# ◇論 文◇

# 加熱を受けた超速硬セメント硬化体の過膨張現象と 拘束条件下で膨張した硬化体の力学特性に関する研究

# Study on the Overexpansion of Hardened Paste of Ultra Rapid Hardening Cement Under Heat and the Mechanical Properties of Hardened Paste After Restrained Expansion

 森
 寛
 晃\*,
 江里口
 玲\*\*,
 中
 島
 裕\*\*\*

 渡
 邉
 晋
 也\*\*\*\*,
 久
 保
 善
 司\*\*\*\*\*

MORI, Hiroaki\*; ERIGUCHI, Akira\*\*; NAKAJIMA, Yutaka\*\*\*; WATANABE, Shinya\*\*\*\*; KUBO, Yoshimori\*\*\*\*

### 要 旨

速硬セメント硬化体を加熱した後に吸水させると比較的短期に過大な膨張(過膨張)を生じ ることがある.本検討では,加熱温度と供試体サイズを変えた速硬セメント硬化体に65~120℃ の加熱を与え,その後浸水させて硬化体の膨張挙動を把握するとともに,外観のひび割れ発生 状況や硬化体強度の変化を調べた.その結果,過膨張は100℃を超える加熱によって生じる可 能性があり,供試体寸法が小さい場合にはその影響は顕著であること,一方で,供試体寸法が 大きくなり,鉄筋などによる拘束がある場合には,100℃を超える加熱を受けても過膨張の影響 は硬化体表層付近に限定され,部材としての力学特性は大きく低下しないことが分かった.

**キーワード**:超速硬セメント,加熱温度,過膨張,エトリンガイト分解,ひび割れ, 鉄筋拘束,拘束膨張試験,力学特性

<sup>\*</sup>中央研究所 研究開発推進部 インフラ先進技術チームリーダー(兼)高機能コンクリートチーム リーダー Manager, Infrastructure Advanced Technology Team and Manager, Multi-function Concrete Team, Research & Development Promotion Department

<sup>\*\*</sup> 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 部長 General Manager, Cement & Concrete Research Department \*\*\* 太平洋マテリアル株式会社 Taiheiyo Materials Corporation

<sup>\*\*\*\*</sup>一般社団法人日本建設機械施工協会 Japan Construction Machinery and Construction Association \*\*\*\*\* 金沢大学 Kanazawa University

## ABSTRACT

Excessive expansion (overexpansion) may occur in a relatively short period of time when hardened paste of rapid hardening cement is subjected to water absorption after heating. In this study, hardened specimens of rapid hardening cement were prepared in different sizes, heated under different temperatures between 65°C and 120°C, and then immersed in water to investigate their expansion behavior, as well as cracks in appearance and changes in the strength of the hardened cement. It was found that overexpansion was likely to occur when the heating temperature was above 100°C, and that the effect of overexpansion was more significant in the smaller specimens. In the specimens with larger sizes and restrained by steel reinforcement, even when heated at above 100°C, the effect of overexpansion was found to be limited to the vicinity of the surface of the hardened cement, with no significant impairment to the mechanical properties as a structural member.

## **Keywords** : Ultra rapid hardening cement, Heating temperature, Overexpansion, Ettringite decomposition, Cracking, Reinforcement restraint, Restrained expansion test, Mechanical properties

## 1. はじめに

速硬型補修材料あるいは超速硬セメントを用いた 硬化体を対象に行った既往の検討<sup>1)2)</sup>において, 200℃前後の高温履歴を与えた後に浸水させること で,わずか数日の内に大きなひび割れを伴って膨張 破壊する現象(以下,過膨張と呼ぶ)が報告されて いる.この過膨張は,速硬セメント硬化体の主要な 水和物であるエトリンガイトの分解・再生成によっ て生じると説明されているが,メカニズムの詳細は 明らかになっていない.

エトリンガイトの分解・再生成に起因するコンク リートの劣化現象として、コンクリート製品等での 発生が確認されているエトリンガイトの遅延生成<sup>3)</sup> (以下, DEFとする)がある.これはセメント水和の 初期に生じるエトリンガイトが,想定より高い温度 での蒸気養生によってモノサルフェートに変質し、 その後の湿潤環境下で再生成する現象である.

エトリンガイトの分解・再生成がセメント硬化体 の膨張破壊を引き起こす点では類似の現象であるが, DEFはセメント硬化過程に受ける熱履歴あるいは水 和による熱に起因し,発生までに比較的長い時間を 要するのに対して,速硬セメント系材料の過膨張は 硬化後に受ける熱に起因すること,さらに加熱後に 水が供給されると直ちに生じる点で異なっている. 本検討では、超速硬セメント硬化体を対象に、過 膨張が発生する加熱温度域を明らかにするため、加 熱温度を変えて過膨張の発生有無を調べ、各温度で の硬化体強度の変化を実験的に把握した.また、 100℃前後の加熱条件で、供試体寸法を変えて同様 の実験を行い、鉄筋などによる拘束がある場合とな い場合とで膨張挙動を比較することで、寸法や拘束 有無による膨張挙動の違いや膨張抑制の効果を検討 した.さらに、過膨張による強度低下が懸念された ため、100℃以上の加熱を与え、鉄筋拘束下で膨張さ せた供試体の載荷試験を行い、部材としての力学性 能を評価した.

#### 2. 実験概要

- 2.1 加熱温度の違いが過膨張の発生に与える影響 (シリーズ1)
- (1) 使用材料とモルタル配合

セメント(C)は、カルシウムサルフォアルミネート3Ca0・3A1<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・CaSO<sub>4</sub>(以下、CSAとする)を主成分と する超速硬セメントを用いた.CSAは、石こうが存在 し、かつ水酸化カルシウムが無い場合は、以下の反 応が急速に進み、エトリンガイト3Ca0・A1<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・ 3CaSO<sub>4</sub>・32H<sub>2</sub>Oを多量に生成することで早期強度を発 現する.  $3Ca0 \cdot 3A1_2O_3 \cdot CaSO_4 + 2CaSO_4 + 38H_2O$ 

 $\rightarrow 3Ca0 \cdot A1_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 2A1_2O_3 \cdot 3H_2O \quad (1)$ 

細骨材 (S) は静岡県産山砂 (表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.29%) を使用した. モルタル配合は,水セメ ント比を 40%, S/C=2.0とし,ホバートミキサ (容量 5L) を用いて練混ぜを行った. 混和剤としてナフタ レンスルホン酸系の高性能減水剤を C×0.4% 添加 して流動性を確保し,凝結調整のために専用遅延剤 をC×0.6% 添加して,可使時間を確保した.

#### (2) 長さ変化測定用供試体

供試体寸法は4×4×16cmとし,無筋供試体と拘束 膨張供試体の2種類を作製した.無筋供試体は,JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モ ルタルバー法)」を参考に,両端のゲージプラグ間長 さを測定した.また,過大な膨張を鉄筋等による拘 束によって抑制できるかどうか検討するため,JIS A 6202附属書A「膨張材のモルタルによる膨張性試験 方法」で使用する拘束膨張供試体を作製して,長さ 変化を計測した.この供試体では,断面中央の拘束 棒(断面積9.87mm<sup>2</sup>,拘束筋比0.62%)の両端に鋼板 が固定され,膨張が生じると膨張拘束力が反力とし てモルタルに作用する.

供試体数は、同一条件につき3体とした.所定の 型枠に超速硬セメントモルタルを打込み、翌日に脱 型して、その後、材齢7日に加熱を行うまで気中養 生を行った.

#### (3) 供試体の加熱および給水方法

加熱条件は,最高温度を65,80,90,105℃および120℃の5段階に変化させ,各温度で6時間保持とした.最高温度100℃以上では乾燥機を,それ以下の温度では蒸気養生槽を用い,プログラム運転することで行った.昇温速度は20℃/h,降温速度は5~6℃/hとした.温度プログラムパターンをFig.1に示す.

加熱終了後は、供試体温度が室温程度まで下がる のを確認してから20℃恒温室へ移動した.供試体温 度が安定してから測長を行い、その後、恒温室で水 中への浸せきを開始した.

#### (4) 膨張率測定および外観観察

加熱前後で測長を行い、その後は所定材齢で水中から供試体を取り出して長さ変化を測定した.同時にひび割れ有無を目視で確認した.膨張率の算出は JIS A 1146あるいはJIS A 6202附属書Aに示される



長さ変化率の算出方法に従い,本検討では加熱前の 測定値を基準とした.測定は,長さ変化が収束する 材齢70日程度まで行った.

#### (5) モルタルの圧縮強度試験

加熱とその後の浸水による超速硬セメントモルタ ルの強度変化を調べるため、供試体 φ 5×10cmを各 水準で9体作製した.供試体は長さ変化測定用と同 様の操作を行い、加熱後(材齢9日)と、材齢28日 および91日に試験を実施した.

# 2.2 供試体寸法の違いが過膨張に与える影響 (シリーズ2)

#### (1) 供試体概要

供試体寸法は  $10 \times 10 \times 40$  cm とし, シリーズ 1 と同様に, 無筋供試体および拘束膨張供試体の 2 種類を作製した. 無筋供試体は, JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に, 拘束膨張供試体は, JIS A 6202 附属書 B「コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」のA法に準拠して作製した. 拘束膨張供試体に用いる拘束棒は $\phi$ 11mmの丸鋼棒で, 拘束筋比は 0.95% となり, シリーズ 1 より拘束筋比がやや大きい. 供試体数は同一条件で 2 体とした.

モルタル配合は水セメント比を40%, S/C=2.0とし, コンクリート用パン型ミキサ(容量50L)を用いて練 混ぜを行って,供試体を作製した.

加熱条件は最高温度を80,105℃および120℃の 3水準とし、それぞれ保持時間を6時間とした.使 用した乾燥機や運転プログラム、加熱して浸水まで の養生方法はシリーズ1と同じとした.

#### (2) 膨張率測定および外観観察

加熱前後で測長を行い、その後は所定の材齢で 水中から取り出して長さ変化を測定した。同時に ひび割れ有無を目視で確認した. 膨張率の算出は JIS A 1129あるいは JIS A 6202 附属書 Bに示され る長さ変化率の算出方法にしたがい、本検討では 加熱前の測定値を基準とした。測定は、長さ変化 が収束する材齢90日程度まで行った.

#### 2.3 拘束膨張供試体の載荷試験(シリーズ3)

シリーズ2で長さ変化が収束した拘束膨張供試体 を対象に、供試体の長手方向に載荷を行い、荷重と 供試体変形の関係を調べた.なお120℃加熱の無筋 供試体では、2体のうち1体の底面側に等間隔のひ び割れが入り、供試体に反りが生じたため載荷試験 は行えなかった. 80℃ と105℃ 加熱については無筋 供試体と拘束膨張供試体の両方で載荷試験を行った.

#### (1) 供試体の前処理

無筋供試体は両端部の長さ変化用のゲージプラグ をグラインダーで切除し、両端面を研磨して平滑に した. 拘束膨張供試体は両端面の鋼板の錆をサンド ペーパーで除去して平滑にした.

#### (2) 計測項目

Load 🥌

載荷時の荷重はロードセルにて計測した.供試体 の打設面と底面を除く両側面のコンクリート表面に

コンクリート用ひずみゲージ(東京測器社製PL-90, PL-60)を縦横に貼付け、供試体の軸方向ひずみおよ び軸直交方向のひずみを計測した. 拘束膨張供試体 の丸鋼棒ひずみは、あらかじめ長手方向中央の表裏 に貼付した高温用ひずみゲージ(東京測器社製ZFLK-2, (東京測器社製,耐熱仕様)により計測した.拘 束膨張供試体の各ひずみの計測箇所をFig.2に示す.

#### (3) 載荷方法

載荷試験には、最大容量3000kNの耐圧試験機(前 川試験機製作所社製)を使用し,載荷速度は0.3N/mm<sup>2</sup> 程度とした.拘束膨張供試体の載荷状況をFig.3に 示す.載荷は、供試体断面中央の丸鋼棒の座屈に伴 い周囲のコンクリートが崩壊して、荷重が急激に低 下するのをもって終了とした.

#### 3.実験結果および考察

#### 3.1 加熱温度が過膨張に与える影響

#### (1) 加熱温度と膨張挙動の関係

無筋供試体の膨張率変化をFig.4に、拘束膨張供 試体の膨張率変化をFig.5に示す.また,加熱温度 ごとに供試体のひび割れ状況と最終的な膨張率をま とめて Table 1に示す.

まず無筋供試体については、150℃で加熱したも のは浸水後わずか1日で大きなひび割れが生じて長 さ変化の計測が不能となった. 120℃加熱も同様で,



Fig.2 Each strain measurement point on the constrained expansion specimen.

(拘束膨張供試体の各ひずみ計測箇所)



Loading test status of expansion-Fig.3 constrained specimen. (拘束膨張供試体の載荷状況)





浸水1日で縦横方向にひび割れが発生して,膨張率 が大きくなった.120℃加熱,浸水7日後の無筋供試 体外観をFig.6に示す.極めて短期間のうちに大き なひび割れを生じており,いわゆる過膨張が生じた と考えられる.既往の検討<sup>1)</sup>では最高温度150℃,9 時間保持の条件で過膨張が発生したとされているが, 本検討では120℃で6時間保持の条件で過膨張が生 じる結果であった.

続いて、それ以下の加熱温度 65~105℃ の場合は、 温度が高いほど最終的な膨張率は大きくなる傾向が ある.このうち 65℃ や 80℃ で加熱したものは、試 験期間を通じてひび割れが生じることは無かった.



Fig.6 Large longitudinal and transverse cracks in unreinforced specimens heated to 120°C (120°C加熱した無筋供試体の縦横の大きなひび割れ)





65℃はほとんど膨張せず,80℃では浸水から20日 程度まで緩やかに膨張は生じたが,最終的な膨張率 は約0.2%にとどまり,これらの加熱温度では過膨張 は生じなかった.これに対して,90と105℃の加熱は, 縦横に大きなひび割れは生じないものの,最終的な 膨張率は0.5%程度に達しており,過膨張かどうかの 判断は難しかった.

#### (2) 一軸拘束による過膨張の抑制

120℃と 150℃ で加熱した拘束膨張供試体では, 浸水後4日以内に軸方向に大きなひび割れが発生した.120℃加熱,浸水7日後の拘束膨張供試体の外観



Fig.7 Axial cracking of restrained specimens heated to 120℃ (120℃加熱した拘束供試体の軸方向ひび割れ)

_										
	Size	Restrained	Heating temperature							
	(cm)	condition	80°C	90°C	$105^{\circ}$ C	120°C				
	4×4×16	unreinforced	2.0%	5.5%	5.3%	7.0% (6days)				
			No cracks	No cracks	Some fine cracks	Large vertical and horizontal cracks				
		Restrained	1.2%	2.6%	1.9%	1.3%(6days)				
		(0.62%)	No cracks	No cracks	Some fine cracks	Large axial crack				

Table 1 Final expansion rate and visual appearance of specimen (供試体の最終膨張率と外観ひび割れ状況)

を Fig.7 に示す.軸方向に連続したひび割れは, 120℃では打込み面と底面の2面に,150℃では側面 も含む全4面に発生した.120℃と比べて150℃の方 がひび割れ幅は大きく,これらの供試体では外側へ モルタルがはらみ出していた.以上のことより,過 膨張が発生する条件では,一軸方向の拘束(拘束筋 比 0.62%)だけでは膨張を抑えられないといえる.

一方,それ以下の加熱温度では,いずれの供試体 も軸方向に連続したひび割れは生じておらず,また, 無筋供試体で生じる膨張は約半分程度に抑えられて いる.無筋供試体で緩やかな膨張が生じる 80~ 105℃の加熱条件の範囲であれば,一軸方向の拘束 で膨張を抑えられ,外側へのはらみ出しは生じない ことがわかった.

#### (3) 過膨張による力学特性の変化

加熱とその後の浸水によるモルタル強度の変化を Fig.8に示す.なお、図中の破線は、試験室内で気乾 養生を行った供試体の各材齢強度を目安として示す ものである.





加熱直後の強度について、65℃および 80℃ では強 度はほぼ変わらないが、90℃以上の加熱では温度が 高いほど強度は低下している.特に、105℃ や120℃ では強度低下が大きく、加熱前の約半分以下となっ た.加熱後は、いずれも浸水によって強度は回復す る傾向があり、例えば、105℃ 加熱でも最終的には気 乾養生を上回る強度に達した.ただし、120℃ 加熱は その後の浸水でも強度回復は見込めないことがわかった.

#### 3.2 供試体寸法が過膨張に与える影響

#### (1) 供試体寸法による膨張挙動の違い

シリーズ2の無筋供試体の膨張率変化をFig.9に, 拘束膨張供試体の膨張率変化をFig.10に示す.なお, 図中には,シリーズ1の4×4×16cmの膨張率変化 (加熱温度80℃,105℃および120℃)を併せて掲載 した.供試体のひび割れ状況と最終的な膨張率を加 熱温度ごとにまとめてTable 2に示す.なお,網掛 けはシリーズ3で載荷試験を行った水準を表す.

**Fig.9**の無筋供試体の膨張率変化を見ると,供試体寸法が大きい場合には4×4×16cmと比べて各材齢の膨張率は小さく,最終的な膨張率も小さい.シ







Fig.10 Effect of heating temperature and size of restrained specimen on expansion rate (拘束供試体の膨張率変化(加熱温度と供試体寸法))

(供試体の最終膨張率と外観ひび割れ状況)									
Size	Restrained	Heating temperature							
(cm)	condition	80°C	$105^{\circ}\!\mathrm{C}$	120°C					
10×10×40	10×10×40 unreinforced 1.8%		2.7%	3.0% and 10%					
		No cracks	No cracks	Cracks and warp of specimen					
	Restrained	0.8%	1.0%	1.1%					
	(0.95%)	No cracks	No cracks	No cracks					

Table 2 Final expansion rate and visual appearance of specimen

\*Loading tests were carried out on the shaded specimen.

リーズ1で過膨張が生じたと判断される120℃加熱 や過膨張の疑いのある105℃加熱でその傾向は大き い.一方,80℃加熱では供試体寸法による膨張率の 差はほとんどなかった.

これに対して、拘束膨張供試体の膨張率変化は、 供試体寸法が小さい場合には加熱温度によって膨張 率に差はみられるが、寸法が大きい場合にはいずれ も膨張率 0.1%程度に抑制されている. 無筋供試体で 大きな膨張を示す120℃加熱(膨張率約0.8%)にお いても膨張が抑制される結果となった.

供試体寸法によって膨張に差が見られた原因とし て、加熱によるエトリンガイトの脱水とそれによる メタエトリンガイトへの変質<sup>6)</sup>が硬化体の表層付近 に限定されたことが考えられる.Q.Zhouら<sup>7)</sup>は,エト リンガイトの加水分解は水蒸気圧と温度に依存する としており、供試体加熱時には供試体内部ほど水蒸 気圧が上昇して、結合水の脱水は生じ難くなった可 能性がある.

#### (2) 過膨張発生リスクに関する考察

80℃加熱の無筋供試体では、供試体寸法によらず 0.2%程度の膨張が緩やかに生じたものの、この膨張 は一軸方向の拘束(拘束筋比0.62%あるいは0.95%) によって半分程度に抑えられている.外観上,ひび 割れなども生じておらず、この温度域では過膨張は 生じないと考えられる.

一方,100℃以上の加熱では、供試体寸法が小さい 場合に、0.5%以上の比較的大きな膨張は生じるもの の, Fig. 11 に示すように供試体寸法が大きい場合に は、供試体端部にごく微細なひび割れが生じるだけ で120℃加熱のFig.6やFig.7のように明確なひび 割れが認められないケースもある. 100℃以上の加 熱で過膨張が生じるリスクは否定できないが、シリ ーズ2の結果より、 寸法が大きい実部材ではそのリ スクは大幅に軽減されると考えられる.

これは、硬化体内部の温度上昇は100℃前後にと

どまり,かつ水和物の脱水などにより水蒸気圧が高 まりやすいために、エトリンガイトの分解が生じる 領域は硬化体の表層付近に限定され、部材全体とし て膨張は小さくなること、また、内部鉄筋あるいは



Fine cracks at the edge of unreinforced Fig.11 specimens heated to 105°C (105℃加熱した無筋供試体の端部に 生じたヘアクラック)



Fig.12 Complete stress - concrete strain curve, and Complete stress - rebar strain curve (全応力とコンクリートひずみ、鉄筋ひず みの関係)

周辺部材からの拘束によって膨張は抑制されるため である.

# 3.3 加熱による膨張が生じた硬化体の 力学性能について

(1) 拘束膨張供試体の力学性能の評価について

105℃で加熱後,28日間浸水した供試体のコンク リートおよび鉄筋のひずみに対して全応力をプロッ トしたものを**Fig.12**に示す.コンクリートの軸方向 ひずみと軸直交ひずみは供試体両側面の値を平均化 して示す.鉄筋ひずみは丸鋼棒中央付近の両側面の 値を平均化して示す.

**Fig. 12**より、コンクリート軸方向ひずみと鉄筋ひ ずみの全応カーひずみ曲線はほぼ重なっており、荷 重の増加に対してコンクリートと鉄筋がそれぞれ応 力を負担して変形している.

ここで軸方向ひずみ50 µ 付近から1/3応力までの 全応カーひずみ曲線の勾配を拘束膨張供試体の静弾 性係数(ヤング率)として算出した.さらに丸鋼棒 の静弾性係数を209kN/mm<sup>2</sup>として,所定ひずみ時の鉄 筋負担応力を算出し,それを供試体が受け持つ全応 力から除すことで,コンクリート分担応力を算出し た.鉄筋の荷重負担分を考慮した拘束膨張供試体の コンクリート圧縮強度ならびに静弾性係数をそれぞ れFig. 13およびFig. 14に示す.なお,図中左端の気 乾養生データは,強度管理用供試体 φ 10×20 cm の 3 体の平均値,それ以外は各温度で加熱した無筋供試



Fig.13 Compressive strength of restrained specimen after expanded (拘束膨張供試体のコンクリート強度)

体および拘束膨張供試体(いずれも10×10×40cm) の2体の平均値である.

Fig. 13より,加熱温度が高いほどコンクリート強度は低下する傾向がある.しかし,80℃加熱では無筋および拘束有りいずれの場合にも,気乾養生コンクリートよりも強度は高かった.無筋供試体と拘束膨張供試体を比べると,若干拘束膨張供試体の方が強度は小さい.105℃や120℃での加熱は80℃よりも強度は低下する傾向があり,気乾養生コンクリートと比べて,105℃加熱は約4%の強度低下,120℃加熱は約16%の強度低下となった.

一方,静弾性係数は,全ての加熱温度で拘束の有 無によらず,気乾養生コンクリートよりも高くなっ ており,拘束膨張コンクリートの剛性は低下しない ことが分かった. 辻ら<sup>8)</sup>は,一軸拘束を受けた膨張コ ンクリートは圧縮強度が膨張作用により低下しない 場合でも,ヤング係数が普通コンクリートに比べて 小さくなるとしている.今回の結果との相違につい て,原因は不明だが,拘束膨張供試体の膨張率が高々 0.1%(1000μ)程度で,文献に示される膨張コンク リートと比べて小さいことが考えられる.

3.1(3)より,100℃前後の加熱では直後に大きな 強度低下を生じることは分かっているが,一方で, 供試体寸法が大きい場合にはコンクリート内部では エトリンガイト分解は生じ難く,外からの水分供給 も表層付近に限定されるため,実部材の力学性能低 下への影響は小さい可能性がある.シリーズ3の拘



Fig.14 Young's modulus of restrained specimen after expanded (拘束膨張供試体の静弾性係数)



Fig.15 Effect of heating temperature, specimen size and restrained on occurring excessive expansion (過膨張発生に与える加熱温度、拘束および供試体寸法の影響)

束膨張供試体の載荷試験より,100℃前後の加熱を 受けても,コンクリートの圧縮強度と静弾性係数に 顕著な低下は生じないことがわかった.

#### (2) 過膨張が生じた場合の補修に対する考え方

シリーズ1からシリーズ3の結果を総括して,加 熱温度ごとの過膨張の発生有無,および鉄筋拘束や 寸法の影響について整理したものを**Fig. 15**に示す.

超速硬セメントが使用される橋梁支承の台座コン クリートなどの部材では、火害によって100℃以上 の熱を受けると、その後の水分供給の状況によって は過膨張が生じる可能性がある.実構造物では火災 の規模にもよるが、6時間程度までの受熱時間であ れば、部材内部においてエトリンガイト分解は生じ 難く、外からの水分供給も表層付近に限定されるた め、過膨張やそれによる強度低下の影響はかぶり近 傍に留まると思われる.さらに、鉄筋あるいは周辺 部位からの拘束があれば、100℃前後の加熱を受け ても膨張は抑えられ、力学的性能の変化も小さいこ とがわかっている.火災等によるきわめて例外的な 加熱作用を受けない限り、過膨張の発生はきわめて 限定的であることが明らかとなった.

火害を受けた場合の速硬系材料を用いた材料の補 修方法として、ひび割れの発生など過膨張の発生が 疑われる影響範囲を特定した上で、その部位をはつ り取って打替えすることが現実的な対応策であると 考えられる. 4.まとめ

本検討で得られた結果を以下に示す.

- (1) 超速硬セメント硬化体の過膨張が発生する加 熱温度域は、保持時間6時間の場合、105~ 120℃以上であって、80℃以下では発生しない、90~105℃の温度域では比較的大きな膨 張が生じており、過膨張かどうかの判断は難 しかった。
- (2) 過膨張が生じると、一軸方向の拘束で膨張を 抑制できず、軸方向ひび割れの発生や軸直交 方向へのはらみ出しが生じた.拘束膨張供試 体で確認されたこれら外観上の特徴は、過膨 張発生有無の判断目安となる.
- (3)供試体寸法が大きくなると、加熱温度が同じであっても最終的な膨張率は小さくなる.80~105℃の温度域では、無筋での膨張率は0.2%前後であった.無筋で大きな膨張を示した120℃も含めて、拘束下での膨張率はいずれも0.1%程度にとどまった.
- (4) 無筋の小型供試体の場合,100℃前後の加熱 で一旦,強度は低下するが,その後の浸水で 回復する.ただし,120℃の加熱では強度回復 は見込めなかった.

- (5)供試体寸法の違いによって膨張に差が見られた原因として、加熱によるエトリンガイトの脱水とメタエトリンガイトへの変質が硬化体の表層付近に限定されたことが考えられる.
- (6) 100℃以上の加熱を与えた拘束膨張供試体で 部材としての力学特性を評価したところ,圧 縮強度や静弾性係数に顕著な性能低下は生じ ないことが確認できた.

# 参考文献

- 林千晶,久保善司,渡邉晋也. 高温履歴を受けた超速硬セメント硬化体の過膨張現象に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 2020,42(1), p. 461-466.
- 川口勇作,久保善司,渡邉晋也.加熱履歴を受けた速硬型補修材料のDEFに関する基礎的研究. コンクリート工学年次論文集.
   2019,41(1), p.1679-1684.
- 3) 平尾 宙. 硫酸塩劣化事例—エトリンガイトの 遅延生成 (DEF) に関する研究—. コンクリート 工学. 2006,44(7), p. 44-51.
- 4) 星野清一,平尾宙,山田一夫. X線回折/リート ベルト法によるセメントペーストの水和反応解 析. コンクリート工学年次論文集. 2006,28(1), p.41-46.
- 5) 野澤里渚子,斎藤豪,佐藤賢之介ほか. 乾燥条件および温度履歴がエトリンガイト結晶中の水分状態に及ぼす影響. セメント・コンクリート論文集. 2016,70(1), p. 2-8.
- 森 寛晃, 江里口 玲, 渡邉晋也ほか.加熱した超 速硬セメント硬化体の過膨張メカニズムの研 究. コンクリート工学年次論文集. 2021, 43(1), p. 395-400.
- Q. Zhou; F. P. Glasser. Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120° C. Cement and Concrete Research. 2001, 31(9), p. 1333-1339.
- 21 幸和. 一軸拘束を受けた膨張コンクリートの力学的特性. 土木学会論文集.
   1986, (372), p. 149-155.