

泥石流堆积体边坡失稳机理的试验与稳定性分析

朱颖彦, 崔鹏, 陈晓晴

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041)

摘要: 泥石流堆积体边坡失稳现象由于其组成物质、形成年代和堆积部位等方面的特点, 与其他岩土边坡失稳有不同的表现。根据泥石流堆积体的形态特点与沉积特征, 利用条块侧向推力正弦变化的 Spencert 条分法进行泥石流边坡稳定性的分析, 对山地工程减灾分析有意义。利用 Spreadsheet 自嵌 Visual Basic Application 编译器编写了描述沿深度变化土体物理参数的稳定性分析程式。程序从确定性分析开始计算边坡稳定性系数, 并利用 Spreadsheet 的约束优化功能寻找可能的圆弧滑动面, 在此基础上计算最可能的非圆弧滑面, 最后与实际观测滑面稳定性分析进行对比现场试验人工降雨造成超渗产流, 实时测得的数据表明, 在距表层土体 50 cm 以下含水量变化很小, 边坡并没有产生明显的后缘张裂隙, 在集中降雨导致超渗产流的情况下, 泥石流堆积体边坡失稳主要是表层 50 cm 深度以内土体含水量变幅大的土层中发生, 而在 50 cm 以下深度范围内土体基本保持稳定。程序分析表明, 随着给定的滑动土层厚度的增加, 安全系数逐步降低, 只有平均土层深度为 2.4 m 才有完全满足约束条件的最优非圆弧滑面。研究结果表明, 条分法已经不能适用于强降雨条件下泥石流堆积体边坡失稳机理的研究。

关键词: 边坡工程; 泥石流堆积体; 边坡失稳; 野外试验; 稳定性分析

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)21 - 3927 - 08

EXPERIMENT ON MECHANISM OF SLOPE FAILURE OF DEBRIS FLOW FAN AND STABILITY ANALYSIS

ZHU Ying-yan, CUI Peng, CHEN Xiao-qing

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Failure of debris flow fan is distinct from the common rock and soil slope failure due to the unique geotechnical features of debris flow sediment. Unfortunately, this type of failure was not comprehensively and systematically studied in the past. In our recent research, according to the unique characters of debris flow fan the Spencert slicing method with varying side force inclination is used to search for the noncircular critical slip surface. This is done using Spreadsheet-automated constrained optimization. The results are then compared with the in-situ slip surface. A practical subroutine is developed to interpret the stability of slope with varying physical parameters along the depth by using Visual Basic Application embedded in Microsoft Excel. The in-situ experiment shows that the water content hardly change 50 cm beneath the slope surface and no obvious tension cracks are observed behind the slope. However in the soil layer where the actual sliding occurred, great alteration of water content under concentrated artificial rainfall happened, which is in consistent with the results of numerical simulation. With the increase in height of the soil layer, the calculated safety factor gradually decreases and an optimized noncircular slip surface with an average height of 2.4 m is obtained satisfying all the constrains and assumptions. It can be inferred that the slope failure of the debris flow fan is attributed to the dynamic seepage force caused by hydraulic gradient; and the slicing method is not suitable for the research of the mechanism of failure of debris

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 29

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90202007); 中国科学院研究生科学与社会实践资助专项(创新研究类)项目

作者简介: 朱颖彦(1971 -), 男, 2002 年于中国地质大学(武汉)第四纪地质学专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与滑坡、泥石流数值模拟方面的研究工作。E-mail: zh_y_y@imde.ac.cn.

flow fan.

Key words: slope engineering; debris flow fan; slope failure; field experiment; stability analysis

1 引言

在中国西部地区，新构造运动强烈，地形起伏大，气候多变，为泥石流发育创造了条件，造成了泥石流的广泛发育，形成了不同规模的泥石流堆积扇体。随着西部大开发战略的实施，铁路和公路建设作为实施西部大开发的重要举措，列入国家建设的优先领域。山区道路工程与城市建设常穿越泥石流堆积体，或在一些古老泥石流堆积体上开挖，形成不稳定边坡，这些边坡在各种触发因素下，将形成滑坡或泥石流灾害^[1]。这种发生在山地泥石流堆积体上的边坡失稳现象由于其组成物质、形成年代和沉积构造等方面的特点，与其他岩土边坡失稳有不同的表现，常被国内外界定为：滑坡型泥石流^[2, 3]、蒋家沟类滑坡^[4]、松散砾石土滑坡^[5]、土力类泥石流^[6]、滑坡转化为泥石流^[7, 8]。对这种边坡失稳现象的研究，对防灾减灾，对促进山区交通与城市建设发展，具有十分重要的科学价值与社会意义。

本文根据泥石流堆积体的形态与沉积特征，以现场原位试验数据、不排水不固结抗剪强度指标为参数，根据文^[9, 10]，改为采用全应力法、利用条块侧向推力正弦变化的 Spencert 条分法进行泥石流边坡稳定性的分析，利用 Spreadsheet 自嵌 Visual Basic Application 编译器编写了描述随土深度、位置变化物理参数的稳定性分析程序。程序从原位参数分析开始计算边坡稳定性系数，并利用 Spreadsheet 的约束优化功能寻找可能的圆弧滑动面，在此基础上计算最可能的非圆弧滑动面，最终与现场观测结果进行比较。本文内容涉及现场原位试验、室内抗剪强度试验、数据分析与计算机模拟等环节，全文所提供的研究思路、原位数据与研究结论，对促进泥石流堆积体滑坡机制、滑坡转化泥石流机理、泥石流起动机理等学科前沿问题的研究，均有一定的参考价值。

2 泥石流堆积体的特征

泥石流堆积物是泥石流活动的产物，它的各种特征客观地记录了泥石流的基本性质、运动特性、暴发频率、规模大小和沉积环境，它的结构和构造

是泥石流流体的结构、动力特性和成岩作用三者的联合效应。由于西南山区高速公路铁路建设的需求，从 20 世纪 80 年代初开始，国内许多专家学者对泥石流堆积物沉积构造^[11]、组分^[12]、显微特性^[13, 14]等方面进行了研究，形成了丰富的研究成果。

泥石流相对来说是一种对物源区碎屑作整体的近距离搬运和堆积体，组成泥石流固体物质的颗粒级配变化很大。据统计，粒径从 10 m 到胶体微粒，颗粒大小和颗粒的形状取决于源区碎屑的粒度组合。根据泥石流流体的粘度与流体容重，可将泥石流分为粘性、亚粘性、稀性与挟砂水流 4 种^[12]。亚粘性泥石流和粘性泥石流对源区物质作整体搬运、整体堆积，稀性泥石流则在沿程沉积时有粒度分异现象。

前人对云南东川蒋家沟粘性泥石流堆积物作了大量的研究^[12]。粘性泥石流的堆积过程介于稀性泥石流和塑性泥石流堆积过程之间的过渡形式。粘性泥石流体除个别大石块呈推移质外，其他颗粒呈悬浮质，流态种类多，层动、蠕动、紊动、滑动均有发生，并系整体或成层堆积，从而使粘性泥石流堆积体的宏观构造变得多样而复杂。两种典型泥石流沉积结构如图 1, 2 所示。图 1 为粗化分层构造，

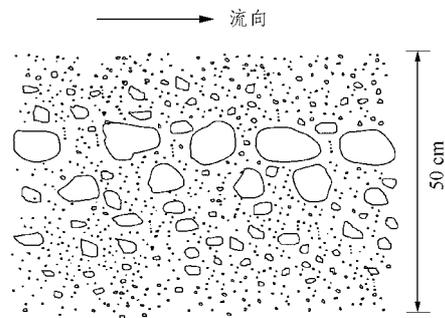


图 1 粗化分层构造(据朱平一, 1987)
Fig.1 Bedded coarsened subsiding configuration (After Zhu Pingyi, 1987)

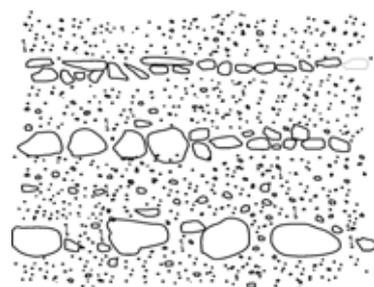


图 2 反向料级构造(据刘耕年, 1996)
Fig.2 Anti-grading configuration (After Liu Gennian, 1996)

为不同场次泥石流堆积后的“水流粗化”的结果。图 2 为反向粒级构造，上部正粒级是重力分异的结果，下部的反向粒是层流剪切的结果。

3 试验研究

以云南省小江流域泥石流分层粗化构造土层堆积体(图 2)为对象，进行滑坡起动试验。研究地点位于中国科学院东川泥石流观测站蒋家沟流域的左支沟—多照沟上游弯房子的一处粘性泥石流堆积物斜坡(图 3)。

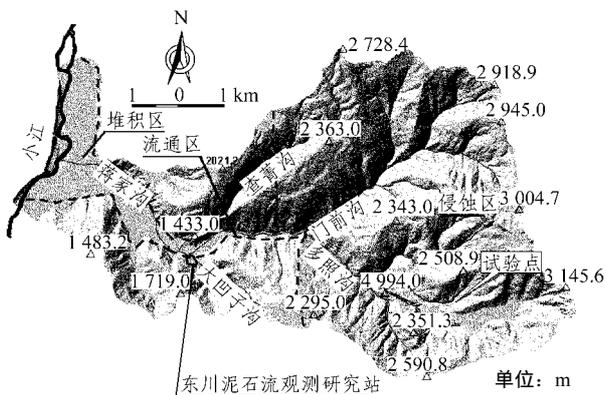


图 3 试验地点: 东川泥石流观测站左支沟—多照沟上游弯房子

Fig.3 Experiment spot: Wan House in the upper reach of Duozhao Gully—left branch gully of Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station

对堆积区原状土取样，进行室内物理力学性质试验。颗粒分析使用筛析和比重计法。试验仪器为 4.0~1.0 mm 分析筛和甲种比重计，分散剂为六偏磷酸钠。试验表明，砾石呈次磨圆角砾状，最大砾径 $\phi 60$ mm，为残坡积物，砾石含量 43.2%，粘粒含量 4.7%，均匀系数 $C_u = 972.4$ ，表明泥石流堆积区原状砾石土样为极为不均匀，但在较高围压下，细颗粒充填于粗颗粒所形成的空隙中，可形成高密度和较好的力学特性。测试结果见表 1。

三轴试验使用 TSZ30 - 2.0 应变控制式三轴仪。按仪器规格，去除 >5 mm 的泥石流堆积土，并保持 <2 mm 的土料与原状土料级配不变，用等量替换法配制接近原状土级配的试样，保证试验用砾石土的砾石含量和粘粒含量不变。对同一级配土样配制成含水量 10%、密度约为 2.0 g/cm³ 的试样，进行抽真空饱和 48 h，再上机进行反压力饱和使试样达到或接近饱和状态，最后进行不固结不排水剪 UU 试验，施加围压分别为 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 kPa，共 7 组静三轴试样。由于试样的不均匀性，饱和度无法完全达到 100%，造成测试过程中孔隙比有区别，无法得到 $\varphi_{um} = 0$ 的强度参数，考虑到强度参数 φ_{um} 和 c_{um} 在本质上的统一性，因此，试验结果按饱和度和轴向应变 5% 为破坏标准整理出不同饱和度和相同密度试样的静三轴强度参数。测试结果见表 2。

表 1 颗粒试验

Table 1 Grading experiment

粒径/mm	百分含量/%			频数	标准差	变异系数
	样号 1	样号 2	平均值			
60 - 40	2.800	2.800	2.800	2	0.00	0.00
40 - 20	12.500	12.500	12.500	2	0.00	0.00
20 - 10	16.200	16.200	16.200	2	0.00	0.00
10 - 5.0	14.500	14.500	14.500	2	0.00	0.00
5.0 - 2.0	9.700	10.700	10.200	2	0.71	0.07
2.0 - 0.5	10.000	7.500	8.750	2	1.77	0.20
0.5 - 0.25	4.300	3.500	3.900	2	0.57	0.15
0.25 - 0.075	5.600	6.600	6.100	2	0.71	0.12
0.075 - 0.005	19.800	20.900	20.350	2	0.78	0.04
<0.005	4.700	4.700	4.700	2	0.00	0.00
<i>d</i> ₆₀	6.824	6.793	6.809	2	0.02	0.00
<i>d</i> ₅₀	3.805	3.922	3.864	2	0.08	0.00
<i>d</i> ₁₀	0.007	0.007	0.007	2	0.00	0.00
<i>C</i> _u	974.800	970.000	972.400	2	3.39	0.00
<i>C</i> _c	1.288	0.552	0.920	2	0.52	0.57

表 2 抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters

土样 编号	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	试验后含水量 /%	饱和度 S_r /%	孔隙比 e	强度参数			
					c_u/kPa	$\phi_u/(^\circ)$	c_{un}/kPa	$\phi_{un}/(^\circ)$
1	2.00	13.60	101.90	0.346			8.02	3.80
2	2.00	13.10	98.30	0.346			19.30	5.30
3	2.00	12.30	91.70	0.365			31.50	5.10
4	2.00	13.30	99.30	0.367			16.50	5.20
5	2.00	13.00	97.70	0.363			20.09	3.92
6	2.10	13.70	104.00	0.361			9.26	3.52
7	2.10	13.05	100.00	0.363	8.4	43.1		
均值	2.37	15.34	115.48	0.419	8.4	43.1	17.45	4.47

砾石土的渗透系数试验使用 TST - 70 型渗透仪。土体密度按 $1.56 g/cm^3$ 配制，用等量替换法制备成接近新近沉积弱固结的土体。平均渗透系数为 $0.006 cm/s$ ，结果与细砂的渗透系数 $0.001 \sim 0.006 cm/s$ 较接近，由于松散原状土中的孔隙率应大于试验配制土，则可推测，渗透性应略大于 $0.006 cm/s$ ，是属于强渗透系数的土类。测试结果见表 3。

表 3 泥石流堆积土渗透系数试验

Table 3 Experiment on permeability coefficient of debris flow fan

测试序号	渗透系数/ $(cm \cdot s^{-1})$ 平均值/ $(cm \cdot s^{-1})$ 频数	标准差	变异系数
1	0.005		
2	0.010		
3	0.005	0.005	5
4	0.008	0.002	0.302
5	0.005		
6	0.004		

现场人工降雨滑坡起动试验于 2004 年 8 月~10 月期间完成。野外人工降雨试验设备由人工降雨装置与数据实时采集设备组成。含水量测量采用美国产的 TRASE TDR 时域水分仪，测试数据以体积含水量参数表示，由美国产的 CR10X 完成数据采集。设置 TRASE 的采样频率为 2 min/次，CR10X 的采样频率为 5 s/次。传感器在不同土层深度进行埋设。传感器埋设布置见图 4。图 4 中点划线是实地测量的土体大致滑动线。

试验中放置雨量筒 2 个，测得的降雨量分别为 140.9 和 142.6 mm，平均为 141.75 mm，降雨总历时 141 min，实际降雨强度为 60.3 mm/h。试验步骤

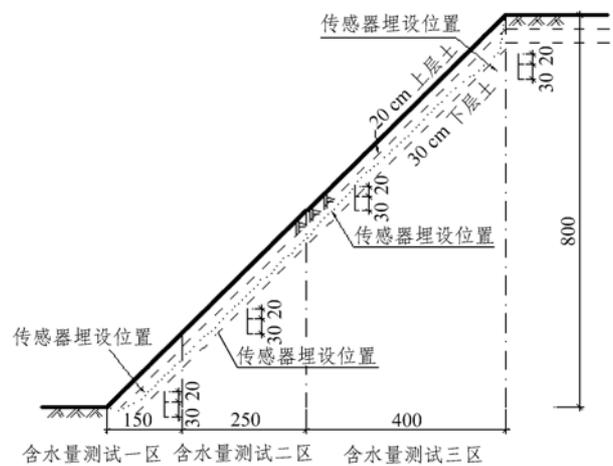


图 4 坡体分层与传感器埋设布置(单位: cm)

Fig.4 Layout of sensors and different slope beds(unit: cm)

与现象如表 4 所示。

表 4 试验步骤与现象

Table 4 Experiment program and observation

时间/(时:分:秒)	试验步骤与观测的现象
08: 38: 00	开始实施降雨
08: 43: 00	坡面出现超渗产流
09: 06: 00	中部逐渐形成细沟
09: 16: 00	上部探孔上方形成冲沟
09: 39: 00	由于风向问题调整喷头停止降雨
09: 47: 00	重新开始降雨
10: 06: 00	下部探头下方临空面上产生小崩塌
10: 20: 00	下部临空面处的再次出现尺寸为 $20 cm \times 20 cm \times 10 cm$ (长 \times 宽 \times 高)崩塌体
11: 02: 00	顶部探头出现崩塌
11: 07: 00	停止降雨

降雨停止后对坡面特征地形进行测量与土体取

样。通过测量，形成冲沟的沟床坡度为 $45^\circ \sim 46.5^\circ$ ，顶部探头处形成的崩塌的滑动面坡度为 47° ，后壁坡度为 81.5° ，明显的滑动层厚度从下至上分别为 27，24 和 17 cm。根据土层深度与坡体不同位置，实测土体发生破坏时体积含水量见表 5。

表 5 不同土层的体积含水量

Table 5 Volumetric water content of different slope beds

土层深度 (自地面线向下)	体积含水量/%			
	>8	8~4	4.0~1.5	<1.5
H1(<0.2 m)	8.9	8.3	14.7	25.7
H2(0.2~0.5 m)	8.7	11.7	14.7	23.7
H3(>0.5 m)	8.5	8.8	10.8	11.0

4 稳定性分析

在野外试验没有实时测量孔隙水压力，因此，对 Spencert 法^[15]进行修改，利用全应力法分析泥石流堆积体边坡稳定。

如图 5 所示，根据水平方向力的平衡与 Mohr-Coulomb 强度准则，可导出基本平衡方程：

$$T_i = (c_i l_i + P_i \tan \varphi'_i) / F \tag{1}$$

$$E_i = E_{i-1} + P_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i \tag{2}$$

式中： F 为安全系数， E_i 为侧推力系数。

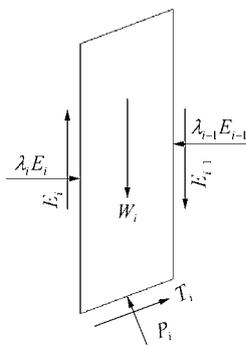


图 5 条块受力图

Fig.5 Slip equilibrium

由此可得

$$P_i = \frac{W_i - (\lambda_i - \lambda_{i-1})E_{i-1} - \frac{l}{F} c_i (\sin \alpha_i - \lambda_i \cos \alpha_i)}{\lambda_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i + \frac{l}{F} \tan \varphi'_i (\sin \alpha_i - \lambda_i \cos \alpha_i)} \tag{3}$$

其中，

$$\lambda_i = \lambda' \sin \left(\frac{x_i - x_0}{x_n - x_0} \pi \right) \tag{4}$$

整体平衡方程：

$$\sum [T_i \cos \alpha_i - P_i \sin \alpha_i] - P_w = 0 \tag{5}$$

$$\sum [(T_i \sin \alpha_i - P_i \cos \alpha_i - W_i) L_{xi} + (T_i \cos \alpha_i - P_i \sin \alpha_i) L_{yi}] - M_w = 0 \tag{6}$$

由此给出对于意滑面形心矩臂的水平与垂直分量：

$$L_{xi} = 0.5(x_i + x_{i-1}) - x_c \tag{7}$$

$$L_{yi} = y_c - 0.5(y_i + y_{i-1}) \tag{8}$$

式中： P_w 为滑坡后缘张裂隙水压力， W_w 为由水压力引起的倾覆力矩。在本文中并没有考虑坡体后缘裂隙的水压力，因此，从物理现象来看，表 6 中 1# 条块计算值中出现负值是不合现实的。这也是基于 SPENCER 条分法分析坡体稳定性的缺陷。

文[9, 10]基于 Spreadsheet 表单提供了一种实用的滑坡稳定性进行最优滑面搜索方法。在上述文献思路基础上，作者用 VBA 语言编写相应 Spencert 程序，可对条块的分层土体重量、强度指标、含水量，根据滑动面位置与深度，进行内插值计算，做稳定性自迭代分析，自动搜索最可能圆弧滑动面与非圆弧滑动面的位置。表 6 中 Microsoft Excel 表单给出了最可能圆弧滑动面计算数据与过程。计算所取用的参数见表 2，5。

在表 6 中单元 \$B\$11: \$D\$11 和 \$S\$4: \$T\$4 中分别输入任意圆心坐标、侧压力系数、安全系数值 $x_c = 9$ ， $R = 13$ ， $\lambda_a = 0$ ， $F = 1$ 。激活 Microsoft 内建的规划求解器(Solver)，设定目标单元格 \$U\$4 为最小值，约束条件 \$S\$7: \$T\$7=0， $\text{Radius} \geq y_c$ ， $X_{\min} = 0$ ， $y_c = 8$ ， $F \geq 1$ ，单击求解器选项菜单，选中“自动比例”，求解后可得到最危险滑动面 $F = 1.9$ ， $\lambda_a = 0.7$ 。

最可能的非圆弧滑面在已知圆弧滑面的基础上，改变求解器自动搜索选项，给定约束条件 \$D\$20: \$D\$44 ≤ \$C\$20: \$C\$44， D44=0$ ， O22: O44 ≥ 0， S7: T7=0$ ， $F \leq 2$ ， $F \geq 0$ ，设定可变单元格 T4， S4$ ， B11: D11，目标单元格不变，求解后可得到最优非圆弧滑面的安全系数 $F = 1.7$ ，比圆弧滑面略小，侧向推力系数 $\lambda_a = 0.8$ ，大于圆弧滑面。图 6 给出了 3 个从不同初始圆弧滑面程序搜索得到的非圆弧滑面，相对坐标差值处于在千分位以后，因此，计算结果相当稳定。$$

将坡面坐标减去 0.5 m 作为实际滑动面坐标，来取代表 6 中滑坡面坐标 \$D\$20: \$D\$44，进行实际滑面上土体的稳定性分析。在规划求解器(Solver)中，设定目标单元格 \$U\$4 为最小值，约束条件 \$S\$7:

表 6 条块稳定性计算结果
Table 6 Stability calculation of slicing

18	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
19	x	y_{top}	y_{bot}	ω_1	ω_2	ω_3	c	φ	b	h	W	α/rad	l	P	σ	T	E	λ'	Ma	L_x	L_y	Flevel	Mnum
20	8.00	8.00	8.00														0.00	0.00					
21	7.67	7.67	5.71	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	0.98	6.55	1.43	2.31	-4.86	-2.10	7.92	-5.95	0.10	0.73	7.83	1.14	5.95	11.35
22	7.34	7.34	4.80	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	2.25	15.05	1.22	0.97	12.28	12.64	10.51	1.97	0.19	0.96	7.50	2.74	-7.92	-28.91
23	7.00	7.00	4.13	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	2.71	18.13	1.11	0.75	14.15	18.77	10.47	10.02	0.29	1.08	7.17	3.54	-8.05	-46.24
24	6.67	6.67	3.58	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	2.99	20.00	1.03	0.64	14.73	22.92	10.27	17.28	0.37	1.17	6.83	4.15	-7.26	-54.60
25	6.34	6.34	3.11	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.16	21.17	0.95	0.57	14.97	26.13	10.07	23.58	0.45	1.23	6.50	4.66	-6.30	-57.03
26	6.00	6.00	2.71	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.26	21.85	0.88	0.52	15.13	28.89	9.94	28.92	0.53	1.26	6.17	5.09	-5.34	-55.23
27	5.67	5.67	2.35	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.31	22.16	0.82	0.49	15.32	31.42	9.87	33.34	0.59	1.28	5.83	5.47	-4.42	-50.30
28	5.34	5.34	2.04	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.31	22.17	0.76	0.46	15.56	33.87	9.86	36.88	0.65	1.28	5.50	5.81	-3.54	-43.03
29	5.00	5.00	1.75	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.27	21.94	0.70	0.44	15.85	36.29	9.91	39.55	0.69	1.27	5.16	6.11	-2.67	-34.06
30	4.67	4.67	1.50	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.21	21.50	0.65	0.42	16.20	38.70	10.00	41.37	0.72	1.25	4.83	6.37	-1.82	-23.89
31	4.34	4.34	1.27	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.11	20.87	0.60	0.40	16.56	41.05	10.11	42.32	0.74	1.22	4.50	6.61	-0.95	-12.99
32	4.00	4.00	1.07	8.80	8.80	8.80	8.36	43.08	0.33	3.00	20.08	0.55	0.39	16.90	43.26	10.23	42.39	0.75	1.18	4.16	6.83	-0.07	-1.80
33	3.67	3.67	0.89	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	2.86	19.15	0.50	0.38	17.19	45.24	10.32	41.56	0.74	1.15	3.83	7.02	0.83	9.21
34	3.33	3.33	0.73	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	2.69	18.07	0.45	0.37	17.33	46.71	10.35	39.82	0.72	1.11	3.50	7.19	1.73	19.60
35	3.00	3.00	0.58	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	2.51	16.86	0.41	0.36	17.25	47.50	10.28	37.21	0.69	1.07	3.16	7.35	2.62	28.88
36	2.67	2.67	0.46	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	2.31	15.52	0.36	0.36	16.88	47.34	10.07	33.77	0.65	1.04	2.83	7.48	3.44	36.57
37	2.33	2.33	0.35	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	2.10	14.08	0.32	0.35	16.15	46.00	9.67	29.62	0.59	1.01	2.50	7.60	4.15	42.22
38	2.00	2.00	0.25	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	1.87	12.52	0.27	0.35	15.00	43.30	9.08	24.94	0.53	0.99	2.16	7.70	4.68	45.51
39	1.67	1.67	0.17	10.80	10.80	10.80	8.36	43.08	0.33	1.62	10.86	0.23	0.34	13.42	39.16	8.26	19.96	0.45	0.97	1.83	7.79	4.98	46.23
40	1.33	1.33	0.11	11.00	11.00	11.00	8.36	43.08	0.33	1.36	9.10	0.19	0.34	11.43	33.65	7.25	14.97	0.37	0.96	1.50	7.86	4.99	44.39
41	1.00	1.00	0.06	11.00	11.00	11.00	8.36	43.08	0.33	1.08	7.24	0.15	0.34	9.10	27.01	6.08	10.28	0.29	0.96	1.16	7.91	4.69	40.19
42	0.67	0.67	0.03	11.00	11.00	11.00	8.36	43.08	0.33	0.79	5.29	0.10	0.34	6.56	19.57	4.80	6.19	0.19	0.97	0.83	7.96	4.09	33.97
43	0.33	0.33	0.01	23.82	23.82	23.82	17.45	4.47	0.33	0.48	3.26	0.06	0.33	3.95	11.81	3.29	3.15	0.10	1.00	0.50	7.98	3.04	24.73
44	0.00	0.00	0.00	24.07	24.07	24.07	17.45	4.47	0.33	0.16	1.10	0.02	0.33	1.34	4.02	3.18	0.00	0.00	1.00	0.16	8.00	3.15	25.24

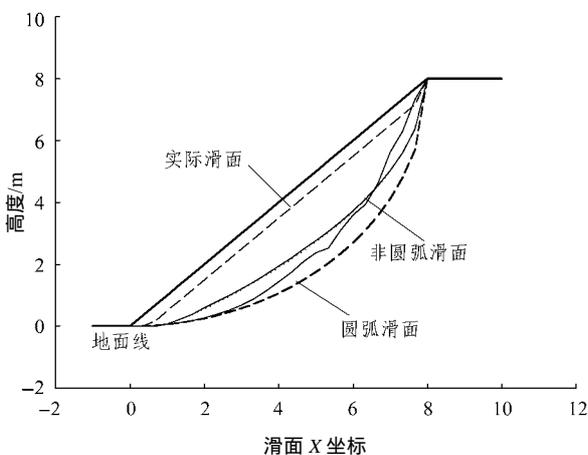


图 6 Solver 搜索的滑面

Fig.6 Slip surface obtained by Solver

$ST\$7=0$, 可变单元格 $SS\$4$: $ST\$4$, 规划求解器找不到精确解, 但是给出了一个最接近的迭代值, $F = 4.0$, $\lambda_a = 1.8$ 。

5 滑坡失稳的机理

由于在求解器约束条件中, 限定圆弧滑面的剪出口在坡脚 $X = 0$ 的位置, 求解得到的最不稳定圆弧滑面的后缘和剪出口坐标位置与实际观察一致。但是, 条块高度 h ($SK\$21$: $SK\$44$) 最大值为 3.31 m, 最小值为 0.16 m, 与实际观测滑面位置(图 6 中虚线)不符。最可能的非圆弧滑面的位置较圆弧滑面线更接近边坡侧面, 但是仍与实际观测面位置有一定差

距。

从实际滑面坐标分析滑体的稳定性, 根据式(1)可知, 滑动面上抗滑力主要取决于滑动面土体的抗剪强度, 在抗剪强度降低 4 倍以下时, 可得到 $\Sigma M = 0.2$, $\Sigma F = 0$, 且侧推力系数达到 3.4, 坡体接近临界状态, 才有可能形成不稳定的滑动面。当实际滑面坐标取为斜坡侧面高程 40 cm 以下时, 可以找到一解: $F = 4.7$, $\lambda_a = 1.8$, 并满足所有约束条件与最优状况。分别减少土层厚度值, 可得出不同的稳定性系数, 如表 7 所示。

表 7 土层厚度、安全系数的关系

Table 7 Relationship between the height of soil and factor of safety

土层厚度/cm	λ_a	F
70	1.8	2.7
60	1.9	3.0
50	1.8	4.0
40	2.4	4.8
30	1.8	6.1
20	1.9	9.2

从上述数据分析可推出以下结论:

(1) 随着土层厚度的减少, 滑面以上泥石流堆积体表层土体因含水量提高, 相对重量增加, 但是, 平行坡面的切向力不能克服土体的抗力产生滑动, 并且稳定系数随上覆土层重量的减低逐步上升。

(2) 斜坡表层土体 50 cm 内的滑动不是由于滑面以上土体整体极限平衡破坏产生的。

(3) 整体极限平衡破坏主要发生在土层厚度大于 1 m 深度以上, 最有可能的为非圆弧滑面, 如图 6 所示。

(4) 泥石流堆积体边坡发生的机理不能完全归之于滑动面上土体抗剪强度原理, 土力学中的条分法不能完全解释破坏的机制。

(5) 在数值分析中没有考虑水力坡降引起的渗透力, 因此, 推测表层土体主要是水力渗透力引起单个颗粒或团块发生移动, 然后相互影响到一定深度, 形成相对稳定的厚度的土体发生破坏。

由上述分析可知, 处于弱固结状态泥石流堆积土边坡失稳的机制可能如下: 当发生短历时强暴雨, 泥石流堆积土地表形成超渗产流。上层松散泥石流堆积土的渗透系数较大, 坡顶与坡脚高差形成较大的水力梯度, 渗透力推动细颗粒向深度运移。由于不同场次泥石流堆积后的“水流粗化”的结果, 在经历快速紊流渗透后, 局部堵塞以至于形成相对不

透水层, 坡脚形成渗流出口, 最先浅层土体发生重力剪切, 相当于处于不排水不固结条件下土体发生剪切破坏, 砾石土在剪切中呈现体缩的趋势, 产生正值的孔隙水压力, 不断增加直到稳定值, 相应地, 土中的有效应力不断减少, 强度不断降低, 最后接近于 0, 以至于发生失稳破坏, 最后因为动力作用, 连续牵连至下层含水量变化小的土层和溯源滑动。

6 结论与讨论

(1) 由于三轴仪的规格限制, 采用等量替换法后的土体强度将与原级配有有一定差距, 本文没有做更多的研究。

(2) 在用条分法作数值分析时, 没有考虑坡体后端张裂隙中水推力的力矩作用, 在表 6 中 1[#] 条块出现张力, 与实际观测不符。但是, 对坡体的整体稳定分析影响不大。

(3) 泥石流堆积土边坡失稳破坏可能主要取决于其弱固结状态的细观结构和非饱和状态, 因此, 如何确定弱固结宽级配砾石土的强度, 将值得更深入的研究。

致谢 本文在中国东川泥石流观测站的支持下完成, 参加试验的人员还有冯至立博士、陈杰博士。文章采纳的岩土体物理参数由中国科学院成都山地灾害与环境研究所岩土力学实验室刘中港工程师、黄蓉高级试验师提供。本文的 VBA 程序得到了新加坡南洋理工大学 Low Bak Kong 博士的调试。加拿大达尔豪斯大学矿产工程系主任 Stevon Zhou 教授对本文的英文摘要进行了修改。在此, 对他们的支持表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 崔鹏, 杨坤, 朱颖彦, 等. 西部山区交通线路的泥石流灾害及减灾对策[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 326 - 331.(Cui Peng, Yang Kun, Zhu Yingyan, et al. Debris flow hazards along the traffic lines in mountain areas of Western China[J]. Mountain Journal, 2004, 22(3): 326 - 331.(in Chinese))
- [2] 李天池, 章书成, 康志成. 滑坡型泥石流[A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第四号)[C]. 北京: 科学出版社, 1984. 171 - 177.(Li Tianchi, Zhang Shucheng, Kang Zhicheng. Landslide-type debris flow[A]. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology. Chinese Academy of Sciences (No.4)[C]. Beijing:

- Sciences Press, 1984. 171 - 177.(in Chinese))
- [3] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 519 - 522.(Li Shude. Formation mechanism of the landslide type of debris flow[J]. Beijing University Journal(Natural Science), 1998, 34(4): 519 - 522.(in Chinese))
- [4] 胡发德, 田连权. 蒋家沟泥石流源地滑坡类型初探[A]. 见: 泥石流观测与研究[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 64 - 65. (Hu Fade, Tian Lianquan. The primitive research on landslide at the location of headstream of debris flow in Jiangjia Gully[A]. In: Debris Flow Observation and Research[C]. Beijing: Science Press, 1996. 64 - 65.(in Chinese))
- [5] 胡明鉴, 张平仓, 汪 稔. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 831 - 1 834.(Hu Mingjian, Zhang Pingcang, Wang Ren. Cause of frequent occurrence of gravel slope landslide in Jiangjia Gully and experiment simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 831 - 1 834.(in Chinese))
- [6] 郭仲三, 田连权, 郭四稳, 等. 蒋家沟泥石流土力学类泥石流起动的动力学模型[A]. 见: 杜榕桓编. 泥石流观测与研究[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 64 - 65.(Guo Zhongsan, Tian Lianquan, Guo Siwen, et al. The dynamics model for the initiation of soil-mechanics-type debris flow in Jiangjia Gully[A]. In: Du Rongheng ed. Debris Flow Observation and Research[C]. Beijing: Science Press, 1996. 64 - 65. (in Chinese))
- [7] Richard M. Iverson M E, Reid R G. Debris-flow mobilization from landslides[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 1997, 25: 85 - 138.
- [8] Iverson R M. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245 - 296.
- [9] Low B K, Tang W H. Efficient reliability evaluation using spreadsheet[J]. J. Engrg. Mechanics, 1997, 123(7): 749 - 752.
- [10] Low B K, Gilbert R B, Wright S G. Slope reliability analysis using generalized method of slices[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 350 - 363.
- [11] 吴积善. 泥石流体的结构[A]. 见: 泥石流论文集[C]. 重庆: 科学技术文献出版重庆分社, 1981. 58 - 66.(Wu Jishan. The structure of debris flow[A]. In: Memoirs of Debris Flow[C]. Chongqing: Chongqing Branch of Science Technology Press, 1981. 58 - 66.(in Chinese))
- [12] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 94 - 100.(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. The Research and Prevention for Debris Flow[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 94 - 100.(in Chinese))
- [13] 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都: 成都地图出版社, 1993. (Tian Lianquan, Wu Jishan, Kang Zhicheng, et al. The Erosion, Transportation and Deposition of Debris Flow[M]. Chengdu: Chengdu Map Press, 1993.(in Chinese))
- [14] 崔之久. 泥石流沉积与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.(Cui Zijiu. Debris Flow Deposition and Environment[M]. Beijing: Ocean Press, 1996.(in Chinese))
- [15] Spencer E. The line criterion in embankment stability analysis[J]. Geotechnique, 1973, (23): 85 - 100.