

論文

[1016] 高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストのレオロジー特性

正会員○近田孝夫（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

正会員 松下博通（九州共立大学土木工学科）

前田悦孝（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

1. まえがき

コンクリートの流動性を考えるとき、コンクリートをセメントペーストと骨材の2相材料と考え、骨材表面のペースト膜の性質とその膜厚によってコンクリートの流動性が支配されるという余剰ペースト膜厚理論がある。この理論は、Kennedy, Powersらによって提唱されたフレッシュコンクリートの理論的な配合設計法の1つであり、コンクリートの流動性は、セメントペーストの流動性が一定の場合には、骨材表面に形成される余剰ペースト膜厚が大きいほど、余剰ペースト膜厚が一定の場合にはセメントペーストの流動性が大きいほど良好であるとする考え方である。（式（1）および図-1参照）。

$$F_c = f(F_p, T_p) \quad (1)$$

ここに F_c : コンクリートの流動性
 F_p : セメントペーストの流動性
 T_p : 余剰ペースト膜厚

筆者らは、これまでの研究で、セメントペーストのコンシステンシーを一定とした場合、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率で流動性も最大となり、最適細骨材率であることを実験的に実証し [1]、このことは骨材の最大寸法が 20~120mmの広範囲のコンクリートに対して十分適用できることを報告している。[2]

本報告は、余剰ペースト膜厚理論におけるもう1つのファクターであるセメントペーストの流動性を評価するに当たり、数種類のセメント系材料および混和剤を用い、セメントペーストの水/固体容積を変化させた場合についてフロー値、JAロート流下時間および音叉型振動式粘度計による流動曲線から求めた塑性粘度の関係について基礎的実験を行なった結果をまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 使用材料

セメントは市販品の普通ポルトランドセメント（以下、OPC と称す）を、高炉スラグ微粉末は粉末度の異なる3種類（以下、S4, S6, S7 と称し、総称で単にSと称す）を使用した。これらの物理試験結果を表-1に、粒度分布測定結果を図-2に示す。混和剤は、AE剤，減水剤（リグニンスルホン酸塩系），高性能減水剤（ナフタリンスルホン酸塩系）を使用した。

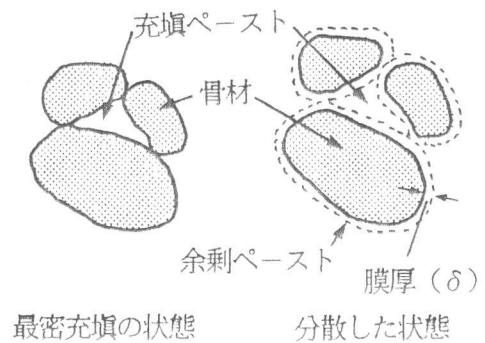


図-1 Kennedyによる
 充填ペーストと余剰ペースト

2.2 セメントペーストの配合

本試験では、水量の影響を調査する際に水/固体容積比（以下、 V_w/V_s と称す）でセメントペーストの配合を設定し、水（ V_w ）部分の体積は水+混和剤の体積とした。本試験の V_w/V_s の範囲は1.0~2.0であり、 W/C =約31~69%に相当するが、同一 V_w/V_s であってもスラグ置換率の違いにより W/C の値は約2.5~5%の差異がある。AE剤（記号A）、減水剤（記号R）、高性能減水剤（記号SP）の添加量は、それぞれ $(OPC+S) \times 0.04, 0.25, 1.0$ wt%とした。本報告では、例えば、スラグ微粉末の粉末度が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 、スラグ置換率が50%、混和剤が減水剤、 $V_w/V_s=1.5$ の配合をS4-50%-R-1.5と表示した。混和剤無添加の場合の記号はPとした。

2.3 練り混ぜ

練り混ぜは、公転 44rpm, 自転154rpm, 内容積20リットルのホバート型ミキサーを使用した。練り混ぜ手順は、水と混和剤を入れた練り鉢に、ミキサーを回転しながら、試料投入1分→練り混ぜ1分→停止・掻き落とし1分30秒→練り混ぜ2分とした。練り混ぜ量は6リットルである。試験は、20℃の恒温室内で行ない、セメントペースト温度は、 $V_w/V_s=1.25\sim 2.0$ では20~21℃、 $V_w/V_s=1.0$ では22~24℃であった。

2.4 測定方法

練り混ぜ終了後直ちにフリーフロー値、JAロート流下時間および流動曲線の測定を実施した。但し、流動曲線の測定は、S4-50-Rにおいて V_w/V_s を変化させた場合、スラグ置換率を変化させたS4-0~100%-R-1.5の配合、スラグ粉末度を変化させたS4, S6, S7-50%-R-1.5の配合、および混和剤の種類を変化させたS4-50%-P, R, SP-1.5（Pは混和剤無添加の場合）の配合について実施した。

フリーフロー値は『JIS R 5201セメントの強さ試験』に準じ、フローテーブルに落下を与える前の試料の広がり方を測定した。JAロート流下時間は土木学会規準『PCグラウト試験方法』に従って測定した。

流動曲線の測定は、音叉型振動式粘度計を使用した。本装置は、図-3に示すように、一對の板バネの先端に取り付けられた感應板を試料中に装入し、板バネを振動系の固有振動数で逆位相に強制的に共振振動させており、感應板が試料に与えるずり応力を板バネの加振力を制御して連続的に

表-1 使用材料の物理試験結果

試料	比重	粉末度 (cm^2/g)	平均粒径 (μm)
OPC	3.14	3250	17.3
S4	2.91	4000	10.0
S6	2.90	6170	5.5
S7	2.90	7250	3.8

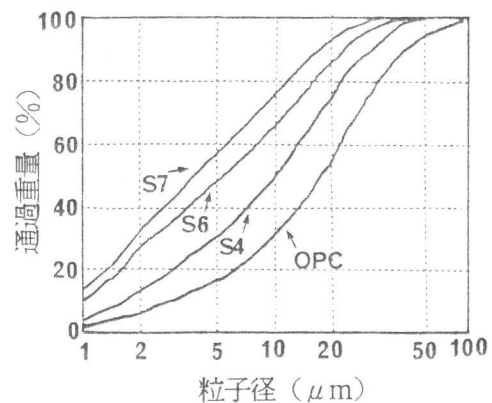


図-2 使用材料の粒度分布

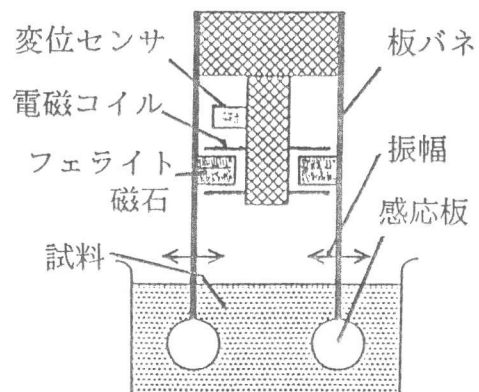


図-3 音叉型振動式粘度計の機構概要

変化させる。一方、ずり応力変化過程時の板バネの応答振幅値と非ニュートン見掛け粘度の関係は、粘度計校正用標準液を用いて検量線を求めておき、応答振幅値を測定することにより、ずり応力変化過程時のずり速度（＝ずり応力／非ニュートン見掛け粘度）を求めるものである。

3. 試験結果

3.1 JAロート流下時間およびフリーフロー値

(1) V_w/V_s および混和剤の影響

図-4に、測定結果の一例として、スラグ粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 、スラグ置換率50%において各種混和剤を使用した場合の V_w/V_s とフリーフロー値およびJAロート流下時間の関係を示す。スラグ置換率、スラグ粉末度が異なる場合も V_w/V_s の変化に対するJAロート流下時間、フリーフロー値の変化の傾向および混和剤の影響は、図-4の場合と同様であった。

図-4に示されるように、 V_w/V_s とJAロート流下時間には双曲線的な関係あり、 V_w/V_s が小さくなると流下時間が急激に増大する領域がある。さらに V_w/V_s が小さくなるとロートからのセメントペーストの流出が不完全（図中の×印）となった。また、 V_w/V_s が大きくなるほど、混和剤の違いによる流下時間の差異は小さくなる傾向があり、 $V_w/V_s = 2.0$ における流下時間はいずれの場合も約11~12秒である。一方、フリーフロー値は、 V_w/V_s の増加に対して指数曲線的に増大する傾向にあり、 V_w/V_s が大きいほど混和剤の違いによるフリーフロー値の差は大きくなっている。本試験の場合、フリーフロー値 300以上では試料がフローテーブルからこぼれる（図中の×印）ため、測定値が得られたのは V_w/V_s が比較的小さい範囲である。

混和剤の影響は、無添加（記号P）とAE剤添加（記号A）の場合ではJAロート流下時間がほぼ一致している。減水剤（記号R）、高性能減水剤（記号SP）の添加は、流下時間が急激に増大する領域を無添加、AE剤添加の場合よりも V_w/V_s の低い範囲に移動させ、その効果は高性能減水剤の方が大きい。フリーフロー値の測定結果においても、AE剤添加の場合は無添加の場合と大きな差はない。減水剤、高性能減水剤の添加はフリーフロー値を増大させ、特に、高性能

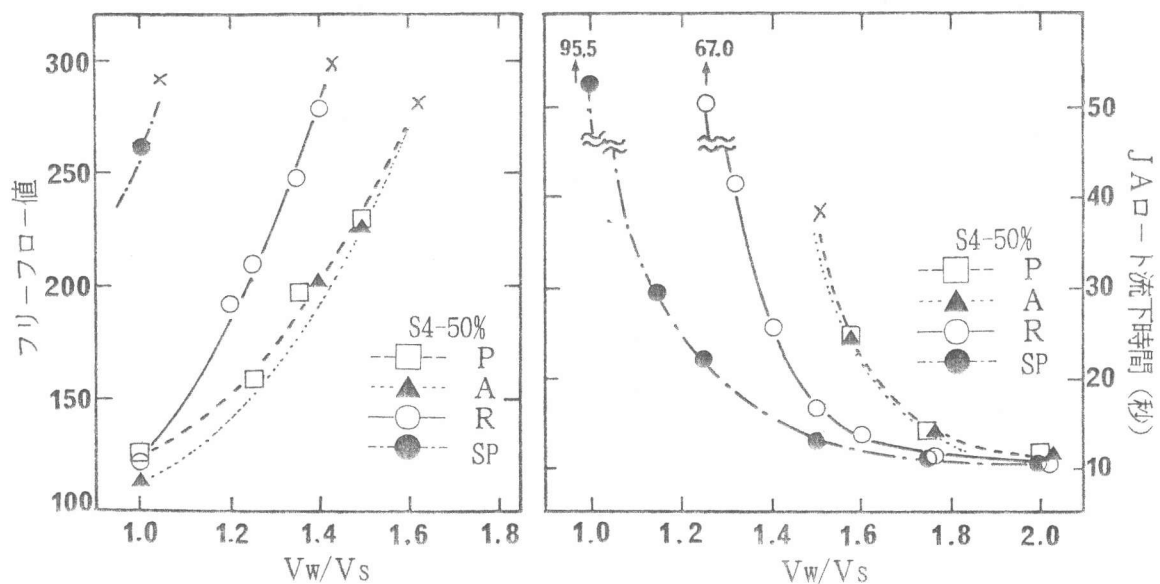


図-4 水／固体容積比 (V_w/V_s) とフリーフロー値およびJAロート流下時間の関係

減水剤はその効果が大きく、本試験の V_w/V_s の範囲ではほとんどの場合でフリーフロー値が300を越えた。以上の結果より、本試験の各混和剤の添加量では、減水剤、高性能減水剤の添加はセメントペーストの流動性を増大させ、その効果は高性能減水剤の方が大きいこと、AE剤添加の場合と無添加の場合ではセメントペーストの流動性に大きな差異はないことが確認された。よって、以下の考察においては無添加、減水剤添加、高性能減水剤添加の場合について行なうこととした。

(2) スラグ置換率およびスラグ粉末度の影響

スラグ粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合のスラグ置換率とフリーフロー値の関係を図-5に、スラグ置換率とJAロート流下時間の関係を図-6に示す。図-5より、フリーフロー値は、スラグ置換率が大きくなるほど増大する傾向が認められる。この傾向は、 V_w/V_s が大きい方が、無添加の場合より減水剤を添加した場合の方がスラグ置換率の変化に対するフリーフロー値の変化は大きいようである。図-6より、JAロート流下時間はスラグ置換率が大きくなるほど減少する傾向にあるが、無添加、減水剤添加の場合に比較して高性能減水剤添加の場合はスラグ置換率の影響が小さいようである。これらの結果より、スラグ置換率が大きくなるとセメントペーストの流動性は増大するが、その効果は V_w/V_s および添加剤の種類によって異なると考えられる。

スラグ置換率50%の場合のスラグ粉末度とフリーフロー値の関係を図-7に、スラグ粉末度とJAロート流下時間の関係を図-8に示す。図-7より、フリーフロー値は、スラグ粉末度が高くなるほど減少する傾向が認められ、 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ から $6000\text{cm}^2/\text{g}$ に変化する場合より $6000\text{cm}^2/\text{g}$ から $7000\text{cm}^2/\text{g}$ に変化する場合の方がフリーフロー値の減少割合が大きいようである。図-8より、JAロート流下時

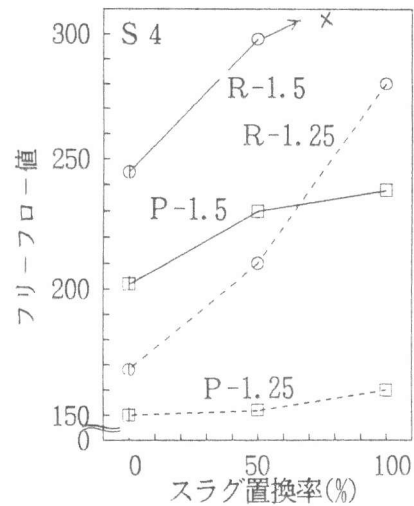


図-5 スラグ置換率とフリーフロー値の関係

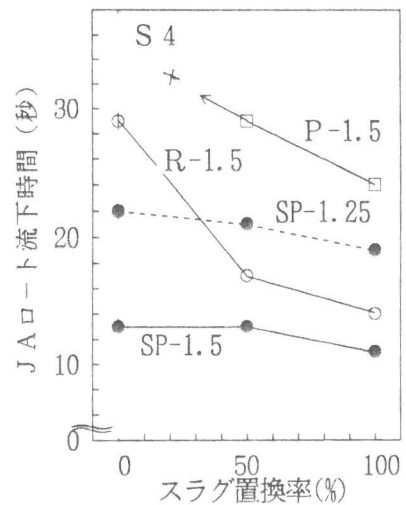


図-6 スラグ置換率とJAロート流下時間の関係

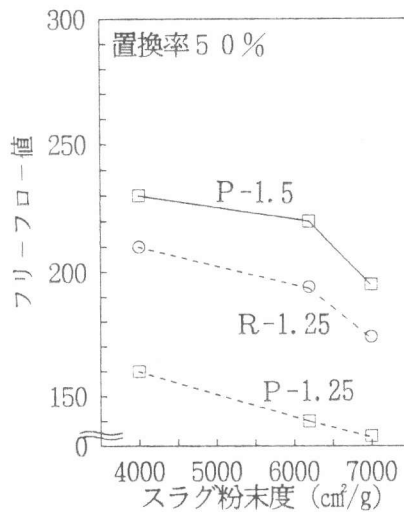


図-7 スラグ粉末度とフリーフロー値の関係

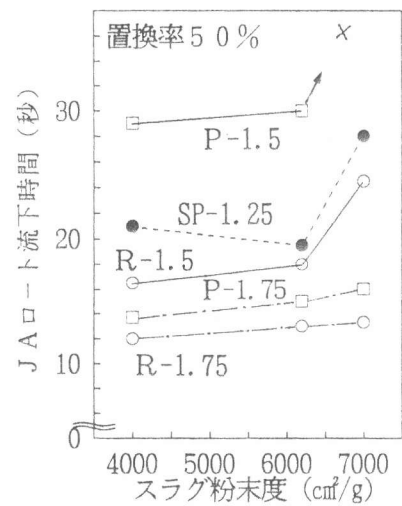


図-8 スラグ粉末度とJAロート流下時間の関係

間は、スラグ粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ と $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合では大きな差はないが、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ から $7000\text{cm}^2/\text{g}$ に変化する場合は流下時間が増大する傾向にある。これらの結果から、スラグの粉末度を高めるとセメントペーストの流動性は低下する傾向にあるが、その程度はスラグ粉末度が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を越える領域で顕著になるものと考えられる。

3.2 塑性粘度および降伏値

図-9に流動曲線の1例を示す。図-10は流動曲線から求めた塑性粘度と降伏値の関係を示したものである。これより、塑性粘度が大きい場合は降伏値も大きくなっており、流動曲線を測定した配合の範囲におけるセメントペーストの流動性の変化は、塑性粘度と降伏値がある程度一定の割り合いでともに増加または低下するような場合に相当していると考えられる。

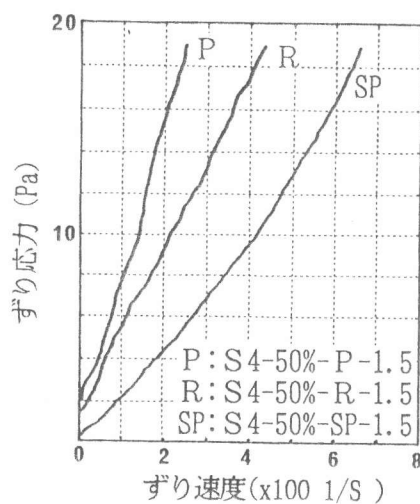


図-9 流動曲線測定結果

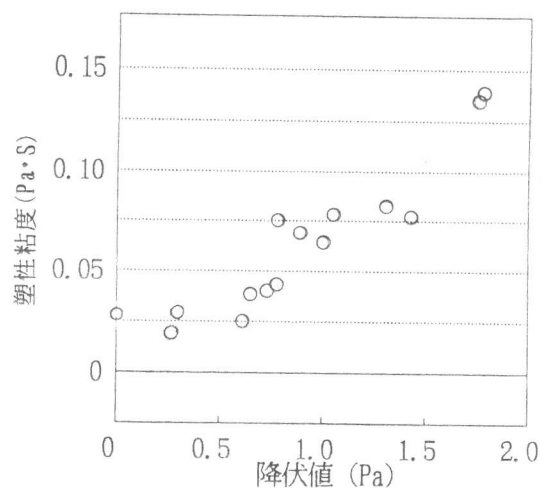


図-10 降伏値と塑性粘度の関係

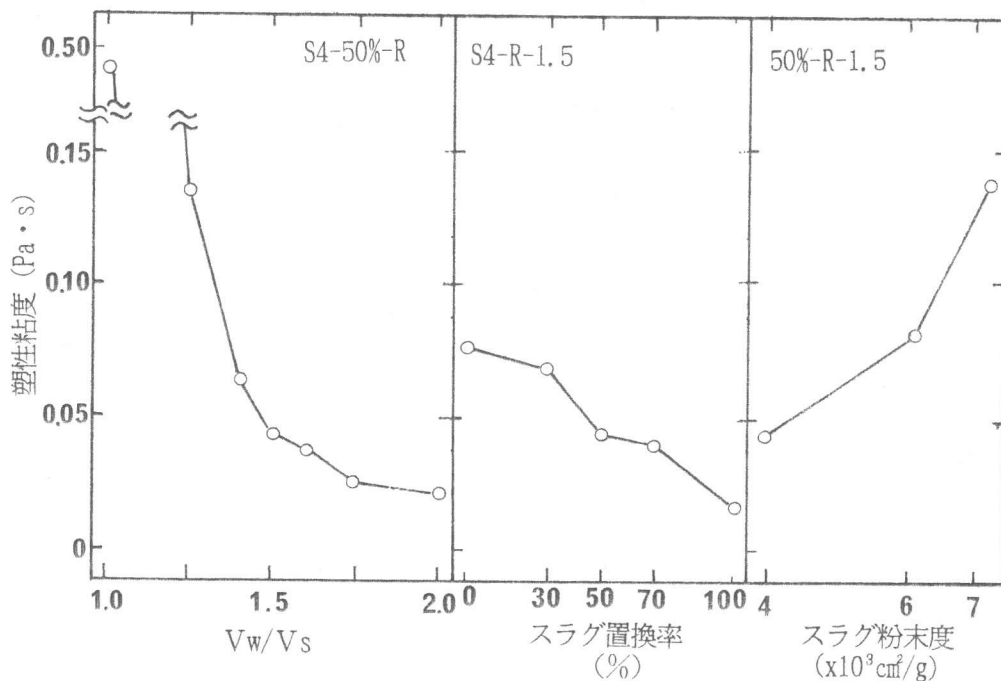


図-11 V_w/V_s と塑性粘度の関係

図-12 スラグ置換率と塑性粘度の関係

図-13 スラグ粉末度と塑性粘度の関係

図-9は、S4-50%-P, R, SP-1.5 の測定結果であるが、減水剤および高性能減水剤の添加により塑性粘度、降伏値ともに低下し、その程度は、高性能減水剤添加の場合の方が大きい。図-11, 図-12, 図-13に、それぞれ V_w/V_s , スラグ置換率, スラグ粉末度と塑性粘度との関係を示す。 V_w/V_s が小さくなるほど、塑性粘度は増大する。その変化の傾向は、 $V_w/V_s=2.0$ 付近では変化が小さく、 V_w/V_s が小さくなると塑性粘度は急激に増大する。スラグ置換率を大きくすると、塑性粘度は低下する傾向がある。スラグ粉末度を高めると塑性粘度は増大するが、その増加割合は $4000\text{cm}^2/\text{g}$ から $6000\text{cm}^2/\text{g}$ への変化する場合より $6000\text{cm}^2/\text{g}$ から $7000\text{cm}^2/\text{g}$ に変化する場合の方が大きい。

これらの結果と図-4～図-8の結果は傾向が類似しており、塑性粘度が増大する場合には、JAロート流下時間もほぼ同様に増大し、フリーフロー値は減少する傾向にある。

図-14は、塑性粘度とJAロート流下時間の関係を示したものである。これより、塑性粘度と降伏値がともに増加または低下するような場合は、JAロート流下時間は塑性粘度にほぼ比例して変化する傾向があると考えられる。

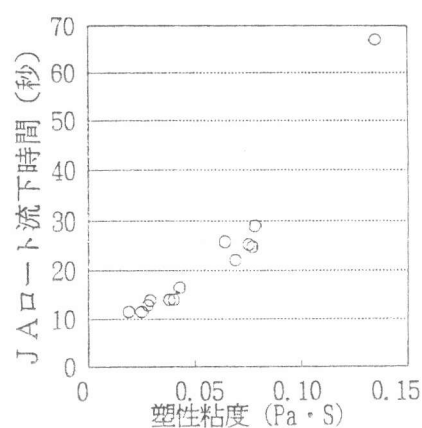


図-14 塑性粘度とJAロート流下時間の関係

4. 結論

本試験の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) V_w/V_s の増加に対して、JAロート流下時間および塑性粘度は双曲線的に減少し、フリーフロー値は指数曲線的に増大する傾向がある。
- (2) 本試験の範囲では、AE剤添加と無添加の場合ではセメントペーストの流動性に大差はない。減水剤、高性能減水剤の添加はJAロート流下時間が急激に増大する領域を V_w/V_s の小さい範囲に移動させ、フリーフロー値を増大させる効果があり、その効果は高性能減水剤の方が大きい。
- (3) スラグ置換率を大きくすると塑性粘度は低下し、セメントペーストの流動性は大きくなるがその効果は V_w/V_s , 混和剤の種類によって変化する。
- (4) スラグ粉末度を高めると塑性粘度は増大し、セメントペーストの流動性は小さくなる傾向にあるが、この傾向はスラグ粉末度が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を越えると顕著になる。
- (5) 塑性粘度と降伏値がほぼ一定の割合いでともに増加または低下するような場合はJAロートの流下時間は塑性粘度にほぼ比例する。

参考文献

- 1) 松下博通・近田孝夫：余剰ペースト理論の配合設計への適用に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 43, pp. 84～89, 1989
- 2) 松下博通・近田孝夫：余剰ペースト膜厚理論のコンクリート配合設計への適用、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、pp. 184～185, 1989. 10

謝辞

音叉型振動式粘度計を用いた流動曲線の測定は、秩父セメント(株)中央研究所開発部の皆様に協力戴きました。ここに厚くお礼申し上げます。