

岩石边坡稳定性与支护的数值分析及综合比较

徐 青, 陈胜宏, 汪卫明

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 断层或节理裂隙等不连续面的切割导致岩体具有二重性——连续性和不连续性。由于目前还没有一种能考虑岩体二重性的实用的分析方法, 所以对岩石边坡进行稳定性研究时应采用多种方法进行综合比较。采用有限单元法(属于等效连续介质力学方法)和块体单元法(属于不连续介质力学方法), 对瀑布沟加里俄呷料场高边坡进行稳定性分析及支护研究。根据 2 种方法计算结果的综合比较分析, 得到对该边坡的稳定性和支护方案的认识。研究结果还表明: 若节理连通率的影响仅用强度参数表达, 而在计算网格中不予考虑, 则有限单元法和块体单元法得到的结果规律一致, 且量值相差不大; 由于块体单元法完全通过节理体现岩体的变形, 而有限单元法则可考虑岩块的变形, 所以有限单元法得到的位移值、屈服区及锚杆应力比块体单元法稍大。

关键词: 岩石力学; 边坡稳定性; 支护优化; 有限单元法; 块体单元法

中图分类号: TU 45; P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3692 - 07

NUMERICAL ANALYSIS AND COMPREHENSIVE COMPARISON OF STABILITY AND REINFORCEMENT OF ROCK SLOPE

XU Qing, CHEN Shenghong, WANG Weiming

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Because of the existence of discontinuities such as faults and joints, rock masses have dual characteristics—continuity and discontinuity. Since there is no applicable method to treat the duality at present, it is encouraged to conduct comprehensive comparison using different numerical analysis methods. The analysis of stability and reinforcement of the rock slope in Pubugou Hydraulic Project is taken as an example to show the methodology of the comprehensive comparison study, in which finite element method(belongs to equivalent continuous medium approach) and block element method(belongs to discontinuous medium approach) are applied. Through the comprehensive comparison of the calculation results, the stability and reinforcement schemes of the slope are calibrated. The study also shows that: (1) if the influences of the persistence ratio of joints are considered in the strength parameters only, finite element method and block element method present close results with minor differences; (2) compared with block element method, finite element method provides larger displacement, yield zone and the rock bolt stress. The reason is that the deformation of the intact rock can be considered in the finite element method, while the block element method can only take the deformation of joints into consideration.

Key words: rock mechanics; slope stability; reinforcement optimization; finite element method; block element method

收稿日期: 2007 - 04 - 12; **修回日期:** 2007 - 08 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679066, 50639090)

作者简介: 徐 青(1965 -), 女, 2005 年于河海大学环境工程专业获博士学位, 现为高级工程师, 主要从事水工结构工程及岩土工程的研究工作。E-mail: xuqing8263@hotmail.com

1 引言

岩体通常被断层或层面、节理、裂隙等结构面切割, 使得其具有二重性——连续性和不连续性^[1]。

目前, 常用的数值分析方法大多基于等效连续介质的概念, 如有限单元法、边界单元法、差分法等。为了考虑不连续面的影响, 一般的解决方法是: 当结构面数量较少时, 采用一些特殊单元来模拟^[2]; 当结构面很密集、数量很多时, 采用等效连续介质方法来模拟, 仅在本构关系中考考虑结构面的影响^[3~7]。另外一类常用的数值分析方法则是基于不连续介质的概念, 如离散单元法^[8, 9]、不连续变形法^[10]、刚体—弹簧单元法^[11]、块体单元法^[12~14]等。

边坡的稳定问题非常复杂, 除地质因素外, 还与施工开挖、地下水渗流、锚固支护等因素有关。尽管已经提出了一些能考虑岩体二重性的数值分析方法^[15, 16], 但尚不能完全解决复杂工程的实际问题。

岩体的真实情况介于连续介质和不连续介质之间, 目前还很难有理论层面的界定。本文认为: 对实际的复杂工程采用分属于连续介质和不连续介质的各种方法进行综合分析是明智的。本文对滑坡问题进行过各种方法的比较与安全系数的取值研究^[17], 但能否应用于人工岩石边坡的稳定与支护设计, 则有待于进一步探讨。

本文结合瀑布沟加里俄呷料场高边坡的稳定分析和支护问题, 分别采用有限单元法和块体单元法进行初步探讨。在计算边界条件和力学参数一致的前提下, 用 2 种方法对该边坡的开挖和支护过程进行模拟, 对边坡的稳定性和支护效果进行评价, 同时对 2 种方法得到的位移、屈服区、安全度及锚杆应力等力学量进行比较。

2 模拟方法的特点

2.1 有限单元法

本文研究采用有限单元法软件 CORE3, 其特点^[1]是:

- (1) 可以同时考虑多组节理和锚杆。
- (2) 可以考虑锚杆穿过节理面时的局部化应力。
- (3) 可以同时进行等效模拟和离散模拟: 对系

统锚杆和节理裂隙可采用等效的方法进行模拟, 对主锚杆和大规模断层可采用离散的方法进行模拟。

(4) 可以考虑各种荷载的作用, 模拟岩体中的渗流场、初始地应力场等。

(5) 可以考虑开挖过程和支护过程。

2.2 块体单元法

本文研究采用块体单元法软件 BLOCK3。块体单元法假定岩体被节理裂隙切割成块体系统, 块体为刚体, 变形发生在结构面, 通过力的平衡关系、变形协调关系和结构面的本构关系建立求解块体系统变形和稳定的控制方程。其特点^[1]是:

(1) 可以离散模拟大量的断层、层面、节理等不连续面。

(2) 可以离散模拟预应力锚索、锚杆等常用支护措施。

(3) 可以考虑各种荷载的作用, 模拟岩体中的渗流场、初始地应力场等。

(4) 可以考虑开挖过程和支护过程。

(5) 前处理简单, 既具有有限单元法的精度, 又具有刚体极限平衡法的简便。

3 工程简介

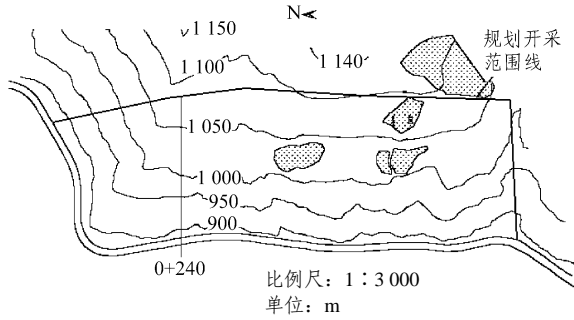
3.1 工程概况

瀑布沟水电站位于大渡河中游四川省汉源县及甘洛县境内, 电站枢纽由砾石土心墙堆石坝、左岸地下厂房系统、左岸岸边开敞式溢洪道、左岸泄洪洞、右岸放空洞及尼日河引水工程等组成, 是一座以发电为主, 兼有防洪、拦沙等综合效益的大型水电工程。最大坝高 186 m, 总装机 3 300 MW。

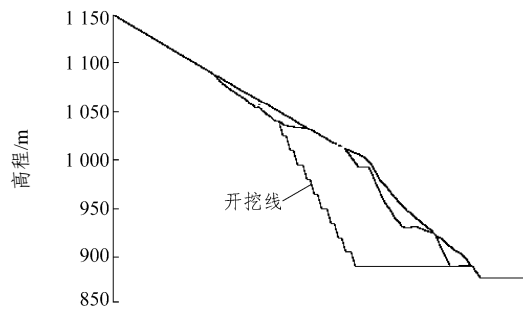
加里俄呷料场位于坝址左岸上游约 4 km 处, 西临大渡河, 东靠雄厚山体, 北接罗多沟, 南临脚踏沟, 地形东高西低。料场广布于澄江期花岗岩中, 中、粗粒结构, 块状、次块状构造, 地形坡度上缓下陡。料场无大的辉绿岩脉及断层破碎带分布, 主要节理裂隙有 4 组。料场地下水主要包括基岩裂隙水和松散堆积潜水。地表径流条件优越, 地表水沿冲沟排向大渡河。

加里俄呷料场开挖出来的边坡岩石比较破碎, 节理、裂隙发育, 且料场开挖边坡高达 210 m, 属超高边坡。料场两侧受罗多沟及脚踏沟切割, 构成 3 面临空的高边坡开采空间, 坡面较平顺, 所以可

作为二维问题进行分析。加里俄呷料场平面图及典型断面图(0+240断面)如图1所示。



(a) 平面图



(b) 0+240断面图

图1 加里俄呷料场
Fig.1 Jiali'exia quarry

3.2 计算条件

(1) 初始地应力场。参考瀑布沟水电站坝区地应力反演结果，自重系数取为 1.25，东面构造作用取为 1.40 MPa。

(2) 岩体力学参数。岩体力学参数如表 1 所示，表 1 中所列节理的强度已经考虑了节理连通率的影响，因此在计算网格中不再考虑节理的连通率问题。

表 1 边坡岩体力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of slope

岩体类别	密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性 模量 /GPa	泊松 比	岩石强度		节理强度	
				黏聚力 /MPa	摩擦 因数	黏聚力 /MPa	摩擦 因数
新鲜~微风化块状 结构花岗岩	2.65	23.0	0.21	2.00	1.35	1.5	1.00
弱风化次块状结构 花岗岩	2.61	13.5	0.25	1.20	1.00	1.0	0.85
强风化带	2.50	0.5	0.35	0.05	0.55		

(3) 地下水。东面山体地下水位取地表以下 120 m；西面取大渡河水位。

(4) 岩体强、弱风化带及崩坡积体分布。根据地勘资料，强风化带及崩坡积体的水平分布深度在

高程 950.00 m 以上取 15 m，高程 950.00 m 以下取 10 m；弱风化带的水平分布深度平均取 70 m。

(5) 节理裂隙产状。模拟两组控制性节理面：① $N30^{\circ} \sim 40^{\circ} E/NW \angle 55^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ；② 近 $SN/E \angle 50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。

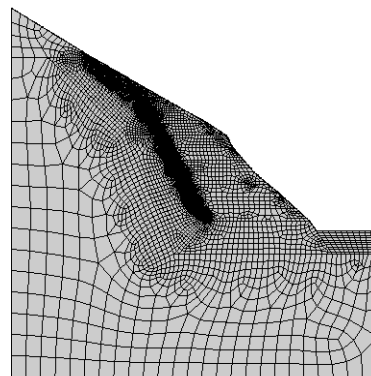
(6) 开挖松弛影响。开挖爆破造成的卸荷松弛范围取为 10 m，其中表层 3 m 的强度折减为 60%，其余 7 m 的强度折减为 80%。

4 无支护条件下的分析成果

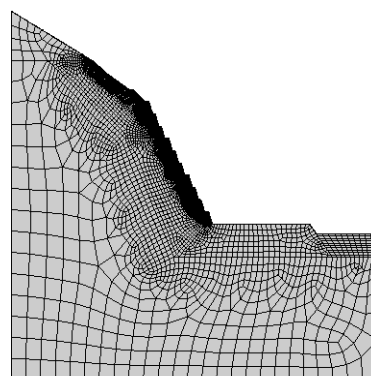
本文以 0+240 断面作为典型断面进行研究。

4.1 有限单元法

计算范围为高程 700.00~1 150.00 m，东西方向取 450 m。取 x 轴水平向西、 y 轴水平向南、 z 轴铅直向上。共 12 个开挖步。天然边坡有限单元模型划分为 7 506 个单元、15 230 个节点；开挖单元数为 1 598 个。有限单元模型如图 2 所示。



(a) 天然边坡



(b) 开挖边坡

图 2 有限单元模型

Fig.2 Finite element models

计算时首先模拟初始地应力场和初始渗流场，然后模拟各开挖步。

由应力矢量图(图 3)可以看出：边坡基本处于压

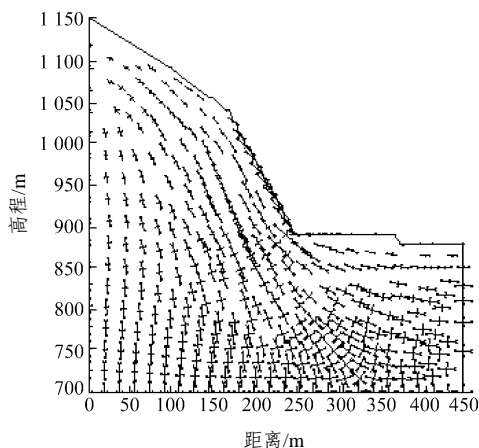


图 3 应力矢量图(有限单元法)

Fig.3 Stress vector diagram(FEM)

应力状态, 坡脚处有应力集中现象。由位移矢量图(见图 4)可以看出: 边坡开挖后的坡面位移方向以指向坡外为主; 终采平台(高程 890.00 m)的铅直位移方向向上, 水平位移方向指向坡内; 边坡开挖后的最大位移约为 23 mm, 发生在终采平台。

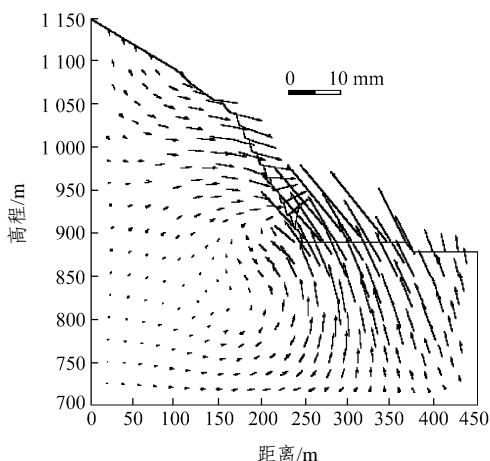


图 4 位移矢量图(有限单元法)

Fig.4 Displacement vector diagram(FEM)

由点安全度等值线图(图 5)可以看出: 在不采取任何加固措施的情况下, 边坡开挖后有部分区域点安全度小于 1.15, 分布在高程 850.00~995.00 m, 最大深入岩体深度约 74 m; 坡脚有小部分区域屈服(点安全度小于 1.00), 但屈服区未向上贯通, 分布在高程 890.00~930.58 m, 最大深入岩体深度约 37 m。节理未发生屈服破坏。因此, 边坡存在局部浅层破坏的可能性。

根据计算得到的应力场, 采用遗传算法搜索最危险滑动面^[18], 得到相应的最小安全系数 $K = 4.389$, 其破坏路径如图 6 所示。因此, 边坡满足整

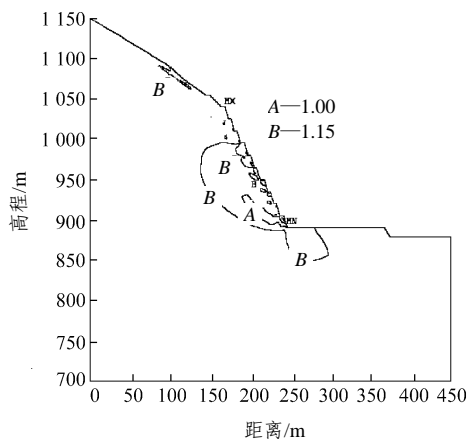


图 5 岩体点安全度等值线图

Fig.5 Contour of point safety degree of rock mass

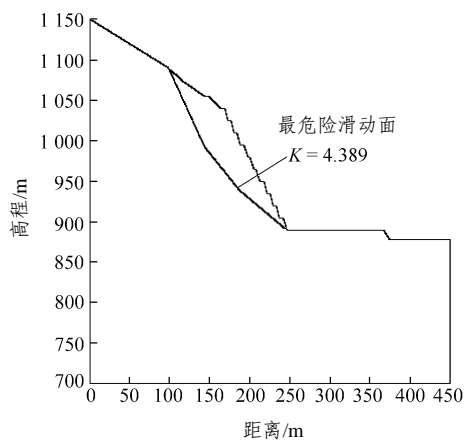


图 6 最危险滑动面及安全系数

Fig.6 The most dangerous sliding face and minimum safety coefficient

体稳定性要求。

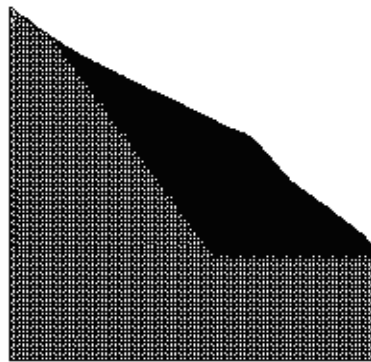
4.2 块体单元法

块体单元根据节理切割面确定, 输入所有节理裂隙的地质要素(倾角、中心点坐标)后, 即可采用块体识别方法建立块体单元模型^[19]。共有块体单元 25 347 个, 其中开挖块体单元 10 468 个。计算模型如图 7 所示。

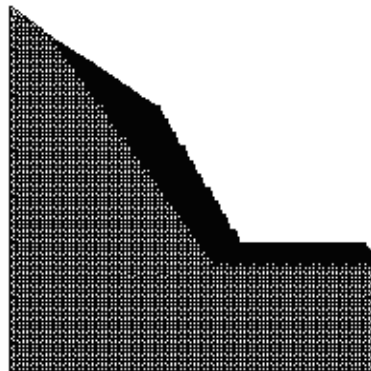
计算时首先模拟初始地应力场和初始渗流场, 然后模拟各开挖步。采用块体单元法分析时未考虑卸荷松弛。

由位移矢量图(图 8)可以看出: 边坡开挖后的坡面位移方向以指向坡外为主; 终采平台的铅直位移方向向上, 水平位移方向指向坡内; 边坡开挖后的最大位移约为 15 mm, 发生在终采平台。

图 9 为点安全度 $K < 1.0$ 区域分布图, 由图 9 可以看出: 在不采取任何加固措施的情况下, 边坡开挖后高程 890.00~920.00 m(终采平台)有小部分区域屈服。因此, 边坡在坡脚部位存在局部浅层破坏



(a) 天然边坡



(b) 开挖边坡

图7 块体单元模型

Fig.7 Block element models

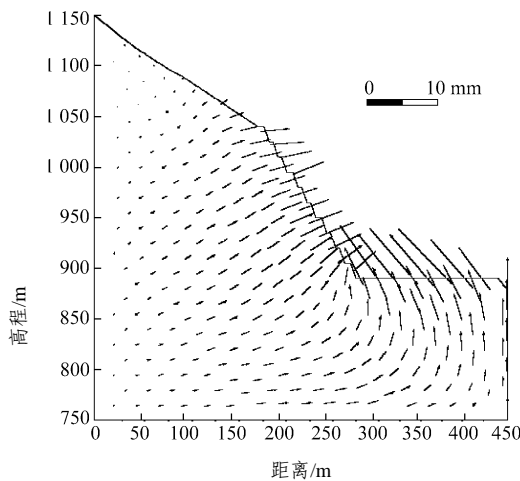


图8 位移矢量图(块体元法)

Fig.8 Displacement vector diagram(BEM)

的可能性。

5 支护设计

加里俄呷料场覆盖层剥离和交通洞开挖揭露出来的地质情况表明,边坡岩石较破碎,节理、裂隙较发育。上述2种方法的计算结果表明:边坡不存

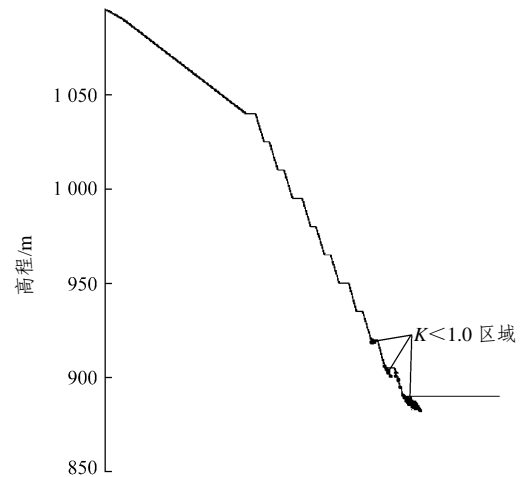


图9 点安全度 $K < 1.0$ 区域分布图

Fig.9 Distribution of the region with point safety coefficient $K < 1.0$

在整体稳定问题。但是边坡中下部浅层部位点安全度普遍不足,局部稳定问题较严重,而且坡脚存在一定深度的向坡顶延伸的压剪屈服区,若不适当控制,在爆破荷载的作用及恶劣的运行条件下,将会威胁边坡的安全。为了确保料场开采施工安全以及左高线公路的交通安全,通过各种方案的比较,提出对该边坡采取如下支护措施:(1)对开挖边坡及时采取系统锚杆支护,系统锚杆 $\phi 22.0$ mm、长4.0 m、截面2 m \times 2 m,边坡支护滞后开挖一台阶;(2)开挖面喷射C20混凝土;(3)在高程907.00,902.00,897.00,892.00 m各布置一排1800 kN预应力锚索,长35 m,水平间距6 m;(4)破碎带、断层带、夹泥层边坡加挂 $\phi 6.5$ mm,0.2 m \times 0.2 m钢筋网。

考虑以上支护措施,重新进行边坡稳定分析。图10,11为边坡开挖后点安全度等值线图,可以看

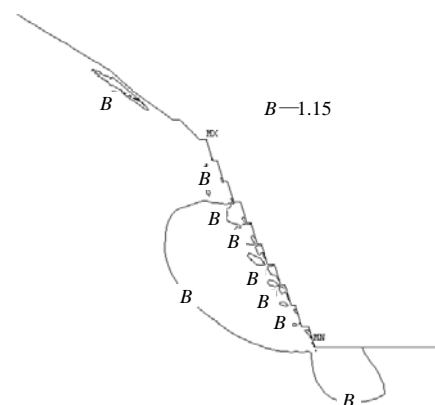


图10 采取支护措施后边坡点安全度等值线图(有限元法)

Fig.10 Contour of point safety degree of slope after reinforcement(FEM)

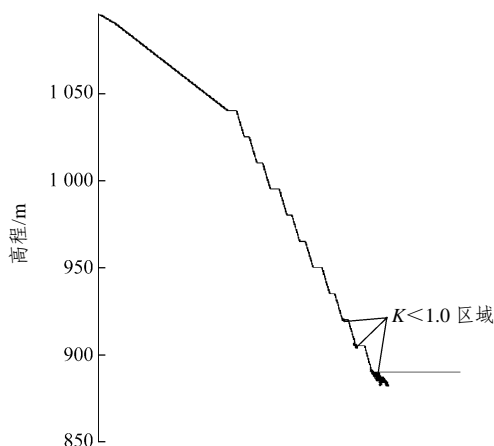


图 11 采取支护措施后边坡点安全度 $K < 1.0$ 区域分布图 (块体元法)

Fig.11 Distribution of the region with point safety degree $K < 1.0$ after reinforcement(BEM)

出: 在坡脚采取锚索加固措施后, 屈服区($K < 1.0$)基本消失。

表 2, 3 分别为两种方法计算的锚杆应力统计结果, 可以看出: 锚杆普遍受拉, 有限单元法计算的最大拉应力达 177.37 MPa, 块体单元法计算的最大拉应力达 113.52 MPa, 均发生在高程 890.00~905.00 m; 边坡中下部高程的锚杆应力普遍大于上部高程, 作用明显; 锚杆强度有大于 2.0 的安全系数。

表 2 锚杆应力(有限元法)
Table 2 Bolt stresses(FEM)

高程/m	法向应力/MPa			剪应力/MPa		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1 090.00 ~ 1 055.00	13.68	1.80	5.16	9.89	2.43	5.16
1 055.00 ~ 1 040.00	33.74	2.94	10.72	31.26	1.66	10.16
1 040.00 ~ 1 025.00	39.39	-3.39	4.84	46.78	0.16	9.92
1 025.00 ~ 1 010.00	37.38	-4.18	4.03	46.05	0.05	11.12
1 010.00 ~ 995.00	43.54	-2.28	5.77	44.19	0.03	10.90
995.00 ~ 980.00	61.14	-2.39	7.77	52.62	0.17	12.39
980.00 ~ 965.00	69.83	-2.46	8.43	54.79	0.03	13.72
965.00 ~ 950.00	64.28	-2.24	7.72	46.82	0.00	12.61
950.00 ~ 935.00	72.83	-1.51	9.94	56.71	0.02	13.23
935.00 ~ 920.00	78.05	-1.48	10.26	57.07	0.03	13.13
920.00 ~ 905.00	66.84	-0.41	7.80	36.36	0.09	7.74
905.00 ~ 890.00	177.37	-4.07	17.41	94.72	0.04	12.95

表 3 锚杆应力(块体元法)
Table 3 Bolt stresses(BEM)

高程/m	轴向应力/MPa			剪应力/MPa		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1 109.00 ~ 1 070.00	30.52	-0.24	6.24	38.45	0.26	12.64
1 070.00 ~ 1 055.00	39.30	-0.29	6.64	35.24	0.34	11.52
1 055.00 ~ 1 040.00	38.36	-0.54	7.37	40.67	0.57	12.41
1 040.00 ~ 1 025.00	41.87	-1.57	5.81	42.75	0.08	13.29
1 025.00 ~ 1 010.00	45.95	-1.89	6.62	45.21	0.21	11.53
1 010.00 ~ 995.00	38.33	-2.87	7.75	41.29	0.14	10.62
995.00 ~ 980.00	49.79	-2.64	5.25	39.48	0.12	9.48
980.00 ~ 965.00	56.90	-1.97	7.38	35.15	0.17	9.66
965.00 ~ 950.00	54.34	-2.64	8.59	42.75	0.26	10.49
950.00 ~ 935.00	58.75	-1.25	9.87	46.15	0.24	11.84
935.00 ~ 920.00	55.29	-1.92	10.83	43.27	0.35	10.72
920.00 ~ 905.00	46.46	-2.17	11.26	64.78	0.48	11.38
905.00 ~ 890.00	113.52	-3.74	16.45	79.17	0.66	13.71

6 结 论

本文结合瀑布沟水电站加里俄呷料场边坡工程, 对岩石高边坡稳定及支护优化问题进行了综合的数值分析方法研究。研究分别采用有限单元法和块体单元法, 模拟边坡的开挖及支护过程。该研究不仅解决了工程问题, 而且得到了以下有关方法应用的认识:

(1) 块体单元法属于不连续介质力学方法体系。通过块体单元法的分析结果, 主要可以了解岩石边坡的整体变形规律和整体稳定性、是否存在控制边坡整体稳定性的大规模可动块体, 以及局部是否存在较大规模的定位或半定位可动块体。

(2) 有限单元法属于连续介质力学方法体系, 发展成熟且应用广泛。通过有限单元法的分析结果, 主要可以了解岩石边坡的整体变形规律、岩石边坡的应力分布规律、岩石边坡的点安全度及屈服区分布规律, 以及岩石边坡的整体稳定性和局部稳定性。

(3) 若节理的连通率影响仅用强度参数表达, 而在计算网格中不予考虑(如本文中的边坡案例), 则有限单元法和块体单元法得到的结果规律一致, 仅量值稍有出入。

(4) 由于块体单元法完全通过节理体现岩体的

变形,而有限单元法则可考虑岩块的变形;同时,本文采用块体单元法分析时未考虑卸荷松弛,所以有限单元法得到的位移值、屈服区、锚杆应力比块体单元法分别约大20%,30%,35%。

(5)若在计算网格中不考虑节理连通率的影响,则有限单元法和块体单元法这两种不同类型的数值分析方法可以取相同的安全控制标准。

参考文献(References):

- [1] 陈胜宏. 计算岩体力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (CHEN Shenghong. Computational rock mechanics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.(in Chinese))
- [2] GOODMAN R E, TAYLOR R, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(3): 637 - 659.
- [3] ZIENKIEWICZ O C, PANDE G N. Time-dependent multi-laminated model of rocks—a numerical study of deformation and failure of jointed rock masses[J]. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech., 1976, 1(2): 219 - 247.
- [4] 李术才, 陈卫忠, 朱维申, 等. 加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 661 - 1 666.(LI Shucai, CHEN Weizhong, ZHU Weishen, et al. Catastrophe model of crack propagation in bolt-supported jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 661 - 1 666.(in Chinese))
- [5] 杨强, 陈新, 周维垣. 基于二阶损伤张量的节理岩体各向异性屈服准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1 275 - 1 282. (YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Weiyuan. Anisotropic yield criterion for jointed rock masses based on a two-order damage tensor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1 275 - 1 282.(in Chinese))
- [6] 李宁, 张平, 段庆伟, 等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(LI Ning, ZHANG Ping, DUAN Qingwei, et al. Dynamic meso-damage model of jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 579 - 1 584.(in Chinese))
- [7] CHEN S H, EGGER P. Three-dimensional elasto-viscoplastic finite element analysis of reinforced rock masses and its application[J]. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech., 1999, 23(1): 61-78.
- [8] CUNDALL P A. Formulation of three-dimensional distinct element model. part 1. a scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomechanics Abstracts, 1998, 25(1): 10 - 16.
- [9] HART R, CUNDALL P A, LEMOS J. Formulation of three-dimensional distinct element model. part 2. mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomechanics Abstracts, 1988, 25(1): 11 - 25.
- [10] SHI G H. Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of deformable block structures[J]. Engineering Computations, 1992, 9(2): 157 - 168.
- [11] KAWAI T. A new discrete model for analysis of solid mechanics problem[J]. Seisan Kenkyn, 1977, 29(4): 204 - 207.
- [12] CHEN S H, SHAHROUR I, EGGER P, et al. Analysis of arch dam abutment slope using elasto-viscoplastic block theory[J]. Rock Mech. and Rock Eng., 2002, 35(3): 1 - 23.
- [13] 陈胜宏, 汪卫明, 邹丽春. 岩石边坡开挖及加固分析的弹黏塑性块体元方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 953 - 958.(CHEN Shenghong, WANG Weiming, ZOU Lichun. Elasto-viscoplastic block element method for excavation and reinforcement analysis of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 953 - 958.(in Chinese))
- [14] 任青文, 余天堂. 边坡稳定的块体单元法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 20 - 24.(REN Qingwen, YU Tiantang. Slope stability analysis with block element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 20 - 24.(in Chinese))
- [15] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods[J]. Int. J. for Num. Methods in Eng., 1994, 37(2): 229 - 256.
- [16] SHI G H. Manifold method[C]// Proc. of the First Int. Forum on DDA and Simulation of Discontinuous Media. Berkeley, California, [s.n.], 1996: 52 - 204.
- [17] 徐青, 陈士军, 陈胜宏. 滑坡稳定性分析与安全系数取值研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 58 - 62.(XU Qing, CHEN Shijun, CHEN Shenghong. Study on stability analysis and safety factor of landslide[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 58 - 62.(in Chinese))
- [18] 吴余生, 冯道雨, 陈胜宏. 基于自适应有限元法和改进遗传算法的边坡临界滑动面搜索[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 6 - 10.(WU Yusheng, FENG Daoyu, CHEN Shenghong. Searching for critical slip surface in slopes based on adaptive FEM and improved genetic algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 6 - 10.(in Chinese))
- [19] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 51 - 55.(WANG Weiming, CHEN Shenghong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(5): 51 - 55.(in Chinese))