

文章编号: 1000-7709(2018)01-0143-03

基于三维离散元法的某水垫塘岩质边坡稳定性分析

杜朋召¹, 魏 杰¹, 高 平¹, 刘尚各²

(1. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对泾河下游河谷段某水垫塘岩质边坡的岩体结构特性和结构面发育情况, 依据边坡工程地质资料, 在分析边坡岩体结构特征和潜在滑移模式的基础上, 利用三维离散元法分析边坡稳定性, 并采用极限平衡法对计算结果进行对比验证。分析结果表明, 基于三维离散元法的岩质边坡稳定性分析结果合理, 在正常和暴雨工况下, 边坡安全系数均大于规范要求的安全系数标准。研究成果可为岩质边坡稳定性分析提供参考。

关键词: 岩质边坡; 结构面; 组合块体; 三维离散元
中图分类号: TU457

文献标志码: A

1 概况

某水垫塘岩质边坡位于泾河下游峡谷段, 距峡谷出口约 29 km。边坡山势陡峻, 顺河向净长 335 m, 坡高 200~300 m, 自然坡度 60°~80°, 为 1 级边坡^[1]。其中, 右岸水垫塘边坡区域, 为典型的 V 字型河谷地貌, 两岸基岩裸露, 山势陡峻, 边坡整体走向为 SW 60°, 倾向为 SE。出露基岩主要为奥陶系巨厚层灰岩, 局部地表为第四系残坡积土。右岸水垫塘边坡部位岩层层面对不发育, 主要发育结构面为断层、顺层大裂隙、次生夹泥裂隙和硬性结构面等。依据构成组合块体的结构面类型, 水垫塘边坡部位主要发育的结构面及其性状见表 1。这些结构面相互切割、彼此组合, 将形成不同形状、不同规模的块体, 不仅影响水垫塘的施工与运营安全, 而且威胁到下游二道坝安全。为此, 有必要评价该边坡的稳定性。边坡稳定性常用的分析方法主要有工程类比法、图解法、极限平衡法和有限单元法等^[2]。其中, 工程类比法和图解法属于定性分析法, 无法准确计算边坡

安全系数; 极限平衡法目前主要用于二维计算, 对于具有三维效应的岩质边坡, 有一定局限性; 而有限元法在处理岩质边坡内部广泛存在的结构面问题时, 也存在一定难度^[3]。离散元法是一种非连续性数值分析方法^[4], 该方法允许岩块之间滑动、平移和转动, 具有宏观上的不连续性, 能够较真实地模拟岩质边坡的变形特征和破坏模式。离散元法由于其在处理非连续介质中的独特优势, 在国内岩质边坡的稳定性分析中已取得一定成果^[5~8]。因此, 本文根据水垫塘岩质边坡的岩体结构特征和结构面发育情况, 在分析边坡潜在滑移模式的基础上, 采用三维离散元法分析边坡稳定性, 并依据计算结果, 提取潜在滑体几何信息和滑动方向, 对边坡进行三维极限平衡计算, 对比验证离散元法计算结果, 从而确定水垫塘岩质边坡的安全系数。

2 边坡潜在滑移模式

依据水垫塘边坡内部结构面的性状和位置, 对各结构面可能产生的块体组合进行分析。其

表 1 右岸水垫塘边坡主要结构面

Tab.1 The main structure planes in plunge pool right slope

结构面类型	代表性结构面	产状	性状特征
侧裂面	断层 f1	310°~350°/56°~85°	充填岩屑、角砾、方解石及少量断层泥, 挤压较紧密, 宽度 100~400 mm
	次生夹泥裂隙 R1、R2、R3	300°~330°/57°~85°	充填深红色粘土, 局部夹岩屑和钙质土, 一般宽度 1~20 mm
	硬性结构面 J1、J1	280°~340°/50°~70°	一般延伸 5~10m, 局部 20~30 m, 间距 3~5 m, 连通率 50%~70%
底滑面	顺层大裂隙 L1	170°~236°/33°~57°	一般宽度 5~300 mm, 局部可达 500~600 mm, 充填泥夹岩屑或岩屑夹泥
上下游拉裂面	夹泥裂隙 L2	270°/85°	延伸长约 40 m, 裂隙面平直光滑, 多张开充填岩屑和泥质, 沿裂隙面局部有轻微溶蚀
	夹泥裂隙 L3	87°/85°	裂隙面平直光滑, 多张开充填岩屑和泥质, 沿裂隙面局部有轻微溶蚀

收稿日期: 2017-03-06, 修回日期: 2017-04-24

作者简介: 杜朋召(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程稳定性分析, E-mail: zhuiheng0101@163.com

中,对边坡稳定性影响较大的是 f1-L1-L2-L3 组合,该组合以 f1 为侧裂面,L1 为底滑面,以 L2、L3 为上下游拉裂面,存在向河谷方向发生潜在滑移的可能。f1-L1-L2-L3 组合切割形成的块体顺河向长约 180~220 m,垂河向宽约 110~120 m,块体总体积约为 956 700 m³。该组合各结构面在水垫塘边坡的位置和赤平投影见图 1。

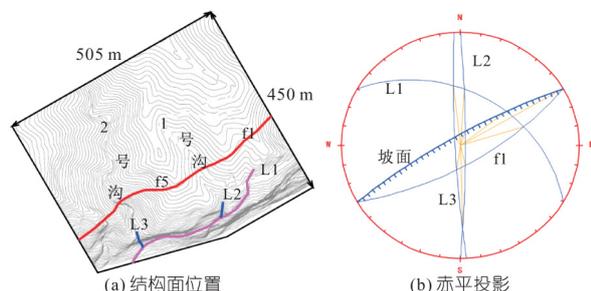


图 1 水垫塘边坡结构面位置及赤平投影图
Fig.1 The structure planes location in plunge pool slope and its stereographic projection

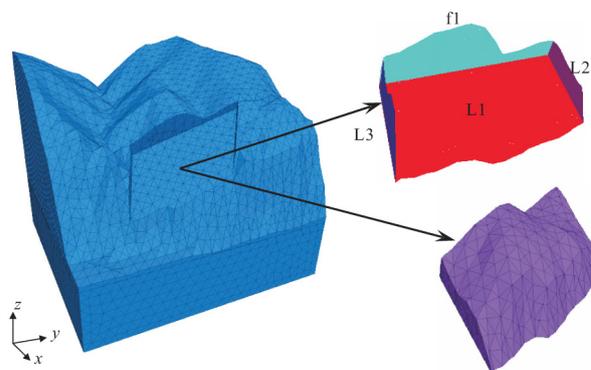


图 2 边坡岩体及结构面 3DEC 模型
Fig.2 The 3DEC slope model of rock and structure planes
的物理力学参数设计值见表 2、3。

表 2 边坡岩体物理力学参数设计值
Tab.2 Physico-mechanical parameters design values of rock mass

参数	取值	参数	取值
容重/(kN·m ⁻³)	26.5	自然抗剪强度下 c/kPa	1 200
变形模量/GPa	15	饱和抗剪强度下 φ/(°)	53
泊松比	0.24	饱和抗剪强度下 c/kPa	1 200
自然抗剪强度下 φ/(°)	53		

表 3 边坡结构面参数设计值
Tab.3 Physico-mechanical parameters design values of structure planes

岩结构面编号	自然抗剪强度		饱和抗剪强度	
	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa
f1	18	50	15	40
L1	22	50	21	40
L3,L2	20	50	18	10

3 边坡稳定性计算

3.1 计算原理

离散元法计算边坡安全系数时,主要通过逐渐折减岩体及结构面的力学参数,反复计算,直至边坡达到临界状态时的折减系数即为边坡的安全系数 F_s [7],公式为:

$$\begin{cases} c_k = c/F_s \\ \varphi_k = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, c_k 、 φ_k 分别为折减后的粘聚力和内摩擦角; c 、 φ 分别为岩体及结构面的粘聚力和内摩擦角。

3.2 计算模型及参数

依据水垫塘边坡形态及结构面发育位置,计算边界取横河向长 450 m,顺河向长 505 m,底面高程取 450 m,以山体向河谷方向为 x 轴正向,垂直 x 轴向上游方向为 y 轴正向,垂直向上为 z 轴正向。利用等高线建立地表面,通过拉伸形成块体模型。在此基础上,依据结构面的发育位置及产状,进行块体切割,构建结构面,其中 L2 和 L3 按最不利情况考虑,均延伸至 f1 断层,形成 f1-L1-L2-L3 组合。

采用三维离散元软件 3DEC 构建边坡岩体及结构面模型,模型共划分单元 81 720 个。边坡岩体及结构面 3DEC 模型见图 2。

由于岩质边坡的稳定性主要受结构面强度控制,计算时岩体取 II 类岩体。综合现场和室内试验结果,并结合相关工程经验,边坡岩体及结构面

3.3 离散元计算结果

地应力测试结果表明,区域内最大主应力值 σ_{max} 为 9.76 MPa,灰岩饱和单轴抗压强度平均值 R_c 为 96.8~121.0 MPa。根据岩体分级标准[9], $R_c/\sigma_{max} > 7$,判定边坡区地应力水平属于低应力区。因此,在分析边坡稳定性时,只考虑自重应力的影响,不计构造应力。在自重应力场的基础上,利用三维离散元程序,通过强度折减法,计算水垫塘边坡在正常和暴雨工况下的安全系数分别为 1.48、1.43,均大于相应工况下的安全系数标准(分别为 1.30~1.25、1.25~1.20)。

在 3DEC 软件中,通过强度折减,自动搜索边坡潜在不稳定块体。在正常工况下,当折减系数为 1.48 时,f1-L1-L2-L3 组合块体将产生滑动,边坡变形区域及块体滑动方向见图 3。由图 3 可知,岩体及结构面参数折减后,边坡的变形区域主要集中在 f1-L1-L2-L3 组合的块体部分,受 L3 下游山体的阻挡,块体的滑动主要沿裂隙 L1 向河谷方向滑动,滑动方向与 L3 走向近似平行,平均滑移方向为 SE5°。

3.4 极限平衡计算结果

为验证离散元法计算结果,在 3DEC 软件中,

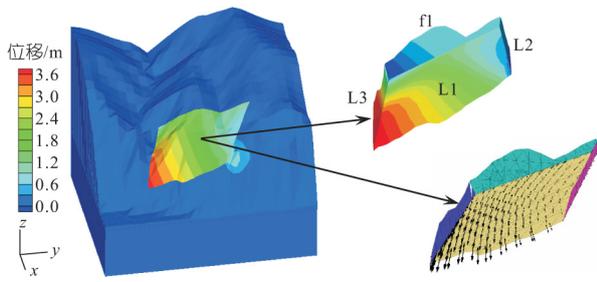


图 3 折减后边坡变形区域及滑动方向

Fig.3 The deformation region and sliding direction of slope after parameters reduction

提取 f1-L1-L2-L3 组合块体的几何参数。其中,块体中 f1 面积为 7 090 m²,L1 面积为 29 050 m²,L2 面积为 2 527 m²,L3 面积为 3 147 m²,块体体积为 956 700 m³。以 L1 为滑动面,SE5°为滑动方向,采用极限平衡法,通过受力分析,计算得到边坡组合块体在正常和暴雨工况下的安全系数分别为 1.34、1.25,结果见表 4。

表 4 正常工况和暴雨工况下极限平衡法计算结果

Tab.4 The result of limit equilibrium method in normal condition and raining condition

工况	编号	相关参数	力学计算
正常	块体	$V=956\ 700\ m^3, \rho=2\ 650\ kg/m^3,$ $W=2.54 \times 10^7\ kN$	下滑力: $1.30 \times 10^7\ kN$
	f1	$A=7\ 090\ m^2, c=50\ kPa, \varphi=18^\circ$	抗滑力: $3.26 \times 10^5\ kN$
	L1	$A=29\ 050\ m^2, c=50\ kPa, \varphi=22^\circ$	抗滑力: $9.53 \times 10^6\ kN$
	L2	$A=2\ 527\ m^2, c=50\ kPa, \varphi=20^\circ$	抗滑力: $3.04 \times 10^6\ kN$
	L3	$A=3\ 147\ m^2, c=50\ kPa, \varphi=20^\circ$	抗滑力: $4.53 \times 10^6\ kN$
		安全系数	1.34
暴雨	块体	$V=956\ 700\ m^3, \rho=2\ 650\ kg/m^3,$ $W=2.54 \times 10^7\ kN$	下滑力: $1.30 \times 10^7\ kN$
	f1	$A=7\ 090\ m^2, c=40\ kPa, \varphi=15^\circ$	抗滑力: $2.84 \times 10^5\ kN$
	L1	$A=29\ 050\ m^2, c=40\ kPa, \varphi=21^\circ$	抗滑力: $9.23 \times 10^6\ kN$
	L2	$A=2\ 527\ m^2, c=10\ kPa, \varphi=18^\circ$	抗滑力: $2.70 \times 10^6\ kN$
	L3	$A=3\ 147\ m^2, c=540\ kPa, \varphi=18^\circ$	抗滑力: $3.94 \times 10^6\ kN$
		安全系数	1.25

3.5 结果对比分析

三维离散元法与极限平衡法计算结果对比见表 5。由表 5 可知,正常和暴雨工况下,两者偏差分别为 9.5%和 12.6%。其中,极限平衡法计算结果相对偏小,但两者整体偏差不大。究其原因,

表 5 离散元与极限平衡法计算结果对比

Tab.5 The results of 3D distinct element method and limit equilibrium method

计算工况	离散元法	极限平衡法	偏差
正常	1.48	1.34	9.5%
暴雨	1.43	1.25	12.6%

Stability Analysis of Plunge Pool Rock Slope Based on 3D Discrete Element Method

DU Peng-zhao¹, WEI Jie¹, GAO Ping¹, LIU Shang-ge²

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the plunge pool rock slope engineering geological data, the characteristics of rock mass structural and the potential failure modes of the slope are analyzed. The 3D discrete element method is used to analyze the slope stability analysis, and the limit equilibrium method is employed to verify the calculation results. The results show that the stability analysis of rock slope based 3D discrete element method is reasonable. In the normal and heavy rain conditions, the safety factor of slope is greater than the standard requirements. The research can provide reference for stability analysis of rock slope.

Key words: rock slope; structure plane; assemblage block; 3D discrete element

主要为在组合块体潜在滑动过程中,L3 下游岩体对滑体具有一定抗滑作用,这在采用极限平衡法时是难以计算的。由此表明,基于三维离散元法的岩质边坡稳定性分析结果合理,边坡的安全系数大于规范要求的安全系数标准,水垫塘边坡稳定性满足规范要求。

4 结论

a. 边坡潜在滑移模式主要为以 f1 为侧裂面、L1 为底滑面、以 L2、L3 为上下游拉裂面的 f1-L1-L2-L3 组合。

b. 利用三维离散元法,计算得到水垫塘边坡在正常和暴雨工况下,安全系数分别为 1.48、1.43;边坡 f1-L1-L2-L3 组合的潜在滑动方向与 L3 走向近似平行,平均滑移方向为 SE5°。

c. 采用极限平衡法对离散元分析结果进行验算,两者偏差整体相对较小,表明基于三维离散元法的边坡稳定性分析结果合理,边坡安全系数大于规范要求的安全系数标准。

参考文献:

- [1] SL 386-2007, 水利水电工程边坡设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] 朱永生,朱焕春,石安池,等.基于离散单元法的白鹤滩水电站复杂块体稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2 068-2 075.
- [4] CUNDALL P A. A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems[C]//Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Nancy, France:[s.n.],1971.
- [5] 巨能攀,赵建军,黄润秋,等.基于 3DEC 的边坡块体稳定性分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(6):925-928.
- [6] 郑文棠,徐卫亚,张治亮,等.复杂楔形体组合下的岩质高边坡稳定分析[J].长江科学院院报,2008,25(5):115-119.
- [7] 单仁亮,杨昊,王述红,等.节理化岩质边坡开挖稳定性分析及支护方案设计[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):1 016-1 022.
- [8] 宁宇,徐卫亚,郑文棠.应用离散元强度折减对复杂边坡进行稳定性分析[J].岩土力学,2007,28(S):569-574.
- [9] GB/T 50218-2014,工程岩体分级标价[S].北京:中国计划出版社,2015.