

DOI: 10.11779/CJGE202211019

阶梯状滑动断续节理顺层边坡稳定性分析

李得建¹, 贾文韬¹, 程肖^{2*}, 赵炼恒³, 张迎宾¹, 余鹏程¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川大学灾后重建与管理学院深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 中南大学土木工程学院重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 阶梯状滑动顺层岩质滑坡在工程中较为常见, 其岩桥和节理特性对阶梯状滑动面的形成至关重要。考虑岩桥和节理面之间强度参数弱化特性, 构建阶梯状滑动顺层边坡稳定性分析模型。研究表明: 与平面型滑动对比验证了分析模型的准确性。裂隙连通率 k_Y 、基本摩擦角 ϕ_b 、粗糙度系数 JRC 和弱化系数 K_c 对安全系数 F_s 影响显著。岩桥倾角 β_3 越大, F_s 减小越显著, 边坡越不稳定。台阶法中开挖次数和坡角角度对边坡稳定性影响显著, 通过算例分析验证了该方法与极限平衡解差异率在 1% 以内。某些情况下当开挖使节理面出露时, F_s 显著降低 (如 $\beta=53^\circ$ 时降低了 22.8%), 易诱发滑坡的发生。同时, 随着拉裂缝倾角 β_1 和充水高度 h_w 的增大, F_s 显著降低, 出流缝被堵塞时水力效应更为显著, 此时边坡最不稳定。

关键词: 节理岩质边坡; 阶梯状滑动; 弱化系数; 台阶型坡面; 水力作用

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)11-2125-10

作者简介: 李得建(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土构筑物极限状态分析及抗减震消能加固设计等方面的教学和科研工作。E-mail: lidejian@swjtu.edu.cn。

Stability of stepped sliding of bedding rock slopes with discontinuous joints

LI De-jian¹, JIA Wen-tao¹, CHENG Xiao², ZHAO Lian-heng³, ZHANG Ying-bin¹, YU Peng-cheng¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Institute for Disaster Management and Reconstruction, MOE Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Civil Engineering, Key Laboratory of Heavy-Haul Railway Engineering Structure, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The bedding rock landslides with stepped sliding surface are common in engineering, and the characteristics of rock bridges and joints are very important to the formation of stepped sliding surface. The weakening characteristics of the strength parameters of rock bridges and joints are considered. The models for stability of stepped sliding of bedding slopes are established. The results show that the accuracy of the model is verified by comparing with the planar failure model. In addition, the fracture connectivity rate k_Y , basic friction angle ϕ_b , roughness coefficient JRC and weakening coefficient K_c have significant influences on F_s . In this mode, the greater β_3 is, the more significant the reduction of F_s is, and the more unstable the slope is. In addition, the excavation times and slope angle have significant influences on the slope stability. The difference rate between the proposed method and the limit equilibrium solution is less than 1%. In some cases, when the joint surfaces are exposed by excavation, F_s is significantly reduced (the reduction of 22.8% when $\beta=53^\circ$), which easily leads to the occurrence of landslides. Meanwhile, with an increase in angle β_1 of tensile cracks and height h_w of water, F_s significantly decreases. The water pressure is more significant when the outlets are blocked, and the rock slope is most unstable.

Key words: joint rock slope; stepped sliding; weakening coefficient; step-type slope surface; water pressure

0 引言

实际工程中岩质边坡大多是由岩桥和不连续节理面组成的复杂地质体^[1-2], 且大多数岩质边坡节理面相对于工程尺度呈显著的非贯通特征。由于岩桥和不连续节理面大都埋入边坡内部, 节理面的发育具有显著的随机性, 故对其稳定性分析较为复杂和困难。在断续节理顺层岩质边坡内部存在共面和雁型两种节理面^[3-4]。

破坏模式区别在于岩桥贯通模式: 若是节理间岩桥贯通则为平面型破坏模式; 若是相邻节理间岩桥贯通则

基金项目: 四川省科技厅项目 (2021YJ0032, 2021YJ0390); 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放基金项目 (KLE-TJGE-B2004); 中央高校基本科研业务费-科技创新项目 (2682021CX007); 专职博士后研发基金项目 (2022SCU12126)

收稿日期: 2021-11-16

*通信作者 (E-mail: chengxiao@scu.edu.cn)

为阶梯状(或多阶梯)破坏模式。在强震^[5-6]、降雨^[7-8]、开挖^[9]、长期蠕变时空演化及其他作用^[10-11]下发生的阶梯状滑坡表明:当岩桥发生破坏后,通过与相邻节理面搭接或多层节理面搭接形成阶梯状和多阶梯状破坏模式(图1)。



图1 三荔高速顺层岩质阶梯状滑面失稳案例^[8]

Fig. 1 Typical case of stepped sliding of jointed rock landslides in Sandu-Libo Expressway^[8]

基于平面型破坏模式, Jennings^[12]提出了断续节理强度参数的加权平均计算公式: $\tan\varphi = k\tan\varphi_j + (1-k)\tan\varphi_r$, $c = kc_j + (1-k)c_r$ (k 为裂隙连通率)。该式考虑了岩桥和节理面抗剪强度参数的差异性, 却未考虑其相关性(本文研究对象为次生节理, 该类节理可视为由完整岩石演化而来)。虽然邹宗兴^[13]探究了顺层岩质边坡滑带抗剪强度参数弱化系数的问题, 但是, 从规范中相关规定和实际情况可知^[2, 14], 内摩擦角正切值与黏聚力两者的弱化程度并不一致。目前研究大都忽略了岩桥和节理面强度参数的相关性和差异性, 或对两者仍采用相同的破坏准则, 其合理性受到削弱。节理面抗剪性能并不总能满足 M-C 破坏准则, 尤其当 σ_n 较小时计算出的剪切强度明显偏大^[15]。Barton 等^[16-18]通过研究节理面直剪特性, 并基于试验结果提出了可用于评估不规则、无充填节理面峰值抗剪强度的非线性 JRC-JCS 经验公式(即 B-B 破坏准则), 可较好反映节理面的抗剪性能。

综上所述, 首先, 岩桥和节理面分别服从 M-C 和 B-B 破坏准则, 岩桥和节理面强度参数采用不同弱化系数 K_ϕ 和 K_c 。然后, 开展考虑后缘倾斜拉裂缝存在的阶梯状岩桥剪切破坏模式下边坡稳定性研究, 开展对比分析和参数敏感性分析, 获取各关键参数对断续节理顺层岩质边坡稳定性的影响规律。最后, 基于台阶型边坡外形特征, 开展台阶法开挖次数和坡角角度对节理顺层岩质边坡安全系数影响规律的探究。同时考虑水力作用的影响, 探究出流缝被堵塞和未堵塞对边坡稳定性的影响, 分析拉裂缝倾角和拉裂缝充水高度对边坡稳定性的影响规律。

1 断续节理顺层边坡阶梯状失稳模式

1.1 B-B 破坏准则与 M-C 破坏准则的参数转换

岩桥服从 M-C 破坏准则, 节理面服从 B-B 破坏准则。考虑岩桥和节理面抗剪强度参数的差异性, 利用不同的弱化系数 K_c 和 K_ϕ 获取岩桥强度参数 c_r , φ_r 。根据相关学者研究^[19-20], 获得两准则参数具体转换为(图2)

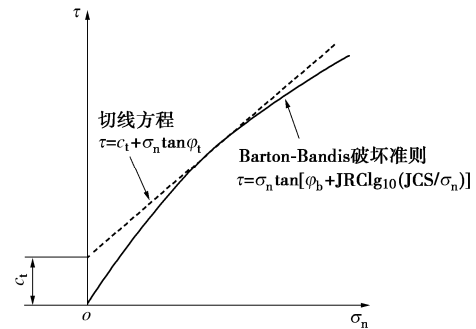


图2 B-B 与 M-C 破坏准则相关参数转换示意图

Fig. 2 Conversion parameters of B-B and M-C failure criteria

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\partial\tau}{\partial\sigma_n}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial\tau}{\partial\sigma_n} = \tan\left(\text{JRC} \lg \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \varphi_b\right) - \frac{\pi \text{JRC}}{180 \ln 10} \left[\tan^2\left(\text{JRC} \lg \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \varphi_b\right) + 1 \right], \quad (2)$$

$$c = \tau - \sigma_n \tan\varphi. \quad (3)$$

通过式(1)~(3)可获取节理面黏聚力 c_j 和内摩擦角 φ_j , 结合 K_c , K_ϕ 可获得岩桥黏聚力 c_r 和内摩擦角 φ_r 。

1.2 岩桥与节理面强度参数弱化特性

断续节理顺层岩质边坡与贯通节理岩质边坡破坏机理有些不同^[21-22], 因而岩桥和节理面强度参数存在显著的弱化特性, 并存在以下两方面的假定:

(1) 根据节理接触状态, 节理面所受到的法向应力等于总法向应力乘以传压系数。本文假定节理面承担的法向应力与岩桥部分承担的法向应力一致。

(2) 实际边坡中岩桥和节理面搭接处是应力集中部位, 存在明显弱化现象, 且向岩桥内部弱化趋势逐渐减弱。本文假定忽略岩桥局部弱化情况, 取完整岩桥相关强度参数。

基于以上两个假定, 通过引入弱化系数将弱化特性体现在强度参数上面, 可有效体现节理面对断续节理顺层岩质边坡稳定性的影响。

1.3 断续节理顺层岩质边坡阶梯状失稳模式构建

基于上述相关假定, 构建阶梯状滑动极限状态失

稳模式如图 3 所示, 为求解方便建立直角坐标系, A 点坐标为 $(0, 0)$, X 轴方向指向向右, Y 轴方向指向向上。注意: 根据黄达等的研究^[2, 23], 当岩桥倾角小于 90° 时主要发生剪切破坏; 岩桥倾角大于 90° 时主要发生张拉破坏。本文构建的分析模型中岩桥倾角小于 90° (图 3 中 β_3), 故分析模型适用于岩桥剪切破坏。

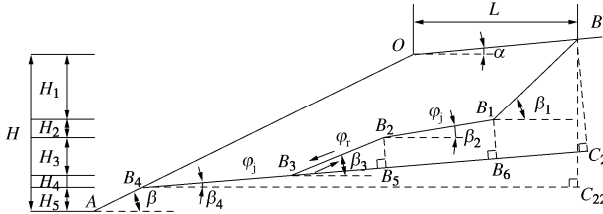


图 3 顺层岩质边坡岩桥剪切贯通阶梯状失稳模式图

Fig. 3 Shear cut through mode of rock bridges of stepped sliding of jointed rock slope

图 3 中, 边坡坡角和坡顶角分别为 β, α , OB 水平距离为 L , 边坡高度为 $H+L\tan\alpha$ 。 BB_1 高度为 $H_1+L\tan\alpha$, 倾角为 β_1 ; B_1B_2, B_3B_4 为节理面长度, 高度分别为 H_2 和 H_4 , 倾角分别为 β_2, β_4 (岩桥间节理面大都近平行, 故 $\beta_4=\beta_2$)。 B_2B_3 为岩桥剪切破坏长度, 高度为 H_3 , 倾角为 β_3 。 BC_2, B_2B_5, B_1B_6 与 B_4C_2 垂直, BC_2 与 B_4C_2 垂直。坐标参数: $B(H/\tan\beta+L, H+L\tan\alpha)$, $B_1(H/\tan\beta+L-(H_1+L\tan\alpha)/\tan\beta_1, H-H_1)$, $B_2(H/\tan\beta+L-(H_1+L\tan\alpha)/\tan\beta_1-H_2/\tan\beta_2, H-H_1-H_2)$ 。

阶梯状滑动裂隙连通率表达式为

$$k_Y = \frac{\frac{H_4 + H_2}{\sin\beta_2} + \frac{(H_1 + L\tan\alpha) \cdot \cos(\beta_1 - \beta_2)}{\sin\beta_1}}{\frac{H_4 + H_2}{\sin\beta_2} + \frac{H_3 \cdot \cos(\beta_3 - \beta_2)}{\sin\beta_3} + \frac{(H_1 + L\tan\alpha) \cdot \cos(\beta_1 - \beta_2)}{\sin\beta_1}} = k_{Y1} + k_{Y2}, \quad (4)$$

式中, k_Y 为裂隙连通率。 k_{Y1} 可提供抗滑力 (节理面), k_{Y2} 不可提供抗滑力 (后缘倾斜拉裂缝)。

H_4 可由 H_3, y_4 表示:

$$H_4 = H - H_1 - H_2 - y_4 - H_3. \quad (5)$$

通过式 (6), y_4 可由 H_3 表示:

$$y_4 = y_{44} - H_3 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_2) \cdot \sin\beta}{\sin(\beta - \beta_2) \cdot \sin\beta_3}. \quad (6)$$

将式 (5), (6) 代入式 (4), 可获得 H_3 表达式:

$$H_3 = \frac{(1-k_Y) \frac{(H_1 + L\tan\alpha) \cdot \cos(\beta_1 - \beta_2)}{\sin\beta_1} + (1-k_Y) \frac{H - H_1 - y_{44}}{\sin\beta_2}}{(k_Y - 1) \frac{\sin(\beta_3 - \beta_2) \cdot \sin\beta}{\sin(\beta - \beta_2) \cdot \sin\beta_3 \cdot \sin\beta_2} + k_Y \frac{\cos(\beta_3 - \beta_2)}{\sin\beta_3} + \frac{(1-k_Y)}{\sin\beta_2}}. \quad (7)$$

进而获取点 B_4 的坐标 x_4 和 y_4 :

$$\left. \begin{aligned} x_4 &= \frac{H - H_1 - \tan\beta_2 \left(\frac{H}{\tan\beta} + L - \frac{H_1 + L\tan\alpha}{\tan\beta_1} \right)}{\tan\beta - \tan\beta_2} \\ y_4 &= x_4 \cdot \tan\beta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式 (8) 中 y_4 代入式 (5), 可获得 H_4 表达式。将 H_3, H_4 及其他相关参数代入阶梯状滑动面岩桥剪切破坏稳定性分析中, 可获取其安全系数表达式。

2 断续节理顺层岩质边坡阶梯状失稳模式的构建

2.1 断续节理阶梯状滑动岩桥剪切破坏稳定性分析

边坡沿缓倾裂隙面滑动导致岩桥发生剪切破坏贯通。因此, 可沿缓倾裂隙方向 (图 3 中 B_4C_2 方向) 计算抗滑力 F_{resist} 和下滑力 F_{induce} 从而得到该模式下安全系数表达式^[12]。

(1) 边坡体沿 B_4C_2 方向抗滑力的计算

节理面和岩桥承担的法向应力相同, 投影在 B_4C_2 上坡体法向应力 σ_{nY} 为

$$\sigma_{nY} = \frac{W \cos\beta_4}{B_4B_6}, \quad (9)$$

式中, W 为滑坡体自重, $W=\gamma S_{Y滑}$, $S_{Y滑}$ 为滑坡体面积。 $S_{Y滑}$ 的计算过程如下:

a) 四边形 $OBC_{22}B_4$ 面积 S_{Y1} 的求解

$$S_{Y1} = \frac{L \cdot L \tan\alpha}{2} + L \cdot (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) + \frac{(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)^2}{2 \tan\beta}. \quad (10)$$

b) 多边形 $BC_{22}B_4B_3B_2B_1$ 面积 S_{Y2} 的求解

$$S_{Y2} = \frac{(L \tan\alpha + H_1)^2}{2 \tan\beta_1} + \left(\frac{L \tan\alpha + H_1}{\tan\beta_1} + \frac{H_2}{2 \tan\beta_2} \right) \cdot H_2 + \left(\frac{L \tan\alpha + H_1}{\tan\beta_1} + \frac{H_2}{\tan\beta_2} + \frac{H_3}{2 \tan\beta_3} \right) \cdot H_3 + \left(\frac{L \tan\alpha + H_1}{\tan\beta_1} + \frac{H_2}{\tan\beta_2} + \frac{H_3}{\tan\beta_3} + \frac{H_4}{2 \tan\beta_4} \right) \cdot H_4, \quad (11)$$

$$S_{Y滑} = S_{Y1} - S_{Y2}. \quad (12)$$

用 $H_5 \geq 0$ 对滑动面在坡表出露进行约束:

$$H_5 = H - H_1 - H_2 - H_3 - H_4 \quad (H_5 \geq 0). \quad (13)$$

c) B_4B_6 长度

$$B_4B_6 = \frac{H_4}{\sin\beta_4} + \frac{H_3 \cdot \cos(\beta_3 - \beta_4)}{\sin\beta_3} + \frac{H_2}{\sin\beta_2}. \quad (14)$$

阶梯状滑动面为岩桥剪切破坏与相邻节理面连接贯通而成, 岩桥倾角大于节理面倾角, 故 $\beta_3 > \beta_2 = \beta_4$ 。

由于岩桥和节理面对边坡稳定性的贡献不同，故 B_4B_6 方向抗滑力为

$$F_{\text{resist}} = (c_r + \sigma_{nY} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_3B_5 + (B_5B_6 + B_4B_3) \cdot \left\{ \sigma_{nY} \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{nY}} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

(2) 边坡体沿 B_4B_6 方向下滑力的计算

$$F_{\text{induce}} = W \cdot \sin \beta_4 \quad (16)$$

(3) 阶梯状岩桥剪切破坏模式安全系数的计算

$$F_s = \left\{ (c_r + \sigma_{nY} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_4C_2 \cdot (1 - k_Y) + \left\{ \sigma_{nY} \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{nY}} \right) \right] \right\} \cdot B_4C_2 \cdot k_{Y1} \right\} / W \cdot \sin \beta_4 \quad (17)$$

将相关参数代入式(17)，可求得阶梯状滑动岩桥剪切破坏时边坡安全系数 F_s 。

2.2 各关键参数对阶梯状滑动岩桥剪切破坏影响分析

(1) 对比分析

开展平面型与阶梯状失稳模式下安全系数的对比分析对比结果如图4所示。参数取值：① $k_Y=0.5 \sim 1.0$ ， $\beta_3=35^\circ \sim 80^\circ$ ， $K_\varphi=0.6$ ， $K_c=0.2$ ；② $k_Y=0.5 \sim 1.0$ ， $\beta_3=35^\circ \sim 80^\circ$ ， $K_\varphi=0.8$ ， $K_c=0.4$ 。

其他参数取值： $H=100 \text{ m}$ ， $L=25 \text{ m}$ ， $\alpha=10^\circ$ ， $\beta=75^\circ$ ， $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ ， $H_1=2 \text{ m}$ ， $H_2=3 \text{ m}$ ， $\beta_1=75^\circ$ ， $\beta_2=35^\circ$ ， $\varphi_b=20^\circ$ ， $\text{JRC}=6$ ， $\text{JCS}=40 \text{ MPa}$ 。

由图4可知，当 $\beta_3=\beta_2=35^\circ$ 时为平面型失稳模式。随 β_3 的增大，平面型失稳模式转化为阶梯状失稳模式， F_s 呈减小趋势，且 β_3 越大，减小得越快，这与

文献[4]中数值模拟的结果规律相一致。由图4(a)可知， k_Y 越小岩桥对边坡稳定性的贡献越大，故 F_s 越高。此时随着 β_3 的变化，对 F_s 的影响越来越显著。由图4对比可知，随 K_φ 和 K_c 的增大，岩桥抗剪强度参数相应减小，故 F_s 相对降低，这是由于以节理面参数为基础， K_φ 和 K_c 越大，岩桥强度参数越小，故 F_s 越低。

(2) 参数敏感性分析

探究裂隙连通率 k_Y 和基本摩擦角 φ_b 、粗糙度系数 JRC 和壁面有效抗压强度 JCS 、弱化系数 K_φ 和 K_c 、岩桥倾角 β_3 和节理面倾角 β_2 对阶梯状滑动边坡稳定性的影响，具体如图5所示。参数取值如表1所示，其他参数取值：图5(a)~(c)中 $H=50 \text{ m}$ ， $\alpha=10^\circ$ ， $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ ， $H_1=2 \text{ m}$ ， $H_2=3 \text{ m}$ 。图5(d)中 $H=100 \text{ m}$ ， $\alpha=10^\circ$ ， $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ ， $H_1=1 \text{ m}$ ， $H_2=3 \text{ m}$ 。节理面参数取值时，应保证 $\varphi_b + \text{JRC} \lg(\text{JCS}/\sigma_n)$ 最大值不大于 70° 。

由图5可知，随 k_Y ， K_φ 和 K_c 的增大， F_s 显著减小。 φ_b 增大同样提高了岩桥和节理面抗剪强度参数， F_s 呈非线性增大趋势。 F_s 随 JRC 和 JCS 的增大均呈非线性增大趋势，只是后者增加得越来越慢。 F_s 随 β_3 的增大而非线性减小，且减小趋势非常显著，即岩桥倾角越大，减小越快。这是由于岩桥倾角越大，构成的阶梯状滑动面更容易下滑，边坡越不稳定。故所呈现的效果与滑动面的倾角越大边坡越不稳定的情况类似，因此， F_s 越小。 F_s 随 β_2 的增大而非线性减小，且减小趋势较为显著。

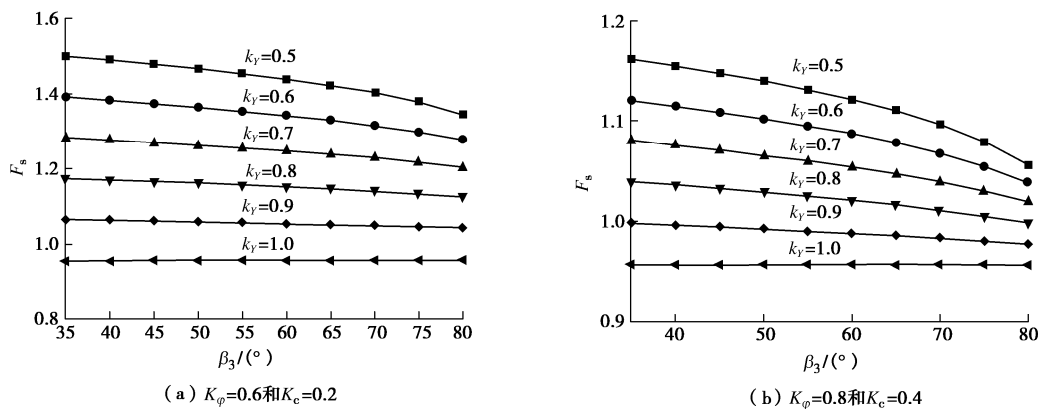


图4 弱化系数 K_φ 和 K_c 下安全系数 F_s 随岩桥倾角 β_3 和裂隙连通率 k_Y 的变化曲线

Fig. 4 Safety factor F_s versus rock bridge angle β_3 and fracture connectivity rate k_Y under weakening coefficients K_φ and K_c

表1 参数分析图5参数取值

Table 1 Values of parameters in Fig. 5

参数	k_Y	$\varphi_b/(^\circ)$	K_φ	K_c	JRC	JCS/MPa	$\beta_3/(^\circ)$	$\beta_2/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	L/m	$\beta_1/(^\circ)$
图5(a)	0.2~1.0(0.1)	20~36(4)	0.8	0.4	6	50	50	40	60	16	60
图5(b)	0.8	28	0.650.6~0.95 (0.05)	0.05~0.40 (0.05)	6	30	60	45	60	15	60
图5(c)	0.65	20	0.6	0.3	0~18(3)	20~100(20)	50	40	60	22	60
图5(d)	0.6	20	0.8	0.4	10	40	30~75(5)	25~50(5)	58	10	60

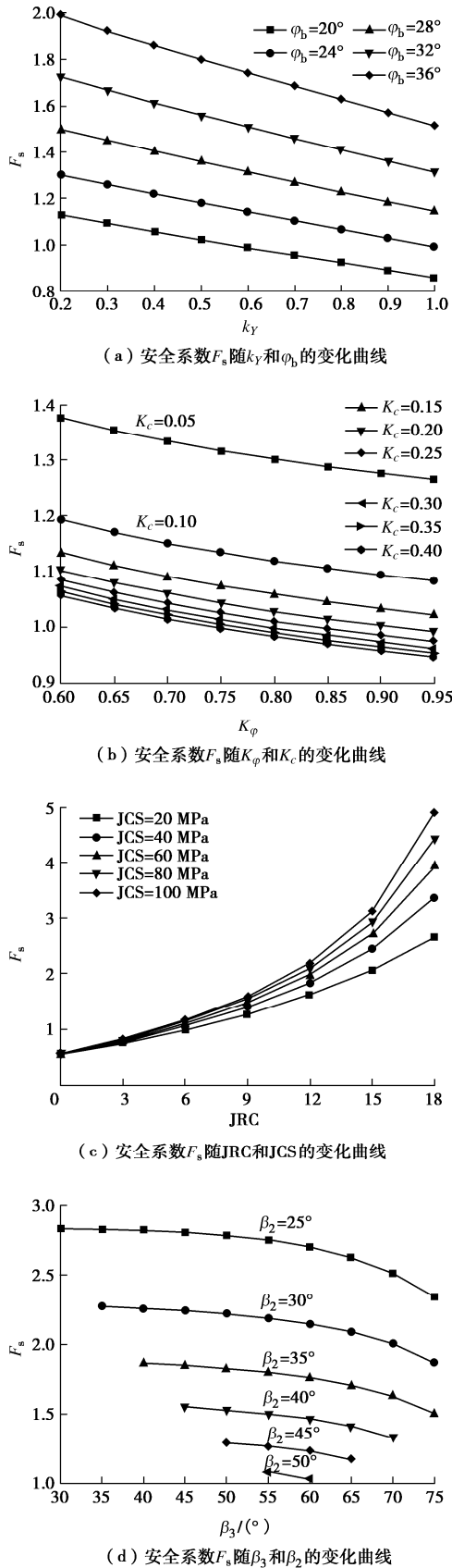


图 5 阶梯状失稳模式各关键参数对边坡稳定性的影响规律
Fig. 5 Influences of key parameters on stability of stepped failure mode of slope

3 阶梯状滑动台阶型坡面岩质边坡稳定性分析

3.1 台阶型坡面边坡阶梯状失稳模式构建

典型顺层岩质边坡表现为节理面在坡面出露或者随着开挖进行在开挖面出露。目前针对边坡的开挖处置大都基于台阶法开展, 通常情况下坡率设置为 1 : 0.75 (53.13°) 或 1 : 1 (45°), 台阶之间设置平台 (通常设置为 2 m, 可根据现场实际情况相应调整), 达到对边坡卸载和使之更加稳定的目的。台阶型坡面顺层岩质边坡阶梯状岩桥剪切贯通模式如图 6 所示。

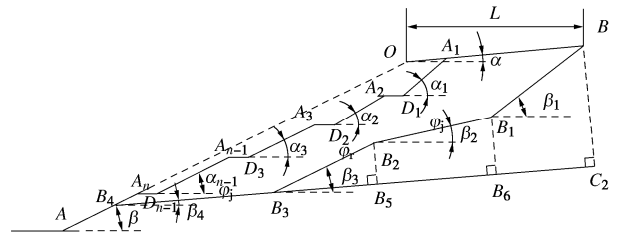


图 6 台阶型坡面顺层岩质边坡阶梯状岩桥剪切贯通模式图
Fig. 6 Shear cut through mode of rock bridges of stepped sliding of jointed rock slope based on step-type slope surface

基于图 3, 6 分别设置若干级边坡和台阶, 自上而下为 $A_i D_i$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) 和 $A_n A$, 倾角为 α_i ($i=1, 2, \dots, n-1$), 高度为 $h_1 + L_{A1} \tan \alpha_1$ 、 h_i ($i=2, 3, \dots, n$), 平台宽度为 d_i ($i=1, 2, \dots, n-1$)。考虑边坡开挖顺序均是自上而下进行, 故着重探究开挖次数和各级边坡坡率对阶梯状滑动岩质边坡稳定性的影响分析。

(1) 台阶型坡面引起边坡几何尺寸的变化

基于 2.1 节, 通过边坡裂隙连通率、几何尺寸和岩土体参数获得阶梯状滑动面位置和安全系数表达式, 具体依照 2.1 节相关内容求解。

台阶法使阶梯状滑动面上部岩体重力荷载减小, 若按照 2.1 节计算公式, 滑动面上的正应力、岩桥和节理面参数均随之变化, 故为获得开挖次数和坡角角度的影响, 设定每组情况下岩桥和节理面抗剪强度参数均一致, 而正应力因为上覆荷载的变化而随之变化, 进而影响抗滑力计算。开挖效应主要引起边坡体几何尺寸和潜在滑动面上覆岩土体重度的变化, 不考虑开挖时滑坡体面积为 $S_{Y滑}$ (式 (12)), 开挖掉的滑坡体面积为 $S_{Y挖}$, 具体相关几何尺寸计算如下:

台阶型坡面点 A_1 至坡顶点 O 的水平距离 L_{A1} 为

$$L_{A1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\tan \alpha_i} + \frac{h_n}{\tan \beta} + \sum_{i=1}^{n-1} d_i - \frac{H}{\tan \beta}}{1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_1}} \quad (18)$$

每级开挖体面积计算为

$$S_{Y_{挖i}} = \left[L_{A1} \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_1} \right) - \left(\sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{h_j}{\tan \alpha_j} + d_j - \frac{h_j}{\tan \beta} \right) \right) \right] h_i + \frac{h_i^2}{2 \tan \beta} - \frac{h_i^2}{2 \tan \alpha_i} \quad (i=1,2,\dots, n-1), \quad (19)$$

故开挖体总面积为

$$S_{Y_{挖}} = \sum_i^{n-1} S_{Y_{挖i}} \quad (20)$$

此时阶梯状滑动台阶型坡面滑坡体区域面积为

$$S_{Y_{台}} = S_{Y_{滑}} - S_{Y_{挖}} \quad (21)$$

有些情况下滑坡体潜在滑动面从台阶型边坡坡面或者平台间出露, 即此时未完全包含挖坡体, 故在计算开挖后滑坡体面积时需将多减去的部分重新加回。

(2) 边坡体沿 B_4C_2 方向抗滑力的计算

a) 若 B_3B_4 未因开挖而出露, 可参照式 (9) 进行法向应力计算。故投影在 B_4C_2 上坡体法向应力 $\sigma_{nY_{台}}$ 为

$$\sigma_{nY_{台}} = \frac{W_{台} \cdot \cos \beta_4}{B_4B_6} \quad (22)$$

式中, $W_{台}$ 为滑坡体自重, $W_{台} = \gamma S_{Y_{台}}$, $S_{Y_{台}}$ 为滑坡体面积, 具体计算见式 (21)。

由于开挖时潜在滑动面并未出露, 故 B_4B_6 的长度和抗滑力计算如式 (14), (15) 不变。

b) 若 B_3B_4 因开挖而出露, 此时节理面长度变短, 即采用新的 $B_3B_4_{台}$ 代入式 (14), (15) 求解因节理面出露而造成法向应力、 B_4B_6 的长度和抗滑力改变后的数值。

(3) 边坡体沿 B_4B_6 方向下滑力为

$$F_{induce} = W_{台} \cdot \sin \beta_4 \quad (23)$$

(4) 台阶型坡面阶梯状失稳模式安全系数为

$$F_s = \left\{ (c_r + \sigma_{nY_{台}} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_3B_5 + (B_5B_6 + B_4B_3) \cdot \left\{ \sigma_{nY_{台}} \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{nY}} \right) \right] \right\} \right\} / W_{台} \cdot \sin \beta_4, \quad (24)$$

式中, 若因开挖节理面出露, 采用新的 $\sigma_{nY_{台}}$ 和 $B_3B_4_{台}$ 代入相应的位置进行替代。

将相关参数代入式 (24) 中, 可以求得台阶型坡面阶梯状失稳模式岩桥剪切破坏时安全系数 F_s 。

3.2 算例分析

(1) 对比分析

锦屏一级水电站右岸泄洪洞引渠内侧岩质边坡共形成六级台阶, 属于典型多级台阶状坡面岩质高边坡。由于文献[24]中采用的各节理面裂隙连通率为 100%, 故此时发生平面型滑动破坏模式。相关参数如下: 后缘拉裂缝处内摩擦角为 16.70° , 黏聚力为 20 kPa, 抗拉强度为 200 kPa。滑动面 g_{8sz-1} 错动带处内摩擦角为

30.96° , 黏聚力为 170 kPa。滑动面 g_{y7} 错动带处内摩擦角为 28.81° , 黏聚力为 150 kPa^[24]。基于本节方法开展与文献[24, 25]中计算结果的对比分析 (表 2)。

表 2 本文计算结果与文献[24, 25]计算结果的对比分析

Table 2 Comparison between calculated results and those obtained in References [24, 25]

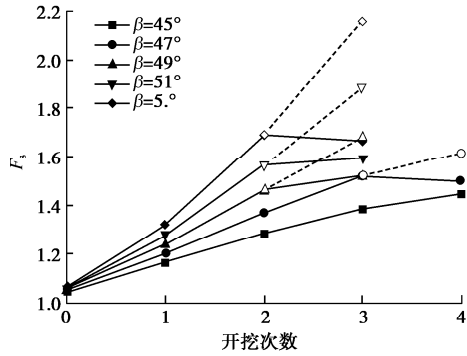
滑动面组合	不考虑拉裂缝的贡献 ^[24]		
g_{8sz-1} 错动带	文献[24]极限分析上限解	文献[24]极限平衡解	本文
	1.058657	1.058652	1.047927
g_{y7} 错动带	文献[24]极限分析上限解	文献[24]极限平衡解	本文
	1.018695	1.018693	1.007019
滑动面组合	考虑拉裂缝的贡献 ^[25]		
g_{8sz-1} 错动带	文献[25]极限平衡解		本文
	1.289		1.216197
g_{y7} 错动带	文献[25]极限平衡解		本文
	1.256		1.214398

由表 2 可知, 与文献[24]计算结果十分接近, 差异率在 1%以内, 与文献[25]计算结果也较为接近, 差异率在 5%以内, 从而验证了本文方法的准确性。结果表明: 伴随着后缘拉裂缝的开展, F_s 降低达 17.08%, 表明后缘拉裂缝开展对边坡稳定性的显著影响。

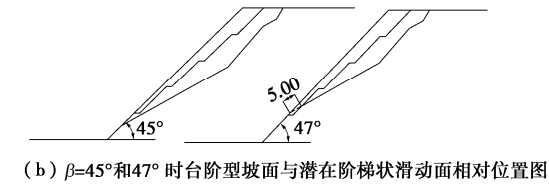
(2) 算例分析

台阶型开挖次数和坡角角度对节理岩质边坡稳定性影响显著, 故探究它们对台阶型岩质边坡稳定性的影响规律。参数取值为: $k_Y=0.75$, $\beta_1=60^\circ$, $\beta_2=30^\circ$, $\beta_3=50^\circ$, $\beta=45^\circ \sim 53^\circ$ (坡率 1:1~1:0.75), $\alpha=0^\circ$, $H=50$ m, $H_1=4$ m, $H_2=3$ m, $L=15$ m, $\gamma=25$ kN/m³, $K_\varphi=0.6$, $K_c=0.2$, $\varphi_b=20^\circ$, $\text{JRC}=3$, $\text{JCS}=20$ MPa。本节以五级边坡为例, 开挖次数和坡角角度对岩质边坡阶梯状失稳模式安全系数的影响规律具体如图 7 所示。图 7 (a) 中虚线表示未考虑节理面出露对抗滑力贡献的丧失, 图 7 (b), 7 (c) 中虚线表示出露的节理面长度。

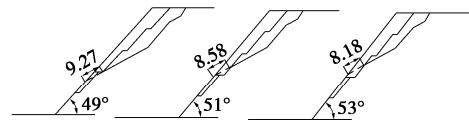
由图 7 可知, 开挖坡率较大时 (倾角较小), 节理面不易随开挖而出露。此时, 随着开挖次数的进行, 达到对边坡安全卸载的目的, 故 F_s 相应提高 (图 7 (a))。而随开挖坡率的减小, 节理面在边坡下部出露。由于保持裂隙连通率不变, 使得阶梯状滑动面剪出口位置相应提高, 故其节理面出露长度相应减小 (图 7 (b), 7 (c))。由于节理面出露部分对抗滑力贡献的丧失, 使 F_s 显著降低, 开挖坡率越小, 降低程度越显著, 降低程度分别从 $\beta=47^\circ$ 的 7.2% 增加至 $\beta=53^\circ$ 的 22.8%, 说明节理面对边坡抗滑力的影响。



(a) 开挖次数和坡角角度对阶梯状岩质边坡安全系数影响规律



(b) $\beta=45^\circ$ 和 47° 时台阶型坡面与潜在阶梯状滑动面相对位置图



(c) $\beta=49^\circ$ 、 51° 和 53° 时台阶型坡面与潜在阶梯状滑动面相对位置图

图 7 开挖次数和坡角角度对阶梯状滑动台阶型坡面边坡安全系数和破坏模式的影响规律

Fig. 7 Influences of excavation times and slope angle on safety factor and failure mode of stepped sliding of slope based on step-type slope surface

4 水力作用下阶梯状滑动岩质边坡稳定性分析

4.1 水力作用下阶梯状滑动岩质边坡失稳模式构建

由于边坡后缘拉裂缝的存在, 为水力作用提供了过水通道, 因而降雨或地下水会对顺层岩质边坡的稳定性产生更为不利影响。基于图 3, 考虑出流缝被堵塞和出流缝未堵塞两种工况^[26], 其中, 出流缝未堵塞时采用地下水水位中点处水压力最大的水力分布情况^[26-27], 构建了水力作用下阶梯状滑动岩质边坡失稳模式如图 8 所示。

基于图 3 相关参数, 设地下水的重度为 γ_w , 拉裂缝充水高度为 h_w ; 出流缝被堵塞时节理面、岩桥和拉裂缝所受的水压力分别为 U_1 , T_1 和 V_1 ; 出流缝未堵塞时各部分所受的水压力分别为 U_2 , T_2 和 V_2 。

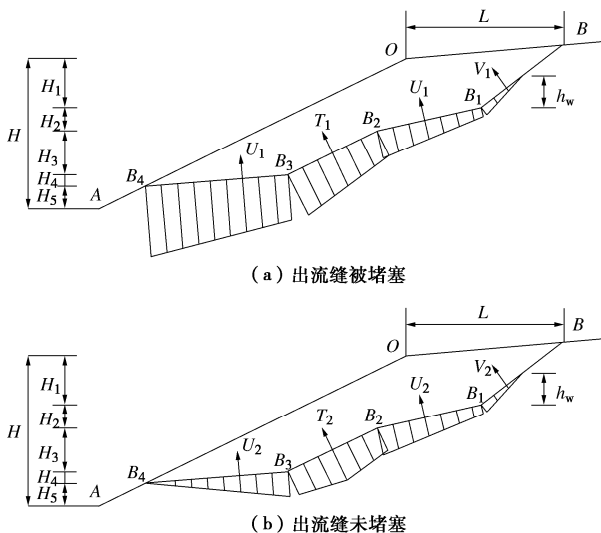


图 8 水力作用下阶梯状岩质边坡失稳模式图

Fig. 8 Failure mode of stepped sliding of jointed rock slope under water pressure

(1) 出流缝被堵塞时边坡安全系数 F_{S1} 的计算

根据图 8 (a), 出流缝被堵塞时节理面、岩桥和拉裂缝所受的水压力分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{\gamma_w H_2 (2h_w + H_2)}{2 \sin \beta_2} + \frac{\gamma_w H_4 (2h_w + 2H_2 + 2H_3 + H_4)}{2 \sin \beta_4}, \\ T_1 &= \frac{\gamma_w H_3 (2h_w + 2H_2 + H_3)}{2 \sin \beta_3}, \\ V_1 &= \frac{\gamma_w h_w^2}{2 \sin \beta_1}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

基于式 (25), 坡体法向应力 σ_{n1} 为

$$\sigma_{n1} = \frac{W \cos \beta_4 - U_1 - T_1 \cos(\beta_3 - \beta_4) - V_1 \cos(\beta_1 - \beta_4)}{B_4 B_6} \quad (26)$$

坡体抗滑力 $F_{resist1}$ 为

$$F_{resist1} = (c_r + \sigma_{n1} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_3 B_5 + (B_3 B_6 + B_4 B_3) \cdot \left\{ \sigma_{n1} \tan \left[\phi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{n1}} \right) \right] \right\} \quad (27)$$

坡体下滑力 $F_{induce1}$ 为

$$F_{induce1} = W \sin \beta_4 + T_1 \sin(\beta_3 - \beta_4) + V_1 \sin(\beta_3 - \beta_4) \quad (28)$$

出流缝被堵塞时边坡安全系数 F_{S1} 为

$$F_{S1} = \left\{ (c_r + \sigma_{n1} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_4 C_2 \cdot (1 - k_y) + \left[\sigma_{n1} \tan \left[\phi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{n1}} \right) \right] \right] \cdot B_4 C_2 \cdot k_{y1} \right\} / (W \cdot \sin \beta_4 + T_1 \sin(\beta_3 - \beta_4) + V_1 \sin(\beta_1 - \beta_4)) \quad (29)$$

(2) 出流缝未堵塞时边坡安全系数 F_{S2} 的计算

根据图 8 (b), 出流缝未堵塞时节理面、岩桥和拉裂缝所受的水压力分别为

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= \frac{\gamma_w H_2 (2h_w + H_2)}{2 \sin \beta_2} + \frac{\gamma_w H_4^2}{2 \sin \beta_4}, \\ T_2 &= \gamma_w [(h_w + H_2 + H_3 - H_4)(h_w + H_2 + H_3 - 3H_4) + (-h_w - H_2 + H_3 + H_4)(3h_w + 3H_2 + H_3 + H_4)] / 8 \sin \beta_3, \\ V_2 &= \frac{\gamma_w h_w^2}{2 \sin \beta_1}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

基于式 (30), 坡体法向应力 σ_{n2} 为

$$\sigma_{n2} = \frac{W \cos \beta_4 - U_2 - T_2 \cos(\beta_3 - \beta_4) - V_2 \cos(\beta_1 - \beta_4)}{B_4 B_6} \quad (31)$$

坡体抗滑力 $F_{\text{resist}2}$ 为

$$F_{\text{resist}2} = (c_r + \sigma_{n2} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_3 B_5 + (B_5 B_6 + B_4 B_3) \cdot \left\{ \sigma_{n2} \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{n2}} \right) \right] \right\} \quad (32)$$

坡体下滑力 $F_{\text{induce}2}$ 为

$$F_{\text{induce}2} = W \cdot \sin \beta_4 + T_2 \sin(\beta_3 - \beta_4) + V_2 \sin(\beta_1 - \beta_4) \quad (33)$$

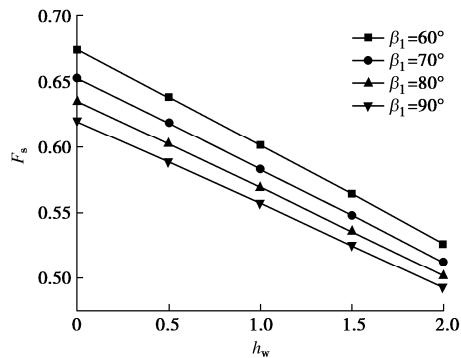
出流缝被堵塞时边坡安全系数 F_{S2} 为

$$F_{S2} = \left\{ (c_r + \sigma_{n2} \cdot \tan \varphi_r) \cdot B_4 C_2 \cdot (1 - k_Y) + \left[\sigma_{n2} \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_{n2}} \right) \right] \right] \cdot B_4 C_2 \cdot k_{Y1} \right\} / (W \cdot \sin \beta_4 + T_2 \sin(\beta_3 - \beta_4) + V_2 \sin(\beta_1 - \beta_4)) \quad (34)$$

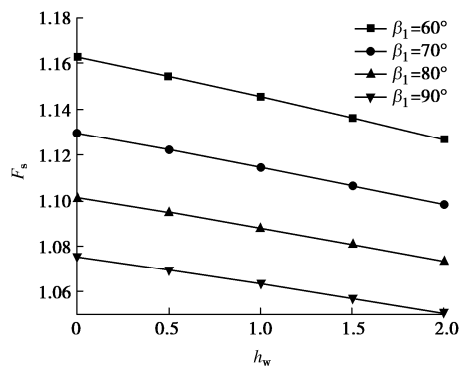
将相关参数代入式 (29), (34), 可求得出流缝被堵塞和未堵塞时边坡的安全系数 F_{S1} , F_{S2} 。

4.2 拉裂缝相关参数和拉裂缝充水高度对边坡稳定性的影响

裂缝倾角 β_1 和拉裂缝充水高度 h_w 对边坡稳定性影响显著。基于此, 开展出流缝被堵塞与未堵塞时的对比分析与 β_1 和 h_w 对边坡稳定性的参数敏感性分析, 如图 9 所示。参数取值: $\beta_1=60^\circ \sim 90^\circ$, $h_w=0 \sim 2.0$ m。其他参数取值: $H=100$ m, $L=25$ m, $\alpha=10^\circ$, $\beta=75^\circ$,



(a) 出流缝被堵塞时安全系数 F_s 的变化曲线



(b) 出流缝未堵塞时安全系数 F_s 的变化曲线

图 9 F_s 随拉裂缝倾角 β_1 和拉裂缝充水高度 h_w 的变化曲线
Fig. 9 F_s versus angle β_1 and depth h_w of water in tensile cracks

$\gamma=25$ kN/m³, $H_1=2$ m, $H_2=3$ m, $\beta_2=35^\circ$, $\varphi_b=20^\circ$, $\text{JRC}=6$, $\text{JCS}=40$ MPa, $\gamma_w=10$ kN/m³。

由图 9 可知, 当出流缝被堵塞或未堵塞时, F_s 均随着 h_w 的增加而降低, 且均随着 β_1 的增加而降低。由图 9 (a) 与 (b) 对比可知, 当 $\beta_1=60^\circ$ 时, 出流缝被堵塞时 F_{S1} 随着 h_w 的增加降低了 22.0%, 出流缝未堵塞时 F_{S2} 降低了 3.1%, 出流缝被堵塞时 F_s 对 h_w 的变化较敏感。在不考虑水力作用的情况下, 当 $\beta_1=60^\circ$ 时, $F_s=1.41$; 当出流缝被堵塞且 $h_w=2.0$ m 时, 与不考虑水力作用时相比, F_s 下降了 62.8%; 当出流缝未堵塞且 $h_w=2.0$ m 时, 与不考虑水力作用时相比, F_s 下降了 20.3%。因此, 水力作用对带裂缝边坡的稳定性有重要的影响。

5 结 论

本文开展了阶梯状岩桥剪切贯通失稳模式下各关键参数对断续节理顺层岩质边坡稳定性影响规律的研究, 获得 4 点结论。

(1) 假定岩桥服从 M-C 破坏准则, 节理面服从 B-B 破坏准则, 考虑岩桥和节理面强度参数的弱化系数 K_φ , K_c , 依据节理面强度参数和弱化系数 K_φ , K_c 获得了岩桥内摩擦角 φ_r 和黏聚力 c_r 。

(2) 基于断续节理顺层岩质边坡阶梯状岩桥剪切失稳模式, 通过对比分析验证了该模式的准确性。研究表明: 裂隙连通率 $k_G(k_Y)$ 、基本摩擦角 φ_b 、粗糙度系数 JRC 、弱化系数 K_c 和岩桥倾角 β_3 对 F_s 影响显著。尤其 β_3 越大, F_s 减小越显著, 边坡越不稳定。

(3) 通过对比分析验证了台阶型坡面岩质边坡阶梯状失稳模式稳定性计算结果的准确性。研究表明: 开挖次数和坡率对断续节理顺层岩质边坡稳定性影响显著。开挖范围不涉及潜在滑动面时边坡更为稳定, 而开挖一旦使节理面出露便使得边坡稳定性大幅下降, 最高下降达 22.8%, 因此当开挖范围涉及到潜在滑动面时, 此时使得边坡稳定性显著下降。故在实际工程中, 不能盲目放坡, 应先对目标边坡地质情况进行细致调研, 才能真正达到放坡促使边坡更为稳定的目的。

(4) 通过对比分析以及参数分析探究了水力作用对边坡稳定性的影响规律。研究表明: 水力作用对边坡稳定性的不利影响十分显著。其中, 出流缝被堵塞时边坡 F_s 下降非常显著, $h_w=2.0$ m 时 F_s 下降达 62.8%, 出流缝未堵塞时安全系数下降较为显著; 拉裂缝倾角和拉裂缝充水高度对边坡稳定性有一定的不利影响。在实际工程中对于带裂缝边坡, 不能忽视水

力作用的影响, 在实际工程中, 对易滑边坡及时做出排水措施。

参考文献:

- [1] EBERHARDT E, STEAD D, COGGAN J S. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, **41**(1): 69 - 87.
- [2] DA HUANG, CEN D F, MA G W, et al. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints[J]. *Landslides*, 2015, **12**(5): 911 - 926.
- [3] 朱 雷, 黄润秋, 严 明, 等. 基于裂纹扩展模式的岩质斜坡阶梯状滑移破裂机制研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(7): 1216 - 1224. (ZHU Lei, HUANG Run-qiu, YAN Ming, et al. Step-path failure mechanism of rock slopes based on crack coalescence modes in rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(7): 1216 - 1224. (in Chinese))
- [4] 郭牡丹. 基于岩体结构面特征的三维网络模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. (GUO Mu-dan. Study on 3-Dimensional Network Simulation Based on the Character of Structural Planes in Rock Mass[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese))
- [5] 黄润秋, 许 强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (HUANG Run-qiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: China Science Press, 2008. (in Chinese))
- [6] GARCÍA M, PASTÉN C, SEPÚLVEDA S A, et al. Dynamic numerical investigation of a stepped-planar rockslide in the Central Andes, Chile[J]. *Engineering Geology*, 2018, **237**: 64 - 75.
- [7] TANNANT D D, GIORDAN D, MORGENROTH J. Characterization and analysis of a translational rockslide on a stepped-planar slip surface[J]. *Engineering Geology*, 2017, **220**: 144 - 151.
- [8] ZHAO L H, LI D J, TAN H H, et al. Characteristics of failure area and failure mechanism of a bedding rockslide in Libo County, Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2019, **16**(7): 1367 - 1374.
- [9] 杨绪波. 大型岩质边坡开挖的岩体结构效应研究—以云南澜沧江小湾水电站#4 山梁边坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2005. (YANG Xu-bo. Study on the Rock Mass Structure Effect of Large Rock Slope During Excavation-Taking Slope No.4 in Xiaowan Hydropower Project on Lancang River of Yunnan as An Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [10] BRIDEAU M A, YAN M, STEAD D. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures[J]. *Geomorphology*, 2009, **103**(1): 30 - 49.
- [11] 黄润秋, 陈国庆, 唐 鹏. 基于动态演化特征的锁固段型岩质滑坡前兆信息研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(3): 521 - 533. (HUANG Run-qiu, CHEN Guo-qing, TANG Peng. Precursor information of locking segment landslides based on transient characteristics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(3): 521 - 533. (in Chinese))
- [12] JENNINGS J E. A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mine[C]// *Proceeding of the Symposium on the Planning Open Pit Mines*. Johannesburg, 1970.
- [13] 邹宗兴. 顺层岩质滑坡演化动力学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. (ZOU Zong-xing. Research on the Evolution Dynamics of the Consequent Bedding Rockslides[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese))
- [14] 重庆市设计院. 工程地质勘察规范 DBJ50—043—2005[S]. 2005. (Chongqing Design Institute. Code for Engineering Geological Investigation DBJ50—043—2005[S]. 2005. (in Chinese))
- [15] 陈祖煜, 汪小刚, 杨 健, 等. 岩质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (CHEN Zu-yu, WANG Xiao-gang, YANG Jian, et al. Rock Slope Stability Analysis-Theory Methods and Programs[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [16] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. *Engineering Geology*, 1973, **7**(4): 287 - 332.
- [17] BARTON N. The shear strength of rock and rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1976, **13**(9): 255 - 279.
- [18] BANDIS S, LUMSDEN A C, BARTON N R. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, **18**(1): 1 - 21.
- [19] HOEK E. *Rock Engineering*[M]. Netherlands: A A Balkema, 1995: 70 - 72.
- [20] PRASSETYO S H, GUTIERREZ M, BARTON N. Nonlinear

- shear behavior of rock joints using a linearized implementation of the Barton-Bandis model[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, **9**(4): 671 - 682.
- [21] 唐志成, 夏才初, 刘远明. 岩桥渐进弱化的 Jennings 抗剪强度准则[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(11): 2093 - 2099. (TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, LIU Yuan-ming. Modified Jennings shear strength criterion based on mechanical weakening model of rock bridges[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(11): 2093 - 2099. (in Chinese))
- [22] 邓华锋, 齐 豫, 李建林, 等. 水 - 岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(4): 634 - 643. (DENG Hua-feng, QI Yu, LI Jian-lin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(4): 634 - 643. (in Chinese))
- [23] ZHANG X P, WONG L N Y. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bonded-particle model approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, **46**(5): 1001 - 1021.
- [24] 王根龙, 伍法权, 张茂省. 平面滑动型岩质边坡稳定性极限分析上限法[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(2): 176 - 180. (WANG Gen-long, WU Fa-quan, ZHANG Mao-sheng. Method of upper bound limit analysis for plane sliding of rock slopes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(2): 176 - 180. (in Chinese))
- [25] 梁文辉. 锦屏一级水电站引渠边坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (LIANG Wen-hui. Study on Stability of Approach Channel Slope for Jinping 1 Hydropower Station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [26] 舒继森, 王兴中, 周毅勇. 岩石边坡中滑动面水压分布假设的改进[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, **33**(5): 509 - 512. (SHU Ji-sen, WANG Xing-zhong, ZHOU Yi-yong. Improving on assumption for water pressure distributing on failure surface in rock slope[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, **33**(5): 509 - 512. (in Chinese))
- [27] ZHAO L H, ZUO S, LI L, et al. System reliability analysis of plane slide rock slope using Barton-Bandis failure criterion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, **88**: 1 - 11.

第十二届全国基坑工程研讨会暨第四届全国可回收锚杆技术研讨会第 2 号通知

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办, 华东交通大学承办的“第十二届全国基坑工程研讨会暨第四届全国可回收锚杆技术研讨会”将于 2022 年 11 月 25—27 日在江西省南昌市召开。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会

承办单位: 华东交通大学

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的新技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深

基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥膨胀土等特殊土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑧超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑨基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑩特、重、大基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

联系方式: 方焘 18007091122 (会务统筹), 罗如平 15801721637 (招商参展), 周鹏 18820102489 (论文报告), 丁海滨 18720076117 (酒店住宿), 祝俊华 15002941201 (会议接待), 地址: 江西省南昌市经开区双巷东大街 808 号华东交通大学。

(大会组委会)