

論文 ひび割れからの通水量に基づく自己治癒性能の評価試験方法の一提案

齋藤 尚^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：本研究では、ひび割れからの通水量に基づく自己治癒性能の評価試験方法を提案することを目的に、普通モルタルを対象に、ひび割れ導入までの養生期間、表面ひび割れ幅、水頭差および供試体厚さをパラメータとして、通水量に及ぼす影響を実験的に検討し、得られた結果から自己治癒性能の評価試験方法を提案した。さらに、既往の研究の自己治癒材料を用いたモルタルを対象に通水量の変化を検討し、提案した試験方法で自己治癒性能を評価することが可能か検証した。その結果、提案した評価試験方法を用いることによって、自己治癒性能を評価可能と考えられる。

キーワード：自己治癒、ひび割れ、通水量、評価試験方法

1. はじめに

近年、高度経済成長期以降に建設された社会資本の老朽化が進んでおり、今後 20 年間で建設後 50 年以上が経過する社会資本の割合が加速度的に増加するとされている^{例え 1)}。コンクリートは社会資本整備を行うために必要不可欠な材料として用いられてきたが、その材料特性として引張強度が圧縮強度よりも低いため、ひび割れが発生しやすい特徴を有している。コンクリート構造物におけるひび割れは、強度や剛性、耐久性、水密性といった様々な性能を低下させる要因となり得るため、ひび割れを抑制することは構造物の長寿命化を図る上で極めて重要である。しかしながら、構造物のひび割れを完全に防止する技術は確立されておらず、その劣化の程度に応じて維持管理・更新が行われている現状にある。一方、今後社会インフラの老朽化に伴う維持管理・更新費が増加することを勘案すると、社会インフラの安全確保および維持管理・更新に係るコストの縮減および平準化の両立が課題となっている。

近年、コンクリートにひび割れ自己治癒性能を付与した、自己治癒コンクリートに関する研究が国内外において行われている。自己治癒に関する研究としては、自己治癒材料、自己治癒性能の評価試験方法に分類することができる。まず、自己治癒材料に関しては、膨潤性粘土鉱物を含有する無機系材料やバクテリア、高吸水性ポリマーなどを用いた研究が数多く報告^{2)~4)}されている。例えば、上記材料を用いた研究では 0.15~0.35mm のひび割れを有するモルタルやコンクリートを対象に、ひび割れからの通水量や透水係数の変化について議論している。次に、自己治癒性能の評価試験方法に関しては、国内外の既往の研究を元に、化学および物理的観点から自己治癒の程度を評価する試験方法が報告されている^{例え 5)}。

しかしながら、自己治癒性能の評価試験方法のうち、ひび割れからの通水量に基づく評価に着目した場合、ひび割れ導入までの養生期間や表面ひび割れ幅、供試体寸法などの試験条件が自己治癒性能に及ぼす影響について体系的に検討した事例は報告されておらず、統一的な試験方法が定まっていない状況にある。そのため、上述した各種試験条件が自己治癒性能に及ぼす影響を検討し、それらの影響度合いを把握しておくことは評価試験方法を定める上で重要と考えられる。

そこで、本研究では、ひび割れからの通水量に基づく自己治癒性能の評価試験方法を提案することを目的に、実験的な検討を行った。図-1 に実験の流れを示す。実験では、まず普通モルタルを対象に各種試験条件が通水量に及ぼす影響について検討し、得られた結果から自己治癒性能の評価試験方法を提案した。次に、既往の研究⁹⁾の自己治癒材料を用いたモルタルを対象に通水量の変化を検討し、提案した試験方法で自己治癒性能を評価することが可能か検証した。

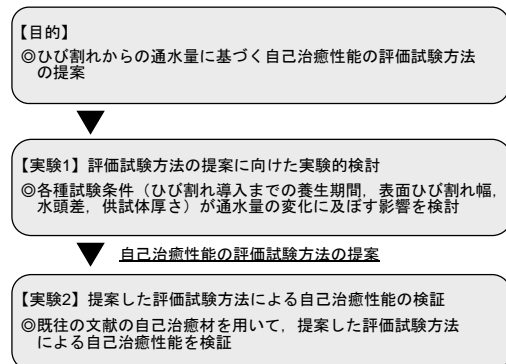


図-1 実験の流れ

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

*2 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 教授 博(工) (正会員)

表-1 実験パラメータ

ひび割れ導入までの養生期間 (日)	表面ひび割れ幅 (mm)	水頭差 (mm)	供試体厚さ (mm)
14	0.2	100	30
28	0.3	300	
91	0.4	500	
182	0.3	100	60
			120
			180

表-2 モルタルの配合およびフレッシュ・強度性状

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)			AD (C×%)
		W	C	S	
50	2.5	267	533	1334	0.60

フレッシュ性状*			強度性状**				
Flow (mm)	Air (%)	M.T. (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)				
			7d	28d	56d	91d	182d
235	3.9	21	41.1	48.1	53.4	61.0	66.6

* Flow : モルタルフロー(JIS R 5201), Air : 空気量(JIS A 1128), M.T. : 練上り温度(JIS A 1156)

** 寸法 φ50×100mm(JIS A 1108)

2. 実験 1 : 評価試験方法の提案に向けた実験的検討

2.1 実験概要

(1) 実験パラメータ

表-1 に実験パラメータを示す。実験パラメータは、ひび割れ導入までの養生期間 (以下、養生期間)、表面ひび割れ幅、水頭差および供試体厚さの 4 種類とした。養生期間は 14, 28, 91, 182 日の 4 水準、表面ひび割れ幅は 0.2, 0.3, 0.4mm の 3 水準、水頭差は 100, 300, 500mm の 3 水準、供試体厚さは 30, 60, 120, 180mm の 4 水準に変化させた 48 ケースについて検討した。

具体的には、表面ひび割れ幅を 0.2~0.4mm としたケースでは、水頭差を 100~500mm に変化させ、供試体厚さを 30mm に固定した条件で検討した。また、表面ひび割れ幅を 0.3mm としたケースでは、水頭差を 100mm に固定し、供試体厚さを 60~180mm に変化させた条件で検討した。なお、いずれのケースにおいても、養生期間は 14~182 日まで変化させて検討した。

(2) モルタルの使用材料・配合

モルタルの材料には、セメントに市販の普通ポルトランドセメント (C : 密度 3.15g/m³)、細骨材に静岡県掛川市産山砂 (S : 表乾密度 2.57g/m³)、混和剤にリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を主成分とする高機能型 AE 減水剤 (AD : 標準形)、をそれぞれ用いた。

表-2 にモルタルの配合を示す。配合は W/C=50%, S/C=2.5 とし、目標モルタルフローが 240±15mm、目標空気量が 4.5±1.5% に収まるように、AE 減水剤の添加量を調整して定めた。



写真-1 供試体外観

モルタルの製造は温度 20±2°C の恒温室で行った。ミキサには容量 50L のパン型ミキサを用い、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 30L とした。練混ぜはセメントおよび細骨材を 15 秒間空練りした後に、混和剤を含む水を投入して 2 分間本練りを行い、練り舟に排出した。

(3) 供試体

供試体は φ100mm×厚さ 30~180mm の円柱とし、供試体数は 1 ケース当たり 2 体とした。供試体の作製手順は、φ100×200mm の軽量鋼製型枠内に、長さ 200mm のポリスチレン製 L 型アングル (断面 10×10×厚さ 1mm) を対になるように 2 本設置し、供試体側面の鉛直方向に切欠きを設けることによって、割裂引張試験によるひび割れが供試体断面の中心付近に発生しやすいようにした。供試体は、所定の養生期間まで温度 20±2°C の恒温室で封かん養生を行った。脱型した供試体は厚さ 30~180mm になるようにコンクリートカッターで切断し、割裂引張試験を行って、完全に破断させた。供試体割裂面の微粉は自己治癒現象における目詰まりを期待できる存在となるが、各供試体の微粉の量が異なると、通水量の変化にも影響を与えると判断し、割裂面に付着した微粉はホウキを用いて取り除いた。その後、割裂面に 10mm 角にカットした厚さ 0.2~0.4mm のフッ素樹脂シートを複数枚設置して供試体を組み合わせ、さらにステンレス製ホースクランプを用いて結束することで 0.2~0.4mm の表面ひび割れ幅が再現できるように調整した。その後、100~500mm の水頭差が確保できるようにオーバーフロー孔を設けた内径 75mm の硬質塩化ビニル製パイプ (以下、塩ビ管) を供試体上面に取り付け、通水実験に供した。なお、供試体側面および供試体上面と塩ビ管の設置面はシリコーン樹脂にてコーティングし、通水実験時に漏水しないように施した。写真-1 に水頭差 100mm、供試体厚さ 30mm の供試体外観を示す。

(4) 測定項目

測定項目は、表面・内部ひび割れ幅の計測および通水実験による通水量の測定とした。

表面ひび割れ幅は、通水実験開始前にデジタルマイクロスコープ (倍率 100 倍) を用いて計測した。測定数は

1 体あたり 9 点とした。また、本供試体における表面ひび割れ幅と内部ひび割れ幅との関係性を把握するために、通水実験用供試体とは別にひび割れ幅計測用供試体を作製し、表面および内部ひび割れ幅を計測した。ひび割れ幅計測用の供試体は、 $\phi 100 \times$ 厚さ 30mm の寸法とし、表面ひび割れ幅が 0.2~0.4mm 程度の範囲に分布するように、ステンレス製ホースクランプの結束具合を調整し、計 15 体作製した。供試体は、表面ひび割れ幅を 1 体あたり 9 点測定した後、ひび割れ部に赤色顔料を混合した超低粘度エポキシ樹脂を注入して硬化させた。エポキシ樹脂が硬化した後、供試体をコンクリートカッターで切断し、厚さ方向のひび割れ幅を 9 点計測した。

通水実験は、供試体をステンレス製グレーチング上に設置し、通水量の測定中は給水タンクから塩ビ管内に常時水を供給し、所定の水頭差を一定に保った状態で 5 分間の通水量を測定した。通水実験は、開始日の通水量を初期通水量 (0 日) として、以降 7, 14, 28, 56, 91, 182 日の材齢で通水量を測定した。なお、各材齢で通水量の測定が終了した供試体は、次の測定材齢まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中環境下で静置させた。

通水実験の供給水には、あらかじめコンテナ容器に上水道水を汲み置き、ポータブル溶存酸素計で計測した溶存酸素量が 95~98%、すなわち過飽和状態でない水を用いた。これは、過飽和状態の供給水を用いることでひび割れ内に気泡が発生し、通水開始直後に急速な通水量の減少が生じる現象^{7,8)}を避けるためである。

2.2 実験結果および考察

(1) 表面・内部ひび割れ幅の計測結果

図-2 に表面ひび割れ幅の設定値と計測値の関係を示す。図より、表面ひび割れ幅の計測値は設定値に対して、一部の供試体を除いて、 $\pm 0.05\text{mm}$ の範囲に分布していた。本結果から表面ひび割れ幅は設定値を概ね再現できていると考えた。

図-3 に表面ひび割れ幅と内部ひび割れ幅の関係を示す。なお、図中には $y=x$ の直線を示している。図より、内部ひび割れ幅は表面ひび割れ幅を概ね再現できていることが確認できる。また、 $y=x$ に対する内部ひび割れ幅の偏差は $-0.033 \sim 0.001\text{mm}$ となり、比較的高い精度で供試体を作製できていることが確認された。

(2) 各種試験条件と初期通水量の関係

図-4 に各種試験条件が初期通水量に及ぼす影響の一例として、供試体厚さ 30mm 一定のケースにおける水頭差と初期通水量の関係を示す。なお、初期通水量は単位時間当たりの通水量で表している。図より、水頭差の増加に伴って、初期通水量は増加する傾向を示した。特に、この傾向はひび割れ幅が増加するほど顕著となった。

次に、同一ひび割れ幅および水頭差において、初期通

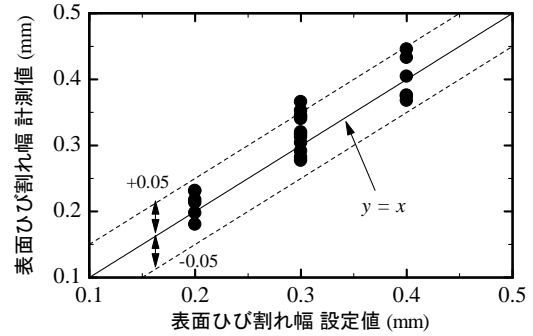


図-2 表面ひび割れ幅の設定値と計測値の関係

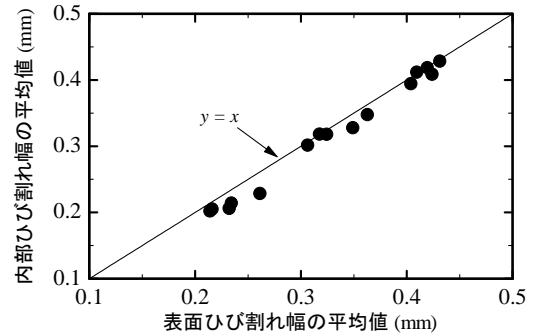


図-3 表面ひび割れ幅と内部ひび割れ幅の関係

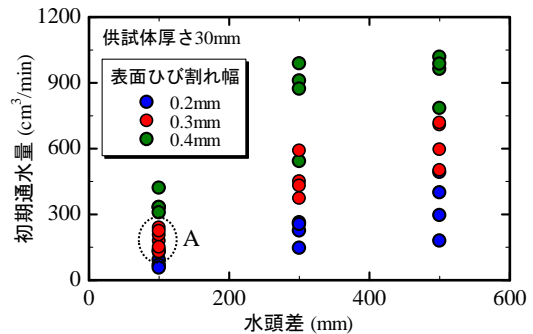


図-4 水頭差と初期通水量の関係

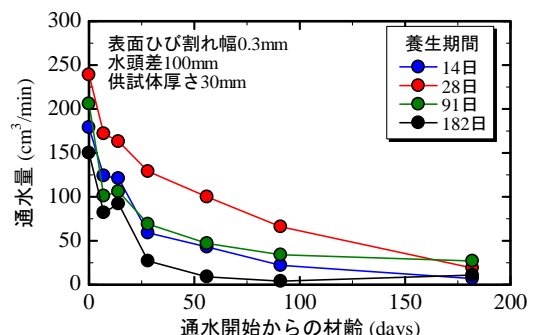


図-5 通水量の経時変化

水量のばらつきが認められた影響について検討した。例えば、図-4 中の領域 A の表面ひび割れ幅 0.3mm、水頭差 100mm および供試体厚さ 30mm のケースに着目すると、表面ひび割れ幅は $0.295 \sim 0.323\text{mm}$ にもかかわらず、初期通水量は $150 \sim 239\text{cm}^3/\text{min}$ になった。これは、式(1)のハーゲン・ポアズイユ式⁹⁾で示されるように、通水量は単にひび割れ幅や水圧差などの条件だけでなく、ひび割れ面の凹凸が影響したと考えられる。

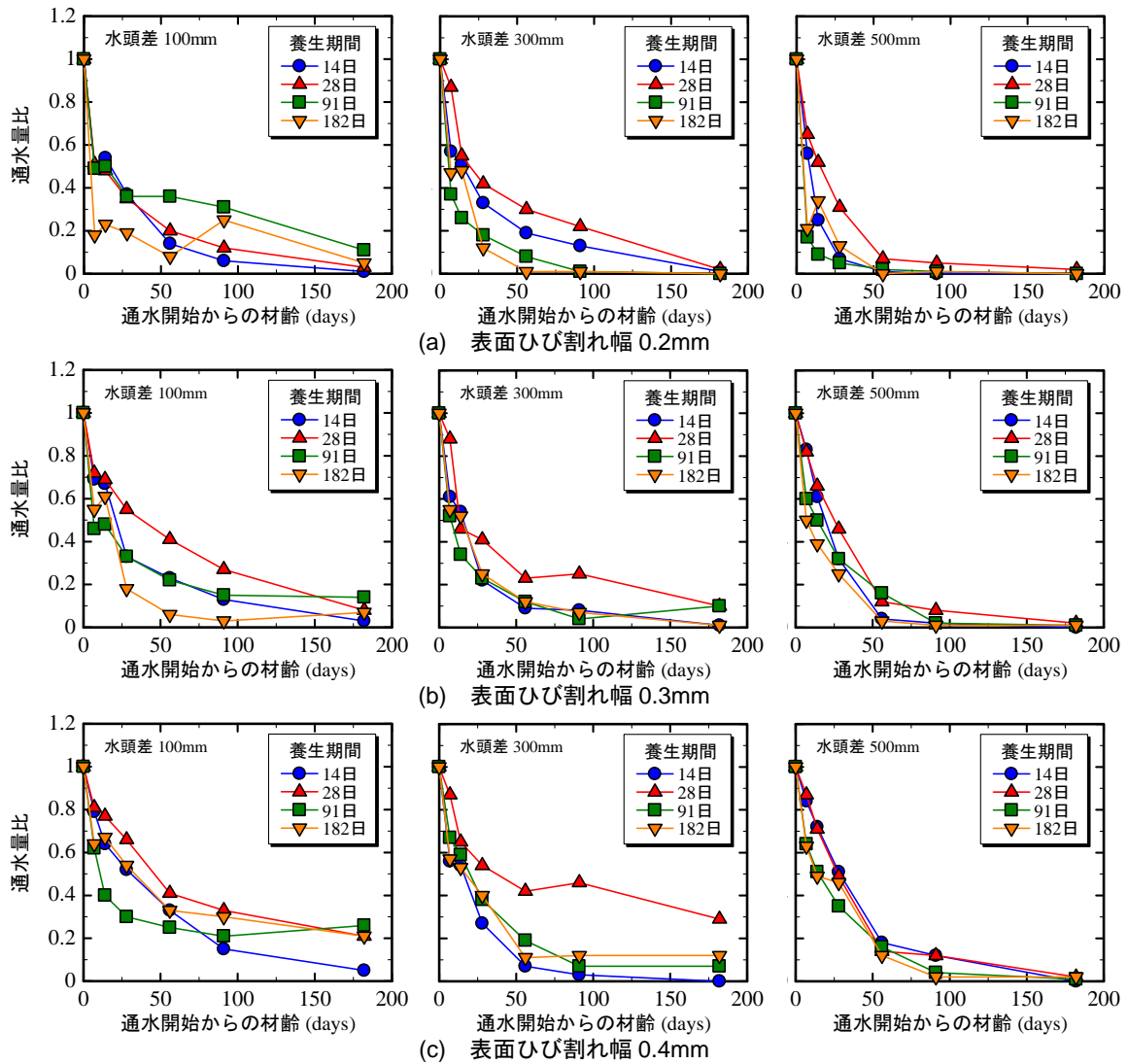


図-6 通水量比の経時変化（供試体厚さ 30mm 一定のケース）

$$q = \xi \cdot \Delta p \cdot b \cdot w^3 / 12 \cdot \eta \cdot d \quad (1)$$

ここに、 q ：ひび割れからの通水量 (m^3/s)、 ξ ：ひび割れの凹凸を考慮した補正係数、 Δp ：水圧差 (N/m^2)、 b ：ひび割れの長さ (m)、 w ：ひび割れ幅 (mm)、 η ：水の粘性係数 (Ns/m^2)、 d ：水路長 (mm)

(3) 通水量(比)の経時変化

図-5 に通水量の経時変化の一例として、表面ひび割れ幅 0.3mm、水頭差 100mm および供試体厚さ 30mm のケースにおける結果を示す。なお、図中の通水量は 2 体の平均値を示している。いずれのケースにおいても、通水開始から材齢の経過によって通水量は減少していく傾向を示した。これは、試験条件を変化させた他のケースにおいても同様の傾向であった。通水量が低下した要因は、供試体の表面ひび割れ部に白色の析出物が生成した影響によって、ひび割れ幅が減少した影響と考えられる。

この白色の析出物は、すべてのケースにおいて発生していることが確認された。なお、本実験では通水開始から 182 日まで通水量を測定しているが、通水量が $0\text{cm}^3/\text{min}$ 、すなわち完全に止水したケースはなかった。

次に、2.2 節(2)で示したように、初期通水量は同一条件においてもあるばらつきが確認された。そこで、初期通水量に対する各材齢における通水量を通水量比と定義し、無次元化した値にて試験条件の影響について記述することにした。

図-6 に通水量比の経時変化として、供試体厚さ 30mm 一定のケースにおける結果を示す。養生期間の影響に着目すると、養生期間が 28 日の場合、自己治癒による通水量比の低下が生じにくいことが全体的な傾向として確認できる。養生期間が 14 日の場合は、モルタル中に未水和セメントが多く残存するため、初期の材齢から通水量比が低下したと考えられる。一方、養生期間が 91 日および 182 日の場合は、未水和セメントが少なくなっているにもかかわらず、通水量比の低下が大きくなっている

ケースが散見された。一般に養生期間が長くなると、未水和セメントの残存量が少なくなるため、通水量比の低下が生じにくくなると予想していたが、必ずしもそのような結果にはならなかった。これは、通水量比の変化が単に未水和セメントの残存量だけでなく、割裂面の凹凸や空隙に加えて、モルタル内部から生じる気泡や供給水中の溶存空気が複合的に作用した影響と考えられる。

表面ひび割れ幅の影響に着目すると、図-4 に示したように、表面ひび割れ幅の増加に伴って、初期通水量は増加した。図-6 より、同一水頭差で比較した場合、表面ひび割れ幅が大きくなると、通水開始からの 182 日経過時点における通水量比が高くなる傾向を示した。これは、表面ひび割れ幅が大きくなると、自己治癒現象による通水量の低下が生じにくくなることを表していると考えられる。

水頭差の影響に着目すると、表面ひび割れ幅の場合と同様に、水頭差の増加によって初期通水量は増加した。通水量比の変化は、水頭差が 100mm の場合には材齢の経過により緩やかに低下した。一方、水頭差が 300mm、500mm と大きくなるにつれて、材齢 56 日程度までの通水量比が急激に低下していく傾向が確認された。これは、今回の実験では通水実験以外の期間は水中に浸漬していたため、水頭差の影響が顕著に表れなかった可能性が示唆される。

図-7 に通水量比の経時変化の一例として、養生期間 28 日で供試体厚さを 30~180mm に変化させたケースにおける結果を示す。図より、供試体厚さの影響に着目した場合、いずれのケースにおいても通水量比の変化は概ね同程度であり、供試体厚さによる顕著な差は認められなかった。これは、その他の養生期間においても同様の傾向を示した。

2.3 自己治癒性能の評価試験方法の提案

本節では、2.2 節(3)の検討結果に基づき、自己治癒性能の評価試験方法の提案を行った。本研究で提案する評価試験方法は、自己治癒材料の有無で通水量(比)の差が生じる条件、すなわち自己治癒材料を用いていない普通モルタルの通水量(比)が低下しにくい条件を設定することが好ましいと考えた。

養生期間に関しては、未水和セメントの影響を受けにくく、供試体作製からひび割れ導入までの期間が短い条件であることが好ましいと考えられる。2.2 節(3)の結果から、養生期間 14 日では通水量比は未水和セメントの影響を受けて初期材齢から低下しているため、条件として好ましくないと判断した。また、養生期間 91 日および 182 日では、未水和セメントの影響は受けにくいと考えられるが、供試体作製からひび割れ導入までの期間が長く、自己治癒性能を評価するために時間を要する。さら

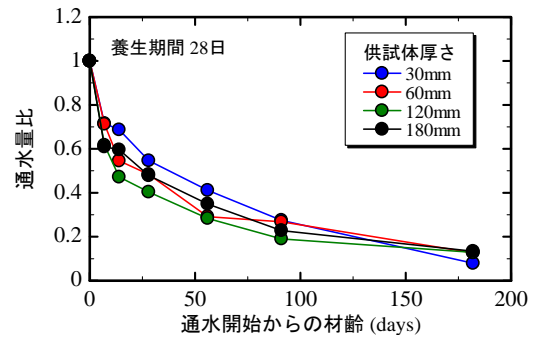


図-7 通水量比の経時変化 (供試体厚さ 30~180mm のケース)

表-3 実験 2 における実験条件

区分	条件	設定値
モルタル配合	W/C	50%
	自己治癒材	80kg/m ³ (細骨材置換)
通水実験	養生期間	28 日
	表面ひび割れ幅	0.3mm
	水頭差	100mm
	供試体厚さ	30mm

に、通水量比も未水和セメントの残存量が多いと思われる養生期間 28 日よりも低くなることが確認された。そのため、未水和セメントの影響を受けにくく、供試体作製から通水実験開始までの期間が短い条件としては、養生期間 28 日が好ましいと判断した。

その他、表面ひび割れ幅、水頭差および供試体厚さに関しては、適用部材や箇所によって条件が異なるため、それらの条件に合わせて選択することが好ましいと考えられる。

以上より、自己治癒性能の評価試験方法としては、養生期間 28 日を試験条件とし、その他の条件については適用部材や箇所によって選択することが好ましい。また、本評価試験に用いる供給水には、過飽和状態でない溶存酸素量 95~98% 程度の水を用いることが好ましい。

3. 実験 2: 提案した評価試験方法による自己治癒性能の検証

3.1 実験概要

本実験に用いた自己治癒材料は、既往の研究⁶⁾に示される低活性セメントとした。自己治癒モルタルの配合は、表-2 と同様とし、自己治癒材料は細骨材の一部に 80kg/m³ 置換した。また、モルタルの製造方法および供試体は 2.1 節と同様とした。通水実験の条件は、表-3 に示すように、養生期間 28 日、表面ひび割れ幅 0.3mm、水頭差 100mm および供試体厚さ 30mm とした。

3.2 実験結果および考察

図-8 に通水量比の経時変化として、自己治癒モルタルと普通モルタルを比較した結果を示す。図より、自己

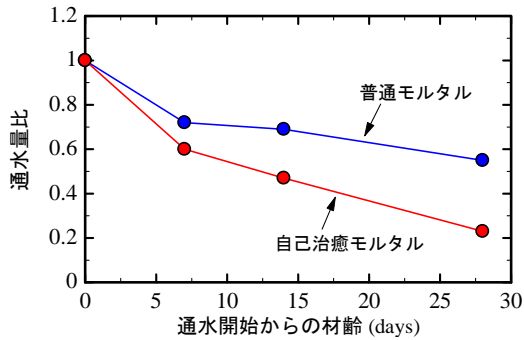


図-8 自己治癒モルタルの通水量比

治癒モルタルの通水量比は、普通モルタルよりも低下することが確認された。自己治癒モルタルについても、普通モルタルと同様に、表面ひび割れ部に白色の析出物が生成した影響でひび割れ幅が減少し、通水量比が低下したと考えられる。

以上より、本研究の範囲では、提案した評価試験方法を用いることによって、自己治癒性能を評価できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ひび割れからの通水量に基づく自己治癒性能の評価試験方法を提案することを目的に、普通モルタルを対象に各種試験条件が通水量に及ぼす影響を実験的に検討し、得られた結果から自己治癒性能の評価試験方法を提案した。さらに、自己治癒材料を用いたモルタルを対象に、提案した試験方法で自己治癒性能を評価することが可能か検証した。以下に本研究の範囲で得られた結果を示す。

- (1) 割裂面にフッ素樹脂シートを設置することによって、供試体の内部ひび割れ幅は表面ひび割れ幅を概ね再現できることが確認された。
- (2) 初期通水量は水頭差の増加に伴って、増加する傾向を示した。この傾向は表面ひび割れ幅が増加するほど顕著であった。
- (3) 通水量比の結果から、ひび割れ導入までの養生期間が長くなる、すなわち未水和セメントの残存量が少なくなっても、通水量比の低下が小さくなるとは限らなかった。これは、通水量比の変化が未水和セメントの量だけでなく、割裂面の凹凸や空隙に加えて、モルタル内部から生じる気泡や供給水中の溶存空気が複合的に作用した影響と考えられる。
- (4) 自己治癒性能の評価試験方法としては、養生期間 28 日を試験条件とし、その他の条件については適用部材や箇所によって選択することが好ましい。また、

試験の供給水には、過飽和状態でない溶存酸素量 95 ~98% 程度の水を用いることが好ましい。

- (5) 提案した評価試験方法により、自己治癒材料を用いたモルタルの自己治癒性能が評価可能と考えられる。

今回提案した評価試験方法は、自己治癒性能を評価するための 1 つの方法と考えている。今後は連続通水や乾湿繰返しなど、より実構造物に近い条件で試験方法を提案できるように検討していくことが課題である。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省：平成 28 年度国土交通白書，pp.2-11，2016
- 2) 安台浩，森田卓，戸部良太，岸利治：無機系ひび割れ自己治癒組成物を用いた効率的な漏水抑制対策に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.477-484，2010
- 3) E. Tzivilogou et al.: Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness, Construction and Building Materials, Vol.122, pp.118-125, 2016
- 4) A. Mignon et al.: pH-responsive superabsorbent polymers: A pathway to self-healing of mortar, Reactive and Functional Polymers, Vol.93, pp.68-76, 2015
- 5) 例えば、W. Tang, O. Kardani, H. Cui: Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review, Construction and Building Materials, Vol.81, pp.233-247, 2015
- 6) 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
- 7) 生駒勇人，岸利治：自己治癒現象に関わるコンクリートのひび割れ初期通水量の急速抑制メカニズムの解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.1648-1653, 2014
- 8) 佐藤成幸，M. Kayondo，岸利治：コンクリート中のひび割れを通る液状水からの気泡発生メカニズムに関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.69, pp.327-334, 2015
- 9) C. Edvardsen: Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Materials Journal/July-August, pp.448-454, 1999
- 10) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'16, p.102, 2016