

高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトの収縮およびブリーディング

群馬大学工学部 正会員 ○池田 正志
 群馬大学大学院 正会員 工博 辻 幸和
 群馬大学大学院 正会員 博士(工学) 李 春鶴
 JR東日本 藤本 晃輔

1. はじめに

シーす内に注入したPCグラウトが収縮すると、シーすとPC鋼材との付着が不完全になってしまう。またブリーディングが発生すると、ブリーディング水が蒸発した後にその部分が空隙となる。そのため、PCグラウトの収縮とブリーディングを抑えることは重要である。また、セメントよりも塩化物イオン濃度が小さい高炉スラグ微粉末でセメントの半分程度を置換することにより、PCグラウト中の塩化物イオンの総量を低減させることができ、PC鋼材の保護に有効である。加えて、高炉スラグ微粉末を用いたPCグラウトは、材料分離抵抗性が向上し、長期強度が高いなどの利点がある。

本研究は、円筒型グラウトミキサを用いて、比表面積の異なる2種類の高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトを、W/BとW₁/Bの異なる分割練混ぜ方法で製造し、収縮性状およびブリーディング性状について比較検討を行うとともに、収縮率とブリーディング率の関連性について検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

PCグラウトは、以下に示す結合材、水、およびPCグラウト用混和剤（以下、混和剤と称する）により製造した。結合材(B)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。表-1に結合材の品質を示す。普通ポルトランドセメントの比表面積は3260cm²/gである。高炉スラグ微粉末は比表面積が4130cm²/gのもの（以下、Nと称する）と、6140cm²/gのもの（以下、Sと称する）の2種類を使用した。塩化物イオン量は、普通ポルトランドセメントでは170ppm、高炉スラグ微粉末では40ppmである。

練混ぜ水は、上水道水を練上がり温度が20±3℃になるように水温を調整して使用した。

混和剤は、ノンブリーディング・高粘性型の高性能PCグラウト用混和剤を使用した。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。

表-1 結合材の品質

種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	塩化物イオン(ppm)
普通ポルトランドセメント	3.16	3260	170
高炉スラグ微粉末N	2.89	4130	40
高炉スラグ微粉末S	2.88	6140	40

2.2 配合

表-2には、PCグラウトの配合の種類を示す。W/Bは41%、43%、45%の3種類とした。また分割練混ぜにおける一次水結合材比のW₁/Bは、W/B=41%の配合ではW₁/B=36%とし、W/B=43%、45%の配合ではW₁/Bを30%、36%の2種類とした。高炉スラグ微粉末の置換率は、結合材の質量に対して

表-2 PCグラウトの配合の種類

W/B	W ₁ /B	高炉スラグ(N,S)の置換率	混和剤添加率Ad
41%	36%	0%、40%、60%	0.4%
43%	30%		0.4%、0.6%
	36%		0.4%
45%	30%		0.4%、0.6%
	36%		0.4%

40%と60%の2種類とした。混和剤の添加率は結合材質量に対して、メーカーが推奨する1.0%よりも小さい0.4%と0.6%の2種類とした。これは、W/B、W₁/B、高炉スラグ微粉末の置換率の違いによるPCグラウトのフレッシュ性状の変化を明確にするためである。

2.3 ミキサの仕様

PCグラウトの練混ぜには、300まで練混ぜ可能な円筒型グラウトミキサを使用した。写真-1 および写真-2には、ミキサの外観および練混ぜ槽内の様子をそれぞれ示す。写真-2で分かるように、練混ぜ槽の内面側壁には円周方向の流れを制御する抑止板を鉛直方向に3箇所設けてある。これにより、練混ぜ性能が従来のミキサに比べて向上されている。回転数は、1150rpmである。



写真-1 ミキサの外観



写真-2 ミキサの練混ぜ槽内

2.4 練混ぜ方法

練混ぜ方法は、すべての配合で分割練混ぜ方法とした。分割練混ぜ方法は、図-1に示すように、一次水 W₁に結合材 B と PCグラウト用混和剤 Ad を混合したものを添加した後に90秒間一次練混ぜを行う。その後、二次水 W₂を添加して、さらに90秒間二次練混ぜを行い、合計180秒間練混ぜる方法である。この分割練混ぜ方法によれば、PCグラウトのフレッシュ性状は一括練混ぜ方法に比べて改善される^{1)~3)}。

2.5 ブリーディング率および収縮率の試験方法

PCグラウトのブリーディング率試験および収縮率試験は、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている容器方法 (JSCE-F 533-1999) に従う方法で行った。収縮率試験では、図-2に示すように、マイクロメータだけでなく、レーザー変位計を用いた。

収縮率の算出には、式(1)および式(2)を用いた。

$$\text{収縮率 (マイクロメータ) (\%)} = \frac{B_0 - B_n}{H} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{収縮率 (レーザー変位計) (\%)} = \frac{B'_n - B'_0}{H} \times 100 \quad (2)$$

ここに、B₀: 基長 (mm) B₀=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 5mm

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)

B₀' : 測定開始時のレーザー変位計の測定値

B_n' : 材齢 n 分におけるレーザー変位計の測定値

H : 測定開始時の試料の高さ

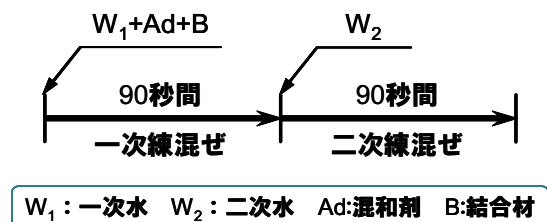


図-1 分割練混ぜ方法

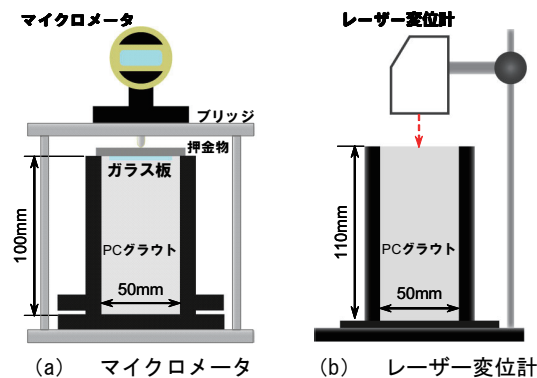


図-2 収縮率試験の概要図

3. 異なる測定方法による収縮性状

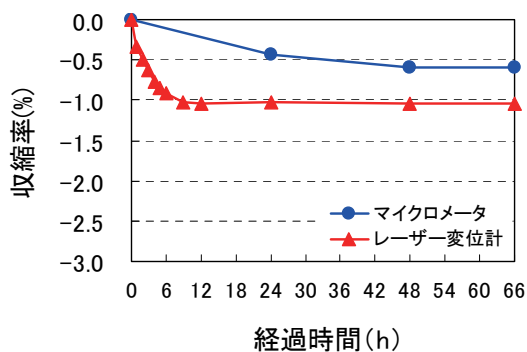
図-3には、測定方法の違いによる収縮性状を示す。セメントのみを用いて、W/Cを41%と45%とした場合である。レーザー変位計を用いた試験結果によると、測定開始から10時間ほどで収縮率は一定となっている。マイクロメータによると、2日まで収縮が継続してからその後はほぼ一定となっている。

また、測定方法の違いによって収縮率の値が異なっていることが認められる。マイクロメータを使用した試験では、試料上面にガラス板を乗せるために、構造上ブリーディング水が蒸発しにくいので、レーザー変位計を用いた収縮率試験に比べて値が小さくなっている。しかし、W/Bが45%と大きい配合では、W/Bが41%の配合に比べてガラス板の重みの影響が著しくなっており、ブリーディングが発生しやすくなったために、レーザー変位計を用いた試験よりも収縮率の値が小さくなっている。すなわち、マイクロメータを用いた試験では、ブリーディングによる影響が大きいと考えられる。そのため、以下に示す収縮率は、レーザー変位計で測定した値を使用する。

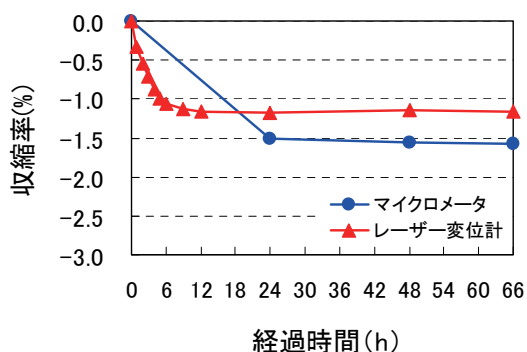
4. ブリーディング

練上がり6時間後のブリーディング率とW/Bの関係を、図-4に示す。すべての配合で、W/Bが大きいほど、ブリーディング率は大きくなっている。これは、W/Bが増加するに従い、PCグラウト中の単位水量が増加するためである。

混和剤の添加率が0.6%の配合の方が、添加率が0.4%の配合に比べて、ブリーディング率の値が小さくなる

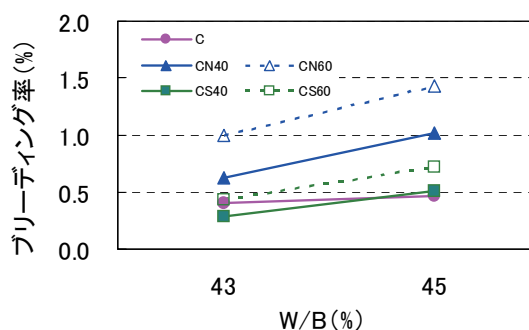


a) Cシリーズ, W/C=41%

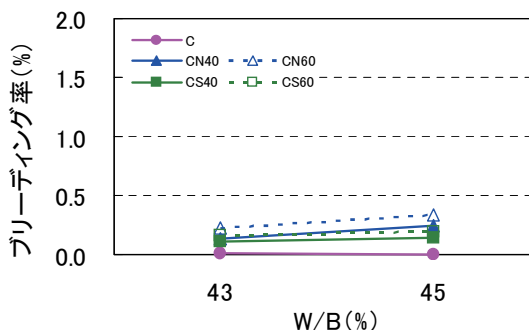


b) Cシリーズ, W/C=45%

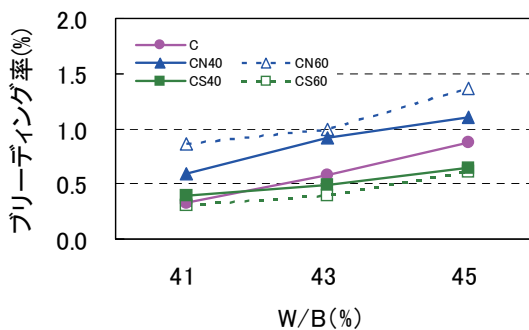
図-3 測定方法の違いによる収縮率



a) $W_1/B=30\%$, $Ad=0.4\%$



b) $W_1/B=30\%$, $Ad=0.6\%$



c) $W_1/B=36\%$, $Ad=0.4\%$

図-4 ブリーディング率とW/Bの関係

ともに、W/Bの増加に伴うブリーディングの増加する割合が小さくなっている。これは、PCグラウトの単位水量が増えても、混和剤に含まれる増粘剤の作用によってPCグラウト内部に水が閉じ込められたためである。

このことから、ブリーディングを減らすには、W/Bを小さくするよりも混和剤の添加率Adを高くしたほうが効果的であるといえる。

高炉スラグ微粉末の置換率で比較すると、一般にCN60>CN40>C≧CS60≒CS40の順で、ブリーディングが少なくなっている。粉末度の小さい高炉スラグ微粉末を用いたCNシリーズでは、置換率が60%の配合の方がブリーディングは多く発生している。

しかし、粉末度の大きな高炉スラグ微粉末を用いたCSシリーズでは、ブリーディング率がセメントのみの配合よりも減少している。これは、粉末度の高い高炉スラグ微粉末を使用したことにより、CNシリーズに比べて比表面積が増加して、結合材の粒子表面に水が多く吸着したためである。

図-5には、練上がり6時間後のブリーディング率と収縮率の絶対値を示す。ここで、W₁/Bはすべて36%である。Cシリーズでは、W/Bの増加に従いブリーディング率は増加しているのに対して、収縮率はほぼ一定である。すなわち、セメントのみの配合では、W/Bの増加とともにブリーディング水による沈下が大きくなり、水和収縮が小さくなっていると言える。

乾燥収縮の影響も考えられるが、練上がり6時間後では、まだPCグラウトの硬化は完全に終了していないので、乾燥収縮の影響はないと思われる。野口らの研究⁴⁾によれば、セメントペーストはW/Bの増加とともに水和反応が遅くなるかとされている。そのため、W/Bの増加に伴い水和収縮も遅くなり、W/Bの高い配合ではブリーディング率と収縮率の差が小さくなったと思われる。

CNシリーズも、Cシリーズと同様の傾向を示している。しかしCNシリーズにおいては、CN40-41以外の配合では、ブリーディング率より収縮率が小さくなっている。CNシリーズは、高炉スラグ微粉末で置換したことにより、Cシリーズに比べてさらに水和収縮が遅くなったためである。また、PCグラウト用混和剤

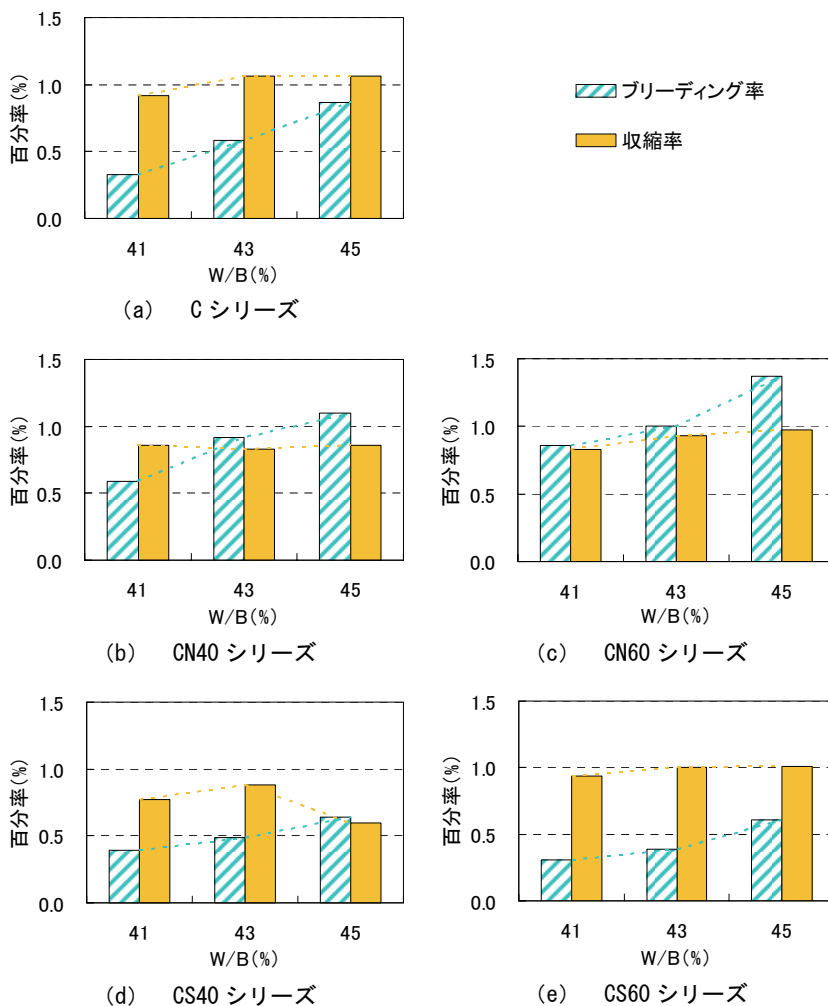


図-5 6時間後のブリーディング率と収縮率の関係

には、収縮低減作用の効果が付与されている。この混和剤の収縮低減作用の効果が、ブリーディング水の蒸発による沈下に水和収縮を加えたPCグラウト全体の収縮に勝ったために、ブリーディング率が収縮率を上回ったと思われる。

比表面積が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスの高炉スラグ微粉末の置換率が40%のCS40の収縮率は、W/B=45%で最小値になっている。CS40-41, CS40-43の両配合では、収縮率に占めるブリーディング水による沈下は、それぞれ半分程度であるが、CS40-45はブリーディング率が収縮率より大きくなっている。CSシリーズは粉末度の高い高炉スラグ微粉末を使用しているため、水和反応が速く水和収縮が大きい。しかし、W/Bの高い配合では、前述の通り水和収縮は小さくなる。

比表面積が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスの高炉スラグ微粉末の置換率が60%のCS60は、Cシリーズと同様の傾向を示している。CS60が他の高炉スラグ微粉末で置換した配合よりもCシリーズと似た傾向を示しているのは、粉末度の高い高炉スラグ微粉末で半分以上置換したことにより、水和反応の速さがセメントのみの配合と同程度になったためと言える。

図-6には、3時間後、6時間後、3日後の各時間におけるブリーディング率と収縮率の関係を、実線または破線で結んで示す。3日後のブリーディング率は、6時間後のブリーディング率を最終ブリーディング率とし、その値を用いている。W_f/Bは、いずれの配合でも36%である。

いずれのシリーズでも、6時間後までにおいてもブリーディング率よりも収縮率が大きくなるものがほとんどである。しかし、CNシリーズのW/Bが43%と45%およびCS40のW/Bが45%の配合では、ブリーディング率が収縮率よりも大きくなった。これはW/Bが大きいために、ブリーディングが著しかったことに加え、CNシリーズは水和反応が遅いため、水和収縮も遅くなったためである。このことは、CNシリーズの6時間後以降の収縮率が、他のシリーズに比べて大きく増加していることから推測できる。

3時間から6時間後のグラフの傾きは、一般にW/Bが大きいほど緩やかになり、ブリーディング率と収縮率が等しい等価線の傾きに近くなっている。これらのことは、W/Bの増加に伴い、ブリーディングの継続時間が3時間後を超えて長くなるとともに、水和反応が遅くなり、水和収縮が遅くなったことの影響が大きく現われたためと考えられる。

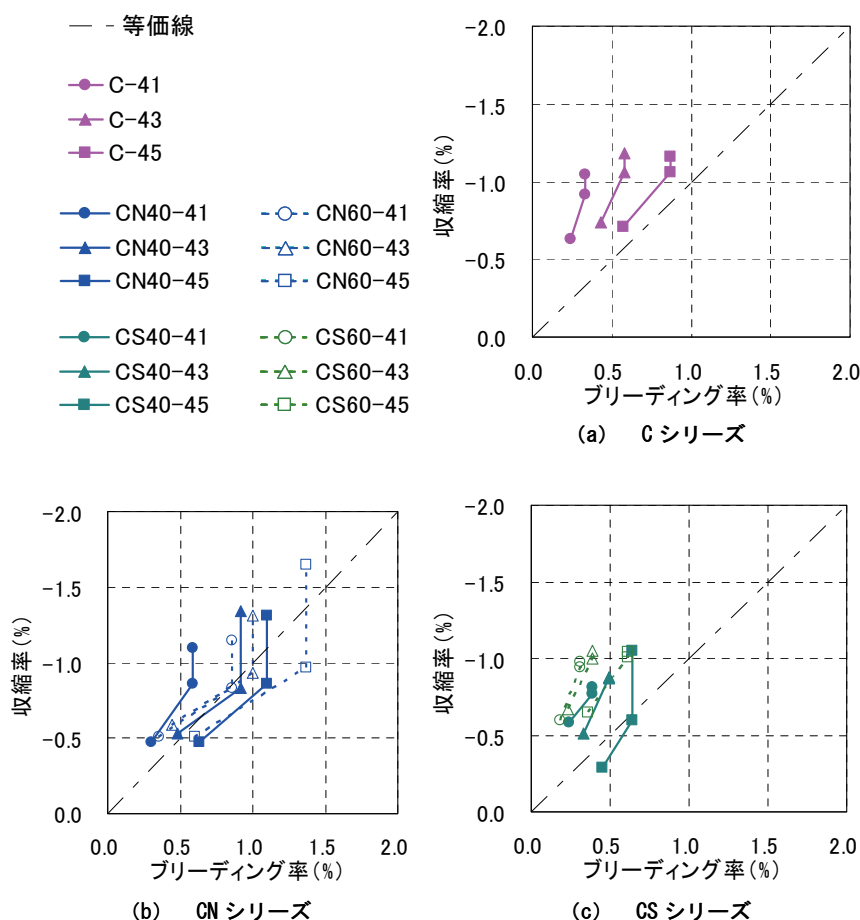


図-6 各時間におけるブリーディング率と収縮率の関係

5. まとめ

本研究では、塩化物イオンを低減するために、セメントの半分程度を比表面積の異なる2種類の高炉スラグ微粉末 N, S で置換したPCグラウトを製造して、ブリーディング率、マイクロメータおよびレーザー変位計を用いた収縮率の測定結果を報告した。練混ぜ方法は、材料を均一に練り混ぜることが可能な分割練混ぜ方法とし、W/B, W_1/B , およびPCグラウト用混和剤の添加率を要因にとった。本研究の範囲内で、以下のことが明らかになった。

- 1) 水と結合材の質量比の W/B を小さくすることで、PCグラウトの単位水量が少なくなり、それに応じてブリーディング率は小さくなる。しかし、W/B を2%減らすよりもPCグラウト用混和剤の添加率を0.2%増やしたほうが、ブリーディング率の低減には効果がある。
- 2) W/B を小さくすることで、収縮率を小さくできる。収縮率は、ブリーディング水の蒸発による体積変化によるものが大きい。
- 3) ブリーディング率と収縮率には関連性があるが、収縮にはブリーディング水の蒸発以外に水和反応の速度も影響していることを両者の比較において考慮しなければならない。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（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。本研究の実施には、当時当研究室の院生と学部学生であった諸氏に多大なご援助を頂いた。付記して、厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 辻幸和・宮崎弘毅・門倉智・広瀬晴次：分割練混ぜ方法による高粘性PCグラウトの練混ぜ効果，第54回セメント技術大会講演要旨，pp.102-103，2000
- 2) 宮前俊之・辻幸和・池田正志・大和田雅仁：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
- 3) 宮前俊之・辻幸和・池田正志・広瀬晴次：分割練混ぜ方法による高粘性PCグラウトの製造，第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.763-768，2001
- 4) 野口康成・原田宏・大門正機：ポルトランドセメントペーストの水和収縮に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.52-57，1994