

制样误差对结构面直剪试验结果影响定量研究

邹宗兴, 唐辉明, 刘 晓, 雍 睿, 倪卫达

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在结构面直剪试验制样过程中, 所产生的误差会对试验结果带来很大的影响。研究结构面制样误差对试验结果的影响具有十分重大的意义。推导结构面倾斜时的正、剪应力的修正公式, 并研究控制结构面倾斜的 2 个参数爬坡角 α 、偏角 β 对试验结果的影响。定量分析结果表明: 试验结果误差对控制结构面倾斜的因子爬坡角 α 敏感, 而偏角 β 对试验结果影响较小, 可忽略; 最后提出了 2 种试验结果误差修正方法, 并给出一修正实例。

关键词: 岩石力学; 直剪试验; 抗剪强度; 爬坡角; 结构面; 敏感性分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)08 - 1664 - 06

QUANTITATIVE STUDY OF STRUCTURAL PLANE DIRECT SHEAR TEST RESULTS INFLUENCED BY SAMPLE PREPARATION ERRORS

ZOU Zongxing, TANG Huiming, LIU Xiao, YONG Rui, NI Weida

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: How to obtain reasonable shear strength parameters of structural planes is one of the important topics in rock mechanics. Direct shear test is widely used to determine the shear strength parameters of rock joints. Sample preparation errors have great effects on shear strength obtained from the test. Great deviation between test results and true values will be generated unless the test results are amended. However, this kind of preparation errors can not be avoided under the current situation. So, it is significant to study the test results influenced by sample preparation errors. Normal and shear stresses correction formulae are deduced in this paper. In addition, the influence of parameters α and β on test results is also interpreted. Quantitative analysis shows that test results are sensitive to climbing angle α , while β has little effect on the test results, which is so tiny that it could be ignored. Two methods are put forward to amend the results, and an instance is also cited.

Key words: rock mechanics; direct shear test; shear strength; climbing angle; structural plane; sensitivity analysis

1 引 言

岩体结构面抗剪强度参数如何合理获取是岩体力学研究的重要基础课题之一^[1], 参数获取合理与否直接关系到工程岩体稳定性分析的合理性。如何

正确、合理地获取强度参数的研究一直受到众多学者的重视^[2~8]。

结构面抗剪强度参数常用的取值方法主要有 3 类:

(1) 根据试验分析选取, 其中包括剪切试验与三轴压缩试验。

收稿日期: 2010 - 01 - 21; **修回日期:** 2010 - 04 - 06

基金项目: 汶川地震区岩体稳定性评价技术方法资助项目(G091914)

作者简介: 邹宗兴(1988 -), 男, 2009 年毕业于中国地质大学(武汉)工程地质专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: zouzongxing123@126.com

(2) 按规范或估算法选取。规范主要有国标、水利以及铁路等行业规范，常见的估算法包括 Bieniawski 的 RMR 分类体系法^[9]、N. Barton^[10] 的 JRC-JCS 模型法等。

(3) 根据坡体极限平衡状态，利用极限平衡法或数值分析进行反演确定。

其中，由于结构面直剪试验原理简单、携带方便、试验成本低廉、试验周期短等优点，而被广泛运用于测定岩体结构面抗剪强度参数。

结构面直剪试验误差产生的因素很多，例如：结构面剪切接触面积测量误差、偏轴压应力的影响^[11]、制样误差的影响等等。结构面剪切接触面积测量的不准确可以通过采用先进技术，如采用激光扫描^[12]等手段得以解决；偏轴应力的影响可以通过改进试验仪器来解决；而对于制样误差，结构面制样过程中，因结构面上下块捆绑在一起的内部不可视，导致其在混凝土内固定时会产生一定角度的倾斜。这种影响因素的存在致使同组试验数据离散性相当大，甚至得出黏聚力 c 为负值，试验结果严重失真。制样误差对试验结果的影响远远大于前面两种因素结构面剪切接触面积测量误差、偏轴压应力的影响。在现有的技术条件下制样，结构面在混凝土内的这种倾斜是无法避免的。

鉴于国内外尚未有学者对该问题进行过研究，本文采用数学解析法展开制样误差对试验结果影响的定量研究。

2 正、剪应力修正公式推导

结构面直剪试验制样中，结构面的倾斜是难以避免的。结构面倾斜可由 2 个参数控制：结构面的爬坡角 α (结构面顺剪切方向成仰角时值为正，与剪切方向成俯角时值为负)，结构面倾向与剪切方向的夹角为 β (本文称其为偏角 β) 见图 1 (为便于在图中显示 2 个参数，放大了试样的倾斜程度)。

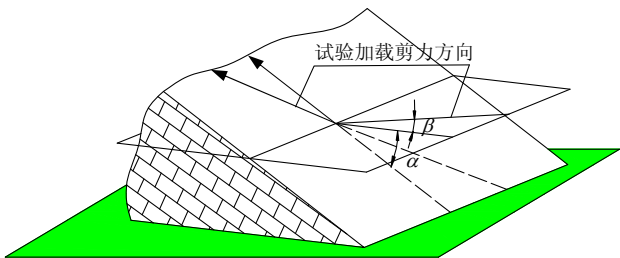


图 1 三维结构面空间方位

Fig.1 Three-dimensional spatial position of structural plane

结构面倾斜将会导致结构面破坏时所测得的应力值与结构面上实际的应力值不等。为便于研究结构面上实际应力与所测应力两者之间的关系，建立空间坐标，取与试样中结构面空间方位一致的斜截面进行应力分析(见图 2)。

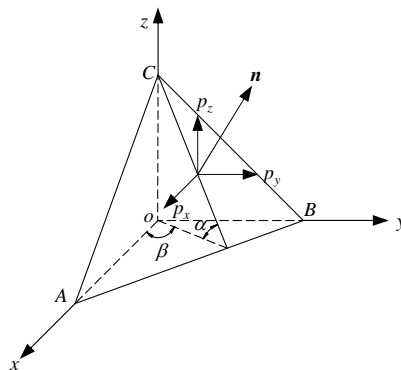


图 2 单元微截面

Fig.2 Infinitesimal element section

由空间几何关系可得斜截面外法线 n 的方向余弦分别为

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= \cos(\mathbf{n}, x) = \sin \alpha \cos \beta \\ l_2 &= \cos(\mathbf{n}, y) = \sin \alpha \sin \beta \\ l_3 &= \cos(\mathbf{n}, z) = \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当试验得到正应力 σ 和剪应力 τ 时，则空间的应力状态为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\tau \\ 0 & 0 & 0 \\ -\tau & 0 & -\sigma \end{bmatrix} \quad (2)$$

应力方向转换方程为

$$\left. \begin{aligned} p_x &= \sigma_x l_1 + \tau_{xy} l_2 + \tau_{xz} l_3 \\ p_y &= \tau_{yx} l_1 + \sigma_y l_2 + \tau_{yz} l_3 \\ p_z &= \tau_{zx} l_1 + \tau_{zy} l_2 + \sigma_z l_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(1), (2)代入式(3)可得

$$\left. \begin{aligned} p_x &= -\tau \cos \alpha \\ p_y &= 0 \\ p_z &= -\tau \sin \alpha \cos \beta - \sigma \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

微截面 ABC 上的正应力 σ^* 和剪应力 τ^* 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma^* &= p_x l_1 + p_y l_2 + p_z l_3 \\ \tau^* &= (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \sigma_n^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(1), (4)代入式(5), 可得

$$\begin{aligned} \sigma^* &= -\tau \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta - (\tau \sin \alpha \cos \beta + \sigma \cos \alpha) \cdot \\ \cos \alpha &= -2\tau \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta - \sigma \cos^2 \alpha = \\ -\tau \sin(2\alpha) \cos \beta - \sigma [1 + \cos(2\alpha)] / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (\tau^*)^2 &= (-\tau \cos \alpha)^2 + (\tau \sin \alpha \cos \beta + \sigma \cos \alpha)^2 - \\ (2\tau \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta + \sigma \cos^2 \alpha)^2 &= \\ \left[\frac{\sigma}{2} \sin(2\alpha) - \tau \cos(2\alpha) \cos \beta \right]^2 &+ \tau^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \end{aligned} \quad (7)$$

微截面上的正应力大小为

$$|\sigma^*| = \tau \sin 2\alpha \cos \beta + \sigma [1 + \cos(2\alpha)] / 2 \quad (8)$$

该应力值 $|\sigma^*|$ 亦为实际结构面上的正应力大小。

斜截面上的剪应力大小为

$$|\tau^*| = \left\{ \left[\frac{\sigma}{2} \sin(2\alpha) - \tau \cos(2\alpha) \cos \beta \right]^2 + \tau^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \right\}^{1/2} \quad (9)$$

该应力值 $|\tau^*|$ 亦为实际结构面上的剪应力大小。容易验证当 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$ 时, $\sigma^* = \sigma, \tau^* = \tau$ 。

3 影响因素敏感性分析

3.1 试验结果对参数 α, β 敏感性分析

为分析控制结构面倾斜的 2 个因素 α, β 对试验结果的影响, 对 2 个因素进行敏感性分析。目前人们广泛采用的敏感性分析方法是单因素分析法。但这一方法存在很大的局限性, 因为单因素敏感性分析是建立在其他因素不变的条件下, 而这些因素间的相互作用是十分复杂的^[13]。对于 2 个影响因素的分析, 可以通过绘制目标函数等值线图, 从等值线的形状、疏密程度来比较 2 个因素的敏感性^[14]。

假设现有一组不存在制样误差的直剪试验数据(见表 1), 可得到结构面的抗剪强度参数 $c^* = 0.075$ MPa, $\varphi^* = 30^\circ$ (c^*, φ^* 分别表示为结构面实际的, 或试验中不存在制样误差所得到的黏聚力与内摩擦

角)。

在不同 α, β 组合影响情况下, 通过式(8), (9) 对表 1 的试验数据反算得出不同 α, β 组合下所对应的正、剪应力值, 再由最小二乘法可以得出不同

表 1 直剪试验数据

Table 1 Data of direct shear test		MPa
τ_n	σ_n	
0.190	0.2	
0.421	0.6	
0.652	1.0	
0.883	1.4	
1.114	1.8	

的 α, β 组合下的 c, φ 值。

经统计, 2 个影响因素的变化值都在 15° 以内。因此在研究试验结果(c, φ)对因素 α, β 的敏感性, 只需研究 15° 范围内的即可。据以上思路绘制出了不同 α 与 β 组合下的 c, φ 值等值线图。

从图 3, 4 可以看出, α 对试验结果 c, φ 的影响明显大于 β 对试验结果的影响, 且抗剪强度参数 c, φ 随着爬坡角 α 的增大而增大, 但随着偏角 β 的增大 c, φ 值反而减少。这也说明随着爬坡角 α 的增大试验误差越来越大; 而当 α 一定时, 偏角 β 的增大对 α 带来的误差有一定的修正作用, 使得试验误差反而减小。

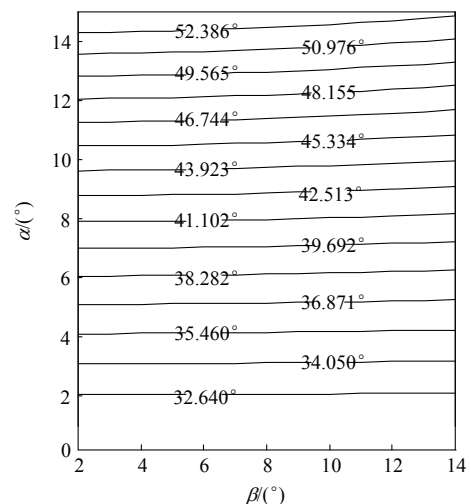


图 3 不同 α 与 β 组合下 φ 值等值线图

Fig.3 Contour map of φ varying with α and β

同时, 从图 3, 4 还可以清楚地看出, 等高线近水平。这也就说明试验结果误差主要受控与参数

爬坡角 α ，而偏角 β 对试验结果几乎不产生影响，可以忽略。

因此，可以对以上正、剪应力修正公式做如下简化，令 $\beta=0^\circ$ ，可得

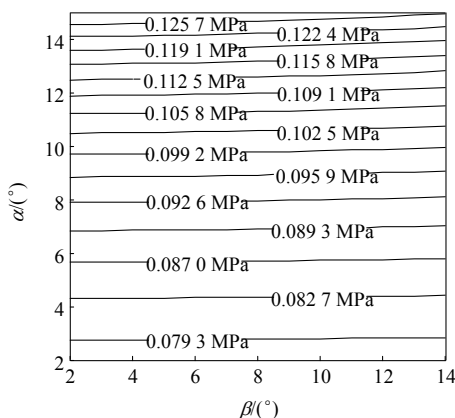


表 4 不同 α 与 β 组合下 c 值等值线图
Fig.4 Contour map of c varying with α and β

$$|\sigma^*| = \tau \sin(2\alpha) + \sigma[1 + \cos(2\alpha)] / 2 \quad (10)$$

$$|\tau^*| = \tau \cos(2\alpha) - \frac{\sigma}{2} \sin(2\alpha) \quad (11)$$

3.2 α 对试验结果的影响

假定有一组试验，制样时普遍存在误差爬坡角为 α (可由试样统计得)。由莫尔 - 库仑公式：

$$\tau^* = \sigma^* \tan \varphi^* + c^* \quad (12)$$

将式(10)，(11)代入式(12)中整理可得

$$\tau = \frac{\sin(2\alpha) + [1 + \cos(2\alpha)] \tan \varphi^*}{2[\cos(2\alpha) - \sin(2\alpha) \tan \varphi^*]} \sigma + \frac{c^*}{\cos(2\alpha) - \sin(2\alpha) \tan \varphi^*} \quad (13)$$

由式(13)可知，倘若不对试验数据进行修正，即正、剪应力未经过式(9)，(10)修正所得到的 φ ， c 值分别为

$$\varphi = \arctan \frac{[\sin(2\alpha) + (1 + \cos(2\alpha))] \tan \varphi^*}{2[\cos(2\alpha) - \sin(2\alpha) \tan \varphi^*]} \quad (14)$$

$$c = \frac{c^*}{\cos(2\alpha) - \sin(2\alpha) \tan \varphi^*} \quad (15)$$

由式(14)可以得到不同 φ^* 和 α 对试验结果的影响。

从图 5 可以看出：试验制样误差中爬坡角对试验结果影响是很大的。 $\varphi = 35^\circ$ 时，微小误差(爬坡角为 2°)可使 φ 产生近 3° 的试验误差，这不可不引起重视。同时也可以看出，试验制样误差使得 φ 的增量 $\Delta\varphi$ 要比 α 大，且随 α 的增大两者的差值也逐

渐增大。

4 试验误差修正公式

试验中，由于剪切方向的不确定性，可能出现

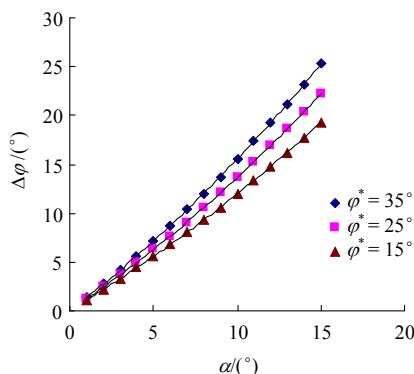


图 5 α 对 $\Delta\varphi$ 的影响

Fig.5 Influence of α on $\Delta\varphi$

爬坡为正负 2 种情况。但在同一组剪切试验中，样本数量少，正负难以平衡，总会表现出平均爬坡角偏正或是偏负，这就需要对试验结果进行修正。

由莫尔 - 库仑公式：

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (16)$$

再将式(10)，(11)代入式(16)整理可得

$$\tau^* = \frac{2 \tan \varphi - \tan(2\alpha)}{1 + 1 / \cos(2\alpha) + 2 \tan(2\alpha) \tan \varphi} \sigma^* + \frac{1 + \cos(2\alpha)}{1 + \cos(2\alpha) + 2 \sin(2\alpha) \tan \varphi} c \quad (17)$$

式(17)与(13)为反函数关系，由式(17)易得出修正后的抗剪强度参数 c^* ， φ^* 为

$$\varphi^* = \arctan \frac{2 \tan \varphi - \tan(2\alpha)}{1 + 1 / \cos(2\alpha) + 2 \tan(2\alpha) \tan \varphi} \quad (18)$$

$$c^* = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{1 + \cos(2\alpha) + 2 \sin(2\alpha) \tan \varphi} c \quad (19)$$

根据所测得的平均爬坡角，按式(18)，(19)修正公式对试验所得的参数 c ， φ 进行修正，可得修正后的试验参数 c^* ， φ^* 。式(18)，(19)提出能够对已做试验获得的试验参数进行修正，意义是重大的。

根据式(18)给出了 $\varphi = 25^\circ$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $\varphi = 35^\circ$ ， $\varphi = 40^\circ$ 条件下，参数 φ^* 修直角坐标图。一般制样误差产生的爬坡角在 15° 内，不超过 15° ，因此给出了

-15°~15°范围内的修正图(见图 6)。对于黏聚力, 提出修正系数 k :

$$k = c_n / c = \frac{1 + \cos 2\alpha}{1 + \cos(2\alpha) + 2 \sin(2\alpha) \tan \varphi} \quad (20)$$

由式(20)可以绘制出图 7 所示的 k 与 α 的关系

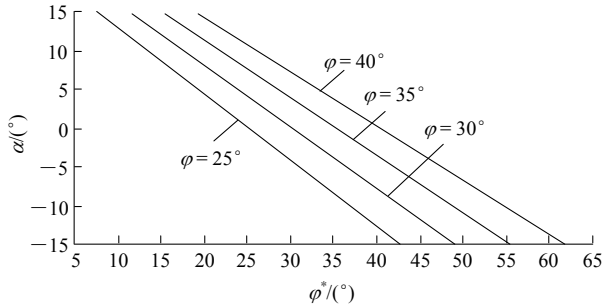


图 6 φ^* 修正结果图

Fig.6 Amended results diagram of φ^*

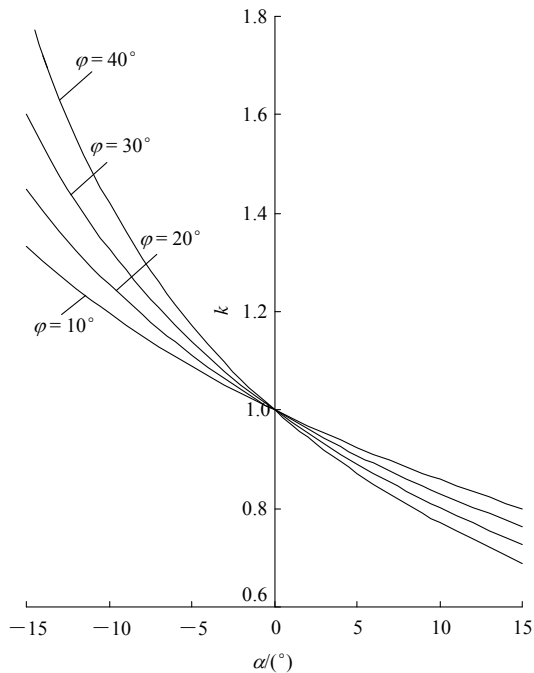


图 7 k - α 关系曲线图

Fig.7 Relation curves of k - α

曲线图。由图 7 可知, 爬坡角为正值时, 修正系数 $k < 1$, 且爬坡角 α 值一定时 φ 值越大修正系数 k 也越小。当爬坡角为负值时, 情况正好相反。

5 实例分析

有取自汶川县映秀镇百花大桥处的结构面岩块。其岩性为灰岩, 结构面类型为层面, 泥质充填。

该组结构面中 6 块试样因制样误差产生的爬坡角及结构面破坏时正剪应力值见表 2。

由最小二乘法计算得抗剪强度参数: $\varphi = 35.4^\circ$, $c = 0.0317 \text{ MPa}$, 且 $R^2 = 0.935$ 。

(1) 修正方法 I:

据修正公式式(10), (11)对试验数据进行修正得

表 2 修正前后应力值

Table 2 Stress before and after the amendment

试验修正前		$\alpha / (^\circ)$	试验修正后	
σ / MPa	τ / MPa		σ^* / MPa	τ^* / MPa
0.40	0.27	2	0.42	0.26
1.03	0.84	5	1.17	0.74
1.36	1.00	4	1.49	0.90
1.69	1.05	0	1.69	1.05
2.32	1.64	3	2.49	1.51
1.83	1.52	6	2.13	1.30

到修正后的正剪应力值(见表 2)。

由最小二乘法计算得抗剪强度参数: $\varphi_1^* = 31.07^\circ$, $c_1^* = 0.0168 \text{ MPa}$, 且 $R^2 = 0.999$ 。

(2) 修正方法 II

对具试验误差的试验参数 c , φ 作直接修正, 即按修正公式进行修正。将 $\alpha = (2 + 5 + 4 + 0 + 3 + 6) / 6 = 3.3^\circ$, $\varphi = 35.4^\circ$ 代入式(18)可得

$$\varphi_2^* = \arctan \frac{2 \tan 35.4^\circ - \tan(2 \times 3.3^\circ)}{1 + 1 / \cos(2 \times 3.3^\circ) + 2 \tan(2 \times 3.3^\circ) \times \tan 35.4^\circ} = 31.02^\circ$$

由式(19)或由图 7 查表可得: $k = 0.925$, $c_2^* = 0.0293 \text{ MPa}$ 。

从上述修正实例可知: 采用修正方法 I 修正后, 试验数据的离散性明显下降(对比修正前后 R^2), 更能接近数据真实情况。修正方法 I, II 修正结果中 φ^* 完全一致, 而 c^* 有所出入。

显然修正方法 II 的精度不及修正方法 I。因为修正方法 II 引进平均爬坡角, 而修正方法 I 则是对每个数据进行修正, 故而 2 种方法中 c^* 会有所偏差。

使用 2 种修正方法的步骤: 修正方法 I, 对试验得到的正、剪应力值先按式(10), (11)进行修正, 进而得到破坏时结构面上实际正、剪应力值, 然后采用最小二乘法计算最终可得出试验参数 c^* , φ^* 值。修正方法 II, 不对正剪应力作修正, 对试验结

果中的 c , φ^* 值按式(18), (19)作直接修正。

2 种方法都有其各自特点: 修正方法 I 使用范围广, 在非线性莫尔 - 库仑判据中也能使用, 且较修正方法 II 精确, 在今后对试验结果修正时该方法可以大为推广; 修正方法 II 则适合于一组试验中爬坡角离散性较小的情况, 且只能使用于线性莫尔判据, 具有一定的局限性。但它能在以往试验中爬坡角没有作精准测量的情况下对试验结果作出初步修正。

6 结 论

(1) 分析了制样误差中 2 个参数对试验结果的影响。得出: 试验结果主要受结构面爬坡角 α 的影响, 偏角 β 对试验结果的影响很小, 可以忽略。

(2) 爬坡角对试验结果的影响很大, 随爬坡角的增大影响逐渐增大。一般情况下, 当爬坡角为 10° 时, 内摩擦角误差可达 14.5° 。

(3) 从修正实例中可知, 2 种修正方法得到的结果基本内摩擦角完全一致, 而黏聚力会有微小偏差。结果以修正方法 I 得到的参数为准。

参考文献(References):

- [1] 孙广忠. 论爬坡角[J]. 水文地质工程地质, 1979, 6(1): 1 - 3.(SUN Guangzhong. Discussion on climbing angle[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1979, 6(1): 1 - 3.(in Chinese))
- [2] 向波, 周立荣, 马建林. 基于岩体结构面分级的抗剪强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3 547 - 3 552.(XIANG Bo, ZHOU Lirong, MA Jianlin. Determination method of shear strength based on classification of rock structure surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3 547 - 3 552.(in Chinese))
- [3] 张林洪. 结构面抗剪强度的一种确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 114 - 117.(ZHANG Linhong. A determination method of joint shear strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 114 - 117.(in Chinese))
- [4] 武雄, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 工程岩体抗剪强度确定综合方法——GMEM 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 246 - 251.(WU Xiong, JIA Zhixin, CHEN Zuyu, et al. Research of a synthetical method GMEM on ascertaining shear strength for engineering rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 246 - 251.(in Chinese))
- [5] 杜时贵, 胡晓飞, 郭霄, 等. JRC-JCS 模型与直剪试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2 747 - 2 752.(DU Shigui, HU Xiaofei, GUO Xiao, et al. Comparison study of JRC-JCS Model and direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 747 - 2 752.(in Chinese))
- [6] 曾纪全, 杨宗才. 岩体抗剪强度参数的结构面倾角效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 418 - 3 425.(ZENG Jiquan, YANG Zongcai. Dip effect of structural plane on shearing strength parameters of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 418 - 3 425.(in Chinese))
- [7] 童志怡, 陈从新, 徐建, 等. 基于黏着摩擦理论的结构面抗剪强度选取方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1 367 - 1 371.(TONG Zhiyi, CHEN Congxin, XU Jian, et al. Selection of shear strength of structural plane based on adhesion friction theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1 367 - 1 371.(in Chinese))
- [8] 周应话, 周德培, 杨涛, 等. 节理岩体抗剪强度参数的实验分析[J]. 西南交通大学, 2005, 40(1): 73 - 76.(ZHOU Yinghua, ZHOU Depei, YANG Tao, et al. Experimental investigation on shear strength parameters of jointed rock mass[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(1): 73 - 76.(in Chinese))
- [9] 潘别桐. 工程岩体强度的估算方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1985, 10(11): 63 - 67.(PAN Bietong. The method of estimating the strength of rock masses[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1985, 10(11): 63 - 67.(in Chinese))
- [10] BARTON N. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287 - 322.
- [11] 韩佳泳. 直剪试验中参数误差原因探讨[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(2): 43 - 44.(HAN Jiayong. Discussion on error of parameters in direct shear test[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(2): 43 - 44.(in Chinese)).
- [12] 孔祥辉. 结构面表面形态与力学性质相关性研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 长江科学院, 2008.(KONG Xianghui. Study of correlation between surface feature of structural plane and mechanical property[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2008.(in Chinese))
- [13] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989 - 992.(NI Heng, LIU Yourong, LONG Zhiguo. Application of orthogonal design on landslide sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 989 - 992.(in Chinese))
- [14] 刘晓, 唐辉明, 刘瑜. 基于集对分析和模糊马尔可夫链的滑坡变形预测新方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3 399 -

3 405.(LIU Xiao, TANG Huiming, LIU Yu. A new model for
landslide displacement prediction based on set pair analysis and

fuzzy-Markov chain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):
3 399 - 3 405.(in Chinese))