

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18156

研究課題名(和文) コンクリートの膨張材によるひび割れ低減技術の高度化

研究課題名(英文) Improvement of crack reduction technology by concrete expansion material

研究代表者

寺本 篤史 (TERAMOTO, Atsushi)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号：30735254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：膨張材は、エトリンガイト(Aft)や水酸化カルシウム(CH)といった膨張性水和物を生成することにより自己収縮低減に寄与するとされていたが、本研究により、超高強度領域の水セメント比においては、Aftは自己収縮低減にほとんど寄与せずCHの生成がより大きな効果を有していることが明らかになった。

また、膨張材を多量に使用した場合、セメントペーストが十分に硬化した後に未反応の膨張材が水和反応し、膨張圧による有害なひび割れを発生させる場合があること、これらの遅れ膨張は、水分が十分に供給されていない条件でも発生しうることが明らかになり、膨張材の使用量には上限を設ける必要性が再確認された。

研究成果の概要(英文)：Although it was said that the expansive material contributes to the reduction of autogenous shrinkage by producing expandable hydrate such as ettringite (Aft) and calcium hydroxide (CH), this study has revealed that Aft hardly contributes to reduction of autogenous shrinkage and CH production has a greater effect in ultra high strength cement paste. In addition, when a large amount of expansion material is used, unreacted expansion material undergoes a hydration reaction after cement paste is sufficiently cured, sometimes causing harmful cracks due to inflation pressure. These delayed expansion are caused by moisture. It was revealed that it could occur even under conditions that were not sufficiently supplied, and the necessity of setting an upper limit on the amount of expanding material used was reconfirmed.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート ひび割れ制御 膨張材 収縮低減剤 エトリンガイト 水酸化カルシウム

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物のひび割れは、それ自体が美観の低下をもたらすだけでなく、ひび割れ部から二酸化炭素や塩化物イオンの侵入を容易にさせ、鉄筋腐食による RC 部材の剛性低下など、更なる劣化の進行をもたらす。現状、コンクリート構造物の長寿命化を実現するために、調合、施工段階で様々なひび割れ抑制対策がとられている。例えば、乾燥によるコンクリートのひび割れを防止するために、硬化直後からの散水養生、水分一散防止のためのシート養生は一般的に広く実施されている。

これらのひび割れを防止するための管理は大変重要な項目であるが、近年の、建設現場における労務の不足、人工の高騰を考慮すると、施工計画段階から実施可能で、極力施工後に手間のかからないひび割れ防止措置が望まれる。

近年、強度及び耐久性の向上を目的として高強度コンクリートの使用が増加している。高強度コンクリートは、普通コンクリートと比較して多量のセメントを使用するため、コストは高くなるが、密実な内部構造を有するため劣化因子の進入を抑制し、比較的簡便な維持管理で長寿命のコンクリート構造物が生産可能である。ただし高強度コンクリートの技術的な課題として、コンクリートが十分に硬化していない段階に生じるひび割れの発生が問題となっている。

高強度コンクリートにおいて、初期に発生するひび割れの主な原因は、コンクリートが水和反応によって硬化する際に生じる現象“自己収縮”によるもので、自己収縮はコンクリートの引張強度が十分に発揮される前に生じるため、施工後にひび割れ防止措置をとることが難しい。上記背景より、コンクリートの調合設計の段階からひび割れ低減する方法が強く望まれている。

## 2. 研究の目的

上述のように、コンクリート構造物のひび割れ原因のひとつに、コンクリートの水和反応によって生じる自己収縮がある。自己収縮が他のひび割れ原因と一線を画するのは、コンクリート施工後のひび割れ防止対策がほとんどないことである。つまり、自己収縮に対してはコンクリートの調合段階で何らかの対策をとる必要がある。

現状、自己収縮低減を目的として膨張材や収縮低減剤が使用されているが、これらの材料は比較的高価であるにも関わらず、厳密な調合方法が確立されておらず、経験主義的に使用されている。

本研究では、コンクリート構造物に生じるひび割れの低減を目的として使用される膨張材が、様々な調合条件・温度環境、あるいは収縮低減剤のような他の混和材料と併用した場合において、最も効果を発揮する最適調合方法の基盤となるデータを提供するこ

とを目的とする。

## 3. 研究の方法

コンクリートは、流動性をもったフレッシュな状態から、セメントの水和反応によって徐々に硬化していき強度を発揮する材料であり、ひび割れの原因のひとつとなる自己収縮も水和反応によって生じる現象である。

自己収縮低減を目的として付与する膨張材は、セメントペースト中の水と反応して膨張性水和物を生成し、その膨張圧によって自己収縮量を低減するとされている。この膨張材の水和反応は、セメントの水和反応と時期を同じくして進行しているため、膨張材による膨張圧の効果を最大化するためにはセメントの水和反応と膨張材の水和反応の相対的な時間関係が重要となる。

加えて、膨張材により生成される膨張性水和生成物の種類としては、水酸化カルシウム及びエトリンガイトが挙げられているが、両者がどのような機構で膨張圧を生じているかに関しては統一見解がなく、いずれの膨張性水和物についてもどの程度の膨張圧を発生させるかは解明の途上にある。

また、膨張材は多量に添加するほど自己収縮低減効果が大きいことが明らかになっているが、膨張材を過大に使用した場合、有害な遅れ膨張が生じることが明らかになっている。この遅れ膨張による劣化に関しては、発生機構が明らかになっておらず、またその発生条件も不明であるため、膨張材の調合設計においては、経験的に遅れ膨張が生じない程度の量を上限とする使用方法がとられている。しかしながら現在の経験的手法が確実に安全であるとの確証を得るには至っていない。

そこで、本研究では上記課題に対して 3 つの実験シリーズを実施した。

### 実験

膨張材を含むセメントペーストを用いた、自己収縮進展中の水和反応解析

膨張材の収縮低減効果と膨張性水和物の関係性を明らかにするため、時々刻々の自己収縮ひずみを取得するとともに、膨張性水和物である水酸化カルシウムとエトリンガイト量の経時変化を得た。

このとき、自己収縮ひずみには、水分消費による収縮ひずみ成分と膨張ひずみ成分が混在するため、膨張ひずみ成分のみをとりだすため、水和による自己乾燥によって生じる収縮駆動力の影響を取り除くことで、膨張ひずみ成分のみを抽出し、膨張性水和物が膨張ひずみ成分と比較した。

### 実験

異なる種類の膨張材の自己収縮低減機構の相違に関する実験

現行使用されている自己収縮低減用の膨張材としては、主としてカルシウムサルフォアルミネート系（CSA系）と石灰系とに大別される。CSA系はエトリンガイトと水酸化カルシウム、石灰系は水酸化カルシウムを生成し、膨張圧を発生させるとされているが、両者の膨張機構に関して統一的に説明を試みた研究事例はほとんどない。そこで、実験と同様の手法で、両膨張材の膨張に寄与する水和物を調査した。

#### 実験

膨張材を多量に使用した場合の遅れ膨張の発生条件の導出

セメントが十分に水和反応をした後で膨張材が反応すると、ポップアウトなどの別の不具合を引き起こす。しかしその条件は具体的に明らかになっていない。そこで、膨張材の混和による有害な遅れ膨張が発生する条件を明らかにすることを目的として、膨張材の混和量および、養生条件（初期養生温度および外部からの水分供給）をパラメータとして遅れ膨張の発生条件を明らかにすることを試みた。

#### 4. 研究成果

図1、図2にそれぞれ、膨張材混和の有無による、水酸化カルシウム量およびエトリンガイト量の経時変化の差異を示す。

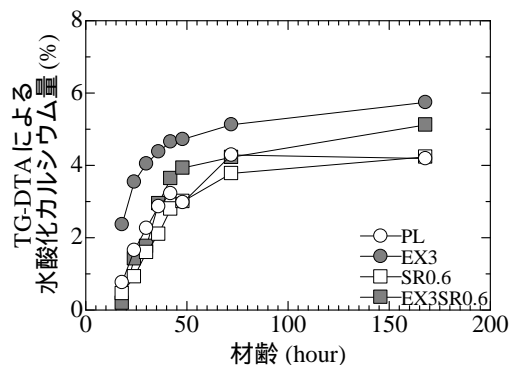


図1 水酸化カルシウム量の経時変化

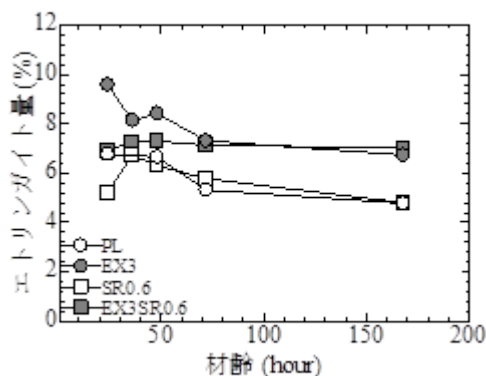


図2 エトリンガイトの経時変化

図1より、いずれの調合についても水和の進行に伴い水酸化カルシウム量は増大しているが、特に、膨張材を混和した調合において、より多量の水酸化カルシウムが生成されており、膨張材による水酸化カルシウムの生成効果が確認される。また、図2のエトリンガイト量の経時変化をみると、水酸化カルシウム量と同様に、膨張材の混和によってエトリンガイト量の生成量が増大していることが確認できる。

この間の自己収縮低減量と両水和物の関係性を比較したものが図3である。

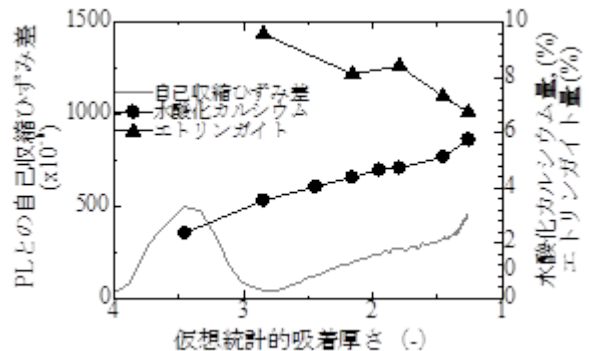


図3 水酸化カルシウムとエトリンガイトが自己収縮ひずみにおよぼす影響

図3より、自己収縮低減量が増加している区間において、水酸化カルシウムが一様に増大を続けていることが分かる。すなわちこの間の膨張の駆動力として水酸化カルシウムが寄与している可能性が考えられる。一方、当該区間のエトリンガイト量の推移をみるとほぼ一定値を保っている。このことから、膨張材の混和によって材齢24時間以降の水酸化カルシウムの生成が、自己収縮の低減に貢献している可能性があること、材齢24時間以降のエトリンガイト量は収縮低減量と相関が小さいことが明らかにされた。

次に、膨張材種類による比較をした図が、図4である。

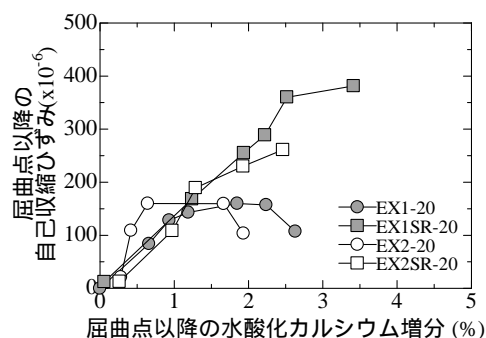


図4 水酸化カルシウムと自己収縮低減量の関係に及ぼす膨張材種類の影響

図より、CSA系（EX1）と石灰系（EX2）は似通った傾向を示しており、生成される水酸化カルシウムの膨張効果は、生成元の膨張材種類によらないと考えられる。

最後に、膨張材混和量をパラメータとした場合の自己収縮ひずみの経時変化を図 5 に、その後 60%RH で長期間養生した場合のひずみ変動を図 6 にそれぞれ示す。

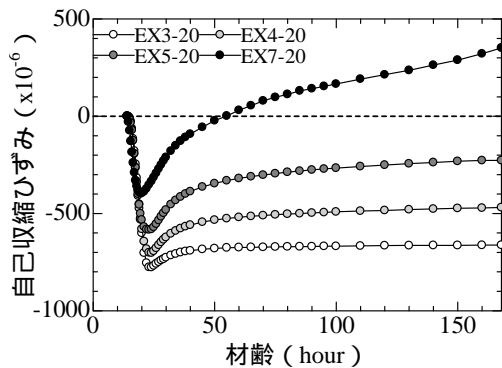


図 5 膨張材混和量をパラメータとした場合の自己収縮ひずみの試験結果

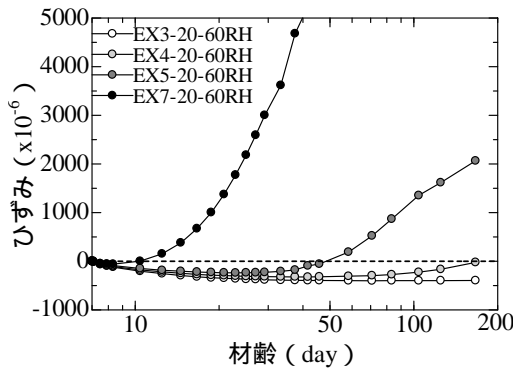


図 6 膨張材混和量をパラメータとした場合の長期的なひずみ変化 (20 -60%RH)

図 5 より自己収縮ひずみ量は、膨張材の添加率に応じて減少し、結合材あたり 7%の膨張材を添加することで自己収縮ひずみをほぼ相殺できることが確認できる。

一方で、図 6 より 7%の膨張材を添加した試験体において顕著な膨張が認められ、試験体全体に亀甲状のひび割れが発生し、典型的な膨張破壊を起こした。このことから、多量の膨張材を混和した場合、十分な水の供給がなくとも有害な膨張劣化が生じることが示された。

一方で、材齢初期の 40 で養生した試験体における長期的なひずみ変化を示したものが図 7 であるが、材齢 146 日までの間で遅れ膨張の傾向は見られなかった。また、20 条件では、相対湿度 100%や、水中養生といった水が外部から供給される条件においては、膨張材添加率が大きいほどその後の膨張量が大きくなる傾向がみられたが、40 条件、90 条件では、その後のひずみ挙動に関して混和材添加率の影響がほとんどみられない。この結果は、材齢 7 日までの高温養生によって、モルタル中の未反応の膨張材が相対的に少なくなった可能性を示唆している。

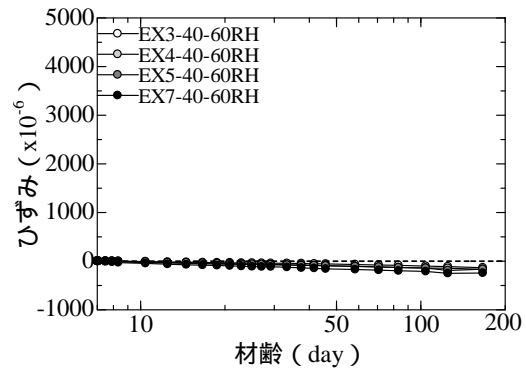


図 7 膨張材混和量をパラメータとした場合の長期的なひずみ変化 (40 -60%RH)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

1. 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭: 膨張材を混和した低水結合材比シリカフュームセメントモルタルの自己収縮及び線膨張係数に及ぼす骨材量の影響, コンクリート工学年次論文集, (採録決定済)(査読あり)
2. 寺本篤史, 張玉露, 大久保孝昭: 膨張材添加率が低水結合材比シリカフュームセメントモルタルの自己収縮および遅れ膨張に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, (採録決定済)(査読あり)
3. 寺本篤史, 張玉露, 大久保孝昭, 丸山一平: 膨張材種類が低水結合材比シリカフュームセメントペーストの若材齢体積変化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.525-530, 2016.7 (査読あり)
4. 寺本篤史, 堀田和宏, 大久保孝昭, 丸山一平: 膨張材及び収縮低減剤を使用した低水結合材比シリカフュームセメントペーストの若材齢体積変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.439-444, 2015.7 (査読あり)

[学会発表](計 4 件)

1. 張玉露, 寺本篤史, 森元悠太, 大久保孝昭: 細骨材混和量が超高強度モルタルの自己収縮に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.40, pp.9-12, 島根大学 (島根県), 2017.3.5
2. 張玉露, 寺本篤史, 森元悠太, 大久保孝昭: 膨張材種類が超高強度セメントペーストの若材齢体積変化に及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集, A-1, pp.9-12, 福岡大学 (福岡県), 2016.8.25
3. 張玉露, 寺本篤史, 森元悠太, 大久保孝昭: 石灰系膨張材が超高強度セメントペーストの若材齢体積変化に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会中国支部研究

報告集, Vol.39, pp.9-12, 近畿大学(広島県), 2016.3.6

4. A. Teramoto, K. Hotta, T. Ohkubo, I. Maruyama, Study on the Effect of Expansive Additive on Autogenous deformation, International Concrete Sustainability Conference, Washington D. C.U.S.A., 2016.5.17

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺本 篤史 (TERAMOTO, Atsushi)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：30735254

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )