

- 2 フレッシュコンクリートのレオロジーモデルおよび 流動解析手法に関する研究

Study on Rheological Model and Numerical Analysis Method of Flow for Fresh Concrete

(研究期間 平成 12 ~ 14 年度)

材料研究グループ

李 柱国

Dept. of Building Materials and components

Zhuguo Li

Synopsis – This study aimed at clarifying flow behaviors of fresh concrete and developing a new numerical analysis method of flow. After the flow mechanism and granular character of fresh concrete were investigated, the shear strain (or shear rate) – stress (normal stress and shear stress) – temperature relation equations were induced. Based on the obtained constitutive equations, flow curve of fresh concrete including high fluidity concrete was clarified, effects of stress and temperature on the flow behaviors were quantified, and a rheological model for fresh concrete was proposed, which can be widely applied to any kind of concrete. Moreover, the yield condition, time-dependence of fluidity and thixotropic character of high fluidity concrete were quantitatively examined. The flow simulation method was finally discussed based on the rheological model proposed and Finite Element Method.

【研究目的及び経過】 コンクリートの生産・施工システムの合理化を実現するには、フレッシュコンクリートの性質を正確に把握することおよび数値解析による予測技術確立することが基本となる。現在、フレッシュコンクリートのレオロジー的研究は、それを均質な連続体と近似した実験的な考察が大半であるが、実験装置や実験中における材料性状の水和反応や分離による不安定さなどの問題により、精密な実験的考察を行うのが困難な状況にある。また、ビンガムモデルに基づいた流動解析予測の精度および適用範囲に限界がある。このため、フレッシュコンクリートの各性状に関する系統的・定量的な把握がなされておらず、理論不在の研究結果が多い。

本研究では、普遍性・共通性をもつフレッシュコンクリートのレオロジー理論体系を構築するための基礎研究として、従来の現象論的なアプローチとは異なって材料の構造特性に主眼を置いた物性論的なアプローチによって、フレッシュコンクリートの流動性状を解明した上で、任意の調合・載荷条件下の変形流動挙動を表現できるレオロジーモデルの提案および高精度で予測できる数値解析方法の開発を試みた。

【研究内容】 本研究の目的を実現するために、以下の研究を行なった。

(1) フレッシュコンクリートを構成する骨材粒子とセメントが静止および移動の時に受ける粒子間力をそれぞれ考察し、外力が作用する場合には、骨材粒子群とセメント粒子群の変形時間依存性を調べた。

(2) アイリング速度過程粘性理論を拡張することによって、せん断力を加えるときの移動セメント粒子の発生

確率を調べ、微視アプローチによって粒子移動がもたらす粒子集合体のマクロなせん断ひずみを検討した。

(3) 粒子間隙水の表面張力による粒子間の摩擦抵抗の増加および粒子間力の大きさと方向を定量的に考察し、高流動コンクリートの降伏条件を検討した。

(4) 高流動コンクリート中の粒子間力分布、粒子平均接点角、摩擦抵抗および摩擦抵抗を打ち勝てる粒子間力をもつセメント粒子の数を検討した上で、せん断速度式および流動曲線を考察した。また、せん断面上の垂直応力及び温度が流動挙動に与える影響を定量的に調べた。

(5) Brown 運動による粒子の衝突凝集、セメントの水和物の生成および外力による粒子分散が高流動コンクリートの流動挙動に与える影響を考察し、静止の場合および外力が作用する場合においては高流動コンクリートの変形抵抗性の経時変化をそれぞれ調べた。

(6) 高流動コンクリートのビンガム定数の測定値と実験時の環境温度、載荷速度、せん断面上の垂直応力および用いられたせん断速度のレベルと分布範囲などの実験条件との関係を理論的に考察した。

(7) 外力が作用するとき、普通フレッシュコンクリートにおける粒子の平均移動距離、平均移動方向角、外力による粒子間力は粒子間の摩擦抵抗を打ち勝った活性化粒子の発生確率などを調べ、粘塑性状態におけるフレッシュコンクリートの力学構成式およびせん断速度式を誘導し、応力状態、外力の持続時間、環境温度などが変形抵抗性に及ぼす影響を定量的に検討した。

(8) せん断ボックス試験器を試作し、フレッシュコンクリートのせん断ひずみ、せん断速度および応力や載荷

持続時間や温度などの影響を測定する方法を検討した。
 (9) (1) ~ (8)の研究結果に基づいて、フレッシュコンクリートの变形流動挙動を表現するレオロジーモデルの提案を試みた。

(10) 提案したレオロジーモデル、高流動コンクリートのせん断速度式および粘塑性有限要素法に基づいて、高精度で任意のフレッシュコンクリートの流動挙動を解析的に予測する可能性を検討した。

[研究結果] 以上の研究によって得られた結果が以下のようにまとめられる。

- (1) 静止セメント粒子は固体摩擦抵抗のみを受けるが、移動セメント粒子は摩擦抵抗と粘着性抵抗をとともに受ける。骨材粒子は、いずれの場合にも摩擦抵抗しかを受けない。また、セメント粒子群の变形は時間に依存する。これらによって、フレッシュコンクリートを粘着性粒子(セメント粒子)と非粘着性粒子(骨材粒子)からなる含水粒子集合体と見なすことができ、そのせん断速度はセメント粒子の移動に起因するものであることを確認した。
- (2) フレッシュコンクリートの变形流動機構を明らかにした。せん断ひずみ速度は式(1)に表される。

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{L_0} \cdot N_{ca} \cdot J \cdot \Lambda_{cm} \cdot \cos \theta_{cm}$$

$$J = 2A \sinh\left(\frac{f_v \cdot \Lambda_{cm}}{2kT}\right), A = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right) \quad (1)$$

ここに、 L_0 : 単位長さ(=1)、 N_{ca} : 単位面積における粒子間力が粒子間の摩擦抵抗より大きいセメント粒子の個数、 J : 移動セメント粒子の発生確率、 Λ_{cm} : セメント粒子の移動開始から新たな安定位置に至るまでの平均移動距離、 θ_{cm} : セメント粒子の平均粒子接点角、 f_v : 1個のセメント粒子がその粘性抵抗によって負担するせん断力の平均値、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度、 h : プランク定数、 E_c : セメント粒子の相対運動を阻害するエネルギー障壁としてのセメント粒子の平均ポテンシャルエネルギー

(3) 高流動コンクリートの降伏条件式は、式(2)に示すように表され、真の降伏値 τ_y はせん断面上の垂直応力 σ_n 比例し、比例定数は内部摩擦角 ϕ_m の正接値である。

$$\tau_y = \sigma_n \tan \phi_m + N f_{vm} \tan \phi_m \quad (2)$$

ここに、 f_{vm} : 水の表面張力による粒子間の平均付着力

(4) 高流動コンクリートのせん断速度 $\dot{\gamma}$ とせん断応力 τ の関係は、式(3)に示すように得られ、垂直応力と温度の影響を定量的に明らかにした。

$$\dot{\gamma} = \frac{2kT}{h} N_c \Lambda_{cm} \exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right) \sinh\left[\frac{S_d \Lambda_{cm}}{2kT N_c} (\tau - \tau_y)\right] \quad (3)$$

(5) 高流動コンクリートの流動性が静止時間および外

力持続時間に依存する特性を定量的に明らかにした。また、チキソトロピー性の表現形式としてのヒステリシス・ループの形状および面積の影響要因を解明した。その詳細は、発表した論文「日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.15-22, 2002.8.」を参照していただきたい。

(6) 高流動コンクリートのビンガム定数の測定値は、各測定条件に依存することを確認した。ビンガム定数の測定値と測定条件との関係についての詳細は、発表した論文「日本建築学会構造系論文集, No.563, pp. 1-8, 2003.1.」を参照していただきたい。

(7) 非粘着性粒子群と粘着性粒子群のせん断ひずみと応力関係をそれぞれ解明した上で、粘塑性状態におけるフレッシュコンクリートの力学構成式およびせん断速度式が式(4), (5)のように得られ、垂直応力、温度および載荷持続時間が变形抵抗性に及ぼす影響を定量化した。式(4), (5)中の各記号の意味については発表した論文「日本建築学会構造系論文集, No.564, pp.1-8, 2003.2.」を参照していただきたい。

$$\dot{\gamma} = \frac{S_1 \tau}{\sigma_n - b_1(\tau - C_{w1})} + \frac{S_2 \tau \omega}{\sigma_n + b_2 C_{w2} - b_2 \tau \omega} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2B_p R_p (1+D) \tau \exp(-qt)}{1+2D(1-\omega)} \left[1 - \frac{b_2 \tau (1-\omega)}{\sigma_n - b_2(\omega \tau - C_{w2})} \right] \quad (5)$$

(8) 試作したせん断ボックス試験器は、広範囲のコンクリートの变形流動特性の測定に適用可能である。この試験器を用いてせん断実験を行い、(1)~(7)に述べた理論的考察結果の妥当性を検証した。

(9) フレッシュコンクリートの变形流動性状を表現するレオロジーモデルを図1に示すように提案した。せん断弾性係数および粘度係数は、モデルのパラメーター要素であるが、定数ではなく、応力状態や載荷持続時間に伴って変化するものである。

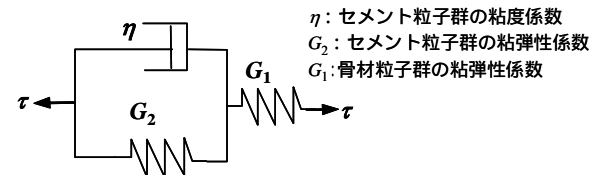


図1 フレッシュコンクリートの变形流動モデル

(10) 数値解析の入力パラメーターおよび設定値の影響要因を明らかにした。また、スランピングされる時に、硬練りおよび高流動試料の流動挙動をそれぞれシミュレートし、提案したレオロジーモデル、高流動コンクリートのせん断速度式および粘塑性有限要素法に基づいた流動解析手法は、汎用性、高精度特徴をもつこと、および骨材分離に予測可能であることを確認した。