

岩质斜坡复杂块体稳定性评价研究

王 猛,任光明

(成都理工大学环境与土木工程学院,成都 610059)

摘 要: 复杂块体具有多滑面、三维空间分布的特点。利用“等 K 法”进行刚体极限平衡分析的思路,将“等 K 法”延伸到三维空间。通过把复杂块体的多滑面、三维空间问题分解为若干子块的平衡;把复杂块体转换为若干楔体、及平面问题,使复杂问题简单化。根据这一思路,我们分析了某水电站库区高边坡复杂块体稳定性,工程实践证明,所建模型实用性较强。
关键词: 复杂块体;等 K 值法;三维空间;稳定性
中图分类号: P642. 2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006)02-0165-03

Studies on Evaluation of Complicated Block Stability on Rockmass Slope

WANG Meng, REN Guang-ming

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The complicated block have many characteristics such as too many sliding surfaces and distributing in three-dimensional space. The idea which make use of equivalence K method analysis rigid body limit equilibrium method, extend equivalence K method in three-dimensional space. Much passes to the complicated block questions of too many sliding surfaces and distributing in three-dimensional space resolve for equilibrium of some pieces; transform complicated block problem into some of cuneiform, flat surface problems, and the complicated problem turns in brief. According to that method, the stability of high slope of the hydroelectric power station in reservoir area is analyzed, the engineering practices prove that the model function set up is effective.
Key words: complicated block; equivalence K method; three-dimensional space; stability

某水电站的趾板轴线上游约 90 m,河流右岸岸坡上发育一斜坡,斜坡上部发育 F22、F20 断层,下部发育 Lj103 结构面。在 F22、F20 断层、Lj301 结构面及坡顶面和坡面共同切割下,斜坡构成不规则复杂块体(详见图 1)。通过查阅资料,目前用于边坡稳定性分析的方法大体上可分为定性分析和定量分析方法两大类。定性分析方法包括工程类比法和图解法,定量分析方法主要有极限平衡法、极限分析法及可靠度分析方法。对于块体稳定性评价,二维块体稳定性评价发展成熟,三维块体楔形体稳定性评价也比较成熟;但是对于图 1 的复杂块体还未见有相关文章对该类型块体稳定性作出定量评价。

1 斜坡地质条件概况

斜坡形态上为突出的山梁,坡度 40~45°,斜坡宽度 45~75 m,后缘高程约 1 853 m,前缘高程在 1 580~1 588 m 之间,坡高约 330 m,斜坡总体积约 67×10⁴ m³。斜坡主要为暗紫红色的厚层块状英安质凝灰岩和凝灰质砾岩。斜坡位于六坎沟向斜的南西翼,其走向为 NW280°~320°,向 SE 方向倾伏,倾角 28°~30°,向斜轴部在坝区河段约 10 斜跨河流。斜坡内岩层产状 NW315°~320°NE 55°~65°,走向与右岸岸坡呈 20~30°的小角度斜交,倾向坡外,偏向下游。受构造裂隙、风化及卸荷等影响,斜坡表生改造作用较强烈。在高程 1 640 m~1 670 m 以上岩体卸荷、松弛现象较强烈,斜坡裂隙多呈张开状,宽度 1~5 cm,岩体松动、拉裂变形较剧,岩

体总体呈次块状结构—碎裂结构、岩体完整性较差;对于高程 1 640 m 以下,据 PD15 平洞揭露,岩体多呈块状—次块状,岩体完整性较好。斜坡内地下水不发育,主要为裂隙水。斜坡上下游侧各发育一条冲沟,斜坡上游边界为 F22 断层,下游边界为 F20 断层,底滑面为 Lj301 结构面。

2 复杂块体稳定性评价方法

对于具有多个滑面的滑动岩体,在采用“等 K 法”进行刚体极限平衡分析时,一般认为通过相邻两个滑移面的交线存在一个错动面,这样就可以将一个复杂的整体平衡转化为若干子块的平衡。^[5]文献[5]只是对二维块体进行了分析,我们延伸到三维块体,即:复杂块体分成上部楔体和下部五面体两个子块进行分析。通过改变错动面倾角,取得不同倾角下稳定安全系数,利用优化方法,找出最小安全系数 K。

2.1 几何参数求解

首先建立一个空间直角坐标系,设 z 轴与重力方向相反(向上为 z 轴正向),x 和 y 分别为正东和正北方向。设结构面 n_i 的产状:倾角 α 和倾向 β_i,可求出 n_i 的向上单位法线矢量 n_i:
$$\hat{n}_i = (A_i, B_i, C_i) = (\sin\alpha \cdot \sin\beta_i, \sin\alpha \cdot \cos\beta_i \cdot \cos\alpha) \quad (1)$$
(A_i、B_i、C_i 为结构面法线方向的方向导数)。对于两结构面交棱线的矢量,即棱矢量 l_{ij}:

$$\vec{l}_{ij} = \vec{n}_i \times \vec{n}_j = \begin{vmatrix} x & y & z \\ A_i & B_i & C_i \\ A_j & B_j & C_j \end{vmatrix} = [(B_i C_j - B_j C_i), (A_j C_i - A_i C_j), (A_i B_j - A_j B_i)] \quad (2)$$

式中: $\hat{n}_i = (A_i, B_i, C_i)$, $\hat{n}_j = (A_j, B_j, C_j)$ 。

由空间解析几何可知, 空间平面的方程可表达如下:

$$A_i x + B_i y + C_i z = D_i \quad (3)$$

设 \vec{l}_i, \vec{l}_j 为块体的两棱矢量, 由矢量叉积: $\vec{l}_i \times \vec{l}_j = 2S_{ij}\vec{n}_{ij}$, 可求得:

$$S_{ij} = \frac{|\vec{l}_i \times \vec{l}_j|}{2 \cdot |\vec{n}_{ij}|} \quad (4)$$

式中: \vec{l}_i ——第 i 条棱的矢量表达式; \vec{l}_j ——第 j 条棱的矢量表达式; S_{ij} ——由棱设 \vec{l}_i, \vec{l}_j 构成的平行四边形面积; \vec{n}_{ij} —— S_{ij} 平面法向单位矢。三棱锥的体积 V_i :

$$V_i = \frac{1}{3} h_i S_i \quad (5)$$

式中: V_i ——第 i 个三棱锥的体积; h_i ——第 i 个三棱锥的高; S_i ——第 i 个三棱锥的底面积; 块体体积 V :

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (6)$$

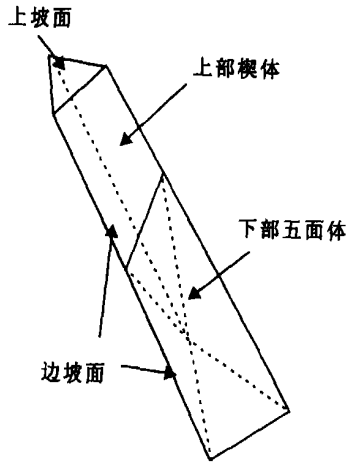


图 1 复杂块体整体模型

由 (8)、(9) 式解出 N_A 和 N_B :

$$N_A = A_1 G + A_2 T + A_3 V + A_4 S - U_A \quad (10)$$

$$N_B = B_1 G + B_2 T + B_3 V + B_4 S - U_B \quad (11)$$

$$A_1 = (m_{A,B} m_{G,B} - m_{G,A}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (12)$$

$$A_2 = (m_{A,B} m_{T,B} - m_{T,A}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (13)$$

$$A_3 = (m_{A,B} m_{V,B} - m_{V,A}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (14)$$

$$A_4 = (m_{A,B} m_{S,B} - m_{S,A}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (15)$$

$$B_1 = (m_{A,B} m_{G,A} - m_{G,B}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (16)$$

$$B_2 = (m_{A,B} m_{T,A} - m_{T,B}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (17)$$

$$B_3 = (m_{A,B} m_{V,A} - m_{V,B}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (18)$$

$$B_4 = (m_{A,B} m_{S,A} - m_{S,B}) / (1 - m_{A,B}^2) \quad (19)$$

设 S_{\downarrow} 为沿交棱线向下作用的下滑力:

$$S_{\downarrow} = m_{G,1} G + m_{V,1} V + m_{S,1} S \quad (20)$$

设 S_{\uparrow} 为沿交棱线向上作用的抗滑力:

$$S_{\uparrow} = c_A \cdot A_A + c_B \cdot A_B + N_A \cdot \tan(\varphi_A) + N_B \cdot \tan(\varphi_B) + m_{T,1} T \quad (21)$$

式中: c_A, φ_A ——滑面 A 的凝聚力和摩擦角, c_B, φ_B ——滑面 B 的凝聚力和摩擦角。上部楔体的稳定系数 F :

$$F = \frac{S_{\uparrow}}{S_{\downarrow}} \quad (22)$$

我们给定结构面的产状及相关点的坐标值, 通过 (1) ~ (6) 式, 我们可以建立各个面的空间平面方程, 同时可以求出错动面倾角为 α 时的复杂块体任意结构面的面积、高及体积等几何参数。

2.2 复杂块体稳定性分析的力学分析

这里, 我们设 $m_{\vec{n}_i, \vec{n}_j}$ 为向量 \vec{n}_i 在向量 \vec{n}_j 上的投影, 即该两向量的点积:

$$m_{\vec{n}_i, \vec{n}_j} = \vec{n}_i \cdot \vec{n}_j \quad (7)$$

对于楔体, 假定楔体底滑动的剪切力平行于交棱线, 下部块体对楔体作用力沿交棱方向向上。作用在楔体上的力有: 楔体的重量 G ; 楔体两侧有效法向反力, 设为平面 A 上的有效法向反力 N_A 和平面 B 上的有效法向反力 N_B ; 平面 A 上的上举力 U_A ; 平面 B 上的上举力 U_B ; 下部块体对楔体的作用力 T ; 由张裂缝中的水所产生的力 V ; S 水平地震力。将楔体上的力投影到 C 平面上 (C 平面为与交棱垂直的剖面), 可以得到以下方程:

$$(N_A + U_A) + m_{A,B}(N_B + U_B) + m_{G,A}G + m_{T,A}T + m_{V,A}V + m_{S,A}S = 0 \quad (8)$$

$$(N_B + U_B) + m_{B,A}(N_A + U_A) + m_{G,B}G + m_{T,B}T + m_{V,B}V + m_{S,B}S = 0 \quad (9)$$

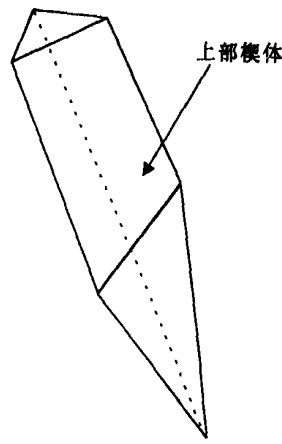


图 2 上部楔体模型

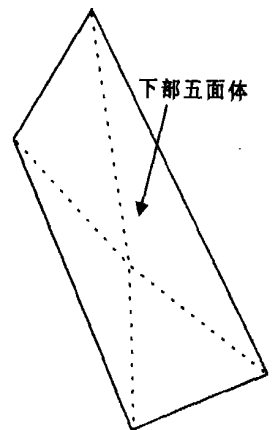


图 3 下部五面体模型

由 (21)、(22) 式可以求得下部块体对楔体的作用力 T :

$$T = \frac{F(m_{G,1}G + m_{V,1}V + m_{S,1}S) - (c_A \cdot A_A + c_B \cdot A_B + N_A \cdot \tan(\varphi_A) + N_B \cdot \tan(\varphi_B))}{m_{T,1}T} \quad (23)$$

假定下部五面体沿平面 D 滑动, 滑动方向为上部交棱线在平面 D 上的投影方向。作用在五面体上的力有: 五面体的重量 G_5 ; 底滑面 D 的有效法向反力 N_D ; 平面 D 上的上举力 U_D ; 上部块体对五面体的作用力 T ; S 水平地震力。将五面体上的力投影到 D 平面上, 可以得到以下方程:

$$N_D + U_D + m_{G,5}G_5 + m_{T,5}T + m_{S,5}S = 0$$

从中可以解出 N_D : $N_D = - (U_D + m_{G,5}G_5 + m_{T,5}T + m_{S,5}S)$ 。设 $S_{\downarrow 5}$ 为沿平面 D 向下作用的下滑力:

$$S_{\downarrow 5} = m_{G,5}G_5 + m_{T,5}T + m_{S,5}S \quad (24)$$

设 $S_{\uparrow 5}$ 为沿平面 D 向上作用的抗滑力:

$$S_{\uparrow 5} = c_D \cdot A_D + N_D \cdot \tan(\varphi_D) \quad (25)$$

式中: c_D, φ_D ——滑面 D 的凝聚力和摩擦角。五面体的稳定系数 F_5 :

$$F_5 = \frac{S_{\uparrow 5}}{S_{\downarrow 5}} \quad (26)$$

2.3 复杂块体稳定系数 K

通过上述(1) ~ (26) 式, 我们求出错动面为 α_i 时复杂块体稳定系数 K_i 。我们令错动面倾角作为设计变量, 取稳定安全系数为目标函数, 利用优化方法, 找出最小安全系数 K 及其对应的错动面倾角:

$$\begin{cases} K_i = K_i(\alpha_i) \\ K = \min K_i \end{cases} \quad (27)$$

通过(27) 式计算出最小安全系数 K , K 就是我们复杂块体的安全系数。

3 工程实例

3.1 计算参数

复杂块体主要由 F22、F20 及下部底滑面三个结构面及边坡面、顶面组成。现场勘查所得各面产状见表 1; 根据实验结果, 我们选取的结构面力学参数见表 2。

表 1 各面产状统计表

名称	F22 断层	F20 断层	Lj301	上下部分割面	坡顶面	边坡面
倾向	50 °	305 °	340 °	340		350 °
倾角	60 °	60 °	22 °	90	0 °	43 °

表 2 结构面力学参数

结构面名称	F20		F22		Lj301	
状态	天然状态	饱水状态	天然状态	饱水状态	天然状态	饱水状态
C /MPa	0.015	0.010	0.015	0.010	0.387	0.330
f	0.534	0.453	0.534	0.453	0.843	0.781

3.2 计算结果及分析

据上述方法, 按迭代法计算的不同工况下复杂块体的整体稳定性, 计算结果见表 3。

通过上述计算结果分析可知: 当错动面 $\alpha = 90$ 时, 复杂块体为最小安全系数; 斜坡在天然状态下不考虑地震力时处于基本稳定状态, 其稳定系数 $K = 1.43$, 当 $a = 0.145 g$ 时, 其稳定系数 $K = 1.19$; 当结构面饱水、不考虑地震力时, 其稳定系数 $K = 1.28$, 当 $K = 0.145 g$ 时, 其稳定系数 $K = 1.08$ 。

表 3 复杂块体稳定性计算结果

计算工况		稳定系数
错动面 $\alpha = 90^\circ$	天然状态	1.43
	天然状态+ 地震 $K = 0.145 g$	1.19
	饱水状态	1.28
	饱水+ 地震 $K = 0.145 g$	1.08

4 主要结论及认识

(1) 斜坡后缘发育有方向约 NE20 ° 宽 3.5 ~ 5 m、长 100 m 左右、错落台坎高 0.5 ~ 1.5 m 的拉张、陷落带;

(2) 在 1 655 ~ 1 670 m 高程以上, 斜坡上、下游侧边界结构面具明显的蠕滑变形迹象, 构造岩原始结构被破坏, 且变形体表部裂隙多呈张开状, 岩体松动、拉裂变形较剧烈;

(3) 在 1 655 ~ 1 670 m 高程以下在地表斜坡体的下游侧有锯齿状剪张性张裂缝的变形迹象, 张开宽度 5 ~ 10 cm, 在勘探平洞内三壁贯通的陡倾角拉张裂隙较发育。

(4) 尽管该斜坡体的后缘以及坡体的浅表部存在明显的拉裂、松动变形特征, 但在其下部目前还未形成明显贯通性滑移面、无显著变形的特征。

(5) 复杂块体模型计算结果: 复杂块体在天然或潜在滑动面饱水条件下, 其稳定性总体处于稳定状态, 但当考虑饱和和地震影响时, 处在极限平衡状态, 存在失稳的可能。

(6) 通过对实例分析, 我们所建立的复杂块体模型模拟了不同工况下斜坡的稳定性, 其结论基本符合地质宏观判断, 计算结果实用于工程建设要求。

参考文献:

[1] Donald I, Chen Z Y. Slope stability analysis by the up2 per bound approach: fundamentals and methods[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 853– 862.

[2] Goodman R E, Shi G H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering [M]. [s. l.]: Prentice – Hall International, Inc. , 1985.

[3] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定性分析——原理 · 方法 · 程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[4] 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.

[5] 梅明荣, 任青文. 基于优化理论的刚体极限平衡模型[J]. 长江科学院院报, 1996, 16(3): 17– 20.

[6] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.

[7] 陈祖煜. 潘家铮最大最小原理的证明[J]. 清华大学学报, 1998, (1): 6– 13.

[8] 孙玉科, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.

(上接第 144 页)

[17] M C Christie, K R Dyer, P Turner. Sediment flux and bed Level measurements from a macro tidal Mudflat [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(5): 667– 688.

[18] McQuoid, M R, Hobson L A. A Holocene record of diatom and silicoflagellate microfossils in sediments of Soanich Inlet, ODP leg 169s[J]. Marine Geology, 2001, 174: 111– 123.

[19] 高湘, 张建锋, 王华军, 等. 黄河泥沙的絮凝形态学和絮体构造模型问题[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 69– 73.

[20] 张红武, 赵连军, 王光谦, 等. 黄河下游河道准二维泥沙数学模型研究[J]. 水利学报, 2003, (4): 1– 7.

[21] 刘爱霞, 卢金发. 黄河中游悬移质泥沙粒径与流域环境的关系[J]. 地理学报, 2002, (2): 232– 237.

[22] 常军, 基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲海岸线动态变化监测与模拟预测研究[J]. 山东师范大学学报, 2001, (4): 26– 29.

[23] 吴永胜, 王兆印. 渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响[J]. 海洋科学进展, 2002, (2): 22– 30.

[24] 曹文洪, 何少苓, 方春明. 黄河河口海岸二维非恒定水流泥沙数学模型[J]. 水利学报, 2001, (1): 42– 48.

[25] 庞家珍, 姜明星, 李福林. 黄河口径流、泥沙、海岸线变化及其发展趋势[J]. 海洋湖沼通报, 2000, (4): 1– 6.

[26] 许炯心. 黄河下游泥沙淤积的经验统计关系[J]. 地理研究, 1997, 10(4): 234– 240.