

考虑土工复合材料衬垫系统的尾矿库稳定性分析

吴焕新¹, 张 峰²

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 2. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:尾矿库库底铺膜层构成的土工复合材料衬垫系统往往形成薄弱层面威胁坝体的稳定性,在分析中需要重点关注。文章基于水力分析系统 Autobank 对铺膜面形成的衬垫薄弱层进行标记,在最危险滑动面的搜索中若搜索圆弧与衬垫薄弱层相交,则增加考虑该薄弱层与部分圆弧构成的复合滑动面,计算方法采用适用各种形状滑面的摩根斯顿法,以得到库身的最小抗滑稳定安全系数。算例分析结果表明:部分通过土工衬垫薄弱层的复合滑动面安全系数较小,且该平移滑动是完全可能发生的,为该剖面的最危险滑动面。本文结果可为尾矿库设计和运行提供科学依据,并为同类工程提供参考。

关键词:土工复合材料衬垫系统; 刚体极限平衡法; 薄弱层; Autobank

中图分类号: TU926.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)06-0009-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.06.070

Stability analysis of tailings dam considering geocomposite liner system

WU Huanxin¹, ZHANG Feng²

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: The geosynthetic composite lining system composed of a membrane layer at the bottom of a tailings pond often forms a weak layer that threatens the stability of the dam body, thus requires special attention in the analysis. This article is based on the hydraulic analysis system Autobank to mark the weak layer of the lining formed by the film laying surface. If the search for the most dangerous sliding surface intersects with the weak layer of the lining, a composite sliding surface composed of the weak layer of the lining and some arcs is added. The calculation method adopts the Morgenstern method applicable to various shapes of sliding surfaces to obtain the minimum anti sliding stability safety factor of the storage body. The analysis of calculation examples considering different positions of membrane laying shows that the safety factor of the composite sliding surface partially passing through the weak layer of the geotechnical lining is relatively small, and this translational sliding is completely possible, making it the most dangerous sliding surface in this section. The results of this article can provide scientific basis for the design and operation of tailings ponds, and provide references for similar projects.

Key words: geosynthetic composite lining system; rigid body limit equilibrium method; weak layer; Autobank

作为土力学中三大经典问题之一的边坡稳定性分析,是坝体结构设计和滑坡治理的基础^[1]。边坡稳定分析大体上可以分为两大类:刚体极限平衡法和考虑塑性区发展的强度折减法^[2]。刚体

极限平衡法将坡体视为不变形的刚体,其力学模型较为简单,便于工程人员接受且易于实现,成为各类规范推荐的边坡计算方法,《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)^[3]也要求尾矿库的坝坡

收稿日期: 2023-07-30

作者简介: 吴焕新(1983—),男,高级工程师,从事尾矿库方面的设计研究。

通信作者: 张 峰(1987—),男,在读博士,从事工程仿真方面研究。

稳定性分析计算方法应采用基于刚体极限平衡方法的简化毕肖普法或者瑞典圆弧法^[4]。

随着我国环保要求的提高,对不具备采用黏土防渗层的尾矿库实施铺膜防渗处理的方式正逐步被环保部门和设计单位所采纳。如具有耐腐蚀、较强抗穿刺能力等特点的高密度聚乙烯膜(HDPE膜)是目前较为理想的防渗材料,目前广泛用于城市生活垃圾填埋场和其它各种工业固废堆场的防渗处理中^[5]。

对于库底铺设土工防渗膜的尾矿库,土工复合材料形成的衬垫系统可能成为尾矿库坝体稳定性的薄弱层,尾矿库发生破坏时可能全部或者部分沿着该衬垫系统滑动,此时圆弧搜索方法则因为滑动面形状的强制要求而搜索不到该最危险的滑面,李炳华等^[6]指出存在软弱层面情况下边坡可能出现安全系数更小的复合滑动面,QIAN^[7-8]等的调查结果显示与尾矿库类似的垃圾填埋场更多的是出现沿衬垫系统的平移滑动。因此当尾矿库采用铺膜防渗设施时,铺膜形成的软弱层面对于稳定分析的影响不容忽视。

目前对于尾矿库抗滑稳定性分析,由于计算软件的限制,一般均进行圆弧法最危险滑动面的搜索,从而忽视了可能存在的安全系数更小的复合滑动面,计算偏危险。本文基于土工分析系统Autobank,采用软弱层标记功能对铺膜形成的衬垫软弱层进行设置,对含土工复合材料衬垫的尾矿库剖面进行稳定性分析,并考虑可能的铺膜布置型式。计算结果显示沿着基底衬垫的复合滑动面的安全系数可能更小,成为最危险滑面。该种

考虑铺膜衬垫层的稳定性分析方式目前尚不多见,本文研究可为尾矿库设计及稳定性计算提供参考。

1 尾矿库复合滑动面破坏形式及其搜索实现

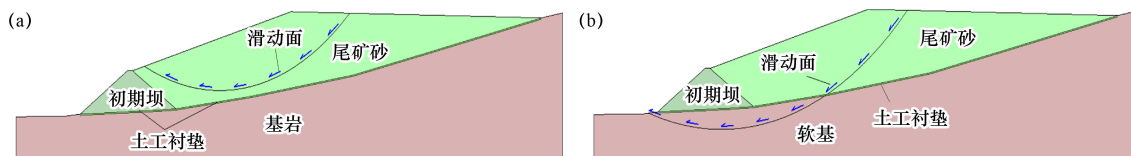
1.1 尾矿库滑动的复合滑动面

通常尾矿砂具有一定的黏聚力(GB 50863—2013)推荐尾中砂平均值能达到7 kPa以上,尾粉土等则更大),因此采用圆弧法搜索最危险滑动面是合适的。对于未铺膜或库底平缓的尾矿库,其滑动面接近于圆弧,圆弧法搜索可以较好的分析其稳定性,其滑动形式一般如图1所示。

若库底铺膜形成土工复合材料衬垫系统,该衬垫系统通常抗剪强度较小形成软弱层面,此时可能出现库身整体或部分沿着该软弱层面的复合面滑动,如图2所示。若采用圆弧方法进行搜索有可能因为强制要求滑动面为圆弧而忽略该复合滑动面,当复合滑动面安全系数较小时,则该圆滑滑动法未能得到最危险滑动面和真实的安全系数。

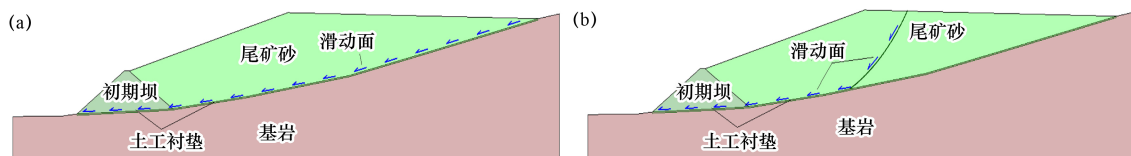
因此在库底铺膜的尾矿库稳定性分析中,考虑复合滑动面的最危险滑弧搜索更为科学合理。本文对该种尾矿库的滑动面抗滑稳定计算进行详细剖析,并通过实际工程算例对圆弧滑动面搜索、沿土工复合材料衬垫系统的整体滑动、考虑土工衬垫系统的复合滑动面搜索3种情况进行计算并分析结果。

考虑到可能会出现复合滑动面,此时瑞典法及毕肖普法已经不适用,故计算均采用摩根斯顿法搜索最危险滑面,该方法中每个土条都能严格满足平衡条件,其滑动面可以为任意,是一种严格且普遍的条分法。



(a) 尾砂中的圆弧滑动; (b) 尾砂和地基中的圆弧滑动

图1 圆弧滑动面



(a) 整体沿建基面的滑动; (b) 库身圆弧及部分建基面构成的滑动

图2 复合滑动面

1.2 尾矿库复合滑动面的搜索实现

目前主要的稳定性分析软件主要考虑圆弧滑动面, 对可能的圆弧滑动面进行稳定计算并得到安全系数最小的滑动面作为计算结果。水工分析系统 Autobank^[9] 是河海大学工程力学研究所根据我国当前水利行业的需求而设计开发的水工分析系统, 包含渗流计算、稳定计算, 应力变形分析等模块。二十余年的实践证明该软件计算方法先进, 运行稳定, 计算结果可靠, 满足工程需要。软件可以直接导入 AutoCAD 图形元素, 建模快捷, 图形化操作界面, 输出图形美观, 同时具有一键生成计算书的功能大大提高了工程技术人员的工作效率和工作质量。Autobank 稳定分析方法为符合规范推荐方法的刚体极限平衡方法, 提供了瑞典法、毕肖普法和摩根斯顿法等条分方法, 并可以考虑超静孔隙水压力、坡面超载等稳定影响因素。

Autobank 搜索滑动面可以为圆弧和抛物线形状, 并可以对软弱层面进行标记, 即当搜索得到的滑动面与软弱层面相交时, 还增加考虑通过软弱层面的复合滑动面计算。本文采用 Autobank 软件的稳定分析模块分析尾矿库稳定性, 通过软弱层标记库底土工复合材料衬垫系统, 以此考虑可能的复合滑动面。

1.3 衬垫系统的抗剪强度

目前在垃圾填埋场领域衬垫系统的抗剪强度已积累了较多了工程经验和研究成果, 文献^[7-8] 对国际上 15 起大型垃圾填埋场失稳破坏实例进行了研究和分析, 其中 11 座的破坏形式为平移破坏, 仅 4 座为圆弧滑动破坏, 并且所有的含有土工膜或组合衬垫系统的填埋场的破坏形式都是破坏面沿衬垫系统或沿衬垫系统和垃圾体的平移破坏。可见以土工合成材料为主组成的复合衬垫界面往往为垃圾填埋场中的薄弱面, 平移滑动破坏是现代大型卫生填埋场发生失稳破坏的主要形式。文献 [10] 详细地介绍了卫生填埋场的设计与施工。

因近些年来环保要求不断提高, 库底铺膜已经成为尾矿库主要的防渗措施, 但目前尾矿库库底铺膜所形成的土工复合材料衬垫系统的抗剪强度及其对稳定性的影响研究成果较少。由于库底铺设防渗在结构形式上类似垃圾填埋场, 参考垃圾填埋场的经验, 尾矿库沿土工衬垫层的平移滑

动不容忽视。显然土工材料衬垫系统的抗剪强度直接影响坝体的稳定性, 现有试验结果^[8] 显示, 滑动时衬垫界面的抗剪强度要大大低于设计的试验峰值抗剪强度, 而非常接近于大应变时界面的残余强度, 由于多层衬垫的界面材料在土工材料衬垫运行中产生了较大的相对位移, 使得衬垫界面的强度由峰值强度下降至残余强度。尾矿库在铺膜后堆坝的过程中, 尾矿砂(初期坝)在自重作用下使得土工衬垫上产生相对位移, 很容易引起材料间的相对位移, 从而降低衬垫界面上的剪切强度, 计算中需要根据基底土工复合材料衬垫的组成及坡度选用合适的衬垫界面强度参数。

2 算例分析

常见的尾矿库铺膜形式有全库底(包括初期坝)铺膜和库身尾砂底部及初期坝上游坡铺膜, 两种型式下的尾矿库软弱层面位置相应不同, 在搜索过程中可能出现不一样的滑动面, 以下对上述两种情况分别举例进行计算说明。

2.1 全库底铺膜防渗的尾矿库抗滑稳定

2.1.1 工程概况

某尾矿库属于典型的山谷型尾矿库, 尾矿处理采取传统的湿式堆存工艺, 采用上游式筑坝方式。尾矿库工程由初期坝、后期堆积坝、尾矿库截排洪(水)系统、防渗系统、排渗系统、辅助设施等组成。尾矿库设计最终堆积坝顶标高为 412 m, 设计总坝高为 79 m, 设计总库容 2 120 万 m³, 尾矿库设计等别为二等库。初期坝采用透水型碾压式混合材料坝, 坝顶标高为 367 m, 宽度为 4 m, 坝轴线长度约为 342.6 m, 上下游坡比均为 1:2, 采用库区风化料筑坝; 后期堆积坝采用旋流分级底流筑子坝, 堆积坝外坝坡平均边坡比 1:5.2, 堆积高度为 45 m。

为了确保环保相关规范, 该尾矿库按照Ⅱ类库环保要求进行防渗, 尾矿库堆积范围以内全库底采用 HDPE 土工膜防渗衬层水平防渗方式, 防渗膜从上游堆积坝库底范围穿过初期坝底部一直延伸至初期坝下游截渗坝坝前。库底防渗层做法为整平碾压的地基层 + 500 g/m² 无纺土工布 + 2.0 mm 厚双糙面 HDPE 土工膜 + 500 g/m² 黑色长丝无纺土工布 + 0.3 m 厚的尾砂防护层防止防渗膜长时间暴晒。库

内尾砂分层按照工勘报告实测钻孔剖面简化处理,得到的计算剖面如图 3 所示。

这里为分析滑动破坏的形式,以工勘报告实测的坝体浸润线埋深和正常运行水位工况为例进行分析,正常运行水位为 408.30 m,干滩长度为 250 m。

根据工勘报告提供的推荐值,选取各地层计算参数如表 1 所示。

库底采用无纺土工布 + 双糙面 HDPE 土工膜 + 黑色长丝无纺土工布防渗,参考文献 [10],综合考虑工程实际情况选取库底土工衬垫的界面强度指标:峰值强度 $c = 10\text{ kPa}$, $\varphi = 18^\circ$,残余强度为 $c = 3\text{ kPa}$, $\varphi = 15^\circ$,参考垃圾填埋场的实测数据及经验^[11],拟定坝顶正下方之上的土工衬垫界面采用峰值强度,之下采用残余强度。

2.1.2 圆弧滑动面搜索

圆弧法搜索得到的最危险滑弧如图 4 所示,抗滑稳定安全系数为 1.82,滑弧均位于尾矿砂中,并在初期坝上方滑出。计算模型中包含库底土工

衬垫层,但由于该层厚度较薄(建模中为 0.2 m),圆弧法搜索中由于强制要求滑动面为圆弧,所得到的最危险滑面未触及基底,滑弧均位于尾砂中。

2.1.3 沿土工衬垫的整体滑动

考虑尾矿库库身整体滑动,计算沿库底复合土工材料衬垫系统的抗滑稳定安全系数。衬垫系统的抗剪强度指标取值如前文所述,得到抗滑稳定安全系数为 2.26(图 5),显然该滑动安全系数较大,尾矿库库身整体滑动的可能性较小。

2.1.4 考虑土工衬垫的复合滑动面搜索

考虑土工衬垫系统的复合滑动面搜索,搜索得到的安全系数为 1.25。滑动面由圆弧段和折线段组成,圆弧段位于尾砂中,折线段沿着基底土工衬垫层滑出,如图 6 所示。

与圆弧滑动面搜索得到的结果相比,复合滑动面的安全系数出现了大幅度降低(下降幅度达到 46%),主要原因是圆弧搜索方法强制要求滑动面为滑弧,虽然此时底部土工衬垫层仍然存在,但该

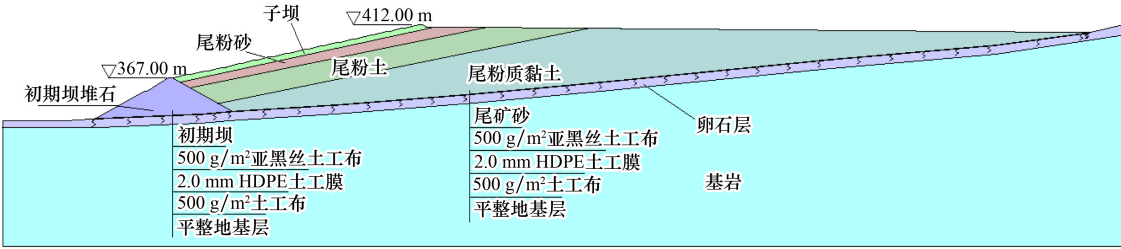


图 3 尾矿库计算模型

表 1 稳定性计算参数

材料	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗剪强度	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
子坝	1.88	2.00	6.0	34.0
尾粉砂	1.90	2.00	10.6	31.3
尾粉土	2.00	2.05	10.8	29.4
尾粉质黏土	1.95	1.98	11.5	18.0
初期坝堆石	1.90	2.10	0	40.0
卵石层	2.05	2.20	0	37.0
基岩	2.00	2.10	11.0	30.0

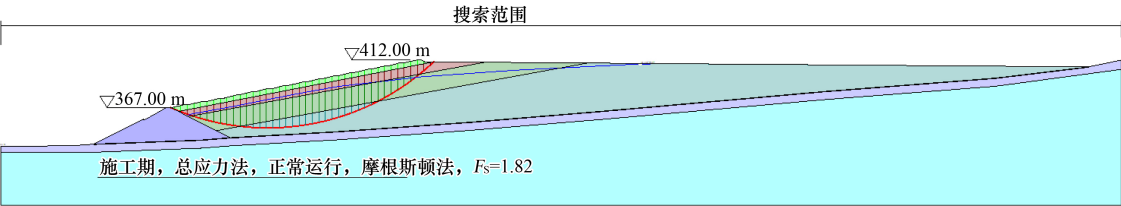


图 4 圆弧滑动面搜索结果

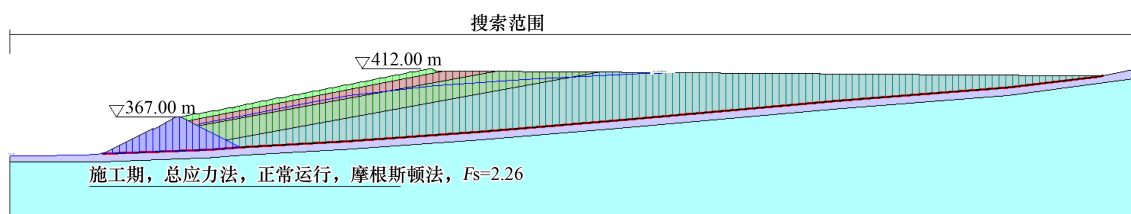


图 5 尾矿库的整体滑动

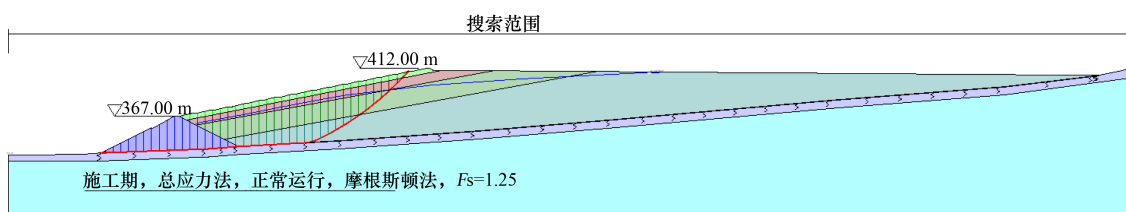


图 6 考虑土工衬垫的复合滑动面搜索

限制条件忽略了可能的复合滑动面。然而该复合滑动面完全可能且更可能出现, 因此本节中的考虑土工衬垫的复合滑动面抗滑稳定安全系数更为符合实际结果, 尾矿库的稳定性分析应该考虑该种情况。

2.2 初期坝上游坡铺膜防渗的尾矿库抗滑稳定

某尾矿库初期坝为碾压堆石坝, 坝顶高程为 984 m, 堆积坝坝高为 90 m, 最终堆积坝高为 1 074 m。设计根据环保需求在初期坝上游坡和库区底部设置土工防渗层, 并在初期坝底部设置 HDPE 排水管导出上游坡尾矿渗滤液。对该尾矿库断面进行稳定性分析, 这里仅说明有无考虑土工复合材料衬垫系统对稳定性计算的区别, 限于篇幅略去计算参数等的说明, 计算方法采用摩根斯顿方法, 工况为正常水位, 计算模型如图 7 所示。

当不考虑设置衬垫系统软弱层, 采用圆弧滑动法所搜结果如图 8 所示, 此时抗滑稳定安全系数为 1.32, 滑弧底部触及衬垫系统, 限于滑弧形状限制, 仅圆弧底部一小段与基底重合, 滑坡体在初期坝上游坡顶滑出; 当采用衬垫系统软弱层标记的复合滑动面进行搜索, 可得到图 9 的结果, 复合滑动面入口段和出口段均为圆滑, 出现在尾砂中, 中段为与

基底重合的折线段, 位于土工衬垫系统中, 此段基底坡度相对较陡, 安全系数为 1.15。

同样, 该复合滑动面是有可能出现的滑动面且安全系数最小, 为断面的最危险滑动面, 该种情况的滑动不可忽视。

3 结 论

(1) Autobank 采用软弱层标记库底因铺膜而形成的土工复合材料衬垫系统, 采用摩根斯顿法对尾矿库进行包含复合滑动面的最危险滑面搜索, 能更准确地分析尾矿库的稳定性, 结果更为合理全面。

(2) 对圆弧滑动面搜索、沿土工复合材料衬垫系统的整体滑动、考虑土工衬垫系统的复合滑动面搜索 3 种情况计算结果可以更好的反应尾矿库的稳定状态, 相应库身的稳定安全系数应该为这 3 种情况的小值。

(3) 不同位置铺膜形成的衬垫系统, 通过软弱层面标记可以搜索得到不同型式的复合滑动面, 具体应视工程实际铺膜情况而定。

因铺膜形成的土工复合材料衬垫系统导致出

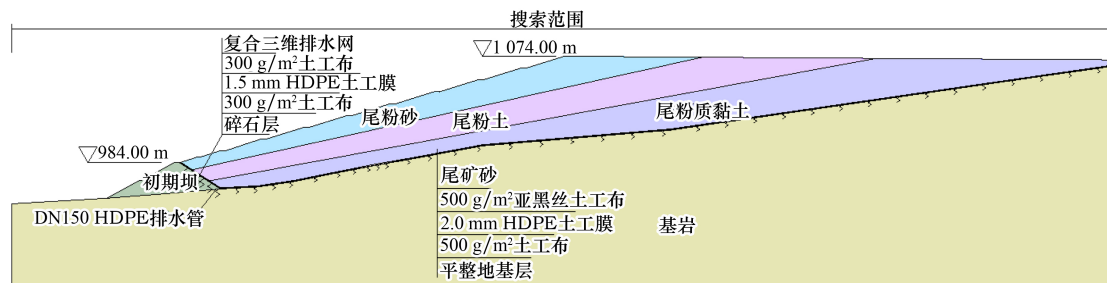


图 7 算例 2 计算模型

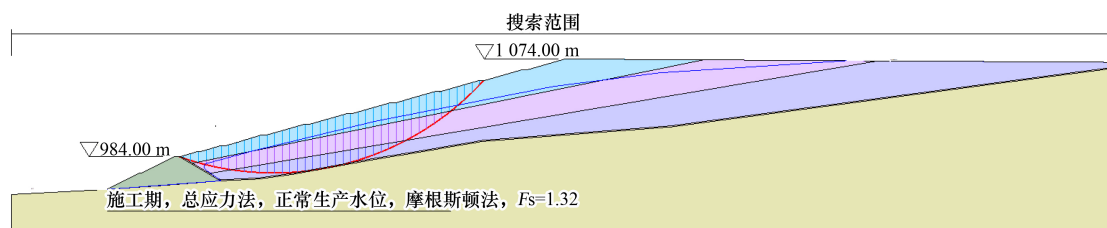


图 8 圆弧滑动面搜索结果

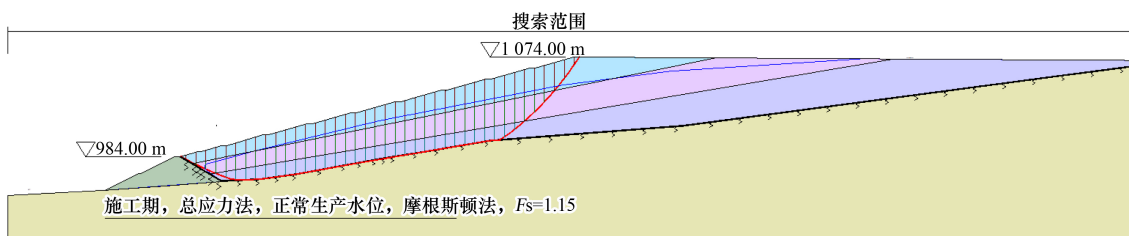


图 9 复合滑动面搜索结果

现的复合滑动面安全系数可能更小, 该种滑动不可忽视。本文对于铺膜防渗处理的尾矿库稳定性计算的处理方式可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 苏振宇. 三维边坡稳定有限元极限平衡法研究及应用[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- [2] 秦鹏飞. 极限平衡和数值方法在边坡工程中的应用[J]. 金属矿山, 2020(6): 6.
- [3] 尾矿设施设计规范: GB 50863—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [4] 朱建华, 刘石桥. 尾矿坝坝坡稳定计算荷载组合的探讨[J]. 工程建设, 2010, 42(1): 34—37.
- [5] 吴焕新, 王又武, 陈章友, 等. 关于垃圾填埋场安全性的相关问题探讨[J]. 工程建设, 2014, 46(3): 32—34.
- [6] 李炳华, 孙德才, 程博, 等. Autobank 软件在渗流稳定应用中的探讨[J]. 绿色环保建材, 2020(11): 2.
- [7] QIAN X, KOERNER R M. Stability analysis when using an engineered berm to increase landfill space[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(8): 1082—1091.
- [8] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfill failures [C]. Boston: GeoDenver 2000 Congress, 2000.
- [9] 李慈祥, 张峰. Autobank 在箱涵结构计算中的应用[J]. 绿色环保建材, 2020(6): 2.
- [10] 钱学德. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 施建勇, 雷省, SHI, 等. 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2014(6): 998—1004.
- [5] 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [6] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [7] 白晓宇, 苏杭, 张鹏飞, 等. 深基坑土岩界面微型钢管桩受力特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(11): 36—42.
- [8] 印长俊, 易丹萍, 龚家兴. 注浆微型钢管桩抗弯性能研究[J]. 应用力报, 2023, 40(5): 1125—1132.
- [9] 刘涛, 吴泽, 李智远. 微型钢管桩在山区综合管廊基坑支护中的应用[C]//. 2022 年工业建筑学术交流会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社出版发行, 2022.
- [10] 杨汉臣. 微型钢管桩在边坡治理中的应用及其机理分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [11] 丁光文. 微型桩处理滑坡的设计方法[J]. 西部探矿工程, 2001(4): 15—17.
- [12] 薛承鹏. 微型钢管桩在边坡治理工程中的应用[J]. 福建交通科技, 2022(11): 11—13; 50.
- [13] 丁光文; 王新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004(1): 47—50.
- [14] 谢晓华, 刘吉福, 庞奇思. 微型桩在某滑坡处治工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001(2): 110—111.
- [15] 黄伟钦. 微型桩在边坡支护中的综合应用[J]. 岩石力学与工程学报. 1998, 20(S1): 1218—1220.

(上接第 8 页)