

# アルカリシリカ反応と遅延エトリンタイト生成の複合劣化メカニズム解明のための実験的検討

試験研究センター 材料部 材料試験室 澁井 雄斗、吉田 夏樹

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）および遅延エトリンタイト生成（以下、DEF）は、コンクリート内部で膨張反応が生じ、ひび割れを生じさせる現象です。

マスコンクリートや二次製品のように材齢初期に高温履歴を受けた場合、セメント水和物で膨張作用のあるエトリンタイトが供用開始から数年後に生成することで、DEFを生じる可能性があります<sup>1)</sup>。国内では、ASRの認知度は高く、様々な試験方法が提案されている一方で、DEFは試験方法が未だ確立されていません。

著者らは、構造物の維持管理を適切に行うためにASRとDEFを見分けることや、両者が複合的に作用した場合の劣化メカニズムを解明するために研究しています。本稿では、コンクリート試験体を用いた劣化促進に関する実験について、概要を紹介します。

## 2. 実験方法

コンクリート試験体の使用材料を表-1、配合計画を表-2に示します。膨張量の測定のために、両端にプラグを埋設した75×75×250mmの試験体を作製しました。

ASRの促進のために、反応性骨材、NaOHを使用し、後養生ではNaOH溶液を含んだ不織布で試験体を包み、40℃、95%RHで養生しました(40℃AW)。ASRはpHおよび養生温度が高いほど反応が進みます。

一方DEFでは、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を添加し、材齢初期に90℃の高温履歴を与え、後養生では20℃の上水道水に浸漬しました(20℃水中)。セメントの化学組成および鉱物組成を表-3、DEFに関する各推定値を表-4に示します。既往研究<sup>2)、3)</sup>による各推定値の閾値を超えるように、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を添加しました。また、エトリンタイトは、pH・

表-1 使用材料

水 W	上水道水
セメント	早強ポルトランドセメント（以下、HPC） （密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> ，比表面積 4480 cm <sup>2</sup> /g）
細骨材 S	石灰砕砂 （福岡県北九州市産，表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> ）
非反応性粗骨材 G <sub>1</sub>	石灰砕石 2005 （高知県鳥形山産，表乾密度 2.69 g/cm <sup>3</sup> ）
反応性粗骨材 G <sub>2</sub>	アルカリシリカ反応性骨材 （表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> ）
添加材	水酸化ナトリウム NaOH、硫酸カリウム K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

表-2 配合計画

配合・劣化メカニズムの想定	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		W	HPC	S	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	NaOH	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
反応性骨材-NaOH 添加(R-NaOH)・ASR	68.6	175	255	891	753	323	3.87	—
非反応性骨材-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 添加(NR-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )・DEF					1076	—	—	10.33
反応性骨材-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 添加(R-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )・ASR+DEF 複合					753	323	—	10.33

表-3 セメントの化学組成および鉱物組成

種類	化学組成 (%)									Na <sub>2</sub> O 等量	鉱物組成 (%，Bogue)			
	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
HPC	0.96	20.18	4.97	2.62	64.98	1.43	3.07	0.17	0.36	0.40	65	9	9	8
HPC+K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.84	19.30	4.75	2.50	62.15	1.37	4.93	0.16	2.70	1.93	57	13	8	8

表-4 Kelham および Zhang らによる DEF に関する各推定値

種類	90℃で初期高温養生したモルタルの膨張率 (%)	DEF index	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (モル比)
	Kelham の推定式による		
HPC	0.2	0.7	0.8
HPC+K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.5	2.6	1.4

温度が高いほど不安定であるため、後養生では水中浸漬によるアルカリ溶脱にともないpHを低下させることで、DEFを促進しました。

また、ASRとDEFの複合劣化を想定し、それぞれの促進条件を組み合わせました。

### 3. 結果・考察

各配合 (N=2) の膨張率の経時変化を図-1~図-3に示します。同様の配合であっても、初期養生、後養生の違いにより膨張率の変化が大きく異なることがわかります。

図-1より、R-NaOH-常温-40℃CAW、R-NaOH-高温-40℃CAWを比較すると、初期に高温履歴を受けることで膨張率が大きくなりました。ASRが促進されたと考えられ、材齢55週時点のR-NaOH-高温-40℃CAWの試験体断面を観察すると、ASRゲルによるひび割れが確認されました。一方で、R-NaOH-高温-20℃水中は、水中浸漬によるアルカリ溶脱によりASRが促進されにくいと考えられ、相対的に膨張率が小さくなったと推察されます。

図-2より、NR-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-高温-20℃水中では、膨張率が約1.6%に達しているのに対して、比較用のNR-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-常温-20℃水中では膨張が生じませんでした。反応性骨材を使用していないため、DEFによる膨張となります。水中浸漬により、試験体中のアルカリが溶脱しpHが低下したと考えられ、DEFの促進を実験的に再現することができました。

図-3より、R-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-高温-20℃水中は、早期に膨張が著しく進行していたものの、材齢71週以降はR-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-高温-40℃CAWのほうが膨張率が大きくなりました。ASRとDEFの複合劣化が生じうる場合、アルカリ溶脱を抑えた40℃CAWのほうが、コンクリートが膨張するポテンシャルをより適切に評価できる可能性があります。

### 4. まとめ

配合、養生条件の違いにより、膨張率の経時変化が大きく異なることを確認しました。

反応性骨材が使用される場合、初期の高温履歴は、DEFだけではなくASRも促進させるため、膨張率の違いのみで、ASRとDEFを見分けることはできません。このため、今後は、任意の材齢で採取した分析用試料を用いて組織観察を行い、ASR、DEF、ASRとDEFの複合劣化が、本実験の試験体中で生じているかを材齢ごとに確認し、膨張率の経時変化との関係性について検討を続ける予定です。

凡例の表記(例)			
反応性骨材の有無	添加材	初期養生	後養生
R	- K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	高温	20℃水中

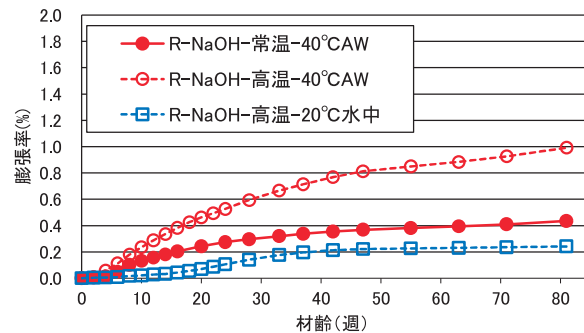


図-1 R-NaOHの膨張率の経時変化

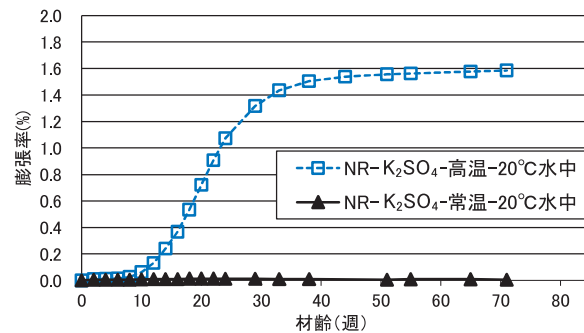


図-2 NR-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の膨張率の経時変化

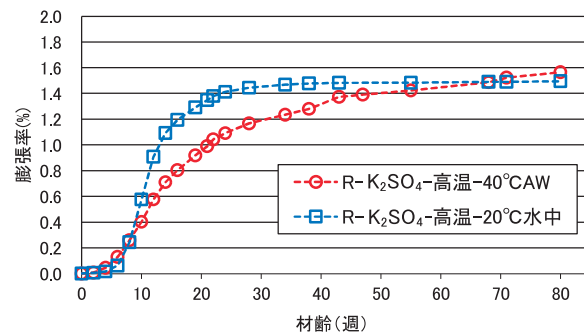


図-3 R-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の膨張率の経時変化

### 【参考文献】

- 吉田夏樹：エトリンガイトの遅延生成 (DEF) によるコンクリートの劣化現象, GBRC, Vol.46, No.1, pp.31-40, 2021.
- Kelham, S.: The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation, Cem. Concr. Compos., Vol.18, pp.171-179, 1996.
- Zhang, Z., Olek, J., Diamond, S.: Studies on Delayed Ettringite Formation in Heat Cured Mortars II. Characteristics of Cement that may be Susceptible to DEF, Cem. Concr. Res., Vol.32, pp.1737-1742, 2002