

文章编号: 1000-7598-(2008)01-0094-07

基于三维多重网格法的抗滑稳定计算精度分析

杨 强, 朱 玲, 薛利军

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 在以有限元法来分析评价坝基、边坡的稳定安全度时, 多重网格法将有限元分析网格和滑移块体的滑面网格作为独立的两套网格, 滑面网格可随意切割有限元单元。这样一套有限元网格和一套应力成果就可以进行任意的滑块稳定分析。着重分析了多重网格法的精度。针对三维柱体和锦屏高边坡, 研究两套网格如何匹配以提高计算精度进行处理, 初步得出了一些有关多重网格法计算精度的知识。最后, 应用基于多重网格法的第 2 类方法分析了锦屏左坝肩高边坡的稳定性问题。

关 键 词: 插值; 刚体极限平衡法; 块体; 滑动面

中图分类号: O 241; TU 454

文献标识码: A

Computational accuracy of stability analysis based on 3-D multi-grid method

YANG Qiang, ZHU Ling, XUE Li-jun

(Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The conception and method of multi-grid is brought forward; the mesh of finite element analysis and the sliding surface's mesh are deal with as two unattached mesh, and the sliding surface's mesh can go across any finite elements. In this way, discretionary sliding blocks' analysis can be done with a set of finite element mesh and a set of stress results. The calculation efficiency of multi-grid method is emphatically analyzed. The 3D multi-grid method is applied to a typical 3-D quadrangular and Jinping Project high slope. Numerical results show that the properly adjusting the mesh of the finite element models and sliding surfaces can effectively improve the precision and calculation efficiency of this method; especially for the large scale structure. Finally, the stability of Jinping Project high slope is analyzed using the second way of multi-grid method.

Key words: interpolation; rigid limit equilibrium method; slide blocks; sliding surfaces

1 引 言

如何以有限元法来分析评价坝基、边坡的稳定安全度是岩土界长期关注的课题^[1-5]。这方面的研究工作大体可分为两类: (1) 按超载或降强的方式计算至结构破坏为止, 以超载系数或强度储备系数来定义结构稳定安全系数; (2) 将有限元应力成果整理到滑面上, 再按刚体极限平衡法的方式确定滑移体安全系数。第 1 类方法的难点在于非线性有限元计算的收敛性: 岩土结构的特点易于造成三维畸形网格、高度不均匀的材料分区、高量级荷载, 这都对收敛性有很不利的影响。第 2 类方法的优点是可以利用线弹性或一般非线性的应力成果去计算稳定安全系数, 而不用计算至结构濒临破坏(极限状态)时的应力分布。有鉴于此, 第 2 类方法得到了广泛

的应用。

第 2 类方法概念简单明确, 且能直接利用刚体极限平衡法的安全指标体系, 颇受工程设计人员欢迎, 它同时反映了岩体结构稳定分析的多尺度的特点。岩质坝基和边坡的结构面呈多尺度分布, 有限元分析中岩体本构只能反映中、小尺度的结构面的力学效应, 无法反映长、大节理组的效果。第 2 类方法通过滑面的设置, 在滑面上可以反映长、大节理组连通率的影响。以此而论, 第 2 类方法不应视为一种简化方法, 而是岩质边坡全面稳定分析不可或缺的一个重要方面, 它反映了岩体结构稳定分析的多尺度计算策略。

第 2 类方法一般要求滑面沿有限单元面布置, 以便于计算滑面受力。但在复杂结构的三维分析里要做到这一点困难很大, 即或可以布置, 要想进行

收稿日期: 2006-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50579026); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2002CB412708)。

作者简介: 杨强, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构和岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: yangq@tsinghua.edu.cn

最危险滑块搜索又要改变网格，这使的工作量和难度都极大，为此笔者提出了多重网格法以解决这一难题^[6-8]。多重网格法将有限元分析网格和滑面网格作为独立的两套网格，滑面网格可随意切割有限元单元。这样一套有限元网格和一套应力成果就可以进行任意的滑块稳定分析。本文着重分析多重网格法的精度。针对三维柱体和锦屏高边坡，研究两套网格如何匹配以提高计算精度，初步得出了一些有关多重网格法计算精度的知识。最后，本文应用基于多重网格法的第2类方法分析了锦屏左坝肩高边坡的稳定性问题。

2 多重网格法

三维有限元的应力成果依托于结构网格，以高斯点应力成果精度最高。多重网格法的思路是，将滑面(平面或曲面)剖分成平面或曲面网格，滑面上各个节点应力由有限元高斯点应力值插值得到，具体步骤如图1和图2所示。针对滑面 P 中 O 节点，先搜索与之距离最近的高斯点 Q ，取其所在单元 M 所有高斯点进行应力插值。假设该单元有8个高斯点，那么 O 节点应力 $\sigma_{ij}^{(O)}$ 可由下述插值公式求得：

$$\sigma_{ij}^{(O)} = \sum_{k=1}^8 \sigma_{ij}^{(k)} S_k, \quad S_k = \frac{\frac{1}{L_k^n}}{\sum_{k=1}^8 \frac{1}{L_k^n}} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{ij}^{(k)}$ 为单元 M 中第 k 个高斯点应力； S_k 为单元 M 第 k 个高斯点的权函数； L_k 为节点 O 与第 k 个高斯点的距离。当指数 $n=0$ 时，节点应力为8个高斯点应力的算术平均；当 $n \rightarrow \infty$ 时，节点应力就是最近高斯点应力。

滑面网格一般采用四边形面单元。在四边形面单元中，先将单元分为两个三角形(如图3所示)，三角形 $A'B'C'$ 上的力矢量 F_i 按下式计算：

$$F_i = \sigma_{ij} A_j \quad (2)$$

式中： σ_{ij} 为该单元的平均应力， $\sigma_{ij} = \frac{1}{3}(\sigma_{ij}^{(A')} + \sigma_{ij}^{(B')} + \sigma_{ij}^{(C')})$ ； $\sigma_{ij}^{(A')}$ ， $\sigma_{ij}^{(B')}$ ， $\sigma_{ij}^{(C')}$ 分别为节点 A' ， B' ， C' 的节点应力； $\vec{A} = A_j$ 为该单元的面积矢量， $\vec{A} = \frac{1}{2} \vec{B'C'} \cdot \vec{B'A'}$ 。

将滑面上所有三角形单元法向力矢量求和，即可得到滑面的内力，并可分解为滑面的法向力和切向力，进而按照式(3)和式(4)计算滑面甚至或滑块的安全系数：

$$K_1 = \frac{f_1 R_1 + c_1 A_1}{S_1}; \quad K_2 = \frac{f_2 R_2 + c_2 A_2}{S_2} \quad (3)$$

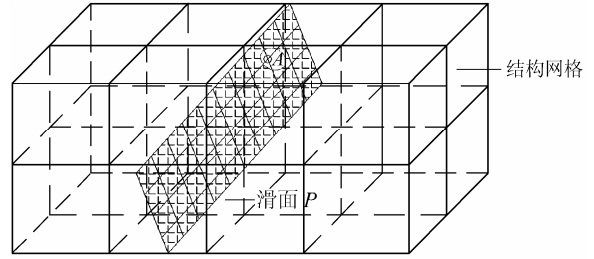


图1 滑面与结构网格示意图

Fig.1 Sliding surface and structural mesh

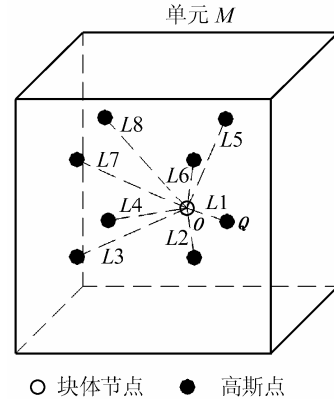


图2 权函数示意图

Fig.2 Sketch map of weight function

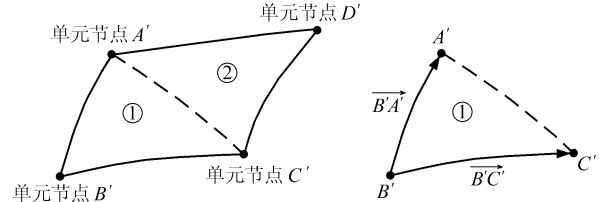


图3 面积矢量示意图

Fig.3 Sketch of area vector

$$K_c = \frac{f_1 R_1 + c_1 A_1 + f_2 R_2 + c_2 A_2}{S_1 + S_2} \quad (4)$$

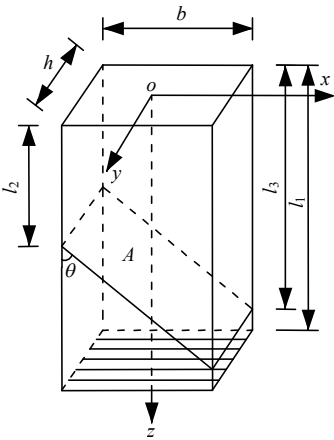
式中： K_1 为上游侧滑面安全度； K_2 为下游侧滑面安全度； K_c 为滑块整体抗滑稳定安全系数； R_1 ， S_1 ， A_1 ， f_1 ， c_1 分别为上游侧滑面法向力、切向力、面积、剪摩系数； R_2 ， S_2 ， A_2 ， f_2 ， c_2 分别为下游侧滑面法向力、切向力、面积、剪摩系数。

3 数值算例

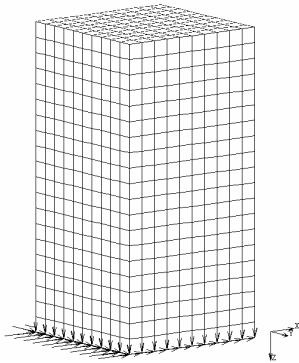
3.1 三维柱体算例1

为检验多重网格法计算效果，本算例分别使用MSC. Marc 软件对三维长方体进行了有限元计算。如图4(a)所示，块体高 $l_1 = 10$ m， $l_2 = 5$ m， $l_3 = 9$ m，长度和宽度相等为 $h = b = 5$ m。弹性模量 $E = 21$ GPa，泊松比 $\mu = 0.167$ ，剪摩系数 $f = 0.7$ ，

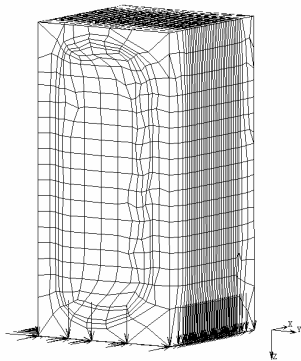
$c = 0.6 \text{ MPa}$ 。重度 $\gamma = 24.3 \text{ kN/m}^3$ 。在 $z = 10 \text{ m}$ 端部固支，考虑自重荷载。



(a) 三维柱体算例 1 模型图



(b) 有限元规则网格图



(c) 有限元不规则网格图

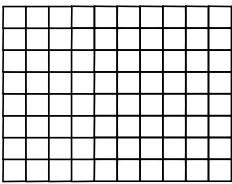
图 4 三维柱体算例 1 示意图
Fig.4 3-D quadrangular sample1

本算例两套网格方案。方案 1(如图 4(b)所示)，采用 8 节点六面体规则单元，整个模型共 2 000 个单元，1 541 个节点。高斯点共 16 000 个。方案 2(如图 4(c)所示)，采用不规则 8 节点六面体单元，整个模型共 3 044 个单元，4 959 个节点，高斯点共 16 000 个。滑面采用 3 套疏密不同的网格(如图 5 所示)进行有限元多重网格法的插值分析。

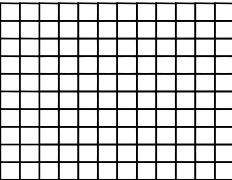
本例三维柱体仅受自重荷载，块体内体力为 0，侧面自由，故滑面 A 所受合力理论上应为滑面 A 上方块体重力，即

$$\left. \begin{aligned} F &= \gamma V \\ F_N &= \gamma V \sin \theta \\ F_S &= \gamma V \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

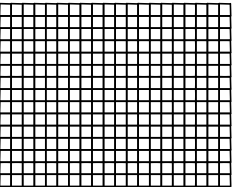
式中： V 为滑面 A 上方块体体积； θ 如图 4(a)所示。
由式 (5) 计算出三维柱体内应力分布并投影至面 A (如图 4(a)所示) 上，即可得到 A 面上受力情况，将此解近似看作理论解 (如表 1 所示)。



(a) 8×10



(b) 10×12



(c) 15×20

图 5 A 滑面网格示意图
Fig.5 Mesh of sliding surface A

表 1 方案 1 采用不同滑面网格时多重网格法结果对比
Table 1 Multi-grid method results of different sliding surfaces meshes of sample 1

力的类型	网格	矢量方向			力 / MN	误差率 / %
		l	m	n		
合力	理论解	0.000	0.000	-1.000	6.003	0
法向		0.000	-0.625	0.781	4.687	0
切向		0.000	-0.781	-0.625	3.749	0
合力	8×10	0.001	0.009	-1.000	5.912	1.52
法向		0.000	-0.625	0.781	4.647	0.86
切向		0.001	-0.781	-0.625	3.653	2.57
合力	10×12	0.000	0.008	-1.000	5.971	0.52
法向		0.000	-0.625	0.781	4.692	0.09
切向		0.001	-0.781	-0.625	3.693	1.49
合力	15×20	0.000	0.012	-1.000	5.940	1.05
法向		0.000	-0.625	0.781	4.680	0.15
切向		0.000	-0.781	-0.625	3.656	2.50

由表 1 可以看出, 利用 MSC. Marc 进行有限元计算, 而后采用高斯点应力进行多重网格插值的结果与理论解吻合得较好, 尤其是滑面 A 采用 10×12 划分的情况。分析原因如下:

(1) 本模型高斯点共 16 000 个, 分布均匀且较为密集, 故而进行多重网格插值的时候, 误差相对较小。

滑面 A 的 3 种网格方案中, 10×12 最接近理论解, 误差率仅为 0.52 %, 0.86 %, 2.57 %。考虑到此网格方案中滑面 A 的节点分布密度与三维柱体的有限元模型中高斯点分布密度最为接近, 当选择最近的高斯点进行插值时, 会引入较小误差。可见, 并非滑面 A 网格越密集, 插值结果就越精确。

表 2 方案 2 采用不同滑面网格时多重网格法结果对比
Table 2 Multi-grid method results of different sliding surfaces meshes of sample 2

力的类型	网格	矢量方向			力 / MN	误差率 / %
		l	m	n		
合力	8×10	-0.002	0.018	-1.000	5.921	1.36
法向		0.000	-0.625	0.781	4.688	0.02
切向		-0.003	-0.781	-0.625	3.616	3.57
合力	10×12	-0.001	0.015	-1.000	5.882	2.01
法向		0.000	-0.625	0.781	4.649	0.82
切向		-0.001	-0.781	-0.625	3.604	3.87
合力	15×20	-0.001	0.017	-1.000	5.907	1.59
法向		0.000	-0.625	0.781	4.673	0.30
切向		-0.001	-0.781	-0.625	3.613	3.64

方案 2 的理论解与方案 1 相同。由表 2 可以看出, 此方案结果与理论解也吻合得不错, 但比方案 1 的效果略差。这是因为方案 2 的有限元模型本身网格不规则, 故插值后结果不如规则网格理想, 误差率最大为 3.87 %。另外, 滑面 A 的 3 种网格方案中, (a) 8×10 的误差率为 1.36 %, 0.02 %, 3.57 %, 比另外两种网格方案结果稍好, 观察方案 2 的有限元模型发现, 滑面 A 所处的位置上有限元网格密度与 (a) 8×10 最为接近。

3.2 三维柱体算例 2

如图 6 所示, 块体高 $l_1 = 10$ m, 长度和宽度相等, $h = b = 5$ m, $l_2 = 3$ m, $l_3 = 8$ m, A 为 $1/4$ 圆柱面, 其轴线在 $z = 3$ m, $x = 2.5$ m 处。弹性模量 $E = 21$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.167$, 剪摩系数 $f = 0.7$, $c = 0.6$ MPa, 重度 $\gamma = 34.3$ kN/m³。在 $z = 10$ m 端部固支, 考虑自重荷载。

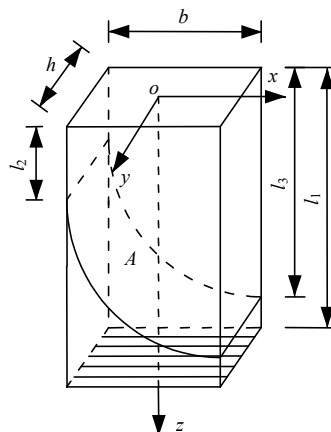
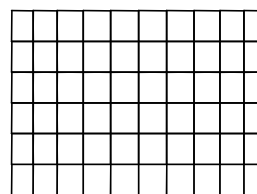
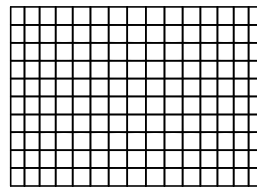


图 6 三维柱体算例 2 示意图
Fig.6 3-D quadrangular sample2

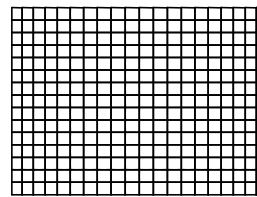
本算例同样采用两套方案, 两套方案均取与算例 1 同样的网格。方案 1 为规则网格, 如图 4(b)所示; 方案 2 为不规则网格, 如图 4(c)。滑面采用 3 套疏密不同的网格 (如图 7 所示) 进行有限元多重网格法的插值分析。



(a) 6×10



(b) 10×15



(c) 15×20

图 7 A 滑面网格投影示意图
Fig.7 Mesh projection of sliding surface A

本例三维柱体与算例 1 中情况一样, 故其理论解仍按式 (3) 计算。由式 (3) 计算出的三维柱体内应力分布并投影至面 A 上, 即可得到 A 面上受力情况, 将此解近似看作理论解。

利用计算出来的有限元结果插值得到的不同滑面网格上受力情况如表 3 所示。

表 3 采用不同滑面网格时多重网格法结果对比
Table 3 Multi-grid method results of different sliding surfaces meshes

不同解	网格	矢量方向			合力 / MN	误差率 / %
		<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>		
理论解		0.000	0.000	-1.000	5.940	0
方案 1: 规则 网格	06×10	0.001	0.000	-1.000	5.899	0.69
	10×15	0.004	0.000	-1.000	5.939	0.02
	15×20	0.001	0.000	-1.000	5.905	0.59
方案 2: 不规则 网格	06×10	-0.001	0.000	-1.000	5.954	0.24
	10×15	-0.004	0.000	-1.000	5.895	0.76
	15×20	-0.002	-0.001	-1.000	5.973	0.56

此例中滑面 *A* 为曲面, 故 *A* 面上合力是将各单元的力矢量加和得到的合矢量。由表 3 可看出, 此算例两个方案的结果与理论解均较为吻合, 其中方案 1 规则网格的整体计算精度较方案 2 不规则网格的好, 且以规则网格的(b) 10×15 与理论解最为接近, 误差率仅为 0.02 %, 观察模型网格可知, 此时曲面 *A* 的网格与模型网格密度最为接近。而方案 2 中不规则网格以最稀疏的(a) 6×10 与理论解最为接近, 误差率为 0.24 %, 同样是滑面 *A* 所处的位置上有限元网格平均密度与(a) 6×10 最接近的原因。

3.3 锦屏左岸高边坡滑块算例

锦屏一级水电站工程规模巨大, 开挖边坡最高达 200~300 m, 左坝肩的整体稳定重点是变形拉裂岩体的稳定性问题。此变形拉裂体位于 1 800 m 高程以上, 谷坡高陡, 岩体节理裂隙发育, 形成巨大的潜在不稳定块体。本文仅对左岸边坡在自重作用下做静力分析。理论上, 在天然地应力场作用下滑块所受合力应与块体自重平衡, 其方向铅直向下, 利用这一点可以校核多重网格法的误差。

此有限元模型采用 4 套疏密不同的网格, 首先分别进行有限元计算, 然后利用多重网格法将有限元的应力成果转移到滑块各滑面上, 求得各滑面上受力情况, 最后将所有滑面受力进行矢量加和, 将结果与整个滑块所受重力进行比较, 以此校核此多重网格法的计算精度, 具体数据见表 4。

表 4 采用不同滑面网格时滑块合力对比
Table 4 Total force of slide block of different sliding surfaces meshes

方案值	高斯点 个数	滑块受力/10 ⁴ N			合力与铅直 方向夹角/(°)
		<i>x</i> 方向合力	<i>y</i> 方向合力	<i>z</i> 方向合力	
理论值	—	0	0	—	0
方案1	17 442	2 417 857	1 519 180	20 837 449	7.80
方案2	97 645	1 363 428	232 457	19 914 090	3.97
方案3	339 536	226 441	234 956	21 917 472	0.85
方案4	1 485 632	159 508	81 170	21 206 702	0.48

如表 4 所示, 随着有限元模型网格逐渐加密, 可供插值的高斯点个数逐渐增多, 滑块所受合力方向与铅直方向的夹角逐渐趋近于 0。可见, 有限元模型的网格疏密对多重网格法的计算精度有一定影响, 模型网格越密, 多重网格法结果越精确。但当模型网格加密至一定程度后, 对多重网格法计算精度的影响会逐渐减小, 如表 4 中方案 3 和方案 4, 可供插值的高斯点个数增加了 3 倍, 但合力与铅直方向夹角变化不大。

4 工程实例

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅砻江干流上的重要梯级电站, 工程枢纽位于盐源县洼里乡下游 10~15 km 的河段上。锦屏电站拱坝左高边坡规模大, 地质条件复杂, 存在深拉裂隙带、煌斑岩脉且层间挤压带较发育。枢纽区工程开挖边坡主要包括拱肩槽、缆机平台等的开挖边坡, 均属于一级边坡。

建立三维有限元模型, 模拟锦屏左岸主要的地形地质条件。网格模拟的范围: 以坝轴线为中心, 向上游 1 倍坝高以上、左右岸各 3 倍坝高、下游 2 倍坝高以上, 坝建基面以下至少 1 倍坝高, 在这个范围内模拟各种地质构造。有限元计算网格 (如图 8 所示) 的节点总数约 97 812 个, 单元总数约 13 7645 个。左岸边坡稳定的关键块体为左岸的 NNW 向裂密带+煌斑岩脉+*f*₄₂₋₉ 断层切割而成的变形拉裂岩体, 属交线滑动的情况, 其主要材料信息如表 5 所示。根据锦屏高边坡关键块体的几何信息进行了滑移体网格划分, 如图 9 所示。

对锦屏左岸边坡进行三维非线性有限元的整体计算, 而后根据多重网格法插值得到滑块体各滑面上节点应力, 然后积分求得开挖过程中各滑面及

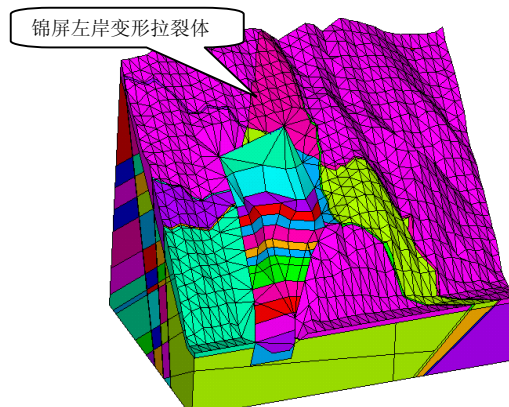


图 8 锦屏左岸有限元模型

Fig.8 FEM model of left bank of Jinping

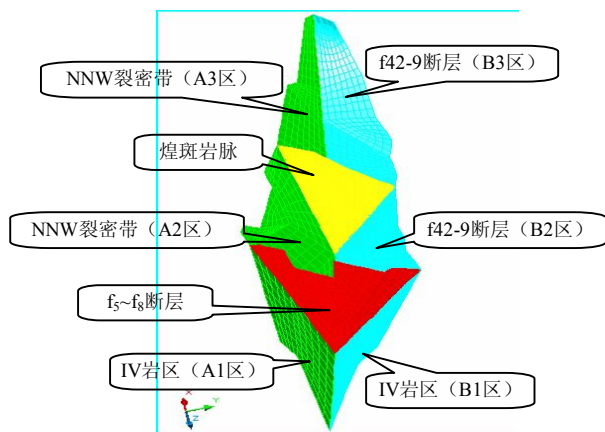


图9 左岸滑块及其材料分区示意图

Fig.9 Slide block and its material subarea of left bank

后缘拉裂面受力情况,进而得到滑移块的整体抗滑稳定安全系数。通过这样的计算,可以得到锦屏左岸关键滑块的整体抗滑稳定安全系数(如表6所示)在未开挖、开挖至坝顶、完全开挖时分别为1.308, 1.455, 1.114。结果表明:(1)边坡开挖对左岸关键滑块整体稳定性有一定影响,但其整体抗滑稳定安全系数始终保持在1.100以上;(2)该滑块从天然状态到开挖至坝顶,整体抗滑稳定安全系数提高了约11%,减载效果有所体现,从坝顶到坝底的开挖过程中,挖坡脚的作用明显,整体抗滑稳定安全系数降低了约23%;(3)总体来说,整个开挖过程中,挖坡脚的作用更为明显,完全开挖时安全度最低,为1.114,表明左岸关键滑块具有一定的整体抗滑稳定安全系数,但仍需辅以必要的支护措施,如设置混凝土抗剪洞等。

表5 左岸边坡整体稳定分析块体参数

Table 5 Parameters of left slope blocks

编号	块体边界 名称	特征参数		力学参数	
		产状	分区	c / MPa	f
1	NNW 向裂隙密集带	NW18°	A3	0.45	0.625
		SE65°	A2	0.35	0.575
2	断层 f_{42-9}	NE80°	B3	0.426	0.58
		SE48°	B2	0.02	0.30
3	IV 岩体	NE10°	A1	0.60	0.70
		SE15°	B1	0.60	0.70

表6 开挖过程中滑块整体抗滑稳定安全系数统计表

Table 6 Safety factors of slide block during excavation

开挖情况	滑动力合力 $/ 10^4 \text{ N}$	滑阻力合力 $/ 10^4 \text{ N}$	整体抗滑 稳定安全系数
未开挖	9 897 961	12 946 084	1.308
开挖至坝顶	8 046 160	11 707 859	1.455
完全开挖	6 568 481	7 315 734	1.114

5 结 论

通过本文的分析,说明了以下几个问题:

(1) 多重网格法的计算精度与有限元模型的网格疏密程度有一定关系,有限元模型网格越密,多重网格法结果越精确,但当模型网格加密至一定程度后,对多重网格法计算精度的影响会逐渐减小;

(2) 在有限元模型网格疏密程度一定的情况下,网格规则的有限元模型的整体计算精度比网格不规则的高;

(3) 在有限元模型网格疏密程度一定的情况下,滑面网格与模型网格疏密程度越接近,多重网格法的整体计算精度越高;

(4) 在有限元模型网格疏密程度一定的情况下,滑面为平面的整体计算精度比滑面为曲面的情况高。

因此,在运用基于三维多重网格法的强度校核法时,为了进一步改善精度,应该注意以下几点:

(1) 在有限元计算可容许的范围内,模型网格应适当加密;

(2) 进行有限元模型网格划分时,应尽量使用规则单元;

(3) 滑面网格划分时,不可过疏,也不必太密,以接近滑面所处位置附近的有限元网格的疏密程度为宜;

(4) 滑面尽量取平面,当滑面必须为曲面时,注意调整滑面网格,尽量使其接近附近的有限元网格疏密程度。

基于多重网格法的锦屏高边坡的稳定分析实例表明,该方法具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254—260.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254—260.
- [2] 弥宏亮, 陈祖煜, 张发明, 等. 边坡稳定三维极限分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2002, 5(23): 650—653.
MI Hong-liang, CHEN Zu-yu, ZHANG Fa-ming, et al. The 3D limit method for slope stability analysis and applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 5(23): 650—653.
- [3] 杨健, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 水电站进水口高边坡稳定

- 性三维极限分析[J]. 岩土力学, 2004, 6(25): 991—994.
- YANG Jian, WANG Yu-jie, CHEN Zu-yu, et al. 3D limit analysis of stability of high slope at intake of huge hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 6(25): 991—994.
- [4] 张均锋, 丁桦. 边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 365—370.
- ZHANG Jun-feng, DING Hua. Generalized 3D limit-equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 365—370.
- [5] 杨强, 陈新, 周维垣, 等. 推求拱坝极限承载力的有效算法[J]. 水利学报, 2002, (11): 60—65.
- YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan, et al. An effective method for evaluating ultimate bearing capacity of arch dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (11): 60—65.
- [6] 杨强, 朱玲, 刘福深. 高拱坝坝肩稳定分析中拉裂面的作用机理研究[J]. 水力发电, 2005, (7): 36—38.
- YANG Qiang, ZHU Ling, LIU Fu-shen. On working mechanism of tensional surfaces in abutment stability analysis of arch dam[J]. **Water Power**, 2005, (7): 36—38.
- [7] 杨强, 朱玲, 翟明杰. 基于三维非线性有限元的坝肩稳定刚体极限平衡法机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 403—3 409.
- YANG Qiang, ZHU Ling, ZHAI Ming-jie. On mechanism of rigid limit equilibrium method for abutment stability analysis of arch dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3 403—3 409.
- [8] 杨强, 朱玲, 薛利军. 基于三维多重网格法的极限平衡法在锦屏高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5 313—5 318.
- YANG Qiang, ZHU Ling, XUE Li-jun. Slope stability analysis based on 3D multi-grid method and its application to Jinping High Slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(S2): 5 313—5 318.

关于 2008 年第五届亚洲岩石力学大会的通知

由伊朗岩石力学学会 (IRSRM) 主办的第五届亚洲岩石力学大会 (ARMS 2008) 将于 2008 年 11 月 24~26 日在伊朗首都德黑兰国际会议中心举行。11 月 23~24 日将举行国际岩石力学学会 2008 年年会。本届会议将充分交流岩石力学和岩石工程领域的新进展和新成就, 为世界各地的专家、学者和工程技术人员提供高水平的论坛。中国首位 Rocha 奖获得者梁正昭博士的授奖仪式也在本届大会期间进行。

本届会议的主题是: “New Horizons in Rock Mechanics – Developments and Applications”(岩石力学发展和应用的新视野)。会议将围绕大会主题安排特邀报告、主题演讲和技术展览等一系列学术活动, 将涵盖以下内容: (1)实验室试验 (岩石特性); (2)地质调查; (3)岩体边坡稳定性; (4)地下工程稳定性; (5)地表改善; (6)岩石地基; (7)岩石动力学; (8)数值分析在地质力学中的应用; (9)岩石力学的耦合过程; (10)岩石力学和地球资源; (11)石质建筑材料/装饰材料; (12)仪器和监测系统; (13)岩石力学的新发展和新应用; (14)在地质力学方面的特别主题, 如: 在地下挖掘过程中煤气泄漏及处理; 岩石力学教育等。

会议注册费为 500 美元/人, 学生注册费为 300 美元/人; 陪同人员的费用和安排将随后通知。

会议论文: 大会组委会现正广泛征集论文, 请按组委会要求, 围绕上述主题提交 300 字左右的英文摘要, 以双倍行距的格式打印在 A4 纸上。为方便评审专家做出正确的评估, 选出合适大会主题的论文, 摘要应浓缩论文内容和结论。论文摘要请按照要求直接提交第五届亚洲岩石力学大会秘书处, 大会将不接受已发表过的论文。为掌握和统计我国学者提交论文情况, 以利于学会的组团工作, 请同时将论文发给我学会秘书处国际部一份以备案。

重要日期: (1)摘要提交截止日期: 2008 年 1 月 31 日; (2)摘要接受通知日期: 2008 年 2 月 28 日; (3)论文全文提交截止日期: 2008 年 5 月 31 日; (4)论文接受通知日期: 2008 年 8 月 31 日; (5)作者提前注册截止日期: 2008 年 9 月 31 日。

第五届亚洲岩石力学大会秘书处地址:

Secretariat of Iranian Society for Rock Mechanics (IRSRM)

c/o Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering,

Tarbiat Modares University, P.O Box No.14115-314, Tehran, Iran.

Tel./Fax: +98-21-88630482; Email: irsrm@modares.ac.ir

会议的相关信息, 可登陆大会网站查询 (www.irsrm.net, www.arms2008.org, www.arms5.org)。有关本届大会的进一步信息, 我学会将及时在学会网站上发布, 也可咨询学会国际部。

学会国际部联系电话: 010-8299-8164, 8299-8163; E-mail: csrme@163.com; 网址: www.csrme.com。

(摘自 中国岩石力学与工程学会网站)