

PCグラウトのレオロジー特性に及ぼす練混ぜ方法の影響

熊本高等専門学校	正会員 博 (工)	○松家 武樹
(株)安藤・間	正会員	田辺 重男
(株)安藤・間		工藤 朗太
(株)安藤・間		木村 茂昭

Abstract : In this study, the effects of mixing methods on rheological properties of PC grout were examined. From the test results, it can be concluded that (1) when shape of mixing blade, rotational speed of mixing blade and settling time of mixing were conducted, the flow time of the PC grout was affected; (2) the intermittent mixing, including some settling time, shortened the flow time of PC grout, compared to conventional mixing; (3) when intermittent mixing was conducted, the plastic viscosity of PC grout was smaller than that of conventional mixing.

Key words : PC grout , rheological property , mixing blade , rotational speed , settling time

1. はじめに

PCグラウトのレオロジー特性は、セメントの種類、水セメント比（以下、W/Cと略記）、混和剤の添加量、およびPCグラウト温度などに起因することが報告^{1,2)}されてきた。これらは、主に材料や配合に関するものである。PCグラウトのレオロジー特性に及ぼす影響には、練混ぜ方法に関するものなども考えられるが、これらの研究は少ない³⁾。著者らは、これまでに通常の方法で製造されたPCグラウトに、真空下および大気圧下での遠心作用による練混ぜを付与したPCグラウトの流下時間に及ぼす影響について検討してきた。遠心作用を付与して製造されたPCグラウトは、通常の方法で製造されたPCグラウトに比して、流下時間が短くなることを明らかとしてきた⁴⁾。この結果より、練混ぜ方法の違いはPCグラウトのレオロジー特性に影響を及ぼすことが示唆される。

そこで本研究では、練混ぜ方法がPCグラウトのレオロジー特性に及ぼす影響について明らかにすることとした。なお、本研究ではPCグラウトのレオロジーの基本的特性を把握するための実験として、2つのシリーズについて検討した。シリーズIでは、攪拌羽根の形状、攪拌羽根の回転数および静置時間を設けた攪拌方式がPCグラウトの流下時間に及ぼす影響について検討した。シリーズIIでは、シリーズIで得られた結果のメカニズムを明らかにするための詳細な検討を行った。

2. PCグラウトの配合および練混ぜ

本研究で用いたPCグラウトの粘性タイプは高粘性を対象とした。水は上水道水、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤はGF-1720を使用しセメントに対して1.0%を添加した。なお、GF-1720の主要成分は高性能減水剤と増粘剤から構成されている⁵⁾。PCグラウトの練混ぜは、温度20℃の試験室で行い、容量150ℓのグラウトミキサーを用いて行った。

3. シリーズI

3.1 実験概要

表-1に、シリーズIにおける練混ぜ方法を示す。本シリーズでは、グラウトミキサーに取付けられている攪拌羽根の形状、攪拌羽根の回転数、および攪拌方式をパラメーターとし、練混ぜを行った。

表-1 練混ぜ方法 (シリーズ I)

Case No.	W/C (%)	攪拌羽根の形状	攪拌羽根の回転数 (rpm)	攪拌方式														
				項目	経過時間 (秒)													
					0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780
Case 1	40	Type A	990	連続練り	[0-180s continuous mixing] ★													
Case 2				断続練り	[0-300s mixing, 300-600s stop, 600-780s mixing] ★													
Case 3		Type B	950	連続練り	[0-180s continuous mixing] ★													
Case 4				断続練り	[0-60s mixing, 60-720s stop, 720-780s mixing] ★													
Case 5			950	断続練り	[0-300s mixing, 300-600s stop, 600-780s mixing] ★													
Case 6				連続練り	[0-30s 950rpm, 30-120s 1880rpm, 120-780s 1880rpm] ★													
Case 7		1500	断続練り	[0-30s 950rpm, 30-780s 1500rpm, 780-780s stop] ★														

★ : 流下時間の測定時期

詳述すると、本シリーズでのW/Cは40%とし、攪拌羽根の形状は図-1に示すType AおよびType Bのものを使用した。すべての材料投入後の攪拌羽根の回転数は、950~1880rpmの範囲である。なお、Case 6については、60秒間950rpmによる練混ぜを行い、30秒間で1880rpmの回転数まで上げ、その後90秒間1880rpmによる練混ぜを行った。攪拌方式には、連続練りと断続練りの2種類がある。連続練りとは180秒間行う練混ぜを中断することなく連続的に行う方式であり、断続練りとは180秒間行う練混ぜの途中に静置時間をはさみながら断続的に練混ぜを行う方式である。練混ぜ途中時に設ける静置のタイミングは前記表-1に示すとおりであり、静置時間は300秒とした。なお、静置回数はCase 2, Case 5およびCase 7は2回であり、Case 4は1回である。

本シリーズでは流下時間の測定を、表-1に示すとおり練混ぜ直後に行っている。測定方法についてはJSCE-F 531に準拠した。流下時間の結果は、同一条件で3回の試験の平均値である。

3.2 実験結果および考察

図-2に、本シリーズで得られた流下時間の結果を示す。同一条件における流下時間のばらつきの範囲は、0.3秒から3.1秒であった。本シリーズ内では、同図で得られた結果の平均値を抽出し、攪拌羽根の形状、攪拌羽根の回転数、および攪拌方式の各パラメーターがPCグラウトの流下時間に及ぼす影響について論述することとした。

(1) 攪拌羽根の形状の影響

図-3には、攪拌羽根の形状の影響に着目した流下時間の結果を示す。攪拌方式にかかわらず、Type Bの攪拌羽根を用いた流下時間はType Aに比して短くなっており、その短縮時間は8.1秒から10.3秒の範囲である。

(2) 攪拌羽根の回転数の影響

図-4には、攪拌羽根の回転数の影響に着目した流下時間の結果を示す。攪拌方式にかかわらず、回転数の高い場合の流下時間は、回転数の低い場合に比して短くなっており、その短縮時間は1.2秒から

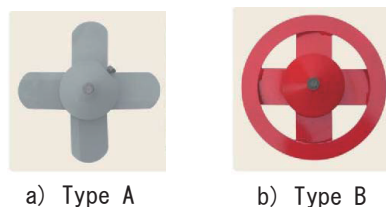


図-1 攪拌羽根の形状

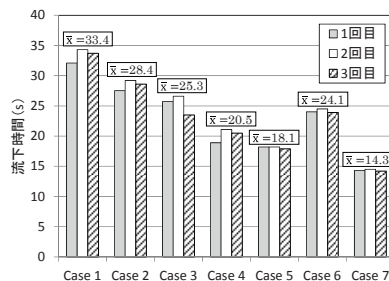


図-2 流下時間

3.8秒の範囲である。

(3) 攪拌方式の影響

図-5には、攪拌方式の影響に着目した流下時間の結果を示す。攪拌羽根の形状にかかわらず、断続練りの流下時間は連続練りに比して短くなっており、その短縮時間は4.8秒から7.2秒の範囲である。

(4) シリーズIの総括

本シリーズの結果を総括すると、PCグラウトの流下時間は、攪拌羽根の形状、攪拌羽根の回転数、および攪拌方式の影響を受けることが明らかとなった。攪拌羽根の形状および攪拌羽根の回転数がPCグラウトの流下時間に及ぼす影響は、PCグラウトへのエネルギー伝達効率に起因するものと考えられる。一方、攪拌方式がPCグラウトの流下時間に及ぼす影響の要因は判然としない。このメカニズムを解明するためには、3つの課題を明らかにする必要があると考える。

第一の課題は、静置すること自体がPCグラウトの流動性に及ぼす影響を明らかにすることである。著者らは、付加的にW/Cが42.8%におけるPCグラウトの流下時間の経時変化試験を実施した。その結果を図-6に示す。PCグラウトを静置した場合、流下時間に大きな経時変化はない。練混ぜ直後から70分経過後に流下時間が最も短くなっているが、練混ぜ直後より1.9秒短くなる程度である。この結果より、静置すること自体が流下時間に及ぼす影響は小さいといえ、静置したのちに再攪拌することが影響していると考えられる。シリーズIIでは、静置すること自体がフロー値に及ぼす影響を確認するために、フロー値の経時変化について検討することとする。

第二の課題は、静置したのちに再攪拌することが流下時間に影響を及ぼすメカニズムを明らかにすることである。このため、シリーズIIでは、マイクロSCOPEによるセメント粒子の分散状況、および塑性粘度や降伏値について検討することとする。

第三の課題は、流下時間と静置回数、および流下時間と練混ぜ途中時に設ける静置時間の関係を明らかにすることである。ここでは、流下時間と静置回数の関係について整理する。

図-7に、静置回数の影響に着目した流下時間の結果を示す。同図に示す縦軸は断続練りと連続練りの流下時間の差分値であり、断続練りによる流下時間の短縮時間を示すものである。同図に示すとおり、静置回数の増加とともに流下時間の短縮時間は大きくなっている。この結果は、静置回数が流下時間に影響を及ぼすことを示唆するものである。一方、流下時間と練混ぜ途中時に設ける静置時間の関係について把握するために、シリーズIIでは静置時間を450秒とした場合について検討することとする。

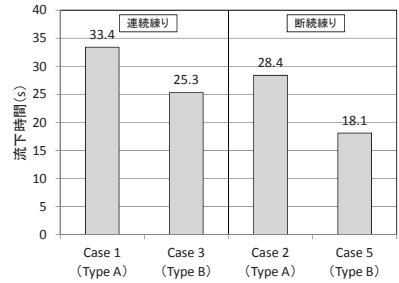


図-3 攪拌羽根の形状の影響

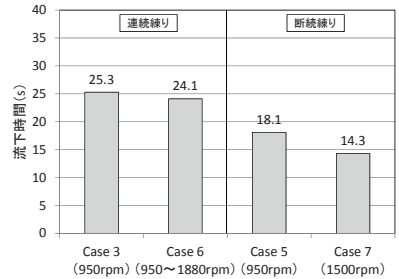


図-4 攪拌羽根の回転数の影響

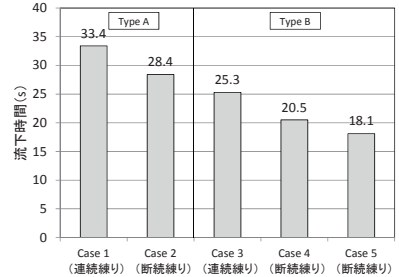


図-5 攪拌方式の影響

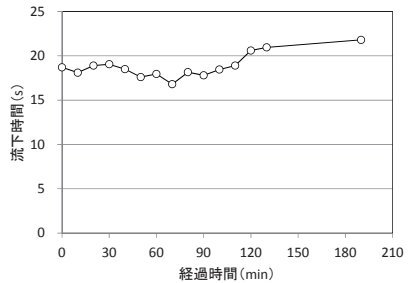


図-6 流下時間の経時変化

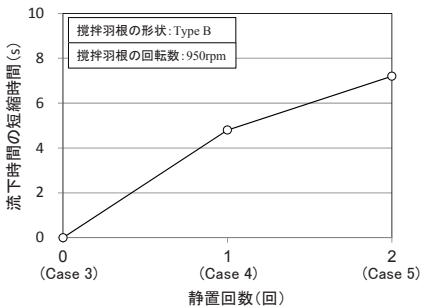


図-7 静置回数の影響

4. シリーズII

本シリーズでは、シリーズIで明らかとなった連続練りと断続練りの違いがPCグラウトのレオロジー特性に及ぼす影響のメカニズムを明らかにするものである。

表-2 練混ぜ方法 (シリーズ II)

Case No.	W/C (%)	攪拌羽根の形状	攪拌羽根の回転数 (rpm)	攪拌方式	
				項目	経過時間 (秒)
Case 1	40	Type B	920	連続練り	0 - 180 (★)
Case 2				断続練り	0 - 120 (静置) 450 - 600 (★)

★：流下時間の測定時期

4.1 実験概要

表-2に、シリーズIIにおける練混ぜ方法を示す。本シリーズでは、前記図-1に示すType Bの攪拌羽根を用い、攪拌羽根の回転数を920rpmとして180秒間の練混ぜを行った。攪拌方式は、連続練りと断続練りの2種類である。Case 2の断続練りでは、120秒間の練混ぜ後、450秒間静置し、再度60秒間の練混ぜを行った。なお、Case 2の静置回数は1回である。

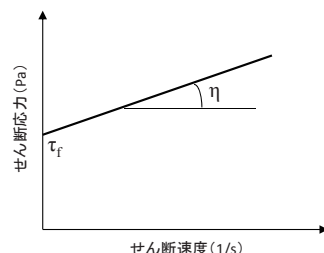


図-8 ビンガム流体モデル

(1) 流下時間およびフロー試験

流下時間の測定はシリーズIで論じた方法と同様である。フロー試験は、既往の文献⁶⁾に記されている円筒容器 (内径50mm×高さ100mm) を用いる方法で行った。フロー値の結果は、直角2方向の直径を計測した平均値である。なお、フロー値は、前記課題1を明らかにするために必要となる。

(2) マイクロスコープによるPCグラウトの観察

PCグラウト中のセメント粒子の分散状況の観察を、マイクロスコープ (倍率：×200, KEYENCE社製) により行った。この観察結果は、前記課題2を明らかにするために必要となる。

(3) 塑性粘度および降伏値

本研究では、PCグラウトのレオロジーモデルをビンガム流体モデルと仮定し、B型回転粘度計より塑性粘度および降伏値を算出した。図-8にビンガム流体モデルを示す。塑性粘度および降伏値は、B型回転粘度計より求めたせん断応力およびせん断速度の値をプロットしたものを線形近似し、縦軸の切片を降伏値 τ_r 、その傾きを塑性粘度 η として算出した⁷⁾。この結果は、前記課題2を明らかにするために必要となる。

4.2 実験結果および考察

本シリーズは、前記3つの課題を解明し、連続練りと断続練りの違いがPCグラウトのレオロジー特性に及ぼす影響のメカニズムを明らかにするために行ったものである。このため、各課題ごとに結果を整理する。

(1) 静置すること自体が流動性に及ぼす影響 (前記課題1)

図-9には、Case 1における練混ぜ直後のフロー値、および練混ぜ直後から450秒間静置した後に行ったフロー値の結果を示す。経過時間630秒後のフロー値は、練混ぜ直後からほぼ変化はない結果となった。前記シリーズIの結果と併せて論じると、静置すること自体がPCグラウトの流下時間およびフロー値に及ぼす影響は小さいといえる。本実験におけるPCグラウトに用いた混和剤の主要成分は、前述のとおり、高性能減水剤と増粘剤から構成されている⁵⁾。高性能減水剤の主成分はメラミンスルホン酸系化合物であり、静電的反発力による化学的作用によりセメント粒子を分散させるものである。すなわち、静置しただけでは、静電的反発力の化学

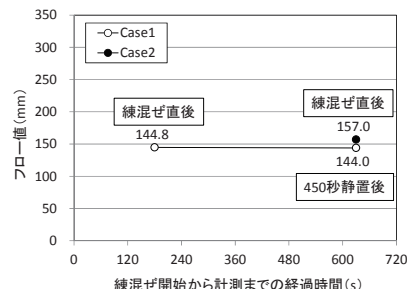


図-9 フロー値の経時変化

作用は促進しないことを意味する。

一方、図-9にはCase 2における練混ぜ直後のフロー値も示す。Case 2のフロー値はCase 1の値とほぼ同じである。前記シリーズIの結果と併せて論じると、静置したのち再攪拌することがPCグラウトの流下時間に及ぼす影響は大きい、フロー値に及ぼす影響は小さいといえる。

(2) メカニズムの解明 (前記課題2)

図-10に、本シリーズにおける流下時間の結果を示す。流下時間はシリーズIで論じてきた結果と同様の傾向を示しており、Case 2の断続練りはCase 1の連続練りに比して短くなっている。その差は6.7秒である。

著者らは、このメカニズムを解明するために、Case 1およびCase 2の練混ぜ方法で製造したPCグラウトを顕微鏡で観察した。その結果を図-11に示す。Case 1では、セメント粒子の大きな凝集体が見受けられるものの、Case 2ではセメント粒子の凝集体がCase 1に比して小さくなっている。この結果から、断続練りは連続練りに比して、セメント粒子は分散していることが実証された。

図-12にはせん断応力とせん断速度の関係を示す。Case 1とCase 2を比較した場合、降伏値はほぼ同じ値であるが、塑性粘度はCase 2の方がCase 1に比して小さな値となっている。この結果から、断続練りが降伏値に及ぼす影響はほとんどないが、塑性粘度には影響を及ぼすことが明らかとなった。山口ら⁶⁾の報告では、塑性粘度は流下時間と、降伏値はフロー値とそれぞれ相関関係があるとしており、本実験結果においても同様な結果となっている。なお、断続練りによる塑性粘度の低減は、セメント粒子の分散に伴う内部拘束水の開放に起因するものと考えられる。

図-13に、セメント粒子の分散状態に伴う拘束水の開放状況のモデルを示す⁸⁾。断続練混ぜの場合、練混ぜの中断から再度練り混ぜるまでにPCグラウトを数分間静置している。この静置時間を設けることで、混和剤がセメント粒子表面に十分に吸着される。十分に吸着された時点で、再び練り混ぜることにより、セメントがより分散し、セメント粒子の凝集体に拘束されていた内部拘束水が開放される。内部拘束水の開放により、流動性に寄与する水量が増加したため断続練りの塑性粘度は小さくなったものと考えられる。内部拘束水の開放に伴う塑性粘度の低減の結果として、断続練りの流下時間は連続練りに比して短くなったと考えられる。

(3) 静置時間が流下時間に及ぼす影響 (前記課題3)

シリーズIでは、静置回数が流下時間に及ぼす影響について整理したが、本シリーズでは練混ぜ途中時の静置時間と流下時間の短縮時間について整理する。図-14には練混ぜ途中時の静置時間と流下時間の短縮時間の関係を示す。同図にはシリーズIにおける前記図-5に示すType Bの攪拌羽根を用いた結果も示す。なお、シリーズIでは1回の静置時間は300秒である。本実験結果における流下時間の短縮時間は静置時間の増加とともに大きくなっている。この結果から、流下時間と練混ぜ途中時の静置時間には強い相関があるといえる。なお、静置時間600秒の結果は、他のケースと異なり断続回数が2回

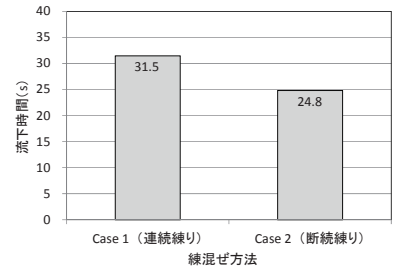


図-10 流下時間

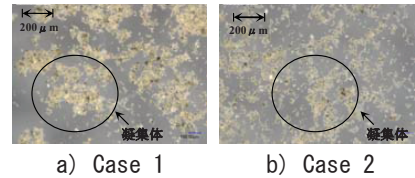


図-11 顕微鏡による観察結果

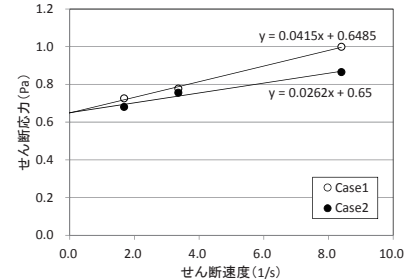


図-12 せん断応力とせん断速度の関係

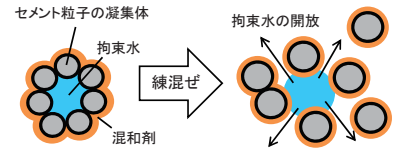


図-13 セメント粒子の分散状態の変化⁸⁾

であり、静置回数の影響が含まれているが、それぞれの寄与の程度は明らかではない。

(4) 流下時間と塑性粘度の関係およびフロー値と降伏値の関係

前述のとおり、塑性粘度は流下時間と、降伏値はフロー値とそれぞれ相関関係があると報告されている⁶⁾。本論文でも同様にそれぞれの相関関係について検討した。図-15に塑性粘度と流下時間の関係を、図-16には降伏値とフロー値の関係を示す。各図には山口らの実験データ⁶⁾および本実験で得られたデータを線形近似した結果も示す。塑性粘度と流下時間の相関係数は0.96であり、フロー値と降伏値の相関係数は0.98であり、いずれも相関関係があるといえる。

5. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) PCグラウトの流下時間は、攪拌羽根の形状、攪拌羽根の回転数、および攪拌方式の影響を受ける。
- (2) 練混ぜ途中で静置時間を設ける断続練りは、一般的に行う連続練りに比して、PCグラウトの流下時間を短くさせるが、フロー値はほぼ変化しない。
- (3) 断続練りは連続練りに比して、塑性粘度を小さくさせるが、降伏値にはほとんど影響しない。
- (4) 断続練りによる流下時間の短縮は、セメント粒子がより分散したことにより塑性粘度が小さくなったことに起因する。

参考文献

- 1) 出雲淳一：PCグラウトの品質改善に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.641/V-46，pp.133-151，2000。
- 2) 一般社団法人プレストレスト・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2013改訂版），2013。
- 3) 李春鶴，辻幸和，半井健一郎，青木文良：粒度の異なる高炉スラグ微粉末を用いたPCグラウトの高強度化，Cement Science and Concrete Technology，No.61，pp.148-152，2007。
- 4) 松家武樹，田辺重男，木村茂昭，坂田祐介：真空および大気圧下での遠心作用による練混ぜを付与したPCグラウトの諸特性，プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集，pp.47-52，2014。
- 5) 岩永豊司，永瀨強，山下直樹，小松茂：PCグラウト材料の変遷と今後の方向性，プレストレストコンクリート，Vol.48，No.2，pp.64-67，2006。
- 6) 山口光俊，細野宏巳，野島昭二，辻幸和：PCグラウトのレオロジー特性に関する統一試験，プレストレストコンクリート技術協会第13回シンポジウム論文集，pp.175-178，2004。
- 7) 水上伸介，出雲淳一：PCグラウトの充填性能評価に関する一考察，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.5，pp.71-80，2001。
- 8) 中山智大，大内雅博：外力によるセメントの凝集・分散と高性能AE減水剤の吸着，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1217-1222，2010。

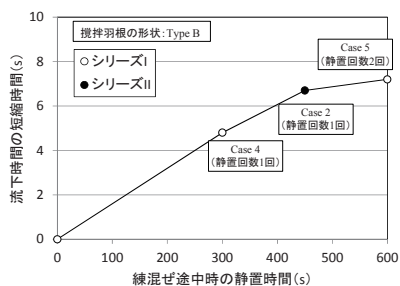


図-14 静置時間と流下時間の短縮時間の関係

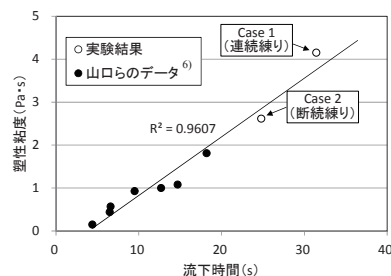


図-15 塑性粘度と流下時間の関係

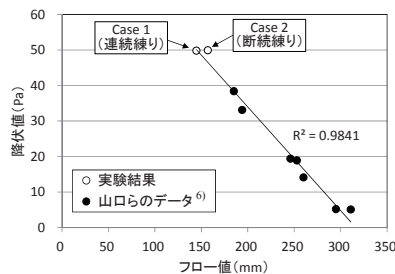


図-16 降伏値とフロー値の関係