

文章编号: 1673-5196(2018)02-0117-05

水驱型层状岩质边坡破坏机理的讨论

夏良¹, 符贵军², 陈浩²

(1. 湖北交投智能检测股份有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 水驱型层状岩质边坡的破坏是一个渐进的过程. 以断裂力学为理论基础, 推导边坡后缘裂隙充水的临界深度公式; 分析滑坡发生初期内部微裂纹的贯通机制; 对顺层赋水边坡的层间破坏给出解释. 研究结果表明, 水对坡体的影响在相当长的时间里是以物理化学作用为主, 层状岩体破坏的临界长度与坡角、孔隙率、层厚、水头和水力坡降有关, 内水压力的骤然升高会加速边坡失稳.

关键词: 岩质边坡; 充水深度; 水力驱动; 层间破坏

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A

Discussion of mechanism of water-triggered failure of layered rock slope

XIA Liang¹, FU Gui-jun², CHEN Hao²

(1. Hubei Communications Investment Intelligent Detection Co., Wuhan 430000, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock & Soil Mechanics, Wuhan 430071, China)

Abstract: The water-triggered failure of the layered rock slope is a progressive process. By taking fracture mechanics as theoretical basis, the formula of critical depth of water filling into crack at trailing edge of slope was deduced, the through-going mechanism of internal micro-cracks in the initial stage of the landslide was analyzed, and the explanation of the reason of interlayer failure of smooth-layer water-bestowal slope was given out. The investigation result shows that, during a long time, the influences of water on the slope will principally be a physical and chemical action. The critical length of layered rock failure will be related to slope angle, soil porosity, layer thickness, hydraulic head, and hydraulic gradient slope. A sudden increase of inner water pressure will accelerate the collapse of slope stability.

Key words: rock slope; water-filling depth; water triggering; interlayer failure

岩质边坡的稳定性分析是水利水电、铁路、公路、矿山等工程中经常遇到的问题,其安全性直接关系到工程的正常运行和人民的生命财产安全. 通常坡体的破坏是一个从局部屈服开始,然后逐点扩展,最终形成大规模破坏的渐进过程. 在此过程中,应力不断进行释放和重分布:首先破坏的岩土体将超额负载施加到邻近区域,当积累到一定阈值后,再次发生转移,同时伴随有边坡内部的相对位移滑动. 这种不断的调整使得破坏面持续扩大,最终导致坡体的破坏.

影响边坡稳定性的因素很多,总体分为以地形地貌、地质构造、水文气象为主的自然因素和以工程

活动为主的人为因素两大类,囊括了风化作用、水力作用、地质条件、软化作用、地震作用和人工扰动 6 个加速坡体失稳的不良诱因^[1],其中,最为普遍的因素是水力作用. 目前,国内外学者对降水引发的滑坡机制做了大量的研究^[2-8],主要是从滑面 C 、 φ 值的变化及有效应力的角度对土质边坡进行分析,而对于层状岩质边坡在赋水条件下的累进性破坏鲜有研究,缺乏清晰的机理认识. 陈喜昌等^[9]认为降雨后地下水压力的升高导致了边坡安全储备的下降;胡其志等^[10]指出坡体后缘拉裂所产生的裂缝为地表径流的入渗提供了通道,改变了结构面的受力状态;李宗利等^[11]对岩石裂纹的水力劈裂进行了分析;魏来等^[12]从断裂力学的角度推导了水力劈裂的临界深度公式;吴永等^[13]给出了降雨作用下裂隙的扩展贯通机理. 全面深入地认识水驱型岩质边坡的破坏机

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51404239)

作者简介: 夏良(1975-),男,湖北潜江人,工程师.

制有着重要意义。

本次研究以断裂力学为基础,修正了后缘充水条件下的临界深度公式,从细观的角度解释了裂隙向下扩张的趋势,并提出了水驱型层状岩质边坡渐进性破坏机制,揭示了断裂长度同水压力、容重等的关系. 所得结果为工程的治理提供了理论依据,提出了新的治理思路。

1 后缘充水临界深度

在自然界中,顺层岩质边坡是常见的一类工程体,其一般由沉积作用形成的砂岩、泥岩、页岩和由变质作用形成的千枚岩、板岩所构成,不同时期的地质环境造就了层理、片理以及互层面等原生潜在滑动面. 特别对于缓倾情况,层状板往往因为蠕滑作用,使坡体后部产生拉应力集中,发生开裂,促使节理扩张,这为降水或径流等水流的入渗提供了条件. 当裂隙充水深度达到一定程度时,水力作用将加速岩体的破坏。

暴雨条件下,坡体的裂隙会在短时间内积聚大量的水,一方面产生静水压力,另一方面会对岩土体有渗透的作用. 假定水对已有裂隙只存在静水压力,以下部扩展端为端点,扩展方向为 x 轴,则模型可概化为半无限平面问题,如图 1 所示。

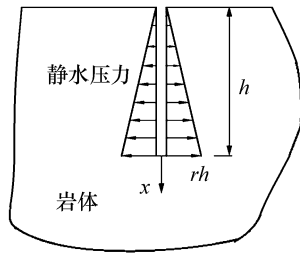


图 1 后缘充水示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water filling at trailing edge

根据断裂力学的基本理论,采用西斯特嘎德(Westergaard,1939)应力函数的 I 型解答^[14],当裂纹表面有均匀分布的情况时,应力强度因子为:

$$K_I = \zeta \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

式中: ζ 为形状因子; K_I 为裂缝端的应力强度因子; a 为裂隙原始长度的一半; σ 代表远场的均布应力。

在本问题中,由于静水压力为线性增大,严格意义上讲不符合公式的使用条件,吴永等^[13]取 $\sigma = r_w h$,即原有裂隙尖端处的静水压力作为应力条件代入,得到了强度因子的上限,偏于保守. 鉴于岩土体的抗拉强度远远小于其抗压强度,故对静水压力做等效代换,在相同条件下,以弯矩为桥梁将水力作用等代为应力 σ_c :

$$\sigma_c = \frac{r_w h}{\sqrt[3]{2}} \tag{2}$$

式中: r_w 为水的容重; h 为充水深度。

故有应力强度因子为

$$K_I = \frac{\zeta r_w h^{\frac{3}{2}} \pi^{\frac{1}{2}}}{\sqrt[3]{2}} \tag{3}$$

式中符号意义同前。

根据强度因子是物质本身固有属性的认识,以其为断裂判据,当充水深度满足下式时,裂缝可以自发地扩展:

$$K_I \geq K_{Ic} \tag{4}$$

式中: K_{Ic} 为岩体的韧性指标。

可以得到临界充水深度 h_{cr} 为

$$h_{cr} = 0.7965 \left(\frac{K_{Ic}}{\zeta r_w} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{5}$$

为验证本文理论,选取都汶公路映秀段附近一典型的平移式岩质滑坡为研究对象. 边坡由白垩纪砂岩组成,因地震作用,在后缘形成一条深 $h = 16$ m 的裂缝,坡体已在降雨作用下失稳,裸露出长 $b = 58$ m 的基岩滑面. 其天然重度为 24.75 kN/m^3 , $\gamma = 2.6 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, $\gamma_w = 1 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, $\theta = 10^\circ$, $b = 58 \text{ m}$, $h = 16 \text{ m}$, $K_{Ic} = 0.442 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $c = 79 \text{ kPa}$. ζ 为形状因子,取 0.6828 ^[15]. 经计算可得 h_{cr} 为 12.8 m ,比吴永等^[13]的结果 11 m 深 1.8 m . 当后缘充水至这一深度时,裂隙自行发生扩张,造成更大的破坏。

由临界充水深度的计算公式(5)可以看出,对 h_{cr} 有影响的因素为韧性指标与裂隙的形状系数. 在未达到这一深度之前,水对坡体的影响更多地体现在软化作用与化学作用。

2 裂缝扩展角度的分析

基于以上的分析,可以知道坡体的稳定性决定于裂缝的扩张与充水的深度. 已有的计算模型大都是假定了滑面已经贯通,通过力学分析得出安全系数,这与自然界的实际情况有很大差别. 现仅考虑后缘张拉裂缝已经存在,而潜在滑面尚未形成时,得到的模型如图 2 所示。

仍然从断裂力学出发,取裂隙端部向下一定区域的单元体进行受力学析,并将裂纹的三向受力简化为二维平面问题,见图 3. 忽略地质内部构造应力的影响,只考虑岩体自重应力场的作用:

$$\sigma_v = \gamma h \tag{6}$$

$$\sigma_h = \lambda \gamma h \tag{7}$$

式中: σ_v 为垂直应力; σ_h 为水平应力; λ 为岩体的侧压

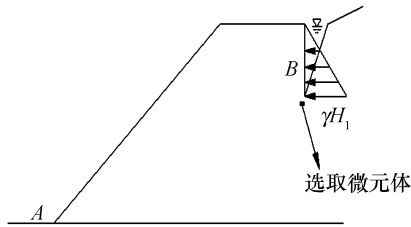


图 2 裂隙受力图

Fig. 2 Crack stress diagram

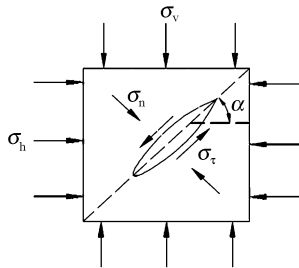


图 3 微元受力分析

Fig. 3 Micro-element stress analysis

力系数; γ 为岩体容重; h 岩体厚度.

裂隙的长度取为 $2a$, 与主应力 σ_h 夹角为 α , 考虑岩体内因局部微孔隙连通所产生的孔隙水压力 p , 易得如下表达式:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cos 2\alpha - p \quad (8)$$

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \sin 2\alpha \quad (9)$$

即裂缝的形成机制是压剪形式, 在工程中, 由于压剪时近似可以认为裂缝为闭合的, 所以在这里将其视为 II 型扩展. 沿用上一节的公式, 并考虑有效应力原理:

$$K_{II} = \zeta \sigma_\tau' \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

$$\sigma_\tau' = \sigma_\tau - \sigma_n \tan \theta - c \quad (11)$$

孔隙水压力的存在使得裂隙的强度因子增大, 当满足 $K_{II} \geq K_{IIc}$ 时, 裂隙得到扩张.

薛昌明提出了应变能密度因子断裂判据, 即 S 判据. 其基本假设是裂纹沿 $S = S_{min}$ 的方向扩展, 即要寻找 S 的极小值点. 对于纯 II 型裂隙, 可以根据相关公式得到:

$$\theta_0 = \arccos[(1 - 2\nu)/3] \quad (12)$$

式中: θ_0 为扩张方向与原裂隙的夹角; ν 为泊松比.

故可以得到表 1.

表 1 裂隙发展角

Tab. 1 Crack propagation angle

ν	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\theta_0 / (^\circ)$	70.5	74.5	78.5	82.3	86.2	90.0

可以得到结论, 开裂角 θ_0 与 ν 泊松比有关, 且均

大于 70° , 呈现两向趋势, 一方面向已经存在的后缘拉裂贯通, 一方面以较陡的方向向下发展, 呈现出锯齿状. 在达到新平衡后, 又重新开始新一轮的破坏, 这也是滑面在滑体后部较陡立的原因. 需要注意的是这里所解释的仅适用于裂缝的发展初期, 当裂缝扩张到一定深度时, 由于应力偏转等因素, 实际情况已不能简化为纯 II 型裂隙, 有待于压剪等理论的研究完善. 典型的渐进性破坏见图 4.

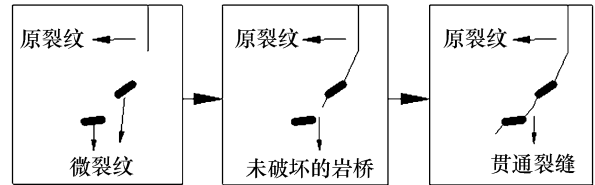
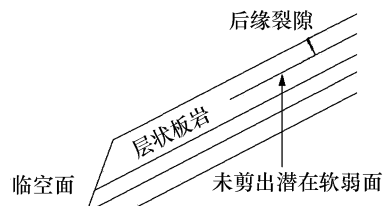


图 4 渐进破坏示意图

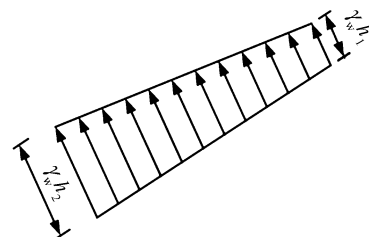
Fig. 4 Schematic diagram of progressive failure

3 层状边坡的充水断裂分析

对于由相对完好的岩石所组成的层状岩质边坡, 在后缘拉裂缝形成并向下同原岩既有结构面贯通后(结构面并未切出坡面), 因为水的作用, 此滑面会发生弱化, 并继续向下扩张. 考虑到表层岩板受到风化作用的影响, 其微裂隙贯通度高于下部, 造成了层板沿倾向的渗透系数远大于沿板厚方向的渗透系数, 故将表层概化为透水介质, 与深部岩体的分界面为不透水界面, 据此建立简化的分析模型, 如图 5 所示.



(a)



(b)

图 5 层状断裂分析

Fig. 5 Layered fracture analysis

沿坡体倾向, 结构面上的静水压力越来越大, 就第一层板而言, 受力状况为三向受力. 取单位宽度层板为受力分析体, 忽略板侧向相对力, 可以得到受力

图图 6^[16].

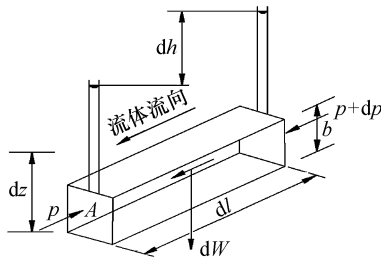


图 6 微元受力分析图

Fig. 6 Micro-element stress analysis graph

在边坡渗流场中沿渗流方向取一微元体,以该微元体作为研究对象.微元体长 dl ,截面面积 A ,孔隙率为 n ,板厚 b ,充水高度 h , α 为已知倾角,则沿水流方向受力有:

- 1) 微元体两端面所受静水压差 dP

$$dP = (dh - dz)\gamma_w A = (dh - dz)\gamma_w b = (dh - \sin \alpha dl)\gamma_w b$$
 (13)

式中: dh 、 dz 分别为两端面的水头差和高度差.

- 2) 微元体水流自重沿渗流方向分力

$$dT = \gamma_w nb \sin \alpha dl$$
 (14)

- 3) 岩石骨架自重沿渗流方向分力

$$dW = \gamma(1 - n)b \sin \alpha dl$$
 (15)

沿与水流垂直的方向,受力有:

- 1) 水流沿破裂面垂直方向分力

$$dT' = \gamma_w nb \cos \alpha dl$$
 (16)

- 2) 岩石沿破裂面垂直方向分力

$$dW' = \gamma(1 - n)b \cos \alpha dl$$
 (17)

- 3) 下部水体的垂直压力

$$dJ = (\gamma_w l \sin \alpha + \gamma_w h) dl$$
 (18)

在这里假定 $dh = i dl$,即水头变化可以用坡降来表示,则对微元体进行积分有如下结果:

水流方向截面受力:

$$R_1 = \int_0^L [\gamma_w b(i - \sin \alpha) + \gamma_w nb \sin \alpha + \gamma(1 - n)b \sin \alpha] dl$$
 (19)

则截面所受压应力为

$$\sigma_1 = \frac{R_1}{b} = \gamma_w i L + [\gamma_w(n - 1) + \gamma(1 - n)] \sin \alpha L$$
 (20)

截面所受弯矩为

$$M = \int_0^L [\gamma_w h + \gamma_w l \sin \alpha - \gamma_w nb \cos \alpha - \gamma(1 - n)b \cos \alpha] \times (L - l) dl = \frac{\gamma_w h L^2}{2} + \frac{\gamma_w \sin \alpha L^3}{6} - \frac{\gamma_w nb \cos \alpha L^2}{2} -$$

$$\frac{\gamma(1 - n)b \cos \alpha L^2}{2}$$
 (21)

当 $\gamma_w h + \gamma_w l \sin \alpha - \gamma_w nb \cos \alpha - \gamma(1 - n)b \cos \alpha = 0$ 时,存在解 L_1 (最大负弯矩处到后缘裂缝距离)使得负向弯矩最大(层板上部受拉).这里主要考虑正向弯矩(层板下部受拉)情况 L_{cr} 作用,有

$$\sigma_2 = \frac{M_{cr}}{I} \cdot \frac{b}{2} = \frac{6M_{cr}}{b^2}$$
 (22)

易知当式

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \sigma_t$$
 (23)

成立时,板层从下部开始开裂,裂缝向上开始发展.

综上所述,整个板层的破坏决定于函数

$$f(L, \alpha, n, h, i, b) = 0$$
 (24)

从式中可以看出,坡体裂隙的发展是一个多因素影响的结果,可以计算得到临界发展长度 L_{cr} .一般情况下,水的作用主要是通过物化作用的影响而得到的,其裂隙的扩展需要很长的时间.当出现地震等偶然工况,后缘拉缝闭合,局部水压力增大,将会导致 L_{cr} 减小,加速破坏过程.

取板厚 $b = 0.8$ m,孔隙率 $n = 0.1$,倾角 $\alpha = 15^\circ$,层板容重 24 kN/m³,充水高度 $h = 2$ m,水利坡降 $i = 0.05$,岩石抗拉强度 $\sigma_t = 1$ MPa,研究板厚与充水高度对于 L_1 和 L_{cr} 的影响(图 7).

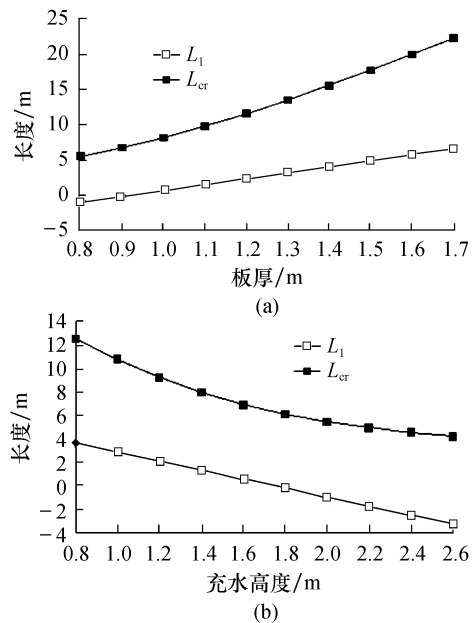


图 7 因素影响

Fig. 7 The influence of factors

从图 7a 中可以得到,随着板厚的增加, L_1 同临界长度 L_{cr} 一起增大.当板厚为 0.85 m 时, L_1 等于 0,即此时,整个结构面受到正弯矩的作用;同时,当板厚为 1.6 m 时, L_{cr} 等于 20 m,比 0.8 m 时增加了

15 m. 说明对于层状岩体,板厚的增大可以增加岩体赋水条件下的稳定性,延缓底部拉裂缝的产生. 从图 7b 中可以得到,随着裂隙水压力的增大,即偶然情况下后缘裂缝急速闭合时, L_1 同临界长度 L_{cr} 一同减小. 当压力相当于充水高度为 1.8 m 时, L_1 等于 0;并且从 L_{cr} 曲线的趋势可以看到,层板的临界长度有一极限值,在 3~4 m 之间. 说明岩体的破坏必然是分段累进性的. 对于本例,经计算可知 $L_1 = -0.98$ m, $L_{cr} = 5.48$ m,可以推断,当新生产的裂缝露出坡面时,会形成新一轮破坏,直至结构面贯通.

对于一个实际的岩质边坡治理项目,现有的工程手段主要集中在削坡、挡墙、抗滑桩、挂网和锚喷 5 个方面,形成了一套行之有效的处理方法,但其设计都是以假定滑面已经形成,计算得到边坡某一状态下的所需加固力为基础的,并未考虑坡体破坏的渐进性特征. 针对水驱型层状岩质边坡,结合已有分析结果,可以得到其破坏模式的 3 大特点:1) 从后缘拉裂开始,逐步向岩体深部发展的似弧状齿形滑面;2) 水力作用主导的渐进分段特点,即层板的断裂是由底面向临空面逐渐扩展的,加速了表层岩体的风化和水力贯通,形成潜在的剪出口;3) 特殊情况下,结构面上静水压力骤然升高,层板具有特定的断裂距离 L_{cr} .

4 结论

1) 边坡后缘产生拉裂隙并充水后,从断裂力学出发,将静水压力作用按力矩等效的方式,给出裂隙继续向下扩张的临界充水高度 h_{cr} 的表达式,表明其受材料韧性强度与形状系数的影响.

2) 通过微元的受力分析,定性地给出后缘张拉裂隙向下部转向扩张的理论解释;并说明初期的滑动面应为锯齿状,经过微裂缝不断地两向发展和贯通,最终导致滑坡. 这一过程与岩体的泊松比 ν 有关,开裂角 θ_0 通常大于 70° .

3) 分析了顺层岩质边坡在节理面裂隙还未完全出露的情况下,由于水的作用,层板局部应力达到岩石的抗拉强度,发生断裂的机理;给出了对应的状态方程,涉及长度、孔隙率、倾角、充水高度、水力坡降、板层厚度 6 个参数. 在一定条件下要求已有结构面长度 L 必须达到 L_{cr} ,才能使得层板发生断裂.

4) 通过系统的分析,指出对于边坡失稳这样一个累进性过程,水对坡体的影响主要体现在前期的

物理化学作用和后期的力学机制. 从阶段上讲,前者是量变,后者是质变. 板厚的增加将增加坡体的稳定性,延缓层板底部裂隙的产生;当发生地震或边坡后缘闭合情形时,短时间内内水压力急骤升高,造成临界长度 L_{cr} 的减小,加速层状岩体破坏,产生由下而上的裂缝;临界长度存在极限值.

参考文献:

- [1] 李 宁,姚显春,张承客. 岩质边坡动力稳定性分析的几个要点 [J]. 岩石力学与工程,2012,31(5):873-881.
- [2] SIRANGELO B, PASQUALE V. A real time forecasting model for landslides triggered by rainfall [J]. Meccanica, 1996, 31(1):73-85.
- [3] POLEMIO M, SDAO F. The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area [J]. Engineering Geology, 1999, 53(3):297-309.
- [4] MONTRASIO L, VALENTINO R. Experimental analysis and modelling of shallow landslides [J]. Landslides, 2007, 4(3):291-296.
- [5] 刘礼领,殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析 [J]. 岩土力学,2008,29(4):1061-1066.
- [6] 章广成,唐辉明,胡 斌. 非饱和渗流对滑坡稳定性的影响研究 [J]. 岩土力学,2007,28(5):965-970.
- [7] LI Xinp, HE Siming. Seismically induced slope instabilities and the corresponding treatments: the case of a road in the Wenchuan earthquake hit region [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(1):96-100.
- [8] GUAN Zhicheng. Investigation of the 5. 12 Wenchuan Earthquake damages to the Zipingpu Water Control Project and an assessment of its safety state [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4):820-834.
- [9] 陈喜昌,谷明成,石胜伟,等. 岩质滑坡的时间预报与水力启动模型 [J]. 工程地质学报,2009,17(6):752-761.
- [10] 胡其志,周 辉,肖本林,等. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学,2010,31(11):3594-3598.
- [11] 李宗利,张宏朝,任青文,等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算 [J]. 岩土力学,2005,26(8):1216-1220.
- [12] 魏 来,唐红梅. 岩质边坡结构面的水力劈裂效应分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(5):986-989.
- [13] 吴 永,何思明,罗 渝. 震后暴雨型岩质滑坡启动机理 [J]. 岩土工程学报,2011,33(1):135-139.
- [14] 李世愚,和泰名,尹祥础. 岩石断裂力学导论 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [15] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 [M]. 北京:科学出版社,1981.
- [16] 刘才华,徐 健,曹传林,等. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3529-3533.