報告　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

栗田　淑乃[*1]・細田　暁[*2]・小林　薫[*3]・松田　芳範[*4]

要旨：本研究では養生水の pH，水温を変化させ，自己治癒効果の違いに着目して試験を行った。その結果，表面ひび割れ幅の測定のみでは大きな違いが見られず，他の評価方法の検討が必要であるという結論に至り，ひび割れ面の析出面積やひび割れ間の漏水速度による評価を試みた。結果として，表面ひび割れ幅の推移とひび割れ面の析出面積には明確な因果関係は見られなかった。ひび割れ面の凹凸の大小によって自己治癒効果に差異が見られた。本実験ではコンクリートではなくモルタルを供試体としたこと，養生水の pH の条件設定などが不十分であったこともあり，今後も評価方法の検討が必要である。

キーワード：ひび割れ，自己治癒，水温，pH，治癒の評価方法

1. はじめに

膨張材や炭酸化合物などの混和材を添加した水結合材比25～60%の自己治癒コンクリートを静止水中で養生した場合に自己治癒効果が確認されている[1),2),3)]。さらに，小松らの研究[4)]によってひび割れ間をつねに通水する場合において，静止水中での養生よりも良好な自己治癒効果が確認された。しかしこの研究[4)]で水中で養生した実験では，過去の研究で良好な治癒効果が得られた材料・配合[2)]において明確な治癒効果が得られなかった。

この理由として，養生水槽の水量に対する供試体の体積の割合（以下，供試体の体積比）の違いが考えられる。小松らの研究では供試体の体積比は 17.1%であるのに対し，山田らの研究では 0.69%と小さかった。コンクリートは強アルカリ性であるため供試体の体積比が大きいほど養生水の pH は高くなると考えられる。事実，小松らの研究では pH が約 11 程度となっていた。山田らの研究では供試体の体積比が小さく，ひび割れ幅の計測時ごとに水を入れ替えていたため養生水は中性に近かったと推察される。

以上のことから，本研究では実験ごとに治癒効果が異なる原因の一つは養生水のpHによるものであると考え，養生水の性質が治癒効果に与える影響を検討することを目的とした。今回はそのために取得した基礎的データの報告を行う。

自己治癒効果の評価方法は様々な手法が考えられる。我々の自己治癒コンクリートは，漏水防止をターゲットとしているため，漏水量で検証するのが直接的である。今回の報告では，表面ひび割れ幅の推移，ひび割れ面への析出状況の把握，水頭をかけたときの漏水量から治癒効果を評価した。

2. 実験概要

本研究では 3 種類の試験を行っている。1 つ目は 3.1 で述べる養生水槽の pH 推移を調べる試験，2 つ目は 3.2 で述べる水温の違いが自己治癒効果に及ぼす影響を調べる試験，そしてこの両試験の結果に基づいての自己治癒評価方法の検討を行った試験を 3.3 で述べる。

以上のすべての試験において，同一の配合・材料のモルタルを使用した。

2.1 使用材料及びモルタルの練り混ぜ

本試験で使用した材料を**表－1** に示す。使用したセメントは自己治癒効果が高くなるよう[5)]低熱ポルトランドセメントとした。自己治癒効果を発揮するためのカルシウム供給源としてエトリンガイト系膨張材を使用し，その他の混和材として市販の無機質セメント結晶増殖材を使用した。モルタルの配合を**表－2** に示す。同じ混和材を添加したコンクリートの場合に顕著な自己治癒効果が確認されており[2)]，これを参考にモルタルの配合を決定した。本研究では，養生水の影響を調べる基礎研究という位置づけで，モルタルで実験を行った。セメント，

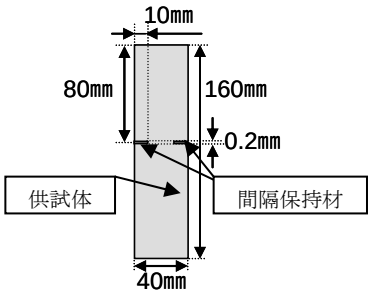
表－1　使用材料

材料名	種類および物性値
セメント	C:低熱ポルトランドセメント (密度=3.24g/ cm^3)
膨張材	E:エトリンガイト系 (密度=2.93g/ cm^3　比表面積 2930cm^2/g)
混和材	Z:無機質セメント結晶増殖材
細骨材	S:千葉県君津市法木産陸砂 (密度=2.65g/ cm^3)
混和剤	A:高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)

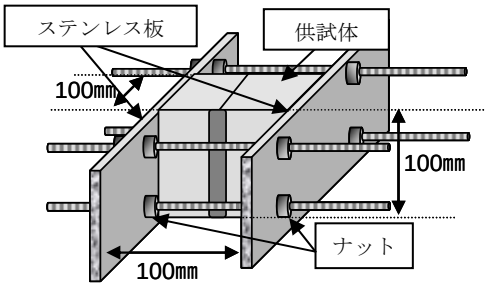
*1 横浜国立大学　大学院環境情報学府　環境システム学専攻　(正会員)
*2 横浜国立大学　大学院環境情報研究院　准教授　博（工）　(正会員)
*3 東日本旅客鉄道（株）　研究開発センター　フロンティアサービス研究所　博（工）(正会員)
*4 東日本旅客鉄道（株）　建設工事部　構造技術センター　(正会員)

表－2　モルタルの配合

W/P(%)	単位量					
	(kg/m^3)					(g/ m^3)
	W	C	E	Z	S	A
40	256	608	32	3.6	1277	640



図－1　3.1，3.2 試験の供試体模式図



図－2　ひび割れ幅制御方法

細骨材，混和材，膨張材をモルタルミキサーに投入し 30 秒間空練りした後，かき落としを行い再び 30 秒間空練りを行った。水，混和剤を投入し，30 秒間練混ぜ，かき落とし，3.1，3.2 の供試体のものは 90 秒，3.3 の供試体は 120 秒間練混ぜた。練混ぜ時間が異なるのは，使用する供試体のサイズが他の試験のサイズよりも大きいこと，3.1 及び 3.2 において自己治癒効果にばらつきがみられたことから，膨張材や混和材が混ざりきっていなかった可能性も考えられるため，さらに入念に練混ぜたためである。

2.2 供試体作製方法

2.2.1 pH推移試験及び水温の違いによる自己治癒効果を調べる試験

供試体の体積比が大きいほど養生水の pH が高くなりやすいと考えた。養生水槽の大きさに限りがあったため，供試体を小さいものにすることによって体積比をある程度自由に変化できるようにした。供試体は**図－1** に示すように 40×40×160mm のモルタルとし，型枠中央部の両端に 40×10×0.2mm のアルミニウム板を間隔保持材として設置した（**図－1**）。

試験体の打込み後，室温 20℃一定，湿度 60%の恒温室に静置し材齢 5 日目に脱型した後，曲げ試験によりひび割れを発生させた。間隔保持材を取り除いた部分にエポキシ系接着剤を塗り，ひび割れを固定させた。接着剤を硬化させるために 1 日おき，材齢 6 日目から養生を行った。水温 1℃の水槽は冷蔵庫内に設置し，それ以外は恒温室に設置した。

2.2.2 自己治癒評価方法の検討試験

本試験では 3.1，3.2 の試験結果から表面ひび割れ幅の推移のみでは漏水防止効果の評価として不十分であるとの判断に基づき，漏水量を含めた自己治癒評価方法を検討することとした。

漏水速度は単位時間当たりのひび割れ部の漏水量を表面ひび割れ部の面積で除することによって算定できる。初期の漏水速度を同程度にするためにはひび割れ幅をほぼ同じにする必要があったため，表面ひび割れ幅を 0.2mm（誤差±20%以内）に制御した。

供試体は 100×100×100mm の角柱とし，4 体を作製した。材齢 3 日で脱型し，材齢 7 日目で 2 個の試験体に中央に割裂ひび割れを，残り 2 個の試験体は中央部で切断し模擬的なひび割れを作製した。

その後**図－2** に示すように供試体の両側にステンレス製の型枠と 4 本の鋼棒をセットする。鋼棒についているステンレス型枠の外側にあるナットを締めることによってひび割れ幅を減少させることができる拘束治具である。マイクロスコープでひび割れ幅を観察しながらナットを締め付け，目標のひび割れ幅となったところで型枠内側のナットでひび割れ幅を固定した。ひび割れの上面，下面のそれぞれ 2 箇所ずつ計 4 箇所においてひび割れ幅が 0.2mm（誤差±20%以内）となるようにした。

さらに供試体の両側にあるひび割れ部に紙テープを貼った後エポキシ系樹脂を塗り側面からの漏水を防いだ。硬化を待つため 1 日おき，材齢 8 日から養生を開始した。

2.3 養生方法

各実験における供試体の体積比，水質，名称を**表－3**（1）～（3）に示す。養生水の pH 推移試験に使用した水槽の水量は大（b : big，水量 : 49.2 リットル），小（s : small，水量 : 約 3.4 リットル）の 2 種類，1 種類の水槽につき養生水を交換するもの（wc : water change）と交換しないものの 2 つを使用し，計 4 種類の水槽で試験した。1 つの水槽につき供試体は 2 つとした。各水槽の名称は**表－3**（1）の通りとする。

水温の違いによる自己治癒効果を調べる試験の水温は**表－3**（2）で示すように 40℃，20℃，1℃の 3 種類と

表－3　各試験における水槽の条件

（1）養生水の pH 推移試験

種類	水交換有	水交換無	水交換有	水交換無
名称	b-wc	b	s-wc	s
供試体サイズ(mm)	40×40×160			
供試体の体積比(%)	1.04		14.92	
供試体数(個)	2	2	2	2

（2）水温の違いによる自己治癒効果の違いを調べる試験

種類	40℃	20℃	1℃
名称	40℃	20℃	1℃
供試体サイズ(mm)	40×40×160		
供試体の体積比(%)	1.04		10.06
供試体数(個)	2	2	2

（3）自己治癒評価方法の検討実験

種類	アルカリ性		中性	
ひび割れ(mm)	割裂 0.2	切断 0.2	割裂 0.2	切断 0.2
名称	spt-a	cut-a	spt-n	cut-n
供試体サイズ(mm)	100×100×100			
供試体の体積比(%)	3.33			
供試体数(個)	1	1	1	1
備考	60 リットルの水槽から 2 つの水槽に分割			

した。40℃の水槽では電熱ヒーターと温度調整器を使用して養生水の温度を上昇させ，設定温度になった時点でヒーターが停止するようにした。ヒーターによって次第に水が蒸発していくため,数日おきに 50 リットル程度になるように水道水を足した。20℃の場合は 20℃一定の恒温室で養生させた。養生水温 1℃のものは養生水槽ごと冷蔵庫の中に入れて養生した。冷蔵庫の容量の問題で養生水槽の大きさは中（約 5.1 リットル）とした。

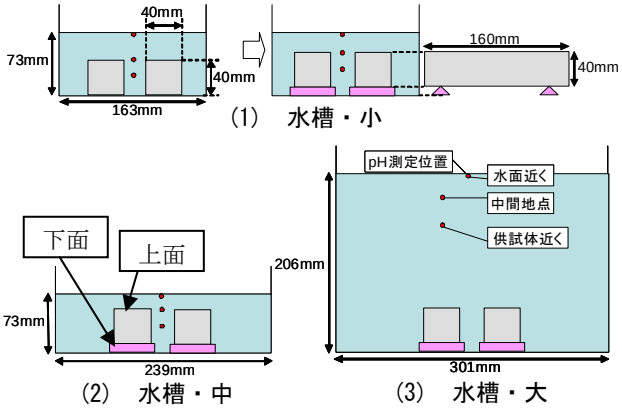
自己治癒評価方法の検討実験では当初 60 リットルの水槽に供試体を全て（割裂（spt : split）2 つ，切断（cut）2 つ）を入れていたが，養生開始 4 日目からアルカリ水質の水槽，中性の水槽に spt，cut の供試体を 1 セットずつ分けて入れた。供試体の名称は**表－3**（3）に示すようにアルカリ性の養生のものは末尾に a（alkalinity）,水交換をして中性に近づける養生のものは n（neutrality）をつけた。アルカリ性の水槽には 60 リットルの水槽に入っていた養生水をそのまま使用し，中性に近づける水槽には水道水を使用した。中性の水槽は測定時に pH9.5 を超えていたら水を交換した。

2.4 評価方法

2.4.1 pH測定方法

本試験では pH メーターによって pH を測定した。

測定箇所は**図－3** に示すように，供試体近く，中間地点，水面近くの 3 点と攪拌後の計 4 点である。測定する際，水を揺らさないように出来る限りゆっくり電極を挿入した。使用した水槽は大，中，小の 3 種類である。外環境に影響されないように測定時以外はラップによって蓋をしてある。電極の長さに限りがあるため水槽が大きい場合は供試体近くを測定できなかった。攪拌後の pH



図－3　pH 測定位置

は任意の 3 点を測定し，平均をとったものを値として採用した。

2.4.2 マイクロスコープによるひび割れ幅測定方法

各供試体の表面ひび割れ幅の経時変化をマイクロスコープによって測定した。3.1，3.2 の試験では，表面ひび割れ幅の中央 1 点を測定点とし，上面，下面の計 2 点で測定した。3.3 の実験では上下面において無作為に各 2 点ずつ測定点を設け，1 点の測定方法は 2 箇所測定の平均とした。ひび割れ表面にマイクロスコープをあて，計測機能を用いて毎回同じ場所のひび割れ幅を測定した。測定間隔は養生開始から 0，7，14，21，28 日とした。

2.4.3 ひび割れ面による自己治癒面積

養生 28 日後の供試体のひび割れ断面を観察した。あらかじめカメラと供試体の位置を決定しておき，同一距離で撮影ができるようにした。供試体の破面を 40×40（個）のメッシュに分割し，析出物がある場所をメッシュの個数で数える。この個数を面積に換算し，治癒の析

出物が発生した領域を把握する。

2.4.4 漏水量測定

ひび割れ間に 10～15℃程度の水道水を漏水させることによって漏水量の計測を行った。測定時のみ養生水槽から取り出し，小松らの研究[4)]と同様に 10kPa の水頭を与え，ひび割れを通って出た供試体の下面からの漏水量を測定した。計測後，再び供試体を養生水槽に戻した。

3. 実験結果

3.1 養生水のpH推移変化試験

ここでは，養生水に占める供試体の体積比によって養生水の pH がどのように変化するかを測定した結果を示す。その際のひび割れ幅の推移を計測した結果も示す。養生水の pH の経時変化を**図－4** に示す。今回は攪拌後の pH のみを記載する。b-wc や s-wc の水槽において pH が急激に上下しているが，これは養生水を交換することによって養生水の pH が変化したためである。

供試体の体積比 1.04%の結果を見ると，水交換有と水交換無では，180 時間までは水を交換しなかったので pH はほぼ同じであり，180 時間の時に 1 度水を交換することによって一時的に pH は下がったものの，次第に水交換無のものとほぼ同じ pH 推移となった。

供試体の体積比が 14.92%の水槽では，pH が養生開始後急激に増加している。そのため 310 時間までは 1 日に 1 回水の交換を行ったが，大きい水槽とは異なり，pH が水を交換する前の数値近くまで戻った。その後次第に減少し，水を交換していないものとほぼ同じ pH となった。

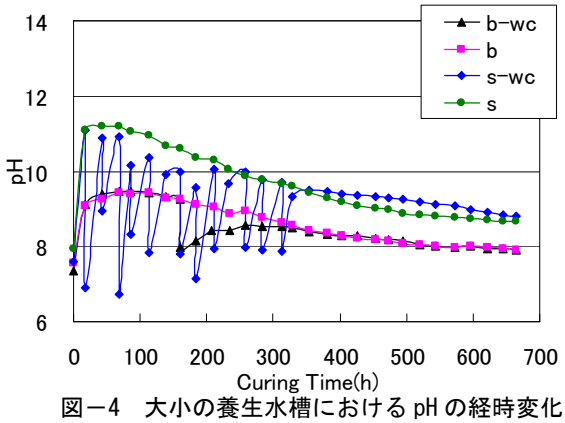
このことから，水交換によって pH は一時的に下がるが，供試体の体積比の大きさによっては前回の測定値近くまで戻る傾向がみられた。今回の場合，少なくとも水供試体比約 15%以下では水を交換せずとも自然に pH は減少した。

pH が徐々に低下する理由としては空気中の CO_2 による炭酸化の影響によるものと考えている。水槽には常時蓋をしてあるが，pH 測定時に養生水を攪拌していることやひび割れ幅測定時にコンクリートを水槽から出していることも，炭酸化による pH の低下に寄与したと考えている。

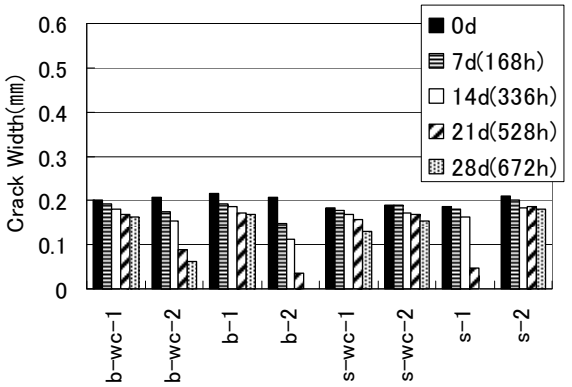
図－5 に下面のひび割れ幅の経時変化を示す。水槽の名称の末尾についている数字は供試体番号である。このグラフでは 14 日以降，ひび割れ幅が急激に減少しているものが見られる。しかし，水槽ごとによる自己治癒効果の違いは見られなかった。

今回の実験ではひび割れ表面の析出物は部分的に発生していたため，測定場所に析出物が発生していなかった供試体もあった。そのため，**図－5** のグラフにおいてひび割れが閉塞していなくとも析出が小さいとは言い切れない。そのためひび割れ幅の減少を評価する際には，1 箇所のみで自己治癒効果を判断するのではなく，数箇所測定したものを平均化することが必要であるといえる。

ひび割れ面における析出物の面積を**表－4** に示す。析出は**写真－1** のように破面の中央に偏って発生していた。



図－4　大小の養生水槽における pH の経時変化

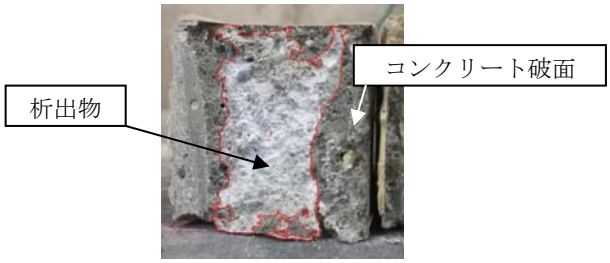


図－5　各供試体のひび割れ幅経時変化

表－4　析出物面積とその割合

水槽	番号	析出面積 (cm^2)	析出領域の割合 (%)
b-wc	1	6.49	40.5
b	1	7.23	45.2
	2	8.81	55.1
s-wc	1	7.74	48.4
	2	7.66	47.9
s	1	6.87	43.0
	2	6.90	43.1

注)b-wc-2 はデータなし



写真－1　析出物の分布模式図（40℃－1，28d）

この実験では析出領域の割合が 40.5～55.1%程度と大きな差は無い。**図－5** と**表－4** を比較してみると，析出面積の大きかった b-2 では表面のひび割れが閉塞していた。一方で必ずしも析出面積が大きくない s-1 のひび割れ幅も閉塞しており，析出面積と表面のひび割れの閉塞には明確な関係は見られない。

析出物面積は厚さ方向を考慮していないため，析出物量を正確に表しているわけではないが，ひび割れ表面に析出物が発生していなくても，供試体内部において析出物による閉塞が起こっている可能性があるといえる。ひび割れの内部には，初期のひび割れ間隔が小さい場所を起点に析出していると考えている。

3.2 水温の違いによる自己治癒効果の違い

養生水の pH 推移を**図－6** に示す。**図－4** と比較すると，40℃，20℃では b のグラフと同形状となっており，pH の高さにも違いはみられない。40℃は水を足しているため pH の低い水が混ざり，pH の減少が促進されたと考えられるが，400 時間を越えたあたりから 20℃よりも多少 pH が高くなっている。

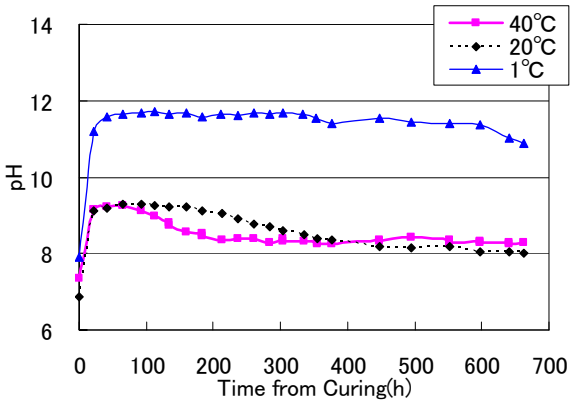
一方 1℃のグラフに着目すると，pH が急激に増加した後ほぼ一定となっている。1℃の水量は 5.1 リットルであり， 3.4 リットルよりも供試体の体積割合が小さいにも関わらず pH が高い値となっていた。高アルカリとなった理由として，温度が低いために 3.1 で述べた炭酸化反応が停滞した可能性があると考えている。

各供試体のひび割れ幅の経時変化を**図－7** に示す。名称の末尾についている数字は供試体番号である。40℃-2 の供試体において，21 日ではひび割れがいったん閉塞しきった後，28 日では再び開いているが，これは測定の際に供試体をぶつけた衝撃により析出物が取れてしまったためである。40℃の供試体は養生後 7 日に端面が欠けてしまっている部分があることが確認できた。膨張材の働きが高温下で活発になったために起こった過膨張の要因もあると考えている。

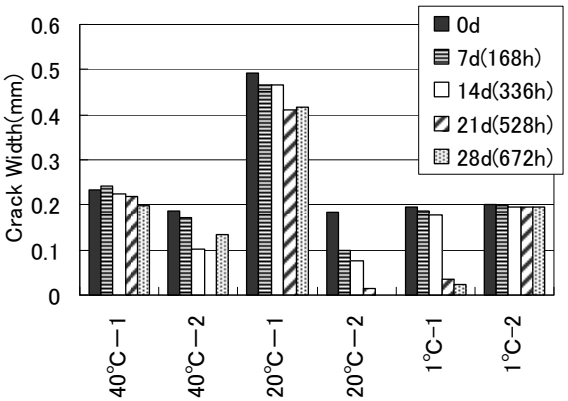
低温条件下での養生は高アルカリ水での養生になったことから，自己治癒が見られないと予測したが，1℃-1 のひび割れが閉塞しており，治癒は発現した。

各供試体における析出面積とその割合を**表－5** に示す。この試験では析出物の割合が 44.2～59.2%程度となった。水温 1℃の供試体の析出領域の割合は 40℃，20℃の供試体と比べて若干低めだが，pH 推移実験の結果（**表－4**）が 40.5～55.1%程度であったため誤差程度であるといえる。水温 40℃の供試体の割合がやや高めだが，**図－7** にはその結果があまり反映されていないようにみられた。

この実験でも析出物による補湯面ひび割れの閉塞は確認できたが，温度によってひび割れ幅表面の閉塞の違い，析出領域の割合の違いは見られなかった。



図－6　各水温の水槽における pH の経時変化



図－7　各供試体のひび割れ幅経時変化

表－5　析出物面積とその割合

水槽	番号	析出面積	析出領域の割合
		(cm^2)	(%)
40℃	1	8.65	54.1
	2	9.47	59.2
20℃	1	7.88	49.3
	2	9.13	57.1
1℃	1	7.07	44.2
	2	7.22	45.2

3.3 自己治癒評価方法の検討実験

ひび割れ幅の測定の他に漏水速度を用いて自己治癒効果の評価を行った。

各水槽における養生水の pH を**図－8** に示す。中性の水槽は水を何回か交換しており，pH の減少が見られた。他の実験と同じように，300 時間を越えたあたりから pH が低下し始めていることが確認できる。

ひび割れ幅の推移を**図－9** に示す。このグラフは供試体の上面のひび割れ幅を平均化したものである。これを見ると spt-n，spt-a ともに cut-n，cut-a よりもひび割れが閉塞していることが分かる。これは供試体を割裂した供試体のほうが凹凸が多く，水が滞留しやすいため，自己治癒が起こりやすかったためであると考えている。1 章で述べたように高アルカリ性の養生水では自己治癒が起

こりにくいと考えていたが，今回の実験ではそのような結果は得られなかった。しかし，**図－8** をみると pH の差が 1 程度しかなく， pH が 9～10.5 程度の範囲では，治癒効果に大きな差がないと見ることもできる。

漏水試験の結果を**図－10** に示す。今回の試験では同じひび割れ幅である小松らの実験[4]と比べて初期漏水速度が 5 倍近く大きい。これは供試体がモルタルであり，ひび割れ面の粗さが小さいためであると考えている。初期漏水速度が非常に大きいために，ひび割れ間に多少析出物が見られる程度では，漏水速度の顕著な低下にはつながらなかった。

4. まとめ

養生水の pH, 温度がひび割れの自己治癒成分を含むモルタルの治癒性状に及ぼす影響を検討した。表面ひび割れ幅の経時変化，ひび割れ面の析出領域，漏水速度の観点で治癒性状を評価した。以下の知見が得られた。

(1) 本研究の条件においては，養生水の pH は 1℃の場合を除いて徐々に低下した。1℃の場合は高アルカリが継続した。pH の違いにより治癒に顕著な差は見られなかった。

(2) 1℃の低温においても析出物が確認された。養生水の温度が治癒性状に及ぼす傾向は明確ではなかった。

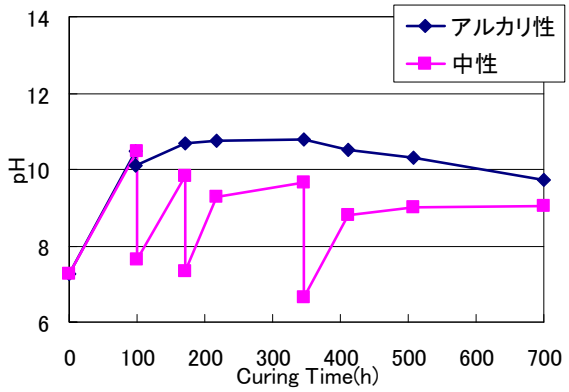
(3) 表面ひび割れ幅の推移とひび割れ面の析出には明確な因果関係は見られなかった。

(4) ひび割れ面の凹凸の大小によって自己治癒効果に差異が見られた。ひび割れ面が粗い方が治癒効果が大きかった。

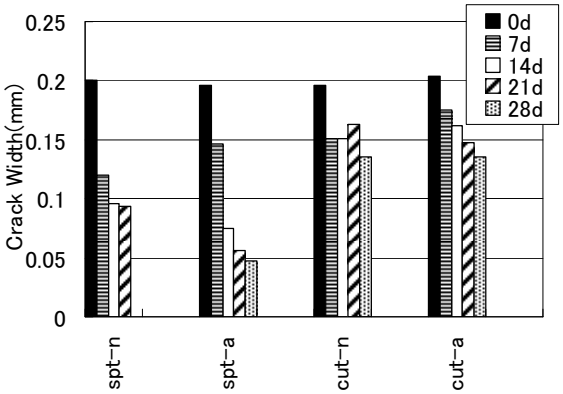
(5) モルタルのひび割れで漏水試験を行うと，コンクリートの試験体に比べ漏水速度が著しく大きくなった。

謝辞

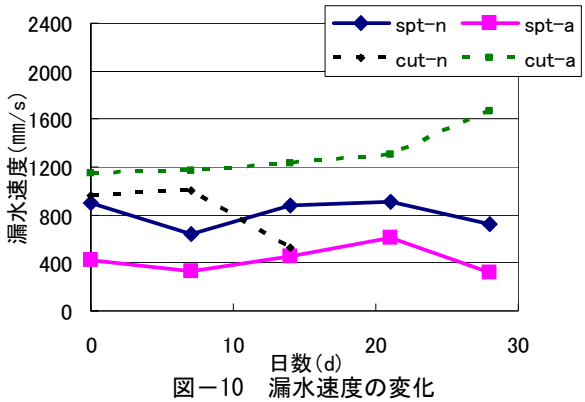
本研究の実施に際して，池野誠司氏（JR 東日本研究開発センター），安台浩特任助教（東京大学生産研究所），小松怜史氏（横浜国立大学大学院環境情報学府）との議論が大変参考になりました。ここに謝意を表します。



図－8　各水槽における pH の経時変化



図－9　各供試体のひび割れ幅経時変化



図－10　漏水速度の変化

参考文献

1) 下村　哲雄，細田　暁，岸　利治：低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vo.23，No.2，pp.661-666，2001

2) 山田　啓介，細田　暁，在田　浩之，岸　利治：膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.261-266，2007

3) 平野　勝彦，細田　暁，石渡　大嗣，山田　啓介：水分供給条件や膨張作用の有無がひび割れ自己治癒効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vo.29，No.1，pp.267-272，2007

4) 小松　怜史，細田　暁，安　台浩，池野　誠司：ひび割れ間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，Vo.30，No.1，pp.117-122，2008

5) Keisuke YAMADA, Akira HOSODA, Toshiharu KISHI, and Shinichirou NOZAWA:Crack Self Healing Properties of Expansive Concretes with Various Cements and Admixtures，*Proceedings of First International Conference on Self Healing Materials*, 18-20 April, 2007

6) Carola Edvardsen：Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, *ACI Material Journal*/July-August, pp.448-454, 1999