

固体三轴高压下红河断裂带周城 断层泥力学性质的研究

李建国 王绳祖 张渤海 石桂梅

(国家地震局地质研究所, 北京)

提 要

在固体三轴高压和应变率 $4.4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 下研究了红河断裂带周城断层泥的力学性质。研究表明, 在差应力作用下, 断层泥应力-应变曲线表现出与试件压实、屈服和碎裂流动等不同变形机制对应的非线性、线性等阶段性变化特征。干、湿断层泥破坏应力 σ_c 随围压 σ_3 的变化关系分别为

$$\sigma_c = 23.7\sigma_3^{0.68}$$

$$\sigma_c = 10.4\sigma_3^{0.62}$$

在较高围压下, σ_c 随 σ_3 呈线性变化。含水量对变形特征和破坏应力水平有重要影响。干、湿断层泥有效弹性模量 E_{ed} 和 E_{em} 以及(潮)湿断层泥的初始模量 E_{om} 均随围压增加而增加, 但干断层泥初始弹性模量 E_{od} 近似保持常数。同时, $E_{od} < E_{ed}$; $E_{om} < E_{em}$, $E_{em} > E_{ed}$ 。在试件变形过程中有声发射事件显示, 但数量少, 辐射弹性波能量小。断层泥试件破坏型式表现为渐进式碎裂流动特征, 因此, 断层泥变形有利于断层活动呈现稳滑。

一、前 言

红河断裂带位于云南省西南部, 北端与金沙江断裂相连, 南端向越南境内延伸, 全长约1000km, 总体走向NW, 右旋。沿断裂带有深源岩浆出露, 断陷盆地发育, 水系错动明显。断裂带北段地震频度高, 震级大; 南段断层泥发育, 地震活动性相对平静。因此, 红河断裂带不仅是贯穿地壳的深大断裂带, 同时也是地震活动性有显著差异的活动断裂带^[1~6]。近年来对地震形成条件, 地震活动与断层活动的相互关系曾进行过较深入的野外考察和研究^[6~9]。本文则采用固体围压三轴实验装置对断裂带内周城断层泥的力学性质在室温高压下进行了研究。

二、断层泥矿物组分

断层泥采集地位于大理西北约20km处周城附近的红河断裂剪切破裂带内, 断层泥的厚度大于20cm, 呈灰白色; 粘土矿物含量约37%; 碎裂物质主要为石英、方解石等, 其几何

形态在宏观上以球形、椭球和扁平状为主,角砾状颗粒次之。断层泥粒度组分和化学、矿物成分分别示于表1~3。

表1 周城断层泥颗粒组分

粒级(mm)	0.5 ~0.25	0.25 ~0.125	0.125 ~0.0625	0.0625 ~0.0313	0.0313 ~0.0156	0.0156 ~0.0078	0.0078 ~0.0039	0.0039 ~0.0020	0.0020 ~0.0010	<0.001
重量百分数 (%)	12.95	8.79	7.35	6.19	6.72	4.88	5.07	5.06	6.06	36.93

表2 周城断层泥化学成分

化学 成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	挥发质
重 量 百分数 (%)	35.22	0.49	9.12	2.18	7.31	0.096	15.41	11.33	0.33	1.15	0.25	5.74	2.73	14.54

注:表1~2中数据分别由国家地震局地质研究所胡碧茹和刘桂芬等提供。

表3 周城断层泥矿物组分

粘 土 矿 物	重量百分数 (%)	碎 裂 物 质	重量百分数 (%)
高岭石、蒙脱石、绿泥石、	37	石英、长石、方解石、	63

注:表中数据由国家地震局地质研究所冯锦江提供。

三、断层泥试件与力学性质试验

将野外采集的断层泥搅拌均匀,并保持天然湿度置入模具内,在100MPa压力下(稳压20min)挤压成型。成型后的试件直径为10mm,高20mm。在试件成型过程中通常有1.3~3.0%(以重量百分计)的水量外溢。本文规定成型后的试件为(潮)湿断层泥,含水量为12.3~12.8%;在110℃下烘干的试件为干(燥)断层泥。试件内不同粒径碎裂物质的分布基本均匀。

用于断层泥力学性质试验的固体围压三轴装置在文献[10]中曾有介绍。在室温下,围压介质为铅。最高围压为700MPa。由设置于容器外部的压力传感器、位移传感器分别观测作用于试件上的轴向压力 σ_1 、围压 σ_3 和纵向压缩 $\Delta l/l$ 。为了解在试验过程中试件破裂特征,进行了声发射事件累计次数和能量观测。将上述信号(σ_1 , σ_3 , $\Delta l/l$ 和声发射事件数)同步输入X-Y函数记录仪。在应变率为 $4.4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 下得到断层泥应力、应变和声发射事件关系曲线。试验后对试件表面和内部变形、破坏机制进行了初步的细观、微观观察。

四、实 验 结 果

(一)断层泥应力-应变曲线

干、湿断层泥的应力-应变曲线分别示于图1~2。干断层泥应力-应变关系表现出非线性—线性—非线性—近似线性的阶段性变化特征,其应变随差应力水平增加单调上升;在相

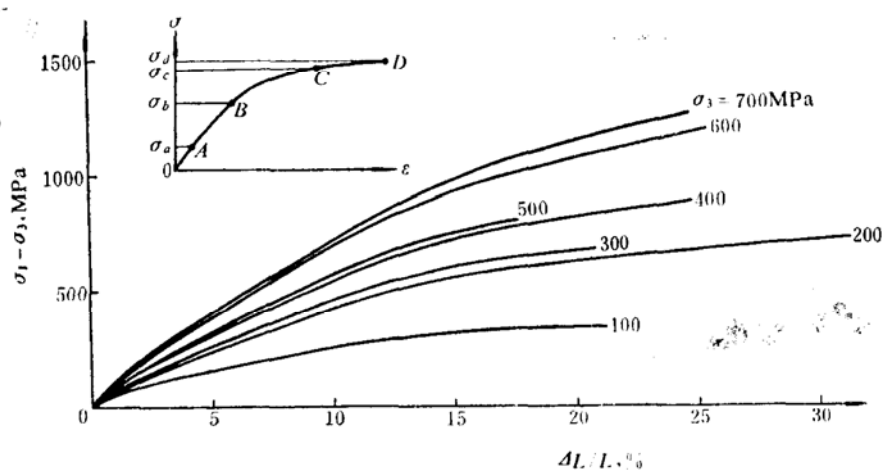
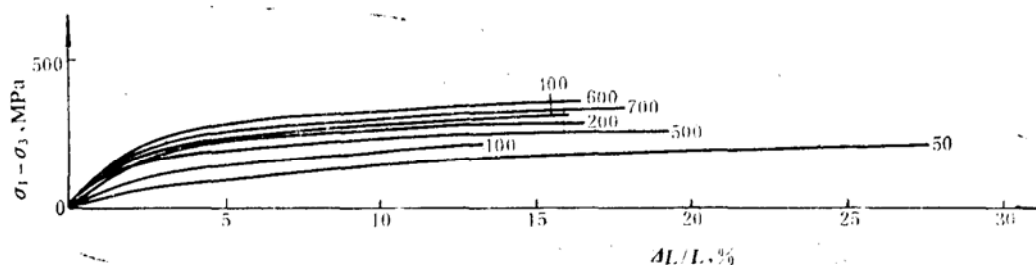


图1 干断层泥的应力-应变曲线

图2 潮湿断层泥的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \Delta l/l$ 曲线

同应变下, 差应力水平随围压增加而增大。应变量一般达20~25%, 最大达30%, 在此应变范围内未出现峰值抗压强度。

在 $\sigma_3 < 200$ MPa时, 潮湿断层泥的应力-应变特征与图1所示的相同; 当 $\sigma_3 \geq 200$ MPa后, 曲线上的线性变化段向非线性转化; 在 $\Delta l/l > 10\%$ 后, 差应力水平变化不大。

现以OA, AB, BC和CD分别表示应力-应变曲线上非线性、线性等变化区段, 由此可以得到与阶段性变化对应的临界应力 σ_a , σ_b , σ_c 和 σ_d 。 σ_d 为曲线斜率近似为零时的最大应力。由图3可以看到 σ_a , σ_b , σ_c , σ_d 均随围压呈幂函数变化。在 $\sigma_3 = 0$ 时, 各临界应力值均甚小, 因此近似取

$$\sigma_a = \sigma_b = \sigma_c = \sigma_d = 0$$

采用最小二乘法对所得数据进行处理。以 σ_c 为例, 可得到 σ_c 随围压的变化关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= 23.7\sigma_3^{0.56} \text{ (MPa)} && \text{干断层泥} \\ \sigma_c &= 10.4\sigma_3^{0.62} \text{ (MPa)} && \text{湿断层泥} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其相关系数分别为

$$\begin{aligned} r &= 0.987 && \text{干断层泥} \\ r &= 0.959 && \text{湿断层泥} \end{aligned}$$

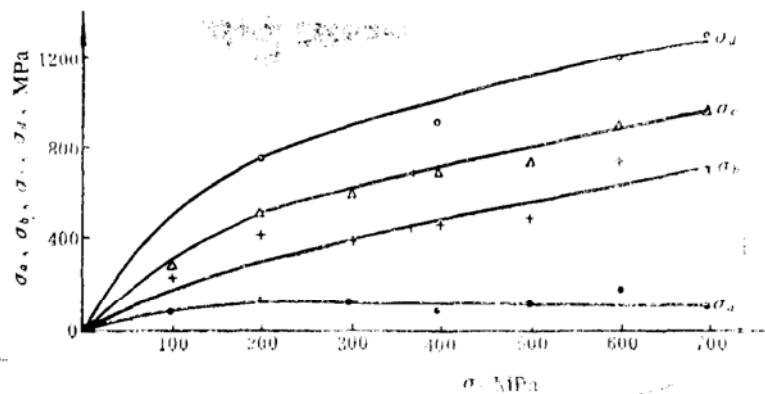
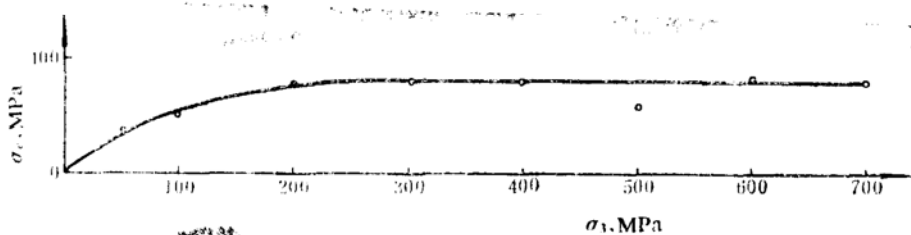


图3 干断层泥临界应力随围压的变化

图4 潮湿断层泥临界应力 σ_c 随 σ_3 的变化

若仅考虑 $\sigma_3 \geq 200$ MPa时临界应力随围压的变化, 方程(1)可简化为

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 343 + 0.88\sigma_3 \text{ (MPa)} && \text{干断层泥} \\ \sigma_c &= 300 \text{ (MPa)} && \text{湿断层泥} \end{aligned} \quad (2)$$

潮湿断层泥 σ_c 保持常数, 与围压变化无关。

(二) 断层泥的弹性模量

我们研究了断层泥的初始弹性模量和有效弹性模量。由图1, 2中应力-应变曲线开始段和卸载线线性段的斜率可以得到不同围压下的初始和有效弹性模量(表4)。以 E_{od} 和 E_{om} 分

表4 断层泥在不同围压下的弹性模量

围 压 σ_3	弹 性 模 量 (GPa)				
	E_{od}	E'_{od}	E_{om}	E_{ed}	E_{em}
50			2.84		17.20
100	12.40	6.02	4.15	19.20	23.20
200	11.80	17.03	7.65	27.60	27.80
300	12.80	10.52	13.40	25.79	31.80
400	12.40	8.85	14.24	26.49	36.00
500	11.91	10.88	11.12	30.00	44.00
600	11.84	10.87	14.60	34.80	54.00
700	11.78	12.17	14.80	48.00	55.90

别表示干、湿断层泥的初始模量; E_{ed} 和 E_{em} 分别表示有效模量。为检验初始模量取值的正确性, 还根据断层泥本构方程^[11]

$$\sigma = \varepsilon / (b + a\varepsilon) \quad (3)$$

由于断层泥应力-应变曲线(图1)计算了 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时的初始弹性模量 E_{od}' 。 E_{oa} , E_{od}' , E_{om} , E_{ed} 和 E_{em} 随围压 σ_3 的变化趋势如图5所示。由图5可知:

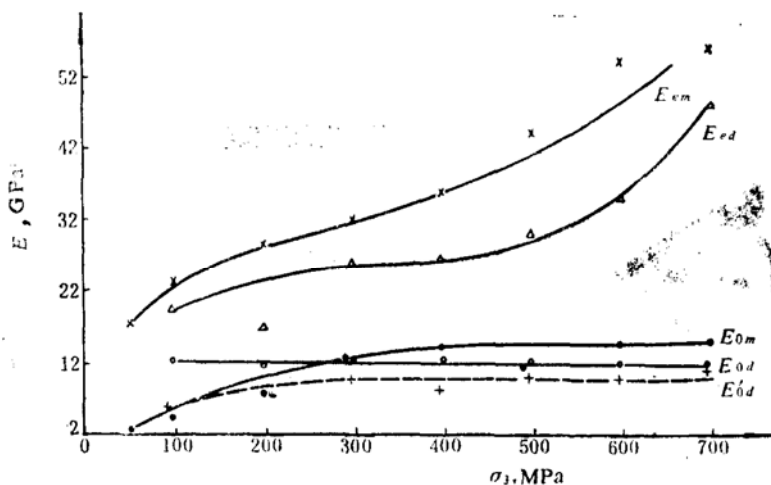


图5 断层泥弹性模量随围压的变化

1. 干断层泥初始弹性模量 E_{od} 近似保持常数; 潮湿断层泥初始弹性模量 E_{om} 在低围压下随 σ_3 增加而增加, 在高围压下也近似保持常数, 且 E_{od} 和 E_{om} 相差较小。有效弹性模量 E_{ed} 和 E_{em} 则相差较大, 两者随围压的变化关系比较复杂, 但总趋势均随围压增加而增大。

2. $E_{ed} > E_{od}$, $E_{em} > E_{om}$; 并且 $E_{em} > E_{ed}$ 。

3. 干断层泥初始模量计算值 E_{od}' 与实验值在较高围压下的变化趋势基本一致。

(三) 断层泥在破裂发展过程中的声发射

断层泥在变形、破裂发展过程中均有声发射事件显示(声发射接受仪系统的门槛选择为 0.5V, 增益为 63db, 接受换能器置于高压容器底座上), 典型的声发射活动性变化示于图6。当 $\Delta l/l > 2 \sim 5\%$ 时声发射事件开始出现, 一次试验的事件累计数 N 由低围压时的几十次增加到高围压时几百次, 但声发射率无明显变化。在相同围压下潮湿断层泥声发射次数较干燥断层泥少。实验表明, 在声发射时, 由于辐射的弹性波能量小, 在应力-应变曲线上均未出现相应的应力突降(应力记录灵敏度为 20 MPa/mm)。

(四) 断层泥试件的残余变形和破坏

断层泥试件在经历较大应变后均发生了显著的残余变形。在低围压时, 试件上部残余变形明显; 在较高围压下, 横向残余变形比较均匀(图7)。试件表面发育了两组斜交的微破裂网络, 两组裂纹的最小夹角为 $60 \sim 70^\circ$, 其夹角平分线与 σ_1 最大主应力方向一致。沿剪切破裂面发生的滑移错动比较明显, 但破裂面均未贯通试件, 也无明显的主破裂面。断层泥试件的破坏通常表现为渐进式失稳。

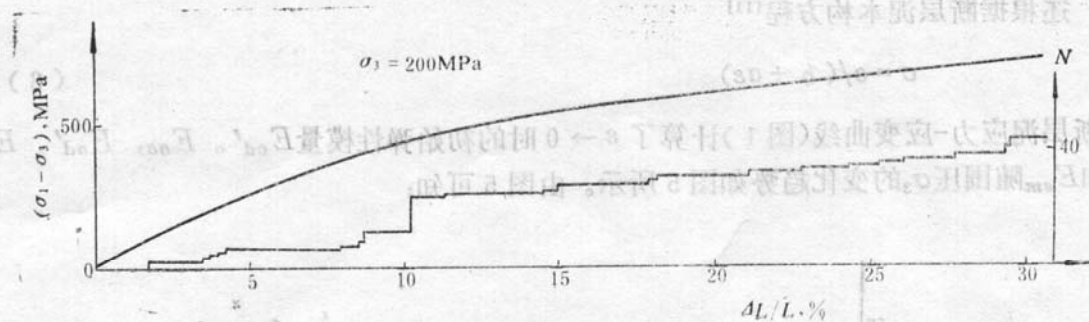


图6 断层泥 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \Delta L/L$ 曲线和声发射事件(N)

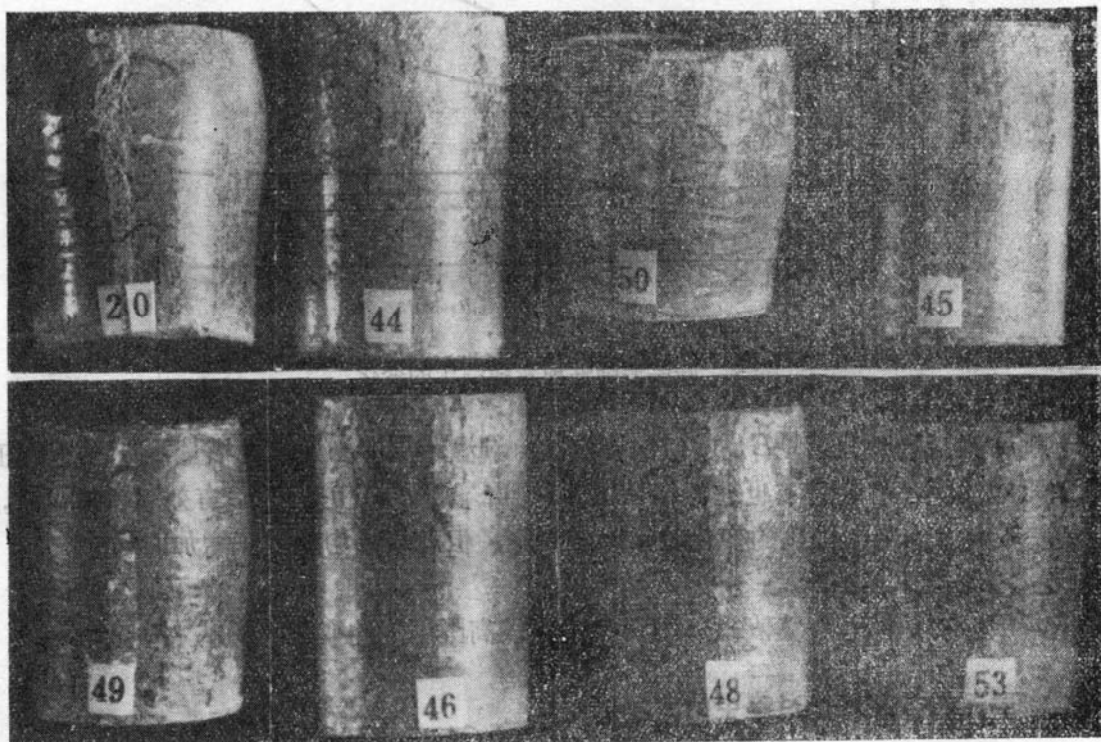


图7 不同围压下试验后的断层泥试件(室温)

20(50), 44(100), 50(200), 45(300), 49(400), 46(500), 48(600), 53(700)

试验前断层泥试件尺寸: $\phi 10 \times 20 \text{ mm}$

试件号后括号内的数字为围压, 单位MPa

五、关于断层泥应力应变曲线的阶段性变化特征与变形机制

为察明断层泥应力-应变曲线上呈现的非线性、线性、非线性和近似线性变化的物理基础, 对 $\sigma_3 = 300 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3 = 700 \text{ MPa}$ 条件下不同变形阶段的断层泥试件取样、切片, 并对其变形机制和破裂特征进行了镜下观察。观察内容和结果如表5所示。

在 $\sigma_3 = 700 \text{ MPa}$ 下各阶段变形、破坏特征与表5基本相同。从观察结果可以看到:

OA段——非线性变化段, 在此阶段内断层泥颗粒结构特征与静水压力下的基本相同, 但在差应力作用下孔隙被压实, 因此, OA为颗粒断层物质孔隙结构的压密阶段。

表5 断层泥试件在 $\sigma_3 = 300\text{MPa}$ 下的变形、破坏特征

变形阶段	采 样 点 位	OA段内	AB段内	BC段内	CD段内
	阶段变化特征	非线性变化	线性变化	非线性变化	近似线性变化
	采 样 变 量	$\leq 1\%$	3.5%	14.6%	$>30\%$
断 层 泥 结 构 变 化 特 征		不同粒径断层泥矿物或矿物集合体均匀分布, 长轴无明显取向。	孔隙度明显下降, 断层物质长轴有取向变化。	椭球和扁平状断层物质的长轴转向最大剪应力方向。	粗粒断层物质长轴沿最大剪应力方向呈定向排列, 在大范围内均有流线显示。
破 裂 分 布 特 征			颗粒较大和强度较低的断层物质发生破裂。	粗粒断层物质继续发生破裂, 两组斜交的共轭剪切裂纹发生和发展。	共轭剪切裂纹发育, 沿裂纹面有剪切滑移, 但裂纹并未贯通试件, 破裂面有粘土矿物充填。

AB段——线性变化段, 断层泥在OA段压实基础上, 其微孔隙和低强度断裂物质在较大差应力作用下进一步碎裂和压实, 压密程度随差应力增加而增加。由于压实变形, 粗粒矿物或矿物集合体的长轴方向由随机的转向最大剪应力的方向。在此阶段内开始发生的声发射事件可能与孔隙结构破裂和低强度碎裂物质在转向过程中发生的破坏有关。

BC段——非线性变化段, 在此阶段内, 碎裂物的长轴明显地转向最大剪应力的方向, 并在转向过程中进一步遭受破坏。断层泥内部较大范围内发育密集的共轭剪切微裂纹, 这与岩石的非线性变形阶段的特征相对应, 可称此阶段为部分屈服变形段, 尽管两者变形机制并不完全一致。

CD段——近似线性变化段, 这时矿物和矿物集合体长轴已沿最大剪应力方向呈定向排列, 在横向变形较大部位有清晰的流线显示, 流线方向与最大剪应变方向一致。共轭剪切裂纹进一步延伸, 但均未贯通试件。沿裂纹面有滑移表现。

归纳上述不同阶段的变形特征, 可以认为在断层泥应力-应变曲线上呈现的非线性、线性等变化特征, 就本质而言, 乃是变形机制相继发生转化的反映。同时还可看到BC段与CD段变形机制基本相同, 但裂纹发育的密度和长度, 碎裂流动规模在CD段均特别显著。因此, 本文定义屈服段的上限应力 σ_c 为断层泥破坏强度, 方程(1)和(2)则表达了断层泥破坏应力随围压的变化。

六、含水量对断层泥力学性质的影响

图1~2的实验结果表明, 干、湿断层泥的应力-应变特征和破坏应力差别较大。干断层泥由于缺水, 其孔隙空间将在围压和差应力作用下压实, 增加颗粒间接触面积, 从而增加力学强度。因此, 干断层泥破坏强度 σ_c 表现为随围压增加而增加。这一变化趋势与液体三轴下的实验结果相同^[12]。潮湿断层泥的力学性质变化则不完全与此相同, 当围压低于试件成型

压力时, 应力-应变曲线变化特征与干断层泥相同, 当围压大于成型压力时, 断层泥孔隙将进入饱水状态, 并因此形成孔隙压力, 此孔隙压力随围压增加而增加, 使有效压力保持常数, 这时, 断层泥破坏强度将与围压变化无关。图4中破坏应力在低围压下随围压上升而增加也是断层泥颗粒物质压实的结果, 而在 $\sigma_3 \geq 200 \text{ MPa}$ 高围压下, 破坏强度保持常数则与孔隙压力随围压增加, 有效压力保持不变有关。潮湿断层泥破坏强度在较高围压下保持常数的这一特征与液体三轴下的结果是一致的^[18]。表6中观测的含水量变化是潮湿断层泥在高围压下产生孔隙压力的证明。

表6

潮湿断层泥含水量在实验过程中的渗出量

$\sigma_3 (\text{MPa})$	100	300	500	700
含水量(%) (以重量百分数表示)	<0.05	0.2~0.5	0.5~2.2	0.6~2.6

由于试件在固体围压三轴装置中处于半封闭状态, 外溢含水量可能存在差异, 此外, 试件原含水量也不完全相同。因此, 应力-应变曲线变化特征和临界应力水平受含水量影响的程度也不相同。图2中 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \Delta l/l$ 曲线在 $\sigma_3 > 200 \text{ MPa}$ 后出现的复杂变化都显然与含水量变化有关。在差应力作用下引起的含水量变化, 还将导致潮湿断层泥残余应变增加, 使有效弹性模量 E_{em} 增大(图5)。

七、断层泥变形、破坏特征与断层活动稳定性

断层泥是断裂形成和断裂活动过程中破裂物和磨损物变化的产物, 其力学性状对断层活动稳定性和活动方式有重要意义。固体三轴高压下实验研究表明, 干、湿断层泥在差应力作用下具有较高破坏强度, 有声发射活动显示, 同时又表现出显著的残余变形和渐进式破坏特征。(全)断层泥的破坏型式与岩石切面夹断层泥薄层在摩擦滑动时的破坏型式不同, 在上述实验条件下, (全)断层泥仅有渐进式破坏, 夹层摩擦滑动则不仅有渐进式失稳, 还有突发式失稳(粘滑), 失稳型式的差异很可能与破坏机制有关。前者为断层泥内部大范围内碎裂流动——颗粒物质间的相对运动或滚动; 后者主要为泥/岩界面的摩擦滑动, 或为较大整体结构间的平动, 其运动过程为动、静相间。在较低差应力作用下(全)断层泥内部的碎裂流动变形就可发生(潮湿断层泥更是如此)。换言之, 在相同差应力作用下, 呈碎裂流动变形的断层泥颗粒散体所积累的弹性应变能将小于整体平动的固结体的能量。突发式破坏失稳系较大弹性应变能的突然释放。相比之下, 碎裂流动在宏观尺度上将难以积累足够的弹性应变能。因此, (全)断层泥的碎裂流动将难以形成突发式破坏所必需的释能条件, 所以, 当断裂带内断层泥存在的厚度和深度均较大时, 断层活动将转化为断层泥内部的碎裂流动, 断层活动将因此趋于稳滑。红河断裂南段呈现的稳定滑动, 很可能与厚层断层泥内部的碎裂流动变形机制有关。

八、主要结论

红河断裂带周城断层泥在压缩变形过程中表现出非线性-线性-非线性和近似线性等阶段

性变化特征, 不同变化特征分别与断层泥试件压实、屈服和碎裂流动等变形机制相对应。其破坏应力随围压增加而增大; 在高围压下干断层泥破坏应力随围压呈线性变化, 而潮湿断层泥破坏应力为常数。断层泥有效弹性模量和湿断层泥初始弹性模量均随围压增加而增大, 而干断层泥初始弹性模量近似等于常数。断层泥在变形过程中有声发射活动, 但弹性波辐射能很小。断层泥的破坏型式表现为碎裂流动。

红河断裂带南段断层泥发育, 地震频度低, 震级小, 属稳定滑动。其稳滑机制可能与断层泥内部发生的碎裂流动变形有关。

用固体三轴实验装置进行试验研究所揭示的断层泥破坏应力随围压变化的特征与液体围压下的结果相同, 表明该实验装置不仅可用于对岩石力学性质的实验研究, 同时也可用于断层泥等柔性岩质在压缩条件下的力学性质的实验研究。而且围压介质较之液、气三轴更符合于赋存断层泥的地质环境。

向宏发同志为实验研究提供了断层泥; 王文华同志参加了实验, 仅此致谢。

参 考 文 献

- [1] 李坪、汪良谋, 云南川西地震地质基本特征的探讨, 地质科学, 1975年第4期, 第308~325页。
- [2] 李祥根, 川滇高原新构造特征、运动类型和强震区地质构造标志的探讨, 西南地区地震地质及烈度区划探讨, 地震出版社, 1977年, 第37~55页。
- [3] 阙荣举, 我国西南地区现代构造应力场与现代构造运动特征的探讨, 地球物理学报, 第20卷, 第2期, 1977年, 第96~109页。
- [4] 国家地震局地质研究所, 中华人民共和国地震地质构造图, 地图出版社, 1979年。
- [5] 邵宏舜, 云南大理一下关强震区的地质考察, 川滇强震区地震地质调查汇编, 地震出版社, 1979年, 第162~170页。
- [6] 韩源, 我国西南地区若干地震地质问题讨论, 地震研究, 1980年第3期, 第31~41页。
- [7] 朱成男、段如乐、孔祥红, 红河断裂带的错断水系与地震活动问题, 中国活动断裂, 地震出版社, 1982年, 第267~272页。
- [8] 姚顺民、张靖、李祥根、向宏发、陈铁牛、张国伟, 云南红河断裂带北段地震位错与地震重覆发生的时间间隔, 地震地质, 第6卷, 第1期, 1984年, 第1~13页。
- [9] 杨主恩、胡碧茹、杨继武, 红河及曲江断裂带断层泥的特征及其地震地质意义, 地震地质, 第7卷, 第1期, 1985年, 第25~34页。
- [10] 张流、王绳祖、王光根、刘树山, 高温高压岩石三轴实验装置(固体介质)及实验技术, 力学与实践, 第4卷, 第4期, 1982年, 第36~40页。
- [11] Desai, C.S. and Christian, J.T., 岩土工程数值方法, 卢世深等译, 中国建筑工业出版社, 1981年, 第58~61页。
- [12] 王宝生、许秀琴、袁淑荣、刘天昌、马谨, 三条断裂带断层物质的强度特征, 地球物理学报, Vol. 29, No. 6, 1986。
- [13] Wang, Chiyuen, Mao, Naihsien and Wu, Francis T., Mechanical Properties of Clays at High Pressure, J.G.R., Vol. 85, No. B3, 1980, pp. 1462~1468。

Studies on the Mechanical Properties of Zhoucheng Fault Gouge of Honghe Fault Zone under High Pressures

Li Jianguo, Wang Shengzu, Zhang Botao and Shi Guimei

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

Abstract

The mechanical properties of Zhoucheng fault gouge of Honghe fault zone were studied under high pressure in triaxial compression equipment with solid confining medium and at strain rate of $4.4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. It shows that the stress-strain curves of gouge exhibit linear and nonlinear deformation characteristics which correspond to the different deformation mechanisms of compact, yield and cataclastic flow of gouge specimen. The relations between the failure strength (σ_c) of gouge and the confining pressure (σ_3) are

$$\sigma_c = 23.7\sigma_3^{0.58} \quad (\text{for the dry gouge})$$

$$\sigma_c = 10.4\sigma_3^{0.62} \quad (\text{for the moist gouge}).$$

The moisture content is an important factor which influences the deformation characteristics and the failure strength of gouge. The effective elastic moduli, E_{ed} and E_{em} , of dry and moist gouge and the initial elastic modulus, E_{om} , of moist gouge increase with increasing confining pressure, and the initial elastic modulus, E_{od} , of dry gouge is nearly constant. The acoustic emission events occur during the deformation. Under high pressure the progressive failure processes take place in the gouge specimen, so the deformation of gouge is favorable to stable sliding of the active fault.