

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの DEF 膨張抑制効果に関する研究

九州大学大学院

学生会員

○池田 隆徳

学生会員 川端 雄一郎

正会員

濱田 秀則

フェロー 松下 博通

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) と称される劣化現象である。本研究は、DEF による膨張に対する水セメント比(W/C)および SO₃ 量の影響を明確にし、高炉スラグ微粉末(BFS)、フライアッシュ(FA)の抑制効果について検討を行った。

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、硫酸塩として硫酸カリウムを使用し、添加 SO₃ 量を 0, 2, 3, 4% とした。また、BFS および FA はセメントに対し質量で内割置換とした。

2. 2 供試体作製および養生方法

JIS R 5201 のモルタル作製方法で練混ぜを行った後、温度 20℃ で前養生を 4 時間行い、その後温度 90℃ での蒸気養生を 10 時間行った。蒸気養生後は徐々に冷却し、打設後 24 時間で脱型した。また、脱型後は温度 20℃ での水中養生とした。なお、供試体は「(セメントの種類)-(W/C)」の形で表記する。

2. 3 測定項目

(1) 長さ変化

脱型後の長さを基長とし、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。

(2) 超音波伝播速度

材齢 91 日において超音波伝播速度の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3. 1 水セメント比が膨張挙動に及ぼす影響

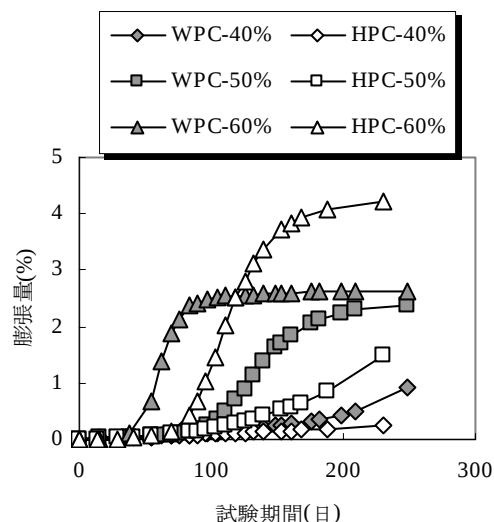
図-1 に SO₃ 添加量 3% における膨張量の経時変化を示す。水セメント比(W/C)での比較をすると、WPC, HPC の両者において W/C が大きいほど早期に膨張を開始する傾向が見られる。これは、W/C が大きいほど組織がポーラスになり、細孔溶液の移動によるアルカリの溶出が容易となり、エトリンガイトが生成しやすいためと考えられる。Lawrence の報告²⁾によると、W/C が大きいほど膨張開始が早く、最終膨張量は小さくなるとされる。現時点では、膨張は継続しており最終膨張量は明確ではないが、W/C の増加に伴い膨張が早期に開始する傾向は Lawrence の結果と一致している。

表-1 使用材料

使用材料		物性
セメント	白色ポルトランドセメント(WPC)	密度: 3.05g/cm ³ 比表面積: 3660cm ² /g
	早強ポルトランドセメント(HPC)	密度: 3.14g/cm ³ 比表面積: 4520cm ² /g
細骨材	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(BFS)	密度: 2.90g/cm ³ 比表面積: 4180cm ² /g
フライアッシュ(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

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

図-1 膨張量の経時変化 (SO₃: 3%)

キーワード DEF, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, エトリンガイト

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 tel&fax092-802-3387

さらに、セメントの種類で比較すると、HPCはWPCに比べ、膨張開始は遅く、膨張量は大きくなる傾向にあり、HPC-60%については現時点で膨張量は4%に達しており非常に大きな値であるといえる。また、図-2にWPC-60%における膨張量の経時変化を示す。SO₃添加量0%では全く膨張は見られず、SO₃添加量が多いほど膨張量が大きいことが分かる。この結果より、一般的に、W/Cが小さいほど単位体積当たりのセメント量が多く、従ってSO₃量が多いことを考慮すると、W/Cが小さいほど膨張量が大きくなることが推察される。また、膨張開始材齢はSO₃添加量による違いは見られないが、SO₃添加量が多いほど膨張速度が大きいことが分かる。

3. 2 超音波伝播速度

図-3に材齢91日における膨張量と超音波伝播速度の関係を示す。膨張量と超音波伝播速度には相関が見られ、膨張量の増加に従い、超音波伝播速度が低下していることが分かる。このことより、膨張量の増加によりマイクロクラックが発生していると考えられる。また、WPCとHPCを比較すると同じ膨張量に対し、HPCの方が超音波伝播速度の低下が大きいことが分かる。

3. 3 BFSおよびFAのDEF膨張抑制効果

図-4にBFSを内割混入した場合の膨張量の経時変化を示す。BFSの40%以上の置換により全く膨張挙動を示さず、膨張の抑制効果があることが分かる。膨張を抑制できる理由の一つとしては、セメントに対し置換することによりSO₃量を減少させるためと考えられる。図-5にFAを内割混入した場合の膨張量の経時変化を示す。10%置換ではモルタルは膨張しており、現時点では膨張量は0.55%に達している。さらに、供試体にはひび割れの発生も見られた。そのためFAによるDEF膨張の十分な抑制には20%以上の置換が必要である。ただし、10%置換であっても膨張開始を遅らせる効果は見られる。

4. 結論

本研究は、水セメント比およびSO₃量がDEF膨張に及ぼす影響を明確にし、BFSおよびFAのDEF膨張抑制効果について検討を行った。以下にその概要を示す。

- (1) W/Cの増加に伴い、早期に膨張を開始する。また、HPCの方がWPCに比べ膨張開始が遅く、最終膨張量は大きくなる。
- (2) SO₃量の増加に伴い、膨張量は増加する。
- (3) 膨張量の増加に伴い超音波伝播速度の低下が見られ、膨張量の増加に伴いマイクロクラックが発生していると考えられる。
- (4) セメントに対し、BFSで40%以上、FAで20%以上の質量置換によりDEF膨張に対し、十分な抑制効果が認められる。

- 1) 松下博通, 川端雄一郎: 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, 2005, p.32-38
- 2) Lawrence, C.D: Mortar expansion due to delayed ettringite formation, effect of curing period and temperature, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, 1995, p.903-914

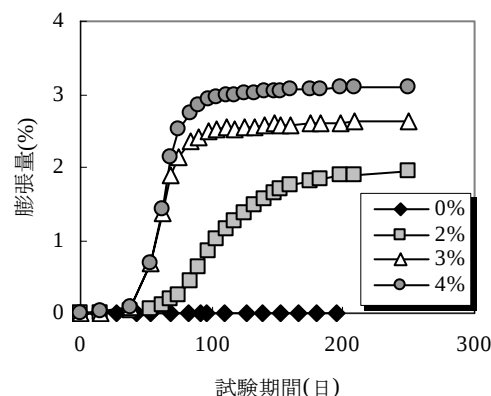


図-2 膨張量の経時変化 (WPC-60%)

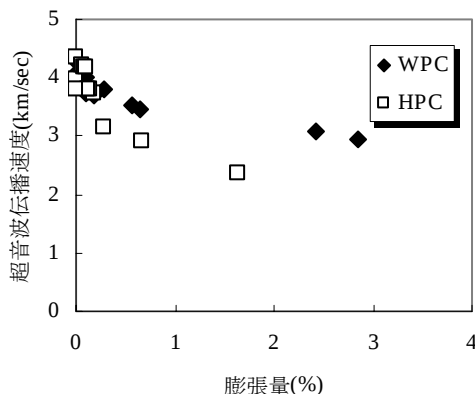


図-3 膨張量と超音波伝播速度の関係

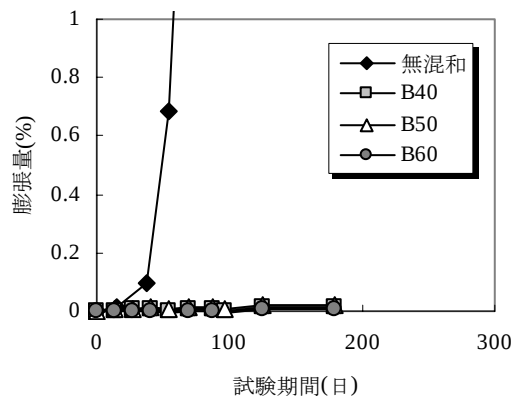


図-4 膨張量の経時変化 (BFS)

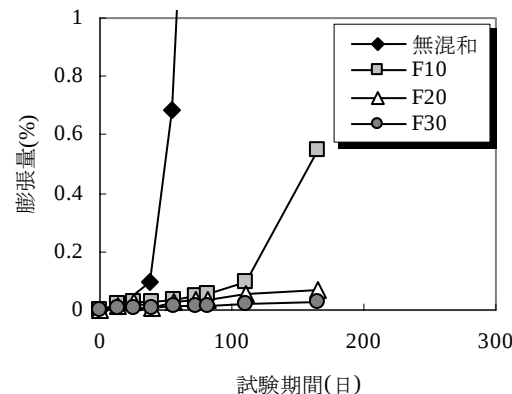


図-5 膨張量の経時変化 (FA)