

高温蒸気養生を行ったモルタルの DEF による長期膨張性状とその制御に関する研究

九州大学大学院 学生会員 ○池田 隆徳
九州大学大学院 正会員 濱田 秀則

(独)港湾空港技術研究所 正会員 川端 雄一郎
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴

1. はじめに

近年、国内において蒸気養生を行ったコンクリート二次製品の異常膨張事例が報告されている¹⁾。この異常膨張は DEF(Delayed Ettringite Formation: エトリンガイトの遅延生成)に起因する膨張現象であるとされる。筆者らはこれまで DEF 膨張に対するセメント種類、骨材種類の影響²⁾および高炉スラグ微粉末(BFS)、フライアッシュ(FA)による DEF 膨張抑制効果³⁾について報告を行っているが、長期的な膨張挙動については、不明確であった。長期的な膨張性状は、DEF 膨張のリスクや DEF 膨張の制御に関して、より現実的に即した評価を可能とするものであり、本稿では、DEF に関するモルタルの膨張試験の約 4 年間の長期データより、DEF 膨張のリスクおよび DEF 膨張の制御手法について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。なお、白色ポルトランドセメントは、実際に DEF 膨張を生じた 2 次製品に使用されていたことから試験に用いることとした。また、細骨材は絶乾状態で使用した。

表-2 にモルタルの配合条件を示す。モルタルの配合は、水結合材比(W/B)を 40, 50, 60%の 3 水準とし、砂結合材比(S/B)を 1.5 で一定とした。また、BFS および FA の置換率は、それぞれ 40, 50, 60%および 10, 20, 30%とし、セメントに対して質量置換とした。さらに、DEF 膨張の促進のため、硫酸塩として硫酸カリウムを使用し、SO₃ 添加量として表-2 に示す水準となるよう添加した。

2.2 供試体作製および養生方法

供試体は、40×40×160mm の角柱供試体とした。JIS R 5201 のモルタル作製方法に従い練混ぜを行った後、温度 20℃、相対湿度 100%で前養生を 4 時間行った。その後、蒸気養生を 10 時間行った。蒸気養生の温度は、W/C=50%の混和材無混和の供試体のみ 70, 80, 90℃とし、その他はすべて 90℃とした。蒸気養生後は徐々に冷却し、打設後 24 時間で脱型した。脱型後は温度 20℃での水中養生とした。

2.3 測定項目および方法

所定の材齢において、コンタクトゲージ法により長さ変化および質量を測定した。なお、長さ変化の基長は脱型時の長さとした。

3. 実験結果および考察

図-1 に SO₃ 添加量 3%における異なる W/C のモルタルの膨張挙動を示す。膨張率は、W/C=40%のモルタルが最も大きく、W/C=60%のモルタルが最も小さい。膨張率は、試験期間が経過するにつれて増加し、約 1000 日以後はほぼ一定となる。膨張率は、W/C=40%のモルタルが約 2.5%、W/C=50%のモルタルが約 2.0%、W/C=60%のモルタルが約 1.5%となる。

表-1 使用材料

使用材料	物性
白色ポルトランドセメント	密度: 3.05g/cm ³ 比表面積: 3660cm ² /g SO ₃ : 2.52%
セメント強さ試験用標準砂	絶乾密度: 2.64g/cm ³ 吸水率: 0.42%
高炉スラグ微粉末4000(BFS)	密度: 2.90g/cm ³ 比表面積: 4180cm ² /g
フライアッシュ II 種(FA)	密度: 2.30g/cm ³ ブレン比表面積: 3910cm ² /g ガラス化率: 73%

表-2 モルタルの配合条件

W/B(%)	S/B	SO ₃ 添加量(%)	置換率(%)	
			BFS	FA
40, 50, 60	1.5	0, 2, 3, 4	—	—
			—	—
			—	—
		2, 3	40	—
			50	—
			60	—
			—	10
			—	20
			—	30
			—	—

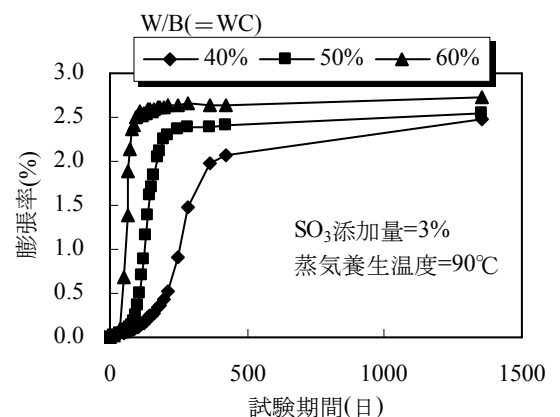


図-1 モルタルの膨張挙動 (SO₃=3%)

膨張挙動を示す。図より、W/C が高いほど膨張開始が早い傾向にあり、既往の知見⁴⁾と一致する結果であった。一方、材齢3年10ヶ月(1400日)での膨張率を比較すると、ほぼ同程度の膨張率であるが、W/C=40%に関しては、現時点においても膨張は収束しておらず、今後も膨張率が大きくなると考えられ、非常に長期にわたって膨張が継続することが分かる。

図-2に W/C=60%における SO₃ 添加量の異なるモルタルの膨張挙動を示す。図より SO₃ 添加量が多いほど膨張量が多い傾向にあり、これは既往の知見⁴⁾と同様の傾向である。ここで着目すべきは、SO₃ 添加量が0%(無添加)においても、膨張を生じている点であり、さらに、その膨張率も1.5%と非常に大きい値となっている。なお、現時点においては、SO₃ 無添加で膨張を示したのは、W/C=60%のみであったが、W/Cが高いほど早期に膨張を開始することを考慮すると、低W/Cの供試体も今後膨張を示す可能性が考えられる。

DEF膨張を生じる条件のひとつに高温養生を行うことが挙げられる。図-3は各蒸気養生温度における SO₃ 添加量と材齢3.5年の膨張率の関係を示している。図より SO₃ 添加量が4%の場合には、いずれの養生温度においても同程度の膨張率を示していることが分かる。しかし、SO₃ 添加量が小さくなれば、蒸気養生温度を70℃とすることで、大幅に膨張が低下している。現在、蒸気養生温度は65℃以下が推奨されているが、DEF膨張の抑制の観点からも、この温度上限値を遵守することが望まれる。

図-4に W/B=50%, SO₃ 添加量=2%, 蒸気養生温度=90℃の場合の BFS, FA 混和モルタルの膨張挙動を示す。なお、凡例の形は、混和材種類を、色は置換率を示している。図より、FAの10%の置換では、膨張開始は遅延しているが、2%程度の大きな膨張を示しており、抑制効果は認められない。よって、BFSで40%以上、FAで20%以上の置換率とすることで、DEF膨張を抑制可能であった。なお、この傾向は、異なるW/CおよびSO₃添加量3%の場合でも同様であった。また、筆者らの既報³⁾では、材齢約1年のデータより、BFSで40%、FAで20%以上の置換率でDEF膨張を抑制可能であることを示したが、長期的なデータからも、同様の置換率によって抑制が可能であることが示された。

4. まとめ

- (1) 長期的な膨張計測より、90℃の蒸気養生を行ったモルタルにおいて、SO₃ 無添加の条件で DEF 膨張が確認された。
- (2) 蒸気養生温度の制御は、DEF 膨張を制御する上で、非常に重要であることが示された。
- (3) 混和材の使用は、DEF 膨張の抑制に有効であることが長期計測結果より確認された。

【参考文献】

- 1) 松下博通ほか: 御影石を模擬したコンクリート二次製品の異常膨張現象, コンクリート工学, Vol.43, No.12, pp.32-38, 2005, 2) 池田隆徳ほか: モルタルの DEF 膨張に及ぼすセメント及び骨材種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.987-992, 2007, 3) 池田隆徳ほか: 混和材による高温養生を行ったモルタルの DEF 膨張の抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.135-140, 2008, 4) C.D. Lawrence: Mortar Expansions Due to Delayed Ettringite Formation -Effect of Curing Period and Temperature, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.903-914, 1994

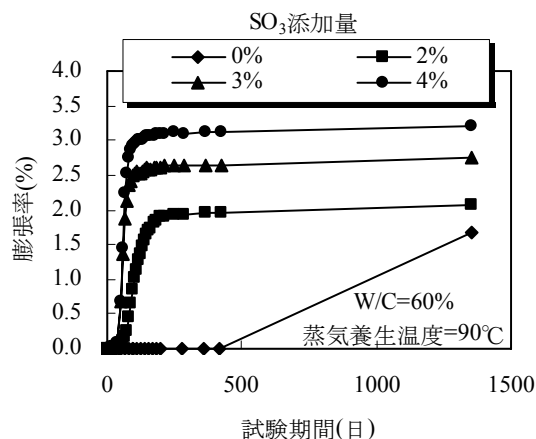


図-2 モルタルの膨張挙動(W/C=60%)

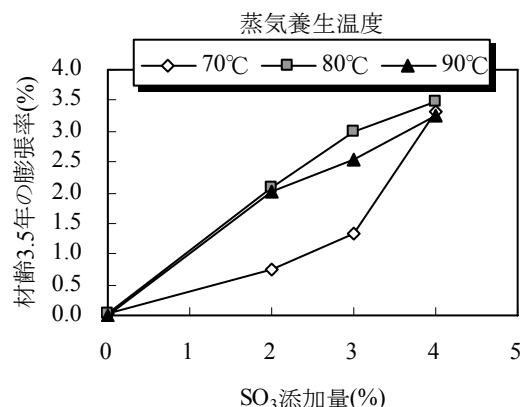


図-3 SO₃ 添加量と膨張率の関係

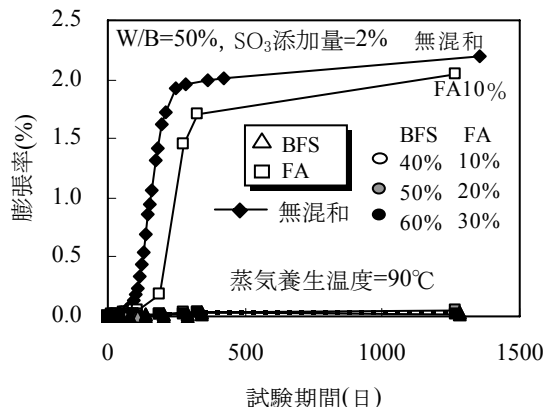


図-4 BFS および FA の DEF 膨張抑制効果