

# 基于拉剪强度同等折减法的滑坡稳定性分析

曾一芳, 王 鹏, 明俊男, 赵 桦

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

**摘要:**以攀枝花教师街滑坡为背景,考虑土体抗拉强度的影响,结合抗剪强度,采用“拉剪强度同等折减法”来研究滑坡的稳定性。通过室内试验,分析了含水率对教师街滑坡不同岩土层的影响规律,发现滑带层土体的内摩擦角和粘聚力受水的作用更加显著。通过利用有限差分软件 FLAC 和拉剪同等折减法,得到了教师街滑坡的拉剪临界折减系数、临界内摩擦角、临界粘聚力;同时,还发现教师街滑坡对土体的内摩擦角敏感度最高,但是抗拉强度的影响和粘聚力很接近,不容忽视;滑坡坡肩位移大于坡脚位移,应注意坡肩位移的变化。

**关键词:**拉剪强度同等折减法;滑坡;稳定性分析;含水率;抗拉强度指标;粘聚力;内摩擦角

**中图分类号:**P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)02-0084-05

**Landslide Stability Analysis Based on Equal Reduction Method of Tensile and Shear Strength/ZENG Yi-fang, WANG Peng, MING Jun-nan, ZHAO Hua** (State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Based on the background of the landslide of Panzhibua, considering the influence of soil tensile strength, combined with the shear strength and using “equal reduction method of tensile shear strength”, the landslide stability is studied in this paper. Through the indoor experiment, the influence laws of moisture content on the different rock and soil layers of the landslide are analyzed; it is found that the internal friction angle and cohesion of the sliding belt soil are more obvious. By using the finite difference software FLAC and equal reduction method of tensile shear strength, the landslide tensile shear critical reduction coefficient, critical internal friction angle and the critical cohesion of the landslide are obtained; it is also found that the landslide there is most sensitive to the internal friction angle of the soil, but the influence force of the tensile strength and the cohesion are very close, so that it can not be neglected. The slope shoulder displacement is greater than the slope base displacement and the slope shoulder displacement changes should be noticed.

**Key words:** equal reduction method of tensile shear strength; landslide; stability analysis; moisture content; tensile strength index; cohesion; internal friction angle

## 0 引言

滑坡失稳的原因主要有内部和外部两个因素。内部因素主要是滑坡岩土体的性质、组成成分、结构、地应力及裂纹等;外部因素主要有地震、水力条件和人类活动等。

水又是诱发浅表层滑坡的主要因素,对滑坡的影响分为两方面:一方面是土体在雨水作用下力学性质发生改变,强度降低;另一方面是雨水使得土体重度增加,并产生渗透力作用<sup>[1]</sup>。对滑坡稳定性分析的方法主要有极限平衡分析法、有限元强度折减分析法等。有限元强度折减法不仅可以确定滑坡的安全系数,还可以自动寻找滑坡潜在破坏位置<sup>[2-5]</sup>;对有限元强度折减法计算滑坡稳定性的判据也有相应的适用范围,并且在此基础上提出了改进方法,以

提高数值计算的精准性<sup>[6-7]</sup>。

滑坡在变形过程中,滑坡后缘、滑坡坡面等位置会出现明显拉裂缝,甚至贯通拉裂缝,这一现象的出现都与土体的抗剪强度和抗拉强度有重要关系。但由于滑坡土体抗拉强度相对较小,大多数情况下被忽略,因此,这增加了滑坡不稳定的潜在因素。到目前为止,几乎还没有学者结合具体滑坡来分析土体抗拉强度对滑坡稳定性的影响。因此,本文根据攀枝花盐边县教师街浅层滑坡的室内试验和现场实践,研究含水率对滑坡稳定性内在因素的影响关系;建立数值模型时考虑土体的张拉屈服破坏情况,采用具有安全储备的有限元折减法——“拉剪强度同等折减法”<sup>[6]</sup>来计算滑坡稳定性,分析抗拉强度、粘聚力和内摩擦角对滑坡稳定性的影响情况。

收稿日期:2017-09-09;修回日期:2017-11-24

基金项目:四川省 2012 第四批重大地质灾害勘察项目(编号:GC20121127014)

作者简介:曾一芳,男,汉族,1992 年生,硕士研究生,研究方向为岩土体稳定性及工程效应,四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号,906274360@qq.com。

## 1 滑坡工程地质条件

教师街浅层滑坡主要由松散的坡积土、洪积堆

积土组成。根据现场钻孔及调查资料,教师街浅层滑坡地质剖面见图 1,滑坡区工程地质条件如下。

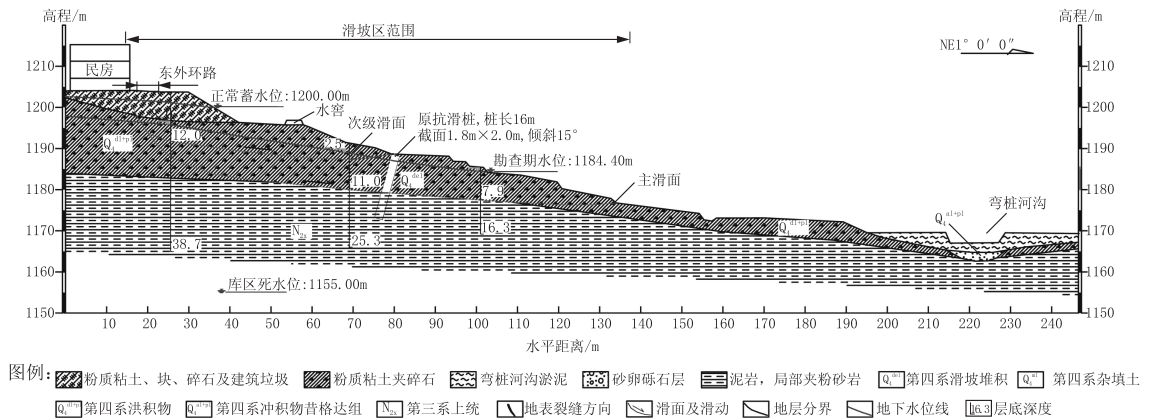


图 1 滑坡工程地质剖面

(1)人工填土层:棕红、红褐色,局部灰黄色,主要由粉质粘土组成,含少量碎石及砖块、混凝土、瓦等建筑垃圾。层厚 5.0~11.20 m。为修建渔门集镇时的弃土(堆填时间约 15 年)以及滑坡滑动后居民自发的填土。

(2)粉质粘土夹块碎石层:黄、褐红、棕红、砖红、灰白、灰色,主要由粉质粘土组成,稍湿,可塑状,局部软塑、硬塑。含 3%~12%的辉长岩、砂岩碎块石,中等风化,较坚固,棱角状,见铁锰质氧化膜。局部段块、碎石富集,见少量卵石。该层厚度 7.4~14.0 m,主要分布在滑坡区南西侧及北侧。

(3)岩层全风化带地层:主要由粘土矿物、长石、石英等组成,泥质、粉砂质结构,薄—中厚层状构造,具水平层理,泥质弱胶结,局部夹薄层粉砂岩,具有遇水软化、暴晒干裂等特征。该层是组成滑带的主要物质。

(4)强风化及中等风化层:青灰、深灰色。矿物成分主要为绢云母,次为绿泥石及炭质。鳞片变晶结构,薄—中厚层平行构造。岩层倾向 60°~80°,少数在 85°以上,倾向 165°,大部分矿物已风化蚀变,风化裂隙发育,裂面见铁锰质浸染。该层岩土体含水量较高,接近饱和状态。

## 2 室内试验

### 2.1 试验仪器

#### 2.1.1 含水率试验仪器

(1)电子天平(称量 200 g,最小分度 0.01 g);  
(2)电热烘箱(应能控制温度为 105°~110°);(3)具

有密封盖的称量盒。

#### 2.1.2 剪切试验仪器

(1)应变控制式直剪仪:由剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量测系统组成;(2)环刀:内径 61.8 mm,高度 20 mm;(3)位移测量设备:量程 10 mm、最小分度 0.01 mm 的百分表。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 含水率试验方法

(1)用原状土制取 24 组试样,其中滑体土试样 12 组,滑带土试样 6 组,滑床土试样 6 组。每组试样 50 g,放入称量盒,称盒加试样质量  $m_0$ ,准确至 0.01 g;(2)将称量盒及试样置于烘箱内,在 105°~110°恒温下烘干;(3)将称量盒放入干燥器内冷却至室温,称盒加干土质量  $m_d$ ,准确至 0.01 g。试样含水率  $\omega_0$  计算公式如下,结果记录在表 1 中。

$$\omega_0 = (m_0 / m_d - 1) \times 100 \quad (1)$$

### 2.2.2 剪切试验方法

(1)将制取好的试样放入剪切盒,并在试验仪器上安装水平位移测量装置,调至零;(2)在剪切盒上施加垂直剪切压力,拔去固定销,立即以 0.8 mm/min 的剪切速度进行剪切,使试样在 3~5 min 内剪损并结束试验。

## 2.3 试验结果分析

根据表 1 中成果数据可以得到含水率-粘聚力 ( $\omega - c$ ) 和含水率-内摩擦角 ( $\omega - \varphi$ ) 的关系图,分别见图 2,图 3。

从图 2、图 3 中可以看出滑坡在竖直方向各个滑层土体的粘聚力和内摩擦角与含水率的关系:

表1 教师街滑坡土样试验结果

试样编号	含水率 $\omega$ / %	抗剪强度		
		粘聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	
滑体土试样	人 HT1	56.4	12.9	7.6
	工 HT2	51.4	13.6	8.1
	填 HT3	42.8	17.1	9.3
	土 HT4	34.2	20.5	10.9
	HT5	41.2	14.9	8.3
	HT6	40.8	15.4	8.5
	粉 HT7	37.0	17.5	9.6
	质 HT8	29.3	21.6	11.6
	粘 HT9	28.5	22.3	12.2
	土 HT10	28.0	23.2	12.5
	HT11	27.7	24.1	12.9
	HT12	26.1	26.2	13.9
滑带土试样	HD1	47.8	12.1	6.4
	粉 HD2	44.7	13.4	7.1
	质 HD3	40.1	14.6	7.9
	粘 HD4	34.8	17.2	8.8
	土 HD5	32.1	19.1	9.4
	HD6	28.9	20.6	10.1
滑床土试样	HC1	36.1	26.9	15.4
	HC2	35.3	28.2	15.6
	HC3	32.8	31.3	16.1
	HC4	30.8	33.6	16.7
	HC5	29.5	34.9	17.4
	HC6	28.3	37.4	17.9

每一土层中的粘聚力和内摩擦角都随着含水率的增大而减小;昔格达组泥岩虽然含水率高,接近饱和状态,但是其最大含水率在 36.1% 左右,远小于其他三组土层的最大含水率,最小粘聚力和最小内摩擦角也分别大于其他三组土层的最大粘聚力和最大内摩擦角。因此,昔格达组泥岩作为滑床是相对稳定的,为教师街滑坡提供了地质基础。

人工填土层的含水率变化范围在 34.2% ~ 56.4%,相对于其他三组土层,含水率变化范围是最大的;但是在相同的含水率条件下,人工填土层的粘聚力和内摩擦角都分别大于滑体粉质粘土层和滑带粉质粘土层的粘聚力和内摩擦角;其原因是人工填土层是由碎石及砖块、混凝土、瓦等建筑垃圾和弃土组成的,而这些建筑垃圾磨圆度较差,相互之间的嵌入形成的咬合作用强烈,所以填土层的内摩擦角较大;在建筑垃圾之间充填的弃土为粘土,而粘土的粘聚力较高,使得弃土在填土层中形成连接桥梁的作用,保证了填土层的粘聚力。因此,人工填土层相对于滑体粉质粘土层和滑带粉质粘土层是稳定的。

滑体粉质粘土层在位置上位于人工填土层和滑带粉质粘土层之间,从图 2 和图 3 中可以看出:在相同的含水率条件下,其粘聚力和内摩擦角数值大小也介于这两者之间,滑带粉质粘土层的粘聚力和内摩擦角最小。其原因是滑带的粉质粘土与滑体的粉质粘土本来是同一种粉质粘土,但是在水和压力的作用下,导致粉质粘土层与泥岩层接触面附近的粉质粘土力学性质发生改变,具体表现为粘土颗粒之间的连接力和咬合作用减弱,使得接触面附近粉质粘土的粘聚力和内摩擦角减小,从而形成相对于泥岩层和滑体粘土层的弱力学性质层面——滑带粘土层。

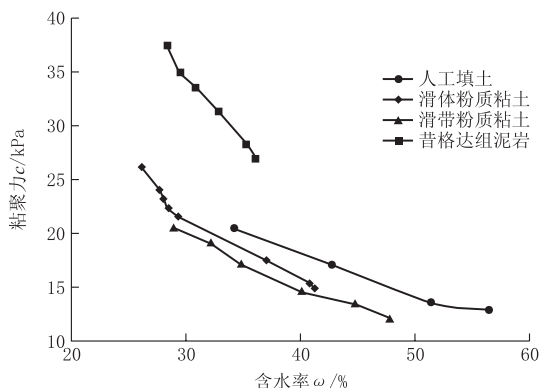


图2 滑坡区试样土含水率与粘聚力关系

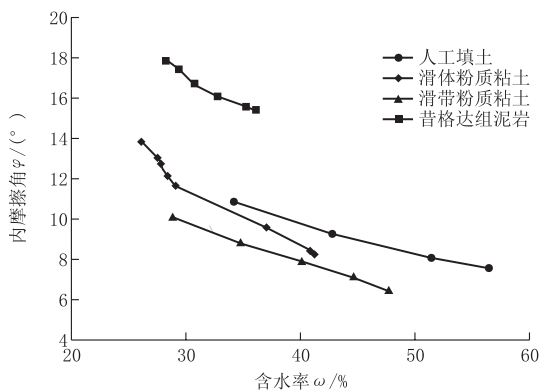


图3 滑坡区试样土含水率与内摩擦角关系

### 3 数值模拟试验

#### 3.1 数值模拟方案设计

以往的强度折减法过分重视边坡的剪切破坏特征,忽略了边坡的张拉破坏特征,而边坡的破坏形式不是单纯的剪切破坏,往往为“张拉+剪切”破坏(即使一般边坡也有部分位置发生张拉破坏),根据拉剪强度同等折减的强度折减法原理,应把滑坡的抗拉强度指标也作为折减的一部分。定义  $K$  为折减系数,有折减公式如下:

$$\begin{cases} c_f = c/K \\ \varphi_f = \arctan(\tan\varphi/K) \\ T_f = T/K \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c_f$ ——滑坡土体折减后的粘聚力, $\varphi_f$ ——土体折减后的内摩擦角, $T_f$ ——土体折减后的抗拉强度指标。

利用表 1 中的数据进行整理分析,得出滑坡土体折减结果如表 2 所示。

表 2 滑坡折减参数设计

折减系数 $K$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度指标 $T/\text{kPa}$
1.00	17.800	9.900	25.100
1.05	16.952	9.429	23.905
1.10	16.182	9.000	22.818
1.15	15.478	8.609	21.826
1.20	14.833	8.250	20.917
1.25	14.240	7.920	20.08
1.30	13.692	7.615	19.308
1.35	13.185	7.333	18.593

本文数值模型将利用 FLAC 软件根据实测滑坡剖面进行建立,模型长 75 m,高 36 m,共有三层结构:人工填土层,滑体及滑带层,滑床层;模型采用 Mohr - Coulomb 准则;边界条件为:左右边界限制 X 方向的位移,底边界限制 X、Y 方向的位移,在上边界加载力边界条件,来模拟滑坡顶面的堆载作用。模拟折减计算过程见图 4。

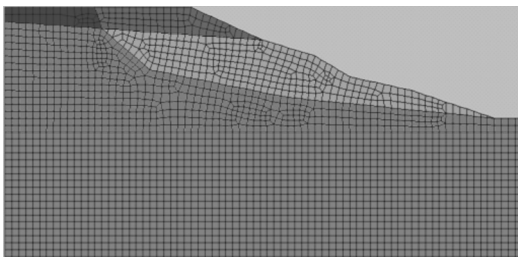


图 4 数值模拟网格划分

### 3.2 模拟计算结果分析

#### 3.2.1 滑坡临界折减系数分析

根据模拟计算结果可以得到如表 3 中数据,并可得到攀枝花教师街滑坡的折减系数-滑坡稳定系数图( $K - F$ ),抗拉强度指标-滑坡稳定系数图( $T - F$ ),粘聚力 & 内摩擦角-滑坡稳定系数图( $c \& \varphi - F$ )。

从图 5 中可以看出:随着折减系数的增加,滑坡稳定性逐渐减小。当滑坡折减系数  $K = 1$  时,滑坡稳定性系数  $F = 1.316$ ,此时滑坡稳定,未出现失稳

表 3 滑坡基于抗拉剪折减系数法的数值模拟结果

折减系数 $K$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度指标 $T/\text{kPa}$	计算稳定系数 $F$	滑坡坡肩位移 $S_1/\text{m}$	滑坡坡脚位移 $S_2/\text{m}$
1.00	17.800	9.900	25.100	1.316	0.0100	0.00100
1.05	16.952	9.429	23.905	1.241	0.0136	0.00115
1.10	16.182	9.000	22.818	1.186	0.0154	0.00420
1.15	15.478	8.609	21.826	1.137	0.0207	0.00567
1.20	14.833	8.250	20.917	1.091	0.0256	0.00684
1.25	14.240	7.920	20.080	1.049	0.0340	0.00894
1.30	13.692	7.615	19.308	1.011	0.0600	0.01460
1.35	13.185	7.333	18.593	0.975	0.2100	0.04700

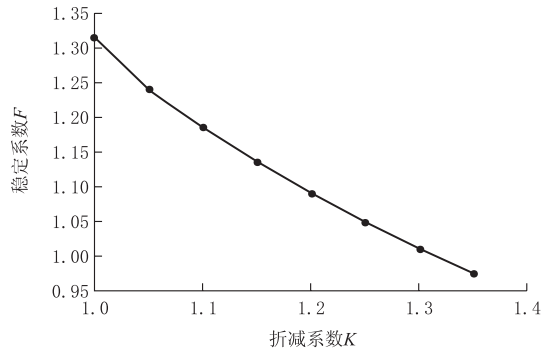


图 5 滑坡折减系数与稳定系数关系

现象;当折减系数逐渐减小到 1.3 时,滑坡稳定系数  $F = 1.011$ ,此时滑坡处于稳定与失稳的平衡状态,但滑坡仍保持稳定;在折减系数  $K = 1.35$  时,滑坡稳定性系数  $F = 0.975$ ,此时滑坡失稳,出现滑动。因此,通过抗拉剪折减系数法的数值模拟得出:教师街滑坡的最终安全系数为 1.3,即粘聚力  $c \geq 13.692 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi \geq 7.615^\circ$ ,抗拉强度指标  $T \geq 19.308 \text{ kPa}$ 。

#### 3.2.2 滑坡影响因子敏感度分析

从图 6,图 7 分析滑坡稳定性影响因子( $c$ 、 $\varphi$  和  $T$ )可以发现:滑坡稳定系数都分别随着粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和抗拉强度指标  $T$  的减小而减小。从图 6 中可以看出:当抗拉强度指标  $T = 25.1 \text{ kPa}$  时,滑坡稳定系数  $F = 1.316$ ;当  $T = 18.593 \text{ kPa}$  时,滑坡稳定系数  $F = 0.975$ 。则可以得到抗拉强度指标  $T$  与滑坡稳定性系数  $F$  之间的敏感度  $S_T = \Delta T / \Delta F = 0.064$ ;同理分析粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  分别与滑坡稳定系数  $F$  之间的敏感度有: $S_c = 0.074$ ,  $S_\varphi = 0.133$ 。通过以上灵敏度的分析可知:攀枝花教师街滑坡对土体内摩擦角  $\varphi$  的敏感度最高,对土体抗拉强度指标  $T$  和粘聚力  $c$  的敏感度相接近,这也说明土体抗拉强度对滑坡稳定性的影响是不容忽视的,

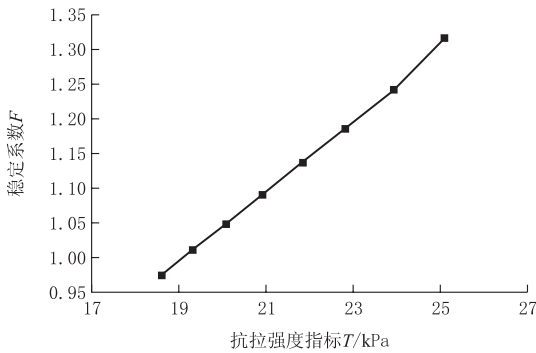


图6 滑坡抗拉强度与稳定系数关系

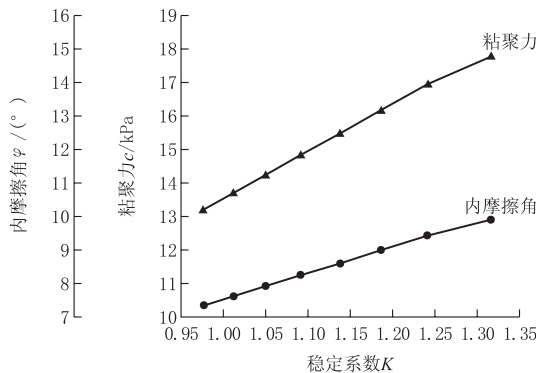


图7 粘聚力和内摩擦角与稳定系数关系

应该加以重视。

### 3.2.3 滑坡坡肩和坡脚位移分析

分析图8滑坡坡肩和坡脚位移与折减系数的关系可知:坡肩位移  $S_1$  和坡脚位移  $S_2$  随着折减系数  $K$  的增大而增大;在相同折减系数条件下,坡肩位移大于坡脚位移;在折减系数  $K=1\sim 1.3$  时,  $S_1$  从 0.01 m 增加到 0.06 m,  $S_2$  从 0.001 m 增加到 0.0146 m,当  $K=1.35$  时,  $S_1=0.21$  m,  $S_2=0.047$  m;由此可知,坡肩位移和坡脚位移都在  $K=1.35$  时发生了跳跃式增长,这点从图8中也可看出。因此,可以判断滑坡在  $K=1.35$  时发生破坏变形,因此应注意滑坡坡肩的位移变化。

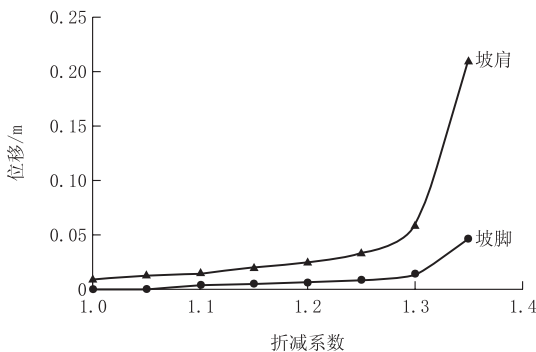


图8 折减系数与坡肩和坡脚位移关系

## 4 结论

通过攀枝花教师街滑坡室内试验和数值模拟分析,可以得出如下结论:

(1)滑坡在滑动过程中,后缘和坡面常出现拉裂缝,甚至贯通拉裂缝,这与土体抗剪强度和抗拉强度均有重要关系。所以普通有限元强度折减法不能完全保证滑坡稳定性计算结果的有效性。因此,采用考虑土体抗拉强度的折减系数法,即拉剪强度同等折减法来分析滑坡稳定性更科学合理。

(2)通过室内试验,分析了含水率与不同土层的粘聚力和内摩擦角的关系发现:滑床的泥岩层与滑体的粉质粘土层之间形成了一个弱力学层面——滑带层,滑带层的粘聚力的和内摩擦角远小于上下两层,尤其是在水的影响作用下,粘聚力和内摩擦角显著减小,这是导致滑坡失稳的根本原因。

(3)利用抗拉剪滑坡强度有限元折减法分析发现:教师街滑坡临界安全折减系数  $K=1.3$ ,临界粘聚力  $c=13.692$  kPa,临界内摩擦角  $\varphi=7.615^\circ$ ,临界抗拉强度指标  $T=19.308$  kPa。

(4)通过滑坡含水率影响因子敏感度的分析发现:滑坡土体内摩擦角  $\varphi$  对滑坡稳定性影响最显著;滑坡土体抗拉强度指标  $T$  对滑坡稳定性产生了与粘聚力相似的影响程度,因此滑坡土体抗拉强度对滑坡的影响是十分重要的,应加以重视。

(5)对滑坡坡肩位移  $S_1$  和坡脚位移  $S_2$  分析发现:  $S_1 > S_2$ ,并且二者都在折减系数为 1.35 时位移发生突变,呈跳跃式增长,可以判定此时滑坡失稳,因此应注意滑坡坡肩和坡脚的位移变化。

## 参考文献:

- [1] 许建聪,尚岳全,陈侃福,等.强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3246-3251.
- [2] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):254-260.
- [3] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [4] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [5] Ugai K. A method of calculation of total safety factor of slope by elasto-plastic FEM[J]. Soils & Foundations, 1989, 29(2): 190-195.
- [6] 陈力华,靳晓光.有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J].土木工程学报,2012,(9):136-146.
- [7] 袁维,李小春,白冰,等.一种考虑拉破坏的强度折减法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,(S1):3009-3014.