

## 高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを併用した PC グラウトのフレッシュおよび強度性状

群馬大学工学部 正会員 ○池田正志  
群馬大学工学部 正会員 工学博士 辻 幸和  
群馬大学工学部 正会員 PhD 杉山隆文  
極東鋼弦コンクリート振興(株) 正会員 広瀬晴次

## 1. はじめに

普通ポルトランドセメントに含有される塩化物イオンの許容値が、2003年にJIS R 5210 (ポルトランドセメント)の改正により、200ppmから350ppmに緩和された。そのため、これに代わる結合材が必要となるが、これを用いたPCグラウトの主目的である、①PC鋼材を腐食から保護すること、②PC鋼材と部材コンクリートの間の一体性を確保することのうち、②の目的に関する研究はほとんどなされていない。

本研究では、普通ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末あるいは40%をフライアッシュでそれぞれ置換した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を検討した結果を報告する。その際に、PCグラウトがノンブリーディングで良好な流動性および強度を保持するためには、セメント等の粒子を均一に分散させる配合、混和剤、ミキサ、および練混ぜ方法等への配慮が必要不可欠であることを提示する。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

結合材には普通ポルトランドセメント、置換材料としては2種類の高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュ(ブレン値が $5460\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下Fと称する)の混和材を用いた。高炉スラグ微粉末は、ブレン値が $4230\text{cm}^2/\text{g}$ (以下、Nと称する)と $6250\text{cm}^2/\text{g}$ (以下、Sと称する)の粉末度を変えた2種類とした。PCグラウト用混和剤としては、ブリーディング防止タイプの混和剤(以下、混和剤Cと称する)、ノンブリーディング高粘性タイプの混和剤(以下、混和剤Gと称する)の2種類を使用した。

## 2.2 PCグラウトの配合

PCグラウト用混和剤は、結合材の質量比でメーカーの推奨値である1%を基準として使用した。高炉スラグ微粉末を併用した場合には、更に0.4、0.6、0.8%に変化させた。以下の表示で、CN・1.0、CN・0.8、CN・0.6、CN・0.4のように略記する。またフライアッシュを併用した場合は、JP30漏斗による流下時間が流動性試験の推奨値内である13~25秒の範囲に収まらないと見込まれた場合には、PCグラウト用混和剤の使用量を結合材の質量比で0.75%に減少した。それでも推奨値から外れる場合には、高性能AE減水剤を結合材の質量比で0.25%添加した。

セメントに対する置換率を高炉スラグ微粉末は50%に、フライアッシュは40%にそれぞれ一定にした。これらの置換率は、普通ポルトランドセメントの塩化物イオンの許容値が緩和されたことと、混和したPCグラウトの性状を勘案して決めた。一方水結合材比は、高炉スラグ微粉末を併用した場合は45%と一定にし、フライアッシュを併用した場合は一括練混ぜ方法および分割練混ぜ方法ともに37~41%とした。また分割練混ぜ方法では、水結合材比で30%を一次水として使用し、残りの水を二次水として使用した。

## 2.3 練混ぜ方法

PCグラウトの練混ぜは、30リットルの容量まで練混ぜが可能な新型ミキサを使用し、練混ぜ時間は180秒とした。新型ミキサの形状を図-1に、練混ぜ槽内の様子を写真-1に示す。これらに示すように、ミキサの内面に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。これにより練混ぜ性能が、従来型のミキサに比べて向上されている。新型ミキサの回転数は、通常1150rpmである。

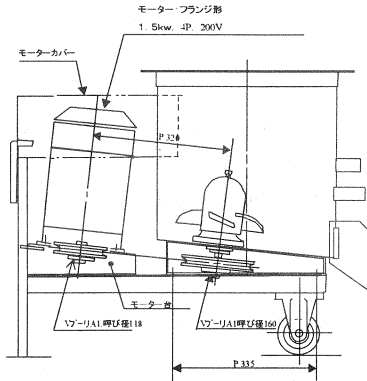
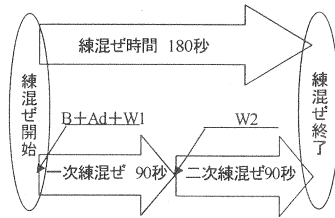


図-1 新型ミキサの形状



写真-1 練混ぜ槽内の様子



B: 結合材 Ad: 混和剤 W1: 一次水 W2: 二次水

図-2 分割練混ぜ方法

練混ぜ方法は、一括練混ぜ方法と分割練混ぜ方法の2種類を用いた。分割練混ぜ方法は図-2に示すように、結合材BにPCグラウト用混和剤を混合したものに一次水W1を添加した後、90秒間の一次練混ぜを行った。一次練混ぜ終了後に二次水W2を添加した後、更に90秒間の二次練混ぜを行い、合計180秒間練り混ぜた。なお一括練混ぜ方法においても、180秒間練り混ぜた。練上がり温度は、15±5℃であった。

2.4 流動性および圧縮強度試験方法

流動性試験はJSCE-F 531-1999に準じて行った。PCグラウトの流動性試験には、図-3に示すJ14漏斗および流出管の長さを10, 30, 50, 70mmに変化させた5種類のJP型漏斗を使用した。それぞれの漏斗で流下時間を測定し、流動性状を評価した。

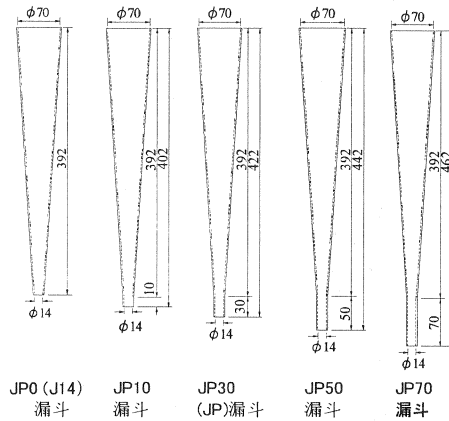


図-3 JP型漏斗の形状寸法

流動性試験は、PCグラウトの練混ぜ直後に加え、20±3℃の恒温室内で湿布を覆って30分および60分間静置した後、手練りで2~3分間練り直した後も行った。また流動性試験に使用したPCグラウトは、1.2mmのふるいを通したPCグラウトを用いた。

流動性試験方法は、漏斗の流出口を塞いでPCグラウトを漏斗の上端まで充填し、その後流出させた。そして、流出口からのグラウト流が急激に細くなるまでの時間を、流下時間として測定した。

圧縮強度試験は、JSCE-G 531-1999に従って行った。すなわち、材齢28日および91日まで湿布養生した直径が50mm、高さが100mmの円柱供試体を用いた。養生中の温度は15±5℃であった。

2.5 ブリーディングおよび収縮試験方法

写真-2および写真-3には、ブリーディングおよび収縮性状の試験の様子を示す。土木学会規準の容器方法(JSCE-F 533-1999)に従って行った。また試験は、室温を20±3℃、湿度を80%以上に保った恒温室内で行った。

ブリーディング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た。また、ブリーディング率は、(1)式を用いて算出した。収縮試験では、内径が50mm、高さが100mmの円柱形の型枠を用いた。そして収縮率の算出は、(2)式を用いた。

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

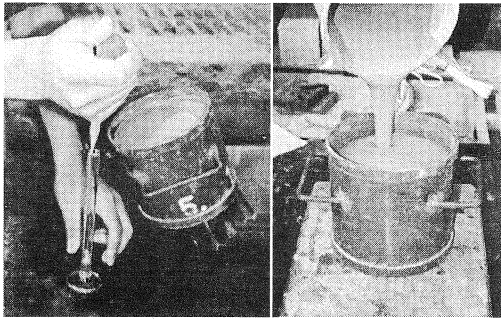


写真-2 ブリーディング試験状況

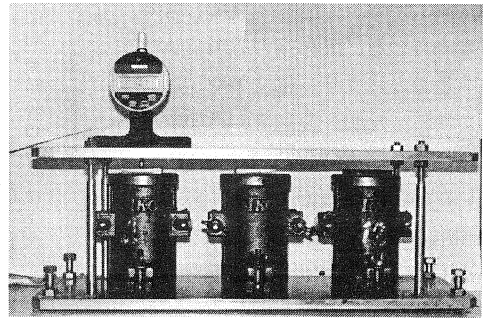


写真-3 収縮試験状況

ここに、 $B$  : 3時間経過したブリーディングによる水量 (ml)  
 $B'$  : 6時間経過したブリーディングによる水量 (ml)  
 $V$  : 試料の体積 (ml)

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

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 (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 (mm)  
 $H$  : 100 (mm)

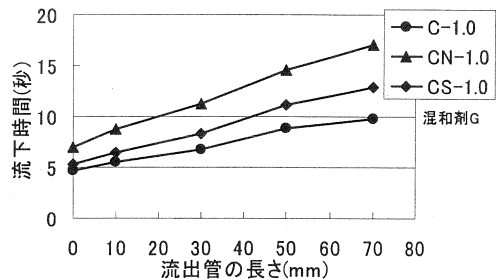


図-4 流動性 (高炉スラグ微粉末の併用)

### 3. 流動性

図-4に、練混ぜ直後の高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトの流動性試験結果を示す。横軸に流出管の長さ、縦軸に流下時間をとっている。流出管の長さにはほぼ比例して、流下時間が増加していることが確かめられた。また図-5に、JP30漏斗を用いて測定した、経過時間に伴うPCグラウトの流下時間の変化を示す。C-1.0と比較してCN-1.0とCS-1.0に示すように高炉スラグ微粉末を50%セメントと置換すると、流下時間が少し大きくなっている。また、粉末度の大きい高炉スラグ微粉末(CS-1.0)を併用しても、流下時間が特に大きくなることはなく、流下時間の経時変化にも大きな差は認められない。

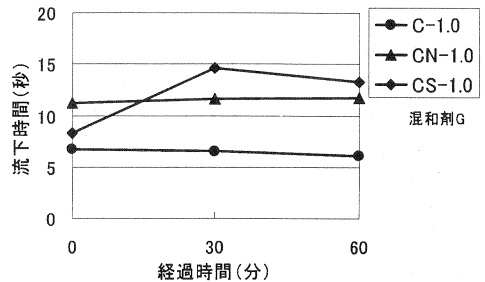


図-5 経過時間による流動性の変化

流下時間と混和剤の添加率の関係を図-6に示す。ここで用いたPCグラウトは練上がり直後のものであり、用いた漏斗はJP30漏斗である。すべての配合で、混和剤の添加量が

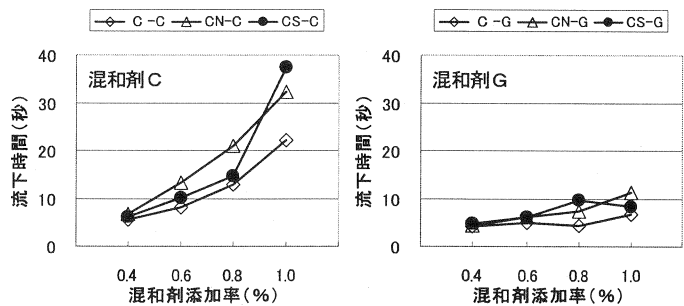


図-6 流動性 (PCグラウト用混和剤の添加率を変化)

増大すると流下時間が遅くなる傾向が見られる。特に、高炉スラグ微粉末 N および S を使用し、混和剤 C の添加量を 0.4% とした CN-0.4, CS-0.4 配合と、混和剤 C の添加量を 1.0% とした CN-1.0, CS-1.0 配合で

は、流下時間が4倍程度異なる結果となっている。混和剤の添加率が增大することにより、粘性が増したためである。なお、混和剤の添加率が流動性に及ぼす影響は、混和剤Cを用いた場合に顕著であった。また、混和剤Gを用いた配合に比べて、混和剤Cを用いた配合は、流下時間が一般に遅くなることが確かめられた。

フライアッシュを40%置換した場合における流動性試験結果の一例を図-7に示す。明らかに一括練混ぜ方法より分割練混ぜ方法の方が流動性が良いことが分かる。

これは分割練混ぜ方法により、セメント粒子と微細で球形な形をしているフライアッシュが均一に混ざり合い流動性が改善された結果である。しかし、流動性の指標であるJP30漏斗の流下時間の推奨値である13~25秒の範囲に収まる配合は、一括練混ぜ方法、分割練混ぜ方法ともに、水結合材比W/Bが高い場合にあることが確認された。

フライアッシュを併用した場合においても、混和剤Gを用いた方が混和剤Cを用いた配合に比べて流動性が良いことが確かめられた。混和剤Cを用いる場合は、分割練混ぜ方法を用いて、W/Bを高くする必要がある。

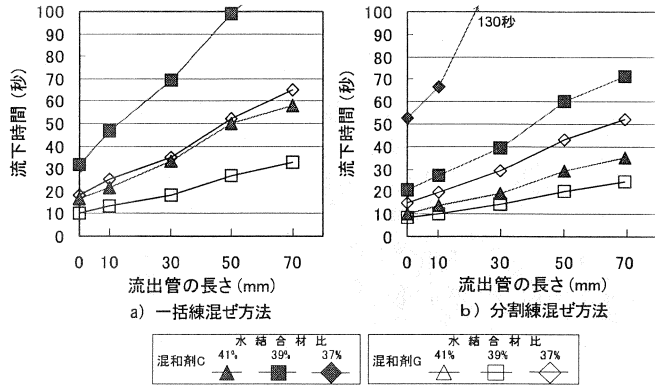


図-7 流動性 (フライアッシュの併用)

4. ブリーディング率

図-8には、高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトの3時間後と6時間後のブリーディング試験結果を示す。混和剤Gを用いた配合であって、その添加率を1.0%とした配合以外は、3時間後のブリーディング率と比較して6時間後のブリーディング率が約2倍になる傾向が見られた。

混和剤の添加率が增大するに従って、ブリーディング率が減少する傾向がある。混和剤の添加率の増加とともに、粘性が増したためである。そして、混和剤の添加率をメーカーが推奨する1.0%とした配合では、いずれもブリーディングは生じないことが、確かめられた。

6時間後のブリーディング率を、混和剤の種類ごとに図-9に示す。混和剤Cを用いた配合は、混和剤Gを用いた配合よりも、いずれもブリーディング率は小さいことが明らかになった。混和剤Cのほうが、粘性を増加させる性質が大きいためである。

そして、混和剤Cを用いた配合では、高炉スラグ微粉末を併用すると添加率が0.8%の場合でも、ブリー

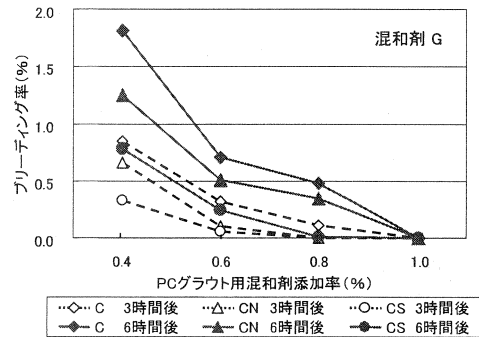


図-8 ブリーディング率 (高炉スラグ微粉末の併用)

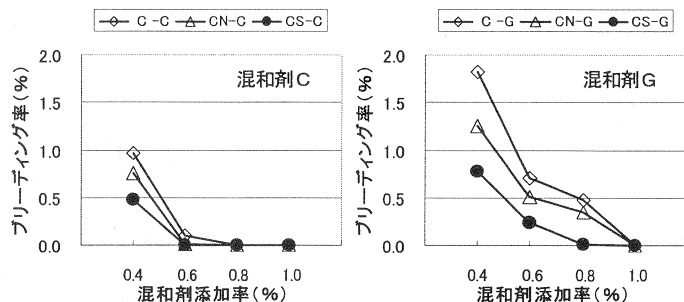


図-9 ブリーディング率 (6時間後の高炉スラグ微粉末の併用)

ーディングが発生しないことが認められる。

結合材をセメントのみとした C 配合シリーズでは、混和剤の添加率に関わらず、すべての配合において、ブリーディング率が最大となった。また反対に、比表面積が最も大きい高炉スラグ S をセメントの 50% と置換した CS 配合シリーズでは、混和剤の添加率に関わらず、すべての配合においてブリーディング率が最小となっている。結合材に比表面積が大きい材料を使用することにより、時間が経過した後も結合材と水の吸着が良いため、ブリーディング率が小さくなったためである。

### 5. 収縮率

図-10 に収縮率の経時変化の例を、また図-11 に材齢 3 日の収縮率と混和剤の添加率の関係を示す。ブリーディング試験と同様に、混和剤の添加率が增大すると収縮率が小さくなる傾向が認められる。また、ブレン値が小さい高炉スラグ N をセメントの 50% と置換し、混和剤 G の添加率を 1.0% とした CN-1.0 配合では、収縮率はほぼ 0 であった。

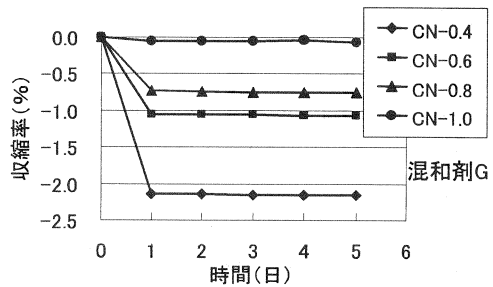


図-10 高炉スラグ N を併用した PC グラウトの収縮率

すべての配合では、収縮が 1 日でほぼ終了しており、2 日目以降にはほとんど収縮していない。そして混和剤 C を用いた配合は、混和剤 G を用いた配合よりも収縮率が小さくなる傾向が認められる。

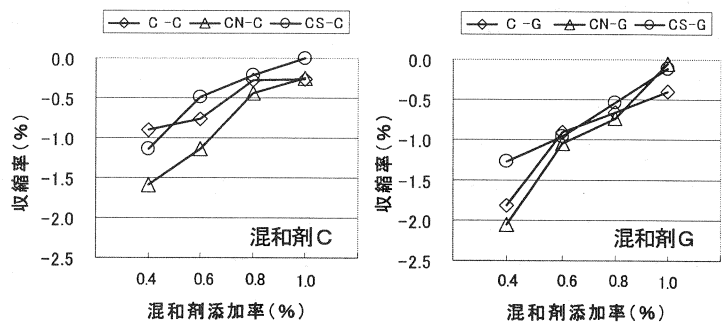


図-11 収縮率 (材齢 3 日)

混和剤の添加率を 1.0% とした配合を除くと、高微粉末の CS 配合シリーズが、混和剤の添加率に関わらず、ほとんどすべての配合において収縮率が最小となった。PC グラウトの収縮率は、発生したブリーディング量の影響を大きく受けるため、ブリーディング率が最小となった CS 配合シリーズが、収縮率試験でも収縮率が最小となったと考えられる。結合材の粉末度が収縮率に及ぼす影響も大きいことが認められた。

PC グラウトの収縮率は、発生したブリーディング量の影響を大きく受けるため、ブリーディング率が最小となった CS 配合シリーズが、収縮率試験でも収縮率が最小となったと考えられる。結合材の粉末度が収縮率に及ぼす影響も大きいことが認められた。

### 6. 圧縮強度

図-12 には、高炉スラグ微粉末を併用したすべての配合の材齢 28 日における圧縮強度の試験結果を示す。いずれの配合においても 30N/mm<sup>2</sup> 以上の強度を示している。また、結合材にセメントのみを使用した配合では、混和剤の添加率に関わらずほぼ一定の強度を示している。しかし、セメントの 50% を高炉スラグ微粉末で置換した配合では、結合材にセメントのみを使用した配合と比較して、混和剤の添加率に関わらず同等以上の強度を示し

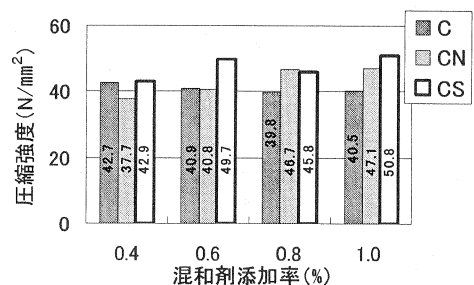


図-12 圧縮強度 (高炉スラグ微粉末の併用)

ている。特に、高微粉末の高炉スラグ微粉末を用いた CS 配合シリーズが、全ての配合において最も大きい圧縮強度を示している。

フライアッシュを併用した PC グラウトの圧縮強度を図-13に示す。全ての配合において、材齢 28 日と 91 日の強度を比較すると明らかに 91 日の強度の方が高くなっている。これは、フライアッシュ特有のポズラン反応の効果が現れたためである。材齢 28 日までの養生では、 $20\text{N/mm}^2$ は越えているものの  $30\text{N/mm}^2$ を達成する配合は少ない。91 日まで湿布養生を行うと、 $30\text{N/mm}^2$ を全ての配合が越えている。

混和剤 G を用いた場合は、一括練混ぜ方法より分割練混ぜ方法の方が強度は高くなる傾向が、水結合材比が 37%と小さい配合において見られる。しかし、混和剤 C を用いた配合ではその傾向は見られなかった。養生温度、練上がり温度などが影響すると考えられ、今後検討していく。

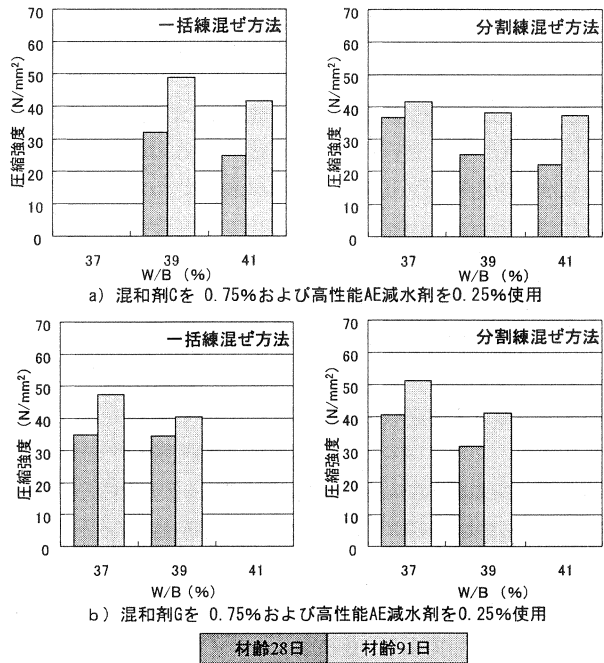


図-13 圧縮強度 (フライアッシュの併用)

7. まとめ

本研究で得られた 2 種類の高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを併用した PC グラウトの性状を、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と比較すると、以下のことが明らかになった。

- (1) セメントの 50%を高炉スラグ微粉末で置換した場合、高微粉末の高炉スラグ微粉末を併用しても流動性が少し低下するが、大きな差は認められない。
- (2) フライアッシュで 40%置換した PC グラウトは、全般的に流動性が良く、中でも混和剤 G を用いた方が流動性は良くなることが確かめられた。
- (3) セメントの 50%を高炉スラグ微粉末で置換した配合のほうが、ブリーディングの発生が抑制され、収縮率が小さくなり、また圧縮強度が向上する。
- (4) 比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を併用することにより、ブリーディング率および収縮率が抑制でき、圧縮強度が大きくなる。
- (5) 材齢 91 日まで湿布養生を行えば、フライアッシュで 40%置換した PC グラウトでも  $30\text{N/mm}^2$ 以上の圧縮強度が得られる。
- (6) 分割練混ぜ方法の方が一括練混ぜ方法よりも、流動性が改善される。

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財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 構造物の現状の問題点とその対策, 土木学会コンクリート技術シリーズ 52, pp.285-292, 2003.6