

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.007

持续强降雨影响下黄梅县袁山村三组滑坡 破坏特征与成因分析

陈慧娟¹, 邹浩^{1,2*}, 阎遥¹, 王超¹, 毛帅¹

CHEN Hui-Juan¹, ZOU Hao^{1,2*}, YIN Yao¹, WANG Chao¹, MAO Shuai¹

1. 湖北省地质局第三地质大队, 湖北 黄冈 438000; 2. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室(湖北省地质局), 湖北 武汉 430034

1. The Third Geological Team of Hubei Geological Bureau, Huanggang 438000, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environmental Geology (Hubei Geological Bureau), Wuhan 430034, Hubei, China

摘要: 2020年7月8日凌晨4点5分, 湖北省黄梅县大河镇袁山村三组在强降雨作用下突发一起体积为40000 m³的小型岩土混合型滑坡, 造成8人遇难, 1人受伤, 以及大量农田、房屋、管道、输电线路损毁, 直接经济损失约1760万元。为查明滑坡破坏特征和成因机制, 采用现场工程地质调查和流固耦合数值模拟方法, 对滑坡体的形态、规模、变形破坏特征与成因机制进行分析总结, 认为袁山村三组滑坡为持续性强降雨诱发的小型高位远程岩土混合型滑坡-碎屑流, 强降雨作用3.5 h之后, 雨水渗至滑面, 导致坡体地下水位迅速抬升, 滑坡岩土体基质吸力和有效应力急剧降低, 破坏模式为牵引式破坏。本文研究成果可为鄂东北地区类似滑坡的机理分析与监测预警工作提供有益的借鉴。

关键词: 持续强降雨; 滑坡破坏特征; 成因分析; 湖北省黄梅县

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)03-0482-10

Chen H J, Zou H, Yin Y, Wang C and Mao S. 2023. Analysis of Characteristics and Causes of Landslide Damage in Group 3 of Yuanshan Village, Huangmei County Under the Influence of Continuous Heavy Rainfall. *South China Geology*, 39(3):482-491.

Abstract: At 4:05 a.m. on July 8, 2020, a small rock-soil mixed landslide with a volume of 40,000 m³ suddenly occurred in the third group of Yuanshan Village, Dahe Town, Huangmei County. The landslide killed 8 people, injured 1 person, and destroyed a lot of farmland, houses, pipelines, transmission lines, and caused a direct economic loss of about 17.6 million yuan. In order to identify the characteristics and cause of landslide, on-site engineering geological survey and fluid-structure coupling numerical simulation were used to analyze and summarize the form, scale, deformation and damage characteristics and cause of the landslide. It is concluded that the landslides in Yuanshancun Group are small and high long-range mixed landslide-debris flow induced by sustained heavy rainfall. After 3.5 hours of heavy rainfall, the rainwater seeps into the sliding surface, causing the rapid rise of the groundwater level of the slope, the sharp decrease of the suction and effective stress of the landslide mass. The landslide failure mode is retrogressive. This paper can provide a useful reference for mechanical analysis, monitoring, and previous warning of similar landslides in northeast of Hubei province.

Key words: continuous heavy rainfall; landslide; damage characteristic; cause analysis; Huangmei County of Hubei Province

收稿日期: 2023-2-16; 修回日期: 2023-4-12

第一作者: 陈慧娟(1988—), 女, 工程师, 从事地质灾害防治工作, E-mail: chenhuijuan1223@qq.com

通讯作者: 邹浩(1983—), 男, 高级工程师, 地质工程专业, 从事岩土体稳定性评价与地质灾害防治工作, E-mail: 258462846@qq.com

2020年7月8日,黄梅县遭遇特大暴雨,当日零时至6时,黄梅县平均降雨量达200 mm,大河镇最大达353 mm,超历史极限值。受特大暴雨影响,凌晨4点5分左右,黄梅县大河镇袁山村三组突发一起小型岩-土混合型滑坡,滑坡已滑方量约40000 m³。滑坡导致5户17间房屋被毁,造成8人遇难,1人受伤,毁田100亩,损毁输电线路400 m、供水管道400 m,直接经济损失约1760万元。滑坡发生后斜坡区域尚有近10000 m³残留体,处于不稳定状态。

对于我国主要的地质灾害类型——滑坡灾害,目前已有较为成熟的研究成果(黄润秋,2007;许强等,2019;刘道涵等,2020;段钊等,2023;薛宏程等,2023;吴爽爽等,2023),同时国内外学者针对降雨型滑坡成因机制也开展了大量研究。许建聪等(2005)研究了强降雨对浅层滑坡稳定性的影响规律,认为强降雨是诱发滑坡失稳的主要因素;蒋中明等(2012)研究了降雨作用下厚覆盖层边坡暂态孔隙水压力的变化规律,从而查明降雨型滑坡变形破坏机理;代贞伟等(2016)对三峡库区杨家水井滑坡的变形失稳机理进行了详细研究,认为持续降雨是滑坡发生的直接诱发因素。此外,还有不少学者从不同角度研究降雨型滑坡及降雨对滑坡发生的影响(简文星等,2013;王宇等,2013;张玉等,2013;汪丁建等,2016;覃小华等,2017;杨宗信等,2020;肖捷夫等,2021;常宏,2022;丛凯等,2022;卢永兴等,2022;文豪等,2022;赖波等,2023),研究成果丰硕。但以上研究多通过解析方式推导得到降雨入渗条件下滑坡孔隙水压力分布,并利用极限平衡法求解滑坡安全系数,较少考虑滑坡渗流与应力应变之间的耦合关系,以及实际地形对滑坡变形破坏机制的影响,不能准确反映降雨入渗条件下滑坡渗流与稳定性的演化过程。目前,综合考虑滑坡实际地形开展降雨型滑坡流固耦合研究仍显不足。

鄂东北黄冈等地区的滑坡多为浅层滑坡,并集中发生于强降雨后,具有典型的降雨诱发型滑坡特征(邹浩等,2016,2021)。深入揭示浅层降雨滑坡成因机制对该区区域滑坡监测预警与治理至关重要(李伟等,2020;许强等,2020;张凯翔,2020;江鸿彬,2021;邵安阳等,2023)。鉴于此,本文基于现场工程地质调查,在查明黄梅县袁山村三组浅层降雨滑坡工

程地质特征并初步分析滑坡成因机制的基础上,建立滑坡数值模型进行流固耦合模拟,详细分析降雨入渗条件下滑坡渗流和应力演化过程,依据滑面应力法计算滑坡时变稳定性,查明滑坡成因机制,以期为该区类似滑坡成因机制分析和监测预警提供参考。

1 滑坡概况

袁山村三组滑坡位于湖北省黄冈市黄梅县大河镇袁山村,距大河镇6.3 km、黄梅县城11.5 km,从大河镇到滑坡区,有S308、X233等公路及沿途村镇公路相通,地理坐标为东经115°46′43.07″,北纬30°7′25.86″。滑坡区多年平均气温16.7℃,多年平均降水量为1369.34 mm,全年以6月降雨量最多,平均212.3 mm;12月降水量最少,平均仅39.9 mm,相差172.4 mm。

研究区属构造侵蚀丘陵区,所处斜坡上陡下缓,其剖面表现为凹形,坡体平均坡度约31°,坡体植被发育。出露岩性主要为第四系滑坡堆积层(Q^{del})和燕山晚期二长花岗岩($\gamma\gamma_s^3$),二长花岗岩表层风化强烈,强风化层厚度约1~2 m。水文地质条件较简单,地下水类型可分为第四系松散岩类孔隙水和岩浆岩、变质岩等基岩裂隙水,第四系松散岩类孔隙水主要赋存于第四系残坡积物中,主要接受大气降水补给,以上层滞水为主,含水量少,基岩裂隙水富水性总体贫乏,涌水量小于10 t/d,在滑坡坡脚处以泉水形式出露,并形成小水潭。

2 滑坡基本特征

2.1 形态特征

滑坡区平面呈舌形(图1a),整个滑坡体及堆积区长500 m,均宽约80 m,水平滑动距离约350 m,为小型高位远程岩土混合型滑坡-碎屑流,总体上可分为滑动区、流通运移区和堆积区(图1b)。

滑动区:平面呈舌形,剖面呈上陡下缓,总体坡度约31°,主滑方向200°。滑动区滑坡后缘高程240 m,剪出口高程180 m,相对高差60 m,纵长约60 m,均宽约80 m,滑体平均厚度4 m,滑坡体方量19200 m³。滑体顺坡向整体下错25 m,后壁坡度约



图1 黄梅县袁山村三组滑坡平面形态(a)及工程地质平面示意图(b)

Fig. 1 Landform plane form (a) and engineering geological plan (b) of Yuanshan landslide, Huangmei County

图a为无人机拍摄于2020年7月;1.滑坡范围;2.第四系人工填土;3.第四系滑坡堆积层;4.燕山晚期二长花岗岩;5.等高线;6.剖面线

50°。滑动区失稳后仍保留 10000 m³残坡积物,滑坡左侧以松散物下滑形成的陡坎为界,残坡积物较厚,后侧以下错形成的滑坡壁为界,坡体表面松散

物厚度较薄,基岩出露;滑坡右侧以岩体下滑形成的破碎带和下错陡坎为界,岩石出露,存在较多的危岩体(图2)。

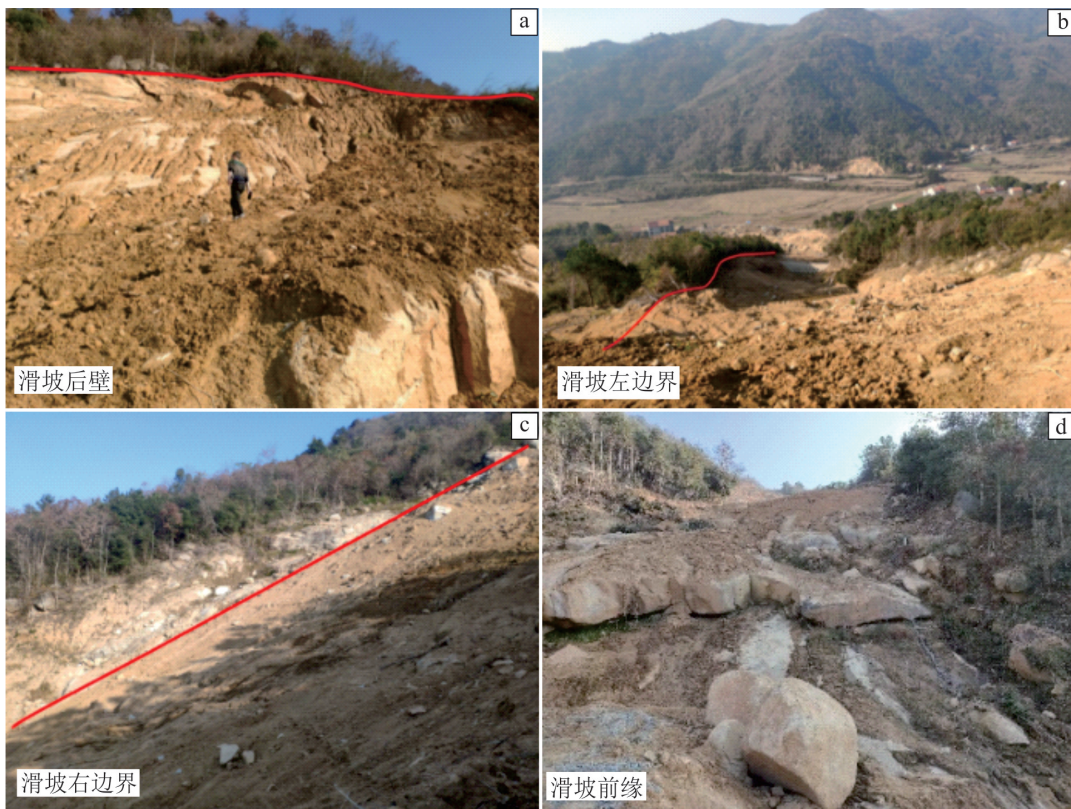


图2 黄梅县袁山村三组滑坡边界照片

Fig. 2 Photos showing boundary of Yuanshan landslide, Huangmei County

流通运移区:滑坡发生滑动后,饱水滑坡体顺斜坡向往下滑动,铲刮斜坡中部高程 100~180 m 坡体残坡积层,形成流通运移区,流通运移区平面呈长条形,平均宽度约 30 m,长度约 80 m,由于滑坡铲刮效应叠加降雨作用,导致流通运移区斜坡岩土体失稳,滑体平均厚度约 3 m,体积约 7200 m³。

堆积区:堆积区整体呈扇形,扇长 150 m,扇宽 90 m,面积约 6800 m²,平均厚度约 3 m。

2.2 结构特征

滑坡主滑方向地层剖面特征见图 3a。滑体物质主要由表层第四系残坡积物及下部全-强风化花岗岩及球状风化花岗岩大块石组成,残坡积物成分为土黄色粉质粘土夹碎石,呈可塑-硬塑状,结构松散,透水性较强,主要为花岗岩风化产物

(图 3b)。残坡积物自上而下粒径依次变小,碎石含量依次降低,滑坡顶部土石比约 7:3,底部土石比约 8:2,碎石成分主要为燕山晚期二长花岗岩,块径 2~5 cm,棱角-次棱角状,分布于斜坡体中下部。滑体中部左缘第四系覆盖物较厚,为 5~6 m,而滑坡后缘、前缘、右缘基岩出露,其中滑坡后缘岩体风化程度高,坡体后缘及右缘存在较多危岩体及孤石,块径大于 1 m,呈棱片状,易沿坡面滚落。强风化花岗岩结构破碎,呈沙状,性质软弱,遇水软化,手捏易碎,厚度 1~2 m。滑床岩性为中风化花岗岩,灰白色-浅肉红色,中粒花岗结构,块状构造,裂隙弱发育,岩体结构完整性较好。滑坡滑面为强、弱风化花岗岩接触面,滑面形态呈弧形。

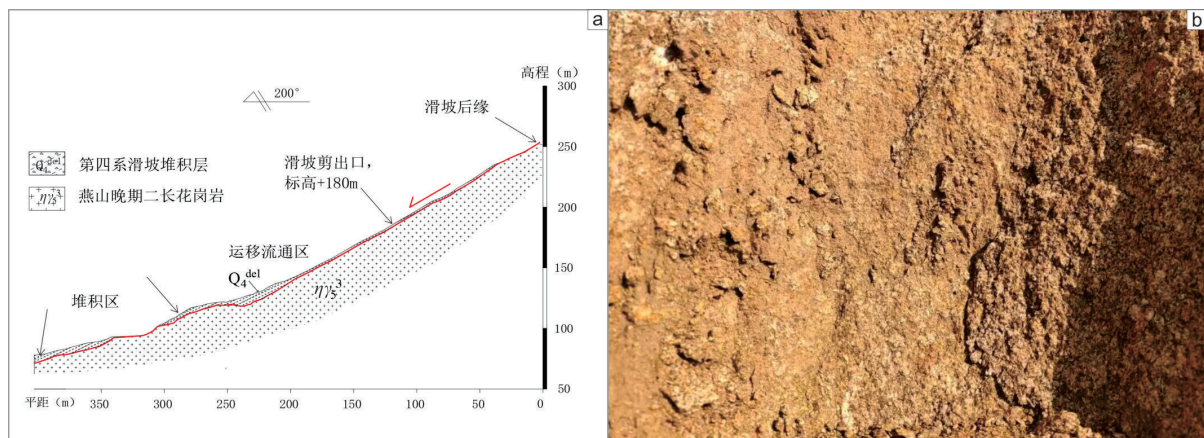


图 3 黄梅县袁山村三组滑坡主滑剖面图(a)及滑体物质中的残坡积物(b)

Fig. 3 Main sliding profile (a) and residual slope deposits in the sliding material (b) of Yuanshan landslide, Huangmei County

3 渗流与稳定性分析

采用流固耦合方式对滑坡渗流、应力和稳定性进行数值模拟分析,揭示滑坡成因机制。

3.1 理论基础

降雨条件下滑坡孔隙水二维流动连续性方程可由达西公式给出:

$$\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 v_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 v_w}{\partial y^2} + \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: k_x 与 k_y 为 x, y 方向的渗透系数, v_w 为渗

流速度, γ_w 为水的重度, θ_w 为体积含水量函数。

简化起见,不考虑滑坡岩土体的各向异性,则 $k_x = k_y = k$, 非饱和状态下,土体渗透系数函数及体积含水率函数可用 VG 模型表示:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{(1-\frac{1}{n})}} \quad (2)$$

$$k = k_s \frac{\{1 - (\alpha \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \psi)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

式中: θ_r, θ_s 分别为残余含水率、饱和含水率, α 为进气值的倒数, h 为吸力水头, ψ 为吸力压力

(kPa), k_s 为饱和渗透系数, m, n 为拟合参数。

当土体处于非饱和状态时,非饱和区域的抗剪强度 τ_f 可用Fredlund双应力变量表示:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (5)$$

式中: c' 为有效粘聚力, φ' 为有效内摩擦角, $(\sigma_n - u_a)$ 为净法向应力, $\tan \varphi^b$ 为与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 有关的参数, 联合式(2)可得:

$$\tan \varphi^b = \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (6)$$

当土体处于非饱和状态时,土体粘聚力表达式为:

$$C = c' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (7)$$

式中: C 为非饱和土体的表观粘聚力。

由于该滑坡纵向长度 125 m, 平均滑面深度约为 4 m, 滑面深度相较于滑坡纵向长度来说很小, 因此对其稳定性分析可采用无限长边坡模型进行分析, 其稳定性计算公式为:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (8)$$

其中: τ 为滑面剪应力。

当滑坡模型流固耦合计算完成后, 即可得到滑面处正应力和剪应力值, 进而可根据式(8), 得到无限长滑坡稳定系数。

3.2 模型设置

利用GeoStudio软件开展滑坡数值模拟分析, 滑坡数值模型见图4, 模型水平长度 309.7 m, 竖直长度为 252.8 m。依据工程地质调查结果, 将模型材料分为花岗岩残积土和花岗岩两组, 花岗岩残积土为滑坡发生的主要土层, 为详细分析降雨入渗过程中该地层的渗流场和应力场演化, 对该地层网格进行加密划分, 网格单元类型为四面体和三角形混合单元, 网格节点总数为 18082, 网格总数为 17757。

模型底边界为位移全约束, 左右边界为位移法向约束, 边坡坡面施加降雨边界, 据当日实际降雨监测数据可知, 滑坡发生当日零时至 6 时降雨量达 353 mm, 因此降雨强度设置为 1.63×10^{-5} m/s, 降雨历时设置为 6 h。根据现场测定数据, 初始地下水位设定为基岩面以下 1 m。

各地层岩土体材料性质根据室内试验和工程地质类比确定, 具体参数取值见表1, 残积土层与基岩本构模型均设定为线弹性模型。滑坡降雨流固耦合计算通过Sigma/W模块完成, 随后基于应力计算结果, 采用式(8)计算滑坡不同降雨时刻的稳定性。为更好的展现滑坡渗流与应力应变演化过程, 在滑坡数值模型滑动区上设置了两个监测剖面 JC1 和 JC2, 剖面方向均为竖直向下, 具体位置见图4。

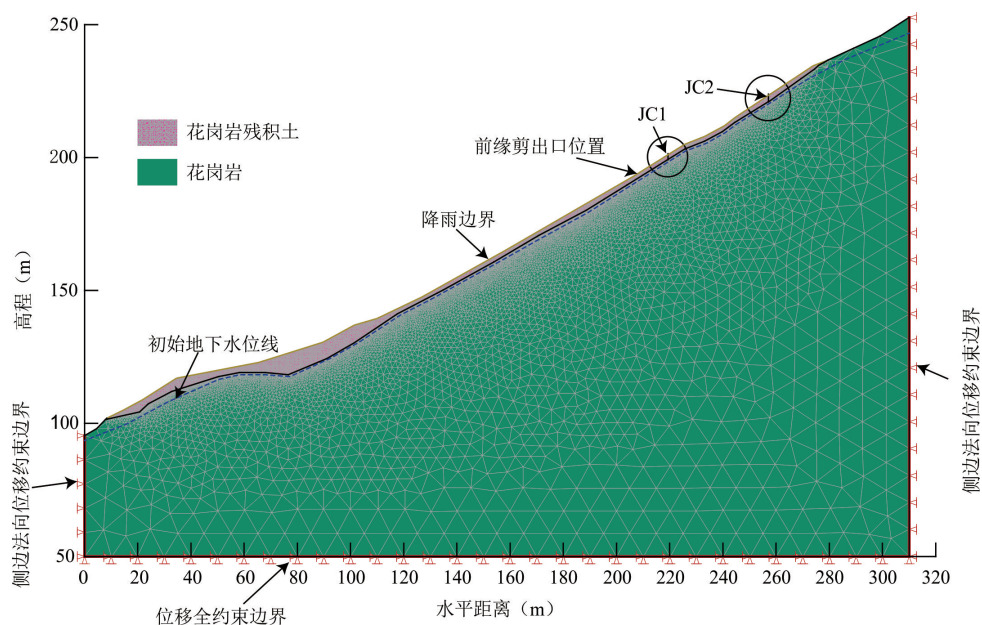


图4 黄梅县袁山村三组滑坡数值模型

Fig. 4 Numerical model of Yuanshan landslide, Huangmei County

表 1 黄梅县袁山村三组滑坡花岗岩残积土模型参数

Table 1 Parameters of granite residual soil model of Yuanshan landslide, Huangmei County

天然重度 γ (kN/m ³)	有效粘聚力 c' (kPa)	有效内摩擦角 φ' (°)	弹性模量 (MPa)	泊松比 μ	饱和渗透系数 k (m/s)	饱和含水率 θ_s	残余含水率 θ_r	进气值 $1/\alpha$ (kPa)	形状参数 n
18.5	5	33	56	0.33	1.63×10^{-5}	0.42	0.244	7.04	1.6

3.3 计算结果

3.3.1 渗流计算结果

袁山村三组滑坡渗流计算结果如图 5 所示,初始情况下 JC1 和 JC2 监测剖面孔隙水压力均为负值,且孔隙水压力随着距滑面距离减小而线性增大,JC1 监测剖面初始(0 sec)孔隙水压力为-40~-5 kPa(图 5a),JC2 监测剖面初始孔隙水压力为-43~-7 kPa(图 5b)。

当降雨进行至第 30 min 时,浅表层 1 m 深度范围内孔隙水压力变化明显,且孔隙水压随深度增大而逐渐减小,坡体表面趋于饱和,1 m 深度以下范围孔隙水压力基本无变化;随着降雨时间持续增

长,雨水持续向下入渗,从图中可以看出,孔隙水压变化深度以每 0.5 m/30 min 的速度向下延伸,当降雨进行至第 3.5 h 时,JC1 监测剖面基本饱和,各监测点孔隙水压基本一致,约为-3 kPa;在第 3.5 h 之后,JC1 监测剖面各监测点孔隙水压急速增大,部分监测点孔压由负值转为正值,且距离滑面越近,孔压增加幅度越大,表明雨水入渗至滑面部位,浸润线迅速抬升,当降雨进行至 6 h 时,各监测点孔压均为正值,表明浸润线升至坡表。JC2 监测剖面的孔压在第 4.5 h 之后开始急剧增大,变化规律与 JC1 监测剖面基本一致,表明滑坡后缘孔隙水压变化略滞后于前缘。

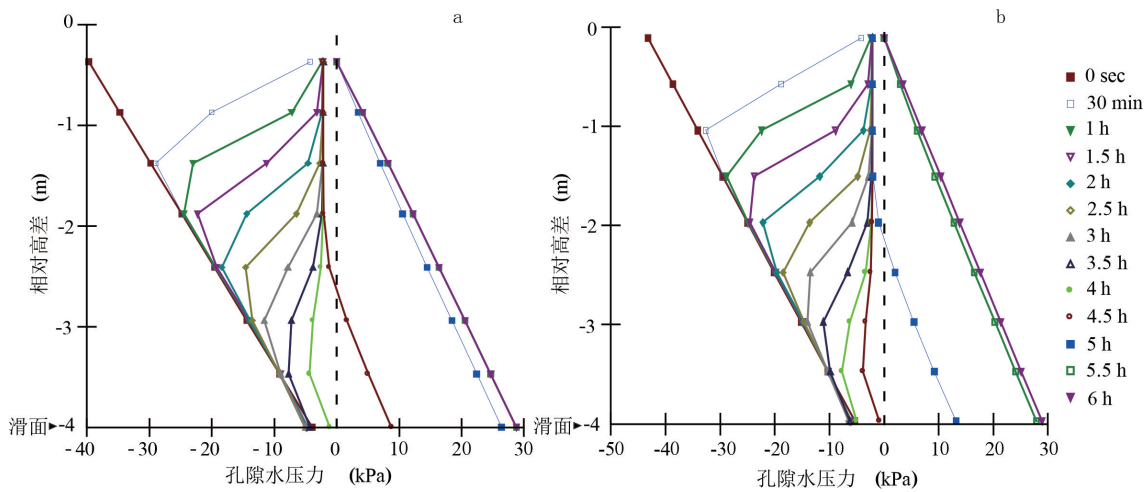


图 5 黄梅县袁山村三组滑坡 JC1(a)和 JC2(b)监测剖面孔隙水压力变化曲线

Fig. 5 Pore water pressure change curve of monitoring profile JC1 (a) and JC2 (b) of Yuanshan landslide, Huangmei County

两个监测剖面底部为滑面位置,滑面位置处孔隙水压变化和体积含水率变化曲线如图 6 所示,从图中可以看出,降雨前 3.5 h,滑面处孔隙水压和体积含水率基本保持不变,负孔隙水压有略微的增大,体积含水率有略微的降低,这主要是由于雨水

入渗过程中,坡体部分封闭气体来不及排出,渗流对封闭气体产生一定挤压作用,导致负孔隙水压略微增大,体积含水率略微降低。降雨初期坡体处于非饱和状态,由于负孔压作用,坡体渗透性较低,雨水入渗缓慢,对滑面处孔隙水压和体积含水率影响

不大;第3.5 h之后,雨水已缓慢入渗至滑面部位处,监测剖面各监测点的负孔隙水压均大幅降低,并趋近于0,这使得坡体渗透性增强,雨水可以快速入渗至滑面位置,从而迅速提升滑面处孔隙水压和体积含水率。

从以上分析可以看出,由于坡体干燥,负孔隙水压力较大,渗透性较弱,强降雨3.5 h之内,雨水

入渗缓慢,大量雨水以坡面径流方式向外排泄,当降雨进行至4 h时,雨水入渗至滑面,整个滑坡体基本趋近于饱和状态,滑体渗透性增大,雨水可以快速渗入坡体,在随后两个小时之内,浸润线逐渐抬升坡表,滑面处孔隙水压和体积含水率逐渐增大,这将降低滑面处有效应力和表观粘聚力,不利于滑坡稳定。

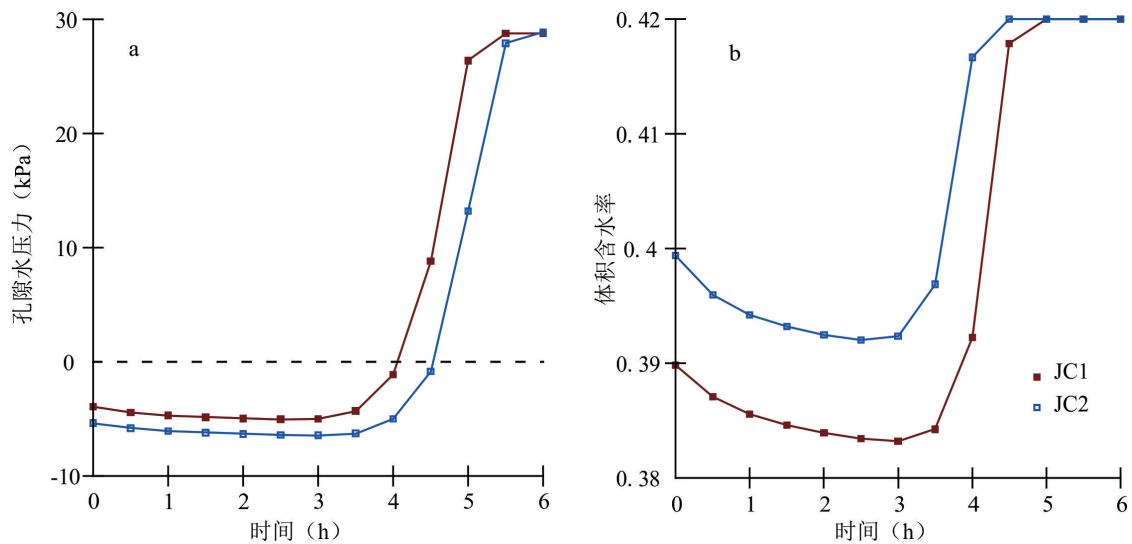


图6 黄梅县袁山村三组滑坡监测孔滑面处孔隙水压力(a)及体积含水率(b)变化曲线

Fig. 6 Variation curve of pore water pressure (a) and volume water content (b) change curve at sliding surface of the landslide monitoring hole in Yuanshan landslide, Huangmei County

3.3.2 应力计算结果

图7为JC1和JC2监测剖面底部滑面处有效应力路径。从图中可以看出在强降雨3.5 h之内,两处监测点有效应力路径基本无变化,JC1滑面和JC2滑面平均有效主应力(p)基本维持在70 kPa和65 kPa左右,偏差应力(q)基本维持在30~28 kPa之间,JC1偏差应力大于JC2,表明相同条件下JC1滑面较JC2滑面更易发生失稳,此时应力路径均位于有效应力破坏主应力线 K_f' 右侧,表明两者处于稳定状态;当降雨进行到第3.5 h~4.5 h时,两者应力路径迅速向左平移,逐步逼近 K_f' 线,JC1平移幅度大于JC2,这说明滑面处孔隙水压力急剧升高,导致两者平均有效主应力降低,偏差应力基本保持不变;当降雨进行至第5 h时,两者有效应力路径继续

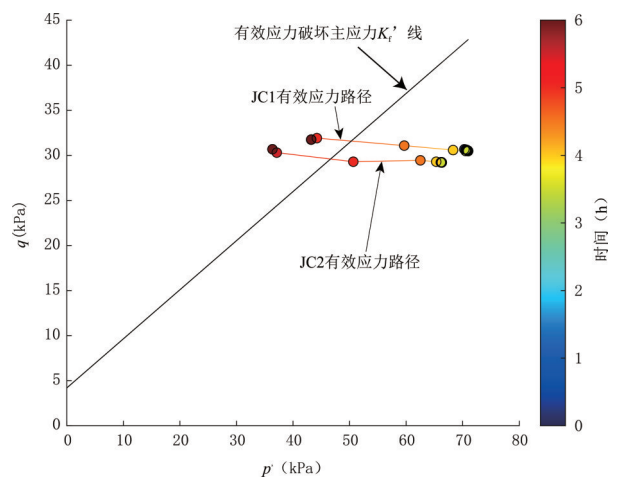


图7 黄梅县袁山村三组滑坡监测孔滑面处有效应力路径
Fig. 7 Effective stress path at sliding surface of monitoring hole of Yuanshan landslide, Huangmei County

向左平移,JC1有效应力路径平移至 K_f' 线左侧,JC2有效应力路径仍位于 K_f' 线右侧,表明此时JC1滑面处率先发生失稳,JC2滑面处接近临界失稳状态;当降雨5.5 h之后二者有效应力路径皆位于 K_f' 线左侧,表明二者皆处于失稳状态。

由以上分析可知,滑面处有效应力路径变化趋势与滑面处孔隙水压力变化息息相关,孔隙水压力的急剧增大将迅速降低滑面处平均有效主应力,对偏差应力影响较小,使得有效应力路径迅速向左平移并逼近 K_f' 线,不利于滑面稳定,滑坡前缘有效应力路径变化速度快于后缘,在第5 h时,滑坡前缘率先发生失稳,第5.5 h时,滑坡后缘也发生失稳,滑源区滑坡变形破坏模式呈现牵引式破坏特征。

3.3.3 稳定性计算结果

图8a为JC1和JC2监测剖面底部滑面处表观

粘聚力变化曲线,从图中可以看出:表观粘聚力随时间的变化趋势与该处孔隙水压力随时间的变化趋势(图6a)相反,在前3.5 h之内,表观粘聚力基本保持不变,并有略微的增大,这与负孔隙水压略微增大(图6a)有关,该时段内JC1和JC2滑面处表观粘聚力初始值约为7.2 kPa和7.8 kPa,JC2滑面处表观粘聚力高于JC1;降雨3.5 h之后,表观粘聚力急剧降低,并在第5 h降至土体有效粘聚力,这与滑面处孔隙水压力急剧增大(图6a)紧密相关。

图8b为JC1和JC2监测剖面底部滑面处安全系数变化曲线,从图中可以看出:在前3.5 h之内,安全系数基本维持在1.4左右不变,坡体处于稳定状态,3.5 h之后,安全系数急剧下降,JC1和JC2安全系数变化规律基本一致,JC2安全系数变化滞后JC1约30 min,JC1在第5 h率先降到1以下发生失稳,随后第5.5 h,JC2安全系数也降到1以下发生失稳。

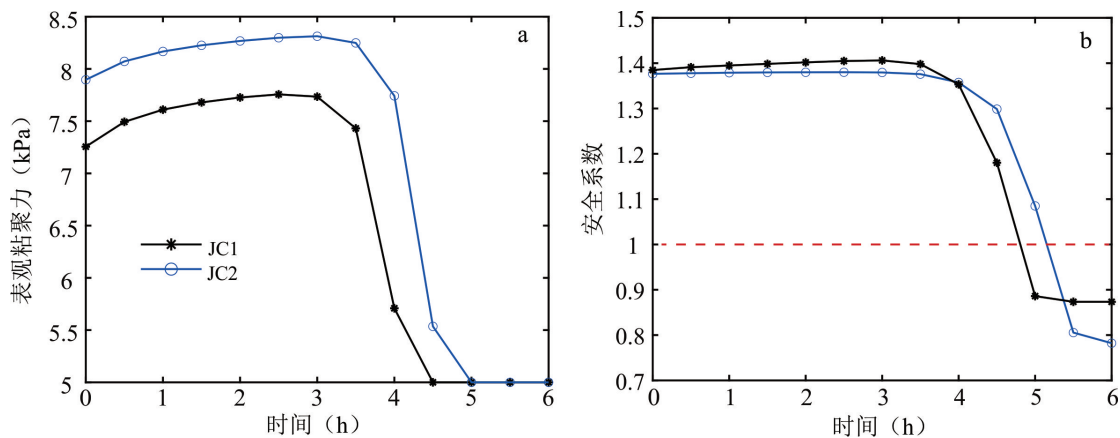


图8 黄梅县袁山村三组滑坡监测孔滑面处粘聚力(a)和安全系数(b)变化曲线

Fig. 8 Change curve of cohesion (a) and safety coefficient (b) at the sliding surface of the landslide monitoring hole in Yuanshan landslide, Huangmei County

3.4 滑坡成因分析

依据现场工程地质调查结果和数值模拟分析,袁山村三组滑坡成因可分为内在控制性因素和外在诱发因素两方面。

(1) 独特的地质条件为滑坡内因

滑动区地形陡峭,平均坡度达 31° ,陡峭的地形不利于滑坡稳定,为滑坡失稳创造了良好的动力条

件;滑坡前缘地形开阔,为滑坡失稳提供了良好的临空条件,同时也为滑坡高速远程运动提供了良好的通道和堆积条件;滑体物质主要为第四系残坡积物粉质粘土夹碎石、强风化花岗岩,结构松散,遇水易软化,强降雨条件下,雨水容易入渗滑坡体内,削弱表观粘聚力,不利于滑体稳定。

(2) 降雨为滑坡主要诱发因素

滑坡发生前遭遇了持续强降雨,根据黄梅县降雨资料显示,滑坡区域六小时降雨量达353 mm,超历史极限值。在暴雨入渗和冲刷下,初始3.5 h内,入渗速度较慢,暴雨主要以地表径流方式向外排泄,雨水入渗作用下,岩土体从坡面向滑面内部逐渐饱和,而滑面处孔隙水压基本保持不变,有效应力路径、表观粘聚力和稳定性也基本保持不变;在3.5 h之后,雨水入渗至滑面,坡体基本饱和,岩土体渗透性能增大,雨水得以迅速入渗,导致坡体地下水水位迅速抬升,滑面处孔隙水压力迅速增大,基质吸力丧失,使得滑面处表观粘聚力下降至有效粘聚力水平,下降幅度约为2~3 kPa,滑面抗滑强度下降;另一方面,滑面处孔隙水压的急剧增大使得其有效应力路径相应的迅速左移,并逐渐逼近 K_f' 线,滑面处有效应力降低,安全系数也由初始的1.4左右迅速降低至1附近,并在第5 h,JC1安全系数率先降到1以下,在第5.5 h,JC2安全系数也降到1以下,滑坡在降雨进行至5.5 h发生整体失稳,失稳模式为牵引式,这与现场调查结果吻合。

基于以上分析可知,流固耦合分析可合理的揭示降雨条件下浅层残积土滑坡的渗流场和应力场变化规律,并对滑坡稳定性做出准确预测,在实际的滑坡监测预警工作中,可选用该方法对滑坡稳定性进行评价和预测。

4 结论

通过对黄梅县大河镇袁山村三组滑坡进行现场工程地质调查和流固耦合数值模拟,对滑坡体的形态、规模、变形破坏特征与成因机制进行了研究,得到以下结论:

(1)陡峭的地形为滑坡提供良好的临空条件,结构松散的残坡积粉质黏土夹碎石土和强风化花岗岩为滑坡形成提供了良好的物质基础,持续性强降雨是滑坡主要的诱发因素。

(2)在6 h强降雨作用过程中,前期3.5 h强降雨对滑坡稳定性影响较弱,雨水多以径流方式排出,雨水入渗速率较慢;强降雨进行3.5 h之后,坡体基本达到饱和,岩土体渗透性强,孔隙水压力急剧上升,导致残积土层表观粘聚力急剧降低、有效应

力快速减小,从而使得滑坡抗滑力急剧降低,稳定系数从1.4降低至1以下,滑坡失稳,滑坡后缘安全系数降低速度略慢于前缘,滑坡破坏模式为牵引式破坏。

(3)袁山村三组滑坡的流固耦合分析结果与实际情况基本符合,表明本文分析方法可合理预测或再现强降雨作用下浅层残积土滑坡渗流场和应力场演化过程,对滑坡稳定性作出准确评价,可为类似滑坡的监测预警工作提供参考。

参考文献:

- 常宏.2022.三峡库区潜在顺层岩质滑坡识别的宏观判据[J].华南地质,38(2):265-272.
- 丛凯,魏洁,杨亚兵,陈龙,张彤炜,李生,付舟,张彤文,张帆宇.2022.基于坡表变形分析与降雨响应模拟的立节北山滑坡运动特征[J].地质科技通报,41(6):54-65.
- 代贞伟,魏云杰,侯时平.2016.三峡库区杨家水井滑坡变形失稳机理研究[J].工程地质学报,24(4):527-534.
- 段钊,张庆,李明,朱锬,吴延斌.2023.易侵蚀层厚度对滑坡运动过程与堆积特征影响的模型试验研究[J].西安科技大学学报,43(4):733-742.
- 黄润秋.2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,26(3):433-454.
- 简文星,许强,童龙云.2013.三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J].岩土力学,34(12):3527-3533+3548.
- 江鸿彬.2021.初论地质灾害监测预警体系建设[J].资源环境与工程,35(4):526-529.
- 蒋中明,曾铃,付宏渊,何忠明.2012.降雨条件下厚覆盖层边坡的渗流特性[J].中南大学学报(自然科学版),43(7):2782-2788.
- 赖波,赵风顺,江金进,江山,江宁,李俊生.2023.基于AHP-信息量法的珠海市地质灾害风险评价[J].华南地质,39(1):147-156.
- 刘道涵,刘磊,陈长敬,刘圣博.2020.基于电阻率参数的滑坡体综合地球物理探测研究[J].华南地质,36(3):240-245.
- 刘伟,张庚丽,费红霞.2020.十堰市地质灾害专业监测成功预警预报分析及思考[J].资源环境与工程,34(2):243-246.
- 卢永兴,陈剑,霍志涛,李毅,蓝景周,聂小力,岳连雄.2022.降雨与开挖作用下黄土滑坡失稳过程分析:以关中地区长武县杨厂村老庙滑坡为例[J].地质科技通报,41(6):95-104.
- 邵安阳,杜琦,王浩,罗鹏,魏雨溪.2023.湖北省地质灾害成功预报案例和模式浅析[J].资源环境与工程,37(3):

- 328-333+364.
- 覃小华,刘东升,宋强辉,吴越,张裕,叶泳.2017.强降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的基岩型层状边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,39(6):1065-1073.
- 汪丁建,唐辉明,李长冬,葛云峰,易贤龙.2016.强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J].岩土力学,37(2):439-445.
- 王宇,李晓,张搏,黎明.2013.降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J].水利学报,44(4):416-425.
- 文豪,陈国庆,李红,马金根,吴章雷.2022.考虑降雨滑坡多级滑动的改进传递系数法研究[J].地质科技通报,41(6):162-168.
- 吴爽爽,胡新丽,孙少锐,魏继红.2023.间歇式滑坡变形力学机制与单体预警:案例研究[J/OL].岩土力学. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.1780>
- 肖捷夫,李云安,胡勇,张申,蔡浚明.2021.库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J].岩土力学,42(2):471-480.
- 许建聪,尚岳全,陈侃福,杨建锋.2005.强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,24(18):3246-3251.
- 许强,董秀军,李为乐.2019.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),44(7):957-966.
- 许强,彭大雷,何朝阳,亓星,赵宽耀,修德皓.2020.突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究:以甘肃黑方台为例[J].工程地质学报,28(1):111-121.
- 薛宏程,彭杏瑶,马倩,卿正阳.2023.考虑阻力作用的碎石土滑坡涌浪数值模拟方法研究[J].人民长江,54(7):153-158.
- 杨宗信,王礼勇,石莉莉,付校龙,刘世皓,乔建平.2020.降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J].岩石力学与工程学报,39(2):272-285.
- 张玉,徐卫亚,邹丽芳,孙怀昆.2013.降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J].岩土力学,34(3):833-841.
- 张凯翔.2020.基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状[J].中国地质灾害与防治学报,31(6):1-11.
- 邹浩,陈金国,何文娟,葛长山.2021.鄂东黄冈地区堆积层滑坡及接触面物理力学特性研究[J].资源环境与工程,35(2):188-195.
- 邹浩,陈金国,吴恒,王超.2017.2016年多轮强降雨影响下黄冈市地质灾害发育规律浅析[J].资源环境与工程,31(6):764-768.