

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0078-05

典型涉水滑坡机理及演化规律研究

卿 菁, 张凌晨, 卢应发

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为探究涉水滑坡的形成机理和变形的动态变化规律, 首先研究岩土工程中常用的弹塑性理论及三维非饱和和渗流理论的基本原理。其次, 基于 Rhino 软件利用高精度等高线建立卡子湾滑坡的真三维地质模型。然后, 基于三维有限差分软件 FLAC3D, 应用 Fish 语言编写计算程序。最后, 将库水调度周期的五个阶段概化为具体工况, 并计算分析卡子湾滑坡的位移和塑性区变化特点。结果表明: 库水位的升降均对滑坡的变形均有明显影响, 其中快速下降阶段的影响最为显著; 卡子湾滑坡为动水压力型牵引式滑坡。

[关键词] 涉水滑坡; 变形; 形成机理; 动态演化规律

[中图分类号] TU431 [文献标识码] A

滑坡是较为常见的地质灾害, 常会带来巨大的损失。影响滑坡稳定性的因素多种多样, 其中包括地质运动、气象条件、人类工程活动等^[1-6]。

自从三峡大坝建成水库蓄水以来, 使大量自然边坡开裂形成滑坡, 同时使原本沉睡已久的古老滑坡又重新活跃了起来。然而, 水库周期性蓄水是引起库区滑坡变形的主要原因之一。殷跃平^[7]系统地研究了三峡库区滑坡的渗透压力问题, 指出考虑动水压力在滑坡防治中的重要性, 并提出水位下降对滑坡稳定性的影响与滑动带的平缓程度相关。郑晓晶等^[8]研究了库水位变化对滑坡稳定性的影响规律。徐平等^[9]研究了一个完整的库水位变化周期内的马家沟滑坡稳定性演化规律, 并针对该滑坡提出了加固处理方法。陆世轩等^[10]研究了老蛇窝滑坡的动态稳定性。

现行滑坡稳定性分析中, 极限平衡法不能真实地体现滑坡的应力状态与位移演化规律。然而, 数值分析方法不仅能计算滑坡的应力分布及变形规律, 而且可较准确地体现出滑坡整体所处的状态。因此, 这里采用有限差分法对实际工程案例中的滑坡进行数值模拟计算, 从而对临水库大型滑坡的成因机制以及动态发育规律进行探究。

1 理论基础

1.1 本构模型

在岩土工程中, 弹性本构模型与摩尔-库伦本

构模型较为常用^[11]。弹性本构模型基于剪切模量与体积模量两个参数, 适用于以弹性变形为主的材料。摩尔库伦本构关系基于粘聚力、内摩擦角、剪胀角与抗拉强度等参数, 适用于弹塑性材料的模拟计算。故这里在模拟计算的过程中采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 弹塑性本构模型。

1.2 屈服准则

由于滑坡体岩土材料的复杂性使摩尔-库伦本构模型所需的参数中剪切模量与体积模量的试验获取较为困难, 故采用根据材料弹性模量与泊松比进行弹性力学换算, 换算依据的公式如下^[12]:

$$k = \frac{E}{3(1-2\mu)}, G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

式中: E 为弹性模量; μ 为泊松比; k 为体积模量; G 为剪切模量, 其中 E 、 k 、 G 的单位均为 Pa, μ 无量纲。

为了与摩尔-库伦本构模型相对应, 本文在模拟计算过程中采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 屈服准则。对应的屈服判据为^[13]:

$$F^S = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2C \sqrt{N_\varphi} = 0$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中: c 为粘聚力, Pa; φ 为摩擦角, ($^\circ$); σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力, F^S 为材料剪应力。

1.3 渗流基本原理

在库水位周期作用下, 滑坡介质中水的状态是

[收稿日期] 2020-03-06

[基金项目] 国家自然科学基金(41372363, 41641027); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005); 湖北省科技厅自然科学基金资助项目(2017A C A 188)

[第一作者] 卿 菁(1996-), 女, 湖南永州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向岩土力学理论的工程应用

一个由非饱和到饱和再到饱和的往复过程。考虑滑坡岩土体各向异性,由达西定律推导得三维非饱和渗流的基本微分方程为^[14-16]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = m_v \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中: H 为水头, m ; Q 为流量, m^3 ; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数; m_v 为比水容量, cm^2/kg ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

2 滑坡概况

2.1 地理位置

卡子湾滑坡在行政区域上,位于湖北省秭归县归州乡彭家坡 6 组。地理坐标为北纬 $31^{\circ} 0' 48''$, 东经 $110^{\circ} 41' 37''$ 。滑坡坐落在归州河左岸,距离归州河入江口约 1900 m。滑坡处于坡度在 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围的顺向斜坡之上。

2.2 水文地质特征

卡子湾滑坡的地质形态特征如图 1 所示。滑坡的平面分布区域形状近似一个开口朝向归州河的簸箕,其前缘没入归州河。滑体前部坡度较缓,中部有 100 m 左右的顺坡向平台,此处房屋较多。滑体受季节性雨水冲刷,形成了两道冲沟,分别位于滑坡两侧。滑坡外形突出,近似成阶梯状,其坡长约 1270 m,坡高约 635 m。



图 1 卡子湾滑坡外观全貌

卡子湾滑坡受地下水与地表水的共同作用。滑坡地下水受三峡水库水位的周期性变化及大气降水的影响,其存在形式包括滑床中透水性较强的滑移碎裂岩中的裂隙水及滑体具有透水性的堆积物孔隙水。影响滑坡的地表水主要为归州河,是长江的支流,其水位受库水调度及降雨周期的影响。

2.3 滑坡物质组成

卡子湾滑坡的滑体物质呈上下两层分布。滑体上层物质组成为粉质黏土夹杂碎石块而形成的碎石土,且块石的分布十分不均匀,前部坡脚较多,向中部与后部逐渐较少。滑体下层物质的主要组成成分为砂岩,其中还含有夹泥页岩,故具有较大的孔隙度,且透水性良好。

滑动带的物质结构分布同样为上下两层结构,

其上层部分由堆积碎石土覆盖碎裂岩组成,下层部分由碎裂岩覆盖层间错动带组成。

滑床的岩土体物质类型属侏罗系上统遂宁组 (J_3s),其组成成分包括长石砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩(呈紫红色)及泥岩与砂岩交互层。滑坡东北部的滑床侧向出露基岩产状为 $300^{\circ} \angle 34^{\circ}$;西南部的滑床岩石产状为 $65^{\circ} \angle 66^{\circ}$ 。

3 变形分析

3.1 宏观变形

卡子湾滑坡的变形主要集中在中部和前部区域。如图 2 所示,根据工程地质勘察所得的变形情况将滑坡分为预警区、变形影响区和稳定区。变形预警区和变形影响区共同组成卡子湾滑坡的滑体,稳定区构成深层滑动带,稳定区之外为基岩滑床。



图 2 卡子湾滑坡工程地质平面图

三峡水库蓄水初期,卡子湾滑坡的滑体前缘和西北部首先出现裂缝及地表建筑变形。随后,滑坡前缘的裂缝发育,预警区中后部开始出现裂缝。至今,变形继续发展,滑坡前缘裂缝贯通,预警区中后部裂缝不断扩展,变形影响区前部开始发生变形。

3.2 成因与机制分析

卡子湾滑坡的前缘面向归州河,处于归州河沿南北方向急转弯的凹形河岸段。由于三峡水库蓄水作用导致归州河水位升高,淹没了滑坡前缘。在库水的侵蚀及河水的冲刷对滑坡的稳定性产生了影响。由于滑体物质成分的特征,在归州河的冲刷作用下,卡子湾滑坡前段形成临空面从而产生滑坡。因此,卡子湾滑坡体为动水压力型滑坡,也是牵引式滑坡。

此外,人类的耕植与工程活动导致植被与土体结构的严重破坏,故遇到暴雨等气象情况,雨水渗入坡体的速度增大,导致岩土体内含水量快速增长而软化。岩土体软化后,其强度下降,引起岩土体沿着下方滑动面产生剪切位移。

4 真三维数值模拟

4.1 模型的建立

基于 Rhino 软件建立真三维地质模型不仅能提高精度,而且能直观地展示与处理模型,同时克服了

数据文件建模方法费时多、工作量大、易出错的缺点。

根据卡子湾滑坡的地质特征和变形特点,基于Rhino建模软件,利用工程地质勘察所得的高精度地形等高线建立真三维地质模型。真三维模型建立的范围如图3所示,包含了滑体、滑带和滑床。卡子湾滑坡真三维地质模型根据工程地质剖面图确定滑体与滑动带的界面和滑动带与滑床的界面,克服了传统三维地质模型滑体与滑带取平均厚度而导致模型与实际不符的缺点(图3a、3b)。如图3c所示,模型沿主下滑方向(x 方向)的尺寸为1380 m;沿垂直于主下滑方向(y 方向)的尺寸为1709 m;模型底面标高为0 m($z=0$ m);模型沿竖直方向(z 方向)的尺寸为601 m,且底面标高为0 m($z=0$ m)。

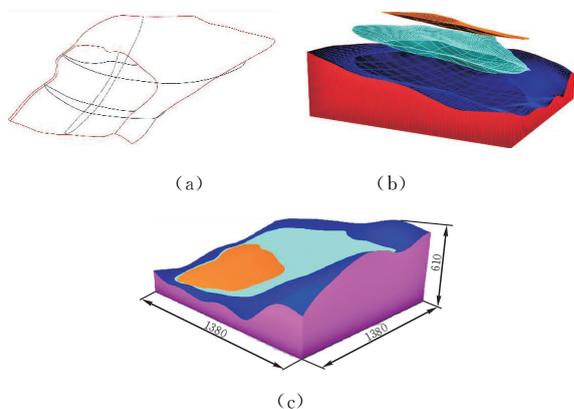


图3 真三维地质模型

运用网格插件Griddle进行真三维网格划分,得到真三维模型计算网格如图4所示。整个网格包含了55166个节点,90868个单元,其中计算网格以六面体单元为主。

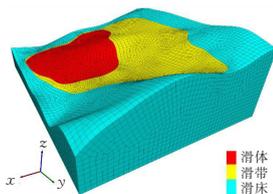


图4 模型计算网格

根据工程地质平面图所示主下滑计算剖面I-I'剖面的位置,在真三维地质模型上截取模型的主下滑计算剖面(图5),以便于对模拟结果进行分析。

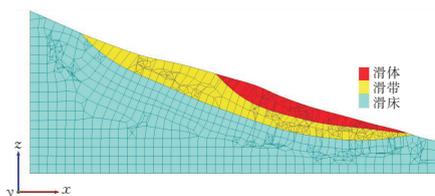


图5 模型主下滑计算剖面

4.2 模型参数

根据卡子湾滑坡的工程地质勘察资料,结合对滑坡试验数据的统计分析并采用工程类比法,综合获得卡子湾滑坡真三维数值模型计算参数(表1)。

表1 真三维数值模型参数

部位	滑体	滑带	滑床
容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	19.350	18.560	25.000
弹性模量 E/MPa	10.248	9.437	289.170
泊松比 μ	0.288	0.270	0.440
粘聚力 c/Pa	36.000	28.000	960.000
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	24.200	18.300	40.000
抗拉强度/MPa	0.003	0.002	0.100
渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.650×10^{-10}	3.550×10^{-11}	9.800×10^{-12}

4.3 边界条件

如图6所示,对真三维地质模型底面($z=0$ m)施加固定约束(x, y, z 方向均无位移)边界条件,对外法线沿 x 方向的边界面($x=0$ m、 $x=1709$ m)施加与边界面外法线反向的单向约束,对外法线沿 y 方向的边界面($y=0$ m、 $y=1380$ m)施加与边界面外法线反向的单向约束。在175 m库水位与重力(重力加速度取 $g=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)作用下对模型进行初始化计算,并将达到平衡的应力应力场作为真三维模型的初始应力场。

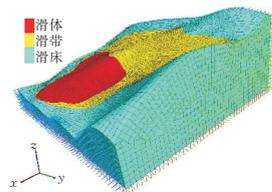


图6 边界条件

4.4 计算工况

对水库蓄水后的一个完整的库水位升降周期内的各个阶段进行概化,得到数值模拟计算工况(表2)。基于此,在一个完整的库水位调度周期内,对渗流作用下的卡子湾滑坡进行数值模拟计算,并分析此动态过程中滑坡的位移及塑性区的变化规律。

表2 计算工况

阶段	变化特征	起止时间/d	库水位/m	升降速率/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
I	缓慢下降	d1~d123	175~159	0.13
II	快速下降	d124~d147	159~145	0.6
III	维持不变	d148~d222	145	0
IV	快速上升	d223~d289	145~175	0.45
V	维持不变	d290~d365	175	0

表中荷载组合方式为重力+库水作用

4.5 计算分析

基于Fish语言编写程序,以实现库水位反复升降各个阶段的模拟过程,针对不同的库水位变化速

率,施加相应的渗流作用力,并导入 FLAC3D 进行运算。

1)位移分析 一个完整的库水位调度周期内卡子湾滑坡主下滑计算剖面的位移如图 7 所示。

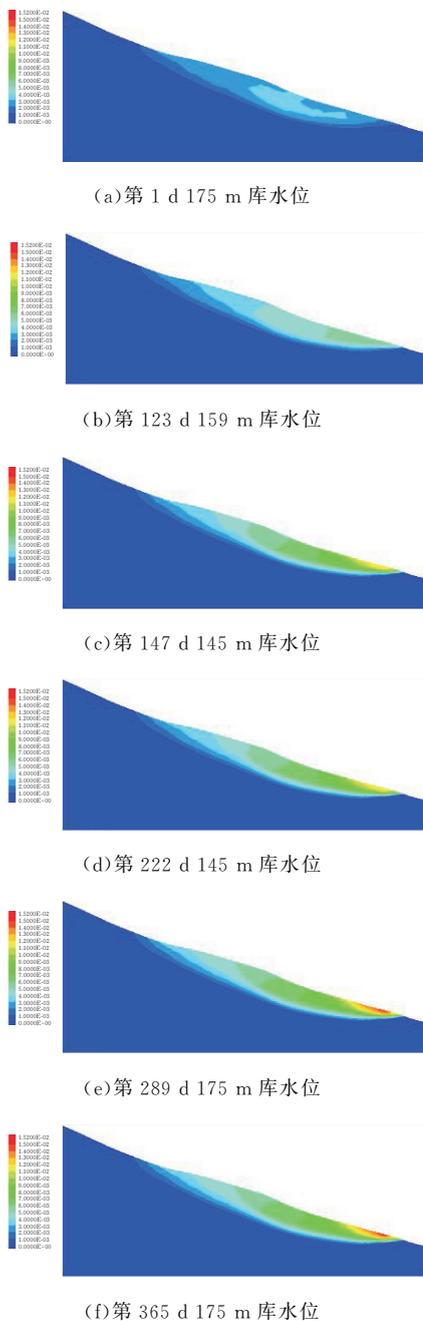


图 7 位移云图

由图 7 可知,库水位作用第一阶段初滑坡的最大位移为 3.801 mm;第一阶段末滑坡的最大位移为 5.918 mm,最大位移阶段增量为 2.116 mm,日增量为 0.017 mm;第二阶段末滑坡的最大位移为 14.093 mm,最大位移阶段增量为 8.175 mm,日增量为 0.341 mm;第三阶段末滑坡的最大位移为 15.672 mm,最大位移阶段增量为 1.579 mm,日增量为 0.021 mm;第四阶段末滑坡的最大位移为 16.147 mm,最大位移阶段增量为 0.474 mm,日增

量为 0.007 mm;第五阶段末滑坡的最大位移为 16.311 mm,最大位移阶段增量为 0.165 mm,日增量为 0.002 mm。在整个模拟周期内,最大位移呈增长趋势,位移的增长速率先增大后减小,快速下降期(第 II 阶段)的增长速率最大,高水位期的最小。

2)塑性区分析 一个完整的库水位调度周期内卡子湾滑坡的塑性区计算结果如图 8 所示。

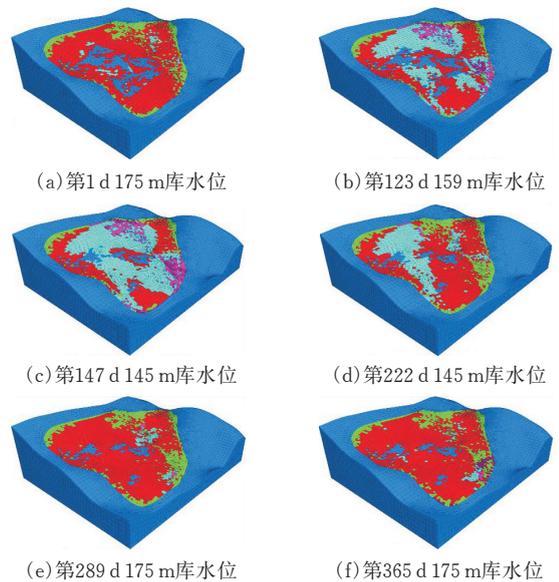


图 8 塑性区云图

由图 8 可知,在库水位调度模拟的第一阶段初大部分滑体单元处于初始地应力作用下的原状剪切状态,滑坡后缘小范围局部受原状拉张作用。随着库水位下降,现状剪切破坏塑性区的面积逐渐增大,滑坡后缘的拉破坏区逐渐扩展。低水位阶段,现状剪切塑性区的面积减小,后缘张拉区的面积持续增大。库水位上升过程中,现状剪切塑性区面积减小,原状剪切塑性区面积增大,后缘张拉破坏塑性区面积增大,且出现明显的拉剪破坏区。

根据塑性区演化规律可知,卡子湾滑坡在一个完整库水位调度周期内,其前缘主要是以拉剪的方式破坏。这是由于前缘受到归州河冲刷的作用而形成的。滑坡中前部由原本的受剪切状态逐渐转化为拉剪状态,故应力传递至中后部,导致滑坡后缘处于张拉应力状态。

5 结论

结合实例,采用有限差分法对三峡库区典型滑坡的变形机制及其动态发展规律进行了研究分析。

1)卡子湾滑坡的变形与库水位的波动关系十分密切。在库水位快速下降阶段,滑坡的变形增加最为明显。在库水位快速上升阶段,滑坡变形增加虽不及快降阶段显著,但仍较为明显。在滑坡防治中

需考虑水位降速和升速对稳定性的影响。

2)卡子湾滑坡塑性破坏区的变化特征与一般牵引式滑坡较为一致。其变形机理为:前缘受河水冲刷形成了利于滑移的临空条件,坡体结构松散且包含易形成滑动带的岩土层,在库水和降雨的动水压力作用下土体强度降低伴随岩体裂隙扩展而发生变形。

3)基于有限差分法数值模拟的滑坡变形特征分析结果与实地勘察的结论表现良好的一致性。有限差分法在大变形分析中具有较好的适用性。此外,本文的典型案例可为涉水滑坡的防治研究提供参考。

4)所取模型计算参数皆为定值。然而,滑坡岩土体物理力学参数在经历多次水库水位波动和降雨过程会发生变化,故应该建立考虑岩土体参数动态变化的分析机制,从而为滑坡的监测预报提供更为合理可靠的依据。

[参 考 文 献]

- [1] 曹瑾,张卫锋,双灵. 云南宁洱县普治村古滑坡的复活成因及防治建议[J]. 云南地质,2016,35(2):268-272.
- [2] 周样样. 陕南地区强降雨条件下突发型地质灾害成因机制研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [3] 王康年,戴启冰. 黄平县李家院老滑坡地质灾害特征及稳定性反演分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2012,29(6):39-43.

- [4] 郑金秀. 镇坪县宝塔梁滑坡稳定性分析与评价[D]. 西安:西安科技大学,2012.
- [5] 曾凡稳. 南京地区下蜀土滑坡稳定性影响因素分析[J]. 路基工程,2010(2):132-134.
- [6] 王少飞. 重庆奉节大坪滑坡稳定性分析及评价[D]. 西安:西安科技大学,2008.
- [7] 殷跃平. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2003(3):4-11.
- [8] 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(2):29-32.
- [9] 徐平,李同录,李萍. 考虑非饱和渗流作用下三峡库岸滑坡稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):7-12.
- [10] 陆世轩,肖诗荣,周俊,等. 库水升降速率对老蛇窝滑坡稳定性影响分析[J]. 人民长江,2017,48(8):38-43.
- [11] 白建方,董士欣. 常用岩土本构模型的选择及对场地动力反应分析结果的影响[J]. 震灾防御技术,2017,12(3):635-645.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [13] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [14] Fredlund, Rahardjo. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley and Sons Inc,1993.
- [15] Fox J A. An Introduction to Engineering Fluid Mechanics[M]. London:Palgrave,1977.
- [16] Wp Graebel, As Paintal. Engineering Fluid Mechanics [J]. Applied Mechanics Reviews,2001,54(5):89.

Study on Mechanism and Evolution of Typical Wading Landslide

QING Jing, ZHANG Lingchen, LU Yingfa

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to explore the formation mechanism of wading landslide and the dynamic change law of deformation, the basic principles of elastic-plastic theory and three-dimensional unsaturated seepage theory commonly used in geotechnical engineering were firstly studied. Secondly, based on Rhino software, the true 3D geological model of kaziwan landslide was established by using high precision contour line. Then, grounded on the three-dimensional software FLAC3D with finite difference method, the calculation program was written by Fish language. Finally, the five stages of reservoir water dispatching cycle were generalized into specific working conditions, and the displacement and plastic zone variation characteristics of the landslide in kaziwan were calculated and analyzed. The analysis results show that the rise and fall of reservoir water level has obvious influence on the deformation of the landslide, and the influence during the rapid decline stage is the most significant. The slide of kaziwan is a traction landslide under dynamic water pressure.

Keywords: wading landslide; deformation; formation mechanism; dynamic evolution rule

[责任编辑:裴 琴]