

ASR の進行がエトリンガイト遅延生成による膨張挙動に及ぼす影響

公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 ○山崎 由紀
公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 上原 元樹

1. 目的

高温環境に曝されたコンクリートでは、セメント水和物であるエトリンガイトが分解し、年月を経て再生成する DEF (Delayed Ettringite Formation) 反応によって、膨張、ひび割れが生じる場合がある。エトリンガイトは、アルカリシリカ反応 (ASR) が生じたコンクリート中のひび割れ等に析出していることも多く、ASR ゲルの生成により細孔溶液のアルカリ成分が消費されて pH が低下することや、pH の低下によってエトリンガイトが析出しやすくなることが知られている¹⁾。ASR が生じたコンクリートのうち、高温履歴のある場合には、DEF が複合して膨張に影響する可能性が考えられる。本研究では、細骨材の ASR 反応性や硫酸カリウム (K₂SO₄) の添加量が異なるモルタル供試体について、異なる環境条件における膨張挙動を調べ、ASR の進行が DEF 膨張に与える影響を検討した。

2. 実験

モルタル供試体の条件を表 1 に示す。細骨材は 3 種類とし、ASR 反応性のない細骨材としてセメント強さ試験用標準砂 (JIS R5201 以下、標準砂) を用いた。また、JIS A 1145 : 2007「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)」により ASR に対して「無害でない」と判定される骨材として、溶解シリカ量 Sc=847mmol/L、アルカリ濃度減少量 Rc=172mmol/L の安山岩および Sc=67mmol/L、Rc=28mmol/L の粘板岩を用い、それぞれ標準砂と表乾状態の質量比 2 : 3 で混合した細骨材 (以下、それぞれ細骨材 A1、細骨材 A2) を使用した。

全ての条件で早強ポルトランドセメント (表 2) を使用し、水セメント比 0.5、砂セメント比 2.0 の配合とした。K₂SO₄ の添加量は、SO₃ 換算でセメント量の 2% (細骨材 A1 使用の供試体では 2%と 0.5%) とした。モルタ

表 1 モルタル供試体の条件

細骨材	K ₂ SO ₄ 添加量	履歴温度	供試体形状	材齢 7 日以降の環境条件
標準砂	2%	85℃	角柱	20℃水中
細骨材 A1	2%	85℃	角柱	20℃水中、20℃湿空、40℃湿空 (3 週間) 後に 20℃水中
		20℃	円柱	20℃水中、20℃湿空、40℃湿空
	0.5%	85℃	円柱	20℃水中、20℃湿空、40℃湿空
			角柱	40℃湿空 (3 週間) 後に ①20℃水中、または ②20℃湿空
細骨材 A2	2%	85℃	円柱	20℃水中、20℃湿空、40℃湿空

ルを φ5×10cm の円柱または 4×4×16cm の角柱型枠に充填・密封し、20℃環境に 4 時間静置した後、最高温度 85℃ (昇温・降温速度 20℃/時、最高温度 12 時間保持) の高温履歴を与えた。K₂SO₄ 添加量 2%、細骨材 A1 使用の供試体については、20℃環境に静置する条件でも作製した。材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日まで 20℃気中に静置した後に、20℃の水中 (オーバーフロー式の水槽) に浸漬して膨張率の推移を調べた。一部の供試体では、20℃、R.H.≥90%の気中 (以下、湿空)、および 40℃湿空環境における膨張率との比較を行った。また、細骨材 A1 使用の供試体については、40℃湿空に 3 週間静置した後に、20℃水中または 20℃湿空環境に静置する条件での膨張率を測定した。

角柱供試体の膨張率は、コンタクトゲージを用いて計測した。また、円柱供試体の膨張率は、所定の 9 点で測定した供試体の直径から計測し、コンパレータスタンドおよびデジタルインジゲーター (精度 1.5μm) を用い、寸法許容差 0.25μm のゲージブロックを標準尺として測定した。各条件 3 体の供試体について、材齢 7 日を基準に膨張率を計測した。

表 2 早強ポルトランドセメントの化学組成

化学成分 [mass %]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	その他	Total
	0.45	1.29	5.30	19.76	0.16	2.62	0.28	66.94	0.25	0.08	2.71	0.17	100

各値は原子番号で Na 以上の元素(Cl を除く)を酸化物換算し、それらと Cl 量との合計を 100mass%として補正規格化した値である。

キーワード エトリンガイト, アルカリシリカ反応, 化学法, 硫酸塩, 高温履歴

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 TEL 042-573-7338

3. 結果

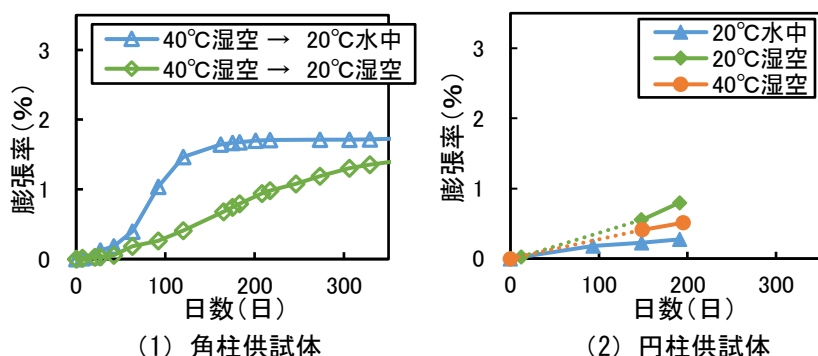
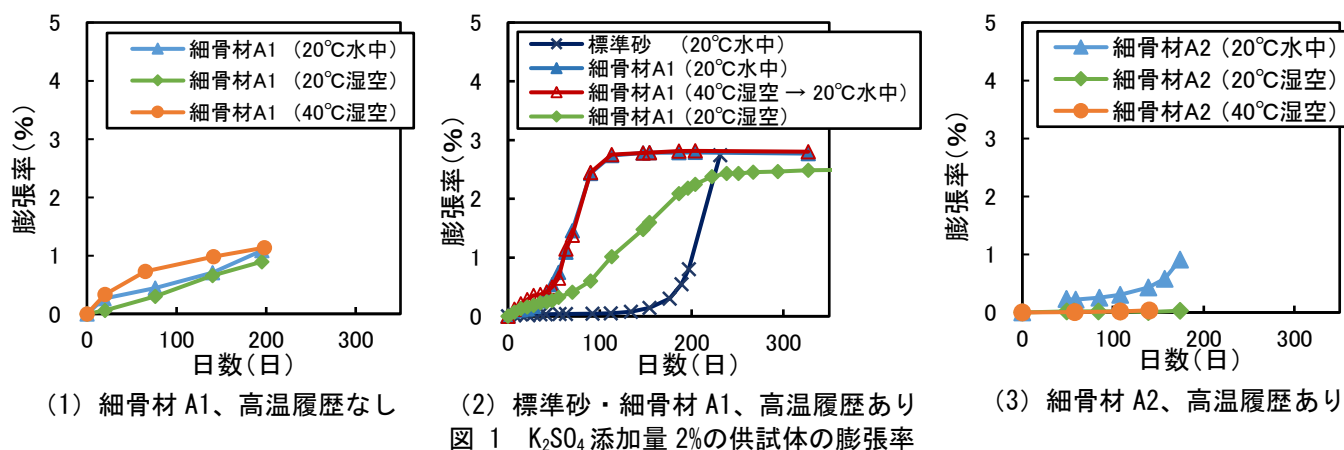
K_2SO_4 添加量 2%の供試体の膨張率を図 1 に示す。図 1 (1) より、細骨材 A1 使用の供試体について、高温履歴のない条件では、ASR により各環境において約 200 日で 0.9~1.1%程度の膨張が生じた。一方、図 1 (2) より、高温履歴のある条件では、20℃水中において約 100 日で 2.7%、20℃湿空環境において約 200 日で 2.2%の膨張が生じた。また、20℃水中浸漬前に 40℃湿空期間がある場合にも、ない場合と同様に膨張が生じた。これらの膨張は、標準砂使用の供試体に比べて早期に生じており、ASR による膨張よりも大きいことから、細骨材 A1 使用の供試体では DEF による膨張が促進されて生じたものと考えられる。これに対し、図 1 (3) より、細骨材 A2 使用の供試体では、20℃水中において、約 100 日以降に膨張が生じ始めており、標準砂使用の供試体の膨張挙動と大きな相違はみられなかった。細骨材 A2 は A1 に比べて、 $Sc \cdot Rc$ の値が小さく、ASR が生じた際にも pH が低下しにくいため、DEF が促進されなかった可能性が考えられる。

K_2SO_4 添加量 0.5%、細骨材 A1 使用の供試体の膨張率を図 2 に示す。図 2 (1) より、40℃湿空に静置後、20℃水中に浸漬した供試体では、約 200 日で 1.7%の膨

張が生じており、図 2 (2) における、40℃湿空環境での膨張（約 200 日で 0.5%）よりも大きな膨張が生じていることから、DEF による膨張が促進されたものと考えられる。一方、図 2 (2) より、40℃湿空に静置せずに 20℃水中に浸漬した供試体では、現時点で大きな膨張は生じていない。これは、 K_2SO_4 添加量 2%の場合には、高温履歴から浸漬前（材齢 7 日）までに ASR が進行したため、40℃湿空期間の有無による大きな差は認められなかったのに対し、添加量 0.5%の場合には浸漬前までの ASR の進行が少ないため、40℃湿空条件の有無による差が大きくなったものと推察される。

なお、図 2 (2) において、約 200 日で最も大きな膨張が生じている条件は 20℃湿空環境であるが、アルカリの溶出がなく、ASR と DEF がともに進行しやすい環境であり、両者が複合して生じている可能性がある。

以上のことから、化学法により「無害でない」と判定される骨材でも、 $Sc \cdot Rc$ の値によって DEF への影響は異なり、それらの値の大きな骨材を用いた場合、高アルカリや 40℃湿空条件等の ASR 促進条件で、より DEF による膨張が促進されることがわかった。今後、pH や生成物等を詳細に調査し、骨材における ASR の反応性・促進環境と DEF 促進作用の関係を検討する予定である。



参考文献

- 1) Sidney Diamond, The relevance of laboratory studies on delayed ettringite formation to DEF in field concretes, Cement and Concrete Research 30, Vol.30, No.12, pp.1987-1991, 2000.