

基于Slope/W软件的边坡稳定性分析研究

郭谷芳^{1*}, 马哲², 胡鸿¹, 邹榕¹, 刘敏¹

¹景宁畲族自治县交通运输局, 浙江 丽水

²浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

山体滑坡给人民生命安全和物质财产造成巨大损失。本文采用slope/w软件运用二维极限平衡法对道路路堑边坡进行分析, 通过收集有代表性的土样并运送到实验室来确定输入力学参数, 抗剪强度参数由直剪试验和固结不排水三轴试验确定; 同时通过现场勘察调研, 调查水位位置情况。数值分析过程中, 采用Morgenstern-price法计算干燥水位和最高水位条件下路堑边坡的安全系数。结果表明, 干燥水位和最高水位条件下路堑边坡的安全系数分别为1.284和0.714; 可以看出水位上升将导致边坡安全系数下降, 计算结果表明在最高水位情况下, 该滑坡处于不稳定状态, 需进行必要的加固防护。

关键词

Slope/W软件, 二维极限平衡法, 边坡稳定性, 数值模拟

Stability Analysis of Slope Based on Slope/W Software

Gufang Guo^{1*}, Zhe Ma², Hong Hu¹, Rong Zou¹, Min Liu¹

¹Transportation Bureau of Jingning She Autonomous County, Lishui Zhejiang

²Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: May 30th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

Landslides have caused huge losses to people's lives and material property. In this paper, slope/w software is used to analyze the road cut slope with two-dimensional limit equilibrium method. Representative soil samples are collected and sent to the laboratory to determine the input mechanical parameters. Meanwhile, the water level position is investigated through field investiga-

*通讯作者。

tion. Among them, the shear strength parameters are determined by direct shear test and consolidated undrained triaxial test. In the process of numerical analysis, the Morgenstern-price method is used to calculate the safety factor of cut slope under the condition of dry water level and maximum water level. The results show that the safety factors of cut slope under dry water level and maximum water level are 1.284 and 0.714 respectively. It can be seen that the rise of water level will lead to the decline of the safety factor of the slope. The calculation results show that the landslide is in an unstable state at the highest water level, and necessary reinforcement and protection should be carried out.

Keywords

Slope/W Software, Two-Dimensional Limit Equilibrium Method, Stability Analysis of Slope, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是一种重要的地质灾害,边坡失稳导致破坏山体滑坡,产生大量的人员伤亡和财产损失,造成巨大的灾难。边坡稳定性分析是判断滑坡是否稳定、是否需要采取加固和治理措施,以及预防滑坡发生滑动破坏的重要依据[1] [2] [3]。在道路设计及施工过程中,对于大型山体,大多数道路都是通过开挖山体,形成高边坡路堑的形式,以短距离连接城镇,达到方便城镇之间交通的目的[4] [5] [6]。由于土质边坡由于土体强度相对于岩石强度较低,因此,土质边坡更加容易发生破坏,引起人们更多的高度关注。

山体滑坡在社会上造成人员伤亡,给人们带来巨大的危害。许多研究者针对滑坡进行了广泛的研究。董阳丹[7]基于现场野外调查,利用离散元软件 UDEC 对西宁市张家湾滑坡进行危险性评价预测分析,结合动力分析与条件分析法对张家湾滑坡进行风险评估。李均益[8]以“5.12”汶川地震诱发的青川县刨地里滑坡为例,现场调查了滑坡的地质特征,并基于离散元软件(UDEC)分析了 1 号滑坡动力响应及变形破坏过程,探讨了滑坡的成因机制。陈晨[9]以云南省文山至麻栗坡高速公路 K39 段复合型双层滑带滑坡为例,采用室内环剪试验探明该滑坡深层、浅层滑带各自的残余强度,分析不同含水率、法向应力和剪切速率对滑带土残余强度的影响;采用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟,基于滑坡应力-应变历史对滑坡稳定性进行评价。张凯元[10]在野外地质调查研究的基础上,通过岩芯观察和监测资料分析,对大坪地滑坡的形成机理和与稳定性进行了研究评价,滑坡位于喇叭口向斜的南翼近核部,为斜顺向坡-顺向坡结构,该向斜的北翼对滑坡的运动起到了控制作用,限制了其向北延伸,并对大坪地滑坡形成侧向挤压。碎石土高边坡是路基工程中一种常见的特殊路基,对于需要加固的不稳定路堑高边坡,潜在不稳定面的确定是最重要也是首要的问题,薛来生[11]提出采用 Slope/W 搜索潜在不稳定面对不稳定面进行修正,按照不平衡推力法计算边坡的设计下滑力的方法加以解决。路基边坡坡度的合理性直接影响着工程的安全性和经济性,本文以风积沙路基为例,在路基边坡坡度设计理论分析的基础上,徐涛[12]借助 SLOPE/W 对风积沙路基进行了稳定性计算,结合现有规范的相关规定,给出在确保工程安全性前提下,具有经济性的路基边坡坡率。

前人的研究没有考虑孔隙压力效应对边坡稳定性的影响, Slope/W 软件是一个功能强大的边坡稳定性分析程序,其应用极限平衡理论,可综合考虑地下水、土体裂缝、坡顶堆载等影响因素,能够对复杂土层、任意滑动面形状及多种孔隙水压力状况建立二维计算模型,可用于研究土质高边坡的稳定性问题

[13]。在本研究中, 本文应用 Slope/W 软件对土质高边坡进行稳定性分析, 以确定其边坡稳定安全系数。采用安全系数评估干燥条件和最高水位条件下的边坡稳定性, 采用极限平衡法分析二维边坡稳定性, 对边坡进行稳定性验算, 可为边坡治理提供科学依据。

2. 岩体力学参数与试验方法

本研究收集土壤数据, 确定土壤参数的工程特性和边坡稳定性分析的指标特性。在路堑边坡不同深度处采集 4 个样品进行土壤参数测定。输入的参数由不同深度的代表性土壤样品确定。需要使用活塞土样取样器收集完整的样品, 以获得高质量的土壤样品。在本研究中, 三轴试验仪所用土样的直径为 50 mm, 高度为 100 mm, 实验室测试的样品是通过原位含水率和单位重量对样品进行重塑获得的。无黏性土的试样采用直接剪切试验, 在剪切箱上施加垂直法向应力, 然后施加水平应力, 直至试样破坏。在特定深度进行了三次试验, 获得了一组强度参数(c, ϕ)。采用固结不排水三轴试验对粘性土进行了试验, 并对重塑土样品进行了孔隙水压力测量。根据建议, 从顶部到脚趾的连接线可以确定台阶边坡的整体坡度。因此, 将边坡的为简化的整体边坡, 建立的数值模型如图 1 所示。

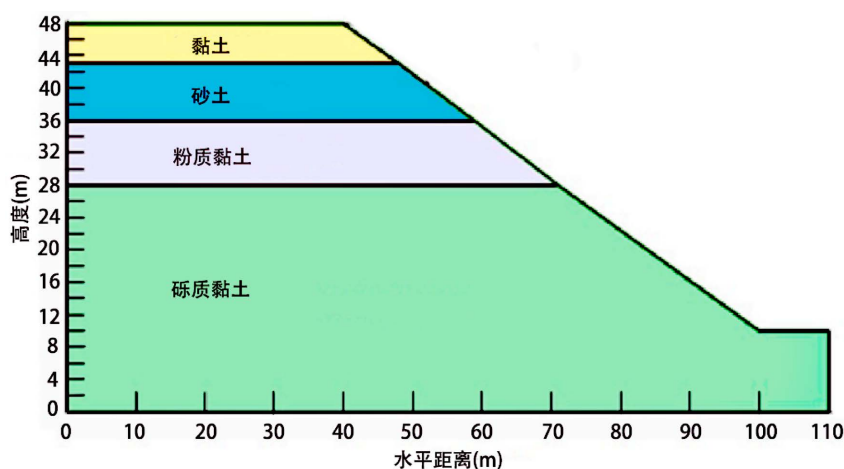


Figure 1. Numerical model of road cutting slope

图 1. 道路路堑边坡数值模型

土壤样品的单位重量(γ)是通过使用岩心切割器进行现场测试, 将岩心切割器中样品的净重除以岩心切割器的体积得到的。水位是在坡脚处观测到的。本研究取地下水位为极端水位条件, 取最高水位条件。用于分析的坡面水位是在最可能的情况下进行的, 范围从最小到最高水位; 考虑到不同季节的水位波动, 基于水位效应对极端情况进行了分析。最高水位的地下水位剖面图从沿坡安装的立水管线上获取。

现场的样品被小心地用塑料袋包裹到实验室, 并从每种土壤类型中提取样品以测定水分含量。室内强度试验测定时, 将土样与土的自然含水率逐层压实, 直至重塑后的土样与土的原位单位重量相匹配。采用直剪试验获得了无黏性土的抗剪强度参数。通过施加不同的法向应力, 然后施加水平力进行了三次试验。准备相同的土样进行测试, 获得抗剪强度参数。在每个土样上施加正向垂直应力, 然后施加水平剪应力, 直至破坏。建议施加低于、等于和高于原位竖向应力的垂直应力。在每次试验中, 土在给定的施加正应力和水平剪应力作用下失效后, 正应力和剪应力图帮助我们确定抗剪强度参数黏聚力(C)和内摩擦角(ϕ)。黏性土样进行三轴压缩试验, 确定抗剪强度参数; 通过改变围压后施加偏应力进行了三次试验, 直至土体因剪切或胀形破坏。在土的自然条件下, 围压是随应力状态而调节的。重塑粘土 CU 三轴试验的建议破坏应变变为 20%~30%。

土壤的特性之一是它在受到应力时具有弹性。它是有限元数值软件的输入参数之一。它是通过计算应力应变的斜率从实验室确定的。在本研究中, 剪切模量(G)和体积模量(K)是输入参数。它们用土的弹性模量(E)和泊松比(ν)表示。土的 G 和 K 相对于 E 和 ν 由式(1)、式(2)给出。

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

泊松比(ν)是土的侧向应变与正应变之比。粘土的泊松比(ν)为 0.4~0.5, 中、致密无黏性土壤的泊松比(ν)为 0.3~0.4, 松散至中等无黏性土壤的泊松比(ν)为 0.2~0.35。在本分析中, 粘土土的 ν 值为 0.4, 砂质土的 ν 值为 0.35。

对于满足 mohr-colummb 破坏准则的弹塑性材料, 根据 φ - ν 不等式原理调整泊松比 ν , 始终为减小强度参数 C , φ 。 φ - ν 不等式如式(3)所示。

$$\nu < 0.5 - 0.5 \sin \varphi \quad (3)$$

本分析采用粘质土固结不排水试验, 砂质土 ν 取 0.5 和 0.15。

土壤渗透性(k)由实验室对满足原位单位重量和原位含水量要求的重塑土样进行落头渗透性试验获得。渗透率通过测量给定时间内横截面积的圆柱形管中下降的水位来确定。

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4)$$

式中, L 为压实土的长度, A 为垂直于流动方向的土样面积。在实验室中对边坡输入参数进行了测试, 以进行二维极限平衡法分析。

3. 计算数值模型

本研究采用 Mohr-Coulomb 模型对干燥和最高水位条件进行分析。由于孔隙水压力在荷载作用下的发展, 在分析最高水位条件下的边坡时考虑了水位的影响。该模型的边界条件为: 模型左侧处、右侧处对应的边界在 x 方向上受到位移限制; 底面对应的边界在 x 、 y 方向位移上受到限制; 此外, 顶部模型边界处于自由状态。无黏结土直剪试验和黏结土不排水固结试验, 采用 CU 三轴试验及孔隙水压力测量确定边坡强度参数, 采用 Slope/W 软件对边坡进行分析。土壤的单位重量(γ)是 Slope/w 的输入参数。边坡稳定分析输入数据如表 1 所示。

Table 1. Input parameters of soil slope stability analysis

表 1. 土质边坡稳定性分析输入参数

坡高(m)	土体类型	土体重度 (KN/m ³)	渗透系数 k(m/s)	剪切试验方式	土体粘聚力 (kPa)	土体内摩擦角 (°)	土体弹性模量 (kPa)	土体剪切模量 (kPa)	土体体积模量 (kPa)
0~5	黏土	17.64	2.2×10^{-10}	固结不排水三轴试验	21.6	0	5×10^6	1.78×10^6	8.33×10^6
5~12	砂土	17.63	1.2×10^{-6}	直接剪切	0	45	1×10^7	4.34×10^6	4.76×10^6
12~20	粉质黏土	17.41	8.6×10^{-10}	固结不排水三轴试验	13.8	0.5	1.5×10^7	5.35×10^6	2.5×10^7
20~38	砾质黏土	16.68	3.9×10^{-10}	直接剪切	36	10	5×10^7	2.17×10^7	2.38×10^7

利用准确的输入参数对边坡稳定性进行了分析，以确定干燥水位和最高水位条件下的安全系数。边坡的稳定性以无因次项表示，即安全系数，并由公式(5)确定。

$$FOS = \frac{\text{抵抗力}}{\text{下滑力}} = \frac{\text{抵抗力矩}}{\text{下滑力矩}} \tag{5}$$

在本研究中，运用 Slope/W 采用极限平衡分析方法进行二维边坡稳定性分析。

4. 数值模拟计算结果与讨论

本文采用二维极限平衡法对路堑边坡进行稳定性分析。在极限平衡法分析中，首先假设一个滑动面，可以是圆弧形的面、圆弧与直线的结合面或者一系列直线组成的滑面。然后将滑动面内的土体视为脱离体，并按一定规则划分为多个土条。通过土条的平衡条件来计算出作用于滑动面内的土体的力系，以达到静力平衡时所需的土体抗力，然后将这个结果与滑动面实际所能提供的岩土抗力进行比较，可以得出安全系数。边坡分析的输入参数为单位重量(γ)、抗剪强度参数(c, ϕ)、弹性模量(E)和水位等原始数据。

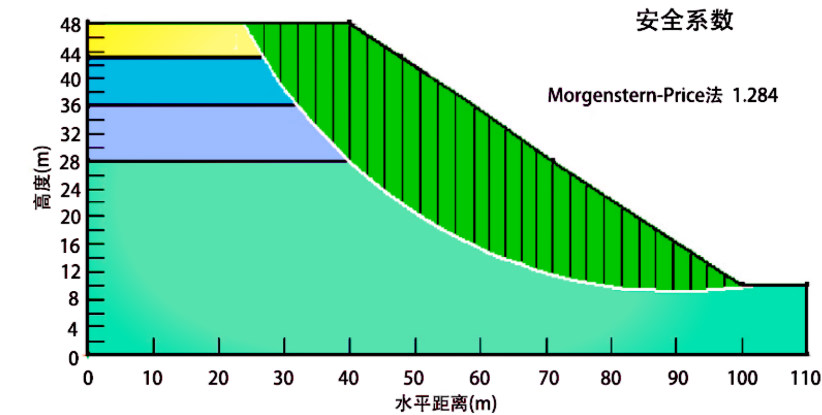


Figure 2. Stability of slope under dry conditions
图 2. 干燥条件下边坡稳定性

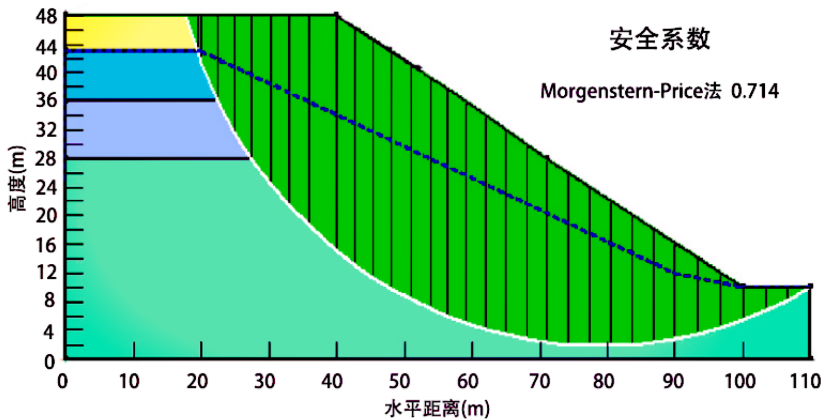


Figure 3. Stability of slope under maximum water level
图 3. 最高水位条件下边坡稳定性

在本研究中，运用 Morgenstern-Price 法对干燥条件和最高水位分别进行了稳定性分析。Morgenstern-Price 法是一种用于边坡稳定分析的极限平衡法。假设滑裂面为任意形状，通过分析满足力和力矩平衡的微分方程，来求解安全系数。在 Morgenstern-Price 法中，条间作用力的方向被假定为水平方向的某一函

数, 根据滑动土体的边界条件来求解。从图 2 可以看出, 在干燥条件下, 采用 Morgenstern-Price 法计算的边坡二维极限平衡法安全系数为 1.284, 大于 1.0, 处于稳定状态。而在最高水位条件下, 可以看出, 采用 Morgenstern-Price 法计算的安全系数为 0.714 (图 3), 小于干燥条件下的安全系数, 小于 1.0, 处于不稳定状态。二维极限平衡法分析表明, 在干燥条件下边坡条件满足稳定边坡的要求, 在最高水位条件下边坡条件不满足稳定边坡的要求。

本研究对二维极限平衡法边坡稳定性进行了分析, 给出了干燥条件和最高水位条件下边坡的总体稳定性。从干燥和最高水位条件下的边坡分析可以看出, 由于孔隙水压力对土体强度的影响, 孔隙水压力降低了土体的有效抗剪强度, 因此干燥条件下的安全系数大于最高水位条件下的安全系数。

5. 结论

在本研究中, 本文利用二维极限平衡法分析了道路路堑边坡的稳定性。从现场确定边坡分析所需的输入参数, 并将样品仔细带到实验室进行测试。通过对边坡的分析, 确定了干燥条件下边坡的稳定性和最高水位最坏条件下的稳定性。

(1) 利用 Slope/W 软件对二维极限平衡法的安全系数进行了计算, 利用 Morgenstern-price 方法进行边坡稳定性分析, 干燥水位和最高水位的安全系数分别为 1.284 和 0.714。

(2) 由于孔隙水压力对土体强度的影响, 孔隙水压力降低了土体的有效抗剪强度, 因此, 干燥条件下的安全系数大于最高水位条件下的安全系数, 分析计算结果表明在最高水位情况下, 该滑坡处于不稳定状态, 需进行必要的加固防护。

参考文献

- [1] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [2] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001(5): 525-529.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005(1): 91-98+104.
- [4] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(8): 1525-1544.
- [5] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境保护, 2000(2): 89-97+181.
- [6] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(6): 1104-1112.
- [7] 董阳丹, 魏占玺, 董建辉. 基于离散元 Runout 预测的张家湾滑坡风险评估[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(1): 1-6.
- [8] 李均益, 罗永红, 周赞, 等. 青川刨地地震滑坡发育特征及其成因机制探讨[J/OL]. 地震学报, 2024: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2021.P.20240410.0935.002.html>, 2024-06-25.
- [9] 陈晨, 李琴琴, 张扬景皓, 等. 双层滑带滑坡土环剪试验与稳定性分析[J]. 路基工程, 2024(3): 60-67.
- [10] 张凯元, 邓华锋, 路永强, 等. 乌东德水库库区大坪地滑坡形成机理与稳定性评价[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 55-62.
- [11] 薛来生, 张恒荣. GEO-slope/w 和不平衡推力法联合确定公路碎石土路堑边坡下滑力设计值[J]. 路基工程, 2013(2): 136-139.
- [12] 徐涛. SLOPE/W 在路基边坡坡度设计中的应用[J]. 交通节能与环保, 2014, 10(2): 57-60.
- [13] 陈振民. SLOPE/W 软件总应力法和有效应力法的应用[J]. 水运工程, 2009(7): 107-111+117.