

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.04

基于 GIS 的单体滑坡稳定性分区 ——以某高速公路滑坡为例

邓 庆¹, 赵其华¹, 王晨辉², 林冠宇²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 以川东地区某新建高速公路的堆积体滑坡为工程实例, 在对其进行现场踏勘和工程地质勘查的基础上, 分析了该滑坡的工程地质条件、变形破坏演化机制。创新性的将传递系数法与 ArcGIS 的空间分析及数据处理功能相结合, 对该滑坡的稳定性进行了评价及计算分区。首先, 基于极限平衡理论得出滑坡的抗剪强度指标, 再采用 ArcGIS 空间差值及栅格计算, 结合力学公式, 对该滑坡进行了空间模拟及稳定性评价, 做出滑坡安全系数计算分区图。结果表明, 在常规工况条件下, 滑坡体局部处于欠稳定状态; 在非常规工况条件下, 滑坡体欠稳定区域大范围扩展, 整体稳定性差。进而划分出该滑坡在不同工况的施工过程中需要重点防护治理部位, 为该工程的进一步施工提供有意义的参考。

关键词: 高速公路; 滑坡; 稳定性评价; ArcGIS; 安全系数

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0022-07

GIS-based stability evaluation and zoning: taking a highway landslide as an example

DENG Qing¹, ZHAO Qihua¹, WANG Chenhui², LIN Guanyu²

(1. State Key Laboratory of GeoHazard Prevention and Geo Environment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Taking the landslide of an expressway as an example, this paper analyzes the engineering geological conditions and the deformation mechanism based on the field investigation and engineering geological exploration. The stability of the landslide is evaluated and zoned, using the method of combining the transfer coefficient with the spatial analysis and data processing function of ArcGIS. Based on the theory of limiting equilibrium, the shear strength parameters of the landslide are obtained. Using the ArcGIS space interpolation and grid computing, and the mechanical formula, the stability of the landslide was evaluated based on the three-dimensional simulation. The results show that under normal operating conditions, part of the landslide is unstable. While under the extreme operating conditions, such as rainstorm and earthquake, the unstable region of landslide expands sharply, and the whole stability is very poor. The part needed to protect of the landslide can be chosen, which can provide valuable reference for the expressway construction.

Keywords: expressway; landslide; stability evaluation; ArcGIS; factor of safety

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB013501); 国家自然科学基金项目(41272333)

第一作者: 邓 庆(1992-), 女, 岩土工程专业, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 516661424@qq.com

通讯作者: 赵其华(1965-), 男, 土木工程专业, 教授, 博导, 研究方向为岩土工程。E-mail: zhqh@163.com

0 引言

高速公路的线形选择要求严格,在山区或丘陵区施工建设高速公路时常形成高填或深挖边坡,边坡稳定性问题成为该区域建设高速公路的主要工程地质问题。在施工开挖过程中,若对地质环境条件及地质灾害的重视程度不足,往往造成古滑坡复活或形成新的滑坡灾害。川东地区某高速公路通过的堆积体滑坡是规模大、稳定性差、施工扰动有可能引起整体或局部滑动的地质灾害,对该工程的选线、施工都有很大影响。

目前滑坡稳定性分析的方法主要有基于极限平衡理论的条分法、瑞典圆弧法等,以及基于弹塑性理论、运用有限元或有限差分理论的数值分析方法^[1]。极限平衡理论把滑坡区域的岩土体视为刚体,运用摩尔-库伦屈服准则判断滑动面的抗滑力,从而计算滑坡的安全系数,得到的结果直观反映了滑坡体的稳定性状态,是滑坡防治工程中常用的稳定性计算方法^[2]。

地理信息系统(GIS)具有强大的空间分析和数据计算能力,可很好的反映三维空间的地理信息分析,因此被越来越多的运用于岩土工程领域。李先华等^[3](2001)在GIS支持下完成了滑坡在三维空间中运动过程的数字仿真。高明忠等^[4](2006)在Visual Basic 6.0平台下,对建立在OCX技术基础上的GIS功能组件Map Objects进行了集成二次开发,并成功应用于对四川省紫坪铺水利枢纽工程水库两岸重点库区的地质建模。谢谟文等^[5](2006)改进了Hovland三维边坡稳定性分析模型,结合GIS空间数据分析,提出了基于COM技术开发的GIS扩展模块3DslopeGIS,将该模块

嵌入ArcGIS等软件,可用于边坡三维安全系数计算。谷天峰等^[6](2013)利用GIS建立了滑坡的三维地质模型,并分别采用极限平衡法和强度折减法,评价了吕梁机场滑坡的稳定性。王卫东等^[7](2015)结合GP服务,基于GIS实现了边坡监测数据的分析处理及灾害预警功能。

上述研究系统和计算模型多数致力于计算滑坡的整体稳定系数来判断滑坡的稳定性,对于滑坡的局部区域的稳定性难以给出结果。因此,本文基于川东地区某新建高速公路堆积体滑坡的现场考察和工程地质勘查、钻孔数据等,结合极限平衡理论和ArcGIS的空间分析及数据处理功能,对滑坡的稳定系数进行计算,并实现在平面上进行稳定性分区,直观反映出该滑坡的欠稳定区域,划出滑坡防治的重点部位,对于工程的施工建设具有一定的参考意义。

1 研究区工程地质特征

1.1 概况

川东低丘地区某新建高速公路穿越由于崩塌及局部垮塌形成的大型堆积体,堆积体纵向宽350~680 m,横向长约2.4 km,钻孔揭露最大厚度52.5 m。该滑坡位于堆积体前缘、河流右岸。滑坡前缘为一陡坎,高差19 m;后缘未见明显裂缝,高程约489 m。滑坡坡面呈阶梯型,植被覆盖率较低,坡度约15°~30°。平面呈舌形,顺沟整体呈带状,主滑方向93°,纵向长度300 m,平均宽700 m,钻孔揭露最大滑体厚度25.3 m,平均厚度9.6 m,面积约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑体体积 $1.44 \times 10^6 \text{ m}^3$,属大型中层滑坡(图1)。目前滑坡

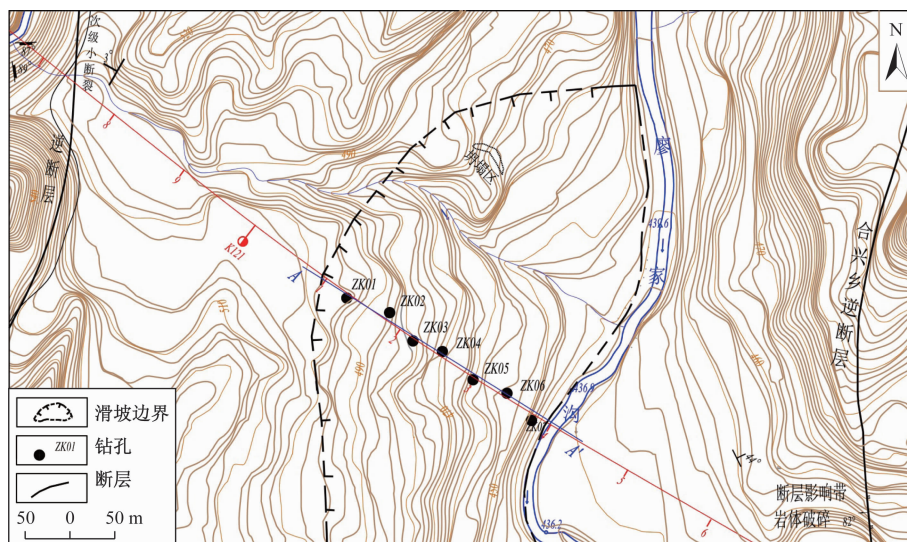


图1 滑坡工程地质平面图

Fig.1 Plan of engineering geology of the highway landslide

在自然状态下整体基本稳定,前缘局部在雨季有垮塌、变形现象。

1.2 地层岩性

根据地表调查与钻探揭露(图2),研究区地层岩性主要为第四系全新统崩积层(Q_4^{col})粉质黏土、块石土,滑坡堆积层(Q_4^{del})粉质黏土、块石土;白垩系下统苍溪组(K_1c)泥岩、砂岩。

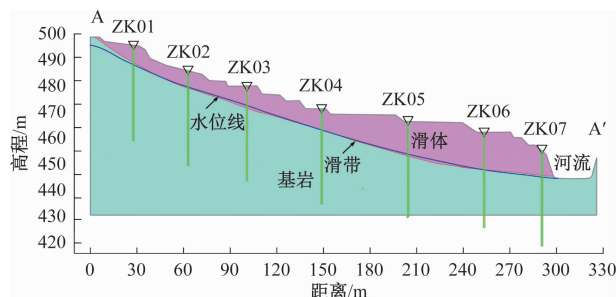


图2 滑坡工程地质剖面图(A-A'剖面)

Fig.2 Profile (A-A') of engineering geology the highway landslide

(1)第四系全新统(Q_4)粉质黏土包括崩积层和滑坡堆积层,黄褐色、红褐色,可塑状态,含少量碎石土块,厚度及分布范围不均,压缩变形大,易发生差异沉降,力学性质较差。上部为结构松散、厚为0.3~1.0 m的耕植土。天然重度为17.5~20.4 kN/m³,液限为27.6%~33.8%,塑限为16.1%~20.7%。

(2)第四系全新统(Q_4)块石土包括崩积层和滑坡堆积层,浅棕红色、浅灰色,湿,中密-密实,局部为碎石土,粉粘粒集中,块石土风化强烈,厚度小,稳定性差,开挖易发生坍塌。在不同地带及不同层位其成分不同,母岩成份主要以中风化砂岩及强风化泥岩组成,含量约80%,粒径一般100~200 cm,最大约250 cm,透水性根据块石土成分不同。

(3)白垩系下统苍溪组(K_1c)泥岩为浅棕红色,层状构造,泥质结构,岩质较软。强风化岩体节理裂隙发育,岩体较破碎,岩芯呈块状及短柱状,遇水易软化;中风化岩体较完整,岩芯呈柱状。层厚3.0~19.3 m。自由膨胀率 $F_s=7\%$,膨胀力 $P_p=44$ kPa,饱和吸水率 $W_{sr}=4.2\%$,为不易崩解岩石。中风化泥岩饱和单轴抗压强度为1.67~2.96 MPa,平均为2.81 MPa。根据钻孔揭露,一般在基岩面以上5 m范围内均揭露有岩块被揉搓挤压现象,并有多处光滑面,具有擦痕,说明该层岩体曾经发生过滑动。

(4)白垩系下统苍溪组(K_1c)砂岩为浅灰色、灰黄色,层状构造,粉-细粒结构,泥钙质胶结,岩质较软。

强风化岩体节理裂隙发育,中风化岩体较完整、岩芯呈柱状。层厚1.2~12.0 m。中风化砂岩饱和单轴抗压强度为33.54~43.31 MPa,平均为39.20 MPa。

1.3 地质构造与地震

根据地质调查,线路穿越的白垩系苍溪组岩体出露的岩层产状 $300^\circ\angle 3^\circ$ 、 $64^\circ\angle 44^\circ$,发育有2组倾向 82° 及 178° 的裂隙,裂隙倾角多大于 70° 。根据区域地质资料,线路穿越的合兴乡冲逆断层,规模较大,为龙泉山东坡主要断裂之一,全长约24 km。断层主要发生在白垩系下统苍溪组与白龙镇组之间,区内出露上盘地层为侏罗系下统蓬莱镇组,下盘地层为白垩系下统苍溪组,断距大于300 m,走向北 $15^\circ\sim 20^\circ$ 东,倾向北西,倾角 82° 。在合兴乡以南的地段断面倾向南东,致使断面产生扭曲,其产状为走向北 23° 东,倾向南东,倾角 68° ,断层两盘岩石挤压明显,岩体破碎。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)、《地震动峰值加速度区划图》及《地震动反应谱特征周期区划图》,结合《四川省汶川8.0级地震灾后重建地震评价规划用图》(2008.06),拟建场区地震动峰值加速度0.10 g,地震动反应谱特征周期为0.40 s,地震基本烈度为Ⅶ度。

1.4 水文地质

研究区地表水为河流,宽16.0 m,水深2.5 m,水量随季节变化。年平均降水量为759.1~1155.0 mm,多集中于6~9月,占全年降雨量的75%。地下水类型为松散岩类孔隙潜水及基岩裂隙潜水。松散岩类孔隙水主要含水层为第四系松散粉质黏土及碎石土中,水位埋深1.0~18.0 m;基岩裂隙水主要赋存于砂岩、泥岩等基岩风化裂隙带中,受基岩裂隙发育程度不均及裂隙的充填物影响。

2 滑坡成因演化机制

堆积体滑坡是指发生在第四系及近代松散堆积层的一类滑坡^[8]。滑坡形成机理是滑坡孕育和滑动的物理力学过程,因此滑坡的形成机制和滑坡成因是相互联系的。

研究区内构造主要为龙泉山箱型背斜及背斜、东翼合兴乡冲逆断层。受复杂断层构造条件影响,不良地质发育。区域内发育有由崩积及局部垮塌堆积形成的大规模堆积体。堆积体物质由砂岩、泥岩块石土及粉质黏土构成。该滑坡正是位于此大型松散堆积体前缘,为堆积土层滑坡。厚度较大的堆积体叠置于岩质较软的白垩系泥岩斜坡上,堆积层松散块石土与下伏

强风化基岩间充填的粉质黏土形成软弱滑带土,使坡体易发生失稳破坏。堆积层本身已具有沿基岩面滑移的趋势,加之人类活动加速了滑坡的变形进程。

该滑坡前缘临空,河流流水及季节性不定性流水不断对坡脚的冲刷淘蚀,使高陡的临空面进一步增大,坡脚支撑力减弱,致使斜坡向临空方向挤压蠕动变形、滑移,坡体结构松弛破坏,抗滑抵抗力降低,从而在滑坡前缘坡脚形成剪切蠕滑。加之根据钻孔水位观测数据显示,坡体局部土层地下水丰富,地下水的渗流作用进一步降低了土体强度。在非常规工况下,如连续降雨或暴雨地表水渗入坡体,软化岩土体,使岩土内静水压力增大,坡体受雨水冲刷等因素影响,将使斜坡岩土体发生滑动。

3 滑坡稳定性分析

3.1 研究思路与工作流程

根据地质调查与钻孔勘察,可以基本确定该滑坡的滑坡边界及滑移面的空间分布情况。研究滑坡体沿该滑移面的稳定系数分布情况有利于确定滑坡防治的重点部位及合理手段。其基本思路是:首先采用传递系数法反算得出滑坡体的抗剪强度指标,根据钻孔数据确定滑移面的分布形态;再利用 ArcGIS 空间确定性插值进行空间插值,推测滑移面的位置和形态,在此基础上将滑坡在水平面上划分为若干栅格,每个栅格的顶面为滑坡表面,底面为滑移面,栅格与地表和滑移面一起构成一个立方体柱(图3);随后根据立方体的高度、地面倾角、滑坡的物理力学参数指标计算每个柱体的安全系数,得到稳定系数在平面上的分区图。工作流程图见图4。

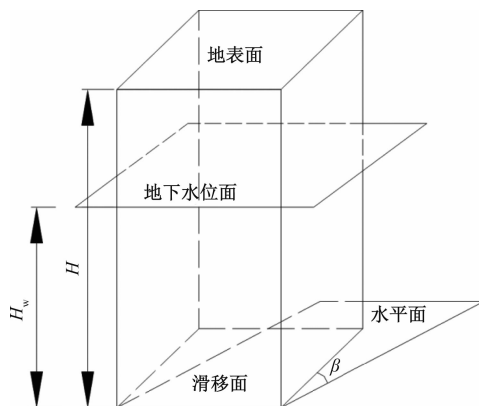


图3 GIS三维栅格柱体模型图

Fig.3 Three-dimensional grid column model of GIS

不考虑柱体之间的相互作用,利用无限边坡安全

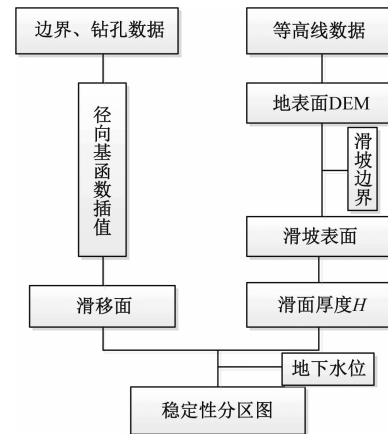


图4 工作流程图

Fig.4 Route chart

系数公式^[9]:

$$K_f = \frac{c + (\gamma - m\gamma_w)H(\cos\beta)^2 \tan\varphi}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} \quad (1)$$

式中: c ——有效内聚力/kPa;

γ ——滑坡体的容重/(kN/m^3),本文天然状态下取 $19.0 \text{ kN}/\text{m}^3$;

γ_w ——水的容重/(kN/m^3),取 $10.0 \text{ kN}/\text{m}^3$;

m ——无量纲, $m = H_w/H$,当 $H_w < 0$ 则 $m = 0$;

H ——滑移面到地表面的距离/m;

H_w ——滑移面以上水位/m;

β ——滑移面倾角/(°);

φ ——滑移面内摩擦角/(°)。

地表面高程、滑移面高程及倾角可通过 GIS 空间分析方法获得,地下水位、岩土体容重可根据现场勘察及室内外土工试验获得。

3.2 滑坡抗剪强度指标取值

传递系数法基于极限平衡理论,不仅能够计算折线形滑动面的稳定系数,还能计算剩余下滑力,是滑坡防治工程中常用的稳定性计算方法。计算稳定系数的公式如下:

$$K_f = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{i=1}^{n-1} \psi_i) + R_n \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{i=1}^{n-1} \psi_i) + T_n \right)} \quad (2)$$

式中: K_f ——滑坡安全系数;

T_i ——下滑力;

R_i ——抗滑力。

下滑力 $T_i = (W_{i1} + W_{i2}) \sin\alpha_i + D_i \sin\beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i)$

抗滑力 $R_i = ((W_{i1} + W_{i2}) \cos\beta_i - D_i - D_i \sin\beta_i \sin(\alpha_i - \beta_i)) \tan\varphi_i + C_i L_i$

$$\text{下滑力传递系数 } \Psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i$$

$$\text{孔隙水压力 } D_i = \gamma_w H_w L_i \cos \alpha_i$$

式中: W_{i1} ——第 i 滑块水位线以上土体的重量/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

W_{i2} ——第 i 滑块水位线以下土体的浮重量/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

α_i ——第 i 滑块的滑面倾角/($^\circ$);

β_i ——第 i 滑块的地下水流向/($^\circ$);

φ_i ——第 i 滑块的滑面内摩擦角/($^\circ$);

C_i ——第 i 滑块的滑面内聚力/kPa;

L_i ——第 i 滑块的滑面长度/m;

γ_w ——水的容重(kN/m^3),取 $10.0 \text{ kN}/\text{m}^3$;

H_w ——滑移面到地下水位面的距离/m。

计算地震作用下滑坡的安全系数时,在每个条块受力的基础上,增加一个水平力地震力 Q_i 。

$$Q_i = \xi_e \times (W_{i1} + W_{i2})$$

式中: ξ_e ——水平地震系数(取 $0.012 5^{[10]}$),其他变量解释同公式(2)。

根据现场地质踏勘,该滑坡目前在天然状态下处于基本稳定状态。按照《公路路基设计规范》要求,针对高速公路边坡治理,确定各计算工况的安全系数标准分别为:天然状态 1.20,饱和状态 1.15,校核工况(地震作用) 1.075。因此,可将安全系数带入公式(2),反算确定滑坡体的抗剪强度指标,结合室内外土工试验结果及综合影响参数,滑坡体的抗剪强度指标建议值见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

工况	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	有效内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
天然状态	19.0	24.5	19.5
饱和状态	21.5	22.8	17.0
校核工况	19.0	21.2	16.6

3.3 滑移面的空间模拟

ArcGIS 中有多种空间确定性插值的方法,它们以数据的内部相似性或平滑度为基础,通过已知点的数据信息来建立全局数据。

本次研究从地质踏勘和钻孔揭露的若干确定性滑坡点作为推测滑移面的已知点。采用径向基函数插值方法得到滑坡的空间分布特征三维效果图(图 5)。从该图可以直观看出滑移面的空间分布形态。

获得滑移面的高程数据后,采用 ArcGIS 的坡度分析(Slope)得到滑移面的倾角在平面的分布图(图 6)。



图 5 径向基函数插值效果示意图

Fig. 5 Effect graph of the radial basis function interpolation

使用栅格计算工具(Raster Calculator)将滑坡表面的高程栅格数据与滑移面的高程栅格数据做差即得到滑坡体的厚度(H)分布图(图 7)。

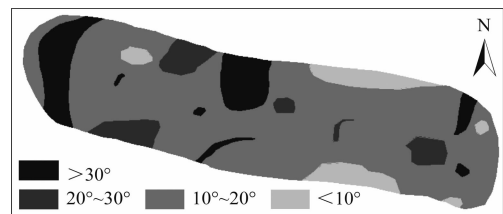


图 6 滑移面倾角分布示意图

Fig. 6 Distribution map of dip angle of sliding surface

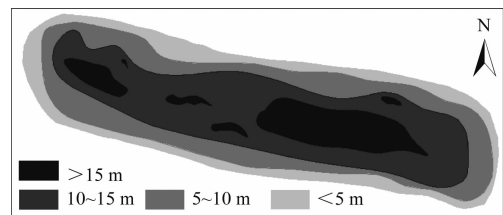


图 7 滑坡体厚度分布示意图

Fig. 7 Distribution map of thickness of landslide body

3.4 滑坡稳定性分区

将公式(1)中的参数的栅格数据的数据带入到 ArcGIS 的栅格计算工具(Raster Calculator),计算得出各栅格的稳定系数。依照《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 021—2006)^[11-13]将边坡的稳定性进行等级划分:安全系数 $K_f \geq 1.15$ 为稳定状态; $1.15 > K_f \geq 1.05$ 为基本稳定状态; $1.05 > K_f \geq 1.0$ 为欠稳定状态,对稳定系数的计算结果对滑坡进行划分,即可得到滑坡体安全系数在平面上的分布图(图 8)。图中稳定区的稳定系数均大于 1.15,基本稳定区的稳定系数介于 1.05 到 1.15 之间,欠稳定区的稳定系数介于 1.0 到 1.05 之间。

由 3 种不同工况下的稳定性分区图可以得出,该滑坡在天然状态,即常规工况时欠稳定区域主要分布于前缘坡度较陡处及滑坡中部及后缘,面积较小,施工时应注意减少施工扰动并结合公路构造物布设采取有

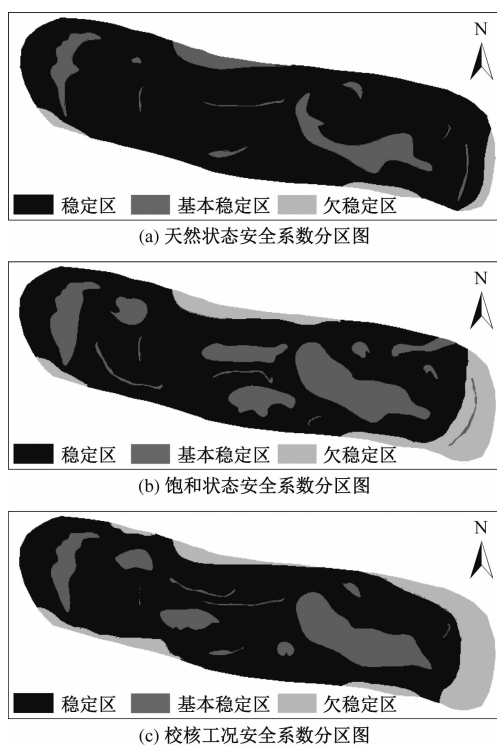


图8 稳定性分区图

Fig.8 Zoning map of the landslide stability

效治理措施;在饱和状态、暴雨及地震作用,即非常规工况时滑坡体的欠稳定区域大范围扩展,且主要集中于前缘位置,稳定区域面积减少,滑坡体整体稳定性差,施工时应采取相关的防治手段或停止施工以保证安全。总之,该方法能快速进行滑坡体易于失稳空间部位的预测,对于从总体上把握滑坡体的重点防治区域具有重要意义。经模拟可得出,该滑坡在各种工况下前缘稳定性均较差,施工中应重视对滑坡前缘的监测与防治工作。

4 讨论

本文在计算过程中不考虑各个三维栅格柱体单元间的相互作用,相当于二维剖面计算中的条分法,安全系数计算结果偏于保守。对滑坡体的地下水位进行监测,通过不同工况条件下岩土体抗剪强度参数的取值不同,分别研究降雨及地震作用的影响,结果具有一定的参考价值。

在地震作用的滑坡体抗剪强度指标取值时,加入水平地震系数进行受力分析,相当于地震作用下滑坡稳定性分析中的拟静力法,取值综合了土工试验结果及综合影响系数,但未考虑竖直方向的地震力作用,这是对实际情况的简化,应进行进一步的地震动力影响

作用分析。

5 结论

本文在现场踏勘和工程地质分析的基础上,分析该滑坡的形成演化机制,利用 ArcGIS 空间分析和栅格计算功能,结合力学原理的滑坡稳定性评价得出稳定系数在平面上的分布图,直观的反映了滑坡体的稳定区、基本稳定区及欠稳定区,为工程的进一步施工提供了一定的数据支持。

(1)该滑坡属于堆积体滑坡,受复杂的区域断层构造作用及地形地貌因素影响,滑坡体前缘临空面受河流长期淘蚀冲刷,抗滑抵抗力降低,从而在滑坡前缘坡脚形成剪切蠕滑。

(2)采用基于极限平衡理论的传递系数法,结合室内外土工试验及综合影响参数等,给出了该滑坡的岩土体在不同工况下的抗剪强度指标。

(3)通过滑坡稳定性分区图可直观看出,滑坡体前缘稳定性较差。在常规工况条件下,滑坡体局部处于欠稳定状态;在非正规工况条件下,滑坡体欠稳定区域大范围扩展,整体稳定性差;是施工的重点防治部位,应给予高度重视。

参考文献:

- [1] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理(第二版)[M].北京:地质出版社,1994.
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principle of engineering geological analysis (Second Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [2] 苏爱军.滑坡稳定性评价原理与方法——条分法的改进[M].武汉:中国地质大学出版社,2008.
SU Aijun. The principle and method of landslide stability evaluation—the improved slice method [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008.
- [3] 李先华,林琨,陈晓清,等. GIS支持下降雨滑坡的启动机制研究与数字仿真[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2):133-140.
LI Xianhua, LIN Hui, CHEN Xiaoqing, et al. Digital simulation model of landslide motion process under GIS support [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2):133-140.
- [4] 高明忠,谢和平,李洪,等. 基于 GIS 的地层剖面图形生成技术[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1791-1794.
GAO Mingzhong, XIE Heping, LI Hong, et al.

- Technique of generating stratigraphic section based on GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(10): 1791-1794.
- [5] 谢谟文,蔡美峰,江崎哲朗. 基于 GIS 边坡稳定性三维极限平衡方法的开发及应用[J]. 岩土力学, 2006,27(1):117-122.
- XIE Mowen, CAI Meifeng, Esaki Tetsuro. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(1):117-122.
- [6] 谷天峰,王家鼎,王念秦. 吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析[J]. 岩土力学,2013,34(7): 2009-2016.
- GU Tianfeng, WANG Jiading, WANG Nianqin. Geological features of loess landslide at Lüliang airport and its 3D stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(7):2009-2016.
- [7] 王卫东,刘超,李大辉,等. 基于 GIS 的公路边坡危险性分析与预警系统研究[J]. 华中师范大学学报(自科版), 2015, 49(3):452-459.
- WANG Weidong, LIU Chao, LI Dahui, et al. Research on GIS-based analysis and early highway slope risk warning system[J]. Journal of Central China Normal University (Nat. Sci.), 2015, 49(3):452-459.
- [8] 贺可强,王荣鲁,李新志,等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测——以三峡库区八字门滑坡分析为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8):1644-1651.
- HE Keqiang, WANG Ronglu, LI Xinzhi, et al. Load-unload dynamic law of ground water level and dynamic displacement prediction of debris landslide: a case study of Bazimen landslide in Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(8):1644-1651.
- [9] 王旭春,何满潮,蒋宇静,等. 在 GIS 中实现基于力学原理的滑坡稳定性计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6):977-980.
- WANG Xuchun, HE Manchao, JIANG Yujing, et al. The stability calculation of landslide based on the principle of mechanics in GIS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 977-980.
- [10] DB50/143—2003,地质灾害防治工程勘察规范[S]. 重庆:重庆市质量技术监督局发布,2003.
- DB50/143—2003, Specification for geological disaster prevention and investigation[S]. Chongqing: Chongqing Bureau of quality and technology supervision, 2003.
- [11] DZ/T0218—2006,滑坡防治工程勘察规范[s]. 北京:中国标准出版社出版,2006.
- DZ/T0218—2006, Specification of geological investigation for landslide[s]. Beijing: Published by China Standard Press, 2006.
- [12] 黄润秋. 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,2007,26(3):433-454.
- HUANG Runqiu. Large scale landslides and its mechanism in China since Twentieth Century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3):433-454.
- [13] 朱雷,黄润秋,王小群,等. 基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2015,36(S2):431-438.
- ZHU Lei, HUANG Runqiu, WANG Xiaoqun, et al. Stability study of landslide based on dynamic evolution of sliding surface strength parameter [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(S2):431-438.

封面照片说明

美姑县牛牛坝乡四俄千村滑坡灾害

美姑县牛牛坝乡四俄千村滑坡为大型古滑坡的复活型滑坡,发生于 2016 年 10 月 14 日,由于前期调查和监测预警,实现了成功避险,避免了人员伤亡。该滑坡地理位置:102°59'39.21"E、28°14'55.40"N。滑体长约 600 m,宽约 300 m,平均厚度约 10 m,总体积为 $1.80 \times 10^6 \text{ m}^3$,属大型土质推移式滑坡。滑动面为基岩与第四系残坡积层接触面,滑动方向 280°,地形坡度约 30°。滑坡边界清晰,后缘陡壁高约 10 m,前缘鼓胀凸起,滑体主要为第四系残坡积层夹砂泥岩块石。

(国土资源部地质灾害应急技术指导中心 殷志强 供稿)