



## 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析

石 浩, 李远耀, 许艺林, 郑 阳, 陈科翰, 马银亮

**Seepage characteristics of accumulation landslides under different types of heavy rainfall stability analysis**

SHI Hao, LI Yuanyao, XU Yilin, ZHENG Yang, CHEN Kehan, and MA Yinliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309046>

### 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

##### [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

##### [三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制](#)

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73–81

##### [基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析](#)

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112–118

##### [基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法](#)

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100–107

##### [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](#)

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

石爱红, 李国庆, 丁德民, 菡权坤 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 141–151



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309046](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309046)

石浩, 李远耀, 许艺林, 等. 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 222-233.  
SHI Hao, LI Yuanyao, XU Yilin, et al. Seepage characteristics of accumulation landslides under different types of heavy rainfall stability analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 222-233.

## 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析

石 浩<sup>1</sup>, 李远耀<sup>1</sup>, 许艺林<sup>2</sup>, 郑 阳<sup>1</sup>, 陈科翰<sup>1</sup>, 马银亮<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 (武汉) 地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;  
2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 暴雨是堆积层滑坡灾害发生的主要诱因之一, 暴雨作用下堆积层滑坡体渗流场的时空动态特征是评价滑坡稳定性和开展气象风险预警的关键。针对当前主要以降雨强度为变化参数的模拟分析工况存在的不足, 以广东省特大型地质灾害——丰顺县三坑村滑坡群Ⅲ号滑坡为例, 基于现场调查和资料分析, 建立精细化滑坡地质结构模型, 采用统计方法分析区内降雨特征, 将暴雨划分为“均匀型”和“峰值型”两种类型, 通过模拟滑坡体内浸润线及孔隙水压力的变化, 分析滑坡在不同类型暴雨下的渗流场动态, 进而分析滑坡的应力-应变场与位移特征, 开展稳定性定量评价研究。研究结果表明: 均匀型暴雨会显著影响滑坡深部渗流场, 造成明显局部变形; 峰值型暴雨诱发滑坡模式随雨量峰值位置的变化而有所差异, 前锋型降雨诱发的变形表现出牵引式特点, 随着雨量峰值后移, 滑坡变形表现出推移式特点。数值模拟结果和滑坡实际变形较为吻合, 研究成果可为堆积层滑坡的治理及防护工程的设计提供借鉴。

**关键词:** 堆积层滑坡; 暴雨类型; 数值模拟; 变形机理; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0222-12

## Seepage characteristics of accumulation landslides under different types of heavy rainfall stability analysis

SHI Hao<sup>1</sup>, LI Yuanyao<sup>1</sup>, XU Yilin<sup>2</sup>, ZHENG Yang<sup>1</sup>, CHEN Kehan<sup>1</sup>, MA Yinliang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. Northwest Electric Power Design Institute Co. Ltd., China Power Engineering  
Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** Heavy rainfall is a major causes of sedimentary landslide disasters, and understanding the spatiotemporal dynamic characteristics of the seepage field in landslides under heavy rain is crucial for evaluating landslide stability and providing meteorological risk early warnings. Current simulations and analyses often focus primarily on rainfall intensity as the change parameter, which limits their effectiveness. This study takes the No. Ⅲ landslide of Sankeng Village Landslide Group in Fengshun County, a super-large geological disaster in Guangdong Province, as a case study. Based on the field investigation and data analysis, a refined landslide geological structure model was developed and statistical methods were used to analyze the rainfall characteristics in the area, classifying the rainfall into “uniform type” and “peak type”. The dynamics of the seepage field under

收稿日期: 2023-09-20; 修订日期: 2024-01-19

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172286)

第一作者: 石浩(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质、地质灾害分析与防治的研究。E-mail: [3365523485@qq.com](mailto:3365523485@qq.com)

通讯作者: 李远耀(1978—), 男, 副教授, 主要从事工程地质与地质灾害方面的教学研究工作。E-mail: [liyuanyao2004@163.com](mailto:liyuanyao2004@163.com)

these two types of rainstorms was analyzed by simulating changes in the infiltration line and pore water pressure within the landslide. The stress-strain field and displacement characteristics of the landslide were then examined, and stability was quantitatively evaluated. The results show that the uniform rainstorm will significantly affect the seepage field in the deep part of the landslide, resulting in noticeable local deformation. The landslide response to peak rainfall varies with the change of position, with forward rainfall causing traction-like deformation, while backward-moving peak rainfall induces a pushing deformation. The numerical simulation results align well with the observed deformation of the landslide. This study can provide basic information for the design of the treatment and protection engineering of the accumulation layer landslide.

**Keywords:** accumulation landslides; rainstorm type; numerical simulation; deformation mechanism; stability analysis

大量研究表明,降雨是滑坡灾害发生的主要诱因之一,特别是久雨和暴雨诱发的滑坡,约占滑坡总数的90%<sup>[1-2]</sup>。近些年,随着全球气候变暖,极端降雨事件频繁发生,为有效减轻或消除降雨诱发的滑坡灾害威胁,开展降雨型滑坡渗流特征与稳定性研究是十分必要的。

近年来,针对降雨类型对滑坡稳定性影响的研究逐渐深入<sup>[3-5]</sup>,学者们普遍将降雨类型分为均匀型、递增型、递减型和峰值型4种<sup>[6-8]</sup>(或称为平均型、后峰型、前峰型、中峰型)<sup>[9-11]</sup>。如:张石等<sup>[5]</sup>通过对不同降雨类型下粉土边坡渗流及稳定性研究,认为雨强峰值出现越早或出现次数越少,湿润锋入渗深度越深;林鸿州等<sup>[6]</sup>发现峰值型降雨的入渗作用将使土体迅速饱和,若此时土体受到扰动则更容易发生破坏;唐栋等<sup>[11]</sup>研究认为有峰型前期降雨比平均型前期降雨对边坡稳定性影响整体要大,且后峰型降雨影响最大。

针对降雨诱发滑坡机理的研究,相关学者研究表明:降雨条件和渗透过程对滑坡稳定性的影响至关重要<sup>[12]</sup>,降雨型滑坡变形机理的分析需要从渗流场的变化规律入手。如:张维<sup>[13]</sup>采用离心模型试验及高速不排水剪切试验对持续降雨诱发滑坡的机理进行研究,认为滑坡是由滑源区松散土体内部亚稳定结构失稳、孔隙水压力骤增及剪切强度降低诱发;石振明等<sup>[14]</sup>通过模型试验,发现孔压的变化规律与坡面变形规律具有一致性,指出降雨通过改变边坡内孔隙水压力的大小进而导致边坡变形。

随着数值模拟技术及模型试验的快速发展,相关学者对降雨型滑坡变形破坏模式也开展了深入研究。徐永强等<sup>[15]</sup>利用Geo Studio软件对三舟溪滑坡在研究区实际降雨和三峡工程运行库水位条件下的瞬态渗流场进行数值模拟和边坡稳定性分析;Yang等<sup>[16]</sup>采用深度积分连续介质方法对汉源县某降雨型滑坡

的动态过程进行模拟,得到与现场调查较为吻合的结果;孟生勇等<sup>[17]</sup>采用物理模型试验探究斜坡内部水土力学变化以及稳定性时空演化规律,发现堆积体斜坡破坏经历了微裂隙发育-局部破坏-整体破坏3个阶段,呈现出“初期拉裂-坡面坍塌-塑性滑动”的破坏模式;冯文凯等<sup>[18]</sup>采用物理模型试验探究广东省龙川县贝岭地区群发性滑坡的变形规律,结果显示该滑坡总体上表现出“逐级后退、依次破坏”变形特征;李思德等<sup>[19]</sup>基于物理模型试验,研究在不同防护措施下,极端降雨引起的滑坡变形特征,发现暴雨停止后坡体经历变形-蠕滑-加速-破坏4个阶段,最终发生整体滑动;Bai等<sup>[20]</sup>针对某降雨过后发生的滑坡开展调查,认为此类滑坡首先在坡脚处发生初始变形,并表现出向坡体中上部持续牵引变形的发展特征。

然而,目前对于降雨诱发滑坡的机理研究与稳定性分析,多是依据降雨强度设置分析工况,而实际降雨过程中很少出现均匀降雨的情况,同时,不同降雨类型对滑坡的发生有着完全不同的诱发机理,进而使滑坡表现出不同的破坏模式。因此,为揭示不同降雨的差异性作用,选取典型降雨型堆积层滑坡,开展变形机理及稳定性研究。

## 1 滑坡发育特征

### 1.1 滑坡孕灾条件

三坑村滑坡群位于广东省梅州市丰顺县小胜镇三坑村(图1),距离梅州市区直线距离约64 km。滑坡区域属亚热带季风气候区,具有雨热同期、雨水丰盈且雨季集中的气候特征。平均年降水量1 776.1 mm,历年最大降雨量3 106.7 mm(1961年),日最大降雨量500.13 mm(1980年5月17日),雨季多集中在3—9月,雨季降雨量约占年降雨量的80%,台风暴雨诱发的山体滑坡是当地的主要地质灾害。

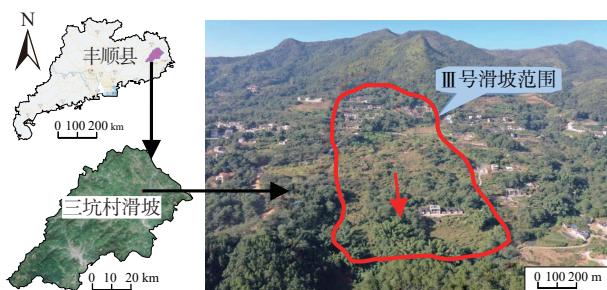


图 1 三坑村Ⅲ号滑坡位置图

Fig. 1 Location of the No. III landslide in Sankeng Village

## 1.2 滑坡发育特征

Ⅲ号滑坡平面上大体呈“长舌”状(图 2),整体坡度约  $10^\circ \sim 13^\circ$ ,主滑方向  $45^\circ$ 。前缘最低标高 132.59 m,

后缘标高 365.69 m,纵长约 949 m,横宽最大约 367 m,平面面积约  $25 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;滑坡平均厚度约 19.50 m,体积约  $504 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属特大型滑坡。滑坡体的物质组成自上而下分别为:地表耕植土或人工填土、坡积粉质黏土和残积砂质黏性土,砂质黏性土层在与上覆粉质黏土接触带含水量较大。根据钻孔揭露,滑坡潜在滑动带主要位于粉质黏土与下伏砂质黏性土接触带及局部砂质黏性土内部。Ⅲ号滑坡上共测制了 5 条工程地质纵剖面,其中 L17 剖面位于坡体中部,在剖面线附近存在明显变形迹象,且穿过坡体后部和中部的两个居民区及主要公路,具有代表性。因此选择 L17 剖面为滑坡主剖面(图 3)。

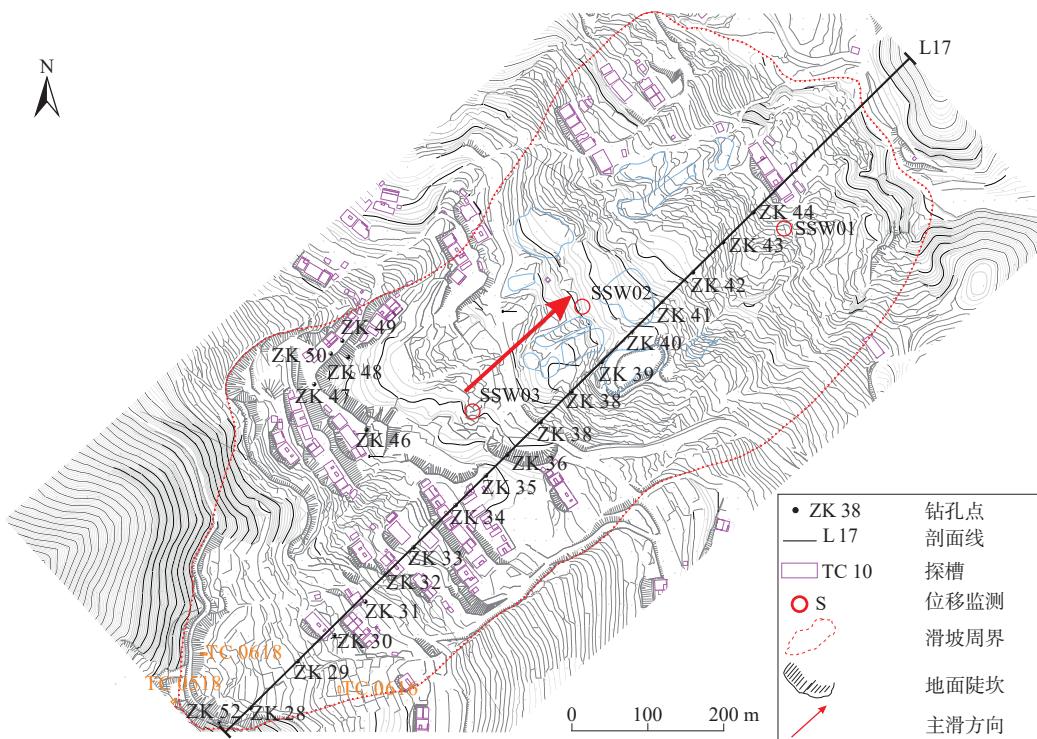


图 2 滑坡勘探平面布置图

Fig. 2 Landslide exploration floor plan

## 1.3 滑坡变形特征

20世纪80年代以来,坡体上的部分房屋出现墙体开裂、地面下沉、道路破损等现象。2006年雨季,坡体中部水泥公路发生沉降和侧移,路面遭到严重破坏。2008年道路重新浇筑后,陆续又出现下沉和开裂。2021年在Ⅲ号滑坡开展自动化监测,3个位移监测布置点如图 2 所示,各点位不同深度处的累计位移变化曲线如图 4 所示。滑坡目前处于稳定变形阶段,从深部监测数据来看变形速率较小,最大位移量为 12 mm,整体属蠕滑特征。降雨是该滑坡的主要诱发

因素,雨季后期往往是发生明显位移的时期,在降雨作用下,地表水可能从后缘及中部张拉裂缝中入渗,加之原本地表水体较为丰富,对滑坡稳定性不利。因此,需要在现场调查及监测资料的基础上,针对滑坡的变形机理、不同条件下的变形趋势和稳定性做进一步分析。

## 2 数值模型建立

### 2.1 滑坡数值模型

采用有限元方法开展滑坡在不同类型暴雨下的渗

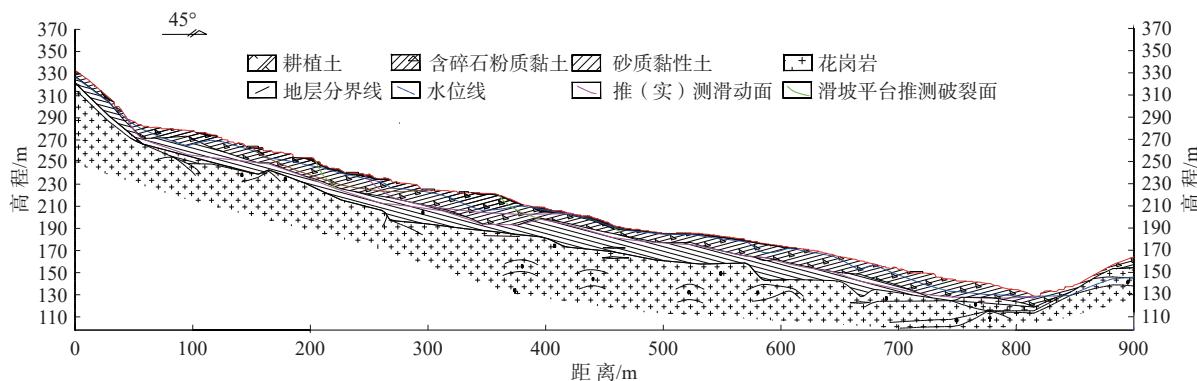


图 3 滑坡主剖面图

Fig. 3 Main section of the landslide

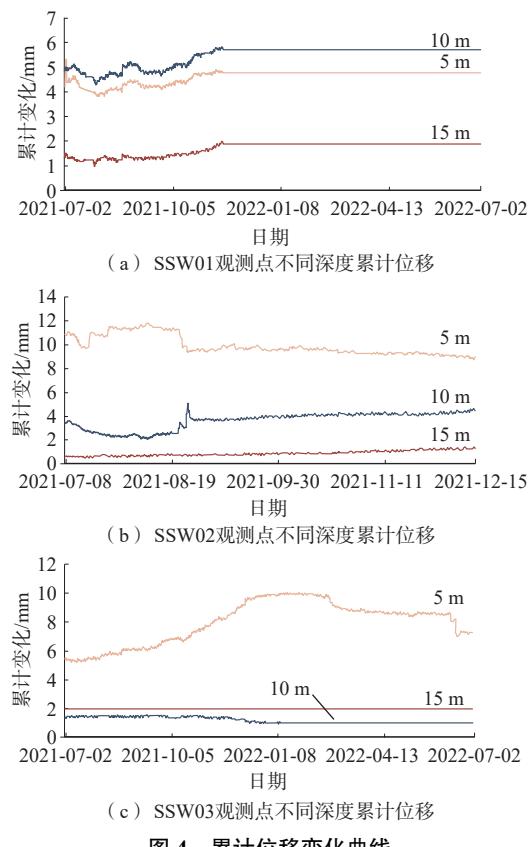


图 4 累计位移变化曲线

Fig. 4 Cumulative displacement variation

流分析、稳定性分析和欠稳定工况的变形分析<sup>[21–24]</sup>。钻孔揭露斜坡中风化花岗岩及以下岩层完整性较好, 可统一视为稳定基岩。因此, 在数值模拟中主要设置粉质黏土层、砂质黏土层、强风化花岗岩及基岩 4 个部分。考虑各区域的计算精度, 选取边长 3 m 大小的四边形网格对粉质黏土层和砂质黏土层进行剖分, 基岩部分采用边长 30 m 四边形的网格, 强风化花岗岩层则处在上述两种规格网格的过渡区域, 采用四边形/三角形网格剖分, 共划分 10 992 个单元(图 5)。在渗流模

拟中, 初始地下水浸润线的设置对模拟结果有很大的影响<sup>[25–28]</sup>。根据在 L17 剖面上布设的钻孔水文资料得到初始地下水浸润线, 如图 5 所示。

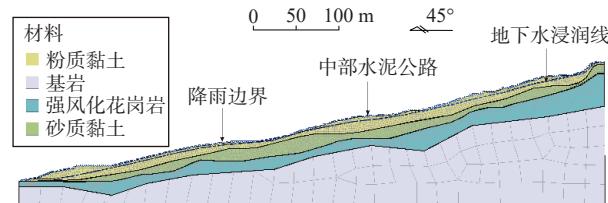


图 5 数值建模效果

Fig. 5 Numerical modeling

## 2.2 参数选取

根据勘察资料及反演分析综合确定模型参数。坡体材料选用摩尔-库仑材料模型, 将基岩部分视为不透水材料, 在天然和饱和两种状态下的内摩擦角及黏聚力均设置为极大值。通过反演工况下的滑坡地下水渗流情况, 获取饱和状态下的渗透系数及体积含水率, 具体参数见表 1。

## 2.3 工况设计

根据梅州市丰顺县气象站点 1956—2021 年的单日最大降雨数据, 采用 Gumbel-I 型分布法进行拟合, 得到不同重现期的日最大降水量分布曲线(图 6)。按照国家防办《防汛手册》的规定: 24 h 降雨量超过 50 mm 的降雨为暴雨。选取 2013—2022 年丰顺县的逐日降雨量(图 7), 得出近 10 a 中达到暴雨的天数共计 58 d。汛期暴雨以峰值型为主, 暴雨事件往往表现出前后相邻日降雨量差异大、雨量渐次变化的特点, 而前汛期及后汛期的降雨量较为均匀。因此, 把降雨分为均匀型和峰值型两类。

进一步对每个降雨事件进行详细分析, 识别降雨事件的标准为: 以暴雨日为中心, 分别向前及向后统计每日降雨量, 追溯到自然天内总降雨量小于 1 mm

表 1 岩土体物理参数  
Table 1 Geotechnical physical parameters

| 物质     | 重度<br>( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/MPa |        | 泊松比  | 天然状态           |               | 饱和状态           |               | 饱和渗透系数<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 饱和含水率 |
|--------|---|----------|--------|------|----------------|---------------|----------------|---------------|--|-------|
|        |   | 天然       | 饱和     |      | $c/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ | $c/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ |  |       |
| 粉质黏土   | 18.6                                    | 5.7      | 4.89   | 0.23 | 22.6           | 18.2          | 21.8           | 16.9          | $3\times 10^{-9}$                          | 0.35  |
| 砂质黏土   | 18.6                                    | 6.9      | 6.20   | 0.21 | 26.1           | 21.3          | 20.8           | 20.3          | $5\times 10^{-8}$                          | 0.31  |
| 强风化花岗岩 | 19.4                                    | 20.0     | 20.0   | 0.18 | 21.7           | 22.4          | 18.4           | 21.7          | $3\times 10^{-10}$                         | 0.22  |
| 基岩     | 21.3                                    | 1000.0   | 1000.0 | 0.10 | 1 000.0        | 40.0          | 1 000.0        | 40.0          | 0  | 0.00  |

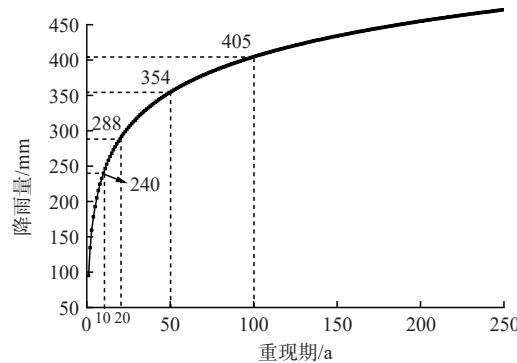


图 6 降雨重现期  
Fig. 6 Rainfall resumption period

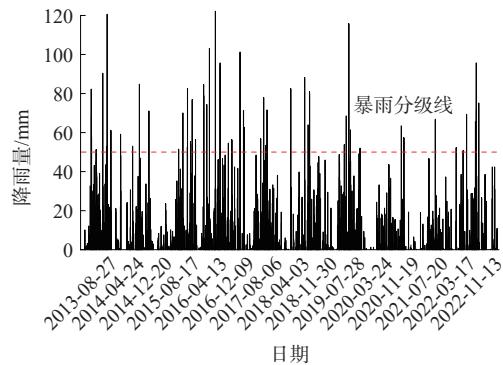


图 7 2013-2022 年丰顺县逐日降雨  
Fig. 7 Daily rainfall in Fengshun County from 2013 to 2022

则设为降雨事件开始或截止日,若出现两个相连的暴雨日只算作1个降雨事件。58个暴雨日共计有46个

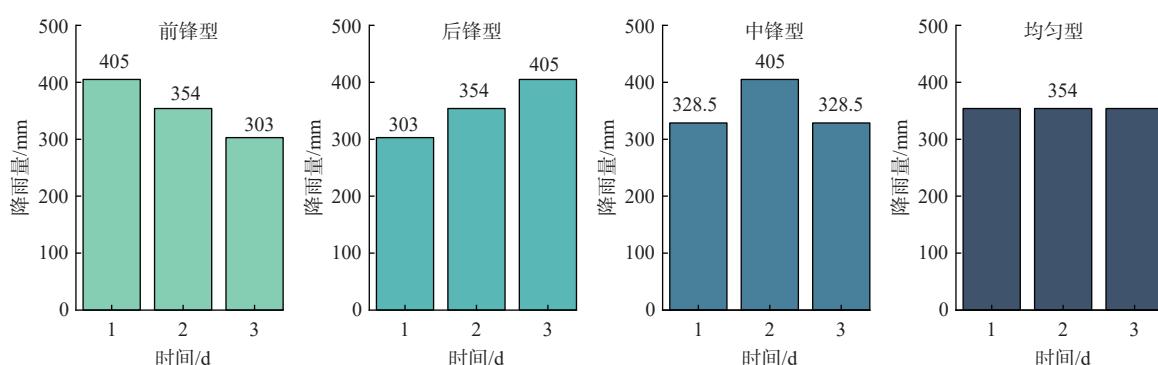


图 8 降雨量历时过程图  
Fig. 8 Diagram of the rainfall over time

降雨事件,记为J1—J46,其中前峰型暴雨22次,中峰型暴雨18次,后峰型暴雨6次,平均降雨天数为6.4 d,最长降雨天数为19 d,近10年事件降雨总量均值为720.2 mm。通过分析滑坡区历史降雨资料,可知100年一遇降雨强度几乎不可能连续数日出现,故选取该值为峰值降雨强度。参考近年来我国极端降雨事件的降雨特征<sup>[29-30]</sup>,控制总降雨量与研究区50年一遇暴雨的3 d总降雨量一致。在前峰和后峰型降雨中,设置50年和100年一遇的暴雨相连,在中峰型降雨中,第1天、第3天则为剩余降雨量的均值,设置的数值模拟工况如表2所示,根据模拟工况得到的降雨量历时过程如图8所示。

表 2 数值模拟工况  
Table 2 Cases in Numerical simulation

| 工况  | 降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 降雨时长/d | 降雨类型 | 降雨总量/mm |
|-----|--|--------|------|---------|
| 工况一 | 240.0                                  | 3.0    | 均匀型  | 720     |
| 工况二 | 288.0                                  | 3.0    | 均匀型  | 864     |
| 工况三 | 354.0                                  | 3.0    | 均匀型  | 1 062   |
| 工况四 | 165.9                                  | 6.4    | 均匀型  | 1 062   |
| 工况五 | 55.9                                   | 19.0   | 均匀型  | 1 062   |
| 工况六 | 405.0, 354.0, 303.0                    | 3.0    | 前峰型  | 1 062   |
| 工况七 | 328.5, 405.0, 328.5                    | 3.0    | 中峰型  | 1 062   |
| 工况八 | 303.0, 354.0, 405.0                    | 3.0    | 后峰型  | 1 062   |

## 2.4 边界条件

数值模拟过程中主要考虑暴雨对滑坡体的影响。

因此,设定坡表为降雨入渗面,并将降雨入渗面设置为流量边界,大小为单位降雨量。综合考虑模拟期的地下水监测数据、滑坡坡形及渗流系数等因素,确定滑坡初始地下水位线。

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 滑坡渗流分析

如图9所示,当降雨进行至第3天,粉质黏土层趋于饱和,深部孔压逐渐增大,坡体前中部的孔压变化明显,但改变雨强对孔压分布影响不大,工况一、工况二和工况三下孔压的变化趋势与孔压变化不大。在孔压变化明显的坡体前部、中后部各选择一个典型断面(图10),点1、点2位于粉质黏土层,点3、点4位于砂质黏土层,分析坡内固定点的单位流量变化(图11),研究不同雨强下坡体内的渗流方式。砂质黏土层的单位流量远大于粉质黏土层,粉质黏土层内的单位流量随降雨呈现不同的变化趋势。对于粉质黏土层,工况一条件下,前1.5天的流量逐渐增大,随后呈现持续下降的趋势;工况二条件下前1天的流量略有增大,随后迅速下降。工况三条件下单位流量从首日起便呈现下降趋势。对于砂质黏土层来说,在降雨3 d内不同工况的流量差异不明显,在工况三条件下降雨结

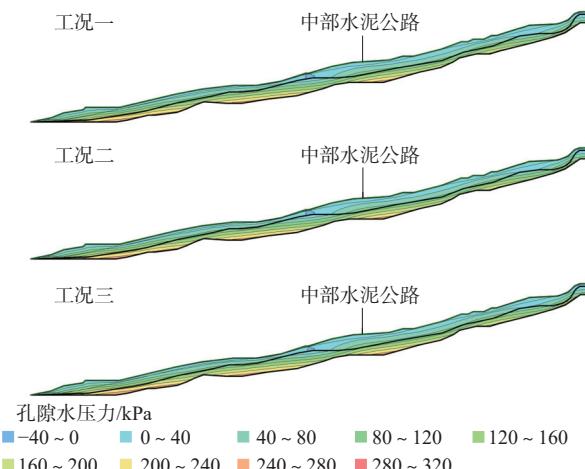


图9 不同雨强孔压等值线

Fig. 9 Pore water pressure contours of different rain strengths

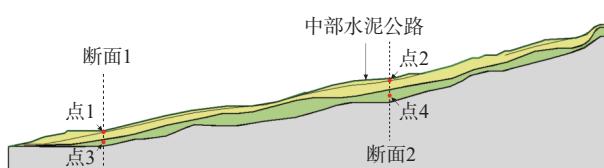
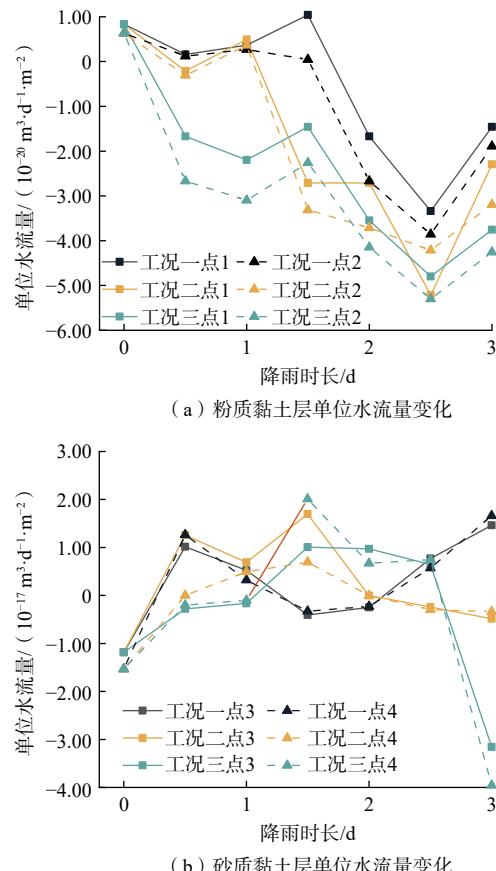


图10 特征点位

Fig. 10 Feature points



(a) 粉质黏土层单位水流量变化

(b) 砂质黏土层单位水流量变化

图11 单位流量变化

Fig. 11 Change in unit flow

束后单位流量迅速下降。

因粉质黏土层渗透性较小,较大的雨强主要转为坡表径流,对砂质黏土层的单位流量影响不大。粉质黏土层在流量增大后均经历了一段快速降低的过程,且雨强越小流量降低的时间越晚。由于在降雨作用下土体逐渐趋于饱和,渗透系数增大,垂直入渗量增大导致浅表层顺坡向水流量减小。因此,砂质黏土层得以在降雨持续补给下形成趋于稳定的渗流通道。

如图12所示,在相同的总降雨量下,354 mm/d连续3 d的降雨条件下,坡体表层未完全饱和,而坡体深部已出现较大的孔压;165.9 mm/d连续6.4 d的降雨时坡体表层已经饱和但是孔压等值线分布不均匀;55.9 mm/d连续19 d的降雨使坡体表层充分饱和,孔压等值线分布均匀且稳定,深部孔压达到3种工况中的最大值。在短时强降雨的作用下,渗透性较差的粉质黏土层表层快速饱和,从而迟滞了坡体内的空气排出,对入渗的雨水形成阻碍,雨水容易在坡面停留冲刷坡表。而久雨时粉质粘土层因完全饱和,渗透系数增大,且砂质黏土本身的渗透性较好,雨水能够更多

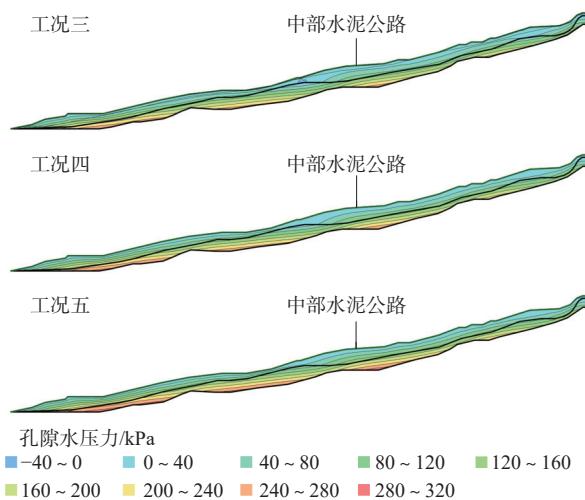


图 12 相同总降雨量的孔压等值线

Fig. 12 Pore pressure contour for the same total rainfall

地入渗到深层。表明降雨时长对滑坡深部孔压的影响较大。

如图 13 所示, 坡内流向差异主要体现在坡体中部水泥公路附近。久雨条件下降雨充分入渗, 坡内渗流场有充足的时间趋于稳定, 各层水流分布均匀。而短时强降雨条件下, 由于表层多处于非饱和状态, 坡内水流易从坡体中部的非饱和区流出, 可能在坡体中部形成地下水出口, 也是滑坡中部水泥公路处变形破坏严重的原因之一。

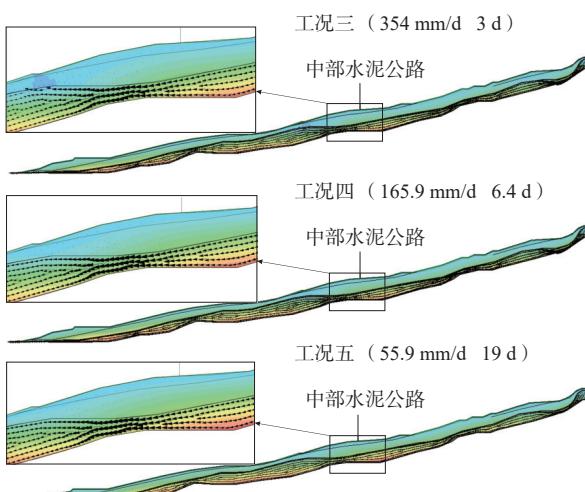


图 13 相同总降雨量的流向

Fig. 13 Flow direction of the same total rainfall

由图 14 可知, 降雨初始阶段坡体表层大部分处于非饱和状态, 随着降雨的持续, 深部孔压逐渐增大, 粉质黏土层非饱和区域减小, 孔压维持在较小值(<40 kPa)。降雨 6.4 d 以后, 深部孔压已达到较大值, 坡体中前部孔压上升速度最快, 粉质黏土层在充分饱和后孔压逐

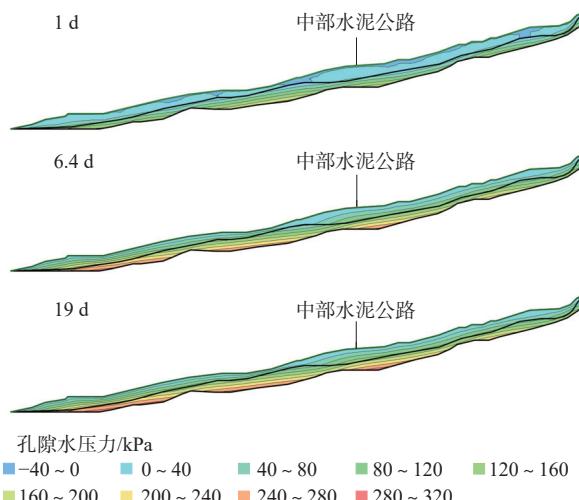


图 14 不同降雨时长孔压等值线

Fig. 14 Pore water pressure contours of different rainfall durations

渐增大, 中前部增长明显, 是因为坡体中前部水流稳定, 形成了良好的入渗通道。坡体后部由于汇水面积小且较为陡峭, 雨水只能从后缘裂隙入渗, 所以坡体后部孔压始终较小。表明降雨时长主要影响坡体的深部孔压。

如图 15—17 所示, 对比工况三的孔压等值线可以看出, 3 种峰值型降雨均能使得表层土体充分饱和且深部孔压达到较大值, 坡体不同深度的孔压随降雨峰值的变化呈现出不同的增长速度。前峰型降雨(工况六)在第 1 天即出现大于 280 kPa 的孔压值, 随后变化幅度减小, 到第 3 天时孔压分布几乎不再变化。中峰型降雨(工况七)在第 2 天出现大于 280 kPa 的孔压值, 随后孔压基本不再变化。后峰型降雨(工况八)孔

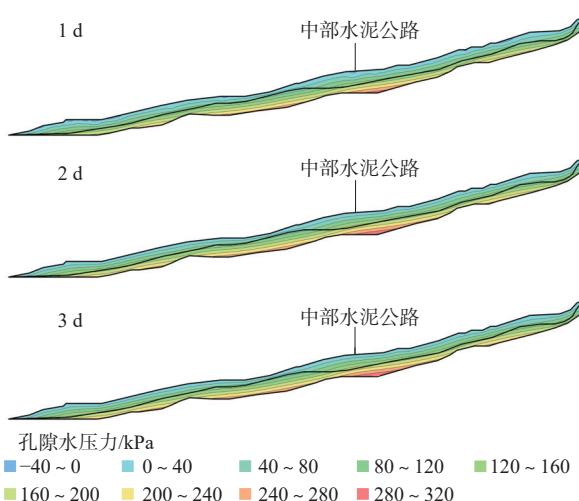


图 15 前峰型降雨孔压等值线

Fig. 15 Pore water pressure contours of pre-peak rainfall

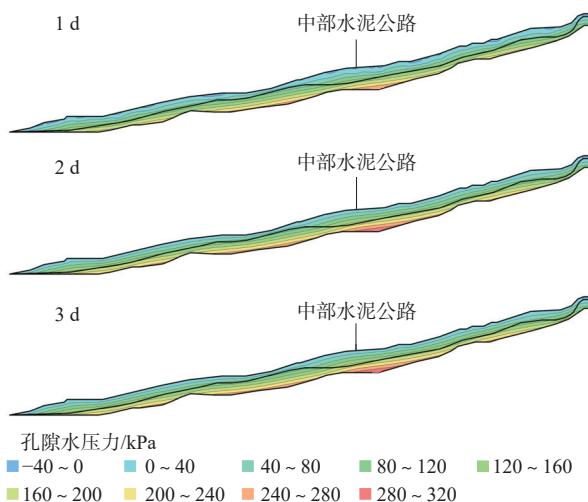


图 16 中峰型降雨孔压等值线  
Fig. 16 Pore water pressure contours of Mid-peak rainfall

压值变化最慢,在第2天出现大于280 kPa的孔压值,随后孔压缓慢变化。3种工况下均呈现坡体中部孔压率先增大,随后前缘孔压增大,后部孔压变化幅度最小的特点。

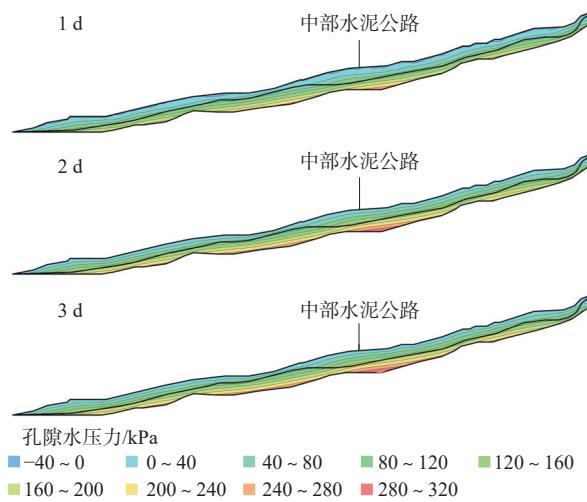
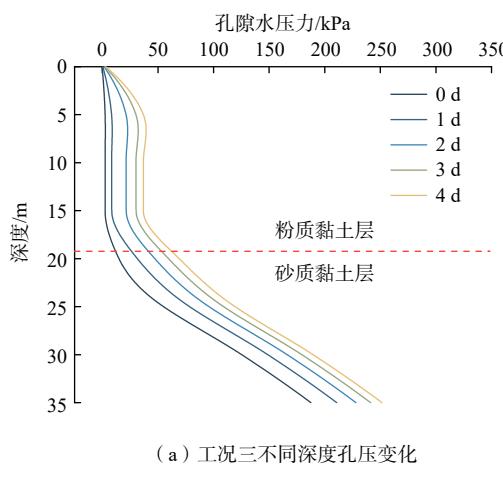
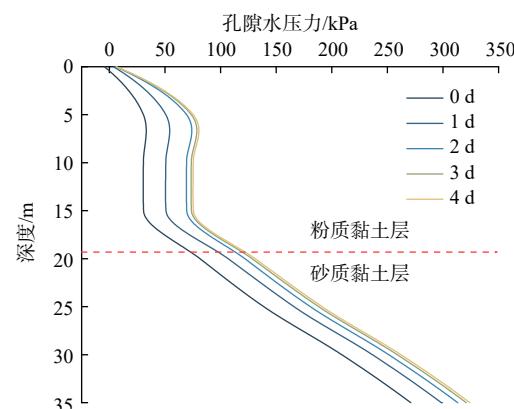


图 17 后峰型降雨孔压等值线  
Fig. 17 Pore water pressure contours of Post-peak rainfall

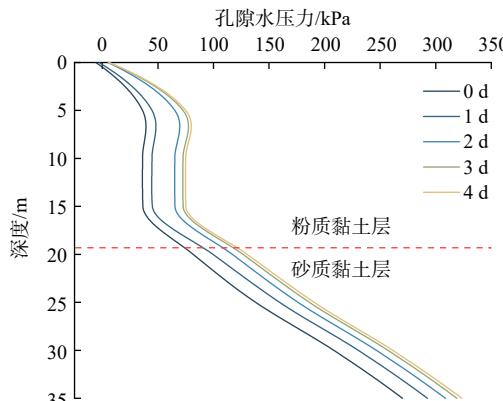
在孔压变化最显著的坡体中部水泥公路后方设定纵剖面(同图10中的断面2),此处坡体厚35 m,其中粉质黏土层厚16 m,砂质黏土层厚19 m。如图18所示,均匀型降雨过程中,不同深度处的孔压均随降



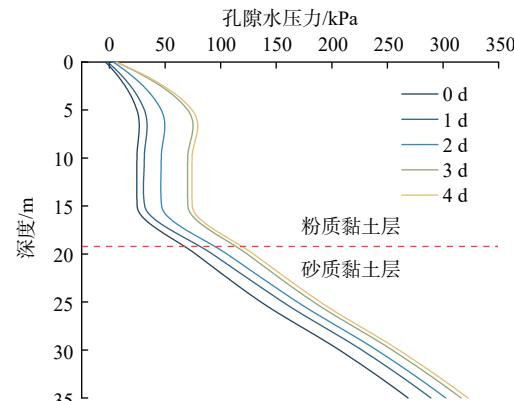
(a) 工况三不同深度孔压变化



(b) 工况六不同深度孔压变化



(c) 工况七不同深度孔压变化



(d) 工况八不同深度孔压变化

图 18 不同雨型坡体不同深度的孔压变化

Fig. 18 Changes in pore pressure at different depths of different rain-shaped slopes

雨进行均匀变化,增大的速度逐渐减慢。前峰型降雨前2天的孔压增长速率远大于其他时间段,中峰型降雨第2天的孔压增长速率远大于其他时间段,后峰型降雨第3天的孔压增长速率远大于其他时间段。由于降雨量到达峰值,在单位时间内的汇水量增加,雨水入渗增多,孔压增长速率也随之加快。对于峰值型降雨,砂质黏土层不同深度的孔压变化速度较为一致。而粉质黏土层则在不同的深度范围内表现出不同的变化特性:在0~6 m内孔压变化速度随深度增加而增大,6~19 m内孔压的变化速度趋于一致。均匀型降雨中,两层土的差异性则较小。

### 3.2 不同暴雨类型的稳定性分析

在渗流分析基础上,采用极限平衡法计算三坑村Ⅲ号滑坡在不同工况下的坡体稳定性,选择SLOPE/W稳定性计算模块开展模拟。坡体各部分物理参数见表2。在滑坡稳定性计算模型的基础上,依据坡表形态自动对坡体进行条块分隔。在计算过程中自动搜索滑移面,以此计算滑坡体可能存在的最危险滑动面。得到各工况条件下滑坡临界滑移面的稳定系数变化过程如图19所示。

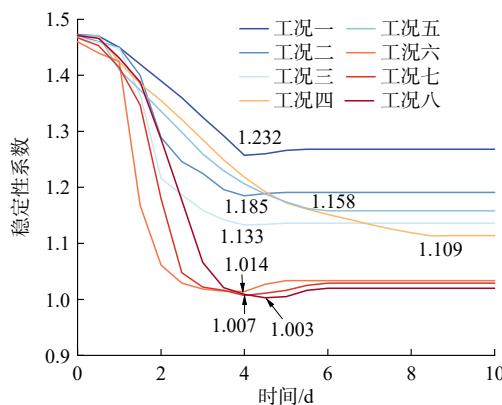


图19 各工况滑坡稳定系数变化

Fig. 19 Changes in the stability coefficient of landslides under different conditions

在初始状态下,坡体的稳定系数均大于1.2,处于稳定状态。对比工况一、工况二、工况三可得,降雨强度的增大,稳定系数减小,最终值略高于该过程的最小值。工况三、工况四、工况五则表明,在降雨总量不变的情况下,降雨强度和降雨时长均会降低坡体稳定性,在降雨初期,雨强会使坡体稳定性下降较快,但随降雨进行,降雨时长的影响较大。在久雨时,粉质黏土层逐渐饱和,雨水稳定下渗,地下渗流通道更易形成,对坡体稳定性的影响更大。对比工况六、

工况七、工况八,前峰型降雨在峰值时,粉质黏土层还未完全饱和,雨水入渗会有一定阻碍。随着渗流通道在峰值到达前逐渐贯通,峰值的出现使坡体内单位流量增大。因此,对于峰值型降雨来说,峰值位置越靠后坡体稳定系数越低。

分析各个工况下坡体稳定系数的最小值可以发现,工况三(均匀型暴雨)、工况五(久雨)、工况六(前峰型暴雨)、工况七(中峰型暴雨)、工况八(后峰型暴雨)共5种工况下,坡体处于欠稳定状态,无不稳定状态出现。

### 3.3 欠稳定工况的变形分析

采用SIGMA/W变形模块模拟不同工况条件下坡体的变形特征,坡体为耦合孔隙水压力变化的摩尔-库仑材料模型,基岩部分在模拟过程中视为不透水固定边界,模型参数赋值见表1。如图20(a)所示,均匀降雨工况下,剪应变主要分布在粉质黏土和砂质黏性土界面附近。久雨工况下坡体应变分布广但量值较小,坡体前缘和中后部都有剪应变存在,坡体各部变形较

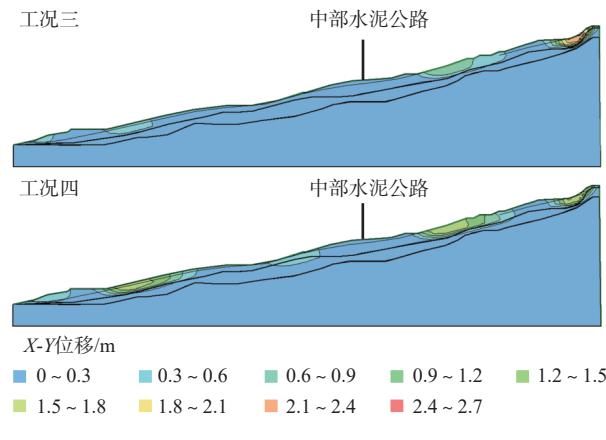
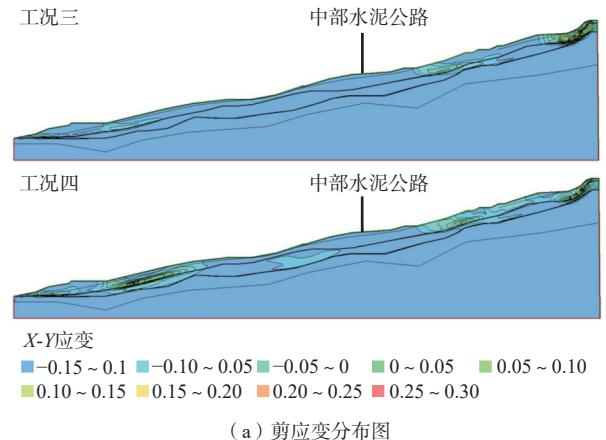


图20 均匀降雨工况变形情况

Fig. 20 Deformation of uniform rainfall condition

为均匀, 最大位移量为 0.113 m, 如图 20(b)所示。而短时暴雨工况普遍对坡体的影响范围小于久雨, 变形集中在坡体前部及后部, 最大位移量为 0.143 m。因为短时暴雨主要对坡表进行冲刷, 导致坡体的局部变形; 而久雨时在坡体内部形成了稳定的渗流场, 所以会造成坡体大范围的变形。

前峰型降雨下坡体前缘有一定的应变, 其余工况下应变主要分布于坡体中后部, 后峰型暴雨工况下应变值达到最大, 见图 21(a)。相较于均匀降雨工况, 峰值降雨工况下的坡体变形更大, 见图 21(b)。前峰型暴雨条件下, 坡体各部分均有变形, 前缘位移较为集中,

最大位移量为 0.145 m。中峰型暴雨条件下, 位移集中在坡体中后部, 最大位移量为 0.168 m。后峰型暴雨条件下, 位移集中在坡体中后部, 最大位移量为 0.174 m。由于前峰型降雨的峰值最早出现, 大量的降雨转为坡表径流冲刷坡表, 相较于均匀型暴雨, 其冲刷破坏的影响会更严重。当峰值后移, 在坡体前部已形成良好入渗通道, 而在后部雨水从裂缝入渗, 使坡体后部发生剧烈变形。因此, 峰值型暴雨相较于均匀型暴雨, 坡体中后部出现了更大范围的变形。

总结不同暴雨类型对坡体变形的影响, 可以认为峰值型暴雨条件下坡体局部会出现更大的位移, 峰值型暴雨对坡体变形的影响大于均匀型降雨。对于均匀型降雨, 较大的雨强易使坡体产生较大位移, 较长的降雨历时可使水分缓慢而均匀地入渗, 从而增大坡体的变形范围。对于峰值型降雨, 雨量峰值位置越靠前坡体前缘越易发生变形, 而雨量峰值位置靠后, 坡体的变形主要集中在中后部且总体位移值较大。

#### 4 结论

(1) 三坑村Ⅲ号滑坡属特大型复合式滑坡, 变形破坏主要由暴雨诱发, 变形特征以地面隆起和张拉裂缝为主, 变形区域主要集中在坡体中部至后缘的粉质黏土层和砂质黏性土层。

(2) 均匀型暴雨影响深部渗流, 坡体内部的孔隙水压稳定上升, 坡体容易发生局部变形。前峰型暴雨主要转为坡表径流, 坡体大部分发生变形, 而前缘受到的冲刷更严重, 变形大且集中, 前缘抗滑力逐渐减小, 表现出牵引式的特点。随着峰值后移, 当到达降雨峰值时, 坡体已充分软化, 地表水从后缘裂缝入渗, 导致后缘发生剧烈变形, 且地下水通过内部渗流通道逐渐促使中前缘发生变形, 表现出推移式的特点。

(3) 降雨总量不变的情况下, 降雨强度和降雨时长均会降低坡体稳定性。在降雨初期, 降雨强度对坡体稳定性更大, 但当降雨持续进行时, 降雨时长逐渐产生更大的影响。对于峰值型降雨来说, 稳定性最小值并非出现在降雨过程结束时, 峰值位置越靠后坡体稳定性系数越低。

(4) 较大雨强的均匀型暴雨易使坡体产生较大位移, 而较长的降雨历时会增大坡体的变形范围。峰值型暴雨对坡体变形的影响更大, 且造成的坡体局部位移更大; 对于峰值型降雨来说, 雨量峰值位置越靠前坡体前缘越易变形, 而雨量峰值位置靠后, 坡体的变形主要集中在中后部且总体位移值较大。

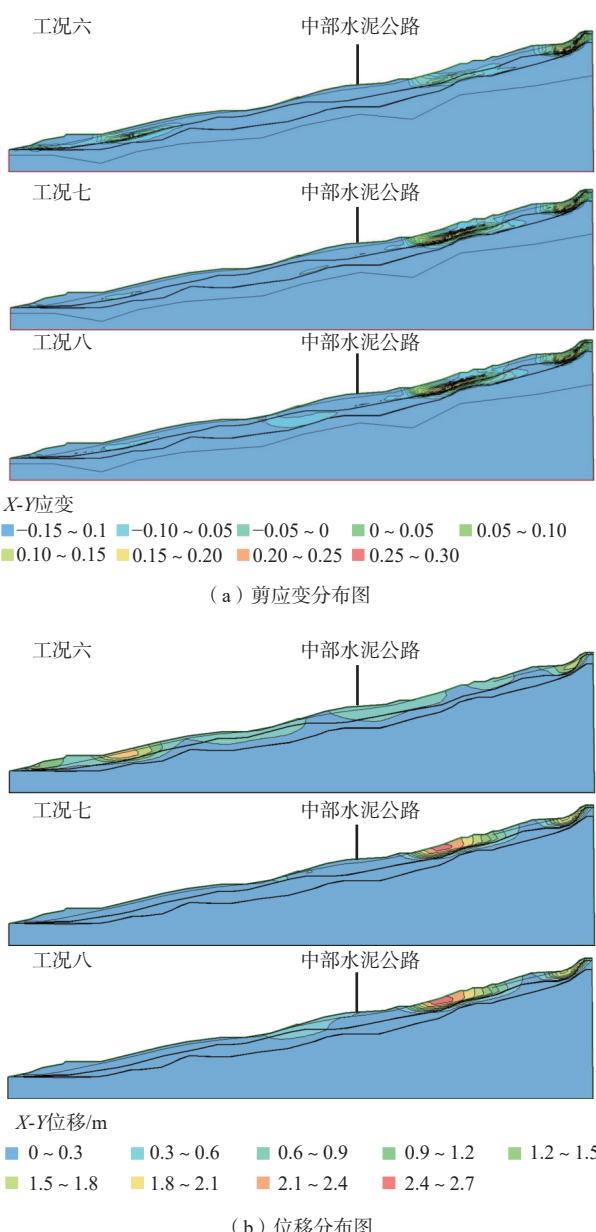


图 21 峰值降雨工况变形情况

Fig. 21 Deformation of peak rainfall condition

## 参考文献 (References) :

- [1] 自然资源部. 全国地质灾害通报 [R]. 北京: 中国地质环境监测院, 2023. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. China geological hazard bulletin [R]. Beijing: China Institute of Geological Environment Monitoring, 2023. (in Chinese)]
- [2] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29-34. [LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China--Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 29-34. (in Chinese with English abstract)]
- [3] TSAI T L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide [J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(7): 1563–1569.
- [4] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 38(5): 1049–1062.
- [5] 张石, 郑东健, 武鑫. 降雨类型对粉土边坡渗流及稳定性的影响 [J]. 水力发电, 2022, 48(9): 34–39. [ZHANG Shi, ZHENG Dongjian, WU Xin. Influence of rainfall types on seepage and stability of silt slope [J]. Water Power, 2022, 48(9): 34–39. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198–204. [LIN Hongzhou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198–204. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 罗渝, 何思明, 何尽川. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(9): 1357–1363. [LUO Yu, HE Siming, HE Jinchuan. Effect of rainfall patterns on stability of shallow landslide [J]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(9): 1357–1363. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李绍红, 朱建东, 王少阳, 等. 考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 131–135. [LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 131–135. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郁舒阳, 张继勋, 任旭华, 等. 降雨类型对浅层深层滑坡渗流及稳定性的影响 [J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 123–127. [YU Shuyang, ZHANG Jixun, REN Xuhua, et al. Influence of different rainfall patterns on seepage and stability of shallow and deep landslides [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3): 123–127. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡欣宇, 赵少飞, 邢明源, 等. 不同降雨类型对非饱和土边坡安全系数的影响 [J]. 华北科技学院学报, 2021, 18(5): 61–66. [HU Xinyu, ZHAO Shaofei, XING Mingyuan, et al. The safety factors of unsaturated soil slopes under different rainfall types [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2021, 18(5): 61–66. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 唐栋, 祁小辉, 蒋水华, 等. 不同前期降雨与土-水特征曲线对边坡稳定的影响 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 148–155. [TANG Dong, QI Xiaohui, JIANG Shuihua, et al. Effect of different antecedent rainfalls and SWCCs on slope stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup1): 148–155. (in Chinese with English abstract)]
- [12] PAONUZZI P, DEL FABBRO M, BOLLA A. Soil moisture profiles of unsaturated colluvial slopes susceptible to rainfall-induced landslides [J]. *Geosciences*, 2021, 12(1): 6.
- [13] 张维. 持时小雨诱发云南镇雄赵家沟高速远程滑坡机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017. [ZHANG Wei. Study on mechanism of high-speed and long run-out landslide induced by prolonged low-intensity rainfall in Zhaojiagou, Zhenxiong, Yunnan [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 石振明, 赵思奕, 苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 135–140. [SHI Zhenming, ZHAO Siyi, SU Yue. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 135–140. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 徐永强, 祁小博, 张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 111–118. [XU Yongqiang, QI Xiaobo, ZHANG Nan. Numerical simulation and stability analysis for the seepage flow in the Sanzhouxi landslide under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 111–118. (in Chinese with English abstract)]
- [16] YANG Weibin, WANG Fulei, TIE Yongbo, et al.

- Characteristics and dynamic process modeling of the rainfall-induced landslide on August 21, 2020 in Hanyuan County, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 720872.
- [17] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104 – 112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 104 – 112. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 冯文凯, 胡芮, 白慧林, 等. 花岗岩残积层滑坡形成机理降雨模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(18): 7799 – 7809. [FENG Wenkai, HU Rui, BAI Huilin, et al. Formation mechanism of rainfall residual layer of granite landslide[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(18): 7799 – 7809. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 李思德, 李远耀, 殷坤龙, 等. 基于物理模型试验的杆塔基础滑坡防护措施效果研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 209 – 218. [LI Side, LI Yuanyao, YIN Kunlong, et al. Study on the effect of tower foundation landslide protection measures based on a physical model test[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 209 – 218. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] BAI Huilin, FENG Wenkai, LI Shuangquan, et al. Flow-slide characteristics and failure mechanism of shallow landslides in granite residual soil under heavy rainfall[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(6): 1541 – 1557.
- [21] 郑晓晶, 殷坤龙. 基于非饱和渗流的水库库岸滑坡稳定性计算[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 29 – 32. [ZHENG Xiaojing, YIN Kunlong. Stability calculation of reservoir bank landslide based on unsaturated seepage flow[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(2): 29 – 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 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. [LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1061 – 1066. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 颜斌, 倪万魁, 刘海松. 黄土边坡降水入渗规律及其稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 77 – 81. [YAN Bin, NI Wankui, LIU Haisong. Research on rainfall infiltration law and stability of loess slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(3): 77 – 81. (in Chinese with English abstract) ]
81. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 324 – 329. [WU Huozhen, FENG Meiguo, JIAO Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Sup1): 324 – 329. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] SORBINO G, NICOTERA M V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides[J]. *Engineering Geology*, 2013, 165(2): 105 – 132.
- [26] CHO S E. Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration[J]. *Engineering Geology*, 2016, 211: 184 – 197.
- [27] 汪华斌, 李建梅, 金怡轩, 等. 降雨诱发边坡破坏数值模拟两个关键问题的解决方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 777 – 784. [WANG Huabin, LI Jianmei, JIN Yixuan, et al. The numerical methods for two key problems in rainfall-induced slope failure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 777 – 784. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 汤明高, 吴川, 吴辉隆, 等. 水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 115 – 125. [TANG Minggao, WU Chuan, WU Hui long, et al. Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 115 – 125. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 南赟, 翟淑花, 李岩, 等. 北京地区“23·7”特大暴雨型地质灾害特征及预警成效分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 66 – 73. [NAN Yun, ZHAI Shuhua, LI Yan, et al. Analysis on the characteristics of geological disasters and effectiveness of early warning during heavy rainfall on “23 · 7” in Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(2): 66 – 73. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 杨帆, 周悦, 罗岚扬, 等. 广东省降雨时空分布特征分析[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(11): 46 – 51. [YANG Fan, ZHOU Yue, LUO Lanyang, et al. Analysis of spatiotemporal distribution characteristics of rainfall in Guangdong Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(11): 46 – 51. (in Chinese with English abstract) ]