

論文 PC グラウトのブリーディングおよび収縮性状

池田 正志*1・山口 光俊*2・李 春鶴*3・辻 幸和*4

要旨：本研究は、円筒型グラウトミキサを用いて、分割練混ぜ方法と一括練混ぜ方法により、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を併用したPCグラウトを製造し、そのブリーディング率、マイクロメータおよびレーザー変位計を用いた収縮率を測定した結果について、両者の関連性とともに関連性について検討を行った結果を報告する。そして、水結合材比を小さくすることで、ブリーディング率および収縮率を小さくできること、また、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などを報告する。

キーワード：PCグラウト、ブリーディング、収縮、高炉スラグ微粉末、分割練混ぜ、レーザー変位計

1. はじめに

シース内に注入したPCグラウトにブリーディングが生じ、凝結硬化の過程で収縮すると、シースとPC鋼材との付着が不十分になってしまう。そのため、PCグラウトのブリーディングと収縮を抑えることは重要である。高炉スラグ微粉末をセメントの半分程度置換すると、PCグラウトの材料分離抵抗性が向上し、長期強度が高くなる場合がある。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は、PCグラウトの塩化物イオン量を低下させる利点もある。

本研究は、円筒型グラウトミキサを用いて、水結合材比W/Bおよび一次水結合材比W₁/Bの異なる分割練混ぜ方法と一括練混ぜ方法により、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グラウトを製造し、そのブリーディング性状および収縮性状について、これまで検討されていない両者の関連性を主体に報告する。

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。高炉スラグ微粉末には、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であり、高炉スラグ微粉末では約1/4の40ppmであった。

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。

PCグラウト用混和剤(以下、混和剤と称する。)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。その主成分は、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 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。また練混ぜには、一括練混ぜ方法および一次水結合材比W₁/Bを変えた分割練混ぜ方法を用いた。すなわち、分割練混ぜ方法では、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種類に変化させた。高炉スラグ微粉末の置換率は、結合材の質量に対し

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(Ad)の添加率
41%	36%	0%, 40%, (50%), 60%	0.4%
43%	30%		0.4%, 0.6%
	36%		0.4%
45%	30%		0.4%, 0.6%, 0.8%
	36%		0.4%

(): 一括練混ぜ方法のみ

表-1 結合材の品質とシリーズの名称

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

*1 群馬大学 工学系技術部技術専門職員 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 工修 (正会員)

*3 群馬大学大学院 工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*4 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

て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%を主とし、一部0.8%と1.0%についても行った。これは、W/B、W₁/B、および高炉スラグ微粉末の置換率の違いによるPCグラウトのブリーディングと収縮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、モーターを水平面に15度傾けて、60mmの偏心をとって配置している。また内径が420mmの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。これらにより、練混ぜ性能が従来のミキサに比べて向上さ



写真-1 ミキサの外観



写真-2 ミキサの練混ぜ槽内

れている。回転数は、1150rpmである。

2.4 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とした。練混ぜ時間は180秒と一定にし、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。ブリーディング試験状況を、写真-3に示す。ブリーディング率は、式(1)および式(2)を用いた。

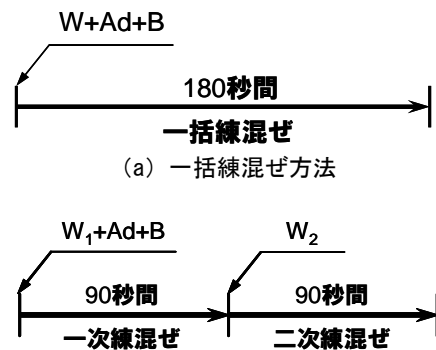
$$3 \text{ 時間後のブリーディング率}(\%) = \frac{B}{V} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{最終ブリーディング率}(\%) = \frac{B'}{V} \times 100 \quad (2)$$

ここに、B:3時間後のブリーディングによる水量(ml)

B':6時間後のブリーディングによる水量(ml)

V:試料の体積(ml)



W₁:一次水 W₂:二次水 Ad:混和剤 B:結合材

(b) 分割練混ぜ方法

図-1 練混ぜ方法



1) 試料の採取



2) ブリーディング水の採取



3) メスシリンダーによる測定

写真-3 ブリーディング試験の状況

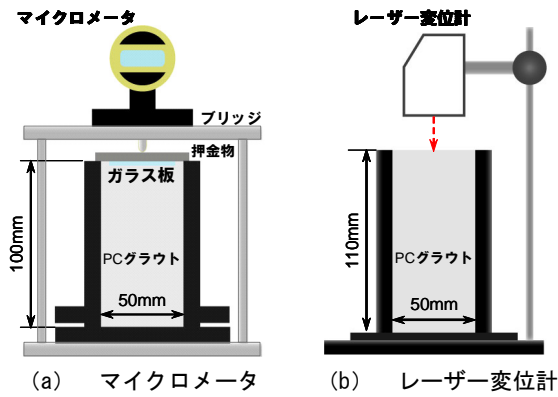


図-2 収縮率試験の概要図

収縮率試験では、図-2 に示すように⁴⁾、マイクロメータだけでなく、レーザー変位計も用いた。収縮率の算出には、式 (3) および式 (4) を用いた。

$$\text{収縮率(マイクロメータ)}(\%) = \frac{B_0 - B_n}{H} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{収縮率(レーザー変位計)}(\%) = \frac{B_n' - B_0'}{H} \times 100 \quad (4)$$

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 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)

B_0' : 測定開始時のレーザー変位計の測定値

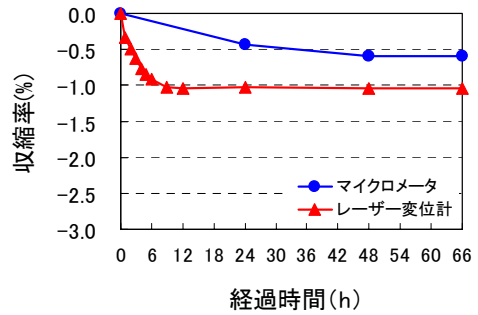
B_n' : 材齢 n 日におけるレーザー変位計の測定値

H : 測定開始時の試料の高さ

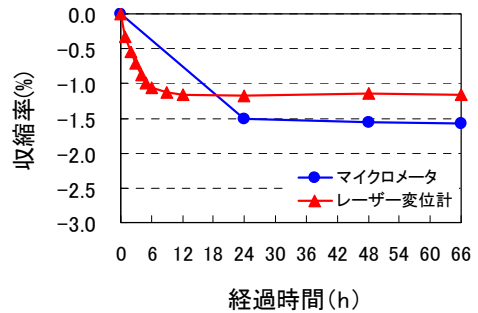
3. 異なる測定方法による収縮性状

測定方法の違いによる収縮性状を、図-3 に示す。セメントのみを用いて、 W/C を 41% と 45% とし、 $W_1/C = 36\%$ 、 $Ad = 0.4\%$ とした分割練混ぜの場合である。マイクロメータを用いた試験結果は、1日を経て、2日まで収縮が継続し、その後はほぼ一定となっている。レーザー変位計によると、測定開始から10時間ほどで収縮率はほぼ一定となっている。

また測定方法の違いによって、収縮率の値そのものが異なっている。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、上面に浮き上がったブリーディング水がガラス板により蒸発しにくいため、レーザー変位計を用いた収縮率試験に比べて収縮率の値が小さくなると考えられる。しかし、 W/B が 45% と軟らかい配合では、 W/B が 41% の配合に比べてガラス板の重みの及ぼす影響が著しくなって、ブリーディング水そのものが発生しやすくなってガラス板の沈下量がブリーディング水の蒸発を防止する影響よりも著しくなる。その

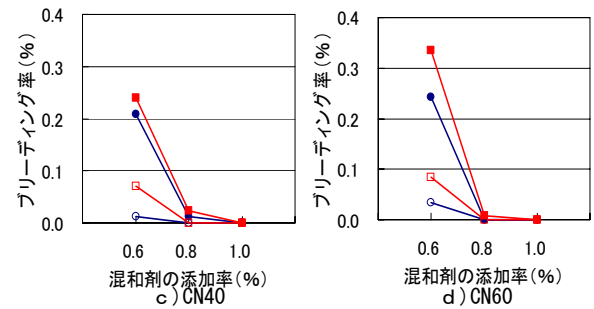
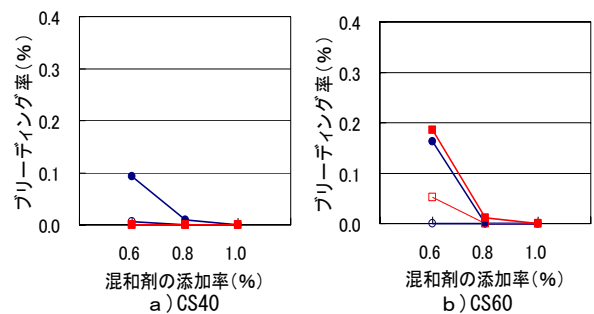


a) Cシリーズ, $W/C=41\%$



b) Cシリーズ, $W/C=45\%$

図-3 測定方法の違いによる収縮率



	3時間後	6時間後
一括	○	●
分割	□	■

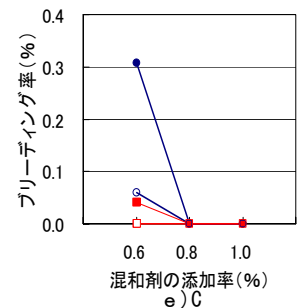


図-4 練混ぜ方法の異なるブリーディング率

ために、レーザー変位計を用いた試験よりも収縮率の絶対値が大きくなったと考えられる。このように、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

図-4には、一括練混ぜ方法と分割練混ぜ方法によって製造したPCグラウトの、混和剤の添加率と3時間後および6時間後のブリーディング率との関係について、図-5には、高炉スラグ微粉末の置換率とブリーディング率の関係についてそれぞれ示す。

分割練混ぜ方法では、一括練混ぜ方法と同様に、混和剤の添加率が減少すると、ブリーディング率が増加している。また、粉末度が最も大きいCSシリーズが、最もブリーディング率が小さくなった。

混和剤の添加率が1.0%の配合は、すべてのシリーズにおいて、3時間後および6時間後のブリーディング率が0%になった。また、混和剤の添加率が0.8%の配合でも、すべてのシリーズが、3時間後のブリーディング率が0%になり、6時間後のブリーディング率も非常に小さくなっている。混和剤の添加率が0.6%の配合では、Cシリーズは分割練混ぜ方法のほうが、ブリーディング率は抑えられているが、それ以外の配合は、一括練混ぜ方法と同程度か少し大きい結果となった。

混和剤の添加率が1.0%、0.8%では高炉スラグ微粉末

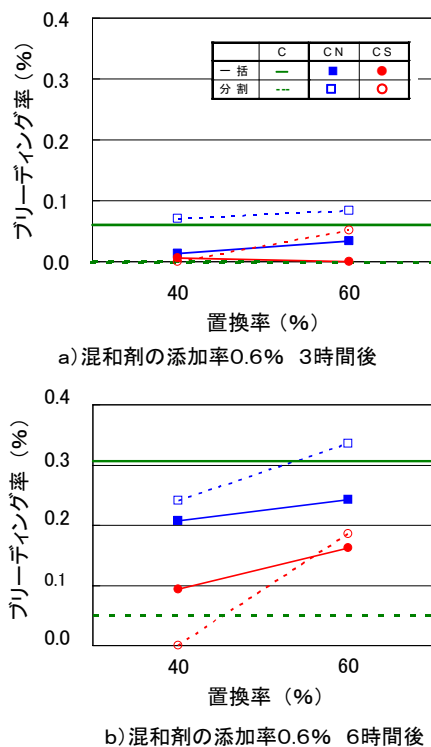


図-5 高炉スラグ微粉末の置換率とブリーディング率の関係

の置換率による変化は認められなかったが、図-5に示すように、混和剤の添加率が0.6%では、置換率が60%よりも40%の配合のほうがブリーディング率を抑えられた。

図-6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。ここですべて、Adは0.4%、W₁/Bは36%の分割練混ぜの場合である。

Cシリーズのセメントのみの配合では、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、W/Bが増加すると、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考えられる。練上がり6時間後まででは、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⁵⁾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とされている。そのため、W/Bの高い配合では水和収縮が遅くなり、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シリーズとブリーディング率は同様の傾向を示している。しかしながら、CN40のW/Bが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。高炉スラグ微粉末N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。

比表面積が6000cm²/gクラスの高炉スラグ微粉末Sの置換率が40%のCS40の収縮率は、W/B=45%で最小値に

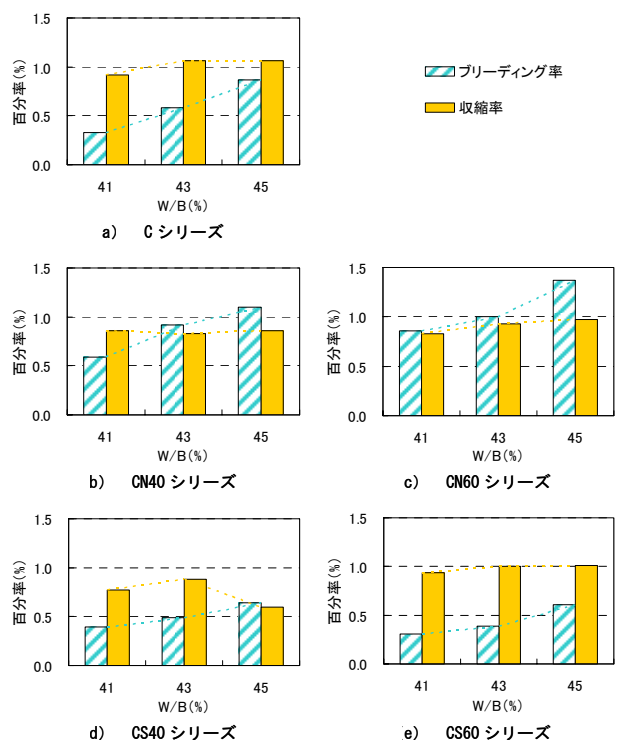


図-6 6時間後のブリーディング率と収縮率の関係

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少し大きくなっている。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ったと考えられる。

高炉スラグ微粉末 S 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 が他の比表面積の小さい高炉スラグ微粉末 N 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置換したことにより、水和反応の速度が速くなり、セメントのみの配合に近くなったためと言える。

図-7 には、3 時間後および 6 時間後のブリーディング率と収縮率との関係を示す。混和剤の添加率を変化させている。3 時間後と 6 時間後のプロットは、実線または破線で結んでいる。

混和剤の添加率 Ad が減少すると、ブリーディング率が大きくなる直線となることが認められる。混和剤の添加率が 1.0% のすべての配合では、3 時間後の収縮率は規定値である $\pm 0.5\%$ を満たしているが、6 時間経過後の収縮率では満たしていない。また、すべての配合において、6 時間後のブリーディング率が 0% の配合以外は、3 時間後から 6 時間後のブリーディング率と収縮率は増加している。このことは、ブリーディング量が収縮に大きな影響を及ぼしていることを示す。また、混和剤の添加率が 0.8% では、添加率 0.6% の配合に比べ直線の傾きが急で

あるのは、ブリーディングが著しく抑えられたことによる。

高炉スラグ微粉末 S を置換した CS シリーズのほうが、ブリーディング率と収縮率が抑えられている。しかし 3 時間後では、混和剤の添加率が 1.0% の場合は、セメントのみでもブリーディングとともに収縮率も小さくなって、CS シリーズや CN シリーズとほぼ同程度の収縮率を示している。

以上のことより、レーザー変位計を用いて測定すれば、収縮率の経時変化や、結合材の違いによる収縮の変化の様子が明確にでき、ブリーディング率と収縮率の関係も求められる。

図-8 には、同じく 3 時間後、6 時間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示す。いずれの配合とも、 W_1/B は 36% の分割混ぜを行った PC グラウトで、混和剤添加率が 0.4% と非常に少量の場合である。

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配合がほとんどである。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ている。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に、水和収縮が小さかったためである。

3 時間から 6 時間後の直線の傾きは、W/B が大きいほど一般に緩やかになる。そして、ブリーディング率と収縮率が等しい等価線に近づいている。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

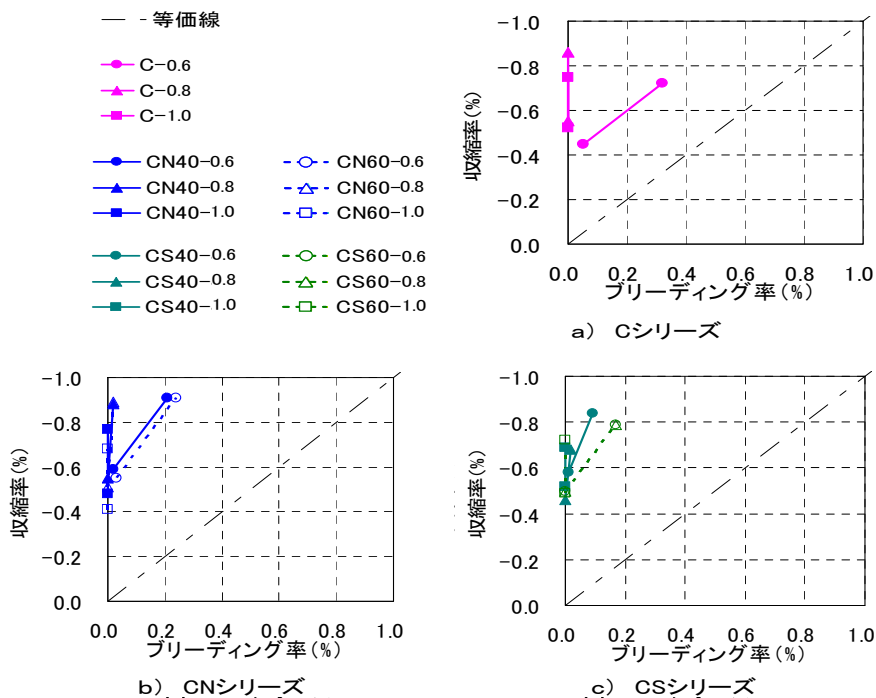


図-7 ブリーディング率と収縮率の関係 (PCグラウト用混和剤の添加率を変化)

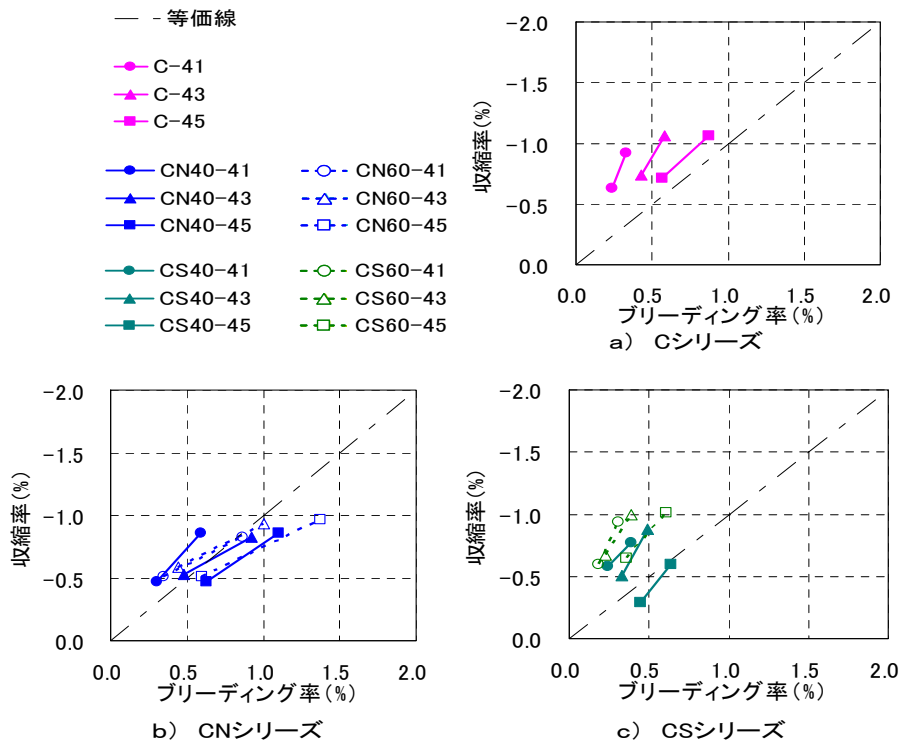


図-8 ブリーディング率と収縮率の関係（分割練混ぜ方法）

後を超えて長くなるとともに、水和反応が遅くなり、水和収縮が小さ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。

5. まとめ

本研究では、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、これまで報告がないブリーディング率とレーザー変位計を用いた収縮率の相互関係を報告した。練混ぜ方法は、一括練混ぜ方法と分割練混ぜ方法とし、W/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、収縮率を一般には小さくできる。収縮率は、ブリーディング水による体積変化によるものが大きいと考えられる。しかしながら、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を用いると、収縮率は W/B の減少とともに小さくならない配合もあった。
- 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) 池田正志, 辻幸和, 李春鶴, 藤本晃輔: 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, 第 17 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.403-408, 2008
- 5) 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