

文章编号: 1000-7598-(2005) 07-1063-05

三峡库区岩体天然结构面抗剪性能试验研究

李克钢, 许 江, 李树春

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 采用自制的试验装置对取自三峡库区的含天然结构面的岩块试件进行压剪试验, 通过对 4 组试件进行不同正压力及不同含水量(天然状态与饱水状态)下的剪切试验, 绘制出其相应的变形和强度曲线, 并对这几组曲线进行了对比分析。试验结果表明: 岩块中结构面的抗剪强度不仅与岩块所受法向应力的大小有关, 而且与岩块含水量的大小有关, 即结构面抗剪强度的大小随着法向应力的增大而增大, 又随着含水量的增大而减小; 最后, 运用最小二乘法对该结构面的抗剪参数进行了求解, 且与推荐值进行了比较, 对比发现二者基本吻合, 说明该试验装置与试验方法在实际工程应用中是可行、有效的。

关 键 词: 结构面; 抗剪强度; 抗剪参数; 剪切试验

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

Study on property of rock mass discontinuity shear strength in Three Gorges reservoir area

LI Ke-gang, XU Jiang, LI Shu-chun

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: By using homemade shear equipment, the shear tests of rock mass which has natural discontinuities from the Three Gorges reservoir area are carried out under different states; the deformation and intensity curves of different models are drawn. After analyzing the experimental data we conclude that the shear strength of discontinuity is relevant not only to positive stress but also to water content of the discontinuity of the rock mass; that is, the shear strength rise with the rise of the positive stress and decrease with the rise of water content. Finally, we compare the shear strength parameters which with the theoretical data, and find the two groups of data are consistent. The paper also proves the experimental device and method are feasible and valid in engineering application.

Key words: discontinuity; shear-strength; shear parameter; shear test

1 引 言

大量的工程实践表明, 影响岩体或岩石力学性质的因素有很多, 诸如岩体(石)类型、组成成分、组成结构、围压、温度、应变速度、含水率、载荷作用时间和作用性质等等, 而岩体结构面作为岩体的重要组成单元之一, 岩体的强度、变形性质、破坏特征等又与结构面的展布、组合情况和力学性质密切相关。历史上许多工程的失事、失稳, 究其原因, 大多是由于沿着软弱夹层或软弱结构面发生位移量很大的滑动而造成的。因此, 岩体结构面的力学性质对岩体的稳定性至关重要, 对其作出定性、定量分析和评价, 无论是对岩体基本力学特性的研究,

还是岩体稳定性分析都具有十分重要的意义^[1~4]。

目前, 确定 c 和 φ 最常用的方法主要有两种: 一是经验估算法; 二是室内外岩体力学试验。经验估算法就是根据 Barton 的 JRC-JCS 模型来求解, 而此法中 JRC 全凭个人肉眼的观察与判断, 其又存在尺寸效应, 因此随意性太大, 这样难免会造成计算结果与实际不符的局面; 而室外(现场)大型抗剪试验又存在投资大、周期长等缺点^[5~8]。因此, 本文拟根据自制的试验装置对取自三峡库区含天然结构面的岩体试件进行压剪试验, 了解其变形特性及强度特性以求解 c , φ 值, 为实际工程的建设提供理论依据与指导。

收稿日期: 2004-01-16

修改稿收到日期: 2004-04-16

基金项目: 教育部优秀青年教师资助计划; 重庆市院士基金资助项目(No.6592); 重庆市应用基础基金资助项目。

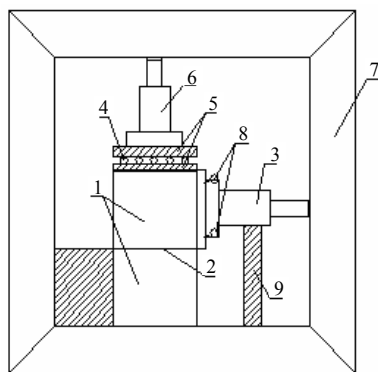
作者简介: 李克钢, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: likegang_78@tom.com

2 试验方法

2.1 试验装置

本试验所用的含天然结构面的岩块试件均取自重庆市云阳县寨坝滑坡体, 岩块试件的上盘为粉质泥岩, 下盘为砂岩, 加工成形后的岩块试件的尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 。

为简单、快速、准确地测定结构面的抗剪强度, 特自行设计制作了相应的实验加载装置 (如图 1 所示), 以实现在法向载荷和切向载荷独立加载条件下对岩体的抗剪特性进行实验分析。该实验装置的框架采用 U 型钢焊接而成, 分别利用液压千斤顶实现对岩块试件施加法向加载和切向加载, 其中垂直最大载荷可达 100 kN , 水平最大载荷可达 50 kN , 且两个方向的载荷大小可任意独立调节, 并通过钢垫板将载荷传递至岩块试件, 以保证所加载荷为均布荷载。另外, 在垂直方向上两垫板间还设置了滚轴, 以尽量减小岩块试件在剪切滑移中钢垫板与岩块试件间的摩擦阻力。在受剪试件的中央水平位置两边, 各安装了一个大量程的百分表, 以检测结构面的水平剪切位移, 所测两位移值的算术平均值即视为岩块试件的水平剪切位移值。



1—试件 2—节理面 3—水平千斤顶 4—滚轴 5—垫板
6—垂直千斤顶 7—框架 8—位移表 9—千斤顶支架

图 1 压剪加载装置图

Fig.1 The equipment of shear experiment

2.2 试验方法

本次试验的 4 组试件 (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) 均取自云阳寨坝滑坡体, 所有试验都在常温下按照《岩土工程试验规范》进行, 即先逐级加载法向力至预定值, 直到其稳定后, 再分级施加切向应力。两次加载间隔时间为 5 min 左右, 使得压力表指针稳定后, 再进行下一级的加载。另外, 在试验过程中要时刻注意法向压力表的计数, 使其保持恒定, 确保所测数据的正确性。

为了使所得的强度曲线与现场实际相符, 剪切

试验中应注意使垂直应力 (法向力) 与岩体剪切破坏时正应力的数值一致。本试验所涉及地段的岩样距地表约 10 m , 按自重应力估算, 其最大垂直应力约为 $0.2 \sim 0.3\text{ MPa}$ 。因此, 在试验中法向力的实际取值应分别为: 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.4 MPa 。为了避免试验误差, 在试验前, 油压泵在压力机上对千斤顶进行了校验, 得到了其校验曲线, 试验中所施加的压力分别为: 3.29 , 6.58 , 9.86 , 13.15 kN 。

岩石含水量的大小对强度试验的结果有较大影响。由于在自然状态下寨坝滑坡体基本处于稳定状态, 只有当其受到降雨的影响, 即在含水量发生变化, 尤其是受暴雨影响滑坡体处于饱水状态时才会出现失稳的情况, 因此, 我们选取了两种试验状态即天然和饱水状态进行试验。在天然状态下, 应注意使试件含水率尽可能接近现场岩体的含水状态, 具体做法是将试件取出后, 及时用塑料包好, 拿回试验室后立即进行试验; 而进行饱水状态试验时, 试件的具体制作方法是当完成天然状态的试验后, 在常温状态下, 将试件放置于水中, 让其浸泡时间不低于两昼夜, 最终达到试件的充分饱水。

3 试验结果及分析

3.1 变形特性

3.1.1 自然状态下的变形特性

图 2 给出了 4 组不同试件在相同试验条件下的剪切力-剪切位移图。从图 2 中可以看出, 在加载初期, 曲线呈线性增长, 表现为弹性, 剪切刚度可视为常量; 随着剪切力的增加, 曲线呈现非线性变化, 即位移随着力的增加明显增大, 曲线斜率开始变小; 当剪切力达到某一值时, 剪切位移突然增大, 试件发生大幅度的滑移, 这时曲线斜率趋近于零, 剪切刚度也随之降为零, 说明试件的抗剪能力丧失, 即试件已沿结构面破坏。

纵观图 2 中 $k_1 \sim k_4$ 共 4 个试件的剪切力-剪切位移曲线发现: 每组图中的 4 条曲线的变化轨迹较为相似: 在法向力由 3.29 kN 升高到 13.15 kN 的过程中, 剪切力-剪切位移曲线的斜率依次增大, 剪切力峰值点也依次提高, 说明随着法向力的增大, 结构面的抗剪强度值逐渐增大, 这与理论分析是相符的。从这 4 组变形曲线对比可知, 要使滑移面产生相同的剪切位移, 随着法向力的增大, 需要的剪应力也越来越大, 这说明滑移面的剪切破坏是与法向力密切相关的, 即当法向力增大时岩体的抗剪强度增大。

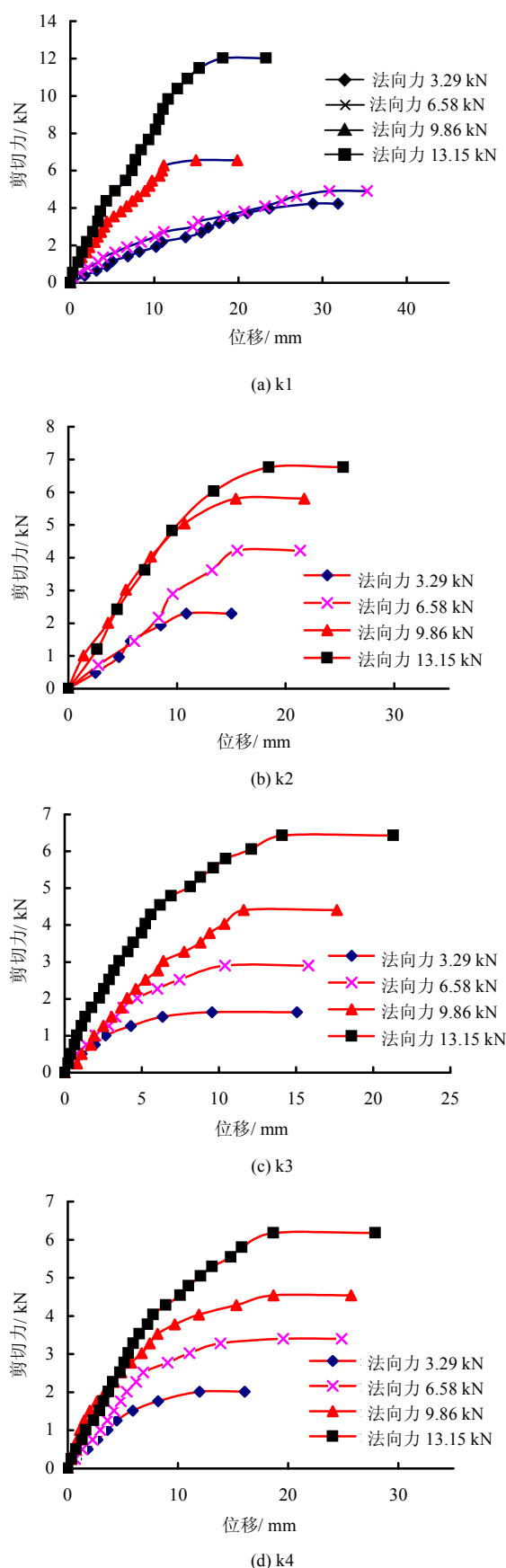


图2 自然状态下 k1~k4 试件在不同法向力时的剪切力-位移图

Fig. 2 The shear loading-displacement curve of the four models under the natural state

3.1.2 饱水状态下的变形特性

饱水状态下的变形特性见图 3(a)~(d)。

对 4 组曲线图进行整体分析, 我们发现: 图 3(b)~(d)中曲线的规律与试件在自然状态下一致, 即随着法向力的增加, 试件的抗剪强度也随之增大, 也就是说当法向荷载持续增大时, 如果要使结构面产生相同大小的位移, 那么所需的剪应力也越来越大。这说明在饱和水状态下结构面的剪切破坏也是与法向力密切相关的, 即当法向力增大时, 抗剪强度也存在增大的趋势。

而在图 3(a)中却有所不同: 当法向力从 3.29 kN 升高到 9.86 kN 时抗剪强度是增大的; 但从 9.86 kN 再升高到 13.15 kN 时试件的抗剪强度却反而减小了。经分析后, 我们认为这是由于岩体在形成过程中其结构面的粗糙程度、起伏状况不完全相同造成的。在此次试验所用试件中, 试件 k1 是最粗糙的, 在岩体沿结构面的剪切变形过程中, 不断对结构面上的相互接触的凸起部分施以剪切。因此, 在整个试验过程中随着法向力的增大, 结构面逐渐被摩擦得越来越光滑, 摩擦阻力也随之越来越小, 在饱水状态下再加上水的浸滑, 进一步降低了结构面的摩擦系数。最终导致了试件 k1 在高法向力下的最大剪切力低于低法向力时的现象。

3.1.3 不同含水量下的变形曲线对比

由于在同一法向力作用下, 不同含水量的剪切位移曲线的变化趋势都基本相似, 因此只选取了试件 k1 在法向力 6.58 kN 作用下自然状态与饱水状态时的剪切力-位移图进行说明, 如图 4 所示。从两条变形曲线的对比情况来看, 在两种情况下曲线的变化趋势是基本一致的, 但岩体试件在自然状态时的抗剪强度要比在饱水状态时的大, 这是因为随着岩体试件结构面中含水量的增大, 水对结构面产生了润滑作用, 降低了滑移面的摩擦系数, 从而使得摩擦力也相应减小所致。另外, 从图中还可看出, 在饱水状态下相同剪切力作用产生的剪切位移比自然状态的要大。因此, 必须注意虽然滑坡体在目前的应力状态下没有发生破坏, 但是一旦降雨, 即使在相同的应力条件下其仍有发生滑坡的可能性。

3.2 强度特性

通过试验求岩体结构面抗剪强度参数 c , φ 是岩体工程稳定性分析最基础的工作。目前, 求值方法有点群中心法、优定斜率法、随机-模糊法和模糊回归法等^[7, 8], 本文拟采用应用最为普遍的最小二乘法求解, 结果如表 1 所示, 图 5 为根据试验数据绘制的各试件在自然状态与饱水状态下的强度曲线对比图。

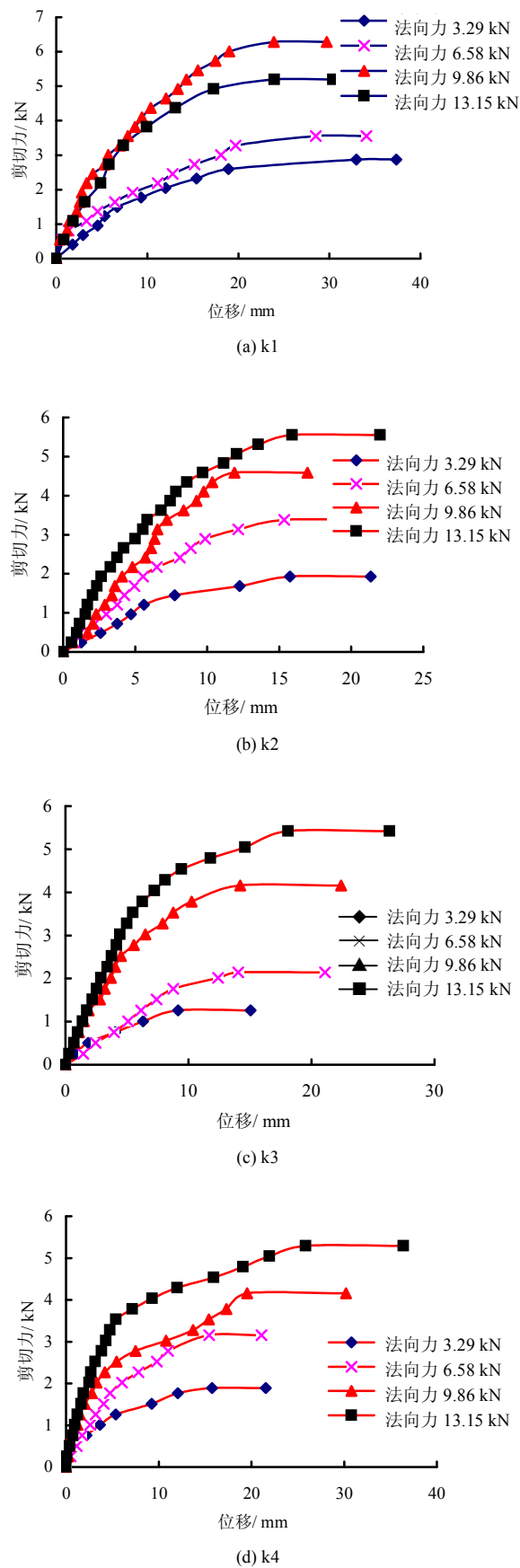


图 3 饱水状态下 k1~k4 试件在不同法向力时的剪切力-位移图
Fig. 3 The shear loading-displacement curve of the four models under the full-water state

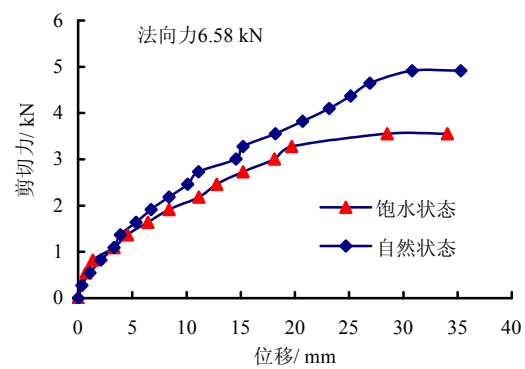


图 4 相同法向力下试件 k1 在两种状态时的剪切力-位移对比图
Fig. 4 The shear loading-displacement curve of the k1 model under the same normal force and the two states

纵观表 1 中的 4 组数据,发现试件 k1 的数据与其它三组相比出现了异常现象,之所以出现该种情况,如前所述,是由于 k1 与其它三组试件相比,其粗糙度最大,结构面极不平整,在试验过程中法向力很难始终保持恒定。再加上经过多次试验由于结构面的摩擦阻力的减小,使得抗剪强度在高法向力下低于低法向力,从而最终影响到了 c 和 φ 值的正确性。由于试验过程中试件数量不是很多,同时考虑到环境的影响,将 c , φ 平均值与推荐值比较后发现数据不完全一致,但在今后的试验当中,只要选取足够、适当的试件进行试验,淘汰异常值进行计算,计算结果将肯定会更加接近实际情况。

通用的结构面抗剪强度准则是运用摩尔-库仑准则,即 $\tau=c+\sigma \tan \varphi$ 。在 c , φ 为常量的前提下, τ 的大小与 σ 成正比。从表 1 可以看出,在饱和状态下的 c , φ 值明显比在自然状态时的小,因此,在饱和水状态下岩体的抗剪强度值也会明显的比自然状态时的低,也就是说纵然外界应力状态不发生任何改变,但是如果有降雨发生,岩体仍然可能会沿着结构(节理)面产生滑移破坏,最终导致滑坡的产生。

表 1 各试件的抗剪参数值				
Table1 The shear parameters of the different models				
试件编号	状态	k	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$
K1	自然状态	0.764 4	41	37.4°
	饱和状态	0.315 7	54.6	17.5°
K2	自然状态	0.455 8	25.5	24.5°
	饱和状态	0.414 5	20.6	22.5°
K3	自然状态	0.426	7.1	23.1°
	饱和状态	0.366 4	5.6	20.1°
K4	自然状态	0.345 8	30.3	19.1°
	饱和状态	0.313 8	27.9	17.4°
平均值	自然状态	—	21	22.2°
	饱和状态	—	18	20°
推荐值	自然状态	—	17	18°
	饱和状态	—	13	13.3°

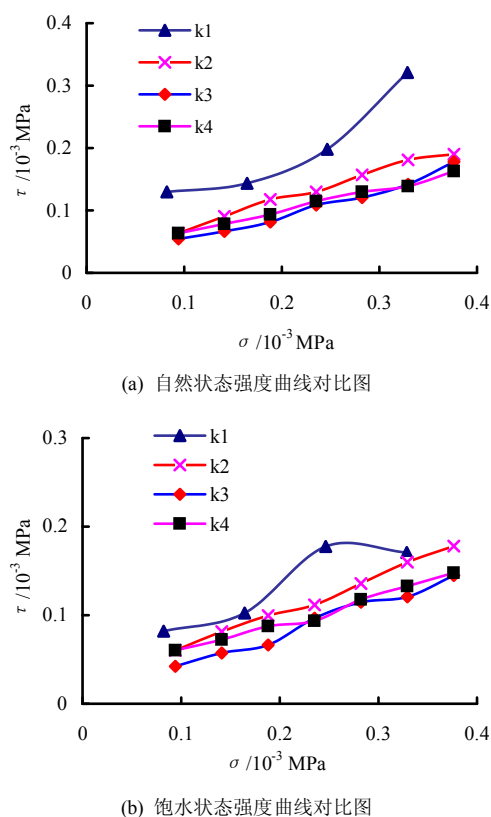


图5 两种状态下各试件的强度曲线对比图
Fig. 5 Comparison of the intensity curve between four models under the two states

4 结论

对取自云阳寨坝滑坡体的4组试件进行了室内抗剪试验,并针对试件在不同状态下(不同应力条件及含水量)的试验情况进行了分析,获得了如下几方面的主要结论:

(1) 在试件受力变形初期,剪切变形近似为弹性,但随着剪切力的增加,剪切位移速率明显增大,在剪切力达到某一数值时,结构面抗剪能力迅速下降,岩体沿结构面发生破坏。

(2) 通过对岩体试件进行不同法向载荷和含水量条件下的抗剪试验发现,结构面的抗剪强度会随着法向力的增大而增大,并随着含水量的增大而降低。

(3) 结构面抗剪强度的大小与岩体岩性软硬、风化程度、裂隙组合和发育状况有关,虽然我们试验所选取的4个试件是取自同一滑坡区,但由于以上因素的影响决定了试验所得数据必定会出现一定的离散性与异常现象(如表1中k1)。因此,在进行试验时应尽可能的多选几组试件进行试验,这样可以比较容易排出异常值的影响,从而选取正常值进行计算,使计算结果更加准确。虽然如此,该试验所得的数据与给定的数据相比还是比较吻合的,

说明该试验装置与方法在分析岩体抗剪性能及求解参数方面是可行的。

(4) 由于本装置轻便、易于搬运,所以,还可以利用本装置进行现场抗剪试验,这样可以避免由于运输试件而造成的试件的破碎、不接近实际状态的缺点,得出的试验结果也将会更加具有实际指导意义与参考价值。

参考文献

- [1] 刘新荣, 鲜学福, 余海龙等. 岩性特征对岩体力学性质的影响[J]. 江西有色金属, 2001, 2(15): 11—14.
LIU Xin-rong, XIAN Xue-fu, YU Hai-long, et al. The affection of lithological character on rock mechanical properties[J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2001, 2(15): 11—14.
- [2] 李瑞源. 岩体抗剪参数的确定[J]. 南昌水专学报, 1992, 15(1): 19—25.
- [3] 李建林, 孙志宏. 节理岩体压剪断裂及其强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 444—448.
LI Jian-lin, SUN Zhi-hong. Study on crack and strength of joint rock under compression-shear stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 444—448.
- [4] 贺建民, 吴刚. 岩体异性结构面的抗剪强度准则[J]. 重庆大学学报, 1994, 17(2): 105—110.
HE Jian-ming, WU Gang. The Criterion to shear strength of discontinuities with different rock properties in rock mass[J]. *Journal of Chongqing University*, 1994, 17(2): 105—110.
- [5] 黎造, 高正夏, 候曙光. 岩体结构面粗糙度系数的小尺度量测及其抗剪强度分析[J]. 勘查科学技术, 2002, 3: 8—12.
LI Zao, GAO Zheng-xia, HOU Shu-guang. The miniature scale measurement of roughness coefficient of rock mass structural plane and its shear strength analysis[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2002, 3: 8—12.
- [6] 李克钢, 许江, 李华等. 云阳寨坝滑坡滑移面剪切变形特性的实验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(7): 113—115.
LI Ke-gang, XU Jiang, LI Hua, et al. Experimental study on the shear distortion of the discontinuity of Zhaiba landslide in the Yunyang City[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2003, 26(7): 113—115.
- [7] 李华晔, 黄志全, 刘汉东等. 岩基抗剪参数随机-模糊法和小浪底工程 c , ϕ 值的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 155—161.
LI Hua-ye, HUANG Zhi-quan, LIU Han-dong, et al. The random-fuzziness method of shear parameters and c , ϕ values calculation of rock foundation for Xiaolangdi project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(2): 155—161.
- [8] 张飞, 赵玉仑. 岩石抗剪强度参数的稳健估计[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 53—56.
ZHANG Fei, ZHAO Yu-lun. Robust estimate of the rock shear strength parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 53—56.