

Landslide disaster mechanism under continuous rainfall and application of GNSS monitoring and early warning technology

Yuebin Jiang Chijin Hou

Dali Branch, Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co., Ltd., Dali, Yunnan, 671000, China

Abstract

Yunnan Province has many mountains, steep slopes and heavy rainfall. Under the condition of continuous rainfall, the loose soil on the surface of the mountain area is prone to traction landslide disaster under the action of seepage. Based on the seepage module in Abaqus, this paper analyzes the stability of loose soil in mountainous areas under 24 h continuous rainfall seepage. The results show that rainfall seepage has a great influence on the stability of loose soil. According to the actual landslide warning case, the effectiveness of GNSS technology for slope stability monitoring is analyzed. The on-site verification results after the disaster are consistent with the GNSS monitoring data in time and space.

Keywords

Seepage effect ; Strength reduction method ; GNSS technology ; Slope stability ; Engineering case

持续降雨作用下滑坡致灾机制及 GNSS 监测预警技术应用

姜跃斌 侯赤金

云南地质工程第二勘察院有限公司大理分院, 中国·云南大理 671000

摘要

云南省地区山多坡陡、降雨量大。在连续降雨条件下, 山区表面松散的土体在渗流作用下, 容易发生牵引式滑坡灾害。本文基于Abaqus中的渗流模块, 对24h连续降雨渗流情况下山区松散土体的稳定性进行了分析, 结果表明降雨渗流作用对松散土体的稳定性影响较大。根据实际的滑坡预警案例, 分析了GNSS技术对边坡稳定性监测的有效性。灾害发生后的现场核查结果与GNSS监测数据保持时间与空间上的一致性。

关键词

渗流作用; 强度折减法; GNSS技术; 边坡稳定性; 工程案例

1 引言

根据中华人民共和国应急管理部于2024年初发布的2023年全国自然灾害基本情况显示, 全国共发生地质灾害3666起。级别以小型为主, 主要发生在华北、西南等地区。且近60年我国因滑坡灾害死亡的人数超过2.5万人, 每年就有400人因为滑坡而失去生命^[1,2]。

使用有限元的强度折减法对边坡稳定性进行分析, 可对不同地貌、不同岩体参数的边坡进行安全系数的以及可能发生滑坡区域的计算^[3]。郑颖人等使用强度折减法对某高速公路岩质高边坡稳定性进行了分析, 结果与现场实测数据、传统的计算方式相似。马建勋等将二维有限元强度折减法扩

展至三维领域, 发现有限元强度折减法也适用于三维模型。

在我国云南等地区的连续降雨条件下, 雨水在岩土体内赋存, 导致孔隙水压力不断增大, 导致滑坡的发生。李宁等提出了一种降雨诱发的浅层滑坡稳定性分析方法。詹良通等降雨诱发型的滑坡预报降雨强度-历时(I-D)曲线的影响因素进行了分析, 发现降雨强度较小时影响较大, 降雨强度较大时, 边坡失稳时的临界值不随降雨强度增大而增大。对于边坡的持续降雨, 可以视作时间较长的渗流作用, 在有限元分析软件中, 可以通过渗流模块进行计算。荣冠等对有限元计算过程中的若干问题进行了分析, 并运用其自主研发的SUSC程序进行了模拟, 与模型试验结果吻合。张晓咏使用Abaqus对水坝两侧在不同水头下的渗流作用进行了计算, 其结果与理论计算结果吻合。陈丽刚使用Abaqus的渗流模块与应力模块进行耦合, 对某边坡在水压力和降雨条件下的稳定性进行分析, 结果符合实际情况。杜明亮通过有限元分析得出, 在渗流作用下, 边坡的位移场和应力场均有大的变

【作者简介】姜跃斌(1988-), 中国云南楚雄人, 本科, 高级工程师, 从事地质灾害防治、监测预警、矿山生态修复等研究。

化,最终导致失稳现象。

GNSS (Global Navigation Satellite System) 技术在监测、测绘等领域有着广阔的前景。何秀凤等总结分析了 InSAR 和北斗/GNSS 两种技术在地表变形监测中的发展现状与发展趋势。近年来,GNSS 监测预警技术被应用在了边坡的灾害监测中,吴浩等基于 GNSS 与 GIS 相结合的技术,针对露天矿边坡变形研发了在线监测设备。刘善军等基于 GNSS 研发了适合露天矿山的无线监测技术。王慧敏等将 GNSS 技术应用到了重庆巴南至綦江高速公路的边坡自动化监测中。

以上众多学者的成果资料为有限元的强度折减法、渗流模块以及 GNSS 监测预警技术的应用奠定了理论基础。本文使用 Abaqus 有限元分析软件对云南省常见的滑坡模型进行了自然工况下与持续降雨的不同降雨强度下的边坡稳定性进行了分析。结果表明,在持续降雨作用下,边坡安全系数明显降低,但随着降雨强度的增大,安全系数降低幅度并不明显。

2 降雨作用对边坡稳定性的影响

模拟降雨作用下的滑坡,需要同时考虑应力场与渗流场的相互作用。张晓咏等使用强度折减法结合渗流模块对渗流作用下的边坡稳定性分析进行了分析。

本章根据本文中工程案例的滑坡模型,边坡坡度为 20°-30°。其中,坡体覆盖层设置为粉质粘土的松散土体,下伏基岩为砂岩与泥岩,岩土体物理力学参数如表 1 所示。

使用 Abaqus 进行强度折减法和渗流场的耦合分析,模型采用二维断面,使用 Auto Cad 建模软件建立后导入 Abaqus 中。总体为具有变化坡度的自然边坡模型。对底面的 x 、 y 轴两个方向进行位移限制,对两侧的 x 轴方向进行位移限制。

2.1 自然工况下边坡稳定性分析

在 Abaqus 的强度折减法中,需要对土体材料参数中的摩擦系数 $\tan\phi$ 和粘聚力 c 进行折减,折减系数定义为 F_{trial} ,也即安全系数 F_s ,得到一组新的 c_{trial} 和 ϕ_{trial} ,并通过定义场输出进行计算。其计算公式如下所示:

$$c_{\text{trial}}=c/F_{\text{trial}} \quad (1)$$

$$\phi_{\text{trial}}=\arctan(\tan\phi/F_{\text{trial}}) \quad (2)$$

然后设置两个分析步,第一个分析步为地应力平衡步,第二个分析步为强度折减步。在地应力平衡步中,施加垂直向下的重力。在强度折减步中,通过场的变化,使安全系数由 0.5 逐渐变化至 2。在计算失效时的安全系数就是本模型的边坡稳定性安全系数 F_s 。

在地应力平衡时的最大主应力和最小主应力分布。最大主应力和最小主应力的峰值出现在地层埋深最深的位置,分别为 1.27 MPa 和 3.01 MPa。

地应力平衡时的塑性区分布,地层均无塑性区产生,地应力平衡正确,可基于此地应力平衡模型进行下一步

计算。

经计算,自然工况下此边坡的安全系数为 1.49,安全储备较高。即将发生滑坡时的塑性区分布,在边坡最陡峭的地方存在滑坡风险,形成了贯通的塑性区。滑坡长度约为 180m,高度约为 10m。这与本文中进行分析的 GNSS 实际工程案例的滑坡区域大小相似,说明本分析准确性较高。

即将发生滑坡时的位移矢量,可以看出,在滑坡体的最下方位移矢量最大,说明在强度不断折减时,滑坡体底部受力最大,位移在此处不断叠加,最终形成了下大上小的滑坡位移趋势。

x 、 y 轴的位移分布云图, x 轴的最大位移出现在滑坡体的下方,最大为 13.1m,这是由于此处土体受到横向的推挤作用,位移叠加最大。 y 轴的最大位移出现在滑坡体的中上方,最大为 7.67m,类似于沉降位移的叠加,出现在土体上方位置。

2.2 不同降雨强度下边坡稳定性分析

采用 Abaqus 中的渗流模块进行不同强度的连续降雨工况下的边坡稳定性分析,土层采用的渗透系数 $k=2.2 \times 10^{-4}$ m/s。分别用 5mm/h, 10mm/h, 15mm/h 的孔隙水压力来模拟小雨、中雨和大雨的渗透强度。孔隙水压力作用于土层上表面,渗出边界为土层下表面。对土层进行 24h 的渗透后的空隙水压力如图 7 所示,可见降雨强度越大,孔隙水压力峰值越大。

不同降雨强度下的塑性区分布如图 8 所示,与自然工况下的边坡塑性区不同,在降雨条件下,边坡出现多层贯通现象,且随着降雨强度的增大,边坡贯通区域与贯通强度均有所增大。

边坡在不同降雨强度下的安全系数,在自然工况下,安全系数为 1.49,在小雨工况下,安全系数为 1.10,在中雨工况下,安全系数为 1.05,在大雨工况下,安全系数为 1.01。可见降雨渗流作用对边坡安全稳定性的影响较大,即使小雨,也会使边坡稳定性大幅降低。

3 GNSS 技术工程应用

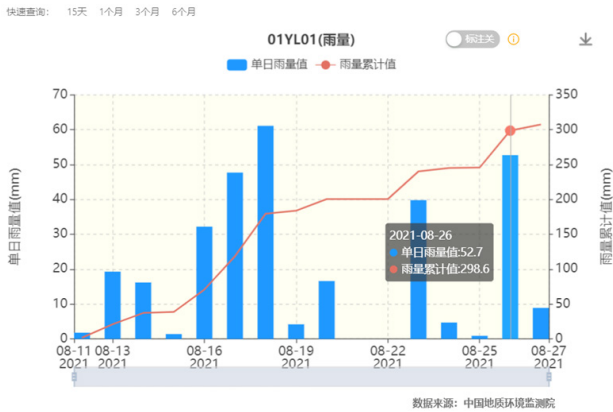
3.1 工程背景

该滑坡位于庄房村委会新文小组北东侧的斜坡上临近红翠线公路,滑坡周界清晰,滑向 208°,地形坡度 25°-30°,平面上呈“圈椅”状,滑坡长约 200m,宽约 70m,厚 5m-8m,体积约 8.4 万 m^3 ,规模为小型,为类型为牵引式滑坡,滑坡后缘变形严重,形成多个错台,陡坎高 1m-2m,可见裂缝延伸长约 3m-7m,宽 2cm-10cm,可见深度 20cm,滑坡下覆岩体为二叠系中统黑泥哨组:灰岩、玄武岩(P2h)。滑坡本身威胁红翠线公路。但滑坡处于一个冲沟源头,冲沟沟口为村庄,距离滑坡仅有 200m。

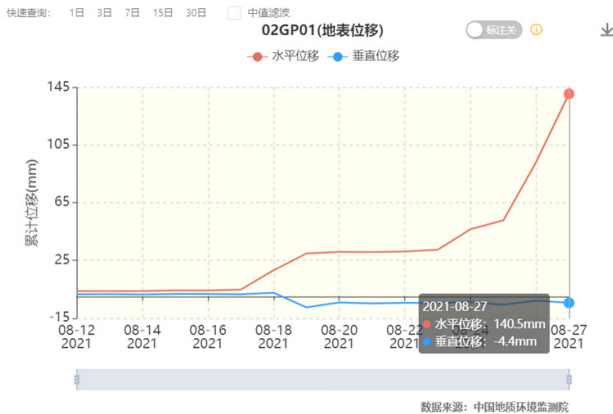
3.2 预警信息

2021 年进入汛期后,该点经历多轮连续降雨,7 月初和 8 月底降雨量较大。日降雨量最高为 52.7mm。查看平台

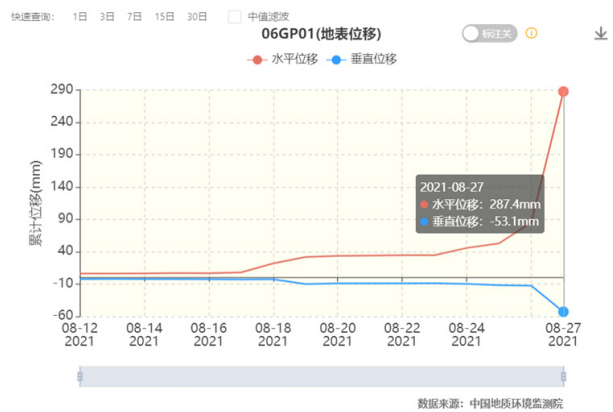
地表位移监测曲线, 安装的 2 个 GNSS 地表位移测站均监测到连续变形(如下图), 平面位移较大, 2021 年 7 月 27 日 10 点累计变形量达到 287.4mm, 且还在处于持续变形状态。



降雨量数据



地表位移数据 1



地表位移数据 2

滑坡发生时降雨量及地表位移数据变化

该隐患点处于蠕滑变形阶段, 处于不稳定状态, 此次预警为红色警报级有效预警。滑坡后缘红翠线公路出现张拉裂缝, 滑坡中部错台加剧, 判断滑坡处于蠕滑变形阶段, 遇强降雨存在进一步变形破坏的可能。



滑坡发生后的裂缝

4 结论

使用 Abaqus 有限元分析软件中的渗流模块与强度折减法进行耦合, 分析了云南常见边坡在连续的、不同降雨强度下的边坡稳定性, 并通过 GNSS 实际工程案例对降雨量与滑坡灾害等级的判定, 主要结论如下:

(1) 连续的降雨会导致边坡稳定性大幅下降, 本文中的计算模型在自然工况下安全系数为 1.49。但在 5mm/h、10mm/h 和 15mm/h 的 24h 连续降雨条件下, 安全系数大幅下降, 分别为 1.10、1.05 和 1.01。

(3) 通过分析 GNSS 案例的降雨量与地表位移监测数据可知, 降雨量到一定程度后会发生不同等级的滑坡, 实际变形量与监测变形数据吻合, 预警时间准确。

(4) 滑坡发生后的灾情情况与预警等级保持一致, 证明使用 GNSS 可有效的对灾情等级做出研判, 便于应急管理人员对滑坡灾害进行防控处理。

参考文献

- [1] 吕奕杰, 叶健, 徐清杨, 等. 面向大规模滑坡灾害模拟的地形建模与三维可视化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 467-474.
- [2] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2161-2172.
- [3] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, (03): 343-346.