

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.04.13

引用格式: 杨峰, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 海南省澄迈县福山镇高铁站前道路土体滑坡的 GEO5 数值模拟研究[J]. 中国地质调查, 2020, 7(4): 104-111.

海南省澄迈县福山镇高铁站前道路土体滑坡的 GEO5 数值模拟研究

杨峰^{1,2}, 薛桂澄^{1,2}, 柳长柱^{1,2}, 阮明^{1,2}, 杨永鹏^{1,2},
王晓林^{1,2}, 李信^{1,2}, 符允隆^{1,2}

(1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206; 2. 海南省地质调查院, 海口 570206)

摘要: 通过对海南省澄迈县福山高铁站前道路土体滑坡的形态特征、地层岩性、水文地质环境条件及地质构造等情况的分析, 结合地形测量、钻探揭示的地层结构及分类, 运用 GEO5 模拟软件中的地层模块建立了滑坡区三维可视化模型, 并在此模型基础上, 采用边坡稳定性分析模块, 运用萨玛法(Sarma), 对该滑体边坡在天然状态和饱水状态 2 种工况下进行数值模拟研究, 得出边坡稳定性情况和滑动面位置。模拟结果与野外调查结果相吻合, 为今后制定合理的滑坡防治措施提供了理论依据。

关键词: GEO5; 数值模拟; 三维可视化模型; 稳定性分析; 滑动面

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2020)04-0104-08

0 引言

随着海南国际旅游岛和海南自贸区(港)经济建设的快速发展, 建设与用地的矛盾十分突出, 自然地质环境和人为活动等要素形成诸多潜在不稳定边坡, 在强降雨或强台风条件下极易导致边坡发生崩滑流等地质灾害现象, 严重阻碍了当地的工程建设和社会发展^[1-4]。在澄迈县 1:5 万地质灾害详查中, 福山镇高铁站前道路土体边坡在经历了强热带风暴“贝碧嘉”后, 发生边坡失稳导致路面变形及人行道毁坏, 对该路段过往人员及车辆造成了严重威胁^[5]。因此, 对滑坡稳定性的研究十分重要。滑坡稳定性的评价方法主要包括岩土力学参数获取法、稳定系数(安全系数)法等^[6-7]。目前广泛采用极限平衡法, 但该计算理论未能考虑岩土体内部的应力应变关系, 不能可视化地认识滑坡的发生及其发展过程^[8-9]。随着计算机软件技术的发展, 数值模拟方法作为一种有效的研究方法逐渐应用于

边坡稳定性研究中, 如 FLAC-3D、里正边坡计算、GeoStudio 等软件对边坡稳定性的分析^[10-13]。其中, 有限元强度折减法因其为边坡稳定系数及滑面的确定提供了一条有效途径, 而被越来越多学者用于降雨条件下边坡稳定性的研究中^[14-17]。本文采用 GEO5 软件, 结合区域上三维可视化模型, 对天然状态和饱水状态 2 种工况下澄迈县福山镇高铁站前道路土体边坡进行了数值模拟研究, 分析了边坡滑动面及其位移变化规律。

1 滑坡概况

1.1 基本概况与几何特征

滑坡位于福山镇高铁站道路北侧, 滑坡后缘地理坐标为 109°54'53"E、19°52'45"N, 滑体为建设道路填方形成的人工充填边坡。2018 年 8 月 14 日至 17 日台风“贝碧嘉”登陆海南期间, 该处坡体发生滑动, 导致斜坡后缘公路毁坏, 并影响到路旁铺设的燃气管道, 幸未造成人员伤亡, 滑坡定名为“福山

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-07-06。

基金项目: 2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目“人工填土型滑坡灾害成灾机制与数值模拟研究——以澄迈福山动车站道路滑坡为例(编号: 2019RC347)”和 2020 年海南省财政项目“海南地质灾害形成机理研究与监测预警示范(2020 年度)(编号: T102656.510)”联合资助。

第一作者简介: 杨峰(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害形成机理与预警预报研究工作。Email: 254208840@qq.com。

“高铁站前道路土体滑坡”。该滑坡体的几何特征为: 沿主滑方向长度为 70 m,影响宽度为 120 m,坡度 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$,坡向 $NW350^{\circ}$ (为主滑方向),推测厚度为 4 ~ 5 m,滑坡体方量约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于小型滑坡(图 1)。



图 1 滑坡勘察平面示意图

Fig. 1 Plan sketch of the surveyed landslide

1.2 地形地质条件

滑坡体前缘坡脚处发育 2 处溪流,前缘剪出口处有地下水渗出,之前修建高度约 1 m 的简易挡土墙也遭到毁坏,后缘裂缝导致公路路面毁坏及人行

道不规则变形(图 2)。

滑坡区属于火山岩台地区,地势南高北低,由滑坡后缘向前缘剪出带递减。通过钻探揭露该区地层岩性为: 填土,分层深度 0 ~ 9.1 m; 可塑—软塑状粉质黏土(褐红色,俗称“红土”),分层深度 5 ~ 15 m; 黏土(深黄色),分层深度 10 ~ 20 m; 可塑状粉质黏土(灰绿色),分层深度 20 ~ 25.6 m。由于覆盖层较厚且工作周期较短,本次勘察钻孔均未能揭露至基岩面(图 3)。

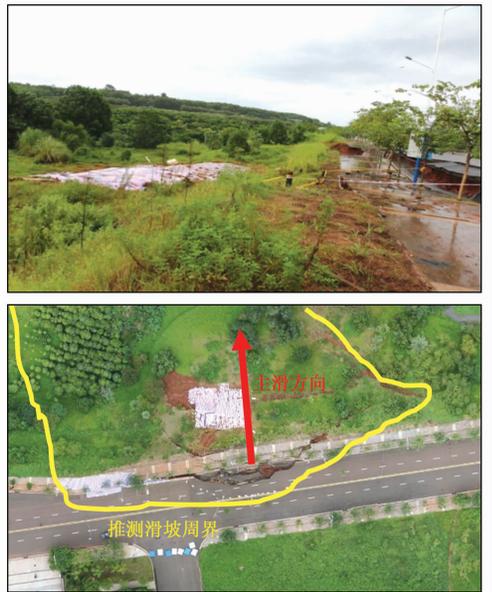


图 2 滑坡现场照片及航拍现状

Fig. 2 Field and aerial photographs of the landslide

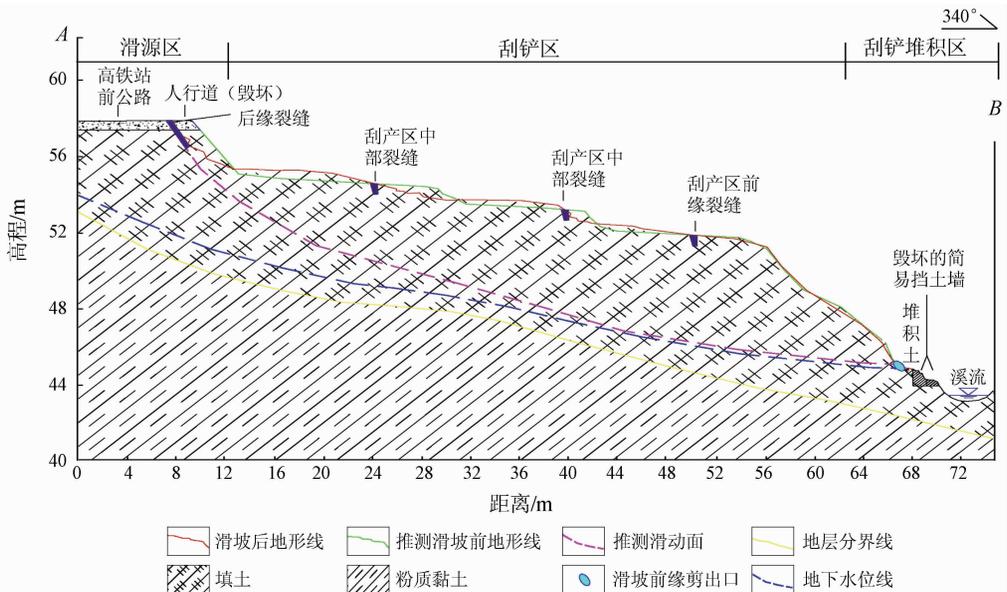


图 3 滑坡勘察剖面示意图

Fig. 3 Cross-section sketch of the surveyed landslide

1.3 工程勘察特征

根据本次滑坡钻探及室内土工试验分析结果,滑坡勘察区范围内共划分了4个工程地质层。

(1)填土。杂色,松散-稍密,稍湿-潮湿,主要由玄武岩风化残积土、粉质黏土、碎石、混凝土等组成,表层含有植物根系,分布于整个勘察区。

(2)可塑-软塑状粉质黏土。褐红色,可塑-软塑状,为玄武岩风化残积土,以黏粒为主,次为粉细粒,干强度中等,韧性中等,局部可见含有铁质结核碎块,呈不规则状,直径多为0.2~1.0 cm,岩心含水率较高,软化,多不呈土柱状。

(3)黏土。深黄色,杂色,可塑-软塑状,为第四系下更新统秀英组海相沉积,以黏粒为主,次为粉细粒,干强度中等,韧性好,透水性弱,岩心切面光滑。

(4)可塑状粉质黏土。灰绿色,可塑,为第三系海口组海相沉积,以黏粒为主,次为粉细粒,干强度中等,韧性中等,透水性弱。岩心切面光滑,局部可见有黏土与粉细砂,呈互层状。深度22.0~23.8 m和24.6~24.9 m处为弱固结状的粉砂岩,可见水平层理构造,整段层位局部可见少量贝壳碎屑。

2 滑坡稳定性数值模拟

2.1 计算模型

采用GEO5模拟软件中的地层模块建立了滑坡区三维可视化模型(图4),以平行于高铁站前道路指向东为X轴正方向,以垂直于高铁站前道

路指向北为Y轴正方向,竖直向上为Z轴正方向,模型以图1中推测滑坡周界为范围,涵盖了整个滑坡区。模型中包含了此次勘察的要素,如地层岩性及其分层结构、地下水位埋深以及地形测绘等,为计算边坡稳定性提供了滑坡区内水文及工程地质等背景参数。

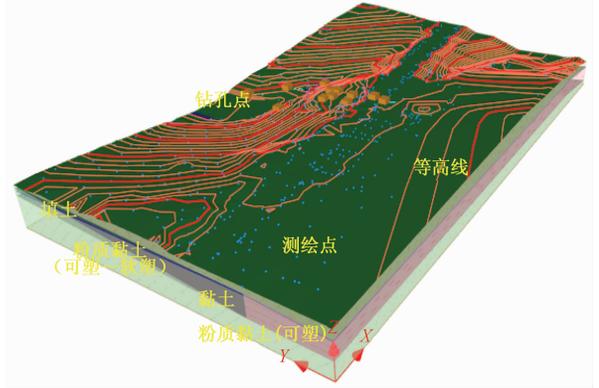


图4 滑坡区三维可视化模型结构示意图
Fig.4 Three-dimensional visualization model of the landslide

2.2 剖面概化与网格剖分

为更好地模拟实际工况,本文选取边坡变形较大、剪出口有地下水渗出、坡脚鼓胀较为严重部位的边坡剖面(A-B剖面)(图1)作为典型剖面进行稳定性分析(图5)。采用GEO5中边坡稳定性分析模块,将剖面模型概化为4种材料:①填土;②粉质黏土(可塑-软塑);③黏土;④粉质黏土(可塑)。概化材料的物理力学参数取值由模型和土工试验综合得出,材料模型选取软件自带的Drucker-Prager模型,具体取值见表1。

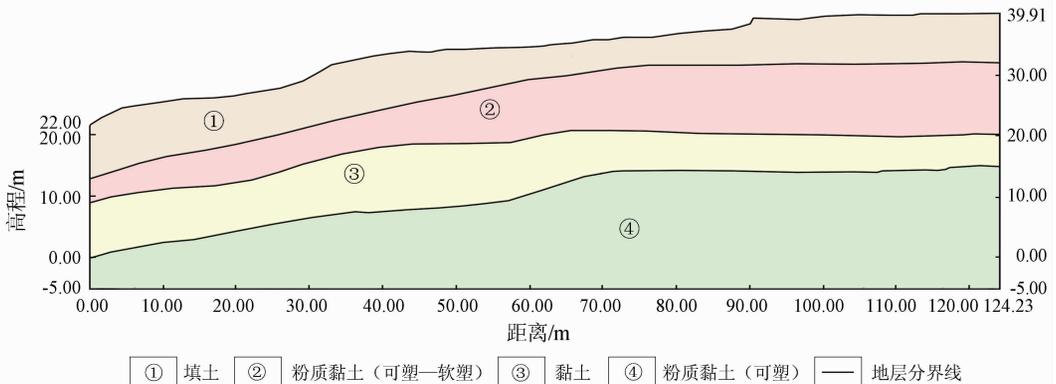


图5 工程勘察剖面图(A-B剖面)

Fig.5 Engineering survey profile (Section A-B)

表 1 滑体材料参数选取表

Tab.1 Parameters of sliding material

材料分区	材料名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 C_{ef}/kPa	内摩擦角 $\psi_{ef}/(^{\circ})$	泊松比
①	填土	20.0	12	12.0	0.40
②	粉质黏土(可塑—软塑)	19.0	9	20.0	0.35
③	黏土	18.0	33	12.5	0.38
④	粉质黏土(可塑)	19.5	10	20.0	0.30

之后,对 A—B 剖面进行网格划分(图 6),生成节点数为 4 155、单元总数为 2 453 的有限元网格。GEO5 程序采用有限元强度折减法对边坡稳定性进行分析,该方法的基本原理是将坡体强度参数(C_{ef} 和 ψ_{ef})同时除以一个折减系数,得到一组新的值,然后作为新的材料参数输入,再由软件自动演算,利用相应的稳定判断准则,确定相应的坡体最小稳定安全系数,此时坡体达到临界破坏状态,同时可以得到坡体的潜在滑动面^[18-20]。

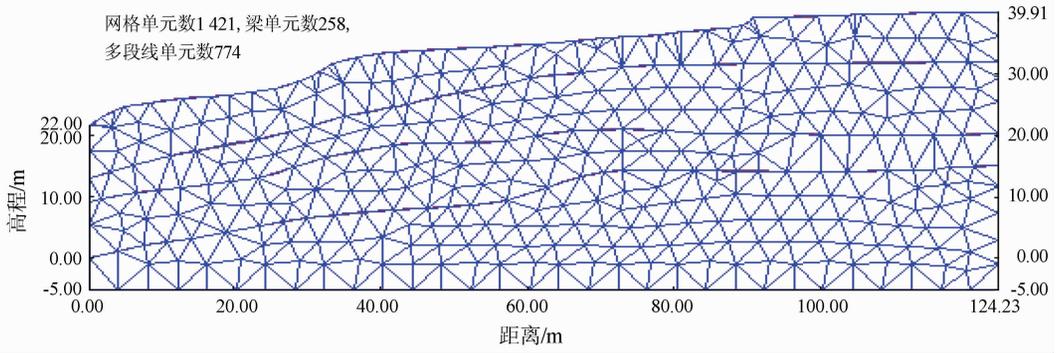


图 6 A—B 剖面生成有限元网格示意图

Fig. 6 Sketch of finite element grids for A—B profile

3 结果及分析

3.1 边坡稳定性验算和滑动面分析

进入天然状态工况界面,计算分析边坡在天然

状态下的稳定性,选取软件界面中的萨玛法(Sarma)进行边坡稳定性验算^[21-22]。通过一段时间的求解即可得到边坡在天然状态下的安全系数(1.76) > 设计安全系数(1.35),以及天然状态下边坡的潜在滑动面位置(图 7)。

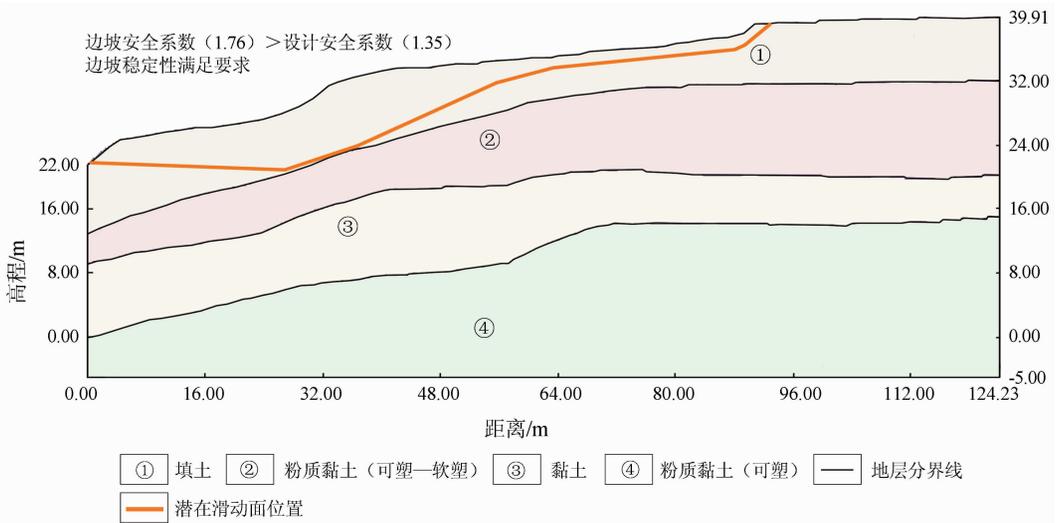


图 7 天然状态工况下边坡稳定性计算示意图

Fig. 7 Sketch of the side slope stability under natural state working condition

进入饱水状态工况界面,计算分析边坡在饱水状态下的稳定性,根据钻孔勘查资料及台风

“贝碧嘉”期间的降雨情况,加入地下水位线并选取软件界面中的萨玛法(Sarma)进行边坡稳

定性验算。通过一段时间的求解即可得到边坡在饱水状态下的安全系数(1.27) < 设计安全系

数(1.35),以及饱水状态下边坡的失稳滑动面位置(图8)。

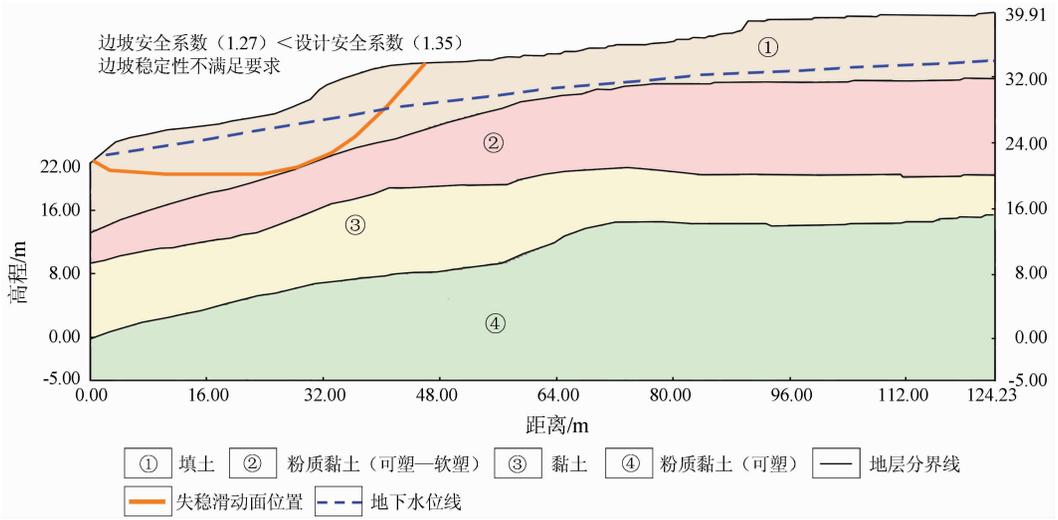


图8 饱水状态下工况下边坡稳定性计算示意图

Fig. 8 Sketch of the side slope stability under full water state working condition

3.2 位移云图分析

由天然状态工况条件下边坡位移云图(图9)

和饱水状态工况条件下边坡位移云图(图10)可以看出二者的稳定状态和位移变化情况。

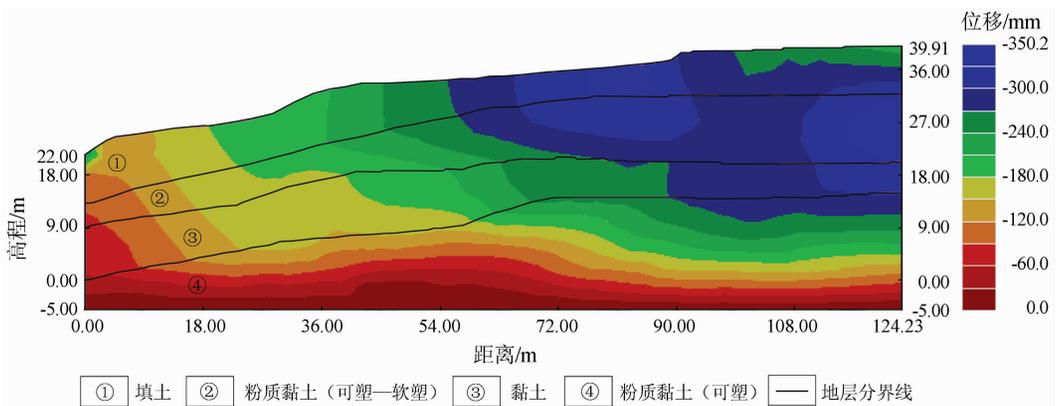


图9 天然状态工况条件下边坡位移云图

Fig. 9 Satellite picture of the side slope shifting under natural state working condition

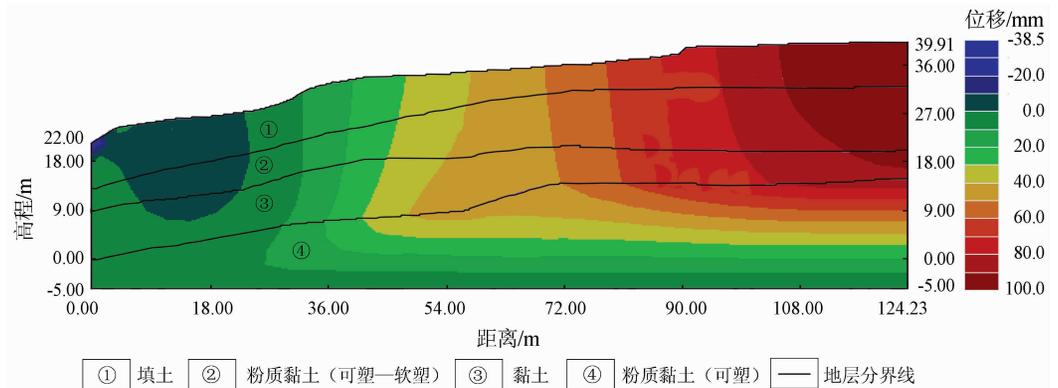


图10 饱水状态工况条件下边坡位移云图

Figure 10 Satellite picture of the side slope shifting under full water state working condition

天然状态工况条件下边坡有限元网格位移变化范围为 $-350.2 \sim 0$ mm,表明边坡土体在天然状态下处于稳定状态。边坡网格由坡顶蓝色逐渐递减至坡脚红色,表明土体位移变化在垂向上由坡顶至坡脚逐渐增大,与边坡稳定性计算的潜在滑动面位置及深浅变化趋于一致。

饱水状态工况条件下边坡有限元网格在垂直方向上的位移变化范围为 $-38.5 \sim 100.0$ mm,表明边坡土体在饱水状态下处于滑动状态。边坡网格由坡顶红色逐渐递减至坡脚蓝色,表明土体位移变化在垂向上由坡顶至坡脚逐渐递减,与边坡稳定性计算的失

稳滑动面位置及深浅变化基本趋于一致,且在边坡顶处滑动及变形最为强烈,与野外调查结果基本吻合。

3.3 塑性应变分析

边坡弹塑性区域分布、边坡失稳破坏可以看作是塑性区逐渐发展、扩大直至贯通而进入完全塑流状态、无法继续承受荷载的过程。潜在滑坡在自重作用下坡体内部区域将产生不同程度的塑性变形,若发生塑性变形的区域相互贯通且计算分析不收敛,则表明边坡发生整体失稳,结构不稳定。天然状态和饱水状态 2 种工况条件下塑性分析结果如图 11 和图 12 所示。

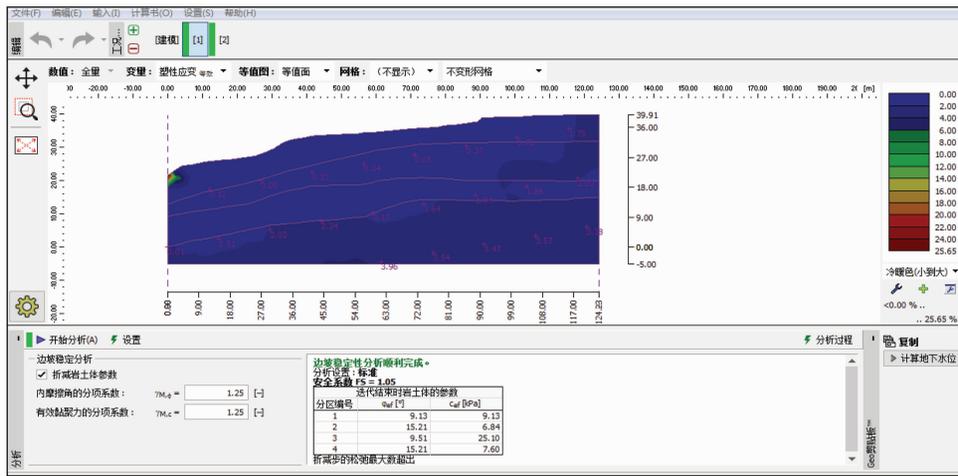


图 11 天然状态工况下边坡塑性应变界面示意图

Fig. 11 Plastic strain interface of the side slope under natural state working condition

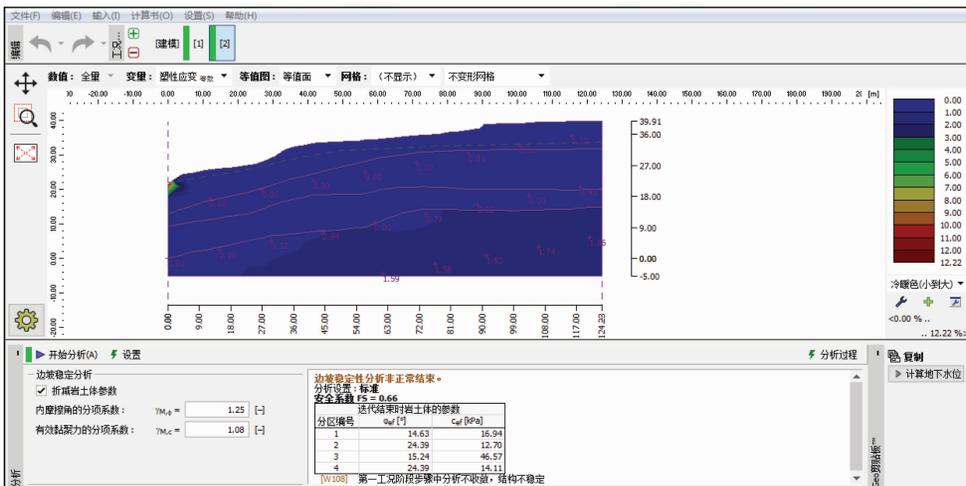


图 12 饱水状态工况下边坡塑性应变界面示意图

Fig. 12 Plastic strain interface of the side slope under full water state working condition

计算结果显示:在天然状态工况条件下,边坡塑性应变计算分析顺利完成,计算分析过程中每一步均收敛,表明边坡整体结构稳定;在饱水

状态工况条件下,边坡塑性应变计算分析非正常结束,计算分析过程中不收敛,说明边坡整体结构不稳定。

4 结论

通过野外调查、室内资料整理和数值模拟分析等手段,本文研究建立了澄迈县福山高铁站前土体滑坡的三维可视化模型,并选择模型典型剖面进行概化,利用有限元分析方法对滑坡的稳定性进行了分析,主要结论如下。

(1)天然状态工况条件下边坡整体稳定性较好,边坡安全系数(1.76) > 设计安全系数(1.35),满足设计要求;饱水状态工况条件下边坡安全系数(1.27) < 设计安全系数(1.35),不满足设计要求。此外,还得出边坡在天然状态和饱水状态下的潜在滑动面和失稳滑动面。天然状态和饱水状态2种工况条件下的模拟结果与野外调查结果一致。

(2)模拟边坡发生滑移时,坡顶滑动位移垂直变化量比坡脚的滑动位移垂直变化量要大,从垂向上表现为递减趋势,模拟的结果与野外调查结果吻合。

(3)天然状态工况条件下,边坡塑性应变计算分析顺利完成,计算分析过程中每一步均收敛,说明边坡整体结构稳定;饱水状态工况条件下,边坡塑性应变计算分析非正常结束且不收敛,说明边坡整体结构不稳定。分析计算结果与野外调查结果吻合。

参考文献:

[1] 夏南,杨峰,陈毅,等.海南岛1:5万地质灾害详细调查报告(第一批—第三批)[R].海口:海南省地质调查院,2013-2016.

[2] 薛桂澄,柳长柱,杨峰,等.澄迈县福山动车站前道路填方土体滑坡调查简报[R].海口:海南省地质调查院,2018:8.

[3] 杨峰,陈毅,龚皓,等.海南省澄迈县1:5万地质灾害详细调查报告[R].海口:海南省地质调查院,2018:11.

[4] 杨峰,陈毅,李信,等.基于GIS技术的海南省白沙县地质灾害

易发性区划研究[J].地质灾害与环境保护,2017,28(4):87-89,101.

[5] 颜若福.澄迈县福山动车站土体滑坡通讯稿[R].海口:海南省地质环境监测总站,2018:8.

[6] 李宁,许建聪.基于场变量的边坡稳定分析有限元强度折减法[J].岩土力学,2012,33(1):314-318.

[7] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.

[8] 何晖,李志雨.基于FLAC3D的矿区潜在滑坡稳定性分析[J].甘肃科学学报,2013,25(3):32-35.

[9] 王根龙,叶万军,伍法权,等.崩滑地质灾害稳定性评价方法研究[M].上海:上海交通大学出版社,2013.

[10] 张晶,陈剑平,何隆祥,等.基于FLAC3D的新岩滑坡稳定性分析[J].中国水运,2013,13(4):263-265.

[11] 秦凯旭,冯文凯,郎秋玲.GEO-SLOPE软件在某滑坡稳定性计算中的应用[J].灾害学,2007,22(2):21-24.

[12] 熊征,李先福,杨利伟.FLAC3D在库岸斜坡稳定性分析中的应用[J].武汉工程大学学报,2007,29(2):27-30.

[13] 唐栋,李典庆,周创兵,等.考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(11):3239-3248.

[14] 叶帅华,时轶磊.降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1648-1656.

[15] 张硕,裴向军,黄润秋,等.降雨诱发黄土高填方支挡边坡失稳机理研究[J].工程地质学报,2017,25(4):1094-1104.

[16] 李焕强,孙红月,孙新民,等.降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J].岩土工程学报,2009,31(4):589-594.

[17] 李绍红,朱建东,王少阳,等.考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法[J].水文地质工程地质,2018,45(2):131-135,149.

[18] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.

[19] 曾亚武,田伟明.边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J].岩土力学与工程学报,2005,24(增刊2):5355-5359.

[20] GEO-SLOPE International Ltd.边坡稳定性分析软件SLOPE/W用户指南[M].中仿科技(CnTech)公司,译.北京:冶金工业出版社,2011:166-172.

[21] GEO5岩土工程设计手册(中国规范版)[M].63-68.

[22] GeoStudio2007操作实例教程[M].17-45.

GEO5 numerical simulation research on the soil landslide in the front road of Fushan high-speed railway station in Chengmai County of Hainan Province

YANG Feng^{1,2}, XUE Guicheng^{1,2}, LIU Changzhu^{1,2}, RUAN Ming^{1,2},
 YANG Yongpeng^{1,2}, WANG Xiaolin^{1,2}, LI Xin^{1,2}, FU Youlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, China;
 2. Hainan Institute of Geological Survey, Haikou 570206, China)

Abstract: Based on the analysis of the morphological characteristics, stratigraphic lithology, hydrogeological environmental conditions and geological structure of the soil landslide in the front road of Fushan high-speed railway

station in Chengmai County of Hainan Province, the three - dimensional visualization model of the landslide area was established through the stratum module in the GEO5 software, combined with topographic survey, layer structure and stratigraphic classification. On the basis of this model, the authors adopted the slope stability analysis module and Sarma method to conduct numerical simulation research on the slope stability and the position of the sliding surface under two working conditions of natural state and full water state. The simulation results are in agreement with the field survey results, which will provide some theoretical basis for the establishment of reasonable landslide prevention and control measures in the future.

Keywords: GEO5; numerical simulation; three - dimensional visualization model; stability analysis; sliding surface

(责任编辑: 刘丹)