

コンクリートの収縮ひび割れに起因する RC 建築物劣化の制御技術に関する研究

Study on Controlling Techniques for Deterioration of
RC Building Caused by Shrinkage Cracks of Concrete

2019 年 9 月

広島大学大学院工学研究科 建築学専攻

張 玉露

コンクリートの収縮ひび割れに起因する RC 建築物劣化の制御技術に関する研究

目次

第一章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 RC 建築物における高強度コンクリートの実用化	2
1.1.2 コンクリート材料のひび割れ補修技術	4
1.2 研究の目的	5
1.2.1 調査段階における高強度コンクリートの自己収縮低減方法の確立	5
1.2.2 RC 建築物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす外部影響要因の特定	6
1.3 論文の構成	7
第一章参考文献	10
第二章 既往の研究	12
2.1 はじめに	12
2.2 コンクリートの自己収縮ひび割れ抑制方法	12
2.2.1 コンクリートの収縮ひび割れ制御方針	12
2.2.2 コンクリートの自己収縮	14
2.2.3 膨張材による自己収縮の低減	17
2.3 コンクリートのひび割れ補修技術	24
2.3.1 ひび割れ補修方法の現状	24
2.3.2 ひび割れ挙動に及ぼす影響要因	26
2.4 本章のまとめ	31
第二章参考文献	33
第三章 膨張材による超高強度コンクリートの自己収縮低減機構	36
3.1 はじめに	36
3.2 膨張材の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	36
3.2.1 実験材料及び調合条件	36
3.2.2 実験概要	40
3.2.3 実験結果	48
3.2.4 自己収縮の温度依存性に関する考察	58
3.2.5 水和圧理論に基づく考察	64
3.3 膨張材を使用した超高強度モルタルの若材齢体積変化に及ぼす骨材量の影響	80
3.3.1 研究の背景と目的	80
3.3.2 実験材料及び調合条件	81

3.3.3	実験概要	82
3.3.4	実験結果及び考察	83
3.4	本章のまとめ	94
	第三章参考文献	96
第四章 膨張材添加量が超高強度モルタルの自己収縮及び遅れ膨張に及ぼす影響 99		
4.1	はじめに	99
4.2	コンクリートの硫酸塩劣化に関する既往の研究－遅延エトリンサイト生成 (DEF)	100
4.2.1	DEF 膨張の発生機構	100
4.2.2	DEF 膨張の発生条件及び影響要因	104
4.3	実験概要	109
4.3.1	実験材料及び調合条件	109
4.3.2	自己収縮に関する実験 (シリーズ 1)	111
4.3.3	遅れ膨張に関する実験 (シリーズ 2)	113
4.3.4	質量含水率・結合水量測定実験	114
4.3.5	水和解析	115
4.4	実験結果及び考察	115
4.4.1	自己収縮ひずみの経時変化 (シリーズ 1)	115
4.4.2	材齢 7 日時点の水和物生成量	118
4.4.3	材齢 7 日時点の質量含水率	119
4.4.4	材齢 7 日時点以降のひずみの経時変化 (シリーズ 2)	120
4.4.5	材齢 7 時点における膨張材の反応率に関する考察	124
4.4.6	材齢 7 日以降の水和物生成量	127
4.4.7	膨張材の遅れ膨張と DEF 膨張の比較	129
4.5	本章のまとめ	131
	第四章参考文献	133
第五章 RC 建築物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響要因 140		
5.1	はじめに	140
5.2	左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす収縮低減剤及び外壁温度日変動の影響	140
5.2.1	研究背景と目的	140
5.2.2	実験概要	143
5.2.3	実験結果及び考察	149
5.2.4	応力解析	153
5.3	RC 建築物の乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に及ぼす壁面温度と部材の拘束効果の影響	

響	157
5.3.1 研究の背景と目的	157
5.3.2 北海道にある実建築物のモニタリング概要	158
5.3.3 北海道にある実建築物のモニタリング結果及び考察	159
5.3.4 数値解析による検証	165
5.3.5 広島にある実建築物のモニタリング概要	170
5.3.6 広島にある実建築物のモニタリング結果及び考察	172
5.3.7 数値解析による検証	175
5.4 本章のまとめ	182
第五章参考文献	184
第六章 結論	186
6.1 本論文のまとめ	186
6.2 今後の課題	191
関係論文リスト	193
謝辞	

第一章 序論

1.1 研究の背景

二十一世紀以降、世界経済の急速な成長に伴い、資源の節約、環境負荷の低減は、全人類に対して、地球環境を保護するための重大な課題になる。中国が2011年に発表した「第12次5ヵ年計画」では、「循環経済」、「低炭素技術」、「環境・生態保護の継続可能性」を実現する「グリーン発展」の理念が、新世紀の経済発展方針として提唱され^[1]、2016年の「第13次5ヵ年計画」にも強調されている^[2]。地球温暖化等環境問題を低減するため、各分野、各領域における努力に関心が集まっている。

建設領域において、建設コストの削減、構造物性能の多様化、耐用年数の長寿命化が目指されている。具体的には、容易に使用可能な材料の開発と性能向上；建築物の高層化および構造物の大空間化・小断面化といった課題の達成が求められる。また、建築構造物の長寿命化に対して、十分な力学性能を保持するだけでなく、耐久性能を向上する要求が高まっている。鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete, RC）は建築・土木分野における主要な建設材料の一つであり、RCの高強度化、高耐久化は建築構造物の長寿命化を実現するために重要である。

日本のRC建築物は1970年代の高度経済成長期に建てられたものが多く、法定耐用年数は50年前後となっており、多くの建物が建て替えの時期に直面している。地球環境への配慮や資源の有効利用などの観点から、社会的背景の主流として、建築物を取り壊して建て替えるフロー型社会から、建築物に手を加えることで使用年数を伸ばすストック型社会に変革している。その中、RC建築物の耐用年数を延長するために、劣化が発生し、性能が低下した建築物に対して適切な補修・改修を行うことが必要不可欠となる。

セメント系材料は、圧縮強度が高く、引張強度が低いという特徴を有し、外部荷重だけでなく、材料自体の化学反応によって、ひび割れが発生し易いという短所がある。ひび割れの発生は、内部鉄筋の腐食、コンクリートの中酸化を促進させ、建築部材の性能低下または構造物全体の劣化を促進する。そのため、耐久性の観点から考えると、コンクリートひび割れの抑制対策および適切な補修技術の確立は、RC建築物耐久性の維持、向上することに重要な課題の一つである。

図1-1にはRC建築物の長寿命化の概念図を示している。RC建築物の各性能は、供用期間に環境条件および外部荷重等の複合的な影響を受け、竣工時から、経年低下する。劣化を避け、耐久性を保持するための一つの方策として、設計段階と建設段階に高強度・高耐久性材料および施工技術を適用することで、使用期間の劣化リスクを低減することができる。

また、供用期間に生じた劣化に対して、劣化の原因を解明し、原因の因子を把握することで、適切な補修・改修を実行することが可能となり、再劣化の発現を抑制し、性能を保持・向上することは有効な対策である。

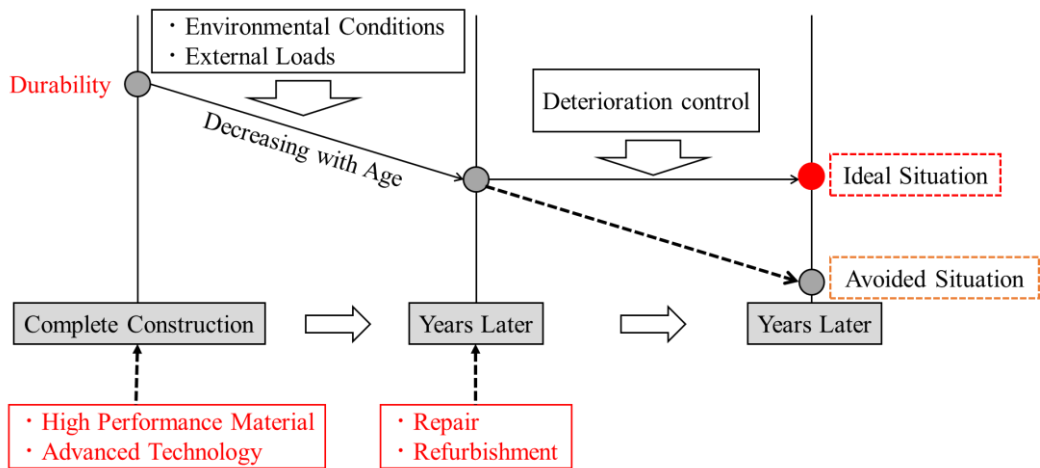


Figure 1-1 Schematic Chart of Improvement Policy for RC Structures Durability

図 1-1 RC 建築物の長寿命する概念図

1.1.1 RC 建築物における高強度コンクリートの実用化

高強度コンクリートは、水セメント比が小さいため、水和反応によって緻密な内部構造を形成させ、塩化物イオン等の有害因子のコンクリート内部への移動を抑制し、鉄筋の腐食やコンクリート中性化の進行有効的を抑制する^[3,4]。そのため高強度コンクリートは普通コンクリートより、圧縮強度が高いだけでなく、耐久性の大幅に向上させることによって、RC 建築物の維持管理コストの低減を期待することもできる^[5]。

Fc36N/mm²以上の高強度コンクリートが開発された以来、建築物の高層化進展、土木分野におけるプレキャストコンクリート（Precast Concrete, PC）製品の性能の向上に貢献している。特に、高性能 AE 減水剤（High Performance AE Water Reducing Agent）の開発^[6]およびシリカフェーム（Silica Fume）等の反応性微粉末の応用技術^[7]の発展に伴い、Fc150N/mm²レ

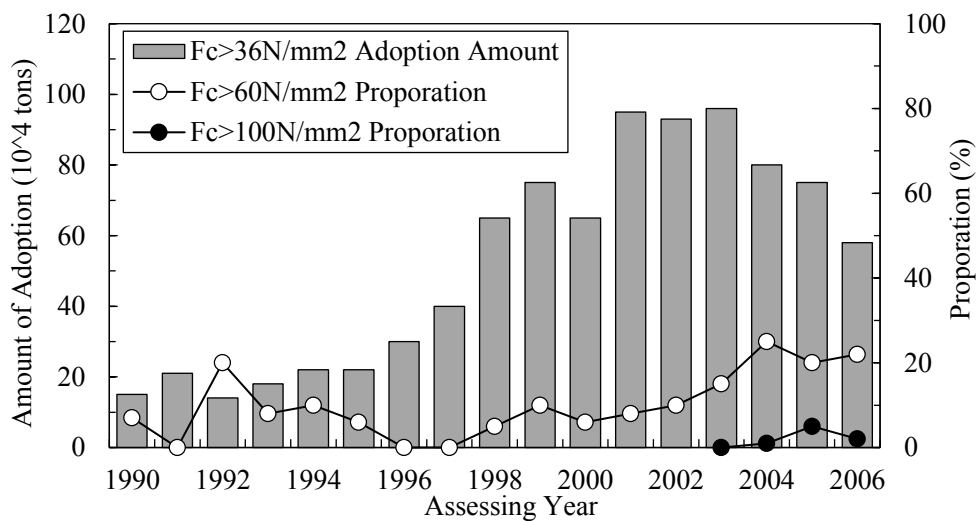


Figure 1-2 Transition of Fc in Buildings Where High Strength Concrete was Adopted ^[9]

図 1-2 高強度コンクリートが採用された建築物における Fc の推移^[9]

ベルの超高強度コンクリートが、実構造物に適用されている^[8]。

1970年以降、建築・土木分野のいずれも、コンクリートの高強度化が進み^[9]、特に、 $Fc60N/mm^2$ 以上の高強度・超高強度コンクリートの採用割合も増加している（図1-2）^[10]。高強度・超高強度コンクリートの活用は都市化において、益々重要な役割を果たしていると言える。

しかしながら、高強度コンクリートの水結合水比は小さいため、単位結合材量が大きく（図1-3）、水和反応によって引き起こされる自己収縮ひずみ量が普通コンクリートより卓越すること課題が挙げられる^[11]。また、高強度コンクリートは、流動性を確保するために単位骨材量が普通コンクリートより小さくなることが多く（図1-3）、骨材による自己収縮ひずみの拘束効果が小さい^[12,13]。そのため、高強度コンクリートの材齢初期において大きな自己収縮ひずみが生じ易い。

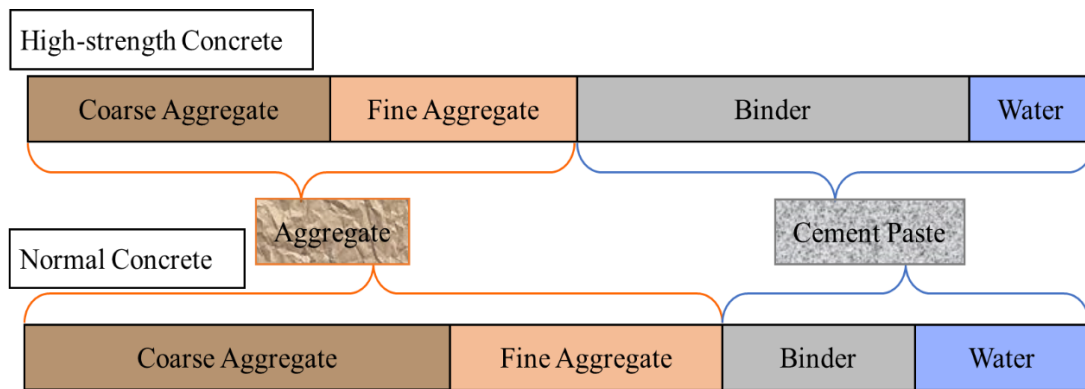


Figure 1-3 Schematic Chart of Concrete Composition (Vol.%)

図1-3 コンクリート材料組成の概念図 (Vol.%)

部材内外の拘束（鉄筋）が存在する場合、自己収縮はコンクリート内部に引張応力を生じさせ、十分引張強度が発現していない若材齢において、収縮ひび割れを引き起こす危険性を増加させる。

しかしながら、コンクリートの強度を向上するために水結合材比を低下させることが、自己収縮ひずみの増大と直結しているため、十分な強度を求めるコンクリートの自己収縮ひび割れを制御するためには、調合上の特別な配慮が必要であり、高強度コンクリートの強度を保ちつつおよび耐久性を確保することが課題として認識されている。

高強度コンクリートの自己収縮ひび割れの制御対策として、打設後に有効な方法は殆どない。内部への水分の供給は、自己収縮を抑制する効果的な対策の一つであるが、高強度コンクリートの水分拡散係数は小さいため、部材の極表層にしか水分供給されないことも多い。そのため、調合段階において自己収縮低減対策が重要であり、膨張材や収縮低減剤等の混和材・剤の使用^[14-16]、或は比較的高い含水率を有する人工軽量骨材^[17,18]の使用は基本的な方法として提案されている。

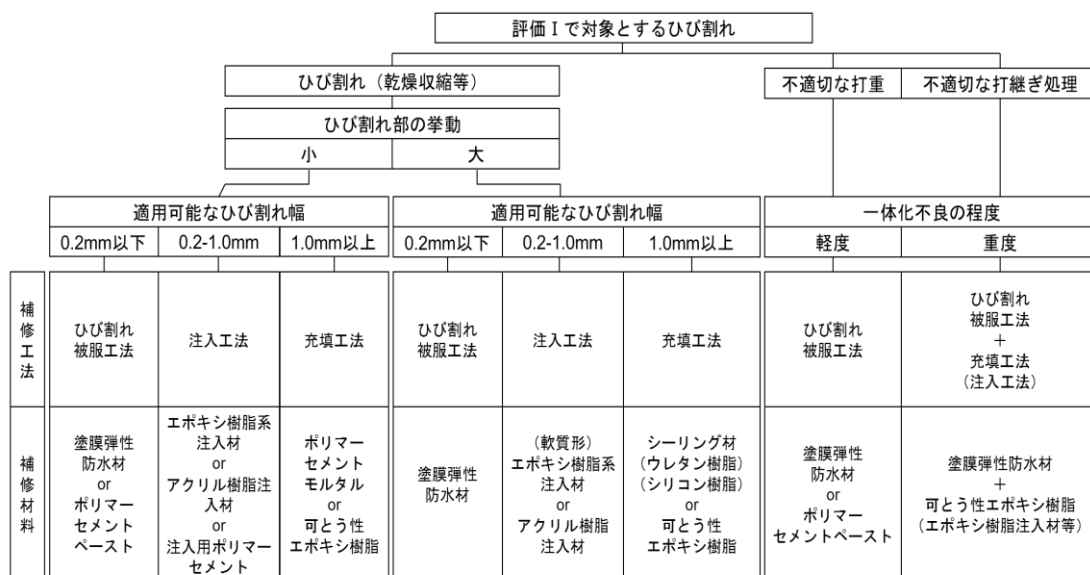
第一章 序論

これらの対策の実用の際して、「高強度コンクリート施工指針（案）・同解説」（日本建築学会）および「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」（日本建築学会）等の指針類に発刊されているが、いまだ技術は十分に成熟しているとはいえず、完全な適用方法は確立されていない。例えば、膨張材・収縮低減剤等の混和材料の使用によって収縮をゼロにする試みはいくつか提案されているが、特に膨張材の使用量の増加は強度への悪影響が大きくなるため、合理的な利用は困難である^[17]。また、高強度コンクリートにおいて膨張を過量添加した場合、有害な遅れ膨張破壊を引き起こす危険性が高くなる^[15,19,20]ことが知られており、高強度コンクリートの自己収縮ひび割れ制御に関して膨張材や収縮低減剤等混和材料の適切な使用方法の確立が期待されている。

1.1.2 コンクリート材料のひび割れ補修技術

コンクリート材料のひび割れを調合段階で抑制することは、RC建築物の性能向上の重要な方針の一つであるものの、ひび割れの発生原因が、外部影響要因によって支配される場合、調合段階の対応は不十分なこともある。供用期間において発生したひび割れの幅や長さの変化を効果的に抑制することは、技術的に困難である。構造物の性能を保つため、ひび割れの発生メカニズム、影響要因を把握した上で、適切な補修対策を実施することが必要である。

実際にひび割れを補修する時、補修工法や補修材料の選定は慎重に考慮しなければならない。補修効果や、補修場所に二次劣化の発生が生じないことを確保するため、ひび割れ自体の特性および周囲環境の状況を含めて考慮することは重要である。ひび割れ補修工法の選定について、日本コンクリート工学会の指針^[21]に定める一般的選定方法の流れを図 1-4 に示す。



※ 「評価 I で対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れ等、竣工から数年内には収束と考えられるひび割れをさす。

Figure 1-4 Flow of Cracks Repairing Method Selection ^[21]

図 1-4 ひび割れ補修工法の選定フロー図^[21]

同図によると、ひび割れ幅の相違によって補修工法と補修材が異なり、加えて供用期間に「ひび割れ部の挙動の有無」によっても選定工法が異なっていると指摘されているが、「ひび割れ部の挙動の有無」に関しては、実際にひび割れ挙動を取得することの労力が大きいため、実測値を使用せず経験によって判断する場合が多い。即ち、補修材の選定が十分な工学的根拠に基づいて行われているとは言えない。

外部環境の温度、湿度変化、ひび割れ部周囲部材の拘束状況、外部荷重の状況によって、ひび割れの挙動に及ぼす影響を特定することは、適切なひび割れ補修技術の開発に非常に重要と言える。そのため、実際構造物を対象としたひび割れ挙動の影響要因を特定する上で、より簡便かつ高精度に実測或は推定する手法の提案が希望される。

以上の背景より、RC 建築物の耐久性を維持或は向上する社会的なニーズに応じて、高強度・超強度コンクリートのような新材料の開発および品質の改善、より先端的な施工工法の提案、既存構造物の性能評価および適切な補修・改修技術の確立が大きな課題である。

1.2 研究目的

本論文では、RC 建築物の長寿命化に対して、材料レベルの性能改善および、実構造物レベル劣化状況調査の両方面から、実験的研究を行う。まず、高強度コンクリートの自己収縮ひび割れを抑制するため、調合段階において、膨張材の使用が高強度コンクリートの若材齢体積変化に及ぼす影響を検討する。また、RC 建築物が供用期間における性能変化に着目し、乾燥収縮ひび割れの低減手法および補修技術の確立についての基礎的データを蓄積する目的として調査を行う。

1.2.1 調合段階における高強度コンクリートの自己収縮低減方法の確立

セメントの水和反応によって、内部水の消費に起因するコンクリート体積の減少は、自己収縮という^[22]。膨張材や収縮低減剤等の化学混和材・剤の使用は、調合段階に採用される一般的な対策である。しかしながら、メーカーや製造方法の相違によって、混和材・剤の種類や品質も異なっている。自己収縮低減効果の保つおよび他の性能に悪影響を及ぼさないため、膨張材や収縮低減剤の使用が水和反応に及ぼす影響を明らかにすること必要である。そのため、本部分に、以下三つの目的を設定して、それぞれの検討を行う。

(1) 膨張材の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を明らかにする。

実用時に、自己収縮低減効果を最大にする膨張材の適切な選定を行うためには、膨張材の種類およびそれらの自己収縮低減機構、収縮低減効果の差異を明らかにする必要がある。異なる膨張材を使用した場合、セメントペーストの線膨張係数、水分の消費、弾性係数の発現および膨張性水和物生成等の実験を実施し、膨張材の種類が超高強度セメントペーストの体積変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

(2) 膨張材を使用した超高強度モルタルの若材齢体積変化に及ぼす細骨材量の影響を明らかにする。

コンクリートはセメントペーストと骨材の複合材料であり、セメントペーストによって得られた知見をコンクリートに応用していくためには、骨材がコンクリートの自己収縮に及ぼす影響を検討する必要がある。骨材がセメントペーストの体積変化に及ぼす拘束効果に関して、コンクリートの乾燥収縮を対象とした複合則理論に基づく評価方法が提案されているが、高強度コンクリートの自己収縮に対する複合則理論の適用性については知見が少ない。特に、自己収縮低減するために膨張材を添加した場合、コンクリートにおいて収縮と膨張が変化するような複雑な体積変化が生じている状況で、複合則理論の適用性を検討した事例がほとんどない。そのため、膨張材を添加した高強度コンクリート若材齢体積変に及ぼす骨材の拘束効果の影響を明らかにすることを目的とした。

(3) 膨張材の添加量が超高強度モルタルの自己収縮低減効果および遅れ膨張に及ぼす影響を明らかにする。

(1) に実施した研究に基づく、膨張材の添加量を増加するほど、自己収縮低減効果を向上できると考えられた。しかし、多量の膨張材の使用した場合、供用期間に有害な遅れ膨張劣化を引き起こすリスクが高くなる。そのため、遅れ膨張劣化を引き起こさない範囲に、自己収縮低減効果を最大化にする膨張材の最適使用量を確認することを目的として研究を行った。また、膨張材の遅れ膨張を防ぐため、膨張発生メカニズムおよび生起条件を明らかにすることを目的とした。

1.2.2 RC 建築物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす外部影響要因の特定

新築建造物の調合段階におけるひび割れ抑制技術が大事である一方、既存建造物の性能観測、劣化の検知と補修・改修技術の確立も、建築の長寿命化における重要な課題である。特に、供用期間において、コンクリート部材に生じたひび割れが、環境条件の影響を受けて挙動することによって、補修後の再劣化が生じる可能性がある。これらのリスクを低減するためには、あらかじめ対象のひび割れがどのように挙動するのかを理解し、その挙動に合わせた適切な補修材を選定する必要がある。そのため、ひび割れ挙動に関しては、実建造物を対象とする測定および実験的検証が必要であると考えられる。本論文では、以下の二つの目的を設定して研究を行う。

(1) 左官モルタルのひび割れリスクに及ぼす収縮低減剤及び外壁温度の日変動の影響を明らかにする。

建築物の長寿命化に実現するため、外壁に施工する左官モルタル等仕上げ材の耐久性を注目する必要がある。供用期間において、左官モルタルが乾燥収縮ひずみや温度ひずみの影響を受けて、下地コンクリートとディファレンシャルムーブメントによってひび割れを引き起こす^[23]。特に、季節変化と昼夜の温度変動によって外壁の温度の年変動と日変動が生じている。これらの温度変動は左官モルタルの体積変化、剛性発現に影響を及ぼし、左官モル

タルと下地コンクリート間に拘束が発生するタイミングにおいてモルタルの温度が高くなっている場合、硬化後の温度収縮が乾燥収縮ひび割れを助長する可能性がある。このようなモルタルの硬化するタイミングと外壁温度の年変動に関する研究は既に行われているが、本研究では、外壁温度の日変動による乾燥収縮ひび割れの発現に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

本検討では併せて、左官モルタルの乾燥収縮ひずみの低減を目的とした収縮低減剤の使用や、収縮低減剤を使用した場合の、上記の外壁温度の日変動の影響についても検討を実施した。

以上の検討に基づき、左官モルタルの乾燥収縮ひび割れを抑制可能な施工時刻の提案を行う。

(2) ひび割れ挙動に及ぼす壁面温度および周囲部材の拘束の影響を明らかにする。

1.1.2 節に述べたように、ひび割れ補修技術の確立において、環境条件や他の部材等の影響を受けるひび割れ開閉挙動を適切に把握することは重要である。本研究は工学的な根拠に基づくひび割れ補修工法・補修材の選定が可能なフローを提案することを目的とし、まずは構造物のひび割れ開閉挙動に及ぼす温度変動および周囲部材の拘束条件の影響を明らかにすることを試みた。

上記の検討に加えて、実建築物におけるひび割れ開閉挙動の長期間モニタリングを実施し、ひび割れ開閉挙動の時間依存性の確立および推定方法の提案のためにデータを蓄積する。

1.3 論文の構成

本論文では、RC 建築物の耐久性を向上するという最終目標に対して、調合段階における高強度コンクリートの自己収縮ひび割れを制御するため膨張材使用方法の確立および、供用期間における建築物に生じたひび割れの開閉挙動の時間依存性に及ぼす影響要因を特定することを目的とし、それぞれ実験的研究を行った。論文の全体構成を図 1-5 に示す。

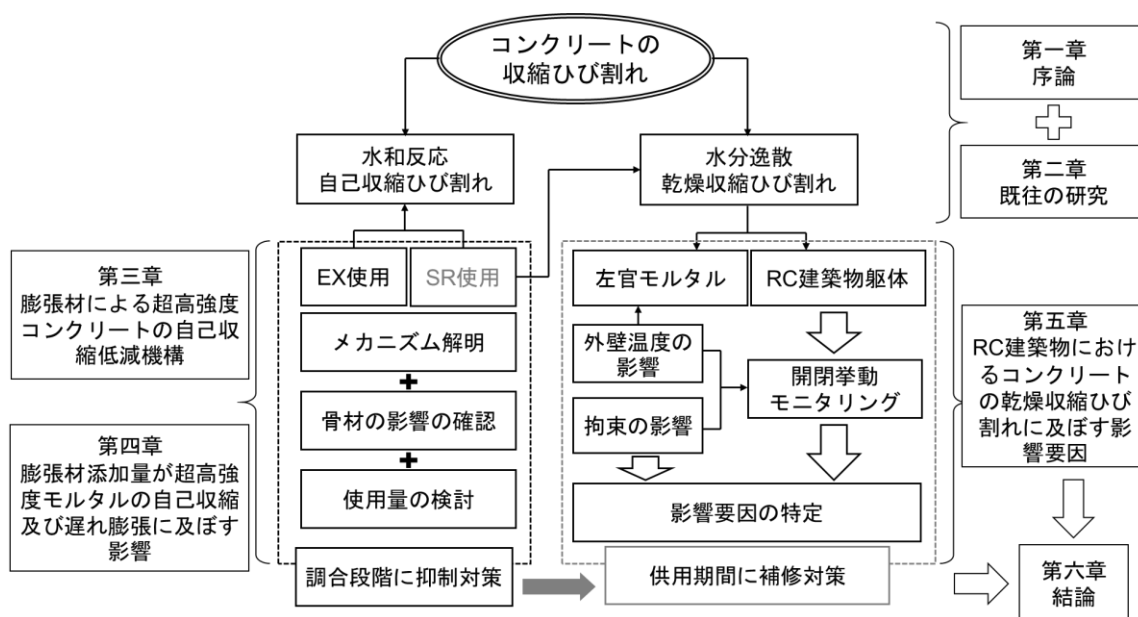


Figure 1-5 Constitution of This Thesis

図 1-5 本論文の全体構成

本論文では、本章も含めて 6 章で構成している。各章の概要は以下の通りである。

第一章 序論

本章では、本論文の背景、目的、構成概要を述べ、本研究の意義を説明する。

第二章 既往の研究

本章では、既往の研究を整理し、コンクリートの収縮ひび割れを制御する方針および具体的な実用方法を示す。

まず、RC 建築物の高耐久性化において、高強度コンクリートの自己収縮低減方法を着目して、自己収縮メカニズム、膨張材による自己収縮低減効果、影響要因および、膨張材がコンクリート性能に及ぼす影響を整理し、膨張材の最適使用方法を確立するため、現状直面している課題を紹介する。

次に、ひび割れ補修技術に関して、補修工法の現状を整理して、各方法の適用性をまとめる。更に、ひび割れ補修工法および補修材の選定に関して、ひび割れ挙動への影響要因についての研究を調査して、現状に残っている課題を抽出する。

第三章 膨張材による超高強度コンクリートの自己収縮低減機構

本章では、まず、膨張材の種類の違いが、超高強度セメントペーストの自己収縮ひずみの低減効果に及ぼす影響を確認し、自己収縮駆動力（水分消費）の観点、セメントペーストの剛性発現の観点および膨張性物質の生成の観点から、エトリンガイト石灰複合型膨張材と石灰系早強性膨張材の自己収縮低減機構の差異を明らかにする。

次に、膨張材添加した場合、骨材使用量が、自己収縮低減効果に及ぼす影響を把握する。

具体的には、コンクリート材料において過去に提案されている乾燥収縮を対象とした複合則理論の自己収縮ひずみへの適用性を検証し、骨材が膨張材の自己収縮低減効果に及ぼす影響の評価について検証を行う。

第四章 膨張材添加量が超高強度モルタルの自己収縮低減効果及び遅れ膨張に及ぼす影響

本章では、膨張材の最適使用量の確認および膨張材の遅れ膨張が発生する条件の特定を目的として実験的検討を行う。膨張材の添加率が異なる超高強度モルタルの自己収縮ひずみ経時変化を測定し、膨張材混和率と自己収縮低減効果の関係性を確認する。

膨張材を過度に混和した場合に生じる有害な膨張が生じる条件を探索するため、材齢初期（7日間）の温度養生条件およびその後の養生環境の湿度条件を複数設定し、各養生条件における遅れ膨張発生の有無を測定する。長期間の長さ変化、前期養生温度、後期養生湿度を組み合わせて検討することによって、膨張材の遅れ膨張生起条件を示す。また、遅れ膨張が生じた材齢において水和解析を行い、膨張性水和物の相対含有量の変化によって、膨張材の遅れ膨張発生機構に関する考察を行う。

第五章 RC 建築物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響要因

本章では、RC 建築物の仕上げ材の耐久性およびコンクリート躯体のひび割れ挙動に関する調査を行う。まず、左官モルタルの乾燥収縮を抑制する目的として収縮低減剤の使用に着目し、外部環境温度の変動方法が収縮低減効果の影響を実験的に示す。また、FEM 解析を用い、下地コンクリートとの拘束によって生じるモルタルの乾燥収縮応力に及ぼす外壁温度の変動方向の影響を示す。これらの検討によって、左官モルタルの施工時刻を考慮することによりひび割れリスクを低減できるのかを明示する。

その後、外壁温度変動および周囲拘束効果がひび割れの開閉挙動の特性に及ぼす影響を明らかにするため、実 RC 建築物におけるモニタリングを実施する。モニタリング結果から、外壁温度変動と拘束の影響を抽出して考察し、FEM 解析を用いた検証を実施する。実測および数値解析を併せて実施することによって、外壁温度変化や拘束がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を明らかにする。

第六章 結論

本章では、本論文から得られた知見、結論を取りまとめ、今後の課題を併せて示す。

第一章 序論

第一章参考文献

- [1] 科学技術振興機構 中国総合研究センター：中国の第十二次五ヵ年規画における綠色発展の実態と動向，2011.9
- [2] 中国国家發展改革委員会：国家發展改革委員会・国家エネルギー局通知－エネルギー發展第 13 次五ヵ年計画配布に関する一，2016.12.26
- [3] プレキャストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工基準，2008.10
- [4] 石中正人，二宮祐希，中山英明，鳴瀬浩康：超高強度コンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす各種要因の影響について，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，398-405，2012
- [5] 一宮利通，睦好宏史，桜田道博，武者浩透：高強度コンクリートの耐久性と構造物の高耐久化，コンクリート工学，Vol.49，pp.70-73，2011.5
- [6] 服部健一：特殊減水剤の物性と高強度発現機構，コンクリート工学，Vol.14，No.3，pp.31-38，1976.3
- [7] H.H. Bach.: 水硬性複合材料，特公昭 60-59182（登録 No.419493）
- [8] 陣内浩，黒岩秀介，早川光敬，並木哲，飯島真人，原孝文，小田切智明，井上善尊：設計基準強度 150N/mm² クラスの高強度コンクリートによる実大 RC 柱の施工性と構造体強度発現性状の検討，日本建築学会技術報告集，No.17，pp.1-5，2003.6
- [9] 太平洋セメント：コンクリートの高強度化，CEM^S，2010.7
- [10] 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状(2009)，2009.10
- [11] 丸山一平，佐藤良一：超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見，日本建築学会構造系論文集，Vol.72，No.617，pp.1-7，2007.7
- [12] D.W. Hobbs: Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal Proceedings of ACI, Vol.71, pp.445-450, Sep. 1974
- [13] 宮澤伸吾，北田悦子，井田敦師：コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材混入量の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.667-671，1998.7
- [14] 谷村充，兵頭彦次，佐藤良一：膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.951-956，2002.7
- [15] 郭度連，谷村充，佐竹紳也，柴垣昌範：膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.471-476，2008.7
- [16] 鈴木雅博，丸山一平，中瀬博一，佐藤良一：超高強度コンクリートを用いた RC 柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.635，pp.1-10，2009.1
- [17] 黒岩秀介，陣内浩，並木哲，名和豊春：人工軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.695，pp.19-26，2014.1
- [18] J. Liu, C. Shi, N. Farzadnia and X. Ma: Effects of Pretreated Fine Lightweight Aggregate on Shrinkage and Pore Structure of Ultra-high Strength Concrete, Construction and Building

Materials, Vol. 204, pp.276-287, Apr. 2019

- [19] 鈴木雅博, 中瀬博一, 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度膨張コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.375-382, 2005
- [20] 陣内浩, 黒岩秀介, 並木折, 渡邊悟士: 超高強度コンクリートの長さ変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.393-394, 2005
- [21] 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2009-, p.121, 2009
- [22] 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996.11
- [23] 名知博司, 小野正: タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.68, No.563, pp.15-22, 2003.1

第二章 既往の研究

2.1 はじめに

コンクリートの収縮ひび割れの主たる原因は、温度収縮、乾燥収縮および自己収縮に分類される。それぞれの原因に基づくひび割れを制御するためには、ひび割れの発生機構、影響要因を正確に把握した上で、適切な対策を提案するべきである。2.2節では、まず、高強度コンクリートに発生する自己収縮に着目し、コンクリートの自己収縮ひび割れ抑制方法の現状を調査し、抑制対策をまとめて、現状に直面している課題を抽出して示す。

2.3節では、供用段階に構造物に生じたひび割れの開閉挙動の制御方法に関して、ひび割れ補修技術の現状およびそれに対する課題をまとめる。

2.2 コンクリートの自己収縮ひび割れ抑制方法

2.2.1 コンクリートの収縮ひび割れ制御方針

コンクリートの収縮ひび割れは、

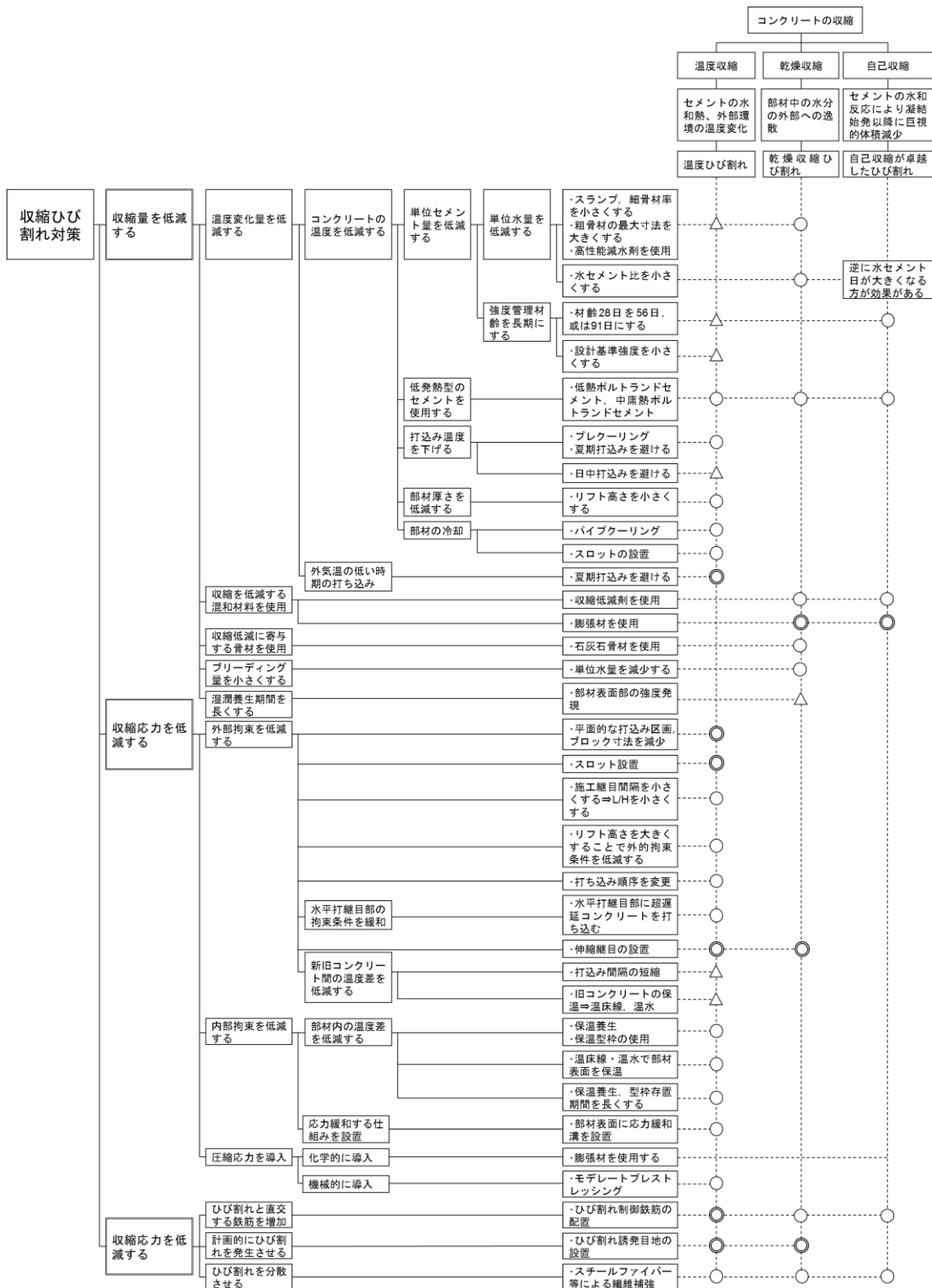
- (I) セメントの水和反応によって、凝結開始以降に生じる巨視的な体積減少である自己収縮ひび割れに起因する「自己収縮ひび割れ」；
- (II) セメントの水和発熱、外部環境の温度変化によって生じる温度ひび割れに起因する「温度収縮ひび割れ」；
- (III) コンクリート系部材内部の水分が外部環境への逸散によって生じる乾燥収縮ひび割れに起因する「乾燥収縮ひび割れ」に分類できる^[1]。

また、これらの収縮ひび割れを抑制・制御する方針として、

- (I) 収縮ひび割れを低減する、
- (II) 収縮応力を低減する、
- (III) 収縮ひび割れ幅を低減する三つと提示されている^[1]。

日本コンクリート工学会、土木学会、日本建築学会等で制定された複数の指針に提示された収縮ひび割れ制御方法を整理し、統括された収縮ひび割れの対策系統を図2-1に示す。収縮ひび割れを制御する対策では、抑制対象に関わらず、下記の3方面から工夫していると理解できる。

- (I) 材料方面、例えば、セメント、骨材種類の選定、材料単位含有量の制御、混和材料の適切使用等によって、コンクリートの物性・化学特性を変化させ、収縮ひび割れ、ひび割れ幅を低減する；
- (II) 施工方面、工事の順序、施工時期、環境条件の制御（温度、湿度）および施工工法等により、ひび割れのリスクあるいは程度を低減する；
- (III) 補助措置と装置、伸縮継目やひび割れ誘発目地等の設置および開口補強筋等の使用によって、収縮ひび割れが発生する場所や発生時期、発生後のひび割れ幅等を人工的に制御して、収縮ひび割れによるRC構造物の劣化程度を低減あるいは抑制する。



記号では、◎：効果が大きい、○：効果が中程度、△：効果があるが寄与率は低いを意味している。

Figure 2-1 System of Shrinkage Cracks Countermeasure [1]

図 2-1 収縮ひび割れ対策系統図[1]

また、収縮の低減を目的とした様々な対策を見ると、収縮の種類によっては十分に効果を発揮できない対策も存在している。特に、コンクリートの自己収縮に対しては、打設後の有効な対策が少なく、セメント種類を選定し、膨張材や収縮低減剤の使用を選択するという調合時の対策以外に有効な対策がほとんど存在しない。自己収縮は、比較的小さい水結合材比が有する高強度・超強度コンクリートで収縮量が大きくなることが一般的な認識である^[2-4]。以下では、高強度コンクリートを対象として、自己収縮性状の調査を行った。

2.2.2 コンクリートの自己収縮

コンクリートの自己収縮 (Autogenous Shrinkage) は、日本コンクリート工学協会 (当時) 1996 年自己収縮研究委員会報告書^[5]において、「セメント系材料において、セメントの水和による凝結過程および凝結以後に巨視的に生じる体積減少」と定義されている。似たような用語として、セメントの水和反応によって、微小な空隙を有する水和物が生成することに伴い生じる実質の体積減少は、水和収縮 (Hydration Shrinkage) という。このうち自己収縮は、水和収縮中の空隙分を除いた「見かけの体積減少」を指すと解釈される。

また、物質の浸入や逸散、温度変化、外力や外部拘束により発生する自己応力に起因する変形は自己収縮に含まない。自己収縮率と水和収縮率の関係および水平方向の自己収縮と水和収縮のイメージ図を図 2-2 に示す。

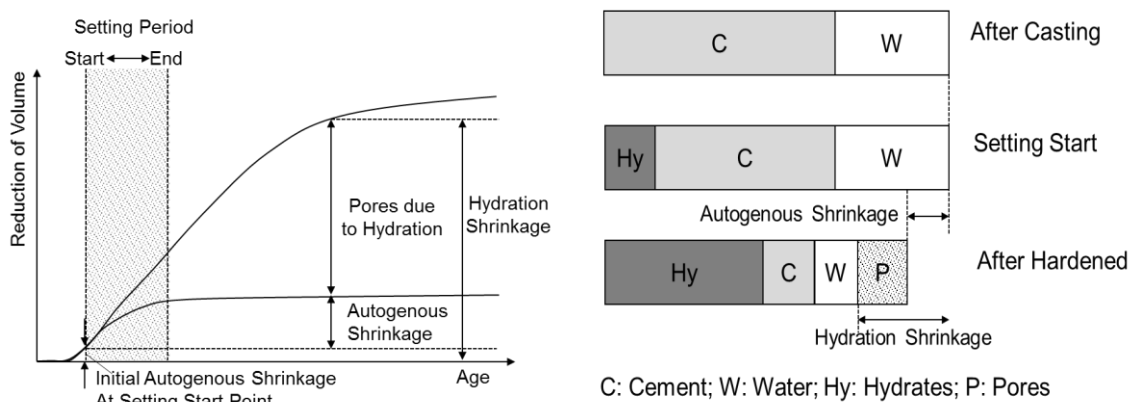


Figure 2-2 Relationship between Hydration Shrinkage and Autogenous Shrinkage ^[5]

図 2-2 水和収縮と自己収縮の関係性概念図^[5]

コンクリート自己収縮ひび割れを正しく制御・抑制するため、自己収縮 (ひび割れ) の特徴を把握する必要である。既往の研究によってコンクリートの自己収縮が以下の特徴を有することが明らかになっている。

(1) コンクリートの自己収縮ひび割れは、水結合材比の小さい程大きくなる。

既往の研究^[6]において、自己収縮ひび割れと水セメント比との関係を測定した結果の一例を図 2-3 に示す。文献^[6]に、封緘処理したセメントペースト試験体を 20°C60%RH 環境に一

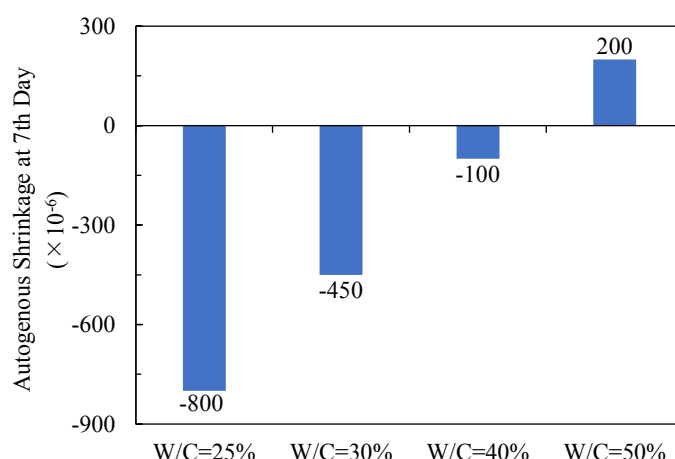


Figure 2-3 Relationship of Autogenous shrinkage and Water to Cement Ratio [6]

図 2-3 自己収縮ひずみと水セメント比の関係性の一例[6]

週間養生した。図に示すように、水セメント比が比較的大きい普通コンクリートでは、自己収縮ひずみ量が無視できる程小さく（膨張側に発現することもある）、水セメント比の小さいものほど自己収縮量が大きくなる傾向がうかがえる。特に、水セメント比が 30%以下になると、文献の実験条件では、自己収縮ひずみ量が著しく大きくなることが確認できる。

コンクリートのさらなる高強度化を求めるため水セメント比を 20%以下にする場合、コンクリートの流動性を確保するために、シリカフェーム微粉末を混和することが多く、シリカフェームの使用によりコンクリートの自己収縮ひずみが更に大きくなる傾向がある。

自己収縮発生メカニズムに関しては、複数の仮説が提案されており、文献^[7]に詳細な整理がなされているため、本論文では、各仮説の概要を以下に述べる。

(I) 毛細管張力説^[8]

セメントの水和反応が進行するとセメントペースト内部に毛細管空隙が形成される。水セメント比が小さいコンクリート内部の自由水は毛細管空隙を満たすことができず、気液界面が発生し、毛細管空隙にメニスカスが形成され、負圧が発生して、自己収縮の駆動力となる。

(II) 分離圧説^[7]

コンクリート内部に、固体表面に吸着される水層が固体間のファンデルワールス力を抵抗効果が有し、分離圧という。セメントの水和による水の消費あるいは外部への水の逸散によって固体間に吸着水層厚さが減少されると共に、分離圧が減少し、固相間の距離が小さくなって、セメントペーストが収縮する。

(III) 表面張力説^[9]

コンクリート内部において固体表面に吸着される水が表面エネルギーによって表面張力が生じさせる。固体表面に水分子の吸着・脱離によって表面張力を変化させ、セメントペーストの体積変化を引き起こす。

(IV) 水和圧説^[10]

Maruyama は分離圧理論^[11]に基づき、多孔質材料の体積変化と分離圧の釣り合い式を導出して、収縮の駆動力を評価する水和圧理論を提案した^[10]。水和圧は、セメントペースト固体表層に吸着水の厚さに依存し、セメントペーストの収縮駆動力となる。また、吸着圧さが大きい程水和圧が小さくなると明らかにされた^[10]。

以上の仮説はいずれにも、自己収縮の駆動力がコンクリート内部相対湿度に関連し、相対湿度の低下、即ち、水分の消費によって収縮に進行する点で共通している。このことから、単位水量（W/B 比）が小さい程、水和反応に起因する収縮の進行を促進させる現象が理解できる。一方、コンクリート内部相対湿度状況によって、ある一つの仮説で説明できない事例が存在する^[7,12]。即ち、一つ理論でコンクリートの収縮現象を説明するのは現実的ではなく、複数の仮説が組み合わされて収縮を引き起こすと考えられる。

(2) 自己収縮ひび割れの発生を早期的に発見することは困難である。

コンクリートの自己収縮は三次元的に生じている。また、コンクリートの収縮が鉄筋等の要因による拘束を受け、コンクリート内部に引張応力を発生させて、コンクリートのひび割れが生じる原因となる。図 2-4 に乾燥収縮ひび割れ、自己収縮ひび割れのイメージ図^[6]を示す。図に示すように、コンクリートの乾燥収縮ひび割れでは、コンクリート内部から水分が外部環境へ逸散することによって生じるため、コンクリートの表面から収縮が発生する。また、コンクリート内部の相対湿度勾配の発生によって、コンクリート内外の収縮量の差異が生じ、内部のコンクリートに拘束される形で表層コンクリートに引張応力が作用し表面にひび割れが発生する。

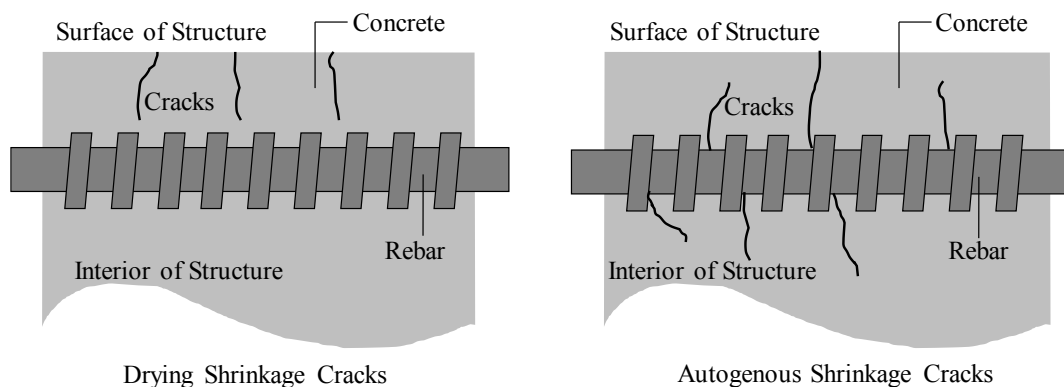


Figure 2-4 Image Figure of Cracks due to Shrinkage of Concrete ^[6]

図 2-4 コンクリートに生じるひび割れのイメージ図^[6]

一方、自己収縮はコンクリート内部の水和反応に起因する体積減少であり、コンクリートの表面、内部に関わらず、同一程度の収縮量が発生する。

鉄筋等の内部拘束材が存在する場合、コンクリートは自己収縮により、鉄筋の拘束効果を受け、鉄筋の近傍にひび割れを生じさせる。この鉄筋近傍のひび割れは外部に到達しな

い場合もあり、この場合自己収縮ひび割れを早期に発見することが困難である。

自己収縮によって生じた内部ひび割れが表層に到達する時、ひび割れから雨水や塩化物イオンの浸入が容易になり、結果として鉄筋の腐食を引き起こし、RC 構造物や部材の力学性能低下させる可能性がある。また、建築物表面に到達したひび割れに沿って滲み出る錆汁は、建築物の美観性に影響を及ぼし、建築物の価値の低下に直結する。

2.2.3 膨張材による自己収縮の低減

図 2-1 に示すように、自己収縮の低減手法として、調合段階に膨張材、収縮低減剤の使用あるいはそれらの併用が有効であると明示されている。本節では、自己収縮低減対策に対して、膨張材および収縮低減剤の使用の現状を調査して、それらの技術の進捗および直面している課題を抽出する。

(1) 膨張材の自己収縮低減機構

膨張材の水和反応が膨張性水和物質を生成および成長することによって、マトリクスの体積を増大させ、収縮による体積減少を補償する^[13]。一般的に使用されている膨張材は、石灰 (CaO)、Ye'elimite ($3\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_4$)、石膏 (CaSO_4) およびアルミン酸カルシウム ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) 等物質の単体あるいは複合体を主組成物とし、水和反応によって、エトリンガイト (Ettringite, AFt) また水酸化カルシウム (Calcium Hydroxide, CH) を生成させ、膨張効果を発揮する^[14]。

AFt や CH を膨張源とした膨張材を添加した場合におけるセメントの水和反応過程およびそれに対するセメントペーストの体積変化の概念図を図 2-5、図 2-6 に示す。水和反応過程を四段階に分け、膨張材の自己収縮低減機構を説明される。

- (I, II) 注水後、セメントのクリンカー成分の C_3A が速やかに反応し、セメント粒子表面に水和物を生成する。この段階においてセメントの水和物は十分に生成しておらず、マトリクスの剛性も小さいため、膨張材の水和によって生成させる膨張性物質は反力を得られず膨張効果を発揮しない。
- (III) 水和の進行に従い、セメントの水和生成物はマトリクスのフレームを形成し、凝結が開始する。その時点を臨界水和状態と言う^[15]。
- (IV) 膨張材の水和反応が進み、AFt や CH 等が生成および結晶の成長することによって、剛性が発現したマトリクスに膨張圧を与えて、自己収縮低減 (膨張) 効果を発揮する。

十分な剛性がしてない状態において、セメントペーストの自己収縮量を効果的補償する段階は、膨張材の有効膨張期間と呼ばれる^[13,16]。

膨張材による膨張量とセメントペーストの自己収縮量が平衡点に達した後、セメントペーストの自己収縮進行速度より膨張発現の速度が大きい場合に、マトリクスの体積変化量は膨張側に推移する。

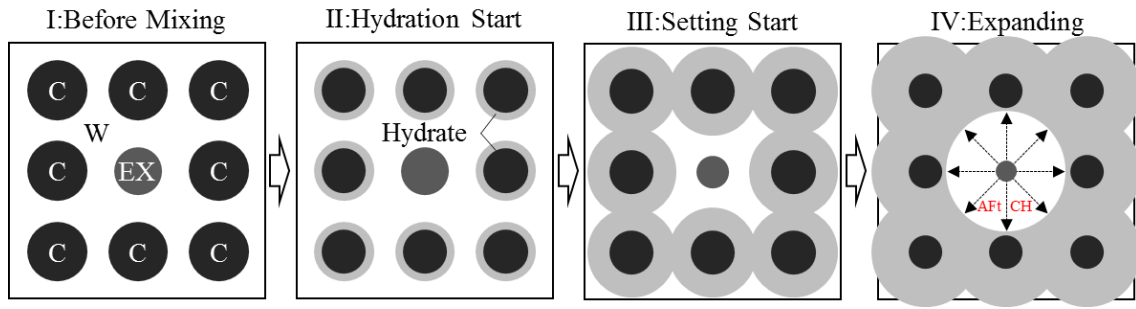


Figure 2-5 Schematic Chart for Hydration Process of Cement Mixed with Expansive Additive [14]

図 2-5 膨張材が添加した場合セメントの水和反応過程の概念図[14]

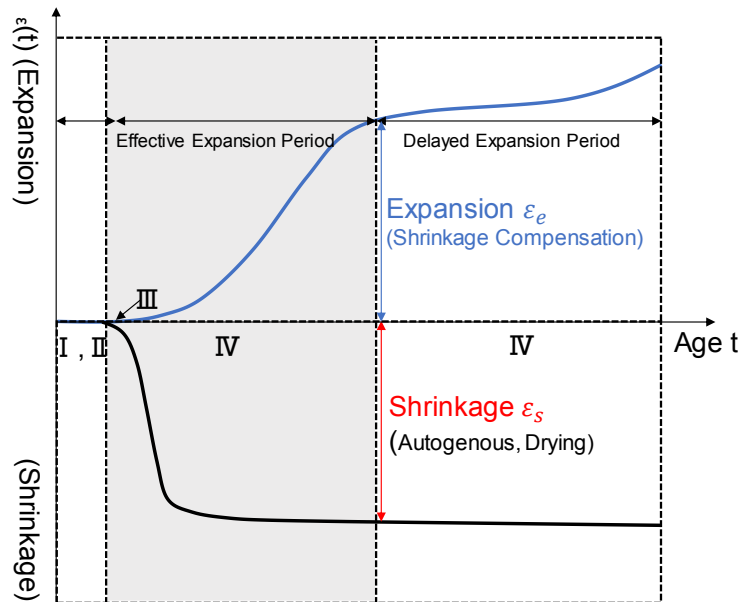


Figure 2-6 Schematic Chart for Strain Variation with Age of Cement Mixed with Expansive Additive [14]

図 2-6 膨張材を添加したセメントの水和反応によるひずみ経時変化概念図[14]

セメントペーストの剛性が十分に発現したあとに、膨張材が反応し有害な膨張を引き起こす段階は、膨張材の遅れ膨張と呼ばれる^[13,17]。膨張材の遅れ膨張によってマトリクス内部に、引張強度以上の引張応力が生じた場合、コンクリートの膨張ひび割れが発生する^[18,19]。

図 2-6 に示すように、膨張材の水和反応による膨張の発現とセメント水和反応による自己収縮進行のタイミングは自己収縮低減効果に重要である。即ち、セメントペーストの剛性が小さい状態において膨張材の水和によって収縮低減効果を発揮し、硬化体に形成した後に反応する膨張材が、自己収縮低減効果に寄与することより、遅れ膨張を引き起こすリスクがある。特に、水結合材比が比較的小さい（単位水量少ない）高強度・超高強度コンクリートに対して、セメントクリンカー成分の水和速度と膨張材の水和速度のバランスによって、自己収縮低減効果が決まる。言い換えると、膨張材あるいはセメント成分の水和

速度を制御することができれば、膨張材の自己収縮低減効果を適切に発揮させることが可能であると考えられる。

(2) 膨張材がコンクリートの性能に及ぼす影響

コンクリートの自己収縮低減のため膨張材の使用は、コンクリートの機会的特性に影響を与える。本節では、既往の研究を調査し、膨張材がコンクリートの自己収縮低減効果、圧縮強度および長期的体積安定性に及ぼす影響をまとめる。

(I) 膨張材の自己収縮低減効果

膨張材によって高強度コンクリートの自己収縮低減効果を確認するため、複数の研究データを用いて、式 2-1 に示す計算方法によって自己収縮ひずみ低減率を求めた。

$$\alpha = \left| \frac{\varepsilon_{EX}(t) - \varepsilon_{PL}(t)}{\varepsilon_{PL}(t)} \right| \times 100 \quad \text{式 2-1}$$

ここに、 α : 自己収縮ひずみ低減率 (%)

$\varepsilon_{EX}(t)$: 膨張材を添加したコンクリート材齢 t における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{PL}(t)$: 膨張材を添加していないコンクリート材齢 t における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

である。

膨張材を添加した場合、セメントの水和反応が影響を受けるため、厳密には上式のように同一材齢で比較することは不適當だが、既往の研究論文から得られる情報が限られているため、上記の計算方法を採用した。既往の研究において高強度コンクリートを対象として得られた測定データの膨張材添加率とコンクリートの自己収縮低減率の関係を図 2-7 に示す。

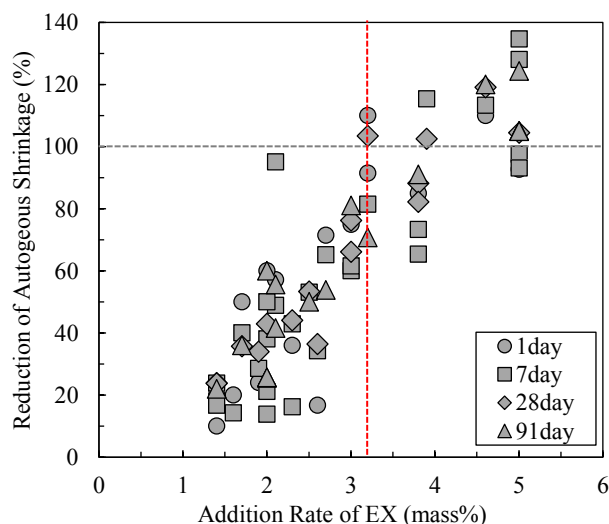


Figure 2-7 Relationship of Reduction of Autogenous Shrinkage and Addition Rate of EX

図 2-7 高強度コンクリートの自己収縮ひずみ低減率と膨張材添加率の関係^[20-25]

図に示すように、調査した範囲^[20-25]において、材齢に寄らず膨張材の添加率は大きい程、自己収縮低減効果が高くなる傾向が見られる。また、水結合材比にもよるが、既往の研究によると結合材質量に対して膨張材添加率が概ね3.2%以上となる場合に、自己収縮は完全に抑制されている。これらのことよって、高強度コンクリートの自己収縮を抑制する対策として膨張材の使用は、膨張材の添加量を慎重的に配慮する必要がある。

一方、高強度・超高強度コンクリートの水和熱が大きいであるため、水和発熱が膨張材の自己収縮低減効果に及ぼす影響を考慮する必要がある。三谷ら^[23]は、異なる温度条件によって養生した超高強度セメントペーストを対象として、石灰系膨張材の自己収縮低減効果を検討した。膨張材の自己収縮低減率に及ぼす養生温度履歴の影響を図2-8に示す。水結合材比に関わらず、養生温度の相違によって自己収縮低減率が異なり、最高養生温度の大きい程、自己収縮低減率が小さくなる傾向が見られている。原因を調査して見ると、三谷らの実験には石灰系膨張材が使用されているため、膨張材の膨張機構としては、水酸化カルシウムが主導的な役割を果たすと推察される。しかし、セメント中のシリカフェームは高温履歴時に水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こすため系内の水酸化カルシウムが大量消費される^[26]。以上のことより、高温時の膨張効果が低下にすると考えられる。

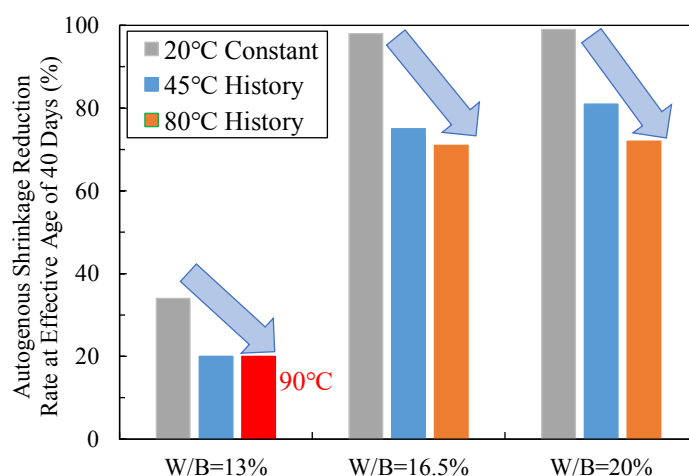


Figure 2-8 Influence of Temperature Conditions on Autogenous Shrinkage Reduction of Expansive Additive ^[23]

図2-8 膨張材自己収縮低減効果に及ぼす温度条件の影響^[23]

以上の調査により、膨張効果に寄与する水和物が温度の影響を受けることが確認できる。すなわち、温度条件の相違によって膨張材の自己収縮低減効果が異なる可能性が存在する。膨張性物質としては上記に述べた水酸化カルシウムだけでなく、エトリンガイトも高温時に不安定になりモノサルフェートに転移する可能性^[27]が考えられるため、石灰系以外の膨張材においても温度条件には十分な配慮が必要である。加えて、セメントの水和と膨張材の水和で見かけの活性化エネルギーが異なる場合、上述の膨張材の反応タイミングが有効

膨張期間からずれることも考えられるため、高強度コンクリートの自己収縮を低減するため膨張材を使用する時、単に自己収縮低減効果を考慮するだけではなく、膨張材の種類、セメントの種類（組成成分）や養生温度等条件を組み合わせる必要がある。

（Ⅱ）膨張材がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

膨張材の添加に伴い、コンクリートの圧縮強度がある程度低下するという結果が複数の研究により報告されている。既往の研究のデータ^[20-23]を整理し、膨張材を添加しない場合と比較して圧縮強度の低下率と膨張材添加率の関係性を図 2-9 に示す。調合条件と養生条件の差異が含まれているため、ある程度のばらつきが見られるが、膨張材の添加率の大きい程、圧縮強度低下率が大きくなる傾向が見られる。一例として、上述の自己収縮を完全に補償できる目安であった結合材質量の約 3.2%の膨張材を添加した場合、高強度コンクリートの圧縮強度は最大 15%以上低下する可能性がある。

また、コンクリートの圧縮強度に及ぼす膨張材の影響は、水結合材比によって異なると報告され、水セメント比が小さい程、コンクリートの圧縮強度低減率が大きい^[28]。これは水結合材比が比較的小さい高強度コンクリートは内部構造が緻密であるため、圧縮強度が膨張材の膨張挙動による影響を受けやすいためと考えられる^[14]。

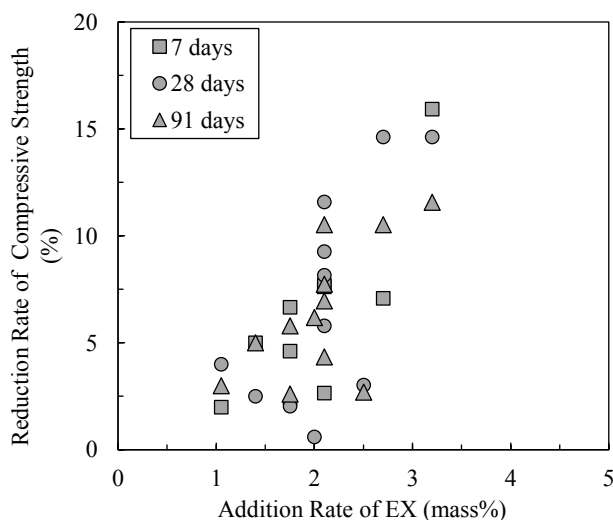


Figure 2-9 Effect of EX Addition Rate on Compressive Strength of Concrete ^[20-23]

図 2-9 コンクリートの圧縮強度に及ぼす膨張材添加率の影響^[20-23]

更に、庄司ら^[29]の研究によると、一定量膨張材を添加した場合に、単位結合材量（膨張材+セメント）を変更させた検討において、コンクリートの圧縮強度が単位結合材量に依存すると指摘された。庄司らの実測データに基づいて、結合材量における膨張材の相対含有率が、圧縮強度に及ぼす影響、並びに膨張材の有無がコンクリートの圧縮強度比に及ぼす影響をプロットしたものが図 2-10 である。図から分かるように、膨張材無添加の場合、コンクリートの圧縮強度は単位結合材量によらずほとんど変わらないが、膨張材を添

加した場合には、ある範囲において、膨張材の相対含有率の大きい程、圧縮強度比が大幅に低減される結果が見られる。これらのことは、膨張材の添加量が同一である場合、単位結合材量の小さい程、膨張材の割合が大きくなり、コンクリートの圧縮強度を大幅に低減させると考えられる。

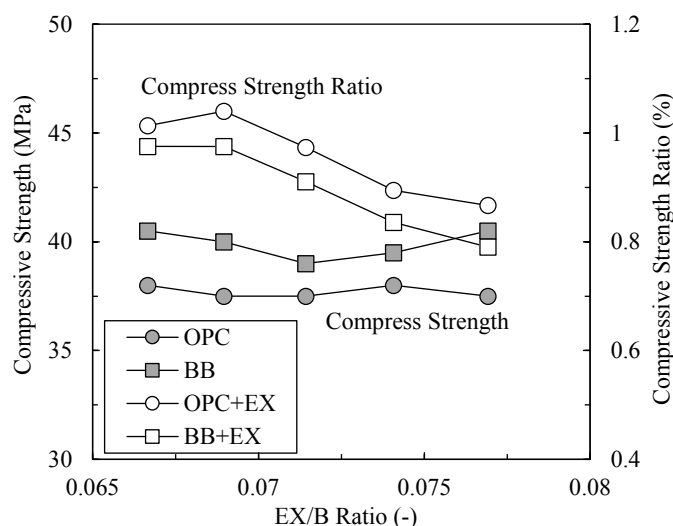


Figure 2-10 Effect of EX/B Ratio on Compressive Strength of Concrete ^[29]

図 2-10 膨張材添加した場合コンクリートの圧縮強度と結合材量の関係^[29]

(Ⅲ) 高強度コンクリートにおける膨張材の遅れ膨張

コンクリートの自己収縮低減の目的に対して、土木学会が「膨張コンクリート設計施工指針」^[30]で規定した収縮補償用膨張材標準単位使用量は $20\sim 30\text{kg/m}^3$ である。材齢初期において自己収縮量が著しく大きな高強度・超高強度コンクリートに対して、標準用量^[30]よりクリート（モルタル，セメントペースト）を対象として「標準使用量」以上の膨張材を添加した場合に、遅れ膨張を引き起こす事例の複数が報告されている。既往の研究に報告した膨張材の遅れ膨張事例を表 2-1 にまとめて示している。既往の報告に基づき、膨張材の遅れ膨張の特徴は以下のようにまとめることができる：

- ① 水結合材比が 15%ほど小さい試験体に遅れ膨張が発生する；
- ② 標準使用量以上に使用した場合において、膨張材種類によらず、遅れ膨張が生じる可能性がある；
- ③ 使用量が同じ場合にも、膨張が発生しないケースも存在している；
- ④ 初期養生温度が常温あるいは高温によらず、遅れ膨張が発生することがある；
- ⑤ 長期養生環境の湿潤状況に限らず、気中養生した場合にも、膨張が生じさせる可能性がある。

Table 2-1 Delayed Expansion of Expansive Additive in (Ultra-) High-strength Concrete

表 2-1 高強度・超高強度コンクリートにおける膨張材の遅れ膨張

References	Year	W/B (mass%)	Type of EX	EX Amount (kg/m ³)	Initial Temperature History	Curing Circumstances
Suzuki [18]	2005	15	Ettringite-Lime Composite Type	35	20°C, 40°C Constant	Sealing
Uehara [22]	2005	25	Low Addition Type	30	60°C History	Sealing
Jinnai [31]	2005	15	-	40	20°C Constant	60%RH
Matsuda [32]	2006	16	Low Addition Type	30	60°C History	Sealing
Kaku [33]	2008	16.5	Lime Based Type ; Ettringite-Lime Composite Type	40	20°C Constant	Sealing; 7days Sealing→Air

しかし、以上の研究において、膨張材の遅れ膨張の発生機構については明確に示していない。

盛岡らは、水結合材比が小さいモルタルに生じた膨張挙動を長期的に測定し、また、その期間に各水和物の推移を追跡して、水和が抑制された膨張材の緩やか反応によって、膨張を引き起こすと指摘している^[34]。類似の研究として、郭らは、一般的にセメントを完全水和させることに必要な水セメント比が約 40%である^[35]ため、水結合材比が極めて低い超高強度コンクリートに多量の膨張材を添加した場合に、セメントと膨張材の水和初期に未反応の膨張材が多く残るまま状態に硬化して剛性が発現し、その後の長期養生期間に骨材等から吸水して、未反応膨張材の緩やかな水和が進行することによって、十分な剛性が有するコンクリート硬化体内部に膨張性物質の生成および成長した結果、膨張圧を生じさせて、(遅れ)膨張を引き起こすと推測された^[33]。しかし、具体的にどのような水和物の生成が膨張に寄与しているかは明らかになっておらず、有害な遅れ膨張を引き起こす膨張材の(未)反応率等も不明なままである。膨張材の遅れ膨張有効的に防止する対策の提案は重要な課題のひとつとして認識されている。

以上の調査をまとめると、膨張材の使用は、コンクリートの自己収縮低減効果に貢献が發揮する一方、不適切な調合で用いた場合、コンクリートの圧縮強度に不利な影響を与える場合がある。特に、結合材に対して膨張材の添加量が大きい程コンクリートの圧縮強度に不利な影響は著しくなる。また、高強度・超高強度コンクリートの自己収縮対策として膨張材の使用方法に関しては、膨張材の遅れ膨張機構を解明し、生起条件を確立する上で、膨張材の最適量を提案することは避けられない課題になっている。

2.3 コンクリートのひび割れ補修技術

第一章に述べたように、RC 構造物の供用期間において発見された耐久性の低下あるいは材料レベルの劣化に対して、適切な補修・改修対策を行い、構造物の使用性能を回復または保持することは、RC 構造物長寿命化を実現することに大事な一つである。本節では、コンクリート系材料を対象としたひび割れの補修技術に関する既往の研究を調査してまとめる。

2.3.1 ひび割れ補修方法の現状

第一章の図 1-3 にまとめたように、現状、一般的なひび割れ補修工法としては、ひび割れ表面被覆工法、注入工法、充填工法等の 3 つが主に使用されている^[36]。各工法の概念図を図 2-11、2-12、2-13 にそれぞれを示す。

(1) ひび割れ表面被覆工法（シール工法）

ひび割れ被覆工法では、一般的にひび割れ幅が 0.2mm 以下のひび割れに適用される。ひび割れとの接着性に優れた表面被覆材や目地材などを塗布し、ひび割れ部の防水性や耐久性を向上させる工法である^[37]。図 2-11 に示すように、表面被覆工法（シール工法）は、ひび割れ内部の処理が困難であり、外部の影響に引き起こすひび割れ幅の変動やひび割れ長さの発現が有する場合、被覆材料と下地（コンクリート、モルタル）の一体性が低下し、被覆材料にひび割れが発現する可能性もある。表面被覆工法において、一般には塗膜弾性防水材、ポリマーセメントペーストやセメントフィラーなどが使用される。この方法は被覆層厚さが小さいため、補修部性能の長期間におよぶ維持管理については注意する必要がある^[38]。

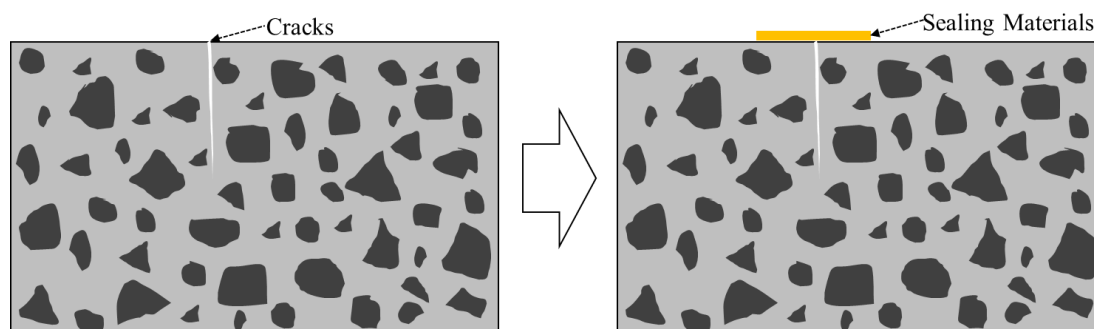


Figure 2-11 Schematic Chart of Surface Sealing Method for Cracks Repairing

図 2-11 ひび割れ表面被覆工法の概念図

(2) 注入工法

注入工法では、一般的にひび割れ幅が 0.2mm~1.0mm 程度の比較的広いひび割れの補修に適用される。ひび割れ部に樹脂系やセメント系注入材料を注入して、ひび割れ部の防水性や耐久性を向上させる工法である^[37]。注入装置や技術等の発展に従い、現状、注入量の管理、注入精度、ひび割れ深部に狭い位置まで十分な注入材を確実に注入できることを概ね満足できるとされている^[38]。ひび割れ補修用の一般的な注入材は、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの有機系、セメント系、ポリマーセメント系がある。補修材料の軟硬質、粘性

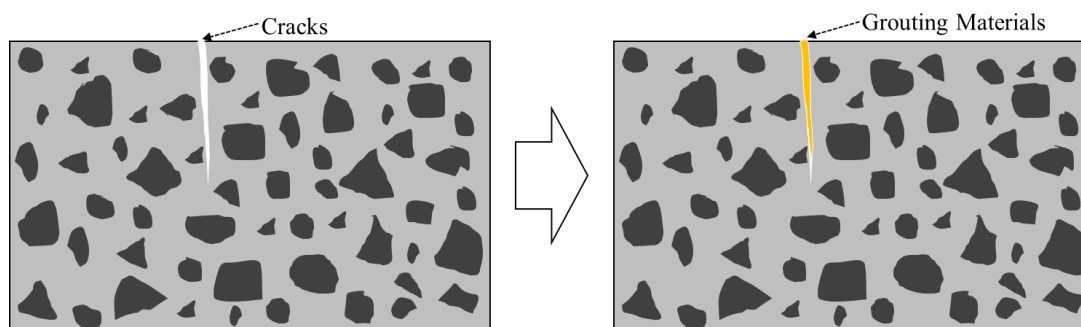


Figure 2-12 Schematic Chart of Injecting Method for Cracks Repairing

図 2-12 ひび割れ注入工法の概念図

等特性がひび割れ補修効果および補修部の再劣化の有無に影響を与えるため、ひび割れの実状況に応じて、相関規格・指針^[39,40]を参照して慎重的に選定することが必要である。

(3) 充填工法

充填工法では、一般的にひび割れ幅が 1.0mm（ひび割れ挙動がある場合 0.5mm）以上、比較的幅が広いひび割れの補修に適用される。ひび割れ長さ方向に沿って、U や V 字形に下地コンクリートをカットした後、補修材料を充填し、コンクリートの防水性や耐久性を向上させる工法である。例えば図 2-13 に示すように、ひび割れに沿って約 10mm 程度の U 字形補修槽を作り、その部分に可とう性エポキシ樹脂やポリマーセメントモルタルなどを充填し、ひび割れを補修する^[41]。

ひび割れの充填補修工法に対して、ひび割れ挙動の有無によって、充填材料の選定が必要である。ひび割れ挙動がある場合には、ウレタン樹脂やシリコン樹脂などのシーリング材（シーラント系、目地材）を使用し、ひび割れ挙動が小さな部分では可とう性エポキシ樹脂を用いることもある。一方、動きがない場合には、ポリマーセメントモルタルを充填する場合もある^[38]。

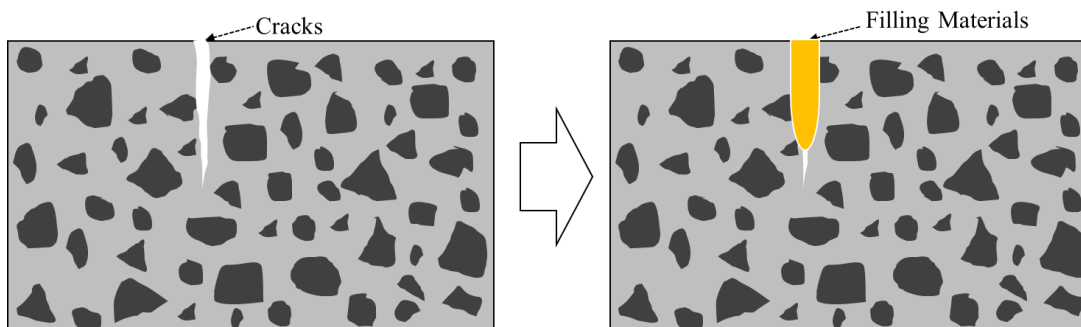


Figure 2-13 Schematic Chart of Filling Method for Cracks Repairing

図 2-13 ひび割れ充填工法の概念図

なお、ひび割れの充填工法は、鉄筋の腐食が発生しない場合に良く使用され、鉄筋の腐食が発生した場合には、適切断面修復を実施する上でひび割れの補修効果を発揮させる。

以上の既存の主な補修工法を比較してまとめたものが表 2-2 である。ひび割れの有効な補修に際して、ひび割れ特性を把握した上で、補修工法、補修材料の選定が必要であり、適切な補修を行った場合には RC 構造物の使用性や耐久性が効果的に向上される。

Table 2-2 Applicability of Three Cracks Repairing Methods [36]

表 2-2 ひび割れ補修工法の適用性^[36]

Cracks Repairing Methods		Applicability ^{※1}			
		Cracks Behavior		Cracks Depth	
		Large	Small	Deep	Low
Surface Sealing Method	Sealing of Cracks	×	○	×	○
Injecting Method	Low Pressure Injection	△ ^{※2}	○	×	○
	High Pressure Injection	△ ^{※2}	○	○	○
Filling Method	U, V Cut Methods	○	○	△ ^{※3}	○

※1 ○: Applicable, △: Applicable with Conditions, ×: Inapplicable

※2 Using Grouting Materials with Extensibility

※3 Combining with Injecting Method

第一章の図 1-3 からわかるように、補修工法の選定根拠の重要な一つとして、ひび割れ挙動の有無がある。しかし、ひび割れの挙動は、様々な外部条件の複合作用の結果であり、ひび割れの挙動特性を把握することに対して、環境条件（温度、湿度）がひび割れ挙動に及ぼす影響についての調査が必要である。

2.3.2 ひび割れ挙動に及ぼす影響要因

一般的に、コンクリート材料が温度、湿度変化によって膨張・収縮特性を有し、自然環境に暴露される RC 建築物（部材）は、季節変化、昼夜の気温変化、天候の変化等に伴う温度、湿度変化の影響を受け、それとともにひび割れ幅も複雑な変化する可能性が高い。文献^[42]において、実際 RC 建築物を対象とし、ひび割れの開閉幅の変動を長期間にわたり測定した結果から、天候、季節、壁面温度等要因がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を詳細に検討された。本節では、既往の研究で得られた実測データを例として、ひび割れ開閉挙動に及ぼす外部環境条件の影響をまとめて示す。

(1) ひび割れ開閉挙動に及ぼす天候の影響

文献^[42]に測定したデータの一部が図 2-14 に示す。同じ場所の対象ひび割れに対し、雨天、曇天および晴れにおいて、ひび割れ幅挙動の経時変化がそれぞれを測定された。また、日照時間や時刻の相違を含めて考慮し、同建物の南面、西面、北面のひび割れを選ばれて測定を行った。図 2-14 の結果によって、以下のひび割れ挙動特徴をまとめる。

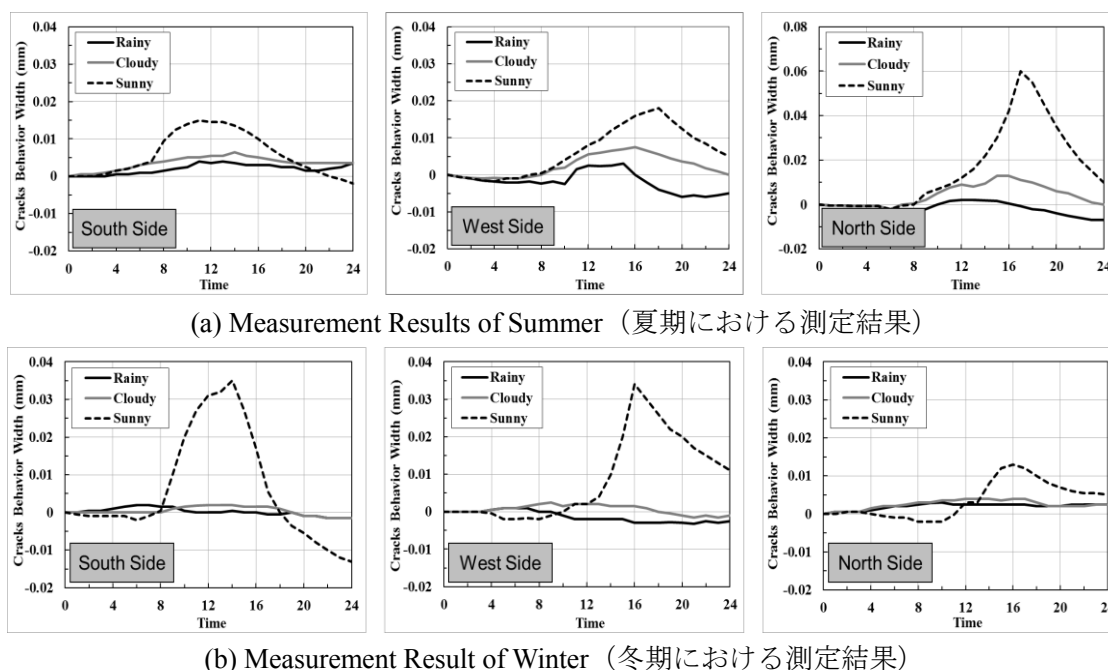


Figure 2-14 Effect of the Weather on Cracks Behavior [42]

図 2-14 ひび割れ挙動に及ぼす天候の影響 [42]

- (I) 季節や測定面に寄らず、雨天や曇天に比べて、晴天天候の場合、ひび割れ開閉挙動が著しく大きい。つまり、日射の有無がひび割れ開閉挙動に影響を及ぼすことを示している。
- (II) 夏期において、ひび割れは午前 6:00 頃から開きはじめ、正午頃にひび割れ幅が最も大きい幅になる。この傾向は、冬期も同じである。方角では、西面と南面は同じ傾向を有しているが、ひび割れが開きはじめる時間および最大値に到達する時間は南面よりやや遅れる。

これらのことより、ひび割れの補修のためにひび割れ幅を測定する場合、天候状況を考慮することが必要であり、ひび割れが最も大きく開く晴天に測定を行うことが重要であると指摘された^[42]。

(2) ひび割れ開閉挙動に及ぼす季節の影響

大久保ら^[42]の測定において、晴天の場合、南面では、夏期より冬期のほうが正面から日照時間が長いため、ひび割れ挙動が大きいと報告している。一方、西面に対しては、夏期にかなり長時間の直達日射を受けるため、冬期より夏期のひび割れ挙動が大きくなる結果が得られた。また、曇天の場合では、測定面の方位に関わらず、冬期と夏期が同じひび割れ開閉傾向が有し、1日のひび割れ挙動幅は大きな差異がないと示された。

以上の測定結果をまとめると、1日のひび割れ開閉挙動に及ぼす季節変動の影響は、対象建物の日照時間の影響を強く受けることが指摘された^[42]。

(3) ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度の影響

(1) と (2) の調査によって、ひび割れ開閉挙動が日射を原因とする外壁の温度変化の影響が大きいことが示された。これを踏まえて、RC 建築に生じた貫通乾燥収縮ひび割れを対象として、屋外側の挙動および外壁温度の経時変化を測定した結果の一例^[42]を図 2-15 に示す。

貫通ひび割れは、外壁温度の上昇に伴い、ひび割れ（屋外側）が閉じる方向に進展し、温度低下に従って、ひび割れ挙動が開く方向に発現することが示している。その原因を調査すると、外壁温度が上昇する場合、コンクリートの熱膨張が生じさせる。壁周囲に比較的大きな剛性を有する部材（柱、梁）が存在するため、壁コンクリートの膨張に拘束を与え、コンクリートの膨張がひび割れ側に発現し、ひび割れ幅を小さくさせる（閉じる）。外壁温度の上昇に伴うひび割れ幅の減少のメカニズムの概念図を図 2-16 に示す。

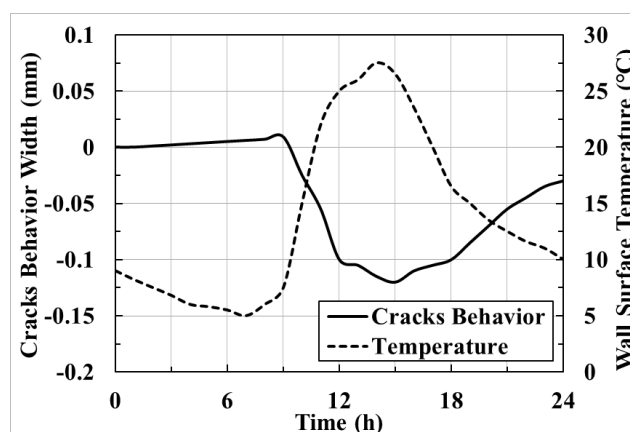


Figure 2-15 Cracks Behavior and External Wall Temperature Variation with Time ^[42]

図 2-15 屋外側ひび割れ開閉挙動と外壁温度の関係^[42]

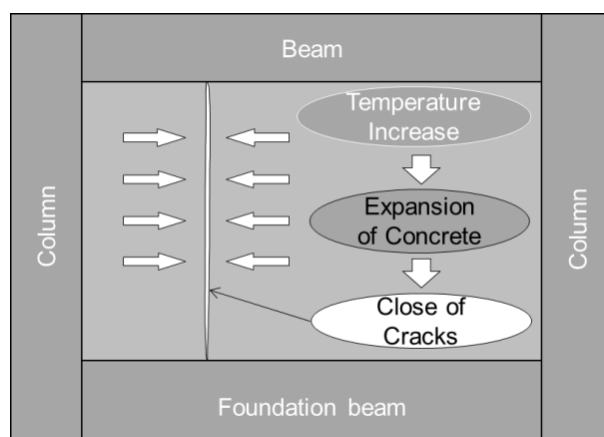


Figure 2-16 Schematic Chart of Cracks Behavior When External Wall Temperature Increase

図 2-16 外壁温度が上昇する場合屋外側ひび割れ挙動の概念図

ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度の関係を正確に把握するため、上記の結果に踏まえて、複数のひび割れに測定されたひび割れ開閉挙動と壁面温度の関係性をまとめて整理した結果を図 2-17 に示す。ここでは、ひび割れ開閉幅の最大値と最小値の差分を「ひび割れ日較差」と称し、壁面温度の最大値と最小値の差分を「温度日較差」と称している。図 2-17 にはひび割れ日較差と壁面温度日較差の関係性を示しているものである。図によって、屋外側や屋内側によらず、ひび割れ日較差が壁面温度日較差の増大程概ね比例的に増大していることが分かる。更に、ひび割れ日較差とひび割れ幅の初期値に相関がなく、初期幅が小さいひび割れに対しても、比較的大きなひび割れ日較差がある場合も存在していることも明らかにされた^[42]。

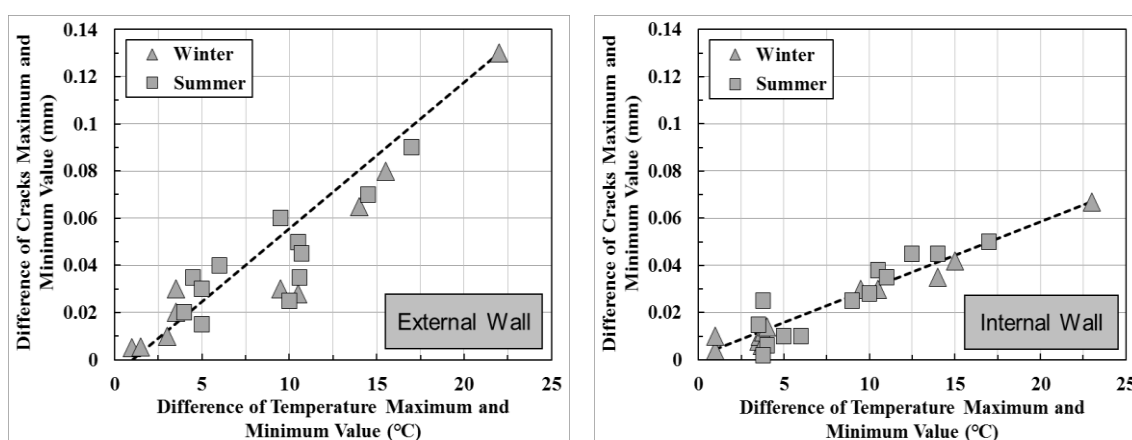


Figure 2-17 Relationship of Cracks Behavior Difference and Temperature Difference ^[42]

図 2-17 ひび割れ幅日較差と壁面温度日較差の関係性 ^[42]

これらのことによって、日変動のひび割れ幅挙動の大きさ（ひび割れ日較差）はひび割れ幅の絶対値によらず、ひび割れが生じる壁面温度の変化幅（温度日較差）との相関が高いと考えられた。この研究によって、実際のひび割れ開閉挙動の測定が困難である場合に、壁面温度の計測結果によってひび割れ幅を推定することが可能であると指摘された^[42]。

(4) 屋外側と屋内側のひび割れ挙動の相違

RC 壁に生じる貫通ひび割れに対して、外気温と室内温度（空調で制御する）の差がある場合、壁の厚さ方向に、温度勾配が発生する。温度勾配に応じて、壁の外側と内側にコンクリート膨張量の差が発生する場合、壁鉄筋がコンクリート体積変化に拘束効果を与え、壁の内外で異なる挙動が生じさせる可能性が指摘されている^[42]。既往の研究に、耐震壁厚さ方向の貫通乾燥ひび割れを対象として、両側のひび割れ幅の経時変化を測定して、屋内側と屋外側のひび割れ挙動の相違および壁面温度との関係性を検討された。計測結果の一例として、図 2-18 に示す。

図に示す測定例の場合、外壁温度が日射の変化に従って上昇、下降することに対して、屋内壁面温度は、室内空調等気温調整設備のため、大きな変化がなく、概ね一定値で推移

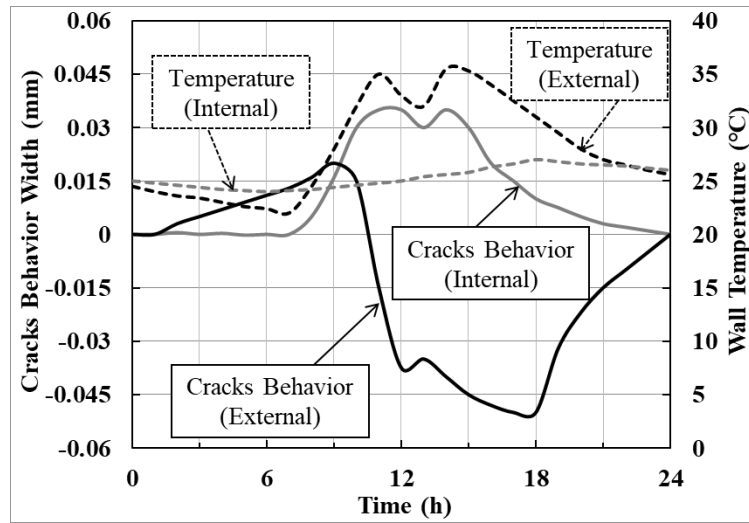


Figure 2-18 racks Behavior and Wall Surface Temperature Variation with Time [42]

図 2-18 壁の内外側におけるひび割れ開閉挙動と壁面温度の経時変化（夏期） [42]

していることが見られた。このときの、ひび割れ開閉挙動を見ると、屋外側のひび割れ挙動は（3）にまとめたように、温度の上昇に伴い、ひび割れが閉じる方向に発現し、温度が下降傾向に転じた後、ひび割れ幅が小さくなる結果を示した。しかし、屋内側のひび割れ幅では、屋外側の挙動と完全に逆な挙動方を示した。即ち、外壁温度の上昇に伴い、屋外側のひび割れが閉じ、屋内側の方が開く方向に進展し、外壁温度の下降する場合、屋内のひび割れが閉じる傾向を示している。

図 2-19 は、日射に起因して外壁温度が急激に上昇する場合において、RC 壁に生じた貫通ひび割れ（屋内、屋外）の開閉挙動を概念図として示したものである。図に示すように、

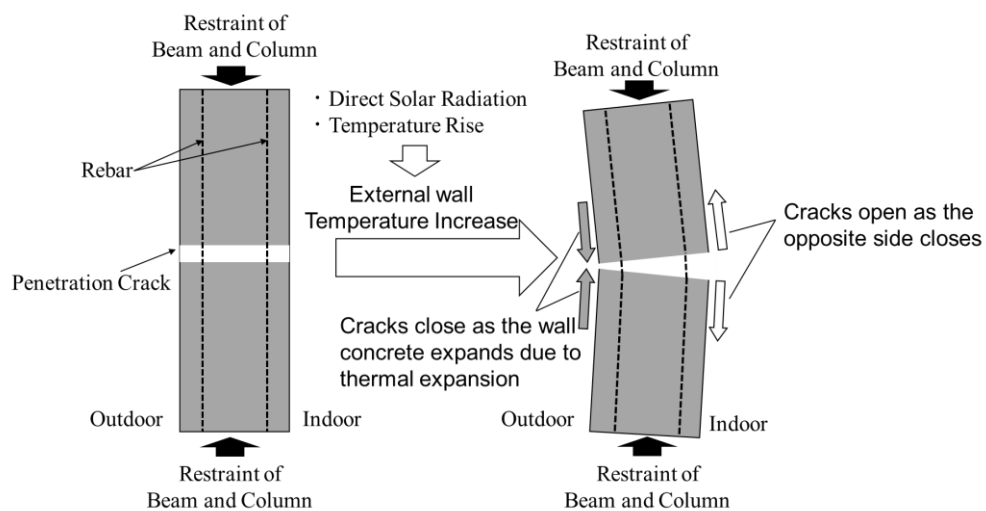


Figure 2-19 Schematic Chart of Cracks Behavior When External Wall Temperature Rapid Increase [42]

図 2-19 日射等に起因する外壁温度の急激な上昇に伴うひび割れ開閉挙動の概念図 [42]

日射等の外部要因によって外壁面温度が増加する場合、外壁面表層コンクリートの熱膨張によって体積の増大が発生する。しかし壁鉄筋および周囲（柱、梁）の部材が、コンクリートの膨張に拘束効果を与えるため、実際にはひび割れは閉じる方向に推移する。一方、屋内側において、急激な温度上昇は生じず、表層コンクリートの膨張・収縮はほとんど発生しない。にもかかわらず、屋外側の外壁が伸びることによって、壁部材断面に反り変形が引き起こされ、結果的に屋内側ひび割れが開く方向に挙動していく^[42]。

本節の調査によって、ひび割れの挙動が複雑な環境要因の影響を受けられることが明らかになった。その結果では、複雑な挙動特徴が発生することに対して、ひび割れの補修がひび割れ自体の内部要因（幅、深さ）および環境条件の外部要因（温度）を総合的考慮すべきである。更に、文献^[42]において、ひび割れの挙動に及ぼす建物の階数（拘束効果）や壁面の方角の影響も受け、実際に補修を行う時、それらのことも含めて考慮する必要がある。

更に、日変動のひび割れ挙動を着目して検討することが重要である一方で、地域による気候の相違を考慮して、年間の温度変動特性の影響も把握することが必要である。既往の研究は短期的なモニタリング事例が多く、長期的な環境特性における RC 構造物のひび割れ挙動特性を把握することは、ひび割れ補修技術に不可欠なものである。

そのため、気候特徴が有する複数の地域においての RC 構造物を対象とし、多量の実測データを蓄積することによって、全面的なひび割れ挙動評価方法を提案することは課題として残っている。以上に加えて、実構造物におけるデータの測定を、数値解析によって再現可能なモデルを構築することで、複雑な条件におけるひび割れ挙動特性をより高精度に予測できる技術が、適切なひび割れ補修技術の確立に対して期待されていると考えている。

2.4 本章のまとめ

本章では、RC 構造物の耐久性の向上を目標として、コンクリート材料に生じる収縮側の体積変化を制御する対策に関する既往の研究をまとめた。

コンクリートの収縮ひび割れ制御対策として、調合段階における混和材料の使用および供用期間におけるひび割れ補修の実施等の 2 つ観点から、調査を行った。

まず、コンクリートの収縮抑制方針について、既往の研究を調べた。収縮ひび割れ制御の着手点として、収縮ひずみ制御、収縮応力制御およびひび割れ幅の制御等の方針が挙げられたことと、各方面に対する実際的に使用された方法をまとめて示した。

次に、RC 構造物の耐久性を向上する現状に、優れた強度性能と耐久性能が有する高強度・超高強度コンクリートを対象として、自己収縮の低減対策に関する内容が具体的な調査を行った。自己収縮の発生機構をまとめた上で、自己収縮ひび割れの特徴を説明した。それらの調査によって、調合段階での制御方法が必要不可欠であることが明らかになった。

調合段階における膨張材の使用の重要性、膨張材の自己収縮低減機構、低減効果、影響要因および膨張材の使用がコンクリートの性質に及ぼす影響をまとめた。それらの調査に踏まえて、膨張材の効果的使用する観点から、高強度コンクリートに発生した膨張材の遅

第二章 既往の研究

れ膨張に関する研究現状を調査して、最適膨張材使用量の確立および膨張材の遅れ膨張発生機構や生起条件が明らかになってない現状を紹介した。本節の調査によって、高強度コンクリートの自己収縮低減を目的とした膨張材の使用に関する今後の課題と研究方向を明確に示した。

更に、RC 構造物の耐久性の向上のもう一つの大きな要因として、供用段階に生じたひび割れの補修技術に関して、現状を調査した。

現状よく採用されている一般的なひび割れ補修工法および各手法の適用性をまとめた。その後、適切な補修方法を選定する際に問題となっているひび割れ挙動の把握という課題に関して、詳細な調査を行った。RC 壁に生じた貫通ひび割れの開閉挙動に及ぼす天候、季節、壁面温度等の環境要因の影響を一つずつ検討した研究をまとめて紹介し、ひび割れ補修に対して、基本的に考慮不可欠な影響因子を示した。それらの既往の研究への調査に基づく、ひび割れ補修技術の確立に関して、実測データの取得および、数値解析を用いたひび割れ挙動を予測できる方法の提案が今後の課題として抽出された。

第二章参考文献

- [1] 小野定：コンクリートの収縮対策－③収縮ひび割れ対策と補修－，コンクリート工学，Vol.50，No.4，pp.379-384，2012.7
- [2] 田澤栄一，宮沢伸吾，佐藤剛，小西謙二郎：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学会年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.561-566，1992.7
- [3] 堀田智明，名和豊春：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.68，No.565，pp.1-7，2003.3
- [4] M. Zhang, C. Tam and M. Leow: Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research Vol.33, pp.1687-1694, Apr. 2003
- [5] 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，p.1，1996.11
- [6] 堀田智明，名和豊春：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.68，No.565，pp.1-7，2003.3
- [7] 寺本篤史：セメント系材料の水和反応に依存する体積変化に関する研究，名古屋大学学位論文，2012
- [8] P. Lura, O.M. Jensen and K. Breugel: Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.223-232, Apr. 2002
- [9] Z.P. Bazant and F.H. Wittmann: Creep and shrinkage in concrete structures, JOHN WILEY & SONS, pp.129-161, 1982
- [10] I. Maruyama: Origin of drying shrinkage of hardened cement paste: Hydration pressure, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.187-200, Jun. 2010
- [11] B.V. Derjaguin, N.V. Churaev and V.M. Muller: Surface Forces, Plenum Publishing Corporation, pp.25-52, 1987
- [12] R.F. Fledman: Sorption and length-change scanning isotherms of methanol and water on hydrated portland cement, 5th ISCC, Tokyo, III-23, pp.53-66, 1967
- [13] 小野吉三，中川晃次：セメントの膨張材，Gypsum & Lime, No.106，pp.15-20，1970
- [14] 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状，日本建築学会，p.8，2013
- [15] A. Bentur and M. Ish-Shalom: Properties of type K expansive cement of pure components II. Proposed mechanism of ettringite formation and expansion in unrestrained paste of pure expansive component, Cement and Concrete Research, Vol.4, No.5, pp.709-721, Feb. 1974
- [16] 盛岡実：セメント系膨張材の水和反応と材料設計，東京工業大学学位論文，1999
- [17] 盛岡実，萩原宏俊，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998.7
- [18] 鈴木雅博，中瀬博一，丸山一平，佐藤良一：超高強度膨張コンクリートの自己応力に

第二章 既往の研究

- 及ぼす温度履歴の影響, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.375-382, 2005
- [19] 松田拓, 嶋毅, 河上浩司, 西本好克: 初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1247-1252, 2006.7
- [20] 高田和法, 柳井修司, 渡部貴裕, 一宮利通: 超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1007-1012, 2003.7
- [21] 都築正則, 一瀬賢一魏, 神代泰道, 川口徹: 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす結合材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1299-1304, 2004.7
- [22] 上原伸郎, 鈴木康範, 河上浩司, 西本好克: 超高強度コンクリートの自己収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1099-1104, 2005.7
- [23] 三谷裕二, 中崎豪士, 谷村充, 丸山一平: 高温履歴を受けた超高強度コンクリートの膨張材による自己収縮制御, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1241-1246, 2010.7
- [24] 石川伸介, 立山創一, 安部弘康: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する研究—各種セメントにおける自己収縮量および膨張材による自己収縮低減効果, 安藤建設技術研究所報, Vol.13, pp.27-34, 2007
- [25] A. Su, L. Qin, S. Zhang, J. Zhang and L. Zhao: Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Admixture on the Volume Deformation of Ultrahigh Performance Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1-7, Jul. 2017
- [26] 三谷裕二, 番地成朋, 谷村充, 丸山一平: 高温履歴を受けた低水結合材比シリカフェーム混和セメントの強度および水和反応特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1495-1500, 2009.7
- [27] V. Satava and O. Veprek: Thermal decomposition of ettringite under hydrothermal conditions, *Journal of The American Ceramic Society*, Vol.58, pp.357-359, 1975
- [28] 松本健一, 谷村充, 佐竹紳也: 水セメント比の異なる膨張コンクリートの基礎的性状, 日本建築学会大会梗概集 (関東), pp.223-224, 2006.9
- [29] 庄司慎ほか: 単位セメント量の少ない膨張コンクリートの圧縮強度特性, 土木学会第66回年次学術講演会, pp.1031-1032, 2011
- [30] 土木学会: 膨張コンクリート設計施工指針, 土木学会, 1993
- [31] 陣内浩, 黒岩秀介, 並木折, 渡邊悟士: 超高強度コンクリートの長さ変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.393-394, 2005
- [32] 松田拓, 嶋毅, 河上浩司, 西本好克: 初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1247-1252, 2006.7
- [33] 郭度連, 谷村充, 佐竹紳也, 柴垣昌範: 膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.471-476, 2008.7
- [34] 盛岡実ほか: 膨張材を混和した低水結合材比モルタルの膨張挙動, 「膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化」に関するシンポジウム, pp.103-108, 2003.9

- [35] 荒井康夫：セメントの材料化学，大日本図書，pp.170，1984
- [36] 前山篤史，秋山暉：ひび割れ補修工法—ある現場技術者の経験より—，コンクリート工学，Vol.48，No.5，pp.88-91，2010
- [37] 日本建築仕上げ学会：FINEX，Vol.12，No.70，2000
- [38] 西村和真：RC 造外壁の経年劣化に対する補修・改修技術の評価に関する研究，広島大学学位論文，2017
- [39] 日本工業標準調査会：JIS A 6204 建築補修用注入エポキシ樹脂，2008
- [40] 日本建築仕上材工業会：NSKS-3003 ポリマーセメントスラリーの品質基準（案）
- [41] 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針—2009—，日本コンクリート工学協会，p.121，2009
- [42] 大久保孝昭，森濱直之，流田靖博，長谷川拓哉，藤本郷史：実建築物の壁面に生じたひび割れ挙動計測に基づくひび割れ補修のための調査診断に関する考察，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.662，pp.737-744，2011.4

第三章 膨張材による高強度コンクリートの自己収縮低減機構

3.1 はじめに

本章では、膨張材による高強度コンクリートの自己収縮低減機構の解明を目的とした。まず、日本国内で市販されている主要な膨張材二種類について、超高強度セメントペーストの自己収縮低減メカニズムに関して水和圧理論による考察を行った。また、コンクリートがセメントペーストと骨材の複合材料であることを踏まえ、セメントペーストによって得られた知見をコンクリートに応用していくため、膨張材を添加した場合の膨張および収縮ひずみに対して既往の複合則理論の適用性の検討を行った。

3.2 膨張材の種類が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

本節では、膨張材を用い高強度コンクリートの自己収縮低減メカニズムおよび膨張材の膨張機構を解明するため、二種類の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を検討した。具体的に実施した実験内容を表 3-1 に示す。

Table 3-1 Contents of Experiments Conducted

表 3-1 本研究に実施した実験概要

Experimental Items	Results
Length Change Measurement	Thermal Expansion Coefficient Variation with Age
	Autogenous Shrinkage Variation with Age
Moisture Content Measurement	Mass Moisture Content Variation with Age
Bound Water Measurement	Bound Water Amount Variation with Age
Propagation Velocity of Ultrasonic Waves Measurement	Propagation Velocity of Ultrasonic Waves and Young's Modulus Variation with Age
Hydration Analysis	Calcium Hydroxide Production Variation with Age
	Ettringite Production Variation with Age

3.2.1 実験材料及び調合条件

表 3-2 に本実験で使用した材料およびセメントの鉱物組成を示す。セメントは市販のシリカフェームプレミックスセメント（以下、SFPC と表記する）であり、本実験で使用した二つのロットの SFPC のリートベルト解析による鉱物組成解析の結果を表 3-2 に示す。表に示す結果によって、二つのロットの SFPC の鉱物組成は大きな差異が見られないことが確認された。

Table 3-2 Mineral Composition of Cement and Admixtures Used in This Experiment

表 3-2 本実験使用した及びセメントの鉱物組成と混和材料の概要

Cement (C)	Silica Fume Premix Cement (SFPC)			
Mineral Composition (Crystal)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Lot No.1	44.20%	37.40%	3.05%	12.50%
Lot No.2	44.40%	37.20%	3.03%	12.25%
Admixtures				
CSA Type Expansive Additive (EX1)	Low-addition Ettringite-Lime Composite Type			
Lime Type Expansive Additive (EX2)	Lime Based Early-strength Type			
Shrinkage Reducing Agent (SR)	Lower Alcohol Alkylene Oxide Adducts			
High Performance Water Reducing Agent (SP)	Polycarboxylate Based Superplasticizer			

膨張材では、表 3-3 に示すように、日本国内外に複数種類が開発されているが、膨張性水和物として、主に水酸化カルシウム (CH) およびエトリンガイト (AFt) が生成している。本実験では、膨張材種類による影響を確かめるため、市販の低添加エトリンガイト石灰系複合型膨張材 (CSA 系、以下、EX1 と表記する) および早強性膨張材 (石灰系、以下、EX2 と表記する) を使用した。この二種類膨張材は、日本国内で自己収縮低減によく使用される膨張材として最も一般的なものである。二種類の膨張材の差異は、膨張圧を付与する水和生成物として、CSA 系膨張材が主にエトリンガイトを生成し、石灰系膨張材が主に水酸化カルシウムを生成する。

Table 3-3 Examples of Expansive Additive Used in Japan and Abroad

表 3-3 膨張材の主成分及び水和物 (例: 日本, アメリカ, 中国)

Country	Symbol of EX (Cement)	Main Components of EX	Expansive Hydrates	Remarks
Japan	A, D ^[1]	C ₄ A ₃ Ŝ	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	C: CaO A: Al ₂ O ₃ Ŝ: SO ₃ M: MgO H: H ₂ O
	B ^[1]	C, A, CŜ	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	
	C, F ^[1]	C	CH	
	E ^[1]	C ₄ A ₃ Ŝ, C	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂ , CH	
USA	K ^[2]	C ₄ A ₃ Ŝ	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	
	M ^[2]	CA, C ₁₂ A ₇	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	
	S ^[2]	C ₃ A	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	
China	UEA ^[3]	C ₄ A ₃ Ŝ	C ₆ AŜ ₃ H ₃₂	
	MEA ^[4,5]	M	MH	

また、自己収縮ひずみ低減手法の一つとして、収縮低減剤の添加が良く採用されており、本研究には、自己収縮低減効果を向上する目的で収縮低減剤と異なる膨張材を併用した場合に自己収縮低減機構と低減効果の差異を確認するため、低級アルコールアルキレンオキシド系収縮低減剤（以下、SR と表記する）も併せて使用し、検討を行った。セメントペーストの流動性を求めるため、ポリカルボン酸系高性能減水剤（以下、SP と表記する）を使用した。本実験に使用したセメントペーストの調合条件を表 3-4 に示す。

Table 3-4 Compounding Details of Cement Paste

表 3-4 メントペーストの調合条件

Symbol	W/B (mass%)	EX1/B (mass%)	EX2/B (mass%)	SR/B (mass%)	SP/B (mass%)
PL	16.5	—	—	—	3.3
EX1		3	—	—	3.3
EX2		—	3	—	3.1
SR		—	—	0.6	3.1
EX1SR		3	—	0.6	3.3
EX2SR		—	3	0.6	3.1

本実験において、全ての調合で水結合材比（W/B）を 16.5%とした。この程度の水結合材比のコンクリートにおいて、単位セメント量は概ね 900-1000kg/m³であり、膨張材メーカー推奨の添加量が 25 kg/m³であることから、本実験に膨張材の添加率は結合材量に対して内割 3%とした。また、収縮低減剤は結合材に対して 0.6%を水に内割置換率した。高性能減水剤の使用量には、予備実験において、所定のワーカビリティが得られると判断した分量であり、EX1 の実験シリーズでは、結合材質量に対して 3.3%、EX2 の実験シリーズでは、結合材質量の 3.1%とした。

図 3-1 に異なるロットの SFPC を用いた場合に、高性能減水添加量が 3.3%および 3.1%とした場合のひずみの経時変化を示す。図より、いずれのロットの場合も、収縮開始時点およびその後のひずみ履歴が概ね一致していることが確認できる。また、高性能減水剤は 30%の固体と 70%の液体を構成と考え、計量する時 70%の水として調合計算を行った。図中、定期的なひずみのパルス波形については後述する。

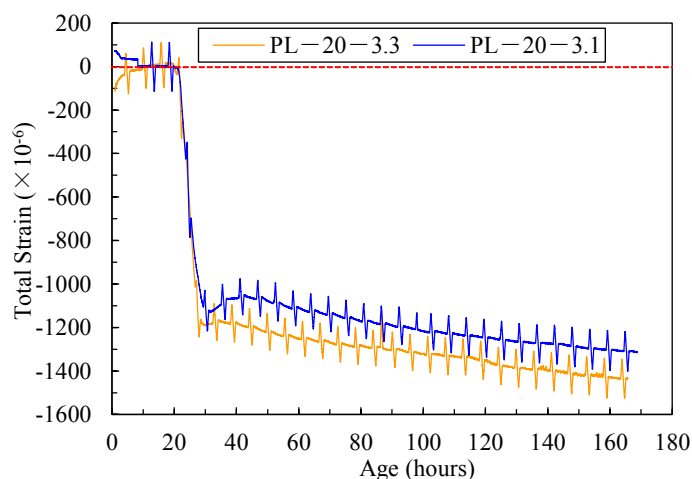


Figure 3-1 Comparison of Shrinkage Start Point with Different Addition Rate of SRA (PL-20)

図 3-1 高性能減水剤添加量が異なる場合収縮開始時点の比較 (PL-20)

セメントペーストの練り混ぜは、まず、セメントと膨張材を添加し、ホバート型ミキサによって1分間低速空練りを行う。十分に粉体が混合された後、収縮低減剤および高性能減水剤を混和した水を注水し、低速で1分間練り混ぜた後、高速で9分間練り混ぜを行った。その後、容器や羽についたセメントをかき落とした後、さらに1分間高速で練り混ぜた。練り混ぜ後は体積変化測定実験用、含水率・水和反応解析用、超音波伝播実験用の型枠・アルミバッグにセメントペーストを打設した。

本実験では、表 3-4 に示す全て調合について 10℃、20℃、30℃の恒温養生条件で7日養生し測定を行った。また、線膨張係数と自己収縮ひずみを取得するため、体積変化試験体に対して、10℃、20℃、30℃それぞれのベース温度に加えて、±5℃の温度パルスを与えた。線膨張係数と自己収縮ひずみの算出方法は後節で説明する。本実験に採用した温度履歴を 図 3

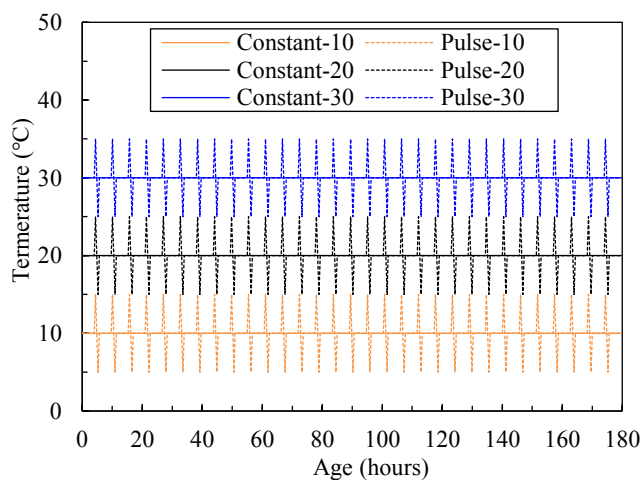


Figure 3-2 Temperature History for Curing

図 3-2 養生温度履歴

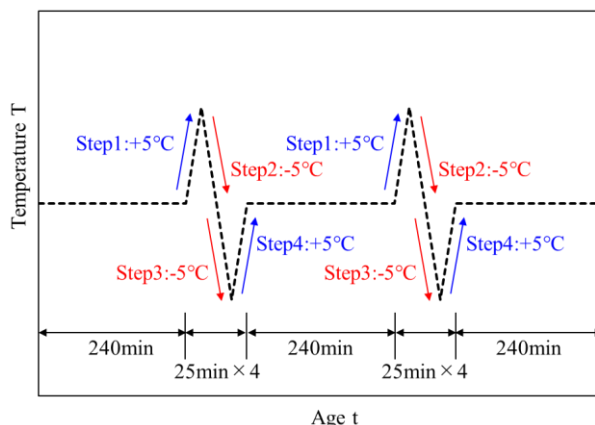


Figure 3-3 Temperature Pulse for Autogenous Shrinkage Measurement

図 3-3 自己収縮ひずみ測定用温度パルス

ー2 に示し、温度パルスの詳細を図 3-3 に示す。以降の検討では、それぞれの温度条件で養生した試験体名記号の末尾に“-10”，“-20”，“-30”を添えて表記する。

3.2.2 実験概要

(1) 体積変化測定実験

本実験では図 3-4 に示すような型枠を作製し、レーザー変位計を用いてセメントペーストの体積変化を計測した。図 3-5 に示すような装置を採用し、試験体それぞれの温度を制御した。図 3-4 に示すように、試験体型枠は熱伝導性を良くするためにポリエステルフィルム(0.3mm厚)を折り曲げて作製し、ペースト打ち込みネジおよび熱電対を挿入する箇所のみスチレンボードを切り出して接着した。

図 3-4 に示す型枠に練り混ぜたセメントペーストを打設した直後、ペーストと外部環境

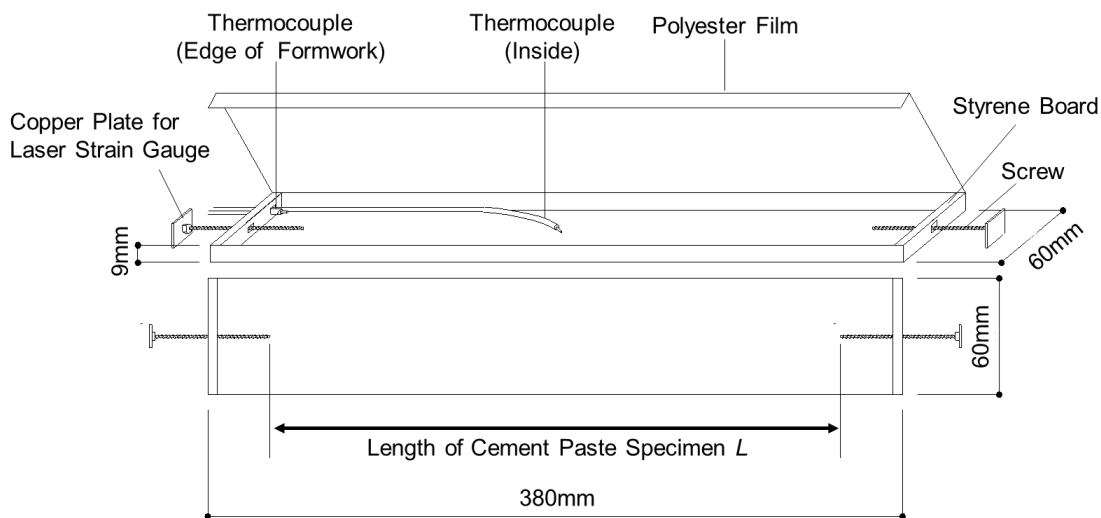


Figure 3-4 Formwork for Volume Change Measurement [6]

図 3-4 体積変化測定用型枠^[6]

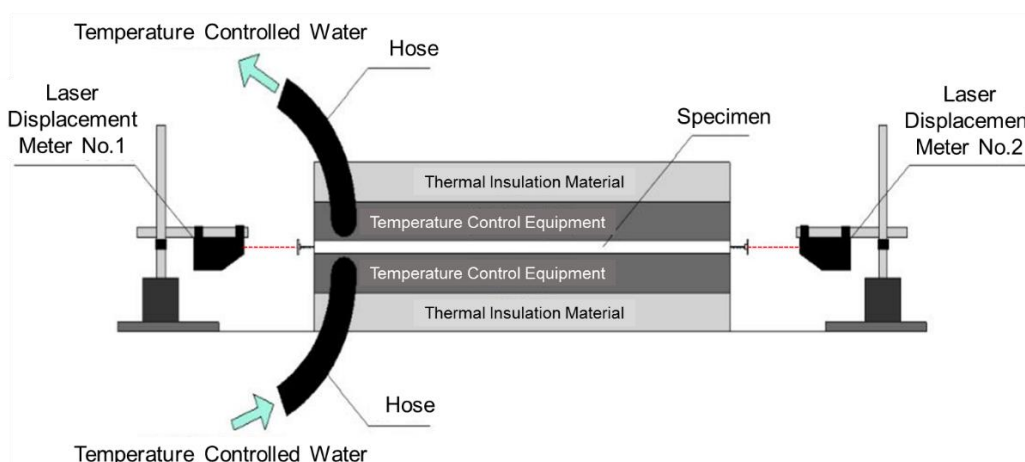


Figure 3-5 Cross section of Temperature Control System for Volume Change Measurement

図 3-5 体積変化測定用温度制御装置断面図

との水分交換を防ぐため、アルミテープ用い型枠を封緘し、図 3-5 に示す温度制御装置に設置して、レーザー変位計をペーストに打ち込みネジの外部露出した部分に取り付けた銅板に照射して相対変位の経時変化を測定した。

試験体の温度制御は、任意のタイミングで水温を制御可能な装置で温度調整された水を図 3-5 示すホースから装置内部に流すことで試験体の温度を制御した。なお、試験体の保温性向上ため、温度制御装置全体が断熱材で覆われている。

以上の装置により、試験体は任意のプログラムによって養生可能である。

また、既往の研究より、本装置で得られるひずみ結果は、埋め込み型ひずみ計よりも材齢初期のひずみに対して敏感であること、ある程度硬化した後は埋め込み型ひずみ計やメタルベースゲージの測定結果と概ね同様の結果が得られることが分かっている^[7]。本実験では 3 台の装置を同時に稼働させ、10°C、20°C、30°C一定での養生温度を基本として測定を実施した。

(2) 線膨張係数と自己収縮ひずみの算定

(1) 線膨張係数の算出方法

上記の測定装置は、任意の温度を試験体に与えることができるため、線膨張係数を算出可能である。膨張材を添加した調合において、高強度セメントペーストの線膨張係数に関する既往の研究データはほとんどないため、本研究において、文献^[8]に提案された方法を用い、図 3-3 に示した温度パルスの各ステップにおける線膨張係数を式 3-1、式 3-2 によって計算した。

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_{total}}{\Delta T} \quad \text{式 3-1}$$

$$\varepsilon_{total} = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{式 3-2}$$

ここに、 α : セメントペーストの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ϵ_{total} : 試験体の全ひずみ ($\times 10^{-6}$)

T : 試験体の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔL : 試験体の一軸長さ変化量 (レーザー変位 No.1 と No.2 示す数値の合計) (mm)

L : セメントペーストの試験体の有効長さ (図 3-4 参照) である。

低水結合材比の調合では、膨張材の有無によらず、材齢初期に自己収縮が顕著に進行するため、温度ひずみのみを計測することが困難である。そのため、図 3-6 に示すように、温度と全ひずみの関係は各 Step で異なる傾きを持つ。さらに、Step1 から Step4 までの間に $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度変化を受け基準温度に戻ってきた状態において全ひずみは基準温度時に戻らない。一方、自己収縮の進行が緩やかな材齢では、図のようにほとんど自己収縮の影響は見られず温度と全ひずみの関係は全 Step でほぼ同一の線形を示している。そのため、線膨張係数の算出に際し温度ひずみを導出するためには、自己収縮の影響を低減する必要がある。

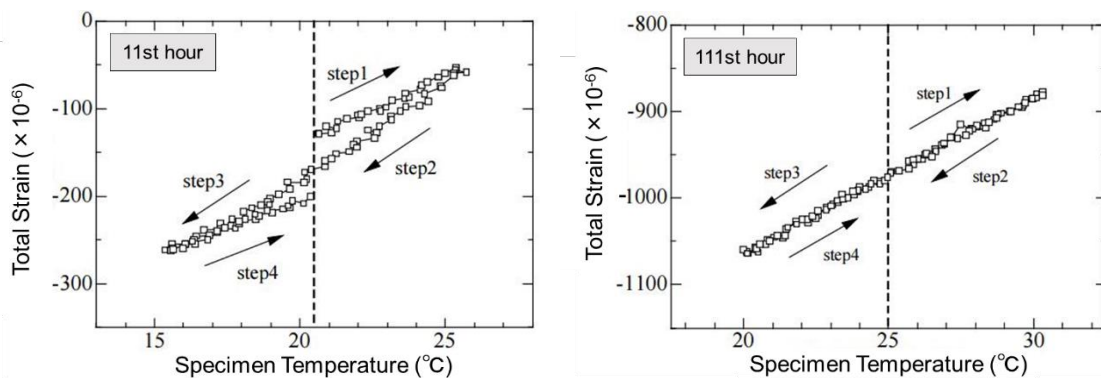


Figure 3-6 Relationship Between Total Strain and Specimen Temperature [9]

図 3-6 全ひずみと供試体温度の関係^[9]

本実験では、既往の研究にならい、以下の方法で自己収縮の影響を取り除いた。まず、温度パルスの Step1, Step2 において自己収縮が、単位時間当たり自己収縮ひずみ増加量 a で線型に進行すると仮定した。このとき、Step1, Step2 での全ひずみ量はそれぞれ式 3-3, 式 3-4 で表される。昇温、降温の速度が一定であることを考慮すると、式 3-3 から式 3-4 を差し引くことで自己収縮ひずみ増加量 a を消去でき、結果として線膨張係数 α は a の値によらず式 3-5 で表すことができる。

$$\text{Step1 での全ひずみ量} : \epsilon_{total,s1} = \alpha \Delta T_{s1} + at_{s1} \quad \text{式 3-3}$$

$$\text{Step2 での全ひずみ量} : \epsilon_{total,s2} = \alpha \Delta T_{s2} + at_{s2} \quad \text{式 3-4}$$

$$\text{線膨張係数} : \alpha = \frac{\epsilon_{total,s1} - \epsilon_{total,s2}}{\Delta T_{s1} - \Delta T_{s2}} \quad \text{式 3-5}$$

ここに、 α : 当該区間における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ΔT_{si} : Step*i* における温度変化量 ($^{\circ}\text{C}$)

t_{si} : Step*i* の測定時間 (minutes)

a : 単位時間あたり自己収縮ひずみ増量 ($\times 10^{-6}$) である。

(II) 自己収縮ひずみの算出方法

上記の方法によって得られた線膨張係数, 試験体温度および全ひずみの測定値を用いて, 式 3-6 に示すような増分法により自己収縮ひずみを算出した。

$$\Delta \varepsilon_{auto,i} = \Delta \varepsilon_{total,i} - \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (T_i - T_{i-1}) \quad \text{式 3-6}$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_{auto,i}$: Step*i* における自己収縮ひずみの増分 ($\times 10^{-6}$)

$\Delta \varepsilon_{total,i}$: Step*i* における全ひずみの増分 ($\times 10^{-6}$)

α_i : Step*i* における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

T_i : Step*i* における試験体温度 ($^{\circ}\text{C}$) であり, 1 ステップは 1 分として計算した。

本実験には, 図 3-2 と 図 3-3 に示した線膨張係数算出用温度パルスが 340 分毎に設定したため, 1 分毎の線膨張係数の経時変化を実験的に取得してなかった。そこで, 自己収縮ひずみを算出する際に, シグモイド曲線を用いて, 線膨張係数の経時変化を近似して試みた。なお, 既往の研究によって, SFPC における線膨張係数の測定値は, 材齢 20 時間前後で線膨張係数が最大値を取得, その後約 20 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に落ち着くという傾向があるが, この傾向を近似曲線で描画するにあたり, 水の線膨張係数である 70 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) から 2 つのシグモイド曲線を用いて測定値のグラフの最も線膨張係数が大きくなる点以降の点を通る曲線を描いた。ここで, セメントペーストが固まっていない状態では線膨張係数の計測値はばらつきがある。近似曲線の描画の際には線膨張係数の最大値をとる点以前の点は除外した。例として, PL-2 の線膨張係数の近似式を図 3-7 に示す。

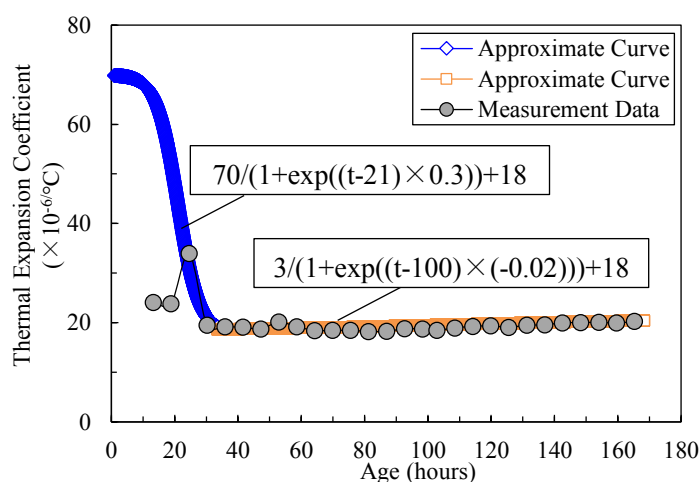


Figure 3-7 Example of Thermal Expansion Coefficient Measurement Data and Approximate Cure (PL-20)

図 3-7 PL-20 の線膨張係数と近似曲線

本実験に得られたセメントペーストの全ひずみの経時変化において、収縮の開始する時点が養生温度によって異なっている。本実験にセメントペーストの凝結始発実験が行われてないため、セメントペーストのひずみが収縮側に急激に進行する時点に凝結始発時点と仮定し、ひずみ値を0とみなして整理した。

(3) 質量含水率・結合水量測定実験

本研究では、水和反応によって水分を消費する観点から自己収縮メカニズムを考察するため、セメントペーストの質量含水率および結合水量を測定した。セメントペーストの各調合や温度条件において、質量含水率・結合水量の経時変化を比較する。各調合のセメントペーストが練り混ぜ直後に、アルミバッグに約100g-150g程度量を打設し、アルミテープを用いて封緘処理した後、10℃、20℃、30℃それぞれの温度制御装置に養生した。

具体的な測定方法では、①～⑥の手順で行った、実験風景を図3-8に示す。

- ① アルミバッグに打設し、各温度条件に養生したセメントペースト試験体を粉砕する。
- ② 坩堝（ふた+本体）の番号を記録し、質量を計測する。
- ③ 坩堝に粉砕された試料を1.0g～1.5g入れ、質量を計測して記録する。
- ④ 105℃マッフル炉に24時間以上静置し、未反応の自由水を蒸発させる、絶乾状態にする。
- ⑤ ④をデシケーターに静置冷却させた後、質量を計測し記録する。
- ⑥ ⑤を1000℃の炉に3時間静置し、強熱による結合水を蒸発させる。

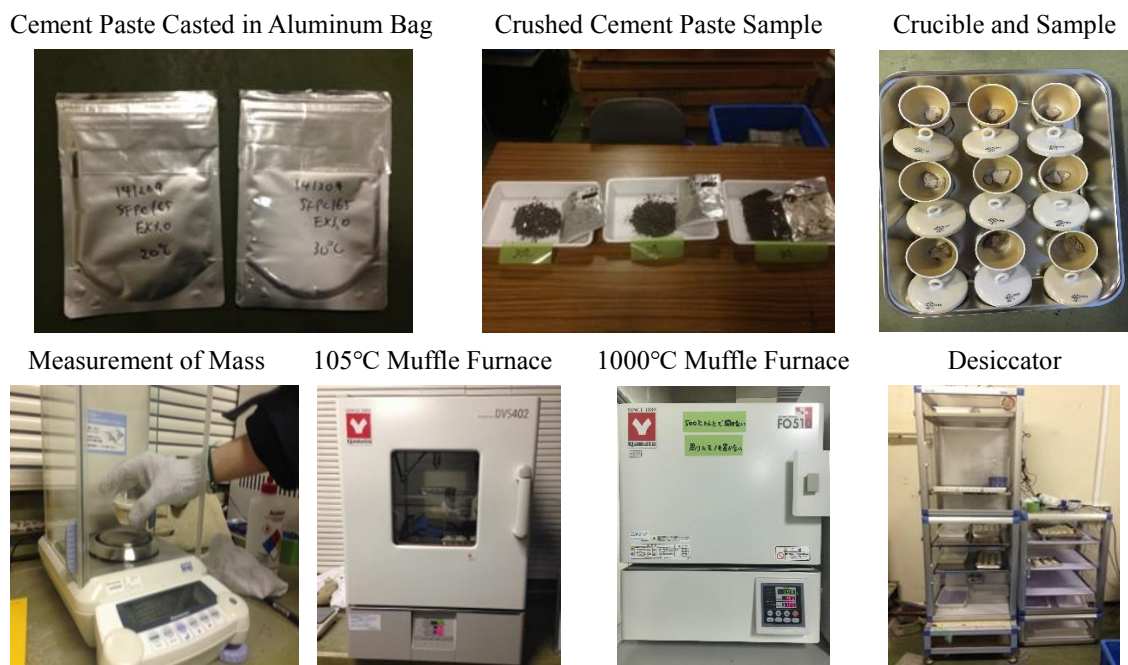


Figure 3-8 Measurement of Mass Moisture and Bound Water Content

図3-8 質量含水率・結合水量の測定

計測したデータを用い、式3-7、式3-8によって質量含水率・結合水量を算出した。

$$\text{質量含水率(\%)} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{式 3-7}$$

$$\text{結合水量(\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad \text{式 3-8}$$

ここに、 m_0 ：105°C乾燥前のセメントペースト試料の質量 (g)

m_1 ：105°C乾燥後のセメントペースト試料の質量 (g)

m_2 ：1000°C乾燥後のセメントペースト試料の質量 (g) である。

なお、各条件に対して3つの試料の計測を行い、得られた質量含水率・結合水量データは3つの試験結果の平均値をその材齢・温度条件の質量含水率・結合水量とした。全ての質量は0.1mgまで計測可能な電子天秤を用いて計測した。

(4) 水和解析実験

膨張材の自己収縮低減機構を解明するため、膨張材の水和反応によって生成された膨張性水和物の生成量を取得する。所定材齢のセメントペーストの水和反応を停止させて、XRD/リートベルト解析によって、水酸化カルシウムおよびエトリンガイト生成量を取得した。

水和停止は、水和反応進行中のセメントペースト試料をアセトンに浸漬することで行った。本実験で実施した水和停止作業を以下①～⑥に示し、実験風景を図3-9に示す。

- ① 所定材齢におけるアルミバッグ中のセメントペーストを5mm以下に破碎する。
- ② 粉碎した試料をビーカーに入れ、十分な量のアセトンを注入する十分掻き混ぜ、30分放置する。
- ③ アセトンを分離するため、アスピレーターに濾紙をセットし、スイッチを入れ②の試料を加えながら掻き混ぜ、試料が乾燥され色が薄くなるまでアスピレーターのスイッチを切る。
- ④ 試料を再度ビーカーに入れ、②と同じ量アセトンを注入する十分掻き混ぜ後6時間静置する。
- ⑤ ③の繰り返し作業を行う。
- ⑥ 試料をトレーに入れ、デシケーターの中で24時間保存し、試料ビンに詰める。



Figure 3-9 Hydration Stop Operation of Cement Paste

図 3-9 セメントペーストの水和停止作業手順

上記の水和停止作業によって作られた試料を用いて、XRD/リートベルト解析を行う。X線回折(X-ray Diffraction, 以下XRDと表記する)の原理は、原子が規則的に並んだ結晶にX線を入射した時、回折現象により特定の方向に強いX線が観察される現象を利用したものであり、図3-10の示すように、A、Bそれぞれの位置で散乱されるX線の光路差が、X線の波長の整数倍になっていると、波の位相が一致するため、波の振幅が大きくなることで説明される。物質はそれぞれに特有な規則性を持つ結晶をつくることから、X線回折では化合物の種類を調べることができる^[10]。

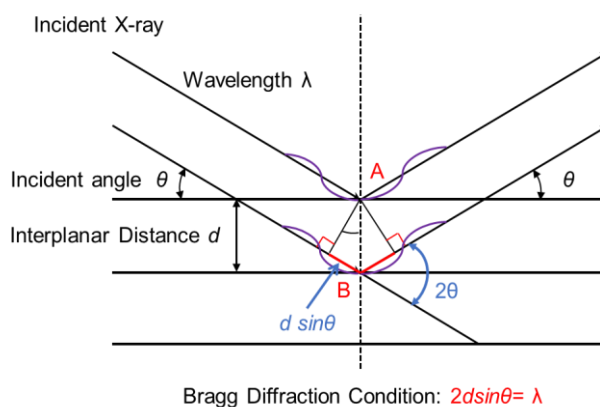


Figure 3-10 Schematic Chart of X-Ray Diffraction

図3-10 X線回折概念図

本実験では、水和停止試料を微粉碎して90μ以下に調整した後、内部標準試料としてα-Al₂O₃を質量の内割10%混和し、測定サンプルを作製した。D2PHASER卓上型粉末X線回折装置を使用した。解析条件は、X線管球セラミックス：Cu，管電圧：30kV，管電流：10mA，走査範囲：2θ=5～65°，ステップ幅：0.02（測定可能な最小半値幅<0.05°），スキャンスピード：0.5°/minとした。

非晶質物質量は内部標準α-Al₂O₃の定量から式3-9に従い算出した^[11]。

$$A = \{100 \times (S_R - S)\} / \{S_R \times (100 - S) / 100\} \tag{式 3-9}$$

ここに、A：非結晶質相対含有率（mass%）

S：α-Al₂O₃の添加率（mass%）

S_R：α-Al₂O₃の定量値（mass%）である。

XRD/リートベルト解析は各材齢の試料について2回の解析を行い、2回解析の平均値をその材齢の含有率として採用した。

（5）超音波伝播速度実験

各調合のセメントペーストの剛性（以下、弾性係数を指す）の発現を確認するため、超音波伝播試験を行い、セメントペーストの動弾性係数の経時変化を取得した。

超音波伝播速度試験用試験体の概要を図3-11に示す。試験体寸法は150mm×50mm×50mm

である。図に示すように、型枠は主にスタイロフォームで作製した、長手方向の両側は平滑な2mm厚のアクリル板で覆い、強力接着剤で接着した。セメントペーストを打設後、打設面を0.3mm厚のポリエステルフィルムを覆い、アルミテープで封緘した後、10℃、20℃、30℃それぞれの恒温条件で養生した。所定材齢に試験体を取り出し、超音波測定器によって、縦波および横波の伝播時間を速やかに計測した。

本実験で使用した超音波測定器は、図3-12に示すPundit PL-200である。送受信のトランスデューサには横波測定用(250kHz)を使用した。横波用トランスデューサでは縦波と横波を同時に測定することが可能であるが、本実験では縦波伝播時間を使用した。伝播時間を取得し、試験体の長さで除すことで超音波伝播速度を算出した。

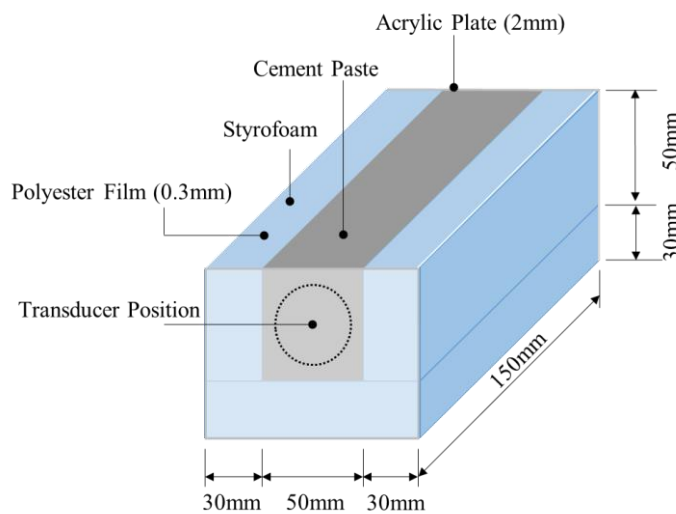


Figure 3-11 Framework and Specimen Outline of Propagation Velocity of Ultrasonic Waves Measurement

図3-11 超音波伝播試験用試験体及び型枠の概念図

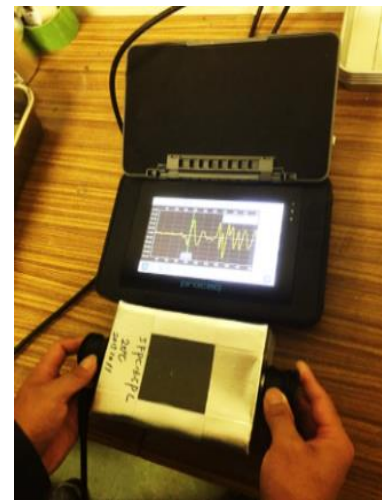


Figure 3-12 Landscape of Measurement

図3-12 実験風景

本研究で行った実験フローを図3-13にまとめる。実験フローに対応する超音波伝播速度、質量含水率・結合水量測定実験、および水と解析を行った材齢の一覧を表3-5に示す。

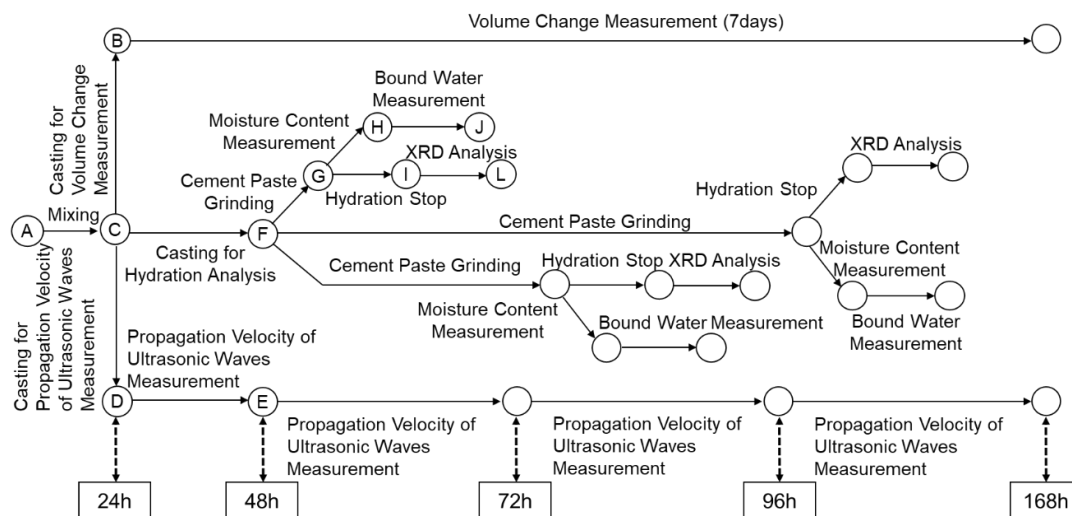


Figure 3-13 Experiment Flow of This Research

図 3-13 実験フロー

Table 3-5 Experiment Age for Propagation Velocity of Ultrasonic Waves Measurement, Moisture Content/ Bound Water Content Measurement and Hydration Analysis

表 3-5 超音波伝播速度, 質量含水率・結合水量, 水和解析実験を実施した材齢

Conducted Age	6h	9h	12h	15h	18h	21h	24h	27h	30h	36h	39h	42h	48h	54h	72h	120h	168h	
PL	10°C	-	○	○	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	20°C	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30°C	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EX1	10°C	-	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○
	20°C	-	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○
	30°C	○	-	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○
EX2	10°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
	20°C	○	○	○	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	-	○	○
	30°C	○	○	○	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	-	○	○
SR	10°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
	20°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
	30°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
EX1SR	10°C	-	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○
	20°C	-	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○
	30°C	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○
EX2SR	10°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
	20°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○
	30°C	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	○	-	○	-	○	○

3.2.3 実験結果

本節では測定結果を調合ごとに示す。実験結果に基づく考察は3.2.4節以降で述べる。なお、本実験では、10°C、20°C、30°Cの温度条件で行ったが、10°Cの試験体表面に結露が発生したため、適切な自己収縮ひずみおよび線膨張係数を取得できなかった。

(1) 線膨張係数の経時変化

本実験から得られたセメントペーストの線膨張係数の経時変化を図3-14に示す。図に示すように、20°C温度条件においては、全ての調合セメントペーストの線膨張係数は材齢極初期の大きな値から硬化に伴い急激に減少し、その後、材齢約168時間までほぼ $19(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 一定値に収束する傾向が見られた。また、30°C養生の場合、材齢168時間に至るまで徐々に

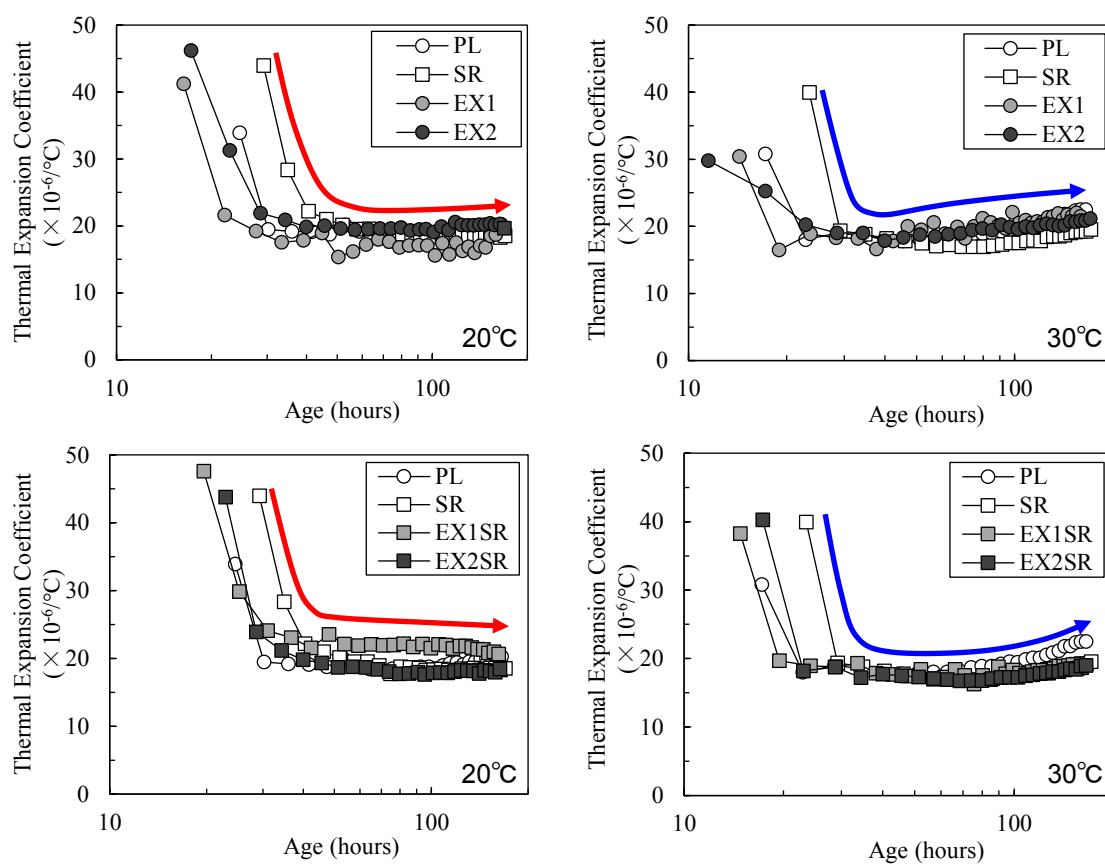


Figure 3-14 Thermal Expansion Coefficient Variation with Age

図 3-14 各調合における線膨張係数の経時変化

上昇する傾向を有した。このことは、30°Cで養生された試験体は、水和反応速度が速く、試験体の自己乾燥が促進された結果線膨張係数が増加したと考えられる^[12]。

また、同じ温度条件において、膨張材や収縮低減剤を単一あるいは併用で使用した場合にも、線膨張係数の値はPLと比べて大きな差異はないが、収縮低減剤を添加した場合、一定値に収束にする材齢が遅延する結果が得られた。収縮低減剤が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響については、収縮低減剤の水和遅延効果に伴って、線膨張係数の急減する材齢を遅延させるものの、硬化後の値に及ぼす影響は小さく、本検討の調合範囲内では、線膨張係数の測定結果にほとんど差異が生じてなかった。

更に、膨張材種類が線膨張係数に及ぼす影響に着目すると、収縮低減剤の有無によらず、各調合の線膨張係数が概ね同様の経時変化を示しており、膨張材種類の相違は、線膨張係数の経時変化に大きな影響を与えてなかった。

一般的にセメントペーストの線膨張係数は内部の含水状態の影響を大きく受け、内部相対湿度の低下に伴って、線膨張係数が増大することが知られている^[13]。膨張材を添加した調合では、材齢極初期から膨張材の水和反応が進行し内部含水率が低下することでセメントペーストの線膨張係数が増大することが予想されたが、本検討の範囲内では、線膨張係数の

経時変化に及ぼす膨張材種類の影響は明確に確認されなかった。

(2) 自己収縮ひずみの経時変化

本実験によって得られた各調合のセメントペーストの自己収縮ひずみ経時変化を収縮低減剤の有無，養生温度別に整理した結果を図 3-15 に示す。

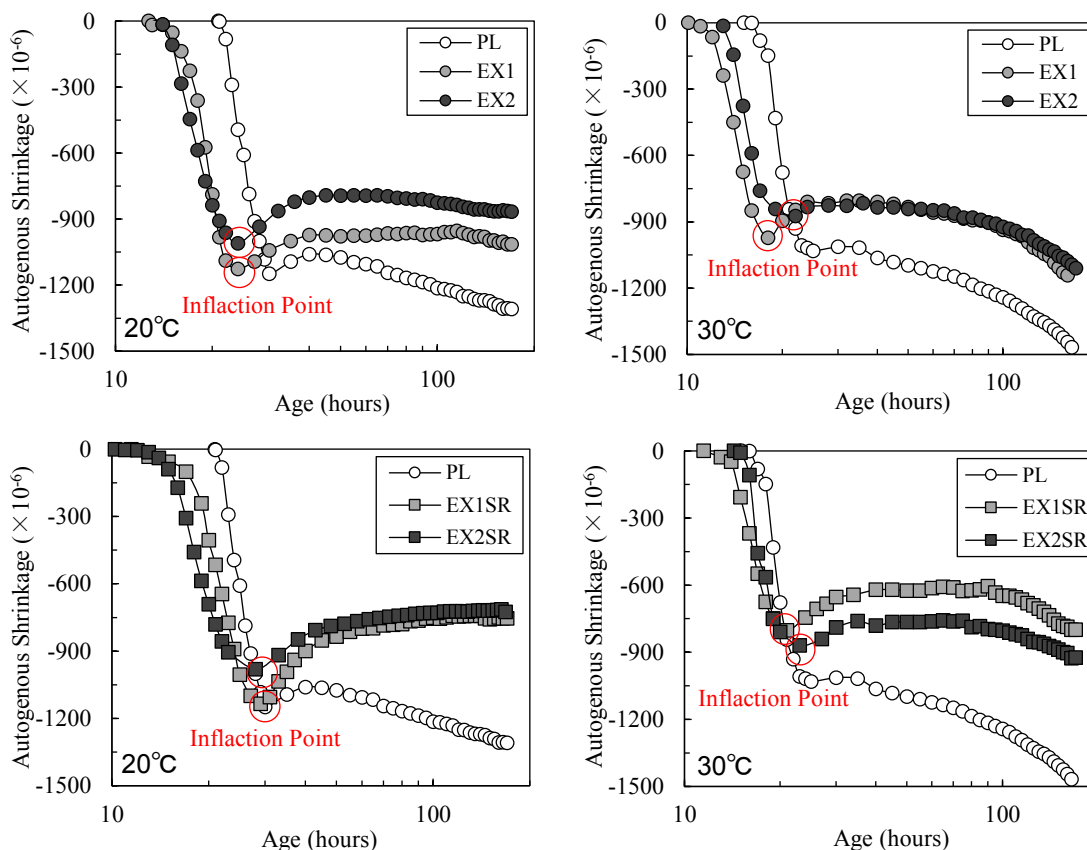


Figure 3-15 Autogenous Shrinkage Variation with Age

図 3-15 各調合における自己収縮ひずみの経時変化

図に示すように、いずれの調合も、材齢約 20-30 時間以前に、自己収縮ひずみが急激に進展し、極小値点（以下、屈曲点と称する）に至った後、膨張傾向に転じる傾向が見られる。また、いずれの材齢においても、温度条件によらず、膨張材や収縮低減剤または両者を併用した場合に、自己収縮ひずみ量が低減されており、膨張材、収縮低減剤の添加によって自己収縮ひずみ量を効果的に低減できることが再確認された。20°C養生の EX1SR と EX2SR では材齢 168 時点の計測終了時まで、継続的に自己収縮ひずみが減少する傾向を示している。

膨張材種類による自己収縮低減効果を定量に評価するため、屈曲点における各調合の自己収縮ひずみを整理したものが表 3-6 である。

表に示すように、本実験の結果として、20°C条件の方が 30°C条件より屈曲点以前の自己収縮ひずみは大きくなっており、既往の研究⁸⁾を再現する結果であった。

Table 3-6 Comparison of Autogenous Shrinkage at Inflection Point

表 3-6 屈曲点における自己収縮ひずみ量の比較

Specimen Symbol	EX1				EX2			
	20°C		30°C		20°C		30°C	
With/Without SR	-	○	-	○	-	○	-	○
Age of Inflection Point (h)	24	29	18	21	24	28	22	23
Shrinkage at Inflection Point ($\times 10^{-6}$)	-1127	-1135	-973	-809	-1011	-980	-874	-870

また、屈曲点以前の自己収縮ひずみ量に及ぼす膨張材種類の影響に着目すると、20°Cで養生される場合は、収縮低減剤の有無によらず、EX2 を添加した方が屈曲点時の自己収縮ひずみ量が小さい (EX2<EX1, EX2SR<EX1SR) ことが確認できる。この結果によって、超高強度セメントペースト屈曲点における自己収縮ひずみ量が膨張材種類によって影響を受ける可能性が示唆された。

一方、30°C養生した場合は、収縮低減剤の有無によって、屈曲点時の自己収縮ひずみ量の大小関係が逆転している (EX2<EX1, EX2SR>EX1SR)。従来、膨張材は、水和反応する環境の状況によって膨張効果が異なると言われているが、屈曲点以前の膨張効果に関しても膨張材と母材セメントの温度依存性の相違、あるいは収縮低減剤の使用による水和遅延の影響の差異がこのような結果をもたらしたと推察される。

(3) 質量含水率・結合水量の経時変化

本実験で取得した各調合における試験体の質量含水率・結合水量の経時変化を図 3-16 に示す。図に示すように、いずれの調合でも水和反応の進行に従い質量含水率が減少し、結合水量は増加の傾向が読み取れる。

材齢約 12 時間までは養生温度に関わらず、同じ調合における質量含水率・結合水量値はほぼ同じで、12 時間以降は水和反応の促進に伴い、養生温度が高い方は質量含水率が小さく、結合水量が大きいことが確認できる。また、EX1 を使用した調合では、材齢 7 日の時点で、養生温度や収縮低減剤の有無に関わらず含水率はおおよそ 9.5%、結合水量はおおよそ 7.5%程度の値に収束した。

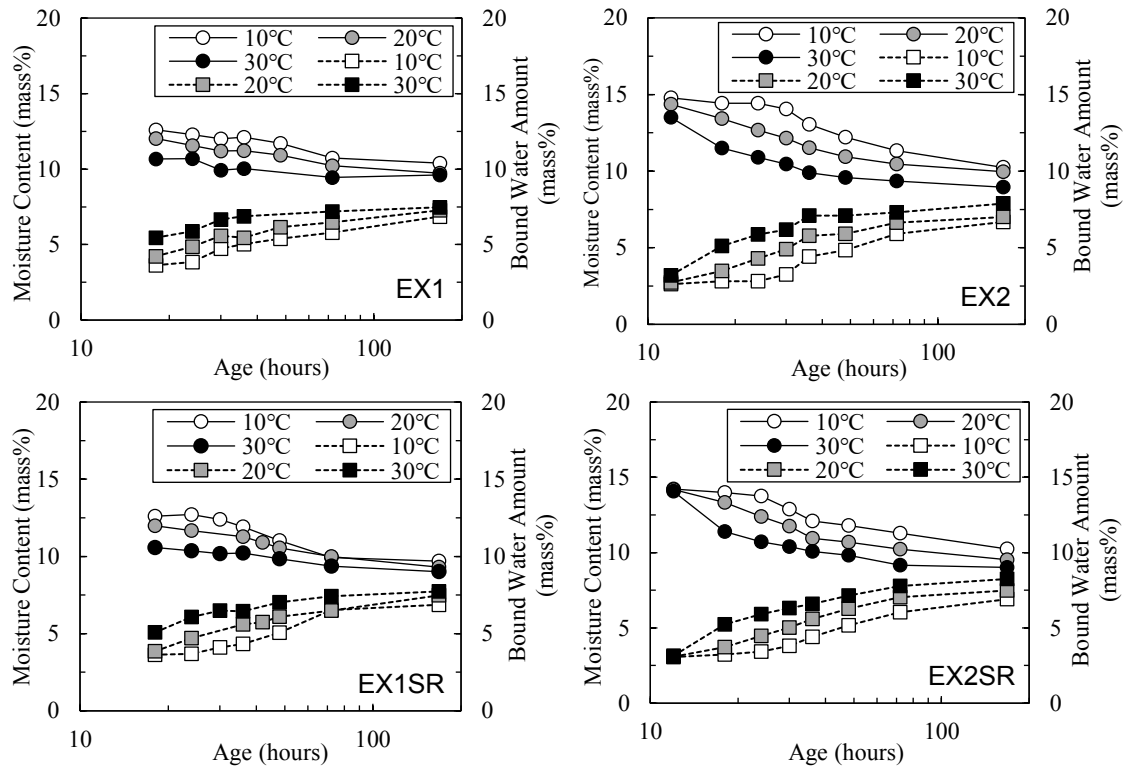


Figure 3-16 Moisture Content and Bound Water Amount Variation with Age (a) and Effective Age (b)

(Solid Line: Moisture Content; Dotted Line: Bound Water Amount)

図 3-16 質量含水率・結合水量の経時変化（実線：質量含水率；破線：結合水量）

また、膨張材種類による質量含水率・結合水量に及ぼす影響を確かめるため、膨張材種類による質量含水率・結合水量経時変化を比較した結果を図 3-17 に示す。図に示すように、ある程度のばらつき見えるものの、10°Cと 20°Cにおいて、収縮低減剤の有無に関わらず、材齢約 36 時間まで CSA 系膨張材 (EX1) 添加した方は質量含水率が小さくて、結合水量は大きい。このことより EX1 膨張材の水和反応による多くの水が消費されることが分かる。

一般に、水和による内部水の消費が自己収縮ひずみを増大させる駆動力と考えられている。この観点からみると、自己収縮低減に対して、石灰系膨張材より CSA 系膨張材は不利に動く可能性がある。しかし、30°Cの条件において、若材齢における両者の質量含水率・結合水量の差異が小さくなっており、図 3-15 に示すように、30°C養生された試験体の自己収縮ひずみ量が概ね同じである結果と符合している。

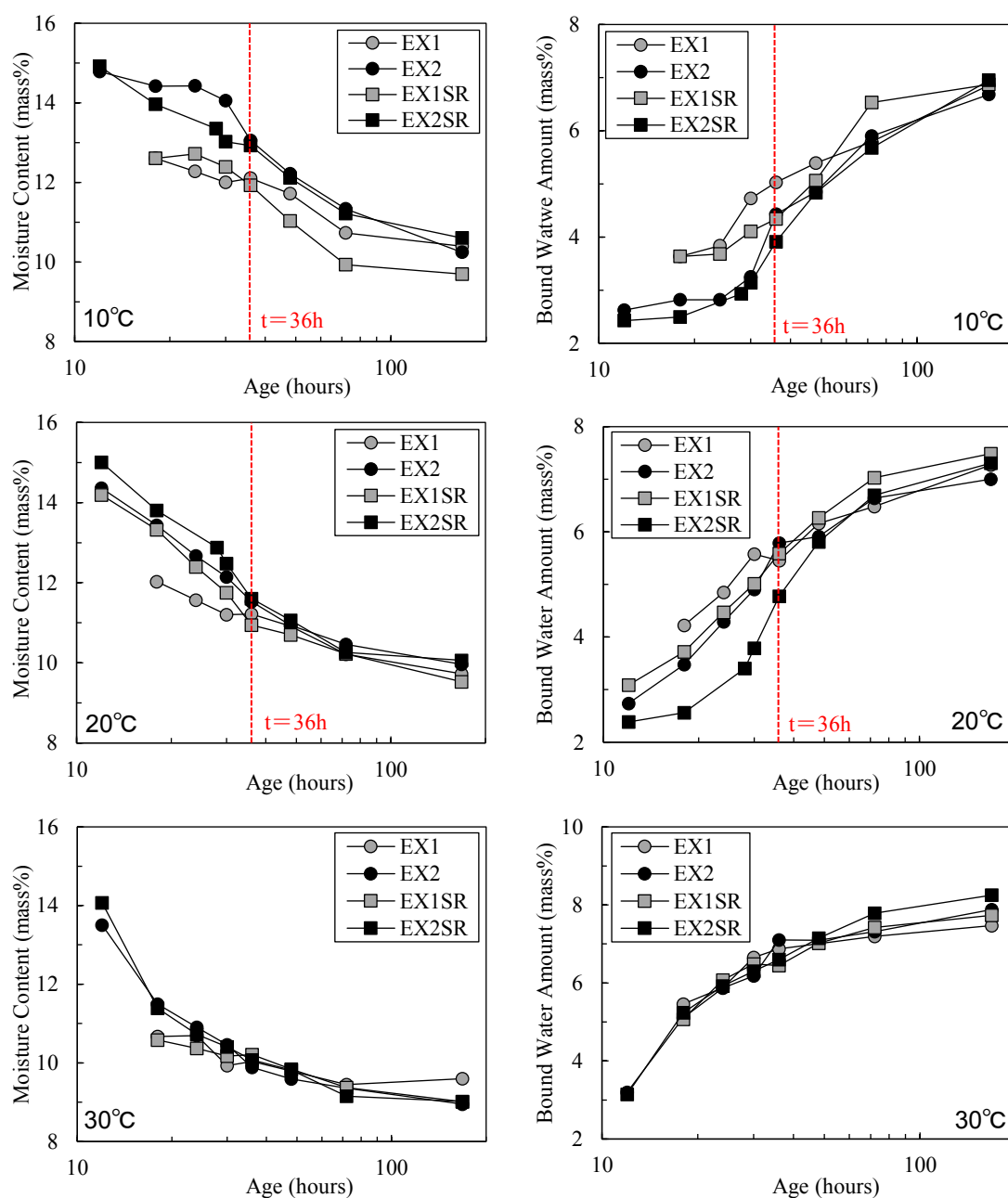


Figure 3-17 Comparison of Moisture Content and Bound Water Amount for Different EX

図 3-17 膨張材種類が質量含水率・結合水量に及ぼす影響

(4) 超音波伝播速度の経時変化

本実験の測定によって得られた、セメントペースト内部に超音波（縦波，以下に P 波と称する）伝播速度の経時変化を図 3-18 に示す。測定結果から，いずれの調合においても，養生温度が高い程，超音波伝播速度の発現が速く，材齢約 48 時間までに急激に増加して，材齢 7 日まで同じ調合ではほぼ同じ値に収束した。これは，養生温度が大きい程，水和速度が大きくなり，剛性に寄与する水和物の生成速度が大きくなると意味している。

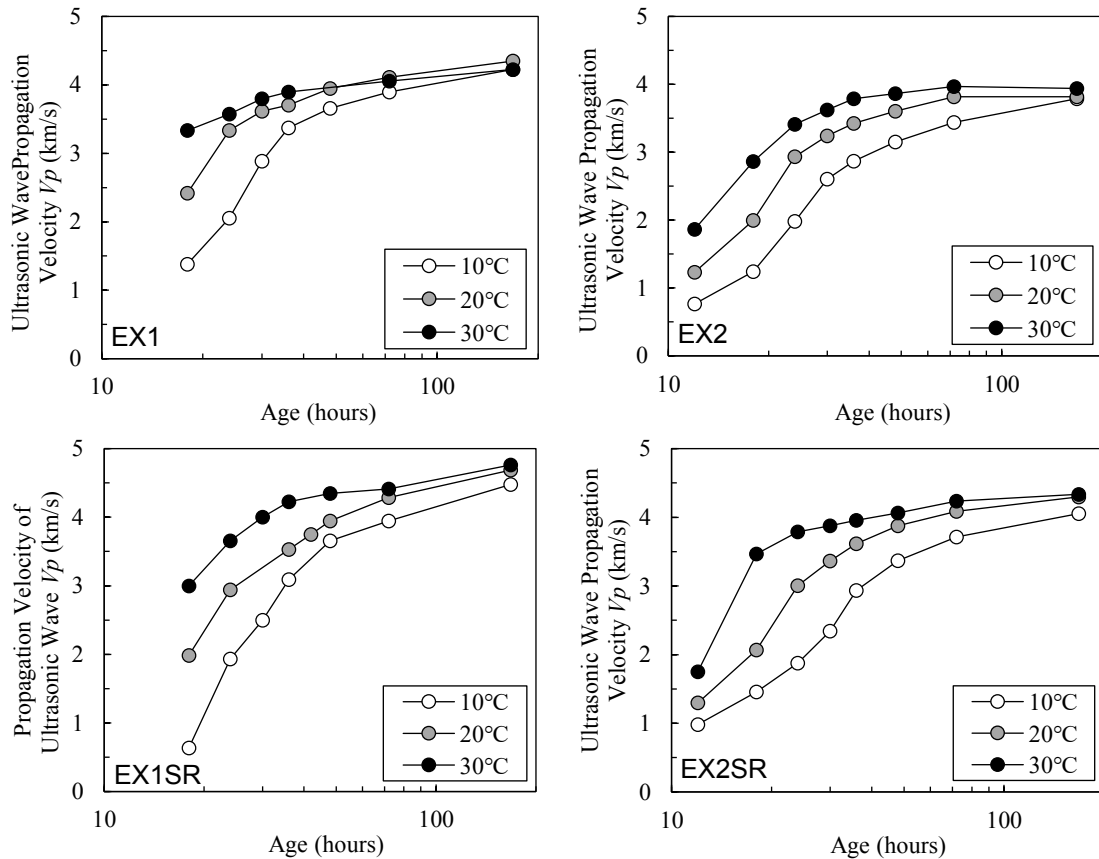


Figure 3-18 Ultrasonic Wave Propagation Velocity Variation with Age

図 3-18 超音波伝播速度の経時変化

膨張材種類によって、超音波伝播速度の経時変化を比較した結果を図 3-19 に示す。図に示すように、温度条件と関係がなくて、収縮低減剤の有無に関わらず EX1 を使用する場合は EX2 の方より、材齢初期超音波を伝播する水和生成物が生成されている結果が得られた。セメントペーストの剛性の発現は超音波伝播速度と相関性があり、セメントペーストの剛性の発現においては、CSA 系膨張材 (EX1) を使用した場合、石灰系膨張材 (EX2) の方より有利に働く。

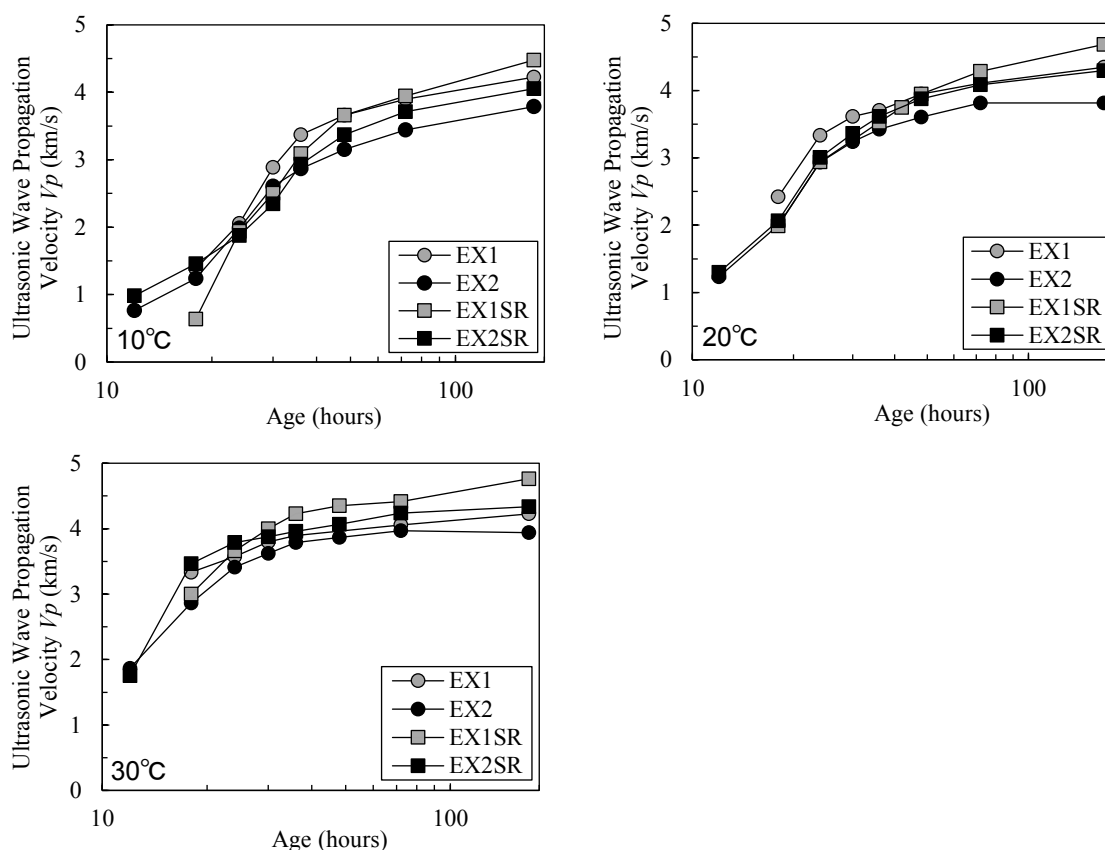


Figure 3-19 Comparison of Ultrasonic Wave Propagation Velocity for Different EX

図 3-19 膨張材種類が超音波伝播速度に及ぼす影響

超音波伝播速度とセメントペーストの動弾性係数は高い相関を有する^[14,15]ため、本研究では、超音波伝播速度測定値を用いて、式 3-10 によるセメントペーストの動弾性係数を算出した。

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{式 3-10}$$

ここに、 E ：セメントペーストの動弾性係数 (GPa)

V_p ：超音波伝播速度 (P 波) (km/s)

ρ ：セメントペーストの見かけ密度 (g/cm^3)

ν ：セメントペーストのポアソン比 (-)，本研究では 0.2 と仮定

なお、セメントペーストの見かけ密度は、水結合材比 (16.5%) およびシリカフェームプレミックスセメントの密度 ($3.16\text{g}/\text{cm}^3$) を使用して、 $2.42 (\text{g}/\text{cm}^3)$ と算出した。

以上の方法によって得られた動弾性係数と結合水量の相関関係を図 3-20 に示す。図に示すように、いずれの温度条件においても、膨張材の種類に関わらず、動弾性係数と結合水量は概ね一様な関係性を示している。これらのことによつて、若材齢において膨張材の水和反応に消費された水分はセメントペースト剛性の発現に寄与している可能性が高い。

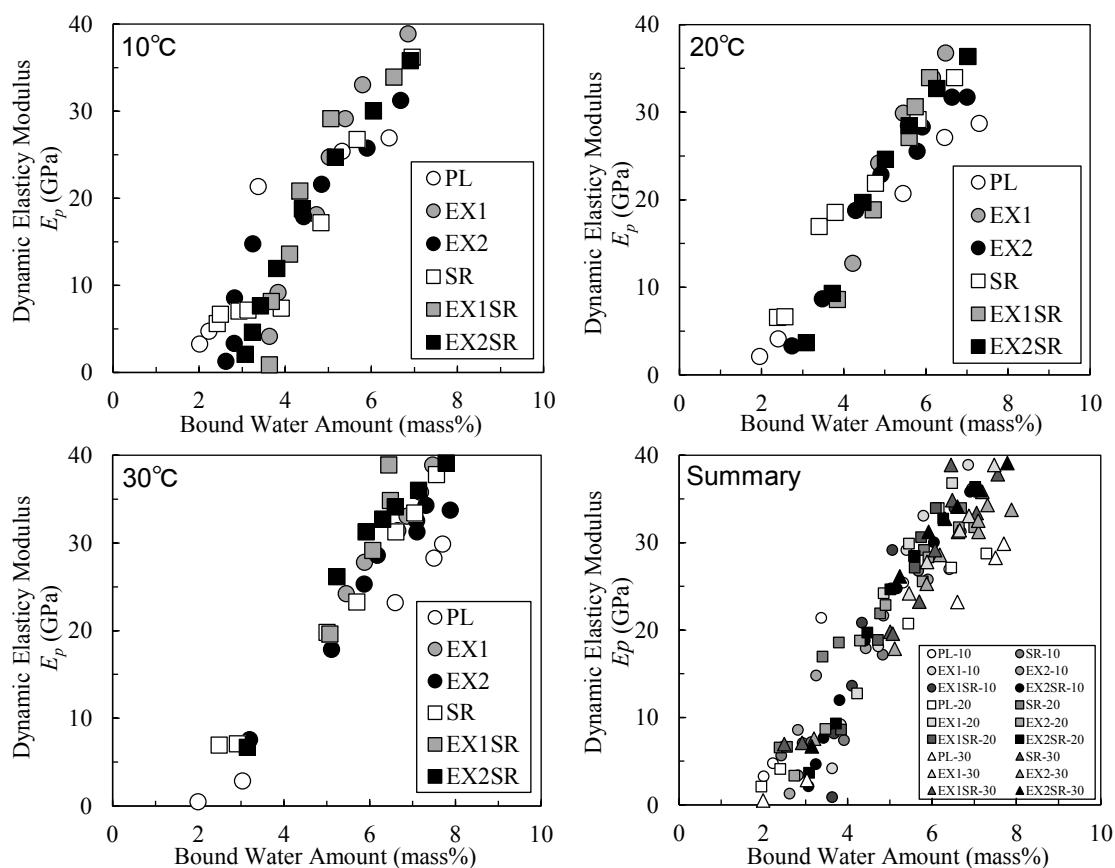


Figure 3-20 Relationship between Dynamic Elasticity Modulus and Bound Water Amount

図 3-20 セメントペーストの動弾性係数と結合水量の関係

以上検討によって、材齢極初期において、水分消費を原因とする収縮の駆動力および剛性発現による収縮抑制力のいずれも、エトリンガイト石灰複合型膨張材（CSA系，EX1）の方が、石灰系早強性膨張材（石灰系，EX2）の方より大きくなっていると考えられる。

(5) 水酸化カルシウム及びエトリンガイト含有量の経時変化

CSA系膨張材（EX1）は主にエトリンガイトを生成し、石灰系膨張材（EX2）は主に水酸化カルシウムを生成することで膨張圧を付与すると考えられているが、両者の膨張機構および膨張効果を詳細に比較検討した事例が少ない。

図 3-21 には、XRD/リートベルト解析によって得られた水酸化カルシウム含有量の経時変化を示す。図に示すように、20°C養生条件では、いずれの調合も、材齢約 72 時間まで水和反応の進行に伴い水酸化カルシウムの含有量が増加する傾向を示す。その後は生成速度が緩やかになり、PL および SR では水酸化カルシウムの含有量は停滞した。膨張材を添加した調合は他の調合より水酸化カルシウムの含有量が大きい結果が得られた。

一方、30°C養生の場合は、水和の進行に伴って水酸化カルシウム含有量が増大傾向を示し、材齢約 72 時間でピークに達した後、減少する傾向を示した。これは、シリカフェームのポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費され、その消費速度が生成速度を上回った

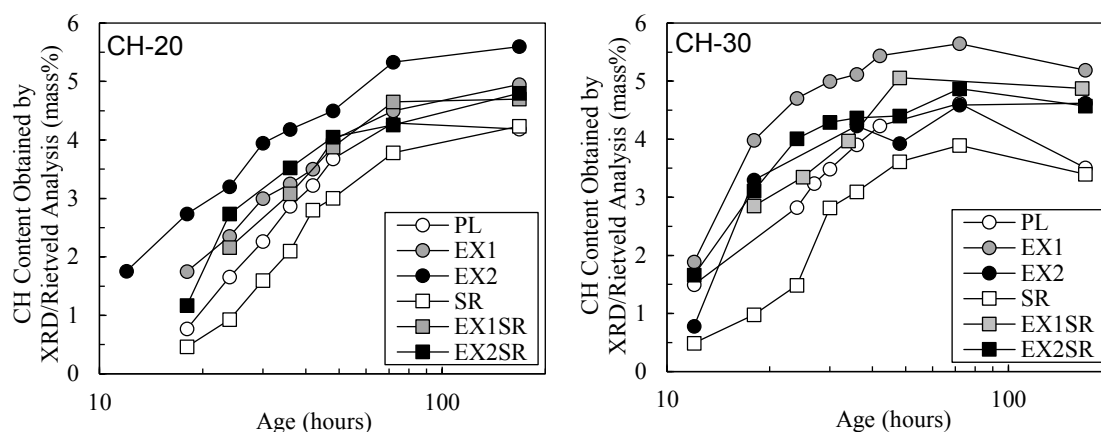


Figure 3-21 CH Content Obtained by XRD/Rietveld Analysis Variation with Age

図 3-21 XRD/リートベルト解析によって得られた水酸化カルシウム含有量の経時変化

めと考えられている。

また、収縮低減剤が水酸化カルシウム含有量の影響を着目すると、EX1, EX2に関わらず、材齢 168 時間において、収縮低減剤が有る場合は、収縮低減剤のない場合より、水酸化カルシウムの含有量が小さい結果が見られた。既往の研究に得られた結果と同様に、収縮低減剤は水酸化カルシウムの生成に若干抑制効果を与えることと考える [16,17]。

本実験で XRD/リートベルト解析による得られたエトリンガイト含有量の経時変化を図 3-22 に示す。セメントおよび膨張材の水和反応に伴い、エトリンガイト含有量が増加し、材齢約 18~36 時間前後にエトリンガイトの含有量の最大値をとり、その後減少していく傾向を示している。

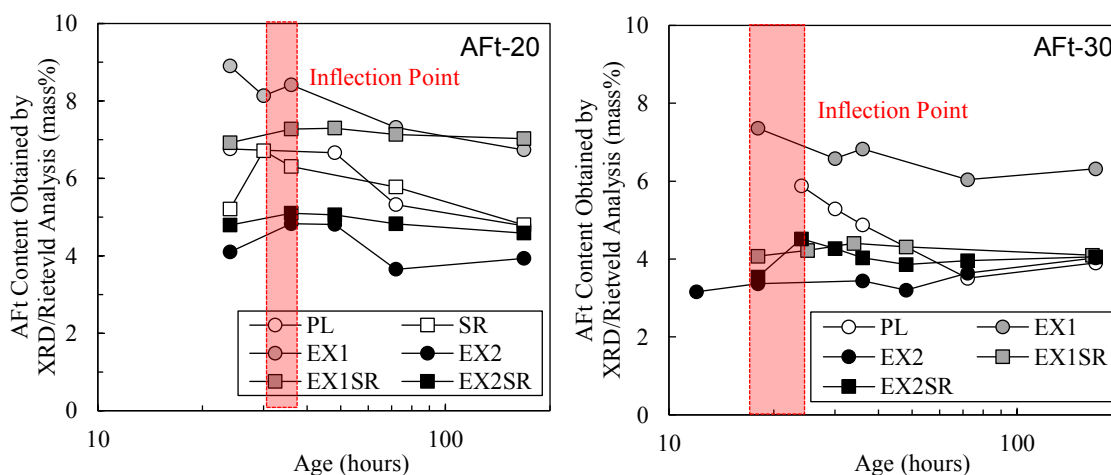


Figure 3-22 Content of AFt Obtained by XRD/Rietveld Analysis Variation with Age

図 3-22 XRD/Rietveld 解析による得られたエトリンガイト含有量の経時変化

注水直後に、セメントに含まれる C₃A と石膏の水和反応によって、エトリンガイトを生成する。水和の進行に伴いエトリンガイト生成量が増加する一方で、溶液中 SO₄²⁻イオンを消費する。SO₄²⁻イオン濃度の低下に伴い、エトリンガイトが不安定になり、未反応の C₃A と再反応して、準安定なモノサルフェート類化合物に変化する結果は、エトリンガイト量が低減される^[18,19]。

自己収縮ひずみの経時変化を比較すると、既往の研究^[20]に示されたように、エトリンガイト生成量がピークに達する材齢が自己収縮ひずみの屈曲点と概ね一致している。エトリンガイト生成ピーク時含有量は、石灰複合型膨張材 (EX1) を使用した方が明らかに多いことが確認された。逆に、石灰系膨張材を使用した場合、PL と比較してもエトリンガイト含有量は小さい。水酸化カルシウムの添加によるエトリンガイトの初期生成およびモノサルフェート相への転換プロセスを促進する既往の研究知見^[21]に基づき、石灰系膨張材の添加による水酸化カルシウムの生成はエトリンガイト生成量の低減を促進すると考えられる。

3.2.4 自己収縮の温度依存性に関する考察

セメントの水和反応速度は、温度が高いほど大きくなるため、水和反応に起因する自己収縮の進展、剛性・強度等の発現の速度も高温時の方が大きくなると考えられる。本論文では、水和反応に伴う自己収縮の発現に及ぼす要因を推測するため、水和反応に起因するセメントペースト諸物性の経時変化の温度依存性を評価した。ここに、見かけの活性化エネルギーを設定したアレニウス則を用いた有効材齢の概念を使用し、各物性の経時変化に及ぼす養生温度の影響を取り除いて試みた。

本論文で使用した有効材齢式は CEB-FIP Model Code^[22]に採用された式 3-11 である。

$$t_e = \sum \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \cdot \Delta t \quad \text{式 3-11}$$

$$E_a = 33.5 \text{ (kJ/mol)} \quad T_k \geq 293\text{K} \quad \text{式 3-12(a)}$$

$$E_a = 33.5 + 1.47 \times (293 - T_k) \text{ (kJ/mol)} \quad T_k < 293\text{K} \quad \text{式 3-12(b)}$$

ここに、 t_e : 有効材齢 (hours)

E_a : 見かけ活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 気体定数 (8.314J/(mol·K))

T_0 : 基準温度 (293K)

T_k : 試験体温度 (K) である。

活性化エネルギーは、化学反応における各素反応過程に必要な最小のエネルギーである。セメントの水和反応は複数の化学反応が同時に生じている状態であるため、全ての素反応をそれぞれの活性化エネルギーを用いて正確に記すことが困難である。そこで、水和反応という複雑な化学反応全体の活性化エネルギーを表す指標として「見かけの活性化エネルギー」^[23]という概念が使われる。見かけの活性化エネルギーの算出方法については、Hansen ら

[24]提案した式 3-12 を使用した。

ここに、式 3-12 によって計算して、ベース温度 10°C (283K) で養生された場合に、 $E_a/R=5800K$ であり、は 20°C (293K) と 30°C (303K) の場合では、 $E_a/R=4030K$ である。 T_k が 293K 以上の場合におけるこの方法で算出した E_a/R は、CEB-FIP MODEL CODE^[22]提示したものおよび日本コンクリート工学会の自己収縮研究委員会の報告書^[25]で自己収縮ひずみの予測式の時間項に使用した 4000K の値と概ね一致している。

(1) 自己収縮ひずみ経時変化の温度依存性

以上の方法を用いて、調合ごとに自己収縮ひずみの経時変化を有効材齢で整理した結果を図 3-23 に示す。図から、 $E_a/R=4030K$ の場合では、本実験の調合のいずれにせよ、自己収縮ひずみの経時変化が有効材齢式によって評価できないことが見られる。

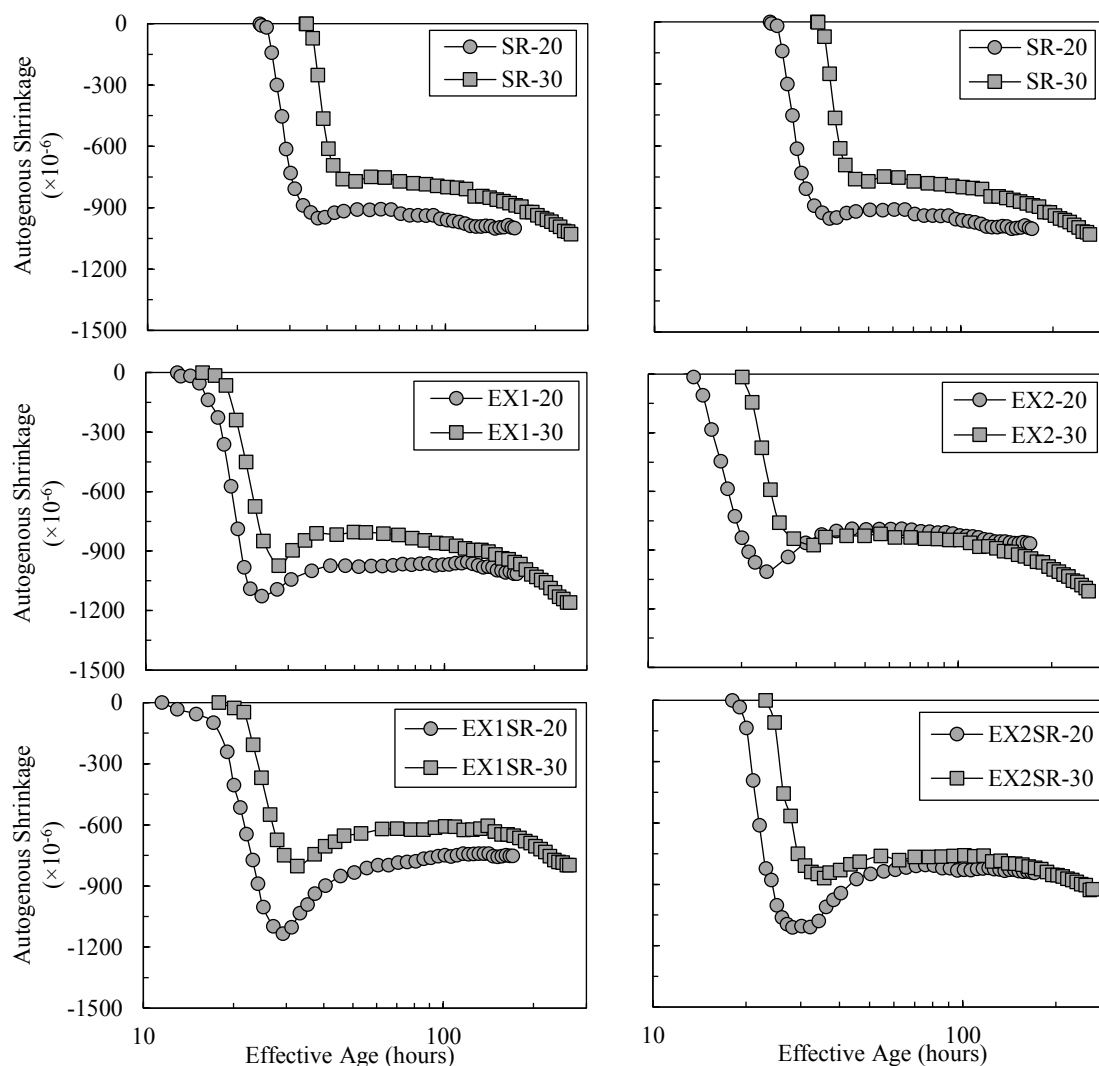


Figure 3-23 Evaluation of Autogenous Shrinkage by Effective Age

図 3-23 有効材齢による自己収縮ひずみの評価 ($E_a/R=4030K$)

寺本ら^[8]の研究によって、屈曲点以前の自己収縮ひずみの温度依存性は、練上り温度に相関すると指摘されているが、本実験において、練上り温度を精確に制御していないことが有効材齢式 ($Ea/R=4030K$) による評価できない原因の一つと考えられる。また、この段階では、セメントペーストが十分に硬化してなく、粘性が非常に高いため、収縮進行に対する温度以外の影響因子が存在すると示唆している。現状、既往の研究にも屈曲点以前の収縮機構が十分に解明されていないが、それとともに、今後の課題としたい。

文献^[8]において、超高強度セメントペーストの自己収縮ひずみの屈曲点前後の収縮機構が異なり、屈曲点以降の自己収縮ひずみの発現が、内部湿度の低下と相関して、見かけの活性化エネルギーを適切に変更させた場合上記の有効材齢式によって温度依存性を評価できると指摘された。そのため、本考察では、同様な評手法を用いて、有効材齢式によって屈曲点以降の自己収縮ひずみの温度依存性を検証してみた。屈曲点以降の自己収縮ひずみを有効材齢で整理した結果を図 3-24 に示す。なお、ここに、 $Ea/R=10000K$ であり、屈曲点を原点として自己収縮ひずみをプロットし直した。

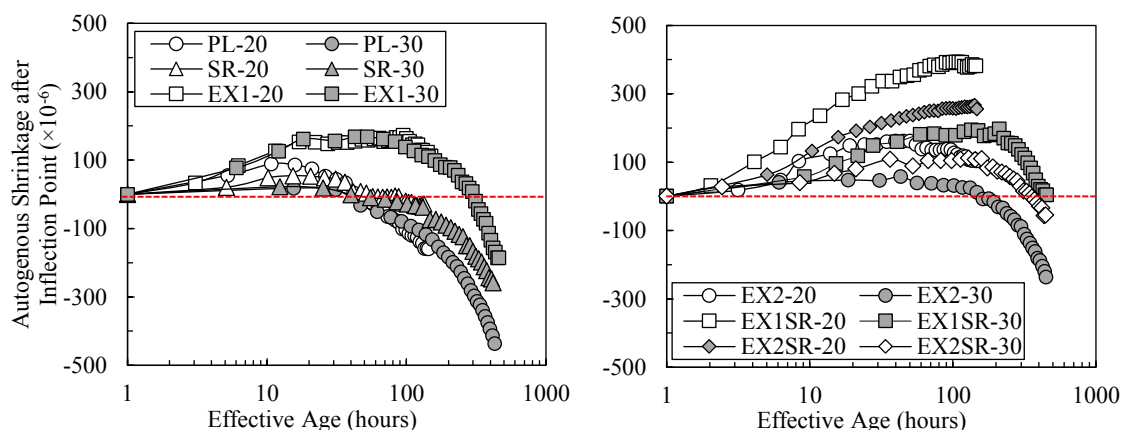


Figure 3-24 Temperature Dependency of Autogenous Shrinkage after Inflection Point

図 3-24 屈曲点以降における自己収縮ひずみの温度依存性 ($Ea/R=10000K$)

図に示すように、屈曲点以降の段階において、PL, SR, EX1 では、自己収縮ひずみの発現は養生温度によらず、調合ごとで概ね同一曲線に推移している、自己収縮発現の温度依存性を確認できる。また、その中に、PL と SR はほぼ同じ曲線に進行していることに対して、EX1 の乖離が発生している。つまり、PL や SR と EX1 の自己収縮ひずみ温度依存性が確認できるが、その依存性が異なっている。これは、膨張材の使用によって、セメント水和反応の見かけの活性化エネルギーを変化させることと推察している。この結果から、屈曲点以降において、PL, SR および EX1 の自己収縮ひずみ発現速度は温度に依存し、その依存性そのものは PL や SR と EX1 で異なると考えられる。

一方、EX2, EX1SR, EX2SR いずれの自己収縮ひずみ発現傾向は有効材齢 ($Ea/R=10000K$) による十分補正が十分ではなく、温度依存性を確認できなかった。つまり、自己収縮ひずみ

発現速度に対して、養生温度以外の影響要因が存在していると推察する。

以上の結果を併せてみると、調合条件の相違、特に、膨張材の有無に対して、自己収縮ひずみ発現速度に及ぼす温度だけの影響を受けることなく、硬化に伴う剛性の発現速度や膨張性物質の生成速度と生成タイミング等もセメントペーストの自己収縮発現に影響を与えると推察している。また、調合条件の相違に対して、水和反応物質の差異に伴い各調合の見かけの活性化エネルギーを変更させることは、調合ごとに自己収縮ひずみの温度依存性の差異を引き起こす可能性がある。

(2) 質量含水率・結合水量経時変化の温度依存性

水和反応による水の消費に及ぼす温度条件の影響を確認するため、有効材齢を用いて整理した質量含水率・結合水量の経時変化を図3-25に示す。

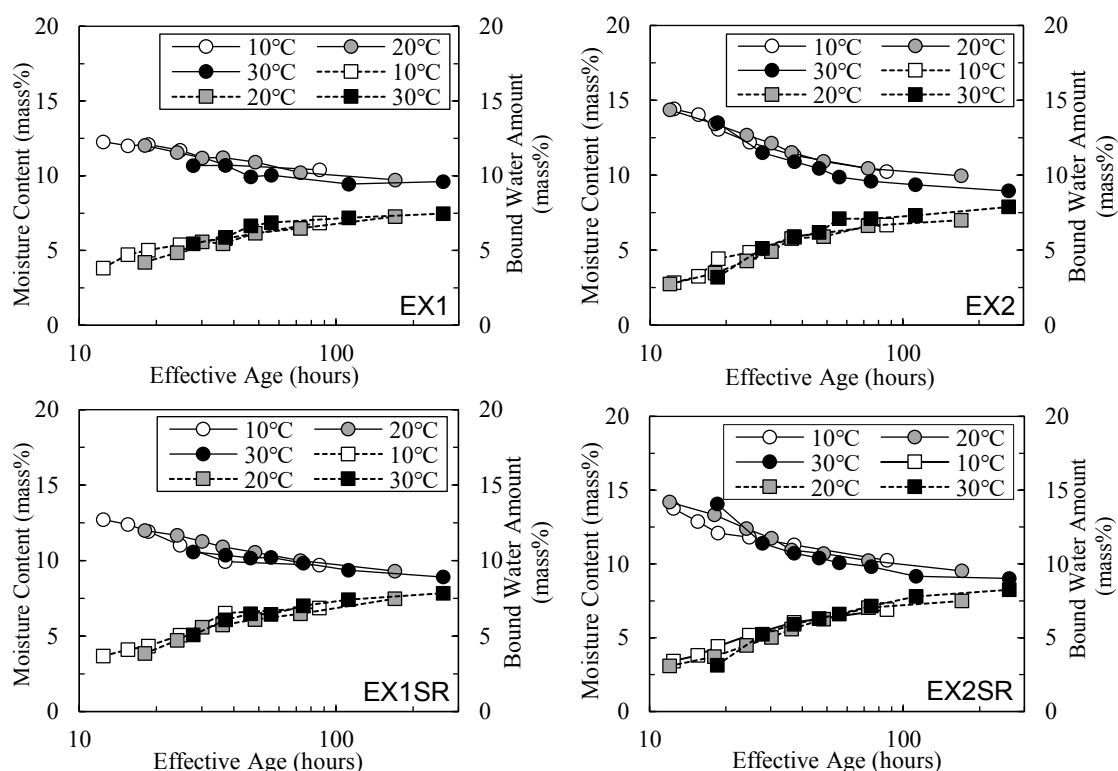


Figure 3-25 Evaluation of Moisture Content and Bound Water Amount by Effective Age
(Solid Line: Moisture Content; Dotted Line: Bound Water Amount)

図3-25 有効材齢による質量含水率・結合水量の評価 (Ea/R=4030K)

(実線：質量含水率，破線：結合水量)

図に示すように、何れの調合条件においても、質量含水率・結合水量は概ね同一曲線に沿って推移している。これは、有効材齢によって質量含水率・結合水量変化速度の温度依存性が評価できると意味している。つまり、水和反応による水分の消費速度に関しては、概ね養生温度でにより決められ、そのほかの要因の影響が認められなかった。また、質量含水率・

結合水量の経時変化という点では膨張材や収縮低減剤の添加および膨張材の種類によって見かけの活性化エネルギーには大きな影響を及ぼさないと示唆された。

水和反応による水の消費が自己収縮発現原因の一つと挙げられたが、図 3-23、図 3-24 示した自己収縮ひずみの結果と併せて考えると、自己収縮ひずみ速度と水分の消費速度が同じ有効材齢による評価できないため、本実験に得られた自己収縮ひずみ発現に及ぼす影響要因では水分の消費の以外に存在していると示唆された。

(3) 超音波伝播速度経時変化の温度依存性

超音波伝播速度により得られたセメントペーストの剛性発現に及ぼす養生温度の影響確認するため、有効材齢による温度依存性の評価を行った。有効材齢を適用して整理した超音波伝播速度の経時変化を図 3-26 に示す。

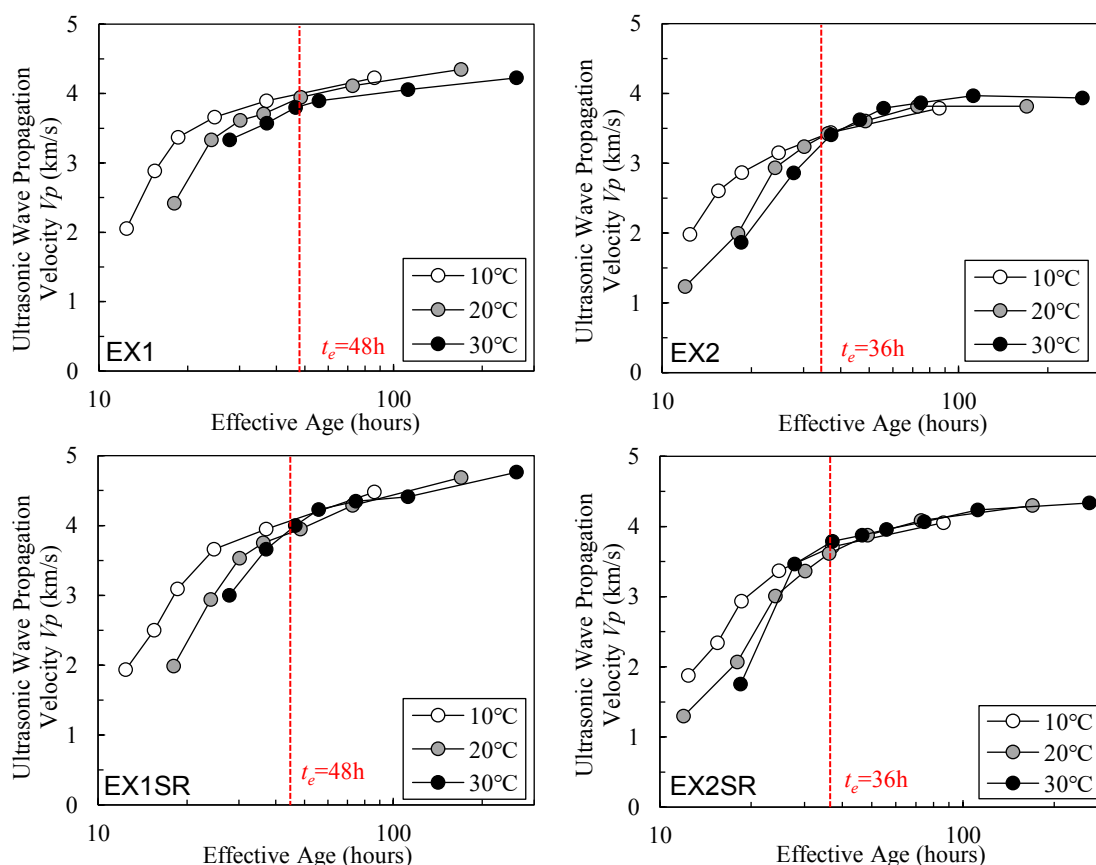


Figure 3-26 Evaluation of Ultrasonic Wave Propagation Velocity by Effective Age

図 3-26 有効材齢による超音波伝播速度の評価

図によると、EX1 を添加した場合、有効材齢約 48 時間まで、EX2 を添加した場合、約 36 時間まで、超音波伝播速度値は養生温度別で、 $10^{\circ}\text{C} > 20^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ の順を示している。これらの結果は、材齢極初期に、セメントペーストが十分に硬化してない段階に、剛性発現速度に及ぼす温度の影響が大きいことを意味している。

また、その後の段階は、ある程度ばらつきがあるものの概ね同一の曲線上を進行しているとみられる。つまり、ある程度硬化した後に、セメントペースト剛性の発現速度は、養生温度密接な関係が有し、有効材齢を用いた場合、温度相違による剛性の発現速度を補正できると示唆されている。

これらの検討によって、膨張材を添加した調合において、セメントペーストが十分に硬化していない段階では、剛性の発現速度に及ぼす温度の影響を有効材齢により評価することは困難であると推察される。その段階のセメントペーストが柔らかくて、粘性が高いことが原因であると考えられる。また、以上の傾向は膨張材の種類が異なる場合でも確認された。

(4) 水和物生成量経時変化の温度依存性

水酸化カルシウムとエトリンガイトの生成速度に及ぼす養生温度の影響を確かめるため、有効材齢による水酸化カルシウムとエトリンガイトの経時変化の評価を試みた。有効材齢で整理した水和生成物の経時変化を図 3-27 に示している。

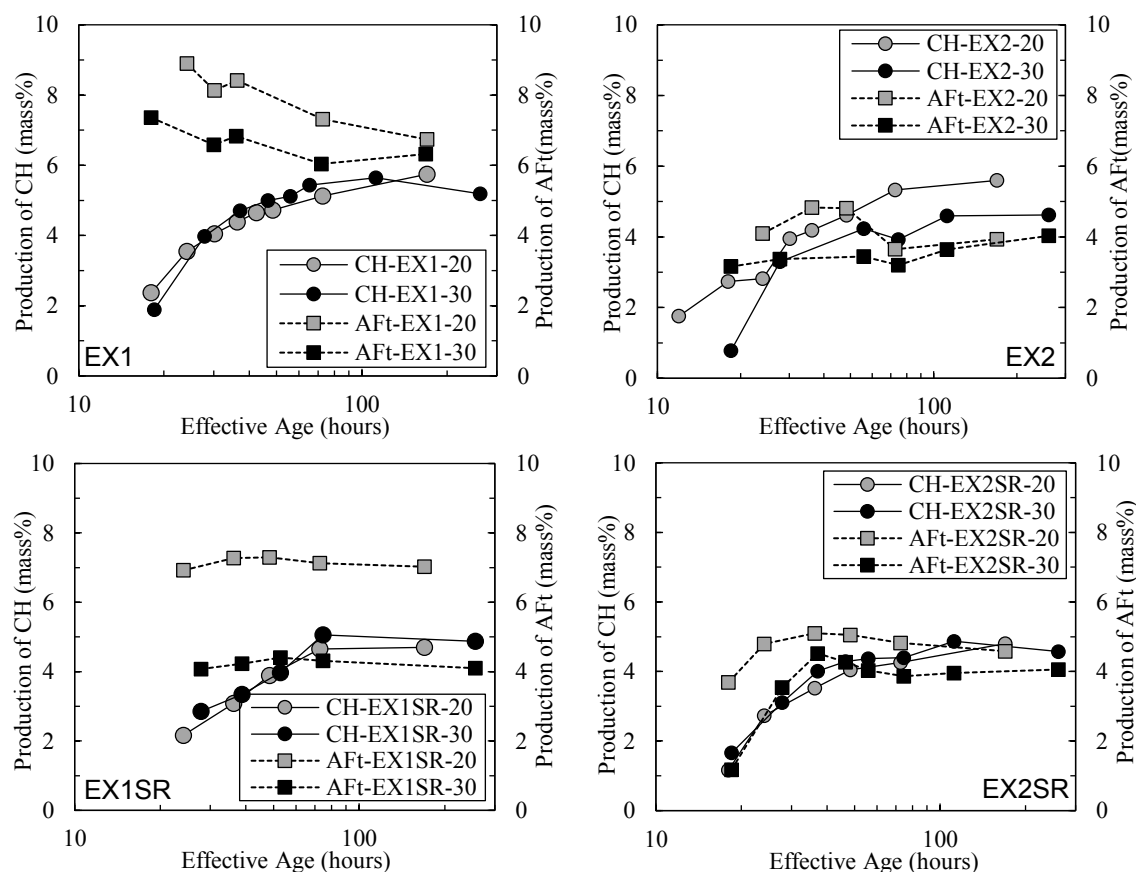


Figure 3-27 Evaluation of Production of CH and AFt by Effective Age
(Solid Line: CH; Dotted Line: AFt)

図 3-27 有効材齢による水酸化カルシウムとエトリンガイト生成量の評価
(実線 : CH ; 破線 : AFt)

まず、水酸化カルシウム生成量の経時（有効材齢）変化に着目すると、調合条件に関わらず、20℃と30℃の水酸化カルシウム生成量は概ね同一の曲線上で推移している。つまり、20~30℃程度の温度差においては水酸化カルシウム生成量の温度依存性は、有効材齢（ $E_a/R=4030K$ ）で概ね評価できることが確認された。本実験の場合、セメントおよび膨張材の水和反応による水酸化カルシウムの生成および、シリカフェームのポゾラン反応による水酸化カルシウムの消費は、いずれも養生温度と相関があるため、水和解析に得られた水酸化カルシウム量の経時変化は温度に依存すると考えられる。

一方、エトリンガイトは、いずれの調合においても、20℃と30℃が異なる曲線に沿って進行していることが見られる。つまり、エトリンガイト生成量の経時変化の温度依存性に対して有効材齢による適切に評価することは困難であった。

本実験において、セメントと膨張材の水和反応によってエトリンガイトの生成と共に、系内硫酸塩（石膏）の消費に伴ってエトリンガイトが不安定になり、モノサルフェートに転化するプロセスの発生によってエトリンガイトが消費される^[18,26]。また、エトリンガイトからモノサルフェート類物質への転化プロセスは、溶液成分、pH、温度等複雑な要因の影響を受ける^[27]ため、本実験に測定したエトリンガイトの生成速度に対して、温度の影響は有効材齢による補正できないと考えられた。

自己収縮に関する物性の温度依存性に関する考察によって、本実験の場合は、水和反応の期間（屈曲点前、後）によらず、自己収縮ひずみの発現速度と水分消費、剛性発現あるいは水和物生成速度の温度依存性は一つの有効材齢式で評価できないことが確認された。屈曲点以前の段階には、セメントペーストの粘性が高く、剛性の発現は温度の影響を受けやすく、さらに温度以外の影響要因が有すると推察された。また、屈曲点以降では、水和物（エトリンガイト）生成量の経時変化は複数の要因の影響を受けるため、温度の影響を有効材齢による評価できないことは、この段階の自己収縮ひずみ温度依存性を確認できない原因になる可能性と考えている。

以上の検討によって、膨張材の添加によって自己収縮低減機構については、水分の消費に起因する収縮の駆動力あるいは剛性の発現による収縮の抵抗力いずれの観点によっても、膨張材の自己収縮低減メカニズムを説明できないことがある。また、生成量が複雑な経時変化を有する膨張性水和物は自己収縮ひずみ発現との明確な関係性が明らかにされてない。特に、膨張性水和物の生成によって、膨張材の膨張効果（自己収縮低減効果）をどう発揮することはまだ不明である。

そのため、自己収縮ひずみ全体に含まれたセメントペーストの収縮と膨張材の膨張成分のそれぞれを抽出して、膨張性水和物質との関係性に関する議論が必要である。

3.2.5 水和圧理論に基づく考察

前節では、実験結果を示した上で、セメントペーストの若材齢における自己収縮ひずみについて、水分の消費、剛性の発現また膨張性水和物質の推移等の観点から主として温度依存性に関する検討を行った。本節では、膨張材の自己収縮低減メカニズムを水和圧理論に基

づく考察を行う。特に、二種類の膨張材の膨張機構の差異に着目して議論する。

(1) 水和圧理論の概説

水和圧理論では、Maruyama^[28]が、従来の分離圧理論に基づき提案し、セメントペーストに働く収縮駆動力がセメントペースト表層の水の吸着厚さに依存するという立場でセメントペーストの体積変化の評価を行ったものである。既往の文献^[29]を参照して、水和圧理論の概要を紹介する。

Derjaguin ら^[30]が提案した分離圧理論の概念図を図 3-28 に示す。

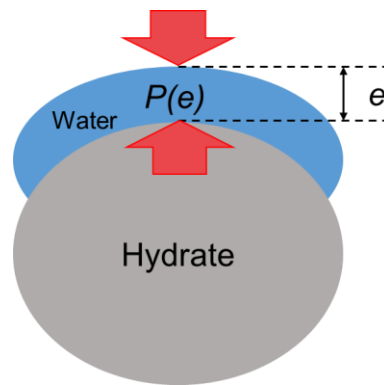


Figure 3-28 Schematic Chart of Disjoining Pressure Theory

図 3-28 分離圧理論の概念図

面積一定の液体薄膜を考えた場合、吸着物質と被吸着表面の距離 $e(m)$ の時に動く相互作用エネルギーを $P(e)$ (J/m^2) としたときに、式 3-13 が成り立つというものである。

$$\mu = \mu_0 + v_0 \frac{dP(e)}{de} \tag{式 3-13}$$

ここに、 μ : 薄膜の化学ポテンシャル ($J/1$ 分子)

μ_0 : バルクの吸着物質の化学ポテンシャル ($J/1$ 分子)

v_0 : 吸着物質 1 分子が占める体積 ($m^3/1$ 分子) である。

この時、Derjaguin らの記法によって、分離圧 $\Pi(e)$ (N/m^2) は式 3-14 で定義する。

$$\Pi(e) = -\frac{dP(e)}{de} \tag{式 3-14}$$

この分離圧 $\Pi(e)$ は、 $P(e)$ が減少関数である時、即ち薄膜が厚いことを好み、被吸着表面において吸着物質が吸着されることを好む時に、厚さ e を保つため、その薄膜に加えておかななくてはならない圧力であると解釈できる。分離圧の本質は、吸着される壁面と吸着質との間に生じる相互力である。

式 3-14 見ると、分離圧では、化学ポテンシャルの変化が相対湿度によって決定されるという仮説であると理解されており、化学ポテンシャルは式 3-15 による求められる。

$$\begin{aligned}\frac{dP(e)}{de} &= \frac{\mu - \mu_0}{v_0} \\ &= \frac{RT \ln(h)}{v_0}\end{aligned}\tag{式 3-15}$$

ここに、 R ：気体定数 (J/(mol·K))

T ：絶対温度 (K)

h ：相対湿度である。

従来の研究では、セメント硬化体中の分離圧の変化は、平衡する雰囲気相の相対湿度から求められた化学ポテンシャル変化から説明可能であるとの仮説が用いられてきた。これは、例えばセメント硬化体中の水は、周囲環境にある化学ポテンシャルと、表面から生じる親水力（ファンデルワールス力や静電相互作用）とのバランスの結果、新しい平衡状態を目指すことで表面への水の吸着や離脱が決定するはずとの仮定に基づいている。しかし、この過程は吸着と離脱が全くの可逆反応である時に成り立つのであって、セメント硬化体中の水分のように吸着等温線・離脱線においてヒステリシス挙動を示すような場合には必ずしも成立しない。

以上のことを踏まえ、丸山らはセメントペーストに動く分離圧がセメントペースト表層への吸着厚さに依存するという観点から体積変化の評価を試みた。

セメントペースト中の水にかかる水和圧の化学ポテンシャルは、式 3-14、3-15 によって、式 3-16 で表される。

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_0 + v_0 \frac{dP(e)}{de} \\ &= \mu_0 - v_0 \Pi(e)\end{aligned}\tag{式 3-16}$$

また、セメントペースト中の水にかかる静水圧の化学ポテンシャルは Sheludko ら^[31]の方法を用いた考え方から式 3-17 で表される。

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_0 + v_0 \frac{dP(e)}{de} \\ &= \mu_0 + v_0 \rho g H\end{aligned}\tag{式 3-17}$$

$$\mu = \mu_0 + v_0 p_H$$

ここに、 p_H ：静水圧（静止している液体中の任意の面に作用する圧力）

ρ ：液体の密度 (g/m³)

g ：重力加速度 (m/s²)

H ：液体高さ (m) である。

薄膜は、薄膜と同一の液体を含んだ多孔性円環と平衡状態にあることから、式 3-16、3

－17 で表される分離圧の化学ポテンシャルと静水圧の化学ポテンシャルは等しい。したがって、式 3-18 を得られる。

$$\mu_0 - v_0\Pi(e) = \mu_0 + v_0p_H$$

$$\Rightarrow \Pi(e) = -p_H \tag{式 3-18}$$

この原理原則によって、セメントペースト硬化体中の水分状態と体積変化を力のつり合いにより関連づけることを考える。分離圧の考え方^[32]を図 3-29 に示す。

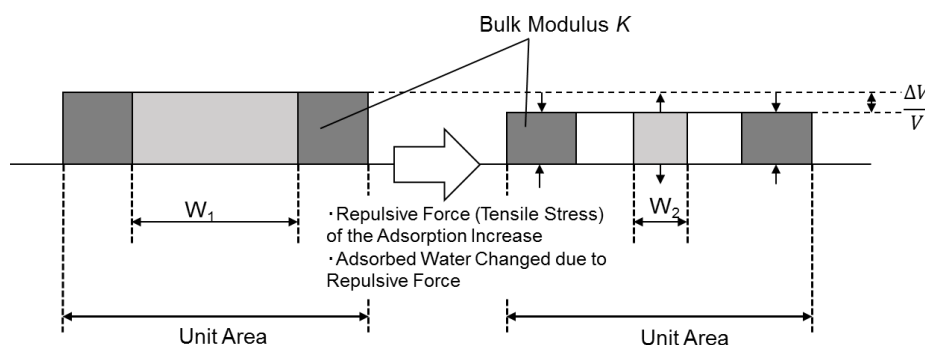


Figure 3-29 Consideration of Disjoining Pressure ^[32]

図 3-29 分離圧の考え方^[32]

セメントペースト硬化体中の吸着厚さが e の状態であったときに、その時体積ひずみを $\Delta V/V$ 、体積含水率を w 、多孔体の見かけ体積弾性係数を K (N/m²) とした時式 3-19 が成り立つ。

$$w \cdot \Pi(e) + K \cdot \Delta V/V = 0 \tag{式 3-19}$$

吸着厚さ e の時の分離圧 $\Pi(e)$ の反力をセメント硬化体の骨格が負担すると考えたものであり、分離圧が作用する単位体積あたりの物質質量として体積含水率を用いたセメント硬化体内での力の釣り合い式である。この式は、任意の平衡する 2 点の状態に対して適用でき、分離圧の原点および収縮の原点について座標変換を行っても一般性は失わない。

ここで、飽水状態 (状態 1) における体積ひずみおよび分離圧をゼロとした場合、飽水状態から任意の平衡状態 (状態 2) に移行した時に生じる分離圧の差分 $\Delta \Pi_{21}$ は式 3-20 によって得られる。

$$\Delta \Pi_{21} = - \left(\frac{K}{w_{v2}} \cdot \frac{\Delta V_{21}}{V} \right) \tag{式 3-20}$$

ここに、 w_{v2} : 状態 2 における体積含水率

$\Delta V/V$: 飽水状態からの体積ひずみの変化量である。

なお、体積弾性率は、ヤング係数、ポアソン比 ν との関係は式 3-21 に示し、体積ひずみ

と一軸ひずみは式 3-22 も成り立つ。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{式 3-21}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \frac{\Delta l}{l} \quad \text{式 3-22}$$

以上から、実験よりヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、質量含水率 w 、一軸ひずみ $\Delta l/l$ を測定すれば、分離圧の差分 $\Delta\Pi_{21}$ を取得できる。また、水の平均吸着厚さ e は、質量含水率 w_m 、水の密度 ρ_w 、セメントペースト硬化体の比表面積 S を用いて式 3-23 による算出し、分離圧—平均吸着厚さ曲線を得ることができる。

$$e = \frac{m_w}{\rho_w \cdot S} \quad \text{式 3-23}$$

丸山ら^[33]は、様々な調合におけるセメントペーストをそれぞれ離脱、再吸着させたものの平均吸着厚さ—分離圧の関係を取得し、複数の実験データを図 3-30 に示した。

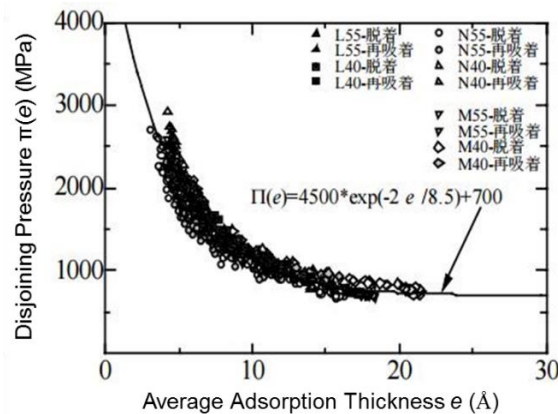


Figure 3-30 Disjoining Pressure—Average Adsorption Thickness Curve^[33]

図 3-30 分離圧—平均吸着厚さ曲線^[33]

図に示すように、各調合におき、脱離、再吸着させヒステリシス挙動を示すものであっても、分離圧と平均吸着厚さの関係は同じの指数関数型曲線で表現できることは分かる。図に示すように、水の平均吸着厚さと分離圧曲線の関係はポルトランド系セメントにおいてセメント種類や水セメント比の異なっても同一の曲線で評価可能なことが分かった。

膨張材を添加した場合において、図 3-30 に示すような水和圧曲線に関する検証がなされておらず、上記と同様な傾向を有すると仮定すると、膨張材を添加した場合にも、水の吸着厚さが自己収縮の駆動力の重要な決定要因になると考えられる。

本研究では、セメントペーストの比表面積を取得してないため、平均吸着厚さの算出はできない。しかしながら、比表面積は結合含水率と高い相関関係にある^[34]ことから、本節では、質量含水率を結合水量で除した値（以下、仮想統計的吸着厚さと称する）を平均吸着厚

さの代わる指標として採用し考察を行う。

(2) 仮想統計的吸着厚さの経時変化

本実験による得られた仮想統計的吸着厚さの経時変化は図 3-31 に示す。

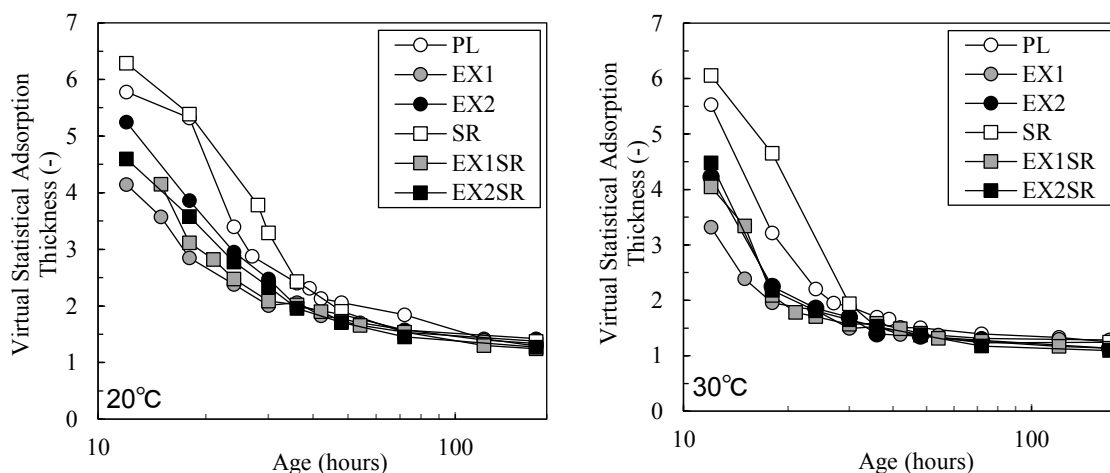


Figure 3-31 Virtual Statistical Adsorption Thickness Variation with Age

図 3-31 各調合の仮想統計的吸着厚さの経時変化

図に示すように、材齢約 36 時間までの領域では、温度条件に関わらず、膨張材を添加した EX1, EX2, EX1SR, EX2SR の場合は PL または SR の場合より小さな仮想統計的吸着厚さであることを示している。前節に述べたように、仮想統計的吸着厚さが小さい程水和圧（分離圧）は大きくなるため、セメントペースト表層の水に起因する収縮駆動力だけを考えると、膨張材を添加した方がむしろ自己収縮を大きくすることになる。

しかしながら、実際には膨張材を添加していない方が自己収縮ひずみ量は大きい。これは、膨張性水和物の増大による膨張圧によって自己収縮が低減されているといえる。これら収縮の駆動力と収縮を抑制させる膨張圧のバランスによって膨張材による自己収縮の低減効果が決定されており、膨張材の添加による自己収縮ひずみの低減は収縮駆動力以外の要因があると考えられる。

(3) 膨張性物質による膨張量の抽出

膨張材の自己収縮低減機構および低減効果を明らかにするため、セメントペーストの体積変化に含まれる全体の膨張・収縮挙動から、水の消費に関する収縮駆動力の影響を分離して、膨張性物質による膨張量を抽出する必要がある。同一の水和圧曲線を有する調合では、統計的吸着厚さ（本論文に、仮想統計的吸着厚さ）が同じであれば収縮駆動力が同じであり、図 3-20 に示すように、結合水量あたり剛性がほぼ同程度であるため、仮想統計吸着厚さと自己収縮ひずみは大きな相関関係があると考えられる^[35]。

この観点を踏まえて、各調合の仮想統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの関係性をプロッ

トした結果を図 3-32 に示す。仮想統計的吸着厚さを算出した際に、図 3-16 に示した質量含水率および結合水量経時変化の実測データによって、近似曲線の数式を使用した。

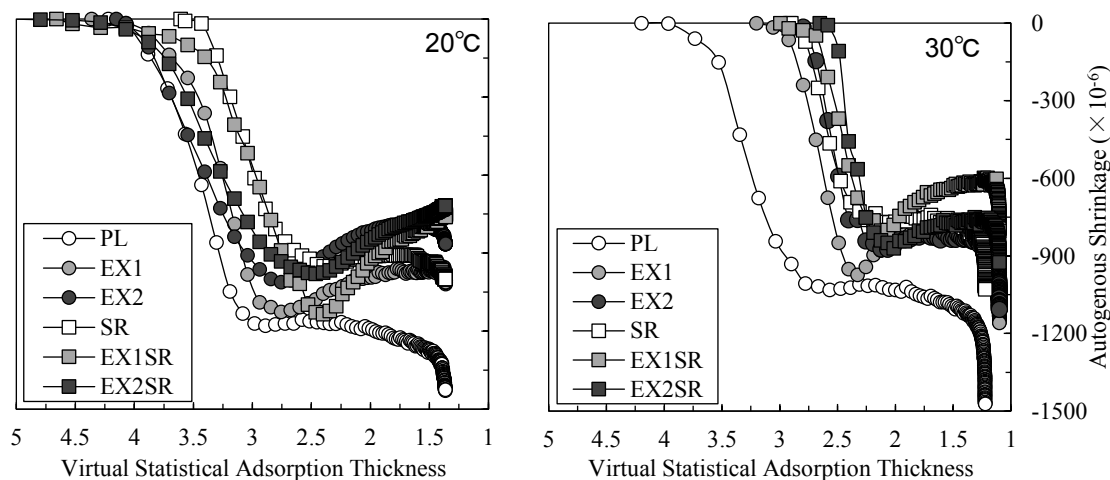


Figure 3-32 Autogenous Shrinkage Variation with Age for Virtual Statistical Adsorption Thickness

図 3-32 各調合における仮想統計的吸着厚さに対する自己収縮ひずみの経時変化

図を見ると、20°Cの場合に各調合はほぼ同じ仮想統計的吸着厚さの領域（4.0～2.5 の間）において自己収縮ひずみが増加している。膨張材を添加した 4 調合は仮想統計的吸着厚さ 2.5 以下の領域で緩やかに膨張の傾向が見られる。

30°C養生の場合は、PL 以外の調合ではほぼ同じ仮想統計的吸着厚さの領域（3.0～2.0 の間）において自己収縮ひずみは急激に増加して極小値を取り、約 2.0 以下の仮想統計的吸着厚さの領域においてある程度膨張の傾向が示した。PL ではより大きな仮想統計的吸着厚さの領域（4.0～2.5 の間）において収縮が進行し、それ以下の領域にも膨張の傾向が見られなかった。

更に、膨張材の自己収縮低減機構を明らかにするため、同一の仮想統計的吸着厚さである EX, EXSR と PL との自己収縮ひずみ量の差分を、自己収縮ひずみ補償量として算出した。各調合において、自己収縮ひずみ補償量、水酸化カルシウムおよびエトリンガイト含有量と仮想統計的吸着厚さの関係性を図 3-33 に示す。

EX1-20°Cおよび EX2-20°Cの場合は、仮想統計的吸着厚さ 2.7 以下の領域において PL との自己収縮ひずみ量差分が増大する傾向が示している。同じ領域において、水酸化カルシウム含有量の上昇傾向も読み取れた。一方で、エトリンガイトの含有量は水酸化カルシウムの方と異なって、仮想統計的吸着厚さ 2.7 以下の領域において、EX1 の場合は自己収縮補償量の傾向と逆に、減少している傾向が有し、EX2 の場合はある程度増加傾向がある。収縮低減剤を同時に添加した EX1SR, EX2SR の場合では、仮想統計的吸着厚さ 2.4 以下の領域において、自己収縮ひずみ差分の増大と水酸化カルシウム含有量の上昇傾向は同様一致であるが、エトリンガイトの含有量の変化傾向は自己収縮補償量との明確な相関性が見られない。

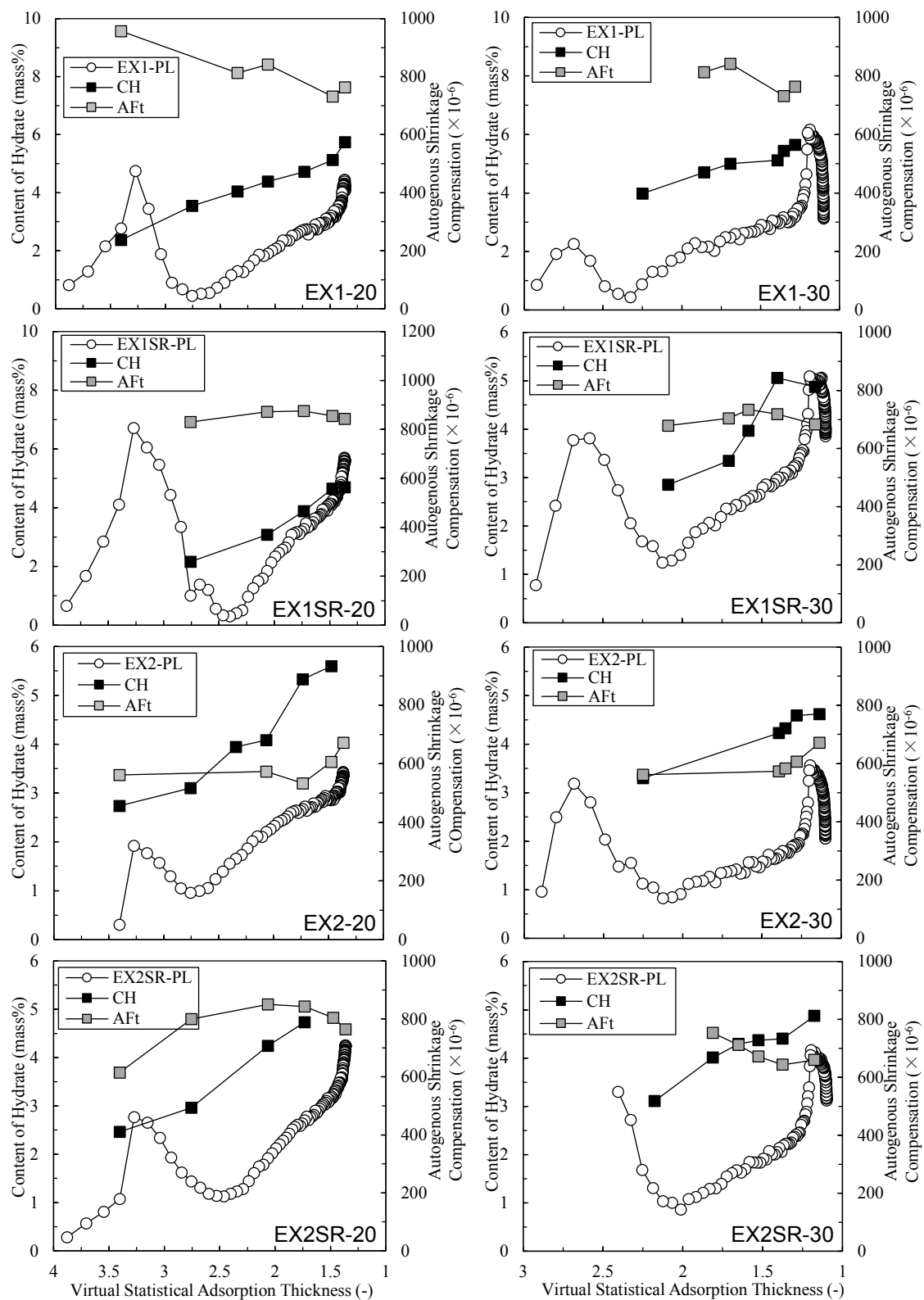


Figure 3-33 Effect of Calcium Hydroxide and Ettringite on Autogenous Shrinkage

図 3-33 自己収縮ひずみに及ぼす水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの影響

30℃養生された場合は、20℃と同じで、ある吸着厚さの領域における、水酸化カルシウム含有量と自己収縮補償量が同じ傾向を示した。同じ領域において、エトリンガイトの含有量は自己収縮補償量の変化傾向と明確な相関性が確認できてない。

以上の傾向をまとめると、膨張材 (EX1, EX2) を添加したセメントペーストの場合は、仮想統計的吸着厚さがおおよそ 3.0 以下の PL との自己収縮ひずみ差分は増加していく領域において、膨張性物質の水酸化カルシウム含有量が一般的な増大傾向が有することが明らかになった。すなわち、この領域における膨張の駆動力としては水酸化カルシウムが寄与している可能性を示唆する。

更に、自己収縮補償量と水酸化カルシウム含有量が同時に増大する領域において、同一仮

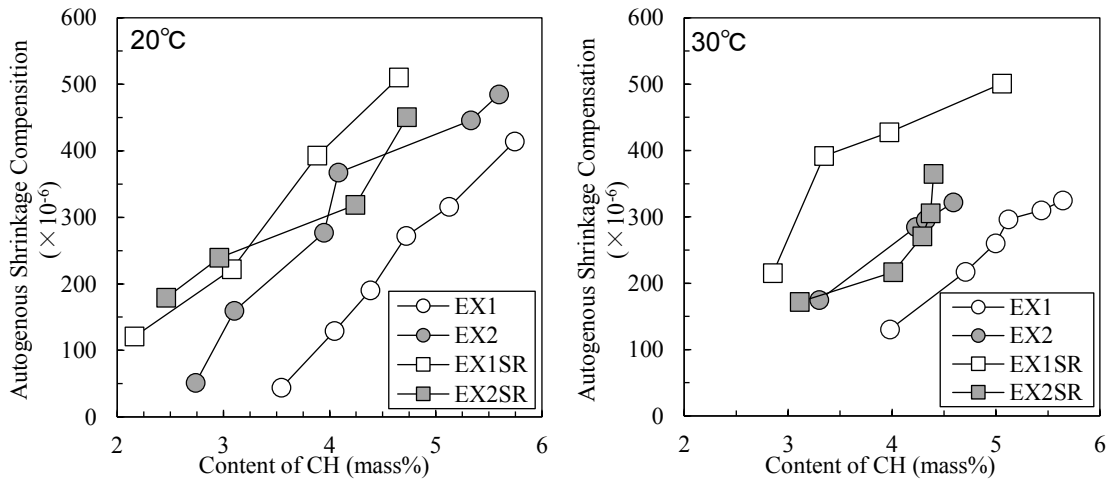


Figure 3-34 Relationship of Autogenous Shrinkage and Content of CH

図 3-34 自己収縮ひずみ補償量と水酸化カルシウム含有量の関係

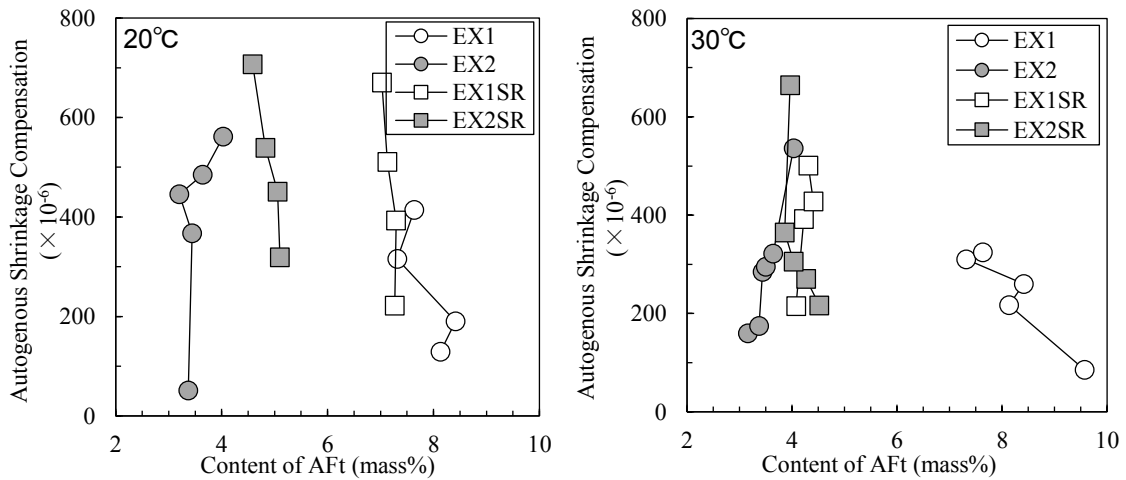


Figure 3-35 Relationship of Autogenous Shrinkage and Content of AFt

図 3-35 自己収縮ひずみ補償量とエトリンガイト含有量の関係

の関係をプロットした結果を図 3-34、図 3-35 に示す。

図 3-34 によって、多少のバラツキは見られるものの、膨張材を添加した各調合の水酸化カルシウムの含有量と自己収縮補償量とに正の相関があることが確認された。これらの結果は、膨張材の添加によって生成される膨張性物質の中では、水酸化カルシウムが一定の材齢（おおよそ 24 時間）以降の自己収縮の低減に貢献している可能性を示唆する。逆に、図 3-35 に示すように、エトリンガイトの含有量は、自己収縮ひずみ補償量との相関関係が見られなかった。

膨張材種類による自己収縮ひずみ低減効果に及ぼす影響を着目し、水酸化カルシウムと自己収縮補償量の関係曲線の傾きはほぼ一致しているため、本研究の条件と範囲内には、エトリンガイト石灰複合型膨張材（EX1）および石灰系早強性膨張材（EX2）を使用した場合においても、膨張の駆動力となる水酸化カルシウムの生成による自己収縮を低減させる効果は生成元の膨張材の種類に寄らず、ほぼ同様であると考えられる。

上記検討の一方で、膨張材を添加したセメントペーストの自己収縮ひずみは、膨張・収縮要因が両方含めるため、膨張材による自己収縮低減効果を考察する時、自己収縮ひずみの全体から膨張・収縮成分を分離して検討する必要がある。

（4）水和圧理論による自己収縮ひずみ成分の分離

丸山らの研究において、普通のポルトランドセメントの水和圧曲線を描く際に、収縮低減剤の有無によって、水和圧曲線が異なっていることが確認されており、収縮低減剤を添加する場合は水和圧曲線の勾配が小さいことが明らかにされた^[32]。水和圧曲線（図 3-30）を見ると、水和反応の進行に伴って、水の吸着厚さが減少するほど、収縮駆動力は大きくなるのが分かる。収縮低減剤はセメント硬化体の表面を疎水性にすることで、セメント硬化体表面に水分子の付着する面積を小さくさせる代わりに吸着厚さが大きくなる。即ち、収縮低減剤を添加させることによって水の吸着厚さが減少しにくいため、水和圧（収縮駆動力）の増加を抑制する。言い換えれば、任意の範囲内での統計的吸着厚さの減少量に対して、水和圧の増加量（収縮駆動力の増加量）が低減されるため、水和圧曲線の勾配が小さくなる。以上の収縮低減剤による収縮低減メカニズムの一つの概念図を図 3-36 に示す。

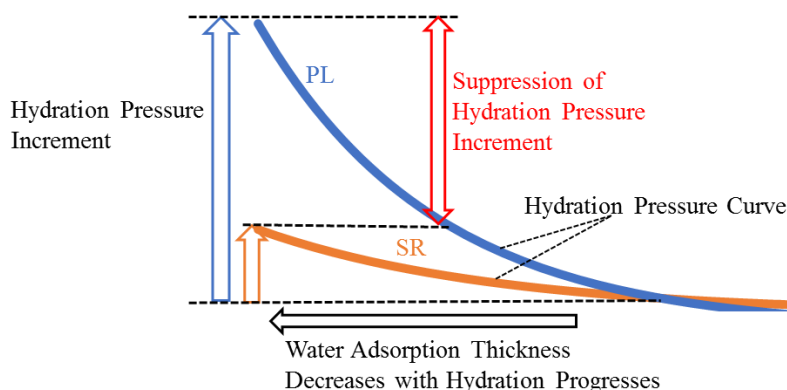


Figure 3-36 Schematic Chart of Hydration Pressure Variation with the Decrease of Water Adsorption Thickness

図 3-36 水の吸着厚さの減少に伴い水和圧の変化の概念図

丸山らの研究に示すように、水和圧曲線が式 3-24 に表す回帰式で描けることが分かる。

$$\Pi(e) = \Pi_0 \exp(-2e/\lambda_0) + \Pi_1 \quad \text{式 3-24}$$

ここに、 Π_0 、 Π_1 ：水和圧曲線における材料や温度に依存する係数

λ_0 ：親水力の減水長（3.0～10Å）である。

既往の研究に得られた普通のポルトランドセメントの水和圧曲線の Π_0 、 λ_0 の値は表 3-7 にまとめた。

本論文では、前節に述べた式 3-20～式 3-23 を用い、水和圧 $\Pi(e)$ （分離圧）および吸着厚さ e をそれぞれに算出して、式 3-24 に示す回帰式に基づく PL および SR の水和圧曲線をプロットした。しかし、本実験には、セメントペーストの体積含水率 w_{v2} は計測してないが、既往の研究^[36]に、質量含水率 w_m と体積含水率 w_{v2} の線形関係が確認されており、本論文には、式 3-25 によって、体積含水率 w_{v2} を算出して採用した。

$$w_{v2} = 1.1435w_m + 0.1199 \quad \text{式 3-25}$$

また、セメントペースト硬化体の比表面積は測定してないため、文献^[34]に求めた BET 比表面積と結合水量の関係式（式 3-26）を採用して比表面積を算出する。セメントペーストのポアソン比は本実験データの不足ため、0.2 と仮定した。

$$S = 21.4 \exp(10.2w_c) \quad \text{式 3-26}$$

ここに、 S ：BET 比表面積（ m^2/g ）

w_c ：結合水量（ g/g ）である

以上の様々な計算式によって、本実験から得られたデータおよびある物理量の仮定値を

用いて、ここに検討した PL および SR の水和圧曲線を描いた。また、実験値から回帰させた回帰曲線および回帰式を併せて図 3-37 に示す。

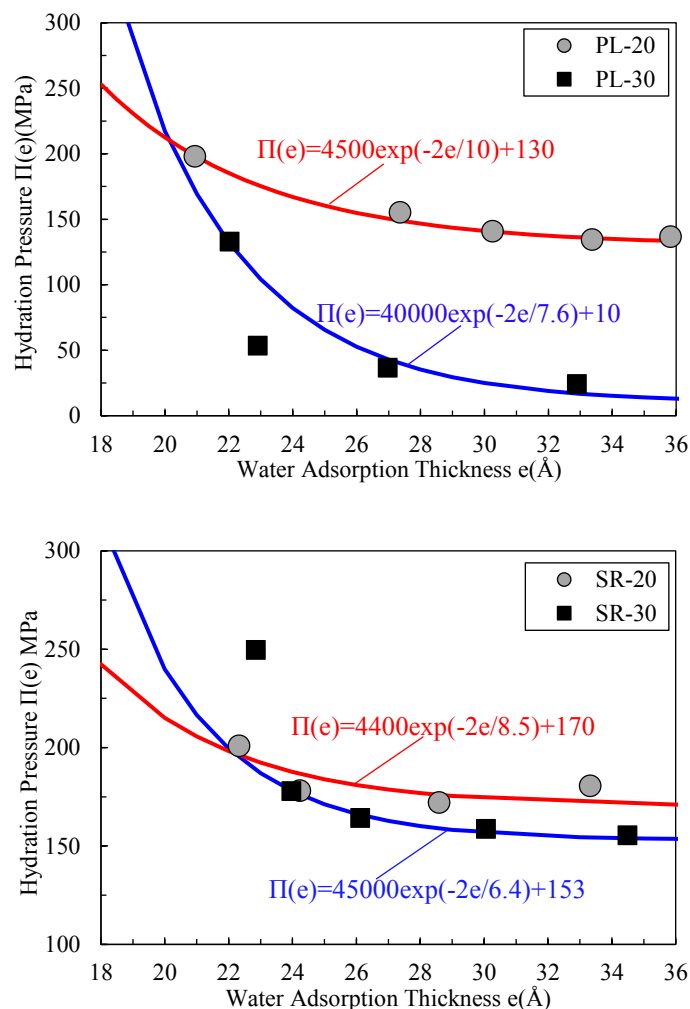


Figure 3-37 Hydration Pressure Curve of PL and SR with Different Temperature Conditions

図 3-37 PL と SR の水和圧曲線と回帰曲線

温度条件に関わらず、本考察範囲において、収縮低減剤の有無で水和圧曲線の勾配が変化することが確認された。なお、本実験条件においては、材齢極初期にあたる吸着厚さが約 36Å 以上の範囲には、セメントペーストの剛性が十分に発現していないため、回帰曲線を良く近似できないものがある。よって図に示す回帰式は、吸着厚さが 18~36Å の範囲内でのみ適用可能である。

屈曲点（材齢 24 時間）以前の極若材齢において、自己収縮ひずみの収縮機構を水和圧理論で検証した事例はなく、材齢 1 日前後で自己収縮メカニズムが異なる可能性があるため、可能性があるため、本論文では、水和圧理論が適用可能と考える屈曲点以降（ $e < 36\text{Å}$ ）の自己収縮ひずみを対象として、自己収縮ひずみを収縮・膨張要因を分離する作業を試みた。

ここには、**図 3-38** に示すように、実験測定によって得られた PL と SR の水和圧理論を適用させた水和圧曲線およびその曲線を近似させた回帰曲線を使用した。ここでは、膨張材が水和曲線に与える影響が小さいものと仮定し、EX1, EX2 の場合は PL と同じ回帰曲線および、EX1SR, EX2SR の場合は SR と同じ回帰曲線を使用する。

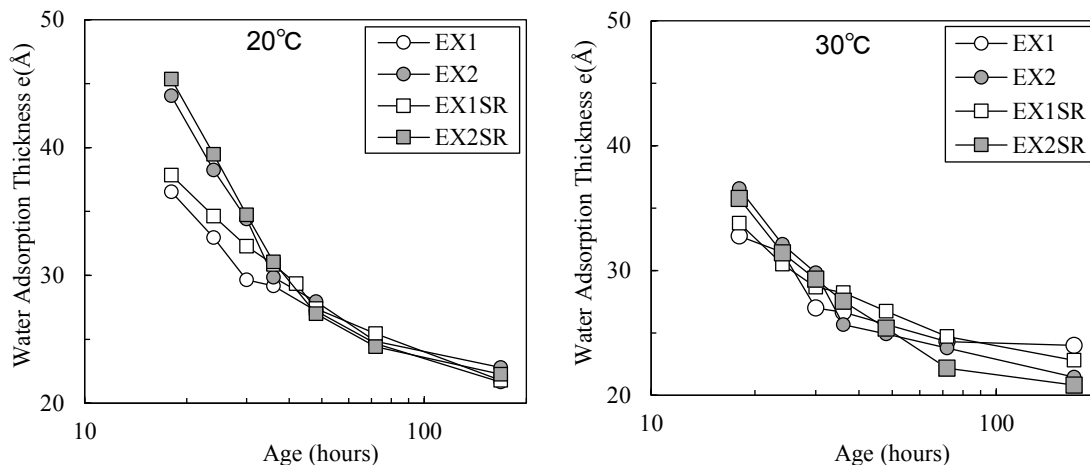


Figure 3-38 Water Adsorption Thickness Variation with Age

図 3-38 水の吸着厚さの経時変化

式 3-23 併せて、本実験から得られデータを用いて算出した水の吸着厚さの経時変化を **図 3-38** に示す。

また、**式 3-22~24** および **図 3-37** に示す水和圧回帰曲線式を用い、一軸ひずみを逆算した。これらの一軸ひずみの逆算値は、水和圧理論に基づく分離された自己収縮ひずみの収縮成分（図に、“-Shrinkage”で示す）とした。また、実際に体積変化測定試験による得られた自己収縮ひずみの全体（図に、“-Total Strain”で示す）から収縮成分との差分を取って算出した結果を膨張ひずみ成分（図に、“-Expansion”で示す）とした。

以上の理論式および実験データを使用して、各調合における自己収縮ひずみ全体から分離させたひずみの膨張・収縮成分の経時変化を **図 3-39** に示す

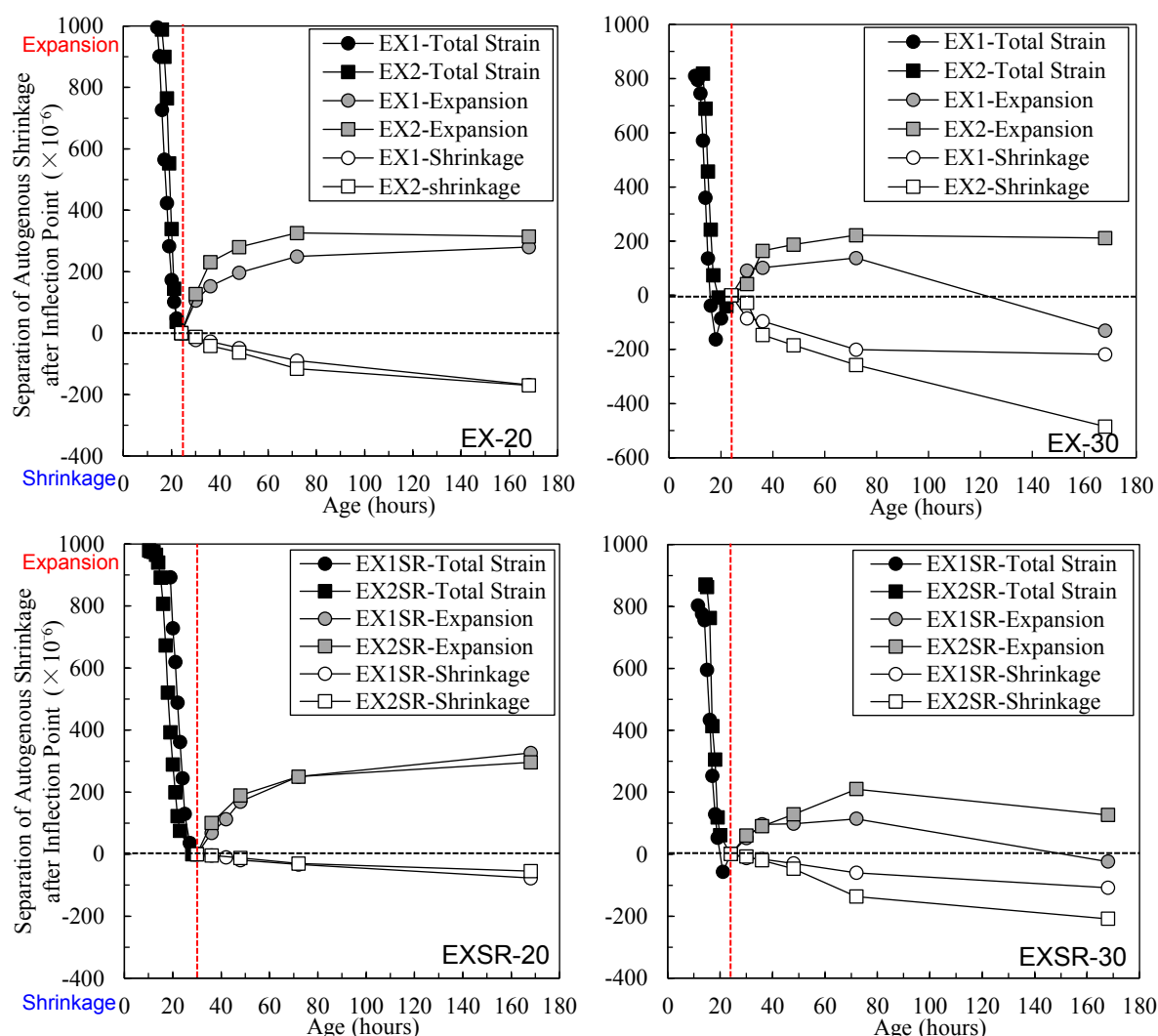


Figure 3-39 Separation of Autogenous Shrinkage after Inflection Point

図 3-39 屈曲点以降における自己収縮ひずみの分離

以上の作業によって、膨張材を添加した場合において、膨張材の水和反応に起因する膨張効果が得られた。膨張に寄与する物質を確認するため、分離された膨張ひずみ成分と水酸化カルシウムまたエトリンガイトの関係性を検討した結果を図 3-40 に示している。

図に示すように、材齢約 24~30 時間以降(水の吸着厚さが約 36Å 以下の範囲)において、多少のバラツキがあるものの、各調合は同じで、膨張ひずみ量は水酸化カルシウム含有量と概ね同様な変化傾向を示している。つまり、膨張材による自己収縮を低減させる効果は、水酸化カルシウムによる膨張圧の発現に強く寄与していることが示唆された。この結果は、図 3-33 に得られた知見と一致している。

また、図を見ると、膨張材単体使用された場合、膨張ひずみ量の増加傾向と水酸化カルシウム含有量の変化傾向はほぼ同じであるが、収縮低減剤を併用する場合、膨張ひずみの増加速度が大きくことが見られ、収縮低減剤と膨張材を併用することによって、膨張(収縮低減)

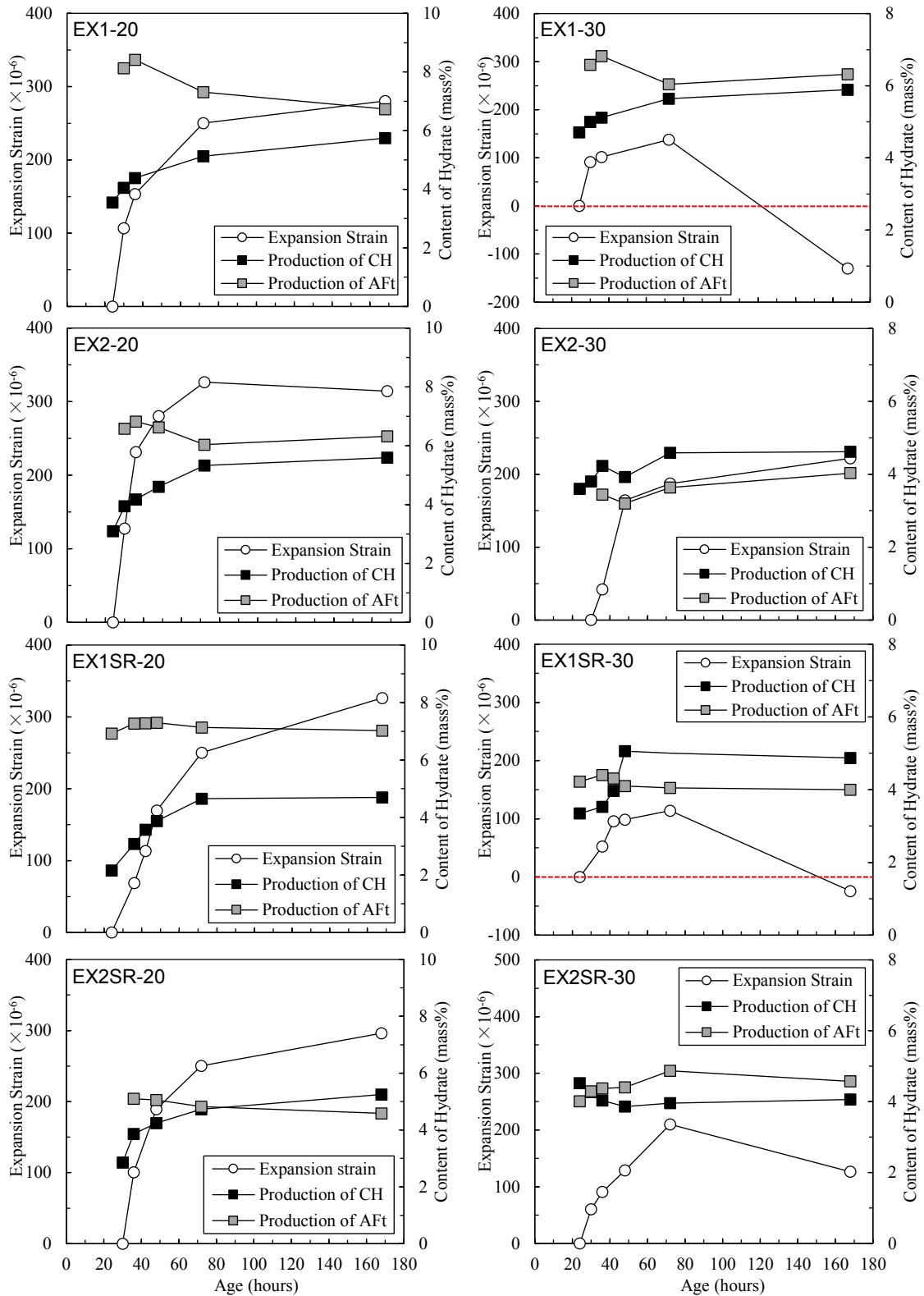


Figure 3-40 Effect of Calcium Hydroxide and Ettringite on Expansion due to EX

図 3-40 膨張ひずみ成分に及ぼす水酸化カルシウム及びエトリンガイトの影響

効果を向上できることも確認できた。

一方、いずれの調合、いずれの温度条件においても、エトリンガイトの含有量は、膨張ひずみ量の増加傾向と伴い、明確な相関が無いことが分かる。

更に、屈曲点以降に膨張効果に寄与する水和物を確認するため、屈曲点以降の水酸化カルシウムおよびエトリンガイト含有量の増分と膨張ひずみの関係をプロットした結果を図 3-41 に示す。

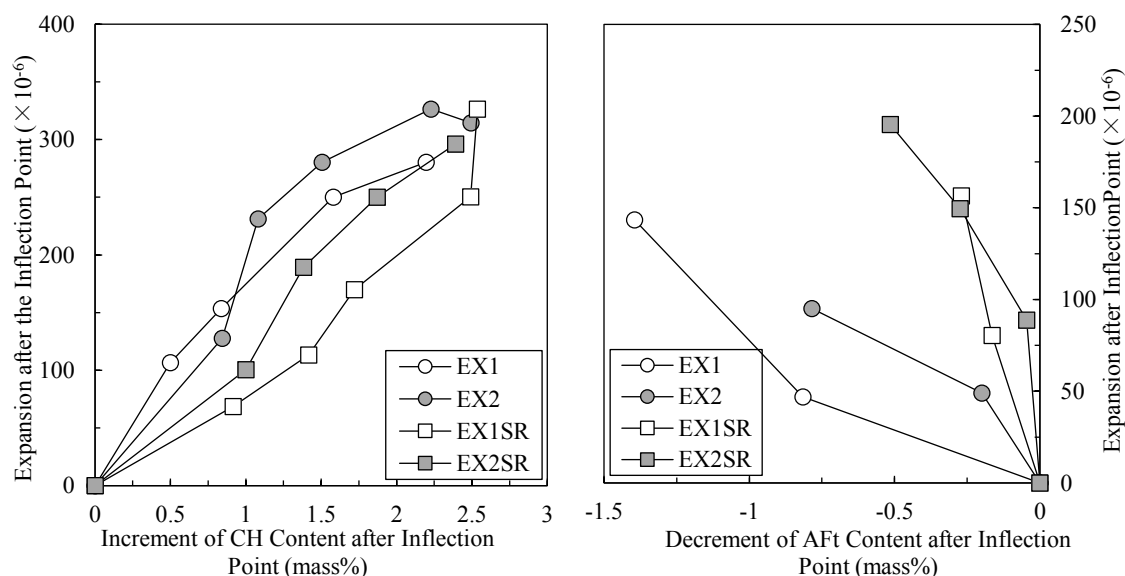


Figure 3-41 Relationship between Variation Amount of CH/Aft and Expansion Strain after Inflection Point (20°C)

図 3-41 屈曲点以降の膨張ひずみと CH, Aft 含有量の変化量の関係 (20°C)

図に見ると、20°C養生された場合、屈曲点以降の材齢において、膨張ひずみひずみと水酸化カルシウム含有量増分との相関関係が確認された。また、収縮低減剤の有無に関わらず、CSA系 (EX1) および石灰系 (EX2) 膨張材を使用する場合は膨張ひずみと水酸化カルシウム含有量増分とは概ね同じな変化傾向が有することが見られた。

これらのことから、水酸化カルシウムによる膨張圧に及ぼす影響は、膨張材の種類に関係がないと考えられる。即ち、屈曲点以降の材齢範囲に、水酸化カルシウムによる自己収縮低減効果は、生成元の膨張材の種類によらない。一方、膨張ひずみ量とエトリンガイト含有量の減量との関係を見ると、屈曲点以降において、エトリンガイト含有量の減少に従い膨張ひずみが増大する傾向が明らかに見られた。そのため、エトリンガイト生成は膨張ひずみの発現によらないと考えられる。これらの検討結果は、図 3-34、図 3-35 に得られた結論と良く一致している。本考察では、水和反応による水の消費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に及ぼす影響を示した。

3.3 膨張材を使用した超高強度モルタルの若材齢体積変化に及ぼす骨材量の影響

3.3.1 研究背景と目的

前節では、膨張材および収縮低減剤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検討を行い、膨張材種類によらず材齢約 24 時間以降における自己収縮低減量と水酸化カルシウムの生成量に高い相関関係があることを明らかにした。この結果は、材齢 24 時間以降に膨張材の自己収縮ひずみ低減効果に関しては、エトリンガイトより水酸化カルシウムの生成のほうが貢献していることを示すものであった。

一方、コンクリートはセメントペーストと骨材の複合材料であるため、前節に示したセメントペーストで得られた知見をコンクリートに応用してくためには、骨材がコンクリートの自己収縮に及ぼす影響を検討する必要がある。

セメントペーストあるいはモルタルの体積変化量からコンクリートの体積変化を推定する試みとしては複合則理論に基づく研究が行われている。従来、コンクリートの体積変化に関する複合則の研究としては、乾燥収縮を対象とした検討が多く、例えば、仕入ら^[37]は、セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮の関係を検討して、乾燥収縮量をセメントペーストの量による評価理論式を導出した。実験による検証結果から、コンクリートまたはモルタルの乾燥収縮量は骨材量および収縮量が一定ならば、セメントペースト量に比例して増加することを示した。

後藤ら^[38]は、上記に挙げた様々な複合則式を利用して、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響を考察し、コンクリートの乾燥収縮には骨材の容積含有率や弾性係数のほかに骨材自体の体積変化も重要な役割を果たしていることを指摘した。江口ら^[39]は、コンクリートの乾燥収縮予測について、既存の複合モデルを基盤として提案された予測式の適用性を実験データで確認したうえで、既存式を時間依存型に拡張し、材齢因子も考慮含めて収縮予測式を提案した。それ以外にも、様々な複合則理論が提示されている。既存の複合則式^[例 えば 40]を整理し、表 3-7 にまとめた。

以上の既往の研究は、乾燥収縮を対象としたものであるが、コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材の影響に関する検討は比較的少ない。寺本ら^[41]の研究において、経時的に収縮を示すセメントペーストを用いて、乾燥収縮と同様の複合則理論を用いることでモルタルおよびコンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響を評価できることを示した。しかし、膨張材を用いた高強度コンクリートのように、材齢によって収縮と膨張が変化するような複雑な体積変化が生じる場合における骨材の拘束効果に関しては更なる検討が必要である。特に、膨張材の自己収縮低減効果に及ぼす骨材の拘束効果の影響は明らかになっていないのが現状である。高強度コンクリートの自己収縮低減に応じて膨張材を適切に使用する目的に対して、骨材の影響を実験的に検証する必要がある。

Table 3-7 Existing Composite Theory Equation [e.g.40]

表 3-7 既存複合則理論式のまとめ [例えば 40]

Models	Year	Composite Theory Equations	Remarks
Ono	1953	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{1+(mn-1) V_a\} / \{1+(n-1) V_a\}$	$m = \epsilon_a/\epsilon_p, n = E_a/E_p$
Pickett	1956	$\epsilon_c/\epsilon_p = (1-V_a)^\alpha, \alpha = 3(1-\nu_c) / \{1+\nu_c+2(1-2\nu_c) E_c/E_a\}$	$K_a = E_a/(3-2\nu_a),$
Fulton	1961	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{1+(mn-1) V_a\} / \{1+(n-1) V_a\}$	$K_p = E_p/(3-2\nu_p)$
Hansen-Nielsen	1965	$\epsilon_c/\epsilon_p = (1-m) \{n+1-(n-1) V_a^2-2nV_a\} / \{(n+1)+m, n \geq 1$ $\epsilon_c/\epsilon_p = (1-m) \{n+1-(n-1) V_a\} / \{n+1+(n-1) V_a\} + m, n \leq 1$	$\epsilon_c, \epsilon_p, \epsilon_a$: Strain of concrete cement paste and aggregate
Kawase	1966	$\epsilon_c/\epsilon_p = 1-3n(1-m) (1-\nu_p) V_a / \{2(1-V_a) + 2n(1-2\nu_p) V_a + n(1-\nu_p)\}$	E_a, E_p : Young's Modulus of aggregate and cement paste
Patten	1968	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{2+(n-1) V_a\} (1-V_a) / \{2(n-1) V_a\}$	ν_c, ν_p : Poisson ratio of concrete and cement paste
C and CA	1971	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{n+1+(2mn-n-1) V_a\} / \{n+1+(n-1) V_a\}$	V_a : Volume rate of aggregate
Hobbs	1974	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{(2mn-n+1) V_a + n+1\} / \{n+1+V_a(n-1)\}$	
Kishitani-Baba	1975	$\epsilon_c/\epsilon_p = \{1-(1-mn) V_a\} \{n+1-(n-1) V_a\} / \{n+1+(n-1) V_a\}$	

そのため、本節では、自己収縮ひずみが卓越する極低水セメント比かつ、膨張材を使用した調合において、細骨材率が異なるセメントペーストおよびモルタル試験体を作製し、7日間の自己収縮ひずみを計測し、若材体積変化に対する細骨材の拘束効果の影響を検討した。本節で行った実験内容を表 3-8 に示す。

Table 3-8 Contents of Experiments Conducted

表 3-8 本研究に実施した実験概要

Experimental Items	Results
Length Change Measurement	Thermal Expansion Coefficient Variation with Age
	Autogenous Shrinkage Variation with Age
Moisture Content Measurement	Mass Moisture Content Variation with Age
Bound Water Measurement	Bound Water Amount Variation with Age
Propagation Velocity of Ultrasonic Waves Measurement	Propagation Velocity of Ultrasonic Waves and Young's Modulus Variation with Age

3.3.2 実験材料及び調合条件

本実験の調合条件を表 3-9 に、使用した材料の概要を表 3-10 に示す。水結合材比 16.5% の超高強度セメントペースト、および全容積に対して 15%, 30%, 45% の細骨材を使用した超高強度モルタル試験体を作製した。

それぞれの調合には、自己収縮低減を目的として、3.2 節に検討した二種類膨張材の内、石灰系早強型膨張材を使用し、結合材の質量に対して 3% を添加した。本論文でそれぞれの

記号を S0, S15, S30, S45 と表記する。また、比較用として、膨張材及および細骨材両方とも添加していないセメントペースト試験体（以下、PL と表記する）も作製した。セメントペーストおよびモルタルの流動性を確保するため、結合材質量に対する 3.1%のポリカルボン酸系高性能減水剤を添加した。

セメントペーストおよびモルタルの練り混ぜでは、3.2.1 節に記述した同様の手順で行う。本実験の温度条件では、3.2.2 に述べた方法を採用し、20℃および 30℃の恒温養生を行った。また、線膨張係数を求めるため、前述と同じ温度パルスを導入して養生を行った。本節に、養生温度別で試験体記号の末尾に“-20” , “-30”を添えて表記する。

Table 3-9 Compounding Details of Cement Paste and Mortar

表 3-9 本実験の調合条件

Symbol	W/B (mass%)	S (Vol%)	EX/B (mass%)	SP/B (mass%)
PL	16.5	-	-	3.1
S0		-	3	
S15		15	3	
S30		30	3	
S45		45	3	

Table 3-10 Details of Materials Used in This Experiment

表 3-10 本実験に使用した材料概要

Components	Type	Physical Properties
Cement (C)	Silica Fume Premix Cement	Density: 3.16g/cm ³ Specific Surface Area: 6690cm ² /g
Aggregate (S)	Crushed Sand	Density: 2.61g/cm ³ Water Adsorption Rate: 1.07%
Expansive Additive (EX)	Lime-based Early-strength Type	Density: 3.19g/cm ³ Specific Surface Area:4520cm ² /g
Water Reducing Agent (SP)	High Performance AE type	Polycarboxylate Based Superplasticizer

3.3.3 実験概要

(1) 体積変化測定実験

本実験では、3.2.2 節に述べた同じ方法を用いて、試験体の長さ変化測定実験を実施し、同じ方法を使用して線膨張係数および自己収縮ひずみの経時変化を取得した。

(2) 質量含水率・結合測定実験

本実験では、3.2.2 節に述べた同じ方法を用いて、試験体の質量含水率および結合水量の

測定実験を実施した。

(3) 超音波伝播速度測定実験

複合則理論に基づく考察には、セメントペーストおよび骨材の剛性が必要となるため、本実験では、超音波伝播速度測定実験によって、セメントペーストおよびモルタルの動弾性係数を弾性理論^[42]式によって算出した。実験方法では、3.2.2 節に紹介した装置を使用して、同じ手順で実施した。

本研究では、直接的に骨材の剛性を実験的に測定していないが、既往の研究に参考して、モルタルの剛性およびセメントペーストの剛性の実験値を用いて、弾性係数の複合則モデルの一つである Hashin-Hasen モデル^[43]によって骨材の動弾性係数の推定を行った。材齢 7 日時点において、各温度条件で養生したモルタルの動弾性係数と細骨材の体積比の関係性を図 3-42 に示している。また、骨材体積比と動弾性係数の関係を Hashin-Hasen モデルによって最小二乗回帰し、最も実験値と適合する骨材の動弾性係数として 54GPa を得られた。以降の検討は、骨材の動弾性係数として、推定値の 54GPa を採用した。

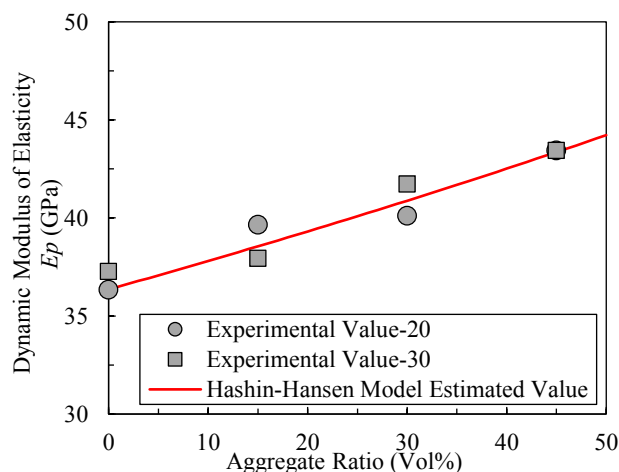


Figure 3-42 Relationship of Dynamic Modulus of Elasticity and Volume Rate of Aggregate

図 3-42 モルタルの動弾性係数と骨材体積比の関係

3.3.4 実験結果及び考察

(1) 線膨張係数の経時変化

本実験から得られた線膨張係数の経時変化を温度別に図 3-43 に示す。3.2 節のセメントペーストの実験結果結果と同様に、いずれの調合、温度条件についても、線膨張係数は材齢極初期から硬化に伴い急激に減少し、材齢約 24 時間後に極小値を取り、その後 20°C 養生した方がほぼ一定値を、30°C 養生した方が緩やかに増大傾向を示していた。既往の研究^[8]によって、線膨張係数の変化傾向に急激転じる材齢は、3.2 節に述べた自己収縮ひずみの“屈曲点”の材齢と概ね一致しているため、ここでも“屈曲点”と称する。前節に述べたように、屈曲点以降に線膨張係数の増大傾向は自己乾燥に起因するものと考えられており^[12]、20°C

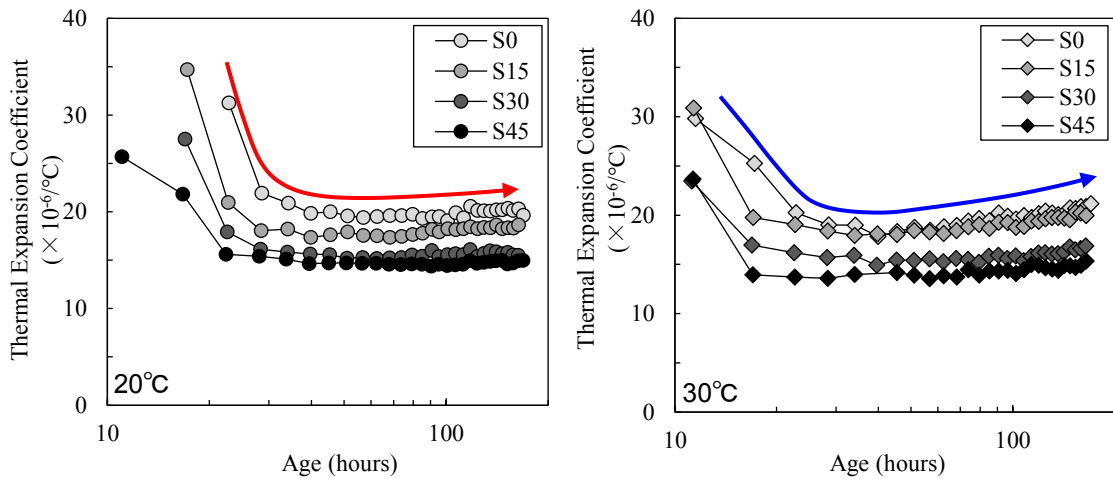


Figure 3-43 Thermal Expansion Coefficient Variation with Age

図 3-43 線膨張係数の経時変化

条件と比較して、自己乾燥速度が大きい 30°C条件で顕著な傾向がみられたものと推察される。また、全体的な傾向を見ると、いずれの温度条件においても細骨材の体積比の大きい程線膨張係数の値は小さくなる結果であった。これは、温度変動による体積変化は、乾燥収縮などと同様に、骨材がセメントペーストの体積変化を拘束していることを意味する。

また、細骨材が温度変動によるモルタルの体積変化に及ぼす拘束効果を確認するため、それぞれの線膨張係数の経時変化における屈曲点および材齢 7 日時点の線膨張係数値を取り出し、骨材体積比との関係性を整理して、図 3-44 に示す。屈曲点材齢も併せて示す。

図に示すように、いずれの材齢においても、温度条件に関わらず、細骨材体積比の大きい程モルタルの線膨張係数は小さくなることが確認できた。細骨材を使用していない場合 (S0) に、すべての調合がほぼ 20 (×10⁻⁶/°C) の同一な線膨張係数値を有することに対して、細骨

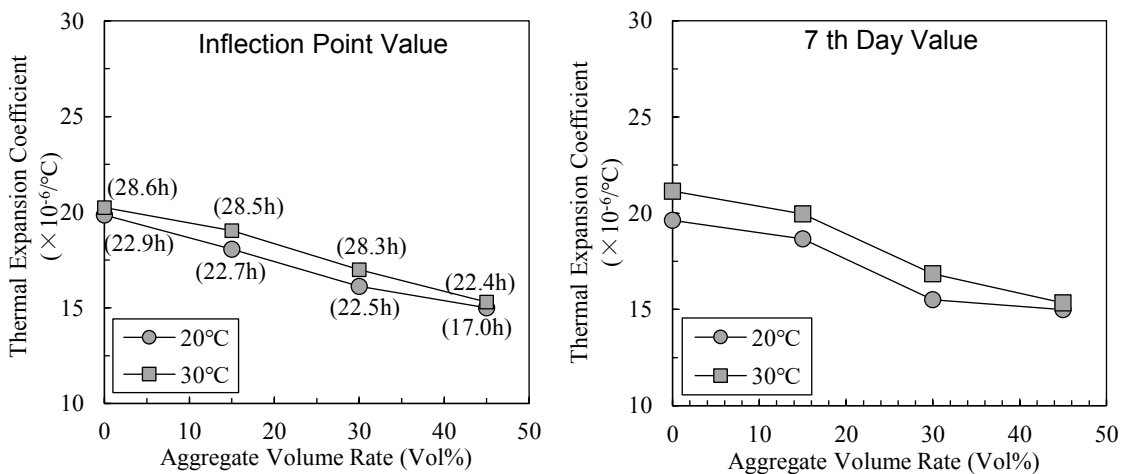


Figure 3-44 Thermal Expansion Coefficient Variation with Aggregate Volume Rate

図 3-44 線膨張係数と細骨材体積比の関係

材が 45%を使用した場合は、 $15 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ を示した。一般的に、セメントペーストの線膨張係数は $20 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ であり、細骨材が $5\sim 10 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 程度^[44-46]の比較的小さい線膨張係数値が有し、同じ温度条件を受ける時、モルタルでは骨材の使用によって、セメントペーストの体積変化に及ぼす拘束効果を与える。本実験によって得られた、モルタルの線膨張係数は細骨材の体積率の増加するほど減少している傾向は、骨材がセメントペーストの温度変化に生じさせる体積変化を拘束していることが意味している。

また、同一調合条件において、養生温度が線膨張係数に及ぼす影響を着目し、いずれの材齢においても、 30°C 養生したセメントペースト・モルタルの線膨張係数は 20°C の方より大きい結果であった。前述のように、線膨張係数の変化は自己乾燥に起因するものと考えられており、 20°C 条件に対してより自己乾燥速度が大きい 30°C 条件で顕著な傾向がみられたものと推察される。なお、各調合のセメントペースト・モルタルの線膨張係数の極小値をとる材齢を見ると、温度条件によらず、細骨材の添加率の大きいほど早くなることが読み取れた。このことは、骨材割合の大きさは、マトリクス形成に寄与することを示している。

(2) 線膨張係数に複合則理論の適用性

既往の研究において、コンクリートの線膨張係数を対象とした複合則理論に関する検討が少ないことであるため、本研究では、既往の研究に提案された複合則理論が、モルタルの線膨張係数への適用性に関する検証を試みた。

まず、表 3-6 にまとめた複数の複合則理論式の内、既往の研究一般的採用された Hobbs モデル^[47]を採用し、実験によって得られたセメントペースト (S0) の線膨張係数を用いて、各体積比を有するモルタルの線膨張係数を推定した。ここに、Hobbs モデルの線膨張係数への適用式は式 3-27、式 3-28 に示す通りである。

$$\frac{\alpha_m}{\alpha_p} = \frac{2(mn - n + 1)V_a + n + 1}{n + 1 + V_a(n + 1)} \times 100 \quad \text{式 3-27}$$

$$m = \frac{\alpha_a}{\alpha_p}, n = \frac{E_a}{E_p} \quad \text{式 3-28}$$

ここに、 α_m : モルタルの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

α_p : セメントペーストの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

α_a : 細骨材の線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

E_a : 細骨材の動弾性係数 (GPa)

E_p : セメントペーストの動弾性係数 (GPa)

V_a : 細骨材の体積比 (%) である。

Hobbs モデルが最も適合する細骨材の線膨張係数は $11 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ であったため、ほかの複合則理論との比較時にも、細骨材の線膨張係数は $11 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ と仮定して行った。 E_a は前述の通り 54 (GPa) を採用し、 E_p は 3.2.3 節に得られたセメントペーストの動弾性係数値を使用した。

セメントペーストの線膨張係数の屈曲点値および材齢 7 日時点値を使用して、Hobbs モデ

ルに基づいて、細骨材が 15%、30%、45%を使用した場合モルタルの線膨張係数を推定した結果を図 3-45 に示している。

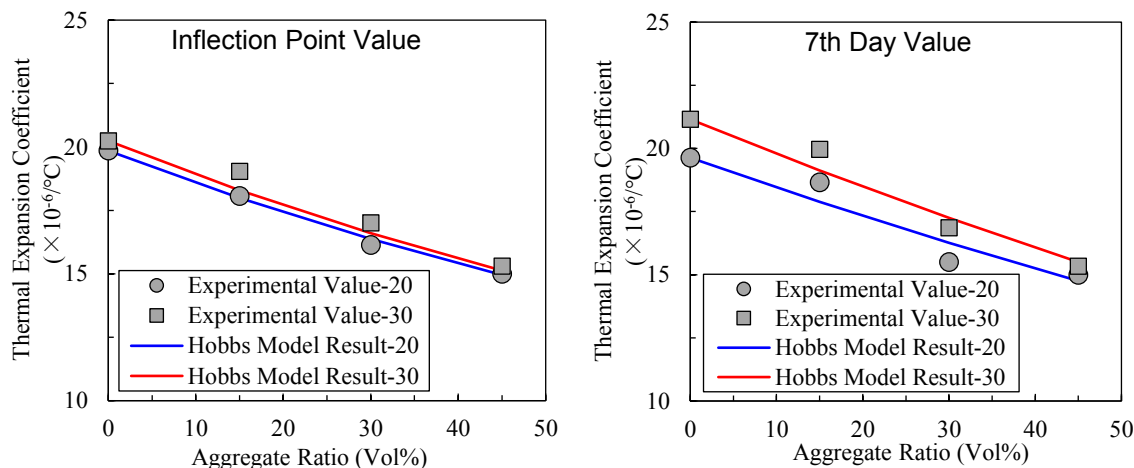


Figure 3-45 Comparison of Thermal Expansion Coefficient Value Obtained by Experimental Measurement and Hobbs Model Estimation

図 3-45 Hobbs モデルによる線膨張係数の推定値と実験値の比較

(1) に検討した結果より、いずれの材齢においても、細骨材の体積比と線膨張係数の実験値は一樣な関係が見られた。この関係性は、図 3-45 より、Hobbs 複合則モデルに基づく推定値と概ね一致することが明らかになった。つまり、Hobbs モデルによる線膨張係数の推定値と実験値は良く合っており、細骨材体積率との相関性も実験値の場合と一致している。なお、ここに細骨材の線膨張係数は $11 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ と仮定した。

更に、複合則理論はモルタルの線膨張係数に対する一般的な適用性を確かめるため、表 3-6 にまとめた複数の複合則モデルを用い、モルタルの線膨張係数を推定して検証を行った。上記各複合則モデル理論式を用い、モルタル試験体の線膨張係数の推定値と実験値の関係を整理した結果を図 3-46 に示す。20°C および 30°C の温度条件に養生した全ての試験体の結果が含まれている。また、Hobbs モデルとの比較のため、細骨材の線膨張係数はすべて $11 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ の仮定値を採用した。

図に示すように、骨材の線膨張係数を $11 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ と仮定した場合、複合則モデルによりセメントモルタル線膨張係数の推定値と実験値が良い一致を示すものと実験値を過小に評価するものが見られた。

本実験に実際の骨材の線膨張係数値は測定していないため、各モデルの推定精度を評価することはできず、あくまで Hobbs モデルとの比較になるが、乾燥収縮の実験値を用いて構成された既存の複合則理論の中には、熱による体積変化の予測において、推定誤差が大きくなるものが存在することが示された。この原因として、体積変化では、骨材の乾燥収縮と比較してセメントペーストの方は圧倒的に量が大きい温度変動による体積変化は骨材とセ

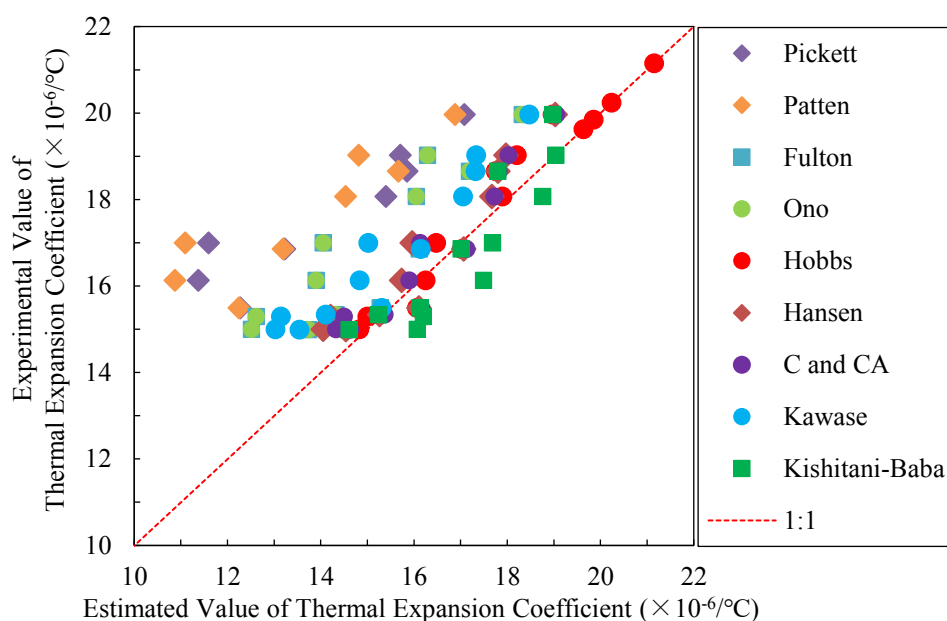


Figure 3-46 Relationship of Thermal Expansion Coefficient Experimental Value and Estimated by Composite Theories

図 3-46 線膨張係数の実験値と複合則理論による推定値の関係

メントペーストでせいぜい数倍の違いしかないのに対して、乾燥収縮の骨材の体積変化はセメントペーストに対して無視できない程度の量が発生していることから、骨材そのものの変形をどの程度考慮するかが推定精度に影響を与えたものとみられる。

具体的には、Patten モデル（表 3-6 参照）のように、骨材の体積変化を考慮していないモデルもあるため、線膨張係数を推定する際には、骨材の値を実測する並びに使用する複合則モデルを慎重に選定することが必要不可欠であると考えられる。

以上の検証によって、モルタルの線膨張係数に対して複合則理論の一般的適用性が確かめたが、表 3-6 にまとめた各複合則理論式による推定誤差が存在することが明らかになった。そして、推定精度を向上するため、細骨材の線膨張係数実測値および推定用モデルを選定する必要がある。

(3) 自己収縮ひずみの経時変化

本実験によって得られた各調合における自己収縮ひずみの経時変化を図 3-47 に示す。図 3-47 において、既往の研究結果と同様に、いずれの養生温度でも材齢約 24 時間頃まで、自己収縮ひずみが急激に進行し、その後ある程度の膨張傾向に転じることを示した。この急激な収縮後の膨張はセメントや膨張材の水和によって生成される水酸化カルシウムやエトリンサイトなどの膨張性水和物によるものと考えられている^[48]。ある程度の膨張に進行した以降の材齢において、20℃養生では、PL 以外の各試験体の自己収縮ひずみの増加はほぼ停滞傾向になることに対して、30℃養生の自己収縮ひずみ量は緩やかに続き進行している傾向が示した。この結果は、3.2 節においてセメントペーストを対象として得られた結果と

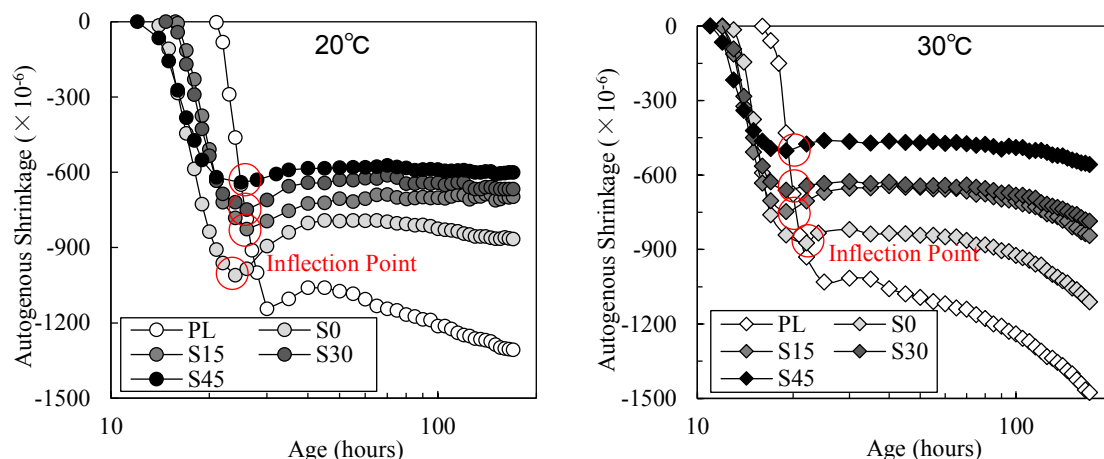


Figure 3-47 Autogenous Shrinkage Variation with Age

図 3-47 各調合における自己収縮ひずみの経時変化

一致している。

また、細骨材の使用によって自己収縮を低減させる効果を定量的評価するため、膨張材を添加した各調合 (S0, S15, S30, S45) の自己収縮ひずみ経時変化の屈曲点値および7日時点値を取り出した結果は図 3-48 に示す。比較するため、膨張材も骨材も混和していない PL のデータも併せて示している。また、屈曲点を原点として整理した自己収縮ひずみの経時変化の結果を図 3-49 に示す。

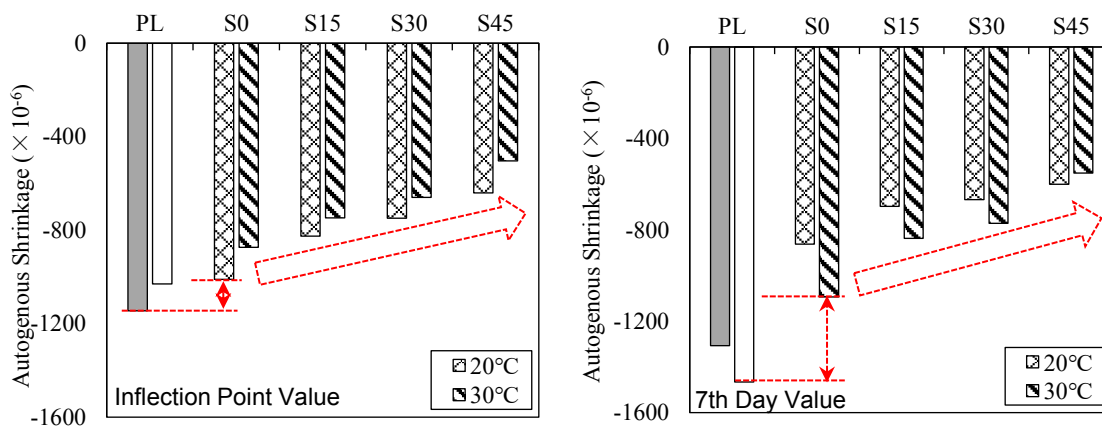


Figure 3-48 Comparison of Autogenous Shrinkage on Inflection Point and 7th Day

図 3-48 屈曲点及び材齢 7 日時点における自己収縮ひずみ量の比較

図 3-48 に示すように、細骨材が自己収縮ひずみ量に及ぼす影響に着目すると、細骨材も膨張材も使用していない PL に対して、結合材質量に対して 3%の膨張材を添加した場合、自己収縮ひずみが減少し、更に骨材の体積率の増加に従って自己収縮ひずみ量が小さくなることが確認できる。

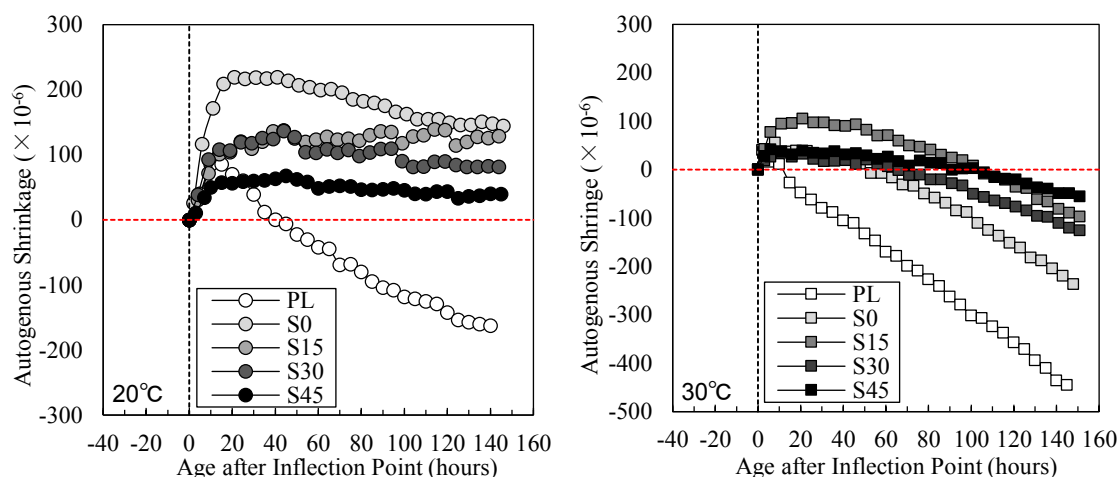


Figure 3-49 Autogenous Shrinkage Variation with Age after Inflection Point

図 3-49 屈曲点を原点として整理した自己収縮ひずみの経時変化

図 3-49 に示す結果によって、屈曲点以降において、膨張側に発現するひずみ量は骨材使用量の多い程小さくなる（S45-30°Cは多少誤差がある）ことが読み取れる。これらの結果は、骨材の使用によって、自己収縮が抑制されるためである。

屈曲点（材齢約 24 時間）以降の範囲において、図 3-47 示すような膨張と収縮が併発している複雑な体積変化の中で、骨材がセメントペーストの膨張・収縮に具体的にどのように拘束しているのかは現状よくわかってない。そのため、本研究では、セメントペーストおよびモルタルの自己収縮ひずみを、収縮要因と膨張材の膨張効果による要因を分離し、それぞれにおいて骨材の拘束効果を考察する。

（4）複合則理論に基づく骨材がモルタルの体積変化に及ぼす影響の評価

本考察では、まず、3.2.5 (4)節に述べたように、水和圧理論を用いて、膨張材を添加したセメントペーストの自己収縮ひずみ全体から膨張成分と収縮成分に分離する。収縮側の複合則理論が成立と仮定する前提において、セメントペーストの収縮から複合則理論によって各骨材体積比を有するモルタルの収縮ひずみを推定する。その後、実測によって得られたモルタルの自己収縮ひずみ全体と収縮ひずみの推定値との差分を取り、モルタルの膨張ひずみの計算値を取得する。

次に、セメントペーストの膨張ひずみ成分を用いて複合則理論に基づき推定し、各調査におけるモルタルの膨張ひずみ成分推定値を得る。

最後に、モルタルの膨張ひずみ計算値と推定値を比較して議論し、膨張材を添加する場合モルタルの体積変化への複合則理論の適用性および、膨張材の膨張効果に及ぼす骨材の拘束効果を検証する。本考察の流れを図 3-50 に示す。

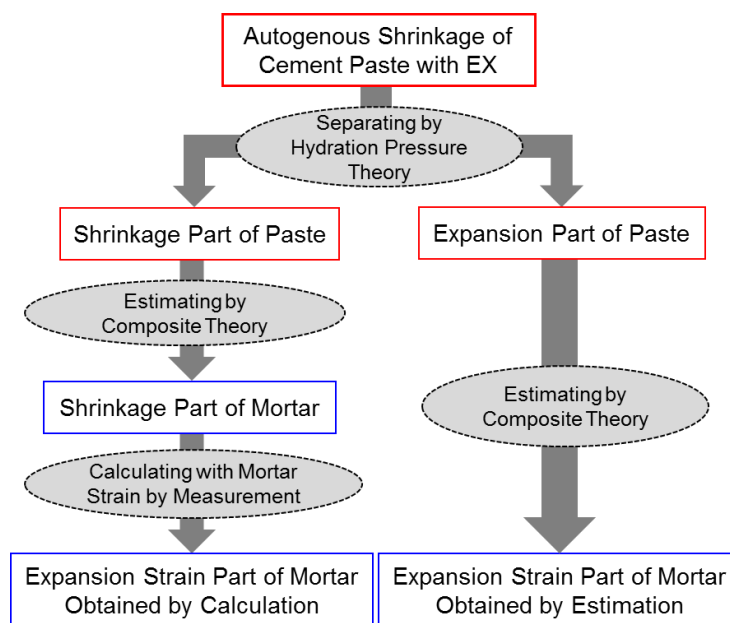


Figure 3-50 Flow Chart of Discussion on the Applicability of Composite Theory for Shrinkage of Mortar with Expansive Additive

図 3-50 膨張材が添加する場合複合則理論の適用性に関する検証のフロー図

3.2.4 節に説明した水和圧理論に関して、膨張材を添加した場合、水和圧曲線の導出に際し、膨張圧の影響を避けられないため、適切な水和圧曲線を描くことができない。そのため、本考察では、膨張材を添加したセメントペースト（S0）も PL と同じ水和圧曲線を有すると仮定して検討を行う。また、前節に述べたように、材齢 24 時間以前の極若材齢において、自己収縮ひずみの収縮機構を水和圧理論で検証した事例がなく、材齢 1 日前後で自己収縮メカニズムが異なる可能性があるから、水和圧理論が適用可能と考えられる材齢 24 時間以降の自己収縮ひずみに対象を絞って検証した。

PL の調合において、実測データを用い、水和圧理論を適用させた水和圧曲線およびそれに近似させた回帰曲線が前節の図 3-37 に示した同じものを使用した。前に説明したように、図中の黒点は実験値であり、実線はそれぞれの近似曲線である。近似曲線の適用範囲は、図中に示す $18 < e < 36$ (Å) である。実験によって得られた膨張材を有するセメントペーストの水の吸着厚さの経時変化を温度別で整理した結果は図 3-51 に示す。

図 3-51 に示す水の吸着厚さデータおよび図 3-37 に得られた回帰曲線を使用し、図 3-50 に説明した手順で実施して、S0 の自己収縮ひずみ全体（図に、“-Total Strain” で示す）を膨張成分（図に、“-Expansion” で示す）および収縮成分（図に、“-Shrinkage” で示す）に分離した結果を図 3-52 に示している（参考のため、材齢 24 時間以前の全ひずみも併せて示す）。

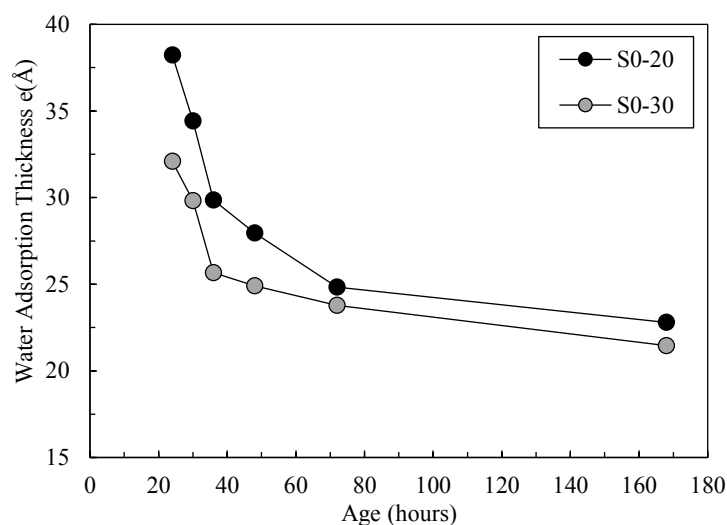


Figure 3-51 Water Adsorption Thickness of S0 Variation with Age

図 3-51 水の吸着厚さの経時変化 (S0)

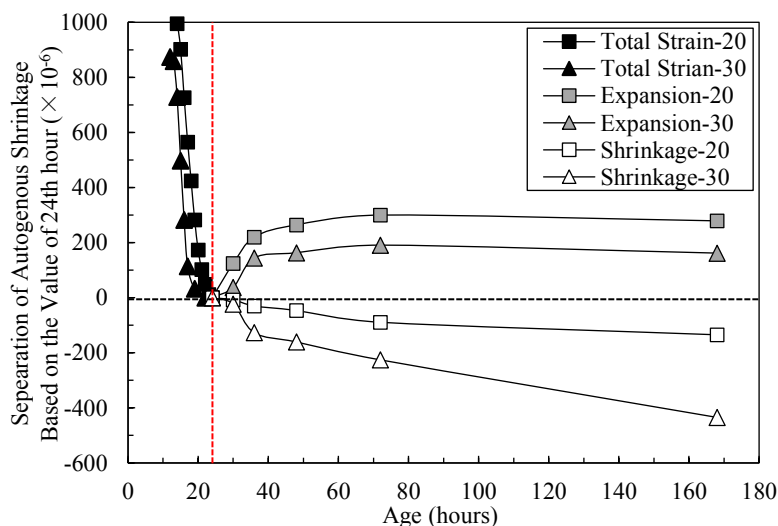


Figure 3-52 Separated Strain Components of S0 Variation with Age after 24 Hours

図 3-52 分離したセメントペーストひずみ成分の経時変化 (S0)

上記の方法で分離したセメントペーストのひずみ成分を用いて、複合則モデルによって各調合のモルタルのひずみ成分をそれぞれに推定して試みた。既往の研究^[49]に、超高強度コンクリートの自己収縮を対象とした Hobbs 複合則モデルの適用性に関する検討がされており、本検討は、まず、Hobbs モデルを用いてモルタルのひずみ成分を推定した。3.3.4 (4)節で述べた線膨張係数の推定式と同様に、Hobbs モデルのひずみ推定式を使用して推定を行った。各調合に対する推定したひずみの経時変化の結果は図 3-53 に示す。

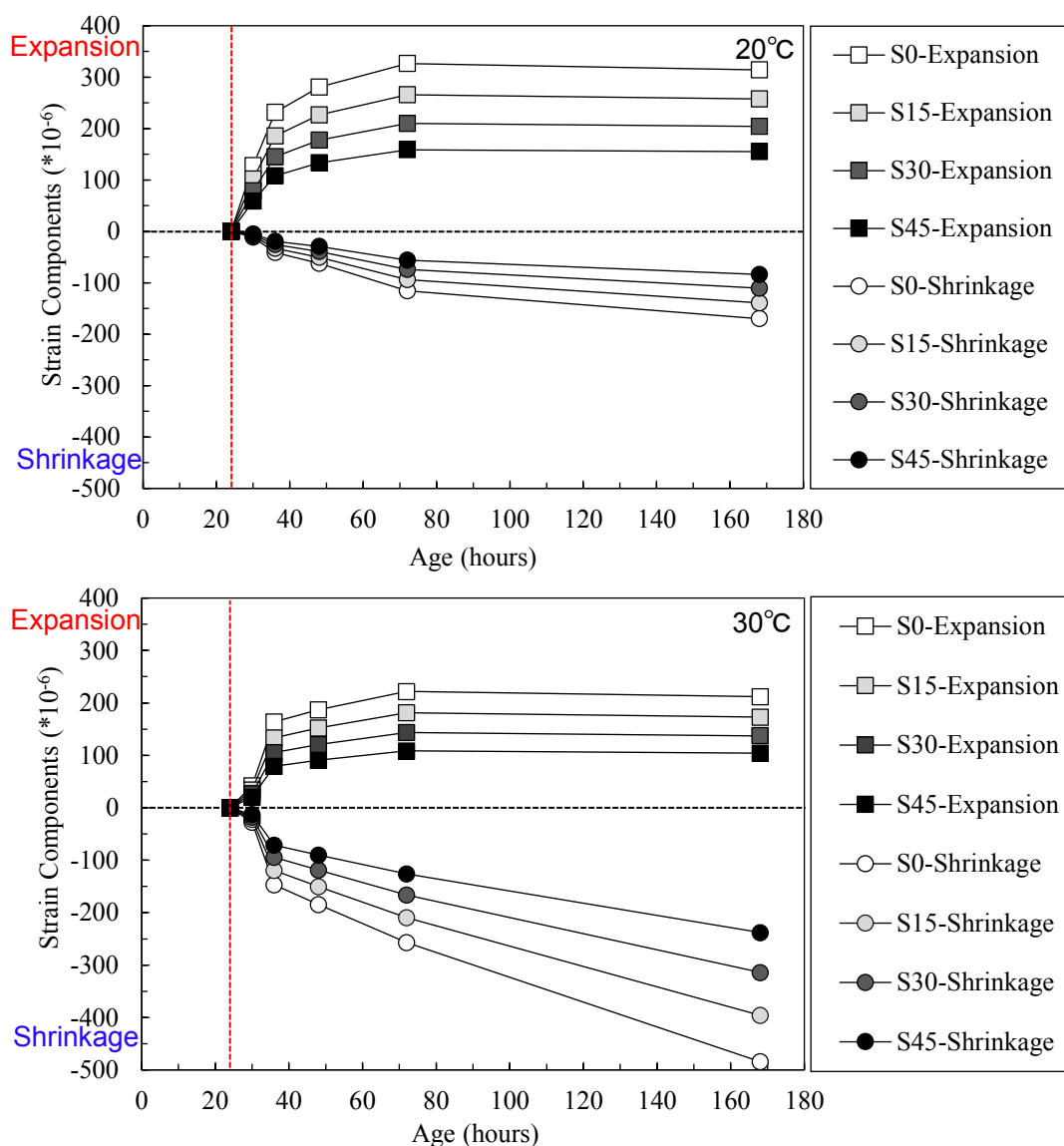


Figure 3-53 Estimating of Mortar Strain Components by Hobbs Model

図 3-53 Hobbs モデルによってモルタルのひずみ成分の推定

複合則モデルの推定に得られたモルタルの膨張ひずみ成分と実測によって得られたモルタル自己収縮ひずみ全体との差分をモルタル膨張ひずみ成分の計算値とした。各調査におけるモルタル膨張ひずみ成分の推定値と計算値が骨材の体積比との関係性を図 3-54 に示す。

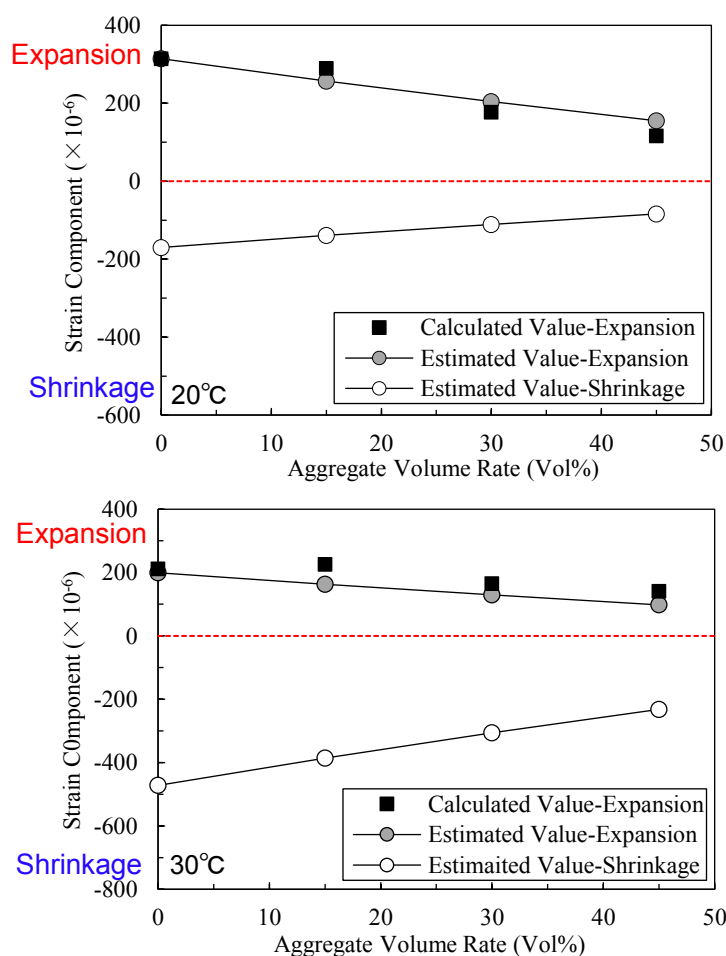


Figure 3-54 Relationship of Mortar Expansion Strain and Aggregate Volume Rate at Age of 7th Day (Hobbs Model)

図 3-54 材齢 7 日の自己ひずみと骨材体積率の関係 (Hobbs モデル)

図に示すように、いずれの温度条件においても、膨張ひずみの計算値と推定値は良く一致し、Hobbs モデルの適用性が確認された。このことから、収縮側の複合則モデルが成り立つと仮定した場合、膨張側の拘束効果に関しても、推定値と計算値が比較的良い一致を示し、骨材によるセメントペーストの拘束は、膨張時と収縮時に対してほぼ同程度の抑制効果を有していることを意味している。

以上の検討により、超高強度モルタルにおいて、Hobbs 複合則理論の適用性は確認した。更に、自己収縮ひずみに対して複合則理論の一般的な適用性を確かめるために、本研究は複数の複合則モデルを用いて上記と同様な作業を行った。

図 3-55 に示すのものは、表 3-7 にまとめた各複合則理論式を用いて、取得した全てのモルタル試験体の膨張ひずみ成分推定値と計算値の関係である。同図には 20°C と 30°C 両方の結果とも示している。また、各モデルを使用した場合の推定値と計算値の相関性を示すため、最小二乗法によって各モデルの決定係数を計算し、表 3-11 に示す。

図に示すように、使用したモデルによってはある程度の誤差が見られるものの、膨張ひずみの計算値と推定値は概ね良い相関を示している。

以上の検証より、本実験で用いた、膨張材を添加した超高強度セメントモルタルに対して、材齢約 24 時間以降の自己収縮ひずみは、膨張成分、収縮成分を含めて、ある一定の誤差範囲内において既存の複合則モデルを適用することが可能であった。

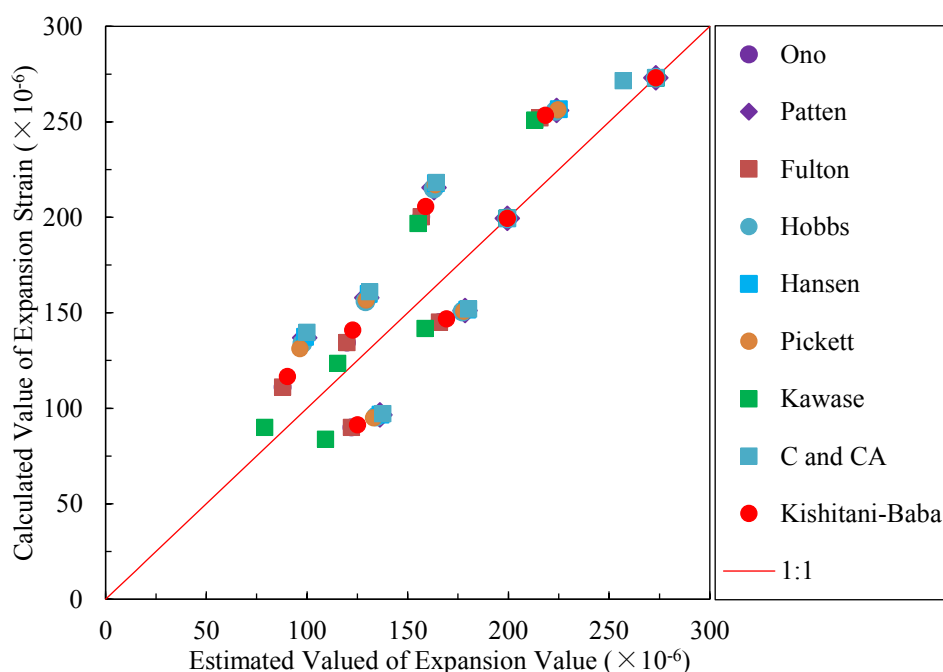


Figure 3-55 Relationship of Calculated Value and Estimated Value of Mortar Expansion Strain

図 3-55 膨張ひずみの計算値と推定値の関係

Table 3-11 Correlation of Estimated Value and Calculated Value of Mortar Expansion Strain

表 3-11 各モデルにおける膨張ひずみの推定値と計算値の R² 値

Model	R ² Value	Model	R ² Value
Kishitani-Baba	0.794	Pickett	0.704
C and CA	0.711	Patten	0.678
Kawase	0.879	Fulton	0.822
Hansen	0.669	Ono	0.822
Hobbs	0.696		

3.4 本章のまとめ

本章では、膨張材の使用によって高強度コンクリートの自己収縮低減機構を解明することを目的として実験的検討を実施した。

まず、異なる膨張材を使用した場合高強度コンクリートの自己収縮低減機構を解明する

上で、自己収縮低減効果に及ぼす膨張材種類の影響を確かめた。エトリングライト石灰複合型（CSA系）、石灰系早強性（石灰系）膨張材および収縮低減剤を添加した超高強度セメントペーストの若材齢体積変化を着目し、水の消費、剛性の発現および水和圧理論の観点から、二種膨張の自己収縮低減機構と低減効果の差異を検討した。得られた主な知見を以下示す。

- [1] 水結合材比 16.5%，膨張材を結合材の内割 3%を添加した場合、膨張材種類が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響は小さい。
- [2] 材齢 7 日まで自己収縮ひずみ低減効果について、収縮低減剤の有無によらず、石灰系膨張材は CSA 系膨張材より優れた自己収縮低減効果を有している。
- [3] 材齢初期 CSA 系膨張材を使用した場合は、セメントと膨張材の水和反応により比較的多い水分を消費し、剛性の発現に寄与する。剛性の発現が自己収縮を抑制することを考えると、材齢初期の自己収縮低減に CSA 系膨張材は効果的に働く。
- [4] 材齢約 24 時間以降において、水酸化カルシウムの生成が自己収縮低減効果に寄与し、エトリングライトと収縮補償量との間には明確な相関関係が確認されない。また、水酸化カルシウムによる自己収縮低減効果は、生成元の膨張材の種類によらない。

以上の知見を踏まえて、膨張材を使用した場合、高強度・超高強度コンクリートの収縮と膨張成分が併発している複雑な体積変化に対して、骨材の拘束効果の検討を実施した。石灰系早強性膨張材を添加した超高強度セメントペーストとモルタルを対象とし、複合則理論によって、若材齢の線膨張係数および自己収縮ひずみに及ぼす骨材体積比の影響を検討した。得られた知見が以下に示す。

- [5] 骨材はモルタルの線膨張係数および自己収縮ひずみの変化を拘束するが、線膨張係数と自己収縮ひずみでは、セメントペーストの体積変化に対する骨材自体の体積変化の割合に大きな差異があり、乾燥収縮や自己収縮に対して適用可能であった既存の複合則モデルは、線膨張係数に適用できないことがある。
- [6] 骨材は、膨張材による膨張およびセメントペーストの自己収縮を拘束し、膨張側・収縮側によらず、抑制効果がほぼ同程度であると明らかにされた。
- [7] 材齢約 24 時間以降の自己収縮ひずみは、膨張成分、収縮成分を含めて、ある誤差範囲内において既存の複合則モデルを適用することが可能であることを確認した。

第三章参考文献

- [1] 五味秀明：膨張材，コンクリート工学，Vol.26，No.4，p.32-36，1988
- [2] America Concrete Institute: Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete, ACI Committee 223, Feb. 1998
- [3] Q. Wang, Z. Ren and Z. Zhang: Study on the Delayed Ettringite Formation in Massive Shrinkage Compensating Concrete with U-Type Expansive Agent, Key Engineering Materials, Vol.477, pp.340-347, Apr. 2011
- [4] L. Mo, M. Deng, M. Tang and A. Al-Tabbaa: MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future, Cement and Concrete Research, Vol.57, pp. 1-12, Mar. 2014
- [5] F. Cao, M. Miao and P. Yan: Hydration characteristics and expansive mechanism of MgO expansive agents, Construction and Building Materials, Vol.183, pp.234-242, Sep. 2018
- [6] 堀田和宏：建築物のひび割れ抑制・補修技術の高度化に関する研究，広島大学学位論文，2015.2
- [7] 寺本篤史，丸山一平，三谷裕二，谷村充：低水結合材比シリカフュームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.601-606，2009.7
- [8] 寺本篤史，丸山一平：超低水セメント比シリカフュームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.634，pp.2069-2076，2008.12
- [9] 寺本篤史，宮治友也，丸山一平，鈴木雅博：超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.633-637，2007.7
- [10] 株式会社東レリサーチセンター HP X線回折 (X-ray Diffraction: XRD)，
http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/kouzou/kou_006.html
- [11] A.G. De La Torre, S. Bruque and M.A.G. Aranda: Rietveld quantitative amorphous content analysis, Journal of Applied Crystallography, Vol.34, pp.196-202, Feb. 2001
- [12] E.J. Sellevold, Ø. Bjøntegaard: Coefficient of Thermal Expansion of Cement Paste and Concrete: Mechanisms of Moisture Interaction, Materials and Structures, Vol.39, No.9, pp.809-815, Jul. 2006
- [13] S.L. Meyers: Thermal expansion characteristics of hardened cement paste and of concrete, Proceedings of the Thirtieth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C., January 9-12, 1951, pp.193-203
- [14] J. Carrillo, J. Ramirez and J. Lizarazo-Marriaga: Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities, Journal of Building Engineering, Vol. 23, pp.18-26, May 2019
- [15] 寺本篤史，五十嵐豪，丸山一平：硬化過程におけるモルタルの動弾性係数に及ぼす骨材量の影響に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp.132-139，2011
- [16] Y. Wehbe and A. Ghahremaninezhad: Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA)

- and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, Vol.138, pp.151-162, May 2017
- [17] W. Zuo et al.: Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol.100, pp.413-422, Oct. 2017
- [18] F.H.W Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford Services Ltd., 1997
- [19] J. Bensted and P. Barnes: *Structure and Performance of Cements*, 2nd edition, Taylor & Francis e-Library, 2008
- [20] 高橋俊之, 中田英喜, 吉田孝三郎, 後藤誠史: セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響, *コンクリート工学論文集*, Vol.7, No.2, pp137-142, 1996.7
- [21] 露木尚光, 笠井順一: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が共存した $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の水和挙動, *窯業協会誌*, Vol.90, No.10, pp.562-569, 1982
- [22] CEB-FIP: *MODEL CODE 1990 - Material properties*, Thomas Telford, 1990
- [23] 伊藤憲雄, 三橋博三, 桐越一紀: 養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, *コンクリート工学論文集*, Vol.15, No.1, pp.103-112, 2004.1
- [24] P.F. Hansen, and E.J. Pedersen: *Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete*, *Nordisk Betong*, No.1, pp.127-140, 1977
- [25] 日本コンクリート工学協会: *コンクリートの自己収縮研究委員会報告書*, 2002
- [26] K.L. Scrivner: *The Microstructure of Concrete*, in *Materials Science of Concrete*, 1st Edition, American Ceramic Society, pp.127-161, 1989
- [27] F.P. Glasser: *The Stability of Ettringite*, International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, 4-6 September 2002, Villars, Switzerland, pp.43-64
- [28] I. Maruyama, *Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration pressure*, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, pp.187-200, 2010
- [29] 寺本篤史: セメント系材料の水和反応に依存する体積変化に関する研究, 名古屋大学学位論文, 2012
- [30] B.V. Derjaguin: *A theory of capillary condensation on the pores of sorbents and of other capillary phenomena taking into account the disjoining action of polymolecular liquid films*, *Acta Physico-chimica URSS*, Vol. 12, No. 2, pp. 181-200, 1945
- [31] A. Scheludko, D. Exerova: *Colloid Chemistry*, Elsevier Publ. Co., 1966
- [32] 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.74, No.645, pp.1895-1903, 2009.11
- [33] 丸山一平, 岸直哉: セメント硬化体の収縮理論, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.74, No.642, pp.1395-1403, 2009.8
- [34] 丸山一平, 五十嵐豪: ポルトランドセメントの水和反応と水蒸気吸着試験による硬化体

- の比表面積, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.663, pp.865-873, 2011.5
- [35] 寺本篤史, 堀田和宏, 大久保孝昭, 丸山一平: 膨張材および収縮低減剤を使用した低水結合材比シリカフェ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
- [36] 吉岡昌洋, 梶田佳寛: せき板除去後のコンクリート中の水分移動に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.205-210, 2008.7
- [37] 仕入豊和: セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮の関係に関する実験研究, 日本建築学会関東支部第 30 回技術研究発表会, pp.13-16, 1961.6
- [38] 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, No.286, pp.125-137, 1979.6
- [39] 江口清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67, No.557, pp.15-22, 2002.7
- [40] 例えば, 川瀬清孝: コンクリートの長さ変化率の推定式, 日本建築学会論文報告集, p.28, 1996.10
- [41] 寺本篤史, 丸山一平, 五十嵐豪: 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材量および骨材寸法の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.48, pp. 37-40, 2010.2
- [42] 三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会, pp.128-129, 1978
- [43] T.C. Hansen: Influence of aggregate and voids on modulus of elasticity of concrete, cement mortar and cement paste, Road Research Laboratory, Proc. 62, No. 2, pp.193-216, Feb. 1965
- [44] 西沢紀昭: コンクリート用骨材, コンクリート工学論文集, Vol.5, No.7, pp.60-67, 1967.7
- [45] 徳田弘, 伊藤勉: コンクリートの熱拡散率におよぼす配合, フライアッシュ混和および粗骨材の石質の影響, セメント技術年報, 昭和 38 年 XVH
- [46] 徳田弘, 伊藤勉: 人工軽量骨材を用いたコンクリートの熱的性質について, 土木学会コンクリートライブラリー第 10 号「構造用軽量骨材シンポジウム」, 1964.5
- [47] D.W. Hobbs: Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.405-450, Sep. 1974
- [48] 日本建築学会: 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状, 日本建築学会, pp.14-18, 2013
- [49] 寺本篤史, 丸山一平, 谷村充, 三谷裕二: 超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.654, pp.1421-1430, 2010.8

第四章 膨張材の添加量が超高強度モルタルの自己収縮及び遅れ膨張に及ぼす影響

4.1 はじめに

第三章の検討によって、膨張材の使用による高強度コンクリートの自己収縮低減機構に関しては、材齢約 24 時間以降の期間に、膨張材の水和反応により生成した水酸化カルシウムが自己収縮低減に寄与し、その低減効果は生成元の膨張材種類によらないことが明らかになった。また、膨張材を使用した場合も、セメントペーストの自己収縮に対して、骨材は膨張側および収縮側にほぼ同様の拘束効果を与えることが、複合則理論による検討によって確かめられた。

膨張材の水和反応によって生成される水酸化カルシウムの量は、ある範囲内においては膨張材の添加量と相関関係にあるため、三章の検討より、多量の膨張材を添加することでより大きな自己収縮低減効果を得られるという知見は説明が可能になる。

しかし、多量の膨張材を使用した場合、長期的には膨張材の遅れ膨張によって亀甲状のひび割れが発生する事例が報告されている。

この遅れ膨張によるコンクリートの劣化は、エトリンガイト石灰複合型および石灰系早強性膨張材のいずれについても発生事例が確認されている。例えば、鈴木ら^[1]の研究では、水結合材比 15%、単位膨張材量が 35 kg/m³ (EX/B=3.4%) で材齢 100 日以上において、陣内ら^[2]の研究では水結合材比 15%、単位膨張材量 40 kg/m³ (EX/B=4.0%) の条件で 7 日間封緘後気中養生環境において、郭ら^[3]の研究では、水結合材比 16.5%、単位膨張材量が 40 kg/m³ (EX/B=4.3%) で 7 日間封緘後気中養生約 50 日後において、それぞれ遅れ膨張の発生が報告されている。

以上の条件から、郭らは、極めて水結合材比の小さいコンクリートに多量の膨張材を添加した場合、未反応の膨張材が残ったまま硬化し、硬化後、骨材内部から緩やかに供給される水によって膨張材が反応し、過度な膨張圧が生じた結果、ひび割れ等の劣化に発展するとの推測をしている^[3]。しかしながら、未反応膨張材および骨材からの水分供給のいずれについて定量的な検討を実施していない。

また、膨張材多量使用時の遅れ膨張と似たような劣化を示す現象として、遅れエトリンガイト生成 (DEF) が挙げられる。DEF 膨張は材齢初期に高温養生を行ったコンクリートにおいて、“数月から数年の時間を経てコンクリート内部で発生する硫酸塩がアルミネーと系水和物等と反応することにより、エトリンガイトを生成し、コンクリートの膨張劣化を引き起こす”^[4]というものであり、エトリンガイトが膨張圧の主な原因であるとされている。DEF に関するメカニズム研究は土木分野を中心に比較的多数実施されているが、膨張材の遅れ膨張については、発生機構、生起条件および影響因子など、まだ検討が不十分である。更に、DEF 膨張と膨張材の遅れ膨張と関連も不明である。

以上の背景および第三章の研究を踏まえて、超高強度コンクリートを材齢初期から長期にわたり、ひび割れ・劣化を生じさせない合理的な調合設計法を確立するためには、膨張材の最適使用量および、遅れ膨張の発生条件を明らかにすることが必要である。本章では、膨張材を比較的少量に使用した場合の膨張材による自己収縮低減効果を確認するとともに、膨張材の添加による有害な遅れ膨張が発生する条件を解明することを目的として、実験的検討を行った。また、膨張材の遅れ膨張と DEF とのメカニズムを比較して検討するため、DEF 膨張劣化の発生機構、生起条件および複数の影響因子に関する文献調査を行った。

4.2 コンクリートの硫酸塩劣化に関する既往の研究—遅延エトリングイト生成 (DEF)

セメント基材の水和反応によるエトリングイトの生成は、硫酸塩による膨張劣化の主な原因と考えられる^[5]。水和過程におけるエトリングイト生成時期によって、初期エトリングイト生成 (Early Ettringite Formation, EEF) と遅延エトリングイト生成 (Delayed Ettringite Formation, DEF) に分類される^[6]。水和反応開始の数時間以内に均一生成される初期エトリングイトは、セメント系材料の強度発現に貢献し、膨張性を持つため、マトリックスの収縮補償にポジティブな効果を発揮する^[7-9]。一方、セメント硬化体の剛性が十分に発現した (数週から数年) 後、マトリックス内部に局所的に生成された遅延エトリングイト (二次エトリングイト) は、過大な膨張圧を生じさせ膨張劣化を引き起こす。

コンクリートの硫酸塩劣化は、硫酸塩が提供されるソースによって呼称が異なり、周囲環境から硫酸イオンが RC 構造物内部に浸透することで引き起こす外部硫酸塩劣化 (External Sulphate Attack, ESA) および、セメント中の SO_3 あるいは石膏や特殊な骨材から硫酸イオンが提供されることで引き起こす内部硫酸塩劣化 (Internal Sulphate Attack, ISA) に分類されている^[6]。DEF は、ISA の一種であり、コンクリートが高温履歴を経た場合に、初期エトリングイトが熱分解されて硫酸イオンとなり、その後の反応によりエトリングイトを再生成するプロセスを指す^[8-12]。すなわち、硫酸イオンは外部からの供給なしに生じる^[11]。

膨張材の遅れ膨張は封緘養生でも生じている結果が報告されていることから、ISA に近い機構が生じている可能性がある。よって本節では、DEF に関する既往の研究を調査し、DEF 膨張機構、生起条件および影響要因に関する知見をまとめる。

4.2.1 DEF 膨張の発生機構

(1) セメントペースト均一膨張説とエトリングイト結晶成長説

DEF 膨張が発生するメカニズムに関しては、従来、(I)セメントペーストの均一膨張説^[13] および (II) エトリングイト結晶の成長圧説^[14] という二つが提案されている。提案された仮説の比較を表 4-1 に示す。

セメントペースト均一膨張説は、セメントペースト内部に生成させたエトリングイトがセメントペーストマトリックスに均一膨張を生じさせ、コンクリートの膨張を引き起こすという主張であり、結晶成長圧説は、骨材とセメントペーストの界面の限られた空間 (ギャップ) に生成されたエトリングイトの結晶の成長によって、膨張応力を引き起こされ、ギ

Table 4-1 Hypothesis of DEF Expansion Mechanism

表 4-1 DEF 発生機構の仮説

Hypothesis	Homogeneous Paste Expansion	Ettringite Crystal Pressure
References	[13,15-17]	[14,18-21]
Summary of Hypothesis	Ettringite crystals generated in cement paste lead to the homogenous expansion and cause cracks at the interface between cement paste and aggregate.	The growth of ettringite crystal, generate in restricted space (gap) between aggregate and cement paste, exerting expansive stress and widen the width of gap lead to expansion.
Conceptual Diagram		
Experimental Basis	Width of the gap around aggregates is almost always directly proportional to the size of the aggregate.	The interface between aggregate and cement paste is the critical site where ettringite recrystallizes and thus generates expansive pressure.
Controversy and Criticism	Expansion model is oversimplification and the gaps are part of the cracks in cement paste [22].	Interface of aggregate and cement paste is not necessary and the DEF-related expansion also occurred in neat cement paste [23].

ギャップの幅を広げることで膨張が生じるものである。

Diamond^[22]はセメントペーストそのものが均一ではないため、均一な膨張を生じさせることは不可能であり、セメントペースト均一膨張説は合理的ではないとした。逆に、結晶成長圧説では、骨材とセメントペーストの界面が DEF 膨張の発生に重要であると強調されているが、セメントペースト単体の試験体でも DEF が観察されている現実を解釈できなかった^[23,22]。そのため、既存の仮説のいずれも、決定的な説明を行うことはできておらず、引き起こす DEF のメカニズムに関する論争が継続されている。

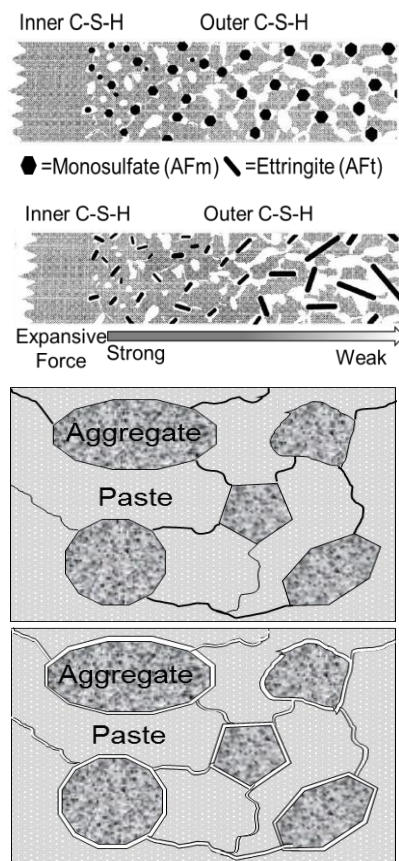
(2) 既存仮説に基づく発展

既存の仮説に基づく DEF 膨張に関する検討は多数行われている^[24-26]。複数の研究で合意されている点は、セメントペースト膨張説とエトリンガイト結晶の成長説が併せて発生し、

DEF 膨張を引き起こす^[27,11,28]というものである。この複合仮説の概念図を図 4-1 に示す。

この仮説で提案した DEF 発生機構を以下に示す。

- (I) 高温養生後前生成したエトリンガイトが、モノサルフェート (AFm) 類に分解し、放出された SO_4^{2-} が C-S-H に吸着されて、その後緩やかに空隙溶液に溶出される。
- (II) 常温養生に回復した後、外部 C-S-H 中の小さな細孔に存在するモノサルフェートが (I) に放出された SO_4^{2-} との in-situ 反応が発生し、エトリンガイトが再生成する。エトリンガイトが過飽和になってから、限られた空間 (外部 C-S-H) にエトリンガイト結晶が生じることおよび結晶の成長に伴い、結晶圧が発生し、セメントペーストの膨張を引き起こす。
- (III) セメントペーストの膨張によって、セメントペーストと骨材が分離し、骨材との界面に隙間が生じる。
- (IV) 骨材とセメントペーストの界面にエトリンガイト結晶が生成し、結晶の成長により隙間が充填される。



(I) Directly after heating, initial ettringite deposits into AFm and SO_4^{2-} elute to the pore solution.

(II , III) During high-humidity storage, AFm and SO_4^{2-} react in pore solution forming ettringite crystals in outer C-S-H. With the supersaturation of AFt in limited space (outer C-S-H), AFt crystallize and crystals grow up that generate large expansive pressure, resulting expansion cracks in the cement paste.

(IV) Gaps caused at the interface of aggregate and matrix, widened by fulfilled ettringite crystal that regenerate in the after stage.

Figure 4-1 DEF expansion mechanism proposed by Famy ^[27]

図 4-1 Famy 提案された DEF 膨張機構^[27]

以上のように Famy は、セメントペーストの均一膨張によって骨材との界面に隙間を引き起こして、エトリンガイト結晶の生成場所を提供するため、結晶の成長が膨張に促進効果を与えるものの、全体の膨張はセメントペーストに生成されたエトリンガイトが生じさせると考えた^[27]。

また、複数の研究報告において、DEF 膨張機構に対して、エトリンガイト結晶の形態、生成する場所、セメントペーストの内部構造（空隙分布とサイズ）および C-S-H の特性は重要な役割を果たすことが報告されている。

Yan らは、高温履歴有した温度プログラムで養生したモルタルの体積変化とエトリンガイト生成量の経時変化との比較検討した結果より、エトリンガイトの生成量は膨張量と相関がなく、結晶の形態が膨張に寄与すると推測した^[29]。他の研究^[30,31]研究も、pH が低い環境で生成させ、サイズが大きなエトリンガイト結晶は、膨張の発生に寄与せず、pH が高い環境で、針状(棒状)結晶が多量に生成されることで膨張が引き起こされるとしている。エトリンガイト結晶の形態は、形成条件(温度、湿度)および存在環境(スペース、空隙溶液成分)の相違により異なる。また、結晶の変化(形状、体積、組成原子比)は DEF 膨張に寄与する。

上記の膨張機構の仮説以外にも、コンクリート（セメントペースト、モルタル）系内に存在する空隙、例えば、ペーストと骨材表面の隙間、ペースト内部の空隙、微細ひび割れ等が、水分の移動に伴うイオンの移動を容易にし、反応の進行を促進させると推察される。また、より大きい空間がある場所に、エトリンガイト結晶の生成および成長は容易である。

Fu らの研究によると、DEF によるマクロな膨張は、既存クラックの拡大な結果であり、エトリンガイトが既存のクラックの中で優先的に核を生成し、成長することがクラックの拡大の一因と考えられた^[32]。新しいクラックを起こして、結晶が成長することより、既存クラックに結晶の生成および成長は、必要なエネルギーが小さいため、膨張を引き起こしやすい^[33]。この観点に関しては、複数の研究も、乾/湿繰り返し、凍結/融解循環あるいは ASR 等 ASR によって引き起こしたマイクロクラックのは、膨張の発生を促進する結論を挙げられた^[10, 34-35]。一方、Tosun の研究より、ある範囲において、比較的大きい既存クラック（空隙）が膨張を促進させることに對し、クラック（空隙）が大きすぎると、エトリンガイト結晶は空隙を充填されておらず、膨張を引き起こさないことも挙げられた^[21]。

これらの観点によって、空隙に生成するエトリンガイトが膨張に寄与するの否かは、空隙のサイズあるいは隙間の幅に大きく相関すると考えられる。現状、コンクリート系内の既存の空隙が DEF 膨張の発生を促進し、最終膨張量を象出させることが明らかにされた。しかし、既存の空隙のサイズと DEF 膨張との関連性は以前不明であり、大きな課題の一つである。

Famy の研究において、常温環境に戻った後、C-S-H に吸着された SO_4^{2-} イオン空隙溶液への放出がエトリンガイト再生成の必要条件であることが分かる^[27]。 SO_4^{2-} イオン移動の駆動力、C-S-H に吸着された硫酸塩と空隙溶液中 SO_4^{2-} イオン濃度差である。

これらの観点から見ると、C-S-H は DEF 膨張に役割を果たすと考えられる。文献^[36]には、

C-S-H の化学(原子)組成が養生温度に依存し、高温条件で生成された外部 C-S-H が硫酸塩に対してより大きな親和性を有し、熱養生直後多量の SO_4^{2-} イオンを吸着させることが明らかにされた。同様に、複数の研究において、C-S-H に吸着された硫酸塩量は温度に依存し、 60°C 以上の養生で生成させた C-S-H には、比較的多い SO_4^{2-} イオンが吸着していることが報告されている^[15,37-39]。

C-S-H は初期エトリンガイトの熱分解に放出された硫酸塩イオンの存在場所を提供するため、DEF が生じる前提条件として、C-S-H が必要であると示している^[27]。また、養生温度の変動による内部構造の変化は、硫酸イオンの吸着と放出プロセスに影響を及ぼす^[36]。

以上の調査によって、DEF の発生は、エトリンガイトが膨張に寄与していることが分かっているものの、複雑な化学・物理プロセスの複合作用の結果が影響を及ぼしあう。

4.2.2 DEF 膨張の発生条件及び影響要因

セメント系材料において、エトリンガイトの遅延生成（二次生成）に相関する主な化学変化は、初期エトリンガイトの生成と熱分解、その後の給水によるエトリンガイトの再生成である^[11]。このことから、セメント系材料において DEF 生じる条件^[11,6,40]としては、

- (I) 十分な量の SO_3 を含有すること（初期エトリンガイト生成）、
- (II) ある程度的高温養生を経験すること（エトリンガイト熱分解）、
- (III) 十分な量の水を供給されること

が挙げられている。更に、それぞれの必要条件に影響を及ぼす内外因子、例えば、セメント成分組成、高温温値と養生時間、環境の相対湿度などが DEF 膨張の発生および膨張量の発現に影響を与えると考えられる。既往の研究に提示された DEF の発生条件および影響因子をまとめて図 4-2 に示す。本節では、図 4-2 にしめした要因による DEF 膨張の影響を具体的に説明する。

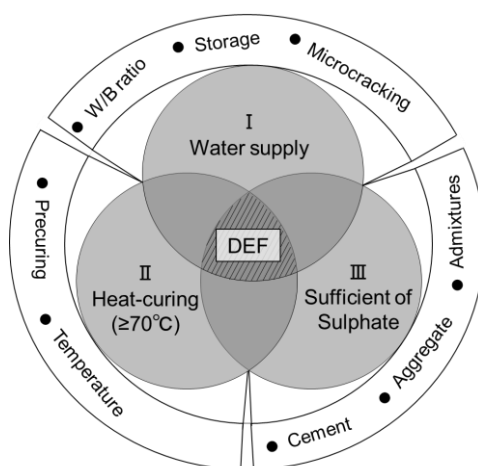


Figure 4-2 Conditions and Affect Factors on DEF

図 4-2 DEF の生起条件および影響因子

(1) セメント特性と DEF

セメントの化学組成について、SO₃の含有率は初期エトリンサイト生成に直結するため、DEF膨張挙動に寄与すると考えられている。複数の研究でも、セメント中のSO₃含有率がDEFに及ぼす影響が強調されている。既往の研究によって得られたセメント中SO₃含有率とDEF膨張率の関係を図4-3にまとめる。

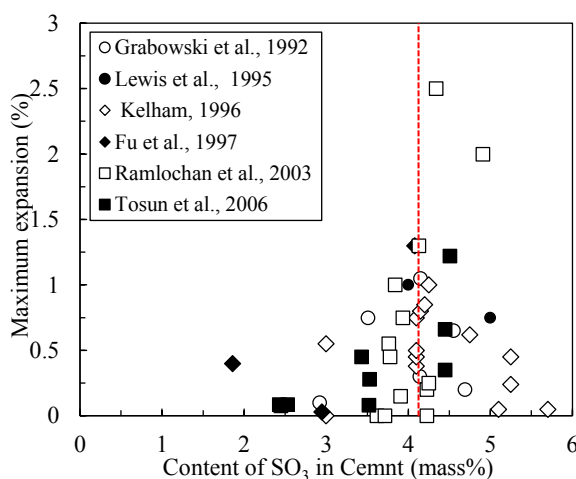


Figure 4-3 Relationship of Maximum DEF Expansion and Content of SO₃ in Cement

図 4-3 DEF 膨張量とセメントに SO₃ 含有率の関係性^[16,41-45]

図 4-3 から分かるように、研究者によって、データのばらつきがあるが、SO₃含有率が小さい場合は、最大膨張量が小さいこと、SO₃含有率が增大するほど、膨張量が増加するわけではなく、DEF膨張量に対して、SO₃量はペシマムを有していることが分かる。その原因としては、SO₃が少ない場合、十分なエトリンサイトが生成できないこと、含有量の多い場合には、高温養生後、多量生成したエトリンサイトが高温履歴後分解しないで残るため、DEFに寄与しないと見解がある^[11]。

一方、ほかの研究では、SO₃含有率ではなく、SO₃/Al₂O₃モル比がDEF膨張に影響を与えている^[45]。図 4-4 に、既往の研究で得られたデータからセメントに含まれたSO₃/Al₂O₃のモル比とDEF膨張量の関係性をプロットした結果を示す。この図より、DEF膨張量とSO₃/Al₂O₃モル比の相関関係を確認できる。具体的にはSO₃/Al₂O₃モル比が1.1に達した時に、膨張量が概ね最大値になることが見られる。SO₃/Al₂O₃モル比が1.1から離れほど膨張量は小さくなる。SO₃/Al₂O₃モル比のペシマム^[23,46,47]が存在する理由としては、前に述べたSO₃含有率と同様に、Al₂O₃が少ない場合、エトリンサイト生成量が小さく、Al₂O₃の過量存在する場合には、エトリンサイトがモノサルフェートに転換するため。更に、HeinzとLudwigらの研究で、(SO₃)²/Al₂O₃はDEF膨張に影響があり、2.0という「安全値」以下である場合は、DEF膨張が発生するリスクが小さいと指摘されている^[19]。

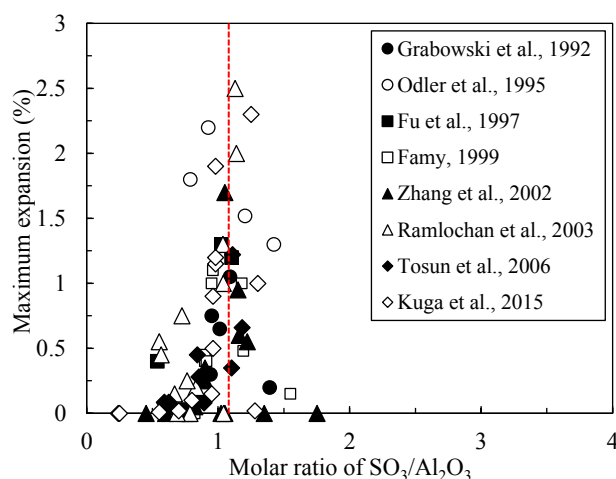


Figure 4-4 Relationship of Maximum DEF Expansion and $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar Ratio of Cement

図 4-4 セメントの $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比と DEF 膨張量の関係^[41-46,27,49]

DEF 膨張に及ぼすセメント化学成分の影響では、 SO_3 、 Al_2O_3 だけではなく、 CaO や MgO 、アルカリ含有率および、クリンカー成分の C_3S 、 C_3A 等の物質も DEF 膨張に影響を与えていると報告されている^[16,20,42,50,51]。一方、DEF 膨張に及ぼすセメント材料の影響に関しては、セメント粒子のサイズ、つまり、セメントの比表面積が重要な影響を与えるとされている。複数の研究で、セメントの比表面積の大きい程、DEF 膨張量が大きくなるという見解が挙げられている^[43,43,45,52]。本件については、比較的大きな比表面積を有するセメントを使用した場合、より緻密な内部構造が生成されるため、エトリングタイトの生成がより大きな膨張圧を生じさせ、膨張量が大きくなるといった仮説^[52]。

(2) 骨材特性と DEF

セメントと同様に、骨材自体の物理、化学性状や寸法もコンクリートの DEF 膨張性状に影響を与えられている。

Grabowski らは、骨材の種類がコンクリートの DEF 膨張に及ぼす影響を与えると報告した^[41,32]。特に、石灰石系骨材を使用した場合、DEF 膨張の発生を遅延、または完全に抑制できると報告している。骨材種類の影響に関して、Fu の研究では、クォーツ系骨材を使用したモルタル試験体に、比較的大きな膨張が発生したことを指摘された^[32]。そのほかにも石灰石系骨材が DEF 膨張を抑制させ、クォーツ系骨材の使用は膨張を助長させることが、複数の研究において明らかにされた^[53,54]。原因は以下の二点が挙げられている。

- (I) クォーツ系骨材が比較的大きな線膨張係数が有するため、高温養生においてより大きな温度変形が生じ、セメントペーストと骨材界面に大きな隙間を引き起こし、イオンの移動が促進させる。その結果は、DEF 膨張の発生が促進され、膨張量も大きくなる^[53]。
- (II) 石灰石系骨材の表面が比較的精粗いため、セメントペーストとの結合が強化され、より緻密な遷移帯を生成させた結果は、イオンの移動を遅延させし、セメントペー

ストと骨材の界面を広げる必要な応力も増加させるため、DEF 膨張の発生および膨張量の発現を抑制する^[54]。

また、既往の研究には、骨材のサイズあるいは骨材粒子の比表面積は DEF 膨張に著しく影響を与えると報告されており^[20,53,55]、大きな比表面積を有する骨材の使用が、大きな DEF 膨張を引き起こすと明らかにされた。その理由として、大きな比表面積を有する骨材を使用する場合は、セメントペーストと骨材の界面の量が増加されて、セメントペーストとの界面に、空隙溶液中のイオンが移動しやすくなるため、DEF 膨張の発生を促進させると推察されている。

なお、DEF 膨張に及ぼす骨材の影響は、ASR を含めて検討する必要がある。反応性を有する骨材を使用した場合、ASR の発生が DEF 膨張に促進効果を与えることが報告されている^[53,51]。ASR が DEF に及ぼす影響に関しては、ASR の発生によって、コンクリート内部に初期クラックが生じ、イオンの移動を促進することによって DEF 膨張の発生を促進させるといった物理的な影響^[57]、および、ASR の発生に伴う溶液中アルカリイオンの消費が、エトリンガイトの結晶プロセスを促進させる^[58]ことによって、DEF の発生を促進させるといった化学的な影響^[36]の両側面から、DEF の発生を促進させる。

(3) 水結合材比と DEF

Siedel らの研究において、遅延生成されたエトリンガイト量および結晶形態は W/C の影響を受けることが明らかにされた^[59]。W/C が 0.35 の場合と比較して、W/C が 0.65 のコンクリートは、遅延エトリンガイト生成量が大きいと確認された。また、W/C が 0.65 の試験体には、C 軸が骨材表面と垂直する針状エトリンガイト結晶が生成し、W/C が 0.35 の方は、C 軸が骨材表面と平行する板状結晶の存在が SEM 観察による確認された。結晶の C 軸が最も成長し易い軸であるため、W/C が 0.65 の方が結晶の成長による大きな膨張を引き起こす可能性があると推測された^[59]。

一方、W/C が大きくなるほど、DEF 膨張の発生が促進されるものの、最終膨張量は減少するという結果も報告されている^[20,23]。大きな W/C が有するコンクリートは内部の空隙率が大きいため、コンクリート材料の浸透性が大きくなり、水分移動に伴う反応性イオンの移動を容易にし、膨張の発生を促進する。しかし、内部空隙率が大きい場合、エトリンガイトの結晶圧が小さくなり膨張量が低下するといわれている。

以上の議論によって、コンクリートの W/C は、セメントの水和反応に直接影響を及ぼし、コンクリート材料の内部構造（細孔サイズ、空隙率等）を変化させ、DEF 膨張挙動に影響効果を与える。しかし、この観点の詳細的な検討が少なく、例えば、空隙のサイズと DEF 膨張の関係性を定量的に検証した研究がほとんどない。

(4) 温度条件と DEF

DEF に及ぼす養生温度の影響は、エトリンガイトの熱分解に影響を与える。エトリンガイトの熱安定性については、多数の研究が行われており、熱分解の臨界温度値が提案され

ているが、存在する環境の温度、乾燥状況、pH、気圧などの条件によって、エトリンガイトの熱安定性は異なる^[60-64]。セメント系材料において、複雑な水和反応による系の温度、水分状況、pH 条件が複合的に変化しているため、その環境におけるエトリンガイトの熱安定性を把握することは困難である。

既往の研究で得られたデータをまとめ、整理した養生温度と DEF 膨張量の関係を図 4-5 に示す。

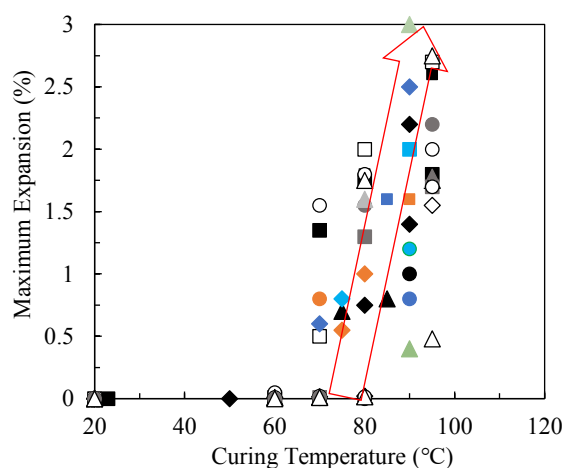


Figure 4-5 Relationship of Maximum DEF Expansion and Curing Temperature

図 4-5 DEF 膨張量と養生温度の関係

図に示すように、ほとんどの研究において、70°C以下温度で養生された試験体には、著しい膨張が観察されておらず、70°C以上の場合、温度が大きい程、最終膨張量が大きくなる傾向が見られる。その原因として、(1) 高温状態において、初期エトリンガイトの分解率が大きくなり、遅延エトリンガイトの生成に必要な SO_4^{2-} イオンが多量に提供できる^[65]こと、(2) 養生温度が高くなるほど、セメントペーストの多孔性が大きくなり^[66,67]、 SO_4^{2-} イオンの移動を促進させるため、エトリンガイト生成に促進効果を与えること、(3) 高温養生により C-S-H の内部構造と化学組成が変化し、高い密度がある内部 C-S-H (Inner C-S-H) が多量に生成され、 SO_4^{2-} イオンがトラップされる場所を提供し、後期のエトリンガイト再生成に必要な SO_4^{2-} イオンを放出できる^[67,68]との推察が挙げられている。

また、高温養生温度値だけでなく、常温での前養生時間も DEF 膨張に影響を与える^[40]。常温前養生時間が短い場合は、水和により生成される C-S-H 量が不足するため、高温養生段階に分解された SO_4^{2-} イオンの保留場所が少なく、エトリンガイト再生成に不利である。逆に、前養生が長い場合、石膏がなくなるほど、初期エトリンガイトは C_3A と反応して熱に安定するモノサルフェート相に転換する結果は、その後の高温養生段階に分解させるエトリンガイトが少なくなり、DEF に必要な SO_4^{2-} イオンの放出が減少されること^[40]が挙げられている。

(5) 湿度条件と DEF

前に述べたように、DEF 膨張発生条件の一つとして、水分の提供があり、DEF 膨張は、コンクリート系内あるいは外部環境の含水状況に相関すると考えられる。

一般的に、DEF による膨張劣化は環境の相対湿度の増加に従って増大すると認識されている^[23,69]。これは、相対湿度の大きい程、エトリンガイト再生成に必要な水が容易に供給されることおよび、水分の移動による SO_4^{2-} イオンの溶出を促進させるため、DEF 膨張の発生を促進させるためと考えられる。

DEF 膨張を抑制するため、膨張を引き起こす相対湿度の閾値を確かめる実験が行われているが、実験に採用された試験体寸法の相違によって、同一な相対湿度の閾値を決められていない^[70,71]。試験体寸法に応じて、硫酸イオンの溶出量と速度が異なるため、同じ湿度条件であっても、DEF 膨張挙動が異なるためである^[71]。そのため、単純な実験によって DEF 膨張を生じさせる相対湿度の閾値を確かめることは現状困難である。

以上の文献調査によって、DEF 膨張発生する基本条件としては、

- (I) 材齢初期の高温履歴養生、
- (II) 十分量の硫酸塩を有する、
- (III) 十分量の水分供給が必挙げられた。

一方、高強度コンクリートを対象として膨張材の遅れ膨張は、

- (I) 初期高温養生履歴を受けてない場合にも生じる、
- (II) 水結合材比が極めて小さいコンクリートにも発生する、
- (III) 外部から水分供給を要しない、といった点で、DEF とは発生条件が明確に異なる。

しかし、両者はいずれもコンクリートの硬化後に膨張性水和物が生成し、過度な膨張圧によりコンクリート組織を破壊するという点では一致している。また、膨張材には、一定量の硫酸塩が含まれていることから、DEF 膨張と同様の条件で遅れ膨張が発生する可能性も考えられる。そこで 4.3 節では、膨張材の遅れ膨張と DEF との関連性を理解するための条件を設定した実験を実施することとした。

4.3 実験概要

本実験では、エトリンガイト石灰複合型膨張材の添加量をパラメータとして複数の超高強度モルタル試験体を作製し、膨張材の添加率が自己収縮低減効果に及ぼす影響について検討するとともに、膨張材の添加量と長期的な養生条件がその後の遅れ膨張の発生条件に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。シリーズ 1 は、材齢 7 日以前の自己収縮低減効果に関する試験であり、シリーズ 2 は 7 日以降の養生条件が遅れ膨張に及ぼす影響に関する検討である。

4.3.1 実験材料及び調合条件

本実験に使用した材料は、第三章の実験に使用された材料と同じである。セメントでは、ベース中庸熱ポルトランドセメントに対して 10%のシリカフェームを添加して造られたシ

リカフュームプレミックスセメント（記号：SFPC）を使用した。XRD/リートベルト解析によって得られた SFPC の鉱物組成成分が表 4-2 に示す。また、膨張材には低添加型エトリンガイト複合型膨張材（CSA 系膨張材，記号 EX）を使用し，その化学組成成分は表 4-3 に示している。

Table 4-2 Mineral Composition of Base Cement in SFPC Acquired by XRD/Rietveld Analysis

表4-2 XRD/リートベルト解析によって得られたベースセメントの鉱物組成

Mineral Composition (mass %)				
Base Cement in SFPC	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
		44.2	37.4	3.05

Table 4-3 Composition of Ettringite-lime Composite Expansive Additive [72]

表4-3 エトリンガイト石灰複合型膨張材の化学組成 [72]

EX	Chemical Composition (mass%)					Mineral Composition (mass %)					Ig.loss
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	CaO	f-CaO	C ₄ A ₃ Ŝ	CŜ	C ₂ S	C ₄ AF	
	1.8	0.9	5.4	19.6	67.0	45.4	9.2	31.4	8.0	3.3	

調合条件は，すべての調合で水結合材比を 16.5%とし，膨張材の添加率は結合材質量に対して内割で 3%，4%，5%，7%の 4 水準（試験体記号：EX3，EX4，EX5，EX7）とした。本実験で使用した膨張材について，メーカーが実験結果^[73]に基づき，普通コンクリートの乾燥収縮を抑制する目的に対する基準単位添加量を 20 kg/m³推奨している。水結合材比が 16.5%のような超高強度コンクリートの単位セメント量は概ね 1000 kg/m³程度であり，既往の研究では，30kg/m³（EX/B=3%）実用におけるほぼ上限値と認識されている。本研究では，自己収縮低減効果を向上できる膨張材の最適使用量を確認するため，現状の膨張材使用上限量より多い添加率（3%，4%，5%，7%）を設定して実験的検討を実施した。

また，膨張材の遅れ膨張の発生条件が DEF と類似している場合，膨張材添加率が大きい程，結合材中 SO₃ 含有量は増加する。よって，DEF が発生した事例^[23,42,46]の SO₃ 量と同程度の水準に設定することも，本実験で多量に膨張材を使用する目的の一つである。

更に，DEF によるひび割れは骨材とセメントペーストの界面に多く見られることから，セメントペーストよりモルタルの方が遅れ膨張によるひび割れを誘発しやすい^[71]と考えられる。そのため，材料全体体積に対して内割 30%（質量含有率 53.4%）の砂（東広島市黒瀬町産）を使用して，モルタル試験体を作製した。モルタルの流動性を確保するため，すべての試験体は結合材質量に対する 3.1%のポリカルボン酸系高性能減水剤（記号：SP）を添加した。調合計算する時，SP 質量の 30%を固形分，70%を水分として扱った。

本実験に使用した材料の物理特性を表 4-4 に，モルタルの調合条件を表 4-5 に示した。また，各膨張材添加率時の結合材全体に対する SO₃ の含有率についても，表 4-5 に併せて

示している。

Table 4-4 Physical Properties of Materials

表 4-4 使用した材料の物理特性

Materials	Symbol	Physical Properties
Cement	SFPC	Silica Fume Premixture Cement Density: 3.04g/cm ³ , Specific Surface Area: 6690cm ² /g
Expansive Additive	EX	Ettringite-lime Composite Expansive Additive Density: 3.05g/cm ³ , Specific Surface Area: 2840cm ² /g
Fine Aggregate	S	Crushed Sand Density: 2.61g/cm ³ , Water Absorption Rate: 1.07%
Water	W	Tap water
High Performance Water Reducing Agent	SP	Polycarboxylate Based Superplasticizer

Table 5 Details of Mortar Mixtures

表 4-5 モルタルの調合条件

Symbol	W/B (mass%)	EX/B (mass%)	S/(S+B+W) (Vol%)	SP/B (mass%)	Total Content of SO ₃ (mass%)
EX3	16.5	3	30	3.1	2.20
EX4		4			2.37
EX5		5			2.54
EX7		7			2.88

4.3.2 自己収縮に関する実験（シリーズ 1）

シリーズ 1 の自己収縮試験では、埋め込み型ひずみを使用してモルタルの水和によって生じる一軸長さ変化量の測定実験を行う。40mm×40mm×160mm の型枠を用いて、モルタル試験体を作製した。

試験体長軸方向の自由変形を確保するため、型枠の両端にスチレンボード（厚み：3mm）を設置し、底面には摩擦の影響を除くためテフロンシート（厚み：1mm）を設置した。そのため、モルタル供試体の実際寸法は 40mm×39mm×154mm であった。また、試験体は全面をポリエステルフィルムで覆うことで、乾燥および摩擦の影響を極力少なくした。本シリーズにおける試験体の概要を図 4-6 に示す。

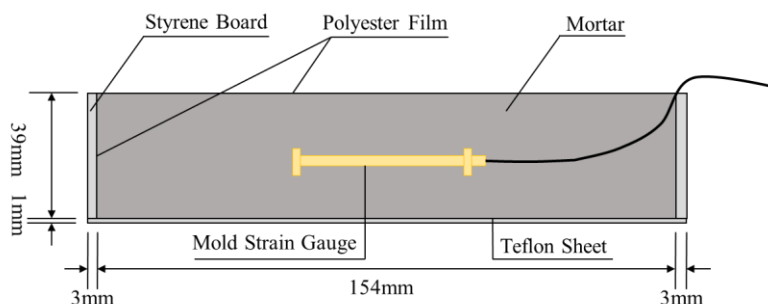


Figure 4-6 Outline of Specimen for Length Measurement

図 4-6 長さ変化測定用試験体の概要

測定用埋込ゲージは、エンジニアリングプラスチック製埋め込み型ひずみ計 (KM-50F 型, 標点距離: 50mm) である。測定許容温度範囲は、 -20°C ~ $+60^{\circ}\text{C}$ であり、測定ひずみ制限値は ± 5000 ($\times 10^{-6}$) であるため、本実験の 20°C および 40°C で養生した試験体に使用する。試験体は、同一の調合条件について、 20°C および 40°C の条件それぞれ各 9 体を作製した。なお、本章ではそれぞれの養生温度の試験体記号の末尾に“-20”, “-40”を付けて表記する。また、DEF 膨張と比較し、膨張材の遅れ膨張機構を解明するため、高温養生を行う試験体も作製した。遅れ膨張実験に使用する高温養生の試験体は、 90°C 高温槽に 7 日間の養生を実施するため、試験体の作製は上記と同じ方法であるが、埋め込み型ひずみゲージは用いず、高温養生後にメタルベースゲージを貼り付けることで、長期的なひずみ計測のみを実施した。材齢初期に 90°C 高温を与えた試験体の記号に“-90”を付けて表記する。

シリーズ 1 の測定実験は以下の手順に従って実施した。シリーズ 1 で行った主な実験風景を図 4-7 に示す。

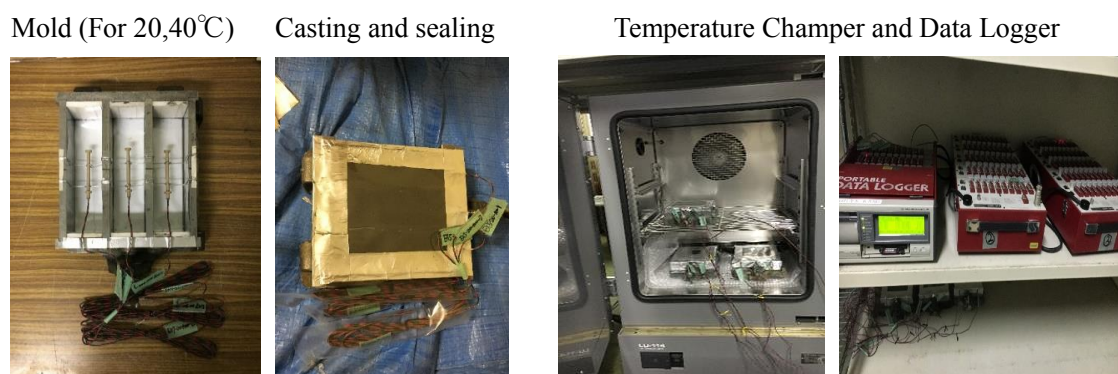


Figure 4-7 Landscape of Main Processing of Series No.1

図 4-7 シリーズ 1 における主な実験風景

- ① 型枠にテフロンシートと端部のスチレンボードおよびポリエステルフィルムを設置した後、 20°C と 40°C 用型枠の中心に埋め込み方ひずみ計を固定した。 90°C 養生用の型枠に

埋め込み型ひずみ計を設置していない。

- ② モルタルの練り混ぜは、まず、セメントと膨張材を混和して、ホバート型ミキサによって、低速で 30 秒の練りを行った。その後、細骨材をミキサに加入し、30 秒の低速練りを行った。十分に固体物が混和された後、減水剤と混和された水をミキサに入れた。そして、低速で 1 分間練り混ぜた後、高速で 9 分間練り混ぜ、容器や羽についたセメントをかき落とした後、さらに高速で 1 分間練り混ぜた。
- ③ 作製したモルタルを 20°C 恒温室に移動して、①に準備した型枠に 3 本ずつ打設する。
- ④ 打設後、型枠上面をポリエステルフィルムで覆い、アルミテープを使用して封緘する。
- ⑤ 作製した試験体の 3 セット（各計 9 本）ずつ、注水してから 2 時間以内に 20°C、40°C および 90°C の恒温室（装置）に移動して、恒温養生開始する。20°C と 40°C の全ての試験体はデータロガーを使用して 7 日間の自己収縮ひずみデータを測定した。90°C 養生の試験体は埋め込み型ひずみ計を設置していないため、自己収縮の計測は行っていない。また、T 型熱電対により、恒温室の温度を測定した。

4.3.3 遅れ膨張に関する実験（シリーズ 2）

シリーズ 2 の実験では、7 日間の 20°C、40°C、90°C 恒温度条件で養生した試験体を温度および湿度が異なる環境に移動して、長期間的に養生しながら、主として遅れ膨張のモニタリングを目的として長さ変化を測定した。併せて、定期的に試験体の外観観察を実施し、ひび割れ発生の有無を調査した。

また、埋め込み型ひずみ計を設置してある 20°C、40°C の試験体では、シリーズ 1 から引き続きひずみの計測を行い、初期 90°C で養生した試験体については、シリーズ 2 のみタルベースゲージを使用して長期の長さ変化の測定を実施した。

シリーズ 2 の具体的な作業は以下の手順で実施した。シリーズ 2 に実施した主な実験風景を図 4-8 に示す。

Specimens Cured under 90°C



Moisture and Underwater Curing



Figure 4-8 Landscape of Main Processing of Series No.2

図 4-8 シリーズ 2 における主な実験風景

- ① 材齢 7 日において、20°C、40°C 条件で養生した同一調合の各 3 セット（計 9 本）の試験体を取り出して、いずれも 20°C のとなるよう恒温室で空冷する。
- ② 冷却された試験体の型枠と取って、各 3 本ずつをそれぞれ、20°C 恒温環境で、相対湿度 60%（記号：60RH）、相対湿度 100%（記号：100RH）および水中（記号：Water）の 3 つの異なる環境に静置する。
- ③ 初期 90°C 条件で 7 日間養生した全ての試験体は、①と同様の作業を行って冷却した後、相対する側面にそれぞれメタルベースゲージを貼り付けて、防水処理を施す。その後、20°C、40°C 試験体と同様に、3 体の試験体をそれぞれ 20°C 環境で、相対湿度 60%、相対湿度 100%、水中の 3 つ異なる環境に静置する。
- ④ 初期 90°C で養生した試験体については両側面のメタルベースゲージの平均値を、また、20°C、40°C 条件については引き続き、試験体中央に設置した埋め込み型ひずみ計でひずみの測定を実施する。
- ⑤ 長期間におけるひずみの測定を進行しながら、定期的に試験体の外観観察を実施し、ひび割れの有無を調査する。

シリーズ 1 とシリーズ 2 に実施した実験の流れと取りまとめたものが図 4-9 である。

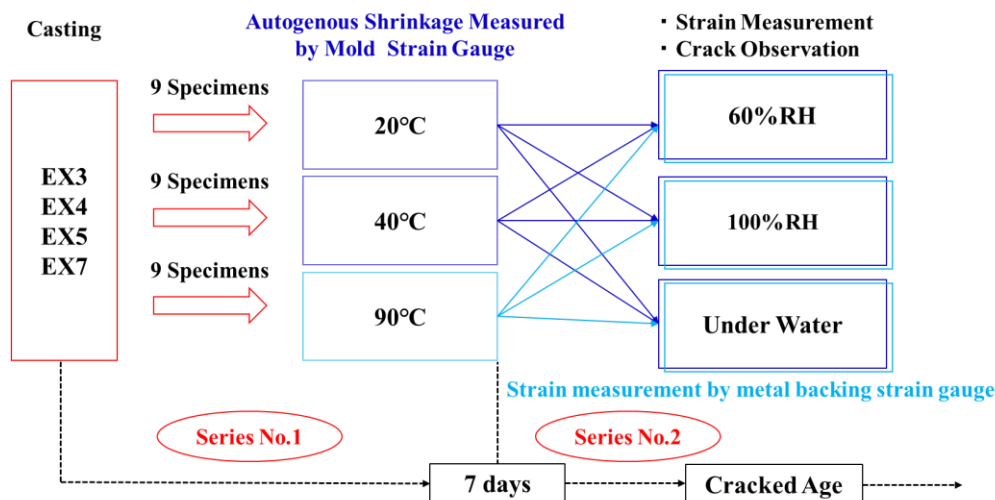


Figure 4-9 Flow Chart of Length Measurement within Series No.1 and Series No.2

図 4-9 シリーズ 1 とシリーズ 2 に実施した長さ変化測定実験のフロー図

4.3.4 質量含水率・結合水量測定実験

長さ変化測定用の試験体と同時に、アルミ製バッグで封緘養生を実施した試験体を作製し、20°Cおよび40°Cで材齢 168 時間までの養生を実施した内、質量含水率・結合水量の測定を実施した。所定材齢においてアルミバッグで封緘養生を実施した試験体を取り出し、3.2.2 (3)節に説明した方法を用いて、モルタルの質量含水率・結合水量を取得した。

4.3.5 水和解析

第三章に示したように、膨張材の水反応により生成された水和物が膨張圧を引き起こして自己収縮低減効果に寄与している。三章では、主として上記の機構を確認するための水和反応解析を実施したが、本章では、膨張材の遅れ膨張メカニズムを明らかにすることを目的とする。

20℃と 40℃恒温養生した試験体（水和解析用）を材齢 7 日および各湿度条件で長期養生した後、材齢 260 日で、水和停止を実施して、XRD/リートベルト解析によって水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの生成量を取得した。また、初期 90℃養生を行った試験体についても、同様に水和解析を行ったが、水和解析用の試料において養生中試験体内部の水分が多量に蒸発しており、適切な水和解析のデータを取得することができなかった。

本実験に実施した水和停止および XRD 解析作業の実験方法が 3.2.2 (4)節に詳細的に説明した方法と同じである。リートベルト解析によって水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの生成物量を取得する際に、解析ソフト TOPAS4.2 を使用し、Alite (C₃S), Belite (C₂S), Aluminate (cubic)(C₃A), Ferrite (C₄AF), Gypsum (C \hat{S} H₂), Bassanite (C \hat{S} H_{0.5}), Portlandite (CH), Ettringite (AFt), Monosulphate (AFm), Lime, Quartz, Anorthite, (CaAlSi₂O₈), Albite (NaAlSi₃O₈), Ye'elimite (C₄A₃ \hat{S})と Anhydrite (CaSO₄) 等物質を水和反応の主生成物として、定量的解析を実施した。ここに、C: CaO, S: SiO₂, A: Al₂O₃, F: Fe₂O₃, \hat{S} : SO₃ を意味する。

4.4 実験結果および考察

4.4.1 自己収縮ひずみの経時変化（シリーズ 1）

シリーズ 1 で実施した実験によって得られた材齢 7 日まで各調合モルタルの自己収縮ひずみの経時変化を図 4-10 に示す。本実験では、凝結実験を行ってないため、凝結始発材齢はモルタルの硬化開始材齢とすることの代わりに、ひずみが収縮側に推移し始まる材齢をとって、自己収縮ひずみの経時変化を整理した。谷村^[74]の研究において、水結合材比が 30%である鉄筋コンクリートを対象とした測定結果によって、コンクリートの収縮開始材齢は、鉄筋に応力を導入し始まる材齢と概ね一致していることが明らかにされた。この知見に基づき、収縮開始の材齢を凝結始発の材齢と扱うことに大きな差異はないと考えられる。

図に示すように、既往の複数の検討に示したように、水結合材比 20%を下回るようなセメントペースト、モルタル、コンクリートでは、材齢 1 日前後をめぐり自己収縮の進行速度が急激に変化することが見られた。その後、ある程度の膨張傾向に進行した。第三章に述べたように、自己収縮速度が急激に変化する点が（屈曲点）が現れる。

屈曲点では、エトリンガイト生成量のピーク材齢と一致すること、セメントペーストおよびモルタルの線膨張係数が極小値を取る材齢と概ね一致する^[75]こと、屈曲点以前の材齢では、40℃以下の養生温度では、温度が低い程自己収縮ひずみ量が大きくなること、それ後の材齢では、アレニウス則の有効材齢により自己収縮進行速度の温度依存性が評価できる^[76]という特徴を有している。膨張材を添加したセメントペーストでは屈曲点がより明確に生じること、膨張材を添加した場合でも、エトリンガイトの生成ピーク材齢と一致する

ことも報告されている^[77]。

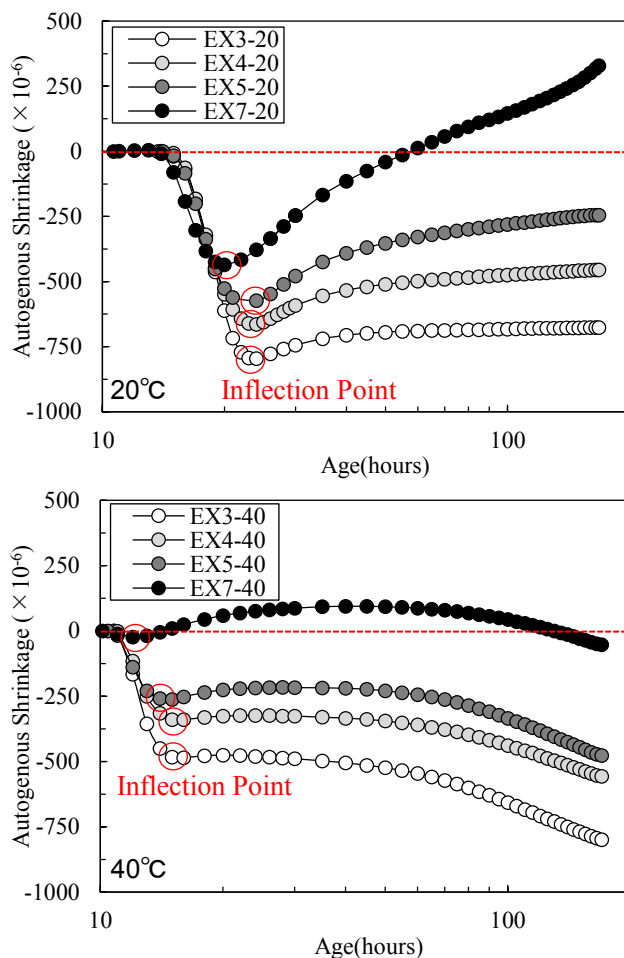


Figure 4-10 Autogenous Shrinkage Variation with Age

図 4-10 自己収縮ひずみの経時変化

膨張材の添加率をパラメータとした本実験においても、屈曲点は明らかに存在することが分かる。表 4-6 に、各調合の屈曲点材齢における自己収縮ひずみ量を示しているが、既往の研究の通り、屈曲点以前の自己収縮ひずみ量は、温度の影響を受け、低温養生（20°C 条件）の方が高温養生（40°C 条件）の方より屈曲点以前の自己収縮ひずみは大きくなっている。また、屈曲点時の自己収縮ひずみ量は、膨張材の添加率に応じて線形的に減少し、

Table 4-6 Comparison of Autogenous Shrinkage Value on Inflection Point ($\times 10^{-6}$)

表 4-6 屈曲点材齢における各調合の自己収縮ひずみ量の比較 ($\times 10^{-6}$)

	EX3	EX4	EX5	EX7
20°C	-783	-664	-574	-436
40°C	-480	-337	-257	-24

40°C条件では結合材あたり7%の膨張材を添加することで屈曲点以前の自己収縮ひずみをほぼ相殺できることが確認できる。

この屈曲点を材齢およびひずみの原点を取り直し、その以降の自己ひずみの挙動についてプロット結果を図4-6に示す。20°Cの温度条件では、膨張材の添加率に応じて、材齢7日まで膨張が継続しているのに対して、40°Cの方が材齢約50時間までの膨張挙動を示した後、収縮挙動が継続に進行する。結果として、材齢7日までいずれの調合でも、40°C養生した方が自己収縮量の大きいことが見られた。

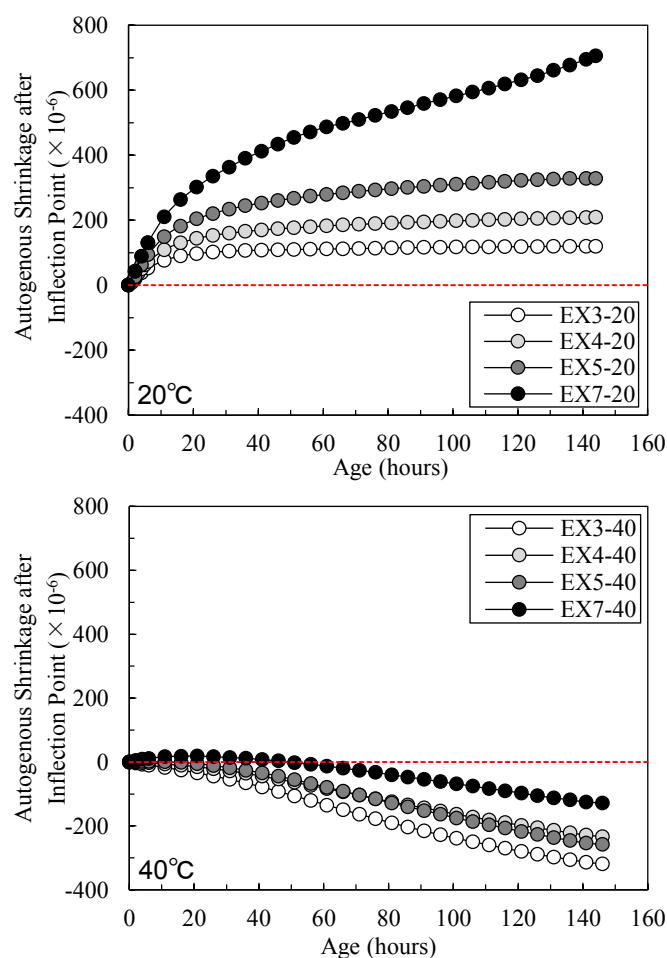


Figure 4-11 Autogenous Shrinkage after Inflection Point Variation with Age

図4-11 屈曲点以降の自己収縮ひずみの経時変化

以上より、膨張材を添加した超高強度モルタルの自己収縮は若材齢において収縮と膨張の駆動力が同時に発生する複雑な挙動を取ることが確認できる。このような複雑な挙動を分離して評価する試みを第三章で行った。いずれにせよ、膨張材を添加した場合、養生温度の違いによって自己収縮ひずみの結局値が異なるため、温度の影響をアレニウス則等の速度論だけで表現する不可能である。

膨張材が超高強度モルタルの若材齢自己収縮の低減効果を定量的に評価するため、材齢 7 日時点において、各調合モルタルの自己収縮ひずみ量と膨張材添加率の関係を図 4-12 に示す。

図によると、表 4-6 に示した屈曲点の結果と同様に、材齢 7 日時点における自己収縮ひずみは温度条件によらず、膨張材添加率が増加する程、ほぼ線形的に減少している傾向が読み取れた。また、20°C条件で養生した EX7 の試験体が材齢 7 日時点まで、自己収縮ひずみが膨張側 (380×10^{-6} 程度) で推移しているが、今後も膨張傾向が継続する場合、膨張ひび割れの発生リスクが高まると予想できる。

養生温度の影響を着目すると、いずれの膨張材添加率においても、20°Cの方が材齢 7 日時点の自己収縮ひずみ量が 40°Cの方より小さいことが示している。これらのことによって、材齢 7 日時点まで、20°C養生した場合、40°Cより、水酸化カルシウム量が多いことと推察される。

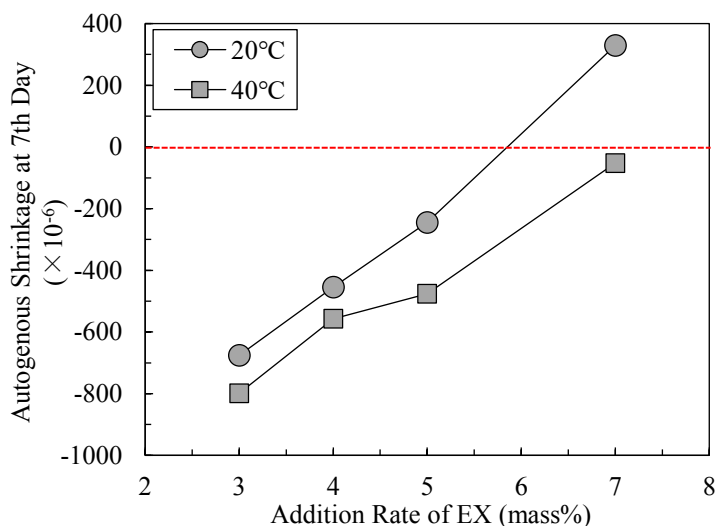


Figure 4-12 Autogenous Shrinkage of Mortars Variation with Addition Rate of EX at 7 Days

図 4-12 材齢 7 日時点における自己収縮ひずみ量と膨張材添加率の関係

4.4.2 材齢 7 日時点の水和物生成量

材齢 7 日時点において、XRD/リートベルト解析によって得られた水酸化カルシウム生成量と膨張材の添加率の関係を図 4-13 に示す。図に示すように、いずれの温度条件においても、膨張材添加率の大きい程、材齢 7 日時点の水酸化カルシウム生成量が線形的に増加する傾向が示している。図 4-12 と併せて考えると、膨張材の添加率を増加させることによって、材齢 7 日時点に生成させた水酸化カルシウム量が多くなり、自己収縮低減効果を向上させることが明らかである。

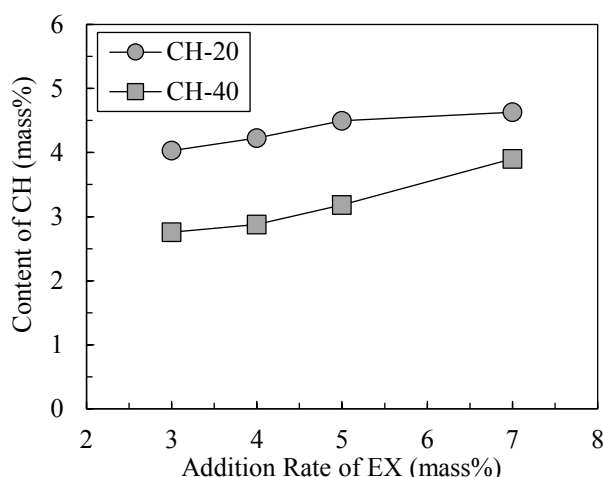


Figure 4-13 Production of Calcium Hydroxide Variation with Addition Rate of EX at 7th Day

図 4-13 材齢 7 日時点における水酸化カルシウム生成量と膨張材添加率の関係

一方、温度条件に着目し、40℃養生した場合と比較した場合、いずれの膨張材添加率であっても、20℃の方がより多く水酸化カルシウム量を示し、図 4-12 に示した結果と符合していることが確認された。

その原因として、SFPC 中に含まれるシリカフェームのポゾラン反応速度は温度が高い程大きくなる^[78,79]ため、本実験でも、20℃より 40℃条件で多くの水酸化カルシウムが消費されたためと考えられる。

4.4.3 材齢 7 日時点の質量含水率

図 4-14 には、材齢 7 日時点において、20℃と 40℃の温度条件で養生した試験体の質量含水率および結合水量と膨張材添加率の関係を示している。

図を見ると、20℃条件で養生した場合、添加率 4%の実験結果でばらつきがみられるものの、膨張材の添加率が増加しても、質量含水率はほとんど変化しないのに、40℃で養生した場合は、膨張材添加率が大きい程、質量含水率が小さくなる傾向が確認される。

この結果について、膨張材とセメントの水和反応によって水を消費する観点から考えると、高い温度条件（40℃）で養生した場合に、膨張材の反応により多くの水が消費されると読み取られる。既往の研究に、CSA 系膨張材の水和反応速度が養生温度に強く依存し^[80-82]、SFPC^[76]より CSA 系膨張材^[83]の見かけの活性化エネルギーが大きいであると報告されている。即ち、SFPC より CSA 系膨張材が温度の影響を著しく受けると考えられる。この観点によって、養生温度が 20℃から 40℃に変化する場合、膨張材添加率が大きい程、水和反応速度の増加量が大きいであり、水和反応による消費された水分量が大きくなると考えられる。この結果より、材齢 7 日時点において、40℃条件で養生した方がより多くの膨張材が反応し、逆に、20℃条件で養生した場合、膨張材の添加率が大きいものほど、未反応膨張材が残っていると推察できる。

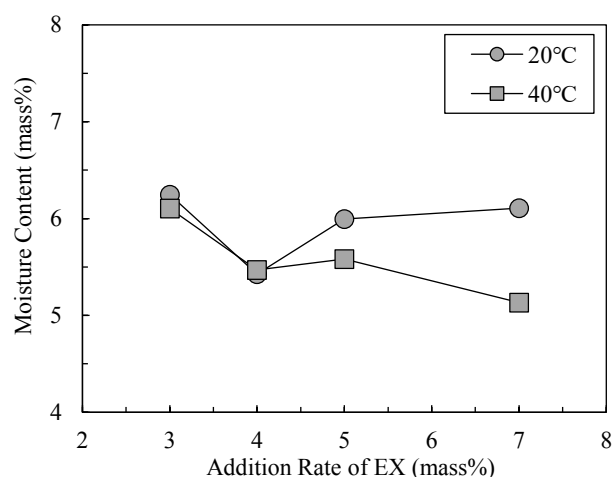


Figure 4-14 Moisture Content Variation with Addition Rate of EX at 7th Day

図 4-14 材齢 7 日時点における質量含水率と膨張材添加率の関係

以上の結果をまとめると、材齢初期に高い温度条件で養生した場合、膨張材の水和反応、シリカフェームのポゾラン反応が促進されること、両者の温度依存性の結果、40°Cではポゾラン反応の促進がより影響が大きく、結果として系内の水酸化カルシウムは減少し、養生温度が低い場合より自己収縮低減効果が減少すると推察できる。

逆に、材齢初期に、低い温度条件で養生した場合、未反応膨張材が多量に残存し、材齢後期に遅れ膨張を引き起こすリスクが高くなっていると考えられている。

4.4.4 材齢 7 日時点以降のひずみの経時変化 (シリーズ 2)

材齢 7 日まで 20°C, 40°C, 90°C で養生した各調合のモルタル試験体を、材齢 7 日時点において、20°C 相対湿度 60%, 20°C 相対湿度 100%, 20°C 水中という 3 つの異なる水分環境に移動し、その後のひずみ変化を取得した結果は、図 4-15, 図 4-16 および図 4-17 に示す。ここで、横軸は材齢 7 日時点のひずみを原点として整理した。

図 4-15 において、20°C で初期養生した試験体については、EX7-20-60RH は材齢 13 日から、EX7-20-100RH と EX7-20-Water は材齢 8 日から、著しく大きな膨張傾向が示している。以上より、結合材量あたり 7% 程度の膨張材を使用し、20°C で養生した場合、その後の吸湿の有無に関わらず、遅れ膨張が発生する結果が得られた。また、EX7 より膨張材添加率が少ない、EX5-20-60RH や EX4-20-60RH においても、同様な膨張傾向が生じている。

図 4-15(a) に着目すると、初期 20°C、その後 60%RH 環境で養生した場合、遅れ膨張が開始する材齢の早さおよび同一材齢の膨張量のいずれも、EX7 > EX5 > EX4 > EX3 の順位を示している。つまり、膨張材の添加率が大きい程、遅れ膨張が生じる材齢が早く、遅れ膨張量も大きいことが確認される。一方、図 4-15(b), 図 4-15(c) をみると、20°C で養生した後、水中養生や湿気養生 (100%RH) という相対湿度が大きい環境に長期暴露した結果、材齢 260 日まで EX7 以外の試験体には顕著な膨張傾向が認められなかった。

この結果により、同じ膨張材添加率を有する試験体で初期条件が同じであっても、その

養生しても、その後の養生環境によって、膨張挙動が異なることが確認された。つまり、膨張材添加率によっては、遅れ膨張の発生は環境条件の影響が大きいといえる。

相対湿度が大きい環境より、乾燥環境（60%RH）において顕著な膨張が発生した結果については、当初の予想と異なる結果であったが、想定されるメカニズムとしては、試験体表面からの乾燥を受ける状態において水分移動の駆動力とする試験体内外の相対湿分布が生じ、水分移動に伴う反応性イオンの移動が促進されることや、乾燥により比較的大きな内部空隙が生じ、エトリングait等の膨張性水和物の生成に有利な条件となったなどが推察できるが、現時点で検証には至っておらず、今後の検討課題である。

一方、初期養生として40℃（図4-16）と90℃（図4-17）で養生した試験体には、材齢260日まで、いずれの湿度条件に関わらず、試験体に膨張傾向が見られなかった。これは、初期に比較的高い温度条件で養生した場合、膨張材が優先的に反応し、その後の材齢で遅れ膨張を誘発する未反応膨張材量が少ない、あるいは残らないためと推察している。

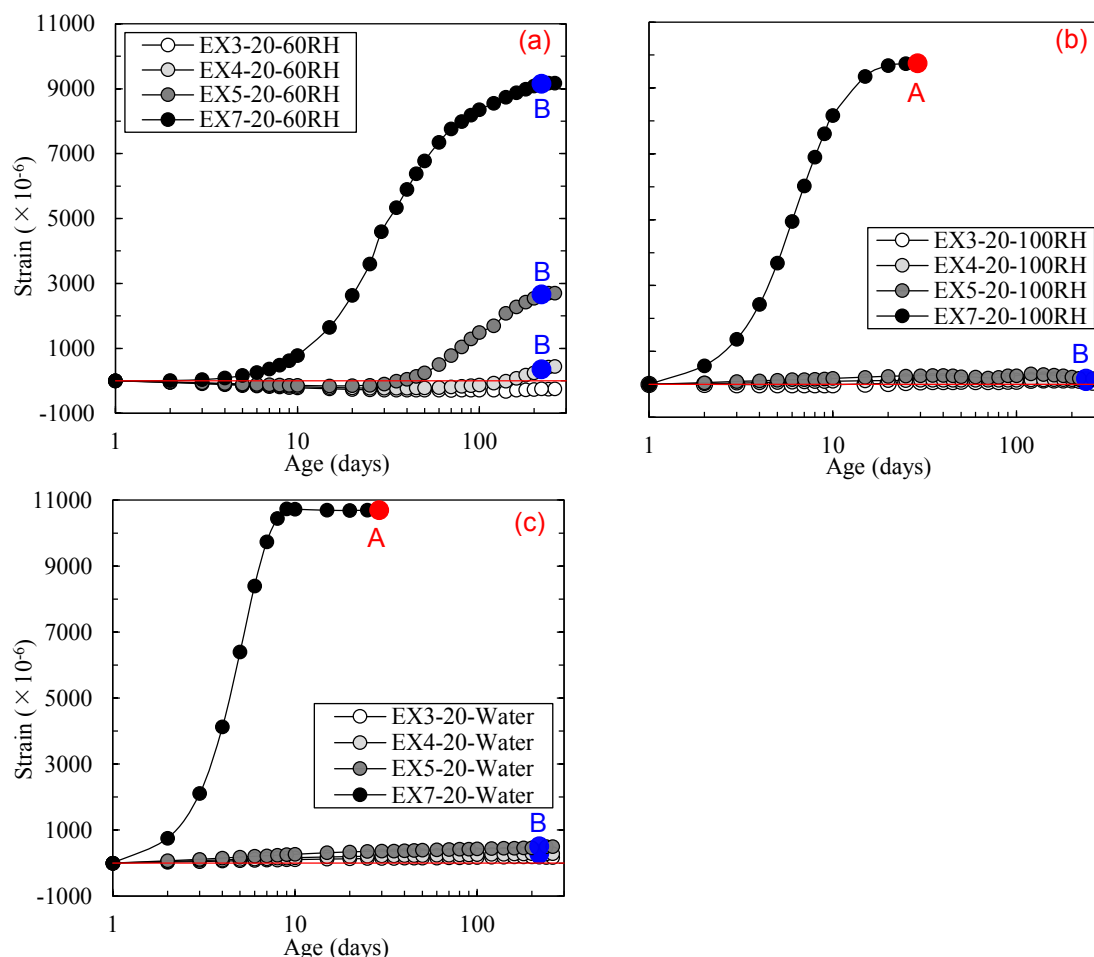


Figure 4-15 Strain of Mortars Variation with Age after 7 Days (Initial 20°C Curing)

図4-15 材齢7日以降におけるモルタルの経時変化（初期20℃養生）

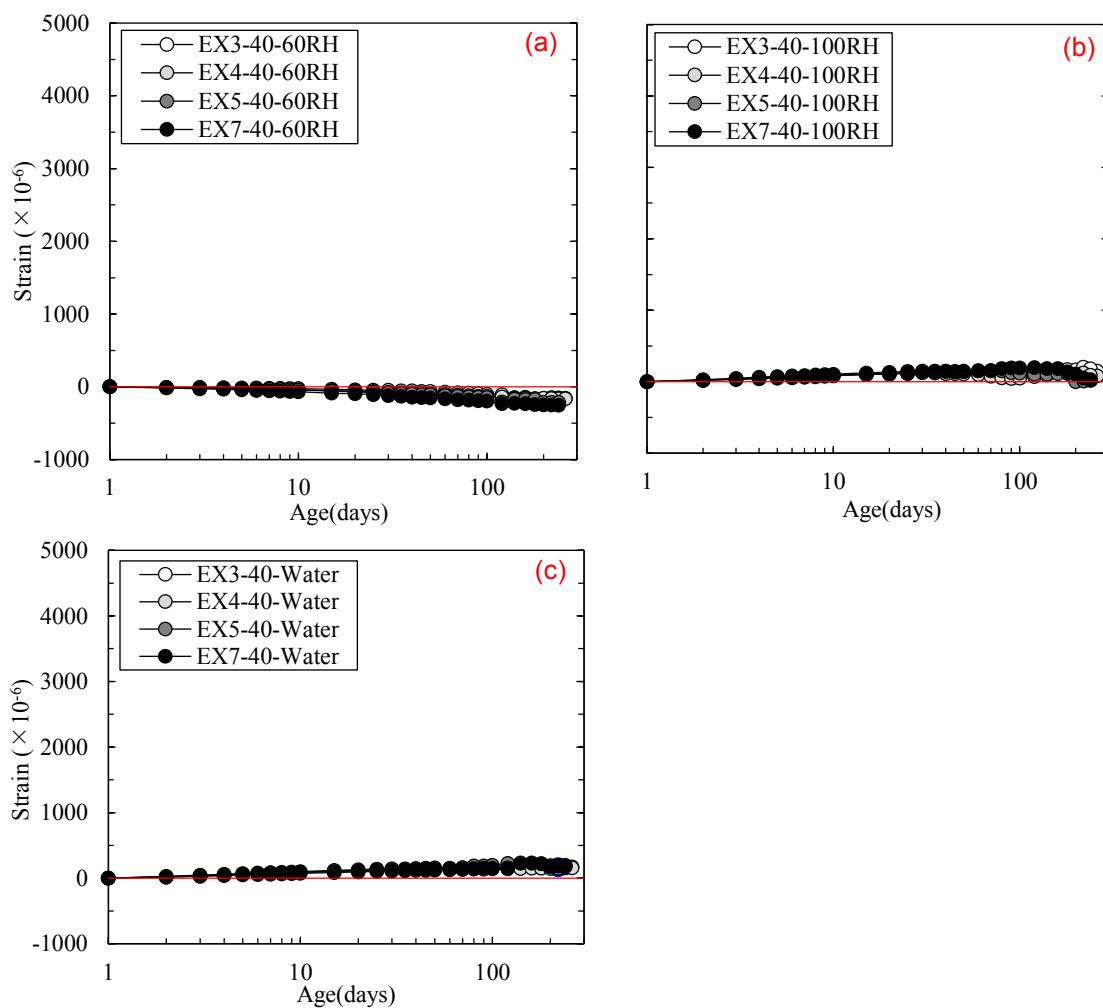
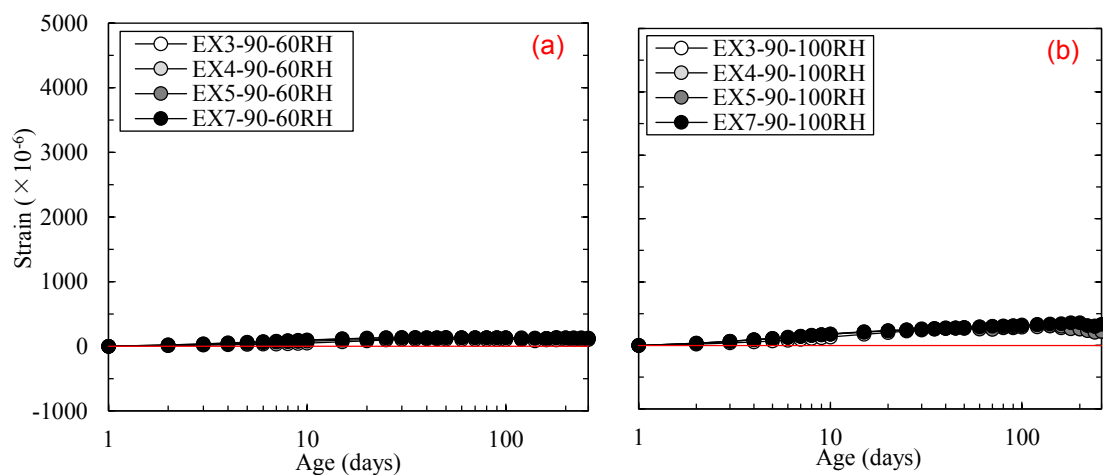


Figure 4-16 Strain of Mortars Variation with Age after 7 Days (Initial 40°C Curing)

図 4-16 材齢 7 日以降におけるモルタルの経時変化 (初期 40°C 養生)



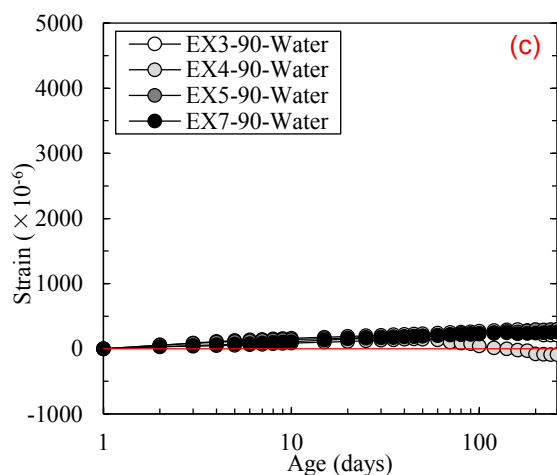


Figure 4-17 Strain of Mortars Variation with Age after 7 Days (Initial 90°C Curing)

図 4-17 材齢 7 日以降におけるモルタルの経時変化（初期 90°C 養生）

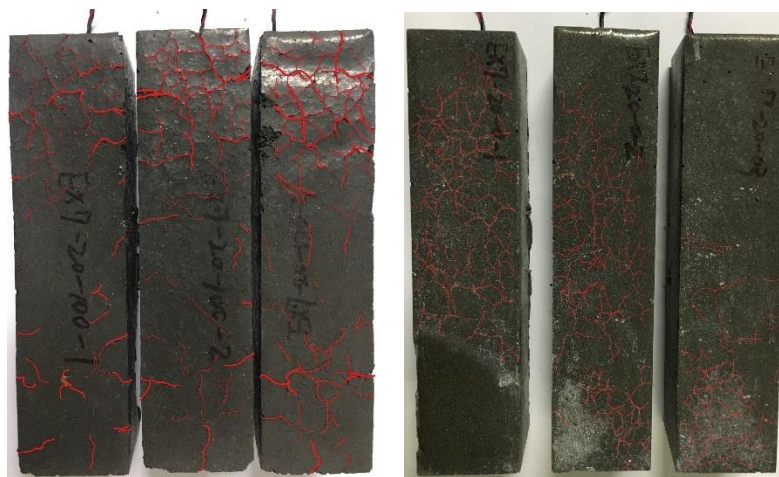


Figure 4-18 Delayed Expansion Cracks of Specimens with Large Expansion Strain

(Lift: EX7-20-Water, Right: EX7-20-100RH)

図 4-18 大きな膨張ひずみが生じた試験体の遅れ膨張ひび割れ

(左 : EX7-20-Water, 右: EX7-20-100RH)

材齢 36 日において、ひずみ測定で大きな膨張が確認された EX7-20-100RH と EX7-20-Water 試験体を養生槽から取り出して外観を観察したところに、試験体それぞれの 3 本ともに顕著的なひび割れが認められた。試験体の外観を図 4-18 に示している。写真に示したように、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ている。

一方で、材齢 260 日まで、9000 ($\times 10^{-6}$) 程度大きな膨張ひずみが得られた EX7-20-60RH の試験体に、明確なひび割れの発生が確認されていない。EX7-20-Water や EX7-20-100RH と比較して、約 1500 ($\times 10^{-6}$) や 1000 ($\times 10^{-6}$) 程度小さいことが確認されており、表面までひび割れの発生が確認されないものの、試験体内部に多量微細なひび割れが発生し、材齢

の増加に伴い、表面まで発現する可能性が高いと推測している。

また、図 4-15(a)において、EX5-20-60RH, EX4-20-60RH は、膨張ひずみが進行し続ける傾向が示しているため、今後も膨張ひずみが更に大きくなる可能性があると考えられる。

4.4.5 材齢 7 時点における膨張材の反応率に関する考察

前節および 4.4.3 節の結果を併せて見ると、初期 20°C 条件で養生した試験体は、未反応膨張材の継続的な水和によって、遅れ膨張の発生が引き起こされたと推察した。しかし、遅れ膨張発生機構および生起条件を解明するため、膨張材の水和反応率の経時変化を把握する上に、定量的な考察が必要である。

膨張材の水和反応率に関しては、既往の研究において、膨張材^[84-87]および類似なカルシウムスルホアルミネートセメント (CSA) ^[88-91]を対象とした成分分析した結果によって、遊離石灰 (Free Lime, f-CaO), Ye'elimate (3CaO · 3Al₂O₃ · SO₄) と無水石膏 (Anhydrite, CaSO₄) 等成分の水和反応が、膨張性水和物の生成に寄与すると考えられている。そのため、これらの物質の水和率を膨張材の反応率とする既往の研究がいくつかある。既往の研究において、XRD/リートベルト解析によって膨張材の水和反応率を定量評価した事例を表 4-6 にまとめる。

表に示すように、膨張材の種類によって、遊離石灰, Ye'elimate, 無水石膏の単体あるいは併用で膨張材の水和反応率の評価が行われた。既往の研究において、膨張材添加率はセメント質量に対して 10%以下であった。また、材齢 7 日まで、養生温度によって差異があるものの、無水石膏の水和率は 95%以上^[87,92], Ye'elimate の水和率は 80%以上^[86,92], 遊離石灰の水和率が 90%以上^[86,87,92,93]であることが一般的な知見として得られた。一方、表 4-6 に示した研究については、水結合材比が 50%ほど大きい実験を実施したため、水和反応に十分量の水分を提供できることが確認される。本実験のように、水結合材比が極めて小さい (16.5%) 場合、膨張材の水和反応がどの程度で進行することが既往の研究にも明らかにされていない。

Table 4-6 Quantitative Evaluation of EX Hydration Rate by XRD/Rietveld Analysis

表 4-6 XRD/リートベルト解析による膨張材の反応率を定量評価する事例

References	Type	Main Mineral Composition and Contents of EX (mass%)					EX/C (mass%)	W/B (mass%)
		Free Lime	Ye'elimate	Anhydrite	C ₄ AF	Others		
Yamamoto [86]	CSA	51.8	-	27.4	20.3	0.5	6.0	50
	CSA	19	31.3	39.8	-	9.9	10.0	
Higuchi [87]	CSA	45.4	9.2	31.4	3.3	10.7	7.0	50
Sagawa [92]	CSA	26.4	18	50.3	2.7	2.6	10.0	50
Jeon [93]	Lime	50	-	-	-	50	5.9	55

本実験では、膨張材の反応率を把握するため、既往の研究に倣い、本実験に使用した膨張材に含まれる Free Lime, Ye'elimite, Anhydrite の水和反応状況に着目して、XRD 解析による定性的評価並びに、リートベルト解析による定量的計算を試みた。

膨張材の反応率を定性的に把握するため、未反応膨張材単体（記号：EX100）、未反応 SFPC（記号：EX0）、内割の 3%、4%、5%、7%、10% と 50%の膨張材を添加した SFPC（記号：EX3, EX4, EX5, EX7, EX10, EX50）を対象として、XRD 解析を行った。その結果を図 4-19 に示す。Free Lime, Ye'elimite と Anhydrite が生じるピークに L, Y, A を明示している。

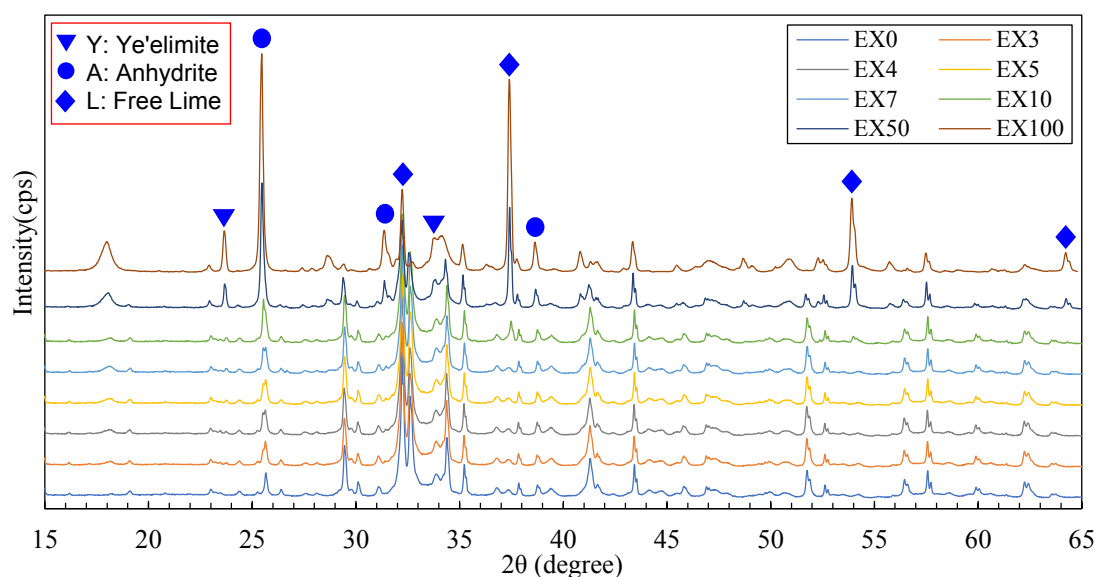


Figure 4-19 Results of XRD Analysis on Unhydrate Samples with Different Addition Rate of EX

図 4-19 異なる膨張材添加率が有する未反応セメントサンプルの XRD 解析結果

図に示すように、膨張材単体 (EX100) の場合、Free Lime に対して、回折角度 2θ の 32.4° , 37.4° と 53.4° 付近, Anhydrite に対して、回折角度 2θ の 25.8° , 31.3° 38.7° 付近, Ye'elimite に対して、回折角度 2θ の 23.6° と 34.1° 付近に明確なピークが確認される。膨張材がセメントと混和した場合、膨張材添加率が小さくなる程、いずれの物質も波形のピークが減少していることが示される。特に、膨張材添加率が 10%以下になる場合、 25.8° , 32.4° と 34.1° 付近のピークしか見えなくなる。しかし、いずれのピークの強度 (Intensity) は、膨張材添加率の相違に対する差異はほとんど見えない。

これらの結果から、膨張材の添加率が 3%~7%である場合において、未反応の混和物に対しても、XRD 解析によって Free Lime, Ye'elimite, Anhydrite のいずれの含有率を定性的に把握することが極めて困難であるといえる。即ち、本実験のような実調査に近い実験条件では、XRD 解析によって膨張材の水和反応率を確認することは不可能であると考えている。

また、本実験の調査において、初期 20°C と 40°C 条件で養生し、水和反応が 7 日時点まで進行したモルタル試験体の XRD 解析波形を図 4-20 に示す。比較するため、同じ膨張材添

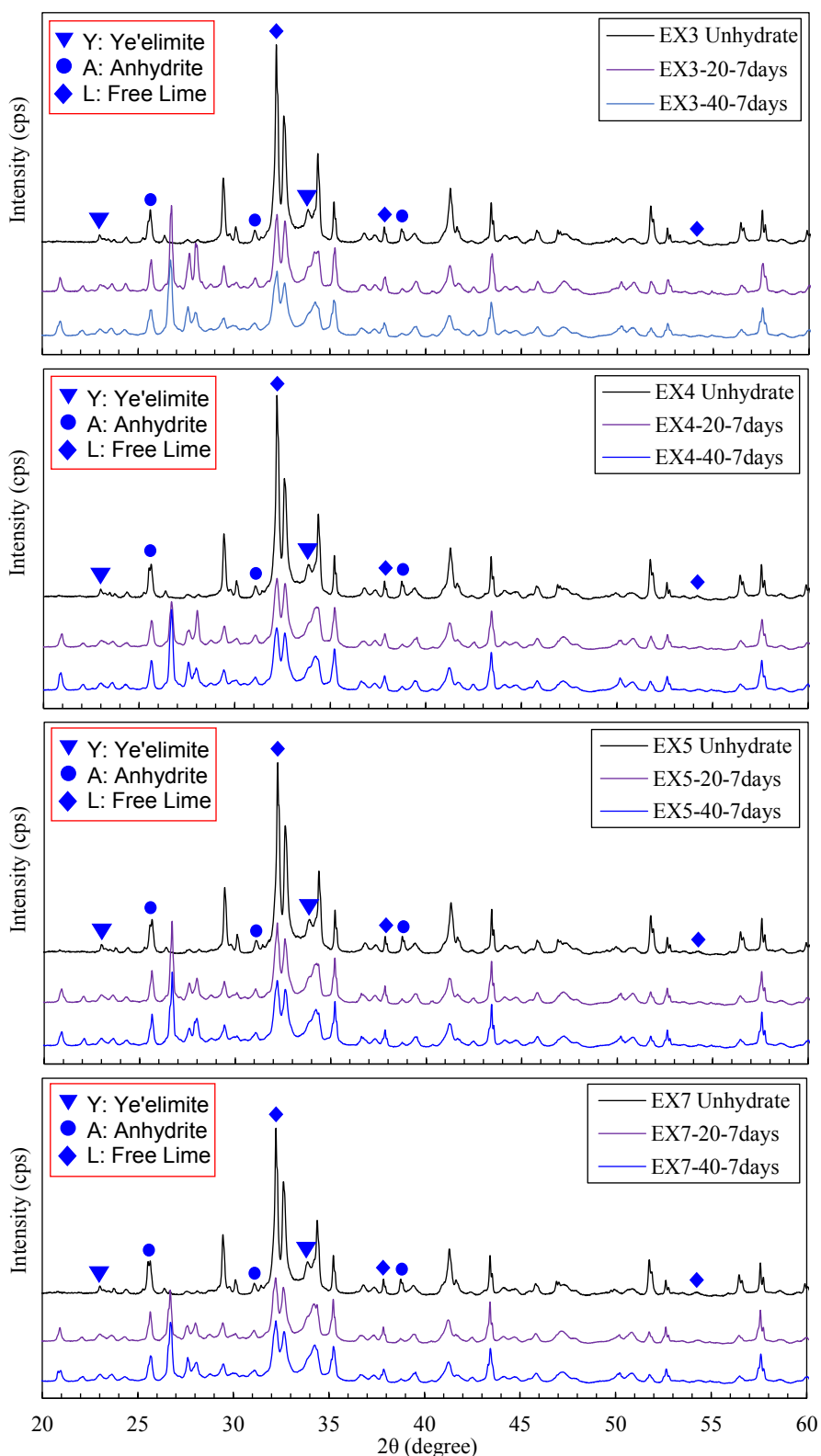


Figure 4-20 XRD Analysis Results on Unhydrate Mixture and Hydrated Mortars of 7th Day

図 4-20 未反応セメント混和物と材齢 7 日のモルタルの XRD 解析結果の比較

加率を有する未反応混和物 (EX+SFPC) の解析結果も併せて示す。図 4-19 に示す結果と同様に、回折角度 2θ の 25.8° と 32.4° 付近に、小さな Anhydrite ピークと Free Lime のピークが観察されている。また、 20°C と 40°C 条件で養生した場合の結果を比較してみると、いずれの回折角度においても、波形ピークの差異がほとんど無いと確認されている。この結果から、上記と同様に、本実験の調合条件において材齢 7 日時点の Anhydrite や Lime の残存量の差異を XRD 解析によって評価することはできないと判断される。そのため、今後の研究に、膨張材の水和反応率を定量評価する手法の確立に関する深く検討が必要である。

4.4.6 材齢 7 日以降の水和物生成量

膨張材の遅れ膨張を引き起す原因を解明するため、膨張性物質の変化に関する検討を実施した。遅れ膨張が確認された材齢の直後 (36 日) に、EX7-20-Water および EX7-20-100RH 試験体が停止を行って、XRD/リートベルト解析によって水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの生成量を取得し、結果を図 4-21 に示す。更に、材齢 220 日まで大きな膨張ひずみが測定された EX7-20-60RH 試験体の一本を破砕し、同じ水和解析方法で水酸化カルシウムおよびエトリンガイト生成量を取得した。結果を図 4-21 に併せて示す。

図 4-21 に示すように、EX7-20-Water の方に対して、膨張が確認された材齢に有した水酸化カルシウムおよびエトリンガイト生成量が材齢 7 日時点の生成量より、著しく大きいことが確認される。

山本らは、樋口^[94]らの研究に膨張材を添加したセメントペースト内部毛細管レベル空隙が多量生成する実験結果および、CSA 系膨張材中の微細結晶として存在する遊離石灰の水和反応によって、微細な水酸化カルシウムを生成し、水和核となって微細エトリンガイト結晶を生成させる^[95]という観点を踏まえて、水和物の間に毛細管レベル空隙を多量に抱え込みながら水酸化カルシウムおよびエトリンガイトが生成することで、膨張の発現に寄与すると指摘された^[86]。この観点を踏まえて、EX7-20-Water に観察された水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの多量生成が、遅れ膨張を引き起こす原因と推察される。

一方、明確な膨張ひび割れが観察された EX7-20-100RH の試験体において、水酸化カルシウムおよびエトリンガイト生成量のいずれにも、材齢 7 日時点の生成量と概ね変化がなかった。

4.2.1(2)節に述べたように、DEF に関して、Stark ら^[96] Tosun ら^[21]の研究には、エトリンガイト結晶形態の相違によって、膨張性が異なると報告された。Tosun らはモルタル試験体の DEF 挙動の測定並びに SEM-EDS 解析を行い、結晶形態の相違に対して、膨張に寄与する、寄与しないエトリンガイトが存在し、制限された狭い空隙 (マイクロクラック) に生成された塊状エトリンガイト (Massive Ettringite) は膨張を引き起こすと指摘された^[21]。結晶の形態を含めて、結晶の生成場所^[33,21]、結晶のサイズ^[25]なども DEF 膨張の有無に寄与する観点が挙げられている。本実験において、XRD/リートベルト解析では、モルタル中のエトリンガイトの平均的な含有量しか取得できておらず、結晶の分布、形態、サイズ等が得られていない。本研究でも、XRD 解析によって観測できるエトリンガイト生成量がほぼ同

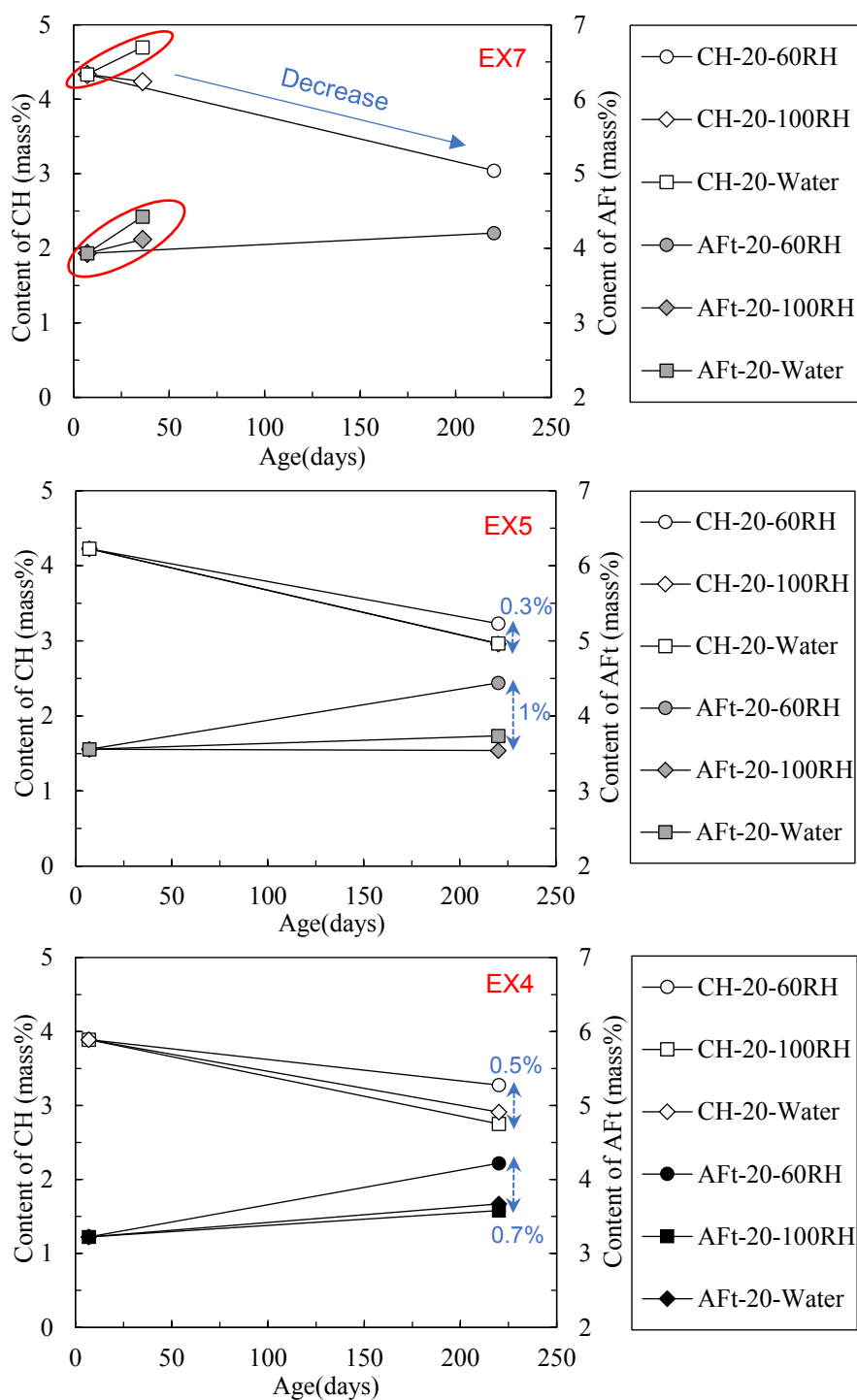


Figure 4-21 Content of CH and AFt Variation with Age (Initial 20°C Curing)

図 4-21 水酸化カルシウム及びエトリンガイト生成量の変化 (初期 20°C養生)

様であっても、エトリンガイト結晶の分布状況、形態、サイズ等の相違が、異なるモルタルの膨張性状を引き起こす可能性があると考えられる。しかし、この観点に関しては今後 SEM 微観察を用いて、さらなる検討が必要である。

EX7-20-100RH と同様に、EX7-20-60RH の試験体では、材齢 220 日の水酸化カルシウム量が材齢 7 日時点より小さく、エトリンガイト生成量がほぼ同じである結果が、**図 4-21** からみられている。水酸化カルシウム量の減少に関しては、ポゾラン反応によって消費されたと考えられる。この結果によって、EX7-20-60RH に生じた膨張傾向は、水酸化カルシウム生成量に直結関係しなく、エトリンガイトが生成するためと推察される。また、EX7-20-100RH と同様に、エトリンガイト生成量だけでなく、膨張性有する結晶の存在は膨張を引き起こしたと考えられる。

一方、比較的小さい膨張傾向が示している EX4-20-60RH と EX5-20-60RH 試験体の水和解析結果を見ると、水酸化カルシウムおよびエトリンガイトのいずれも、相対湿度 100% (100RH) や水中 (Water) 養生した場合と比較して、明確な差異がない ($\Delta \max=0.3\% \sim 1.0\%$, **図 4-16** 参照) ことに対して、試験体の膨張ひずみが明らかに異なっている。つまり、膨張材が結合材量に対して 4%, 5%程度添加した場合には、初期 7 日間 20°C 恒温養生した後、遅れ膨張が相対湿度 100%, 水中のような湿潤環境より、相対湿度 60%の比較的乾燥環境に発生した結果が得られた。

前に述べたように、比較的乾燥 (60%RH) 条件では、湿潤環境 (100%RH, Water) より試験体内部に多く微細な空隙 (クラック) を引き起こす結果は、水分移動に有利であり、膨張の発生を促進されたと推察した。

4.4.7 膨張材の遅れ膨張と DEF 膨張の比較

本研究では、膨張材の遅れ膨張機構に関して XRD を用いた実験的検証を行ったが、XRD の精度的な問題により、十分な検証に至らなかった。本節では、本実験で得られた結果と DEF に関する既往の研究知見を比較して試みた。本実験の結果と DEF の比較したものを **表 4-7** に示す。

4.2 節に述べたように、DEF 膨張では、初期エトリンガイトの熱分解が発生し、セメント硬化体が形成した後に再生成したエトリンガイトが膨張圧に寄与して、コンクリートの膨張劣化を引き起こす。コンクリート内部の高温履歴がエトリンガイトの分解と再生成の条件として強調されている。

Table 4-7 Comparison of Delayed Expansion Caused by EX and DEF

表 4-7 膨張材の遅れ膨張と DEF 膨張の比較

Comparison Items	Expansion of DEF	Delayed Expansion of EX
Mechanism (Hypothesis)	Initial AFt decompose during thermal curing and regenerate after hardened	AFt and/or CH generate after hardened
Initial Temperature	$\geq 70^{\circ}\text{C}$	20°C
Long-term Storage	Under water (Generally)	60%RH, 100%RH, Water
Expansive Substances	AFt	AFt, CH

本実験において、膨張傾向を示した試験体（EX7-20-60RH/100RH/Water, EX4-20-60RH, EX5-20-60RH）の水和解析結果を併せてみると、モルタルが十分硬化した後に、水酸化カルシウムの増減に関わらず、膨張の発生が確認されたため、エトリングタイトの生成は遅れ膨張の直結原因と考えている。また、エトリングタイト生成量より、結晶形態等も膨張の発生に役を果たす可能性があるかと推察している。それに加えて、水酸化カルシウムの多量存在（EX7-20-Water）は膨張の発生を促進し、膨張量の発現を助長すると考えられる。

DEF 膨張では必要条件とされている高温履歴は、膨張材の遅れ膨張の発生に寄与せず、より低い初期温度を有する場合に、遅れ膨張が発生している。この点からみると、膨張材の遅れ膨張に対してエトリングタイトの熱分解が必要ではなく、DEF 膨張の発生プロセスと明らかに異なる。膨張材に対しては、初期養生温度が高い程、未反応膨張材が少なくなり、硬化後の膨張を引き起こさない。

既往の研究に、水結合材比が比較的大きい調合において、同じ材齢にセメントクリンカー成分の水和反応率より、膨張材の水和率が高いと報告された（図 4-22 参照）^[92,93]。この知見を踏まえて、本実験場合でも、膨張材の水和反応は優先的発生する可能性と考えられる。そのため、比較的高い温度（40℃, 90℃）で養生した場合、初期段階における膨張材の水和反応率が高く、逆に、未反応膨張材が少ないため、硬化後に遅れ膨張を引き起こさないと考えられる。第三章の実験においても、20℃養生より、30℃養生した温度が高い程、材齢 7 日以前の段階に水酸化カルシウムの生成量が大い結果（EX1）が得られ、膨張材の反応率が高いと推測できる。

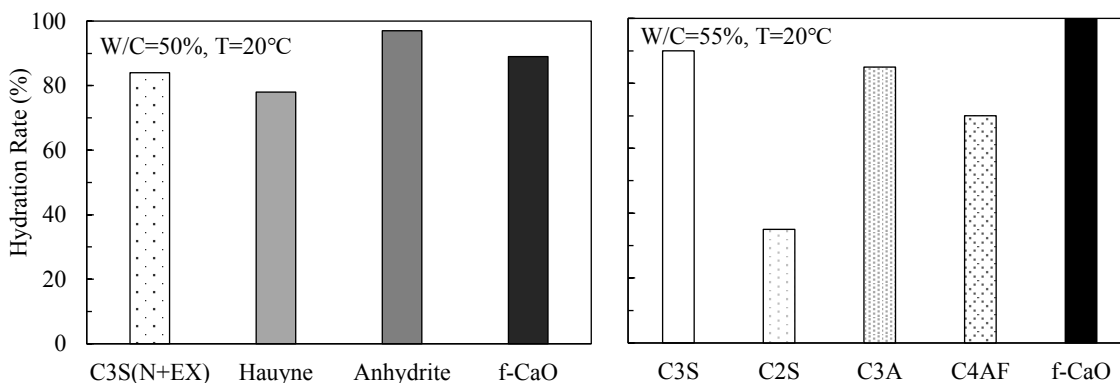


Figure 4-22 Comparison of Hydration Rate of Cement and EX (7th Day)^[92,93]

図 4-22 膨張材とセメント水和反応率の比較（材齢 7 日時点）^[92,93]

また、養生条件に着目すると、相対湿度が高い条件であれば、DEF と膨張材の遅れ膨張挙動が類似であり、相対湿度の大きい程膨張の発生が速くなり、膨張量が大きくなる（EX7-20-100RH, EX7-20-Water）。高湿条件で、水和に必要な水分を提供され、反応性イオンの移動も促進されるためである。しかし、DEF 膨張が完全に生じない乾燥（60%RH）条件において、膨張材の遅れ膨張が発生し、系内外相対湿度差が水分移動の駆動力となり、

エトリンガイト（水酸化カルシウム）の生成プロセスを促進すると考えられる。

一方、膨張を起こす物質に関して、本実験では、水酸化カルシウム生成量が減少しても、遅れ膨張傾向を引き起されており（EX4-20-60RH, EX5-20-60RH）、エトリンガイトの生成は遅れ膨張に直結することはDEFと類似している。しかし、本実験に使用したCSA系膨張材は、水和反応によるエトリンガイトと水酸化カルシウムの両方とも生成されるため、遅れ膨張に対するそれぞれの役割を精確に評価する困難である。今後、水酸化カルシウムあるいはエトリンガイトの単体を生成させる膨張材の遅れ膨張挙動を把握する上で、それぞれの膨張機構に関する議論が必要である。

更に、DEFの膨張機構について、結晶圧理論に基づき、コンクリート内部細孔溶液の化学組成、細孔溶液の過飽和度、エトリンガイト結晶のサイズ等原因を含めて考慮する研究がなされている^[24,26,97,98]。本実験において、水酸化カルシウムおよびエトリンガイトのいずれも小さい場合に観察された遅れ膨張（例えば、EX7-20-100RH）については、膨張性物質の量だけ寄与するわけではなく、結晶形態、内部構造等の影響に関して、結晶圧理論に基づき議論が必要であると考えられる。

以上より、膨張材の遅れ膨張は、複雑な化学反応機構を一つの理論で説明することが困難であり、実験データを蓄積すると共に、詳細的な検討が今後の課題になっている。

以上より、この実験シリーズにおいて、高強度・超高強度コンクリートに対して推奨量を超える膨張材が使用しても、水和初期に高温養生また水和発熱に応じて膨張材がほとんど残さないことによって、遅れ膨張を引き起こさない可能性があることが明らかにされた。

既往の研究において、低水セメント比の超高強度コンクリートを使用した場合において、柱と同じ厚さが有する部材内部にも、水和発熱による60～80℃程度の高温を生じられる^[99,100]と考えられるが、膨張材の推奨標準使用量であっても、このような高温履歴を受ける条件では、必ずしも遅れ膨張を引き起こすと言えないと考えている。

以上の観点から、現状で推奨されている膨張材使用量より適度に増量使用しても、高強度・超高強度コンクリートの自己収縮低減効果を向上することが実現可能であるといえるが、しかし、未反応膨張材の定量手法が確立されていない現状で、上記の運用はリスクがあるため、今後、実際の調合に近い条件で、膨張材の反応率を定量する手法の確立が重要な課題になると考えられる。

4.5 本章のまとめ

本章では、超高強度コンクリートの自己収縮低減に対して、膨張材の最適使用量および、膨張材の遅れ膨張機構と膨張の発生条件を明らかにすることを目的とし、超高強度モルタルを対象とした実験的検討を実施した。得られた知見を以下に示す。

- [1] 本実験の調合範囲において、膨張材添加量が大きいくほど、材齢7日以前の自己収縮低減効果は向上する。結合材量の内割7%置換の膨張材を使用した場合、40℃恒温条件で7日養生した時、高強度モルタルの自己収縮がほとんど0まで抑制できる。

第四章 膨張材の添加量が超高強度モルタルの自己収縮及び遅れ膨張に及ぼす影響

- [2] 膨張材添加量の増加に伴う、水酸化カルシウムの生成量の増加が、自己収縮低減に貢献していると確認できた。
- [3] 結合材量内割の7%の膨張材を添加したモルタルにおいて、初期20℃条件で7日養生した後、養生条件の相対湿度状況によらず、大きな膨張ひずみの発生が確認された。また、比較的湿潤環境（100%RH，水中）で養生した試験体に、亀甲状典型的な膨張ひび割れの多量発生が確認された。
- [4] 水和解析に関する検討結果によって、膨張材の大量添加で生成された大量の水酸化カルシウムとエトリンガイトが、遅れ膨張ひび割れの発生に寄与し、エトリンガイト生成量が小さい場合でも、結晶形態等が結晶圧に寄与して大きな膨張ひずみを引き起こす可能性がある。
- [5] 膨張材を含む超高強度コンクリートの実調合に近い条件において、XRD/リートベルト解析によって膨張材の反応率を同定することは困難であった。
- [6] 本実験調合条件の範囲において、材齢初期に比較的高い温度条件で養生した場合には、膨張材を多量使用しても、遅れ膨張が発生しない可能性があることを確認できた。

第四章参考文献

- [1] 鈴木雅博, 中瀬博一, 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度膨張コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.375-382, 2005
- [2] 陣内浩, 黒岩秀介, 並木哲, 渡邊悟士: 超高強度コンクリートの長さ変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.393-394, 2005
- [3] 郭度連, 谷村充, 佐竹紳也, 柴垣昌範: 膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.471-476, 2008.7
- [4] 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針改定調査委員会報告書, 2014
- [5] ACI Committee 201: Guide to durable concrete, ACI manual of concrete practice Part 1. Detroit, Mich., 1994
- [6] M. Collepardi: A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.25, pp.401-407, Jul. 2003
- [7] P.K Mehta: Sulfate attack on concrete-a critical review, In: Materials science of concrete III, Journal of the American Ceramic Society, pp.105-30, 1993
- [8] H.F.W. Taylor: Cement chemistry, 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, p.459, 1997
- [9] C.D. Lawrence: Physiochemical and mechanical properties of Portland cements, Hewlett PC, editor. Leas chemistry of cement and concrete. 4th ed. Arnold Publisher, pp.343-419, 1998
- [10] G. Escadeillas, J-E. Aubert, M. Segerer and W. Prince: Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1445-1452, Jul. 2007
- [11] H.F.W. Taylor, C. Famy and K.L Scrivener: Delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.5, pp.683-693, Jan. 2001
- [12] Y. Gu, R-P. Martin, O.O. Metalssi, T.F. Chong and P. Dangla: Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, In press, 28 May 2019
- [13] V. Johansen, N. Thaulow, J. Skalny, Simultaneous presence of alkali silica gel and ettringite in concrete, Advances in Cement Research, Vol.5 pp.23-29, Jan. 1993
- [14] D. Heinz, Deleterious formation of ettringite-like phases in heat-treated mortars and concretes, Ph.D. Thesis, Technical University of Rhein-Westfalen, 255 pages, 1986
- [15] K.L. Scrivener, H.F.W. Taylor, Delayed ettringite formation: A microstructural and microanalytical study, Advances in Cement Research, Vol.5, pp.139-146, Oct. 1993
- [16] M.C. Lewis, K.L. Scrivener, S. Kelham, Heat curing and delayed ettringite formation, Materials Research Society symposia proceedings, Vol.370, pp.67-76, Jan. 2011
- [17] F.P. Glasser, The role of sulfate mineralogy and cure temperature in delayed ettringite formation, Cement and Concrete Composites, Vol.18, pp.187-193, Jan. 1996

- [18] D. Heinz, U. Ludwig, Mechanisms of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment, ACI Special Publication, Vol.100, pp.2059-2072, Apr. 1987
- [19] D. Heinz, U. Ludwig, I. Ruediger, Delayed ettringite formation in heat-treated mortars and concretes, Betonwerk + Fertigteil – Technik, Vol.55, pp.56-61, Jan. 1989
- [20] C.D. Lawrence: Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature, Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.903-914, May. 1995
- [21] K. Tosun, B. Baradan, Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion, Cement and Concrete Composites, Vol.32, pp.271-280, Apr. 2010
- [22] S. Diamond, Delayed ettringite formation-processes and problems, Cement and Concrete Composites, Vol.18, pp.205-215, Jan. 1996
- [23] I. Odler and Y. Chen: Effect of cement composition on the expansion of heated-cured cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.853-862, May 1995
- [24] G. W. Scherer, Crystallization in pores, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1347-1358, Aug. 1999
- [25] J. Flatt and G.W. Scherer: Thermo dynamics of crystallization stresses in DEF, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.325-336, Mar. 2008
- [26] J. Bizzozero, C. Gosselin, K.L. Scrivener, Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate, Cement and Concrete Research, Vol.56, pp.190-202, Feb. 2014
- [27] C. Famy: Expansion of heat-cured mortars, Thesis (PhD), University of London, 1999.
- [28] X. Brunetaud, L. Divet, and D. Damidot: Delayed Ettringite Formation: Suggestion of a Global Mechanism in Order to Link Previous Hypotheses, 7th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, SP-222, Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, pp.63-76, May 2004
- [29] P.Y. Yan, X. Qin, The effect of expansive agent and possibility of delayed ettringite formation in shrinkage-compensating massive concrete, Cement and Concrete Research, Vol.31, pp.335-337, Feb. 2001
- [30] J. Stark, K. Bollmann: Delayed ettringite formation in Greece, Weimar (Germany), Bauhaus-University, 2000
- [31] M. Katsioti, N. Patsikas, P. Pipilikaki, N. Katsiotis, K. Mikedi and M. Chaniotakis, Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement, Construction and Building Materials, Vol.25, pp.900-905, Feb. 2011
- [32] Y. Fu, Delayed ettringite formation in portland cement products, Ph.D. Thesis, University of Ottawa, 199pages, 1996
- [33] Y. Fu, P. Xie, P. Gu, J.J. Beaudoin: Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste, Cement and Concrete Research, Vol.24,

pp.1015-1024, Sep. 1994

- [34] Y. Shao, C.J. Lynsdale, C.D Lawrence and J. H. Sharp: Deterioration of heat-cured mortars due to the combined effect of delayed ettringite formation and freeze/thaw cycles, *Cement and Concrete Research*, Vol.27, pp.1761-1771, Nov. 1997
- [35] S.O. Ekololu, M.D.A. Thomas and R.D. Hooton: Implications of Pre-formed Microcracking in Relation to the Theories of DEF Mechanism, *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.161-165, Feb. 2007
- [36] C. Famy, K.L. Scrivener, A. Atkinson, A.R. Brough: Effects of an early or a late heat treatment on the microstructure and composition of inner C-S-H products of Portland cement mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp.269-278, Feb. 2002
- [37] H.H. Patel, C.H. Bland, A.B. Poole: The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.25, pp.485-490, Apr. 1995
- [38] M.C. Lewis, K.L. Scrivener: A microstructural and micro analytical study of heat cured mortars and delayed ettringite formation, *Proceeding of 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, Vol.4, pp.409-416, 1997
- [39] J.I. Escalante-Garcia, J.H. Sharp: Variation in the composition of C-S-H gel in portland cement pastes cured at various temperatures, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.82, pp.3237-324, Apr.1999
- [40] Y. Shimada, V.C. Johansen, F. M. G. Miller and T. O. Mason: Chemical Path of Ettringite Formation in Heat-Cured Mortar and Its Relationship to Expansion: A Literature Review, *PCA Research and Development Bulletin RD136*, No. 2476, 2005
- [41] E. Grabowski, B. Czarnecki, J.E. Gillott, C.R. Duggan and J.F. Scott: Rapid Test of Concrete Expansivity due to Internal Sulfate Attack, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.5, pp.469-480, Sep. 1992
- [42] S. Kelham: The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Composites*, Vol.18, pp.171-179, Dec. 1996
- [43] Y. Fu, J. Ding and J.J. Beaudoin: Expansion of Portland Cement Mortar Due to Internal Sulfate Attack, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No.9, pp.1299-1306, Sep. 1997
- [44] T. Ramlochan, P. Zacarias, M.D.A. Thomas and R.D. Hooton: The Effect of Pozzolans and Slag on The Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature Part I: Expansive Behavior, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp.807-814, Jun. 2003
- [45] K. Tosun: Effect of SO₃ content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp.761-772, Oct. 2006
- [46] Z.Z. Zhang, J. Olek and S. Diamond: 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, pp.1737-1742, Nov. 2002
- [47] P.E. Grattan-Bellew, J.J. Beaudoin and V.-G. Vallé: Effect of Aggregate Particle Size and Composition on Expansion of Mortar Bars due to Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.8, pp.1147-1156, Aug. 1998
- [48] S. Kelham: Influence of Cement Composition on Volume Stability of Mortar, *ACI Special Publication*, Vol.177, pp.27-46, Jan. 1999
- [49] 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, *日本コンクリート年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.838-843, 2014.7
- [50] C.D. Lawrence: *Laboratory Studies of Concrete Expansion Arising from Delayed Ettringite Formation*, British Cement Association, Berks, UK, 1993, 147 pages
- [51] A. Shayan and I. Ivanusec: An Experimental Clarification of the Association of Delayed Ettringite Formation with Alkali-Aggregate Reaction, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, No.3, pp.161-170, Dec. 1996
- [52] A. Pavoine, X. Brunetaud, L. Divet: The Impact of Cement Parameters on Delayed Ettringite Formation, *Cement & Concrete Composites*, Vol.34 pp.521-528, Apr. 2012
- [53] P. E. Grattan-Bellew, J. J. Beaudoin V. -G. Vallé: Delayed ettringite formation: Effect of clinker particle size and composition on expansion of mortar bars, in: M. Cohen, S. Mindess, J. Skalny (Eds.), *Materials Science of Concrete Special Volume, The Sidney Diamond Symposium*, American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, August 1998, pp.295-307
- [54] R. Yang, C. D. Lawrence and J. H. Sharp: Effect of Type of Aggregate on Delayed Ettringite Formation, *Advances in Cement Research*, Vol.11, No. 3, pp.119-132, Jul. 1999
- [55] M.A. Shamaa, S. Lavaud, L. Divet, J.B. Colliat, G. Nahas and J.M. Torrenti: Influence of Limestone Filler and of The Size of the Aggregates on DEF, *Cement and Concrete Composites*, Vol.71, pp.175-180, Aug. 2016
- [56] I. Meland, H. Justnes, J. Lindgard, and S. Smeplass: Durability Problems Related to Delayed Ettringite Formation and/or Alkali Aggregate Reactions, *Proceedings of the 5th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Leuven, Belgium, IV, 8 pages, Jun. 1995
- [57] O.R. Batic, C.A. Milanese, P.J. Maiza and S.A. Marfil: Secondary Ettringite Formation in Concrete Subjected to Different Curing Conditions, *Cement and Concrete Research*, Vol.30 pp.1407-1412, Sep. 2000
- [58] P.W. Brown and J.V. Bothe: The Stability of Ettringite, *Advances in Cement Research* Vol.5, No.18, pp.47-63, Apr. 1993
- [59] H. Siedel, S. Hempel and R. Hempel: Secondary Ettringite Formation in Heated Portland Cement Concrete: Influence of Different W/C Ratios and Heat Temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, pp.453-461, Mar. 1993
- [60] P. K. Mehta: Stability of Ettringite on Heating, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.55,

No.1, pp.55-56, Jan. 1972

- [61] Q. Zhou, E.E. Lachowski and F.P. Glasser: Metaettringite, A Decomposition Product of Ettringite, *Cement and Concrete Research* Vol.34, No.4, pp.703-710, Apr. 2004
- [62] H.Y. Ghorab and E.A. Kishar: Studies on the Stability of the Calcium Sulfoaluminate Hydrate. Part I: Effect of Temperature on the Stability of Ettringite in Pure Water, *Cement and Concrete Research*, Vol.15, pp.93-99, Jan. 1985
- [63] Y. Shimada and J.F. Young: Thermal Stability of Ettringite in Alkaline Solutions at 80°C, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.2261-2268, Dec. 2004
- [64] X.B. Wang, Z.H. Pan, X.D. Shen and W.Q. Liu: Stability and Decomposition Mechanism of Ettringite in Presence of Ammonium Sulfate Solution, *Construction and Building Materials*, Vol.124, pp.786-793, Oct. 2016
- [65] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland and P. Lunk: Effect of Temperature on The Pore Solution, Microstructure and Hydration Products of Portland Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.483-491, Apr. 2007
- [66] K.O. Kjellsen, R.J. Detwiler and O.E. Gjorv: Development of Microstructures in Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.21, pp. 179-189, Jan. 1991
- [67] K.L. Scrivener: Microstructure of concrete, *Materials Science of Concrete I*, American Ceramic Society, Columbus, Ohio, pp.127-161, 1989
- [68] E. Gallucci, X. Zhang and K.L. Scrivener: Effect of Temperature on The Microstructure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H), *Cement and Concrete Research*, Vol.53, pp.185-195, Nov. 2013
- [69] C. Famy, K.L. Scrivener, A. Atkinson and A.R. Brough: Influence on The Storage Conditions on The Dimensional Changes of Heat-cured Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.795-803, May 2001
- [70] L.A. Graf: Effect of Relative Humidity on Expansion and Microstructure of Heat Cured Mortars, *Portland Cement Association RD139*, p.50, 2007
- [71] M.A. Shamaa, S. Lavaud, L. Divet, G. Nahas and J.M. Torrenti: Influence of Relative Humidity on Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Composites*, Vol.58, pp.14-22, Apr. 2015
- [72] 樋口隆行, 江口政孝, 盛岡実, 坂井悦郎: 高温炭酸化処理した膨張材を混和したモルタルの物性と水和反応解析, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.67, pp.129-136, 2013
- [73] 羽原俊祐, 福田峻也, 小山田哲也, 藤原忠司: コンクリートの DEF による硫酸塩膨張現象について, *セメント・コンクリート論文集*, No.60, pp.335-341, 2006
- [74] 谷村充, 兵頭彦次, 佐藤良一: 膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.24, No.1, pp.951-956, 2002

第四章 膨張材の添加量が超高強度モルタルの自己収縮及び遅れ膨張に及ぼす影響

- [75] 寺本篤史, 丸山一平: 超高強度セメントペーストの若材齢自己収縮メカニズムに関する研究, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, 2012
- [76] 寺本篤史, 丸山一平: 超低水セメント比シリカフェュームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.634, pp.2069-2076, 2008.12
- [77] 寺本篤史, 堀田和宏, 大久保孝昭, 丸山一平: 膨張材および収縮低減剤を使用した低水結合材比シリカフェ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
- [78] 三谷裕二, 番地成朋, 谷村充, 丸山一平: 高温度履歴を受けた低水結合材比シリカフェューム混和セメントの強度および水和反応特性, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1495-1500, 2009.7
- [79] 佐藤正己, 小泉公志郎, 梅村靖弘: 熱養生履歴が超高強度コンクリート中のセメントおよびシリカフェュームの水和反応および水和物のケイ酸構造へ与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.480-487, 2014
- [80] S. Nagataki and H. Gem: Expansive admixtures (mainly ettringite), *Cement and Concrete Composites*, Vol.20, pp.163-170, 1998
- [81] 盛岡実, 萩原宏俊, 姜珍圭, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: 遊離石灰含有量の多いカルシウムサルホアルミネート系膨張材の水和反応, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, Vol.7, pp.99-106, Oct. 2000
- [82] 山本賢司, 樋口隆行, 中島康弘, 岡実実, 坂井悦郎, 大門正機: 遊離石灰-カルシウムアルミノフェライト-無水セッコウ系膨張材の水和特性, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, Vol.10, pp.293-300, Jun. 2003
- [83] T. Higuchi, M. Eguchi, M. Morioka and E. Sakai: Hydration and properties of expansive additive treated high temperature carbonation, *Cement and Concrete Research*, Vol.64, pp.11-16, Oct. 2014
- [84] J. Champenois, M. Dhoury, C.C.D. Coumes, C. Mercier, B. Revel, P.L. Bescop and D. Damidot: Influence of sodium borate on the early age hydration of calcium sulfoaluminate cement, *Cement and Concrete Research*, Vol.70, pp.83-93, Apr. 2015
- [85] D. Jansen, A. Spies, J. Neubauer, D. Ectors and F. Goetz-Neunhoeffler: Studies on the early hydration of two modifications of Ye'elimite with gypsum, *Cement and Concrete Research*, Vol.91, pp.106-116, Jan. 2017
- [86] F. Winnefeld, L.H.J. Martin, C.J. Müller and B. Lothenbach: Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements, *Construction and Building Materials*, Vol.155, pp.154-163, Nov. 2017
- [87] A. Berrio, C. Rodriguez and J.I. Tobón: Effect of Al_2O_3/SiO_2 ratio on Ye'elimite production on CSA cement, *Construction and Building Materials*, Vol.168, pp.512-521, Apr. 2018
- [88] 佐川孝広, 名和豊春: X 線回折リートベルト法による高炉スラグ量の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.155-160, 2010.7

- [89] 全培糊, 丸山一平: 高炉スラグ微粉末と石灰系膨張材を混和したセメントペーストの若材齢水和挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.712, pp.841-850, 2015.6
- [90] 樋口隆行, 盛岡実, 坂井悦郎, 大門正機: 膨張材を混和したセメントペーストの膨張挙動におよぼす膨張材混和時期の影響, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.105-110, 2000
- [91] 盛岡実: セメント系膨張材の水和反応と材料設計, 東京工業大学学位論文, 1999
- [92] Z. Zhang: Delayed ettringite formation in heat-cured cementitious system, Thesis (PhD), Purdue University, 1999
- [93] X. Xie and J.J. Beaudoin: Mechanism of sulphate expansion I. Thermodynamic principle of crystallization pressure, Cement and Concrete Research, Vol.22, pp.631-640, Jul. 1992
- [94] P. Chaunsali and M. Paramita: Physicochemical interaction between mineral admixtures and OPC-calcium sulfoaluminate (CSA) cements and its influence on early-age expansion, Cement and Concrete Research, Vol.80, pp.10-20, Feb. 2016
- [95] 橋田浩, 黒田泰弘, 山崎庸行, 友澤史紀: 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, pp.51-63, 1999.1
- [96] 鈴木雅博, 丸山一平, 中瀬博一, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.635, pp.1-10, 2009.1

第五章 RC 建築物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響要因

5.1 はじめに

第一章で述べたように、RC 構造物の耐久性の向上という目標に対して、調合段階での高強度・高耐久性材料の選択は重要な方針の一つである。しかしながら、計画あるいは施工段階における対策が困難な場合も多数存在するため、供用期間中に生じた劣化に対して適切な補修・改修によって、構造物の耐久性を保持・向上することも重要な対策となる。

RC 構造物の供用期間に生じるコンクリート系材料の乾燥収縮は、ほとんど避けることができないコンクリートの宿命的な課題であり、コンクリート躯体のみならず、左官モルタル等の仕上げ層にも、ひび割れを誘発する可能性がある。躯体に発生するひび割れが構造物の耐久性を直接的に低下させることは言うまでもないが、左官モルタル等の仕上げ材に生じたひび割れも、外壁の美観性を低下させ、構造物の耐久性を低下させる。そのため、RC 構築物の耐久性を向上するという目標に対して、左官モルタルの乾燥収縮の抑制および、躯体コンクリートに生じた乾燥収縮ひび割れの補修を考慮することが必要不可欠である。

本章では、乾燥収縮が建築物のセメント系材料に与える劣化に関連する事象のうち、左官モルタル仕上げ材の乾燥収縮ひび割れの抑制および、躯体コンクリートに生じた乾燥収縮ひび割れの補修技術に着目し、基礎的な実験検討を行った。

5.2 左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす収縮低減剤及び外壁温度日変動の影響

5.2.1 研究背景と目的

左官モルタルは、建築物表面に施工する保護層であり、建築物の美観性および耐久性に重要な役割を果たす。そのため、セメント系材料の耐久性に関する研究は躯体コンクリートを対象としたものが圧倒的に多いものの、左官モルタル自体の耐久性、特に、ひび割れの発生に伴う劣化事例を扱った既往の研究は複数報告されている^[1]。

左官モルタルに生じるひび割れの原因として、**図 5-1** に示すように、下地コンクリートとのディファレンシャルムーブメント (Differential Movement) が挙げられる^[2]。RC 建築物のコンクリート躯体表面に施工した左官モルタルは、構造物の表層に位置しているため、外部環境の影響を受けやすい。

例えば、左官モルタルの乾燥収縮が下地コンクリートの拘束を受け、モルタル内部に引張応力を生じさせる。また、日射等の影響により壁面温度が上昇した際も、左官モルタルの線膨張係数がコンクリートと比較して大きいことから、モルタルの温度ひずみはコンクリートより大きくなり、モルタルーコンクリート界面に拘束応力を引き起こす。以上の温度ひずみによる拘束応力は、それそのものがひび割れを発生させるほど大きい問題となることは

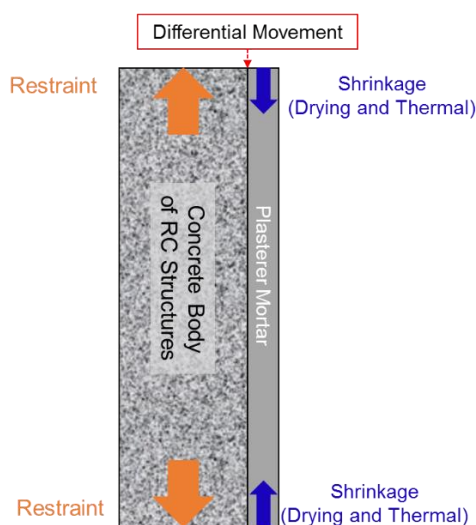


Figure 5-1 Schematic Chart of Differential Movement in Concrete Body and Plasterer Mortar

図 5-1 コンクリート躯体と左官モルタルの界面に生じる
ディファレンシャルムーブメントの概念図

少ないが、乾燥収縮による引張拘束応力を助長しひび割れが生じやすい環境となりえる。

そのため、左官モルタルの乾燥収縮ひび割れを防ぐ目的に対しては、下地コンクリートとのディファレンシャルムーブメントによってモルタルに生じる拘束応力を予測、制御していくことが必要であり、下地コンクリート、左官モルタルそれぞれに発生するひずみ成分に加えて、ヤング係数の発現、クリープ性状を正確に把握することが求められる。

このうちひずみ変動に着目すると、既往の研究において、モルタルの乾燥収縮ひずみに関する実験的検討^{3, 4)}は複数報告されており、セメントペーストの乾燥収縮メカニズムと骨材の複合則に立脚した予測手法に関する検討も進んでいる⁵⁾。

しかし、外壁の温度変動に伴う温度ひずみが左官モルタルのひび割れに及ぼす影響に関する検討は少ないのが現状である。

左官モルタルへ及ぼす外壁温度の影響を検討した事例の一つに、大久保ら⁶⁾の研究が挙げられる。この研究では外気温度の年変動を考慮して、各月に施工したモルタルに発生したひび割れ率に関する検討を行い、秋（9月、10月）に左官モルタルを施工した場合、ひび割れ率が著しく大きくなる結果を得ている（図 5-2、図 5-3 参照）。

この現象について大久保らは、左官モルタル施工後数か月以内の季節変動による温度低下が乾燥収縮ひび割れの発生を助長すると推察している⁶⁾。このことはモルタル硬化時の温度が左官モルタルのひび割れリスクに大きく関与していることを意味する。

以上の研究により、モルタルの温度ひずみがひび割れリスクに影響を及ぼすことは明らかであるが、温度ひずみの影響を定量的に評価するためには、モルタルの線膨張係数を考慮することが不可欠要因である。

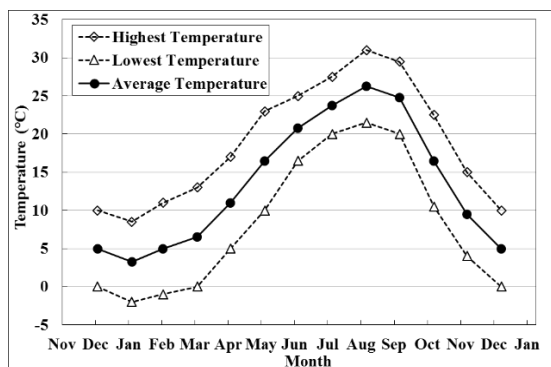


Figure 5-2 Temperature Variation during A Year [6]

図 5-2 気温の年間変化[6]

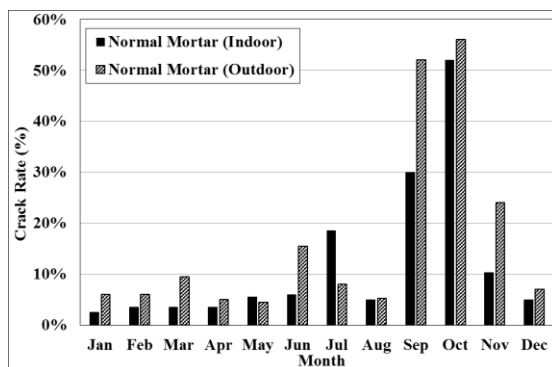


Figure 5-3 Crack Rate for Plaster Mortar Constructed in Different Month (Without SR)

図 5-3 左官モルタルの施工月に対するひび割れ率 (SR 無) [6]

図 5-4 は、モルタルに生じる線膨張係数の経時変化の概念図である。図に示すように、材齢極初期（材齢 24 時間前）において、注水直後に大きな線膨張係数を有する水が支配的働く段階から、モルタル（コンクリート、セメントペースト）マトリクス形成に伴い、線膨張係数が減少し、その後自己乾燥によって徐々に大きくなる[7]。図に示すような線膨張係数の履歴を考慮すると、左官モルタルの施工直後に、温度低下を伴う場合、極めて大きな温度収縮ひずみが生じる可能性が考えられる。もちろんこの間のモルタルはクリープも大きいため、ひずみの大きさがすなわち引張応力の大小に直結するわけでないが、左官モルタル施工直後の温度変動方向はひび割れリスクに寄与していると考えられる。

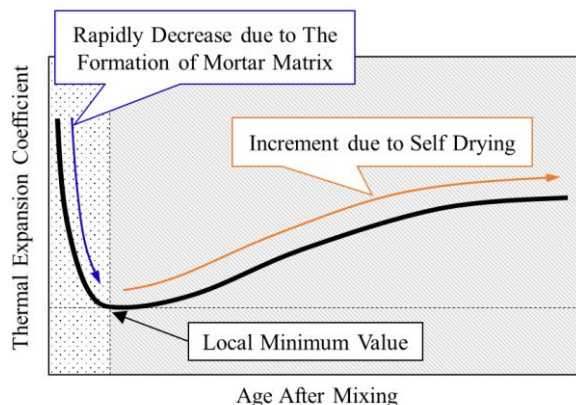


Figure 5-4 Schematic Chart of Thermal Expansion Coefficient Variation in Early Age [7]

図 5-4 材齢初期における線膨張係数経時変化の概念図[7]

以上より、左官モルタルの温度ひずみがひび割れリスクに及ぼす影響に関しては、外壁温度の年変動が重要なことは既に明らかにされているが、日変動による影響も考慮する必要

があると考えられる。外壁温度の日変動がひび割れリスクに対して影響を及ぼすことが明らかになれば、左官モルタルを施工する適切な時刻を指定するために役に立つ。

一方、調合段階におけるモルタルの乾燥収縮ひび割れ制御対策として、収縮低減剤の活用に関する研究が進み、その低減効果が報告されている^[8]。左官モルタルを対象として、乾燥収縮ひび割れ抑制効果に及ぼす外壁温度年変動の影響に関して、先の文献^[6]で検討が行われている。

当該論文において、収縮低減剤を使用した左官モルタルの施工時期を変更させて得られたひび割れ率の結果を図 5-5 に示す。収縮低減剤が使用していない場合（図 5-3 参照）と比べて、収縮低減剤を使用した場合は、ひび割れ率が明らかに減少している。特に、ひび割れ率が非常に高い秋季施工（9 月、10 月）の場合に対して、収縮低減剤の使用することによって大幅にひび割れ率を低減させることが分かる。これらの結果より、ひび割れ発生しやすい時期に収縮低減剤を使用することで、効果が十分に発揮されることが考えられる^[6]。

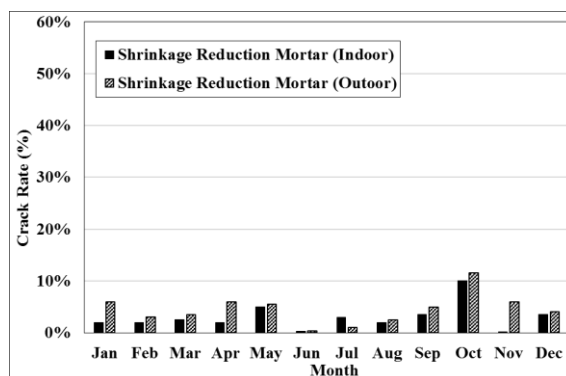


Figure 5-5 Crack Rate for Plaster Mortar Constructed in Different Month (With SR)^[6]

図 5-5 左官モルタルの施工月に対するひび割れ率（SR 有）^[6]

以上の背景を踏まえて、本検討では、左官モルタルの施工後の温度変動ならびに、収縮低減剤の活用に関して検討を行う。

具体的には、左官モルタル施工直後の温度変動に着目し、①午前中の施工を想定し、施工直後に温度が上昇する場合と、②午後の施工を想定し、施工直後に温度が下降する場合において温度ひずみが左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす影響についての検討を行う。また、左官モルタルの乾燥収縮ひずみを低減する目的で使用する収縮低減剤が、上記の温度ひずみにどのような影響を与えるのかについても併せて議論する。

5.2.2 実験概要

モルタルの温度ひずみを適切に評価するためには、モルタルの線膨張係数を取得することが必要である。一般的に、モルタルの線膨張係数は $15 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 程度の値が使用されることが多いが、実際には骨材種類^[9]の影響を受け、また硬化過程および内部含水状態の変化によって経時的にも変動する^[10, 11]。そのため本実験では、外壁温度の日変動を模擬し

た温度履歴を与えた条件において、モルタルの線膨張係数の経時変化並びに温度ひずみの経時変化を取得することを目的とする。加えて、収縮低減剤を添加した場合についても、これらの諸物性を実験的に取得する。

(1) 実験材料及び調合条件

本実験で使用したモルタルは、収縮低減剤の添加無し (PL) と添加有り (SR) の 2 種類である。使用した材料の概要および調合条件を表 5-1 および表 5-2 にそれぞれに示す。市販の普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は既往の研究⁶⁾を参考し 52%にした。また、細骨材はセメントの質量に対して 2.4 とした (細骨材体積比は約 2.9)。収縮低減剤はセメント質量に対して 3%を添加し、それぞれの試験体にセメント添加用ポリマーディスパーションとして EVA をセメント質量に対して 10%を添加した。計量する際に、EVA の場合は 55%を、収縮低減剤の場合は 100%を水に置換して計算した。モルタルの練上り温度を統一するため、セメントの温度は 27.5°Cにした。

モルタルの練り混ぜには、ホバートミキサを使用し、低速で 1 分間、高速で 3 分間練り混ぜ、掻き落としの後さらに 1 分間高速で練り混ぜた。結果として左官モルタルの練り上がり温度は 21.8~23.6°Cであったが、その後の養生により、注水後 40 分以内に 27.5°Cに達した。

Table 5-1 Materials Used for Mortars

表-1 モルタルに使用した材料概要

Material Components	Outline of Material Components
Cement (C)	Ordinary Portland Cement (Density: 3.15g/cm ³)
Fine Aggregate (S)	Crushed Sand Produced in Kurose, Higashi-Hiroshima (Saturated Surface Dry Density: 2.58g/cm ³)
EVA	Main Component: Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Emulsion
Shrinkage Reducing Agent (SR)	Main Component: Lower Alcohol Alkylene Oxide Adduct

Table 5-2 Compounding Details of Mortars

表 5-2 モルタルの調合条件

Symbol	W/C (mass%)	S/C (mass%)	Admixture	
			EVA/C (mass%)	SRA/C(mass%)
PL	52	240	10	-
SR			10	3

(2) 温度条件

5.1 節に説明したように、本実験は、左官モルタル施工直後温度の昇降に着目し、それぞれの条件において、線膨張係数および温度ひずみを取得することを目的とする。このため、本実験のモルタル試験体の養生温度履歴の設定は、図 5-6 に示す、9 月の東広島市にお

る RC 造建築物（南側）の外壁温度の日変動履歴の実測データを参考にした。実験用温度履歴を抽出した結果を図 5-7 に示す。

図 5-7 に示すように、日中の外壁温度変化を想定して、温度の上昇と下降履歴を有し、最高 35℃、最低 20℃となるような温度履歴を単純化し、実験用養生温度として採用した。

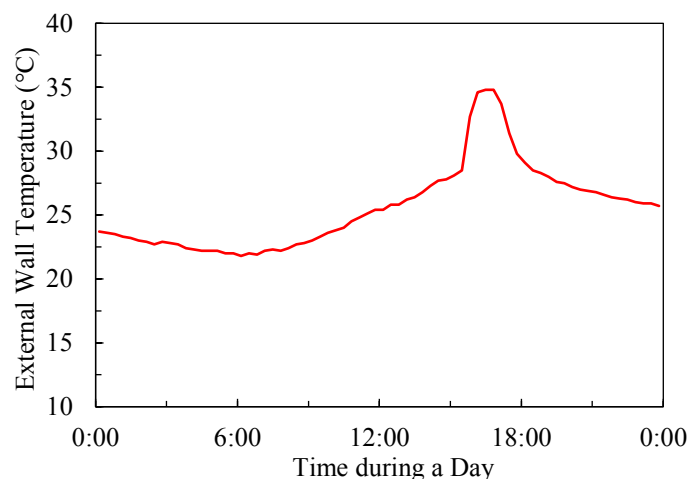


Figure 5-6 External Wall Temperature Variation during A Day Acquired in RC Structure (South Side) Located in Higashi-Hiroshima City

図 5-6 東広島市における RC 造建築物（南側）の外壁温度日変動の測定例

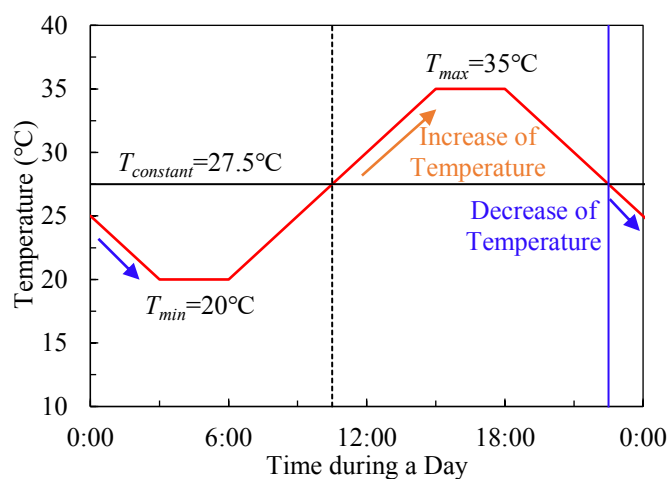
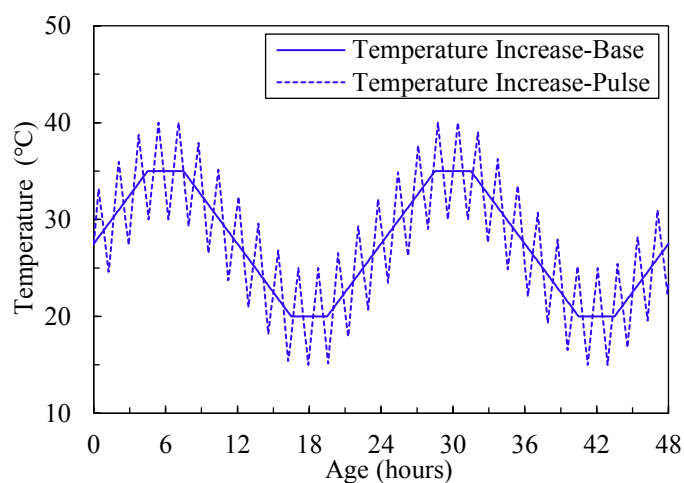


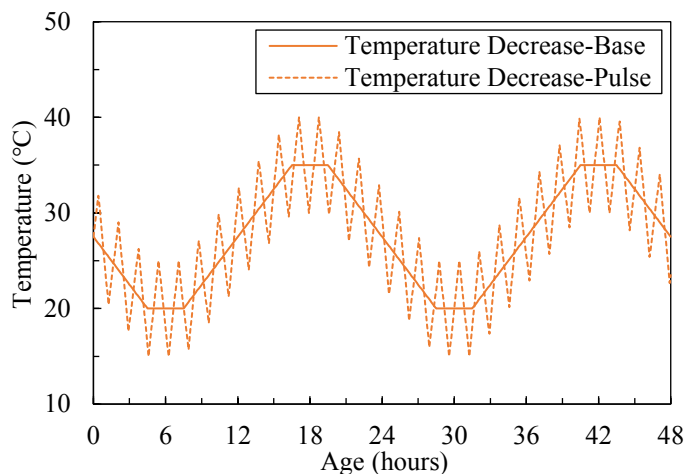
Figure 5-7 Temperature History Simulated the Daily Variation of External Wall Temperature Acquired in RC Structure (Sout Side)

図 5-7 RC 造建築物の外壁温度（南側）の日変動を模擬した温度履歴

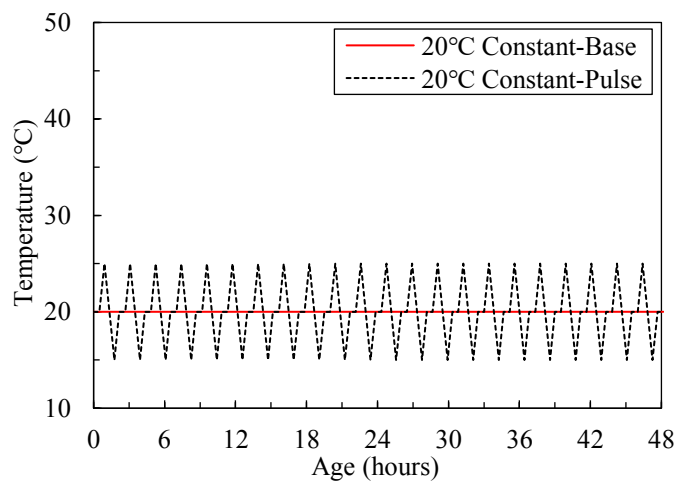
試験体に与える温度養生条件では、初期温度から 35℃まで昇温履歴（図に“-Increase”と表記する）、初期温度から 20℃まで降温履歴（図に“-Decrease”と表記する）、2つの温度履歴プログラムを設定した。それぞれの養生温度の経時変化は図 5-8(a), (b)に示している。



(a) Temperature Increase History; (a) 温度上昇履歴



(b) Temperature Decrease History; (b) 温度下降履歴



(c) 20°C Constant Temperature History; (c) 20°C一定温度履歴

Figure 5-8 Temperature Histories for Mortar Curing

図 5-8 モルタル養生用温度履歴

ここに、昇温履歴養生では、前節に述べたように、左官モルタルを午前中に施工し、施工直後に温度が上昇すると想定しており、降温履歴は左官モルタルを午後に施工し、施工直後に外壁温度が下降すると想定した。

本実験では、モルタルの諸物性に及ぼす練上がり温度の影響を極力取り除くため、最高温度と最低温度の平均値である 27.5℃を初期温度に設定し、昇温、降温履歴を設けた。なお、試験体設置から温度上昇、下降が開始されるわずかな時間の差異が実験結果に影響しないよう、注水時刻から 1 時間までは 27.5℃一定温度の養生を行い、その時点から、**図 5-8**、**図 5-9** に示すような温度履歴を与えた。そこで、本節に示す全ての図において、原点の材齢は温度上昇あるいは下降を開始した材齢（注水後 1 時間）である。

また、線膨張係数の経時変化を取得するため、各履歴のベース温度に加えて、3.2.2 (1)節に説明した、**図 5-8(a)**、**(b)**に併せて示すように、±5℃の温度パルスを有する履歴を与えた。

更に、線膨張係数の経時変化に及ぼすベース温度の影響を確認するため、**図 5-8(a)**、**(b)**に示した温度履歴の別に、20℃一定温度を基準として、130 分ごとに±5℃の温度パルスを有する温度履歴（以下、“20℃ Constant”と表記する）を採用して実験を実施した。20℃一定温度の履歴は**図 5-8(c)**に示している。

以上のことを整理すると、実施したベースとなる温度履歴は、昇温、降温、20℃一定 3 種類であり、それぞれのベース履歴に対して、線膨張係数測定用の温度パルスの有無で、計 6 種類の温度履歴を、普通モルタルおよび収縮低減剤を有するモルタルに与えた。本実験ではそれぞれの調合と温度履歴の組み合わせについてそれぞれ 1 体ずつ試験を実施した。調合条件ごとに温度条件の組み合わせを表 5-3 にまとめる。

Table 5-3 Summary of Compounding and Temperature Curing Conditions for Mortar

表 5-3 モルタルの調合に対する養生温度条件のまとめ

Compounding Conditions	Temperature History	Temperature Pulse
Plain Mortar (PL)	Increase	With/Without
	Decrease	With/Without
	20°C Constant	With/Without
Shrinkage Reducing Mortar (SR)	Increase	With/Without
	Decrease	With/Without
	20°C Constant	With/Without

(3) 線膨張係数及び温度ひずみ算出方法

本実験では、温度制御したモルタルの体積変化を測定する手法として、第三章 3.3.2 (1)節に詳細的説明したように、既往の文献に提案された非接触型変位計による体積変化測定装置を使用して、注水から材齢 48 時間までのモルタルのひずみ経時変化を取得した。

線膨張係数の経時変化は、以下に示す 2 つ通りの方法により算出した。

(I) 20°C一定温度をベースとする場合

20°C一定温度を基準として±5°Cの温度パルスを与えた場合については、既往の研究^[12]で採用されている方法に則り、第三章 3.3.2 (2)節に紹介したような計算方法で線膨張係数を算出した。簡単にまとめて言うと、所定材齢で導入される 1) +5°C, 2) -5°C, 3) +5°C, 4) -5°Cという4つのステップの内、1), 2) 並びに3), 4) の空間において、自己収縮ひずみが線形的に進行すると仮定し、全ひずみを平均化することによる自己収縮ひずみの影響をキャンセルすることで、温度ひずみを抽出する。取得した温度ひずみと温度の関係性から線膨張係数を得た。採用した方法の概要を図 5-9 に示す。

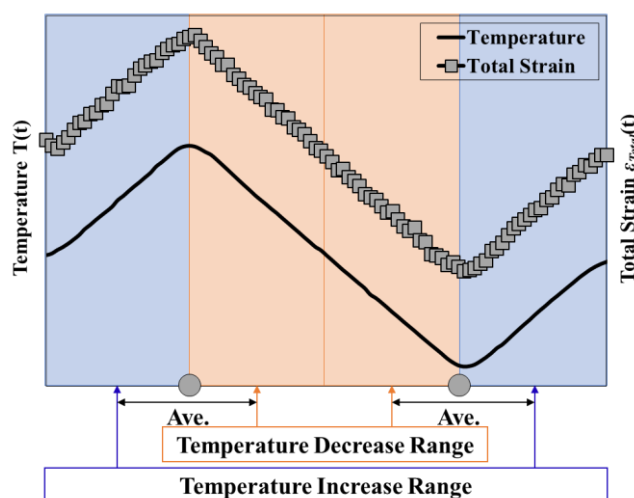


Figure 5-9 Schematic Chart of Calculation Method for Thermal Expansion Coefficient
(20°C Constant Temperature)

図 5-9 線膨張係数算出方法の模式図 (20°C一定温度)

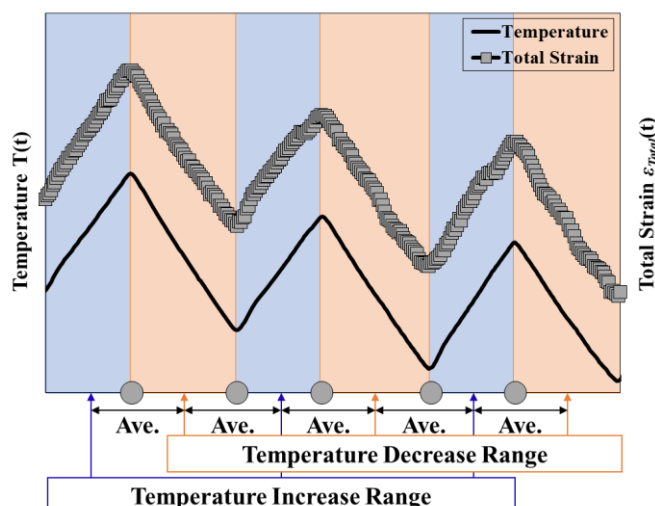


Figure 5-10 Schematic Chart of Calculation Method for Thermal Expansion Coefficient
(Temperature Increase and Decrease)

図 5-10 線膨張係数算出方法の模式図 (温度上昇と下降)

(II) 温度上昇・下降のベース履歴を有する場合

ベース温度が昇降を有する場合に、一定温度と同じ方法で線膨張係数を算出することが困難である。そのため、図 5-10 の模式図に示した方法を採用して求めた。本実験で設定した温度履歴において、図 5-10 中の●印で示す材齢を基準として、その前後の材齢は上昇域と下降域に分けられる。本検討では、ある材齢における線膨張係数の値を、その前後の温度上昇域と温度下降域それぞれの温度とひずみの関係から得られた傾きの平均値を採用した。

上記の方法で得られた線膨張係数の経時変化から、第三章の 3.2.2 (2) 節に説明した増分法によって、1 分ごとに温度ひずみの増分を算出し、増分法の合算することで各材齢の温度ひずみを得た。その後、計測で得られた全ひずみの増分から温度ひずみの増分を差し引くことで自己収縮ひずみの増分を取得し、合算することで自己収縮ひずみの経時変化を取得した。

5.2.3 実験結果及び考察

(1) 線膨張係数

本実験で得られた各温度履歴の線膨張係数の経時変化を図 5-11 に示す。第三章と第四章で得られた結果と同様に、本実験においても、モルタルの線膨張係数は材齢極初期の比較的大きな値から減少し、屈曲点に達した後、緩やかに増加し、材齢 48 時間で約 $16 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ の値を示した。図 5-4 に基づき説明したように、注水してから、比較的大きな線膨張係数が有する水が支配的に働き、セメントの水和に伴うモルタルマトリクス形成によって線膨張係数が低下させることと、屈曲点以降の段階に、自己乾燥に起因するセメント硬化体中の含水率が気液界面に生じる収縮駆動力の差異によって線膨張係数の増加を引き起こすことと考えられた。

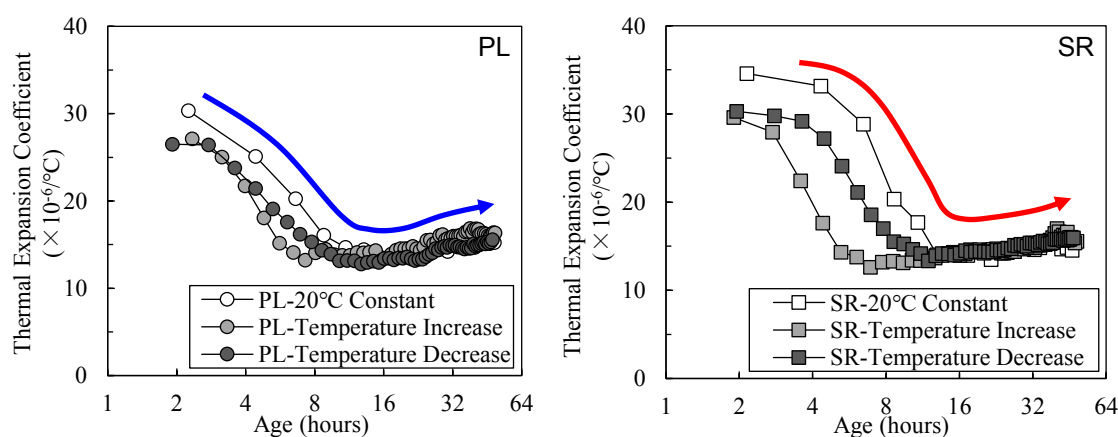


Figure 5-11 Thermal Expansion Coefficient Variation with Age

図 5-11 線膨張係数の経時変化

上記の線膨張係数経時変化に及ぼす温度履歴の影響を取り除くため、アレニウス則による有効材齢の概念を用いて評価した。本検討では、第三章と同様に、式 5-1 に示した有効材齢式^[13]を使用して、各温度条件における有効材齢を得た。

$$t_e = \sum \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \Delta t \quad \text{式 5-1}$$

ここに、 T_e ：有効材齢 (hours)

E_a ：見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

R ：気体定数 (8.314J/(mol・K))

T_0 ：基準温度 (293K)

T_k ：試験体温度 (K)

Δt ：単位時間 (1min)

$E_a/R=4000$ (K) である。

有効材齢を用いて線膨張係数の経時変化を整理した結果を図 5-12 に示している。

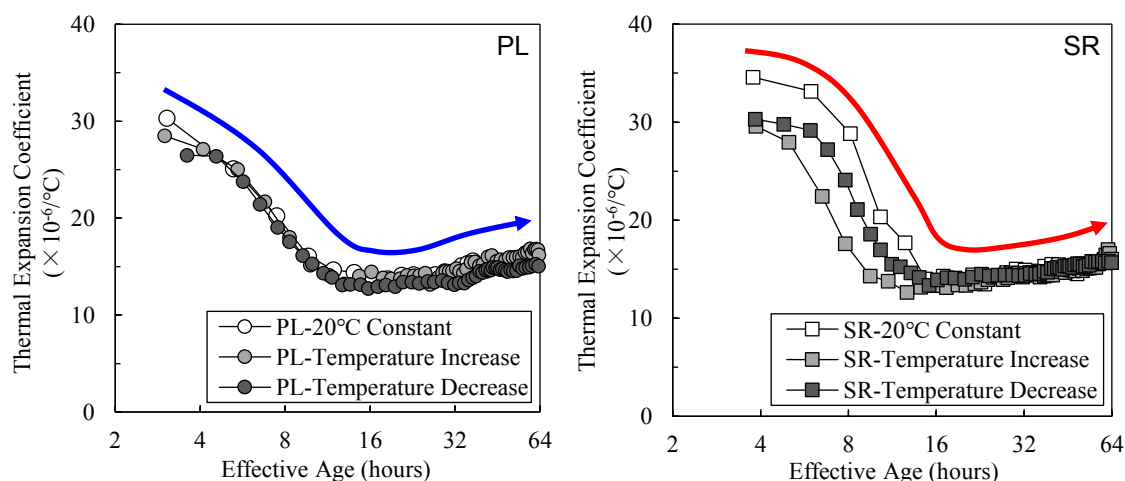


Figure 5-12 Thermal Expansion Coefficient Variation with Age
(Effective Age Used, $E_a/R=4000K$)

図 5-12 線膨張係数の経時変化 (有効材齢使用, $E_a/R=4000K$)

図に示すように、PL と SR を比較すると、SR は PL とほぼ同様な傾向を示しているが、初期の減少傾向が PL と比較して緩やかであることが分かる。これは、収縮低減剤によるセメントの水和反応の遅延効果によるものと考えられる。また、SR では、線膨張係数の急減段階において、ベース温度の相違による線膨張係数の経時変化を、上記有効材齢式で自分に補正できていないことが確認される。このことは、収縮低減剤の添加によって、モルタルマトリクス形成過程がより温度履歴の影響を受けやすくなっていることを意味している。

既往の研究によって極小値点(屈曲点)以降の段階上昇傾向は収縮低減剤の添加により抑制可能であることが明らかにされている^[4]が、本実験は水セメント比が 52%であり、材齢 48 時間までの計測では自己乾燥による影響が小さく、そのため PL, SR とともにほぼ同様の測定値を示した。

(2) 温度ひずみと全ひずみ

気温の季節変動や日変動等により、モルタルが温度変化を有する場合、線膨張係数の経時変化は大きな意味を持つ。温度上昇時と下降時の線膨張係数が異なる場合、同一量の温度変化であってもモルタルに温度収縮・温度膨張ひずみが残留する。

寺本らの研究において、水和発熱により高温履歴を有するマスコンクリートを想定した試験体の線膨張係数および温度ひずみの経時変化を取得したところ、温度が下降する時の線膨張係数が大きくなり、結果として温度下降後に収縮ひずみが発生させる結果が得られた^[15]。この結果は、水和発熱により高温履歴を有するマスコンクリートにおいて、線膨張係数の経時変化がひび割れリスクを高める可能性があることを意味する^[15]。

図 5-13 は、各調合のモルタルにベースとなる温度履歴を与えた場合の全ひずみの経時変化であり、図 5-14 は、全ひずみと線膨張係数の経時変化を用いて、5.2.2(2)節で説明した方法によって得られた各モルタルの温度ひずみの経時変化である。図 5-15 は材齢 48 時間に、初期温度と同じ 27.5°Cに戻ってきた時点における全ひずみと温度ひずみを示したものである。

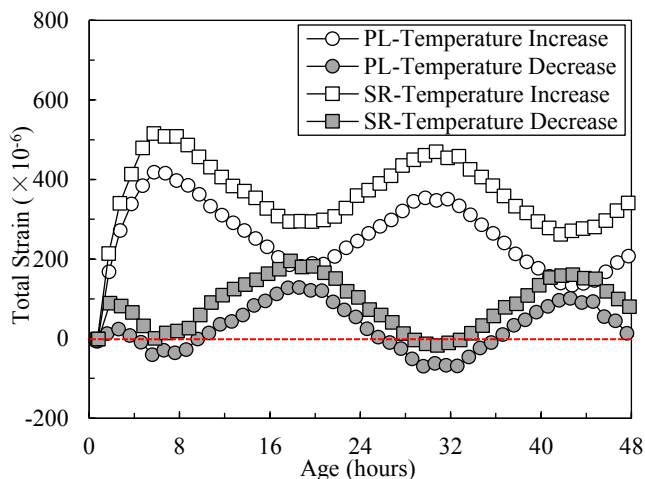


Fig.5-13 Variation of Total Strain Generated under Curing Temperature Condition Simulating Daily Variation of External Wall Temperature

図 5-13 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴中に生じた全ひずみの経時変化

図 5-13 の全ひずみの経時変化をみると、PL, SR いずれの調合についても、山型の履歴を繰り返しており、全ひずみに及ぼす温度ひずみの影響が大きいことが分かる。本実験で用い多調合は、水セメント比が 52%であり自己収縮ひずみが小さく、乾燥収縮も生じないため、この結果は妥当である。

また、図 5-15 より、施工直後に温度上昇を受ける場合と、温度下降する場合では、48 時間後に温度が 27.5°Cに戻った場合に、PL で 195 (x 10⁻⁶)、SR で 260 (x 10⁻⁶) の全ひずみ差が生じている。これは、線膨張係数が大きな値を有する材齢 5 時間以前における温度の上昇また下降が大きく影響するためである。

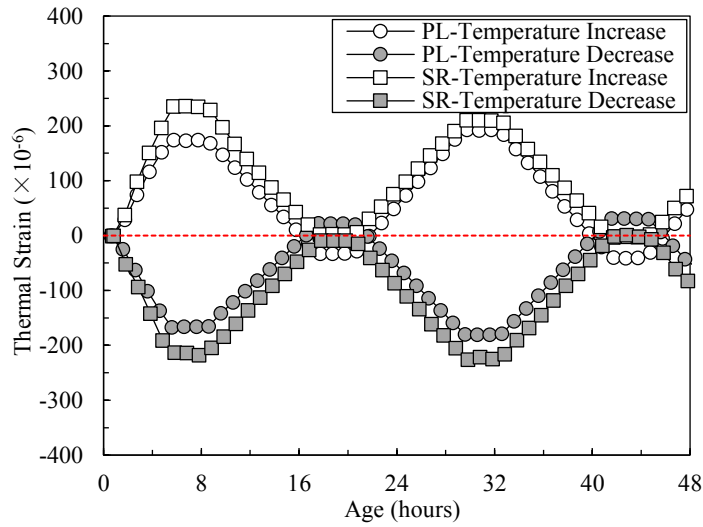


Fig.5-14 Variation of Thermal Strain Generated under Curing Temperature Condition Simulating Daily Variation of External Wall Temperature

図 5-14 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴中に生じた温度ひずみの経時変化

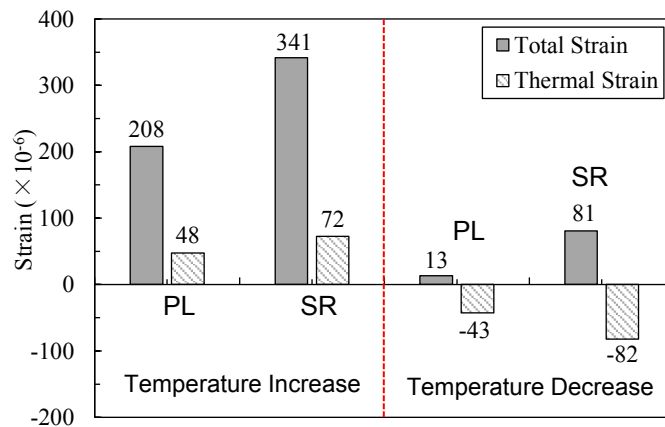


Figure 5-15 Comparison of Total Strain and Thermal Strain at Age of 48 hours

図 5-15 材齢 48 時間における全ひずみと温度ひずみの比較

この間の温度ひずみの経時変化に着目して、収縮低減剤の影響を見てみると、SRは5.3.1節で述べたように線膨張係数の減少段階がより緩やかに進行するため、初期の温度変化の影響をより大きく受けることが確認できる。即ち、収縮低減剤を使用した場合、施工直後に温度下降を受ける条件では、より多くの温度収縮ひずみを発生させる要因になり得る。一方で、自己ひずみを含めた全ひずみの傾向を見ると、いずれの温度履歴でもSRはPLより収縮が小さい結果となっており、本実験程度の躯体温度の日変動では収縮低減剤の使用によってひび割れリスクが増大する可能性は小さいと考えられる。

以上、極若材齢時のひずみ挙動を述べたが、ひずみ挙動はその大小が直接ひび割れリスクに直結するものではなく、ヤング係数の発現や、クリープ性状を正しく把握し応力解析を実

施する必要がある。

5.2.4 応力解析

以上の実験結果に基づき、本節では、左官モルタルに生じ拘束応力に対して、若材齢時の温度の日変動による影響について FEM による数値解析を行う。

応力解析には 3 次元温度応力プログラム JCMAC3 を使用した。JCMAC3 の特徴として、以下の解析を行うことができる。

- ① セメントの水和発熱による熱伝導解析
- ② 水分の逸散による湿気移動解析
- ③ 温度応力/乾燥収縮応力/自己収縮応力解析
- ④ コンクリートメッシュ分割と独立に任意パイプ位置設定可能なパイプクーリング解析

(1) 解析モデル概要及び解析条件

本解析では、RC 建築物における壁厚 300mm の耐震壁表面に施工された、厚さが 30mm の左官モルタルを想定して、図 5-16 に示すような単純な解析モデルを作成した。また、本モデルにおいて最大主応力が発生する要素は図 5-16 に青いマークで示したものになるため、以降の考察はこの要素の解析結果を示す。

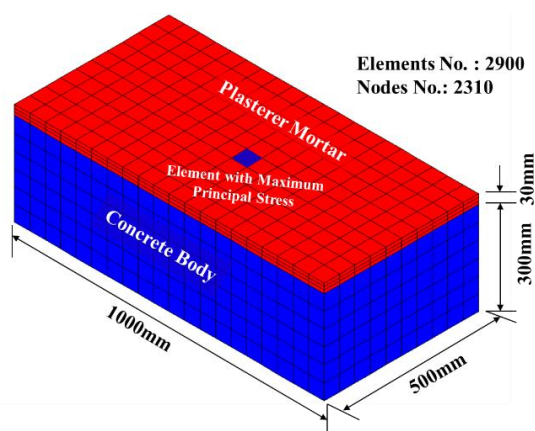


Figure 5-16 Outline of FEM Analysis Model

図 5-16 FEM 解析モデル概要

解析のパラメータとしては、収縮低減剤の有無を想定した異なる乾燥収縮ひずみ 2 種類と、施工時刻の違いを考慮した外気温度の日変動履歴である。モルタルの乾燥収縮ひずみは、収縮低減剤の有無を対象として、片側乾燥条件で実施した松本ら^[16]の実験を参考して、図 5-17 に示すモデルを採用した。

解析場を使用したモルタルの外気温度条件は、躯体温度の日変動を考慮した 27.5°C から上昇履歴 (図 5-8 (a) のベース温度と同じ) を設定し、この温度履歴を、モルタルのヤング係数の発現に対して 2 時間ずつずらした複数の条件 (図 5-18) で実施した。この時間の

ずれが 12 時間に達した時が, 5.2.3 節, 図 5-8(b)の温度下降 (ベース温度) 条件と一致する。また, 長期的な乾燥収縮の影響を把握するため, 上記の温度条件について, 材齢 10 日以降は, 27.5°C一定として 300 日まで解析を実施した。

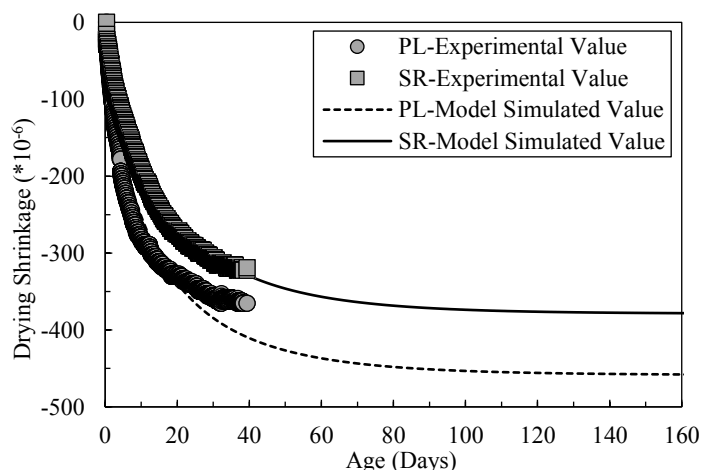


Figure 5-17 Drying Shrinkage of Mortars Used in FEM Analysis ^[16]

図 5-17 解析用モルタルの乾燥収縮ひずみ^[16]

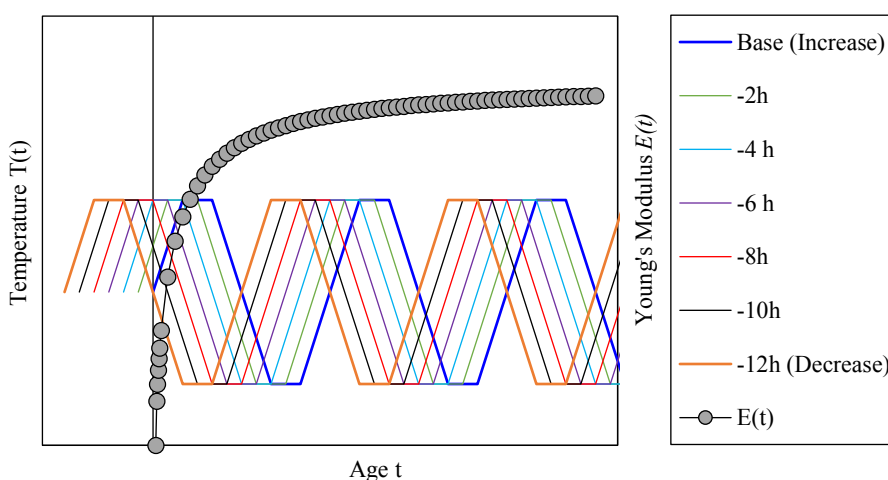


Figure 5-18 Relationship of Mortar Young's Modulus and Temperature

図 5-18 モルタルヤング係数の発現と温度の関係

コンクリートおよびモルタルの伝熱物性は「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」^[17]を参考し, 表 5-4 の通り設定した。下地コンクリートの応力物性は, ヤング係数:22GPa, ポアソン比:0.2, 線膨張係数:10 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を使用した。クリープ特性については, 有効ヤング係数法を採用した。セメント系材料のクリープは, セメントペーストの量大きい程小さくなる特性^[18]を考慮して, 「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」で採用されているコンクリートのクリープ係数の 5/6 の値を採用した。

Table 5-4 Thermal Properties of Concrete Body and Plasterer Mortar Used in FEM Analysis [17]

表 5-4 解析用下地コンクリートと左官モルタルの伝熱物性^[17]

Thermal Properties	Analysis Objects	
	Concrete Body	Plasterer Mortar
Thermal-Body Definition	No-Heating Element	Heating Element
Initial Temperature (°C)	27.5	27.5
Thermal Expansion Coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10	15
Heat Transfer Coefficient ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	3	2.8
Specific Heat ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	1.02	0.928
Density (kg/m^3)	2300	2100

なお、本解析では、乾燥収縮ひずみに対する温度の日変動の影響を定性的に把握するために実施したものであり、ひび割れ発生によるひずみ軟化を考慮していないため、解析結果の数値は参考値である。

(2) 解析結果及び考察

収縮低減剤の使用が左官モルタルに生じさせた主応力に及ぼす低減効果を確認するために、解析による得られた主応力の経時変化を図 5-19 に示す。収縮低減剤により低減された乾燥収縮ひずみの影響では、PL と比較して、材齢 300 日時点まで、約 1MPa 程度の引張応力の低減が認められた。

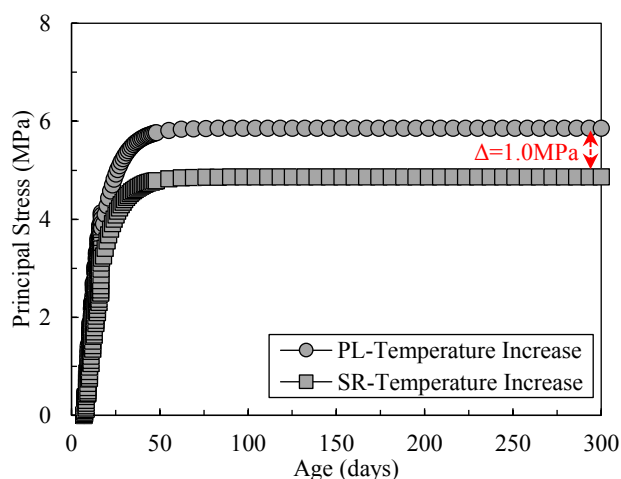


Figure 5-19 Effect of Shrinkage Reduction Agent on Principal Stress Generated in Mortar

図 5-19 モルタルに生じた主応力に及ぼす収縮低減剤の影響

一方、温度変動はモルタルの応力伝達を行えるようになる凝結始発材齢の影響を受けるため、図 5-19 のような主応力の発現が日変動履歴によって異なる。今回の解析条件では、

温度履歴変動に応じて主応力の差分が最大 0.2MPa (材齢 300 日の値に対して 3.4%) 程度であった。即ち、温度上昇履歴より温度下降した場合は、モルタルに生じさせた主応力が 0.2MPa 程度大きい結果になっている。

この結果より、モルタルの剛性が発現する材齢において、温度下降が生じる温度履歴を有する場合に、より大きな拘束応力が導入されることが分かる。このことは左官モルタルの施工時間の考慮により、ひび割れリスクを低減できることを示している。

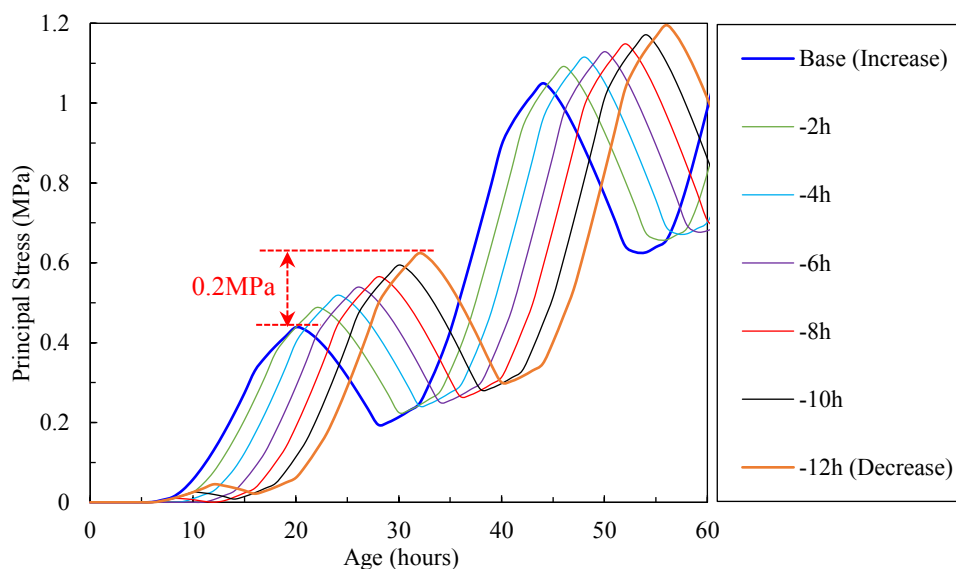


Figure 5-19 Effect of Temperature Variation on Principle Stress Generated in Mortar

図 5-19 モルタルの主応力に及ぼす温度変動の影響

本節の検討によって、左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす施工直後温度変動方向の影響を確かめた。実験結果により、左官モルタルの施工直後の温度低下はより大きな収縮ひずみを引き起こすと明らかとなった。原因として、左官モルタル施工直後の線膨張係数が大きい段階に、温度の下降が収縮側の大きな温度ひずみを引き起こすためと考えられる。また、収縮低減剤を添加した場合、線膨張係数の初期低下が遅延されるため、温度変動の影響を受けやすい。数値解析結果を併せてみると、収縮低減剤の使用によって、モルタルに生じた引張応力を低減することで、ひび割れリスクを抑制する可能性がある。また、モルタルの硬化過程において、温度変動方向の相違により生じさせた全ひずみの差異に応じて、モルタルに生じさせ拘束応力の差異を確認できた。以上より、左官モルタルの日中施工時刻を考慮することで、収縮ひび割れリスクを抑制できると考えられる。

更に、温度変動方向の影響に加えて、日中に温度上昇・下降速度や時間の長さはひび割れリスクに影響を与える可能性が有し、今後に詳細的検証する必要であると考えられる。

5.3 RC 建築物の乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に及ぼす壁面温度と部材の拘束効果の影響

5.3.1 研究の背景と目的

5.2 の検討では、日中に生じる外壁温度の変動が、左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに影響を及ぼすことを明らかにした。一方、供用期間において、乾燥収縮ひび割れは、左官モルタルだけでなく、コンクリート躯体にもひび割れを引き起こし、構造物全体の耐久性を低下させる可能性がある。

実構造物に対して、ひび割れの発生を確認した後、適切な補修を実施することは、コンクリート構造物の耐久性を向上させるために重要な維持管理項目の一つである。本節では、RC 建築物におけるコンクリートのひび割れ補修技術に着目し、実構造物を対象とした長期間モニタリングおよび数値解析による検証を行い、ひび割れ補修技術の確立に関する基礎的な研究を行った。

コンクリート構造物のひび割れ補修技術に関して、補修工法および補修材の選定が最も大きな課題と考えている。いくつかの公的機関の仕様書^[19]で提示されている補修材・補修工法の選定フローにおいては、「ひび割れ挙動の有無」、「ひび割れ幅」等の指標が選定根拠になっている。

しかし、「ひび割れ部の挙動の有無」に関しては、実際にひび割れ開閉挙動を取得することの労力の大きさから、実測値を使用せず、経験によって判断している場合が多い。即ち、補修材の選定が十分な工学的根拠に基づいて行われているとは言えないのが現状である。

この結果として、補修後に、補修部から再びひび割れが発生する事例もみられ、コンクリート構造物のひび割れ開閉挙動をより簡便かつ高精度に実測あるいは推定する手法が求められている。

実際に構造物のひび割れ開閉挙動を測定した既往の研究^[20,21]では、構造物に生じたひび割れの開閉挙動は、壁面の環境要因によって大きな影響を受けることが報告されている。しかしそれぞれの要因を定性的、定量的に整理するまでには至っていない。大久保らの研究^[22]において、夏期と冬期の各一週間程度の期間に渡って実建築物に生じた貫通ひび割れの開閉挙動を測定した事例が報告されている。この事例によると、ひび割れの開閉挙動は、周辺部材による拘束や、外部環境（温度、湿度）変化等の影響を受けるとしている。

なかでも特筆すべき事例として、屋外側壁面が日射の影響を受ける日中において、屋外側のひび割れと屋内側のひび割れは、反対方向に挙動し、壁面にはそり変形が生じている結果を報告している。一方で、この既往の研究は夏期から冬期に亘って連続的に測定したものではないため、季節間の温度変動がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響に関しては、不明な点が残されている。

ひび割れの開閉挙動には、温度の他にも、含水率変化（降雨）や、対象部材の拘束条件、対象ひび割れの形状（ひび割れ発生要因）など多数の影響要因が考えられるが、本節の研究では、ひび割れ開閉の最も大きな影響要因と考えられる壁面温度の日変動および年変動によって生じるひび割れの開閉挙動について検討を行う。それに加えて、周囲部材の拘束度が

ひび割れ開閉挙動に与える影響に関する検討も実施した。

ひび割れ開閉挙動の長期モニタリング対象となるひび割れの選定に際しては、極力複雑な要因が含まれないための配慮として、比較的単純な形状を有する乾燥収縮による貫通ひび割れを対象とした。壁面温度とひび割れ開閉挙動の相関について検討する場合、日射条件や気温の日変動、年変動は地域や対象建物によって全く異なることが予想されるため、日本の各都市におけるひび割れ開閉挙動のデータを蓄積していく計画のはじめとして、本検討はまず、北海道札幌市と広島県東広島市における構造物を対象としてひび割れ開閉挙動のモニタリングを実施した。

さらに、上記モニタリング結果の合理性を検証するため、簡易な解析モデルを利用して、温度変動や部材の拘束条件がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を定性的に把握することを目的とした。

5.3.2 北海道にある実建築物のモニタリング概要

実建築物に生じたひび割れの開閉挙動は気候区分によって異なると考えられるため、寒冷地域の体表地として札幌市の RC 建築物を選定した。対象建築物は、壁面に乾燥収縮による貫通ひび割れを有し、かつ長期間のモニタリング測定の許可が得られたもので、その概要は以下のとおりである。

対象建物：北海学園大学工学部山鼻キャンパス 1 号館 (図 5-20(a))

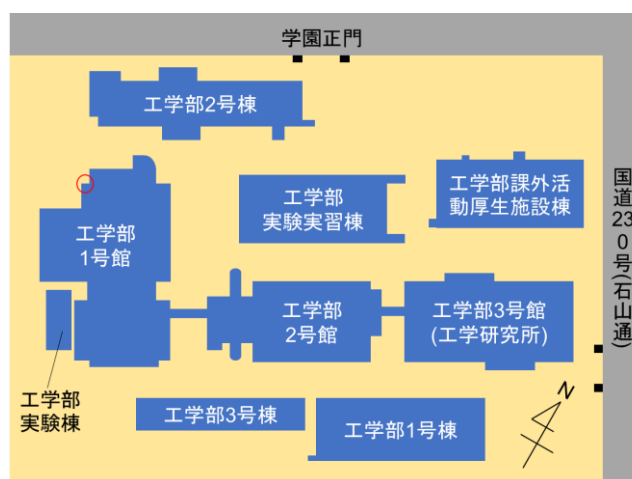
概要：RC5 階建て

測定期間：2018 年 9 月から (2019 年 6 月現在、継続中)

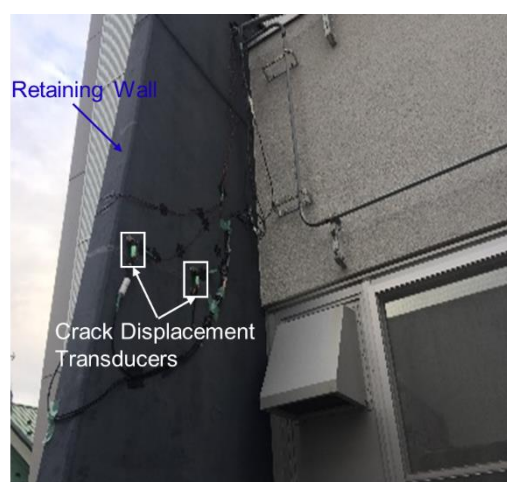
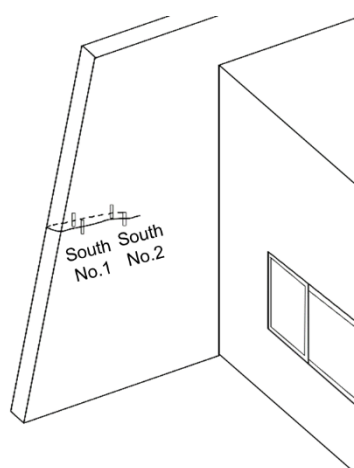
測定箇所：測定対象部材は、対象建物から張り出した擁壁 (Retaining Wall) であり、南面から北面に貫通した乾燥収縮ひび割れが生じている (図 5-20(b))。東側で対象建物と接合しているため、東側方向でひび割れ挙動は拘束を受けることが予測される。また、上部には拘束材となる梁が存在せず、西側は比較的外部拘束が小さい。対象の初期ひび割れ幅はクラックスケールにより 0.1mm 以下であると確認している。

亀裂変位計 (Crack Displacement Transducer) によるひび割れ挙動の測定は、上記擁壁の南側と北側で行った。図 5-20(b)に南面の計測位置を示すが、西より外部拘束が小さいと考えられる南 1 と東側建物による拘束が大きいと予想される南 2 で行った。北面での計測は、南 1 の真裏 (北 1)、南 2 の真裏 (北 2) で行っている。実際のモニタリングの様子を図 5-20(c)に示す。

壁面温度の影響を把握するため、変位計設置箇所の極近傍に熱電対を設置し、壁面の温度の経時変化を同時に測定した。



(a) Planar Position of Morning Structure (Red Circle); (a) 対象建築物の平面位置 (赤○印)



(a) Position of Crack; (b) ひび割れ位置 (c) Landscape of Morning; (c) モニタリング風景
Figure 5-20 Outline of Crack Behavior Long-term Morning (Hokkai-Gakuen University, Eng.1)

図 5-20 実建築物におけるひび割れ挙動長期間測定概要 (北海学園大学工学部 1 号館)

5.3.3 北海道にある実建築物のモニタリング結果及び考察

(1) 壁面温度とひび割れ開閉挙動の測定結果

札幌市において、2018/9/1 から 2018/11/30 までの期間に測定した壁面温度およびひび割れ開閉の経時変化の例として、南 1 および北 1 の測定結果を図 5-21 と図 5-22 に示す。

図 5-21 より、測定期間中における壁面温度は、細かな日変動を伴いながら 9 月から 11 月にかけて緩やかに低下していることが確認できる。また、壁面の方角が壁面温度の日変動に及ぼす影響を確認するため、全測定期間からある一週間 (9/10-9/18) の壁面温度の推移を取り出したものが図 5-23 である。図より、壁面は気温の日変動の影響を受けながら温度上昇、下降サイクルを繰り返すこと、日光が直射する南面において日中の壁面温度が北面より 10°C 程度高くなっていることが確認できる。

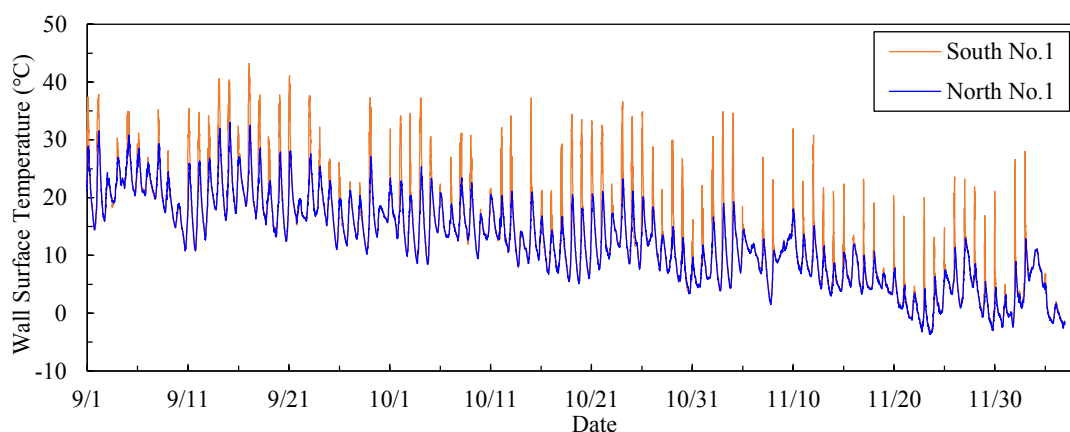


Figure 5-21 Morning Result of Wall Surface Temperature Variation with Date

図 5-21 壁面温度のモニタリング結果 (南 1, 北 1)

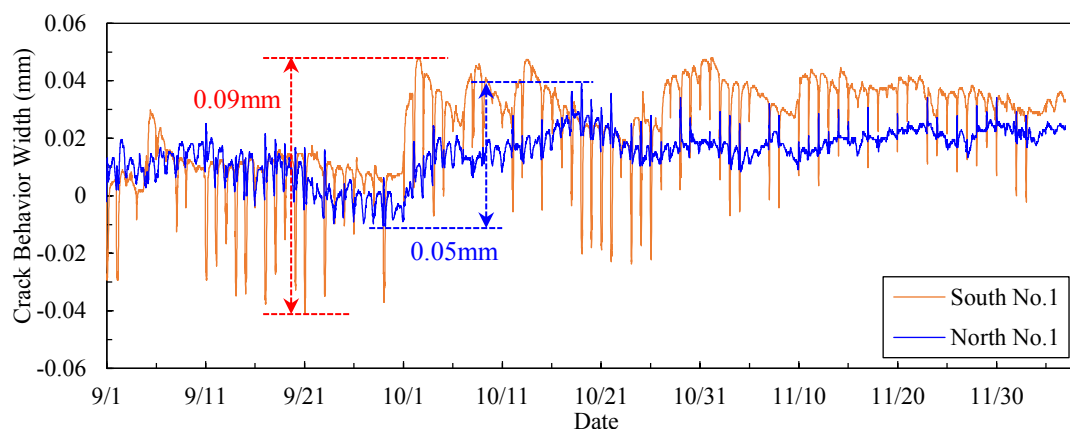


Figure 5-22 Morning Result of Crack Behavior Width Variation with Date

図 5-22 ひび割れ開閉挙動のモニタリング結果 (南 1, 北 1)

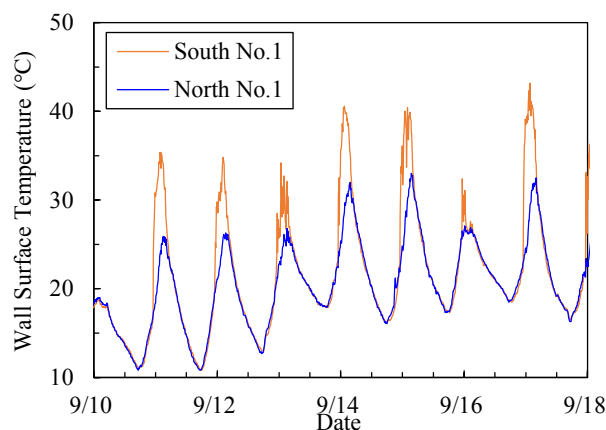


Figure 5-23 Wall Temperature Variation (South No.1 and North No.1)

図 5-23 壁面温度変動 (南 1, 北 1)

また、図 5-22 は、測定期間中における、南 1 および北 1 地点のひび割れの開閉挙動の経時変化である。図中の縦軸は 9/1 の 0 時時点を基準としたひび割れ開閉を示している。図より、いずれのひび割れ幅も刻々と変化していること、南面のほうが北面よりひび割れ開閉挙動の幅が大きいことが確認できる。測定期間中において、ひび割れ開閉幅は南 1 で 0.09mm、北 1 で 0.05mm であった。

(2) ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度の影響

既往の研究^[22]で指摘されている通り、図 5-21～図 5-23 の結果から、ひび割れの開閉挙動は壁面温度と強い相関があることが推察される。そこで、ひび割れ開閉に及ぼす壁面温度の影響を明らかにするため、壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係を図 5-24 に示す。なお、図 5-24 では、日射による壁面温度の日変動の影響を取り除くため、測定期間における午前 7 時時点のデータのみを抽出したものである。図より、ある程度のばらつきがみられるものの、南面、北面ともに、壁面温度の上昇に伴って、ひび割れ幅が減少する結果が見られた。

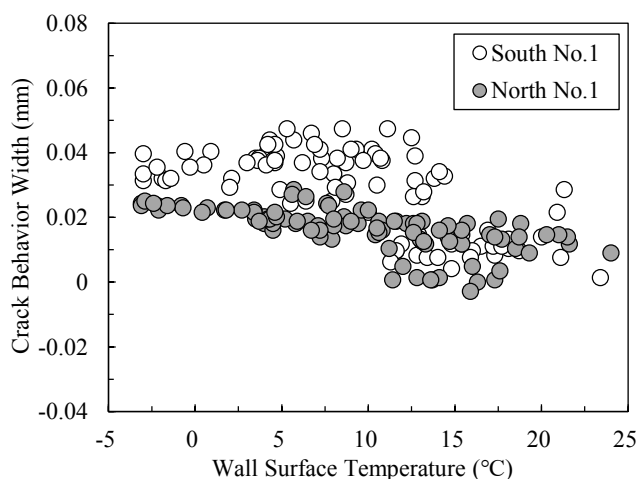


Figure 5-24 Relationship of Crack Behavior Width and Wall Surface Temperature
(South No.1 and North No.1)

図 5-24 ひび割れ開閉幅と壁面温度の関係 (南 1, 北 1)

季節変動のように、緩やかに壁面温度が変化する場合、壁面断面内の温度勾配はほとんどないと考えられる。壁内に温度勾配がない理想的な状態を考えた場合、壁内全体の温度上昇によるひび割れの挙動は図 5-25 の概念図のようになると考えられる。すなわち、温度の上昇によりコンクリートおよび鉄筋には熱膨張が生じる。このとき、対象壁のひび割れ幅の変動を拘束する部材 (外周の柱や梁等) が存在しなければ、壁全体が変形しひび割れは開く方向に挙動すると予測されるが、実構造物のように、周辺部材からも拘束を受ける場合、熱膨張による壁全体の変形は、変形しやすいひび割れ部を埋めるように挙動することが考えられる。

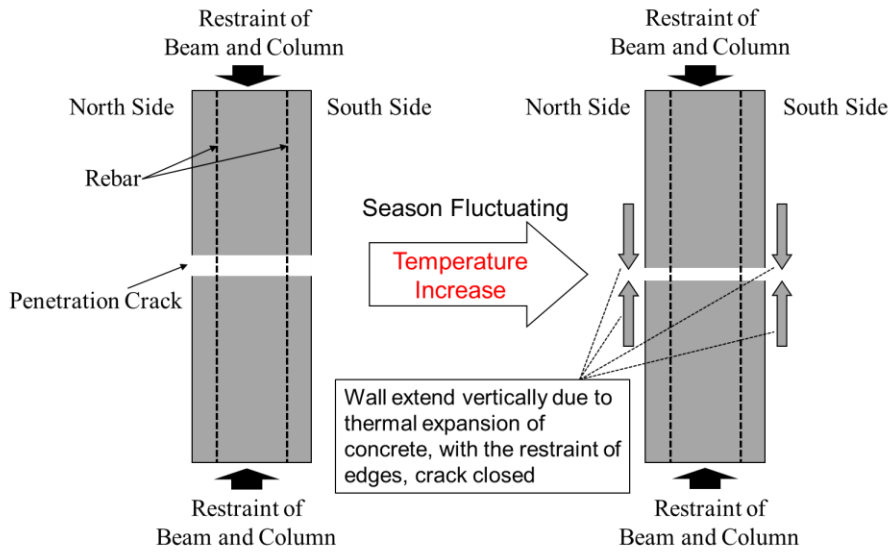


Figure 5-25 Schematic Chart of Cracking Behavior with Wall surface Temperature Increase When Thermal Gradient Does Not Generated in Cross Section

図 5-25 断面に温度勾配が生じない場合温度上昇に伴うひび割れ挙動の概念図

次に、日射によって壁面温度に比較的急速な変動が生じる場合のひび割れ開閉挙動について考察する。図 5-26 は、測定期間において、日射の影響が比較的強い 9 月 12 日の壁面温度のデータを抽出したものである。図に示されるように、日射が南面に当たり出す午前 11 時前から、南面の壁面温度が急激に増大し、南面と北面で明らかな温度差が生じていることが確認できる。それに対して、同じ期間 (9/12) にひび割れ幅の開閉挙動を取り出した結果は図 5-27 に示したものである。壁面温度が上昇する時間帯において、南面と北面ひび割れ

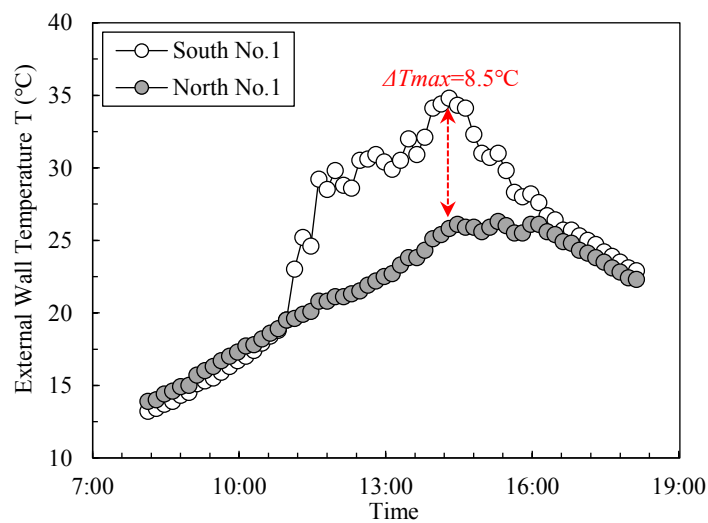


Figure 5-26 Wall Surface Temperature Variation during Sept.12 (South No.1 and North No.1)

図 5-26 9 月 12 日における壁面温度の日変動 (南 1, 北 1)

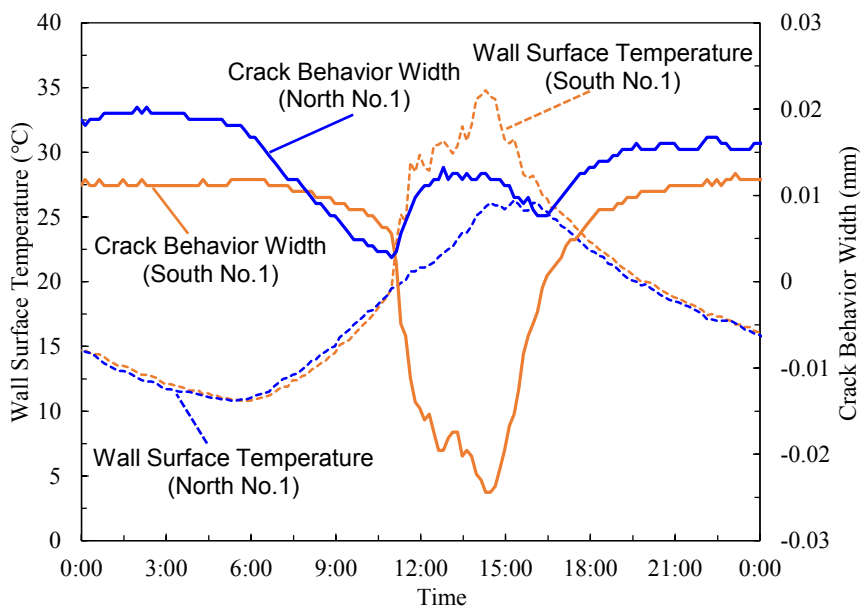


Figure 5-27 Crack Behavior Width Variation during Sept.12 (South No.1 and North No.1)

図 5-27 9 月 12 日におけるひび割れ開閉幅の日変動 (南 1, 北 1)

閉が同じ方向に挙動するが、本モニタリングの場合、日射に伴って温度差が生じる午前、南北の挙動が逆方向に発現するそり変形が生じ、既往の測定結果^[22]が再現された。

そり変形は南北の壁面に大きな温度差が生じることに伴い発生している。このような壁断面内に比較的大きな温度勾配が生じている際のひび割れの開閉挙動と壁面温度の関係性を調べるため、9 月 12 日に得られた両者の値をプロットしたものが図 5-28 である。

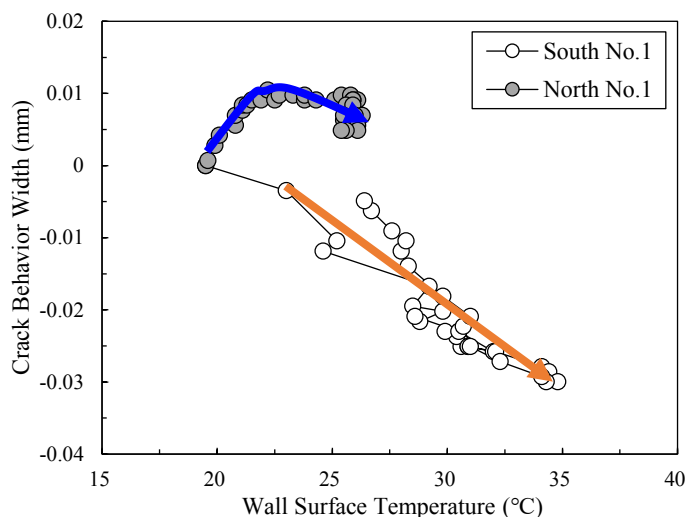


Figure 5-28 Relationship of Crack Behavior Width and Wall Surface Temperature at Sept.12

図 5-28 9 月 12 日におけるひび割れ開閉挙動と壁面温度関係 (南 1, 北 1)

図に示されるように、南面は図 5-24 と同様に、壁面温度の上昇に伴ってひび割れが閉じるが、北面のひび割れは、南面とは逆に開く傾向が確認できる。すなわち、壁全体がそり変形を起こすようなひび割れ開閉挙動が生じている。

外気温度の年変動のように、緩やかに温度変動が生じる場合を想定し、壁南面と北面に極端な温度勾配が生じない条件と、日変動のように壁断面内に温度勾配がある場合のひび割れ挙動の概念図を図 5-29 に示す。

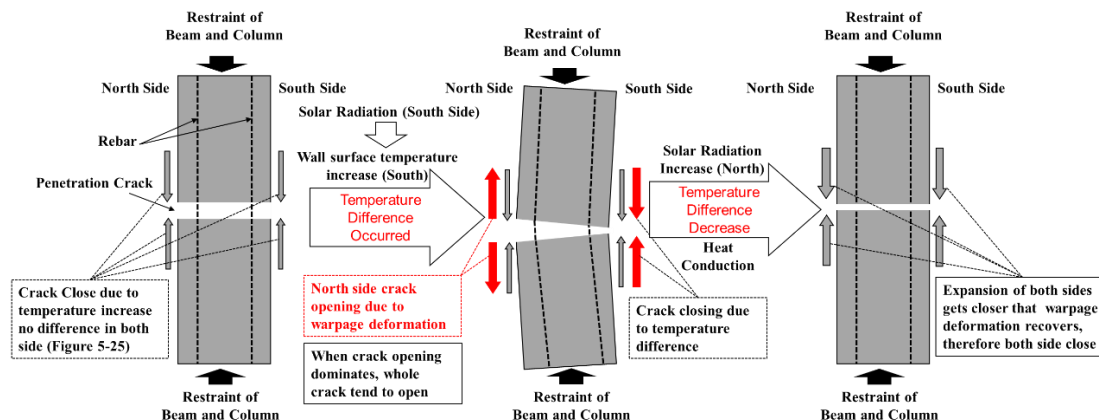


Figure 5-29 Schematic Chart of Cracking Behavior with Wall surface Temperature Increase When Thermal Gradient Generated in Cross Section

図 5-29 断面に温度勾配が生じた場合温度上昇に伴うひび割れ挙動の概念図

壁面温度の年変動の場合は、温度上昇に伴い、ひび割れ全体が閉じる方向に挙動する（図 5-25）。一方、日射によって壁面内に温度勾配が生じる場合には、南面の温度上昇によって、南面にはひび割れが閉じる方向にコンクリートの変形が生じるのに対して、北面には温度変動の駆動力が生じない。この時、壁面内に存在する鉄筋を介して、南面と北面の膨張量の差異が壁のそり変形を引き起こす。つまり、図 5-25 の機構に加えてさらに、南面にはひび割れを閉じる方向の駆動力が、北面にはひび割れを開く方向の駆動力が生じると考えられる。その後、壁面内の熱の移動や、周辺気温の上昇により、壁面北側の温度が上昇した場合、南北間の温度差が減少し、それに起因するそり変形は低減され、北面のひび割れは閉じる方向に転換する。

以上の考察より、壁面温度がひび割れの開閉挙動に及ぼす影響は、年変動のように温度変化が緩やかな場合と、日射を伴う日変動のように比較的急速な変動の場合で異なることが分かる。

仮にひび割れに補修材が注入されている状況を想定した場合、図 5-25 のような断面内に温度勾配が生じない緩やかな温度変動のみが生じるとすると、ひび割れ内の補修材には、一様な圧縮応力もしくは引張応力が生じると考えられる。このとき、補修材と躯体の劣化機構として両者の界面の引張破断を前提とするなら、ひび割れ幅が最大となる時期に補修材

の注入を行い、主に圧縮応力が作用するよう配慮した施工が望ましい。

一方、図 5-29 のような壁全体にそり変形が生じる挙動を考慮した場合、補修材には圧縮・引張が繰り返し作用し、加えて補修材そのものの温度変化による物性の変化も考慮しなければならない。補修材に十分な耐久性を期待する場合には、想定するひび割れ開閉挙動を正しく理解し、それに適した機能を有する材料の選定が重要である。

5.3.4 数値解析による検証

本節では、実建築物におけるモニタリング結果に基づいて、数値解析によってひび割れ開閉挙動に及ぼす温度変化および拘束度の影響を考察する。本解析には、5.2.4 節に説明した、三次元温度応力解析プログラム JCMAC3 を使用した。

(1) 解析モデル概要と解析条件

本解析では、厚さ 150mm を有する柱・梁付き壁において、高さ方向 (Z 軸) の中心に初期幅が 0.2mm の模擬貫通ひび割れを導入した。壁面の配筋は、ダブルの鉄筋要素 (D10 に相当) を 150mm ピッチで設置した。このとき、鉄筋要素の設置にはモデルの連続性が必要であったため、模擬貫通ひび割れ要素は、厚さが 0.2mm の著しくヤング係数が小さい ($E=0.002\text{GPa}$) 要素に置き換えた。上記の模擬貫通ひび割れは、壁部分のみに存在し、柱部分は通常のヤング係数を使用している。

ひび割れ開閉挙動として、5.3.3 節で述べたような機構を想定した場合、ひび割れ開閉幅はいずれも建築物の寸法の影響を受ける。そこで、解析モデルのひび割れ直行方向の高さは実建築物に近い 3000 mm と設定した。また、ひび割れ開閉挙動に及ぼす周辺部材の拘束の影響を再現するため、断面積が 600×600 mm の梁・柱を設置した。実建築物において、熱変形に対する周辺部材の拘束度は不明である。特に実建築物の温度膨張による高さ方向 (Z 軸) への変形に関しては、実測データがほとんどない。

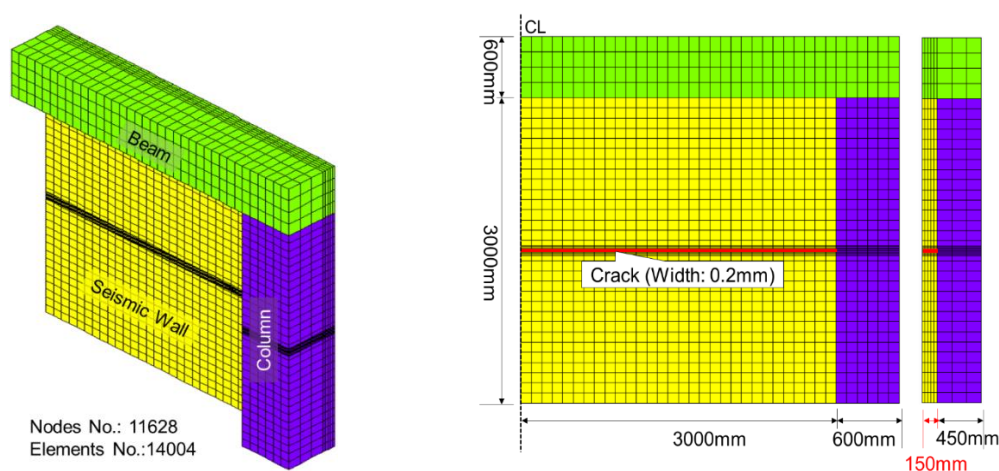


Figure 5-30 Outline of FEM Analysis Model

図 5-30 FEM 解析モデル概要

仮に、梁要素上部の境界条件を完全固定とした場合、実建築物の拘束条件より著しく厳しい状態となり得る。よって今回の解析では、柱要素のヤング係数は一定（22GPa）とし、梁要素上部を完全固定のうえ、梁そのもののヤング係数を変動させることで、実建築物のひび割れ開閉挙動の再現を試みた。図 5-30 に解析モデルの概要を示す。

コンクリート要素の伝熱・応力物性は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」^[17]を参考に設定した。代表的な値を表 5-5 に示す。

Table 5-5 Thermal and Stress Properties of Elements Used in FEM Analysis ^[17]

表 5-5 解析用各部材要素の伝熱・応力物性^[17]

Thermal Properties	Analysis Elements			
	Seismic Wall	Beam	Column	Crack
Heat Transfer Coefficient (W/m ² ·°C)	1.6	1.6	1.6	0.0257
Specific Heat (kJ/kg·°C)	1.02	1.02	1.02	1
Density (kg/m ³)	2300	2300	2300	1
Young's Modulus (GPa)	22	22	22	0.002
Poisson Ratio (-)	0.2	0.2	0.2	0.2

(2) シリーズ 1：壁面温度勾配がひび割れ挙動に及ぼす影響

5.3.3 節で示したモニタリング結果を参考に、壁面温度が緩やかに変化する場合と急速に変化する場合の 2 つの条件を想定して、シリーズ 1 の解析を行った。

シリーズ 1 では、図 5-31 に示す 2 種類の温度履歴を片側の壁のみに与え、この間の模擬貫通ひび割れの最上部節点と最下部節点の相対変位（以下、ひび割れ開閉）を求めた。壁両側の温度差がほとんど生じない条件としては、外気温の昇温速度を +0.1°C/h と遅くし、

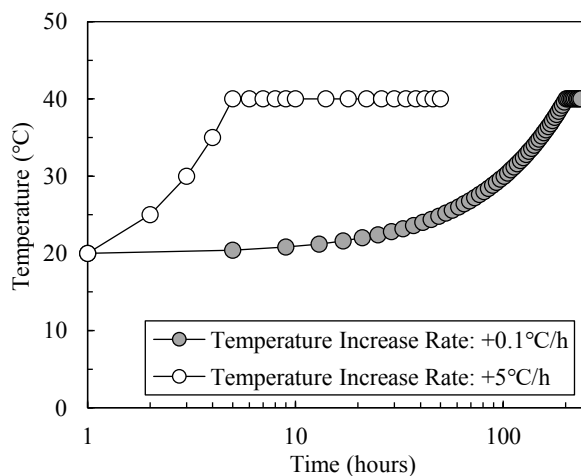


Figure 5-31 Temperature History Used in FEM Analysis

図 5-31 解析用温度履歴

壁両側の温度差が大きくなる条件としては昇温速度を $+5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ と速くした。以下、便宜上、温度履歴を与えた側の壁を「南面, South」その反対側の壁を「北面, North」と称する。なおシリーズ 1 では、ひび割れ開閉の変動が概ね実建築物と等しくなるよう梁部材のヤング係数を 5GPa とした。

図 5-32 は、外気温の昇温速度を $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ とした場合の解析結果のうち、横軸に壁面温度、縦軸にひび割れ開閉をプロットしたものである。図から確認できるように、昇温速度を小さくし、南面と北面との温度差が小さくなるようにした場合、模擬ひび割れの相対変位は、南面、北面ともに閉じる方向に挙動する。これは、図 5-25 の結果を再現する結果である。

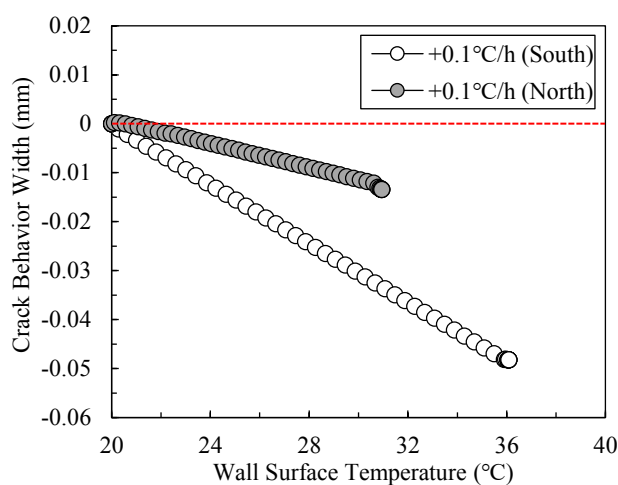


Figure 5-32 Analysis Result When Temperature Increase Slow ($+0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

図 5-32 昇温速度が遅い場合の解析結果 ($+0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

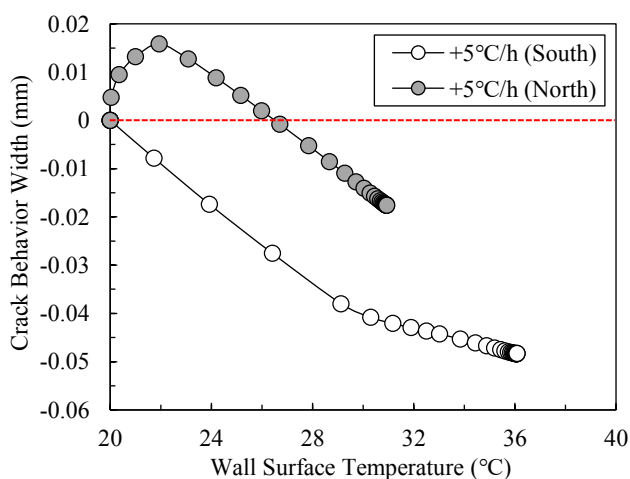


Figure 5-33 Analysis Result When Temperature Increase Fast ($+5^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

図 5-33 昇温速度が速い場合の解析結果 ($+5^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

一方、同様の拘束条件で、南北面に顕著な温度差が発生するように外気温の昇温速度を+5.0°C/h と変更した場合の解析結果が図 5-33 である。図のように、南面の温度のみ急激に増加する場合、南面のひび割れ開閉は壁面温度の上昇に伴い、図 5-32 と比較してより大きな傾きをもって閉じる方向に挙動する。一方、北面のひび割れ開閉は、南北面の温度差が大きい初期段階には、ひび割れは開く方向に挙動し、その後、閉じる方向に転じた。この解析結果も図 5-28 の結果を概ね再現するものであった。

(3) シリーズ 2 : コンクリートの線膨張係数がひび割れ挙動に及ぼす影響

温度変動に伴うコンクリートの熱膨張は、ひび割れ開閉挙動の駆動力である。そのため、温度変動に加えて、コンクリートの線膨張係数も、壁コンクリートの体積変化に影響を及ぼし、ひび割れ開閉挙動に寄与すると考えられる。ここに、コンクリートの線膨張係数がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を確かめるために、シリーズ 2 の解析を実施した。

本解析においては、対象壁コンクリートの線膨張係数 (TEC) を 5, 10, 15 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と変化させて、壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係を得られた。なお、温度条件では、図 5-31 に示す 2 つ温度条件の内、南北面に顕著的な温度差が発生するよう昇温速度+5°C/h を設定し、梁柱部材の応力物性と境界条件はシリーズ 1 と同じに設定した。

対象壁の線膨張係数を変化させて解析による得られた結果を図 5-34 に示す。図に示すように、本解析条件において、線膨張係数の大小によらず、対象壁のそり変形が発生している。また、周囲部材拘束条件および温度変化速度が同じであっても、コンクリートの線膨張係数の相違によって、ひび割れ開閉挙動幅が異なっている。線膨張係数が大きい程、ひび割れの開閉方向のいずれにも、開閉挙動幅が大きくなることが確認できる。南面に対して、温度変化量が同じであり、線膨張係数が大きい程、コンクリートの熱膨張に伴うひび割れ閉じる量が大きくなる。北面に対しては、線膨張係数が大きい程、南北面に生じた温度差に伴う

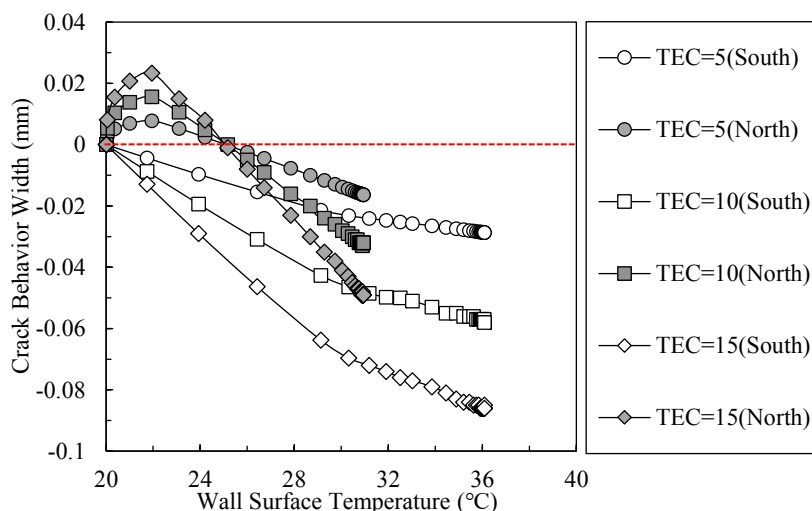


Figure 5-34 Effect of Thermal Expansion Coefficient (TEC) on Crack Behavior Width

図 5-34 ひび割れ開閉挙動幅に及ぼすコンクリートの線膨張係数の影響

コンクリートの膨張量の差分が大きくなり、そり変形量も大きくなる。

(4) シリーズ3：コンクリートの熱伝導率がひび割れ挙動に及ぼす影響

シリーズ2の解析結果に踏まえて、コンクリートの伝熱物性の一つとして熱伝導率は、コンクリート壁内部の温度勾配に直結するため、ひび割れ開閉挙動に影響を及ぼすと考えられる。シリーズ3では、壁コンクリートの熱伝導率 (K) を 0.5, 1.0, 1.6 (W/(m・K)) と設定した場合にひび割れ開閉挙動幅と壁面温度の関係を得られた。解析結果を図 5-35 に示す。なお、外気温および境界条件はシリーズ2と同様に設定し、壁コンクリートの線膨張係数は $10 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ の一定値に設定した。

図 5-35 に示すように、本設定の場合は、熱伝導率の値に関わらず、対象壁のそり変形が生じている。また、南面のひび割れ挙動幅と温度の関係性は熱伝導率によらず、概ね同一である。北面では、壁面温度が同じ場合、熱伝導率の小さい程、そり変形量が大きいため結果が読み取られた。

南面において、温度が同じ場合、コンクリートの変形量が同じである。一方、熱伝導率が小さい程、同じ時点において壁の南北面に生じた温度差が大きく、壁コンクリート南北両面の変形量差異が大きいため、北面のそり変形量が大きくなることが原因と考えられる。それに対して、熱伝導率が大きい場合、壁のそり変形量が小さくなる。

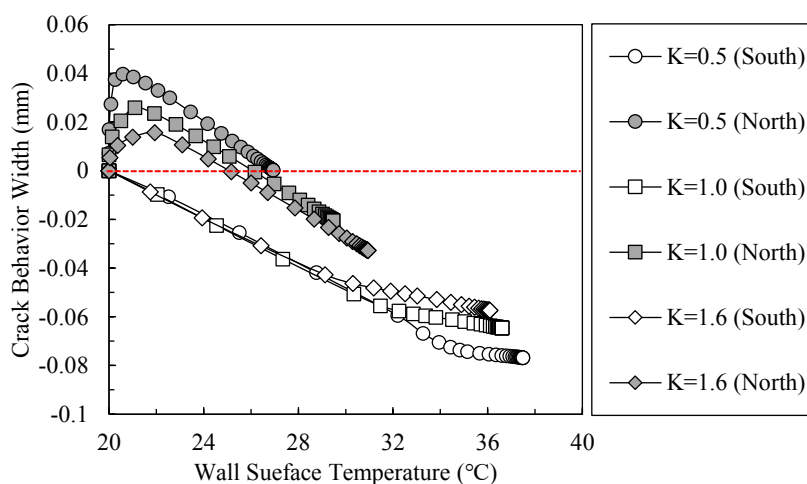


Figure 5-35 Effect of Thermal Conductivity (K) of Concrete on Crack Behavior Width

図 5-35 ひび割れ開閉挙動に及ぼすコンクリートの熱伝導率の影響

以上の結果より、外部拘束条件が同じ場合であっても、壁面の昇温速度によって発生するひび割れ挙動の正負が反転する可能性があることが確認された。また、コンクリート材料の伝熱物性 (線膨張係数, 熱伝導率等) は、コンクリート部材内部の温度勾配と温度変形に直結するために、ひび割れ開閉挙動幅に影響を与えることを確かめた。これらの結果によって、理論解析によるひび割れ開閉挙動を評価する際に、三章に得られたコンクリート系材料線膨張係数の経時変化および熱伝導率等の物性を含めて考慮する必要があると考えられる。

(5) シリーズ4：拘束条件がひび割れ挙動に及ぼす影響

これまでの議論で言及した壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係が、どのような構造物・部材でも生じるのかを検証するために、シリーズ2では対象壁の拘束条件を変化させ、壁面温度の変動によるひび割れ開閉挙動に対する拘束度の影響を検討した。

本解析においては、対象壁周囲の梁部材のヤング係数を変化させることで対象壁の拘束度を制御した。また、温度条件は図5-31に示す2つの温度条件のうち、南北面に顕著な温度差が発生するような昇温速度+5°C/hを設定した。これは周辺拘束が対象壁のそり変形によるひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を確認するためである。

ひび割れ直交方向の拘束度を大きくするため、梁のヤング係数を5GPaから22GPaに変更し、同様の解析を実施した。図5-36に示すように、南北面ともに、ひび割れの開閉は閉じる方向に推移する結果が得られた。

この結果は、梁上部を完全固定したうえで梁のヤング係数を大きくすることで、ひび割れ直行方向上部への変形が著しく抑制され、コンクリート部材の温度上昇による膨張が、ひび割れを閉じる方向にしか作用できないことが原因と考えられる。即ち、壁面温度によるひび割れの開閉挙動は、周辺の拘束条件の影響を受け、開閉方向が変化することが確認された。

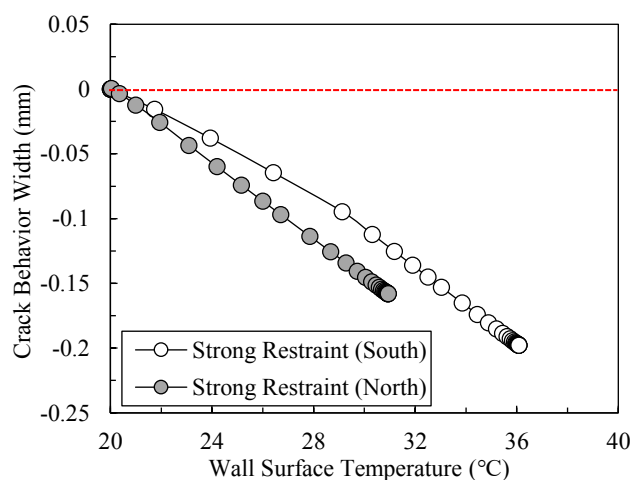


Figure 5-36 Analysis Result When Restraint Degree is Large

図5-36 拘束度が大きい場合の解析結果

一方で、シリーズ4で実施したような拘束条件が、現実の建築構造物で存在し得るのか否かについては未確認のため、ひび割れ挙動に及ぼす拘束条件の影響を正確に把握するため、次に、実建築物を対象として、拘束条件が異なる場合におけるひび割れ挙動の実測データを取得する上で、検証を実施する。

5.3.5 広島にある実建築物のモニタリング概要

北海道札幌市のような夏季と冬季の温度差が激しく、多雪地域特性がある亜寒帯湿潤気候と異なり、広島県東広島市では、典型的な瀬戸内海式天候であり、一年通して天候や湿度

が安定して降水量が梅雨期と秋雨期に集中する特徴を有する^[23]。本節では広島地域で長期間測定を実現できる建物を選定してモニタリングを実施した結果を報告する。対象建築物とひび割れ状況も含めて、モニタリング概要は以下のとおりである。

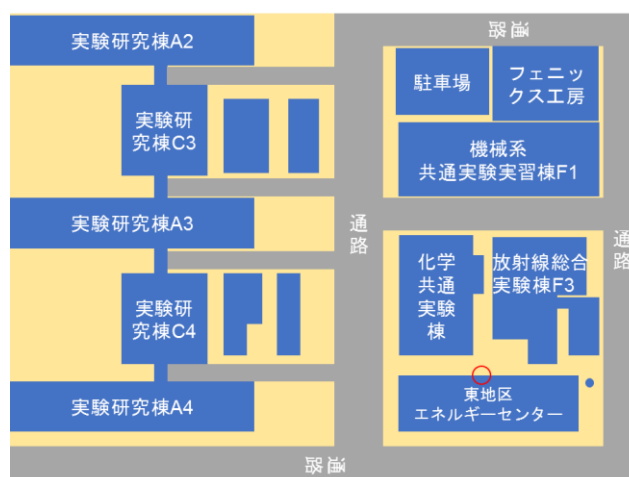
対象建築物：広島大学東広島キャンパス東エネルギーセンター（図 5-37a）

概要：RC2 階建て（地下配管ピット有）

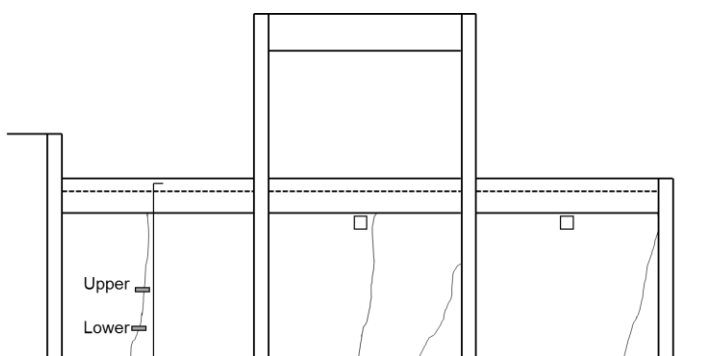
測定期間：2018 年 11 月から 12 月まで

測定箇所：測定対象部材は、対象建築物における比較的日射による温度の影響が小さい北側の耐震壁（Restrain Wall）であり、屋内と屋外に貫通ひび割れが発生し、壁面縦方向の全面に発現している（図 5-37(b)）。耐震壁の上下部に梁が存在するため、ひび割れの縦方向に沿って、梁による異なる拘束度が有すると予測される。初期ひび割れ幅は 2019 年 6 月にクラックスケールにより上部 0.58mm，下部 0.54mm と確認している。

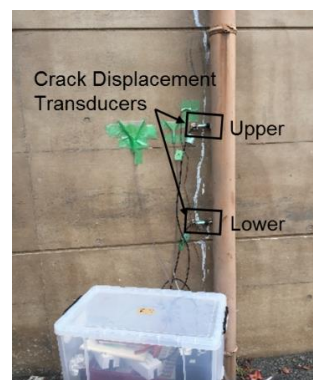
亀裂変位計によるひび割れ挙動の測定は、上記耐震壁を対象に実施した。図 5-37(b)に計測位置を示すが、耐震壁下部の梁による拘束効果が大きいと考えられる箇所（以下、下部



(a) Planar Position of Morning Structure (Red Circle)



(b) Position of Crack



(c) Landscape of Morning;

Figure 5-37 Outline of Crack Behavior Morning (East Energy Center of Hiroshima Univwesity)

図 5-37 実建築物におけるひび割れ挙動長期間測定概要（広島大学東エネルギーセンター）

(Lower) と称する) および, 下部梁による拘束効果が比較的小さい箇所の二つ所 (以下, 上部 (Upper) と称する) とした。また, 変位計設置個所の極近傍に熱電対を設置し, 壁面温度の経時変化を同時に測定した。実際モニタリングの様子を図 5-37(c)に示す。

5.3.6 広島にある実建築物のモニタリング結果及び考察

東広島市において, 2018/11/4 から 2018/12/30 までの期間に測定した壁面温度およびひび割れ開閉挙動幅の経時変化の結果を図 5-38 と図 5-39 に示す。なお, 測定機器の都合のため, 測定全期間に対して, 測定できてない期間が複数存在している。

図 5-38 より, 北海道における得られた結果と同様に, 測定期間中における壁面温度は, 細かな日変動を伴いながら 11 月から 12 月にかけて緩やかに低下していることが確認できる。また, 測定場所の相違による壁面温度の差異に着目すると, 縦方向の相対位置によって, 壁面温度の測定値がやや異なっているが, 温度差 ΔT_{max} は常に 5°C 以下であった。

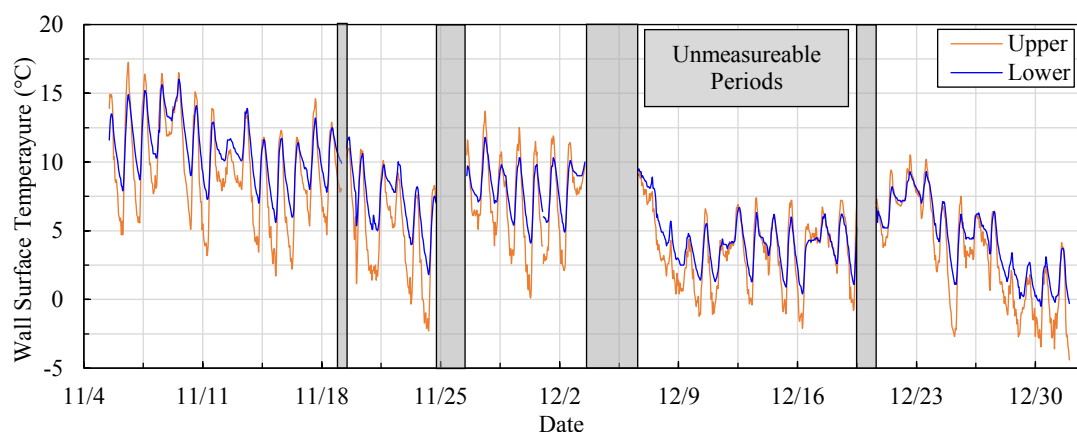


Figure 5-38 Morning Result of Wall Surface Temperature Variation with Date

図 5-38 壁面温度のモニタリング結果

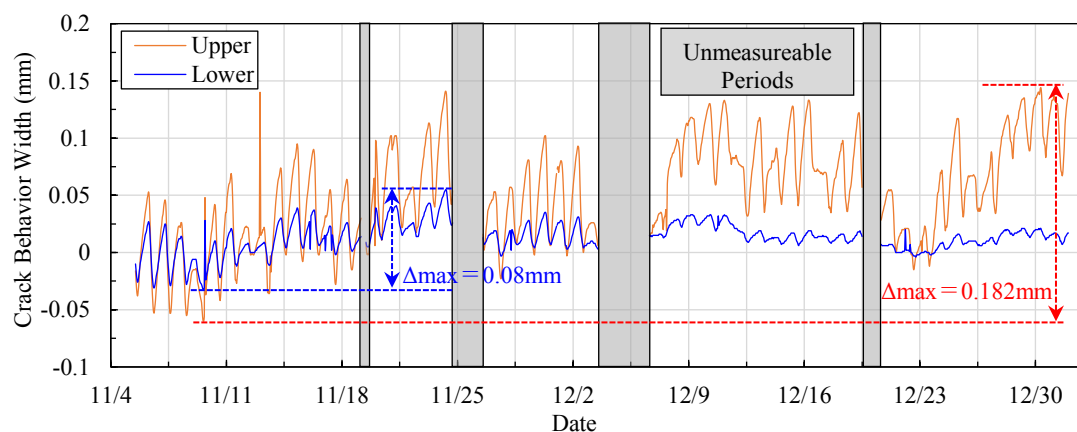


Figure 5-39 Morning Result of Cracks Behavior Width Variation with Date

図 5-39 ひび割れ開閉幅のモニタリング結果

一方、図 5-39 に示したひび割れ開閉幅の経時変化を見ると、気温の低下に伴い、壁面温度の全期間にわたって経時的に低下し、ひび割れ開閉幅が大きくなる方向に挙動している傾向が確認できた。測定位置によって、ひび割れ開閉挙動幅が明らかに異なり、上部の開閉幅が 0.182mm であることに対して、下部の最大幅は 0.08mm となっている。

ひび割れ挙動に及ぼす測定箇所温度差の影響を小さくするため、全測定期間において、測定箇所の上下に温度差が小さい、12月22日と12月23日の部分データを取り出して、その温度とひび割れ開閉幅の経時変化を図 5-40 と図 5-41 に示している。ここに、ひび割れの開閉幅は12月22日の0時を原点として整理した結果である。図 5-40 によって、この期間に両箇所の壁面温度がほぼ一致しており、同じ値で推移していることが確認できる。一方、図 5-41 に示すひび割れ開閉幅を着目すると、測定箇所の上下において、壁面温度がほぼ同じ時点においても、ひび割れ開閉幅に大きく差異が発生している。具体的には、ひび割れ上部の挙動幅が大きく、下部の方はほとんどひび割れ開閉が生じていない傾向が見られた。

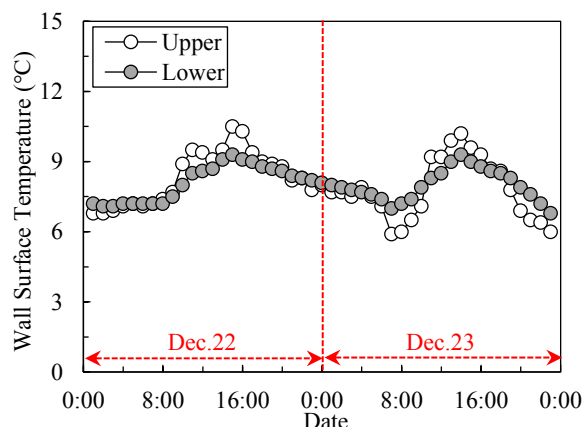


Figure 5-40 Wall Surface Temperature Variation during Dec.22~Dec.23

図 5-40 12月22日と23日における壁面温度の日変動

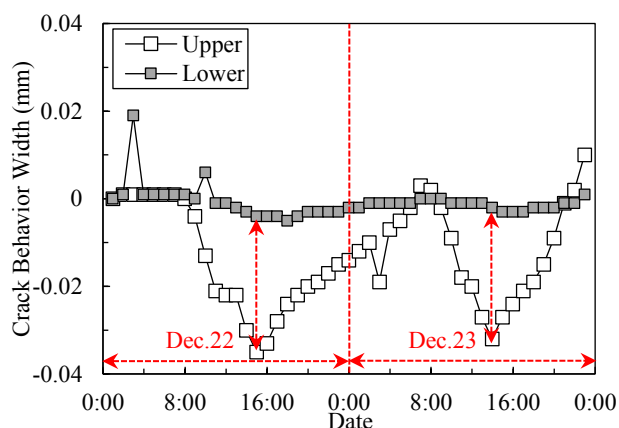


Figure 5-41 Wall Surface Temperature Variation during Dec.22~Dec.23

図 5-41 12月22日と23日における壁面温度の日変動

図 5-41 に示した期間だけでなく、測定全期間においても、ひび割れ上部の開閉挙動幅が下部より大きいことが確認できる (図 5-39)。即ち、全測定期間において、ひび割れ上下部の温度差が小さい状況であっても、同一ひび割れの下部と上部でひび割れ開閉挙動幅は著しく異なり、特に、梁からの距離がより遠い上部でひび割れ挙動幅が大きくなっていることが確認できた。

東広島市で得られたデータを用いて、ひび割れ開閉幅と温度変動の関係をプロットした結果を図 5-42 に示す。北海道の南面に得られた結果と同様に、温度の上昇に伴い、ひび割れ幅が小さくなり、閉じる方向に挙動する結果が得られた。上部と下部のひび割れ挙動と温度の関係性を比較してみると、上部の方が下部の方より、温度変動ごとにひび割れ開閉幅が変化し易い傾向が見られる。これらの結果によっても、下部梁の拘束効果を強く受けるひび割れ位置で、ひび割れ開閉が抑制されていることが確認できる。

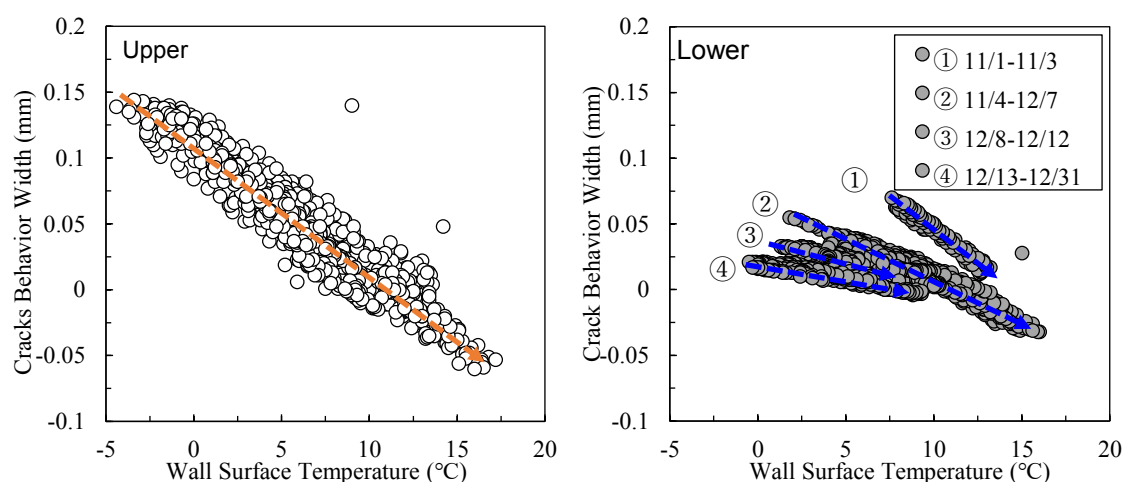


Figure 5-42 Relationship of Crack Behavior Width and Wall Surface Temperature

図 5-42 ひび割れ開閉幅と壁面温度の関係性

また、図 5-42 に示した下部ひび割れ挙動と温度の関係性において、測定期間によって、ひび割れ挙動幅と壁面温度関係の傾きが異なっている。測定期間において気象庁に記録された降雨状況を調査し、上記の各期間における日平均降水量が、① (0mm) > ④ (1.1mm) > ② (2.2mm) > ③ (3.5mm) の結果であった。ひび割れ開閉幅と平面温度の関係曲線の傾きが、① > ② > ③ > ④ の関係と比較して、降雨状況の相違が、壁面の体積変化に影響を及ぼすと推察された。また、期間④と期間①②③の傾向が異なることから、降雨以外の影響要因も存在すると推察している。

更に、上部ひび割れ開閉幅と壁面温度が概ね同一曲線に沿って推移することは、ひび割れの上部より、下部の方が降雨時地面積水の影響がより大きいためと考えられる。

5.3.7 数値解析による検証

(1) 解析概要

壁に生じる貫通ひび割れの開閉挙動に及ぼす周囲部材の影響の概念図を図5-43に示す。外部温度変化する時、断面積が大きい梁あるいは柱部材は壁の変形量より小さいため、壁コンクリートの変形を拘束される。ひび割れが発生した場合、ひび割れ部の拘束効果がなくなり、壁コンクリートの自由に变形に伴い、ひび割れ開閉挙動が発生する。壁コンクリートの変形量に対する梁柱部材の拘束度が異なる場合、ひび割れ開閉挙動幅が異なる。

本研究では、ひび割れ開閉挙動幅に及ぼす周囲梁柱部材の拘束度の影響を定量評価するため、上記実建築物におけるモニタリング結果に基づき、FEM 解析による検証を行った。本解析では、実建築物をほぼ再現したモデルを構築した。解析ソフトは前節と同様に、3次元温度応力解析プログラム JCMAC3 を使用した。

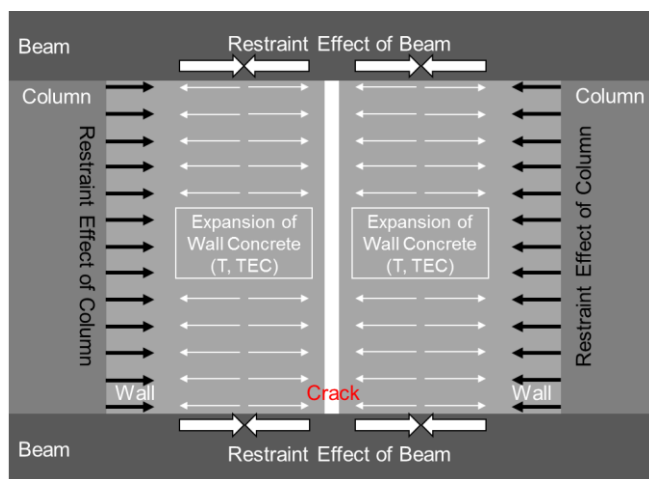


Figure 5-43 Schematic Chart of Restraint on Crack Behavior due to Around Elements

図 5-43 ひび割れ挙動に及ぼす周囲部材の拘束の概念図

本解析では、広島大学東エネルギーセンターの構造図を参考に、実建築物の部材寸法、材料特性を再現し、温度条件は上述のモニタリング結果を使用した。モニタリングは地上一階で実施しているが、モニタリングで使用した一階の平面図を図5-44に示す。

節点数、要素数が過大になると、ソフト自体の容量制限により、解析が不可能になるため、対象建築物の一階に配置する柱の対称性を考慮し、本解析では、一階柱平面分布の対称軸を境界として、対象建築物の西側半部を再現させるようなモデルを作成し多。それらの概要を図5-45示す。

断面方向では、地下部分の構造は省略し、地上部分のみのモデルを作成した。地下階および東側部分の部材の影響を再現するため、地下階と一階および、東と西の境界の梁柱節点に、三軸方向固定の境界条件を設定した。なお、モデルを作成する際に、ひび割れ挙動に与える影響が小さいと考えられる非構造部材は簡易化するか省略した。

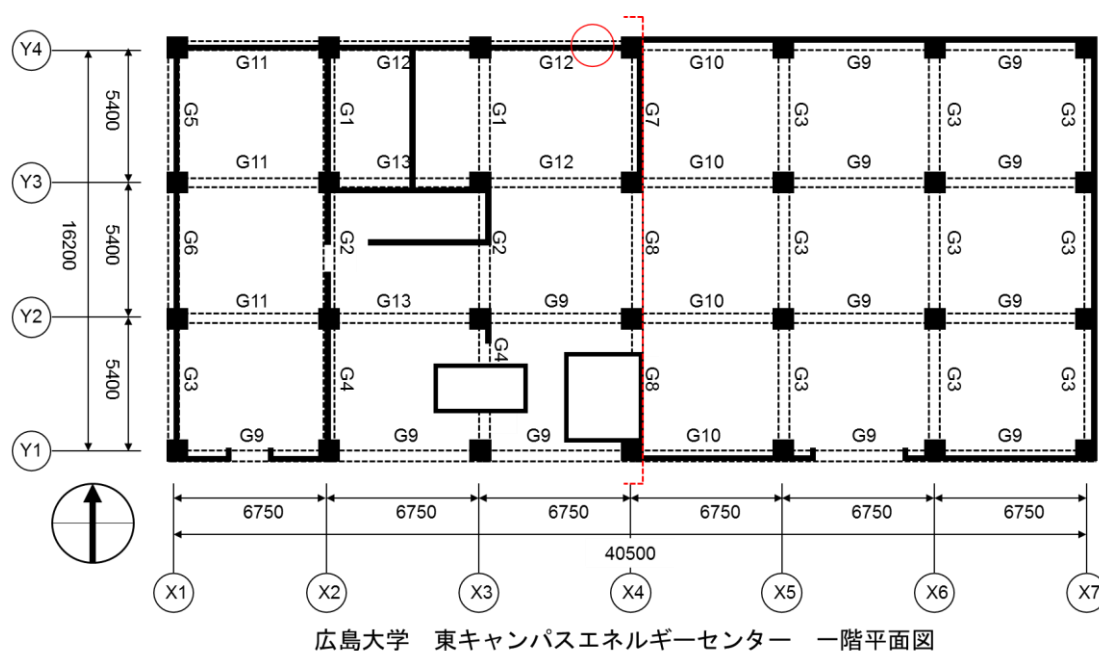


Figure 5-44 Simplified Chart of First Floor Plan of Object Structure

図 5-44 対象建築物の一階平面寸法と柱と梁の分布図

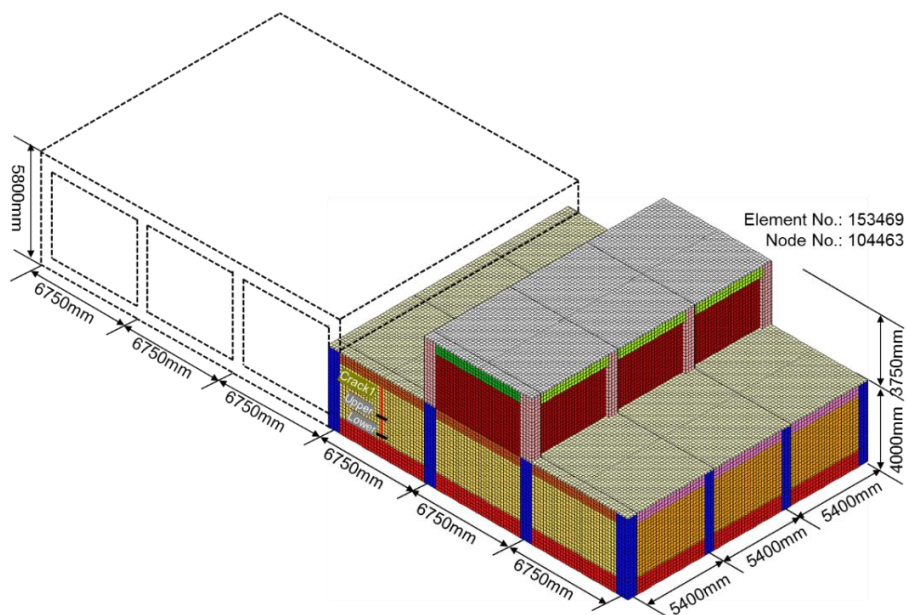


Figure 5-44 Outline of Analysis Model

図 5-45 解析モデル概要

モニタリング対象の貫通ひび割れの再現は、前節に採用した方法と同じ、実建築物の対象壁のほぼ同位置に、厚さが実ひび割れ幅（約 0.6mm）と同じ、ヤング係数が著しく小さい（ $E=0.002\text{GPa}$ ）要素を設置した。縮小部材の予備解析の結果、本解析ソフト上の各部材の配

筋は、ひび割れ挙動に影響を与えないと確認されたため、本解析の全ての部材には鉄筋を設置していない。

実建築物において、各部材の断面寸法は、図 5-44 に示すように、平面位置によって若干異なっているが、解析モデルを作成する際には、モデルを簡易化するため、対象ひび割れ周囲の梁柱等部材の寸法を再現した上で、それ以外の、ひび割れ挙動に与える影響が小さいと考えられる部材については寸法を統一した。解析用各部材の寸法は表 5-6 にまとめる。

Table 5-6 Dimensions of Each Element Adopted in Analysis Model

表 5-6 解析モデルに採用した各部材の寸法

Elements	Seismic wall (mm)	Beam (mm×mm)	Column (mm×mm)	Floor Slab (mm)
First Floor	200	600×1000	650×800	100
Second Floor	200	600×600	650×800	100
Roof Floor	200	600×600	650×800	100

各部材の伝熱・力学特性は前節と同様に、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」^[7]を参考し、表 5-5 に示した同じ物性値を採用して解析を行った。

解析用の外気温条件は、モニタリング期間中一部のデータを使用した。更に、ひび割れ挙動に及ぼす上下部の温度差の影響を取り除くため、温度差が小さい実測温度データを用いた。図 5-39 に示した 12 月 22 から 23 日の間のデータを着目し、各時点において、測定場所の下部と上部の測定温度の平均値を参考に、図 5-46 に示すような温度履歴を解析モデルの外気温データとして採用した。また、室内の温度変化は実際に測定していないため、室内外の温度差を考慮して、15°C 一定温度条件を採用した。

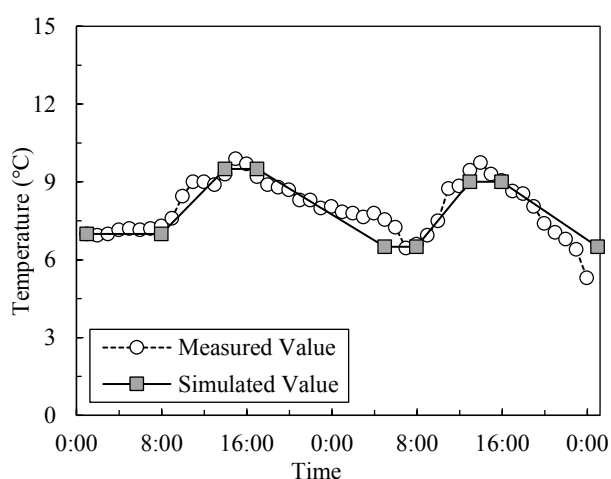


Figure 5-46 Outdoor Temperature History for Analysis Simulated Based on Measured Value

図 5-46 実測データにより抽出した解析用外気温履歴

(2) 解析結果及び考察

(I) 外壁温度とひび割れ開閉挙動の再現

解析期間における壁面温度解析値の日変動を図 5-47 に示す。図中には、比較のため、実測によって得られた温度データを併せて示している。図に示すように、壁面温度の実測値と解析値を比較すると、解析位置における壁面温度の経時変化を概ね再現できている。

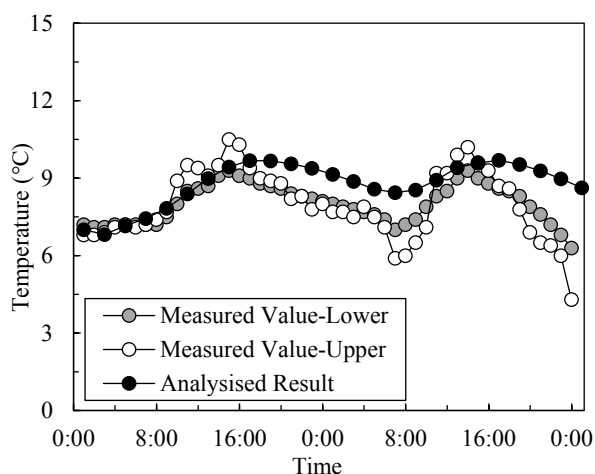


Figure 5-47 Analysis Result of Wall Surface Temperature Variation with Time

図 5-47 壁面温度日変動の解析結果

本解析の場合、室内の温度変化及各部材の伝熱物性値は実測データでなく、既往のデータ（指針）を採用したことおよび、実建築物表面の仕上げ材等の影響を考慮していないため、実測データと差異が生じているが、ひび割れ開閉挙動を確認する上では、概ね問題のない程度の誤差と判断した。

次に、対象箇所におけるひび割れ開閉挙動幅の結果を示す。ここに、模擬ひび割れは耐震壁の縦方向に要素を設置したため、ひび割れ要素の左右節点の水平方向の変位差をひび割れ開閉挙動幅とした。この方法によって、解析期間におけるひび割れ開閉挙動幅の日変動結果を図 5-48 に示す。比較のため、図中には実測データも併せて示す。

結果を見ると、設置した外気温条件の場合では、ひび割れ全体が閉じる方向に進展している。また、ひび割れ開閉挙動幅値に着目すると、解析のほうが実測値より、ひび割れ開閉量は大きい結果となったものの、同程度のオーダーでひび割れ開閉挙動を再現可能であった。

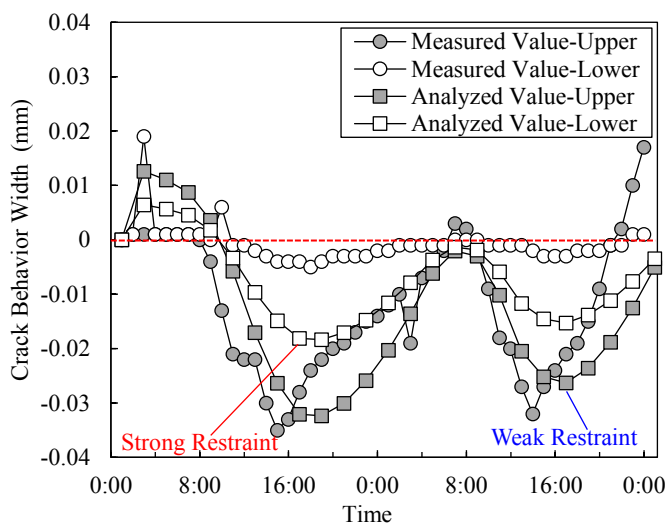


Figure 5-48 Analysis Result of Crack Behavior Width Variation with Time

図 5-48 ひび割れ開閉挙動幅日変動の解析結果

一方、解析結果において、上部と下部のひび割れ開閉挙動に着目すると、下部で得られたひび割れ挙動幅が上部の結果と比較して小さいことが確認できる。この結果は、実測の傾向と一致している。つまり、解析においても、ひび割れ開閉挙動幅に及ぼす下部梁の影響を再現できている。

以上の実測結果並びに数値解析に基づく検証によって、ひび割れの発現方向と直交方向に存在する部材が、ひび割れ開閉挙動に拘束効果を与える可能性が確認できた。この仮説によると例えば、ひび割れが発生した壁周囲に、ヤング係数が大きい柱・梁部材が存在する場合、ひび割れ挙動はより小さくなると推測している。そこで、本解析モデルを用いて、拘束効果に関するパラメトリックスタディを行った。

(II) ひび割れ開閉挙動幅に及ぼす梁の影響

本解析では、ひび割れ開閉挙動に及ぼす梁の拘束効果の影響を確かめるため、下部梁のヤング係数はパラメータとして、0.001GPa、22GPa、50GPa 三つのレベルを設定し、解析を行った。この場合に、下部梁以外の柱と上部梁部材のヤング係数は 22GPa 一定値を設定した。また、地下階による境界条件を排除するため、一階と地下階の節点での固定節点条件を解除し、自由境界条件を設定した。この場合、ひび割れ挙動に及ぼす影響要因について、下部梁のヤング係数が唯一のパラメータであると考えられる。これらの条件で解析した結果を図 5-49 に示す。

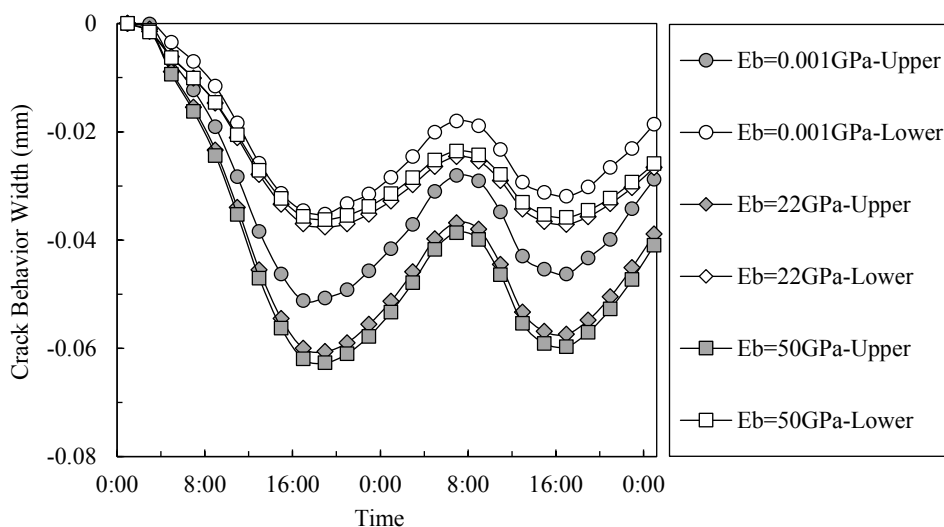


Figure 5-49 Comparison of Crack Behavior Width for Different Young's Modulus of 1F Beam

図 5-49 一階の梁部材のヤング係数が異なる場合ひび割れ開閉挙動幅の比較

解析結果から、本設定の場合、下部梁のヤング係数によらず、ひび割れ開閉は全体的に閉じる方向に挙動している。これは、温度変動に伴う壁コンクリートの体積変化は、左右の柱の拘束を受けて、ひび割れ閉じる方向しか挙動できないためである。また、下部梁のヤング係数が著しく小さい (0.001GPa, 無しに近い条件と想定) 場合は、ひび割れの位置によらず、ひび割れは同じ開閉幅で挙動すると予想したものの、解析対象場所によって、ひび割れ開閉挙動幅量の差異が生じていた。これは、上部梁が壁面を通してある程度の拘束効果を与えることが原因と考えられた。

一方、下部梁のヤング係数がある程度以上の場合 (22GPa, 50GPa), ヤング係数に関わらず、上部、下部でひび割れ開閉挙動幅に大きな差異が生じている。

以上の結果より、ひび割れと直交する方向 (ここに、梁) の拘束により、ひび割れ開閉挙動は影響を受け、拘束体からの距離がその程度を決定していることが示唆された。

(Ⅲ) ひび割れ開閉挙動幅に及ぼす柱の影響

本解析では、柱の拘束度がひび割れ開閉挙動幅への影響を確かめるため、柱のヤング係数を極端に変更させた条件で解析を実施した。柱のヤング係数を 0.001GPa, 22GPa, 50GPa と設定した場合、解析によって得られたひび割れ開閉挙動幅の経時変化を図 5-50 に示す。なお、解析の場合に、壁上下部に存在する梁の影響を排除するため、両方のヤング係数とも 0.001GPa を設定した。境界条件を取り除くため、地下階および東側部分との接合部に固定無、自由と設定した。

解析結果から、本解析に設定した温度条件において、ひび割れ幅は閉じる方向に推移している。ひび割れが閉じる量に着目すると、ひび割れの位置によらず柱のヤング係数が大きいほど、ひび割れ開閉幅が増大している結果が読み取られた。特に、柱のヤング係数を 0.001GPa (柱が存在しない条件に近い) と設定する場合は、周囲部材の拘束効果がほぼ存在

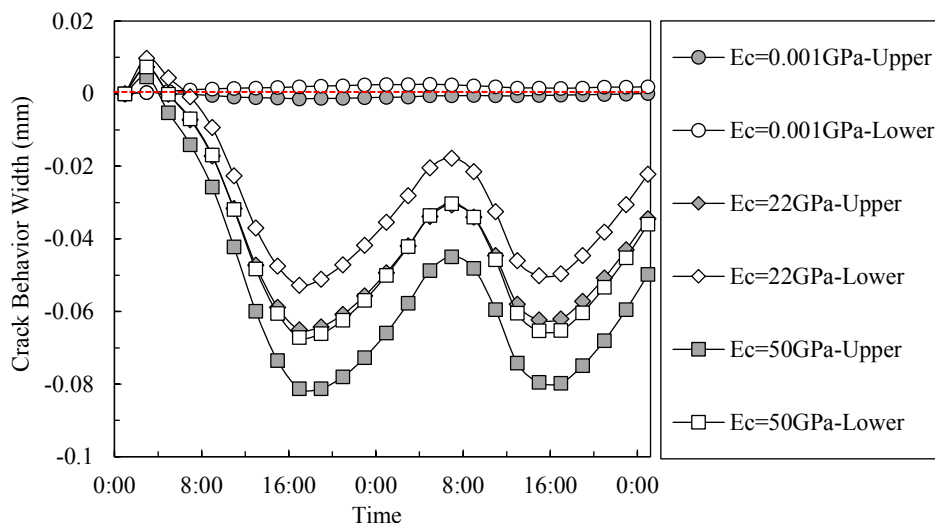


Figure 5-50 Comparison of Crack Behavior Width for Different Young's Modulus of Column
 図 5-50 柱部材のヤング係数が異なる場合ひび割れ開閉挙動幅の比較

しない状況であるため、壁部材が自由に変形可能であり、上下位置に関わらず、ひび割れ幅はほとんど挙動しない結果を示している。この結果は、ひび割れと平行している外部拘束もまた、ひび割れ開閉挙動幅に影響を与えることを示唆する。また、柱の拘束効果が存在場合 ($E_c=22\text{GPa}$, 50GPa) において、対象壁コンクリートの変形は柱と右スパン壁等部材の複合的な拘束効果を受けるため、ひび割れの上下位置において開閉挙動幅の差異が生じている。

以上の検討に基づき、外壁温度の上昇する場合において、梁柱部材による拘束効果を受けると考えると、ひび割れ挙動の概念図を図 5-51 に示す。

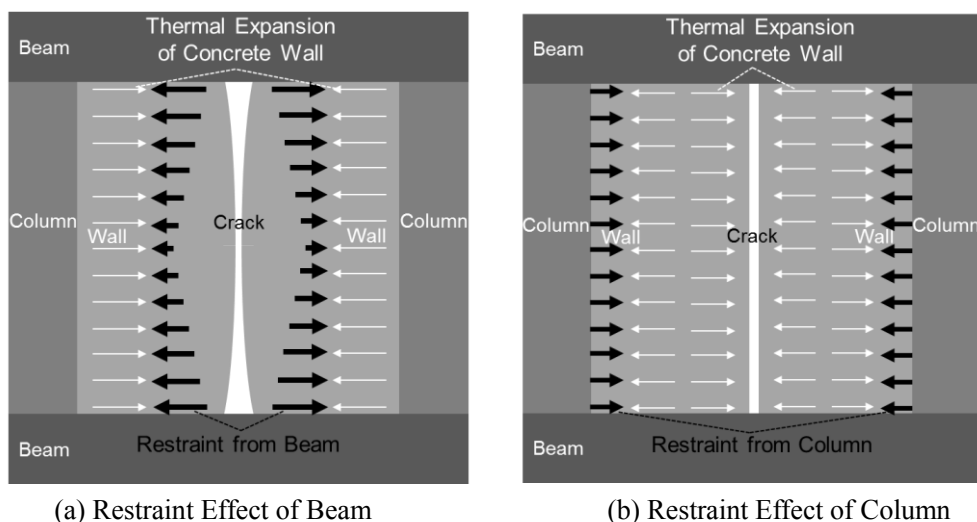


Figure 5-51 Schematic Chart of Crack Behavior under the Restraint of Column and Beam When External Wall Temperature Increase

図 5-51 梁と柱の外部拘束が有する場合壁面温度の上昇に伴ひび割れ挙動の概念図

まず、梁の拘束効果（図 5-51(a)）は、コンクリートの熱膨張が生じた際に、壁と梁のいずれも水平方向の変形が生じる。しかし、梁断面積は壁と比較して大きいため、断面内の温度変化量は相対的に小さく、熱膨張も壁より小さい。よって梁は壁の変化を拘束する。ひび割れ上下部に存在する梁の拘束効果は、ひび割れ縦方向に拘束度勾配を生じさせ、梁から離れる距離の大きい程、拘束効果が小さくなる。結果として、縦方向にひび割れ挙動（閉じる）幅が異なり、拘束度の小さい場所でひび割れ挙動幅が大きくなる。

一方、柱部材の拘束効果（図 5-51(b)）については、外気温度上昇に伴いコンクリートの熱膨張を拘束する部材として柱の存在が必要であるといえる。柱のヤング係数を無視できる場合、壁コンクリートは水平方向に比較的自由に挙動でき、ひび割れ部の挙動は小さくなる。柱のヤング係数が有する場合、ひび割れの位置によらず、柱の拘束度が大きい（ヤング係数が大きい）程ひび割れ幅閉じる量が大きくなる。

以上の検討より、壁部材に生じたひび割れ開閉挙動は周囲部材の拘束の影響を受け、また、拘束の方向によって拘束度に対するひび割れ挙動幅が変化する。すなわち、ひび割れ発現方向と直交方向に存在する部材（梁）はヤング係数が大きいほど、ひび割れ挙動幅が小さくなり、反対に、平行方向に存在する部材（柱）はヤング係数が大きいほど、ひび割れ挙動幅が大きくなると考えられる。

更に、上記の拘束機構に踏まえて、周囲部材の拘束度の変化に伴うひび割れ開閉挙動幅の変化について定量的評価を試みた。本解析の場合では、ひび割れの同じ場所に対し、柱のヤング係数を 22GPa から 50GPa に変化させると、ひび割れ開閉挙動幅の最大変化率は 24.9%（約 0.0162mm）（図 5-50 参照）であり、梁のヤング係数を 22GPa から 50GPa に変化させる結果は、ひび割れ開閉挙動幅の最大変化率は 5.0%（約 0.002mm）（図 5-49 参照）である。本解析の結果によると、対象ひび割れ開閉挙動幅の変化は、梁より柱の拘束効果が著しく受けることが見られる。すなわち、同じ温度条件である場合は、ひび割れ進展方向と直交する部材の拘束効果より、平行する部材の拘束効果は大きいと考えられる。

以上の仮説は、あくまで解析上の結果であり、実建築物のモニタリングによって検証されたものではないが、解析上の結果を前提とすると、ひび割れ補修を行う際に、対象ひび割れ周囲部材の拘束状況を配慮することが重要であると考えられる。

本研究では、ひび割れ開閉挙動に及ぼす壁面温度および周囲部材による拘束効果の影響に特化した検討を実施したが、実建築物に対しては、そのほかにも、乾燥や降雨による含水率の変化等の様々な外部影響要因が考えられるため、引き続き、実建築物を対象とする調査を拡大し、データを蓄積していくことが今後の課題となる。

5.4 本章のまとめ

本章では、RC 建築物の供用期間における材料劣化によって生じるひび割れを抑制手法の確立およびひび割れ補修技術を確立する目標に対して、基礎的な検討を実施した。

まず、壁部材表面に存在する仕上げ材の耐久性を着目して、左官モルタルの収縮ひび割れリスクに及ぼす外壁温度の影響を実験および数値的解析による検討を実施した。また、収縮

低減とする収縮低減剤の効果を併せて検討した。得られた知見を以下に示す

- [1] 収縮低減剤の使用の有無によらず、左官モルタルの線膨張係数は経時変化し、特に、材齢極初期の線膨張係数値が大きい段階に外壁温度変化が生じた場合、その影響が大きくなる。また、収縮低減剤を加えることで水和が遅延するため、線膨張係数の減少に時間を要し、温度変動の影響を受ける期間が増加する。
- [2] 収縮低減剤の使用によりモルタルの乾燥収縮ひずみ量は低減し、結果として、下地コンクリートの拘束効果による長期的な引張応力を抑制できるため、ひび割れリスクを低減できる。
- [3] 左官モルタル施工直後に外気温度が上昇する（午前中施工）場合は、ひび割れ発生リスクを低減できる。
- [4] 左官モルタルの施工後の外部温度が、上昇する場合と、下降する場合で、左官モルタル内部に 0.2MPa 程度の引張応力の差異を生じさせる可能性がある。

これらの検討によって、左官モルタルの実施工する際に、一日中施工時刻を含めて考慮することで、ひび割れリスクを抑制できると考えられる。

一方、建築物の外壁に生じさせるひび割れ補修工法および補修材の選定することについて、ひび割れの挙動特徴を把握することは重要との考えから、ひび割れ開閉挙動に及ぼす影響因子を特定することを目的として、実建築物への長期間モニタリングおよび数値検証によって外壁温度変動および他の部材による拘束の影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- [5] 実建築物の貫通ひび割れの開閉挙動は、壁面温度の変化に依存し、壁面そのものの温度変化によるコンクリートの膨張・収縮ならびに、壁断面に生じる温度勾配に起因する壁のそり変形の影響を受ける。また、コンクリート熱膨張に関連する材料物性（線膨張係数、熱伝導率等）はひび割れ開閉挙動幅に影響を与える。
- [6] 季節変化による壁面温度の年変動履歴に対して、壁面温度の日変動に伴い、ひび割れの開閉挙動が逆方向に動く場合がある。
- [7] 同じ温度環境においても、対象ひび割れ周囲部材の拘束状況によって、ひび割れの開閉挙動（方向）は異なり、ひび割れ開閉挙動幅も異なる可能性がある。
- [8] 壁に生じる乾燥収縮ひび割れ挙動に対して、周囲梁柱部材の有無によって、ひび割れ挙動幅が異なり、ひび割れと直交方向の拘束度が大きい程、ひび割れ挙動幅が小さく、ひび割れと平行方向の拘束度が大きい程、ひび割れ挙動幅が大きい。

これらの調査によって、ひび割れを補修する際に、外壁温度変動に伴うそり変形が発生する場合、補修材には圧縮・引張が繰り返し作用し、加えて補修材自体の温度変化による物性変化を含めて考慮する必要があると考えられる。

第五章参考文献

- [1] 日本建築仕上学会：外壁仕上げの損傷事例原因と対策，技術書院，pp.108-123，1996
- [2] 名知博司，小野正：タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.68，No.563，pp.15-22，2003.1
- [3] 出雲健司：各種モルタルの乾燥収縮について，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1301-1302，2002.9
- [4] 蔣海燕，佐藤嘉昭，大谷俊浩，上田賢司：各種骨材を用いたモルタルの収縮ひび割れ特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.103-110，2012
- [5] 田中希枝，島弘：骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合則モデルの検証，土木学会論文集，Vol.68，pp.78-82，2012
- [6] 大久保孝昭，猪原崇，松本慎也：下地コンクリートに拘束される左官モルタルのひび割れにおよぼす施工時期の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.673，pp.333-340，2012.3
- [7] E.J. Sellevold and Ø. Bjontegaard: Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction, *Materials and Structures*, Vol.39, pp.809-815, 2006
- [8] 小川晴果，小柳光生，堀長生：ひび割れ低減モルタルの開発（その1）収縮低減剤及び膨張材の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.253-254，2005
- [9] 寺本篤史，丸山一平：人工軽量骨材による高炉セメントモルタルの線膨張係数の制御，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.677，pp.1007-1014，2012.7
- [10] S.L. Meyers: Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and of Concrete, *Proceedings of the Thirtieth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C., January 9-12*, Vol.30, pp.193-203, 1950
- [11] 丸山一平，岸直哉，猪飼陽子：セメント硬化体中の水分と体積変化に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.62，pp.115-121，2009
- [12] 寺本篤史，五十嵐豪，丸山一平：温度履歴を受ける各種ポルトランドセメントペーストの若材齢体積変化，日本建築学会構造系論文集，Vol.672，pp.153-159，2012.2
- [13] 伊藤憲雄，三橋博三，桐越一紀：養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.1，pp.103-112，2004.1
- [14] 寺本篤史，丸山一平，樋口隆行，盛岡実：高温履歴を有する高炉セメントペーストの若材齢体積変化に及ぼす収縮低減剤の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.176-182，2015
- [15] 寺本篤史，丸山一平：温度履歴を受ける各種ポルトランドセメントの温度ひずみの影響，土木学会年次学術講演会，Vol.129，pp.257-258，2011
- [16] 松本慎也，大久保孝昭：下地コンクリートに拘束される仕上モルタルにおいて乾燥収縮ひび割れが発生しやすい位置の予測，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.648，pp.241-

249, 2010.2

- [17] 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.41-66, 2012
- [18] 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲：若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, Vol.599, pp1-14, 1998.8
- [19] 国土交通省大臣官房庁営繕部監修：建築改工事 国土交通省大臣官房庁営繕部監修監理指針, 財団法人建築保全センター, 2004, pp.289-299
- [20] 田中享二, 申洪澈, 安藤紀明：エポキシ樹脂注入によるコンクリート・モルタルのひび割れ補修部の疲労試験方法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67, pp.21-27, 2002.4
- [21] 申洪澈, 宮内博之, 田中享二：エポキシ樹脂注入補修部の疲労耐久性に及ぼす気象劣化の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.69, pp.29-34, 2004.6
- [22] 大久保孝昭, 森濱直之, 流田靖博, 長谷川拓哉, 藤本郷史：実建築物の壁面に生じたひび割れ挙動計測に基づくひび割れ補修のための調査診断に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, pp.737-744, 2011.4
- [23] 檀上友太：RC 構造物のひび割れ挙動の影響因子と測定方法に関する研究, 広島大学学位論文, 2019

第六章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、RC建築物の長寿命化という目標に対して、コンクリートの収縮ひび割れに起因する建築物の劣化制御技術に関して、大きく以下の2つの領域について研究を行った。

- (1) 膨張材を活用した高強度・超高強度コンクリートの自己収縮ひび割れ制御方法の確立
- (2) RC造壁に生じた乾燥収縮ひび割れの適切な補修方法を決定するための、ひび割れ開閉挙動の把握

本論文で得られた結論を以下に示す。

第一章ではまず、本研究の背景として、RC建築物の耐久性向上の必要性を説き、RC建築物の耐久性を向上する方策として、調合設計段階におけるコンクリート材料の高強度・高耐久性化技術および、供用段階におけるコンクリート部材に生じたひび割れの補修技術の現状を記したうえで、本研究の目的と概要を述べた。

第二章では、第一章で示した最終目的に対して、現在の研究状況と本研究の課題を抽出するため既往の研究を整理した。

まず、コンクリート材料全般について、収縮ひび割れを制御する方策および現状の実用事例を示し、次に、既に多数の実用化実績がある高強度・超高強度コンクリート材料における重要課題である「自己収縮ひび割れ」について、自己収縮ひび割れを低減するための調合段階における膨張材の活用状況を説明し、現状が膨張材自己収縮低減機構を十分に解明できてなく、自己収縮の低減効果の向上と遅れ膨張劣化の防止を平衡できる最適膨張材使用量が確立されていないなどの課題を示した。

また、既存建築物の供用段階に生じたひび割れの補修技術については、現状採用されている主な補修工法を紹介し、補修工法・補修材を選定する根拠となっているフローの問題点として、ひび割れの開閉挙動が十分に把握できていない現状を示した。

一章、二章を踏まえて、本論文で設定した課題は以下のとおりである。

- (1) 膨張材の自己収縮低減効果に寄与する水和物質を解明し、自己収縮低減メカニズムおよび、膨張材種類の相違に伴うそのメカニズムの差異を明らかにする。
- (2) 膨張材の自己収縮低減効果に及ぼす骨材の影響を明らかにする。
- (3) 膨張材の添加量が自己収縮低減効果と遅れ膨張に及ぼす影響を明らかにする。
- (4) 左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす外壁温度の日変動の影響を明らかにする。
- (5) 乾燥収縮ひび割れ開閉挙動に及ぼす外壁温度および周囲部材の拘束条件の影響を明らかにする。

第三章と第四章では、上記の課題のうち、(1)から(3)を解決するために、以下に示す3つのシリーズの実験的検討を実施した。それぞれの検討の概要と得られた成果を以下に記す。

【1】膨張材の自己収縮低減効果に寄与する水和物の特定に関する実験的検討

水結合材比 16.5%の超高強度セメントペースト試験体を対象とし、膨張材の添加により自己収縮量を制御することを試みた。同時に水和反応解析を実施し、自己収縮低減に寄与する水和物の特定を行った

実験では、材齢 7 日までの一軸長さ変化、質量含水率・結合水量、超音波伝播速度、膨張性水和物（水酸化カルシウムとエトリンガイト）の生成量の経時変化を測定し、水和圧理論に基づきセメントペーストの自己（収縮）ひずみに含まれる膨張成分と収縮成分を分離し、膨張ひずみと、膨張性水和物量の関係性を考察した。

その結果、超高強度セメントペーストにおいて、材齢約 24 時間以降の段階で観察される膨張ひずみ成分は、膨張材の水和反応により生成された水酸化カルシウム量と高い相関性を示し、この期間における水酸化カルシウムの生成が自己収縮の低減に寄与することを明らかにした。

一方、従来、膨張材の膨張効果における主要因とされていたエトリンガイトの生成は、自己収縮低減効果と明確な関連性が認められなかった。しかしながら、本実験で実施した XRD/リートベルト解析で検知できない寸法・形状のエトリンガイトが膨張に寄与している可能性は排除できないため、本実験の結論を検証するためには SEM 観察の詳細的検討を要する。

また、建設業界で自己収縮ひずみの補償のために一般的に使用されている二種類の膨張材（CSA 系膨張材、石灰系膨張材）を比較したところ、水分消費量や、剛性発現速度の相違がみられ、それに伴う自己収縮低減効果にも差異を確認された一方、いずれの条件でも膨張ひずみ成分は水酸化カルシウムの生成量と同程度の相関性が認められ、水酸化カルシウム生成元の影響はほとんどないことを明らかにした。

【2】膨張材を含む調合における自己収縮ひずみの骨材の拘束効果に関する実験的検討。

【1】の検討は骨材を含まないセメントペーストを対象として実施したが、【1】の知見をコンクリートへ適用するためには骨材の拘束効果を理解しなければならない。

セメントペーストの体積変化を骨材が拘束する程度は、乾燥収縮ひずみを対象として既往の研究が多数なされており、「複合則理論」として整理されている。一方で、膨張材を使用した場合のひずみ履歴を考慮すると、骨材が収縮ひずみと膨張ひずみと同じように拘束しているのかについては過去の知見がほとんどない。そこで本研究では、その影響を明らかにするため、膨張材を添加した超高強度モルタルを用い、細骨材の体積比を変化させた条件で、自己収縮ひずみ等の物性の経時変化を測定し、乾燥収縮ひずみを対象として確立された既存の複合則理論の適用性を確認した。

第六章 結論

その結果、膨張材を添加した超高強度モルタルの自己収縮において、膨張・収縮成分のいずれに対しても、骨材は概ね同程度の拘束効果を与えることが明らかにされた。

【1】の知見を併せて考えると、例えばセメントペースト中の膨張性水和物の生成量を変化させることでセメントペーストの膨張量を制御し、コンクリート中に含まれる骨材の体積割合から、コンクリートの膨張量を推定する、といった材料設計、調合設計の流れが見込まれる。一方で、本研究の検討では、骨材が膨張材およびセメントの水和反応に及ぼす影響は直接的には評価できないこと、複合則理論の推定精度を確保するためには骨材の物性（弾性係数、ポアソン比など）を適切に取得する必要があることが今後の課題として挙げられた。

また、併せて実施した線膨張係数に及ぼす骨材の拘束効果の影響に関しては、Hobbs モデルのように骨材そのもの体積変化量を考慮できる複合則理論でなければ十分な精度が確保できないことを確認した。

【3】遅れ膨張劣化を引き起こさない最適な膨張材最適添加量に関する実験的検討。

【1】の知見のように、膨張性水和物（水酸化カルシウム）を多量に生成することで、セメントペーストの自己収縮量は低減できる。そして膨張性水和物を多量生成する最も簡易な方法は膨張材添加量を増やすことである。しかしながら、過量の膨張材はコンクリートが硬化した後有害な遅れ膨張を引き起こすことが知られている。そこで【3】では、有害な遅れ膨張が発生する条件を特定することで、遅れ膨張劣化のメカニズムを理解し、遅れ膨張が生じない最適膨張材添加量を見出すことを目的とした。

実験は、CSA 系膨張材の添加率をパラメータとした複数の超高強度モルタル試験体を作製し、材齢初期（0-7 日）の温度条件および材齢 7 日以降の湿度条件を変化させ、膨張材による遅れ膨張が発生する養生条件を特定することを試みた。測定項目は材齢 7 日までの自己収縮ひずみとその後の自由ひずみであり、遅れ膨張の発生原因を特定するため所定の材齢において水和反応解析を実施した。

実験結果より、膨張材を添加した超高強度モルタルにおいて、材齢 7 日まで、膨張材添加量が大きい程、自己収縮ひずみ低減効果が大きくなり、加えてこの間に生成された水酸化カルシウム量も自己収縮ひずみ低減量と相関がみられることを確認した。この時、膨張材を結合材の内割 7%置換した場合に、初期 40°Cで養生すると、材齢 7 日時点でのモルタルの自己収縮ひずみをほぼ 0 まで抑制可能であった。

一方、その後の材齢においては、材齢 7 日まで 20°Cで養生した試験体について、膨張材添加率が 5%以上の試験体には遅れ膨張が発生した。湿度条件でみると 60%RH, 100%RH, 水中養生のいずれについても、遅れ膨張が発生しており、膨張材による遅れ膨張の発生には外部からの水分供給が不要との知見が得られた。

一方で、材齢 7 日まで 40°C一定もしくは 90°C一定で養生した試験体については、いずれの湿度条件でも遅れ膨張が発生しなかった。この結果は、材齢初期に高温で養生された場

合、膨張材の反応が促進され、材齢 7 日時点で未反応の膨張材量が著しく低下したためと解釈され、膨張材の過量添加による遅れ膨張の原因は、未反応膨張材の継続的な水和が原因と考えられた。

なお、同様な膨張劣化を示すコンクリートの劣化現象の一つに DEF があり、初期 90°C の養生は DEF の発生を促進するために実施したが、本研究の範囲では DEF と思しき膨張劣化は一切確認できず、また初期に 90°C 養生した試験体は膨張材による遅れ膨張も認められなかった。このことから、膨張材の遅れ膨張のメカニズムは DEF による膨張機構とは異なるものと考えた。

上記の著者の推察を検証するためには、任意材齢において膨張材の未反応率を定量化することが必要である。本論文においても上記の試みは実施したが、膨張材添加率を 10% まで上昇させても、XRD/リートベルト解析において膨張材の未反応率を検知することは不可能であった。

以上より、【1】、【2】の知見を活かして膨張材による自己収縮ひずみの制御を実施することは、ある限られた範囲において可能であると考えられるが、実務において遅れ膨張のリスクなく実施するためには、膨張材未反応率を確認できるシステムが必要であり、本論文においてその方法を提案するには至らなかった。そのため、自己収縮低減効果を向上するため盲目的に膨張材を増加することは現時点で実現的ではない。しかしながら、現在メーカーが推奨している 3 倍の膨張材を添加した試験体においても、初期に高温養生を行った場合には遅れ膨張が生じない（剛性の発現もほかの試験体と相違ない）、という実験的事実は、膨張材の添加率によって自己収縮ひずみ制御を行う可能性を示唆する結果であった。

次に、第五章では、上記の(4)と(5)の課題を解決するため、RC 建築物に発生した乾燥収縮ひび割れの制御・補修技術の高度化を目的として、左官モルタルの乾燥収縮ひび割れの発生リスクおよび、すでに構造物に発生している乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に関する実験的検討を実施した。

【1】 左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす壁面温度の日変動の影響に関する実験的検討。

既往の研究において秋に施工された左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクは高まることが報告されている。これは施工後に冬を迎え壁面温度が低下すること、すなわち左官モルタルが硬化した後に大きな温度収縮ひずみが発生し、この収縮ひずみに対する下地からの拘束応力が乾燥収縮ひずみによるひび割れを助長するためと考えられている。

硬化後の温度変動によって生じるひずみ履歴が乾燥収縮ひび割れリスクに影響を与えることを考慮すると、左官モルタルの施工前後における壁面温度の日変動も影響要因になり得る。

そこで本実験では、施工直後に壁面温度が上昇する場合（午前中の施工を想定）、および

第六章 結論

下降する場合（午後の施工を想定）の温度履歴を模擬した条件を与え、左官モルタルの温度ひずみの経時変化を取得した。この実験の背景には、セメント系材料は一般的に、硬化直後に高い線膨張係数を有し、硬化に伴って線膨張係数が低下傾向を示すという実験事実がある。つまり、線膨張係数が大きい時期に温度低下を受ける場合、大きな温度収縮ひずみが発生する可能性が高いと考えられる。

実験結果によると、午後の施工を想定した条件（施工直後に温度下降）では、温度下降時に大きな収縮ひずみが発生し、その収縮ひずみその後も残留する結果が得られた。この結果は、左官モルタルの施工直後の温度変動は、乾燥収縮ひび割れリスクに影響を及ぼすことを示唆する。

実際には、拘束応力を算定する場合、クリープの影響を加味しなければならず、若材齢のクリープが硬化後と比較して大きいことを考慮すると、収縮ひずみの大小だけで拘束応力を議論することはできない。そこで本検討では、下地と左官モルタルを想定した簡易な FEM モデルを作成し、既往の研究で示されている諸物性をインプットとした条件で数値解析を実施した。数値解析によると、施工直後に温度上昇する場合と温度下降する場合との比較で、約 0.2MPa 程度の差異が生じた結果であった。

以上の考察から、日中の温度変動に対して施工時刻を考慮することで乾燥収縮ひび割れのリスクを低減できる可能性があることが示された。

さらに、左官モルタルに生じる自己収縮および乾燥収縮を低減する目的で、収縮低減剤の効果の検証を実施した。その結果収縮低減剤は、上記の温度収縮ひずみを助長する可能性があるものの、長期的には左官モルタルの自己収縮ひずみおよび、乾燥収縮ひずみを低減させることによって、下地コンクリートの拘束効果に起因する拘束応力を減じ、ひび割れリスクを低減させると考えられた。

【2】RC 壁に生じた乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に関する検討。

RC 部材に生じたひび割れに対して適切な補修を実施するためには、その対象となるひび割れの幅や形状、および開閉挙動を把握し、そのひび割れに適した補修工法および補修材を選定しなければならない。しかしながら、実構造物においてひび割れの開閉挙動を測定により取得しているケースは極めてまれであり、実際には施工業者の経験により施工方法の選定がされている。本検討は、対象ひび割れの開閉挙動を、部材の条件および簡易なモニタリングから高い精度で推定手法を提案することを最終な目的とし、本論文では、ひび割れ開閉挙動に影響を与える複数の要因の中から、壁面温度と周囲部材の拘束条件に着目し、実建築物における乾燥収縮ひび割れの開閉挙動の長期間モニタリング並びに数値解析を用いたモニタリング結果再現検証を実施した。

まず、長期モニタリングの結果から、RC 造壁に発生した乾燥収縮ひび割れは、壁面温度の影響を強く受け、柱・梁に拘束を受ける状態では、壁面温度の上昇に伴ってひび割れは閉じる方向に挙動することが確認された。壁面温度がひび割れ開閉挙動に与える影響は、

部材の温度分布の程度によって異なり、年変動のように壁面温度が比較的緩やかに変化する場合は、部材断面方向に温度分布がほとんど生じず、ひび割れはどの断面においても一様に挙動するのに対し、日変動のように、壁部材断面に温度勾配が生じている場合には、壁全体がそり変形を引き起こし、温度上昇時により急激に閉じ、反対側のひび割れは逆に開く方向に挙動する結果が得られた。このことは、RC 壁の表面温度だけでひび割れの開閉方向を一元的に推定することが不適切であることを意味する。

また、FEM を用いた検討において、コンクリート材料の線膨張係数および熱伝導率をパラメータとした検討を実施したところ、線膨張係数が大きいほど、および熱伝導率が小さいほど、そり変形が大きくなる結果が得られた。

次に、同一ひび割れにおいて周囲部材の拘束がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を明らかにするために、梁からの距離が異なる箇所でひび割れ開閉挙動のモニタリングを実施した。

その結果、拘束体としての梁からの距離が遠いほどひび割れ開閉挙動が大きくなる結果が得られた。つまり、同一のひび割れであっても測定する場所によって異なる開閉挙動を示す場合があり、補修材の選定に使用するデータを取得する場合には、より拘束度の小さい場所で測定を行ったほうがよいと判断された。

本研究では、RC 壁に生じた乾燥収縮ひび割れを対象としたが、ひび割れの開閉挙動に及ぼす要因としては、壁面温度と拘束条件以外にも、部材の形状、鉄筋比やかぶり厚さ、ひび割れの形状（異なるひび割れ発生原因）、コンクリートの含水状態、降雨の影響など、多数考えられるため、引き続き、実構造物のデータ蓄積を拡大し、より一般的な解を得られるよう継続的な検討を行う必要がある。

6.2 今後の課題

本論文では、膨張材による高強度コンクリート自己収縮ひび割れ抑制技術の高度化およびひび割れ補修技術の高度化に関する研究を行った。

本研究によって、6.1 節で述べたような新たな知見が得られたが、得られた知見を社会に還元するためには多くの課題が残されている。本節では、本研究の今後の展望を踏まえ、具体的な研究課題を述べる。

膨張材を用いた自己収縮ひび割れの抑制技術の確立に関しては、

- [1] 膨張材を現在の推奨量以上の添加率で使用することが一つの選択肢となりうるが、膨張材の多量添加により、遅れ膨張が発生しないこと、および材料の機械的特性（強度、剛性）に有害な影響を与えないことが前提条件となる。前者を解決するためには、任意の時点で膨張材の反応率を取得する分析技術を確立することが必要であるが、現状、膨張材の反応率を XRD により精確に把握することは困難であるため、膨張材の反応率を把握できる指標の提案および有効性の評価が必要不可欠である。

また、後者については、膨張材の転嫁によりセメントの水和が阻害されないことを確

第六章 結論

認できるシステムが必要であり，例えば膨張材を含む系での水和反応モデルの提案は一つの解決策になり得る。

- [2] 膨張材の過量添加による遅れ膨張の発生原因は，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と予想したが，ひび割れ発生後の試験体を分析したところ，ひび割れ発生前と比較して両水和物ともに明確な上昇は見られなかった。既往の研究によると，膨張性水和物による膨張圧の発現は，XRDにより取得可能な結晶量だけではなく，水和物の結晶状態，生成場所の影響を受ける。これらを検証するためにはSEM観察やEPMAなど，水和物の位置情報も取得可能な分析手法を使用する必要があると考えられた。
- [3] 膨張材による遅れ膨張に関する本実験の結果から，遅れ膨張の発生は湿度条件によらないと推察されたが，60%RHのような低湿度の状態でどのように膨張材の反応が進行したかについては不明な点が残されている。本件については，膨張材の反応に必要な限界水分量の導出や，セメントペースト中の水の移動経路について詳細な検討が必要である。

ひび割れ補修技術の高度化に関しては，

- [1] ひび割れ開閉挙動の影響要因の抽出が途上にあり，特に湿度変化や降雨の影響など，水に関する検討が不十分である。また，水和の進行や炭酸化の進行によって材料の組成が変化した場合，線膨張係数や熱伝導率が変化し，結果としてひび割れ開閉挙動に影響を与える可能性が高い。このような様々な影響因子が考えられる中，まずは，影響度合いの大きな因子を特定し，簡易なモニタリングと組み合わせることで，容易にひび割れ開閉挙動を推定できるシステムを構築する必要がある。
- [2] 本研究の最終的な目標は，合理的なひび割れ補修方法の選定フローを構築することであるが，ひび割れ開閉挙動に応じて補修材の選定を行う場合には，補修材そのものの性能評価がなされていなければならない。そのためには，例えば実構造物のひび割れ挙動に近い条件での補修材の促進劣化試験の提案や，補修材とコンクリート界面の接着一体性評価方法の提案など，多方面からの検討が必要である。

最後に，本論文は，RC建築物の耐久性の向上を目指して，調合設計段階に先端的な材料の開発と性能の改良に加えて，供用段階の維持管理と性能保全に関する実験的研究を通じて最終目標の達成に有益なデータと知見を得られたと考える。また，現状の成果に加えて，上記の今後の課題の解決は，将来にRC建築物の長寿命化を実現することに対して十分に期待されている。

関係論文リスト

I. 論文発表（査読付き）

- [1] 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
- [2] 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭: 膨張材を混和した低水合材比シリカフュームセメントモルタルモルタルの自己収縮及び線膨張係数骨材量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.391-396, 2017
- [3] 寺本篤史, 張玉露, 大久保孝昭: 膨張材添加量が超高強度セメントモルタルの自己収縮及び遅れ膨張に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.385-390, 2017
- [4] Yulu Zhang, Atushi Teramoto, Taka-aki Ohkubo: Effect of Addition Rate of Expansive Additive on Autogenous Shrinkage and Delayed Expansion of Ultra-High Strength Mortar, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.250-261, 2018
- [5] 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭, 森元悠太: 左官モルタルのひび割れリスクに及ぼす収縮低減剤及び外壁温度の日変動の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.483-488, 2018
- [6] 張玉露, 寺本篤史, 金澤健, 大久保孝昭: 乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に及ぼす壁面温度と部材拘束条件の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.425-430, 2019

II. 口頭発表（筆頭者が口頭発表者）

- [1] 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭, 森元悠太: 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, 2016
- [2] 張玉露, 寺本篤史, 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, 日本建築学会学術講演梗概集(九州), pp.179-180, 2016
- [3] 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭, 森元悠太: 細骨材の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.13-16, 2017
- [4] 森元悠太, 大久保孝昭, 寺本篤史, 張玉露: 収縮低減剤が高強度セメントペーストの線膨張係数の経時変化に及ぼす影響, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.40, pp.9-10, 2017
- [5] 張玉露, 寺本篤史, 大久保孝昭: 膨張材添加量が超高強度モルタルの自己収縮及び遅れ

膨張に及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.249-250, 2017

- [6] 森元悠太, 大久保孝昭, 寺本篤史, 張玉露: 収縮低減剤が高強度セメントペーストの線膨張係数の経時変化に及ぼす影響に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.103-104, 2017

III. その他

- [1] 張玉露: 高強度コンクリートの膨張材によるひび割れ制御技術に関する研究, 広島大学大学院工学研究科建築学専攻, 学位論文, 2017年2月, 指導教員 大久保孝昭

謝辞

本論文は、広島大学建築材料学研究室に入ってから 5 年間で実施した研究によって得られた成果をまとめたものです。研究の実施や論文の作成をする際に、様々な方々のご支援やご指導をいただきました。末筆ながら、お世話になった皆様に心より感謝の意を表したいと思っております。

まず、学位論文の主査として本研究を進めるにあたり終始あたたかいご指導と激励を賜りました大久保孝昭教授に心から深く感謝いたします。五年ぐらい前に、大久保先生が日本語すらきちんと話せなかった私を材料研の一員として受け入れられ、大切な「留学夢」を実現させ豊かな留學生活及び貴重な人生経験を積む機会を頂き、誠にありがとうございました。五年の間、実験や論文に関する貴重なご示唆やご指導を頂いただけでなく、社会人になる道においても導いていただいたことに心より感謝申し上げます。

既往の五年間に、論文の副査として務めて頂いた、また研究について最もご支援を頂いた寺本篤史先生、大変ありがとうございました。最初、実験機器の使い方、実験の方法などから教えて頂き、またレポートや論文、学会発表用の PPT などの修正に関する多くのご支援を頂き、本当にお世話になりました。先生は数十回のご徹夜までして論文を修正して頂きまして、深甚の謝意を表します。研究課題をご真摯に取り組んでいただいただけではなく、研究者としてあるべき「覚悟」、「考え方」、「科研態度」についても教えて頂き、いつまでも忘れられません。誠に残念ながら、まだ合格な研究者になっていない私は、これから寺本先生からの「科研啓発」を心に留めながら、一生懸命に頑張っていきたいと思っております。寺本先生、誠にありがとうございました。

既往の五年間に、大久保恩師と寺本恩師に様々なご迷惑をお掛けしましたが、大変申し訳ございませんでした。もし何かしら思いがけないことがありましたら、ぜひご容赦ください。

また、本論文の副査をご担当していただきました広島大学教授田川浩先生、教授河合研至先生、准教授日比野陽先生には、貴重なお時間を割いて賜り、論文のご精読及び貴重なご指摘やご意見を頂き、大変お世話になりました。心から感謝いたします。

また、いつもお兄さんのように様々なアドバイスを頂いた優しい先輩、李亮先生（鄭州航空工業管理学院）に大変感謝しております。研究や生活で悩むとき、いつも優しく励んでいただき精神的なサポートを頂きました。ありがとうございました。

材料研に在籍している同期の蘇振東さん、三年間に一緒に頑張っていて、様々なお手伝いを頂きまして、ありがとうございました。これからも頑張ってください。修士時代の同期、西村和真さん、柴戸啓太さん、石橋弘平さんとともに充実した二年間を過ごして様々な経験を積み、どうもありがとうございます。同じ研究班に所属した森元悠太君、村上亮太君、渡部雅貴君、実験やデータ整理など熱心なお手伝いを頂き、ありがとうございました。皆様が明るい未来を迎えられることをお祈りし、今後お会いを楽しみにしております。

また、留学の五年間に、経済的なご支援を頂いた、公益財団法人広島国際センター様及び

公益財団法人八幡記念育英奨学会様，大変お世話になりました。皆様のお陰様で，学業を順調に終わり，非常に充実な留学生活をできました。誠にありがとうございました。

最後に，数十年間に学業及び成長のなかでいつも心の支えになってくれた両親に心より感謝申し上げます。いつも私をあきらめない夢楠ちゃん，日本で出会った友人達に，ありがとうございました。

また，研究を進めるにあたり，ご支援、ご協力を頂きながら，ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます

上記の方々に，心から厚くお礼を申し上げます。

張 玉露

2019年（令和元年）9月