

# 論文 高炉スラグ微粉末および尿素を使用したコンクリートの諸特性

三岩 敬孝\*1・堀井 克章\*2・横井 克則\*3

**要旨：**近年、乾燥収縮を抑制できるとして尿素を使用した研究が進められてきている。しかし、尿素を使用したコンクリートに関するフレッシュ性状や凍結融解、乾燥収縮および塩化物の浸透などに対する抵抗性、スラグ微粉末の使用の影響等の研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、一般に用いられている高炉セメントに相当する高炉スラグ微粉末を使用し、尿素を混入したコンクリートの諸特性について検討した。その結果、フレッシュ性状として凝結が遅延すること、硬化後の特性として高炉スラグ微粉末の使用により凍結融解に対する抵抗性が向上することや、乾燥収縮を大幅に低減できることなどが明らかとなった。

**キーワード：**尿素、高炉スラグ微粉末、凝結、ブリーディング、凍結融解、乾燥収縮

## 1. はじめに

コンクリートに生じるひび割れは、その原因として様々あるが、コンクリート内部の鉄筋を腐食させることから、コンクリート構造物として耐力や防水性を低下させる原因となる。このため、近年では、コンクリート構造物の耐久性の向上を図ることを目的として、ひび割れ対策に関する関心が高まっている。コンクリートに発生するひび割れの原因には、使用材料や水和熱といった初期材齢における化学的要因や内部鉄筋の腐食など長期材齢における使用環境による要因、さらに、外力による物理的要因などさまざまな要因が考えられる。このようなさまざまな要因の中で、水和熱による温度ひび割れや乾燥による乾燥収縮ひび割れに対して、低熱セメントの使用や混和剤として収縮低減剤の使用などの対策がされてきている。

一方、尿素は、無色無臭で水溶性があり水に溶けやすく、水と混ぜることによって生じる吸熱反応から水温が低下すること、また、保水性があることから農業用肥料としても利用されてきた。このような尿素の特徴に着目し、近年、尿素を添加したコンクリートに関する研究が進められてきている。特に、尿素のもつ吸熱反応により、コンクリート練混ぜ時の水和反応にともなう水和熱の低減効果が認められている<sup>1),2)</sup>ことや、水溶性であることから尿素が水に溶解することによる単位水量の減少にともなう乾燥収縮の低減効果などが明らかとなってきた<sup>3),4),5)</sup>。しかし、このような尿素の特徴を生かしたコンクリートの品質改善、特に、ひび割れ対策として利用されている低熱セメントや収縮低減剤との比較検討は行われているものの、施工性や凍結融解、外部からの塩化物イオンの浸透などに関する研究が少ないことや、近年一般的に使用されている高炉セメントへの適用に関する研

究は行われていないのが現状である。

そこで本研究では、高炉セメント B 種に相当する高炉スラグ微粉末を使用し、さらに尿素を配合したコンクリートに対して、施工性に影響を及ぼすブリーディングや凝結特性といったフレッシュ性状および凍結融解に対する抵抗性や乾燥収縮、塩化物の浸透など硬化後の特性について検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

結合材としてセメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>）、高炉スラグ微粉末（密度 2.88g/cm<sup>3</sup>、比表面積 4630cm<sup>2</sup>/g）を使用した。尿素は工業用尿素（顆粒状、密度 1.32g/cm<sup>3</sup>）とした（写真-1 参照）。骨材として細骨材は兵庫県赤穂産の砕砂（表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.29%、実積率 55.5%、F.M.=2.82）、粗骨材は兵庫県赤穂産の砕石（表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.06%、実積率 58.8%、最大寸法 20mm）を使用した。また、空気量を調整するために混和剤として変性ロジン酸化合物系の AE 剤を使用した。



写真-1 尿素の外観

\*1 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博士（工学）（正会員）

\*2 阿南工業高等専門学校 創造技術工学科建設コース 教授 博士（工学）（正会員）

\*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博士（工学）（正会員）

表-1 コンクリートの配合

配合の種類	(W+U)/(C+BS) (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		水(W)	尿素(U)	セメント(C)	高炉スラグ 微粉末(BS)	細骨材(S)	粗骨材(G)	AE 剤
U00-S0	60	170	0	283	0	861	940	0.0226
U10-S0	62	153	22					
U20-S0	64	136	45					
U00-S50	60	170	0	142	142	861	940	0.0226
U10-S50	62	153	22					
U20-S50	64	136	45					

## 2.2 配合

本実験に使用したコンクリートの配合は尿素的添加量による影響および AE 剤添加の影響について検討できるように設定した。尿素は単位水量に対して 0, 10 および 20vol% 使用し、目標空気量が 4.5±1.5% を満足する一定量の AE 剤を添加することによって、目標スランプ値は設定せず尿素的添加によるスランプ値の変化についても検討できるものとした。さらに、高炉セメントの使用について検討するために、結合材として普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種に相当する結合材に対して 50% の高炉スラグ微粉末を使用した。

本実験で使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。

## 2.3 供試体の作製

コンクリートの練混ぜには、パン型強制練りミキサ(容量 55 リットル)を使用し、練混ぜ水以外の材料をミキサに投入後、30 秒間空練りを行い、水を投入して 1 分 30 秒の計 2 分間練り混ぜた。ここで、尿素は事前に練混ぜ水に溶解させることなく顆粒状のままミキサに投入した。また、練り混ぜられたコンクリートを圧縮試験用供試体は φ100×200mm、凍結融解試験、乾燥収縮試験および塩水浸漬試験用供試体は 100×100×400mm の型枠に打設し、材齢 3 日まで恒温室(室温 20℃, 相対湿度 50%)に静置し、脱型後、所定の材齢まで水中養生(水温 20±3℃)を行った。

## 2.4 試験項目および方法

### (1) 凝結試験

凝結試験は、JIS A 1147-2007「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠して行った。なお、凝結試験はそれぞれのセメントに対して尿素的添加した場合、その変化のみ検討することとして、尿素的添加量が 0 および 20vol% の配合で実施した。

### (2) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123-2011「コンクリー

トのブリーディング試験方法」に準拠して行った。なお、ブリーディング試験においても凝結試験と同様にその変化のみ検討することとして、尿素的添加量が 0 および 20vol% の配合で実施した。

### (3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、尿素的添加したコンクリートにおいて、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を確認するためにコンクリート打設後、材齢 7, 28 および 91 日まで水中養生を行った後、JIS A 1108-2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して試験を行った。

### (4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現の違いを考慮して材齢 91 日まで水中養生した供試体に対し、JIS A 1148-2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した水中凍結融解試験方法(A 法)とし、30 サイクル毎に共鳴振動数の測定を行った。なお、劣化度は相対動弾性係数および質量減少率により評価した。

### (5) 乾燥収縮による長さ変化試験

乾燥収縮による長さ変化試験は、材齢 7 日まで水中養生した供試体を室温 20℃, 相対湿度 60% の恒温室内に静置し、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」のコンタクトゲージ方法に準拠して行った。

### (6) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は、十分に強度発現した供試体について検討することとして、材齢 91 日以上水中養生した供試体を 28 日間恒温室内(室温 20℃, 相対湿度 50%)で乾燥させた後、供試体側面以外からの塩分の浸入を抑制するためにコーティングを施し、5% の NaCl 水溶液に 28 日間浸漬した(写真-2 参照)。

その後、供試体をコンクリートカッターで切断し、コンクリート表面から 10mm および 20mm において採取したドリル粉について、硬化コンクリート中の全塩分迅速



写真-2 塩水浸漬状況

法測定器を用いて塩化物イオン濃度を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状として練上がり直後のコンクリートの性状を表す練上がり温度、スランプ値および空気量試験の結果を図-1、図-2 および図-3 にそれぞれ示す。

図-1 より、これまでの研究結果と同様に尿素有添加に伴って練上がり温度が低下し、20vol%の尿素有添加したコンクリートは、添加していないコンクリートに比べ高炉スラグ微粉末の使用に関係なく約 2℃低下した。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントに比べ水和反応が抑制されることから水和熱の低下に加え、尿素有添加によってさらに練上がり温度が低下している。尿素有添加による練上がり温度の低下は、既往の研究<sup>1)2)</sup>からも明らかなように水と尿素有吸熱反応によるものであり、高炉スラグ微粉末の使用による影響はないものといえる。

また、図-2 および図-3 より、高炉スラグ微粉末の使用に関係なく、尿素有添加することによってスランプおよび空気量が増加している。本配合では単位水量に対して体積割合で尿素有添加していることから配合上、見掛けの水結合材比((W+U)/B)は増加している。しかし、溶液の体積は一定としていることから、尿素有添加することによって生じた吸熱反応から練上がり温度が低下し、その結果、空気連行性が高まり空気量が増加したものと考えられる。さらに、空気量の増加に伴って、エントレインドエアによるベアリング効果からコンクリートの流動性が向上したものと考えられる。

#### 3.2 凝結

図-4 に凝結試験結果を示す。この図より尿素有20vol%添加することによって、普通コンクリートに比較して凝結時間が約5時間遅延している。また、さらに高炉スラグ微粉末を使用することで凝結が遅延し、普通コンクリートに比較して約8時間遅延している。これは、

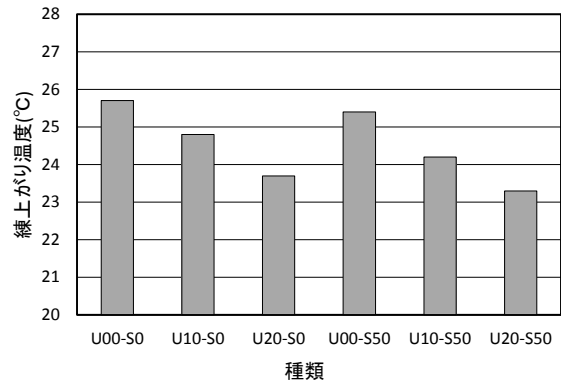


図-1 練上がり温度

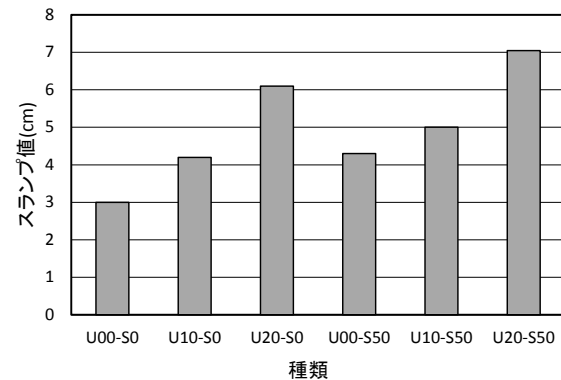


図-2 スランプ

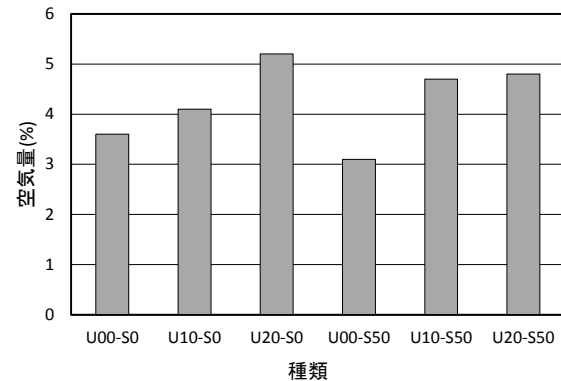


図-3 空気量

既往の研究<sup>1)4)</sup>からも明らかなように、尿素有水との吸熱反応によりコンクリート温度が低下し、セメントの水和反応が遅延したことが原因であると考えられる。特に、普通コンクリートに比べ高炉スラグ微粉末を使用することによって凝結が遅れることから、両材料の同時使用は初期強度発現が小さく施工性の低下が懸念され注意が必要であるといえる。

#### 3.3 プリーディング

図-5 にプリーディング試験結果を示す。この図より普通コンクリートおよび高炉スラグ微粉末を使用したコ

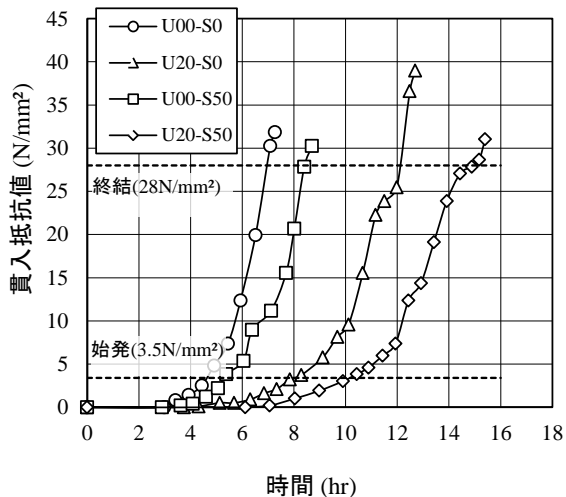


図-4 凝結

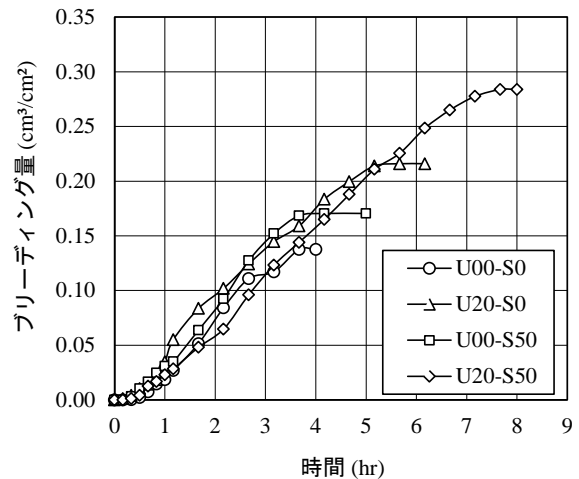


図-5 ブリーディング

コンクリートのいずれのコンクリートにおいても、ブリーディングの滲出速度は変わらない。尿素を添加した練混ぜ水は水道水に比較して表面張力が低下することからブリーディングが早くなると考えられるが、一方で、尿素の添加によって練混ぜ水の密度が大きくなったことが原因であると考えられる。

また、尿素を添加したコンクリートの方がブリーディング量は多く、ブリーディングが終了するまでの時間は、長くなっており、その傾向は凝結試験における凝結時間と同様となった。このことから、尿素を添加したことによる凝結遅延が原因であると考えられる。

### 3.4 圧縮強度

図-6 に圧縮強度試験結果を示す。結合材として普通ポルトランドセメントを使用しても高炉スラグ微粉末を使用しても、尿素を多量に添加することによって若干強度が低下する傾向がある。しかし、高炉スラグ微粉末を使用した場合、初期強度は小さいものの材齢 91 日における長期強度の伸びが大きく、普通ポルトランドセメント以上の強度となっている。このことから、尿素の添加は高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に悪影響を及ぼすことはなく、同量の尿素を添加した場合、高炉スラグ微粉末を使用することで、長期的に尿素の添加による強度低下を抑制することができるといえる。

### 3.5 凍結融解試験

図-7 に凍結融解試験結果による相対動弾性係数の経時変化、図-8 に質量減少率の経時変化をそれぞれ示す。また、図-9 および図-10 に各配合における供試体断面から測定した気泡間隔係数および平均気泡径をそれぞれ示す。

図-7 および図-8 より、尿素の添加量が 20vol% の範囲内においては、セメントの種類に関係なく、全ての配合において凍結融解 300 サイクル終了後の相対動弾性係

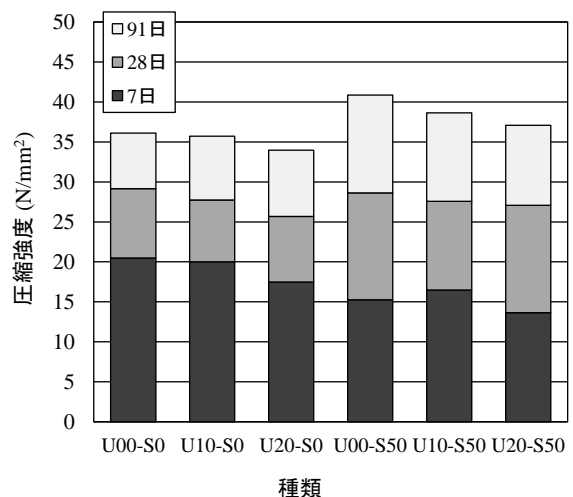


図-6 圧縮強度

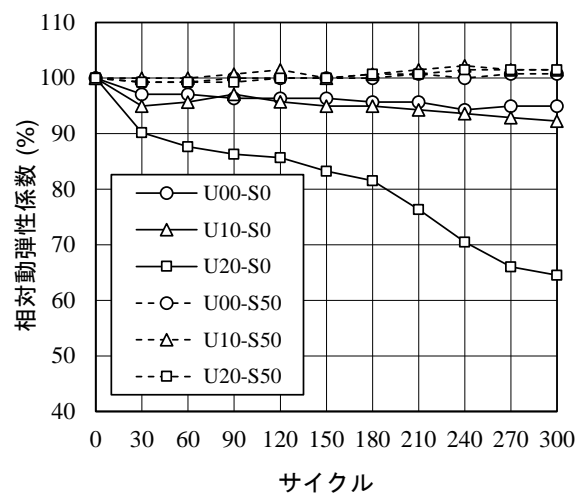


図-7 凍結融解による相対動弾性係数の経時変化

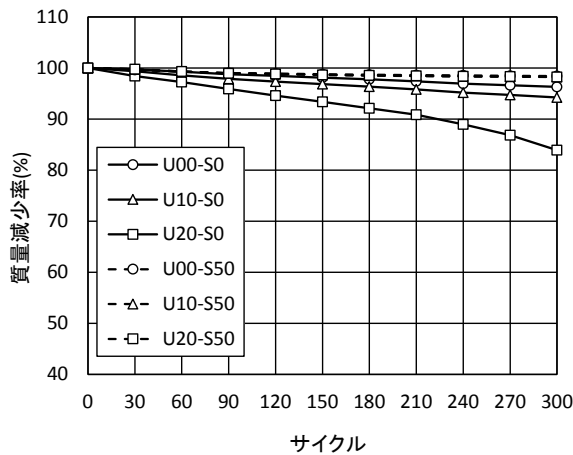


図-8 凍結融解による質量減少率の経時変化

数が 60% 以上であり、凍結融解に対する抵抗性を有しているといえる。特に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは 300 サイクル終了時の相対動弾性係数が全く低下しておらず、また、質量減少もほとんどないことから、普通コンクリートに比較して高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性が高いといえる。一方、普通コンクリートの場合、尿素的添加量が増加するにともない、若干、相対動弾性係数および質量減少率が低下している。特に、20vol%の尿素的添加した場合 (U20-S0)、300 サイクル終了時の相対動弾性係数は約 65% となっている。本研究では、尿素的添加によるフレッシュコンクリートの性状を把握するために AE 剤添加量を一定としているものの、目標とする  $4.5 \pm 1.5\%$  の空気量は全ての配合で満たしている (図-3 参照)。また、図-9 および図-10 から分かるように、気泡間隔係数は全ての配合において  $200 \mu\text{m}$  前後、平均気泡径が約  $80 \mu\text{m}$  であることからコンクリート内部にはエントレインドエアが適切に分散して混入していると考えられる。しかし、普通コンクリートに 20vol%の尿素的添加した場合、圧縮強度 (図-6 参照) が最も小さくなっていることや尿素的添加による保水性の向上からコンクリート中の水分量が増加したことなどにより、AE 剤の添加によって空気量のある程度確保しても、凍結融解に対する抵抗性に影響を及ぼしたと考えられる。

### 3.6 乾燥収縮による長さ変化試験

図-11 に乾燥収縮による長さ変化試験結果および図-12 に質量変化率をそれぞれ示す。これらの図より、普通コンクリートに比較して、高炉スラグ微粉末を使用した場合、乾燥収縮が大きくなるものの、尿素的添加によって大幅に収縮量を低減できるといえる。また、乾燥材齢約 50~100 日以降の質量変化はほとんどなく、特に、尿素的を 20vol% 使用した場合、早期に質量が一定となった。

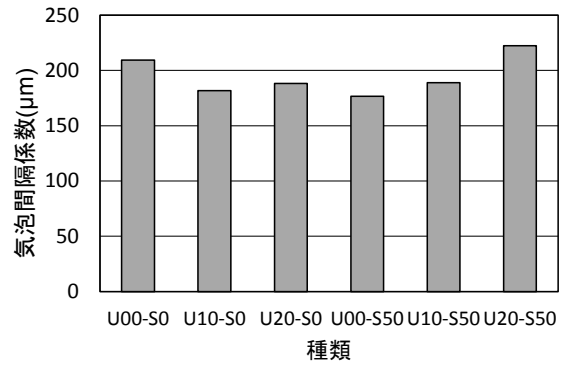


図-9 気泡間隔係数

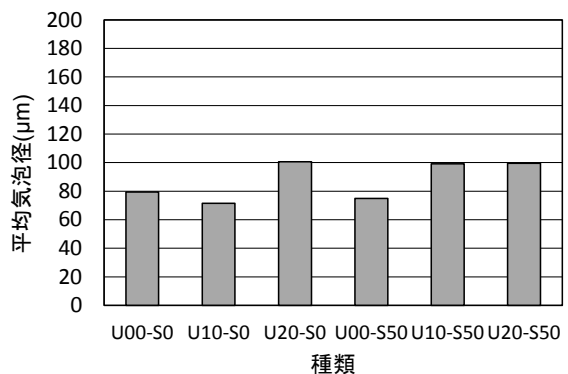


図-10 平均気泡径

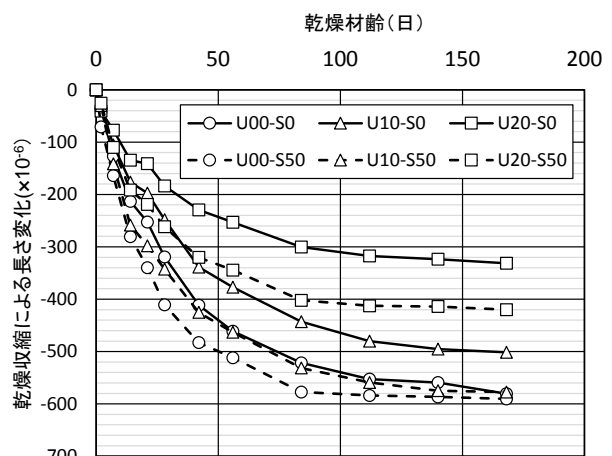


図-11 乾燥収縮による長さ変化試験

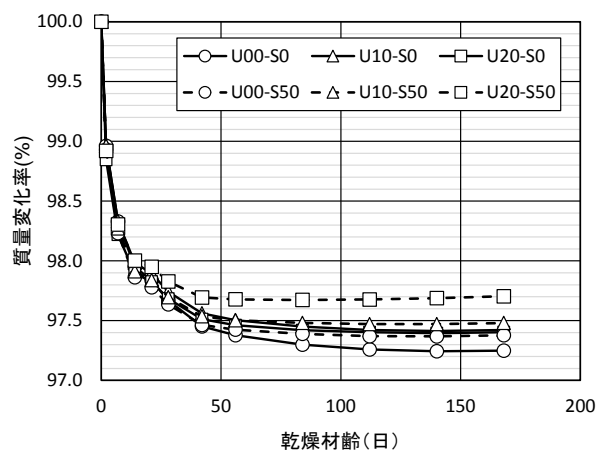


図-12 乾燥収縮による質量変化率

これは既往の研究<sup>4),5),7)</sup>からも明らかなように、尿素は非揮発性であることからコンクリート中の水分の逸散が低減されたこと、また配合上、単位水量が低減できることがその要因であるといえる。本実験の結果、その効果は高炉スラグ微粉末を使用した場合においても有効であり、単位水量に対して 20vol%の尿素を添加することによって普通コンクリートの場合約  $250 \times 10^{-6}$ 、高炉スラグ微粉末を使用した場合においても約  $150 \times 10^{-6}$  の収縮量を低減することができた。このことから、高炉セメントを使用したコンクリートは一般に乾燥収縮量が大きくなるが、その低減対策として尿素の添加は有効であると考えられる。

### 3.7 塩水浸漬試験

図-13 に塩水浸漬試験によるコンクリート表面から 10mm および 20mm における塩化物イオン濃度について示す。この図より、普通コンクリートおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいても、ほぼ同様であり尿素の添加量に関係なく塩化物イオンの浸透に対する抑制効果はみられなかった。

## 4. まとめ

尿素は水溶性で農業用肥料として利用されている一般的な材料であるが、水との吸熱反応や保水性を有することを利用して温度ひび割れの防止や単位水量の低減による乾燥収縮の低減などの研究が進められている。しかし、一般的に使用されている高炉セメントへの適用性やフレッシュ性状および硬化後の各種環境作用に対する抵抗性に関する研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、高炉セメント B 種に相当する高炉スラグ微粉末を使用し、単位水量に対し 20vol%の尿素を添加したコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の諸特性について普通コンクリートと比較検討した。

本研究で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 高炉スラグ微粉末を使用しても、尿素の吸熱反応によりコンクリートの練上がり温度は低下することからスランプおよび空気量は大きくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末を使用した場合、普通コンクリートに比較して大幅に凝結時間が遅延することから、ブリーディングの終了時間が長くなる。
- (3) 尿素を添加しても高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により長期強度は増進する。
- (4) 尿素を添加しても圧縮強度をある程度確保することによって凍結融解に対する抵抗性は確保され、普通コンクリートに比較して高炉スラグ微粉末を使用した方が凍結融解に対する抵抗性が向上する。
- (5) 高炉スラグ微粉末を使用することによって増加する

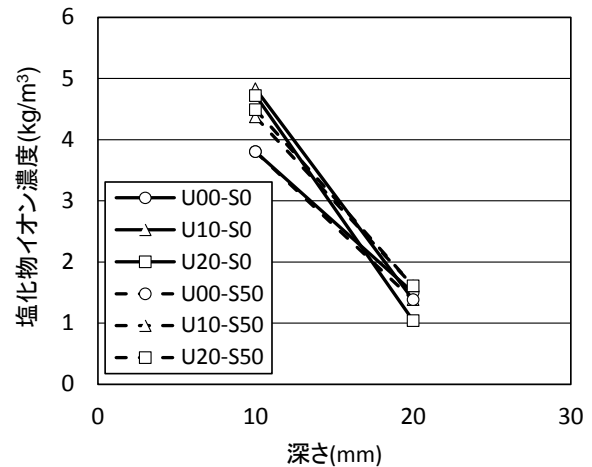


図-13 塩水浸漬試験結果

乾燥収縮を尿素の添加によって大幅に低減することができる。

- (6) 普通コンクリートおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートのいずれにおいても、尿素の添加量に関係なく、塩化物イオンの浸透はほとんど変わらない。

## 参考文献

- 1) 阪田憲次, 浜田俊彦, 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, No.42, pp.403-406, 1988
- 2) 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われ制御効果に関する研究, セメント技術年報, No.42, pp.407-410, 1988
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 堀井克章, 酒井圭祐: 尿素および低吸水性骨材による砂岩砕石コンクリートの乾燥収縮抑制効果, 土木学会年次学術講演会講演概要, pp.1209-1210, 2013
- 6) 堀井克章, 酒井圭祐, 脇山春菜: 尿素を用いたコンクリートおよびモルタルの諸性状, 土木学会年次学術講演会講演概要, pp.1079-1080, 2014
- 7) 田中博一, 宮川豊章: 尿素, 石灰石骨材および高濃度シラン系表面含浸材を用いたコンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.568-573, 2012