

PROCEEDING OF NATIONAL SYMPOSIUM ON
EARTH-ROCKFILL DAMS AND GEOTECHNICAL MECHANICS

土石坝与岩土力学

——技术研讨会论文集

中国水利学会岩土力学专业委员会 编
水利水电土石坝工程信息网

北京出版

土石坝与岩土力学

—— 技术研讨会论文集

**Proceeding of National Symposium on
Earth-rockfill Dams and Geotechnical Mechanics**

中国水利学会岩土力学专业委员会
水利水电土石坝工程信息网 编

地 震 出 版 社

2001

【内容提要】 土石坝在坝工建设中有悠久的历史。由于它具有良好的适用性和经济性,近二、三十年以来,土石坝工程建设在我国迅速发展。为及时总结经验,进一步推动我国土石坝和相应的岩土力学的发展,本书选编了2001年10月在四川省都江堰市召开的全国土石坝与岩土力学技术研讨会的论文56篇。内容涉及具有各类防渗体的土石坝筑坝技术和岩土力学理论分析、试验与观测等各方面,分五个部分:理论与计算、观测与分析、坝料与试验、工程与总结和其它。可供坝工及岩土力学领域的设计、施工、科研人员等以及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝与岩土力学——技术研讨会论文集 / 刘瑛珍、郦能惠主编;
中国水利学会岩土力学专业委员会, 水利水电土石坝工程信息网编.
—北京:地震出版社, 2001.10
ISBN 7-5028-1963-0

I. 土... II. ①刘...②中...③水... III. ①土石坝—学术会议—文集
②岩土力学—学术会议—文集 IV. TV641-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第067500号

土石坝与岩土力学——技术研讨会论文集

中国水利学会岩土力学专业委员会 编
水利水电土石坝工程信息网
责任编辑:李和文

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:68423031

门市部:68467991

传真:68467972

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京市朝阳燕华印刷厂

版(印)次:2001年10月第一版 2001年10月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:532千字

印张:20.75

印数:0001~1000

书号:ISBN 7-5028-1963-0/P·1093(2514)

定价:46.00元

版权所有 翻印必究

前 言

全国土石坝与岩土力学技术研讨会于2001年10月在四川省都江堰市召开,会议由中国水利学会岩土力学专业委员会和水利水电土石坝工程信息网联合主办,由水利部四川水利水电勘测设计研究院、国家电力公司北京勘测设计研究院和水利部南京水利科学研究院联合承办,会议得到了中国水利学会和水利部水利水电规划设计总院的关心与指导。

土石坝是一种最常见的坝型。土石坝工程适应性强,在不良的地形、地质和气候条件下,有较大的优越性;在缩短工期,降低造价,节省劳力、三材和对外交通运输量等方面也有明显的优点。随着科学技术的不断进步,有着悠久历史的土石坝的设计和建设规模均列坝工建设之首。世界上已建成的土石坝,高度超过300m。我国天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝(坝高178m)和小浪底水利枢纽斜心墙堆石坝(坝高164m)的建成,以及一大批具有国际先进水平的高土石坝项目的设计研究,标志着我国土石坝筑坝技术达到了一个新的水平。

举办此次会议和选编本论文集的目的在于推动我国土石坝与岩土力学的发展,期望将我国土石坝工程的设计与施工,从较多地依靠工程经验提高到较多地掌握内在规律,从而达到安全可靠、技术先进、经济合理。

会议征文通知发出后得到了水利水电工程界同仁的热情支持,主办单位收到了大量的稿件,此外,还特邀从事土石坝工程研究的专家、教授撰写了数篇论文。经过评审编入本集的论文共计56篇,入编的有些论文因篇幅或格式等原因,编者作了一些修改。论文内容丰富、面广、涉及到的土石坝工程包括:土质防渗体堆石坝和非土质防渗体堆石坝、混凝土面板堆石坝、沥青混凝土心墙坝和土工膜防渗坝等;还涉及到岩土力学的室内试验、现场测试、本构模型和数值分析。论文包括土石坝与岩土力学各个方面,有筑坝材料、计算分析、原型观测、坝基处理、抗震工程和施工质检。对土石坝的稳定分析、应力变形分析和沉降计算等关键技术以及混凝土面板堆石坝的计算分析和原型观测等均有论述。论文反映了土石坝与岩土力学当前的研究成果。

中国水利学会岩土力学专业委员会秘书长 邵能惠
水利水电土石坝工程信息网 刘琪珍

2001年9月

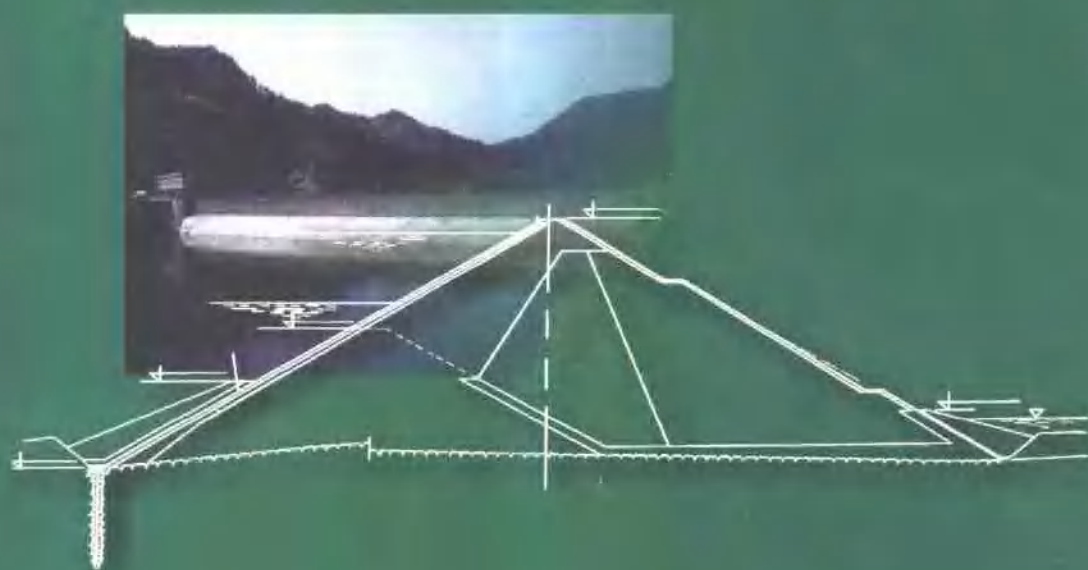
论文集由刘瑛珍、邴能惠统筹策划，邴能惠、陈建苏组织统稿，邴能惠、刘瑛珍、洪重光、齐俊修审阅、修改，陈建苏、刘更新、高利华、张玉龙编辑、排版。论文集由水利水电土石坝工程信息网筹资出版，并得到北京勘测设计研究院和《土石坝工程》编辑部同志的大力支持，谨此一并致谢。

PROCEEDING OF NATIONAL SYMPOSIUM ON EARTHROCKFILL DAMS AND GEOTECHNICAL MECHANICS

主 编: 刘瑛珍 酆能惠

责任编辑: 李和文

封面设计: 徐雁生



ISBN 7-5028-1963-0



9 787502 819637 >

ISBN 7-5028-1963-0 (I)
2004-03-01

目 录

第一部分 理论与计算

边坡稳定分析的通用条分法的原理和使用方法	陈祖煜 (3)
关于土石坝边坡的稳定安全系数标准问题	王新奇等 (13)
寻找土石坝稳定安全系数极值的新进展	阎中华等 (18)
土工参数变异对边坡稳定计算的影响	蔡袁强等 (24)
用应力变形分析预测大坝性状	邴能惠等 (30)
非线性解耦 K-G 模型及其特点	高莲士等 (36)
面板堆石坝三维计算的几个问题	卢廷浩等 (43)
面板堆石坝三维耦合非线性数值计算方法与实例分析	吴兴征等 (46)
堆石料静动力耦合本构模型及参数确定与实验验证	栾茂田等 (57)
瓦都水库粘土心墙土石坝分区设计与应力应变分析	孙 陶 (70)
土石坝沉降计算的几个问题	曹国利等 (75)
大坝沉降变形模糊信息分析的计算精度及稳定性探讨	唐彤芝等 (87)
软土坝基上筑坝时的坝基稳定问题——塑流规律研究	戴永志等 (92)
软土坝基塑流的非线性有限元分析	戴永志等 (96)

第二部分 观测与分析

高面板堆石坝的新型安全监测设备	邴能惠等 (103)
土石坝原型观测资料的统计分析	邴能惠等 (108)
天生桥面板堆石坝变形性状及三维反馈分析	高莲士等 (112)
“635”粘土心墙砂砾石坝工程性状分析	陈生水等 (119)
十三陵蓄能电站上池堆石坝体沉降变形分析	张亦昭 (126)
八都面板堆石坝原型观测与资料分析	熊国文等 (134)
十三陵抽水蓄能电站上池大坝渗流观测	周正新 (139)
小浪底水利枢纽土石坝安全监测自动化及运用	宗志坚等 (143)

第三部分 坝料与试验

微小应变测试技术及堆石坝坝料的动剪切模量与阻尼比	孔宪京等 (147)
堆石料与基岩大型直剪试验研究	齐俊修 (157)
黄土类土的工程性质研究及在高土石坝中的应用	孙胜利等 (164)
西郊、三坪两水库大坝心墙土料分散性试验研究	樊恒辉等 (171)
强风化岩作为高土石坝防渗料的试验研究	周春意等 (180)

均质土坝压实性填土的抗剪强度及影响因素分析	瞿剑华等(185)
四川碾压式土石坝建设与筑坝材料研究综述	陆恩施(189)
紫坪铺水利枢纽工程筑坝材料研究	刘 勇(192)
砂砾石反滤料级配的实用设计方法	孙胜利等(198)
浇筑式沥青混凝土心墙两侧副心墙材料的探讨	于生清(203)
小浪底大坝防渗体填筑质量检测与控制	吴中伟等(207)
满拉水利枢纽工程宽级配砾质土心墙堆石坝填筑质量控制	任金明(211)
YS-30 型应力路径大型三轴仪及其在粗粒土试验研究中的应用	秦红玉等(217)

第四部分 工程与结构

天荒坪抽水蓄能电站上水库防渗方案的设计决策	肖贡元等(225)
江苏宜兴抽水蓄能电站上库主坝设计的关键技术问题	肖贡元等(232)
紫坪铺水利枢纽工程混凝土面板堆石坝设计	杨志宏(239)
小浪底工程大坝岩基排水孔组合过滤体研究与应用	姜苏阳等(243)
黄河小浪底水利枢纽进口岩石高边坡稳定分析和加固处理	郭朝文等(246)
满拉土心墙堆石坝阻滑板抗震措施设计	杨玉航等(252)
小浪底大坝防渗墙墙段连接技术	段世超等(255)
浙江省某水库软基筑坝设计方案探讨	陈秀良等(259)
严寒地区过水土坝设计与施工应注意的几个问题	刘 丽等(263)
紫坪铺混凝土面板堆石坝施工分期研究	曾统全(267)
小浪底大坝 F ₁ 断层处理	段世超等(271)
小浪底大坝坝基地震液化问题研究	葛 勇等(275)

第五部分 其他

聚丙烯纤维混凝土在白溪钢筋混凝土面板堆石坝中的应用	郑子祥等(285)
复合土工膜在王甫洲土石坝工程中的应用	翁建良等(291)
土工膜在土石坝防渗中的应用	施建勇等(296)
土工膜技术在徐州地区堤坝加固工程中的应用	白莉萍等(302)
高压摆喷灌浆防渗板墙在二道河子水库的应用	吕惠民等(307)
薄型混凝土防渗墙在病险水库坝基处理中的应用	肖树斌等(311)
振冲法加固岸堤水库砂壳心墙坝的实践	李旺林(315)
土石坝 CAD 系统开发设计简介	王家维等(318)
工程地质剖面图 CAD 绘图系统	徐春才(321)
编后语	(326)

第一部分 理论与计算

土石坝与岩土力学——技术研讨会论文集

边坡稳定分析的通用条分法的原理和使用方法

关于土石坝边坡的稳定安全系数标准问题

寻找土石坝稳定安全系数极值的新进展

土工参数变异对边坡稳定计算的影响

用应力变形分析预测大坝性状

非线性解耦 K-G 模型及其特点

面板堆石坝三维计算的几个问题

面板堆石坝三维耦合非线性数值计算方法与实例分析

堆石料静动力耦合本构模型及参数确定与实验验证

瓦都水库粘土心墙土石坝分区设计与应力应变分析

土石坝沉降计算的几个问题

大坝沉降变形模糊信息分析的计算精度及稳定性探讨

软土坝基上筑坝时的坝基稳定问题——塑流规律研究

软土坝基塑流的非线性有限元分析

原书空白

边坡稳定分析的通用条分法的原理和使用方法

陈祖煜¹

〔摘 要〕 介绍通用条分法稳定分析的原理, 计算公式和使用方法。

〔关键词〕 土石坝 稳定计算 通用条分法 摩根斯坦法

1. 前言

在即将颁布的《碾压式土石坝设计规范》中, 对边坡稳定分析方法的有关规定, 作了重要修改, 要求对圆弧和任意形状滑裂面, 分别采用 Bishop 法和 Morgenstern-Price 法。作者曾经专门著文说明, 为什么要用这两个方法来代替传统的瑞典法和滑楔法。本文拟对规范推荐的 Morgenstern-Price^[6]的原理和使用方法作一说明。在规范中, 采用了由作者和 Morgenstern 教授改进后的计算公式^[2, 3], 即该法的积分形式。本文在介绍这一方法时, 沿用国内已有的提法, 称其为“通用条分法”。为了配合本法作为规范推荐的方法在土石坝设计中推广使用, 作者特将有关的土石坝边坡稳定分析程序 STAB 的普及版, 以及求解力和力矩平衡方程的源程序在网上公布, 可供使用者随意下载使用(参见第 4 节)。

2. 边坡稳定分析的通用条分法

2.1 通用条分法的静力平衡方程及其解

建立在极限平衡原理基础上的边坡稳定分析法包含有以下几条基本原则:

(1) 关于安全系数的定义。

土坡沿着某一滑裂面滑动的安全系数 F 是这样定义的, 将土的抗剪强度指标降低为 c'/F 和 $\tan\phi'/F$, 则土体沿着此滑裂面处处达到极限平衡, 即

$$\tau = c'_e + \sigma'_n \cdot \tan\phi'_e \quad (1)$$

式中:
$$c'_e = \frac{c'}{F} \quad (2)$$

$$\tan\phi'_e = \frac{\tan\phi'}{F} \quad (3)$$

上述将强度指标的储备, 作为安全系数定义的方法, 是经过多年的实践被工程界广泛承认的一种作法。

(2) 摩尔-库伦强度准则。

设想土坡的一部分沿着某一滑裂面滑动。在这个滑裂面上, 土体处处达到极限平衡, 即正应力 σ'_n 和剪应力 τ 满足摩尔-库伦强度准则。设土条底的法向力和切向力分别为 N 和 T , 则有

$$\Delta T = c'_e \Delta x \sec \alpha + (\Delta N - u \Delta x \sec \alpha) \tan \phi'_e \quad (4)$$

1 中国水利水电科学研究院。

式中: c' , ϕ' ——土的有效抗剪强度指标;

α ——土条底倾角, $\tan \alpha = dy/dx$;

u ——孔隙水压力, 通常定义孔隙水压力系数

$$r_u = \frac{u}{dW/dx} \quad (5)$$

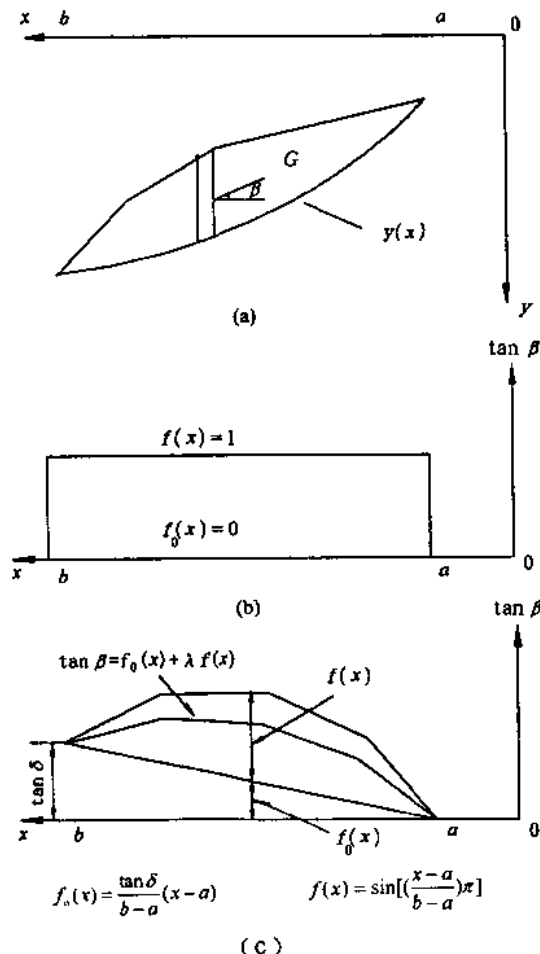
(3) 静力平衡条件。

将滑动土体分成若干土条, 每个土条和整个滑动土体都要满足力和力矩平衡条件。在根据静力平衡条件建立起来的方程组中, 未知数的数目超过了方程式的数目, 解决这一静不定问题的办法是对多余未知数进行假定, 使剩下的未知数的数目和方程数目相等, 从而解出安全系数的值。

2.2 静力平衡方程的普遍形式及其解

2.2.1 作用在土条上的力

设想某一边坡的滑动土体沿滑裂面 $y=y(x)$ 下滑 (图 1)。此时, 根据安全系数的定义, 土体和滑裂面上的抗剪强度指标均已缩减为 c'_0 , $\tan \phi'_0$ 。在滑动土体中切出一垂直土条, 研究这个浸水土体, 分析作用在其上的力, 计有:



(a) 滑坡体 (b) 侧向力假定 1 (c) 侧向力假定

图1 边坡稳定的条分法

- (1) 土条重量 ΔW ，浸润线上为天然重，浸润线下为饱和重；
- (2) 坡表面垂直荷重 $q\Delta x$ ；
- (3) 地震力，水平地震力 $\Delta Q = \eta\Delta W$ ，其作用力与土条底距离为 h_e ；
- (4) 作用在土条垂直边上的总作用力 G (即土骨架间的法向有效作用力和水压力之和)，它与水平线的夹角为 β ，其作用点的 y 坐标值为 y_i (图 2)。

2.2.2 静力平衡微分方程及其解

对土条建立 x 和 y 方向的静力平衡方程

$$\Delta N \sin \alpha - \Delta T \cos \alpha + \Delta Q - \Delta(G \cos \beta) = 0 \quad (6)$$

$$-\Delta N \cos \alpha - \Delta T \sin \alpha + (\Delta W + q\Delta x) - \Delta(G \sin \beta) = 0 \quad (7)$$

将式(4)代入式(6)，(7)，消去 ΔN ，令 $\Delta x \rightarrow 0$ ，得到静力平衡的微分方程

$$\cos(\phi'_e - \alpha + \beta) \frac{dG}{dx} - \sin(\phi'_e - \alpha + \beta) \frac{d\beta}{dx} G = -p(x) \quad (8)$$

其中

$$p(x) = \left(\frac{dW}{dx} + q \right) \sin(\phi'_e - \alpha) - r_s \frac{dW}{dx} \sec \alpha \sin \phi'_e + c'_e \sec \alpha \cos \phi'_e - \eta \frac{dW}{dx} \cos(\phi'_e - \alpha) \quad (9)$$

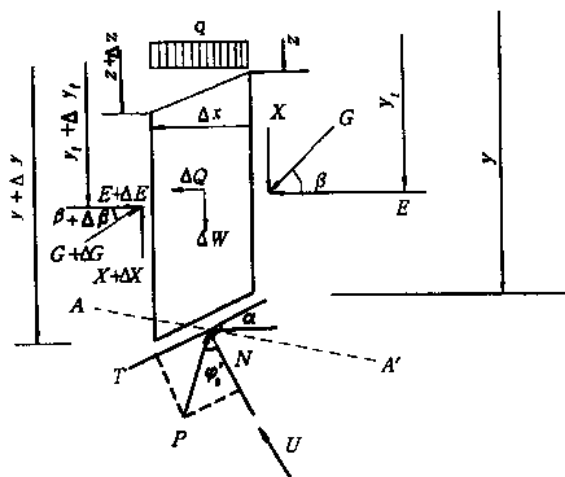


图2 作用在土条上的力

同时，将作用在土条上的力对土条底中点取矩，建立力矩平衡方程

$$\begin{aligned} & (G + \Delta G) \cos(\beta + \Delta\beta) \left[(y + \Delta y) - (y_i + \Delta y_i) - \frac{1}{2} \Delta y \right] \\ & - G \cos \beta \left(y - y_i + \frac{1}{2} \Delta y \right) + G \sin \beta \Delta x - \eta \frac{dW}{dx} h_e = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

h_e 为侧向力作用点距条底的垂直距离，即 $h_e = y - y_i$ 。当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时，可得

$$G \sin \beta = -y \frac{d}{dx} (G \cos \beta) + \frac{d}{dx} (y_i G \cos \beta) + \eta \frac{dW}{dx} h_e \quad (11)$$

2.2.3 静力平衡方程的解

微分方程组(8)和(11)的边界条件是

$$G(a) = 0 \quad (12)$$

$$G(b) = 0 \quad (13)$$

$$y_t(a) = y(a) \quad (14)$$

$$y_t(b) = y(b) \quad (15)$$

式(8)是一个一阶非线性常微分方程, 它的积分形式是

$$G(x) = -\sec(\phi'_e - \alpha + \beta)s^{-1}(x) \left[\int_a^x p(\zeta)s(\zeta)d\zeta - G(a) \right] \quad (16)$$

其中

$$s(x) = \sec(\phi'_e - \alpha + \beta) \exp \left[- \int_a^x \tan(\phi'_e - \alpha + \beta) \frac{d\beta}{d\zeta} d\zeta \right] \quad (17)$$

式(16)的积分形式是

$$\int_a^x G(\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) dx = \int_a^x \eta \frac{dW}{dx} h_e dx + [G \cos \beta (y_t - y)]_a^x \quad (18)$$

令 $x = b$, 并使用式(12)至式(15)的边界条件, 式(16)和式(17)可化为

$$\int_a^b p(x)s(x)dx = 0 \quad (19)$$

$$\int_a^b p(x)s(x)t(x)dx - M_e = 0 \quad (20)$$

其中

$$t(x) = \int_a^x (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) \exp \left[\int_a^\xi \tan(\phi'_e - \alpha + \beta) \frac{d\beta}{d\zeta} d\zeta \right] d\xi \quad (21)$$

$$M_e = \int_a^b \eta \frac{dW}{dx} h_e dx \quad (22)$$

在获得式(20)时应用了式(16)、(19)和下面的关系式:

$$\int_a^x G(\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) dx = - \int_a^x \left[\int_a^\xi p(\zeta)s(\zeta)d\zeta \right] d\xi = - \left[t \int_a^x p(\zeta)s(\zeta)d\zeta \right]_a^x + \int_a^x p(\zeta)s(\zeta)t(\zeta)d\zeta \quad (23)$$

式(19)和(20)分别反映滑动土体力和力矩平衡要求。这两个方程中包含一个未知数, 即安全系数 f , 它隐含在中 ϕ'_e 和 c'_e 中, 另外还包含一个变量 $\beta(x)$, Morgenstern 和 Price 假定其符合某一形状的分布, 留下一个待定常数和 F 一起求解, 即假定

$$\tan \beta = \lambda f(x) \quad (24)$$

在大部分的计算中, 我们令 $f(x) = \text{常数} = 1$, 见图 1(b)。这种特例称 Spencer 法。

Chen 和 Morgenstern 发现, 为了保证在 $x=a$ 和 $x=b$ 处剪应力成对原理不被破坏, 要求 $\beta(x)$ 在该两端为指定值。因此假定

$$\tan \beta = f_0(x) + \lambda f(x) \quad (25)$$

$f_0(x)$ 在 $x=a$ 和 $x=b$ 处为指定值, $f(x)$ 在 $x=a$ 和 $x=b$ 处为零, 见图 1(c) 所示。使用这一规定, 可以进一步限制对未知函数 $\beta(x)$ 作假定的随意性。见 2.3 节的讨论。

2.3 静力平衡方程的数值解

2.3.1 Newton-Raphson 迭代法

通常采用 Newton-Raphson 迭代法求解下列静力平衡方程中的 F , λ 。

$$G_n(F, \lambda) = \int_a^b p(x)s(x)dx = 0 \quad (26)$$

$$M_n(F, \lambda) = \int_a^b p(x)s(x)t(x)dx - M_e = 0 \quad (27)$$

先假定一个 F_1 , λ_1 , 代入式(26)、(27), 下一个更为接近其解 F^* , λ^* 的数值 F_2 , λ_2 通过下式求得($i=1$)。

$$\Delta F_i = F_{i+1} - F_i = \frac{G_n \frac{\partial M_n}{\partial \lambda} - M_n \frac{\partial G_n}{\partial \lambda}}{\frac{\partial G_n}{\partial \lambda} \frac{\partial M_n}{\partial F} - \frac{\partial G_n}{\partial F} \frac{\partial M_n}{\partial \lambda}} \quad (28)$$

$$\Delta \lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i = \frac{-G_n \frac{\partial M_n}{\partial F} + M_n \frac{\partial G_n}{\partial F}}{\frac{\partial G_n}{\partial \lambda} \frac{\partial M_n}{\partial F} - \frac{\partial G_n}{\partial F} \frac{\partial M_n}{\partial \lambda}} \quad (29)$$

重复上述步骤, 直至下列收敛标准得到满足

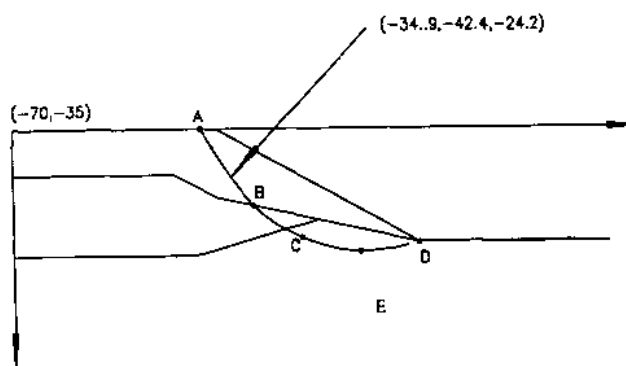
$$\Delta F_i < \varepsilon \quad (30)$$

$$\Delta \lambda_i < \varepsilon \quad (31)$$

用式(28)、(29)求解, 需要确定 $\partial M_n / \partial \lambda$, $\partial M_n / \partial F$, $\partial G_n / \partial \lambda$, $\partial G_n / \partial F$ 的数值。计算这些导数的公式和详细推导参见文献[4]。

2.3.2 算例

图3算例为澳大利亚 ACAD 协会考核稳定分析程序的一个考题^[5]。图示滑裂面为使用圆弧滑裂面和 Bishop 法算得的最小安全系数为 1.378, 对同一弧使用 Spencer 法的安全系数为 1.382。迭代过程见表 1。可见, 安全系数从初值 1.350, 过渡到 1.382, λ 从 0.465 过渡到 0.377, 经过了 3 次迭代, 不平衡的力和力矩 G_n 和 M_n 分别减少了 1 万倍, 收敛的速度非常快。在第 4 节中, 此例将作为网上提供的附源程序的测试考题, 再作进一步介绍。



澳大利亚 ACAD 标准问卷题。圆弧, Bishop 法 $F_s = 1.378$, 同一弧, Spencer $F_s = 1.382$

图3 通用条分法算例

表1 图1所示算例迭代过程

No.	$G_n(F, \lambda)$	$M_n(F, \lambda)$	F	λ
1	27.113120	123.942300	1.350149	4.646409E-01
2	1.355217	19.561880	1.382552	3.872862E-01
3	9.619116E-03	1.118679E-01	1.382340	3.769034E-01

3. 通用条分法的有关理论问题

3.1 通用条分法的理论意义

上节介绍的通用条分法,反映了作者与 Morgenstern 教授本人对 Morgenstern-Price 法的改进,其主要的改善如下:

(1)应用严格的解析方法获得了边坡稳定极限分析方法的力和力矩平衡方程式的闭合解,即式(9)和式(10),使这一方法获得了严格的数学力学内涵。式(9)和式(10)是一种形式解,也就是说,稳定分析的各种简化法在引入各自的简化假定后,都可以从式(9)和式(10)得到回归。

(2)提出了对土条侧向力倾角 β 假定在两端的限制条件,以保证剪应力成对的原理不受破坏。

(3)提出了收敛性能极好的数值分析方法。改进方法采用 Newton-Raphson 法,求解包含有两个未知数的二元非线性联立方程式(9)和式(10)。作者提供全部计算导数项的解析解^[4],因而具有极好的收敛特性。

关于第3个改进,我们已在2.3.2节中作了讨论。在本节中,我们只讨论前两个改进。

3.2 关于通用条分法的普遍意义的讨论

控制方程式(9)和式(10)具有普遍意义,它可以推广到大部分边坡稳定分析的简化方法中。我们知道当取 $f(x)=1$ 时,通用条分法即回归为 Spencer 法^[7],因此,Spencer 法是通用条分法的一个特例。下面,我们分别证明 Bishop 法^[1]和滑楔法^[8]也是通用条分法的特例。

(1)通用条分法可以回归为 Bishop 法。

Bishop 法假定滑面为圆弧,同时假定条向力倾角 $\beta=0$,通过条块垂直方向的静力平衡计算滑面上的有效法向力,然后对圆心取矩计算安全系数(图4)。具体公式如下:

$$F = \frac{\sum_{n=1}^N \{[\Delta W (1 - r_u) \tan \phi' + c' \Delta x] / [\cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi' / F)]\}}{\sum_{n=1}^N [\Delta W \sin \alpha + \Delta Q R_d]} \quad (32)$$

式中: R_d —水平地震力与圆心的垂直距离。如果将通用条分法的坐标轴原点设在圆心同一水平线上(图4),则通用条分法的力矩平衡方程式(式(10))在引入相应的假定条件后,可以回归为毕肖普法,推导过程如下。

当 $\beta=0$ 时,式(17)可化为

$$s = \sec(\phi'_c - \alpha) \quad (33)$$

同时,在圆弧的条件下,有

$$t = - \int_a^x \tan \alpha d\xi + y(a) = - \int_a^x \frac{dy}{d\xi} d\xi + y(a) = -y = -R \cos \alpha \quad (34)$$

$$p(x) = \frac{dW}{dx} \sin(\phi'_e - \alpha) - r_u \frac{dW}{dx} \sec \alpha \sin \phi'_e + c'_e \sec \alpha - \eta \frac{dW}{dx} \cos(\phi'_e - \alpha) \quad (35)$$

将式(33)、(34)、(35)代入式(12)得

$$-R \int_a^b \left[\frac{dW}{dx} \sin(\phi'_e - \alpha) - r_u \frac{dW}{dx} \sec \alpha \sin \phi'_e + c'_e \sec \alpha \cos \phi'_e - \eta \frac{dW}{dx} \cos(\phi'_e - \alpha) \right] \sec(\phi'_e - \alpha) \cos \alpha dx - \int_a^b \eta \frac{dW}{dx} h_e dx = 0 \quad (36)$$

式(20)最终归结为

$$\int_a^b \left[\frac{dW}{dx} \cos \alpha \tan(\phi'_e - \alpha) - r_u \frac{dW}{dx} \sin \phi'_e \sec(\phi'_e - \alpha) + c'_e \sec(\phi'_e - \alpha) \cos \phi'_e - \eta \frac{dW}{dx} R_d \right] dx = 0 \quad (37)$$

根据式(2)和式(3)的定义, 式(37)可化为(令 $\Delta x \rightarrow 0, N \rightarrow \infty$)

$$\int_a^b \left[\left(\frac{dW}{dx} \tan \phi'_e - r_u \frac{dW}{dx} \tan \phi'_e + c'_e \right) \cos \phi'_e \sec(\phi'_e - \alpha) - \frac{dW}{dx} \sin \alpha - \eta \frac{dW}{dx} \cdot R_d \right] dx = 0 \quad (38)$$

不难发现, 式(38)和(36)是等同的。

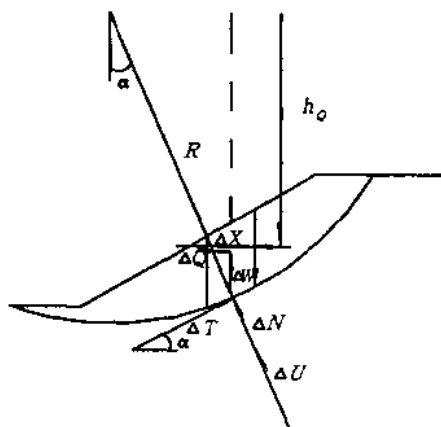


图4 Bishop 法计算简图

(2) 通用条分法回归为滑楔法。

滑楔法仅应用静力平衡条件计算安全系数。因此, 需要对每一个土条间作用力倾角 β 给定一个假定值。修订的土石坝规范规定了 $\beta = 0$ 和 $\beta = \alpha + \gamma$ (其中 γ 为土条坡面的倾角) 两种处理方案, 并对滑楔法计算公式作了规定。如果将图 2 中的条块右侧 G 用 G_R 代表, 左侧的 $G + \Delta G$ 用 G_L 来代表, 规范提供的计算 G_L 的公式如下:

$$G_L = \sec(\phi'_e - \alpha + \beta_L) [G_R \cos(\phi'_e - \alpha + \beta_R) - (\Delta W - \Delta V) \sin(\phi'_e - \alpha) + u \sec \alpha \sin \phi'_e \Delta x - c'_e \sec \alpha \cos \phi'_e \Delta x + \Delta Q \cos(\phi'_e - \alpha)] \quad (39)$$

计算从顶部第一个滑块开始, 按式(39)逐条计算条间的内力 G 。最终获得一个位于坡趾条块的 G_L , 反复调整 F 值, 直至坡趾的 G_L 为零。

我们知道在土条宽度很小, α 可视为常数时, 式(8)可以变为

$$\frac{d}{dx} (G \cos(\phi'_e - \alpha + \beta)) = -p(x) \quad (40)$$