

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.017

土坡等圆心角斜条分法与经典条分法的比较

董育烦¹ 孟永旭¹ 王永明²

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014 ; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 :通过对等圆心角斜条分法(D 条分法)及传统条分法求解安全系数过程的分析 ,定性地分析了 D 条分法与传统条分法的不同之处 ,再结合澳大利亚 ACADS 考核算例计算结果 ,对 D 条分法与传统条分法的差异加以定量分析 ,同时也对定性分析结论的正确性加以验证 .结果表明 ,D 条分法与传统条分法已经有很大程度的不同 ,当平均应力水平接近于 0 或 1 时 ,所得出的安全系数与传统条分法得出的安全系数的差异将更大 ,应直接采用平均应力水平来评价土坡的稳定性 .

关键词 :土坡 ;等圆心角斜条分法 ;D 条分法 ;应力水平 ;安全系数

中图分类号 : TU432 **文献标识码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2009)06-0697-05

土坡计算的经典方法是条分法 ,传统的垂直条分法需要引入较多的假定才能使问题得到解答 ,但计算结果相对于严格方法往往存在较大的偏差^[1-2] .等圆心角斜条分法(以下简称 D 条分法)是笔者于 2006 年提出的^[3] ,它是一种以等圆心角斜条分为基础的土坡稳定极限平衡计算方法 .与垂直条分法相比 ,D 条分法对条间力的假定避免了传统垂直条分产生的诸多问题 .此外 ,D 条分法原理简单 ,便于工程人员理解掌握 ,所得出的计算结果不仅能够反映土坡稳定性 ,更能反映土坡各部分的应力状态及其差异 ,能够为土坡处理设计提供更为直接的理论依据 .本文在定性分析的基础上 ,通过对考核算例的计算 ,定量比较了 D 条分法与传统条分法计算结果的差异 .

1 D 条分法基本原理

D 条分法以某一圆弧滑裂面圆心为中心 ,用等圆心角扇形来分割滑动土体 ,形成近似等腰梯形的土条(图 1) .

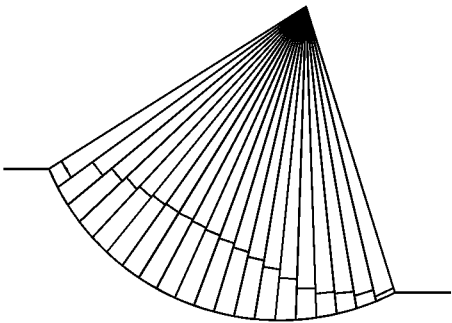


图 1 土坡斜条分示意图

Fig. 1 Soil slope with gradient slices

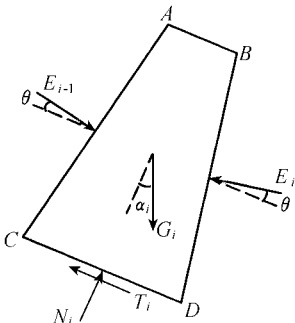


图 2 D 条分法单个土条受力分析

Fig. 2 Stress analysis of a single slice for D slice method

斜条分保证了土条间不存在相对切向滑动 ,土条上的作用力可以简化为图 2 所示的数个作用力 :土条间法向作用力 E_{i-1} 、 E_i ,土条自身重力 G_i ,土条底面法向力 N_i 及切向力 T_i .在滑裂面的垂直方向与平行方向 ,建立土条力的平衡方程 :

$$N_i = G_i \cos \alpha_i + (E_{i-1} + E_i) \sin \theta \tag{1}$$

$$E_{i-1} \cos \theta + G_i \sin \alpha_i = T_i + E_i \cos \theta \tag{2}$$

式中 : θ ——条间法向作用力与土条底面的夹角 ; α_i ——重力与土条底面法向的夹角 .再将 Mohr-Coulomb 破坏

准则^[4]:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{3}$$

用于计算土条底部极限切向力 T_f ,就可以根据式:

$$S_i = \frac{\tau}{\tau_f} = \frac{T}{T_f} \tag{4}$$

计算单个土条的应力水平^[5] ,加权平均就可以得出土坡整体应力水平及稳定安全系数:

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i l_i}{l} \tag{5}$$

$$F_s = \frac{1}{\bar{S}} \tag{6}$$

有关 D 条分法原理推导详见文献 [3] .

2 D 条分法与经典条分法的定性比较

本文着重将 D 条分法与经典的瑞典条分法和简化 Bishop 条分法进行比较 ,以分析 D 条分法与传统垂直条分法不同之处 ,理解 D 条分法的特点 .定性的比较分析从以下几个方面来阐述 .

2.1 作用力的假定

首先 ,对于条间力的假定 ,D 条分法与经典条分法是不同的 .瑞典条分法假定每一土条两侧作用力的合力方向均和该土条底面平行 ,因而在建立土条底部法线方向力的平衡时 ,可以不考虑 ,但是这个假定会使得牛顿作用力与反作用力原理在 2 个土条之间得不到满足^[6] . Bishop 条分法考虑了条间力的作用 ,但问题不能求解 ,简化 Bishop 条分法是在 Bishop 条分法的基础上假定各土条之间的切向力均略去不计 ,也就是假定条间力的合力是水平的 ,才使得问题能够求解 .

以上 2 个问题对于 D 条分法均不存在 .由于剖分形式不同 ,D 条分法中两土条间的法向作用力大小相等方向相反(图 3) ,且 D 条分法中两土条间不存在切向的相对位移趋势 ,故不考虑切向条间力是合理的 .

其次 ,土条剖分形式也影响了力的作用位置 .如图 4 所示 ,经典条分法由于是垂直条分 ,土条重力的作用点与底面法向反力的作用点并不在同一底面法向线上 ;而 D 条分法因斜条分的采用 ,两作用点位于同一底面法向线上 .这就使得经典条分法在计算过程中引入了附加力矩 $W_i d_i$,此力矩在计算分析中起到减小下滑的作用 ,反映在计算结果上 ,经典条分法得到的安全系数比 D 条分法大一些 .

2.2 平衡条件的满足

瑞典条分法与简化 Bishop 条分法均采用垂直土条 ,它们对土条自身的受力方向与作用位置作了一些假定 ,这些假定有些是任意的 ,缺乏合理性 .即使是在假定的基础上 ,土条力矩、垂直力与水平力都难以保证完全平衡 . D 条分法通过合理的假定使得垂直力与水平力得到平衡 ,对于土条力矩的平衡 ,由于 D 条分法采用类似不平衡推力法来计算求解未知量 ,所以并不要求力矩的严格平衡 .

D 条分法与经典条分法建立力或力矩平衡的目的 ,本质上都是为了求解安全系数 .经典条分法只是一般形式的剖分 ,没有直接面向力或力矩的平衡 ,而 D 条分法从条分形式到作用力的假定都是为了建立力的严格平衡 ,这就使得与 D 条分法相比 ,经典条分法所建立的力或力矩平衡并不是十分严格 .3 种方法所满足的平衡条件见表 1 .

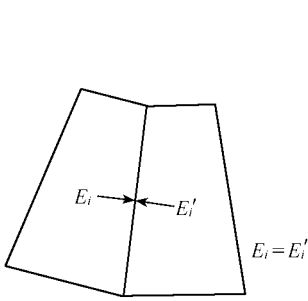


图 3 D 条分法假定的条间作用力
Fig. 3 Assumed forces between two slices for D slice method

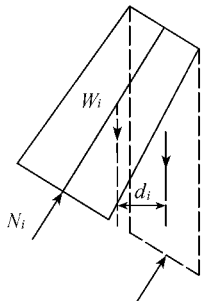


图 4 D 条分法与经典条分法力矩比较
Fig. 4 Comparison between moments of D slice method and vertical slice methods

表 1 3 种方法平衡条件比较

Table 1 Comparison of equilibrium conditions for three slice methods

计算方法	整体力矩	土条力矩	垂直力	水平力
瑞典条分法	✓	×	×	×
简化 Bishop 条分法	✓	×	×	✓
D 条分法	×	×	✓	✓

注 :✓表示满足该项平衡条件 ,×表示不满足 .D 条分法计算中 ,有剩余不平衡力时 ,表示土坡已不能维持稳定 .

2.3 安全系数的定义

瑞典条分法与 Bishop 条分法求解公式均可以从 Bishop 强度折减公式(式 7))推导出.采用 Bishop 强度折减法推导安全系数时,总是先将土条的强度参数先进行一定的折减,然后再将之代入力矩平衡公式求解^[7],这样就默认各土条的折减程度是相同的,即认为各土条的安全储备是一样的.

$$\tau = \frac{\tau_f}{F_s}$$

(7)

D 条分法是从顶部土条开始逐步求解对下一土条的作用力,同时求出底部的剪力,实际剪力与极限抗剪强度之比即为该土条的应力水平.因各土条重量不同以及土条自身在滑坡体中所处的位置不同,得出的实际剪力与极限抗剪强度也不相同,应力水平也就有了差异.应力水平的差异实际上是土条强度储备的不同,对于图 5 所示的一般土坡而言,顶部($S_i = 1$)的土条是主动滑动土条,无强度储备,已经达到极限状态,若无下部条块支撑,即可下滑;而土坡下部($-1 \leq S_i < 0$)土条则是抗滑土条,它们提供了大部分的抗滑力;中部($0 \leq S_i < 1$)为过渡区域,土条由主动滑动向抗滑过渡.

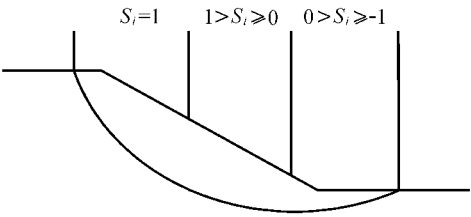


图 5 一般土坡各部分土条应力水平的差异
Fig. 5 Differences of slice stress levels in common soil slope

2.4 求解方式

D 条分法与 Bishop 强度折减法的本质区别是:Bishop 强度折减法是先将强度统一折减再代入平衡方程计算求解,而 D 条分法是先分别求解强度发挥值再加权平均,最后利用式(6)计算平均折减系数,即为稳定安全系数. Bishop 强度折减法先折减的做法能够对强度作任意的折减,不论现实土坡是否能够真实达到平衡,总能通过整体力矩的平衡求解安全系数. D 条分法分别求解土条强度发挥程度再折减,当计算的土坡不稳定时,最后的土条力的平衡分析中将出现不平衡力.对于不稳定的土坡(Bishop 强度折减法计算得到的 $F_s < 1.0$) D 条分法只能全部以 $\bar{S} = 1$ 来表示.

基于 Bishop 强度折减的方法,以力矩平衡来计算安全系数值,大重量土条的抗滑或滑动力矩的大小对整体的影响得到体现.而 D 条分法对不同重量的土条等权重地将应力水平加权平均,这就使得当土坡安全时,大重量土条起抗滑作用, D 条分法夸大了小重量危险土条的影响,安全系数偏小;而当土坡偏不安全时, D 条分法又夸大了小重量抗滑土条的影响,安全系数又变为偏大.有关 D 条分法的偏差,将在下文进一步讨论.

3 算例计算的定量比较

为了考察实际计算中 D 条分法与经典条分法的差异,同时也为了验证笔者开发的 D 条分法分析程序的正确性,下面将使用 D 条分法计算澳大利亚计算机应用协会(ACADS)边坡稳定分析的 3 道考核题(图 6)^[8-9].

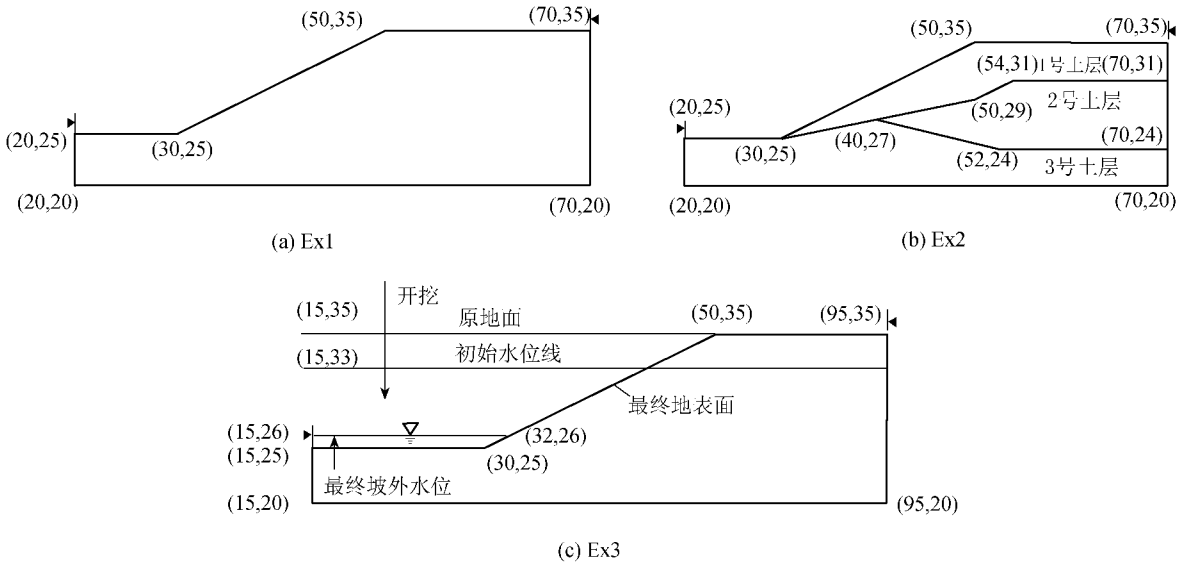


图 6 澳大利亚 ACADS 边坡稳定考核题

Fig. 6 Slope stability examples from ACADS , Australia

考核题 Ex1 是均质边坡,单一土层,条件比较简单.考核题 Ex2 同考核题 Ex1 具有相同的几何形状,但土层材料不均一,包含 3 层不同性质的土层.考核题 Ex3 是一个地基的快速开挖的考题,D 条分法计算采用的孔隙压力处理方法是把所给的地下水面作为测压管面.表 2 是考核题计算中采用的强度参数值,计算得到的最小安全系数见表 3.

表 2 考核题土层强度参数取值^[10]

Table 2 Soil parameters for examples

考核题	土层	c'/kPa	$\varphi'/(\text{^\circ})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
Ex1		3.0	19.6	2.00
	1 号土层	0.0	38.0	1.95
Ex2	2 号土层	5.3	23.0	1.95
	3 号土层	7.2	20.0	1.95
Ex3		11.0	28.0	2.00

表 3 考核题安全系数

Table 3 Safety factors for three slice methods

考核题	简化 Bishop 条分法 ^[9]	D 条分法	ACADS 建议值 ^[8]
Ex1	0.993	1.00	1.00
Ex2	1.406	1.32	1.39
Ex3	1.431	1.30	1.53

从表 3 计算结果的绝对值来看,D 条分法的计算结果大体上与简化 Bishop 条分法以及 ACADS 建议值保持一致,合理地反映了所计算土坡的稳定程度,这就从一定程度上说明了 D 条分法计算方法与计算程序的正确性.

对比分析来看,D 条分法 Ex1 的计算结果比简化 Bishop 条分法值略大,同 ACADS 建议值相等;Ex2 的计算结果同简化 Bishop 条分法以及 ACADS 建议值相差了约 5%,而 Ex3 的计算结果相差最大,达到了 15%.这样的结果也就验证了 2.1 与 2.4 中定性分析的结论:Ex1 处于临界状态,D 条分法结果偏大;Ex2 与 Ex3 处于稳定状态,D 条分法结果偏小,且所计算的土坡越稳定,差值越大.

4 结论与建议

为了使 D 条分法与传统方法的计算结果具有可比性,本文引入了公式(6),实际上,D 条分法与传统方法已经有很大程度的不同.在 ACADS 考核题计算分析中,D 条分法的计算结果同传统方法的差异就说明了这点.由于公式(6)的引入,当平均应力水平接近于 0 或 1 时,所得出的安全系数与传统方法得出的安全系数的差异将更大,故建议直接采用平均应力水平来评价边坡的稳定性(图 7): $\bar{S} = 0$ 表示土坡绝对安全,相当于均质或层状土层的平地; $0 < \bar{S} < 1$ 表示土坡处于安全状态,数值越小越安全; $\bar{S} = 1$ 则表示土坡处于临界状态或滑动,而对于不稳定土坡的稳定性不再加以区分.上述根据平均应力水平将土坡稳定性分类也可以这样理解:D 条分法考虑安全程度的差异,不考虑失稳程度的差异.

可见,D 条分法假定合理,原理简单,作为一种不同于传统垂直条分的土坡极限平衡分析方法,在土条作用力假定、土条应力状态差异反映以及问题求解方式上均有独特的优势.

参考文献:

[1] 钱家欢.土力学[M].2 版.南京:河海大学出版社,1997:168-173.
[2] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2002:199-208.
[3] 董育烦,张发明,郭炳跃,等.土坡等圆心角斜条分稳定性分析法[J].岩土力学,2008,29(9):2595-2598.(DONG Yu-fan, ZHANG Fa-ming, GUO Bing-yue, et al. Analytical method of soil slope stability based on gradient slice and equal central angle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2595-2598. (in Chinese))
[4] 工程地质手册编委会.工程地质学手册[M].4 版.北京:中国建筑工业出版社,2007:147-149.
[5] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM5): 1629-1653.
[6] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,2003:304-305.
[7] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.
[8] DONALD I B, GIAM P. The ACADS slop stability programs review[C]//Proc. 6th International Symposium on Landslides. Christchurch: [s. n.], 1992: 1665-1670.
[9] 陈祖煜.土质边坡稳定分析[M].北京:中国水利水电出版社,2003:365-376.

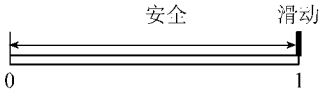


图 7 平均应力水平代表的土坡稳定性
Fig. 7 Slope stability represented by average stress level

[10] Rocscience Inc. 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes :Verification Manua[EB/CD]. Toronto ,Canada : Rocscience Inc. 2003 :7-45.

Comparison of D slice method and classical slice methods for soil slopes

DONG Yu-fan¹ , MENG Yong-xu¹ , WANG Yong-ming²

(1. East China Investigation and Design Institute , CHECC , Hangzhou 310014 , China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Through analysis of the solution processes of safety factors using the gradient slice method with equal central angles (referred to as the D slice method) and the traditional slice methods , the difference between them was qualitatively analyzed . Furthermore , based on the calculated results of three examples from ACADS , Australia , the above difference was quantitatively analyzed , and the accuracy of the result of the qualitative analysis was validated . The results show that the D slice method is quite different from the traditional slice methods , especially when the average stress level is close to 0 or 1 . In that case the difference between the safety factors of the present and traditional methods will be larger . The average stress level should be used to directly evaluate the stability of soil slopes .

Key words : soil slope ; gradient slice method with equal central angles ; D slice method ; stress level ; safety factor

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63 ,CN32-1117/TV ,ISSN1000-1980 ,双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考 .

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响 .刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号 .

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,每期定价 12.00 元 ,全年 6 期共 72.00 元 .欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系 .

编辑部地址 :南京市西康路 1 号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786343

E-mail :xb@hhu.edu.cn

网址 :http://kkb.hhu.edu.cn/xb/index_xb.htm