

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

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

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

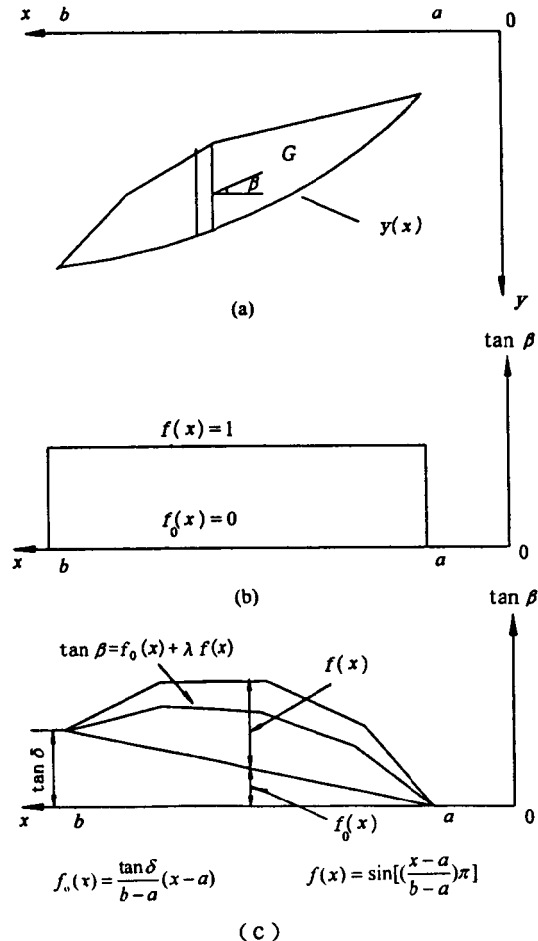
(3) 静力平衡条件。

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'/λ 、 $\tan\phi'/\lambda$ 。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

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

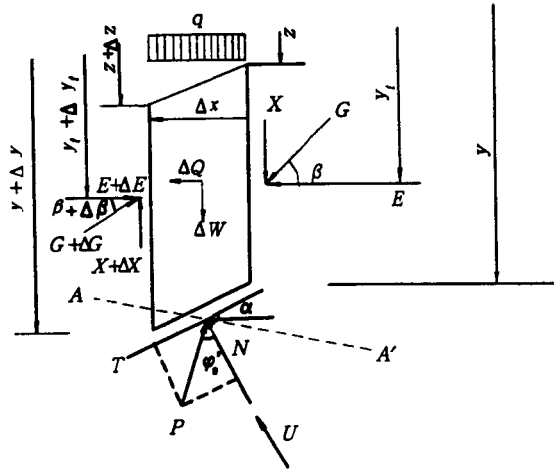


图2 作用在土条上的力

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

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

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

$$y_1(a) = y(a) \quad (14)$$

$$y_1(b) = y(b) \quad (15)$$

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

$$\int_a^x G(\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) dx = \int_a^x \eta \frac{dW}{dx} h_e dx + [G \cos \beta (y_1 - y)]_a^x \quad (18)$$

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:

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

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 。

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

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

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

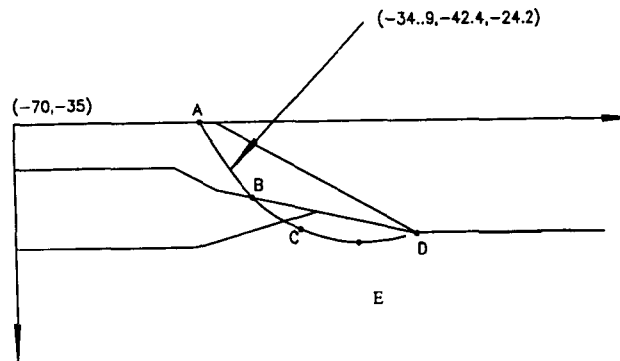
$$\Delta F_i < \varepsilon \quad (30)$$

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

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。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.	$G_c(F, \lambda)$	$M_c(F, \lambda)$	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(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

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

将上式变为差分形式，式 40 即变为式 39)。

3.3 土条侧向力须满足的边值条件

在求解滑动土体的力和力矩平衡方程式时，为了使问题变得静定可解，引入了对 $\tan\beta$ 的假定。本节论证的问题是 $\tan\beta$ 值在滑动土体两端，即 $x=a$ 和 $x=b$ 处是确定的，不能随意假定，否则将违背剪应力成对原理。这一命题是在 Chen 和 Morgenstern 改进方法首先提出的。

首先，让我们来考察一个处于滑面逸出点的端部的土条 B(图 5 左下角)这是一个特殊的土条，它具有三角形形状，土条在此尖灭为一个单元。在这个土单元的垂直面上有

$$\tan \beta_b = \lim_{x \rightarrow a} \frac{x}{E} = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_x} \quad (41)$$

式中： β_b —— $\beta(x)$ 在端部的值；

τ_{xy} σ_x —— 作用在边条块 B 的垂直面 C 的剪应力和垂直应力。

式(41)说明，如果端点的应力状态是确定的，则 β 在端点处的值也是确定的。就图 5 B 点的情况而言， τ_{xy} 的值是零，在 σ_x 不等于零的时候， β_b 的值就是零。换句话说，如果 $\beta(x)$ 的值在端点被假定为非零值的话，在端部剪应力成对的原理将受到破坏。

经过论证，Chen 和 Morgenstern 认为，当土条的宽度足够小时，端点土条的侧向作用力的合力平行于该土条顶面 即

$$\beta_a = \gamma_a \quad (42)$$

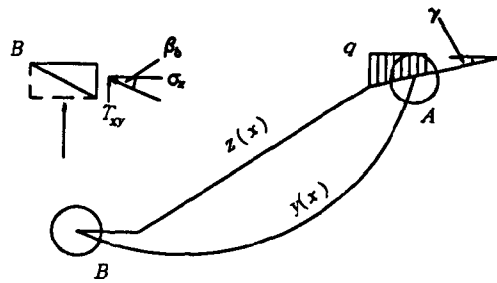


图 5 说明土条侧向力须满足的边值条件示例

其中 γ 为滑裂面两个端部坡面的倾角(图 5)。有关证明可参阅文献[4]。

固定土条侧向力在端部的值，可以限制对 β 假定的任意性，具有一定的理论和实用意义。

从实用角度，可以对式(43)中的 $f_0(x)$ 和 $f(x)$ 取下面两种假定，它分别代表了方法严格程度的两个水平。

(1) 土条侧向力实用假定 1: 取 $f_0(x) = 0$, $f(x) = 1$ 这就是常用的 Spencer 法。

(2) 土条侧向力实用假定 2: 取 $f_0(x)$ 在 (a, b) 区间内为直线 其值在 $x = a, b$ 时按式(42)确定， $f(x)$ 为正弦曲线 见图 1(b)。

下面我们通过一个实例说明在一定条件下，使用土条侧向力实用假定(2)的必要性。

图 6 是上海勘测设计院在进行铜官山抽水蓄能电站重力坝方案时事先设计的一个考题。使用 STAB 程序计算时，利用坡顶设拉力缝并充水的功能模拟重力坝承受的水压力。对这样一个简单的混凝土大坝抗滑稳定问题，在设定的推力和滑面上的强度指标条件下，安全系数完全可以用简单的力学平衡求得。此例 ϕ 和 c 分别取 38.66° 和 35t/m^2 ，混凝土容重取 2.5t/m^3 ，无扬压力，可得 $F = 1.867$ 。可是，采用 STAB 程序的 Spencer 法，安全系数却是 $F = 2.585$ 。

出现这一问题的原因就在于对于 A 点对水压力的倾角的假定上面。显然，在 A 点 β 应为零。而采用 Spencer 法（即土条侧向力实用假定 1，即图 6 标注为 a) 的分布图形），则土条间作用力的倾角，包括 A 点，均为一非零的值，这样，在端部 A， β 出现了突变点。就好像水压力也是以一个倾斜的 β 角作用在坝面上。这一问题导致了安全系数严重地偏离正确值。如果我们采用土条侧向力应用假定 (2)（参见图 6 中下方标注 b) 所示三角形图形），令 $f_0(x)$ 在 A 点为零，获得了 $F = 1.868$ ，与理论值完全一致。

需要指出，Spencer 本人已经注意到了他的方法在处理拉力缝充水情况时的这一问题。在他的进一步研究中，提出了一个类似于 Morgenstern-Price 法的对侧向力的假定，以实现 β 值在拉力缝处为零的这一条件。

4. 使用方法——边坡稳定分析程序 STAB

4.1 边坡稳定分析程序 STAB

为了配合修订的土石坝设计规范的颁布和执行，作者已将边坡稳定分析程序 STAB 的普及版公布于网上。网址为 <http://www.geoeng.iwhr.com> 或 <http://166.111.46.52>。

边坡稳定分析程序 STAB 是 80 年代水利水电规划设计院主持的《水工建筑物设计专用程序软件包》的一部分。在 1984 年黄山会议上，通过鉴定。经 10 余年的应用，已日臻完善。读者可以在网上下载该程序的普及版以及相应的说明书，并了解这一程序的功能。同时，作者在网上公布了进行本文提出的通用条分法以及瑞典法、毕肖普法计算的源程序 S.FOR。本节简要介绍这一程序。

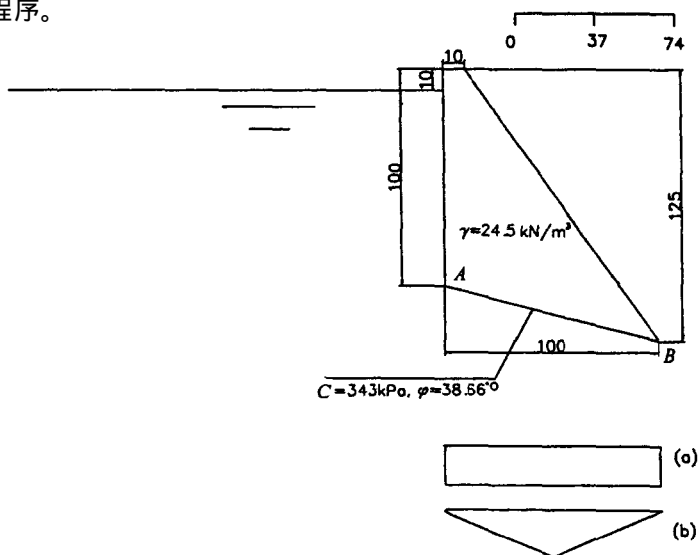


图 6 采用更加符合实际的土条侧向力假定 2 的必要性示例

4.2 计算通用条分法安全系数的程序 S.FOR

4.2.1 说明

本程序包括一个主程序和三个子程序。子程序 DETE 实现通用条分法的计算过程，同时也包括陆军工程师团法的计算。子程序 SAFE2 实现瑞典法、毕肖普法和简化法的计算过程。通过一个整型变量 OPTION 来控制计算方法 通过变量 ID-C 来控制滑面形状（圆弧或非圆弧），控制滑面几何形状的点有两套，一套为界面在土条底的坐标，用 $X2(I)$ 、 $Y2(I)$ 代表，土条总数为 NS。另一套为土条底中点的坐标 用 $X(I)$ 、 $Y(I)$ 来代表，在输入 $W(I)$ 、 $RU(I)$ 等一系列

物理力学参数时，都是相应土条中点的，但是，加上了左，右两个端点的相应物理量，因此，读入了总数为 $N=NS+1$ 行数据。在使用程序 DETE 实现通用条分法时，程序首先使用子程序 SAFE2 中简化法的计算安全系数，作为初值，然后进行第 3 节介绍的稳定分析方法的计算。子程序 SAFE2 在进行 Bishop 法计算时，同样用简化法计算安全系数初值。

4.2.2 源程序结构

主程序。

这一程序要求读入整型量 OPTION 来控制计算方法，和整型量 ID-C 来控制滑面形状。

OPTION=0, SPENCER 法

OPTION=1, BISHOP 法

OPTION=2, 瑞典法

OPTION=3 工程师团法

OPTION=4, 简化法

ID_C=0, 任意形状滑裂面； ID_C 不为零，圆弧滑裂面

程序读入土条的几何物理量。

程序 SAFE2。

本子程序计算圆弧滑裂面的各种简化方法。

子程序 DETE。

本子程序进行通用条分法的计算，即按式 (9) 和式 (10) 计算不平衡力和力矩，然后按节的步骤进行迭代求解安全系数。

4.2.3 算例

以 2.3.2 节的算例，说明上节所示源程序的使用。计算简图见图 7。数据文件分别为 s0.dat, s1.dat, s2.dat, s3.dat，分别相应于通用条分法中 Morgenstern-Price 法，Bishop 法、瑞典法和陆军工程师团法。这些数据文件除控制符 OPTION 不同外其他均相同。陆军工程师团法在数据最后增加了一行输入平均坝坡数据。文件 s0.dat 列于后。相应迭代过程已在 2.3.2 节中介绍。相应 s1.dat, s2.dat, s3.dat 的安全系数分别为 1.384, 1.228 和 1.346。

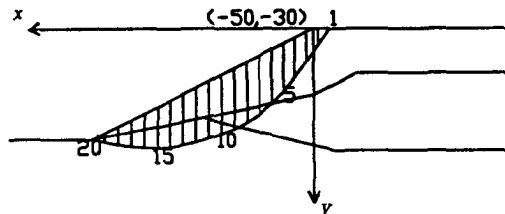


图 7 相应数据文件 s0.dat 的计算简图

参考文献

- [1] Bishop, A W, 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5.No.1.
- [2] Chen, Z.and Morgenstern, N R, 1983, "Extensions to the generalized method of slices for stability analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.1.
- [3] 陈祖煜, 1983, 土坡稳定分析通用条分法及其改进, *岩土工程学报*, 第五卷, 第 4 期。
- [4] 陈祖煜, 1991 边坡稳定分析- 极限平衡法的改进和应用, 清华大学博士论文。
- [5] Donald I. and Giam, P.1992, The ACAD slope stability analysis program review. Proc. of the 6th International Symposium on Landslides. Vol. 3.
- [6] Morgenstern, N.R. and Price, V.1965, "The analysis of the stability of general slip surface", *Geotechnique*, 15, No.1.
- [7] Spencer, E.1967. A method of analysis of stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*. 171.
- [8] U.S.Army Corps of Engineers, 1967, *Stability of slopes and foundations*, Engineering Manual, Visckburg, Miss.

关于土石坝边坡的稳定安全系数标准问题

王新奇¹ 李治明¹ 代巧枝¹

[摘要] 阐述国内外规范中有关土石坝稳定计算方法和稳定安全系数的规定, 通过一些计算实例, 提出了合理的稳定安全系数标准。

[关键词] 土石坝 稳定计算 安全系数 标准

《碾压式土石坝设计规范》(SDJ 218-1984)(以下简称SDJ 218-1984规范)规定以瑞典圆弧法为稳定计算的基本方法。对于计及条块间作用力方法的安全系数, 则规定可提高5%~10%。但是由于瑞典圆弧法计算软弱夹层或孔压较大的边坡时误差较大, 一般采用计及条块间作用力的简化毕肖普法等方法。后又陆续出现了Morgenstern-Price、Janbu等的改进方法。而计及条块间作用力的方法没有明确的安全系数标准, 比瑞典圆弧法的安全系数标准提高5%~10%的范围较大, 难以判别。本文试图通过计算实例并总结相关标准, 讨论安全系数标准的问题。

1. SDJ 218-1984规范中规定的计算方法和安全系数标准

《碾压式土石坝设计规范》(SDJ 218-1984)及其修改和补充规定:

第7.3.8条 静力稳定计算采用刚体极限平衡法。对于均质坝、厚斜墙坝和厚心墙坝, 可采用不计条块间作用力的瑞典圆弧法; 对于有薄软土夹层的情况, 以及薄斜墙、薄心墙坝, 可采用滑楔法, 计算坝坡抗滑稳定安全系数。在不同滑动面上重复进行计算, 直到求得最小安全系数。静力稳定计算方法见本规范附录三第四节。

坝坡抗滑稳定的安全系数, 应不小于表

7.3.8规定的数值。

补充规定 1.0.16条 将表 7.3.8 中的非常运用条件 II 取消, 与非常运用条件 I 合并为非常运用条件, 安全系数标准采用非常运用条件 I 的规定。

补充规定 1.0.17条: “对 I、II 级坝及高坝, 以及一些比较复杂的情况, 可采用简化毕肖普法或其他方法计算坝坡的抗滑稳定安全系数。在滑动面上重复进行计算, 直到求得最小安全系数。计算方法的要点见本规范附录三第四节, 这时最小安全系数值应比表 7.3.8 中的规定提高 5%~10%, 但对一级坝正常运用条件的安全系数应不小于 1.5。”

表 7.3.8 坝坡抗滑稳定最小安全系数

运用条件	工程等级			
	I	II	III	IV、V
正常运用条件	1.30	1.25	1.20	1.15
非常运用条件 I	1.20	1.15	1.10	1.05
非常运用条件 II	1.10	1.05	1.05	1.00

2. 国外稳定计算方法和安全系数

国外规范规定的安全系数见表 1 和表 2。从表中可以看出, 采用的计算方法、安全系数标准各异。但是在相同或近似工况时, 规定的安全系数相差不大。

鉴于瑞典圆弧法的局限性, 国外的规范一般不仅仅是基于瑞典圆弧法确定最小安全系数标准, 多以计及条间力的方法或同时考虑瑞典圆弧法规定安全系数标准。并且与我国规范不同的是, 除前苏联外, 一般没有以坝的不同等级划分不同的标准。

¹ 黄河水利委员会规划勘测设计研究院。

表1 国外规范规定的安全系数汇总

国家或地区	年代	安全系数				计算方法
		施工期	稳定渗流期	水库骤降	遭遇地震	
美国垦务局	80年代	1.3~1.4	1.5	1.3		斯宾塞法
美国加州水资源局	80年代	1.3	1.5	1.2	1.0~1.1	
美国陆军工程师团	80年代	1.3	1.5	1.2	1.0	改良圆弧法、滑楔法
加拿大拉格朗德工程	70年代	1.3	1.5	1.3	1.1	简化毕肖普法(圆弧)
澳大利亚急流口坝	70年代	1.3	1.6	1.3	1.0~1.2	瑞典圆弧法
台维斯沙立逊手册	70年代	1.25	1.5	1.25	1.0	
印度	70年代	1.25	1.50	1.25	1.00	
日本	70年代				1.2	均考虑地震

表2 前苏联坝坡稳定最小安全系数

荷载和作用力组合	各级大坝的容许安全系数			
	I	II	III	IV
基本组合	1.30~1.25	1.20~1.10	1.15~1.10	1.10~1.05
特殊组合	1.10~1.05	1.05	1.05	1.05

注：特殊组合为遭遇地震。

3. 不同计算方法计算结果的对比分析

3.1 算例

算例1. 计算的工况为稳定渗流期下游坡，各种方法的物理力学性质指标计算结果见表3。

表3 瑞典圆弧法与其他方法计算的安全系数比较

例题	坝型	坝高/m	边坡	瑞典圆弧法	简化毕肖普法	美国陆军工程师团法	罗厄法			
1	心墙坝	90	上游1: 2.2 下游1: 2.6	1.454	1.502	3.3%	1.504	3.4%	1.506	3.6%
2	均质坝	20	上游1: 2.0 下游1: 2.0	1.646	1.765	7.2%	1.752	6.4%	1.812	10.1%
3	心墙坝	153	上游1: 2.2 下游1: 2.1	1.650	1.768	7.2%	1.794	8.7%	1.793	8.7%
4	心墙坝	90	上游1: 2.2 下游1: 2.6	1.46	1.550	6.1%	1.56	6.8%	1.55	6.1%
5	均质坝	50	上游1: 2.2 下游1: 2.0	1.718	1.911	11.2%	1.885	9.7%	1.904	10.8%
6	斜心墙坝	60	上游1: 2.3 下游1: 2.1	1.808	2.007	11.0%	1.977	9.3%	1.979	10.6%
平均						7.7%		7.4%		8.3%

说明：1)简化毕肖普法等方法中第一栏为安全系数；第二栏为比瑞典圆弧法安全系数大的百分数。

算例2. 坝基有软弱层的例子见图1，计算结果见表4。

表4 瑞典圆弧法与其他方法计算的安全系数比较

情况	瑞典圆弧法	简化毕肖普法	简布法	斯宾塞法	摩根斯坦-普赖斯法				
简单的均质土坡	1.928	2.080	7.9%	2.008	4.1%	2.073	7.5%	2.085	8.1%
同1, 但有软弱层	1.288	1.377	6.8%	1.432	11.2%	1.373	6.6%	1.394	8.2%
同1, 但 $r_u=0.25$	1.607	1.766	9.9%	1.708	6.2%	1.761	9.6%	1.772	10.3%
同2, 但两种土层的 $r_u=0.25$	1.029	1.124	9.2%	1.162	12.9%	1.118	8.6%	1.137	10.5%
同1, 但考虑地下水渗流	1.693	1.834	8.3%	1.776	4.9%	1.830	8.1%	1.838	8.6%
同2, 同时考虑地下水渗流	1.171	1.248	6.6%	1.298	10.8%	1.245	6.3%	1.265	9.4%
平均			8.1%		8.3%		7.8%		9.2%

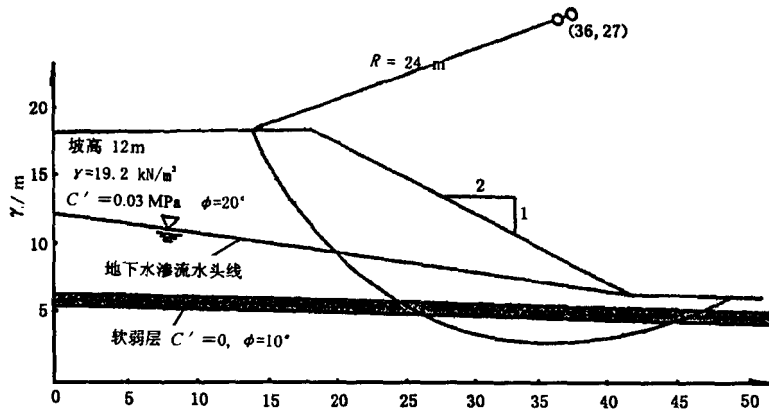


图1 坝基有软弱层的边坡断面

算例3. 小浪底水利枢纽大坝, 计算结果见表5。

表 5 小浪底大坝瑞典圆弧法与其他方法计算的安全系数比较

	工作条件	瑞典圆弧法 安全系数 F	摩根斯顿-普赖斯法 安全系数 F_w	简化毕肖普法 安全系数 F_b	$[(F_w-F)/F] / \%$	$[(F_b-F)/F] / \%$
下游坡 (D0+387.5)	水位: 275.0m 地震: 0度	1.494	1.564	1.582	4.7	5.9
	水位: 275.0m 地震: 8度	1.252	1.317	1.333	5.2	6.5
平均					4.9	6.2

算例 4. 4 座混凝土面板堆石坝施工期上、下游坡、稳定渗流期正常运用和其遇 7 度地震时, 简化 Bishop 法、美国陆军工程师团法、罗厄法、摩根斯顿-普赖斯法的稳定安全系数与瑞典圆弧法稳定安全系数相差的百分数见表 6。

表 6 混凝土面板堆石坝稳定安全系数比较

例题	比瑞典圆弧法大的百分数			
	简化 Bishop 法	美国陆军工程师团法	罗厄法	摩根斯顿-普赖斯法
株树桥	4.60%	4.40%	4.90%	12.50%
株树桥	4.90%	4.20%	1.70%	13.50%
株树桥	11.40%	10.60%	11.20%	11.00%
株树桥	5.30%	5.60%	5.30%	10.30%
株树桥	5.50%	5.70%	5.40%	10.90%
株树桥	5.70%	5.80%	5.70%	7.00%
天生桥	11.20%	10.50%	11.00%	11.50%
天生桥	2.30%	2.10%	2.10%	4.90%
天生桥	2.90%	1.80%		5.60%
天生桥	9.50%	8.90%	8.60%	10.70%
天生桥	10.30%	9.90%	9.20%	12.60%
天生桥	10.80%	10.70%	8.70%	13.90%
梅溪	15.50%	14.60%	14.00%	21.30%
梅溪	7.50%	6.50%	8.90%	12.40%
梅溪	7.80%	6.10%	5.60%	12.40%
梅溪	15.50%	15.80%	17.70%	23.70%

续表 6

例题	比瑞典圆弧法大的百分数			
	简化 Bishop 法	美国陆军工程师团法	罗厄法	摩根斯顿 - 普赖斯法
梅溪	14.80%	14.20%	15.10%	26.50%
梅溪	15.80%	14.80%	14.90%	27.60%
西线	3.30%	3.30%	3.30%	4.20%
西线	2.70%	2.70%	2.70%	3.00%
西线	3.00%	2.90%	2.70%	3.30%
西线	8.20%	7.80%	8.00%	9.40%
西线	8.20%	7.80%	8.00%	9.40%
西线	9.20%	8.70%	8.20%	10.80%
平均	8.20%	7.70%	8.00%	12.00%
	8.98%			

从表1~表6可知,瑞典圆弧法的计算得出的稳定安全系数比简化毕肖普法等其他方法的成果小5%~10%这与规范规定的情况“采用简化毕肖普法或其他方法计算坝坡的抗滑稳定安全系数,应比表7.3.8中的规定“基于瑞典圆弧法规定的安全系数提高5%~10%”是吻合的。因此,对于非软弱地基和孔隙压力影响不大的土石坝,SDJ 218-1984规范中关于瑞典圆弧法的结果与其他方法的结果差值的规定是合适的。

坝体的安全系数与坝高有关,对于某一相似计算剖面而言,材料指标不变,安全系数随坝高的增加而减小。一般来说,坝越高,坝的等级越高,因此,安全系数标准与坝的级别相关是可行的。

1993年,美国土木工程师学会在《堤坝稳定分析25年回顾》专著中邀请邓肯(Duncan)作发展水平报告。报告对传统的各种边坡稳定分析方法的计算精度和适用范围作了如下论述。

(1)各种边坡稳定分析的图表在边坡的几何条件、容重、强度指标和孔压可以简化的情况下可得出有用的结果,其主要的局限性在于使用这些图表需对上述条件作简化处理,使用图表法的主要优点是可以快速求得安全系数,通常可先使用这些图表进行初步核算,再使用计算机程序进行详细核算。

(2)传统的瑞典法在平缓边坡、高孔隙水压情况下进行有效应力法分析时是非常不准确的。该法的安全系数在“ $\phi=0$ ”分析中是完全精确的,对于圆弧滑裂面的总应力法可得出基本正确的结果。此法的数值分析不存在问题。

(3)简化毕肖普法在所有情况下都是精确的(除了遇到数值分析困难情况外)其局限性表现在仅适用于圆弧滑裂面以及有时会遇到数值分析问题,如果使用简化Bishop法计算获得的安全系数反而比瑞典法小,那么可以认为Bishop法中存在数值分析问题。在这种情况下,瑞典法的结果比毕肖普法好,基于这个原因,同时计算毕肖普法和瑞典法,比较其结果,也许是个好主意。

(4)仅使用静力平衡的方法的结果对所假定的条间力方向极为敏感,条间力假定不合适将导致安全系数严重偏离正确值。与其他考虑条间作用力的方向一样,这个方法也存在数值分析问题。

(5)满足全部平衡条件的方法(如简布法、斯宾塞法)在任何情况下都是精确的(除非遇到数值分析问题)。这些方法计算的成果相互误差不超过12%,相对于一般可以认为是正确的答

案的误差不超过6%，所有这些方法都有数值分析问题。

从邓肯的论述中可以这样认为，除瑞典圆弧法外，考虑条间力的其他方法均是可靠的和精确的，除非遇到数值分析问题。

4. 结论

4.1 土石坝边坡稳定计算安全系数标准问题

土石坝边坡稳定计算的方法有多种，SDJ218-84规范规定以瑞典圆弧法为基本方法，并且也是基于瑞典圆弧法确定的最小安全系数标准，采用瑞典法的最大优点是计算简便。但是由于它在孔隙水压力较大和饱和软弱地基上筑坝的情况下可能得出错误的结果，并且只限于圆弧滑动面，因此基于瑞典圆弧法确定安全系数标准有很大的局限性。

从常规的计算结果看，对同一滑裂面而言的安全系数，计及条块间作用力方法的成果比瑞典圆弧法大约5%~10% 平均值约为7%。因此可以考虑采用基于计及条块间作用力的计算方法确定最小安全系数的标准。

用实践中应用较多的简化毕肖普法确定圆弧滑裂面安全系数，用摩根斯坦-普赖斯法、滑楔法或其他方法确定非圆弧滑裂面安全系数。

4.2 混凝土面板堆石坝安全系数标准

在基岩上用硬岩填筑的混凝土面板堆石坝，一般不需进行坝坡稳定计算，直接按经验确定坝坡为 1:1.3~1:1.4；该坝坡如用线性指标计算其安全系数，往往不能满足规范要求（如 1 级坝安全系数不小于 1.5）。作者曾对三座 1 级混凝土面板堆石坝 16 种工况进行计算，坝坡平均安全系数 1.363，而采用非线性指标计算的平均安全系数为 1.76，简化以平均值统计，两者相差约 30%。混凝土面板堆石坝粗粒料采用非线性抗剪强度指标在实际计算中可能存在下述问题：当坝基存在软弱夹层时，通过坝体粗粒料和坝基软弱夹层滑动的安全系数，按 SL 228-1998《混凝土面板堆石坝设计规范》规定，其安全系数标准应符合土石坝设计规范规定，而土石坝设计规范规定的安全系数标准一般低于直接按经验确定坝坡的安全系数，如上所述 1:1.3~1:1.4 的坝坡安全系数平均 1.76 远大于 1.50；也就是说如通过坝基软弱夹层进行稳定计算，由于要通过非线性的坝体，即使安全系数满足 1.50 但远低于 1.76 无形中降低了坝的安全度。

另外土石坝安全系数标准是依据线性指标计算而定的，混凝土面板堆石坝粗粒料采用非线性指标，直接用基于线性指标确定的安全系数标准也不尽合理。

对于上述安全系数不一致问题，建议以粗粒料坝坡自身的安全系数为标准，使通过坝体粗粒料和坝基软弱夹层滑动的安全系数不小于上述标准，以此确定坝体坝基的稳定安全系数。

参考文献

- [1] 郭诚谦，陈惠远，土石坝，北京：水利电力出版社，1992年3月。
- [2] [苏] H. H 罗扎诺夫主编，土石坝，北京：水利电力出版社，1986年。
- [3] 钱家欢，殷宗泽合编，土工原理与计算，北京：水利电力出版社，1994年6月 第二版。
- [4] 水利电力部，碾压式土石坝设计规范(SDJ218-84)，北京：水利电力出版社，1985年。
- [5] 水利电力部，碾压式土石坝设计手册，北京：水利电力出版社，1989年。
- [6] 日本电力土木技术协会编，陈惠远等译，最新土石坝工程学，北京：水利电力出版社，1981年新本。