

高流動コンクリートのレオロジー定数に関する検討

太平洋セメント株式会社 正会員 ○早川 隆之
 太平洋セメント株式会社 正会員 扇 嘉史
 太平洋セメント株式会社 正会員 谷村 充
 琉球大学 工学部環境建設工学科 正会員 山田 義智

1. はじめに

セメントペースト(以後ペーストと略す)の流動特性は、コンクリートの流動特性と強い関係性があることから、ペーストを基軸としたレオロジーに関する研究が広く行われている。本研究では、一般的なスランプレットを対象とした山田らの手法¹⁾を応用して高流動コンクリートのレオロジー定数を推定し、実測したフロー特性との関係性を検討した。

2. 各種レオロジー評価試験の概要

2.1 使用材料および練混ぜ方法

使用材料を表1に示す。コンクリートの練混ぜは、強制二軸ミキサ(60L)を用い、モルタルを120秒間練混ぜ、粗骨材投入後90秒間練混ぜた後、300秒間静置し、20秒間練混ぜて排出した。ペーストおよびモルタルの練混ぜは、ホバートミキサ(5L)を用いて行い、練混ぜ時間は、コンクリートと同じ530秒間とした。

2.2 モルタル・コンクリート配合およびフロー試験

配合とフロー試験結果を表2に示す。コンクリートは単位粗骨材かさ容積が異なる5配合とし、モルタルは各コンクリートから粗骨材を取り除いた配合とした。まず、C-3のスランプレットが60±5cmとなるようSP添加率を選定(C×1.05%)し、他は同じ添加率とした。表2より、S/Cの減少および単位粗骨材かさ容積の増大に伴いモルタルフロー、スランプレットは大きくなる傾向であった。

2.3 ペーストを用いたレオロジー評価

2.2と同一のW/CとSP添加率でペーストを作製しレオロジーを評価した。試験は外円筒回転式の回転粘度計を用い、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300秒時点の内円筒に作用するトルクを測定²⁾し、せん断ひずみ速度とせん断応力に変換し、ペーストの見かけの粘度を求めた。

ペーストのせん断ひずみ速度とせん断応力および見かけの粘度の関係を図1に示す。図1より、ペーストは降伏値が小さく、また低せん断ひずみ速度域で見かけの粘度(せん断応力/せん断ひずみ速度)が大きく、Binghamモデルでは流動曲線の非線形性をとらえきれずに降伏値を大きく評価している。このため、モルタルおよびコンクリートの流動曲線も同様に非線形となることが予想されることから、降伏値の推定には新たな近似モデルの適用を検討した。

3. レオロジー定数の推定に関する検討

キーワード:レオロジー, ペースト, モルタル, コンクリート, 降伏値, 塑性粘度, 骨材, Bingham, Casson

連絡先: 〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2, 太平洋セメント(株) 中央研究所, TEL:043-498-3855, FAX:043-498-3849

表1 使用材料

使用材料	記号	密度*(g/cm ³)	産地・製造等
水	W	1.00	上水道水
セメント	C	3.21	中庸熟ポルトランドセメント
粗骨材	G	2.64	硬質砂岩砕石 2005(実積率 59.5%)
細骨材	S	2.58	山砂(粗粒率 2.88, 実積率 67.0%)
高性能 AE 減水剤	SP	—	ポリカルボン酸エーテル系

*骨材の密度は表乾密度を示す。

表2 各種配合およびフロー試験結果

記号	種類	W/C (%)	W (kg/m ³)	S/C	Gかさ容積 (m ³ /m ³)	SP (C×%)	フロー (mm)	M:200mm C:500mm 到達(秒)
M-1	モルタル	30	232	1.69	—	1.05	148	未達
M-2			242	1.56	—	1.05	232	5.3
M-3			253	1.42	—	1.05	276	3.3
M-4			265	1.28	—	1.05	281	1.8
M-5			278	1.15	—	1.05	296	1.3
C-1	コンクリート	30	170	1.69	0.44	1.05	455	未達
C-2			170	1.56	0.49	1.05	550	10.4
C-3			170	1.42	0.54	1.05	610	7.3
C-4			170	1.28	0.59	1.05	665	5.7
C-5			170	1.15	0.64	1.05	665	6.2

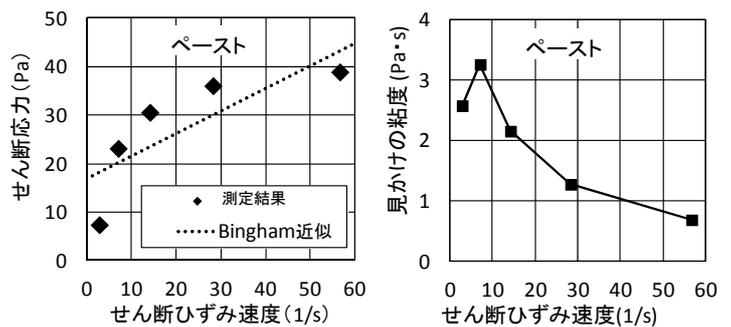


図1 ペーストにおけるせん断ひずみ速度とせん断応力および見かけの粘度の関係

3.1 モルタルおよびコンクリートの粘度式

Roscoe式に基づくモルタルとコンクリートの粘度式を式(1)、式(2)に示す¹⁾。モルタルの粘度式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。

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

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

上式で、 η_p はペーストの見かけの粘度、 η_m と η_c は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 は細・粗骨材の体積分率、 ϕ_m^s と ϕ_m^g は細・粗骨材の実積率である。 β_s と β_g は細・粗骨材の形状係数で、流動曲線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逆解析的に求めた($\beta_s=3.2$, $\beta_g=2.4$)。また、固体係数 a , b は今回はいずれも 1.0 とした。

3.2 各相に作用するせん断ひずみ速度

各相に作用するせん断ひずみ速度は、懸濁質が変形せず懸濁媒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た¹⁾。

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

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

3.3 流動曲線の近似によるレオロジー定数の決定

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近似する方法として、次式に示す Casson 式³⁾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。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図 2 に示す。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に着目した Casson 式による近似直線であり、後者の方が低せん断ひずみ速度域の測定結果をよく表していた。

また、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 近似により求めた。算出結果を表 3 に示す。

表 3 各試料のレオロジー定数

レオロジー定数	モルタル					コンクリート				
	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

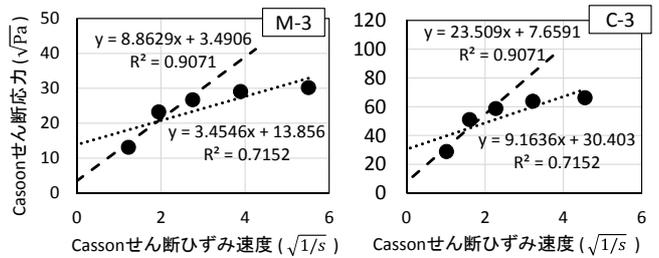


図 2 せん断応力-せん断ひずみの関係と Casson 近似

3.4 コンクリートのレオロジー定数とフロー特性の関係

モルタルフローとスランプフローの関係を図 3 に、モルタルフロー200mmとスランプフロー500mm 到達時間の関係を図 4 に示す。また、粗骨材体積分率と推定したレオロジー定数およびフロー特性の関係を図 5 に示す。図 3, 図 4 より、実測したモルタルとコンクリートのフロー特性には良い相関が認められた。また、図 5 より、粗骨材体積分率の増加に伴い降伏値と塑性粘度が減少する一方、スランプフローは増大し、フロー500mm到達時間は減少する傾向を示した。さらに、いずれの値においても粗骨材体積分率 0.35 程度以上でほぼ一定となることから、レオロジー定数の推定値とフロー特性との間には一定の相関性があることが示唆された。

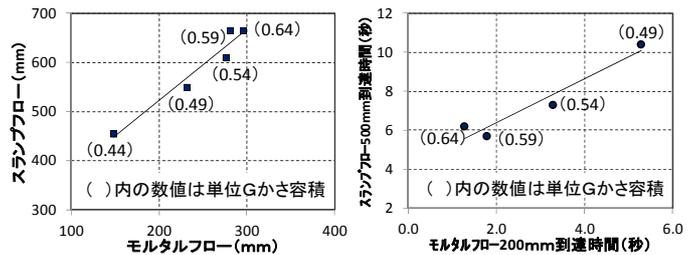


図 3 各フロー値の関係 図 4 200・500mm 到達時間の関係

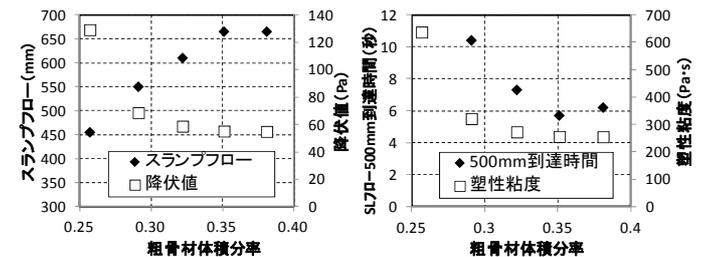


図 5 粗骨材体積分率とレオロジー定数およびフロー特性の関係

4. まとめ

山田らの粘度式と Casson 式を応用することで粗骨材量を変化させた高流動コンクリートのレオロジー定数を推定し、実測したフロー特性との関係性を明らかにした。

【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) 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