

論文 寒冷時での使用を考慮した尿素塗布によるコンクリートの乾燥収縮低減工法の改良

佐藤 匠*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・劉 玲玲*4

要旨: コンクリートは硬化後、水分の逸散等により乾燥して収縮し、ひび割れが生じる。この乾燥収縮によるひび割れは構造物の耐久性や美観に悪影響を与える。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、尿素の使用が効果的とされている。このような背景から尿素水溶液をコンクリートに浸漬・塗布することで乾燥収縮を低減する工法が開発された。しかし、尿素水溶液は温度が低下すると水に溶けていた尿素が再び結晶化してしまうため、寒冷時での施工に適さない。本研究では、耐低温性能を有する不凍液を尿素水溶液に添加することでこの問題を解決しようと試みた。

キーワード: 尿素, 乾燥収縮低減剤, 寒冷時, 不凍液

1. 研究背景

硬化したコンクリートは、乾燥作用により内部に存在する自由水が逸散することで体積が収縮する。またコンクリートが拘束されている状態にある場合、収縮によって引張応力が発生し、ひび割れが生じる。構造物に生じたひび割れは耐久性や美観に悪影響を与える。こ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ており、これまでに多くの研究がなされている。代表的なコンクリートの乾燥収縮低減方法として、膨張材や乾燥収縮低減剤の混和、尿素の混和、石灰石骨材の利用などが挙げられる。しかし、レディーミクストコンクリート工場において混和材料を投入する方法は、材料の品数増加、管理の問題、練混ぜ時の投入の手間などに起因する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ないことが多く、混和の度に臨時の人手を要するため、混和材料を用いた乾燥収縮低減策の普及の問題点となっている。

また、既往の研究成果において、尿素をコンクリートに 20kg/m^3 混和すると、普通コンクリートに対して 15~20%の乾燥収縮低減効果を得られることが分かっている。しかし、コンクリートの乾燥収縮は主に表面部で生じており、コンクリート内部の乾燥は進行しにくい²⁾。そのため、乾燥収縮低減を目的として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難い。

これらの背景から、より効率的に、また、より安価で簡便に乾燥収縮を低減するために、尿素をコンクリート全体に混和するのではなく、表面部にのみ含浸させる工法を開発した³⁾。図-1 に濃度 50%尿素水溶液を浸漬・塗布した場合のコンクリートの長さ変化率を、図-2 に尿素水溶液を浸漬した場合の圧縮強度をそれぞれ示す³⁾。

図-1, 2 より、尿素水溶液をコンクリート硬化体表面部に浸漬・塗布することで乾燥収縮を低減することができ、圧縮強度も増加することが確認されている。

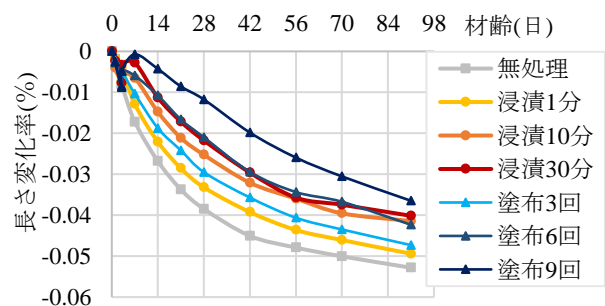


図-1 尿素水溶液を浸漬・塗布した場合の長さ変化率

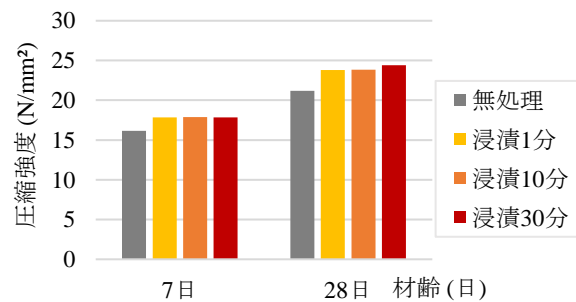


図-2 尿素水溶液浸漬した場合の圧縮強度

しかし、尿素水溶液は温度が低下すると、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再び結晶化し析出するため、寒冷時での施工に適していない。そこで、不凍液が持つ耐低温性能・耐凍結性能に着目し、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析出することを抑制し、寒冷時での施工を可能にしようと試みた。本研究では、寒冷時での実験を行う前の予備

*1 宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻土木工学プログラム (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 博士(工学) (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 博士(工学) (正会員)

*4 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)

試験的段階として種々の検討を行った。ここに、寒冷時とは、JASS5 寒中コンクリートを参考に 5℃程度を想定している。

2. 不凍液添加による結晶化温度の変化

2.1 概要

寒冷時に温度低下により尿素水溶液から、尿素が析出する問題について、まず、尿素水溶液に不凍液を添加し、温度を下げた場合に尿素が結晶化して析出する温度（以下結晶化温度）の変化について、検討した。

2.2 使用材料

尿素は工業用の市販品を用いた。不凍液はエチレングリコールを主成分とした市販品（不凍液 A）を用いた。図-3にこの不凍液を水に添加した場合の凍結温度を示す。

不凍液添加尿素水溶液の作製方法としては、まず、不凍液濃度が、30、40、および 50%となるように水に添加して不凍液溶液とし、水温が 20℃になるように調整した。その後、温度を 20℃で一定に保ちながら、尿素を溶解させ、不凍液添加尿素水溶液とした。尿素的添加割合は材料のバラつき等を考慮し、20℃の状態では析出しないように定めた。表-1に質量割合を示す。

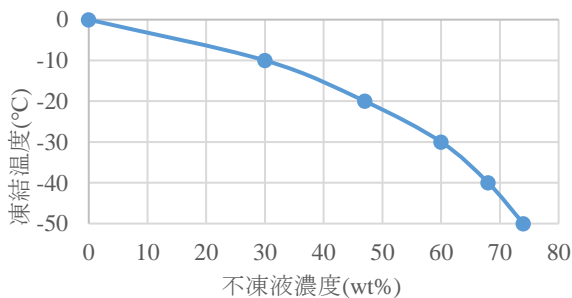


図-3 不凍液水溶液の凍結温度

2.3 試験方法

写真-1に試験の様子を示す。

試験方法は、濃度の異なる不凍液添加尿素水溶液をそれぞれ透明な容器に入れる。容器を氷水に浸し、徐々に温度を低下させ、目視にて尿素的結晶化が確認できた時点の溶液温度を温度計を用いて測定した。また、比較のために、濃度 50%の尿素水溶液を用意し、同様に測定した。

2.4 試験結果

表-1に試験結果の比較を示す。

不凍液添加尿素水溶液は、尿素水溶液と比較して結晶化温度が低く、不凍液の濃度が高いほど結晶化温度は低い。このことから、不凍液は尿素水溶液に添加することで結晶化温度を低下させる効果を有していることが確認できた。しかし、不凍液が結晶化温度を低下させるメカニズムに関しては、現状では不明である。不凍液の主成

分であるエチレングリコールが何かしらの効力を発揮しているものと推察され、今後の検討が必要である。



写真-1 試験の様子

表-1 結晶化温度の比較

名称	質量割合 (%)			結晶化温度 (°C)
	不凍液	水	尿素	
50%尿素水溶液	0	50	50	8
30%不凍液* 添加尿素水溶液	17	39	44	5
40%不凍液* 添加尿素水溶液	24	35	41	4
50%不凍液* 添加尿素水溶液	30	30	40	1

*3種類の不凍液のいずれも同じ質量割合で検討した。

3. 不凍液添加尿素水溶液浸漬によるモルタルの乾燥収縮低減効果

3.1 概要

本章では、コンクリートにおける試験の予備的段階として、不凍液添加尿素水溶液にモルタルを浸漬した場合の乾燥収縮低減効果についての検討を行った。

3.2 使用材料および配合条件

表-2に配合条件を、表-3に本研究における使用材料を示す。

また、本章では比較のために、主成分の異なる3種類の不凍液を用いた。第2章で用いた、エチレングリコール（含有率 70~80%）を主成分とした不凍液を AFA、新たに用意した、メタノール（含有率 51%）を主成分とした不凍液を AFB、グリセリン（含有率不明）を主成分とした不凍液を AFC とする。尿素水溶液は尿素濃度を 50%とし、不凍液添加尿素水溶液は、AFA、AFB、AFC のいずれの不凍液においても、30%の不凍液添加尿素水溶液を使用した。ただし、それぞれの不凍液を用いて不凍液添加尿素水溶液を作製する方法および質量割合は 2.2 と同様とした。

モルタルの水セメント比は 50%とし、フレッシュ性状

の目標値は、空気量を $2.0 \pm 1.5\%$ 、モルタルの 15 打フローを $200 \pm 20\text{mm}$ とした。

表-2 配合条件およびフレッシュ性状試験結果

W/C (%)	S/C	空気量(%)	モルタルフロー(mm)
50	2.3	2.4	220

表-3 使用材料

種別	名称	記号	密度 (g/cm ³)
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. 2.61, 吸水率: 1.94)	S	2.61
粗骨材	笠間産碎石 (F.M. 2.62, 吸水率: 0.75)	G	2.62
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤	SP	1.00
その他	工業用尿素	U	1.32
	不凍液 A	AFA	-
	不凍液 B	AFB	
	不凍液 C	AFC	

3.3 練混ぜ方法

練混ぜには公称容量 10L のオムニミキサーを使用した。練混ぜ手順はセメント、細骨材を投入し、空練りを 60 秒行い、その後水を投入して 60 秒練り混ぜ、排出した。

3.4 試験項目

(1) フレッシュ性状試験

空気量試験は JIS A 1116 に、モルタルフロー試験は JIS R 5201 にそれぞれ準拠した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JSCE G 505 1999 に準拠した。直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体を作製し、供試体作製翌日に脱型し、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室にて気中養生を行い、材齢 7 日、28 日に圧縮強度試験を行った。なお、浸漬を行う供試体は材齢 3 日において後述の浸漬処理を行い、その後、再び同様の気中養生を行った。

(3) 乾燥収縮試験

図-4 に乾燥収縮試験の実施フローを示す。

乾燥収縮試験は JIS A 1129-3 を参考にした。40×40×160mm の角柱供試体を作製し、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 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室にて供試体を保管し、長さ変化・質量変化の測定を行った。なお、浸漬を行う供試体は材齢 3 日において後述の浸漬処理を行い、その後、再

び同様の恒温恒湿室内に置き測定を継続した。

3.5 硬化体の浸漬方法

圧縮強度試験および乾燥収縮試験に使用する供試体は、乾燥開始から 3 日目まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で気中養生後、尿素水溶液および不凍液添加尿素水溶液のそれぞれの水溶液に浸漬した。また、浸漬時間は 1 分、10 分、30 分間の 3 条件とした。

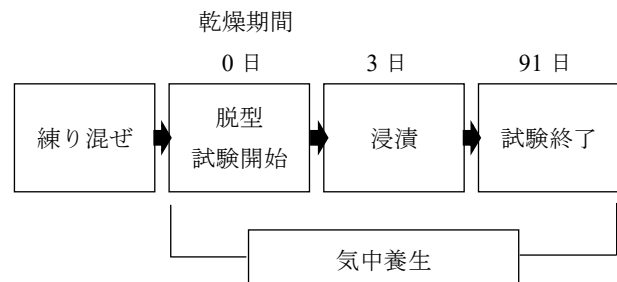


図-4 乾燥収縮試験の実施フロー

3.6 試験結果

(1) フレッシュ性状試験

表-3 にフレッシュ性状試験の結果を示す。

空気量およびモルタルフロー値はいずれも目標値を満たした。

(2) 圧縮強度試験

図-5 に不凍液添加尿素水溶液浸漬時の圧縮強度試験の結果を示す。

図より、不凍液添加尿素水溶液に浸漬したとき、無処理と比較して圧縮強度が大きい傾向にあることが分かる。これは、不凍液添加尿素水溶液が浸透していく過程で、水分が減少し尿素濃度が上昇し、再結晶化が生じることで微細な間隙を埋め、硬化体がより緻密になったためと考えられる³⁾。また、水溶液の侵入により、供試体内部に残存する水分の逸散を防止する効果が現れ、多くの水分が硬化体内部に残存したことが圧縮強度増加に寄与したと考えられる。

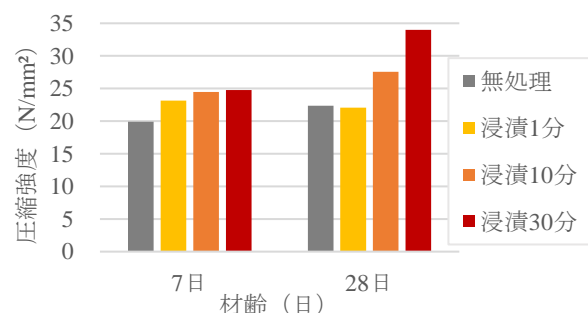


図-5 圧縮強度試験結果(AFA)

(3) 乾燥収縮試験結果

不凍液添加尿素水溶液浸漬時のモルタル供試体の長さ変化率を AFA は図-6 に、AFB は図-7、に AFC は図-8 にそれぞれ示す。

図-1 に示す尿素水溶液に硬化体を浸漬した場合と同様に、図-6~8 より不凍液添加尿素水溶液に浸漬した場合でも、尿素水溶液に浸漬した場合と同様に乾燥収縮低減の効果が得られることが確認できた。また、いずれの不凍液においても浸漬時間が長いほどその効果は大きい。

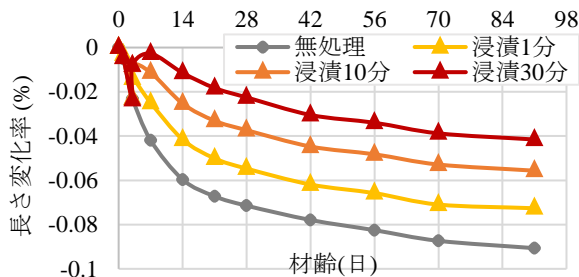


図-6 30%不凍液添加尿素水溶液浸漬時の長さ変化率(AFA)

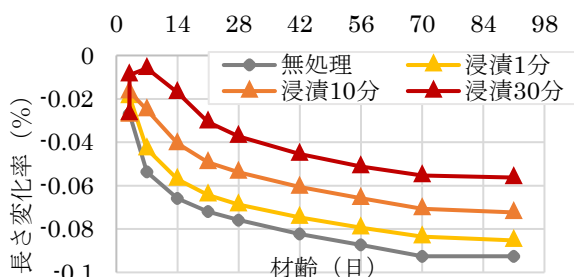


図-7 30%不凍液添加尿素水溶液浸漬時の長さ変化率(AFB)

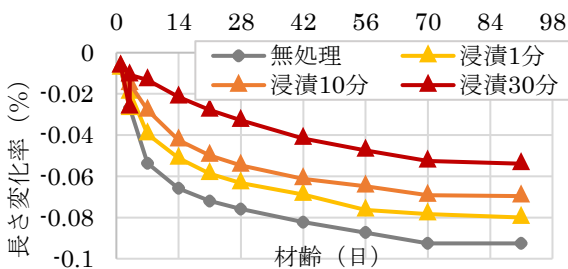


図-8 30%不凍液添加尿素水溶液浸漬時の長さ変化率(AFC)

また、尿素水溶液と各不凍液添加尿素水溶液の乾燥収縮低減効果を比較するために、乾燥期間 91 日における長さ変化を用いて無処理からの低減率を算出し、比較を行った。図-9 に各水溶液に浸漬した場合の乾燥収縮の無処理からの低減率を示す。無処理からの低減率は、無処理の乾燥期間 91 日における長さ変化率を 100%としたときの、各水溶液への浸漬時間毎の 91 日における長さ変化

率の割合を表しており、式(1)を用いて算出した。

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

図-9 より、乾燥収縮の無処理からの低減率は尿素水溶液と比較すると、不凍液添加尿素水溶液の方が低くなることが分かった。使用した 30%不凍液添加尿素水溶液の溶液中の尿素濃度はいずれの不凍液においても約 44% であり、尿素水溶液よりも尿素濃度が低いため、乾燥収縮低減の効果が小さくなったと考えられる。しかし、尿素水溶液には劣るものの、十分な乾燥収縮低減率を示しているため、効果はあると考えられる。また、各種不凍液添加尿素水溶液どうしの結果を比較すると、AFA が最も無処理からの低減率が大きくなっている。水溶液は毛細管現象により供試体内部へと浸透していると考えられ、液体の性質により浸透しやすさが変わると考えられる。各不凍液中の主成分の性質の違いにより、供試体への各水溶液の浸透しやすさに違いが生じていると推察されるが、今後の検討が必要である。

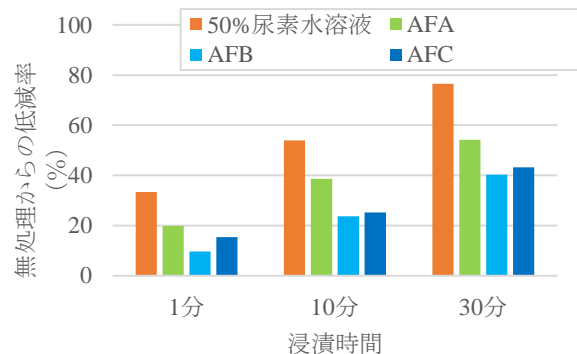


図-9 各水溶液の無処理からの収縮低減率の比較

4. 不凍液添加尿素水溶液浸漬によるコンクリートの乾燥収縮低減効果

4.1 概要

モルタルにおける予備実験において良好な結果を得られたため、本章ではコンクリートにおいて同様に乾燥収縮低減効果の検討を行った。また、本章でも、比較として尿素水溶液（尿素濃度 50%）を用いて同様に乾燥収縮試験を行い、不凍液添加尿素水溶液に浸漬した場合との比較を行った。

4.2 使用材料および配合条件

表-3 に使用材料を、表-4 に配合条件を示す。

水セメント比は、40, 50, および 60% の 3 水準とし、尿素水溶液に浸漬する配合では 50% のみとした。フレッシュ性状の目標値は空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ とし、目標値を満たすように SP の量を調整した。また、本章での不凍液はモルタルでの試験において良好な結果

となった AFA を用いた。

4.3 練混ぜ方法

練混ぜには公称容量 55L のパン型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、空練りを 60 秒行い、その後あらかじめ SP を添加した練混ぜ水を投入して 90 秒練り混ぜ、排出した。

表-4 配合条件およびフレッシュ性状試験結果

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				添加率 (C*%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
	W	C	S	G			
40	170	425	712	988	0.20	3.0	8.0
50	170	340	809	958	0.15	3.8	8.0
60	170	283	851	965	0.20	3.4	9.5

4.4 試験項目

(1) フレッシュ性状試験

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

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠した。直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体を用い、試験期間中は 20±3℃、60±5% の恒温恒湿室にて供試体を保管した。浸漬した供試体の試験は 3.5 と同様とした。

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は 3.4 と同様の手順で行った。100×100×400mm の角柱供試体を用い、試験期間中は 20±3℃、60±5% の恒温恒湿室にて供試体を保管した。浸漬した供試体の試験は 3.5 と同様とした。

4.5 硬化体の浸漬方法

水溶液への浸漬方法、使用した各種水溶液、浸漬時間は全て 3.5 と同様とした。

4.6 試験結果

(1) フレッシュ性状試験

表-4 にフレッシュ性状試験の結果を示す。

空気量およびスランプ値はともに目標値を満たした。

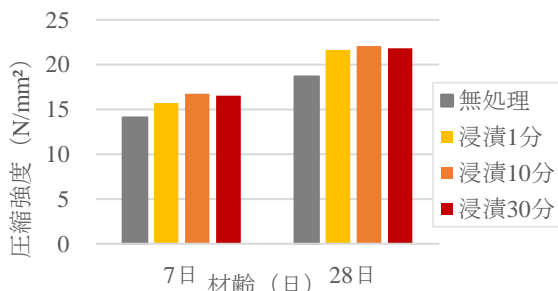


図-10 圧縮強度試験結果 (W/C=60%)

(2) 圧縮強度試験

図-10 に圧縮強度試験の結果を示す。

不凍液添加尿素水溶液に浸漬すると、無処理と比較して圧縮強度が大きくなることが確認できた。これは、モルタルの場合と同様に、表面より硬化体内部へ侵入した尿素の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ことや、水溶液の侵入により水分が保持されたため、その水分が養生に寄与したためと考えられる。

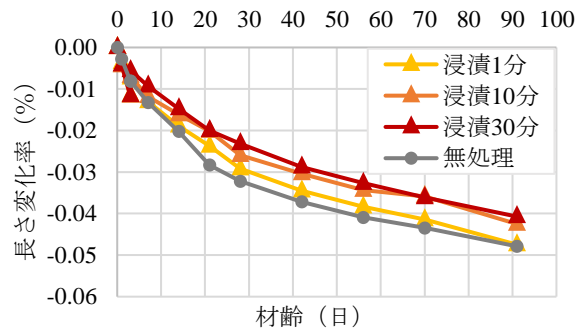


図-11 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=40%)

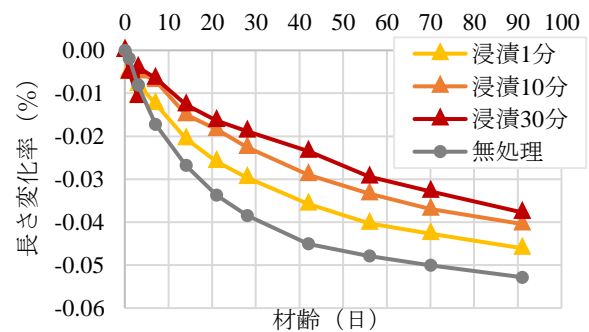


図-12 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=50%)

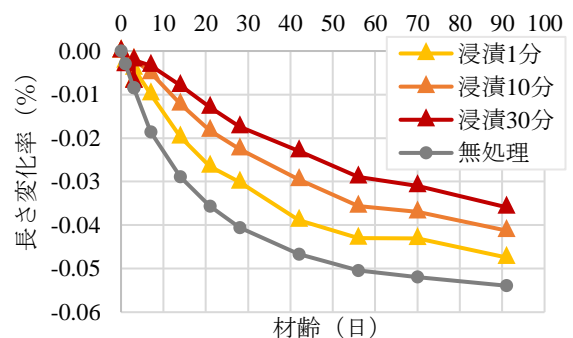


図-13 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=60%)

(3) 乾燥収縮試験

不凍液添加尿素水溶液浸漬時の乾燥収縮試験の長さ変化率について、水セメント比 40% を図-11 に、水セメント比 50% を図-12 に、水セメント比 60% を図-13 に、それぞれ示す。また、質量変化率について、水セメント

比 40%を図-14 に、水セメント比 50%を図-15 に、水セメント比 60%を図-16 にそれぞれ示す。

図-11~13 より、全水セメント比において、無処理の場合と比較した場合、不凍液添加尿素水溶液の浸漬により、長さ変化率は小さくなり、乾燥収縮低減効果が確認できた。これは、圧縮強度と同様に、尿素の再結晶化による膨張圧の発生や尿素の保水効果が現れたためと考えられる。また、浸漬時間が長いほど乾燥収縮低減の効果は大きくなることが分かった。これは浸漬時間が長いほど硬化体内部へと含浸される水溶液の量が増加するため、再結晶化する尿素の量も増加するためと考えられる。

また、各水セメント比の結果を比較した場合、水セメント比 40%の供試体は 50%および 60%の供試体と比べ、無処理に対する長さ変化率が小さいことが分かる。これは硬化組織が緻密となる低水セメント比は水溶液が表面から浸透しにくく、反対に硬化組織が粗となる高水セメント比では水溶液が表面から浸透しやすく、多くの水溶液が内部に含浸されたためと考えられる。図-14~16 より、いずれの水セメント比においても無処理の場合と比較して、質量変化率が小さくなっていることから、内部により多くの水分が残存していることが確認できた。

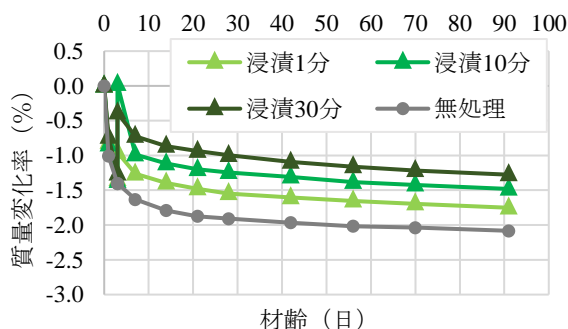


図-14 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=40%)

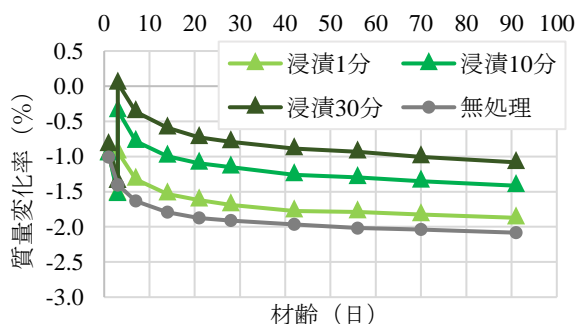


図-15 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=50%)

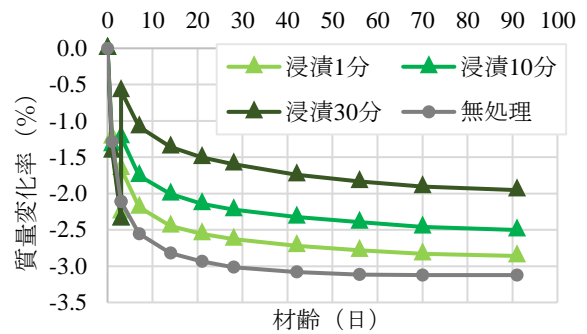


図-16 不凍液添加尿素水溶液浸漬 (W/C=60%)

5. まとめ

本研究から得られた成果を以下に示す。

- (1) 尿素水溶液に不凍液を添加することで尿素が結晶化する温度を低下させることができることが分かった。このメカニズムについては、今後検討が必要である。
- (2) 圧縮強度試験において、無処理に比べて不凍液添加尿素水溶液に浸漬した供試体は圧縮強度が大きくなる傾向がみられた。また、不凍液添加尿素水溶液は浸漬時間が短い場合、効果が小さくなる可能性も確認できた。
- (3) 乾燥収縮試験において、無処理に比べて不凍液添加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。また、浸漬時間が長いほど硬化体内部で含浸する水溶液量は多くなり、乾燥収縮低減の効果も大きくなることが分かった。
- (4) 不凍液添加尿素水溶液浸漬による乾燥収縮低減の効果は水セメント比 40%の場合は小さく、水セメント比 50 および 60%の場合は大きくなる。

参考文献

- 1) 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, コンクリート工学, Vol.52, No.4, pp.303-308, 2014
- 2) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 316 号, pp.145-152, 1981
- 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