

DOI: 10.11779/CJGE201909005

# 反倾岩质边坡次生倾倒机理及稳定性分析

王俊杰<sup>1, 2</sup>, 郭建军<sup>\*1, 3</sup>

(1. 重庆交通大学水工建筑物健康诊断技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160)

**摘要:** 倾倒破坏是反倾边坡的一种常见破坏模式, 其中次生倾倒是反倾岩质边坡倾倒破坏的主要诱因。建立了反倾岩层在坡后土体作用下次生倾倒破坏的地质力学模型, 基于室内物理模拟试验, 分析了反倾岩层上覆土压力分布规律、岩层的破坏模式和整体破坏面的形状与位置。根据库仑主动土压力理论得到下卧岩层表面各点法向压力的理论值与实测值基本相符, 土体中存在土拱效应导致两者存在差异, 随着上覆土体厚度及堆载作用的加大, 土拱效应越明显。各岩层可能的破坏模式包括弯拉破坏、弯滑破坏和滑动破坏。下卧反倾岩层的整体破坏面是一通过坡脚的近似平面, 整体破坏面与岩层面法线方向呈  $0^\circ \sim 25^\circ$  的夹角。基于叠合悬臂梁模型, 引入岩层横截面上节理面的黏聚力和岩石抗拉强度随岩层嵌入深度的折减系数, 改进了反倾岩层的极限平衡分析方法, 推导了坡体任意岩层下推力的理论公式, 定义了任意岩层变形破坏的安全系数和边坡整体倾倒破坏的综合安全系数。提出了下卧反倾岩层潜在整体破坏面的理论计算方法, 并确定了影响潜在整体破坏面位置的敏感因素。

**关键词:** 反倾边坡; 次生倾倒; 物理模拟试验; 叠合悬臂梁模型; 稳定性分析; 整体破坏面

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)09-1619-09

**作者简介:** 王俊杰(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事库岸边坡稳定性分析方面的研究工作。E-mail: wangjunjiehu@163.com。

## Mechanism and stability of secondary toppling of counter-tilt rock slopes

WANG Jun-jie<sup>1, 2</sup>, GUO Jian-jun<sup>\*1, 3</sup>

(1. Diagnostic Technology on Health of Hydraulic Structures Engineering Research Center of Chongqing Education Commission of China, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Research Center of Diagnosis Technology and Instruments of Hydro-Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** Among kinds of toppling failures of anti-dipping rock slopes, the secondary toppling is the main inducement. The geo-mechanical model for the secondary toppling of the anti-dipping rock strata under the action of the soil behind the slope is established. Based on the laboratory physical simulation tests, the distribution laws of earth pressure on the surface, failure modes, shapes and positions of the integral failure surface of the counter-tilt rock strata are analyzed. According to the Coulomb's active earth pressure theory, the theoretical values of normal pressure at each point on the underlying stratum surface are basically consistent with the measured values, but the soil arching effect leads to the difference between them. With the increase of overlying soil thickness and surcharge effect, the soil arching effect becomes more obvious. The possible failure modes of various strata include bending failure, bending-slip failure and sliding failure. The integral failure surface of the underlying anti-dipping rock stratum is an approximate plane through the foot of the slope, and the angle between the integral failure surface and the normal direction of the rock strata is  $0^\circ \sim 25^\circ$ . Based on the superimposed cantilever beam model, the limit equilibrium analysis method of anti-dipping rock strata is improved by introducing the reduction coefficient of the cohesion of joints on the cross-section of rock strata and the tensile strength of rock with the embedded depth of rock strata. The theoretical formula of thrust for arbitrary stratum in the slope is derived. The safety factors of deformation and failure of arbitrary rock stratum and the comprehensive safety factor of the whole slope collapse are defined respectively. The theoretical method for calculating the potential integral failure

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (U1865103); 重庆市科技人才专项 (cstc2017kjrc-cxycyd30001); 国家科技支撑计划课题 (2015 BAK09B01); 重庆市基础与前沿研究计划项目 (重点) (cstc2015jcyj BX0139)

收稿日期: 2018-10-18

\*通讯作者 (E-mail: guofuzhi@126.com)

surface of the underlying anti-dipping strata is proposed, and the sensitive factors affecting the location of the potential integral failure surface are found.

**Key words:** counter-tilt slope; secondary toppling; physical simulation experiment; superimposed cantilever beam model; stability analysis; integral failure surface

## 0 引言

Goodman 和 Bray 提出次生倾倒是由于外在的因素所造成的,如坡顶堆载、地震作用、坡脚切割、风化作用等。如国内的四川省阿坝州金川县露天矿边坡变形破坏案例,王思敬<sup>[1]</sup>指出:建矿过程中的大爆破和后期的开挖是诱因,岩体的结构效应和时间效应导致岩体蠕变,且经历了两次滑动-倾倒变形,最终滑动崩塌。黄润秋<sup>[2]</sup>分析了国内外大量反倾边坡破坏实例,认为倾倒破坏是层状岩体根部应力及其变形超过岩石的抗拉强度,从而导致其折断破坏,一般表现为大规模的崩塌-滑坡。陈祖煜等<sup>[3]</sup>、汪小刚等<sup>[4]</sup>运用物理模型的离心试验分析反倾岩层倾倒破坏的整体破坏面。郭建军等<sup>[5]</sup>基于空间几何关系,引入重度增大系数考虑坡后土体对反倾岩层的作用,推导出了坡脚岩层的安全系数计算公式。针对岩块-弯曲复合式倾倒,Babiker 等<sup>[6]</sup>提出了一种非关联、低剪胀、摩擦模型的塑形极限分析方法。Majdi 等<sup>[7]</sup>引入新的参数,运用固体力学和断裂力学方法对 Aydan 提出悬臂梁模型进行了修正,考虑地质构造损伤对坡体稳定性的影响<sup>[8]</sup>。Evans<sup>[9]</sup>提出应根据风化作用、应力重分布和蠕变等方面分析次生倾倒变形。Teme 等<sup>[10]</sup>对次生倾倒破坏的变形失稳机理的和稳定性计算进行理论分析,但没有考虑节理贯通率、地下水等因素。Alejano 等<sup>[11]</sup>对西班牙 Valencia 的露天矿边坡次生倾倒破坏进行反演分析。Mohtarami 等<sup>[12]</sup>研究了坡体后上方是风化的岩石或土体,坡体中、下部是反倾岩层的次生倾倒模型,并给出了理论计算公式,但没有考虑层间黏聚力和地下水的作用。Lian 等<sup>[13]</sup>、Zhang 等<sup>[14]</sup>分析了岩层的倾角、岩石抗拉强度、节理面的黏聚力和摩擦力等因素对倾倒破坏形成机制的影响。Huang 等<sup>[15]</sup>指出防止坡脚岩体在三峡大坝水位升降作用的被软化是预防巫峡地区反倾岩质边坡倾倒变形破坏的有效手段。Guo 等<sup>[16]</sup>、Yagoda-Biran 等<sup>[17]</sup>基于振动台试验研究了反倾边坡在地震作用下的灾变破坏机制。Wang 等<sup>[18-19]</sup>针对岩体结构面的产状及其力学性质分析了坡体的稳定性。郑允等<sup>[20]</sup>基于块体倾倒破坏的极限平衡分析方法和传递系数法,推导出了坡顶荷载作用下反倾边坡坡脚剩余下滑力和维持边坡稳定所需要的支护力的计算公式,然而对于此类反倾边坡,主要的危险不是在坡脚而是在坡顶。

上述研究成果在一定程度上加深了人们对反倾边坡次生倾倒理论的理解,但是基本都是基于坡体内在整体破坏面已知的前提下进行分析,且对坡体中各岩层的破坏模式未形成统一的认识。为此,本文首先基于室内试验成果,阐述反倾岩层在坡后土体及堆载作用下的破坏机制,然后基于叠合悬臂梁模型,提出反倾岩层在坡后土体及堆载作用下稳定性的顺次传递分析方法,并进一步提出坡体内部潜在整体破坏面的搜寻方法,对进一步理解反倾层状岩质边坡在坡后土体及堆载作用下的稳定性及其次生倾倒破坏机理具有参考意义。

## 1 反倾岩质边坡次生倾倒破坏模拟试验

反倾岩层在坡后土体自重及堆载作用下次生倾倒破坏模拟试验模型如图 1 所示。上覆土体在自重及堆载作用下,产生向下滑动趋势,并作用于下卧层状岩体。为了分析不同倾角的反倾岩层受到上覆土体或者风化形成松散碎屑堆积物的压应力分布情况,完成了不同倾角( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$ )岩层在上覆土体自重及堆载作用下的物理模拟试验。

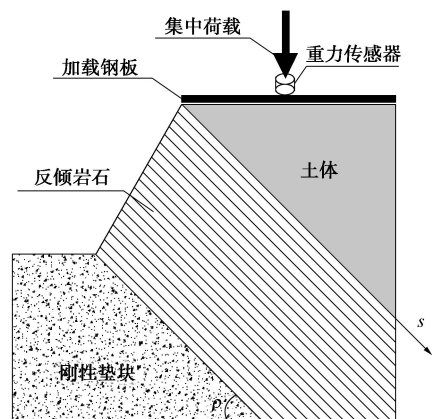


图 1 反倾岩层在坡后土体自重及堆载作用下次生倾倒模拟模型

Fig. 1 Model for secondary toppling of anti-dipping rock strata under action of self-weight and surcharge of soil behind slope

由图 2 可以看出,在上覆土体自重作用下,下卧岩层上表面各测点的压力强度值,随着深度的增加,近似呈线性增加,实测值与理论值<sup>[21]</sup>存在差别,理论值大于实测值。根据图 3 可得,当土体上方还有均布附加荷载时,下卧岩层上表面的土压力分布呈非线性变化,且压力最大的点不是位于岩层嵌入根部,而是

位于坡表附近。出现以上现象的原因是由于坡后土体的深度增加或者堆载作用强度加大导致土体内部形成了土拱效应, 附加应力横向扩散, 土压力主要传递到岩层的中上部位。所以在分析下卧岩层受力状态时, 应根据坡后土体及堆载作用的具体情况计算岩层上表面受到来自后方土体推力作用的分布情况。当坡肩以上水平, 无堆载作用, 仅在坡后土体自重作用下时, 下卧岩层上的土压力可以按照库仑主动土压力计算, 如果岩层倾角过于平缓, 需结合坦墙理论模型计算土压力。当坡肩以上有堆载或附加荷载时, 下卧岩层所受的土压力应为附加荷载与坡后土体重力的矢量和。

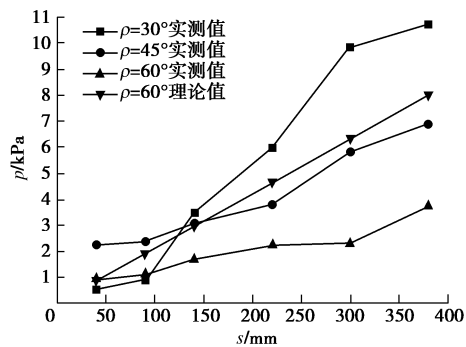


图2 上覆土体自重作用下岩层上表面土压力分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of earth pressure on surface of rock strata under action of self-weight of overlying soil

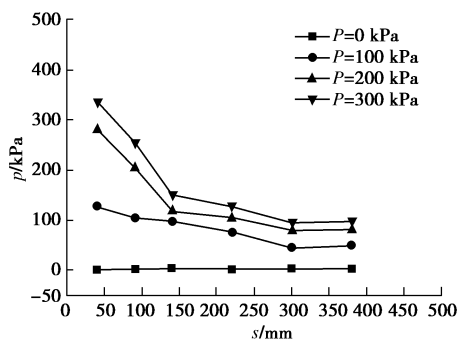


图3 坡顶荷载作用下60°倾角岩层上表面土压力分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of earth pressure on surface of rock stratum with dip angle of 60° under surcharge of soil behind slope

同时观测了不同模拟模型在坡顶荷载作用下各岩层的破坏模式, 根据图4可以看出, 45°倾角的反倾岩质边坡次生倾倒破坏面近似成一个平面, 在接近坡顶附近, 岩层破坏位置向坡肩方向偏移了一定距离, 在接近坡脚附近, 岩层破坏位置向坡体内部方向偏移了一定距离; 中部岩层的破坏面连成一条线, 其与岩层面的法线的夹角约为25°; 中部岩层破坏面处的裂缝呈平直状态, 有错位迹象; 破坏面左上部分的破坏段岩层基本保持呈平直状态, 无明显弯曲现象; 各相

邻岩层破坏段呈面接触状态。结合其他几组模拟试验可得出, 岩层破坏的模式主要有3种(如图5所示): 第一, 岩层横断面上的拉应力首先大于其自身的抗拉强度, 发生弯曲倾倒, 形成弯拉破坏, 并形成上宽下窄的拉裂缝; 第二, 岩层横断面上剪应力首先大于抗剪强度, 发生剪切滑动破坏, 岩层破坏面上段和下段出现错位现象; 第三, 岩层破坏面呈现出前两种破坏现象的叠加。



图4 45°倾角的反倾岩质边坡次生倾倒整体破坏面图

Fig. 4 The integral failure surface for secondary toppling of anti-dipping rock stratum with 45° dip angle

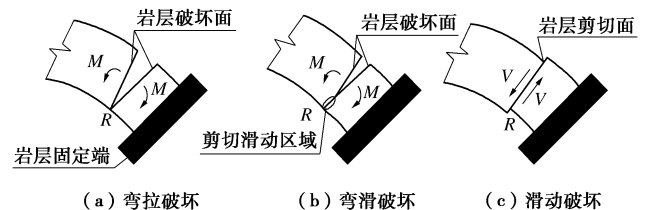


图5 反倾岩层弯曲倾倒破坏的截面破坏模式分析示意图

Fig. 5 Analysis sketch of failure modes of cross-sections of anti-dipping rock strata with bending and toppling failures

## 2 反倾岩层次生倾倒的顺次传递分析法

针对工程中可能形成次生倾倒破坏的反倾岩质边坡进行稳定性分析, 建立图6所示的地质力学模型。 $\phi$ 表示坡面的倾角;  $\rho$ 表示岩层层面倾角;  $\lambda$ 表示地下水位与水平面的近似夹角。整个反倾边坡的可能破坏面在岩层部分区域近似呈平面, 所以首先取边坡的潜在破坏面为一个过坡脚P点的平面, 该平面与水平面的夹角为 $\varpi_j$ ,  $\varpi_j$ 的取值范围为 $90^\circ - \rho < \varpi_j < \phi$ , 然后可计算坡体中各岩层在上覆土体和堆载作用下在已知破坏面处的稳定性情况和可能破坏模式, 进而求出坡体的整体稳定性。

$L_i$ 表示第*i*层岩层的从坡表至坡里坐标原点的长度, 第*i*层岩层的厚度为 $t_i$ , 岩层的总厚度为 $t_z$ , 其中下卧首层岩层, 即第*n*层岩层的长度为 $L_n$ 。

$$L_n = \frac{H}{\sin \rho} - \frac{t_n}{2} \left[ \tan \left( \rho + \phi - \frac{\pi}{2} \right) + \cot \rho \right] \quad (1)$$

由于第*i*层岩层比第*i*+1层岩层在坡表处要缩进一部分, 缩进部分长度为 $\Delta L_i$ 。

$$\Delta L_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \tan \left( \rho + \phi - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

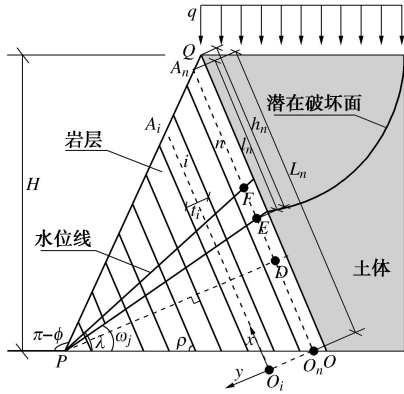


图6 反倾岩质边坡次生倾倒破坏顺次传递分析示意图

Fig. 6 Analysis sketch of secondary toppling of anti-dipping rock slope with analytical method of sequential transmission

所以第*i*层岩层的长度, 即从坡表处岩层的中点 $A_i$ 到坡里坐标原点 $O_i$ 的距离为 $L_i$ 。

$$L_i = L_{i+1} - \Delta L_i \quad (3)$$

岩层的节理发育程度和风化程度往往是由坡表到坡体内部逐渐减弱<sup>[1]</sup>, 第*i*层岩层的坡表 $A_i$ 处附近横断面的节理面黏聚力和岩石抗拉强度分别设为 $c_{iL}$ 和 $\sigma_{iL}$ , 坡体内部较深的 $O_i$ 处横断面的节理面黏聚力和岩石抗拉强度分别设为 $c_{i0}$ 和 $\sigma_{i0}$ , 如图6所示, 当 $c_{iL} = \Lambda_1 c_{i0}$ ,  $\sigma_{iL} = \Lambda_2 \sigma_{i0}$ 时, 可求第*i*层岩层在长度 $L_i$ 范围内的任意横断面的节理面黏聚力 $c_{ix}$ 和岩石抗拉强度 $\sigma_{ix}$ ,  $\Lambda_1$ 和 $\Lambda_2$ 是折减系数。

$$c_{ix} = c_{i0} \left[ \frac{(\Lambda_1 - 1)}{L_i} x + 1 \right] \quad (4)$$

$$\sigma_{ix} = \sigma_{i0} \left[ \frac{(\Lambda_2 - 1)}{L_i} x + 1 \right] \quad (5)$$

取坡体中第*i*层岩层为研究对象, 第*i*层岩层发生弯曲破坏或剪切破坏的可能位置应该位于长度 $L_i$ 范围内, 如下图7(a)所示。第*i*层岩层除受到自重之外, 在层面法线方向上受到上部岩层或土体传来的荷载 $P_i$ , 下部岩层的支撑力 $P_{i-1}$ , 岩层在上层面切线方向上受层间切向力 $S_i$ , 岩层在下层面切线方向上可能受到均匀分布的层间切向力 $S_{i-1}$ 。在坡体深部 $O_i$ 处可以看作固定端。

任意选取一潜在整体破坏面, 其与水平面的夹角为 $\varpi_j$ , 与岩层*i*交于 $B_i$ 和 $C_i$ 两点, 记为 $B_i C_i$ 。破坏面以上破坏段长度为 $l_i$ 。进一步取 $l_i$ 岩层段为研究对象, 如图7(b)所示。 $\gamma'$ 表示岩层的重度,  $\varphi_d$ 表示岩层

层面之间的内摩擦角,  $\varphi'_d$ 表示岩层横断面上的内摩擦角,  $W_i$ 表示该岩层在破坏面 $B_i C_i$ 以上长度段内的自重。 $\eta_i$ 为力臂系数,  $e_i = \eta_i h_i$ 表示传递推力的合力 $P_i$ 作用点到破坏面 $B_i C_i$ 的距离。 $\eta_i$ 的取值取决于第*i*+1层岩层的破坏模式(第*i*+1层岩层发生滑动破坏时 $\eta_i = 0.5$ , 第*i*+1层岩层发生倾倒破坏时 $\eta_i = 1$ )。破坏面与岩层面法线的夹角为 $\alpha_j$ 。

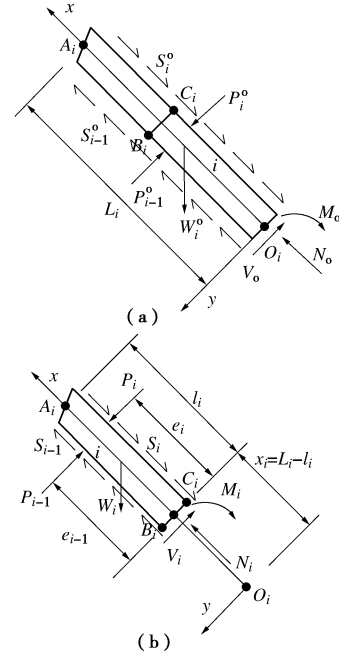


图7 反倾岩层*i*在长度 $L_i$ 范围内的受力分析图

Fig. 7 Force analysis of anti-dipping rock stratum *i* in range of length  $L_i$

$$\alpha_j = \varpi_j + \rho - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$x_i = x_{i+1} - \left( \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \right) \tan \alpha_j \quad (0 < i < n) \quad (7)$$

$$l_i = L_i - x_i \quad (0 < i \leq n) \quad (8)$$

$$h_i = l_i + \frac{1}{2} t_i \tan \left( \phi + \rho - \frac{\pi}{2} \right) \quad (0 < i \leq n) \quad (9)$$

$$W_i = \gamma' t_i l_i \quad (0 < i \leq n) \quad (10)$$

$$S_i = P_i \tan \varphi_d + c' h_i \quad (0 < i < n) \quad (11)$$

(1) 假定第*i*层岩层发生滑动破坏时, 向下一层岩层传递的推力为 $P'_{i-1}$ ,  $\eta_{i-1} = 0.5$ ,  $e_{i-1} = \eta_{i-1} h_{i-1}$ 。岩层*i*-1对岩层*i*的支反力也为 $P'_{i-1}$ 。

$$P'_{i-1} = \frac{\left\{ P_i + W_i \sin \nu + \frac{1}{2} \gamma_s u_i^2 \cos^2 \nu - \frac{1}{2} \gamma_s u_{i-1}^2 \cos^2 \nu - c_{ix} t_i - \left[ P_i \tan \varphi_d + c' h_i - c' h_{i-1} + W_i \cos \nu - \frac{1}{2} \gamma_s t_i (u_i + u_{i-1}) \cos \nu \right] \tan \varphi'_d \right\}}{1 - \tan \varphi_d \cdot \tan \varphi'_d} \quad (12)$$

同时, 定义岩层  $i$  形成滑动破坏的稳定安全系数为

$$f_{si} = \frac{\left\{ \frac{1}{2} \gamma_s u_{i-1}^2 \cos^2 \nu + c_{ix} t_i + [P_i \tan \varphi_d + c' h_i - c' h_{i-1} + W_i \cos \nu - \frac{1}{2} \gamma_s t_i (u_i + u_{i-1}) \cos \nu] \tan \varphi'_d \right\}}{P_i + W_i \sin \nu + \frac{1}{2} \gamma_s u_i^2 \cos^2 \nu} \quad (13)$$

(2) 假定岩层  $i$  将可能发生倾倒破坏,  $\eta_{i-1}'' = 1$ , 岩层  $i$  对岩层  $i-1$  的推力为

$$P_{i-1}'' = \frac{\left[ P_i \cdot \eta_i h_i - (P_i \tan \varphi_d + c' h_i) \cdot t_i + W_i \sin \nu \cdot \frac{1}{2} l_i - W_i \cos \nu \cdot \frac{1}{2} t_i + \frac{1}{6} \gamma_s u_i^3 \cos^2 \nu - \frac{1}{6} \gamma_s u_{i-1}^3 \cos^2 \nu + \frac{1}{6} \gamma_s t_i^2 (2u_i + u_{i-1}) \cos \nu - (1-k) t_i^2 \sigma_{ix} / 2 \right]}{\eta_{i-1} h_{i-1}} \quad (14)$$

同时, 定义岩层  $i$  形成倾倒破坏的稳定安全系数为

$$f_{ui} = \frac{\left[ (P_i \tan \varphi_d + c' h_i) \cdot t_i + W_i \cos \nu \cdot \frac{1}{2} t_i + \frac{1}{6} \gamma_s u_{i-1}^3 \cos^2 \nu + (1-k) t_i^2 \sigma_{ix} / 2 \right]}{\left[ P_i \cdot \eta_i h_i + W_i \sin \nu \cdot \frac{1}{2} l_i + \frac{1}{6} \gamma_s u_i^3 \cos^2 \nu + \frac{1}{6} \gamma_s t_i^2 (2u_i + u_{i-1}) \cos \nu \right]} \quad (15)$$

(3) 如果  $P_{i-1}' > 0$ ,  $P_{i-1}'' > 0$ , 则比较  $f_{si}$  和  $f_{ui}$  的大小。

①当  $f_{si} < f_{ui}$  时,  $P_{i-1} = P_{i-1}'$ ,  $F_{si} = f_{si}$ ,  $\eta_{i-1} = \eta_{i-1}' = 0.5$ ;

②当  $f_{si} > f_{ui}$  时,  $P_{i-1} = P_{i-1}''$ ,  $F_{si} = f_{ui}$ ,  $\eta_{i-1} = \eta_{i-1}'' = 1$ 。

(4) 如果  $P_{i-1}' > 0$ ,  $P_{i-1}'' < 0$ , 则  $P_{i-1} = P_{i-1}'$ ,  $F_{si} = f_{si}$ ,  $\eta_{i-1} = \eta_{i-1}' = 0.5$ 。

(5) 如果  $P_{i-1}' < 0$ ,  $P_{i-1}'' > 0$ , 则  $P_{i-1} = P_{i-1}''$ ,  $F_{si} = f_{ui}$ ,  $\eta_{i-1} = \eta_{i-1}'' = 1$ 。

(6) 如果  $P_{i-1}' < 0$ ,  $P_{i-1}'' < 0$ , 则  $P_{i-1} = 0$ ,  $\eta_{i-1} = 0$ ,  $F_{si} = \min(f_{si}, f_{ui})$ 。

根据上述的 (1) 至 (6) 步, 可以分析每一岩层将发生滑动破坏或倾倒破坏的安全系数, 及各岩层之间的相互推力, 并确定每一岩层的最小安全系数为  $F_{si}$ 。其中坡脚处的第 1 层岩层的下推力  $P_0$  即是边坡的剩余下推力。根据各岩层的稳定安全系数  $F_{si}$  能够确定边坡的整体稳定安全系数  $F_s^j$ 。

$$F_s^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{si} \quad (16)$$

得出每一个  $\varpi_j$  值对应的边坡整体稳定性系数  $F_s^j$ 。该边坡的最小整体稳定全系数为  $F_s$ , 其所对应的可能破坏面即为潜在整体破坏面。

$$F_s = \min(F_s^1, F_s^2, F_s^3, \dots, F_s^n) \quad (17)$$

其中第  $n$  层岩层受到上部土体及坡顶荷载的压力作用, 如图 8 所示。第  $n$  层岩层在上覆土体的自重压力  $W_0$  和外加均布荷载  $q_0$  作用下产生弯曲变形和层间错动, 由于存在坡顶荷载, 故不能按坦墙模型和库仑土压力计算作用于岩层上的力。第  $n$  层岩层的可能破坏面为  $B_n C_n$ , 则分析  $B_n C_n$  截面以上部分岩层受到的土压力。

第  $n$  层岩层受到上覆三角形土体的压力作用为

$$W_0 = \frac{1}{2} \gamma h_n^2 \cos \rho \cdot \sin \rho \quad (18)$$

第  $n$  层岩层上表面受到上覆土体传递压力的法向分力为

$$P_n = (q_0 h_n \cos \rho + W_0) \cos \rho \quad (19)$$

其中,

$$h_n = l_n + \frac{1}{2} t_n \tan \left( \phi + \rho - \frac{\pi}{2} \right) \quad (20)$$

第  $n$  层岩层受到上覆土体的压力作用, 在层面上形成切向力  $S_n$ ,  $S_n$  的方向与第  $n$  块岩层滑动或者倾倒的方向相反,

$$S_n = P_n \tan \delta + T_n + c' h_n \quad (21)$$

相比其他岩层而言, 第  $n$  层岩层的特殊之处在于第  $n$  层岩层受到上覆土体和外荷载的压力作用时, 在层面长度方向形成一个切向的分力  $T_n$ ,  $T_n$  的方向与第  $n$  层岩层滑动或者倾倒的方向相反。

$$T_n = (q_0 h_n \cos \rho + W_0) \sin \rho \quad (22)$$

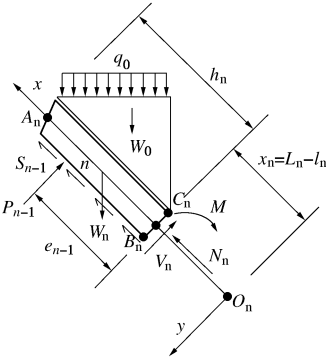


图 8 第  $n$  层岩层受力分析图

Fig. 8 Force analysis of anti-dipping rock stratum  $n$

表 1 工程算例计算参数

Table 1 Parameters of engineering examples

$H/\text{m}$	$t/\text{m}$	$\gamma'/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho/(^\circ)$	$\phi/(^\circ)$	$\varphi_d/(^\circ)$	$\varphi'_d/(^\circ)$	$c/\text{MPa}$	$\sigma_t/\text{MPa}$
100.00	0.40	27	63	55	18	45	0.4	1.5



$3^{\circ}$  ; 当  $t=1\text{ m}$  时,  $\alpha=19^{\circ}$  。随着岩层倾角  $\rho$  的变化,  $\alpha$  的变化幅度是非常大的, 说明岩层厚度也是确定潜在整体破坏面位置的敏感因素。

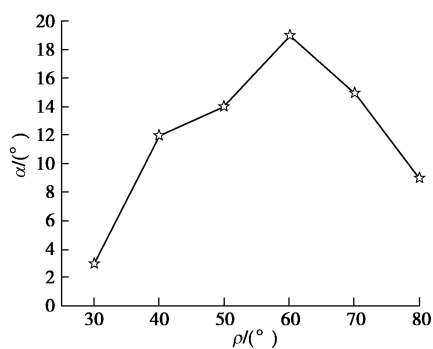


图 12 岩层倾角与  $\alpha$  的关系曲线图

Fig. 12 Relation curve between inclination of rock strata and  $\alpha$

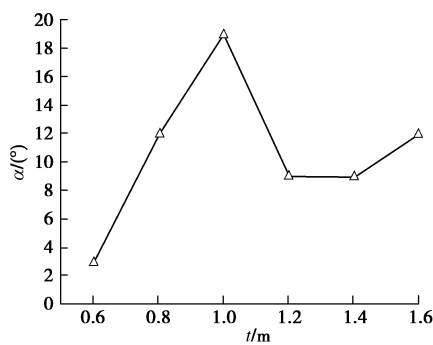


图 13 岩层厚度与  $\alpha$  的关系曲线图

Fig. 13 Relation curve between thickness of rock strata and  $\alpha$

(3) 坡顶荷载作用对  $\alpha$  的影响

由图 14 可知, 随着坡顶分布荷载作用  $q$  的增大, 最危险破坏面与层面法线的夹角  $\alpha$  无明显变化, 即说明坡顶荷载作用大小不是确定潜在最危险破坏面位置的敏感因素。但这并不能说明坡顶荷载作用大小也不是边坡稳定性的敏感因素。

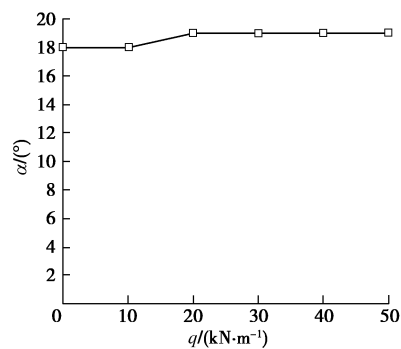


图 14 坡顶荷载与  $\alpha$  的关系曲线图

Fig. 14 Relation curve between load on slope top and  $\alpha$

(4) 地下水位倾角对  $\alpha$  的影响

由图 15 可知: 当地下水位倾角  $\lambda < 60^{\circ}$  时, 或者

不考虑地下水的作用时, 最危险破坏面与层面法线的夹角  $\alpha$  基本保持不变; 当  $\lambda > 60^{\circ}$  时,  $\alpha$  首先骤降, 然后近似呈线性增加; 从整体上看, 地下水位的倾角与  $\alpha$  之间无显著的规律。但是  $\lambda > 60^{\circ}$  时, 随着地下水位倾角的增大,  $\alpha$  的增幅基本相等, 说明地下水位倾角是确定潜在整体破坏面位置的敏感因素。

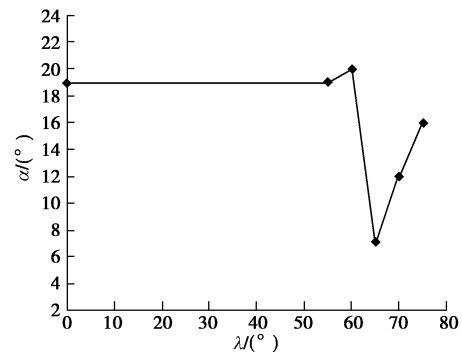


图 15 地下水位倾角与  $\alpha$  的关系曲线图

Fig. 15 Relation curve between groundwater levels and  $\alpha$

(5) 岩层横截面的节理贯通率对  $\alpha$  的影响

由图 16 可知, 随着岩层横截面的节理贯通率  $k$  的增大, 最危险破坏面与层面法线的夹角  $\alpha$  整体上呈增大的趋势, 尤其当  $0.2 < k < 1$  时,  $\alpha$  即随着岩层横截面的节理贯通率  $k$  的增大而近似线性增大,  $\alpha$  的变化幅度大, 最大值为  $19^{\circ}$ , 最小值为  $0^{\circ}$ , 说明岩层横截面的节理贯通率也是确定潜在整体破坏面位置的敏感因素。

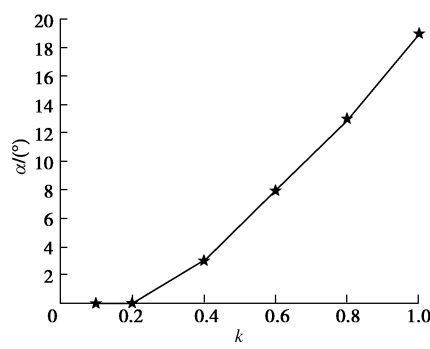


图 16 岩层横截面节理贯通率与  $\alpha$  的关系曲线图

Fig. 16 Relation curve between joint penetration rate on cross-section of rock strata and  $\alpha$

同理, 分析了坡面倾角、岩层层面黏聚力、风化作用导致岩层横截面上节理面黏聚力和岩石抗拉强度的折减系数  $\Lambda$  等因素对  $\alpha$  影响。综合得出, 反倾岩层的岩层倾角  $\rho$ 、岩层厚度  $t$ 、坡面倾角  $\phi$ 、地下水位倾角  $\lambda$ 、岩层层面黏聚力  $c'$ 、岩层横截面的节理贯通率  $k$ 、岩层风化作用导致的强度折减  $\Lambda$  共计 7 项参数均是确定反倾岩质边坡次生倾倒破坏潜在整体破坏面位置的敏感因素。



## 5 结 论

(1)通过反倾岩层坡后土压力分布特性物理模拟试验,得出不同倾角的反倾岩层受到上覆土体及堆载作用下的压应力分布情况:当坡后无堆载,仅在坡后土体自重作用下时,下卧反倾岩层上的土压力基本符合库仑主动土压力,由于存在土拱效应,实测值小于理论值;当坡后土体上方有堆载时,下卧反倾岩层上的土压力实测值不符合库仑主动土压力理论,且坡顶附加荷载越大,土拱效应越明显。下卧岩层破坏的模式主要有3种:第一,岩层横断面上剪应力首先大于抗剪强度,发生剪切破坏,岩层破坏面上段和下段出现错位现象;第二,岩层横断面上的拉应力首先大于其自身的抗拉强度,形成上宽下窄的拉裂缝,发生弯曲倾倒破坏,第三,岩层破坏面呈现出前两种破坏现象的叠加。各岩层的相互作用力为分布力,坡体的整体破坏面基本在一个平面上,且通过坡脚。

(2)基于“叠合悬臂梁模型”,考虑了由于风化作用而导致岩层横截面上节理面黏聚力和岩石抗拉强度衰减这一客观因素,改进了反倾岩层的极限平衡分析方法,推导了坡体任意岩层下推力的理论公式,定义了任意岩层变形破坏的安全系数和边坡整体倾倒破坏的综合安全系数,利用顺次传递分析法,推导了反倾岩质边坡次生倾倒破坏的稳定性分析方法。

(3)分析了反倾岩质边坡次生倾倒潜在整体破坏面的影响因素,得出反倾岩层的岩层倾角 $\rho$ 、岩层厚度 $t$ 、坡面倾角 $\phi$ 、地下水位倾角 $\lambda$ 、岩层层面黏聚力 $c'$ 、岩层横截面的节理贯通率 $k$ 、岩层风化作用导致的强度折减 $\Lambda$ ,共计7项参数均是确定反倾岩质边坡次生倾倒破坏潜在整体破坏面位置的敏感因素。

### 参考文献:

- [1] 王思敬. 金川露天矿边坡变形机制及过程[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 76 - 83. (WANG Si-jing. On the mechanism and process of slope deformation in an open pit mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 76 - 83. (in Chinese))
- [2] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. (HUANG Run-qiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese))
- [3] CHEN Z Y, GONG W J, MA G W, et al. Comparisons between centrifuge and numerical modeling results for slope toppling failure[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(9): 1497 - 1508.
- [4] 汪小刚, 张建红, 赵毓芝, 等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 14 - 21. (WANG Xiao-gang, ZHANG Jian-hong, ZHAO Yu-zhi, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 14 - 21. (in Chinese))
- [5] 郭建军, 王俊杰, 黎洪光. 反倾层状岩土复合边坡的稳定性分析方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 70 - 75. (GUO Jian-jun, WANG Jun-jie, LI Hong-guang, et al. Method of stability analysis for anti-inclined and layered slopes with rock and soil composition[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(10): 70 - 75. (in Chinese))
- [6] BABIKER A F A, SMITH C C, GILBERT M, et al. Non-associative limit analysis of the toppling-sliding failure of rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 1 - 11.
- [7] MAJDI A, AMINI M. Analysis of geo-structural defects in flexural toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 175 - 186.
- [8] GUO J J, WANG J J. Mechanism analysis of the failure for a safe jointed rock high slope: tectonic structures and damage[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(1): 455 - 467.
- [9] EVANS R S. Analysis of secondary toppling rock failures-The stress redistribution method[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1981, 14(2): 77 - 86.
- [10] TEME S C, WEST T R. Some secondary toppling failure mechanisms in discontinuous rock slopes[C]// Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics. Texas, 1983: 193 - 204.
- [11] ALEJANO L R, GOMEZ-MARQUEZ I, MARTINEZ-ALEGRIA R. Analysis of a complex toppling-circular slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, 114: 93 - 104.
- [12] MOHTARAMI E, JAFARI A, AMINI M. Stability analysis of slopes against combined circular-toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 67: 43 - 56.
- [13] LIAN J J, LI Q, DENG X F, et al. A numerical study on toppling failure of a jointed rock slope by using the distinct lattice spring model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 513 - 530.



- [14] ZHANG G C, WANG F, ZHANG H, et al. New stability calculation method for rock slopes subject to flexural toppling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, **106**: 319 - 328.
- [15] HUANG D, GU D M. Influence of filling-drawdown cycles of the Three Gorges reservoir on deformation and failure behaviors of anacinal rock slopes in the Wu Gorge[J]. Geomorphology, 2017, **295**: 489 - 506.
- [16] GUO S F, QI S W, YANG G X, et al. An analytical solution for block toppling failure of rock slopes during an earthquake[J]. Applied sciences, 2017, **7**: 1 - 17.
- [17] YAGODA-BIRAN G, HATZOR Y H. A new failure mode chart for toppling and sliding with consideration of earthquake inertia force[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, **64**: 122 - 131.
- [18] WANG J J, ZHAO T L, CHAI H J, et al. Failure of a rock slope 16.5 years after excavation in repeated strata of sandstone and mudstone[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**: 1458 - 1471.
- [19] 王俊杰, 冯 登, 柴贺军, 等. 基于赤平极射投影和  $K$ -均值聚类算法的优势结构面分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(1): 74 - 81. (WANG Jun-jie, FENG Deng, CHAI He-jun, et al. Dominant discontinuities based on stereographic projection and  $K$ -means clustering algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 74 - 81. (in Chinese))
- [20] 郑 允, 陈从新, 刘婷婷, 等. 坡顶荷载作用下岩质边坡倾倒破坏分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(9): 2039 - 2047. (ZHENG Yun, CHEN Cong-xin, LIU Ting-ting, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes under the loads applied on the top[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(9): 2039 - 2047. (in Chinese))
- [21] 郭建军, 王俊杰, 黎洪光, 等. 坡后土体推力作用下反倾节理岩质边坡次生倾倒机理分析[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(5): 1205 - 1212. (GUO Jian-jun, WANG Jun-jie, LI Hong-guang, et al. Analysis of secondary toppling mechanism of jointed rock slope under soil pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(5): 1205 - 1212. (in Chinese))
- [22] 刘海军. 皖南山区反倾板岩边坡倾倒变形机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (LIU Hai-jun. Research on the toppling deformation mechanism of counter-tilt slate slope in the mountainous area of Southern Anhui[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [23] 郑 允, 陈从新, 刘秀敏, 等. 层状反倾边坡弯曲倾倒破坏计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 2): 4252 - 4261. (ZHENG Yun, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Investigation on calculation method of layered counter-tilt slope for flexural toppling failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 4252 - 4261. (in Chinese))