

論文 高流動コンクリートの流動性に及ぼす粗骨材形状の影響

宮野 和樹^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・五味 信治^{*3}・岡本 将昭^{*4}

要旨:高流動コンクリートの流動性に及ぼす粗骨材形状の影響を実験的に検討した。まず、粗骨材形状および粒度分布より粗骨材の体積に対する表面積の大小の傾向を表している特性値を算出した。次に、その特性値と実積率および粗骨材絶対容積とを関連づけ、膜厚理論に基づき実験結果を考察した。その結果、粗骨材の投影周長、投影面積、体積および粒度分布を考慮して、粗骨材形状を定量化できることが示された。また、その定量値および粗骨材実積率より算出されたモルタル膜厚係数を用いることによって、粗骨材種類および粗骨材絶対容積にかかわらずコンクリートの流動性等を推定できることが示された。

キーワード:高流動コンクリート, 粗骨材形状, 粒度分布, 実積率, モルタル膜厚係数

1. はじめに

高流動コンクリートの流動性は、スランプフロー、50cm フロー到達時間などによって評価されるが、それらの指標は、粗骨材形状、寸法、粒度分布などの影響を受ける¹⁾。粗骨材形状の影響を評価する場合は、実積率が特性値として用いられることが多い。また、実積率以外に、偏平度、比表面積なども有用な特性値として考えられるが、それらの特性値を考慮した高流動コンクリートの調合方法は確立されていない。

一方、最近、高流動コンクリートの流動性を、セメントペーストやモルタルの膜厚に基づいて評価する方法が報告されている²⁾³⁾。これは、骨材周りの空隙を占めるセメントペーストやモルタルの厚さと流動性によりコンクリートの流動性を評価するものであり、粗骨材形状が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響を評価していると考えられる。

そこで、粗骨材形状の定量化にあたって、粗骨材の体積に対する表面積または表面積の大小の傾向を表す値を算出することにより、膜厚理論に関連づけて、高流動コンクリートの流動性を評価することができると考えられる。

本研究は、高流動コンクリートの流動性に及ぼす粗骨材形状の影響を実験的に検討したものであり、まず、粗骨材形状の影響と粒度分布を考慮した粗骨材特性値を提案する。次に、その特性値と実積率および粗骨材絶対容積とを関連づけ、膜厚理論に基づき実験結果を考察することを目的とする。

2. 粗骨材形状の定量化

2.1 定量化概要

粗骨材形状を評価する指標として、粗骨材体積に対する粗骨材表面積の割合が重要である。しかし、粗骨材表面積の測定は、非常に困難である。計算により表面積を求める方法として、粗骨材を楕円体で近似し、その直交3方向の径を計測し、それをもとに楕円の面積を求め、その平均の4倍を表面積とする方法や、粗骨材を球体で近似して、その3方向の投影面積の平均の4倍を表面積とする方法など⁴⁾が提案されている。しかし、それらの方法は、粗骨材表面の凹凸を反映できていないと考えられる。本研究では、粗骨材の投影面積に対する投影周長を求め、粗骨材の投影単位面積あたりの周長を算出

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 日産建設(株) 技術研究所 所長 (正会員)

*4 日産建設(株) 技術研究所 主任研究員 工修

した。この粗骨材の単位面積あたりの周長は、体積に対する表面積の大小の傾向を表していると考えられる。次に、粗骨材の単位体積あたりの単位面積周長を求め、これが粗骨材体積に対する表面積の傾向を表す特性値と考えた。

2.2 使用材料

使用した粗骨材の種類および特性を表-1に、粗骨材の粒度分布を表-2に示す。粗骨材は、硬質砂岩碎石、石灰岩碎石、川砂利の3種類で、実積率がそれぞれ59.9%、61.0%、65.3%と異なる。また、粒度分布は3種類ともほぼ同様の値となった。

2.3 測定方法

各粗骨材を、5~10mm(以下1005)、10~15mm(以下1510)、15~20mm(以下2015)、20~25mm(以下2520)の粒度範囲にふるいを用いて分粒し、粒度範囲1005、1510では20個を、粒度範囲2015では10個を、粒度範囲2520では5個を無作為抽出して測定試料とした。粒度範囲2015、2520は、粒度分布において占める割合が小さく影響が少ないため、測定試料数を少なくした。

各粗骨材において図-1に示すように、直交する3方向の画像A、B、Cをデジタルカメラにより撮影した。次に、パソコン内に画像を読み込み、その画像をトレースして、粗骨材の投影周長と投影面積を測定した。また、粗骨材の体積を算出するために、各粗骨材の絶乾質量を測定した。

2.4 定量化方法

各粗骨材の投影周長、投影面積、体積を用いて、粗骨材種類の違いによる形状の差異と粗骨材の粒度分布を考慮した単位面積周長を以下のように算出した。

まず、各粗骨材単体の単位面積周長 L は次式で算出した。

$$L = \frac{\frac{L_A}{S_A} + \frac{L_B}{S_B} + \frac{L_C}{S_C}}{3} \quad (1)$$

ここで、 L_A 、 L_B 、 L_C ：画像A、B、Cの粗骨材の

表-1 粗骨材の種類および特性

種類	特性
硬質砂岩碎石	表乾密度2.66g/cm ³ 、吸水率0.82%、実積率59.9%、粗粒率6.67
石灰岩碎石	表乾密度2.71g/cm ³ 、吸水率0.28%、実積率61.0%、粗粒率6.67
川砂利	表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.49%、実積率65.3%、粗粒率6.66

表-2 粗骨材の粒度分布

ふるいの寸法 (mm)	ふるいの通過質量百分率(%)		
	硬質砂岩碎石	石灰岩碎石	川砂利
25	100	100	100
20	96	95	95
15	81	81	82
10	37	37	39
5	0	0	0

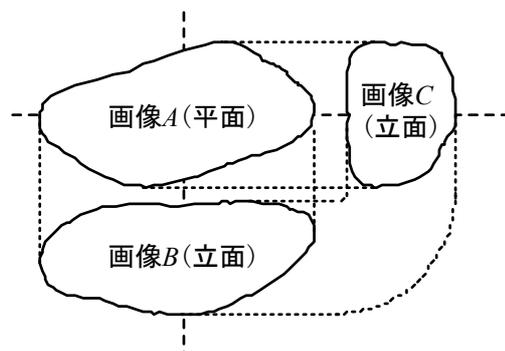


図-1 粗骨材の撮影方向

周長(mm)、 S_A 、 S_B 、 S_C ：画像A、B、Cの粗骨材の投影面積(mm²)。

次に、各粒度範囲ごとに粗骨材1cm³あたりの単位面積周長 L_S を次式で算出した。

$$L_S = \frac{\sum \frac{L}{V}}{N} \quad (2)$$

ここで、 V ：粗骨材単体の体積(cm³)、 N ：ある粒度範囲において測定した粗骨材の個数(個)。

最終的に、粗骨材種類ごとに形状の差異と粒度分布を考慮した単位面積周長 L_{SV} を次式で算出した。

$$L_{SV} = \sum L_{Si} P_i \quad (3)$$

ここで、 L_{Si} ：粒度範囲*i*の L_S 、 P_i ：全粗骨材が

1cm³である場合の粒度範囲*i*の粗骨材体積(cm³),
i=1005, 1510, 2015, 2520。

2.5 計算結果および考察

粗骨材種類ごとの L_S と L_{SV} の計算結果および全粗骨材が 1cm³ である場合の各粒度範囲の粗骨材体積を表-3に示す。 L_S は、粒度範囲 2520, 2015 では、粗骨材種類による相違はみられないが、粒度範囲 1510, 1005 では、硬質砂岩砕石が他の 2 種類より大きく、石灰岩砕石および川砂利は同程度の値となった。 L_{SV} については、1510, 1005 と同様に、硬質砂岩砕石が他の 2 種類より大きく、石灰岩砕石および川砂利は同程度の値となった。これは、各粒度範囲の体積百分率が 1510, 1005 において大きいため粒度範囲 1510, 1005 の L_S と同様の傾向になったと考えられる。このように、石灰岩砕石、川砂利より硬質砂岩砕石の L_{SV} が大きくなったのは、粗骨材表面の凹凸が他の 2 種類に比べ多く、また、扁平であるためであると考えられる。最終的に求められた L_{SV} は粗骨材表面の凹凸および扁平度を考慮することができたと考えられる。

3. 実験概要

3.1 要因と水準および使用材料

粗骨材種類は、表-1と同様で、硬質砂岩砕石、石灰岩砕石、川砂利の 3 種類とした。粗骨材絶対容積は、280/l から 400/l まで 20/l 刻みで変化させた。対象とした高流動コンクリートは、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を質量比で 1:1 に混合したものを結合材とした。水結合材比は 45%、細骨材モルタル容積比は 55%、高性能 AE 減水剤の添加率は結合材の質量に対して 1.05%、分離低減剤の添加率は水の質量に対して 0.08%とし、すべてにおいて一定とした。目標空気量は 2.0±1.0%とし、測定結果は、目標の範囲内となった。実験の要因と水準を表-4に、粗骨材以外の使用材料を表-5に示す。

3.2 試験項目および試験方法

高流動コンクリートの試験項目として、コン

表-3 L_S と L_{SV} の計算結果および全粗骨材が 1cm³ である場合の各粒度範囲の粗骨材体積

粗骨材種類	粒度範囲	L_S	体積 ^{注)} (cm ³)	L_{SV}
硬質砂岩砕石	2520	0.038	0.038	0.900
	2015	0.055	0.156	
	1510	0.154	0.435	
	1005	2.219	0.371	
石灰岩砕石	2520	0.033	0.050	0.762
	2015	0.060	0.144	
	1510	0.136	0.432	
	1005	1.851	0.374	
川砂利	2520	0.025	0.055	0.789
	2015	0.041	0.124	
	1510	0.129	0.428	
	1005	1.856	0.392	

注) 同種類の粗骨材においては、密度が等しいため、質量百分率を体積百分率とし、体積を算出した。

表-4 実験の要因と水準

要因	水準
粗骨材種類(実積率)	硬質砂岩砕石(59.9%)
	石灰岩砕石(61.0%)
	川砂利(65.3%)
粗骨材絶対容積(l/m ³)	280,300,320,340, 360,380,400

表-5 使用材料

材料	種類	特性・主成分
結合材	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3290cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	密度2.90g/cm ³ , 比表面積4900cm ² /g
	大井川水系陸砂	表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率2.01%, 粗粒率2.56
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	分離低減剤	水溶性セルロースエーテル系

クリートでは、スランプフロー、50cm フロー到達時間および空気量を測定した。また、コンクリートをウェットスクリーニングすると、粗骨材種類の違いによる粗骨材形状の差異および粗骨材量により、粗骨材に付着するモルタル中の水、結合材、細骨材の割合およびモルタル量が異なり、ウェットスクリーニングしたモルタル（以下スクリーニングモルタル）の流動性に粗骨材種類の影響が大きく反映されると考えられ

る。そこで、スクリーニングモルタルを用い、塑性粘度、降伏値を測定した。スランプフロー試験および空気量試験は、3層に分けて詰め、各層の突き回数を5回として行った。塑性粘度、降伏値は、内円板型回転粘度計（フルスケールトルク：5750 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ ，測定範囲：400 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ～64 $\text{kPa}\cdot\text{s}$ ）を用いて測定した。

コンクリートの練混ぜは、温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$ の室内で、容量 50 l のパン型強制練りミキサを用いて、1回の練混ぜ量を 40 l で行った。練混ぜ手順は、結合材、細骨材、分離低減剤をミキサに投入後、15秒間空練りした後、水、高性能 AE 減水剤を投入し、30秒間練混ぜた。かき落としをし、さらに 60秒間練混ぜた後、粗骨材を投入し 90秒間練混ぜた。300秒静置した後排出し、直ちにコンクリート試験を行った。スクリーニングモルタルの塑性粘度、降伏値の測定は、コンクリートを 5 mm のふるいでウェットスクリーニングしたものを用い、コンクリート排出 12

分後に開始した。

4. 実験結果

コンクリート試験結果を図-2に示す。粗骨材絶対容積が大きくなるとスランプフローは小さくなり、50 cm フロー到達時間は大きくなる。粗骨材種類ごとに比較すると、スランプフローにおいて、石灰岩碎石と川砂利は同程度の値および傾向を示している。しかし、硬質砂岩碎石は他の2種類より小さい値となり、粗骨材絶対容積が 320 l/m^3 以上になると減少度合いが他の2種類より大きくなる。50 cm フロー到達時間においては、石灰岩碎石と川砂利は同程度の値および傾向を示しており、硬質砂岩碎石は他の2種類より値が大きくなる。

スクリーニングモルタル試験結果を図-3に示す。粗骨材絶対容積が大きくなると塑性粘度、降伏値とともに概ね大きくなる。塑性粘度、降伏値ともに、石灰岩碎石、川砂利は同程度の値お

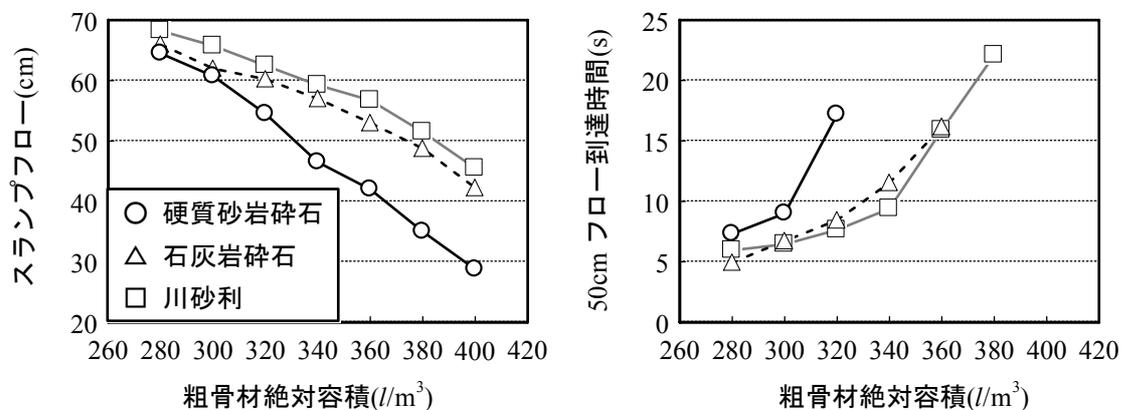


図-2 コンクリート試験結果

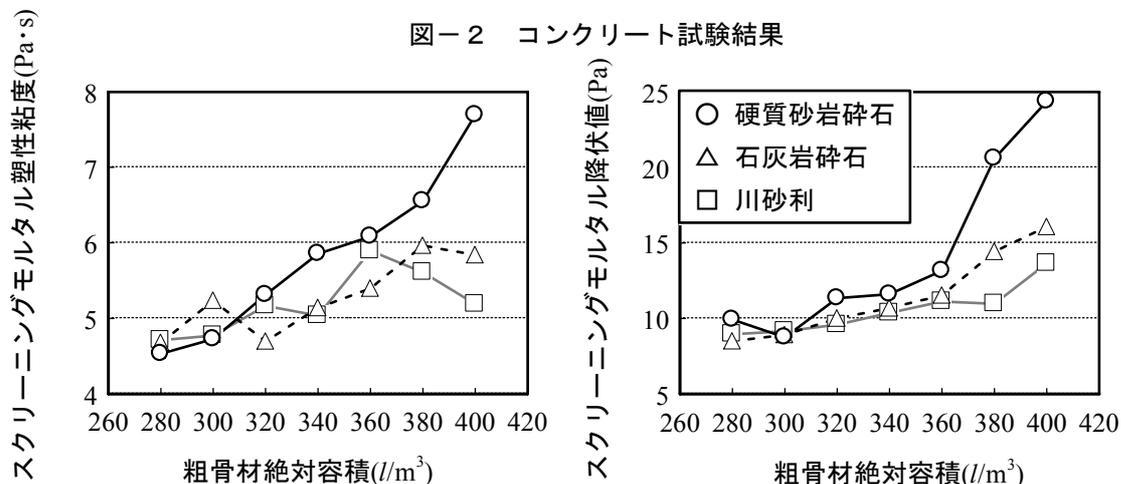


図-3 スクリーニングモルタル試験結果

よび傾向を示している。しかし、硬質砂岩碎石は、他の2種類より大きな値となり、粗骨材絶対容積が 360l/m^3 以上から急激に大きくなる傾向がみられる。

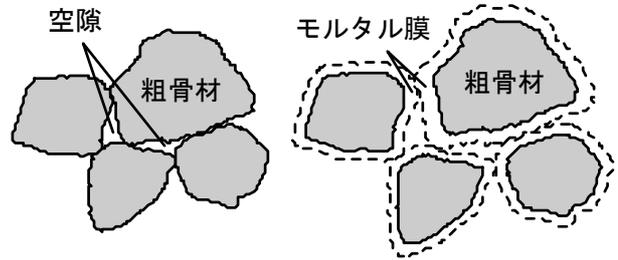
コンクリート試験，スクリーニングモルタル試験結果より硬質砂岩碎石が他の2種類より流動性が劣り，石灰岩碎石と川砂利は同程度の値を示している。使用した粗骨材の粒度分布および粗粒率は同程度の値であるため，粒度分布および粗粒率の影響を受けたとは考えられない。実積率は，硬質砂岩碎石 59.9%，石灰岩碎石 61.0%，川砂利 65.3%で，硬質砂岩碎石と石灰岩碎石の値が近く，実積率のみの影響を受けたとは考えられない。

5. 考察

5.1 モルタル膜厚係数の算出

実積率と粗骨材表面の凹凸および偏平度をもとに考慮する必要があると考えられるため，実積率と L_{SV} を用いることとした。実積率と L_{SV} を同時に考慮するため， L_{SV} は粗骨材の比表面積

に相当すると考え，膜厚理論を用いて考察することとした。膜厚の概念図を図-4に示す。モルタルの総容積から粗骨材の最密充填状態時の空隙容積を引いたものを余剰モルタル容積と考



粗骨材の最密充填状態 実際のコンクリートの状態

図-4 膜厚の概念図

表-6 各調合のモルタル膜厚係数

粗骨材 絶対容積 (l/m^3)	粗骨材種類		
	硬質砂 岩碎石	石灰岩 碎石	川砂利
280	2.11	2.54	2.58
300	1.85	2.22	2.28
320	1.62	1.95	2.02
340	1.41	1.71	1.79
360	1.23	1.49	1.58
380	1.07	1.30	1.39
400	0.92	1.13	1.23

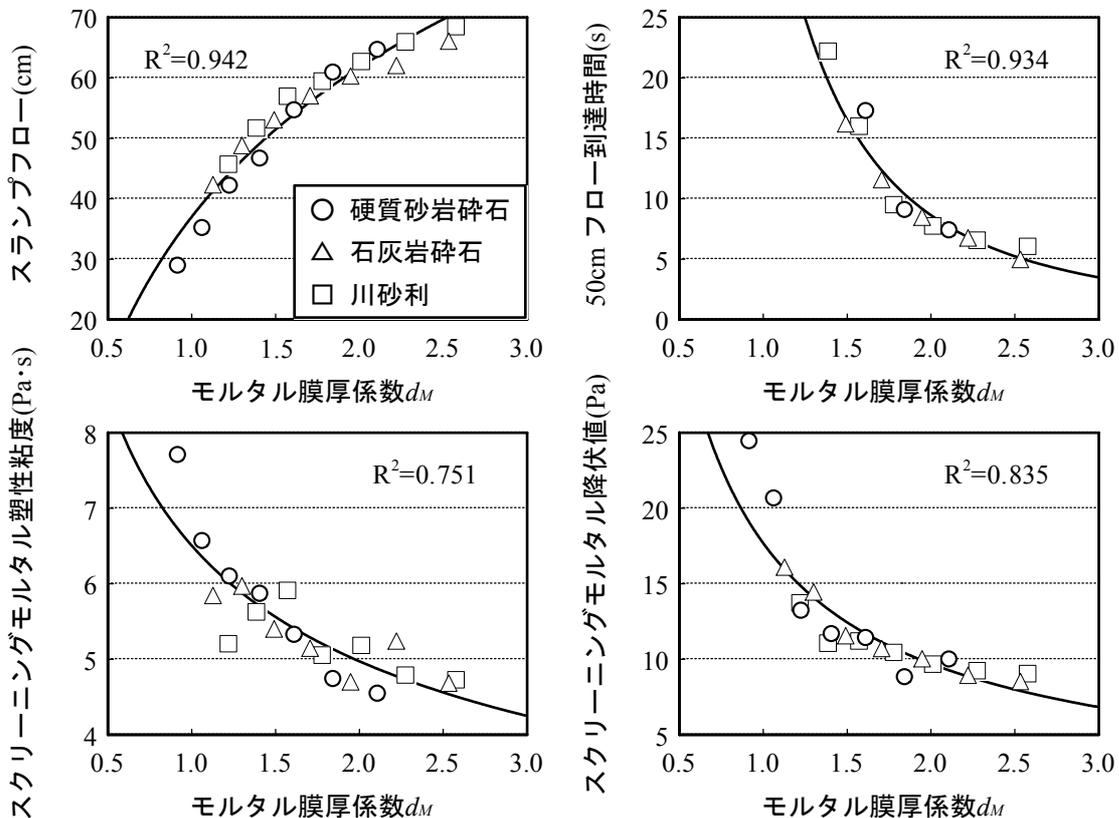


図-5 モルタル膜厚係数 d_M と各試験値の関係

えた。そこで、余剰モルタルの容積 V_{SM} を次式で算出した。

$$V_{SM} = (1 - V_G) - \frac{V_G(100 - SC)}{SC} \quad (4)$$

ここで、 V_G ：コンクリート 1cm^3 中の粗骨材容積(cm^3)、 SC ：粗骨材の実積率(%)。

次に、モルタル膜は、粗骨材の大きさにかかわらず同じ厚さになると考え、モルタル膜厚係数 d_M を次式で定義した。

$$d_M = \frac{V_{SM}}{V_G \times L_{SV}} \quad (5)$$

各調合のモルタル膜厚係数 d_M を表-6に示す。

5.2 モルタル膜厚係数における評価

モルタル膜厚係数と各試験値の関係を図-5に示す。スランプフローは d_M が大きくなると大きくなり、50cm フロー到達時間、スクリーニングモルタル塑性粘度、スクリーニングモルタル降伏値は d_M が大きくなると小さくなる。図よりいずれもモルタル膜厚係数で表現することが可能であると考えられる。そこで、スランプフローは対数関数で近似し、50cm フロー到達時間、スクリーニングモルタル塑性粘度、スクリーニングモルタル降伏値は指数関数で近似した。その結果、各試験値において次式が得られた。

$$SF = 35.872 \ln(d_M) + 36.496 \quad (6)$$

$$FT_{50} = 41.976 d_M^{-2.2873} \quad (7)$$

$$\eta_M = 6.5080 d_M^{-0.39088} \quad (8)$$

$$\tau_M = 17.714 d_M^{-0.87672} \quad (9)$$

ここで、 SF ：スランプフロー(cm)、 FT_{50} ：50cm フロー到達時間(s)、 η_M ：スクリーニングモルタル塑性粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 τ_M ：スクリーニングモルタル降伏値(Pa)。

d_M を用いることによって粗骨材種類および粗骨材絶対容積にかかわらずコンクリートのスランプフロー、50cm フロー到達時間、スクリーニングモルタル塑性粘度およびスクリーニングモルタル降伏値を推定できると考えられる。

6. まとめ

高流動コンクリートの流動性に及ぼす粗骨材

形状の影響を、粗骨材の体積に対する表面積の大小の傾向を表す特性値を算出し、その特性値と実積率および粗骨材絶対容積を考慮することにより、膜厚理論に関連づけて検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)粗骨材の投影周長、投影面積、体積および粒度分布を考慮した L_{SV} を用いることによって、粗骨材形状を定量化することができた。
- (2) L_{SV} と粗骨材実積率より算出されたモルタル膜厚係数 d_M を用いることによって、粗骨材種類および粗骨材絶対容積にかかわらずコンクリートのスランプフロー、50cm フロー到達時間、スクリーニングモルタル塑性粘度およびスクリーニングモルタル降伏値を推定できた。

謝辞

論文のとりまとめに際しては、宇都宮大学助教授 中村成春氏に貴重な御助言を頂きました。また、実験に際しては、宇都宮大学卒論生 小川原一太君、香川清児君の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)寺田謙一、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸、三島直生：フレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼすせん断層厚さおよび粗骨材要因の影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.513, pp.15-22, 1998.11
- 2)吳相均、野口貴文、友沢史紀：余剰ペースト膜厚を用いた高流動コンクリートのレオロジー一定数の予測、材料、Vol.48, No.10, pp.1193-1198, 1999.10
- 3)緑川猛彦、G.I.Pelova, J.C.Walraven：粒度分布の異なる細骨材を用いた高流動モルタルへの水膜モデルの適用、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.2, pp.943-948, 2001.7
- 4)寺田謙一、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸、三島直生：形状係数による粗骨材の比表面積の簡易測定法、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、A-1, pp.549-550, 1998.9