

コンクリートの蒸気養生条件と DEF 膨張

岩手大学大学院 学生会員 ○福田 峻也
 岩手大学 正会員 羽原 俊祐
 岩手大学 正会員 小山田 哲也
 岩手大学 正会員 藤原 忠司

1 はじめに

エトリンガイトの遅延生成 (Delayed Ettringite Formation) とは、コンクリートに起こる新しい劣化事例でコンクリートが硬化後に数ヶ月から数年で膨張破壊する現象である。DEF による劣化の被害例は欧米で 90 年以降に報告されており¹⁾、硫酸塩量が多く、且つ蒸気養生したコンクリートで起こりやすいとされている。最近の研究では、添加する硫酸塩の量は添加するほど膨張が大きくなること、蒸気養生後の保管条件については 20℃ の水中でないと膨張しないことを明らかにしている²⁾。DEF は蒸気養生を行うコンクリート製品に起こりやすい現象であり、ここでは特に、蒸気養生条件として最高温度と前養生時間が DEF による硫酸塩膨張に及ぼす影響について検討した。

2 実験方法

早強セメント及び 2.5mm 以下のケイ石砕砂を用い、水セメント比 0.5、砂セメント比 1.5 で 4×4×16cm のモルタル供試体を各々 3 本作製し、長さ変化をダイヤルゲージ及びノギスにより測定した。実験で調べた水準は表 1 に示すように、蒸気養生の最高温度、前養生時間について検討した。添加する硫酸塩として、硫酸カリウムまたは無水石こうを用い、SO₃ としてセメント中の SO₃ 量 (2.8%) にさらに 2% 加算して混合添加した。蒸気養生の条件としては最高温度で 12 時間加熱後、徐々に常温まで冷却し、8 時間後に取り出し、その後 20℃ 水中で保管した。

表 1 実験水準

蒸気養生温度	90, 80, 70, 60, 55, 50, 20℃
前養生時間	1, 4, 8, 16, 24 時間, 2 日, 1 週間
硫酸塩の種類	硫酸カリウム、無水石こう

下線部は標準水準

3 実験結果及び考察

3.1 DEF の膨張条件

添加する硫酸塩の種類として硫酸カリウム、無水石こう、90℃ 蒸気養生と蒸気養生を行わない 20℃ 標準養生を行った供試体の 1 日以降の長さ変化を図 1 に示す。硫酸カリウムを添加し 90℃ 蒸気養生を行った場合、材齢 20 日ころから、無水石こうを添加した場合では材齢 130 日ころから膨張し始め、どちらも 2% と大きな膨張量を示した。しかし、無添加で 90℃ の蒸気養生を行った場合や硫酸カリウムを添加した場合でも、20℃ の標準養生では未だ膨張はみられない。このことから、90℃ という高い温度での蒸気養生を行う、かつ余剰の硫酸塩を添加した高い場合に DEF による膨張が発生することがわかる。特に、無水石こうより硫酸カリウムを添加したほうが、早く膨張することからアルカリの存在が DEF を促進する。

また、蒸気養生後の保管条件が 20℃ の水中でないと膨張しないこと、硫酸塩の添加量が増えるにつれて膨張量が大きくなる (図 2, 3)。保管条件の理由としては、エト

リンガイトが高い温度より 20℃ の常温のほうが生成しやすいこと、またエトリンガイトの生成は溶解析出反応なので液相を介しないと反応が進まないことなどがあげられる。また、添加量の影響では硫酸カリウムを 0.5% と少量添加した場合でも材齢 300 日で 0.9% の膨張に達し、硫酸アルカリの影響は大きいことが理解できる。

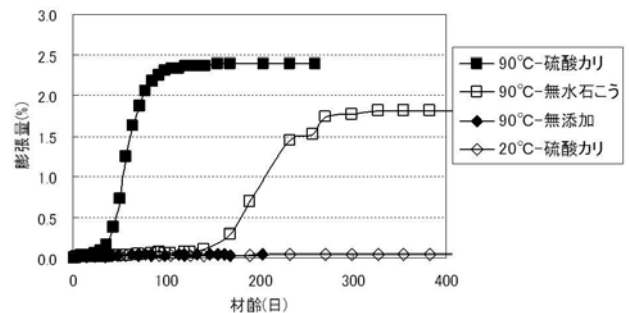


図 1 硫酸塩の種類と蒸気養生の影響
(前養生 4 時間、添加量 2%、20℃ 水中保管)

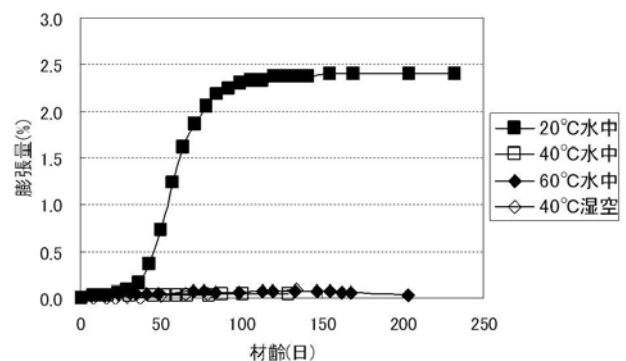


図 2 保管条件の影響
(硫酸カリ+2% 添加、90℃ 蒸気養生、前養生 4 時間)

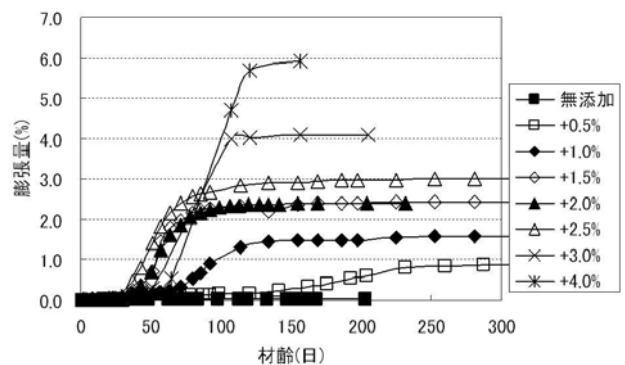


図 3 添加量の影響
(硫酸カリウム、90℃ 蒸気養生、前養生 4 時間)

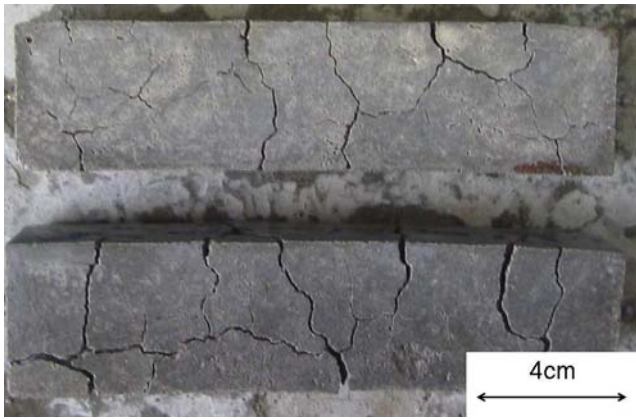


写真1 DEF劣化した供試体

3.2 蒸気養生条件(養生温度、前養生時間)の影響

蒸気養生における最高温度と練混開始から蒸気養生を行うまでの前養生時間について検討した。SO₃として2%の硫酸カリウムを添加して表1の水準の温度で蒸気養生した供試体の1日以降の長さ変化を図4に示す。養生温度が90℃で20日、80℃で50日、70℃で100日から膨張し始め、養生温度が高いほど早期に膨張を開始し、最終膨張量は2.0%以上という大きな膨張を示した。しかし、60℃で蒸気養生した場合には材齢190日で膨張量は0.04%であり未だ顕著な膨張は認められない。このように、60℃以下の蒸気養生では蒸気養生を行わない20℃標準養生と同じく膨張しないことがわかる。70℃以上の蒸気養生では温度上昇に伴ってエトリンガイトの分解が促進され、後に20℃の水中でエトリンガイトが再生成するものと考えられる。

硫酸カリウムをSO₃として2%添加し、前養生時間を表1の時間とした場合の長さ変化を図5に示す。前養生

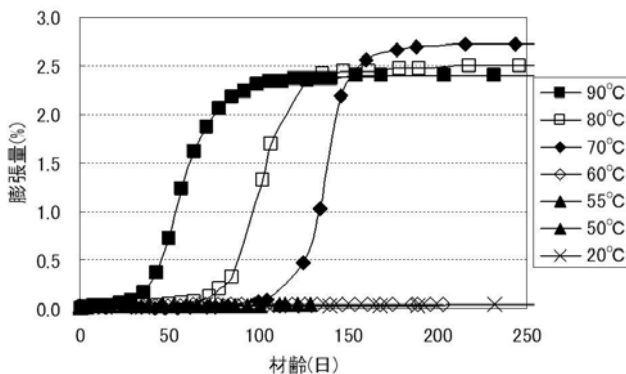


図4 蒸気養生温度の影響

(硫酸カリ+2%添加、前養生4時間、20℃水中保管)

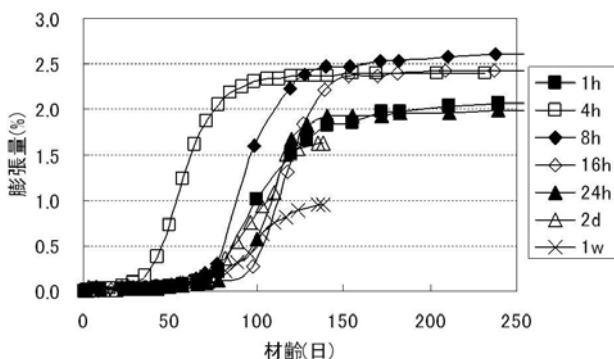


図5 前養生時間の影響

(硫酸カリ+2%添加、90℃蒸気養生、20℃水中保管)

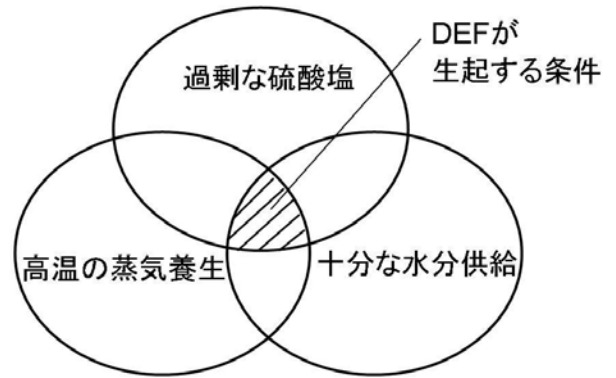


図6 DEFの生起条件

4時間では材齢20日ともっとも早く膨張し始める。その後、1, 8時間が続き、あとは材齢が長くなるにつれて膨張開始材齢が遅くなり、最終膨張量は前養生が24時間までであれば約2.0%まで膨張する。前養生時間が2日、1週間の場合でも材齢140日でそれぞれ1.6, 0.9%の膨張を示した。前養生が1週間でも高温の蒸気養生を実施すれば膨張が生じることは、材齢長期のコンクリートにおいても火災や地熱の影響などにより供用後のコンクリートが過熱された場合には、その後DEFを生起させる可能性があることを示している。

3.3 DEFの生起条件の検討

前述のデータをもとにDEFの生起条件について考察した(図6)。過剰な硫酸塩、高温の蒸気養生、十分な水分供給、これらの3つの条件が重なった場合にのみDEFによる膨張が発生する。しかし、いずれかの条件が1つでも外れるとDEFによる膨張は発生しない。したがって、DEFの抑制のためには、いずれかの条件1つを除外することにより、DEFの発生リスクを低減することができる。

4. まとめ

蒸気養生の最高温度、前養生時間の長さの影響の検討、及びDEFの生起条件についてまとめを行った。

- (1) 蒸気養生条件として蒸気養生温度は70℃以上で膨張し、最終の膨張量は2.0%以上に達する。また、60℃以下で蒸気養生した場合はDEFによる膨張は発生しない。
- (2) 前養生時間は4時間をもっとも早く膨張し始め、それを挟む1, 8時間が続き、あとは材齢が長くなるにつれて膨張開始材齢が遅くなる。前養生時間が1週間でも高温の蒸気養生を実施すればDEFによる膨張が発生する。
- (3) DEFの生起条件は過剰な硫酸塩、高温の蒸気養生、十分な水分供給、これらの3つの条件が重なった場合にのみDEFによる膨張が発生するが、1つでも外れるとDEFは発生しない。

参考文献

- 1) H.F.W.Taylor, C.Famy and K.L.Scrivener: Delayed Ettringite Formation, CEMENT and CONCRETE RESEACH, Vo31, pp.683-693, 2001
- 2) 羽原俊祐ほか: コンクリートのDEFによる硫酸塩膨張の生起条件の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28, pp.743-748, 2006