

DEF 膨張に伴うセメント硬化体の圧縮強度および空隙構造の変化

山梨大学 正会員 ○佐藤 賢之介
 山梨大学 非会員 内田 壮太
 山梨大学 正会員 齊藤 成彦

1. はじめに

DEF (Delayed ettringite formation)は、高温履歴を受けたセメント硬化体内部で“エトリンガイトが遅延生成する現象”を指し、数%オーダーの著しい膨張を生じさせて損傷をもたらす。近年、工場製品やマスコンクリートにおけるDEFが海外を中心に報告され¹⁾、DEFに関する研究が活発に行われている。特にDEFの発生条件や抑制方法に関しては検討事例が比較的多く、使用材料や温度管理等を適切にすることによりDEFを抑制できることが明らかにされてきている。

一方で、DEF膨張が発生した場合、セメント硬化体の内部損傷を誘引し、各種性能や物性が刻々と変化すると考えられる。しかし、この観点からのDEFに関する研究は乏しく、不明な点が多い。今後、DEF膨張が発生した場合の性能予測手法の構築へと発展させるためには、DEFの進行に伴う硬化体の力学特性や空隙構造等の経時変化を適切に評価する必要があると考える。

そこで、本研究ではDEF膨張を生じさせたセメントペースト硬化体について、圧縮強度試験と空隙径分布の測定を行い、DEFの進行に伴う圧縮強度および空隙構造の変化の観点から検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 試料作製

国内において市販されている早強ポルトランドセメントを使用して、セメントペースト供試体を作製した。セメントに対し、SO₃添加率として4%となるように硫酸カリウム(K₂SO₄)を添加して、水セメント比(W/C)を40, 50, 60%とした配合で練混ぜを行い、直径50mm×高さ100mmの円柱供試体を作製した。

打込み後は20°C環境で4時間の前養生を行い、昇温速度約20°C/hで加熱した。最高温度90°Cにて12時間保持した後、自然冷却を行い材齢1日で脱型し、後養生は20°C水中養生とした。なお、養生水は後養生開始

から84日まで2週間毎、その後は1カ月毎に交換した。

2. 2 膨張量および圧縮強度の測定

脱型時の長さを基長とし、ノギスを用いて後養生開始から84日まで2週間毎に直径および高さの長さ変化を測定した。また後養生395日においても測定を実施した。圧縮強度試験は、後養生開始後0, 28, 56, 84, 395日において行った。

2. 3 分析項目

後養生開始後0, 28, 56, 84, 395日の試料について、ダイヤモンドカッターを用いて円柱供試体の高さ方向における中央部を厚さ1cmに切り出し、粗砕後アセトン浸漬を行い分析に使用した。

試料中のエトリンガイトの生成状況を確認するため、XRD測定を実施した。試料は、アセトンを減圧乾燥した後、90μmふるいを通るように粉碎し、20°C RH11%の真空デシケータで恒量まで乾燥したものを使用した。

また空隙構造の変化を把握することを目的として、5mm角程度に粗砕し、20°Cの真空デシケータ内でシリカゲルを用いて恒量となるまで乾燥した試料について、水銀圧入式ポロシメータにより空隙径分布を取得した。

3. 実験結果および考察

3. 1 DEF膨張挙動

図1に、W/Cの異なるセメント硬化体の膨張率の経時変化を示す。図中の凡例は「セメント種類 W/C—直径(D)または高さ(H)の膨張率」として表記した。W/C=40%の場合では、後養生395日時点でも顕著な膨張は発生しなかった。一方で、W/C=50%および60%では、直径および高さのいずれの方向についても著しい膨張が発生し、最終的な膨張率はそれぞれ1.8%と3%程度となった。以上のように、W/Cの増大とともに早期に膨張が発生して顕在化する傾向が示された。なお、直径と高さの膨張率は概ね同程度で、既往の研究²⁾と同様の等方的なDEF膨張挙動となった。

キーワード DEF, 膨張, 圧縮強度, 空隙構造, XRD, 水銀圧入法

連絡先 〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11 山梨大学工学部土木環境工学科 TEL 055-220-8530

図2に、各試料のXRDパターンの経時変化を示す。高W/Cの試料ほど、 $2\theta=9^\circ$ 付近のエトリンサイトピークが早期に形成され、材齢進行によりその回折強度も増大した。以上ことから、本研究において作製したセメントペースト供試体においてはDEF膨張が発生したものと判断した。

3. 2 DEF膨張に伴う圧縮強度の変化

図3に、各W/Cの試料における圧縮強度の経時変化を示す。顕著なDEF膨張が認められなかったW/C=40%試料では、後養生初期から395日にかけて圧縮強度が増大する傾向となった。W/C=50%の場合も後養生84日までは強度が増加したが、395日では低下しており、W/C=60%においても56日以降から圧縮強度が大幅に低下する結果となった。この圧縮強度の低下が生じた時期は、膨張率の著しい増大が発生した時期と概ね一致していた。このことから、顕著なDEF膨張によってセメント硬化体に内部損傷が発生して圧縮強度の低下に至ったものと考えられた。

3. 3 DEF膨張に伴う空隙構造の変化

図4に、DEF膨張が最も顕著に生じたW/C=60%試料の空隙径分布の経時変化を示す。後養生前の試料(図中0d)では、空隙径分布の $0.1\mu\text{m}$ 付近に顕著なピークが認められ、後養生28日後においては $0.08\mu\text{m}$ 付近にピークがシフトし、空隙構造が緻密化したことが確認された。これは、後養生によりセメント水和が進行したことに加え、エトリンサイトの遅延生成が空隙を充填するように生じたためであると考えられた。後養生56日以降においても、ピークがさらに小径側にシフトするとともに、ピーク高さも低下したことが確認された。一方で、直径約 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲においては、後養生の進行に伴い空隙量が増加しており、特に後養生84日試料においては約 $0.4\mu\text{m}$ に明瞭なピークが認められ、比較的粗大な空隙が増加した。図1に示したように、後養生56日以降においてはDEF膨張も顕在化していたことから、DEF膨張が顕在化した際には、DEFによる内部損傷が進行し、空隙の粗大化が生じるものと考えられた。これにより、圧縮強度の低下を招くものと推察された。

4. まとめ

本研究では、DEF膨張がセメント硬化体の圧縮強度および空隙構造の変化に及ぼす影響について検討を行った。その結果、DEF膨張が顕在化した場合においては圧縮強度の低下が生じることが確認された。また、著しいDEF膨張が生じた硬化体では、空隙の粗大化が発生した。以上のことから、DEF膨張の進行により粗大な空隙が形成され、それに伴い圧縮強度が低下したものと推察された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会編：「DEFのリスクを考える」に関するシンポジウム エトリンサイトの遅延生成に(DEF)に関する研究委員会報告書、日本コンクリート工学会(2019)
- 2) H. Bouzabata et al. : Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp. 1024-1031 (2012)

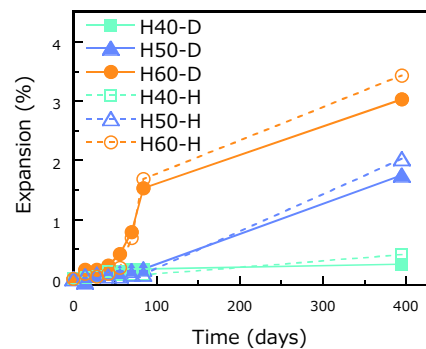


図1 膨張率の経時変化

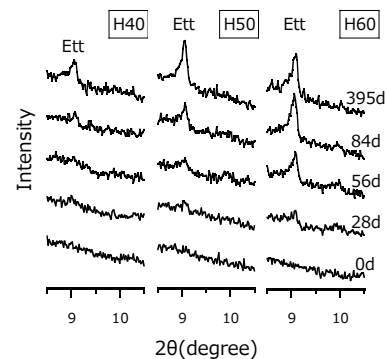


図2 XRDパターンの経時変化

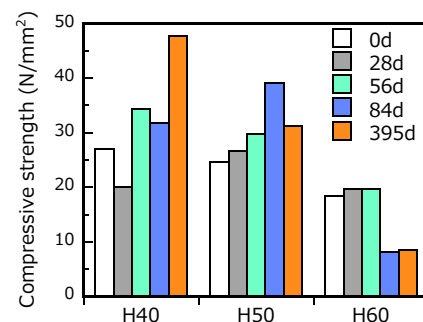


図3 圧縮強度の経時変化

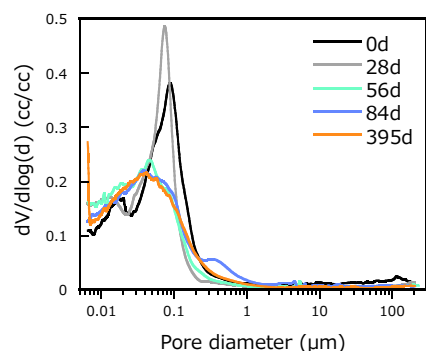


図4 空隙径分布の経時変化 (H60)