

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.027

黄陵县印台山边坡稳定性分析

潘网生^{1,2,3}, 卢玉东¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 西安思源学院 管理学院, 西安 710038)

摘要: 针对黄陵印台山老滑坡不稳定现状, 通过野外调查采样及一系列室内试验方式获取土样基本物理性质及抗剪强度指标, 在分析非饱和土渗流过程及作用机理基础上, 探讨了印台山裂缝对黄土边坡稳定性影响, 同时借助 geostudio2007 软件模拟了上述过程。研究结果表明: 降雨强度及降雨持时与边坡稳定性存在明显相关性, 降雨强度越大, 边坡稳定性越低; 降雨持时越长, 边坡稳定性也越低。印台山边坡裂缝的存在是影响边坡稳定的积极因素, 裂缝产生的优先流一方面通过对土体内部孔隙水压力的改变来影响边坡应力平衡, 另一方面通过与岩土层分界面的相互作用, 促成岩土层分界面发展为优势滑动面, 进而影响边坡整体稳定性。在滑坡防治方面, 建议在坡体前缘段设置抗滑桩, 以增大坡体抗滑阻力, 并对边坡裂缝进行有机物填充处理, 避免优先流的产生。

关键词: 裂缝; 优先流; 降雨; 边坡稳定性; 黄土滑坡

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0946-07

Stability analysis of Yintaishan slope in Huangling County

PAN Wang sheng^{1,2,3}, LU Yu dong¹

(1. School of Environment Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. School of Management, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: According to the unstable status of old landslide in Yintaishan of Huangling County, the physical properties and shear strength of soil samples collected in the field were determined through laboratory tests. Based on the analysis of seepage process and action mechanism of unsaturated soil, the impacts of ground fracture on the stability of Yintaishan slope were discussed, and the process was simulated using the geostudio2007 software. The results showed that there is an obvious correlation between precipitation intensity and duration and slope stability, and slope stability decreases with the increasing of precipitation intensity and duration. The existence of ground fracture can affect slope stability. On one hand, the preferential flow generated by ground fracture can affect the stress equilibrium of soil slope through the variation of pore water pressure; on the other hand, the interaction between the preferential flow and interface of soil layer can change the interface of soil layer into the priority slip surface and then affect slope stability. Finally, based on its adverse impact of fracture, some suggestions of prevention and treatment were put forward, such that the antislid pile should be considered at the beginning of slope to increase the antiskid resistance and the fracture is filled with the organic matter to avoid the preferential flow.

Key words: fracture; preferential flow; rainfall, slope stability; loess landslide

大量的滑坡统计数据已经证明降雨与黄土滑坡之间有着密切的关系^[1-4], 关于降雨作用于黄土滑坡的机理, 可以通过模拟降雨入渗过程中土体内部孔隙水压力和基质吸力的变化对黄土抗剪强度的影响加以解释^[5], 无论是利用极限平衡法, 强度折减法还是有限元等方法, 绝大多数学者是基于

土体连续、均质这一假设前提展开研究的。然而事实上, 无论是通过肉眼观测还是通过黄土微观结构电镜扫描^[6]或是染色示踪试验^[7], 均证实黄土内部存在大量空隙、节理和裂隙。上述空隙的种类、结构形态及其连通性与黄土渗透性有着密切的关系, 直接带来降雨入渗的显著差异, 而这种差异

收稿日期: 2015-01-20 修回日期: 2015-07-23 网络出版时间: 2015-09-24
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2030.008.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(40372114)
作者简介: 潘网生(1975-), 男, 江苏镇江人, 讲师, 博士研究生, 主要从事地质灾害风险评估与生态环境方面研究。E-mail: mcypang@sina.com

的结果即是所谓的优先流。关于优先流,最早是用来描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程以及土壤水分或溶质运移机理而提出的专业术语^[8]。优先流主要表现为指流、大孔隙流、漏斗流等多种形式,能够对黄土深层稳定性带来直接影响的主要是指后两者。黄土内部空隙结构在大孔隙流、漏斗流的作用下是不断发展变化的,浅层黄土裂隙、垂直节理及生物孔洞,会逐渐发育成为大孔径的洞隙,并逐步深入黄土体内部,成为地表降雨与地下水联系的主要通道,也成为降雨后作用于黄土斜坡深层失稳的重要因素^[9]。同时,深部的黄土裂隙、孔洞也可能因为大孔隙流、漏斗流的作用导致湿陷、塌落、压实而发展为结构致密的隔水层,最终发展为滑动面。因此,一般靠降雨通过黄土粒间裂隙、孔隙正常下渗很难影响坡体深层稳定,坡体深层稳定性主要受优先流如大孔隙流、漏斗流控制。但目前这方面的研究成果并不多,可查文献主要是以刘领礼^[10]、唐正光^[11]、马佳^[12]、曾磊^[13]、殷宗泽^[14]、海龙^[15]等作品为代表。关于优先流作用于黄土边坡稳定性的机理,文献[16-21]已经给出清晰的解释,这里不再赘述。

本文之所以选择黄陵县印台山边坡作为研究对象,是由于该边坡作为一处老滑坡体,目前仍处于不稳定状态,对居住在该坡体上的印台山村民的生命财产安全构成极大的威胁,而管理部门并没有给予足够的重视。此外,学术界对此关注也甚少,可查文献寥寥,且专门针对其裂缝的边坡稳定性分析尚无。本文拟结合印台山滑坡的野外调查及钻孔取样资料,深入分析并揭示由裂缝所产生的优先流对边坡稳定性的影响,以引起有关部门足够重视,及时采取有效措施加强此类地质灾害的防范与治理。

1 滑坡体地质环境背景

印台山滑坡位于黄陵县城黄帝陵对面的印台山西麓、沮河右岸(见图1),该滑坡为第四系全新世早期滑坡体(老滑坡),滑坡体总体呈东高西低簸箕形,滑坡体周界明显,滑坡后壁陡峭,高约10 m,后缘宽约200 m,前缘延伸至沮河,宽约300 m。滑坡体长约150 m,前缘厚度为10~12 m,中后部厚度25~30 m,为一大型缓慢变形的牵引式滑坡。

通过野外调查发现,滑坡体表面分布有四条拉张裂缝,每条裂缝宽约2~3 cm,地面错落约8~10 cm,大致呈北西向延伸,主要分布于滑坡体中上部,由低处向高处发展,强度逐渐减弱,其中有两条裂缝贯通性好。裂缝穿过地段多形成墙体开裂,窑洞顶裂缝甚至倒塌。近年来,印台村村民的建筑活动对老滑坡体的应力平衡带来威胁,加之生活污水废水的无序排放和下渗导致坡体地下水位上升(所测定的地下水位

线见图2),土体含水率增大,再一次加剧了裂缝的扩张,形成了新的潜在滑坡危险。

根据前人研究成果及野外钻孔取样发现,印台山滑坡体岩土类型主要有素填土、粉质黏土、卵砾石以及砂岩。老滑坡滑动面位于粉质黏土层与砂岩交界面上(见图2)。滑体土为粉质黏土,厚度15~30 m不等,滑坡体前缘滑床为厚度约4.3 m的卵砾石层,后缘滑床为砂岩层。滑带土为滑动面上方的粉质黏土在滑动过程受挤压破裂形成,厚度0.8~1.0 m不等。岩土类型分布见表1钻孔资料。通过室内试验获取各类土体物理性质及抗剪强度指标(见表2表3)。

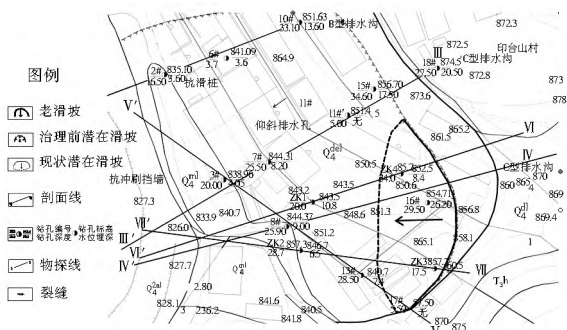


图1 印台山滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Plan view of engineering geology of Yintaihan landslide

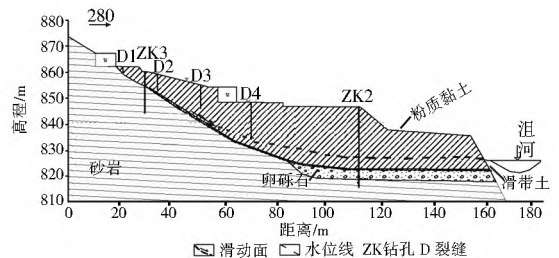


图2 印台山滑坡 X-X 工程地质剖面图

Fig. 2 Cross-section view of engineering geology in the profile X-X of Yintaihan landslide

表1 岩土层钻孔资料

Tab. 1 Drilling data of soil layer

岩土类型	钻孔 ZK2			钻孔 ZK3		
	高程/m	厚度/m	厚度/m	高程/m	厚度/m	厚度/m
粉质黏土层	823.3	847.2	23.9	854.2	860.1	5.9
滑带土层	822.3	823.3	1.0	853.4	854.2	0.8
卵砾石层	819.2	822.3	3.1			0
砂岩层	816.5	819.2	2.7	843.3	853.4	10.1

表2 岩土体基本物理性质

Tab. 2 Physical properties of soil samples

土的类型	天然含水率 (%)	饱和含水率 (%)	残余含水率 (%)	饱和渗透系数 / (m · h ⁻¹)	天然容重 / (kN · m ⁻³)	饱和容重 / (kN · m ⁻³)
粉质黏土	22.7	50.15	4.55	0.008 6	20	24.47
滑带土	42.65	42.65	4.35	0.003 9	23.54	23.54
卵砾石	32.34	32.34	10.3	0.000 94	28.59	28.59
砂岩	27.18	35.11	9.12	0.000 43	27.66	29.39

表 3 土体抗剪强度参数

Tab. 3 Shear strength indexes of soil samples

土的类型	饱和有效抗剪强度		天然有效抗剪强度	
	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi(^{\circ})$
粉质黏土	12.7	21.3	24.3	33
滑带土	10.8	18.9	10.8	18.9
卵砾石	19.6	31.6	19.6	31.6
砂岩	420	36.2	640	41.3

2 渗流数值模拟与边坡稳定性分析

2.1 渗流与边坡稳定基本方程

(1) 饱和 非饱和和二维渗流基本方程。

由于非饱和水份运移规律也遵循达西定律,因此,本文关于饱和 非饱和和二维渗流基本方程采用文献[22]公式。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = C_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数; h 为水头; Q 为流量边界; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; C_w 为比水容量,即土壤水分特征曲线斜率的倒数,土壤水分特征曲线可通过 van Genuchten 函数^[23]公式(2)求取。

$$\theta = \theta_v + \frac{(\theta_s - \theta_v)}{[1 + (h/a)^n]^m} \quad (2)$$

式中: θ 为含水率; θ_s 为饱和含水率; θ_v 为残余含水率; a, n 为拟合形态参数; $m = 1 - \frac{1}{n}$; h 为土壤基质吸力值。

(2) 非饱和土抗剪强度基本方程。

非饱和土抗剪强度公式主要是由 Mohr-Coulomb 强度理论引入基质吸力发展而来,本文关于饱和 非饱和有效抗剪强度采用文献[24]公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma' - u_a) \tan \psi' + (u_a - u_w) \tan \psi^b \quad (3)$$

式中: τ_f 为非饱和土抗剪强度; c' 为饱和有效黏聚力; $(\sigma' - u_a)$ 为剪切面法向有效应力; $(u_a - u_w)$ 为土体基质吸力; ψ' 为饱和有效内摩擦角; $\tan \psi^b$ 为非饱和土抗剪强度随基质吸力 $(u_a - u_w)$ 增加的速率,称为基质吸力内摩擦角。其中,基质吸力 u 值由土-水特征曲线试验获取。

(3) 边坡极限平衡方程。

关于边坡极限平衡分析采用 Morgenstern Price 法^[25],根据滑坡体二维静力平衡条件和沿主滑方向的力矩平衡条件,推导出边坡安全系数。本文通过 Geostudio 2007 软件自带的 Morgenstern Price 算法实现。

本文关于渗流有限元的计算主要借助于 Geostudio 2007 软件的 SEEP/W 功能实现,并将渗流分析结果与 SLOPE/W 模块进行耦合分析,进而求解渗流过程中的边坡稳定性。

2.2 边坡模型构建

本文根据印台山滑坡体野外调查及钻孔资料,以 $\times \times \times$ 剖面构建符合实际的边坡模型,以揭示裂缝产生的漏斗流对边坡稳定性的影响,边坡土层结构由粉质黏土层、滑带土层、卵砾石层及砂岩层等构成。根据对印台山滑坡体上四条裂缝的实际测量,裂缝 D1、D2、D3、D4 的深度分别为 1.4 m、5.2 m、8.1 m 和 14.2 m,裂缝系由坡体缓慢滑动牵引所致,平面上呈弧形分布,剖面上也呈弧形分布,本文二维模型将其假

设为垂直型拉裂缝,裂缝宽均假设为 0.1 m,见图 3。

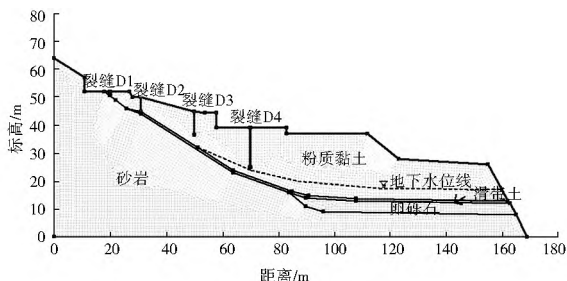


图 3 印台山滑坡实际边坡模型

Fig. 3 Actual slope model of Yintaishan landslide

2.3 边坡模型边界条件设定

边界条件按以下规则确定,当降雨强度小于表层土体渗透性时,按流量边界处理,大小为降雨强度;当降雨强度大于表面土体渗透性时,边坡表面会产生径流,此时假设裂缝单位长度的汇水面积为 100 m²,结合裂缝宽度及深度,分别计算不同降雨强度条件下各裂缝单位时间内的汇水量大小,从而确定裂缝底部和侧壁基于时间函数的总水头大小。模型底面为不透水边界。SEEP/W 软件运行时会根据土体初始含水率和不同降雨条件来判断土体渗透性,并计算土体瞬时体积含水率。由于非稳态分析中需要考虑初始条件,模型中所有岩土体初始容重根据钻孔取样测定的天然容重设定(见表 2),其中粉质黏土容重取值以地下水水位线为界,水位线以上的粉质黏土容重为 20 kN/m³,水位线以下的粉质黏土容重为 24.47 kN/m³,边坡模型所设定的地下水水位线见图 3。

2.4 土水特征曲线及渗透性函数

土水特征曲线是建立孔隙压力和体积含水率之间的关系,土水特征关系借助 Geoslope 软件自带 van Genuchten 函数拟合,公式(2)中的 a, n 形态参数见表 4。

表 4 Van Genuchten 模型函数参数

Tab. 4 Parameters of van Genuchten model

土体类型	粉质黏土	滑带土	卵砾石	砂岩
a	36.1	32.3	24.8	27
n	1.71	1.81	1.33	1.2

2.5 降雨模型设计

为反映不同的降雨量及降雨持时对上述三类边坡稳定性影响的差别,本文研究设定降雨强度分别是 0.005 m/h、0.007 m/h、0.02 m/h、0.05 m/h。

3 分析与讨论

3.1 降雨对边坡稳定性影响分析

以钻孔取土样,通过室内试验获取的土体平均抗剪强度参数及本文预设的降雨条件,并借助于 geoslope 软件渗流稳定耦合分析,得出该滑坡体的最危险滑动面首先出现在边坡前缘,即边坡前缘最先失稳。失稳所需时间与降雨强度存在明显相关关系,降雨强度越大,滑坡体前缘失稳所需时间越短,且边坡最危险滑动面随降雨强度及降雨持时的变化而不同。分析结果显示,降雨强度 0.005 m/h、降雨持时 312 h

条件下,边坡前缘失稳,见图4(a);降雨强度0.007 m/h、降雨持时290 h条件下,边坡前缘失稳,见图4(b);降雨强度0.02 m/h、降雨持时132 h条件下,边坡前缘失稳,见图4(c);降雨强度0.05 m/h、降雨持时36 h条件下,边坡前缘失稳,见图4(d)。

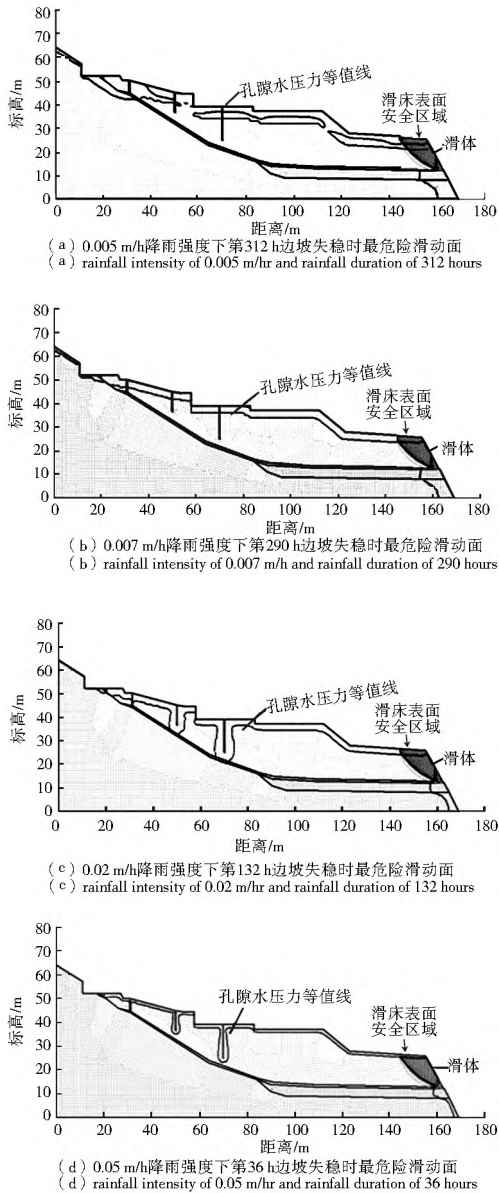


图4 印台山边坡模型不同降雨条件下的失稳时最危险滑动面
Fig. 4 The most dangerous sliding surfaces of Yintai Mountain slope toe under different rainfall conditions

基于 geoslope 软件的渗流-稳定耦合分析结果表明,边坡前缘失稳后,其整体稳定性安全系数仍较高。以0.02 m/h降雨强度、324 h降雨持时条件为例说明(见图5),图5(a)所示滑动面的安全系数为1.55,图5(b)所示滑动面的安全系数为1.68。表明该条件下印台山边坡在第一时间发生整体性塌落事件的可能性很小。然而,边坡前缘的失稳将对整个边坡产生牵引,以致坡面裂缝进一步扩展、拉张,为降雨入渗提供更为便捷的通道。雨水通过扩张的裂缝以更快的速度进入斜坡体深部,直至到达砂岩-粉质黏土分界面,通过改变界面土层的抗剪强度,进而促使其发展为滑动面,并最终影响坡体的整体稳定性。

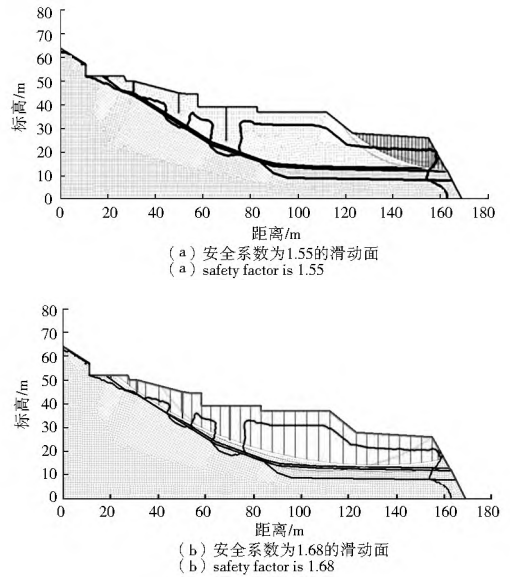


图5 印台山边坡模型在0.02 m/h降雨强度、324 h降雨持时条件下不同安全系数的滑动面
Fig. 5 Sliding surfaces of different safety factors for Yintai Mountain slope model under rainfall intensity of 0.02 m/h and rainfall duration of 324 hours

3.2 裂缝对边坡稳定性影响分析

(1) 孔隙水压力响应分析。

孔隙水压力统计剖面选取两处,分别是距离=70 m与距离=100 m。距离=70 m剖面正位于裂缝D4正下方,通过对该剖面在不同降雨强度下孔隙水压力统计,可以揭示裂缝产生漏斗流对边坡土体内部孔隙水压力的影响。距离=100 m剖面位于边坡中部,且位于裂缝下坡方向30 m处,以揭示同一边坡体无裂缝土体内部孔隙水压力变化规律,并与距离=70 m剖面作比较研究。

根据渗流有限元分析结果,当降雨强度为0.005 m/h和0.007 m/h时,边坡内部并无优势流产生,所有湿润锋以极其缓慢且近平均的速度向粉质黏土内部推进,随着降雨的持续进行,后期水分逐步在坡脚方向迁移富集。所不同的是,后者水分迁移速度要快于前者。由图6对比分析即可发现这一规律,坐标位置距离=100 m,标高=31 m,0.007 m/h降雨强度条件下,该处孔隙水压力在第290 h接近零值,而在0.005 m/h降雨强度条件下,同一坐标位置处孔隙水压力在第312 h接近零值。

当降雨强度为0.02 m/h和0.05 m/h时,距离=70 m剖面与距离=100 m剖面土体内部孔隙水压力均急剧上升,见图6(a)。由此发现,当降雨强度大于土体饱和渗透系数时,坡体地表以下一定深度的土体,其内部孔隙水压力上升速度与降雨强度呈正比,降雨强度越大,孔隙水压力上升速度就越快。所不同的是,同一降雨强度下,在距离=70 m剖面土体内,降雨入渗沿着裂缝优先到达土体深部,该剖面受孔隙水压力影响的土层深度明显大于无裂缝的距离=100 m剖面。由此表明,裂缝所产生的优先流可以通过改变土体内部孔隙水压力而影响土体应力状态,进而影响边坡稳定性。

(2) 模型比较分析。

为充分说明裂缝产生的优先流对边坡稳定性影响,本文

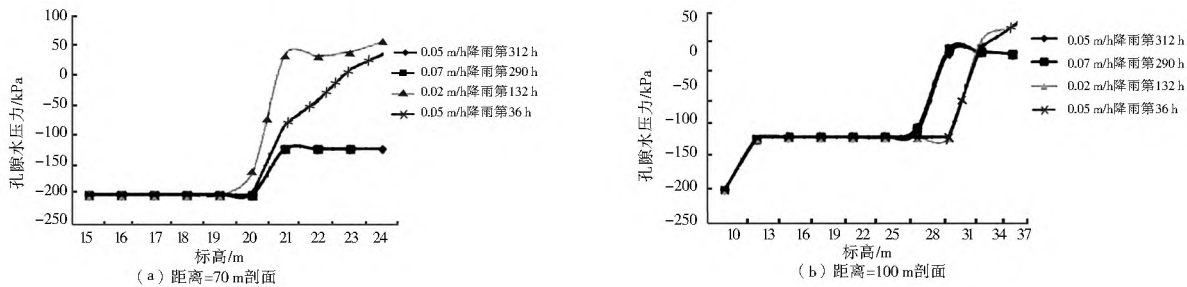


图 6 不同降雨条件下边坡失稳时的孔隙水压力

Fig. 6 Pore water pressure of slope instability under different rainfall intensities.

构建另外两类边坡模型做比较研究。一类是不含裂缝的边坡模型,见图 7(a),另一类是裂缝位于边坡中部的模型,见图

7(b)。分别对上述两类边坡模型进行渗流-稳定耦合分析,得到边坡前缘失稳所需时间,见表 5。

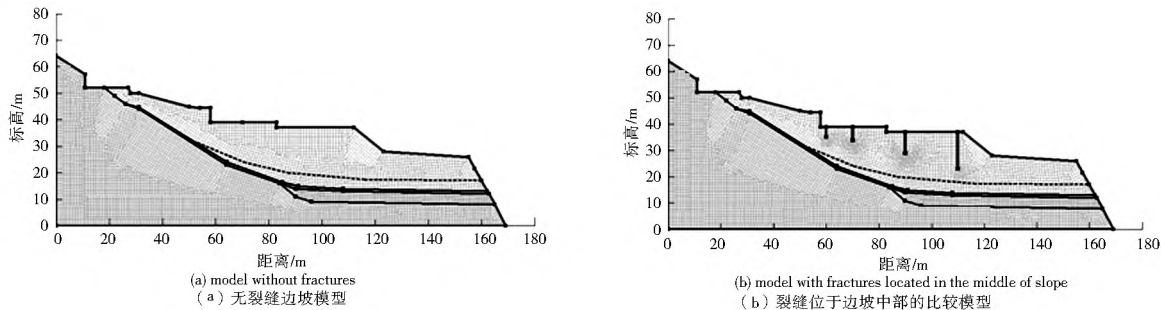


图 7 印台山滑坡比较研究模型

Fig. 7 Slope models of Yintai Mountain landslide for comparative study

表 5 不同降雨强度下边坡前缘失稳时间

Tab. 5 Instability time of slope toe under different rainfall intensities

降雨强度 / (m · h ⁻¹)	0.005	0.007	0.02	0.05
印台山实际边坡模型	312	290	132	36
无裂缝的模型	360	312	204	72
裂缝位于边坡中部的模型	324	276	96	24

表 5 中的结果表明:在不同降雨强度条件下,不含裂缝模型,其边坡前缘稳定性要强于含裂缝边坡模型;裂缝位于中部的模型,其边坡前缘稳定性要弱于裂缝位于后缘的边坡模型(印台山实际边坡模型)。此外,对上述三类边坡模型的整体稳定性分析也有类似结论。以 0.02 m/h 降雨强度、204 h 降雨持时条件为例,印台山实际边坡模型的整体稳定性安全系数是 2.333,最危险滑动面见图 8(a);无裂缝边坡模型的整体稳定性安全系数是 2.345,最危险滑动面见图 8(b);而裂缝位于中部的模型,其整体稳定性安全系数是 2.354,最危险滑动面见图 8(c)。三类边坡模型的整体稳定性安全系数虽差异不大,但所影响的坡体范围却明显不同。由此表明,裂缝所处位置对边坡稳定性具有明显影响,裂缝距离坡脚越近,其对边坡稳定性越不利。

3.3 土层分界面对边坡稳定性影响探讨

以降雨强度为 0.02 m/h 条件为例,当降雨持续一定时间,裂缝 D3 和 D4 产生的优先流率先抵达滑带土,由于砂岩渗透系数较小,垂直渗透减弱,因此优先流沿着黏土与砂岩分界面进行侧向渗流,见图 9。随着降雨渗流的持续进行,分界面上方滑带土含水率持续增大,抗剪强度降低,在滑坡体前缘

滑出牵引作用下,极易促使老滑坡复活,发生坡体整体滑塌。因此,岩土层分界面的形态无疑会影响滑动面的形态,在优先流作用下往往可以对边坡整体稳定性产生积极影响。

3.4 滑坡防治

综合以上分析,认为印台山滑坡是较为典型的拉张型黄土滑坡,边坡体前缘土体在满足降雨条件下极易失稳,前缘的滑出会加剧坡面裂缝的扩张,使得由裂缝产生的优先流作用更为明显,土层分界面在优先流作用下极易发展为优势滑动面,进而带来边坡的整体失稳。因此,针对该滑坡的治理,首先,需要在滑体前缘段坡体设置抗滑桩,以增大坡体抗滑阻力;其次,利用防水有机材料对坡体裂缝进行填充,减少地表水渗入,同时尽可能对裂缝附近的建筑及人工设施进行拆除或重新规划,避免生活及生产污水的灌入;最后,因降雨强度与边坡稳定性有着直接相关关系,有必要在滑坡体后缘修筑排水渠,尽可能减少地表水下渗。

4 结论

(1) 降雨强度及降雨持时与边坡稳定性存在明显相关性,降雨强度越大,边坡稳定性越低;降雨持时越长,边坡稳定性也越低。

(2) 印台山边坡裂缝的存在是影响边坡稳定的积极因素,一定的降雨条件下,裂缝所产生的优先流一方面通过对土体内部孔隙水压力的改变来影响边坡应力平衡,另一方面通过与岩土层分界面的相互作用,达到增大该界面上方土体含水率,降低土体抗剪强度,特别是当前缘滑体滑出之后,极易促成岩土层分界面形成优势滑动面,进而影响边坡整体稳定性。

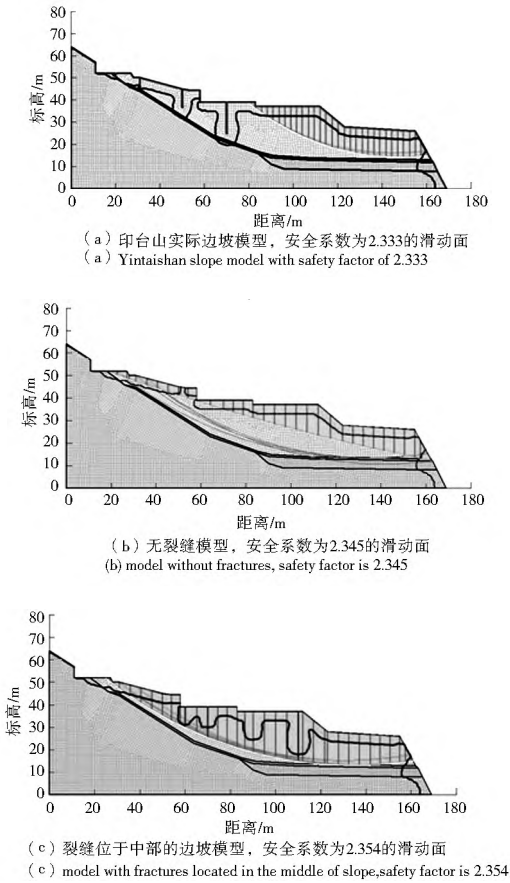


图8 三类边坡模型0.02 m/h降雨强度下第204 h时的整体稳定性状态

Fig. 8 Sliding surfaces of different safety factors under rainfall intensity of 0.02 m/hr and rainfall duration of 324 hours.

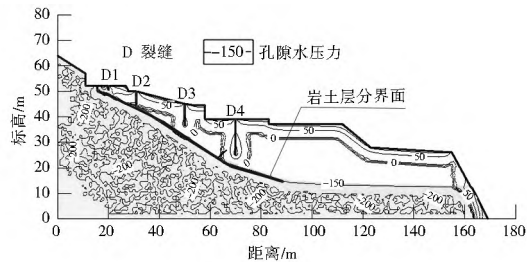


图9 优先流作用下的土体内部孔隙水压力分布及土层分界面渗流特点

Fig.9 Distribution of pore water pressure and seepage characteristics of interface of soil layer under the action of preferential flow

(3) 裂缝所处位置对边坡稳定性具有明显影响, 裂缝距离坡脚越近, 其对边坡稳定性越不利。

(4) 针对该滑坡的治理, 需要在滑体前缘段设置抗滑桩, 以增大坡体抗滑阻力。尽可能对地表裂缝附近的建筑进行拆除或重新规划, 并对裂缝进行防水有机物填充处理, 以避免雨水及生活污水的灌入而产生优先流。此外, 有必要在滑坡坡体后缘修筑排水渠, 减少地表雨雪水的下渗。

参考文献(References):

[1] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 87-92. (LIN Xiao-song, GUO Yue. A study on coupling

relation between landslide and rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2): 87-92. (in Chinese))

[2] 许领, 李宏杰, 吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 32-35. (XU Ling, LI Hong-jie, WU Duo-xian. Discussion on infiltration of surface water and their significance to terrace loess landslides [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 32-35. (in Chinese))

[3] 晏同珍, 杨顺安. 崩塌滑坡灾害群发性初探[J]. 灾害学, 1987, 2(3): 23-24. (YAN Tong-zhen, YANG Shun-an. Preliminary study on clustered landslide disasters [J]. Journal of Catastrophology, 1987, 2(3): 23-24. (in Chinese))

[4] 王景明, 陈树强. 陕西泾阳地裂缝灾害及其成因分析[J]. 水土保持学报, 1989, 3(1): 31-37. (WANG Jing-ming, CHEN Shu-qiang. An approach to the ground rift and its cause for Jinyang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(1): 31-37. (in Chinese))

[5] 周创兵, 李典庆. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 477-487. (ZHOU Chuang-bing, LI Dian-qing. Advances in rainfall induced landslides mechanism and risk mitigation. Advances in Earth Science, 2009, 24(5): 477-487. (in Chinese))

[6] 颜斌. 洛川剖面黄土的结构性及其力学特征研究[D]. 长安大学, 2010. (YAN Bin. Research on the structural and mechanical characteristic of Luochuan loess profile[D]. Chang'an University, 2010. (in Chinese))

[7] 盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究[J]. 土壤, 2012, 44(1): 144-148. (SHENG Feng, FANG Yan. Study on preferential soil water flow using iodine starch staining method[J]. Soils, 2012, 44(1): 144-148. (in Chinese))

[8] Gerke HH. Preferential flow descriptions for structured soils [J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2006, 169: 382-400.

[9] 李喜安, 彭建兵, 郑书彦, 等. 公路黄土洞穴灾害与水土流失研究[J]. 公路, 2004(12): 70-73. (LI Xi-an, PENG Jian-bing, ZHENG Shu-yan, et al. Loess cave hazard in highways and water and soil loss [J]. Highways, 2004(12): 70-73. (in Chinese))

[10] 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(4): 1061-1066. (LIU Li-ling, YIN Kun-long. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4): 1061-1066. (in Chinese))

[11] 唐正光. 降雨入渗影响因素与滑坡的研究[D]. 昆明理工大学, 2012. (TANG Zheng-guang. Research into factors affecting rainfall infiltration and landslide[D]. Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))

[12] 马佳. 裂土优势流与边坡稳定性分析方法[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007. (MA Jia. Preferential flow and stability analysis method for fissure clay slopes[D]. Wuhan Institution of Rock & soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Pr. China, 2007. (in Chinese))

[13] 曾磊. 优势渗流通道对黄土斜坡稳定性影响研究[D]. 长安大学, 2011. (ZENG Lei. Study on the influence of the prior infiltration channels on loess slope stability[D]. Chang'an University, 2011. (in Chinese))

- [14] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J], 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161. (YIN Zong ze, YU AN Jurr ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161. (in Chinese))
- [15] 海龙, 梁冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析[J], 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 46-50. (HAI Long, LIANG Bing. Analysis of land slope stability considering rainfall infiltration[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4): 46-50. (in Chinese))
- [16] 邵龙潭, 王助贫, 关立军, 等. 非饱和土中水流入参与气体排出过程的求解[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 8-16. (SHAO Long-tan, WANG Zhr pin, GUAN Li jun, et al. Numerical simulation of the process of pore water infiltration and pore gas flow in unsaturated soil[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 8-16. (in Chinese))
- [17] Glass RJ, Steenhuis TS, Parlange JY. Wetting front instability II. Experimental determination of relationships between system parameters and two dimensional unstable flow field behavior in initially dry porous media[J]. Water Resource Research, 1989, 25(6): 1195-1207.
- [18] DiCarlo DA, Banters TWJ, Darnault CJG Steenhuis TS, et al. Lateral expansion of preferential flow paths in sands[J]. Water Resource Research, 1999, 35(2): 427-434.
- [19] 李亮. 地裂缝带黄土的渗透变形试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. (LI Liang. Seepage deformation experimental research of fissured loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- [20] 许兆义, 赵英杰, 陈家军. 包气带水流中黄土裂隙作用机制研究[J]. 长春地质学院学报, 1993, 23(3): 326-329. (XU Zhaoyi, ZHAO yir jie, CHEN Jia jun. Research of fractural efficacy on mechanisms governing water flow in unsaturated loess[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1993, 23(3): 326-329. (in Chinese))
- [21] 李贺丽. 指流特性及其影响因素的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (LI He li. Experimental research on characteristics and effect factors of finger flow[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [22] Fredlund, Rahardjo. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley and Sons Inc, 1993.
- [23] Van Genuchten, M. Th. "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [24] Coulomb C A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a l'architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., 1776(7): 343-387.
- [25] M ORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surface[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.

(上接第 940 页)

- [8] 钟开斌, 张佳. 论应急预案的编制与管理[J]. 甘肃社会科学, 2006(3): 230-241. (ZHONG Kai bing, ZHANG Jia. The formulation and management of pre arranged planning[J]. Gansu Social Sciences. 2006(3): 230-241. (in Chinese))
- [9] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(分论). 北京: 科学出版社, 1994: 320-326. (MA Zong jin. The major natural disasters and mitigation measures in china (subpandect) [M]. Beijing: Science Press, 1994: 320-326. (in Chinese))
- [10] 李风. 工程安全与防灾减灾[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (LI Feng. Engineering safety and disaster prevention and mitigation. Beijing: China Architecture and Building Press [M]. 2008. (in Chinese))
- [11] 陈群祥. 对我国应急管理体系统建设的回顾与思考[J]. 长春工业大学学报: 社会科学版, 2008, 20(3): 70-74. (CHEN Qun xiang. Review and reflection of emergency management system in China[J]. Journal of Changchun University of Technology: Social Sciences Edition, 2008, 20(3): 70-74. (in Chinese))
- [12] 孙绍聘. 中国救灾制度研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 20-31. (SUN Shaoping. The study of China relief system[M]. Beijing: The Commercial Press, 2004: 20-31. (in Chinese))
- [13] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论)[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 110-197. (MA Zong jin. The major natural disasters and mitigation measures in china (pandect) [M]. Beijing: Science Press, 1994: 110-197. (in Chinese))
- [14] 马宗晋, 方蔚青, 高文学, 等. 中国减灾重大问题研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 290-295. (MA Zong jin, FANG Wei qing, GAO Werr xue, et al. Major issues on disaster reduction in China [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992: 290-295. (in Chinese))
- [15] 魏迎奇. 堰塞湖灾变特征及应急处理技术[J]. 中国水利, 2008(11): 37-39. (WEI Ying qi. Cataclysm feature of dammed lake and emergency treatment technology[J]. Water Conservancy, 2008(11): 37-39. (in Chinese))
- [16] Dai F C, Lee C F, Deng J H, et al. The 1786 earthquake triggered landslide dam and subsequent dam break flood on the Dadu River, southwestern China[J]. Geomorphology, 2005, 65(3): 205-221.
- [17] 党超, 丁瑜, 褚娜娜. 土石坝漫顶溃决模型[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 207-215. (DANG Chao, DING Yu, CHU Na na. Simulation of debris dams breach due to overtopping[J]. Journal of mountain science, 2012, 30(2): 207-215. (in Chinese))