

高炉スラグ微粉末の併用による高品質なPCグラウトの製造

群馬大学大学院	正会員	博士(工学)	李	春鶴
群馬大学大学院	正会員	修士(工学)	山口	光俊
群馬大学工学部	正会員		池田	正志
群馬大学大学院	正会員	工学博士	辻	幸和

Recently, a high-performance grout for prestressed concrete is a necessity for prestressed concrete beam with high-strength concrete. The purpose of this research is to investigate fresh properties and compressive strength of the grout for prestressed concrete using different finenesses of ground granulated blast-furnace slag with replacement ratio as 40% and 60% by an ordinary portland cement. The compressive strength of the grout is depended by replacement ratio and fineness of ground granulated blast-furnace slag and water to binder ratio. The fresh properties such as flowing time are depended by dosage ratio of superplasticizer and admixture of the grout for prestressed concrete. It has been found that the grout for prestressed concrete with high-strength can be obtained by using the superplasticizer and the admixture of the grout for prestressed concrete in the manufacturing process. The fresh properties of the grout for prestressed concrete are satisfied with standard requirements.

Key words : High performance grout for prestressed concrete, Compressive strength, Ground granulated blast-furnace slag, Flowing time, Shrinkage ratio, Bleeding ratio

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、シース内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 鋼材との間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¹⁾。このため、PC 構造物が所要の構造性能を持ち、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持つ PC グラウトを、確実に充填しなければならない。したがって、PC グラウト自体には腐食性のある構成物を極力抑えたうえで、所要の流動性、材料分離抵抗性、充填性等の品質を有することが、PC グラウトに要求されている。

一方、高強度コンクリートの適用が広がりつつある現段階では、PC グラウトの充填性が良好であっても、高強度コンクリートの PC 部材では、従来の PC 部材における付着応力度より相当高い応力が発生する。したがって、PC グラウトの強度基準にある 30N/mm^2 を満たすだけでなく、高強度コンクリートの強度レベルに対応する高強度の PC グラウトが要求されている^{2)~4)}。このように、PC グラウトの高性能化を図るためには、PC グラウトがシースと PC 鋼材との隙間を完全に充填し、PC 鋼材を腐食から保護するとともに、部材コンクリートと PC 鋼材の一体化に必要な強度を有していなければならない。そこで、硬化後の PC グラウトの圧縮強度を向上させることによって、コンクリートと PC 鋼材との間に確実に十分な付着力を与え、部材の構造性能の向上ならびに破壊に対する安全度を増す必要がある。

PC グラウト自体の塩化物イオンを提言するために、高炉スラグ微粉末をセメントの半分程度置換した配合について、その流動性、ブリーディング、収縮性状および圧縮強度についての実験結果を報告して来た^{5)~8)}。そして高炉スラグ微粉末による置換は、その種類と置換率を適切に選定すれば、PC グラウトの性状を向上できることを提示した。本研究では、要求されるフレッシュ性状を満たしながら、

高強度のPCグラウトを開発することを目的とし、PCグラウト用混和剤と高性能AE減水剤を用いて、2種類の比表面積の高炉スラグ微粉末をセメントの半分程度を置換した高品質のPCグラウトの製造についての実験結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメントおよび置換材料としての高炉スラグ微粉末である。表-1に示すように、比表面積が小さいもの(以下、Nと称する)、比表面積が大きいもの(以下、Sと称する)の2種類を用いた。

PCグラウト用混和剤(以下、混和剤と称する。)には、主成分が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のものを用いた。ノンブリーディング・高粘性型タイプで、メーカーからの添加率の推奨値は結合材質量の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、推奨値よりも少量の0.4%、0.6%、0.8%および推奨値の1.0%を用いた。

高性能AE減水剤には、主成分がポリカルボンエーテル系化合物と配向ポリマーの複合体のものを使用した。

練混ぜ水は、水道水を用いた。

2.2 配合設計および練混ぜ方法

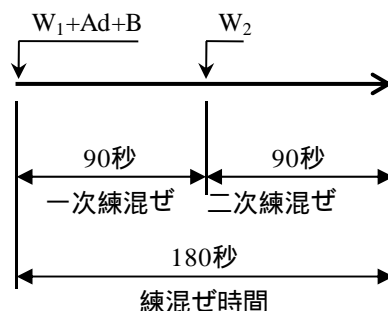
配合設計において、表-2の品質基準を満足することを目標とした。製造したPCグラウトの配合を表-3に示す。PCグラウト用混和剤のみを使用した配合(以下、Aoシリーズ)は、比表面積が異なる2種類の高炉スラグ微粉末の置換率はそれぞれ40%と60%、水結合材比を41%、43%、45%の3種類、混和剤の添加率は、結合材の質量の0.4%、0.6%、0.8%、1.0%の4種類にした。また、混和剤と高性能AE減水剤を使用した配合(以下、Eoシリーズ)は、水結合材比が36%、混和剤の添加率を結合材の質量の0.5%、高性能AE減水剤の添加率を結合材の質量の0.8%とし、高炉スラグ微粉末Sを用い

表-1 結合材の物理性状

結合材	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	3.16	3260
高炉スラグ微粉末N	2.88	4130
高炉スラグ微粉末S	2.88	6140

表-2 PCグラウトの品質基準

	土木学会基準
流動性(秒)	13-25
ブリーディング率(%)	0
収縮率(%)	-0.5 ~ 0.5
塩化物イオン総量(kg/m ³)	<0.3
圧縮強度(N/mm ²)	>30



B: 結合材 W₁: 一次水 W₂: 二次水 Ad: 混和剤

図-1 分割練混ぜ方法

表-3 配合表

供試体シリーズ名	配合シリーズ名	高炉スラグ微粉末種類	置換率 (%)	W/B (%)	練混ぜ方法	PCグラウト用混和剤の添加率 (%)	高性能AE減水剤の添加率 (%)
Ao	CC00	N	0	41,43,45	分割	0.4,0.6,0.8,1.0	
	CN40		40				
	CN60		60				
	CS40	S	40				
	CS60		60				
Eo	CS40		40	36	一括	0.5	0.8

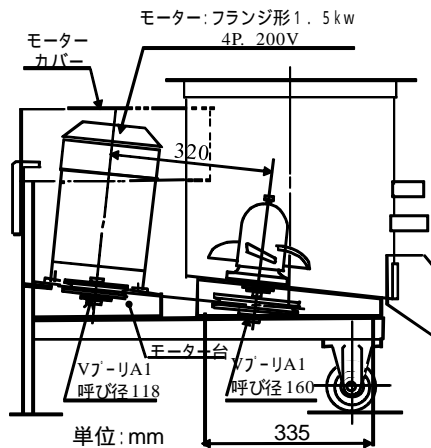


図 - 2 ミキサの形状

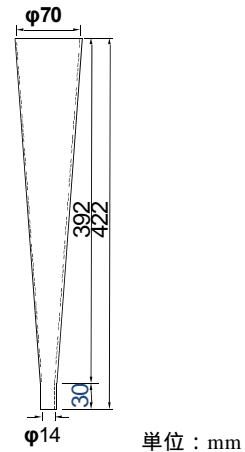


図 - 3 JP 漏斗の形状と寸法

てその置換率は 40% ととした。

練混ぜ方法は、分割 (図 - 1) と一括の 2 種類の練混ぜ方法を用いた。Ao シリーズは分割練混ぜ方法を使用し、1 次水結合材比 W_1/B は 30% とした。Eo シリーズは従来型の一括練混ぜ方法を使用した。

分割練混ぜ方法の手順は、図 - 1 に示すように、まず、ミキサに結合材、混和剤と一次水を投入し、90 秒間練り混ぜる。そして、ミキサを止めて、二次水を投入し、90 秒間練り混ぜる方法である。

練混ぜには、新型ミキサ (図 - 2) を用いた。新型ミキサは、回転数は 1150rpm であり、従来型のミキサに比べて練混ぜ性能が向上している。このような分割練混ぜ方法および新型ミキサについては、过らの研究^{4),5)}を参考した。

2. 3 測定項目および試験方法

本研究では、PC グラウトの流動性、材料分離抵抗性、収縮特性、圧縮強度の測定をそれぞれ行った。測定試験に用いたすべての試料は、練り上がった直後に 1.2mm のふるいを通させて測定に使用した。

流動性試験は JSCE-F 531-1999 に従い、図 - 3 に示す流出管の長さが 30mm の JP 漏斗を使用した。そしてそれによる流下時間を測定し、流動性状を評価した。

ブリーディング率および収縮率試験は、JSCE-F 533-1999 (容器方法) に従って行った。

圧縮強度試験は、JSCE-G 531-1999 に従って行った。圧縮試験用の供試体は直径が 50mm、高さが 100mm の円柱形とした。打込み後、材齢 1 日にセメントペーストでキャッピングをし、型枠上面に重りを置いた。材齢 2 日に脱型し、24 時間水中養生をさせた。その後、供試体を取り出し、ポリエチレン袋で覆い、材齢 28 日まで 20 ± 3 の室内で封緘養生した。

3. 実験結果および考察

3. 1 流動性

水結合材比が 45% の PC グラウトの流下時間と混和剤の添加量の関係を図 - 4 に、混和剤の添加率をメーカーの推奨値の 1.0% を添加した PC グラウトの流下時間と水結合材比の関係を図 - 5 にそれぞれ示す。図 - 4 に示すように、高炉スラグ微粉末の比表面積と置換率に関わらず、高炉スラグ微粉末を併用した PC グラウトは、セメントのみの PC グラウトより流下時間が少し短くなって、高炉スラグ微粉末の併用により PC グラウトの流動性が改善されている。また、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末 S で置換したものは、比表面積が小さい高炉スラグ微粉末 N で置換したのものより、流下時間が短いことから、高炉スラグ微粉末の比表面積は PC グラウトの流動性に影響を及ぼすと考えられる。PC グラウト用混和剤を 1.0% 使用した Ao シリーズにおいては、図 - 5 に示すように、各水結合材比の PC グラ

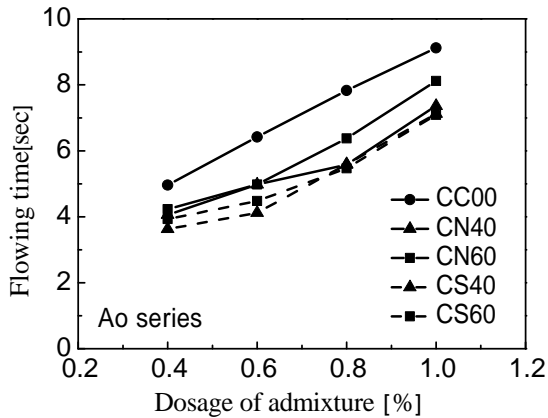


図 - 4 流下時間と混和剤添加率の関係

ウトは、セメントのみ、高炉スラグ微粉末 N の併用、高炉スラグ微粉末 S の併用の順で、PC グラウトの流動性が少し改善されることが確認できる。

水結合材比を45%から43%に低減した場合、本研究の範囲では高炉スラグ微粉末の種類と置換率にかかわらず、流動性は少し悪くなるものの、その低下は小さい。またその値は、品質基準である13秒～25秒の範囲より少し小さい。

高炉スラグ微粉末Sを置換して、水結合材比を43%から41%まで低減させた場合、粘性が急激に増加して、流下時間は品質基準を満たすものの、流下時間は急激に長くなっている。この傾向から、水結合材比を41%よりもさらに下げるとすると、高炉スラグ微粉末Sを併用しても流下時間が長くなりすぎて、品質基準を超えてしまい、適切な流動性を持つPCグラウトの製造ができない。すなわち、現段階での混和剤の性能範囲では高強度PCグラウトの製造には限界があり、考えられる改善方法としては、ミキサの回転性能を向上させ、更なる均一な練混ぜ効果を求めることであると考えられる。

3.2 ブリーディング率

練上がり 6 時間後のブリーディング率と水結合材比の関係を図 - 6 に示す。水結合材比が 43% から 45% に増加すると、ブリーディング率は一般に大きくなるのが確かめられた。これは水結合材比が増加するに従い、PC グラウト中の単位水量が増加するためである。

混和剤の添加率の違いで比較すると、混和剤の添加率が 0.6% の配合の方が、0.4% の配合に比べて、水結合材比の増加に伴いブリーディングが増加する割合が小さくなり、メーカー推奨値の添加率が 1.0% の場合は、水結合材比に関わらず、ブリーディング率が 0 になった。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、水結合材比を小さくするよりも混和剤の添加

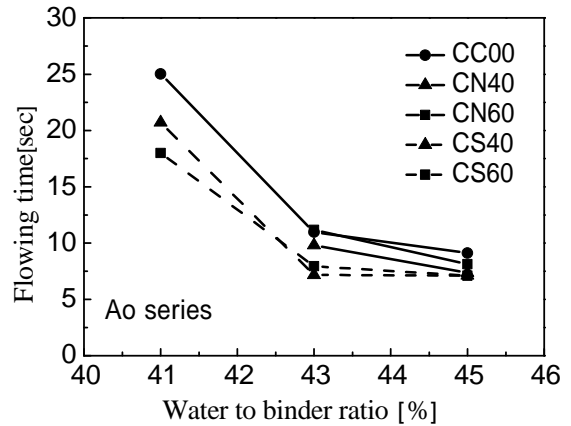


図 - 5 流下時間と水結合材比の関係

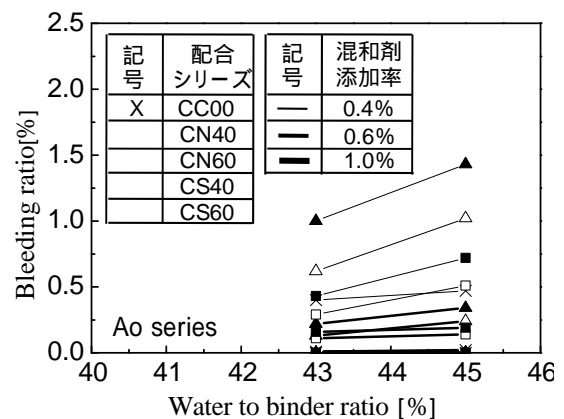


図 - 6 ブリーディング率と水結合材比の関係

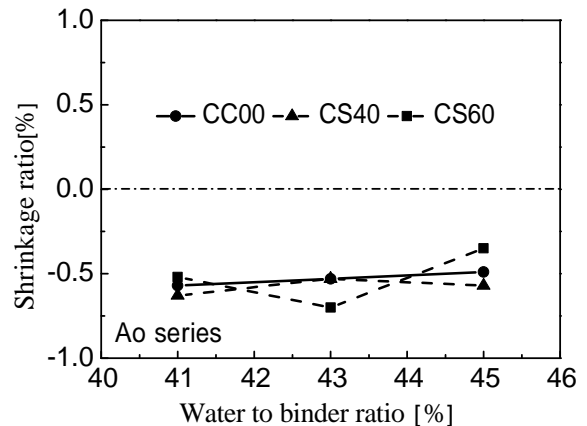


図 - 7 収縮率と水結合材比の関係

率を高くしたほうが、より効果的であるといえる。

高炉スラグ微粉末の置換率と種類で比較すると、基本的に CN60 > CN40 > CC00 CS60 CS40 の順で、ブリーディングが少なくなっている。高炉スラグ微粉末 N を置換した場合、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、高炉スラグ微粉末 S を用いた場合は、ブリーディング率がセメントのみの配合よりも減少した。これは、比表面積が大きいため、結合材粒子表面に水が多く吸着したためである。また、混和剤との反応も活発化され、混和剤の性能である粘性効果がより発揮されたためと考えられる。

3.3 収縮率

図 - 7 は、高炉スラグ微粉末 S で置換し、混和剤を結合材比の 1.0% 添加した場合の PC グラウトの収縮率と水セメント比の関係を示す。収縮は材齢 1 日目でほぼ終了したとみなせるため、材齢 1 日のものを代表に用いた。この図に示すように、PC グラウトの品質基準である -0.5% ~ 0.5% の範囲内にわずかであるが収めることができなかった。また、水結合材比が小さくなることにより、わずかであるものの大きくなる傾向が見て取れる。図 - 6 に示すように、混和剤を結合材比の 1.0% 添加した場合のブリーディング率は 0 である。したがって、ここでの収縮率は自己収縮による収縮が主要因と考えられ、使用された混和剤の性能範囲では、ミキサの回転性能を向上させることで、高炉スラグ微粉末の置換率と水結合材比の変化にも対応できると考えられる。

3.4 圧縮強度

混和剤を結合材比の 1.0% 添加した場合の PC グラウトの圧縮強度と水結合材比の関係を図 - 8 に示す。普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末 S と高炉スラグ微粉末 N で 40% 置換した場合の圧縮強度を比較すると、同程度あるいは増加する傾向がある。また、高炉スラグ微粉末の置換率が 40% は 60% と比較すると、同程度あるいは少し増加する傾向がある。すなわち、PC グラウトの高強度化のためには、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末 S を置換した方が、また置換率は 40% 程度に抑えた方が、それぞれ効果的であると考えられる。

圧縮強度と水結合比の関係から認められるが、混和剤を 1.0% 添加した場合は、水結合材比を小さくすることによる PC グラウトの圧縮強度の増加は顕著ではない。これは、現在一般に用いられている PC グラウト用混和剤の品質の範囲では、圧縮強度の増進には限界があると考えられる。また、水結合材比を極端に下げると、粘性が急激に上昇し、充填性が悪くなる。また、現在の新型ミキサの能力制限条件により、水結合水比を極端に下げることが、実現性が低い。したがって、現在の練混ぜ条件で、流動性を確保し、ブリーディングを抑制し、収縮量を増加させず、また塩化物イオンの含有量を抑制しながら、PC グラウトの更なる高強度化を実現するためには、材料の工夫が必要である。

高性能 AE 減水剤は、減水の効果が高いため、収縮率の改善効果がある。また、高性能 AE 減水剤は PC グラウトの流動性も向上させることが確認されている⁵⁾。したがって、圧縮強度を高めるために、水結合材比を下げ、低下する流動性は PC グラウト用混和剤の使用量を低減する、PC グラウト用混和剤と高性能 AE 減水剤を効率的に組み合わせることが考えられる。

図 - 9 には、流動性が品質基準を満たす A₀ シリーズと PC グラウト用混和剤を 0.8% および高性能 AE 減水剤を 0.5% 添加した E₀ シリーズの圧縮強度の比較を示す。供試体名の配合シリーズ名後ろの数値は水結合材比を表す。

図に示すように、高性能 AE 減水剤と混和剤を有効に組み合わせることによって、水結合材比を 36% まで下げて、圧縮強度を 60N/mm² 以上まで上昇させることができた。E₀ シリーズの場合は流下時間が 12 秒であり、ほぼ流動性の品質基準を満たす。ブリーディング率は 0 で、収縮率は -0.11% であり、ブリーディング率や収縮率に関する品質基準を満たしている。練混ぜは、一括練混ぜ方法を使用している。一括練混ぜ方法と分割練混ぜ方法による同一な配合における圧縮強度の比較はないが、分割練

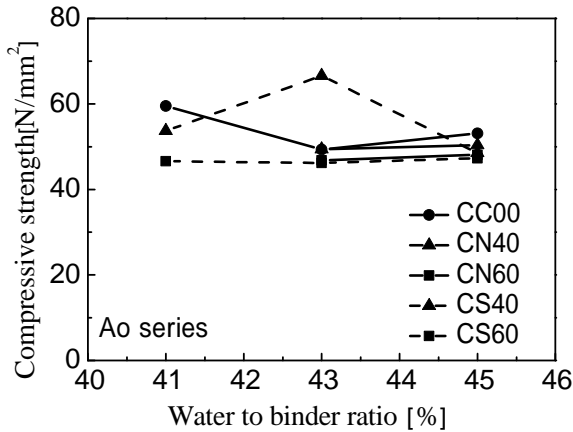


図 - 8 圧縮強度と水結合材比の関係

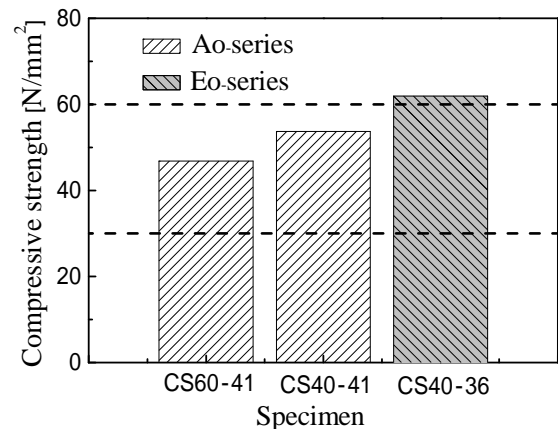


図 - 9 圧縮強度

混ぜ方法によるフレッシュ性状の改善効果は顕著である⁵⁾。今後は、ミキサの性能を向上させて、小さい一次水結合材比での一次練混ぜを行う分割練混ぜ方法を採用することにより、小さい水結合材比のPCグラウトのフレッシュ性状の改善を行い、更なる高強度化が期待できる。

4. まとめ

PCグラウトの高強度化を図る基礎実験を実施し、本研究の範囲内で、次に示す知見が得られた。

- (1) 普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で置換して製造したPCグラウトの高強度化は、高炉スラグ微粉末の比表面積、置換率、配合の適切な組み合わせにより実現可能である。
- (2) PCグラウト用混和剤のみを用いた条件でのPCグラウトの高強度化には限界があること明らかになった。高性能AE減水剤とPCグラウト用混和剤を適宜組み合わせることによって、圧縮強度を60N/mm²以上まで増加できた。

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。ここに付記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) (社)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)(1999)
- 2) 李春鶴ほか：高炉スラグ微粉末で置換したPCグラウトを用いたPPCはりの曲げ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.451-456(2007)
- 3) 橋本親典ほか：高強度PCグラウトを用いたPC鋼より線の付着性状とPRCはりの曲げ性状，プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.7-12(1995)
- 4) 辻幸和ほか：高強度PCグラウトの製造に関する基礎研究，プレストレストコンクリート，Vol.36，No.3，pp.47-56(1994)
- 5) 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技術シリーズ52，pp.285-292(2003)
- 6) 池田正志ほか：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)
- 7) 山口光俊ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.769-774(2009)
- 8) 池田正志ほか：PCグラウトのブリーディングおよび収縮性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.787-792(2009)