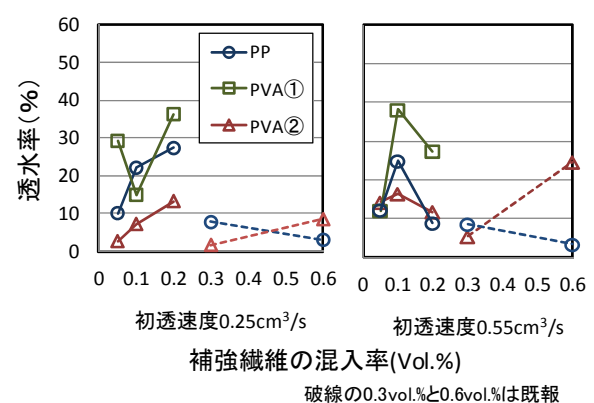
図－6 透水試験結果 PP (初透速度 0.55cm³/s)



図－8 透水試験結果 PVA② (初透速度 0.55cm³/s)



図－7 透水試験結果 PVA① (初透速度 0.55cm³/s)



図－9 補強繊維の混入率と透水率の関係

回の実験の範囲内においては、初透速度 0.25cm³/s では PVA②が、初透速度 0.55cm³/s では PP の自己治癒性能が高いという結果であった。しかし、いずれにおいても透水率は 0%にはならなかった。

PVA①は、PVA②に比べてアスペクト比が大きく、繊維径が小さいものである。同量を混入した場合、繊維の表面積が大きくなり、自己修復物質が付着するため自己治癒性能も高まると予想した。しかし、透水試験の結果はその反対で、自己治癒性能は低い結果となった。この原因は、PVA①と PVA②の引張強度とヤング係数の違いに有るものと考えられ、模擬ひび割れの入り方の違いによるものと推察される。繊維の混入率と透水率の関係を図－9に示す。浸漬日数 28 日の結果である。なお、混入率 0.3Vol.%と 0.6Vol.%については既報⁷⁾の数値を参考までに示した。補強繊維の混入率が増えると透水率は上昇している。これは、補強繊維の混入率が少ないほど自己治癒性能が高まるという今までに想定していない結果となった。この原因も、模擬ひび割れの入り方の違いによるものと推定した。川又ら¹⁰⁾は、繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の強度特性に与える影響について検討し、PP に比べて PVA の方が繊維の引張強度や弾性率が高いため、繊維補強モルタルの引張応力や曲げ荷重が大きくなる結果を得ている。すなわち、補強繊維

の混入率が高い場合や、PVA①のように引張強度やヤング係数が高い場合には、コンクリートとの付着強度も高くなり、ひび割れが分散する可能性がある。今回の実験では、同一ひび割れ幅と同一透水量における自己治癒性能を評価するために、模擬ひび割れはあえて 1 本を導入した。しかし、模擬ひび割れ近傍の細かなひび割れの発生により、透水試験時にその部分に通水が生じ、結果的に透水量が増え、自己治癒性能が低下したのではないと思われる。そのためにひび割れ誘導目地の幅や深さなどの再検討が必要であると考えられる。

4.3 マイクロ스코プによる観察結果

写真－6および写真－7にマイクロ스코プの観察結果の代表例を示す。各写真の左上から浸漬前 (0d), 7d, 14d, 28d の状況を示している。透水試験の結果から、いずれも透水率は浸漬 28 日で 0%に至らなかったが、マイクロ스코プによる観察結果でも、完全な閉塞には至らなかった。しかし、補強繊維の混入は自己治癒には有効的であることは今回の実験結果からも得られている。自己治癒性能はひび割れ幅が小さいほど、初透速度が小さいほど高くなる。そのため、補強繊維の効果は、比較的早い段階でひび割れ幅と透水速度を小さくするもので、その後のセメント水和物の析出と吸着を補助するものと

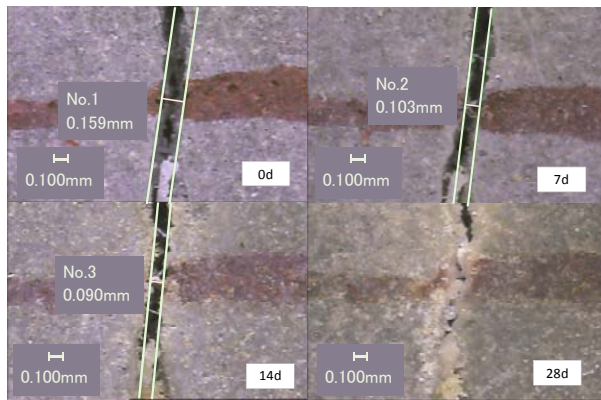


写真-6 PP0.2 (初透速度 0.55cm³/s)

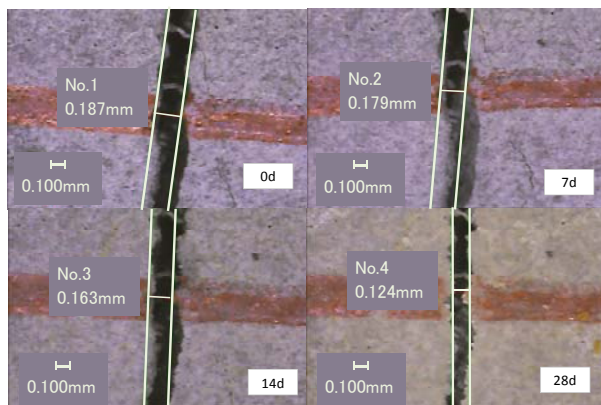


写真-7 PVA①0.2 (初透速度 0.25cm³/s)

思われる。例えば写真-6のPP0.2(初透速度 0.55cm³/s)では、7日の透水率は20%で、その後おおむね閉塞が見られた。しかし、写真-7のPVA①0.2(初透速度 0.25cm³/s)では、7日目から14日目でも50%と大きいため、ひび割れの幅は狭くなっているものの、全く閉塞は見られない。このように、補強繊維の混入の目的は、早期に自己治癒を促し、ひび割れ幅と透水速度を小さくした上で、その後のセメント水和物であるカルサイトの付着を促すものであると考えられ、今後は浸漬日数ごとのSEMによる分析などで確認したいと考えている。

5. まとめ

補強繊維の種類と混入量を変化させた重量コンクリートの自己治癒性能について研究した結果、今研究の範囲内では以下のようなことが分かった。

- (1) 模擬ひび割れの作製において、繊維を破断させず架橋させたままとする製法で、ひび割れ幅を固定し、初期透水速度も一定とさせる保持具の挿入方法が確認できた。
- (2) 重量コンクリートに補強繊維を使用することにより、水中浸せき後のひび割れ部の透水率は小さくなり、自己治癒性能が高まることが確認できた。
- (3) 補強繊維の混入率が増えると自己治癒性能も向上す

ると考えられたが、今回の実験では明確な関係性は得られなかった。

- (4) 補強繊維の混入の効果は、早期に自己治癒を促し、ひび割れ幅と透水速度を小さくした上で、その後のセメント水和物であるカルサイトの付着を促して自己治癒性能を高めるものと考えられる。

参考文献

- 1) 橋高義典, 小川洋二, 横室隆, 井川秀樹: X線透過デジタル画像の2層明度分析によるコンクリート製遮蔽容器のX線遮蔽性能の評価, コンクリート年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1990-1995, 2014
- 2) 坂本浩幸: コンクリートによる放射線の遮蔽について, コンクリートテクノ, Vol.31, No.6, pp.63-68, 2012.6
- 3) 進藤義勝, 宗金昌典, 上田隆雄, 渡邊健: フライアッシュコンクリートの自己治癒効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.137-142, 2010
- 4) 栗田淑乃ほか: 養生水の性質が自己治癒コンクリートの治癒効果に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.247-252, 2009
- 5) 小出貴夫, 岸利治, 安台浩: 造粒したひび割れ自己治癒材料および高炉スラグ細骨材を用いた自己治癒コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1408-1413, 2012
- 6) 新井健志, 橋高義典, 田村雅紀: 特殊混和材を用いたコンクリートの劣化度修復性とその評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), A-1, 材料施工, pp.1089-1090, 2004.8
- 7) 井川秀樹, 横室隆, 橋高義典, 江口秀男: 繊維補強した重量コンクリートの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, Vol.38, No.1, pp.1677-1682, 2016
- 8) 五十嵐ら: セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, JCI-TC075B, pp.11-13, 2009.3
- 9) 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.777-778, 2011.9
- 10) 川又篤, 高橋貴蔵, 堀越哲郎, 松岡茂: 繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の靱性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.295-300, 2005