

論文 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

小松 怜史*1・細田 暁*2・安 台浩*3・池野 誠司*4

要旨: 筆者らの過去の研究で確認されてきたコンクリートの自己治癒効果は、すべて静止水中で養生した条件下のものであった。本研究では実構造物での漏水を模擬した、ひび割れ間を通水する状態でのコンクリートの自己治癒効果を、マイクロスコープによる観察と通水速度により評価した。その結果、従来の研究での治癒限界ひび割れ幅を超えるひび割れ幅で非常に優良な治癒性状を発揮した配合があった。通水状態を継続した方が静水中に浸漬するよりも治癒性状が良好となることもわかった。

キーワード: ひび割れ, 自己治癒効果, 通水速度

1. はじめに

ひび割れの自己治癒効果を目的として、炭酸化合物や膨張材などの混和材を添加した水粉体比 25~60%のコンクリートについて、いくつかの報告^{1), 2), 3)}がなされている。ひび割れ発生後に外部から水分が供給される場合、ひび割れ近傍のコンクリートの追加膨張、もしくはひび割れ部に水和物が析出することにより、ひび割れが治癒するとしている。治癒の効果は透水試験からも確認されている。

これまでの筆者らの研究において、自己治癒性能を発揮したコンクリートは、すべてひび割れ発生後に静水中で養生をしたものである。実際の構造物で発生するであろう、ひび割れ部からの漏水のような、ひび割れ間を通水する状態での自己治癒効果は検証されていない。

本研究では、これまでの筆者らの研究において、静水養生状態で自己治癒効果の高いとされてきた配合を含めた3つの配合に対し、通水状態での治癒性状を確認する。ひび割れ幅をコントロールし、養生中、通水試験中にひび割れ幅を固定する必要があるため、供試体の作製方法を入念に検討する。その上で、ひび割れ導入後にひび割れ幅を固定した供試体を、静水状態、通水状態のそれぞれで養生し、治癒性状を通水試験から得られる通水速度と、ひび割れ幅のマイクロスコープによる観察の2つの観点から評価する。

2. 試験体の作製方法

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1に示す。セメントには普通および低熱ポルトランドセメントの2種類を用いた。自己治癒の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た。自己治癒のた

めのその他の混和材として、第3著者らが開発したセメント鉱物結晶生成材⁴⁾と第2著者らが既往の研究で使用した市販の無機質セメント結晶増殖材²⁾を使用した。

2.2 コンクリートの配合と練り混ぜ

コンクリートの配合を表-2に示す。配合1は膨張材もその他の混和材も入っていないベースコンクリートである。これを基準に各自己治癒コンクリートの性能を比較する。

配合2は第3著者らが開発中の、静水養生中でひび割れ間に析出物が顕著に表れる配合のコンクリートであるが、これまで治癒したコンクリートでの透水試験は行われていない。

配合3は筆者らの過去の研究²⁾において、自己治癒効果の大きかった低熱セメントを用いたコンクリートである。

表-1 使用材料

材料名	種類および物性値
セメント	N:普通ポルトランドセメント (密度=3.15g/cm ³)
	L: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=2.93/cm ³ 比表面積 2930cm ² /g)
混和材	Z1:セメント鉱物結晶生成材
	Z2: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)
粗骨材	G:埼玉県秩父郡両親村産碎石 (密度=2.66g/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 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 工修 (正会員)

*4 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

表-2 コンクリートの配合

No.	セメント 種類	水粉体比	水	セメント	膨張材	混和材		細骨材	粗骨材	混和剤
		W/P	W	C	E	Z1	Z2	S	G	A
		(kg/m ³)								
1	N	47	175	370	0	0	0	809	920	1.48
2		47	175	333	14.8	22.2	0	809	920	7.40
3	L	45	170	328	50.0	0	4.00	839	950	1.51

コンクリートの練り混ぜは、秋季から冬季にかけて実験室で行った。セメント、細骨材、混和材、膨張材を2軸強制練りミキサーに投入し60秒空練りしたあと、水、混和剤を投入し90秒練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して60秒練り混ぜた。

2.3 ひび割れ幅コントロール方法とひび割れ面積

本研究では、単位時間当たりのひび割れ部の通水量をひび割れ部の面積で除することによって、通水速度を算定する。そのためには、供試体にはなるべく微細なひび割れを伴わない、ひび割れ幅の変動の小さい一本の貫通ひび割れを導入する必要がある。種々の検討を重ねた結果、直接引張りによって、ひび割れを導入する方法を採用した。なお、ひび割れを導入する断面には鉄筋は貫通させていない。これは、鉄筋の付着によりひび割れ面の形状が変化する影響を除くためである。

供試体型枠として写真-1に示すような100×100×400mmの角柱を採用した。型枠両端に厚さ19mmでφ19の穴あき鋼製端板を配置した。両側の鋼製端板からD16の異形鉄筋を150mmずつ埋め込んだ。試験体中央部にひび割れを導入するために端部から200mmのところ到底辺15mm、高さ10mm、奥行き100mmの三角柱型のノッチを型枠側面の両側に配置した。

すべての配合において、ひび割れ導入後の養生を常時ひび割れ間に水が流れる通水状態と静止水中に置いた状態の2種類に分け、ひび割れ幅を0.1、0.2、0.4mmの3種類にコントロールした。なお、試験装置の制約から、各ひび割れ幅に対して、供試体の数は1体ずつとなっている。

ひび割れ導入後の、ひび割れ幅のコントロール方法について説明する。両端の異形鉄筋に引張力を加えて中央部にひび割れ導入後、写真-2に示すようなステンレス製の型枠を供試体にセットする。ステンレス製にした理由は、この器具でひび割れ幅を固定したまま水中養生しても錆びないようにするためである。なお、ステンレス鋼棒の直径はM10で、4本の鋼棒を使つての拘束治具となっている。ひび割れ面での噛み合いのため、ステンレス型枠のナットを締め付けないとひび割れ幅は減少しない。目標であるひび割れ幅までマイクロスコープを覗きながらナットを締め付けていった。水頭がかかる面と、

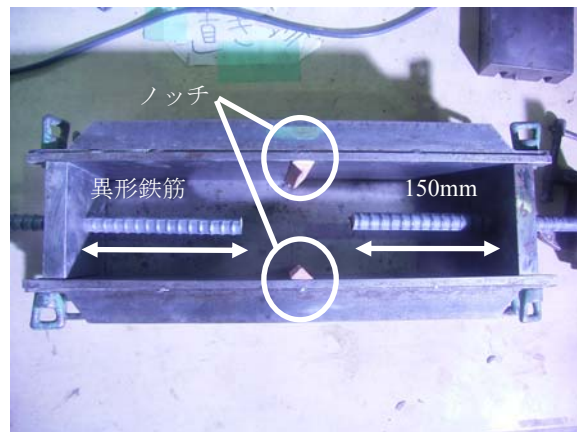


写真-1 供試体型枠と鉄筋の配置状況

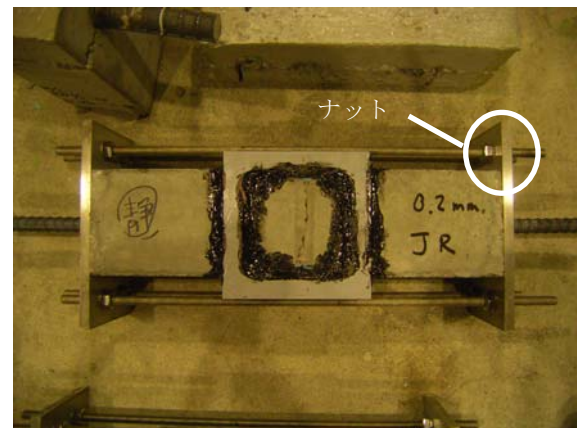


写真-2 ステンレス製の拘束端板

表-3 2種類の算定方法によるひび割れ面積の比較

測定面	ひび割れ幅	計算値	測定値	誤差
上面	0.1mm	8mm ²	8.37mm ²	4.60%
	0.2mm	16mm ²	15.88mm ²	-0.12%
	0.4mm	32mm ²	32.49mm ²	1.50%
下面	0.1mm	8mm ³	8.94mm ²	11.70%
	0.2mm	16mm ³	15.3mm ²	-3.90%
	0.4mm	32mm ³	30.39mm ²	5.00%

反対側の水が流れ出る面のそれぞれ2箇所ずつ、計4箇所において目標のひび割れ幅（誤差±20%以内）になったところで、ナットで固定した。さらに、供試体の両側から100mm×100mmのプラスチック板をエポキシ系樹脂

の接着剤にて貼り付けた。

最終的に通水速度で評価するために、コンクリート内の平均ひび割れ面積を求める必要がある。そこで各ひび割れ幅の供試体1体ずつについて、供試体両面のひび割れをマイクロスコープで接写し画像処理をしてひび割れ面積を計算してみた。次にひび割れのジグザグ形状を考慮しないひび割れ面積の計算値（設定したひび割れ幅×ノッチを除いた供試体の幅）を算定した。両者を比較したものが表-3である。平均すると両者の差は3%程度と小さかったので、流速を算出する時のひび割れ面積には以後ジグザグ形状を考慮しない計算値の値を用いることとする。

2.4 養生方法

20℃・相対湿度60%の恒温恒湿室で養生を行った。各供試体についてポリメチルペンテンフィルムで打設面を覆い、緘封状態にして型枠中で養生し、水分の出入りがないようにした。材齢3日で脱型し、その後材齢7日まで湿布養生をした。7日目にひび割れを導入し、2.3で述べたようにひび割れ幅をコントロールした後、供試体と先に述べたプラスチック板をエポキシ系接着剤で固定するために1日置いた。

なお配合2,3に関しては、膨張材を使用した配合であり、硬化時の膨張を拘束するため、写真-2で示したステンレス製の拘束端板を打設直後から設置した。ひび割れ導入時にはステンレス型枠は除去し、ひび割れ導入後に再度ステンレス型枠を据付けて、ひび割れ幅のコントロールを行った。

2.5 マイクロスコープによる治癒評価

既往の研究⁵⁾に習い、配合1~3の2つの養生条件における供試体の、ひび割れ幅の経時変化をマイクロスコープによって計測した。ひび割れ面を接写し、マイクロスコープの計測機能でひび割れ幅を測定した。機能上2

点間の距離を計測するため、局所的にしか評価できない点がある。そのため、1観測点につき近接する6箇所計測した。通水する両面において2観測点ずつ計測し平均したものをひび割れ幅とした。

3. 通水試験の概要

3.1 通水試験方法と通水速度

ひび割れ幅固定後、静水状態の供試体は28日間、20℃の水道水(±2℃以内)に浸漬させた。通水状態の供試体は、温度管理されていない実験室内で、20℃の水道水がひび割れ間を常に通水している状態に置いた。ひび割れ部を通過した水は循環させずに廃棄した。通水速度の計測および、マイクロスコープによる観測間隔は通水開始後0日目、3日目、7日目、14日目、21日目、28日目とした。なお通水している水の水頭は10kPaとし、温度調整のために電熱ヒーターと温度調整器を用いた。またこの試験装置の制約上、1度に6体までしか供試体を通水できない。そのため、静水で養生している試験体に対して通水試験をする場合は、通水養生の試験体を取り外した。通水速度を計測した後、通水養生の試験体を元に戻した。

Edvardsenの研究⁶⁾において表-4のようにコンクリートの自己治癒効果の限界ひび割れ幅が提示されている。ただし、この研究は欧州でのものであり、特に混和材を使用していないコンクリートが、主として水中に溶存した二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを沈殿させる治癒機構を対象としている。ここで表-4及び参考文献⁶⁾の以下の式(1)を用いて、通水初期の通水量を算出した。

$$q_0 = 740 \cdot I \cdot w_m^3 \cdot k_t \quad (1)$$

q_0 = initial water leakage per meter visible crack length, l/h;

I = hydraulic gradient, m of water head/m;

w_m = crack width (mean value) at the surface, mm; and

k_t = factor comparing different water temperature (20C: k_t = 1)

表-4 自己治癒が生じる限界ひび割れ幅⁶⁾

hydraulic gradient, m/m	w_k , mm ^{*1}
40	≤0.10
25	0.10 to 0.15
15	0.15 to 0.20

*1 w_k : 誤差10%~30% w_k = design crack width

表-5 既往の研究⁶⁾に基づき算定した治癒限界の初期通水速度

ひび割れ幅, mm	v_0 , mm/s
0.10	82.2
0.15	116
0.20	123

表-6 予備試験での初期通水量 単位(ml/s)

通水開始からの時刻	供試体 0.1mm	供試体 0.2mm	供試体 0.4mm
0時間	118.9	722.6	1208.2
5時間	87.7	398.0	728.8
10時間	81.5	388.3	633.3
15時間	78.8	408.9	617.3
17時間	99.2	549.8	774.5
24時間	93.2	446.5	724.8
72時間	78.0	392.4	557.2

※なお供試体の付け外し後、漏水チェックのために、各供試体通水開始後5分間漏水チェックを行っている。

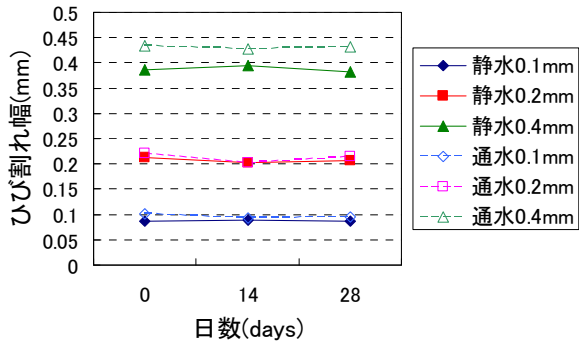


図-1 配合 1 のひび割れ幅の経時変化

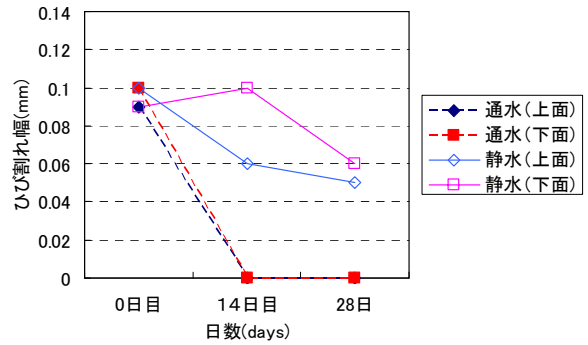


図-2 配合 2 のひび割れ幅の経時変化
(初期ひび割れ幅 0.1mm)

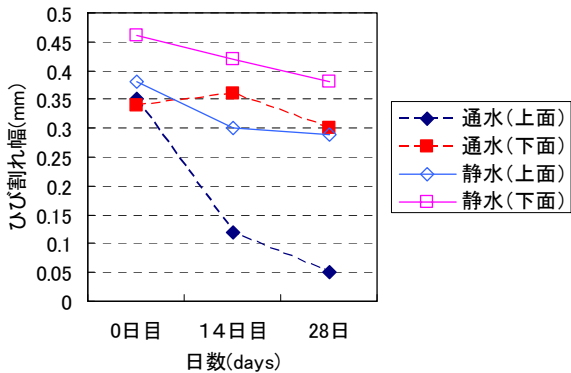


図-3 配合 2 のひび割れ幅の経時変化
(初期ひび割れ幅 0.4mm)

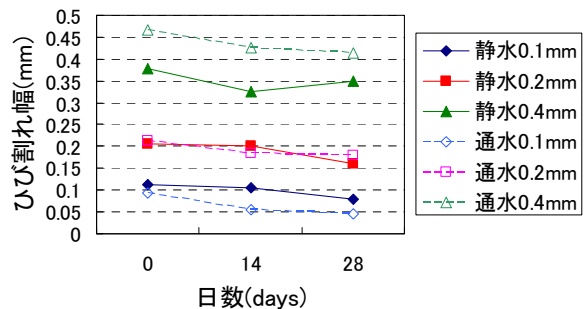


図-4 配合 3 のひび割れ幅の経時変化

そして(1)式で求めた q_0 から(2)式を用いて、3段階のひび割れ幅に対して、治癒限界の初期通水速度を表-5に示した。この値は、Edvardsenの研究に基づく算定値であり、実験におけるひび割れのジグザグ形状の影響なども加味した、自己治癒が生じる限界の通水速度とみなすことができる。後に、これらの算定値と筆者らの実験結果を比較する。

$$v_0 = q_0 \cdot 10^3 / 3600 / w_k \quad (2)$$

v_0 = 治癒限界の初期通水速度; mm/s

3.2 供試体取り外しによる影響の確認

3.1で述べたように、通水速度の測定の際に供試体の取り外し・付け替えをすることがあるので、予備試験を実施し、通水開始初期の段階で、供試体の取り外しの影響を調べた。配合および通水開始材齢は2章で述べた、本試験と同じ形態をとった。

表-6は各ひび割れ幅の供試体における、初期の通水量の経時変化である。通水開始から各供試体とも通水量が減少し、通水量が安定してきたと思われた通水開始15時間後に1度各供試体を取り外した。60分後にもう一度設置し直し、通水開始後17時間目で通水量を測った。すると各供試体とも通水量が表のようにわずかに増加した。これは供試体の付替えの影響と考えられる。しかし本試験での最初の観測材齢である72時間後(3日目)には、

各供試体とも通水開始15時間目での値を下回った。供試体の付替えの影響は、長期的な通水量の減少傾向には顕著な影響は与えないものと判断した。

4. 実験結果

4.1 マイクロスコープによるひび割れ幅の変化

配合1~3の各供試体のひび割れ幅の経時変化をグラフにした結果が図-1~4である。実線は静水中に養生したもので、点線は通水状態で養生したものを表している。なお配合2に関して、供試体の通水する上下面での傾向の違いから、初期ひび割れ幅ごとにグラフを分けた。

配合1において、ひび割れ表面に結晶が析出することによる、ひび割れ幅の変化は見られなかった。したがって後述する配合1の通水速度の変化は、目詰まりによるところが大きいと考えている。

配合2においては、他の2配合と違い顕著なひび割れ幅の減少が見られた。ひび割れ幅の減少は図-2から通水状態で養生した方が静水中で養生したものよりも顕著である。写真-3, 4は配合2を通水状態で養生した、ひび割れ幅0.4mmの供試体上面である。ひび割れ間に既往の研究でみられたような結晶とは異なる物質の析出がみられ、明らかなひび割れ幅の減少が確認できた。なお、この物質は現在分析中である。また初期ひび割れ幅が0.4mmと大きな場合でも、ひび割れ幅の減少が見られる。

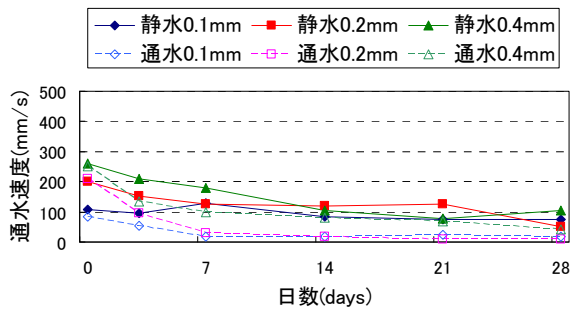


図-5 配合 1 の通水速度の経時変化

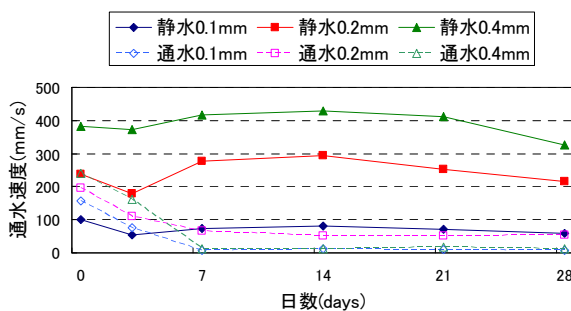


図-6 配合 2 の通水速度の経時変化

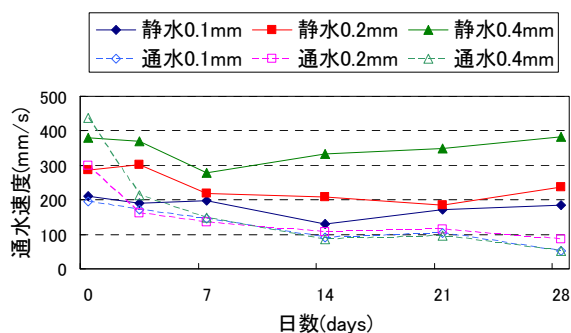


図-7 配合 3 の通水速度の経時変化

これは、既往の研究⁶⁾などで示されている治癒の限界ひび割れ幅よりはるかに大きい領域のものであり、配合 2 の良好な治癒能力を示すものである。

配合 3 については、配合 2 ほど顕著ではないが、配合 1 にくらべると若干の結晶の析出が見られ、ひび割れ幅の減少が確認できた。配合 3 においても、通水状態の方が静水状態のものよりもややひび割れ幅の減少度合いが大きかった。

4.2 通水速度によるひび割れ自己治癒の変化

配合 1~3 の各供試体の通水速度の経時変化を図-5~7 にそれぞれ示す。実線は静水中に養生した供試体の、ひび割れ間の通水速度の経時変化である。点線は通水状態を継続した供試体の、ひび割れ間の通水速度の経時変化である。いずれの配合、いずれのひび割れ幅においても通水状態で養生した配合の方が静水状態で養生した配

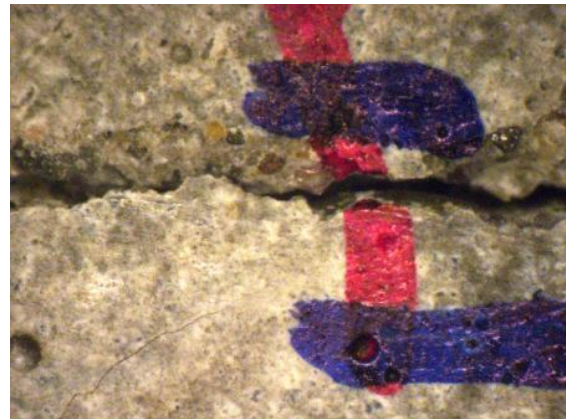


写真-3 ひび割れ幅 0.4mm の通水試験体上面 (配合 2 通水開始)



写真-4 ひび割れ幅 0.4mm の通水試験体上面 (配合 2 通水開始後 28 日目)

合より通水速度の減少度合いが大きい。

既往の研究では、自己治癒成分を混和していない普通のコンクリートにおいて、今回の実験よりも水頭が 5 倍~8 倍の圧力下 (動水勾配: 33~53m/m) でひび割れ幅の大きさが 0.1mm 以下では目詰まりを起し、0.3mm を超えると目詰まりの影響がないこと⁷⁾、また同様に 15 倍~30 倍の高圧下 (動水勾配: 15~30m/m) でひび割れ幅が 0.2mm を超えるとコンクリートの治癒効果による漏水の減少が期待できなくなるということ⁸⁾が報告されている。目詰まりは、ひび割れ壁面から剥がれた粒子が、ひび割れ間の狭隘な箇所滞留し、通水可能な領域が徐々に減少するといったこと等により生じると考えている。本研究においても、自己治癒成分を含まない普通コンクリートでも通水速度は減少を示しており、これは目詰まりによるものと考えている。また、目詰まりは、静水中に浸漬しておくよりは、通水状態を続けた方が大きいようである。

配合 2 において、本研究の初期通水速度が表-5 で示した Edvardesen の実験結果に基づく治癒限界の初期通水速度よりはるかに大きいにも関わらず、通水速度が経時

的に大きく減少した。供試体表面において明らかにひび割れ間に析出物が観察された配合 2 においては、通水による目詰まりと、析出物による治癒の双方の効果により、既往の研究よりもはるかに良好な治癒性状を示したといえる。

配合 1 と配合 3 については、供試体表面においては析出物の量が顕著ではなく、表-5 と比較すると初期通水速度はすべて治癒限界初期通水速度の値をうまわわっていることから、通水速度の減少は主として通水による目詰まりによりもたらされたと考えている。

配合 3 に関して、既往の研究²⁾において供試体を静水養生した場合、優良な治癒効果を発揮したにも関わらず、本実験では明瞭な治癒効果が見られなかった。その理由として、既往の研究と本研究の静水養生していた水に占める供試体の割合が大きく異なっていたため、養生していた水の pH に違いが出たものと考えている。本研究において、その割合が 17.1%であるのに対し、既往の研究では大型水槽を使用したために 0.69%と非常に小さかった。また pH は本研究では約 11 と強塩基性を示した。既往の研究では中性に近い pH を示していたと推測される。配合 3 の治癒機構は CaCO₃ の析出である。pH が高い状況では Ca²⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻などのイオン濃度が低下⁶⁾することが知られている。本研究においては、静水養生の水槽の水の pH が高いことにより、CaCO₃ の析出が抑制されたものと考えている。

本研究において、通水養生の方が治癒効果が高かった理由の一つとして、通水する水の pH はほぼ 7 であり、ひび割れ間での析出効果が大きかったこともあって考えている。

今回の実験では、ひび割れを導入した断面には鉄筋が貫通していない。断面をひび割れが貫通することにより、鉄筋近傍のひび割れ幅が小さくなり、ひび割れ間の通水は著しく抑制されることが分かっている⁵⁾。このような状況での目詰まり、析出物による治癒の効果も今後検証していく予定である。

5. まとめ

普通コンクリートおよび 2 種類の自己治癒コンクリートに対して、ひび割れ間を通水する状態と静止水に浸漬した状態で、ひび割れの治癒性状を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) すべての配合において、通水する状態が継続された場合、各ひび割れ幅の供試体の通水量は減少傾向を示した。静止水に浸漬したものよりも、通水量の減少が著しかった。
- (2) ひび割れ間へ析出物を生成する自己治癒成分を含むコンクリート（配合 2）は、通水条件において良好

な治癒性状を示した。ひび割れ間を常に通水する状態で、幅 0.4mm のひび割れが、通水量およびひび割れ幅の減少という点で良好な治癒性状を示した。

- (3) 筆者らの既往の研究で良好な性能を示したものとほぼ同じ配合の自己治癒コンクリート（配合 3）が、本研究ではわずかな治癒効果しか示さなかった。静水養生の水の pH が高かったことが原因である、との考察を示した。

謝辞：本研究の遂行に際しては、岸 利治准教授（東京大学生産技術研究所）、小林 薫博士（JR 東日本研究開発センター）、松田芳範氏（JR 東日本構造技術センター）、石渡大嗣氏（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。ここに深謝いたします。

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) Kishi, T., Ahn, T., Hosoda, A., Suzuki, A., and Takaoka, H.: Self Healing Behaviour by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent, First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, 2007.4 (CD-ROM)
- 5) 石渡大嗣, 細田 暁, 平野勝彦, 山田啓介: ひび割れ自己治癒コンクリートにおける膨張の拘束の影響, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.617-623, 2007
- 6) Carola Edvardsen: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, *ACI Material Journal*/July-August, pp.448-454, 1999
- 7) 伊藤 洋, 坂口 雄彦, 西山 勝栄, 清水 昭男: コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究, セメント技術年報 41, pp.217-220, 1987.12
- 8) 壺岐 直之, 清宮 理, 山田 昌郎, 高野 誠紀: 沈埋トンネル側壁のひび割れからの漏水と自治効果の確認実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.737-742, 1995.6