

論 文

[1018] 高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究

河井 徹*¹・橋田 浩*²

1. はじめに

高流動コンクリートのフレッシュコンクリートの諸性状をレオロジーの面から解析する研究が進められており、数多くの成果が出されている^{たとえば}[1]。しかし、高流動コンクリートのモルタルのレオロジー定数を実測した報告はあるものの[2][3][4]、高流動コンクリートそのもののレオロジー定数を実測し検討を行った研究成果は、ほとんど報告されていない。

そこで、筆者らは、各種の高流動コンクリートのレオロジー定数の測定を行い、レオロジー定数と試験方法、鉄筋間通過性能および材料分離との関係等に関して種々の実験的な検討を行った。本論文は、それらの実験概要と得られた成果に関して記述するものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料と配合

セメントCは3成分系の低発熱セメント（普通ポルトランドセメント：高炉スラグ微粉末：フライアッシュ＝35:45:20、比重2.78、比表面積 3,630cm²/g、水和熱7日 48.6cal/g、28日 62.1cal/g）、細骨材Sは浜岡産陸砂（比重2.59、粗粒率2.75）、粗骨材Gは峩朗産の石灰岩碎石（比重2.70、粗粒率6.63）を使用した。増粘剤Vaはポリアクリルアミド系化合物を主成分とした粉末のものを使用した。

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。既往の高流動コンクリートの配合[4][5]を参考として、実際に使用されている高流動コンクリートより塑性粘度の範囲を広く変化させた配合とした。すなわち、配合A0、A1、A3は、それぞれ表-1の配合Aで増粘剤をVa/W=0, 1, 3%添加したもの、配合B2は配合Bに、増粘剤をVa/W=2%添加したものとした。単位水量と単位粗骨材量は一定とした。高性能AE減水剤はナフタリン系のものを使用した。各配合ともスランプフローは50～65cmを目標にし、高性能AE減水剤の添加率を変えることにより3から5水準変化させた。また、空気量はAE剤の添加により5±1%にした。

2. 2 練混ぜ方法

ミキサは容量100ℓのパン型強制練りを用い、練混ぜ量は90ℓとした。粗骨材、細骨材、セメント、増粘剤を投入後空練りを10秒間行い、その後、混和剤を添加した練混ぜ水を投入して2分間練り混ぜた。コンクリートの練り上がり温度と実験室内の温度は20±2℃に保った。

表-1 配 合 表

配合No	粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
A	20	45	50	165	367	846	882
B		33.7	46.4	165	490	731	882

* 1 清水建設(株)技術研究所 建設技術研究部主任研究員（正会員）

* 2 清水建設(株)技術研究所 建設技術研究部研究員、工修（正会員）

2.3 試験項目と試験方法

コンクリートの試験項目は、スランプフロー試験、Vロート流下試験[6]、レオロジー定数を求めるTwo-Point 試験、鉄筋間通過試験および粗骨材の移動に起因する材料分離の試験[5][7]とした。また、コンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルについては、Kロート流下試験とミニスランプフロー試験[4]を行った。

スランプフローの測定は土木学会規準に準じた。Vロート試験、Kロート試験およびミニスランプフロー試験に用いた測定器具の形状を図-1に示す。Two-Point 試験方法の概略を図-2に示す。Two-Point 試験では、回転数の上昇・下降時のトルクを測定し、両者がほぼ直線関係を示す下降時(50~10rpm)の値を式(1)により回帰し、見掛けのレオロジー定数であるgとhを求めた。

$$T = g + hN \quad \text{----- (1)}$$

ここで、T:トルク、N:回転数

実際の降伏値 τ_f と塑性粘度 η_{pl} は、それらに装置定数 K/G と $1/G$ をそれぞれ乗じて求めた。Two-Point 試験の装置定数である K/G と $1/G$ は、レオロジー定数の異なる6配合のモルタルを用いて、二重円筒式回転粘度計(外筒径390mm、内筒径260mm)により求めたレオロジー定数とTwo-Point 試験により求めた見掛けのレオロジー定数の両者の直線関係を確認したうえでその勾配から定めた(図-3)。このようにした理由は、レオロジー定数の測定においては、粘着力の大きい軟練りモルタルに

は回転粘度計が、コンクリートにはTwo-Point 試験が適していることからである[8]。

コンクリートの鉄筋間通過試験は図-4に示すような装置を用いて、約25lのコンクリートを自重で通過させた場合の通過率を調べた。スクリーンは、A、B、Cの3種類を用いた。材料分離試験は、練混ぜ直後のコンクリートを $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の型枠内に自重で詰め、振動数60Hz、振幅1.1mmの振動テーブル上で30秒間振動させて材料分離の程度を調べるものであり、式(2)で材料分離指数SIとして算出した。

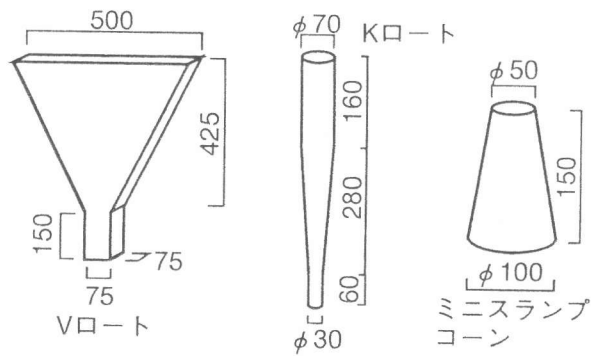


図-1 各種試験器具の形状寸法

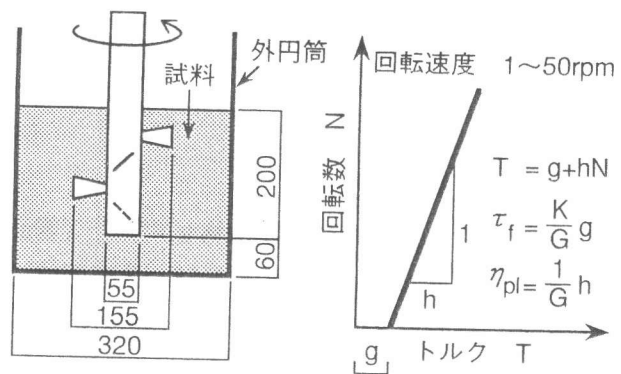


図-2 Two-Point 試験法概要図

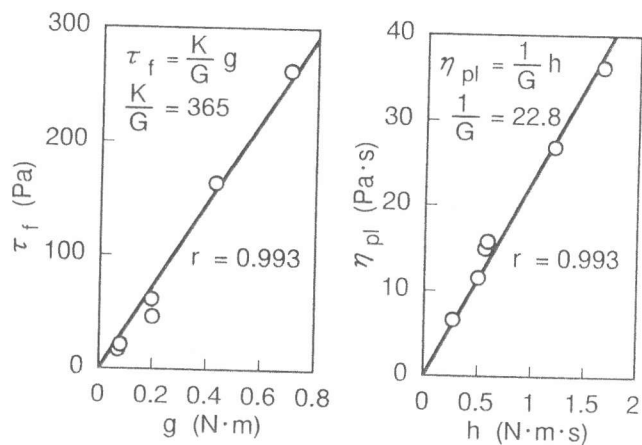


図-3 K/G と $1/G$ の設定

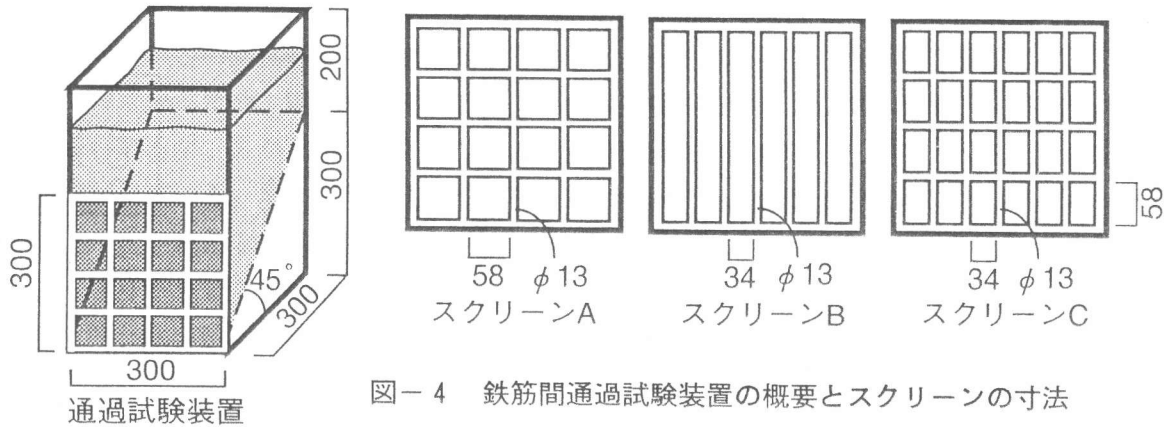


図-4 鉄筋間通過試験装置の概要とスクリーンの寸法

$$SI = \{ (G_2 - G_1) / (G_2 + G_1) \} \times 100 \quad (\%) \quad \text{-----}(2)$$

ここで G_1 、 G_2 : それぞれ、上部 2 ℓ および下部 2 ℓ のコンクリート中の粗骨材量

3. 実験結果

3.1 レオロジー定数

スランプフローとレオロジー定数との関係を図-5に示す。スランプフローと塑性粘度との相関関係は無いこと及び増粘剤の添加率の増加により塑性粘度が増加していることが分かる。一方、スランプフローと降伏値とは比較的良好な相関関係があり、スランプフローが大きいほど降伏値は小さくなっている。一般にコンクリートのスランプと降伏値とは相関があることは多くの文献で報告されているが、高流動コンクリートのように降伏値が小さい場合はスランプフローと降伏値とは比較的良好な相関を示すことが明らかになった。

Vロートの流下時間とレオロジー定数との関係を図-6に示す。Vロートの流下時間と塑性粘度との関係において、配合 A0 でスランプフローが約69cmの場合に、粗骨材同士のかみ合いが生じ、流下時間が大幅に増加していた。それ以外の塑性粘度が20~80Pa・sの範囲では、Vロートの流下時間と塑性粘度とは比較的良好な相関があることが示されている。一方、Vロートの流下時間と降伏値との相関関係は低いことが分かる。なお、Vロートの粘度計としての適用性を検討するために、配合A2で細骨材率を45, 50, 55, 60%とした配合で、単位粗骨材量がVロートの流下時間に与える影響を把握する試験

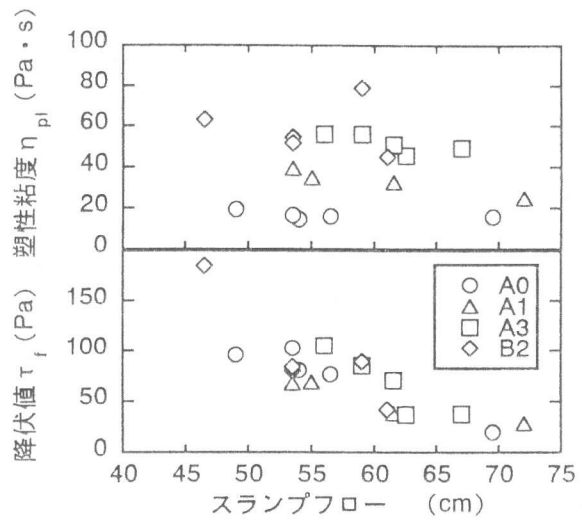


図-5 スランプフローとレオロジー定数

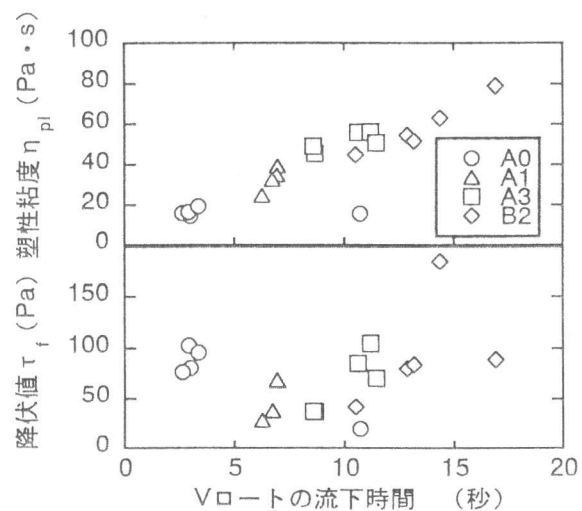


図-6 Vロートの流下時間とレオロジー定数

を行った。試験結果を図-7に示す。細骨材率が45%の場合には粗骨材のかみ合いが生じたために流下時間が著しく増加していた。前述の結果とも併せて考察すると、Vロートの流下時間は塑性粘度が小さい場合や粗骨材量が増加した場合には粗骨材とモルタルとの材料分離により粗骨材同士がかみ合うために流下時間が増加する場合があるが、材料分離が生じない範囲では塑性粘度と良い相関があることが示された。なお、モルタルのレオロジー定数に関しては、図-1に示すミニスランプフローと降伏値との関係、Kロートの流下時間と塑性粘度との関係には、互いに良好な相関があることが既に報告されている[4]。

3.2 鉄筋間通過率

図-8に、スクリーンAの場合のレオロジー定数と鉄筋間通過率との関係を示す。塑性粘度と通過率との関係において、塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上の場合には高い通過率を示しているが、塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の場合にはすべて配合A0の場合であり、通過率が低くなる場合がある。通過率が低い場合は、鉄筋の格子部分で粗骨材同士のかみ合いが認められていた。一方、通過率と降伏値との関係では、配合A0以外の配合は降伏値の値によらず通過率が高くなっている。

以上より、スクリーンAの場合には降伏値の値によらず、塑性粘度が $20\sim 80\text{Pa}\cdot\text{s}$ であれば通過率は高く、塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の場合には粗骨材のかみ合いが生じるために、通過率が低下する場合が多いことが分かった。

図-9に、スクリーンBの場合のレオロジー定数と鉄筋間通過率との関係を示す。塑性粘度と通過率との関係において、スクリーンAの場合と同様に塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$

s以下の場合には通過率が低い場合が多くなっているが、塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上の場合には比較的高い通過率を示している。ただし、塑性粘度が $50\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上になると通過率がやや減少する傾向が認められている。通過率と降伏値との関係からは、あまり明確な傾向は認められないが、 50Pa 付近が通過率が高いようである。そこで、通過率とスランプフローとの関係を示したところ図-10のようになり、スランプフローが $60\sim 65\text{cm}$ 程度のとき通過性能が高くなる傾向が認められた。

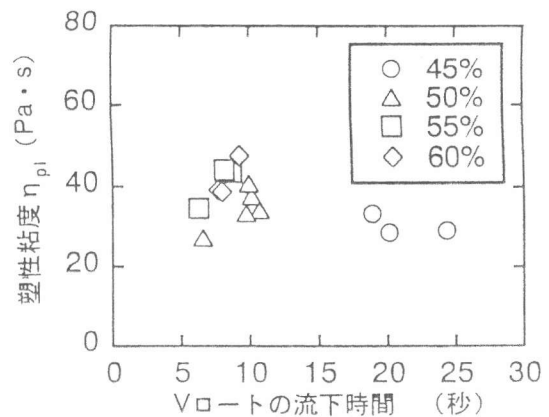


図-7 細骨材率とVロートの流下時間

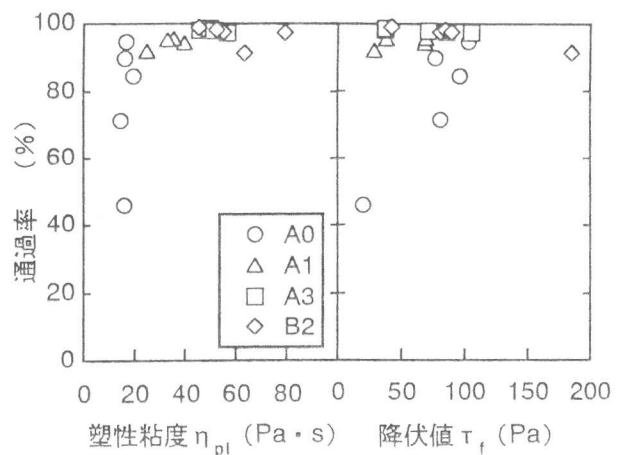


図-8 鉄筋間通過率 (スクリーンA)

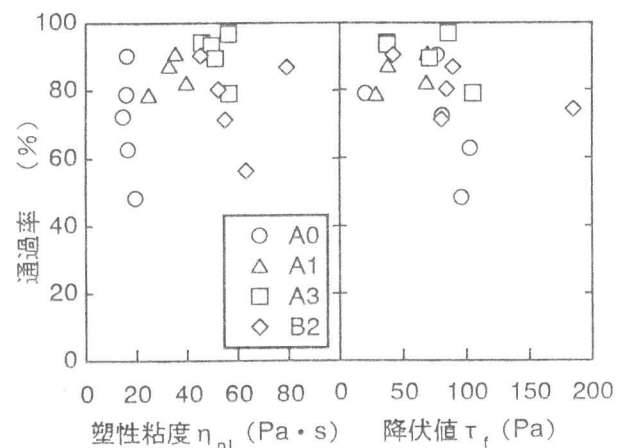


図-9 鉄筋間通過率 (スクリーンB)

図-11に、スクリーンCの場合のレオロジー定数と鉄筋間通過率との関係を示す。全体的に通過率が低くなっているため、定量的な考察は無意味であると思われるが、スクリーンAおよびBの延長的な傾向が出ている。すなわち、通過率は塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ を越えると増加するが、塑性粘度が $45\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度を越えると減少している。

以上より、本実験における鉄筋間通過試験結果からは、通過率を高くするためには塑性粘度が $20\sim 50\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度が良いと考えられる。この塑性粘度の範囲では、Vロートの流下時間は $5\sim 13$ 秒、モルタルのKロートの流下時間は $5\sim 17$ 秒。モルタルの塑性粘度は文献[4]から判断して、 $5\sim 15\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度と推定される。また、通過率が最大になる場合の降伏値は 50Pa 前後であると判断される。この場合のスランブフローは $60\sim 65\text{cm}$ 程度、モルタルのミニスランブフローは $27\sim 33\text{cm}$ 程度であり、降伏値は文献[4]から $25\sim 40\text{Pa}$ 程度と推定される。

3. 3 材料分離試験結果

図-12にレオロジー定数と材料分離指数SIとの関係を示す。材料分離指数SIと降伏値との相関関係は明確ではない。一般にコンクリートのレオロジー定数は振動中には減少する[9]、降伏値はゼロになり[10]、振動によるコンクリートの材料分離の速度がモルタルの塑性粘度に支配される[11]等のさまざまな研究成果が出されている。本試験では、塑性粘度の増加とともに材料分離指数SIが減少しており、塑性粘度が約 $30\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上では材料分離指数SIはほぼ 20% 以下の値を示している。また、水中不分離性コンクリート程度まで塑性粘度を上げたコンクリートについて同一の試験を行った

結果では、スランブフローが 60cm を越えた場合でも材料分離指数SIが $2\sim 3\%$ という非常に小さい結果が得られている[7]。以上より、本試験の振動条件では、材料分離指数は塑性粘度に支配されていると考えて良いであろう。本試験方法は、単位粗骨材量が相違すると、材料分離指数SIも当然相違するが、一般の建築用コンクリートとして単位粗骨材量が $927\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比が $55\sim 60\%$ 、スランブ 18cm 前後のコンクリートについて同一の実験を行った結果、材料分離指数

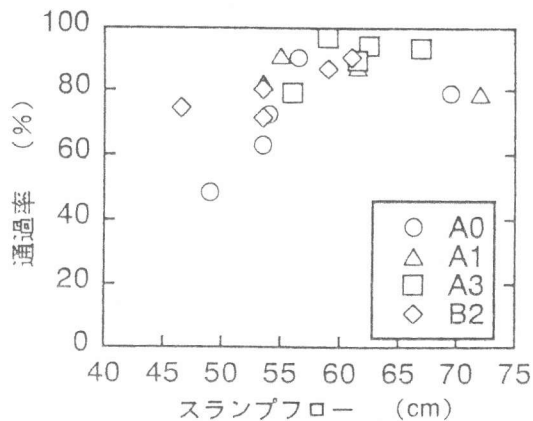


図-10 鉄筋間通過率(スクリーンB)

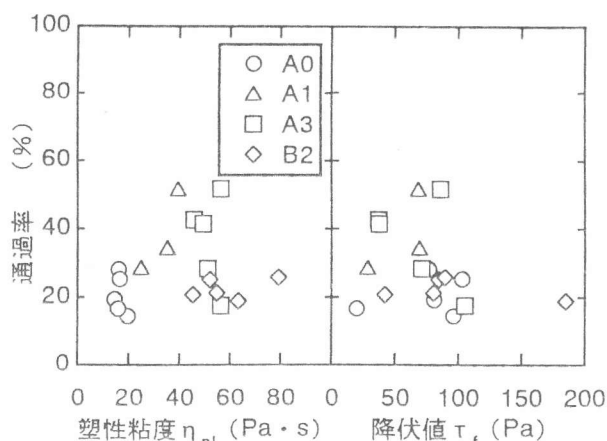


図-11 鉄筋間通過率(スクリーンC)

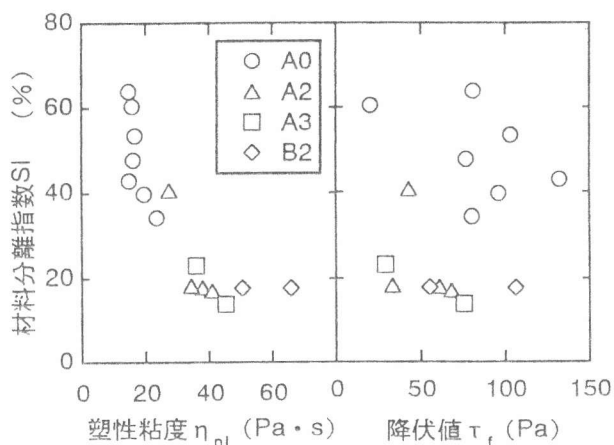


図-12 レオロジー定数と材料分離指数

SIは15~17%であった。すなわち、高流動コンクリートで塑性粘度が $30\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上の場合は、振動に対する粗骨材の移動に起因する材料分離に対する抵抗性は通常の建築用コンクリートと極端に相違することはないと考えて良いと考えられる。

4. まとめ

本実験で扱った高流動コンクリートに関して以下のことが結論付けられる。

- (1)スランプフローはコンクリートの降伏値と比較的良好な相関がある。
- (2)Vロートの流下時間は、粗骨材同士のかみ合いがない場合には、コンクリートの塑性粘度と良好な相関がある。
- (3)鉄筋間通過性能は、塑性粘度が $20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の場合には材料分離により低下するケースが多いが、塑性粘度が $20\sim 80\text{Pa}\cdot\text{s}$ では良好となる。ただし、鉄筋間隔が狭くなると塑性粘度が $50\text{Pa}\cdot\text{s}$ を越えると多少低下する傾向が認められる。
- (4)鉄筋間通過性能は、塑性粘度が $20\sim 80\text{Pa}\cdot\text{s}$ の場合にはコンクリートの降伏値が 50Pa 程度の場合、すなわちスランプフローが $60\sim 65\text{cm}$ 程度の場合が最大となる。
- (5)振動機をかけた場合の粗骨材の材料分離は塑性粘度が $30\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の場合には顕著になる。すなわち、高流動コンクリートに振動機をかける必要がある場合には、粗骨材の移動による材料分離に対する抵抗性を出すために、コンクリートの塑性粘度を $30\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上にすることが望ましい。

今後は、単位粗骨材量（粗骨材体積濃度）と粗骨材の最大寸法を変化させた場合のコンクリートの鉄筋通過性能とレオロジー定数との関係を定量的に把握していく予定である。

参考文献

- 1) 谷川恭雄・森 博嗣・黒川善幸：超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関するレオロジー的考察、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.79-84、1993.5
- 2) 名和豊春・江口 仁・大久保正弘・深谷泰文：高流動コンクリートの配合と流動性に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.369-374、1992.6
- 3) 久保田裕康・下山善秀・藤原浩巳：高流動コンクリートの施工性・充填性に関する実験的研究、第46回セメント技術大会講演集、1992.5
- 4) 河井 徹・橋田 浩・黒田泰弘・井上秀之：高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究（その1：モルタルの特性）、日本建築学会大会、1993.9
- 5) 河井 徹・黒田泰弘・武川芳廣：低発熱セメントを用いた高流動コンクリートの諸性質に関する実験的研究、土木学会論文集、No.462、VI-18、pp.111-120、1993.3
- 6) 小沢一雅・岡村 甫・坂田 昇：締め固め不要コンクリートの充填性評価のためのロート試験、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.17-22、1993.5
- 7) 河井 徹：高流動域まで流動化したコンクリートに対する粘稠剤の効果について、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、V-155、pp.358-359、1988.10
- 8) 水口裕之・正木位史：フレッシュコンクリート用回転翼型レオメータの開発、フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集、pp.7-12、1989.4
- 9) 明石外世樹・角田 忍・森本登志也：Two-Point Workability Testによるフレッシュコンクリートの物性値測定、フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集、pp.7-12、1986.3
- 10) Tattersall, G. H. and Baker, P. H. : The Effect of Vibration on Rheological Properties of Fresh Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.40、No.143、June、1988
- 11) 谷川恭雄・森 博嗣・黒川善幸・小高茂央：非定常粘塑性サスペンション要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション、日本建築学会東海支部研究報告、1993.2