

泥浆体流变试验的比测*

泥浆体流变比测组¹⁾

提 要 这次泥浆体流变试验的比测使用了五种不同规格的旋转式粘度计, 并把其测试结果与毛管式粘度计的测试结果作了对比. 对比结果表明: 若用旋转式粘度计测试具有非牛顿体特性的泥浆体, 应尽可能采用具有转筒半径比(a =外筒半径 R_e /内筒半径 R_i)较小的测试室, 若是用具有 $a > 1.05$ 的测试室测试, 所得的数据则应作特殊处理. 毛管式、旋转式两种粘度计的测试结果基本一致, 并具相仿的精度. 测试结果的离散程度超过仪器的测试误差. 这有待进一步研究、查明原因.

关键词 流变学 流变试验 泥浆体 宾汉切力 刚度系数

1990 年报道过几种毛管式粘度计泥浆体流变试验的比测结果^[1]. 其中指出: 按宾汉模式所得的流变参数的离散度分别为 $\pm 15\sim 20\%$ (刚度系数 η) 和 $\pm 20\sim 40\%$ (宾汉切力 τ_0). 这比仪器可达到的测试精度要低得多. 究其原因可能在于: 泥浆体流变特性复杂, 又具触变性.

表 1 比测所用的旋转式粘度计规格

Table 1 The characters of rotational viscometers used in comparing experiments

编号	仪器型号	仪 器 几 何 特 征				仪器来源
		外筒半径 R_e (厘米)	内筒半径 R_i (厘米)	转筒半径比 $a = R_e/R_i$	转筒有效高度 h (厘米)	
1 [#]	NXS-11	4	3.8456	1.04	7	成都仪器厂产品
		4	3.1774	1.26	5	
		2	1.4598	1.37	3	
2 [#]	RV2	1.995	1.615	1.24	7.21	德国产品
3 [#]	RV12	2.1	1.84	1.14	6	德国产品
4 [#]	HR, 卧式	7.5	4.88	1.54	13.2	山地所研制品
5 [#]	LR, 大尺度型	9.5425	9.2175	1.04	9.76	原铁科所研制品

* 国家自然科学基金资助项目(项目号:4880001).

1) 执笔者: 沈寿长(铁道部科学研究院西南分院, 成都, 610031).

本文收稿日期: 1993-01-19.

泥浆体流变试验中较普遍使用的除毛管式粘度计外,还有同轴圆筒旋转式粘度计(简称旋转式粘度计)。这两种粘度计的测试结果因有差异而引起过较大争议,为此作一次认真的对比分析显得十分必要。用旋转式粘度计(表1)作泥浆体流变比测试验的有:中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所(以下简称山地所)吴积善、王德征、赵惠林,水利水电科学研究院泥沙研究所(水科院)苏晓波等,铁道部科学研究院西部分院(即原铁科所)庞久红等;作对比分析的是沈寿长和庞久红。

比测所用的土样(或试样)有东川土和武功黄土,详见参考文献[1]。

一、数 据 处 理

与毛管式粘度计测试时的做法一样,泥浆体流变特性仍用宾汉模式来描述,后再比较两个流变参数的差异。宾汉模式为

$$\tau = \tau_b - \eta(du/dr), \quad (1)$$

式中 τ 为切应力; τ_b 为宾汉切力; η 为刚度系数; du/dr 为切率。

旋转式粘度计的测试室是一个圆柱状环形间隙(图1)。在测试室内试样所承受的 τ 随试样距旋转轴的距离 r 不同而异。

对任一 r 的圆柱状剪切面所施加的剪切扭距 M 是一个常数

$$M = \text{const.} = 2\pi r^2 h \tau, \\ \tau = M/(2\pi r^2 h), \quad (2)$$

即 τ 与 r^2 成反比。 h 的符号含义见表1。

对牛顿体来说, τ 与 du/dr 呈线性正比关系,因此旋转式粘度计内筒壁处的切率

$$(du/dr)_b = \Omega[2R_c^2/(R_c^2 - R_b^2)], \quad (3)$$

式中 Ω 为内外筒间的相对角速度(弧度/秒); R_b, R_c 的符号含义亦见表1。式(3)等号右边方括号内的那项即为仪器常数值,一般由厂家标定给出。

而对非牛顿体来说, τ 与 du/dr 不呈简单的线性正比关系,因此不能用式(3)来求算切率。唯有若 $a \rightarrow 1.0$, 即内外筒半径相差无几者,才可把式(3)视作为切率的近似值。

M. Kreiger 和 H. Elrod 推导出了旋转式粘度计的切率一般表达式^[2], 即

$$\left(\frac{du}{dr}\right)_b = \frac{\Omega}{\ln a} \left[1 + \frac{\ln a}{\Omega} \frac{d\Omega}{d(\ln \tau)} + \frac{(\ln a)^2}{3\Omega} \frac{d^2\Omega}{d(\ln \tau)^2} + \dots \right]. \quad (4)$$

式(4)对任何试样都能作处理。一般来说,若式(4)等号右边方括号内第二项数值 < 0.2 者,则略去第三项以后各项所引起的误差就 $< 1\%$; 如果第二项数值 > 0.2 者,则应计算到第三项;若 > 1.0 者,则应计算更多项。

用旋转式粘度计测试具有起始屈服切力 τ_0 的试样时,若施加在转筒上的剪力扭距

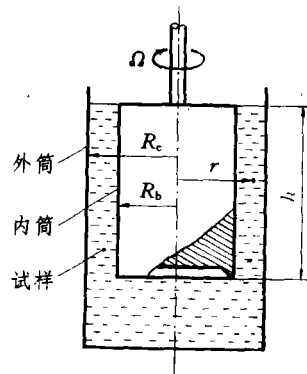


图1 旋转式粘度计的测试室

Fig.1 The test cell of rotational viscometer

$$M < 2\pi R_0^2 h \tau_0$$

者, 在外筒壁处的切应力 $\tau_c < \tau_0$, 该处的试样就不会发生剪切变形. 由此剪切运动仅发生在间隙内侧的局部范围内. 在这种情况下, 同内筒在直径无限大的外筒中旋转的效果是一样的. 由 Kreiger^[8] 分析得知, 此时内筒壁处试样的切率

$$(du/dr)_0 = 2[d\Omega/d(\ln \tau)]. \quad (5)$$

二、对比、检 验

用表1所列的各种仪器, 对不同比重 γ_c 的泥浆体进行了测试. 据所测得的数据求得 τ 和 du/dr , 后再算得宾汉体流变参数 η 和 τ_0 . 把 η 值除以与该测次同温度下水的粘度系数 μ , 便转换成相对刚度系数 $\eta_r = \eta/\mu$, 以抵偿各测次温度差异所造成的影响. 最后点绘出 γ_c 不同的泥浆体的 η_r 值图. 图2为以式(3)处理后所得的 η_r 比较图.

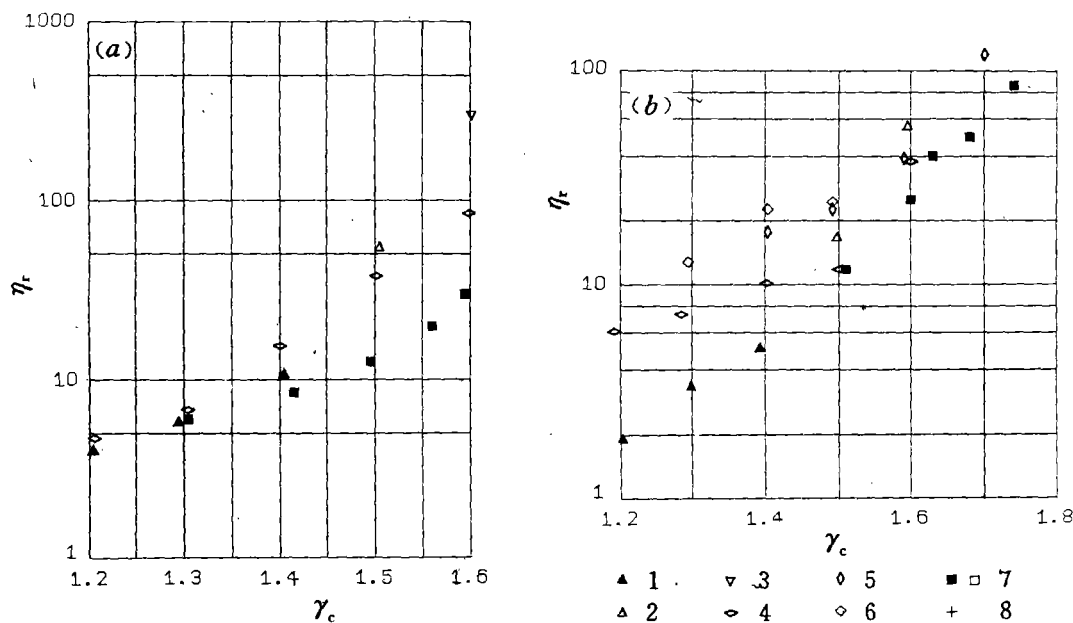


图2 用式(3)处理的 η_r 比较图

Fig. 2 The comparing diagram of η_r processed with eq. (3)

土样: a. 武功黄土; b. 东川土. 测试试样所用的仪器型号, 转筒半径比: 1. NXS-11, $a=1.04$; 2. NXS-11, $a=1.26$; 3. NXS-11, $a=1.37$; 4. RV2, $a=1.24$; 5. RV12, $a=1.14$; 6. HR, $a=1.54$; 7. LR, $a=1.04$; 8. 毛管式

由图2可见, 点据显得非常分散, γ_c 相同的 η_r 值的最大差异可达10倍, 这也可能就是过去常发生的对测试结果分歧争议的原由; 点据的 a 值愈大, η_r 值的差异就愈大、明显偏高.

把测试数据再用式(4,5)来推算切率, 并剔除有些低浓度测次中可能已进入紊动状态的高切率点据后, 所求得的 η_r 值即有很大变化(图3). 与图2相比, 图3中 a 值较小的点据,

η_r 值变化不大, 只差2—6%; 而 a 值较大者, η_r 值变化就大, 如1" 仪器以 $a=1.37$ 的测试室所作的 $\gamma_c=1.6$ 武功黄土浆体的测次, 使 η_r 减小了78%。经这样处理后, 点据的分散程度明显减小。4" 仪器的结构不同于一般旋转式粘度计的结构, 因而未用式(4,5)加以处理, 未列入图3中。

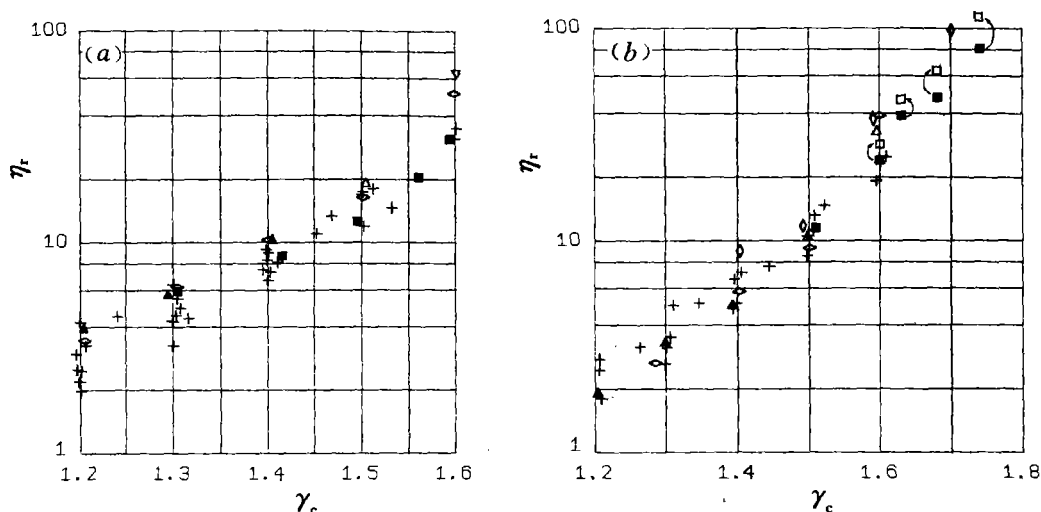


图3 用式(4,5)处理的 η_r 比较图

Fig. 3 The comparing diagram of η_r processed with eq. (4,5)

a. 武功黄土; b. 东川土. 图例符号含义见图2

测试结果证明, 两种土样的浆体流变曲线有所不同: 武功黄土的浆体流变曲线大体吻合宾汉模式, 点据分布基本上呈直线; 而东川土的点据分布略呈弯曲, γ_c 越大, 弯曲度越明显。由此用宾汉模式所求得的流变参数将随所取切率测试范围不同而异。为减少这对比较结果的影响, 把东川土浆体 $\gamma_c > 1.5$ 的测次, 都取 $du/dr < 500$ (1/秒) 的测试数据来计算 η_r 值, 并把点据作局部调整。其结果以图3 b 中的箭头所示。由此使点据的离散度进一步减小, 一般在 $\pm 20\%$ 内, 只武功黄土高比重浆体的点据仍较离散。

此外还对 τ_a 值作了比较(图4)。图4是用式(4,5)处理的结果, 它与用式(3)处理的结果的差异均不如 η_r 值的差异明显。 τ_a 值的离散度则近似或略大于 η_r 值的离散度。

图3, 4中也点绘出了用毛细管式粘度计按切率测试范围 < 800 (1/秒) 的测试数据所得的 η_r 值和 τ_a 值的点据^[1]。由图3, 4可见, 用毛细管式和旋转式两种粘度计所得的结果基本上是吻合的。

点据离散的原因是多重的, 其中重要的一点可能是泥浆体特性的复杂而又不稳定。但从对比分析中可看出, 在测试手段方面以下两点具有重要影响。

1. 旋转式粘度计 a 值的大小。显然式(4)是一个幂级数。计算时舍弃尾项所引起的误差, 与式(4)等号右边方括号内第二项数值大小直接有关。 a 值愈大, 这个第二项数值也愈大, 误差就愈大。若第二项数值 > 1.0 者, 则要计算至第四项以后, 并必须计算 Ω 对 $\ln \tau$ 的

四阶以上的高阶导数. 这对一般测读精度的仪器是难以适应的. 分析中 $a > 1.1$ 测次的第二项数值多在 1—2 之间, 少数的测次则达到 4—7. 其实分析时只能计算到第三项. 若欲计算更高阶导数, 随机误差则将非常之大. 这一点可能是测试结果误差的重要来源.

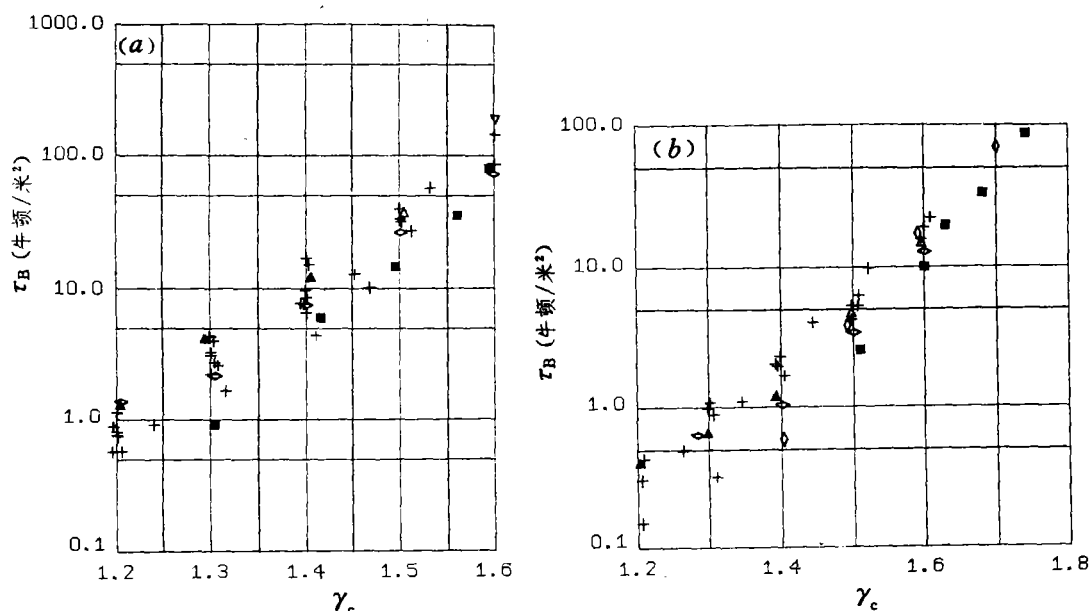


图 4 τ_B 比较图

Fig. 4 The comparing diagram of τ_B

a. 武功黄土, b. 东川土. 图例符号含义见图 2

2. 测试时 τ 对 Ω 曲线的测读精度. 一般仪器都设有若干级固定的转速, 只是测得一组对应的 Ω 值、 τ 值, 就在 Ω, τ 坐标上得到若干点据. 点据一般为 10—15 个; 只有少数仪器可作无级调速连续测试, 直接取得 τ 对 Ω 的连续曲线. 式 (4, 5) 的计算主要依据是 $\ln \tau$ 对 Ω 曲线的斜率. 离散的测点测读误差所造成的波动, 对曲线的选配和导数值的取值均具有极大影响. 对比分析中有些测次 $\Omega - \ln \tau$ 测点难以连成一条光滑曲线, 这自然对比测结果带来很大偏差, $\tau - du/dr$ 曲线发生畸变. 少数测次用宾汉模式适线求流变参数时, 相关系数 < 0.9 . 为保证对比分析精度, 应尽可能测得连续曲线, 或者增大测点密度, 或重复多次测读.

三、误差分析

现就旋转式粘度计的仪器常数标定误差和测试读数误差, 对测试结果的影响加以分析.

(一) τ 值的精度

内筒壁处的切应力 τ_0 由剪切扭矩读数 M 与内筒几何尺寸 R_0, h 所确定, 即

$$\tau_b = M / (2\pi R_b^2 h).$$

把上式微分后再除原式,得 τ_b 的相对误差表达式. 把它写成差分的形式为

$$\frac{\Delta\tau_b}{\tau_b} = \frac{\Delta M}{M} - 2\frac{\Delta R_b}{R_b} - \frac{\Delta h}{h}, \quad (6)$$

式中 $\Delta M/M$ 取决于仪器剪切扭矩测量系统的精度,一般为1%,精度指标是按满量程计算的,所以当用于小量程时实际精度会低于此值; $\Delta R_b/R_b$ 决定于内筒半径量测精度,一般可达 $\pm 0.1\%$ 以上; $\Delta h/h$ 则并不是完全可由外形量测所决定的, h 由于受内筒上边缘液面波动和下边缘端面效应的影响,而不完全与内筒的几何高度相同,应作专门的试验来标定, h 的实际精度低于 R_b 的精度,标定精度为 $\pm 3-5\%$.

于是 τ_b 值测试的相对误差极值为 $\pm 4-6\%$,或然值为 $\pm 3-5\%$.

(二) du/dr 值的精度

旋转式粘度计环形间隙内的切率分布随试样的流变特性不同而异,且对测试精度的影响亦可能不同. 兹分别分析之.

牛顿体的切率与切应力呈正比关系. 切率可用式(3)算得. 把式(3)微分后,即可求得切率相对误差的表达式

$$\frac{\Delta(du/dr)}{(du/dr)} = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} - \frac{2}{a^2-1} \left(\frac{\Delta R_c}{R_c} - \frac{\Delta R_b}{R_b} \right). \quad (7)$$

非牛顿体的切率与切应力不呈简单的正比关系,因此切率相对误差的表达式随流变特性不同而异. 下面按宾汉模式作一分析评价.

对图1所示的同轴转筒仪器来说,间隙内距旋转轴的距离 r 的任一点试样所受的切应力与切率之间服从的关系是

$$du/dr = (\tau - \tau_b) \eta.$$

又由式(2)可见, r 不同处的 τ 应与 r^2 呈反比. 若令试样的宾汉切力 τ_b 与内筒壁切应力 τ_b 之比 $m = \tau_b/\tau_c$, $t = r/R_b$, 于是

$$\frac{du}{dr} = \left(\frac{du}{dr} \right)_b \frac{t^{-2}-m}{1-m}. \quad (8)$$

内外筒间的相对角速度

$$\Omega = \int d\omega = \int_{R_b}^{R_c} \frac{1}{r} \left(\frac{du}{dr} \right) dr = \int_1^a \frac{1}{t} \left(\frac{du}{dr} \right) dt.$$

式中 ω 为 r 任一点试样的角速度. 其余符号含义同前述.

把式(8)代入上式后,积分得

$$\left(\frac{du}{dr} \right)_b = 2\Omega(1-m) / [1 - (1/a^2) - 2m \ln a]. \quad (9)$$

对上式微分后再除原式,得切率相对误差

$$\frac{\Delta(du/dr)_b}{(du/dr)_b} = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} - \frac{2(1-m a^2)}{a^2(1-2m \ln a) - 1} \left(\frac{\Delta R_c}{R_c} - \frac{\Delta R_b}{R_b} \right). \quad (10)$$

式(7,10)表明, a 值对切率的测试精度有重要影响;在相同的内外筒半径量测精度下,较小的 a 值会造成较大的误差. 这是由于内外筒间的间隙尺寸较小,而使量测到的间隙尺寸相对误差增大所致,进而影响 du/dr 值的精度.

式(10)中,若切率测试范围很宽、施加的切应力又很大者, m 则向零趋近.当 $\tau_0 \rightarrow \tau_B$ 时, $m \rightarrow 1$. 由此 m 的取值范围应在 0—1 之间.最大误差将发生在 $m \rightarrow 0$ 时,此时式(10) \rightarrow 式(7),故可用式(7)来评价切率的测试误差.

一般旋转式粘度计转速的测读精度都可达到 1%. 内外筒半径的量测精度若按 0.1% 计,则可得转筒半径比 a 不同的切率测试误差(表 2).

表 2 du/dr 值的精度Table 2 The tasting accuracy of du/dr

a	1.05	1.10	1.20
最大误差(%)	5	3	2
或然误差(%)	3.0	1.7	1.6

四、结 语

1. 泥浆体具有的非牛顿体特性,使旋转式粘度计的环形间隙内切率沿径向分布变得复杂化,从而使以内外筒间的相对角速度来推算切率的误差增大.因此用旋转式粘度计来测试泥浆体时应尽量采用较小的转筒半径比 a . 若采用 $a > 1.05$ 者,必须用式(4,5)进行数据处理,有条件时尽可能测得 $\tau-\Omega$ 连续曲线或增加测点密度,以减小分析误差.

2. 用旋转式粘度计所得的测试结果中,相对刚度系数 η_r 值的离散度多在 $\pm 20\%$ 以内,宾汉切力 τ_B 值的差异则较大.就测试数值和离散度而言,旋转式粘度计与毛管式粘度计所测得的结果相仿,即两种粘度计的测试结果大体一致.

3. 商品性的旋转式粘度计出厂精度一般都自称可达 2%;有关单位自行研制的特殊粘度计测读精度按分析也可达 $\pm 5\%$. 此次比测结果相互间的差异在排除不合理测次后,比仪表误差仍要大好几倍.这说明尚有一些其他原因在影响着测试结果的精度.对此值得进一步研究、查明.

这次泥浆体流变试验比测是迄今为止多单位合作完成的、最为广泛深入的一次.期望比测成果对泥浆体流变特性的研究起到一点促进作用.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提供了土样.报告经水利水电科学研究院万兆惠高级工程师校阅,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审定.在此谨向各有关单位和专家教授的合作支持、热情指教表示谢意.

参 考 文 献

- [1] 泥浆体流变比测组,1990,几种毛管式粘度计泥浆体流变试验的比测,山地研究,8(3),第 137—146 页.
- [2] Krieger, I. M. et al., 1953, Direct determination of the flow curves of non-Newtonian fluids. I. Shearing rate in the concentric cylinder viscometer. *Journal of Applied Physics*, 24(2), 134—136.
- [3] Krieger, I. M. et al., 1952, Direct determination of the flow curves of non-Newtonian fluids. *Journal of Applied Physics*, 23(1), 147—149.

A COMPARING EXPERIMENT FOR SOIL AND WATER MIXTURE ON DIFFERENT KINDS OF VISCOMETER *

Group of Rheologic Comparing Experiments¹⁾

Abstract

After the comparing experiments of rheologic test for the mixture of soil and water on capillary viscometers have been finished in 1990, the next one with different kinds of viscometer are carried out. Five different types of rotational viscometer are used in the experiments, three of them are commercial and two are developed by researcher-selves. The test results are compared each other and also with those from capillary viscometer. The results of this comparison are as follows.

1. Because the mixture of soil and water is a non-Newtonian fluid, the distribution of shear rate of the sample in the testing gap of rotational viscometer becomes more complicated, and the deviation of the estimating shear rate will increase in the data processes. Therefore, the test cell with smaller ratio of radius of outer cup to inner bob ($a = R_c/R_b$) should be adopted. If $a > 1.05$, the eq. (4,5) should be employed and more attention should be paid in the data processes.

2. The values and accuracy of test results from these rotational viscometers are similar to that from capillary viscometer. The accuracy is $\pm 20\%$ for rigidity coefficient and $\pm 40\%$ for Bingham shear stress. It confirms that the test results from these two kinds of viscometers are coincident with each other.

3. The deviations of rheologic factors obtained from rotational or capillary viscometers are in several times greater than the measuring errors of these equipments. The extra deviations over the measuring accuracy may be caused by the complexity of the property of mixture.

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

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

1) Written by Shen Shouchang (Southwest Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Chengdu, 610031).