

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.013

溜砂坡抗剪强度参数估算模型实验研究

卜祥航¹, 王君², 黄歆³, 彭浩⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

3. 成都中科达能源科技有限责任公司, 四川 成都 610072;

4. 四川省地质矿产勘查开发局测绘队, 四川 成都 610072)

摘要: 为揭示溜砂坡抗剪强度参数与其控制因素间的内在联系, 配制五种不同级配样品, 计算五组样品的浑圆度、细颗粒含量、不均匀系数和曲率系数。分析控制因素对溜砂坡抗剪强度参数的影响: 黏聚力和内摩擦角分别与不均匀系数、曲率系数呈正比关系; 黏聚力和内摩擦角均随颗粒的浑圆度的增大而增加; 黏聚力和内摩擦角均随细颗粒含量的增大而减少。并绘制出关系曲线, 刻画控制因素与抗剪参数间的内在规律性。最后通过多元线性回归理论, 构建出简洁、快速的溜砂坡抗剪强度参数估算模型, 并通过野外取样, 验证了此估算模型的准确性。

关键词: 溜砂坡; 抗剪强度参数; 影响因子; 估算模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0079-04

Experimental Research on Shearing Strength Parameters Estimation Model of Talus Slope

BU Xianghang¹, WANG Jun², HUANG Xin³, PENG Hao⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu, Sichuan 610072, China;

2. Nuclear Industry Southwest Survey & Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China;

3. Chengdu Zhongkeda Energy Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China;

4. Geological Surveying and Mapping Institute of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: In order to reveal the internal relationship between the shearing strength parameters and their control factors, this paper carried an experiment which focused on the flowing factors of shear strength: non-uniform degree, curvature coefficient, round degrees and fine particle content, experimental results indicate that those factors have great effects on shear strength. The cohesion and internal friction have positive relative with non-uniform degree and curvature coefficient. The cohesion and internal friction increase with round degrees. Along with the increase of fine particle content, the cohesion and internal friction are reducing. The relation curve was acquired based on the results, and the inherent law between the control factor and the shearing parameters was determined. Finally, linear fitting is conducted for the four factors. The obtained formula can be applied to the estimation of the cohesion and internal friction of sliding sand slope.

Keywords: talus slope; shearing strength parameter; influence factor; estimation model

溜砂坡是指高峻陡峭斜坡的脆性岩体在物理风化作用下, 岩体被侵蚀而结构破坏, 形成粒径大小不等的砂粒和碎屑, 并以散落现象形成散粒堆积体^[1]。1938年, 国外最早提出了碎屑溜的专业描述^[2], 随后以其自组织临界性为基础, 研究失稳破坏的动力

学机制及其强度特征^[3-4], 如 Caine 通过碎屑坡的稳定性试验, 认为其强度指标的降低是失稳的根本原因^[5]; 在国内, 溜砂坡的概念最先由罗德富提出^[1], 而后国内学者从不同角度及试验方法出发, 对溜砂坡的形成演变规律、失稳破坏因素及坡体强度

特征等有了更多了解^[5-11]。如王成华等^[9]、吴国雄等^[10]认为溜砂坡天然休止角的主要影响因素是颗粒粒径及含水率。卜祥航等^[11]建立了溜砂坡天然休止角与其内部因子的关系估算模型,以上均忽略了溜砂坡抗剪强度参数的控制因素对其强度影响。由于溜砂坡动力特征的复杂性,对其抗剪强度参数的控制因素和估算模型研究成果较少,因此,此方面的研究尚处于薄弱环节。

为提升对溜砂坡动力特征的认识,本文以抗剪强度 c 、 φ 为指标,选取三个主控因素(颗粒磨圆度、细颗粒含量、颗粒级配参数),通过室内物理力学实验,揭示溜砂坡抗剪强度参数与控制因子间的内在联系,构建溜砂坡抗剪强度参数简洁、快速的估算模型,对寻求有效的防治措施及工程设计具有十分重要的意义。

1 试验材料及计算方法

根据溜砂坡的结构特点和前人研究成果^[1,10-13],选取颗粒磨圆度、细颗粒含量、颗粒级配参数作为影响因子,分析它们与抗剪强度(c 、 φ)间的关系,建立溜砂坡的抗剪强度估算模型。

1.1 试验材料

由于室内试验条件所限,将粒径小于 5 mm 的颗粒作为细颗粒^[14],粒径在 5 mm ~ 20 mm 的颗粒作为粗颗粒,配制五组不同级配($C_u = 12.1$ 、9.6、7.2、5.0、4.4)样品,典型样品颗粒级配见图 1。

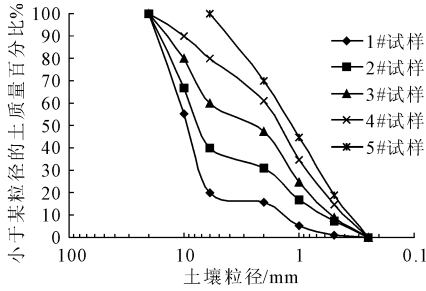


图 1 试验材料级配曲线图

1.2 参数计算方法

本文代表颗粒磨圆程度指标为浑圆度^[15],如式(1)计算其值

$$R = \sum_{i=1}^n (r_i/R)/n \tag{1}$$

其中: r_i 为某尖角半径; R 为颗粒的内接圆半径,取最大值; n 为颗粒中尖角的总数。

细颗粒含量(m)指试样中细颗粒质量与颗粒总质量的比值。

为达到与实际相符的情况,因溜砂坡在天然状态下只有重力场作用,所以本文剪切试验中正压力的取值均较小,分别为 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa。样品的抗剪强度曲线见图 2。根据库仑定量公式(2),计算得出试验样品的抗剪强度参数。然而颗粒间存在某些咬合点,在剪切过程中这些咬合点会被磨损或者剪断,从而产生黏聚力。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{2}$$

其中: τ_f 为抗剪强度; c 为黏聚力; σ 为总应力; φ 为内摩擦角。

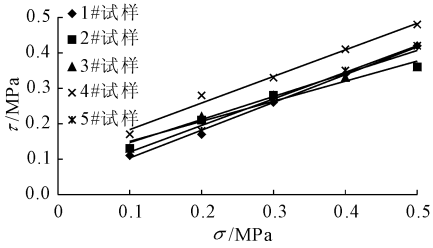


图 2 样品 $\tau - \sigma$ 曲线

通过上述方法即可得到所需参数值,见表 1。

表 1 抗剪强度影响因素参数汇总

样品 编号	C_u	C_c	浑圆 度 R	$m/\%$	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
1 #	12.1	3.00	1.72	20	0.070	40.5
2 #	9.6	2.77	1.54	40	0.066	39.3
3 #	7.2	2.57	1.63	60	0.060	39.1
4 #	5.0	1.96	1.43	80	0.059	38.2
5 #	4.4	1.70	1.39	100	0.048	38.1

2 试验成果分析

2.1 颗粒级配对抗剪强度的影响

不均匀系数、曲率系数分别与内摩擦角、黏聚力间的函数关系如下(见图 3—图 6):

$$c = -0.19 C_u^2 + 5.47 C_u + 31.6, \quad R^2 = 0.86 \tag{3}$$

$$\varphi = 0.01 C_u^2 + 0.15 C_u + 37.3, \quad R^2 = 0.96 \tag{4}$$

$$c = -0.93 C_c^2 + 18.2 C_c + 22.6, \quad R^2 = 0.87 \tag{5}$$

$$\varphi = 1.76 C_c^2 - 6.54 C_c + 44.2, \quad R^2 = 0.97 \tag{6}$$

由图 3 和图 5 可看出,黏聚力的大小与颗粒的不均匀系数(C_u)及曲率曲线(C_c)呈正相关关系。由图 4 和图 6 可看出,内摩擦角的大小与颗粒的不均匀系数(C_u)及曲率曲线(C_c)亦呈正相关关系。因此,当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时,颗粒级配愈良好、连续,颗粒抗剪强度愈大。级配愈良好、连续的样品,大小不同粒组的分布范围愈大,既土粒愈加不均匀,

中间粒组的存在性愈好,各粒组空隙充填效应愈好。大颗粒形成较为系统的空隙,小颗粒则可充分填充,增加了颗粒间相互作用点的数量,密实度增加,咬合能力增强,从而颗粒的抗剪强度也随之增高。

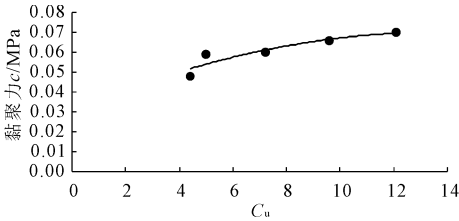


图 3 黏聚力与不均匀系数曲线图

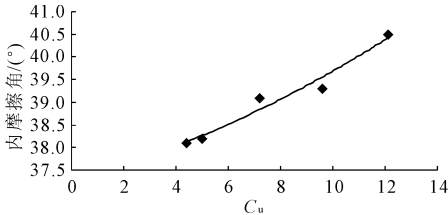


图 4 内摩擦角与不均匀系数曲线图

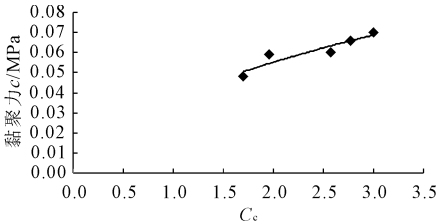


图 5 黏聚力与曲率系数曲线图

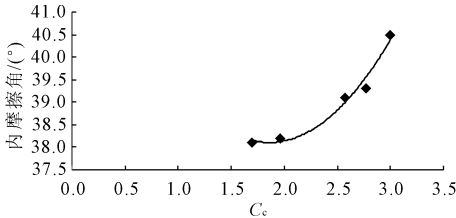


图 6 内摩擦角与曲率系数曲线图

2.2 颗粒磨圆程度对抗剪强度的影响

浑圆度分别与内摩擦角、黏聚力间的函数关系如下：

$$c = -137.85R^2 + 476.23R - 343.83, R^2 = 0.76$$
(7)

$$\varphi = 8.46R^2 - 19.56R + 48.9, R^2 = 0.89$$
(8)

抗剪强度参数的大小随浑圆度的增大均有增大的趋势,颗粒间的运动过程中会有能量耗散,浑圆度越大的颗粒,其表面越粗糙,凹凸性较强。在剪切过程中,颗粒间具有更复杂和曲折的摩擦路径,会造成

较大的能量耗散,颗粒运动的过程中加速过程变短。因此,浑圆度大,内摩擦角和黏聚力增大,从而更加有利于坡体的稳定。

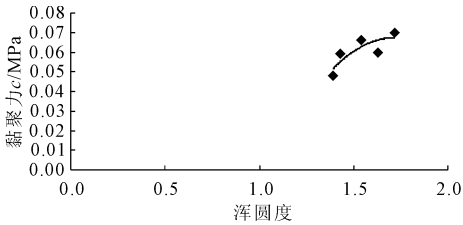


图 7 黏聚力与浑圆度曲线图

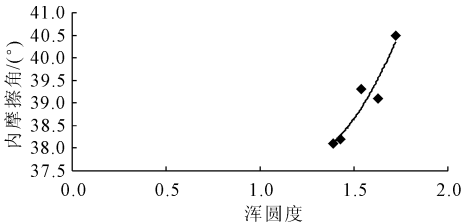


图 8 内摩擦角与浑圆度曲线图

2.3 细颗粒含量对抗剪强度的影响

细颗粒含量 m 分别与内摩擦角、黏聚力间的函数关系如下：

$$c = -0.02m^2 - 0.075m + 71.64, R^2 = 0.95$$
(9)

$$\varphi = 0.003m^2 - 0.062m + 41.56, R^2 = 0.96$$
(10)

抗剪强度参数的大小随 m 值增大而减小。颗粒以粗颗粒为主时,相邻颗粒间的接触面积会较大,在剪切力的作用下,某一颗粒若持续运动需跨越其相邻颗粒造成的阻碍,这个过程会更加困难。因为高度和角度存在的起伏差,剪切过程中出现剪胀效应,若要剪断颗粒,则需要更大的力量。因此,颗粒以粗颗粒为主时,表现出的力学性质会增大,从而黏聚力和内摩擦角会增加。颗粒以细颗粒为主时,颗粒的突角变短小,彼此间的接触面积降低,咬合的强度也会降低,在剪切和挤压的作用下,颗粒间相互运动所需克服的摩擦作用较小,彼此间的滑动就比较容易。因此,如图 9 和图 10 所示,黏聚力和内摩擦角的大小随细颗粒含量的增大而减少。

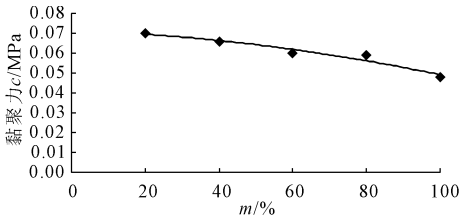


图 9 黏聚力与细颗粒含量曲线图

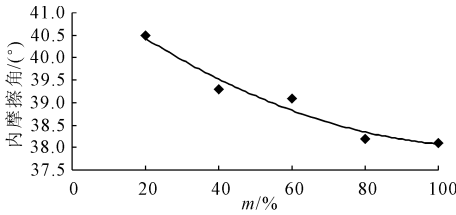


图 10 内摩擦角与细颗粒含量曲线图

最后通过多元线性回归分析方法,利用述所得数据及分析成果,建立溜砂坡抗剪强度参数的估算模型:

$$c = -0.008m - 0.033C_u - 0.102C_c - 0.051R + 1.642, \quad R^2 = 0.91 \quad (11)$$

$$\varphi = 0.002m + 0.296C_u - 0.749C_c + 3.677R + 32.809, \quad R^2 = 0.92 \quad (12)$$

为验证溜砂坡抗剪强度参数的估算模型公式(11)和公式(12)的准确性,本文从都一汶高速路旁某一处溜砂坡堆积体取砂样,按照上述的参数计算方法,得出此砂样相关数据,见表 2。将表 1 中的相关参数带入公式(11)、公式(12),可得估算模型的计算结果: $c = 1.02 \text{ MPa}$ 、 $\varphi = 38.07^\circ$ 。比室内试验所得的 $c = 0.62 \text{ MPa}$ 、 $\varphi = 38.17^\circ$ 分别大 0.4 MPa 和小 0.1° ,均在可接受的范围内。通过上述的验证,可以根据颗粒的不均匀程度、细颗粒含量和磨圆度快速估算溜砂坡抗剪强度参数大小。

表 2 验证实验数据

C_u	C_c	浑圆度 R	m /%	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
7.3	2.98	1.45	50.2	0.62	38.17

3 结 论

针对溜砂坡抗剪强度参数的控制因素研究成果较少的现状,本文开展了颗粒磨圆度、细颗粒含量、颗粒不均匀度对抗剪参数(c 、 φ)的影响分析,揭示了溜砂坡抗剪强度参数的控制因素内在关系:(1)当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时,抗剪参数(c 、 φ)的大小随颗粒不均匀系数、曲率系数的增大而增大;(2)抗剪参数 c 、 φ 的大小随浑圆度的增大而增大;(3)抗剪参数 c 、 φ 的大小随细颗粒含量的增大而减少。并绘制了控制因素与溜砂坡抗剪强度参数关系曲线,刻画出它们间的规律性,形成单因子与抗剪参数间的关系模型。

参考文献:

[1] 卜祥航,傅荣华,李 宁,等.散粒体斜坡注浆固坡工程防治技术试验研究[J].工程地质学报,2015,23(3): 415-419.

[2] Blong R J. A numerical classification of selected landslides of debris slide-avalanche-flow type[J]. Engineering Geology, 1973,7(2):99-114.

[3] Gabriel D. The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam: short slope laboratory experiments on interrill erosion[J]. Geomorphology, 1999,28: 169-172.

[4] Bretz M, Cunningham J B, Kurczvnslei Pletal, et al. Imaging of avalanches in granular materials[J]. Physical Review Letters, 1992,69(16):2431-2434.

[5] 王成华,阙 云,徐 骏,等.粒状碎屑溜砂坡运动方程与砂坡土压力计算[J].岩土力学,2007,28(7): 1299-1303.

[6] 梁光模,王成华,张小刚.川藏公路中坝段溜砂坡形成与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):33-38.

[7] 蒋良潍,姚令侃,李仕雄.非均匀散粒体自组织临界性机制初探[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3178-3184.

[8] 何越磊,姚令侃,苏风环,等.沙堆模型动力学特性与灾害系统演化预测研究[J].自然灾害学报,2005,15(4): 44-50.

[9] 王成华,阙 云,李新坡,等.粒状碎屑溜砂坡运动特征与动力数值分析[J].岩土力学,2007,28(2):219-223.

[10] 吴国雄,曾榕彬,王成华.溜砂坡的形成诱发因素及失稳破坏条件[J].中国铁道科学,2006,27(5):7-12.

[11] 卜祥航,傅荣华,李仅德,等.散粒体斜坡失稳破坏内部因素试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(9): 116-120.

[12] 慕焕东,邓亚虹,李荣建,等.砂粒含量对砂质黄土力学性质影响试验研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):36-39.

[13] 凌 华,傅 华,韩华强,等.颗粒破碎对堆石料静动力特性影响的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):44-47.

[14] 徐建华.地理系统分析[M].兰州:兰州大学出版社,1991.

[15] 尚彦军,杨志法,廖秋林,等.雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(4):34-35.