https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.034



基于NSGA-II遗传算法的黄土滑坡 参数反分析与稳定性预测

曾 鹏^{1,2*},王宇豪^{1,2,4},张天龙³,张 琳^{1,2},南骁聪⁵

1. 成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都 610059

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059

3. 西南交通大学土木工程学院,四川成都 610031

4. 四川省川建勘察设计院有限公司,四川成都 610094

5. 山东高速工程检测有限公司,山东济南 250002

摘 要:甘肃省永靖县黑方台台塬周边区域由于黄河移民大规模农业灌溉诱发了众多黄土滑坡灾害,其稳定性分析与滑面 预测可为防灾减灾提供重要支撑,显得尤为重要.黑方台黄土滑坡具有渐进后退式的失稳特征,已发生滑坡灾害与潜在滑 坡灾害具有高度相似性,其反分析结果可为未来滑坡稳定性分析提供重要数据基础.选用有限差分强度折减法,通过设定3 个目标优化函数(土体抗剪强度参数均值误差函数、滑面位置误差函数和稳定性系数误差函数),基于NSGA-II遗传算法开 展稳定性反分析获取黄土的粘聚力和内摩擦角.以黑方台党川2^{*}滑坡为例,通过第一次滑动时观测到的滑面信息,并假设 其稳定性系数等于1,利用NGSA-II算法反分析得出当滑坡发生时,天然黄土层粘聚力为28.20 kPa,内摩擦角为25.16°,饱 和黄土层有效粘聚力为16.59 kPa,有效内摩擦角为16.11°.基于该反分析结果,对党川2^{*}滑坡后续3次失稳的稳定性系数和 临界滑面进行了预测,并与实际观察结果对比验证.研究结果表明,通过多目标约束优化算法开展滑坡稳定性反分析可获 得更加合理的黄土强度参数估计,为黑方台地区滑坡稳定性分析和风险定量评估提供了新的解决思路. 关键词:黄土滑坡;稳定性反分析;多目标优化;遗传算法;滑面预测;灾害地质.

中图分类号: P694 文章编号: 1000-2383(2023)05-1675-11 收稿日期:2022-10-10

Parameter Back Analysis and Stability Prediction of Loess Landslide Based on NSGA-II Genetic Algorithm

Zeng Peng^{1,2*}, Wang Yuhao^{1,2,4}, Zhang Tianlong³, Zhang Lin^{1,2}, Nan Xiaocong⁵

1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

- 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
- 4. Sichuan Chuanjian Survey and Design Institute Co. Ltd., Chengdu 610094, China

5. Shandong High-Speed Engineering Detection Co. Ltd., Jinan 250002, China

Abstract: Many loess landslides were caused by the agricultural irrigation in Heifangtai terrace, Yongjing County, Gansu

引用格式:曾鹏,王宇豪,张天龙,张琳,南骁聪,2023.基于NSGA-II遗传算法的黄土滑坡参数反分析与稳定性预测.地球科学,48(5):1675-1685. **Citation**: Zeng Peng, Wang Yuhao, Zhang Tianlong, Zhang Lin, Nan Xiaocong, 2023. Parameter Back Analysis and Stability Prediction of Loess Landslide Based on NSGA-II Genetic Algorithm.*Earth Science*,48(5):1675-1685.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41977224).

作者简介:曾鹏(1987-),男,博士,研究员,主要从事地质灾害风险评价研究工作. E-mail:zengpeng15@cdut.edu.cn

^{*} 通讯作者:曾鹏, E-mail:zengpeng15@cdut.edu.cn

Province. Their stability analysis and critical slip surface identification are particularly important, as it can provide a good support to disaster prevention. The loess landslides located on the margin of Heifangtai terrace have the characteristics of progressive backward failure, and the occurred and potential landslides are highly similar. The results from back analysis can provide important data basis for future landslide stability prediction. In this paper, the finite difference strength reduction method was used to calibrate the cohesion and internal friction angle of loess based on the NSGA-II genetic algorithm by setting three objective optimization functions (i. e., mean value of soil strength parameters, slip surface and factor of safety). Taking Dangchuan 2[#] landslide in Heifangtai terrace as a study case, based on the slip surface observed after the first slide and assuming its factor of safety was equal to 1, the back analysis results show that the cohesion and internal friction angle of natural loess were 28.20 kPa and 25.16[°]; and the effective cohesion and internal friction angle of saturated loess were 16.59 kPa and 16.11[°]. Based on the computed results, the factor of safety and critical slip surface of the three subsequent slides were predicted, with their comparison with in-site observation information. The results show that a more reasonable estimation of loess strength parameters can be obtained by using the multi-objective constraint optimization algorithm, which provides a new solution for the stability analysis and quantitative risk assessment of landslides in Heifangtai terrace.

Key words: loess landslide; stability back analysis; multi-objective optimization; genetic algorithm; slip surface identification; hazard geology.

0 引言

我国滑坡地质灾害频发,体现出数量多、分布 广、损失大的特点,其风险评估与防控显得尤为重 要(何成等,2021;李文彬等,2021;吴润泽等,2021). 随着经济的高速发展,工程建设、农业灌溉和资源 开发等人类活动越来越频繁,我国西北地区黄土滑 坡灾害时有发生,造成了严重的经济损失和人员伤 亡.例如:甘肃省永靖县黑方台地区,黄河水利工程 建设移民因农业生产需要建造了大量的抽水灌溉 设施.灌溉用水入渗造成地下水位上升,在台塬周 边诱发了大量的黄土滑坡,严重威胁台塬下方盐 锅峡镇居民的生命财产安全.稳定性评价作为滑 坡风险定量评估的重要一环近年来获得了越来越 多的关注,国内外学者开展了大量的研究工作.

获取准确可靠的物理力学计算参数是开展滑 坡稳定性评价的基本前提条件.针对黑方台地区的 黄土,国内学者开展了大量的试验研究.朱兆波等 (2021)利用环剪仪进行实验,测得了滑带土残余强 度参数;郭倩怡等(2018)使用改进的四联直剪仪对 黄土进行了不同条件下的直剪实验;李威(2018)使 用三轴仪在不同围压以及剪切速率下研究了饱和 重塑黄土的抗剪强度;马建全(2012)通过天然三轴 实验研究了黄土滑坡的稳定性;Gu et al.(2019)利 用GDS三轴仪开展黄土剪切实验,研究了灌溉对黑 方台黄土滑坡稳定性的影响.这些试验成果为黄土 滑坡稳定性研究提供了重要的数据支撑.然而,由 于黄土普遍具有发育良好的管状垂直节理,采样过 程中很容易扰动破坏,室内试验研究难以获得原状 黄土的物理力学参数.同时,由于尺度效应问题,试 验研究成果难以表征真实滑坡灾害的参数特征.

根据滑坡灾害观测信息开展参数反分析,为获 取可靠的黄土滑坡稳定性计算参数提供了一种重 要途径.刘文红等(2014)基于Bishop法利用滑坡前 坡体几何和物理参数反演获得天然黄土滑坡粘聚 力和内摩擦角;邓东平等(2017)基于极限平衡理论 通过临界圆弧滑动面的判别,推导出参数反演的显 示表达式,并开展了边坡稳定性参数反演分析; Zhao et al.(2015)基于三维上限分析理论研究了滑 坡抗剪强度参数可靠度反分析方法.这些研究成果 在一定程度上提高了滑坡稳定性计算参数的准确 性,但大多只考虑稳定性系数或者变形特征作为约 束条件,未考虑反分析过程中计算滑面与实际观察 滑面的匹配性,反分析结果可靠性有待进一步提升.

滑坡稳定性评价除了需要计算稳定性状态,也 需要对临界滑面进行预测,从而对潜在失稳方量进 行评估.这对于滑坡风险定量评估中的空间影响概 率的评估是至关重要的(Sun et al., 2021).传统滑 坡临界滑面预测大多基于极限平衡法.如张剑波等 (2012)使用遗传算法结合极限平衡法.如张剑波等 (2012)使用遗传算法结合极限平衡法来搜索黄土 高边坡三维最危险滑裂面;黄雅虹等(2017)采用 Monte Carlo随机搜索法与遗传算法相结合的优化 方法来确定黄土边坡临界滑面.传统的极限平衡法 往往只能考虑近似圆弧状的滑动面,对不规则滑面 的适应性有限;同时,其搜索过程中需要进一步借 助优化算法,计算成本较高.基于有限元或者有限 差分的强度折减法为临界滑面识别提供了一种新的解决方案(Griffiths and Lane, 1999). 沈子翔(2015)基于强度折减法的交替变度量法来搜索黄 土滑裂面;聂治豹等(2017)提出了基于强度折减法确定边坡临界滑动面的小波变换法;袁维等(2016) 基于强度折减法和位移场分析确定临界滑动面.

本文以甘肃黑方台党川2^{*}滑坡的多次后退 式失稳滑动作为研究对象,利用第一次失稳滑 体的稳定性状态和滑面形状作为观察信息,结 合该地区黄土抗剪强度参数统计信息构建3个 目标优化函数,利用有限差分强度折减法和 NSGA-II多目标优化遗传算法,开展黄土抗剪 强度参数反分析研究,并将反分析结果用于后 续滑坡的稳定性系数和滑面形态预测与验证.

1 黄土滑坡稳定性反分析

本文综合考虑黄土抗剪强度参数统计信息、 滑坡稳定性系数和滑面形状特征点观察信息,设 置3个优化目标函数,利用NSGA-II多目标优化 遗传算法,结合有限差分强度折减法,构建黑方台 地区典型黄土滑坡稳定性反分析模型,获取多目 标约束条件下黄土抗剪强度参数反分析结果.

1.1 土体抗剪强度参数均值误差函数

通过查阅文献收集获得20组天然黄土粘聚力和内摩擦角参数,以及11组饱和黄土有效粘聚力和 有效内摩擦角参数(马建全,2012;Xu et al., 2013; 孙萍萍等,2013;杨飞,2013;张茂省,2013;周飞, 2015;武金辉,2016;毕银强等,2018;冯立等,2018; Lian et al., 2018;宋登艳等,2018;Gu et al., 2019, 2020;李宇飞,2019;王锴,2020),进行统计分析获 得各参数的均值和标准差,并假设其服从正态分布 (Tarantola,2005),将参数均值误差函数表示为:

$$f_1(\boldsymbol{\theta}) = \left(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\mu}_s\right)^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_s^{-1} \left(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\mu}_s\right), \qquad (1)$$

式中,θ为抗剪强度参数向量,μ_e为参数均值,C_e⁻¹ 表示参数协方差矩阵的逆矩阵,T表示矩阵转 置.本研究共包含4个抗剪强度参数,假设两两 之间无相关性,协方差矩阵C_e为4个抗剪强度参 数标准差平方组成的对角矩阵.考虑到每个参数 均值的影响各不相同,因此使用无偏差误差函数 模型降低各均值的影响(Zhang *et al.*, 2010).

1.2 滑面位置特征点坐标误差函数

根据已失稳黄土滑坡滑面观测信息,将其在





x方向等分为4段,获得5个滑面特征坐标点(图 1).其中,最左侧滑面特征坐标点为剪出口位置, 最右侧滑面特征坐标点为后缘拉裂缝位置.分别 提取5个特征坐标点的位置信息作为实际滑面 观察信息,可表达为(*a_i*, *b_i*),*i* = 1,2,3,4,5.

假设通过有限差分数值模拟计算获得的临 界滑面特征点为 (x_i, y_i) , i = 1, 2, 3, 4, 5.则 滑面位置误差函数可表示为:

$$f_{2}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^{5} (x_{i} - a_{i})^{2} + \sum_{i=1}^{5} (y_{i} - b_{i})^{2}.$$
(2)

1.3 稳定性系数误差函数

假设滑坡在失稳时处于极限平衡状态,稳定性 系数为1,则滑坡稳定性系数误差函数可表示为:

 $f_{3}(\theta) = [FS(\theta) - 1]^{2}$, (3) 式中, FS 为有限差分强度折减法计算得出的滑 坡稳定性系数.

2 有限差分强度折减法及滑面信息提取

2.1 强度折减法

使用 FLAC 有限差分软件自带的强度折减法 进行边坡稳定性分析.通过公式(4)和公式(5)进行 抗剪强度参数折减,直到计算边坡到达了极限平衡 状态,此时的折减系数即为边坡的稳定性系数 FS.

$$c_{\rm r} = c/FS , \qquad (4)$$

$$\varphi_{\rm r} = \arctan\left(\tan\varphi/FS\right),$$
 (5)

式中,c和 *φ*分别为计算输入的土体粘聚力和内摩擦 角;c_r和 *φ*_r分别为折减后的土体粘聚力和内摩擦角.

2.2 FLAC中临界滑面信息提取

为获得给定计算参数条件下黄土滑坡的

临界滑面,本文使用FLAC内置FISH语言编程提取单元节点位移信息,导入到MATLAB中使用K-means聚类算法识别滑动的单元体,从而实现临界滑面的提取(张天龙,2020).

K-means 算法的目标是将 n 个对象依据对 象间的相似性聚集到指定的 k 个类簇中,每个 对象属于且仅属于一个其到类簇中心距离最 小的类簇中.每一个对象到每一个聚类中心的 欧式距离如下式所示:

dis
$$(A_i, C_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^{m} (A_{i,t} - C_{j,t})^2}$$
, (6)

式中,A_i表示第*i*个对象,C_j表示第*j*个聚类中心; A_{i,i}表示第*i*个对象的第*t*个属性,C_{j,i}表示第*j*个 聚类中心的第*t*个属性,*t*=1,2,…,*m*.

依次比较每一个对象到每一个聚类中心的 距离,将对象分配到距离最近的聚类中心的类 簇中,得到k个类簇 $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$.本文仅考 虑节点位移属性,因此t=1;其属性可分为有节 点位移和无节点位移,即k=2.

3 NSGA-II多目标优化遗传算法

3.1 算法简介

NSGA-II 是一种基于 Pareto 最优解并带有 精英保留策略的快速非支配多目标优化遗传算 法(Cao et al., 2020).主要分为以下三大计算部 分:(1) Pareto 解集快速非支配排序;(2)计算拥 挤度和拥挤度比较算子;(3)交叉迭代,优胜劣 汰进行精英保留策略筛选最优参数点.不断重 复以上3个步骤,最终达到目标迭代计算次数或 收敛条件,求出最优的 Pareto 解集并输出.

如果定义一组非支配 Pareto 解的等级为 1,将其从解集中去除,在剩下的解集中定义 Pareto 解等级为 2. 重复以上过程,直到所有的 Pareto 解集等级被划分完成,则可以得到解集 中所有 Pareto 解的等级(图 2).

3.2 Pareto最优点选取

在获得最优 Pareto 解集后,需要选取其中的 最优点作为多目标优化反分析的最终解.因为抗 剪强度参数误差、滑面特征点坐标误差和稳定性 系数误差量纲不同,所以首先要进行误差无量纲 化.本文选用欧几里德无量纲方法(Sayyaadi and Mehrabipour,2012):



图 2 Pareto 解集的等级划分 Fig.2 Classification of Pareto solution sets

$$\bar{F}_{i} = \frac{F_{i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (F_{i})^{2}}},$$
(7)

式中, \bar{F}_i 表示无量纲化后的 Pareto 解集, F_i 表示 在多目标优化后的 Pareto 解曲线上的点,n代表 Pareto 解集上的点个数.

本文选用LINMAP法(Sayyaadi and Mehrabipour,2012)确定Pareto解集最优点.计算Pareto解 集中的点到最理想解点的距离:

$$d_{i+} = \sqrt{\sum_{i=1}^{q} \left(\bar{F}_{i} - \bar{F}_{ideal} \right)^{2}},$$
 (8)

式中,q为目标数量, \bar{F}_{ideal} 表示在q个目标优化下的理想点.最后选择的最优点 i_{inal} 为:

$$i_{\text{final}} = i \in \min(d_{i+}). \tag{9}$$

本文利用有限差分强度折减法和NSGA-II多目标优化遗传算法,基于3个目标函数 (式(1)、(2)、(3))进行黄土滑坡稳定性反 分析,其计算流程如图3所示.

4 案例分析

4.1 黑方台党川 2* 滑坡简介

黑方台位于甘肃省永靖县黄河北岸,盐锅峡 水库下游,距兰州市45 km,距永靖县城20 km. 黑方台台塬面积约为11.5 km²,冲沟中发育最长 的虎狼沟将黑方台分为两部分.黑方台最高区 域位于台塬西北部,海拔为1920.60 m,最低区 域位于黄河和湟水河的交汇处,海拔约为 1560.37 m.西边面积较小的为方台,约为 1.5 km²,东边面积较大的为黑台,约9 km²(图4). 滑坡地层岩性从上至下分别为(图5):黄土、粉质 粘土、砂卵石层、泥岩、砂质泥岩(产状135°∠11°).

2015年4月29日党川2^{*}滑坡发生两次静态液 化型失稳破坏.第一次失稳滑体长度约20m,平均



图 3 黄土滑坡参数反分析算法流程

Fig.3 Flow chart of loess landslide parameter back analysis



图4 黑方台地区高程图及党川2*滑坡地理位置

Fig.4 Elevation map of Heifangtai area and location of Dangchuan 2[#] landslide







图 6 党川 2[#]滑坡及其主要影响范围 Fig.6 Dangchuan 2[#] landslide and its deposition area



图 7 党川 2[#]滑坡多次失稳平面分区



宽度约为115 m,面积约为8 396 m²;第二次失 稳包括3轮滑动,总面积约为27 422 m²,其主要 影响范围如图6所示.第二次3轮滑动之间间 隔时间过短,只记录到第3轮滑动的滑面信息, 第1轮和第2轮滑动仅记录到后缘点位置信息. 多次失稳区域如图7所示(许强等,2016).

4.2 数值模型及计算参数

经调查,该滑坡失稳破坏主要发生在黄土层中,运动过程中部分铲刮粉质粘土层.因此,为了计算简便,选取黄土层和部分粉质粘土层建立FLAC模型.模型高50m,上宽260m,底部宽300m,采用定水头边界.FLAC模型网格数量共计9000个,本构模型为Mohr-Coulomb模型,使用软件自带的强度折减法及其默认收敛准则进行计算.

黑方台地区的渗流模式比较复杂,是基质渗流 和优势渗流的结合.由于粉质粘土的渗水性差,地

★Ⅰ 谷工层的渗流系数				
Table 1 Seepage parameters of soil layers				
土层	黄土层	粉质粘土层		
渗流系数(m/s)	$6.8 imes 10^{-6}$	2×10^{-8}		
密度(g/cm ³)	1.54	2.06		
★ 水位线 ★ 水流矢量线				
图 8 渗;	点水位线和流量9			







下水在黄土底部富集并沿台塬边渗出.当在高灌溉量下,大部分灌溉水沿着落水洞迅速下渗,由优势渗流起主导作用(赵宽耀等,2020).本文简化起见,在模拟过程中仅考虑优势渗流.在 FLAC中GWflow模式下,使用部分饱和的快速稳定流(Fastwb)方式,使得底部黄土迅速达到饱和状态,模拟高灌溉量水流通过黄土层的优势通道快速达到底部.渗流模拟参数如表1所示.

根据表1的渗流参数,在FLAC中建模并输入 相关参数进行渗流模拟,推导出滑坡发生时渗流的 水位线.通过FLAC内置FISH语言编写渗流流量 流入与流出判断程序来判定渗流达到稳定状态.稳 态流动下的渗流矢量图与水位线如图8所示.

渗流模拟得出渗流从黄土层与粉质粘土层 交界处流出,与实际相符.确定水位线以下为饱 和黄土层,最终模型如图9所示.

为获得黑方台地区黄土抗剪强度参数统 计信息,本文搜集大量黑方台滑坡的黄土试验 研究成果.分别获取天然黄土粘聚力、内摩擦 角参数和饱和黄土有效粘聚力、有效内摩擦角 参数.并对其进行统计分析,计算得到均值与 标准差,结果如表2所示.粉质粘土层粘聚力 为50 kPa,内摩擦角为30°(李姝,2016).

表2 黄土抗剪强度参数统计信息

Table 2 Statistical info	ormation of loess
--------------------------	-------------------

强度参数	均值	标准差
天然黄土粘聚力(kPa)	26.11	5.65
天然黄土内摩擦角(°)	23.58	4.65
饱和黄土有效粘聚力(kPa)	18.64	8.85
饱和黄土有效内摩擦角(°)	17.37	6.02



Fig.10 Results of NSGA-II genetic algorithm



图 11 Pareto 多目标优化结果

Fig.11 Results of Pareto multi-objective optimization

4.3 参数反演结果分析

根据图 3 所示计算流程,使用均匀采样法确定 100 个初代样本,NSGA-II 遗传算法迭代次数为 25 次,计算如图 10 所示.Pareto最优解集以及 LINMAP 最优解点见图 11.

选取 LINMAP 最优解点作为最终反分析结果. 计算结果显示天然黄土粘聚力为 28.20 kPa,内摩擦



图 12 模拟临界滑面与真实滑面对比 Fig.12 Simulated and observed critical slip surfaces





角为25.16°;饱和黄土有效粘聚力为16.59 kPa,有效 内摩擦角为16.11°,对应的稳定性系数为0.99.将反 演参数代入FLAC模型获得对应的临界滑动面,并 与第一次失稳滑动的真实滑面进行对比,如图12所 示.对比显示,反分析计算获得的临界滑面与实 际观察滑面后缘与剪出口一致性较好,仅滑面 形状有些许差异,竖直方向最大误差为4.10 m.

4.4 第二次失稳滑动预测

第二次失稳滑动的范围更大,并且分为3 轮滑动.3轮滑动之间间隔时间过短,只记录到 第3轮滑动的滑面信息,第1轮和第2轮滑动仅 记录到后缘点位置信息.因此,结合滑后现场 堆积形态特征以及多次失稳后缘点位置信息, 可推测3轮滑动的滑面信息如图13所示.

第二次失稳滑动与第一次失稳滑动之间仅 间隔约3h(许强等,2016),短时间内黄土物理力 学参数以及水位变化不大,可忽略不计.因此,可 将基于第一次失稳观察信息反分析获得的黄土 抗剪强度参数用于第二次失稳滑动预测.第1轮 模拟获得失稳范围如图14a所示,计算稳定性系 数为0.98;第2轮模拟获得失稳范围如图14b所 示,计算稳定性系数为0.99;第3轮模拟获得失稳 范围如图14c所示,计算稳定性系数为0.97.

本文预测结果与该滑坡实际失稳观察结果吻 合度较高.首先,本文模型成功预测了第二次失稳 中的3轮滑动行为,前2轮预测临界滑面与实际观 察滑面基本一致,但第3轮滑面形态有较大差别.3 轮预测滑面与实际观测(推测)滑面竖直方向最大 误差分别为4.92 m、6.56 m和9.84 m.其次,3轮失稳





预测的稳定性系数均小于且接近1,表明滑坡 处于不稳定状态,其失稳的可能性较大.

4.5 讨论

本文反演的滑面和预测的滑面均与实际观 察滑面存在一些差异,其原因主要包括:(1)本文 未考虑黄土垂直节理的影响;(2)黄土在长期水 动力作用下可能形成内部孔隙和空洞,本文未予 考虑;(3)滑坡土体存在一定的空间变异性,本文 未予考虑;(4)FLAC内置本构模型在模拟黄土 滑坡过程中存在一定的误差;(5)现有强度折 减法依然存在一定的不合理性;(6)本文建立 的假三维模型未考虑滑坡三维空间效应.这些 潜在问题需要在未来开展更加深入的研究.

5 结语

本文构建抗剪强度参数、稳定性状态和滑面 位置3个目标函数,使用NSGA-II多目标优化遗 传算法结合有限差分强度折减法,建立了一套土 质滑坡稳定性计算参数反分析模型.以黑方台党 川2[#]滑坡的两次失稳共计4轮滑动为研究对象, 开展模拟分析和验证.得到的主要结论如下:

(1)使用多个目标函数,特别是滑面位置信息误差函数,可为滑坡稳定性反分析设定更多的优化约束条件,反分析结果更加可靠.

(2)有限差分强度折减法可以直接获得 任意形状的临界滑面,适用于考虑滑面位置 信息的滑坡稳定性反分析.

(3)对第二次失稳的3轮滑动预测结果显示,本 文反分析方法获得的结果可靠性较高,可对相似滑坡的稳定性状态和临界滑面进行有效预测.

(4)本文研究成果有效标定了黄土抗剪强 度参数,提高了滑坡稳定性和临界滑面预测准 确性,为黑方台地区滑坡稳定性分析和风险定 量评估提供了有效技术支撑.

References

- Bi, Y. Q., Zhang, M. S., Gu, T. F., et al., 2018. Soil-Water Characteristics and Strength Indexes of Unsaturated Loess. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 38(3): 520-527 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Y., Mihardjo, L. W. W., Parikhani, T., 2020. Thermal Performance, Parametric Analysis, and Multi-Objective Optimization of a Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump Water Heater Using NSGA-II and Decision Makings. *Applied Thermal Engineering*, 181: 115892.
- Deng, D. P., Li, L., Zhao, L. H., 2017. Back Analysis of Anti-Slide Strength Parameters of Slope Stability Based on Limit Equilibrium Theory. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(3): 67-73, 79 (in Chinese with English abstract).
- Feng, L., Hu, W., Zhang, M. S., et al., 2018. Study on Practical Use of Strength Theory Concerning Unsaturated Loess. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 54(5): 619-625 (in Chinese with English abstract).
- Griffiths, D. V., Lane, P. A., 1999. Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, 49(3): 387-403.
- Gu, T., Sun, P., Wang, J., et al., 2020. An Experimental and Numerical Study of Landslides Triggered by Agricultural Irrigation in northwestern China. Advances in Civil Engineering, (3): 1-13.
- Gu, T. F., Zhang, M. X., Wang, C. X., et al., 2019. The Effect of Irrigation on Slope Stability in the Heifangtai Platform, Gansu Province, China. *Engineering Geolo*gy, 248: 346-356.
- Guo, Q.Y., Gu, T.F., Xie, W.L., et al., 2018. Analysis of Shear Strength and Parameter Difference of Loess under Different Test Methods—Taking Heifangtai Loess Landslides in Gansu Province as an Example. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 20(1): 25-31 (in Chinese with English abstract).

- He, C., Tang, H.M., Shen, P.W., et al., 2021. Progressive Failure Mode and Stability Reliability of Strain -Softening Slope. *Earth Science*, 46(2): 697-707 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y.H., Lü, Y.J., Rong, M.S., et al., 2017. Efficient Search for the Most Possible 3D Slip Surface on the Loess Slope and Its Stability Evaluation. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(1): 125-132 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., 2016. Experimental Study on the Influence of Long-Term Groundwater Action on Loess Strength in Heifangtai, Gansu Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Li, W., 2018. Experimental Study and Numerical Simulation on the Influence of Confining Pressure and Shear Rate on Shear Strength of Saturated Remolded Loess (Dissertation). Chang' an University, Xi' an (in Chinese with English abstract).
- Li, W. B., Fan, X. M., Huang, F. M., et al., 2021. Uncertainties of Landslide Susceptibility Modeling under Different Environmental Factor Connections and Prediction Models. *Earth Science*, 46(10): 3777-3795 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., 2019. Study on the Influence of Freeze-Thaw Action on Pore Structure and Slope Stability of Heifangtai Loess (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lian, B., Wang, X., Zhu, R., et al., 2018. A Numerical Simulation Study of Landslides Induced by Irrigation in Heifangtai Loess Area—A Case Study of Huangci. *Earth and Environmental Science*, 108: 032064.
- Liu, W.H., Zhang, Y.Q., Li, T.L., et al., 2014. Analysis on Failure Mechanism of Unsaturated Loess Slope with Inverse Results of Soil Strength Parameters. *Journal of Engineering Geology*, 22(5): 915-920 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J.Q., 2012. Study on Stability of Loess Landslide at Platform Edge in Heifangtai Irrigation District (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Nie, Z.B., Zheng, H., Zhang, T., 2017. Determination of Slope Critical Slip Surfaces Using Strength Reduction Method and Wavelet Transform. *Rock and Soil Mechanics*, 38(6): 1827-1831 (in Chinese with English abstract).
- Sayyaadi, H., Mehrabipour, R., 2012. Efficiency Enhancement of a Gas Turbine Cycle Using an Optimized Tubu-

lar Recuperative Heat Exchanger. *Energy*, 38(1): 362-375.

- Shen, Z.X., 2015. Study on Search Technology and Reinforcement Optimization of Slip Surface of Loess Slope (Dissertation). Xi' an University of Architecture and Technology, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Song, D. Y., Zhang, M. S., Mu, H. D., et al., 2018. Research on the Evolution Mechanism of Deformation and Failure of No. 13 Landslide in the North of Jiaojiayatou. *Geological Bulletin of China*, 37(7): 1360-1364 (in Chinese with English abstract).
- Sun, P.P., Zhang, M.S., Dong, Y., et al., 2013. The Coupled Analysis of Phreatic Water Flow and Slope Stability at Heifangtai Terrace, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 32(6): 887-892 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X.P., Zeng, P., Li, T.B., et al., 2021. From Probabilistic Back Analyses to Probabilistic Run-out Predictions of Landslides: A Case Study of Heifangtai Terrace, Gansu Province, China. *Engineering Geology*, 280:105950.
- Tarantola, A., 2005. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation (2nd Ed.). Elsevier Science, New York.
- Wang, K., 2020. Study on the Formation Mechanism of Loess Landslide Induced by Irrigation—Taking Luojiapo Landslide in Heifangtai as an Example (Dissertation). Changan University, Xi' an (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.H., 2016. Study on Stability of Landslide in Heifangtai Loess Plateau (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wu, R. Z., Hu, X. D., Mei, H. B., et al., 2021. Spatial Susceptibility Assessment of Landslides Based on Random Forest: A Case Study from Hubei Section in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 46(1): 321-330 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Dai, F.C., Tu, X.B., et al., 2013. Landslides in a Loess Platform, North - West China. Landslides, 11: 993-1005.
- Xu, Q., Peng, D. l., Qi, X., et al., 2016. Dangchuan 2^{*}LANDSLIDE of April 29, 2015 in Heifangtai Area of Gansu Province: Characteristices and Failure Mechanism. Journal of Engineering Geology, 24(2): 167-180 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., 2013. Study on Deformation Mechanism of Loess Landslide Induced by Heifangtai Irrigation (Dissertation). Changan University, Xi' an (in Chinese with English abstract).

- Yuan, W., Hu, Y.J., Li, X.C., et al., 2016. An Approach to Determining Critical Slip Surface Based on Displacement Field Analysis. *Rock and Soil Mechanics*, 37(6): 1791-1798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wilson, H., Tang, L. M., et al., 2010. Efficient Probabilistic Back-Analysis of Slope Stability Model Parameters. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental En*gineering, 136: 99-109.
- Zhang, J.B., Sun, J., Zhang, S., et al., 2012. Search for the Most Dangerous Slip Surface of 3D Loess-Slope Based on the Genetic Algorithm. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3): 19-22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. S., 2013. Formation Mechanism as Well as Prevention and Controlling Techniques of Loess Geo – Hazards in Irrigated Areas: A Case Study of Heifangtai Immigration Area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River. *Geological Bulletin of China*, 32(6): 833-839 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T.L., 2020. Study on Evaluation Method of Instability Probability of Soil Landslide Based on Active Learning Agent Model and Strength Reduction Method (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K.Y., Xu, Q., Liu, F.Z., et al., 2020. Seepage Characteristics of Preferential Flow in Loess. *Chinese Journal* of Geotechnical Engineering, 42(5): 941-950 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. H., Shi, Z., Lin, Y. L., et al., 2015. Reliability Back Analysis of Shear Strength Parameters of Landslide with Three-Dimensional Upper Bound Limit Analysis Theory. *Landslides*, 13(4): 711-724.
- Zhou, F., 2015. Study on Deformation Characteristics and Landslide Mechanism of Loess Slope in Heifangtai, Gansu Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. B., Wang, X. G., Zhu, R. S., et al., 2021. Ring Shear Test on the Shear Characteristics of Sliding Zone Soil of Loess in Heifangtai, Gansu. Journal of Arid Land Resources and Environment, 35(5): 144-150 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕银强,张茂省,谷天峰,等,2018.非饱和黄土土水特征及 其强度指标.防灾减灾工程学报,38(3):520-527.
- 邓东平,李亮,赵炼恒,2017.极限平衡理论下边坡稳定性 抗滑强度参数反演分析.长江科学院院报,34(3):67-73,79.

- 冯立,胡炜,张茂省,等,2018.非饱和黄土强度理论的实用
 化方法研究.兰州大学学报(自然科学版),54(5):
 619-625.
- 郭倩怡,谷天峰,谢婉丽,等,2018.不同试验方法下黄土抗 剪强度以及参数差异分析:以甘肃省黑方台黄土滑坡 为例.防灾科技学院学报,20(1):25-31.
- 何成, 唐辉明, 申培武, 等, 2021. 应变软化边坡渐进破坏模 式及稳定性可靠度. 地球科学, 46(2): 697-707.
- 黄雅虹, 吕悦军, 荣棉水, 等, 2017. 黄土边坡"三维最危险 滑裂面"的高效搜索和稳定性评价. 震灾防御技术, 12 (1): 125-132.
- 李姝, 2016. 甘肃黑方台地下水长期作用对黄土强度影响的 试验研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 李威,2018. 围压及剪切速率对饱和重塑黄土抗剪强度影响 试验研究及数值模拟(硕士学位论文). 西安:长安大学.
- 李文彬, 范宣梅, 黄发明, 等, 2021. 不同环境因子联接和预 测模型的滑坡易发性建模不确定性. 地球科学, 46 (10): 3777-3795.
- 李宇飞,2019. 冻融作用对黑方台黄土孔隙结构及边坡稳定 性影响研究(硕士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 刘文红,张亚卿,李同录,等,2014.根据参数反演结果分析 非饱和黄土边坡破坏机理.工程地质学报,22(5): 915-920.
- 马建全,2012.黑方台灌区台缘黄土滑坡稳定性研究(博士学 位论文).长春:吉林大学.
- 聂治豹,郑宏,张谭,2017.基于强度折减法确定边坡临界 滑面的小波变换法.岩土力学,38(6):1827-1831.
- 沈子翔,2015.黄土边坡滑裂面搜索技术与加固优化研究(硕 士学位论文).西安:西安建筑科技大学.
- 宋登艳,张茂省,慕焕东,等,2018. 焦家崖头北部13号滑 坡变形破坏演化机制.地质通报,37(7):1360-1364.
- 孙萍萍,张茂省,董英,等,2013.甘肃永靖黑方台灌区潜水 渗流场与斜坡稳定性耦合分析.地质通报,32(6): 887-892.
- 王锴,2020. 灌溉诱发黄土滑坡形成机理研究: 以黑方台罗 家坡滑坡为例(硕士学位论文). 西安: 长安大学.
- 武金辉,2016.黑方台黄土台塬滑坡稳定性研究(硕士学位论 文).兰州:兰州大学.
- 吴润泽, 胡旭东, 梅红波, 等, 2021. 基于随机森林的滑坡空 间易发性评价: 以三峡库区湖北段为例. 地球科学, 46 (1): 321-330.
- 许强,彭大雷, 亓星,等, 2016.2015年4.29甘肃黑方台党川
 2#滑坡基本特征与成因机理研究.工程地质学报, 24
 (2):167-180.
- 杨飞,2013.黑方台灌溉诱发黄土滑坡变形机理研究(硕士学 位论文).西安:长安大学.
- 袁维,胡叶江,李小春,等,2016.一种基于位移场分析的临 界滑动面确定方法研究.岩土力学,37(6):1791-1798.

- 张剑波,孙静,张帅,等,2012.黄土高边坡三维最危险滑裂 面的遗传算法搜索.测绘通报,(3):19-22.
- 张茂省,2013.引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术:以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例.地质通报,32(6):833-839.
- 张天龙,2020. 基于主动学习代理模型和强度折减法的土质 滑坡失稳概率评价方法研究(硕士学位论文). 成都: 成 都理工大学.
- 赵宽耀, 许强, 刘方洲, 等, 2020. 黄土中优势通道渗流特征 研究. 岩土工程学报, 42(5): 941-950.
- 周飞,2015.甘肃省黑方台黄土斜坡变形特征与滑坡机理研 究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.
- 朱兆波,王新刚,朱荣森,等,2021.甘肃黑方台黄土滑坡滑 带土剪切特性环剪试验研究.干旱区资源与环境,35 (5):144-150.