

トンネル海底部におけるてん充層の劣化メカニズムに関する一考察

西日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○南里 卓洸
正会員 山根 寛史

1. はじめに

海峡直下を貫いた海底トンネルの海底部区間（以下、海底部）では、海水同等の漏水や常時高温多湿な環境により、各種軌道材料に激しい塩害が生じている。海底部では、2004 年度より軌道スラブ交換を行い、てん充層には、海底部にて実際に暴露試験を行った知見¹⁾から、耐海水性 CA モルタルが採用されている。供用開始から約 10 年が経過した頃から、一部にてん充層の劣化に起因すると考えられる高低狂い（年間最大 8.8mm）の進行が確認されるようになった。てん充層側面から奥行 150mm 程度まではつり出す額縁補修を実施してきたが、一部で軌道狂いが再発し、補修を繰返している。

軌道狂いが生じる前にてん充層の劣化を把握し、適時適所に補修することを最終的な目的に、供用中の耐海水性 CA モルタルから一部を採取し、化学的な成分分析を行った。また、分析結果に基づき、海底部でてん充層が劣化に至るメカニズムを考察したので報告する。

2. 劣化原因の仮説

2-1. カルシウムの溶脱による劣化

一般に、コンクリート等のセメント硬化体に海水成分が乾湿繰返しで作用した場合、海水に触れることで硬化体の細孔溶液中に海水が浸入し、乾燥することで溶液中のアルカリ濃度が上昇する。特に、海水に含まれる硫酸マグネシウムの影響により、硬化組織である C-S-H からカルシウムが溶脱し、脆弱化することが知られて²⁾いる。その際、外観上は泥状に劣化が進行するとされている。

2-2. 膨張性水和物（エトリンガイト）の生成による劣化

軌道スラブ交換の施工後数時間で列車を走行させるため、初期強度の発現を早めることを目的に、耐海水性 CA モルタルにはアルミネート成分の多いセメントが用いられている。このようなセメントを用いた工場製作のコンクリート製品等では、エトリンガイトの生成・膨張により劣化する可能性があることが知られている。

3. 試験概要

3-1. 試験対象としたてん充層の概要

本試験の対象としたてん充層の概要を表 1 に示す。資料の採取は、比較として位置づけた非海底部の 1 箇所を含む計 13 箇所で行った。表 1 には、各試料を採取した箇所の漏水状況、および敷設年を示しており、補修履歴のある箇所は補修を実施した年を（）で示している。また、各採取箇所においては、リバウンドハンマーを用いた反発度の計測³⁾を実施しており、その結果を表 1 に併せて示している。各試料は、採取後、デシケーター内で 1 晩減圧乾燥し、粉碎して試験に供した。

表 1 海底部に敷設されているてん充層（試験対象量）

試料 No.	敷設位置	周辺漏水	敷設年 (補修年)	反発度
1	非海底部	無	2007	20
2	海底部	有	(2017)	18
3		有	(2017)	13
4		無	2007	19
5		有	(2017)	11
6		無	(2017)	15
7		無	2007	19
8		無	2007	16
9		無	2007	21
10		有	2007	14
11		無	2007	16
12		有	2008	10
13		有	2008	14

3-2. 試験方法

本試験では、3 種類の試験を実施した。

①蛍光 X 線分析（XRF）

JIS K 0119(2008)に基づき、波長分散型蛍光 X 線分析装置（MiniPal4）を用い、11Na(ナトリウム)～92U(ウラン)の範囲で同時測定とした。この手法は、各元素量を、炭素を除いた全元素量で除すことにより得られる相対量である。

②自動滴定装置を用いたカルシウム溶脱分析

JIS R 5202（2014）に基づき、自動滴定装置の光度滴定法を用いて、カルシウムの定量分析を実施した。

キーワード 新関門トンネル、軌道スラブてん充層、CA モルタル、成分分析調査、カルシウム溶脱

連絡先 〒802-0002 福岡県北九州市小倉北区京町 4-7 小倉新幹線保線区 TEL:093-541-6915

これは、試料から抽出したカルシウムの質量を、試料全体の質量で除して得られる値である。

③粉末 X 線回折(XRD)による定性分析結果

JIS RK 0131 (1996) に基づき、粉末 X 線回折分析装置による生成物の分析を行った。本試験は、漏水の影響を定性的に評価することを目的に、表1の試料 No. 2 および 7 の 2 試料のみを対象とした。

4. 成分分析評価および劣化メカニズムの考察

4-1. カルシウム溶脱による劣化

蛍光 X 線分析より得られた、各試料におけるカルシウム(Ca) およびマグネシウム(Mg)の含有率と、リバウンドハンマーで得られた反発度の関係を図1に、Ca 溶脱分析により得られたカルシウムの含有率と反発度の関係を図2にそれぞれ示す。これらより、反発度が低い箇所から得られた試料は、カルシウムの含有率が低い一方で、マグネシウムの含有率が高いことが分かる。

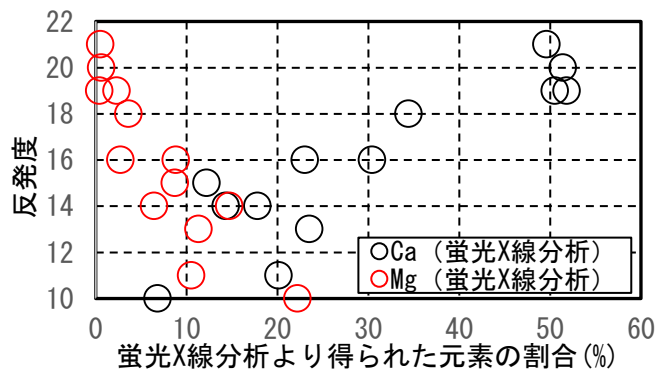


図1 反発度と各元素割合の関係（蛍光 X 線）

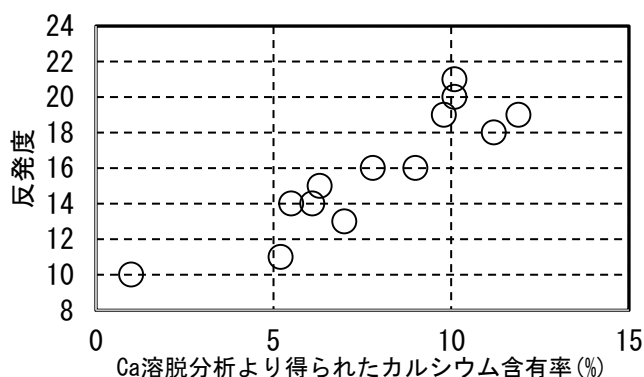


図2 反発度とカルシウムの関係

4-2. 膨張性水和物（エトリンガイト）の生成による劣化

2 試料を対象に実施した粉末 X 線回折分析により得られた結果を図3に示す。これより、エトリンガイトは、漏水有の箇所では検出されず、漏水無の箇所からは微量検出された。漏水無の箇所から検出された微量のエトリンガイトは、セメント水和反応で生成されたと考えられ、CA モルタル劣化の主要因である可能性は低いと考えられる。

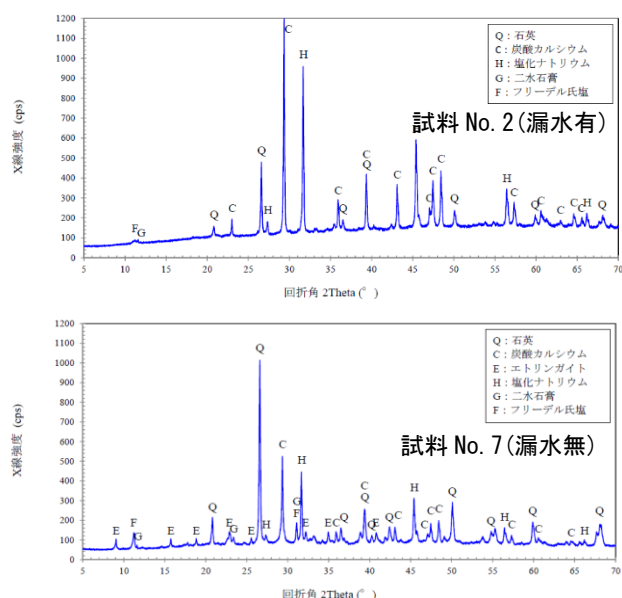


図3 粉末 X 線回折(XRD)による分析

4-3. 劣化メカニズムの考察

序論にて示したように、耐海水性 CA モルタルは、長期の海水含浸試験を経て導入された。一方で、現場に敷設されている耐海水性 CA モルタルの供用環境は、単純な含浸状態ではなく、乾湿の繰返し状態下にあると推察される。本試験の結果より、海底部における耐海水性 CA モルタルの劣化原因は、海水の乾湿繰返し作用により、セメントの硬化組織からカルシウムが溶脱した影響が支配的である可能性が示唆された。

5. 結論

- i) 反発度が低い、すなわち劣化が進行していると考えられるてん充層においては、カルシウム含有率が低い一方で、マグネシウムの含有率が高い傾向であることが明らかになった。
- ii) 海水の乾湿繰返し作用により、セメントの硬化組織からカルシウムが溶脱し、劣化が促進している可能性を示した。併せて、セメント系材料の耐海水性を評価する上では、乾湿の繰返しによる影響を留意することの重要性を示した。

参考文献

- 1) 山根, 柳谷「塩害環境下で適用する軌道スラブ用コンクリート材料に関する研究」第15回鉄道工学シンポジウム2011.4
- 2) 例えば, 吉田夏樹「硫酸ナトリウムの結晶成長によるコンクリートの劣化現象」東京工業大学博士論文, 2011.
- 3) 高橋, 桃谷, 藪中, 長沼「貫入試験による CA モルタルの劣化評価」第17回鉄道工学シンポジウム2013.4