

doi:10.3799/dqkx.2017.570

台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制

张泰丽^{1,2}, 周爱国^{1*}, 孙强², 伍剑波², 王赫生², 刘政华³

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 南京地质调查中心, 江苏南京 210016

3. 浙江省地质环境监测院, 浙江杭州 310007

摘要: 台风暴雨常引发大量的滑坡灾害, 造成生命财产损失, 因而研究台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制对滑坡的防治、预警预报具有重要意义。以浙江省中林村滑坡为例, 采用有限元数值方法, 模拟了台风暴雨的两种常见工况(工况 1: 等强度降雨; 工况 2: 渐变强度降雨)下滑坡地下水的暂态渗流场及稳定性。结果表明: 两种工况条件下, 滑坡地下水渗流特征基本相同, 地下水水位响应迅速, 地下水水位位于强风化和中风化接触面附近, 且在坡脚形成溢流; 但是工况 1 较工况 2 地下水水位上升速度快、幅度大; 滑坡稳定系数与地下水水位及降雨强度等密切相关, 在高强度降雨条件下, 随地下水水位上升稳定系数快速下降, 水位稳定以后, 稳定系数下降速度减缓; 中林村滑坡为典型的滑塌—拉裂—蠕滑缓动型变形破坏模式, 台风暴雨引起斜坡岩土体地下水水位上升, 基质吸力降低和孔隙水压力增加是其发生变形破坏的主要原因。本文所得结论能够为东南沿海地区台风暴雨诱发滑坡的预测预报与防治提供理论支持。

关键词: 台风暴雨; 滑坡; 渗流; 地下水; 成因机制; 工程地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2017)12-2354-09

收稿日期: 2017-01-22

Characteristics of the Groundwater Seepage and Failure Mechanisms of Landslide Induced by Typhoon Rainstorm

Zhang Taili^{1,2}, Zhou Aiguo^{1*}, Sun Qiang², Wu Jianbo², Wang Hesheng², Liu Zhenghua³

1. School of Environment, China University of Geosciences Wuhan 430074, China

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

3. Zhejiang Institute of Geo-Environment Monitoring, Hangzhou 310007, China

Abstract: Typhoon rainstorm usually causes a large number of landslides leading to property and life losses. The research on the characteristics of groundwater seepage and genetic mechanism of landslides, therefore, is of great significance in early warning and forecasting of typhoon-induced-landslide. Taking Zhonglincun landslide located in Zhejiang province as an example, the paper used finite element method to simulate the transient seepage field and stability of the landslide under two conditions including rainfalls with constant intensity of 200 mm/d and gradually increased intensity. The results showed that the characteristics of groundwater seepage under both conditions were almost the same. The groundwater level responded rapidly and finally approached near the contact between strongly and moderately weathered strata, in addition, the ground water overflowed from the slope toe. The rising speed of groundwater level, however, was faster and the range was larger under the first condition. The factor of safety was closely related to the ground water level and rainfall intensity. Under the former condition, factor of safety decreased rapidly with increased water level, the falling speed slowed down after the water level became roughly stable. Failure mode of the Zhonglincun landslide can be summed up as creep-crack and slide-crack-creep, while rise of water table, decrease of matrix suction and increase of pore pressure in the slope were the main reasons leading to the failure of Zhonglincun

基金项目: 中国地质大调查项目(Nos.1212011140010, DD20160282).

作者简介: 张泰丽(1980—), 女, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为地质灾害调查评价。ORCID: 0000-0001-5980-6496.

E-mail: zhangtaili@126.com

* 通讯作者: 周爱国, ORCID: 0000-0002-5491-6773. E-mail: aiguo Zhou@cug.edu.cn

引用格式: 张泰丽, 周爱国, 孙强, 等, 2017. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制. 地球科学, 42(12): 2354-2362

landslide.

Key words: typhoon rainstorm; landslides; seepage; groundwater; failure mechanism; engineering geology.

0 引言

我国海岸线全长超过 1.8 万 km (邱文玉, 2014), 每年平均有 7.2 个台风和热带气旋登陆, 是世界上台风登陆最频和台风破坏最严重的国家之一. 台风过境常引发大量的滑坡、泥石流等地质灾害 (韩晖, 2005), 造成严重的财产损失和人员伤亡. 例如, 2004 年第 14 号台风“云娜”在浙江乐清引发 21 处滑坡、泥石流, 造成 42 人死亡、倒塌房屋 288 间; 2005 年台风“泰利”在浙江省引发 14 处滑坡、6 处泥石流, 导致 17 人死亡, 经济损失高达 2 000 万元 (陈光平, 2011; 姜伟平等, 2006); 2006 年 8 月 11 日 08 号台风“桑美”在浙江和福建交界处登陆, 同样引发了多处地质灾害, 造成 35 人死亡和失踪. 大量事实和研究证明, 台风期暴雨是滑坡发生的主要诱因之一 (孔维伟等, 2013; 吴益平等, 2014; Brand *et al.*, 1984).

台风暴雨与一般降雨诱发滑坡的成因机理相似 (冯杭建等, 2014; 张泰丽等, 2016). 但是, 由于台风期暴雨持续时间长、强度大、降雨集中 (陈香和刘景秀, 2007; 韩俊, 2012), 故在其作用下斜坡具有地下水反映灵敏、地下水渗流速度快、坡表冲刷能力强等特点 (崔鹏等, 2010), 与一般降雨形成滑坡的机理又存在显著的差异性. 韩俊 (2012) 建立了覆盖层与基岩接触面滑坡的物理模拟实验模型, 模拟了斜坡在一般暴雨、一般台风暴雨、特大台风暴雨 3 种工况下不同断面孔隙水压力及位移变化特征, 实验结果表明: 台风暴雨较一般暴雨诱发滑坡滑动的位移量大、速度快, 斜坡产生破裂面的位置高; 而变形破坏的模式基本相似, 以蠕滑—拉裂为主. 大量的调查数据显示, 台风期诱发的滑坡主要分为两种类型: 覆盖层沿基岩接触面发生的突变型滑坡和沿层内错动带发生的切层缓动型滑坡 (崔鹏, 2010). 突变型滑坡为目前专家学者的主要研究对象; 而缓动型滑坡由于发生率较低等原因, 目前尚缺少系统的理论研究. 但后者规模大, 危害范围广, 对其开展地下水渗流特征及成因机制研究具有重要的意义 (夏敏等, 2014).

本文以浙江省文成县中林村滑坡为例, 模拟两种常见台风暴雨工况下缓动型滑坡的地下水渗流动态特征及稳定系数, 以期揭示台风暴雨条件下非饱和和岩土体中地下水渗流特征及滑坡成因机制, 为东南沿海台风暴雨型滑坡的预警预报提供理论依据.

1 浙江台风暴雨型滑坡的发育特征

1.1 台风期降雨特征分析

根据 1959—2007 年影响和登陆浙江省台风引起的最大日降雨量统计, 70% 台风能造成大—特大暴雨, 日降雨量一般在 100~400 mm/d, 最大日降雨量 863 mm (2014 年“云娜”台风, 百年一遇降雨量), 受台风影响严重的浙江沿海地区最大日降雨量一般都高于 200 mm/d, 过程降雨量在 300 mm 以上 (韩晖, 2005). 台风期降雨呈单峰型变化 (图 1), 一般中期出现降水峰值, 峰值前期降水快速增加, 后期降水缓慢下降. 降雨周期为 3~6 d, 出现暴雨的天数一般为 1~3 d (图 1), 极大值为 1 h 左右 (图 2).

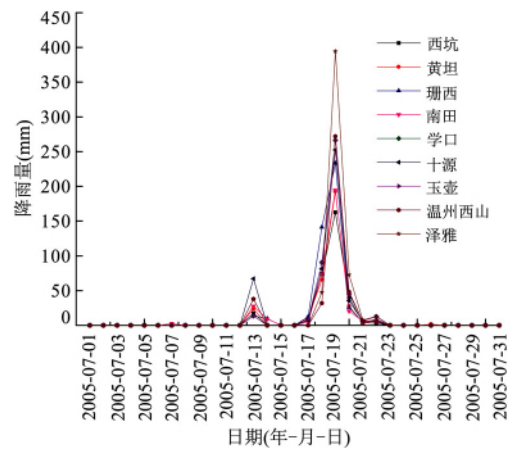


图 1 “海棠”台风降雨量分布图

Fig.1 The distribution of rainfall induced by typhoon Haitang

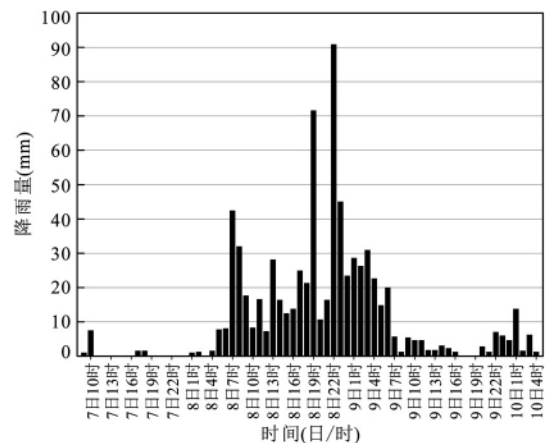


图 2 “泰利”台风降雨量分布图

Fig.2 The distribution of rainfall induced by typhoon Taili

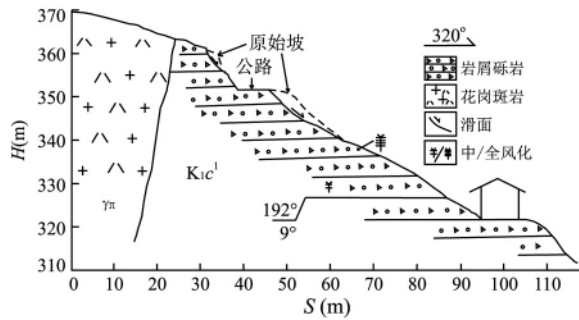


图 3 突变型滑坡实例

Fig.3 An example of destructive landslide

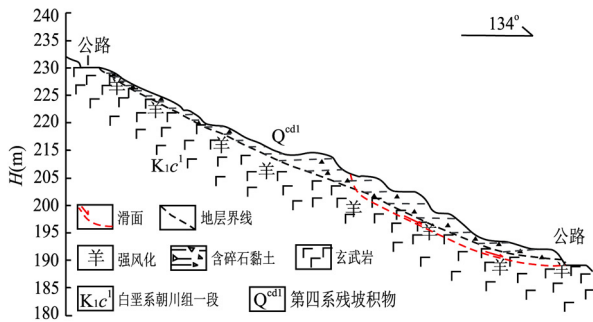


图 4 缓动型滑坡实例

Fig.4 An example of slow-moving landslide

1.2 台风暴雨型滑坡发育特征

台风暴雨诱发的滑坡可以分为突变型滑坡和缓动型滑坡两类,分别占总数量的 69.5% 和 30.5%。台风暴雨诱发的突变型滑坡实例如图 3 所示。一般该类滑坡的滑体为厚度小于 2 m 的松散物,滑床为较坚硬完整岩体,滑体体积小于 1 000 m³,形态多呈长条形和半圆形(Caine, 1980; Caleaterra *et al.*, 2000; Chert *et al.*, 2005);滑动面为岩土接触带或风化层内错动带,多发育于 25°~45° 斜坡转折端敏感区。其特点是突发性强,其成因机理为台风期暴雨形成地表径流,冲刷地表松散岩土体,使斜坡发生拉裂破坏形成滑坡。

台风暴雨诱发的缓动型滑坡实例如图 4 所示。滑坡物质主要为风化土层和呈碎裂结构的岩体,一般厚度大于 5 m,规模大于 10 000 m³,主要发育于 25°~40° 的斜坡上;滑动面为层内错动带或风化层差异错动面。此类滑坡早期出现拉张和剪切裂隙后,斜坡达到新的平衡状态。台风期初期持续降雨及暴雨导致岩土体含水量增加,地下水水位上升,岩土体由非饱和状态过渡为饱和状态,抗剪强度降低;另外,地下水渗流场变化导致斜坡体内渗透压力增加,两者共同作用使岩土体沿层内错动带发生剪切破

坏,发生较深层的滑动。

2 中林村滑坡的基本特征

中林村滑坡位于浙江省温州市文成县 56 省道中林大桥北侧,滑坡前缘高程 198 m,后缘高程 251 m,滑坡高差约 58 m,水平投影长度约 107 m,宽约 47 m,厚度 4~8 m,规模约 24 000 m³,主滑方向 85°。滑坡地形上陡下缓,坡度介于 31°~24°,发育多个梯田台坎(图 5)。

滑体物质主要为散裂结构和碎裂结构的全~强风化凝灰岩岩体及其残坡积物。根据钻孔勘探揭露:滑坡体组成物质自上而下分 4 层(图 6):(1)松散残坡积层(Q^{eld}):黄色—棕黄色含角砾粉质粘土,厚 0.3~2.4 m,松散,可塑;(2)棕黄色—灰褐色全风化凝灰岩:为白垩系朝川组(K_{1c}),风化残积物,厚 2.4~4.9 m;(3)灰黄色—灰褐色强风化凝灰岩(白垩系朝川组, K_{1c}):厚 3.0~5.8 m;(4)浅灰—灰褐色中风化凝灰岩(白垩系朝川组, K_{1c})。

该滑坡受台风“泰利”影响,于 2012 年 6 月 19 日下午 6 时斜坡发生变形破坏。滑坡后部出现拉张裂隙和剪切裂隙,裂缝长达 30 m,宽度 2~30 cm 不等,下错一般有 3~5 cm;前缘公路边坡及坡脚处发生连续的滑塌,规模约 300 m³。

2014 年布设的测斜管测到的滑坡深部位移数据如图 7 所示,可以看出,滑坡目前处于蠕动变形状态,监测期内累积位移量约在 10~30 mm,滑面埋深在 8.7~2.5 m 之间,即,滑坡中部(zk07)滑面埋深较大,位移量较小;而滑坡前缘(zk10)滑面埋深小,位移量大。根据对变形破坏特征和监测数据的分析认为:(1)滑动面发育在全强风化凝灰岩与中风化凝灰岩界面附近,前缘则在全风化层内剪出;(2)滑坡前缘位移量大,前缘先行启动、滑塌,变形逐级向后传递,导致后缘拉裂,从滑坡机制上属牵引式滑坡,且为一典型的台风暴雨诱发的缓动型滑坡。

3 滑坡渗流场及稳定性数值模拟

为揭示台风暴雨条件下中林村滑坡的地下水渗流特征和变形破坏机制,采用 Geostudio 中的 SEEP/W 模块模拟台风暴雨工况下斜坡体内的降雨入渗过程和渗流场变化;在此基础上,将渗流场导入 SLOPE/W 稳定性计算模块计算斜坡的稳定性

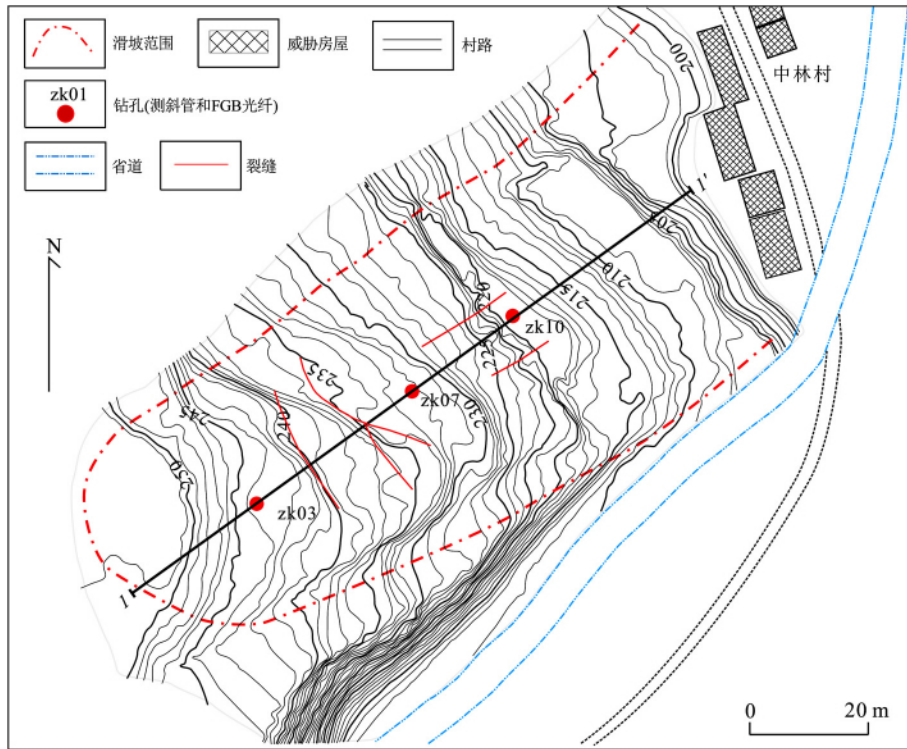


图 5 中林村滑坡平面图

Fig.5 Layout of Zhonglin landslide

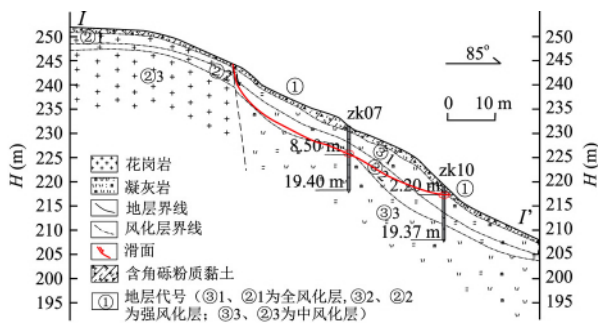


图 6 中林村滑坡工程地质剖面(I-I')

Fig.6 The geological section of Zhonglin landslide

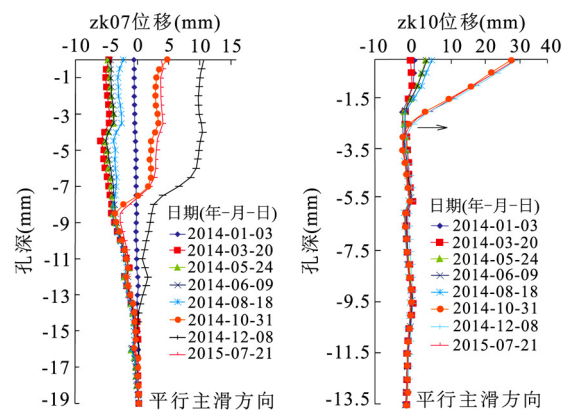


图 7 中林村滑坡累积位移-深度曲线图

Fig.7 Cumulative displacement-depth curves of Zhonglin landslide

系数,分析台风暴雨对斜坡稳定性的影响.

3.1 模型建立及参数选取

以图 6 为地质模型而建立的数值模型如图 8 所示,其中,物质组成为含角砾的粉质粘土、全风化层、强风化层、中风化基岩等 4 个岩土层;根据地下水水位监测数据,在枯水期斜坡体内的地下水位在中风化和强风化层接触面之下.通过测试和经验取值,各层的物理、力学及渗透系数等参数如表 1 所示.

采用暂态流方法模拟降雨入渗过程中渗流场的变化过程,所需的渗透系数曲线和土水特征曲线根据软件自带的 Fredlund and Xing 模型、Fredlund 模型和饱和体积含水率、饱和渗透系数自动生成.

3.2 模拟工况

根据研究区台风降雨的降雨量分布特点,并参考浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值(谢剑明等, 2003),本文将 200 mm/d 作为滑坡发生的临界降雨量.模拟工况包括:

工况 1:暴雨(200 mm/d)一直持续 24 h,相当于台风期极端降雨量.

工况 2:降雨强度逐渐增大至 200 mm/d,相当于考虑台风暴雨的前期降雨量(图 9).

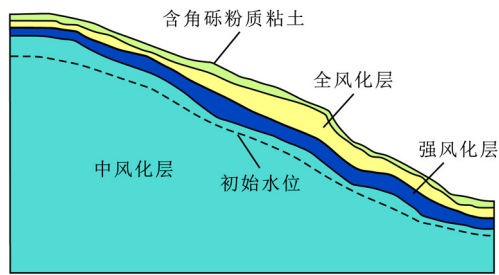


图 8 中林村滑坡模拟分析有限元模型

Fig.8 The finite element model for seepage simulation

表 1 中林村滑坡各层岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials in numerical model of Zhonglincun landslide

参数	含角砾粉质粘土	全风化层	强风化层	中风化层
天然容重(kN/m ³)	18.7	19.3	20.0	25.0
饱和体积含水率(%)	30	28	26	25
饱和渗透系数(m/h)	0.050	0.216	0.160	0.100
粘聚力 c(kPa)	20.1	19.0	21.0	27.0
内摩擦角 ϕ (°)	21.8	20.0	23.0	26.0

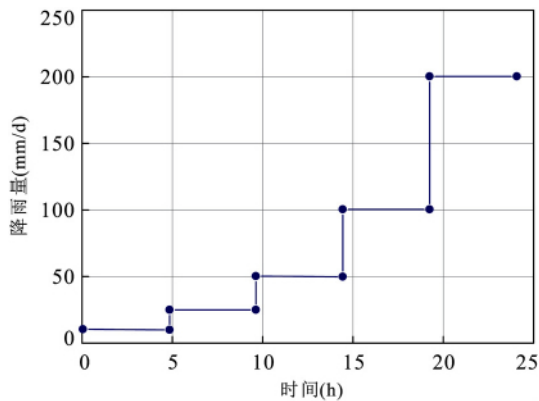


图 9 工况 2 降雨强度变化情况

Fig.9 The distribution curve of rainfall intensity of Case 2

4 数值模拟结果分析

4.1 工况 1 模拟结果分析

降雨强度为 200 mm/d 时各个时刻斜坡体内孔隙水压力的分布情况如图 10 所示,图中显示:

(1)随着降雨进行,4.8 h 后地下水位上升明显,滞后时间短.水位线在坡脚处达中风化层与强风化层的分界面之上,但未出现坡面径流.主要是因为滑坡表层的含砾石粉质粘土渗透性强,降雨能够很快入渗,同时全风化和强风化的凝灰岩裂隙发育,透水能力较强,表层土体饱和后浸润面迅速向深部发展.

(2)4.8 h 后地下水水位线出现差异性上升,中

后部上升较慢,前缘上升较快,地下径流速度开始增加.降雨 14.4 h 之后,滑坡中后部地下水位上升较为缓慢,最终处于强风化层和微风化层中.地表开始形成地表径流,前部地下水位继续上升,溢出地表.表明地下水水位对高强度的持续降雨响应迅速,非饱和土体迅速接近饱和状态,渗透系数降低.

(3)在台风暴雨的持续性作用下,地下水反应迅速,短时间内快速上升,基质吸力降低,孔隙水压力增加.4.8 h 后地下水径流强度及速度逐渐增强;14.4 h 后降雨入渗量降低.

将上述所得渗流场导入 Slope/W 模块,可以计算出上述相应时间斜坡的稳定系数,如图 11 所示.斜坡在台风暴雨作用 24 h 后的最危险滑动面如图 12 所示.可以看出,在台风暴雨作用下,由于地下水上升导致的基质吸力降低和孔隙水压力增加,稳定性系数迅速降低.台风暴雨 4.8 h 后地下水径流强度及速度逐渐增强,在动水压力条件下,强风化与微风化接触带附近土体颗粒粘聚力急剧降低,导致土体颗粒流失,岩土结构孔隙逐渐增加,形成空洞,其次上部覆盖层逐渐软化,重度增加,在重力作用下上部覆盖层发生滑塌,表层岩土体产生裂缝,稳定系数下降;坡脚处随着地下水水位上升,逐渐接近饱和状态,在重力作用下发生滑塌,坡脚应力重新分布,导致上部岩土体向下发生滑移;在作用 14.4 h 后,由于降雨入渗量降低,斜坡稳定系数下降速度减缓.

4.2 工况 2 模拟结果分析

工况 2 不同时刻斜坡体内的孔隙水压力分布如图 13 所示.可以看出:

(1)在强度逐渐增加的降雨的作用下,4.8 h 后地下水位明显上升,与工况 1 相似,并于中林村滑坡降雨量及地下水水位监测数据相一致(图 14).

(2)在 14.4 h 之后滑坡中后部地下水位上升速度减缓,最终处于强风化层和微风化层中,前部地下水位继续上升,稳定在全风化层和强风化层之间,在坡脚处形成坡面溢流.和工况 1 相比,降雨 14.4 h 之后地下水位上升速率较为缓慢,且地下水位低于工况 1.

斜坡在工况 2 不同步的稳定系数变化曲线如图 15 所示,降雨作用 24 h 后的最危险滑动面如图 16 所示.可以得知:在 14.4 h 后当降雨强度变为 100 mm/d 时,滑坡由基本稳定状态进入不稳定状态,相比工况 1(9.6 h)所需时间更多.24 h 降雨作用之后,滑面跨越残积层、强风化层和微风化层,相较于工况 1 而言,最危险滑面的埋深稍浅,位于地下水水

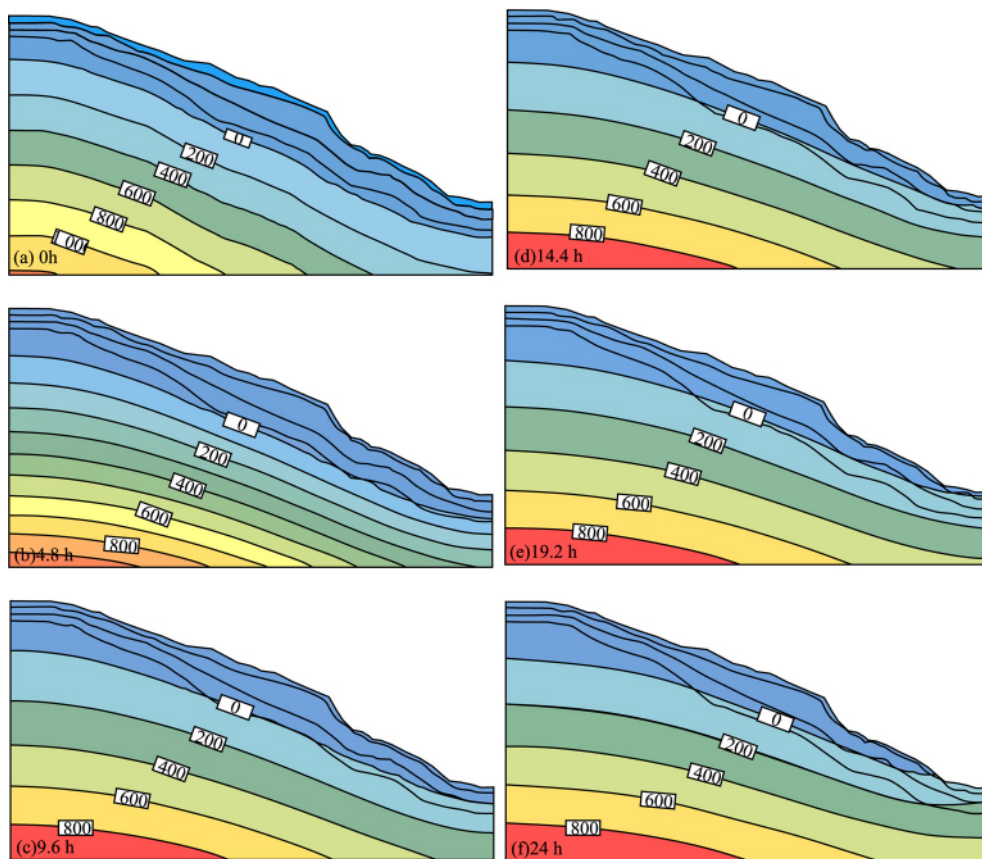


图 10 工况 1 滑坡孔隙水压力模拟结果

Fig.10 Pore pressure contours at different steps in the slope in Case 1

图中数值单位为 kPa

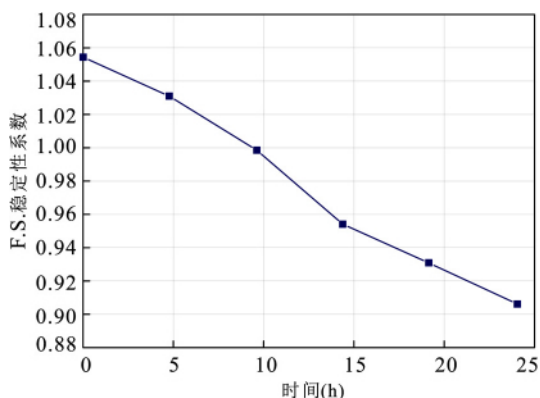


图 11 工况 1 滑坡不同时刻稳定性系数

Fig.11 Stability coefficient of landslide at different steps in Case 1

位线之上.随着降雨强度的增加,滑坡稳定性系数持续下降,从初始的 1.054 下降到 0.941.可以看出,两种模拟工况下,工况 1 时斜坡的稳定系数下降更快,经过一天降雨后稳定系数更低,且最危险滑面更深一些.

综上所述,在台风暴雨前期降雨量较小阶段(渐

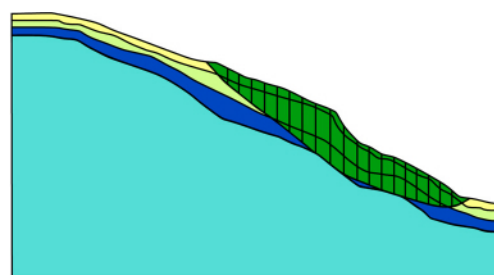


图 12 工况 1 暴雨 24 h 后最危险滑面

Fig.12 The critical slip surface after 24 hours in Case 1

变降雨阶段),由于火山岩风化层裂隙发育,降雨转化为地下水和充填孔隙水两部分,导致岩土体含水率及饱和度较工况 1 增加速度快,重度随之增加,在重力作用下发生下沿浅层的层内软弱带发生剪切破坏,导致局部岩土下滑,产生拉张裂隙和剪切裂隙.这时孔隙水压力增加并不大(图 13b、13c、13d),稳定系数趋近但是大于 1.0(图 15),因此,滑移速度较慢,基本处于蠕滑状态.随着降雨强度增加(极端暴雨阶段),滑面逐渐向深层扩展,由地下水径流对岩土颗粒的冲刷作用为主导因素,形成深部滑裂面.特别是由于坡脚

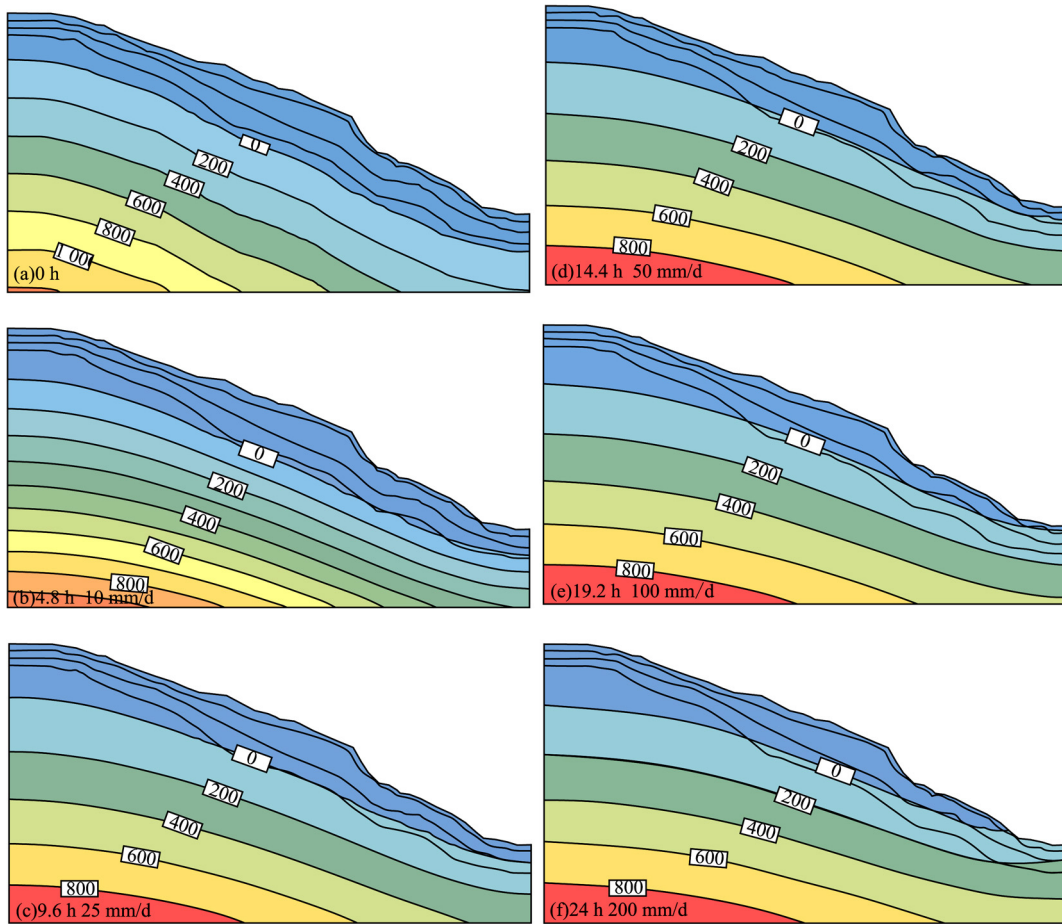


图 13 工况 2 不同时刻边坡内部孔隙水压力分布图

Fig.13 Pore pressure contours at different steps in the slope in Case 2

图中数值单位为 kPa

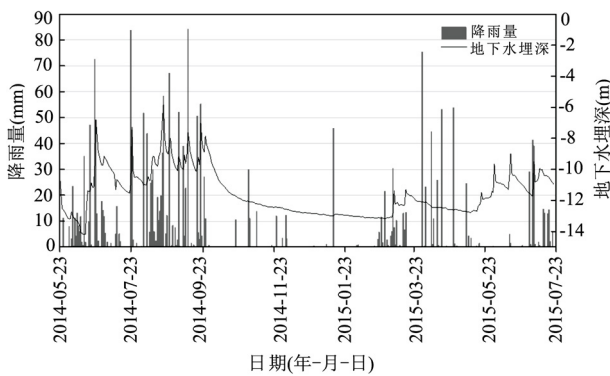


图 14 中林村滑坡降雨量与地下水水位对比图

Fig.14 Comparisons between ground water level and rainfall at Zhonglincun landslide site

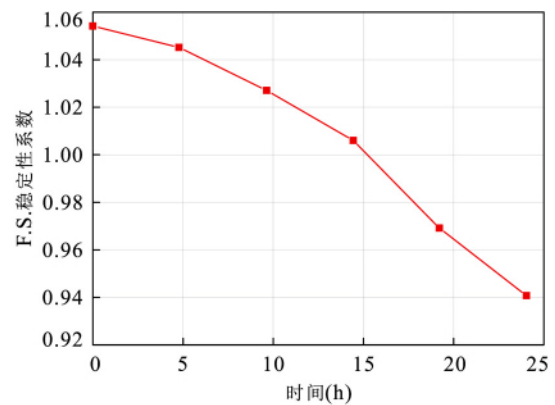


图 15 工况 2 斜坡不同时刻稳定性系数

Fig. 15 Stability coefficient of the slope at different steps in Case 1

处岩土体在降雨中迅速饱和,水位线上升并形成溢流,动水压力和孔隙水压力增加幅度较大(图 13e、13f),此时坡体的稳定系数减小速度增加且迅速降低到 1.0 以下(图 15),坡体前缘发生滑塌,位移逐渐向后扩展并带动斜坡后部发生变形破坏.因此,在台风

暴雨的一个持续降雨周期内,滑坡变形破坏的地质力学模式可以总结为滑塌—拉裂—蠕滑模式.数值模拟结果与中林村滑坡“泰利”台风(过程降雨量 80~100 mm)过境之后变形破坏特征相吻合.

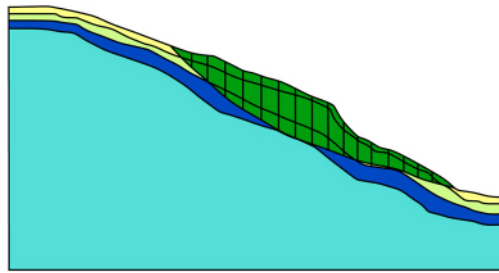


图 16 工况 2 中暴雨 24 h 后最危险滑面

Fig.16 The critical slip surface after 24 hours in Case 2

5 结论

本文采用 Geostudio 软件对文成县中林村滑坡的渗流场和稳定性进行了数值模拟,获取了等强度降雨和渐变(增)强度降雨两种工况下地下水渗流特征及稳定系数变化曲线,分析了斜坡的地下水水位变化与变形失稳规律,揭示了台风暴雨作用下缓动型滑坡地下水渗流特征及成因机制,得出结论如下:

(1)在台风暴雨两种工况条件下,坡体内地下水渗流场变化特征基本相同.降雨作用下地下水水位迅速响应,天然状态下,地下水水位位于滑面以下,而在 24 h 降雨后,斜坡体内中部地下水水位位于强风化和中风化接触面附近,而在坡脚位置形成坡面溢流.相对于渐变强度降雨,等强度降雨作用下地下水水位上升速度更快、幅度更大,而且地表和地下径流的速度也更快.

(2)降雨入渗导致中林村滑坡的稳定系数迅速下降,稳定系数与降雨强度和地下水水位等密切相关.在高强度降雨条件下,地下水水位上升过程中稳定系数快速下降,水位稳定以后,稳定系数下降速度减缓.

(3)台风暴雨诱发的中林村滑坡变形破坏模式为滑塌—拉裂—蠕滑模式,前缘土体在迅速上升的地下水作用下先行启动,形成局部滑塌;位移向后传递,但是中部滑体相对较厚、位移较前缘小;后缘后中部位移的作用而拉裂.滑坡目前处于蠕滑变形阶段.

(5)台风暴雨入渗导致斜坡体内地下水水位迅速上升,岩土体由非饱和转为饱和状态,孔隙水压力上升,渗透压力增大等是中林村滑坡发生的主要原因.

(6)本文对中林村滑坡数值模拟的地下水渗流场变化特征与现场监测结果基本一致,说明本次数值模拟研究的结果真实可靠.

References

- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling; Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press Inc., New York.
- Brand, E.W., Premehitt, J., Phillipson, H.B., 1984. Relationship Between Rainfall And Landslides in Hong Kong. In: Proc. 4th Int. Symp. On landslides, Toronto, Ontario. Bl. Teeh Publishers, Vancouver, Canada. 377—384.
- Cai, F., Ugai, K., 2004. Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability. *International Journal of Geomechanics*, 4(2): 69—78. doi: 10.1061/(asce)1532—3641(2004)4:2(69)
- Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity; Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler; Series A, Physical Geography*, 62(1/2): 23. doi: 10.2307/520449
- Caleaterra, D., Parise, M., Palma, B., et al., 2000. The Influence of Meteoric Events in Triggering Shallow Landslides in Pyroclastic Deposits of Campania, Italy. In: Proceedings 8th Inter-National Sympo-Sium on Landslides, Cardiff, 209—214.
- Chen, G.P., 2011. Study on Distribution Characteristics and Influencing Factors of Slope Geological Hazard Induced by Typhoon in Wenzhou (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Liu, J.X., 2007. Analysis on Typhoon Catastrophe in Fujian. Taking 200519 # “Rongwang” Typhoon as an Example. *Journal of Quanzhou Normal University*, 25(2): 86—90 (in Chinese with English abstract).
- Chert, C.Y., Chen, T., C., Yu, F.C., et al., 2005. Rainfall Duration and Debris-Flow Initiated Studies for Real-Time Monitoring. *Environmental Geology*, 47(5): 715—724. doi: 10.1007/s00254-004-1203-0
- Cui, P., Chen, S.C., Su, F.H., et al., 2010. Formation and Mitigation Countermeasure of Geo-Hazards Caused by Morarc Typhoon in Taiwan. *Journal of Mountain Science*, 28(1): 103—115 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H.J., Zhou, A.G., Yu, J.A., 2016. Comparative Study on Plum-Rain-Triggered Landslide Susceptibility Assessment Models in West Zhejiang Province. *Earth Science*, 41(3): 403—415 (in Chinese with English abstract).
- Han, H., 2005. The Study on the Typhoon Rainstorm Nearly 50 Years in China (Dissertation). Normal University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Han, J., 2012. Physical Simulation Study on the Formation Mechanism of Typhoon Landslide in Wenzhou Region (Dissertation). Chengdu University of Technology,

- Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Iverson, R. M., 2000. Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, 36(7): 1897–1910. doi: 10.1029/2000wr900090
- Kong, W. W., Zhao, Q. H., Han, J., et al., 2013. Model Experiments for Deformation and Failure Mechanism of Typhoon Induced Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 21(2): 297–303 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. L., Yin, K. L., 2008. Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism of Rainstorm Landslide. *Rock and Soil Mechanics*, 29(4): 1061–1066 (in Chinese with English abstract).
- Lou, W. P., Hu, L. H., Deng, S. R., et al., 2006. Causes and Characteristics of Disasters of 0513 Typhoon Talim. *Journal of Catastrophology*, 21(2): 85–89 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, W. Y., 2014. Characteristics of Tro-Pical Cyclone Extreme Precipitation and Its Preliminary Causes in China's South-East Coast (Dissertation). Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889–895 (in Chinese with English abstract).
- Xia, M., Ren, G. M., Ma, X. L., 2014. Dynamic Responses of Groundwater Seepage of Landslide Influenced by Fluctuation of Reservoir Water Level. *Journal of Southwest JiaoTong University*, 49(3): 399–405.
- Xie, J. M., Liu, L. L., Yin, K. L., et al., 2003. Study on the Threshold Values of Rainfall of Landslide Hazards for Early-Warning and Prediction in Zhejiang Province. *Geological Science and Technology Information*, 22(4): 101–105 (in Chinese with English abstract).
- Yarahmadi Bafghi, A. R., Verdel, T., 2005. Sarma-Based Key-Group Method for Rock Slope Reliability Analyses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(10): 1019–1043. doi: 10.1002/nag.447
- Zhang, T. L., Zhou, A. G., Sun, Q., et al., 2016. Characteristics and Deformation failure Mode of Geological Hazards in Yixian County, Southern Anhui Province. *Geology and Exploration*, 24(5): 477–487 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. B., Li, D. Q., 2009. Advances in Rainfall-Induced Landslides Mechanism and Risk Mitigation. *Advances in Earth Science*, 24(5): 477–487 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈光平, 2011. 台风引发温州市斜坡地质灾害的发育分布及影响因素研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 陈香, 刘景秀, 2007. 福建省 2005 年“龙王”台风灾害链巨灾分析. *泉州师范学院学报*, 25(2): 86–90.
- 韩晖, 2005. 近 50 年中国台风暴雨研究(硕士学位论文). 北京师范大学博士论文.
- 韩俊, 2012. 温州地区台风滑坡形成机理物理模拟研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 姜伟平, 吴利红, 邓盛蓉, 等, 2006. 0513 号台风“泰利”灾害成因及特征分析. *灾害学*, 21(2): 85–89.
- 刘礼领, 殷坤龙, 2008. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析. *岩土力学*, 29(4): 1061–1066.
- 邱文玉, 2014. 我国东南沿海台风极端降水特征及成因初探(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.
- 夏敏, 任光明, 马鑫磊, 等, 2014. 库水位涨落条件下滑坡地下水渗流场动态特征. *西南交通大学学报*, 49(3): 399–405.
- 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等, 2003. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究. *地质科技情报*, 22(4): 101–105.
- 周创兵, 李典庆, 2009. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展. *地球科学进展*, 24(5): 477–487.
- 张泰丽, 周爱国, 孙强, 等, 2016. 安徽南部黟县地质灾害特点及变形破坏模式. *地质与勘探*, 52(2): 292–299.
- 崔鹏, 陈树群, 苏凤环, 等, 2010. 台湾“莫拉克”台风诱发山地灾害成因与启示. *山地学报*, 28(1): 103–115.
- 孔维伟, 赵其华, 韩俊, 等, 2013. 台风滑坡变形破坏机制模型试验研究. *工程地质学报*, 21(2): 297–303.
- 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 2016. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比. *地球科学*, 41(3): 403–415.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889–895.