

勉宁高速公路岩质边坡的有限元法分析

谷拴成 韩佳明

(西安科技大学, 陕西西安 710054)

【摘要】 以勉县—宁强高速公路建设为依托, 依据实际工程的地质特征和物理力学参数, 建立边坡的有限元模型, 使用 ANSYS⁶¹ 程序进行数值模拟分析, 采用强度折减法计算边坡安全系数, 对边坡的稳定性给出综合评价。

【关键词】 边坡; 有限元; 安全系数

【中图分类号】 TU 457

FEM Analysis for the Rock Slope of Mian—Ning Highway

Gu Shuancheng Han Jiaming

(Xi'an University of science & technology, shanxi Xi'an 710054, China)

【Abstract】 Based on the construction of the highway from Mianxian to Ningqiang, the finite element model of slope is set up by geologic character and physical parameter. The factor of safety is calculated by ANSYS⁶¹ program and the method of strength reduction. As a result, the stability of slope is evaluated.

【Key Words】 slope; finite element; factor of safety

1 工程概况

随着我国国民经济的大力发展, 很多省区的高速公路已由平原进入山区, 特别是西部大开发战略的实施, 山区高等级公路建设越来越多。高速公路技术标准高, 沿线地质条件复杂, 不可避免会遇到各种岩质边坡的稳定性问题, 这一直是道路路基工程和其它土木工程中的技术难题。为使工程符合安全、合理的原则, 正确地评判边坡稳定性是高速公路建设成败的关键。

勉宁高速公路主要通过中低山、丘陵、河流阶地、洪积扇和残坡积裙等 5 种地貌单元, 出露的地层由老到新有震旦系、寒武系、志留系和第四系。组成边坡的岩性有白云岩、粗砂岩(含砾)、中砂岩、细砂岩、泥质灰岩和泥岩、页岩、钙质泥岩等, 但主要以软弱岩层为主, 有一部分硬质岩层及少量松散堆积物, 故边坡的稳定性较差。

本文以具有代表性的 K52+(370~420 m) 路段为例。岩性为灰色、灰绿色泥页岩粉砂岩薄层。地层为条带的志留系, 倾向变化较大, 但倾角较小, 一般为 20°~45°, 层厚 0.2~4 cm。易风化, 风化后成黄绿色、浅黄色页片状或碎屑状。节理面在岩体

中很普遍, 呈有规律的、等密度的分布。

依据工程地质与水文地质勘察资料, 对本文的 K52+(370~420 m) 路段中试验数据进行分析。上部 3.5 m 深度范围内岩体的天然重度为 0.258 kN/m³, 其下部岩体的饱和重度为 0.262 kN/m³, 弹性模量为 2.63×10⁸ Pa, 泊松比为 0.26, 内聚力为 1.56×10⁵ Pa, 内摩擦角为 32°。岩层节理的重度为 0.13 kN/m³, 弹性模量为 5.51×10⁵ Pa, 泊松比为 0.44, 内聚力为 600 Pa, 内摩擦角为 8°。

2 有限元基本原理

2.1 有限元分析方案

用有限元法分析一个系统, 一般需建立并求解控制该系统的线性方程组, 这些方程就成为有限元方程。可以用多种不同的方式或方法来建立有限元方程, 例如变分法(能量法)和加权残值法^[1]。常用加权残值法建立有限元方程。

用有限元法求解时所设的势函数为

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n Q_i N_i \quad (1)$$

式中: n 为单元结点数; Q_i 为单元结点未知量, 也即待定系数; N_i 为单元形函数。

由伽辽金法,取形函数 N_i 为权函数可得

$$\sum_{e=1}^m \int_{V^e} N_i \left[F \left(\sum_{i=1}^n Q_i N_i \right) - f \right] dV + \sum_{i=1}^k \int_{S^e} N_i \left[G \left(\sum_{i=1}^n \int_{V^e} Q_i N_i \right) - g \right] dS = 0 \quad (2)$$

上式实际是仅含结点未知量 Q_i 的线性方程组,也即有限元方程。由此方程组解的结点未知量,进而就可得到控制方程式的近似解。

在连续的结构体中可以使用等参单元,在两种不同材料的界面采用 Goodman 单元、Desai 单元、薄层单元接触摩擦单元等。

2.2 有限元弹塑性分析方法

弹塑性应力应变关系理论,包括屈服面、流动法则,硬化规律和试验参数确定等方面^[2]。Drucker-Prager 模型是在考虑静水压力影响的广义 Mises 准则的基础上建立起来的,参数少,计算简单,同时也考虑了岩土类材料的剪胀性。屈服准则公式为

$$f(p, \sqrt{J_2}) = 3 \sqrt{J_2} ap - k = 0 \quad (3)$$

按照相关流动法则有

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

式中 $d\lambda$ 由加载条件决定

$$d\lambda = \frac{H_{ij} d\epsilon_{ij}}{H} \quad (5)$$

式中: H 为硬化参量。

则 D-P 模型的本构关系可表达为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} = [D_{ijkl}^e - D_{ijkl}^p] d\epsilon_{kl} \quad (6)$$

其中弹塑性矩阵为

$$D_{ijkl}^p = \left[K - \frac{2G}{3} \right] \delta_{ij} \delta_{kl} + 2G \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{H_{ij} H_{kl}}{H + G} \quad (7)$$

增量理论的弹塑性应力和应变关系为

$$\{d\sigma\} = (D_e - (1-r)D_p) \{d\epsilon\} \quad (8)$$

式中: D_e 为弹性矩阵, D_p 为塑性矩阵。

$$r = -f_0 / (f_1 - f_0) \quad (9)$$

式中: f_0 为初始应力状态(弹性)对应的屈服函数值, f_1 为试探应力状态(塑性)对应的屈服函数值。当 $r=1$ 时,使用弹性矩阵,当 $r=0$ 时,使用完全弹塑性矩阵,当 $0 < r < 1$ 时,表示单元由弹性状态向弹塑性状态过渡,使用弹塑性矩阵。

2.3 有限元强度折减法计算安全系数。

强度折减技术是利用下式调整土体的强度指标 c 和 φ , 然后对边坡进行有限元分析,通过不断地增

加折减系数,反复分析边坡,直至其达到临界破坏,此时得到的折减系数即为安全系数 f_s ^[3,4]。

$$c_i = c / f_i \quad (10)$$

$$\tan \varphi_i = \tan \varphi / f_i \quad (11)$$

式中: f_i 为强度折减系数; c 和 φ 为材料的真实参数; c_i 和 φ_i 为材料的折减参数。

一般情况下,一种岩石的强度参数 c 和 φ 越高,其弹性模量 E 越大,泊松比 ν 越小。因此,应对刚度参数 E 和 ν 作相应的调整。随着 c_i 和 φ_i 的降低, ν_i 将增大, E_i 将减小,可用下式计算^[5]:

$$E_i = \frac{E\nu}{\nu_i}; \quad \nu_i = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sin \varphi_i}{\beta} \right] \quad (12)$$

式中: $\beta = \frac{\sin \varphi}{1-2\nu}$, 若已达到了极限状态,取安全系数 $f_s = f_i$, 分析结束。否则,取一个新的强度折减系数 f_i , 重复上边的计算。

3 工程分析

本文采用大型有限元程序 ANSYS61 对具有代表性的 K52+(370~420 m) 路段的边坡进行稳定性分析。这段边坡是左右边坡,其岩性为层状泥岩,产状为 $355^\circ \angle 47^\circ$ 。

首先建立边坡的二维有限元基本模型。总宽度为 88.7 m, 左侧总高度为 38 m, 右侧总高度为 39 m。在开挖前,左侧坡度为 $\arctan 1/7$, 右侧坡度为 $\arctan 1/8$, 开挖分为二级开挖,第一级边坡左侧高 6 m, 右侧高 7 m, 第二级边坡左右均高 10 m, 左右两侧的坡角均为 47° , 开挖区域中间的高度为 14 m, 底部宽度为 24 m, 上部为弧形,在开挖区域底部以下有深 20 m 的岩体,整体模型上部,3.5 m 深用来模拟天然重度的岩石,下部是饱水重度岩石。斜向竖条为岩石结构体。

对基本模型划分网格(见图 1)。岩体应依据含水量不同,而采用不同的材料属性。使用 plane82 单元和平面应变特性,总共划分 6 567 个结点,1 711 个单元,其中四边形单元有 1 509 个,三角形单元有 202 个,主要集中在边坡右下方的结构面上。

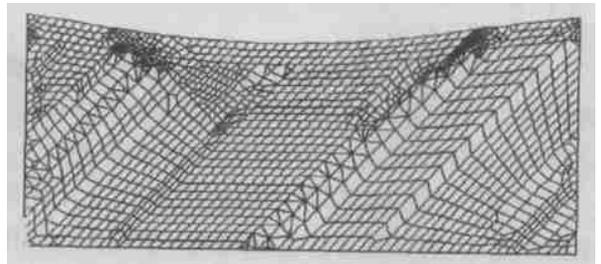


图 1 有限元网格

使用接触对来模拟节理。采用标准面一面接触,即在接触分开时结构体之间法向应力为零。总共建立了 83 个接触对,单元类型为 `targe169` 和 `conta172`。使用其特定的材料属性,来模拟节理夹层中的物质,并且减少渗入量,规定节理宽度为 0.01 m 。

施加约束和重力,并进行设置和求解。在模型的两侧限制水平方向的自由度,在模型的底部限制所有的自由度,并施加重力加速度,定义时间步为 1,子步数量为 10,采用静态分析可得开挖前的岩体受重力作用模拟。在结果上杀死面单元和接触单元模拟开挖,定义时间步为 10,子步数量为 100,再进行计算可得开挖后的结果。

如图 2 所示,对于左边坡,左上部的结构体相对于右下部结构体有向下的滑动,最大值为 $0.840\ 95\text{ m}$,对于右边坡,左上部的结构体相对于右下部结构体有向上的滑动,最大值为 $0.247\ 41\text{ m}$ 。

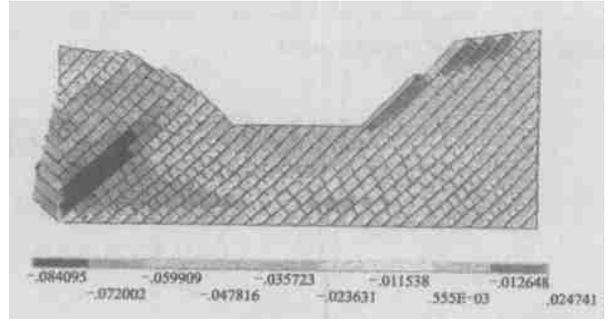


图 2 接触对滑动

这表明,在这两处均有可能发生破坏。

总体来讲,本模型有向右的微小位移,左边沉降要大于右边,而且节理间有相对滑动,对于左边坡,左上方的结构体相对于右下方的结构体有向下的移动,而对于右边坡却相反。结果见表 1,这表明,应力在这些地方可能会达到极限值,引起破坏。

表 1 计算结果表

边 坡	沉降(边坡底部)/m	应力(边坡底部)/Pa	塑性应变	最大张开间隙/m	最大剪应力/Pa
左边坡	0.13	1×10^7	0.002(左下方)		2.9×10^5 (二级边坡)
右边坡	0.10	5×10^6		0.478 552(右上方)	2×10^5 (一级边坡)

经过折减材料的强度发现,当折减系数为 1.12 时,计算不收敛,可认为模型破坏,把折减系数定义为边坡的安全系数,即边坡的安全系数为 1.12,其破坏形式为左边坡是平移滑动破坏,右边坡是溃屈破坏。

4 结 论

如何比较准确地分析边坡的稳定性是修建高速公路的关键技术问题,目前常用的方法有极限平衡法和有限元法。本文通过典型的特征断面,实测其物理力学参数,考虑软岩及节理特性,采用弹塑性有限元法进行推测分析,计算边坡强度折减后的应力和变形模量,对边坡的稳定性给出了综合评价。现场实践表明采用有限数值模拟和分析边坡稳定性,对确定边坡加固方案和治理具有十分重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 朱伯芳,有限单元法与应用. 北京:水利电力出版社,1979
- 2 郑颖人,龚晓南. 岩土塑性力学基础,北京:中国建筑工业出版社,1989
- 3 连镇营,韩国成,孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性. 岩土工程学报,2001,23(4):406~411
- 4 赵尚毅等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数. 岩土工程学报 2002,24(3):343~346
- 5 郑宏,李春光,李焯芬等求解安全系数的有限元法. 岩土工程学报,2000,24(5):626~628

收稿日期 2004-07-05