

半边街滑坡形成机制与基于有限元模拟的多场演化特征

郑志文, 孙玄

(湖北省神龙地质工程勘察院有限公司, 武汉 430050)

摘要: 半边街滑坡属于典型的降雨型堆积层滑坡,在降雨作用下产生了较大程度的变形破坏,仍在继续发展。对半边街滑坡地质条件与破坏特征进行了调查与分析,阐述了滑坡的变形机制。建立基于有限元的滑坡数值模型,采用渗流-应力耦合分析方法,研究了不同降雨工况下滑坡的稳定性及渗流场、位移场演化特征。结果表明滑坡位移主要受控于渗流场变化,在连续数天的暴雨或大暴雨工况下,极有可能产生整体滑动。研究成果为今后此类滑坡的预警、治理工程提供重要的理论依据。

关键词: 滑坡; 降雨入渗; 数值模拟; 稳定性; 渗流场

中图分类号: X141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)14-0281-08

作为一种较为常见的地质灾害,滑坡广泛分布于我国山区尤其是西南地区^[1],其预防、治理工作往往伴随诸多难题^[2-4]。降雨是诱发滑坡最重要的因素之一^[5-7],降雨入渗往往使滑坡体内孔隙水压力升高,重度增加,非饱和基质吸力降低,对滑坡稳定性的影响具有重要意义。尤其是近些年来,随着极端气候的增加,降雨诱发滑坡的案例更是屡见不鲜^[8-11]。

半边街滑坡是一个典型的降雨诱发型堆积层滑坡。2021年5月,受长时间降雨影响,滑坡后缘开始出现房屋开裂、地面裂缝等变形情况,每当雨季或下部溪沟发洪水时,地面、墙体的开裂、地面沉降情况仍在继续发展。滑坡变形规律显示,降雨作用是其产生变形和局部破坏的最主要因素,研究该滑坡在降雨作用下的整体稳定性及滑坡体内多场响应特征,是保证坡上居民的生命财产安全以及G213国道的安全运营的重要保障,对今后该地区相似滑坡的预防预警和治理工作都具有十分重要的意义。

降雨对滑坡稳定性的影响是地质灾害防控领域的重要课题^[12],学者们开展了众多相关研究。石诚等^[13]选择降雨强度、降雨持续时间、坡比、坡高、岩土体渗透系数5个参数,采用灰色关联分析方法,进行降雨入渗对边坡稳定性影响的敏感性分析,结

果表明,降雨强度和降雨持续时间是主要影响因素;Marin和Velásquez^[14]通过建立相关物理模型和参数分析研究了水力特性对边坡稳定性的影响及浅层滑坡降雨阈值的确定;石振明等^[15]提出了考虑降雨入渗的多层非饱和土边坡稳定性分析方法,低强度长历时的降雨易诱发深层滑动,高强度短历时的降雨易诱发浅层滑动。但值得注意的是,降雨诱发型滑坡具有入渗机理、多场耦合作用复杂的特点,不同的降雨条件下,滑坡稳定性变化规律也有不同,其相关研究工作具有较高难度。考虑渗流-应力耦合的滑坡多场分析是解决此类问题的必要方法。

数值模拟分析具有快速、低成本以及精确度高的特点^[16],是研究滑坡最常用的方法之一^[17-21]。本文采用有限元数值模拟软件GeoStudio中的SLOPE/W模块和SEEP/W模块进行渗流-应力耦合分析计算,模拟在连续降雨作用下半边街滑坡的稳定性变化、渗流场、位移场、应力场等多场演化特征,确定降雨作用对滑坡的影响。研究成果为今后此类滑坡的预警、预防、治理工作提供一定的理论依据。

1 滑坡背景

1.1 滑坡概况

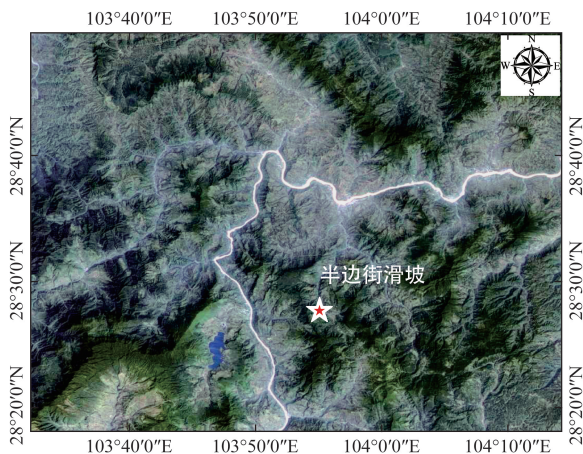
研究区地处云贵高原与川西南山地过渡地带,

收稿日期: 2024-04-09

作者简介: 郑志文(1991—),男,湖北孝感人,工程师,研究方向为工程地质勘查、地质环境调查、地质灾害防治;孙玄(1990—),男,湖北武汉人,工程师,研究方向为工程地质勘查、地质环境调查、地质灾害防治。

属构造侵蚀高中山地貌类型,区内构造强烈,山脉走向多呈南北向或北东向延伸。内地势南高北低,相对高差超过1 700 m。全区88.3%以上的面积为山地(图1)。据气象站资料统计,研究区年平均降雨量为998.2 mm,5—9月为雨季,降雨量占全年的80%,日最大降雨量为60~80 mm,最长连续降雨28 d。

半边街滑坡位于中村河左岸,G213国道横穿滑坡体(图2)。2021年5月,受连续近半月的降雨影响,滑坡上方出现房屋开裂、地面裂缝等变形情况。一旦滑坡发生整体破坏,将直接威胁村民41户164人的生命财产安全,以及G213国道的通行安全。滑坡开裂变形较严重,且当地政府已进行相应监测工作。结合各种资料进行分析,滑坡平面形态为圈椅状,后缘位于老G213国道附近,前缘临近中村河。滑坡整体宽约150 m,面积约24 000 m²,主滑方向为225°。滑体厚度平均为10 m,滑体放量约为 24×10^4 m³,属于中层中型牵引+推移式土体滑坡。



基于中国地图 GS(2024)0650 号制作,底图无修改

图1 研究区概况

1.2 滑坡区地质条件

滑坡区位于中村背斜近核部,受强烈构造挤压。出露的地层主要有侏罗系中统自流井组砂岩、泥岩(图3)。浅层岩体较为破碎,风化严重,构造裂隙发育,岩层产状较平缓,为 $205^\circ \angle 8^\circ$ 。滑坡地处溪沟右岸,地势总体上北高南低,坡面形态呈阶梯状,上下陡而中部缓,上部地形坡度为 $25^\circ \sim 38^\circ$,中部为台阶状缓坡,下部地形坡度为 $30^\circ \sim 70^\circ$ 。

坡体主要为第四系崩坡积物,上覆一定厚度的第四系土体,结构松散,力学性质一般,滑体主要为含碎块石粉质黏土与碎石土。经钻探、井探、取样等手段揭示,滑床物质主要为侏罗系中统自流井组全风化泥岩、强风化泥岩及中风化砂岩,基岩风化作用较强烈,节理裂隙发育,但整体透水性仍较差。区内人类工程活动主要表现为道路、房屋修建切坡开挖,其次为当地农耕活动,对坡体改造强烈。

1.3 变形破坏特征

滑坡区开裂变形迹象在前、中、后缘均有体现,但在滑坡后缘一带,特别是公路下排房屋及路面,



图2 半边街滑坡航拍

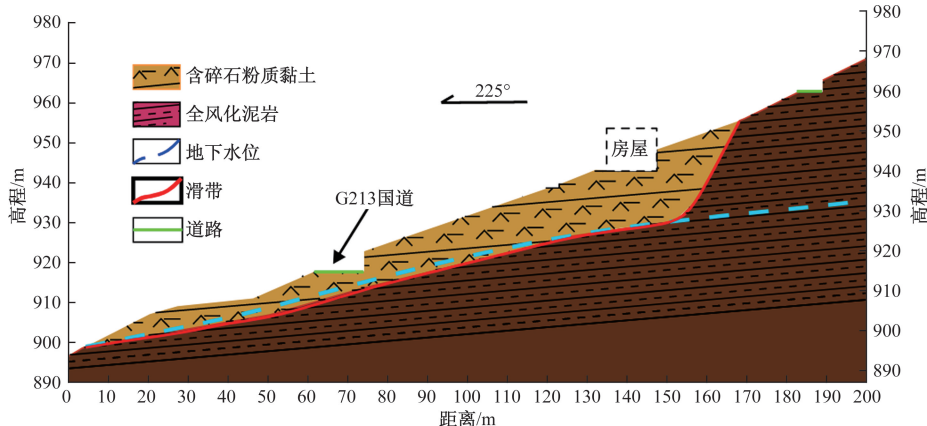


图3 半边街滑坡主滑方向剖面

变形现象分布较为集中,现场调查的滑坡主要变形迹象如图 4(a)~图 4(f)所示,具体拍摄地点如图 2 所示。

滑坡后缘处产生了较多变形迹象,主要为路面沉降和地面裂缝。裂缝大多数张拉裂缝,走向多于滑坡主滑方向近垂直,部分为不均匀沉降裂缝。公路路面产生了较明显的沉降[图 4(a)],下座为 5~15 cm,变形区长度为 24 m。公路下方房屋也受到滑坡极大影响,产生多处墙体开裂情况[图 4(b)~图 4(d)],对当地住户生命财产安全财产极大威胁,当地政府已采取贴片监测等多种方法对裂缝进行监测。据监测结果,房屋墙体裂缝宽度普遍在 1~15 cm。

滑坡中部 G213 国道下方路堤也产生多处开裂变形[图 4(e)],宽度普遍在 0.5~5 cm,表明滑坡对 G213 国道的安全运营也有极大影响。滑坡原有排水沟受滑坡影响,局部产生破坏[图 4(f)]。同时滑坡前缘临沟处也发育多处的小型地面裂缝,多为拉张裂缝。

2 滑坡成因机制

2.1 影响因素

半边街滑坡稳定性影响因素可分为内在因素与诱发因素。内在因素与滑坡区地质条件有关,主要包括地形地貌条件及滑坡岩土体特性等;诱发因素主要有大气降水及人类工程活动。

(1)内在因素。

地形地貌:滑坡区属构造侵蚀高中山地貌,前缘溪沟切割,地形复杂,总体地形为阶梯形斜坡,局部坡度过陡,汇水面积较大,为滑坡的形成提供了有利地形条件。

地质构造:滑坡位于中村背斜近核部,受构造挤压强烈,导致滑坡浅层岩体较为破碎,风化严重,构造裂隙发育,易于地下水入渗。

岩土体特性:滑坡滑体物质主要为含碎块石粉质黏土,结构松散,渗透性好,大气降雨和地表水入渗快,而下伏基岩的透水性相对较差,地下水易堆积于滑带底部。受地下水长期浸泡软化以及侵蚀作用,底部滑体及浅层强风化破碎岩体易形成软弱带,大大降低了滑坡的整体稳定性。

(2)诱发因素。

降雨:降雨入渗,致使滑坡体内孔隙水压力升高,土体重度增加,同时降水入渗还使岩土体浸水力学强度的降低,皆不利于滑坡的稳定。

人类工程活动:滑坡区主要人类工程活动为斜坡中下部新建国道 G213,斜坡中上部原国道 G213 大量工程处车辆通行,以及当地群众农耕活动及房屋修。对滑坡体有一定扰动及加载作用。

2.2 形成机制

半边街滑坡的变形破坏是其独特的内外因共同作用的结果。人类工程活动、地质构造、地层岩性为滑坡的形成奠定物理基础,连续强降雨是导致



图 4 滑坡变形破坏情况

滑坡失稳变形的关键性触发因素。

滑坡表层土体由于人类耕作,结构较为松散,易于地表水入渗,而滑坡下伏基岩透水性相对较差,地下水易长期堆积于基覆界面,对该界面的岩土体产生浸泡软化、结构劣化作用。在强构造作用下,滑坡区浅层岩体结构破碎,风化严重,在地下水的浸泡软化作用下,强度大大降低,甚至发生泥化现象。这为滑坡的发生提供了客观条件。而研究区的地形条件是形成滑坡的客观因素。滑坡坡面呈上下陡中部缓的特点,滑坡上部地形坡度为 $25^{\circ}\sim 38^{\circ}$,中部较缓,下部地形坡度为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。地形条件的有利组合,滑坡上部堆积体提供了较大的重力势能差,为坡体物质的滑移提供了动力条件。

滑坡前缘冲沟在丰水期,水位有较大的升高,对滑坡前缘的冲刷作用比较强烈,是滑坡前缘产生牵引作用的重要因素。在连续降雨作用下,地下水位持续升高,滑体土也随降雨时间增加而从由前缘往后部逐渐饱和,最先导致滑坡前缘的局部稳定性降低,形成了前缘的许多小型裂缝。同时,滑坡前缘抵抗中后缘变形的能力也随之降低,从而对滑坡整体形成一个牵引作用。滑坡后缘人类工程建筑和人类活动是滑坡后部产生推力的主要因素。

在连续降雨作用下,滑体土重度增加导致滑坡推力增加,同时水对其产生软化作用,在上部建筑荷载作用下,产生了地面沉降、不均匀沉降以及房屋开裂等多种局部变形破坏现象。

3 数值模拟分析

根据前文研究结果,确定连续的降雨作用,是半边街滑坡的关键触发因素,为了研究连续降雨作用对半边街滑坡稳定性的影响,本文采用有限元数

值模拟软件 GeoStudio 中的 SLOPE/W 模块和 SEEP/W 模块进行渗流-应力耦合分析计算,研究了滑坡在降雨作用下的稳定性变化、多场演化特征规律。

3.1 滑坡模型及模拟参数

根据滑坡勘察结果,滑坡体为含碎块石粉质黏土层,滑床主要为强风化泥岩,高程范围为 890~970 m,水平距离约为 200 m。根据勘察信息采用 GeoStudio 有限元数值模拟软件,建立边坡数值分析模型,划分有限元网格,模型网格尺寸为 1~3 m,共计 1 052 个节点、992 单元。根据实际滑坡概况,滑坡坡表为降雨入渗边界,滑坡前缘冲沟为研究区地下水排泄口,模型右侧边界的初始水头由钻孔揭露的地下水位确定。滑坡模型如图 5 所示。

考虑近些年极端暴雨天气发生的情况(短暂特大暴雨、连续大雨等),模拟了 2 种降雨强度的入渗工况,分别为大暴雨(150 mm/d)和特大暴雨(250 mm/d),计算时间均为 20 d,考虑渗流-应力耦合作用,利用 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块进行边坡渗流计算和稳定性计算。

根据试验包括现场大重度试验、渗水试验、室内直接剪切试验以及工程经验等,获取了的滑坡岩土体相关物理力学参数,数值模拟过程中所用参数如表 1 所示。

3.2 模拟结果

3.2.1 滑坡渗流计算

通过上述条件建立了滑坡计算网格模型,添加渗流计算参数和初始条件之后,计算得到在暴雨、大暴雨工况下,不同降雨历时的滑坡孔隙水压力分布特征,如图 6 所示。在 Geostudio 中,地下水浸润线所处位置的孔隙水压力值为 0,该线以上部分的

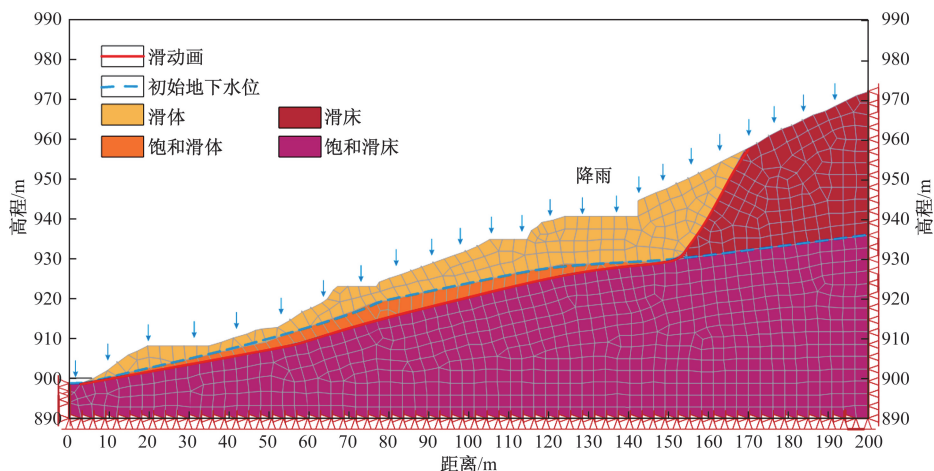


图5 滑坡模型示意图

表 1 岩土体参数

物质	天然状态			饱和状态			饱和渗透系数 (k)/(cm·s ⁻¹)	体积含水量	弹性模量 (E)/MPa	泊松比(ν)
	c /KPa	φ /($^{\circ}$)	γ / (kg·m ⁻³)	c /KPa	φ /($^{\circ}$)	γ / (kg·m ⁻³)				
含碎石 粉质黏土	20	15	21.5	16	11	22	9.3×10^{-4}	0.32	10	0.22
全风化泥岩	—	—	—	23.8	18.2	22.4	2.4×10^{-7}	0.12	600	0.2

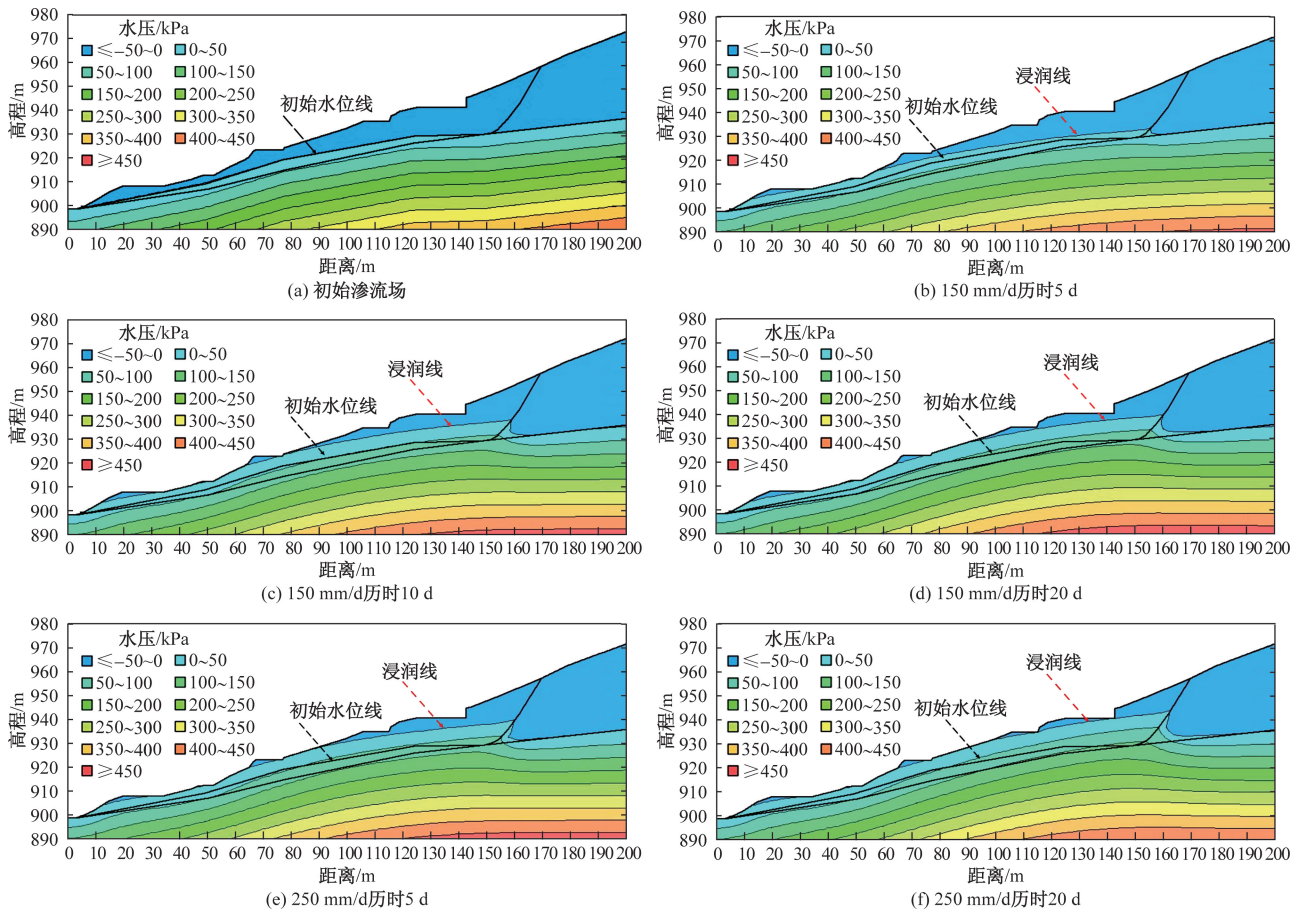


图 6 不同工况下滑坡渗流场变化

孔隙水压力值均小于 0。在入渗作用下,滑坡坡表含水率逐渐增大,基质吸力逐渐降低,开始出现暂饱和区,随后饱和区向坡体内部扩展,在遇到下伏基岩顶面或潜水位后,于此堆积,导致坡体潜水位升高。限于篇幅,本文仅展示部分模拟结果。

根据数值模拟计算结果,初始状态下滑坡孔隙水压力等值线呈明显的环状分布,且越靠近边坡表层,负孔隙水压力值越大。随着降雨入渗的进行,坡体内孔隙水压力逐渐升高。如图 6(b)所示,在 150 mm/d 的降雨强度下,持续 5 d 降雨,浸润线已有明显上升,接近了滑坡中前部坡表的 G213 国道处。且对比不同降雨强度、相同降雨历时的滑坡孔隙水压力云图[图 6(b)与图 6(e)]可知,降雨强度越大,孔隙水压力的上升速率越快。

由模拟结果可知,在暴雨工况下,随降雨时间增加,滑坡前缘饱和区域明显增多,孔隙水压力值明显高于滑体中部、后部。从滑坡剖面示意图(图 3)可以看出,半边街滑坡滑体部分呈一个顺坡向的近三角形,后部滑体厚度明显大于前缘滑体,坡体在经受降雨作用之后,地下水浸润线会有一个整体的升高,滑坡后缘的地下水也会有顺坡流向滑坡前缘排泄的趋势,而前缘滑体整体厚度较小,因此会较快达到全部饱和状态。在前缘达到饱和状态之后,降雨作用持续进行,地下水在前缘及前缘陡坎坡脚、临空面处溢出,前缘渗流场趋于稳定状态。

图 6(b)~图 6(d)分别为 150 mm/d 降雨强度下降雨历时为 5、10、20 d 的滑坡孔隙水压力,由此可知,在持续 20 d 的降雨过程中,滑坡浸润线是一

个持续上升的过程,其上升速度在降雨前期较大,在一定时间(10 d左右)后速度开始减慢,到后期之后滑坡体逐渐形成较稳定的渗流场,浸润线趋于稳定。图6(d)和图6(f)分别为降雨强度150 mm/d、200 mm/d降雨历时为20 d的滑坡孔隙水压力云图,对比可知,在高降雨强度下滑坡体浸润线升高速度较快,但在后期形成较稳定的渗流场后,滑体浸润线的高度总体相差不大。

由渗流模拟结果可以看出,在滑坡加速变形阶段,滑坡前、孔隙水压力明显高于中部、后部,且上升速度最快。由此可见,在降雨前期做好坡体前缘的地下排水工作,同时加强地表排水,遏制雨水向坡体区域渗流,应能有效防止滑坡的变形破坏作用。

3.2.2 滑坡位移场特征

对半边街滑坡的位移场分析,选取了降雨强度150 mm/d历时5 d、10 d、15 d、20 d以及降雨强度250 mm/d历时5 d、20 d的位移云图进行分析,计算结果如图7(a)~图7(f)所示。

从图7(a)~图7(f)可以看出,降雨作用下滑坡

位移主要集中在滑坡中后部,位移场呈层状分布,主要沿岩土分界面产生,较大值出现于坡表,模拟结果与滑坡实际变形情况(图2、图4)相符。滑坡最大位移均出现在中部G213国道及其后方位置,这表明持续的暴雨或大暴雨将会极大程度地影响G213国道的安全运营。

图7(a)~图7(d)为150 mm/d历时5~20 d的滑坡位移,可以看到滑坡的位移随着降雨历时的增加而逐渐增大。150 mm/d历时5 d时[图7(a)],滑坡最大位移值约为0.35 m,出现在G213国道下方,在相同降雨强度历时15 d时[图7(c)],滑坡最大位移发展为约0.8 m,最大位移点出现在G213国道后方。且从图7(a)~图7(d)中看出位移场从中后部逐渐往前部与后部扩张,在历时20天时,滑坡后部近乎全部产生明显位移。

对比相同降雨历时、不同降雨强度下滑坡位移云图,可知降雨强度越大,滑坡产生的位移量也就越大,150 mm/d历时20 d时[图7(d)],滑坡最大位移值约为0.85 m,在250 mm/d历时20 d时

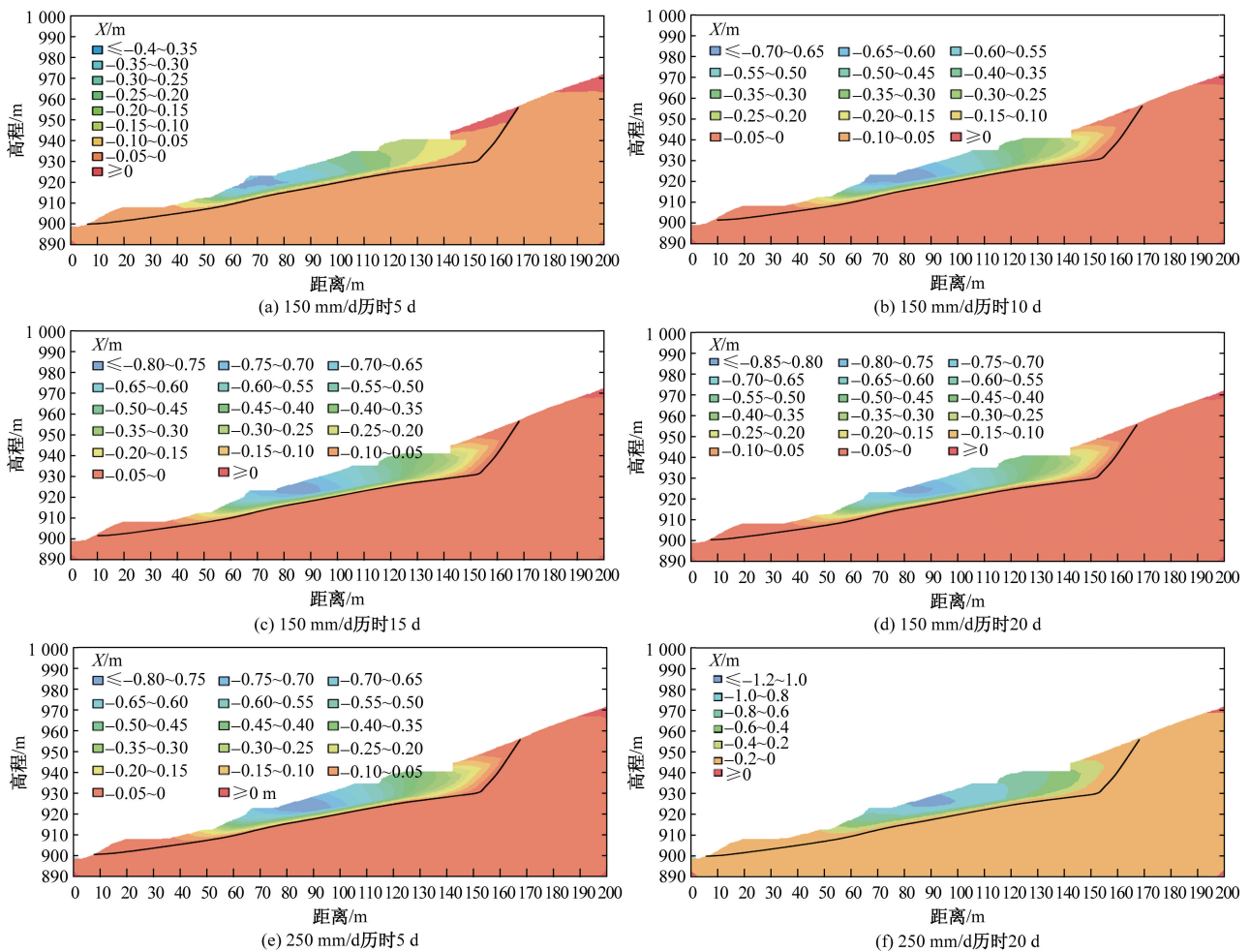


图7 滑坡位移场特征

[图 7(f)], 滑坡最大位移值约为 1.2 m。

综合分析, 滑坡位移场发展规律与渗流场演化规律具有一致性。滑坡浸润线往滑坡后缘扩展的过程中, 滑坡位移场也在由中部往后部扩展, 浸润线上分速率越快, 滑坡位移量增加速率越快, 表明滑坡的位移的变化主要受控于渗流场变化, 在滑坡防治工程中, 应着重考虑地下水的影响。

3.2.3 滑坡稳定性分析

因为已知滑坡主滑带为基岩土体接触界面, 因此完全指定滑移面, 将渗流计算结果导入 Slope/W 模块中, 应用 Janbu 法对滑坡在降雨入渗条件下的稳定性进行计算, 得到如图 8 所示结果。滑坡稳定状态可根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016) 确定, 具体划分情况如表 2 所示。

由滑坡稳定性计算结果, 降雨作用对半边街滑坡的稳定性有着极重要的影响。滑坡初始稳定性系数均为 1.091 (自重应力状态下), 处于一个基本稳定状态, 随着降雨入渗作用的进行, 滑坡稳定性系数逐渐减小, 且降雨强度越大, 滑坡稳定性系数降低速率越快。其稳定性系数的降低在两种工况下均表现出前期下降快、后期下降慢的特点。在降雨前期 (0~5 d) 为快速下降阶段, 在 150 mm/d 的降雨强度下, 下降速率约为 0.016 2 d, 在 250 mm/d 的降雨强度下, 下降速率约为 0.033 2 d。5 d 后为缓慢下降阶段, 此外 250 mm/d 的降雨强度下, 在降雨历时约 8 d 后滑坡稳定性系数基本趋于稳定, 基本保持在 0.883 左右。

结合前文滑坡孔隙水压力变化分析, 可知滑坡

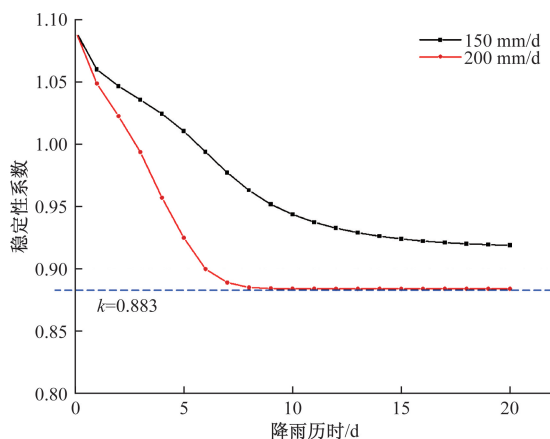


图 8 半边街滑坡稳定性变化

表 2 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数	$K < 1.00$	$1.00 \leq K < 1.05$	$1.05 \leq K < 1.15$	$K \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

稳定系数变化与坡体渗流演化密切相关。降雨入渗前期, 滑坡土体迅速向饱和状态转化, 导致滑坡整体重度增加, 物理力学性质降低, 下滑力增大, 导致滑坡稳定性系数降低。而在一定时间的降雨入渗作用后, 坡体开始形成较为稳定的渗流场, 此后滑坡稳定性系数开始趋于稳定。

此外, 值得注意的是, 在两种工况下, 经历一段时间的人渗作用后, 滑坡均会处于不稳定状态。经历 6 d 左右的暴雨后, 滑坡稳定性系数降低为 0.99; 经历 3 d 左右的大暴雨后, 滑坡稳定性系数降低为 0.99, 在此状态下, 滑坡处于不稳定状态, 有极大可能发生整体滑动, 需要对该滑坡进行治理, 此外, 本研究的稳定性变化趋势也给滑坡的预防、预警提供了一个有力的降雨监测信号, 对滑坡的预防具有重要意义。

4 结论

本文在分析滑坡工程地质条件的基础上, 阐明了半边街滑坡的变形特征与成因机制, 并采用有限元分析软件 GeoStudio 研究了持续降雨条件下半边街滑坡的稳定性及孔隙水压力、位移场变化规律, 为该滑坡的防治提供了一定的理论依据, 主要结论如下。

(1) 半边街滑坡是在降雨、后部人类工程活动、及前缘冲沟冲刷作用及前缘牵引作用下形成的滑坡, 在连续几天的暴雨或大暴雨降雨工况下, 有产生整体滑动的可能, 急需对滑坡进行治理。

(2) 降雨强度越大, 滑坡体内浸润线上升的速率越快, 饱和区域往后缘扩展的速率也就越快。在降雨作用持续一定时间后, 滑坡浸润线上升速率会逐渐减慢, 最后达到一个基本稳定的位置, 此时滑坡稳定性系数开始趋于稳定。

(3) 滑坡位移场发展特征与渗流场演化规律具有很好的相似性, 表明滑坡的位移的变化主要受控于渗流场变化, 在滑坡防治工程中, 应着重考虑地下水的影响。

(4) 长时间的降雨作用对半边街滑坡的稳定性有着极重要的影响, 且降雨强度越大, 滑坡稳定性系数的降低程度越明显。在滑坡防治时一定要着重考虑此因素, 在降雨前期做好坡体前缘的地下排水工作, 同时加强地表排水, 遏制雨水向坡体区域渗流, 应能有效防止滑坡的变形破坏作用。

参考文献

- [1] 方迎潮, 王小松, 蒋毅, 等. 基于时序 InSAR 技术的中贵

- 天然气管道天水市段沿线滑坡隐患识别与形变分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4): 1357-1369.
- [2] 段永侯. 我国地质灾害的基本特征与发展趋势[J]. 第四纪研究, 1999(3): 208-216.
- [3] 王剑, 应春业, 胡新丽, 等. 浸泡作用下碎石土剪切强度衰减规律及机理[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 294-300.
- [4] 陈远铭, 叶振南, 陈宗良, 等. 基于无人机遥感影像的滑坡形态变形特征: 以陇南白龙江流域泻流坡滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2665-2672.
- [5] 刘鹏, 高振海, 刘琼. 雨水入渗诱发滑坡灾害的机制分析[J]. 土工基础, 2010, 24(3): 33-35.
- [6] 李昂, 侯圣山, 周平根. 四川雅安市雨城区降雨诱发滑坡研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007(1): 15-17.
- [7] 李长冬, 洗进业, 刘勇, 等. 暴雨作用下基于滑坡互信息量的白家包滑坡变形响应机制研究[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 19-26.
- [8] 麦鉴锋, 洗宇阳, 刘桂林. 气候变化情景下广东省降雨诱发滑坡灾害潜在分布及预测[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(11): 2042-2054.
- [9] 杨潇, 梅红专. 湖北崇阳县大药菇山区降雨型滑坡成因机理分析[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(4): 500-504.
- [10] 窦晓东, 张泽林. 甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 9-18.
- [11] WANG J, HU X, ZHENG H, et al. Energy transfer mechanisms of mobility alteration in landslide-debris flows controlled by entrainment and runout-path terrain: a case study[J]. Landslides, 2024, 21: 1-18.
- [12] 冯乐涛, 吴玮江, 刘兴荣, 等. 黄土高原降水入渗方式与引发滑坡研究——以甘肃黄土地区为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5937-5945.
- [13] 石诚, 阮永芬, 施炳军, 等. 降雨入渗对边坡稳定性影响的敏感性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 1002-1007.
- [14] MARIN R J, VELÁSQUEZ M F. Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides[J]. Geomorphology, 2020, 351: 106976.
- [15] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977-985.
- [16] 惠航, 刘锋, 冯兵, 等. 基于PFC2D的柿子树坪滑坡变形特征模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 973-981.
- [17] 王安礼, 邬忠虎, 姜义黎, 等. 公路岩质边坡稳定性的数值模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9577-9582.
- [18] 亓文斌, 刘会林, 王飞飞, 等. 地下采矿引起山体滑坡发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 29-32.
- [19] 宋民崇, 余云燕. 三维数值模拟在某高速公路边坡稳定性分析中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(1): 4-9.
- [20] 孙炜锋, 王继明, 谭成轩, 等. 陕西宝鸡地区塌山黄土滑坡三维稳定性分析[J]. 地质通报, 2008(5): 668-673.
- [21] 谢从珍, 卢伟民, 马康, 等. 结合MIDAS仿真和BP神经网络的输电杆塔基础滑坡风险评估[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6923-6930.

Formation Mechanism and Multi-field Evolutionary Characteristics of the Banbianjie Landslide

ZHENG Zhiwen, SUN Xuan

(Hubei Shenlong Geologic Engineering Reconnaissance and Survey Institute Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The Banbianjie landslide is a typical rainfall accumulation landslide, and continues to develop after significant deformations and damages. In this paper, the geological conditions and deformation characteristics of the landslide were investigated and analysed, and the landslide deformation mechanism was described. A typical profile of the landslide was selected to establish a numerical model based on finite elements. The GeoStudio software was used to carry out seepage-stress coupling analysis and calculation of the landslide, and the stability of the landslide and the evolution characteristics of seepage and displacement fields under different rainfall conditions were investigated. The research results provide an important theoretical basis for the early warning and management of such landslides in the future.

Keywords: landslides; rainfall; numerical simulation; stability; seepage field