

几种毛管式粘度计泥浆体流变试验的比测*

泥浆体流变比测组¹⁾

提 要 清华大学水利系等7个单位分别以自制的大尺度毛管式粘度计,对两种统一采集的土样进行了泥浆体流变试验。各组试验数据经统一处理后,并进行对比。结果表明:试样流变特性与宾汉模式相近,各单位试验所得的流变参数——宾汉切力和刚度系数的离差分别为 $\pm 20-40\%$ 和 $\pm 15-25\%$;两者的离差超出仪器可达到的测试精度甚大。出现这种情况的原因可能在于:泥浆体流变特性复杂,又具触变性。因此有必要制定一套试验操作规定。

关键词 流变学 流变试验 泥浆体 宾汉切力 刚度系数

随着高含沙水流和泥石流流运动力学研究的开展,泥浆体流变特性的试验也更受重视。为测定高含沙水流和泥石流浆体的流变特性,过去曾使用过的仪器有:旋转式、毛管式、落球式、漏斗式等粘度计,其中使用较普遍的是旋转式粘度计和毛管式粘度计。这些粘度计中有些是定型的商品仪器,然而现有仪器的规格性能尚不能完全满足泥浆体试验的需要。所以有很多是自制的仪器,特别是毛管式粘度计,几乎都是各个单位自制的。

由于粘度计型式繁多,规格不一,加上试验对象的复杂性,使试验结果出现各种差异。这对生产应用和成果交流、相互引用带来诸多不便,故迫切需要对各家的仪器与试验结果进行一次对比、检验,以改进试验技术,统一试验方法,使试验向统一化、标准化迈进。

表 1 比测所用的毛管式粘度计规格和动能修正系数

Table 1 The sizes and kinetic energy correction factors of the capillary viscometers used in contrast test

单 位	仪 器 的 测 管 尺 寸			出入口动能修正系数 α
	长度 L (厘米)	内径 D (厘米)	L/D	
清 华	120.0	0.582	206.19	$(\Delta h = 0.23 Q)^{1)}$
水科院	169.0	0.500	338.00	
西北所 (双管式)	169.0	0.409	413.20	由长短两管之差来消除入口影响
	90.0		220.05	
西北所 (横管式)	71.7	0.278	257.91	2.16
有色院	140.0	0.374	374.33	在测管上开孔直接测压
长沙院	80.0	0.597	134.00	
核六所	200.0	0.582	343.64	
黄科所	81.5	0.414	196.86	

1)清华采用的是,以流量 Q 按式计算动能损失水头 Δh 给予修正的方法。

1987年8月从事泥浆体流变试验的单位,在铁道部科学研究院西南研究所(成都)召

* 国家自然科学基金资助项目。

1)由铁道部科学研究院西南研究所沈寿长执笔。

开的流变研讨会上,决定开展泥浆体流变试验的比测,并得到国家自然科学基金的资助。比测用统一采集的土样,按讨论规定的要求,各单位分头进行,然后汇总、对比、检验。

参加比测工作的有清华大学水利系费祥俊(以下简称清华),水利水电科学研究院泥沙研究所万兆惠、苏晓波、袁玉萍(水科院),西北水利科学研究所蒋素绮(西北所),长沙矿冶研究院唐达生(长沙院),北京有色冶金设计研究总院郝兆山(有色院),核工业部第六研究所岑荣枢(核六所),黄河水利委员会水利科学研究所张隆荣(黄科所),中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所吴积善、王裕宜、赵惠林(山地所),铁道部科学研究院西南研究所谢慎良(铁科所)。这些单位共采用 8 种毛管式粘度计(表 1)和 5 种旋转式粘度计,作了 119 次试验。1989 年 8 月在中国科学院东川泥石流观测研究站,对试验结果进行了对比与分析讨论。现仅就已完成的毛管式粘度计的比测结果进行分析讨论。

一、土样的物理化学特征

比测选用的是两种统一采集的土样:一种是云南东川土;另一种是陕西武功黄土(表 2)。

表 2 土 样 特 性¹⁾

Table 2 The characteristics of soil samples

土 样 名 称	平 均 粒 径 (毫米)	最 大 粒 径 (毫米)	粘 粒 含 量 (%)	颗 粒 密 度 (克/厘米 ³)	Ca ²⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)	Na ⁺ -K ⁺ (%)	HCO ₃ ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	Cl ⁻ (%)	总盐量 ΣX (%)	ESP 值 ²⁾ (%)
东 川 土	0.012	0.5	27.0	2.70	0.0261	0.0075	0.0991	0.0224	0.0988	0.0115	0.1327	74.68
武 功 黄 土	0.014	0.1	25.9	2.62	0.0053	0.0047	0.0736	0.0392	0.0155	0.0289	0.0836	88.04

1)武功黄土的颗粒分析资料由西北所提供,其余资料则由中国科学院东川泥石流观测研究站提供。

2)代换性阳离子 Na^+K^+ 百分含量 $\text{ESP} = (\text{Na}^+\text{K}^+/\Sigma X) 100\%$ 。

在旋转式粘度计上,令切率自零增加到最大、再回到零的连续剪切试验结果表明,东川土浆体具有触变性,而武功黄土浆体则无此种性质(图 1)

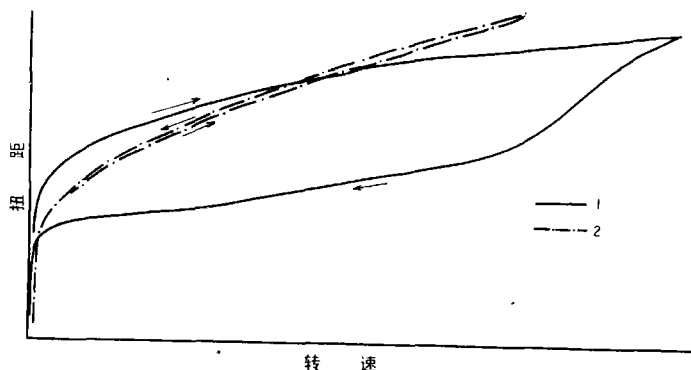


图 1 两种泥浆体的流变试验曲线

Fig. 1 The records of rheologic test for two different mixtures

1. 东川土 ($\gamma_c = 1.58$); 2. 武功黄土 ($\gamma_c = 1.60$)

二、数据 处 理

一般认为泥浆体的流变特性服从宾汉模式

$$\tau_w = \tau_B - \eta(du/dr)_w, \quad (1)$$

式中 τ_w 与 $(du/dr)_w$ 分别为管壁切应力与管壁切率(恒小于 0 的负值); τ_B 与 η 是两项流变参数,分别为宾汉切力与刚度系数。

把式(1)代入表征宾汉体流动规律的伯京汉(Buckingham)方程

$$8v/D = (\tau_w/\eta)[1 - (4/3)(\tau_B/\tau_w) + (1/3)(\tau_B/\tau_w)^4] \quad (2)$$

后,得式

$$-(du/dr)_w = (8v/D)(1 - \tau_B/\tau_w)[1 - (4/3)(\tau_B/\tau_w) + (1/3)(\tau_B/\tau_w)^4]^{-1}, \quad (3)$$

式中 v 为测管内平均流速; D 为测管内径。 τ_B/τ_w 值恒小于 1.0。当其值甚小时,略去式(3)中的高次项后,可得 τ_w 与 $8v/D$ 的直线式

$$\tau_w = \eta(8v/D) + (4\tau_B/3). \quad (4)$$

整理宾汉流体试验数据的方法有两种:一种是直接从式(4)出发,通过点绘 τ_w 与 $8v/D$ 数据在图上,用适线法直接确定 τ_B 值及 η 值;另一种是用式(3)计算出 $(du/dr)_w$ 值后,再与 τ_w 值作线性回归分析来确定 τ_B 值及 η 值,分析时需先初步假定一个 τ_B 值,迭代计算到 τ_B 的假定值与分析值相近为止。

当泥浆体流变特性不完全符合式(1)时,上述方法会引入一些误差。

表述各种与时间无关的非牛顿体流变关系的拉毕诺维奇(Rabinowitch)方程^[1]

$$-(du/dr)_w = (3/4)(8v/D) + (1/4)(8v/D) \times \{[d \lg(8v/D)]/[d \lg \tau_w]\}, \quad (5)$$

可用来处理各种非牛顿体的试验数据。计算时式中末尾的导数值,可由 $8v/D$ 与 τ_w 数据点绘在对数坐标图上,用其斜率来估计。然后按算得的 $(du/dr)_w$ 值与 τ_w 值来判定非牛顿体流变模式,并确定流变参数。

各比测单位的数据处理都是用式(3)或式(4),并以用式(4)者居多。进行综合分析、对比时,统一用式(5)作了进一步处理,以便检验试样的流变模式,使最终的对比数据皆经相同的处理方法作过处理。比较用不同处

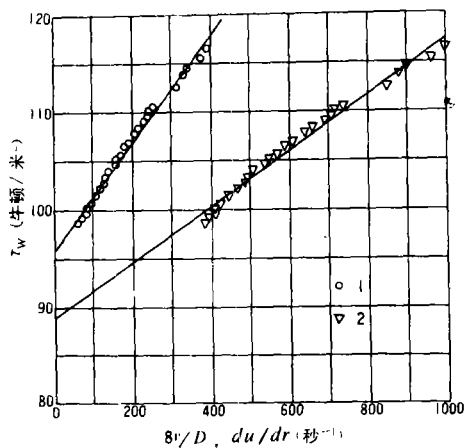
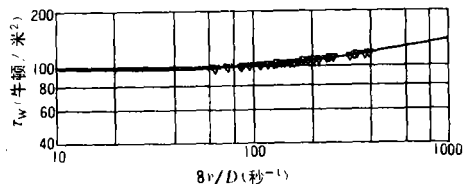


图 2 用式(4,5)处理武功黄土($\nu_c=1.60$)的数据(由有色院提供)所得结果间的差异

Fig. 2 The differentiation between the results processed with eq. (4,5) for one of the test data of Wugong loess($\nu_c=1.60$)

1. 用式(4)处理结果, $\eta=0.057$ 帕·秒, $\tau_B=93.68$ 牛·顿/米²; 2. 用式(5)处理结果, $\eta=0.029$ 帕·秒, $\tau_B=88.50$ 牛·顿/米²

理方法所得的结果表明,试样流变特性符合式(1)且切率测试范围较高者,结果非常相近;而切率测试范围较低或试样流变特性偏离式(1)者,则差别较大。图2为其中一例。产生差别的原因在于:所有测点的 τ_B/τ_w 值都大于0.8。式(4)中的高次项不容忽略,试验结果已不宜用该式来处理。

三、试样流变模式分析

各单位的试验数据经上述统一处理后,无论是东川土浆体还是武功黄土浆体,大多数测次的 $[(du/dr)_w, \tau_w]$ 点据分布呈直线,并具屈服切应力。作直线回归分析所得的相关系数 R 有83%的测次大于0.99;部分切率测试范围较窄、精度较差的测次也多在0.95以上。这证明它们与式(1)相吻合。

然而东川土浆体的低切率区并不完全与式(1)相吻合。这在一些切率测试范围较完整的测次中反映甚为明显,而在某些缺乏低切率区测点的测次中则没有反映。

图3所示为水科院与黄科所所作的东川土浆体($\gamma_c=1.50$)的数据分析结果。由图3可见,低切率区有一上凸形区段。严格地说,东川土浆体流变特性不完全符合式(1)(其确切的流变模式尚待研究)。但从总体来看又与式(1)差别不大。因此为便于综合对比、检验,仍用式(1)来表示之,并求定流变参数。

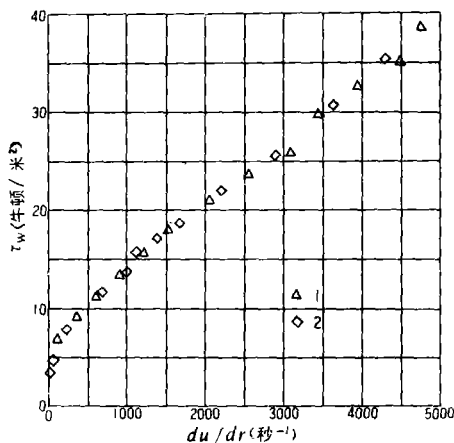


图3 东川土浆体($\gamma_c=1.50$)流变关系

Fig. 3 The relationship between shear stress and shear rate for mixture of Dongchuan soil ($\gamma_c=1.50$)

1、黄科所;2、水科院

四、对比、检验

比测办法规定:泥浆体比重取 $\gamma_c=1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60$ 六种,在温度 20°C 条件下进行试验。实际试验时没有全部控制住指定的数值;由于设备条件的限制,温度差异特别大,最低的只有 11.1°C ,最高达 29.0°C 。

温度的变化对泥浆体粘度的影响明显。为能使不同温度下的试验结果作对比,据有关文献^[2]可认为,泥浆体的粘度变化与同温度下的纯水粘度变化成正比。因此把泥浆体 η 值的对比改用相对值 η/μ 作比较,其中 μ 是该测次温度下的纯水粘度系数。关于 τ_B 值受温度影响的变化情况,尚不清楚,暂无法校正。

至于泥浆体比重 γ_c 值的参差问题,在点绘出 $\eta/\mu-\gamma_c$ 关系图(图4、5)和 $\tau_B-\gamma_c$ 关系图(图6)后,以图上的点据分布误差带来加以对比、检验。

(一) η/μ 值的对比情况

由图4可见,对武功黄土浆体来说,与图4b的点据分布离散度相比,图4a的点据分

布离散度要大 1 倍,且数值偏大,尤其是那些切率上限值较低测次的点据分布相差更大。这与用式(4)分析定线时是否考虑到略去高次项的影响有关。

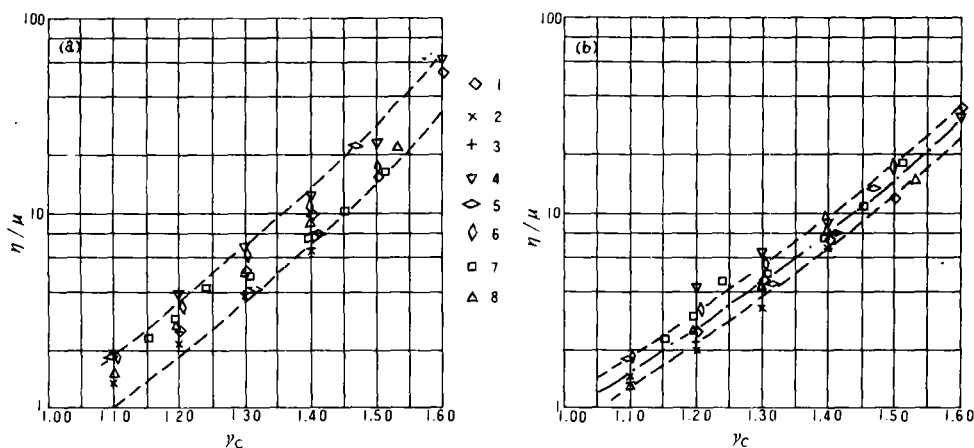


图 4 武功黄土浆体的 $\eta/\mu-\gamma_c$ 关系图:a. 用式(3,4)处理结果;b. 用式(5)处理结果

Fig. 4 The relationships between η/μ and γ_c for mixture of Wugong loess;a. The results processed with eq. (3, 4); b. The results processed with eq. (5)

1. 水科院;2. 西北所(横管式);3. 西北所(双管式);4. 有色院;5. 核六所;6. 长沙院;7. 清华;8. 黄科所

但图 4b 中以下几个测次的点据仍明显偏离点据分布误差带。

清华 $\gamma_c = 1.24$ 这个测次的点据分布明显偏高,与其邻近 γ_c 值测次的点据分布亦呈反常;有色院 $\gamma_c = 1.20, 1.30$ 两个测次的切率测试范围较宽,点据分布较集中,相关系数较高,但与其他各家相比显得偏高;西北所(横管式) $\gamma_c = 1.20, 1.30$ 两个测次的切率测试范围较窄,与各自上下 γ_c 值测次的点据分布相比似偏低。

不计入这五个测次后,其余测次的点据都分布在 $\pm 20\%$ 的误差带内。

东川土浆体(图 5a)比武功黄土浆体的点据分布离散度更大,点据分布上下限之比达 2。在图 5a 内,位于上部的点据,切率测试范围较窄,上限只及 $(du/dr)_w < 800$ 处;位于下部的,上限 $(du/dr)_w$ 高达 2000—4700 处。

如前所述,东川土浆体流变特性并不严格服从式(1),点据分布在低切率区略呈上凸形,其曲线斜率比高切率区曲线斜率要大,因此把东川土浆体流变特性简化成式(1)来表示时,只取低切率区点据的 η 值将比包括高切率区点据的 η 值要大。但武功黄土浆体无此现象。这是造成点据分布离散度增大的主要原因。

为消除此影响而使对比置于同等条件下,兹采用以下两种方法。

1. 对切率测试范围较宽的测次,只截取低切率区的点据来计算 τ_b 值及 η 值(图 5b)。有些测次由于所测试的切率下限值太高,未显示低切率区的流变特性者只得舍弃。经选择处理后,点据分布离散度大为减小。除清华 $\gamma_c = 1.62$ 这个测次的切率测试范围太窄而偏离较大外,其余测次的点据都分布在 $\pm 25\%$ 误差带内。

2. 舍弃切率测试范围 < 800 的测次,而完全用高切率区的点据来进行对比、检验。由

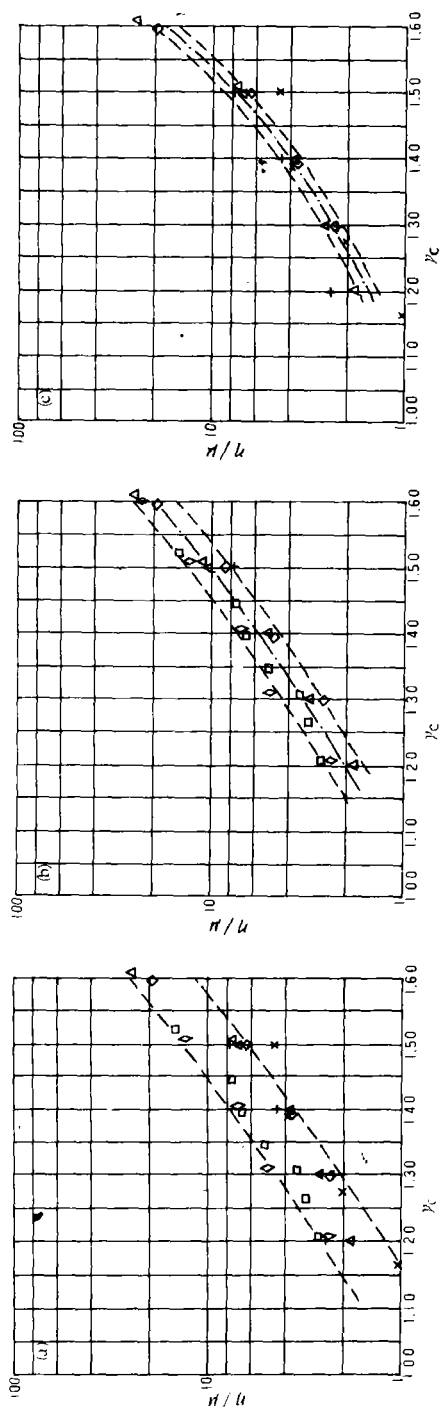


图 5 东川土浆体的 η/μ - γ_c 关系图: a. 不分切率测试范围的数据; b. 只采用 $(du/dr)_w < 800$ 的数据处理结果; c. 只采用 $(du/dr)_w \geq 800$ 的数据处理结果
 Fig. 5 The relationships between η/μ and γ_c for mixture of Dongchuan soil: a. The results processed with the data in whole range tested; b. The results processed with the data of $(du/dr)_w < 800$; c. The results processed with the data of $(du/dr)_w \geq 800$

图例符号含义同图 4

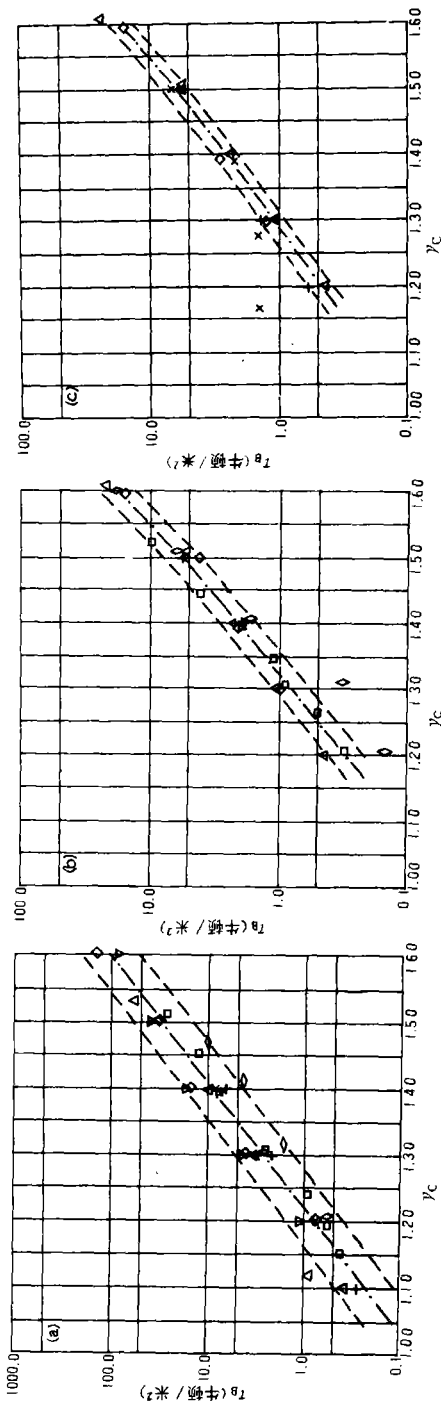


图 6 τ_B - γ_c 关系图: a. 武功黄土浆体的试验结果; b. 东川土浆体只采用 $(du/dr)_w < 800$ 的数据; c. 东川土浆体只采用 $(du/dr)_w \geq 800$ 的数据
 Fig. 6 The relationships between τ_B and γ_c : a. for mixture of Wu Gong loess; b. for mixture of Dongchuan soil with the data of $(du/dr)_w < 800$; c. for mixture of Dongchuan soil with the data of $(du/dr)_w \geq 800$

图例符号含义同图 4

于高切率区泥浆体流变特性相对稳定, 除少数点据误差较大外, 其余点据都分布 $\pm 15\%$ 误差带内(图 5c)。

(二) τ_0 值的对比情况

由图 6 可见, 武功黄土浆体的 τ_0 值比 η 值具有更大的离散性, 点据分布误差带宽度达 $\pm 40\%$ 。而东川土浆体在低切率区与高切率区各自的 τ_0 值与 η 值的点据分布误差带宽度相仿, 分别为 $\pm 25\%$ 与 $\pm 17\%$ 。

五、误差分析

毛管式粘度计的测验误差可有: 1. 仪器常数(如测管内径 D 、长度 L 和出入口动能修正系数 α 等)的率定误差, 它将影响试验结果的精度; 2. 试验操作过程中各项记录(如测压用比压计读数 H 、流量测量时的体积 V 与时段 t 等)的测读误差。上述两项测验误差将影响 $8v/D$ 值和 τ_w 值。

(一) 对 $8v/D$ 值的影响

流速 v 一般用体积法确定, 设时段 t 内截取出流体积 V , 则

$$8v/D = (32/\pi)(V/t D^3). \quad (6)$$

上式微分后相除, 即得以差分形式表示的相对误差

$$\frac{\Delta(8v/D)}{(8v/D)} = \frac{\Delta V}{V} - \frac{\Delta t}{t} - 3 \frac{\Delta D}{D}. \quad (7)$$

D 值多用天平称重来率定。由称出测管内水柱重 W 后可得

$$D = (4/\pi)^{1/2} \rho^{-1/2} L^{-1/2} W^{1/2}, \quad (8)$$

式中 ρ 为水的密度。

式(8)微分后相除, 即得

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{2} \frac{\Delta W}{W} - \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (9)$$

按一般量测方法估计, 则 $\Delta D/D \approx 1\%$, $\Delta t/t \approx 1\%$, $\Delta W/W \approx 0.5\%$, $\Delta L/L \approx 0.1\%$, 温度变化 10°C 时的 $\Delta \rho/\rho \approx 0.17\%$ 。

于是 $8v/D$ 的相对误差的极值为 3.16% , 或然值为 1.60% 。

(二) 对 τ_w 值的影响

τ_w 由测管两端的压差来确定。若此压差用测管两端液位差 h 与比压计两端液位差 H (图 7) 来表示, 则为

$$\tau_w = (Dg/4L)[\gamma H + (h + \alpha v^2/2g) \gamma_m], \quad (10)$$

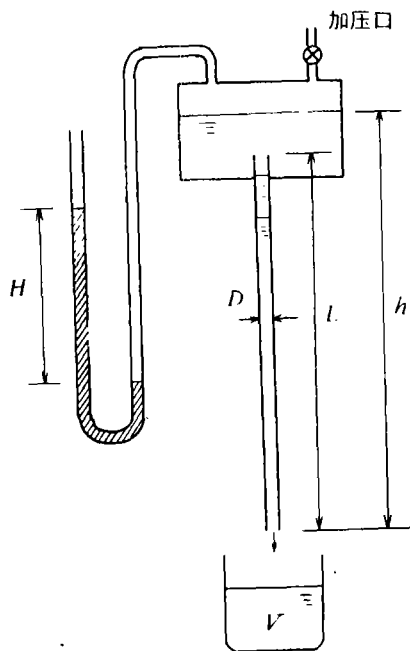


图 7 毛管式粘度计构造图

Fig. 7 The scheme of capillary viscometer

式中 γ, γ_m 分别为比压计内液体比重与测管内试样的比重。

式(10)微分后相除,可得

$$\frac{d\tau_w}{\tau_w} = \frac{dD}{D} - \frac{dL}{L} + \frac{d[\gamma H + (h + \alpha v^2/2g) \gamma_m]}{[\gamma H + (h + \alpha v^2/2g) \gamma_m]}. \quad (11)$$

上式的末项可作如下变换,令

$$x = \gamma H / \gamma_m (h + \alpha v^2/2g), \quad y = \alpha v^2/2g h. \quad (12)$$

x 值相当于比压计两端压差与测管两端压差之比, y 值相当于管流动能水头与测管两端静压水头之比。于是有

$$\frac{d[\gamma H + (h + \alpha v^2/2g) \gamma_m]}{[\gamma H + (h + \alpha v^2/2g) \gamma_m]} = \frac{(\gamma/\gamma_m) dH/h + dh/h + y(da/a + 2dv/v)}{(x+1)(y+1)}. \quad (13)$$

把式(13)代入式(11),并改写成差分形式后,得 τ_w 的测读误差分析式

$$\frac{\Delta\tau_w}{\tau_w} = \frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta L}{L} + \left[\frac{\gamma}{\gamma_m} \frac{\Delta H}{h} + \frac{\Delta h}{h} + y \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} + 2 \frac{dv}{v} - 2 \frac{dt}{t} - 4 \frac{dD}{D} \right) \right] (x+1)^{-1} (y+1)^{-1}. \quad (14)$$

在低切力区,比压计内都用低密度液体,故 $\gamma/\gamma_m \leq 1$; 式(14)方括弧内第一项的值应为 $\pm 0.1-0.2\%$ 。在高切力区,若用水银作比压计介质,则此项值可能达 $\pm 2.7\%$ 以上。

Δh 为试验时间 t 内试样容器中液面下降量,此值与 V 和容器水平截面积大小有关。就各家现有仪器的测管尺寸而言,在高切力区 $\Delta h/h$ 都在 0.5% 以内,在低切力区此值甚微。有些仪器的构造能保持液面恒定,则此项仅为液面高度的测读误差。

y 值与 x 值变幅较大。由测验幅度较宽的水科院与黄科所的读数分析得知:低切率区 $y = 1 \times 10^{-4}$, $x = -0.97$; 高切率区 $y = 0.90$, $x = 15.00$ 。

α 值是用清水来率定的。西北所曾用不同浓度的泥浆体进行了率定对比。对比结果发现, α 在不同浓度下具有不同的值,并随速度大小而变。 α 值变化范围大致在 $1-4$ 之间,各家现用的 α 值在 $2.0-2.4$ 之间。由此估算 $\Delta\alpha/\alpha$ 的最大偏差值可达 $\pm 100\%$ 。

各项误差作以上估算后,即可按式(14)估算出 τ_w 在高低切率区的相对误差(表3)。

表3 τ_w 的相对误差估算值(单位除 x 值及 y 值外,均为%)

Table 3 The evaluation of error for τ_w measurement

切率区 $8v/D$	$\frac{\Delta D}{D}$	$\frac{\Delta L}{L}$	$\frac{\gamma}{\gamma_m} \frac{\Delta H}{h}$	$\frac{\Delta \gamma_m}{\gamma_m}$	$\frac{\Delta h}{h}$	$\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$	$\frac{dv}{v}$	$\frac{dt}{t}$	x	y	$(\frac{\Delta \tau_w}{\tau_w})_{\max}$
≈ 3500	± 0.3	± 0.1	± 2.7	≈ 0	± 0.5	± 100	± 1	± 1	15.00	0.90	3.62
≈ 10	± 0.3	± 0.1	± 0.2	≈ 0	± 0.1	± 100	± 1	± 1	-0.97	≈ 0.00	4.09

由式(14)和表3可知, τ_w 值的误差,在高切率区主要来自 α 值的误差,在低切率区主要来自比压计读数误差,误差幅度均可达 $\pm 3-4\%$ 。

综上所述,现用的仪器测试精度能达到 $\pm 5-10\%$,而实际比测结果的误差已超过仪器测试精度的 $3-4$ 倍。这表明尚有别的重要误差来源。

其中,一个很重要的误差来源为试样流变特性不稳定。泥浆体是一种结构松散的两相体,随搅拌强度与经历的不同,可使颗粒间形成的网络结构具有不同的密度与强度,所

以呈现有触变性。毛管式粘度计虽不存在试样连续受剪的弊病,但在样品制备和试验操作程序之间的差异仍会影响试样流变特性与试验结果。

另一个很重要的误差来源是数据处理中引入的误差。泥浆体是一种复杂的非牛顿体。它的 $(du/dr)_w$ 不等于 $8v/D$, 必须经数据处理来推求。处理中不管用什么方法都会引入一些主观误差。点据散乱而切率测试范围又较窄的测次引入误差则更大。

六、结 语

1. 各单位现用的毛管式粘度计所测定的泥浆体流变参数,一般可达 $\pm 15-25\%$ (刚度系数 η)和 $\pm 20-40\%$ (宾汉切力 τ_B)的精度。

2. 误差分析结果表明,目前的测试方法可以达到 10% 以内的精度。本次比测结果超出此限的原因,主要在于泥浆体流变特性不稳定而又复杂。若能对试验操作程序作出统一规定,则将可能缩小试验结果之间的差异。因此拟定一套统一的毛管式粘度计泥浆体流变试验操作规定是很必要的。

3. 数据处理方法是否正确也会影响试验结果的准确程度,特别是对那些切率测试范围较窄的测次影响更大,所以为确保处理结果的准确性,除保证测读精度外,切率测试范围也要有足够的宽度。

4. 泥浆体的流变特性与宾汉模式相近,但有的也并不严格,低切率区尤为如此。该段又是实践中较常遇到的切率范围。所以对一些较复杂的泥浆体的流变模式尚值得研究。

这次比测是迄今为止在众多单位密切配合下共同完成的、最为广泛而又深入的一次。中国科学院东川泥石流观测研究站和西北水利科学研究所无偿地提供了土样。比测报告经集体讨论后写成。其间和清华费祥俊一起作了误差分析,铁科所庞久红完成数据处理,报告最后经本次比测的倡导者成都科技大学水利学院华国祥教授修改审定。为此,谨向各有关单位和专家教授的友好合作、热情指教深表谢忱。

参 考 文 献

- [1] Van Wazer, J. R., et al., 1963, Viscosity and flow measurement. John Wiley & Sons Inc., New York, 191—193.
- [2] Higgins, J. O., et al., 1983, The mechanics of mudflows. State of Washington, Waters Research Center, Washington State University & the University of Washington, Pullman, Washington.

A COMPARING EXPERIMENT FOR SOIL AND WATER MIXTURE ON SEVERAL CAPILLARY VISCOMETERS*

Groups of Rheologic Comparing Experiment¹⁾

Abstract

The rheologic test for mixture of soil and water is one of the most important tasks in research on mechanism of debris flow. By its content of coarse particles, the tests are usually made on large scale viscometers developed by researchers themselves. In order to compare the experimental results made by different researchers and to improve the standardization of this kind of experiment, 7 research groups from different organizations have cooperatively pursued on a comparing experiment using their own viscometers with various sizes and structures (Table 1).

2 kinds of mixture in a sequence of assigned concentrations have been tested, one is made by Wugong loess, the other by Dongchuan soil mixed with water (Table 2). The results of this comparing experiment are as follows:

1. The rheologic behaviours of those mixtures basically coincide with the Bingham model, but the mixtures made by Dongchuan soil have a little departure in lower shear-rate range (Fig. 3).

2. The deviations of rheologic factors obtained by different groups are in the range of $\pm 15\text{--}25\%$ for rigidity coefficient (Fig. 4, 5) and $\pm 20\text{--}40\%$ for Bingham shear stress (Fig. 6).

3. According to the analysis of measuring errors, the measuring accuracy could be within the range of $\pm 10\%$. The extra deviations for measuring accuracy may be caused by complexity and thixotropy of the mixtures.

4. The processing of test data is also an important link to get the correct results (Fig. 2). Since it could be an another error source, especially when the measuring readings are scattered and the range of shear-rate measured is not wide enough.

Key words rheology, rheologic test, mixture of soil and water, Bingham shear stress, rigidity coefficient

* The project is supported by the Natural Science Foundation of China.

1) Written by Shen Shouchang (Southwest Research Institute, China Academy of Railway Science).