

尿素を用いたPCグラウトの諸特性

熊本高等専門学校	学生会員	○河野 恭生
熊本高等専門学校	正会員	博士 (工学) 松家 武樹
熊本高等専門学校		博士 (工学) 岩坪 要
阿南工業高等専門学校		博士 (工学) 堀井 克章

Abstract : In this study, the following items were investigated : fresh properties, compressive strength, drying shrinkage, and CO₂ emission of PC grout using urea. From the test results, when the urea is replaced by water in the range of 20% of the volume, it was made clear that temperature immediately after mixing, air volume, and drying shrinkage strain of PC grout can be reduced, but flow time was lengthen, and compressive strength was reduced. On the other hand, CO₂ emissions increased in accordance with substitution rate of the urea, and CO₂ emissions of the PC grout in the present study were in the range of 1028kg/m³~1300kg/m³. In addition, CO₂ emission increased by at most 272kg/m³ by using the urea.

Key words : PC grout, urea, fresh properties, hardened properties, CO₂ emission

1. はじめに

プレストレストコンクリート工学会から発刊されている「PCグラウトの設計施工指針」によると、PCグラウト注入時におけるPCグラウトの温度は、35℃以下を標準とすることが定められている¹⁾。一般に、PCグラウトの温度が高くなると、粘性が小さくなる。このため、流下時間は短くなり、所定の規格値に収まらないことがある。このことを避けるために暑中期における施工では、セメントなどの材料を直射日光が当たらない場所に保管したり、冷水器を用いて練混ぜ水を冷やすといった工夫などが施されている。しかしながら、これらの対策技術は煩雑である。さまざまな視点からのアプローチにより基本的な情報を蓄積し、暑中期におけるより簡易な対策技術を標準化していくことが肝要であると考えられる。

一方、PCグラウトの品質検査項目には、レオロジー試験、単位容積質量試験、圧縮強度試験および塩化物イオン含有量試験などが規定されている^{1),2)}。しかしながら、PCグラウトの乾燥収縮に関する項目はない。PCグラウトはコンクリート内部のシース管内に充填されるため、乾燥収縮の影響は小さいものと想定され、検査項目に規定されていないと考えられる。一方、玉越らの文献³⁾によると、PC橋のはつり調査によってシース管内外の水の出入りがあることが確認されており、井ノらの文献⁴⁾によると、シース管施工位置の範囲内にあるコンクリート表面から深さ150mmの範囲においてはコンクリートの乾燥収縮が生じることが確認されている。これらのことを鑑みると、PCグラウトは乾燥収縮を生じさせる環境下にある可能性があることを示唆するものであり、PCグラウトの乾燥収縮特性を把握しておく必要がある。

以上のことを背景に、本研究では、コンクリート分野でも用いられている尿素に着目⁵⁾し、練混ぜ水の容積に尿素を置換した高粘性PCグラウトのフレッシュ性状、強度特性、乾燥収縮特性およびCO₂排出量について明らかにすることとした。

2. 実験概要

2.1 PCグラウトの配合および製造

(1)使用材料と配合

PCグラウトの製造に使用する材料の種類および密度を表-1に示す。練混ぜ水は上水道水、セメントは普通ポルトランドセメント、尿素は顆粒タイプのもの、混和剤(以下、Adと略記)は高粘性タイプのもので使用しセメントに対して1.0%を添加した。表-2および写真-1に、本実験で使用した尿素の物理的性質および外観を示す。尿素は、高い水溶性を有し、溶解時に吸熱反応⁶⁾を起こすといった性質がある。

表-3に、本実験におけるPCグラウトの配合を示す。配合名に示すP配合は一般的に用いられる基本的な配合である。U10、U20およびU50は、P配合における練混ぜ水の容積に対し、尿素を10%、20%および50%置換した配合である。これ以降、尿素置換率10%、20%および50%の配合をU10、U20およびU50と略記する。なお、本研究におけるPCグラウトの配合は水と尿素を加えた溶液の容積を一定としている。

(2)PCグラウトの製造

PCグラウトの製造は、回転数600rpmのハンドミキサーを用いて行った。練混ぜは、最初に水、尿素および混和剤を、塊がなくなる10秒程度練り混ぜ、次にセメントを加え180秒間行った。また、各配合の練混ぜ時における平均室温は26.2℃で、各材料の平均温度は、水が21.7℃、セメントが23.3℃、混和剤が24.9℃、および尿素が23.4℃であった。なお、各配合で製造したPCグラウトの量は10ℓである。

2.2 試験項目および方法

(1)フレッシュ時のPCグラウト

フレッシュ性状では、JP漏斗を用いた流動性試験、空気量試験、単位容積質量試験および円筒容器を用いたフロー試験を、それぞれJSCE-F 531、JIS A 1128、JSCE-F 536およびJASS 15M 103に準拠して行った。本研究では、尿素の吸熱反応の効果を明らかにするため、練上がり時点におけるPCグラウトの温度の測定も行った。

各試験について詳述すると、流動性試験および単位容積質量試験の結果は、同一条件でそれぞれ3回および9回の試験の平均値である。また、流動性試験におけるP配合の流下時間は、高粘性PCグラウトの規格値である14~23sを目標値¹⁾とした。空気量試験は、モルタル用エアメータを用いて行った。円筒容器を用いたフロー試験の結果は、φ50×100mmおよびφ50×51mmの容器を用意し、各容器1回ずつ試験を行い、直角2方向の直径を計測した平均値である。なお、本研究では空気量の影響を評価するために、空気量試験および単位容積質量試験時におけるタンピングなどの空気を排出させる作業は除外した。

(2)硬化時のPCグラウト

硬化後における試験では、圧縮強度試験および長さ変化試験を、それぞれJSCE-G 531-2007およびJIS A 1129-3に準拠して行った。圧縮強度試験および長さ変化試験の結果は、同一条件でそれぞれ3個の供試体の結果を平均した値である。圧縮強度試験は前記表-3に示す4配合、長さ変化試験は、U50を除く

表-1 使用材料の種類および密度

使用材料	種類	密度(g/cm ³)
練混ぜ水	上水道水	1.00
セメント	普通ポルトランドセメント	3.14
尿素	顆粒	1.32
混和剤	主成分:メタクリル系化学物, 水溶性高分子エーテル系化合物	-

表-2 尿素の物理的性質

項目	内容
化学式	CH ₄ N ₂ O
分子量	60.06g/mol
形態	無色, 透明, 無臭
溶解度	108g/100ml(20℃)
溶解熱	-15.4kJ/mol



写真-1 尿素

表-3 PC グラウトの配合

配合名	W/C (%)	溶液 (水+尿素) (ℓ/m ³)	単位量(kg/m ³)			混和剤(kg) 高粘性 Ad
			水 W	尿素 U	セメント C	
P	43.0	575	575	-	1336	13.36
U10	38.7	575	517	76	1336	13.36
U20	34.4	575	460	152	1336	13.36
U50	21.5	575	287	379	1336	13.36

3配合について行った。なお、前述のとおり、供試体の作製時におけるタンピングなどの空気を排出させる作業は除外した。

3. 実験結果および考察

3.1 PCグラウト温度

図-1に練上がり時点におけるPCグラウトの温度測定の結果を示す。PCグラウト温度は、尿素の置換率が増加するとともに低下している。尿素を用いない場合のPCグラウトの温度に比して、U10の場合では5.2℃、U20では10.0℃、U50の場合では17.2℃低下している。この結果は、尿素特有の吸熱反応による効果といえる。

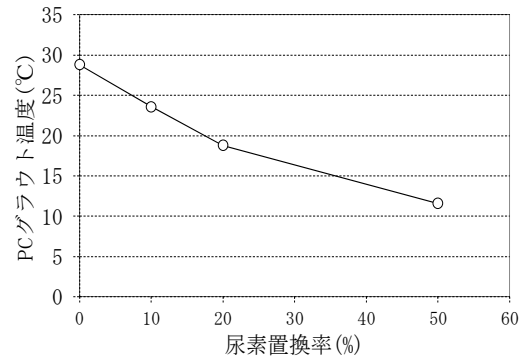


図-1 PC グラウト温度

3.2 流動性

(1) 流下時間

図-2にJP漏斗を用いて行った流下時間の結果を示す。流下時間は、尿素置換率が増加するとともに長くなっている。これは、尿素を練混ぜ水の容積に置換したことによるPCグラウトの粘性の増加、およびPCグラウトの温度低下に伴うPCグラウトの粘性の増加が影響していると考えられる。著者らの既往の研究⁷⁾では、PCグラウト温度1℃あたりの流下時間の差異は0.3秒程度であることを明らかにしており、本実験結果における尿素を用いたことによる流下時間の遅れは、主に尿素の置換に伴う単位水量の減少であるといえる。

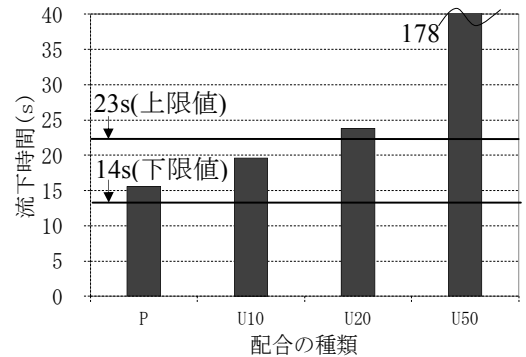


図-2 流下時間

なお、図-2には、高粘性PCグラウトにおける流下時間の規格値も示している。本実験における規格流下時間内の配合は、P配合とU10配合の2配合である。

(2) 円筒容器を用いたフロー試験

図-3にφ50×100mmおよびφ50×51mmの円筒容器を用いたフロー試験の結果を示す。φ50×100mmの円筒容器を用いた試験結果は、全体的な傾向として、尿素の置換率が増加するとともにフロー値は小さくなっている。しかしながら、U20のフロー値は、他の配合に比して著しく大きくなっている。これについては、他の値と著しく異なっていたため、再度試験を行った。1回目および2回目の試験の結果は、265mmおよび281mmであり、図-3におけるφ50×100の円筒容器を用いたU20の試験結果は、2回の平均値を示している。一方、φ50×51mmの円筒容器を用いた試験結果は、全体的な傾向として、U50を除く3配合のフロー値は同程度の値を示しており、φ50×100mmの円筒容器を用いた試験結果とは異なる挙動を示している。これらの原因については判然としないが、円筒容器の寸法効果の影響について検討が必要であると考えられる。さらに、フロー値は降伏値と相関関係があることが報告^{8),9)}されていることから、今後、降伏値や塑性粘度などを含めた詳細な検討も必要である。

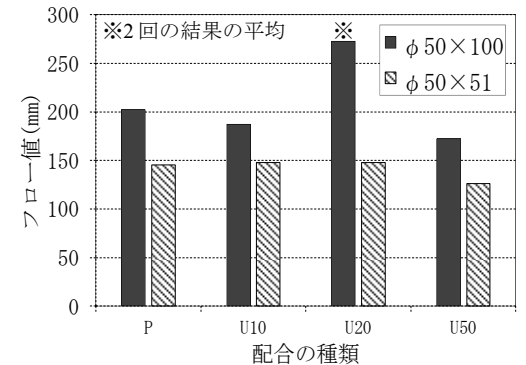


図-3 フロー値

3.3 空気量

図-4に空気量試験の結果を示す。P配合のPCグラウトは0.8%の空気量を有しているものの、U10およびU20では空気量は0%であった。著者ら⁷⁾はこれまでに、PCグラウト温度が20℃程度以上の範囲では、温度の低下とともにPCグラウトの空気量は減少し、それ以降の温度低下は空気量を増大させることを明らかにしている。本実験では、28.8～18.8℃の温度範囲では温度低下とともに空気量が減少傾向にある。尿素置換率20%の範囲における結果は、著者らの既往の研究における試験結果の挙動と同様の傾向を示している。

一方、U50のPCグラウトの空気量はそのほかの配合に比して著しく多くなっている。この原因は、U50では尿素的置換量が溶解度を超えて溶けきれず、溶けきれなかった粒子がその周りに空気を巻き込んだためと考えられる。なお、本実験における練混ぜ水の平均温度は、21.7℃である。尿素的溶解度は、21.7℃の水に対して約110.0g/100ml¹⁰⁾であるため、完全に溶かすことのできる尿素的置換率は最大45.5%となる。

3.4 単位容積質量

図-5に単位容積質量試験の結果を示す。単位容積質量は、尿素的置換率の増加とともに大きくなる傾向が見られる。これは、尿素的密度が水の密度より大きいこと、および尿素的置換率の増加とともに空気量が低減すること起因している。一方、U50の単位容積質量はU20の値に比して小さくなっている。これは、空気量の増加による影響と考えられる。

3.5 圧縮強度

図-6に各材齢におけるPCグラウトの圧縮強度を示す。PCグラウトの圧縮強度は、尿素的置換率の増加とともに低下している。既往の研究⁵⁾では、尿素的は水に溶解した際の吸熱反応により、練上がり温度の低下に加え、それに伴う水和の遅延作用があると報告されている。本研究でも同様に、尿素的の吸熱反応に伴う水和の遅延により、材齢28日時点までの圧縮強度は低下したものと考えられる。

一方、PCグラウトの圧縮強度の標準的な管理値は、材齢7日で30N/mm²以上とされている¹⁾。本実験では、U50を除く配合では管理値を満たす値となった。なお、材齢3日におけるU20およびU50のPCグラウトは水和の遅延により硬化していなかったこと、および材齢28日におけるU50のPCグラウトは3つすべての供試体に大きな亀裂が生じていたことにより、本試験を実施できていない。

図-7にP配合におけるPCグラウトの圧縮強度を基準とした圧縮強度の低下率を示す。材齢7日時点における圧縮強度の低下率は尿素的置換率の増加とともに大きなものとなっている。しかしながら、材齢

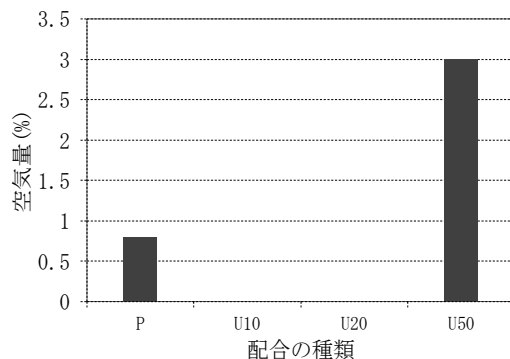


図-4 空気量

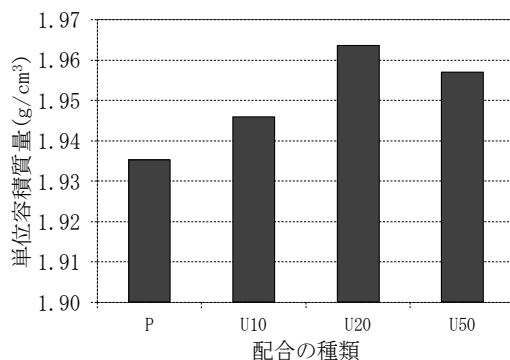


図-5 単位容積質量

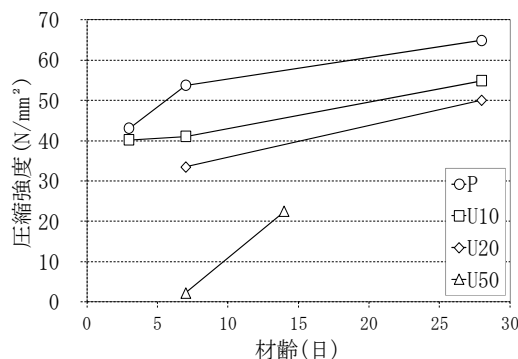


図-6 圧縮強度

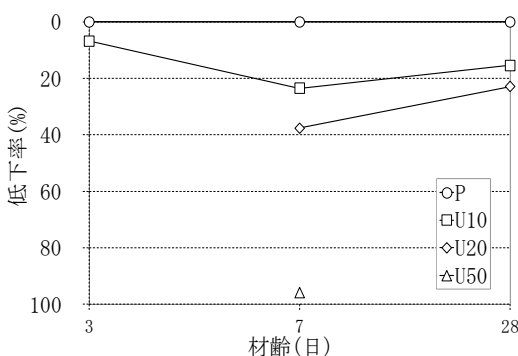


図-7 圧縮強度の低下率

28日時点における圧縮強度の低下率は小さくなっている。材齢7日および材齢28日におけるU50を除くPCグラウトの圧縮強度の低下率は、それぞれ23.6%~37.6%および15.4~22.8%の範囲である。

3.6 乾燥収縮

図-8に材齢91日までの乾燥収縮ひずみの結果を示す。材齢91日時点での乾燥収縮ひずみは、いずれの配合においても収束していない。一方、各配合におけるPCグラウトの乾燥収縮ひずみは、尿素置換率が増加するとともに低減している。これは、尿素の混入に伴い練混ぜ水を減少させたことが影響していると考えられる。尿素を用いたU10およびU20の乾燥収縮ひずみは、尿素を用いないP配合に対して、17.6%および40.0%低減する結果となっている。

図-9には質量減少率を示す。質量減少率は、U10, P, U20の順で大きくなっており、本実験結果は乾燥収縮ひずみの結果と符合していない。本結果における質量減少率は、練混ぜ水量やPCグラウトに含有される空気量の影響などが複雑に絡み合った結果であり、それぞれの寄与の程度は明らかではない。

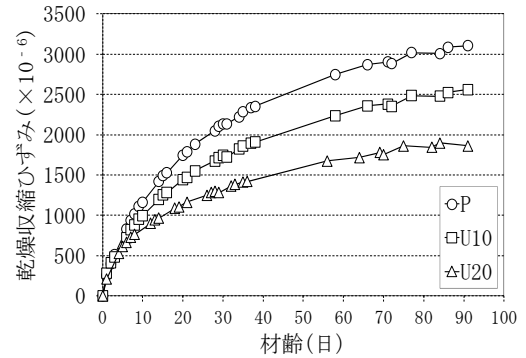


図 - 8 乾燥収縮ひずみ

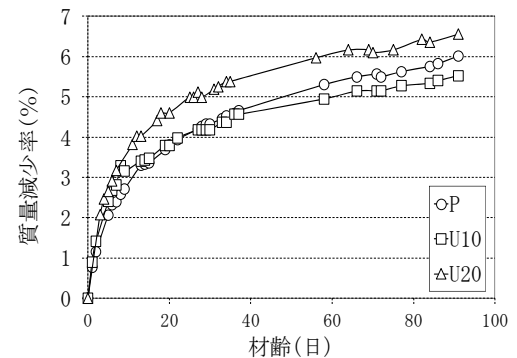


図-9 質量減少率

4. 尿素の利用による環境評価

近年、世界全体でCO₂削減のための議論が行われており、あらゆる分野においても環境に対する配慮の重要性が増してきている。土木分野においても、CO₂排出量の削減は避けられない課題である。そこで、PCグラウト製造における総CO₂排出量とその内訳、および尿素による影響を明らかにした。

4.1 算出方法

本研究に関連するインベントリデータは、日本コンクリート工学会より発刊されている「環境テキスト(案)」¹¹⁾、および小林らの文献¹²⁾より引用した。練混ぜ水、ポルトランドセメントおよび尿素のCO₂排出原単位は、それぞれ0.348kg-CO₂/m³、769.0kg-CO₂/tおよび719.4kg-CO₂/tとした。混和剤に関しては、使用量が少量であることから、対象から除外した。なお、本研究で算出するCO₂排出量は、CO₂排出原単位に各材料の使用量を乗じて算出する。

4.2 CO₂排出量

図-10に各配合におけるCO₂排出量およびその内訳を示す。尿素置換率の増加に伴い、CO₂排出量は増加しており、最大272kg/m³増加している。また、各配合におけるCO₂排出量の内訳は、いずれの配合においてもセメントの割合が大きいことが明らかである。なお、本実験におけるCO₂排出量の合計は、1028~1300kg/m³の範囲である。

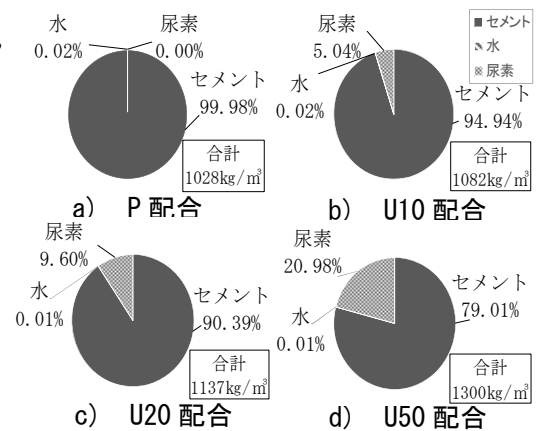


図 - 10 CO₂ 排出量の内訳

5. まとめ

尿素置換率0%から50%までの範囲における本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 練混ぜ水に対して尿素を20%の範囲で置換することにより、PCグラウトの練上がり温度、空気量および乾燥収縮ひずみは低減でき、単位容積質量は大きくなる。
- (2) 尿素的置換率増加とともに、PCグラウトの流下時間は長くなり、圧縮強度の低下率は大きくなる。材齢7日および材齢28日における圧縮強度の低下率は、それぞれ23.6%~37.6%および15.4~22.8%の範囲である。
- (3) 尿素を用いないPCグラウトのCO₂排出量は1028kg/m³であり、尿素的置換率20%の範囲において最大109kg/m³のCO₂排出量が増加する。PCグラウトのCO₂排出量の内訳では、セメントに起因する量がもっとも支配的である。

謝辞

本研究の一部を実施するにあたり、福岡大学工学部の橋本紳一郎助教が保有している設備を拝借した。ここに深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：PCグラウトの設計施工指針(改訂版)，2012
- 2) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PCグラウト&プレグラウト PC鋼材(施工マニュアル2013改訂版)，2013
- 3) 玉越隆史，平賀和文，木村嘉富：PC鋼材の腐食損傷への対応事例—妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査—，土木技術資料，第54巻，第5号，pp.50-51，2012
- 4) 井ノ口公寛，伊代田岳史：コンクリートの表層と内部の湿度の相違が乾燥収縮と耐久性に与える影響，第38回土木学会関東支部技術研究発表会，Vol.33，No.1，pp.563-568，2011
- 5) 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
- 6) 渡部康弘，園山裕之，西山桂：「温度と熱」の科学的定義に基づいた中学校理科単元「化学変化と熱」における授業実践，教育臨床総合研究12 2013研究，pp53-65，2013
- 7) 松家武樹，田辺重男，木村茂昭，坂田祐介：真空および大気圧下での遠心作用による練混ぜを付与したPCグラウトの諸特性，プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集，pp47-52，2014
- 8) 山口光俊，細野宏巳，野島昭二，辻幸和：PCグラウトのレオロジー特性に関する統一試験，プレストレストコンクリート技術協会第13回シンポジウム論文集，pp.175-178，2004
- 9) 松家武樹，田辺重男，工藤朗太，木村茂昭：PCグラウトのレオロジー特性に及ぼす練混ぜ方法の影響，プレストレストコンクリート工学会第24回シンポジウム論文集，pp.371-376，2015
- 10) 東京書籍：ダイナミックワイド図説化学，2011
- 11) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートの環境テキスト(案)，2013
- 12) 小林久，佐合隆一：窒素およびリン肥料の製造・流通段階のライフサイクルにわたるエネルギー消費量とCO₂排出量の試算，農作業研究36(3)，pp141-151，2001