

論文 超速硬性混和材と加熱養生を併用した超速硬コンクリートの寸法安定性

下澤 淳平*1・樋口 隆行*2・入内島 克明*3・小島 正朗*4

要旨: 超速硬性混和材を用いて、加熱養生温度を変えて調製し、作製から約 2 年が経過したモルタルおよびコンクリートの物理的性質の評価、硬化体の分析を実施した。90°Cで加熱養生を行ったモルタル硬化体は、材齢 2 年で $1,000 \times 10^{-6}$ を超える膨張を示し、XRD や SEM 観察の結果から、エトリンタイトの遅延生成 (Delayed Ettringite Formation) による膨張である可能性が示唆された。一方、60~80°Cで加熱養生を行ったモルタル硬化体や、90°Cで加熱養生を行ったコンクリート硬化体には顕著な膨張は見られなかった。DEF による膨張を抑制するためにはコンクリートを 80°C以下の条件で養生することが必要と考えられる。

キーワード: 超速硬性混和材, 加熱養生, 耐久性, プレキャスト

1. はじめに

コンクリート構造物の建設現場では、高品質と短工期が求められる。この 2 つの要求を両立する方法の 1 つとして、プレキャスト工法が挙げられる。建設現場の工程の進捗に影響を受けることなく、安定した高品質のコンクリート部材を製作できる。また、通常、プレキャスト部材の製造は、コンクリートを打ち込んだ翌日に脱型・吊上げを行うが、早期に脱型および吊上げ可能な強度を発現させ、1 日に複数回の製作が可能になれば、短工期を実現することができる。これまでに早期脱型を目的とした様々な混和材料が検討され¹⁻⁴⁾、筆者らも、建築構造プレキャスト部材に適用可能な経済性と性能、品質を両立する超速硬コンクリートを開発し、実用化している^{5,6)}。この超速硬コンクリートは、超速硬性混和材と加熱養生を併用することを特徴とする。しかし、養生温度が高すぎると、脱型直後にコンクリート表面から水分が逸散しやすくなり、表面の緻密性が損なわれたり⁷⁻¹⁰⁾、セメント中の硫酸アルカリ濃度が高い場合は DEF (Delayed Ettringite Formation) と呼ばれるエトリンタイトの遅延生成によってコンクリートが膨張破壊する場合があることが一般的に明らかとなっている¹¹⁻¹⁵⁾。筆者らはこれまでに材齢 1 年で耐久性の評価を実施している¹⁶⁾。本報では、超速硬性混和材を用いて、加熱養生温度を変えて調製したモルタルおよびコンクリートの耐久性を評価することを目的に、作製から約 2 年が経過した試験体の物理的性質、ならびに硬化体の分析を実施した結果について報告する。

質、ならびに硬化体の分析を実施した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の化学成分と物理的性質を表-1に示す。超速硬性混和材は、CaO, Al₂O₃, SO₃を主成分とするエトリンタイト生成系を用いた。セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。モルタルの細骨材は、新潟県姫川産川砂(表乾密度 2.62g/cm³)、コンクリートの細骨材は、各務ヶ原肢三井山川砂(表乾密度: 2.57g/cm³)、粗骨材は各務ヶ原肢三井山川砂利(表乾密度: 2.61g/cm³)を用いた。混和剤(SP)には、ポリカルボン酸塩系の高性能減水剤を用いた。

2.2 モルタルの調合条件

モルタルの調合を表-2に示す。超速硬性混和材の添加率はセメント内割で 5mass%とした。水結合材比は 30mass%とした。ホットコンクリートでの製造を想定し、練上り温度を 35°Cに調整した。

表-2 モルタル調合

調合	W/B (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			
			W	C	Add	S
Control	30	1.38	247	824	0	1139
Add	30	1.38	247	781	41	1138

表-1 使用材料

材料	化学成分(%)						密度 (g/cm ³)
	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	R ₂ Oeq	Cl	LOI	
超速硬混和材	51.6	7.0	22.5	3.29	0.047	5.1	2.65

*1 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 (正会員)

*2 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 グループリーダー (正会員)

*3 電気化学工業株式会社 特殊混和材部 技術課長 (正会員)

*4 株式会社竹中工務店 技術研究部 主任研究員 (正会員)

表-3 コンクリート調合とフレッシュ性状

調合	水結合材比(%)	空気量(%)	s/a(%)	水/蒸気	セメント	超速硬混和材	細骨材	粗骨材
1	30	4.5	47	157/5	513	27	747	856
2	40	4.5	47	130/32	385	20	800	916
3	50	4.5	47	127/35	308	16	832	952
PL	40	4.5	47	132/30	405	0	802	919

表-4 フレッシュ性状

スランプ (cm)		空気量 (%)		コンクリート温度 (°C)	
直後	30分	直後	30分	直後	30分
18.2	7.2	3.8	2.8	31	27
5.3	1.3	3.4	2.6	35	32
6.6	5.1	4.3	3.3	35	28.5
14.1	13.5	3.9	3.1	35	30

2.3 コンクリートの調合条件

コンクリートの調合を表-3に示す。超速硬性混和材はセメントに置換し、添加率を0~27kg/m³に設定した。加熱養生の効率を高めることを目的に、ホットコンクリート設備を用いた。なお、蒸気から供給される水を練り混ぜ水の一部とした。

2.4 養生条件

モルタル、コンクリートともに、図-1に示す条件で槽内の温度を制御した。練り混ぜ後、35°Cで30minの前置時間を取った後、蒸気を導入して45°Cで1hr保持し、その後30minで60, 70, 80, 90°Cまで蒸気を用いてさらに昇温した。注水から3hr後に槽の扉を開放し、硬化体を取り出し脱型した。加熱養生後の硬化体は、室温まで温度が下がった後、20°Cの水槽で2次養生を行った。

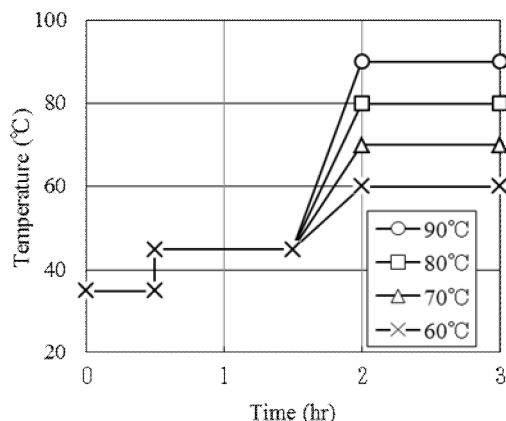


図-1 加熱養生条件

2.5 モルタル物性評価

(1) 圧縮強さ

JIS R 5201 に準拠して実施した。材齢 3.5hr (加熱養生時間 3.0hr と脱型時間 0.5hr), 1日, 2年で測定した。なお、材齢 3.5hr の供試体と、材齢 1日および2年の供試体は別の日に打設した。

(2) 長さ変化率

JIS A 6202 付属書 1 に準拠して測定した。加熱養生後 1日から3か月間は 20°C60%RH 室内で乾燥養生を行い、その後、40°Cの室内で水中養生した。

2.6 モルタルの試験体の分析

(1) 組織観察

超速硬性混和材の使用、および加熱養生による DEF の有無を確認するため、モルタル硬化体の SEM 観察を実施した。加熱養生温度が 60°C, 90°C のモルタル硬化体について、加熱養生後 1日と、加熱養生後に 20°C 水中で材齢 2年間養生した試料を観察した。モルタル硬化体を多量のアセトンを用いて水和停止し、アスピレーターで 20°C 乾燥を行った。その後、試料表面をオスミウム(Os) でコートし、走査電子顕微鏡 (日立ハイテクノロジー社製 SEM : SU6600), および微小部元素分析計 (オックスフォード Inc.社製 EDS : INCA Energy X-act) を用いて観察および成分分析を実施した。

(2) 粉末 X 線回折

組織観察に用いたモルタル硬化体を微粉碎して試料とした。エトリンガイトの回折ピーク強度を比較した。

2.7 コンクリート物性評価

(1) 乾燥収縮率

乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129 ダイヤルゲージ方法に準拠した。供試体は、加熱養生後 1日から材齢 7日まで 20°C で封かん養生を行い、以後、20°C, 60%RH の環境で養生した。

(2) 安定性評価

安定性の評価を目的として、コンクリートバー法による長さ変化率を評価した。供試体は、加熱養生後 1日から材齢 7日まで 20°C で封かん養生を行い、以後、供試体は湿布で覆い、水分の逸脱が生じないようにビニール袋

に入れて 40°C90%RH の室内で養生した。

3. 実験結果

3.1 モルタル物性

(1) 圧縮強さ

圧縮強さの測定結果を図-2に示す。材齢 3.5hr に着目すると、60°C、90°Cともに 30N/mm²以上の値を示し、早期に脱型可能な強度を有していることが分かる。その後、材齢 1日で 40N/mm²程度まで強度増進し、材齢 2年では 50~60N/mm²程度の値を示した。加熱養生温度が低いほど高い圧縮強さを示している。加熱養生温度が高くなると、モルタルやコンクリートが熱膨張して、硬化体中の空隙が増加する¹³⁾。このため、60~90°Cの加熱養生温度の範囲において、熱膨張の影響を受けにくい 60°Cの試験体が最も高い強度を示したと考えられる。なお、60°Cの材齢 1日強度が材齢 3.5hr 強度より低いが、2.5の試験方法に示すように打設日が異なることによる日間変動であると考えられ、いずれも材齢 2年にかけて強度が増大しているため耐久性に影響はないと考えられる。

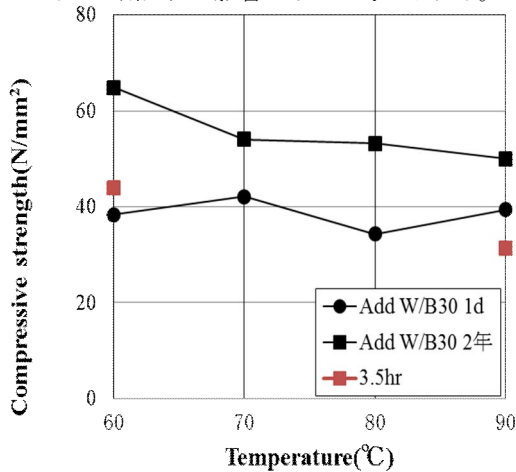


図-2 モルタル圧縮強さ

(2) 長さ変化率

モルタルの長さ変化率の測定結果を図-3に示す。まず、硬化体の調製から3か月間の乾燥養生期間に着目すると、加熱養生温度および超速硬性混和材の有無によらず、収縮挙動を示していることが分かる。加熱養生温度に着目すると 60°Cで加熱養生したものが最も収縮が大きく、約 $1,200 \times 10^{-6}$ 程度収縮した。水結合材比が 30%と低く自己収縮が顕在化していると考えられる。

材齢 3か月以降は、試験体の養生環境を水中養生とし、養生温度も 40°Cに変更して促進養生とした。加熱養生温度および超速硬性混和材の有無によらず収縮ひずみは約 40日かけて徐々に小さくなった。材齢 5か月で比較すると、加熱養生温度 60°Cでは -500×10^{-6} 程度、70°Cでは $-300 \sim -400 \times 10^{-6}$ 程度、80°Cや 90°Cではほぼ -100×10^{-6} 程度の収縮を示した。湿潤環境になったことで自己収縮および

乾燥収縮が緩和されたと考えられる。

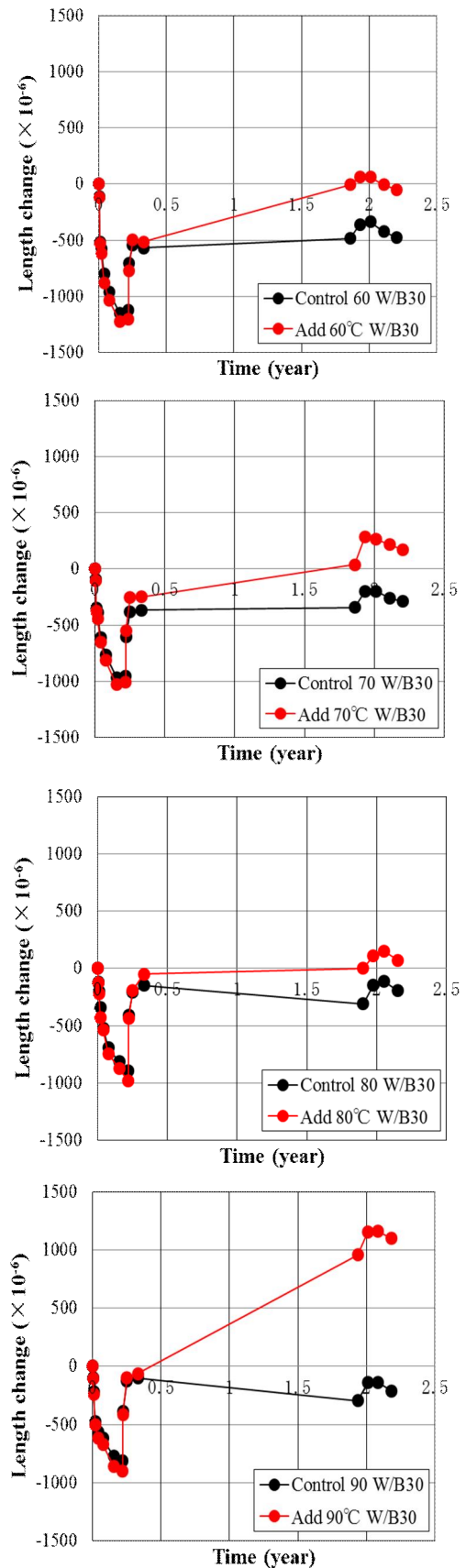


図-3 モルタル長さ変化率

次に材齢 2 年に着目すると、超速硬性混和材無しの Control は長さ変化率に大きな変化は認められないが、超速硬性混和材を添加した調査では、無混和に比べて収縮が小さくなったり、膨張側のひずみが確認された。特に加熱養生温度 90℃では $1,000 \times 10^{-6}$ を超える大きな膨張が見られた。図-4 に超速硬性混和材を混和した調査の加熱養生温度と、硬化体作製後 1 日および材齢 2 年の長さ変化率の関係を示す。硬化体作製後 1 日の長さ変化率は、加熱養生温度によらずほぼ同じ値を示している。一方、材齢 2 年の長さ変化率に着目すると、加熱養生温度が 60～80℃の範囲では、試験体作製直後とほぼ同等の長さ変化率であるが、90℃では顕著に膨張していることが分かる。この原因を明らかにするため、モルタル硬化体の分析を実施した。

3.2 モルタル硬化体の分析結果

(1) 粉末 X 線回折

60℃または 90℃で加熱養生したモルタル硬化体の作製後 1 日と材齢 2 年の粉末 X 線回折の測定結果を図-5 に示す。いずれもエトリンガイト (Ett) のピークが確認できるが、作製後 1 日に着目すると、90℃は 60℃に比べてエトリンガイトのピーク強度がやや小さい。90℃では、エトリンガイトの一部が分解した可能性がある。次に材

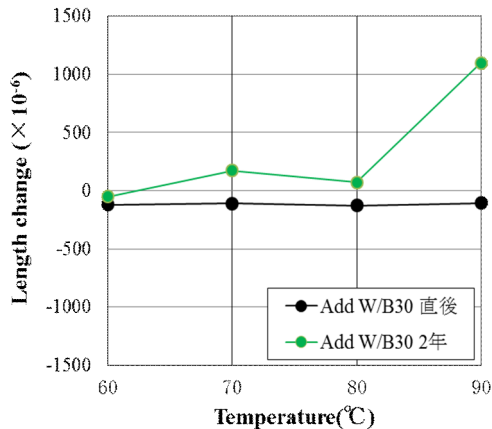


図-4 蒸気養生温度とモルタル長さ変化率の関係

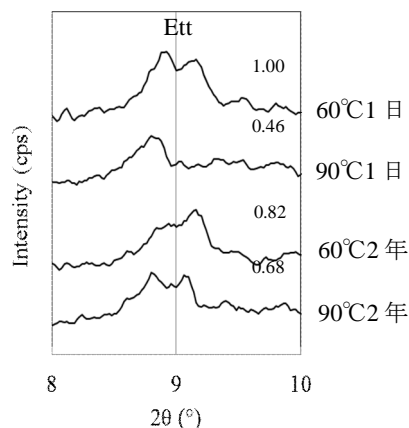


図-5 モルタル硬化体の粉末 X 線回折測定結果

齢 2 年に着目すると、60℃では作製後 1 日と大きな変化は見られないが、90℃では材齢 2 年の方が作製後 1 日に比べてエトリンガイトのピークが強い。

(2) SEM 観察

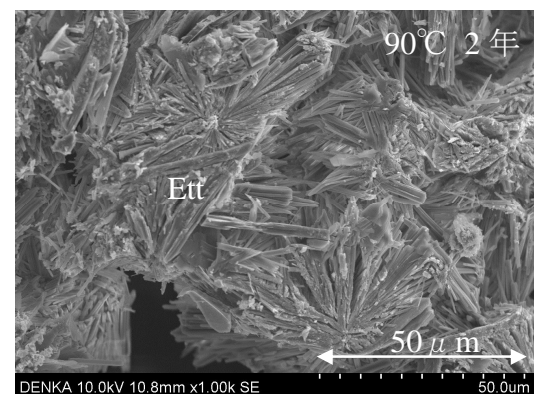
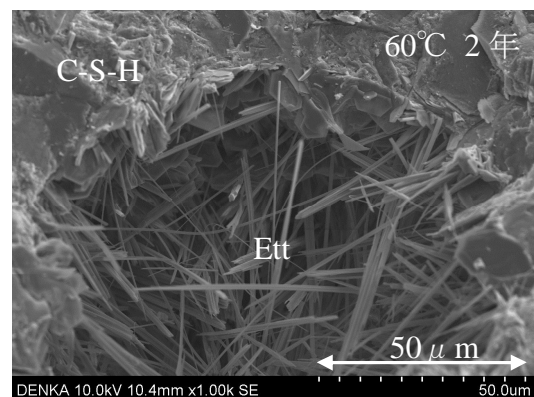
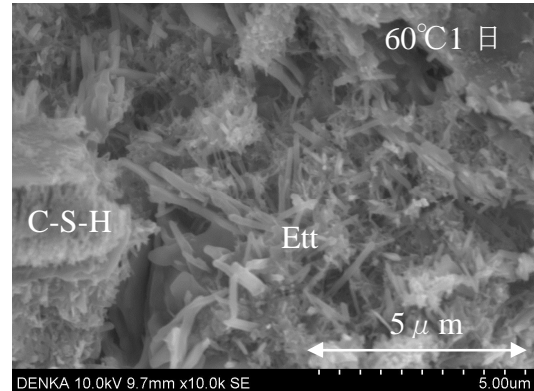


図-6 モルタル硬化体の SEM 観察結果

図-6にモルタル硬化体のSEM観察結果を示す。60℃で加熱養生した直後の硬化体では、C-S-Hの水和組織周辺にエトリングイト(Ett)の針状結晶が見られ、長さは1~5 μ m程度のものが多い。次に90℃で作製後1日の硬化体に着目すると、C-S-Hの水和組織周辺にエトリングイトの針状結晶が見られる。結晶の大きさは60℃に比べてやや小さい。これに対して、材齢2年の硬化体に着目すると、60℃ではエトリングイトの針状結晶が大きく成長し、組織内に比較的均一に分布している。エトリングイト周辺に空間も多く、周囲の組織に膨張を与えている印象は少ない。一方、90℃の硬化体に着目すると、空隙部分にエトリングイトが集積して放射状に生成している。エトリングイト周囲の空隙は少なく、周辺組織に膨張を与えていることが示唆される。膨張に伴うひび割れは見られないが、DEFで生ずるものと同様な形態のエトリングイトが確認された^{11,12)}。

3.3 コンクリート物性

(1) 乾燥収縮ひずみ

加熱養生温度を90℃とし、水結合材比を変化させたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を図-7に示す。水結合材比によらず収縮挙動を示し、水結合材比40%の条件が最も収縮率が大きくなり、材齢約3年で -800×10^{-6} 程度の収縮ひずみを示している。次に水結合材比40%の条件で、超速硬性混和材の有無に着目すると、超速硬性混和材の添加によって収縮ひずみが若干大きくなり、材齢約3年で -800×10^{-6} 程度の値を示した。

(2) 安定性(コンクリートパー法)

次に加熱養生温度を90℃とし、供試体を封かん養生して測定したコンクリートの長さ変化率の測定結果を図-8に示す。いずれの硬化体も促進材齢3年まで $-300 \sim +100 \times 10^{-6}$ の範囲で推移している。水結合材比の影響に着目すると、水結合材比30%の条件で 100×10^{-6} 程度の

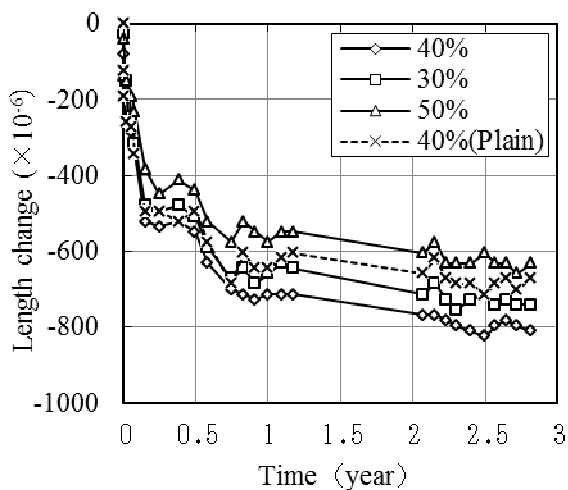


図-7 コンクリート長さ変化率 (20°C60%RH)

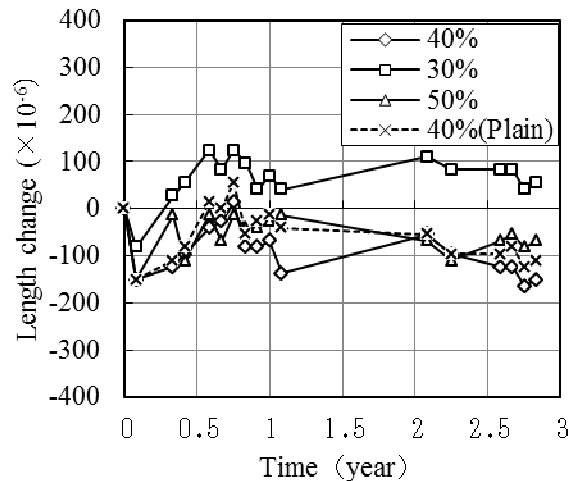


図-8 コンクリート長さ変化率

膨張が見られる。水結合材比40%で超速硬性混和材の有無に着目すると、ほぼ同等の寸法変化率を示している。図-4に示すように、モルタル試験体では加熱養生温度が90℃の条件で、DEFと思われる膨張が確認されたが、コンクリート試験体ではモルタルのような顕著な膨張挙動は見られていない。水結合材比30%の配合で若干の膨張が生じた理由として、単位セメント量および単位速硬性混和材量が多く、供給されるSO₃量が多いことが考えられる。

4. 考察

DEFは養生温度が80℃を超えると顕著になり、硫酸アルカリの含有量の増加やSO₃/Al₂O₃モル比が0.55以上の時に膨張量が増加することが報告されている^{11,12,15)}。本検討でも、DEFが顕在化する90℃で加熱養生を行ったモルタル硬化体で、材齢2年で大きな膨張を確認した。超速硬性混和材の添加によって増加する硫酸アルカリ量はSO₃換算で1.1%に相当し、セメント中に含まれるSO₃3%を加味すると4.1%となる。SO₃/Al₂O₃モル比も0.96となることから、モルタル硬化体で見られた $1,000 \times 10^{-6}$ 程度の膨張が生じた結果は既往の研究と符合し、これはDEFによるものと考えられる。この値はアル骨判定の閾値に相当する膨張率である。

一方、養生条件が若干異なるものの、コンクリートでは、モルタルのような大きな膨張は認められていない。モルタルに比べてセメントおよび速硬性混和材の単位量が少ないこと、コンクリートのほうが膨張圧を緩和しやすいこと、水分の供給が少ないことなどが考えられるが、今後も評価を継続する予定である。膨張の生じやすかったモルタル試験体でも、80℃以下の温度条件では膨張が生じなかったことから、80℃以下の温度条件にて加熱養生時の温度管理を徹底するとともに、硫酸アルカリ量の低減を図る必要があると考えられる。また、部材が大き

くなると躯体内部温度が蒸気養生条件より高くなる可能性があるため注意が必要である。

5. まとめ

超速硬性混和材を用いて、加熱養生温度を変えて調製し、作製から約2年が経過したモルタルおよびコンクリートの物理的性質の評価、硬化体の分析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 加熱養生で90℃の熱履歴を受けたモルタル硬化体は、材齢2年で $1,000 \times 10^{-6}$ 程度の膨張を示した。XRDやSEM観察の結果から、DEFによる膨張である可能性が示唆された。
- (2) 加熱養生で90℃の熱履歴を受けたコンクリートの膨張率は、 100×10^{-6} 程度となりモルタル試験の値と比べると1/10程度となった。
- (3) 加熱養生で60~80℃の熱履歴を受けたモルタル硬化体や、90℃で蒸気養生を行ったコンクリート硬化体には顕著な膨張は見られない。コンクリートで80℃以下の養生条件では、DEFによる膨張の可能性は極めて低いと考えられる。

参考文献

- 1) 松永嘉久, 渡辺芳春, 坂井悦郎, 大門正機: 超早強混和材の特性とコンクリート製品への適用, セメントコンクリート論文集, Vol.52, pp.412-417, 1998
- 2) 松永嘉久, 山本賢司, 盛岡実, 渡辺芳春, 坂井悦郎, 大門正機: 超早強コンクリート混和材によるコンクリート製品の製造効率の向上と環境負荷低減, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, Vol.8, pp.339-343, 2001
- 3) 河野清, 堀井克章, 浅井洋: 製品用硬練りコンクリートに対する無機系硬化促進剤の利用, セメント技術年報, Vol.38, 昭59
- 4) 小林哲夫, 安藤豊, 上杉郁雄: 短時間脱型用混和材を用いたコンクリートの諸特性, セメントコンクリート論文集, No.44, pp.134-139, 1990
- 5) GBRC, (一財) 日本建築総合試験所, 建築技術認証性能証明番号: GBRC性能証明 第13-22号
- 6) 小島正朗, 石山直希, 山本登昭, 入内島克明: プレキャスト部材用超速硬コンクリートの開発と適用

—やわらぎ森のスタジアムの施工—, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.128-143, 2014

- 7) 笠井芳夫: 極早期脱型するコンクリートの強度に関する研究(その2), 日本建築学会論文報告集, No.180, pp.7-12, 1971
- 8) 住吉宏, 窪山潔, 今橋太一, 塩谷勝: コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響, セメント技術年報, Vol.35, pp.290-293, 1981.12
- 9) 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.469-474, 2012
- 10) 佐々木謙二, 岡野耕大, 片山強, 原田哲夫: 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの水分逸散性状と緻密性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1540-1545, 2012
- 11) 山本賢司, 吉野亮悦, 渡辺芳春, 坂井悦郎: エトリンガイト生成系高強度混和材における遅れ膨張の抑制, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, Vol.14, pp.75-82, 2007
- 12) 羽原俊祐, 福田俊也, 小山田哲也, 藤原忠司: DEFによるコンクリートの硫酸塩膨張現象について—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
- 13) 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, Vol.44, No.7, pp.44-51, 2006
- 14) 久我龍一郎, 辻大二郎, 米澤敏男, 坂井悦郎: 高炉スラグ高含有セメントのDEFに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 15) Heinz, D. and Ludwig, U.: Mechanism of secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes subjected to Heat Treatment, Concrete Durability, ACI SP-100, Vol.2, pp.2059-2071, 1987
- 16) 栖原健太郎, 入内島克明, 小島正朗, 畑信次, 米澤敏男: 超速硬性混和材と加熱養生を併用する超速硬コンクリートの開発(その5) 超速硬コンクリートの耐久性の評価, 日本建築学会学術講演概要集, A-1, 材料施工, pp.597-598, 2013.8