

修正有限元强度折减法与失稳判据在 边坡稳定分析中的应用

施建勇, 曹秋荣, 周璐翡

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098)

摘 要: 现有的有限元强度折减法用于边坡稳定性分析, 在土体变形特性的认识和失稳判据上有缺陷。基于土体的应力-应变曲线和邓肯-张非线性弹性模型进行有限元强度折减法计算分析, 在现有方法仅对强度参数——黏聚力 c 和内摩擦角 φ 进行折减的基础上, 提出了切线弹性模量 E_t 的折减算法, 更全面地体现折减的内涵; 提出了以潜在滑动区域的能量积分变化作为判据, 根据能量积分与折减系数关系曲线的特征, 将其拟合两段直线, 以其交点所对应的折减系数作为边坡的安全系数。比较分析了修正 Duncan 有限元强度折减法、失稳判据与文献的计算结果, 同时分析了边坡滑动区能量积分计算范围对结果的影响, 并用于南水北调东线实际工程计算分析。结果表明: 修正 Duncan 有限元强度折减法能较全面考虑土体的变形和强度特性, 新的边坡滑动失稳判据可行且具有较好的计算稳定性, 能保证工程建设的安全。

关 键 词: 强度折减法; 切线弹性模量; 变形能; 失稳判据

中图分类号: TU457

文献标识码: A

Modified finite element method for shear strength reduction and instability criterion in slope stability analysis

SHI Jian-yong, CAO Qiu-rong, ZHOU Lu-fei

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The finite element method for strength reduction recently used in slope stability analysis has disadvantages in revelation of soil deformation behavior and instability criterion. Based on stress strain curves of soil, Duncan-Zhang nonlinear elastic model and direct reduction of strength parameters (cohesion c and friction angle φ) of soil, discount method for tangent modulus E_t is presented. The connotation of reduction is entirely revealed. And the exchange of deformation energy in potential slip area is proposed as instability criterion. On the characteristics of relation curve of deformation energy in slip area and reduction coefficient, two straight lines are drawn, the value of reduction coefficient at intersection point of the two lines is choice of safety factor of slope stability. The calculation results by modified Duncan's finite element method with new instability criterion and references are compared, the influence of calculation area on deformation energy is analyzed, the new method is used in slope stability analysis of south channel of East line in South-to-North Water Diversion Engineering. All results show that the soil behaviors of deformation and strength are more entirely considered in modified Duncan's finite element method for shear strength reduction, new instability criterion of slope is reliable and calculation is steady; safety of slope construction can be ensured.

Key words: strength reduction method; tangent elastic modulus; deformation energy; instability criterion

1 引 言

Duncan^[1]提出的边坡安全系数的定义, 为使边坡刚好达到临界破坏状态时, 对土体材料的抗剪强度进行折减的程度。但现有的仅对抗剪强度折减的计算分析方法有明显的缺陷。分析发现: 随着折减系数的增大, 强度参数 c 、 φ 减小, 土体

的破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随之减小, 在破坏比 R_f 不变的情况下, 土体的极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 也相应减小。所以, 土体的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和轴向应变 ε_a 的关系曲线将随着折减系数的增大而同比例折减。图 1 表明, 当折减系数 F_1 从 1.0 开始增加时, 相应的破坏偏应力满足 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f_1} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{f_2} > (\sigma_1 - \sigma_3)_{f_3}$ 。

收稿日期: 2013-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(No.41172234)。

第一作者简介: 施建勇, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事软土特性与加固技术、城市垃圾填埋有关的研究工作。

E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn

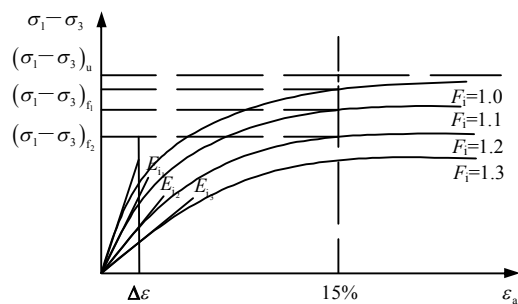


图1 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线
Fig.1 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$

显然, 图1中初始切线模量 E_{i1} 、 E_{i2} 、 E_{i3} 等随着折减系数增大逐渐减小, 而不仅是强度或强度参数的折减。

此外, 现有的收敛性、土体位移和表示土体塑性某些物理量的变化与分布3类失稳判据也存在一定的局限性^[2-6]。以有限元数值计算迭代过程计算是否收敛作为准则, 尽管 Griffith^[3]和 Dawson^[4]的研究认为, 该准则计算所得的安全系数与极限平衡法十分接近, 结果可靠, 但其存在一定的人为任意性。以边坡某部位或节点位移与折减系数曲线的特征作为判据的优点是具有明确的物理意义; 但取坡体中点、坡脚点、坡顶点位移或是整个坡体每次计算得到的最大位移的变化作为判据等没有明确的确定方法。以土体塑性物理量的分布变化作为失稳判据物理意义明确且判断比较直观; 但有关学者研究认为, 土体滑动面塑性区域贯通是土体破坏的必要条件而非充分条件^[5-6]。

本文拟对 Duncan 有限元强度折减法与失稳判据进行修正, 并应用于南水北调东线工程渠道的边坡稳定分析。

2 修正 Duncan 有限元强度折减法与失稳判据

根据图1, 若令轴向应变在 $\varepsilon_a = d$ 时破坏, 应力达破坏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 则有

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{d}{a + bd} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_a = d$ 为土体的破坏应变; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为土体的破坏应力; a 、 b 均为 Duncan 模型参数。

相应的切线模量可以表示成:

$$E_i = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{d(1 - R_f)} \quad (2)$$

式中: E_i 为切线模量, R_f 为破坏比。

在破坏应变 d 和破坏比 R_f 保持不变时, 可以推出 E_i 的折减率与破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的折减率是一致的, 即破坏偏应力折减满足:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f' = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / F_i \quad (3)$$

初始切线模量的折减满足:

$$E_i' = E_i / F_i \quad (4)$$

强度参数折减后的弹性模量应表示成:

$$E_i' = (1 - R_f s)^2 E_i' = (1 - R_f s)^2 (E_i / F_i) \quad (5)$$

可见, 仅仅对强度或强度参数进行折减的强度折减法, 并没有从土体的变形性质上全面反映强度折减法的内涵, 只有同时考虑初始切线模量和强度或强度参数的折减才是满足土体变形性质的强度折减法。

与此同时, 基于前述失稳判据的局限性, 拟采用危险滑动区的能量作为新的失稳判据, 如图2所示。

以新的强度折减法进行有限元计算, 由对应的应力 σ 和应变 ε 得到在边坡可能滑动区域内的变形能量 $E = \iint \varepsilon d\sigma ds$, 也可以简化为滑弧所经过单元的变形能量之和 $E = \varepsilon \sigma \Delta V$, 如图2中所有阴影单元的变形能量和。对于有限元计算结果, 可以整理得到总能量 E 随着折减系数 F_i 的变化情况, 作出 $E - F_i$ 的变化曲线, 并找出边坡临界破坏时的安全系数 F_s , 如图3所示。将滑动区能量积分与折减系数的关系曲线处理为两段直线; 折减系数增加, 滑动区能量积分近似线性增加; 超过某一点后, 减系数增加滑动区能量积分增加加快; 这两段直线的交点认为是土坡的临界破坏点。由计算可知, 使用能量判据所得的安全系数具有较好的可信度, 且一般说来, 计算得到填土边坡的安全系数小于天然边坡的安全系数^[7]。

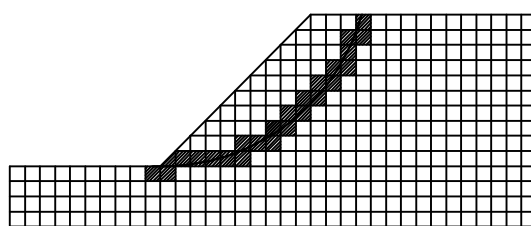


图2 能量积分示意图

Fig.2 Deformation energy diagram

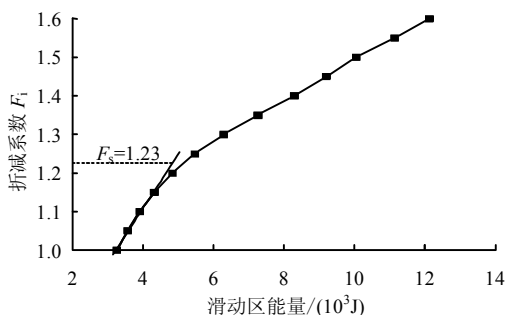


图3 能量与折减系数曲线拐点

Fig.3 Inflexion of curve of energy and reduction coefficient

新能量失稳判据的优点在于避免了位移变化等判据仅选取坡体中某一点的变化来进行判断的人为任意性。

3 计算分析

3.1 不同计算方法影响分析

根据文献[8], 分析一个均质土坡, 坡高为 20 m, 设计坡比为 1:1, 坡体下有 8 m 厚同质土体作为地基, 边坡的外轮廓如图 2 所示。基底为固定支承, 不允许位移; 两侧设置滑动支承, 允许竖向沉降。整个土体分 5 次均匀加载, 每次 4 m。土体的参数见表 1。

表 1 土体的非线性弹性参数

Table 1 Nonlinear elastic parameters of soil

γ /(kN/m ³)	φ /(°)	c /kPa	R_f	K	n	K_{ur}
20.0	20.0	40.0	0.85	300	0.45	360

文献[8]中绘制了折减系数同土坡顶点水平位移的关系曲线, 当折减系数与坡顶水平位移的曲线斜率减小到某一固定值时土体刚好达到“破坏”状态, 来确定临界破坏状态的安全系数, 计算得出的土体安全系数为 1.27; 利用本文修正方法和判据得到的安全系数为 1.23, 见图 3。计算结果基本接近, 差别在于使用的计算程序和失稳判据不同。

3.2 不同能量积分计算范围影响分析

分别计算危险滑动区(以下简称 dc)往上再增加一层单元(以下简称 1sc)、危险滑弧往下再增加一层单元(以下简称 1xc)、上下各增加一层单元(以下简称 1sxc)、往上增加两层单元(以下简称 2sc)、往下增加两层单元(以下简称 2xc)和上下各增加两层单元(以下简称 2sxc)情况下的能量积分值, 并将折减系数和上述不同积分范围下求得的能量值整理作出 $E-F_i$ 曲线图, 见图 4。

由图 4 可知, 在相同的折减系数下, 能量积分计算范围的增大使得能量值也相应地增大。但是滑动区能量 E 和折减系数 F_i 的曲线基本呈现出向右平行移动的趋势, 所以, 可以初步推测能量积分影响范围的增大对于最后安全系数的求解影响很小。为此, 分别比较和分析了 1sc、1sxc 和 2sxc 三种情况下的曲线(分别如图 5 所示)。由图 3 和图 5 可得, 1sc 情况下安全系数为 $F_s=1.22$, 1sxc 情况下安全系数 $F_s=1.22$, 2sxc 情况下的安全系数 $F_s=1.23$ 。经比较计算可知, 能量积分范围对最后安全系数的取值

影响并不大, 即修正 Duncan 有限元强度折减法对能量积分范围具有比较高的计算稳定性。为了便于分析, 实际计算时只取紧靠滑动区域单元进行能量积分。

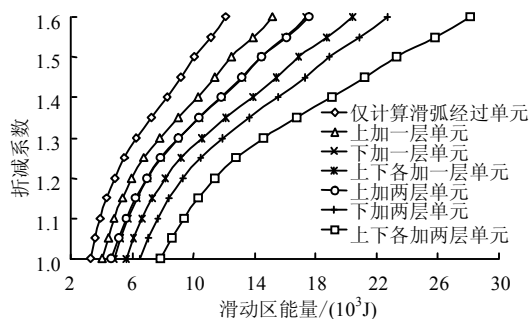
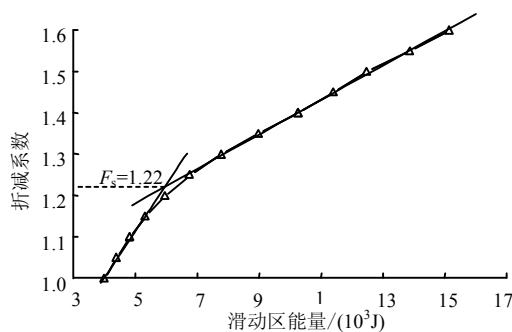
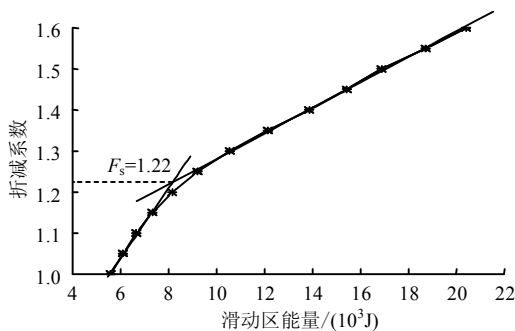


图 4 能量积分层数影响比较

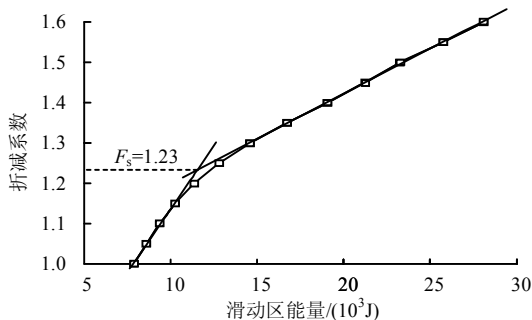
Fig.4 Comparison of the influence on deformation energy layers



(a) 仅计算滑弧经过单元能量积分时的安全系数取值



(b) 上下各加一层单元计算能量积分时的安全系数取值



(c) 上下各加两层单元计算能量积分时的安全系数取值

图 5 能量积分影响范围变化情况下安全系数取值
Fig.5 Safety factors under the exchange of influence area by deformation energy

3.3 南水北调东线工程边坡稳定分析

利用新强度折减方法对南水北调东线工程穿越黄河南干渠的边坡稳定性进行分析, 计算选取淹豆桥断面 (设计桩号 2+300 m) 为例进行边坡稳定计算, 断面计算简图见图 6。

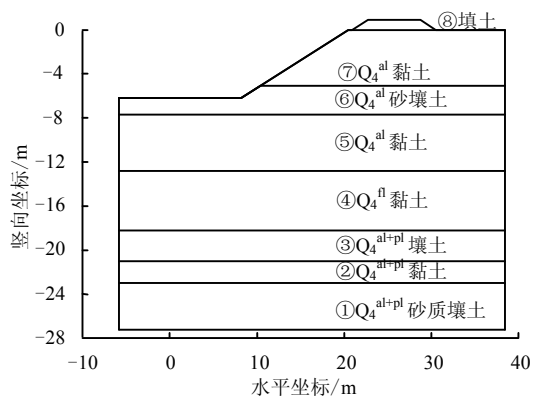


图 6 淹豆桥断面计算简图

Fig.6 Calculating simplified diagram of Yandou bridge section

网格划分图如图 7 所示, 共划分为 230 个单元, 计节点数为 257 个。有水平向约束 44 个, 垂直向约束 19 个 (其中边坡底面两个方向上均约束, 边坡两侧只约束水平方向), 并根据工程实际情况采用开挖计算, 荷载分为 5 级, 第 1 级为初始状态, 剩下的 4 级代表分 4 次开挖。断面材料种数为 10 种 (如图 7), 计算所需的具体的材料参数如表 2 所示。采用河海大学岩土工程研究所编制的 BCF 有限元强度折减程序进行计算。

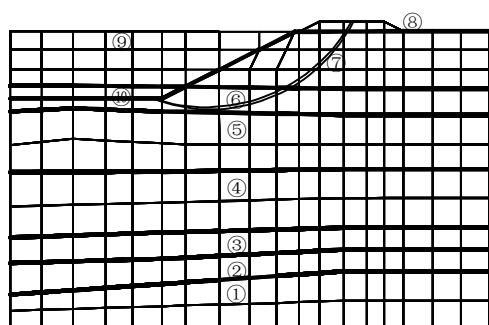


图 7 淹豆桥断面有限元计算网格划分以及滑弧位置

Fig.7 Finite element mesh of Yandou bridge section and the location of slip circle

对可能滑动区域的能量积分, 即计算图 7 中可能滑动经过单元 (共计 13 个单元) 的能量和。经过计算, 分别得到相应折减系数和滑动区能量, 将两者的数据关系整理成如图 8 的曲线。由图 8 整理得到曲线的拐点, 即坡体的临界破坏点, 其对应的折减系数即边坡的安全系数为 1.44。南干渠的施工

已经顺利完成, 没有发生边坡不稳定的征兆, 工程建设是安全的。

表 2 有限元计算参数取值表

Table 2 Finite element calculating parameters

材料类型	γ (kN/m ³)	ϕ ($^{\circ}$)	c /kPa	R_f	K	n	K_{ur}
①	21.0	33.0	14	0.982	190.0	0.680	380
②	19.8	24.5	47	0.881	144.5	0.590	289
③	20.1	26.0	23	0.796	130.0	0.640	260
④	18.8	24.5	47	0.881	144.5	0.590	289
⑤	18.8	24.5	47	0.881	144.5	0.590	289
⑥	19.8	19.0	17	0.831	110.0	0.230	220
⑦	18.5	13.0	16	0.555	31.1	0.646	62
⑧	18.8	24.5	47	0.881	144.5	0.590	289
⑨	18.5	130	16	0.555	31.1	0.646	62
⑩	19.8	19.0	17	0.831	110.0	0.230	220

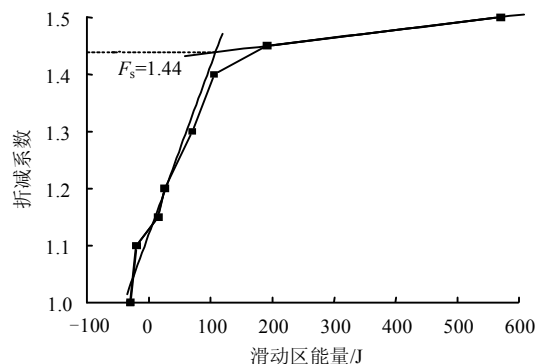


图 8 淹豆桥断面安全系数确定

Fig.8 Safety factor of Yandou bridge section

为对比分析, 同时采用毕肖普方法对淹豆桥断面的安全系数进行计算, 结果为 $F_s=1.75$, 用修正 Duncan 有限元强度折减法计算所得的安全系数较小, 如果按修正 Duncan 有限元强度折减法计算结果进行实际工程施工控制, 能保证工程安全。

4 结 论

(1) 修正 Duncan 有限元强度折减法与现有的有限元强度折减法相比, 不仅仅折减强度参数, 而是全面考虑土体的变形和强度特性, 从土体的应力-应变关系出发, 深入分析折减的内涵, 提出了考虑折减的初始切线模量和非线性弹性模型的修正公式。

(2) 提出了沿滑动区变形能积分的思路, 由能量积分与折减系数关系曲线的趋势线确定边坡稳定安全系数, 得到边坡滑动失稳的新判据, 通过与现有文献计算结果和积分范围影响对比分析, 证明新的边坡滑动失稳判据可行且具有较好的计算稳定性。

(3) 修正 Duncan 有限元强度折减法和边坡滑动失稳的新判据用于对南水北调东线工程穿越河南干渠淹豆桥断面的边坡稳定性进行分析, 计算结果比常规的毕肖普法计算结果偏安全, 提出的新方法能保证工程建设的安全。

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 Division, ASCE**, 1996, 122(7): 577—596.
- [2] ZIENKIEWICZ O C. Associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. **Geotechnique**, 1975, 25(4): 671—689.
- [3] GRIFFITHS D V. Slope stability analysis by finite elements [J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [4] DAWSON E M. Slope stability analysis by strength reduction [J]. **Geotechnique**, 1999, 49(6): 835—840.
- [5] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [6] 吕攀峰. 土坡稳定分析方法研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 周璐璐. 以滑动区能量为判据的有限元强度折减法边坡稳定性分析[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [8] 迟世春, 关立军. 应用强度折减有限元法分析土坡稳定的适应性[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2005, 37(9): 1298—1302.
- [9] CHI Shi-chun, GUAN Li-jun. Soil constitutive relation for slope stability by finite element method with strength reduction technology[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, 37(9): 1298—1302.
- [10] 上接第 236 页
- [11] OMRAN M E, TOKMECHI Z. Sensitivity analysis of symmetrical hardfill dams[J]. **Middle-East Journal of Scientific Research**, 2010, 6(3): 251—256.
- [12] 何蕴龙. Hardfill 坝结构设计方法[J]. **水电能源科学**, 2011, 29(3): 67—70.
- [13] 李平, 何蕴龙, 张艳峰. Hardfill 坝坝基弹模的变化对坝体应力影响的研究[J]. **农村水利水电**, 2008, (10): 91—94.
- [14] 吴凤先, 何蕴龙, 李平. Hardfill 坝坝基竖向应力大小及分布规律求解[J]. **农村水利水电**, 2009, (7): 72—79.
- [15] BATMAZ S, KOKSAL A, ERGENEMAN I, et al. Design of the 100 m high Oyuk hardfill dam[J]. **International Journal on Hydropower & Dams**, 2003, 10(5): 138—142.
- [16] 黎学皓, 刘勇. CSG 筑坝技术在洪口过水围堰中的应用[J]. **水利水电施工**, 2009, (3): 15—20.
- [17] 赖福梁, 林琳. 贫胶粗粒料筑坝新技术在洪口水电站的设计与实施[J]. **中国水利**, 2007, (21): 50—52.
- [18] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. **土木工程学报**, 2007, 40(2): 97—103.
- [19] YANG Shou-long. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(2): 97—103.
- [20] CHAZALLON C, HICHER P Y. A constitutive model coupling elastoplasticity and damage for cohesive-frictional materials[J]. **Mechanics of Cohesive-frictional Materials**, 1998, 3(1): 41—63.
- [21] GU Xue-fan. Shear behaviour of sandstone-concrete joints and pile shafts in sandstone[D]. Australia: Monash University, 2001.
- [22] 敖麟. 重力坝坝基附近的应力分布及有限单元法解答[J]. **水利学报**, 1984, (8): 15—25.
- [23] AO Lin. Stress distribution in the vicinity of gravity dam foundation and the solution obtained by FEM[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1984, (8), 15—25.