

ガラス微粉末を添加した PCグラウトの性状について

出雲淳一

正会員 工博 関東学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒236 横浜市金沢区六浦 4834)

既存構造物の調査において、PCグラウトの充てん不良による劣化事例が報告されており、PCグラウトの性能改善が望まれている。本研究は、PCグラウトの充てん不良をなくすために、土木学会に規定される流動性を確保するとともに、ブリージングが生じないグラウトを開発することを目的としている。

通常、用いられるセメント系のグラウトに粒子径が数十 μm 程度のガラス微粉末をブリージングを抑制する目的で添加し、さらに高性能減水剤を組合わせて用いたグラウトの性状を実験により調べた。実験からは、適量の高性能減水剤の使用の下で、ガラス微粉末をグラウトに添加することにより、グラウトの流動性を著しく損なうことなく、ブリージングを抑制することができることが確認された。

Key Words : fine glass powder, non-bleeding, PC grout, SiO_2 content, superplasticizer
segregation of materials

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下PCと呼ぶ)グラウトは、PC鋼材とシースとの間の空隙を埋めて、コンクリートと一体とするとともに、PC鋼材の腐食を防ぐ働きをしている。しかし、グラウトが不良の場合には、高応力下で用いられるPC鋼材の腐食を引き起こし、PC構造物の耐久性を低下させる。これまでに行われた既存構造物の調査においても、グラウトの充てん不良による構造物の劣化事例が報告されている^{1), 2)}。

PCグラウトは数m~数十mに渡る狭小で、しかも曲線配置されたPC鋼材とシースとの空隙に充てんされるために、その施工管理が難しいものとなっている。さらにPCグラウトの充てん状況の検査方法およびグラウト不良に対する補修方法^{2), 3)}が、現在様々提案されているものの十分に確立されているとは言い難く、注入が確実に行われるようなPCグラウトの品質改善を図ることが必要と考えられる。

PCグラウトに要求される品質は、土木学会標準示方書〔施工編〕によると、流動性が良いこと(JAロートによる流下時間が15~30秒の範囲にあるこ

と)、膨張率が10%以下であること、ブリージング率が3%以下であること、および材令28日の圧縮強度が20MPa以上であることが要求されている。特に、ブリージング率がゼロであることはシース内の空隙を少なくし、PC鋼材の腐食を防ぐために、耐久性の面から望ましが、そのような配合は現時点では一部の製品を用いる場合に限られており、費用の面でも割高となっている。

PCグラウトの流動性を著しく損なうことなく、ブリージングをゼロに抑え、さらに高強度PCグラウトを安価に製造できれば、PC構造物の耐久性、信頼性向上にとって好ましいと考えられる。

本研究は、このような観点から、PCグラウトの品質改善についての検討を行うことを目的としている。グラウトのブリージングを抑えるためには、グラウトの粘性を増加させる方法が挙げられるが、その反面グラウトの流動性が悪くなり、グラウトの充てん性が損なわれることになる。PCグラウトの品質を改善するために、ガラス瓶を数十 μm 程度に粉砕して作られたガラス微粉末と高性能減水剤を通常のセメント系グラウトに添加してPCグラウトを製造して、その性能について実験および検討を行ったので、ここに報告する。

表-1 ガラス微粉末の組成

	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PbO
ガラス微粉末	69.6	16.7	9.7	3.2	0.5	0.3	0.03
ガラス瓶 ⁴⁾	73.0	15.0	10.0	—	1.0	0.05	—

2. ガラス微粉末の物理・化学的性質

(1) ガラス微粉末の製造

実験に用いたガラス微粉末は、ガラス瓶をハンマーを用いて、粒径が1.0～1.5mm程度の大きさになるまで粉碎を行ない、その後ボールミル小型回転架台に24時間かけ、ガラス粉末の微細化を行なった。さらに、微細化されたガラス粉末を250番ふるい(0.063mm)でふるい、粒度調整を行なった。

(2) ガラス微粉末の化学組成分析

ガラスを粉碎して得られたガラス微粉末の組成分析をJIS R 3101 (ソーダ石灰ガラスの分析方法)にしたがって行った。表-1にその分析結果を示している。測定結果からは、ガラス微粉末中の主成分はシリカ質であり、SiO₂の含有量は重量百分率で約70%となっている。その他の成分としては、含有量の多い順にNa₂Oの16.7%、CaOの9.7%となっており、これらの成分が、ガラス成分の大半を占めている。

表-1には今回製造したガラス微粉末の成分以外に、市販のガラス瓶の標準的な組成例⁴⁾も比較のために示している。ガラス微粉末の成分は、市販のガラス瓶の標準的な組成とほぼ同じような成分構成となっている。

ガラスの主成分は非晶質のシリカであり、シリカフェームのSiO₂の含有量が70～98% (一般に90%以上含むものが多い)程度⁵⁾とされていることから、それに比べてやや少ない量のSiO₂を含有していることが理解される。

(3) 色および形状

ガラス粉末の製造の原料に用いられたガラス瓶は半透明の茶褐色を呈していたが、粉碎によって得られたガラス粉体は白色の微粉末となった。また、ガラス微粉末の電子顕微鏡(SEM)の観察結果を写真-1に示している。今回製造したガラス微粉末の粒子の大きさはほぼ10～50μm程度と判断され、その形状は非常に角張った形をしていることが理解される。

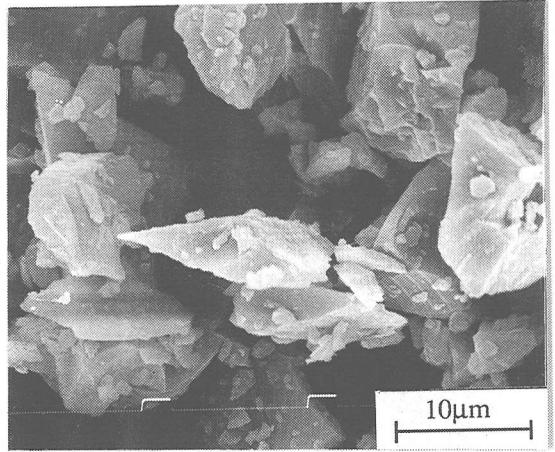


写真-1 SEMによるガラス微粉末

(4) 比重および比表面積

ガラス微粉末の比重および比表面積は、それぞれ比重が2.75g/cm³、窒素吸着法(BET法)によって求めた比表面積の値が3.69m²/gであった。

今回実験に用いたガラス微粉末の比重、比表面積は試行的に行った粉碎による結果で、これらの値は粉碎条件によって変わると考えられる。粉碎によって得られたこのガラス微粉末の比表面積は、セメントの比表面積の約10倍のオーダーの大きさであり、またシリカフェームの比表面積の約1/10のオーダーの大きさであることから、これらの中間的な大きさとなっている。

ブリージングを抑制する目的で、できる限り比表面積の大きいガラス微粉末を製造することを考慮した。しかし、乾式粉碎によって得られるガラス微粉末の比表面積をシリカフェームのそれと同程度の大きさまでにするのは難しいと考えられ、今回得られた程度の比表面積の大きさが粉碎による限界ではないかと判断している。

表-2 グラウトの配合

単位重量 (kgf/m³)

供試体 番号	W/C (%)	ガラス微粉 末の添加率 (%)	水	セメント	ガラス 微粉末	高性能 減水剤
1	38	0	534	1432	0	10
2	38	5	520	1395	70	10
3	38	10	507	1361	136	10
4	38	15	494	1328	199	11
5	40	0	547	1392	0	10
6	40	5	533	1357	68	10
7	40	10	520	1325	132	10
8	40	15	507	1294	194	10
9	43	0	565	1336	0	9
10	43	5	551	1304	65	10
11	43	10	538	1274	127	10
12	43	15	525	1245	187	10
13	45	0	576	1301	0	9
14	45	5	563	1271	64	9
15	45	10	550	1242	124	10
16	45	15	537	1215	182	10

(5) グラウト中における予想されるガラス微粉末の効果

製造されたガラス微粉末は、比表面積がセメント粒子よりも小さく、セメントと水に添加することによりグラウトの粘性を増加させ、しかもグラウト中の保水性を高めてブリージングを抑制すると考えられる。また、ガラス微粉末の主成分が非晶質のシリカ質であることから、セメントの水和反応の過程においてポゾラン反応を起こし、その結果グラウト強度を増加させることが予想される。しかし、ガラス微粉末がセメントと水との存在下においてポゾラン反応を生じさせるかどうかは化学的な検証が必要であり、ガラス微粉末のポゾラン反応性についての検証は別の機会に報告することにする。

3. 実験計画

(1) 使用材料

実験に用いた材料には、普通ポルトランドセメント、ガラス微粉末、およびナフタリンスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤を用い、練りませ水には上水道水を用いた。

(2) 配合

実験パラメータとしては、グラウトの水セメント比を変化させることにし、W/C=38%、40%、43%、45

%とした。ガラス微粉末はブリージングを抑制する目的で用いるので、セメントと置換して用いることにせず、これらの配合にガラス微粉末をセメント重量の{0%、5%、10%、15%}添加することにした。

高性能減水剤は、セメント重量とガラス微粉末の重量の総重量に対して、1.5%添加させて実験を行った。しかし、実験結果はブリージングを抑制するには至らなかった。そこで、高性能減水剤の量を約半分にした0.7%を用いて実験を行った。高性能減水剤を0.7%用いた場合のグラウトの配合を表-2に示す。

(3) 練混ぜ方法

PCグラウトの練混ぜには、JIS R 5201「セメントの物理試験」で用いる練混ぜ機を使用し、練混ぜ方法は一括練りとし、3分間練混ぜを行った。

(4) 試験方法

試験は土木学会規準「PCグラウトの試験方法」に従い、流動性試験、ブリージング率、膨張率の測定を行った。流動性試験にはJAロートを用いて、流下時間の測定を行った。また、ブリージング率、膨張率の測定は、ポリエチレン袋を用いた方法によって行った。試験は、3個の供試体について行い、実験結果は3個の供試体の測定値を平均して表すことにした。

圧縮強度試験に関しては、製作したグラウトをφ5

表-3 実験結果

供試体番号	W/C (%)	ガラス粉末の添加率 (%)	流下時間直後 (秒)	流下時間30分後 (秒)	ブリージング率 (3h) (%)	ブリージング率 (20h) (%)	膨張率 (3h) (%)	膨張率 (20h) (%)	圧縮強度 (MPa)
1	38	0	28	28	1.3	0.0	4.0	-1.9	64.0
2	38	5	34	35	0.4	0.0	2.7	-1.6	59.6
3	38	10	57	62	0.3	0.0	1.8	-0.8	60.1
4	38	15	85	—	0.2	0.0	3.3	0.8	64.5
5	40	0	21	28	1.1	0.0	1.1	0.7	58.9
6	40	5	29	37	0.4	0.0	1.1	-3.0	54.8
7	40	10	43	52	0.4	0.0	1.2	-0.8	57.4
8	40	15	68	82	0.1	0.0	0.1	-1.5	57.6
9	43	0	18	21	1.3	0.0	2.6	-2.3	48.4
10	43	5	21	27	0.0	0.0	0.0	0.0	34.2
11	43	10	27	32	0.3	0.0	1.8	-1.5	45.7
12	43	15	42	54	0.3	0.0	0.3	-3.1	53.0
13	45	0	17	18	2.3	0.5	3.8	-1.0	48.9
14	45	5	19	21	1.7	0.0	3.2	-2.9	31.4
15	45	10	24	28	0.2	0.0	0.9	-2.2	33.2
16	45	15	31	46	0.0	0.0	1.5	0.7	38.0

×10cmの金属製の軽量モールドに詰め込み、膨張を抑制するための重りは載荷せずに、試験日まで型枠を外さずに28日養生した。これは、軽量モールド内のグラウト供試体の方が、型枠を外した状態で養生した供試体よりもシースで覆われたグラウトの状態により近いと考えたため、今回このような試みで供試体を製作した。供試体は、圧縮強度試験を行う前に研磨機を用いて供試体の上面を滑らかに仕上げしてから載荷を行った。

4. 実験結果および考察

(1) ガラス微粉末の添加量と流下時間との関係

表-3は実験結果の一覧表であり、また図-1は高性能減水剤をセメント重量とガラス微粉末の重量の総重量に対して、0.7%添加した場合および1.5%添加した場合の実験結果を示したものである。図-1の横軸にはガラス微粉末の添加率をとり、縦軸にJAロートをを用いた場合のグラウトの流下時間をとってその関係を示している。

高性能減水剤の添加量が0.7%および1.5%のいずれの場合にもガラス微粉末を添加することにより、グラウトの粘性が増すために水セメント比が一定の条件では、ガラス微粉末の添加量の増加に伴い流下時間も増加する傾向が認められる。高性能減水剤をセメント重量とガラス微粉末の重量の総重量に対し

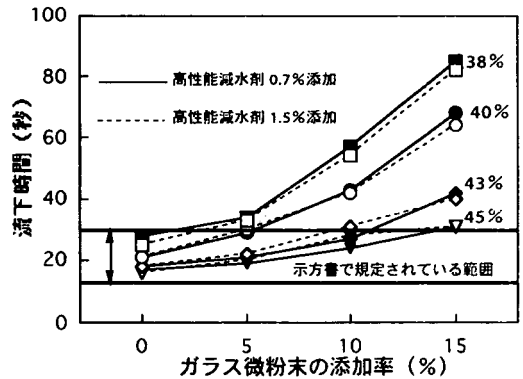


図-1 ガラス微粉末の添加率とJAロートの流下時間

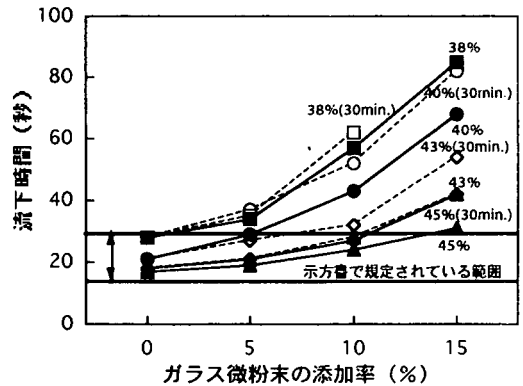


図-2 コンсистенシーの経時変化

て、1.5%添加させた場合には、0.7%添加した場合に比べて若干流下時間が減少する傾向が見られるが、高性能減水剤の添加量に比例して流動特性が改善されるわけではないことが実験結果からも理解される。また、ガラス微粉末の添加量に応じて粘性が増し、J Aロートの流下時間も増加する傾向が認められる。しかし、ガラス微粉末を添加した場合でも、高性能減水剤を用いることにより、水セメント比が38%~45%の範囲においても、土木学会標準示方書〔施工編〕に規定されているJ Aロートによる流下時間を15~30秒の範囲におさまるようなグラウトを製造することができることが理解される。

また、実験では練混ぜ後30分間放置したグラウトのJ Aロートの流下時間の測定も行った。時間の経過に伴い、流下時間も長くなる傾向が認められる。また、ガラス微粉末の添加量が増加するのに伴い、30分後の流下時間も数秒~十数秒長くなっているのが観察される。しかし、J Aロートによる流下時間が15~30秒の範囲にあるようなグラウトの場合には、練混ぜ後30分経過しても流下時間の増加は少ないと判断される。

(2) ガラス微粉末の添加量とブリージング率との関係

図-3~図-4は、実験から得られた3時間後のガラス微粉末の添加量とブリージング率との関係を示したものである。図-3は高性能減水剤を1.5%添加した場合の実験結果を示したものであり、図-4は高性能減水剤を0.7%添加した場合の実験結果を示したものである。高性能減水剤を1.5%添加した場合には、ガラス微粉末を添加してもブリージングを抑制する効果は認められない。また、ブリージングの量も供試体によってまちまちで、実験からは一定の傾向を見

いだすことができない結果となっている。ブリージング率に関しても、多くの場合、土木学会標準示方書〔施工編〕に規定されているブリージングの値を上回る結果となっている。

一方、高性能減水剤を0.7%添加した場合には、ガラス微粉末の添加率に応じてブリージングが減少する傾向が見られ、ブリージング率も高性能減水剤を1.5%添加した場合に比べ全体的に小さくなっている。また、実験結果からはガラス微粉末の添加により、ブリージングが抑制されることが理解される。高性能減水剤を1.5%添加した場合には、ガラス微粉末を添加してもブリージングを抑制する効果は認められず、ブリージングの発生量もかなり多くなることが実験結果より判断され、ブリージングの発生に高性能減水剤の添加量が大きく影響している。これは、辻ら⁷⁾が指摘するように高性能減水剤の添加量が増えるとかえって、材料分離が生じやすくなるためにブリージングが増加するためと考えられる。実際、実験においてもポリエチレン袋中のブリージングの発生状況を観察すると比重の軽い順に上面から水、白色のガラス微粉末、セメントの3層に分離している状況が観察された。しかし、高性能減水剤を0.7%添加した場合には材料分離が生じにくい結果となっており、グラウトの配合設計の検討に高性能減水剤の量の検討は不可欠と考えられる。

ガラス微粉末を添加した場合のブリージング率は、ガラス微粉末を添加しない場合のおおよそ半分以下となっている。また、その値も多くの場合0.5%以下となっている。今回ポリエチレン袋によってブリージング率の測定を行ったが、ブリージング水の測定精度を考えあわせると、ブリージング率が0.5%以下程度のグラウト試料は見掛け上ほとんどブリージングがないように見受けられる。0.5%以下程度のブ

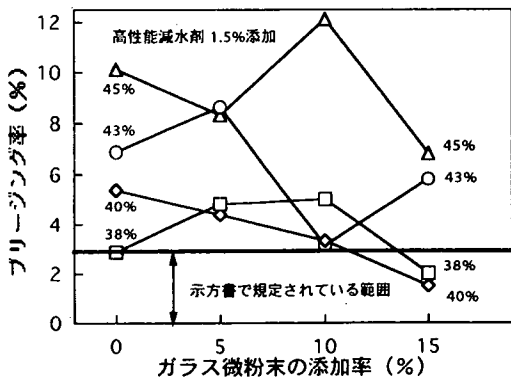


図-3 ガラス微粉末の添加率とブリージング率

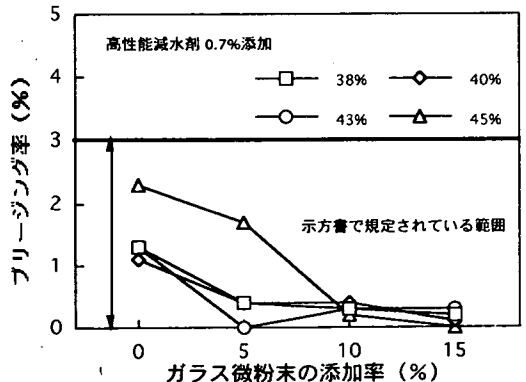


図-4 ガラス微粉末の添加率とブリージング率

リージング率を許容するとした場合、今回行った実験の範囲では水セメント比が43%前後、ガラス微粉末のセメントに対する添加率が5%~10%の範囲でブリージングがほとんどなく、J A ロートによる流下時間が15~30秒の範囲にあるようなグラウトの製造も可能ではないかと考えている。

(3) 膨張率

今回の実験では、グラウトに膨張剤を添加することは行わなかった。3時間後および20時間後の膨張率の測定結果を表-2に示している。3時間後の膨張率は、ガラス微粉末を添加しない場合には、1.1%~4.0% (平均値2.9%) 程度の膨張率が観察された。一方、ガラス微粉末を添加した場合には、0.0%~3.3% (平均値1.5%) 程度の膨張率となっており、ガラス微粉末を添加した場合の膨張率が若干小さくなっている。

一方、20時間以後の膨張率は、ガラス微粉末を添加しない場合には、-2.3%~0.7% (平均値-1.1%) 程度の膨張率であり、ガラス微粉末を添加した場合には、-3.1%~0.8% (平均値-1.3%) 程度の膨張率となっている。膨張率に関しては、ガラス微粉末を添加しない場合とガラス微粉末を添加する場合との差異は認めがたいと考えられる。

(4) 圧縮強度

図-5は、高性能減水剤を0.7%添加した場合の実験結果を縦軸に圧縮強度を横軸にガラス微粉末の添加率をとった場合の関係を示している。ガラス微粉末を添加した場合、ガラス微粉末を添加しない場合に比べ圧縮強度は、同等かそれ以下となっており、主成分がシリカ質のガラス微粉末をセメント系グラウトに添加して用いても、今回行った実験に関しては、

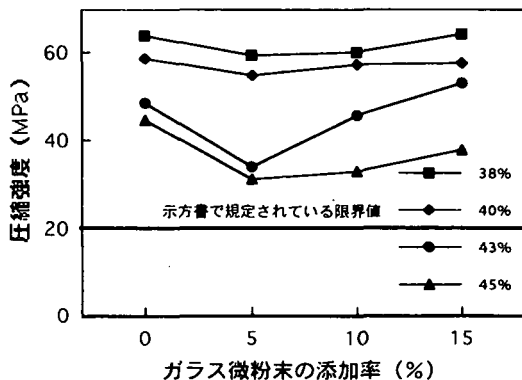


図-5 ガラス微粉末の添加率と圧縮強度

材齢28日における圧縮強度の増加は認められなかった。

長滝ら⁶⁾は、シリカフェームの品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を実験的に調べ、シリカフェームの中には必ずしも強度増加に寄与しないことを報告している。今回用いたガラス微粉末の場合にもこれと同じように、ガラス微粉末の品質に原因があるのではないかと考えられる。また、今回製造したガラス微粉末の比表面積は、シリカフェームの約1/10のオーダーであり、ポゾラン反応性、内部組織の緻密化においてもシリカフェームよりも劣ることが考えられ、ガラス微粉末の添加がグラウトの材齢28日の圧縮強度増加に寄与しなかったものと考えられる。

しかし、セメントにガラス微粉末を添加した場合、ガラス微粉末を添加しない場合に比べ、材齢が3ヶ月程度経過すると圧縮強度が上回ることが実験室では確認している。ガラス微粉末の比表面積がシリカフェームに比べて小さいためにシリカ質の反応速度も遅くなるためではないかと判断している。この点に関しては、ガラス微粉末のポゾラン反応の検証を含めた検討が必要と考えており、別の機会に報告することにする。

5. 結論

PCグラウトの品質を改善するために、ブリージングをゼロに抑えしかも流動性を損なわないグラウトを開発することを念頭において、セメント系グラウトにガラス微粉末と高性能減水剤とを添加したグラウトの性状について調べた。本研究を通して得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 粒子の大きさがほぼ10~50 μm程度に微細粉砕されたガラス微粉末と高性能減水剤をセメント量の0.7%添加した場合には、ブリージングも抑制されることが実験により確認された。
- (2) 高性能減水剤の添加量が多い場合には、ガラス微粉末を添加しても材料分離が生じるためにブリージングを抑制することができず、むしろブリージングを助長させることとなった。
- (3) ガラス微粉末を添加しても、グラウトの膨張率が著しく変化する傾向は認められなかった。
- (4) 今回用いたガラス微粉末を添加した場合、ガラス微粉末を添加しない場合に比べてグラウトの圧縮強度が増加する傾向は認められなかった。

6. おわりに

今回行った実験を通して、グラウトの流動特性を損なうことなく、ブリージングをゼロに抑えるグラウトの開発の可能性が確認されたと考えている。しかし、高性能減水剤の添加量あるいは製品の違いによっては、その効用が得られないことが考えられる。また、今回ガラス微粉末を用いて、ノンブリージングタイプのグラウトの開発を検討したが、ガラス微粉末と同様の効果が期待できる高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどの混和材を用いても、ノンブリージングタイプのグラウトの開発が可能と考えられる。これらの混和材の利用の可能性および高性能減水剤とを考慮した配合設計を検討して、目標とするグラウトの開発を行っていく必要があると考えられる。また、開発されたノンブリージングタイプのグラウトは、実構造レベルのグラウト注入においてもその性能が確認されなければならないと考えられる。

一方、ガラス微粉末には幾分アルカリも含まれている。グラウトはシーで覆われているためにガラス微粉末を添加したグラウト中のアルカリがコンクリートに及ぼす影響は少ないと考えられるが、その点についても検討を行う必要がある。

検討すべき課題は数多く残されているが、PCグラウトの品質改善のためにこれらの点について今後検討を行っていく必要があると考えている。

謝辞:本研究を行うにあたり、ガラス微粉末を提供して頂くと共に、貴重な意見をいただいた本学工学部工業化学科 影山俊文教授に深く感謝の意を表します。また、ガラス微粉末の化学分析を快く引受て下さったピー・エス 町田 武氏、および実験を手伝って頂いた工学部土木工学科学生 桑原智保子さん(ピー・エス)にも深く感謝します。

参考文献

- 1) 小林和夫, 宮川豊章, 杉江 功, 森 拓也: PC構造物のグラウト不良とその補修のための注入材料に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol.36, No.3, pp.75-81, 1994.
- 2) 望月秀次, 本間淳史, 上東 泰: 非破壊検査を用いたPCグラウトの点検と補修, プレストレストコンクリート, Vol.37, No.6, pp.67-74, 1995.
- 3) 中原繁則, 長田晴道, 高田三郎: PCグラウトの検査方法の一例, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, pp.86-89, 1985.
- 4) 例えば, 塩川二郎著: 無機工業化学概論, 丸善, pp.149, 1992.
- 5) 長滝重義: シリカフェームに関する研究の現状, 土木学会論文集, No.508/V-26, pp.1-14, 1995.
- 6) 長滝重義, 大即信明, 久田 真, 水野和彦: シリカフェームの品質とその評価に関する研究, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.87-98, 1995.
- 7) 辻 幸和, 池田正志, 橋本親典, 浦野真次: 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.

(1996. 6. 10 受付)

CHARACTERISTICS OF PC GROUT WITH FINE GLASS POWDER

Junichi IZUMO

In the investigation of the existing Prestressed Concrete structures on the deterioration, the several examples of the defects of the PC grout have been reported. The improvement of the PC grout has been requested. This study aims at the development of the new type of the PC grout that has no bleeding kept with the normal fluidity. Through the tests of the grout with the fine glass powder and the moderate amount of the superplasticizer, it was confirmed that the new type of the grout decreases the bleeding without losing the fluidity.