

論文 蒸気養生した超速硬コンクリートの寸法安定性と遅れ膨張の潜在性評価

前田 拓海*1・岩崎 昌浩*2・森 泰一郎*3・小島 正朗*4

要旨：早強セメントとエトリンナイト生成系混和材を使用する超速硬コンクリートの材齢 365 日までの膨張性を調査した。蒸気養生温度 90℃で水結合材比 30 %の場合に限り遅れ膨張が生じたことから、蒸気養生温度の安全領域は 80℃以下と考えられる。蒸気養生温度 90℃の場合は、いずれの水結合材比でも材齢 1 日でエトリンナイトの分解が認められたが、材齢 365 日では膨張が生じていない水結合材比 50 %の場合のみエトリンナイトが検出され、粉末 X 線回折で検出されるエトリンナイトの生成量と遅れ膨張の間に相関性はなかった。また、DEF index による評価をそのまま超速硬コンクリートに適用することは難しいことが明らかになった。

キーワード：速硬性混和材、超速硬コンクリート、蒸気養生、寸法安定性、エトリンナイト

1. はじめに

日本の総労働人口が減少する中、建設技能労働者の人手不足の深刻化が予想されている。一方で、建築工事の短工期化に対しては根強いニーズがある。プレキャスト工法は、コンクリート構造物の建設現場で求められる高品質と短工期を両立し、安定してプレキャストコンクリート部材を製造できる。従来のプレキャストコンクリート部材は、脱型後、吊り上げに必要な強度である 12 N/mm²を発現するまでに 1 日程度の時間を要するが、所要の強度を早期に発現できれば製造期間の短縮と生産性向上に繋がる。プレキャストコンクリート製品工場では、早期に脱型可能な強度を発現させ、高品質な製品を低コストで開発する検討が行われている^{1),2),3)}。鉄筋コンクリート工事の生産性向上に有効なプレキャスト工法の更なる適用拡大を狙いとして、筆者らは、速硬性混和材と加熱養生を併用し、経済性、速硬性能、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^{4),5),6)}。

また、既往の研究結果では、硫酸塩、高温の蒸気養生、供用時に十分な水分供給、これらの条件が重なった場合にのみエトリンナイトの遅延生成が生起することが知られている^{7),8),9),10)}。これを踏まえ、筆者らは、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について、長期の寸法安定性を含めた物理的性状と化学特性につい

て調査してきた^{11),12),13)}。しかしながら、遅れ膨張の生起条件や DEF index およびマスコンクリートのひび割れ制御指針といった遅れ膨張の潜在性評価の指標との関連性は、十分に把握できていない。

本報では、超速硬コンクリートを蒸気養生後、材齢 365 日まで水中養生した場合の長期の寸法安定性を調査し、既報¹³⁾の意図的に硫酸塩とアルカリ成分を添加した超速硬コンクリートの実験における材齢 365 日までの長期膨張特性データを加えて、遅れ膨張の潜在性評価に関する考察について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

(1) 使用材料

セメントに早強ポルトランドセメント (HPC, ブレーン比表面積: 4,290 cm²/g)、速硬性混和材 (FDT) として、CaO, Al₂O₃, SO₃を主成分とするエトリンナイト生成系を用いた。表-1に、使用したセメントと速硬性混和材の化学成分と密度を示す。細骨材は、新潟県姫川水系の川砂 (S, 表乾密度: 2.61 g/cm³)、粗骨材は新潟県姫川水系の川砂利 (G, 表乾密度: 2.66 g/cm³, G max : 25 mm) を用いた。練り混ぜ水には上水道水 (W)、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能減水剤とアルキルエーテル系陰

表-1 使用材料

材料	化学成分 (mass%)						密度 (g/cm ³)
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	R ₂ O	LOI	
早強ポルトランドセメント (HPC)	65.4	5.0	20.1	3.1	0.46	1.5	3.12
速硬性混和材 (FDT)	51.6	7.0	0.3	28.1	2.53	5.1	2.72

*1 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 研究員 (正会員)

*2 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 前任研究員

*3 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 前任研究員 (正会員)

*4 株式会社竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 (正会員)

イオン界面活性剤の AE 助剤を用いた。また、既報¹³⁾の硫酸塩とアルカリ成分の調整には、無水石膏 (CS) と水酸化ナトリウム (Na) の一級試薬をそれぞれ用いた。

(2) コンクリートの調合

表-2 に、コンクリートの調合とフレッシュ性状を示す。速硬性混和材はセメントに対して内割りで 5 % 添加し、空気量は $4.5 \pm 1.5 \%$ とした。また、既報¹³⁾では、硫酸塩とアルカリ成分を過剰に含んだコンクリートの耐久性への影響を評価するため、調合 No.1 および No.3 は、材料中の SO_3 が 37.7 kg/m^3 、全アルカリ量 (R_2O) が 4.90 kg/m^3 となるよう、無水石膏と水酸化ナトリウムを添加したコンクリートも併せて作製した。

(3) セメントペーストの調合

セメントペーストの調合は、コンクリートの調合から細骨材と粗骨材を除いたものとした。高性能減水剤と AE 助剤はコンクリートの調合と同様の添加率を混和し、 $2 \times 2 \times 8 \text{ cm}$ のセメントペースト試験体を作製した。

2.2 養生条件

図-1 に、コンクリート、セメントペーストの蒸気養生条件を示す。練り混ぜ後、 30°C -45 min の前置き養生を施し、 40°C -75 min 保持し、養生温度 60°C 、 70°C 、 80°C 、 90°C の 4 水準の温度まで 30 min かけて昇温して蒸気養生を 1 hrs. 施した。注水から 3.5 hrs. で蒸気養生槽の扉を開放して脱型し、蒸気養生後の試験体は室温まで下がった後、掛け流し式の水槽内にて 20°C の水中養生を施した。試験体は全て同一の水槽内にて水中養生した。既報¹³⁾では、無水石膏と水酸化ナトリウムを添加した試験体は、蒸気養生温度 90°C のみ実施した。

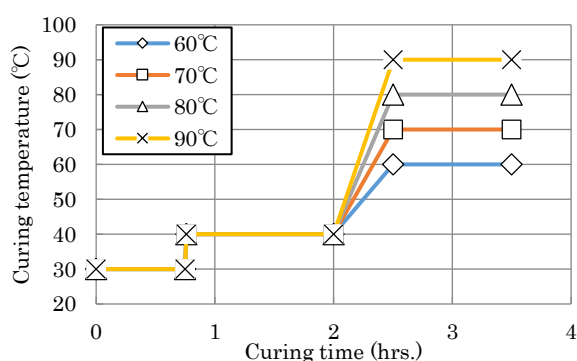


図-1 蒸気養生パターン

2.3 コンクリート物性評価

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠し、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のコンクリートを用いた。脱型直後の材齢 3.5 時間および材齢 1 日で圧縮強度を測定した。

(2) 長さ変化率

JIS A 1129-3 ダイアルゲージ法に準拠し、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のコンクリートを用いた。材齢 365 日までの長さ変化率を測定した。

2.4 セメントペーストの解析

(1) 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折による分析を行った。水中養生を施したセメントペーストをメノウ製乳鉢で手粉碎し、 $90 \mu\text{m}$ 篩を通過した粉体を多量のアセトンで水和停止させた後、 40°C 乾燥を 24 hrs. 施したものを解析試料とした。水結合材比 30% と 50% の試料を抽出した。

(2) 溶出 SO_4^{2-} 量

水中養生を施したセメントペーストをメノウ製乳鉢で手粉碎し、 $90 \mu\text{m}$ 篩を通過した粉体をそれぞれ水粉体質量比 1:10 の割合で調製し、24 hrs. 攪拌後、上澄み液を吸引ろ過したものを用いた。試料の調整は水温 20°C にて行った。溶出した硫酸イオン量の測定にはイオンクロマトグラフィーを用いた。粉末 X 線回折と同様に、水結合材比 30% と 50% の試料を抽出した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリート物性

(1) 圧縮強度

図-2 に、蒸気養生温度 $60 \sim 90^\circ\text{C}$ における材齢 3.5 hrs. および 1 日におけるコンクリートの圧縮強度を示す。蒸気養生温度が高くなるにつれて圧縮強度が増加した。

材齢 3.5 hrs. に着目すると、一般に脱型・吊り上げに必要なとされる 12 N/mm^2 以上の圧縮強度 (図-2 赤線部) を、水結合材比 40 % の場合は蒸気養生温度 70°C 以上で、水結合材比 50 % の場合は蒸気養生温度 80°C 以上で、早期に発現されていることが分かる。

次に、材齢 1 日について見ると、従来のコンクリートでは材齢 28~91 日で発現される設計基準強度の $27 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ の圧縮強度が、超速硬コンクリートでは、いずれ

表-2 コンクリートの調合

調合		W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	HPC	FDT	S	G		
1	F30	30	47	180	570	30	714	821	21.0	4.2
2	F40	40	47	180	428	22	774	889	18.0	6.0
3	F50	50	47	180	342	18	809	930	18.5	4.0

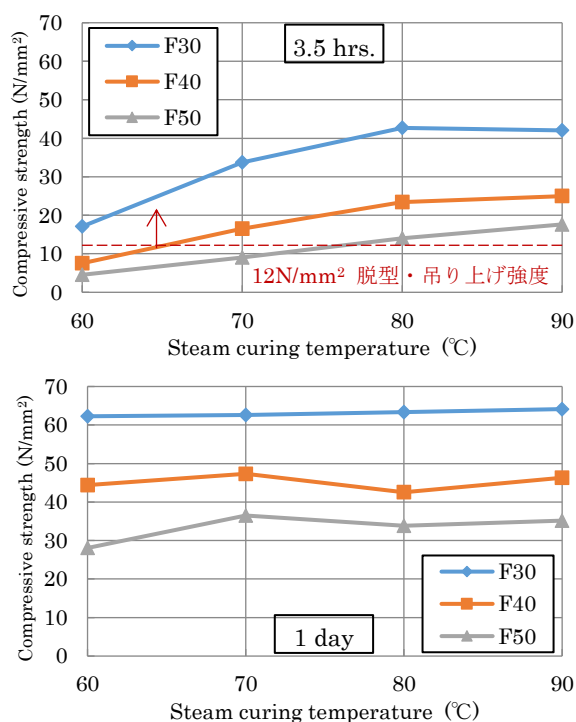


図-2 コンクリートの圧縮強度

の水結合材比と蒸気養生温度の場合でも材齢1日で発現されることが分かる。

以上の結果から、超速硬コンクリートは、脱型・吊り上げ強度や設計基準強度を早期に発現できることが確認された。

(2) 長さ変化率

超速硬コンクリートの寸法安定性を確認するため、長さ変化率を評価した。図-3に、蒸気養生温度60～90℃として、水中養生を施した場合のコンクリートの長さ変化率をそれぞれ示す。蒸気養生温度60℃、70℃、80℃では、いずれの水結合材比においても材齢経過に伴う長さ変化率に大きな変化は確認されなかった。

一方で、蒸気養生温度90℃では、水結合材比40%と50%の場合は、材齢経過に伴う長さ変化率の大きな変化は確認されていないが、水結合材比30%の場合に限り材齢180日以降から遅れ膨張が確認された。速硬性混和材

を含む単位結合材量が多く、SO₃の供給が多いことが遅れ膨張が生じた要因の一つとして考えられる。

既往の研究結果¹⁴⁾によれば、遅れ膨張に及ぼす水結合材比の影響は、高水結合材比であるほど物質移動が容易となるため、アルカリ溶出が早期に生じ遅れ膨張が生じやすい。一方で、最終膨張率は、低水結合材比であるほど組織が緻密になるために大きくなることが明らかにされている。超速硬コンクリートでは、材齢180日以降で水結合材比30%の場合のみ遅れ膨張が生じており、既往の研究結果と異なる傾向を示した。また、図-4に、試薬を用いて硫酸塩とアルカリ成分を過剰添加したコンクリートの材齢365日までの長さ変化率を示す。図中の記号CSは材料中のSO₃が37.7 kg/m³、記号Naは全アルカリ量(R₂O)が4.90 kg/m³、記号CS+NaはSO₃が37.7 kg/m³、全アルカリ量(R₂O)が4.90 kg/m³となるように試薬で

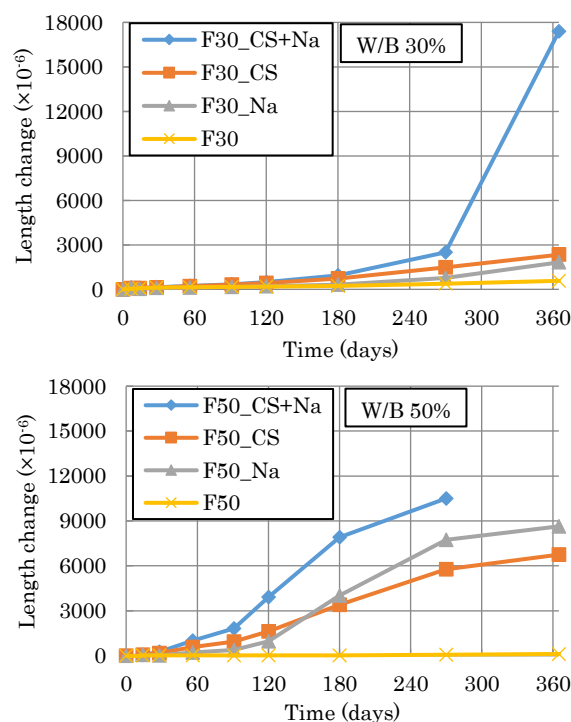


図-4 成分調整したコンクリートの長さ変化率
(蒸気養生温度90℃)

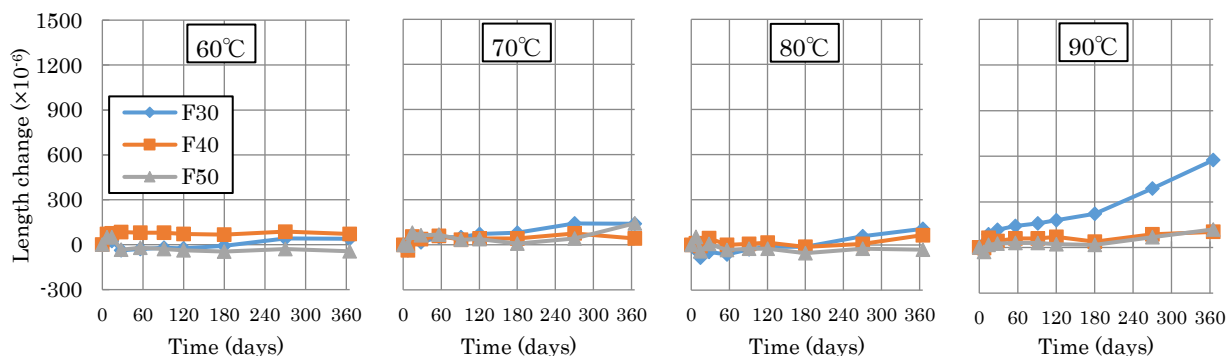


図-3 コンクリートの長さ変化率 (速硬性混和材のみ)

成分調整したものであり、この場合は、既往の研究¹⁴⁾と同様の傾向を示した。原因は十分に明らかではないが、水結合材比の変化によるアルカリ溶出と組織構造以外の因子が影響していると推察される¹⁵⁾。セメント種類によってSO₃や水結合材比の影響が異なり、結合材に速硬性混和材と早強ポルトランドセメントが用いられる超速硬コンクリートでは、SO₃やアルカリの含有量などが汎用のコンクリートと異なるため、遅れ膨張の傾向に違いが生じたと考えられる。

以上の結果から、長期に渡り水分が供給される水中養生を施した場合の材齢365日までの期間における超速硬コンクリートでは、蒸気養生温度90℃で水結合材比30%の場合に限り遅れ膨張が生じたことから、蒸気養生温度の安全領域は80℃以下と考えられる。

(3) 遅れ膨張の潜在性評価

次に、遅れ膨張の潜在性評価について、速硬性混和材のみを用いたコンクリート（図-3）と、硫酸塩とアルカリ成分の調整を施したコンクリート（図-4）の長さ変化率の結果を用いて、実際に遅れ膨張が明確に確認された材齢180日の膨張率と、遅れ膨張の潜在性評価の指標であるDEF index（ $= (\text{SO}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3) \text{ mol} \times [(\text{SO}_3 + \text{C}_3\text{A}) \text{ mass\%} / 10] \times (\text{Na}_2\text{Oeq})^{1/2}$ ）およびマスコンクリートのひび割れ制御指針の規定値を照らし合わせて考察する。図-5に、DEF index と180日膨張率の関係性、図-6に、マスコンクリートのひび割れ制御指針と180日膨張率の関係性をそれぞれ示す。また、本報ではDEF indexを算出する際に混和材由来のAl₂O₃を全てC₃A換算している。

DEF index については、実際に遅れ膨張が生じた蒸気養生温度90℃について整理した。既往の研究結果では、SO₃、C₃A、R₂O量の影響を考慮したDEF indexは1.1以上で膨張を生じ、DEF indexの増加に伴い膨張率が線形的に増加する結果が報告されている¹⁶⁾。上述の規定値と本試験値を照らし合わせると、超速硬コンクリートは、成分調整をしていないものでもDEF index = 1.1であり、遅れ膨張の危険領域となる。水結合材比30%では実際に膨張しており、水結合材比50%では現状は膨張していない（図-3）。試薬で成分調整してDEF indexが大きくなったものは、膨張率も大きくなる傾向を示した（図-5）。しかしながら、蒸気養生温度60～80℃の場合では、DEF indexが危険領域に関わらず、いずれの場合も膨張は確認されなかった（図-3）。既往の研究結果では、DEF indexが安全領域の範囲内でも遅れ膨張が確認された報告がある¹⁵⁾。本試験では逆に、DEF indexが危険領域であっても、蒸気養生温度80℃以下では膨張しておらず、DEF indexはDEFの潜在性評価の十分条件にはなっていない。DEF indexによる潜在性評価をそのまま超速硬コンクリートに適用することは難しいことが明らかになった。

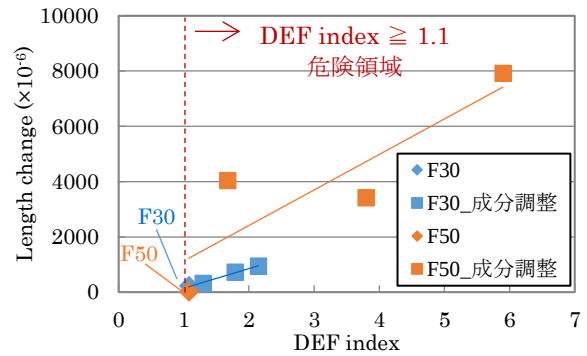


図-5 DEF index と180日膨張率の関係性
(蒸気養生温度90℃)

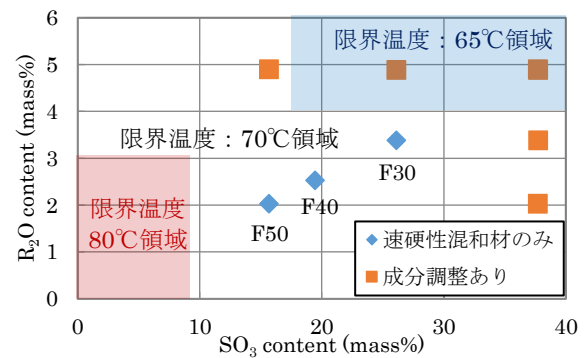


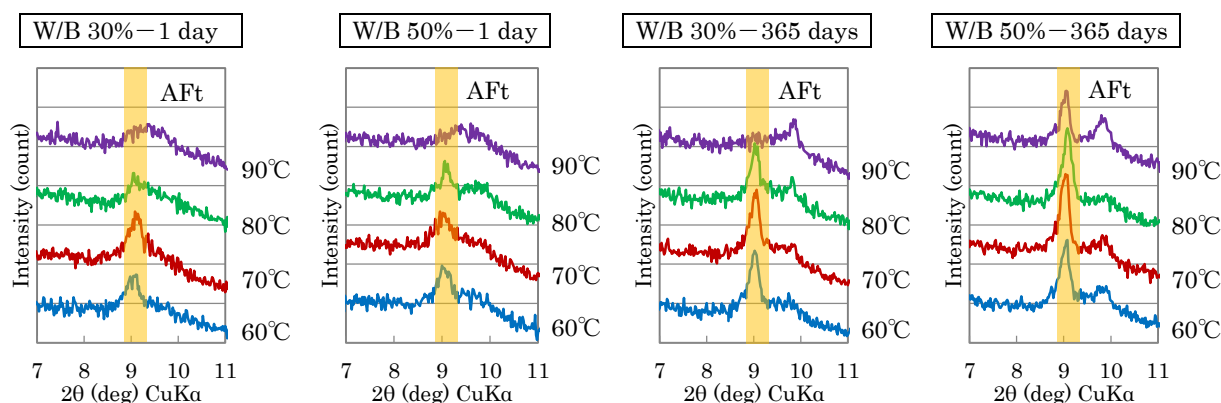
図-6 マスコンクリートのひび割れ制御指針の規定値と180日膨張率の関係性

また、マスコンクリートのひび割れ制御指針では、コンクリートの最高温度の限界温度は、例外を除いて70℃と規定している¹⁷⁾。当該規定を超える範囲は遅れ膨張の危険領域とされており、いずれの場合も90℃の蒸気養生温度は、この限界温度を超えている。蒸気養生温度が90℃の場合、成分調整して硫酸塩とアルカリ成分を過剰に含んだコンクリートはいずれも膨張を示した（図-4）。しかし、速硬性混和材のみを用いた場合は、水結合材比30%では膨張が確認されたが、これより反応が早いと考えられる水結合材比40%、50%では膨張が見られていない（図-3）。マスコンクリートのひび割れ制御指針の限界温度70℃領域のSO₃と全アルカリ量（R₂O）に対して見ると、蒸気養生温度が80℃までで速硬性混和材のみを用いた場合は、いずれの水結合材比においても膨張は示さなかった（図-3、図-6）。超速硬コンクリートにおける蒸気養生温度の安全領域は80℃以下と考えられ、マスコンクリートのひび割れ制御指針の限界温度70℃よりも高い結果となった。

3.2 セメントペーストの分析結果

(1) 粉末X線回折

遅れ膨張に及ぼす蒸気養生温度の影響を詳細に調査するため、水中養生を施したセメントペーストの水和物と溶出イオンの分析を行なった。図-7に、蒸気養生温



図－7 セメントペーストの XRD 回折パターン

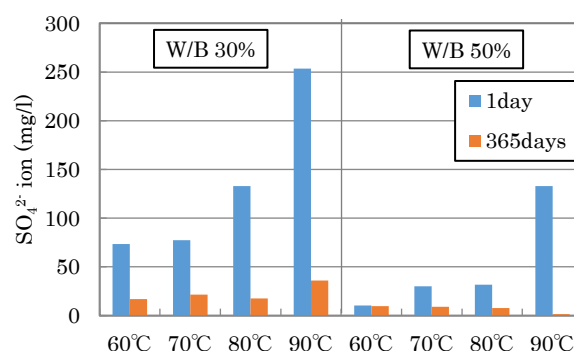
度 60～90℃とした場合の材齢 1 日および 365 日におけるセメントペーストの XRD パターンをそれぞれ示す。まず、材齢 1 日に着目すると、いずれの水結合材比においても、蒸気養生温度 60℃、70℃、80℃の場合でエトリンサイト (AFt) のピークが確認された。一方で、蒸気養生温度 90℃ではエトリンサイトのピークは確認されなかった。エトリンサイトの分解が生じた可能性がある。

次に、材齢 365 日の蒸気養生温度 90℃についてエトリンサイトの回折角度を見ると、水結合材比 30 %の場合ではピークは確認されず、材齢 1 日から 365 日にかけてエトリンサイトは生成されていない。一方で、水結合材比 50 %の場合では、材齢 1 日で確認されなかったエトリンサイトが材齢 365 日で確認された。水結合材比によってエトリンサイトの生成傾向が異なり、水結合材比 50 %ではエトリンサイトの遅延生成が生じたと推察される。また、コンクリートの長さ変化率 (図－3) とセメントペーストにおけるエトリンサイトの生成傾向 (図－7) について整理すると、例えば、蒸気養生温度 90℃では、水結合材比 30 %の場合、コンクリートで遅れ膨張が確認されたが、セメントペーストではエトリンサイトの遅延生成は生じていない。一方で、水結合材比 50 %の場合、セメントペーストでエトリンサイトの遅延生成が生じているが、コンクリートでは遅れ膨張は確認されなかった。

以上の結果から、粉末 X 線回折で検出されるエトリンサイトの生成量と遅れ膨張の間には、明瞭な相関性は確認されなかった。既往の研究結果でも同様の傾向が示されており¹⁸⁾、本試験結果と合致した。膨張に寄与するエトリンサイトが粉末 X 線回折において非晶質化して検出されない報告¹⁹⁾や、空気量の多いモルタルやコンクリートの場合、水が浸透しやすい一方、エトリンサイトは空隙を充填するに留まり、膨張に影響しない報告²⁰⁾もある。非晶質性のエトリンサイトの存在や、硬化体中の空気や空隙による膨張圧の緩衝効果が影響した可能性がある。

(2) 溶出 SO_4^{2-} 量

図－8 に、蒸気養生温度を 60～90℃として、水中養生



図－8 セメントペーストの溶出 SO_4^{2-} 量

を施した場合の材齢 1 日および 365 日におけるセメントペーストから溶出する硫酸イオン量を示す。材齢 1 日に着目すると、蒸気養生温度が高くなるにつれて硫酸イオンの溶出量が増加し、特に 90℃で著しく高くなった。これは、80～90℃の温度を閾値として、セメントペースト中に硫酸イオンが多く存在したことを示唆している。次に、材齢 365 日について見ると、いずれの蒸気養生温度の場合でも、材齢経過に伴い溶出する硫酸イオン量が減少した。硬化体中に存在する硫酸イオンが、エトリンサイトなどの水和物生成に消費されたと考えられる。

セメントペーストの粉末 X 線回折や硫酸イオンの分析結果から、蒸気養生温度 90℃の場合にエトリンサイトの分解や遅延生成が生じた可能性があるが、結合材の調合が同一のコンクリートでは、必ずしも遅れ膨張は生じなかった。但し、遅れ膨張の潜在的な危険性が示唆されるため、今後も、長さ変化率の測定を継続する。

4. まとめ

(1) 材齢 365 日までの期間における超速硬コンクリートでは、蒸気養生温度 90℃で水結合材比 30 %の場合に限り遅れ膨張が生じたことから、蒸気養生温度の安全領域は 80℃以下と考えられ、マスコンクリートのひび割れ制御指針の限界温度 70℃よりも高い結果となった。

- (2) セメントペーストの粉末 X 線回折や溶出イオンの分析結果から、蒸気養生温度 90℃の場合にエトリンガイトの遅延生成が生じた可能性がある。しかしながら、結合材の調合が同一のコンクリート試験体では、必ずしも遅れ膨張は生じておらず、粉末 X 線回折で検出されるエトリンガイトの生成量と遅れ膨張の間には、明瞭な相関性は確認されなかった。
- (3) 超速硬化コンクリートにおいては、DEF index が危険領域の 1.1 であるが、蒸気養生温度 90℃のみ膨張し、60～80℃では膨張は生じていない。DEF index は DEF の潜在性評価の十分条件にはなっておらず、そのまま超速硬コンクリートに適用することは難しいことが明らかになった。

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) 樋口隆行, ゲンドウックフーン, 庄司慎, 富岡茂: 低温で打設し蒸気養生を行った早期脱型材配合コンクリートの物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1963-1968, 2013
- 4) 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ーやわらぎ森のスタジアムの施工ー, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.582-588, 2014
- 5) 小島正朗, 佐々嘉宣, 入内島克明, 栖原健太郎: 速硬性混和材と加熱養生を併用したプレキャスト用超速硬コンクリートの強度発現性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1786-1791, 2014
- 6) 速硬性混和材エフダックタイプ T を添加した超速硬プレキャストコンクリート工法, (一財) 日本建築総合試験所, 建築技術性能証明評価シート, GBRC 性能証明 第 13-22 号, 2014
- 7) 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ー材料, 蒸気養生及び保管条件の影響ー, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.335-341, 2006
- 8) 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
- 9) 福田俊也, 羽原 俊祐, 松尾 久幸, 薄葉 信一: モルタル及びコンクリートにおける DEF 膨張について, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.723-728, 2008
- 10) 川端雄一郎, 松下博通: 高温養生を行なったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.4, pp.549-563, 2011
- 11) 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
- 12) 下澤淳平, 樋口隆行, 入内島克明, 小島正朗: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.187-192, 2015
- 13) 前田拓海, 岩崎昌浩, 森泰一郎, 小島正朗: 硫酸塩とアルカリ成分を混和し加熱養生する超速硬コンクリートの寸法安定性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.519-524, 2018
- 14) Famy, C.: Expansion of Heat-cured Mortar, Ph. D Thesis of Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1999
- 15) 川端雄一郎, 小川彰一, 高橋晴香, 佐川康貴: 長期室内試験に基づく DEF 膨張の影響要因の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.527-534, 2015
- 16) Zhang, Z., Olek, J. and Diamond, S.: Studies on delayed ettringite formation in heat-cured mortars: II. Characteristics of cement that may be susceptible to DEF, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 11, pp. 1737-1742, 2002
- 17) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 公益社団法人日本コンクリート工学会, pp.15-39, 2016
- 18) 山崎由紀, 鶴田孝司, 上原元樹: 種々の養生温度および水中浸漬におけるモルタルの成分変化がエトリンガイトの遅延生成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.639-644, 2018
- 19) 野澤里渚子, 斎藤豪, 佐藤賢之介, 佐伯竜彦: 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, Cement Science and Concrete Technology, Vol.70, pp.2-8, 2016
- 20) 山崎由紀, 上原元樹, 鶴田孝司: 空気量の異なるモルタル・コンクリートにおける DEF (エトリンガイト) の遅延生成による膨張挙動, 第 62 回粘土科学討論会講演要旨集, B5, pp.74-75, 2018