

# 論文 尿素水溶液の散布および塗布工法による乾燥収縮低減剤の開発

劉 玲玲\*1・藤原 浩巳\*2・丸岡 正知\*3・白山 昂資\*1

**要旨：**乾燥収縮によるコンクリートのひび割れは、構造物の耐久性などに悪影響を与える。既往の研究において、コンクリートの乾燥収縮低減方法として、尿素の混和が効果的とされている。しかし、混和材料を混和する方法は、材料および機材コストや人件費の上昇を招く。本研究では、より安価でかつ簡便な方法で乾燥収縮を低減可能とする方法として、尿素と硫酸ナトリウムを一定の割合で混和した水溶液を表面含浸型乾燥収縮低減剤とし、脱型後のコンクリート表面に塗布および散布する方法を試みた。その結果、無処理に比べ各水溶液に塗布また散布した供試体は乾燥収縮が小さくなり、圧縮強度が大きくなることが分かった。

キーワード：散布，塗布，乾燥収縮低減剤，尿素，硫酸ナトリウム

## 1. 研究背景

コンクリート構造物のひび割れ発生を完全に防ぐことは一般的に難しいとされる。構造物に生じたひび割れは、耐久性などの物性に悪影響を与える。特に乾燥収縮によるひび割れは以前から課題とされており、これまで多くの研究がなされている。既往の研究成果において、コンクリートの乾燥収縮低減方法として、次に挙げるものが効果的とされている。

- a) 膨張材の混和
- b) 乾燥収縮低減剤の混和
- c) 石灰石骨材の利用
- d) 尿素の混和

しかし、レディーミクストコンクリート工場を用いて混和材料を混和する方法は、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、一般に常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ないことが多く、混和の度に臨時の人手を要し、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、既往の研究成果において、尿素をコンクリートに 50 kg/m<sup>3</sup> 混和すると、乾燥収縮は約 60% 低減するとされる<sup>1)</sup>。しかし、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、コンクリート内部の乾燥は進行しにくい。よって乾燥収縮の抑制をするために、コンクリート全体に混和材料を用いることは効率的とは言いがたく、主原因である表面部分にのみ収縮低減効果のある材料を用いることが合理的と考えられる。

本研究では上記の状況を考慮し、より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後のコンクリート表面に含浸させることにより、乾燥収縮を低減す

る方法を開発した。これまでの研究では、脱型後を 0 日とし、91 日まで乾燥収縮を測定した結果、尿素混和水溶液を含浸させたモルタルについて収縮低減効果が確認できた<sup>2)</sup>。その後、材齢経過後のモルタルを水に浸漬し、含浸した尿素混和水溶液の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小さくなり、また含浸した水溶液の溶出がみられた。次に、硫酸ナトリウム混和水溶液を用いて未反応のセメント鉱物との反応するにより、水への浸漬を繰り返しても含浸した水溶液が溶出しない収縮低減剤の開発を試みた。しかし、水溶液を含浸させたモルタルに収縮低減作用はなかった。

また、モルタルに尿素と硫酸ナトリウムを一定の割合で混和した水溶液を乾燥収縮低減剤として用いたところ、脱型後 0 日から 91 日まで尿素混和水溶液を含浸させた場合と同様に、乾燥収縮の低減効果が確認できた。また、材齢経過後のモルタルを水に浸漬しても、収縮低減効果が失われることはなく、効果は持続した。

また、コンクリートにおいても、脱型後 0 日から 91 日まで尿素および尿素と硫酸ナトリウムを一定の割合で混和した水溶液を含浸させた場合と同様に、乾燥収縮の低減効果が確認できた<sup>3)</sup>。同様に、材齢経過後のコンクリートを水に浸漬しても、収縮低減効果が失われることはなく、効果は持続した。一方、実施工において適用するためには、浸漬より簡便な工法を検討する必要がある。

本報告では、コンクリートにおいて、尿素および尿素と硫酸ナトリウムを一定の割合で混和した水溶液を塗布または散布した場合の収縮低減効果についての検討結果を示す。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合条件、練混ぜ方法

\*1 宇都宮大学 大学院工学研究科システム創成工学専攻 (学生会員)

\*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科教授 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科准教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

種別	名称	記号	密度
水	上水道水	W	1.00
結合剤	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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Na	2.68

本研究における使用材料を表-1に示す。尿素は市販の工業用製品を用いた。

コンクリートの配合条件を表-2に示す。

フレッシュ性状の目標値は、スランプ 8.0±2cm, 空気量 4.5±1.5%とした。SPの添加量はセメント質量に対して0.1%に一定し、単位水量と細骨材添加率はフレッシュ性状を満たすように適宜調節した。練混ぜには公称容量60Lの二軸ミキサを使用した。練混ぜ手順はセメント、細骨材、粗骨材を投入した後、空練りを15秒行い、あらかじめSPを混和した練混ぜ水を投入し、60秒練り混ぜた後排出した。

## 2.2 試験項目

### (1) フレッシュ性状試験

スランプ試験はJISA1101に、空気量試験はJISA1128にそれぞれ準拠した。

### (2) 圧縮強度試験

JISA1108に準拠した。材齢1日で脱型し、脱型後の養生は20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室にて行い、材齢3日に混合水溶液で塗布し、材齢7、28日に圧縮強度試験を行った。

### (3) 乾燥収縮試験

JISA1129-3に準拠した。供試体作製翌日に脱型し、この日を乾燥期間0日とした。測定期間中は20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室にて保管し、長さ変化と質量変化を測定した。

### (4) 乾燥湿潤繰返し試験

乾燥湿潤繰返し試験は乾燥材齢91日まで、乾燥収縮を測定した供試体を、91日目から21日毎に1時間水に浸漬および乾燥を繰り返す。154日目からは21日毎に水に浸漬せず測定するだけで、雨水等の濡れによって尿素等が溶出することによる収縮低減効果への影響について模擬的に検討を行った。

## 2.3 乾燥収縮低減剤の塗布および散布方法

本研究においては、次に示す2種類の水溶液を乾燥収縮低減剤として使用した。

表-2 配合条件, フレッシュ性状試験結果

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				添加率 (%)	フレッシュ性状	
	W	C	S	G		空気量 (%)	スランプ (cm)
40	170	425	716	983	0.10	4.5	8.0
50	172	344	811	947	0.10	4.0	8.0
60	174	290	847	950	0.10	4.0	8.0

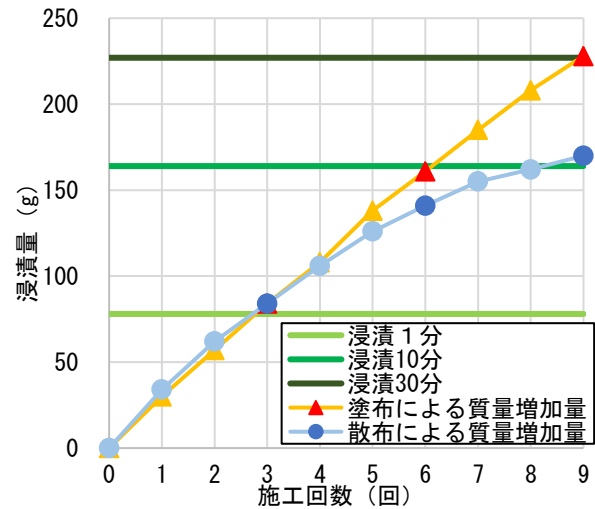


図-1 混合水溶液の含浸量の変化 (W/C=50%)

- ①尿素を水に質量比で50%溶解した水溶液
- ②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

供試体を塗布または散布する材齢は、現場にて構造体への適用を想定し、脱型後乾燥開始から3日目まで20±3℃、相対湿度60±5%に保った恒温恒湿室内で気中養生した後、それぞれの水溶液を塗布または散布した。

塗布には市販の幅70mmの刷毛を使用し、一回あたりの塗布量を1m<sup>2</sup>当たり200g使用することを想定し、本研究に用いた供試体の全表面積に対して36gの乾燥収縮低減剤を30分に1回、供試体全面に満遍なく塗布した。塗布回数は図-1に示すように、浸漬時間1分、10分、30分間の含浸量に相当する3回、6回、9回の3条件とした。また、散布には市販の噴霧器を使用し、供試体表面から垂直距離5cmの位置から、供試体全面に10cm×10cmの面積当たり定量せずに4回吹き付けた。また、比較のため、散布回数は塗布回数と同様の3条件とした。

## 3. 試験結果及び考察

### 3.1 フレッシュ性状試験

試験結果を表-2に示す。いずれの配合もスランプ 8.0±2cm, 空気量 4.5±1.5%の目標値を満たした。

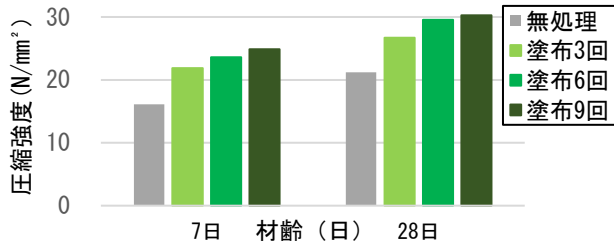


図-2 圧縮強度試験結果 (W/C=50%, 混合水溶液塗布)

### 3.2 圧縮強度試験 (塗布)

水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果について、いずれの水セメント比においても、尿素および混合水溶液で浸漬した供試体は、無処理に比べ圧縮強度が増加する傾向を示した<sup>3)</sup>。

本研究では、水セメント比 50%における、混合水溶液を塗布した場合の圧縮強度試験結果を図-2 に示す。混合水溶液を塗布した供試体は、無処理に比べ圧縮強度が増加する傾向を示した。これも、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濃度の上昇および、尿素的再結晶化が生じることで、硬化組織中の空隙が埋められたためと考えられる。また水溶液の浸入により、供試体内部に残存する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ることによって圧縮強度の増加に寄与したと考えられる。また塗布回数の増加に伴い圧縮強度は増大した。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水溶液が内部へ浸入する量が増加し、その後乾燥した時に多くの尿素が硬化組織中で再結晶化し残存するためと推察される。

### 3.3 乾燥収縮試験 (塗布)

尿素水溶液を塗布した場合の乾燥収縮試験結果について、水セメント比 40%を図-3、水セメント比 50%を図-4、水セメント比 60%を図-5 に、また、混合水溶液を塗布した場合の乾燥収縮試験結果について、水セメント比 40%を図-6、水セメント比 50%を図-7、水セメント比 60%を図-8 にそれぞれ示す。

図より、各水溶液の塗布により、乾燥収縮の低減効果が認められた。しかし、水セメント比 40%において、塗布 3 回の長さ変化率は無処理と同様になった。これは硬化組織が緻密となる低水セメント比の方が水溶液は表面から浸透しにくいと考えられる。また、いずれの水溶液においても塗布回数が増えるほど、収縮低減効果が大きくなるのがわかった。これは圧縮強度と同様の原因だと考えられる。

既往の研究では、モルタルの供試体と比較すると、コンクリートの供試体は体積に対する表面積の割合が小さいことや、強度が高いことにより、浸漬時間 1 分では乾

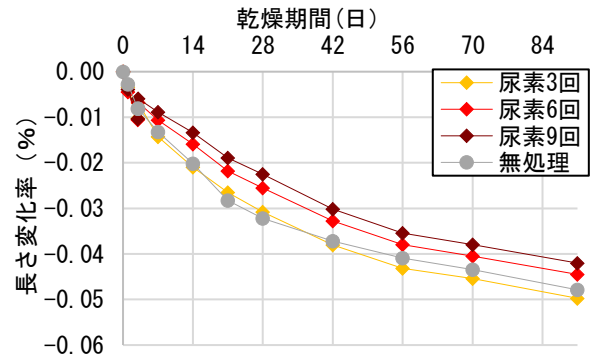


図-3 乾燥収縮試験結果・W/C=40% (尿素塗布)

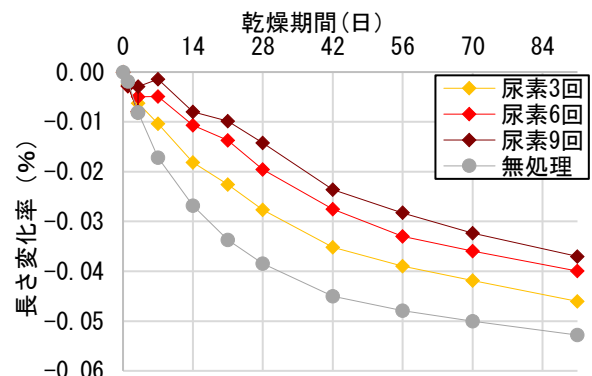


図-4 乾燥収縮試験結果・W/C=50% (尿素塗布)

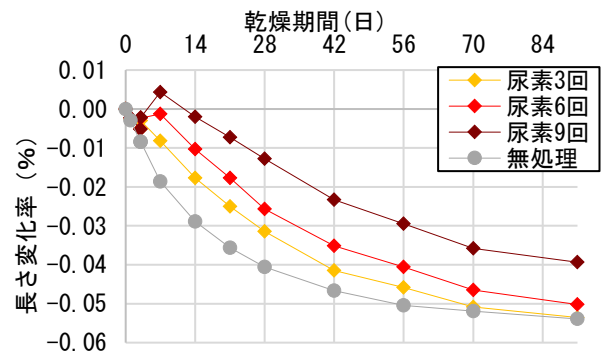


図-5 乾燥収縮試験結果・W/C=60% (尿素塗布)

乾燥収縮低減効果が小さく、水セメント比による違いが明確にならなかった<sup>3)</sup>。しかし、本研究において、塗布回数を 3 回とした場合、水セメント比 50%および 60%の乾燥収縮低減効果は水セメント比 40%より大きくなった。これは硬化体組織が粗である高水セメント比の方が塗布された水溶液は硬化体表面から浸透しやすいためと考えられる。

既往の研究では、浸漬と塗布の効果を比較すると、どの浸漬条件においても、塗布による含浸方法の方は収縮低減効果が大きくなった<sup>3)</sup>。これは、刷毛を用いて水溶液を塗り付ける際に、刷毛の作用力により、水溶液が押し込まれるため、浸漬に比べて多くの水溶液が浸入したことと、30分に1回の塗布としたため、次の塗布までに

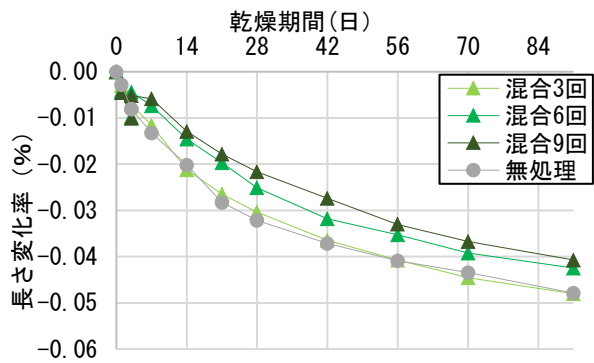


図-6 乾燥収縮試験結果・W/C=40% (混合塗布)

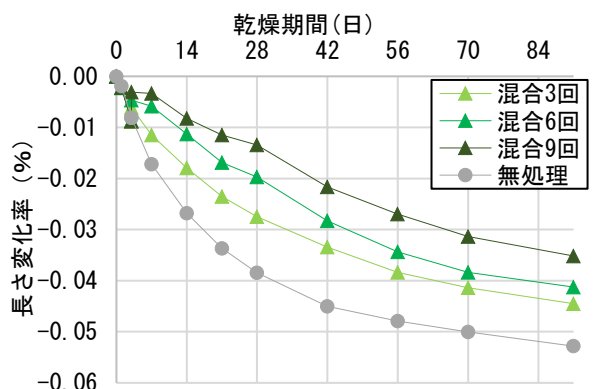


図-7 乾燥収縮試験結果・W/C=50% (混合塗布)

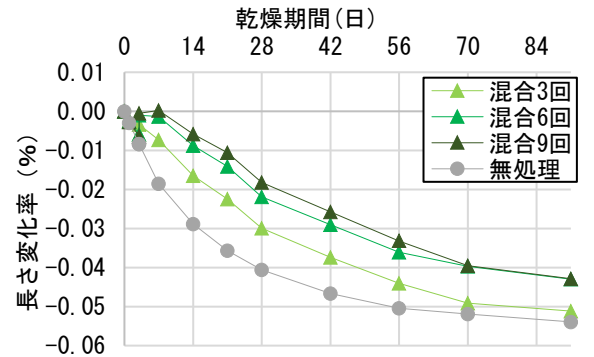


図-8 乾燥収縮試験結果・W/C=60% (混合塗布)

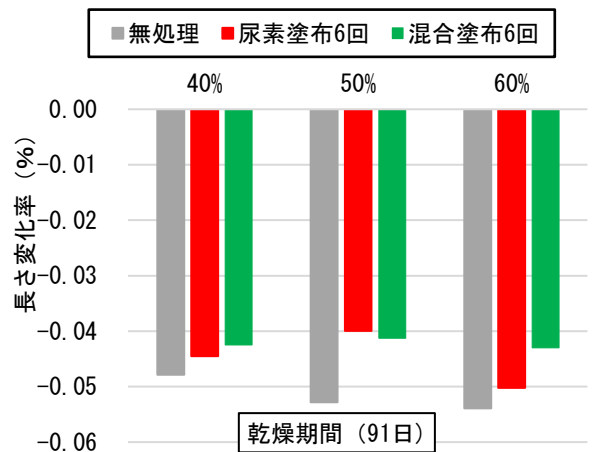


図-9 各水溶液塗布による長さ変化率(塗布 6 回)

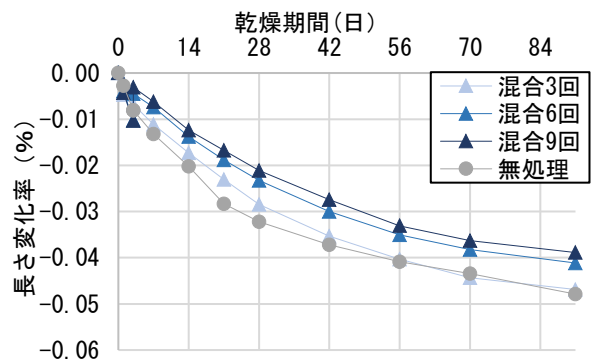


図-10 乾燥収縮試験結果・W/C=40% (混合散布)

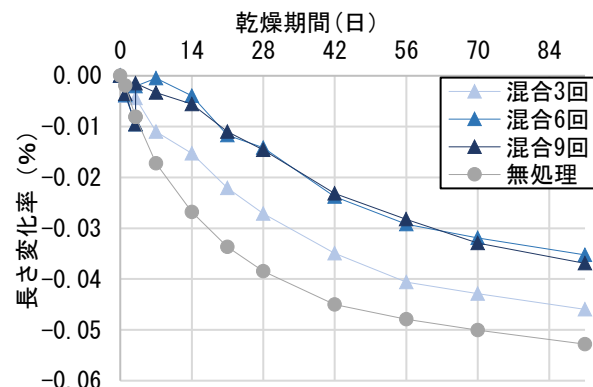


図-11 乾燥収縮試験結果・W/C=50% (混合散布)

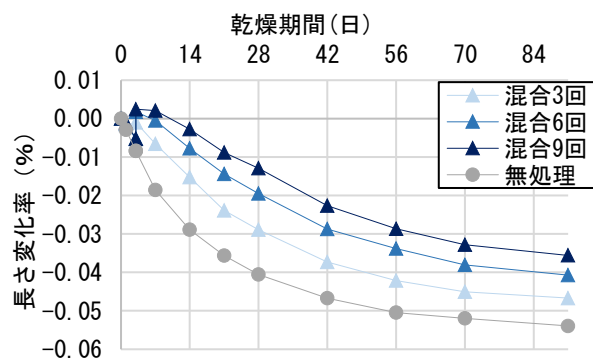


図-12 乾燥収縮試験結果・W/C=60% (混合散布)

表面に塗布した水溶液の水分が蒸発し、尿素有の濃度が高まり、多くの結晶が水分の逸散を抑制したためと推察されるが、さらなる検討が必要である。

これについては、水溶液毎の収縮低減効果を比較するため、各水セメント比において、乾燥期間 91 日における各水溶液で 6 回塗布した場合と無処理の長さ変化率の比較を図-9 に示す。図より、全ての水セメント比において混合水溶液塗布した場合の収縮低減効果は尿素水溶液塗布した場合と同程度、もしくは大きいことを示した。これは、混合水溶液の中の膨張性を有する硫酸ナトリウムもある程度乾燥収縮を抑制すると考えられる。これらより、混合水溶液を含浸させた場合の方が収縮低減効果に寄与すると推察される。

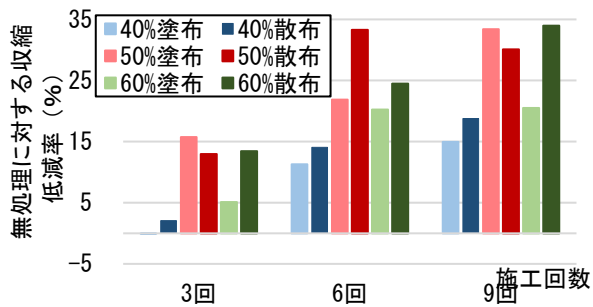


図-13 施工方法の比較 (混合水溶液)

### 3.4 乾燥収縮試験 (散布)

実施工に適用するとき、広範囲を対象とできる噴霧による直接散布方法は作業効率が塗布方法より良いため、ここでは、噴霧器を用いた散布工法による乾燥収縮低減効果を検討した。混合水溶液を散布した場合の乾燥収縮試験結果について、水セメント比 40%の場合を図-10、水セメント比 50%の場合を図-11、水セメント比 60%の場合を図-12 にそれぞれ示す。

図より、全ての乾燥収縮試験において、混合水溶液の散布により、乾燥収縮の低減効果が認められた。また、水溶液の散布回数を 3 回、6 回、9 回とした場合、いずれの水セメント比においても回数を多くなるほど、収縮低減効果が大きくなることがわかった。散布回数が多くなるほど、水溶液の浸入量が多くなり、乾燥後に多くの尿素が残存、結晶化するため、収縮作用が抑制されると考えられる。また、散布回数を 3 回とした場合、水セメント比 50%および 60%の乾燥収縮低減効果は水セメント比 40%の場合より大きくなった。これも塗布した場合と同様に、硬化体組織が粗である高水セメント比の方が水溶液は硬化体表面から浸透しやすいためと考えられる。

施工方法による乾燥収縮低減効果の違いを確認するため、乾燥材齢 91 日における各水セメント比の混合水溶液塗布または散布したものの長さ変化率を無処理と比較し、それぞれの乾燥収縮低減率を図-13 に示す。

図より、全ての水セメント比において散布 6 回の収縮低減割合は塗布 6 回より大きかった。また、水セメント比 60%の場合、それぞれの施工回数について、散布の収縮低減割合は塗布より大きかった。図-1 に示す散布 6 回と 9 回の場合の含浸量は塗布より少なかったことより、上記の結果が得られたのは別の要因だと考える。散布の水溶液はコンクリートの表層付近に多く分布し、塗布の水溶液がコンクリートの表層より深く内部に分布していると考えられる。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る。以上より、散布の水溶液は、含浸量に表れない形でコンクリート表層においてより多く結晶することで、収縮低減効果が顕著に表れると考えられる。そのため、さらなる検討が必要である。

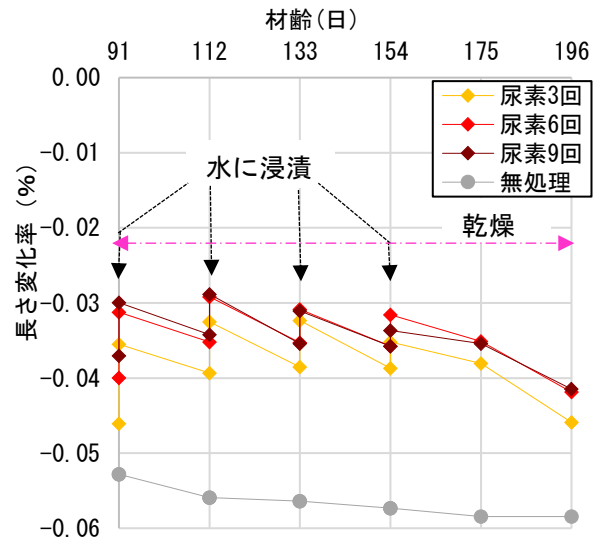


図-14 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=50% (尿素塗布)

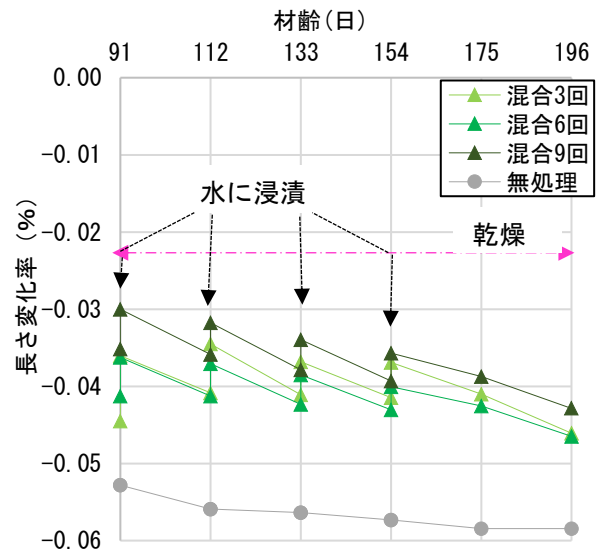


図-15 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=50% (混合塗布)

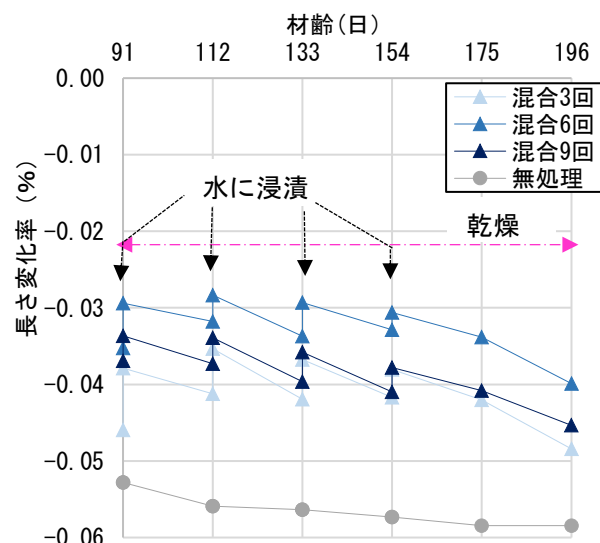


図-16 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=50% (混合散布)

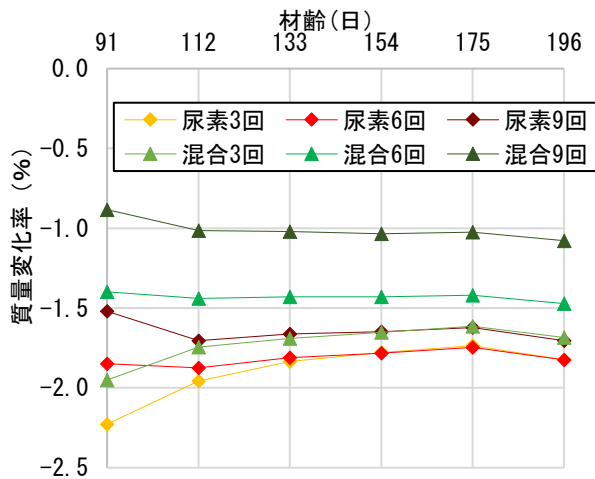


図-17 乾燥湿潤繰返し試験・W/C=50%質量変化率(塗布)

### 3.5 乾燥湿潤繰返し試験

水セメント比50%の乾燥湿潤繰返し試験結果について、尿素水溶液を塗布した場合を図-14、混合水溶液を塗布した場合を図-15、混合水溶液を散布した場合を図-16にそれぞれ示す。図より、91日から154日までの乾燥湿潤繰返し期間において、いずれの水溶液の塗布・散布においても乾燥収縮低減維持効果が見られた。しかし、154日から196日までの乾燥のみの期間において、長さ変化率が増加した。これより、各水溶液の乾燥収縮低減効果の持続性について、さらなる検討が必要と考えられる。

図-14および図-15より、乾燥湿潤を繰返した長さ変化率の試験結果では、塗布水溶液の違いによる変化の差は小さく、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ではなかった。既往の研究では、測定間隔の7日に比べ、さらに長期的な期間の乾燥収縮を考慮した際、混合水溶液を含浸させた場合の方が保水効果を有し、収縮低減効果に寄与するとされている<sup>3)</sup>。一方、本研究では測定間隔を21日としているが、混合水溶液中の硫酸ナトリウムの溶出を防ぐ効果も明確にならなかった。

次に、水セメント比50%の乾燥湿潤繰返し試験結果における塗布した場合の質量変化率を図-17に示す。乾燥期間0日の質量よりそれぞれの日の質量変化率を算出した。なお、91日から154日までの乾燥湿潤繰返す期間は水に浸漬する前に測定した質量を基に、算出した。

図-17に示すように質量変化率において、いずれの塗布回数においても、尿素水溶液で塗布した供試体と比較して、混合水溶液で浸漬した供試体の方が、質量変化率は小さくなった。これは混合水溶液で塗布した際に、コンクリート表面において未反応のセメントと硫酸ナトリウムが反応することで生じる生成物の空隙内に尿素水溶液が残存することで、尿素水溶液のみの塗布した場合に比べてより緻密な構造の中で尿素が再結晶化し、水分の逸散を防いでいるためと考えられる。これより、現在の

供試体をさらに乾燥させることを考慮した際、混合水溶液を含浸させた場合の方が乾燥収縮低減維持効果に寄与すると推察される。

図-15および図-16より、水セメント比50%の場合の乾燥湿潤を繰返した長さ変化率の試験結果において、施工方法の違いによる変化の差は小さかった。雨水等の濡れによる工法の違いが乾燥収縮低減維持効果へ及ぼす影響について明確にならなかった。また、3.4のとおり、散布の収縮低減割合はだいたい塗布より大きかった。これより、実大構造物に作業しやすい散布は塗布より欠点がなく、実施工において適用しやすいと考えられる。

## 4. まとめ

本研究から得られた成果を以下に示す。

- (1) 圧縮強度において、無処理に比べ混合水溶液で塗布した供試体の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、養生が促進されたためと考えられる。
- (2) 乾燥収縮において、無処理に比べ各水溶液に塗布または散布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、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と考えられる。また施工回数が増えるほど、供試体内部へ浸入する水溶液の量は増加し、再結晶化する尿素が多くなるため、施工回数が多いほど乾燥収縮低減効果が高くなった。
- (3) 施工方法について、散布の収縮低減割合は塗布と同程度もしくはそれ以上の値を示した。しかし、雨水の濡れによる乾燥収縮低減維持効果は同等であった。
- (4) 乾燥収縮試験、乾燥湿潤繰返し試験ともに、水溶液の違いによる長さ変化率の変化に大きな違いは認められなかった。

## 参考文献

- 1) 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，Vol.29，No.1，pp.639-644，2007
- 2) 劉玲玲・藤原浩巳・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
- 3) 白山昂資・藤原浩巳・丸岡正知・劉玲玲：塗布および浸漬工法を用いたコンクリートの乾燥収縮低減剤の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1887-1892，2018