

# 高強度PCグラウトの製造に関する基礎研究

辻 幸和\*<sup>1</sup>・池田 正志\*<sup>2</sup>・橋本 親典\*<sup>3</sup>・浦野 真次\*<sup>4</sup>

## 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鋼材と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、配合および練りませによって製造された所要の品質を持つPCグラウトを、確実に充てんしなければならない。したがって、グラウト自体に腐食性のある構成物を含まないうえで、注入作業時の流動性、材料分離抵抗性、充てん性および十分な強度等の品質が、PCグラウトに要求されている。しかしながら、PCグラウトの品質および施工に一部疑念が持たれていることも事実であり、PCグラウトを伴うポストテンション方式のPC橋梁の建設が、英国では停止されている例もある<sup>1),2)</sup>。

また近年、高強度コンクリートの適用などに代表されるように、PC構造物の高性能化は著しく進んでおり、従来から要求されている品質だけではなく、確実な施工方法も含めた、より高品質なPCグラウトが要求されている。

このような高性能化に対応するためには、PCグラウトが完全にシースとPC鋼材との空隙を充てんし、PC鋼材を腐食から保護するという品質を有するだけでは十分とは言えない。そこで、硬化後のPCグラウトの品質を支配する要素として重要な役割を果たす圧縮強度を向上させることによって、コンクリートとPC鋼材との間に確実で十分な付着力を与え、部材の使用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。

本研究は、PCグラウトの高強度を主目的として、高性能減水剤を用いて、一括練りませ方法と分割練りませ方法を採用し、さらに高粉末度の高炉スラグ微粉末をセ

メントの一部と置換して製造した場合について、高性能減水剤の添加率、練りませ方法、スラグ置換率などがPCグラウトの諸性状に及ぼす影響について、実験的に検討した結果を取りまとめたものである<sup>3)~7)</sup>。そして、所要の流動性、ブリージング率および膨張率を満足する配合において、水セメント比と高性能減水剤の添加率との範囲の観点から、圧縮強度が500 kgf/cm<sup>2</sup>程度の高強度PCグラウトが得られる配合条件を提示したものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

高性能減水剤の添加率、水セメント比、スラグ置換率などがPCグラウトの諸性状に及ぼす影響について、実験的に検討を行った。そして、所要の流動性、ブリージング率および膨張率を満足する配合において、高強度PCグラウトが得られる配合条件を提示するため、PCグラウトの基本的な構成材料は、セメント、水、膨張剤および高性能減水剤として、以下の3シリーズの実験を行った。

シリーズIでは、高性能減水剤の添加率や水セメント比が、PCグラウトの諸性状に及ぼす影響を検討した。PCグラウトの練りませ方法は、一括練りませ方法とした。高性能減水剤は練りませ水に混入し、その添加率は結合材量に対する重量比で3%以下とする。

シリーズIIでは、高性能減水剤を用いて、PCグラウトを分割練りませ方法により製造し、PCグラウトの諸性状に及ぼす改善効果を、水セメント比と高性能減水剤の添加率との範囲の観点から検討した。また、分割練りませ方法の場合、高性能減水剤は一次水に混入するとブリージングの低減に最適との報告があるが<sup>8)</sup>、今回の実験では、使用量の低減化を図ることを目的として、二次水に混入した。

PCグラウトの高強度化を目的として、高性能減水剤

\*<sup>1</sup> Yukikazu TSUJI : 群馬大学 工学部建設工学科 教授

\*<sup>2</sup> Masashi IKEDA : 群馬大学 工学部建設工学科 技術官

\*<sup>3</sup> Chikanori HASHIMOTO : 群馬大学 工学部建設工学科 助教授

\*<sup>4</sup> Shinji URANO : 清水建設(株) 技術研究所

を用いて単位水量を少なくしても、所要の品質を満足したうえで高強度な配合を得るのは非常に困難であることがシリーズⅠとシリーズⅡの実験より明らかになった。そこで、シリーズⅢでは、主としてPCグラウトの高強度化を目指し、ブレン値が9 000 cm<sup>2</sup>/g程度の高粉末度の高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置き換えて製造し、高炉スラグ微粉末の置換率がPCグラウトの諸性状に及ぼす影響について検討した。本実験では、PCグラウトの諸性状に及ぼす影響についての基礎資料を得るため、高炉スラグ微粉末の置換率は、{0, 30, 50, 70} %の4ケースとした。練りませ方法は、一括練りませ方法と分割練りませ方法を採用した。

## 2.2 使用材料

セメントは、比重が3.16、ブレン値が3 230 cm<sup>2</sup>/g普通ポルトランドセメント、混和材は、比重が3.00、ブレン値が9 210 cm<sup>2</sup>/gの高炉スラグ微粉末を使用した。混和剤は、主成分がアリルスルホネートの高性能減水剤と反応遅延性のアルミニウム粉末を主成分とする膨張剤を用いた。練りませ水は上水道水を用いた。

## 2.3 配合

実験のシリーズにかかわらず、高性能減水剤の添加率は0 %から3 %の範囲で使用し、膨張剤の添加率は、一般に結合材量に対する重量比で0.008 %と統一した。

シリーズⅠ・Ⅱでは、水セメント比は29 %から44 %の範囲で6ケースとした。シリーズⅢでは高炉スラグ微粉末の置換率が、圧縮強度、流動性、ブリージング率および膨張率に及ぼす影響を検討するため、置換率を{0, 30, 50, 70} %の4ケースに変化させ、置換後の水/(セメント+高炉スラグ微粉末) (以下、水結合材比と称す)を32 %から44 %の範囲で5ケースに変化させた。

なお、高性能減水剤および膨張剤の使用量は、結合材量に対する重量比の添加率で表す。

1バッチ当りの量は約2.0 lで統一した。そして所定の配合については、2バッチの平均値で示した。

## 2.4 練りませ方法

PCグラウトの練りませには、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」で用いる練りませ機を使用し、パドルは葉脈状羽、練り鉢はステンレス鋼製で、最大容量が4.5 lのものを用いた。

一括練り ませ方法	材料投入 :W+S <sub>p</sub> +C+S <sub>g</sub> +膨	3分 練りませ
分割練り ませ方法	材料投入 :W <sub>1</sub> +C+S <sub>g</sub> +膨	1分30秒 一次練りませ
		1分30秒 二次練りませ
C:セメント      S <sub>g</sub> :高炉スラグ微粉末      W:水		
S <sub>p</sub> :高性能減水剤      膨:膨張剤      W <sub>1</sub> /(C+S <sub>g</sub> )=22%		

図-1 PCグラウトの練りませ方法

一括練りませ方法と分割練りませ方法を図-1に示す。

分割練りませ方法は、一次練りませ時における一次水セメント比をブリージングの低減に効果があるとされる22 %とし、膨張剤を混入したセメントを全部投入し一次練りませを1分30秒行う。そして、高性能減水剤を残り水(二次水)と一緒に混入して二次練りませを1分30秒行った。また、高炉スラグ微粉末で置換した場合も、一次水結合材比を22 %と統一した。

分割練りませ方法において、高性能減水剤を二次練りませ時に添加した目的としては、一つは高性能減水剤の使用量を低減することである。また、一次練りませを終了した段階においては、配合が異なっても、すべて水セメント比は22 %となっており、分割練りませ効果が等しく作用していると考えられる。したがって、二つめは高性能減水剤の添加率が、PCグラウトの諸性状に及ぼす影響について検討するためである。

## 2.5 試験方法

流動性(JA ロートによるロート方法)、ブリージング率および膨張率(ポリエチレン袋とメスシリンダーによる方法)、および強度(おもり拘束によるφ5×10 cm円柱型枠を用いた材齢28日の圧縮強度)の各試験は、土木学会規準「PCグラウト試験方法(JSCE-1986)」に準拠した。

## 3. 高性能減水剤を用いたPCグラウトの配合条件

高性能減水剤を添加し、一括練りませ方法によって製造したPCグラウトについて、表-1に示す品質条件を

表-1 PCグラウトの品質規準  
(土木学会コンクリート標準示方書平成3年版)

品質項目	規格・規準	試験方法	規準値・標準値
流動性	土木学会規準「PCグラウト試験方法—コンシステンシー試験方法」	JA ロート流下時間	15~30秒
材料分離抵抗性	土木学会規準「PCグラウト試験方法—ブリージング率および膨張率試験方法」	φ50 mm ポリエチレン袋試験	3%以下
無収縮性	土木学会規準「PCグラウト試験方法—ブリージング率および膨張率試験方法」	φ50 mm ポリエチレン袋試験	膨張率10%以下(ブリージング率以上)
強度	土木学会規準「PCグラウト試験方法—強度試験方法」	φ5×10 cm圧縮強度	f' <sub>c</sub> =200 kgf/cm <sup>2</sup> 以上
塩化物含有量		(財)国土開発技術研究センターの評価を受けた測定器で測定	0.3 kg/m <sup>3</sup> 以下
配合			水セメント比45%以下

表-2 品質条件を満たす配合（一括練りませ方法）

W/C (%) S <sub>p</sub> /C (%)	29	32	35	38	41	44
	0					
0.25						
0.5						
0.75					△	
1.0				▽	▽	
2.0			◆	▼		
3.0						

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ブリージング率 (%)	
	1 未満	1~3
200 以上	◆	◇
300 以上	▼	▽
400 以上	▲	△
500 以上	●	○

満足する配合を、圧縮強度を 100 kgf/cm<sup>2</sup> ごとに、またブリージング率を 1 % 未満と 1~3 % とに分類して、表-2 に示す。水セメント比が 35~41 % の範囲で、高性能減水剤の添加率が 0.75~2 % の範囲において品質条件を満足していることがわかる。そして、高性能減水剤の添加率が 2 % で、水セメント比が 35 % および 38 % の場合に、ブリージング率が 1 % 未満の良質のものが得られた。

従来から用いられている一括練りませ方法によると、水セメント比が大きいとブリージングも増大し、逆に水セメント比の小さい配合で高性能減水剤の添加量を増大させて流動性を改善しても、ブリージングがやはり増大し、高性能減水剤の使用に限界がある。さらに、高性能減水剤の過剰な添加は、圧縮強度や凝結にも悪影響を及ぼすなどの制約が多いために、品質条件を満たす配合の範囲は、このように狭いものとなった。また、表-2 に示す配合のように、表-1 の品質条件を満足しても、圧縮強度については、高性能減水剤を添加することによる改善効果はほとんど認められず、大半は 200~350 kgf/cm<sup>2</sup> 程度であった。

すなわち、高性能減水剤の使用は、品質条件を満足する配合を得るのに効果的であるが、一括練りませ方法による場合には、圧縮強度の改善効果はほとんど認められなかった。

#### 4. 分割練りませ方法で製造した PC グラウトの配合条件

分割練りませ方法と一括練りませ方法により製造した、水セメント比が 41 % における高性能減水剤の添加率と JA ロートでの練りませ直後の流下時間との関係を、図-2 に示す。一括練りませ方法によると、高性能

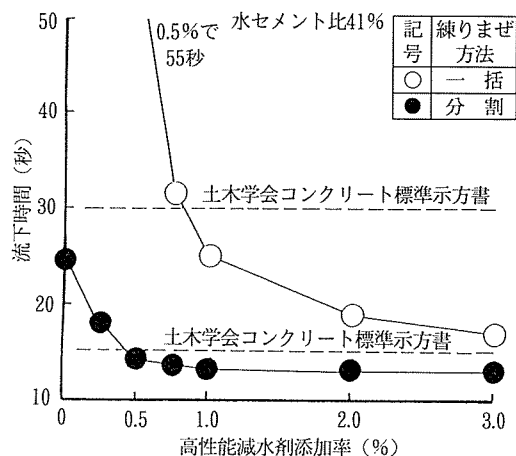


図-2 高性能減水剤添加率と流下時間の関係

減水剤の添加率の増加とともに流動性は改善されるが、添加率が 3 % の配合においても、JA ロートでの流下時間は 17 秒程度である。これに対し、分割練りませ方法で製造した PC グラウトは、高性能減水剤の添加率が 0.25 % と非常に少量の添加でも 18 秒で流下している。そして、0.5 % の添加率では 13 秒程度で流下し、それ以上添加しても流下時間はほとんど減少しない。

このように分割練りませ方法を採用すると、同一の配合に対しても、流下時間が著しく減少している。高性能減水剤の後添加の影響もある<sup>9)</sup>と思われるが、添加率が 0 % の場合も約 25 秒で流下しており、分割練りませ方法による PC グラウトの流動性の改善効果は非常に大きいと考えられる。図-3 は横軸に水セメント比をとり流下時間を示している。この図からも、分割練りませ方法により、高性能減水剤の添加率を少なくしても所要の流動性を満足する配合を得ることができる。この例では、分割練りませ方法が高性能減水剤の 1 % の添加率に対応している。

一次練りませ時の水セメント比が最適の場合、ブリージングは一括練りませ方法で製造したものより大幅に減

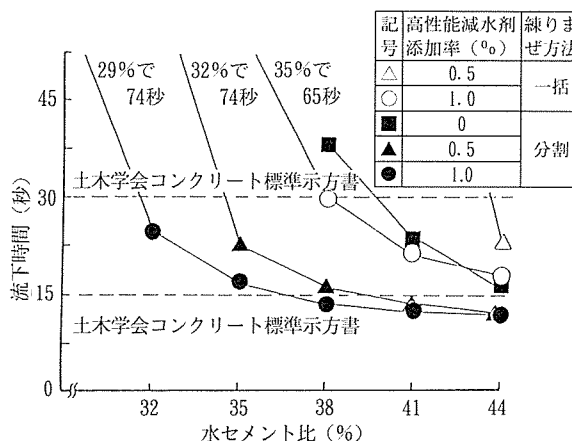


図-3 水セメント比と流下時間の関係

少することが、これまでの田澤らの報告により明らかにされている<sup>10)</sup>。本実験においても、図-4に示すように、高性能減水剤を添加しない場合の水セメント比が大きい配合について確認することができた。

図-5は、高性能減水剤の添加率とブリージング率の関係を示したものである。一括練りませ方法で製造した

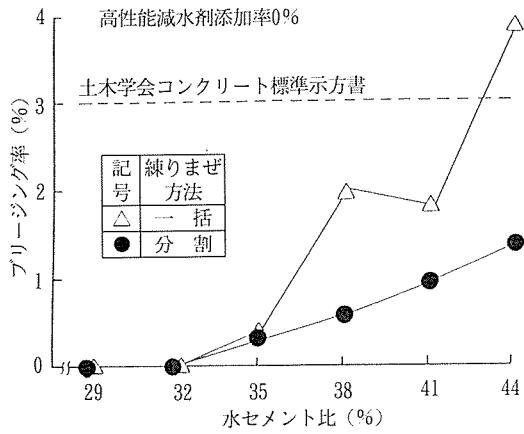


図-4 水セメント比とブリージング率の関係 (高性能減水剤添加率 0%)

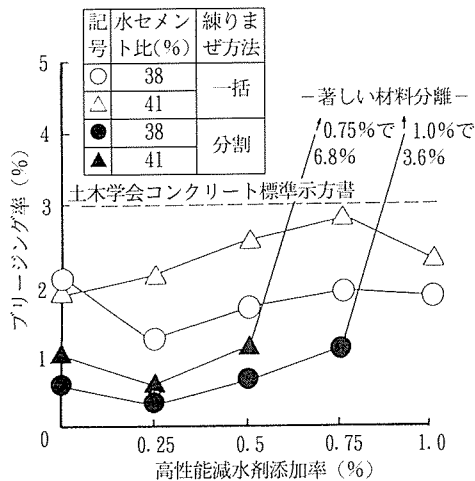


図-5 高性能減水剤添加率とブリージング率の関係

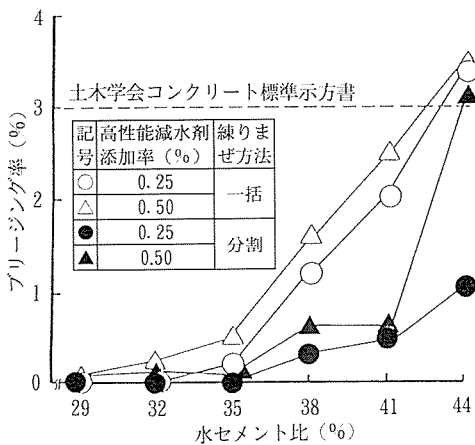


図-6 水セメント比とブリージング率の関係

ものは、高性能減水剤の添加率が1%以下の配合においては、高性能減水剤を添加してもブリージングにはほとんど影響を及ぼしていない。分割練りませ方法によると、高性能減水剤の添加率が0.5%以下の配合においては、一括練りませ方法で製造した同一の配合と比較して、ブリージング率が半分以下となっている。しかしながら、高性能減水剤の添加率が0.75%あるいは1%を超えると、材料分離が著しく、また凝結硬化が遅れ、練りませ3時間後のブリージングは測定不可能であった。この現象は、水セメント比に関係なく認められている。

高性能減水剤が0.25%、0.5%と添加率の少ない配合における、水セメント比とブリージング率の関係を図-6に示す。いずれの練りませ方法においても、水セメント比が大きくなるほどブリージングは増加している。しかしながら、分割練りませ方法で製造したものは、流動性が著しく改善されているにもかかわらず、一括練りませ方法で製造した同一の配合よりもブリージングが減少している。そして、水セメント比が大きく、高性能減水剤の添加率が小さいほど、分割練りませ方法の改善効果が大きいと考えられる。

写真-1と写真-2に、水セメント比が35%の場合

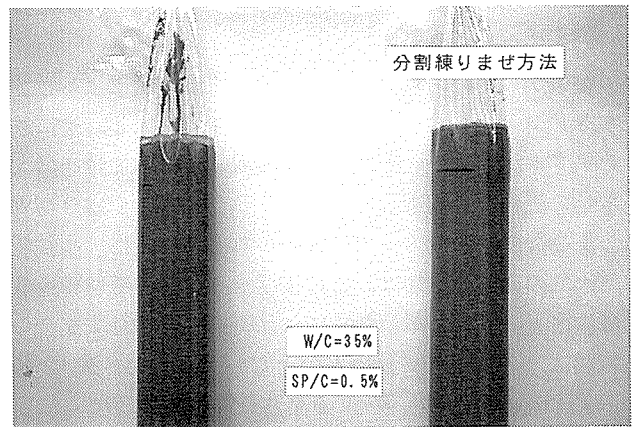


写真-1 ブリージング発生状況 (高性能減水剤添加率 0.5%)

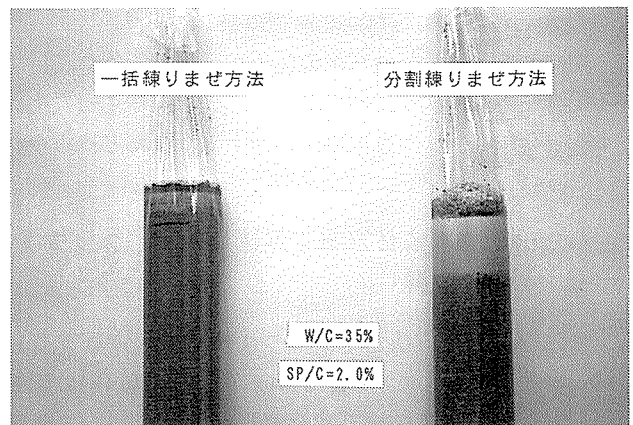


写真-2 ブリージング発生状況 (高性能減水剤添加率 2.0%)

の、一括練りませ方法と分割練りませ方法により製造したPCグラウトの状況を示す。写真-1は、高性能減水剤の添加率が、0.5%の場合であり、写真-2は、高性能減水剤の添加率が2.0%の場合である。高性能減水剤の添加率の小さい写真-1では、分割練りませ方法で製造したPCグラウトのブリージング水（上部の黄色い水）は、減少している。一方、高性能減水剤の添加率の大きい写真-2では、分割練りませ方法で製造したPCグラウトでは、明確なブリージング水は確認できず、白っぽい層ができ、さらにその上には泡が発生しており、著しい材料分離が起こっていることが認められる。

分割練りませ方法による場合、最適な一次水セメント比による一次練りませを行うことによって、セメント粒子の全表面が一様に濡れ、粒子が均一に分散し、二次練りませ後のセメント粒子の適度な凝集作用によって、ブリージングが減少する。同様の理由により、流動性も改善されたものと思われる。高性能減水剤を添加すると、セメント粒子の分散が一層卓越するが、過剰に添加すると凝集作用を破壊し、材料分離が著しくなるものと思われる。

図-7は、水セメント比が38%と41%の配合における膨張率と高性能減水剤の添加率の関係を示したものである。一括練りませ方法によると、高性能減水剤を1%添加しても、膨張性状にはほとんど影響を及ぼさず、膨張率の著しい低下は起こらない。一方、分割練りませ方法によると、高性能減水剤の添加率が0.75%以上となると、膨張率は著しく低下し、沈下収縮した。

これは、著しい材料分離と凝結遅延を起こし、膨張剤であるアルミニウム粉末とアルカリの反応で発生した水素ガスは、写真-2の分割練りませ方法で製造したPCグラウトに見られるように、比重差によって気泡のほとんどが上部へ逃げってしまったためである。

しかしながら、高性能減水剤の添加率が0.5%程度までは、練りませ方法による膨張率の差はほとんどな

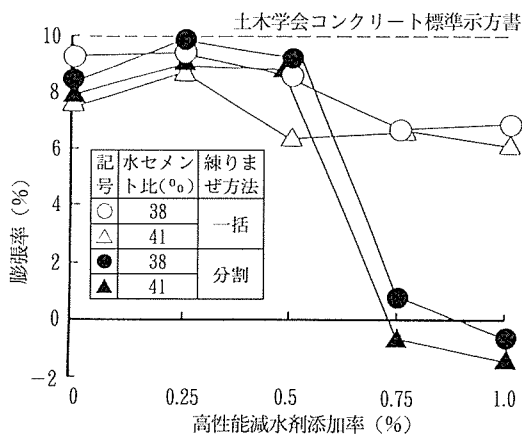


図-7 高性能減水剤添加率と膨張率の関係

く、8%以上と高くなった。練りませ方法によって膨張率の値に差が認められないのは、材料分離が過大でない限り、セメント粒子の分散程度にかかわらず、発生する気泡の量に左右されたためと思われる。

高性能減水剤を0%および1%添加した場合の圧縮強度と水セメント比の関係を図-8に示す。一括練りませ方法による場合、水セメント比が大きくなっても、圧縮強度の低下はほとんど認められず、300~500kgf/cm<sup>2</sup>となっている。分割練りませ方法によると、高性能減水剤の添加率が0%では、改善効果は認められず、一括練りませ方法の場合とほとんど同じ値となっている。そして、高性能減水剤の添加率を1%に増加すると、分割練りませ方法で製造したものは、水セメント比が大きくなるに伴い、著しい材料分離によって、圧縮強度は著しく低下している。

図-9に、分割練りませ方法で製造したPCグラウトの、高性能減水剤の添加率と圧縮強度の関係について示す。一般に、高性能減水剤の添加率が大きくなるに従って、圧縮強度は低下している。

分割練りませ方法により製造したPCグラウトについて、表-1の品質条件を満足する配合を表-3に示す。水セメント比が41%、44%と大きい場合は高性能減水

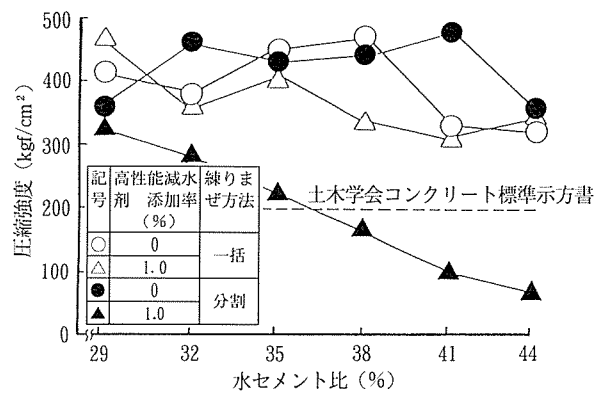


図-8 水セメント比と圧縮強度の関係

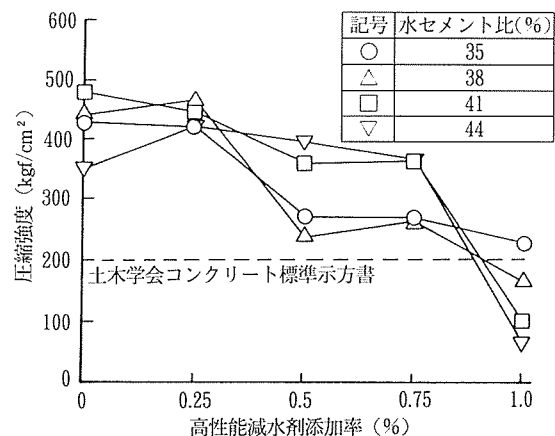


図-9 高性能減水剤添加率と圧縮強度の関係

表-3 品質条件を満たす配合 (分割練りませ方法)

W/C (%)	S <sub>p</sub> /C (%)					
	29	32	35	38	41	44
0					▲	▽
0.25			▲	▲	▲	
0.5			◆	◆	▼	
0.75			◆			
1.0		◆				
2.0						
3.0						

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ブリージング率 (%)	
	1 未満	1~3
200 以上	◆	◇
300 以上	▼	▽
400 以上	▲	△
500 以上	●	○

剤を添加することなく、また 32 % と小さい場合でも添加率が 1 % 以下の配合において品質条件を満足している。しかしながら、二次水に混入した高性能減水剤の添加率が 0.75 % あるいは 1 % を超えると、PC グラウトは著しい材料分離が起こり、同時に膨張率の低下ならびに圧縮強度の低下を起した。このように、分割練りませ方法は高性能減水剤の使用量を減少させることができたが、圧縮強度については改善効果はほとんど認められず、200~400 kgf/cm<sup>2</sup> 程度であった。すなわち、PC グラウトの圧縮強度は、高性能減水剤を用い、一括および分割の練りませ方法を採用しても、所要の流動性、ブリージング率および膨張率を満足していたうえで、セメントだけでは圧縮強度が 500 kgf/cm<sup>2</sup> を超えるような高強度 PC グラウトの製造は非常に困難であると推測され、混和材料の併用が必要であると思われる。

### 5. 高炉スラグ微粉末を用いた高強度 PC グラウトの製造

ここでは、PC グラウトの高強度化を目指し、ブレン値が 9 210 cm<sup>2</sup>/g という高粉末度の高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置換した PC グラウトを製造し、高炉スラグ微粉末の置換率が PC グラウトの諸性状に及ぼす影響について主として検討する。

一般的に粉末度が 9 210 cm<sup>2</sup>/g と非常に高いために、高炉スラグ微粉末をセメントと置換すると PC グラウトの流動性は低下する。図-10 は、水結合材比が 41 % の場合の、スラグ置換率と JA ロートの流下時間の関係を示す。一括練りませ方法と分割練りませ方法にかかわらず、スラグで置き換えて、その置換率が大きくなるにしたがって、流下時間は増大している。しかしながら、この場合でも分割練りませ方法で製造することによ

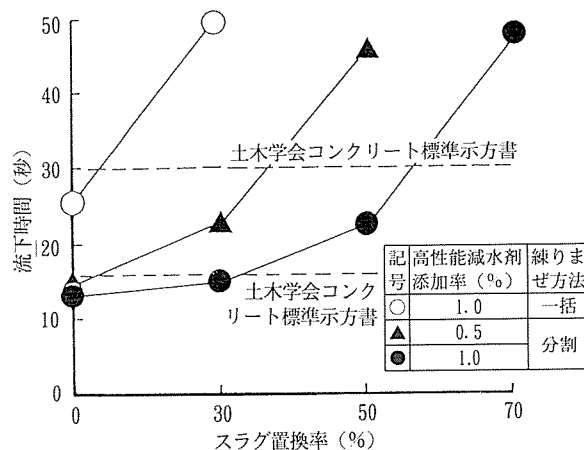


図-10 スラグ置換率と流下時間の関係 (水結合材比 41 %)

り、流動性は改善される。スラグ置換率が 30 % 程度では、水結合材比にもよるが高性能減水剤を適量添加することにより、スラグを置き換えない場合とほぼ同程度の流動性を維持することができる。

分割練りませ方法における、高性能減水剤の添加率が 1 % の場合の、水結合材比と流下時間の関係を図-11 に示す。スラグ置換率が 0 % では、水結合材比が 32 % と小さい配合でも土木学会の品質規準を満たしている。しかしながら、スラグ置換率が大きくなるほど、水結合材比の小さい配合について、流動性が著しく低下する。したがって、分割練りませ方法を採用しても、高粉末度の高炉スラグ微粉末で置換した場合は、その置換率が大きく、また水結合材比が小さい配合に対しては、高性能減水剤の添加率を大きくしなければならない。

一括練りませ方法および分割練りませ方法における、ブリージング率とスラグ置換率の関係の一例を、それぞ

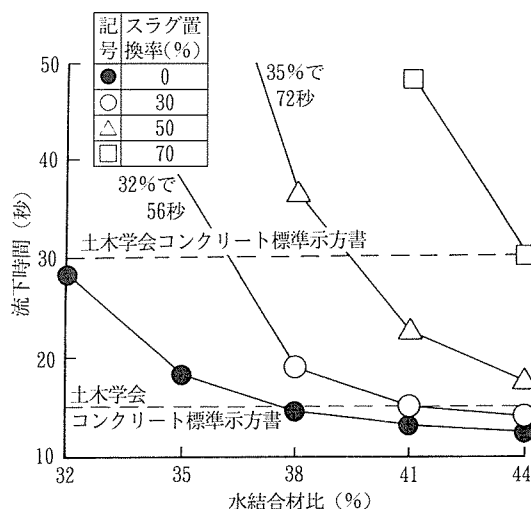


図-11 水結合材比と流下時間の関係 (高性能減水剤添加率 1 %)

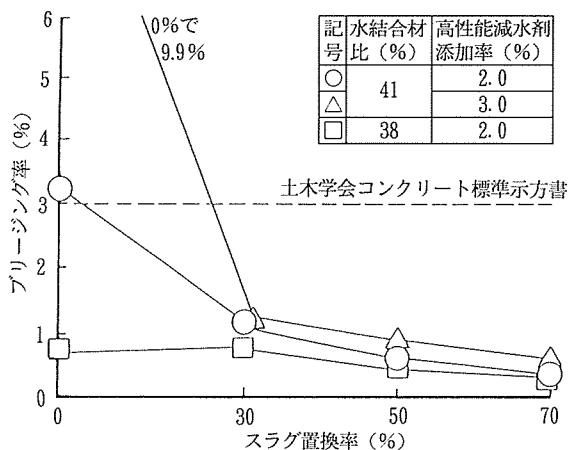


図-12 スラグ置換率とブリージング率の関係 (一括練りませ方法)

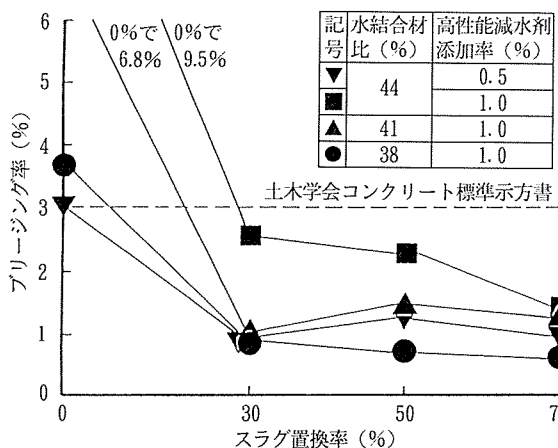


図-13 スラグ置換率とブリージング率の関係 (分割練りませ方法)

れ図-12 および図-13 に示す。まず、図-12 に示すように、一括練りませ方法においては、高性能減水剤の添加率が2%あるいは3%と多量にもかかわらず、スラグ置換率の増加とともにブリージングは減少する。なお、スラグ置換率の増加に伴ってロートによる流下時間も増加し、流動性とブリージングという相反する性状を示している。

これに対して、分割練りませ方法の場合は、スラグ置換率が0%の場合は、高性能減水剤の添加率が約1%を超えると著しい材料分離を起こした。しかしながら、図-13のように、スラグ置換率が30%では、ブリージング率は3%以下となり、著しい材料分離も起こらず、流動性もスラグ置換率が0%とほぼ同様であることから、ブリージングの改善効果があるものと思われる。スラグ置換率が50%あるいは70%では、一括練りませ方法と同様に、流動性とブリージングという相反する性状を示す。

高炉スラグ微粉末を置換しない配合においては、練り

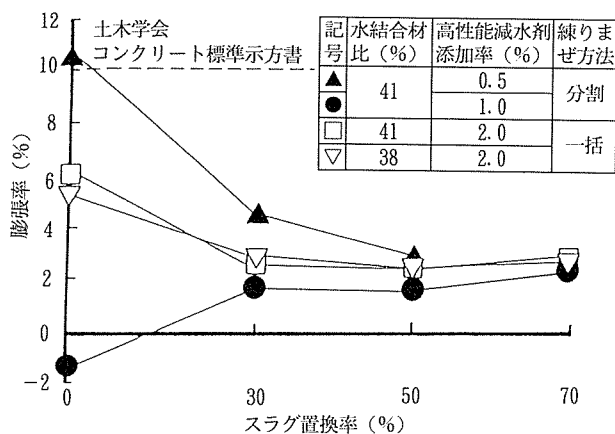


図-14 スラグ置換率と膨張率の関係

ませ方法にかかわらず、膨張剤の影響により、高性能減水剤の添加率が1%以下の範囲で約6%以上と高い膨張率を示している。そして、それ以上高性能減水剤を添加すると、分割練りませ方法においては著しい材料分離を起こすに伴い、沈下収縮した。

しかしながら、図-14 に示すように、高炉スラグ微粉末を30%以上置換すると、膨張率は0~4%の安定した値となっている。これは、高炉スラグ微粉末はセメントが水と反応して生成されるアルカリ分と反応して硬化する性質を有するために、膨張剤であるアルミニウム粉末と反応するアルカリ成分が減少したためと考えられる。製造した供試体を観察すると、著しい材料分離を起こさないいずれの配合においても、スラグで置き換えないものの方が、気泡が多く存在していることが確認された。この適度な膨張率と気泡の減少は、実際のPC構造物において、PC鋼材の防食およびPC鋼材とコンクリートとの一体化に十分に効果的であるものと思われる。

高性能減水剤を1%添加した場合の、圧縮強度とスラグ置換率との関係を図-15 に示す。スラグ置換率が0%の場合は、分割練りませ方法で製造すると、高性

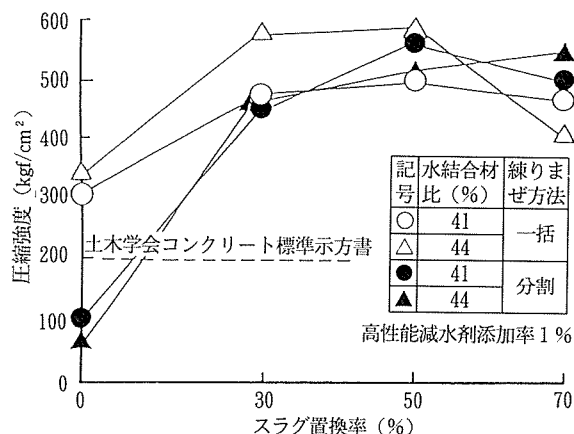


図-15 スラグ置換率と圧縮強度の関係

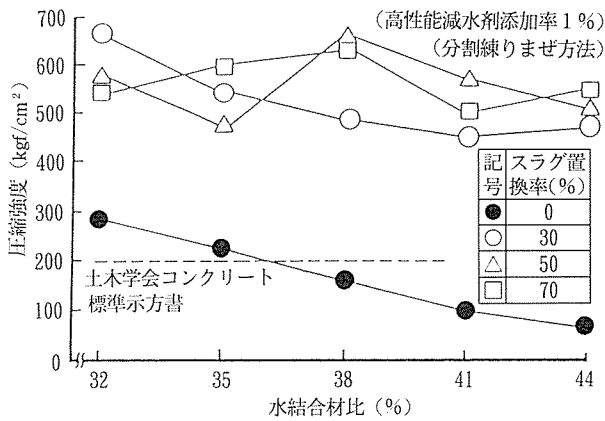


図-16 水結合材比と圧縮強度の関係 (分割練りませ方法)

能減水剤の添加率が1%では材料分離が著しく、一括練りませ方法で製造したものよりも強度は低下した。また、その圧縮強度自体も、一括練りませ方法で製造したもので350 kgf/cm<sup>2</sup>程度となっている。しかしながら、練りませ方法にかかわらず、高炉スラグ微粉末でセメントと置換すると、圧縮強度は500 kgf/cm<sup>2</sup>前後まで増加しており、著しく改善されている。特に、スラグ置換率が0%から30%に増加すると、分割練りませ方法で製造したものの方が、スラグの置換による圧縮強度の改善効果が大きく、400 kgf/cm<sup>2</sup>以上増加している。

分割練りませ方法における、高性能減水剤添加率が1%の場合、圧縮強度と水結合材比との関係を図-16に示す。スラグ置換率が0%では、水結合材比が大きくなるに伴って、強度は低下しており、また、前述のように、ほとんどの配合が材料分離が著しいため、水結合材比が32%でも300 kgf/cm<sup>2</sup>程度の圧縮強度である。しかしながら、セメントをスラグと置換することにより強度は著しく増加しており、水結合材比の影響はあまり受けず、450 kgf/cm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を安定して得られるものとなっている。

図-15および図-16より、練りませ方法、水結合材比にかかわらず、スラグ置換率が30%では改善効果が大きい、50%あるいは70%と置換率を増加させても、30%の時の強度と比較して圧縮強度はほとんど増加しない。これは、置換率が30%では、使用した高炉スラグ微粉末が9210 cm<sup>2</sup>/gと高粉末度のために、セメントと緻密な構造を形成し強度が増加するものの、それ以上置換率を増加しても、強度が低下するほどではないが未反応のスラグが残るため<sup>11)</sup>と思われる。

分割練りませ方法による、スラグ置換率が30%の場合の、圧縮強度と高性能減水剤添加率の関係を示した図-17より、高性能減水剤の添加率の増加に伴い、強度は一般に低下していることが認められる。すなわち、高炉

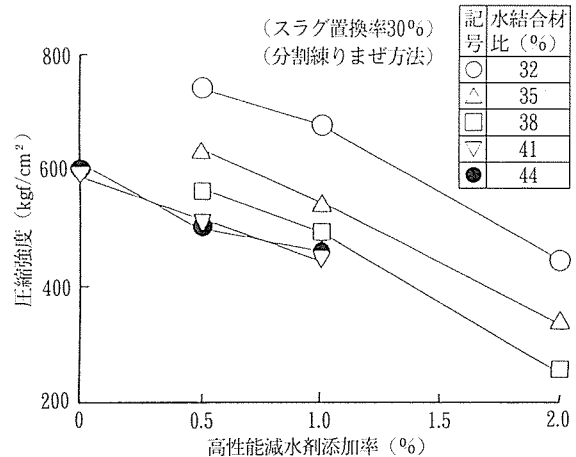


図-17 高性能減水剤添加率と圧縮強度の関係 (分割練りませ方法)

スラグ微粉末と置換することにより、強度は増加するものの、高性能減水剤の添加率の増加は一般に強度を低下させるので、その使用量は必要最小限度にしなければならない。

以上の各性状を考慮すると、高炉スラグ微粉末の置換率が30%の場合、分割練りませ方法を採用すると、500 kgf/cm<sup>2</sup>程度の圧縮強度が得られ、良好な流動性を維持しながらブリージングを低減することが可能となり、最も改善効果が得られる。

そこで、置換率が30%の場合において、分割練りませ方法によって練りませた場合の、表-1に示す品質条件を満足する配合を、表-4に示す。高粉末度の高炉スラグ微粉末で置換したことにより流動性が多少低下したために、品質条件を満足する配合の範囲は広くはないが、●印で示したように、圧縮強度が500 kgf/cm<sup>2</sup>以上、ブリージング率が1%以下という高品質なものが得られた。特に、水結合材比が41%あるいは44%の場合、高性能減水剤の添加率は0~0.5%と非常に少な

表-4 品質条件を満たす配合 (スラグ置換率30%・分割練りませ方法)

W/C+S <sub>g</sub> (%)	32	35	38	41	44
S <sub>p</sub> /C+S <sub>g</sub> (%)					
0					●
0.5				●	●
1.0		●	▲	▲	△
2.0					
3.0					

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ブリージング率 (%)	
	1未満	1~3
200以上	◆	◇
300以上	▼	▽
400以上	▲	△
500以上	●	○



表-5 品質条件を満たす配合  
(スラグ置換率 50 %・分割練りませ方法)

$W/C+S_g$ (%)	32	35	38	41	44
$S_p/C+S_g$ (%)					
0					
0.5					○
1.0			●	○	○
2.0					
3.0					

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ブリージング率 (%)	
	1未満	1~3
200以上	◆	◇
300以上	▼	▽
400以上	▲	△
500以上	●	○

くて済み、経済的である。

スラグ置換率が 50 % においても、圧縮強度が 500 kgf/cm<sup>2</sup> 以上のものが得られたが、ブリージング率も少ない反面、流動性が著しく低下したため、表-5 に示すように、品質条件を満たす配合は非常に少なかった。スラグ置換率が 70 % でも同様の理由により、水結材比が 44 % で高性能減水剤添加率が 1 % の配合のみ、圧縮強度が 500 kgf/cm<sup>2</sup> 以上となった。

## 6. まとめ

本研究は、PC グラウトの高強度化を主目的として、高性能減水剤を用いて、一括練りませ方法と分割練りませ方法により製造し、さらに高粉末度の高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置き換えて PC グラウトを製造し、高性能減水剤の添加率、練りませ方法およびスラグ置換率などが PC グラウトの諸性状に及ぼす影響について、実験的に検討した。そして、所要の流動性、ブリージング率、膨張率を満足する配合において、水結材比と高性能減水剤の添加率との観点から、高強度 PC グラウトが得られる配合条件を提示したものである。

本研究によって得られた結果を取りまとめると、以下のようなものである。

- 1) 従来から用いられている一括練りませ方法によると、高性能減水剤の使用は PC グラウトの流動性の改善に効果的であるが、要求品質を満足しても、その配合の範囲は狭い。そして、高性能減水剤の添加によっても圧縮強度の改善効果はほとんど認められなかった。
- 2) 高性能減水剤を二次水に混入する分割練りませ方法を採用すると、一括練りませ方法で製造したものと比較して、流動性が著しく改善し、高性能減水剤を過剰に添加しない限りブリージングを低減でき

る。そのため、要求品質を満足する PC グラウトを製造するにあたり、水結材比の減少、高性能減水剤の使用量の減少をそれぞれ図ることができ、所要の品質を満足する配合の範囲を拡大することができる。しかしながら、圧縮強度については、分割練りませ方法を採用しても、ほとんど改善効果が認められない。

- 3) 高粉末度の高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置換することにより、セメントと緻密な構造を形成して圧縮強度は著しく改善され、500 kgf/cm<sup>2</sup> 程度を安定して得ることができる。
- 4) スラグ置換率が 30 % では、分割練りませ方法を採用すると、スラグを置換しない場合と同様の良好な流動性を有し、かつ高性能減水剤の過剰添加による著しい分離材料を生じさせない限り、ブリージングも減少する。スラグ置換率が 50 % および 70 % では、ブリージングは減少するものの、高炉スラグ微粉末の粉末度が高いため、流動性が著しく低下する。
- 5) PC グラウトの各性状を考慮すると、高炉スラグ微粉末を 30 % 置換し、分割練りませ方法で製造することにより、所要の品質を満足し、圧縮強度が 500 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の高強度な PC グラウトを得ることができる。

以上のように、PC グラウトの品質は、高性能減水剤の使用、分割練りませ方法の採用および高炉スラグ微粉末の使用によって著しく改善された。しかしながら、高性能減水剤の添加の時期や、分割練りませ方法における一次練りませおよび二次練りませの練りませ時間が PC グラウトの品質に及ぼす影響などに対する検討は、必ずしも十分ではない。したがって、今後これらの項目においても十分に検討し、高強度 PC グラウトを製造するため、品質の評価方法、配合、混和材料および練りませ方法などについて明確な規準を確立しなければならないと考えられる。また、今後 PC グラウトの施工に関しても、自動化や機械化が進むと考えられるので、分割練りませ方法など、従来より煩雑な練りませを行うことのできるミキサが開発されることが望まれる。

## 参考文献

- 1) Mike Winney : Grouted Duct Tendon Ban Poses Problem, New Civil Engineer, 1992. 10. 8.
- 2) Walter Podolny, Jr. : Corrosion of Prestressing Steels and its Mitigation, PCI Journal, Vol. 37, No. 5, Sept.~Oct., pp. 34~55, 1992.
- 3) 辻幸和, 池田正志, 高野秀理 : 高品質 PC グラウトの配合条件, 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. 237~240, 1990年10月.
- 4) 辻, 浦野, 池田, 橋本 : 高品質 PC グラウトの配合選定

◇論文◇

- と練りませ方法, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp. 155~160, 1991.
- 5) 浦野, 辻, 橋本, 池田: 分割練りませ方法による高品質 PC グラウトの性状, 第 2 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. 321~324, 1991 年.
- 6) 辻, 浦野, 橋本, 石川: 高炉スラグ微粉末を用いた PC グラウトの諸性状, コンクリート工学年次論文報告集, 14-1, pp. 257~262, 1992.
- 7) 池田, 辻, 浦野, 橋本: 高強度 PC グラウトの製造, 第 3 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. 251~256, 1992 年.
- 8) 笠井哲郎, 田澤栄一: 三成分系のダブルミキシング効果, 土木学会論文集, 第 402 号 / V-10, pp. 43~51, 1989.
- 9) 笠井芳夫, 小林正几編: セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, pp. 281~294, 1986.
- 10) 田澤栄一, 笠井哲郎: フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果, 土木学会論文集, 第 396 号 / V-9, pp. 135~142, 1988.
- 11) 西川, 鈴木, 高津: 微粉末高炉スラグを用いたセメントペーストの組織と疲労特性, 第 45 回セメント技術大会講演集, pp. 178~183, 1991.

【1993 年 6 月 11 日受付】