

論文 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

白山 昂資*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・劉 玲玲*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、レディーミクストコンクリート工場において混和材料を混和する方法は、投入品数増加、管理の問題、練混ぜ時に投入する手間などにより材料および機材コストや人件費の上昇を招く。本研究では上記の状況を考慮し、より安価でかつ簡便な方法で乾燥収縮を低減可能な方法として、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含浸する方法を試みた。

キーワード: 乾燥収縮低減剤, 尿素, 硫酸ナトリウム, 乾燥収縮

1. はじめに

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。その一部の技術は既に実用化され、その中でも、種々の化成品等の混和材料の利用により、ひび割れを低減する方法が効果的な手段とされる。

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、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。

既往の研究成果において、尿素をコンクリートに 50 kg/m³ 混和すると、乾燥収縮は約 60%低減するとされる¹⁾。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いえず、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モルタル・コンクリート表面に含浸させることで、乾燥収縮を低減する方法とした。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ものについて収縮低減効果が確認できた²⁾。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薄くなり、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反応することで、水に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認められなかった。

そこで、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、効果は継続した。

以上より、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、塗布または浸漬させた収縮低減効果についての検討を示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件, 練混ぜ方法

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。

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

*1 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻准教授 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 ₂ SO ₄)	Na	2.68

量 4.5±1.5%とした。練混ぜには公称容量 60L の二軸ミキサーを使用した。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

スランブ試験は JIS A 1101 に準拠した。また、空気量試験は JIS A 1128 に準拠した。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠した。材齢 1 日で脱型し、脱型後の養生は 20±3 °C、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室にて行い、材齢 7、28 日にて圧縮強度試験を行った。

(3) 乾燥収縮試験

JIS A 1129-3 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 °C、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室にて保管し、長さ変化の測定を行った。

(4) 凍結融解試験

JIS A 1148 に準拠した。

(5) 促進中性化試験

JIS A 1153 に準拠した。

2.3 乾燥収縮低減剤の塗布および浸漬方法

本研究において乾燥収縮低減剤として使用する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（以後、混合水溶液）の塗布および浸漬方法を以下に示す。

浸漬液は、水道水、尿素を水に質量比で 50%溶解させた水溶液、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水溶液の三種類を用いた。ただし水道水への浸漬は乾燥収縮試験においてのみ、他の浸漬液との効果を比較するために行った。

浸漬材齢は現場における構造体への塗布工程を想定し、乾燥開始から 3 日目まで 20±3 °C、相対湿度 60±5%恒温恒湿室で気中養生後、各種溶液に浸漬した。浸漬時間は 1 分、10 分、30 分間の 3 条件とした。塗布も同様に気

表-2 配合条件、フレッシュ性状試験結果

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				添加率 (%)	フレッシュ性状	
	W	C	S	G		空気量 (%)	スランブ (cm)
40	160	400	736	1010	0.10	4.4	7.5
50	170	340	798	969	0.10	3.7	8.5
60	174	290	865	932	0.10	5.1	8.0

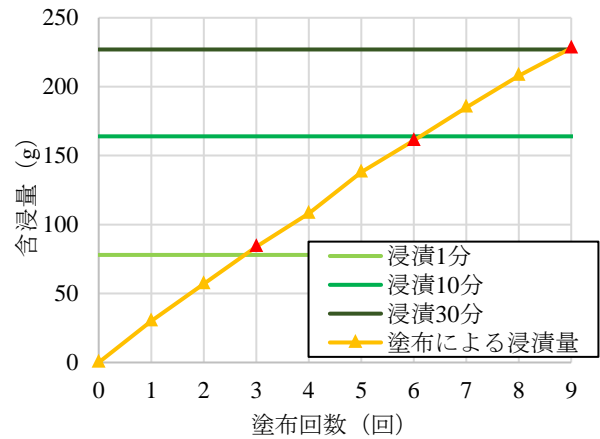


図-1 混合水溶液塗布による含浸量の変化 (W/C=50%)

中養生を行った後、市販の幅 70mm の刷毛を使用し、一回あたりの塗布量を 1m² 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表面積に換算した 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。ただし凍結融解試験と促進中性化試験は、材齢 28 日まで水中養生後、3 日間恒温恒湿室で気中養生し、水溶液への浸漬 1 分のみを行った。

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、98 日目以降 7 日毎に 1 時間水に浸漬および乾燥を繰り返すことで、雨水等の漏れによって尿素等が逸散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。

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ブ 8.0 ±2cm、空気量 4.5±1.5%の目標値を満たした。

3.2 圧縮強度試験

水溶液に浸漬した場合の圧縮強度試験結果について、水セメント比 40%を図-2、水セメント比 50%を図-3、水セメント比 60%を図-4 に示す。

図より、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を含浸した供試体は、無処理に比べ圧縮強度が増加する傾向を示した。これは、供試体表面の空隙

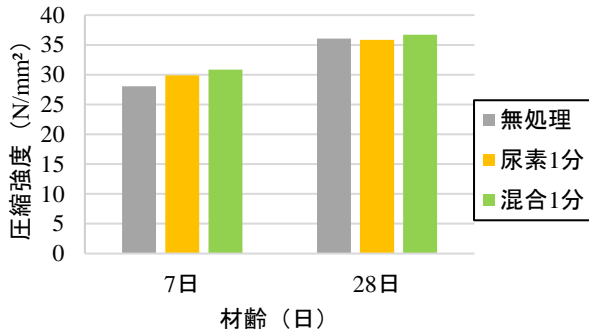


図-2 圧縮強度試験結果 (W/C=40%)

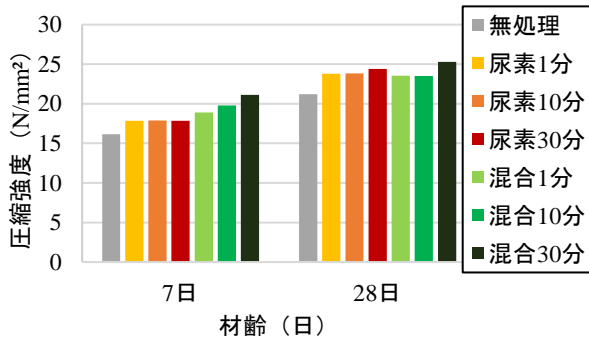


図-3 圧縮強度試験結果 (W/C=50%)

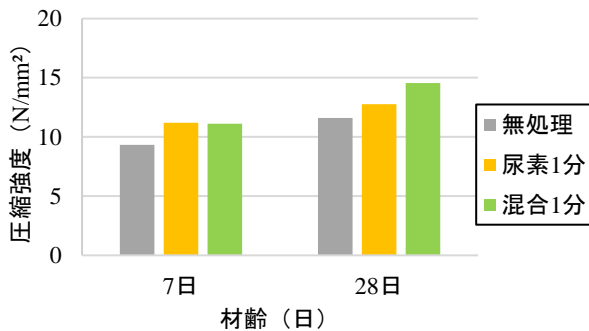


図-4 圧縮強度試験結果 (W/C=60%)

から水溶液が供試体表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と、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で圧縮強度の増加に寄与したと考えられる。また水セメント比 50%において、浸漬時間の延長に伴い圧縮強度は増大した。これは浸漬時間が長くなるほど、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

水溶液に浸漬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-5、水セメント比 50%を図-6、水セメント比 60%を図-7に示す。

図より、全ての乾燥収縮試験において、各水溶液の含

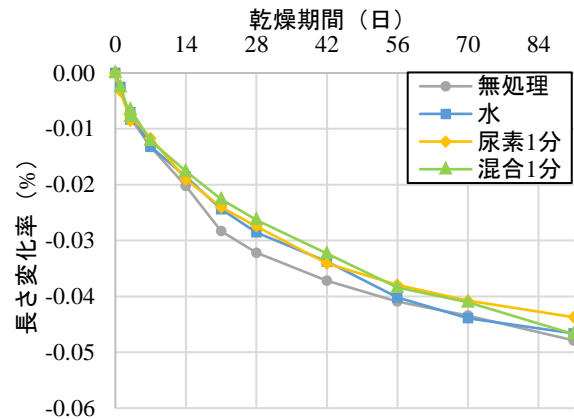


図-5 乾燥収縮試験結果・W/C=40% (浸漬)

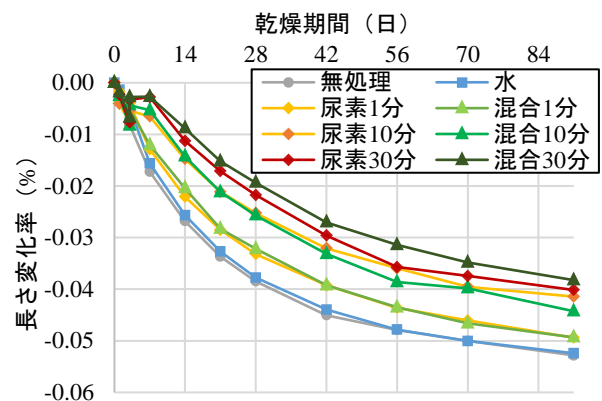


図-6 乾燥収縮試験結果・W/C=50% (浸漬)

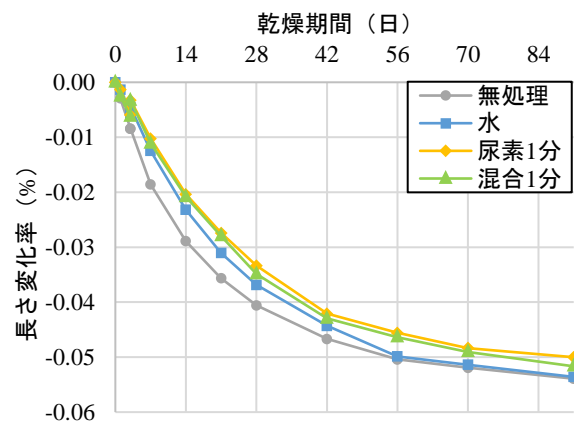


図-7 乾燥収縮試験結果・W/C=60% (浸漬)

浸により、乾燥収縮の低減効果が認められた。図-6より、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ことがわかった。これは圧縮強度と同様に、浸漬時間が長くなるほど水溶液の含浸量が多くなり、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。

図-6において、水溶液の浸漬時間1分間と30分間の乾燥収縮ひずみの差は100μ程とごくわずかな差にみられる。しかしながら、乾燥期間91日における浸漬時間1

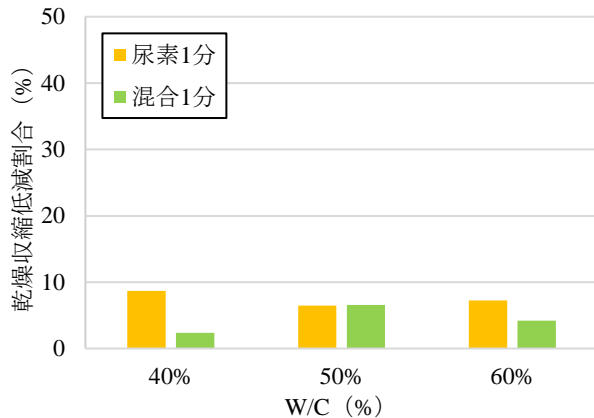


図-8 各水セメント比の無処理に対する、水溶液浸漬1分の91日における長さ変化率の割合

分の乾燥収縮ひずみ約 200 μ と浸漬時間 30 分の乾燥収縮ひずみ約 160 μ より、20%の低減効果がある。乾燥収縮ひずみにおける 20%の低減は効果的なものと考えている。また自己収縮のように 50~100 μ 程度の収縮であっても、近年では無視することのできない劣化要因となっている³⁾。以上より、水溶液の浸漬時間1分間に比べて 100 μ 程乾燥収縮を低減している浸漬時間 30 分間は、有意なデータといえる。

ここで水セメント比の違いによる収縮低減効果の大きさを比較するため、無処理の乾燥期間 91 日における長さ変化率を 100%とした時の、乾燥期間 3 日に各水溶液に 1 分間浸漬した場合の 91 日における長さ変化率の割合を図-8 に示す。ここで比較には次式(1)を用いて算出した。

$$\left\{ 100 - \frac{(\text{水溶液浸漬の長さ変化率})}{(\text{無処理の長さ変化率})} \times 100 \right\} \quad (1)$$

ここで式(1)において、100 から長さ変化率の商を引いて算出される値は、無処理の乾燥期間 91 日における長さ変化率を 0%とした時の、乾燥期間 3 日に各水溶液に 1 分間浸漬した場合の 91 日における長さ変化率の割合を表している。

図-8 より各水セメント比において、無処理と各水溶液を浸漬した場合との収縮低減効果の差は、ほとんど見られなかった。既往の研究成果において、モルタルで同様に 1 分間水溶液に浸漬した場合では、水セメント比が高いほど収縮低減効果が大きく発現した。しかし、本研究においてはモルタル時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や、強度が高いことにより、浸漬時間 1 分では低減効果自体が小さく表れ、水セメント比による違いが明確にならなかったと考えられる。

水セメント比 50%のコンクリートに対して塗布した場

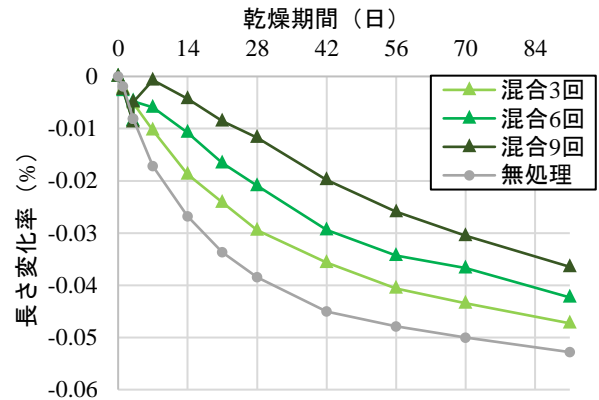


図-9 乾燥収縮試験結果・W/C=50% (塗布)

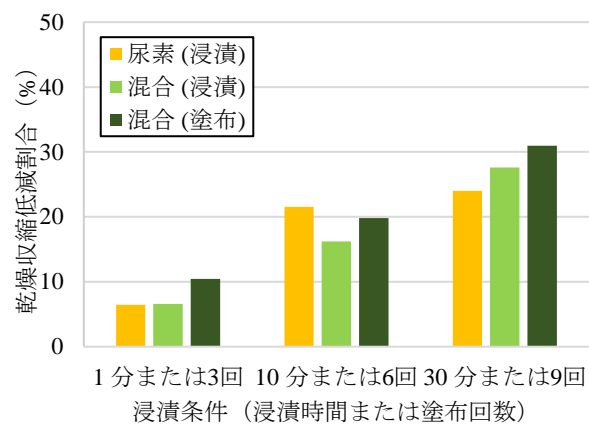


図-10 無処理に対する、水溶液浸漬1分、10分、30分、塗布3回、6回、9回の91日における長さ変化率の割合 (W/C=50%)

合の乾燥収縮試験結果を図-9、無処理の乾燥期間 91 日における長さ変化率を 100%とした時の、浸漬時間 1 分、10 分、30 分と塗布回数 3 回、6 回、9 回の 91 日における長さ変化率の割合を図-10 に示す。ここで比較も図-8 と同様に式(1)を用いて算出した。

図-9 より塗布した場合において、浸漬と同様の収縮低減効果を示した。また塗布の回数を増やしていくことで、浸漬時間を長くすることと同様に、収縮低減効果が大きく発現した。ここで図-10 より浸漬と塗布の効果と比較すると、どの浸漬条件においても、塗布による含浸方法は収縮低減作用に、浸漬と同等程度もしくは大きく寄与している。これは、刷毛を用いて水溶液を塗り付ける際に、浸漬時に供試体表面の空隙中に残存していたわずかな空気が塗布の差異の作用力によって押し出されたため、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、次の塗布までに表面に塗布した水溶液の水分が蒸発し、尿素的濃度が高まり、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。

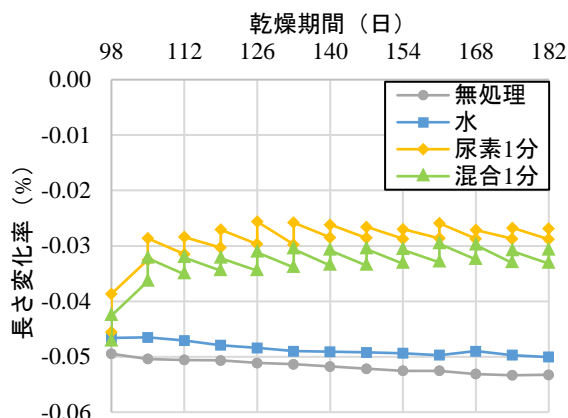


図-11 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=40%長さ変化率

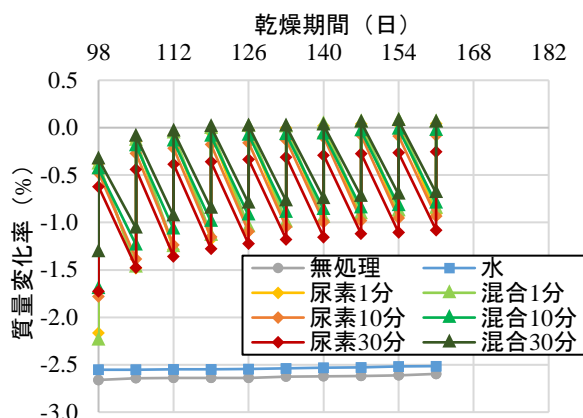


図-14 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=50%質量変化率

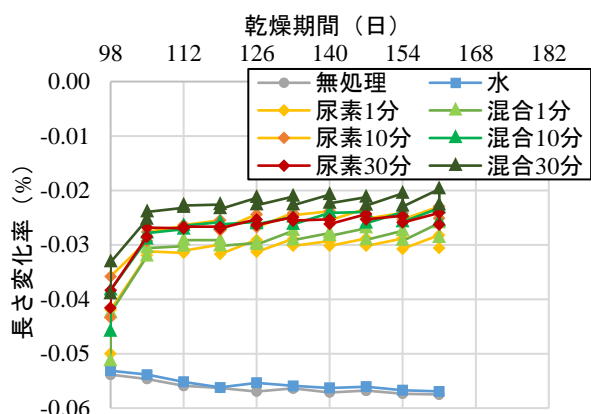


図-12 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=50%長さ変化率

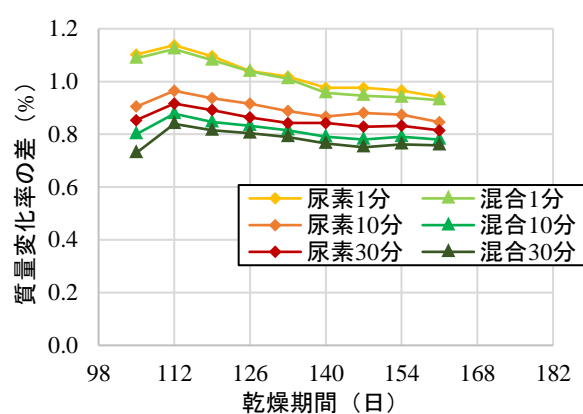


図-15 乾燥湿潤繰返し試験・W/C=50%質量変化率の差

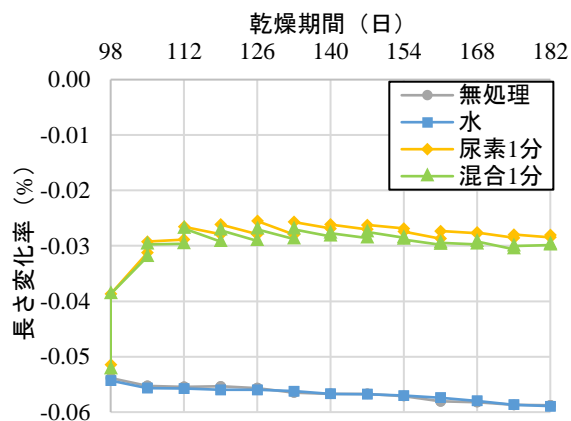


図-13 乾燥湿潤繰返し試験結果・W/C=60%長さ変化率

3.4 乾燥湿潤繰返し試験

水溶液に浸漬した場合の乾燥湿潤繰返し試験結果について、水セメント比 40%を図-11、水セメント比 50%を図-12、水セメント比 60%を図-13にそれぞれ示す。

図より各水セメント比における、乾燥湿潤を繰返した長さ変化率の試験結果において、浸漬する水溶液の違いによる変化の差は小さく、水溶液の溶出を防ぐことを目的とした混合水溶液の効果を明確に見て取ることができなかった。

ここで、水セメント比 50%の乾燥湿潤繰返し試験結果

における質量変化率を図-14、図-14において水に浸漬する前の質量変化率と、7日間の水に浸漬した後の質量変化率の差を図-15に示す。

図-15に示すように質量変化率の差において、浸漬時間 10分と 30分では尿素水溶液を浸漬した供試体と比較して、混合水溶液を浸漬した供試体の方が、7日間の質量変化率の差は小さくなった。これは混合水溶液に浸漬した際に、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、尿素水溶液のみの浸漬をした場合に比べて緻密な構造の中で尿素が再結晶化し、水分の逸散が防がれているためと考えられる。これより、現在の測定期間に比べ、さらに長期的な期間の乾燥収縮を考慮した際、混合水溶液を含ま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推察される。

3.5 凍結融解試験

混合水溶液に浸漬した場合の凍結融解試験の結果を図-16に示す。

図より、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%以上あった。これより混合水溶液浸漬による凍結融解抵抗性への悪影響は無いと考えられる。

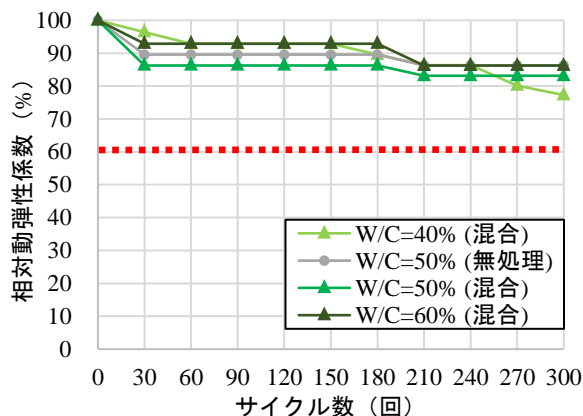


図-16 凍結融解試験結果

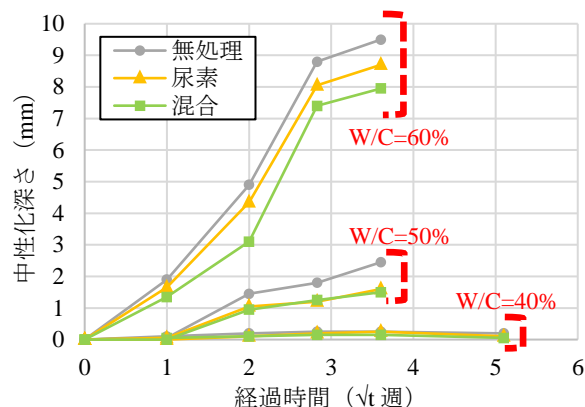


図-17 促進中性化試験結果

3.6 促進中性化試験

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図-17に示す。

図より、いずれの水セメント比においても、水溶液を含浸させた場合において、無処理に比べて中性化深さが小さくなるのが分かった。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と推察される。尿素水溶液と混合水溶液浸漬による差は、同等もしくは混合水溶液がわずかに小さくなるのが分かった。

4. まとめ

本研究から得られた成果を以下に示す。

- (1) 圧縮強度試験において、無処理に比べ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。
- (2) 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。
- (3) 尿素および混合水溶液の含浸方法について、浸漬に比べて繰り返し塗布する方が、収縮低減が高くなった。刷毛を用いて水溶液を塗り付けたことで、浸漬時に表面に残存していたわずかな空気が押し出され、浸

漬に比べ多くの水溶液が浸入したこと、および再塗布の時に 30 分の間隔を設けていたことから、乾燥により供試体表面の尿素濃度がより高くなったためと推察される。

- (4) 乾燥収縮試験、乾燥湿潤繰返し試験ともに、各水溶液浸漬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。しかし質量変化の推移より、混合水溶液に浸漬した場合、7 日間の乾燥作用による質量変化率の差は小さくなった。これは、コンクリート表面に残る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成物生じ、空隙内に多くの尿素水溶液が残存することで、尿素が再結晶化した時、尿素水溶液のみに浸漬した場合に比べて水分が逸散しにくくなるためと考えられる。これより、長期的な期間の乾燥収縮繰返しを考慮した際、混合水溶液を含浸させることで収縮低減にさらに寄与することが期待できる。
- (5) 混合水溶液の浸漬による、凍結融解抵抗性への悪影響は見られなかった。
- (6) 促進中性化試験において、尿素水溶液、混合水溶液の浸漬をした供試体は、浸入した尿素的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。

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.1，2017
- 3) 田澤栄一・宮沢伸吾・重川幸司：水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少，セメント・コンクリート論文集，No. 45，pp. 122-127，1991.