

漏水に伴うコンクリート中のカルシウム溶出現象の分析（１）
—水和反応の進行度と試料サイズの違いによる影響の検討—

金沢工業大学大学院 学生員○川島 健人 *1
金沢工業大学 正会員 木村 定雄*1
金沢工業大学 正会員 大嶋 俊一*2
佐藤工業株式会社 正会員 弘光 太郎*3

1. はじめに

矢板工法により施工された覆工コンクリートの多くは無筋コンクリート造である。無筋コンクリートは鉄筋コンクリートに比べ、劣化メカニズムの解明がなされていない実状にある。また、矢板工法で施工されたトンネルは、防水工が施工されておらず、漏水が多いといった特徴がある¹⁾。筆者らはこの点に着目し、漏水に伴うカルシウム溶出が劣化要因の一つであると考え、そのメカニズムについて検討してきている²⁾。カルシウム溶出とはコンクリートが外部水と接したとき、コンクリートを構成する水酸化カルシウムとカルシウムシリケート水和物(C-S-H)からカルシウムイオン(Ca²⁺)が溶出し、コンクリートが脆弱化する現象である³⁾。現在、この現象に関する研究は少ない。本報告は、既往の研究⁴⁾を踏まえ、水和反応の進行度および分析試験に用いる試料サイズがカルシウム溶出に及ぼす影響について述べるものである。

2. 実験概要

(1) 供試体の作製

供試体はセメントのみからのカルシウム溶出を把握するために、セメントペーストを用いて作製した。配合はトンネルの覆工コンクリートを模擬して、W/C=50%とした。配合を表1に示す。

塩化ビニル管を型枠として、セメントペーストを流し込み、標準養生の後、脱型、切断をし、エポキシ樹脂を塗布した。エポキシ樹脂が乾燥した後に割裂し、割裂面（試験面）を成形して、これを試料とした。なお、試験面は割裂によって成形するため、個々の試料でその面積は若干異なる。その後、成形した試料を1ℓのイオン交換水に浸漬することで、漏水を模擬した。外部水と接触する試験面のサイズが、カルシウム溶出に及ぼす影響を確認するため、図1に示す2つの試料を作製した。カルシウム溶出はキレート滴定により、その量

表 1 供試体の配合

W/C(%)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	VT	T	Ad
50	605	1,225	6.1	0.031	1.0

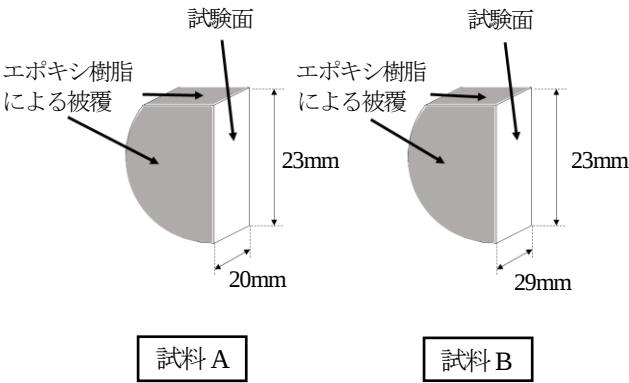


図 1 試料のサイズ

を定量的に把握した。キレート滴定までの前置き期間は、試料 A では3日および7日の2種類とした。試料 B では3日、7日および28日の3種類とした。試料サイズによる影響の検討には、前置き3日と7日の試料を用いた。なお、試料 A と試料 B の試験面の面積比の平均は、試料 A が試料 B に対して 0.69 である。また、試料 B の前置き 28 日の試料は、ある程度水和反応が進行している状態のカルシウム溶出を把握するために作製した。

(2) キレート滴定

キレート滴定によって、試料を浸漬しているイオン交換水中に含まれる Ca²⁺量を求めた。Ca²⁺量の算出は次式による⁵⁾。

$$Ca^{2+} = a \times \frac{1000}{V_{Ca}} \times 0.401 \times f$$

ここで、Ca²⁺：カルシウムイオン濃度(mg/L)

f：EDTA のファクター

V_{Ca}：Ca²⁺の滴定における試料水量(ml)

a：Ca²⁺の滴定に要した EDTA 溶液(ml)

キーワード カルシウム溶出、漏水、キレート滴定、覆工コンクリート、水和反応

連絡先 *1:〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1 地域防災環境科学研究所 TEL:076-274-7009 FAX:076-274-7102

*2:〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1 高度材料科学研究開発センター・生活環境研究所 TEL:076-274-9266 FAX:076-274-9251

*3:〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14 番 10 号 技術研究所 TEL:046-270-3091 FAX:046-270-3093

3. 実験結果とその考察

Ca^{2+} 溶出量の累計の経時変化および Ca^{2+} 溶出速度の経時変化を図2および図3に示す。なお、溶出速度は次式により算出した。

$$\Delta Vt = \frac{\Delta \text{Ca}^{2+}}{\Delta t}$$

ここで、 ΔCa^{2+} : Ca^{2+} の微小溶出量(mg/mm^2)

Δt : 微小時間(day)

ΔVt : 溶出速度($\text{mg}/\text{mm}^2/\text{day}$)

図2をみると、前置き3日と7日の試料の溶出量がほぼ同じとなり、前置き28日の試料の溶出量が、前置き3日と7日の試料の溶出量より大きくなった。また、図3を見ると、前置き3日と7日の試料の溶出速度がほぼ同じとなり、前置き28日の試料の溶出速度は、20日までは若干大きく、時間の経過とともに、他の試料とほぼ同じ値となった。このことから、前置き期間が3日と7日と異なっても、また、試験面の面積比が異なっても Ca^{2+} の溶出傾向は、ほぼ同じであることがわかった。

次に、水和反応の進行度が、カルシウム溶出量に及ぼす影響について考察する。図2と図3より、前置き28日の Ca^{2+} の溶出量と溶出速度が前置き3日と7日を上回るのは、クリンカー化合物の水和反応の進行度が関係していると考えられる。図4にクリンカー化合物の水和反応のモデルを示す。エーライトの水和反応はすぐに開始する。一方、ビーライトの水和反応は材齢28日で約20%となる⁹⁾。そのため、前置き28日の試料は、ビーライトの反応が進行している最中であるのに対し、前置き3日と7日の試料は、ビーライトの水和反応がほとんど進行していない段階と考えられる。すなわち、前置き28日の試料は、前置き3日と7日の試料と比較して、水和反応に伴って生成される水酸化カルシウム量が多い。図5は外部水による Ca^{2+} の溶出機構を示したものである。この図は、ひび割れによって外部水（漏水）が侵入し、セメント硬化体中の Ca^{2+} の溶出を促す機構を模式的に示したものである。ひび割れが発生する前には、内部水に存在する未水和の水酸化カルシウムも存在することから、前置き期間にかかわらず、その Ca^{2+} も溶出することになる。したがって、前置き3日と7日の試料の初期の Ca^{2+} の溶出は、これが主体となすものと考えられる。

参考文献

- 1) 山崎哲也，八木弘：矢板工法トンネルの点検管理のポイント，第74回年次学術講演会，VI-543，2019.9.
- 2) 例えば，辻本剛士，木村定雄：トンネル覆工コンクリート中の水

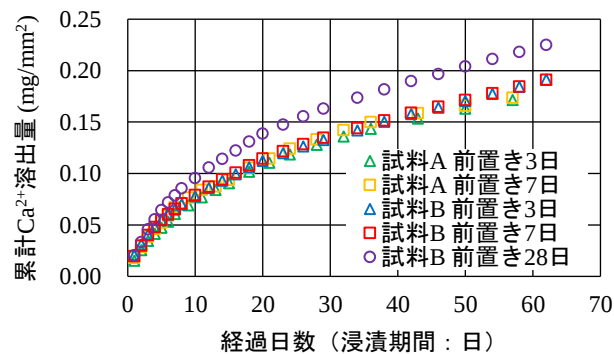


図2 単位面積あたりの累計 Ca^{2+} 溶出量の経時変化

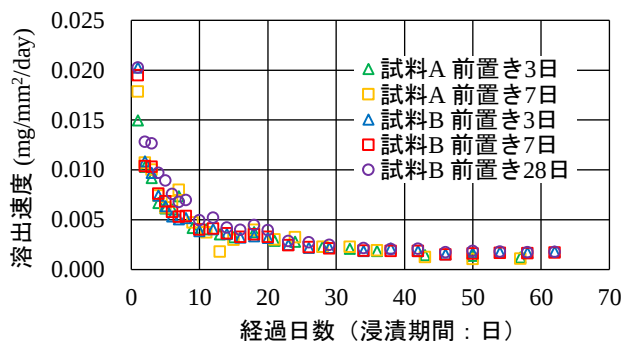


図3 単位面積あたりの Ca^{2+} 溶出速度の経時変化

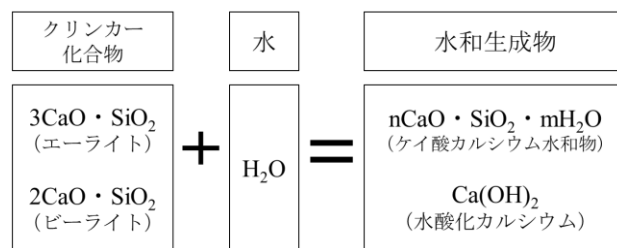


図4 クリンカー化合物の水和反応³⁾

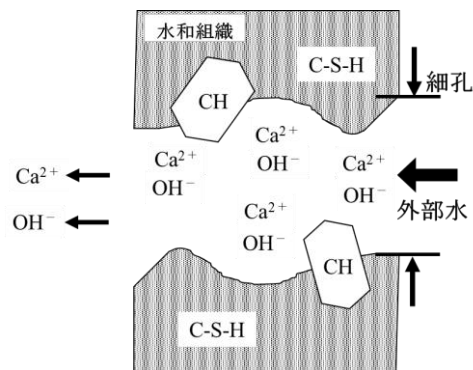


図5 外部水による Ca^{2+} の溶出機構³⁾

酸化カルシウムの溶脱に関する一考察，第66回年次学術講演会，V-165，2011.9.

- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.53，コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状，pp.73-74，2003.6.
- 4) 普照遥，木村定雄，大嶋俊一：トンネル覆工コンクリートの漏水に伴うカルシウム溶出現象の解明，地下空間シンポジウム論文・報告集，第25巻，土木学会，A2-2，2020.01.24
- 5) 日本分析化学会北海道支部，『水の分析(第5版)』，pp.211-216，2005.6.
- 6) 深谷泰文，露木尚光：『セメント・コンクリート材料科学』，pp.56-57，2003.10.10