

論文 高性能グラウトのレオロジー定数, 分離抵抗性および圧縮強度に及ぼすシリカフュームおよび石灰石微粉末の影響

大熊 晃^{*1}・Ammar Yahia^{*2}・呉 承寧^{*3}

要旨: プレストレストコンクリート構造物のポストテンション方式においてグラウトをシース管内に充填させることは, 耐久性の面からとても重要なものであるといえる。本研究は, 充填性の向上を図るためグラウトの流動性を高めることを目的とし, 分離低減材として混和材に着目し, シリカフュームおよび石灰石微粉末を混入したグラウトの材料試験を行った。シリカフューム置換のグラウトは, 粘性および加圧ブリーディング率の低減, 圧縮強度の増加が確認できた。石灰石微粉末混入のグラウトは, 粘性への影響は少なく, 加圧ブリーディング率が低減され, 水セメント比 33%の配合で強度の増加が確認された。

キーワード: 充填性, 流動性, 分離抵抗性, 低水セメント比, シリカフューム, 石灰石微粉末

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下, PC) 構造物でポストテンション方式を採用する場合, PC鋼材の緊張後, シース管内の空隙にグラウトを充填する必要がある。このグラウトを充填する目的は, 部材とPC鋼材を一体化させ, 塩化物イオンの浸透で引き起こされるPC鋼材の腐食を抑制するものである¹⁾。このことから, ポストテンション方式においてグラウトをシース管内に充填させることは, 耐久性の面からとても重要なものであるといえる。従って, シース管内の隅々まで充填され, PC鋼材を確実に保護する高性能なグラウトを製造するためには, 流動性を高めることによって, 充填性の向上が図られると考えられる。

しかし, 流動性を高めることによって, グラウトの材料分離抵抗性は, 著しく損なわれてしまうことが懸念される。よって, 分離抵抗性を高めるために, 水セメント比を低くし, 混和材を使用することで材料分離の低減が図れるのではないかと考えられる。混和材は, 水分を吸着

する表面積が大きいいため, 保水能力の高い²⁾シリカフュームおよび一般的にコンクリート用混和材として使用されている石灰石微粉末を取り上げた。しかし, この2種類の混和材を使用することにより, 分離抵抗性だけでなく, レオロジーおよび圧縮強度がグラウトとしての性能を満足するものかどうかは, ほとんど研究されておらず, 検討を行う必要があると考えられる。

本研究では, 流動性の高いグラウトの製造を目標とし, 分離低減材として混和材を用いたグラウトの分離抵抗性およびレオロジー, そしてグラウトの強度発現に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では, 表-1に示すようにセメントには, 普通ポルトランドセメント (以下, 普通セメント) および低熱ポルトランドセメント (以下, 低熱セメント) を使用し, 混和材には, シリカフュームと石灰石微粉末を使用し, 高性能減水剤は, ポリカルボン酸系のものを使用した。

*1 オリエンタル建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 オリエンタル建設 (株) 技術研究所 ph.D (正会員)

*3 オリエンタル建設 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

表－１ 使用材料の特性

	密度	比表面積 (cm ² /g)
普通セメント	3.16	3,310
低熱セメント	3.22	3,470
シリカフューム	2.20	200,000
石灰石微粉末	2.67	3,840

2.2 試験方法

本実験では、練り混ぜに回転速度 1000rpm のミキサーを用い、固形物が残ることのないように水を攪拌しながら高性能減水剤を投入し、30秒後同じく攪拌しながらセメントおよび混和材の投入を行った。最初の高性能減水剤の投入から練り上がりまで8分間とした。

試験項目は、流動性、分離抵抗性、レオロジー、圧縮強度に関して行った。流動性は、ガラス板上においた内径φ40×40mmの円筒状の筒にグラウトを流し込み、引き抜いたときの広がり大きさを計測した（以下、ミニスランプフロー）。ミニスランプフローは、流動性一定のもとで他の試験を行うための前試験として行い、目標値を185±5mmとなるように高性能減水材の添加量を調整した。分離抵抗性試験は、ポンプ圧入時の圧力下におけるグラウト材料の分離抵抗性を調べるために行った。試験方法は、φ86×86mmの容器に300mlのグラウトを入れて密閉した後、0.50～0.55MPaで10分間加圧してろ紙からこされたブリーディング水を採取した（以下、加圧ブリーディング試験）。分離抵抗性は、このとき採取したブリーディング水量に対するグラウト300ml中に含まれる水量の割合（以下、加圧ブリーディング率）で評価する。レオロジーの測定には、二重円筒型の回転粘度計で内円筒と外円筒の隙間が1.5mmのものを使用した。回転速度は、1分間で直線的に100rpmまで速度を速め、その後、同じ勾配で減速させた。注入施工時には、シース管内にグラウトを注入するため、グラウトが流動し続けることを想定し、加速後の減速時を評価対象として取り扱った。レオロジー定数を求めるとき、グラウト注入施工で一般的なせん断ひずみ速度が50

表－２ 混和材としてシリカフュームを使用したグラウトの配合

配合名 ^{*)}	水結合 材比 W/B (%)	シリカフューム 置換率 SF/B (%)	減水剤 添加率 P/B (%)
NO-WB30-SF0	30	0	0.200
NO-WB30-SF5	30	5	0.219
NO-WB30-SF8	30	8	0.240
NO-WB30-SF10	30	10	0.255
NO-WB30-SF15	30	15	0.296
NO-WB33-SF0	33	0	0.120
NO-WB33-SF5	33	5	0.165
NO-WB33-SF8	33	8	0.210
NO-WB33-SF10	33	10	0.235
NO-WB33-SF15	33	15	0.270
LH-WB30-SF0	30	0	0.120
LH-WB30-SF5	30	5	0.189
LH-WB30-SF8	30	8	0.200
LH-WB33-SF0	33	0	0.100
LH-WB33-SF5	33	5	0.120
LH-WB33-SF8	33	8	0.180

*) NO：普通セメント，LH：低熱セメント

WB：水結合材比（％），SF：シリカフューム置換率（％）

表－３ 混和材として石灰石微粉末を使用したグラウトの配合

配合名 ^{*)}	水セメ ント比 W/C (%)	石灰石微粉 末混和率 LS/C (%)	減水剤 添加率 SP/C (%)
NO-WC30-LS0	30	0	0.200
NO-WC30-LS5	30	5	0.193
NO-WC30-LS10	30	10	0.213
NO-WC30-LS15	30	15	0.226
NO-WC30-LS20	30	20	0.253
NO-WC33-LS0	33	0	0.120
NO-WC33-LS5	33	5	0.162
NO-WC33-LS10	33	10	0.189
NO-WC33-LS15	33	15	0.210
NO-WC33-LS20	33	20	0.231

*) NO：普通セメント，WC：水セメント比（％）

LS：石灰石微粉末混和率（％）

～150s⁻¹であることを考慮し、回転粘度計の減速曲線を用い、せん断ひずみ速度が50～150s⁻¹の範囲で降伏値および塑性粘度を計算した。圧縮強度試験は、材齢1日、28日で行った。養生方法は、20℃の環境下で封間養生をした。

2.3 グラウトの配合

本実験の配合は、水結合材比を30％、33％と

し、シリカフュームを結合材として結合材に対する内割りで 0～15%としたもの、さらに石灰石微粉末をフィラーとしてセメントに対する外割りで 0～20%混入した。高性能減水剤は、流動性を各配合とも一定のものとするため、ミニスランプフローが $185 \pm 5 \text{ mm}$ となるように添加した。表-2,3にグラウト配合表を示す。

3. 試験結果

3.1 高性能グラウトの特性に及ぼすシリカフュームの影響

(1) 流動性に及ぼす影響

図-1は、シリカフュームの置換率を変化させ、ミニスランプフローが $185 \pm 5 \text{ mm}$ になるときの高性能減水剤の添加率を示す。シリカフュームの置換率が増加するにつれて高性能減水剤の添加率が増していく傾向にある。これは、シリカフュームがセメントと比べると密度が小さく、非常に微細なものであるため、置換により粉体表面積が飛躍的に増加し、同水量において粉体表面を覆っている水膜の厚さが $1/5$ 以下にまで薄くなるため、粉体間の抵抗が大きくなると考えられる。さらに、シリカフュームが多く的高性能減水剤を吸着する性質がある⁴⁾ことにも起因すると推測される。また、低熱セメントは、普通セメントに比べ少ない高性能減水剤の添加率で同様の流動性が得られることが分かった。

(2) 分離抵抗性に及ぼす影響

図-2にシリカフュームの置換率を変化させたときの加圧ブリーディング率を示す。シリカフュームの置換率を増加することにより加圧ブリーディング率の低下が見られる。特に、シリカフューム置換率を 8%としたときにその傾向は顕著であった。

(3) レオロジーに及ぼす影響

図-3に、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係を示す。降伏値および塑性粘度は一般的に用いられているビンガムモデルにより評価した。しかし、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係において降伏応力以上の領域で直線的な流動を

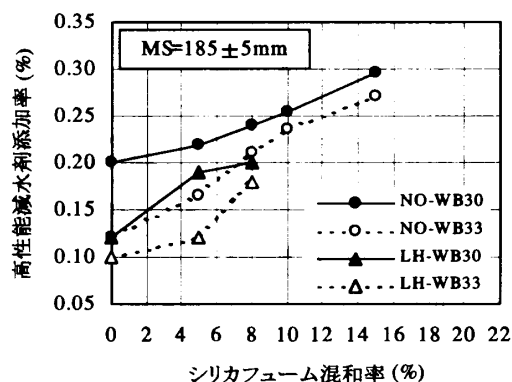


図-1 シリカフューム置換で同一流動性を得るための高性能減水材の添加率

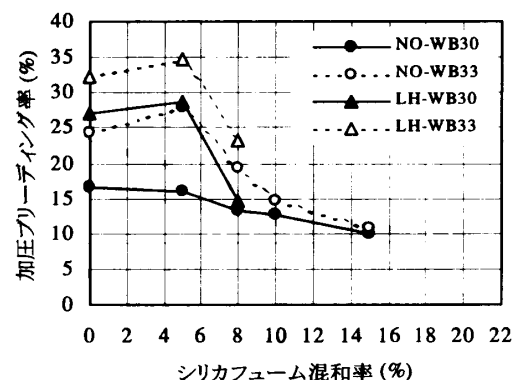


図-2 シリカフューム置換による加圧ブリーディング率の影響

するビンガムモデルは、必ずしも全ての塑性流体に当てはまるわけではなく、流動開始後は指数法則的挙動を示すことが多いため、指数法則モデルとして式(1)に示す Hershel・Bulkley モデル³⁾を採用し、指数に関する評価も同様に行った。式(1)に示す n は、塑性流体のチクソトロピーを評価する指数である。 $n < 1$ のときせん断ひずみ速度の上昇にともない粘性が減少し、 $n > 1$ のときせん断ひずみ速度の上昇にともない粘性が増加することを示している。

$$\tau = \kappa \cdot \dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad (1)$$

ここに、 τ : せん断応力, $\dot{\gamma}$: ひずみ速度

$n < 1$: せん断により粘性が減少

$n > 1$: せん断により粘性が増加

$n = 1$: ビンガムモデル

($n = 1 \Rightarrow \kappa$: 塑性粘度, τ_0 : 降伏値)

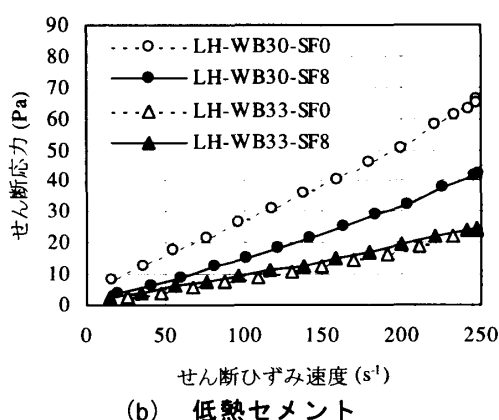
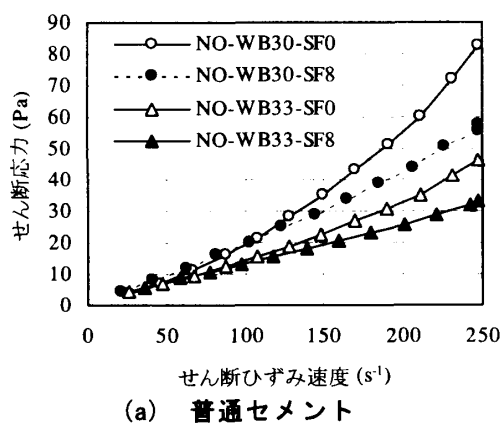


図-3 シリカフューム置換によるレオロジーの影響

表-4 にシリカフュームを用いたグラウトのレオロジー定数を示す。

図-3 より、全てのグラウトの配合で $n > 1$ であった。これは、水セメント比が小さく、単位体積あたりの粉体量が多いため、回転速度が速まるにつれて粉体間の抵抗が大きくなることによって起こった現象であると推測される。

図-3 (a) に示した普通セメントを用いた配

表-4 シリカフュームを用いたグラウトにおけるレオロジー定数

配合名	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)	n
NO-WB30-SF0	0	0.289	1.75
NO-WB30-SF8	0.55	0.209	1.30
NO-WB33-SF0	1.56	0.163	1.57
NO-WB33-SF8	1.57	0.122	1.18
LH-WB30-SF0	4.05	0.222	1.26
LH-WB30-SF8	1.75	0.148	1.30
LH-WB33-SF0	0.64	0.089	1.20
LH-WB33-SF8	1.26	0.084	1.30

合では、同じ水結合材比のときシリカフューム置換により、降伏値の改善は見られなかったが、粘性および n を低く押さえができた。また、同じシリカフューム置換率では、水結合材比が高い配合で粘性および n が低くなっていることが分かった。

低熱セメントを用いた配合では、図-3 (b) に示すように、水結合材比 30% の配合において、シリカフューム置換により粘性が低く押さえられているが、水結合材比 33% の配合ではシリカフューム置換による粘性への影響はほとんど見られなかった。 n に関して見ると、シリカフューム置換による影響はほとんどなかった。

(4) グラウト圧縮強度に及ぼす影響

図-4 は、材齢 1 日と 28 日の圧縮強度を示したものである。材齢 1 日では、普通セメントを用いた水結合材比 30% の配合のとき、シリカフュームが増加するにつれて圧縮強度の低下が見られる。これに対して、水結合材比 33% とした配合は、シリカフュームの増加による顕著な圧

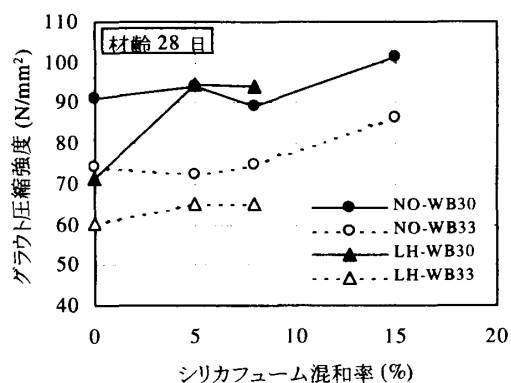
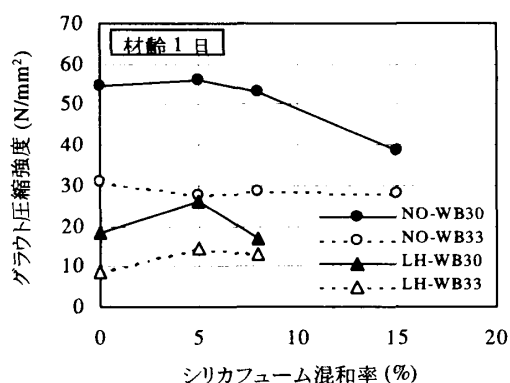


図-4 シリカフューム置換によるグラウト圧縮強度の影響

縮強度への影響は見られなかった。これは、シリカフュームの置換率を増やすと、高性能減水剤の添加量が増加し、その硬化遅延性の影響が水結合材比 30%で大きくなるためと思われる。低熱セメントに関して、シリカフュームの置換率が 5%までは逆に強度の増加が見られるが、置換率 8%の場合、高性能減水剤の遅延性の影響が現れている。材齢 28 日では、ほとんどの配合でポズラン反応による長期強度の伸びが確認され、その傾向はシリカフュームの増加とともに顕著になっている。特に、低熱セメントを用いた水結合材比 30%の配合では、圧縮強度に及ぼすシリカフュームの影響は大きいことが分かる。

3.2 高性能グラウトの特性に及ぼす石灰石微粉末の影響

(1) 流動性に及ぼす影響

図-5 は、石灰石微粉末の混和率を変化させ、ミニスランプフローが $185 \pm 5\text{mm}$ になるときの高性能減水剤の添加率を示す。石灰石微粉末の混和率を増加させると高性能減水剤の添加率も増加する傾向にあったが、シリカフュームと比べると石灰石微粉末の添加率を外割りで増加させても高性能減水剤の添加量は比較的少なかった。これは、石灰石微粉末は、粒子の大きさがセメントと比較的近いためであると考えられる。

(2) 分離抵抗性に及ぼす影響

図-6 に石灰石微粉末の混和率を変化させたときの加圧ブリーディング率を示す。石灰石微粉末の混和率を増加させることによる加圧ブリー

ーディング率の低下が確認された。

(3) レオロジーに及ぼす影響

図-7 に、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係および表-5 に石灰石微粉末を用いたグラウトのレオロジー定数を示す。普通セメントを用いた配合の場合、石灰石微粉末の混和率 10%まではほぼ同様の粘性を示しているが、15%で粘性

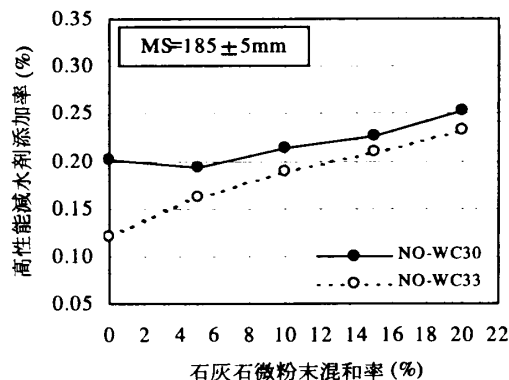


図-5 石灰石微粉末混和で同一流動性を得るための高性能減水剤の添加率

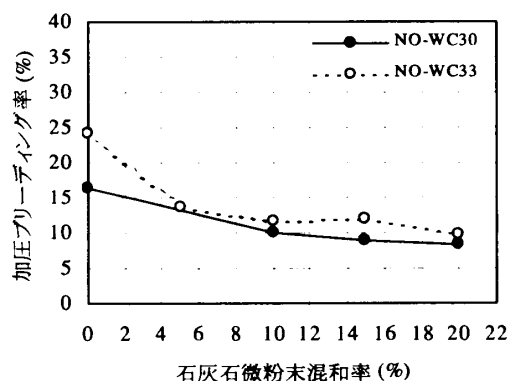
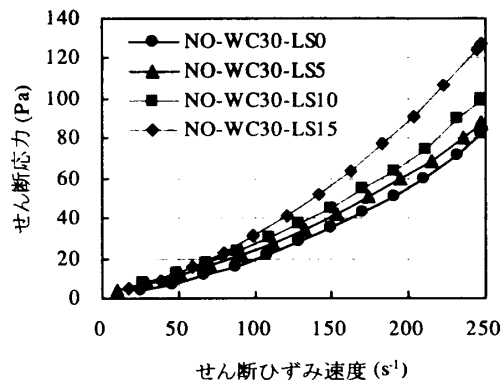
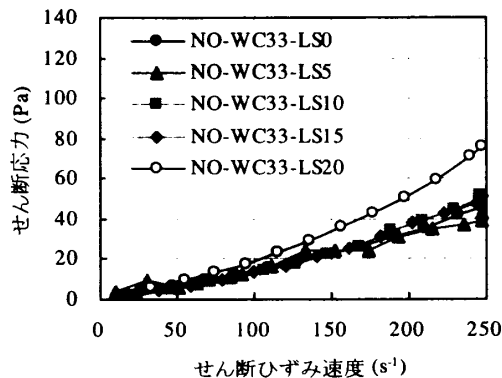


図-6 石灰石微粉末混和による加圧ブリーディング率の影響



(a) 水セメント比 30%



(b) 水セメント比 33%

図-7 石灰石微粉末混和によるレオロジーの影響

表－５ 石灰石微粉末を用いたグラウト
におけるレオロジー定数

	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)	n
NO-WC30-LS0	0	0.289	1.78
NO-WC30-LS5	2.53	0.279	1.60
NO-WC30-LS10	1.74	0.344	1.70
NO-WC30-LS15	0.97	0.452	1.70
NO-WC33-LS0	1.56	0.163	1.50
NO-WC33-LS5	0.63	0.217	1.40
NO-WC33-LS10	0	0.184	1.60
NO-WC33-LS15	1.48	0.172	1.67
NO-WC33-LS20	0.28	0.245	1.79

が高くなっているのが分かる。石灰石微粉末混入による n の増減はほとんどみられなかった。

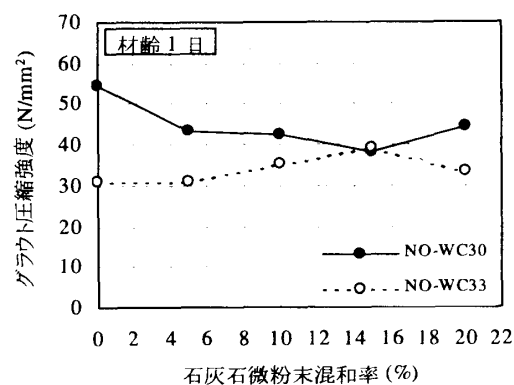
また、水セメント比 33%の配合では、石灰石微粉末の混和率 20%で粘性および n が上昇していることが分かる。

(4) グラウト圧縮強度に及ぼす影響

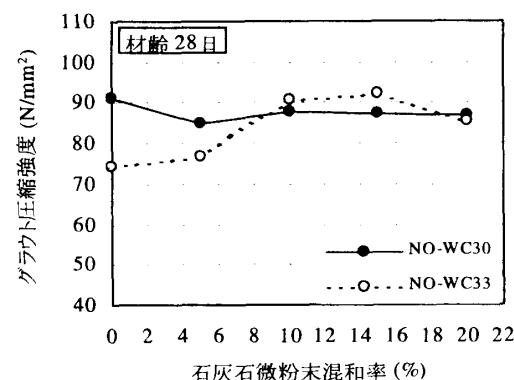
図－８は、材齢 1 日、28 日の圧縮強度を示したものである。材齢 1 日では、普通セメントを用いた水セメント比 30%の配合のとき、水セメント比が同じであるにも関わらず、強度の低下が見られた。これは、高性能減水剤の遅延性の影響によるものであると考えられる。水セメント比 33%の配合は、混和率 15%まで若干の強度の増加が見られた。材齢 28 日の圧縮強度において水セメント比 30%の配合は、石灰石微粉末を混入したことによる影響はほとんど見られなかった。これに対して、水セメント比 33%の配合は、石灰石微粉末混和による強度の増加がみられる。これは、石灰石微粉末を外割りで混和しているため粉体量が多くなり、フィラー効果によるものであると考えられる。

4. まとめ

(1) シリカフュームで置換したグラウトは、流動性を得るために必要とする高性能減水剤の添加量は増加する傾向にあったが、粘性および加圧ブリーディング率が低減され、さらに圧縮強度の増加がみられた。特に、加圧ブリーディング率はシリカフューム置換率 8%で大きく低



(a) 材齢 1 日



(b) 材齢 28 日

図－８ 石灰石微粉末混和によるグラウト
圧縮強度の影響

減された。

(2) 石灰石微粉末を外割りで混入したグラウトは、粘性への影響は比較的少なく、加圧ブリーディング率が低減された。また、水セメント比 33%の配合では強度の増加が確認された。

(3) 以上の結果より、流動性および分離抵抗性の高い高性能なグラウトを製造するためには、レオロジーおよび圧縮強度発現性の観点からも、シリカフュームの置換率が 8%の配合が最も適すると思われる。

参考文献

- 1) 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，1999. 11
- 2) 土木学会：シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針，pp75，1995. 10
- 3) W. H. Herschel・Bulkley：Kolloid Z.，Vol. 39，pp291，1926
- 4) Mangialard ほか：高流動化したマイクロシリカーボルトランドセメント系のコンクリートのワーカビリティ，Cement and Concrete research，Vol18，pp351～362，1988