

論文 セメントモルタルの流動解析への CIP 法の適用

遠山 裕一*1・国枝 稔*2・上田 尚史*3・中村 光*4

要旨: コンクリートやモルタルをはじめとするセメント系材料のフレッシュ性状を予測できる流動予測手法を開発するために、フレッシュ性状の大きく異なる2種類のモルタルを対象にレオロジー的なパラメータを実験的に同定するとともに、障害物を配置した小型のLフロー実験を実施した。その結果、Bingham 流体を対象としたCIP法による数値解析により、両者の流動挙動の違いを再現可能であり、0打のモルタルフロー試験を対象とした3次元解析によりその有効性を検証した。

キーワード: CIP法, 流動解析, レオロジー, フレッシュモルタル

1. はじめに

自己充填コンクリートや繊維補強コンクリートなど、フレッシュ時の性状が硬化後のコンクリートの品質に影響を及ぼす場合がある¹⁾。従って、フレッシュ時のコンクリートの流動挙動を定量的に評価することが重要となる。これまで、コンクリートなどのフレッシュ性状を示す材料の流動予測手法の開発が多く行われてきた²⁾。その代表的なものには、解析対象を有限の要素に区切り、要素ごとで計算をすることにより、近似的に挙動を再現する有限要素法(FEM: Finite Element Method)が挙げられる。このようなLagrange的記述法では、格子が物体を表現するため、物体の変形に伴って格子も変化する。そのため、局所的に大きく変形する挙動を再現しようとする、格子に大きな歪みが生じてしまい、その解析精度に大きく影響を与える。この問題を解決するために、粒子法³⁾や個別要素法⁴⁾を初めとする数多くの研究がなされてきたが、一般的なコンクリートからモルタルのような流動性の高い材料までを統一的に精度良く再現できる手法が確立されたとは言い難い。

本研究では、様々なフレッシュ性状を示す材料や施工条件下にも対応できる解析手法を開発するために、流体力学的な解析手法に基づいたCIP法⁵⁾(Constrained Interpolated Profile)を適用する。コンクリートなどの材料はせん断抵抗を有する流体であると仮定し、Euler的記述法で物質の移動を表現することにより、大きな変形を伴う挙動を再現する。Euler的記述法では格子は固定されており、ある固定点において物体が時間的にどのように変化していくかを対象とするため、大きな変形を伴う場合でも計算格子の歪みには拘束されることはない。このため、フレッシュコンクリートのように大きな変形を伴うような場合でも統一的に計算可能になると考えられる。

そこで本研究では、フレッシュ性状の大きく異なる2種類のモルタルを対象とし、Lフロー試験を改良したミニLフロー試験時の流動挙動を実験的、解析的に検証した。さらに、得られたパラメータをもとに0打のモルタルフロー試験を模擬した3次元解析を実施し、解析手法の妥当性を示した。

2. 数値解析手法

2.1 材料のモデル化

土砂の流動挙動を表現するモデルとしてこれまで森口ら⁶⁾によって開発されたCIP法のモデルに、コンクリート材料を考慮したBingham流体モデルを導入した。その変形特性は式(1)のように表現する。

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_0 \tag{1}$$

ここで τ はせん断応力、 η_0 は塑性粘度、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度、 τ_0 は降伏値である。

本研究では支配方程式としてNavier-Stokes方程式を用いているが、Navier-Stokes方程式はNewton流体を対象としており、粘性が時間的に変化しない。そのため、計

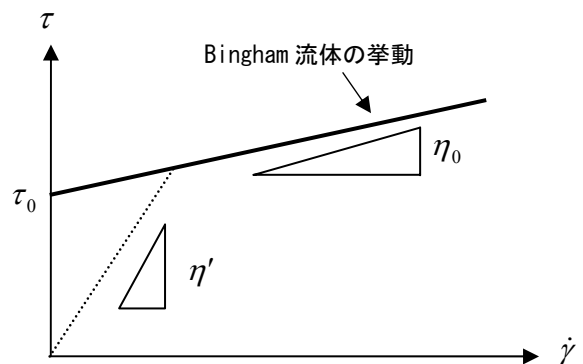


図-1 応力ひずみ速度関係⁷⁾

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 准教授 博士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 助教 修士(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 教授 博士(工) (正会員)

表-1 対象としたモルタルの配合

シリーズ	W/B (W/C)	S/B	単位量 [kg/m ³]					
			水	セメント	シリカフューム	細骨材	化学混和剤	消泡剤
高粘性モルタル	0.18	0.10	265	1346	336	168	33.6	7.4
普通モルタル	0.60	2.38	310	517	0	1230	4.8	0

算中では、上式から得られる等価粘性係数(見かけの粘性係数) η' を用いることで、Bingham 流体の粘性を擬似的に Newton 流体の粘性として表現する(図-1)。等価粘性係数とは、Bingham モデルの割線粘性係数である。等価粘性係数は次式により表現される。

$$\eta' = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

η' は、図-1中の点線の傾きとして表現されるものであり、その値はせん断ひずみ速度に依存し毎時間ステップごとに更新され、せん断応力の経時変化が追跡可能となる。

3.2 基礎方程式と計算方法

基礎方程式は、質量保存則、Navier-Stokes 方程式、圧力方程式、密度関数の移流方程式で構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3\rho} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\phi_l) = 0 \quad (6)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 t は時間、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 p は圧力、 η は粘性係数、 C_s は音速、 \mathbf{f} は重力、表面張力からなる外力項、 ϕ_l は密度関数である。本研究においては剛体と液相の境界に non-slip の条件を与えており、摩擦や滑りの影響を考慮していない。

CIP 法は、これらの基礎方程式を移流項と非移流項の2つの項に分離して、段階的に時間発展計算を行う非保存系の解析手法であり、物理量の補間関数を構築する際に、物理量の値とその空間1階微分値を用いる。物理量の移流方程式から導出される物理量の空間1階微分値に関する移流方程式を解くため、空間1階微分値の空間的・時間的な連続性を考慮することができる。これにより正確な補間関数が構築され、例えば、液相と気相の移動境界面を精度良く追跡できる。そして、非保存系ながら保存性に優れており、多層流体が混在する場でも高精度な解析が可能になる。

3. ミニフロー試験による検証

3.1 実験概要

フレッシュ性状の大きく異なる、低水セメント比モルタル(以下、高粘性モルタル)と普通コンクリート用モルタル(以下、普通モルタル)の2つを対象に検討した。その配合を表-1に示す。高粘性モルタルでは低熱ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm³)を用い、セメント質量の20%をシリカフューム(密度 2.2g/cm³)で置換した。細骨材は7号硅砂(密度 2.68g/cm³)、混和剤には高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)と消泡剤を使用した。普通モルタルでは、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、山砂(密度 2.38g/cm³)、AE 減水剤(リグニンスルホン酸系)を使用した。モルタルのレオロジー定数である降伏値および塑性粘度は、渡辺ら⁸⁾の簡易推定手法を用いて測定した。この手法はモルタルフロー試験(JIS R 5201)の打撃を行わない0打モルタルフロー試験と、Jロート(JSCE-F541)の吹出口直径が14mmのものを使ったJ14ロート流下試験を用いてレオロジー定数である降伏値と塑性粘度を決定する。これらの測定値からレオロジー定数を推定する略算式を以下に示す。

$$\tau_0 = \frac{4.26 \times 10^6}{M_0^2} \quad (7)$$

$$\beta = 1 - 5.14 \times 10^{-3} \times \tau_0 + 7.38 \times 10^{-11} \times \tau_0^4 \quad (8)$$

$$\eta_0 = 0.120 \times \beta \times t_{14} \quad (9)$$

ここで、 τ_0 は降伏値(Pa)、 M_0 は0打モルタルフロー値(mm)、 β は栓流に関するパラメータ、 t_{14} はJ14ロート流下時間(s)である。

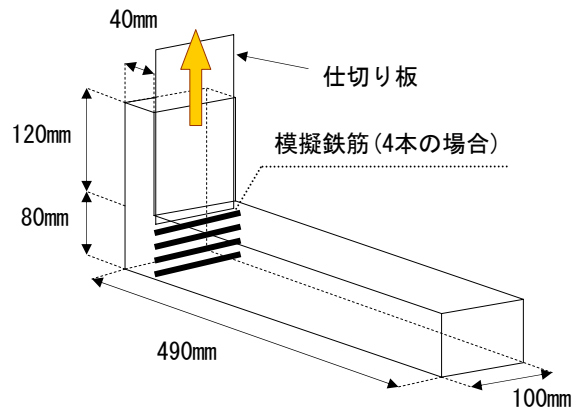


図-2 ミニフロー試験機

表-2 各種流動性試験結果と推定されたレオロジー定数

シリーズ	0打モルタル フロー値(mm)	15打モルタル フロー値(mm)	J14ロート 流下時間(秒)	降伏値 τ_0 (Pa)	塑性粘度 η_0 (Pa·s)
普通モルタル	189	261	8.3	111.8	0.7
高粘性モルタル	288	—	67.0	51.9	10.9

図-2 に示すように谷川ら⁹⁾の用いた改良フロー試験装置を参考にした、ミニL型フロー試験装置(コンクリート用の1/2サイズ)を用いてフロー試験を実施した。実験は、無配筋のものを基準に鉄筋を模擬した10×10mmの断面の亚克力棒(以下、模擬鉄筋)を間隔が均等になるように4本配置したものについて実験を行い、側面からビデオによる撮影を行った。

3.2 実験結果

実験により得られた高粘性モルタル及び普通モルタルのレオロジー定数(降伏値、塑性粘度)の平均値(測定回数はそれぞれ5回)を表-2に示す。高粘性モルタルの塑性粘度は普通モルタルの15倍程度と大きな値であり、降伏値に関しては普通モルタルの半分程度であることから、高粘性モルタルは普通モルタルに比べてよりNewton流体に近い挙動を呈すると推察される。

ミニL型フロー試験によって得られた試験結果を図-3に示す。いずれのケースにおいても、経過時間と到達した距離であるミニLフロー値との関係であるミニスランピング曲線の傾きは流動開始直後が最も大きく、その後小さくなっていく。普通モルタルの模擬鉄筋4本の場合において、骨材の噛み合わせによると思われるつまりが発生した。一方、高粘性モルタルにおいては普通モルタルのような顕著な違いは見られないものの、模擬鉄筋0本の場合と模擬鉄筋を4本入れた場合とでは、ミニLフロー値に違いがみられた。しかし、4本の場合でも最大測定距離である、ミニLフロー値45cmまで到達した。

3.3 ミニLフロー試験を対象とした2次元解析

上記の実験を模擬した、2次元解析を行った。図-4に解析モデルと実験時の写真を、表-3に解析で用いたパラメータを、図-5にミニスランピング曲線の結果を、図-6に解析時の変形の一例を示す。いずれのモルタルにおいても、模擬鉄筋がある場合にはモルタルが模擬鉄筋に接触し、試料が分岐したのち、再び合流する様子がよく再現されている。普通モルタルにおいて、模擬鉄筋0本の場合、流動開始直後において急激に変形するが、その後は移動速度が小さくなる。模擬鉄筋4本の場合も、流動開始後すぐに移動速度が急激に遅くなったが、模擬鉄筋の本数の増加によりその度合いは大きい。今回の解析では、骨材をモデル化していないため、実験時と同様の詰まりを物理的に表現出来ていないと言えないが、定

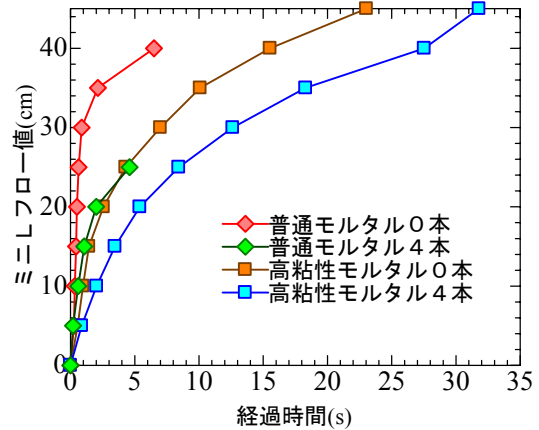


図-3 ミニスランピング曲線

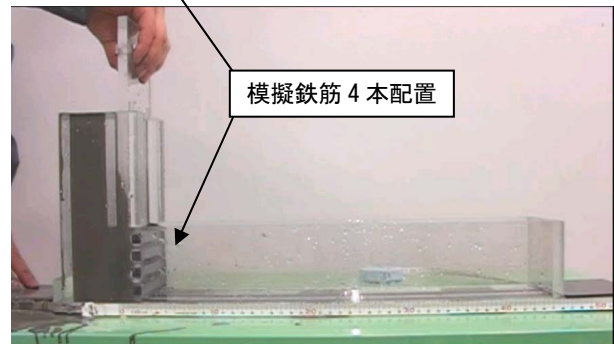


図-4 解析モデルと実験風景

表-3 解析パラメータ

	空気	普通モルタル	高粘性モルタル	剛体
密度 (kg/m ³)	1.25	2300	2300	2500
降伏値 (Pa)	—	112	51.9	—
塑性粘度 (Pa·s)	0.00001	0.71	10.9	1000
メッシュサイズ (m)	$\Delta x=0.005 \quad \Delta y=0.005$			
メッシュ数	100 × 50			
重力加速度 (m/s ²)	9.81			
最大時間増分 (sec)	0.001			

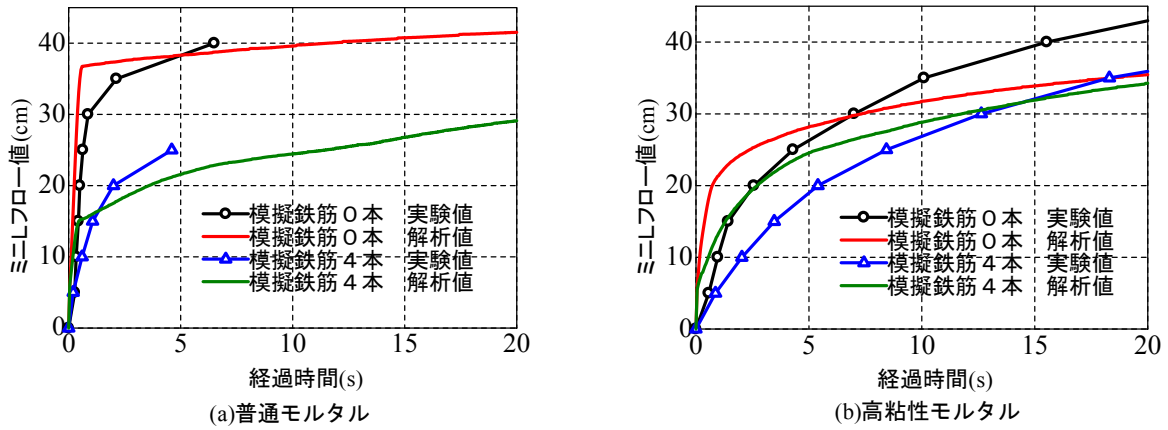


図-5 実験及び解析によるミニスランピング曲線

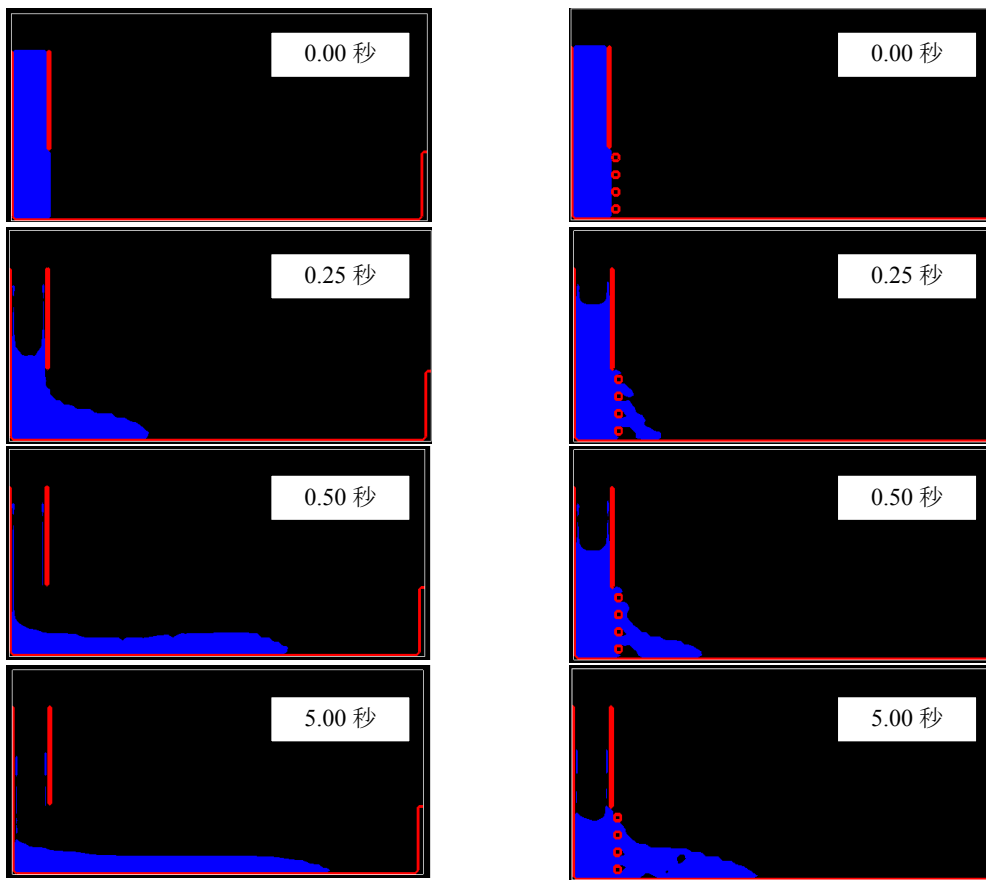


図-6 解析の一例 左：普通モルタル模擬鉄筋0本 右：普通モルタル模擬鉄筋4本

性的には模擬鉄筋の影響を考慮できていると考えられる。以上より、普通モルタルにおいては、実験時に観察された流動性状を定性的に再現出来ている。高粘性モルタルの模擬鉄筋0本の場合、普通モルタルと同様流動開始後に、最大の移動速度になり、その後速度が緩やかになりながらも変形が断続的に続く傾向が見られた。模擬鉄筋4本の場合も、閉塞することなく断続的に変形しており、経過時間が10秒を過ぎた後は、模擬鉄筋0本の場合とほぼ同程度の移動速度となった。以上より、い

れのモルタルについてもその流動挙動を定性的には再現されてはいるものの、とくに高粘性モルタルの方がやや異なっている。

これは、実験により得られたパラメータが適切でないことが1つの要因だと考えられる。そこで、模擬鉄筋0本でのミニフロー実験の結果を定量的に再現できる解析パラメータを、パラメトリック解析をとおした逆解析により導出し(以後、逆解析と呼ぶ)、検討することにした。上記解析と同様に、メッシュサイズ $\Delta x=0.005m$, Δ

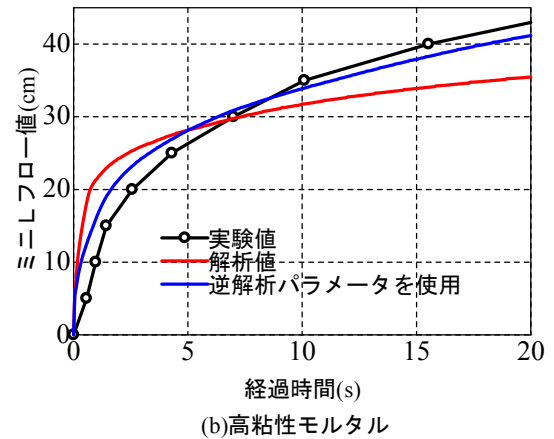
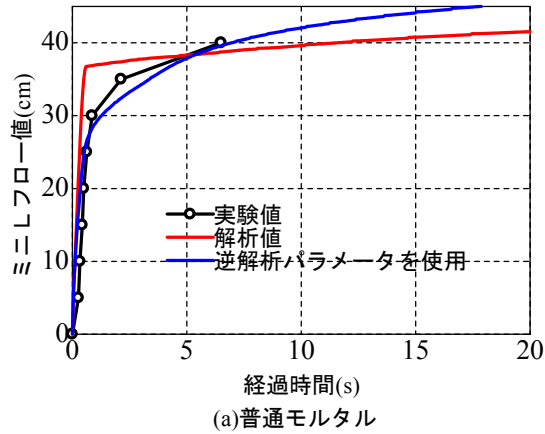


図-7 実験と解析によるミニスランピング曲線

表-4 0打モルタルフロー試験解析パラメータ

解析ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
	普通モルタル	普通モルタル	高粘性モルタル	高粘性モルタル
パラメータの同定方法	実験値	逆解析	実験値	逆解析
密度 (kg/m ³)	2300	2300	2300	2300
降伏値 (Pa)	112	16.8	51.9	2.60
塑性粘度 (Pa·s)	0.71	6.39	10.9	32.7
メッシュサイズ (m)	$\Delta x=0.0025 \quad \Delta y=0.0025 \quad \Delta z=0.0025$			
メッシュ数	128 × 28 × 128			
重力加速度 (m/s ²)	9.81			
最大時間増分 (sec)	0.001			

表-5 0打モルタルフロー試験による解析結果

	0打モルタルフロー値(mm)
普通モルタル実験値	189 (標準偏差6.71)
高粘性モルタル実験値	288 (標準偏差43.35)
ケース1	196
ケース2	231
ケース3	186
ケース4	220

y=0.005m, メッシュ数 100×50 で計算したミニスランピング曲線を図-7 に示す。実験値とほぼ一致するパラメータは、普通モルタルにおいて、実験により導いた降伏値の 0.15 倍で塑性粘度は 9 倍、高粘性モルタルにおいては降伏値 0.05 倍で塑性粘度は 3 倍の値であった。

4 モルタルフロー試験による逆解析

実験より導いたパラメータと、ミニLフロー試験の数値解析より導かれた逆解析パラメータの両者を用いて 0 打モルタルフロー試験の 3 次元解析を行った。表-4 に解析で用いたパラメータを、表-5 に実験及び逆解析より得られた 0 打モルタルフロー値の平均値を、図-8 に

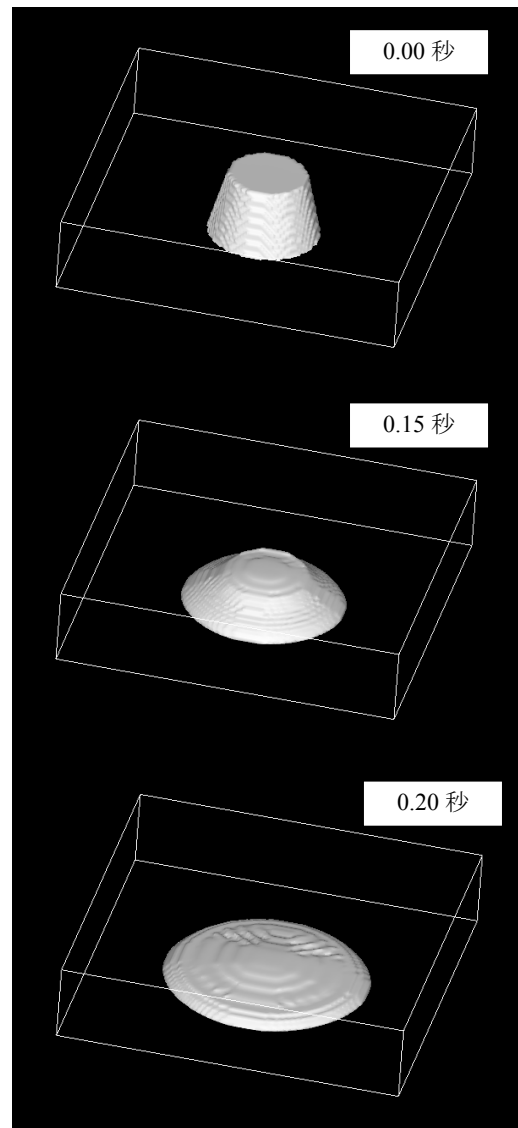


図-8 3次元0打モルタルフロー試験解析例 (普通モルタル)

解析例を示す。普通モルタルにおいて、0 打モルタルフローの結果を比べた際、ケース2よりもケース1の方が実験値に近い値を示した。これは、渡辺らの略算式から求めたパラメータを本CIP法に利用できることを示している。一方、高粘性モルタルの結果は、実験から得られたパラメータを用いたケース3に比べて、解析により同定したケース4の方が実験値に近い値を示した。この原因としては、渡辺らの略算式により推定されたパラメータが本CIP法に直接的に利用できないことを示しており、高精度化に向けたパラメータの決定方法については更なる検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、フレッシュ特性の大きく異なる2種類のモルタルを対象に、レオロジー的なパラメータを同定し、ミニLフロー試験を通して両者の流動特性の違いを定量的に把握した。そして流体力学的な解析手法であるCIP法によってシミュレーションを行い、パラメータの逆解析により、本解析手法の数値解析精度と有用性を確認した。以下に得られた知見と今後の課題を示す。

- (1) Bingham 流体モデルを採用したCIP法により、フレッシュモルタルの流動予測および、鉄筋などの障害物近傍を通過する様子を表現できた。
- (2) 本解析手法では、モルタルと型枠表面との摩擦係数や滑りなどを考慮しておらず、今後どのように定量的にその値を取り扱うか検討する必要がある。
- (3) 本研究の範囲内において、略算式による普通モルタルのパラメータは、流動解析においても十分活用可能であることを示した。一方、高粘性モルタルのパラメータの決定方法については今後の詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、岐阜大学沢田和秀准教授、東京工業大学森口周二博士の助力を得ました。さらに、名古屋大学川崎浩司准教授に貴重な助言をいただきました。

た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 十代田知三, 小林 幸一: 構造体コンクリートの品質変動に及ぼすフレッシュ時の分離性の影響, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, pp. 85-90, 1990
- 2) 例えば, 森博嗣, 谷川恭雄, 黒川善幸, 岡崎浩徳: 粘塑性空間要素法を用いた高流動コンクリートのコンシステンシー試験の流動シミュレーション, コンクリート工学論文集, Vol. 22, No.2, pp. 391- 396, 2000
- 3) 例えば, 富山潤, 入部綱清, 山田義智, 伊良波繁雄: ビンガム流体の流動解析におけるMPS法の適用, コンクリート工学論文集, Vol. 29, No.2, pp. 43- 48, 2007
- 4) 例えば, 平野優, 白岩誠史, 中島有一, 町田篤彦: 個別要素法による高流動コンクリートの流動性状評価に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 22, No.2, pp.907- 912, 2000
- 5) 矢部 孝, 尾形 陽一, 内海 隆行: CIP法原子から宇宙までを解くマルチスケール解法, 森北出版, 2003
- 6) 森口周二, 八嶋 厚, 沢田 和秀: CIP法による地盤材料の大変形解析, 第55回理論応用力学講演会講演論文集, 62, pp.153-154, 2006
- 7) 森口周二, 八嶋厚, 沢田和秀, 林茂則: 粘着力と内部摩擦角を有する流体モデル解析の地盤工学への適用に関する研究の一考察, pp.2043-2044, 2003
- 8) 渡辺健治, 小野博宣, 大津武: 骨材の混合率がモルタルの流動挙動に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.26, No.1, pp.1137-1142, 2004
- 9) 谷川恭雄, 森博嗣, 沢田安浩: フレッシュコンクリートとマトリックスモルタルのレオロジー性質の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No1, pp.119-124, 1991