

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1105-04

接触单元对边坡稳定分析影响的仿真研究

董必昌^{1,2}, 王靖涛², 程 涛³

(1. 武汉理工大学 交通学院, 武汉 430063; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074; 3. 黄石理工学院 土木建筑系, 黄石 435003)

摘 要: 在边坡稳定问题的研究中引入了接触单元的概念, 基于局部破坏理论, 提出了一种新的边坡稳定系数的计算方法。同时与传统方法进行了对比分析, 实例计算结果比较准确, 结果表明该计算方法是可行的和准确的。从而进一步证明了局部破坏理论的正确性和边坡软弱结构面是控制边坡稳定的关键因素。

关 键 词: 接触单元; 边坡稳定; 软弱结构面; 接触面强度参数折减系数法; 局部破坏理论

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Simulation studies on stability of slope with contact element

DONG Bi-chang^{1,2}, WANG Jing-tao², CHENG Tao³

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Department of Civil Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China)

Abstract: Contact element is combined with slope stability problem and a new calculation method of slope safety factor is put forward based on partial failure theory. The computation result obtained by new method is very closed to that of the traditional method, which illustrates that the new method is feasible and correct. Therefore, it is further proved that local failure theory is correct and weak structural plane will control the stability of slope.

Key words: contact element; slope stability; weak structural plane; strength reduction method of interface parameters; partial failure theory

1 前 言

接触单元是当今岩土力学与工程中研究的热点问题, 也是难点问题。2001 年在美国举行的第 10 届国际学术会议——计算机在岩土力学上的应用与进展把接触单元作为会议专门议题之一^[1]。许多土与结构、结构与结构以及结构内部之间相互作用问题都涉及到接触单元。边坡问题也是如此。在许多边坡内部, 往往包含有结构面、节理面或者软弱结构面, 而这些结构面性质通常对边坡的稳定起着决定性的作用, 因此研究这些结构面对边坡稳定的影响具有重要意义。然而, 在实际的边坡稳定分析中, 尤其是对于土质边坡, 人们对于接触面对边坡稳定的影响往往重视不够。基于此, 本文对某土质边坡进行有限元分析, 通过对土坡内某软弱面设置接触单元, 运用强度折减法, 求得边坡的稳定安全系数, 并与其它一些方法进行对比, 得出了一些有价值的规律。

2 边坡稳定分析

2.1 有限元强度折减系数法

目前边坡稳定的研究方法主要有 3 种: 极限平衡法、塑性极限分析法以及有限元法^[2]。极限平衡法经过 70 多年的发展, 已积累了丰富的使用经验, 但由于方法本身没有考虑土体应力-应变关系, 故不能求出坡体的真实受力。塑性极限平衡法虽然克服了上述不足, 能够在一定程度上考虑土体的应力场与速度场, 但同样不能考虑坡体变形及其对稳定性的影响。有限元法的优势在于它不仅可以求出土体中各点的应力和应变, 而且还能考虑土体的非线性本构关系。在世界范围内, 基于有限元法的边坡稳定分析正得到了越来越广泛的应用, 它的逐步完善为准确分析此类问题提供了可能。

在有限元法中, 通常对土体强度指标 c 、 φ 进行折减, 直至计算到不收敛为止, 其折减的倍数即为稳定系数^[3]。这种方法在国外 20 世纪 80 年代就

被采用,但是由于力学概念上的不十分明确,而且受到计算程序及计算精度的影响,这种方法在国内一直没有流行。近年来,随着大型仿真软件的出现以及计算机计算能力的提高,有限元强度折减系数法正成为边坡稳定分析的新趋势。与极限平衡法相比,强度折减系数法不需要任何假定,便可自动求得任意形状的临界滑移面及对应的最小安全系数,同时它亦真实反映坡体失稳及塑性区的开展过程。

2.2 基本公式

由于采用莫尔-库仑条件数值求解十分困难,许多大型软件(如 ANSYS, MARC, PATRAN, NASTRAN 等)只是给出了广义米赛斯屈服准则:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

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 φ 和凝聚力 c 有关的常数。

式(1)是通用表达式,通过变换 α 、 k 就可以在有限元中实现不同的屈服准则。

用 ω 表示稳定系数,屈服准则变为

$$F = \frac{\alpha}{\omega} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{\omega} \quad (2)$$

计算到不收敛时的 ω ,即为边坡稳定安全系数^[3]。

令 F_1 为实际采用的准则, $F_1 = \alpha_1 I_1 + \sqrt{J_2} = k_1$, F_2 为等面积莫尔-库仑准则, $F_2 = \alpha_2 I_1 + \sqrt{J_2} = k_2$, 二准则之间的比值 $\eta = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{k_1}{k_2} = f(\varphi)$ 。由此,即能将按实际采用准则求得的安全系数转换成按莫尔-库仑准则的系数^[2]。

2.3 接触面强度参数折减系数法

2.3.1 土的局部破坏理论

近年来一些学者和研究人员发现,高边坡、挡土墙、桩基础等土工建筑物的破坏都与变形局部化问题有关,其破坏形式往往表现为一条或者多条滑裂面——剪切带的形成。剪切带的形成一般是由于基础中某一部分土体发生应变软化,从而形成局部变形所致^[4]。

影响变形局部化的因素主要有土的密度、有效平均正应力、土颗粒大小以及形状、边界条件以及排水条件等等。当剪切带形成以后,土体的进一步变形主要发生于其中,其他部分的变形很小,甚至表现为卸载^[5]。

根据文[6],土体在应力作用下的变形过程主要

是其中的微裂纹、空洞和微孔隙的发展过程。图 1 为某三轴压力室中土样扫描层位的示意图,图 2 为该土样的三轴剪切试验所测得的应力-应变关系曲线,图 3 为对土样 CT 扫描所得的 CT 数均值与应变的关系曲线,图 4 为土样扫描层面在不同应变时对应的扫描照片,图中的黑点代表微裂隙、空洞和微孔隙。

由图可以看出,该土样为应变软化类型,大致可以分为 4 个阶段,即

微裂纹压密阶段(OA):应变为 0.53%,对应于图中 A 点。在该阶段裂纹有轻微压密现象,CT 数均值轻微上升。

微裂纹萌生轻微发展阶段(AB):应变为 2.41%,对应于图中 B 点。整体上看微裂隙增多,局部微裂隙有增大、扩展和伸长,CT 数值下降。

局部变形快速发展阶段(BC):应变为 6.10%,对应于图中 C 点。由图上可以看出,微裂隙增多,局部已出现连接现象。CT 数均值下降,但下降幅度不大。

软化破坏(CD):应变为 7.68%,对应为图中 D 点。在该阶段 CT 值均值迅速下降,整个层面出现了宽的裂纹,并且微裂纹之间已经相互连接、贯通,而整个土样各层面间的裂纹已经上下贯通,这时土样已经完全破坏。

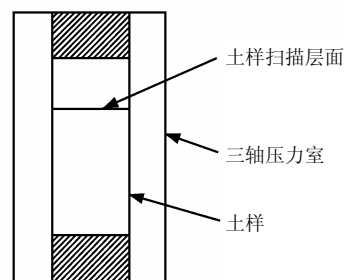


图 1 三轴压力室中试样
Fig.1 Soil in triaxial cell

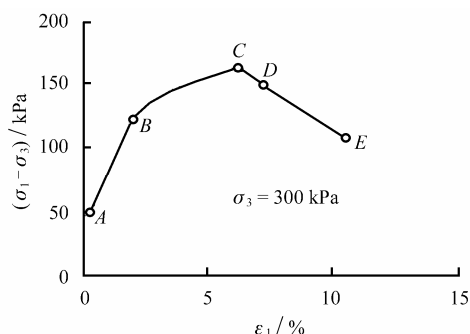


图 2 三轴剪切试验应力-应变关系
Fig.2 Stress-strain relationship of triaxial shear test

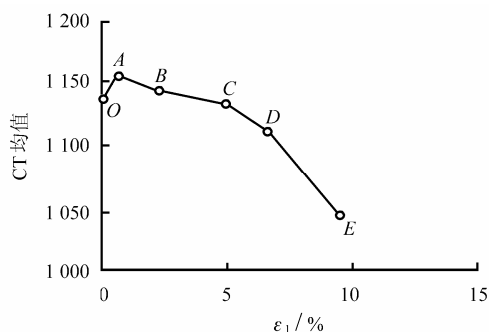


图3 整体CT数均值与应变的关系

Fig.3 Equalizing value of CT and strain relationship

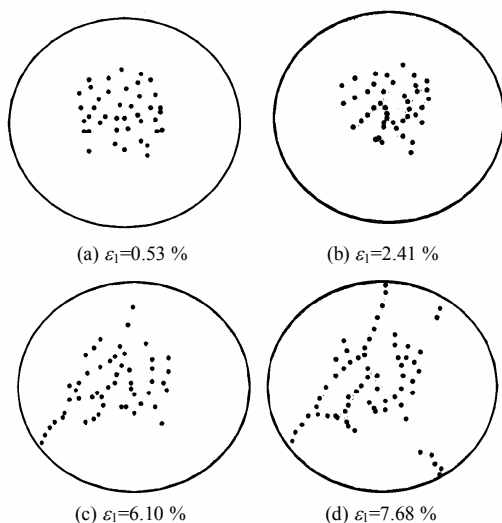


图4 扫描层面在不同应变下的扫描照片示意图

Fig.4 Scanning picture of different strain of soil

综上所述,土样在压力作用下的破坏过程主要是其中的微裂纹、空洞和微孔隙的变化过程,而在土样的其他部分(非微裂隙带)几乎不受到或者受到影响很小,因此这些微裂纹、空洞和微孔隙直接决定着土样的力学性质,是导致土体局部变形,进而导致剪切带产生的主要因素。研究这些微裂纹、空洞和微孔隙的性质,将会直接有助于对土体破坏变形的整体把握。

对应于宏观的实体模型,软弱面是发生土体局部变形的主要位置,因此模型的破坏过程具体表现为其中的软弱面的变形过程。

2.3.2 接触面强度参数折减系数法定义

由边坡稳定安全系数的定义可知,当采用强度折减法对土层 c 、 φ 值进行折减计算至不收敛时,意味边坡已经局部或者整体失稳。失稳位置往往会产生较大的塑性应变,而这失稳位置通常是某软弱结构面或者是潜在滑动面的位置,在边坡的其它位置,则几乎不产生或者产生很小的塑性应变。为此,

基于土的局部破坏理论,本文引入接触单元的概念,提出一种新的边坡稳定安全系数的计算方法——接触面强度参数折减系数法,即在软弱结构面或者潜在滑动面位置设置接触单元,通过对接面强度参数进行折减,计算至不收敛时对应的折减系数即为边坡稳定安全系数。整个过程不需要对土层强度参数进行折减。一些大型仿真软件(如 ANSYS)在处理接触单元本构关系时,其屈服准则均采用莫尔-库仑准则,客观上为接触面强度参数折减系数法提供了计算工具。

3 实例仿真

3.1 地质概况

某土质边坡,坡高 $H = 8\text{ m}$, 土的重度 $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 15\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$, 坡角为 $\beta = 34^\circ$, 坡顶堆载 $P = 20\text{ kPa}$ 。根据地质勘探资料,该土坡下深度 10 m 范围内土层可分为两层,第一层为砂土,第二层为黏土,土坡内部存在着某软弱结构面。各土层的材料参数值见表1。

表1 土层材料参数值
Table 1 Material values of soil

土层	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
黏土	20	0.3	19.0	25	15
砂土	40	0.3	18.5	34	5
黏土	80	0.3	19.5	25	40

边坡坡截面示意图见图5,顶面宽 14 m ,底面宽 26 m ,图中圆弧线为软弱结构面位置。

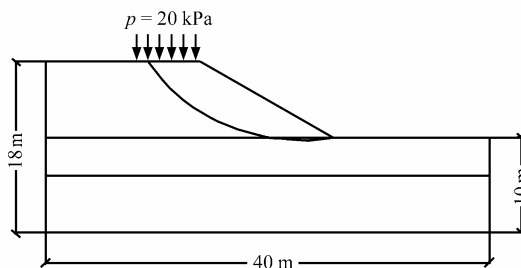


图5 边坡截面示意图

Fig.5 Slope section

3.2 有限元模型

在图6所示的轴对称有限元模型中,采用 plane2 号单元,共划分单元 2 389 个。土体采用 Drucker—Prager 弹塑性模型,圆弧线左右两侧土体之间设置接触单元,共设置接触单元 87 个。

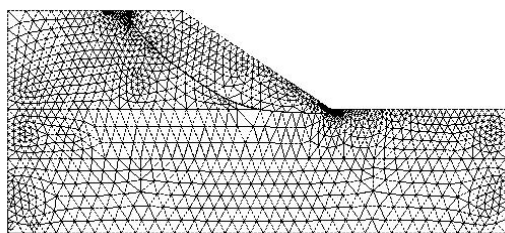


图 6 有限元网格剖分图
Fig.6 FEM mesh

3.3 计算结果分析

对图 6 所示的模型,运用强度折减法,对接触面抗剪强度参数折减进行有限元运算,最后求得边坡稳定安全系数。为了便于对比分析,本文还列出如下几种方法求得的边坡安全系数:①有限元外接圆屈服准则法。②有限元莫尔-库仑等面积屈服准则法。③有限元法(考虑接触单元,土体抗剪强度参数与接触面强度参数同时折减)。④接触面强度参数折减系数法。⑤有限元法(考虑接触单元,土体抗剪强度参数折减、接触面强度参数保持不变)。具体计算结果见表 2。

表 2 计算结果对比
Table 2 The comparison of result

分析方法	①	②	③	④	⑤
稳定系数	1.980	1.571	1.570	1.589	1.920

注:方法①(外接圆屈服准则)与方法②(莫尔-库仑等面积屈服准则)之间的换算系数为 1.261。

由表 2 可知,当采用有限元法(外接圆屈服准则)时计算结果偏大,将有限元法(外接圆屈服准则)所得的计算结果转化为莫尔-库仑等面积屈服准则计算所得时,结果较为理想。将软弱结构面设置成接触单元面后,进行接触面强度参数折减计算,所得结果较为理想,其中仅对接触面强度参数进行折减所得安全系数与对土体抗剪强度参数、接触面强度参数同时折减所得安全系数比较接近。而对土体抗剪强度参数进行折减、接触面强度参数保持不变时计算结果偏大,其几乎与有限元外接屈服准则法相同。这一方面说明了本文所提方法——接触面强度参数折减系数法的正确性,另一方面亦反映了软弱结构面强度参数控制边坡稳定性的规律。

4 结 论

由以上分析,可以得出如下结论:

(1) 本文提出的接触面强度参数折减系数法比较准确确定边坡稳定安全系数。对于某些具有软弱结构面或者潜在滑移面的边坡来说,这些软弱结构面或者潜在滑移面的强度参数是控制边坡稳定的关键因素。另外,该方法也简化了计算过程,缩短了计算机的计算时间。

(2) 采用有限元外接圆屈服准则时,计算结果偏大,需换算成莫尔-库仑等面积屈服准则时,方能取得较好的结果。

参 考 文 献

- [1] Dłuzewski J M, Ciuhak k. Interface elements in slope stability analysis[A]. **Proceedings of the Tenth International Conferences on Computer Methods and Advances in Geomechanics**[C]. [s.l.]: [s.n.], 2001. 447—450.
- [2] 赵尚毅, 郑颖人. 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.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren. Analysis of safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元法求边坡稳定安全系数[J]. 公路交通技术, 2002, (1): 7—9.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Analysis of safety of slope by FEM[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2002, (1): 7—9.
- [4] 蔡正银, 李相崧. 取决于材料状态的变形局部化现象[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 533—538.
CAI Zheng-yin, LI Xiang-song. State-dependent strain localization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 533—538.
- [5] 蔡正银, 李相崧. 无黏性土中剪切带的形成过程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 129—134.
CAI Zheng-yin, LI Xiang-song. Formation of shear band in cohesionless soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 129—134.
- [6] 孙红, 葛修润, 吴刚, 等. 上海黏性土变形特性的宏观细观实验研究[A]. 全国岩土与工程学术大会论文集(上册)[C]. 北京: 人民交通出版社, 2003. 374—378.