

通过滑面应力状态评价滑坡稳定性

崔银祥¹, 聂德新¹, 岳良彬²

(1. 成都理工大学工程地质研究所, 四川 成都 610059; 2. 成都市勘察测绘研究院, 四川 成都 610081)

摘 要:以黄河上游某大型滑坡为例, 研究了有限元法在评价滑坡稳定性中的应用。具体操作过程是: 建立滑坡的有限元模型, 求出滑面上的应力状态, 计算滑面上总的抗滑力与总的滑动力之比, 最后评价滑坡的稳定性。通过对黄河上游某大型滑坡比较研究发现, 采用有限元法比传递系数法得出的稳定性系数高 0.07, 这种差异属允许差异范围。采用有限元法计算该滑坡在天然与地震两种条件下的稳定性系数分别为 1.14 和 1.1, 可以认为滑坡在两种条件下的稳定性较好。该方法原理正确、操作简单、结果可信度高, 有一定的适用价值。

关键词:有限元; 滑面应力状态; 稳定性评价

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

随着我国西部大开发的进一步推进, 滑坡灾害研究已成为水电、公路、铁路和采矿等工程项目的重要研究课题之一。以往的滑坡(边坡)稳定性计算主要采用刚体极限平衡法, 该方法在已建或在建的大量工程项目中发挥了巨大的作用, 但由于其本身的局限性, 无法确定滑坡(边坡)的变形、应力特征及对滑坡(边坡)稳定性的影响^[1, 2]。由于有限元计算可以较全面地研究岩体中各部位的应力状态, 可以获得各地段的变形状况, 可以设置节理单元研究弱面上的应力情况, 可以考虑孔隙水压力, 因此可以较为全面地表示滑坡的基本状况, 因而可以用来评价滑坡的稳定性。作者在几个大型滑坡与坝基深层抗滑稳定计算项目中, 对有限元法在滑坡稳定性评价中的应用进行了深入地探讨。关于有限元法研究滑坡应力、变形的文章已发表得较多, 这里仅就如何通过有限元法进行滑坡的稳定性评价作一介绍。

1 评价的基本原理

通过滑面应力状态评价滑坡(边坡)稳定性的方法跟一般的有限元计算类似, 建模时材料可选择线

弹性或非线弹性材料; 单元可采用等应变三角形或四边形单元, 滑面选用节理单元, 可以考虑地震、开挖、构造应力场等各种复杂工况与复杂的边界条件^[3]。通过模拟计算, 求出模型中各节点的应力值、位移值, 最后计算滑面上总的抗滑力与总的滑动力之比, 进而来求取安全系数。该方法称之为应力代数和比值法, 计算公式为

$$K_s = \frac{\sum f_i \sigma_i \Delta s_i + \sum c_i \Delta s_i}{\sum \tau_i \Delta s_i} \quad (1)$$

式中 f 为滑面上第 i 单元抗剪断摩擦系数; c 为滑面上第 i 单元粘聚力; σ 为滑面上第 i 单元法向应力(正应力); τ 为滑面上第 i 单元切向应力; Δs 为滑动面上第 i 单元长度; K_s 为计算得出的滑面上的稳定性系数。

可见该方法原理简单。实际操作过程中关键是根据野外详实的调查确定好边界条件; 根据试验资料准确给定材料的参数; 选择不同的工况(如天然、地震、局部开挖、水位变化等条件)下分别计算出滑面上的应力状态, 进而根据上式分别评价滑坡的稳定性状况。

收稿日期(Received date): 2004- 09- 11; 改回日期(Accepted): 2004- 12- 05。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(编号: 40372127)资助。[Supported by National Science Foundation of China (No. 40372127)]

作者简介(Biography): 崔银祥(1976-), 男, 山西忻州人, 成都理工大学地质工程专业博士研究生, 主要研究方向为岩土体工程特性。E-mail: cyx2010@163.com 联系电话: 028- 89856621, 13550380757 [Cui Yinxiang (1976-), male, born in Xinzhou City, Shanxi Province, P.H.D. candidate for Geology Engineering in Chengdu University of Technology. Research fields: Engineering properties of rock and soil mass]

2 工程实例

下面通过黄河上游某滑坡的实例评价来说明有限元法在滑坡稳定性评价中的应用。研究区滑坡体形态清楚,在平面上为一个不对称扇形,后缘有明显的圈椅状地形。滑坡前部宽度 800 m,中部宽度 650 m,后部宽度 200~ 240 m,纵向长度 900 m,最厚处为 150~ 160 m,滑坡体积约 $2\,100\times 10^4\text{ m}^3$ 。滑坡体、滑床及附近有以下几种岩性: ① 由长城系岩层下滑时解体的板岩碎块,构成滑坡的主体; ② 滑坡体表部堆积的黄土状粉土夹少量碎石,厚度 2~ 5 m。③ 滑床岩体为长城系板岩,局部夹有片岩,产状: $140^\circ\sim 190^\circ\angle 30^\circ\sim 65^\circ$; 优势产状: $160^\circ\angle 45^\circ$ 。④ 滑坡体前缘为冲积卵砾石层。

2.1 计算模型的建立

材料参数的选取是有限元法的关键之一,直接关系结果的精确程度。本次计算材料按弹性材料考虑,根据滑带土的室内试验结果,选取如下参数作为有限元计算参数(表 1)。滑床岩体(基岩)重度取 27.5 kN/m^3 ,滑体重度取 23.5 kN/m^3 ,第四系卵石层重度取 21.5 kN/m^3 。

表 1 滑带强度参数表

Table 1 Mechanical parameter of sliding soil

滑 带	水上参数		水下参数	
	$\phi(^{\circ})$	$C(\text{MPa})$	$\phi(^{\circ})$	$C(\text{MPa})$
主滑带	26.38	0.050	24.23	0.040
次滑带	24.23	0.040	21.80	0.035
河流冲积物	34.99	0.015	31.80	0.010

计算模型见图 1,主、次滑面均采用节理单元,其余为三角形单元,总节点数 681 个,总单元数 1 201 个。模型只考虑重力场(没有加构造应力场),边界条件为:上部为自由边界,左、右侧及底部光滑约束边界。

2.2 滑面的应力状态

通过计算,可以获得模型中各节点上的应力、变形值。在计算结果中提取主、次滑面的正应力、剪应力分布状况及量值(图 2、图 3)。图中的数字或阴影小方条的高度均代表量值的大小,从图中可以看出,正应力、剪应力的高值段在滑坡的中、下段,滑坡的后部及前缘应力值均较低,正应力、剪应力均在 1 MPa 以下。

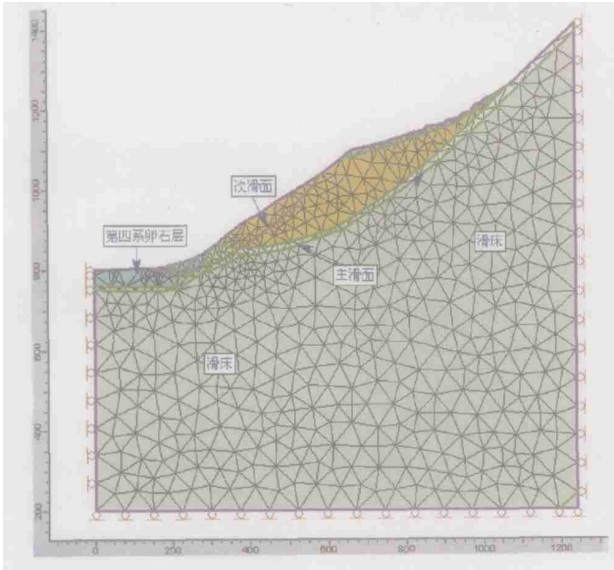


图 1 纵 1 剖面计算模型

Fig. 1 Calculating model of longitudinal profile 1

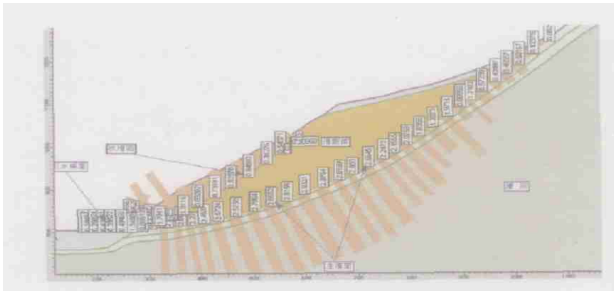


图 2 1 剖面滑面上正应力(MPa)

Fig. 2 Normal stress of sliding surface in longitudinal profile 1

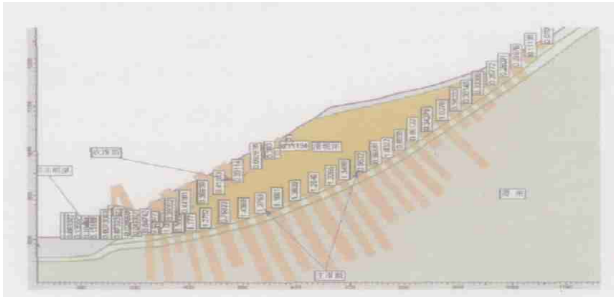


图 3 1 滑面上剪应力(MPa)

Fig. 3 Shear stress of sliding surface in longitudinal profile 1

2.3 滑坡稳定性计算与评价

在获得滑面的正应力(见图 2)、剪应力(见图 3)后,利用给定的强度参数值便可以计算出滑面上的总阻滑力和总下滑力,进而得到稳定性系数。表 2 是纵 1 剖面主滑面不同单元的座标、正应力、剪应力和滑动面上的抗滑力、滑动力。按照前面介绍的评

价滑坡稳定性的方法来评价滑坡的稳定性, 表 2 下部 K 为正常情况下稳定系数。

用同样的方法, 改变有限元模型的水平地震加速度, 重新计算滑面上的正应力、剪应力, 来评价滑坡在地震条件下的稳定性。计算得到考虑 γ° (地震烈度) 下的稳定性系数 $KDZ = 1.17$ 。

表 3 是有限元法计算得出的稳定性系数, 表 4 为通过剩余推力法计算得出的稳定性系数。从表

3、表 4 可以看出, 两种方法计算出的滑坡稳定性系数基本一致, 有限元法计算得出的稳定性系数较传递系数法高 0.07, 这种差异属于允许的差异, 因此, 值得应用。潘家铮院士曾比较过几个经典计算方法在稳定性系数上的差值, 其结果不同方法的差值达到 0.05~ 0.10 左右^[4]。用有限元计算与传递系数法评价该滑坡的稳定性也在此范围内, 因此有限元计算滑坡稳定性成果是可信的。

表 2 纵 1 剖面主滑面上应力及稳定性系数
Table 2 Stress and stability coefficient of main sliding surface in longitudinal profile 1

起点 X 坐标	起点 Y 坐标	终点 X 坐标	终点 Y 坐标	距离 (m)	正应力 (M Pa)	剪应力 (MPa)	Φ提供的 抗滑力	C提供的 抗滑力	滑动力
988.2	1180.3	966.2	1160.4	134.8	0.5	0.3	31.1	6.7	37.5
966.2	1160.4	947.0	1143.2	162.5	0.4	0.3	35.5	8.1	43.3
947.0	1143.2	915.0	1114.9	196.7	0.6	0.3	56.2	9.8	65.6
915.0	1114.9	901.1	1102.8	227.3	1.2	0.4	140.5	11.4	90.0
901.1	1102.8	875.4	1080.7	253.5	0.6	0.4	76.8	12.7	88.9
875.4	1080.7	851.8	1060.9	285.8	2.0	1.0	280.9	14.3	292.9
851.8	1060.9	819.6	1034.5	322.0	1.2	0.3	193.2	16.1	108.6
819.6	1034.5	799.7	1018.4	355.6	1.7	0.9	295.3	17.8	310.7
799.7	1018.4	770.8	995.5	386.9	2.1	1.0	401.4	19.3	371.9
770.8	995.5	751.0	980.7	417.7	2.2	1.1	449.0	20.9	441.7
751.0	980.7	729.8	966.2	442.9	2.3	1.0	500.2	22.1	429.8
729.8	966.2	694.6	944.5	476.4	2.7	0.9	633.2	23.8	451.6
694.6	944.5	669.7	930.4	511.4	2.8	1.4	722.6	25.6	692.3
669.7	930.4	644.4	917.0	540.0	2.8	1.3	758.0	27.0	713.5
644.4	917.0	607.5	898.5	575.0	2.9	1.3	827.9	28.7	726.3
607.5	898.5	572.8	882.3	614.7	2.8	1.4	872.3	30.7	850.6
572.8	882.3	540.9	868.5	651.2	2.8	1.2	915.2	32.6	757.6
540.9	868.5	512.2	857.0	684.1	2.9	1.3	977.3	34.2	872.8
512.2	857.0	477.9	844.5	717.8	2.8	1.4	1007.9	35.9	1035.6
477.9	844.5	439.8	832.1	756.1	2.6	0.7	972.7	37.8	562.9
439.8	832.1	408.9	823.7	792.2	2.6	1.3	1011.0	39.6	1015.9
408.9	823.7	386.0	819.6	819.8	2.5	1.2	1014.1	41.0	985.2
386.0	819.6	365.1	816.4	842.0	2.2	0.3	932.5	42.1	275.4
365.1	816.4	339.2	813.9	865.6	2.0	1.1	887.2	43.3	923.4
339.2	813.9	314.2	813.5	891.1	2.3	0.8	1007.6	44.6	729.2
252.5	828.3	256.2	826.1	2.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3
256.2	826.1	269.7	821.6	11.5	0.4	0.1	2.4	0.6	1.0
269.7	821.6	285.0	817.6	26.5	1.0	0.3	13.8	1.3	9.2
285.0	817.6	301.5	813.7	42.9	0.7	0.4	14.0	2.1	16.0
314.2	813.5	301.5	813.7	6.3	2.3	1.2	7.2	0.3	7.5
							15037.1	650.6	12907.1
K = 1.21									

表 3 有限元分析评价纵 1 剖面稳定性系数

Table 3 Stability coefficient of longitudinal profile 1 by finite element method

滑带	天然状态	天然状态(地震)
纵 1- 主滑带	1.21	1.17

表 4 剩余推力法计算纵 1 剖面的稳定性系数

Table 4 Stability coefficient of longitudinal profile 1 by limit equilibrium method

滑带	天然状态	天然状态(地震)
纵 1- 主滑带	1.14	1.1

利用有限元方法,对滑坡在天然条件与地震条件下分别评价其稳定性,稳定性系数分别为 1.14 和 1.10,可以认为该滑坡在天然条件以及地震条件下稳定性较好。

3 结论

本文以黄河上游某大型滑坡为例,研究了有限元法在评价滑坡稳定性中的作用,得出以下认识:

1. 通过有限元法评价黄河上游某滑坡在天然、地震条件下是稳定性的,评价结果与剩余推力法评价结果基本一致;

2. 有限元法可以用于滑坡稳定性计算,其结论与刚体极限平衡法(本文中采用了剩余推力法)基本一致,而刚体极限平衡法的计算结果已被广泛接受,所以有限元法的结果具有较高的可信度。

3. 有限元法不仅可用于简单边界条件的滑坡稳定性计算,还可用于边界条件复杂的滑坡的稳定性评价,在计算滑坡稳定性的同时,也得到了整个滑

体周围的应力场与变形场,这些有利于对滑坡整体稳定性的把握。

参考文献(References):

- [1] Zhan Jun, Yu Qingyang. Finite element method applying to stability analysis of landslide[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2002, **30**(1): 45~ 47. [詹军,于清杨.有限元法在滑坡稳定性分析中的应用[J].*煤田地质与勘探*, 2002, **30**(1): 45~ 47]
- [2] Yang Jing, He Jiangda, Hu Dejin. Contrast of slice-method with Finite Element Method for earth slope stability analysis[J]. *Sichuan Water Power*, 2003, **22**(1): 27~ 29[杨静,何江达,胡德金.土质边坡稳定分析中条分法与有限元法的比较[J].*四川水力发电*, 2003, **22**(1): 27~ 29]
- [3] Editor Committee of Hydropower Engineering in China. Hydropower Engineering in China (Hydraulic Structures) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000. 8[《中国水力发电工程》编审委员会.中国水力发电工程(水工卷)[M].北京:中国电力出版社,2000. 8]
- [4] Pan Jiazhen. Stability against sliding of constructions and landslide analysis[M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980[潘家铮.建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M].北京:中国水利出版社,1980.]

Landslide Stability Assessment by Stress State on Sliding Surface

CUI Yinxiang¹, NIE Dexin¹, YUE Liangbin²

(1. Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Chengdu Institute of Surveying and Exploring, Chengdu 610081, China)

Abstract: This paper took a landslide in upstream of Huanghe River for an example, and studied finite-element method application in landslide stability assessment. First, created finite-element model, then calculated stress of sliding surface, at last, calculated ratio of total resistance force and total sliding force on sliding surface and assessed the stability of the landslide. By comparison studying of this landslide, stability coefficient by finite-element method was 0.07 higher than by limit equilibrium method, and this difference was allowable difference. The stability coefficients of landslide were 1.14 and 1.10 in nature and earthquake conditions by finite-element method, and these results proved that the landslide was stable in these two conditions. This method had correct principle, simple operation and high credence results.

Key words: Finite-element method, stress state on sliding surface, stability assessment