

# 論文 高炉スラグ微粉末の置換率を変化させた PC グラウトのフレッシュ性状と強度

青木 文良<sup>\*1</sup>・谷口 友一<sup>\*2</sup>・辻 幸和<sup>\*3</sup>・池田 正志<sup>\*4</sup>

**要旨**：近年，普通ポルトランドセメントに含有される塩化物イオンが増加しており，その許容値が 200ppm から 350ppm に緩和された。そのため，PC 鋼材の腐食等の問題が懸念され，セメントの半分程度を高炉スラグ微粉末で置換する研究などが実施され始めている。そこで本研究では，PC グラウト中の塩化物イオンを低減させるとともに，その品質を向上させるため，セメントの 40%および 60%を高炉スラグ微粉末で置換した PC グラウトを，分割練混ぜ方法により製造し，そのフレッシュ性状および圧縮強度の結果を報告する。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末，置換率，分割練混ぜ，フレッシュ性状，圧縮強度

## 1. はじめに

PC グラウトは，ポストテンション方式のプレストレストコンクリート (PC) 構造物において，シーす内に挿入され緊張定着された PC 鋼材を腐食から保護するとともに，コンクリートとシーす中の PC 鋼材との間に付着を与えて両者を一体とするきわめて重要な役割を持つ。

PC 構造物が所要の性能を持ち，優れた耐久性を有するためには，適切な材料，配合および練混ぜによって製造された所要の品質をもつ PC グラウトを確実に充填しなければならない。

しかし近年，普通ポルトランドセメントに含有される塩化物イオンが増加しており，その許容値が 200ppm から 350ppm に緩和された。そのため，鋼材の腐食等の問題が懸念され，セメントの半分程度を高炉スラグ微粉末で置換する研究などが実施され始めている<sup>1), 2)</sup>。

本研究では，PC グラウト中の塩化物イオンを低減させるとともに，その品質を向上させるため，セメントの 40%および 60%を高炉スラグ微粉末で置換した PC グラウトを製造して，そのフレッシュ性状および圧縮強度の実験結果を比較

検討し，高炉スラグ微粉末を併用することの有用性を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究で使用した結合材は，普通ポルトランドセメントと置換材料としての高炉スラグ微粉末である。普通ポルトランドセメントの比表面積は 3320cm<sup>2</sup>/g である。また，高炉スラグ微粉末は，比表面積が 4230cm<sup>2</sup>/g (以下，N と称する) と 6250cm<sup>2</sup>/g (以下，S と称する) の 2 種類を使用した。なお，普通ポルトランドセメントの密度は 3.14g/cm<sup>3</sup>，高炉スラグ微粉末はいずれも 2.88g/cm<sup>3</sup> である。高炉スラグ微粉末の化学成分は，N および S それぞれ，酸化マグネシウムが 5.04%と 5.00%，三酸化硫黄が 1.94%と 1.90%，強熱減量が 1.03%と 0.64%，塩化物イオンが 0.004%と 0.004%，塩基度が 1.84 と 1.84 であった。

PC グラウト用混和剤は，ノンブリーディング高粘性タイプを用いた。PC グラウトに適度な粘性と材料分離抵抗性を与え，ブリーディングの

\*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻

\*3 群馬大学 工学部建設工学科 教授 工博 (正会員)

\*4 群馬大学 工学部建設工学科 技術専門職員 (正会員)

表-1 PC グラウトの配合 (1 バッチあたり)

名称	高炉スラグの置換率		水結合材比 (%)	単位結合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg)	高炉スラグ (kg)	水 (kg)	PC グラウト用混和剤の添加率	
	(%)	(%)							(%)	(g)
C		0	43	1336	575	30	0	一次水+二次水 9.0 + 3.9 = 12.9	0.4	120
CN40	N	40		1316	566	18	12		0.6	180
CN60		60		1306	562	12	18		0.8	240
CS40	S	40		1316	566	18	12		1.0	300
CS60		60		1306	562	12	18			

発生を防止することができる粉末状の混和剤である。主成分は、メラミンスルホン酸系化合物および水溶性高分子エーテル系化合物である。

## 2.2 PC グラウトの配合

PC グラウトの配合を、表-1 に 1 バッチあたりの量で示す。高炉スラグ微粉末の置換率はセメント質量に対して 40%および 60%とした。水結合材比は 43%とし、一次水は結合材質量に対して 30%、二次水は 13%とした。PC グラウト用混和剤の添加率を結合材質量の 0.4%、0.6%、0.8%、1.0%に変化させて、それぞれ製造した。セメントのみを使用した配合を C、セメントの 40%および 60%を高炉スラグ微粉末 N で置換した配合を CN40 および CN60、高炉スラグ微粉末 S で置換した配合を CS40 および CS60 と、それぞれ表記する。なお、1 バッチの練混ぜ量は、22.5ℓ～23.2ℓであった。

## 2.3 ミキサの仕様

練混ぜには、30ℓ の容量まで練混ぜ可能なミキサを使用した。ミキサの回転数は、通常 1150rpm である。ミキサの形状を図-1 に示す。

また、練混ぜ槽内には、PC グラウトの円筒方向の流れを抑制する抑止板を、鉛直方向に 3 箇所設置している。そのため、従来のミキサと比べて練混ぜ性能は向上している。練混ぜ槽内の様子を写真-1 に示す。

## 2.4 分割練混ぜ方法

本研究では、分割練混ぜ方法により PC グラウトを製造した。分割練混ぜ方法は、全材料を一度に投入して練り混ぜる一括練混ぜ方法に比べ、

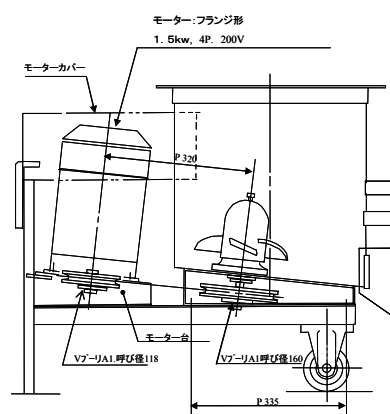
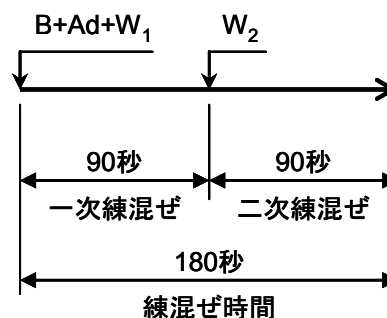


図-1 ミキサの形状



写真-1 練混ぜ槽内



B: 結合材 Ad: 混和剤 W<sub>1</sub>: 一次水 W<sub>2</sub>: 二次水

図-2 分割練混ぜ方法

セメント等の練り玉が少なくなり、材料を均一に分散させて練り混ぜることができる<sup>3)</sup>。

分割練混ぜ方法については、図-2に示す。本研究では、まず一次水を投入して、そこにPCグラウト用混和剤を入れ5秒ほど攪拌させた後、結合材を加えて90秒間練り混ぜた。その後、二次水を投入して90秒間練り混ぜた。合計の練混ぜ時間は180秒間である。

## 2.5 流動性試験方法

流動性試験はJSCE-F 531-1999に準じて行った。漏斗は、流出管の長さが30mmであるJP漏斗を使用した。漏斗の形状寸法を図-3に示す。

練り上がったPCグラウトは、1.2mmのふるいに通して測定に使用した。測定は、練上がり直後に



JP30 (JP) 漏斗

図-3 漏斗の形状寸法

## 2.6 ブリーディング率および収縮率試験方法

ブリーディング率および収縮率試験方法は、容器方法(JSCE-F 533-1999)に従って行った。写真-2および写真-3に、ブリーディング率および収縮率の試験の様子を示す。試験はすべて、温度が20±3℃の恒温室内で行った。

ブリーディング率試験に用いた容器は、内径が140mm、内高が130mmの水密性のものを用い、



写真-2 ブリーディング率試験

練上がりから6時間後までの測定を行った。ブリーディング率は、式(1)を用いて算出した。

$$\text{ブリーディング率 (\%)} = \frac{B}{V} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $B$ ：ブリーディングによる水量 (ml)

$V$ ：試料の体積 (ml)

収縮率試験は、以下の手順で行った。内径が50mm、内高が100mmの円柱形の型枠にPCグラウトを満たし、グラウト天端にガラス板を載せた後、静かにガラス板の上に押金物を載せた。その後、速やかにブリッジ上面から押金物上面までの深さ $A$  (mm)を測り、これに押金物の厚さ $t$  (mm)を加えたものを基長 $B_0$  (mm)とした。24時間後、押金物を取り外し、ブリッジ上面からガラス板上面までの深さ $B_n$  (mm)を測定した。測定は、供試体1個につき、4点測定し、材齢3日まで行った。収縮率の算出には、式(2)を用いた。

$$\text{収縮率 (\%)} = \frac{B_0 - B_n}{H} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $B_0$ ：基長 (mm)、 $B_0 = A + t$

$A$ ：ブリッジ上面から押金物上面までの深さの平均値 (mm)

$t$ ：押金物の厚さ (mm)

$B_n$ ：材齢 $n$ 日におけるブリッジ上面からガラス板上面までの深さの平均値 (mm)

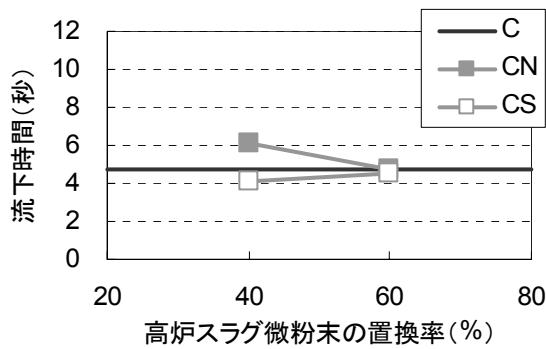
$H$ ：100 (mm)

## 2.7 圧縮強度試験方法

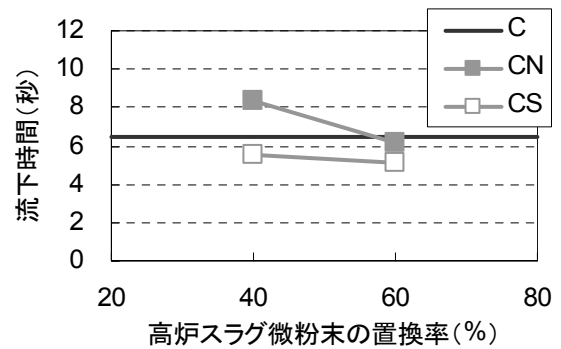
圧縮強度試験は、JSCE-G 531-1999に準じて行った。PCグラウトを詰め終わった供試体は、1



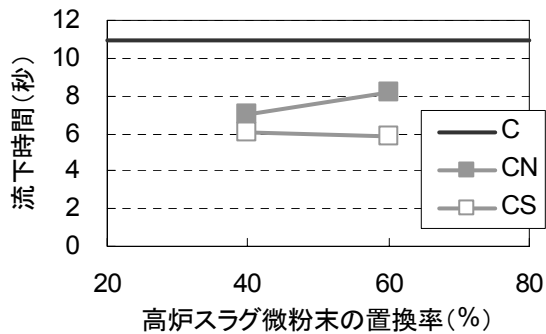
写真-3 収縮率試験



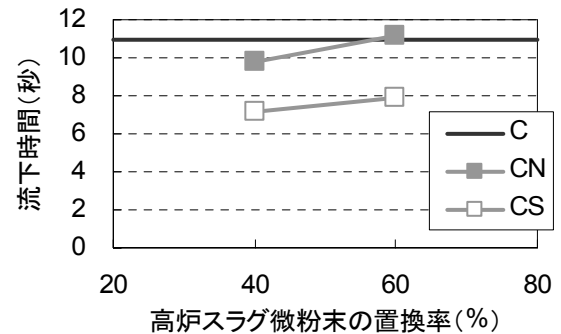
(a) 混和剤の添加率=0.4%



(b) 混和剤の添加率=0.6%



(c) 混和剤の添加率=0.8%



(d) 混和剤の添加率=1.0%

図-4 流動性

日ないし2日後に型枠を外し、24時間水中に置いた後、これを取り出し、ポリエチレン袋で覆い、平均16°Cで所定の材齢まで養生した。なお試験に用いた供試体の材齢は28日である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュ性状

##### (1) 流動性

練上がり直後の流動性試験結果を図-4に示す。高炉スラグ微粉末を置換しても、流動性が著しく低下することはなかった。むしろ高炉スラグ微粉末Sを使用した配合では、流動性は向上した。この傾向は、PCグラウト用混和剤の添加率に関わらず等しく認められた。また、置換率を40%から60%にしても流下時間に大きな変化はなく、同様の流動性が得られた。

置換率が同じであれば、高炉スラグ微粉末Nより高炉スラグ微粉末Sを使用した方が流下時間は速くなることが確認できた。粉末度のより大きい高炉スラグ微粉末を使用することで、流動性を向上できる傾向が認められた。

PCグラウト用混和剤の添加率が増加していく

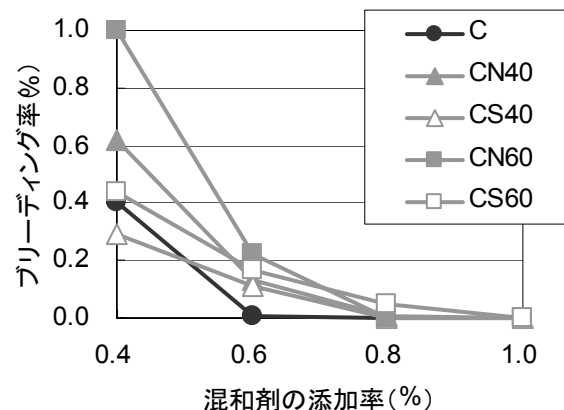
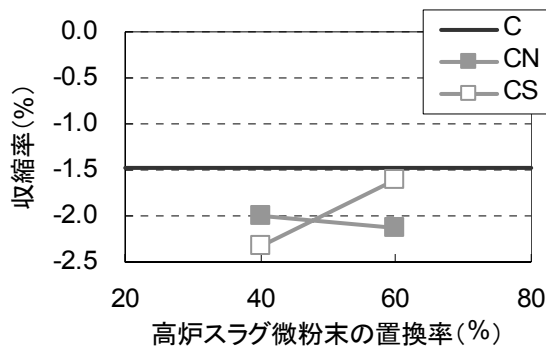


図-5 ブリーディング率

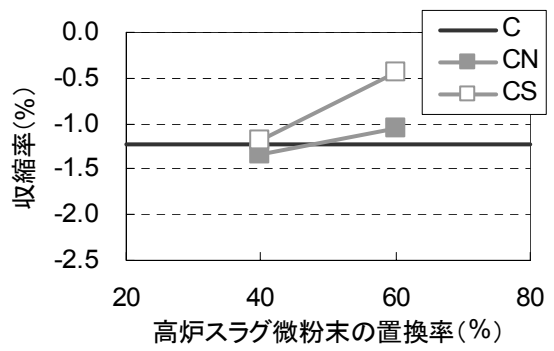
と、流下時間は遅くなり、流動性は低下することが確認された。混和剤量が増加していくことにより、粘性が増した影響である。

##### (2) ブリーディング率

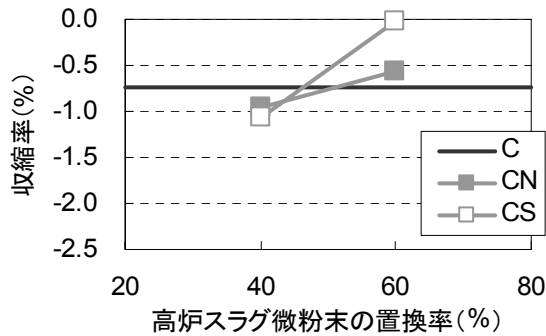
練上がりから6時間後のブリーディング率と混和剤の添加率の関係を図-5に示す。高炉スラグ微粉末を置換すると、ブリーディング率は増加した。しかし、CS40およびCS60に関しては、ブリーディング率の増加割合は小さく、ブリーディングが最も発生した混和剤の添加率を0.4%とした配合について比較すると、Cと同程度の値となった。これは、粉末度の大きい高炉スラ



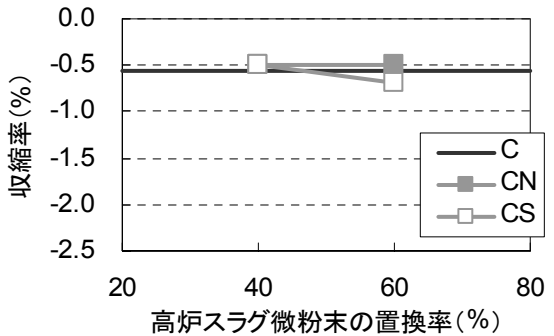
(a) 混和剤の添加率=0.4%



(b) 混和剤の添加率=0.6%



(c) 混和剤の添加率=0.8%



(d) 混和剤の添加率=1.0%

図-6 収縮率

グ微粉末 S を使用したことで、結合材と水との吸着が良くなり、ブリーディング率が小さくなったと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末の置換率を 40%から 60%に変化させた場合、高炉スラグ微粉末の種類に関わらずブリーディング率は増加した。

PC グラウト用混和剤の添加率を増加すると、ブリーディング率は減少した。粘性が増したため、PC グラウト内に水が保留したままになると考えられる。なお、混和剤の添加率を 1.0%とした配合では、いずれの PC グラウトともブリーディングは発生しないことが確認できた。

### (3) 収縮率

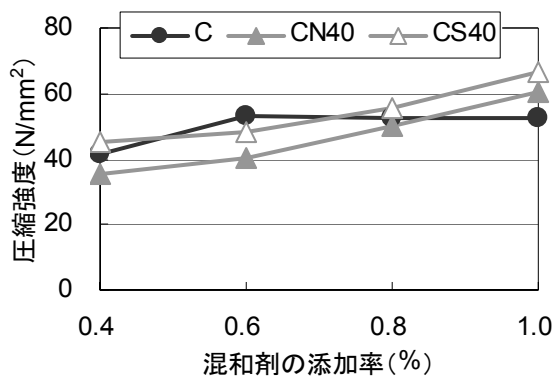
図-6 に材齢 3 日の収縮率試験結果を示す。高炉スラグ微粉末を置換した配合の中では、PC グラウト用混和剤の添加率が 1.0%である場合を除き、高炉スラグ微粉末 S で 60%置換した CS60 配合が、最も収縮していなかった。また、いずれの高炉スラグ微粉末を使った配合でも、置換率を 40%から 60%に増加すると、収縮率は小さくなる傾向がある。そして PC グラウト用混和剤の添加率を 0.6%および 0.8%とした CN60, CS60

の置換率を 60%とした配合では、高炉スラグ微粉末を置換しない C 配合より収縮を抑えられる結果となった。なお、混和剤の添加率を 0.8%とした CS60 では、ほとんど収縮していなかった。このことから、セメントよりも比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を 60%程度置換することで、収縮を抑えられることが認められた。そして、結合材の粉末度が収縮率に及ぼす影響は大きいことが認められた。

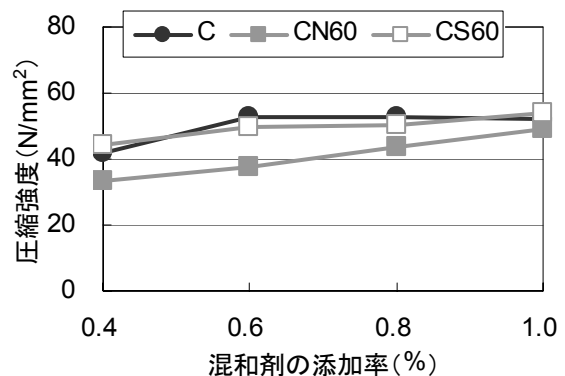
PC グラウト用混和剤の添加率を増加していくと、収縮率は小さくなる傾向が確かめられた。なお、混和剤の添加率を 1.0%とした配合では、結合材の種類に関わらず、収縮率は-0.5%前後に抑えられる結果となった。

### 3.2 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度と混和剤の添加率の関係を図-7 に示す。いずれの配合においても、コンクリート標準示方書で規定されている 30N/mm<sup>2</sup>以上の強度であった。セメントのみの配合と比べ、高炉スラグ微粉末 S で置換した場合、強度が増加する傾向が認められた。しかし逆に、高炉スラグ微粉末 N で置換した場合は、強度が



(a) 高炉スラグ微粉末の置換率=40%



(b) 高炉スラグ微粉末の置換率=60%

図-7 圧縮強度

低下する傾向が認められた。

置換率を 40%から 60%に増加すると、いずれの高炉スラグ微粉末で置換しても、強度は小さくなった。なお、セメントのみを使用した配合では、PC グラウト用混和剤の添加率に関わらずほぼ一定の強度を示した。セメントの 40%および 60%を高炉スラグ微粉末で置換した配合では、混和剤の添加率を増加すると、強度も増加する傾向が認められた。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で、次に示す知見が得られた。

- (1) 普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換して用いる場合、比表面積がより大きいものを使用することで、PC グラウトの流動性は向上し、ブリーディング率は減少する。また、圧縮強度は大きくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末の置換率は 60%より 40%である方が、ブリーディングを抑制でき、圧縮強度は大きくなる。しかし、収縮率は少し大きくなる傾向がある。
- (3) PC グラウト用混和剤の添加率を増加すると、PC グラウトの粘性は増していくことが確認できた。その影響により、流下時間が長くなったものの、ブリーディングおよび収縮を抑制することができた。また、高炉スラグ微粉末を置換した PC グラウトの圧縮強度は大きくなった。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基礎研究 (B) (2) 課題番号：15360229, 代表者：辻 幸和 群馬大学教授) および極東鋼弦コンクリート振興（株）との共同研究を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 辻 幸和ほか：高炉スラグ微粉末を用いた PC グラウトの流動性および強度，土木学会コンクリート・PC 構造物の現状の問題点とその対策に関する研究小委員会，PC 構造物の現状と問題点とその対策，土木学会コンクリート技術シリーズ 52, pp.285-292, 2003.6
- 2) 藤本謙太郎ほか：高炉スラグ微粉末を併用した PC グラウトのフレッシュ性状および強度性状，コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.129-134, 2004.7
- 3) 宮前俊之ほか：高粘性 PC グラウトの製造に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.535-540, 2001.7