論文　無機系ひび割れ自己治癒組成物を造粒混和したコンクリートの漏水抑制効果に関する基礎的検討

森田　卓[*1]・小出　貴夫[*2]・安　台浩[*3]・岸　利治[*4]

要旨：コンクリートに無機系ひび割れ自己治癒組成物の造粒物を混和することで，ひび割れ部からの漏水抑制効果が得られるか基礎的な検討を行った。本検討で無機系組成物を造粒物とした目的は，水と反応性および吸水性が高い無機系材料の使用によるフレッシュ性状の大幅な低下を解決するためと，自己治癒に寄与する自己治癒成分の温存により，長期間自己治癒効果を維持するためである。効果の検討は，屋内・屋外簡易通水試験により行った。その結果，自己治癒組成物の造粒物を細骨材に対して 40kg/m^3 置換した場合，フレッシュ性状の改善効果ならびに, 8 カ月経過した段階でも造粒せずに用いた場合と同等の止水効果が得られた。

キーワード：ひび割れ，自己治癒コンクリート，無機系材料，造粒，通水試験

1. はじめに

近年，高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の劣化が顕著に現れてきている。特に社会基盤施設形成を担うコンクリート構造物におけるひび割れの発生は，機能性，美観性および耐久性の低下の原因となるため，その抑制に対する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。

著者らはこれまでに，無機系ひび割れ自己治癒組成物(以下，無機系組成物)を用いたひび割れ自己治癒コンクリート(以下，自己治癒コンクリート)を提案し，開発に取り組んできた[1), 2)]。それにより，止水性能が向上し，自己治癒コンクリートの実現性が増している[2), 3)]が，水との反応性および吸水性が高い無機系材料の使用によるフレッシュ性状の大幅な低下が課題となっていた[1)]。また今後，長期材齢でのコンクリート構造物のひび割れを確実に治癒し，漏水を完全に止めるには，自己治癒成分を長期的に保存する手法が必要であると考えられる。そこで本研究では，上記課題の解決を目的として無機系組成物を簡易に造粒し，コンクリートに混和することで，その効果について基礎的な検討を行った。

2. 使用する無機系組成物[1)]

本検討で用いる無機系組成物は，カルシウムサルフォアルミネート(CSA)系膨張材を主とする膨張成分，膨潤性のアルミノシリケート粘土鉱物を主成分とするジオマテリアル(Geo-Materials), 炭酸基を有する化学添加材等の混合材料である。**写真-1** に硬化した無機系組成物の性能評価実験の試験結果を示す。自己治癒セメントペースト供試体(W/C=45%)は 120 日間養生後, ひび割れ(0.2mm)を導入した場合，再水中養生 3 日以後からひび割れ部位に白色生成物が析出し，ひび割れが閉塞していることが確認できた。

本研究では，この無機系組成物を造粒物とすることで，その効果の検討を行うこととした。

3. 無機系材料の造粒方法および性能評価実験概要

3.1 無機系組成物の造粒

(1) 造粒物による自己治癒コンセプト

造粒物を用いたひび割れ自己治癒のコンセプトを**図-1**に示す。コンクリート構造物にひび割れが発生した際

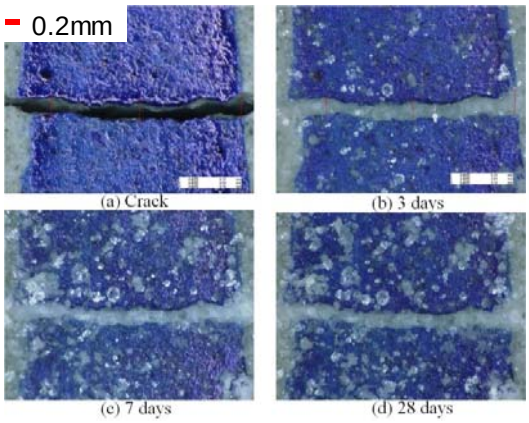


写真-1　無機系組成物によるひび割れ閉塞過程
(水中養生 120 日後，ひび割れ(0.2mm)導入)[1)]

*1 （元）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 住友大阪セメント（株）　セメント・コンクリート研究所　(正会員)
*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)

に造粒物が割れ，水分の供給により自己治癒成分が溶け出して結晶が析出し，ひび割れが閉塞する。このような造粒物を用いることで，課題となっていたフレッシュ性状の改善ならびに自己治癒成分の長期保存が可能となるものと考えている。また，無機系組成物の使用は，従来セメントに対して置換していたため，粉体のまま多量に用いると初期の強度発現が低下する可能性があった。しかし，造粒物の使用は，コンクリート中の細骨材に対して置換して用いることでその点が改善されると考えられる。普通ポルトランドセメント(OPC)をモルタルミキサで攪拌しつつ，スポイトで水を滴下して簡易的に作製した造粒物を**写真-2** に示す。

無機系組成物を造粒物とするためには，無機系組成物と水が最低限必要であり，それによって粉体が凝集し，造粒物が得られる。しかし，無機系組成物と水のみではセメントのような結合材(バインダ)が少ないため，得られた造粒物は脆く，コンクリートに混和した段階で造粒物が崩壊する可能性がある。造粒物の形状保持には，水硬性を有するセメント系材料の混入が考えられるが，水和により強度が高くなると，コンクリート構造物にひび割れが発生した際に，造粒物が割れずに残存する恐れがある。

そこで，造粒物中のセメント系材料の水和の進行を停滞させるため，試験的に水の一部を揮発性有機溶媒(エタノール)で置換することとした。造粒に適した W/C の確認を事前に行った結果，W/C=20%と一定にし，OPC200g をモルタルミキサで攪拌しつつ，水とエタノールをスポイトで滴下して造粒物を作製した。その際に，水とエタノールの置換割合を変えた。作製後，7 日間密封養生を行い，水和反応の進行の有無を XRD(粉末 X 線回折装置)により検討した結果を**図-2** に示す。$Ca(OH)_2$ のメインピークがほぼ見られなかったことから，水に対してエタノールを体積比で 30%置換することで初期のセメント水和進行の大幅な抑制効果が確認できた。そこで，以降の造粒物作製では上記置換率を採用することとした。

(2) 造粒物の作製

モルタルミキサで OPC の造粒物を作製した場合，造粒物の粒径は 300μm ～5mm の範囲にばらついた。特に，粒径 300μm や 5mm 程度の径を有する造粒物が多く存在しており，細骨材の粒度分布とは大きく異なる結果となった。これは，ミキサの羽の形状が造粒に適していないことが要因と考えられる。そこで，医薬品・食品分野で使用される攪拌造粒機(装置容量：25ℓ，仕込み量：12kg/バッチ，所要時間：10 分/バッチ)(**写真-3**)を使用し，造粒を行った。**表-1** に造粒物の配合を示す。硬化したコンクリート中で造粒物がポップアウトする懸念があったことから，膨張成分の有無によって 2 種類(Type-1A，1B)

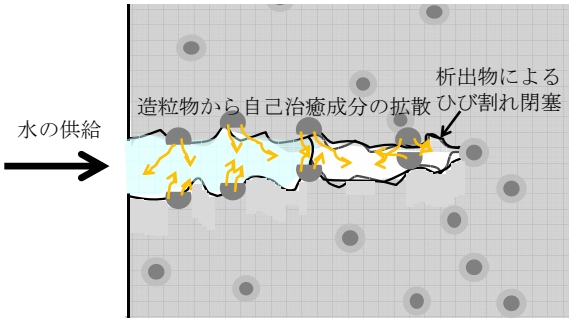


図-1 造粒物による自己治癒コンセプト

写真-2 造粒物(バインダに OPC だけを使用)

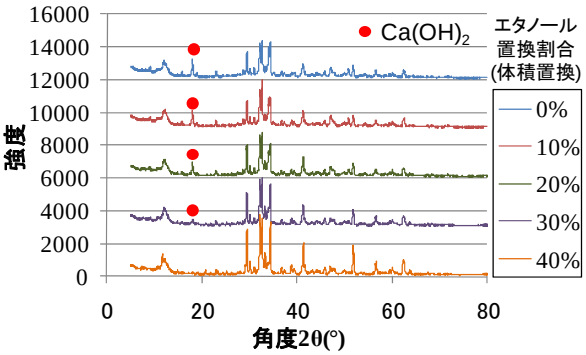


図-2 XRD 測定結果

作製した。バインダ用セメントには，セメントそのものが自己治癒性能を有することが確認されている低熱ポルトランドセメント[3] を使用した。なお，Type-1B の配合については，自己治癒材料中の膨張成分を除き，低熱セメントでその低下分を補った。液体バインダとしては，前述の結果より，水：エタノールを体積比 7:3 で混合したものを使用した。繊維は，ひび割れ自己治癒に適していることが報告されている PVA 短繊維[4](φ27μm×長さ 6mm，密度 1.3g/cm^3)を，ファイバーボールが生成しない量を事前に確認し，外割りで 0.08kg/m^3 添加した。造粒物は，20℃で 7 日間密封養生を行った後，コンクリート用パン形ミキサに造粒物(100kg)と遮水処理用の脂肪酸飽和エタノール溶液(18ℓ)を入れて 1 分間練混ぜた後に，屋外で自然乾燥させてエタノールを除去した。**図-3** に造粒物作製フローを示す。

写真-4 に作製した造粒物の様子を示す。また造粒物のふるい分け試験結果を**図-4** に示す。**写真-4** より，攪拌

造粒機によって，無機系組成物粉体から造粒物が得られたことが確認できる。また，**図-4** より，作製した造粒物は JIS A 5308 の標準粒度の範囲内に概ね収まっており，細骨材と同様の粒度分布を有することが確認できた。

3.2 造粒物を混入したコンクリート供試体による性能評価実験

(1) 供試体の作製

コンクリートの練り混ぜは実機プラントにて行い，その際に使用した材料の諸性状ならびに配合を**表-2**，**3** に示す。自己治癒コンクリート(SHC)の配合には，高性能 AE 減水剤(SP)をセメント量に対して 3.0%混入した。作製するコンクリートは，W/C=57.9%，s/a=45.2%，呼び強度は 24N/mm^2，目標スランプは 21cm，目標空気量は 4.5%とし，自己治癒材料は細骨材に対して 40kg/m^3 置換した。荷卸後にスランプ試験を行うことで造粒物を用いたことによるフレッシュ性状の改善効果を確認した。

作製する供試体はϕ100×h200mm の円柱供試体とし，圧縮強度試験用を測定材齢ごとに各配合 3 体ずつ，屋内通水試験用供試体を各配合 3 体ずつ作製した。

また屋外通水試験用供試体として，**図-5** に示す枡形 RC 試験体を各配合 1 体ずつ作製した。南面と北面で部材の厚さが異なるのは，ひび割れを南面，北面にそれぞれ導入し，流路長の違いによる自己治癒効果を確認するためである。打設後，強度試験用供試体は材齢 24 時間で脱型し，20℃水中養生を行い， JIS A1108 に従って材齢 7 日，28 日に圧縮強度を測定し，無機系組成物混入による強度への影響を確認した。また，長期材齢として材齢 270 日でも同様に圧縮強度を測定した。

通水試験用供試体も同様に 24 時間後に脱型し，8 ヶ月間，屋内気中養生を行った。養生後に圧縮試験機を用いて供試体を割裂した。割裂した供試体の断面は高圧空気を吹き付けて微粒分を除去し，自己治癒に有利な目詰まり効果の発生を抑制した。ひび割れ幅はホースクランプで締め付けて調整し，0.2～0.3mm であることをマイクロスコープで確認した。ひび割れ幅の測定は，供試体上下面各 3 点，計 6 点について行った。

またϕ100mm×h100mm の塩ビ管を供試体上面に水頭が約 80mm となるように取り付け，供試体との隙間および供試体側面のひび割れをシリコーンで塞いだ。測定は，塩ビ管への注水による屋内通水試験で漏水量の経時変化の測定を行い，無機系組成物の造粒化による効果を確認した。

枡形 RC 試験体は 7 日で脱型し，3 ヶ月屋外気中養生を行った。脱型後は，試験体上部に雨水が堪らないように蓋を設置した。養生後，油圧ジャッキによって内部壁面に荷重をかけ，南面，北面にひび割れを導入(ひび割れ幅 0.3~0.7mm 程度)した。なお，普通コンクリート(Plain)試験体は，試験体壁面を押し抜く恐れがあったため，南面のみにひび割れを導入した。枡中に注水することで屋外通水試験を実施し，円柱供試体と同様に効果を確認した。

(2) 止水効果評価試験方法

屋内通水試験は，**写真-5 左**に示す塩ビ管を常に満水に

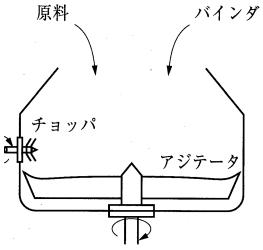


写真-3 使用した撹拌造粒機 [5)]

表-1 造粒物の配合

	自己治癒材料	造粒用バインダ		PVA繊維
		低熱セメント	水+エタノール	(kg/m^3)
Type-1A	42	42	16	0.08
Type-1B	33	49	18	0.08

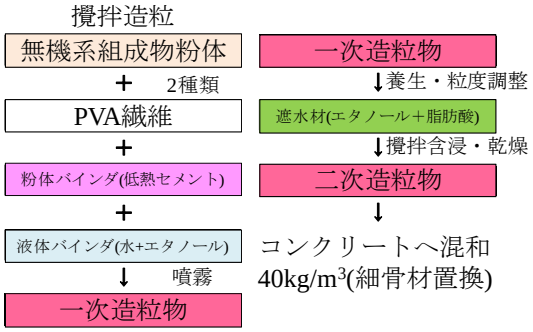


図-3 造粒物作製フロー

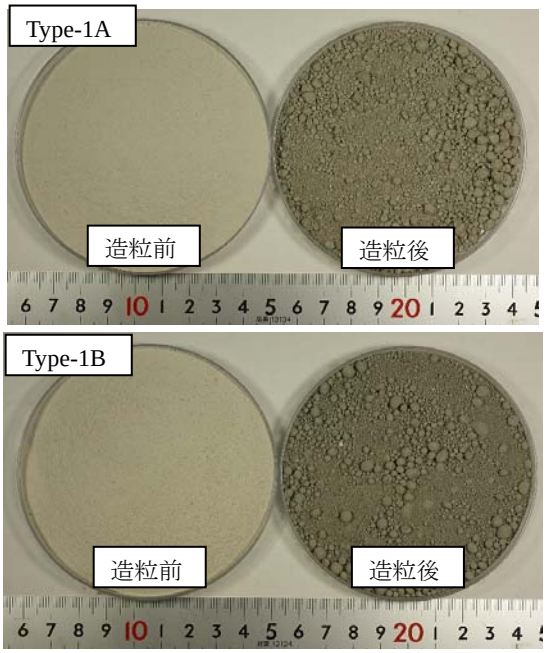


写真-4 作製した造粒物

した定圧連続通水状態とし，塩ビ管の水を満水にした時点を 0 日目とし，0，1，3，7，14，21，28 日目に供試体ひび割れ下面から流出する漏水量を 5 分間計測した。測定は，ひび割れ下面のみからの漏水量を計測できるように供試体下面に漏斗を取り付け，メスシリンダー上に設置している（**写真-5 右**）。塩ビ管に水を満水にした状態で供試体には，約 0.8kPa の水圧が作用している計算となる。また，pH 試験紙で pH を測定することで，漏水量の変化と pH の変化の関係を把握した。通水試験前後には，マイクロスコープでひび割れ部の析出物の有無を確認した。

屋外通水試験は，枡形 RC 試験体に水を満水にした時点を 0 日目とし，0，6，8，11，16，26，44，93，123，134 日目に枡上面 1cm からの水面低下深さの経時変化を 60 分間，10 分おきに測定した。測定後および，通水開始 2，4，7，14，18，25，33，37，41，73，78，112 日に供試体全てに水を供給し，満水にした。

4. 結果および考察

4.1 フレッシュ性状試験結果

表-4 に荷卸後のフレッシュ性状の測定結果を示す。無機系組成物を造粒せずに用いた SHC-Type1A 粉体に比べて，Type-1A 造粒，Type-1B 造粒においてスランプ値の上昇が確認できる。なお，SHC-Type1A 造粒の配合は減水剤量が過大で，若干材料分離が生じていた。このことより，無機系組成物を造粒物としてコンクリートに混和したことによって流動性が改善されたと言える。また，空気量に関しても無機系組成物を粉体のまま混和すると過大になる傾向があるが，造粒によって Plain と同程度に抑制されていることも分かった。

4.2 圧縮強度試験結果

作製した供試体の圧縮強度試験の結果を**図-6** に示す。その結果，材齢 7 日では造粒の有無による圧縮強度の違いは確認されなかった。また，材齢 28 日，270 日においても造粒の有無による強度低下は確認されず，むしろ Plain に比べて若干強度が増す傾向が見られた。上記結果より，SHC が強度に悪影響を及ぼしていないことが確認された。SHC-Type1A 造粒においては強度が Plain を下回っているが，スランプ値が過大であった（**表-4**）ことから，材料分離に起因するものと考えられる。しかし，材齢 270 日になると Plain より若干強度が増加しており，強度低下は初期のみであるものと考えられる。

4.3 屋内通水試験結果

図-7 に通水試験によって得られた漏水量の経時変化を示す。また，**図-8** に漏水量計測直後の pH の経時変化を示す。図に示す結果は各配合 3 体ずつ作製した供試体の平均値を取っている。**写真-6** には，造粒物を用いた供試体の通水前後でのひび割れ部の変化を示す。

図-7 より，各供試体のひび割れ幅を 0.2～0.3mm 程度に調整したにも関わらず，初期値にばらつきが見られる。これは，各供試体によってひび割れ面の表面形状が異なっているためであると考えられる。しかし，Plain に比べ

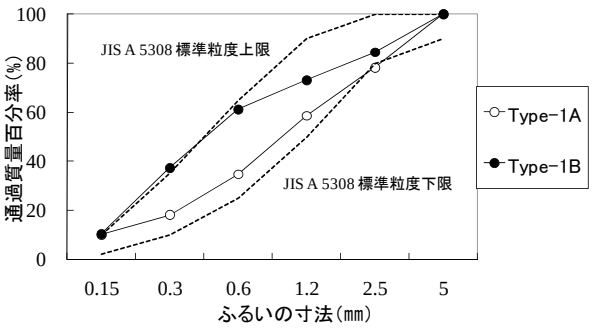


図-4 造粒物のふるい分け試験結果

表-2 使用材料

材料	種類および物性
セメント	C:普通ポルトランドセメント(密度=3.15g/m^3)
混和材	SH:無機系組成物(粉体，造粒物)
細骨材	S1:砂(密度=2.60g/m^3)，S2:砕砂(密度=2.68g/m^3)
粗骨材	G1:砕石(密度=2.65g/m^3)，G2:石灰砕石(密度=2.70g/m^3)
混和剤	高性能AE減水剤　標準形Ⅰ種
その他	PVA-F(φ27μm×長さ6mm，密度=1.3g/m^3)

表-3 コンクリートの配合

コンクリート種類 自己治癒材料	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	配合(kg/m^3)						W/P (%)
				W	C	SH	S	G	SP	
Plain	57.9	45.2	4.5	168	290	0	826	1019	2.3	57.9
SHC-Type-1A粉体						40	786		8.7	50.9
SHC-Type-1A造粒						40	786		8.7	50.9
SHC-Type-1B造粒						40	786		8.7	50.9

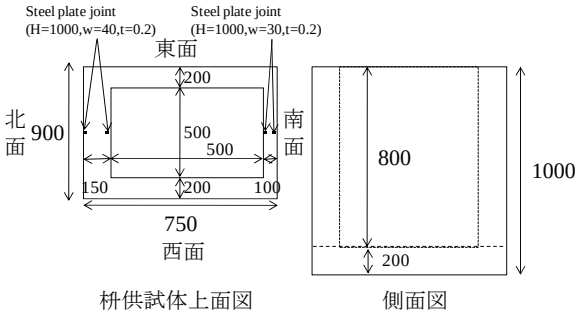


図-5 枡形試験体の形状寸法(mm)

写真-5 通水試験の様子(左：連続通水時，右：測定時)

て，無機系組成物を用いた SHC の方が，造粒の有無，造粒した際の膨張成分の有無によらず初期値が抑えられている傾向が見られる。これは，無機系組成物に含まれるジオマテリアル中の膨潤系材料が膨張したことによって，初期から止水効果が得られているものと考えられる。また，その後の経時変化を見ると，Plain でも吸水などの作用で通水 1 日目に大きく漏水量が低下し，この傾向が 5 日目まで継続しているが，その後は大きな変化が見られず，漏水量は 0 にならなかった。一方，SHC の方でも造粒の有無によらず，通水 1 日目で大きく漏水量が低下していることが確認できるが，さらに通水 14，21 日目になっても微量ではあるが漏水量が低下し続けている。通水 28 日目になっても漏水量は 0 となっていないが，限りなく 0 に近づいていることが確認できる。

また，**図-8** の pH の経時変化より，Plain では通水 1 日目で pH が大きく下がり，その後は大きな変化が見られなかった。一方，SHC の方では造粒の有無，造粒した際の膨張成分の有無によらず，pH の変化は Plain に比べて緩やかであり，通水 14 日目程度まで低下していることが分かった。このことから，SHC の方では，初期にひび割れ内部の水の移動が膨潤系材料の膨張によって抑制され，他の自己治癒成分が初期に流出せずに残存し，徐々にそれらが反応することで止水効果が発現していると考えられる。また，**図-7** と**図-8** の両図において，SHC では通水 14，21 日目程度まで同様に変化が見られたことから，pH を測定することで，自己治癒成分の残存や止水性能の評価が可能であると考えられる。

写真-6(c)，**(d)**の結果からは，SHC-Type1A，1B 造粒供試体において通水前後で明らかにひび割れ部に結晶が析出していることが確認できる。**写真-6(b)** の SHC-Type1A 粉体でも同様に結晶の析出が見られたが，**写真-6(a)**の Plain では見られなかった。

以上の結果より，材齢 8 ヵ月程度の供試体では，無機系組成物の造粒の有無，造粒した際の無機系組成物の多寡によらず，有効な自己治癒効果が発揮されていることが確認できた。そのため，材齢 8 ヵ月程度では，造粒化による自己治癒成分の温存効果の有無を確認することができない。しかし，造粒化した場合は，造粒化しない場合と比べて粉体バインダの分，自己治癒成分が薄まっているにも関わらず，自己治癒効果を損なっていないことが確認できた。よって，造粒物の混和により，自己治癒コンクリートの性能を向上させる可能性を有していると考えられる。

また，SHC に漏水の発生を完全に止める効果を付与するためには，初期からの漏水量を膨潤系材料などで抑制することが重要である。それにより，自己治癒成分を保持することが可能となり，長期的に自己治癒成分の反応が持続して止水効果が得られると考えられる。

表-4 フレッシュ性状試験結果

コンクリート種類 自己治癒材料	SP (C×%)	スランプ(cm)		空気量(%)		温度(℃)	
		出荷	荷卸	出荷	荷卸	出荷	荷卸
Plain	0.8	14.0	12.0	5.0	3.5	14	15
SHC-Type-1A粉体	3.0	16.5	14.5	10.2	5.2	14	15
SHC-Type-1A造粒	3.0	23.5	23.5(SF40)	3.8	3.4	14	15
SHC-Type-1B造粒	3.0	19.0	19.0	2.0	3.4	14	15

※SF：スランプフロー

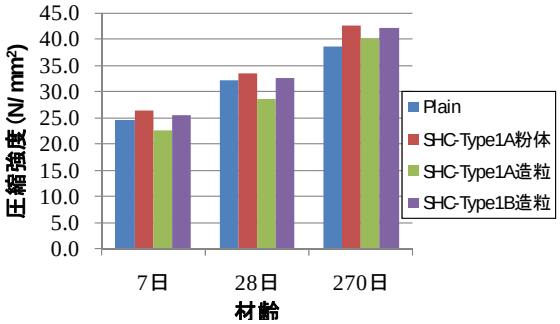


図-6 圧縮強度試験結果

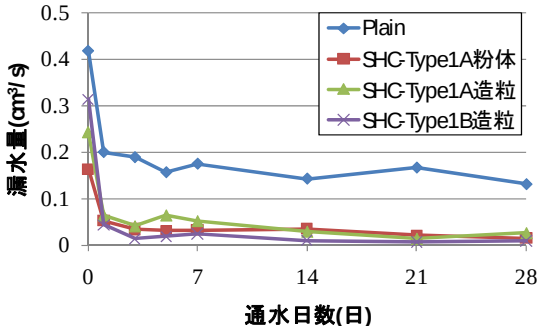


図-7 屋内通水試験結果

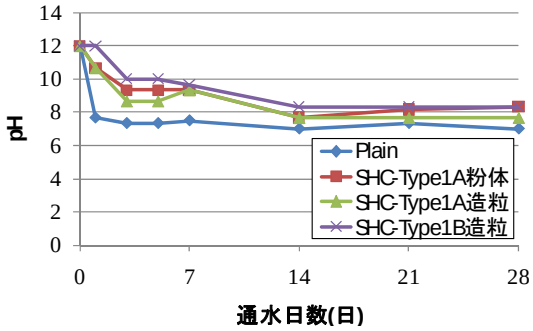


図-8 pH 測定結果

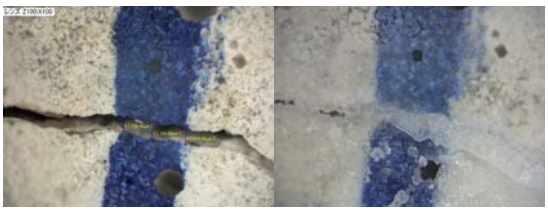
4.4 屋外通水試験結果

図-9 に枡形試験体の屋外通水試験による水面低下深さの経時変化を示す。Plain でも通水日数の経過に伴い，水面低下深さが減少しているように見える。しかしこれは，Plain 供試体にはひび割れが北面に導入できなかったこと，また大気中から CO_2 が供給されたことにより，ひび割れが自然治癒して止水効果が得られたことが原因と考えられる。実際，Plain でもひび割れ部に白色の析出物が確認された。

(a) Plain

(b) SHC-Type1A 粉体

(c) SHC-Type1A 造粒



(d) SHC-Type1B 造粒

写真-6 屋内通水試験後のひび割れ面の様子

（左：通水前，右：通水 28 日後）

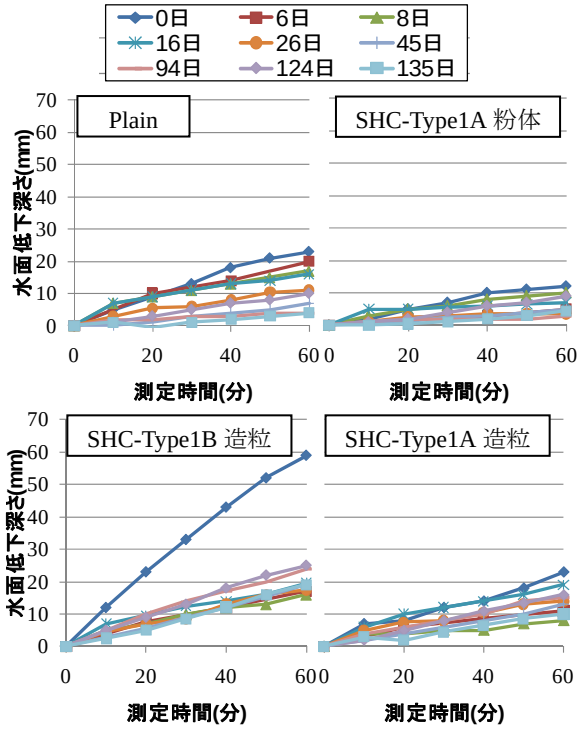


図-9 屋外通水試験結果

また，他の供試体でも通水日数の経過に伴い，水面低下深さが減少しているように見え，また Plain 同様に南面，北面でひび割れ部に白い析出物が確認された。しかしながら，供試体のひび割れ幅の制御が困難であり，各供試体によってひび割れ幅が異なっているため，相対的な比較は困難である。特に SHC-Type1B 供試体ではひび割れ導入時に底面を押し抜いてしまったことから，時間変化による初期の水面低下深さが最も大きく，治癒が不可能であると思われた。しかし，図-9 を見ると，通水 6 日目において水面低下深さが大きく低下していることから，無機系組成物の造粒物を使用したことで 4.3 同様に大きな止水効果が発揮されたものと思われる。

なお, XRD によりひび割れ表面部の結晶性白色析出物は，主に $CaCO_3$ であると同定でき，炭酸基を有する化学添加材によって結晶の生成が促進されたと考えられる。

5. まとめ

以下，本研究より得られた知見を示す。

(1) 無機系ひび割れ自己治癒組成物を細骨材と同様の粒度分布を有する造粒物とし，コンクリートに混和することで，粉体のまま用いた場合に比べて流動性が改善された。

(2) 無機系ひび割れ自己治癒組成物の造粒物を細骨材に対して 40kg/m^3 置換して混入した場合では，圧縮強度は低下しないことを確認した。

(3) 確実な止水効果を長期的に発揮させることを目的として，無機系ひび割れ自己治癒組成物を造粒化して材齢 8 ヶ月段階において通水試験を実施したところ，初期漏水量が抑制され高い止水効果が得られた。また，自己治癒成分の残存の有無を確認する指標として pH の測定が有用であることを確認した。

参考文献

1) Tae-Ho Ahn et al : Crack Self-Healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixture，ACT，Vol.8，No.2，pp.171-186，2010.6

2) 森田卓，戸部良太，安台浩，岸利治：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1571-1582，2010.7

3) 小松怜史，細田暁，安台浩，池野誠司：ひび割れで通水する自己治癒コンクリートの治癒性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.117-122，2008.7

4) 佐藤良恵，小出貴夫，小田部裕一，岸利治：ひび割れの自己治癒機構に関する基礎的検討，第64回セメント技術大会講演要旨，pp.160-161，2010.5

5) 伊藤光弘：図解粉体機器・装置の基礎知識，工業調査会，pp.92-106，pp.314-338，2005.2