

考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

石爱红, 李国庆, 丁德民, 苑权坤

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil

SHI Aihong, LI Guoqing, DING Demin, and YUAN Quankun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan

刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21-21

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在震害滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method

秦溯, 李云安, 孙琳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 81-88

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109029

石爱红, 李国庆, 丁德民, 等. 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 141-151.

SHI Aihong, LI Guoqing, DING Demin, *et al.* Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 141-151.

考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

石爱红¹, 李国庆¹, 丁德民², 苑权坤¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉综合交通研究院有限公司, 湖北 武汉 430015)

摘要: 丁家坡滑坡位于云阳县黄石镇中湾村, 对拟建的云阳—开州(云开)高速公路安全具有潜在的威胁。为了查明丁家坡滑坡特征, 开展了野外工程地质测绘、钻探与试验测试, 采用 Geo-studio 完全耦合计算模式分析了不同降雨工况下滑坡渗流场、应力场、位移场的变化, 考察了基质吸力在滑坡稳定性评价中的作用, 并计算了不同降雨历时、降雨强度下滑坡的稳定性系数。结果表明: (1) 丁家坡滑坡的斜坡地形、松散的岩性、潜在的临空面等因素决定了滑坡的形成与发育, 坡体渗透性较好, 降雨作用激励滑坡的变形, 目前该滑坡处于蠕滑阶段; (2) 降雨入渗后, 坡体孔隙水压力增加, 基质吸力减小, 有效应力和抗剪强度降低, 在土-岩界面形成剪应力集中, 产生应变和位移, 滑坡变形破坏; (3) 高强度短历时的降雨使坡体浅层迅速饱和, 易形成浅层滑, 低强度长历时的降雨使坡体浸润较深, 易造成深部滑动, 其潜在滑动面主要为土-岩界面; (4) 在非饱和状态下土体基质吸力对滑坡的稳定性具有重要影响; (5) 目前滑坡处于基本稳定状态, 一旦发生降雨, 滑坡稳定性将降低, 降雨历时越久、降雨强度越大, 滑坡越易失稳。相对于滑坡 II 区, 滑坡 I 区对云开高速公路安全的影响更大, 应该重点对滑坡 I 区进行防护治理。该研究可为工程设计、施工及滑坡的预警预报提供依据。

关键词: 滑坡; 变形机制; 降雨入渗; 基质吸力; 稳定性评价

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0141-11

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil

SHI Aihong¹, LI Guoqing¹, DING Demin², YUAN Quankun¹

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Wuhan

Comprehensive Transportation Research Institute Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430015, China)

Abstract: The rainfall-induced Dingjiapo landslide poses a potential threat to the safety of the proposed Yunyang to Kaizhou (Yunkai) expressway. In order to identify the characteristics of Dingjiapo landslide, field engineering geological mapping, drilling and tests are carried out, and a numerical simulation code Geo-studio in a fully

收稿日期: 2021-09-10; 修订日期: 2021-12-27

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 湖北省交通运输厅科技项目(2020-2-4-3); 国家自然科学基金项目(42072204); “煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室开放基金项目(SHJT-17-42.8)

第一作者: 石爱红(1996-), 女, 硕士研究生, 从事地质工程与地质灾害方面的研究。E-mail: 185146404@qq.com

通讯作者: 李国庆(1980-), 男, 博士, 副教授, 从事地质环境与地质灾害教学与科研工作。E-mail: ligq@cug.edu.cn

coupled computing mode is used to analyze the variations of landslide seepage field, stress field and displacement field under different rainfall conditions. The role of matrix suction in landslide stability evaluation is analyzed and the landslide stability factors under different rainfall duration and rainfall intensity are estimated. The results show that the slope topography, loose soil and rock characteristics and potential free surface of slope determine the landslide formation and development, the permeability of the landslide body is relatively high and the rainfall stimulates the landslide deformation. The landslide is currently in a creep stage with a few fissures in the central and these fissures show signs of widening during the rainy season. Following the rainfall infiltration, pore water pressure rises, matrix suction declines, effective stress and shear strength also decline, and shear stress concentration occurs in the soil-rock interface, which causes strain and displacement of the slope and deformation and damage of the landslide. High-intensity short-term rainfall could rapidly infiltrate the shallow soil and induce a shallow slide in the saturated section. Low-intensity long-term rainfall can saturate the deep soil and cause a deep landslide with the soil-rock interface as a slip surface. The matrix suction has an important influence on the stability of soil landslide. The stability analysis results show that this landslide at present is in a basically stable state and the stability factor would drop in case of rainfall. The longer the rain lasts and the higher the rainfall intensity is, the lower the stability factor will be. The landslide I area has a greater impact on the safety of Yunkai Expressway than the landslide II area and more attention should be paid to the protection and treatment of the landslide I area.

Keywords: landslide; deformation mechanism; rainfall infiltration; matrix suction; stability evaluation

降雨是诱发滑坡失稳的主要因素之一^[1-4],绝大部分滑坡事件由降雨导致^[5]。降雨使浸润线下移,地下水水位升高,饱和区域扩大,岩土体的黏聚力、内摩擦角减小,抗滑能力减弱;同时滑坡重力下滑力增加,滑坡体的稳定性受到影响^[6-7]。滑坡变形机制一直是专家学者研究的重点,其中降雨历时、降雨强度、降雨类型对滑坡稳定性影响方面的研究较多^[8-10]。以强度大、时间集中为特点的短时降水和极端性降水是滑坡事件的关键诱发因素^[11]。降雨强度越大,雨水入渗越快,含水率和基质吸力变化越快^[12],含水率迅速增大可使滑坡下滑力急剧增大,含水率变化速率到达峰值越快滑坡越易发生失稳破坏^[13-14]。根据 Bishop 和 Fredlund 的抗剪强度理论^[15-17]、物理模型试验^[12]及三轴试验和改进的直剪试验等测试^[18-20]研究证明,基质吸力在滑坡稳定性评价中极其重要^[21-22]。基质吸力是滑坡土体力学强度的重要影响因素,非饱和土体基质吸力产生的拉应力使土颗粒相互聚集在一起^[23],具有一定硬化土体、增强抗剪强度的作用,有利于滑坡稳定。降雨在入渗过程中,由浅到深逐步浸润滑坡土体,使其含水率增加,基质吸力减小,导致滑坡稳定性降低;坡脚最先响应^[17],而坡顶及坡面较深处的土体受降雨的影响具有滞后性^[24-25]。

目前国内外学者一般通过分析渗流场和应力场

来考察降雨强度、降雨历时对滑坡稳定性的影响,较少关注基质吸力的变化及其对滑坡变形及稳定性的影响。位于重庆市云阳县黄石镇中湾村东北部的丁家坡滑坡是 2012 年 10 月 12 日区域降雨诱发的土质滑坡。目前,该滑坡有变形失稳的迹象,对当地居民生命财产及拟建的云阳一开州(云开)高速公路工程具有潜在威胁。本文以该滑坡为例,通过现场勘察、试验测试及数值模拟,研究了滑坡土体渗流、应力应变及位移场特征,揭示了滑坡变形机制;考察了基质吸力在滑坡稳定性评价中的作用,并分析了不同降雨工况对滑坡稳定性的影响。

1 研究区概况

丁家坡滑坡位于构造剥蚀低山斜坡地貌区。斜坡总体呈单斜分布,斜坡坡向约 282°,地面高程 260~410 m,相对高差 150 m,坡角为 15°~25°。地表植被以灌木及农耕作物为主,斜坡范围覆盖层一般较薄,局部较平缓区覆盖层相对较厚,约 0.5~16.0 m,局部可见基岩裸露。

研究区地层主要由第四系全新统土层(Q₄)的粉质黏土夹碎石土和中侏罗系统沙溪庙组(J_{2s})的粉砂质泥岩和砂岩组成。粉质黏土夹碎石块主要是由粉质黏土和块石组成;粉砂质泥岩为紫红色、暗紫红色,泥

质结构,中厚层状构造,主要矿物成分为黏土矿物,强风化层厚1.0~1.5 m。砂岩为灰白色,中细粒结构,中厚层状构造,岩质较硬,强风化层厚1.0~1.5 m。

研究区的构造简单, J_2s 泥岩产状为 $222^\circ \angle 14^\circ$,层面平整,属于结合性差的硬性结构面。本区抗震设防烈度为6度,基本地震加速度值设计为 $0.05 g$ (g 为重力加速度),场地类别为II类,为建筑抗震危险地段。

研究区属于亚热带季风暖湿气候区,气候温和湿润、雨量充沛、四季气温变化明显。多年平均降水量1 200~1 400 mm,其中5—9月降雨量最多,月平均雨量可达172 mm以上。研究区地下水类型以松散孔隙水和基岩裂隙水为主。孔隙水富水程度受控于松散堆积物的岩性、分布位置和地形切割破坏条件。基岩裂隙水岩组为 J_2s 砂岩局部夹泥岩,岩体较完整,裂隙不发育,地下水主要赋存于风化裂隙和构造裂隙中,地面多呈贫水状,富水性弱。地下水主要补给源为大气降雨,水位动态变化受季节影响明显。

2 丁家坡滑坡特征

2.1 滑坡概况

丁家坡滑坡北起团包梁下,南至老三排,东接上丁家坡,西达下丁家坡,威胁中湾村社区39户119人的安全。另外,拟建的云开高速公路的黄石隧道进口段、黄石特大桥主线桥、云阳西枢纽A匝道及B匝道从丁家坡滑坡上通过,公路也存在安全隐患。据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334—2018),丁家坡滑坡为一级地质灾害防治工程。

2.2 滑坡的基本特征

为了查明滑坡的工程地质特征,进行了工程测量、工程地质测绘、钻探等综合勘察,施工了23个初勘钻孔和21个详勘钻孔,钻孔合格率100%,优良率90%以上,钻孔分布情况如图1(a)所示。

勘察结果表明,滑坡总体呈簸箕形,滑动方向约 280° ,区内岩层产状为 $222^\circ \angle 14^\circ$,岩层倾向与滑动方向夹角为 58° 。滑坡纵长约580 m,横向宽约200 m,面积 $97\,390\text{ m}^2$,斜坡覆盖为松散堆积体,厚0.5~16.0 m,滑体平均厚度为6.0 m,体积约为 $58.4 \times 10^4\text{ m}^3$,为中型土质滑坡。

滑坡左侧以宽缓的冲沟凹槽为界,右侧以局部出露的基岩及变形的公路为界,前缘以土-岩接触面为界,后缘裂缝走向大致与滑坡走向一致。滑坡中部局部可见基岩出露,根据钻探结果中部滑体较薄,滑

坡沿中部剪出的可能性较大,故将滑坡分为I区、II区,如图1(b)所示。

滑体主要由粉质黏土夹碎石块组成,碎块石强风化,粉质黏土常年湿润,可塑性较大,厚度总体不大,但分布不均匀,钻孔揭露0.5~16.0 m。滑带主要由粉质黏土夹碎石块组成,相较于滑体碎石块含量少,黏性土含量高。滑床主要由 J_2s 砂岩、泥岩组成,倾角较陡,形态与区域滑坡地貌一致。

2.3 变形发展过程

2012年10月12日,渝东北普降特大暴雨、大雨,雨水沿着排水沟排水,在坡脚形成积水,如图2(a)所示。由于水土相互作用,滑坡下滑力增加,抗剪强度降低,坡体沿着粉质黏土与下覆基岩形成软弱接触面向下移动,滑坡后缘拉裂,发生位移,形成大的裂缝和深陷区,如图2(b)(c)所示。滑坡区其他地方也出现了多处滑移、滑塌、变形,主要集中在滑坡中部,变形多表现为地裂缝、墙裂缝,如图2(d)—(f)所示,区内变形裂缝走向基本与滑坡走向一致。目前滑坡体上均遍布张裂缝,呈羽状分布,长约25 m,宽一般8~15 cm,裂缝部分区域伴随下错,下错距离0.5~10.0 cm不等,在滑坡边界部位裂缝宽达12 cm,这些裂缝在雨季均有加宽迹象。根据以上现象判断,丁家坡滑坡处于蠕变阶段。

2.4 影响因素

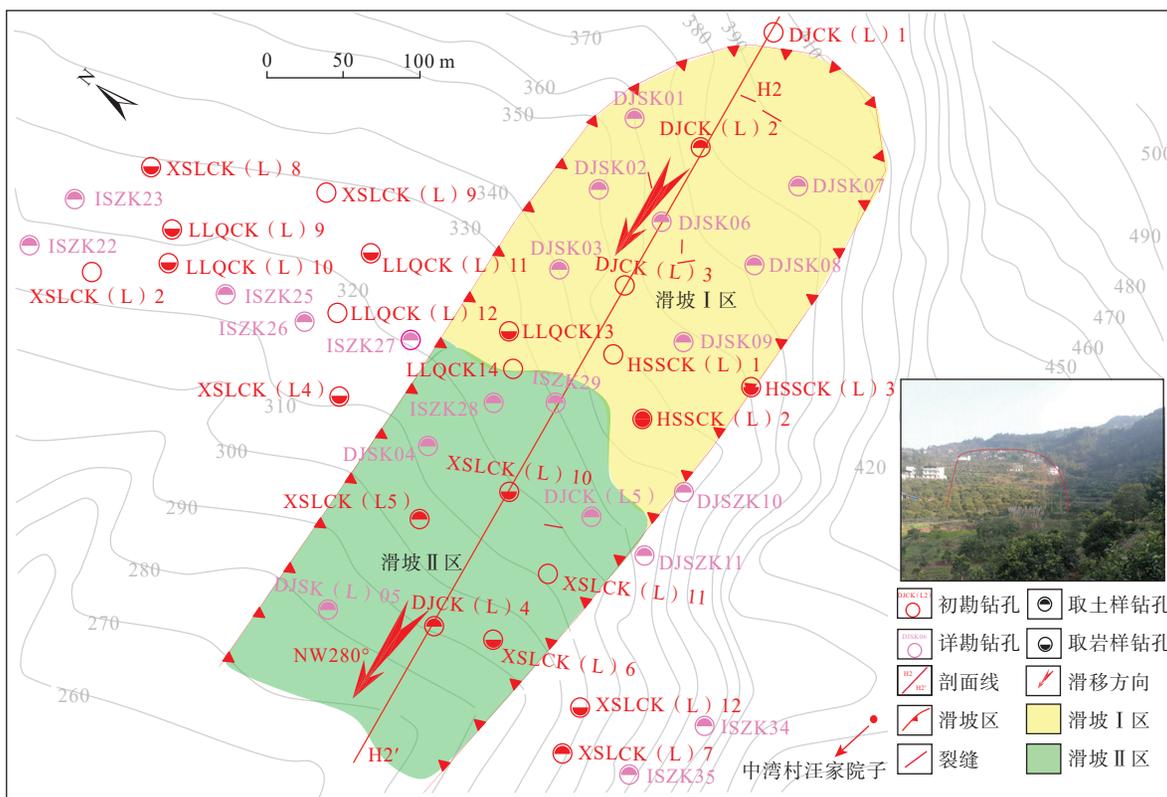
丁家坡滑坡的形成是地形地貌、地层岩性、人类工程活动及降雨共同作用的结果。

(1)不利的地层岩性为滑坡的形成提供了物质基础。在滑坡区域内,堆积了厚度较大的松软土层,其抗剪强度低,当坡脚临空或受地表水冲刷时极易产生滑移。

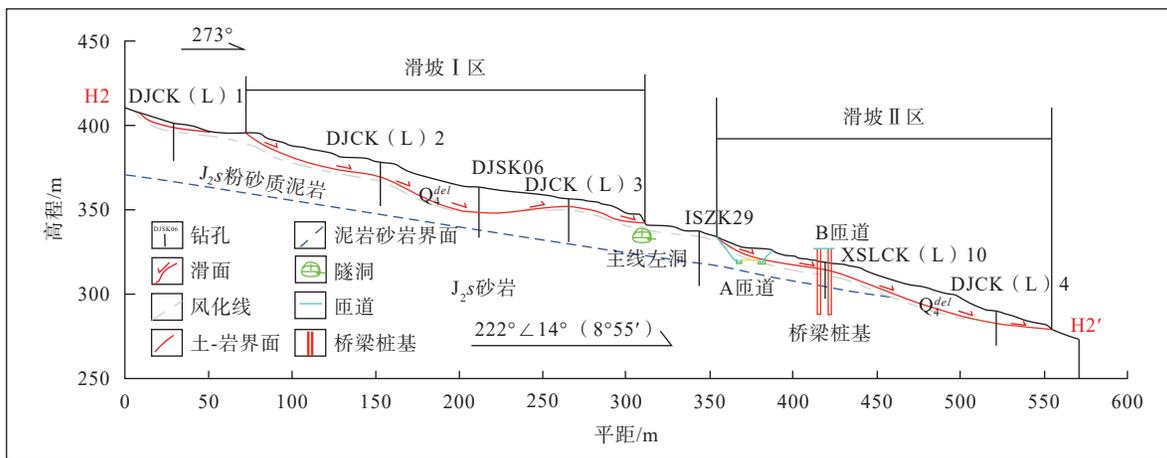
(2)地形坡度条件为滑坡的形成提供了临空面。滑坡位于中低山斜坡地貌区,单斜,土质斜坡段坡角为 $15^\circ \sim 25^\circ$,有利于滑坡的产生。

(3)国道开挖斜坡坡脚,使斜坡的底部临空,在滑坡体形成高2~4 m、角度 $38^\circ \sim 42^\circ$ 的人工开挖边坡,在未对开挖边坡进行支护的情况下,坡体的稳定性差。

(4)降雨作用弱化岩土性质,诱发滑坡。滑坡区内除国道沿线有排水沟以外,滑坡范围内未修筑排水措施,滑坡区内碎石路尚未硬化。区内每年6—9月降雨量大且集中,雨水下渗,使滑体饱和并降低滑带土抗剪强度,致使下滑力增大,抗滑力减小,产生变形。



(a) 滑坡区平面图



(b) 滑坡区剖面图 H2-H2'

图 1 滑坡区平面图和剖面图 H2-H2'

Fig. 1 Layout of the landslide area and sectional view along line H2-H2'

3 数值分析基本理论与方法

3.1 基本理论

3.1.1 非饱和渗流理论

无论饱和还是非饱和渗流都遵循达西定律和质量守恒定律。本文采用 Geo-studio 软件中的 SEEP/W 模块进行渗流模拟, 渗流控制方程为^[26]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_x —— x 方向的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

k_y —— y 方向的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

Q ——施加的边界流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

m_w ——储水曲线的斜率/ kPa^{-1} ;

γ_w ——水的容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

H ——水头/m。

在非饱和渗流分析时, 渗透系数是关于土体基质吸力或含水率的函数, 在 SEEP/W 中采用 Van Genuchten



图 2 滑坡区变形和裂缝照片

Fig. 2 Photo of the deformation and cracks in the landslide area

模型^[27]或 Fredlund-Xing 模型^[28]的土-水特征曲线拟合其关系^[23]。本文采用 Fredlund-Xing 模型, 其土-水特征曲线方程如下:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^Y) - \theta(\Psi)}{e^{Y_i}} \theta'(e^{Y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{Y_i}) - \theta_s}{e^{Y_i}} \theta'(e^{Y_i})} \quad (2)$$

式中: k_w ——指定含水率或者负孔隙水压力计算所得的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

k_s ——测得的饱和渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

θ ——体积含水率 %;

θ_s ——饱和体积含水率 %;

Y ——负孔隙水压力算法的虚拟变量;

i —— j 到 N 之间的数值间距;

j ——最终函数描述的最小负孔隙水压力/kPa;

N ——最终函数描述的最大负孔隙水压力/kPa;

Ψ ——对应第 j 步的负孔隙水压力/kPa;

θ' ——方程初始值。

$$\theta' = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (3)$$

式中: a ——拟合参数, 约等于土中空气进入值;

n ——控制体积含水率函数拐点段斜率的参数;

m ——与残余含水率有关的参数;

$C(\Psi)$ ——修正因子, 可使模型能够表征含水率为 0 时吸力值为 10^6 kPa。

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{C_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{C_r} \right)} \quad (4)$$

式中: C_r ——残余含水率状态时的吸力值/kPa。

3.1.2 非饱和土强度理论

由于降雨历时和强度不同, 非饱和状态不同步, 通过弹塑性有限元分析可以得到不同状态下的应力场、应变场、位移场, 进而分析滑坡的变形破坏机理。其本构模型为弹塑性模型, 破坏前模型为线弹性, 应力达到极限强度时发生破坏。饱和土的抗剪强度采用摩尔-库伦强度准则表示:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (5)$$

式中: τ_f ——剪切强度/kPa;

c' ——有效黏聚力/kPa;

σ ——总应力/kPa;

u_w ——孔隙水压力/kPa;

ϕ' ——有效内摩擦角/($^\circ$)。

非饱和土抗剪强度理论一般采用 Bishop 单应力强度理论^[15]和 Fredlund 双应力强度理论^[16], 分别见式(6)和式(7):

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (6)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7)$$

式中: χ ——有效应力参数, 与土体的饱和度有一定的函数关系, 反映了基质吸力对有效应力的贡献程度;

ϕ' ——对应的净法向应力变量的内摩擦角/($^\circ$);

ϕ^b ——对应的基质吸力变量的内摩擦角/($^\circ$), 反映抗剪强度增长率与基质吸力之间的关系。

为了更好地量化有效应力参数 χ , Fredlund 等^[29]和 Vanahypalli 等^[30]利用抗剪强度的试验结果对 χ 与饱和度函数关系的有效性进行验证^[23]。在基质吸力为 0~1 500 kPa 范围内, 以下 2 个函数关系式与试验结果较吻合。第 1 个函数关系式为:

$$\chi = S^k = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^k \quad (8)$$

式中: S ——饱和度;

k ——优化拟合参数, 用于对预测值与测量值进行优化拟合。

另一种函数关系式为:

$$\chi = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

式中: θ_r ——残余体积含水率/%;

S_r ——残余饱和度。

在 SLOPE/W 中运用了 Vanapalli 等^[30]和 Fredlund 等^[29]建议的非饱和土抗剪强度公式, 分别见式(10)和式(11), 本文采用式(11)。

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right] \quad (10)$$

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^k \tan \phi' \right] \quad (11)$$

3.1.3 边坡稳定性分析

边坡的稳定性常用稳定性系数(F_s)表示, F_s 是指抗滑力和下滑力之间的比值, 其最常用的计算方法是极限平衡法。本文采用极限平衡理论中的 Morgenstern-Price 法进行计算, 它满足 3 个平衡方程, 即水平方向和竖直方向上力的作用平衡方程以及力矩平衡方程。因此, 该方法是一种较为严格的计算求解方法。

3.2 数值模拟方法

3.2.1 模型建立

以丁家坡滑坡为研究对象, 选取具有代表性的 H2-H2' 剖面为例, 建立滑坡计算模型, 如图 3 所示。该模型经过网格划分, 坚持局部细化、精确计算的原则, 共包含 14 897 个节点, 6 064 个单元。

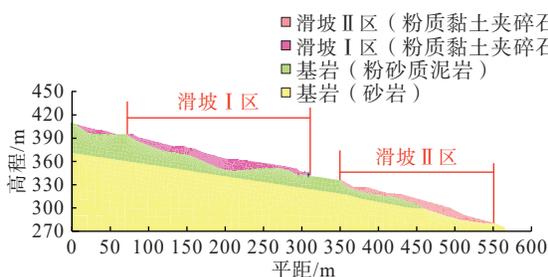


图 3 丁家坡滑坡数值模型图

Fig. 3 Numerical model of Dingjiapo landslide

3.2.2 参数的选取

现场取得 25 组土样、11 组岩样, 进行室内土工试验, 并对潜在的滑动带土取样进行饱和快剪、天然及饱和残余剪切试验, 得到了本次数值分析所需的岩土体物理力学参数, 如表 1 所示。利用单环法测得滑坡粉质黏土夹碎石块的渗透系数约为 1.35 m/d。基岩的渗透系数取自经验值, 如表 1 所示。

3.2.3 边界条件

(1) 滑坡的渗流边界条件: 坡体右侧边界在水位

表 1 岩土体的物理参数

Table 1 Physical parameters of the rock and soil

岩土介质/参数	滑坡 I 区	滑坡 II 区	滑床	
	粉质黏土夹碎石块	粉砂质泥岩	中砂岩	
天然重度/(kN·m ⁻³)	19.7	19.7	25.1	24.7
饱和重度/(kN·m ⁻³)	20.0	20.0	-	-
天然黏聚力/kPa	13.0	15.0	-	-
黏聚力(饱和)/kPa	10.5	12.8	-	-
天然内摩擦角/(°)	10.5	13.0	-	-
内摩擦角(饱和)/(°)	8.6	10.6	-	-
弹性模量/MPa	10.0	10.0	4 030	30 000
泊松比	0.30	0.30	0.29	0.20
渗透系数/(m·d ⁻¹)	1.35	1.35	0.000 5	0.01

注: “-”表示参数不需要设置, 为无。

上方, 设为压力水头边界; 坡体左侧和底面无限远处设置为不透水边界; 坡面为自由入渗边面, 降雨边界, 当降雨量小于渗透系数时为流量边界, 当降雨量大于渗透系数时为压力水头边界。(2) 滑坡的应力边界条件: 固定坡体左右两侧和坡体底面边界。

3.2.4 计算工况

根据云阳县的降雨情况, 选择了 4 种工况: 降雨强度为 0.02 m/d(中雨)、0.05 m/d(大雨)、0.08 m/d(暴雨)、0.12 m/d(大暴雨), 降雨历时为 1~6 d。

4 滑坡变形机制分析

4.1 滑坡渗流场分析

降雨历时越久, 孔隙水压力越大, 浸润线下移, 饱和和区域面积(红色区域)不断扩大, 如图 4(a)(b)所示; 降雨强度越大, 孔隙水压力增加的幅度越快, 坡面越易饱和, 如图 4(b)(c)所示。

数值模拟结果显示, 当分别以 0.04 m/d 的强度降雨 3 d 和以 0.12 m/d 的强度降雨 1 d 时, 两者累计降雨量相等, 但前者的雨水入渗深度、饱和区域面积均大于后者, 如图 4(a)(d)所示。其原因在于, 当降雨强度大于或近似等于坡体的入渗强度时, 一部分雨水向下渗流形成地下径流, 另一部分雨水沿着坡面形成地表径流, 雨水的入渗率低, 仅在坡面浅层形成饱和和区域, 造成浅层滑动; 而低强度降雨, 雨水入渗率较高, 浸润深度大, 由于坡体的渗透系数要远远大于基岩泥岩层, 因此基岩泥岩层底相当于隔水层, 降雨后入渗雨水在土-岩界面形成积水, 并沿土-岩界面渗流到坡底, 从而降低土的强度, 减小基质吸力, 削弱滑坡稳定性。

4.2 滑坡应力应变场分析

在滑坡的前缘及陡峭部位应力变化较为明显。降雨剪应力增加, 坡体上形成较多的黄色剪应力圈。

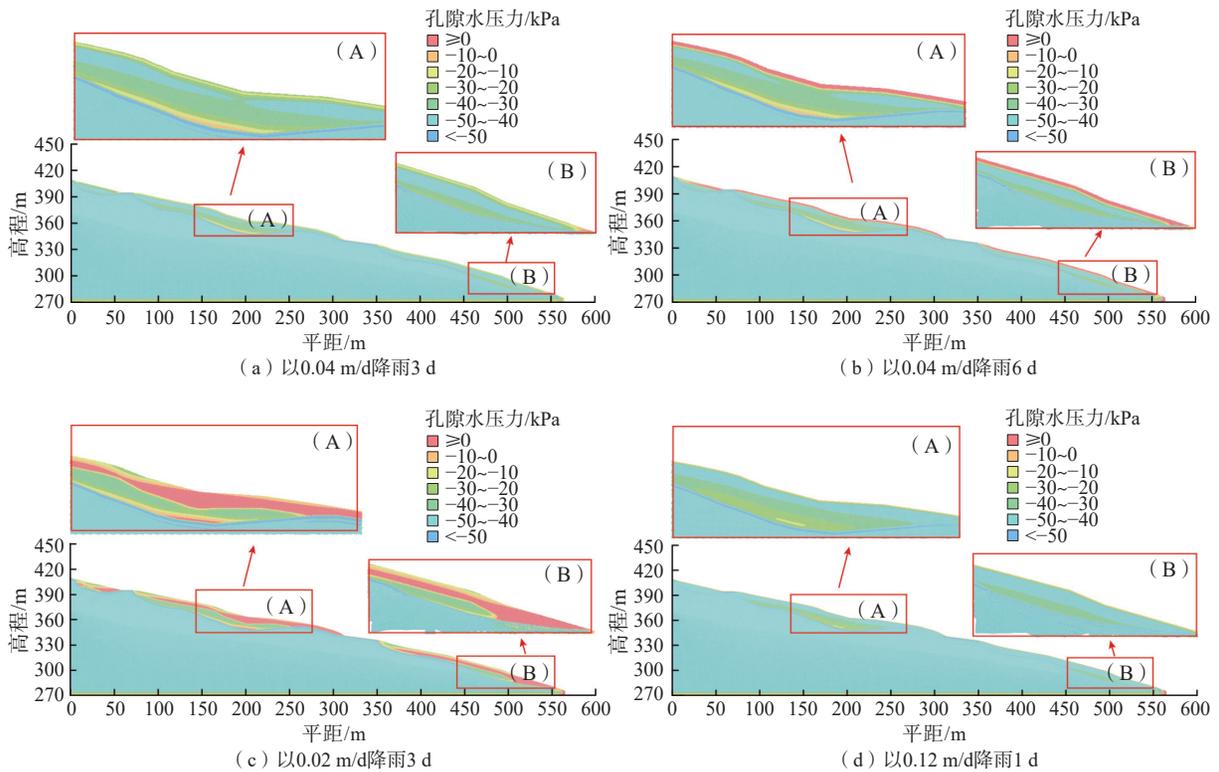


图4 不同降雨工况下孔隙水压力的变化情况

Fig. 4 Variation of pore water pressure under different rainfall conditions

随着降雨时间的持续,剪应力集中范围不断扩大,黄色剪应力圈的面积不断增加;降雨强度越大,剪应力增加得越快,逐渐在滑坡 I 区的中上部和滑坡 II 区的下部形成贯通(图 5),尤其是坡面陡峭的部位。

由于基岩的岩石力学参数(弹性模量、剪切模量)大,即使受到较大剪应力作用,剪应变也较小(<0.001)。滑带为软弱带,岩石力学性质相对较弱,剪应变量大。无论滑坡 I 区还是滑坡 II 区,滑坡的土-岩界面为应变量大的区域(蓝色)。随着降雨时间的持续,剪应变的范围不断扩大,降雨强度越大,剪应变扩大的速度越快(图 6)。

4.3 滑坡位移场分析

丁家坡滑坡的位移主要集中在滑坡 I 区的中部土-岩界面处,滑坡 II 区在坡脚及中部位移最为明显,滑坡 I 区最大位移量约为 26 cm,滑坡 II 区的最大位移量约为 14 cm,滑坡 II 区相对于滑坡 I 区位移量较小,如图 7 所示。相对于滑坡 II 区,滑坡 I 区受降雨的影响大,变形明显,位移量大。

综合滑坡渗流场、应力应变场及位移场的分析结果,得到丁家坡滑坡变形机制:降雨入渗后,坡体的体积含水率和孔隙水压力增加,雨水浸泡使颗粒之间基质吸力降低,有效应力和抗剪强度降低,在土-岩界面

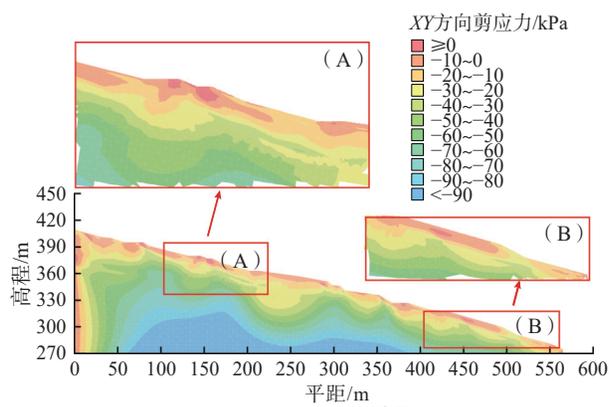
形成剪应力集中,产生应变和位移,滑坡发生变形破坏,最后导致失稳。降雨强度越大,历时越久,滑坡越易变形失稳。

5 滑坡稳定性评价

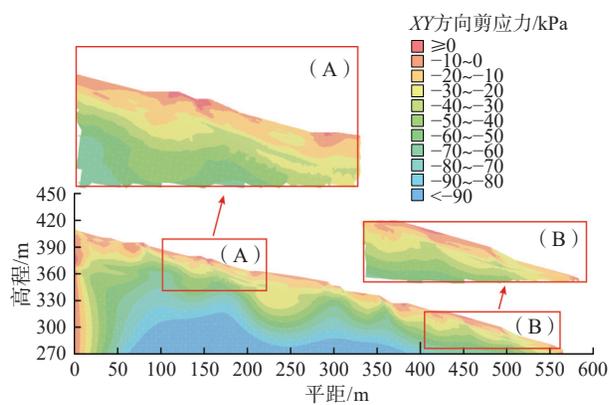
5.1 基质吸力在滑坡稳定性评价中的作用

由 Fredlund 非饱和土抗剪强度理论可知,基质吸力对非饱和土的抗剪强度具有重要意义,而土体的基质吸力与含水率密切相关,其大小在数值上等于负孔隙水压力。土体的含水率增加时,孔隙水压力增大,基质吸力降低,抗剪强度削弱,稳定性系数降低。当土体处于饱和状态时,基质吸力为 0,抗剪强度弱,稳定系数小,滑坡易破坏。反之,当土体处于较为干燥的状态时,含水率较低,基质吸力大,抗剪强度高,有利于滑坡的稳定。因此,在非饱和状态下基质吸力对滑坡稳定性的影响尤为明显。

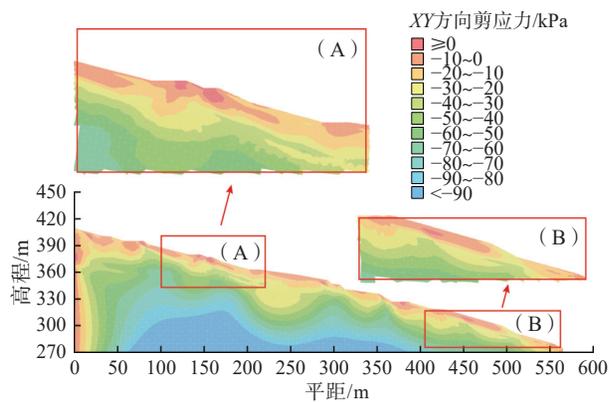
不考虑基质吸力的影响时,丁家坡滑坡 I 区和 II 区的稳定性系数均小于 1,处于不稳定状态;考虑基质吸力对滑坡的影响时,在天然状态滑坡 I 区和滑坡 II 区的稳定性系数均大于 1.05,处于基本稳定状态(图 8)。降雨过程中,考虑基质吸力的稳定性系数大于不考虑基质吸力的稳定性系数。但随着降雨时间



(a) 以 0.04 m/d 降雨 3 d



(b) 以 0.04 m/d 降雨 6 d



(c) 以 0.08 m/d 降雨 3 d

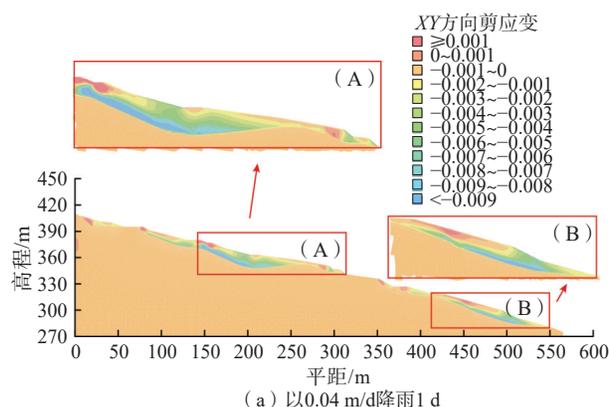
图 5 不同降雨工况下 XY 方向剪应力变化情况

Fig. 5 Variation of XY direction shear stress under different rainfall conditions

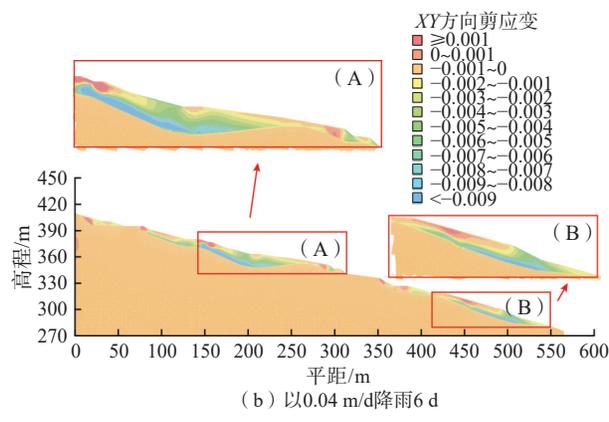
的持续和降雨强度的增加,含水率增加,基质吸力越来越小,考虑基质吸力与不考虑基质吸力的滑坡稳定性系数越来越接近,当土体饱和时,基质吸力为 0,二者相等。可见,在土体非饱和状态下基质吸力对该滑坡稳定性具有较大的影响。因此,在土质滑坡稳定性评价中应考虑基质吸力的作用。

5.2 不同降雨强度、降雨历时工况下稳定性分析

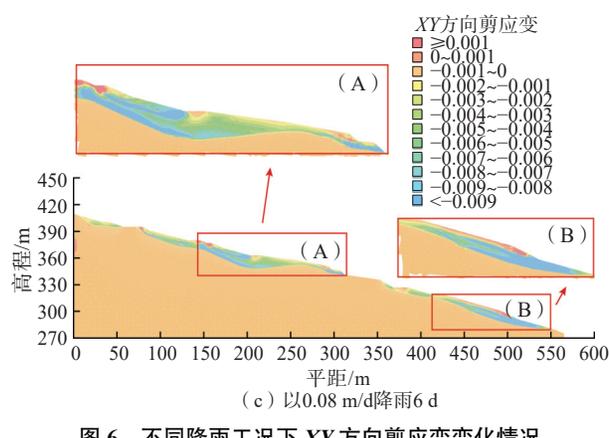
如图 8 所示,考虑基质吸力的影响时,天然状态下滑坡 I 区、滑坡 II 区稳定性系数均大于 1.05,处于基



(a) 以 0.04 m/d 降雨 1 d



(b) 以 0.04 m/d 降雨 6 d



(c) 以 0.08 m/d 降雨 6 d

图 6 不同降雨工况下 XY 方向剪应变变化情况

Fig. 6 Variation of XY direction shear strain under different rainfall conditions

本稳定状态。随着降雨时间的持续以及降雨强度的增加,稳定性系数减小,但最后逐渐趋于一个定值。在滑坡 I 区以 0.04 m/d 降雨 5 d、0.08 m/d 降雨 5 d、0.12 m/d 降雨 4 d 时,和在滑坡 II 区以 0.04 m/d 降雨 4 d、0.08 m/d 降雨 3 d、0.12 m/d 降雨 3d 时,滑坡稳定性系数小于 1,滑坡破坏失稳。滑坡 II 区中雨和大雨工况下稳定性系数较小,但滑坡 I 区在极端天气(暴雨、大暴雨)工况下稳定性系数比滑坡 II 区的变化大。

根据以上对丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价分析,当遇到极端降雨天气时,滑坡 I 区和滑坡 II 区

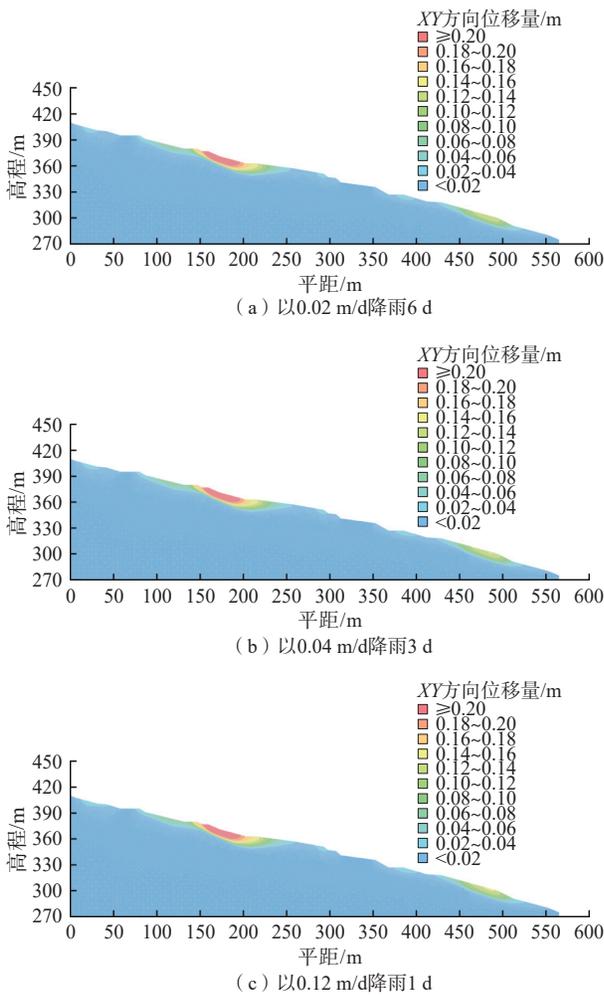


图7 XY方向位移量随时间持续的变化情况

Fig. 7 Variation of XY direction displacement with time

均易变形失稳, 主要发生在坡脚和土-岩界面处。滑坡 I 区一旦破坏失稳, 坡体滑移的岩土体将直接影响坡

脚处的黄石隧道进口段主线左洞。滑坡 II 区变形破坏主要发生在坡脚处, 坡顶的变形比较微弱, 所以滑坡 II 区破坏失稳对坡顶处的黄石特大桥主线桥、云阳西枢纽 A 匝道及 B 匝道的影响较小。综上所述, 滑坡 I 区的稳定性对云开高速安全影响较大, 因此, 需要重点做好滑坡 I 区防护措施。

6 结论

(1) 丁家坡滑坡属于中型中浅层土质滑坡, 斜坡地形、松散层较弱的岩性、潜在临空面等因素决定了滑坡的形成与发育; 坡体渗透性良好, 渗透系数达 1.35 m/d, 降雨激发滑坡的变形。目前滑坡处于蠕变阶段, 坡体中部发育多条裂缝, 且在雨季有加宽迹象。

(2) 数值分析结果表明, 降雨入渗, 孔隙水压力增加, 基质吸力减小, 有效应力和抗剪强度降低, 剪应力主要集中在土-岩界面, 产生应变和位移, 导致滑坡变形失稳。其中滑坡 I 区最大位移量为 26 cm, 滑坡 II 区最大位移为 14 cm。高强度短历时的降雨使坡体浅层迅速饱和, 易形成浅层滑动; 而低强度长历时的降雨使坡体浸润较深, 容易造成深部滑动, 其潜在滑动面为土-岩界面。

(3) 不考虑基质吸力得到的滑坡 I 区和 II 区的稳定性系数均小于考虑基质吸力情况下的稳定性系数, 表明土体基质吸力对该滑坡稳定性具有较大的影响, 在土质滑坡稳定性评价中应考虑基质吸力的作用。

(4) 目前丁家坡滑坡处于基本稳定状态, 在强降雨条件下, 滑坡稳定性将降低。降雨历时越久, 降雨强度越大, 滑坡的稳定性系数越小, 越易失稳。相对

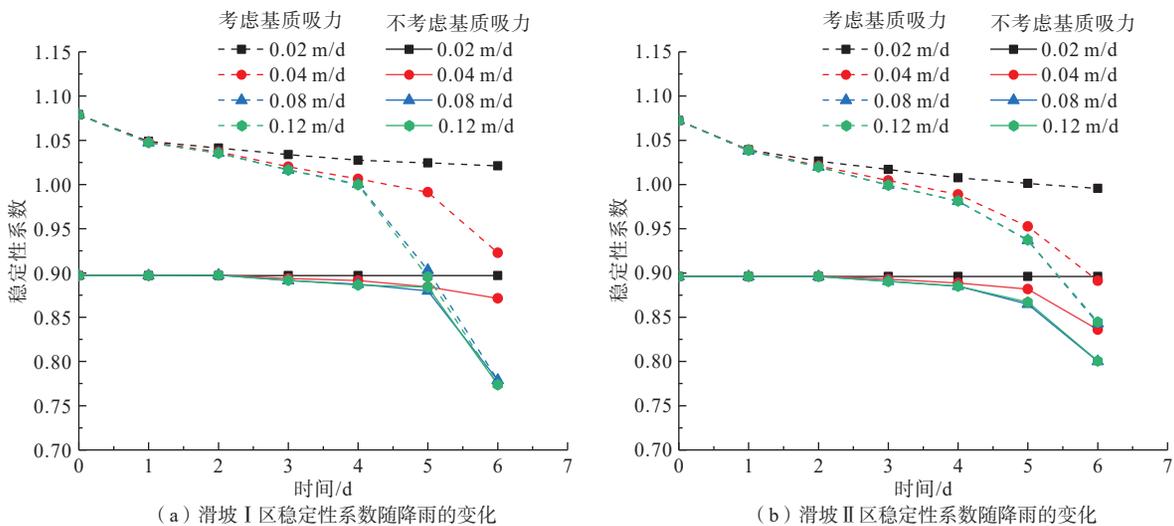


图8 滑坡区稳定性系数随降雨的变化

Fig. 8 Variation of the stability factor of the landslide area with rainfall

于滑坡Ⅱ区, 滑坡Ⅰ区对云开高速公路安全的影响更大, 需要重点做好滑坡Ⅰ区防护措施。

参考文献 (References):

- [1] 熊坤, 易武, 王力, 等. 三峡库区八字门滑坡变形破坏机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 9 - 18. [XIONG Shen, YI Wu, WANG Li, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Bazimen landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 9 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李德营, 徐勇, 殷坤龙, 等. 降雨型滑坡高速运动与堆积特征模拟研究: 以宁乡县王家湾滑坡为例 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 225 - 230. [LI Deying, XU Yong, YIN Kunlong, et al. Simulation of high-speed movement and accumulation characteristics of rainfall-induced landslide: a case of wangjiawan landslide in Ningxiang County [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4): 225 - 230. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄晓虎, 易武, 龚超, 等. 开挖致使古滑坡复活变形机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1276 - 1285. [HUANG Xiaohu, YI Wu, GONG Chao, et al. Reactivation and deformation mechanism of ancient landslides by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1276 - 1285. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 马凤山, 李国庆, 张亚民, 等. 西气东输管道靖边-延川段地质灾害遥感识别及危险性评价 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(增刊1): 138 - 144. [MA Fengshan, LI Guoqing, ZHANG Yamin, et al. Geological hazard evaluation of oil-gas pipeling in loess area based on multiple remote sensing information [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(Sup1): 138 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 蒲娉璠. 重庆市滑坡灾害时空分布特征与易发性评价研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016. [PU Pingfan. Analysis of temporal and spatial characteristics of landslide disaster and landslide susceptibility assessment in Chongqing [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 付宏渊, 陈镜丞, 曾铃, 等. 降雨对炭质泥岩-土分层路堤渗流与变形影响的模型试验 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2852 - 2860. [FU Hongyuan, CHEN Jingcheng, ZENG Ling, et al. Model test on effect of rainfall on seepage and deformation of carbonaceous mudstone-soil stratified embankment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2852 - 2860. (in Chinese with English abstract)]
- [7] PAN Y, WU G, ZHAO Z, et al. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103806.
- [8] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73 - 81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73 - 81. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李冬冬. 降雨诱发豫西锁固型滑坡演化机理模型试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020. [LI Dongdong. Experimental study on the evolution mechanism of landslides with locked section induced by rainfall infiltration in western Henan Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020 (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张勇, 温智, 程英建. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 178 - 182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 178 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 徐辉, 刘海知. 诱发滑坡的多尺度降雨特征 [J]. 山地学报, 2019, 37(6): 858 - 867. [XU Hui, LIU Haizhi. Multi-scale rainfall characteristics of rainfall-induced landslides [J]. Mountain Research, 2019, 37(6): 858 - 867. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曾昌禄, 李荣建, 关晓迪, 等. 不同雨强条件下黄土边坡降雨入渗特性模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊1): 111 - 115. [ZENG Changlu, LI Rongjian, GUAN Xiaodi, et al. Experimental study on rainfall infiltration characteristics of loess slopes under different rainfall intensities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup 1): 111 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李新卫, 晏鄂川, 李辉. 暴雨作用下铜仁地区典型滑坡变形机理研究 [J]. 人民长江, 2016, 47(7): 44 - 49. [LI Xinwei, YAN Echuan, LI Hui. Study on deformation mechanism of typical landslide triggered by rainstorm in Tongren area of Guizhou Province [J]. Yangtze River, 2016, 47(7): 44 - 49. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 霍志涛,李高,王力,等.降雨型滑坡浅层滑动对土体含水率变化的响应[J].*长江科学院院报*,2022,39(7):110-117. [HUO Zhitao, LI Gao, WANG Li, et al. Response of shallow sliding of rainfall-type landslide to the change of soil moisture content[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(7): 110 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [15] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1963, 13(3): 177 - 197.
- [16] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(3): 313 - 321.
- [17] 付宏渊,马吉倩,史振宁,等.非饱和土抗剪强度理论的关键问题与研究进展[J].*中国公路学报*,2018,31(2):1-14. [FU Hongyuan, MA Jiqian, SHI Zhenning, et al. Key issues and research progress of shear strength theory of unsaturated soil[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(2): 1 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王新刚,谷天峰,王家鼎.基质吸力控制下的非饱和黄土三轴蠕变试验研究[J].*水文地质工程地质*,2017,44(4):57-61. [WANG Xingang, GU Tianfeng, WANG Jiading, Research on the triaxial creep test of unsaturated loess under the matric suction control[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 57-61. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郑文晓,甘建军,李荐华.基质吸力对灰岩区滑带土强度影响的试验分析[J].*长江科学院院报*,2020,37(7):120-124. [ZHENG Wenxiao, GAN Jianjun, LI Jianhua. Experimental study on effect of matric suction on strength of slip soil in limestone zone[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(7): 120 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [20] WANG H, SUN P, WANG G, et al. Experimental and numerical study of shallow loess slope failure induced by irrigation[J]. *CATENA*, 2021, 206: 105548.
- [21] 吴俊杰,王成华,李广信.非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J].*岩土力学*,2004,25(5):732-736. [WU Junjie, WANG Chenghua, LI Guangxin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 732 - 736. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄达,匡希彬,罗世林.三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J].*水文地质工程地质*,2019,46(5):127-135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 127 - 135. (in Chinese with English abstract)]
- [23] LU N, WILLIAM J LIKOS. 非饱和土力学[M]. 韦昌富,侯龙,简文星,译.北京:高等教育出版社,2012:161-192. [LU N, WILLIAM J LIKOS. Unsaturated soil mechanics[M]. WEI Changfu, HOU Long, JIAN Wenxing, trans. Beijing: Higher Education Press, 2012: 161 - 192. (in Chinese)]
- [24] 黄观文,王家兴,杜源,等.顾及降雨及库水位因素的滑坡时滞分析与预测——以三峡库区新铺滑坡为例[J].*地球科学与环境学报*,2021,43(3):621-631. [HUANG Guanwen, WANG Jiaying, DU Yuan, et al. Time-delay analysis and prediction of landslide considering precipitation and reservoir water level: A case study of Xinpu landslide in Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 621 - 631. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 何坤,胡卸文,马国涛,等.四川省盐源玻璃村特大型玄武岩古滑坡复活机制[J].*岩土力学*,2020,41(10):3443-3455. [HE Kun, HU Xiewen, MA Guotao, et al. The reactivated mechanism of Boli Village giant ancient basalt landslide in Yanyuan, Sichuan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3443 - 3455. (in Chinese with English abstract)]
- [26] GEO-SLOPE International Ltd. 中仿科技(CnTech)公司,译.非饱和土体渗流分析软件SEEP/W用户指南[M].北京:冶金工业出版社,2011,8:141-149. [Seepage modeling with SEEP/W 2007[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011, 8: 141 - 149]
- [27] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [28] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521 - 532.
- [29] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 440 - 448.
- [30] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 379 - 392.

编辑:汪美华

实习编辑:刘真真