

用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析*

赵尚毅 郑颖人 邓卫东
(后勤工程学院土木工程系 重庆 400041) (交通部重庆公路科学研究所 重庆 400067)

摘要 通过对节理岩质边坡非线性有限元模型进行强度折减,使边坡达到不稳定状态时,有限元静力计算将不收敛,此时的折减系数就是稳定安全系数,同时可得到边坡破坏时的滑动面以及破坏过程,而传统条分法无法获得节理岩质边坡的滑动面与稳定安全系数。该方法为节理岩质边坡稳定分析开辟了新的途径,通过算例表明了此法的可行性。

关键词 岩土力学,节理岩质边坡稳定性分析,有限元强度折减法

分类号 TU 457 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2003)03-0254-07

STABILITY ANALYSIS ON JOINTED ROCK SLOPE BY STRENGTH REDUCTION FEM

Zhao Shangyi¹, Zheng Yingren¹, Deng Weidong²

¹Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041 China

²Chongqing Research Institute of Highway Science, The Ministry of Communications, Chongqing 400067 China

Abstract Stability analysis is made on the jointed rock slope by nonlinear FEM strength reduction method. With the $c-j$ reduction, the nonlinear FEM model of jointed rock slope reaches instability and the numerical non-convergence occurs simultaneously. The safety factor is then obtained by $c-j$ reduction algorithm. At the same time the critical failure surface and overall failure progress are found automatically. This presents a new approach for jointed rock slope stability analysis as the traditional limit equilibrium method can't get the safety factor and failure surface of jointed rock slope. Through a series of case studies, the applicability of the proposed method is clearly exhibited.

Key words rock and soil mechanics, stability analysis of jointed rock slope, strength reduction of FEM

1 前 言

岩质边坡工程的稳定分析历来是工程界和学术界最为关注的重大课题,由于实际岩体中含有大量不同构造、产状和特性的不连续结构面(比如层面、节理、裂隙、软弱夹层、岩脉和断层破碎带等),这就给岩质边坡的稳定分析带来了巨大的困难。岩体是弱面体,其强度主要由结构面控制,传统的用于土质边坡稳定分析的滑动面搜索方法不能用于岩质

边坡。如何建立能合理描述具有不连续性的岩体结构力学行为,引起了许多学者的广泛关注,并提出了多种数值分析方法,如刚性元法、等效连续模型、离散单元法(DEM)、块体理论、DDA等,但是,这些模型一般只是得出边坡应力、位移、塑性区,而无法得到边坡危险滑动面以及相应的稳定安全系数。如何求出复杂岩质边坡滑动面以及稳定安全系数,目前尚没有好的办法。

本文采用低强度弹塑性夹层单元来模拟岩体软弱结构面,用接触单元模拟不连续的硬性结构面,

2002年6月10日收到初稿,2002年7月15日收到修改稿。

* 西部交通建设科技项目(合同号:2001-318-23)。

作者 赵尚毅 简介:男,1969年生,现为博士研究生,主要从事岩土边坡工程数值分析研究工作。

建立节理岩质边坡非线性有限元模型,利用有限元强度折减法来对节理岩质边坡进行稳定性分析,不但找出节理岩质边坡的滑动面,同时求出了相应的稳定安全系数,为节理岩质边坡稳定分析开辟了新的途径。

2 有限元强度折减系数法原理

在有限元静力稳态计算中,如果模型为不稳定状态,有限元计算将不收敛,基于此原理,在非线性有限元边坡稳定性分析中,通过降低结构面的强度(粘聚力和内摩擦角),使系统达到不稳定状态,有限元静力计算将不收敛,此时的折减系数就是边坡稳定安全系数。随着计算机技术的发展,计算机计算速度大大提高,尤其是岩土材料的非线性弹塑性有限元计算技术的发展,出现了许多适合于岩土材料的大型通用有限元软件,其前后处理的功能越来越强大,为利用有限元法进行边坡稳定性分析创造了条件。有限元强度折减法近来在国内外受到关注,在土坡稳定分析中已逐渐得到认可^[1-4],图 1 为用有限元强度折减法求得的均质土坡滑动面,图 2 为土坡达到极限状态时的水平方向位移等值云图。

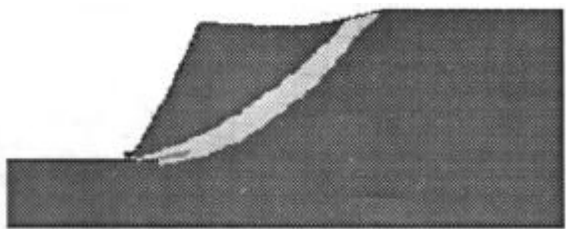


图 1 用有限元强度折减法得到的均质土坡滑动面
Fig.1 Failure surface of soil slope by FEM

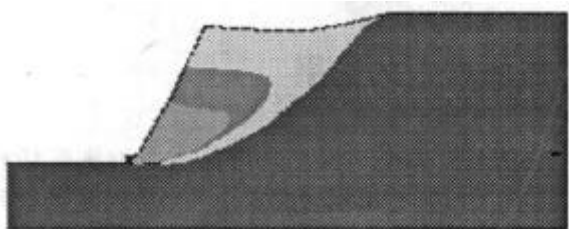


图 2 水平方向位移等值云图
Fig.2 Continuous contours of horizontal displacement

需要说明的是,进行强度折减非线性有限元分析,要有一个过硬的非线性有限元程序和收敛性能良好的本构模型。因为收敛失败可能表明边坡已经处于不稳定状态,也可能仅仅是有限元模型中某些数值问题造成计算不收敛。文[3]对有限元强度折减

法的影响因素以及计算精度进行了详细分析,证实了该方法实用于土坡工程的可能性。对于节理岩质边坡目前尚无研究,本文目的正是为了解决这一问题。为了研究简单起见,这里只研究贯通的节理岩体。

本文计算采用的软件为美国 ANSYS 公司的大型有限元软件 ANSYS 5.61——University High Option 商业版。该软件是目前世界上唯一一个通过 ISO 9001 质量体系认证的有限元分析软件,为非线性强度折减有限元分析的可靠性和计算精度提供了有力的保证。

3 岩体结构面分类及其特征

工程岩土中的结构面 根据结构面的贯通情况,可以将结构面分为贯通性、半贯通性、非贯通性 3 种类型。根据结构面的胶结和充填情况,可以将结构面分为硬性结构面(无充填结构面)和软弱结构面。

由于岩体结构的复杂性,要十分准确地反映岩体结构的特征并使之模型化是不可能的,也没有必要使问题复杂化。基于这种考虑,对于一个实际工程来说,往往根据现场地质资料,根据结构面的长度、密度、贯通率、展布方向等,着重考虑 2~3 个起主要控制作用的节理组或其他主要结构面(图 3)。而对于节理裂隙纵横交错、分布密集的岩体,通常可以采用岩体结构概化等效连续模型处理。

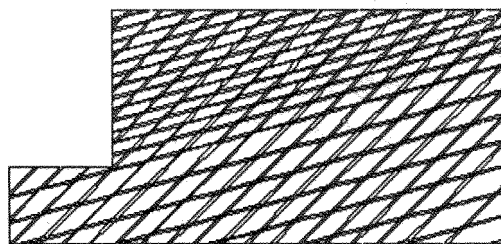


图 3 节理岩质边坡
Fig.3 Jointed rock slope

4 有限元模型及其安全系数的求解

以往人们在进行岩质边坡稳定性分析时,往往采用岩体强度,而不是采用结构面强度。实际上,岩体结构面的强度参数要比岩石的强度低得多,因此,对于岩质边坡来说,起控制作用的是结构面强度。

(1) 软弱结构面。如图 4,软弱结构面采用低强度实体单元模拟,按照连续介质处理,材料本构

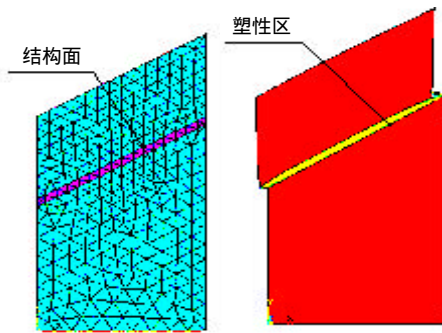


图4 有限元模型以及变形后产生的塑性区
Fig.4 FEM model and plastic zone of deformed model

关系采用理想弹塑性模型，屈服准则为广义米赛斯准则：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k$$

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； α, k 为与岩土材料内摩擦角 j 和粘聚力 c 有关的常数。这是一个通用表达式，通过变换 α, k 的表达式就可以在有限元中实现不同的屈服准则。

在广义米赛斯屈服准则中引入强度折减系数 w ，此时屈服准则表示为

$$F = \frac{\alpha}{w} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{w}$$

式中： w 为达到极限状态时的安全系数。

计算时，首先，选取初始折减系数 w ，将结构面强度参数进行折减，将折减后的参数作为输入，进行有限元计算，若程序收敛，则土体仍处于稳定状态；然后，再增加折减系数，直到不收敛为止，此时系统处于极限状态，此时的折减系数 w 即为坡体的稳定安全系数，同时，还可以得到危险滑动面^[5,6]。

(2) 硬性结构面。如图5所示的无充填的硬性结构面，不能按照传统连续介质原理进行处理，本文采用 ANSYS 程序提供的无厚度接触单元来模拟硬性结构面的不连续性。

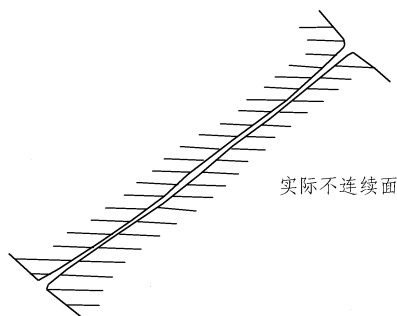


图5 无充填的硬性结构面
Fig.5 Jointed rock mass

如图6所示，接触单元是覆盖在分析模型接触面上的一层单元，程序通过覆盖在两个接触物体表面的接触单元来定义接触表面。在两个接触的边界中，把其中一个边界作为“目标”面，而把另外一个面作为“接触”面，目标面和接触面都可以是柔性体，两个面合起来叫做“接触对”。接触单元与下面的基本变形体单元(可以是弹塑性实体单元)有同样的几何特性，程序会根据接触单元下面的变形体单元的材料特性来确定接触刚度值，两个接触面的接触摩擦行为服从库仑定律：

$$t = c + s \tan j$$

$$s \geq 0$$

在两个接触面开始互相滑动之前，在他们的接触面上会产生小于其抗剪强度的剪应力，这种状态叫做稳定粘合状态，一旦剪切应力超过滑面上的抗剪强度，两个面之间将产生滑动。安全系数的求解原理同上，即

$$F_s = \frac{c}{c'} = \frac{\tan j}{\tan j'}$$

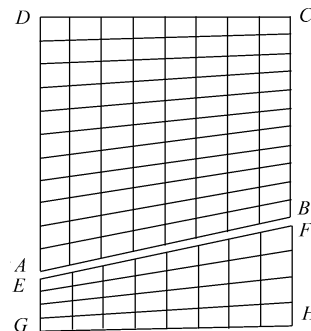


图6 有限元模型
Fig.6 FEM model

5 屈服准则的选用

安全系数大小与程序采用的屈服准则密切相关，不同的准则得出不同的安全系数。传统的极限平衡法采用莫尔-库仑准则，但是由于莫尔-库仑准则的屈服面为不规则的六角形截面的角锥体表面，存在尖顶和棱角，给数值计算带来困难。为了与传统方法进行比较，本文采用了文[7]提出的莫尔-库仑等面积圆屈服准则代替莫尔-库仑准则，它比当前采用的逼近不等角的近似屈服曲线有更高的计算精度，其 α, k 满足下列表达式：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k$$

$$a = \frac{\sin j}{\sqrt{3}(\sqrt{3} \cos q_d - \sin q_d \sin j)}$$

$$k = \frac{\sqrt{3}c \cos j}{\sqrt{3} \cos q_d - \sin q_d \sin j}$$

$$q_d = \sin^{-1} \left\{ \frac{-\frac{2}{3}A \sin j}{2\left(\frac{\sin^2 j}{3} + 1\right)} + \left[\frac{\frac{4}{9}A^2 \sin^2 j - 4\left(\frac{\sin^2 j}{3} + 1\right)\left(\frac{A^2}{3} - 1\right)}{2\left(\frac{\sin^2 j}{3} + 1\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$A = \sqrt{\frac{\delta(9 - \sin^2 j)}{6\sqrt{3}}}$$

表 1 为图 4 所示的软弱结构面稳定安全系数计算结果。计算参数为 $c=0$, $j=15^\circ$, 结构面倾角 15° 。

表 1 图 4 的计算结果

Table 1 Calculation results for Fig.4 by different methods

计算方法	安全系数
有限元法(外接圆屈服准则)	1.24
有限元法(莫尔-库仑等面积圆屈服准则)	0.98
极限平衡方法(解析解)	1.00
极限平衡方法(Spencer 法)	1.00

计算发现, 采用外接圆屈服准则求得的稳定安全系数比传统方法大许多, 采用文[7]提出的莫尔-库仑等面积圆屈服准则的计算结果与传统的莫尔-库仑屈服准则计算结果比较接近, 文[1]对此做了比较分析。

表 2 为图 6 所示的硬性结构面安全系数计算结果, 计算参数为 $c=0$, $j=15^\circ$, 结构面倾角 15° 。通过计算对比发现, 对于直线形滑动面, 采用接触单元时用有限元强度折减法得到的计算结果与理论解析解十分接近, 误差仅为 0.1%, 说明采用接触单元来模拟岩体材料的不连续性是可行的。

6 折线型滑动面边坡稳定性分析

图 7 所示为两个直线滑面组成的折线型滑体 $ABMCD$, 这种折线型滑坡类型是一种常见的滑坡

表 2 图 6 的计算结果

Table 2 Calculation results for Fig.6 by different methods

计算方法	安全系数
有限元法接触单元强度折减	1.001
极限平衡方法(解析解)	1.000
极限平衡方法(Spencer 法)	1.000

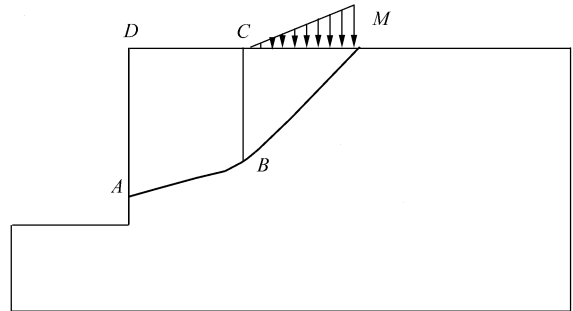


图 7 折线型平面滑动岩质边坡

Fig.7 Plane sliding rock slope

类型。岩体重量 $g=20 \text{ kN/m}^3$, 弹性模量 $E=10^9 \text{ Pa}$ 。滑块 $ABCD$ 面积 433 m^2 , 滑面 $AB=20 \text{ m}$, 倾角 $y_1=15^\circ$, $AD=25 \text{ m}$, $DC=19.32 \text{ m}$, $BC=19.82 \text{ m}$; 滑块 BCM 面积 196.5 m^2 , 滑面 $BM=28.03 \text{ m}$, 倾角 $y_2=45^\circ$, $CM=19.82 \text{ m}$ 。 CM 面上施加有线性变化的面荷载, $P_M=400 \text{ kPa}$, $P_C=0$ 。

计算方法同上, 在滑动面 AB, BM 上布置接触单元(图 8)。计算时, 采用作者编制的二分法计算程序, 通过该程序来对强度参数进行二分法折减, 快速逼近其极限状态, 从而很快求得稳定安全系数。图 9 为坡体达到极限状态后的破坏滑动图。

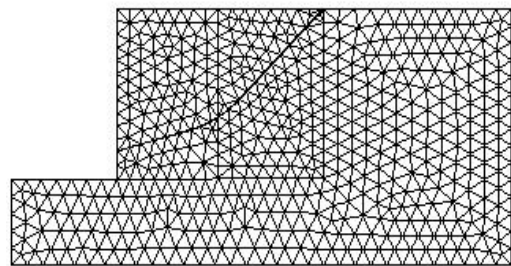


图 8 有限元网格模型

Fig.8 FEM model

为了和传统方法作比较, 本文同时利用中国水利水电科学研究院开发的边坡稳定分析程序 STAB 95 中的 Spencer 法进行计算, 计算结果对比如表 3 所示。

从折线型滑动面的计算结果可以看出, 当内摩

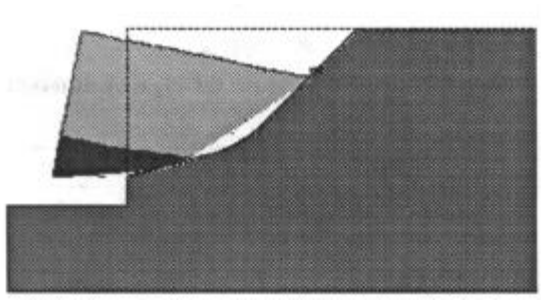


图9 坡体达到极限状态后的破坏滑动图
Fig.9 Failure progress at limited state

表3 不同方法求得的稳定安全系数
Table 3 Safety factors by different methods

参数	有限元强度折减法	Spencer 法
$c = 160 \text{ kPa}, j = 0^\circ$	1.00	0.99
$c = 160 \text{ kPa}, j = 30^\circ$	2.11	2.11
$c = 320 \text{ kPa}, j = 10^\circ$	2.33	2.33
$c = 160 \text{ kPa}, j = 45^\circ$	2.09	1.98
$c = 0 \text{ kPa}, j = 45^\circ$	3.08	2.94

擦角在 30° 以下时，精度较高，当内摩擦角增大时，与传统方法(Spencer 法)相比，误差增大。

另外，在单元划分的过程中，在两个滑动面的交汇处形成了尖角，在尖角处形成较大的应力集中，求解时会产生病态方程。为了避免这些建模问题，需要在实体模型上，使用线的倒角来使尖角光滑化，或者在曲率突然变化的区域使用更细的网格。

7 具有一组平行节理面的岩质边坡算例

如图 10, 11 所示，一组软弱结构面倾角 40° ，间距 10 m，岩体和结构面采用平面 6 节点三角形单元模拟，岩体以及结构面材料物理力学参数取值见表 4。采用不同方法的计算结果见表 5，其中，极限平衡方法计算结果是在滑动面确定的情况下算出的。

表4 计算采用的物理力学参数
Table 4 Material parameters for calculation

材料名称	重度 /kN · m ⁻³	弹性模量 /Pa	泊松比	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
岩体	25	1E+10	0.2	1.00	38
结构面	17	1E+7	0.3	0.12	24

通过有限元强度折减，当有限元计算不收敛时，程序自动找出了滑动面，如图 12。在一组平行的结

表5 图 10, 11 的计算结果

Table 5 Calculation results for Fig.10 and 11 by different methods

计算方法	安全系数
有限元法(外接圆屈服准则)	1.26
有限元法(莫尔-库仑等面积圆屈服准则)	1.03
极限平衡方法(解析解)	1.06
极限平衡方法(Spencer 法)	1.06

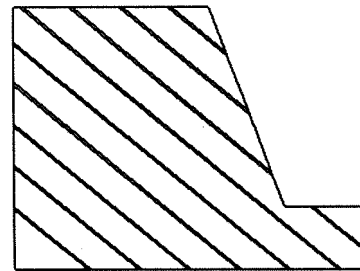


图10 几何模型
Fig.10 Geometry model

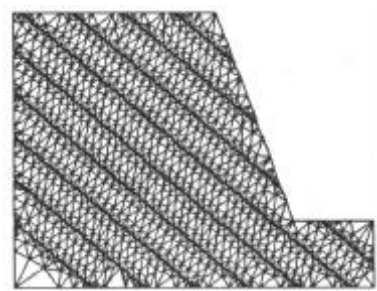


图11 有限元模型
Fig.11 FEM Model

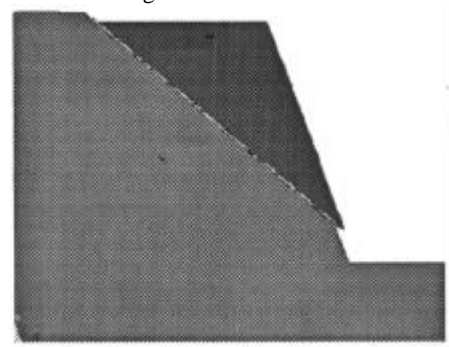


图12 坡体达到极限状态时形成的滑动面
Fig.12 The failure surface at limited state

构面中，只出现了一条滑动面，其余结构面没有出现塑性区和滑动，图 13 为坡体破坏时的运动矢量图。

8 具有二组节理面的岩质边坡算例

如图 14 所示，二组方向不同的节理，贯通率

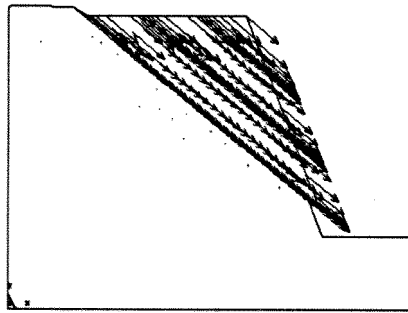


图 13 坡体破坏时的运动矢量图
Fig.13 Displacement vector at failure

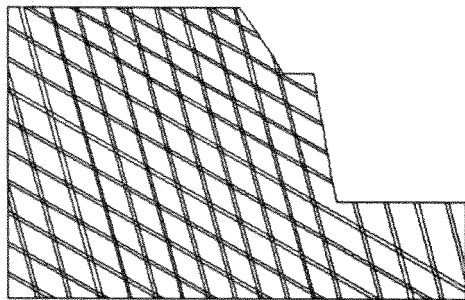
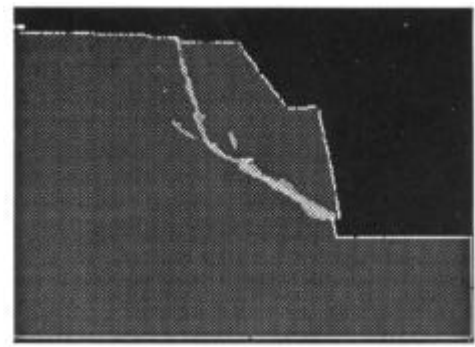
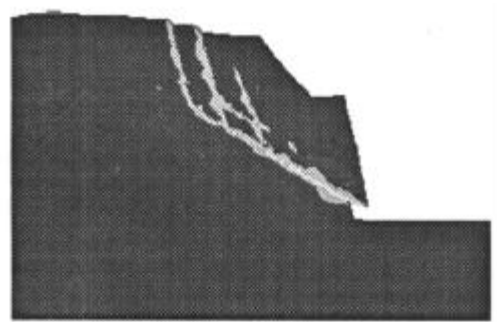


图 14 几何模型
Fig.14 Geometry model



(a) 首先贯通的滑动面



(b) 滑动面继续发展

图 15 极限状态后产生的滑动面和塑性区
Fig.15 Failure surface and plastic zone

100% ,第一组软弱结构面倾角 30° ,平均间距 10 m ;第二组软弱结构面倾角 75° ,平均间距 10 m。岩体以及结构面计算物理力学参数见表 6。

表 6 物理力学参数计算取值
Table 6 Material parameters for calculation

材料名称	重度 /kN · m ⁻³	弹性模量 /Pa	泊松比	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
岩体	25	1×10^{10}	0.2	1.00	38
第一组节理	17	1×10^7	0.3	0.12	24
第二组节理	17	1×10^7	0.3	0.12	24

按照二维平面应变问题建立有限元模型,计算步骤同上。通过有限元强度折减,求得的滑动面如图 15(a)所示,它是最先贯通的塑性区,塑性区贯通并不等于破坏,当塑性区贯通后继续发展到一定程度,岩体发生整体破坏,同时出现第二条贯通的塑性面,如图 15(b)。求得的稳定安全系数见表 7,其中,极限平衡方法计算结果是根据最先贯通的那一条滑动面求得的。

9 结 论

(1) 目前,对复杂节理岩质边坡的稳定性分析

表 7 图 15 的计算结果

Table 7 Calculation results for Fig.15 by different methods

计算方法	安全系数
有限元法(外接圆屈服准则)	1.62
有限元法(莫尔-库仑等面积圆屈服准则)	1.33
极限平衡方法(Spencer 法)	1.36

尚没有好的办法,传统的极限平衡方法无法得到节理岩质边坡的滑动面及其稳定安全系数,而各种数值分析方法只能算出应力、位移、塑性区等,无法判断边坡的稳定安全系数以及相应的滑移面。本文采用非线性有限元强度折减系数法分析了节理岩质边坡的稳定性,利用此法可以由程序自动求得滑动面以及相应的稳定安全系数,为节理岩质边坡稳定性分析开辟了新的途径。

(2) 该方法可以对贯通和非贯通的节理岩质边坡进行稳定性分析,同时可以考虑地下水、施工过程对边坡稳定性的影响,可以考虑各种支挡结构与岩土材料的共同作用,也为岩质边坡稳定性分析开辟了新的途径。

(3) 有限元模型的建立,包括计算范围、边界条件、网格划分密度以及收敛标准等,应满足有限

元计算的精度要求。如果网格划分太粗,将会造成较大的误差。

(4) 所求安全系数的大小与所采用的屈服准则有关。莫尔-库仑屈服准则是目前边坡分析中被广泛采用的屈服准则,但是莫尔-库仑准则的屈服面存在尖顶和棱角,给数值计算带来困难。通过本文计算表明,采用文[7]提出的莫尔-库仑等面积圆屈服准则进行计算,不但满足广义米赛斯屈服准则的通用表达式 $F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k$, 使有限元数值计算变得方便,而且计算结果与传统的莫尔-库仑屈服准则计算结果十分接近。

参 考 文 献

- 1 赵尚毅,郑颖人,时卫民等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 ~ 346
- 2 Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 ~ 403
- 3 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 待刊
- 4 王在泉. 边坡动态稳定预测预报及工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 117 ~ 122
- 5 朱大勇,钱七勇,周早生等. 岩体边坡临界滑动场计算方法及其在露天矿边坡设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 567 ~ 572
- 6 许东俊,陈从新,刘小巍等. 岩质边坡滑坡预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 369 ~ 372
- 7 徐干成,郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 93 ~ 99

大跨度可调式无支墩钢拱架施工混凝土拱桥技术

该项技术主要用于沟谷落差大、复杂地形地质、恶劣条件下大跨度混凝土拱桥的快速施工。研究中设计了大跨度可调式无支墩六四式军用梁钢拱架;采用拱架整体横移技术,拱架只拼装一幅,在支承墩顶面及拱座前墙预埋水平滑道和侧向滑道,当一幅拱桥施工完后,采用 150 t 油压千斤顶将拱架滑移至另一幅位置,72 h 共滑移 10.48 m,拱架实现二次利用;在大跨度箱形拱桥施工中,拱圈混凝土采用分环分段对称浇筑技术,将拱圈分为 3 环,即底板、腹板、顶板,底板、腹板分 5 段浇筑,顶板分 9 段浇筑。

联系单位:中国铁路工程局第十七工程局第四工程处

联系人:张小花

邮 编:030600

电 话:(0354)3023844-2165

隧道喷锚支护衬砌参数的优化研究

该项成果属于土木工程桥梁与隧道工程领域,在建立合理的力学模型的基础上,利用弹塑性理论和系统布置锚杆喷锚支护的承压拱理论,结合统计数据 and 现场测试数据的分析,通过计算隧道开挖后隧道围岩的位移和设置控制位移的方法,以及锚杆加固作用影响系数,编制设计出喷锚支护参数优化设计的实时设计应用程序。该项研究将承压拱理论应用到喷锚支护的参数优化设计之中,不仅考虑围岩的收敛情况,还考虑了围岩的力学性质对支护参数的影响,实现了对喷锚支护设计的及时修改与完善。

联系单位:朝阳市交通局

联系人:高德山

邮 编:122000

电 话:13904919618

(摘自《科学技术研究成果公报》,2002,(1):61)