

論文 セメントペーストのレオロジー試験による高流動モルタルおよびコンクリートの流動特性の推定

上原 義己*1・山田 義智*2・崎原 康平*3・早川 隆之*4

要旨：本研究では、高性能 AE 減水剤を添加したセメントペーストについてレオロジー試験で見かけの粘度を求め、この見かけの粘度よりモルタルとコンクリートのレオロジー定数を推定した。推定したレオロジー定数を入力値として有限要素法（FEM）による解析を行い、得られたモルタルフローおよびスランプフローの解析結果を試験結果と比較検討した。また、骨材量とレオロジー定数およびフロー値との関係性や、モルタルフローとスランプフローの関係性についても、実測結果と有限要素法解析結果の両方で検討を行った。

キーワード：レオロジー、セメントペースト、モルタルフロー、スランプフロー、有限要素法

1. はじめに

コンクリート工事を合理的に行うためには、フレッシュコンクリートの流動特性を把握することが重要である。筆者の一人は、セメントペースト（以後、ペーストと略す）、モルタルおよびコンクリートの流動曲線を同一理論に基づく流動構成式で求め、それを近似することでレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）を求める手法を提案している¹⁾。しかし、その研究では高性能 AE 減水剤が使用された場合は対象としておらず、スランプで管理される普通コンクリートのみを対象としている。

そこで、本研究は高性能 AE 減水剤を用いた高流動モルタルとコンクリートを対象として、上記の提案手法を応用してレオロジー定数を推定し、FEMによりモルタルおよびスランプフローの再現性を確認することで、提案推定手法の有効性と課題を検討したので報告する。

2. ペーストのレオロジー試験とモルタルおよびコンクリートのフロー試験

2.1 使用材料と配（調）合

表-1 に使用材料の種類と物性を示す。各試験で使用

表-1 使用材料の種類と物性

材料項目	記号	種類／物性
水	W	上水道水
セメント	C	中庸熟ポルトランドセメント
細骨材	S	静岡県掛川産山砂 (表乾密度 2.58g/cm ³ , 粗粒率 2.88, 実積率 67.0%)
粗骨材	G ₂₀₁₃	茨城県桜川市産砕石 2013 (表乾密度 2.66g/cm ³ , 粗粒率 7.03, 実積率 58.3%)
	G ₁₃₀₅	茨城県桜川市産砕石 1305 (表乾密度 2.64g/cm ³ , 粗粒率 6.52, 実積率 58.4%)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)
	AE	AE 剤 (ポリアルキレングリコール誘導体)

表-2 モルタル配（調）合表

試料 記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			SP (C×%)	AE (C×%)
		W	C	S		
M-1	30	232(232)	773(241)	1309(507)	1.05	0.01
M-2		242(242)	807(251)	1255(486)	1.05	0.01
M-3		253(253)	843(263)	1198(464)	1.05	0.01
M-4		265(265)	884(275)	1134(440)	1.05	0.01
M-5		278(278)	927(289)	1066(413)	1.05	0.01

※括弧内の数値は単位容積[L/m³]

表-3 コンクリート配（調）合表

試料 記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
		W	C	S	G ₂₀₁₃	G ₁₃₀₅		
C-1	30	170(170)	567(177)	959(372)	146(55)	546(207)	1.05	0.01
C-2		170(170)	567(177)	882(342)	163(61)	608(230)	1.05	0.01
C-3		170(170)	567(177)	805(312)	180(68)	670(254)	1.05	0.01
C-4		170(170)	567(177)	728(282)	196(74)	732(277)	1.05	0.01
C-5		170(170)	567(177)	652(253)	213(80)	794(301)	1.05	0.01

※括弧内の数値は単位容積[L/m³]

したセメントは A 社製の中庸熟ポルトランドセメント、細骨材は静岡県掛川産山砂、粗骨材は茨城県桜川市産砕石を用いた。また、混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤およびポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする AE 剤を使用した。

表-2、表-3 には、モルタルおよびコンクリートの各 5 種類の配（調）合を示す。水セメント比（W/C）は 30% と同一とし、高性能 AE 減水剤（SP）の使用量も 1.05% と同じとした。また、コンクリートのモルタル相の材料構成（水、セメント、細骨材、混和剤）は、表-2 のモルタル配（調）合の割合と同じになるよう設定した。

2.2 試料の練混ぜ手順

スランプフロー試験における各試料の練混ぜの順番は、(a)粗骨材以外の材料をミキサに投入し 2 分間練り混ぜる、(b)粗骨材を投入し 90 秒間練り混ぜる、(c)5 分間ミキサ内で静置する、(d)20 秒間練混ぜた後ミキサから排出するという流れで行った。モルタルフロー試験およびペーストのレオロジー試験においても、粗骨材の投入部

*1 琉球大学大学院 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 修士（工学）（学生会員）

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 博士（工学）（正会員）

*4 太平洋セメント株式会社 修士（工学）（正会員）

分以外は同様の練混ぜ手順で試料の作製を行った。使用したミキサの種類はコンクリートでは強制二軸タイプ、モルタル、ペーストではホバートミキサを用いた。

2.3 ペーストのレオロジー試験

ペーストのレオロジー試験には、外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計を使用し、回転粘度計の外円筒の直径は 70mm、内円筒の直径は 65mm のものを用いた。測定方法は、外円筒の回転速度を一定とし、ペーストの流動がほぼ定常状態となるぎりぎり時間 300 秒後の時点の内円筒に作用するトルクを測定した²⁾。そして、測定されたトルクと外円筒の回転速度をそれぞれせん断応力とせん断ひずみ速度に変換し、それらの関係からペーストの見かけの粘度を求めた。外円筒の回転速度は 2, 5, 10, 20, 40rpm (せん断ひずみ速度で表すと、2.8, 7.1, 14.2, 28.3, 56.6 (1/s)) の 5 パターンとした。

また、今回の測定では各回転速度に対して同じ試料を 3 つ用意した。各回転速度におけるトルクの測定結果は、3 試料の測定で得られた平均値を採用している。

図-1 にペーストのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係と Bingham モデルおよび Herschel-Bulkley モデル³⁾による近似曲線を示す。同図より、測定したペースト (W/C 30%, SP 1.05 (C×%)) は SP 添加のため降伏値が非常に小さく、また、流動曲線も非線形である。そのため、1 次式の Bingham モデルよりも、指数関数の Herschel-Bulkley モデルによる近似が測定結果を表している。

ところで、本研究ではモルタルとコンクリートのレオロジー定数を推定するために、ペーストの見かけの粘度が必要となる。そこで、図-1 のせん断応力をせん断ひずみ速度で除することで、ペーストの見かけの粘度を求めた。図-2 に各せん断ひずみ速度におけるペーストの見かけの粘度を示す。この見かけの粘度と対応するせん

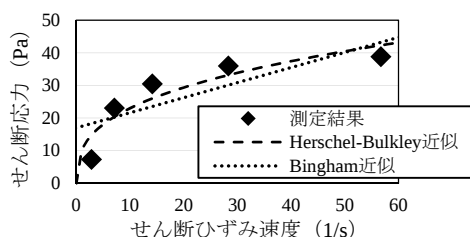


図-1 ペーストのせん断応力とせん断ひずみ速度の関係および各近似曲線

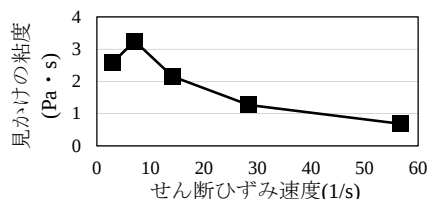


図-2 ペーストの見かけの粘度とせん断ひずみ速度の関係

断ひずみ速度を、次章の式(1)と式(3)にそれぞれ代入することで、モルタルのレオロジー定数を推定し、さらにそれを用いてコンクリートのレオロジー定数を推定した。

2.4 モルタルフロー試験とスランプフロー試験

表-2 および表-3 に示す試料を用いてモルタルフロー試験、スランプフロー試験を行った。モルタルフロー試験では、フロー値、200mm 到達時間の測定を行った。なお、フロー値はゼロ打モルタルフローの値である。また、スランプフロー試験では、フロー値、500mm 到達時間、フロー停止時間、空気量の測定を行った。

表-4 にモルタルフロー試験結果、表-5 にスランプフロー試験結果を示す。ここで、試料記号の番号が同じである場合 (例えば M-1 と C-1 など) は、モルタルの配 (調) 合の割合は同一のものである。

モルタルフローの試験結果を見ると、単位細骨材量が増えるほどフロー値は小さくなることがわかる。また、スランプフローの試験結果はモルタルフロー試験でフロー値が小さい番号の試料ほど (細骨材の多い試料ほど)、コンクリートのフロー値も小さくなる傾向が見られた。

表-4 モルタルフロー試験結果

試料 記号	測定値 (mm)		平均 (mm)	200mm 到達 (秒)	状態観察
	最大	直行方向			
M-1	148	148	148	未達	細骨材が目立つ
M-2	233	230	231.5	5.28	ややもったり
M-3	277	275	276	3.28	基準 (正常)
M-4	282	280	281	1.78	基準同等
M-5	296	295	295.5	1.27	基準同等

表-5 スランプフロー試験結果

試料 記号	測定値(cm)		平均 (cm)	500mm 到達 (秒)	停止 時間 (秒)	空気 量 (%)	状態観察
	最大	直行方向					
C-1	47.4	44	45.5	未達	35.2	1.8	細骨材多め・もったり
C-2	55.5	54.1	55	10.4	43.5	1.3	ややもったり
C-3	62.8	58.7	61	7.3	67	1.3	基準 (正常)
C-4	67.2	65.8	66.5	5.7	64.4	1.1	基準同等
C-5	68.7	64.2	66.5	6.2	84.2	0.9	粗骨材多め・分離傾向

3. レオロジー定数の推定方法および骨材量とレオロジー定数の関係

ここでは、モルタルとコンクリートのレオロジー定数を推定する手法を示すとともに、骨材の体積分率とレオロジー定数の関係を示す。

3.1 レオロジー定数の推定方法

以下にモルタルとコンクリート粘度式の概要、各相に作用するせん断ひずみ速度の決定方法、およびレオロジー定数を求める方法を記す。

(1) モルタルとコンクリートの粘度式

モルタル粘度式とコンクリート粘度式を式(1)、式(2)に各々示す⁴⁾。これらの粘度式は Roscoe 式に基づいており、モルタルの粘度式では細骨材を懸濁質とし、ペーストを懸濁媒とする。同様にコンクリートの粘度式では粗骨材を懸濁質としモルタルを懸濁媒とする。

$$\eta_m = \eta_p \left(1 - \frac{a\phi_s}{\phi_m^s}\right)^{-\beta_s} \quad (1)$$

$$\eta_c = \eta_m \left(1 - \frac{b\phi_g}{\phi_m^g}\right)^{-\beta_g} \quad (2)$$

上式において、 η_p はペーストのレオロジー試験から求めた見かけの粘度である（図-2 参照）。また、 η_m と η_c はそれぞれモルタルおよびコンクリートの見かけの粘度である。 ϕ_s と ϕ_g はそれぞれ細骨材および粗骨材の体積分率であり、 ϕ_m^s と ϕ_m^g はそれぞれ細骨材および粗骨材の実積率である。また、 β_s と β_g はそれぞれ細骨材と粗骨材の形状係数と称する。形状係数の値は、後述するせん断応力とせん断ひずみ速度の関係の近似から求められる降伏値が、モルタルおよびコンクリートのフロー値を有限要素法による流動解析で表せるように逆解析的に決定した。その決定には、モルタル試料記号 M-3 およびコンクリート試料記号 C-3 のフロー試験結果のみを用いた。得られた細骨材の形状係数の値は $\beta_s=3.2$ 、粗骨材の形状係数の値は $\beta_g=2.4$ であった。

また、係数 a , b は固体化係数と称し、ペーストやモルタルが骨材表面に固着することによって流動しない固体（懸濁質）になることを表す係数である。なお、固体化係数に関しては十分な検討がなされておらず、今回は係数 a , b ともその値を 1.0 とした。

(2) 各相に作用するせん断ひずみ速度

モルタルおよびコンクリートの各相に作用するせん断ひずみ速度は、懸濁質（粗骨材および細骨材）は変形せず、懸濁媒（モルタルおよびペースト）で見かけのせん断ひずみ速度が生じるものとした。ここでは、ペーストに作用するせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ を基準に、モルタルのせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_m$ とコンクリートのせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ をそれぞれ次式で求める¹⁾。

$$\dot{\gamma}_m = (1 - a\phi_s)\dot{\gamma}_p \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_c = (1 - b\phi_g)\dot{\gamma}_m \quad (4)$$

(3) 流動曲線の近似によるレオロジー定数の決定

前章で示すレオロジー試験で求めたペーストの見かけの粘度 η_p とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ を式(1)および式(3)に代入し、モルタルの見かけの粘度 η_m とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_m$ が得られ、これらよりモルタルのせん断応力とせん断ひずみの関係が求められる。さらに、モルタルの見かけの粘度 η_m とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_m$ をそれぞれ式(2)および式(4)に代入することにより、コンクリートの見かけの粘度 η_c とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ が得られ、これによりコンクリートのせん断応力とせん断ひずみの関係が得られる。

図-3 にモルタルおよびコンクリートのせん断応力と

せん断ひずみの関係と Bingham モデルによる直線近似を示す。ここでは、モルタル試料記号 M-3 とコンクリート試料記号 C-3 の結果を示す。図中の点線と応力軸との切片が降伏値であり、点線の傾きが塑性粘度となる。同図より、試料記号 M-3 および C-3 とも低せん断ひずみ速度で非線形性が強くなるため、一次式である Bingham モデルでは降伏値を大きく評価することがわかる。

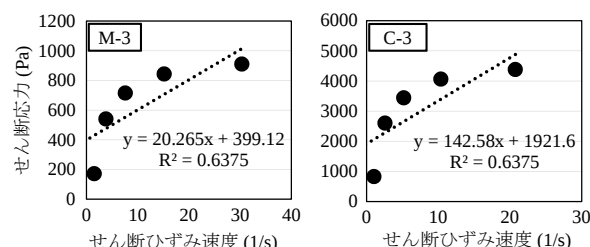


図-3 せん断応力とせん断ひずみの関係および Bingham 近似

一方、図-1 と同様に Herschel-Bulkley モデルで近似した場合は流動曲線をよく表すが、ほとんどのモルタル、コンクリート試料で降伏値がゼロとなり、フロー値に差が生じずフロー試験の結果を的確に表さない。そこで本研究では、低せん断ひずみ速度で非線形性が強く、また降伏値が比較的小さい場合でも精度良く求める方法として 次式に示す Casson 式を用いた。

$$\sqrt{s} = \sqrt{s_c} + \sqrt{\mu_c \cdot D} \quad (5)$$

ここで、 s はせん断応力、 s_c は Casson 降伏値、 μ_c は Casson 粘度（残留粘度）、 D はせん断ひずみ速度である。

図-4 に、モルタルおよびコンクリートのせん断応力の平方根とせん断ひずみ速度の平方根の関係および Casson 式による直線近似を示す。ここで、図中の点線は一般的な Casson 式による近似直線、破線は低せん断ひずみ速度域（ $1.0 \sim 2.3 (\sqrt{1/s})$ ）のみに着目し、Casson 式で近似を行う手法⁴⁾を用いた近似直線である。一般的な Casson 式による近似直線（点線）よりも文献⁴⁾の手法を用いた近似直線（破線）のほうが低せん断ひずみ速度域の測定結果をよく表していることがわかる。

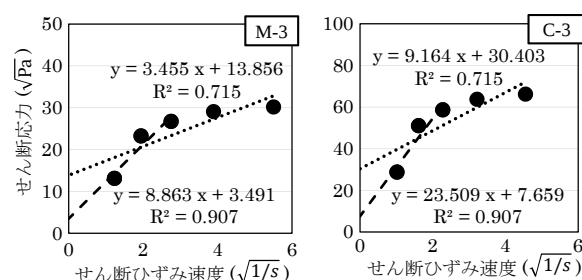


図-4 せん断応力-せん断ひずみの関係と Casson 近似

また、Casson 粘度（残留粘度）に関しては、せん断ひずみ速度が無限大の場合の塑性粘度を表しているため³⁾、流動解析に用いるには適当でない。

以上のことより、本研究では、降伏値は図中の破線より求めた Casson 降伏値とし、塑性粘度は切片を Casson 降伏値で固定した Bingham 近似によって求めた。表-6 に、上記の方法で求めた各モルタル試料および各コンクリート試料の降伏値と塑性粘度をまとめて示す。

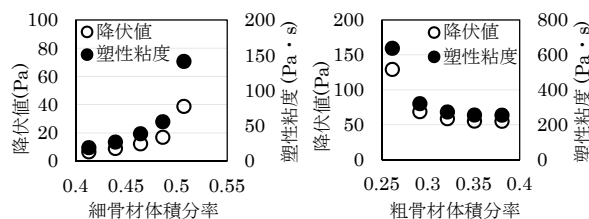
表-6 各試料のレオロジー定数

レオロジー定数	モルタル調査					コンクリート調査				
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
降伏値 (Pa)	38.8	16.8	12.2	8.9	6.6	129.1	68.6	58.7	55.1	54.8
塑性粘度 (Pa・s)	141.2	55.7	38.7	26.9	19.0	637.0	320.8	272.4	255.5	254.7

3.2 骨材量とレオロジー定数の関係

図-5(a)に、モルタル各試料のレオロジー定数と細骨材の体積分率の関係を示す。同図より、細骨材の体積分率の増加に伴って、塑性粘度と降伏値は増大し、その増大率は体積分率の増加とともに増大することが分かる。これは、式(1)の粘度式の影響である。

図-5(b)には、コンクリート各試料のレオロジー定数と粗骨材の体積分率の関係を示す。式(2)のコンクリート粘度式によれば、粗骨材の体積分率の増加に伴いレオロジー定数は増加するが、本研究の範囲では粗骨材の増加に伴いレオロジー定数は減少し、ほぼ一定値となっている。これは、粗骨材の増加に反して低下する細骨材の体積分率によるモルタル相のレオロジー定数の低下が影響しているためである。この結果から、今回の粗骨材の使用範囲においてはコンクリートの流動性は粗骨材の増加による影響よりも、細骨材量増加によるモルタルの流動性低下の影響が大きく、コンクリートの流動性がモルタルの流動性に支配されていることが示唆される。



(a)モルタル-細骨材 (b)コンクリート-粗骨材

図-5 骨材体積分率とレオロジー定数の関係

4. 有限要素法によるフロー解析と実測結果の比較検討

4.1 有限要素法による流動解析の概要¹⁾

(1) 流動構成式について

本解析では、降伏前の流動基準以下のひずみ速度では非常に高い粘性とする bi-viscosity モデル(式(6))を用いた。式中の μ は塑性粘度、 τ_y は降伏値、 e_{ij} はひずみ速度、 τ'_{ij} は

$$\left. \begin{aligned} \text{降伏後: } \tau'_{ij} &= 2 \left(\mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\Pi}} \right) e_{ij}, \quad \Pi \geq \Pi_c \\ \text{降伏前: } \tau'_{ij} &= 2 \left(\mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\Pi_c}} \right) e_{ij}, \quad \Pi < \Pi_c \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

偏差応力成分を表し、 $\Pi = e_{ij} \cdot e_{ij}$ である。 Π_c は流動基準で、流動限界せん断ひずみ速度 π_c より式(7)で定まる。ここで、流動限界せん断ひずみ速度 π_c の値は 0.1 (1/s) とし、全要素がこの値以下になると流動停止と判断した。

$$\Pi_c = \pi_c^2 \quad (7)$$

(2) 運動方程式と有限要素法による離散化

モルタルフロー試験およびスランプフロー試験は、その流体形状から軸対象に近い挙動をとることが多いといえる。そこで、本解析では軸対称問題を想定し、式(8)の運動方程式を用いて計算を行った。また、フレッシュコンクリートは非圧縮性を有すると仮定されるので、式(9)の連続の式を満足する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} \right) + F_z \\ \frac{Dv}{Dt} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \right) + F_r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (9)$$

ここで、 ρ は流体密度(kg/m³)、 u は円柱軸方向 z の流速(m/s)、 v は半径方向 r の流速(m/s)である。また、 τ_{ij} は応力成分、 F は体積分力成分である。

本解析では、式(8)の実質微分項の非線形加速度項を省略し、線形部分の加速度項のみを考慮した。式(8)の右边を有限要素法により離散化し、左辺の加速度項（線形部分）を線形加速度法で離散化すると次式となる。

$$\left[\frac{2}{\Delta t} [C] + [K] \right] \{u\}^{t+\Delta t} = [C] \left(\frac{2}{\Delta t} \{u\}^t + \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\}^t \right) + \{G\} \quad (10)$$

ここで、 $[C]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は粘塑性マトリックス、 $\{G\}$ は外力ベクトルであり、 $\{u\}, t, \Delta t$ はそれぞれ節点速度ベクトル、時間、時間刻みである。なお、粘塑性マトリックスの導出においてペナルティ関数法により体積一定条件を満足させている。その際に、体積一定条件に起因する過拘束を避けるため、Gauss 積分に選択低減積分法を適用した 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた。また、本解析では Bingham モデルに起因する非線形剛性方程式の解法として直接反復法を用いた。

(3) マーカー粒子移動方法および要素分割と境界条件

マーカー粒子の移動法は、まず要素内に存在する各マーカー粒子の位置を考慮して式(11)で各マーカー粒子の速度を求める。そして、次にこの速度に計算時の時間刻みを乗じて移動距離を計算してマーカー粒子を移動させる。このマーカー粒子を追跡することで流動を表す。

$$u_r = \sum_{i=1}^4 N_i u_{ri}, \quad u_z = \sum_{i=1}^4 N_i u_{zi} \quad (11)$$

ここで、 u_r および u_z は要素内における任意マーカー粒子の半径方向と円柱軸方向の粒子速度であり、 N_i は形状関数である。また、下添え字 i はマーカーの存在する要素の4つの節点を表す。 u_{ri}, u_{zi} はそれぞれの節点における半径方向と円柱軸方向の節点速度である。

モルタルフローおよびスランプフロー解析で使用した要素数と節点は、いずれも 420 要素 462 節点とした。境界条件は、円柱軸上を自由すべり条件とし、底面については固着条件として解析を行った（図-6 参照）。

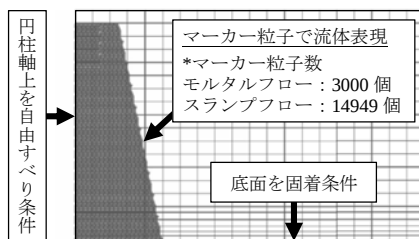


図-6 フロー解析の要素分割モデルの概要図

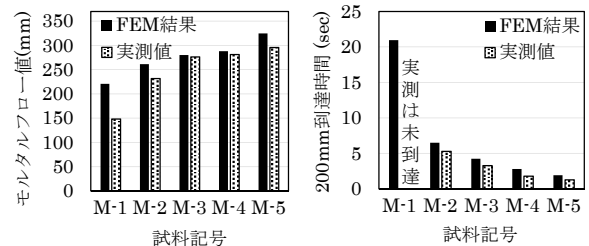
4.2 FEM 解析結果と実測結果の比較検討

ここでは、まずモルタルフローとスランプフロー試験に関して、FEM 解析結果と実測結果の比較検討を行う。そして、次にレオロジー定数とフロー特性の関係について考察し、最後にモルタルフローとスランプフローの関係性について考察する。

(1) モルタルフローに関して

図-7(a)は、モルタルフロー値について FEM 解析結果と実測値を比較している。同図より、試料記号 M-1 において FEM 解析結果が実測値に比べて流動が大きい傾向にあるが、FEM 解析結果は細骨材量が減ると流動しやすくなる実測値の傾向を表しており、モルタルフロー値 200mm 以上の範囲では、実測のモルタルフロー値をよく捉えている。

図-7(b)はモルタルフローの 200mm 到達時間について FEM 解析結果と実測値を比較している。同図より、FEM 解析結果は試料記号の数字が大きくなるほど 200mm 到達時間が早くなっており、実測値の傾向を良く捉えていることがわかった。しかし、同じモルタル試料



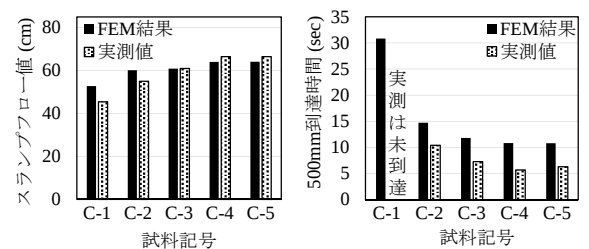
(a)モルタルフロー値 (b)200mm 到達時間
図-7 FEM 結果と実測値の比較(モルタル)

で比較すると、全ての試料において FEM 解析結果の 200mm 到達時間は数秒遅い結果となった。これは、本来は非 Bingham 流動であるモルタルの流動特性を塑性粘度が一定の Bingham モデルで表したことが影響していると考えられる。

(2) スランプフローに関して

図-8(a)は、スランプフロー値について FEM 解析結果と実測値を比較している。同図より、試料記号 C-1 では、FEM 解析結果が実測値に比べて流動が大きい傾向にあるが、それ以外の試料ではスランプフロー値の誤差は数 cm であり、FEM 解析結果は実測のスランプフロー値をよく捉えている。

図-8(b)はスランプフローの 500mm 到達時間について FEM 解析結果と実測値を比較している。同図より、FEM 解析結果は実測値の傾向を良く捉えているが、500mm 到達時間が全体的に 5 秒程度遅い結果となった。この原因は、前項と同様に塑性粘度の評価に非 Bingham 性を考慮していないことが一因と考えられる。



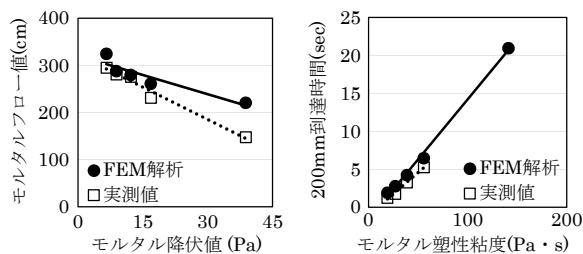
(a)スランプフロー値 (b)500mm 到達時間
図-8 FEM 結果と実測値の比較(コンクリート)

(3) レオロジー定数とフロー特性の関係

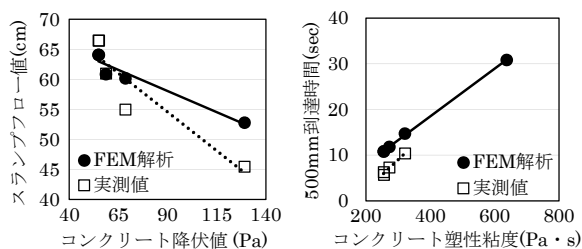
図-9 に、モルタルおよびコンクリートのフロー値と降伏値の関係および各到達時間 (200mm と 500mm) と塑性粘度の関係をまとめて示す。同図には、FEM 解析結果と実測結果をあわせて示している。まず、降伏値とフロー値の関係では、降伏値が大きくなるほどフロー値が小さくなる良く知られた傾向が、FEM 解析結果および実測結果でも得られている。同図(a)のモルタルでは降伏値が大きくなる（本研究の場合は細骨材量の増加）に従い実測値と FEM 解析結果の差が大きくなる傾向が認められ

る。この原因として、比表面積の大きい細骨材には多くのペースト分が固着することが考えられるが、今回はその固着分を考慮していないため(3.1(1)項参照)、細骨材量が多い場合の降伏値を実際よりも低く見積もっている可能性が考えられる。固着の影響についての検討は、今後の課題としたい。一方、コンクリートの場合(同図(b))には、懸濁媒であるモルタル相の影響が強く現れていると考えられる。

モルタルおよびコンクリートの各到達時間(200mmと500mm)に関しては、FEM解析結果は実測結果と同じような傾向ではあるが、FEM解析結果のほうがゆっくりとした流れになっていることが分かる。この原因は前述したように、非Bingham性を考慮していないことが原因の一つと考えられる。



(a)モルタルのレオロジー定数とフロー特性の関係



(b)コンクリートのレオロジー定数とフロー特性の関係

図-9 レオロジー特性とフロー特性の関係

(4) モルタルフローとスランプフローの関係

図-10 にモルタルとコンクリートの流動特性の関係を示す。同図(a)はモルタルフロー値とスランプフロー値の関係、同図(b)ではモルタルフロー200mm到達時間とスランプフロー500mm到達時間を比較している。

同図より、実測結果、FEM解析結果のいずれも、モルタルとコンクリートの流動特性の相関が高く、モルタル

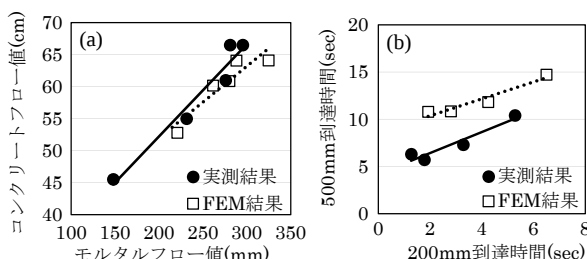


図-10 モルタルとコンクリートの流動特性の関係

の流れやすさがコンクリートの流れやすさに影響していることが分かる。この理由は、3.2節の図-5で示したように、今回の配(調)合では、粗骨材の影響よりもモルタル部分の流動性(レオロジー定数)がコンクリートの流動性に強く影響しているためであると考えられる。

5. まとめ

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 有限要素法によるモルタルフロー解析結果と試験結果を比較すると、細骨材量の減少によるモルタルフロー値の増加傾向および200mm到達時間の短縮傾向をFEM解析で捉えることができた。
- (2) 有限要素法によるスランプフロー解析結果と試験結果を比較すると、試料記号C-1において解析結果が試験結果よりも大きくなっているが、それ以外の試料ではスランプフロー値の誤差が数cm以内であり、試験結果を概ね再現できている。
- (3) モルタルフロー解析における200mm到達時間とスランプフロー解析における500mm到達時間はいずれも、試験結果より遅くなることがわかった。これらの原因は、本来は非Bingham流動であるモルタルおよびコンクリートの流動特性を塑性粘度が一定であるBinghamモデルで表しているためと考えられ、レオロジー定数推定を非Bingham流体にも拡張するとともに、流動解析における非Bingham流動の再現についても今後の課題としたい。
- (4) 骨材量とレオロジー定数の関係およびモルタルフローとスランプフローの関係より、今回の粗骨材使用範囲では、細骨材量増加によるモルタルの流動性低下の影響が強く、コンクリートの流動性はモルタルの流動性に支配されていると考えられる。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号：25420585)の助成を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山田義智ほか：フレッシュコンクリートのレオロジー定数推定に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.661-668，2012
- 2) 東條良太ほか：セメントペーストの流動構成式に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32，No.1，pp.1881-1186，2010.6
- 3) 上田隆宣：測定から読み解くレオロジーの基礎知識，日刊工業新聞社，p.78,80，2012
- 4) 小谷スミ子ほか：高圧処理した卵黄の流動特性，日本家政学会誌，Vol.51，No.10，pp.905-912，2000