

基于SLOPE/W的边坡稳定性分析

王怡晨

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年7月19日; 录用日期: 2025年8月9日; 发布日期: 2025年8月20日

摘 要

本文以某边坡为设计对象, 分析了其稳定性并设计了相应的支护方案。基于软件SLOPE/W分析了无支护结构的某边坡的稳定。在建模过程中, 采用了Morgenstern-Price法、Spencer法、Bishop法和Janbu法进行边坡稳定性分析, 土层模拟中材料模型选择Mohr-Coulomb模型。分析时, 分别考虑了天然工况、地震工况和暴雨工况。结果表明: 在三种工况下边坡都处于不稳定状态。根据边坡实际情况, 对边坡进行了支护设计, 以保证其稳定性, 支护结构类型选择了重力式挡土墙。边坡在进行支护设计后, 其稳定性得到了显著的提高, 本文针对边坡设计的重力式挡土墙, 不仅能够保证边坡安全, 还能够为项目中其余边坡的支护设计提供一定参考。

关键词

边坡稳定性, 边坡治理, SLOPE/W, 重力式挡土墙

Slope Stability Analysis Based on SLOPE/W

Yichen Wang

School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou Henan

Received: Jul. 19th, 2025; accepted: Aug. 9th, 2025; published: Aug. 20th, 2025

Abstract

This article takes a certain slope as the design object, analyzes its stability, and designs corresponding support schemes. The stability of a certain slope without support structure was analyzed based on the software SLOPE/W. In the modeling process, the Morgenstern Price method, Spencer method, Bishop method, and Janbu method were used for slope stability analysis, and the Mohr Coulomb model was selected as the material model for soil simulation. In the analysis, natural conditions, earthquake conditions and rainstorm conditions are considered respectively. The results indicate

that the slope is in an unstable state under all three working conditions. Based on the actual situation of the slope, a support design was carried out to ensure its stability, and a gravity retaining wall was selected as the support structure type. After the support design of the slope, its stability has been significantly improved. This article focuses on the gravity retaining wall designed for the slope, which not only ensures the safety of the slope, but also provides some reference for the support design of other slopes in the project.

Keywords

Slope Stability, Slope Treatment, SLOPE/W, Gravity Retaining Wall

Copyright © 2025 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

边坡工程一直是工程行业重要的研究话题之一，在边坡工程设计当中，支护结构的稳定性是防治灾害的重要指标。如古水水电站泄洪出口边坡[1]、泸定大渡河特大桥边坡[2]等边坡工程均是进行了边坡稳定性分析，并进行合理的支护设计。

边坡稳定性分析的研究方式主要是以数值模拟和试验为主。黄俊辉[3]等采用 UDEC 离散元法和现场监测手段，探讨了坡高、坡角及开挖级数对高陡边坡开挖过程中坡体应力场、位移场及稳定性安全系数的影响规律。张竞超[4]等通过数值模拟和监测方法进行了综合研究，利用有限差分方法对边坡分步开挖进行了全过程数值模拟，分析边坡稳定性状态并设计支护。王立纬[5]等通过 QUAKE/W 分析地震作用下滑坡基本情况，将 QUAKE/W 结果导入 SLOPE/W 中，分析滑坡稳定性。高涛[6]等基于极限平衡理论分析，利用 SLOPE/W 模块对滑坡进行了稳定性分析。SLOPE/W 程序模拟结果表明，水是影响边坡稳定的关键因素。谢伟东[7]等以路基边坡工程为背景，针对隧道下穿运营高速路基边坡，考虑施工扰动与降雨入渗影响，构建非饱和土流固耦合模型分析。结果表明降雨显著影响含软弱夹层边坡稳定性，致安全系数降低。经对比锚索、抗滑桩加固效果后实施施工，收效良好。徐奴文[8]等建立以微震监测主、应力场分析辅的水工岩质边坡稳定性分析方法。通过 RFPA3D 软件分析边坡，剖析微破裂机制、失稳模式及相关演化规律，揭示宏观破坏的研究法。

本文主要围绕边坡稳定性展开，使用 GeoStudio 软件的 SLOPE/W 模块来进行边坡稳定性分析[9]-[11]。

2. 工程地质条件

2.1. 地形地貌

拟建场地原属构造侵蚀—剥蚀斜坡、浅丘地貌，整体地势呈南高北低，人工改造较大，目前拟建场地最高点位于场地南侧，高程为 251.20 m，最低点位于场地北侧已建道路附近，高程为 206.39 m，场地高差约为 44.81 m。拟建场地总体地势陡峻，坡度约为 20°~45°左右，局部较峭，坡度大于 70°。

2.2. 地层岩性

根据工程地质测绘及钻探揭露，拟建场地内出露的地层由新至老主要为：第四系全新统(Q₄^{ml})杂填土、残坡积层(Q₄^{el+dl})粉质粘土，而下伏基岩则为侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})的泥岩和砂岩。

2.3. 地震

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015), 拟建场地震烈度为 VI, 对应的地震动峰值加速度是 0.05 g, 反应谱特征周期 0.35 s。

3. 计算参数

人工填土饱和重度取 21 kN/m³, 饱和状态下综合内摩擦角度 30°。岩土界面抗剪强度指标: 结合地区经验及试验参数, 岩土分界面抗剪强度取值: 粘聚力 3 kPa, 内摩擦角 25°。由于本场地层面较发育, 为软弱结构面, 结构面结合很差, 取结构面粘聚力标准值为 40 KPa, 内摩擦角 15°。

4. 边坡稳定性及破坏模式

4.1. 边坡稳定性

本文选取此边坡作为边坡稳定性及破坏模式分析对象, 为简化分析, 将此边坡简化, 如图 1 所示。此边坡的地层为中风化岩层。

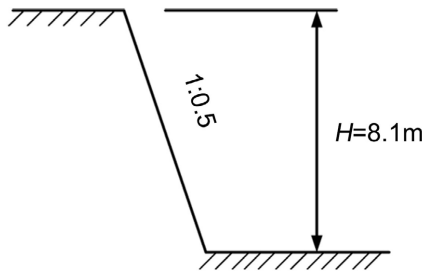
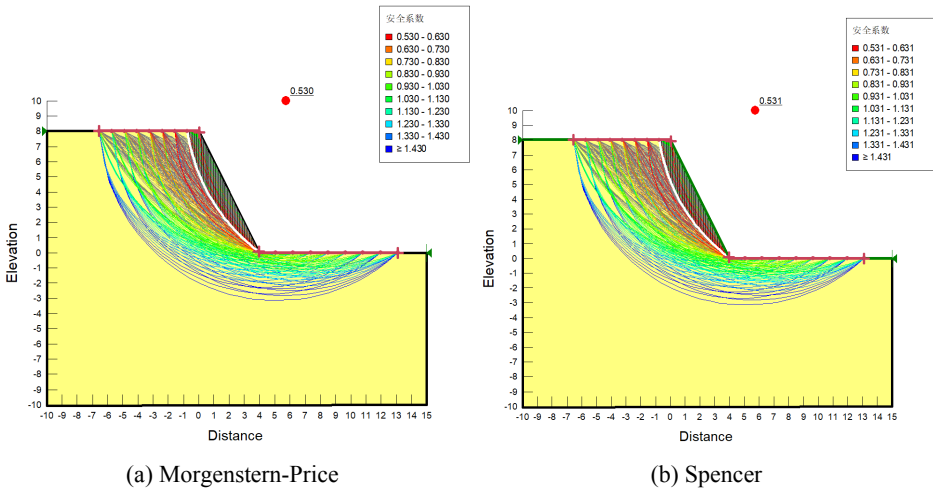


Figure 1. Slope schematic diagram
图 1. 边坡示意图

4.2. 分析结果

天然工况下的结果如图 2 所示。从图中可以看出, Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Bishop 法和 Janbu 法[12][13]对应的边坡稳定系数 Fs 分别为 0.530、0.531、0.534 和 0.509。对应的滑移面面积为 8.31 m³, 重量为 209.38 kN, 抗滑力矩为 1571.23 kN·m, 下滑力矩为 2830.84 kN·m, 抗滑力为 54.21 kN, 剩余下滑力为 99.57 kN, 半径为 16.48 m。



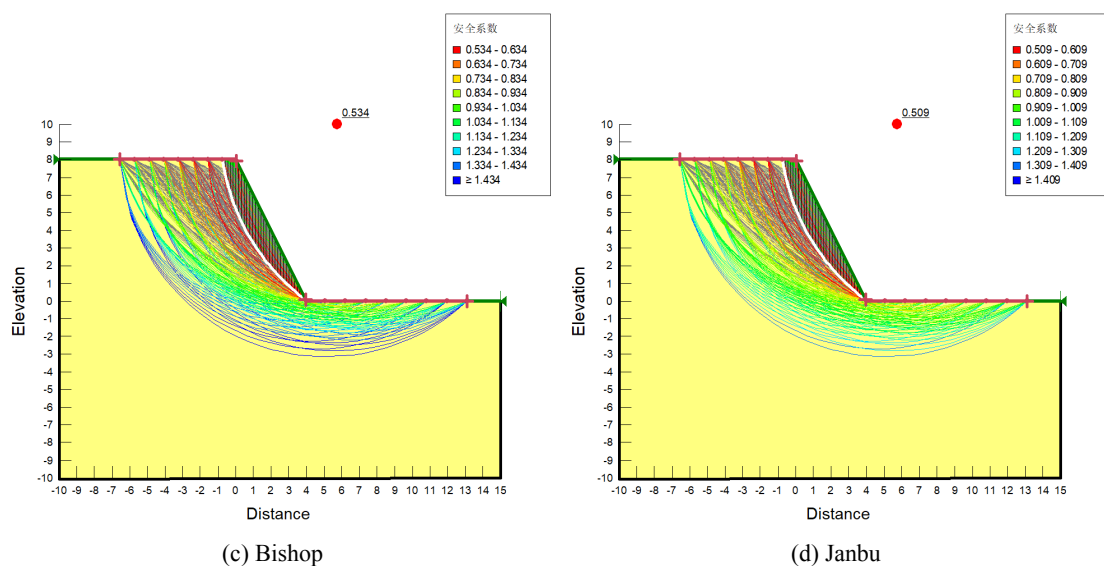
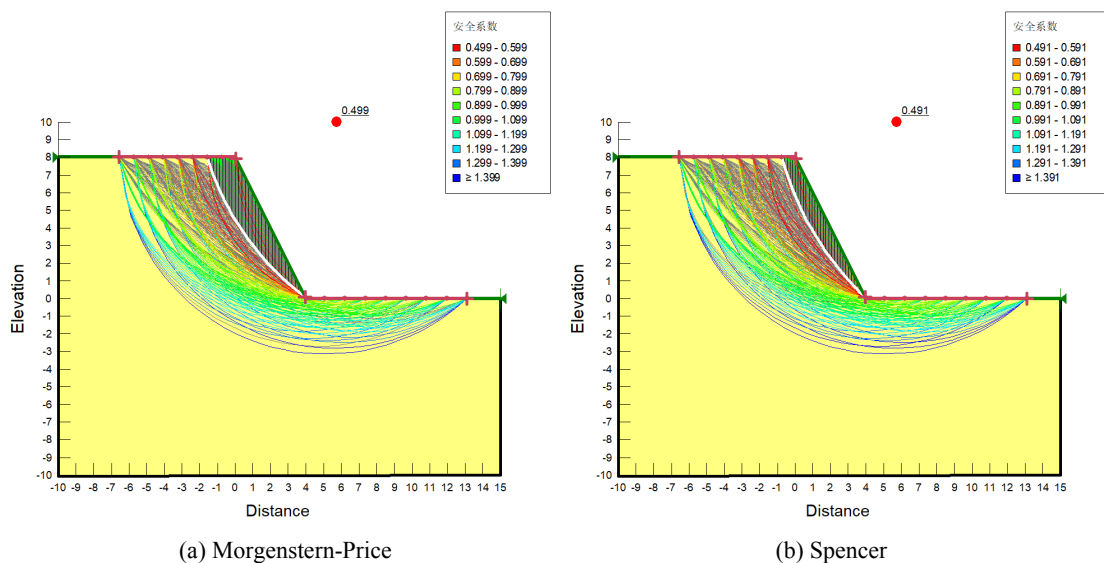


Figure 2. Natural working conditions

图 2. 天然工况

当计算地震工况下边坡稳定性时, 拟建场地震烈度为VI, 对应的地震动峰值加速度是 $0.05g$ 。在边坡稳定性分析中, 要对地震烈度VII度及VII度以上的地区进行地震工况下边坡稳定性校核。根据《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013 可知, 综合水平地震系数取为 0.025 。地震工况下的结果如图 3 所示。从图中可以看出, Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Bishop 法和 Janbu 法对应的稳定系数 F_s 分别为 0.499 、 0.491 、 0.494 和 0.465 , 对应的滑移面面积为 8.31 m^2 , 重量为 209.38 kN , 抗滑力矩为 $1564.62 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 下滑力矩为 $2944.67 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 抗滑力为 54.17 kN , 剩余下滑力为 101.92 kN , 半径为 16.48 m 。

当计算暴雨工况下边坡稳定性[14]时, 降雨时长为一天持续降雨 10 h , 每小时降雨量为 $0.05 \text{ m}^3/\text{h}$ 。暴雨工况下的结果如图 4 所示。从图中可以看出, 该边坡的稳定系数 0.386 、 0.387 、 0.385 、 0.365 , 对应的滑移面面积为 8.57 m^2 , 重量为 215.92 kN , 抗滑力矩为 $843.79 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 下滑力矩为 $2080.91 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 抗滑力为 41.02 kN , 剩余下滑力为 101.06 kN , 半径为 11.87 m 。能够看到, 如果考虑了暴雨工况, 该边坡的稳定系数有所下降。



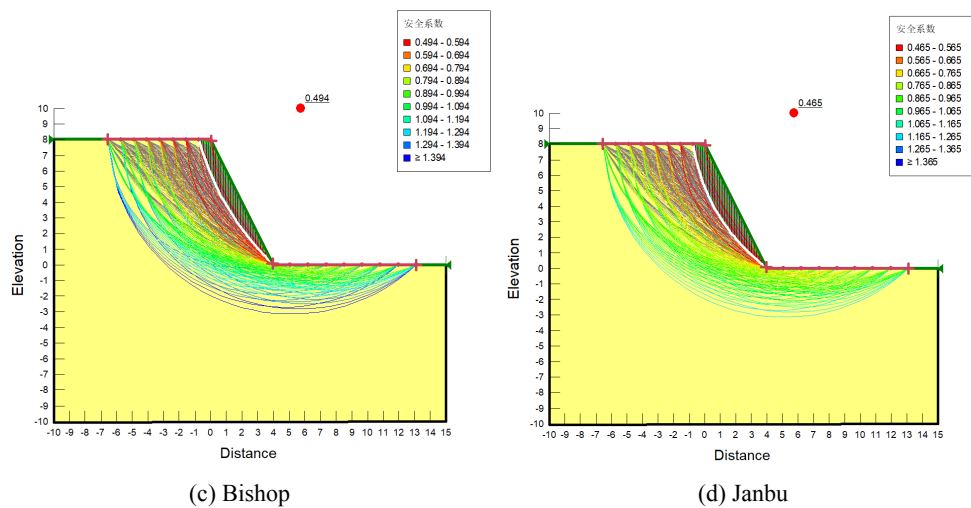


Figure 3. Seismic conditions

图 3. 地震工况

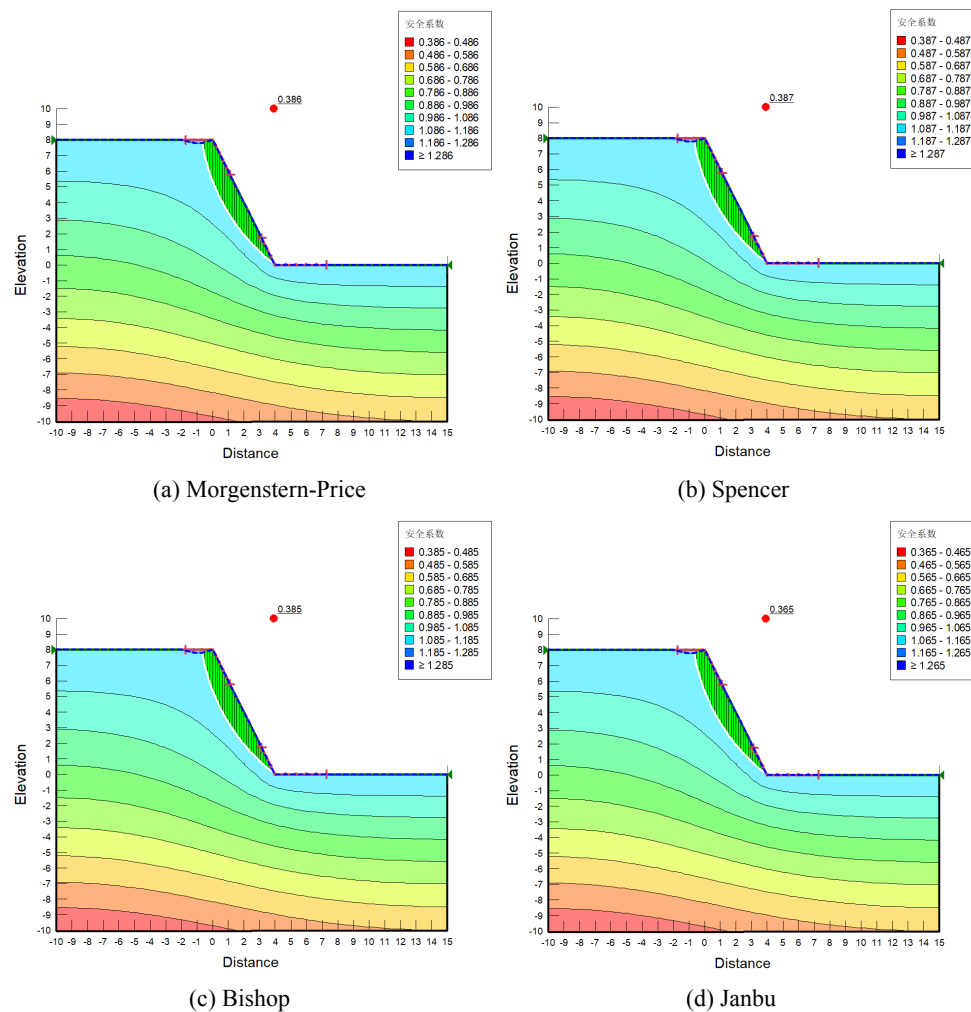


Figure 4. Rainstorm conditions

图 4. 暴雨工况

综上可知，此边坡在天然工况、地震工况以及暴雨工况下，4种极限平衡法计算结果见表1。

Table 1. Four methods of limit equilibrium calculation
表 1. 4 种极限平衡法计算结果

计算方法	Morgenstern Price	Spencer	Bishop	Janbu
天然工况	0.530	0.531	0.534	0.509
地震工况	0.499	0.491	0.494	0.465
暴雨工况	0.386	0.387	0.385	0.365

结果表明，该边坡的稳定性状态属于不稳定状态。

5. 支护结构方案设计

5.1. 常见的支护方案

以下是常见的边坡支护方案[15]，详情见表2。

Table 2. Common slope support schemes
表 2. 常见边坡支护方案

支护形式	适用条件
坡率法	1) 适用于边坡工程安全等级一、二、三级； 2) 土质边坡高度不宜大于 10 m，岩质边坡不宜大于 23 m； 3) 坡顶无重要建筑物，场地有放坡条件； 4) 不良地段，地下水发育区不应采用。
锚喷	1) 适用于岩质边坡； 2) 适用于边坡工程安全等级一、二、三级； 3) 适用高度：Ⅰ类岩质边坡不宜大于 30 m；Ⅱ类岩质边坡不宜大于 30 m，且边坡安全等级为二、三级适用；Ⅲ类岩质边坡不宜大于 15 m，且边坡安全等级为二、三级适用。
排桩式锚杆挡墙	1) 适用于边坡工程安全等级一、二、三级； 2) 土质边坡高度不宜大于 15 m，岩质边坡不宜大于 30 m； 3) 坡顶建筑物需要保护，场地狭窄； 4) 有利于对边坡变形控制，适应于稳定性较差的土质边坡、有外倾结构面的岩质边坡、垂直开挖尚不能保证安全的边坡。
桩板墙	1) 适用于边坡工程安全等级一、二、三级； 2) 悬臂式边坡高度不宜大于 15 m，锚拉式边坡高度不宜大于 25 m； 3) 桩嵌固段土质较差是不宜采用，当对挡墙变形较高时宜采用锚拉式桩板挡墙。
板肋式锚杆挡墙或格构式锚杆挡墙	1) 适用于边坡安全等级一、二、三级； 2) 土质边坡高度不宜大于 15 m，岩质边坡不宜大于 30 m； 3) 边坡高度较大或稳定较差时应采用逆作法施工，对挡墙变形有较高要求的边坡，宜采用预应力锚杆。
重力式挡土墙	1) 适用于边坡安全等级一、二、三级； 2) 土质边坡高度不宜大于 10 m，岩质边坡不宜大于 12 m； 3) 场地允许，坡顶无重要建筑物； 4) 不利于控制边坡变形，土方开挖后边坡稳定性较差时不宜采用。
悬臂式挡墙或扶壁式挡墙	1) 适用于边坡安全等级一、二、三级； 2) 悬臂式挡墙高度不宜大于 6 m，扶壁式挡墙高度不宜大于 10 m； 3) 适用于土质边坡。

5.2. 支护方案的选择

由于此边坡的坡顶无重要建筑物, 边坡高度为 $8.1\text{ m} < 10\text{ m}$, 且边坡安全等级为一级。故本文进一步选择采用重力式挡土墙支护结构对此边坡进行支护设计。

5.3. 重力挡土墙设计

重力式挡土墙[16]-[20]是指通过自身重力加强边坡稳定性的支护结构。根据墙背倾斜情况, 重力式挡土墙可以分为俯斜式挡墙、仰斜式挡墙、直立式挡墙以及衡重式挡墙等类型。目前已经被广泛的应用于实际工程中。因此, 根据工程实际情况, 本研究采用了仰斜式挡墙。通过建造重力式挡土墙能够通过抵挡路基的压力, 从而降低路基的大变形即移动。同时能够形成较为规则的斜坡, 能够节约空间, 提升结构外观。本次支护拟采用素混凝土建造 JA 边坡的重力式挡土墙, 挡土墙几何尺寸如图 5 所示。

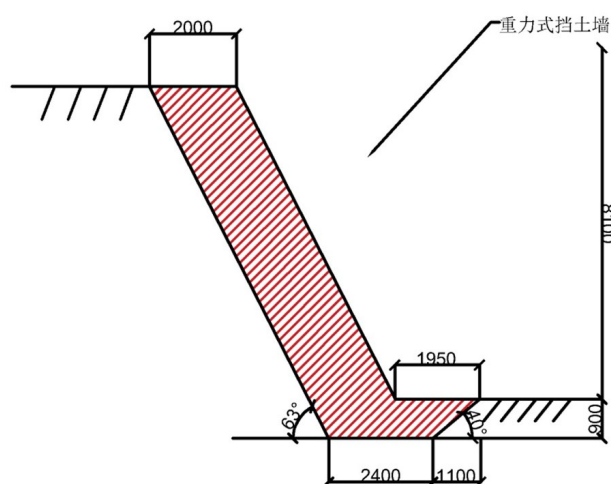


Figure 5. Gravity retaining wall
图 5. 重力式挡土墙

6. 稳定性验算

6.1. 土压力计算

结合边坡的形态, 根据规范《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013 可知, 当边坡坡面为斜面、坡顶水平、无超载时, 水平土压力应按下列计算, 即:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (1)$$

$$K_a = (\cot \theta - \cot \alpha') \tan(\theta - \varphi) - \frac{\eta \cos \varphi}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi)} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \left[\frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\cot \alpha'}{\eta + \tan \varphi} - \sin \varphi}} \right] \quad (3)$$

$$\eta = \frac{2c}{\gamma h} \quad (4)$$

土压力计算示意图如图 6 所示。

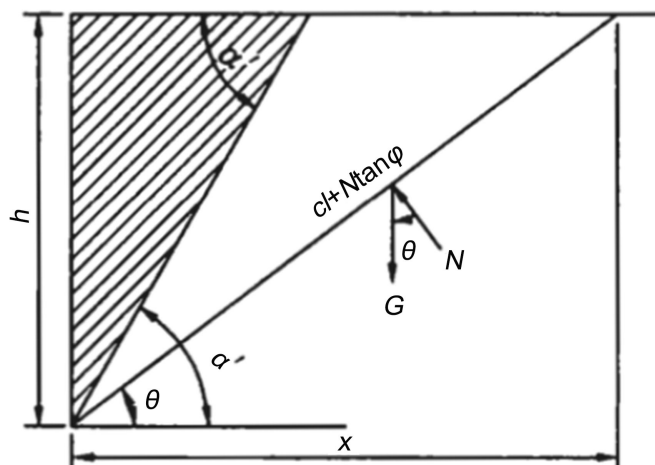


Figure 6. Slide slope pressure diagram

图 6. 边坡土压力计算示意图

根据工程信息，对于此边坡，可计算出 $E_a = 7498.04 \text{ kN/m}$ 。

根据规范《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013，当挡墙高度大于 8 m 时，需要对主动土压力进行放大处理，以保证挡土墙结构的安全，对应的增大系数为 1.2。因此，最终用于挡土墙抗滑移稳定性验算的主动土压力应为：

$$E_a = 1.2 \times 7498.04 = 8997.65 \text{ kN/m}$$

6.2. 挡土墙抗滑移稳定性计算

根据规范《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013，挡土墙抗滑移稳定性应按下列验算，即

$$F_s = \frac{(G_n + E_{an})\mu}{E_{at} - G_t} \geq 1.3 \quad (5)$$

$$G_n = G \cos \alpha_0 \quad (6)$$

$$G_t = G \sin \alpha_0 \quad (7)$$

$$E_{at} = E_a \sin(\alpha - \alpha_0 - \delta) \quad (8)$$

$$E_{an} = E_a \cos(\alpha - \alpha_0 - \delta) \quad (9)$$

根据设计信息，对于此边坡，挡土墙抗滑移稳定性验算公式中对应的各参数如下所示：

(1) $E_a = 8997.65 (\text{kN/m})$ ；

(2) 本文选择使用素混凝土制作重力式挡土墙，因此 $G = 23 \text{ kN/m}$ ；

(3) $\alpha = 63^\circ$ ；

(4) $\alpha_0 = 40^\circ$ ；

(5) $\delta = 11.36^\circ$ ；

(6) 此边坡岩层属于中风化泥岩，裂隙较发育，岩体较完整，岩质软。因此， $\mu = 0.50$ 。可以求得：

$$F_s \approx 2.45 \geq 1.3$$

所以，本文设计的边坡重力挡土墙的抗滑移稳定性符合规范要求。

6.3. 挡土墙抗倾覆稳定性计算

重力式挡土墙的抗倾覆稳定性应按下列公式验算：

$$F_t = \frac{Gx_0 + E_{ax}x_f}{E_{az}z_f} \geq 1.6 \quad (10)$$

$$E_{ax} = E_a \sin(\alpha - \delta) \quad (11)$$

$$E_{az} = E_a \cos(\alpha - \delta) \quad (12)$$

$$x_f = b - z \cot \alpha \quad (13)$$

$$z_f = z - b \tan \alpha_0 \quad (14)$$

根据工程信息及设计信息，对于此边坡，挡土墙抗倾覆稳定性验算公式中对应的各参数如下所示：

- (1) $b = 3.0 \text{ m}$;
- (2) $x_0 = 2.70 \text{ m}$;
- (3) 参考 Terzaghi [21] [22]， z 取挡土墙高度 $1/3$ 。

将上述数值带入公式可以求得：

$$F_t = \frac{Gx_0 + E_{ax}x_f}{E_{az}z_f} = \frac{23 \times 2.7 + (7055.30 \times 1.47)}{5583.95 \times 0.4827} \approx 3.87 \geq 1.6$$

所以，本文设计的边坡重力挡土墙的抗倾覆稳定性符合规范要求。

7. 结论

本文某边坡作为研究对象，进行了边坡稳定性分析。首先基于已有数据，利用 GeoStudio 软件的 SLOPE/W 模块对未设置支护结构的边坡进行了稳定性分析。分析时考虑了天然工况、地震工况和暴雨工况。结果表明，对于此边坡，在 4 种工况中均不稳定。因此，判断边坡需要进行支护设计，以保证边坡稳定性。

根据工程情况，选择使用了重力式挡土墙作为边坡的支护结构。首先，根据规范以及工程情况，设计了重力式挡土墙的几何尺寸以及构造。最后计算了其水平土压力，并基于此分别验算了所设计的重力挡土墙的抗滑移稳定性以及抗倾覆稳定性。计算结果显示，对于此边坡，本文所设计的重力式挡土墙的抗滑移稳定系数 F_s 抗倾覆稳定系数 F_t 分别为 3.87 以及 2.45，均符合规范要求。

因此，可以得出结论，本文设计的重力式挡土墙能够有效的保证此边坡的稳定性，确保工程的安全施工以及后续使用。

参考文献

- [1] 罗军尧, 朱国金, 冯业林, 等. GS 水电站泄洪出口边坡工程地质特征及稳定性评价[J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 283-289.
- [2] 程强, 肖世国, 赵伟. 泸定大渡河特大桥边坡稳定性分析与防护[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(3): 36-43.
- [3] 黄俊辉, 刘新荣, 许彬, 等. 多级高陡边坡开挖过程数值模拟及稳定性研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 44-53.
- [4] 张竟超, 宋小软. 基于数值模拟和监测的边坡稳定性研究[J]. 科技通报, 2017, 33(10): 158-160+191.
- [5] 王立纬, 文海, 张振平, 等. 基于 QUAKE/W 和 SLOPE/W 下甘家寨滑坡地震动力响应分析及稳定性评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 274-280.
- [6] 高涛, 毛巨省, 罗建峰, 等. SLOPE/W 程序在土质边坡稳定性分析中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2006(2): 184-188.

-
- [7] 谢伟东. 降雨入渗对隧道下穿路基段边坡变形稳定性的影响分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4): 470-477.
- [8] 徐奴文, 唐春安, 周钟, 等. 基于三维数值模拟和微震监测的水工岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1373-1381.
- [9] 罗杰. 普阳煤矿 1 号排土场边坡稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [10] 杨槐. SLOPE/W 软件在深路堑边坡稳定性分析中的应用[J]. 价值工程, 2017, 36(13): 78-79.
- [11] 李凤增. 基于 GEO-Slope/W 的土质高边坡稳定性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 67-70.
- [12] 任涛, 段鹏宇, 袁颖. 基于 Morgenstern-Price 法和 ABAQUS 的高速公路边坡稳定性及应变分析[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(5): 95-100.
- [13] 金亮星, 冯琦璇, 潘卓夫. 基于 Morgenstern-Price 法和改进径向移动算法的边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 39-47.
- [14] 姜吉龙. 降雨入渗与地震作用下弃渣场边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [15] 唐杨, 王国炜, 亓兴军, 等. 基于理正岩土计算和 ANSYS 的某重力式挡土墙结构分析[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(6): 9-14.
- [16] 彭旭东. 生产建设项目工程堆积体边坡土壤侵蚀过程[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [17] 吕杨. 土质路堤边坡稳定可靠度分析方法探讨[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [18] 阮铁锋. 重力式挡土墙应用中的一些经验探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2022, (5): 246-247, 28.
- [19] 王亚萍, 倪帆, 旺久, 等. G318 国道拉萨段重力式挡土墙墙背稳定性优化设计[J]. 科学技术创新, 2022(2): 101-104.
- [20] 张宇鹏. 黄土地区建筑边坡重力式挡土墙治理效果评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- [21] Terzaghi, K. (1934) Large Retaining Wall Tests I-Pressure of Dry Sand. *Engineering News Record*, **112**, 134-140.
- [22] 柯才桐, 陈奕柏, 谢洪波, 等. 库伦土压力合力作用点高度解析解[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5): 91-95.