

論文 ひび割れ自己治癒組成物を用いた漏水防止対策に関する基礎研究

森田 卓^{*1}・戸部 良太^{*2}・安 台浩^{*3}・岸 利治^{*4}

要旨：ひび割れ自己治癒材料の補修工法への適用可能性について基礎的な検討を行った。具体的には、新設構造物を対象として、自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリートを背面に施工することにより構造物のひび割れを治癒させる方法と、既設構造物を対象として、ひび割れ部に適当な間隔で削孔を行い、そこに自己治癒成分を含む無機系補修材を充填して周辺のひび割れを治癒させる方法について検討を行った。ひび割れの治癒効果の確認は、簡易通水試験により行った。検討の結果、コンクリート全体に自己治癒組成物を含有しなくても、補修材として使用することで全体にひび割れ自己治癒効果を付与できる可能性が示唆された。

キーワード：ひび割れ、鉱物質系混和材料、自己治癒機能、吹付けコンクリート、補修材、通水試験

1. はじめに

社会基盤施設形成を担うコンクリート構造物のひび割れを減少させることの社会的ニーズは極めて大きい。また、最近では、各国の土木建設分野において、維持補修の効果を減じることなく、その費用をいかに抑制するかが大きな課題となっている。このような背景の下、維持管理費用を大幅に削減できる可能性を有するひび割れ自己治癒コンクリートの実用化には、大きな関心が寄せられている。トンネルや大規模な地下構造物の場合には、漏水対策としてシートを用いた背面防水工が施されるが、水は欠陥部に容易に回るので、完全な防水を実現することは極めて困難である。ひび割れが生じたとしてもコンクリート自体に漏水防止性能を回復する機能を持たせることができれば、その効用は大きい^{1,2,3)}。

本研究では、新規や既存トンネル構造物を対象として、ひび割れ自己治癒材料の適用可能性について基礎的な検討を行った。

新規のトンネル工事への適用については、NATM工法を対象として、自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリートを使用することを想定した(図-1(a))。また、既存トンネルの漏水補修工事への適用については、図-1のように既設トンネル構造物を想定して、漏水が発生しているトンネルについて考えた。現在、この対策として線導水工法や点導水工法があり、前者は連続的に漏水箇所をはつってしまうのでトンネル自身の強度上の問題が考えられる。また、後者の点導水工法はパイプの取り付けに手間を要し、外観も新設当初の状態を維持できるわけではない。そこで、強度を失うことなく、美観上問題とならない新たな補修工法として、ひび割れ部に適当な間隔で削孔を行い、自己治癒成分を含む無機系補修材

を充填する方法を検討した(図-1(b))。以上の2つの方法により、吹き付け部ないし充填部から、外的ないし後天的にひび割れ部位に自己治癒水和物を生成させる方法とその効果について検討を行った。

2. 実験概要

まず初めに本検討で実施した実験について概説する。

2.1 使用材料

本検討ではカルシウムサルフォアルミネート(CSA)系膨張材³⁾、ジオマテリアル(Geo-Materials)⁴⁾、炭酸基系化学添加材を混合したセメント組成物を人工的に作製し、硬化したコンクリートの自己治癒性能を検討した。CSA系膨張材は、エトリンガイト($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)を積極的に生成させて膨張性を付与する材料であり³⁾、一般にコンクリート用混和材として、収縮補償やケミカルプレストレス導入目的で用いられている。ジオマテリアルは、砂・粘土・岩あるいはガスハイドレートなどの自然界で堆積・形成された地盤材料の総称⁴⁾であり、粘土系材料を用いている。本実験では2種類のジオマテリアルA,Bを使用した。ジオマテリアルAは、水分を吸収した際の膨潤効果が高く、防水材や地盤安定化材料としても使用されている。ジオマテリアルBは、不溶性結晶を生成させるための有効成分の供給を目的として添加する材料である。さらに、ひび割れ部において、結晶性水和物を生成するために炭酸基系化学添加材⁵⁾を使用した。図-2は、対象とするひび割れ自己治癒技術の材料設計の概念を表したものであり、主原料である普通ポルトランドセメント(OPC)に対して、その他の使用材料がそれぞれどのような機能を担っているのかを示している⁶⁾。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科(卒) 東京都特別区 墨田区役所(現) (非会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

2.2 硬化した自己治癒組成物の性能評価実験

供試体はφ50×100mm とし、水結合材比は 45%と比較的高い条件で作製した。水和が進行し、水和反応がほぼ終了したと判断される養生 120 日以後供試体に、0.2～0.3mm のひび割れを導入した。その後、再び水中条件下にて養生を行い、サンプルのひび割れ部に生成される水和物について光学顕微鏡(OM)、走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分析装置(SEM-EDS)を利用して観察した。

2.3 自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリートの止水性能評価実験

自己治癒生成物を含有した吹付けコンクリートのひび割れが生じた場合、ひび割れを通過する地下水に自己治癒成分が溶け出すと考えられる。この地下水が覆工コンクリートのひび割れを通過することで、ひび割れ内で自己治癒水和物が生成され、ひび割れが閉塞する可能性がある。上記シナリオを仮定した実験を行い、自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリートの止水性能を検討した。

(1) 供試体の作製

本項で作製する供試体はφ100×300mm とし、配合ごとに 2 体ずつ作製した。

最初に吹付けコンクリートを想定した表-1 に示す配合のコンクリートを 10cm 打設し、翌日に現場での覆工コンクリートにあたる普通コンクリート(表-2)を 20cm 打設した。表-1 中の自己治癒成分は 2.1 で示した材料である。打設後、24 時間で脱型し、28 日間空中養生を行った。養生温度は 20±0.3℃、相対湿度は 60±3%とした。

養生後に圧縮試験機を用いて供試体を割裂した(図-3)。割裂した供試体は、コンプレッサーで表面を整え、厚さ 0.2mm のテフロンシートをひび割れ間に挿入することで、ひび割れ幅の調整を行った。その後、ホースクランプで三か所を締め、供試体側面のひび割れをエポキシ樹脂で塞いだ。

(2) 通水試験装置および測定方法

通水試験器具は、骨組みを垂木で作製し、そこにウレタンコートパネルを貼り付け、内側はシリコンでシーリングした。さらに 図-3 に示すように供試体を設置

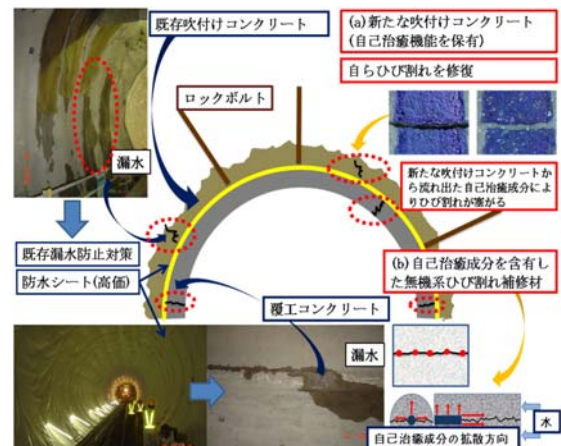


図-1 ひび割れ自己治癒材料のトンネル適用イメージ
(a) 自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリート
(b) 自己治癒組成物を含有した無機系ひび割れ補修材

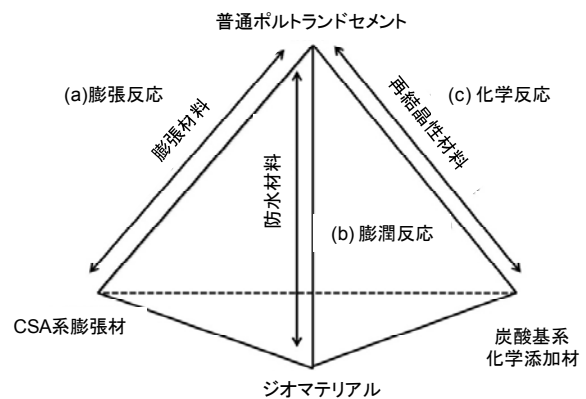


図-2 ひび割れ自己治癒材料の設計概念⁶⁾

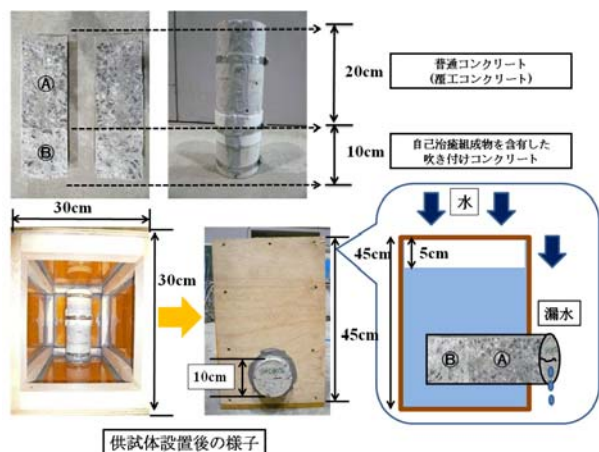


図-3 供試体および通水試験装置

表-1 吹付けコンクリートの配合

	水セメント比	単位量(kg/m ³)						高性能 AE減水剤 SP	急結剤 水溶性 アルミニウム塩
		水	セメント	自己治癒成分	細骨材	粗骨材			
	W/C(%)	W	C	SH	S	G			
OPC	59.2	213	360	0	1074	692	0	0.018	
SH10%		213	324	36			0.005		
SH30%		213	252	108			0.007		
SH50%		213	180	180			0.016		

し、隙間をシリコンで埋めた。通水試験は、通水試験装置を満水にした状態から計測を開始し、水面が 5mm 下がるまでの時間を計測した。通水試験装置を満水にした時点を 0 日目とし、0, 1, 3, 7, 14 日目に水面低下に要する時間の計測を行った。(図-3)

2.4 自己治癒組成物を含有した無機系ひび割れ補修材の止水性能評価実験

図-1 のようなひび割れがトンネル構造物に対して、補修材から自己治癒成分を拡散させることでひび割れを治癒する工法を検討した。ひび割れに沿って一定の間隔で直径 2cm、長さ 10cm 程度のコア抜きを行い、そこへ自己治癒成分を含む補修剤を注入する。ひび割れ部位の補修材から自己治癒成分がひび割れに沿って拡散し漏水を止水するイメージを 図-1(b)下に示す。上記シナリオを仮定した実験を行い、自己治癒組成物を含有したひび割れ補修材の止水性能を検討した。

(1) 無機系ひび割れ補修材の作製

本項で用いる無機系補修材の種類と配合を表-3 に示す。供試体 A は自己治癒成分なしの補修材、B は市販用補修材(触媒性化合物を主成分とした無機質材料)、C は 2.1 に示したジオマテリアル A を用いて作製した膨潤タイプ補修材、D は 2.1 で使用した材料と同様の自己治癒組成物を用いて作製した複合系タイプである。

(2) 供試体の作製

一般的な覆工コンクリートの厚みが約 30cm であることから、作製する供試体の長さも 30cm とした。また、供試体の覆工コンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの直径は補修材の拡散範囲を調べるためにφ100mm とφ150mm の 2 種類を用意し、配合ごとに 3 体ずつ作製した。この供試体のコア抜きを実施することは困難であることから、直径約 2cm の木の丸棒を差し込み、コンクリートの硬化後に引き抜くことで、あらかじめコア状の穴を設けた(図-4(a))。供試体は打設後、24 時間で脱型し、養生条件は、2.3 と同様にした。

養生後、圧縮試験機を利用して供試体すべてを割裂し、2.3 と同様の手順でひび割れ幅が 0.2mm となるように調整し、供試体側面からの漏水を防ぐために側面のひび割れ部にエポキシ樹脂を塗布した。その後、図-4(a) に示すように補修材の注入を行った。

(3) 通水試験装置および測定方法

通水試験器具は、2.3 と同様の木箱を用いて 12 体分作製し、2.3 と同様の手順で供試体を設置した。装置上面に木製の蓋を設置し、そこに水を貯め、それぞれの木箱に徐々に滴下するように 12 か所穴を開けた。通水試験も 2.3 と同様に行い、水面低下に要する時間の計測を行った。

表-2 覆工コンクリートの配合

水セメント比 W/C(%)	単位量(kg/m ³)			
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
47.3	175	370	809	920

表-3 補修材の種類と配合

供試体	水結合材比 W/B(%)	単位量(g)		
		普通 ポルトランド セメント OPC	無機系 ひび割れ 補修材 SH	補修材 の種類
A	30	200	0	なし
C		60	140	膨潤タイプ
D		140	60	複合系タイプ



図-4 自己治癒成分を有する補修材の通水試験

3. 結果および考察

3.1 基礎となる自己治癒組成物のひび割れ自己治癒性能評価

写真-1 に硬化した自己治癒組成物の性能評価実験の試験結果を示す。作製した自己治癒セメント組成物は 120 日間養生後、ひびわれ(0.2mm)を導入した場合、再水中養生 3 日以後からひびわれ部位に自己治癒生成物が生成しているのが確認できた。以前作製されたセメント組成物³⁾は、再水中養生 28 日後、ひび割れ部の結晶に大きな変化が見られた。しかし、今回作製した自己治癒組成物は、大きな変化をせず存在していることから、化学的安定性が増進しているものと考えられる。写真-2(a), (b)の SEM イメージではひびわれ部位に C-A-H, geopolymeric gel 相, CaCO₃ などの複合水和物の生成を確認でき、特に 写真-2(c)の EDS イメージで見られるように、化学添加材によって生成した CaCO₃ と共に AFt 相が生成するのを確認した。以上の結果より、この自己治癒組成物はトンネル構造物の補修材として求められる要因を満たしているものと判断できる。

3.2 自己治癒成分を含有した吹付けコンクリートの通水試験評価

図-5 に吹付けコンクリートに自己治癒コンクリートを使用した通水試験の結果を示す。

図-5(a)において、ひび割れ幅を 0.2mm 程度に統一したにもかかわらず、通水開始時点での水面低下時間にばらつきが見られるが、これは、ひび割れ幅に若干の誤差があったこと、ひび割れ面の形状が異なっていることからこのような結果になったと考えられる。そこで、各測定時の通水時間を初期値の通水時間で除した値を止水率とし、これを評価することで初期値のばらつきを排除した。図-5(b)に通水試験結果を止水率によって評価した図を示す。また、止水率によって整理した結果を表-4 に示す。

図-5(b)、表-4 より、SH10%、30%は 3 日目から止水率が徐々に増加し、14 日目においても増加が続いている。最終値は SH10%の方が高く、止水性能が高い結果となった。また、SH50%の場合は 1 日目から大きな止水性能が発揮されているが、7 日目以降はほぼ一定となっている。

このことより、自己治癒成分の配合率が増加するにつれて、ひび割れ治癒性能が促進されるが、配合率がある程度以上になると、止水性能が有効に作用しないものと考えられる。これは、自己治癒成分の増加により材料自体の化学的安定性が低下する可能性を示しており、今後検討を行う必要があると考えられる。

以上の結果より、吹付けコンクリートに適切に自己治癒組成物を適用すれば、通常のコンクリートと比較して、効果的な止水性能を持つと考えられる。

そのため、実際のトンネル現場においても、自己治癒組成物を含む吹付けコンクリートを使用すれば、漏水を防止できる可能性がある。

3.3 自己治癒成分を含有した無機系ひび割れ補修材の通水試験評価

図-6(a)、7(a)、その他も同様に無機系補修材によるひび割れ自己治癒補修材を使用した通水試験の結果を示す。

また、3.2 と同様に初期値のばらつきを除去するため、

止水率によって評価を行った(図-6(b)、7(b)および表-5、6)。また、写真-3 に通水試験終了後の供試体の様子を示す。

ここで図-6(b)、7(b)において、供試体 A のみ初期値が異なる理由は、他の補修材は膨張材を含有しているため、ひび割れ幅調整後にひび割れが開いたことで通水しやすくなったためであると考えられる。

自己治癒成分なしの供試体 A では継続的に漏水が発生した。補修材ありの供試体 B の場合、φ100mm について

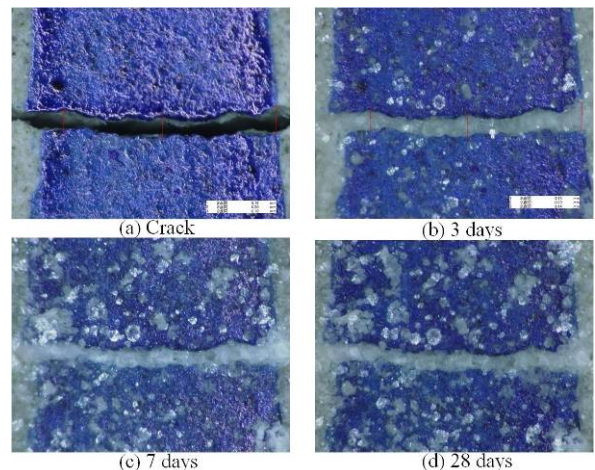


写真-1 化学的安定性と自己治癒速度を増加させた自己治癒組成物

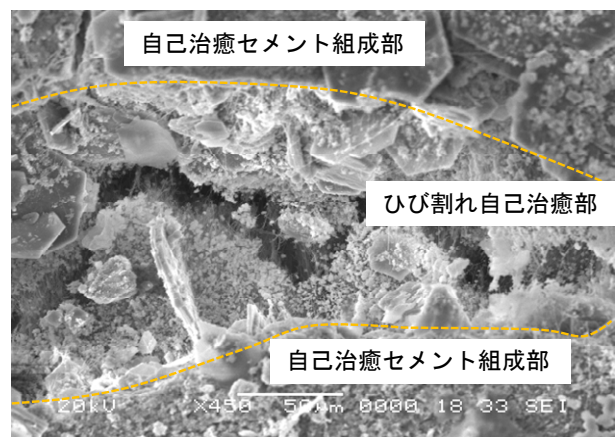


写真-2(a) 自己治癒セメント組成物のひび割れ部に生成した水和物

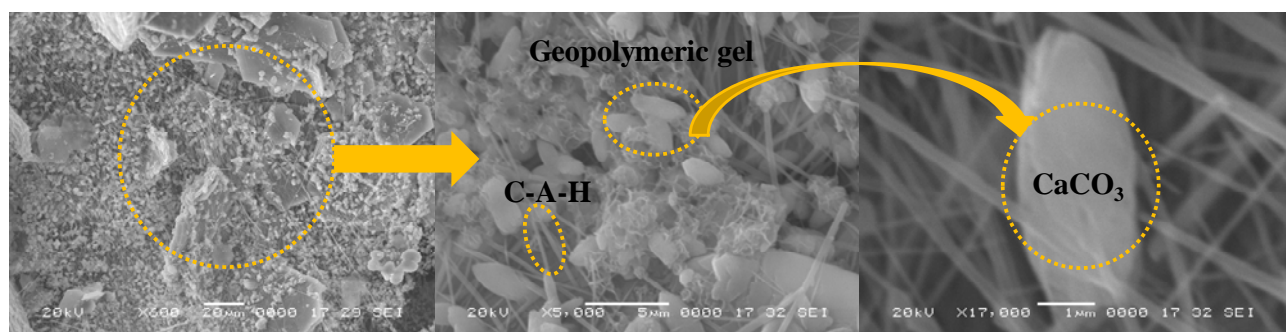


写真-2(b) ひび割れ部に生成した複合水和物(SEM)

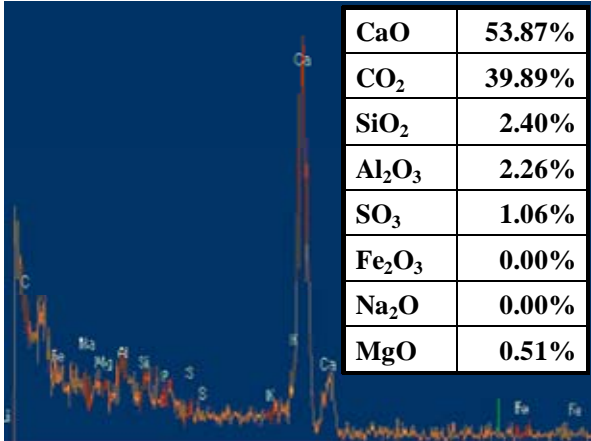
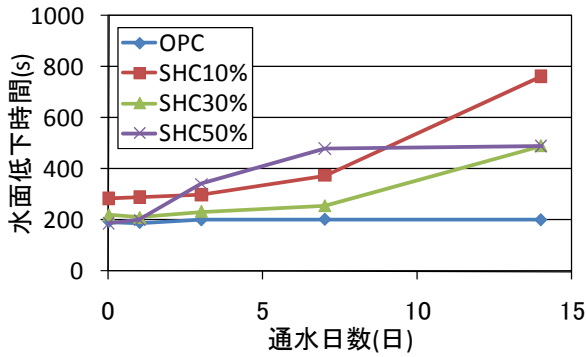
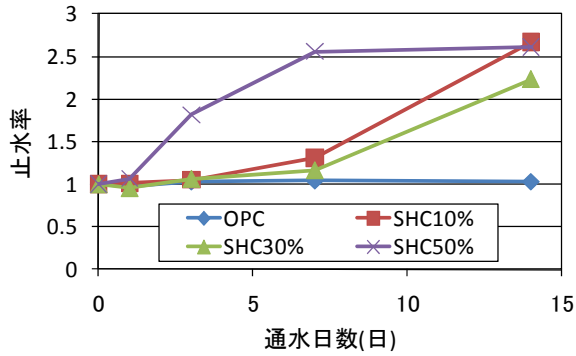


写真-2(c) ひび割れ部に生成した複合水和物(EDS)



(a) 測定結果

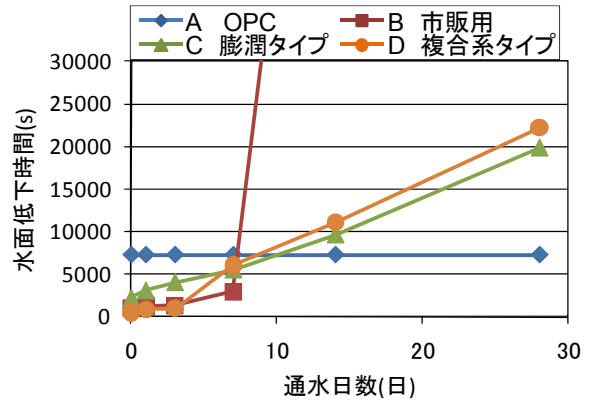


(b) 止水率評価結果

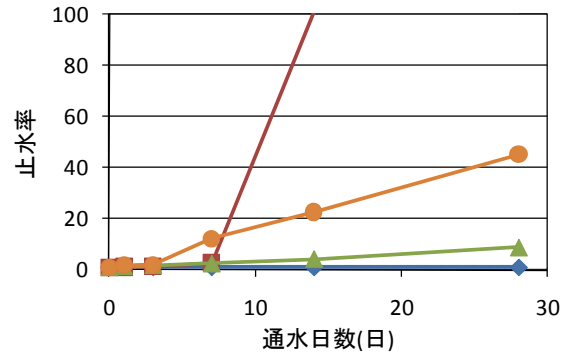
図-5 自己治癒組成物を含有した吹付けコンクリートの止水効果

表-4 止水率評価結果

材齢(日)	止水率			
	OPC	SHC		
		10%	30%	50%
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.98	1.01	0.95	1.06
3	1.03	1.05	1.06	1.82
7	1.04	1.31	1.16	2.56
14	1.03	2.67	2.23	2.61

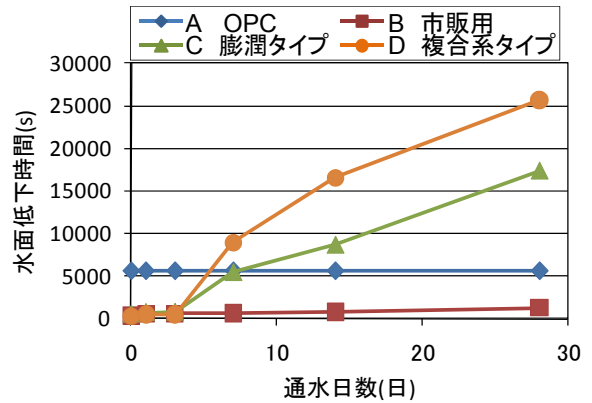


(a) 測定結果

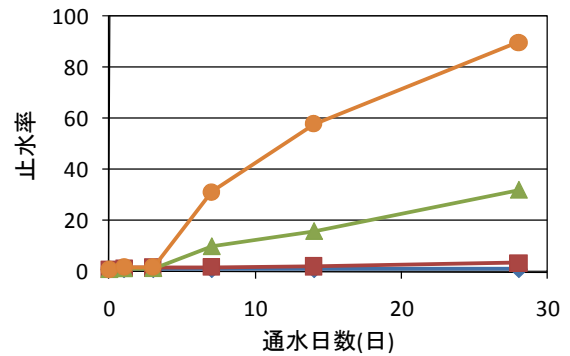


(b) 止水率評価結果

図-6 自己治癒成分を含有した無機系ひび割れ補修材の止水効果 (φ100mm 供試体)



(a) 測定結果



(b) 止水率評価

図-7 自己治癒成分を含有した無機系ひび割れ補修材の止水効果 (φ150mm 供試体)

表-5 止水率評価結果(φ100mm 供試体)

材齢(日)	止水率			
	A	B	C	D
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.00	1.23	1.39	1.86
3	1.00	1.33	1.82	2.00
7	1.00	2.88	2.49	12.33
14	1.00	∞	4.33	22.62
28	1.00	∞	8.89	45.22

表-6 止水率評価結果(φ150mm 供試体)

材齢(日)	止水率			
	A	B	C	D
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.00	1.52	1.35	1.86
3	1.00	1.65	1.40	1.82
7	1.00	1.82	10.02	31.30
14	1.00	2.17	15.99	57.97
28	1.00	3.53	32.18	89.83

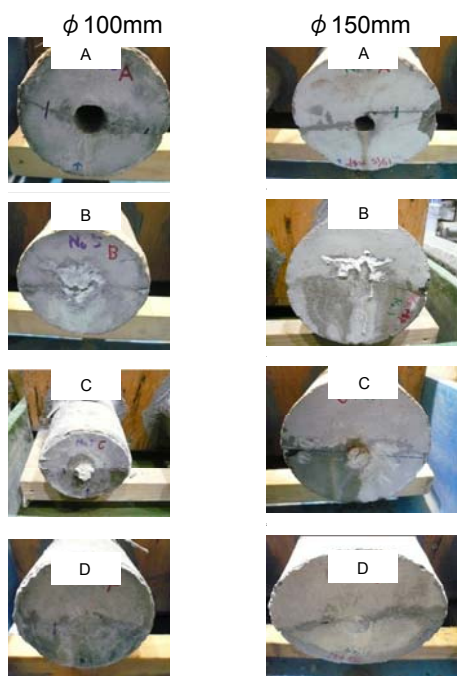


写真-3 止水試験終了後の供試体の様子

は図-6(b), 表-5 より約 7 日間で止水率が無限大となった。しかし, φ150mm については図-7(b), 表-6 より, 止水率の増加が確認できたが, 漏水が発生していた。このことより, 補修材の成分の拡散する範囲に限りがあり, φ150mm 供試体においてはひび割れを治癒しきれなかったものと考えられる。また, 写真-3 より供試体 B において, 表面に白い析出物が確認できる。供試体 C については破壊にまでは至らないものの, 補修材が膨張し, 隆起が生じていた。しかし, 図-6(b), 7(b), 表-5, 6 からも分かるように止水性能は比較的高い。供試体 D については, 写真-3 より表面の美観上に優れ, 28 日経過後止水性能が他に比べて高いことが確認できた。

以上の結果より, D は写真-3 の様子から, 補修材の

膨張率が低いと考えられる。また, OPC の量が多いということは経済的であり, B と比べても表面の美観上で優れており, φ150mm の供試体においても高い止水性を示したことから, 今回検討した配合においては D が最も実用的であると考えられる。

5. まとめ

以下, 本研究より得られた知見を示す。

- (1) 本研究で提案する自己治癒組成物は, 120 日間養生後にひび割れ導入した場合, 再水中養生 3 日以後からひび割れ部位に自己治癒生成物が生成することを確認できた。
- (2) 吹付けコンクリートにおいて, ひび割れ自己治癒組成物の反応メカニズムを用いることで効果的な止水性能が確認できた。
- (3) ひび割れ自己治癒組成物の反応メカニズムを基礎とした新たな無機系ひび割れ補修材を使用した場合, ひび割れ部の結晶生成物, 止水効果が確認され, ひび割れ自己治癒に効果があることが分かった。

謝辞

本研究の遂行に際しては, 小林 薫氏(JR 東日本), 松田芳範氏(JR 東日本), 細田 暁准教授(横浜国立大学大学院環境情報研究院)との議論で大変貴重なご意見をいただきました。ここに, 謝意を表します。

参考文献

- 1) 安台浩: ジオマテリアルを含有した自己治癒コンクリートの開発に関する研究, 東京大学博士学位論文, 2008.3
- 2) T.H. Ahn, T. Kishi : "New method as the self-healing design to repair cracks in cracked concrete", Proc. of 4th International Conference on Construction Materials : Performance, Innovations and Structural Implications, pp. 1339- 1346, Nagoya, Japan, Aug. 24-26, (2009)
- 3) 盛岡実ほか: 遊離石灰 - アウイン - 無水セッコウ系膨張材の膨張特性, コンクリート工学年次報告集, Vol.19, No.1, 1997
- 4) 岡二三生ほか: ジオマテリアルの力学特性の把握と構成モデルの開発, 京都大学大学院, (オンライン), 入手先 <<http://www.ce.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/ground>>, 2010
- 5) T. Kishi et al.: "Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent", 1st International Conference on Self-healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, April 18-20, 2007
- 6) A. Hosoda et al.: "Self-Healing properties with various crack widths under continuous water leakage", 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2008), Cape Town, South Africa, Nov. 24-26, 2008)