

## 論文 モルタル及びコンクリートにおける DEF 膨張について

福田 峻也<sup>\*1</sup>・羽原 俊祐<sup>\*2</sup>・松尾 久幸<sup>\*3</sup>・薄葉 信一<sup>\*4</sup>

要旨：同一のセメント，同一水セメント比，同一養生条件のモルタルとコンクリートを作成し，DEFの発生における両者の対応について検討した。硫酸カリウムを添加し，90 の蒸気養生を実施することによって，コンクリートにおいても，モルタルと同様に，DEFによる膨張が発生することを確認した。発生時期は遅くなり，膨張量はモルタルの場合より，小さくなる。水セメント比，無水石こうの膨張など，コンクリートでの相違はモルタルにおける相違よりも大きく，低水セメント比では膨張しにくく，無水石こうの膨張量も小さい。DEF膨張した供試体の膨張前後の強度を比較すると，圧縮強度は半減する。

キーワード：DEF，硫酸塩膨張，耐久性，エトリンガイト，蒸気養生

### 1. はじめに

硬化後のコンクリートに，エトリンガイトが集積して生成し，コンクリートが膨張破壊する現象は，エトリンガイトの遅延生成(Delayed Ettringite Formation)と呼ばれている。これによるコンクリート劣化の被害例は欧米で 90 年以降に報告され<sup>1, 2, 3)</sup>，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報告されている<sup>1, 2)</sup>。筆者らは，先の報告でモルタルの長期的な膨張量測定により，DEFは過剰な硫酸塩，高温の蒸気養生，供用時に十分な水分供給，これらの3つの条件が重なった場合のみ生起することを明らかにした<sup>4)</sup>(図-1)。実際の劣化事例はコンクリートで観察される。実際のコンクリートでは，どれぐらいの材齢で，しかも膨張の程度については，不明であった。本研究では，同一のセメント，同一水セメント比，同一養生条件のモルタルとコンクリートを作成し，DEFの発生における両者の挙動について検討した。

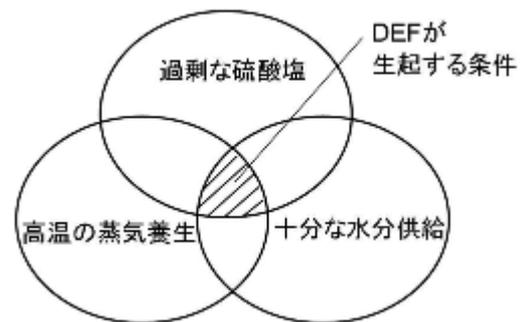


図-1 DEFの生起条件

### 2. 実験方法

#### 2.1 材料

セメントは普通(N)及び早強(H)の2種類の市販のポルトランドセメントを用いた。硫酸塩として，硫酸カリウム(K)及び無水石こう(C)を添加した。硫酸カリウム及び無水石こうをSO<sub>3</sub>として2%追加添加した。セメント中のSO<sub>3</sub>量は早強セメントでは2.8%，普通セメントでは2.0%である。細骨材及び粗骨材は共に茨城県岩瀬産硬質砂岩の砕砂・砕石である。混和剤として，高性能減水剤を使用した。

#### 2.2 モルタル及びコンクリート供試体の形成

水セメント比は，前報告<sup>5, 6)</sup>と同様の50%及び汎用コンクリート製品で通常である41%とした。目標スランブは50%のとき12±2cm，41%のとき18±2cm 目標空気量は2±1%である。コンクリートの配合及びフレッシュ性は表1に示すとおりである。硫酸カリウムを添加することによってスランブが著しく減少した。モルタルはコンクリートを粗骨材を取り除いた配合とし，JIS R5201に準じてホバートミキサーにより混練した。長さ計測用プラグをセットできる型枠を用い，モルタルは4×4×16cm，コンクリートは10×10×40cmにそれぞれ整形した。

蒸気養生(加熱養生)は，20 4時間の前養生の後，90 及び通常の蒸気養生温度である60 で蒸気養生を行い，12時間蒸気加熱養生後，徐々に冷却し，さらに8時間後に取り出した。長さ計測後，20 水中で保管し。それぞれ同一材料及び配合のモルタルとコンクリート

\*1 岩手大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 (正会員)

\*2 岩手大学 工学部建設環境工学科准教授 博(工) (正会員)

\*3 日本コンクリート工業(株) 技術開発担当部長 博(学) (正会員)

\*4 日本コンクリート工業(株) 技術開発第二部

表 - 1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

水準	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュ性状		
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材		混和剤	スランブ (cm)	空気量 (%)
					石こう	硫酸カリ			
H-K-50	170	326	774	1073		14.12	2.04	3.2	1.9
H-K-41	174	406	846	920		17.58	3.81	4.5	2.2
H-C-41	174	410	847	921	13.94		3.82	19.4	2.3
H-B-41	174	424	847	921			3.82	16.7	2.2
N-K-50	174	406	847	921		17.58	3.39	3.5	2.3

表 - 2 実験水準

硫酸塩	無添加, 硫酸カリウム, 石こう(無水, 半水, 2水)
蒸気養生温度	90, 60, (20)
セメント	普通, 早強
水セメント比	50, 41%

を整形し、最長 400 日以上まで長さ変化をダイヤルゲージ及びノギスにより測定し、3 本の平均値を測定値とした。表 - 2 に実験水準を示す。尚、図中の表記は便宜上（セメント）（添加量）（硫酸塩）（水セメント比）（養生温度）と表記する。

### 2.3 強度試験

D E F 膨張した供試体について、膨張後の強度を測定するために強度試験を実施した。膨張量測定用の供試体と同時に混練した 10×20cm の円柱供試体を製作し、コンクリート膨張後の強度を測定し、材齢 14 日及び 28 日の強度と比較した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 D E F の生起条件について

次節のモルタルとコンクリートの膨張の関係について参考にするため、先の報告<sup>4,5,6)</sup>に、新たな測定結果を加えて、D E F の生起条件を整理する。

#### (1) 硫酸塩の種類の影響

蒸気養生の有無(90, 20), 硫酸塩の種類(硫酸カリウム, 無水・半水・二水石こう)の影響について検討した結果を図 2 に示す。硫酸カリウムを添加し、蒸気養生を行ったものは材齢 30 日頃に膨張し始め、膨張量は材齢 100 日で 2.4% と大きな膨張を示した。無水石こうを添加し、蒸気養生を行ったものが、材齢 120 日まではほとんど膨張しないが、材齢 120 日以降、膨張し始め、膨張量は材齢 350 日で 1.8% に達する。石こうについては、半水及び二水石こうを添加した場合には、膨張を示さない。半水石こうは、注水後、速やかに溶出し、

その後、二水石こうとして析出する。半水石こうは実質二水石こうと同じとみなすことができる。二水及び半水石こうでは膨張を示さないが、無水石こうの場合には、硫酸カリウムと同様に膨張し、硫酸カリウムの膨張から 100 日以上も膨張開始時期が遅れる。硫酸アルカリ(カリウム)と無水石こうの場合には、硫酸塩を添加すると最終的には膨張する。膨張する一方、蒸気養生を行っても、硫酸塩を添加しないものや、硫酸カリウムを添加しても蒸気養生を行わないものでは膨張は認められず、D E F による膨張は発生しない。半水及び二水石こうの添加が多くても D E F は生起しない。半水は混練後、速やかに二水石こうとなることから、二水石こう共存時には D E F の発生メカニズムに関して、別の作用機構があると考えられる。

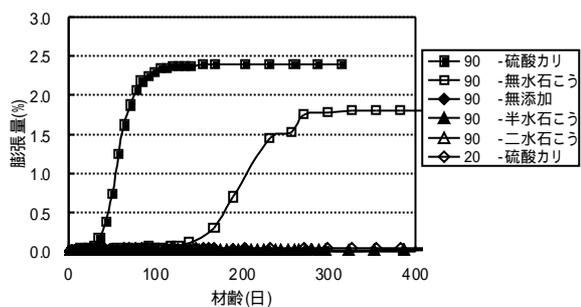


図 - 2 硫酸塩の影響

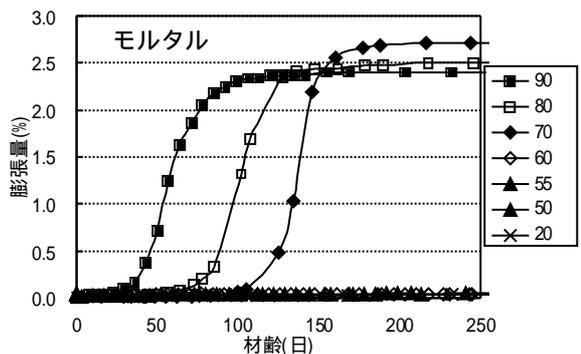


図 - 3 蒸気養生温度の影響

## (2) 蒸気養生温度の影響

早強セメントを用い、硫酸カリウムを  $SO_3$  として 2% 添加し、前養生時間を 4 時間とする条件は共通し、蒸気養生の最高温度を 50~90 範囲で変更し、モルタル供試体を作成した。モルタルの長さ変化を図 - 3 に示す。70 以上の温度で蒸気養生を行うと、材齢 30 日頃から 110 日頃までに、DEF による膨張が生起する。養生温度が高い程、早期に膨張が開始するが、最終的な膨張量は 2.5% でほぼ等しく、大きな膨張を示す。一方、60 以下の蒸気養生では蒸気養生を行わない常温養生と同じく、DEF による膨張はほとんどない。DEF が生起するか否かについての蒸気養生の境界温度条件は、60-70 の領域に閾値がある。

## (3) セメントの種類の影響

硫酸カリウムを  $SO_3$  として 2% 添加し、前養生時間を 4 時間、90 の蒸気養生とした水準について、普通、早強、中庸熱、白色ポルトランドセメント、B 種フライアッシュセメント及び B 種高炉セメントの計 6 種類のセメントを用いた。モルタルの長さ変化を図 - 4 に示す。早強ポルトランドセメントが膨張する材齢が最も早く、材齢 30 日頃から急激に膨張し、材齢 100 日で膨張量は 2.4% に達した。その後膨張はゆるやかになる。普通セメントも材齢 60 日頃から膨張を開始するが、早強セメントに比べ、膨張は緩やかであり、膨張量も材齢 270 日で 0.5% と小さくなる。白色（ホワイト）セメントの膨張量も早強セメントに次ぐ。中庸熱ポルトランドセメント、混合セメントでは硫酸カリウムが添加されていても、ほとんど膨張しない。粉末度が高く、 $C_3A$  の少ないセメントや混合セメントでは DEF による膨張が小さくなる。

## (4) 水セメント比の影響

もっとも DEF による膨張を示しやすい早強セメントを用いて、硫酸カリウムを  $SO_3$  として 2% 添加し、前養生時間を 4 時間、90 の蒸気養生とした水準について、水セメント比を 30~60% まで変更して、水セメント比の

影響について検討を行った。モルタルの長さ変化を図 - 5 に示す。水セメント比 60% が 30 日、水セメント比 50% が 50 日、水セメント比 40% がかなり遅れて 200 日頃から膨張し始める。膨張量はそれぞれ 60% が 2.5%、50% が 2.0%、40% が 0.6% になる。水セメント比が高くなるほど、膨張開始材齢が早くなり、膨張量も大きくなることが理解できる。水セメント比が低いほど、DEF 膨張が大きいとする報告（文献）があるが、DEF の生起条件の一つである十分な水分供給の点からみると、水セメント比が低くなるにつれ、透水速度が小さくなることから、膨張開始材齢の遅延、膨張速度、膨張量が低く抑えられる。水セメント比が 30% ではほとんど膨張しないことになる。

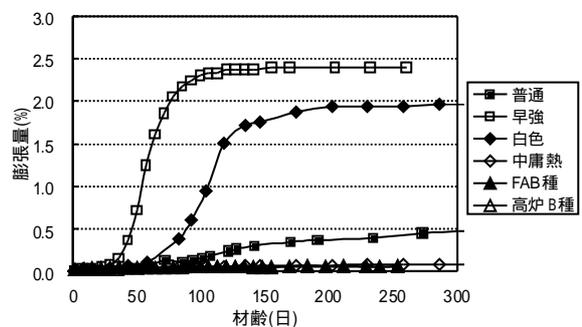


図 - 4 セメントの影響

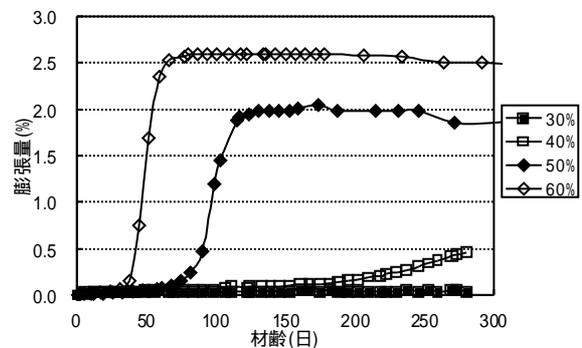


図 - 5 水セメント比の影響

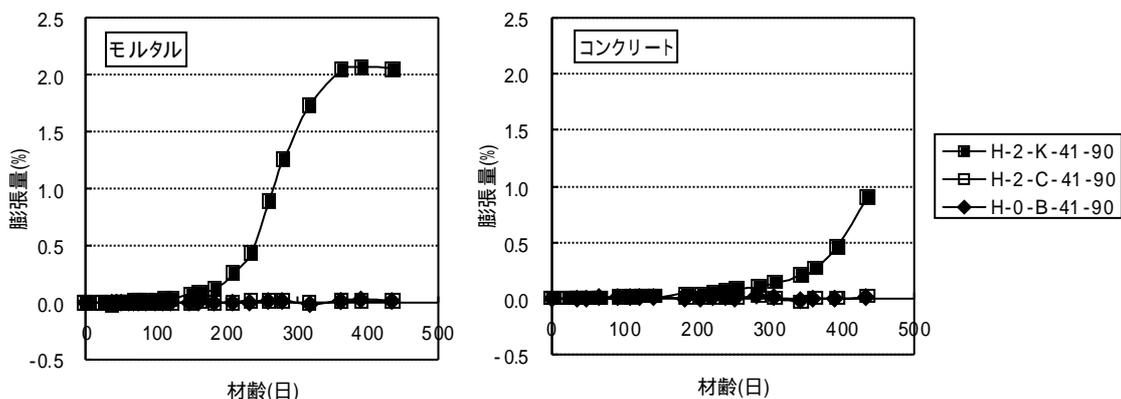


図 - 6 硫酸塩の種類の影響

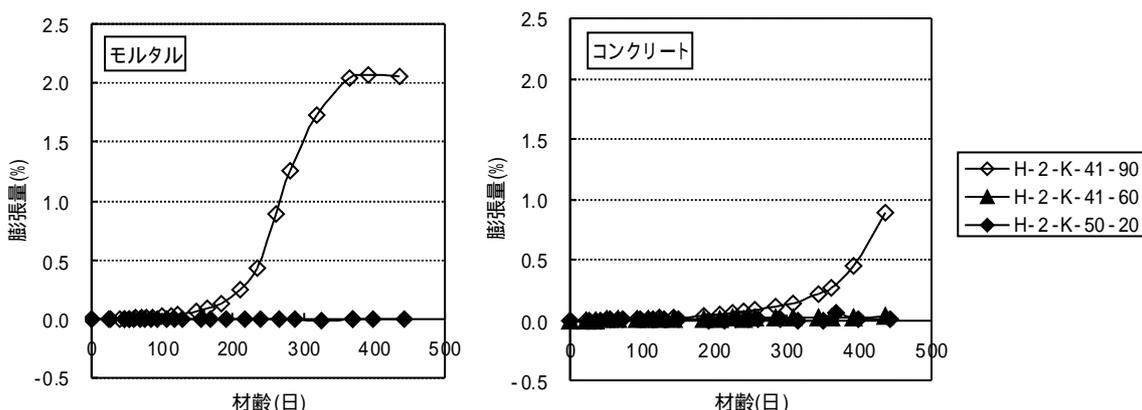


図 - 7 蒸気養生温度の影響

### 3.2 モルタル及びコンクリートのDEF膨張の関係

#### (1) 硫酸塩の影響

早強セメント - 2% 硫酸カリウム - 41% - 90 (早強セメントを用い、2%硫酸カリウムを添加し、水セメント比41%で前養生4時間、90で蒸気養生を実施した)の水準のモルタルとコンクリートの長さ変化を図-6に示す。無添加と無水石こう添加の結果も付記した。モルタル及びコンクリートで無添加、無水石こうを添加した水準ではほとんど膨張していない。硫酸カリウムを添加した水準では、モルタル及びコンクリート共に材齢150日頃から膨張し始める。その後、モルタルは材齢240日頃から急激に膨張し始め、材齢350日には膨張量は2.0%に達した。また、コンクリートも材齢400日頃までは緩やかな膨張を示していたが、その後、急激な膨張を示している。膨張量は材齢440日で0.9%を示し、現在もまだ膨張している。モルタルとコンクリートの膨張を比べると、膨張し始める材齢がほぼ同時期であるが、その後のモルタルは、急激に膨張する。材齢440日現在で両者の膨張量はモルタルが2.0%、コンクリートが0.9%であり、コンクリートのほうはまだ最終の膨張量に至っていないと思われる。コンクリートでは硬化体が大きくなる分、周りからの透水速度が遅くなり、エトリンガイトの再生成速度に影響を与えるため、膨張開始速度の遅延、膨張速度が小さくなることもあるが、膨張しはじめるとその速度は大きくなる。

また、水セメント比50%の硫酸カリウムを添加したモルタルより、100日程度遅れて無水石こうを添加したモルタルで膨張が発生した結果が得られた<sup>7)</sup>。しかし、水セメント比41%では膨張をしめさなかったことは、水セメント比の低下による透水性の減少の寄与が多いと考えられる。

#### (2) 蒸気養生温度の影響

早強セメント - 2% 硫酸カリウム - 41%の水準で、蒸気養生温度を、90、60及び20常養生とした場合には、図-7に示すように、モルタル及びコンクリートともに、膨張を示したのは90の蒸気養生のみである。90蒸気養生を実施した水準において、モルタル及びコンクリート共に材齢150日頃から膨張し始める。その後、この水準での材齢440日現在における膨張量はモルタルが2.0%、コンクリートが0.9%である。コンクリートの膨張は現在も継続しているが、ペースト量がコンクリートはモルタルの半分であり、膨張量も50%以下となった。コンクリートの写真を図-8に示す。この供試体では大きな亀裂が繰り返されるDEF特有の膨張ひび割れたが認められた。

#### (3) セメントの影響

2% 硫酸カリウム 41% 90の水準において、セメントを普通及び早強ポルトランドセメントとした場合の長さ変化を図-9に示す。早強セメントでは、モルタル及びコンクリート共に材齢150日頃から膨張し始める。

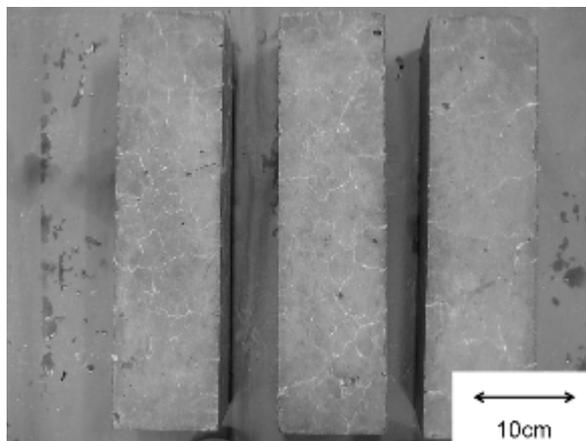


図 - 8 DEF膨張したコンクリートの写真

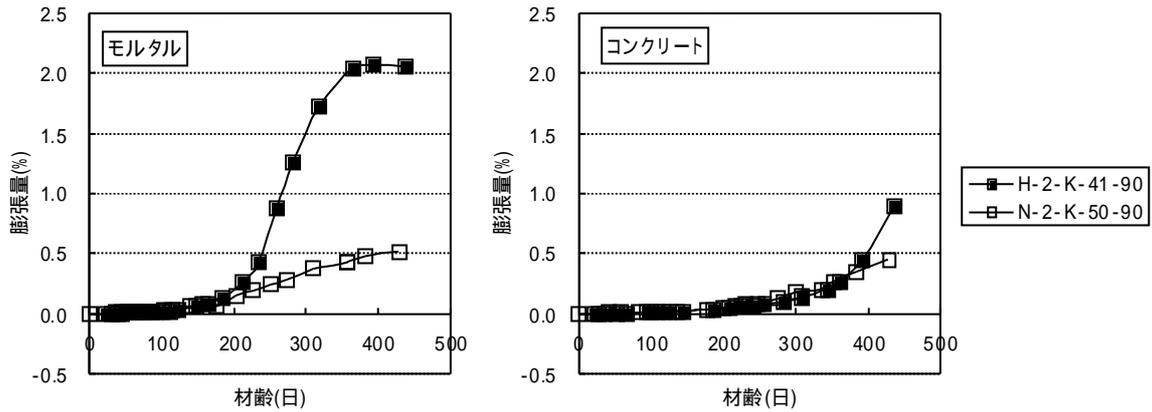


図 - 9 セメントの影響

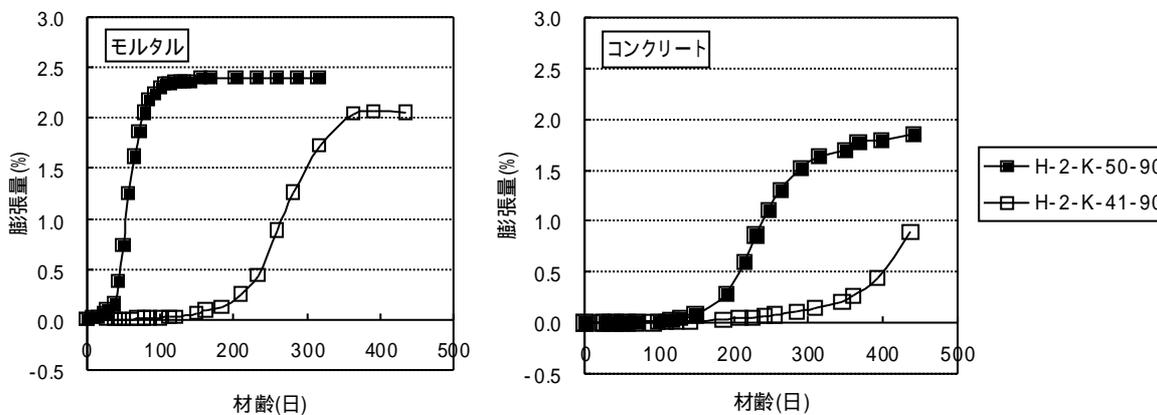


図 - 10 水セメント比の影響

その後、この水準での材齢 440 日現在における膨張量はモルタルが 2.0%、コンクリートが 0.9%である。一方、普通セメント用いた水準では、材齢 200 日頃からモルタル及びコンクリートともに膨張し始める。早強セメントと比べると膨張は緩やかではあるが、材齢 440 日でほぼ同じ 0.5%に至る。これは、筆者らの先の報告とほぼ一致する。しかし、モルタルとコンクリートの膨張量を比較すると早強セメントについてはモルタルのほうがコンクリートの膨張量より大きくなるのに対して、普通セメントの場合はモルタルとコンクリートの膨張量がほぼ同じになった。

#### (4) 水セメント比の影響

早強セメント - 2% 硫酸カリウム - 90 の水準において、水セメント比を 50%と 41%に変更して実験を行った。モルタル及びコンクリートの長さ変化を図 - 10 に示す。水セメント比 41%では、モルタル及びコンクリート共に材齢 150 日頃から膨張し始める。その後、この水準での材齢 440 日現在における膨張量はモルタルが 2.0%、コンクリートが 0.9%である。しかし、水セメント比 50%では、コンクリートでのみ材齢 150 日頃から膨

張し始める。その後、材齢 200 日頃になると急激な膨張を示し、膨張量は材齢 440 日現在で 1.8%と大きな膨張に達した。モルタルは材齢 30 日頃から開始し、膨張量は材齢 100 日で 2.4%と大きな膨張を示す。先の研究<sup>4)</sup>(図 - 5)によれば、水セメント比が高いほど膨張開始材齢が早くなり、膨張量も大きくなる。本研究でも同様の結果が得られた。

#### 3.3 DEF 膨張によるコンクリートの強度変化について 早強セメント - 2% 硫酸カリウム - 50% - 90 の水準

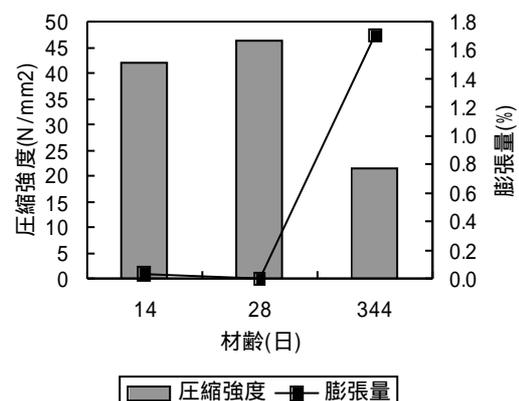


図 - 11 DEF 膨張した供試体の膨張量と圧縮強度

において、材齢 14, 28 日及び D E F 膨張後の材齢 344 日において、強度試験を実施した。強度試験の結果を図 - 11 に示す。材齢 14 日で 42.1 N/mm<sup>2</sup> を示し、材齢 28 日では 46.4 N/mm<sup>2</sup> と材齢 14 日より強度がさらに増した。しかし、D E F 膨張によるコンクリートの膨張量が 1.7% を超えた材齢 344 日時点での圧縮強度は 21.3 N/mm<sup>2</sup> と材齢 14, 28 日時点よりも、半分程度の強度しか示さなかった。D E F 膨張によるクラックの発生は、目視観察と同様に強度低下を招いた。

#### 4. 結論

本研究では、同一のセメント、同一水セメント比、同一養生条件のモルタルとコンクリートを作成し、D E F の発生における両者の対応について検討した。

- (1) 高温の蒸気養生、硫酸塩の量、供用中の十分な水分が D E F の再現には重要であるが、硫酸塩として、硫酸アルカリ(カリウム)、無水石こうでは D E F が再現するが、半水及び二水石こうの添加が多くても、D E F は生起しない。半水は混練後、速やかに二水石こうとなることから、二水石こう共存時には、D E F の発生メカニズムに関して、別の作用機構があると考えられる。
- (2) 硫酸カリウムを SO<sub>3</sub> として 2% 添加し、90 の蒸気養生を実施することによって、コンクリートにおいても、モルタルと同様に D E F による膨張が発生することを確認した。発生時期は遅くなり、膨張量はモルタルの場合より、小さくなる。
- (3) モルタルで認められる作用因子は、コンクリートでも同様に起こるが、水セメント比、無水石こうの膨張など、コンクリートでの相違はモルタル

における相違よりも大きく、低水セメント比では膨張しにくく、無水石こうの膨張量も小さい。

- (4) D E F 膨張した供試体の膨張前後の強度を比較すると、亀裂の発生から劣化が判定されると同様に強度は半減する。

#### 参考文献

- 1) 羽原俊祐：硫酸塩と D E F、セメント・コンクリート、No.671, pp.61-62, 2003
- 2) H.F.W.Taylor et al.: Delayed Ettringite Formation, CEMENT and CONCRETE RESEACH, Vol.31, pp.683-693, 2001
- 3) Y.Shimada: Dissertation of Chemical path of ettringite formation in heat-cured mortar and its relationship to expansion, Northwestern University, 2005
- 4) 羽原俊祐ほか：D E F によるコンクリートの硫酸塩膨張について 材料、蒸気養生及び保管条件の影響、セメント・コンクリート論文集、No. 60, pp.335-341, 2006
- 5) 羽原俊祐ほか：コンクリートの D E F 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大会、Vol.28, p.743-748, 2006
- 6) 羽原俊祐、福田峻也：コンクリートのエトリンガイ ト遅延生成 D E F 劣化によるコンクリート製品のひび割れ現象と対策、コンクリートテクノ、Vol.26, No.3, 2007.3
- 7) 福田峻也ほか：D E F 膨張に及ぼすセメント、骨材、硫酸塩の影響、セメント・コンクリート論文集、No.61, p.358-363, 2007