

顺层斜坡溃屈变形物理模拟及影响因素敏感性分析

杜应琼, 任光明, 杜飞, 朱少帅, 余天彬

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要:利用物理模拟方法再现顺层斜坡溃屈破坏过程,分析了发生溃屈型斜坡的临界坡长与弯曲隆起高度的主要影响因素,并运用优势分析方法论述了各单因素影响的主次关系。分析的结果说明:岩层的单层厚度、滑移面的内摩擦角和内聚力、坡角和岩体的弹性模量是影响顺层斜坡溃屈失稳的主要因素,其影响程度的大小顺序依次为岩层的单层厚度、滑移面的内聚力及内摩擦角、坡角和岩体的弹性模量。

关键词:物理模拟;顺层斜坡;溃屈破坏;临界坡长;弯曲隆起高度

中图分类号:TU457

文献标志码:A

引言

顺层岩质斜坡溃屈失稳机制的研究是评价和防治自然边坡及已发生过的滑坡稳定性的重要依据。目前对顺层斜坡失稳破坏机理、稳定性的评价和分析的方法等方面已有较深入的研究。自二十世纪 80 年代至今,以孙广忠教授为首的专家学者们^[1-14]利用材料力学中的压杆的稳定理论、尖角突变理论和数值模拟等对顺层斜坡的溃屈失稳(滑移—弯曲)问题先后进行了研究,并推导了理论公式,结合相关工程实例进行了验证。本文结合某工程区内发育的大型岩质滑坡的溃屈(滑移—弯曲)破坏机制分析,选取典型恢复剖面对顺倾向岩层滑坡形成机制进行了物理模拟,并结合中滑坡滑移弯曲的临界长度和隆起高度的计算式^[3,6],论述了临界长度和弯曲隆起高度的主要影响因素,并结合优势分析探讨了各影响因素的主次关系。

1 顺层斜坡溃屈破坏过程的物理模拟

1.1 底摩擦试验原理

底摩擦试验是以摩擦力模拟重力场,进行在重力场

作用下天然边坡、开挖边坡、填方路堤和隧道围岩的变形破坏过程和变形破坏机制模拟研究,模拟再现工程岩土体从变形、破坏到失稳的全过程。试验时,摩擦带速度由显示器显示,摩擦带施加给模型的摩擦力采用传感器测量显示,通过转动模型下面的橡皮带,使模型边坡持续受到坡体应力的作用,同时用间断拍照的方式记录模型边坡变形失稳破坏发展的全过程。

本文选取某工程区内发育的大型岩质滑坡的恢复剖面如图 1 所示,利用底摩擦模型法进行物理模拟研究。

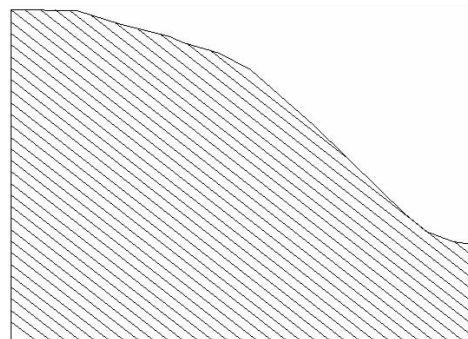


图 1 恢复后的滑坡剖面

1.2 实验材料

通过大量的对比研究,本文选取硫酸钡(BaSO_4)、石英砂(SiO_2)、石膏(CaSO_4)、甘油、水五种原料,按一定配比进行配制。同时,可在平整的试验模型材料上用刀划成裂缝的办法(可在缝中充填滑石粉)模拟岩层层状结构面。

构面。

根据底摩擦试验仪器的条件,选取几何比例尺为1:1000,利用已配制好的模型的材料及适当的各层的制模压力,制成待试验的原始边坡剖面模型(图2(a))。

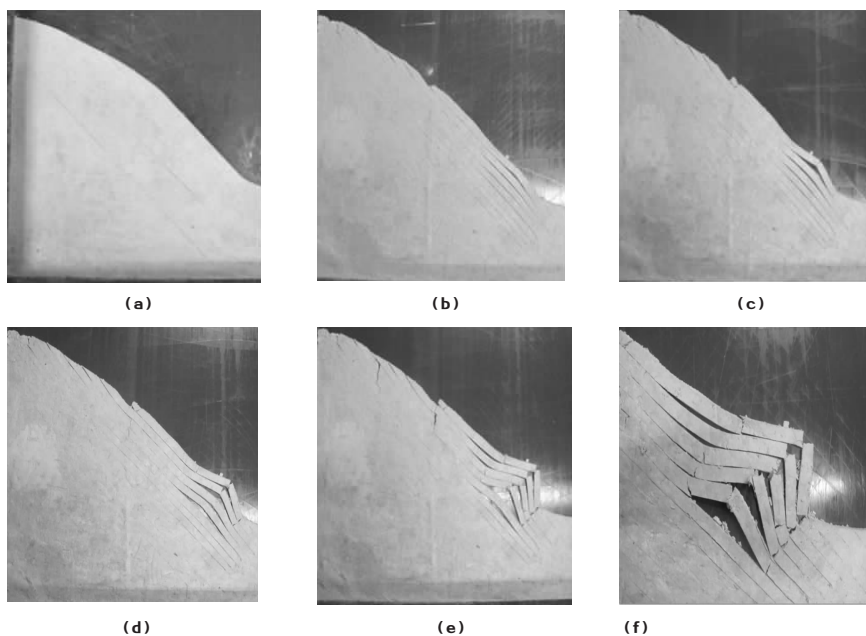


图2 顺层斜坡溃屈破坏物理模拟过程

1.3 实验成果及分析

试验开始后,随着摩擦皮带轮匀速转动,模型浅表部首先发生较明显的轻微差异性层间错动,且各岩层间的错动由坡体表面往坡内减弱,在坡脚附近岩层发生轻微弯曲隆起,并在层间有微弱的架空现象出现(图2(b))。伴随试验的继续进行,在坡脚前缘岩体应力集中,坡体内各岩层间的错动范围增大,在弯曲隆起的转折部位,弯曲的各岩层形成的类似褶曲形态的各岩层出现不同程度的折断现象(图2(c)、图2(d))。随着坡体内各岩层的继续蠕变,在坡体岩层弯曲隆起的下端,岩层变形的加剧导致岩层折断,促使了岩层的另一组潜在破裂面的出现,从而使得断口向坡内一侧变大,向坡外消失。随着时间的增长,岩层弯曲隆起处和折断部位出现了两组连续的破裂面,此时斜坡前缘表面岩层发生了倾倒破坏现象,坡体后缘不仅出现了不同程度的拉裂缝,而且在局部位置还有拉裂陷落带的出现(图2(e)、图2(f))。当坡体形成的滑移面与坡脚部位发育的缓倾角的剪裂面贯通,斜坡岩体在层间的软弱面及其下部缓倾角的剪裂面控制下,容易形成大小各异的滑坡体或具有多级滑面的主、次滑体。

程属于典型的溃屈(滑移—弯曲)变形破坏模式,针对此类滑坡在形成与发展过程中溃屈破坏的临界坡长和弯曲隆起高度,其影响因素的影响程度大小不一。

2 顺层斜坡溃屈破坏的临界长度和弯曲隆起高度的影响因素分析

顺层滑坡溃屈破坏(滑移—弯曲)物理模拟说明:其形成与发展过程是边坡岩层单层厚度、岩体变形模量、滑面的力学性质和坡角等多因素共同作用的结果。其中,边坡岩层单层厚度、岩体变形模量、滑面的力学性质和坡角等因素对溃屈破坏的临界坡长和弯曲隆起高度的各影响因素的影响程度是不同的。李树森、任光明等^[3,6]结合典型的滑移—弯曲型斜坡调查,推导出了顺层溃屈型滑坡发生变形溃屈的临界坡长和弯曲隆起高度的计算式:

$$l_{cr} = h \left\{ \frac{\pi^2 n E}{6 [\rho h n \sin \alpha - (\rho h \cos \alpha \cdot \tan \varphi + c)]} \right\}^{1/3} \quad (1)$$

$$\chi = 0.25 l_{cr} \quad (2)$$

式中: l_{cr} 为临界坡长, χ 为隆起高度, γ 为岩体容重, E 为弹性模量, h 为岩体厚度, α 为坡角, φ 为层内摩擦角, c 为粘聚力, n 为板梁处于临界状态对应的弯曲变形形

从模拟试验现象可知,该类斜坡演变形成滑坡的过

式,当 $n=2$ 时,板梁溃屈临界状态的弯曲变形为全波,故取 $n=2$ 较合理^[15]。

2.1 临界长度和弯曲隆起高度的单因素分析

由式(1)可知,影响顺倾岩层临界长度 l_{cr} 和弯曲隆起高度 χ 的主要因素是岩层单层厚度 h ,边坡滑移面的内摩擦角 φ 、内聚力 c ,弹性模量 E ,重度 γ 和坡度 α 。

根据式(1),在给定的基本参数条件下($E=5\text{ GPa}$, $\varphi=30^\circ$, $c=0.012\text{ MPa}$, $\alpha=40^\circ$, $\gamma=26\text{ kN/m}^3$, $h=1.0\text{ m}$)各单因素对临界长度 l_{cr} 的影响如图3所示。

由图3可知:临界长度随滑移面的内摩擦角、凝聚力、岩体的弹性模量以及岩层单层厚度的增大而增大,随坡角的增大而减小。由式(2)可知,弯曲隆起高度与临界坡长成正比,故弯曲隆起高度也随岩层单层厚度、滑移面凝聚力和内摩擦角以及岩体弹性模量的增大而增大,随坡角的增大而减小。

2.2 临界长度和隆起高度影响因素优势分析

综合考虑岩体各因素对溃屈破坏的临界坡长和弯曲隆起高度的影响程度和主次关系,对临界长度和弯曲隆起高度进行影响因素优势分析,主要的影响因素称为优势因素。优势分析主要是依据系统相关的变量与系统特征变量之间的关联度大小寻求优势因素。

根据式(1)、式(2)得出在不同的岩体力学参数条件下边坡发生溃屈破坏的临界坡长 l_{cr} 与隆起高度 χ ,以顺倾岩层滑移弯曲的临界长度 l_{cr} 和隆起高度 χ 为系统特征变量,选取 $\tan\varphi, h, \alpha, E$ 和 c ^[7]作为相关变量,临界长度 l_{cr} 和隆起高度 χ 详见表1。

表1 溃屈破坏的临界坡长和弯曲隆起高度与各相关变量的关系

相关变量			系统特征变量			
弹性模量/ (E/MPa)	单层厚度/ (h/m)	坡角 (α/rad)	内聚力/ (c/kPa)	摩擦系数	临界坡长	隆起高度
1898.33	0.66	1.04	57.57	0.27	87.11	21.78
4059.50	0.99	0.84	64.79	0.6	116.54	29.14
8294.22	1.26	0.77	69.16	0.72	148.47	37.12
13005.96	1.49	0.74	73.87	0.77	177.63	44.41
16938.90	1.68	0.72	76.13	0.79	208.21	52.05

根据表1,经计算得临界坡长与各相关变量的关联度为: $r_i=(0.5556, 0.7038, 0.6116, 0.6470, 0.6297)$,即 $r_2 > r_4 > r_5 > r_3 > r_1$;弯曲隆起高度与各相关变量的关联度为: $r_i=(0.5540, 0.7124, 0.6160, 0.7058, 0.6360)$,即 $r_2 > r_4 > r_5 > r_3 > r_1$ 。

根据优势计算分析结果表明:在岩体弹性模量 E ,岩层的单层厚度 h ,岩层的倾角 α ,滑移面的粘聚力 c 和摩擦系数 $\tan\varphi$ 这5个因素中,对临界长度 l_{cr} 和斜坡弯曲隆

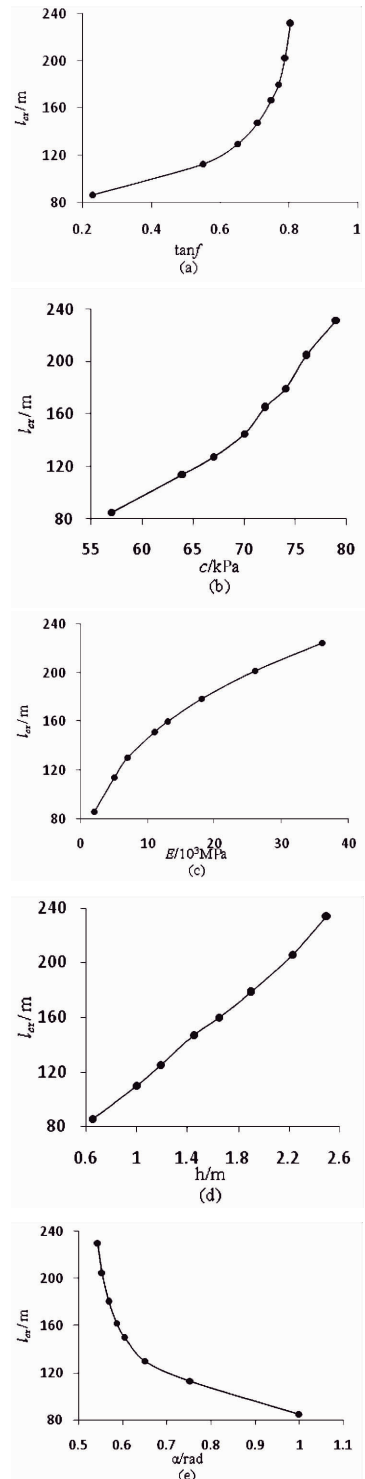


图3 临界长度与各因素的关系

起高度 χ 的影响程度由大到小的顺序依次为:岩层的单层厚度、滑移面的内聚力、滑移面的摩擦系数、岩层的倾角和岩的弹性模量。

3 结论

(1) 本文应用物理模拟试验方法对某工程区一顺层

滑坡恢复剖面进行试验,结果表明,该类顺层岩质斜坡在坡脚无临空条件下形成了典型的溃屈变形破坏。斜坡坡体上部呈现出沿着控制坡体的软弱面(或软弱带)顺层滑动,下部沿着缓倾角的剪裂面做切层滑动。说明该类斜坡的失稳变形破坏可以形成规模大小不等的滑坡体或者同时具有多级滑面的主次滑体。

(2)归纳了影响顺层斜坡溃屈失稳的临界长度及弯曲隆起高度的主要因素,并应用优势分析法探讨了各影响因素的主次关系,这对于定性研究层状边坡溃屈稳定性和分析其溃屈稳定性时的参数取值都具有指导意义,同时在该类斜坡的防治处理中,可根据分析结果采取相应措施,有效地提高边坡的稳定性。

参考文献:

- [1] 孙广忠.岩体力学基础[M].北京:科学出版社,1983.
- [2] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [3] 李树森,任光明.层状结构岩体顺层斜坡失稳机理的力学分析[J].地质灾害与环境保护,1995,6(2):24-29.
- [4] 李天扶.层状岩体边坡顺层破坏机理研究[J].水力发电,1996,(8):46-49.
- [5] 刘钧.顺层边坡弯曲破坏的力学分析[J].工程地质学报,1997,5(4):335-340.
- [6] 任光明.顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析[J].山地研究,1998,16(3):182-187.
- [7] 朱玉平,莫海鸿.顺倾边坡岩层滑移弯曲临界长度及其影响因素分析[J].岩土力学,2004,25(2):283-286.
- [8] 严明,陈剑平,黄润秋,等.岩质边坡滑移-弯曲破坏中间状态的工程地质分析[J].水利水电技术,2006,36(11):41-44.
- [9] 魏玉峰,聂德新,吕生弟,等.溃曲软硬相间顺层斜坡滑移-弯曲破坏机制分析[J].成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(3):287-291.
- [10] 宋玉环.西南地区软硬互层岩质边坡变形破坏模式及稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [11] 胡启军,谢强,郑立宁.长大顺层边坡渐进滑移失稳演化机理研究[J].水文地质工程地质,2011,38(3):31-37.
- [12] 邹杨,周志祥,唐亮.考虑滑移效应组合梁弯曲应力和界面剪力分析[J].工程力学,2013,30(11):173-179.
- [13] 唐晓松,郑颖人,唐辉明.边坡变形破坏演化特征的数值分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2013,36(10):101-113.
- [14] 肖慧,侯克鹏,杜俊.对层状岩质状边坡不同层数溃屈失稳破坏的研究[J].科学技术与工程,2014(2):224-227.
- [15] 王仁,丁中一,殷有泉.固体力学基础[M].北京:地质出版社,1979.

Physical Simulation of Consequent Slope Bulking Deformation and Its Influencing Factor Sensitivity Analysis

DU Yingqiong, REN Guangming, DU Fei, ZHU Shaoshuai, YU Tianbin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China)

Abstract: The physical simulation method is used to reproduce the consequent slope bulking destruction process, the main influencing factors of the critical length and bending uplift location of outburst slope are analyzed, and the primary and secondary relations of influencing factors are discussed through predominance analysis. The results show that, in significant order, the thickness of a single rock layer, the cohesion and friction angle of sliding surface, the elastic modulus of rock mass and the slope angle are the major influencing factors to the bulking and instability of consequent slope.

Key words: physical simulation; consequent slope; outburst failure; critical length of slope; bending height of uplift