

用干扰能量法模拟边坡失稳过程

The unstabilization process of slope simulated by disturbing energy method

赵进勇¹, 章青², 邵国建², 卓家寿²

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪减灾研究所, 北京 100038; 2. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在土体非线性有限元分析的基础上, 采用干扰能量法对边坡失稳过程进行了模拟。结合长江下游某岸坡滑塌实例, 通过逐级非线性有限元分析和用干扰能量法进行稳定评判, 确定了各阶段的稳定薄弱部位和潜在滑体, 进而实现了对岸坡失稳过程的模拟。计算结果与实测结果相比符合性良好。

关键词: 土体非线性; 有限元; 干扰能量法; 稳定; 边坡

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)03-0367-04

作者简介: 赵进勇(1976-), 男, 山东聊城人, 1998年毕业于华北水利水电学院水电建筑工程专业, 获学士学位, 2001年毕业于河海大学防灾减灾工程及防护工程专业, 获硕士学位。现为中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所助理工程师。近期主要从事防洪减灾、岩土工程等方面的技术研究及工程实践工作。

ZHAO Jin-yong¹, ZHANG Qing², SHAO Guo-jian², ZHUO Jia-shou²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of non-linear finite element analysis, the unstabilization process of slope was simulated by disturbing energy method in the thesis. Combined with some slope on the Yangtse River, the weak part and latent slide wedge are determined in different stage by non-linear finite element analysis and disturbing energy method, thus the unstabilization process of slope is simulated. The calculated result agrees fairly with the measured result.

Key words: non-linear; finite element method; disturbing energy method; stability; slope

1 引言*

在对工程结构进行稳定分析时, 传统的方法是静力分析法, 它以考察体的阻滑力和滑动力的比值大小作为判据来确定所考察体是否失稳。由于力是矢量, 应用静力分析法在推导公式和计算时, 必须遵循矢量法则, 其过程相当繁琐, 尤其对三维问题更为复杂。此外, 该法还需事先人为确定最危险滑动面, 而最危险滑动面的确定具有相当大的难度。干扰能量法是根据系统的能量准则, 以考察体受扰动后产生的干扰能量值作为判据去确定考察体是否稳定的一种方法^[1]。由于能量是标量, 无需考虑方向性问题, 所以推导和运算极为简便。此外, 该法还可应用代数叠加方法迅速得到考察体内任意一部分, 甚至整体的干扰能量值, 从而判断考察体是否稳定, 并找出考察体内局部稳定性薄弱部位。

结合长江下游某岸坡工程, 对边坡逐级进行了土体非线性有限元计算, 得到边坡的应力应变状态, 并在此基础上, 分别进行了相应的干扰能量计算, 对边坡的失稳过程进行了探讨。

2 干扰能量法基本原理

2.1 工程稳定的力学机理

工程稳定问题的力学机理与变形体的稳定性类

似。对于任一变形体, 假设系统总势能为 Π_p 。由文献[2]知, 可用总势能的二阶变分来判别系统的稳定状态: 当 $\delta^2 \Pi_p > 0$ 时, 稳定状态; 当 $\delta^2 \Pi_p = 0$ 时, 临界状态; 当 $\delta^2 \Pi_p < 0$ 时, 失去稳定。

设 $\Pi_p(u_i^0)$ 为考察体在原有平衡位置的总势能, $\Pi_p(u_i^0 + \delta u_i)$ 为考察体受到 δu_i 干扰位移后的总势能, $\Delta \Pi_p$ 则为相应于干扰位移引起的干扰能量, 由台劳基数展开:

$$\Delta \Pi_p = \Pi_p(u_i^0 + \delta u_i) - \Pi_p(u_i^0) \approx \delta \Pi_p + \frac{1}{2} \delta^2 \Pi_p \quad (1)$$

因扰动前的总势能具有驻值, 即 $\delta \Pi_p = 0$, 故有

$$\Delta \Pi_p \approx \frac{1}{2} \delta^2 \Pi_p \quad (2)$$

$\Delta \Pi_p$ 为受干扰位移后系统势能的改变量, 所以为一种干扰能量。假设存在某种形式的干扰位移使得 $\Delta \Pi_p < 0$, 则可以得出系统处于不稳定状态的结论; 但是若存在某种形式干扰位移使得 $\Delta \Pi_p > 0$, 并不能得到系统处于稳定状态的结论。须寻找最不利干扰位移(使 $\Delta \Pi_p$ 最小), 然后计算出最小干扰能量, 对系统进行稳定判别。

2.2 干扰能量的表达式

考虑计入几何非线性效应,可推得干扰能量的有限元格式为^[1]

$$\Delta \Pi_p = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{\Omega} \left(\Delta \underline{e}^T \underline{\sigma}^0 + \frac{1}{2} \Delta \underline{\varepsilon}^T \Delta \underline{\sigma} \right) d\Omega - (\Delta \underline{\delta}^e)^T \underline{R}_e^0$$

$$= \Delta U - \Delta W$$

式中

$$\Delta U = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{\Omega} \left(\Delta \underline{e}^T \underline{\sigma}^0 + \frac{1}{2} \Delta \underline{\varepsilon}^T \Delta \underline{\sigma} \right) d\Omega \quad (3)$$

$$\Delta W = \sum_{e=1}^{N_e} (\Delta \underline{\delta}^e)^T \underline{R}_e^0 \quad (4)$$

$\underline{\sigma}^0, \underline{R}_e^0$ 分别为原有状态的应力和荷载; $\Delta \underline{\delta}^e, \Delta \underline{e}, \Delta \underline{\varepsilon}$ 和 $\Delta \underline{\sigma}$ 分别为干扰位移增量、应变增量、小变形应变增量及应力增量; ΔU 表示干扰后贮存在物体内的变形能增量,它使系统恢复原位,称之为干扰内能; ΔW 表示外力在干扰位移中所作的功,它将减少系统的能量。

当 $\Delta W > \Delta U$ 时,系统将出现动能而导致失稳;当 $\Delta W = \Delta U$ 时,系统处于临界状态;当 $\Delta W < \Delta U$ 时,系统除去干扰后可恢复原位,系统稳定。

基于几何非线性有限元格式及虚功原理,可得干扰能量的计算式:

$$\Delta \Pi_p = \sum_{e=1}^{N_e} \left[\frac{1}{2} (\Delta \underline{\delta}^e)^T \underline{k}_{ep} \Delta \underline{\delta}^e + \frac{1}{2} (\Delta \underline{\delta}^e)^T \underline{k}_{\sigma} \Delta \underline{\delta}^e \right] \quad (5)$$

式中 $\underline{k}_{ep} = \int_{\Omega} \underline{B}^T \underline{D}_{ep} \underline{B} d\Omega$, 为单元弹塑性刚度矩阵; $\underline{k}_{\sigma} = \int_{\Omega} \underline{G}^T \underline{M} \underline{G} d\Omega$, 为单元几何刚度矩阵或初应力刚度矩阵。

2.3 最不利干扰位移的确定

在干扰能量的求解过程中,寻找最不利干扰位移是非常关键的。考虑到这一位移必须使干扰能量 $\Delta \Pi_p$ 得到极小值,并且满足位移协调条件,选取具有待定系数的振型函数的叠加作为干扰能量试函数,然后根据极值原理求出待定系数,最终确定最不利干扰位移。

3 干扰能量法在工程稳定分析问题中的应用

3.1 稳定安全系数的求解

采用能量的观点可得如下的稳定安全系数:

$$K_s = \frac{\Delta U}{\Delta W} \quad (6)$$

由于干扰能量是标量,可方便地进行局部和整体

稳定性的分析。若以一个单元为考察对象,计入相邻单元的作用力,可得 ΔU^e 和 ΔW^e , 则该单元的稳定安全系数 $K_s^e = \frac{\Delta U^e}{\Delta W^e}$; 若考虑某一部分的稳定性,只需在上述基础上进行代数相加,便可得到相应的稳定安全系数。

3.2 工程薄弱部位的确定

进行工程稳定分析时,可基于有限元的计算结果用干扰能量法求出每个单元的干扰能量值、安全系数值,然后分别作出相应的等值线图,则最小值曲线经过的区域即为工程薄弱部位。

4 边坡失稳过程的模拟

长江下游某岸坡高 19.8 m, 坡角约为 50°, 主要由淤泥质黏土、淤泥质亚黏土等组成^[3], 1998 年 2 月进行观测时,发现了滑塌现象。

一般地,边坡的失稳破坏并不是瞬间发生的,而是一个由局部破坏逐渐扩展,最终贯通形成滑面的渐进过程^[4]。由于材料本身及外部因素的影响,坡体中的应力分布往往出现局部的应力集中现象,当应力超过材料允许强度时,其状态不稳定,必然导致局部破坏,而一旦发生局部破坏,必然发生应力释放、应力转移和应力重新调整,而破坏区的邻近区域所受影响最大,该部位可能由原来的没有超过强度值转变为超过强度值而发生破坏,并进行应力释放,又把多余荷载转移到其他部位,这一过程反复进行,破坏面会不断延伸。考虑到本例岸坡所处地段的河流冲刷作用较强,在发生局部破坏后,如果破坏单元和水流接触,则很容易被水流冲走,从而导致结构重新调整,岸坡的应力状态也会发生相应变化。

为此,首先采用非线性有限元对边坡进行数值分析,然后利用其计算结果,用干扰能量法得到边坡各单元的干扰能量及安全系数值,进而根据干扰能量及安全系数的等值线图确定边坡的薄弱部位,然后挖除掉薄弱部位单元,对边坡重新进行数值分析,这种过程反复进行 3 次,从而对边坡的失稳过程进行了数值模拟,最后得到边坡的状态面。

4.1 第一次干扰能量计算

图 1 给出考察体的干扰能量等值线(图中干扰能量单位: t·m, 以下同)。

根据干扰能量原理,当某单元的干扰能量值比其他部位小时,将其作为潜在滑动面的组成部分,画出干扰能量值接近、小于或等于零部位的等值线图,如图 2 所示,由图可见,河床底部、河床突出部分的部分区域及右边岸坡的部分区域为薄弱部位,河床底部与突出

部位发生剪切破坏,右边岸坡的部分区域发生受拉破坏,这些部位均位于最危险滑面附近。

基于干扰能量的计算结果,可得每个单元的安全系数。图3给出了第一次计算时的单元安全系数等值线图。图中所示等值线的安全系数均小于等于1.0。

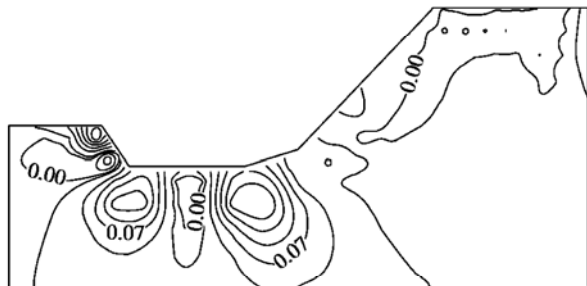


图1 干扰能量等值线图

Fig. 1 Isoline of disturbing energy

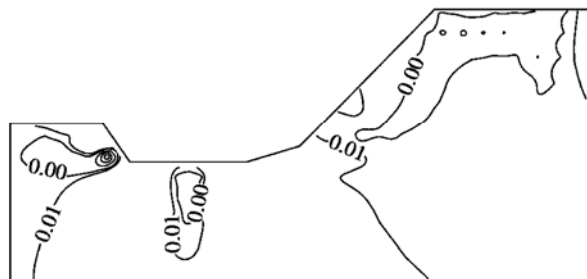


图2 干扰能量等值线图(干扰能量值接近,小于或等于零)

Fig. 2 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

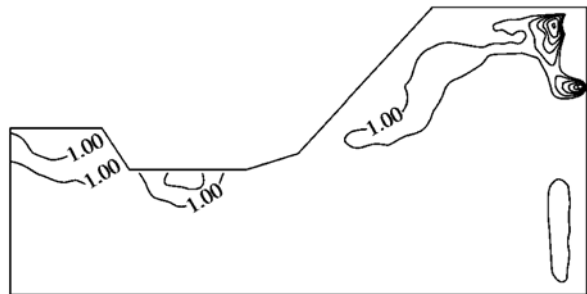


图3 第一次计算单元安全系数等值线

Fig. 3 Isoline of safety factor in the first computation

若安全系数小于等于1,认为此单元接近或已经进入破坏状态。比较图3与图2的等值线可以看出:安全系数小于等于1的区域和干扰能量值接近、小于或等于零的区域基本一致,说明干扰能量法在定性上是合理的。

4.2 第二次干扰能量计算

由图2、图3反映的干扰能量及安全系数分布情况,挖除接近破坏的各单元,对边坡再次进行有限元分析,进而得到各单元的干扰能量值及安全系数值,其等值线图分别如图4、图5及图6所示。

对比分析图5与图6可以看出,图5给出的干扰能量较小值区域与图6给出的安全系数较小值区域是比较类似的。

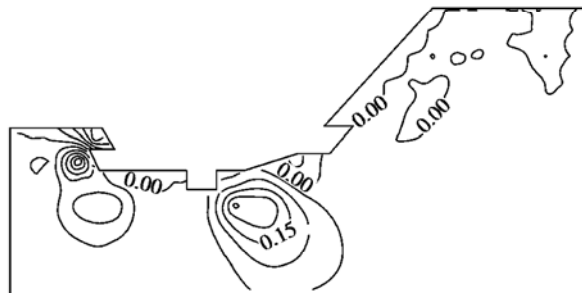


图4 干扰能量等值线图

Fig. 4 Isoline of disturbing energy

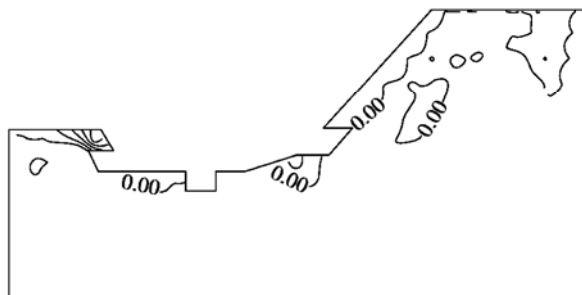


图5 干扰能量等值线图(干扰能量值接近,小于或等于零)

Fig. 5 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

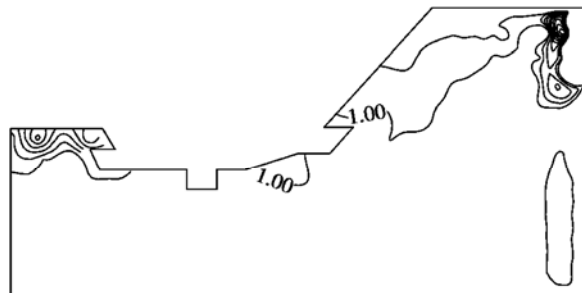


图6 干扰能量等值线图(干扰能量值接近,小于或等于零)

Fig. 6 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

4.3 第三次干扰能量计算

同样地,挖除第二次计算给出的接近破坏各单元,进行第三次有限元及干扰能量计算。得到的单元干扰能量等值线、安全系数等值线分别见图7、图8及图9。

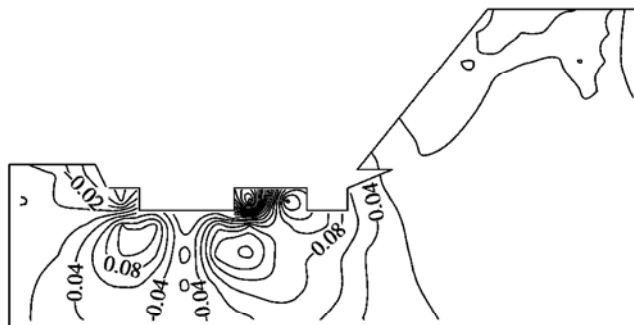


图7 干扰能量等值线图(干扰能量值接近,小于或等于零)

Fig. 7 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

将图8与图9进行对比可知,两图给出的破坏区也基本一致。

由第三次计算得到的单元干扰能量及安全系数等

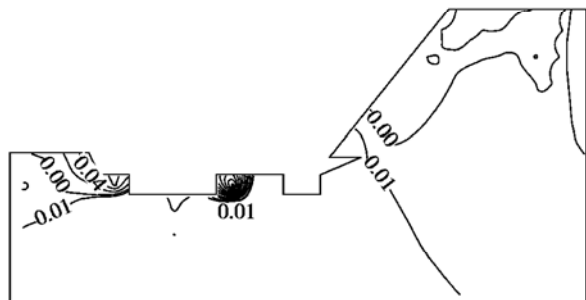


图 8 干扰能量等值线图(干扰能量值接近、小于或等于零)

Fig. 8 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

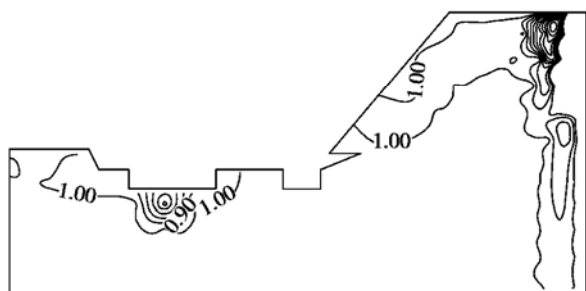
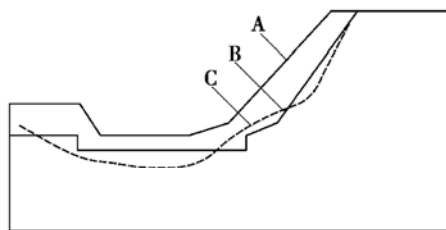


图 9 干扰能量等值线图(干扰能量值接近、小于或等于零)

Fig. 9 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)



A—岸坡初始表面 B—干扰能量法得到的岸坡最后状态面
C—观测结果

图 10 干扰能量等值线图(干扰能量值接近、小于或等于零)

Fig. 10 Isoline of disturbing energy(approach or equal zero)

值线图可知,在河床底部、右岸坡面等部位的部分单元接近破坏状态,这些单元都具有临空面,故很可能产生

滑移;破坏区主要是由河床底部剪切破坏和右边岸坡部分受拉破坏组成,且相互影响,最后形成贯通,造成整体破坏。

经三次分析得到的岸坡最后状态和工程最后的观测结果相比基本是相符的,如图 10 所示。

5 结 语

基于能量原理的干扰能量法利用有限元计算结果能给出每个单元的干扰能量值及安全系数值,由单元的干扰能量值或安全系数值分布情况可方便地确定边坡的薄弱区域,还可通过多次计算大致模拟岸坡的失稳过程,使有限元法在土工数值模拟计算中能够发挥出更大的作用。算例表明该法的计算成果与工程实测结果在定性上是一致的。可见,干扰能量法为边坡稳定分析开辟了一个新的途径。

但因有限元分析过程中存在一些简化假定,而实际情况错综复杂,从而导致对某些作用不能全面反映,如河流冲刷、降雨入渗、孔隙压力等,使得分析结果存在一定的误差;另外,模型选取等因素在一定程度上同样也会影响最后结果。如何减小这些误差是值得深入研究的问题。

参考文献:

- [1] 卓家寿,邵国建,陈振雷. 工程稳定问题中确定滑塌面、滑向与安全度的干扰能量法[J]. 水利学报, 1997, (7): 80-84.
- [2] 卓家寿. 弹塑性力学中的广义变分原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [3] 赵进勇. 滑坡问题的数值分析、神经网络预测及智能整治研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [4] 刘 钧. 可变网格的有限单元分析在边坡稳定计算中的应用[J]. 工程地质学报, 1995, 3(2): 54-59.

“理正岩土工程系列软件”通过水利水电规划设计总院的科技成果评审

北京理正软件设计研究院有限公司研制开发的“理正岩土工程系列软件”已于 2002 年 3 月 26 日通过水利部水利水电规划设计总院组织的科技成果专家评审。

“理正岩土工程系列软件”拥有国产自主知识产权,是国内唯一能综合处理土(岩)质边坡稳定分析、挡土墙设计、软土地基处理及沉降分析;自动设计构件截面,优化设计;处理各种复杂土质条件,解决多极值最小安全系数判别的系列软件。该系列软件填补了国内没有同类大型专业、实用、商品化软件的空白。“理正岩土工程系列软件”自开发以来,以其先进的计算方法,友好的界面,与水利行业规范紧密结合的特点,深受广大水利工程

设计人员的青睐,并已被广泛应用于全国近百个水利工程当中。

主持本次评审的评审组由来自水利部、水科院、各地水利设计单位的十多位专家组成,专家们对“理正岩土工程系列软件”——《边坡稳定分析系统》、《软土地基路堤、堤坝设计软件》、《渗流分析软件》、《挡土墙计算软件》、《边坡滑坍抢险设计软件》、《抗滑桩(挡墙)设计软件》和《岩质边坡稳定分析软件》给予了高度的评价,认为“理正岩土工程系列软件”具有较高的实用价值,总体上达到了国内领先水平,可以在水利水电行业中推广应用。”评审专家热切的希望北京理正软件设计研究院不断创新,锐意进取,打造出具有中国特色的民族软件品牌。

(北京理正软件设计研究院 供稿)