

論文 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

劉 玲玲*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3

要旨：乾燥収縮に起因す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。既往の研究成果において、コンクリートの乾燥収縮の低減方法として、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種々の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鑑み、より安価でかつ簡便な方法で乾燥収縮が低減できる方法として、脱型後のコンクリート表面に尿素を塗布する工法の開発を試みた。

キーワード：モルタル、乾燥収縮、尿素塗布

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非常に難しいことが一般的に知られている。構造物に生じたひび割れは、構造物の耐久性などの物性に悪影響を与える。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。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は効果的な方法の一つとされる。

既往の研究成果において、コンクリートの乾燥収縮の低減方法として、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、都度臨時に人手を要することが多くなり、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。

本研究では上記の状況を鑑み、より安価でかつ簡便な方法で乾燥収縮が低減する方法の開発を試みた。具体的には、一般に安価で工業用や肥料としても利用され、容易に入手できる尿素を主成分とした水溶液をモルタルおよびコンクリートの表面に塗布・含浸することで乾燥収縮を低減する方法である。

既往の研究成果では、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、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。

今回開発した工法は、普通コンクリートを型枠に打ち込み脱型した後、尿素を主成分とした水溶液を表面に塗布するものであり、非常に少ない量で簡便に収縮低減効果を得ることを目的とした工法である。

本報告は、モルタル硬化体に対して本工法を適用した際の効果を検討したものである。

2. 実験概要

実験では、硬化モルタルの表面に尿素を主成分とした水溶液(以下、尿素液)を含浸させるため、一定時間尿素液に浸漬した後、乾燥収縮を測定し、その効果を調べた。

2.1 使用材料およびモルタルの配合条件

本実験の使用材料を表-1 に示す。尿素は市販の工業用とした。尿素は水に事前に溶解して水溶液とした。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。

モルタルの配合条件は、水セメント比を 40, 50, 60% の 3 水準とし、それぞれモルタルの 15 打フローが 200 ± 10mm となるように細骨材セメント比 S/C を調整した。

2.2 練混ぜ方法および供試体の作製・養生方法

モルタルの練混ぜには、公称容量 10L のオムニミキサ

*1 宇都宮大学 工学研究科 (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)

を用いた。1バッチの練混ぜ量は5Lとした。練混ぜ手順は、セメントと細骨材を60秒間空練りし、掻落し後、練混ぜ水を投入し、60秒間練混ぜた。ミキサから排出後、切り返しを行い、モルタルフローおよび空気量を測定し、フレッシュ性状を確認した後、圧縮強度用(φ50×100mm)および長さ変化測定用(40×40×160mm)のモルタル供試体を作製した。翌日に脱型し、所定材齢まで20±3℃、60±5%Rhの恒温恒湿室にて長さ変化を測定した。圧縮強度試験体も成形翌日に脱型し、同じ恒温恒湿室にて試験材齢まで気中養生を行った。

表-1 使用材料

種類	記号	名称	密度 (g/cm ³)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15
練混ぜ水	W	宇都宮市水道水	1.00
細骨材	S	鬼怒川産川砂	2.63
化学系材料	U	工業用尿素	1.32
	P	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	0.99～1.05

2.3 試験項目

(1) モルタルフロー

JIS R 5201:2015「セメントの物理試験方法」に基づき15打フローを測定した。

(2) 乾燥収縮

JIS A 1129:2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に基づき長さおよび質量の変化を測定した。

(3) 圧縮強度

土木学会規準 JSCE-G 505-2013「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(案)」に基づき実施した。なお、養生は気中養生とし、材齢1日で脱型し、乾燥収縮による長さ変化測定用供試体同様に恒温恒湿室内で所定の材齢まで静置した。

(4) 尿素の浸透状況

尿素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、供試体の表面から尿素溶液浸透した界面までの深さをノギスで測定した。

表-2 実験条件の組合せ

W/C (%)	S/C	浸漬液	浸漬時間 (分)	浸漬時材齢	記号 W/C-日数-浸漬液-濃度	15 打フロー (mm)	圧縮強度
40	1. 2	無し	—	—	40%N	191	○
		水	1	3 日	40%3W		
				7 日	40%7W		
		尿素 50%		3 日	40%3U50%		○
				7 日	40%7U50%		
		50	1. 7	無し	—		—
水	1			3 日	50%3W		
				7 日	50%7W		
	10			3 日	50%3W10min		
	30			3 日	50%3W30min		
尿素 30%	1			3 日	50%3U30%		
尿素 40%	1			3 日	50%3U40%		
尿素 50%	1			3 日	50%3U50%	○	
				7 日	50%7U50%		
	10			3 日	50%3U50%10min		
	30			3 日	50%3U50%30min		
市販塗布型 P	1			3 日	50%3P		
				7 日	50%7P		
60	2. 4			無し	—	—	60%N
		水	1	3 日	60%3W		
				7 日	60%7W		
		尿素 50%		3 日	60%3U50%	○	
				7 日	60%7U50%		

2.4 試験条件

本研究における試験条件を以下に示す。また、表-2に試験条件の組合せをまとめて示す。

- ・浸漬液：水道水のみ、水道水に尿素を質量比で 30%、40%および 50%溶解した水溶液、市販の塗布型乾燥収縮低減剤 P を製造元推奨濃度としたものの 5 条件とし、比較として浸漬せず脱型後からそのまま乾燥状態としたもの（記号：N）について試験を行った。

- ・浸漬時間：モルタル供試体を浸漬液の入った容器に浸漬する時間を 1 分、10 分および 30 分間の 3 条件を設けて浸漬した。

- ・浸漬時材齢：現場での構造体への塗布工程を想定し、脱型後材齢 3 日または 7 日目で乾燥状態とした後、浸漬液に浸漬した。浸漬後は 20 ± 3 °C、 $60 \pm 5\%$ Rh の恒温恒湿室内で再び乾燥状態とし、長さ変化を測定した。

- ・浸漬方法：本研究は、尿素をコンクリート表面に塗布することを想定し、短時間、尿素溶液に供試体を浸漬して塗布を模擬することとした。

なお、実施工において、硬化コンクリート表面に尿素を付着させるために、直接塗付または吹付け、養生シートに付着加工したものをコンクリート表面に密着させること等を考えているが、コンクリートの配合条件等により、尿素溶液の含浸状況が異なるため、本試験においては、尿素溶液に供試体を一定時間浸漬することとした。なお、浸漬時の含浸量は、 $W/C=50\%$ 、浸漬液の尿素濃度 50%、浸漬時間 1 分の条件において、浸漬前後の質量増加から推定される尿素溶液付着量は 1m^2 当たり 450 g 塗布することに相当することを確認した。

3. 長さ実験結果および考察

3.1 水セメント比と浸漬時材齢の影響

図-1、図-2 および図-3 に乾燥収縮による長さ変化率の推移について、水セメント比別にそれぞれ示す。乾燥収縮による長さ変化の傾向については、乾燥過程で浸漬処理しないものと水に浸漬した場合についてほぼ同様の傾向を示し、他の浸漬条件の場合より長さ変化率は大きくなった。浸漬液を尿素溶液とした場合、浸漬液が硬化体表面より浸透し、表面に付着した尿素が有する保湿効果により、乾燥が進行しにくくなるため長さ変化が抑制されると考えられる。図-4 に浸漬なし(N)に対して、材齢 3 日に 50%尿素溶液に 1 分間浸漬した場合の収縮低減効果を水セメント比別に示す。乾燥材齢の進行に伴い順次長さ変化率が大きくなるものの、乾燥開始からの材齢 91 日において、浸漬無しおよび水に浸漬した場合と比較して、概ね 2~3 割程度長さ変化率は小さくなった。

また、図-1~図-3 において、乾燥開始から 3 日目に尿素溶液に浸漬した場合、浸漬直後から乾燥材齢 7 日程

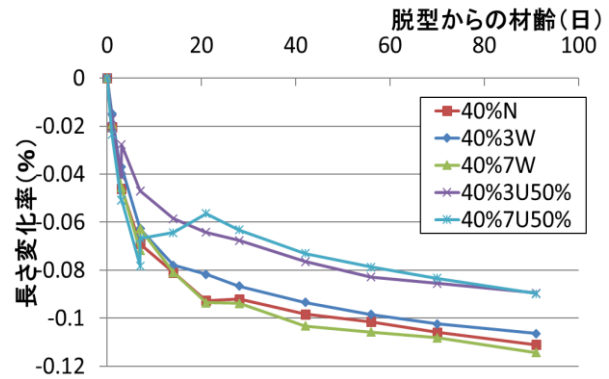


図-1 乾燥収縮による長さ変化率の推移 ($W/C=40\%$)

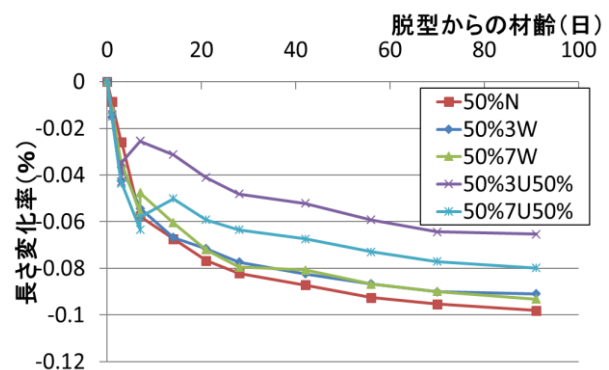


図-2 乾燥収縮による長さ変化率の推移 ($W/C=50\%$)

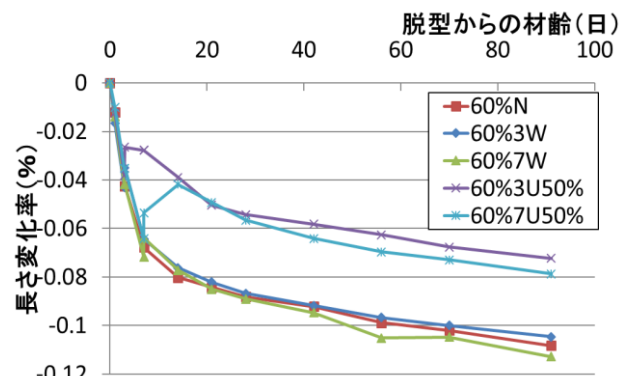


図-3 乾燥収縮による長さ変化率の推移 ($W/C=60\%$)

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含浸し、乾燥過程で空隙中の尿素溶液が高濃度化し、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。

乾燥開始から 7 日目に尿素溶液に浸漬した場合についても、浸漬直後から乾燥開始後数日間において同様の作用と考えられる膨張変化が認められた。なお、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溶液は硬化体表面から浸透しやすいためと考えられる。

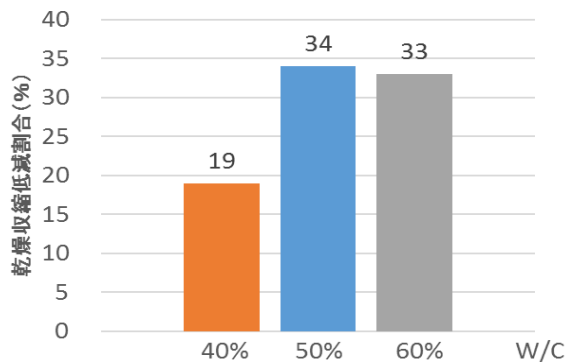


図-4 無処理に対する尿素溶液浸漬による乾燥収縮率
低減効果（乾燥開始からの材齢 91 日）

3.2 浸漬時間の影響

水セメント比 50%, 浸漬時材齢 3 日における, 浸漬時間の影響を比較した結果を図-5 に示す。

浸漬液が水のみの場合, 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, 浸漬せず乾燥させた場合の長さ変化率と同様の变化を示した。一方, 尿素溶液に浸漬した場合, 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り, 浸漬時間 30 分の場合は乾燥開始時より一時的に膨張を示した。

図-6 に材齢 3 日に 50%尿素溶液に浸漬した場合の浸漬無し(N)に対する収縮低減効果(乾燥材齢 91 日)を浸漬時間別にまとめた。浸漬時間 1 分で 34%, 10 分で 55%, 30 分で 77%と浸漬時間が長くなるほど低減効果が大きくなった。これは浸漬時間が長いほど浸透する尿素量が増えることによるものと考えられる。

3.3 尿素濃度の影響

図-7 に水セメント比 50%にて, 浸漬液の尿素濃度を 30, 40 および 50%の 3 条件とした場合の長さ変化率の推移について示す。浸漬液の尿素濃度は, 50%の場合が最も乾燥収縮低減効果が高く, 30%および 40%は 50%よりやや低く, これらの収縮低減効果は同等であった。

水に対する尿素の溶解度は 1080g/L (20℃) であり, 濃度に換算すると 51.9%となる。20℃において尿素濃度 50%の水溶液は飽和状態に近い状態, 乾燥による溶媒の水の蒸散により容易にかつ多量に尿素が再結晶化することが予想され, その結果, 最も高い乾燥低減効果を発揮すると考えられる。また, 尿素濃度が 30%または 40%では飽和状態となるまでに多くの水分が蒸散しなければならず, 収縮抑制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, 析出量が少ないことが収縮抑制効果の差の原因と考えられる。

3.4 市販品塗布型収縮低減剤との比較

水セメント比 50%のモルタル供試体に対して, 濃度 50%の尿素溶液に浸漬したものと, 市販の塗布型収縮低

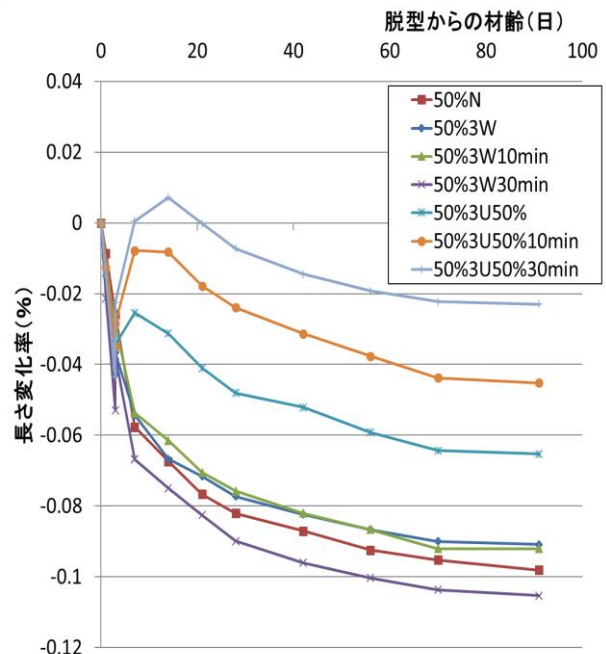


図-5 浸漬時間が異なる場合の乾燥収縮による
長さ変化率の推移 (W/C=50%)

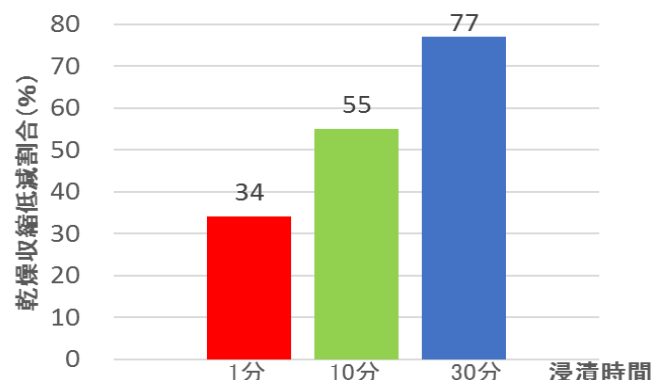


図-6 無処理に対する尿素溶液浸漬による乾燥収縮率
低減効果（乾燥開始からの材齢 91 日）

減剤(市販品)を製造会社指定の濃度の溶液に浸漬したものについて, 乾燥収縮による長さ変化率の推移を比較したものを図-8 に示す。浸漬時期は乾燥開始からの材齢 3 日目および 7 日目の 2 条件とした。乾燥開始からの材齢 3 日目に浸漬した場合, 市販品に浸漬したものよりも, 濃度 50%の尿素溶液に浸漬した方が, 収縮抑制効果が高いことがわかった。また, 乾燥開始からの材齢 7 日目に浸漬した場合, 市販品と尿素溶液との間の効果はほぼ同等であった。前述通り, 尿素溶液に浸漬する場合, 乾燥開始からの材齢により収縮低減効果が異なるが, 市販品については, 浸漬時期の違いはほとんど見られなかった。また, いずれも無処理の条件(図中の 50%N)よりも 2 割以上の収縮抑制効果があることがわかった。

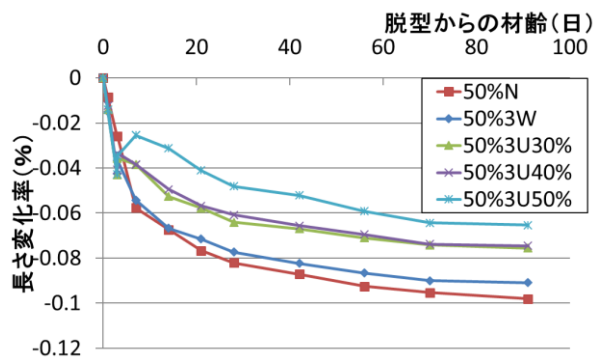


図-7 浸漬液濃度が異なる場合の乾燥収縮による長さ変化率の推移 (W/C=50%)

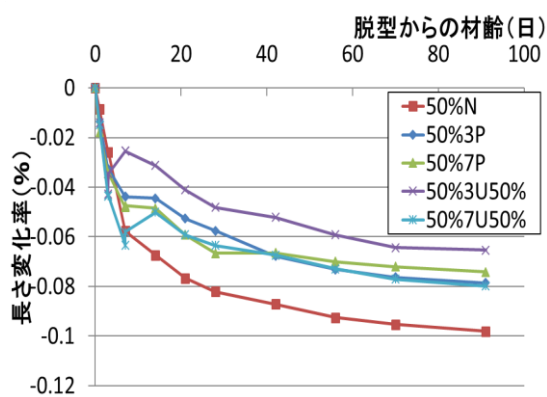


図-8 浸漬液の異なる場合の乾燥収縮による長さ変化率の推移 (W/C=50%)

3.5 質量変化測定結果および考察

結果の一例として水セメント比 50%のモルタル供試体について、濃度 50%の尿素溶液に浸漬したもの、水に浸漬したもの、および無処理のものについて、乾燥収縮による質量変化率の推移を比較したものを図-9 に示す。材齢 3 日で浸漬した供試体の質量が大きくなった。浸漬時間が長くなるほど浸漬直後質量変化率が大きくなった。水に浸漬した場合、浸漬時間を 10 分および 30 分の場合、浸漬せず乾燥させた場合の質量変化率より大きくなった。一方、尿素溶液に浸漬した場合、浸漬せず乾燥させた場合の質量変化率より小さくなった。浸漬時間を 1 分および 10 分の場合は同様の変化を示し、浸漬時間 30 分の場合は乾燥開始時の質量より一時的に増加し、乾燥に伴う質量変化率は最も小さくなった。高濃度の尿素溶液は供試体に染み込みやすいためと考えられる。

4. 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-10 に示す。

本試験では、尿素溶液へ浸漬した供試体については、乾燥開始からの材齢 3 日目に尿素濃度 50%の水溶液に 1 分間浸漬し、その後、再び乾燥状態として材齢 7 日及び 28 日で圧縮強度試験を行った。

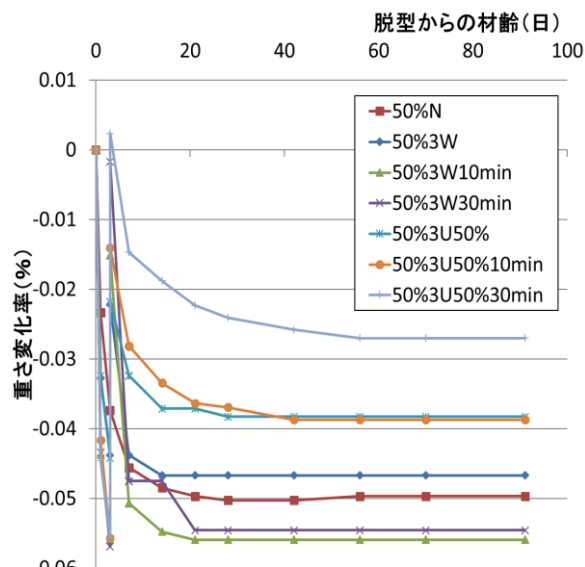


図-9 乾燥収縮による重さ変化率の推移 (W/C=50%)

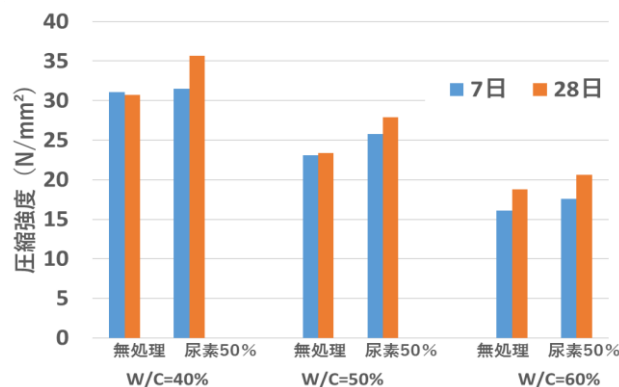


図-10 浸漬条件の異なる場合の圧縮強度

尿素溶液に浸漬した場合、いずれの水セメント比においても、無処理と比べ圧縮強度が高くなる傾向が認められた。これは、供試体表面部分の乾燥収縮の低減により、供試体内部の圧縮応力の低減効果と共に、尿素溶液への浸漬により供試体表面の空隙から尿素溶液が供試体内部へ浸入し、空隙内で水分の散逸に伴う尿素濃度の上昇・尿素の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、尿素溶液の浸透により供試体内部に残存する水分の雰囲気中への散逸を防止する保水作用が現れ、多く水分が硬化体中に残ることで圧縮強度増進に寄与したと考えられる。

5. モルタル硬化体への尿素の浸透深度

尿素の浸透深度試験結果を写真-1 に示す。

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 となり、浸漬時間が長い方が浸透深度は深くなった。

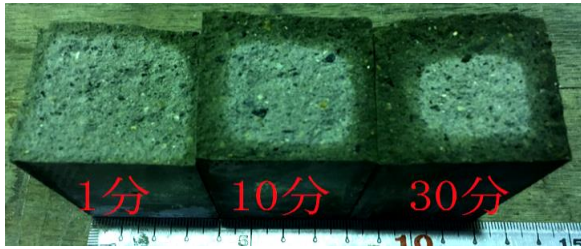


写真-1 浸漬時間の異なる場合の尿素の浸透深度



写真-2 浸漬時間の異なる場合の尿素の結晶（1分）



写真-3 浸漬時間の異なる場合の尿素の結晶（10分）

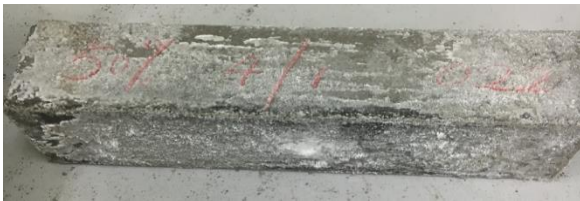


写真-4 浸漬時間の異なる場合の尿素の結晶（30分）



写真-5 浸漬直後の供試体の表面の状態

6. 供試体の表面に付着・析出する尿素の結晶

材齢3日目に尿素濃度50%の水溶液に1分間、10分間、30分間浸漬した供試体の、乾燥収縮試験終了後の供試体の表面の状態を写真-2、写真-3、写真-4にそれぞれ示す。また、浸漬直後の供試体の状態を写真-5に示す。

10分および30分浸漬した供試体の表面には白色の尿素の結晶の析出が認められた。これが美観上の問題となる可能性を有しているものの、尿素の結晶は供試体を破壊することなく、析出していることを示すものと考えられる。

7. 結論

尿素は可溶性であり、水に大量に溶解する性質を有しており、20℃における飽和濃度は51.9%である。飽和状態に近い水溶液とした場合、溶液から水分のみが容易に蒸散し、溶液中の尿素濃度が上昇するため、析出しやすい。その為、飽和状態に近い尿素溶液にモルタル供試体を浸漬すると、尿素はモルタル供試体表面から浸透し、表面および内部に残存する。溶液中の水が蒸散し、尿素濃度が上昇し飽和濃度を超えると尿素は順次析出し、内部で結晶化する。この結果、モルタルの乾燥収縮は小さくなると考えられる。

本研究の結論をまとめると以下になる。

- (1) 質量で50%濃度の尿素溶液に乾燥過程のモルタル供試体を浸漬すると、供試体表面付近にだけでなく内部まで浸透し、供試体内部空隙に残存する。この状態で乾燥作用を受けると、尿素の保水効果により供試体内部の水分の移動を抑制し、乾燥を防ぐだけでなく、供試体表層部分に残存した尿素が空隙内で再結晶化し、結晶生成における膨張圧の作用により収縮に抵抗し、結果として乾燥収縮は低減できる。
- (2) 供試体を浸漬する尿素溶液の尿素濃度は、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。
- (3) 浸漬処理条件において、浸漬時間が長くなるほど、供試体に付着あるいは供試体表層部分に浸入する尿素量が多くなると考えられ、この結果、乾燥作用を受けた場合に析出する尿素量が多くなり、乾燥作用による長さ変化を大きく低減することができる。
- (4) 尿素溶液に浸漬する場合、乾燥開始から7日目よりも3日目に浸漬処理をした方が、乾燥作用による長さ変化を低減する効果が高いことがわかった。
- (5) 尿素溶液への浸漬と圧縮強度の関係については、浸漬液の尿素濃度が50%の場合、尿素の浸透により圧縮強度は無処理よりも増加した。

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