

論文 高炉スラグ微粉末を併用した PC グラウトのフレッシュおよび強度性状

藤本 謙太郎^{*1}・辻 幸和^{*2}・池田 正志^{*3}・谷口 友一^{*4}

要旨：PC グラウトのブリーディングおよび収縮性状に関する研究は、これまで多くの報告があるが、それらの測定は「ポリエチレン袋方法」によるのが一般的である。しかしながら、高性能ノンブリーディングタイプの PC グラウトの開発に伴い、この方法では測定を行うのが困難である。そこで本研究では、比較的試験方法が容易かつ精度の高い「容器方法」を用いてブリーディングおよび収縮性状の試験を行い、それらの結果および強度性状を報告する。

キーワード：高炉スラグ微粉末、容器方法、ブリーディング、収縮性状、強度性状

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、シース中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ス中の PC 鋼材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。このため、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、結合材の一部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¹⁾。

PC グラウトの品質としては、例えば、①ブリーディングが生じると、グラウトが硬化後にシース内の空隙として残ってしまうため、ブリーディングの発生がないこと、②グラウトの注入が確実にできるために、適切な流動性を有し、注入終了までその流動性を保つこと、③PC グラ

ウトの材料に腐食性物質を含まず、PC 鋼材の腐食を防止することなどが求められる。

そのため、高性能なノンブリーディングで、無収縮タイプの PC グラウトが開発された。しかし現在、ブリーディングおよび収縮性状の測定で一般的に用いられている「ポリエチレン袋方法」(JSCE-F 532-1999)では、測定の精度が限られているため、難しい状況である。

本研究では、比較的試験方法が容易かつ精度の高い「容器方法」(JSCE-F 533-1999)を用いて、ブリーディングおよび収縮性状の試験を行った。また PC グラウトの品質を向上するため、結合材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した PC グラウトを製造し使用した。その PC グラウトのフレッシュ性状および強度性状を報告する。

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、置換材料としての高炉スラグ微粉末である。高炉スラグ微粉末は、比表面積が 4230 cm²/g (以下、N と称する。)と 6250 cm²/g (以下、S と称する。)の 2 種類を使用した。また、普通

*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 工学部建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 群馬大学 工学部建設工学科 技術官 (正会員)

*4 群馬大学 工学部建設工学科

表－１ ＰＣグラウトの配合

名称	高炉スラグの種類	水結合材比 W/B(%)	セメント(g)	高炉スラグ(g)	水(g)	混和剤(g)
C-0.4		45	25000 + 0		11250	100 (0.4%)
C-0.6						150 (0.6%)
C-0.8						200 (0.8%)
C-1.0						250 (1.0%)
CN-0.4	N		12500 + 12500			100 (0.4%)
CN-0.6						150 (0.6%)
CN-0.8						200 (0.8%)
CN-1.0						250 (1.0%)
CS-0.4	S		12500 + 12500			100 (0.4%)
CS-0.6						150 (0.6%)
CS-0.8						200 (0.8%)
CS-1.0						250 (1.0%)

ポルトランドセメントの密度は 3.14 g/cm^3 ，高炉スラグ微粉末はいずれも 2.88 g/cm^3 以上であった。

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，ブリーディングの発生を防止することができる粉末状の混和剤である。

2.2 PC グラウトの配合

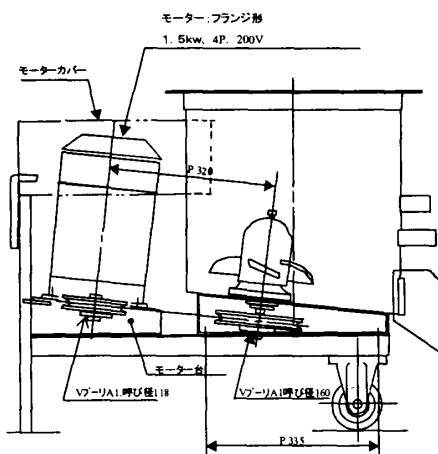
PC グラウトの配合は，水結合材比を 45% とし，高炉スラグ微粉末の置換率は 50% とした。本研究では高炉スラグ微粉末の種類および混和剤の添加量を結合材質量の 0.4%～1.0% に変化させた PC グラウトを製造した。結合材にセメントのみを用いた配合を C，セメントの 50% を高炉ス

ラグ微粉末 N で置換した配合を CN，高炉スラグ微粉末 S で置換した配合を CS と，それぞれ表記する。表－１に PC グラウトの配合を示す。なお，1 バッチの練混ぜ量は，19.2ℓ～19.5ℓであった。

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図－２に示す。

図－２に示すように，その内面に PC グラウトの円筒方向の流れを抑制する抑止版を，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



図－２ 練混ぜ槽内の様子

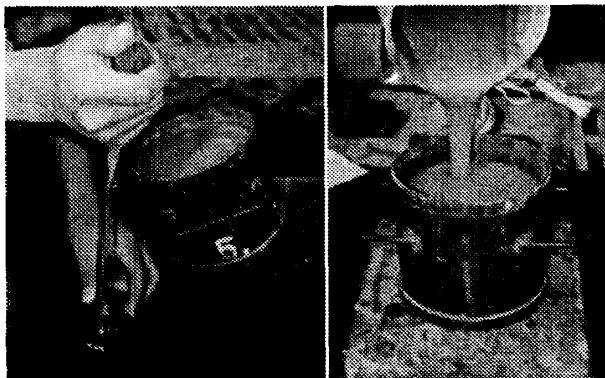


図-3 ブリーディング試験状況

2.4 ブリーディングおよび収縮試験方法

図-3および図-4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。ブリーディングおよび収縮性状の試験は、容器方法(JSCE-F533-1999)に従う方法で行った。

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了。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了。また試験は、室温を $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 、湿度を80%以上に保った恒温室内で行った。収縮率の算出は(2)式を用いた。

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

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)

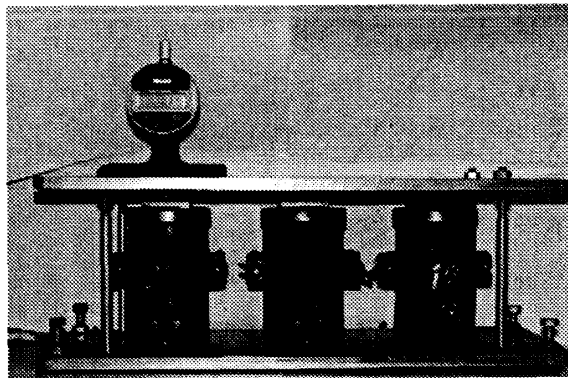


図-4 収縮試験状況

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。PC グラウトの流動性試験は、図-5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、それぞれ流下時間を測定し流動性状を評価した。なお以降は、JP 型漏斗の表記を流出管の長さに対応して、JP10, JP30, JP50, JP70 と表記する。ただし、JP30 漏斗は JP 漏斗と表記することもある。また J14 漏斗については、流出管の長さが 0mm であることから、ここでは JP0 と表記する。

流動性試験は、PC グラウトの練混ぜ直後に加え、 $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 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 分間練り直した後にも行った。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 グラウトを用了。圧縮強度試験は、JSCE-G 531-1999 に従って行った。

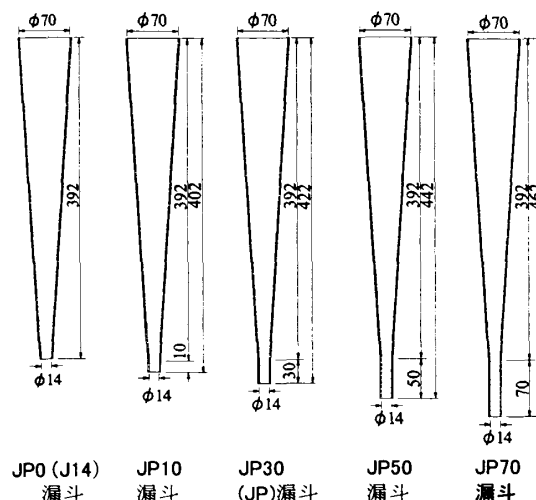


図-5 JP 型漏斗の形状寸法図

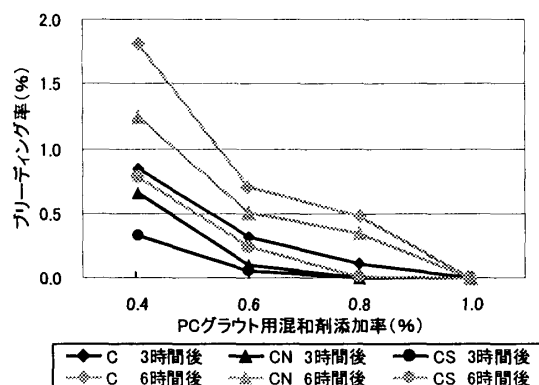


図-6 ブリーディング率

3. フレッシュ性状

3.1 ブリーディング率

図-6には、3時間後と6時間後のブリーディング試験結果を、ブリーディング率で示す。混和剤の添加率を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。

混和剤の添加率が増大するにつれ、ブリーディング率が減少する傾向がある。混和剤の添加率が増大することにより、粘性が増したためPCグラウト内に水が保留した。そのため、ブリーディング率が低下したと考えられる。

また、混和剤の添加率を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。

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と考えられる。このことから、結合材の粉末度がブリーディングに与える影響が大きいことが確かめられた。

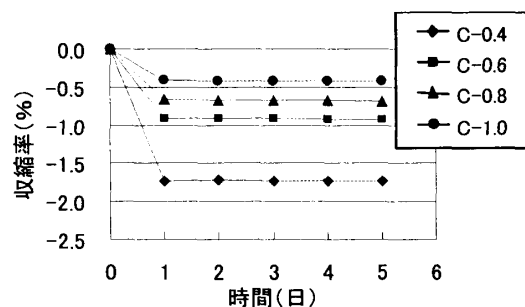
3.2 収縮率

図-7にすべての配合の収縮試験結果を示す。

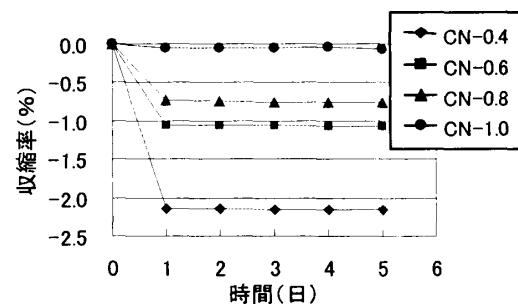
ブリーディング試験と同様に、混和剤の添加率が増大すると収縮率が小さくなる傾向が認められる。また、粉末度が小さい高炉スラグNをセメントの50%と置換し、混和剤の添加率を1.0%としたCN-1.0配合では、収縮率はほぼ0であった。

PCグラウトにブリーディングが生じ、その分もPCグラウトの沈下量に含まれるため収縮し、そのことが混和剤の添加率の影響を受けたものとして現われている。つまり、PCグラウトの収縮率は、PCグラウトに発生したブリーディング量の影響を大きく受けていると考えられる。

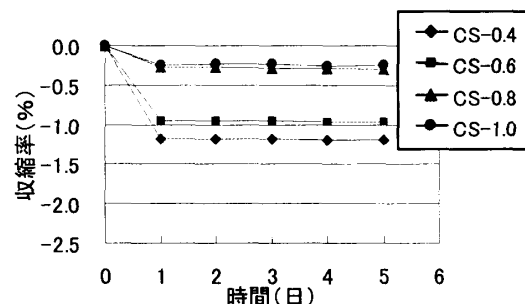
すべての配合では、収縮が1日でほぼ終了しており、2日目以降にはほとんど収縮していない。このことから、PCグラウトの収縮は自己収縮によるものより、ブリーディングの発生によ



(a) 普通ポルトランドセメントのみ使用した配合

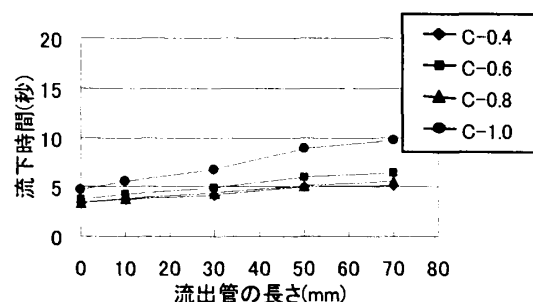


(b) セメントの50%を高炉スラグNと置換した配合

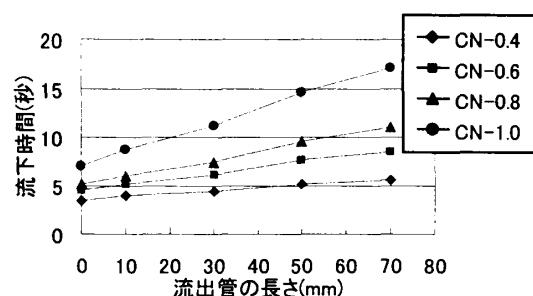


(c) セメントの50%を高炉スラグSと置換した配合

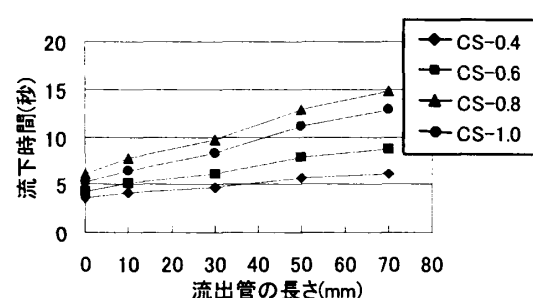
図-7 収縮率



(a) 普通ポルトランドセメントのみ使用した配合



(b) セメントの50%を高炉スラグNと置換した配合



(c) セメントの50%を高炉スラグSと置換した配合

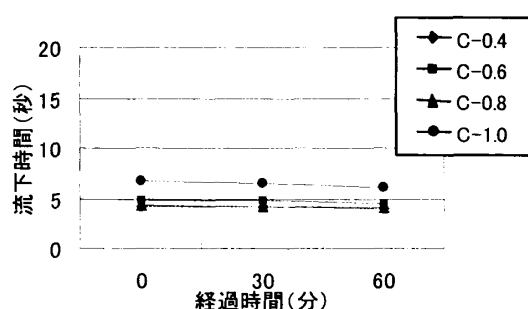
図－8 流動性

て生じる沈下による影響が大きいと考えられる。

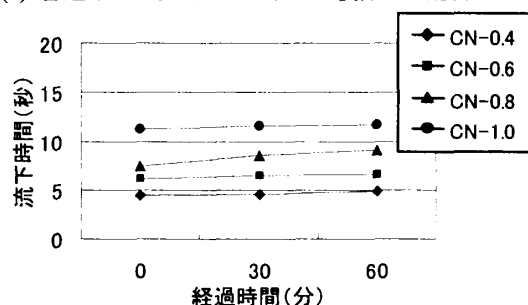
混和剤の添加率を1.0%とした配合を除くと、CS配合シリーズが、混和剤の添加率に関わらず、すべての配合において収縮率が最小となった。これは上述したように、PCグラウトの収縮率は、PCグラウトに発生したブリーディング量の影響を大きく受けるため、ブリーディング率が最小となったCS配合シリーズが、収縮率試験でも収縮率が最小となったと考えられる。このことから、結合材の粉末度が収縮率に与える影響が大きいことが認められた。

3.3 流動性試験結果

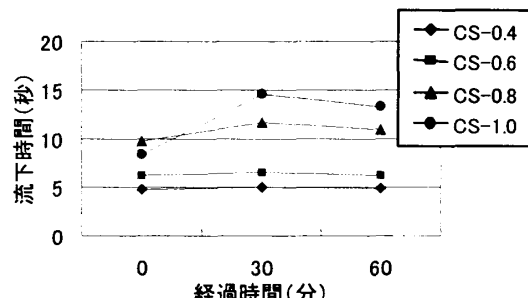
図－8に、練混ぜ直後のPCグラウトの流動性試験結果を示す。横軸に流出管の長さ、縦軸に流下時間をとっている。流出管の長さにほぼ比例して流下時間が増加していることが確かめら



(a) 普通ポルトランドセメントのみ使用した配合



(b) セメントの50%を高炉スラグNと置換した配合



(c) セメントの50%を高炉スラグSと置換した配合

図－9 経過時間による流動性の変化

れた。また図－9に、JP漏斗を用いて測定した、すべての配合の経過時間による流下時間の変化を示す。すべての配合で、混和剤の添加量が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を使用し、混和剤の添加量を0.4%としたCN-0.4配合と、混和剤の添加量を1.0%としたCN-1.0配合では、流下時間が約2倍異なる結果となっている。混和剤の添加率が増大することにより粘性が増したため、流下時間が遅くなったためである。なお、C-0.8配合およびCS-0.8配合では、これらの関係が認められなかった。C-0.8配合の練上がり温度は他の配合に比べて3℃高く、CS-0.8配合の練上がり温度は他の配合に比べて2℃低かったことの影響により、流下時間と混和剤の添加率の関係が認められなかったと思われる。

結合材にセメントのみを使用した配合は、高炉スラグを置換した配合に比べて、混和剤の添加率に関わらず流下時間が最も早い結果となった。高炉スラグ微粉末をセメントの 50%置換することにより、PC グラウトの粘性が増大し、流下時間が遅くなったためである。

結合材にセメントのみを使用した配合では、時間が経過するにつれて流動性が向上し、流下時間が少し早くなる傾向が見られる。それに比べて、高炉スラグ微粉末を置換した配合では時間が経過するにつれて、流動性が若干低下する傾向にある。しかし、すべての配合において、60 分経過後は練混ぜ直後と比較して、大きな流動性の違いがないことから、同等の流動性を保持している。このことから、高炉スラグ微粉末をセメントの 50%置換しても、比較的良好な流動性を確保できると考えられる。

4. 強度性状

図-10 には、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^2 以上の強度を示した。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た。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、混和剤の添加率が増加すると、圧縮強度も増加する傾向が認められる。

セメントの 50%を高炉スラグ微粉末で置換した配合は、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大きい強度を示した。特に、高微粉末の高炉スラグ

微粉末を用いたため、ブリーディングの発生量が最も少なかった 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た。

5. まとめ

容器方法により、高炉スラグ微粉末を併用した PC グラウトのブリーディングと収縮率を測定した結果を、圧縮強度とともに報告した。本研究の範囲内で、次のことが言える。

- (1) 結合材にセメントのみを使用した配合に比べ、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、また強度性状が向上する。
- (2) 置換材として高炉スラグ微粉末を用いた場合、比表面積がより大きい高炉スラグ微粉末を使用することにより、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。
- (3) 結合材に用いる材料に関わらず、混和剤の添加率は、ブリーディング率、収縮率、および強度性状に大きな影響を与える。
- (4) セメントの 50%を高炉スラグ微粉末で置換した場合、流動性に大きな差が認められず、結合材をセメントのみとした場合とほぼ同程度の流動性を示す。

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

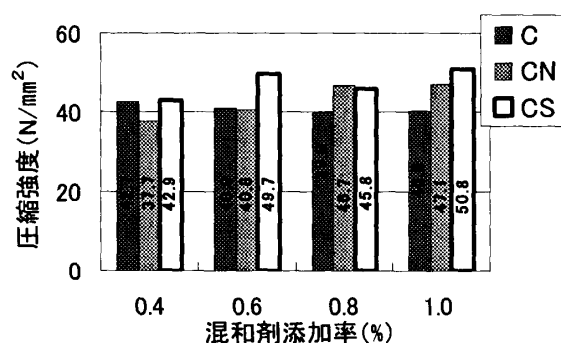


図-10 圧縮強度