

V-177 セメントペーストの粘度方程式と降伏応力の推定

名城大学 正員 菊川浩治

1. まえがき

セメントペーストの粘度方程式に関する研究を継続的に実施しているが、今回は、これまでの成果を基に実測値と計算値との適合性あるいは粘度方程式の適応性などを総合的に検討し、実用できる粘度方程式の提案をしたものである。セメントペーストの降伏応力については、塑性粘度と相関性があると思われたので、セメントの種類をかえたペーストを用いて、その関連を総合的に検討し、簡単に降伏応力を推定できる方法を示した。なお、セメントの粘度方程式にはセメントの単位容積質量が必要になってくるが、その簡易な測定法を提案し、その方法によって求めた単位容積質量を示した。

本研究の実施にあたり、東京都立大学の村田二郎教授に適切な指導を賜った。ここに記して謝意を表します。

2. 使用材料

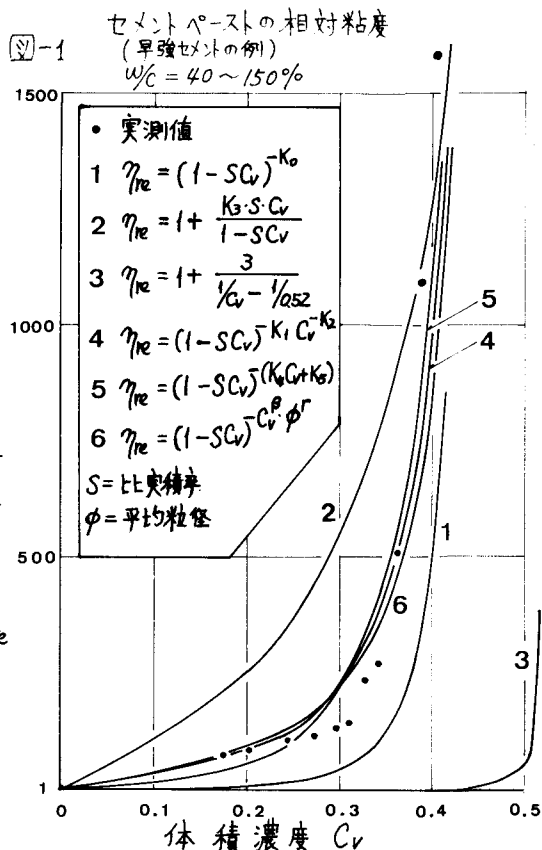
本実験に用いたポルトランドセメントはすべて日本製のもの、普通、早強、超早強および中庸熱セメントである。なお、実験中の材料分離を防ぐ目的で、保水性が優れているといわれている減水剤NL 1850をセメント量の0.25パーセント用いた。

3. 粘度方程式

塑性流動をなす物質の流動と変形を論ずる場合、まず塑性粘度および降伏応力を可成り高い精度で算定できることが必要である。ここでは、まず粘度方程式によって塑性粘度を求める場合を論ずる。図-1の中に6つの粘度方程式を示したが、このうち1式は、巨大粒子の概念を導入したもので Brinkmanによって提案されたものである。ここで K_0 は4.408となった。2式は、有効固相分容積を考えたもので Robinsonによって提案された。ここで K_0 は412.8となった。3式は、粒子間平均液膜厚さを考えたもので、森、乙竹らによって提案されたものである。ここで、粒子は立方格子配列をしていると仮定している。4～6式は著者らによって提案されたもので、懸濁液中の団粒状の粒子群は、流れの中において互いに干渉し、溶質の体積濃度によって、その形態は異なるものとする。そこで、団粒の形状係数 K が体積濃度 C_v の指数関数で表わされるとしたものが4

表-1. セメントの単位容積質量のばらつき

セメントの種類	単位容積質量		標準偏差	変動係数(%)
	実測値	平均値		
普通	1.775	1.789	0.012	0.6
	1.797			
	1.794			
早強	1.656	1.672	0.014	0.8
	1.684			
	1.676			
超早強	1.587	1.595	0.009	0.6
	1.605			
	1.592			
中庸熱	1.724	1.720	0.004	0.2
	1.717			
	1.720			



式であり、同様に一次関数で表わされるとしたものが5式である。ここで $K_1 = 2.036$, $K_2 = -0.959$, $K_4 = -15.60$, $K_5 = 11.18$ であった。ただし、5式の係数 K_4 , K_5 は実用的に水セメント比40~100パーセントの範囲を選んで算定したものである。6式は、セメントの団粒の形状係数 K が体積濃度 C_v とセメントの平均粒径 $\bar{d}$ の両方の指数関数になることに着目し、Cramer式も利用したものである。Cramer式の係数 β γ のうち、ここでは β が-1になったので、6式は β と γ で整理した。ここで、 $\beta = -1.410$, $\gamma = 0.184$ であった。したがって、 γ は β にくらべて十分に小さく、平均粒径 $\bar{d}$ の影響は少ない。そこで、一般にペーストの粘度方程式としては、その簡便さから、4式あるいは5式が適当であろう。なお、セメントの単位容積質量は、JIS R 5201セメントの物理試験方法の粉末度試験用のブレン空気透過装置のセルとプランジャーを用いて求めた。試料を2層に分けて詰め、プランジャーで各層を押して、押し込まれた試料の質量および容積から単位容積質量が求められる。表-1に、測定結果およびそのばらつきを示した。その結果、測定値は再現性が高く、十分実用に供し得るものと思われる。セメントの単位容積質量は、試料の詰った状況の変化によって変動するが、本来、相対粘度 η_{re} が無限大のとき、水中での団粒は最密充填状態になるものである。この水中での団粒の充填状況の把握が是非必要となるが、人為的にこれを検証することは困難である。そこで、空気中での粒子の接触充填の状態により代用することではなかろうかと思われる。そこで、上記の粘度方程式には、表-1の値を用いたものである。

4. 降伏応力の推定

Bingham体の降伏応力は、変形に対して支配的な影響を持つ重要なものである。したがって、その正確な値を算定できる測定法の開発が望まれているが、今のところ十分な測定法はない。二重円筒型回転粘度計によって求める方法もあるが、塑性粘度にくらべてばらつきが大きい。そこで、多数の試料(試料数47個)を用いてセメントペーストの塑性粘度と降伏応力を求め、両者の関係を調べてみると図-2のようになり、セメントペーストの降伏応力は、塑性粘度に正比例することがわかった。この関係を利用して、降伏応力を推定することを考えた。図-2から明らかのように、実験値は多少のずれがあるが、ほとんど原点を通る直線とみなすことができよう。そこで、最小二乗法を適用すると、降伏応力は、つぎのようになった。

$$\tau_f = 0.037 \eta_{pe} - 0.028 \quad \text{7}$$

ここで、 τ_f : セメントペーストの降伏応力 (g/cm^2)

η_{pe} : セメントペーストの塑性粘度 (Poise)

したがって、セメントペーストの塑性粘度がわかれば、7式を用いてその降伏応力を直ちに推定することができる。なお、表-2には、セメントペーストの塑性粘度および降伏応力の測定精度を示した。この程度のばらつきならば、測定値は十分信頼できよう。

表-2. セメントペーストのシロジ-定数のばらつき

水セメント比 W/C	体積濃度 C_v	塑性粘度 η_{pe} (Poise)		標準偏差	変動係数(%)	降伏応力 τ_f (g/cm^2)		標準偏差	変動係数(%)
		実測値	平均値			実測値	平均値		
60	0.345	1.90	1.87	0.07	3.7	0.0431	0.0047	0.0020	4.5
		1.85				0.0472			
		1.78				0.0463			
		1.84				0.0444			
		1.98				0.0424			
50	0.388	5.89	5.64	0.16	2.8	0.0975	0.0093	0.0057	5.7
		5.50				0.106			
		5.51				0.105			
		5.62				0.0944			
		5.66				0.0936			

図-2 セメントペーストにおける降伏応力と塑性粘度の関係。
 $W/C = 38 \sim 150\%$

