

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760523

研究課題名(和文) 施工設計法の確立に向けたフレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築と定量化

研究課題名(英文) Construction and Quantification of Rheological Model of Fresh Concrete towards Development of Workability Design

研究代表者

三島 直生 (MISHIMA, Naoki)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30335145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築および定量化にある。フレッシュモルタルを対象とした回転粘度計を用いた実験の結果に基づき、ダイラタンシーの影響を考慮できるフレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの定式化を行った。また、レオロジー定数に対する各種混和材、経時変化、空気量およびせん断ひずみ加速度の影響を明らかにした。最後に、フレッシュコンクリート用のレオロジー試験装置の試作を行った。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this study is construction and quantification of rheological model of fresh concrete. Formularization of Visco-plastic flow model of fresh mortar considering dilatancy property was carried out based on experimental results by using of rotation visco meter. And influences of admixtures, time course, air content and shear strain acceleration on suggested model were clarified. At the last, a prototype rheometer for fresh concrete was built.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：フレッシュコンクリート フレッシュモルタル レオロジー 回転粘度計 ダイラタンシー 間隙水圧 動的内部摩擦係数

1. 研究開始当初の背景

高度な構造設計をし、良質な材料・適正な調(配)合を用いた場合にも、施工(養生も含む)が適正でなければ高品質な鉄筋コンクリート構造物は生産できない。現状の鉄筋コンクリートに関する研究動向を考えると、構造設計および材料・調(配)合に関する研究は、ある一定の水準に達しているのに対し、施工に関しては、未だに基礎的な段階を脱していない。現状の経験則に基づいた施工では、想定外のコンクリートの充填不良、締固め不足、材料分離などが発生し、均一なコンクリートが製造されないために、所要の構造・耐久性が得られない場合がある。このため、施工の効率化、品質の安定化、および、品質評価方法に関する研究・開発が急務となっている。一方で、関連学会等においては、依然として施工に関する学術研究は多くない。

この最大の理由としては、施工時に取り扱う材料であるフレッシュコンクリートの物性評価方法が確立していない事が挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、既に提案されている施工設計の考え方を申請者なりに具体化し、レオロジーに関する研究の目標設定を明確に行うことにより、実用に耐えうる精度および性能をもったフレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築およびレオロジー定数の定量化を目指す。

3. 研究の方法

新たなフレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築に当たって重要となるのは、施工時に発生する様々な状況を定量的に評価し、ワーカビリティを予測するために利用できるものでなくてはならない点である。すなわち、スランプ試験のような単調流動時の流動性評価では不十分であり、間隙通過時の閉塞、加振時の流動化、材料分離、経時変化による流動性の変化等が主な評価対象となる。

これらの特性を評価するにあたっては、既往の研究で多く見られた均質粘塑性体と見なそうとする視点では難しく、内部の組成を考慮し、高濃度サスペンションとして流動メカニズム自体を検討する必要がある。現在、高濃度サスペンションの流動メカニズムとして考えられているのがチキソトロピーとダイラタンシーである。これら2つの流動メカニズムのうち、ポンプ圧送から打設・振動締固めまでの間のフレッシュコンクリートの流動性に対しては、ダイラタンシーの影響が大きいと考え、本研究では、主にダイラタンシーによる流動性の変化とそのメカニズムの把握を行い、レオロジーモデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 試験方法

本研究では、レオロジー試験として、図-1に示す様な小型の外円筒回転型回転粘度計を用いた測定を行っている。このため、測定対象となる試料は流動性の高いモルタルおよびセメントペーストに限定される。本試験装置の特徴は、外円筒の回転速度を連続的に変化させることができる点、および、内円筒に固定した小型の間隙水圧計で間隙水圧の測定ができる点である。

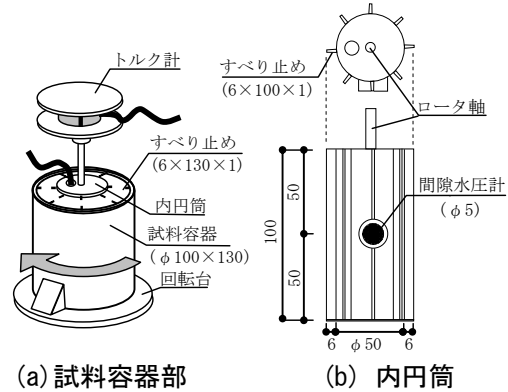


図-1 測定装置の概要(単位: mm)

(2) 測定結果の例

図-2に、回転粘度計による測定結果の例を示す。同試料は回転粘度計での測定のために低水セメント比の高流動モルタル(0打フロー値260mm)を使用しているが、せん断ひずみ速度の増加時にせん断応力の顕著な増大および間隙水圧の低下が確認できる。本研究ではこのせん断応力の一時的な変動(オーバーシュート)を、主としてダイラタンシーによるものと考えてモデル化を進める。ここで、せん断ひずみ速度の減少時には明確なせん断応力の減少が見られないが、これは試料が高流動モルタルであり、負のダイラタンシー(液状化)が発生しにくい試料であるためと考えられる。

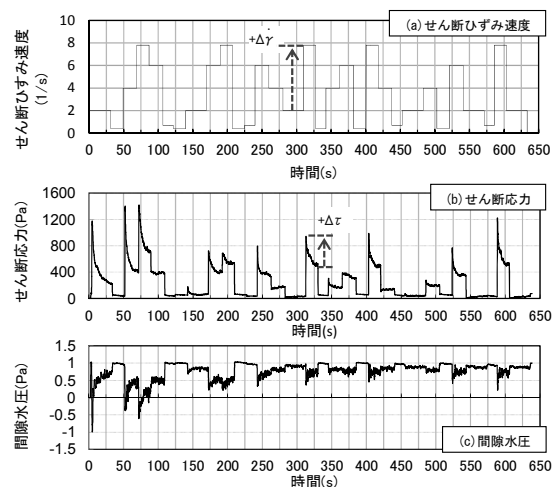


図-2 測定結果の時刻歴の例

(モルタル、水セメント比0.25、細骨材容積比0.50)

(3)  $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係

図-3に、せん断ひずみ速度の変化量 $\Delta\dot{\gamma}$ とその時のせん断応力のオーバーシュート量 $\Delta\tau$ の関係の例を示す。両者の関係は、せん断ひずみ速度の履歴およびその時のせん断ひずみ速度によらず、概ね1本の曲線で近似できるという結果を得ている。また、その関係は以下の式で表すことができる。ただし、せん断応力のオーバーシュートの小さい試料には適用が難しいことが分かっている。

$$\Delta\tau = A\{\exp(B\Delta\dot{\gamma}) - 1\} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta\tau$ :せん断応力の変化分 (Pa),

$\Delta\dot{\gamma}$ :せん断ひずみ速度の変化分 (1/s),

$A, B$ :試料ごとに求まる係数

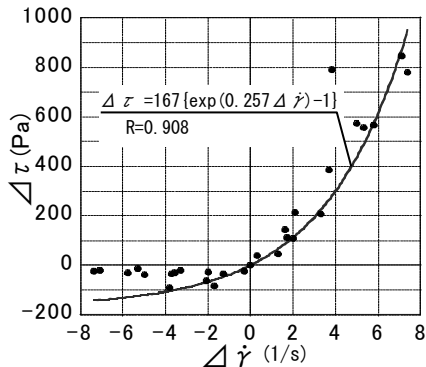


図-3  $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係の例 (図-2と同試料)

(4) コンシステンシー曲線

図-4に、コンシステンシー曲線の例を示す。同図には、図-2に示したせん断応力の履歴のうち、一定のせん断ひずみ速度を試料に与えた区間の最初と最後の値をそれぞれピーク値および定常値として示す。図によれば、ピーク値は幅広く分布しているのに対し、定常値はせん断ひずみ速度の履歴によらず、ほぼ一定の値となっており、ビンガムモデルで近似できると考えられる。

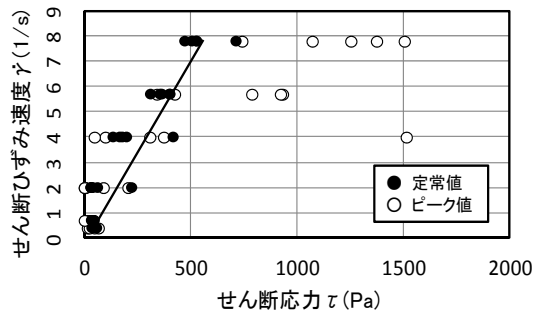


図-4 コンシステンシー曲線の例 (図-2と同試料)

(5) 動的内部摩擦係数

図-5に、せん断応力 $\tau$ と有効応力の変化量 $\Delta p$ の関係を示す。ここで $\Delta p$ は、間隙水圧の変化量と絶対値が等しいとして求めた。図によれば、間隙水圧の測定が非常に困難であるためにばらつきはあるものの、両者の間に線形の関係があると見ることができる。この関係の傾きは流動下における動的な内部摩擦係

数 $\tan\phi'$ であり、重要な材料定数の1つとなる。

また、同関係は定常状態においても成立しており、定常状態の塑性粘度が間隙水圧の変動によって決定していると考えられる。このことから、オーバーシュートだけでなく定常状態も含めたフレッシュモルタルのほぼ全てのせん断抵抗を固体粒子の内部摩擦で一貫して説明できるものと考えられる。

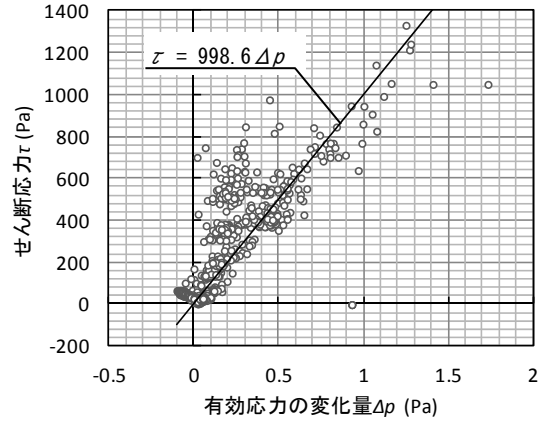


図-5 せん断応力 $\tau$ と有効応力 $\Delta p$ の変化量の関係の例 (図-2と同試料)

(6) フレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの定式化

数値解析などで精密な流動解析を行う場合には、図-2に示したせん断応力の履歴曲線の全てを表現できるモデル、すなわち、オーバーシュート後のせん断応力の収束曲線まで表現できるモデルが必要となるものと考えられるが、本報では、モデルの単純さおよび実用性を重視し、せん断ひずみ速度の変動に起因する最大または最小せん断応力を推定するためのモデルを提案する。以下に、本研究結果から得られたモデルを示す。

$$\tau = \{\eta\dot{\gamma} + \tau_y\} + \Delta\tau \quad (2)$$

$$= p \tan\phi' \quad (3)$$

ここに、 $\tau$ :せん断応力 (Pa)、 $\eta$ :収束時の塑性粘度 (Pa·s)、 $\dot{\gamma}$ :せん断ひずみ速度 (1/s)、 $\tau_y$ :収束時の降伏値 (Pa)、 $\Delta\tau$ :式(1)に示すせん断応力のオーバーシュート量 (Pa)、 $p$ :有効応力 (Pa)、 $\tan\phi'$ :動的内部摩擦係数(-)

本モデルは、フレッシュモルタルの鉄筋間通過時やポンプ圧送時における閉塞危険度の予測、および振動時における流動化し易さの評価に主眼を置いたモデルといえる。式(2)は、ビンガムモデルを、ダイラタンシーによるオーバーシュートの影響を考慮できる様に拡張したものであり、 $\Delta\tau$ の項が閉塞危険度および振動による流動化し易さを示す指標になる。また、式(3)は、式(2)で示した複雑に変化するせん断応力が、全て有効応力の変動により説明できることを示している。試料が流動性の高いモルタルであること、チキソトロピーの影響を考慮していないこ

となど、不完全なモデルではあるものの、施工条件を考慮した材料設計の基礎資料となり得ると考えられる。

(7) 各種要因の影響

① 水セメント比および細骨材容積比

サスペンション濃度が増大するほど、固体粒子間の接触機会が多くなり、ダイラタンシーも発生しやすくなる。このため、水セメント比が小さいほど、また、細骨材容積比が大きいほど、ダイラタンシー特性、すなわち  $\dot{\gamma}$  変化時の  $\tau$  の変化量は大きくなる。測定結果の例を図-6 に示す。

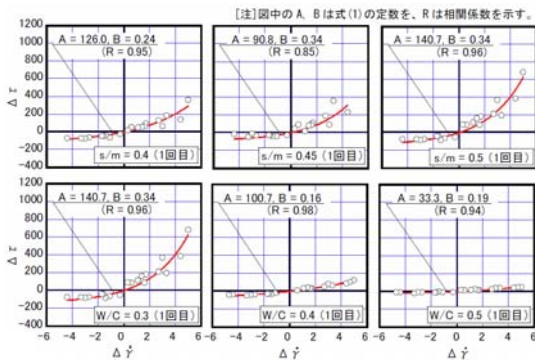


図-6 水セメント比 W/C および細骨材容積比 s/m が  $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$  関係に及ぼす影響

② 空気量

図-7 に、式(1)の係数 A, B に及ぼす空気量の影響を示す。同図から、係数 B は空気量の影響が見られなかったのに対し、係数 A の値は空気量が多くなるほど小さくなる傾向がみられた。係数 A の低下は、図-3 に示した  $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$  関係曲線の曲率が低下することを示しており、空気量が多いほどダイラタンシーの特性は弱くなると考えられる。これは、固体粒子間の接触を連行空気が妨げることによる効果と同時に、ダイラタンシーによる堆積膨張の際に、空気が膨張して間隙水圧の低下を軽減する作用もあると考えられる。

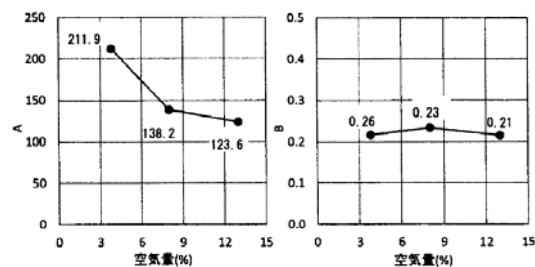


図-7 空気量が係数 A, B に及ぼす影響

③ 各種混和材料

本研究では、フレッシュモルタルのダイラタンシー特性に影響を及ぼすと考えられる混和材料として、フライアッシュ、シリカフュームおよび増粘剤を取り上げ、実験的な検討を行った。図-8 に測定結果の例を示す。実験の結果からは、混和材の容積置換率が大きいほど、また、増粘剤の添加率が大きくなるほど、 $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$  関係曲線の曲率は小さくなり、

ダイラタンシー特性が小さくなった。フライアッシュおよびシリカフュームについては、セメントの内割置換としたために、粒形の悪いセメントに対して、粒子形状が球形であることの影響、すなわち、球形に近いほど粒子間の接触が軽減される効果が影響したと考えられる。また、増粘剤については、増粘剤として使用される高分子が粒子間の潤滑剤として働き、粒子間の接触の影響を減らしたと考えられる。また、動的内部摩擦係数の測定結果については、増粘剤の使用により顕著な低下が見られたものの、他の混和材の使用による明確な影響は見られなかった。

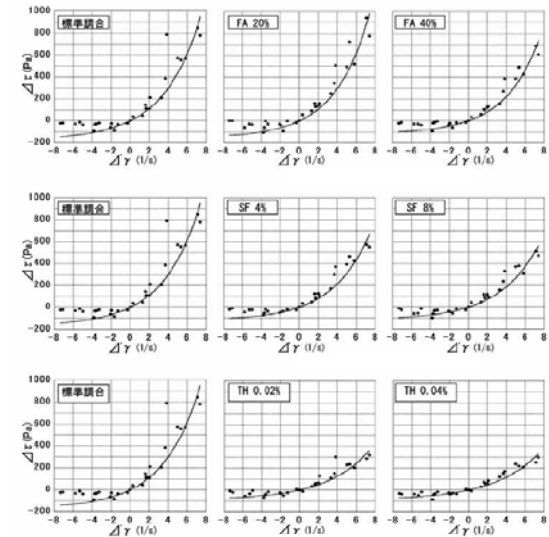


図-8 各種混和材料を用いた  $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$  関係の例 (FA: フライアッシュ、SF: シリカフューム、TH: 増粘剤)

④ 経時変化

図-9 に、経時変化前後のせん断応力の時刻歴の例を示す。同図には、経時変化前の結果をせん断応力軸方向に実数倍 (図の例では 1.5 倍) した曲線も併示する。図によれば、経時変化前の測定結果を実数倍することで、経時変化後のせん断応力の時刻歴曲線にほぼ一致する結果が得られており、このことは、複雑なせん断応力履歴の経時変化の影響を単なる実数倍で表現できる可能性が示された。同様の傾向は、 $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$  関係曲線についても得られている。

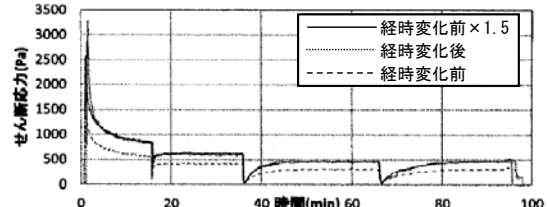


図-9 せん断応力の時刻歴に及ぼす経時変化の影響の例

⑤ せん断ひずみ加速度

図-10 に、せん断ひずみ速度の変化直後のせん断応力の時刻歴に及ぼす、せん断ひずみ加速度の影響を示す。図(a)に示すせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  が加速した場合の結果からは、セ

せん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ が小さくなるほど、せん断応力 $\tau$ の増加勾配が緩やかになり、最大値は小さくなる傾向がある。一方で、せん断応力 $\tau$ の収束値については、せん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ の大きさが変わっても、ほぼ同じ値となることがわかる。さらに、同図はせん断ひずみ速度の変化し始めた時点に合わせて示しているが、せん断応力 $\tau$ の下降域では、せん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ によらず、いずれの曲線もほぼ重なっている。この点の理論的な証明は今後の課題となるが、この様な傾向が一般的である場合には、せん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ の影響も含めたモデル化に際しては、かなりのモデルの単純化が期待できる。図(b)には、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が減速した場合の結果を示す。せん断応力 $\tau$ の最小値の違いは明確には見られない。最小値が全てほぼ0である点については、本調合が高流動モルタルであり、負のダイラタンシー(液状化)の影響を受けにくいと考えられる。他の傾向(ピーク後の曲線が重なる点および収束値が一致する点)については概ね加速した場合と同じである。またこの結果からは、 $\Delta\tau \sim \Delta\dot{\gamma}$ 関係はせん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ の影響を受け、せん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ が小さくなるほど、 $\Delta\tau$ の値が小さくなることが明らかとなった。

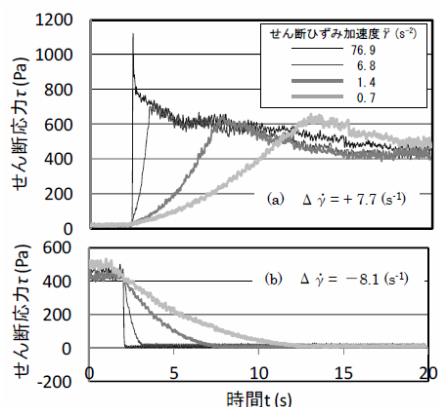


図-10 せん断応力 $\tau$ の時刻歴に及ぼすせん断ひずみ加速度 $\dot{\gamma}$ の影響

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 横山達資、三島直生、畑中重光：有効応力に基づくフレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの構築に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 34(1)、pp. 1222-1227、2012
- ② 横山達資、三島直生、畑中重光：回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのダイラタンシー特性の定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 33(1)、pp. 1217-1222、2011

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 三島直生、畑中重光：フレッシュモルタルのせん断応力の変動に及ぼすせん断ひ

ずみ加速度の影響に関する基礎的研究、第 67 回セメント技術大会、2013 年 5 月 13 日、ホテルメトロポリタン(東京都新宿区)

- ② 三島直生、畑中重光：ダイラタンシーの影響を考慮できるフレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの定式化に関する研究、日本建築学会大会、2012 年 9 月 12 日、名古屋大学(愛知県名古屋市)
- ③ 横山達資、三島直生、畑中重光：フレッシュモルタルのダイラタンシー特性に影響を及ぼす空気量の影響に関する実験的研究、日本建築学会東海支部研究発表会、2012 年 2 月 18 日、名古屋工業大学(愛知県名古屋市)
- ④ 横山達資、三島直生、畑中重光：フレッシュモルタルのダイラタンシー特性に及ぼす経時変化の影響に関する基礎的研究、日本建築学会大会、2011 年 8 月 23 日、早稲田大学(東京都新宿区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三島直生 (MISHIMA Naoki)  
三重大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30335145