

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.145



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟方法

王艳昆^{1,2}, 温韬¹, 王鲁琦³, 胡明毅¹, 魏梦雪¹

(1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 2. 中国地质大学岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:准确获取库岸滑坡在动水作用下的多场信息是可靠评价滑坡稳定性的重要基础。为克服 GeoStudio 和 FLAC3D 数值软件在模拟库岸滑坡多场信息上的限制,提出一种 GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟方法。该方法首先通过 GeoStudio 模拟动水作用下的滑坡时变渗流场,然后通过编制接口程序实现 GeoStudio 模型和渗流场向 FLAC3D 的快速转换。在此基础上,依据岩土体的遇水特性和有效应力原理,修正 FLAC3D 模型中的岩土体参数与初始应力,以计算滑坡的应力应变。采用库水位骤降条件下库岸滑坡大型物理模型试验验证方法的有效性,结果表明:采用该方法模拟的滑坡多场信息演化趋势与物理模型试验结果基本一致,监测点孔隙水压力的最大平均模拟误差小于 10%,土水总压力的最大平均模拟误差小于 33%;模拟结果准确再现了库岸滑坡物理模型试验的牵引式多重滑面滑动破坏模式和最终滑面位置。

关键词:库岸滑坡;多场信息;互馈;演化机制;数值模拟

中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2026)01-0036-08

Multi-field information simulation method of reservoir landslide with mutual feedback between GeoStudio and FLAC3D

WANG Yankun^{1,2}, WEN Tao¹, WANG Luqi³, HU Mingyi¹, WEI Mengxue¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, P. R. China; 2. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Accurately obtaining multiple-field information on the reservoir landslide subjected to dynamic water action is an important basis for reliably evaluating landslide stability. To overcome the limitations of GeoStudio

收稿日期:2023-06-19

基金项目:国家自然科学基金(42307242);湖北省自然科学基金(2023AFB322);岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放基金(202211);西藏自治区科技计划(XZ202202YD0007C)

作者简介:王艳昆(1990-),男,博士,副教授,主要从事滑坡预测预报与防治研究,E-mail:ykwang@yangtzeu.edu.cn。
温韬(通信作者),男,教授,E-mail:wentao200840@yangtzeu.edu.cn。

Received: 2023-06-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42307242); Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2023AFB322); Open Fund of Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education (No. 202211); Science and Technology Program of Tibet Autonomous Region (No. XZ202202YD0007C)

Author brief: WANG Yankun (1990-), PhD, associate professor, main research interests: landslide prediction and prevention, E-mail: ykwang@yangtzeu.edu.cn.

WEN Tao (corresponding author), professor, E-mail: wentao200840@yangtzeu.edu.cn.

and FLAC3D numerical software in simulating multiple-field information of reservoir landslides, this paper proposes a method for simulating multiple-field information of reservoir landslides with mutual feedback between GeoStudio and FLAC3D. This method first simulates the time-varying seepage field of landslides under dynamic water action using GeoStudio and then achieves fast conversion of the GeoStudio model and seepage field to FLAC3D by developing an interface program. Based on the hydrological characteristics of the rock-soil mass and the principle of effective stress, the soil parameters and initial stress in the FLAC3D model are modified to calculate the stress and strain of the landslide. The effectiveness of this method is verified by a large-scale physical model test of a reservoir landslide under a sudden drop in reservoir water level. It can be observed that the simulated evolution trend of multiple-field information of landslides using this method is consistent with the physical model test results. The maximum average simulation error of pore water pressure at monitoring points is less than 10%, and the maximum average simulation error of total stress is within 33%. The simulation results accurately reproduce the traction multiple slip surface failure mode and final slip surface location of the reservoir landslide physical model test.

Keywords: reservoir landslide; multi-field information; mutual feedback; evolution mechanism; numerical simulation

中国水库大坝已超过9.8万座^[1],以三峡库区为代表的高坝库区常集中在构造作用强烈、地质环境脆弱的西南地区,区内库岸滑坡灾害极其发育,已成为制约水电工程效益、威胁库区安全的重要因素。受内外地质营力影响,库岸滑坡演化具有复杂性、随机性和多样性,使得其变形破坏机理的准确揭示和稳定性的可靠评价面临巨大挑战。降雨、库水位升降等动水作用是库岸滑坡变形滑移的重要诱发因素^[2],动水作用下库岸滑坡渗流、应力、变形等多场信息始终处于动态变化之中,导致滑坡稳定性不断演化。因此,准确获取库岸滑坡多场演化信息对库岸滑坡稳定性的可靠评价至关重要^[3]。

数值模拟是获取库岸滑坡多场信息的重要手段,其中GeoStudio和FLAC3D是现阶段库岸滑坡数值模拟常用的两款商业软件。GeoStudio易于上手、建模方便,拥有强大的饱和-非饱和渗流计算功能,可设置复杂的水力边界条件(如降雨强度和库水位高程随时间变化边界),且内置多种极限平衡法,常被用于库岸滑坡渗流场模拟和安全系数计算^[4-6]。然而,GeoStudio内置本构模型较少,难以模拟库岸滑坡大变形,因此,较少被用于库岸滑坡变形破坏机理分析。FLAC3D内置弹、塑性材料本构模型丰富,结构形式多样,易于二次开发,大变形模拟收敛效果好,常被用于库岸滑坡变形破坏机理分析^[7-8]。然而,FLAC3D不能直接进行非饱和渗流模拟,饱和-非饱和渗流计算效率较低,难以设置作用范围和大小均随时间变化的库水位边界,限制了其在库岸滑坡数值分析上的应用。为在FLAC3D中实现滑坡饱和-非饱和渗流模拟,部分学者采用FISH函数二次开发,以实现降雨条件下滑坡饱和-

非饱和渗流模拟功能^[9-12],但并未涉及作用范围和大小均随时间变化的库水位升降条件下滑坡饱和-非饱和渗流模拟。有学者^[13]通过将GeoStudio计算的不同时刻的浸润线导入到FLAC3D,从而间接生成孔隙水压力场。但该方法不能直接生成浸润线以上的负孔隙水压力场,对于存在暂态饱和区初始孔隙水压力场的生成更是无能为力,且该方法一般是手动操作,步骤繁琐,当需要导入多个时刻的浸润线时,计算效率较低。

由于GeoStudio和FLAC3D软件的上述局限性,在利用其进行库岸滑坡的演化机理分析与稳定性评价时面临诸多困难。此外,如果选择自编、自学或购买其他软件进行库岸滑坡数值分析,会增加额外的学习负担、计算负担和经济负担,且所编、所学、所买的软件并不一定能胜任库岸滑坡数值分析工作,存在一定的沉没成本风险。考虑到GeoStudio和FLAC3D两款软件在滑坡研究领域的广泛应用,研究如何充分结合其自身的优点,以准确实现库岸滑坡多场信息高效模拟,具有显著的实际意义和价值。充分发挥GeoStudio与FLAC3D的优点,可以降低学习成本、计算成本和经济成本,提高分析的准确性和效率,从而更好地应对库岸滑坡灾害的挑战。笔者提出一种GeoStudio与FLAC3D互馈的库岸滑坡多场信息演化过程模拟方法,并依据库岸滑坡大型物理模型试验对其有效性进行验证。

1 方法步骤

渗流场模拟为GeoStudio软件固有功能,笔者主要介绍GeoStudio模型和渗流场向FLAC3D模型

和渗流场的转换过程,以及转换后 FLAC3D 模型参数及应力修正的方法步骤。

1.1 GeoStudio 模型转换为 FLAC3D 模型

采用的数值软件版本为 GeoStudio 2012 和 FLAC3D 5.0。由于 GeoStudio 2012 模型为二维有限元模型,而 FLAC3D 模型为三维模型,为实现二维模型向三维模型的转变,沿二维模型剖面的法向方向拉伸一定厚度,建立三维模型。GeoStudio 有限元网格单元类型为三角形和四边形单元,法向拉伸后,三角形和四边形单元变为楔形体(wedge)单元和六面块体单元(brick),它们之间的网格单元对应关系如图 1 所示。

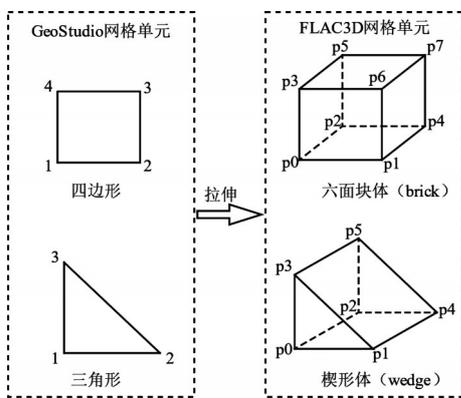


图 1 GeoStudio 和 FLAC3D 网格单元对应关系
Fig. 1 Correspondence between GeoStudio and FLAC3D grid elements

基于以上网格对应关系,采用 Matlab 编制接口程序,实现 GeoStudio 二维模型向 FLAC3D 三维模型的转换,具体步骤如下:

1) 在 GeoStudio 平台 SEEP/W 模块中建立滑坡二维数值模型,对不同滑坡地层进行分组;

2) 将 GeoStudio 文件另存为后缀为“.xml”的文件,如“slope.xml”;

3) Matlab 读取“slope.xml”文件,自动提取网格单元体编号(ID)及其所对应的分组编号、单元节点 ID、节点个数、节点横纵 x 、 z 坐标;

4) 设定二维数值模型的法向拉伸厚度,假设拉伸厚度为 1 m, y 方向为二维剖面的法线方向,生成 FLAC3D 三维模型的网格节点坐标;

5) 根据 FLAC3D 网格单元和节点排列规则^[14],将提取出来的单元、节点和分组信息编排成 FLAC3D 建模信息,保存建模信息文件为“slope_mesh.flac3d”;

6) 在 FLAC3D 中通过 impgrid 命令导入“slope_mesh.flac3d”文件,完成数值模型建立。

1.2 GeoStudio 渗流场导入 FLAC3D 渗流场

由于 GeoStudio 模型向 FLAC3D 模型的转换是

1:1 转换,两种模型各个网格节点位置一致,因此,可将 GeoStudio 计算的各个网格节点的孔隙水压精准赋值到与 FLAC3D 模型相对应的网格节点,实现 FLAC3D 渗流场的快速生成,具体步骤如下:

1) 提取“node.csv”文件中节点 ID 号及其所对应的总水头值,将总水头提取结果写入“seep.txt”文件,更改文件后缀名为“seep.tab”,供 FLAC3D 读取;

2) 编制 FISH 函数读取“seep.tab”文件中的总水头值 h ,并遍历 FLAC3D 网格节点 z 坐标。由于总水头 h 近似等于压力水头和位置水头之和,因此网格节点孔隙水压力 u_w 为

$$u_w = (h - z)\gamma_w \quad (1)$$

式中: γ_w 为水的重度,取 10 kN/m^3 。

1.3 FLAC3D 滑坡模型岩土体参数分区

渗流场导入成功后,在 FLAC3D 中设置无渗流模式,计算滑坡应力应变。该模式下 FLAC3D 软件并不会自动更新饱和区和非饱和区的岩土体参数,因此,需对 FLAC3D 滑坡模型岩土体参数进行分区赋值,主要包括岩土体密度、变形模量、泊松比、抗剪强度参数等。

1.3.1 岩土体密度分区

岩土体密度计算公式可表示为

$$\rho = \rho_d + nS_r\rho_w \quad (2)$$

式中: ρ 为湿密度; n 为孔隙率; ρ_w 为水的密度; ρ_d 为干密度; S_r 为单元饱和度。

由于 $\theta_w = nS_r$, 则式(2)可变换为

$$\rho = \rho_d + \theta_w\rho_w \quad (3)$$

土体体积含水率函数可用 Van Genuchten 模型表示。

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \alpha((u_a - u_w))^n\right]^{(1-1/n)}} \quad (4)$$

式中: θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; u_a 为孔隙气压力,计算时一般将其设定为 0; α 、 n 为拟合参数。

由于孔隙水压力 u_w 已通过 GeoStudio 计算得到,因此,根据式(2)~式(4)编制 FISH 命令,即可更改模型饱和区和非饱和区岩土体密度。

1.3.2 变形模量与泊松比分区

不同含水率条件下岩土体的变形模量 E 和泊松比 μ 不同,目前没有统一的函数关系式定量描述含水率与岩土体变形模量和泊松比之间的关系。简便起见,可取饱和区岩土体变形模量和泊松比为饱和水状态下的试验参数,非饱和区统一取天然状态下岩土体试验参数,具体分区赋值步骤为:

1)编制 FISH 函数遍历各单元饱和度是否小于 1,划分饱和区和非饱和区;

2)饱和区变形模量与泊松比赋值为饱水状态下的试验参数,非饱和区参数赋值为天然状态下的试验参数。

1.3.3 抗剪强度参数分区

根据非饱和土力学理论,岩土体抗剪强度 τ_f 可用式(5)表示。

$$\tau_f = c' + \left(\sigma - u_w \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (5)$$

式中: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; σ 为总应力。

由式(5)可知,当采用固结排水试验获得的有效应力抗剪强度参数时,可不用对模型饱和区和非饱和区的抗剪强度参数进行分区;如果仅有饱和快剪和天然快剪试验的抗剪强度参数,则需对饱和区和非饱和区抗剪强度指标进行分区赋值,分区赋值步骤与 1.3.2 节的赋值步骤基本一致。

1.4 模型初始应力调整

模型初始应力调整主要分为初始总应力修正和非饱和区吸应力修正。

1.4.1 初始总应力修正

在 FLAC3D 无渗流模式计算中,外界孔隙水压力导入后,将立即改变模型初始总应力中孔隙水压力和有效应力的比例,但并不能改变初始总应力的大小,导致导入后的模型初始有效应力与导入前不一致,为保证孔隙水压力导入后的初始有效应力与导入前一致,需对孔隙水压力导入后的模型总应力进行修正。

依据毕肖普有效应力公式及 Lu 等^[15]的研究可知,岩土体有效应力可表示为

$$\sigma' = \sigma - u_a - \sigma^s \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma^s = -(u_a - u_w), u_a - u_w \leq 0 \\ \sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{[1 + (\alpha(u_a - u_w))^n]^m}, u_a - u_w \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ' 为有效应力; σ^s 为吸应力; σ 为总应力。

设定 u_a 为 0,结合式(4)、式(6)、式(7)可得

$$\sigma' = \sigma - u_w \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \sigma - u_w \frac{S_r \theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

假定孔隙水压力导入前模型初始吸应力和总应力分别为 σ_0^s 和 σ_0 ,导入后模型初始吸应力为 σ_1^s ,初始总应力需修正为 σ_1 ,依据孔隙水压力导入前后初始有效应力保持不变的原则,即

$$\sigma_1 - \sigma_1^s = \sigma^0 - \sigma_0^s \quad (9)$$

将式(9)经数学变换可得孔隙水压力导入后的初始总应力为

$$\sigma_1 = \sigma^0 - (\sigma_0^s - \sigma_1^s) \quad (10)$$

依据式(10)编制 FISH 函数,即可实现模型初始总应力修正。

1.4.2 非饱和区吸应力修正

由于 FLAC3D 默认节点饱和度为 1,当渗流场为外界导入时,软件不会自动更新非饱和区的饱和度,软件仍然默认非饱和区的饱和度 $S_r=1$,由式(7)、式(8)可知,其将使非饱和区的吸应力与实际不符,导致有效应力计算错误。因此,需对 FLAC3D 滑坡模型的非饱和区吸应力 σ^s 进行修正,以保证模拟情况的有效应力与实际情形相符。根据式(8),可通过 FISH 函数修正非饱和区的饱和度,从而改变非饱和区的吸引力 σ^s ,实现非饱和区有效应力的修正。

2 案例分析

通过大型物理模型试验,贾官伟等^[16-17]研究了库水位骤降这一动水作用下库岸边坡多场信息演化过程及边坡变形失稳产生滑坡的机理与失稳模式。该试验模型形态简洁经典,试验条件、过程及多场监测信息描述具体,试验结果显著,可为数值模拟分析及验证提供良好基准。笔者以该物理模型试验为例,对所提方法的有效性及其准确性进行验证。

2.1 物理模型试验概况

图 2 为物理模型试验示意图,试验边坡总高度为 6 m,其中基座高 2 m,边坡高 4 m。模型边坡基座长 15 m,坡顶长 5 m、宽 5 m,初始坡度为 45°。P-4、P-5、P-6 为预埋的孔隙水压力计,主要用于监测模型边坡在不同位置处的孔隙水压力变化情况。EP-1H 和 EP-2H 为水平土压力盒,用于监测土压力的水平分量;EP-1V 和 EP-2V 为竖直土压力盒,负责监测土压力的竖直分量。在研究中,贾官伟等^[16-17]基于以上各监测点的数据,对模型试验过程中的孔隙水和土压力变化进行了详细的分析和描述。笔者采用以上监测点数据对比分析数值模拟结果与实际模型试验结果,验证所提出方法的可靠性。

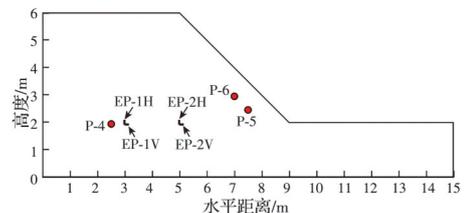


图 2 模型试验示意图(修改自文献[16-17])

Fig. 2 Schematic diagram of model test (modified from references [16-17])

试验用土为钱塘江边的砂质粉土, 比重为 2.69, 最大干密度为 1.57 g/cm^3 , 最优含水量为 18%。试验边坡采用“砂雨法”填筑, 填土干密度在 $1.26 \sim 1.43 \text{ g/cm}^3$ 之间, 结构较松散, 且具有一定非均质性, 总体呈随深度增大而增大趋势^[17]。填土平均饱和和渗透系数 k_s 为 $5.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 有效黏聚力为 1 kPa, 内摩擦角为 30° 。

试验水位首先从 0 m 缓慢上升至 5.6 m, 在水位缓慢上升过程中, 由于坡体填土逐渐饱和, 导致填土基质吸力逐渐丧失, 抗剪强度降低, 边坡坡面产生局部滑塌, 当坡外水位升至 5.6 m 时, 坡肩退到原位置后方 1 m 左右, 边坡坡度也由初始的 45° 变为 33° ^[16-17]。随后, 坡外水位以 1 m/h 的速率从 5.6 m 骤降至 3 m 水位, 水位骤降一方面使得坡外静水压力下降, 削弱了边坡的抗滑力, 另一方面使得坡体内部地下水来不及排出, 导致坡体内地下水位高于坡外水位。在水头差作用下, 坡体内部产生方向指向坡外的渗透力, 并随水位的逐渐降低而逐渐增大, 导致边坡整体下滑力逐渐增大, 两方面共同作用使得边坡安全系数降低, 致使坡顶逐步出现多条平行于边坡走向的张拉裂缝, 其宽度和深度不断加大, 并分别在第 56 min 发生滑块 1、第 100 min 发生滑块 2 和滑块 3 的多重滑面牵引式滑动^[16-17](图 3)。

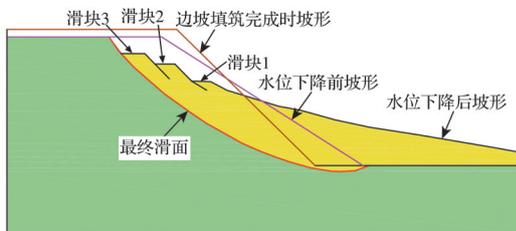


图 3 滑坡前与滑坡后坡形(修改自文献[16-17])

Fig. 3 Slope shape before and after landslide (modified from references [16-17])

2.2 数值模型设置

以水位骤降初始时刻的试验边坡模型为原型建立数值模型, 模型坡度为 33° 。图 4 为在 GeoStudio 的 SEEP/W 模块中建立的有限元模型, 网格单元类

型为三角形和四边形混合单元, 节点数为 1 518, 单元数为 1 426。模型初始水位为 5.6 m, 坡内水位与坡外水位一致。设定总水头以 1 m/h 的速率匀速下降的水位边界, 并将其施加于边坡坡面, 用于模拟库水位由 5.6 m 水位骤降至 3 m 水位, 坡体左右边界以及顶、底边界设定为不透水边界。

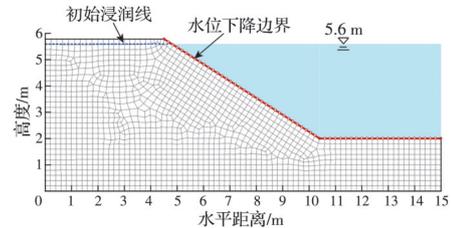


图 4 GeoStudio 有限元模型

Fig. 4 Geostudio finite element model

图 5 为由 GeoStudio 模型转换而成的 FLAC3D 有限差分模型。定义与坡外水头相对应的水头压力边界, 并将其施加于边坡坡面, 用于模拟库水位对边坡坡面的反压作用, 坡体前后左右设定法向位移约束, 底边界为位移全约束。

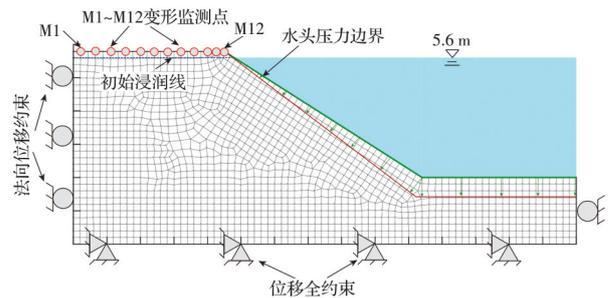


图 5 FLAC3D 有限差分模型

Fig. 5 FLAC3D finite difference model

填土本构模型采用理想弹塑性模型, 破坏准则为摩尔库伦破坏准则。假定填土材料各向同性, 不考虑填土材料的非均质性。依据相关文献^[16-18], 模型材料物理力学参数如表 1 所示。仿真计算时开启 FLAC3D 大变形开关, 以模拟边坡滑坡后的变形过程。仿真计算时间步长为 1 min, 计算总时间设置为 156 min, 存储每一个时间步的计算结果, 以便后处理分析。

表 1 数值模型物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of numerical model

$\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	E / MPa	μ	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$	$k_s / (\text{m/s})$	VG 模型参数			
						θ_s	θ_r	a / kPa^{-1}	n
1.3	18	0.3	1	30	5.3×10^{-6}	0.4	0.1	0.068 5	1.824

2.3 结果对比分析

基于所提方法再现该大型物理模型试验多场信息演化过程, 并与实际监测信息进行对比分析, 验证方法的合理性, 主要包括渗流对比分析、土水

总压力对比分析、变形对比分析。

2.3.1 渗流对比分析

图 6 为孔隙水压力模拟值与实测值对比结果。总体上看, 模拟值与实测值变化趋势较一致, 在具

体数值大小上存在较小差异。在逐渐解体发生滑坡的过程中,边坡原有的渗流通道可能会堵塞或扩大,进而使填土的渗流特性发生动态变化,因此,孔隙水压力的模拟误差可能主要源于数值模型仅为均值模型,未考虑填土材料渗透系数的时空变异性。P-4、P-5、P-6 模拟值多数小于实测值,平均相对误差分别为 9.06%、7.78%、6.26%,相对误差较小,表明孔隙水压力模拟值与实测值较吻合。由图 6 可知,坡内孔隙水压力随坡外水位下降而下降,但坡内孔压下降速率小于坡外水位下降速率,说明坡内水位下降速率滞后于坡外水位,将产生方向指向坡外的渗透力,从而加大边坡下滑力,不利于边坡稳定。

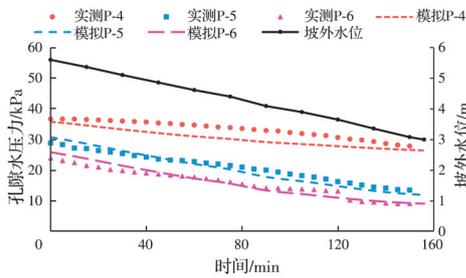


图 6 孔隙水压力模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and measured pore water pressure

2.3.2 土水总压力对比分析

图 7 为土水总压力模拟值与实测值对比结果,可以看出,二者变化趋势较一致,但具体数值差异较大,EP-1H、EP-1V、EP-2H、EP-2V 模拟值多数大于实测值,平均相对误差分别为 32.81%、6.62%、29.91%、26.62%,除 EP-1V 模拟值与实测值误差较小外,其余 3 个监测点模拟误差均较大,但总体处于可接受范围内。土水总压力的模拟误差一方面源于数值模型未考虑填土材料的非均质性,另一方面在于边坡从初始变形到最终失稳破坏发生滑坡是一个从连续力学变形到非连续力学变形的演化过程,在此过程中,土压力盒覆土不断解体、厚度不

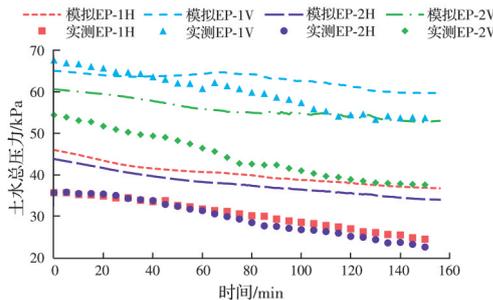


图 7 土水总压力模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of simulated and measured total soil-water pressure

断降低,而 FLAC3D 数值算法是基于连续介质力学的有限差分法,对模拟滑坡非连续介质力学变形破坏过程效果欠佳。由图 7 可知,随着坡外水位下降,各监测点土水总压力逐渐降低,主要是由于随着水位的下降,部分坡体由饱和状态转为非饱和状态,岩土体饱和容重降低,导致土水总压力减小。此外,在边坡不断破坏解体中,土压力盒覆土厚度不断减小,是导致土水总压力不断降低的另一重要原因。

2.3.3 变形对比分析

贾官伟等^[16-17]对滑坡过程及失稳模式进行了详细报道,但并未报道水位骤降过程中边坡变形的时间序列监测数据,因此,主要对比分析滑坡过程及失稳模式。图 8 为坡顶各监测点模拟总变形时间序列曲线(变形监测点位置见图 5)。由图 8 可以看出,在 0~60 min 内,各监测点变形速度缓慢,最大变形在 2 mm 以内,从第 67 min 开始,各监测点变形急剧加速,表明此时边坡开始失稳,也证明所提方法在模拟水位骤降诱发库岸边坡失稳过程方面的有效性。

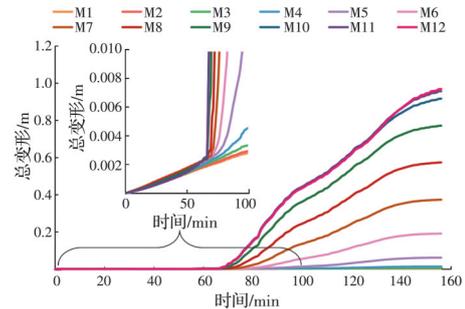


图 8 试验边坡坡顶各监测点模拟总变形时间序列曲线

Fig. 8 Simulated total deformation time-series curves of each monitoring point on the top of the experimental slope

图 9 为试验边坡不同时刻模拟总变形场。由图 9 可以看出,当边坡未发生滑坡时,边坡变形主要集中于坡顶中部,变形大小随深度的增大而逐渐减小。在第 67 min 边坡开始失稳时,滑坡范围为坡面上半部分,滑面形态约为圆弧形,深度为 0.5~1.0 m。随着水位的继续下降,滑坡范围与滑面深度逐渐增大,当模拟进行至第 100 min 时,滑坡范围基本扩展至整个坡面,滑面深度增大到约 1.5 m。当模拟进行至第 156 min 试验结束时,滑坡范围扩展至整个坡面,滑面深度增至约 1.7 m。从数值模拟变形可知,边坡失稳模式为具有多重滑面的牵引式滑动破坏,最终滑面形态为圆弧形,深度约为 1.7 m,这与实际观察到的滑坡最终滑面位置及失稳模式基本一致。

实际试验边坡产生大变形并发生第 1 次滑坡

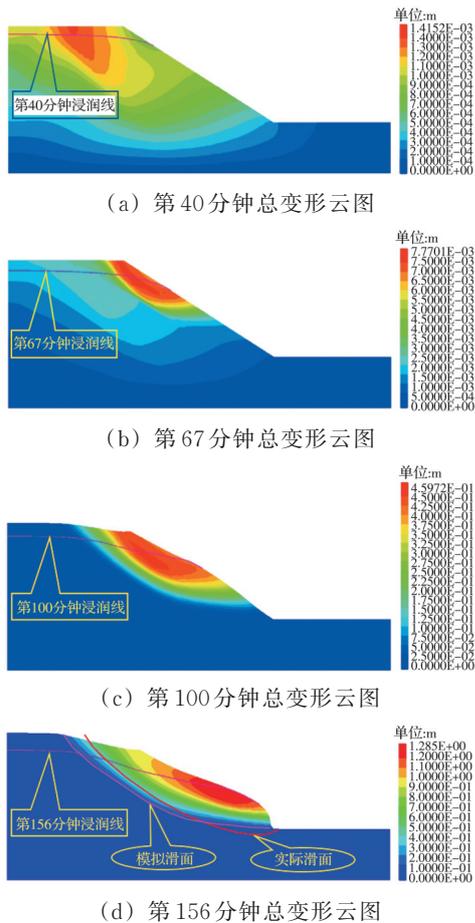


图 9 模型试验边坡不同时刻模拟总变形云图

Fig. 9 Contour maps of simulated total deformation of model test slope at different times

(滑块 1) 的时间为第 40 分钟, 而数值模型监测变形产生陡增、模型第 1 次形成整体滑移体的时间为第 67 分钟, 模拟计算的失稳时间滞后于实际时间 27 min, 两者偏差较大, 主要是因为采用的数值模型未考虑实际填土材料的非均质性以及所采用的理想弹塑性本构模型不能准确描述实际填土的应力应变关系。此外, 动水作用下的库岸滑坡变形破坏过程是一个流固耦合过程, 该方法采用的是孔隙水压力和应力应变分开模拟计算的方法, 并未考虑孔隙水压和填土变形之间真正的耦合效应, 这也是模拟误差的来源之一。滑坡变形失稳模拟结果受岩土体本构模型、岩土体物理力学参数、模型边界条件、模型非均质性等多因素影响, 精确模拟滑坡变形一直是工程地质领域研究难点之一, 融合多源监测数据对数值模型进行反演、校正是实现滑坡变形精确模拟的有效途径, 该方法可为基于多源数据融合反演的滑坡变形精确模拟提供良好的数值方法载体。

3 结论

1) 结合 GeoStudio 软件在饱和-非饱和渗流模拟与 FLAC3D 在应力应变计算方面优点, 提出一种

GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟分析方法, 该方法通过剖析数值模型的建模规则, 建立其网格单元之间的对应关系, 实现 GeoStudio 数值模型向 FLAC3D 模型的自动转换, 并据此实现 GeoStudio 渗流场向 FLAC3D 模型的精准克隆, 依据岩土体遇水特性, 实现数值模型饱和区和非饱和区参数的自动分区赋值, 并基于有效应力原理, 修正数值模型初始应力, 实现动水作用下库岸滑坡应力应变演化过程的快速模拟, 弥补两种软件在库岸滑坡多场信息模拟方面各自的不足。

2) 采用所提方法模拟分析水位骤降条件下大型库岸边坡物理模型试验过程, 与实测孔隙水压力、应力、滑面位置及失稳模式进行对比分析, 并剖析模拟误差来源。结果表明, 多场信息模拟值与实际监测值的演化趋势吻合, 模拟所得的最终滑面位置及展现的失稳模式与实际情况也基本一致。该方法可较好地再现水位骤降诱发库岸滑坡的变形破坏过程, 验证了方法的有效性, 为动水作用下库岸滑坡演化机理数值分析提供了一条可行途径。

需要说明的是, 该方法建立的数值模型是基于滑坡剖面所得, 因此不适用于真实复杂三维地形条件下的滑坡模拟。此外, 孔隙水压力结果和应力应变结果是通过单独计算得到, 未考虑它们之间的耦合效应, 故该方法不适用于考虑流固耦合效应的库岸滑坡多场信息演化过程模拟。再者, 采用的 GeoStudio 和 FLAC3D 软件均是基于连续介质力学的数值模拟软件, 因此, 该方法也仅在连续介质力学假设条件下适用。

参考文献

- [1] JIA J S. A technical review of hydro-project development in China [J]. Engineering, 2016, 2(3): 302-312.
- [2] 李长冬, 龙晶晶, 姜茜慧, 等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 67-77.
LI C D, LONG J J, JIANG X H, et al. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 67-77. (in Chinese)
- [3] 唐辉明, 李长冬, 龚文平, 等. 滑坡演化的基本属性与研究途径[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4596-4608.
TANG H M, LI C D, GONG W P, et al. Fundamental attribute and research approach of landslide evolution [J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4596-4608. (in Chinese)
- [4] 唐军峰, 唐雪梅, 肖鹏, 等. 库水位升降与降雨作用下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 153-161.
TANG J F, TANG X M, XIAO P, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under water-

- level fluctuation and rainfall [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 153-161. (in Chinese)
- [5] 杨背背, 殷坤龙, 梁鑫, 等. 三峡库区麻柳林滑坡变形特征及演化模拟[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 122-129.
- YANG B B, YIN K L, LIANG X, et al. Deformation characteristics and evolution simulation of the Maliulin landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 122-129. (in Chinese)
- [6] ZHOU C, CAO Y, YIN K L, et al. Characteristic comparison of seepage-driven and buoyancy-driven landslides in Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Engineering Geology, 2022, 301: 106590.
- [7] 陈国庆, 唐辉明, 胡凯云, 等. 基于非均质流变特性的滑坡时效演化及预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1795-1809.
- CHEN G Q, TANG H M, HU K Y, et al. Evolution characteristics and early warning of landslides based on heterogeneous rheological properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1795-1809. (in Chinese)
- [8] LI C, TANG H M, WANG Y K. Study on the deformation mechanism of reservoir landslides considering rheological properties of the slip zone soil: A case study in the Three Gorges Reservoir region [J]. Sustainability, 2020, 12(16): 6427.
- [9] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855-861.
- JIANG Z M, XIONG X H, ZENG L. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 855-861. (in Chinese)
- [10] 李毅, 伍嘉, 李坤. 基于FLAC^{3D}的饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 617-622.
- LI Y, WU J, LI K. Saturated-unsaturated seepage analysis based on FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 617-622. (in Chinese)
- [11] 周跃峰, 谭国焕, 甄伟文, 等. 非饱和渗流分析在FLAC3D中的实现和应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(2): 57-61.
- ZHOU Y F, THAM L G, YAN W M, et al. Implementation and verification of unsaturated seepage analysis in FLAC3D [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(2): 57-61. (in Chinese)
- [12] 谢强, 田大浪, 刘金辉, 等. 土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 879-892.
- XIE Q, TIAN D L, LIU J H, et al. Simulation of seepage flow on soil slope and special stress-correction technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 879-892. (in Chinese)
- [13] 冯文凯, 吴卓林, 林布雷, 等. 基于FLAC^{3D}的饱和-非饱和渗流场初始化方法[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(7): 109-114.
- FENG W K, WU Z L, LIN B L, et al. A method of initializing FLAC^{3D} saturated-unsaturated seepage field [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(7): 109-114. (in Chinese)
- [14] Itasca Consulting Group I. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions: Online manual [M]. Minneapolis: Itasca, 2013.
- [15] LU N, ŞENER-KAYA B, WAYLLACE A, et al. Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety [J]. Water Resources Research, 2012, 48(9): W09524.
- [16] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798-1803.
- JIA G W, ZHAN L T, CHEN Y M. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798-1803. (in Chinese)
- [17] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels [J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 92-103.
- [18] 王艳昆, 熊承仁, 王菁莪, 等. 基于点稳定系数法的非饱和河岸边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10): 124-129.
- WANG Y K, XIONG C R, WANG J E, et al. Stability of unsaturated bank slope based on local factor of safety [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(10): 124-129. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)