

論文 高炉スラグ微粉末の併用により塩化物イオン量を低減した PC グラウトの製造

山口 光俊^{*1}・李 春鶴^{*2}・辻 幸和^{*3}・池田 正志^{*4}

要旨: 普通ポルトランドセメントの JIS が 2003 年 11 月に改正された。緩和された塩化物イオン量を有するセメントを用いた PC グラウトの塩化物イオン量を低減するために、比表面積が異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントに対して 50%置換した PC グラウトを製造した。流動性やブリーディング率、圧縮強度などの物性の改善のため、2 種類の PC グラウト用混和剤をそれぞれ 4 種類の添加率を用いることで、それらの影響を把握した。その結果、高炉スラグ微粉末の比表面積、PC グラウト用混和剤の種類や添加率を組み合わせることにより、高性能・高品質の PC グラウトを製造できることが明らかになった。

キーワード: 塩化物イオン、高炉スラグ微粉末、PC グラウト用混和剤、流動性、ブリーディング、圧縮強度

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量は、その許容値が 2003 年 11 月の JIS R 5210 の改正により 200ppm から 350ppm に緩和¹⁾されたことに伴い、近年増加している。PC グラウトの塩化物イオン含有量を低減して PC 鋼材の耐久性を向上させるため、結合材の一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換する研究^{2),3),4)}などが実施されている。

PC グラウトの要求品質としては、ブリーディングが生じると、PC グラウトの硬化後にシーす内にブリーディング水が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、PC グラウトの注入が確実にできるため、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、PC グラウトの材料に腐食性物質を有害量含まず、PC 鋼材の腐食を防止することなど⁵⁾が挙げられる。高品質の PC グラウトの製造にあたっては、高炉スラグ微粉末の種類および PC グラウト用混和剤の種類と添加率が及ぼす影響についての把握が喫緊の課題である。

本研究では、塩化物イオン量を低減するために、普通ポルトランドセメントに対して、比表面積の異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末を 50%置換した PC グラウトを、PC グラウト用混和剤の種類と添加率を変化させて製造した結果を報告する。そして、流動性、ブリーディング、沈下、圧縮強度について、高炉スラグ微粉末を併用することの有効性と課題を提示する。

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、その置換材料としての JIS A 6206 に適合する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 4230cm²/g (以下、P と称する。) と 6250cm²/g (以下、S と称する。) の 2 種類を使用した。密度は、普通ポルトランドセメントが 3.14 g/cm³、2 種類の高炉スラグ微粉末はいずれも 2.88g/cm³であった。

PC グラウト用混和剤として、メラミン系高性能減水剤、増粘剤を主成分とする混和剤(以下、混和剤 C と称する)、およびメラミンスルホン酸系化合物、水溶性高分子エーテル系化合物を主成分とする混和剤(以下、混和剤 G と称する)の 2 種類を使用した。なお、いずれの混和剤もノンブリーディング高粘性タイプである。また、混和剤の添加率を質量で結合材量の 0.4~1.0%に変化させた。混和剤メーカーの推奨する添加率はいずれも 1.0%であるが、ブリーディングの抑制や流動性への影響程度を検討するため、推奨値よりも少量を、レベルを変化させて用いた。

2.2 PC グラウトの配合

表-1 には、2 種類の PC グラウト用混和剤を用いて、PC グラウトの 1 バッチの配合を示す。表-1 の配合名の前半の英語文字は結合材の種類を示し、後半の数値は PC グラウト用混和剤の添加率を示す。すべての配合は、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。結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた配合を CC、普通ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 P で置換した配合を CP、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。1 バッチの練混ぜ量は、19.2L~19.5L であった。

*1 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)

*2 群馬大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

*4 群馬大学 工学系技術部技術専門職員 (正会員)

表-1 PC グラウトの配合

配合名	高炉スラグ 微粉末の 種類	水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ 微粉末の 置換率 S_g/B (%)	セメント C (kg)	高炉スラグ 微粉末 S_g (kg)	水 W (kg)	PC グラウト用 混和剤	
							使用量 Ad (g)	添加率 Ad/B (%)
CC-0.4	—		0	25.00	0	11.25	100	0.4
CC-0.6							150	0.6
CC-0.8							200	0.8
CC-1.0							250	1.0
CP-0.4	P	45	50	12.50	12.50		100	0.4
CP-0.6							150	0.6
CP-0.8							200	0.8
CP-1.0							250	1.0
CS-0.4	S						100	0.4
CS-0.6							150	0.6
CS-0.8							200	0.8
CS-1.0							250	1.0

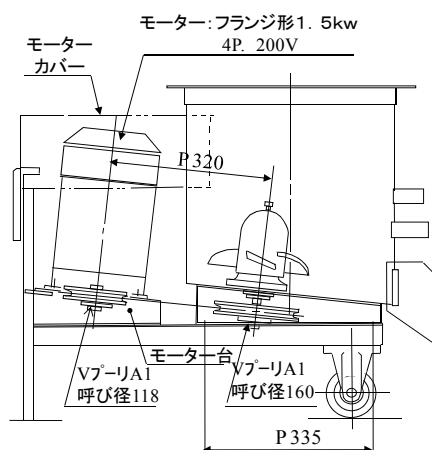


図-1 ミキサの形状



写真-1 ミキサの外観



図-2 JP 漏斗の形状と寸法



写真-2 練混ぜ槽内の様子

2.3 練混ぜ方法

PC グラウトの練混ぜは、一括練混ぜ方法を用いた。ミキサは 30L の容量まで練混ぜが可能なものを使用し、練混ぜ時間は 180 秒とした。

ミキサの形状を図-1 に、外観を写真-1 に、そして練混ぜ槽内の様子を写真-2 に示す。著者らが開発したいわゆる丸型の PC グラウトミキサである。図-1 に示すように、モーターを水平より 15°傾け、内径が 420mm の円筒にその中心より 60mm 偏心して配置している。また、写真-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。これらの配置により練混ぜ性能が、従来型の角型のミキサに比べて向上している。なお、ミキサの回転数は、角型のミキサとほぼ同じであり、通常は 1150rpm を用いている。

2.4 流動性試験方法

流動性試験は、JSCE-F 531-1999 に従って行った。図-2 に JP 漏斗の形状と寸法を示す。流下時間は、PC グラウトを流出させ、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測定した。



写真-3 プリーディング試験の状況



写真-4 収縮試験の状況

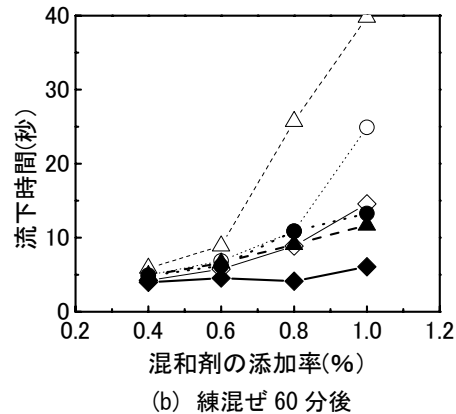
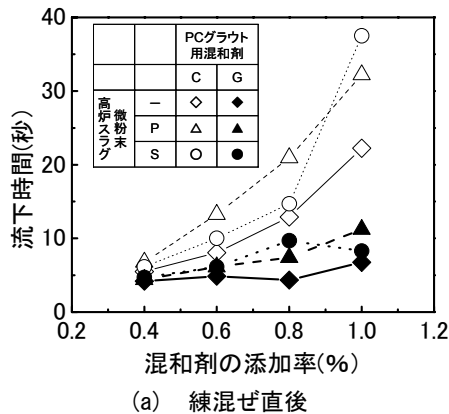


図-3 流動性

流動性試験は、PC グラウトの練混ぜ直後に加え、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室内で湿布を覆って 60 分間静置した後、手練りで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 のふるいを通過した PC グラウトを用いた。

2.5 プリーディングおよび収縮試験方法

写真-3 および写真-4 には、プリーディングおよび収縮性状の試験の様子を示す。プリーディングおよび収縮性状の試験は、容器方法 (JSCE-F533-1999) に従って行った。

プリーディング試験に用いた容器は、内径が 140 mm、内高が 130 mm の水密性のものを用いた。プリーディング率は、式(1)を用いて算出した。

$$P_i = \frac{B_i}{V} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 P_i : i 時間後のプリーディング率(%), B_i : i 時間後のプリーディングによる水量 (ml), i : 練混ぜ後経過時間 (=3, 6h), V : 容器の容積 (ml) である。

収縮試験では、内径が 50mm、高さが 100 mm の円柱形の型枠を用いた。また試験は、室温を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度を 80%以上を保った恒温室内で行った。収縮率の算出は、式(2)を用いた。

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \frac{B_0 - B_n}{H} \times 100 \\ B_0 = A + t \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 ε_n : 材齢 n 日における収縮率(%), B_0 : 基長 (mm), 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上面までの深さの平均値 (mm), H : 型枠の高さ (=100 (mm)) である。

2.6 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は、JSCE-G 531-1999 に準じて、材齢 28 日の養生とともに、材齢 91 日養生の供試体についても行った。養生中の平均気温は 20°C であった。

3. フレッシュ性状

3.1 流動性

流下時間と PC グラウト用混和剤の添加率の関係を図-3 に示す。図-3(a) と (b) は、それぞれ練混ぜ直後と練混ぜ後 60 分経過した時のものである。流下時間は、PC グラウト用混和剤の添加率を増加させると、長くなる傾向が認められる。これは、PC グラウト用混和剤の添加率の増加に伴い PC グラウトの粘性が増したためである。また、混和剤 C を用いた配合は、混和剤 G を用いた配合に比べて、流下時間が長くなるとともに、PC グラウト用混和剤の添加率が及ぼす影響が著しいことも認められる。

セメントのみを使用した CC 配合は、高炉スラグ微粉末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短い結果となった。これは、セメントよりも比表面積の大きい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したためである。ただし、PC グラウト用混和剤の添加率が小さい場合は、高炉スラグ微粉末を 50% 置換したことによ

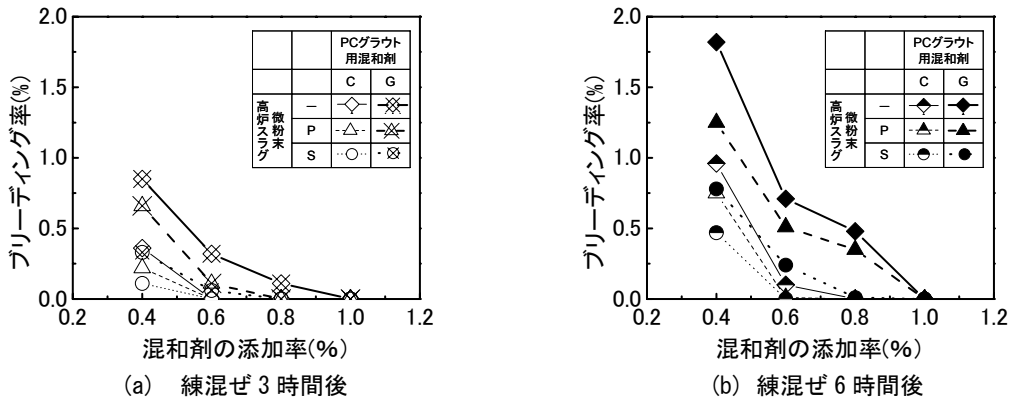


図-4 ブリーディング率(異なる練混ぜ後経過時間)

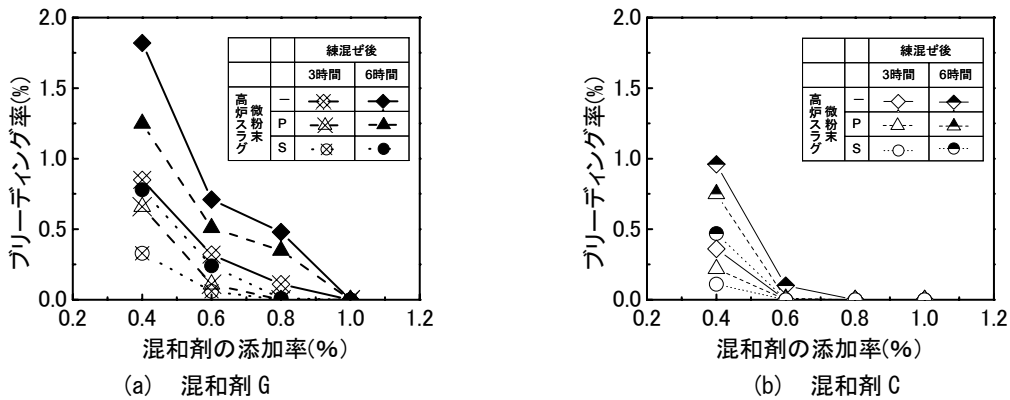


図-5 ブリーディング率(異なるPCグラウト用混和剤)

っても、PCグラウトの流動性を低下させる影響が顕著ではない配合もあった。また、高炉スラグ微粉末Pで置換したCP配合シリーズと高炉スラグ微粉末Sで置換したCS配合シリーズでは、流動性に大きな変化は無く、高炉スラグ微粉末の比表面積が流動性に及ぼす影響は小さかった。

以上より、高炉スラグ微粉末をセメントの50%置換しても、各PCグラウト用混和剤によって適切な添加量を決定することで、比較的良好な流動性を確保できると考えられる。

3.2 ブリーディング率

図-4には、練混ぜ後3時間と6時間経過したPCグラウトのブリーディング率をそれぞれ示す。また、PCグラウト用混和剤別のブリーディング率を、図-5に示す。添加率を1.0%とした配合はいずれも、6時間後においてもブリーディングは生じていない。

図-4に示すように、セメントのみを使用したCC配合シリーズでは、PCグラウト用混和剤の添加率に関わらず、すべての配合シリーズにおいて、ブリーディング率が最大となった。一方、比表面積が最も大きい高炉スラグ微粉末Sをセメントの50%置換したCS配合シリーズでは、PCグラウト用混和剤の添加率に関わらず、すべての配合シリーズ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、時間が経過した後において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、結合材の比表面積がブリーディングに及ぼす影響が大きいことが確かめられた。

図-5に示すように、2種類のPCグラウト用混和剤はともに、添加率が増加するに伴い、ブリーディング率が減少する傾向がある。これは、PCグラウト用混和剤の添加率が増加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、そのためブリーディング率が低下したと考えられる。PCグラウト用混和剤Cを使用した場合には、PCグラウト用混和剤Gを使用した場合に比べて、流動性は悪くなるものの、PCグラウト用混和剤の添加率を少なくしても、ブリーディングを抑えることが出来る。

PCグラウト用混和剤Gを使用した場合、添加率を1.0%とした以外の配合において、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大きく、約2倍になる傾向が認められた。また、ブリーディング率が0%になる配合は、添加率が1.0%のみであった。混和剤Cを使用した場合には、添加率を0.4%とした配合のみ、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倍になる傾向が認められた。

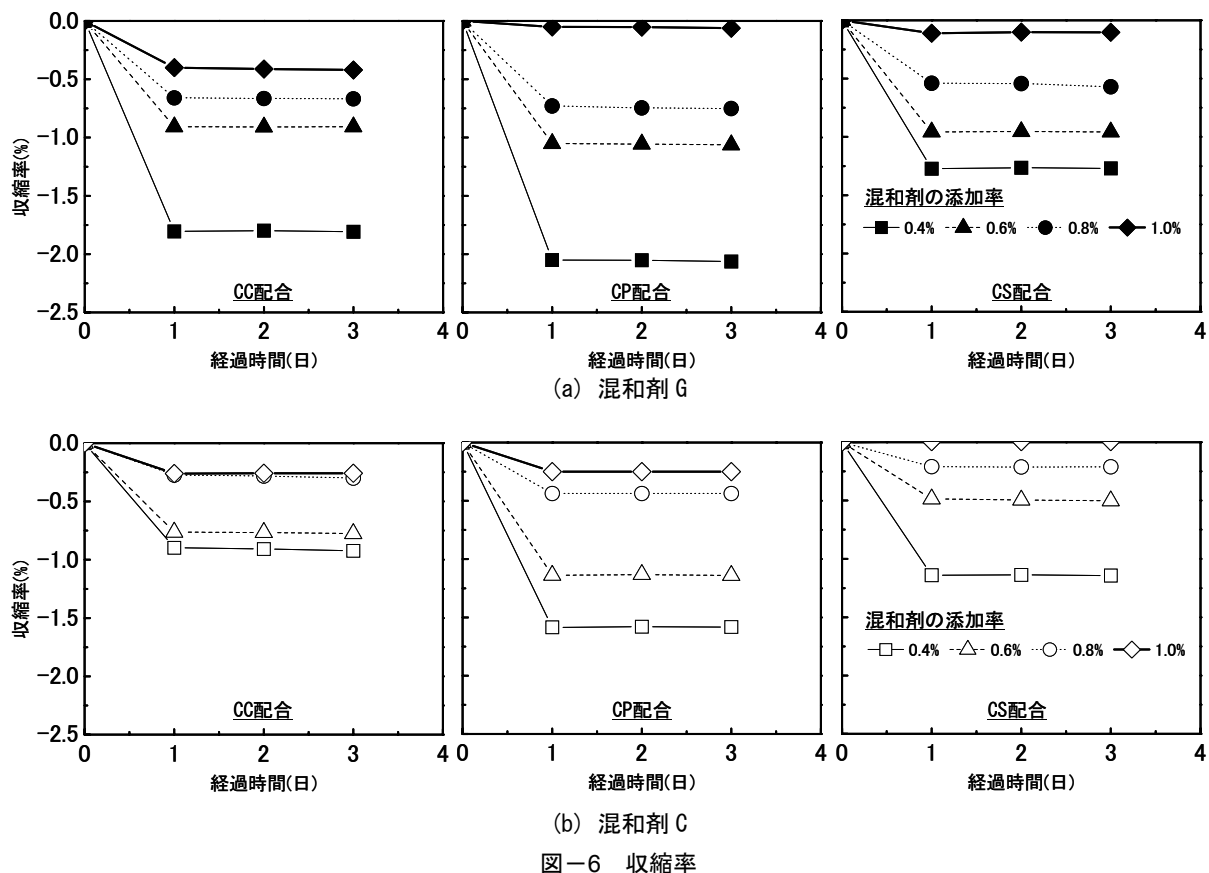


図-6 収縮率

また、6時間後のブリーディング率が0%になる配合は、PCグラウト用混和剤添加率が1.0%と0.8%であった。

3.3 収縮率

図-6には、収縮率の経時変化を示す。材齢1日までの収縮率が大きく、その後3日までにほぼ一定となっている。またブリーディング試験と同様に、PCグラウト用混和剤の添加率が増加すると、すべての配合において収縮率が小さくなる傾向が認められる。また、PCグラウト用混和剤Cを用いたPCグラウトは、PCグラウト用混和剤Gを用いた方より、混和剤の添加率を少なくしても収縮を抑えることが出来る。

PCグラウト用混和剤Gを使用したPCグラウトでは、セメントに対して比表面積が大きい高炉スラグ微粉末PとSは、PCグラウト用混和剤の添加率を1.0%とした配合で、収縮率がほぼ0であった。PCグラウト用混和剤Cを使用のPCグラウトでは、CC、CP、CS配合シリーズにおいてPCグラウト用混和剤の添加率が0.8%以上の場合は、収縮率の規定値である±0.5%を満足していることが認められた。また、CS配合シリーズのCS-0.6は今回唯一、PCグラウト用混和剤Cの添加率が0.6%のもでも規定値を満足した配合であった。

PCグラウト用混和剤の添加率はPCグラウトのブリーディングに影響を及ぼし、その分もPCグラウトの沈下量に含まれるため収縮量が多くなり、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。すべての配合では、収縮が1日ではほぼ終了しており、2日目以降にはほとんど収縮していない。また、PCグラウト用混和剤の添加率を1.0%とした配合とPCグラウト用混和剤Cを添加したセメントのみのCC配合シリーズを除くと、6000cm²/gクラスの比表面積を持つ高炉スラグ微粉末Sで置換したCS配合シリーズが、PCグラウト用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3.2で記述したように、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、ブリーディングが最小となったCS配合シリーズが、収縮率も最小となったと考えられる。これらのことから、置換材料の比表面積が収縮率に及ぼす影響の大きいことが明らかになった。また、混和剤の添加率1.0%のときの収縮が自己収縮量であると仮定すると、混和剤の添加量を小さくした場合において、PCグラウトの収縮は自己収縮によるものよりも、ブリーディングの発生が沈下に及ぼす影響の方が大きいと考えられる。

4. 圧縮強度

PCグラウト用混和剤の添加率と材齢28日標準養生および材齢91日における圧縮強度との関係を、図-7に示す。いずれの配合と材齢においても、30N/mm²以上の圧

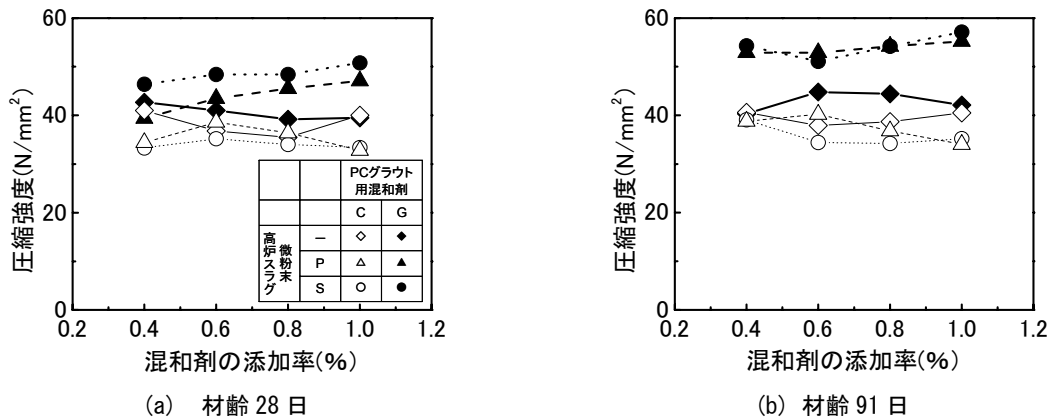


図-7 圧縮強度

縮強度を示している。

セメントのみを使用した配合である CC シリーズは、PC グラウト用混和剤の種類や添加率に関わらずほぼ一定の強度を示した。高炉スラグ微粉末で置換した CS、CP 配合シリーズでは、PC グラウト用混和剤の添加率が増加すると、混和材 G の場合は、圧縮強度も増加する傾向が認められるが、混和剤 C の場合は、圧縮強度が小さくなる傾向が、材齢 28 日と 91 日のいずれにおいても認められる。また材齢 28 日の圧縮強度については、混和剤 G を添加した場合は、混和剤の添加率に関わらず CC 配合シリーズ、CP 配合シリーズ、CS 配合シリーズの順に大きくなるが、混和剤 C を添加した場合は、セメントの 50%を高炉スラグ微粉末で置換した配合シリーズは、CC 配合シリーズ、CP 配合シリーズ、CS 配合シリーズの順に小さくなる傾向が認められる。

5. まとめ

本研究では、塩化物イオン量を低減した PC グラウトを製造するための基礎実験結果を報告した。すなわち、比表面積の異なる高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントに対して 50%置換し、2 種類の PC グラウト用混和剤をそれぞれ添加して製造した PC グラウトの流動性、ブリーディング、収縮および圧縮強度の測定結果を報告した。本研究の範囲内で次のことが言える。

- (1) 結合材に普通ポルトランド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、収縮も小さくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末をセメントに対して 50%置換した PC グラウトは、流動性が少し低下するものの、置換することによる大きな差は認められなかった。
- (3) PC グラウト用混和剤 G を使用した場合、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、圧縮強度は大きくなる。また、混和剤の添加

率を増加させることにより、圧縮強度も増加する。

- (4) PC グラウト用混和剤 C を使用した場合、ブリーディングと収縮の抑制効果大きい。しかし、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、圧縮強度は小さくなり、混和剤の添加率を増加させることにより、圧縮強度も低下する。

謝辞

本研究は、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)および極東鋼鉄コンクリート振興(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) 日本工業規格: JIS R 5210:2003, pp.2, 2003.11.20
- 2) 辻幸和, 池田正志, 谷口友一, 杉山隆文: 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
- 3) 藤本謙太郎, 辻幸和, 池田正志, 谷口友一: 高炉スラグ微粉末を用いた PC グラウトのフレッシュおよび強度性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.129-134, 2004.
- 4) 池田正志, 辻幸和, 杉山隆文, 広瀬春次: 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, 第 13 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, pp.145-150, 2004.10
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル (改訂版), pp.2, 1999.1