

基于黏着摩擦理论的结构面抗剪强度选取方法

童志怡^{1,2}, 陈从新^{1,2}, 徐健³, 张高朝³, 路为⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部, 湖北 恩施 445000; 4. 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 运用黏着摩擦理论, 分析结构面直剪过程中实际剪切面积的变化规律及其对剪切应力的影响, 认为实际接触面积的最大点对应于结构面的剪切破坏状态, 由此通过对试验过程的分析给出了剪切破坏的简易判别式, 在此基础上提出抗剪强度选取的新方法。运用此方法对沪蓉西高速公路 24 标段岩体结构面的抗剪强度进行了选取, 其选取结果与峰值强度折减后的结果比较接近, 且该方法比峰值强度的折减系数选取更合理可靠。

关键词: 结构面; 直剪试验; 抗剪强度; 黏着摩擦

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1367-05

作者简介: 童志怡(1982-), 男, 江苏江都人, 博士研究生, 主要从事岩土体的工程及力学特性的研究工作。E-mail: yuande265@126.com。

Selection of shear strength of structural plane based on adhesion friction theory

TONG Zhi-yi^{1,2}, CHEN Cong-xin^{1,2}, XU Jian³, ZHANG Gao-chao³, LU Wei⁴

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China; 3. Office of Hurongxi Highway Construction, Enshi 445000, China; 4. Research Institute of Highway Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

Abstract: The adhesion friction theory was applied to study the variation of shear area of structural plane and its influence on shear stress. The shearing failure of structural plane was considered to correspond to the maximum of real contact area. A criterion was given to distinguish the shearing failure of structural plane and a new selecting method of shear strength was brought forward subsequently. This method was applied in the direct shear tests on structural plane from the 24th section of Hurongxi Highway in Hubei Province to select the shear strength. The selected result was approximately the peak strength after multiplying a reduction factor, but the proposed method was more reasonable and more convenient than selecting a reduction factor for the peak strength.

Key words: structural plane; direct shear test; shear strength; adhesion friction

0 引言

在岩质边坡中, 结构面的力学特性对边坡的稳定性和破坏模式起控制作用, 因此结构面的抗剪强度参数 c , ϕ 值在边坡岩体的稳定性分析中占有十分重要的地位。岩体结构面的直剪试验是获取抗剪强度参数较为直接的方法, 在各法向应力作用下测得结构面的抗剪强度, 然后根据 Coulomb 表达式统计回归得到结构面的抗剪强度指标 c , ϕ 值。但是不同的抗剪强度选取方法选取的抗剪强度可能不尽相同, 在此基础上分析获得的抗剪强度参数 c , ϕ 值也必然存在差异。

现有的岩石试验规范中对于抗剪强度的选取有如下描述: 绘制各法向应力下的剪应力 τ 与剪切位移 u_s 及法向位移 u_n 关系曲线, 根据关系曲线确定各阶段特

征点剪应力。目前通常选用的抗剪强度主要有比例极限强度、屈服极限强度、峰值强度和残余强度等。比例极限强度在实际工程使用中比较保守, 而且当关系曲线的弹性段不明显时比例极限很难确定; 屈服极限强度目前还没有统一的标准; 峰值强度在实际工程中通常要折减后才能使用, 折减系数仍是根据人为经验确定。以上各种强度计算采用的仍然是结构面的名义表观面积, 没有考虑结构面实际接触面积的变化, 以及由此对剪切应力和剪切强度的影响, 因此有必要在考虑结构面实际接触面积变化的基础上引入一种简单实用且可操作性强的抗剪强度选取方法。

针对抗剪强度选取存在的问题,本文尝试引入摩擦学中的黏着摩擦理论对结构面的摩擦过程进行分析,着重讨论结构面剪切过程中实际接触面积的变化规律,在此基础上建立结构面抗剪强度选取的新方法,并通过沪蓉西高速公路 24 标的岩层结构面实例说明如何运用该方法进行抗剪强度选取,同时与传统的峰值强度选取方法进行比较分析。

1 黏着摩擦理论简介

黏着摩擦理论认为结构面的实际接触面积只占表观接触面积的一部分,在法向载荷 W 的作用下接触峰点处的应力达到受压的屈服极限 σ_s 而产生塑性变形,此后接触点的应力不再改变,只能依靠扩大接触面积来承受继续增加的载荷,其黏着面积为 A_1 。由于结构面的接触点处于塑性流动状态,在摩擦过程中接触点还可能产生瞬间高温,因而使接触点产生黏着,黏着结点具有很强的黏着力。随后在摩擦力作用下,黏着结点被剪切而产生滑动,因此滑动摩擦是黏着结点的形成和剪切交替发生的过程。

修正的黏着摩擦理论认为除了考虑法向力 W 对黏着面积的贡献,还应考虑切向力 F 的作用。实际黏着面积和接触点的变形条件应该取决于压应力 σ 和切应力 τ 的联合作用,并推导出黏着面积公式:

$$A_1^2 = \left(\frac{W}{\sigma_s} \right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{F}{\sigma_s} \right)^2 \quad (1)$$

式(1)中 σ_s 为受压屈服极限, α 为待定常数, $\alpha > 1$, 通常取 $\alpha = 9$ [1]。

2 摩擦过程对实际接触面积的影响

结构面的名义表观剪切面积 A_0 , 直剪过程中结构面的实际接触面积 A_t 远小于 A_0 [4, 8]。 A_t 是由于结构面的黏着摩擦而产生的并随剪切位移而变化, A_t 主要有两部分组成: ①随着黏着摩擦过程的进行而产生的黏着面积 A_{t1} ; ②随着结构面的剪切错动而减小的实际接触面积 A_{t2} , 因此有 $A_t = A_{t1} + A_{t2}$ 。

由(1)式可知:

$$A_{t1} = \sqrt{\left(\frac{W}{\sigma_s} \right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{F}{\sigma_s} \right)^2}$$

已知试样的表观面积为 A_0 , 假定试样为正方形, 其边长则为 $\sqrt{A_0}$, 因此由剪切位移 s 引起的表观面积变化为 $-2\sqrt{A_0}s$, 而 A_t 的减小值 $A_{t2} = -2\lambda \cdot \eta \cdot \sqrt{A_0}s$, 其中 η 为面积接触系数, 其物理意义是实际接触面积与表观面积的比值, η 近似取为 $\eta = A_{t1}/(A_0 - 2\sqrt{A_0}s)$; 结构面在试验时测得的剪切位移 s 的范围较分散, s 对黏着面积的影响应随表观面积 A_0 的增加而增加, 所

以引入黏着面积的修正系数 λ , 它与试样尺寸有关, 表观面积 A_0 越大 λ 也越大, 可取 $\lambda = \sqrt{A_0}/s_m$ (其中 s_m 为剪切位移的上限值, 通常取 $s_m = 20 \text{ mm}$), 经整理可得 $A_{t2} = -\frac{2\lambda A_{t1}}{A_0 - 2\sqrt{A_0}s} \cdot \sqrt{A_0}s = -\frac{2\lambda A_{t1}}{\sqrt{A_0} - 2s} \cdot s$, 所以有

$$\begin{aligned} A_t &= A_{t1} + A_{t2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{W}{\sigma_s} \right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{F}{\sigma_s} \right)^2} \cdot \left(1 - \frac{2\lambda s}{\sqrt{A_0} - 2s} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

直剪试验的结果为离散的 s_i 和 F_i ($i=1, \dots, n$), 运用插值方法整理可得 F 与 s 的关系 $F(s)$, 将 $F(s)$ 代入 A_{t1} 和 A_t 中, 可得 A_{t1} 和 A_t 与剪切位移 s 的关系式, 图 1 为 A_{t1} , A_{t2} 和 A_t 随剪切位移 s 变化的示意图。

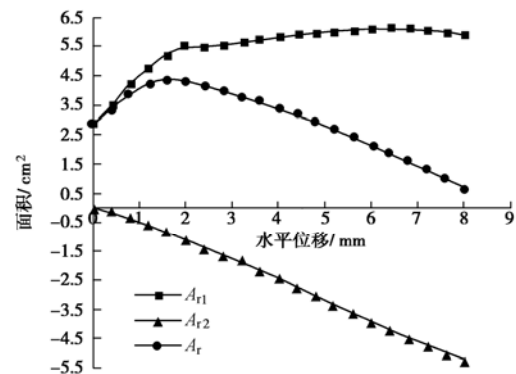


图 1 实际接触面积随剪切位移变化示意图

Fig. 1 Relationship between real contact area and shear displacement

如图 1 所示 A_{t1} , A_{t2} 和 A_t 随剪切位移 s 的变化关系, 可以将结构面的整个试验过程分为 3 个阶段:

第一阶段, 待 W 施加稳定后, 开始施加 F , 剪切变形主要为微凸体的弹性变形和颗粒摩擦, 黏着面积 A_{t1} 逐渐增大, 此时上下盘的相对位移可以忽略, 由于错动引起的面积变化值 $A_{t2} \approx 0$, 因此 A_t 也不断增加。

第二阶段, 随着 F 和 s 的增大, A_{t1} 仍然逐渐增加, 且增加速率基本不变。此时上下盘的错动较为明显, A_{t2} 开始发挥作用, 但其减小速率小于 A_{t1} 的增加速率, 因而 A_t 仍然大于 0, 但增加速率有所减缓。

第三阶段, A_{t1} 继续增加, 但增加速率变缓甚至降为 0。此时上下盘的错动较为剧烈, 由此导致 A_{t2} 的减小速率超过 A_{t1} 的增加速率, 因而 A_t 逐渐呈下降趋势。

综上所述, 随着剪切位移的增加, A_t 呈先增后减的趋势, 因此存在 A_t 的最大值 A_{tmax} , 即图 1 中 A_t 曲线的顶点。

3 抗剪强度选取依据

根据黏着摩擦理论, 结构面的实际接触点均已达到塑性状态, 因此法向力恒定时, 结构面所能提供的

摩擦力应该正比于 A_t 。 A_t 呈先增后减的趋势, 且存在最大值 $A_{t\max}$, 当 A_t 达到 $A_{t\max}$ 时结构面的摩擦力也应最大, 此时结构面发生破坏, 因此将此定为抗剪强度选取点。抗剪强度选取的实质即在实测的 $F(s)$ 曲线中选取点 (s_a, F_a) 使 A_t 达到最大, 即在点 (s_a, F_a) 有

$$\frac{dA_t}{ds} = 0, \quad \frac{d^2A_t}{ds^2} < 0, \quad (3)$$

将 A_t 对 s 求导可得

$$\frac{dA_t}{ds} = \frac{\alpha F}{\sqrt{W^2 + \alpha F^2} \sigma_s} \frac{dF}{ds} \left(1 - \frac{2\lambda s}{\sqrt{A_0} - s} \right) - \frac{\sqrt{W^2 + \alpha F^2}}{\sigma_s} \frac{2\lambda \sqrt{A_0}}{(\sqrt{A_0} - s)^2},$$

由 $dA_t/ds=0$ 可得

$$\frac{\alpha F}{W^2 + \alpha F^2} \frac{dF}{ds} = \frac{2\lambda \sqrt{A_0}}{(\sqrt{A_0} - s) [\sqrt{A_0} - 2(\lambda + 1)s]}. \quad (4)$$

由于方程 (4) 的初值条件难以获取, 因此无法解得 $F(s)$ 的解析表达式。现将 $F(s)$ 代入式 (4) 中, 求解得出满足 $dA_t/ds=0$ 的点 (s_j, F_j) ($j=1, \dots, m$), 然后分别验算在点 (s_j, F_j) 的 d^2A_t/ds^2 是否小于 0, 找出使 d^2A_t/ds^2 小于 0 的点 (s_a, F_a) , 此时 A_t 达到最大, 结构面的摩擦力也达到了最大, 因此可将式 (3) 作为结构面破坏的判断依据, 也是抗剪强度的选取依据, 所得抗剪强度称为黏着强度 τ_a , 并将此方法称为黏着摩擦法。

4 抗剪强度的选取实例

本文以沪蓉西高速公路 24 标段的岩体结构面室内直剪试验为实例, 说明黏着摩擦法的操作过程。

本试验对象为黑色泥灰岩、红色泥质灰岩和灰白色灰岩三组岩层结构面, 三类岩石的起伏度顺序是红色泥质灰岩 > 灰白色灰岩 > 黑色泥灰岩, 硬度关系是红色泥质灰岩 > 黑色泥灰岩 > 灰白色灰岩。结构面之间无充填物, 因此该结构面的直剪试验实际为岩面之间的直接摩擦。图 2, 3 和图 4 分别为 #12 黑色泥灰岩、#14 红色泥质灰岩和 #6 灰白色灰岩试样 $F-s$ 曲线, 从曲线结果可以看出此类的摩擦作用的破坏形式为塑性破坏, 残余强度与峰值强度很接近。红色泥质灰岩因结构面表面有一定的起伏, 在剪切时存在相应的剪断和爬坡作用, 因此残余强度的下降趋势相对明显^[2-3, 7]。

下面以黑色泥灰岩 #12 试样在 $W=28.8$ kN、红色泥质灰岩 #14 试样在 $W=25.2$ kN 和灰白色灰岩 #6 试样在 $W=25.2$ kN 时的 $F-s$ 曲线为例说明黏着摩擦法的具体操作。分别在每幅 $F-s$ 曲线图中补充曲线 $A_t(s)$, 找出 $A_{t\max}$ 的对应点 (s_a, F_a) 即为需要选取的强度点。

从图 5, 6, 7 的选取结果可以看出, 在 $A_{t\max}$ 的对应点 (s_a, F_a) , 其剪切力 F_a 介于剪切力的比例极限和峰值之间, 为了便于和传统的峰值强度比较, 在计算

结构面的抗剪强度时仍然采用名义表观面积 A_0 , 即 $\tau_a = F_a / A_0$ 。

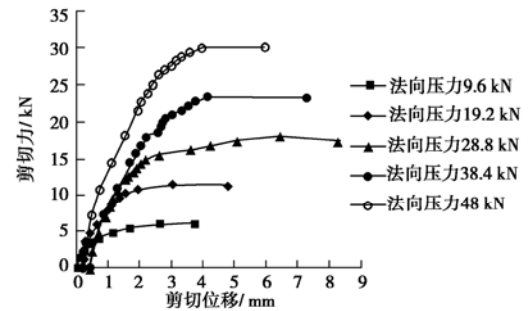


图 2 黑色泥灰岩剪切力 - 剪切位移曲线

Fig. 2 Relationship between shear force and shear displacement of black marlstone

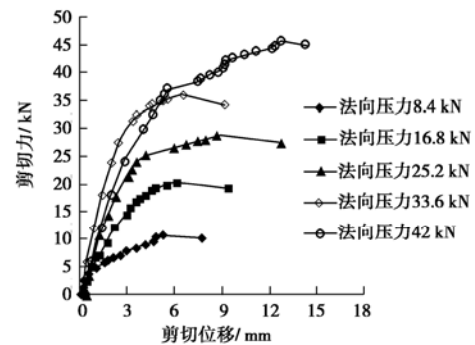


图 3 红色泥质灰岩剪切力 - 剪切位移曲线

Fig. 3 Relationship between shear force and shear displacement of red argillaceous marl

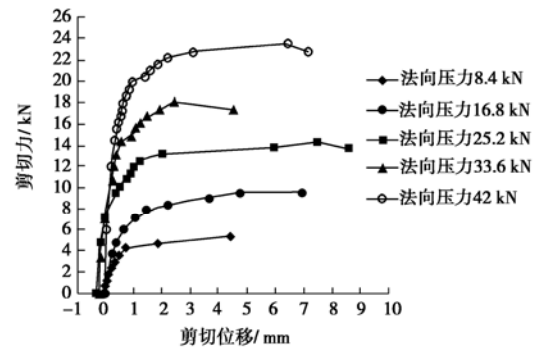


图 4 灰白色灰岩剪切力 - 剪切位移曲线

Fig. 4 Relationship between shear force and shear displacement of grey limestone

5 与传统选取方法的比较

传统的结构面抗剪强度可以取峰值强度、比例极限强度和残余强度等, 比例极限强度在实际工程使用中比较保守, 且当关系曲线的弹性段不明显时比例极限很难确定, 屈服极限强度目前还没有统一的标准, 峰值强度在实际工程中通常要折减后才能使用, 折减系数根据人为经验确定。本文分别选取黑色泥灰岩、

红色泥质灰岩和灰白色灰岩结构面试样的峰值强度 τ_p 和黏着强度 τ_a 。图 8、9 和图 10 分别为三类试样抗剪强度选取结果。

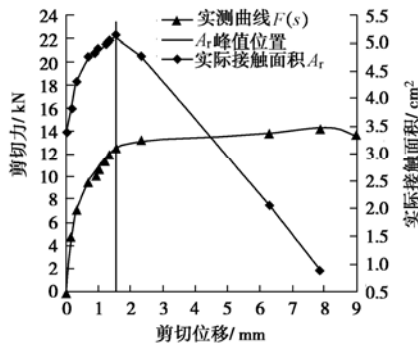


图 5 #12 黑色泥灰岩强度选取示意图

Fig. 5 Selecting method of shear strength of black marlstone

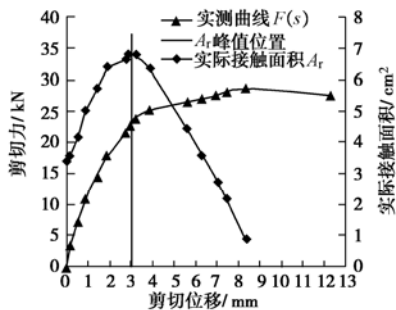


图 6 #14 红色泥质灰岩强度选取示意图

Fig. 6 Selecting method of shear strength of red argillaceous marl

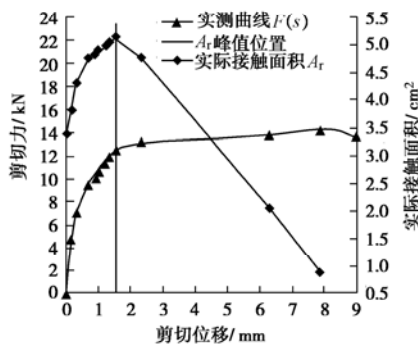


图 7 #6 灰白色灰岩强度选取示意图

Fig. 7 Selecting method of shear strength of grey limestone

为了说明黏着强度与峰值强度的关系, 现定义比值 $k = \tau_a / \tau_p$, 以黑色泥灰岩的结构面试验结果为例说明 k 的分布情况, 其结果见图 11。

从图 11 的结果可以看出黏着强度低于峰值强度, k 值随岩性和法向应力的改变而变化, 分布在 0.71~1 之间, 平均值为 0.82, 同样计算出红色泥质灰岩的 k 值平均为 0.75, 灰白色灰岩的 k 值平均为 0.84。峰值强度在实际运用时的折减系数通常取 0.7~0.9^[5-6], 这与 (0.77, 1) 的分布范围较吻合, 这说明黏着强度与折减后的峰值强度较为接近, 但是峰值强度折减系数的选取人为性强, 而黏着强度则是根据结构面不同的

岩性和法向应力确定, 因此其可操作性更强。

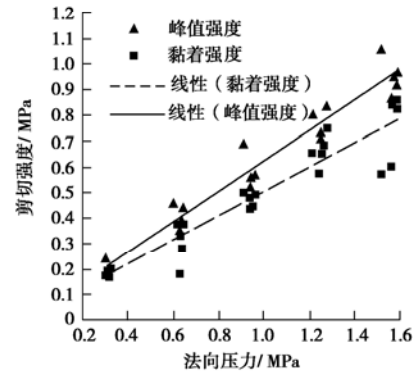


图 8 黑色泥灰岩抗剪强度选取结果比较

Fig. 8 Selected result of shear strength of black marlstone

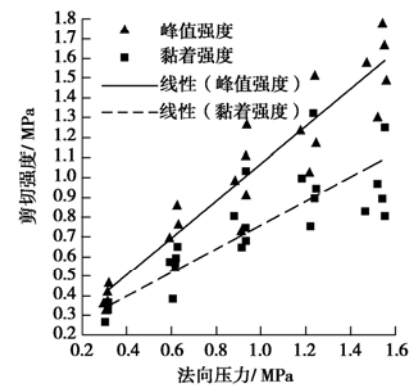


图 9 红色泥质灰岩抗剪强度选取结果比较

Fig. 9 Selected result of shear strength of red argillaceous marl

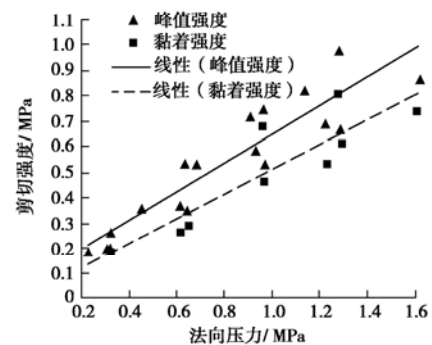


图 10 灰白色灰岩抗剪强度选取结果比较

Fig. 10 Selected result of shear strength of grey limestone

用最小二乘法对图 8、9、10 中 3 类结构面的 c , φ 值进行回归, 并且定义 $m = \varphi_a / \varphi_p$ (φ_a 为黏着强度回归的摩擦角, φ_p 为峰值强度回归的摩擦角) 结果见表 1。

由表 1 的结果可以看出运用黏着强度回归得出的结构面的抗剪强度指标 φ 值均小于峰值强度回归的结果, 并且 m 值的大小与 k 的平均值比较接近; 而 c 值则无此规律, 结合对结构面起伏形态的描述来看, 起伏度顺序是红色泥质灰岩 > 灰白色灰岩 > 黑色泥灰岩, 而 c 值亦是红色泥质灰岩最大、灰白色灰岩次之、黑色泥灰岩最小, 由此可以看出 c 值的大小随结构面

表面的起伏度的增加而增加,与黏着摩擦的过程无关。其中灰白色灰岩的黏着强度的 c 值为 0,可能是由于其硬度较小,剪切摩擦时结构面很快便被磨平的缘故。

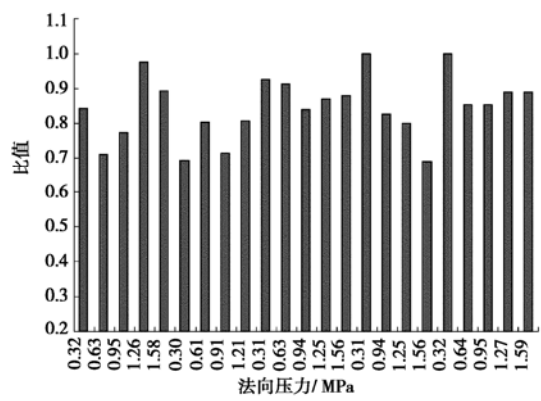


图 11 黑色泥灰岩 k 值分布图

Fig. 11 Distribution of parameter k of black marlstone

表 1 各种强度结果回归的强度指标

Table 1 Strength parameters of selected result

试样名称	选取方法	c/MPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	m	k 平均值
黑色泥灰岩	峰值强度	0.0268	30.8	0.83	0.82
	黏着强度	0.0283	25.4		
红色泥质灰岩	峰值强度	0.140	43.1	0.79	0.75
	黏着强度	0.136	34.2		
灰白色灰岩	峰值强度	0.0835	29.4	0.89	0.84
	黏着强度	0	26.2		

6 结 论

根据以上分析,本文主要完成了以下几点工作并得出了相应的结论:

(1) 结构面的直剪试验是结构面之间相互摩擦的过程,因此可以运用黏着摩擦理论对结构面的直剪试验过程进行分析。

(2) 选取试验过程中实际接触面积达到最大时的点作为抗剪强度的对应点,并在此基础上建立了抗剪强度的选取判据,即式(3)。

(3) 运用黏着摩擦法对沪蓉西高速公路 24 标段内的三类结构面的抗剪强度进行了选取,从选取结果看出,黏着强度小于峰值强度, k 值的分布与峰值强度的折减系数较接近,而黏着摩擦法的可操作性更强。

(4) 运用黏着强度回归得出的抗剪强度指标 φ_a 小于 φ_p , 且 m 的大小与 k 的平均值比较接近,而 c 值则主要和结构面起伏度有关,不受黏着摩擦过程影响。

需要说明的是黏着摩擦理论是针对钢等硬性材料提出的,因此本文只选择了硬性结构面进行了分析,在其他类型的结构面中是否实用仍需要进一步研究。

参考文献:

[1] 温诗铸, 黄 平. 摩擦学原理[M]. 第 2 版. 北京:清华大学出版社, 2002. (WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principle of tribology[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese))

[2] 中科院武汉岩土所. 岩质边坡稳定性的试验研究与计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 1981. (Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of Sciences. Test study and calculating method of rock slope stability[M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese))

[3] GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. (GB/T50266—99 Standard for test method of engineering rock mass[S]. 1999. (in Chinese))

[4] 孔宪立. 岩体工程地质及其灾害[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993. (KONG Xian-li. Rock engineering geology and its disaster[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1993. (in Chinese))

[5] 李同录, 罗世毅, 何 剑, 等. 节理岩体力学参数的选取与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2182 - 2186. (LI Tong-lu, LUO Shi-yi, HE Jian, et al. Detemination and application of mechanical parameters for jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2182 - 2186. (in Chinese))

[6] 刘明维, 傅 华, 吴进良. 岩体结构面抗剪强度参数确定方法的现状及思考[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(15): 65 - 67. (LIU Ming-wei, FU Hua, WU Jin-liang. Current situation of determination methods of shear strength parameters of rock-mass discontinuities and new thoughts[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(15): 65 - 67. (in Chinese))

[7] 余子华, 晏鄂川. 鄂西高速公路岩体结构面强度参数试验研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增): 312 - 317. (YU Zi-hua, YAN E-chuan. Experimental study on shear strength of rockmass structural surface of freeway in the west of Hubei Province[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(S): 312 - 317. (in Chinese))

[8] 周应华, 周德培, 杨 涛, 等. 节理岩体抗剪强度参数的实验分析[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(1): 73 - 76. (ZHOU Ying-hua, ZHOU De-pei, 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))