

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.05.004

基于极限平衡理论的外贸路南侧边坡稳定性分析

王兴宏

(湖南化工地质工程勘察院有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 在基于外贸路南侧边坡区域工程概况及宏观分析的基础上, 确定使用极限平衡理论中的圆弧滑动条分法对外贸路南侧边坡局部及整体性的稳定性进行定量计算。通过地质勘察结果对计算参数进行取值, 采用圆弧滑动条分法计算滑坡的稳定性系数 F_s , 计算结果表明: 边坡局部稳定性验算时, 正常工况下处于稳定状态, 暴雨工况下处于非稳定状态; 边坡整体稳定性验算时, 正常及暴雨工况下均处于稳定状态; 根据稳定性计算结果, 分析边坡失稳原因, 并提出了坡顶裂缝灌浆、坡体松散土强夯、坡脚挡墙的处治措施。

关键词: 外贸路南侧边坡; 极限平衡理论; 圆弧滑动条分法; 稳定性系数

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)05-0029-05

引文格式: 王兴宏. 基于极限平衡理论的外贸路南侧边坡稳定性分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(5): 29-33.

Stability Analysis of South Side Slope of Waimao Road Based on Limit Equilibrium Theory

WANG Xinghong

(Hunan Institute of Chemical Engineering and Geological Engineering Co. Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Based on a macro analysis of the engineering survey of the south slope of Waimao road, a quantitative calculation has thus been made of the local and overall stability of the south side slope of Waimao road by using the circular arc sliding slice method in the limit equilibrium theory. The calculated parameters are evaluated by geological survey results, while the stability coefficient F_s of the landslide is calculated by using the circular arc sliding slice method. The calculation results show that the local stability of the slope is in a stable state under normal working conditions, while in an unstable state under the condition of rainstorm, the overall stability of the slope is checked, whereas it is stable under normal and rainstorm conditions; based on the results of stability analysis, an analysis has been made of the causes of slope instability, followed by some measures put forward for the treatment of crack grouting at the top of slope, dynamic compaction of loose soil on the slope, as well as retaining wall at the toe of slope.

Keywords: south slope of Waimao Road; limit equilibrium theory; circle slide bar dividing method; stability coefficient

0 引言

我国地理环境幅员辽阔、山川广布、地质灾害多

样, 强降雨引起的山体滑坡、崩塌等地质灾害多发。滑坡、崩塌等现象是我国目前最常见的地质灾害^[1-2], 因其直接造成的经济损失不可估量, 据不完全统计,

收稿日期: 2021-11-01

作者简介: 王兴宏 (1988-), 男, 湖南永州人, 湖南化工地质工程勘察院有限责任公司工程师, 主要研究方向为岩土工程勘察, E-mail: 254565538@qq.com

每年造成的经济损失约占其他各种自然灾害总和的1/4以上。因此,对于地质灾害隐患的排查、勘探以及后续的及时治理,是一件极其紧迫且具有重要意义的的事情。

国外对于滑坡的研究起源于20世纪20年代,世界各国对于滑坡的研究仅有零星的报道,直至1950年美国著名学者K. Terzaghi发表了《滑坡机理》论文,较为系统地说明了滑坡机理后,各国加大了这方面的研究,发表了大量关于滑坡原因、过程、稳定性分析方面的论文。

国内对于滑坡的研究相较于国外稍晚些,最早起始于建国初期,分别于1959年和1973年举办了两次全国性相关的学术交流会议后,奠定了对于滑坡研究的理论基础,当前国内对于滑坡的稳定性计算分析方法较多,且已较为成熟。如李世海等^[3]对滑坡的稳定性问题进行了较为系统地讨论,并说明仅靠计算方法不能有效地解决工程实际问题,应将计算模型与监测结果相结合进行判断分析,以正确判断山体当前状态,这是进行滑坡稳定性分析的有效途径。杨成等^[4]在了解滑坡的地质背景及其爆发因素的基础上,对滑坡变形机制进行了分析,确定该滑坡为崩塌堆积体牵引式滑坡,并采用定性分析和定量计算,进行稳定性分析评价,并在此基础上提供了治理方案建议。王恭先^[5]对滑坡防治中的关键技术进行了全面论述并提出了相应的处理方法。熊扬福等^[6]基于边坡的宏观变形特征,并结合监测数据,对孙家庄滑坡的变形机制进行了分析,并对其稳定性进行了计算,以预测滑坡的变形趋势。索俊峰^[7]以黄龙县水磨湾滑坡为研究对象,研究了其区域地质环境,并对其滑坡产生原因进行了分析,通过定性分析、定量计算、数值模拟相结合的方法确定了滑坡的稳定性系数,且对滑坡的治理提出了不同的治理方案。姚广等^[8]以某山区公路路堑滑坡为研究对象,对其稳定性进行了分析,并提出了合理的处治措施。艾国海等^[9]以万州区上海大道末端滑坡为研究对象,对其稳定性进行了分析,并提出了回填反压、完善截排水系统、裂缝回填等防治措施。祝方才等^[10]以仿真软件Geo-Slop为基础,分别采用Morgenstern-Price法、Spencer法、Janbu法及Bishop法,对深圳外环高速公路某路堑边坡在天然工况和饱和工况下进行了稳定性分析,得出了最危险滑裂面的边坡安全系数。

借鉴已有成果,本文在分析外贸路南侧边坡的变形特征以及地质勘察计算参数取值的基础上,分别采用瑞典条分法、简化Bishop法对外贸路南侧边坡的局部及整体稳定性进行计算分析,分析边坡破坏原

因,并提出相应的治理措施。

1 工程概况及滑坡物质组成

1.1 工程概况

外贸路南侧边坡位于长沙市望城区丁字湾街道,场地为新建外贸路路堤边坡,由于连续强降雨,边坡出现多次垮塌,坡体发展多条贯穿裂缝,其中坡顶路面发展一条平行于路面的纵向裂缝,已经严重影响外贸路行驶车辆的安全。因此,业主办方紧急召集勘察、设计及施工单位参与的紧急会议,共同商讨抢险维修工作,根据施工单位测量报告:边坡坡顶人行道标高为45.00 m,坡脚标高为38.24~39.42 m,坡高为5.58~6.76 m,坡向107°,边坡垮塌段长度约为50 m。外贸路坡体裂缝和路面裂缝图片如图1、图2所示。



图1 外贸路坡体裂缝发育照片

Fig. 1 Picture of slope crack development of Waimao Road



图2 外贸路路面裂缝照片

Fig. 2 Picture of Waimao Road cracks

1.2 滑坡物质组成

坡体物质组成主要为①-1人工填土,系人工回填而成,杂色、褐黄色,主要成分为黏性土,含少量卵砾石,结构中密~密实,硬质含量约为5%~10%,粒径一般为5~40 mm,最大粒径约为70 mm。坡面及坡脚分布为①-2人工填土,暗红色,主要成分为黏性土,含少量卵砾石,稍湿,结构松散~稍密,硬质含量约为7%,粒径一般约为5~35 mm,最大粒径约为60 mm。边坡的典型地质剖面图如图3所示。

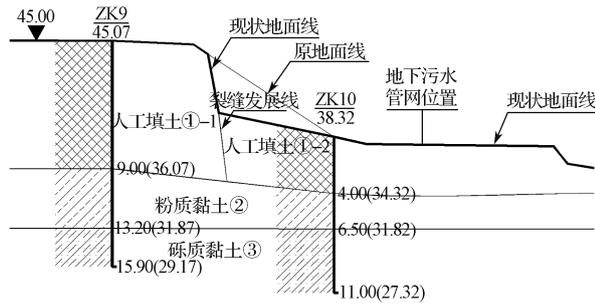


图3 典型地质剖面图

Fig. 3 Typical geological profile

2 滑坡稳定性分析

2.1 变形特征分析

根据现场地质调查和勘察资料，滑坡变形特征主要表现在坡顶外贸路路基发育一条裂缝以及坡体中上部出现多次垮塌，坡后缘发展两条明显的纵向裂缝，裂缝方向均近平行边坡走向；根据施工单位监测结果，边坡没有明显的滑动面，局部偶见掉块现象，下部也未发现明显的变形迹象，边坡变形整体表现为坡体下挫，见图4。



图4 边坡坡体下挫图片

Fig. 4 Picture of slope fall

2.2 成因分析

1) 垮塌原因分析。从现场原位测试结果得知，坡顶及坡肩人工填土①-1呈中密~密实状，坡面及坡脚人工填土①-2呈松散~稍密状，边坡在暴雨条件下，人工填土①-2因浸水软化，最终垮塌。

2) 外贸路路基裂缝发育原因分析。①边坡垮塌后，坡体后缘形成一临空面，静止土压力得到释放，加上路面荷载作用及暴雨的影响，路面产生一条张裂缝。②坡面人工填土①-2，为松散~稍密状，暴雨工况下，土体软化下沉，临空面高度增加，裂缝进一步发育。③以外贸路基裂缝为圆弧入口，土体在上部荷载及土体自重的作用下，可能从松散~稍密状人工填土①-2圆弧滑出，产生整体的圆弧滑动，从而导致坡顶外贸路侧路基产生裂缝。

2.3 稳定性计算方法

根据地质勘探资料及其边坡变形特征，本文采用圆弧滑动条分法进行滑坡稳定性系数计算。

滑坡稳定性系数 F_s 计算公式如下：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (1)$$

式中： $T_i = (Q_i + Q_{bi}) \sin \theta_i + P_{wi} \cos(\alpha_i - \theta_i)$ ；

$$R_i = N_i \tan \phi_i + c_i l_i$$

其中， $N_i = (Q_i + Q_{bi}) \cos \theta_i + P_{wi} \sin(\alpha_i - \theta_i)$ ；

T_i 为第 i 条块滑体在滑动面切线反力，kN/m；

Q_i 为第 i 条块单位宽度岩土体自重，kN/m；

Q_{bi} 为第 i 条块滑体外加荷载的单位宽度自重，kN/m；

θ_i 、 α_i 分别为 i 条块底面和地下水位面倾角，(°)；

P_{wi} 为第 i 条块单位宽度总渗透力，kN/m；

R_i 为第 i 条块滑体在滑动面上抗力，kN/m。

$N_i = (Q_i + Q_{bi}) \cos \theta_i + P_{wi} \sin(\alpha_i - \theta_i)$ ；

ϕ_i 为第 i 条块内摩擦角，(°)；

c_i 为第 i 条块内聚力，kPa；

l_i 为第 i 条块滑面长度，m。

2.4 计算参数取值

本文滑坡体岩土计算参数根据室内试验、工程地质类比法和地区经验等系统分析而来，并结合反演成果进行了校核。其中坡体垮塌部分人工填土①-1采用室内试验残余抗剪强度参数，坡面及坡脚人工填土①-2采用室内试验天然及饱和抗剪强度参数，具体参数见表1和2。

表1 滑塌区人工填土①-1计算参数表

Table 1 Calculation parameters of the artificial fill

①-1 in slump area

工况	重度 / (kN·m ⁻³)	c /kPa	ϕ /(°)
天然	19.10	6.33	7.17
饱和	20.10	5.70	6.50

表2 弱变形区人工填土①-2计算参数表

Table 2 Calculation parameters of the artificial fill

①-2 in weak deformation area

工况	重度 / (kN·m ⁻³)	c /kPa	ϕ /(°)
天然	17.40	13.50	12.20
饱和	18.40	9.50	8.60

2.5 稳定性计算结果及分析

根据边坡变形特征，边坡垮塌后形成临空面，临空面段在强降雨及路基荷载作用下存在局部滑动的可能，故需验算临空部分的天然工况和暴雨工况下的

局部稳定性。边坡坡脚填土松散~稍密状,存在整体圆弧滑动的可能,故需验算边坡在天然工况和暴雨工况下的整体稳定性。本研究分别采用瑞典条分法、简化 Bishop 法计算边坡的稳定性,其计算模型如图 5 所示。

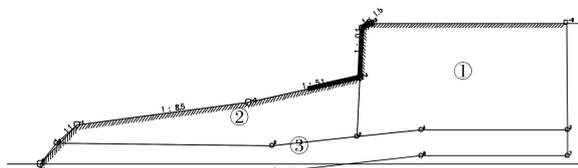


图 5 边坡稳定性计算模型

Fig. 5 Calculation model of landslide stability

1) 选取典型地质剖面图,结合边坡变形特征,采用自动搜索最危险滑动面,对边坡局部稳定性进行分析,计算简图见图 6,计算结果见表 3。

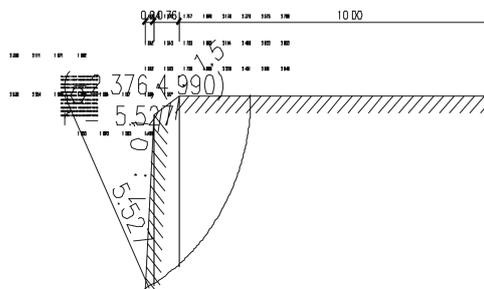


图 6 边坡局部稳定性计算简图

Fig. 6 Schematic diagram of slope local stability calculation

表 3 边坡局部稳定性计算结果与分析

Table 3 Analytical table of local slope stability calculation

计算方法	工况	稳定系数	判定标准	稳定评价
瑞典	正常	1.059	$1.05 \leq F_s < 1.30$	基本稳定
条分法	暴雨	0.974	$F_s < 1.00$	不稳定
简化	正常	1.086	$1.05 \leq F_s < 1.30$	基本稳定
Bishop 法	暴雨	0.986	$F_s < 1.00$	不稳定

由表 3 计算结果可得,瑞典条分法、简化 Bishop 法的计算结果均表明,正常工况下,边坡局部稳定性为基本稳定状态,而非正常(暴雨)工况下,边坡局部稳定性为不稳定状态。

2) 选取典型地质剖面图,结合边坡变形特征,采用以外贸路基裂缝为圆弧入口,给定搜索危险断面,对边坡整体进行稳定性分析,计算简图见图 7,计算结果见表 4。由表 4 所示计算结果可得,瑞典条分法、简化 Bishop 法的计算结果均表明,正常工况及非正常(暴雨)工况下,边坡整体稳定性均处于稳定状态。因此可判定边坡不会以外贸路基裂缝为圆弧入口,从坡脚松散~稍密状人工填土①-2 圆弧滑出,产生整体的圆弧滑动。因而可得边坡外贸路路基

裂缝主要由于边坡垮塌后,坡体后缘形成一临空面,静止土压力得到释放,加上路面荷载作用及暴雨的影响,路面产生一条张裂缝造成的;坡面人工填土①-2,为松散~稍密状,暴雨工况下,土体软化下沉,临空面高度增加,土压力不断得到释放,裂缝逐渐发育。

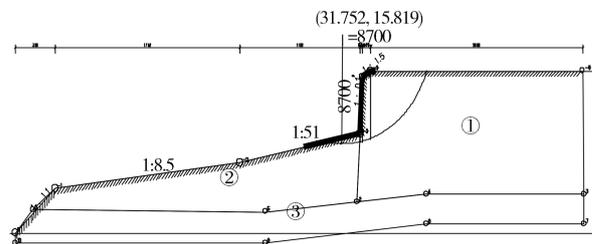


图 7 边坡整体稳定性计算简图

Fig. 7 Calculation diagram of global slope stability

表 4 边坡整体稳定性计算结果与分析

Table 4 Analytical table of global slope stability calculation

计算方法	工况	稳定系数	判定标准	稳定评价
瑞典	正常	1.378	$F_s > 1.30$	稳定
条分法	暴雨	1.302	$F_s > 1.30$	稳定
简化	正常	1.386	$F_s > 1.30$	稳定
Bishop 法	暴雨	1.314	$F_s > 1.30$	稳定

3 结论与建议

1) 边坡稳定性计算结果表明,采用瑞典条分法、简化 Bishop 法计算得到的各种工况下滑坡稳定性系数,正常工况下,边坡局部处于基本稳定状态,非正常(暴雨)工况下处于不稳定状态;边坡整体稳定性计算,正常工况及非正常(暴雨)工况下边坡整体处于稳定状态。

2) 通过对比瑞典条分法、简化 Bishop 法的计算结果发现,由于考虑了条块间的水平力作用,简化 Bishop 法较瑞典条分法的计算结果稍大。

3) 坡面及坡脚人工填土①-2 呈松散~稍密状,边坡在暴雨工况下,人工填土①-2 浸水软化,下沉,造成垮塌。边坡外贸路路基裂缝主要由于边坡垮塌后,坡体后缘形成一临空面,静止土压力得到释放,加上路面荷载作用及暴雨的影响,路面产生一条张裂缝造成的。因此,首先,建议对外贸路基裂缝进行灌浆封闭;其次,坡脚回填土进行反压,且在反压前,对坡面垮塌影响范围内松散~稍密状人工填土①-2 进行强夯处理,强夯处理的同时加强边坡监测,防止边坡扰动,产生二次垮塌。

4) 由于边坡坡底有一在建污水管网,若该段污水管网改线,边坡有放坡条件,建议采用人字坡式排水+护脚挡墙进行支护,坡面放坡坡率采用 1:1.75,

坡面开挖成台阶状,以增大填土与坡面之间的摩擦,回填土应进行分层夯实,压实系数不小于0.94。

5)若边坡无放坡条件,建议采用路堤重力式挡土墙,重力式挡土墙建议以强夯的回填土作为持力层;填筑之前将坡面开挖成台阶状,以增大填土与坡面之间的摩擦,施工应尽量减少对边坡岩土体扰动。

参考文献:

- [1] 仵彦卿,张倬元.岩体水力学导论[M].成都:西南交通大学出版社,1995:1-4.
WU Yanqing, ZHANG Zhuoyuan. An Introduction to Rock Mass Hydraulics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995: 1-4.
- [2] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:651-676.
Editorial Board of Engineering Geology Handbook. Handbook of Engineering Geology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018: 651-676.
- [3] 李世海,刘天苹,刘晓宇.论滑坡稳定性分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3309-3324.
LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis Method for Landslide Stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3309-3324.
- [4] 杨成,李春江,谯乾峰.程家坝滑坡形成机制及稳定性分析[J].土工基础,2019,33(5):591-594,617.
YANG Cheng, LI Chunjiang, QIAO Qianfeng. Development and Stability Analysis of the Chengjiaba Landslide[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(5): 591-594, 617.
- [5] 王恭先.滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3818-3827.
WANG Gongxian. Key Technique in Landslide Control and Its Handling Measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818-3827.
- [6] 熊扬福,吴娟娟,王亚男.孙家庄滑坡失稳机制分析[J].资源环境与工程,2019,33(3):363-367.
XIONG Yangfu, WU Juanjuan, WANG Yanan. Analysis on the Instability Mechanism of Sunjiazhuang Landslide[J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(3): 363-367.
- [7] 索俊峰.黄龙县水磨湾滑坡稳定性分析及治理方案优选[D].西安:长安大学,2019.
SUO Junfeng. Stability Analysis and Treatment Scheme Optimization of Shuimowan Landslide in Huanglong County[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [8] 姚广,田立华.某山区公路路堑滑坡稳定性分析及处治措施研究[J].山西交通科技,2019(3):42-44.
YAO Guang, TIAN Lihua. The Study on Stability Analysis and Treatment Measures of Cutting Landslide of a Highway in Mountainous Area[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2019(3): 42-44.
- [9] 艾国海,冯文凯,黄家华,等.万州区上海大道末端滑坡稳定性分析及防治措施[J].路基工程,2015(5):202-206.
AI Guohai, FENG Wenkai, HUANG Jiahua, et al. Analysis on Stability of Landslide at the End of Shanghai Ave., Wanzhou Dist. and Control Measures[J]. Subgrade Engineering, 2015(5): 202-206.
- [10] 祝方才,刘佳鹏,刘增杰.几种常用边坡稳定性分析方法的比较[J].湖南工业大学学报,2019,33(2):1-5.
ZHU Fangcai, LIU Jiapeng, LIU Zengjie. Comparison of Several Common Methods of Slope Stability Analysis[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33(2): 1-5.

(责任编辑:姜利民)