

顺层坡滑坡形成机制的物理模拟 及力学分析*

任光明 李树森 聂德新 左三胜

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

提 要 利用物理模拟方法再现顺层坡滑坡的形成机制;通过能量平衡法,导出了顺层坡发生溃屈破坏的临界坡长、隆起端位置等力学模型。

关键词 顺层坡 滑坡 形成机制 物理模拟 力学模型

滑坡形成机制的研究是评价、预测和防治自然边坡和已发生滑坡稳定性的重要依据。目前有关顺层滑坡形成机制方面的研究,平面滑动和楔体滑动的机理、分析方法都很成熟^[1];但在斜坡滑移—弯曲(或溃屈)破坏方面尚无系统、成熟的分析方法,仍处于不断完善和发展阶段,如 H. K. 库特以板柱屈曲理论,对溃屈破坏进行了分析;孙广忠^[2]对板裂结构岩体边坡破坏形式尤其是溃屈发生条件进行过探讨;赵平芳^[3]从河谷卸荷在近河床处产生初始挠曲和张破裂机理以及弯曲变形的时间效应分析了溃屈变形破坏机制等。本文结合某工程所在地发育的 30 多个大小不同的顺层坡溃屈变形破坏特征分析的基础上,选取典型剖面对顺层坡滑坡形成机制进行了物理模拟及力学分析。

1 顺层坡滑坡形成机制分析

在所调查的岸坡地段,地层主要为前震旦系中薄层状混合岩与斜长片岩,岩层倾角为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,其间穿插有华力西期伟晶花岗岩脉。因受多次构造运动的影响,在片岩与混合岩中形成数量较多的顺层挤压带,为斜坡变形破坏提供了必要的条件。综合现场调查的大量资料表明,该类斜坡滑坡形成机制为滑移—弯曲(或溃屈),其形成可分为三个阶段:

1. 由于河流下蚀,沿河谷形成高陡层状斜坡(图 1, a),随着岸坡的形成,中薄层状片岩、混合岩沿层间挤压带发生卸荷回弹,在重力作用下岩层发生弯曲变形(图 1, b);
2. 随时间的推移,板状岩层的流变,弯曲变形进一步加剧,形成类似褶曲的“x”裂隙和两个弯曲端端部的张裂带,再继续变形,两个弯曲端的岩层被褶断(图 1, c 中 1、2);
3. 当斜坡变形体上部顺层挤压带和沿张裂带或“x”剪裂隙的抗滑力低于变形体的滑动力时,变形体下滑形成滑坡。在滑坡形成过程中,当滑体沿顺层挤压带和“x”剪裂隙贯通时,可形成滑坡体,此时滑坡规模较小;当滑坡沿下面的张裂带贯通时,滑坡规模加大;当滑体下滑,同时或不同步地沿两个顺层挤压带下滑并贯通下部张裂隙时,可形成具有两组以上滑面的滑坡,或在不同步的情况下形成主、次滑坡体(图 1, d)。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:49672166)。

收稿日期:1997-11-06,改回日期:1998-03-02。

2 顺层坡滑坡形成的物理模拟研究

为了验证上述分析,选取工程区内发育的大型岩质滑坡的纵4恢复剖面(图2),利用底摩擦模型法进行物理模拟研究^[4]。

通过大量的对比研究,选取重晶石粉、氧化锌、石英砂、液体石蜡油四种原料,按一定比例进行配制,同时改变制模压力,可以得到模拟不同性质岩层的模型材料;软弱面选用厚0.01mm的铝箔和滑石粉来模拟。制模时将少许滑石粉均匀地夹于两层铝箔中,可将软弱面的摩擦系数降至0.25左右。

根据底摩擦仪器的条件,选取几何比例尺1:1000。利用配制好的模型材料及各层适当的制模压力,按图2制成待试验的原始斜坡剖面。

试验开始后,随着皮带轮的匀速转动,模型首先发生差异性层间错动,特别是浅表部较明显。各层的层间错动从“坡面”向内逐渐减弱;顺坡方向表现为下部大于上部,在坡体后缘逐渐消失。在坡体靠近坡脚附近发生轻微隆起,并伴有层间架空现象(图3)。

随着试验的继续进行,坡体各层间的错动范围、弯曲隆起、层间架空等变形现象逐渐加剧,并在弯曲隆起的转折端处,各层均发生不同程度的折

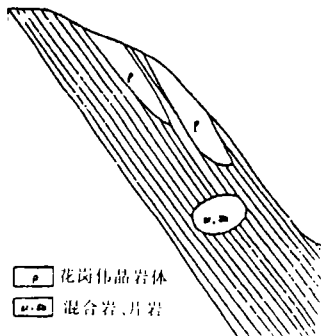
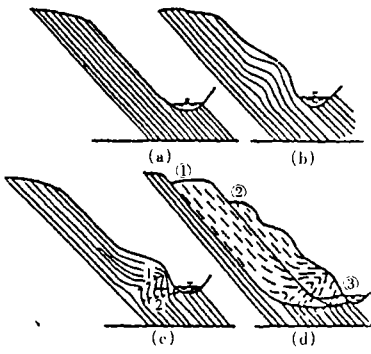


图2 恢复后的滑坡纵4剖面图
Fig. 2 The 4th profile of former landslide



1. 上部张裂带、岩层折断带;2. 下部张裂带、岩层折断带;①次滑面;②主滑面;③沿“x”节理形成的滑面。

图1 顺层坡溃屈破坏形成过程

Fig. 1 Formation process of flexure failure of consequent slope

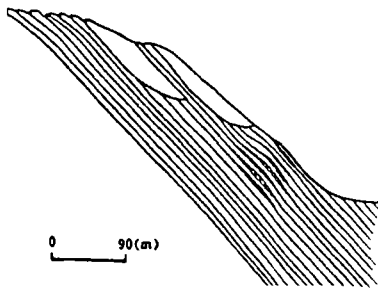


图3 模型早期变形迹象

Fig. 3 The deformation features in early stage of model

断,断口在斜坡临空面一侧相对较大,向坡体内逐渐尖灭;并且变形影响范围逐步向深部扩展,坡体后缘还发育有程度不同的拉裂缝,尤其是伟晶花岗岩分布处最明显。此外,在斜坡弯曲隆起之下的根部,变形导致根部折断,又出现了另一组潜在破裂面,断口在坡体内一侧较大,向坡外尖灭;随坡体的继续蠕变,上述变形现象进一步加剧、且向深部推移,最终在弯曲隆起端及折断处形成两组连续的缓倾角破裂面;同时坡体前缘表面发生倾倒变形破坏,后缘不仅出现一系列的拉裂缝,而且在局部还出现了陷落带(图4)。

从上述试验现象可知,该类斜坡演变形成滑坡过程属于典型的滑移—弯曲(或溃屈)变形破坏模式,其演变过程具有三个阶段:

1. 轻微滑移—弯曲隆起阶段:坡体在重力作用下,各层发生轻微差异性层间错动,在

坡脚前缘发生轻微弯曲隆起变形,且局部出现微弱的架空现象;

2. 强烈滑移—弯曲隆起、滑面贯通阶段:随着坡体继续向下蠕滑,坡体前缘岩体强烈弯曲隆起、架空,在最大隆起端部沿垂直层面折断、局部压碎,同时,根部岩层也发生折断,形成两组缓倾角剪裂面,这两组剪裂面逐渐形成并与滑移面相互贯通。

3. 滑动破坏阶段:一旦滑移面与坡脚附近的缓倾角剪裂面贯通,坡体在岩体的层间软弱面及下部缓倾角剪裂面的控制下,可形成大小不同的滑坡体或具有多级滑面的主、次滑体。

3 顺层坡滑坡形成机制的力学分析

3.1 滑移—弯曲(或溃屈)破坏力学模型的建立

根据上述分析,建立的板梁力学模型如图

5. 取其微元体,受力分析如图 6。

下滑力 $S = \gamma h \sin \alpha$; 抗滑力 $F = \gamma h \cos \alpha \tan \phi + c$; 附加力偶 $m = (\gamma h \cos \alpha \tan \phi + c)h/2$; 轴向均布荷载 $P_1 = (\gamma h \sin \alpha - \gamma h \cos \alpha \tan \phi + c)$; $x = l$ 处(即坡顶)集中荷载 P_2 。式中: γ 为岩体容重; h 为岩体厚度; α 为斜坡倾角; ϕ 、 c 分别为板梁下部支承物的内摩擦角和内聚力。因此,板梁可简化为一个沿轴向压缩和附加弯曲的迭加受力模式(图 7)。设板梁弯曲变形的形函数为^[5]

$$y = a \sin(n\pi x/l) \quad (1)$$

根据能量平衡原理,不计势能时,板梁的变形能(ΔU)等于外力做功(ΔT),即

$$\int_0^l [P_1 \frac{1}{2} (\frac{dy}{dx})^2 dx] + P_2 \int_0^l \frac{1}{2} (\frac{dy}{dx})^2 dx = \frac{EJ}{2} \int_0^l (\frac{d^2y}{dx^2})^2 dx \quad (2)$$

P_1 是轴向均布荷载,且为常量,解式(2)得

$$P_1 = \frac{2\pi^2 n^2}{l^3} EJ - \frac{2P_2}{l} \quad (3)$$

式(3)中的 n 表示板梁处于临界状态时所对应的弯曲变形形式(图 8)。现场调查及模拟试验结果表明,在顺层坡的溃屈变形破坏中,其坡脚附近常有一个充分发育的半波(呈弯曲隆起状),而另一个半波往往因坡体下部受阻、无临空条件等而难于明显发育。因此,板梁溃屈临界状态的弯曲变形当为全波,取 $n=2$ 较合理^[5]。考虑到板梁受到的约束情况:下

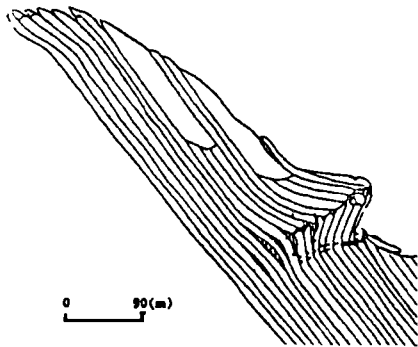


图 4 模型最终破坏迹象

Fig. 4 The late failure features of model

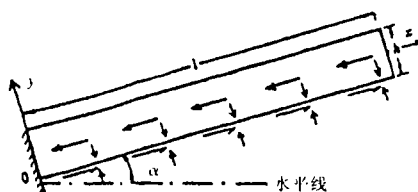


图 5 板梁力学模型

Fig. 5 Mechanical model of plate-beam

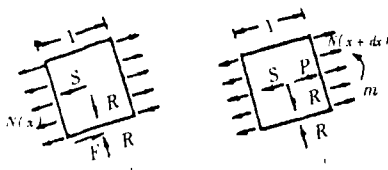


图 6 (a)等效于(b)

Fig. 6 Tiny unit (a) equivalent to (b)

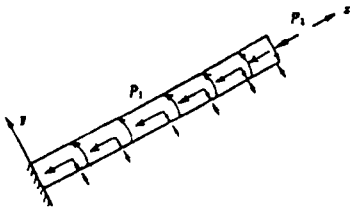


图 7 板梁受轴向压缩和附加弯曲

Fig. 7 Axial compression and additional bending diagram of plate-beam

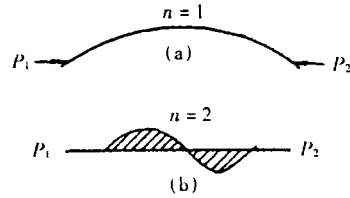


图 8 板梁的弯曲变形形式

Fig. 8 The bending deformation form of plate-beam

端固定, 上端可近似为铰支, 而且板梁仅坡面及坡顶临空. 取长度系数为 $\sqrt[3]{4}$, 设板梁原长为 L , 则 $l = \sqrt[3]{4} L$, 故临界均布荷载 P_{1cr} 为

$$P_{1cr} = \frac{2\pi^2 EJ}{L^3} - \frac{2P_2}{\sqrt[3]{4} L} \quad (4)$$

式中: E 为弹模 (Mpa); J 为板梁横截面关于中性轴的惯性矩, $J = \frac{bh^3}{12}$, b, h 分别为板梁的宽度及厚度 (本研究取 $b=1$); P_2 为坡顶集中荷载 (kN); L 为坡长或板梁长度 (cm 或 m). 式 (4) 即为层状结构顺层坡的溃屈条件. 在不计板梁自重及其梁间的摩擦阻力时, $P_{1cr}=0$, 则

$$P_2 = \frac{\sqrt[3]{4} \pi^2 EJ}{L^2} \approx \frac{\pi^2 EJ}{(0.8L)^2} \quad (5)$$

这相当于不计自重的压杆, 其两端约束介于: 两端铰支 ($\mu=1$) 与一端固定、一端铰支 ($\mu=0.7$) 情况下的欧拉公式.

在多层板梁的情况下, 略去各层接触面之间的摩擦力, 仅考虑其与下覆软弱层带间的摩擦力、内聚力, 且设各层的挠度函数相同, 则有

$$\left(\frac{E_1 J_1}{2} + \frac{E_2 J_2}{2} + \dots + \frac{E_n J_n}{2} \right) \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i J_i \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \quad (6)$$

若各层材料及其厚度相同时, 则

$$\sum_{i=1}^n E_i J_i = m E J \quad (7)$$

故在多层等厚板梁情况下式 (4) 可改为

$$P_{1cr} = \frac{2\pi^2 m E J}{L^3} - \frac{2P_2}{\sqrt[3]{4} L} = \frac{\pi^2 m E h^3}{6L^3} - \frac{2P_2}{\sqrt[3]{4} L} \quad (8)$$

式 (8) 即为多层、等厚、弹模相同岩层的溃屈条件. 由式 (8) 可求出临界坡长 L_{cr} :

$$6[\gamma m h \sin \alpha - (\gamma m h \cos \alpha \tan \phi + c)] L_{cr}^3 + 12 P_2 L_{cr}^2 / \sqrt[3]{4} - \pi^2 m E h^3 = 0 \quad (9)$$

令 $A = 6[\gamma m h \sin \alpha - (\gamma m h \cos \alpha \tan \phi + c)]$; $B = 12 P_2 / \sqrt[3]{4}$; $c = -\pi^2 m E h^3$, 则式 (9) 变为

$$A L_{cr}^3 + B L_{cr}^2 + c = 0 \quad (10)$$

天然斜坡的坡顶一般没有集中荷载 (即 $P_2=0$), 故求解式 (10) 获得的顺层坡溃屈破坏的临界坡长为

$$L_{\sigma} = h \left\{ \frac{\pi^2 m E}{6[\gamma h \sin \alpha - (\gamma m h \cos \alpha \operatorname{tg} \phi + c)]} \right\}^{1/3} \tag{11}$$

式(11)中 $\alpha > \arcsin(\frac{c \cdot \cos \alpha}{\gamma m h}) + \phi$.

定义:层状结构顺层坡岩层溃屈的判据为

$$K = L_{\sigma} / L \tag{12}$$

式(12)中 L_{σ} 为发生溃屈的临界长度; L 为顺层坡岩层实际长度; K 为溃屈判断系数:当 $K=1$ 时,斜坡处于临界状态,当 $K>1$ 时,岩层不溃屈,当 $K<1$ 时,岩层发生溃屈.

为了获得板梁弯曲隆起的最高点位置,对形函数式(1)求极值.溃屈时式(1)可写为

$$y = a \sin(n\pi x / L_{\sigma}) \tag{13}$$

由 $dy/dx=0$,且依据前述分析取 $n=2$,则弯曲隆起最高点位置为

$$x = 0.25L_{\sigma} \tag{14}$$

3.2 顺层坡溃屈破坏力学模型的检验

为检验上面建立的顺层坡溃屈破坏的临界坡长及弯曲隆起最高点位置的力学模型的合理性,根据现场调查的岩体单层厚度及工程区岩体的物理力学参数,获得的不同溃屈深度、不同的岩体力学参数条件下斜坡发生溃屈破坏的临界坡长与隆起位置(表 1).

表 1 不同条件下斜坡溃屈临界坡长及隆起位置

Table. 1 Critical length and bulge place for flexure failure under different conditions

弹性模量 E (MPa)	单层厚度 h (cm)	摩擦系数 f	内聚力 c (KPa)	溃屈深度 (m)	坡 度 β (度)	容 重 γ (g/cm ³)	临界坡长 L_{σ} (m)	隆起位置 x (m)
2×10^3	10	0.35	20.0	10	30	2.7	21.48	5.37
2×10^3	10	0.35	20.0	10	45	2.7	14.67	3.68
2×10^3	30	0.50	50.0	30	40	2.6	38.75	9.61
3×10^3	30	0.50	50.0	30	40	2.6	44.36	11.09
4×10^3	60	0.35	20.0	60	20	2.7	482.38	120.57
5×10^3	10	0.35	50.0	10	30	2.7	63.84	15.96
7×10^3	20	0.50	50.0	10	45	2.6	47.89	11.97
7×10^3	30	0.50	50.0	30	30	2.7	193.97	48.49
7×10^3	40	0.35	40.0	40	30	2.6	76.47	19.12
7×10^3	60	0.35	50.0	60	45	2.7	71.01	17.75

从表 1 可见,岩体弹模越高或岩层单层厚度越大时,其临界坡长越长,隆起点位置越高,即可维持稳定的斜坡高度越高;其它条件相同时,斜坡的坡角增大,可维持稳定的临界坡长变小,隆起端位置下移.

上述结果不仅与物理模拟试验结果相似,而且也与现场已发生滑移—弯曲(或溃屈)破坏的变形破坏迹象完全吻合.因此,建立的顺层坡溃屈破坏的力学模型是合理的.

4 主要结论及认识

1. 现场调查分析及室内物理模拟试验结果表明,顺层坡在坡脚无临空条件下形成典型的滑移—弯曲(或溃屈)变形破坏,其演变过程具有明显的阶段性.

2. 坡体的滑动表现为上部沿软弱面(或带)控制的顺层滑动,下部沿缓倾角剪裂面的

切层滑动。这不仅为该类滑坡滑面强度参数的选取提供了重要的理论依据,而且也表明该类斜坡的变形破坏可形成规模不等的大小滑坡体或同时具有多级滑面的主、次滑体。

3. 通过对顺层坡发生溃屈破坏的力学分析,建立了破坏的力学模型。这为滑坡形成机制分析提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社,1994,327~331.
- [2] 孙广忠. 岩体力学基础. 北京:科学出版社,1983,180~190.
- [3] 赵平芳. 层状结构岩体顺倾边坡的弯曲剪切机制研究. 工程地质科学新进展. 成都:成都科技大学出版社,1989, 294~302.
- [4] 林韵梅. 实验岩石力学—模拟研究. 北京:煤炭工业出版社,1984,132~139.
- [5] 王仁,丁中一,殷有泉. 固体力学基础. 北京:地质出版社,1979,128~133.

第一作者简介 任光明,男,33岁. 成都理工学院工程地质研究所,讲师. 主要从事工程地质及岩土工程方面的教学与科研工作,在国内外发表论文10余篇。

THE PHYSICAL SIMULATION AND MECHANICAL ANALYSIS ON LANDSLIDE'S FORMATION MECHANISM ON CONSEQUENT SLOPE

Ren Guangming Li Shusen Nie Dexin Zuo Sansheng
(Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059)

Abstract

Based on the site investigation, the formation mechanism of landslide on consequent slope was discussed by using the physical simulation and mechanical analysis. The critical length of slope and the place of bending flexure bulge of mechanical model were presented by using energy equilibrium theory. The study provides an important basis for the prediction of slope deformation and the evaluation of landslide's stability.

Key words consequent slope, landslide, formation mechanism, physical simulation, mechanical model