岩质边坡结构面抗剪强度参数的实用确定方法研究

刘明维[1,2]，郑颖人[1]

(1. 后勤工程学院军事土木工程系，重庆 400041；2. 重庆交通学院河海学院，重庆 400074)

摘要：对坡高不大、坡体量较小的中小岩质边坡，由于资金和技术条件所限，目前确定岩体结构面抗剪强度参数大多来自规范和经验，边坡处治往往很难兼顾安全性和经济性。本文对15～30m高岩质边坡中控稳结构面抗剪强度参数粘聚力 c、内摩擦角 ϕ 在边坡稳定中各自发挥的作用进行了定量分析。研究表明：当坡高小于25m时，抗剪强度参数中 c 值是边坡稳定的主要控制因素，因而提出采用现场原位抗切试验确定 c 值，再结合规范取值确定 ϕ 值。这种方法通过现场实测确定了主要参数，同时克服了做大型原位剪切试验时间长和费用高的缺点，是一种经济、实用的边坡结构面抗剪强度参数确定方法。

关键词：岩质边坡；结构面；抗剪强度参数；现场原位抗切试验；安全系数

中图分类号：TU457　　**文献标识码**：A

Abstract: For middle tosmall rock slopes, the shear strength parameters of discontinuities come mainly from the codes and the engineering experiences due to the limits of technique and cost, therefore, the reinforcement of slopes can hardly meet the requirements of both safety and economy. This paper studies the respective actions of shear strength parameters, cohesion c and internal friction angle ϕ, of control discontinuities for 15～30m high rock slopes. The results show that when the height of slope is lower than 25m, the value of c is the main control factor of the stability for rock slope. So it is proposed to adopt the field anti-slice test to confirm the value of c and then confirm the value of ϕ according to the codes. This method is more available to engineering practice because it obtains the main parameters by field measurements while overcomes the disadvantage of large field shear test that costs more time and money. It is an economical and practical method for determining shear strength parameters of discontinuities.

Key words: rock slope; discontinuity; shear strength parameter; the field anti-slice test; safety factor

1 引言

众所周知，岩体结构面抗剪强度是岩质边坡稳定性分析中十分重要的力学参数。工程实践中结构面抗剪强度参数的取值方法主要分为三类：一是根据现场原位大型直剪试验及室内中型直剪试验资料分析选取；二是根据结构面物理性质及地质特征按工程经验和相应技术规范进行估算；三是根据边坡体状态或实测位移，利用极限平衡法或数值分析方法进行抗剪强度反演。室内中型直剪试验因其试样代表性、原状性、试验方法的合理性等对试验结果有较大的影响而受到一定限制。相比之下，现场原位大型直剪试验可以保证试样的原状性和较大的剪切断面，试验结果相对可靠，但原位试验设备复杂(因施加竖向荷载和水平荷载)、成本昂贵、耗时费力，一般中、小工程的技术、经济力量不及。按工程经验和技术规范估算由于其不定量性、经验性、地区性等特点，研究结果的可靠性不高。位移反分析方法虽然在岩体参数反演中有诸多应用[1~4]，但反演需要有实测数据，因而岩体结构面抗剪强度参数反演计算仍很少应用。

对常见中小岩质边坡（坡高小于25m），由于技术、资金条件的限制，结构面抗剪强度参数更多的来自于规范和经验，边坡处治往往很难兼顾安全性和经济性，由此可能造成大量中小边坡工程治理的浪费或失败。实际上，对常见中小岩质边坡，控稳结构面 c 值的变化幅度往往大于 ϕ 值的变化幅度，且 c 值在中小边坡稳定性分析中的作用远大于 ϕ 值的作用，准确确定 c 值更具重要性。这为提出简便易行且准确性更高的岩体结构面抗剪强度参数

收稿日期：2005-05-31；**修订日期**：2005-09-01

基金项目：国家自然科学基金（40318002）.

作者简介：刘明维（1972-），男（汉族），贵州遵义人，讲师，博士研究生.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

确定方法提供了一定的启示。

本文根据极限平衡原理和 Mohr-Coulomb 破坏准则，对 15～30m 高岩质边坡中控稳结构面抗剪强度参数 c、ϕ 值在边坡稳定中各自发挥的作用进行了定量分析，进而提出了在现场原位抗切试验确定 c 值的基础上，采用规范取值确定 ϕ 值的参数确定方法，克服了做大型原位试验时间长和经费昂贵的缺点，计算出的安全系数范围精度较高，具有较强的工程实用性。

2 岩体结构面抗剪强度参数 c、ϕ 值对岩质边坡稳定安全系数的影响分析

2.1 计算模型及基本参数

算例岩质边坡坡高分别为 15m、20m、25m 和 30m，坡体面积分别为 112.5m^2、200m^2、312.5m^2、450m^2，结构面综合倾角约为 45°，上伏基岩及下伏稳定层的 γ = 23.7kN/m^3，c = 200kPa，ϕ = 34°，基本模型结构面 γ = 20.7kN/m^3，c = 110kPa，ϕ = 24°。

2.2 计算结果分析

首先采用极限平衡法（Spencer）计算边坡安全系数如表 1。为了研究抗剪强度参数 c、ϕ 值各自对边坡稳定的影响程度，对每一坡高采取固定 c、ϕ 值中一参数，而另一参数发生变化的方法进行计算。各计算工况的模型参数见表 2，稳定性计算结果如图 1 及表 3、表 4。

不同坡高对应的稳定安全系数　　表 1

序号	坡高（m）	坡体面积（m^2）	稳定安全系数	备注
1	15	112.5	1.750	
2	20	200	1.432	c = 110kPa
3	25	312.5	1.261	ϕ = 24°
4	30	450	1.150	

不同计算工况对应的模型参数　　表 2

计算工况	c 值变化		计算工况	ϕ 值变化	
	c（kPa）	ϕ（°）		c（kPa）	ϕ（°）
1	66		6		18
2	88		7		21
3	110	24	8	110	24
4	132		9		27
5	154		10		30

不同粘聚力 c 对应的安全系数　　表 3

坡高（m）	计算项目	ϕ = 24°							
		c（kPa）							
		66	88	110	132	154	绝对值平均	最大	备注
15	安全系数	1.32	1.545	1.750	1.984	2.200	1.760	2.200	误差值的比较基础为 c = 110kPa
	误差	-0.246	-0.117	0	0.137	0.257	0.151	0.257	
20	安全系数	1.115	1.268	1.432	1.585	1.749	1.430	1.749	
	误差	-0.221	-0.115	0	0.107	0.221	0.133	0.221	
25	安全系数	1.02	1.137	1.261	1.392	1.531	1.268	1.531	
	误差	-0.191	-0.098	0	0.104	0.214	0.121	0.214	
30	安全系数	0.947	1.056	1.150	1.26	1.384	1.159	1.384	
	误差	-0.177	-0.082	0	0.096	0.203	0.112	0.203	

不同内摩擦角 ϕ 对应的安全系数　　表 4

坡高（m）	计算项目	c = 110kPa							
		ϕ（°）							
		18	21	24	27	30	绝对值平均	最大	备注
15	安全系数	1.678	1.710	1.750	1.802	1.855	1.759	1.855	误差值的比较基础为 ϕ = 24°
	误差	-0.041	-0.023	0	0.030	0.060	0.031	0.06	
20	安全系数	1.334	1.386	1.432	1.485	1.543	1.436	1.543	
	误差	-0.068	-0.032	0	0.037	0.078	0.043	0.078	
25	安全系数	1.152	1.206	1.261	1.325	1.389	1.267	1.389	
	误差	-0.086	-0.044	0	0.051	0.102	0.056	0.102	
30	安全系数	0.992	1.072	1.150	1.222	1.31	1.149	1.31	
	误差	-0.137	-0.068	0	0.063	0.139	0.081	0.139	

从图 1 可知，总体上看，c 值变化引起安全系数的变化曲线陡于 ϕ 值变化引起安全系数变化曲线。随着坡高从 15m 增加到 30m，c 值变化对安全系数的影响曲线变缓，而 ϕ 值变化对安全系数的影响曲线逐渐变陡，表明 c 值变化对安全系数的影响程度逐渐减小，ϕ 值变化对安全系数的影响程度逐

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

渐增大。

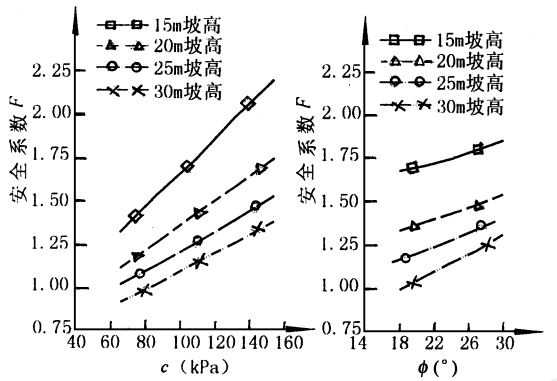


图 1　c、ϕ值的变化与安全系数的关系

由表 3 可见，c 值在 66～154kPa（±40 %范围）间变化时，15m 高边坡安全系数与基本模型安全系数的平均误差达到 15.1 %，最大误差达到 25.7 %。随着坡高增加，平均误差和最大误差逐渐降低，但当坡高为 25m 时，平均误差也达 12.1 %，最大误差为 21.4 %，c 值变化对安全系数的影响非常明显。由表 4 可见，ϕ在 18～30 间变化时，随着坡高增加，平均误差和最大误差逐渐增大，但当坡高小于 25m，平均误差仅为 5.6 %，最大误差 10.2 %，均小于 c 值变化影响程度的 1/2。由此可见，坡高或坡体量越小，c 值对边坡稳定的影响就越突出，c 值稍有变化，安全系数变化较大，可能影响边坡稳定评价结果或引起边坡治理造价大幅变化。因此，对小于 25m 的常见岩质边坡，c 值是边坡稳定的主要控制因素，精确测量 c 值对计算边坡安全系数有着重要的工程意义。

3　现场原位抗切试验与规范取值相结合确定中小岩质边坡结构面抗剪强度参数

3.1　基本思路

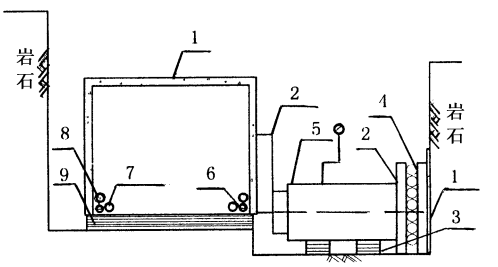
由第 2 节分析可知，对坡高不大或坡体量较小的常见岩质边坡，c 值是边坡稳定的主要控制因素。现场原位抗切试验能精确测量 c 值，而且岩质边坡的岩壁往往可以作为施加水平荷载的反力架，操作简单、方便。该方法可克服做原位大型直剪试验因施加竖向力而带来的资金投入大、花费时间长的缺点。ϕ值可根据结构面物理性质及地质特征按规范取值，得出的安全系数范围精度通常能满足工程应用需要。

3.2　现场原位抗切试验原理

按 Mohr-Coulomb 原理，试验中采取正应力为零加载，通过液压千斤顶施加水平推力直至结构面破坏，将测出的水平推力除以剪切面积，即为粘聚力 c 值。

3.3　试件制备及试验方法

选定试验场地后，在现场人工开槽制成约 50cm ×50cm ×35cm 的试体。试验采用平推试验方法如图 2，切向应力平行作用于层理结构面，并通过试体剪切面中心。切向应力加载设备选用分离式专用液压千斤顶，并配相应的标准压力表（量程为 0～ 2.5MPa），位移测表选用量程为 0～30mm，精度为 1 %的百分表。试验荷载的施加按《水利水电工程岩石试验规程》（SLJ-81、DL5006-92）与（SL264-2001）实施[5]。抗剪断试验结束后，在相同法向应力作用下进行抗剪强度试验。试验中可以用位移大幅度变化和水平荷载无法增加作为试件破坏的标准。



1、砂浆浇注　2、钢板　3、支垫　4、滚轴排
5、液压千斤顶带（标准压力表）　6、标点
7、水平测表　8、垂直测表　9、结构面

图 2　现场原位抗切试验示意

3.4　工程实例

某砂岩岩质边坡，临空面坡高 18m，经现场勘查，表面基本完整，但其间可见一明显结构面，综合倾角约 43°，夹棕褐色泥质砂岩碎屑，厚 2～5mm，起伏差 1～2.0cm。参照《建筑边坡工程技术规范》（GB50330-2002）[6]的分类标准，初步确定 ϕ = 27～35°，c = 0.09～0.13MPa。经现场原位抗切试验，结果如图 3、图 4 所示。同时进行了室内中型直剪试验，成果整理见表 5。

岩体结构面直剪试验成果表　　表 5

组别	抗剪断			抗剪		
	ϕ (°)	f	c (MPa)	ϕ (°)	f	c (MPa)
现场抗切试验			0.110			0.075
室内中型试验	36.65	0.744	0.105	34.825	0.695	0.075

从试验成果表 5 可知，现场原位抗切试验结果与室内中型直剪试验结果较为接近，现场原位抗切试验值略大于室内中型试验值。这是由于室内中型直剪试验在试验取样、运输、试件浇筑及放入直剪仪时都可能产生一定扰动。如果在试件制作中注意

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

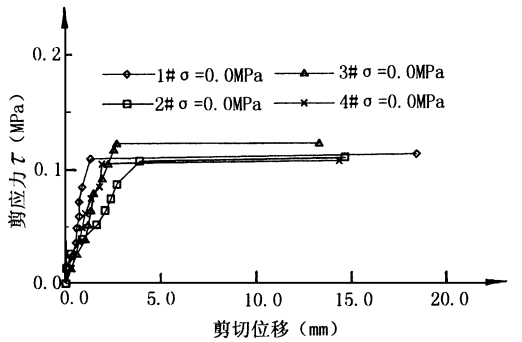


图 3　剪应力 - 剪切位移关系曲线（抗剪断）

制作、运输和浇筑等工艺，室内试验的结果基本能反映结构面的真实值。

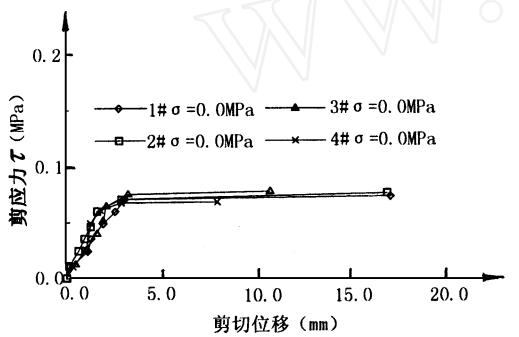


图 4　剪应力 - 剪切位移关系曲线（抗剪）

粘聚力 c 的标准值主要以现场原位抗切试验为依据确定，内摩擦角 ϕ 的标准值按室内中型直剪试验结果确定。根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287-99)[7]并考虑试验结果的离散性等因素，c 的标准值确定为 0.093MPa，ϕ 的标准值确定为 30°。

首先将 c = 0.093MPa、ϕ = 30° 带入边坡进行计算，得到的安全系数 F = 1.766。然后按现场原位抗切试验确定的 c = 0.093MPa 和规范确定的 ϕ = 27～35° 进行计算，以及完全按规范确定的 ϕ = 27～35°、c = 0.09～0.13MPa 计算边坡安全系数如表 6。

不同参数确定方法对应的安全系数　　表 6

项目	安全系数范围	安全系数平均	安全系数与其平均值的最大误差
①现场原位抗切试验 + 室内中型直剪试验	1.766	1.766	
②现场原位抗切试验 + 规范取值	1.67～1.936	1.803	7.5 %
③完全按规范取值	1.49～2.112	1.801	17.3 %
max（abs（[②- ①] /①））	9.6 %		
max（abs（[③- ①] /①））	19.6 %		

从表 6 可知，现场原位抗切试验与规范取值结合求得的安全系数 F = 1.67～1.936。与现场及室内试验相结合确定值求出的安全系数值最大相差仅为 9.6 %。安全系数范围与其平均值的变动在 7.5 % 以内。而如果不做现场试验仅仅完全按规范取值，则求出的安全系数 F = 1.49～2.112，与现场及室内试验确定值求出的安全系数值最大相差达 19.6 %。安全系数范围与其平均值的变动幅度达到 17.3 %。

综上分析，现场原位抗切试验与规范取值相结合的结构面抗剪强度参数确定方法，在花费试验费用较少的情况下，求出的安全系数范围精度有较大提高，在保证边坡治理安全的前提下，降低了工程造价，带来较大的经济效益，具有较强的工程实用性。

4　结论

(1) 采用极限平衡分析方法，对 15～30m 高岩质边坡中控稳结构面抗剪强度参数 c、ϕ 值在边坡稳定中各自发挥的作用进行了定量分析。结果表明，当坡高较小（一般坡高小于 25m）或坡体量不大的情况下，c 值是边坡稳定的主要控制因素，精确测量 c 值对计算边坡安全系数有着重要的工程意义。

(2) 工程实例分析结果表明，对常见坡高小于 25m 的岩质边坡，采用现场原位抗切试验与规范取值相结合的参数确定方法在工程应用上是可行的。该方法克服了做大型原位剪切试验时间长和费用高的缺点，求得的安全系数范围精度较高，是一种经济、实用的岩质边坡结构面抗剪强度参数确定方法。对坡高在 15～25m 中一些重要的或规模较大的岩质边坡建议采用上述方法。

参　考　文　献

[1] 孙钧，黄伟. 岩石力学参数弹塑性反面问题的优化方法 [J]. 岩石力学与工程学报，1992，11 (3)：221～229.

[2] 吉林，赵启林，冯兆祥等. 软弱夹层与结构面的力学参数反演 [J]. 水利学报，2003，(11)：107～111.

[3] 邓建辉，魏进兵，闵弘. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法（Ⅰ）：滑带土抗剪强度参数反演分析 [J]. 岩土力学，2003，(6)：896～900.

[4] 杜景灿，陆兆溱. 加权位移反演法确定岩体结构面的力学参数 [J]. 岩土工程学报，1999，21 (2)：209～212.

[5] SLJ-81、DL5006-92、SL264-2001. 水利水电工程岩石试验规程 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2001.

[6] 建筑边坡工程技术规范（GB50330—2002）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[7] 水利水电工程地质勘察规范（GB50287—99）[S]. 北京：中国计划出版社，1999.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net