

異常膨張を生じたコンクリート二次製品における遅延型エトリングタイトの生成

九州大学大学院 学生会員 ○川端 雄一郎 フェロー 松下 博通
正会員 佐川 康貴

1. 目的

近年、福岡県や山口県においてコンクリート二次製品が異常膨張する事例が報告されており、早急な原因究明が急務である。本研究はコンクリート二次製品の膨張劣化事例について各種分析を行い、その原因について検討した。

2. コンクリート二次製品の膨張事例

2.1 劣化状況

写真-1 はコンクリート製品である縁石ブロックが膨張し、アーチ状にせり出している状況である。これらのコンクリートは製造後数年で劣化を生じており、劣化を生じた縁石ブロックには無数の細かなマイクロクラックが発生していた。また、写真-1 に示すコンクリート二次製品の膨張率は約 2.5%であった。



写真-1 コンクリート二次製品の膨張事例の一例

2.2 膨張を生じたコンクリート二次製品の概要

(1) 使用材料及び配合

コンクリート二次製品は表-1 に示す使用材料及び表-2 に示す配合によって目標スランプ 8cm、目標空気量 2%で製造されている。この製品は天然の御影石を模した特殊な材料及び配合となっている。表-3、表-4 に石灰石及び銅スラグの主な化学成分を示す。石灰石を骨材として使用した際、ACR や珪質石灰石による ASR が危惧されるが、MgO や SiO₂ はほとんど含有されていない。ACR 反応性についてカナダ規格の CSA A 23.2-26A の ACR 反応性を判定するグラフにプロットしたところ、「non-expansive」と判定された。銅スラグについては、ASR や銅スラグの中の有害鉱物、錆等が懸念される。そこで銅スラグについて化学法を行った結果、溶解シリカ量 Sc=42mmol/l、アルカリ濃度減少量 Rc=43mmol/l となり、「無害」と判断された。銅スラグ中の錆について、本研究では EPMA を用いて BSE 像を観察したが、反応環は見られず、銅スラグ中に錆は同定されなかった。

これらの骨材についてそれぞれ JIS に準拠したモルタルバー法を行ったが、膨張率は 6 ヶ月で 0.03%以下であり、「無害」と判定された。また、セメントの種類や骨材の混入量等を変化させた場合についても膨張率は 0.03%以下となり、「無害」と判定された。また、これらの骨材の XRD を行ったところ、有害鉱物はほとんど判定されなかった。

(2) コンクリートの曝露環境

膨張したコンクリートが曝露された箇所の地質調査を行ったが、ばた造成地や新第三紀泥岩含有地層のような硫化鉱物を含有する地盤ではなかった。さらに、劣化が確認された縁石ブロックの周辺にある即時脱型のコンクリートには劣化が認められないこと、劣化を生じた縁石ブロック表面に析出物等が見られないことから外部からの硫酸塩等の侵入による劣化は無いものと考えられた。

表-1 使用材料

使用材料		
セメント	白色ポルトランドセメント	C
細骨材	石灰石砕砂	S ₁
	銅スラグ	S ₂
粗骨材	石灰石砕石(5~15mm)	G

表-2 コンクリートの示方配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S		G
			S ₁	S ₂	
49	180	367	1201	272	422

表-3 石灰石の化学成分

	組成割合(%)				
	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
粗骨材	43.94	0.09	0.02	55.42	0.43
細骨材	43.92	0.09	0.08	55.18	0.49

表-4 銅スラグの化学成分

	組成割合(%)				
	T-Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
銅スラグ	39.20	43.63	4.82	2.44	1.72

キーワード 膨張, エトリングタイト, DEF, 蒸気養生, 石灰石

連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL 092-642-3271

3. 劣化因子の特定と劣化機構の推定

図-1 に膨張を生じたコンクリートのモルタル部から採取した粉末試料の XRD 分析結果の一例を示す。図より、緑石ブロックから CaCO_3 や Ca(OH)_2 の他にエトリンガイト(Ett)と二水石膏(Gyp)が検出された。このことから、コンクリートが硬化後において Ett を生成し、その際の体積膨張によりコンクリートが異常膨張を生じている可能性が高いことが明らかとなった。

次に、Ett 及び Gyp の生成部位を明らかにするため、XGT により元素マッピングを行った。その結果、図-2(a)に示すように緑石断面の Ca の元素状態はほとんど変化がないのに対し、図-2(b)に示す S は石灰石骨材界面並びにマイクロクラックに沿って集積していることが分かった。

さらに、石灰石骨材界面を SEM により観察した結果、図-3(a)に示すように界面に Ett が生成されていることが分かった。その他に、図-3(b)に示すように Ett がマイクロクラック中を充填するように生成されていることが確認された。以上のことから、本研究が対象としたコンクリート二次製品の異常膨張はコンクリートが硬化した後に Ett が遅延して生成したことが原因であると考えられる。

異常膨張を生じたコンクリート二次製品はいずれも蒸気養生を行っている。一般的な工場製品の蒸気養生はコンクリートにひび割れやはく離、変形等を生じさせないように打設後 2~3 時間の前養生時間の確保、 20°C/h の昇温速度、最高温度 65°C 等に定めていることが多い。図-4 に膨張したコンクリートを製造したコンクリート工場においてコンクリートの蒸気養生時に測定した雰囲気温度の一例を示す。図より、本研究で測定したコンクリート工場の蒸気養生温度は蒸気養生開始後、急激に温度が上昇し、一般的な蒸気養生温度である 65°C をはるかに超えていることが分かる。なお、コンクリートの前養生時間については 40 分程度であった。

以上のことから、本研究が対象としたコンクリート二次製品の膨張劣化現象は海外において報告されている DEF(Delayed Ettringite Formation)であると考えられる。DEF はセメント中に含まれる硫酸塩によりコンクリートが劣化する現象であり、蒸気養生温度等の影響を受けることが海外において報告されており、我が国においても今後注意が必要である。また、石灰石界面において S が濃集していることから、コンクリート中における石灰石の反応性についても検討する必要がある。

4. 結論

本研究が対象としたコンクリート二次製品の膨張劣化現象はコンクリートの硬化後に内部硫酸塩がエトリンガイトを生成する DEF であると考えられる。

謝辞：ここに、本研究に関してご助言いただいた愛知工業大学の森野奎二教授に感謝の意を表します。

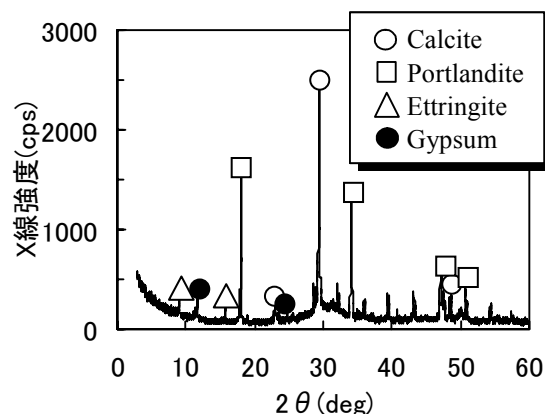
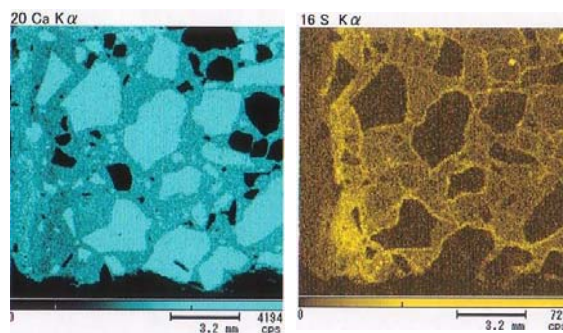
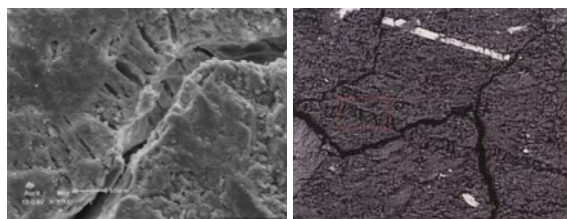


図-1 コンクリート中の生成物



(a) Ca (b) S
図-2 コンクリート二次製品断面の元素マッピング



(a) 骨材界面 (b) マイクロクラック

図-3 エトリンガイトの生成状況

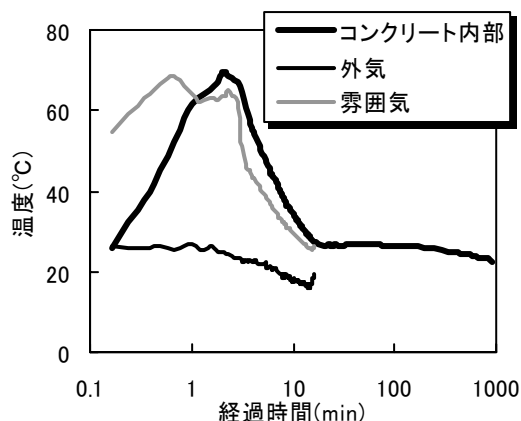


図-4 蒸気養生温度の一例