

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-136-05

顺层路堑边坡锚杆支护稳定性的有限元模拟分析

龚文惠, 刘 涛, 黄燕宏

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘 要: 基于理想弹塑性本构模型和 Drucker-Prager 准则, 运用 ANSYS 软件和有限元数值模拟技术, 建立了顺层岩体边坡的有限元分析模型。结合沪蓉国道主干线宜昌至恩施公路白氏坪-榔坪段顺层路堑高边坡工程实例, 对顺层岩体路堑边坡布设锚杆支护前后的应力、变形和稳定性进行了模拟分析。分析比较表明, 锚杆支护结构可以减小边坡临界状态下的最大位移、增大最危险接触面的摩擦力和提高边坡的稳定性系数, 从而能有效地提高边坡的稳定性以防止顺层滑坡的发生。

关 键 词: 顺层岩体路堑边坡; 稳定性; 锚杆支护; 有限元法; 强度折减法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Simulation analysis of finite element on stability of bedding rock cutting slope supported by anchor structure

GONG Wen-hui, LIU Tao, HUANG Yan-hong

(College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on perfect elastoplastic constitutive model and Drucker-Prager yield criterion, and using ANSYS software and finite element numerical simulation technology, a finite element analysis model for bedding rock cutting slope is established. The stress, deformation and stability of the bedding rock cutting slope before and after supported by anchor are simulated and analyzed for the high bedding rock cutting slope engineering from Baishiping to Langping in Yichang to Enshi highway in the HU-RONG national main trunk. The analysis and comparison indicate that the maximum displacement of the slope at critical state is reduced; the friction force on the most dangerous contact surface is increased; and the stability coefficient is raised when the slope is supported by anchor. So the stability of the bedding rock cutting slope can be improved to protect the slope from bedding sliding.

Key words: bedding rock cutting slope; stability; anchor support; finite element; strength reduction method

1 前 言

在山区公路建设中层状岩质边坡的稳定性问题普遍而突出。顺层滑坡和一般滑坡的主要不同点在于, 其滑动面为岩体中比较软弱的岩层面或软弱夹层面。当地表水浸入使软弱夹层强度降低, 或坡体前缘开挖形成临空面时, 顺层斜坡上的岩土体在重力作用下, 沿某一软弱带或软弱面发生整体或局部的向下移动而形成顺层滑坡现象^[1]。因此, 对顺层岩体边坡采用工程手段进行支护, 以防止滑坡现象的发生具有重要的实际意义。

本文以沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施公路白氏坪-榔坪段顺层路堑高边坡为例, 建立了顺层岩体路堑边坡的有限元分析模型, 运用 ANSYS^[2]软件

和有限元法数值模拟技术, 对顺层岩体路堑边坡在布设锚杆前后的应力、变形以及稳定性进行了模拟分析和比较。

2 边坡稳定性弹塑性有限元法分析

2.1 弹塑性有限元法的原理^[3]

用有限元法分析岩体边坡的稳定性通常包括三个方面内容, 即分析边坡内的力学状态、了解边坡岩体的变形破坏机制以及在一定的破坏判别标准下评价边坡的稳定性。根据物理的近似, 首先将连续边坡体用网格划分为有限数目的单元, 从而用离散结构来代替原来的连续体结构。在满足相邻单元变形相容条件、单元上力的平衡条件(应力-应变关系)的前提下将荷载积移置作用于离散结构的结点上,

收稿日期: 2005-03-28

作者简介: 龚文惠, 女 1966 年生, 博士, 副教授, 从事岩土力学、地基处理和边坡稳定方面的研究。E-mail: gwh87806869@163.com

成为结点荷载。

对于弹塑性问题的处理,当材料应力-应变关系是非线性时,刚度矩阵是与应变和位移有关的非常量,可记为 $[K(\delta)]$,则结构的整体平衡方程为非线性方程组:

$$[K(\delta)]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

非线性问题可以采用直接迭代法、切线刚度法和初应力法等迭代法求解。在每次迭代的过程中通过逐步修改位移和应变,使之满足非线性的应力-应变关系。

本文用弹塑性有限元法求解边坡稳定问题时采用了理想弹塑性模型,并采用 Drucker-Prager 准则:

$$f^* = \beta I_1 + \sqrt{J_2} = k_f \quad (2)$$

式中 I_1, J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量; β, k_f 为与岩土材料内摩擦角 φ 和凝聚力 c 有关的常数。屈服面在 π 平面上为不等角度的六边形的内切圆。

2.2 强度折减法求解稳定安全系数的思路

强度折减有限元分析法求解边坡安全系数的原理^[4]是:首先选取折减系数对岩体强度参数进行折减,将折减后的参数输入进行有限元计算,若程序计算收敛,则边坡处于稳定状态,再逐渐增大折减系数,直到计算不收敛为止,此时的折减系数即为边坡的稳定安全系数 k_s ,相应的滑移面即为最危险滑移面。

按强度折减原理,式(4)所示的屈服准则表示为

$$f^* = \frac{\beta}{k_s} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k_f}{k_s} \quad (3)$$

3 顺层岩体层间接触面分析

由于顺层的滑动面为岩体中比较软弱的岩层面或软弱夹层面,故本文用接触单元来模拟边坡中的主控结构面(对边坡稳定性起主要控制作用)。对于接触问题的分析,为了阻止接触表面相互穿过,这

两个表面间必须建立一种关系,这种关系称为接触协调条件。例如用一个弹簧施加接触协调条件称为罚函数法。弹簧刚度或接触刚度称为罚参数。该弹簧的变形量 Δ 满足方程:

$$F = K\Delta \quad (4)$$

接触刚度 K 越大,接触表面的侵入越少。然而,若该值太大,会导致收敛困难。

还可用另外一种方法,即 Lagrange 乘子法。增加一个附加自由度(接触压力),以满足不侵入条件。将罚函数法和 Lagrange 乘子法结合起来施加接触协调条件合称为增强的 Lagrange 法^[4]。在迭代的开始,接触协调条件基于罚函数刚度决定。一旦达到平衡,就检查许可侵入量,这时如果有必要,接触压力增大,继续进行迭代。Ansys 进行接触问题的计算正是用的这种方法^[3]。

4 边坡支护前后稳定性模拟分析

4.1 基本条件

以沪蓉国道主干线宜昌至恩施公路白氏坪-榔坪段顺层岩体路堑高边坡为例进行分析。坡高 19.83 m,开挖面积为 324.95 m²。岩层以青灰色弱风化瘤状泥质灰岩为主,厚度为 34.3 m,岩层产状为 0° < 25°。岩石的力学强度参数的计算取值如表 1 所示。结构面强度参数: $c=23$ kPa, $\tan\varphi=0.16$ 分析时考虑到破坏主要是集中在坡脚处,故在坡脚附近顺层层厚近似取为相等(为 0.6 m),层数取 8 层,在远离坡脚处岩层厚度适当增大。

4.2 支护结构设计

支护锚杆位置设置在第二次开挖的坡面上,采用 $\phi 33$ mm 螺纹钢,锚杆入土深度为 12 m,锚杆间距为 2 m×2 m,采用梅花型分 5 排垂直布置于坡面,具体布置范围如图 1 所示^[6]。

对于整个路堑边坡的坡面采用高压素喷混凝土护面,由于岩层是坚硬的岩石,破坏主要是由于层间的滑动所造成的。而铺设锚杆后层间的滑动错

表 1 顺层边坡岩石参数的计算值
Table 1 Calculating values of parameters of bedding slope

材料号	岩性	密度 ρ /g·cm ⁻³	泊松比 μ	弹性模量 E /GPa	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)
1	残坡积层及强风化层	2.5	0.35	1.5	15	22
2	弱风化层	2.6	0.25	9.5	1 000	32
3	锚杆与土体形成的加固区	2.6	0.30	6.5	1 000	35

位得到了有效的抑制。这样锚杆和岩体在边坡上形成一个加固区，加固区的参数见表 1。根据实测，加固区与非加固区之间的结构面保守强度参数： $c=32\text{ kPa}$, $\tan\varphi=0.26=\text{MU}$ 。

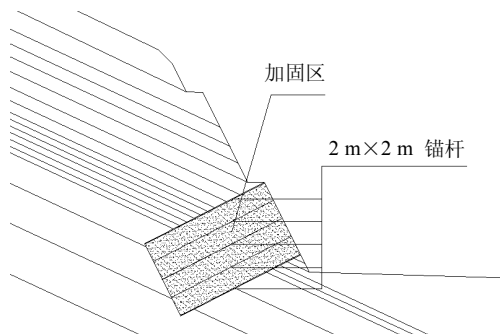


图 1 坡面锚杆布置图
Fig.1 Anchor disposal in slope surface

4.3 模拟分析模型^[5~7]

在顺层岩体路堑边坡的稳定性模拟分析中，对于整个边坡区域作如下假定：

(1) 边坡岩体的变形和位移是微小的，按弹塑性平面应变问题处理；

(2) 不考虑地应力的影响，忽略坡面上覆盖层的影响，计算中只考虑自重应力作用下边坡的应力与位移，同时也不考虑地下及地表水渗流的影响；

(3) 采用三角形 6 结点单元，线性函数的位移模式；

(4) 忽略岩层交界面间胶结物质的厚度，即认为相邻岩层间是直接靠结构面粘合的；

(5) 当作用在接触面上某一点处的切向力达到该方向上的最大抵抗能力时，岩层将沿该方向发生相对滑动；

(6) 在整个变形过程中，接触面上各点位移满足变形相容条件，即发生接触的变形体不相互侵入，将加固区视作一个间接接触。

对顺层岩体路堑高边坡在开挖后在布设锚杆前后，应用 ANSYS 分析软件进行边坡变形和稳定性的仿真模拟分析。布设锚杆前后建立的仿真分析模型如图 2 和图 3 所示。

模型结构除对地质原型进行了必要的简化处理外，基本上保持了与地质原型的一致性，其中充分考虑了在边坡开挖过程中对变形起控制作用的结构面实际发育特征。为了突出研究边坡开挖时的变形全过程，模型中的边界采用铰支约束整体与非加固区形成相互作用，不考虑加固区内的层，即左右边界无水平位移、底边界无竖向位移。由于重点是

考察开挖对边坡表层岩体的影响，故对表层岩体的单元网格加密以提高计算精度。在加固后的模型中，加固区内成为一个单独的区域，认为加固区与非加固区间为接触单元。为了更好地考察加固区与非加固区的接触状况，故在与加固区相邻的周边未加固区域的网格也进行了加密处理。

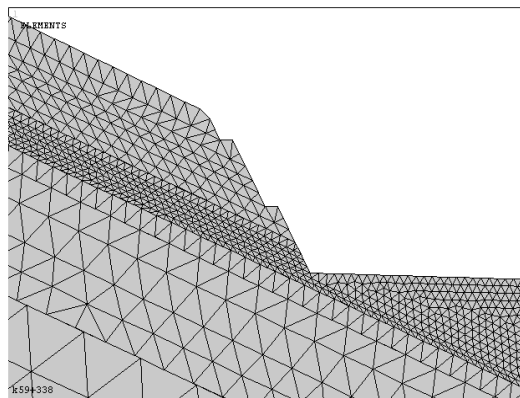


图 2 开挖形成后边坡模拟分析模型图
Fig.2 Slope simulating analysis model after excavation

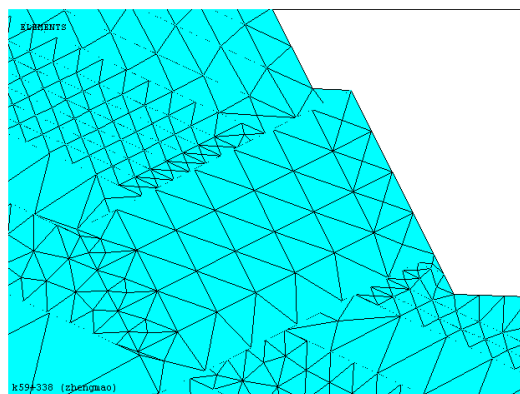


图 3 铺设锚杆后边坡模拟分析模型图
Fig.3 Slope simulating analysis model after laying anchors

4.4 边坡的变形和位移模拟分析

采用弹塑性有限元法对顺层岩体边坡在布设锚杆前后的变形进行模拟分析，得到边坡在布设锚杆前后的总位移和水平位移分别如图 4~7 所示。由位移图可见：

(1) 在顺层岩体路堑边坡开挖时变形从上部岩层开始逐步向深部岩层传递，当穿越软弱夹层时向深层的传递被削弱。

(2) 边坡的变形以坡顶最为显著，随着边坡内变形的不断积累和向深层及坡脚的传递，首先在某一软弱夹层内产生层间错动。同时沿软弱夹层的错

动进一步发展,直至贯穿形成滑动面,此时岩体就可能沿层面发生顺层滑脱。当布设锚杆后,坡脚处的位移明显减小,极限状态(指经边坡稳定系数折减后)最大总位移由原来 101.936 mm 降低为 58.925 mm,最大水平位移由 25.797 mm 降低为 22.035 mm,坡顶处的最大位移点消失。

(3) 未支护时最大水平位移发生在下层坡面处,改布设锚杆后最大水平位移发生在坡顶处。

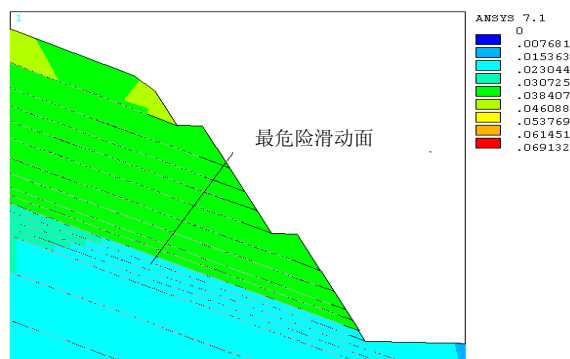


图 4 开挖形成后边坡总位移图 (单位:m)
Fig.4 Total displacement of slope after excavation (unit:m)

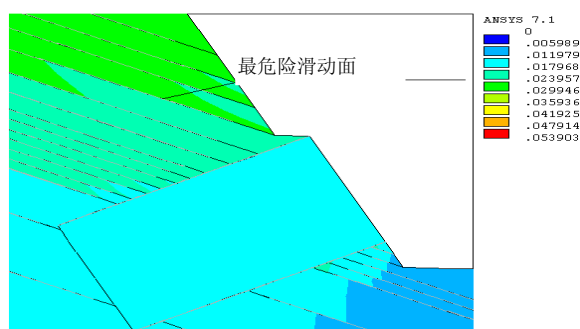


图 5 布设锚杆后边坡总位移图 (单位:m)
Fig.5 Total displacement of slope after Laying anchors (unit:m)

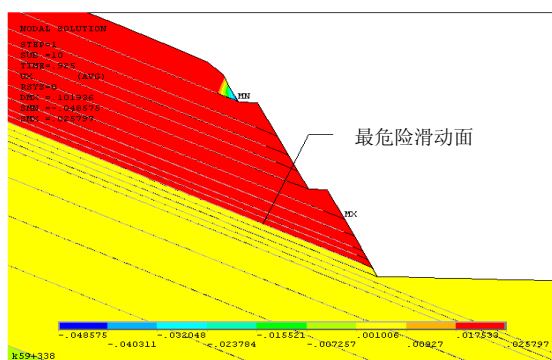


图 6 开挖形成后边坡水平位移图 (单位:m)
Fig.6 Horizontal displacement of slope after excavation (unit:m)

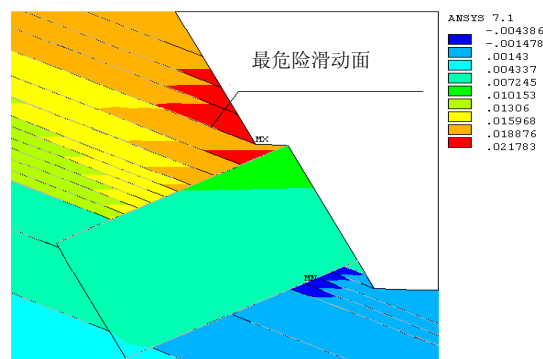


图 7 布设锚杆后边坡水平位移图 (单位:m)
Fig.7 Horizontal displacement of slope after laying anchors (unit:m)

4.5 边坡应力的模拟分析

通过用弹塑性有限元法对顺层岩体边坡在布设锚杆前后的应力进行模拟分析,得到边坡在布设锚杆前后的最危险接触面上摩擦力,如图 8 和图 9 所示。可以看出,布设锚杆之前,边坡的最危险接触面集中在开挖形成的坡脚附近,接触面上摩擦力的大小基本上反映了此处岩石的状态,摩擦力在接触面底部突变为零,说明当岩体达到破坏状态时,岩石最先破坏,而且是以脱落为主;而铺设锚杆之后,边坡的最危险接触面则集中在了第一次开挖的坡脚处,且整个面上的摩擦力分布较均匀,没有出现突变的现象。在极限状态下,接触面上的最小摩擦力达到 30.739 kN。这样防止了岩体在第 2 次开挖的坡脚处出现应力集中而破坏,进而出现顺层滑坡的现象。从而加固效果得以体现。

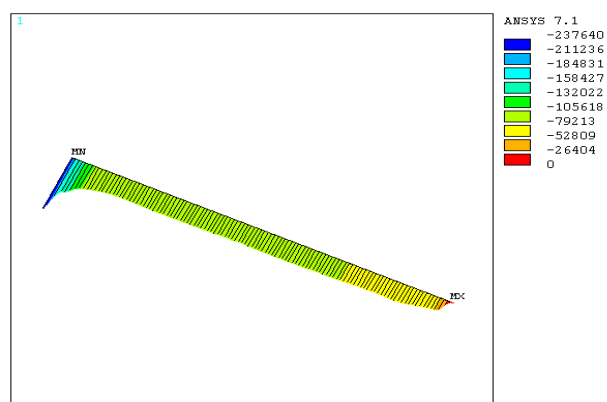


图 8 开挖后最危险接触面的摩擦力图 (单位:Pa)
Fig.8 Friction of the most dangerous contact surface after excavation (unit: Pa)

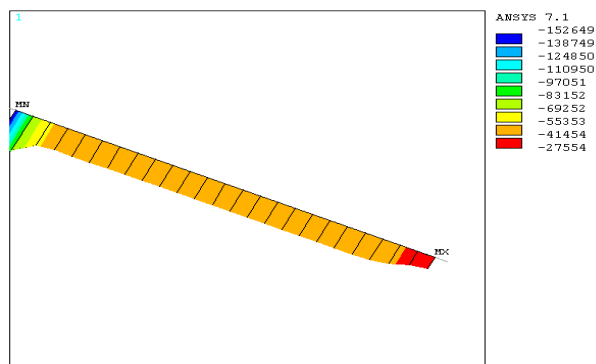


图9 布置锚杆后最危险接触面的摩擦力图(单位: Pa)

Fig.9 Friction of the most dangerous contact surface after laying anchors (unit: Pa)

4.6 边坡稳定性的模拟分析

依据屈服破坏准则,采用强度折减系数法对布置锚杆前后进行模拟分析,其方法是对于各参数同除以一个折减值,这个值逐渐增大,直到ANSYS 计算不收敛为止。从而得到顺层岩体路堑边坡在铺设锚杆前后的稳定性安全系数。在铺设锚杆前边坡的稳定性安全系数为0.8,而在布置锚杆之后,稳定性安全系数提高到了1.25。而且,次稳定性系数恰好满足安全性要求,因此加固方案是安全的,也没有造成浪费,不需要进行调整。

5 结 语

本文在计算过程中采用反演的计算方法,即先设计锚杆的支护方案,然后进行ANSYS 计算,

通过折减法得到安全系数,如果过大或过小再来调整设计方案,同时根据试验来确定加固区结构面上参数的取值,这样避免了烦杂的计算。分析结果表明,由于锚杆抗剪性能良好,有效地阻止了顺层间的滑动,防止顺层滑坡的发生。但锚杆支护对于边坡安全稳定性系数的提高起到了明显的作用,同时锚杆取材、制作简单,便于施工。

参 考 文 献

- [1] 晏鄂川,唐辉明,何淼.路堑边坡工程的动态仿真分析[J].岩土力学,2004,25(2):246—250.
- [2] 易日.使用ANSYS 6.1进行结构力学分析[M].北京:北京大学出版社,2002.
- [3] 赵尚毅,郑颖人.边坡稳定分析的有限元法[J].地下空间,2001,21(5):450—454.
- [4] 赵尚毅,郑颖人,时卫明,等.用有限元强度折减法求边坡稳定的安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343—346.
- [5] 刘祚秋,周翠英,董立国,等.边坡稳定及加固分析的有限元强度折减法[J].岩土力学,2005,26(4):558—561.
- [6] Sharma Sunil. XST ABL reference manual ,interactive software designs[R].Moscow: [s.n.], 1991.
- [7] 张生华,李国富.边坡控制中锚杆作用机理分析研究[J].中州煤炭,2003,(3):1—2.