

抗剪强度折减有限元法的若干问题

陈立宏¹, 于 流², 张洪涛¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘 要: 抗剪强度折减有限元法已经成为当前边坡稳定分析中非常重要的一种手段, 由于其不需要预设滑裂面位置、能计算复杂的几何情况及材料条件等优点, 被不少学者认为是边坡稳定分析的未来。对现行的主要破坏判据进行了分析研究, 并对黏弹性模型的应用进行探讨。同时在 FLAC 中, 基于土石坝分析中常用的邓肯张 EB 模型和莫尔库仑模型, 以及邓肯提出对数非线性强度指标进行了二次开发, 编制了能考虑强度指标非线性的用户程序, 并将其应用于 261.5 m 高的糯扎渡大坝的坝坡稳定分析。

关键词: 边坡稳定; 抗剪强度折减有限元; 破坏判据; 非线性强度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S1-0426-05

作者简介: 陈立宏(1975-), 男, 浙江桐庐人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事岩土及地下工程等方面的研究与教学工作。E-mail: lhchen@bjtu.edu.cn。

Some issues on shear strength reduction finite element method

CHEN Li-hong¹, YU Shu², ZHANG Hong-tao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The shear strength reduction finite element method has become a main technique in the field of slope stability analysis due to its advantages of dealing with complex geometry and nonlinear material, and no need of predefined critical slip surface. Three main problems of shear strength reduction technology including the criteria for failure are discussed. An example analyzed by the ideal elastoplasticity model and rheological model is used to show the advantages and disadvantages of rheological model applied in slope stability calculation. And a user-defined subroutine is developed based on the Duncan-Chang EB model, Mohr-Coulomb model and logarithmical shear strength model, which is used to find the safety factor of Nuozhadu Embankment Dam with a height of 261.5 m.

Key words: slope stability; shear strength reduction; failure criterion; nonlinear strength

0 引 言

目前在分析边坡稳定性时, 常采用极限平衡条分法、极限分析法和有限元数值分析 3 种方法。基于塑性极限平衡原理的极限平衡条分法已被证明是广为使用的评价边坡稳定性最成功的方法^[1-2]。但是极限平衡条分法需要预设潜在滑裂面, 同时对于复杂几何条件和材料时岩土体的应力计算不够准确等局限, 三维条件下最小滑裂面的搜索也是一个难题。极限分析法是塑性力学上、下限定理在边坡稳定分析领域的具体应用。W.F. Chen (1975) 在边坡稳定分析领域引入了极限分析方法^[3]。Sloan (1988, 1989) 采用有限元和线性规划方法来寻找满足静力平衡的应力场(下限法)和满足位移协调的运动场(上限法)^[4-5]。陈祖煜基于上限定理和应用虚功原理, 形成了边坡稳定二维和三

维极限分析上限解^[6-7]。弹塑性有限元数值分析方法分为两种, 一种是通过有限元计算出边坡内的应力场, 计算滑面上的抗力和下滑力的比值, 然后依据数学规划方法等方法确定临界滑动面及相应的安全系数^[8]。第二种为强度折减弹塑性有限元分析方法, 它是将强度折减技术与弹塑性有限元方法相结合, 首先通过针对某一强度折减后进行边坡的弹塑性有限元分析, 然后再根据位移、广义剪应变等描述变形程度的某种物理量作为评判指标, 据此基于一定的经验评判准则确定边坡的极限平衡状态, 并将由此所确定的相应强度折减系数作为边坡的稳定安全系数。Griffith 等人 (1999) 应用强度折减非线性有限元方法, 取得了较

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放研究基金项目

收稿日期: 2011-04-26

好的成果^[9]。使得强度折减法成为了边坡稳定的一个新的发展方向 and 热点, 许多学者在这方面进行了深入的研究^[10-13]。陈卫兵等提出了采用黏弹塑性模型进行抗剪强度折减有限元计算, 并建议用其计算变形结合监测值进行滑坡预警^[14]。本文对抗剪强度折减有限元中的 3 个关键问题进行了探讨, 包括破坏判据、黏弹性模型的应用、非线性强度指标的应用。

1 破坏判据的选择

在抗剪强度折减过程中, 边坡破坏的判别标准主要有 3 种: ①有限元计算不收敛; ②坡体或坡面位移突变; ③潜在滑移面塑性区贯通。这 3 种判据有各自的适用范围和优缺点。

通过强度折减, 使边坡达到破坏状态时, 滑动面上的位移将产生突变, 产生很大的无限值的塑性流动, 有限元程序无法从有限元方程组中找到一个既能满足静力平衡, 又能满足应力—应变关系和强度准则的解, 因此可以根据力的不收敛或者位移不收敛来判断安全系数。早期通常采用解的不收敛作为破坏标准, 在用户指定的收敛准则下算法不能收敛, 表示应力分布不能满足土体的破坏准则和总体平衡要求, 意味着出现破坏。用户指定的收敛标准一般有两种: 一种是指定迭代次数为某一较大的数量, 例如 10000, 超过这个限值则认为土体破坏; 另一种是假定当节点的不平衡力与外荷载的比值小于 10^{-5} 作为终止条件。采用不收敛准则时, 可用二分法等方法求解安全系数, 较易获得相对准确的结果。但是不收敛可能由多种因素造成, 例如程序本身、模型和参数选取、网格精度等。

通过域内广义剪应变等某些物理量的变化和分布来判断, 如当域内的塑性区 (或某一幅值的广义剪应变) 连通时, 则判断边坡发生破坏。理论上, 边坡的变形过程总是伴随着一些物理量的出现和发展, 如塑性区、塑性应变、广义剪应变和应力水平等, 当这些物理量达到一定的值时, 边坡失稳。在一些模型试验中, 研究者们发现边坡破坏时形成了明显的剪切破坏带, 在边坡内自坡底向上贯通。根据这一思路, 为了克服以解的数值不收敛性作为破坏标准的缺点, 尝试着利用图形可视化技术绘制边坡内广义剪应变的分布图, 认为在某一折减系数下, 土体内某一幅值的广义剪应变自坡角底部下方向坡顶上方贯通, 则此前的折减系数为安全系数。

边坡的变形破坏总具有一定的位移特性, 因此有限元计算的位移结果是边坡失稳最直观的表达。如当折减系数增大到某一特定值时, 某部位位移突然迅速增大, 则认为边坡发生失稳。根据计算域内某一部

位的位移或最大位移与折减系数之间关系曲线的变化特征确定失稳状态。目前以位移作为失稳判据的一般方法是建立有限元计算的某个部位的位移或者最大位移值与折减系数的关系曲线, 以此进行判断。但曲线如何选择判据也有不同意见。通常的做法以曲线上的拐点判据或者位移突变点作为边坡处于临界破坏状态的。Tan 和 Donald 用某个节点的位移和折减系数的关系曲线处理为两段直线, 用两直线的交点对应折减系数作为安全系数^[11]。图 1 为某个边坡上一点水平位移随折减系数增加而增加的曲线, 从图上可知, 这三种判据将得出三种虽然相近但却不同的结果, 从而造成使用上的困惑。以作者的观点两直线的交点比较合理, 因为位移突变点实际已处于失效状态, 并非极限状态。而拐点的判断也存在一定的人为因素。

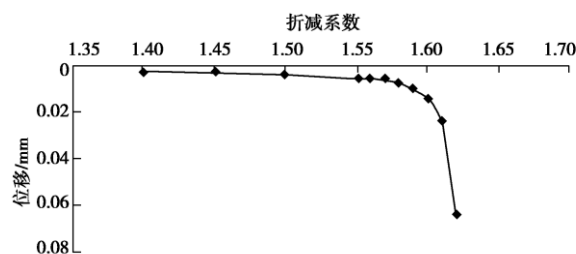


图 1 位移 - 折减系数曲线

Fig. 1 Curve of displacement-reduction factor

2 黏弹性模型的应用

关于黏弹性模型的应用, 陈卫兵等的论文已经进行了较为详细的研究和阐述^[14]。根据其研究成果, 黏弹性模型可根据其位移 - 时间曲线是否出现位移不收敛现象来较为准确的判断边坡的破坏。本文也利用 FLAC 程序对如图 2 所示的 20 m 高的简单边坡进行计算分析。计算模型为莫尔库仑理想弹塑性模型和 FLAC 自带的 Cvisc 模型, 该模型实际为 Kelvin 模型和 Maxwell 模型的串联。模型参数详见表 1 和表 2。

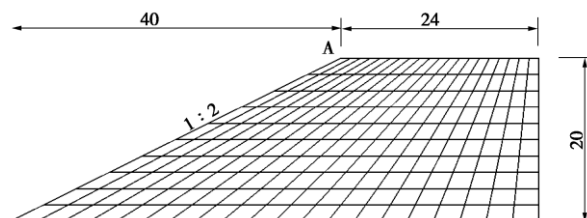


图 2 算例边坡网格

Fig. 3 Mesh of an example slope

图 3 和图 4 分别为不同模型计算时的剪应变增量图。通过对比发现, 在折减系数 1.61 和 1.62 时, 弹塑性模型的塑性区差异很小, 而黏弹塑性模型的结果表明, 在破坏前折减系数 1.59 时, 塑性区显然没有贯

通,而折减系数 1.60 时明显贯通。换言之,利用塑性图可以较为清楚地判断边坡失效与否,从而得到安全系数。此外计算结果也表明,采用黏弹塑性模型后,通过有限元计算的安全系数比弹塑性模型要略小,但是差别不大。考虑到黏弹塑性模型计算所需的时间是弹塑性模型的数十倍,建议实际应用汇总采用弹塑性模型即可,因为抗剪强度折减有限元本质上仍然是一种极限平衡方法,只和抗剪强度大小有关,与变形大小无关。

表 1 莫尔库仑模型计算参数

Table 1 Parameters of MC model

重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	弹模 E_M/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$
22	100	0.3	25.5	24.8	0

表 2 Cvisc 模型计算参数

Table 2 Parameters of Cvisc model

Kelvin 模量 E_K/MPa	Maxwell 黏滞系数 $\eta_M/(\text{MPa}\cdot\text{d}^{-1})$	Kelvin 黏滞系数 $\eta_K/(\text{MPa}\cdot\text{d}^{-1})$
100	10000	96

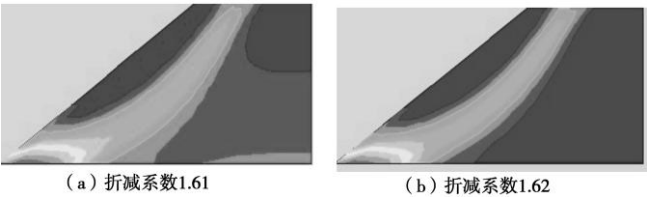


图 3 MC 模型计算下的塑性图

Fig. 3 Cloud charts of shear strain increment of elastoplastic model

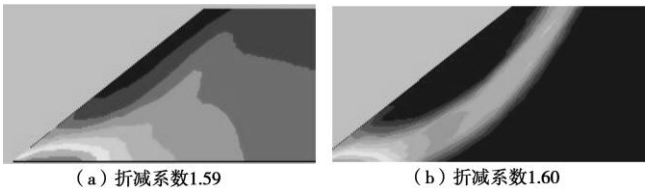


图 4 Cvisc 模型计算时的塑性图

Fig. 4 Cloud charts of shear strain increment of creep model

3 非线性强度指标的折减计算

众所周知,堆石料的抗剪强度在高压下会呈现非常明显的非线性,许多研究结果表明,堆石料的内摩擦角 φ 值在低应力条件下较大,可以超过 50° ,而在高应力条件下较小,可能低于 40° 。堆石料在随着围压的增高会发生颗粒的破碎现象,颗粒破碎引起粒间应力重新分布、粒间粘结力变弱、颗粒容易移动,从而引起内摩擦角降低。其莫尔强度包线是向下弯曲的,并不符合常用的线性的库仑强度定律^[15]。

目前坝工界常用的是邓肯提出的对数非线性强度指标计算公式^[16],

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3 / p_a) \quad , \quad (1)$$

式中 σ_3 为小主应力,即在进行三轴试验时的周围应力。 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 为材料参数。

在稳定分析时,如果根据滑裂面上不同的法向应力确定相应的 φ 值,可以合理地确定真正发挥的抗剪能力,从而找到具有物理意义的临界滑裂面的问题。因此,对堆石材料使用非线性强度指标进行坝坡稳定分析,可以更为合理的反映坝坡的实际安全状态。土石坝设计规范中也要求在可能的条件下对高坝依据非线性强度指标进行坝坡稳定计算。

目前的通用计算程序,例如 ABAQUS、FLAC 等均缺乏必要的非线性强度指标的岩土体本构模型,要开展有关计算分析,必须利用其二次开发环境,自行编写用户子程序。于沐等在 Visual studio 平台上用 C++ 语言编写了考虑非线性强度指标的邓肯张 EB 模型和莫尔库仑模型^[17]。这些模型的原理均为大家所熟知,非常便于程序的编写和实际应用。根据模型生成动态链接库文件(DLL 文件),在 FLAC^{3D} 中通过调用动态链接库实现本构模型的调用,从而实现了非线性强度指标的有限元折减计算。

云南华能澜沧江水电有限公司投资建设的糯扎渡水电站位于云南省普洱市思茅区和澜沧县交界处的澜沧江下游干流上(坝址在勘界河与火烧寨沟之间),是澜沧江中下游河段八个梯级规划的第五级。大坝坝高 261.5 m,是一座高堆石心墙坝。其大坝剖面如图 5 所示。通过强度折减方法分析糯扎渡心墙堆石坝的坝坡稳定性,当折减系数达到 1.59 时,求解平衡状态所需的迭代步数急剧增加,并且出现迭代不收敛现象,而且位移也发生突变。可认为 1.59 为坝坡稳定安全系数,临界滑动面出现在坝体下游坡(图 6),滑面形态基本属于圆弧形滑面,滑面贯穿心墙至上游坡面。

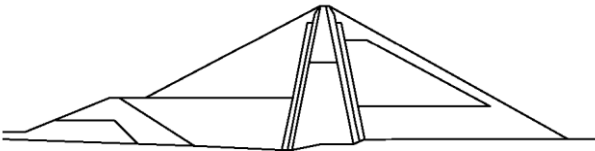


图 5 糯扎渡心墙堆石坝最大横剖面示意图

Fig. 5 Cross section of Nuozhadu Dam

4 结 语

抗剪强度折减有限元方法和极限平衡法、极限分析法、有限元法是目前边坡稳定计算的主要方法。抗剪强度折减有限元法实质是有限元法和极限平衡法的

结合, 具备无需预设滑裂面、应力计算准确、适用于复杂几何条件等优势, 由于只计算安全系数, 因此无

表 3 材料的物理特性和有限元计算参数

Table 3 Parameters of dam										
材料名称	$\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
混合土料	18.0	338	676	0.49	0.77	255	0.20	40.17	—	40.0
掺砾土料	19.6	421	842	0.56	0.78	299	0.25	43.52	11.38	0.0
I 区堆石料	20.0	1425	2850	0.26	0.73	540	0.16	54.2	10.1	0.0
II 区堆石料	21.5	1530	3060	0.175	0.76	376	0.1	50.6	10.2	0.0
III 区堆石料	20.9	1551	2000	0.18	0.78	378	0.15	52.68	11.57	0.0
细堆石过渡料	20.0	1100	2200	0.28	0.69	530	0.12	50.54	6.73	0.0
I 反	18.0	1240	2480	0.176	0.78	254	0.1	49.9	10.1	0.0
II 反	18.9	1450	2900	0.176	0.78	350	0.15	54.1	11.3	0.0
接触粘土	18.0	200	400	0.32	0.92	100	0.35	16.0	—	50.0



图 6 大坝临界破坏状态水平位移

Fig. 6 Critical slide surface and horizontal displacement of dam

需复杂的本构模型和模型参数。采用黏弹性模型虽然能更精确地判断失稳, 但与弹塑性模型相比, 精度提高有限, 考虑到计算所耗费时间以及黏滞系数的影响, 计算中采用弹塑性模型为佳。

失稳判据一直是近年来争论较多的话题, 采用某个节点的位移和折减系数的关系曲线处理为两段直线, 用两直线的交点对应折减系数作为安全系数显得更为合理。

强度非线性在高边坡稳定分析中是一个不可回避的问题, 利用商用程序的二次开发工程编写非线性强度指标的本构模型是解决这一问题的有效途径。

参考文献:

[1] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577 - 689.

[2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis-theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[3] 陈惠发. 极限分析与土体塑性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995. (CHEN Hui-fa. Limit analysis and soil plasticity[M].

Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese))

[4] SLOAN S W. Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12(1): 61 - 77.

[5] SLOAN S W, KLEEMAN P W. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 127(1): 293 - 314.

[6] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报. 2002, 24(1): 1 - 11. (CHEN Zu-yu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1 - 11. (in Chinese))

[7] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析-原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CHNE Zu-yu. Rock slope stability analysis-theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))

[8] FREDLUND D G, SCOULAR R E G. Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis[J]. Slope Stability Engineering, YAGI Norio, YAMAGAMI Takuo,

- JIANG Jing-Cai, editors. A. A. Balkema. 1999, 1: 31 - 36.
- [9] GRIFFITH S D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, **49**(3): 387 - 403.
- [10] UGAI K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(2): 190 - 195.
- [11] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(3): 1 - 8. (LUAN Mao-tian, WU Ya-jun, NIAN Ting-kai. An alternative criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(3): 1 - 8. (in Chinese))
- [12] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 254 - 260. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **22**(2): 254 - 260. (in Chinese))
- [13] 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, 2003(1): 21 - 27. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 21 - 27. (in Chinese))
- [14] 陈卫兵, 郑颖人, 冯夏庭. 考虑岩土体流变特性的强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 101 - 105. (CHEN Wei-bing, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting, et al. Study on strength reduction technique considering rheological property of rock and soil medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 101 - 105. (in Chinese))
- [15] 中国水利水电科学研究院. 糯扎渡心墙堆石坝坝坡稳定分析及其控制标准以及坝体分区优化研究[R]. 北京: 2003. (China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Slope stability analysis and control criteria and optimization of dam partition of Nuozhadu rockfill dam[R]. Beijing: 2003. (in Chinese))
- [16] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 2001. (SL274—2001 Design code for rolled earth-rock fill dams[S]. 2001. (in Chinese))
- [17] 于 沭. 高心墙土石坝变形特性及裂缝开展的数值模拟研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院. 2010. (YU Shu. Numerical analysis on the deformation and crack propagation in high earth core rockfill dam[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)