

令和2年度 博士後期課程修了論文

尿素を用いたコンクリートの
塗布型乾燥収縮低減剤の実用化研究

指導教員 藤原 浩巳 教授

令和3年3月

宇都宮大学大学院

工学研究科 システム創成工学専攻

土木材料研究室

187114M 劉 玲玲

【目次】

第1章 序論

| | |
|-------------------|---|
| 1.1 研究の背景 | 2 |
| 1.1.1 社会的背景 | 2 |
| 1.1.2 技術的背景 | 2 |
| 1.2 研究の目的 | 3 |
| 1.3 論文の構成 | 4 |
| 【参考文献】 | 6 |

第2章 既往の研究

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1 概論 | 8 |
| 2.2 乾燥収縮低減方法に関する既往の研究 | 8 |
| 2.3 尿素を用いたコンクリートに関する既往の研究 | 12 |
| 2.4 本研究で使用した化学材料についての既往の研究 | 13 |
| 2.4.1 尿素に関する既往の研究 | 13 |
| 2.4.2 硫酸ナトリウムに関する既往の研究 | 14 |
| 2.4.3 珪酸ナトリウムに関する既往の研究 | 14 |
| 2.4.4 本研究で使用した不凍液 | 15 |
| 【参考文献】 | 16 |

第3章 尿素水溶液を浸漬した場合の乾燥収縮低減効果

| | |
|----------------------------|----|
| 3.1 概論 | 19 |
| 3.2 モルタルにおける乾燥収縮試験 | 19 |
| 3.2.1 使用材料 | 19 |
| 3.2.2 配合条件 | 19 |
| 3.2.3 練混ぜ手順 | 19 |
| 3.2.4 試験項目および試験方法 | 20 |
| 3.2.5 試験結果および考察 | 24 |
| 3.3 コンクリートにおける乾燥収縮試験 | 36 |
| 3.3.1 使用材料 | 36 |
| 3.3.2 配合条件 | 36 |
| 3.3.3 練混ぜ手順 | 36 |
| 3.3.4 試験項目および試験方法 | 37 |
| 3.3.5 試験結果および考察 | 38 |
| 3.4 まとめ | 46 |

第4章 尿素水溶液の含浸による乾燥収縮低減メカニズム

| | |
|-------------------------------------|----|
| 4.1 概論..... | 49 |
| 4.2 モルタルにおける尿素水溶液の浸透深度試験..... | 49 |
| 4.2.1 試験概要..... | 49 |
| 4.2.2 使用材料..... | 49 |
| 4.2.3 配合条件..... | 49 |
| 4.2.4 練混ぜ手順..... | 49 |
| 4.2.5 試験結果..... | 49 |
| 4.3 コンクリートにおける尿素水溶液の浸透深度試験..... | 50 |
| 4.3.1 試験概要..... | 50 |
| 4.3.2 使用材料..... | 50 |
| 4.3.3 配合条件..... | 50 |
| 4.3.4 練混ぜ手順..... | 51 |
| 4.3.5 試験結果..... | 51 |
| 4.4 SEM 観察試験..... | 54 |
| 4.4.1 使用材料..... | 54 |
| 4.4.2 配合条件..... | 54 |
| 4.4.3 練混ぜ手順..... | 54 |
| 4.4.4 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた観察..... | 54 |
| 4.4.5 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察結果..... | 55 |
| 4.5 デュヌイ表面張力計による尿素水溶液の表面張力測定試験..... | 58 |
| 4.5.1 試験方法の概要..... | 58 |
| 4.5.2 試料..... | 58 |
| 4.5.3 試験器..... | 58 |
| 4.5.4 試験器の下準備..... | 58 |
| 4.5.5 テスト (基準値合わせ)..... | 58 |
| 4.5.6 試料溶液の測定..... | 60 |
| 4.5.7 試験結果と考察..... | 60 |
| 4.6 まとめ..... | 61 |
| 【参考文献】..... | 62 |

第5章 尿素水溶液に含浸したコンクリートの耐久性

| | |
|----------------|----|
| 5.1 概論..... | 64 |
| 5.2 使用材料..... | 64 |
| 5.3 配合条件..... | 64 |
| 5.4 練混ぜ手順..... | 64 |

| | | |
|-------|-------------|----|
| 5.5 | 試験項目および試験方法 | 64 |
| 5.5.1 | 凍結融解試験 | 64 |
| 5.5.2 | 促進中性化試験 | 66 |
| 5.5.3 | ひび割れ抵抗性試験 | 67 |
| 5.5.4 | ひび割れ修復性試験 | 68 |
| 5.6 | 試験結果および考察 | 68 |
| 5.6.1 | 凍結融解試験結果 | 68 |
| 5.6.2 | 促進中性化試験結果 | 70 |
| 5.6.3 | ひび割れ抵抗性試験結果 | 72 |
| 5.6.4 | ひび割れ修復性試験結果 | 73 |
| 5.7 | まとめ | 74 |

第6章 現場へ適用する施工方法の検討

| | | |
|-------|-------------|----|
| 6.1 | 概論 | 76 |
| 6.2 | 使用材料 | 76 |
| 6.3 | 配合条件 | 76 |
| 6.4 | 練混ぜ手順 | 76 |
| 6.5 | 試験項目および試験方法 | 76 |
| 6.5.1 | スランプ試験 | 76 |
| 6.5.2 | 空気量試験 | 77 |
| 6.5.3 | 乾燥収縮試験 | 77 |
| 6.6 | 施工方法の概要 | 78 |
| 6.6.1 | 塗布による施工方法 | 78 |
| 6.6.2 | 散布による施工方法 | 80 |
| 6.7 | 試験結果および考察 | 82 |
| 6.7.1 | フレッシュ性状試験結果 | 82 |
| 6.7.2 | 乾燥収縮試験結果 | 83 |
| 6.8 | まとめ | 98 |
| | 【参考文献】 | 99 |

第7章 尿素水溶液による乾燥収縮低減工法の問題点とその改善策の検討

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.1 | 概論 | 101 |
| 7.2 | 雨水による尿素の溶出問題の対策 | 101 |
| 7.2.1 | 尿素溶出の有無の確認試験 | 101 |
| 7.2.2 | 尿素水溶液に硫酸ナトリウムを混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果の持続能力 | 104 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.2.3 | 尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力..... | 126 |
| 7.2.4 | 再乾燥試験における硫酸ナトリウムによる尿素溶出の抑制作用の有無の検討..... | 144 |
| 7.2.5 | 尿素水溶液に珪酸ナトリウムを混合した場合のコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力..... | 150 |
| 7.3 | 尿素水溶液の寒冷環境での使用..... | 156 |
| 7.3.1 | 不凍液の混合による尿素結晶温度の変化の確認試験..... | 156 |
| 7.3.2 | 尿素水溶液に不凍液を混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 158 |
| 7.3.3 | 主成分の異なる不凍液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 163 |
| 7.3.4 | 寒冷環境での施工を考慮した不凍液混合水溶液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 170 |
| 7.3.5 | 尿素と不凍液の混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果.... | 174 |
| 7.4 | まとめ..... | 184 |
| | 【参考文献】..... | 185 |

第8章 結論と考察

| | | |
|-----|--------------|-----|
| 8.1 | 本研究のまとめ..... | 187 |
| 8.2 | 今後の課題..... | 189 |
| | 謝辞..... | 191 |

第 1 章

序論

目次

| | |
|------------------|---|
| 1.1 研究の背景..... | 2 |
| 1.1.1 社会的背景..... | 2 |
| 1.1.2 技術的背景..... | 2 |
| 1.2 研究の目的..... | 3 |
| 1.3 論文の構成..... | 4 |
| 【参考文献】 | 6 |

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 社会的背景

地球温暖化は世界規模で多くの影響を与える。世界の平均気温は上昇傾向にあり、IPCC 第5次評価報告書では平均気温が1880年から2012年の132年間に0.85°C上昇したことが示されている。そのほかにも、雪氷の減少・海面水位の上昇・海面水温の上昇などの問題が気温上昇とともに発生している。このような問題に悩まされる中、世界全体を見ると二酸化炭素の排出量は増加し続けている。また、水資源の枯渇とともに建設資材としての砂も枯渇している。このような環境問題に対する社会的な関心の高まりに応じ、コンクリートの耐久性向上技術の開発が注目を集めている。持続可能な社会の構築の一環として、構造物を長期にわたり良好な状態で使用することを実現するため、構成材料・部材自体の耐久性向上させることが世界的に重要な課題である。ここで、コンクリート構造物の耐久性の一つに、乾燥収縮によるひび割れに対する抵抗性が挙げられる。

日本国内において、社会基盤の長寿命化、長期効用が望まれている。コンクリートの製造開始から150年以上が経過し、あらゆる用途、場所で使用されているが、コンクリートに生じるひび割れを現状で完全に抑制することは難しい。ひび割れは多種多様であり、使用材料、配合条件、施工方法が原因となり発生するものや、長時間のコンクリート構造物の使用や環境の変化による劣化に伴い、ひび割れが生じるものなど様々である。ひび割れ発生の主要な因子として、乾燥収縮が挙げられる。コンクリートを練り混ぜる際、セメントの水和反応に必要な水量のほかに、施工性の確保のため必要な大量の水を加えていることから、セメントペーストは硬化後に乾燥環境下において大きく収縮する性質を有している。骨材はその収縮に抵抗する役割を担うため、配合設計において可能な限り多くの骨材を使用できるように配慮するが、完全に収縮を抑制することは困難であり、打込み後のコンクリートには数百×10⁻⁶の収縮ひずみを生じる。この収縮作用を拘束すると乾燥収縮によるひび割れが生じる。建築物に多く用いられる薄肉部材は乾燥しやすく、乾燥収縮によるひび割れが生じやすい。

ひび割れ、特に乾燥収縮によるひび割れの発生を抑制するため、これまで多くの研究がなされており、その一部技術は既に実用化されている。その中でも、収縮低減材料を混和する方法が広く用いられている。

1.1.2 技術的背景

尿素をモルタル・コンクリートに混和すると、水和発熱量の低減、乾燥収縮ひずみの低

減効果があり、実施工での適用事例¹⁾も多い。既往の研究成果では、尿素を練り混ぜ水の一部と体積置換して用いるため、あらかじめ溶解しておき、コンクリートを練混ぜる。既往の研究より、尿素を 50kg/m³ 混和すると、乾燥収縮は約 60%低減するとされている²⁾。しかし、レディーミクストコンクリート工場において種々の混和材料を適用する方法は、材料の品数増加・管理の問題、練り混ぜ時に投入する手間などに起因する材料および機材コストや人件費の上昇を招く。また、工場において、一般に使用しない混和材料の投入や骨材の確保・利用は、既存設備のみでは対応できず、材料混和の度に臨時の人手を要するため、混和材料を活用したひび割れ防止策の普及を妨げているのが現状である。したがって、尿素をレディーミクストコンクリート工場において練混ぜ時に投入することは、工程上、煩雑な作業となる可能性がある。

一方、コンクリートの乾燥は主に露出表面部分で生じている。表面付近では湿分の分布に差が生じるが、コンクリートの内部では平衡状態となるためそれほど乾燥は進行しない。このような状態にあるコンクリート全体に対して収縮抑制のための混和材料を用いることは、材料を効率的に利用しているとは言い難く、乾燥する表面部にのみ選択的に収縮低減効果のある材料を含有させることが合理的と考えられる。

近年、打設後のコンクリートおよびモルタルに塗布することで、乾燥収縮を低減し、微細なひび割れを抑制できる塗布型収縮低減剤が開発され、一般に用いられている。市販の乾燥収縮低減剤の収縮低減メカニズムの一つは、コンクリートおよびモルタル中の自由水の表面張力を低減し、毛細管張力を減少させることにより乾燥収縮を抑制し、ひび割れを低減するとされる。もう一つはコンクリートおよびモルタル内部の水分逸散を抑制することで、湿潤状態を保ち、乾燥収縮を抑制し、ひび割れを低減するとされる。

1.2 研究の目的

本研究では、安価で簡便な方法として、尿素を主成分とした水溶液を脱型したコンクリートの表面に塗布することにより、乾燥収縮を低減する方法を開発した。

本研究より、コンクリートにおける乾燥収縮試験の結果から、表面に尿素水溶液を塗りつける方法は、混和材料として使用した場合と比較して、非常に少ない量で簡便に収縮低減効果を得ることができた³⁾。

次に、尿素水溶液による乾燥収縮低減のメカニズムについての仮説を提出し、解明を試みた。

また、乾燥収縮低減効果が確認できた後、尿素水溶液による構造物の耐久性への影響を検討した。

さらに、実施工において適用するためには、浸漬より簡便な施工工法を検討した。

最後は、尿素水溶液に新しい化学材料を添加することにより、欠点を改良し、実用化される乾燥収縮低減剤を開発することを試みた。

尿素水溶液の乾燥収縮低減効果が確認できたが、しかし、材齢経過後のコンクリートを水に浸漬し、収縮低減効果の変化を確認したところ、水に浸漬する度に収縮低減効果が薄くなり、含浸した尿素の溶出がみられた。

この欠点を解決するため、硫酸ナトリウムと未反応のセメント鉱物が反応し、新たに生成物を生じることに着目し、尿素と硫酸ナトリウムを一定の割合で混合した水溶液を供試体に含浸させた。尿素水溶液と同様の収縮低減効果が得られた。また乾燥収縮低減効果維持が可能なことに期待し、その混合水溶液を用いて試験を行ったが、材齢経過後のコンクリートを水に浸漬した後、収縮低減効果が薄くなり、含浸した尿素の溶出がみられた。

次に、コンクリート構造物の地下防水工法としてよく使われているケイ酸質系塗布防水材料の主成分のケイ酸に着目し、尿素とケイ酸の混合水溶液を硬化したモルタルの表面に塗布し、乾燥収縮低減効果を検討した。また、材齢経過後のモルタルを水に浸漬し、含浸した尿素の収縮低減効果の変化も確認した。

また、温度が低下すると、水に溶けていた尿素がコンクリート内部に浸透する前に結晶し析出するため、低温環境で施工した場合に乾燥収縮低減効果が低下する問題がある。

この欠点を解決するため、不凍液が持つ耐低温性能に着目し、尿素と不凍液の混合水溶液を硬化したモルタルの表面に塗布し、乾燥収縮低減効果を検討した。また、この混合水溶液を用い、低温環境での施工効果も検討した。

1.3 論文の構成

本論文の構成を以下に示す。また、 図-1.3.1 に本研究のフローを示す。

第1章では、本研究を行うことになった社会的及び技術的な研究背景を述べ、本研究の目的を記述した。

第2章では、本研究に関連する既往の研究について記述した。

第3章では、尿素水溶液を用いた場合の乾燥収縮低減効果について記述した。

第4章では、尿素水溶液の含浸による乾燥収縮低減メカニズムを解明した。

第5章では、尿素水溶液に含浸したコンクリートの耐久性の試験結果を記述した。

第6章では、施工方法の違いによる尿素水溶液の乾燥収縮低減効果の差別について記述した。

第7章では、尿素水溶液による乾燥収縮低減工法の問題点とその改善策について記述した。

第8章では、これらの結果を統括し、本研究の結論と考察を記述した。

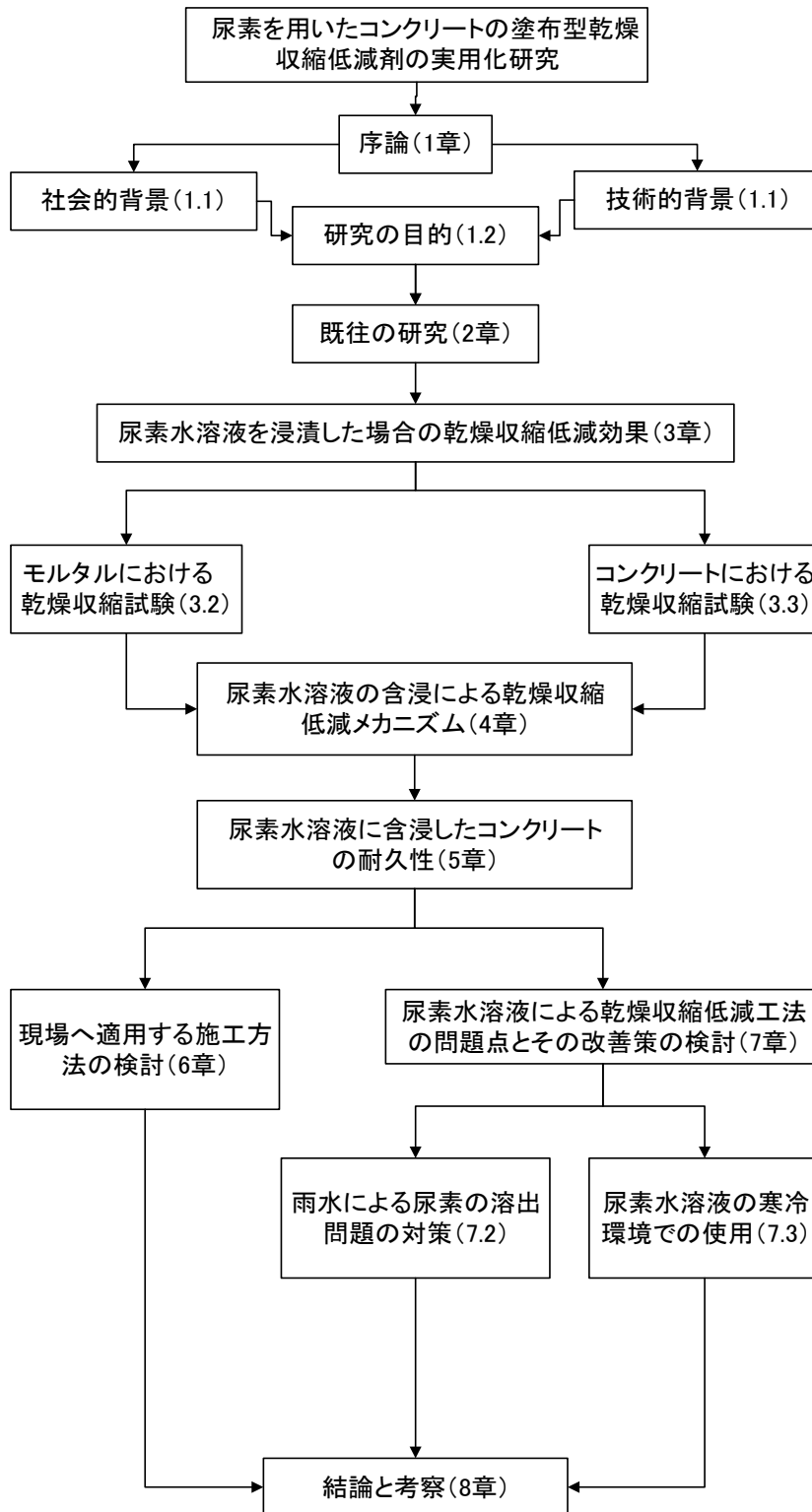


図-1.3.1 本研究のフローチャート

【参考文献】

- 1)清水建設株式会社：尿素を用いたひび割れ低減コンクリート『クラレスクリート』、
DOBOKU 技士会 東京、わが社の技術、第2回、pp.26-29
- 2)河井徹・阪田憲次：尿素を用いたコンクリートの諸特性、コンクリート工学年次論文集、
Vol.29、No.1、pp.639-644、2007
- 3)劉玲玲・藤原浩已・丸岡正知：尿素塗布による新しいコンクリートの乾燥収縮低減工法の
開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.1、pp.415-420、2017

第 2 章

既往の研究

目次

| | |
|--------------------------------|----|
| 2.1 概論 | 8 |
| 2.2 乾燥収縮低減方法に関する既往の研究 | 8 |
| 2.3 尿素を用いたコンクリートに関する既往の研究..... | 12 |
| 2.4 本研究で使用了化学材料についての既往の研究..... | 13 |
| 2.4.1 尿素に関する既往の研究 | 13 |
| 2.4.2 硫酸ナトリウムに関する既往の研究 | 14 |
| 2.4.3 珪酸ナトリウムに関する既往の研究 | 14 |
| 2.4.4 本研究で使用了不凍液 | 15 |
| 【参考文献】 | 16 |

第2章 既往の研究

2.1 概論

モルタルやコンクリートは、吸水によって膨張し、乾燥すれば収縮する。乾燥によりコンクリート中の含水率が小さくなることで生じる変形を乾燥収縮という。コンクリートは乾燥による収縮が最も大きく、これが拘束されることにより、コンクリートに引張応力を生じ発生し、ひび割れが発生する。コンクリートの乾燥収縮を低減することは、構造物の耐久性を向上させる上でも重要である。このため、ひび割れ、特に乾燥収縮によるひび割れの発生を抑制するため、これまで多くの研究がなされており、その一部技術は既に実用化されている。乾燥収縮ひずみを低減する材料として、石灰石粗骨材、収縮低減剤、膨張材、尿素を混和する。また、乾燥収縮ひずみを低減する使用材料の組合せと使用する量、セメントの種類の変更によって、乾燥収縮ひずみ量を低減し、 $0\sim 800\times 10^{-6}$ 程度の範囲で制御させる。

種々の化成品の混和材料の利用により、ひび割れを低減する方法は効果的な方法の一つとされる。しかし、レディーミクストコンクリート工場において種々の混和材料を適用する方法は、材料の品数増加・管理の問題、練混ぜ時に投入する手間などに起因する材料および機材コストや人件費の上昇を招く。また、工場において、一般に使用しない混和材料の投入や骨材の確保・利用は、既存設備のみでは対応できず、材料混和の都度臨時に人手を要することになり、混和材料を活用したひび割れ防止策の普及を妨げているのが現状である。また、コンクリートの乾燥は主として露出表面部分で生じており、コンクリートの内部では平衡状態となるためそれほど乾燥は進行しない。このような状態にあるコンクリート全体に収縮抑制のための混和材料を用いることは、材料的には効率的とはいえず、乾燥する表面部にのみ選択的に収縮低減効果のある材料を含有させることが合理的と考えられる。

本章の2.2節においては、これまでコンクリートに使用した乾燥収縮低減方法に関する既往の研究をとりまとめた。2.3節においては、本研究に関連する尿素を混和材として使用した場合の研究結果を記述した。また、本研究で使用した材料の基本性状および化学性に関する既往の研究を2.4節でとりまとめた。

2.2 乾燥収縮低減方法に関する既往の研究

コンクリートの劣化は、塩化物や炭酸ガスといった誘因物質が表面からコンクリート内部に浸透することによって引き起こされる。コンクリートに乾燥収縮や自己収縮などによるひび割れが生じると、誘因物質の浸透を促進し劣化が伸展する。乾燥収縮とは、セメント水和物の化学的および鉱物的な性質の変化ではなく、水分逸散に伴う物理的な挙動と考

えられている。このような考えに基づく乾燥収縮の主な原因としては、毛細管張力および分離圧の増加、表面張力の増大および相間水の移動などが挙げられる¹⁾。これらの説で最も有力とされるのが毛細管張力説である。図-2.2.1に示すように、フレッシュコンクリート中の練混ぜ水で占められていた空間において、セメントと水によって化学反応が起きた後も水和物で占められなかった空隙を毛細管空隙という²⁾。毛細管張力説は、セメント硬化体中の細孔にメニスカスが形成され、乾燥が進むと間隙水表面の表面張力が増大し、曲率半径が小さくなるため毛細管張力が増大し、セメント硬化体中に働く引張応力が大きくなって体積減少が生じるという説である。図-2.2.2に示すようなメニスカスの理論式は式(2.2.1)で表される²⁾。この式によると、間隙水曲率半径が小さくなるほど、表面張力が大きくなり、毛細管張力が大きくなることが表される。

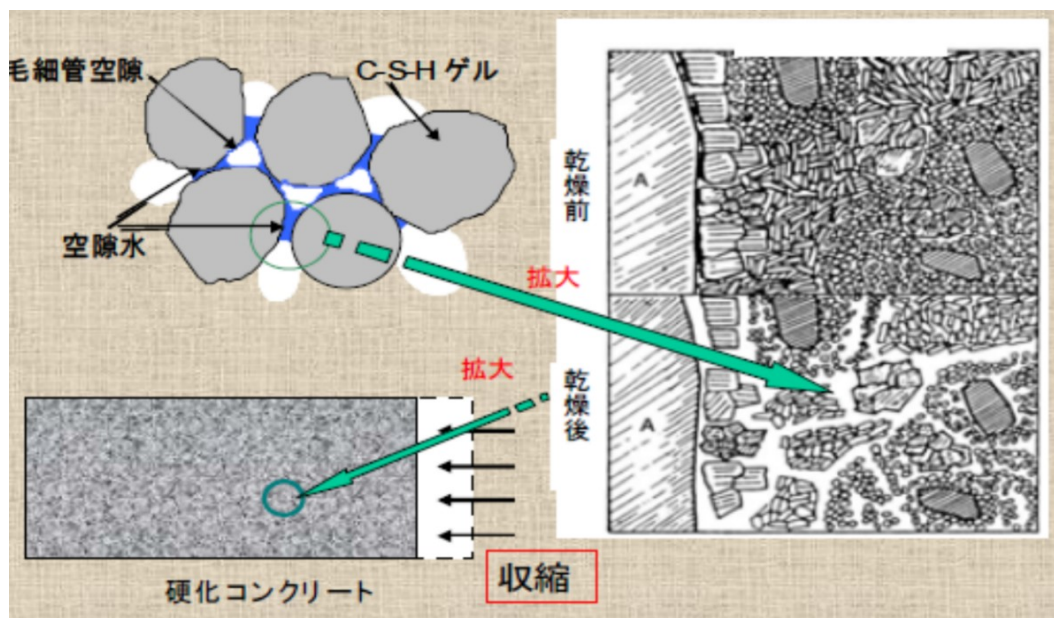


図-2.2.1 硬化体内部の模式図

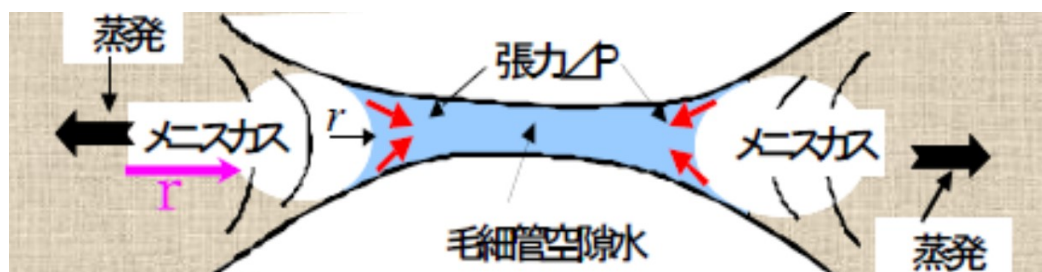


図-2.2.2 メニスカスの原理図

$$\Delta P = 2 \gamma / r \quad (2.2.1)$$

ΔP : 毛細管張力 γ : 表面張力 r : 間隙水曲率半径

乾燥収縮低減方法については、今まで多くの研究が報告されており、コンクリートに混和する乾燥収縮低減材料やコンクリートの表面に塗布する乾燥収縮低減剤が開発されている。

コンクリートに混和する乾燥収縮低減材料は、有機系界面活性剤を主成分とする収縮低減剤や膨張材、石灰石骨材および尿素の使用が推奨されている。既存の収縮低減剤は、ポリオキシアルキレングリコールのアルキルエーテルを基本構造とした非イオン界面活性剤で、空隙水の表面張力を低下させ、水の蒸発により生じる毛細管張力を低減させるものである。しかし、これらの乾燥収縮低減材料はコンクリートの空気量の調整を難しくし、耐凍害性が顕著に低下することが指摘されている。また、生コン工場での洗練水排水の泡立ちや回収水に悪影響を及ぼす等の指摘があり、実際の工事に採用されることは稀である³⁾。また、収縮低減剤については、JIS規格が無く、強度や凍結融解抵抗性への影響など寒冷地での利用にあたり留意すべき事項が多いため積極的に利用される状況にはない⁴⁾。

一方で、コンクリート硬化時に体積を膨張させることでコンクリート中に圧縮応力を発生させ、収縮による引張応力を低減する効果がある⁵⁾。膨張材は、初期材齢に体積が膨張する水和生成物を形成する化学反応により、コンクリートに膨張をもたらすものである。材齢7日まで湿潤養生を行い、それ以降を乾燥状態に曝した場合の膨張コンクリートのひずみ挙動を、通常のコンクリートと比較して模式的に図-2.2.3に示す。膨張の進行は十分な水分供給があれば概ね一週間程度で終了する。膨張が収束した後に乾燥を受けた場合の乾燥収縮は、膨張材を用いないコンクリートとほぼ同等または若干小さい程度であり、長期的に進行する乾燥収縮ひずみそのものを低減するものではない⁵⁾。実構造物の外壁およびスラブにおいても、膨張材を用いることで、初期材齢において膨張に伴う圧縮応力が有効に導入され、コンクリートの引張応力を低減することができる。さらに、長期材齢におけるひび割れを評価した結果、膨張材を用いたコンクリートのひび割れ面積は、普通コンクリートの約35%で、膨張材のひび割れ低減効果を確認している⁶⁾。

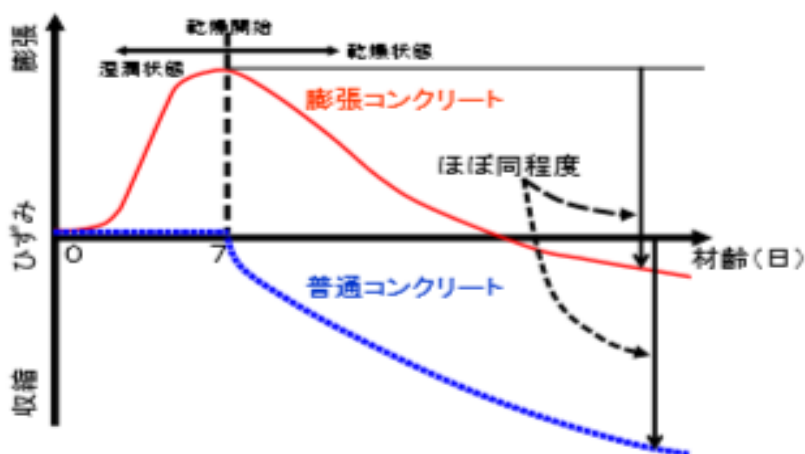


図-2.2.3 収縮補償の概念図

近年では、骨材の種類（岩種）や品質がコンクリートの乾燥収縮に大きな影響を及ぼすことが広く認識されつつある。一方、石灰石骨材を用いたコンクリートは、乾燥収縮が小さくなることが数多くの研究者から報告されており、石灰石骨材の使用は乾燥収縮の低減に有効な方法といえる。しかし、その乾燥収縮低減効果は、石灰石の産地や置換対象が細骨材と粗骨材とでは異なる可能性がある⁷⁾。石灰石砕砂を細骨材に置換することによる乾燥収縮への影響については、明確な傾向を認めることができなかった。石灰石砕石を砂岩砕石に置換すると、その置換率に比例して乾燥収縮ひずみが小さくなった。石灰石砕石を用いた場合、その他の砂岩砕石を用いた場合と比べ、ひび割れ発生材齢が長期化し、拘束下におけるひび割れ抵抗性の向上が確認された⁸⁾。石灰石骨材によるコンクリートの乾燥収縮の低減は、石灰石骨材単体の容積変化が小さいことが強く関係していると考えられる⁷⁾。

尿素を用いたコンクリートに関して、尿素は水に容易に溶解し、ほぼその容積分だけ単位水量を減じることが確認した。また、単位水量の減少により乾燥収縮を大幅に低減できることを明らかにした。さらに、尿素が水に溶解した場合に吸熱反応を示すことおよびその後の水和反応を抑制することにより、水和熱による温度上昇量が低減できることを確認した。単位水量が低減できるとともに尿素は非揮発性を示すため乾燥収縮量が大幅に減少できる。尿素の混入量 50kg/m^3 の場合に乾燥収縮ひずみは 60% 程度減少し、圧縮強度は初期材齢では低下するが長期材齢では変化しないことも確認している⁹⁾。

尿素を用いる場合、単位水量を減少することができるに加え、尿素の保湿効果によりコンクリート内部の水分を外部に逸散しにくくなるとされ、 20kg/m^3 の尿素を用いることで、乾燥収縮ひずみを尿素未使用の普通コンクリートと比較して $15\sim 20\%$ 程度小さくできる。さらに、石灰岩骨材を併用することにより、普通コンクリートと比較して約 45% 小さくすることが可能である¹⁰⁾。

また、コンクリートの表面に塗布する乾燥収縮低減剤は収縮低減策の一つである。

郭らは、塗布タイプ収縮低減剤を用いてその収縮低減効果および養生効果を検討している¹¹⁾。塗布タイプ収縮低減剤の利用により約 70×10^{-6} の収縮ひずみ低減および 25% の水分保持性能の向上が期待できるとされる。また、優れた水分保持能力により、初期材齢に養生効果を発揮し、硬化組織は緻密になるとされる。塗布タイプ収縮低減剤の水分保持性による養生効果により圧縮強度は増大し、また中性化進行の抑制、塩化物イオン浸透の抑制等の耐久性能の向上が認められている。

塗布タイプ乾燥収縮低減剤には、高含浸タイプがある。その中の一つはフローリック社製「ヌッテガード」である。「ヌッテガード」は硬化コンクリートおよびモルタルの表面に塗布することで、特に初期の乾燥収縮を抑制し、ひび割れの発生を低減するとされ、また躯体コンクリートの耐久性状に何ら悪影響を及ぼさないとされる。「ヌッテガード」は含浸性が高く、躯体内部に速やかに浸透するので、塗布時の液垂れが少なく施工性に優れる。また、躯体表面に塗膜層を形成しないので、コンクリートの外観に影響を与えない。浸透した「ヌッテガード」の含浸層により、「ヌッテガード」を塗布したコンクリートは

無塗布のコンクリートより内部の相対湿度が高くなる。この効果により収縮ひずみおよび収縮速度が低下することに加えて、養生効果を発揮すると考えられる。

塗布タイプ乾燥収縮低減剤には、ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ社製の「レオソルブ 703B」という市販品がある。「レオソルブ 703B」はコンクリートの表面に散布・塗布すると毛細管空隙に入り込み、水の表面に疎水膜を形成し、水分の蒸発を抑え込む。一部水分に溶け込んだ「レオソルブ 703B」が毛細管水分の水蒸発時に生じる毛細管張力を低減し、コンクリートの乾燥収縮を低減できるとされる。「レオソルブ 703B」の散布により、コンクリートの収縮量、水分散出量の低減効果があることがわかる。しかしながら散布量 $220\text{g}/\text{m}^2$ 以上での性能向上はあまり見られず、散布量の目安としては散布ロスを考慮し、 $150\sim 300\text{g}/\text{m}^2$ が最適とされる。また、上記の散布量範囲であれば、圧縮強度への悪影響は確認されず、疎水膜形成による保水効果により、通常の気中養生と比べ強度向上（乾燥による強度低下抑制）効果も得られることがわかる。

また、太平洋マテリアル株式会社が開発した「クラックセイバー」は、コンクリート表面に塗布することを目的に適切な塗布量と作業性を改善した塗布型高性能収縮低減剤である。コンクリートおよびモルタル中の間隙水の表面張力を低減し、毛細管張力を減少させることにより乾燥収縮を抑制し、ひび割れを低減する。使用量が少なくても安価に施工できる。また、塗膜形成機能はなく、コンクリートの外観に影響を与えない。

2.3 尿素を用いたコンクリートに関する既往の研究

河井・阪田らは、尿素を混和したコンクリートに関して、従来の知見に新たな知見を加えて検討し⁹⁾、尿素を混入したコンクリートの配合設計方法を提案している。コンクリートに尿素を混入すると尿素は水に容易に溶解するため、その容積分だけの単位水量を低減できる。溶解をする際に、温度が若干低下することによるスランプの増加が認められるため、単位水量を減少させることも可能である。尿素は水に溶解すると吸熱反応を示すため、コンクリートの温度を低下させるとともに凝結を遅延させる。したがって、尿素の混和はコンクリートの断熱温度上昇量を減少させる。また、単位水量が低減できるとともに尿素は非揮発性であるため乾燥収縮量が大幅に減少できる。尿素の混和量 $50\text{kg}/\text{m}^3$ の場合に乾燥収縮ひずみは 60%程度減少される。また、尿素を混和したコンクリートの圧縮強度は、初期材齢では小さくなるが、長期材齢では回復する。

田中らは、尿素の高い水溶性、吸熱反応および非揮発性に着目し、実構造物において尿素の乾燥収縮低減効果および水和熱低減効果を実証した¹⁰⁾。尿素の使用量が $20\text{kg}/\text{m}^3$ および $30\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲において、尿素使用コンクリートの圧縮強度は、未使用の普通コンクリートと同程度である。尿素使用コンクリートの中性化深さは、普通コンクリートと比較して著しく小さく、尿素を $20\text{kg}/\text{m}^3$ 用いた場合で約 70%、尿素を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 用いた場合で約 85%低減される。また、尿素使用コンクリートを実構造物に適用した場合、施工後約 2 年

のひび割れ調査から、スラブでは約 55%、梁においては約 85%のひび割れ本数が低減されることが確認されている。実施工において、尿素使用コンクリートが普通コンクリートと同様に施工できることを確認した¹²⁾。

また、清水建設株式会社の研究結果によると¹³⁾、尿素を使用したコンクリートは、温度ひび割れと乾燥収縮ひび割れ低減の両方に効果があることが最大の特長であり、実構造物においてもその有効性が確認された。また、普通コンクリートと同様に施工することができ、コスト面でも、膨張材や収縮低減剤等と同等以下の価格であるため汎用性が高い。今後、コンクリート構造物のひび割れ低減技術の一つとして広く普及することができる。

2.4 本研究で使用した化学材料についての既往の研究

2.4.1 尿素に関する既往の研究

尿素とは、1773年 F.M.Rouelle によって尿の中から発見され、1828年に Wholer によって、シアン酸アンモニウム NH_4OCN から合成された化合物である。工業的には NH_3 と CO_2 を高温高压下(180~200°C、150~250気圧)で反応させて合成される。一般的には H_2NCONH_2 と記され、水素がほかの置換基に換わった化合物を総称して尿素という。

尿素は水に容易に溶解し、pH7.2で酸と反応して塩を生成する。弱い塩基性を有し、無色の結晶であり、密度は20°Cで 1.335 g/cm^3 である。

尿素の用途として、保湿クリーム・肥料などとして広く使われており、ホルムアルデヒド (HCHO) と反応させることで尿素樹脂(ユリア樹脂)も得ることが出来る。高濃度の水溶液はタンパク質、核酸を変性させる作用がある。皮膚の角質細胞内で塩化して、水分を保持している成分のひとつである¹⁴⁾。尿素は10%まで皮膚の保湿剤として、それ以上で皮膚の角質融解作用を示す¹⁵⁾。抗真菌薬や抗炎症薬の浸透促進剤として働く。

尿素は、窒素を多く含み、植物の葉や茎を育てる化成肥料として、農業でも使用される。ただし、尿素は微生物による分解・化学変化を経てからアンモニア、硝酸の形で吸収・利用が行われるので、肥料の効果が出るのに多少の時間を必要とする。

水と混ぜると吸熱効果が現れる。硝酸アンモニウムと尿素の混合物を水の入った袋と同封し、衝撃を加えて混合物を反応させ冷却効果を得る携帯用の冷却パックとしての用途もある。航空機の機体や滑走路に散布する凍結防止剤として、尿素を主成分とした防氷剤として使用される。一般的に使用される塩化カルシウムと異なり、金属への腐食性が無いため、微細な腐食から重大事故へつながる可能性が排除できない航空機に散布される。

日本国内で生産されている尿素の80%が農業用の肥料として利用され、残りの20%が尿素樹脂やメラミン原料に使用されている¹⁶⁾¹⁷⁾。また、尿素は保水性を付与する性質を有していると言われており、ハンドクリームなどのスキンケア商品に配合されている事が多い。これは、水素結合によるものであり、この力によって尿素が水分子を引き付け、水分

の逸散を防ぎ、保湿作用を示すと言われている。

一方、コンクリートへの適用もいくつかの例がある。阪田・綾野らは、コンクリートに尿素を使用することで、練り上がり直後および硬化後のコンクリートの最高温度を低減する効果が得られることを示した¹⁸⁾。さらに、水和熱を低減させることから、温度差によるひび割れおよび収縮を低減することが可能であると述べている¹⁹⁾。また、長期材齢においては圧縮強度とセメント/(水+尿素)の間に比例関係があることも示している²⁰⁾。

2.4.2 硫酸ナトリウムに関する既往の研究

硫酸ナトリウムの十水和物塩 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の俗称は芒硝である。古く 17 世紀の頃、ドイツの医学者 J.R.グラウバーにより医薬として用いられたために、グラウバー塩の名もある。密度 $1.464\text{g}/\text{cm}^3$ の無色の結晶で、水に可溶であり、特徴として水への溶解度が特異であることが挙げられる。この水溶液を熱すると、 32.38°C までは溶解度があがり続けるが、その温度に達すると、水和物としての結晶 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)ではなく、分解され水と切り離されたもの ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) としての結晶へと変化するため、溶解度は少しずつ減少する。

硫酸ナトリウムの無水物はガラスの製造、乾燥剤として用いられ、十水和物は下剤、防風通聖散、桃核承気湯などの漢方薬に配合されている²¹⁾。また、温泉の含有物質として代表的であり、硫酸ナトリウムなど、アルカリ金属・アルカリ土類金属の硫酸塩を含む温泉は総じて硫酸泉・硫酸塩泉と呼ぶ²²⁾。工業的には水酸化ナトリウムと硫酸を反応させ、排煙の水酸化ナトリウムによる脱硫や、レーヨン製造、臭素製造等で副生する粗雑な硫酸ナトリウム水溶液を沈殿や濾過で精製、留去して製する²³⁾。

また、コンクリートを硫酸ナトリウム溶液に浸漬する場合は、コンクリートの細孔中に浸透した硫酸ナトリウム溶液が、乾燥や温度変化の影響を受けてコンクリートの細孔中で結晶化すると推定され²⁴⁾、硫酸ナトリウムの結晶の膨張圧はコンクリートの乾燥収縮を低減すると考えられる。

2.4.3 珪酸ナトリウムに関する既往の研究

ケイ酸ナトリウムは、通常はメタケイ酸のナトリウム塩 Na_2SiO_3 を指すが、その他に Na_4SiO_4 、 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ などがある。メタケイ酸ナトリウムは二酸化ケイ素を炭酸ナトリウムまたは水酸化ナトリウムと融解して得られる無色の結晶で、水に可溶であり、水溶液は加水分解されアルカリ性を示す。濃い水溶液は粘性のある液体で、水ガラスとよばれ、無臭だが酸味が強く刺激性を有し、接着剤・石鹼(せっけん)配合剤などとして用いられる。水溶液はケミカルガーデンの実験に用いられる。

ケイ酸質系塗布防水材協議会のホームページによると、ケイ酸質塗布防水材は、はじめ

1966年に欧米から日本に紹介されて以来開発が進められ、コンクリート構造物の地下防水工法として数多くの実績を積み上げてきた。

通常、硬化したコンクリートの内部にはセメント粒子や骨材などの間に小さな空隙が存在する。その空隙が大きい場合や空隙の量が多く存在することで、コンクリート構造物の水密性を確保することは困難な状況となる。ケイ酸質系塗布防水材は、コンクリート表面に塗布することで、コンクリートそのものを緻密なものに変化させ、透水に対して防水性を付与する材料になる。防水機構は、防水材中から溶出したケイ酸イオンが、コンクリート中に浸透・拡散し、コンクリートの空隙中にあるカルシウムイオンと化学的に反応して不溶性のケイ酸カルシウム水和物が生成し、この結晶がコンクリート表層部の毛細管空隙を充填することによるものである。この反応によってコンクリート表層は、針状または繊維状結晶の成長促進作用で充填され、メンブレン防水とは異なる、コンクリート自体の緻密化による防水が可能となる。また、未反応の主成分は、乾燥固化後も水分の供給により溶解し反応物を生成し、施工後新たに発生する微細なひび割れ等の空隙を充填する。これらの反応により、ひび割れ深部を含む表層部の空隙を緻密化し、水や各種劣化因子の侵入を長期にわたり抑制する。コンクリート表面の外観を著しく損ねることがなく、少ない工程で、かつ短期間で施工できる。

2.4.4 本研究で使用した不凍液

不凍液とは、水冷エンジンや住宅の暖房ヒーターの一部などの内部を循環する冷却水の一つで、寒冷地において凍結しないように作られた液体のことである。主成分はエチレングリコールであり、濃度によって耐低温性能を調節できる。

本研究は各会社が販売している三種類の不凍液を使用した。不凍液 1号は株式会社 MORESCO が製造されている「ナイブライン Z1」である。「ナイブライン Z1」の主成分は70～80%のエチレングリコールで、その他に防腐剤や防錆剤もある。使用温度範囲は-40℃～60℃である。金属に対する耐食性に優れる。粘度が高いため、適正な濃度で使用しないと循環不良や冷却効果の低下がある。

不凍液 2号は古河薬品工業株式会社が製造されている「凍結防止剤メタブルー」である。「凍結防止剤メタブルー」の主成分は質量比 51～53%のメタノールで、その他に防錆剤、除菌剤、香料もある。-60℃まで凍らない極寒地対応の凍結防止剤であり、仮設トイレの洗浄液として使われている。

不凍液 3号は古河薬品工業株式会社が製造されている「凍結防止剤凍ランブルー」である。「凍結防止剤凍ランブルー」の成分はグリセリン、メタノールと防錆剤で、金属に対して防錆効果があり、ゴムやプラスチックに対しても悪影響がない。人体やペットに対して毒性の少ない成分を使用した一般家庭向けの凍結防止剤である

【参考文献】

- 1)三橋博三・佐藤嘉昭：収縮ひび割れの予測と制御の現状、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.5、pp.4-10、2005
- 2)藤原浩巳：コンクリートの耐久性
- 3)黒岩秀介・並木哲・辻谷薫・正長眞理・名和豊春：保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化、大成建設技術センター報、第45号、2012
- 4)吉田行・嶋田久俊・安中新太郎：収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮抑制効果と凍結融解抵抗性、国立研究開発法人、寒地土木研究所、耐寒材料チーム、2017
- 5)松本健一・片平博・渡邊博志：膨張材によるコンクリートの収縮低減、土木技術資料、53-9、2011
- 6)崔亨吉・辻埜真人・野口貴文・北垣亮馬：膨張コンクリートの実構造物への適用およびひび割れ抑制効果、Cement Science and Concrete Technology、Vol.67
- 7)井上真澄・Aquino Carlos・三浦弘明・岡本享九：石灰石骨材がコンクリートの強度および乾燥収縮特性に及ぼす影響、北見工業大学学術機関リポジトリ、Vol.59、No.10、pp.769-774、2010.10
- 8)兵頭彦次・谷村充・藤田仁・番地成朋：石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.571-576、2009
- 9)河井徹・阪田憲次：尿素を用いたコンクリートの諸特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.639-644、2007
- 10)田中博一・綾野克紀：尿素を用いたコンクリートのひび割れ低減技術、テクニカルレポート、Vol.52、No.4、pp.303-308、2014.4
- 11)郭度連・花田達雄・杉山彰徳：塗布タイプ収縮低減剤を用いたコンクリートの性能向上、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.631-636、2009
- 12)田中博一・河井徹・野田宏昭・綾野克紀：尿素を用いた低収縮コンクリートの実構造物への適用、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.491-496、2011
- 13)清水建設株式会社：尿素を用いたひび割れ低減コンクリート「クラレスクリート」、土木技士会、わが社の技術、第2回、pp.26-29
- 14)Purnamawati S, Indrastuti N, Danarti R, Saefudin T (December 2017). "The Role of Moisturizers in Addressing Various Kinds of Dermatitis: A Review". Clin Med Res (3-4): 75-87
- 15)Celleno L (November 2018). "Topical urea in skincare: A review". Dermatol Ther (6): e12690.
- 16)高本進・稲本直樹・中原勝義・山崎咏：化合物の辞典、pp.614-617、1997
- 17)財団法人国際科学振興財団：科学大辞典、p1043、1985
- 18)阪田憲次・浜田利彦・岩城圭介：尿素によるコンクリートの水和熱低減効果に関する研究、セメント技術年報、42巻、pp.403-406、1988
- 19)阪田憲次・巢元利博・宮崎勝敏：尿素混入コンクリートのひび割れ制御効果に関する研

- 究、セメント技術年報、42 巻、pp.407-410、1988
- 20)阪田憲次・綾野克紀・亀高誠治：高流動コンクリートの水和熱低減に関する研究、コンクリート工学年次論文集、17 巻、pp.87-92、1995
- 21)金成俊：基礎からの漢方薬、医療用漢方製剤・構成生薬解説（改訂 ed.）、薬事日報社、p. 115、ISBN 978-4-8408-1076-0、2009
- 22)環境省：“1. 鉱泉の定義と分類”、鉱泉分析法指針、2002
- 23)松永敬浩・宏之若松：硫酸ナトリウムの製造方法、issued 2002-04-10
- 24)吉田夏樹：硫酸ナトリウムの結晶化成長によるコンクリートの劣化現象、GBRC Vol.36、No.3、pp.13-23、2011.7

第3章

尿素水溶液を浸漬した場合の 乾燥収縮低減効果

目次

| | |
|----------------------------|----|
| 3.1 概論 | 19 |
| 3.2 モルタルにおける乾燥収縮試験 | 19 |
| 3.2.1 使用材料 | 19 |
| 3.2.2 配合条件 | 19 |
| 3.2.3 練混ぜ手順 | 19 |
| 3.2.4 試験項目および試験方法 | 20 |
| 3.2.5 試験結果および考察 | 24 |
| 3.3 コンクリートにおける乾燥収縮試験 | 36 |
| 3.3.1 使用材料 | 36 |
| 3.3.2 配合条件 | 36 |
| 3.3.3 練混ぜ手順 | 36 |
| 3.3.4 試験項目および試験方法 | 37 |
| 3.3.5 試験結果および考察 | 38 |
| 3.4 まとめ | 46 |

第3章 尿素水溶液を浸漬した場合の乾燥収縮低減効果

3.1 概論

本章では、尿素水溶液の含浸による乾燥収縮低減効果を検討した。まずは、硬化モルタルの表面に尿素水溶液を含浸させるため、一定時間尿素水溶液に浸漬した後乾燥収縮を測定し、その効果を調べた。さらに、硬化コンクリートにおける尿素水溶液の乾燥収縮低減効果を確認するため、同様に尿素水溶液に浸漬した後乾燥収縮を測定し、効果を調べた。

3.2 モルタルにおける乾燥収縮試験

3.2.1 使用材料

本試験で用いる使用材料を表-3.2.1に示す。尿素は市販の工業用を用い、質量比で濃度10~50%となるように試験前に水道水に溶解させ水溶液とした。また比較用として市販の塗布タイプの乾燥収縮低減剤P(主成分：グリコールエーテル系誘導体)を用いた。

表-3.2.1 使用材料

| 種類 | 名称 | 記号 | 密度 (g/cm ³) |
|-------|-----------------------------------|----|-------------------------|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 練混水 | 宇都宮市水道水 | W | 1.00 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 | S | 2.56 |
| 化学系材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | グリコールエーテル系誘導体を主成分とする塗布型収縮低減剤(市販品) | P | 0.99~1.05 |

3.2.2 配合条件

本研究で用いた計画配合を表-3.2.2に示す。水セメント比は40%、50%、60%とした。目標フレッシュ性状は、モルタル15打フロー200±10mm、空気量2.0±1.5%とした。

3.2.3 練混ぜ手順

練混ぜには公称容量10Lのオムニミキサーを使用した。また、1バッチあたりの練混ぜ量を5Lとした。練混ぜ手順は図-3.2.1に示すように、まず、セメントと細骨材を投入し、60秒間空練りし、搔落し後、水を投入し、60秒間練混ぜ排出した。

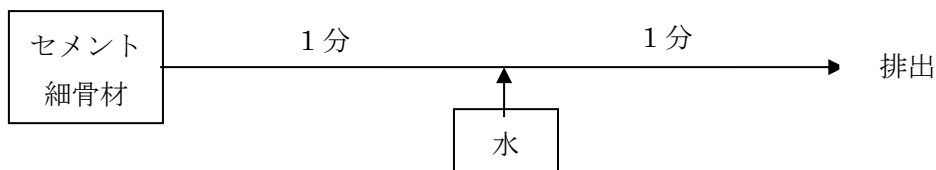


図-3.2.1 練混ぜ手順

表-3.2.2 計画配合

| W/C (%) | S/C | 単体量 (kg/m ³) | | |
|------------|-----|--------------------------|-----|------|
| | | W | C | S |
| 40 | 1.2 | 334 | 835 | 1001 |
| 50 | 1.7 | 335 | 670 | 1140 |
| 60 | 2.4 | 321 | 535 | 1286 |

3.2.4 試験項目および試験方法

1) 15打フロー試験

15打フロー試験は「JIS R 5201 セメントの物理試験方法 フロー試験」に準拠して行った。目標値は 200±10mm とした。

2) 空気量試験

モルタルの空気量測定は「JIS A 1116 : 2005 フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法(質量方法)」に準拠して行った。

目標値は 2.0±1.5% とした。測定には、内径 50mm、高さ 100mm の樹脂製の円柱供試体用軽量型枠容器を用いた。なお試験は練混ぜ終了直後に行った。

3) 圧縮強度試験

尿素水溶液への浸漬による強度への影響を確認するために、「JSCE-G 505 円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準拠し、圧縮強度試験を行った。供試体の養生は、20±3°C、60±5%Rh の恒温恒湿室にて気中養生とした。乾燥開始から材齢 3 日目に尿素濃度 50%の水溶液に 1 分間浸漬し、その後、再び乾燥状態として材齢 7 日および 28 日で圧縮強度試験を行った。比較として、浸漬しないモルタルに対しても同様の強度試験を行った。試験手順は図-3.2.2 に示す。

4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は「JIS A 1129 モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 ダイヤルゲージ方法」に準拠して行った。

手順は、練り上がったモルタルを型枠に詰め、20°Cの恒温室に静置し、翌日脱型を行い、第1回目の測定を行い基長とし、併せて質量を測定した。測定後供試体を 20±3°C、60±5%Rh の恒温恒湿室に静置し、乾燥を開始した。乾燥開始から 3 日目または 7 日目に尿素水溶液に 1 分、10 分および 30 分間浸漬し、浸漬前後の長さや質量の測定を行った。試験手順を図-3.2.3 に示す。水溶液に浸漬した場合の乾燥収縮試験の流れを図-3.2.4 に示す。

モルタル硬化体を各水溶液に浸漬した場合の実験条件を表-3.2.3 に示す。本章では、はじめに、尿素水溶液をモルタル表面に塗布することを想定して、短時間、尿素水溶液に供試体を浸漬することにより、塗布を模擬することとした。供試体は乾燥開始から 3 日目または 7 日目に各濃度の尿素水溶液および市販品 P の原液に浸漬し、91 日まで乾燥収縮を測定した。また、計算は以下に示すように式(3.2.1)を用いて長さ変化率を算出した。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01}-X_{02})-(X_{i1}-X_{i2})}{L_0} \quad (3.2.1)$$

ここに、 ε : 長さ変化率

L_0 : 基長

X_{01} 、 X_{02} : それぞれ基準とした時点における標準尺および供試体の測定値

X_{i1} 、 X_{i2} : それぞれ時点 i における標準尺および供試体の測定値

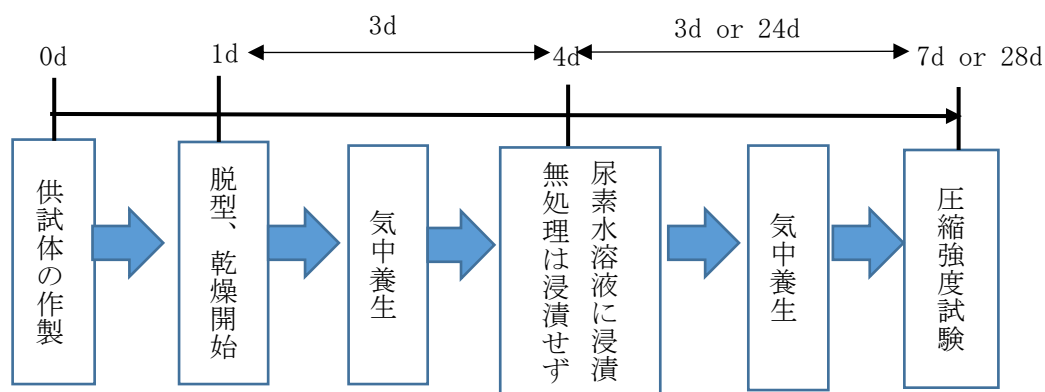


図-3.2.2 圧縮強度試験の手順

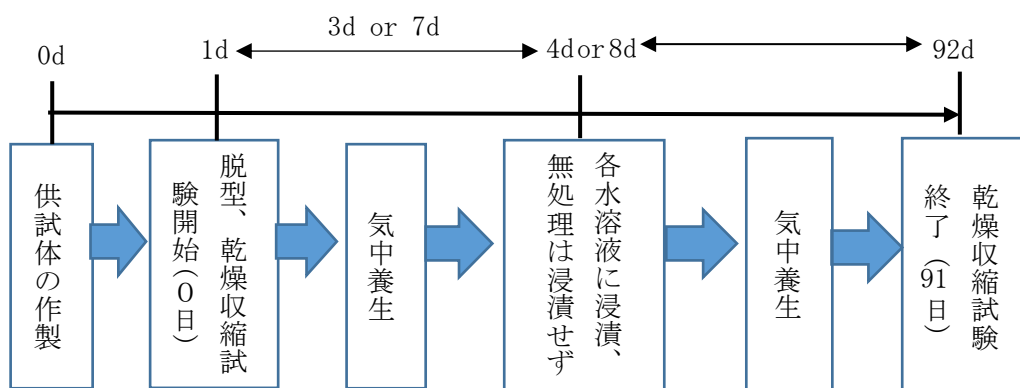


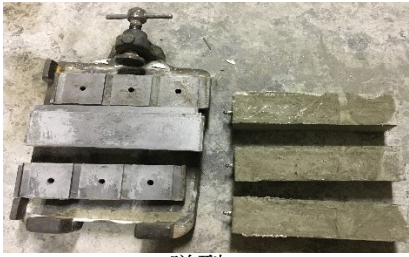
図-3.2.3 乾燥収縮試験の手順

表-3.2.3 モルタル硬化体を各水溶液に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 浸漬時材齢 | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 (W/C-浸漬液-時間) |
|----------|--------|--------|----------------|-----------------|
| 40 | 3日目 | 無し | — | 40%N |
| | | 水 | 1 | 40%水 1分 |
| | | 尿素 50% | | 40%尿素 50%1分 |
| 60 | 3日目 | 無し | — | 60%N |
| | | 水 | 1 | 60%水 1分 |
| | | 尿素 50% | | 60%尿素 50%1分 |
| 50 | 3日目 | 無し | — | 50%N |
| | | 水 | 1 | 50%水 1分 |
| | | | 10 | 50%水 10分 |
| | | | 30 | 50%水 30分 |
| | | 尿素 10% | 1 | 50%尿素 10%1分 |
| | | 尿素 20% | 1 | 50%尿素 20%1分 |
| | | 尿素 30% | 1 | 50%尿素 30%1分 |
| | | 尿素 40% | 1 | 50%尿素 40%1分 |
| | | 尿素 50% | 1 | 50%尿素 50%1分 |
| | | | 10 | 50%尿素 50%10分 |
| | 30 | | 50%尿素 50%30分 | |
| 市販品塗布型 P | 1 | 50%P1分 | | |
| 7日目 | 尿素 50% | 1 | 7d-50%尿素 50%1分 | |



供試体の作製



脱型



気中養生、乾燥開始(0日)



長さの測定(浸漬前)



質量の測定(浸漬前)



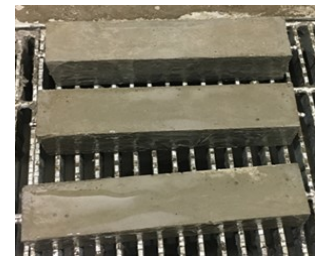
気中養生、91日まで



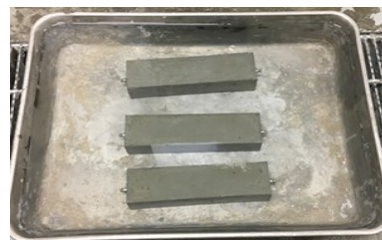
質量の測定(浸漬後)



長さの測定(浸漬後)



30分間乾燥(浸漬直後)



水溶液へ浸漬中

水溶液に浸漬した場合

図-3.2.4 尿素水溶液に浸漬した場合乾燥収縮試験の流れ

3.2.5 試験結果および考察

1) フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3.2.4に示す。いずれの水セメント比においても、目標値を満たした。

表-3.2.4 フレッシュ性状試験結果
(目標値、空気量 2.0±1.5%、15打フロー200±10mm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | 15打フロー (mm) | 温度 (°C) |
|------------|------------|----------------|------------|
| 40 | 2.3 | 195 | 17 |
| 50 | 2.1 | 205 | 16 |
| 60 | 2.2 | 200 | 16 |

2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度の試験結果を図-3.2.5、表-3.2.5に示す。

図より、水セメント比の増大に伴い、圧縮強度は減少することが確認できた。尿素水溶液に浸漬した場合は、いずれの水セメント比においても、無処理より圧縮強度が高かった、また、材齢7日から28日における圧縮強度の増進もみられた。これは尿素水溶液の浸漬により、供試体表面の空隙から尿素水溶液が供試体内部へ浸入し、空隙内で水分の逸散に伴う尿素濃度の上昇・尿素的再結晶化が生じるため、硬化組織の空隙が埋められることで圧縮強度が増進したと考えられる。また、尿素水溶液の浸入・再結晶化により供試体内部に残存する水分の気中への逸散を防止する保水作用が現れ、潤沢に水分が残ることで水和反応が促進し、圧縮強度増進に寄与したと考えられる。

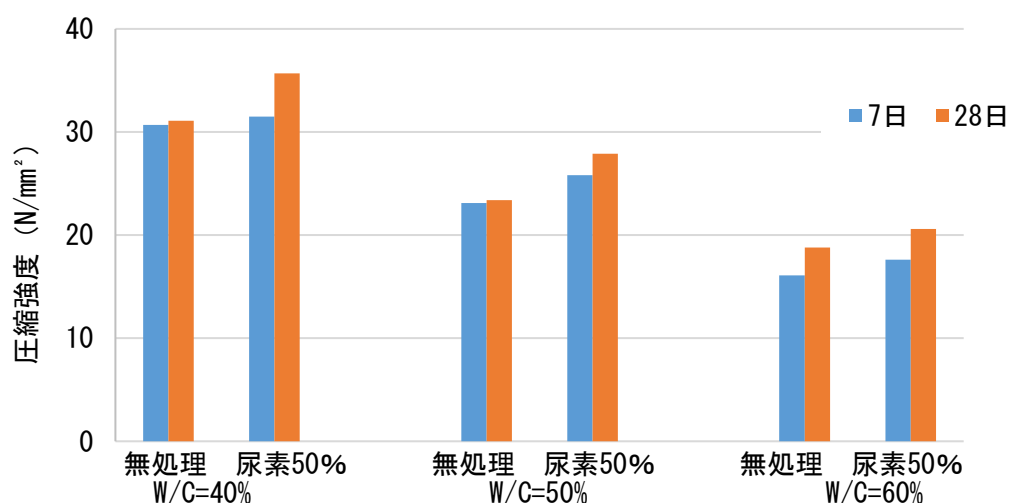


図-3.2.5 尿素水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果

表-3.2.5 尿素水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果

| W/C (%) | 浸漬液 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|---------|--------|---------------------------|------|
| | | 7日 | 28日 |
| 40 | 無し | 30.7 | 31.1 |
| | 尿素 50% | 31.5 | 35.7 |
| 50 | 無し | 23.1 | 23.4 |
| | 尿素 50% | 25.8 | 27.9 |
| 60 | 無し | 16.1 | 18.8 |
| | 尿素 50% | 17.6 | 20.6 |

3) 乾燥収縮試験結果

まずは、水セメント比 50%について、濃度 50%の尿素水溶液を 3 日目または 7 日目に浸漬した場合の結果を図-3.2.6、表-3.2.6、図-3.2.7 および表-3.2.7 に示す。

図-3.2.6 より、乾燥開始から 3 日目に尿素水溶液に浸漬した場合、浸漬直後から乾燥材齢 7 日程度まで膨張作用を示した。これは、浸漬液中の尿素が供試体表面から微細な空隙に浸入し、乾燥過程で空隙中の尿素水溶液が高濃度化し、飽和状態から析出・再結晶化し、その結晶圧によるものと推察される。また、浸漬時材齢は 3 日目の方が 7 日目に比べ収縮低減効果が高いが、これは水和進行による硬化体組織の緻密化が進まない方が尿素水溶液は硬化体表面から浸透しやすいため、乾燥収縮低減効果が高かったと考えられる。

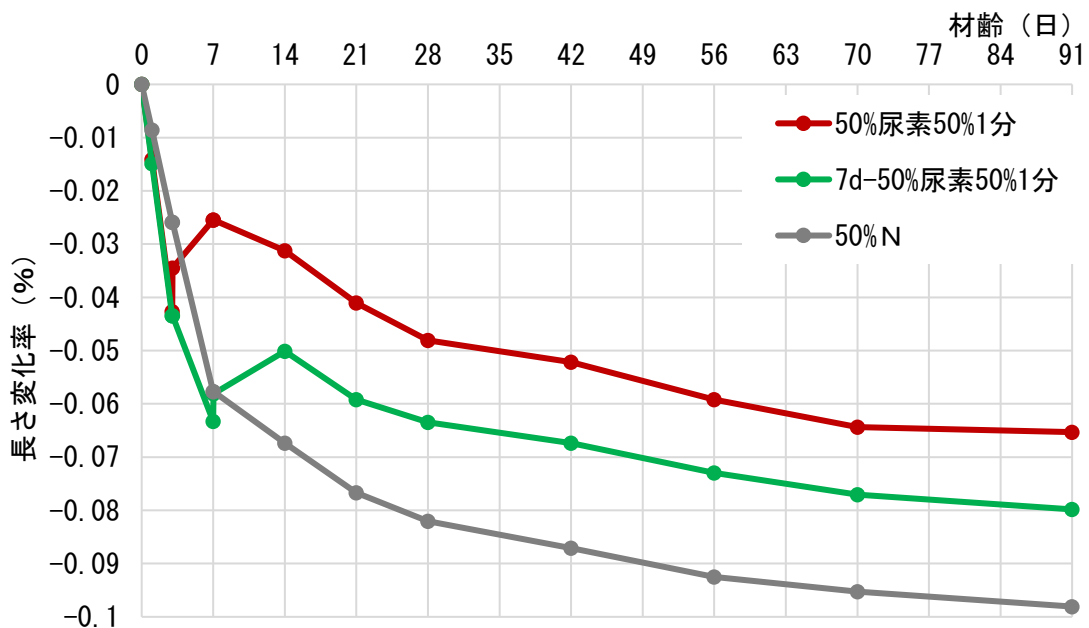


図-3.2.6 浸漬時材齢が変わった場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-3.2.6 浸漬時材齢が変わった場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日前 | 7日後 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.025 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.059 | -0.064 | -0.065 |
| 7d 尿素 50%1分 | 0 | -0.015 | -0.043 | -0.043 | -0.063 | -0.058 | -0.059 | -0.063 | -0.067 | -0.073 | -0.077 | -0.080 |
| 無処理 | 0 | -0.009 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.095 | -0.098 |

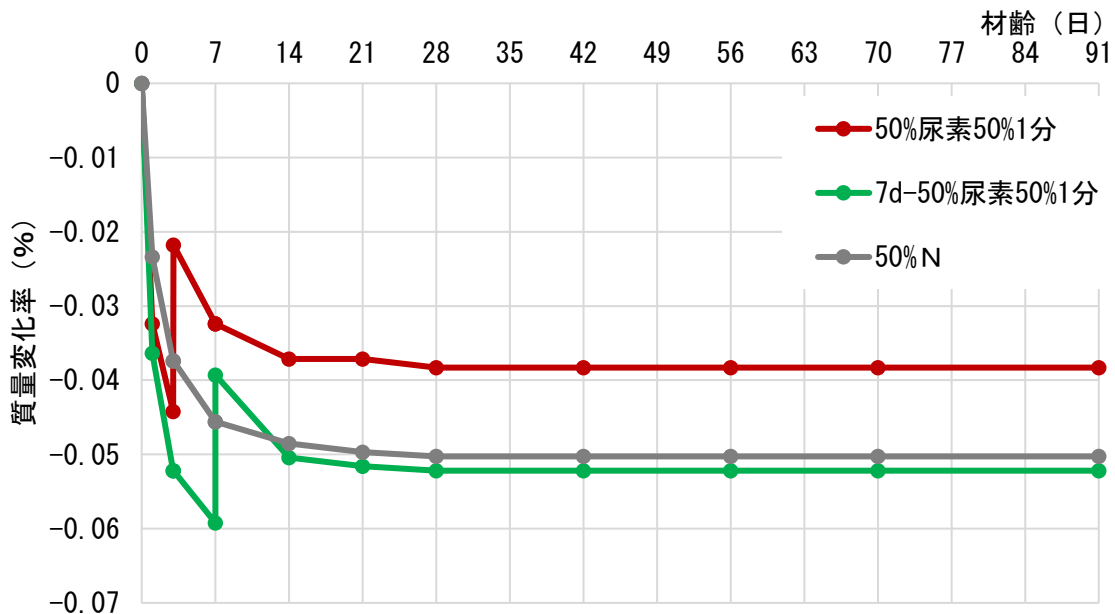


図-3.2.7 浸漬時材齢が変わった場合の質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-3.2.7 浸漬時材齢が変わった場合の質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日前 | 7日後 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.032 | -0.044 | -0.022 | -0.032 | -0.032 | -0.037 | -0.038 | -0.038 | -0.038 | -0.038 | -0.038 |
| 7d 尿素 50%1分 | 0 | -0.036 | -0.052 | -0.052 | -0.059 | -0.039 | -0.052 | -0.052 | -0.052 | -0.052 | -0.052 | -0.052 |
| 無処理 | 0 | -0.023 | -0.037 | -0.037 | -0.046 | -0.046 | -0.050 | -0.050 | -0.050 | -0.050 | -0.050 | -0.050 |

次に、水セメント比 50%の場合、浸漬時間 1 分において、無処理と各溶液に浸漬した後の長さ変化率および質量変化率の推移について図-3.2.8、表-3.2.8、図-3.2.9 および表-3.2.9 に示す。

図-3.2.8 より、尿素水溶液に浸漬したものが、浸漬なし(50%N)の場合より長さ変化率は 1~3 割程度小さくなることがわかった。また、濃度 30%~50%の尿素水溶液に浸漬した場合は、市販品 P に浸漬したものと比較し、収縮低減効果が高くなることがわかった。尿素濃度の違いについては、無処理の場合と比べ、10%および 20%は水溶液浸漬した場合 (50%水 1 分) と同様に若干の低減効果があり、30%および 40%は 2 割程度の低減効果があり、50%の場合が最も長さ変化の低減効果が高くなった。

水に対する尿素の溶解度は 1080g/L(20°C)であり、濃度に換算すると 51.9%となる。20°C において尿素濃度 50%の水溶液はほぼ飽和状態であるため、溶液の水分が蒸散することで容易に且つ、多量に結晶化する可能性があるため、最も高い効果を発揮したと考えられる。尿素濃度が 30~40%では飽和状態となるまでに多くの水分が逸散しなければならず、収縮低減効果を発揮する程度まで尿素が析出するために時間を要することや、析出量が少ないため、収縮低減効果は低くなると考えられる。また、濃度が 10~20%では尿素量が少なく、溶液からの析出ほとんど進行しないため、収縮低減効果が水と同様に低いと考えられる。

図-3.2.9 より、尿素 30~50%水溶液に浸漬した場合、質量減少量は水に浸漬した場合および無処理より小さくなった。これは、浸漬した尿素水溶液が水分の蒸散に伴い、結晶し、硬化体内部空隙に残留し、増加した結晶の質量が供試体の質量に含まれていると考えられる。

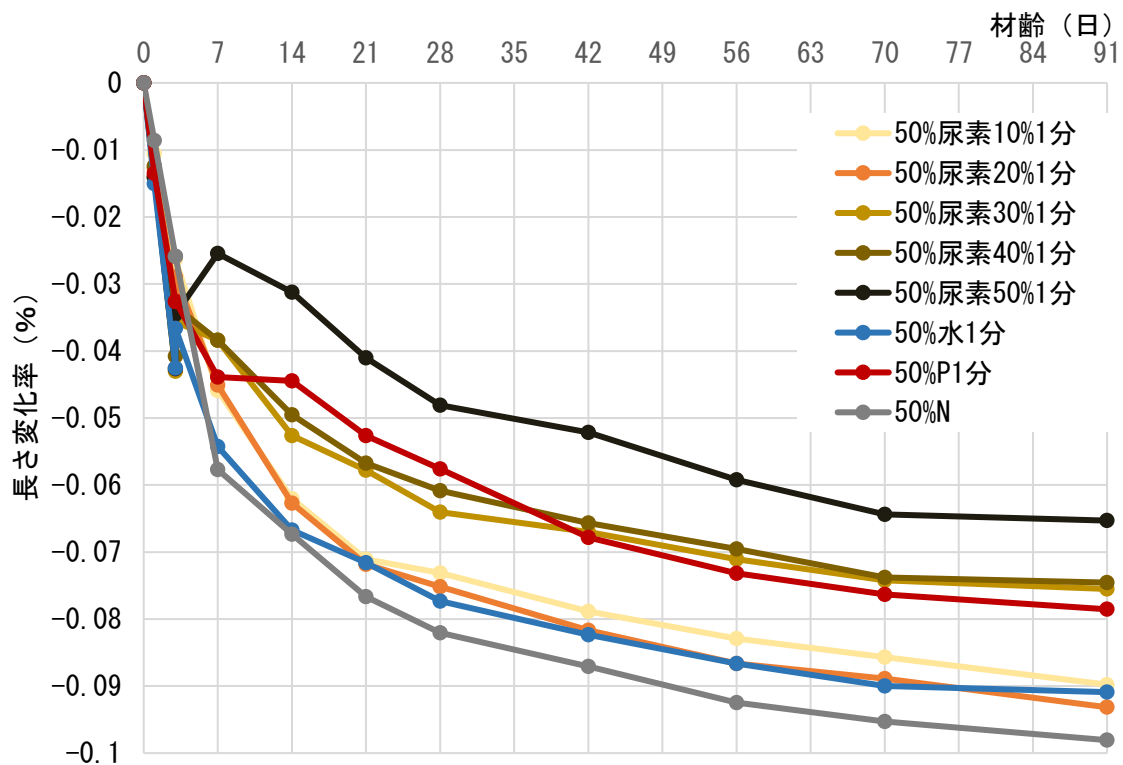


図-3.2.8 各溶液に浸漬した場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-3.2.8 各溶液に浸漬した場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 10%1分 | 0 | -0.011 | -0.031 | -0.026 | -0.046 | -0.062 | -0.071 | -0.073 | -0.079 | -0.083 | -0.086 | -0.090 |
| 尿素 20%1分 | 0 | -0.013 | -0.032 | -0.029 | -0.045 | -0.063 | -0.072 | -0.075 | -0.082 | -0.087 | -0.089 | -0.093 |
| 尿素 30%1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.036 | -0.038 | -0.053 | -0.058 | -0.064 | -0.067 | -0.071 | -0.074 | -0.076 |
| 尿素 40%1分 | 0 | -0.012 | -0.041 | -0.033 | -0.038 | -0.050 | -0.057 | -0.061 | -0.066 | -0.070 | -0.074 | -0.075 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.060 | -0.064 | -0.065 |
| 水 1分 | 0 | -0.015 | -0.043 | -0.037 | -0.054 | -0.067 | -0.072 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.090 | -0.091 |
| 市販品 P1分 | 0 | -0.014 | -0.033 | -0.033 | -0.044 | -0.053 | -0.053 | -0.058 | -0.068 | -0.073 | -0.076 | -0.079 |
| 無処理 | 0 | -0.009 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.096 | -0.098 |

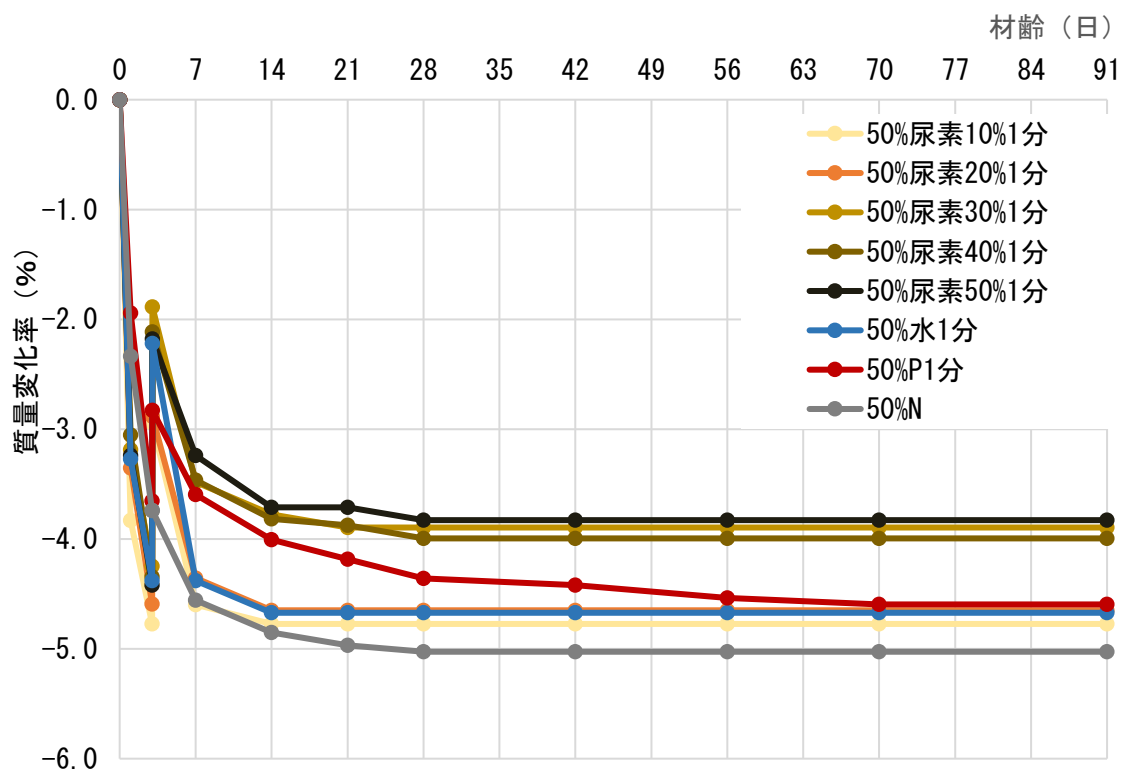


図-3.2.9 各溶液に浸漬した場合の質量変化率 (W/C=50% · 浸漬)

表-3.2.9 各溶液に浸漬した場合の質量変化率 (W/C=50% · 浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 10%1分 | 0 | -3.830 | -4.773 | -2.946 | -4.596 | -4.773 | -4.773 | -4.773 | -4.773 | -4.773 | -4.773 | -4.773 |
| 尿素 20%1分 | 0 | -3.354 | -4.591 | -2.883 | -4.355 | -4.649 | -4.649 | -4.649 | -4.649 | -4.649 | -4.649 | -4.649 |
| 尿素 30%1分 | 0 | -3.186 | -4.248 | -1.888 | -3.481 | -3.776 | -3.894 | -3.894 | -3.894 | -3.894 | -3.894 | -3.894 |
| 尿素 40%1分 | 0 | -3.053 | -4.345 | -2.114 | -3.464 | -3.817 | -3.874 | -3.993 | -3.993 | -3.993 | -3.993 | -3.993 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -3.239 | -4.419 | -2.180 | -3.241 | -3.712 | -3.712 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 |
| 水 1分 | 0 | -3.270 | -4.380 | -2.219 | -4.380 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 |
| 市販品 P1分 | 0 | -1.944 | -3.652 | -2.828 | -3.594 | -4.006 | -4.183 | -4.359 | -4.419 | -4.536 | -4.595 | -4.595 |
| 無処理 | 0 | -2.337 | -3.740 | -3.740 | -4.558 | -4.851 | -4.968 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 |

次に、水セメント比の違いによる結果の比較を図-3.2.10、表-3.2.10、図-3.2.11 および表-3.2.11 に示す。図-3.2.10 より、いずれの水セメント比においても、乾燥過程で無処理と水に浸漬した場合においてほぼ同等の変化傾向を示し、尿素水溶液に浸漬した場合より長さ変化率は大きくなった。これは、尿素水溶液が硬化体表面および表層に付着・浸入し、再結晶化および尿素の保水作用により湿潤状態となるため、収縮量が小さくなると考えられる。収縮量が順次に大きくなる乾燥開始からの材齢 91 日において、無処理および水に浸漬した場合と比較して、概ね 2~3 割程度収縮ひずみが小さくなった。無処理の場合と比較すると、モルタル供試体の水セメント比が 40% の場合の乾燥開始からの材齢 91 日における濃度 50% の尿素水溶液浸漬による長さ変化低減効果は 19% であり、水セメント比 50% では 34%、水セメント比 60% では 33% の乾燥収縮低減効果があることがわかった。これは、水セメント比の高い供試体の表面組織は粗であるため、尿素水溶液が内部に入りやすくなったと考えられる。

図-3.2.11 より、いずれの水セメント比においても、尿素水溶液に浸漬した場合、供試体の質量減少量は水浸漬および無処理より少なかった。これも、浸漬した尿素水溶液が水分の蒸散に従い、結晶し、硬化体内部空隙に残留したため、増加した結晶の質量は供試体の質量に表すと考えられる。

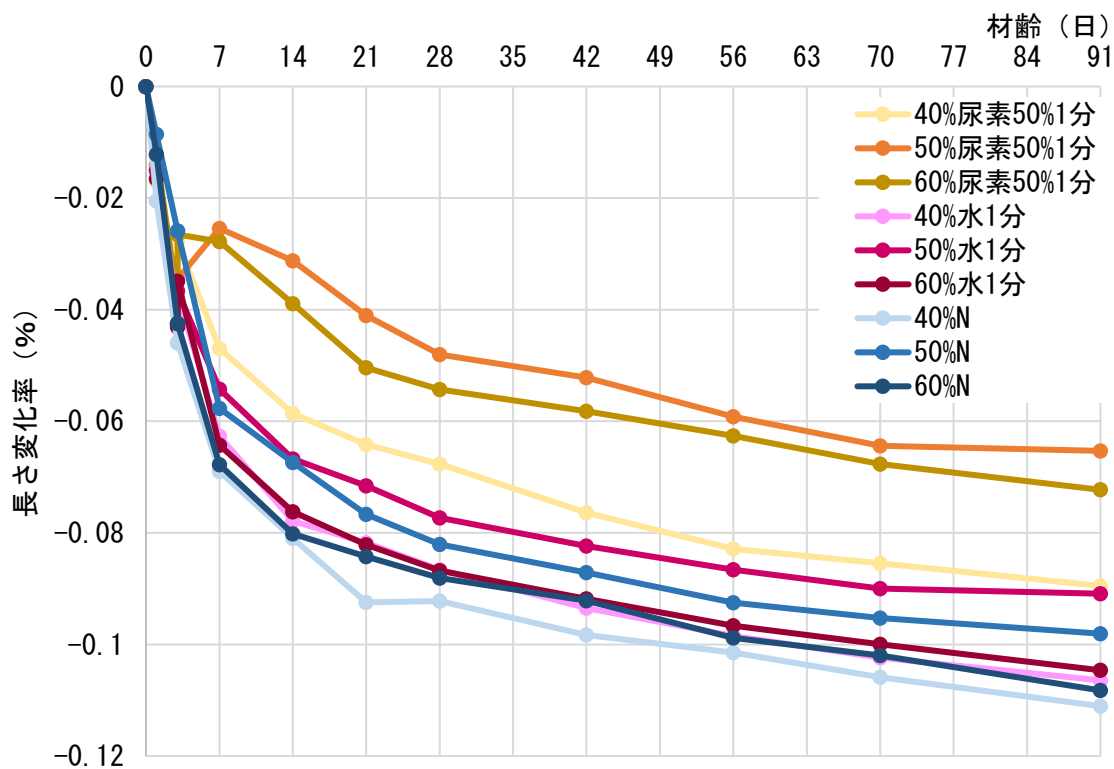


図-3.2.10 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

表-3.2.10 水セメント比が変わった場合の長さ変化率 (尿素 50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 40%尿素 1分 | 0 | -0.017 | -0.041 | -0.028 | -0.047 | -0.059 | -0.064 | -0.068 | -0.076 | -0.083 | -0.085 | -0.090 |
| 50%尿素 1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.059 | -0.064 | -0.065 |
| 60%尿素 1分 | 0 | -0.012 | -0.038 | -0.027 | -0.028 | -0.039 | -0.050 | -0.054 | -0.058 | -0.063 | -0.068 | -0.072 |
| 40%水 1分 | 0 | -0.015 | -0.040 | -0.037 | -0.063 | -0.078 | -0.082 | -0.087 | -0.093 | -0.098 | -0.102 | -0.106 |
| 50%水 1分 | 0 | -0.015 | -0.043 | -0.037 | -0.054 | -0.067 | -0.072 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.090 | -0.091 |
| 60%水 1分 | 0 | -0.017 | -0.043 | -0.035 | -0.064 | -0.076 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.097 | -0.100 | -0.105 |
| 40%無処理 | 0 | -0.020 | -0.046 | -0.046 | -0.069 | -0.081 | -0.092 | -0.092 | -0.098 | -0.101 | -0.106 | -0.111 |
| 50%無処理 | 0 | -0.009 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.096 | -0.098 |
| 60%無処理 | 0 | -0.012 | -0.042 | -0.042 | -0.068 | -0.080 | -0.084 | -0.088 | -0.092 | -0.099 | -0.102 | -0.108 |

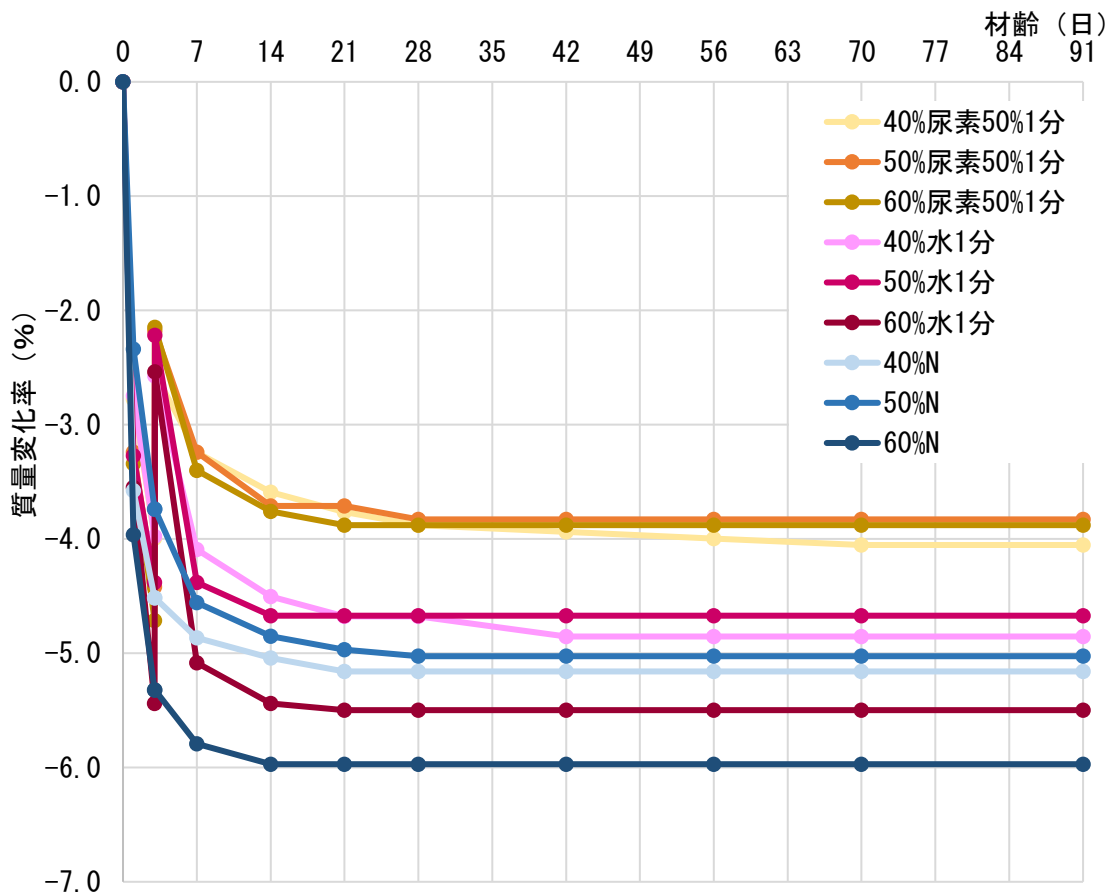


図-3.2.11 水セメント比の違いと質量変化率の関係

表-3.2.11 水セメント比が変わった場合の質量変化率（尿素 50%・浸漬）

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 40%尿素1分 | 0 | -2.779 | -3.995 | -2.548 | -3.243 | -3.590 | -3.764 | -3.880 | -3.937 | -3.996 | -4.053 | -4.053 |
| 50%尿素1分 | 0 | -3.239 | -4.419 | -2.180 | -3.241 | -3.712 | -3.712 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 |
| 60%尿素1分 | 0 | -3.341 | -4.714 | -2.148 | -3.401 | -3.759 | -3.878 | -3.878 | -3.878 | -3.878 | -3.878 | -3.878 |
| 40%水1分 | 0 | -2.748 | -3.976 | -2.573 | -4.093 | -4.503 | -4.678 | -4.679 | -4.854 | -4.854 | -4.854 | -4.854 |
| 50%水1分 | 0 | -3.270 | -4.380 | -2.219 | -4.380 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 |
| 60%水1分 | 0 | -3.548 | -5.441 | -2.537 | -5.085 | -5.440 | -5.498 | -5.498 | -5.498 | -5.498 | -5.498 | -5.498 |
| 40%無処理 | 0 | -3.577 | -4.514 | -4.514 | -4.866 | -5.042 | -5.159 | -5.159 | -5.159 | -5.159 | -5.159 | -5.159 |
| 50%無処理 | 0 | -2.337 | -3.740 | -3.740 | -4.558 | -4.851 | -4.968 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 |
| 60%無処理 | 0 | -3.962 | -5.322 | -5.322 | -5.794 | -5.971 | -5.971 | -5.791 | -5.971 | -5.971 | -5.971 | -5.971 |

次に、モルタルの水セメント比 50%において浸漬時間を 1、10、30 分の 3 水準に変化させた場合の長さ変化率および質量変化率の推移について図-3.2.12、表-3.2.12、図-3.2.13 および表-3.2.13 に示す。

図-3.2.12 より、浸漬液が水のみの場合、浸漬時間を 10 分、30 分と長くしてもその影響はほとんど現れず、通常通り乾燥させた場合の長さ変化と同様の変化を示した。一方、濃度 50%の尿素水溶液に浸漬した場合、浸漬時間が長いほど材齢 7~14 日に現れる膨張現象が顕著となり、浸漬時間 30 分の場合は乾燥開始時よりも膨張を示した。また、膨張作用が現れる期間も異なり、浸漬時間 1 分では、浸漬処理後からの 4 日間において膨張効果が現れていると考えられる。浸漬時間 10 分では、材齢 7 日までの 4 日間は膨張、その後材齢 14 日まで長さ変化率はほとんど変わらず、その後収縮量が増加した。浸漬時間 30 分では、浸漬処理後から材齢 14 日まで膨張作用が顕著に現れ、その後収縮した。いずれの浸漬時間においても、浸漬後収縮が顕著となった時点から以降の長さ変化率の推移の傾向は概ね同様であった。また、乾燥開始からの材齢 91 日における長さ変化率が無処理を 1.0 とすると、浸漬時間 1 分で 0.65、浸漬時間 10 分で 0.45、浸漬時間 30 分では 0.23 と大幅に小さくなっている。このことから、尿素水溶液をモルタル硬化体表面に付着・含浸させると、硬化体の表面に尿素が残存し、また一部が硬化体の空隙に染みこみ、水分の蒸散後、尿素が結晶化することで、収縮を低減する程度の膨張作用を発現すること、浸漬時間が長いほど収縮低減効果は高くなることが推察される。

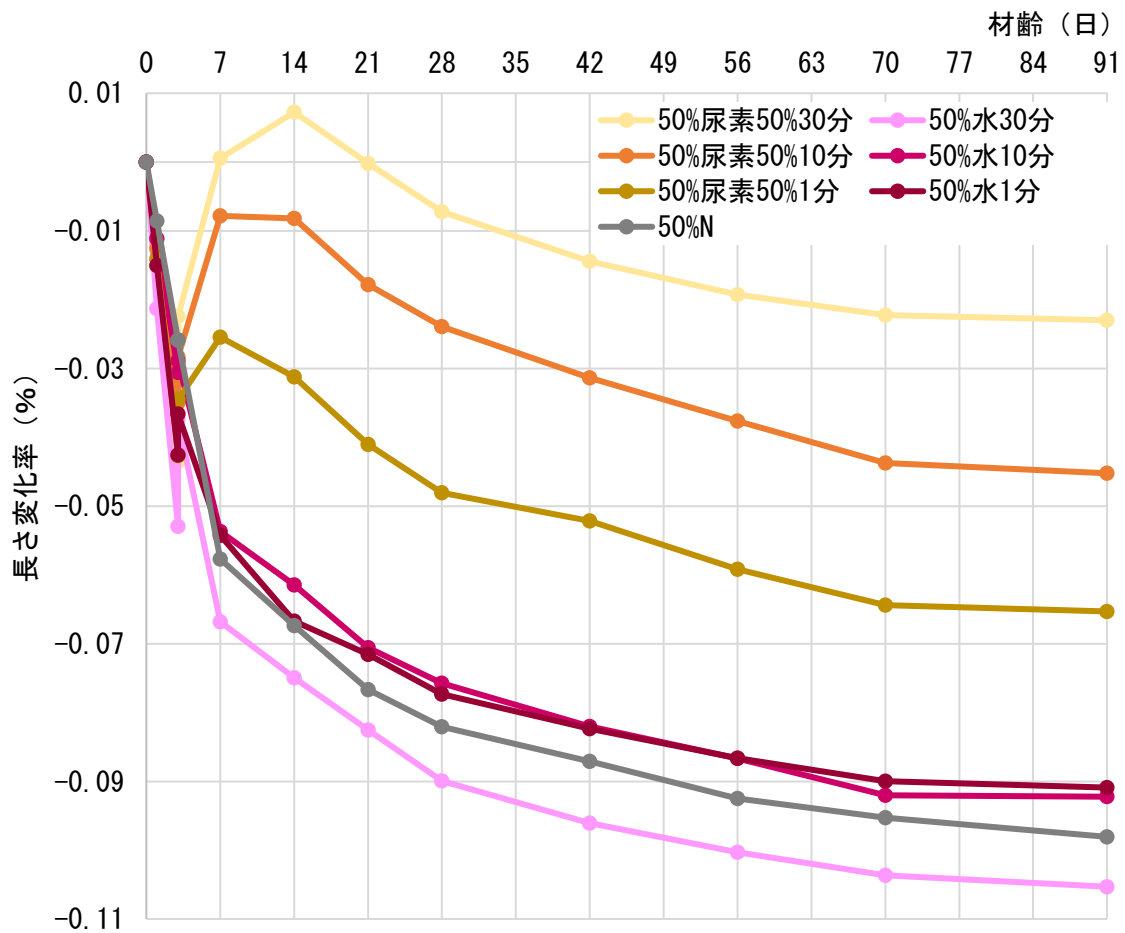


図-3.2.12 浸漬時間と長さ変化率の関係

表-3.2.12 浸漬時間が変わった場合の長さ変化率 (W/G=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -0.015 | -0.044 | -0.022 | 0.001 | 0.007 | 0 | -0.007 | -0.014 | -0.019 | -0.022 | -0.023 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -0.013 | -0.035 | -0.028 | -0.008 | -0.008 | -0.018 | -0.024 | -0.031 | -0.038 | -0.044 | -0.045 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.059 | -0.064 | -0.065 |
| 水 30分 | 0 | -0.021 | -0.053 | -0.037 | -0.067 | -0.075 | -0.083 | -0.090 | -0.096 | -0.100 | -0.103 | -0.105 |
| 水 10分 | 0 | -0.011 | -0.031 | -0.029 | -0.054 | -0.061 | -0.071 | -0.076 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.092 |
| 水 1分 | 0 | -0.015 | -0.043 | -0.037 | -0.054 | -0.067 | -0.072 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.090 | -0.091 |
| 無処理 | 0 | -0.009 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.096 | -0.098 |

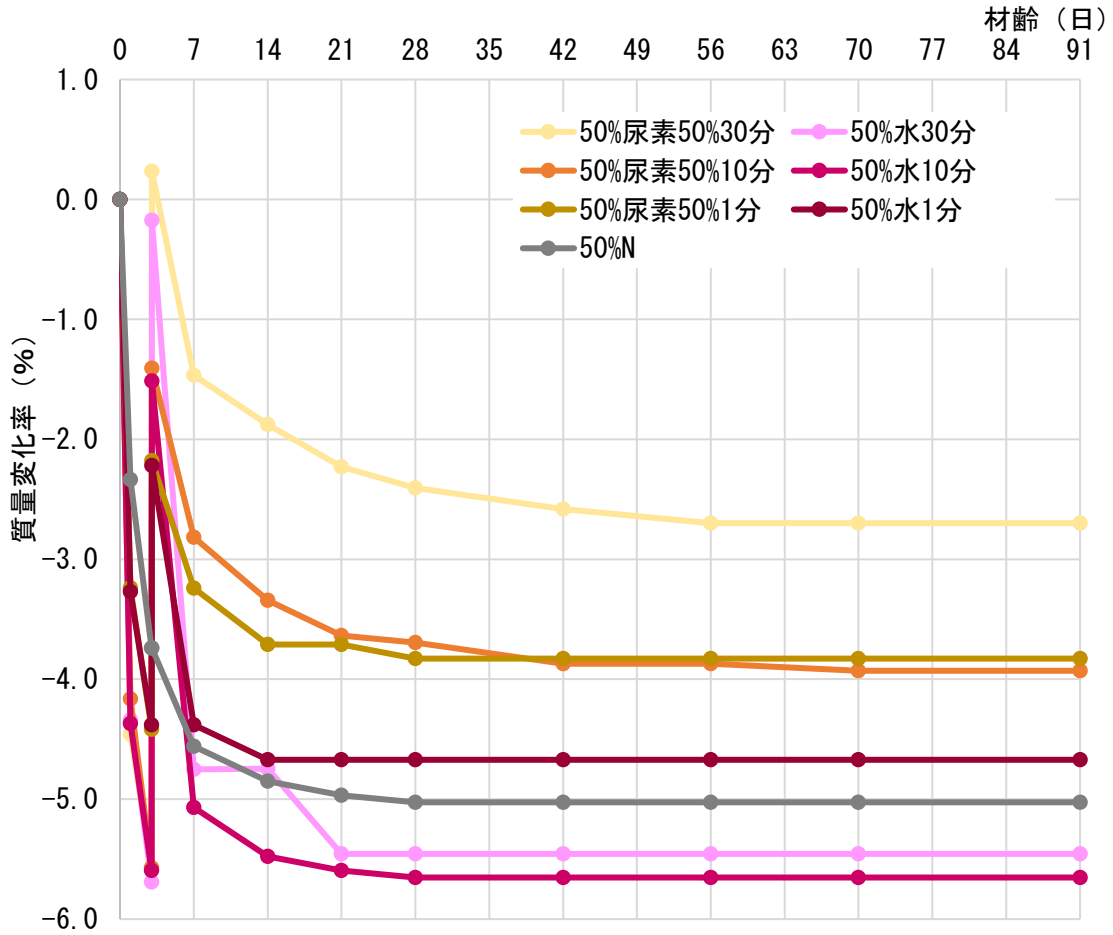


図-3.2.12 浸漬時間と質量変化率の関係

表-3.2.12 浸漬時間が変わった場合の質量変化率 (W/G=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -4.460 | -5.575 | 0.235 | -1.467 | -1.878 | -2.230 | -2.406 | -2.582 | -2.670 | -2.670 | -2.670 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -4.164 | -5.572 | -1.408 | -2.815 | -3.343 | -3.637 | -3.695 | -3.871 | -3.930 | -3.930 | -3.930 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -3.239 | -4.419 | -2.180 | -3.241 | -3.712 | -3.712 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 |
| 水 30分 | 0 | -4.341 | -5.692 | -0.174 | -4.752 | -4.747 | -5.456 | -5.456 | -5.456 | -5.456 | -5.456 | -5.456 |
| 水 10分 | 0 | -4.371 | -5.595 | -1.514 | -5.070 | -5.478 | -5.595 | -5.653 | -5.653 | -5.653 | -5.653 | -5.653 |
| 水 1分 | 0 | -3.270 | -4.380 | -2.219 | -4.380 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 | -4.672 |
| 無処理 | 0 | -2.337 | -3.740 | -3.740 | -4.558 | -4.851 | -4.968 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 |

3.3 コンクリートにおける乾燥収縮試験

3.3.1 使用材料

本試験で用いた使用材料を表-3.3.1に示す。3.2節のモルタルの結果により、濃度が高いほど乾燥収縮低減効果が大きくなったため、尿素は市販の工業用を用い、質量比で濃度50%となるように試験前に水道水に溶解させ水溶液とした。

表-3.3.1 使用材料

| 種類 | 名称 | 記号 | 密度 (g/cm ³) |
|-------|-----------------------------|----|-------------------------|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 練混水 | 宇都宮市水道水 | W | 1.00 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M.:2.65 吸水率:1.94) | S | 2.56 (表乾) |
| 粗骨材 | 硬質砂岩碎石 (F.M.:6.23 吸水率:0.75) | G | 2.64 (表乾) |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 | SP | 1.00 |
| 化学系材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |

3.3.2 配合条件

本試験で用いたコンクリートの計画配合を表-3.3.2に示す。水セメント比は40%、50%、60%とした。目標フレッシュ性状は、スランプ値 8.0±1.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。

表-3.3.2 計画配合

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | SP 添加率 (C×%) |
|------------|--------------------------|-----|-----|------|-----------------|
| | W | C | S | G | |
| 40 | 160 | 400 | 736 | 1010 | 0.10 |
| 50 | 170 | 340 | 798 | 969 | 0.10 |
| 60 | 174 | 290 | 865 | 932 | 0.10 |

3.3.3 練混ぜ手順

練混ぜには公称容量 60L の二軸ミキサーを使用し、1回あたりの練混ぜ量を 30L とした。練混ぜ手順は図-3.3.1に示す。まず、セメント、細骨材および粗骨材を投入し空練りを 15 秒間行った。その後、あらかじめ高性能 AE 減水剤を混和した練混ぜ水を投入し 60 秒練混ぜ、排出した。

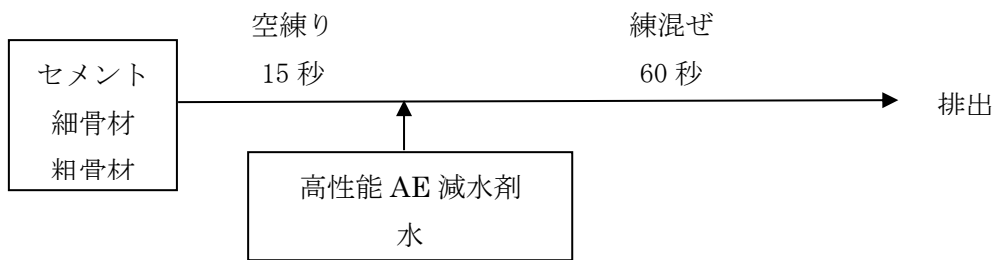


図-3.3.1 練混ぜ手順

3.3.4 試験項目および試験方法

1) スランブ試験

スランブ試験は「JIS A 1101:2005 コンクリートのスランブ試験方法」に準拠して行った。目標値は $8.0 \pm 1.5 \text{cm}$ とした。

2) 空気量試験

空気量試験は「JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準拠して行った。目標値は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は「JIS A 1108:2006 コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。供試体は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体とした。

養生は、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室にて気中養生とした。供試体作製翌日に脱型し、その直後に恒温恒湿室内に静置し、乾燥状態とした。水セメント比が 40%、60% の場合は、材齢 3 日目に尿素水溶液に 1 分間浸漬し、その後、再び乾燥状態として材齢 7 日、28 日で圧縮強度試験を行った。水セメント比が 50% の場合は、材齢 3 日目に尿素水溶液に 1 分、10 分および 30 分間浸漬し、その後、再び乾燥状態として材齢 7 日、28 日で圧縮強度試験を行った。比較として水溶液への浸漬処理をしないコンクリートについても同様の圧縮強度試験を行った。

4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は「JIS A 1129 モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 ダイヤルゲージ方法」に準拠して行った。

試験手順は、練り上がったコンクリートを型枠に詰め、 20°C の恒温恒湿室に静置した。翌日に脱型を行い、第 1 回目の測定を行い基長とし、合わせて質量を測定した。供試体は $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室に静置し、乾燥を開始した。3.2 節のモルタルにおける結果では、浸漬時材齢は 3 日目の方が 7 日目に比べ収縮低減効果が高かったため、乾燥開始から 3 日目

のみに溶液に浸漬を行い、前後の長さ変化と質量変化を測定した。

コンクリート硬化体を尿素水溶液に浸漬した場合の実験手順は図-3.3.2に示す。実験条件を表-3.3.3に示す。本試験では、尿素水溶液をコンクリート表面に塗布することを想定しているため、短時間尿素水溶液に供試体を浸漬することにより、塗布を模擬した。供試体は材齢3日目に尿素水溶液に浸漬し、91日まで乾燥収縮を測定した。

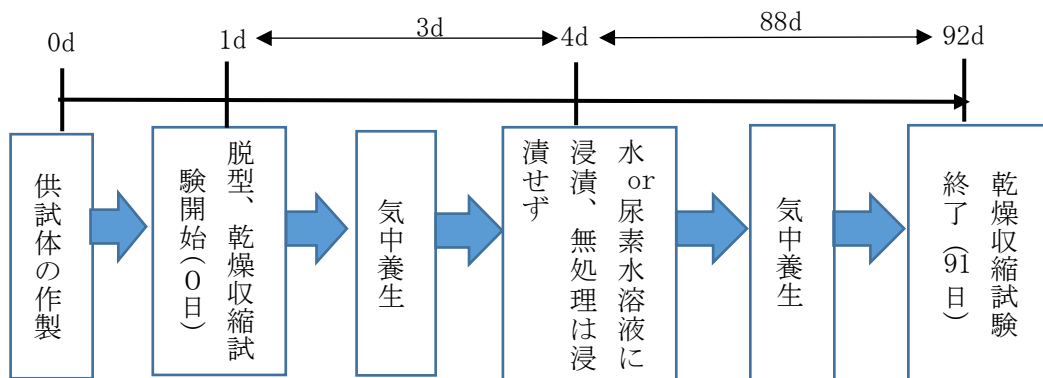


図-3.3.2 乾燥収縮試験の手順

表-3.3.3 コンクリート硬化体を各水溶液に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間(分) | 記号 (W/C-浸漬液-時間) |
|---------|--------|--------------|-----------------|
| 40 | 無し | — | 40%N |
| | 水 | 1 | 40%水 1分 |
| | 尿素 50% | | 40%尿素 50%1分 |
| 60 | 無し | — | 60%N |
| | 水 | 1 | 60%水 1分 |
| | 尿素 50% | | 60%尿素 50%1分 |
| 50 | 無し | — | 50%N |
| | 水 | 1 | 50%水 1分 |
| | 尿素 50% | 1 | 50%尿素 50%1分 |
| | | 10 | 50%尿素 50%10分 |
| 30 | | 50%尿素 50%30分 | |

3.3.5 試験結果および考察

1) フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3.3.4に示す。いずれの水セメント比においても目標値を満たした。

表-3.3.4 フレッシュ性状試験結果

(目標値：空気量 4.5±1.5%、スランプ値 8.0±1.5cm)

| W/C (%) | 空気量(%) | スランプ(cm) | 温度(°C) |
|---------|--------|----------|--------|
| 40 | 4.4 | 7.5 | 17 |
| 50 | 3.7 | 8.5 | 17 |
| 60 | 5.1 | 8.0 | 15 |

2) 圧縮強度試験結果

はじめに、尿素水溶液に1分間浸漬した場合の圧縮強度試験結果を図-3.3.3および表-3.3.5に示す。図-3.3.3より、水セメント比の増大に伴い、圧縮強度は減少することが確認できた。尿素水溶液に浸漬した場合、いずれの水セメント比においても、圧縮強度の増進がみられた。これは、尿素水溶液の浸漬により、供試体表面の空隙から水溶液が供試体内部へ浸入し、再結晶化が生じるため、硬化組織の空隙が埋められることと、水溶液の付着により供試体内部に残存する水分の雰囲気中への逸散を防止する保水作用が現れ、潤沢に水分が残ることで乾燥環境であっても圧縮強度の増進が見られたと考えられる。

次に、水セメント比50%において、尿素水溶液に1分、10分、30分間浸漬した場合の圧縮強度の試験結果を図-3.3.4および表-3.3.6に示す。図-3.3.4より、尿素水溶液への浸漬時間が長いほど、圧縮強度は若干大きくなるのが分かった。これは、浸漬時間が長いほど、供試体表面の空隙から供試体内部へ浸入した溶液が多くなり、再結晶化する尿素が多くなるため圧縮強度が大きくなったと考えられる。

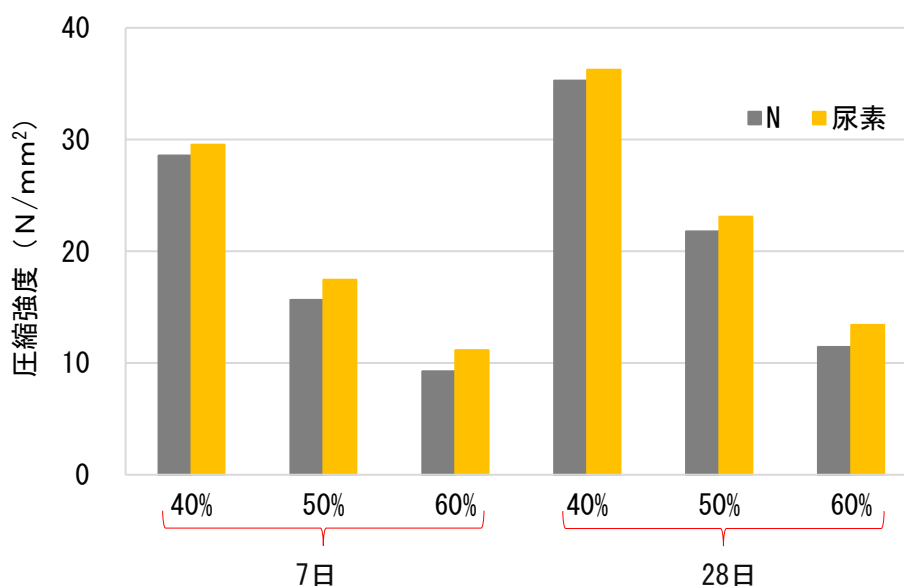


図-3.3.3 尿素水溶液に1分間浸漬した場合の圧縮強度試験結果

表-3.3.5 水溶液に1分間浸漬した場合の圧縮強度試験結果

| W/C (%) | 浸漬液 | 記号 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|---------|----------|----|---------------------------|------|
| | | | 7日 | 28日 |
| 40 | 無し | N | 28.6 | 35.3 |
| | 尿素 50%溶液 | 尿素 | 29.6 | 36.2 |
| 50 | 無し | N | 15.7 | 21.8 |
| | 尿素 50%溶液 | 尿素 | 17.5 | 23.1 |
| 60 | 無し | N | 9.3 | 11.4 |
| | 尿素 50%溶液 | 尿素 | 11.1 | 13.4 |

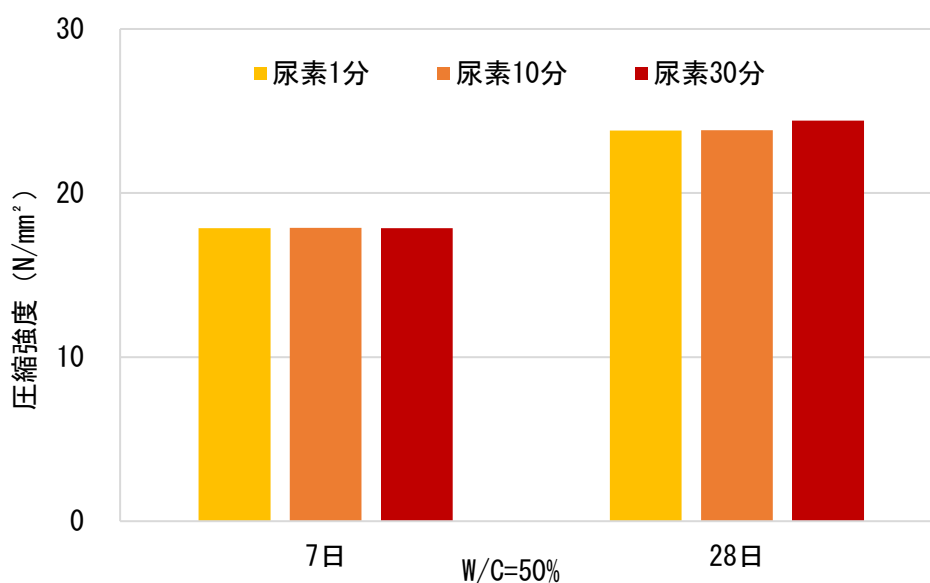


図-3.3.4 水溶液に1分、10分、30分間浸漬した場合の圧縮強度試験結果

表-3.3.6 水溶液に1分、10分、30分間浸漬した場合の圧縮強度試験結果

| W/C (%) | 浸漬液-時間 | 記号 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|---------|---------------|--------|---------------------------|------|
| | | | 7日 | 28日 |
| 50 | 尿素 50%水溶液-1分 | 尿素 1分 | 17.5 | 23.1 |
| | 尿素 50%水溶液-10分 | 尿素 10分 | 18.5 | 23.4 |
| | 尿素 50%水溶液-30分 | 尿素 30分 | 18.1 | 25.0 |

3) 乾燥収縮試験結果

まずは、水セメント比の違いによる結果の比較を図-3.3.5、表-3.3.7、図-3.3.6および表-3.3.8に示す。図-3.3.5より、いずれの水セメント比においても、乾燥過程で無処理および水に浸漬した場合においてはほぼ同等の変化傾向を示し、尿素水溶液に浸漬した場合より長さ変化率は大きくなった。これは、尿素水溶液が硬化体表面および表層に付着・浸入し、再結晶化および尿素有保水作用により、湿潤状態となるため収縮量が小さくなったと考えられる。また、収縮量が順次に大きくなる乾燥開始からの材齢91日において、無処理および水に浸漬した場合と比較して、概ね1割程度収縮ひずみが小さくなった。無処理の場合と比較すると、コンクリート供試体の水セメント比が40%の場合の材齢91日における濃度50%の尿素水溶液浸漬による長さ変化低減効果は8.7%であり、水セメント比50%では6.5%、水セメント比60%では7.3%の長さ変化低減効果があることがわかった。

図-3.3.6より、いずれの水セメント比においても、尿素水溶液に浸漬した供試体の質量減少量は無処理より小さくなった。これは、浸漬した尿素水溶液が水分の蒸散に伴い、結晶し、硬化体内部空隙に残留し、増加した結晶の質量が供試体の質量に含まれていると考えられる。

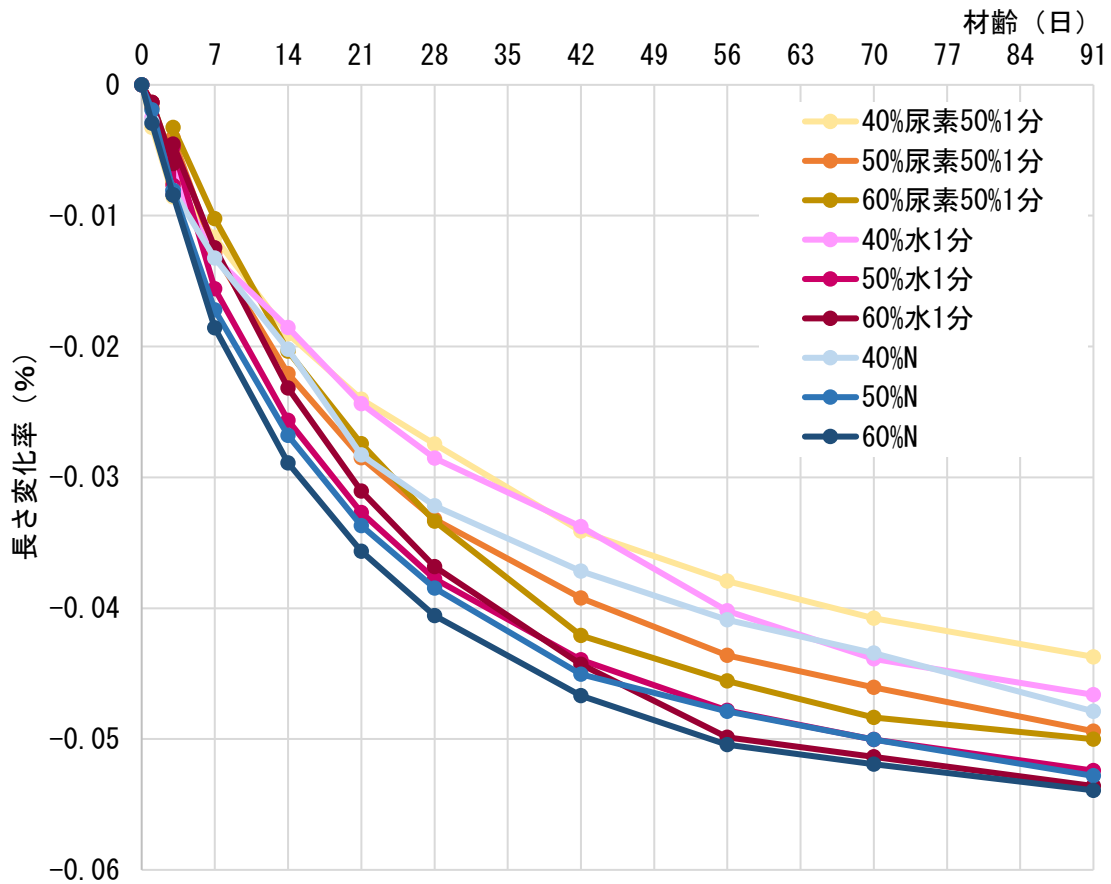


図-3.3.5 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

表-3.3.7 水セメント比が変わった場合の長さ変化率（尿素 50%・浸漬）

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 40%尿素1分 | 0 | -0.003 | -0.009 | -0.008 | -0.012 | -0.019 | -0.024 | -0.027 | -0.034 | -0.028 | -0.041 | -0.044 |
| 50%尿素1分 | 0 | -0.002 | -0.007 | -0.004 | -0.013 | -0.022 | -0.029 | -0.033 | -0.039 | -0.044 | -0.046 | -0.049 |
| 60%尿素1分 | 0 | -0.001 | -0.006 | -0.003 | -0.010 | -0.020 | -0.027 | -0.033 | -0.042 | -0.046 | -0.048 | -0.050 |
| 40%水1分 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.007 | -0.013 | -0.019 | -0.024 | -0.029 | -0.034 | -0.040 | -0.044 | -0.147 |
| 50%水1分 | 0 | -0.001 | -0.008 | -0.005 | -0.016 | -0.026 | -0.033 | -0.038 | -0.044 | -0.048 | -0.050 | -0.052 |
| 60%水1分 | 0 | -0.001 | -0.006 | -0.005 | -0.012 | -0.023 | -0.031 | -0.037 | -0.044 | -0.050 | -0.151 | -0.054 |
| 40%無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.013 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.041 | -0.043 | -0.048 |
| 50%無処理 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |
| 60%無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.019 | -0.029 | -0.036 | -0.041 | -0.047 | -0.050 | -0.052 | -0.054 |

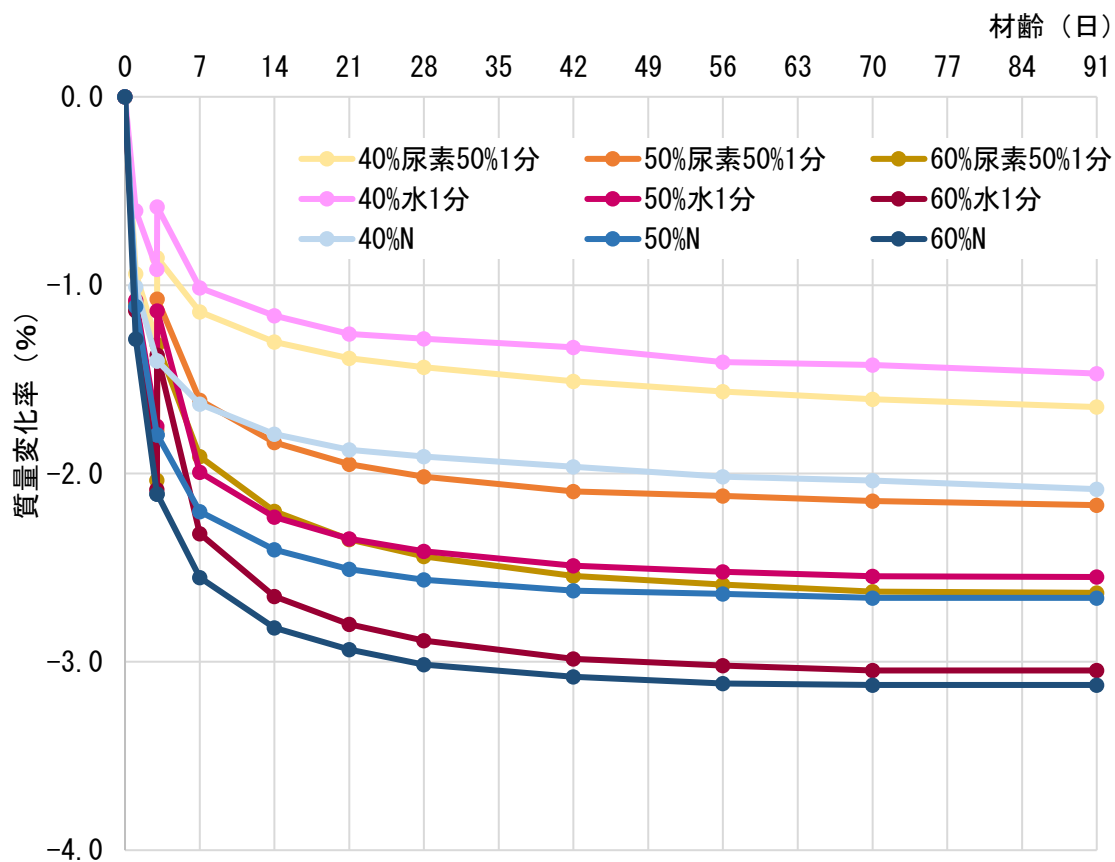


図-3.3.6 水セメント比の違いと質量変化率の関係

表-3.3.8 水セメント比が変わった場合の質量変化率（尿素 50%・浸漬）

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 40%尿素1分 | 0 | -0.940 | -1.302 | -0.854 | -1.142 | -1.302 | -1.388 | -1.435 | -1.511 | -1.565 | -1.606 | -1.647 |
| 50%尿素1分 | 0 | -1.109 | -1.769 | -1.073 | -1.610 | -1.835 | -1.950 | -2.017 | -2.094 | -2.119 | -2.147 | -2.168 |
| 60%尿素1分 | 0 | -1.100 | -2.035 | -1.315 | -1.909 | -2.200 | -2.350 | -2.440 | -2.544 | -2.590 | -2.626 | -2.634 |
| 40%水1分 | 0 | -0.604 | -0.916 | -0.584 | -1.014 | -1.162 | -1.259 | -1.285 | -1.331 | -1.408 | -1.423 | -1.469 |
| 50%水1分 | 0 | -1.081 | -1.749 | -1.137 | -1.993 | -2.231 | -2.347 | -2.413 | -2.490 | -2.522 | -2.546 | -2.550 |
| 60%水1分 | 0 | -1.134 | -2.084 | -1.371 | -2.319 | -2.653 | -2.800 | -2.888 | -2.983 | -3.020 | -3.046 | -3.046 |
| 40%無処理 | 0 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |
| 50%無処理 | 0 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.404 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 |
| 60%無処理 | 0 | -1.287 | -2.109 | -2.109 | -2.553 | -2.820 | -2.935 | -3.015 | -3.080 | -3.115 | -3.123 | -3.123 |

次に、水セメント比 50%において浸漬時間を 1、10、30 分の 3 水準に変化させた場合の長さ変化率および質量変化率の推移について図-3.3.7、表-3.3.9、図-3.3.8 および表-3.3.10 に示す。図-3.3.7 より、尿素水溶液への浸漬時間は 1 分間の場合、91 日における無処理より、乾燥収縮低減効果が少なかった。3.2 節の試験結果において、水セメント比 50% のモルタルで同様に 1 分間水溶液に浸漬した場合は、乾燥収縮が概ね 3 割低減した。しかし、本章においてはモルタル試験に使用した供試体と比較すると、体積に対する表面積の割合が小さいことにより、浸漬時間 1 分では低減効果自体が小さく表れた。

また、尿素水溶液への浸漬時間を 1 分、10 分、30 分とした場合、浸漬時間が長くなるほど、収縮低減効果が大きくなることがわかった。これは、圧縮強度と同様に、浸漬時間が長時間になるほど、尿素水溶液の含浸量が多くなり、乾燥した時に多く尿素が結晶化することにより、乾燥収縮を低減するためだと考えられる。また、材齢 91 日における長さ変化率について無処理を 1.0 とすると、尿素水溶液に浸漬した場合は、浸漬時間 1 分で 0.92、浸漬時間 10 分で 0.77、浸漬時間 30 分では 0.75 と小さくなった。

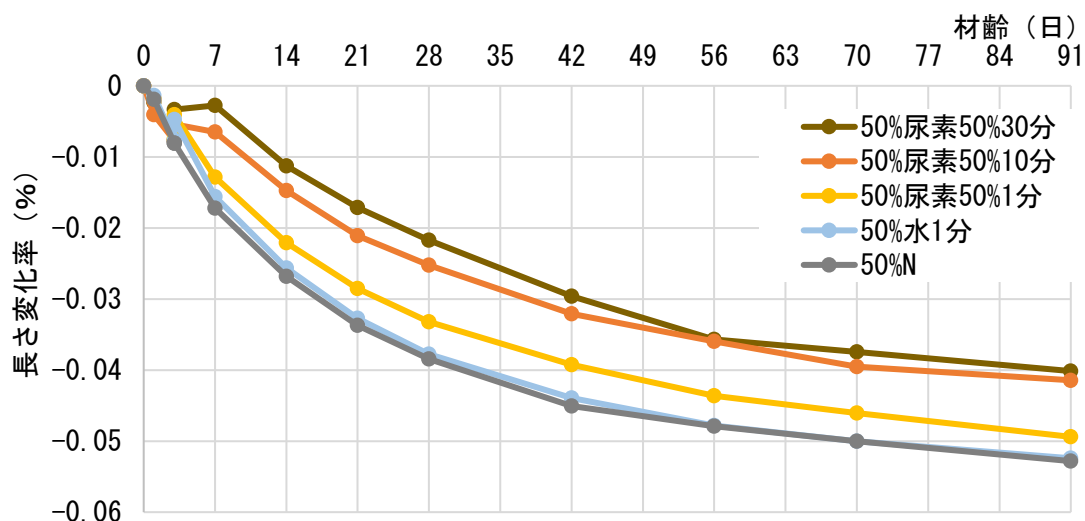


図-3.3.7 浸漬時間と長さ変化率の関係

表-3.3.9 浸漬時間が変わった場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.003 | -0.003 | -0.011 | -0.017 | -0.022 | -0.030 | -0.036 | -0.037 | -0.040 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -0.004 | -0.008 | -0.005 | -0.007 | -0.015 | -0.021 | -0.025 | -0.032 | -0.036 | -0.040 | -0.041 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.002 | -0.007 | -0.004 | -0.013 | -0.022 | -0.029 | -0.033 | -0.039 | -0.044 | -0.046 | -0.049 |
| 水 1分 | 0 | -0.001 | -0.008 | -0.005 | -0.016 | -0.026 | -0.033 | -0.038 | -0.044 | -0.048 | -0.050 | -0.052 |
| 無処理 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |

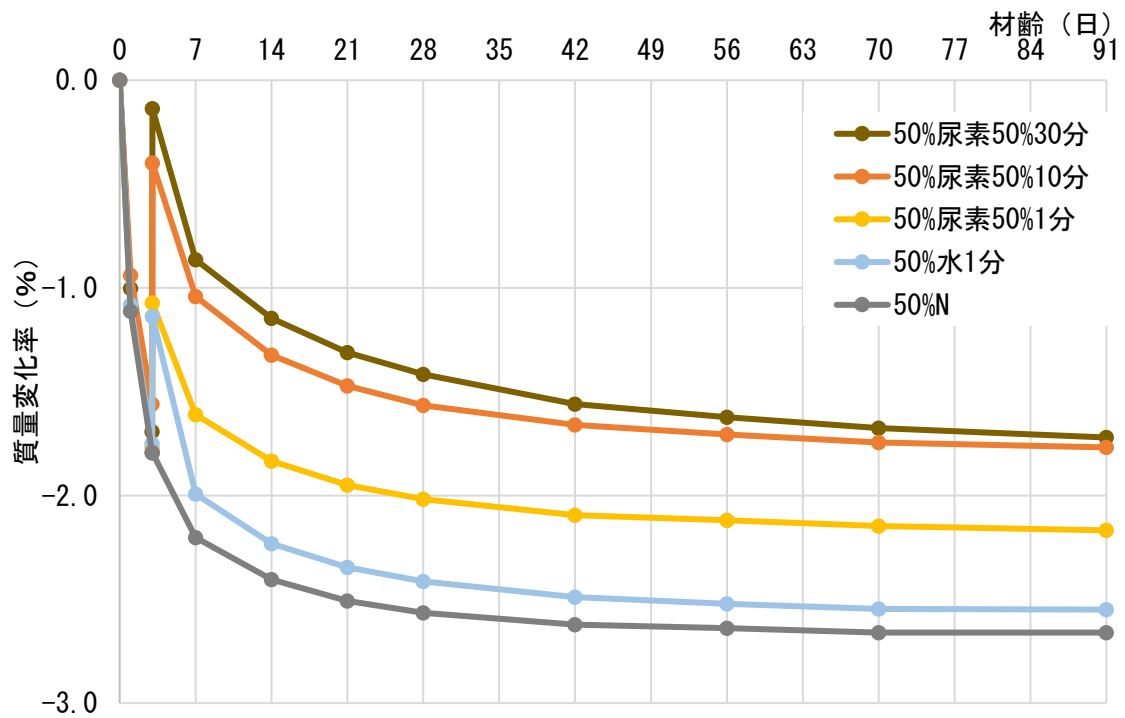


図-3.3.8 浸漬時間と質量変化率の関係

表-3.3.10 浸漬時間が変わった場合の質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -1.004 | -1.693 | -0.136 | -0.864 | -1.147 | -1.311 | -1.416 | -1.560 | -1.623 | -1.675 | -1.721 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -0.940 | -1.559 | -0.398 | -1.041 | -1.324 | -1.471 | -1.566 | -1.660 | -1.706 | -1.744 | -1.768 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -1.109 | -1.769 | -1.073 | -1.610 | -1.835 | -1.950 | -2.017 | -2.094 | -2.119 | -2.147 | -2.168 |
| 水 1分 | 0 | -1.081 | -1.749 | -1.137 | -1.993 | -2.231 | -2.347 | -2.413 | -2.490 | -2.522 | -2.546 | -2.550 |
| 無処理 | 0 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.405 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 |

3.4 まとめ

本章では、尿素水溶液に浸漬したモルタルおよびコンクリート硬化体の基本性状についての実験を行い、以下の結果と知見を得た。

・圧縮強度試験

圧縮強度試験において、無処理に比べ尿素水溶液に浸漬した供試体では圧縮強度は大きくなった。これは尿素水溶液が内部へ浸入し、尿素が再結晶化することで、硬化組織の空隙が埋められたことや、水分の逸散を防止する保水効果が現れ、多くの水分が硬化体中に残存し、水和反応に寄与したためと考えられる。

・乾燥収縮試験

乾燥収縮試験において、無処理に比べ尿素水溶液に浸漬した供試体は乾燥収縮が小さくなった。これは圧縮強度と同様に、供試体表面より浸入した水溶液中の尿素が再結晶化することで、尿素的保水効果によって多くの水分が硬化体中に残り、乾燥を防ぐことができたことが要因として考えられる。

供試体の浸漬時材齢が3日目の方が7日目に比べ収縮低減効果が高かった。これは水和進行による硬化体組織の緻密化が進まない方が尿素溶液は硬化体表面から浸透しやすいためと考えられる。尿素水溶液の尿素濃度について、飽和濃度に近い50%において、乾燥による長さ変化低減効果は高くなった。

また、尿素水溶液による水セメント比の高い供試体への乾燥収縮低減効果が高かった。浸漬時間について、供試体内部へ浸入する尿素水溶液量は増加し、再結晶化する尿素が多くなると考えられるため、浸漬時間が長いほど収縮低減効果が高くなった。

第 4 章

尿素水溶液の含浸による 乾燥収縮低減メカニズム

目次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 4.1 概論..... | 49 |
| 4.2 モルタルにおける尿素水溶液の浸透深度試験..... | 49 |
| 4.2.1 試験概要..... | 49 |
| 4.2.2 使用材料..... | 49 |
| 4.2.3 配合条件..... | 49 |
| 4.2.4 練混ぜ手順..... | 49 |
| 4.2.5 試験結果..... | 49 |
| 4.3 コンクリートにおける尿素水溶液の浸透深度試験..... | 50 |
| 4.3.1 試験概要..... | 50 |
| 4.3.2 使用材料..... | 50 |
| 4.3.3 配合条件..... | 50 |
| 4.3.4 練混ぜ手順..... | 51 |
| 4.3.5 試験結果..... | 51 |
| 4.4 SEM 観察試験..... | 54 |
| 4.4.1 使用材料..... | 54 |
| 4.4.2 配合条件..... | 54 |
| 4.4.3 練混ぜ手順..... | 54 |
| 4.4.4 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた観察..... | 54 |
| 4.4.5 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察結果..... | 55 |
| 4.5 デュヌイ表面張力計による尿素水溶液の表面張力測定試験..... | 58 |
| 4.5.1 試験方法の概要..... | 58 |
| 4.5.2 試料..... | 58 |
| 4.5.3 試験器..... | 58 |
| 4.5.4 試験器の下準備..... | 58 |
| 4.5.5 テスト (基準値合わせ)..... | 58 |
| 4.5.6 試料溶液の測定..... | 60 |

| | |
|--------------------|----|
| 4.5.7 試験結果と考察..... | 60 |
| 4.6 まとめ..... | 61 |
| 【参考文献】..... | 62 |

第4章 尿素水溶液の含浸による乾燥収縮低減メカニズム

4.1 概論

本研究において、硬化モルタルおよび硬化コンクリートを尿素水溶液に浸漬した場合、乾燥収縮低減することが認められた。しかし、実際にどのようなメカニズムで乾燥収縮低減効果を発揮しているのかは解明されていない。

よって本章では、尿素水溶液を浸漬した場合の収縮低減メカニズムを解明するため、尿素水溶液が浸透した深さ、尿素水溶液の表面張力および浸透した尿素的の再結晶に着目し、メカニズムの解明を試みた。

4.2 モルタルにおける尿素水溶液の浸透深度試験

4.2.1 試験概要

尿素水溶液の浸透状況を把握するため、乾燥収縮による長さ変化測定用供試体と同じ試験体を作製し、同じ環境で養生を継続した。そして、乾燥開始からの材齢3日目に尿素質量濃度50%の水溶液に1分、10分および30分間浸漬し、直ちに割裂し、切断面を目視し、モルタル供試体の表面から尿素溶液浸透した界面までの距離を1側面に対し3箇所ノギスで測定し、合計4側面、12箇所を測定し、それらの平均値を浸透深さとした。

4.2.2 使用材料

第3章、3.2.1節と同様とした。

4.2.3 配合条件

第3章、3.2.2節と同様とした。

4.2.4 練混ぜ手順

第3章、3.2.3節と同様とした。

4.2.5 試験結果

尿素水溶液の浸透深度試験結果を写真-4.2.1に示す。写真より、尿素濃度50%の水溶液

に1分、10分および30分間浸漬した場合の供試体の表面から尿素水溶液が浸透した界面までの長さは、平均値で3.52 mm、7.16 mm、10.34 mmとなった。よって、浸漬時間が長い方が浸透深度は深くなる傾向を示した。

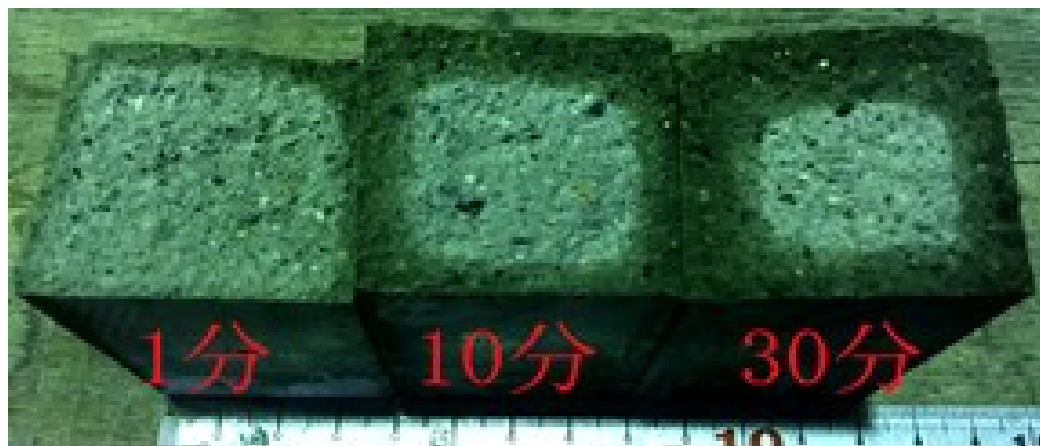


写真-4.2.1 浸漬時間の異なる場合の尿素水溶液の浸透深度

4.3 コンクリートにおける尿素水溶液の浸透深度試験

4.3.1 試験概要

コンクリートにおける尿素水溶液の浸透状況を把握するため、乾燥収縮による長さ変化測定用供試体と同じ試験体を作製し、同じ環境で養生を継続した。そして、乾燥開始からの材齢3日目に尿素濃度50%の水溶液に1分、10分および30分間浸漬し、直ちに割裂し、切断面を目視し、コンクリート供試体の表面から尿素溶液浸透した界面までの距離を1側面に対し3箇所ノギスで測定し、合計4側面、12箇所の平均値を浸透深さとした。比較のため、水溶液に浸漬した供試体も同様に浸透深度試験を行った。

4.3.2 使用材料

第3章、3.3.1節と同様とした。

4.3.3 配合条件

第3章、3.3.2節と同様とした。

4.3.4 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

4.3.5 試験結果

コンクリートにおける尿素水溶液の浸透深度試験結果をそれぞれ写真-4.3.1、写真-4.3.2、写真-4.3.3に示す。純水の浸透深度試験結果をそれぞれ写真-4.3.4、写真-4.3.5に示す。写真より、いずれの浸漬時間においても、打設面からの浸透深さがほかの3面より大きくなったことが分かった。これは、ほかの3面より、打設面が粗であることにより、水溶液が浸透しやすいと考えられる。また、尿素質量濃度50%の水溶液に1分、10分および30分間浸漬した場合の供試体の表面から尿素水溶液が浸透した界面までの長さは、平均値で2.97mm、4.07mm、7.12mmとなり、浸漬時間が長くなると浸透深度は深くなる傾向を示した。

また、水に1分および30分間浸漬した場合の浸透深さは、平均値で3.50mm、6.47mmとなった。尿素水溶液に浸漬した場合と比較すると、浸漬時間1分では、水の浸透深さは尿素水溶液より深く、浸漬時間30分では、水の浸透深さは尿素水溶液より浅かった。これより、尿素水溶液は短時間の浸透が遅かったが、長時間の浸透力は水より高かったと考えられる。



写真-4.3.1 尿素水溶液に1分浸漬した場合の浸透深度

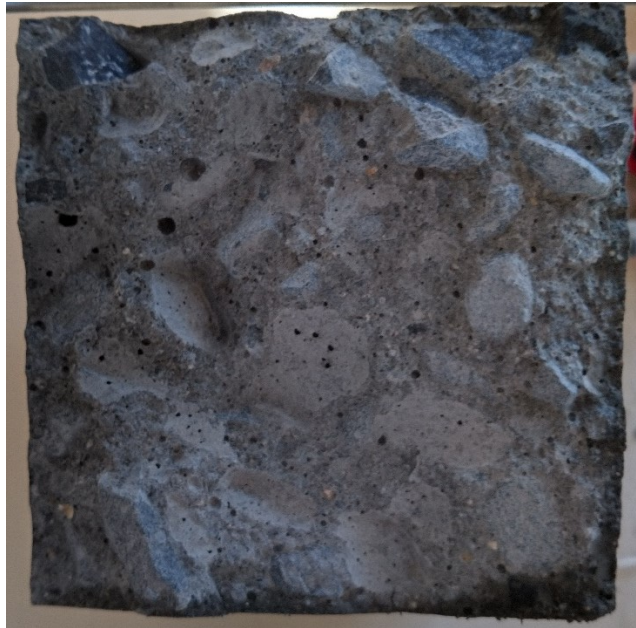


写真-4.3.2 尿素水溶液に10分浸漬した場合の浸透深度

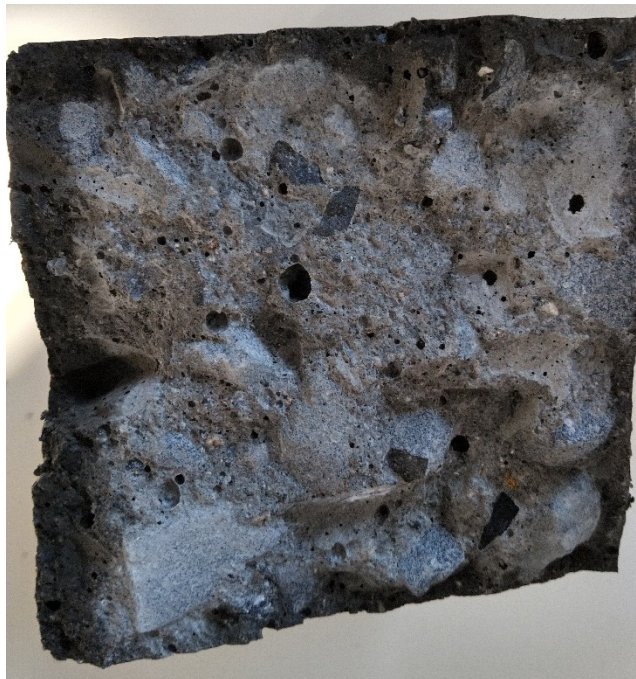


写真-4.3.3 尿素水溶液に30分浸漬した場合の浸透深度

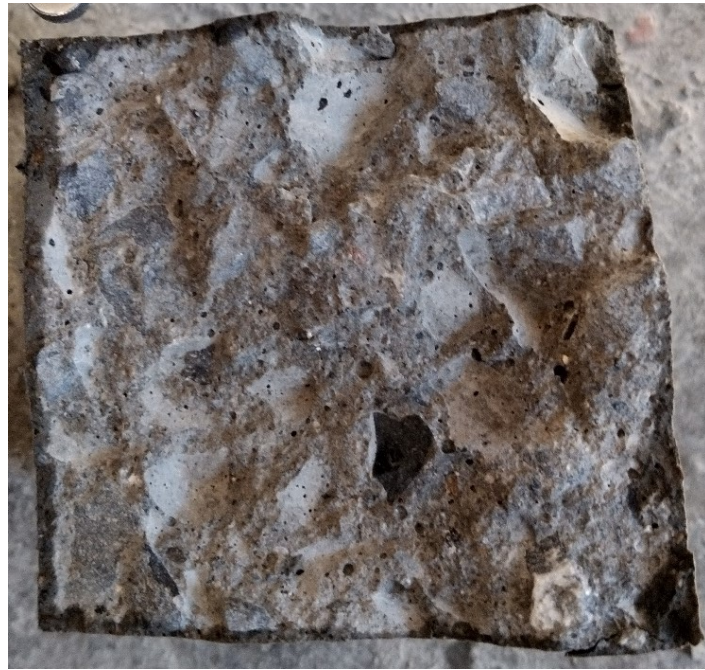


写真-4.3.4 水に1分浸漬した場合の浸透深度

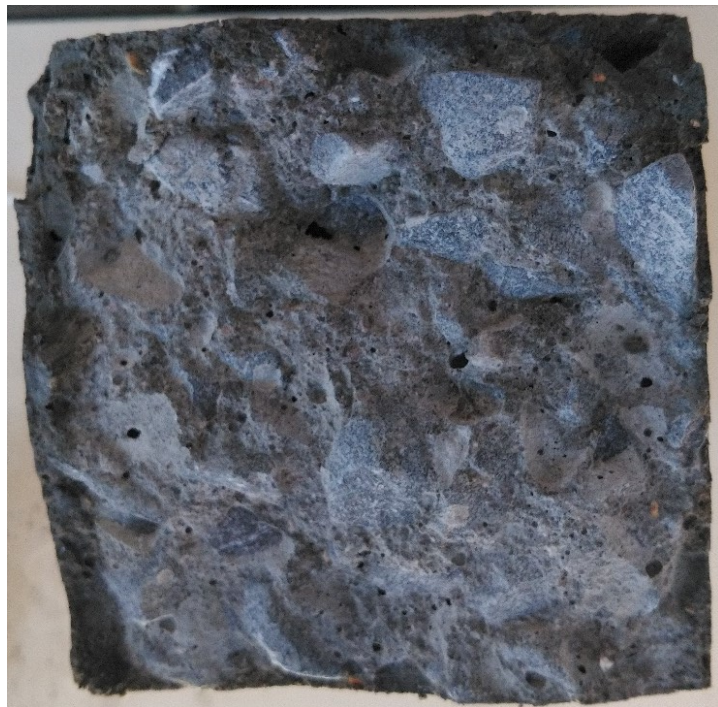


写真-4.3.5 水に30分に浸漬した場合の浸透深度

4.4 SEM 観察試験

4.4.1 使用材料

本試験で用いた使用材料を表-4.4.1に示す。

尿素は市販の工業用を用い、尿素水溶液は質量比で濃度 50%となるように試験前に水道水に溶解し、水溶液とした。

表-4.4.1 使用材料

| 種別 | 名称 | 記号 | 密度 |
|-------|--------------|----|------|
| 水 | 上水道水 | W | 1.00 |
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 化学系材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |

4.4.2 配合条件

水セメント比 60%のセメントペーストを硬化させ、50%の尿素水溶液を含浸させた後、この硬化セメントペーストの表面において、結晶がどのように形成するのか、また表面付近における成分の変化に着目し検討した。

4.4.3 練混ぜ手順

練り混ぜには公称容量 2 L のモルタルミキサーを使用し練り混ぜを行った。練り混ぜ手順を図-4.4.1に示す。ミキサーに、水とセメントを投入し、60 秒間練り混ぜを行った後排出した。

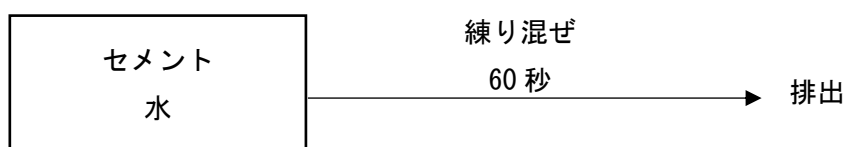


図-4.4.1 練混ぜ手順

4.4.4 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた観察

本試験で使用する SEM 装置を写真-4.4.1に示す。また、SEM 観察に用いた尿素水溶液浸漬した供試体の写真を写真-4.4.2に示す。水セメント比 60%の硬化セメントペーストに

ついで、直径 50mm、高さ 100 mm の型枠を用いて円柱供試体を作製した。供試体作製の翌日に脱型を行い、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室にて気中養生を行った。気中養生開始から 3 日目に尿素水溶液に 60 分間浸漬し、その後再び恒温恒湿室にて気中養生を行い、気中養生の 14 日目に SEM 観察を実施した。SEM 観察は、供試体の表面付近の碎き断面を観察するものとし、供試体表面における結晶の観察を行った。



写真-4.4.1 走査型電子顕微鏡 (SEM)



写真-4.4.2 SEM 観察用供試体 (尿素浸漬)

4.4.5 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察結果

無処理の SEM 観察結果を写真-4.4.3、写真-4.4.4、写真-4.4.5 に、尿素水溶液浸漬の SEM 観察結果を写真-4.4.6、写真-4.4.7、写真-4.4.8 に示す。

無処理の写真より、セメントの水和生成物から成るロッド状あるいは繊維状の結晶が凝集した構造¹⁾がみられ、一般的なセメント硬化体と同様に²⁾細孔が複雑に形成されていることが確認できた。

次に、尿素水溶液に浸漬した場合の SEM 写真に着目すると、表面に付着している結晶の根元には、空隙が埋められている緻密な含浸層が形成されていることが確認された。これは、60 分間の浸漬により供試体表面の細孔に水溶液が浸入し、浸漬後気中での乾燥に伴う水分の逸散により、尿素結晶が供試体表面に残存することでこのように形成されたと考えられる。実際に含浸層を写真-4.4.8 に示すように拡大して観察してみると、尿素結晶の特徴である柱状の結晶³⁾が硬化体断面の空隙に存在していることが確認できた。これより、尿素水溶液を含浸させた硬化体の表面において、尿素が再結晶化し圧縮強度の増進、乾燥収縮の低減に寄与しているといえる。

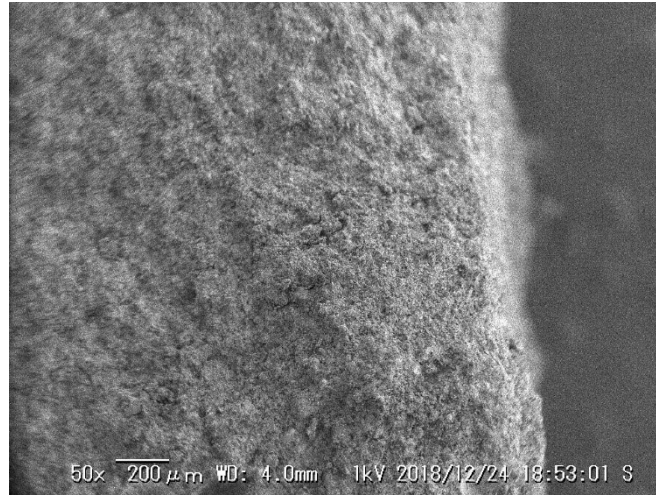


写真-4.4.3 SEM 観察 (無処理)

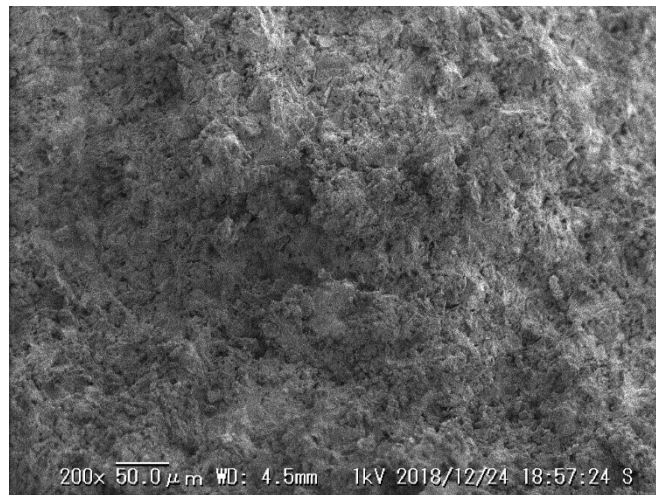


写真-4.4.4 SEM 観察 (無処理)

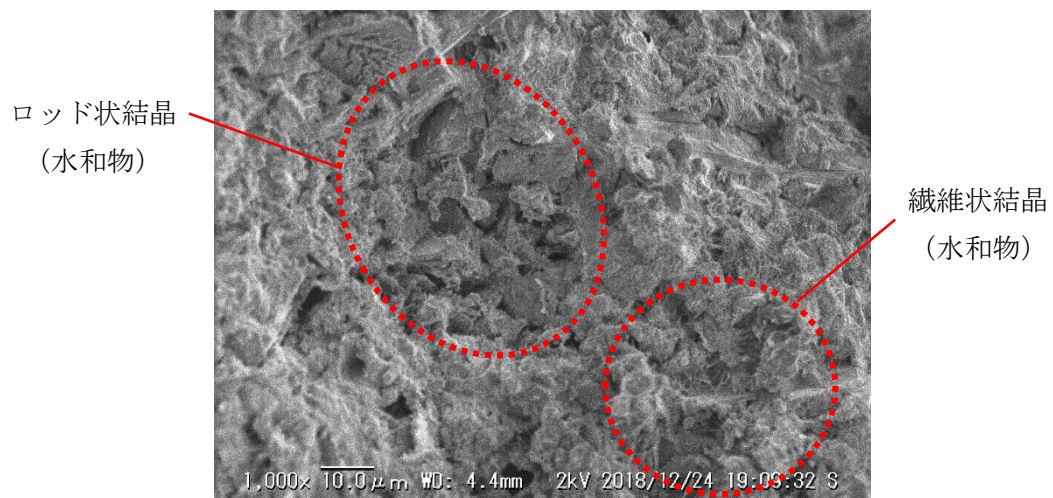


写真-4.4.5 SEM 観察 (無処理)

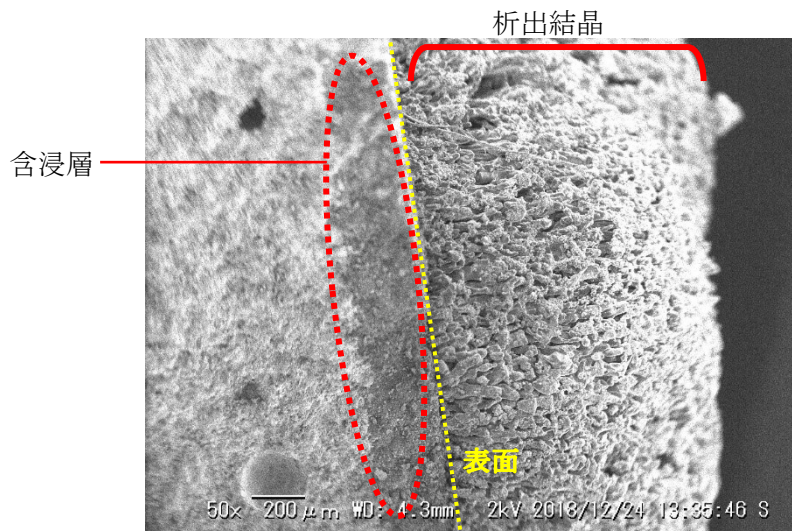


写真-4.4.6 SEM 観察 (尿素水溶液浸漬)

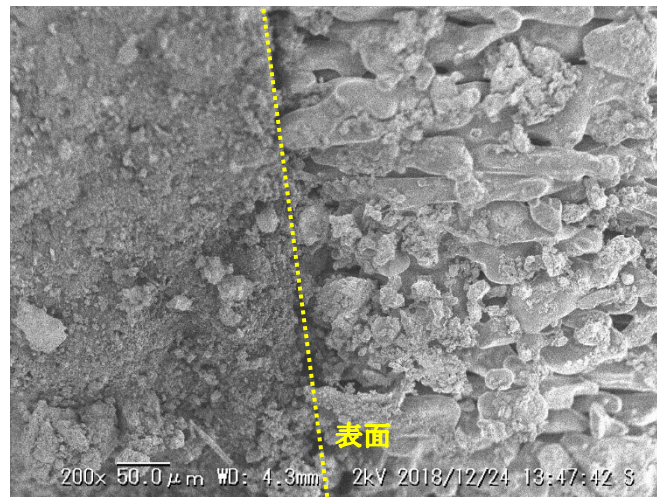


写真-4.4.7 SEM 観察 (尿素水溶液浸漬)

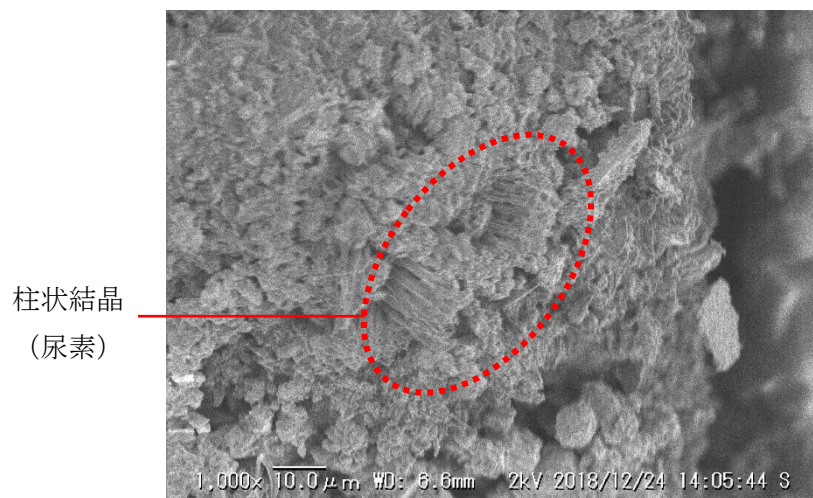


写真-4.4.8 SEM 観察 (尿素水溶液浸漬)

4.5 デュヌイ表面張力計による尿素水溶液の表面張力測定試験

4.5.1 試験方法の概要

液面に垂直に接触させた金属（白金）環を垂直に引き上げ、液体の表面からこれを引き離すのに必要な力を測定することによって、表面張力を求めるものである。

4.5.2 試料

試料には、蒸留水、濃度 50%の尿素水溶液と市販品の乾燥収縮低減剤を用いた。

4.5.3 試験器

試験器は、写真-4.5.1 に示すデュヌイ表面張力計を用いた。

4.5.4 試験器の下準備

試験器の下準備は、次による。

- ①振動及び通風の無い場所で行う。
- ②水準器により本体脚部の水平調節ねじ **A** で水準を出す。
- ③目盛板の **0** に指針 **B** の **0** を合わせる。
- ④洗浄処理をした白金環 **C** をアルミさおの先端に吊す。
- ⑤鋼線取付け後部側面の取っ手 **D** を回して、指示板 **E** の赤色標線にアルミさおが来る様に調節する。
- ⑥試料台の底部つまみ **F** を回して試料台を一番下に下げる。
- ⑦試料容器(ガラス製)に蒸留水を入れ試料台に置く。

4.5.5 テスト（基準値合わせ）

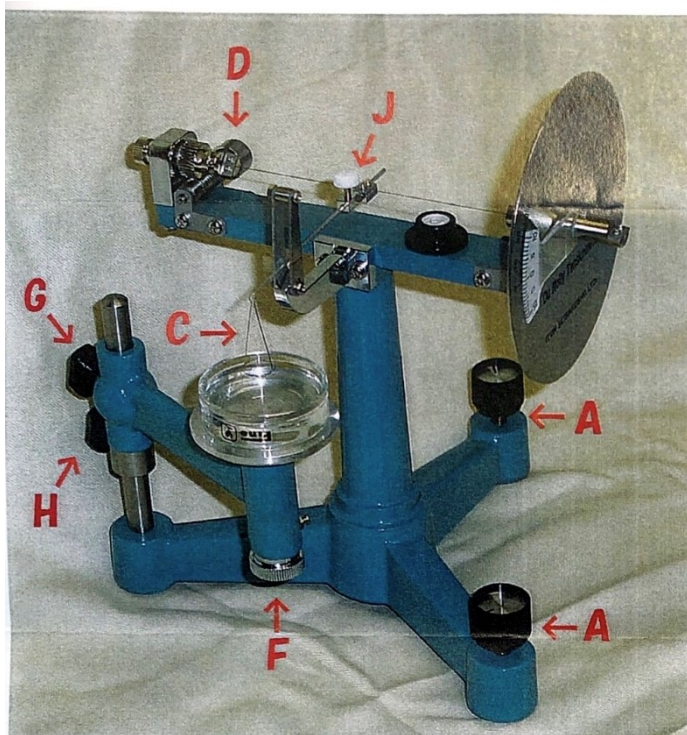
試験器のテストは、次による。蒸留水の表面張力基準値を表-5.5.1 に示す。

- ①試料台の固定取っ手 **G** をゆるめ、白金環と試料容器水面との距離をなるべく短くして固定する。安全のため落下防止金具 **H** を上げて固定する。
- ②試料台の底部つまみ **F** を回して試料容器を微調整し、白金環と試料が触れたら止める。
- ③測定に入る。目盛板後部の取っ手 **I** を静かに回す。指針が **60** を過ぎてから白金環が水面を離れる直前までは特にゆっくり回し、白金環が水面を離れた時に止め、指針の指度

を読む。

④3回測定を行い、平均値を出す。

⑤指度が基準値 72.5 を外れている場合の合わせ方法は、アルミさおの固定ねじ J をゆるめ、指度が 72.5 より少ない時はさお(桿)を前に、大きい時は後ろに少し動かしてねじを締め、測定を繰り返して 72.5 に近づける。



- A 水平調節ねじ
- B 目盛板指針
- C 白金環
- D 鋼線調節取手
- E 指示板
- F 試料台底部ツマミ
- G 試料台固定取手
- H 落下防止金具
- I 目盛板後部取手
- J アルミさお固定ねじ

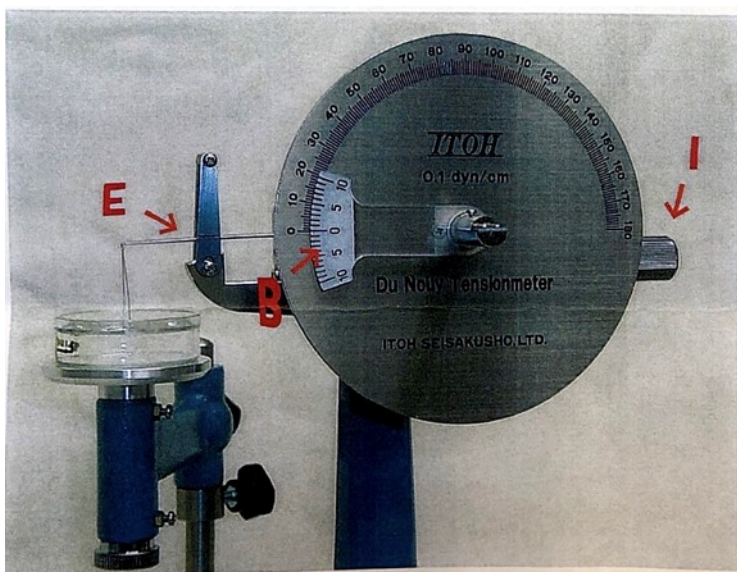


写真-4.5.1 デュヌイ表面張力計

表-4.5.1 温度による蒸留水の表面張力値

| 温度 (°C) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 表面張力 (dyn/cm) | 75.64 | 74.22 | 72.75 | 71.18 | 69.59 | 66.18 | 62.61 | 58.85 |

4.5.6 試料溶液の測定

満足する値が出た場合は、装置及び操作が共に良好な状態にあるので、質量濃度 50%の尿素水溶液を用い、4.5.5 に従って行った。表面張力を測定する直前に溶液の温度を測定した。比較のため、市販品の TG-AS20 の表面張力値も測定した。TG-AS20 は低級アルコールを主成分とし、毛細管張力を弱めることにより乾燥収縮を低減する高性能収縮低減剤である。

4.5.7 試験結果と考察

室温環境での試験結果を表-4.5.2 に示す。表より、水と比べ、尿素水溶液の表面張力が大幅に小さく、TG-AS20 の表面張力値に近づいた。したがって、尿素水溶液には表面張力を低下させる効果があることが確認できたと考えられる。これより、供試体を尿素水溶液に含浸した場合、尿素水溶液が供試体表面層に浸透し、内部溶液の表面張力を低減したため、乾燥収縮低減効果が現れたと考えられる。

表-4.5.2 尿素水溶液の表面張力値

| 種類 | 内容 | 表面張力 (dyn/cm) |
|---------|---------------------|---------------|
| 水 | 蒸留水 | 72.8 |
| 尿素水溶液 | 濃度 50%の尿素水溶液 | 48.7 |
| TG-AS20 | 市販品のコンクリート用高性能収縮低減剤 | 35.0 |

4.6 まとめ

本章では、尿素水溶液を含浸した場合の収縮低減メカニズムを解明するため、浸透深度、走査型電子顕微鏡（SEM）観察および表面張力を検討し、以下の試験結果と知見を得た。

- ・ 尿素水溶液の浸透深度

尿素水溶液を含浸させることで、浸漬時間が長くなるほど浸透深度が深くなる傾向を示した。これより、尿素水溶液の乾燥収縮低減効果は含浸時間や浸透深度と関係があると考えられる。

- ・ 走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた観察

供試体表面を SEM 観察すると、尿素水溶液を含浸した場合、供試体の表面の空隙を満たし、緻密な含浸層が形成されていることが確認できた。また、含浸層内部を観察したところ、尿素結晶と考えられる柱状の結晶が確認され、空隙内での再結晶化が圧縮強度の増進、乾燥収縮の低減に寄与していると考えられる。しかしながら、SEM 観察における硬化体内の結晶の観察により生成物を特定することは難しく、生成物を明確にするために更なる化学分析を重ねる必要がある。

- ・ 尿素水溶液の表面張力

水と比べ、尿素水溶液の表面張力が大幅に小さくなり、TG-AS20 の表面張力値に近い値となった。尿素水溶液の表面張力低下作用が若干発現されたと考えられる。

以上より、尿素の結晶圧と尿素水溶液の表面張力低下性は同時に作用し、乾燥収縮を低減できたと考えられる。また、尿素の結晶圧が最も大きな要因だと考えられる。

【参考文献】

- 1)松井久仁雄・坂本直紀・渡邊次郎・松野信也：超小角 X 線散乱を用いたトバモライト生成過程における C-S-H の解析：CaO-SiO₂-H₂O 系における γ -Al₂O₃ および石膏添加の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.69、pp.61-68、2015.
- 2)蔵重勲・井元晴丈・山本武志・廣永 道彦：セメント硬化体の相組成を考慮した耐久性能評価技術の現状と課題、電力中央研究所報告 研究報告書（電力中央研究所報告）、調査報告：N05061、2005.
- 3)A.E.Smith：The Crystal Structure of the Urea Hydrocarbon Complexes、Acta Crystallographica、5、pp.224-235、1952.
- 4)松下博通・尾上幸造：コンクリート内部空隙中の液体の表面張力が圧縮疲労強度に及ぼす影響・コンクリート工学論文集、Vol.17、No1、pp.19-30、2006.1

第5章

尿素水溶液に含浸したコンクリートの耐久性

目次

| | |
|-------------------------|----|
| 5.1 概論 | 64 |
| 5.2 使用材料 | 64 |
| 5.3 配合条件 | 64 |
| 5.4 練混ぜ手順 | 64 |
| 5.5 試験項目および試験方法 | 64 |
| 5.5.1 凍結融解試験 | 64 |
| 5.5.2 促進中性化試験 | 66 |
| 5.5.3 ひび割れ抵抗性試験 | 67 |
| 5.5.4 ひび割れ修復性試験 | 68 |
| 5.6 試験結果および考察 | 68 |
| 5.6.1 凍結融解試験結果 | 68 |
| 5.6.2 促進中性化試験結果 | 70 |
| 5.6.3 ひび割れ抵抗性試験結果 | 72 |
| 5.6.4 ひび割れ修復性試験結果 | 73 |
| 5.7 まとめ | 74 |

第5章 尿素水溶液に含浸したコンクリートの耐久性

5.1 概論

3章において尿素水溶液の乾燥収縮低減効果が確認できたが、尿素水溶液の含浸が構造物の耐久性に及ぼす影響についての検討も必要である。

本章では、尿素を主成分とした水溶液に含浸したコンクリートについて、凍結融解試験、促進中性化試験、ひび割れ抵抗性試験およびひび割れ修復性試験に関する耐久性の検討を行った。

5.2 使用材料

第3章、3.3.1節と同様とした。

5.3 配合条件

第3章、3.3.2節と同様とした。

5.4 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

5.5 試験項目および試験方法

5.5.1 凍結融解試験

凍結融解試験は、「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して行った。試験手順を図-5.5.1に示す。

各配合に対して 100×100×400mm の角柱供試体を 3 本ずつ作製し、20±2℃の水中で材齢 28 日まで水中養生を行った後、20±3℃、60±5%Rh の恒温恒湿室にて気中養生を行った。気中養生 3 日目に尿素含有水溶液に 1 分間浸漬し、その翌日に試験を開始した。水セメント比 50%においては、比較として無処理のコンクリートについても同様の凍結融解試験を行った。

試験方法の種類は、水中凍結融解試験方法とした。供試体の中心部温度が 4℃から-18℃に下がり、再び-18℃から 4℃に上がるまでを凍結融解の 1 サイクルとし、1 サイクルに要する時間を 4 時間に設定した。測定は 30 サイクルごとに、たわみ振動の一次共鳴振動数およ

び質量を測定し、相対動弾性係数、耐久性指数および質量減少率を式(5.5.1)、(5.5.2)、(5.5.3)より算出した。試験の終了は 300 サイクルとし、それまでに相対動弾性係数が 60%以下になったものは耐久性が低いと判断し、60%以下となった時点のサイクルで終了とした。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (5.5.1)$$

ここに、 P_n ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%)

f_n ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

f_0 ：凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (5.5.2)$$

ここに、 DF ：耐久性指数

P ： N サイクルのときの相対動弾性係数(%)

N ：相対動弾性係数が 60%になるサイクル数、
又は 300 サイクルのいずれか小さいもの

M ：300 サイクル

$$W_n = \left[\frac{m_0 - m_n}{m_0} \right] \times 100 \quad (5.5.3)$$

ここに、 W_n ：凍結融解 n サイクル後の質量減少率(%)

m_n ：凍結融解 n サイクル後の供試体質量(g)

m_0 ：凍結融解 0 サイクルにおける供試体質量(g)

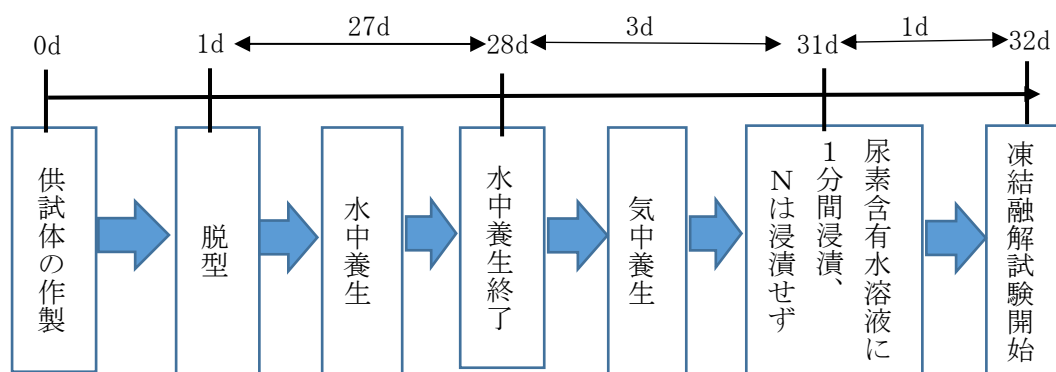


図-5.5.1 凍結融解試験の手順

5.5.2 促進中性化試験

中性化はコンクリート表面から徐々に進行し、鉄筋などの鋼材付近に達すると不動態皮膜が破壊され、さびを生じやすくなり、コンクリートのひび割れや剥離につながる。そこで、本節ではコンクリートの促進中性化試験を行い尿素水溶液の中性化への影響を検討した。促進中性化試験は、「JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。試験手順を図-5.5.2に示す。

各配合に対して100×100×400mmの角柱供試体を3本ずつ作成し、20±2℃の水中で材齢28日まで水中養生を行った後、20±3℃、60±5%Rhの恒温恒湿室にて気中養生を行った。気中養生3日目に尿素水溶液に1分間浸漬し、その後、再び乾燥状態として気中養生28日目に試験を開始した。比較として、無処理のコンクリートについても同様の促進中性化試験を行った。測定は試験開始後1、4、8、13、26週目に行った。図-5.5.3に示すように供試体端部より60mmの間隔で破断し、破断面に濃度1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧することでモルタルの中性化深さを確認した。コンクリート供試体表面から赤色着色部までの距離を1側面に対し5箇所ノギスで測定し、合計2側面、10箇所の平均値を中性化深さとした。

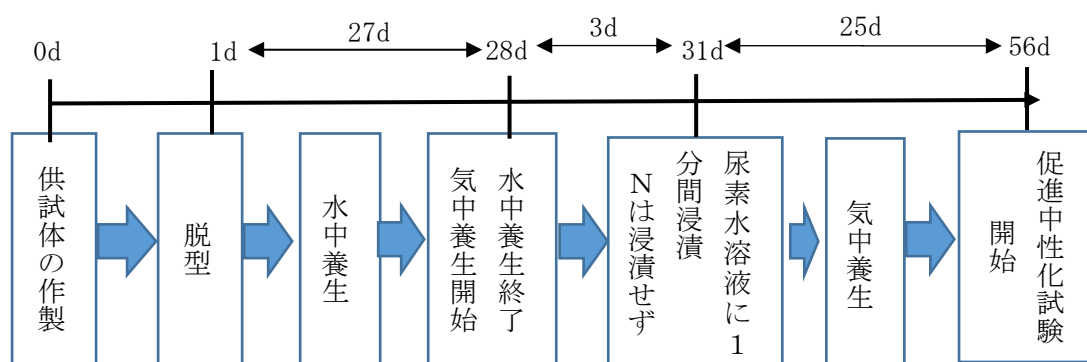


図-5.5.2 促進中性化試験の手順

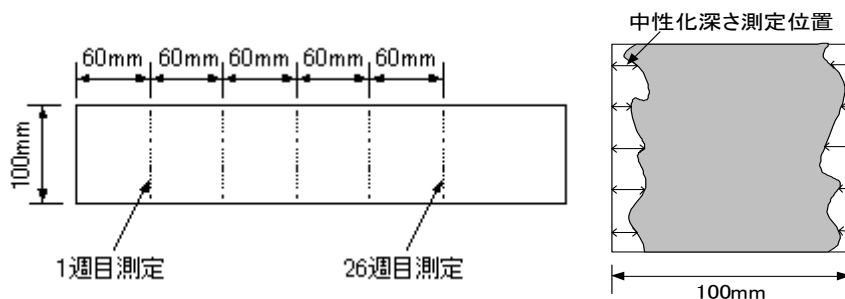


図-5.5.3 中性化深さの測定位置

5.5.3 ひび割れ抵抗性試験

尿素水溶液の浸漬による乾燥収縮低減効果が確認したが、乾燥収縮によるひび割れの発生を抑制することもできると予想し、本節ではコンクリートのひび割れ抵抗性試験を行い、尿素水溶液によるひび割れ抵抗性の有無を検討した。

ひび割れ抵抗性試験は JCI の自己収縮研究委員会報告書に記載されている「JCI 規準集 2004 コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」に類似し、図-5.5.4 に示すような 100×100×1500mm の鋼製型枠に中央部のリブと節を取り除いて、ひずみゲージを貼り付けた D32 異形鋼棒を設置し、鉄筋に発生するひずみを測定した。試験手順は図-5.5.5 に示すように、コンクリート打ち込み後、翌日に脱型し、20±3℃、60±5%Rh の恒温恒湿室にて気中養生を行った。

本試験のコンクリート供試体を尿素水溶液に浸漬することは作業し難いため、浸漬の代わりに尿素水溶液を硬化コンクリートに塗布した。硬化コンクリートに尿素水溶液を塗布する場合、一度に大量の水溶液を塗布すると完全に浸入する前に液垂れが起こる。そこで、一度に塗布する水溶液量を事前に液垂れを生じることなくコンクリート表面から浸み込む量を検討した結果を基に 200 g/m² とし、次の塗布までに 30 分間の乾燥時間を設けて所定回数の塗布を行った。

気中養生 2 日目に尿素水溶液をコンクリートの全面に 6 回および 9 回塗布し、その後、再び乾燥状態として気中養生を開始し、材齢 66 日まで乾燥収縮によるひずみを測定した。比較のため、気中養生 2 日目に塗布しない無処理の供試体を 1 本作製し、材齢 66 日まで乾燥収縮によるひずみを測定した。また、以下の式 (5.5.4) を用いて測定されたひずみから収縮応力を算出した。供試体の測定は 0～1 日に 1 時間 1 回、1～3 日に 4 時間 1 回、3 日から 24 時間 1 回の頻度で実施した。

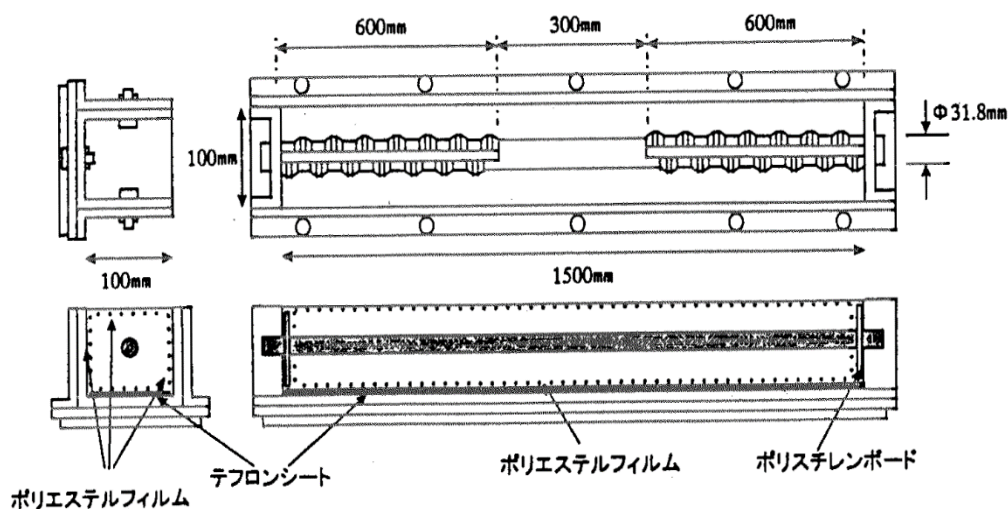


図-5.5.4 「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」における試験型枠

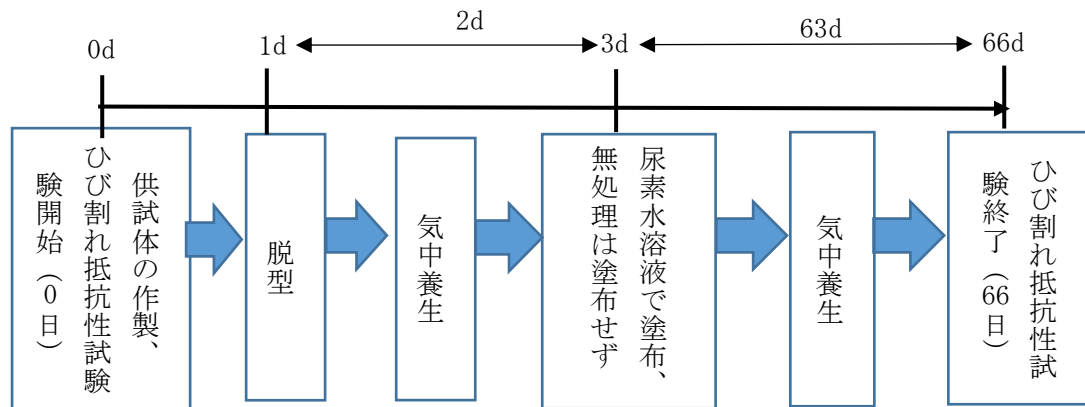


図-5.5.5 ひび割れ抵抗性試験の手順

$$\sigma_c = (E_s \times \epsilon_s \times A_s) / A_c \quad (5.5.4)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの収縮応力 (N/mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

ϵ_s : 鋼材のひずみ

A_s : 鋼材の中央部断面積 (mm²)

A_c : コンクリートの純断面積 (mm²)

5.5.4 ひび割れ修復性試験

ひび割れ抵抗性試験でひび割れが発生した無処理の供試体に対し、尿素水溶液を塗布することで、すでに生じたひび割れを修復する効果を検討した。ひび割れ抵抗性試験においてひび割れが発生した無処理の供試体を用い、材齢 28 日に尿素水溶液を 3 回塗布し、その 3 日後にひび割れ箇所を目視観察し、塗布前と塗布後のひび割れの状態を比較した。また、試験期間中は 20±3℃、60±5%の恒温恒湿室にて供試体を養生した。

5.6 試験結果および考察

5.6.1 凍結融解試験結果

尿素含有水溶液に 1 分間浸漬したコンクリートの凍結融解試験結果を表-5.6.1、図-5.6.1 に示す。水セメント比 50%において、無処理の場合の凍結融解試験開始前の供試体と 300 サイクルの凍結融解作用を受けた供試体の様子を写真-5.6.1、写真-5.6.2 に示す。尿素含有水溶液に浸漬した供試体について、水セメント比 50%を写真-5.6.3 と写真-5.6.4、水セメント比 40%を写真-5.6.5、水セメント比 60%を写真-5.6.6 に示す。

図-5.6.1 より、いずれの水セメント比においても 300 サイクルの凍結融解作用を受け

ても、相対動弾性係数は75%を上回り、耐凍結融解に優れていることが確認できた。これより尿素浸入による凍結融解抵抗性への悪影響は無いと考えられる。

表-5.6.1 凍結融解試験結果

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 | 300 サイクル終了後の耐久指数(D.F.) (%) |
|---------|---------|----------|--------|----------------------------|
| 40 | 尿素含有水溶液 | 1 | 40%Mix | 77.3 |
| 50 | 無し | — | 50%N | 86.3 |
| | 尿素含有水溶液 | 1 | 50%Mix | 83.1 |
| 60 | 尿素含有水溶液 | 1 | 60%Mix | 86.2 |

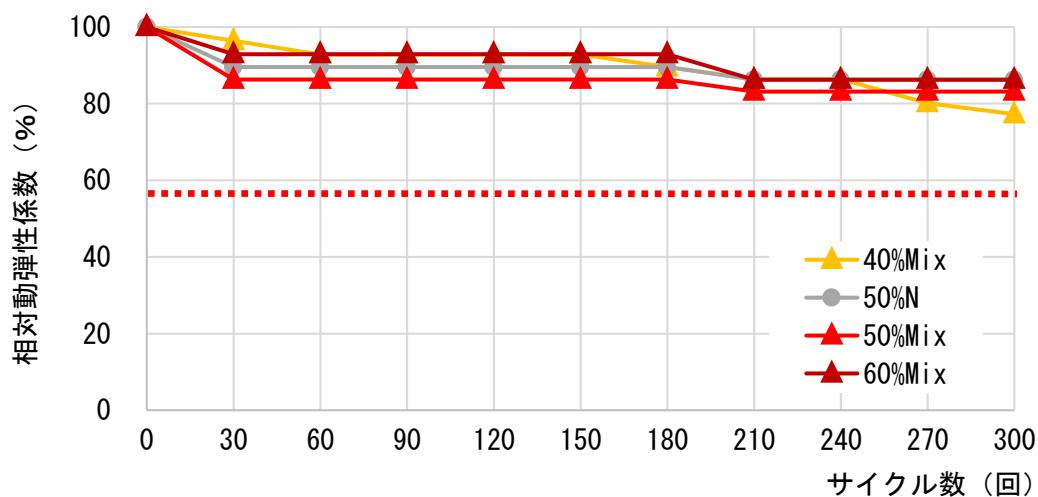


図-5.6.1 凍結融解試験結果



写真-5.6.1 凍結融解試験開始前（無処理）



写真-5.6.2 凍結融解試験終了（無処理）

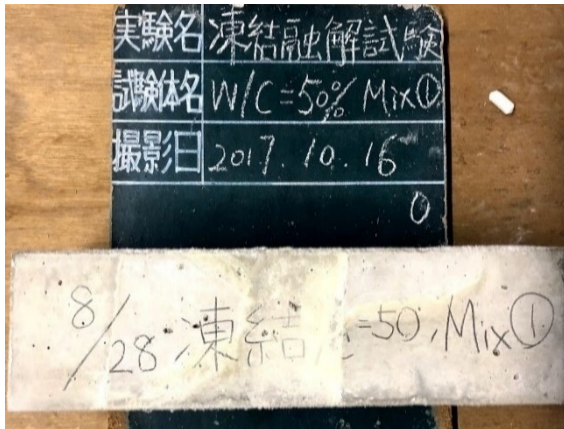


写真-5.6.3 試験開始前（尿素含有水溶液）

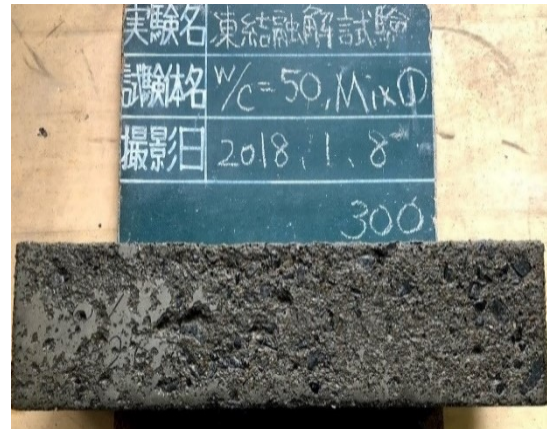


写真-5.6.4 試験終了（尿素含有水溶液）

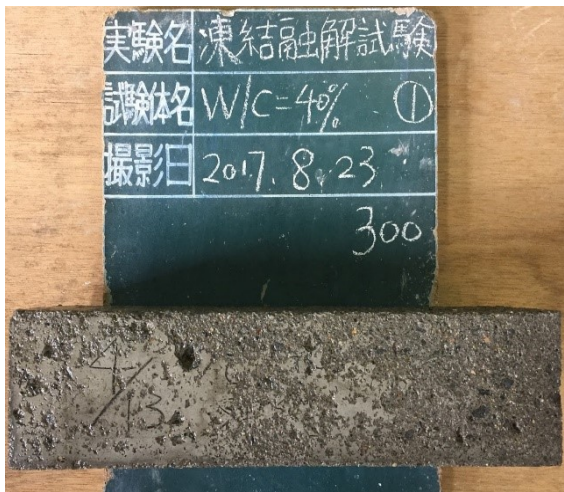


写真-5.6.5 試験終了（尿素含有水溶液）

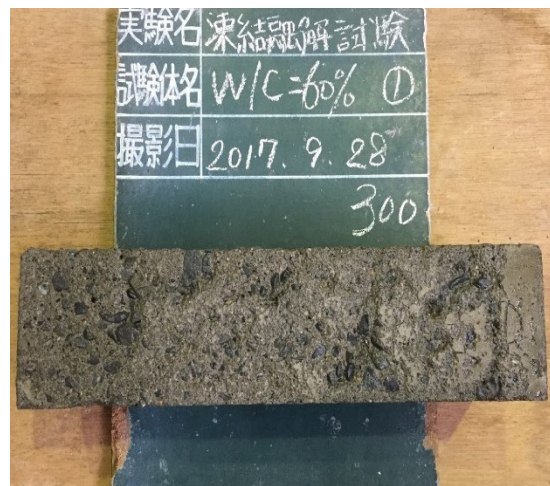


写真-5.6.6 試験終了（尿素含有水溶液）

5.6.2 促進中性化試験結果

水セメント比 40%、50%、60%の促進中性化試験における中性化深さの推移について、水セメント比毎にまとめて表-5.6.2、図-5.6.2に示す。また、水セメント比別に促進中性化試験開始 26 週目の供試体を写真-5.6.7、写真-5.6.8、写真-5.6.9に示す。

図-5.6.2より、いずれの水セメント比においても、尿素水溶液を浸漬した場合において、無処理に比べて中性化深さが小さくなることが分かった。これは、供試体表面の空隙より含浸した水溶液中の尿素が再結晶化することにより、コンクリート表面の硬化組織の細孔空隙を埋め、炭酸ガスの浸入を抑制したためだと推察される。

表-5.6.2 促進中性化試験結果

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 | 促進中性化深さ (mm) |
|---------|----------|----------|----|--------------|
| 40 | 無し | — | N | 0.20 |
| | 50%尿素水溶液 | 1 | 尿素 | 0.10 |
| 50 | 無し | — | N | 3.45 |
| | 50%尿素水溶液 | 1 | 尿素 | 2.05 |
| 60 | 無し | — | N | 11.80 |
| | 50%尿素水溶液 | 1 | 尿素 | 11.30 |

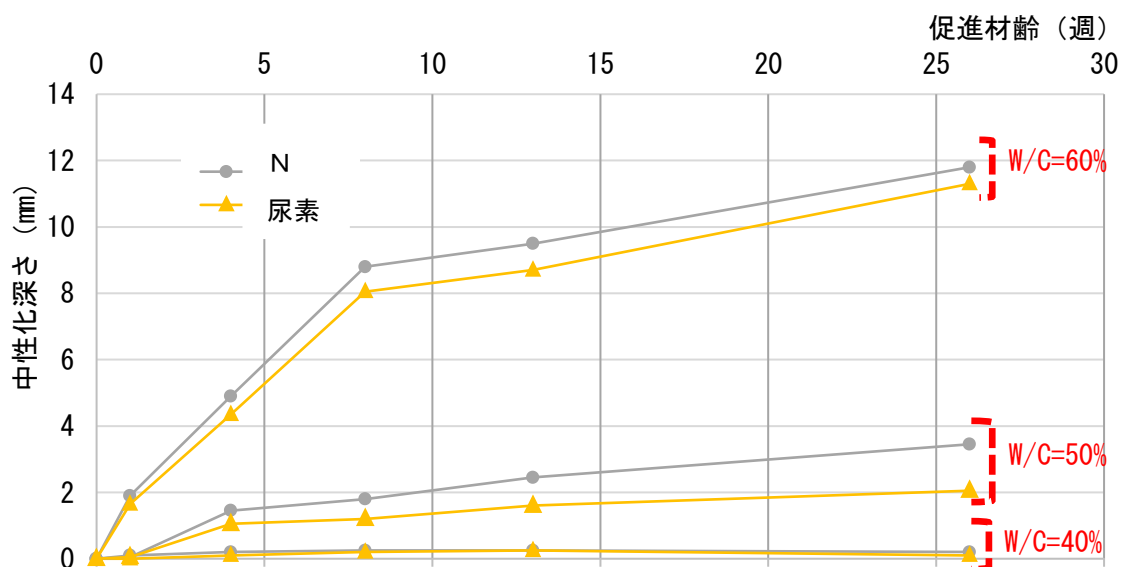


図-5.6.2 促進中性化試験結果

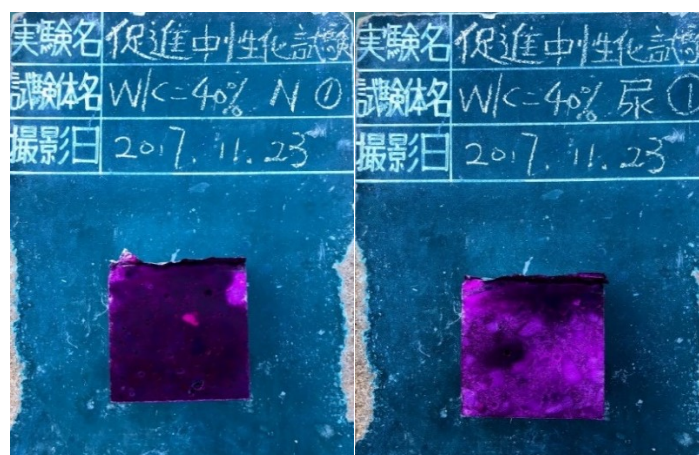


写真-5.6.7 W/C=40%の供試体断面写真 (26 週目)

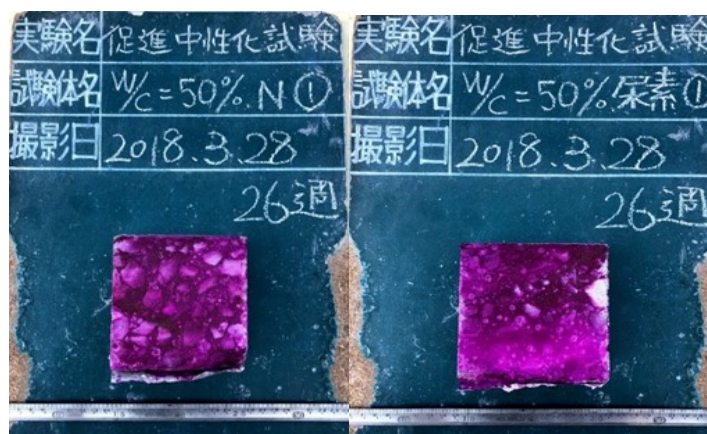


写真-5.6.8 W/C=50%の供試体断面写真（26週目）

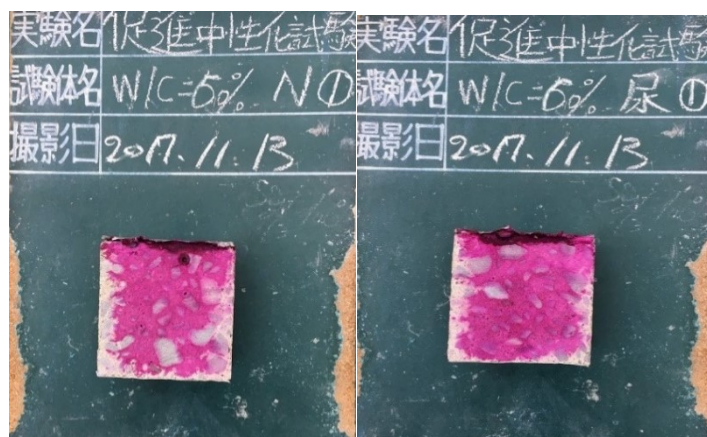


写真-5.6.9 W/C=60%の供試体断面写真（26週目）

5.6.3 ひび割れ抵抗性試験結果

試験結果を図-5.6.3に示す。図より乾燥開始から3日目の尿素水溶液塗布前までの収縮応力は一致の傾向が現れた。また、尿素水溶液塗布直後に収縮応力は一時的に逆方向に増進した。これは、尿素水溶液は硬化体内部の空隙に浸入し、一時的に空隙を膨張させることや硬化体内部の湿潤状態を回復させることにより、収縮応力は逆方向に増進したと考えられる。3日目から、尿素水溶液を6回および9回塗布した場合は、無処理と比べ大きな差が現れた。無処理の供試体では乾燥開始から10日目でひび割れが発生した。尿素水溶液塗布6回の供試体では乾燥開始から20日目でひび割れが生じ、塗布9回の供試体では66日経過しても明確なひび割れが発生しなかった。収縮応力は無処理と比較して塗布6回および塗布9回のほうが低くなり、ひび割れ発生日数も塗布した場合で優良な結果を得た。これは、供試体に尿素水溶液を塗布することにより、無処理の供試体と比較して硬化体内部の湿潤状態が良くなり、また尿素的再結晶化が硬化体内部の空隙を埋めたことが要因と推察される。以上の結果より尿素水溶液塗布することでひび割れ抵抗性が向上することがわかった。

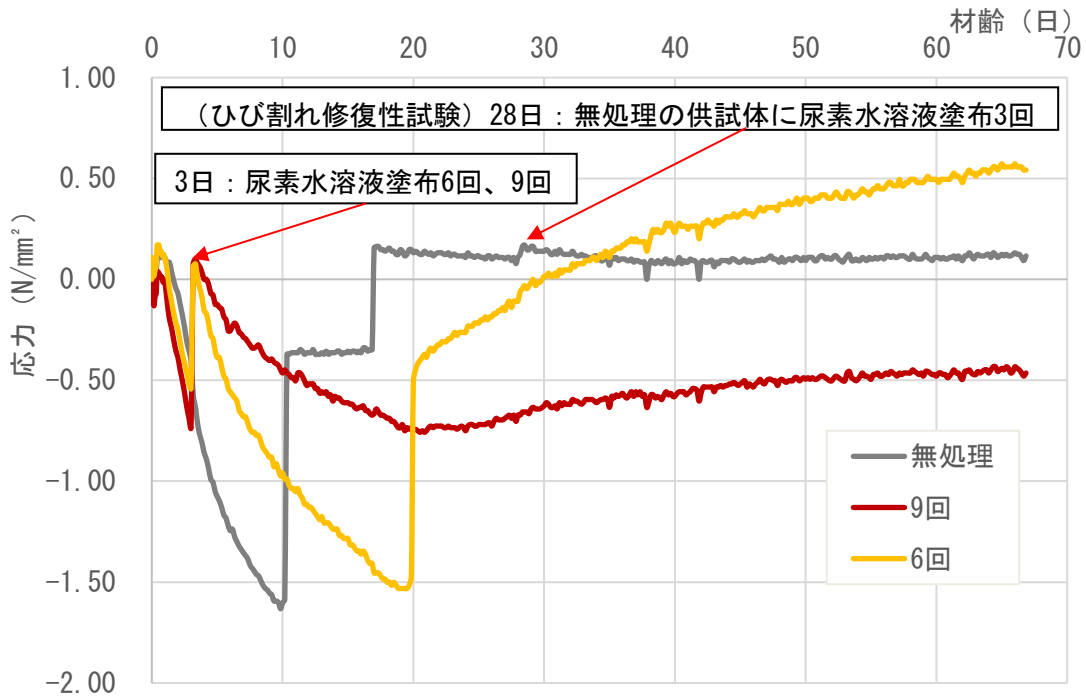


図-5.6.3 ひび割れ抵抗性試験結果

5.6.4 ひび割れ修復性試験結果

写真-5.6.10 に尿素水溶液塗布前にひび割れの様子を、写真-5.6.11 に塗布後3日が経過したひび割れの様子を示す。

写真-5.6.10 より、塗布前の供試体には 0.10~0.20mm 程度のひび割れが生じているが、塗布後の写真-5.6.11 を見ると、ひび割れが目視では見えなくなったことを確認した。これは、尿素水溶液の含浸により供試体内部の水分量が増加することでコンクリートが膨張したことや、尿素がひび割れの空隙内で結晶化したことによってひび割れが埋められたためと考えられる。

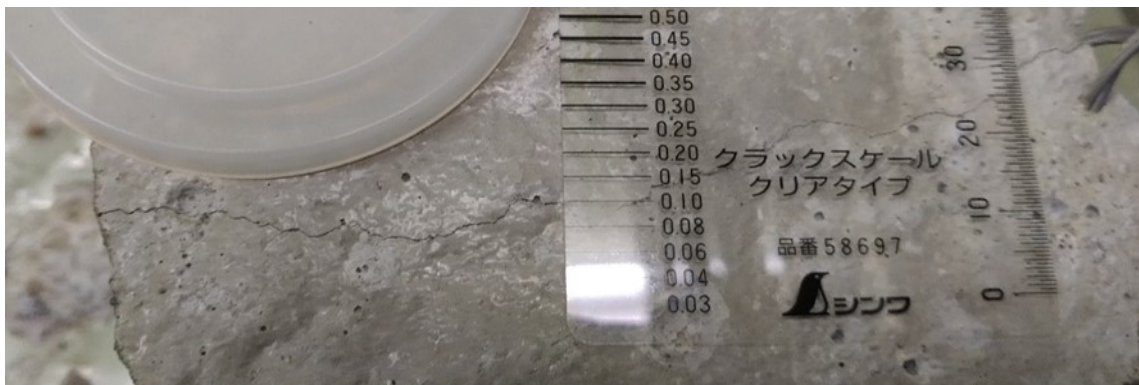


写真-5.6.10 尿素水溶液塗布前のひび割れの様子



写真-5.6.11 塗布後3日が経過したひび割れの様子

5.7 まとめ

本章では、尿素含有水溶液に含浸したコンクリートの強度特性および耐久性について実験を行い、以下の試験結果と知見を得た。

・凍結融解試験

凍結融解試験において、尿素が浸入した場合でも、コンクリートの凍結融解抵抗性への悪影響は見られなかった。

・促進中性化試験

促進中性化試験において、尿素水溶液で浸漬した供試体は、浸入した尿素的の再結晶化によって表面が緻密化し、炭酸ガスの浸入を抑制していると推察される。

・ひび割れ抵抗性試験

ひび割れ抵抗性試験について、尿素水溶液塗布することでひび割れ抵抗性が向上することがわかった。これは、供試体に尿素水溶液を塗布することにより、無処理の供試体と比較して硬化体内部の湿潤状態が良くなり、また尿素的の再結晶化が硬化体内部の空隙を埋めたことが要因と推察される。

・ひび割れ修復性試験

ひび割れ修復性試験について、すでに生じたひび割れに対して尿素水溶液を塗布することによってひび割れを修復する効果が得られることが確認できた。これは、尿素水溶液の含浸により供試体内部の水分量が増加することでコンクリートが膨張したことや、尿素がひび割れの空隙内で結晶化したことによってひび割れが埋められたためと考えられる。

第6章

現場へ適用する施工方法の検討

目次

| | |
|------------------------|----|
| 6.1 概論..... | 76 |
| 6.2 使用材料..... | 76 |
| 6.3 配合条件..... | 76 |
| 6.4 練混ぜ手順..... | 76 |
| 6.5 試験項目および試験方法..... | 76 |
| 6.5.1 スランプ試験..... | 76 |
| 6.5.2 空気量試験..... | 77 |
| 6.5.3 乾燥収縮試験..... | 77 |
| 6.6 施工方法の概要..... | 78 |
| 6.6.1 塗布による施工方法..... | 78 |
| 6.6.2 散布による施工方法..... | 80 |
| 6.7 試験結果および考察..... | 82 |
| 6.7.1 フレッシュ性状試験結果..... | 82 |
| 6.7.2 乾燥収縮試験結果..... | 83 |
| 6.8 まとめ..... | 98 |
| 【参考文献】..... | 99 |

第6章 現場へ適用する施工方法の検討

6.1 概論

3章では、尿素水溶液を浸漬した場合のコンクリートの基本性状について検討を行ったが、実現場においては、尿素水溶液に打設したコンクリートを浸漬することは不可能である。実現場においても適用できる含浸方法による各種性状の検討が必要となる。

そこで本章では、尿素水溶液を用い、打込み・脱型から所定材齢を経過した硬化コンクリート表面に塗布および散布した場合の基本性状について検討した。

6.2 使用材料

3.3.1 節と同様とした。

6.3 配合条件

本研究で用いたコンクリートの計画配合を表-6.3.1に示す。

水セメント比は40%、50%、60%とし、フレッシュ性状の目標値を空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ値 $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ とした。

表-6.3.1 計画配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | SP 添加率 (C×%) |
|---------|---------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----------------|
| | | W | C | S | G | SP |
| 40 | 43 | 170 | 425 | 716 | 983 | 0.10 |
| 50 | 47 | 172 | 344 | 811 | 947 | 0.10 |
| 60 | 48 | 174 | 290 | 847 | 950 | 0.10 |

6.4 練混ぜ手順

3.3.3 節と同様とした。

6.5 試験項目および試験方法

6.5.1 スランプ試験

3.3.4 節と同様に行った。

6.5.2 空気量試験

3.3.4 節と同様に行った。

6.5.3 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は「JIS A 1129-3 : 2010 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法-第3部：ダイヤルゲージ方法」に準拠して行った。硬化コンクリート表面に尿素含有水溶液を塗布および散布する場合の実験条件を表-6.5.1、試験手順を図-6.5.1に示す。

各配合において100×100×400 mmの角柱供試体を3本ずつ作製した。供試体作製の翌日に脱型を行い、20±3°C、60±5%Rhに保持した恒温恒湿室内にて気中養生を行った。脱型日に第1回目の長さ測定を行い基長とし、併せて質量の測定も行った。気中養生開始から3日目に尿素含有水溶液を塗布または散布し、その後再び恒温恒湿室にて気中養生を行い、91日間の測定を継続して実施した。塗布および散布には、質量比で濃度50%となるよう試験前に水道水に溶解させたものを用い、一定の水溶液量を所定の回数塗布および散布し、水溶液の含浸を行った。

比較用として、水溶液に含浸しない供試体（以下、無処理）についても同様の養生を行い、91日間の乾燥収縮による長さ変化および質量変化の測定を行った。

表-6.5.1 乾燥収縮試験におけるコンクリートの水セメント比と実験条件の組合せ

| W/C (%) | 浸漬液 | 塗布回数 (回) | 散布回数 (回) |
|---------|---------|----------|----------|
| 40 | 無処理 | — | — |
| | 尿素含有水溶液 | 3 | 3 |
| | | 6 | 6 |
| | | 9 | 9 |
| 50 | 無処理 | — | — |
| | 尿素含有水溶液 | 3 | 3 |
| | | 6 | 6 |
| | | 9 | 9 |
| 60 | 無処理 | — | — |
| | 尿素含有水溶液 | 3 | 3 |
| | | 6 | 6 |
| | | 9 | 9 |

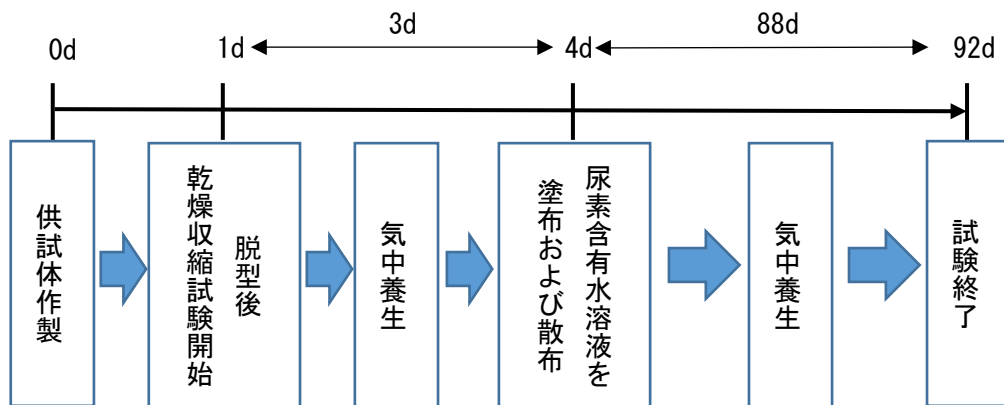


図-6.5.1 尿素水溶液の塗布・散布による乾燥収縮低減効果確認試験の手順

6.6 施工方法の概要

6.6.1 塗布による施工方法

5.5.3 節と同様に、硬化コンクリートに尿素含有水溶液を含浸させる場合、一度に大量の水溶液を塗布すると完全に浸入する前に液垂れを生じる。そこで、一度に塗布する水溶液量を事前に液垂れを生じることなくコンクリート表面から浸み込む量を検討した結果を基に $200\text{g}/\text{m}^2$ とし、本試験に用いた供試体の表面積に相当する 36g を塗布し、次の塗布までに 30 分間の乾燥時間を設けて所定回数の塗布を行った。

ここで、水セメント比 50% の硬化コンクリートに対して行った浸漬と塗布の含浸量の比較を図-6.6.1 に示す。その時の各含浸量を表-6.6.1、表-6.6.2 に示す。図より、浸漬時間 1 分、10 分、30 分における水溶液の含浸量がそれぞれ、塗布回数 3 回、6 回、9 回に相当していることが分かる。これより塗布の回数を 3 回、6 回、9 回と定め、全ての水セメント比において適用した。

塗布をする際に用いた刷毛の写真を写真-6.6.1、塗布の様子を写真-6.6.2 に示す。試験には市販の幅 70 mm の刷毛を用い、供試体に概ね均等に水溶液の含浸を行った。

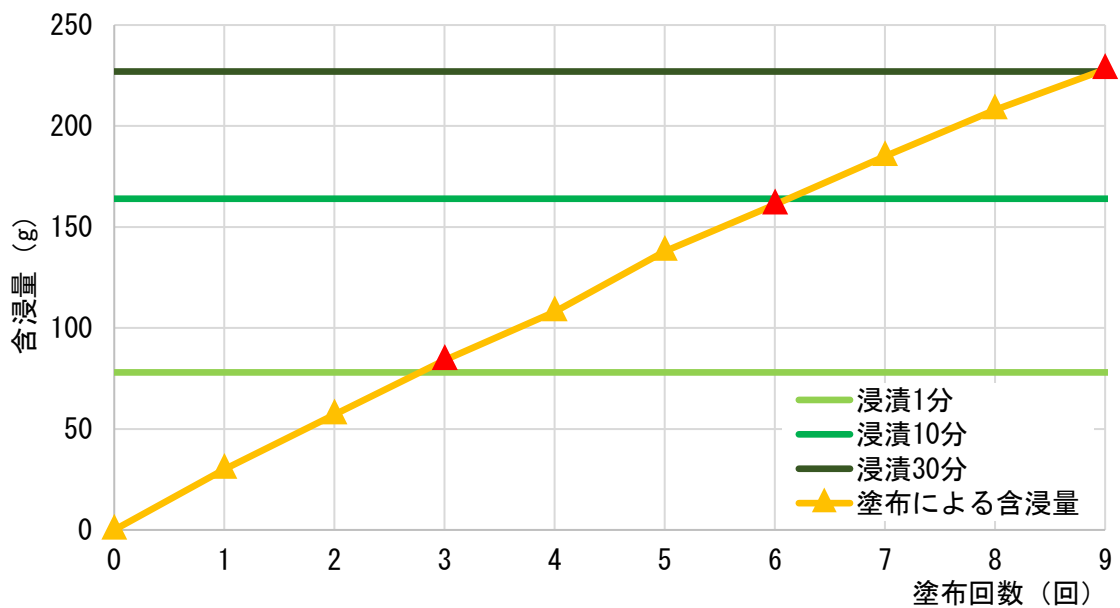


図-6.6.1 浸漬と塗布による含浸量の比較

表-6.6.1 各浸漬時間における含浸量

| | 浸漬 1 分 | 浸漬 10 分 | 浸漬 30 分 |
|---------|--------|---------|---------|
| 含浸量 (g) | 78.0 | 164.0 | 227.0 |

表-6.6.2 各塗布回数における含浸量

| | 塗布 3 回 | 塗布 6 回 | 塗布 9 回 |
|---------|--------|--------|--------|
| 含浸量 (g) | 84.0 | 161.0 | 228.0 |



写真-6.6.1 塗布に用いた市販の刷毛 (幅 70 mm)



写真-6.6.2 塗布による水溶液含浸の様子

6.6.2 散布による施工方法

一度に大量の水溶液を散布すると完全に含浸する前に液垂れを起こす。そこで、塗布と同様に一度に散布する水溶液量を $200\text{g}/\text{m}^2$ とし、本試験に用いた供試体の表面積に相当する 36g の散布を試みた。しかし、散布を行うと細かく霧状になった水溶液が対象物外にも付着するため、水溶液量 36g では供試体を浸漬した場合に相当する含浸量を得ることができなかった。そのため、散布を行う毎に含浸量を計測したところ、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ あたり 3.8g 、つまり一回あたり約 68g の散布を行うことで、浸漬に相当する含浸量を得ることが分かったため、この条件で前述の値で試験を行った。また、塗布と同様に次の散布までに 30 分間の乾燥時間を設け、繰り返し散布を行った。

ここで、水セメント比 50% の硬化コンクリートにおける浸漬と散布の含浸量の比較を図-6.6.2、散布における含浸量を表-6.6.3 に示す。図より、浸漬時間 1 分、10 分における水溶液の含浸量がそれぞれ、散布回数 3 回、6 回に相当していることが分かる。浸漬 30 分と散布 9 回の含浸量には約 40g の差が生じているが、散布 1 回あたりの水溶液量を現状以上に設定すると、散布 3 回、6 回の含浸量が浸漬 1 分、10 分に相当しないと考えられた。これより一回あたり約 68g の散布を行い、回数を 3 回、6 回、9 回と規定して全ての水セメント比に適用した。

散布をする際に用いた霧吹きを写真-6.6.3、散布の様子を写真-6.6.4、写真-6.6.5 に示す。試験には市販の霧吹きを用いた。散布を行う際には、供試体の被散布面の鉛直上方から供試体と霧吹きの間約 50mm の間隔を保ち、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ あたり 3.8g 散布して供試体に概ね均等に水溶液の含浸を行った。

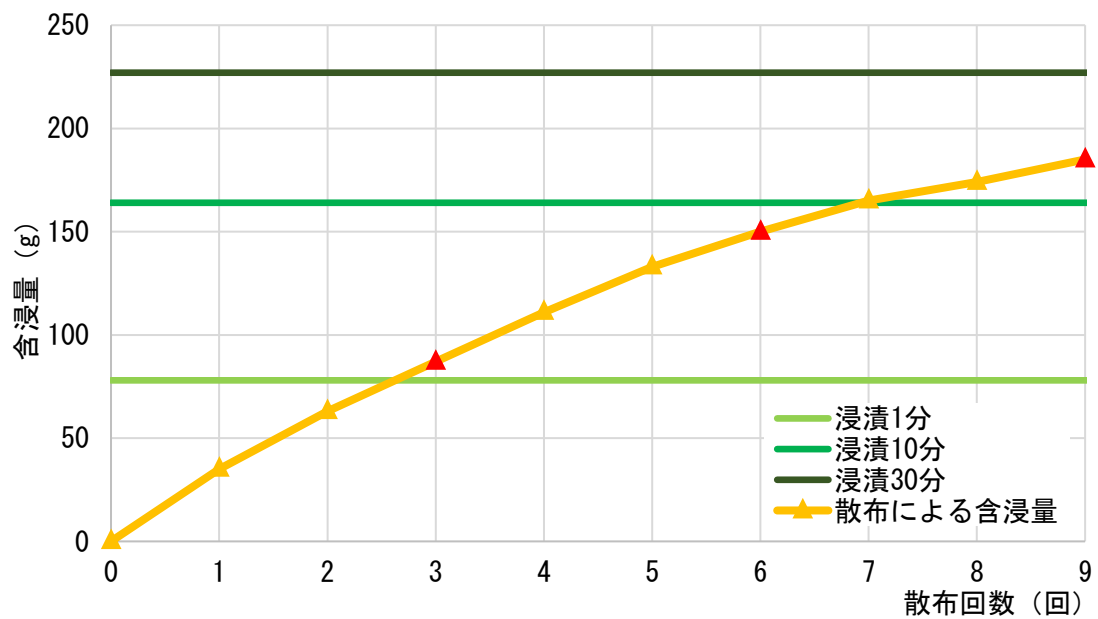


図-6.6.2 浸漬と散布による含浸量の比較

表-6.6.3 各散布回数における含浸量

| | 散布 3 回 | 散布 6 回 | 散布 9 回 |
|---------|--------|--------|--------|
| 含浸量 (g) | 87.0 | 150.0 | 185.0 |



写真-6.6.3 散布に用いた市販の霧吹き



写真-6.6.4 散布の様子



写真-6.6.5 100mm×100mm に 3.8g 散布する様子

6.7 試験結果および考察

6.7.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-6.7.1 に示す。
いずれの水セメント比においても目標値を満たした。

表-6.7.1 フレッシュ性状試験結果
(目標値：空気量 4.5±1.5%、スランプ値 8.0±1.5cm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 温度 (°C) |
|------------|------------|--------------|------------|
| 40 | 4.5 | 8.0 | 22.0 |
| 50 | 4.0 | 8.0 | 20.0 |
| 60 | 4.0 | 8.0 | 23.0 |

6.7.2 乾燥収縮試験結果

尿素水溶液を塗布した水セメント比 40%、50%、60%のコンクリートの乾燥収縮試験結果の長さ変化率をそれぞれ図-6.7.1、図-6.7.3、図-6.7.5、表-6.7.2、表-6.7.4、表-6.7.6、質量変化率をそれぞれ図-6.7.2、図-6.7.4、図-6.7.6、表-6.7.3、表-6.7.5、表-6.7.7に示す。

図より、全ての水セメント比において、尿素水溶液の塗布による乾燥収縮低減効果が認められた。しかしながら、塗布3回では無処理と同程度の長さ変化率を示し、収縮低減割合は小さかった。これは浸漬において、表面積に対する体積の割合が小さいことから収縮低減効果も小さくなると結論付けたように、塗布3回による含浸量が浸漬1分の含浸量に相当するため、同様の結果になったと考えられる。また、塗布回数が増えるほど収縮低減効果は大きくなり、浸漬と同様の傾向を示した。これは、塗布回数が増えるほどコンクリート表面の空隙から内部へ浸入する水溶液量が増加するため、乾燥に伴う水分の逸散により、多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し残存するため、より大きな結晶圧が作用したことが収縮作用抑制の要因と推察される。質量変化率の図より、塗布回数が増えるほど乾燥作用による水分の逸散量が少なくなり質量が維持され、多くの水分が供試体中に残存していることが分かった。供試体表層に含浸層が作られることや多くの結晶が生じることで、水分の逸散量が大幅に減少し硬化体中の水分量が多くなることで、養生効果を大きく得られたことも要因と考えられる。

全ての水セメント比の脱型後材齢3日前後における質量変化率の差に着目すると、水セメント比が大きくなるほど含浸する水溶液量も増加していることが確認できた。一般的にポルトランドセメントを用いた硬化体において、水セメント比が大きくなるほど硬化体の空隙率は増加するとされている¹⁾。そのため、コンクリート硬化体の水セメント比の増大に伴い内部に浸入する水溶液量が増加し、脱型後材齢3日前後における質量変化率の差が大きくなったと推察される。

塗布3回では収縮低減効果は小さいが、塗布6回では全ての水セメント比においておよそ10%の収縮低減割合を示し、十分な収縮低減効果を発揮させるためには、尿素水溶液の塗布を6回以上とすることが望ましいと考えられる。

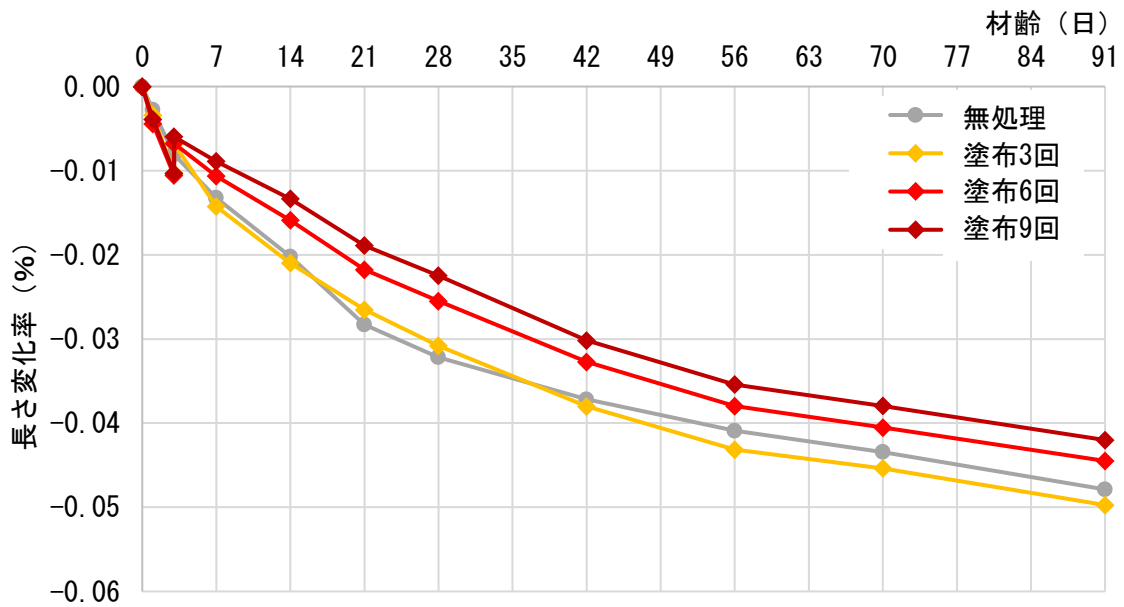


図-6.7.1 長さ変化率 (W/C=40%・塗布)

表-6.7.2 長さ変化率 (W/C=40%・塗布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.013 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.041 | -0.043 | -0.048 |
| 塗布3回 | 0.000 | -0.003 | -0.010 | -0.007 | -0.014 | -0.021 | -0.027 | -0.031 | -0.038 | -0.043 | -0.045 | -0.050 |
| 塗布6回 | 0.000 | -0.004 | -0.011 | -0.007 | -0.011 | -0.016 | -0.022 | -0.026 | -0.033 | -0.038 | -0.041 | -0.044 |
| 塗布9回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.006 | -0.009 | -0.013 | -0.019 | -0.022 | -0.030 | -0.035 | -0.038 | -0.042 |

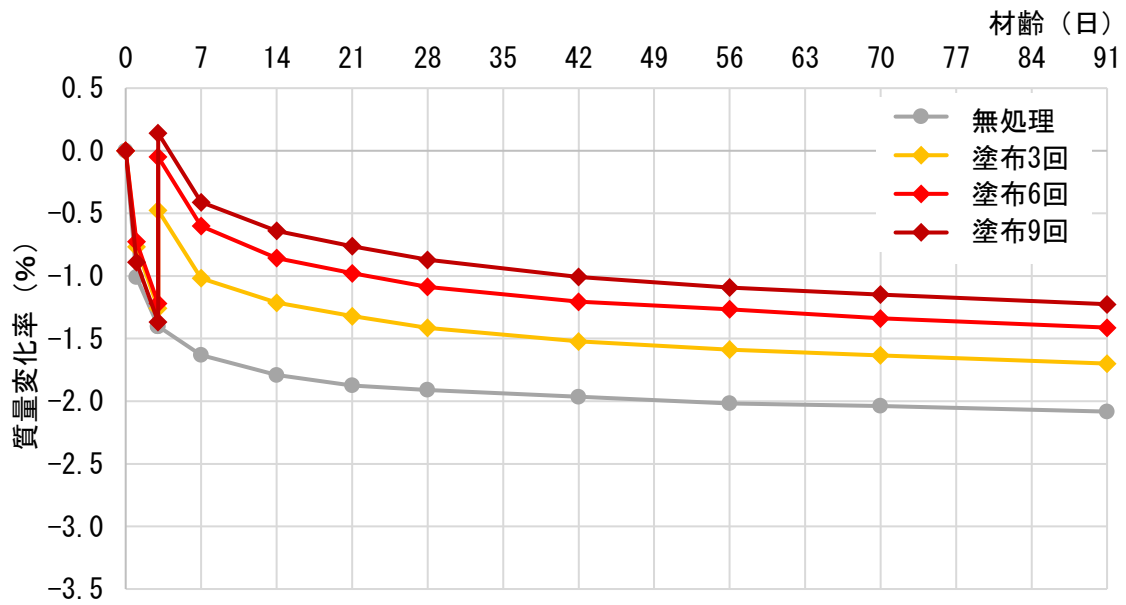


図-6.7.2 質量変化率 (W/C=40%・塗布)

表-6.7.3 質量変化率 (W/C=40%・塗布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |
| 塗布3回 | 0.000 | -0.768 | -1.258 | -0.476 | -1.018 | -1.213 | -1.321 | -1.414 | -1.522 | -1.588 | -1.633 | -1.699 |
| 塗布6回 | 0.000 | -0.727 | -1.220 | -0.049 | -0.601 | -0.856 | -0.979 | -1.087 | -1.206 | -1.266 | -1.339 | -1.412 |
| 塗布9回 | 0.000 | -0.889 | -1.366 | 0.140 | -0.411 | -0.639 | -0.762 | -0.871 | -1.008 | -1.092 | -1.148 | -1.226 |

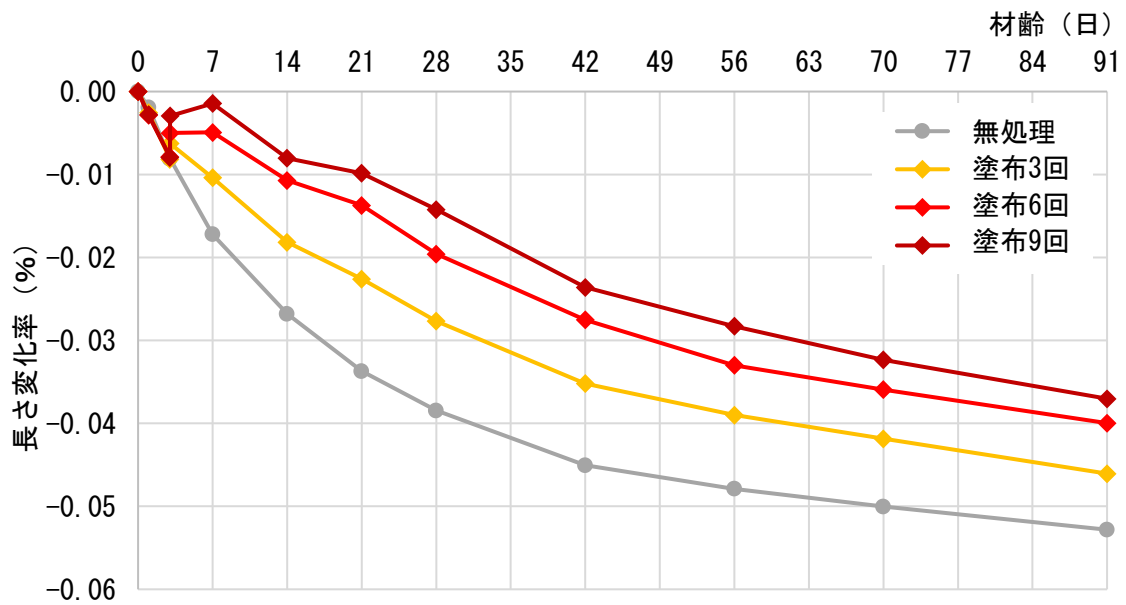


図-6.7.3 長さ変化率 (W/C=50%・塗布)

表-6.7.4 長さ変化率 (W/C=50%・塗布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |
| 塗布3回 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.006 | -0.010 | -0.018 | -0.023 | -0.028 | -0.035 | -0.039 | -0.042 | -0.046 |
| 塗布6回 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.005 | -0.005 | -0.011 | -0.014 | -0.020 | -0.028 | -0.033 | -0.036 | -0.040 |
| 塗布9回 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.003 | -0.001 | -0.008 | -0.010 | -0.014 | -0.024 | -0.028 | -0.032 | -0.037 |

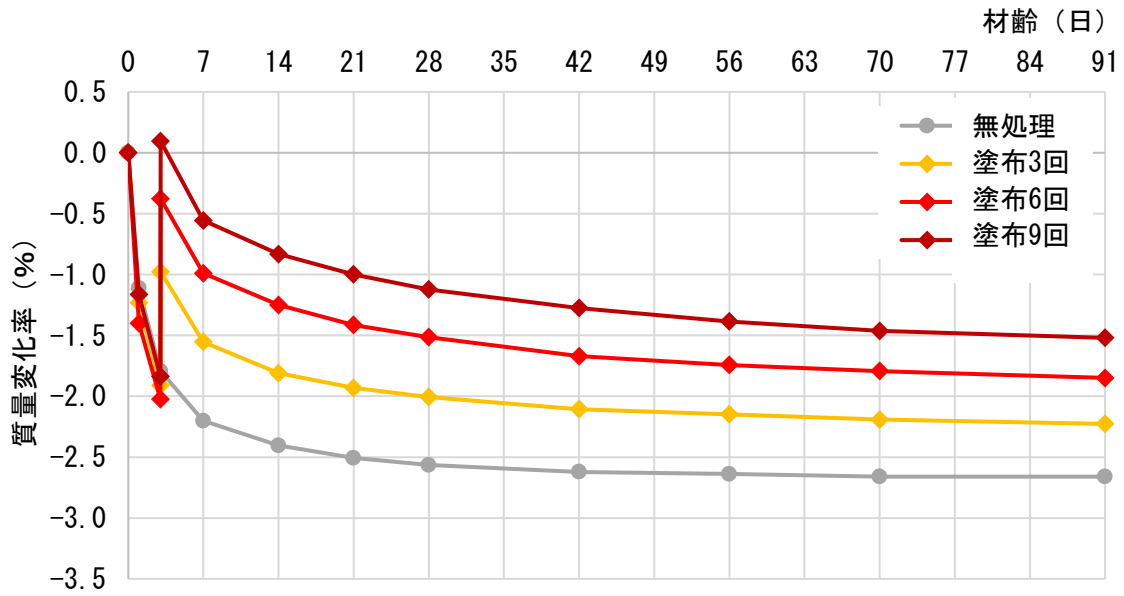


図-6.7.4 質量変化率 (W/C=50%・塗布)

表-6.7.5 質量変化率 (W/C=50%・塗布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.405 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 |
| 塗布3回 | 0.000 | -1.233 | -1.910 | -0.976 | -1.554 | -1.810 | -1.931 | -2.006 | -2.106 | -2.149 | -2.191 | -2.227 |
| 塗布6回 | 0.000 | -1.400 | -2.024 | -0.377 | -0.990 | -1.251 | -1.415 | -1.514 | -1.671 | -1.743 | -1.792 | -1.849 |
| 塗布9回 | 0.000 | -1.165 | -1.838 | 0.096 | -0.556 | -0.833 | -0.999 | -1.123 | -1.275 | -1.385 | -1.463 | -1.520 |

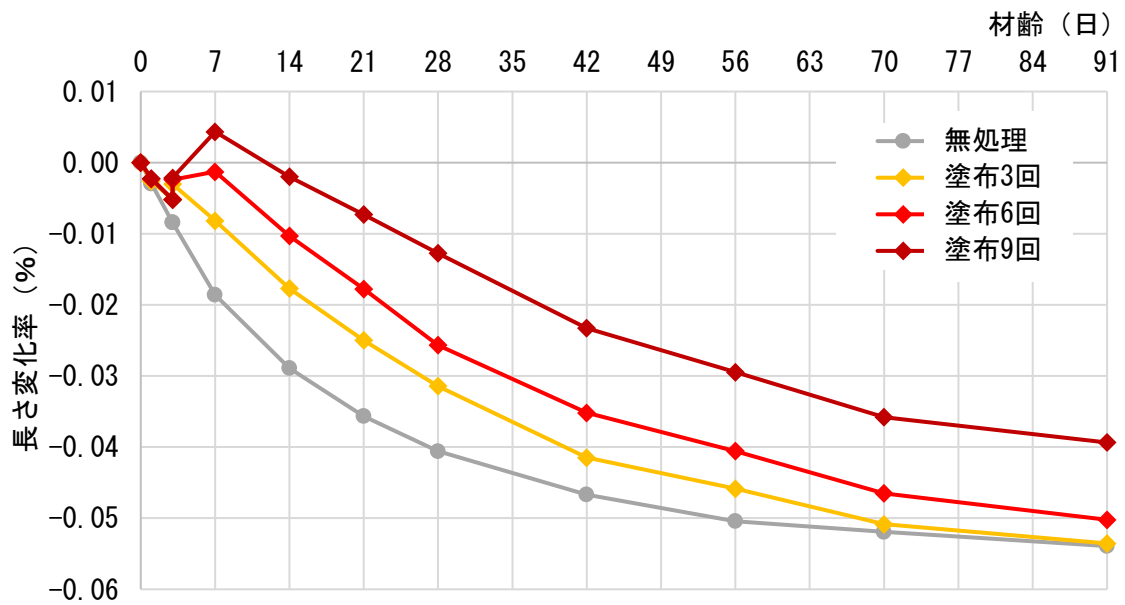


図-6.7.5 長さ変化率 (W/C=60%・塗布)

表-6.7.6 長さ変化率 (W/C=60%・塗布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.019 | -0.029 | -0.036 | -0.041 | -0.047 | -0.050 | -0.052 | -0.054 |
| 塗布3回 | 0.000 | -0.003 | -0.005 | -0.003 | -0.008 | -0.018 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.046 | -0.051 | -0.054 |
| 塗布6回 | 0.000 | -0.002 | -0.005 | -0.002 | -0.001 | -0.010 | -0.018 | -0.026 | -0.035 | -0.041 | -0.046 | -0.050 |
| 塗布9回 | 0.000 | -0.002 | -0.005 | -0.002 | 0.004 | -0.002 | -0.007 | -0.013 | -0.023 | -0.029 | -0.036 | -0.039 |

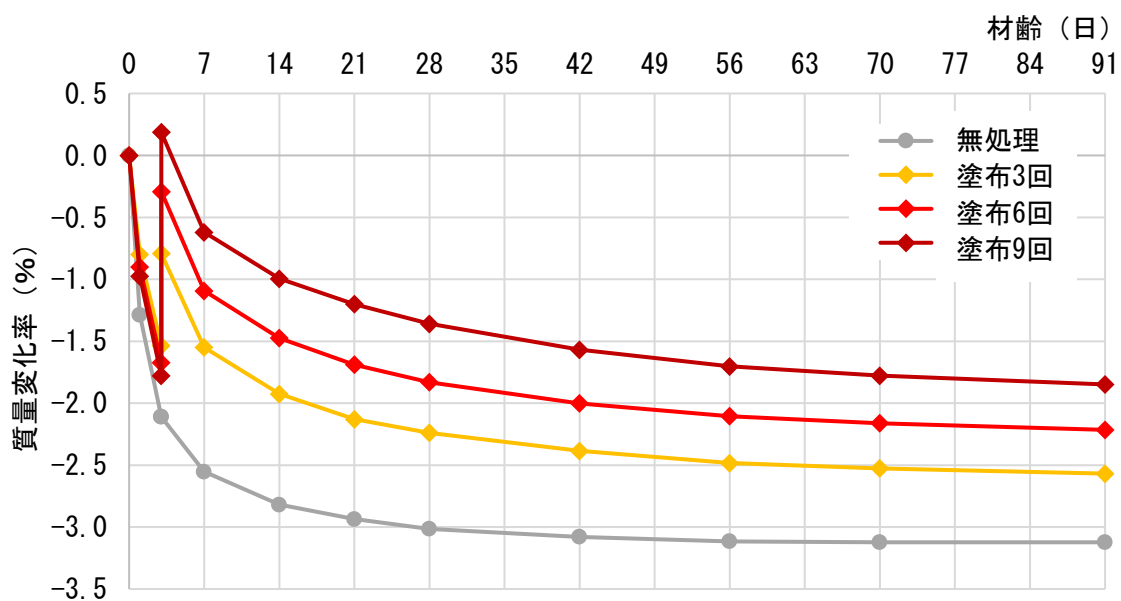


図-6.7.6 質量変化率 (W/C=60%・塗布)

表-6.7.7 質量変化率 (W/C=60%・塗布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.287 | -2.109 | -2.109 | -2.553 | -2.820 | -2.935 | -3.015 | -3.080 | -3.115 | -3.123 | -3.123 |
| 塗布3回 | 0.000 | -0.800 | -1.536 | -0.792 | -1.550 | -1.925 | -2.130 | -2.240 | -2.385 | -2.484 | -2.526 | -2.569 |
| 塗布6回 | 0.000 | -0.900 | -1.673 | -0.292 | -1.093 | -1.474 | -1.688 | -1.831 | -2.002 | -2.105 | -2.162 | -2.215 |
| 塗布9回 | 0.000 | -0.975 | -1.779 | 0.188 | -0.620 | -0.995 | -1.200 | -1.360 | -1.569 | -1.703 | -1.778 | -1.849 |

次に、尿素含有水溶液を散布した水セメント比 40%、50%、60%のコンクリートの乾燥収縮試験結果の長さ変化率をそれぞれ図-6.7.7、図-6.7.9、図-6.7.11、表-6.7.8、表-6.7.10、表-6.7.12、乾燥収縮試験結果の質量変化率をそれぞれ図-6.7.8、図-6.7.10、図-6.7.12、表-6.7.9、表-6.7.11、表-6.7.13 に示す。

図より、全ての水セメント比において浸漬、塗布と同様に尿素含有水溶液を散布することで収縮低減効果が得られることを確認できた。散布回数が増えるほど収縮低減効果は大きくなり、浸漬、塗布と同様の傾向を示した。浸漬、塗布と同様に散布回数が増えるほどコンクリート表面の空隙から内部へ浸入する水溶液量が増加し、乾燥に伴う水分の逸散により、多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し残存するため、より大きな結晶圧が作用したためと推察される。また質量変化率の図より、散布回数が増えるほど質量が維持されていることが分かる。これは、表層に含浸層が作られることや多くの結晶が生じることで、水分の出入りが抑制され、供試体内に多量の水分が保持されたためと考えられる。これより養生効果を大きく得られたことも要因と推察される。

塗布した場合と同様に、散布 3 回では収縮低減効果は小さいが、散布 6 回では全ての水セメント比においておよそ 10%の収縮低減割合を示し、十分に収縮低減効果を発揮させるには尿素水溶液の散布も 6 回以上とすることが望ましいと考えられる。

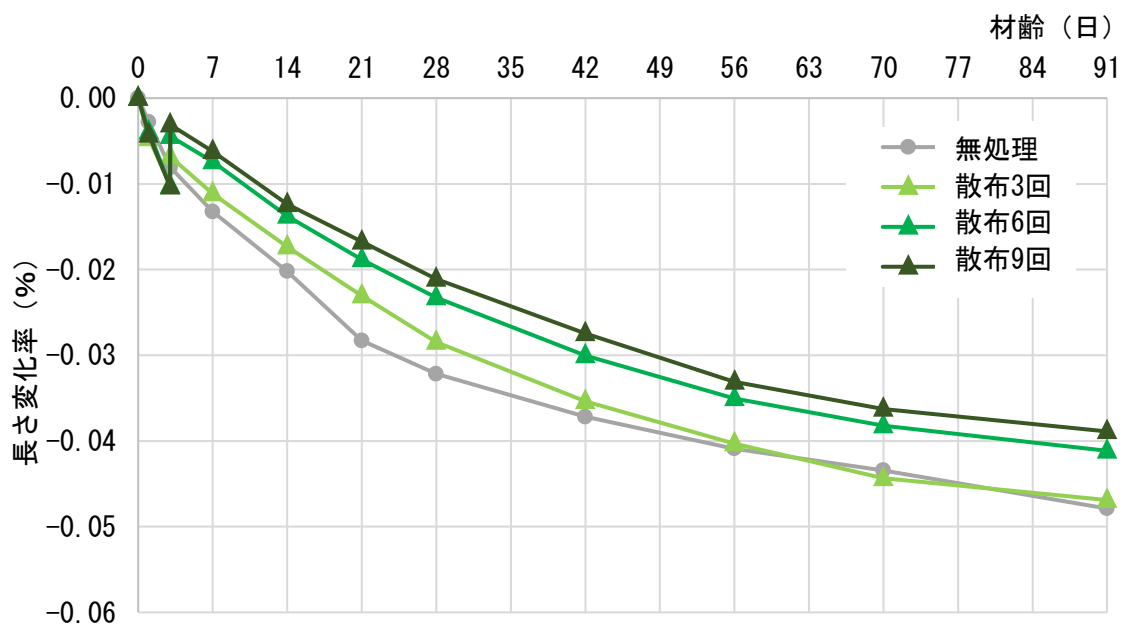


図-6.7.7 長さ変化率 (W/C=40%・散布)

表-6.7.8 長さ変化率 (W/C=40%・散布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.013 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.041 | -0.043 | -0.048 |
| 散布3回 | 0.000 | -0.005 | -0.010 | -0.007 | -0.011 | -0.017 | -0.023 | -0.028 | -0.035 | -0.040 | -0.044 | -0.047 |
| 散布6回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.004 | -0.007 | -0.014 | -0.019 | -0.023 | -0.030 | -0.035 | -0.038 | -0.041 |
| 散布9回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.003 | -0.006 | -0.012 | -0.017 | -0.021 | -0.027 | -0.033 | -0.036 | -0.039 |

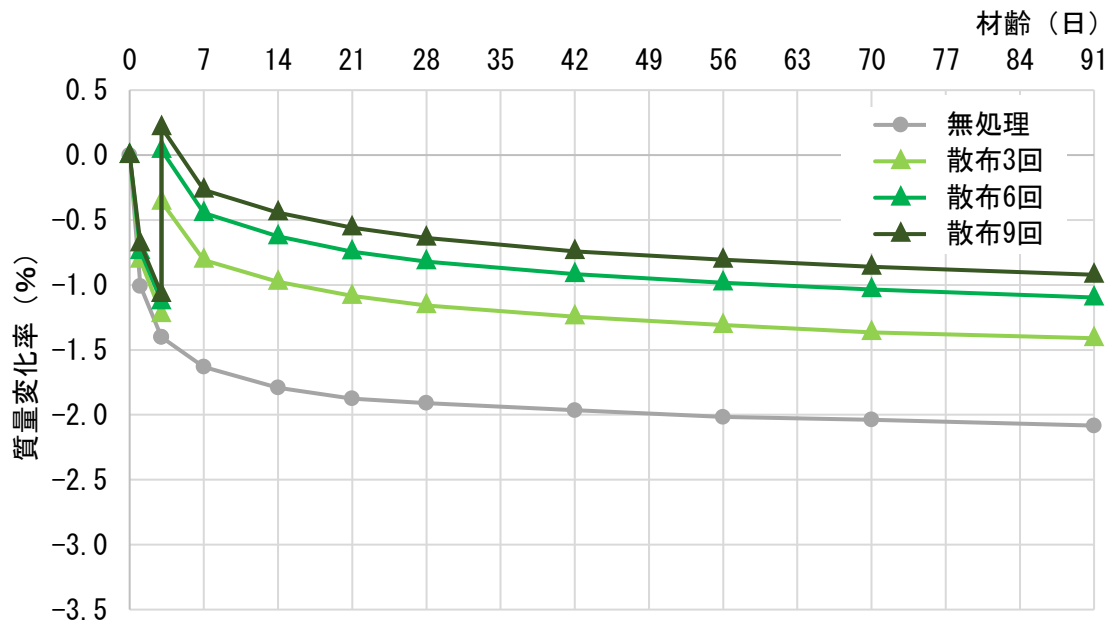


図-6.7.8 質量変化率 (W/C=40%・散布)

表-6.7.9 質量変化率 (W/C=40%・散布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |
| 散布3回 | 0.000 | -0.807 | -1.227 | -0.360 | -0.807 | -0.977 | -1.085 | -1.157 | -1.244 | -1.310 | -1.365 | -1.410 |
| 散布6回 | 0.000 | -0.741 | -1.128 | 0.038 | -0.446 | -0.626 | -0.744 | -0.820 | -0.917 | -0.983 | -1.035 | -1.097 |
| 散布9回 | 0.000 | -0.682 | -1.070 | 0.213 | -0.267 | -0.442 | -0.559 | -0.638 | -0.741 | -0.806 | -0.861 | -0.923 |

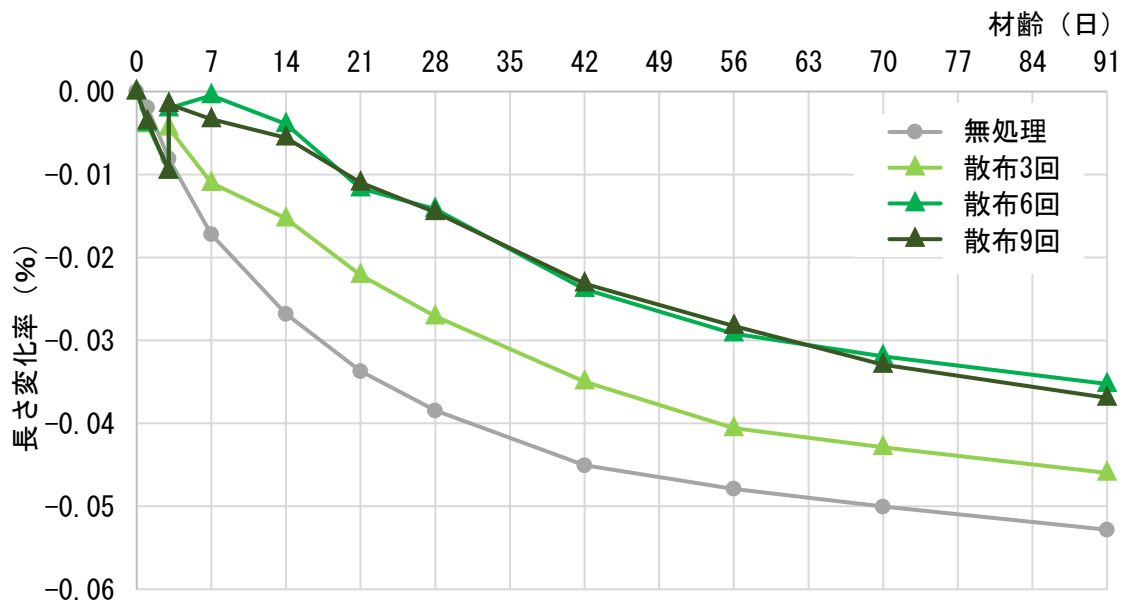


図-6.7.9 長さ変化率 (W/C=50%・散布)

表-6.7.10 長さ変化率 (W/C=50%・散布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |
| 散布3回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.004 | -0.011 | -0.015 | -0.022 | -0.027 | -0.035 | -0.041 | -0.043 | -0.046 |
| 散布6回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.002 | 0.000 | -0.004 | -0.012 | -0.014 | -0.024 | -0.029 | -0.032 | -0.035 |
| 散布9回 | 0.000 | -0.004 | -0.010 | -0.002 | -0.003 | -0.006 | -0.011 | -0.015 | -0.023 | -0.028 | -0.033 | -0.037 |

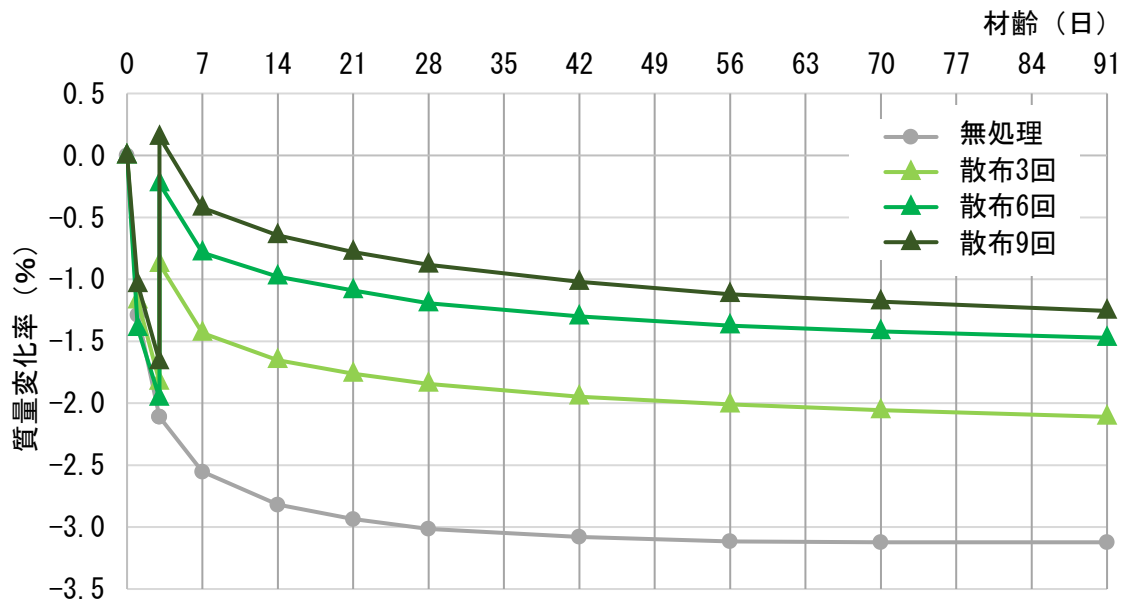


図-6.7.10 質量変化率 (W/C=50%・散布)

表-6.7.11 質量変化率 (W/C=50%・散布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.405 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 |
| 散布3回 | 0.000 | -1.171 | -1.827 | -0.876 | -1.433 | -1.653 | -1.763 | -1.844 | -1.947 | -2.011 | -2.057 | -2.110 |
| 散布6回 | 0.000 | -1.394 | -1.957 | -0.226 | -0.784 | -0.979 | -1.089 | -1.194 | -1.299 | -1.373 | -1.420 | -1.473 |
| 散布9回 | 0.000 | -1.039 | -1.662 | 0.149 | -0.422 | -0.645 | -0.780 | -0.883 | -1.021 | -1.120 | -1.180 | -1.255 |

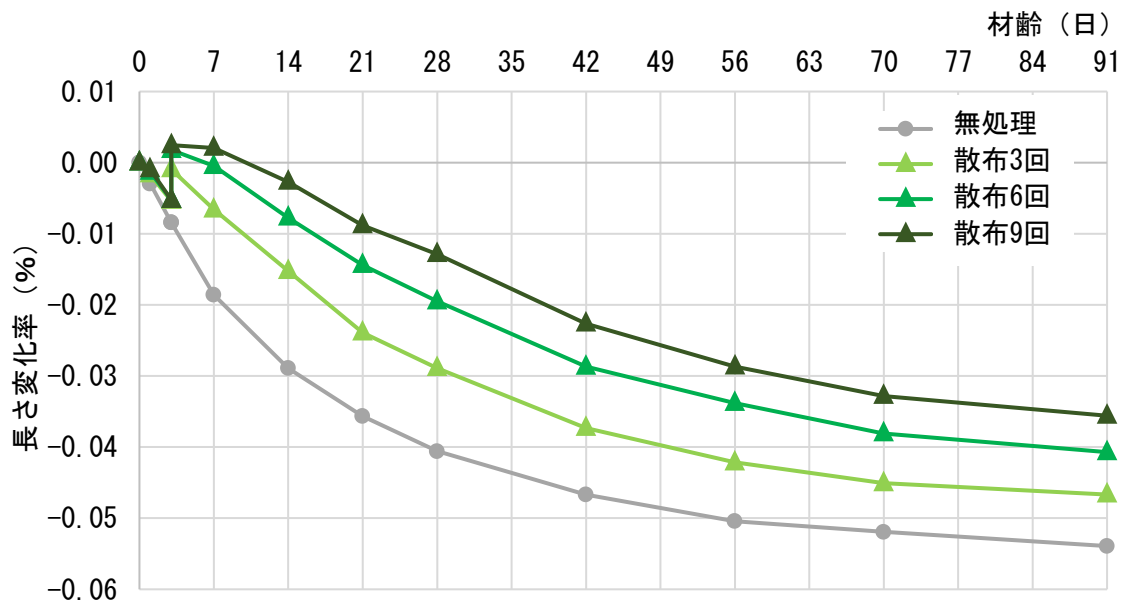


図-6.7.11 長さ変化率 (W/C=60%・散布)

表-6.7.12 長さ変化率 (W/C=60%・散布)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.019 | -0.029 | -0.036 | -0.041 | -0.047 | -0.050 | -0.052 | -0.054 |
| 散布3回 | 0.000 | -0.002 | -0.005 | -0.001 | -0.007 | -0.015 | -0.024 | -0.029 | -0.037 | -0.042 | -0.045 | -0.047 |
| 散布6回 | 0.000 | -0.001 | -0.005 | 0.002 | 0.000 | -0.008 | -0.014 | -0.020 | -0.029 | -0.034 | -0.038 | -0.041 |
| 散布9回 | 0.000 | -0.001 | -0.005 | 0.002 | 0.002 | -0.003 | -0.009 | -0.013 | -0.023 | -0.029 | -0.033 | -0.036 |

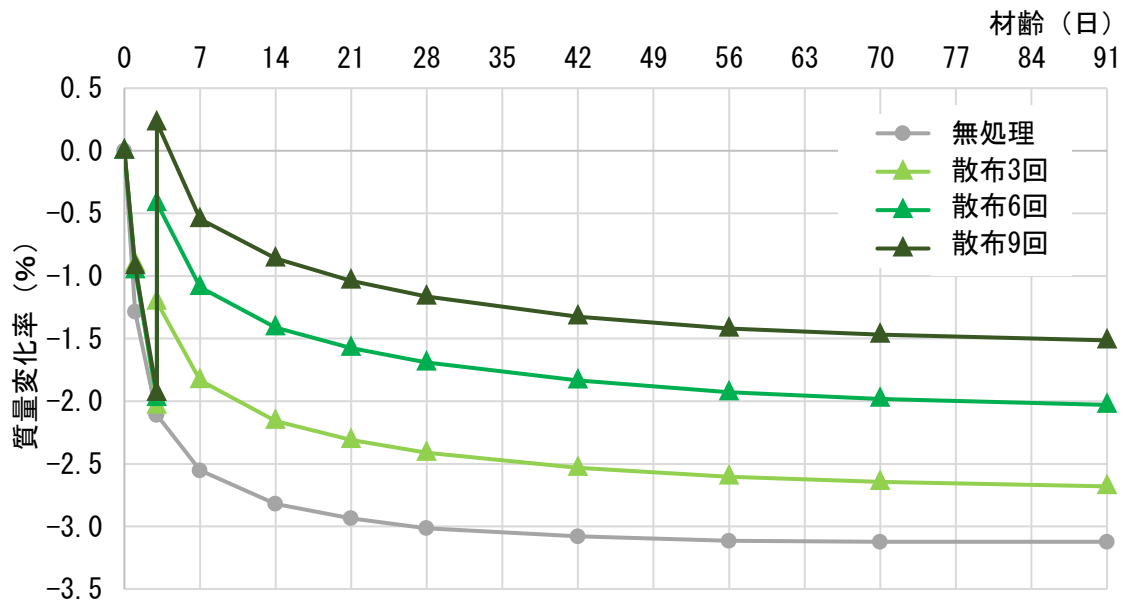


図-6.7.12 質量変化率 (W/C=60%・散布)

表-6.7.13 質量変化率 (W/C=60%・散布)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0.000 | -1.287 | -2.109 | -2.109 | -2.553 | -2.820 | -2.935 | -3.015 | -3.080 | -3.115 | -3.123 | -3.123 |
| 散布3回 | 0.000 | -0.902 | -2.038 | -1.206 | -1.834 | -2.158 | -2.310 | -2.412 | -2.532 | -2.603 | -2.645 | -2.680 |
| 散布6回 | 0.000 | -0.956 | -1.976 | -0.418 | -1.089 | -1.411 | -1.575 | -1.692 | -1.834 | -1.929 | -1.982 | -2.030 |
| 散布9回 | 0.000 | -0.923 | -1.936 | 0.226 | -0.546 | -0.861 | -1.038 | -1.165 | -1.324 | -1.420 | -1.470 | -1.516 |

また、水セメント比 50%の尿素含有水溶液に浸漬、塗布および散布したものについて式(6.7.1)を用い、脱型後材齢 91 日における乾燥収縮低減率をを表-6.7.14、図-6.7.13 に示す。図-6.7.13 において、浸漬と塗布、散布の含浸方法を比較した際に、塗布または散布方法で水溶液の含浸を行った方が、収縮低減効果が大きく発現することがわかった。

4.3 節のコンクリートにおける尿素水溶液浸漬または塗布した場合の浸透深度の結果を表-6.7.15 に示す。表より、塗布における含浸が、浸漬と比較し大きく収縮低減効果を発現したのは、塗布した場合の尿素水溶液の浸透深度が深くなったため、最終的に浸入した尿素が供試体のより深い空隙内に結晶化したためと推察される。

散布が浸漬と比較し大きく収縮低減効果を発現したのは、散布用の霧吹きから吹かれた水溶液の粒子は小さいため、供試体表面の小さい空隙に入りやすくなることで、最終的に尿素が硬化体の微細な空隙に結晶し、供試体の緻密化をもたらしたためと考えられる。

$$\left\{ 1 - \frac{\text{(水溶液を含浸した場合の長さ変化率)}}{\text{(無処理の長さ変化率)}} \right\} \times 100 \quad (6.7.1)$$

表-6.7.14 材齢 91 日における水溶液含浸による乾燥収縮低減率 (W/C=50%)

| | 1分または3回 | 10分または6回 | 30分または9回 |
|----|---------|----------|----------|
| 浸漬 | 7% | 16% | 28% |
| 塗布 | 16% | 22% | 33% |
| 散布 | 13% | 33% | 30% |

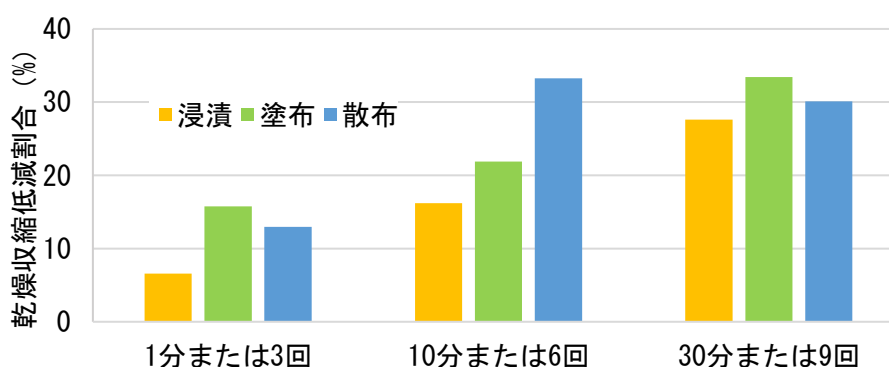


図-6.7.13 材齢 91 日における水溶液含浸による乾燥収縮低減率 (W/C=50%)

表-6.7.15 コンクリートにおける尿素水溶液の浸透深度 (W/C=50%)

| | 1分または3回 | 10分または6回 | 30分または9回 |
|----|---------|----------|----------|
| 浸漬 | 2.97mm | 4.07mm | 7.12mm |
| 塗布 | 4.99mm | 7.78mm | 9.98mm |

6.8 まとめ

本章では尿素含有水溶液を塗布および散布した場合のコンクリートの基本性状について調べ、以下の試験結果と知見を得た。

・乾燥収縮試験

尿素含有水溶液を塗布および散布することで、乾燥収縮低減効果が認められた。また、塗布および散布回数を増加することで多くの水溶液が含浸し、収縮低減効果が高くなった。これは浸漬の場合と同様に、尿素が再結晶化することにより、その結晶圧および尿素的保水効果が作用したためと考えられる。また、浸漬、塗布、散布を比較すると塗布と散布は浸漬に比べ収縮低減効果を大きく得ることができた。

以上の結果より、現場において塗布もしくは散布方法で尿素水溶液の含浸を行うことが望ましいと考えられる。

【参考文献】

- 1)後藤孝治・魚本健人：ポルトランドセメントペースト硬化体の強度発現機構に関する研究、コンクリート工学論文集、No.5、Vol.1、pp.109-117、1994

第7章

尿素水溶液による乾燥収縮低減工法の 問題点とその改善策の検討

目次

| | |
|---|-----|
| 7.1 概論..... | 101 |
| 7.2 雨水による尿素的溶出問題の対策..... | 101 |
| 7.2.1 尿素的溶出の有無の確認試験..... | 101 |
| 7.2.2 尿素水溶液に硫酸ナトリウムを混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果の持続能力..... | 104 |
| 7.2.3 尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力..... | 126 |
| 7.2.4 再乾燥試験における硫酸ナトリウムによる尿素的溶出の抑制作用の有無の検討..... | 144 |
| 7.2.5 尿素水溶液に珪酸ナトリウムを混合した場合のコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力..... | 150 |
| 7.3 尿素水溶液の寒冷環境での使用..... | 156 |
| 7.3.1 不凍液の混合による尿素的結晶温度の変化の確認試験..... | 156 |
| 7.3.2 尿素水溶液に不凍液を混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 158 |
| 7.3.3 主成分の異なる不凍液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 163 |
| 7.3.4 寒冷環境での施工を考慮した不凍液混合水溶液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果..... | 170 |
| 7.3.5 尿素と不凍液の混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果.... | 174 |
| 7.4 まとめ..... | 184 |
| 【参考文献】..... | 185 |

第7章 尿素水溶液による乾燥収縮低減工法の問題点とその改善策の検討

7.1 概論

前章では、コンクリート硬化体に尿素水溶液を塗布および散布することにより乾燥収縮の低減が確認できた。したがって、尿素水溶液含浸による乾燥収縮低減方法は実施工に適用できる可能性があることが認められた。しかし、材齢経過後の供試体を水に浸漬し、雨水の模擬実験として収縮低減効果の変化を確認したところ、水への浸漬を繰り返す度に収縮低減効果の減少が確認され、含浸した尿素的の溶出が認められた。また、尿素水溶液は温度が低下すると溶解度が下がるため、水に溶けていた尿素が低温環境ではコンクリート内部に浸透する前に再び結晶化し析出するため、寒冷時の使用に適していない。

以上より、本章では尿素水溶液を含浸した材齢経過後のコンクリート供試体を繰り返し水に浸漬した場合における収縮低減効果維持の対策について検討した。また、不凍液が持つ耐低温性能および耐凍結性能について着目し、不凍液を尿素水溶液に添加することで尿素が浸透する前に結晶化して析出することを抑制することにより、寒冷時での使用可能性について検討した。

7.2 雨水による尿素的の溶出問題の対策

7.2.1 尿素的溶出の有無の確認試験

1) 試験目的

尿素水溶液を含浸させることによりコンクリートの収縮低減効果が確認できたが、水に容易に溶ける尿素的が雨水に濡れることにより再溶解し、外部へ溶出しやすいことを考え、乾燥収縮試験終了後のモルタル供試体を水に浸漬し、乾燥収縮低減効果の変化を確認した。

2) 試験方法

実験条件は表-7.2.1に示すように、3.2.1節で乾燥収縮試験を行った水セメント比50%のモルタル供試体を用い、乾燥材齢91日目および118日目に水に浸漬し、再び乾燥状態として182日まで長さ変化を測定した。

3) 試験結果

長さ変化率および質量変化率の推移について図-7.2.1、図-7.2.2、表-7.2.2および表-7.2.3に示す。水に2度浸漬した後は乾燥収縮低減効果が減少する傾向が認められた。これは水に浸漬することで浸透した尿素的が溶出したためと考えられる。

表-7.2.1 乾燥収縮試験後、水に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 3日目の浸漬液 | 浸漬時間 | 91 および 118 日目の処理 | 記号 |
|---------|----------|------|------------------|--------------|
| 50 | 無処理 | —— | —— | 50%N |
| | 50%尿素水溶液 | 1分 | 水に1時間浸漬 | 50%尿素 50%1分 |
| | | 10分 | | 50%尿素 50%10分 |
| | | 30分 | | 50%尿素 50%30分 |

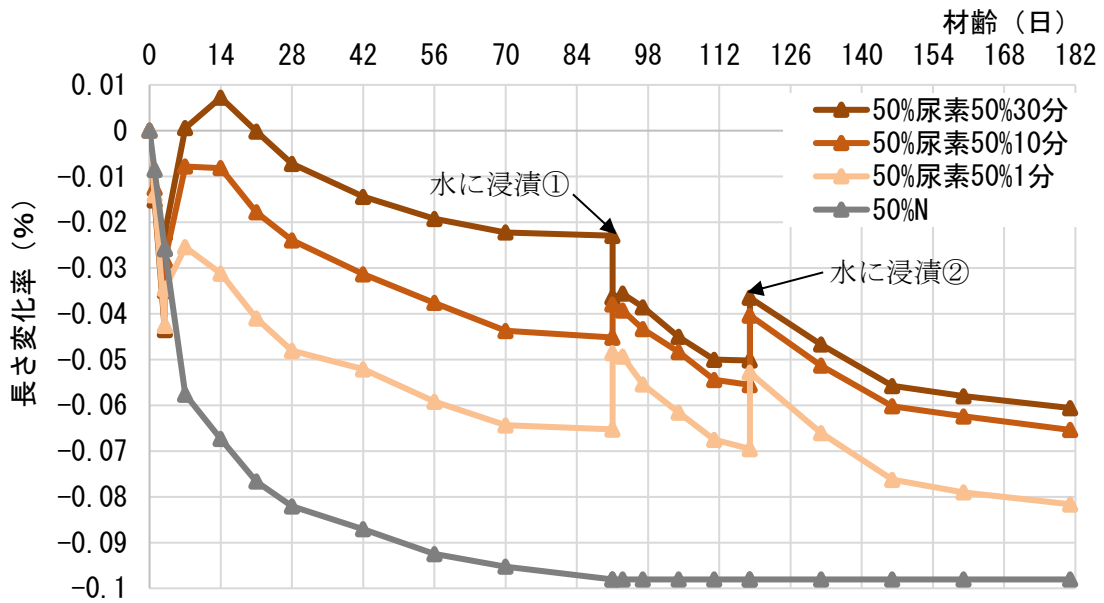


図-7.2.1 水に2度浸漬した場合の長さ変化率の変化

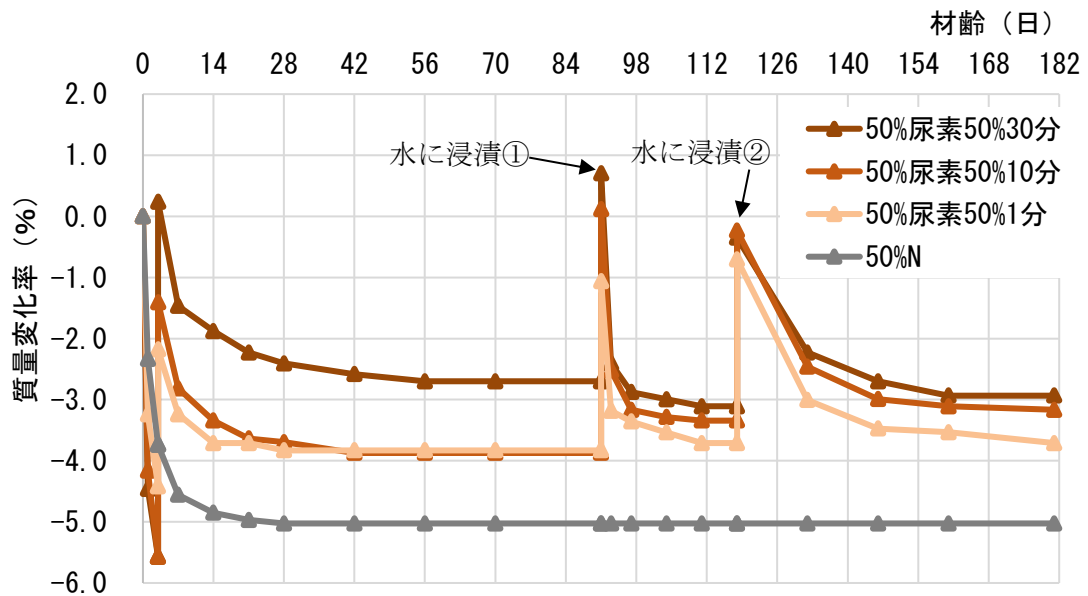


図-7.2.2 水に2度浸漬した場合の質量変化率の変化

表-7.2.2 水に2度浸漬した場合の長さ変化率の変化

| 供試体名 | 長さ変化率(%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日前 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -0.015 | -0.044 | -0.022 | 0.001 | 0.007 | -0.000 | -0.007 | -0.014 | -0.019 | -0.022 | -0.023 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -0.013 | -0.035 | -0.028 | -0.008 | -0.008 | -0.018 | -0.024 | -0.031 | -0.038 | -0.044 | -0.045 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.059 | -0.064 | -0.065 |
| N | 0 | -0.008 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.095 | -0.098 |

| | 水に浸漬② → 水に浸漬① | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | 91日後 | 93日 | 97日 | 104日 | 111日 | 118日前 | 118日後 | 132日 | 146日 | 160日 | 181日 | |
| 尿素 50%30分 | -0.037 | -0.036 | -0.039 | 0.045 | 0.050 | -0.050 | -0.037 | -0.047 | -0.056 | -0.058 | -0.061 | |
| 尿素 50%10分 | -0.037 | -0.039 | -0.043 | -0.048 | -0.054 | -0.056 | -0.040 | -0.051 | -0.060 | -0.062 | -0.065 | |
| 尿素 50%1分 | -0.048 | -0.049 | -0.055 | -0.062 | -0.068 | -0.070 | -0.053 | -0.066 | -0.076 | -0.079 | -0.082 | |
| N | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | -0.098 | |

表-7.2.3 水に2度浸漬した場合の質量変化率の変化

| 供試体名 | 質量変化率(%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日前 |
| 尿素 50%30分 | 0 | -4.460 | -5.575 | 0.235 | -1.467 | -1.878 | -2.230 | -2.406 | -2.582 | -2.700 | -2.700 | -2.700 |
| 尿素 50%10分 | 0 | -4.164 | -5.572 | -1.408 | -2.815 | -3.343 | -3.637 | -3.695 | -3.871 | -3.871 | -3.871 | -3.871 |
| 尿素 50%1分 | 0 | -3.239 | -4.419 | -2.180 | -3.241 | -3.712 | -3.712 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 |
| N | 0 | -2.337 | -3.740 | -3.740 | -4.558 | -4.851 | -4.968 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 |

| | 水に浸漬② → 水に浸漬① | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | 91日後 | 93日 | 97日 | 104日 | 111日 | 118日前 | 118日後 | 132日 | 146日 | 160日 | 181日 | |
| 尿素 50%30分 | 0.7045 | -2.406 | -2.875 | -2.933 | -3.110 | -3.110 | -0.352 | -2.230 | -2.700 | -2.934 | -2.934 | |
| 尿素 50%10分 | 0.118 | -2.523 | -3.167 | -3.284 | -3.343 | -3.343 | -0.235 | -2.463 | -2.991 | -3.108 | -3.167 | |
| 尿素 50%1分 | -1.060 | -3.181 | -3.358 | -3.535 | -3.712 | -3.712 | -0.708 | -3.007 | -3.474 | -3.534 | -3.711 | |
| N | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | |

7.2.2 尿素水溶液に硫酸ナトリウムを混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果の持続能力

1) 概論

本節では、尿素水溶液に硫酸ナトリウムを添加し、硫酸ナトリウムが未反応のセメントと反応することで、水への浸漬を繰り返し行った場合においても含浸した尿素が溶出しない収縮低減材料の開発を試みた。ここでは、水への浸漬による尿素的溶出を防ぐため、尿素水溶液に硫酸ナトリウムを加えた混合水溶液をモルタルに含浸させ、乾燥および乾燥湿潤繰り返しによる長さ変化を測定し、その効果を調べた。

2) 使用材料

本節で使用した材料を表-7.2.4に示す。尿素は市販の工業用を使用し、質量比で濃度50%となるように試験前に水道水に溶解させ水溶液とした。硫酸ナトリウムは質量比で濃度10%となるように水道水に溶解させ水溶液とした。また、硫酸ナトリウムと尿素的の混合使用についても同様に、尿素と硫酸ナトリウムを水に質量比で尿素45%、および硫酸ナトリウム5%の割合で溶解させた混合水溶液とした。

表-7.2.4 使用材料

| 種類 | 名称 | 記号 | 密度 (g/cm ³) |
|-----------|------------------------------------|----|-------------------------|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 練混水 | 宇都宮市水道水 | W | 1.00 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.56 |
| 化学系 材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 硫酸ナトリウム (試薬) | Na | 2.68 |

3) 配合条件

本研究で用いたモルタルの計画配合を表-7.2.5に示す。水セメント比は40%、50%、60%とした。目標フレッシュ性状は、15打フロー200±10mm、空気量2.0±1.5%とした。

表-7.2.5 計画配合

| W/C (%) | S/C | 単位量 (kg/m ³) | | |
|------------|-----|--------------------------|-----|------|
| | | W | C | S |
| 40 | 1.2 | 334 | 835 | 1001 |
| 50 | 1.7 | 335 | 670 | 1140 |
| 60 | 2.4 | 321 | 535 | 1286 |

4) 練混ぜ手順

第3章、3.2.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

第3章、3.2.4節と同様とした。

また、本試験は先に硫酸ナトリウム水溶液にモルタル供試体を浸漬した場合における乾燥収縮試験を行い、硫酸ナトリウムにより乾燥収縮低減効果への影響を検討した。実験条件を表-7.2.6に示す。供試体は乾燥開始から3日目に硫酸ナトリウム水溶液に浸漬し、28日まで長さ変化を測定し、28日から91日まで週に1回水に1時間浸漬し、その前後の長さを測定した。

次に、モルタル硬化体を尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬した場合における実験条件を表-7.2.7に示す。尿素と硫酸ナトリウムを水に質量比で尿素45%、および硫酸ナトリウム5%の割合で溶解させた混合水溶液に、モルタル供試体を浸漬した場合における乾燥収縮試験を行った。供試体は乾燥開始から3日目に混合水溶液に浸漬し、28日まで乾燥収縮を測定し、28日から91日まで週に1回水に1時間浸漬し、その前後に長さを測定した。脱型後0日から91日まで乾燥収縮試験を行った。

表-7.2.6 芒硝水溶液に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 W/C-浸漬液-時間 | |
|-------------|-------------|----------|------------------|---------|
| 40 | 無し | — | 40%N | |
| | 水 | 1 | 40%水 1分 | |
| | | | 40%芒硝 1分 | |
| 50 | 無し | — | 50%N | |
| | 水 | 1 | 50%水 1分 | |
| | | 10 | 50%水 10分 | |
| | | 30 | 50%水 30分 | |
| | 硫酸ナトリウム 10% | 1 | 50%芒硝 1分 | |
| | | 10 | 50%芒硝 10分 | |
| | | 30 | 50%芒硝 30分 | |
| | 60 | 無し | — | 60%N |
| | | 水 | 1 | 60%水 1分 |
| 硫酸ナトリウム 10% | | | 60%芒硝 1分 | |

表-7.2.7 尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 W/C-浸漬液-時間 |
|---------|-------|-----------|------------------|
| 40 | 無し | — | 40%-N |
| | 水 | 1 | 40%水 1分 |
| | 混合水溶液 | | 40%Mix1分 |
| 50 | 無し | — | 50%-N |
| | 水 | 1 | 50%水 1分 |
| | | 10 | 50%水 10分 |
| | | 30 | 50%水 30分 |
| | 混合水溶液 | 1 | 50%Mix1分 |
| | | 10 | 50%Mix10分 |
| 30 | | 50%Mix30分 | |
| 60 | 無し | — | 60%-N |
| | 水 | 1 | 60%水 1分 |
| | 混合水溶液 | | 60% Mix1分 |

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果を表-7.2.8に示す。いずれの水セメント比についても、目標値を満たした。

表-7.2.8 フレッシュ性状試験結果
(目標値、空気量 2.0±1.5%、15打フロー200±10mm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | 15打フロー (mm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-------------|---------|
| 40 | 2.3 | 195 | 17 |
| 50 | 2.1 | 205 | 16 |
| 60 | 2.2 | 200 | 16 |

②圧縮強度試験

混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度の試験結果を図-7.2.3、表-7.2.9に示す。図より、混合水溶液への浸漬時間が長いほど、圧縮強度が高くなった。これは、尿素水溶液に浸漬した場合と同様の要因により、浸漬時間が長いほど、供試体表面の空隙から供試体内部へ浸入した混合水溶液が増加し、再結晶化する尿素が多くなるため圧縮強度が大きくなったと考えられる。

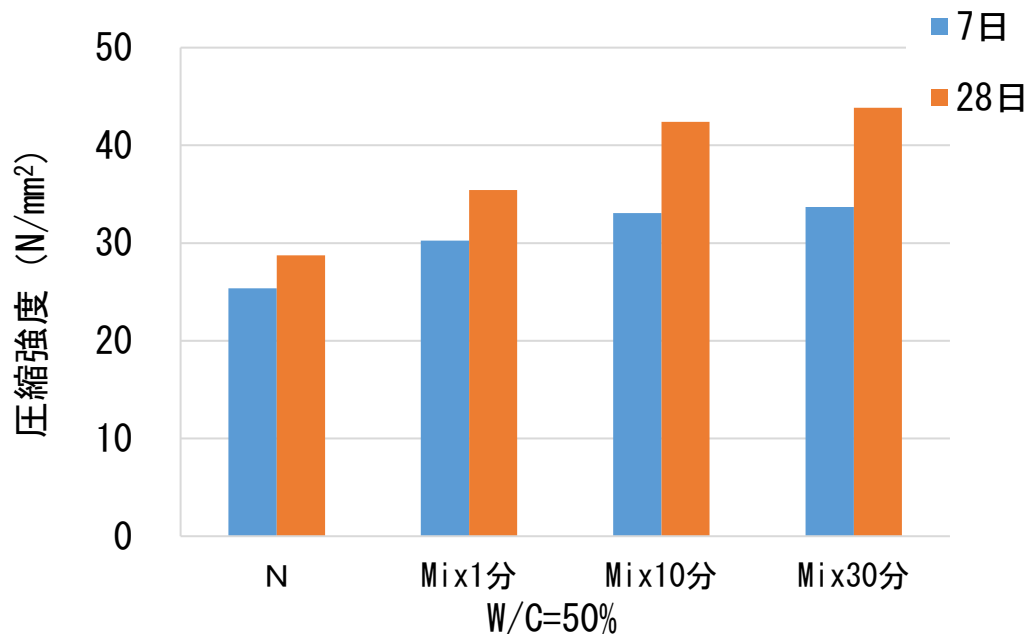


図-7.2.3 混合水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果

表-7.2.9 混合水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果

| W/C (%) | 浸漬液-時間 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|---------|--------|---------------------------|------|
| | | 7日 | 28日 |
| 50% | 無し | 25.4 | 28.8 |
| | Mix1分 | 30.3 | 35.4 |
| | Mix10分 | 33.1 | 42.4 |
| | Mix30分 | 33.7 | 43.8 |

③硫酸ナトリウム水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮試験結果

水セメント比による硫酸ナトリウム溶液に浸漬した場合における比較結果を図-7.2.4、図-7.2.5、表-7.2.10 および表-7.2.11 に示す。図より、硫酸ナトリウム溶液を含浸させたモルタルにおいて収縮低減効果は認められなかった。

モルタルの水セメント比 50%において浸漬時間を 1、10、30 分の 3 水準に変化させた場合における長さ変化率および質量変化率の推移について図-7.2.6、図-7.2.7、表-7.2.12 および表-7.2.13 に示す。図より、浸漬液が硫酸ナトリウム 10%溶液の場合には、浸漬液が水のみの場合と同様に、浸漬時間を 10 分、30 分と長くしてもその影響はほとんど現れなかった。

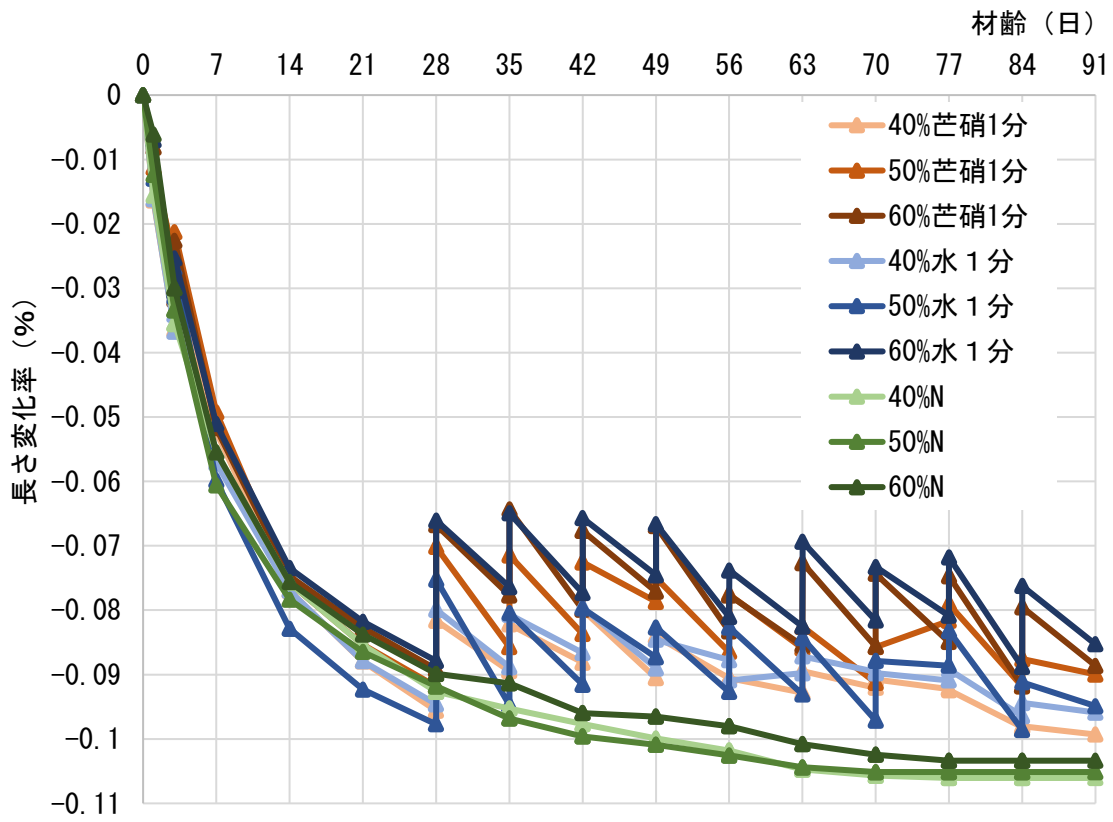


図-7.2.4 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

表-7.2.10 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

| 供試体名 | 長さ変化率(%) | | | | | | | |
|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 40%芒硝1分 | 0 | -0.016 | -0.036 | -0.052 | -0.077 | -0.088 | -0.096 | -0.089 |
| | | | -0.030 | | | | -0.082 | -0.082 |
| 50%芒硝1分 | 0 | -0.011 | -0.025 | -0.049 | -0.076 | -0.085 | -0.092 | -0.086 |
| | | | -0.021 | | | | -0.070 | -0.071 |
| 60%芒硝1分 | 0 | -0.008 | -0.032 | -0.052 | -0.075 | -0.083 | -0.089 | -0.078 |
| | | | -0.023 | | | | -0.067 | -0.064 |
| 40%水1分 | 0 | -0.016 | -0.037 | -0.057 | -0.077 | -0.088 | -0.095 | -0.089 |
| | | | -0.034 | | | | -0.080 | -0.081 |
| 50%水1分 | 0 | -0.013 | -0.031 | -0.060 | -0.083 | -0.092 | -0.098 | -0.095 |
| | | | -0.027 | | | | -0.075 | -0.080 |
| 60%水1分 | 0 | -0.007 | -0.031 | -0.051 | -0.073 | -0.082 | -0.088 | -0.076 |
| | | | -0.025 | | | | -0.066 | -0.065 |
| 40%N | 0 | -0.016 | -0.036 | -0.055 | -0.076 | -0.085 | -0.093 | -0.095 |
| 50%N | 0 | -0.012 | -0.033 | -0.061 | -0.078 | -0.086 | -0.092 | -0.097 |
| 60%N | 0 | -0.006 | -0.030 | -0.055 | -0.076 | -0.084 | -0.090 | -0.091 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 40%芒硝1分 | -0.088 | -0.091 | -0.091 | -0.093 | -0.092 | -0.092 | -0.098 | -0.099 |
| | -0.080 | -0.084 | -0.091 | -0.089 | -0.091 | -0.092 | -0.098 | |
| 50%芒硝1分 | -0.084 | -0.079 | -0.086 | -0.086 | -0.091 | -0.082 | -0.092 | -0.090 |
| | -0.073 | -0.075 | -0.078 | -0.083 | -0.086 | -0.079 | -0.088 | |
| 60%芒硝1分 | -0.080 | -0.077 | -0.083 | -0.085 | -0.086 | -0.085 | -0.092 | -0.089 |
| | -0.068 | -0.067 | -0.078 | -0.073 | -0.074 | -0.074 | -0.080 | |
| 40%水1分 | -0.088 | -0.089 | -0.088 | -0.090 | -0.090 | -0.091 | -0.096 | -0.096 |
| | -0.080 | -0.085 | -0.091 | -0.087 | -0.090 | -0.089 | -0.094 | |
| 50%水1分 | -0.092 | -0.087 | -0.093 | -0.093 | -0.097 | -0.089 | -0.099 | -0.095 |
| | -0.080 | -0.083 | -0.083 | -0.084 | -0.088 | -0.083 | -0.092 | |
| 60%水1分 | -0.077 | -0.075 | -0.081 | -0.083 | -0.082 | -0.081 | -0.089 | -0.085 |
| | -0.066 | -0.067 | -0.074 | -0.069 | -0.073 | -0.072 | -0.076 | |
| 40%N | -0.098 | -0.100 | -0.102 | -0.105 | -0.106 | -0.106 | -0.106 | -0.106 |
| 50%N | -0.100 | -0.101 | -0.103 | -0.104 | -0.105 | -0.105 | -0.105 | -0.105 |
| 60%N | -0.096 | -0.097 | -0.098 | -0.101 | -0.101 | -0.103 | -0.103 | -0.103 |

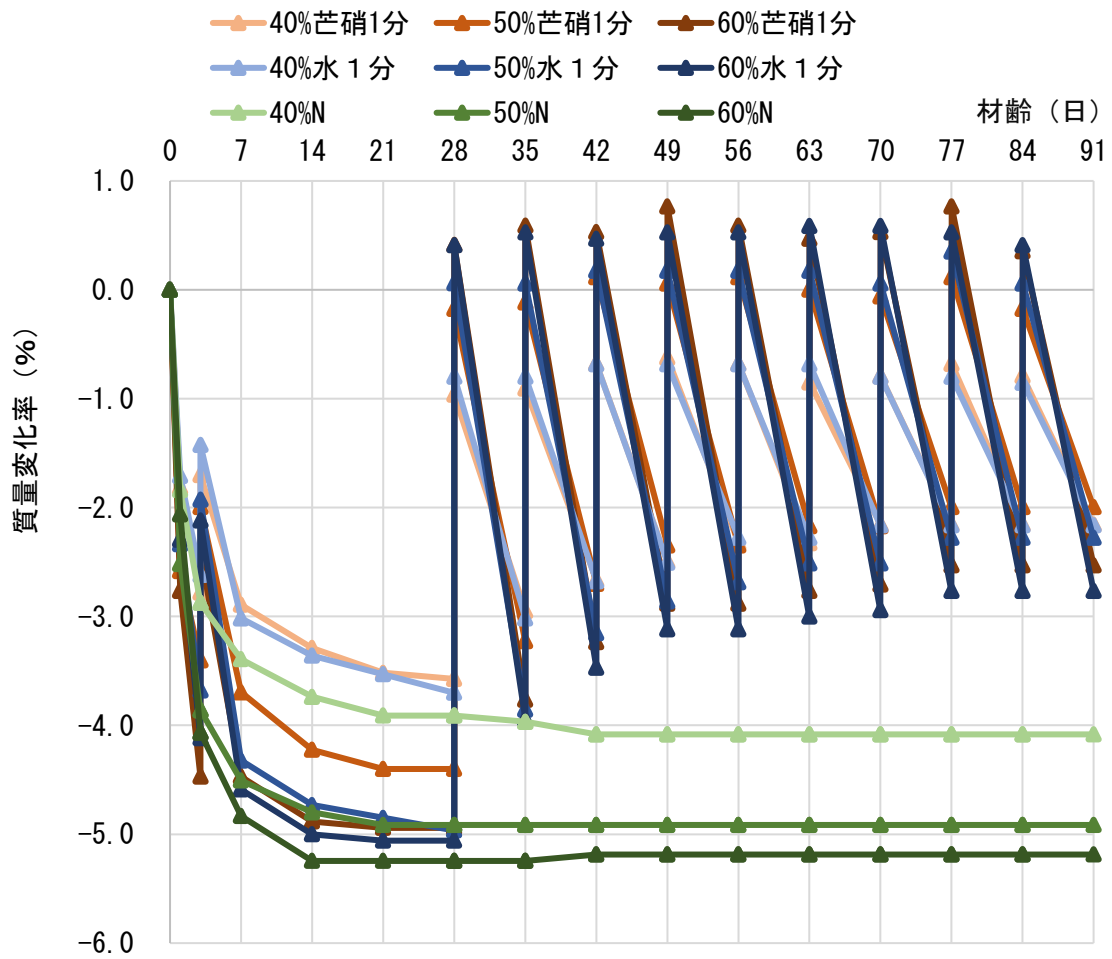


図-7.2.5 水セメント比の違いと質量変化率の関係

表-7.2.11 水セメント比の違いと質量変化率の関係

| 供試体名 | 質量変化率(%) | | | | | | | |
|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 40%芒硝1分 | 0 | -1.815 | -2.779 | -2.893 | -3.290 | -3.517 | -3.574 | -2.949 |
| | | | -1.702 | | | | -0.964 | -0.907 |
| 50%芒硝1分 | 0 | -2.582 | -3.404 | -3.697 | -4.225 | -4.401 | -4.401 | -3.228 |
| | | | -1.995 | | | | -0.176 | -0.117 |
| 60%芒硝1分 | 0 | -2.765 | -4.471 | -4.471 | -4.883 | -4.942 | -4.492 | -3.765 |
| | | | -2.413 | | | | 0.412 | 0.588 |
| 40%水1分 | 0 | -1.708 | -2.620 | -3.018 | -3.360 | -3.531 | -3.702 | -3.018 |
| | | | -1.423 | | | | -0.797 | -0.797 |
| 50%水1分 | 0 | -2.338 | -3.681 | -4.323 | -4.732 | -4.849 | -4.966 | -3.856 |
| | | | -1.928 | | | | 0.059 | 0.059 |
| 60%水1分 | 0 | -2.294 | -4.118 | -4.589 | -5.001 | -5.059 | -5.059 | -3.942 |
| | | | -2.119 | | | | 0.411 | 0.529 |
| 40%N | 0 | -1.840 | -2.875 | -3.393 | -3.738 | -3.911 | -3.911 | -3.968 |
| 50%N | 0 | -2.518 | -3.862 | -4.506 | -4.799 | -4.915 | -4.915 | -4.915 |
| 60%N | 0 | -2.063 | -4.067 | -4.833 | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 40%芒硝1分 | -2.666 | -2.496 | -2.326 | -2.326 | -2.156 | -2.156 | -2.156 | -2.156 |
| | -0.681 | | | | | | | |
| 50%芒硝1分 | -2.669 | -2.347 | -2.347 | -2.171 | -2.171 | -1.995 | -1.995 | -1.995 |
| | 0.117 | | | | | | | |
| 60%芒硝1分 | -3.236 | -2.883 | -2.283 | -2.766 | -2.706 | -2.530 | -2.530 | -2.530 |
| | 0.529 | | | | | | | |
| 40%水1分 | -2.676 | -2.506 | -2.278 | -2.278 | -2.164 | -2.164 | -2.164 | -2.164 |
| | -0.683 | | | | | | | |
| 50%水1分 | -3.155 | -2.862 | -2.687 | -2.512 | -2.512 | -2.278 | -2.278 | -2.278 |
| | 0.176 | | | | | | | |
| 60%水1分 | -3.471 | -3.118 | -3.118 | -3.001 | -2.942 | -2.766 | -2.766 | -2.766 |
| | 0.470 | | | | | | | |
| 40%N | -4.083 | -4.083 | -4.083 | -4.083 | -4.083 | -4.083 | -4.083 | -4.083 |
| 50%N | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 |
| 60%N | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 | -5.245 |

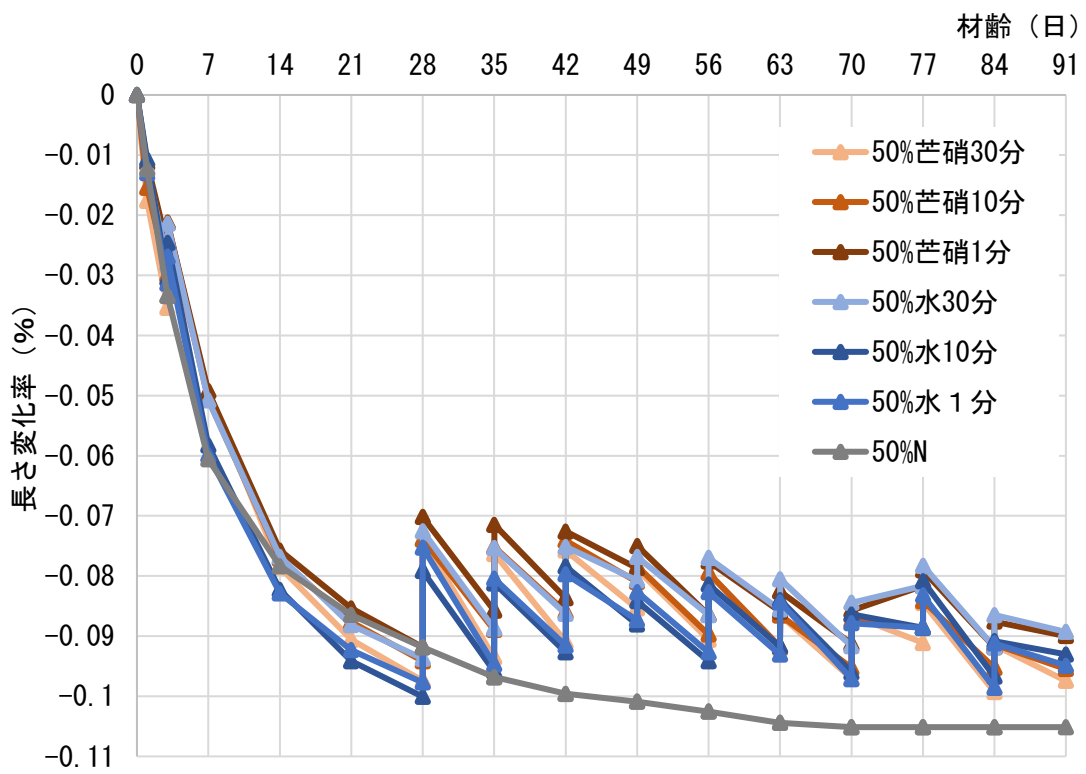


図-7.2.6 浸漬時間と長さ変化率の関係

表-7.2.12 浸漬時間と長さ変化率の関係

| 供試体名 | 長さ変化率(%) | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 50%芒硝 30分 | 0 | -0.018 | -0.035 | -0.049 | -0.079 | -0.091 | -0.097 | -0.094 |
| | | | -0.024 | | | | -0.074 | -0.076 |
| 50%芒硝 10分 | 0 | -0.015 | -0.030 | -0.051 | -0.077 | -0.088 | -0.094 | -0.089 |
| | | | -0.021 | | | | -0.074 | -0.075 |
| 50%芒硝 1分 | 0 | -0.011 | -0.025 | -0.049 | -0.076 | -0.085 | -0.092 | -0.086 |
| | | | -0.021 | | | | -0.070 | -0.071 |
| 50%水 30分 | 0 | -0.012 | -0.028 | -0.051 | -0.077 | -0.088 | -0.094 | -0.089 |
| | | | -0.021 | | | | -0.073 | -0.075 |
| 50%水 10分 | 0 | -0.011 | -0.031 | -0.058 | -0.082 | -0.094 | -0.100 | -0.096 |
| | | | -0.025 | | | | -0.079 | -0.081 |
| 50%水 1分 | 0 | -0.013 | -0.031 | -0.060 | -0.083 | -0.092 | -0.098 | -0.095 |
| | | | -0.027 | | | | -0.075 | -0.080 |
| 50%N | 0 | -0.012 | -0.033 | -0.061 | -0.078 | -0.086 | -0.092 | -0.097 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 50%芒硝 30分 | -0.091 | -0.085 | -0.091 | -0.092 | -0.097 | -0.091 | -0.099 | -0.097 |
| | -0.076 | -0.079 | -0.079 | -0.087 | -0.087 | -0.084 | -0.092 | |
| 50%芒硝 10分 | -0.086 | -0.081 | -0.090 | -0.092 | -0.095 | -0.089 | -0.095 | -0.095 |
| | -0.074 | -0.078 | -0.080 | -0.087 | -0.087 | -0.084 | -0.091 | |
| 50%芒硝 1分 | -0.084 | -0.079 | -0.086 | -0.086 | -0.091 | -0.082 | -0.092 | -0.090 |
| | -0.073 | -0.075 | -0.078 | -0.083 | -0.086 | -0.079 | -0.088 | |
| 50%水 30分 | -0.086 | -0.081 | -0.086 | -0.086 | -0.092 | -0.082 | -0.092 | -0.089 |
| | -0.075 | -0.077 | -0.077 | -0.081 | -0.084 | -0.078 | -0.086 | |
| 50%水 10分 | -0.093 | -0.088 | -0.094 | -0.092 | -0.096 | -0.089 | -0.097 | -0.093 |
| | -0.078 | -0.084 | -0.081 | -0.084 | -0.086 | -0.081 | -0.091 | |
| 50%水 1分 | -0.092 | -0.087 | -0.093 | -0.093 | -0.097 | -0.089 | -0.099 | -0.095 |
| | -0.080 | -0.083 | -0.083 | -0.084 | -0.088 | -0.083 | -0.092 | |
| 50%N | -0.100 | -0.101 | -0.103 | -0.104 | -0.105 | -0.105 | -0.105 | -0.105 |

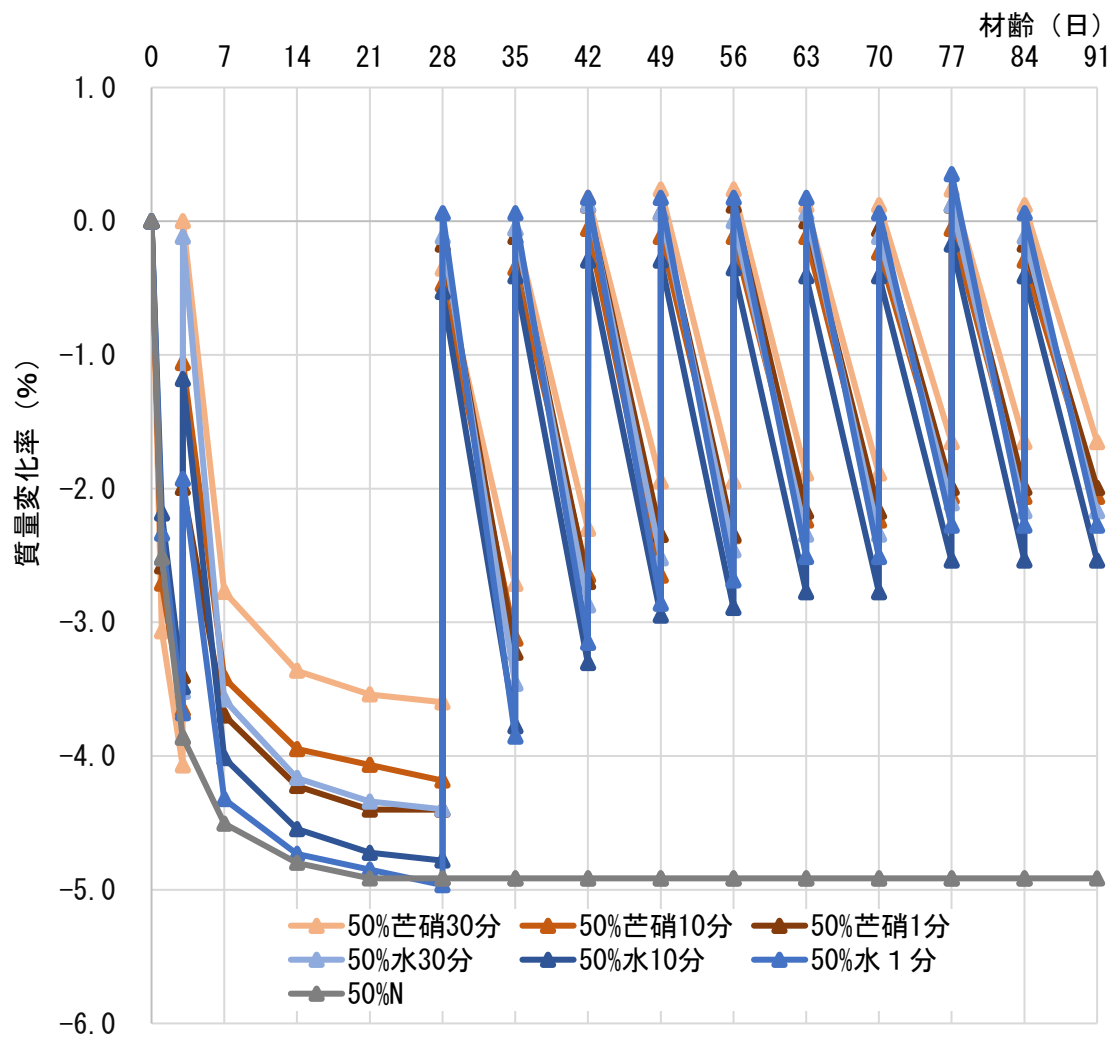


図-7.2.7 浸漬時間と質量変化率の関係

表-7.2.13 浸漬時間と質量変化率の関係

| 供試体名 | 質量変化率(%) | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 50%芒硝 30分 | 0 | -3.068 | -4.071 0.000 | -2.773 | -3.363 | -3.540 | -3.599 -0.354 | -2.714 -0.059 |
| 50%芒硝 10分 | 0 | -2.711 | -3.654 -1.061 | -3.418 | -3.948 | -4.066 | -4.184 -0.472 | -3.123 -0.354 |
| 50%芒硝 1分 | 0 | -2.582 | -3.404 -1.995 | -3.697 | -4.225 | -4.401 | -4.401 -0.176 | -3.228 -0.117 |
| 50%水 30分 | 0 | -2.523 | -3.519 -0.117 | -3.578 | -4.164 | -4.340 | -4.398 -0.117 | -3.460 -0.058 |
| 50%水 10分 | 0 | -2.186 | -3.484 -1.181 | -4.015 | -4.546 | -4.723 | -4.782 -0.530 | -3.778 -0.412 |
| 50%水 1分 | 0 | -2.338 | -3.681 -1.928 | -4.323 | -4.732 | -4.849 | -4.966 0.059 | -3.856 0.059 |
| 50%N | 0 | -2.518 | -3.862 | -4.506 | -4.799 | -4.915 | -4.915 | -4.915 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| 50%芒硝 30分 | -2.301 0.177 | -1.947 0.236 | -1.947 0.236 | -1.888 0.118 | -1.888 0.118 | -1.652 0.236 | -1.652 -0.118 | -1.652 |
| 50%芒硝 10分 | -2.652 -0.059 | -2.652 -0.118 | -2.357 -0.118 | -2.239 -0.118 | -2.239 -0.236 | -2.063 -0.059 | -2.063 -0.295 | -2.063 |
| 50%芒硝 1分 | -2.669 0.117 | -2.347 0.059 | -2.347 0.117 | -2.171 0.000 | -2.171 -0.059 | -1.995 0.117 | -1.995 -0.176 | -1.995 |
| 50%水 30分 | -2.873 0.118 | -2.521 0.059 | -2.463 0.001 | -2.345 0.059 | -2.345 -0.117 | -2.111 0.118 | -2.170 -0.117 | -2.170 |
| 50%水 10分 | -3.305 -0.294 | -2.951 -0.294 | -2.893 -0.353 | -2.774 -0.413 | -2.774 -0.413 | -2.538 -0.176 | -2.538 -0.413 | -2.538 |
| 50%水 1分 | -3.155 0.176 | -2.862 0.176 | -2.687 0.176 | -2.512 0.176 | -2.512 0.059 | -2.278 0.351 | -2.278 0.059 | -2.278 |
| 50%N | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 | -4.915 |

④尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮試験結果

水セメント比による混合水溶液に浸漬した場合における比較結果を図-7.2.8、図-7.2.9、表-7.2.14 および表-7.2.15 に示す。図より、いずれの水セメント比においても、乾燥過程で浸漬処理しないものと水に浸漬した場合には、混合水溶液に浸漬した場合より長さ変化率は大きくなった。乾燥材齢 28 日から 7 日毎に水に 1 時間浸漬しても、収縮低減効果が失われることはなく、効果は継続した。材齢 91 日における、浸漬処理無しおよび水に浸漬した場合と比較して、概ね 2~3 割程度収縮ひずみが小さくなった。浸漬しない場合と比較し、モルタル供試体の水セメント比が 40% の場合の乾燥開始からの材齢 91 日における混合水溶液浸漬による乾燥作用による乾燥収縮低減効果は 16%、水セメント比 50% においては 36%、水セメント比 60% においては 33% であることがわかった。

また、モルタルの水セメント比 50% において浸漬時間を 1、10 および 30 分の 3 水準に変化させた場合における長さ変化率および質量変化率の推移について図-7.2.10、図-7.2.11、表-7.2.16 および表-7.2.17 に示す。図より、乾燥開始から材齢 28 日まで、浸漬液が水のみの場合には、浸漬時間を 10 分および 30 分と長くしてもその影響はほとんど現れず、通常通り乾燥させた場合における長さ変化と同様の変化を示した。一方、混合水溶液に浸漬した場合には、浸漬時間が長いほど浸漬直後から現れる膨張現象が顕著となった。乾燥開始からの材齢 28 日における長さ変化率が無処理を 1.0 とすると、浸漬時間 1 分で 0.78、浸漬時間 10 分で 0.67、浸漬時間 30 分では 0.58 と大幅に小さくなった。また、材齢 28 日から週に 1 回水に 1 時間浸漬した場合には、材齢 91 日における長さ変化率は無処理を 1.0 とすると、混合水溶液への浸漬時間 1 分で 0.66、浸漬時間 10 分で 0.58、浸漬時間 30 分では 0.59 と乾燥収縮低減効果が現れていることがわかった。これらから、混合水溶液をモルタル硬化体表面に付着・含浸させることで、硬化体の表面に尿素が残存する。また、一部が硬化体の空隙に浸入し、結晶化することで、収縮を抑制する膨張作用を発現し、混合水溶液への浸漬時間が長いほど収縮低減効果は高くなることが認められた。また、未反応のモルタルと硫酸ナトリウムが反応することによって、モルタル表面の空隙に残留し、尿素の溶出を抑え、水に浸漬しても収縮低減効果が維持していると考えられる。

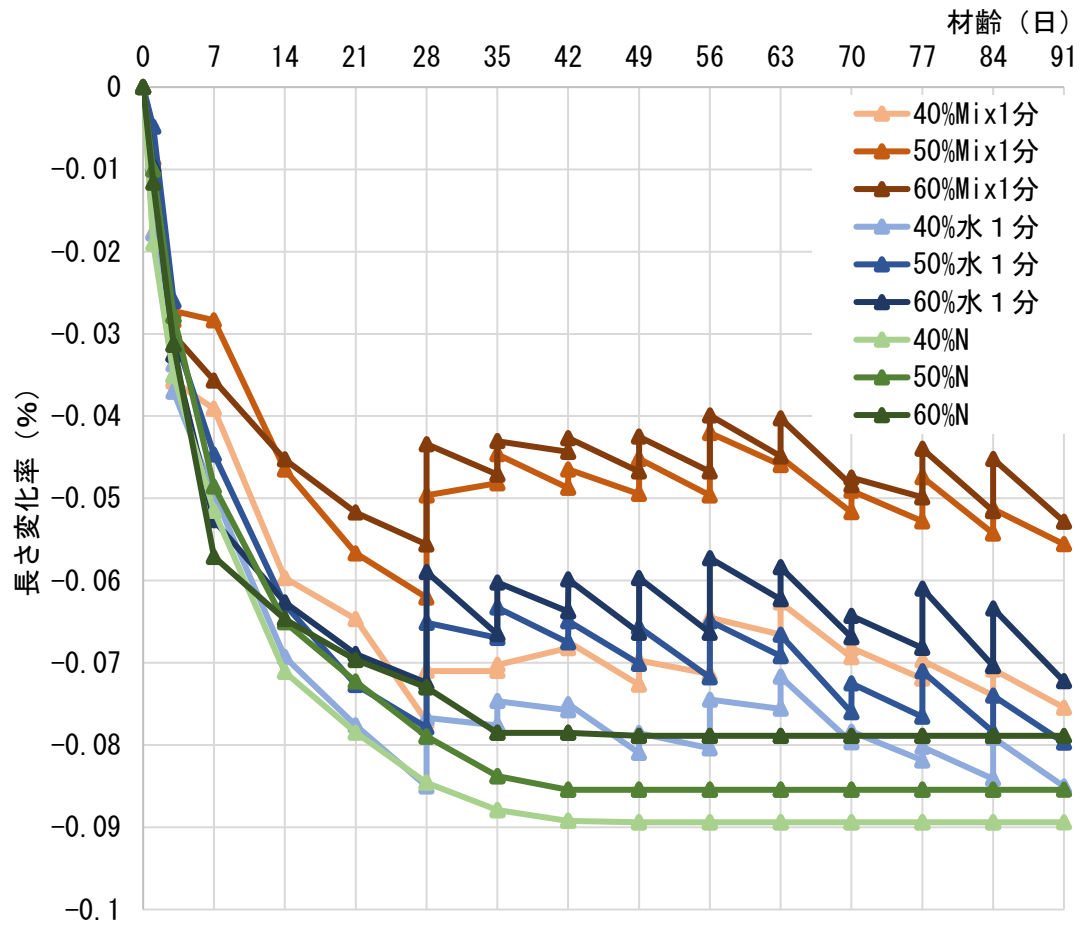


図-7.2.8 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

表-7.2.14 水セメント比の違いと長さ変化率の関係

| 供試体名 | 長さ変化率(%) | | | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 40%Mix1分 | 0 | -0.018 | -0.036 | -0.039 | -0.060 | -0.065 | -0.077 | -0.071 |
| | | | -0.036 | | | | -0.071 | -0.070 |
| 50%Mix1分 | 0 | -0.009 | -0.028 | -0.028 | -0.047 | -0.057 | -0.062 | -0.048 |
| | | | -0.027 | | | | -0.050 | -0.045 |
| 60%Mix1分 | 0 | -0.010 | -0.030 | -0.036 | -0.045 | -0.052 | -0.056 | -0.047 |
| | | | -0.030 | | | | -0.043 | -0.043 |
| 40%水1分 | 0 | -0.018 | -0.034 | -0.049 | -0.069 | -0.078 | -0.085 | -0.078 |
| | | | -0.038 | | | | -0.077 | -0.075 |
| 50%水1分 | 0 | -0.005 | -0.026 | -0.045 | -0.063 | -0.073 | -0.078 | -0.067 |
| | | | -0.030 | | | | -0.065 | -0.063 |
| 60%水1分 | 0 | -0.010 | -0.033 | -0.053 | -0.063 | -0.069 | -0.072 | -0.067 |
| | | | -0.033 | | | | -0.059 | -0.060 |
| 40%N | 0 | -0.019 | -0.035 | -0.052 | -0.071 | -0.078 | -0.085 | -0.088 |
| 50%N | 0 | -0.010 | -0.028 | -0.049 | -0.065 | -0.072 | -0.079 | -0.084 |
| 60%N | 0 | -0.012 | -0.031 | -0.057 | -0.065 | -0.070 | -0.073 | -0.079 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 40%Mix1分 | -0.068 | -0.073 | -0.071 | -0.067 | -0.069 | -0.072 | -0.074 | -0.075 |
| | -0.067 | | | | | | | |
| 50%Mix1分 | -0.049 | -0.049 | -0.050 | -0.046 | -0.052 | -0.053 | -0.054 | -0.056 |
| | -0.046 | | | | | | | |
| 60%Mix1分 | -0.044 | -0.047 | -0.047 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.052 | -0.053 |
| | -0.043 | | | | | | | |
| 40%水1分 | -0.076 | -0.081 | -0.080 | -0.076 | -0.080 | -0.082 | -0.084 | -0.085 |
| | -0.075 | | | | | | | |
| 50%水1分 | -0.068 | -0.070 | -0.072 | -0.069 | -0.076 | -0.077 | -0.078 | -0.080 |
| | -0.065 | | | | | | | |
| 60%水1分 | -0.064 | -0.066 | -0.066 | -0.062 | -0.069 | -0.068 | -0.070 | -0.072 |
| | -0.060 | | | | | | | |
| 40%N | -0.089 | -0.089 | -0.089 | -0.089 | -0.089 | -0.089 | -0.089 | -0.089 |
| 50%N | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 |
| 60%N | -0.079 | -0.079 | -0.079 | -0.079 | -0.079 | -0.079 | -0.079 | -0.079 |

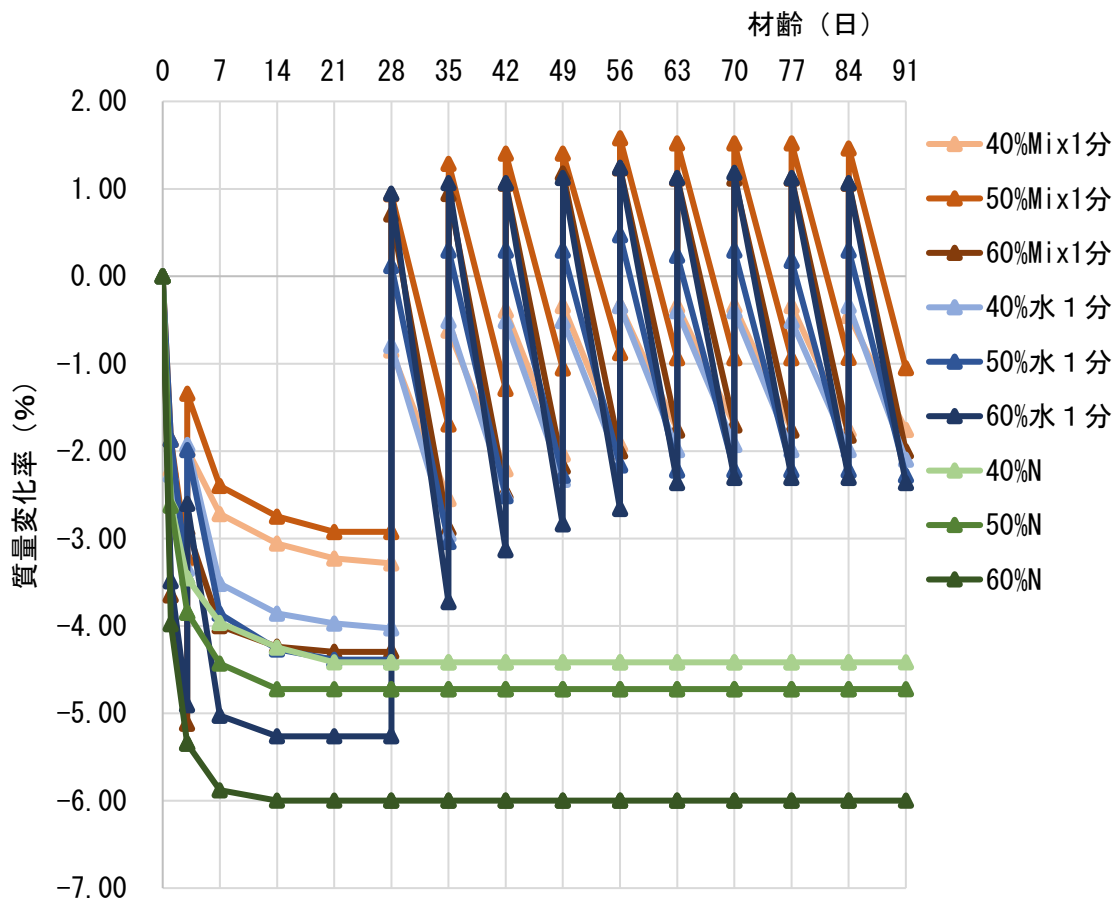


図-7.2.9 水セメント比の違いと質量変化率の関係

表-7.2.15 水セメント比の違いと質量変化率の関係

| 供試体名 | 質量変化率(%) | | | | | | | |
|----------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 40%Mix1分 | 0 | -2.209 | -3.229 -1.982 | -2.719 | -3.059 | -3.229 | -3.285 -0.849 | -2.549 -0.623 |
| 50%Mix1分 | 0 | -1.872 | -3.218 -1.345 | -2.399 | -2.750 | -2.925 | -2.925 0.936 | -1.697 1.287 |
| 60%Mix1分 | 0 | -3.649 | -5.121 -2.884 | -4.002 | -4.238 | -4.296 | -4.296 0.706 | -2.884 0.942 |
| 40%水1分 | 0 | -2.271 | -3.349 -1.929 | -3.519 | -3.859 | -3.973 | -4.030 -0.795 | -2.952 -0.511 |
| 50%水1分 | 0 | -1.872 | -3.450 -1.988 | -3.860 | -4.269 | -4.386 | -4.386 0.117 | -3.041 0.293 |
| 60%水1分 | 0 | -3.489 | -4.908 -2.602 | -5.027 | -5.263 | -5.263 | -5.263 0.946 | -3.726 1.064 |
| 40%N | 0 | -2.605 | -3.455 | -3.964 | -4.247 | -4.417 | -4.417 | -4.417 |
| 50%N | 0 | -2.624 | -3.848 | -4.432 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 |
| 60%N | 0 | -3.981 | -5.346 | -5.881 | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| 40%Mix1分 | -2.209 -0.396 | -2.039 -0.339 | -1.926 -0.339 | -1.756 -0.339 | -1.699 -0.339 | -1.756 -0.339 | -1.756 -0.452 | -1.756 |
| 50%Mix1分 | -1.287 1.405 | -1.053 1.405 | -0.878 1.580 | -0.936 1.521 | -0.936 1.522 | -0.936 1.522 | -0.935 1.463 | -1.053 |
| 60%Mix1分 | -2.472 1.059 | -2.178 1.177 | -2.001 1.236 | -1.766 1.118 | -1.707 1.118 | -1.766 1.118 | -1.825 1.059 | -2.001 |
| 40%水1分 | -2.498 -0.511 | -2.327 -0.511 | -2.157 -0.341 | -1.987 -0.397 | -1.930 -0.397 | -1.987 -0.511 | -1.987 -0.341 | -2.100 |
| 50%水1分 | -2.515 0.293 | -2.281 0.293 | -2.164 0.468 | -2.222 0.234 | -2.222 0.293 | -2.222 0.176 | -2.222 0.293 | -2.281 |
| 60%水1分 | -3.134 1.064 | -2.839 1.124 | -2.662 1.242 | -2.366 1.124 | -2.307 1.183 | -2.307 1.124 | -2.307 1.065 | -2.365 |
| 40%N | -4.417 | -4.417 | -4.417 | -4.417 | -4.417 | -4.417 | -4.417 | -4.417 |
| 50%N | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 |
| 60%N | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 | -5.999 |

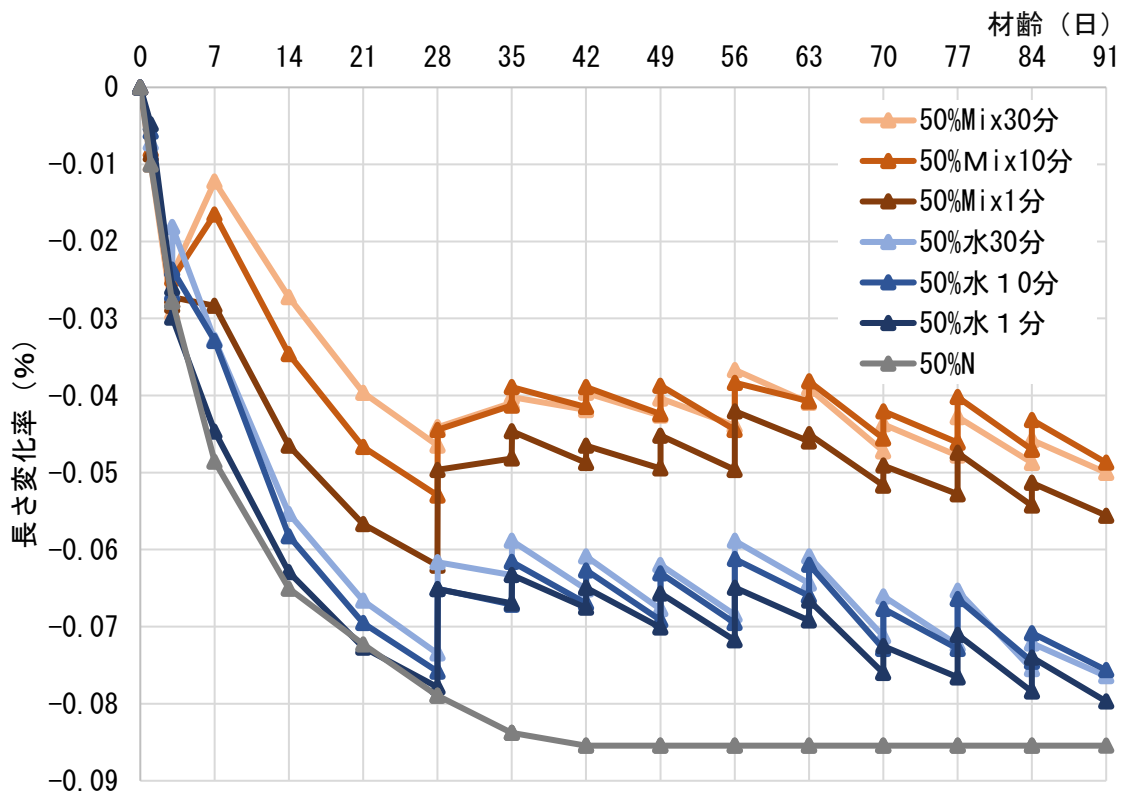


図-7.2.10 浸漬時間と長さ変化率の関係

表-7.2.16 浸漬時間と長さ変化率の関係

| 供試体名 | 長さ変化率(%) | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 50%Mix30分 | 0 | -0.010 | -0.029 -0.024 | -0.012 | -0.027 | -0.040 | -0.046 -0.044 | -0.041 -0.040 |
| 50%Mix10分 | 0 | -0.008 | -0.028 -0.025 | -0.016 | -0.035 | -0.047 | -0.053 -0.044 | -0.041 -0.039 |
| 50%Mix1分 | 0 | -0.009 | -0.028 -0.027 | -0.028 | -0.047 | -0.057 | -0.062 -0.050 | -0.048 -0.045 |
| 50%水30分 | 0 | -0.007 | -0.027 -0.018 | -0.033 | -0.055 | -0.067 | -0.073 -0.062 | -0.063 -0.059 |
| 50%水10分 | 0 | -0.006 | -0.027 -0.024 | -0.033 | -0.058 | -0.070 | -0.076 -0.065 | -0.067 -0.062 |
| 50%水1分 | 0 | -0.005 | -0.026 -0.030 | -0.045 | -0.063 | -0.073 | -0.078 -0.065 | -0.067 -0.063 |
| 50%N | 0 | -0.010 | -0.028 | -0.049 | -0.065 | -0.072 | -0.079 | -0.084 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| 50%Mix30分 | -0.042 -0.040 | -0.043 -0.040 | -0.044 -0.037 | -0.041 -0.039 | -0.047 -0.044 | -0.048 -0.043 | -0.049 -0.046 | -0.050 |
| 50%Mix10分 | -0.041 -0.039 | -0.042 -0.039 | -0.044 -0.038 | -0.041 -0.038 | -0.046 -0.042 | -0.046 -0.040 | -0.047 -0.043 | -0.049 |
| 50%Mix1分 | -0.049 -0.046 | -0.049 -0.045 | -0.050 -0.042 | -0.046 -0.045 | -0.052 -0.049 | -0.053 -0.047 | -0.054 -0.051 | -0.056 |
| 50%水30分 | -0.065 -0.061 | -0.068 -0.062 | -0.068 -0.059 | -0.064 -0.061 | -0.071 -0.066 | -0.072 -0.065 | -0.076 -0.072 | -0.076 |
| 50%水10分 | -0.067 -0.063 | -0.069 -0.063 | -0.070 -0.061 | -0.066 -0.062 | -0.073 -0.066 | -0.073 -0.066 | -0.075 -0.071 | -0.076 |
| 50%水1分 | -0.068 -0.065 | -0.070 -0.066 | -0.072 -0.065 | -0.069 -0.067 | -0.076 -0.073 | -0.077 -0.071 | -0.078 -0.074 | -0.080 |
| 50%N | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 | -0.085 |

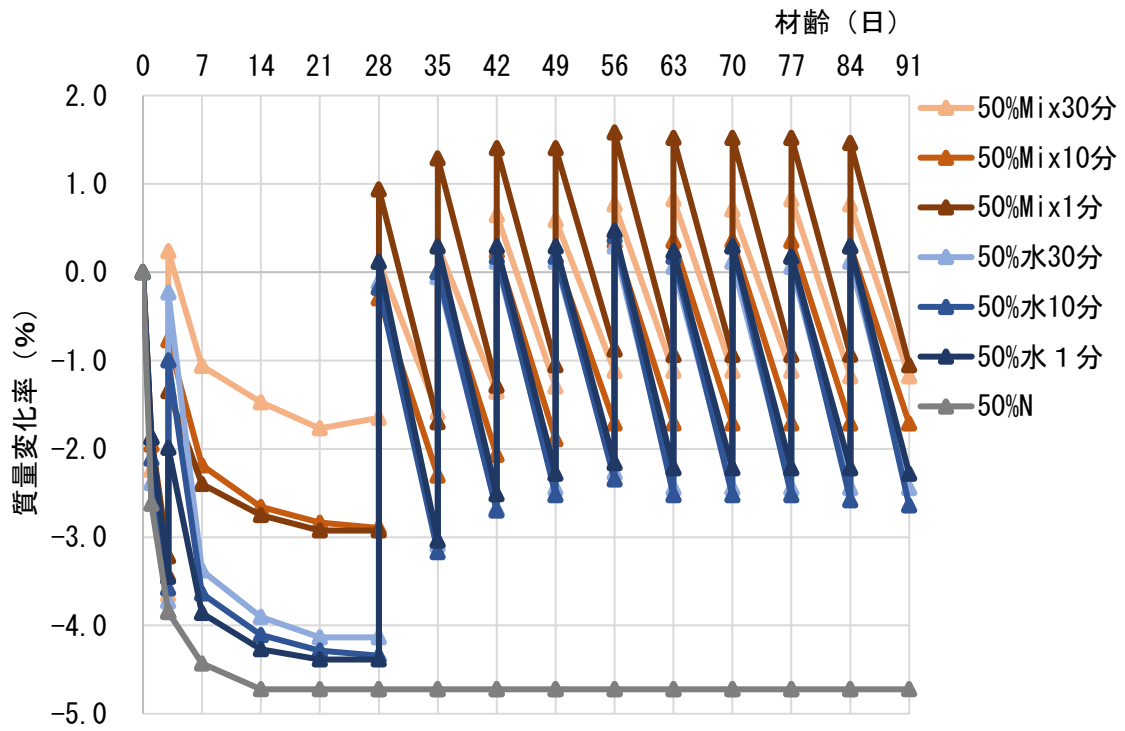


図-7.2.11 浸漬時間と質量変化率の関係

表-7.2.17 浸漬時間と質量変化率の関係

| 供試体名 | 質量変化率(%) | | | | | | | |
|-----------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| | 0日 | 1日 | 3日前後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日前後 | 35日前後 |
| 50%Mix30分 | 0 | -2.240 | -3.654 0.236 | -1.061 | -1.474 | -1.768 | -1.650 0.118 | -1.591 0.294 |
| 50%Mix10分 | 0 | -1.951 | -3.427 -0.769 | -2.187 | -2.659 | -2.836 | -2.896 -0.296 | -2.304 -0.002 |
| 50%Mix1分 | 0 | -1.872 | -3.218 -1.345 | -2.399 | -2.750 | -2.925 | -2.925 0.936 | -1.697 1.287 |
| 50%水 30分 | 0 | -2.387 | -3.728 -0.232 | -3.378 | -3.903 | -4.135 | -4.135 -0.115 | -3.086 -0.057 |
| 50%水 10分 | 0 | -2.113 | -3.580 -0.998 | -3.639 | -4.108 | -4.284 | -4.343 -0.176 | -3.169 0.000 |
| 50%水 1分 | 0 | -1.872 | -3.450 -1.988 | -3.860 | -4.269 | -4.386 | -4.386 0.117 | -3.041 0.293 |
| 50%N | 0 | -2.624 | -3.848 | -4.432 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 |

| 供試体名 | 42日前後 | 49日前後 | 56日前後 | 63日前後 | 70日前後 | 77日前後 | 84日前後 | 91日 |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| 50%Mix30分 | -1.356 0.648 | -1.297 0.589 | -1.120 0.766 | -1.120 0.825 | -1.120 0.707 | -1.120 0.825 | -1.180 0.766 | -1.180 |
| 50%Mix10分 | -2.069 0.235 | -1.891 0.176 | -1.714 0.353 | -1.713 0.353 | -1.713 0.353 | -1.713 0.353 | -1.713 0.294 | -1.713 |
| 50%Mix1分 | -1.287 1.405 | -1.053 1.405 | -0.878 1.580 | -0.936 1.521 | -0.936 1.522 | -0.936 1.522 | -0.935 1.463 | -1.053 |
| 50%水 30分 | -2.679 0.118 | -2.446 0.118 | -2.271 0.293 | -2.446 0.060 | -2.446 0.118 | -2.446 0.061 | -2.447 0.118 | -2.447 |
| 50%水 10分 | -2.700 0.176 | -2.524 0.176 | -2.348 0.411 | -2.524 0.176 | -2.524 0.293 | -2.524 0.176 | -2.582 0.293 | -2.641 |
| 50%水 1分 | -2.515 0.293 | -2.281 0.293 | -2.164 0.468 | -2.222 0.234 | -2.222 0.293 | -2.222 0.176 | -2.222 0.293 | -2.281 |
| 50%N | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 | -4.723 |

7) まとめ

本節では、尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬したモルタル硬化体の基本性状について実験を行い以下の試験結果と知見を得た。

・圧縮強度試験

圧縮強度試験において、無処理に比べ混合水溶液に浸漬した供試体では圧縮強度は大きくなった。これは水溶液が内部へ浸入し、尿素が再結晶化することで、硬化組織の空隙が埋められたことや、水分の逸散を防止する保水効果が現れ、多くの水分が硬化体中に残存したためと考えられる。

・乾燥収縮試験

乾燥収縮試験において、無処理に比べ混合水溶液に浸漬した供試体は乾燥収縮が小さくなった。また、混合水溶液に浸漬した場合には、乾燥材齢の28日から週に1回水に1時間浸漬しても、収縮低減効果が失われることはなく、効果は継続した。これは圧縮強度と同様に、供試体表面より浸入した水溶液中の尿素が再結晶化すること、尿素的保水効果によって多くの水分が硬化体中に残り、乾燥を防ぐことができたことが要因として考えられる。また浸漬時間が長くなるほど、供試体内部へ浸入する尿素水溶液の量は増加し、再結晶化する尿素が多くなるため浸漬時間が長いほど収縮低減効果が高くなったと考えられる。

7.2.3 尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力

1) 概論

モルタルにおける尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液を含浸させた場合には、尿素水溶液を含浸させた場合と同様に収縮低減効果が認められ、更に供試体を水に繰り返し浸漬した場合においても、収縮低減効果の持続能力が認められた。

よって本節では、硬化コンクリートにおける尿素と硫酸ナトリウムの混和水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮低減効果を調べた。さらに材齢経過後の供試体を用い、一定時間水に浸漬することで降雨による濡れの模擬実験として、含浸した尿素的の溶出有無の検討を行った。

2) 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-7.2.18に示す。混合水溶液は質量比で濃度50%となるように、水道水50%、尿素45%、硫酸ナトリウム5%の割合で溶解させて水溶液とした。

表-7.2.18 使用材料

| 種別 | 名称 | 記号 | 密度 |
|-------|--|----|------|
| 水 | 上水道水 | W | 1.00 |
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.56 |
| 粗骨材 | 笠間産碎石 (F.M. : 6.23、吸水率 : 0.75) | G | 2.64 |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 | SP | 1.00 |
| 化学系材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 硫酸ナトリウム (Na ₂ SO ₄) | Na | 2.68 |

3) 配合条件

本研究における配合条件を表-7.2.19に示す。水セメント比は40%、50%、60%とし、フレッシュ性状の目標値を空気量4.5±1.5%、スランプ値8.0±1.5cmとした。

4) 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

表-7.2.19 配合条件

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | SP 添加率 (C×%) |
|------------|-----------------------------|-----|-----|------|-----------------|
| | W | C | S | G | SP |
| 40 | 160 | 400 | 736 | 1010 | 0.10 |
| 50 | 170 | 340 | 798 | 969 | 0.10 |
| 60 | 174 | 290 | 865 | 932 | 0.10 |

5) 試験項目および試験方法

第3章、3.3.4節と同様とした。また、実験条件を表-7.2.20、乾燥湿潤繰返し試験手順を図-7.2.12に示す。乾燥湿潤繰返し試験は91日間の乾燥収縮試験終了後の供試体を用いた。乾燥収縮試験終了後、20±3℃、60±5%Rhの恒温恒湿室にて静置し、材齢98日から乾燥湿潤繰返し試験に移行した。本試験は7日間に一度、コンクリート供試体を水道水に1時間浸漬し、その前後における長さ変化と質量変化の測定を行い、材齢183日まで継続した。水道水は試験前に容器に溜めて静置した状態で使用した。

また、試験期間中の気中養生は20±3℃、60±5%Rhの恒温恒湿室にて行った。比較用として、材齢3日目に処理を行わなかった供試体については、水道水への浸漬は行わず、7日間に一度、長さ変化および質量変化を材齢183日まで測定した。

表-7.2.20 各水セメント比の実験条件

| W/C (%) | 3日目の浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 乾燥湿潤繰返し 試験の実施 | 記号 W/C—浸漬液—浸漬時間 |
|------------|---------|-------------|------------------|--------------------|
| 40 | 無処理 | —— | —— | 40%N |
| | 尿素水溶液 | 1 | ○ | 40%尿素 1分 |
| | 混合水溶液 | | ○ | 40%混合 1分 |
| 50 | 無処理 | —— | —— | 50%N |
| | 尿素水溶液 | 1 | ○ | 50%尿素 1分 |
| | | 10 | ○ | 50%尿素 10分 |
| | | 30 | ○ | 50%尿素 30分 |
| | 混合水溶液 | 1 | ○ | 50%混合 1分 |
| | | 10 | ○ | 50%混合 10分 |
| 30 | | ○ | 50%混合 30分 | |
| 60 | 無処理 | —— | —— | 60%N |
| | 尿素水溶液 | 1 | ○ | 60%尿素 1分 |
| | 混合水溶液 | | ○ | 60%混合 1分 |

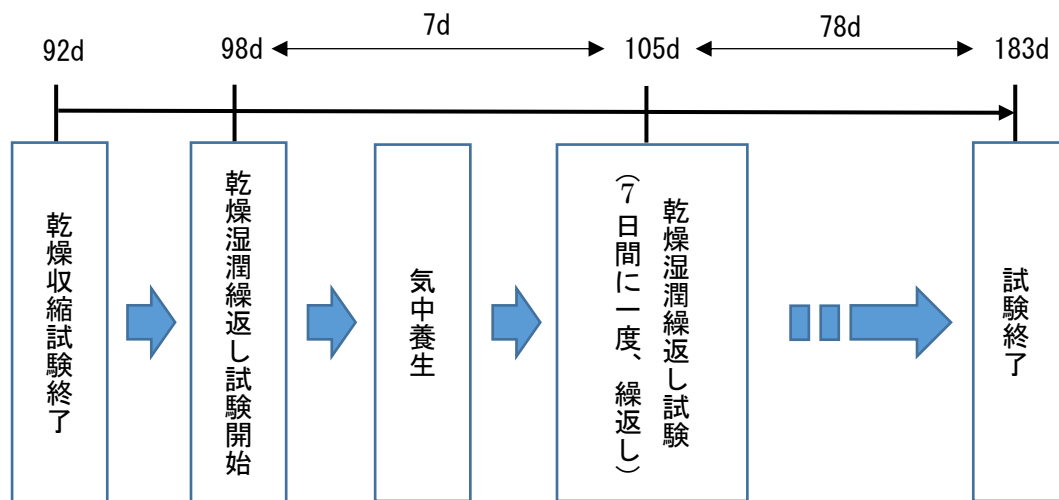


図-7.2.12 乾燥湿潤繰返し試験の手順

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果を表-7.2.21に示す。いずれの水セメント比においても、目標値を満たした。

表-7.2.21 フレッシュ性状試験結果
(目標値：空気量 4.5±1.5%、スランプ値 8.0±1.5cm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-----------|---------|
| 40 | 4.5 | 7.5 | 17.0 |
| 50 | 4.0 | 8.5 | 17.0 |
| 60 | 5.0 | 8.0 | 15.0 |

②圧縮強度試験

水セメント比 50%において、混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度の試験結果を図-7.2.13、表-7.2.22に示す。比較用として、尿素水溶液に浸漬した場合における圧縮強度について示す。図より、混合水溶液への浸漬時間が長いほど、圧縮強度は高くなった。これは、供試体表面の空隙から水溶液が供試体表面層の微細空隙に浸入し、空隙内で水分の逸散に伴う尿素的再結晶化が生じることで、硬化組織の空隙が埋められ再結晶化に伴う膨張圧が生じたためと考えられる。また、浸漬時間が長いほど、供試体表面の空隙から供試体内部へ浸入した混合水溶液が多くなり、尿素水溶液に浸漬した場合と同様の要因により、圧縮強度が高くなったと考えられる。

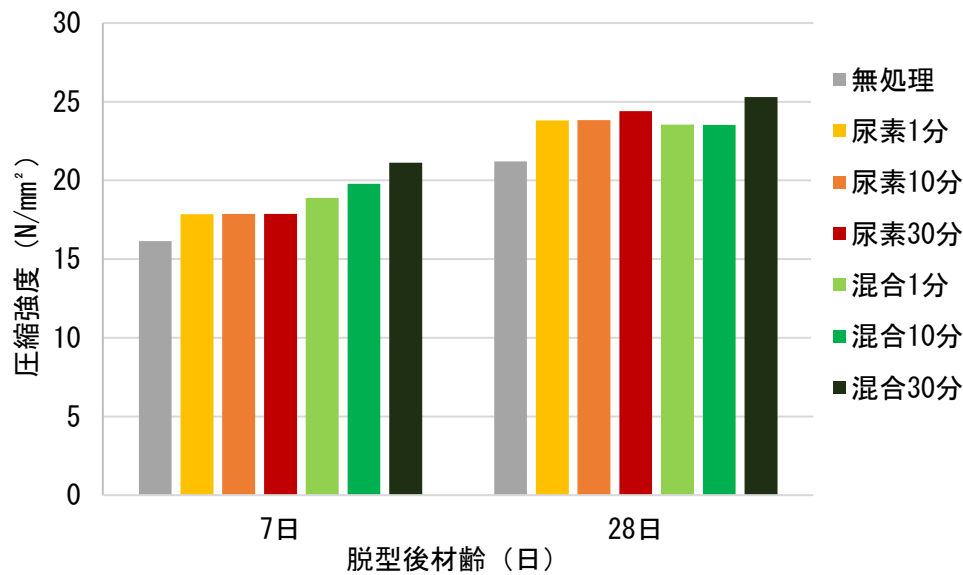


図-7.2.13 混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果 (W/C=50%)

表-7.2.22 混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|-------|---------------------------|------|
| | 7日 | 28日 |
| 無処理 | 16.1 | 21.2 |
| 尿素1分 | 17.9 | 23.8 |
| 尿素10分 | 17.9 | 23.8 |
| 尿素30分 | 17.9 | 24.4 |
| 混合1分 | 18.9 | 23.6 |
| 混合10分 | 19.8 | 23.5 |
| 混合30分 | 21.1 | 25.3 |

③混合水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮試験結果

混合水溶液に浸漬した水セメント比40%、50%、60%のコンクリートの長さ変化率をそれぞれ図-7.2.14、図-7.2.16、図-7.2.18、表-7.2.23、表-7.2.25、表-7.2.27、乾燥収縮試験結果の質量変化率をそれぞれ図-7.2.15、図-7.2.17、図-7.2.19、表-7.2.24、表-7.2.26、表-7.2.28に示す。

図より、全ての水セメント比において、混合水溶液の含浸により乾燥収縮の低減効果が認められた。図-7.2.16より、混合水溶液の浸漬時間を1分、10分、30分間とした場合、いずれの水溶液においても浸漬時間を長くするほど収縮低減効果が大きくなる傾向を示した。これは圧縮強度と同様に、浸漬時間が長くなるほどコンクリート表面の空隙から内部

へ浸入する各水溶液量が増加し、その後の乾燥により多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し、結晶圧が大きく作用したことにより収縮作用が抑制されたと推察される。

また図-7.2.17より、浸漬時間が長くなるほど多くの水分が逸散せずに供試体中に残存していることが分かる。供試体表層に含浸層が作られることや結晶した尿素的保水作用により、多量の水分が保持され、養生効果を大きく得られたことも要因と考えられる。

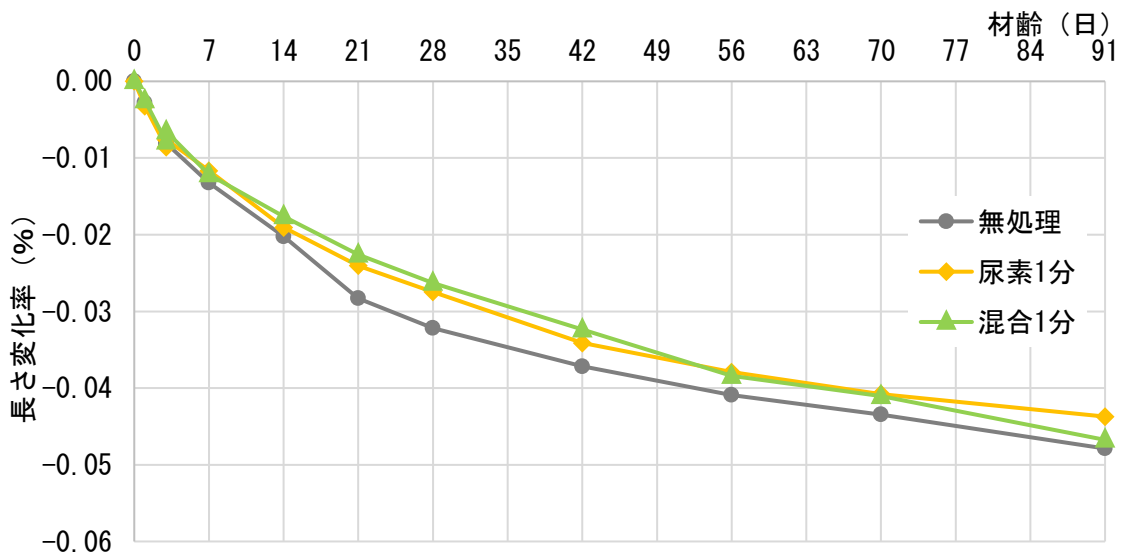


図-7.2.14 長さ変化率 (W/C=40%)

表-7.2.23 長さ変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.013 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.041 | -0.043 | -0.048 |
| 尿素1分 | 0 | -0.003 | -0.009 | -0.008 | -0.012 | -0.019 | -0.024 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.041 | -0.044 |
| 混合1分 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.007 | -0.012 | -0.018 | -0.023 | -0.026 | -0.032 | -0.038 | -0.041 | -0.047 |

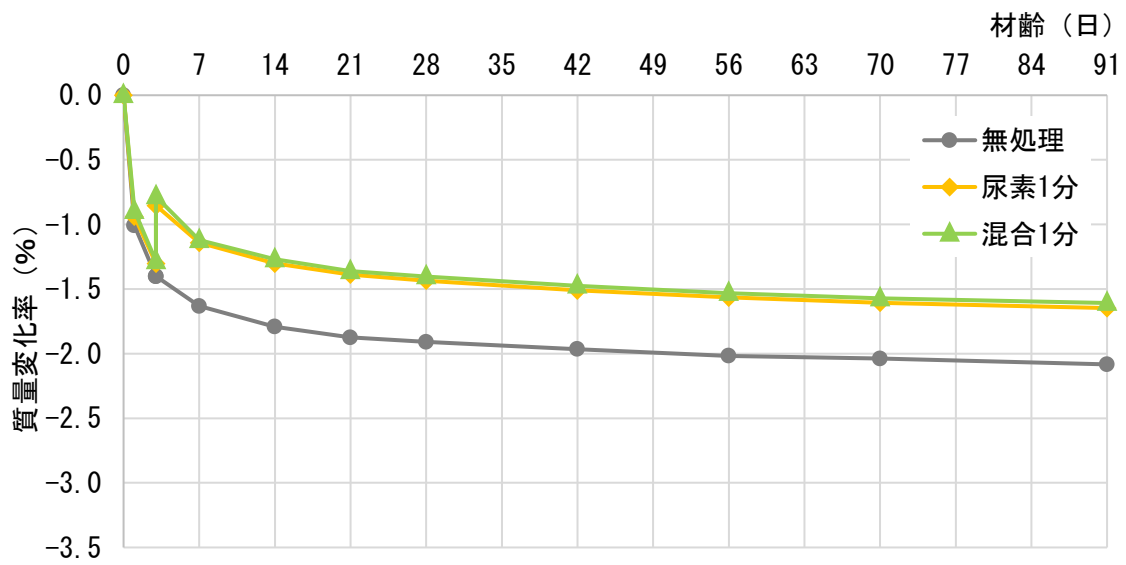


図-7.2.15 質量変化率 (W/C=40%)

表-7.2.24 質量変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |
| 尿素1分 | 0 | -0.940 | -1.302 | -0.854 | -1.142 | -1.302 | -1.387 | -1.435 | -1.511 | -1.565 | -1.606 | -1.647 |
| 混合1分 | 0 | -0.896 | -1.285 | -0.783 | -1.121 | -1.270 | -1.362 | -1.403 | -1.475 | -1.531 | -1.572 | -1.608 |

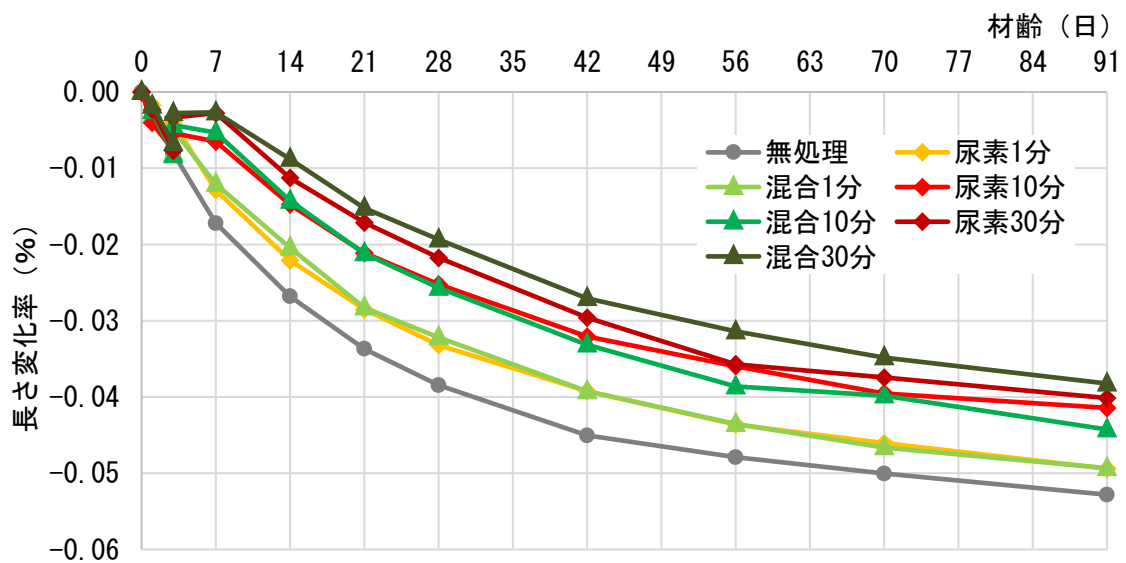


図-7.2.16 長さ変化率 (W/C=50%)

表-7.2.25 長さ変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |
| 尿素1分 | 0 | -0.002 | -0.007 | -0.004 | -0.013 | -0.022 | -0.029 | -0.033 | -0.039 | -0.044 | -0.046 | -0.049 |
| 尿素10分 | 0 | -0.004 | -0.008 | -0.005 | -0.007 | -0.015 | -0.021 | -0.025 | -0.032 | -0.036 | -0.040 | -0.041 |
| 尿素30分 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.003 | -0.003 | -0.011 | -0.017 | -0.022 | -0.030 | -0.036 | -0.037 | -0.040 |
| 混合1分 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.005 | -0.012 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.039 | -0.044 | -0.047 | -0.049 |
| 混合10分 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.004 | -0.005 | -0.014 | -0.021 | -0.026 | -0.033 | -0.039 | -0.040 | -0.044 |
| 混合30分 | 0 | -0.002 | -0.007 | -0.003 | -0.003 | -0.009 | -0.015 | -0.019 | -0.027 | -0.031 | -0.035 | -0.038 |

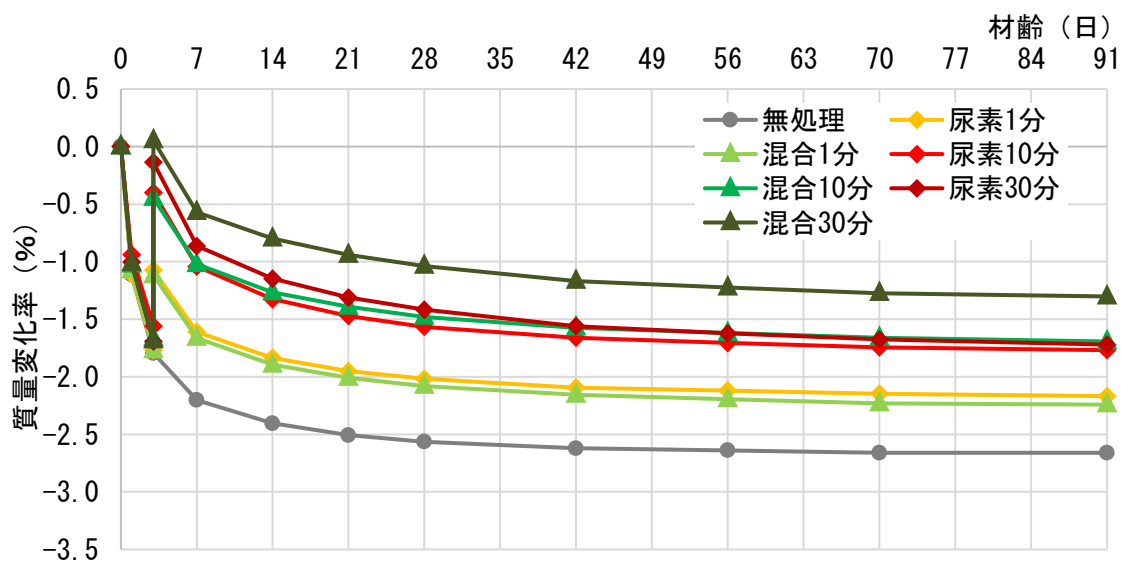


図-7.2.17 質量変化率 (W/C=50%)

表-7.2.26 質量変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 重さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.405 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 |
| 尿素1分 | 0 | -1.109 | -1.769 | -1.073 | -1.610 | -1.835 | -1.950 | -2.017 | -2.094 | -2.119 | -2.147 | -2.168 |
| 尿素10分 | 0 | -0.940 | -1.559 | -0.398 | -1.041 | -1.325 | -1.471 | -1.566 | -1.660 | -1.706 | -1.744 | -1.768 |
| 尿素30分 | 0 | -1.004 | -1.693 | -0.136 | -0.864 | -1.147 | -1.311 | -1.416 | -1.560 | -1.623 | -1.675 | -1.721 |
| 混合1分 | 0 | -1.076 | -1.772 | -1.119 | -1.663 | -1.896 | -2.009 | -2.080 | -2.157 | -2.196 | -2.231 | -2.242 |
| 混合10分 | 0 | -1.025 | -1.665 | -0.448 | -1.022 | -1.266 | -1.392 | -1.480 | -1.574 | -1.620 | -1.662 | -1.693 |
| 混合30分 | 0 | -1.011 | -1.684 | 0.053 | -0.570 | -0.800 | -0.941 | -1.037 | -1.168 | -1.224 | -1.274 | -1.302 |

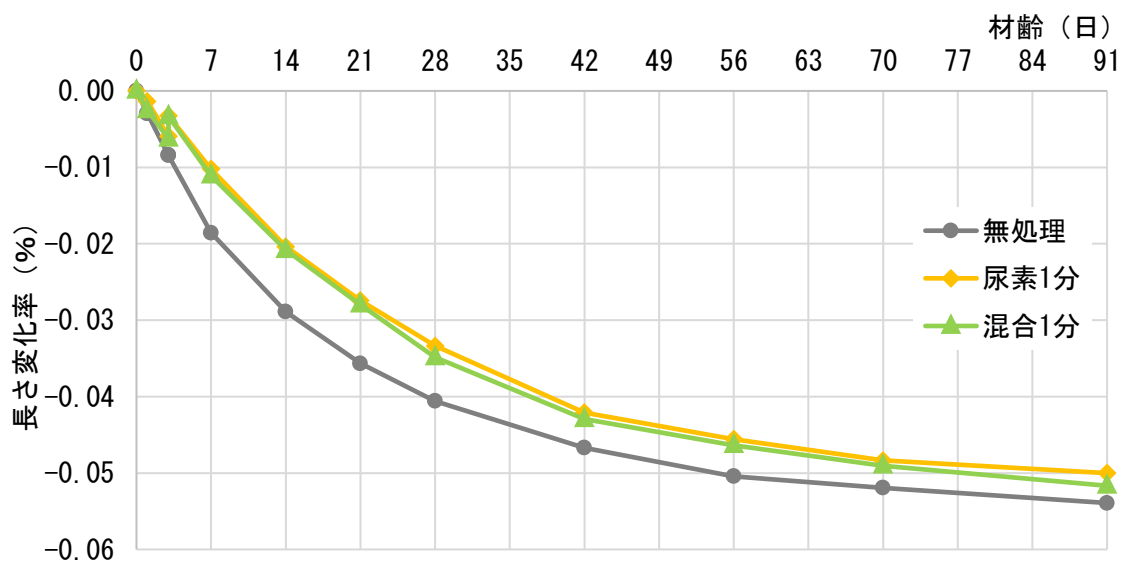


図-7.2.18 長さ変化率 (W/C=60%)

表-7.2.27 長さ変化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.019 | -0.029 | -0.036 | -0.041 | -0.047 | -0.050 | -0.052 | -0.054 |
| 尿素1分 | 0 | -0.001 | -0.006 | -0.003 | -0.010 | -0.020 | -0.027 | -0.033 | -0.042 | -0.046 | -0.048 | -0.050 |
| 混合1分 | 0 | -0.003 | -0.006 | -0.003 | -0.011 | -0.021 | -0.028 | -0.035 | -0.043 | -0.046 | -0.049 | -0.052 |

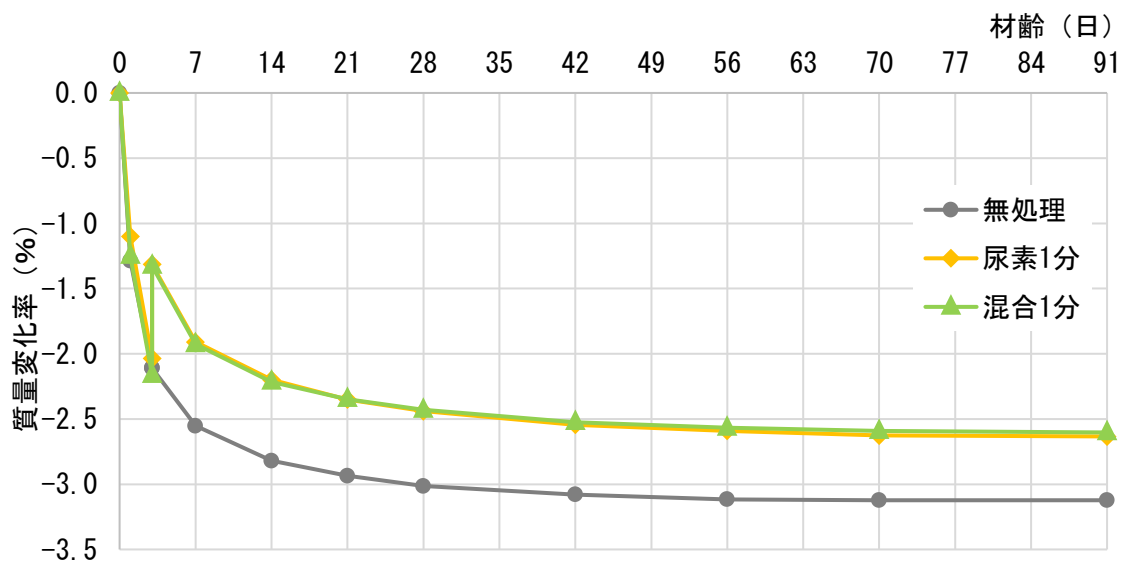


図-7.2.19 質量變化率 (W/C=60%)

表-7.2.28 質量變化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 質量變化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -1.287 | -2.109 | -2.109 | -2.553 | -2.820 | -2.935 | -3.015 | -3.080 | -3.115 | -3.123 | -3.123 |
| 尿素1分 | 0 | -1.100 | -2.035 | -1.315 | -1.909 | -2.200 | -2.350 | -2.440 | -2.544 | -2.590 | -2.626 | -2.634 |
| 混合1分 | 0 | -1.251 | -2.164 | -1.327 | -1.927 | -2.215 | -2.348 | -2.430 | -2.524 | -2.567 | -2.592 | -2.603 |

④乾燥湿潤繰返し試験結果

乾燥開始から3日目に尿素および混合水溶液に浸漬し、乾燥開始から91日目まで乾燥収縮による長さ変化を測定した供試体を用い、水セメント比40%、50%、60%のコンクリートの乾燥湿潤繰返し試験結果の長さ変化率をそれぞれ図-7.2.20、図-7.2.22、図-7.2.24、表-7.2.29、表-7.2.31、表-7.2.33、乾燥収縮試験結果の質量変化率をそれぞれ図-7.2.21、図-7.2.23、図-7.2.25、表-7.2.30、表-7.2.32、表-7.2.34に示す。

図より、全ての水セメント比において3日目に尿素水溶液および混合水溶液に浸漬した供試体の乾燥湿潤繰返し試験期間における長さ変化率と質量変化率の差は小さく、尿素的溶出を防ぐことを目的とした混合水溶液の効果は明確にならなかった。これは、乾燥湿潤繰返し試験を7日間に一度行ったため乾燥期間が短く、供試体内部の湿潤状態が保持されたことが原因と推察される。

以上より乾燥湿潤繰返し試験の測定期間に比べて、さらに長期的な期間の乾燥収縮を考慮し、混合水溶液を含浸させた場合における保水効果の有無を確認し、収縮低減効果の維持効果について検討を行った。しかしながら、目的としていた水溶液溶出の有無については、尿素および混合水溶液を含浸した場合においても認められず、モルタルでの乾燥湿潤繰返し試験と同様の傾向を再確認することはできなかった。これらを踏まえ、次節において乾燥湿潤繰返し試験間の乾燥期間を延長し、再検討を試みる。

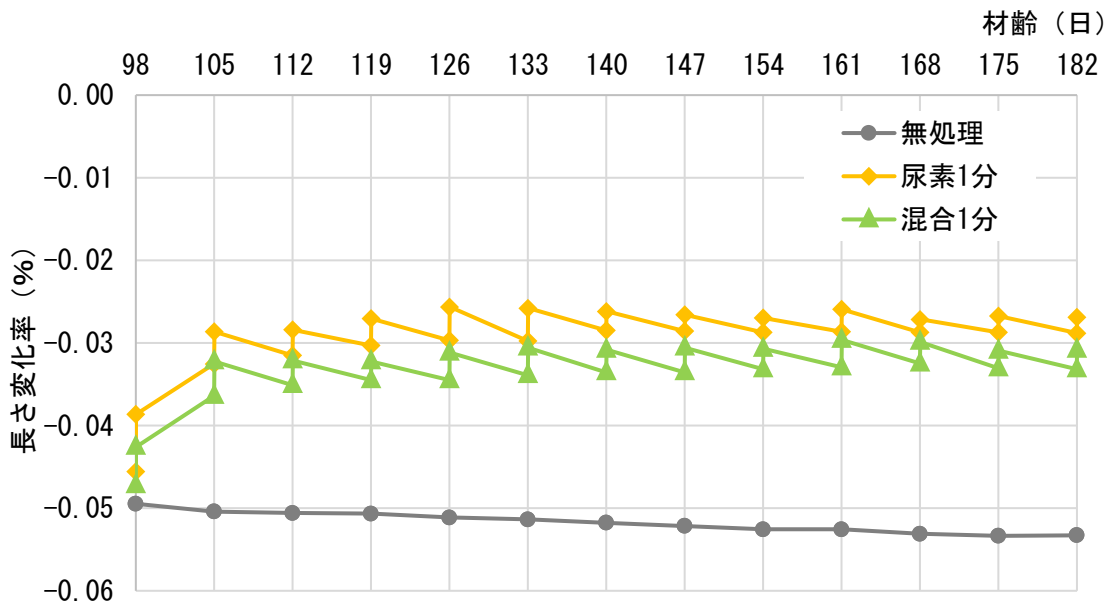


図-7.2.20 長さ変化率 (W/C=40%)

表-7.2.29 長さ変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -0.049 | -0.049 | -0.050 | -0.050 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.051 | -0.052 | -0.052 |
| 尿素1分 | -0.046 | -0.039 | -0.033 | -0.029 | -0.031 | -0.028 | -0.030 | -0.027 | -0.030 | -0.026 | -0.030 | -0.026 | -0.028 | -0.026 |
| 混合1分 | -0.047 | -0.043 | -0.036 | -0.032 | -0.035 | -0.032 | -0.035 | -0.032 | -0.035 | -0.031 | -0.034 | -0.031 | -0.034 | -0.031 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -0.052 | -0.052 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | -0.053 | | |
| 尿素1分 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.026 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | | |
| 混合1分 | -0.034 | -0.031 | -0.033 | -0.031 | -0.033 | -0.030 | -0.032 | -0.030 | -0.033 | -0.031 | -0.033 | -0.031 | | |

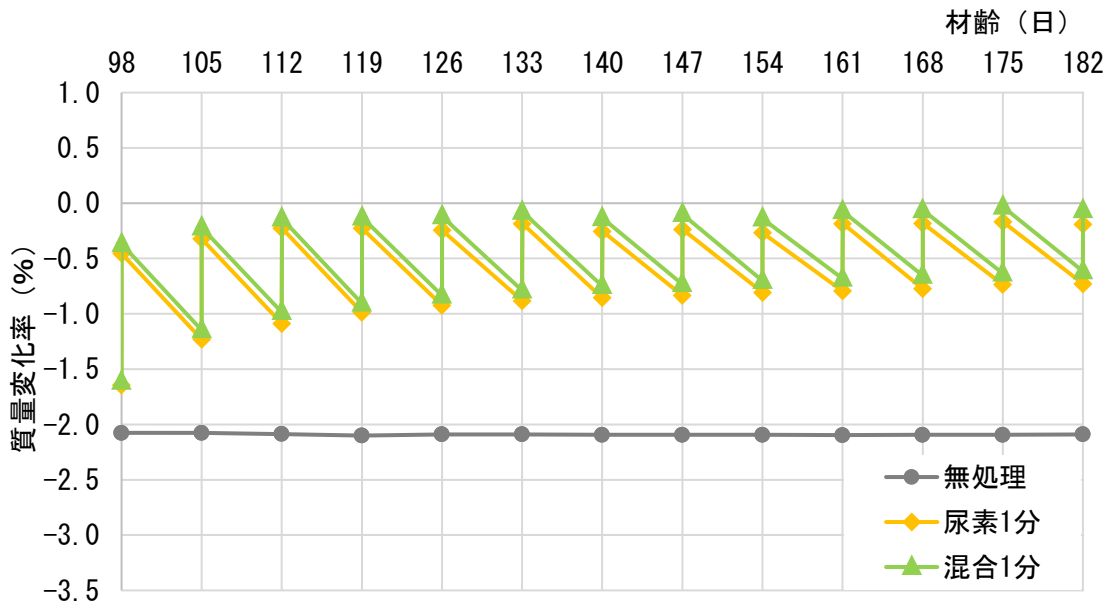


図-7.2.21 質量変化率 (W/C=40%)

表-7.2.30 質量変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -2.076 | -2.076 | -2.076 | -2.076 | -2.087 | -2.087 | -2.100 | -2.100 | -2.090 | -2.090 | -2.090 | -2.090 | -2.093 | -2.093 |
| 尿素1分 | -1.644 | -0.455 | -1.230 | -0.321 | -1.087 | -0.226 | -0.988 | -0.226 | -0.923 | -0.243 | -0.882 | -0.185 | -0.854 | -0.253 |
| 混合1分 | -1.613 | -0.369 | -1.147 | -0.221 | -0.984 | -0.139 | -0.907 | -0.129 | -0.835 | -0.119 | -0.789 | -0.078 | -0.748 | -0.134 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -2.093 | -2.093 | -2.093 | -2.093 | -2.097 | -2.097 | -2.093 | -2.093 | -2.093 | -2.093 | -2.090 | -2.090 | | |
| 尿素1分 | -0.834 | -0.236 | -0.807 | -0.267 | -0.793 | -0.185 | -0.772 | -0.181 | -0.735 | -0.168 | -0.728 | -0.192 | | |
| 混合1分 | -0.733 | -0.098 | -0.702 | -0.139 | -0.682 | -0.072 | -0.656 | -0.062 | -0.636 | -0.032 | -0.615 | -0.062 | | |

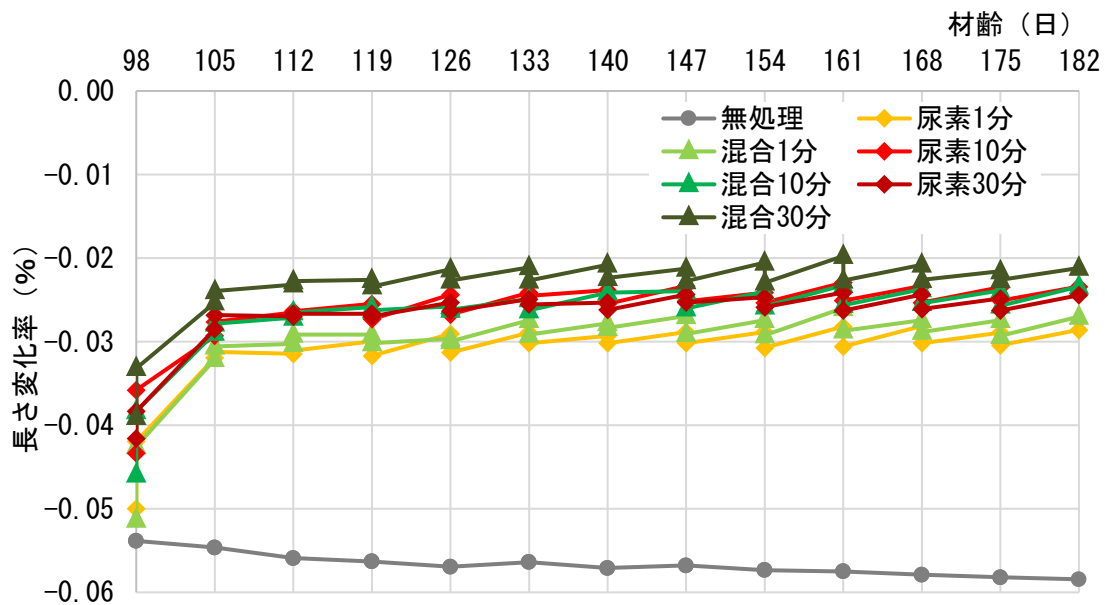


図-7.2.22 長さ変化率 (W/C=50%)

表-7.2.31 長さ変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -0.054 | -0.054 | -0.055 | -0.055 | -0.056 | -0.056 | -0.056 | -0.056 | -0.057 | -0.057 | -0.056 | -0.056 | -0.057 | -0.057 |
| 尿素1分 | -0.050 | -0.042 | -0.032 | -0.031 | -0.031 | -0.031 | -0.030 | -0.032 | -0.029 | -0.031 | -0.029 | -0.030 | -0.029 | -0.030 |
| 尿素10分 | -0.043 | -0.036 | -0.029 | -0.028 | -0.027 | -0.026 | -0.025 | -0.027 | -0.024 | -0.027 | -0.024 | -0.025 | -0.024 | -0.025 |
| 尿素30分 | -0.042 | -0.038 | -0.028 | -0.027 | -0.027 | -0.027 | -0.027 | -0.027 | -0.025 | -0.026 | -0.025 | -0.026 | -0.025 | -0.026 |
| 混合1分 | -0.051 | -0.043 | -0.032 | -0.031 | -0.030 | -0.029 | -0.029 | -0.030 | -0.030 | -0.030 | -0.027 | -0.029 | -0.028 | -0.028 |
| 混合10分 | -0.046 | -0.038 | -0.029 | -0.028 | -0.027 | -0.026 | -0.026 | -0.026 | -0.026 | -0.026 | -0.025 | -0.026 | -0.024 | -0.024 |
| 混合30分 | -0.039 | -0.033 | -0.025 | -0.024 | -0.023 | -0.023 | -0.023 | -0.023 | -0.021 | -0.023 | -0.021 | -0.023 | -0.021 | -0.022 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | | |
| 尿素1分 | -0.029 | -0.030 | -0.029 | -0.031 | -0.028 | -0.031 | -0.028 | -0.030 | -0.029 | -0.030 | -0.029 | -0.030 | | |
| 尿素10分 | -0.023 | -0.025 | -0.024 | -0.025 | -0.023 | -0.025 | -0.023 | -0.025 | -0.023 | -0.025 | -0.023 | -0.025 | | |
| 尿素30分 | -0.024 | -0.025 | -0.025 | -0.026 | -0.024 | -0.026 | -0.024 | -0.026 | -0.025 | -0.026 | -0.024 | -0.026 | | |
| 混合1分 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.026 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.028 | | |
| 混合10分 | -0.024 | -0.026 | -0.024 | -0.026 | -0.023 | -0.026 | -0.024 | -0.025 | -0.024 | -0.026 | -0.023 | -0.025 | | |
| 混合30分 | -0.021 | -0.023 | -0.021 | -0.023 | -0.020 | -0.023 | -0.021 | -0.023 | -0.022 | -0.023 | -0.021 | -0.022 | | |

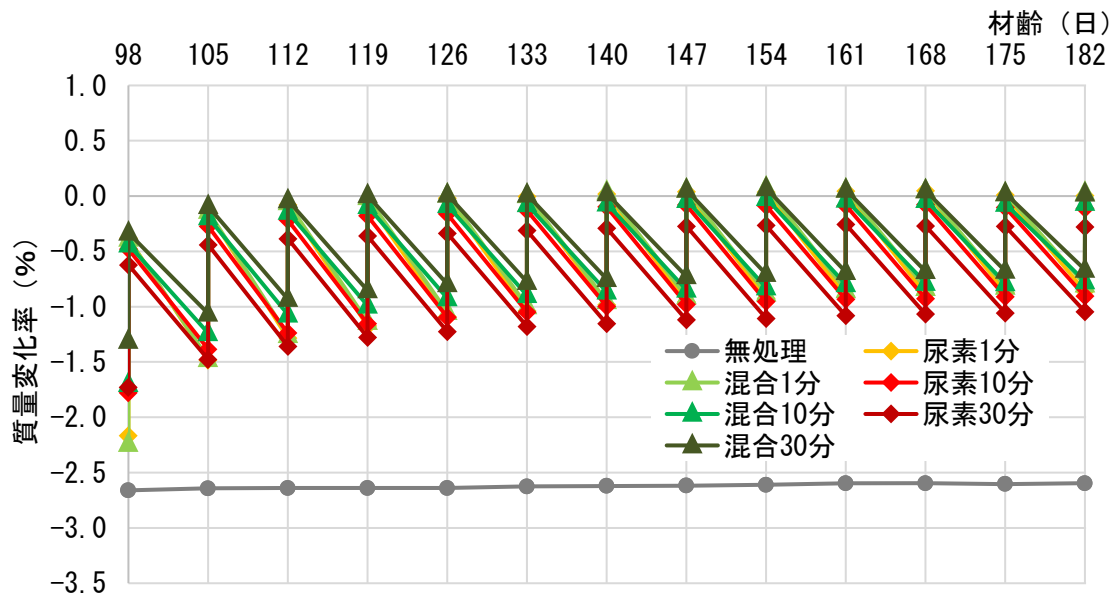


図-7.2.23 質量変化率 (W/C=50%)

表-7.2.32 質量変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -2.660 | -2.660 | -2.643 | -2.643 | -2.639 | -2.639 | -2.639 | -2.639 | -2.639 | -2.639 | -2.625 | -2.625 | -2.621 | -2.621 |
| 尿素1分 | -2.164 | -0.381 | -1.483 | -0.146 | -1.283 | -0.079 | -1.174 | -0.051 | -1.090 | -0.019 | -1.037 | -0.005 | -0.981 | 0.020 |
| 尿素10分 | -1.779 | -0.479 | -1.384 | -0.272 | -1.237 | -0.216 | -1.153 | -0.178 | -1.094 | -0.160 | -1.048 | -0.129 | -0.996 | -0.098 |
| 尿素30分 | -1.728 | -0.622 | -1.476 | -0.441 | -1.357 | -0.385 | -1.276 | -0.360 | -1.224 | -0.336 | -1.179 | -0.311 | -1.154 | -0.290 |
| 混合1分 | -2.242 | -0.385 | -1.473 | -0.135 | -1.257 | -0.057 | -1.137 | -0.011 | -1.049 | 0.014 | -0.996 | 0.006 | -0.950 | 0.038 |
| 混合10分 | -1.700 | -0.438 | -1.239 | -0.193 | -1.071 | -0.144 | -0.990 | -0.091 | -0.924 | -0.081 | -0.896 | -0.074 | -0.864 | -0.067 |
| 混合30分 | -1.309 | -0.332 | -1.062 | -0.092 | -0.931 | -0.039 | -0.853 | 0.008 | -0.796 | 0.015 | -0.775 | 0.015 | -0.750 | 0.025 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -2.618 | -2.618 | -2.611 | -2.611 | -2.596 | -2.596 | -2.597 | -2.597 | -2.603 | -2.603 | -2.596 | -2.596 | | |
| 尿素1分 | -0.957 | 0.041 | -0.925 | 0.037 | -0.904 | 0.044 | -0.886 | 0.048 | -0.869 | 0.009 | -0.862 | 0.006 | | |
| 尿素10分 | -0.978 | -0.080 | -0.954 | -0.087 | -0.933 | -0.084 | -0.926 | -0.077 | -0.909 | -0.101 | -0.905 | -0.111 | | |
| 尿素30分 | -1.119 | -0.273 | -1.105 | -0.266 | -1.081 | -0.255 | -1.067 | -0.269 | -1.056 | -0.273 | -1.046 | -0.280 | | |
| 混合1分 | -0.908 | 0.060 | -0.880 | 0.078 | -0.852 | 0.060 | -0.830 | 0.053 | -0.820 | 0.025 | -0.798 | 0.032 | | |
| 混合10分 | -0.847 | -0.035 | -0.826 | -0.018 | -0.798 | -0.032 | -0.784 | -0.035 | -0.787 | -0.070 | -0.770 | -0.063 | | |
| 混合30分 | -0.726 | 0.057 | -0.705 | 0.072 | -0.687 | 0.057 | -0.680 | 0.050 | -0.676 | 0.026 | -0.665 | 0.023 | | |

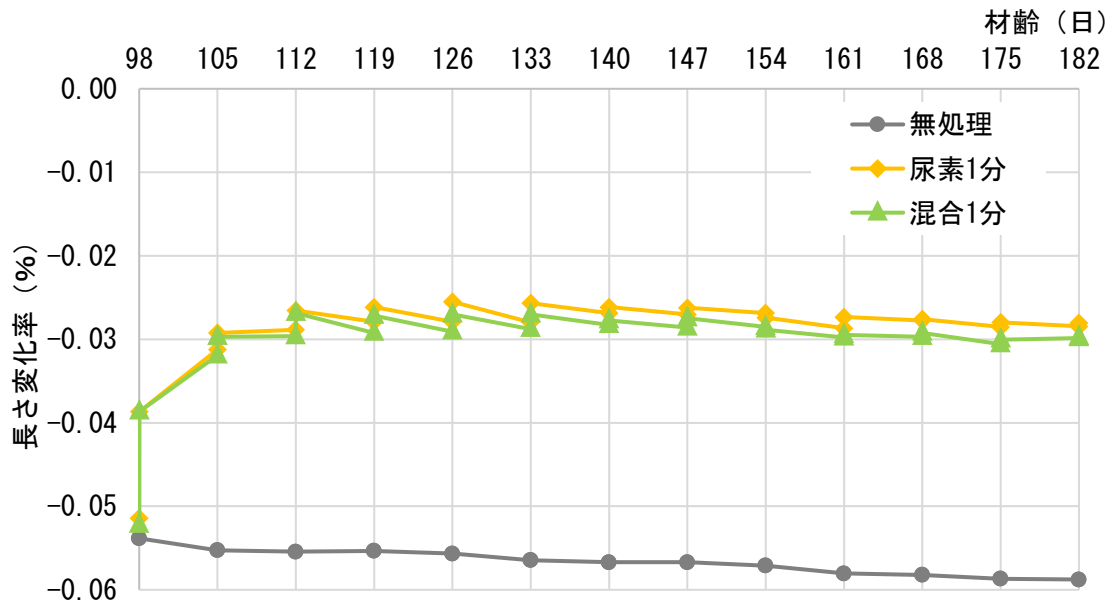


図-7.2.24 長さ変化率 (W/C=60%)

表-7.2.33 長さ変化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -0.054 | -0.054 | -0.055 | -0.055 | -0.055 | -0.055 | -0.055 | -0.055 | -0.056 | -0.056 | -0.056 | -0.056 | -0.057 | -0.057 |
| 尿素1分 | -0.051 | -0.039 | -0.031 | -0.029 | -0.029 | -0.027 | -0.028 | -0.026 | -0.028 | -0.026 | -0.028 | -0.026 | -0.027 | -0.026 |
| 混合1分 | -0.052 | -0.039 | -0.032 | -0.030 | -0.030 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.028 | -0.028 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.057 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.059 | -0.059 | -0.059 | -0.059 | | |
| 尿素1分 | -0.027 | -0.026 | -0.027 | -0.027 | -0.029 | -0.027 | -0.028 | -0.028 | -0.029 | -0.028 | -0.028 | -0.028 | | |
| 混合1分 | -0.029 | -0.027 | -0.029 | -0.029 | -0.030 | -0.029 | -0.030 | -0.029 | -0.031 | -0.030 | -0.030 | -0.030 | | |

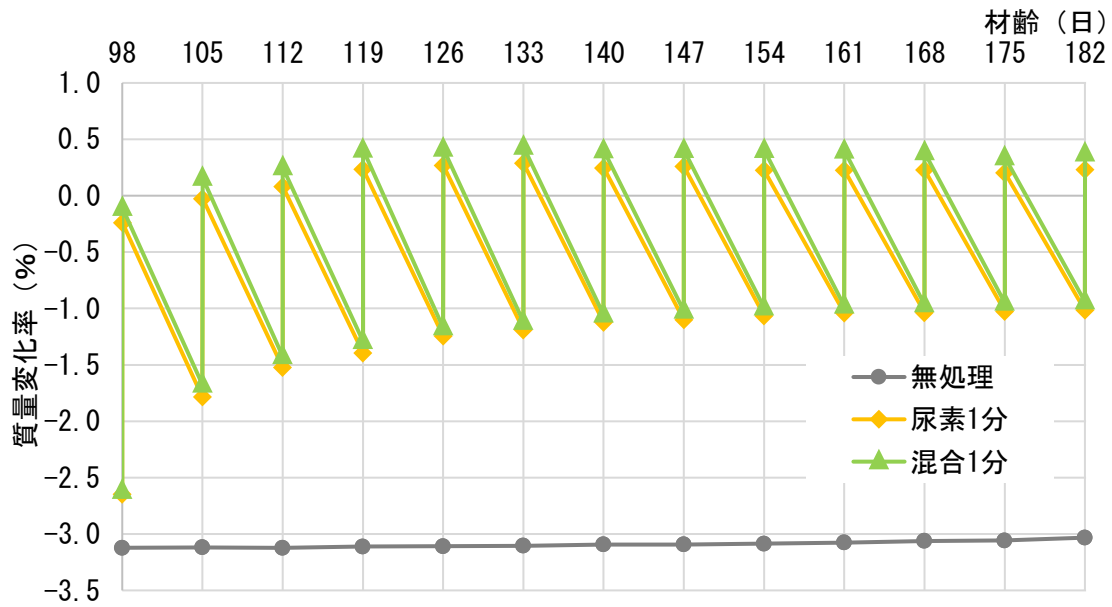


図-7.2.25 質量変化率 (W/C=60%)

表-7.2.34 質量変化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 98日 前 | 98日 後 | 105日 前 | 105日 後 | 112日 前 | 112日 後 | 119日 前 | 119日 後 | 126日 前 | 126日 後 | 133日 前 | 133日 後 | 140日 前 | 140日 後 |
| 無処理 | -3.123 | -3.123 | -3.119 | -3.119 | -3.123 | -3.123 | -3.112 | -3.112 | -3.108 | -3.108 | -3.105 | -3.105 | -3.094 | -3.094 |
| 尿素1分 | -2.648 | -0.239 | -1.784 | -0.025 | -1.523 | 0.082 | -1.394 | 0.235 | -1.244 | 0.268 | -1.190 | 0.290 | -1.122 | 0.247 |
| 混合1分 | -2.618 | -0.108 | -1.676 | 0.157 | -1.424 | 0.251 | -1.291 | 0.409 | -1.169 | 0.416 | -1.119 | 0.434 | -1.054 | 0.402 |
| | 147日 前 | 147日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 161日 前 | 161日 後 | 168日 前 | 168日 後 | 175日 前 | 175日 後 | 182日 前 | 182日 後 | | |
| 無処理 | -3.094 | -3.094 | -3.086 | -3.086 | -3.076 | -3.076 | -3.061 | -3.061 | -3.058 | -3.058 | -3.032 | -3.032 | | |
| 尿素1分 | -1.100 | 0.262 | -1.065 | 0.226 | -1.040 | 0.225 | -1.036 | 0.229 | -1.025 | 0.204 | -1.014 | 0.233 | | |
| 混合1分 | -1.021 | 0.406 | -0.993 | 0.406 | -0.975 | 0.398 | -0.964 | 0.384 | -0.950 | 0.341 | -0.939 | 0.373 | | |

7) まとめ

本節では、尿素と硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬したコンクリート硬化体の基本性状について実験を行い以下の試験結果と知見を得た。

・ 圧縮強度試験

圧縮強度試験において、無処理に比べ混合水溶液に浸漬した供試体では圧縮強度は大きくなった。これは水溶液が内部へ浸入し、尿素が再結晶化することで、硬化組織の空隙が埋められたことや、水分の逸散を防止する保水効果が現れ、多くの水分が硬化体中に残存したためと考えられる。

・ 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験において、無処理に比べ混合水溶液に浸漬した供試体は乾燥収縮が小さくなった。これは圧縮強度と同様に、供試体表面より浸入した水溶液中の尿素が再結晶化すること、尿素的保水効果によって多くの水分が硬化体中に残り、乾燥を防ぐことができたことが要因として考えられる。また浸漬時間が長くなるほど、供試体内部へ浸入する尿素水溶液の量は増加し、再結晶する尿素が多くなるため浸漬時間が長いほど収縮低減効果が高くなったと考えられる。

・ 乾燥湿潤繰返し試験

7 日間に一度、1 時間水に浸漬をすることで、含浸させた尿素的溶出の有無を検討した。しかし、長さ変化では乾燥期間が短いことより、どちらの水溶液を含浸した場合においても尿素的溶出の有無は認められず、モルタルにおける試験と同様の結果は得られなかった。以上より、次節で乾燥期間を延長することで、浸入した水分をより多く放散するような条件で保持している水分量の差から、尿素的水溶液と混合水溶液の差を確認することとした。

7.2.4 再乾燥試験における硫酸ナトリウムによる尿素溶出の抑制作用の有無の検討

1) 概論

前節では、尿素水溶液および混合水溶液を含浸させたコンクリートについて収縮低減効果が確認できたが、乾燥湿潤繰返し試験で尿素水溶液と混合水溶液の差が確認できなかったため、本試験は乾燥湿潤繰返し試験の間隔を21日に延長し、乾燥収縮がより進行する条件としたことで乾燥収縮低減効果の変化がより明確になることを期待し、試験を行った。また、乾燥湿潤繰返し試験が終わった後のコンクリート供試体を再乾燥させることで、さらに乾燥収縮低減効果の変化を測定した。

2) 使用材料

使用材料は7.2.3節と同様とした。

3) 配合条件

本研究における配合条件を表-7.2.35に示す。水セメント比は50%とし、フレッシュ性状の目標値を空気量 $4.5\pm 1.5\%$ 、スランプ値 $8.0\pm 1.5\text{cm}$ とした。

表-7.2.35 配合条件

| W/C (%) | 単位量 (kg/m^3) | | | | SP 添加率 ($\text{C}\times\%$) |
|------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------------|
| | W | C | S | G | SP |
| 50 | 172 | 344 | 811 | 947 | 0.10 |

4) 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

フレッシュ性状試験は第3章、3.3.4節と同様とした。乾燥収縮試験は第6章、6.5.3節と同様とした。気中養生開始から3日目に尿素水溶液または混合水溶液を塗布し、その後再び恒温恒湿室にて気中養生を行い、91日間の測定を継続して実施した。

また、乾燥湿潤繰返し試験および再乾燥試験の実験条件を表-7.2.36、試験手順を図-7.2.26に示す。乾燥湿潤繰返し試験は91日間の乾燥収縮試験終了後の供試体を用いた。乾燥収縮試験終了後、材齢91日から乾燥湿潤繰返し試験に移行した。21日間に一度、コンクリート供試体を水道水に1時間浸漬し、その前後の長さ変化および質量変化の測定を行い、材齢154日まで継続した。水道水は試験前に容器に溜めて静置した状態で使用した。また、試験期間中の気中養生は $20\pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60\pm 5\%\text{Rh}$ の恒温恒湿室にて行った。再乾燥

試験は 154 日までの乾燥湿潤繰返し試験終了後の供試体を用い、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $60\pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室に置き、21 日間に一度、364 日まで長さ変化および質量変化を測定した。比較用として、材齢 3 日目に処理を行わなかった供試体については、水道水への浸漬は行わず、同一頻度で長さ変化および質量変化を材齢 364 日まで測定した。

表-7.2.36 水セメント比 50%における実験条件

| W/C (%) | 3 日目の塗布液 | 塗布回数 (回) | 乾燥湿潤繰返し試験 (21 日間隔) | 再乾燥試験 (21 日間隔) | 記号 塗布液—回数 |
|---------|----------|----------|--------------------|----------------|-----------|
| 50 | 無処理 | — | — | — | N |
| | 尿素水溶液 | 3 | ○ | ○ | 尿素 3 回 |
| | | 6 | ○ | ○ | 尿素 6 回 |
| | | 9 | ○ | ○ | 尿素 9 回 |
| | 混合水溶液 | 3 | ○ | ○ | 混合 3 回 |
| | | 6 | ○ | ○ | 混合 6 回 |
| | | 9 | ○ | ○ | 混合 9 回 |

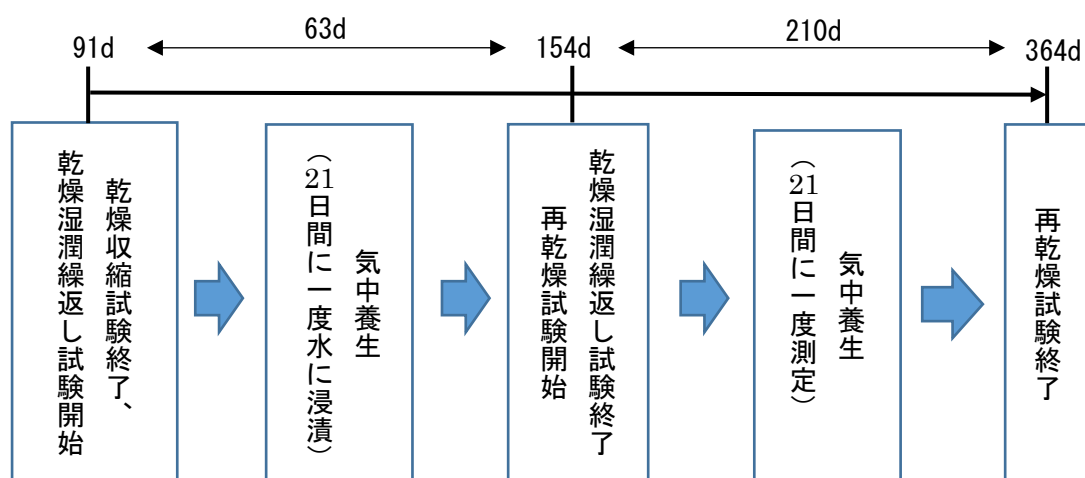


図-7.2.26 乾燥湿潤繰返し試験と再乾燥試験の手順

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果は表-7.2.37 に示すように目標値を満たした。

②長さ変化率および質量変化率の結果

比較のため、経過時間の順に、乾燥収縮試験、乾燥湿潤繰返し試験および再乾燥試験の結果をまとめ、長さ変化率を図-7.2.27、表-7.2.38、質量変化率を図-7.2.28、表-7.2.39

に示す。図-7.2.27より、乾燥湿潤繰返し試験の測定期間を21日に延長した場合についても、乾燥開始3日目に尿素水溶液と混合水溶液を塗布した供試体の乾燥湿潤繰返し試験期間の長さ変化率と質量変化率の差は小さく、尿素的の溶出を防ぐことを目的とした混合水溶液の効果は明確な差は現れなかった。これは、水への浸漬時に供試体内部に浸入した水分が保持されたことが原因と推察される。また、154日から364日までの再乾燥試験により、供試体の乾燥収縮が増大したことで、無処理の長さ変化率に近づき、3日目に浸透した尿素が溶出したためと考えられる。同様に、混合水溶液を塗布した場合においても、有効成分の尿素的の溶出の影響が見られた。以上より、硫酸ナトリウムの混合による尿素的溶出の抑制はできなかったと考えられる。

図-7.2.28より、再乾燥試験期間の質量変化率について、長さ変化率の結果と異なり、乾燥開始3日目に尿素水溶液および混合水溶液を塗布した場合の質量は無処理の場合より大きい。これは、乾燥湿潤繰返した後、溶出してない尿素的が空隙に残留し、保水作用が現れたためと考えられる。

表-7.2.37 フレッシュ性状試験結果

(目標値：空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ値 $8.0 \pm 1.5\text{cm}$)

| W/C (%) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-----------|---------|
| 50 | 4.0 | 8.0 | 20.0 |

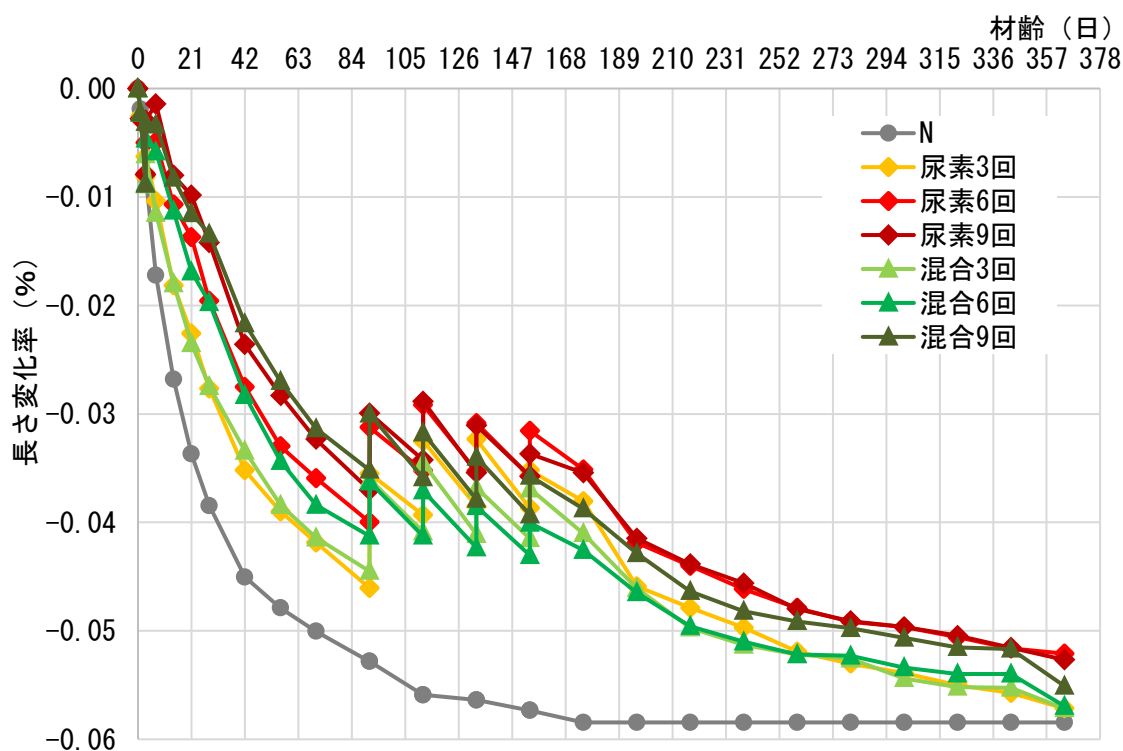


図-7.2.27 長さ変化率 (W/C=50%)

表-7.2.38 長さ変化率 (W/C=50%)

| 3日目 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 前 | 91日 後 | 112日 前 | 112日 後 |
| 無処理 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 | -0.053 | -0.056 | -0.056 |
| 尿素3回 | -0.003 | -0.008 | -0.006 | -0.010 | -0.018 | -0.023 | -0.028 | -0.035 | -0.039 | -0.042 | -0.046 | -0.036 | -0.039 | -0.032 |
| 尿素6回 | -0.003 | -0.008 | -0.005 | -0.005 | -0.011 | -0.014 | -0.020 | -0.028 | -0.033 | -0.036 | -0.040 | -0.031 | -0.035 | -0.029 |
| 尿素9回 | -0.003 | -0.008 | -0.003 | -0.001 | -0.008 | -0.010 | -0.014 | -0.024 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.030 | -0.034 | -0.029 |
| 混合3回 | -0.002 | -0.009 | -0.006 | -0.011 | -0.018 | -0.024 | -0.027 | -0.033 | -0.038 | -0.041 | -0.044 | -0.036 | -0.041 | -0.035 |
| 混合6回 | -0.002 | -0.009 | -0.005 | -0.006 | -0.011 | -0.017 | -0.020 | -0.028 | -0.034 | -0.038 | -0.041 | -0.036 | -0.041 | -0.037 |
| 混合9回 | -0.002 | -0.009 | -0.003 | -0.003 | -0.008 | -0.012 | -0.013 | -0.022 | -0.027 | -0.031 | -0.035 | -0.030 | -0.036 | -0.032 |
| | 133日 前 | 133日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 175日 | 196日 | 217日 | 238日 | 259日 | 280日 | 301日 | 322日 | 343日 | 364日 |
| 無処理 | -0.056 | -0.056 | -0.057 | -0.057 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 | -0.058 |
| 尿素3回 | -0.039 | -0.032 | -0.039 | -0.035 | -0.038 | -0.046 | -0.048 | -0.050 | -0.052 | -0.053 | -0.054 | -0.055 | -0.056 | -0.057 |
| 尿素6回 | -0.035 | -0.031 | -0.036 | -0.032 | -0.035 | -0.042 | -0.044 | -0.046 | -0.048 | -0.049 | -0.050 | -0.051 | -0.052 | -0.052 |
| 尿素9回 | -0.035 | -0.031 | -0.036 | -0.034 | -0.035 | -0.041 | -0.044 | -0.046 | -0.048 | -0.049 | -0.050 | -0.050 | -0.052 | -0.053 |
| 混合3回 | -0.041 | -0.037 | -0.041 | -0.037 | -0.041 | -0.046 | -0.050 | -0.051 | -0.052 | -0.053 | -0.054 | -0.055 | -0.055 | -0.057 |
| 混合6回 | -0.042 | -0.039 | -0.043 | -0.040 | -0.043 | -0.046 | -0.050 | -0.051 | -0.052 | -0.052 | -0.053 | -0.054 | -0.054 | -0.057 |
| 混合9回 | -0.038 | -0.034 | -0.039 | -0.036 | -0.039 | -0.043 | -0.046 | -0.048 | -0.049 | -0.050 | -0.051 | -0.052 | -0.052 | -0.055 |

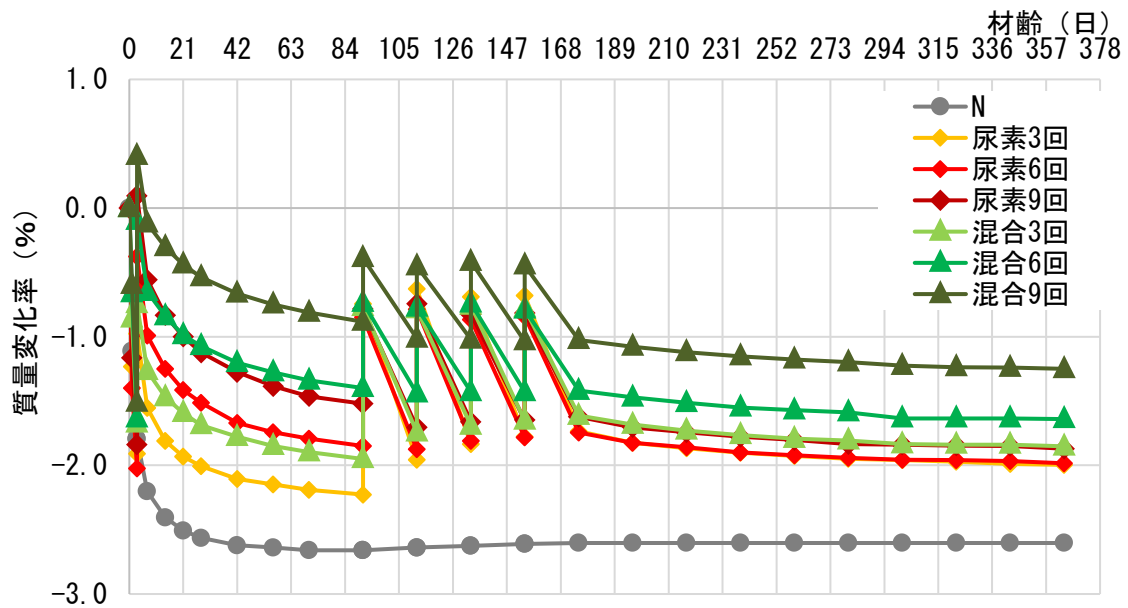


図-7.2.28 質量変化率 (W/C=50%)

表-7.2.39 質量変化率 (W/C=50%)

| 3日目 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 前 | 91日 後 | 112日 前 | 112日 後 |
| 無処理 | -1.112 | -1.794 | -1.794 | -2.202 | -2.405 | -2.508 | -2.564 | -2.621 | -2.639 | -2.660 | -2.660 | -2.660 | -2.639 | -2.639 |
| 尿素3回 | -1.233 | -1.910 | -0.976 | -1.554 | -1.810 | -1.931 | -2.006 | -2.106 | -2.149 | -2.191 | -2.227 | -0.745 | -1.956 | -0.627 |
| 尿素6回 | -1.400 | -2.024 | -0.377 | -0.990 | -1.251 | -1.415 | -1.514 | -1.671 | -1.743 | -1.792 | -1.849 | -0.848 | -1.875 | -0.787 |
| 尿素9回 | -1.165 | -1.838 | 0.096 | -0.556 | -0.833 | -0.999 | -1.123 | -1.275 | -1.385 | -1.463 | -1.520 | -0.783 | -1.704 | -0.744 |
| 混合3回 | -0.859 | -1.673 | -0.747 | -1.266 | -1.470 | -1.593 | -1.687 | -1.779 | -1.849 | -1.898 | -1.951 | -0.768 | -1.744 | -0.786 |
| 混合6回 | -0.662 | -1.635 | -0.098 | -0.651 | -0.840 | -0.988 | -1.072 | -1.203 | -1.277 | -1.340 | -1.398 | -0.735 | -1.440 | -0.772 |
| 混合9回 | -0.597 | -1.513 | 0.406 | -0.120 | -0.304 | -0.438 | -0.537 | -0.664 | -0.749 | -0.813 | -0.883 | -0.389 | -1.014 | -0.452 |
| | 133日 前 | 133日 後 | 154日 前 | 154日 後 | 175日 | 196日 | 217日 | 238日 | 259日 | 280日 | 301日 | 322日 | 343日 | 364日 |
| 無処理 | -2.625 | -2.625 | -2.611 | -2.611 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 | -2.603 |
| 尿素3回 | -1.835 | -0.691 | -1.778 | -0.680 | -1.735 | -1.824 | -1.867 | -1.903 | -1.928 | -1.949 | -1.960 | -1.970 | -1.988 | -1.995 |
| 尿素6回 | -1.810 | -0.866 | -1.782 | -0.841 | -1.746 | -1.825 | -1.860 | -1.900 | -1.921 | -1.942 | -1.957 | -1.960 | -1.967 | -1.985 |
| 尿素9回 | -1.662 | -0.826 | -1.647 | -0.815 | -1.623 | -1.704 | -1.743 | -1.779 | -1.803 | -1.835 | -1.839 | -1.846 | -1.849 | -1.871 |
| 混合3回 | -1.691 | -0.758 | -1.652 | -0.779 | -1.614 | -1.684 | -1.730 | -1.765 | -1.793 | -1.807 | -1.835 | -1.838 | -1.838 | -1.852 |
| 混合6回 | -1.430 | -0.741 | -1.430 | -0.788 | -1.419 | -1.472 | -1.514 | -1.551 | -1.572 | -1.588 | -1.635 | -1.635 | -1.635 | -1.640 |
| 混合9回 | -1.021 | -0.417 | -1.035 | -0.445 | -1.025 | -1.078 | -1.120 | -1.152 | -1.177 | -1.198 | -1.226 | -1.237 | -1.240 | -1.251 |

7) まとめ

本節では、尿素および硫酸ナトリウムの混合水溶液に浸漬したコンクリート硬化体を用い、乾燥湿潤繰返し試験の間隔を 21 日に延長した場合における長さ変化および質量変化を測定し、乾燥湿潤繰返し試験が終わった後、再乾燥試験も行い、以下の試験結果と知見を得た。

・乾燥湿潤繰返し試験

21 日間に一度、1 時間水に浸漬をすることにより、含浸させた尿素有無を検討した。しかし、どちらの水溶液を含浸した場合においても尿素溶出の影響は確認できず、モルタルにおける試験と同様の結果は得られなかった。

・再乾燥収縮試験

再乾燥収縮試験において、3 日目に混合水溶液を塗布した場合においても、有効成分の尿素有無の影響が見られた。以上より、コンクリートに対して硫酸ナトリウムの混合による尿素有無の抑制はできなかったと考えられる。

本節の結果と比べ、7.2.2 節では、硫酸ナトリウムの混合により、乾燥収縮低減効果が維持された理由は尿素有無を抑えたためではなく、水に浸漬した後に供試体内部が湿潤状態であることにより収縮低減効果が維持されたと考えられる。以上より、次節で尿素有無の溶出問題を解決するために、別の材料を用い、再検討を試みる。

7.2.5 尿素水溶液に珪酸ナトリウムを混合した場合のコンクリートにおける乾燥収縮低減効果の持続能力

1) 概論

本節では、防水材として多用されている珪酸ナトリウムの防水性に着目し、尿素水溶液および珪酸ナトリウムの混合水溶液を塗布した場合における乾燥収縮低減効果を調べた。また、乾燥湿潤繰返し試験および再乾燥試験も行い、珪酸ナトリウムの混合による尿素的溶出の抑制作用についても検討した。

2) 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-7.2.40に示す。混合水溶液は7.2.3節と同様に質量比で濃度50%となるように、水道水50%、尿素45%、珪酸ナトリウム5%の割合で溶解させて水溶液とした。

表-7.2.40 使用材料

| 種別 | 名称 | 記号 | 密度 |
|-----------|---------------------------------------|----|------|
| 水 | 上水道水 | W | 1.00 |
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.56 |
| 粗骨材 | 笠間産碎石 (F.M. : 6.23、吸水率 : 0.75) | G | 2.64 |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 | SP | 1.00 |
| 化学系 材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 珪酸ナトリウム (Na_2SiO_3) | Si | 2.40 |

3) 配合条件

本研究における配合条件計を表-7.2.41に示す。水セメント比は50%とし、フレッシュ性状の目標値を空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ値 $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ とした。

表-7.2.41 配合条件

| W/C (%) | 単位量 (kg/m^3) | | | | SP 添加率 ($\text{C} \times \%$) |
|------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|------------------------------------|
| | W | C | S | G | SP |
| 50 | 170 | 340 | 798 | 969 | 0.10 |

4) 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

7.2.4節と同様とした。

また、実験条件を表-7.2.42、試験手順を図-7.2.29に示す。乾燥湿潤繰返し試験は28日間の乾燥収縮試験終了後の供試体を用いた。供試体は $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $60\pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室にて静置し、材齢3日目に混合水溶液を塗布し、長さ変化および質量変化を測定した。

材齢28日から乾燥湿潤繰返し試験に移行した。本試験は7日間に一度、コンクリート供試体を水道水に1時間浸漬し、その前後における長さ変化および質量変化の測定を行い、材齢42日まで継続した。試験期間中の気中養生は $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $60\pm 5\% \text{Rh}$ の恒温恒湿室にて行った。材齢42日から再乾燥試験開始し、材齢301日まで21日間に一度、長さ変化および質量変化の測定を行った。

比較用として、材齢3日目に塗布していない供試体については、一般的な乾燥収縮試験と同様に、途中何の処理も行わず、長さ変化および質量変化を材齢301日まで測定した。

表-7.2.42 水セメント比50%についての実験条件

| W/C (%) | 3日目の塗布液 | 塗布回数 (回) | 乾燥湿潤繰返し試験 (28日~42日) | 再乾燥試験 (42日~301日) | 記号 塗布液—回数 |
|---------|---------|----------|---------------------|------------------|-----------|
| 50 | 無処理 | — | — | — | N |
| | 混合水溶液 | 3 | 7日間隔 | 21日間隔 | 混合3回 |
| | | 6 | | | 混合6回 |
| 9 | 混合9回 | | | | |

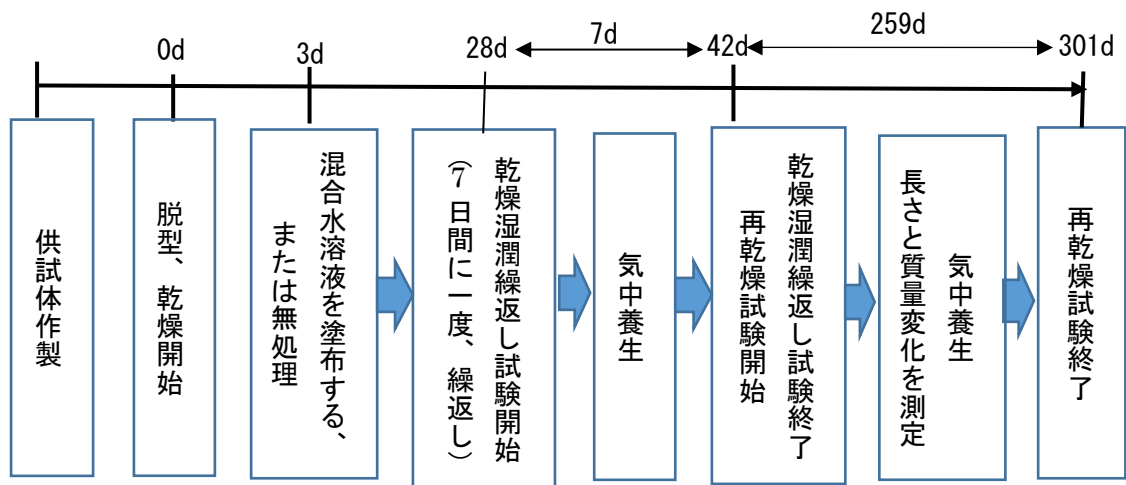


図-7.2.29 試験の手順

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果は表-7.2.43 に示すように目標値を満たした。

表-7.2.43 フレッシュ性状試験結果
(目標値：空気量 4.5±1.5%、スランプ値 8.0±1.5cm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-----------|---------|
| 50 | 3.4 | 9.0 | 31.0 |

②長さ変化率および質量変化率の結果

経過時間の順に、試験結果をまとめ、長さ変化率を図-7.2.30、表-7.2.44、質量変化率を図-7.2.31、表-7.2.45 に示す。図-7.2.30 より、乾燥開始3日目に尿素および珪酸ナトリウムの混合水溶液を塗布した供試体の乾燥収縮は小さくなり、尿素の乾燥収縮低減効果が得られた。しかし、乾燥湿潤繰返し試験期間中には、尿素の溶出を防ぐことを目的とした混合水溶液の効果は明確にならなかった。これは、前節と同様に水への浸漬時に供試体内部に浸入した水分が保持されたことが原因と推察される。また、再乾燥試験結果より、再乾燥させた供試体の乾燥収縮が増大したことで、無処理の長さ変化率に近づき、3日目に浸透した尿素が溶出したためと考えられる。以上より、前節と同じく、珪酸ナトリウムの混合による尿素の溶出の抑制は十分にできなかったと考えられる。

図-7.2.31 の質量変化率について、長さ変化率の結果と違い、3日目に混合水溶液を塗布した場合の質量は無処理の場合より大きかった。これも、乾燥湿潤繰返した後、尿素は空隙に残留し、保水作用を示したためと考えられる。

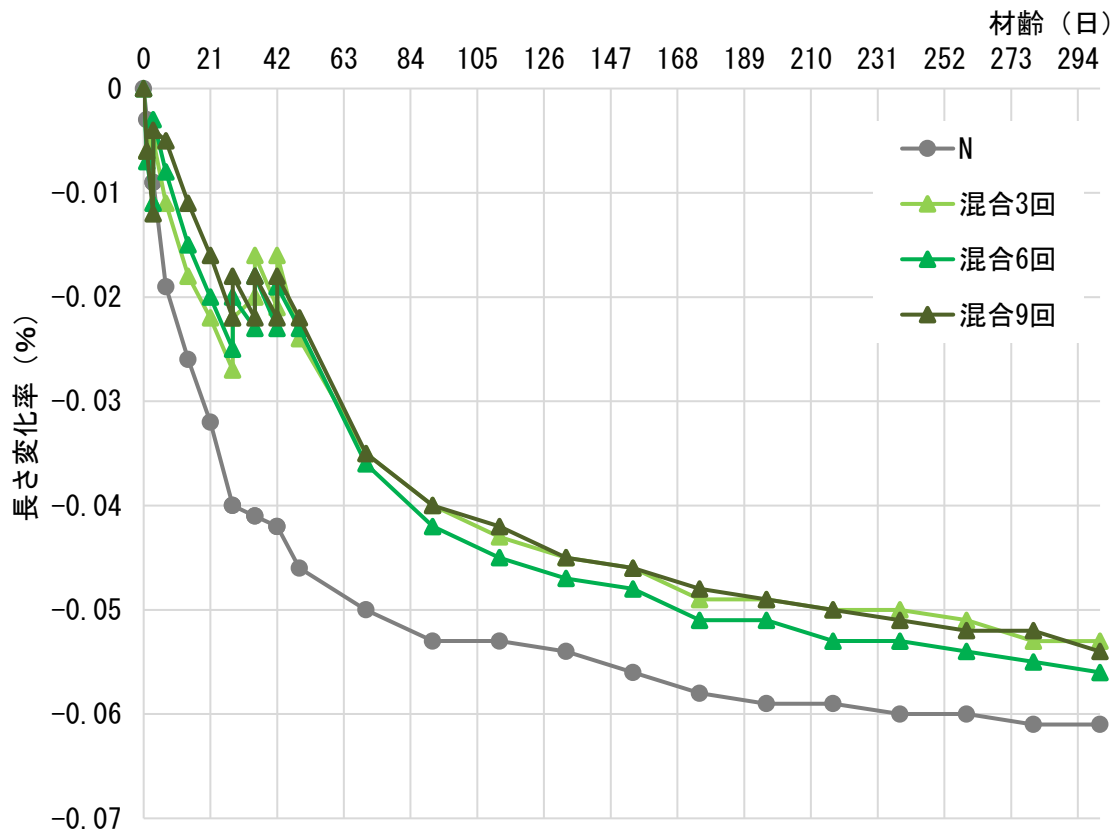


図-7.2.30 長さ変化率 (W/C=50%)

表-7.2.44 長さ変化率 (W/C=50%)

| 3日目 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 前 | 28日 後 | 35日 前 | 35日 後 | 42日 前 | 42日 後 | 49日 |
| 無処理 | 0 | -0.003 | -0.009 | -0.009 | -0.019 | -0.026 | -0.032 | -0.040 | -0.040 | -0.041 | -0.041 | -0.042 | -0.042 | -0.046 |
| 混合3回 | 0 | -0.006 | -0.011 | -0.005 | -0.011 | -0.018 | -0.022 | -0.027 | -0.022 | -0.020 | -0.016 | -0.021 | -0.016 | -0.024 |
| 混合6回 | 0 | -0.007 | -0.011 | -0.003 | -0.008 | -0.015 | -0.020 | -0.025 | -0.020 | -0.023 | -0.018 | -0.023 | -0.019 | -0.023 |
| 混合9回 | 0 | -0.006 | -0.012 | -0.004 | -0.005 | -0.011 | -0.016 | -0.022 | -0.018 | -0.022 | -0.018 | -0.022 | -0.018 | -0.022 |
| | 70日 | 91日 | 112日 | 133日 | 154日 | 175日 | 196日 | 217日 | 238日 | 259日 | 280日 | 301日 | | |
| 無処理 | -0.050 | -0.053 | -0.053 | -0.054 | -0.056 | -0.058 | -0.059 | -0.059 | -0.060 | -0.060 | -0.061 | -0.061 | | |
| 混合3回 | -0.035 | -0.040 | -0.043 | -0.045 | -0.046 | -0.049 | -0.049 | -0.050 | -0.050 | -0.051 | -0.053 | -0.053 | | |
| 混合6回 | -0.036 | -0.042 | -0.045 | -0.047 | -0.048 | -0.051 | -0.051 | -0.053 | -0.053 | -0.054 | -0.055 | -0.056 | | |
| 混合9回 | -0.035 | -0.040 | -0.042 | -0.045 | -0.046 | -0.048 | -0.049 | -0.050 | -0.051 | -0.052 | -0.052 | -0.054 | | |

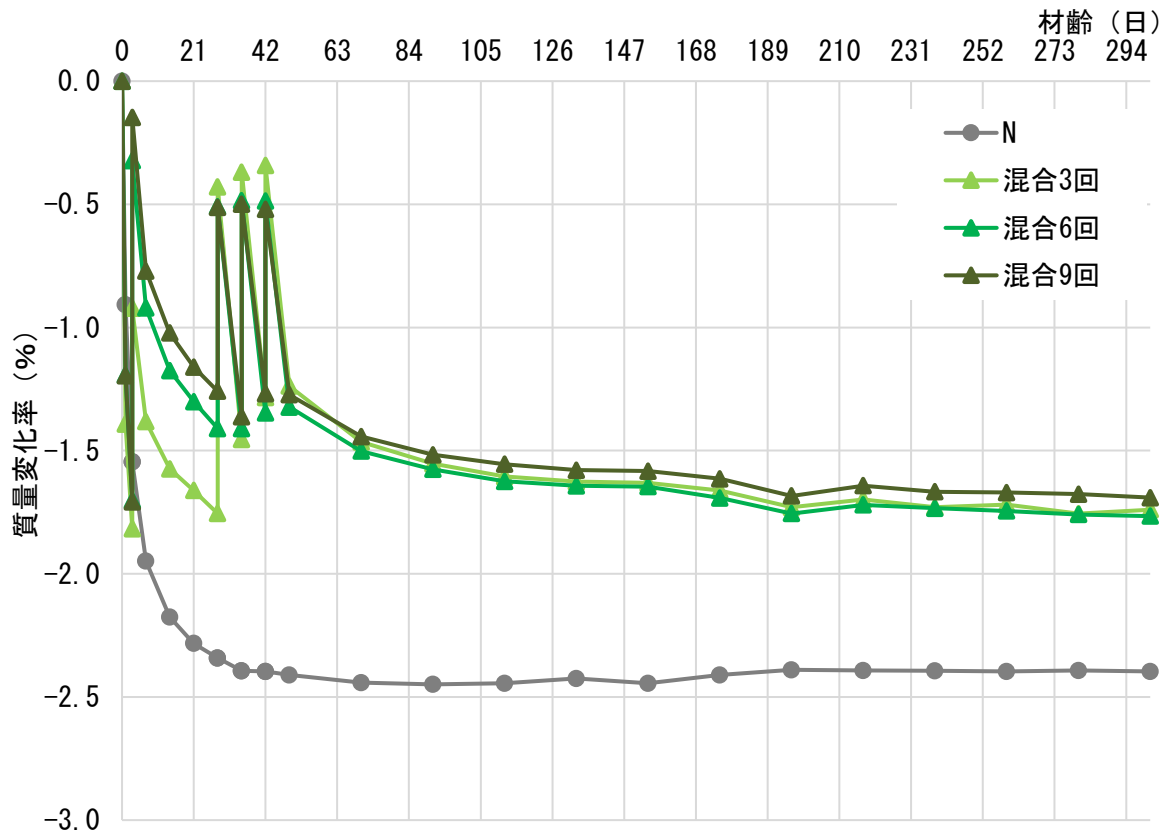


図-7.2.31 質量変化率 (W/C=50%)

表-7.2.45 質量変化率 (W/C=50%)

| 3日目 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 前 | 28日 後 | 35日 前 | 35日 後 | 42日 前 | 42日 後 | 49日 |
| 無処理 | 0 | -0.908 | -1.546 | -1.546 | -1.949 | -2.176 | -2.283 | -2.342 | -2.342 | -2.394 | -2.394 | -2.397 | -2.397 | -2.411 |
| 混合3回 | 0 | -1.393 | -1.817 | -0.922 | -1.382 | -1.574 | -1.662 | -1.755 | -0.430 | -1.455 | -0.369 | -1.284 | -0.342 | -1.238 |
| 混合6回 | 0 | -1.193 | -1.703 | -0.323 | -0.921 | -1.175 | -1.301 | -1.410 | -0.510 | -1.411 | -0.485 | -1.347 | -0.486 | -1.323 |
| 混合9回 | 0 | -1.196 | -1.708 | -0.147 | -0.771 | -1.022 | -1.161 | -1.259 | -0.513 | -1.363 | -0.499 | -1.269 | -0.520 | -1.273 |
| | 70日 | 91日 | 112日 | 133日 | 154日 | 175日 | 196日 | 217日 | 238日 | 259日 | 280日 | 301日 | | |
| 無処理 | -2.442 | -2.449 | -2.445 | -2.425 | -2.445 | -2.411 | -2.390 | -2.393 | -2.394 | -2.397 | -2.393 | -2.397 | | |
| 混合3回 | -1.465 | -1.553 | -1.605 | -1.626 | -1.631 | -1.662 | -1.730 | -1.699 | -1.730 | -1.719 | -1.756 | -1.740 | | |
| 混合6回 | -1.502 | -1.576 | -1.625 | -1.643 | -1.646 | -1.692 | -1.755 | -1.720 | -1.734 | -1.745 | -1.759 | -1.766 | | |
| 混合9回 | -1.443 | -1.517 | -1.555 | -1.579 | -1.583 | -1.614 | -1.684 | -1.642 | -1.667 | -1.670 | -1.677 | -1.691 | | |

7) まとめ

本節では、尿素と珪酸ナトリウムの混合水溶液を塗布したコンクリート硬化体を用い、乾燥湿潤繰返し試験の長さ変化および質量変化を測定し、乾燥湿潤繰返し試験が終わった後、再乾燥試験も行い、以下の試験結果と知見を得た。

・乾燥湿潤繰返し試験

7日間に一度、1時間水に浸漬をすることで、含浸させた尿素の溶出の影響は認められず、前節と同様の結果は得た。

・再乾燥収縮試験

再乾燥収縮試験において、3日目に混合水溶液を塗布した場合において、有効成分の尿素の溶出の影響が見られた。以上より、コンクリートにおける珪酸ナトリウムの混合による尿素の溶出の抑制も十分にできなかったと考えられる。

7.2.1節から本節までの結果について、硫酸ナトリウムまたは珪酸ナトリウムの混合により、乾燥収縮低減効果を維持することができなかったと考えられる。以上より、尿素水溶液の塗布による乾燥収縮低減方法は一般的な環境に適用できるが、雨水環境に適用するため、さらに検討が必要である。

7.3 尿素水溶液の寒冷環境での使用

7.3.1 不凍液の混合による尿素結晶温度の変化の確認試験

1) 試験目的

尿素の溶解は吸熱反応であるため、尿素を水に溶かすほど尿素水溶液自体の温度が低下する。そのため、溶解時には外側から加熱し、水温をある程度維持しなくてはならない。また、寒冷時施工を想定した場合には、気温の低い環境下で低温の構造物に尿素水溶液を含浸させた際、尿素が即座に結晶化し、コンクリートの表層部より奥まで浸透しないという問題がある。本節では、低温において凍結しにくい不凍液の耐低温性能に着目し、尿素と不凍液を混合した水溶液（以下、不凍液混合水溶液）における尿素結晶化温度の変化に関する試験を行った。

2) 使用材料

本実験では尿素は工業用の市販品を用い、不凍液は市販品の「ナイブライン Z1」を用いた。「ナイブライン Z1」の総合仕様書¹⁾に基づき、凍結温度および不凍液濃度の関係を図-7.3.1に示す。図より、不凍液濃度が高いほど凍結温度が下がる。 -10°C 程度以下における使用を想定し、不凍液の濃度がそれぞれ30%、40%、50%となるように水と混合し、そこへ飽和するまで尿素を溶解させて不凍液混合水溶液を作製した。また、不凍液を混和しない尿素濃度50%の水溶液を含めた4種類の水溶液を用いて実験を行った。

また、比較のため、市販品の凍結防止剤の「メタブルー」と「凍ランブルー」の2種類の不凍液を用いて同様な尿素結晶温度の変化の確認試験を行った。

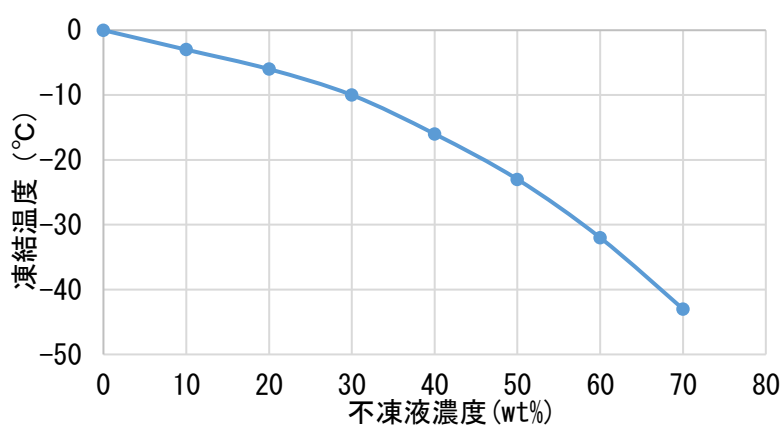


図-7.3.1 「ナイブライン Z1」凍結温度と不凍液濃度の関係

3) 試験方法

試験方法を次に示す。また、実験中の様子を写真-7.3.1に示す。

- (1) 透明な容器に4種類の水溶液をそれぞれ入れる。
- (2) 水溶液の入った容器を氷水に浸して温度を徐々に下げる。
- (3) 容器内に結晶化した尿素が目視で確認できた時点で温度計を用いて温度を測定し、これを結晶化温度とした。

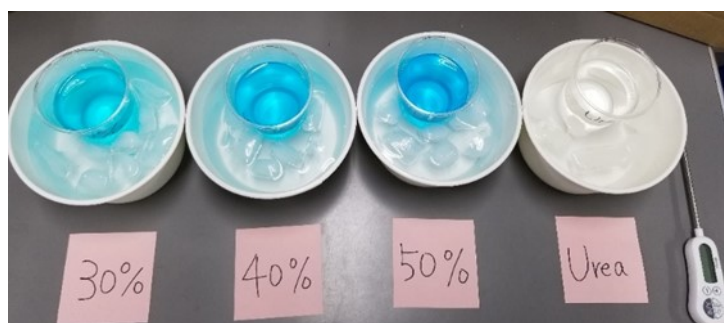


写真-7.3.1 実験の様子

3) 試験結果

3種類の各濃度の不凍液混合水溶液の質量割合および尿素の結晶化温度の関係を表-7.3.1に示す。不凍液濃度および尿素結晶化温度の関係に着目すると、尿素水溶液の結晶化温度は8°Cであるのに対し、各濃度の不凍液混合水溶液の結晶化温度は6°C以下に抑えられ、不凍液を混合することで結晶化温度は低下した。また、不凍液の混合量が増加するほど結晶化温度は低下した。以上より、不凍液を混合することで尿素結晶化温度は低下することが確認できた。

表-7.3.1 各水溶液における尿素の結晶化温度

| 水溶液名称 | 質量比 | 尿素の質量割合 (%) | 尿素の結晶化温度 (°C) | |
|-------------|--------------|-------------|---------------|----|
| | 不凍液 : 水 : 尿素 | | | |
| 尿素水溶液 | 0 : 5 : 5 | 50 | 8 | |
| 30%不凍液混合水溶液 | 3 : 7 : 8 | 44 | ナイブライン Z1 | 5 |
| | | | メタブルー | 5 |
| | | | 凍ランブル | 6 |
| 40%不凍液混合水溶液 | 4 : 6 : 7 | 41 | ナイブライン Z1 | 4 |
| | | | メタブルー | 1 |
| | | | 凍ランブル | 2 |
| 50%不凍液混合水溶液 | 5 : 5 : 6.5 | 40 | ナイブライン Z1 | 1 |
| | | | メタブルー | -1 |
| | | | 凍ランブル | 0 |

7.3.2 尿素水溶液に不凍液を混合した場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果

1) 概論

本節では、モルタル供試体を不凍混合水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮試験および圧縮強度試験を行い、不凍液の混合による乾燥収縮への影響について検討を行った。

2) 使用材料

本実験で用いた使用材料を表-7.3.2に示す。浸漬液は、7.3.1節に示す尿素水溶液または、「ナイブライン Z1」の30%不凍液混合水溶液を用いた。

表-7.3.2 使用材料

| 種類 | 名称 | 記号 | 密度 (g/cm ³) |
|-----------|------------------------------------|----|-------------------------|
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 練混水 | 宇都宮市水道水 | W | 1.00 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.61 |
| 化学系 材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 不凍液 (ナイブライン Z1) | AF | 1.11 |

3) 配合条件

本研究で用いた計画配合を表-7.3.3に示す。モルタルの水セメント比は50%とした。目標フレッシュ性状は、15打フロー200±10mm、空気量2.0±1.5%とした。

表-7.3.3 計画配合

| W/C (%) | S/C | 単位量 (kg/m ³) | | |
|------------|-----|--------------------------|-----|------|
| | | W | C | S |
| 50 | 2.3 | 292 | 583 | 1341 |

4) 練混ぜ手順

第3章、3.2.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

第3章、3.2.4節と同様とした。また、乾燥収縮実験概要について、3日目に尿素水溶液および30%不凍液混合水溶液にモルタル供試体を浸漬した場合における乾燥収縮試験を行った。30%不凍液混合水溶液を用いた理由は、-10℃程度の環境下における施工を想定していることおよび、尿素濃度が最も高いことである。比較のため、3日目に無処理の場合に

おける乾燥収縮試験も行った。実験条件を表-7.3.4に示す。

表-7.3.4 不凍液混合水溶液に浸漬した場合の実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 浸漬液-時間 | 圧縮強度試験 |
|---------|-------------|----------|--------------|--------|
| 50 | 無し | — | N | ○ |
| | 尿素水溶液 | 1 | 尿素 1分 | — |
| | | 10 | 尿素 10分 | — |
| | | 30 | 尿素 30分 | — |
| | 30%不凍液混合水溶液 | 1 | 30%不凍液混合 1分 | ○ |
| | | 10 | 30%不凍液混合 10分 | ○ |
| | | 30 | 30%不凍液混合 30分 | ○ |

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果を表-7.3.5に示す。空気量またはフロー値のどちらも目標値を満たした。

表-7.3.5 フレッシュ性状試験結果

(目標値、空気量 $2 \pm 1.5\%$ 、15打フロー $200 \pm 10\text{mm}$)

| W/C (%) | 空気量 (%) | 15打フロー (mm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-------------|---------|
| 50 | 2.4 | 220 | 15 |

②圧縮強度試験

不凍液混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度の試験結果を図-7.3.2、表-7.3.6に示す。図より、30%不凍液混合水溶液に浸漬した場合について、尿素水溶液に浸漬した場合と同様に、圧縮強度は増加傾向を示すことが確認できた。材齢7日における圧縮強度はほとんど同等であるが、材齢28日においては浸漬時間が長いほど圧縮強度の増加が顕著に現れ、長期的な強度増進が認められた。これは、浸漬時間が長いほど、供試体表面の空隙から供試体内部へ浸入した混合水溶液が多くなり、尿素水溶液に浸漬した場合と同様の要因で、圧縮強度が高くなったと考えられる。

また、不凍液中における低級アルコール成分の作用により硬化体中に残り続ける水分がさらに増えたことおよび、より奥深くまで不凍液混合水溶液が浸透したことにより、硬化体中の組織がより密実になり、材齢28日における長期的かつ顕著な強度増加が現れたことが推察される。

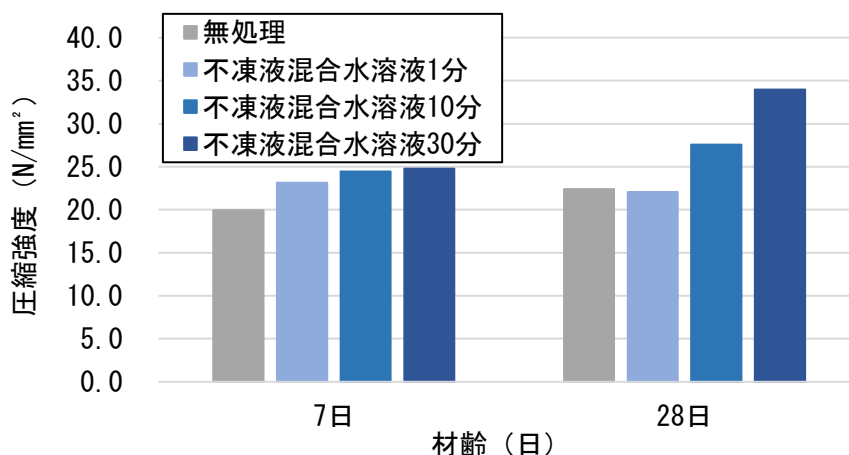


図-7.3.2 不凍液混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果

表-7.3.6 混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果

| W/C (%) | 浸漬液-時間 | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|---------|--------------|---------------------------|------|
| | | 7日 | 28日 |
| 50% | 無処理 | 19.9 | 22.4 |
| | 不凍液混合水溶液 1分 | 23.2 | 22.1 |
| | 不凍液混合水溶液 10分 | 24.5 | 27.6 |
| | 不凍液混合水溶液 30分 | 24.8 | 34.0 |

③乾燥収縮試験結果

尿素水溶液または30%不凍液混合水溶液に浸漬した場合の長さ変化率を図-7.3.3、表-7.3.7、質量変化率を図-7.3.4、表-7.3.8に示す。

図-7.3.3より、30%不凍液混和水溶液の含浸により乾燥収縮の低減効果が認められた。また、不凍液混和水溶液の浸漬時間を1分、10分、30分間とした場合には、尿素水溶液と同様に浸漬時間を長くするほど収縮低減効果が大きくなる傾向を示した。これは3章と同様に、浸漬時間が長くなるほど供試体表面の空隙から内部へ浸入する水溶液量が増加し、その後の乾燥により多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し析出する。その析出した尿素により結晶圧が大きく作用したことにより収縮作用が抑制されると推察される。またそれぞれの浸漬時間において、尿素水溶液に浸漬した場合は混合水溶液に浸漬した場合に比べて、乾燥収縮低減効果が高くなったことが分かった。これは、3章の結果と同様に、20°Cにおける尿素濃度50%の水溶液はほぼ飽和状態であるため、溶液の水分が蒸散することで容易に且つ、多量に結晶化し、最も高い効果を発揮したと考えられる。これに対して、不凍液混合水溶液の尿素濃度は44%であり、乾燥作用による水分の逸散により尿素濃度が相対的に高くなり、飽和状態となるまでに多くの水分が逸散しなければならず、そのために乾燥収縮は進みやすくなること。尿素が析出し、収縮低減効果を発揮するまでの時間を要することや、元々析

出量が少ないため、収縮低減効果が低くなると考えられる。以上より、不凍液が供試体に悪影響を及ぼすことはなく、尿素による乾燥収縮低減効果が維持されたと考えられる。本実験で使用した不凍液は、エチレングリコールが主成分である「ナイブライン Z1」である。エチレングリコールは低級アルコールに属され、既往の研究により、低級アルコール系の乾燥収縮低減剤を用いることで空隙水の表面張力が低下し、収縮を低減する効果が認められている²⁾。図-7.3.4より、浸漬時間 10 分および 30 分において、尿素水溶液に浸漬した場合に比べて不凍液混合水溶液に浸漬した場合のほうが質量減少の傾きが緩やかかつ 28 日に一定の質量となった。質量が一定となった 28 日以降において、不凍液中の低級アルコールのこれらの作用により質量変化が抑制されていると考えられる。

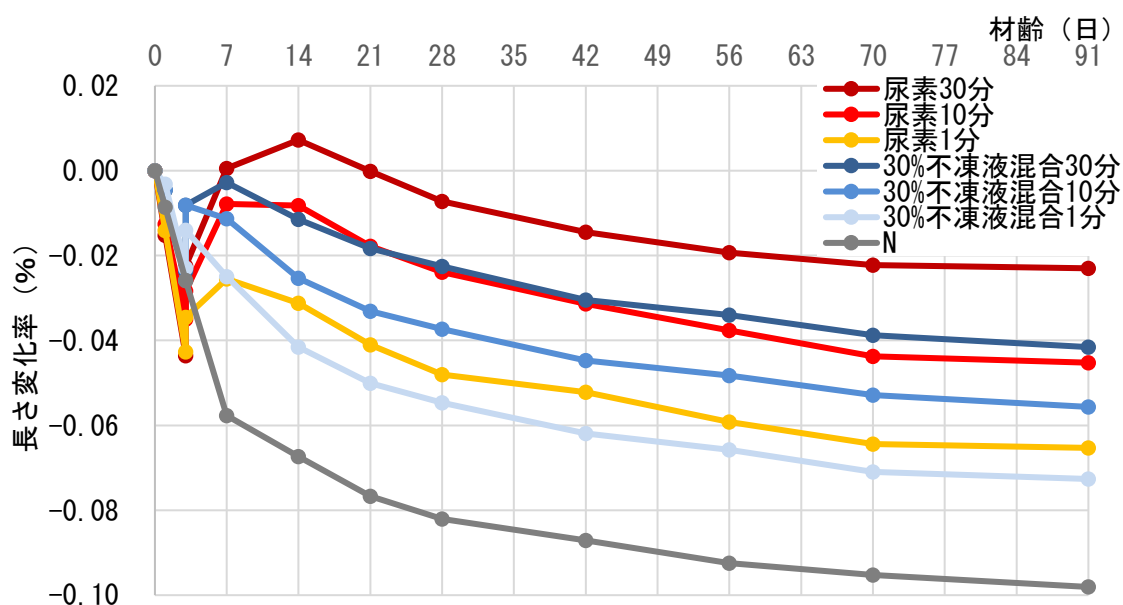


図-7.3.3 浸漬時間が変わった場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-7.3.7 浸漬時間が変わった場合の長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 30分 | 0 | -0.015 | -0.044 | -0.022 | 0.001 | 0.007 | 0 | -0.007 | -0.014 | -0.019 | -0.022 | -0.023 |
| 尿素 10分 | 0 | -0.013 | -0.035 | -0.028 | -0.008 | -0.008 | -0.018 | -0.024 | -0.031 | -0.038 | -0.044 | -0.045 |
| 尿素 1分 | 0 | -0.014 | -0.043 | -0.035 | -0.025 | -0.031 | -0.041 | -0.048 | -0.052 | -0.059 | -0.064 | -0.065 |
| 30%不凍液混合 30分 | 0 | -0.005 | -0.024 | -0.008 | -0.003 | -0.011 | -0.018 | -0.023 | -0.030 | -0.034 | -0.039 | -0.042 |
| 30%不凍液混合 10分 | 0 | -0.004 | -0.023 | -0.008 | -0.011 | -0.025 | -0.033 | -0.037 | -0.045 | -0.048 | -0.053 | -0.056 |
| 30%不凍液混合 1分 | 0 | -0.003 | -0.023 | -0.014 | -0.025 | -0.042 | -0.050 | -0.055 | -0.062 | -0.066 | -0.071 | -0.073 |
| 無処理 | 0 | -0.009 | -0.026 | -0.026 | -0.058 | -0.067 | -0.077 | -0.082 | -0.087 | -0.092 | -0.096 | -0.098 |

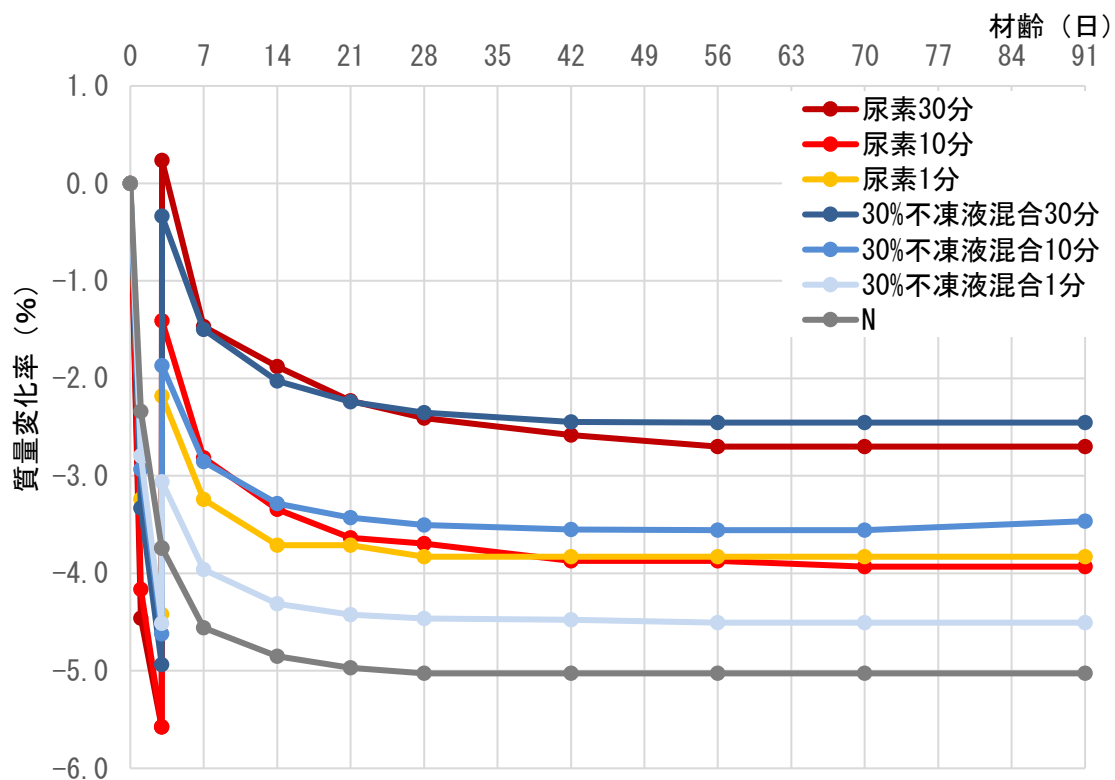


図-7.3.4 浸漬時間が変わった場合の質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-7.3.8 浸漬時間が変わった場合の質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 尿素 30分 | 0 | -4.460 | -5.575 | 0.235 | -1.467 | -1.878 | -2.230 | -2.406 | -2.582 | -2.670 | -2.670 | -2.670 |
| 尿素 10分 | 0 | -4.164 | -5.572 | -1.408 | -2.815 | -3.343 | -3.637 | -3.695 | -3.871 | -3.930 | -3.930 | -3.930 |
| 尿素 1分 | 0 | -3.239 | -4.419 | -2.180 | -3.241 | -3.712 | -3.712 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 | -3.829 |
| 30%不凍液混合 30分 | 0 | -3.331 | -4.934 | -0.336 | -1.497 | -2.028 | -2.240 | -2.352 | -2.447 | -2.453 | -2.453 | -2.453 |
| 30%不凍液混合 10分 | 0 | -2.932 | -4.621 | -1.868 | -2.855 | -3.285 | -3.430 | -3.505 | -3.552 | -3.557 | -3.557 | -3.464 |
| 30%不凍液混合 1分 | 0 | -2.795 | -4.514 | -3.061 | -3.960 | -4.312 | -4.423 | -4.464 | -4.476 | -4.506 | -4.506 | -4.506 |
| 無処理 | 0 | -2.337 | -3.740 | -3.740 | -4.558 | -4.851 | -4.968 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 | -5.026 |

7.3.3 主成分の異なる不凍液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果

1) 概論

本節では、モルタル供試体を主成分の異なる不凍液を用いた不凍液混合水溶液を調製し、これらに浸漬し、乾燥収縮試験を行い、不凍液の主成分の違いによる乾燥収縮低減効果への影響について検討を行った。また、不凍液および尿素の質量割合の異なる混合水溶液に浸漬した場合においても乾燥収縮試験もを行い、不凍液濃度の違いによる乾燥収縮低減効果の影響について検討を行った。

2) 使用材料

本実験で用いた使用材料を表-7.3.9に示す。以後、7.3.2節で用いたエチレングリコールを主成分とする「ナイブライン Z1」を「AF1」、エタノールを主成分とする「凍結防止剤メタブルー」を「AF2」、グリセリンを主成分とする「凍結防止剤凍ランブルー」を「AF3」と呼ぶ。浸漬液は、尿素水溶液または、主成分の異なる不凍液混合水溶液をそれぞれ用いた。

表-7.3.9 使用材料

| 種類 | 名称 | 記号 | 密度 (g/cm ³) |
|-----------|------------------------------------|-----|-------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 練混水 | 宇都宮市水道水 | W | 1.00 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.61 |
| 化学系 材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 不凍液 (ナイブライン Z1) | AF1 | 1.11 |
| | 不凍液 (凍結防止剤メタブルー) | AF2 | 1.00 |
| | 不凍液 (凍結防止剤凍ランブルー) | AF3 | 1.00 |

3) 配合条件

7.3.2節と同様とした。

4) 練混ぜ手順

第3章、3.2.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

第3章、3.2.4節と同様とした。乾燥収縮実験概要について、乾燥開始3日目に各不凍液混合水溶液（質量割合で不凍液：水：尿素＝3：7：8）に浸漬したモルタル供試体の乾燥収縮試験を行った。比較のため、乾燥開始3日目に無処理の場合における乾燥収縮試験も

行った。実験条件を表-7.3.10に示す。

また、不凍液 AF2 において、不凍液濃度および尿素濃度の異なる不凍液混合水溶液に浸漬した供試体の乾燥収縮試験における実験条件を表-7.3.11に示す。

表-7.3.10 各種類の不凍液混合水溶液に浸漬した場合における実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 浸漬液-時間 |
|---------|--------------|----------|--------------|
| 50 | 無し | — | N |
| | 30%AF1 混合水溶液 | 1 | 1号不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 1号不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 1号不凍液混合 30分 |
| | 30%AF2 混合水溶液 | 1 | 2号不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 2号不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 2号不凍液混合 30分 |
| | 30%AF3 混合水溶液 | 1 | 3号不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 3号不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 3号不凍液混合 30分 |

表-7.3.11 質量割合の異なる不凍液混合水溶液に浸漬した場合における実験条件

| W/C (%) | 浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 記号 浸漬液-時間 |
|---------|--------------|----------|--------------|
| 50 | 無し | — | N |
| | 30%AF2 混合水溶液 | 1 | 30%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 30%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 30%不凍液混合 30分 |
| | 40%AF2 混合水溶液 | 1 | 40%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 40%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 40%不凍液混合 30分 |
| | 50%AF2 混合水溶液 | 1 | 50%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | 50%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | 50%不凍液混合 30分 |

6) 試験結果および考察

①主成分の異なる不凍液を用いた乾燥収縮試験

各種類の不凍液濃度 30%の混合水溶液（質量割合で不凍液：水：尿素=3：7：8）に浸漬した場合における長さ変化率を図-7.3.5、表-7.3.12、質量変化率を図-7.3.6、表-7.3.13に示す。図-7.3.5より、各種類の30%不凍液混和水溶液の含浸により乾燥収縮の低減効果が認められた。また、不凍液混合水溶液の中でAF1水溶液を用いた場合には、乾燥収縮低減効果が最も大きかった。図-7.3.6より、AF1水溶液を用いた場合には、保水作用が最も大きく現れ、質量変化率は最も小さかった。以上より、不凍液の主成分の違いは乾燥収縮低減効果に影響を及ぼすことがわかった。AF1の主成分はエチレングリコール、AF2の主成分はエタノール、AF3の主成分はグリセリンであり、すべて低級アルコールに属されるが、これらの主成分の違いによって乾燥収縮低減効果に差が現れたと考えられる。不凍液の主成分と乾燥収縮低減効果の関係については今後も検討が必要である。

②質量割合の異なる混合水溶液を用いた乾燥収縮試験

AF2において、不凍液濃度の異なる混合水溶液に浸漬した場合における長さ変化率を図-7.3.7、表-7.3.14、質量変化率を図-7.3.8、表-7.3.15に示す。図-7.3.7より、不凍液濃度 30%の場合が最も乾燥収縮低減割合が高く、不凍液濃度 40%の場合が最も低くなった。30%不凍液混合水溶液においては尿素的再結晶化が生じることによる結晶圧の影響や保水効果の影響によるものと考えられ、50%不凍液混合水溶液においては、不凍液中の低級アルコールの表面張力の低下による乾燥収縮低減作用が他濃度の場合と比べて大きく作用したためと推察される。また、図-7.3.8より、不凍液濃度が 30%の場合、浸漬した後に保水作用が大きく表れ、質量変化は小さかった。以上より、濃度の違いによって乾燥収縮低減効果に影響が及ぶことがわかった。不凍液濃度が 30%の場合には、尿素濃度が最も高かったため、乾燥収縮低減効果は最も大きく現れたと考えられる。

また、尿素結晶温度の低い 50%不凍液混合水溶液についても、無処理の場合と比べ、材齢 91 日における乾燥収縮を約 2~3 割低減することができた。以上より、本研究の試験温度より低い寒冷環境にこの乾燥収縮低減方法を実用できると考えられる。

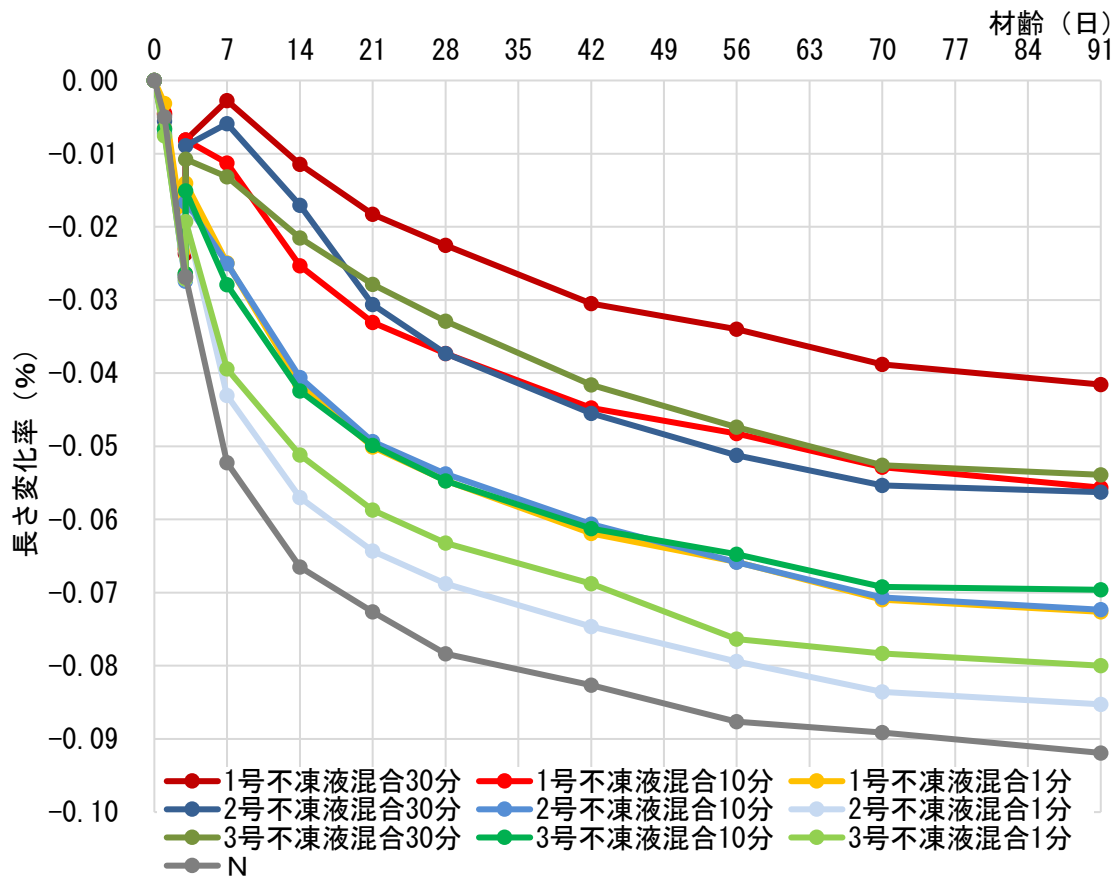


図-7.3.5 不凍液の主成分が変わった場合における長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-7.3.12 不凍液の主成分が変わった場合における長さ変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 1号不凍液混合30分 | 0 | -0.005 | -0.024 | -0.008 | -0.003 | -0.011 | -0.018 | -0.023 | -0.030 | -0.034 | -0.039 | -0.042 |
| 1号不凍液混合10分 | 0 | -0.004 | -0.023 | -0.008 | -0.011 | -0.025 | -0.033 | -0.037 | -0.045 | -0.048 | -0.053 | -0.056 |
| 1号不凍液混合1分 | 0 | -0.003 | -0.023 | -0.014 | -0.025 | -0.042 | -0.050 | -0.055 | -0.062 | -0.066 | -0.071 | -0.073 |
| 2号不凍液混合30分 | 0 | -0.006 | -0.027 | -0.009 | -0.006 | -0.017 | -0.031 | -0.037 | -0.045 | -0.051 | -0.055 | -0.056 |
| 2号不凍液混合10分 | 0 | -0.007 | -0.027 | -0.017 | -0.025 | -0.041 | -0.049 | -0.054 | -0.061 | -0.066 | -0.071 | -0.072 |
| 2号不凍液混合1分 | 0 | -0.007 | -0.027 | -0.019 | -0.043 | -0.057 | -0.064 | -0.069 | -0.075 | -0.079 | -0.084 | -0.085 |
| 3号不凍液混合30分 | 0 | -0.007 | -0.026 | -0.011 | -0.013 | -0.022 | -0.028 | -0.033 | -0.042 | -0.047 | -0.053 | -0.054 |
| 3号不凍液混合10分 | 0 | -0.007 | -0.026 | -0.015 | -0.028 | -0.042 | -0.050 | -0.055 | -0.061 | -0.065 | -0.069 | -0.070 |
| 3号不凍液混合1分 | 0 | -0.008 | -0.027 | -0.019 | -0.039 | -0.051 | -0.059 | -0.063 | -0.069 | -0.076 | -0.078 | -0.080 |
| 無処理 | 0 | -0.005 | -0.027 | -0.027 | -0.052 | -0.067 | -0.073 | -0.078 | -0.083 | -0.088 | -0.089 | -0.092 |

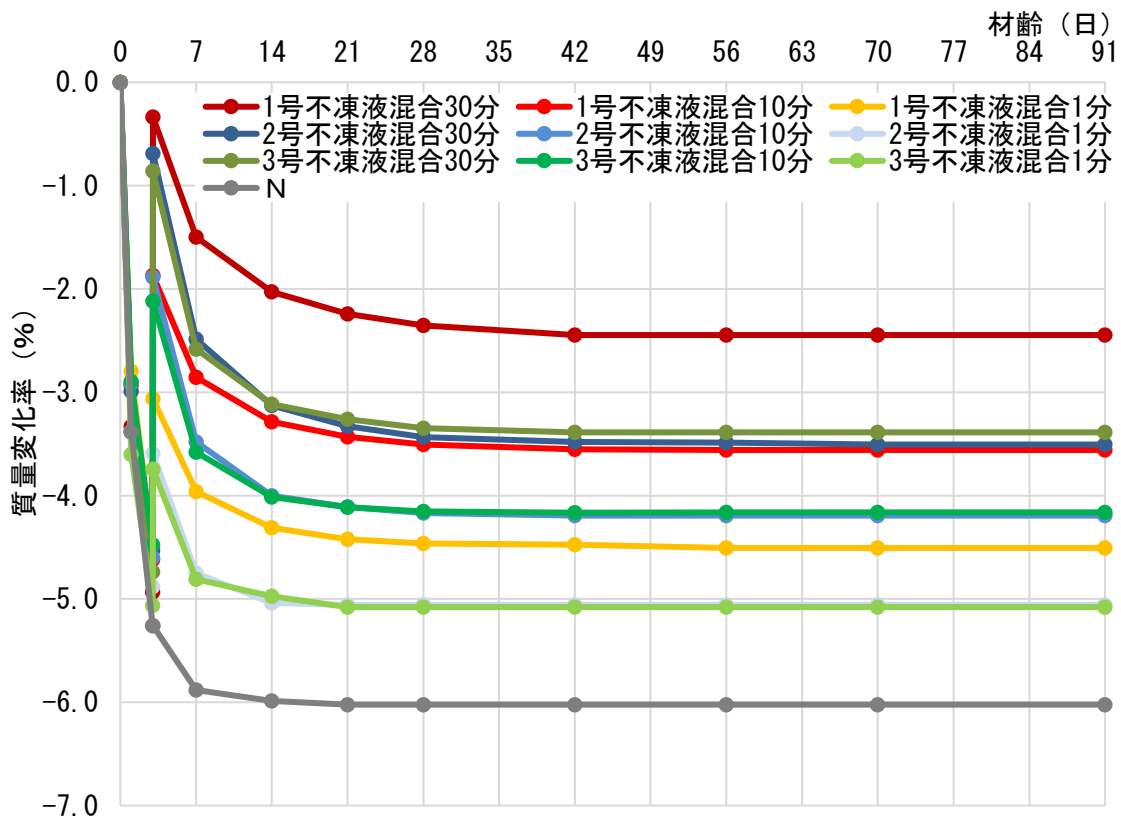


図-7.3.6 不凍液の主成分が変わった場合における質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

表-7.3.13 不凍液の主成分が変わった場合における質量変化率 (W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 1号不凍液混合30分 | 0 | -3.331 | -4.934 | -0.336 | -1.497 | -2.028 | -2.240 | -2.352 | -2.447 | -2.453 | -2.453 | -2.453 |
| 1号不凍液混合10分 | 0 | -2.932 | -4.621 | -1.868 | -2.855 | -3.285 | -3.430 | -3.505 | -3.552 | -3.557 | -3.557 | -3.464 |
| 1号不凍液混合1分 | 0 | -2.795 | -4.514 | -3.061 | -3.960 | -4.312 | -4.423 | -4.464 | -4.476 | -4.506 | -4.506 | -4.506 |
| 2号不凍液混合30分 | 0 | -2.992 | -4.530 | -0.690 | -2.486 | -3.128 | -3.329 | -3.435 | -3.482 | -3.488 | -3.505 | -3.494 |
| 2号不凍液混合10分 | 0 | -2.912 | -4.601 | -1.886 | -3.482 | -4.000 | -4.110 | -4.169 | -4.192 | -4.180 | -4.145 | -4.098 |
| 2号不凍液混合1分 | 0 | -3.382 | -4.880 | -3.594 | -4.751 | -5.039 | -5.056 | -5.057 | -5.039 | -5.039 | -4.839 | -4.744 |
| 3号不凍液混合30分 | 0 | -3.386 | -4.737 | -0.859 | -2.581 | -3.115 | -3.260 | -3.347 | -3.387 | -3.363 | -3.311 | -3.230 |
| 3号不凍液混合10分 | 0 | -2.895 | -4.474 | -2.117 | -3.579 | -4.015 | -4.112 | -4.152 | -4.164 | -4.164 | -4.078 | -4.026 |
| 3号不凍液混合1分 | 0 | -3.602 | -5.065 | -3.744 | -4.809 | -4.975 | -5.079 | -5.053 | -5.026 | -5.009 | -4.803 | -4.702 |
| 無処理 | 0 | -3.383 | -5.259 | -5.259 | -5.883 | -5.987 | -6.023 | -6.023 | -6.023 | -6.023 | -6.023 | -6.023 |

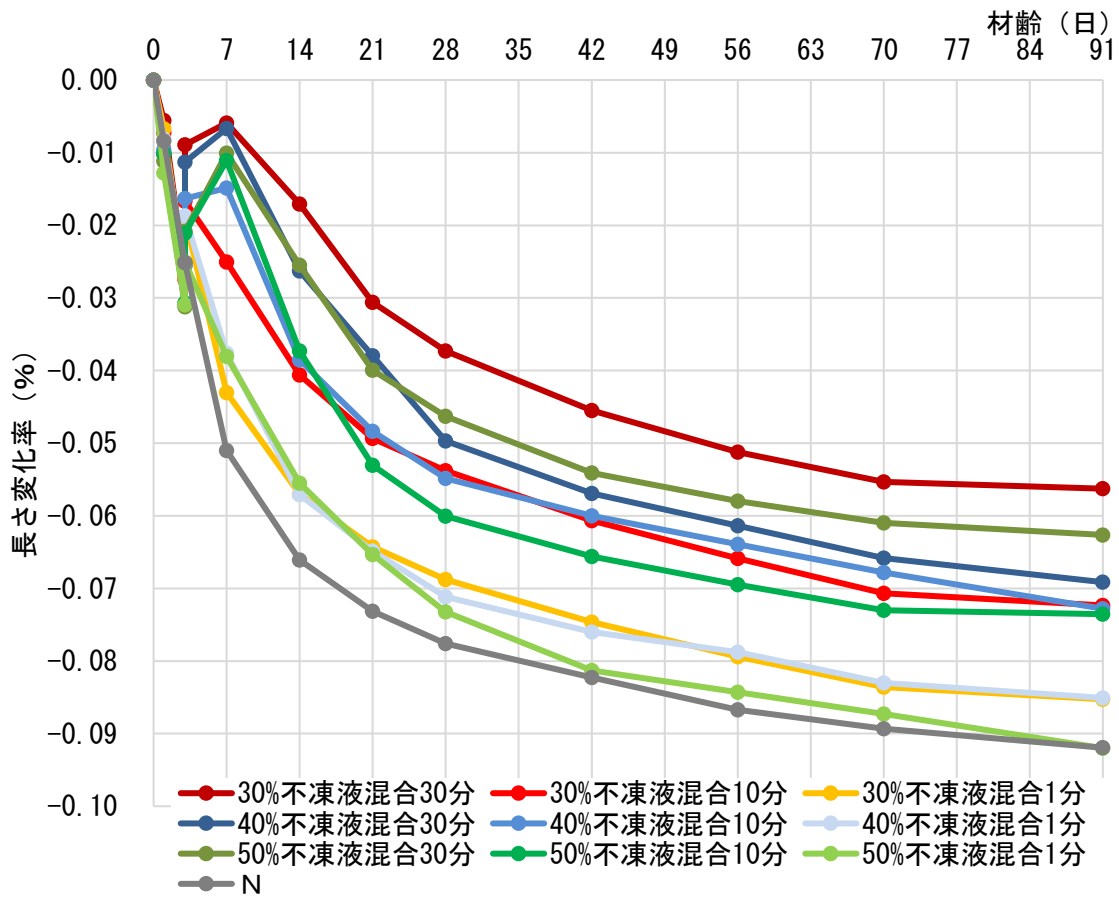


図-7.3.7 不凍液の濃度が変わった場合における長さ変化率 (AF2・W/C=50%・浸漬)

表-7.3.14 不凍液の濃度が変わった場合における長さ変化率 (AF2・W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 30%不凍液混合30分 | 0 | -0.006 | -0.027 | -0.009 | -0.006 | -0.017 | -0.031 | -0.037 | -0.045 | -0.051 | -0.055 | -0.056 |
| 30%不凍液混合10分 | 0 | -0.007 | -0.027 | -0.017 | -0.025 | -0.041 | -0.049 | -0.054 | -0.061 | -0.066 | -0.071 | -0.072 |
| 30%不凍液混合1分 | 0 | -0.007 | -0.027 | -0.019 | -0.043 | -0.057 | -0.064 | -0.069 | -0.075 | -0.079 | -0.084 | -0.085 |
| 40%不凍液混合30分 | 0 | -0.010 | -0.026 | -0.011 | -0.007 | -0.026 | -0.038 | -0.050 | -0.057 | -0.061 | -0.066 | -0.069 |
| 40%不凍液混合10分 | 0 | -0.010 | -0.025 | -0.016 | -0.015 | -0.039 | -0.048 | -0.055 | -0.060 | -0.064 | -0.068 | -0.073 |
| 40%不凍液混合1分 | 0 | -0.008 | -0.025 | -0.019 | -0.038 | -0.057 | -0.065 | -0.071 | -0.076 | -0.079 | -0.083 | -0.085 |
| 50%不凍液混合30分 | 0 | -0.011 | -0.031 | -0.021 | -0.010 | -0.025 | -0.040 | -0.046 | -0.054 | -0.058 | -0.061 | -0.063 |
| 50%不凍液混合10分 | 0 | -0.010 | -0.031 | -0.021 | -0.011 | -0.037 | -0.053 | -0.060 | -0.066 | -0.069 | -0.073 | -0.074 |
| 50%不凍液混合1分 | 0 | -0.013 | -0.031 | -0.025 | -0.038 | -0.055 | -0.065 | -0.073 | -0.081 | -0.084 | -0.087 | -0.092 |
| 無処理 | 0 | -0.008 | -0.025 | -0.025 | -0.051 | -0.066 | -0.073 | -0.078 | -0.082 | -0.087 | -0.089 | -0.092 |

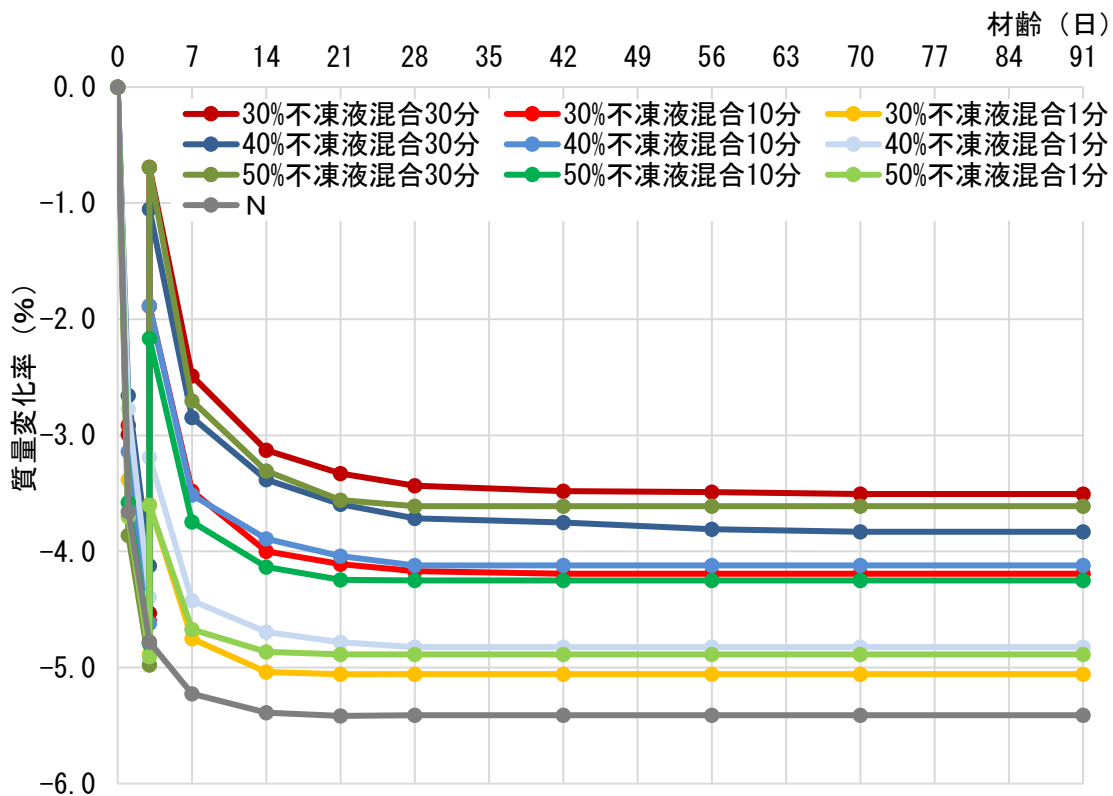


図-7.3.8 不凍液の濃度が変わった場合における質量変化率 (AF2・W/C=50%・浸漬)

表-7.3.15 不凍液の濃度が変わった場合における質量変化率 (AF2・W/C=50%・浸漬)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 30%不凍液混合 30分 | 0 | -2.992 | -4.530 | -0.690 | -2.486 | -3.128 | -3.329 | -3.435 | -3.482 | -3.488 | -3.505 | -3.505 |
| 30%不凍液混合 10分 | 0 | -2.912 | -4.601 | -1.886 | -3.482 | -4.000 | -4.110 | -4.169 | -4.192 | -4.192 | -4.192 | -4.192 |
| 30%不凍液混合 1分 | 0 | -3.382 | -4.880 | -3.594 | -4.751 | -5.039 | -5.056 | -5.057 | -5.057 | -5.057 | -5.057 | -5.057 |
| 40%不凍液混合 30分 | 0 | -2.656 | -4.122 | -1.052 | -2.847 | -3.382 | -3.595 | -3.715 | -3.750 | -3.808 | -3.831 | -3.831 |
| 40%不凍液混合 10分 | 0 | -3.139 | -4.618 | -1.884 | -3.515 | -3.890 | -4.040 | -4.121 | -4.121 | -4.121 | -4.121 | -4.121 |
| 40%不凍液混合 1分 | 0 | -2.772 | -4.393 | -3.189 | -4.424 | -4.695 | -4.783 | -4.824 | -4.824 | -4.824 | -4.824 | -4.824 |
| 50%不凍液混合 30分 | 0 | -3.861 | -4.979 | -0.693 | -2.702 | -3.307 | -3.558 | -3.610 | -3.610 | -3.610 | -3.610 | -3.610 |
| 50%不凍液混合 10分 | 0 | -3.577 | -4.793 | -2.166 | -3.744 | -4.135 | -4.245 | -4.251 | -4.251 | -4.251 | -4.251 | -4.251 |
| 50%不凍液混合 1分 | 0 | -3.701 | -4.905 | -3.601 | -4.671 | -4.864 | -4.887 | -4.887 | -4.887 | -4.887 | -4.887 | -4.887 |
| 無処理 | 0 | -3.657 | -4.780 | -4.780 | -5.226 | -5.388 | -5.417 | -5.411 | -5.411 | -5.411 | -5.411 | -5.411 |

7.3.4 寒冷環境での施工を考慮した不凍液混合水溶液を用いた場合のモルタルにおける乾燥収縮低減効果

1) 概論

本節では、実際に寒冷環境で不凍液混合水溶液の乾燥収縮低減効果を確認するため、 -5°C の環境で冷やしたモルタル供試体に不凍液混合水溶液を塗布した場合の乾燥収縮低減効果を検討した。また、比較のため、同様な環境で、尿素水溶液を塗布した場合および無処理の場合における乾燥収縮試験も行った。

2) 使用材料

使用材料は 7.3.2 節と同様とした。塗布液は、7.3.1 節に示す尿素水溶液または、AF1 の 30%不凍液混合水溶液を用いた。

3) 配合条件

本試験で用いた計画配合を表-7.3.16 に示す。水セメント比は 50%とした。目標フレッシュ性状は、15 打フロー $200\pm 10\text{mm}$ 、空気量 $2.0\pm 1.5\%$ とした。

表-7.3.16 計画配合

| W/C (%) | S/C | 単位量 (kg/m ³) | | |
|------------|-----|--------------------------|-----|------|
| | | W | C | S |
| 50 | 1.8 | 332 | 664 | 1195 |

4) 練混ぜ手順

第 3 章、3.2.3 節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

フレッシュ性状試験および乾燥収縮試験を行った。

乾燥収縮試験手順は、練り上がったモルタルを型枠に詰め、 20°C の恒温室に静置し、翌日脱型を行い、第 1 回目の測定を行い基長とし、併せて質量を測定した。測定後供試体を -5°C 、60%Rh の恒温恒湿試験機に静置した。3 日目に尿素水溶液または 30%不凍液混合水溶液（質量割合で不凍液：水：尿素=3：7：8）を 3 回、6 回および 9 回塗布し、塗布前後の長さ変化および質量変化の測定を行った。その後、供試体を $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $60\pm 5\%$ Rh の恒温恒湿室に静置し、乾燥を開始し、材齢 91 日まで長さ変化および質量変化を測定した。比較のため、3 日目に無処理の場合における乾燥収縮試験も行った。試験手順は図-7.3.9 に示す。実験条件を表-7.3.17 に示す。

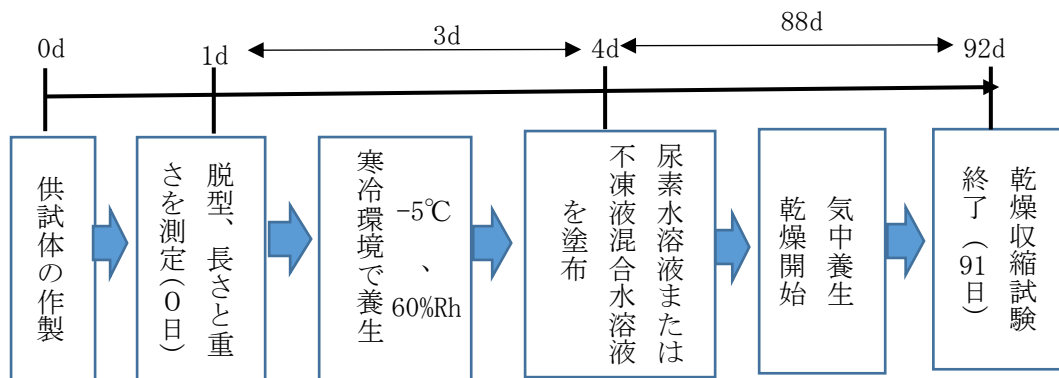


図-7.3.9 寒冷環境で乾燥収縮試験の手順

表-7.3.17 寒冷環境で不凍液混合水溶液を塗布した場合における実験条件

| W/C (%) | 塗布液 | 塗布回数 (回) | 記号 塗布液-回数 |
|---------|--------------|-----------|--------------|
| 50 | 無し | — | N |
| | 尿素水溶液 | 3 | 尿素 3 回 |
| | | 6 | 尿素 6 回 |
| | | 9 | 尿素 9 回 |
| | 30%AF1 混合水溶液 | 3 | 不凍液混合 3 回 |
| | | 6 | 不凍液混合 6 回 |
| 9 | | 不凍液混合 9 回 | |

6) 試験結果および考察

試験結果の長さ変化率を図-7.3.10、表-7.3.18、質量変化率を図-7.3.11、表-7.3.19に示す。図-7.3.10より、-5°Cの低温供試体においては、尿素水溶液塗布3回、6回、9回の乾燥収縮低減効果に比べ、不凍液混合水溶液塗布3回、6回、9回の収縮低減効果が大きくなったことが分かった。不凍液混合水溶液に比べ尿素水溶液の尿素濃度は高いが、低温供試体に塗布するとき、浸透する前に結晶化する尿素が多いため供試体内部浸透しないことにより、乾燥収縮低減効果が小さかったと考えられる。

これより、不凍液の混合により、低温環境での本工法の使用は可能であり、常温環境の場合と同等または大きな乾燥収縮低減効果が得られると考えられる。

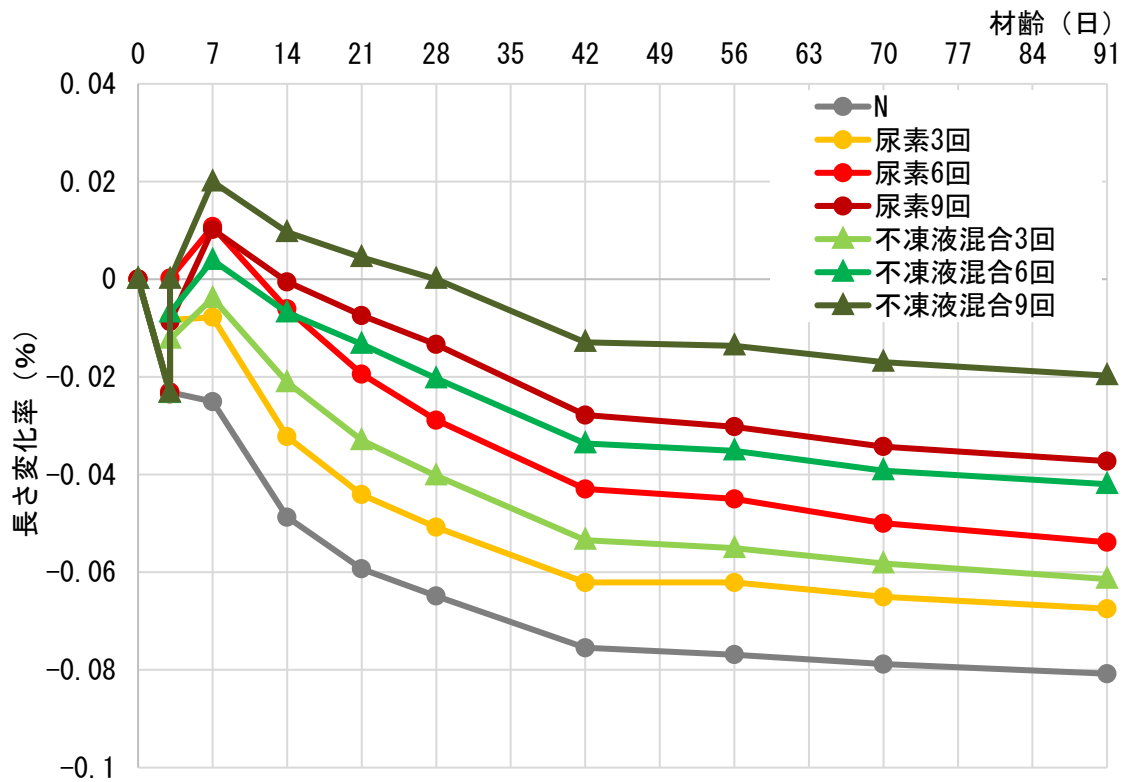


図-7.3.10 寒冷環境で不凍液混合水溶液を用いた場合の長さ変化率（AF1・塗布）

表-7.3.18 寒冷環境で不凍液混合水溶液を用いた場合の長さ変化率（AF1・塗布）

| 塗布液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -0.023 | -0.023 | -0.025 | -0.049 | -0.059 | -0.065 | -0.075 | -0.077 | -0.079 | -0.081 |
| 尿素3回 | 0 | -0.023 | -0.008 | -0.008 | -0.032 | -0.044 | -0.051 | -0.062 | -0.062 | -0.065 | -0.067 |
| 尿素6回 | 0 | -0.023 | 0.000 | 0.011 | -0.006 | -0.019 | -0.029 | -0.043 | -0.045 | -0.050 | -0.054 |
| 尿素9回 | 0 | -0.024 | -0.009 | 0.010 | -0.001 | -0.007 | -0.013 | -0.028 | -0.030 | -0.034 | -0.037 |
| 不凍液混合3回 | 0 | -0.023 | -0.012 | -0.004 | -0.021 | -0.033 | -0.040 | -0.053 | -0.055 | -0.058 | -0.061 |
| 不凍液混合6回 | 0 | -0.023 | -0.007 | 0.004 | -0.007 | -0.013 | -0.020 | -0.034 | -0.035 | -0.039 | -0.042 |
| 不凍液混合9回 | 0 | -0.023 | 0.000 | 0.020 | 0.010 | 0.004 | 0.000 | -0.013 | -0.014 | -0.017 | -0.020 |

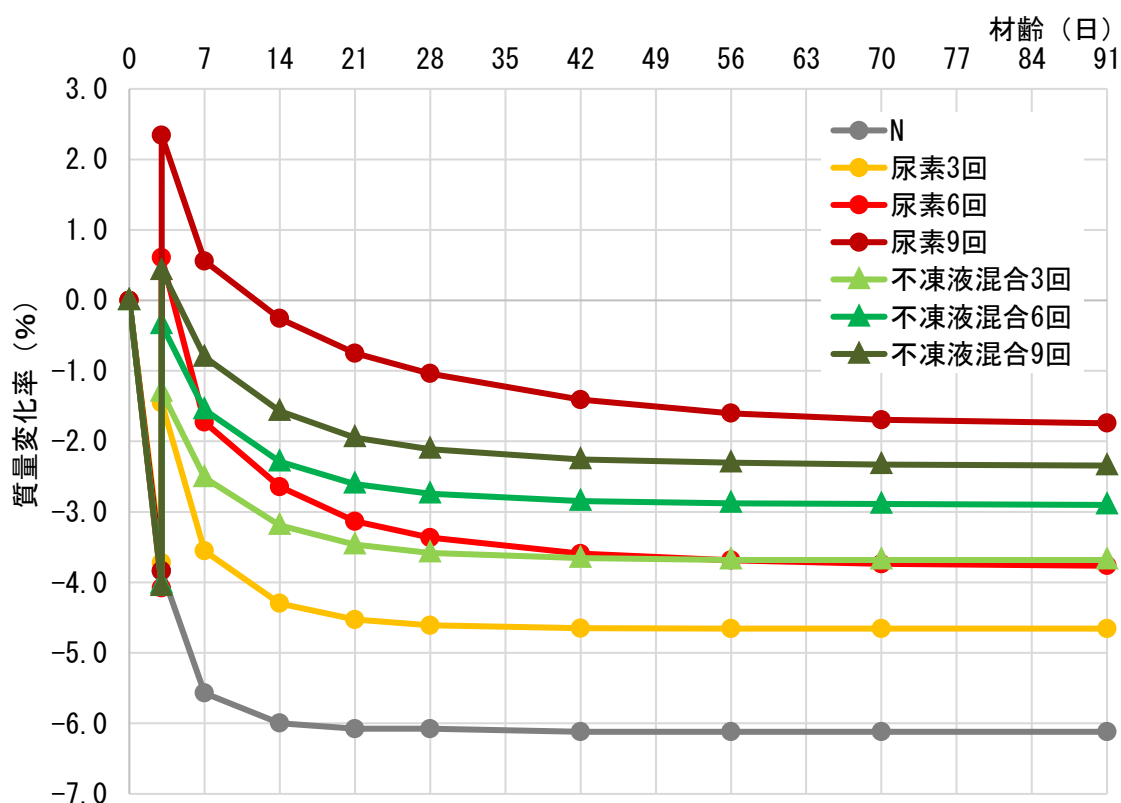


図-7.3.11 寒冷環境で不凍液混合水溶液を用いた場合の質量変化率（AF1・塗布）

表-7.3.19 寒冷環境で不凍液混合水溶液を用いた場合の質量変化率（AF1・塗布）

| 塗布液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 無処理 | 0 | -3.845 | -3.845 | -5.571 | -5.998 | -6.076 | -6.076 | -6.119 | -6.119 | -6.119 | -6.119 |
| 尿素3回 | 0 | -3.719 | -1.455 | -3.554 | -4.298 | -4.528 | -4.609 | -4.650 | -4.655 | -4.655 | -4.655 |
| 尿素6回 | 0 | -4.081 | 0.606 | -1.730 | -2.644 | -3.133 | -3.366 | -3.593 | -3.686 | -3.739 | -3.762 |
| 尿素9回 | 0 | -3.835 | 2.340 | 0.557 | -0.258 | -0.751 | -1.038 | -1.408 | -1.601 | -1.695 | -1.742 |
| 不凍液混合3回 | 0 | -4.036 | -1.300 | -2.513 | -3.190 | -3.465 | -3.581 | -3.657 | -3.681 | -3.681 | -3.681 |
| 不凍液混合6回 | 0 | -4.022 | -0.344 | -1.551 | -2.290 | -2.604 | -2.744 | -2.848 | -2.877 | -2.889 | -2.900 |
| 不凍液混合9回 | 0 | -4.058 | 0.426 | -0.805 | -1.571 | -1.946 | -2.110 | -2.257 | -2.304 | -2.327 | -2.345 |

7.3.5 尿素と不凍液の混合水溶液に含浸したコンクリートにおける乾燥収縮低減効果

1) 概論

7.3.2 節におけるモルタルでの予備実験において、不凍液混合水溶液および尿素水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮効果を比較したところ、不凍液を混和した場合でも乾燥収縮低減効果は現れ、悪影響を及ぼさないことが確認できた。そこで本節では、硬化コンクリートにおいて尿素および不凍液の混和水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮低減効果を調べた。

2) 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-7.3.20 に示す。

表-7.3.20 使用材料

| 種別 | 名称 | 記号 | 密度 |
|-----------|------------------------------------|-----|------|
| 練混水 | 上水道水 | W | 1.00 |
| 結合材 | 普通ポルトランドセメント | C | 3.16 |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 (F.M. : 2.65、吸水率 : 1.94) | S | 2.61 |
| 粗骨材 | 笠間産碎石 (F.M. : 6.23、吸水率 : 0.75) | G | 2.64 |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 | SP | 1.00 |
| 化学系 材料 | 工業用尿素 | U | 1.32 |
| | 不凍液 (ナイブライン Z1) | AF1 | 1.11 |

3) 配合条件

本研究における配合条件を表-7.3.21 に示す。

表-7.3.21 配合条件

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | SP 添加率 (C×%) |
|------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----------------|
| | W | C | S | G | SP |
| 40 | 170 | 425 | 712 | 988 | 0.20 |
| 50 | 170 | 340 | 809 | 958 | 0.15 |
| 60 | 170 | 283 | 851 | 965 | 0.20 |

4) 練混ぜ手順

第3章、3.3.3節と同様とした。

5) 試験項目および試験方法

第3章、3.3.4節と同様とした。また、実験条件を表-7.3.22に示す。不凍液混合水溶液は質量比で不凍液：水：尿素=3：7：8の割合で溶解させて水溶液を用いた。

表-7.3.22 各水セメント比の実験条件

| W/C (%) | 3日目の浸漬液 | 浸漬時間 (分) | 圧縮試験 | 記号 W/C—浸漬液—浸漬時間 |
|---------|----------------------------------|----------|------|--------------------|
| 40 | 無処理 | — | — | 40%N |
| | 30%AF1 混合水溶液 | 1 | | 40%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | | 40%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | | 40%不凍液混合 30分 |
| 50 | 無処理 | — | — | 50%N |
| | 30%AF1 混合水溶液 (不凍液：尿素：水=3：7：8) | 1 | | 50%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | | 50%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | | 50%不凍液混合 30分 |
| 60 | 無処理 | — | ○ | 60%N |
| | 30%AF1 混合水溶液 | 1 | ○ | 60%不凍液混合 1分 |
| | | 10 | ○ | 60%不凍液混合 10分 |
| | | 30 | ○ | 60%不凍液混合 30分 |

6) 試験結果および考察

①フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験結果を表-7.3.23に示す。いずれの水セメント比においても、目標値を満たした。

②圧縮強度試験

水セメント比60%において、30%不凍液混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度の試験結果を図-7.3.10、表-7.3.24に示す。比較のため、無処理の場合における圧縮強度も示す。

図より、不凍液混合水溶液に浸漬した場合には、無処理に比べて圧縮強度が増加するが、わずかであり、ほぼ同等の圧縮強度であるといえる。その要因としては、モルタルの場合と同様に、尿素の再結晶化が生じることによる結晶圧の影響や保水効果による養生効

果が寄与していると考えられる。不凍液を混合することで、上記の尿素の効果は維持され、供試体の強度へ悪影響を及ぼしていないと考えられる。

表-7.3.23 フレッシュ性状試験結果
(目標値：空気量 4.5±1.5%、スランプ値 8.0±1.5cm)

| W/C (%) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 温度 (°C) |
|---------|---------|-----------|---------|
| 40 | 3.0 | 8.0 | 25.0 |
| 50 | 3.8 | 8.0 | 25.0 |
| 60 | 3.4 | 9.5 | 26.0 |

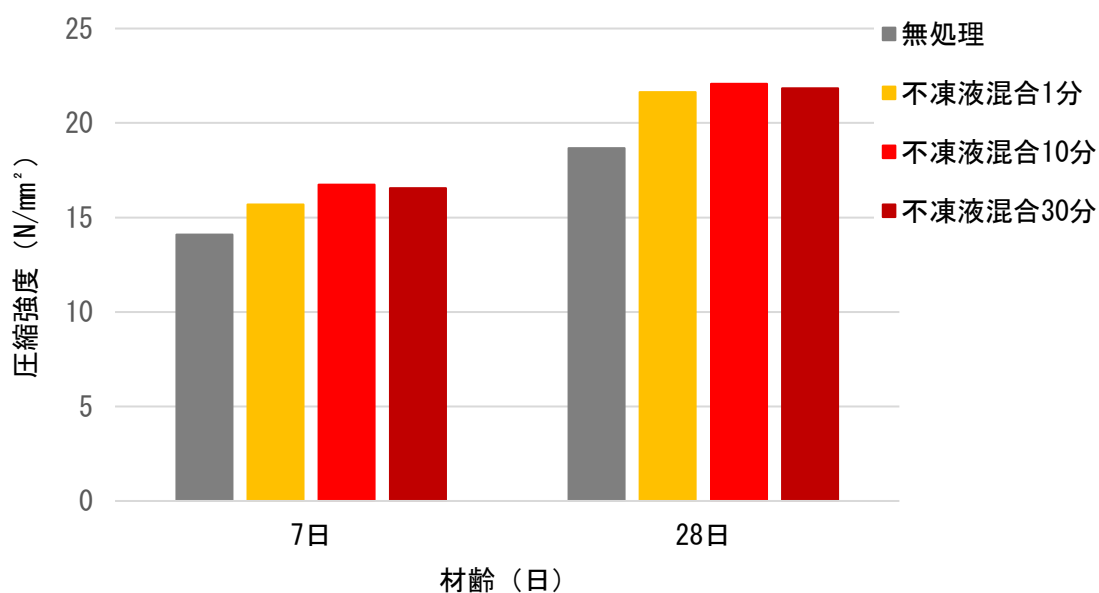


図-7.3.10 不凍液混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果

表-7.3.24 混合水溶液に浸漬した場合における圧縮強度試験結果

| 浸漬液 | 圧縮強度 (N/mm²) | |
|----------|--------------|------|
| | 7日 | 28日 |
| 無処理 | 14.1 | 18.7 |
| 不凍液混合1分 | 15.7 | 21.6 |
| 不凍液混合10分 | 16.7 | 22.1 |
| 不凍液混合30分 | 16.6 | 21.8 |

③不凍液混合水溶液に浸漬した場合における乾燥収縮試験結果

不凍液混和水溶液に浸漬した水セメント比 40%、50%、60%におけるコンクリートの長さ変化率をそれぞれ図-7.3.10、図-7.3.12、図-7.3.14、表-7.3.25、表-7.3.27、表-7.3.29、乾燥収縮試験結果の質量変化率をそれぞれ図-7.3.11、図-7.3.13、図-7.3.15、表-7.3.26、表-7.3.28、表-7.3.30 に示す。

図より、全ての水セメント比において、不凍液混和水溶液の含浸により乾燥収縮の低減効果が認められた。また、不凍液混和水溶液の浸漬時間を1分、10分、30分間とした場合には、いずれの水溶液においても浸漬時間を長くするほど収縮低減効果が大きくなる傾向を示した。これは尿素水溶液に浸漬した場合と同様に、浸漬時間が長くなるほどコンクリート表面の空隙から内部へ浸入する水溶液量が増加し、その後の乾燥により多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し析出する。その析出した尿素により結晶圧が大きく作用したことで収縮作用が抑制されたと推察される。

また、浸漬時間 30 分について、それぞれの長さ変化率の結果に着目すると、乾燥開始からの材齢 91 日において、無処理の場合と比較し、コンクリート供試体の水セメント比が 40%の不凍液混合水溶液浸漬による長さ変化低減効果は 14.6%であり、水セメント比 50%では 28.3%、水セメント比 60%では 33.3%の長さ変化低減効果があることがわかった。これは水セメント比が大きいほど硬化体組織が粗となるため、水溶液が表面から浸透しやすく、より多くの水溶液が内部へ含浸することで乾燥後に残存する尿素も多くなることが影響していると考えられる。以上より、寒冷環境での実施工の場合について、不凍液混合水溶液の含浸による乾燥収縮低減効果は大幅に得られると考えられる。

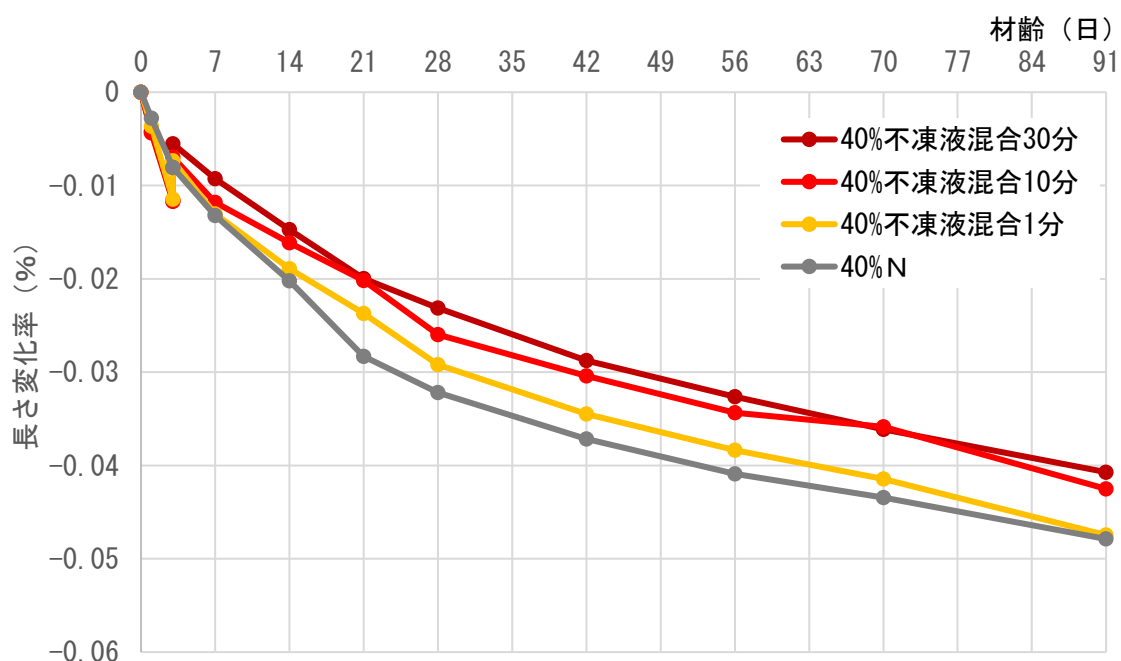


図-7.3.10 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=40%)

表-7.3.25 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -0.004 | -0.012 | -0.006 | -0.009 | -0.015 | -0.020 | -0.023 | -0.029 | -0.033 | -0.036 | -0.041 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -0.004 | -0.012 | -0.007 | -0.012 | -0.016 | -0.020 | -0.026 | -0.030 | -0.034 | -0.036 | -0.043 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -0.004 | -0.011 | -0.007 | -0.013 | -0.019 | -0.024 | -0.029 | -0.034 | -0.038 | -0.041 | -0.047 |
| 無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.013 | -0.020 | -0.028 | -0.032 | -0.037 | -0.041 | -0.043 | -0.048 |

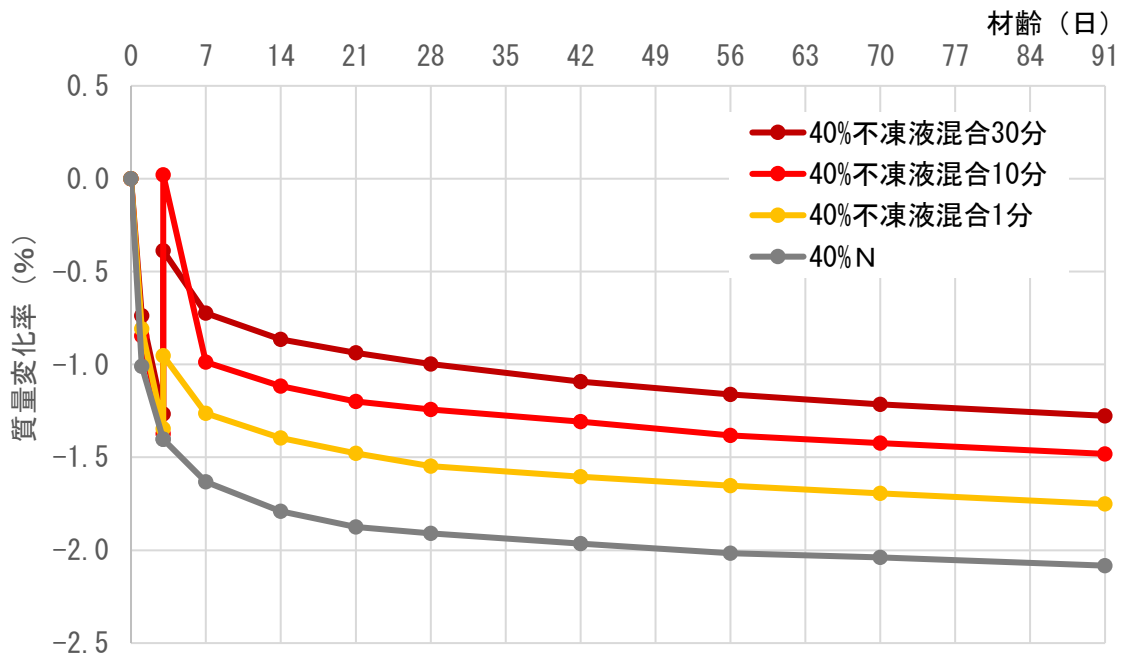


図-7.3.11 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=40%)

表-7.3.26 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=40%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -0.737 | -1.266 | -0.387 | -0.723 | -0.866 | -0.937 | -0.998 | -1.093 | -1.161 | -1.215 | -1.276 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -0.845 | -1.373 | 0.022 | -0.988 | -1.117 | -1.199 | -1.243 | -1.308 | -1.383 | -1.424 | -1.481 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -0.809 | -1.345 | -0.952 | -1.263 | -1.396 | -1.478 | -1.547 | -1.605 | -1.653 | -1.694 | -1.752 |
| 無処理 | 0 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |

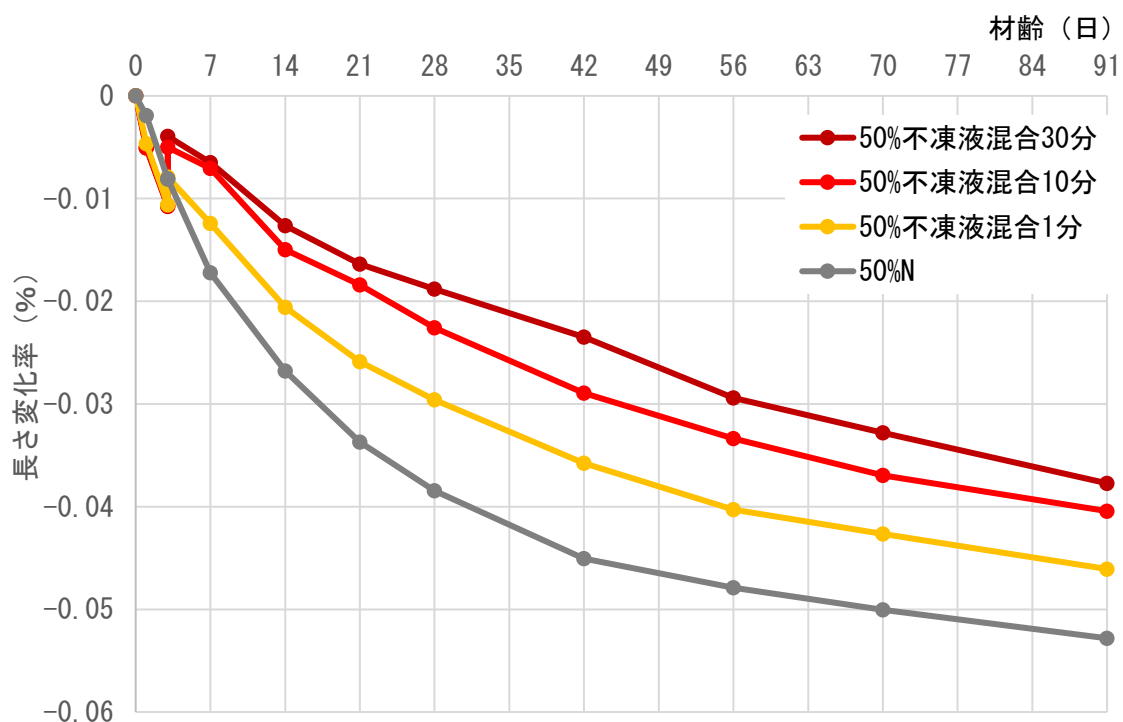


図-7.3.12 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=50%)

表-7.3.27 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -0.005 | -0.011 | -0.004 | -0.006 | -0.013 | -0.016 | -0.019 | -0.023 | -0.029 | -0.033 | -0.038 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -0.005 | -0.011 | -0.005 | -0.007 | -0.015 | -0.018 | -0.023 | -0.029 | -0.033 | -0.037 | -0.040 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -0.005 | -0.011 | -0.008 | -0.012 | -0.021 | -0.026 | -0.030 | -0.036 | -0.040 | -0.043 | -0.046 |
| 無処理 | 0 | -0.002 | -0.008 | -0.008 | -0.017 | -0.027 | -0.034 | -0.038 | -0.045 | -0.048 | -0.050 | -0.053 |

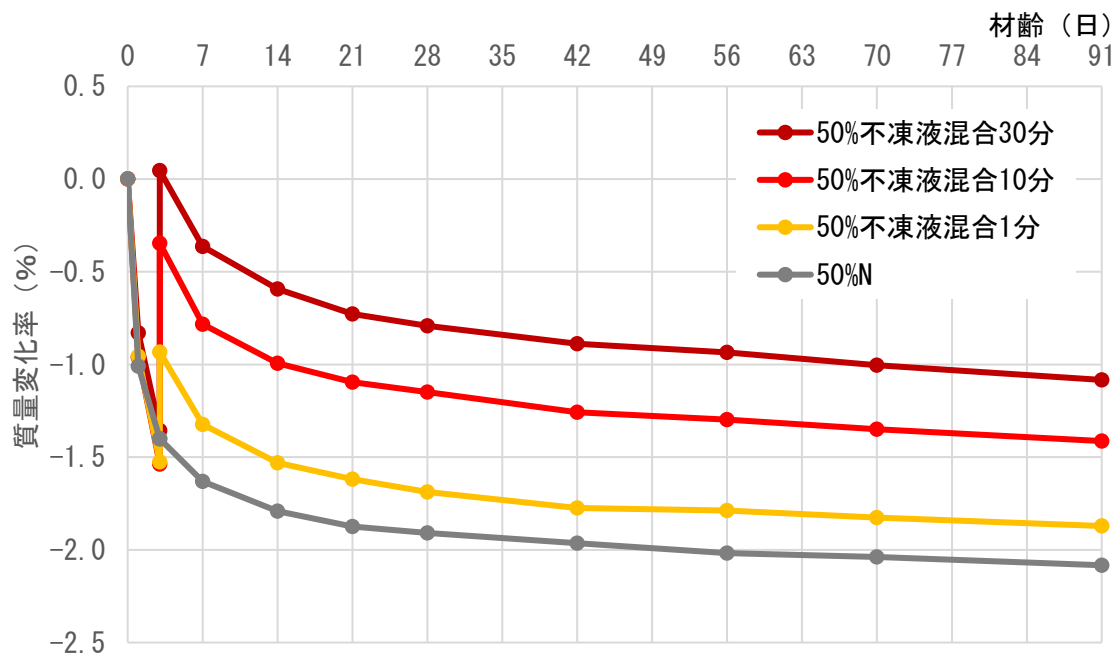


図-7.3.13 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=50%)

表-7.3.28 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=50%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -0.829 | -1.356 | 0.045 | -0.363 | -0.593 | -0.729 | -0.791 | -0.889 | -0.934 | -1.004 | -1.084 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -0.961 | -1.538 | -0.347 | -0.783 | -0.994 | -1.096 | -1.149 | -1.258 | -1.297 | -1.350 | -1.413 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -0.956 | -1.525 | -0.934 | -1.323 | -1.531 | -1.618 | -1.687 | -1.774 | -1.788 | -1.826 | -1.871 |
| 無処理 | 0 | -1.009 | -1.402 | -1.402 | -1.631 | -1.791 | -1.875 | -1.909 | -1.965 | -2.017 | -2.038 | -2.083 |

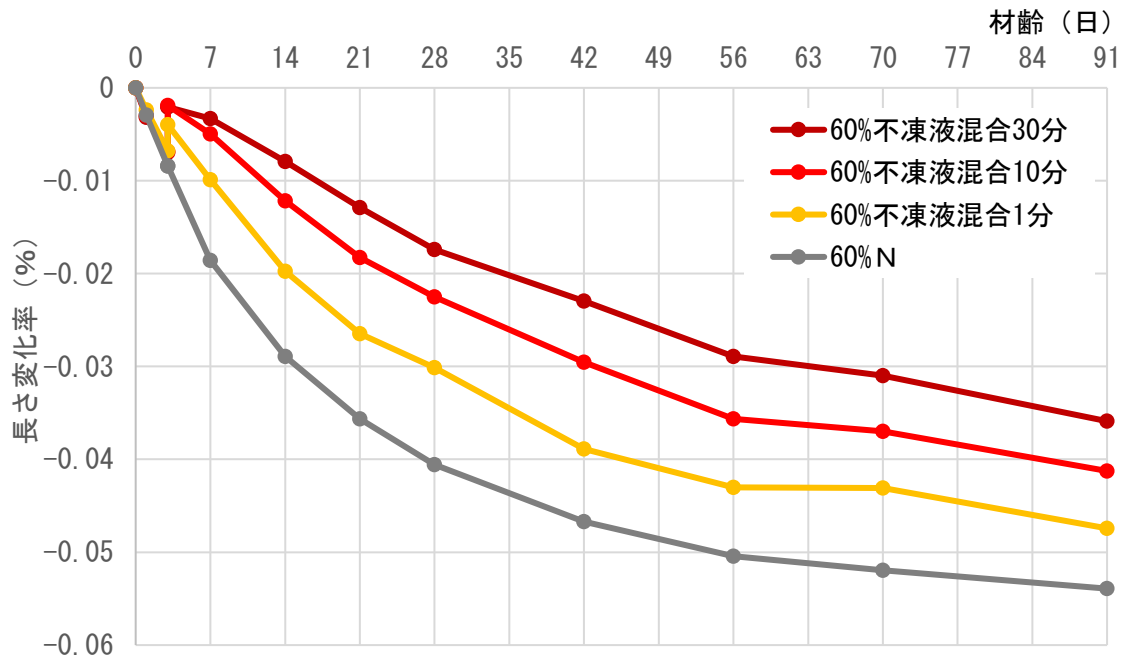


図-7.3.14 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=60%)

表-7.3.29 不凍液混合水溶液浸漬した場合における長さ変化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 長さ変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -0.003 | -0.007 | -0.002 | -0.003 | -0.008 | -0.013 | -0.017 | -0.023 | -0.029 | -0.031 | -0.036 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -0.003 | -0.007 | -0.002 | -0.005 | -0.012 | -0.018 | -0.023 | -0.030 | -0.036 | -0.037 | -0.041 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -0.002 | -0.007 | -0.004 | -0.010 | -0.020 | -0.026 | -0.030 | -0.039 | -0.043 | -0.043 | -0.047 |
| 無処理 | 0 | -0.003 | -0.008 | -0.008 | -0.019 | -0.029 | -0.036 | -0.041 | -0.047 | -0.050 | -0.052 | -0.054 |

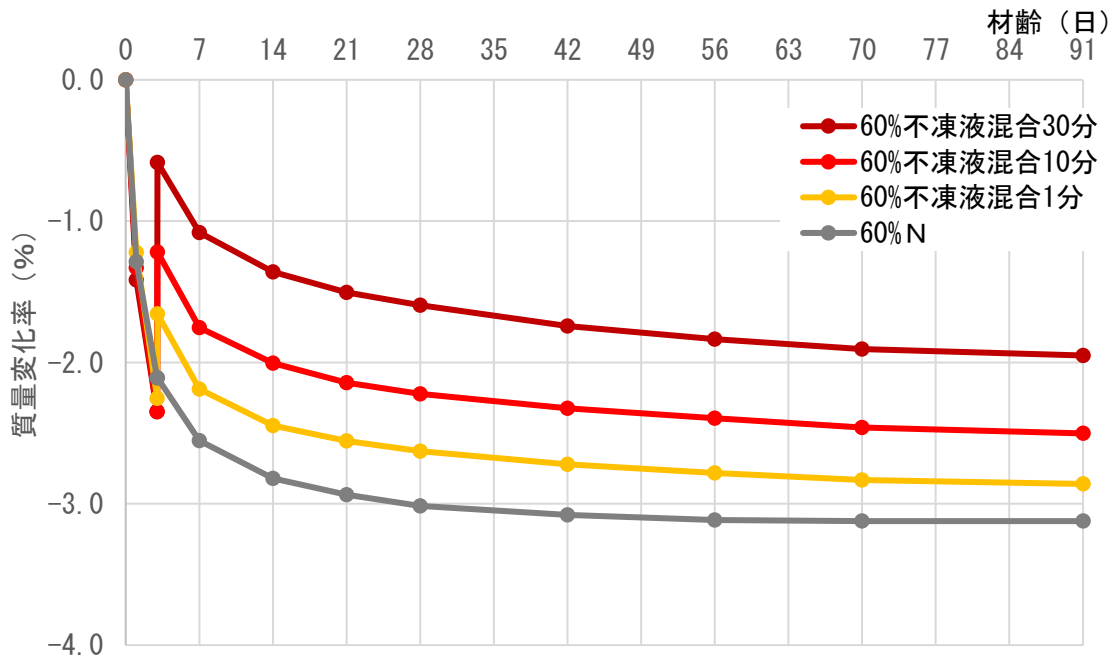


図-7.3.15 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=60%)

表-7.3.30 不凍液混合水溶液浸漬した場合における質量変化率 (W/C=60%)

| 浸漬液 | 質量変化率 (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0日 | 1日 | 3日前 | 3日後 | 7日 | 14日 | 21日 | 28日 | 42日 | 56日 | 70日 | 91日 |
| 不凍液混合 30分 | 0 | -1.417 | -2.350 | -0.585 | -1.081 | -1.359 | -1.504 | -1.595 | -1.743 | -1.835 | -1.905 | -1.951 |
| 不凍液混合 10分 | 0 | -1.331 | -2.348 | -1.220 | -1.754 | -2.006 | -2.142 | -2.222 | -2.324 | -2.394 | -2.460 | -2.502 |
| 不凍液混合 1分 | 0 | -1.222 | -2.254 | -1.656 | -2.188 | -2.447 | -2.555 | -2.629 | -2.720 | -2.783 | -2.832 | -2.860 |
| 無処理 | 0 | -1.287 | -2.109 | -2.109 | -2.553 | -2.820 | -2.935 | -3.015 | -3.080 | -3.115 | -3.123 | -3.123 |

7.4 まとめ

本章では、降雨時の濡れによる尿素溶出問題対策を検討した。また、不凍液を添加することで尿素水溶液が寒冷環境での施工の可否を確認するための実験を行い、以下の結果と知見を得た。

・降雨時の濡れによる尿素溶出問題対策

モルタルについて、硫酸ナトリウムの混合による尿素溶出問題を改善し、乾燥収縮低減効果が維持できた。しかし、コンクリートについて、硫酸ナトリウムの混合または珪酸ナトリウムの混合の方法では尿素溶出問題が改善できず、乾燥収縮低減効果が維持できなかった。尿素溶出問題について、今後は更なる検討が必要であるといえる。

・寒冷時での使用対策

質量濃度 50%の尿素水溶液の結晶化温度は 8°Cであるのに対し、不凍液混合水溶液とした場合の結晶化温度は 6°C以下になることが確認でき、不凍液を混合することで結晶化温度は低下することが分かった。

モルタル供試体を不凍液混合水溶液に浸漬した場合には、30 分間浸漬することで約 50%の乾燥収縮低減効果が認められた。不凍液混合水溶液の浸漬により、水溶液中の尿素的結晶化が生じ、結晶圧や保水効果の影響により収縮作用が抑制されたと考えられる。コンクリート供試体においても十分な乾燥収縮低減効果が認められた。モルタル供試体と同様に、不凍液混合水溶液の浸漬により、水溶液中の尿素的結晶化が生じ、結晶圧や保水効果の影響により収縮作用が抑制されたと考えられる。

また、不凍液中の主成分によって乾燥収縮低減効果は変化することが確認できた。不凍液の主成分には、既存の乾燥収縮低減剤の主成分として用いられている低級アルコールと類似の成分が用いられ、これらが影響していることも考えられるため、今後も更なる検討が必要であるといえる。

また、-5°Cの寒冷環境での乾燥収縮試験では、モルタルにおいて不凍液混合水溶液を塗布した場合は尿素水溶液より乾燥収縮低減効果が高かった。

以上より、不凍液を混合することにより、寒冷環境での尿素水溶液の使用は可能であり、常温環境での場合と同様な乾燥収縮低減効果が得られると考えられる。

【参考文献】

- 1)日曹商事株式会社：「サイブライン Z1」総合仕様書
- 2)八十島治典：各種乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートに関する研究、日本建築学会大会
学術講演梗概集、pp.201-202、2001

第 8 章

結論と考察

目次

| | |
|-------------------|-----|
| 8.1 本研究のまとめ | 187 |
| 8.2 今後の課題..... | 189 |

第 8 章 結論と考察

8.1 本研究のまとめ

■第 1 章について

コンクリート用塗布型乾燥収縮低減剤に関する社会的背景および技術的背景及について述べ、本研究の目的を記した。

■第 2 章について

コンクリート用塗布型乾燥収縮低減剤に関する既往の研究、本研究で用いた材料に関連する既往の研究について記した。

■第 3 章について

尿素水溶液に浸漬したモルタルおよびコンクリート硬化体の基本性状についての実験を行った。

乾燥収縮試験において、無処理に比べ尿素水溶液に浸漬した供試体は乾燥収縮が小さくなった。これは圧縮強度と同様に、供試体表面より浸入した水溶液中の尿素が再結晶化すること、尿素の保水効果によって多くの水分が硬化体中に残り、乾燥を防ぐことができたことが要因として考えられる。

供試体の浸漬時材齢が 3 日目の方が 7 日目に比べ収縮低減効果が高かった。これは水和進行による硬化体組織の緻密化が進まない方が尿素溶液は硬化体表面から浸透しやすいためと考えられる。また、尿素水溶液による水セメント比の高い供試体への乾燥収縮低減効果が高かった。また、供試体を浸漬する尿素水溶液の尿素濃度は、飽和濃度に近い 50%において、乾燥による長さ変化低減効果は高くなった。また、浸漬時間が長くなるほど、供試体内部へ浸入する尿素水溶液量は増加し、再結晶化する尿素が多くなると考えられるため、浸漬時間が長いほど収縮低減効果が高くなった。

圧縮強度試験において、無処理に比べ尿素水溶液に浸漬した供試体では圧縮強度は大きくなった。これは尿素水溶液が内部へ浸入し、尿素が再結晶化することで、硬化組織の空隙が埋められたことや、水分の逸散を防止する保水効果が現れ、多くの水分が硬化体中に残存し、水和反応に寄与したためと考えられる。

■第 4 章について

尿素水溶液を含浸する場合、浸漬時間が長いほど浸透深度が深くなった。これより、尿素水溶液の乾燥収縮低減効果は含浸時間や浸透深度と関係があると考えられる。

供試体表面の SEM 観察により、尿素水溶液を含浸した場合、供試体表面の空隙を満た

緻密な含浸層が形成されていることが確認できた。また、含浸層内部を観察したところ、尿素結晶と考えられる柱状の結晶が確認され、空隙内での再結晶化が圧縮強度試験や乾燥収縮試験、促進中性化試験における強度の増進、乾燥収縮の低減、中性化の抑制に寄与していると考えられる。しかしながら、SEM観察における硬化体内の結晶の観察により生成物を断定することは難しく、生成物を明確にするために更なる化学分析を重ねる必要がある。

水と比べ、尿素水溶液の表面張力は大幅に小さく、市販の塗布型乾燥収縮低減剤の表面張力値に近い値を示した。尿素水溶液の表面張力低下性がわずかであるが確認できた。これより、供試体を尿素水溶液に含浸した場合、尿素水溶液が供試体表面層に浸透し、内部溶液の表面張力を低減したため、乾燥収縮低減ができたと考えられる。

尿素の結晶圧と尿素水溶液の表面張力低下性は同時に作用し、乾燥収縮を低減できたと考えられる。また、尿素の結晶圧が最も大きな要因と考えられる。

■第5章について

尿素水溶液に含浸したコンクリートの耐久性について実験を行った。

凍結融解試験において、尿素が浸入した場合はコンクリートの凍結融解抵抗性への悪影響は見られなかった。促進中性化試験において、尿素水溶液で浸漬した供試体は、浸入した尿素の再結晶化によって表面が緻密化し、炭酸ガスの浸入を抑制していると推察される。

ひび割れ抵抗性試験について、尿素水溶液塗布することでひび割れ抵抗性が向上することがわかった。これは、供試体表面に尿素水溶液を塗布することにより、無処理の供試体と比較して硬化体内部水分の分布状態が良くなり、また尿素の再結晶化が硬化体内部の空隙を埋めたことが要因と推察される。

ひび割れ修復性試験について、すでに生じたひび割れに対して尿素水溶液を塗布することによってひび割れを修復する効果が得られることが確認できた。これは、尿素水溶液の含浸により供試体内部の水分量が増加することでコンクリートが膨張したことや、尿素がひび割れの空隙内で結晶化したことによってひび割れが埋められたためと考えられる。

■第6章について

尿素含有水溶液をコンクリートの表面に塗布および散布することで、乾燥収縮低減効果が認められた。また、塗布および散布回数を増加することで、より多くの水溶液が含浸し、収縮低減効果が高くなった。これは浸漬の場合と同様に、尿素が再結晶化することにより、その結晶圧および尿素の保水効果が作用したためと考えられる。また、浸漬、塗布、散布を比較すると塗布と散布は浸漬に比べ収縮低減効果を大きく得ることができた。

以上の結果より、現場において塗布もしくは散布方法で尿素水溶液の含浸を行うことが望ましいと考えられる。

■第7章について

モルタルについて、硫酸ナトリウムの混合による尿素溶出問題を改善し、乾燥収縮低減効果が維持できたと考えられる。しかし、コンクリートについて、硫酸ナトリウムの混合または珪酸ナトリウムの混合による尿素溶出問題の改善が見られず、乾燥収縮低減効果を維持できなかったと考えられる。モルタルとコンクリートを比較すると、供試体の寸法や供試体内部の組織の違いが影響していることも考えられるため、今後は更なる検討が必要であるといえる。

尿素水溶液の結晶化温度は8℃であるのに対し、不凍液混合水溶液の結晶化温度は6℃以下とすることができ、不凍液の混合により結晶化温度は低下した。このことから、不凍液を適量混合することにより結晶化温度は低下することが確認できた。

モルタル供試体を不凍液混合水溶液に浸漬した場合には、30分間浸漬することで約50%の乾燥収縮低減効果が認められた。不凍液混合水溶液の浸漬により、水溶液中の尿素の結晶化が生じ、結晶圧や保水効果の影響により収縮作用が抑制されたと考えられる。コンクリートにおいても十分な乾燥収縮低減効果が認められた。モルタル時と同様に、不凍液混合水溶液の浸漬により、水溶液中の尿素の結晶化が生じ、結晶圧や保水効果の影響により収縮作用が抑制されたと考えられる。

また、-5℃の寒冷環境での乾燥収縮試験では、モルタルにおいて不凍液混合水溶液を塗布した場合は尿素水溶液より乾燥収縮低減効果が高かった。

以上より、不凍液を混合することにより、寒冷環境での尿素水溶液の使用は可能であり、常温環境での場合と同様な乾燥収縮低減効果が得られると考えられる。

8.2 今後の課題

■尿素溶出問題について

降雨による濡れが考えられる環境で本工法を適用するための尿素溶出改善策をさらに検討する。

■種類の異なる不凍液混合水溶液の乾燥収縮低減効果の違いの検討

不凍液中の主成分によって乾燥収縮低減効果は変化することが確認できた。不凍液の主成分には、既存の乾燥収縮低減剤の主成分として用いられている低級アルコールと類似の成分が用いられ、これらの影響が及んでいることも考えられるため、今後は更なる検討する。

■美観の維持

これまでの検討において、浸漬時間が長いほど、乾燥した供試体表面に析出する結晶が多くなる。析出した結晶は強度が高くないため、接触すると表面の結晶は剥落する。水溶液塗布後、コンクリート表面に析出する結晶を処理し、コンクリート表面の美観を損ねない方法を検討する。

■乾燥収縮低減剤の性能

本乾燥収縮低減剤の具体的なデータを蓄積するために、空隙構造の測定、水分逸散試験、付着試験や塩化物浸透試験などを検討する。

謝辞

本研究を取りまとめる機会を与えて下さったとともに、実験及び論文作成に協力して下さった皆様に対し、心より深く感謝申し上げます。

本論文を作成するに当たり、宇都宮大学大学院工学研究科教授藤原浩已先生に深く感謝いたします。本研究を行う機会を与えてくださるとともに、適切な御指導を賜りましたことに、深く感謝の意を表します。また、実験結果をわかりやすく表現する方法など、今までの自分の足りない部分についても数多くのご指導を賜りましたことは、今後の糧になるものであります。

本研究の実験を行うに当たり、宇都宮大学大学院工学研究科准教授丸岡正知先生に深く感謝いたします。実験方法の検討、実験材料の使用、論文の作成や実験結果の考察など、数多くのご指導を賜りましたことに、心から深く感謝申し上げます。

本研究で使用した各種材料をご提供して頂きました各会社の皆様に深く感謝致します。

この論文を完成させるに当たり、同研究室の白山昂資氏、佐藤匠氏、六本木晶瑚氏とは同じ研究班として数多くの実験を行い、研究生活上における心の支えになって頂きましたことに、心から深く感謝申し上げます。

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、温かく見守ってくれていた家族に対して深い感謝の意を表して謝辞と致します。

令和3年2月

劉 玲玲