

コンクリートの自己修復性能が耐久性に及ぼす影響に関する研究

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○佐野 匠
群馬工業高等専門学校 正会員 田中 英紀

1. はじめに

近年、構造物の安全性、信頼性、経済性を向上させる目的として、発生した損傷を自動的に修復する自己修復材料が脚光を浴びている。紫外線に反応し傷が消える塗料、空気に触れると亀裂が治癒されるセラミックスなどが例である。コンクリートにも、発生したひび割れを充填する自己治癒能力を付加する研究は進められている。

当研究室の事前研究によって、若材齢コンクリートには早期ひび割れに対する自己修復能力が存在することがわかっている。この修復能力はひび割れの入ったコンクリートの強度に関するものである。本研究では養生方法を水中、温水中、海水中と変化させその修復能力の応答を調査すること、さらに、この修復能力が強度だけでなく耐久性にも関わるものであるか調査することを目的とする。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

下記の表 1に今回の実験に使用したコンクリートの配合を示す。

表 1 配合表

粗骨材の 最大寸法 (cm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 S/a (%)
15	8	55	7	45
単位量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 F
174.2	316.8	761.0	960.0	3.15

2. 2 実験方法

本研究では、コンクリートの自己修復能力の養生条件による変化を定量的に評価するため、強度と耐久性という 2 つの観点で比較を行う。材齢 3 日のコンクリート供試体に圧縮強度試験を行う。その際供試体に生じている圧縮応力が圧縮強度から 20%低下するまで載荷し、その後除荷しひび割れを発生させた。その後、それぞれの養生条件のもとで養生し

自己修復させ、圧縮強度試験と耐久性試験を行う。

2. 2. 1 養生条件について

水中、温水中、海水中の 3 つの養生条件を用いて実験を行った（写真 1参照）。水中養生用の水は水道水を用いた。温水養生には水中養生と同一の水を用い、40℃で一定に保つようにした。海水養生用の海水は新潟県柏崎港で採取した天然海水を使用した。



写真 1 各種養生条件

2. 2. 2 圧縮強度試験

強度に対する自己修復能力を比較するために圧縮強度試験を行った。試験には直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体を用いた。3 種類の養生条件で養生を行い、初期損傷あり・なしともに材齢 7 日、14 日、28 日強度を測定した。

2. 2. 3 耐久性試験

コンクリート構造物の劣化要因として、二酸化炭素による中性化や塩化物イオンの侵入による塩害などが挙げられる。今回はひび割れ面への塩化物イオン濃度浸透速度に着目した。

材齢 3 日で圧縮強度試験を行い、初期損傷を与えた円柱供試体をそれぞれの養生方法で材齢 28 日まで自己修復させる。その供試体を海水に浸し、塩化物イオンを浸透させる。その後、ひび割れ周辺のコンクリートを切り出し、塩化物イオン濃度を測定し耐久性を評価する。塩化物イオン濃度の測定は「JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に記載されている硫酸銀滴定法を用いて行った。測定試料として、図 1に示すように供試体のひび割れ周辺を切り取り、粉碎して使用した。

キーワード 自己修復, ひび割れ, 温水養生, 海水養生, 塩化物イオン量

連絡先 〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 群馬工業高等専門学校 E-mail : htanaka@ipc.gunma-ct.ac.jp

実験にはひび割れ幅が 0.2～0.3mm の供試体を選んで使用した。

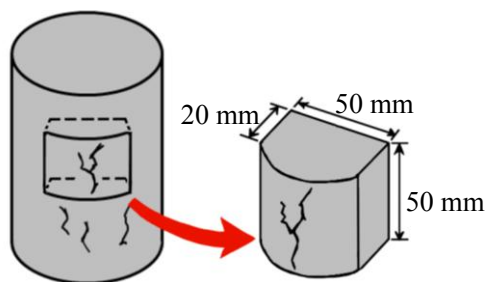


図 1 塩化物イオン量測定用試料の切り出し方

3. 実験結果と考察

3. 1 コンクリートの自己修復箇所について

自己修復後の供試体において、写真 2 のような変化があらわれた。ひび割れの表面に白い析出物が現れ、ひび割れを埋めるような働きをしている。

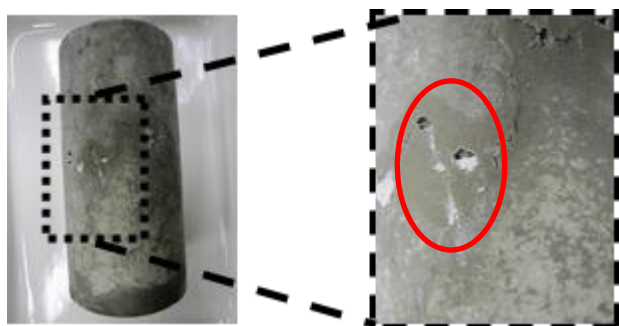


写真 2 ひび割れの自己修復箇所

この析出物の主成分は、コンクリートの強度を分担する水和物のケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) の後期発生型である Type III だと考えられる。析出物を SEM (走査型電子顕微鏡) によって撮影した画像が写真 3 である。

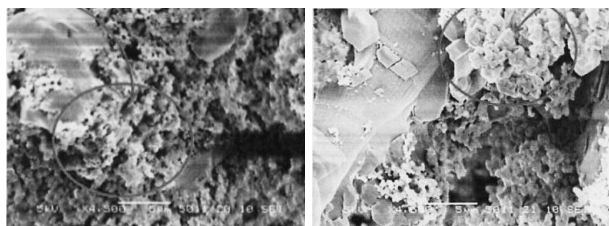


写真 3 析出物の SEM 画像

3. 2 応力とひずみ

応力-ひずみの関係を図 2 に示す。破線は初期損傷ありの供試体のデータであり、1 つ目のピークが材齢 3 日試験を、2 つ目のピークが材齢 28 日試験を表。コンクリートは一度破壊すると、その破壊時の強度以上の応力は発生しないはずである。圧縮強度が回復しているという点から見て、コンクリートの自己修復能力が働いたと考えられる。

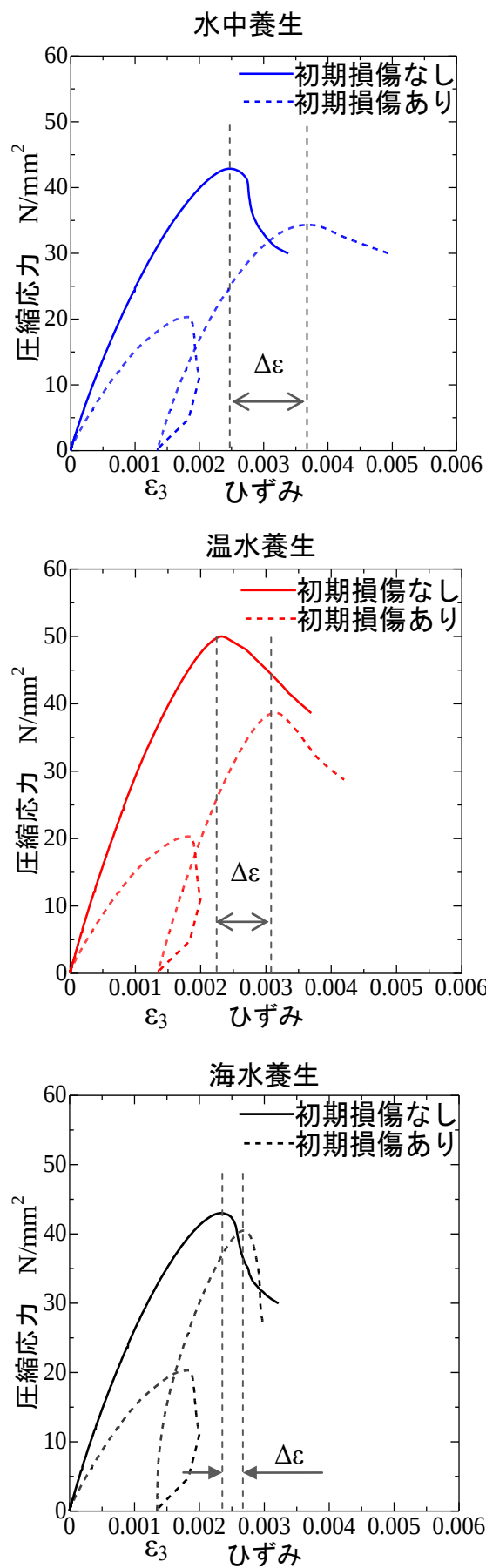


図 2 材齢 28 日圧縮強度試験結果

初期損傷ありの供試体の材齢28日強度を比較すると、水中養生に比べ温水養生と海水養生の供試体は高い値を示している。しかし、温水養生は初期損傷なしの供試体の強度も他より大きく発現しているため、自己修復能力がより大きく発現しているのは海水養生であると言える。

次に、それぞれの養生条件において、材齢28日における初期損傷なしの供試体の応力のピーク時のひずみと初期損傷ありの供試体の応力のピーク時のひずみの差 $\Delta\varepsilon$ は養生方法によって異なっている。水中養生と温水養生の供試体に比べて海水養生の供試体の $\Delta\varepsilon$ が小さい。水中養生と温水養生の供試体では、 $\Delta\varepsilon$ が材齢3日の圧縮試験後に残留したひずみ ε_3 とほぼ等しい値となったが、海水養生の供試体では、 $\Delta\varepsilon$ が ε_3 の約25%の値となっている。よって、海水養生の供試体の方がより密な構造となり、強度と硬度（弾性係数）がともに増大していると考えられる。

3.3 圧縮強度と材齢

圧縮強度と材齢の関係を図3に、各材齢での修復率（初期損傷ありの供試体の強度を初期損傷なしの供試体の強度で除した割合）を表2に示す。温水養生は水中養生に比べ初期損傷あり・なしともに早期から高い値となっている。コンクリートは温水養生を行うと早期強度が増大するという事は広く知られている。しかし、修復率が最も高いのは海水養生であり、海水養生の供試体は、時間が経つにつれ修復率が増大している。よって、自己修復能力が最も発現しているのは海水養生であると考えられる。

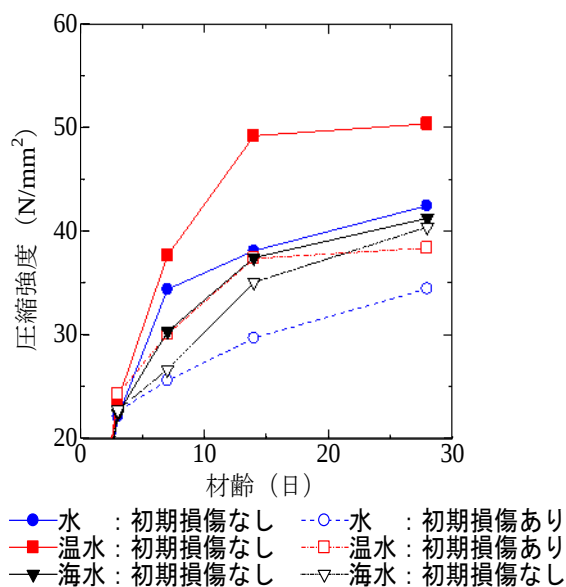


図3 材齢と圧縮強度の関係

表2 材齢と修復率の関係

	7日	14日	28日
水	74%	78%	81%
温水	80%	76%	76%
海水	88%	94%	98%

3.4 塩化物イオン濃度

浸透期間ごとの塩化物イオン量の変化を図4に示す。まず、初期損傷なしの供試体がすべての養生条件の初期損傷ありの供試体より塩化物イオン量の値が小さくなっている。初期損傷ありの供試体は、ひび割れからより多くの塩化物イオンが浸透したため、初期損傷なしの供試体に比べて高い値となったと考えられる。次に、養生を終了した直後の状態だと海水養生の供試体の塩化物イオン量が最も高い値となっている。海水養生の供試体は6ヶ月までは他の供試体の塩化物イオン量よりも高い値となっているが、浸透期間が1年になると初期損傷ありの水中養生と温水中養生の供試体の値より小さくなっている。これは、海水養生の供試体には浸透期間中さらに自己修復が進み、ひび割れ箇所からの塩化物イオンの侵入を阻害したためだと考えられる。海水養生の供試体は他の養生条件の供試体よりもより密な構造となったと考えられる。

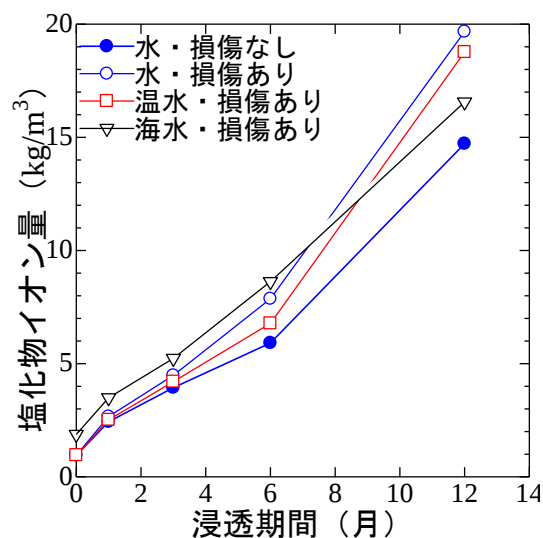


図4 塩化物イオン量の経時変化

3.5 SEM解析結果

海水養生の供試体が強度、耐久性ともに高い自己修復性能を示した。この原因を調査するため海水養生の供試体の自己修復時にひび割れ箇所に現れた白い析出物を、SEMを用いて撮影し、原因の特定を試みた。海水養生の供試体の析出物をSEMで撮影したものを写真4に示す。

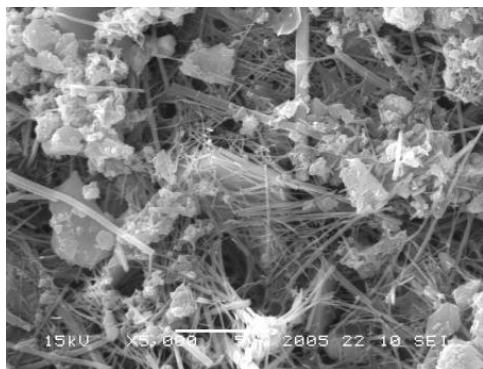


写真 4 海水養生供試体の析出物の SEM 画像

写真 4には針状結晶が見て取れる。これは、水中養生の供試体の析出物の SEM 画像には見受けられなかった特徴である。この針状結晶はコンクリートの水和生成物であるエトリンガイトであると考えられる(写真 5参照)。普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート内でのエトリンガイトの生成には硫酸塩が必要である。海水の塩分のうち、約 10% は硫酸塩である。そのため、海水養生の供試体にはエトリンガイトが生成されていたと考えられる。

エトリンガイトはそれ自体で強度を発現する。さらにセメント硬化体を膨張させる性質がある。そのため、海水養生の供試体は水中養生に比べてより細密な構造になり、高い強度、高い修復率が発現したのだと考えられる。さらに、ひび割れの修復部分の析出物において膨張性の高いエトリンガイトが存在していたため、ひび割れがより細密に充填され塩化物イオンの浸透を阻害したのだと考えられる。

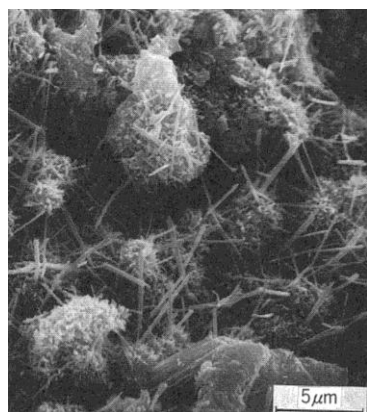


写真 5 エトリンガイトの SEM 画像^[3]

4. まとめ

本研究では 3 つの養生条件で自己修復能力に変化が現れるか調査してきた。結果として、海水養生によって強度、耐久性ともに優れた自己修復能力を引き出せるということが判明してきた。海水に含まれる塩分は鉄筋コンクリートの鉄筋表面に生成される

不動態皮膜を破壊する。この不動態皮膜は鉄筋の発錆を防ぐ働きがあるため、不動態皮膜が無くなると鉄筋が錆び、コンクリートの剥離などの原因となる。また、実験では強度の向上に貢献したエトリンガイトも多量に発生すると、その膨張性が原因となりコンクリートの剥離や鉄筋の破断などを引き起こす。そのため、コンクリートの配合や養生に海水を用いることは厳禁というのが原則であった。しかし、本研究の結果、海水養生によってコンクリートそのものの強度及び損傷箇所の自己修復能力が向上することが判明した。これらのことから、海水にはコンクリート構造物にとって塩害を引き起こす負の面と、自己修復能力を向上させる正の面の 2 つの働きがあるということが言える。

6. 今後の課題

本研究において、海水養生によるコンクリートの自己修復の可能性を見いだすことができた。今後は海水の修復性能に何らかの依存性があるかという観点の調査が必要であると考えられる。例えば、ある温度を超えた場合自己修復能力が高くなり、逆に下回った場合には塩害を促進させてしまう、というような境界について検討することが挙げられる。

また、本研究ではコンクリート表面部の塩化物イオン量しか測定できなかった。そのため、塩化物イオン量の供試体の深さ方向の比較を行うことも今後必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 自己修復材料研究会「ここまできた自己修復材料-信頼性と経済性を高めるキーマテリアル-」：工業調査会，2003，pp.159-180
- [2] セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会「セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書」
<http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/oldlist/committee/tc075b/activity.html>（最終閲覧日：2014.1/20）
- [3] 社団法人セメント協会：「C&C エンサイクロペディア」：1996，pp.22-35