

渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算

Finite element calculation on circular slip of earth slope under seepage action

毛昶熙, 李吉庆, 段祥宝
(南京水利科学研究院 水工研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 分析了土坡滑动稳定性计算的条分法及其存在问题, 并提出了圆弧滑动的有限元法, 以三角形单元的渗透力取代垂直条块周边的水压力, 正确考虑了渗流方向及其力矩的影响, 不仅提高了计算精度, 而且连续计算渗流与滑坡, 使计算过程简便迅速。

关键词: 土坡稳定; 圆弧滑动; 垂直条分法; 有限元法; 渗透力; 边界水压力

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)06-0746-07

作者简介: 毛昶熙, 男, 1918年生, 教授级高工, 主要从事水工渗流研究。

MAO Chang-xi, LI Ji-qing, DUAN Xiang-bao

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In this paper the slices method for sliding stability calculation of earth slope is analyzed and its existing problems are indicated. At the same time the finite element method for circular slip surface is proposed, for which the pore water pressure acting around each vertical slice is replaced by seepage force of triangular element. So the seepage direction with its effect of moment has been considered correctly. Not only the accuracy but also the convenience in calculation is increased due to that the stability calculation is sequentially carried out after seepage calculation in one computer program.

Key words: stability of earth slope; circular slip; vertical slices method; finite element method; seepage force boundary water pressure

1 前言*

堤岸坡的稳定性, 从计算分析和统计数据可知渗流的破坏作用很大, 垮坝失事有 30%~40% 源于渗流^[1]。因而很早就把渗流有限元计算与滑坡结合起来编程序研究堤坝的整体稳定性问题, 并发表交流讨论^[2]。随后又经过不少堤坝计算分析, 深感目前的条分法滑动计算, 对于非均质土坝的复杂渗流场来说, 欲提高精度, 实在有其无法克服的困难, 而且必须在水(水力学)与土(土力学)之间架起桥梁研究这一渗流稳定性问题。因此再把近来对比分析条分法与有限元法的计算成果整编此文, 以抛砖引玉、交流讨论。

2 滑坡计算的常规条分法及其存在问题

2.1 常用的条分法

关于将滑动体划分为垂直土条的计算方法, 源于瑞典圆弧法, 现以分析上游迎水坡的稳定性为例, 简要介绍常用的方法。

在计算孔隙水压力情况下的坡面稳定性时, 将渗流流网图换算成等压线图比较方便, 如图 1(a) 所示沿一般圆弧滑动试取滑动面 AB 分析其安全。每一垂直土条所受的作用力有(图 1(b)): ①土条的重量 G (土粒和水); ②底部滑动面上作用的法向力 N 与孔隙水压力 U , $N = (\sigma - u)l$, $U = ul$; ③沿滑动面作用的切向力 T , $T = (N \tan \phi + c'l)/\eta$, η 为安全系数; ④土

条侧边土压力 ΔE_x , ΔE_z 与水压力 ΔW , $\Delta E_x = E_{x1} - E_{x2}$, $\Delta E_z = E_{z1} - E_{z2}$, $\Delta W = W_1 - W_2$ 。上述各力在平衡状态时, 构成一个闭合力的多边形, 如图 1(c) 所示。

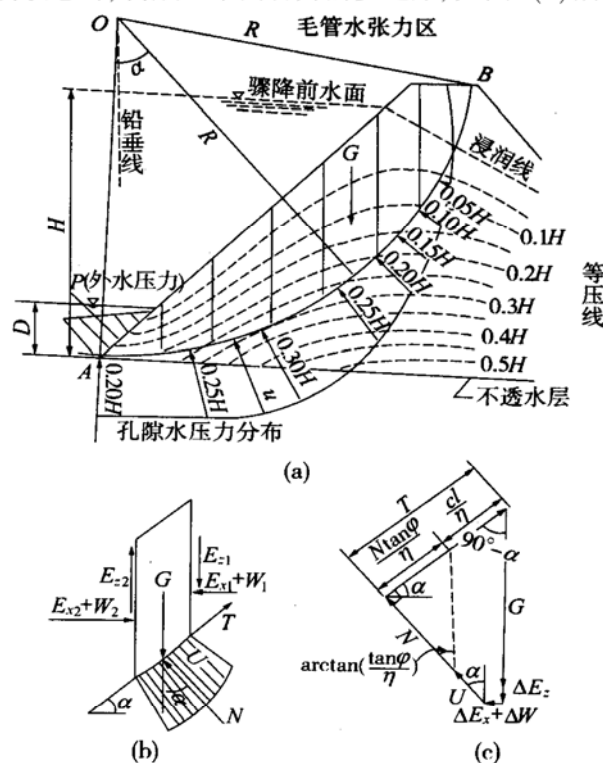


图 1 圆弧滑动条分法示意及土条受力的图示

Fig. 1 Sketch for circular slip of slices method and forces on slice

对于圆弧滑动面, 其安全系数为抗滑力矩与滑动力矩之比。对于整个滑动体, 除径向力 N 及 U 没有力矩外, 内力 ΔE_x , ΔE_z , ΔW 的力矩, 在取各个相邻土条时互相抵消, 根据力矩平衡式 $\sum M_0 = 0$ 可得

$$\eta = \frac{\sum (N \tan \phi + c'l)}{\sum G \sin \alpha} \quad (1)$$

按照瑞典圆弧法费伦纽斯 (Fellenius, 1936) 的假定, 设土条两侧的力与土条底部滑动破坏面平行, 则对破坏面上的法向力没有影响。此时 $N = G \cos \alpha - ul$ 代入式(1)可得安全系数

$$\eta = \frac{\sum [(N \cos \alpha - ul) \tan \phi + c'l]}{\sum G \sin \alpha} \quad (2)$$

毕肖普 (Bishop, 1955) 简化的方法假定土条两侧的力是水平方向而略去了垂直分量, 将作用在土条上力的多边形投影到垂直方向, $\sum F_z = 0$, 求得法向力 N 的表达式再代入式(1), 并因土条宽度 $b = l \cos \alpha$, 则得常用的简化毕肖普公式

$$\eta = \frac{\sum [l(G \cos \alpha - ul) \tan \phi + c'l]}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi) / \eta} \quad (3)$$

条分法的公式很多, 当划分 n 个土条而取每个土条的脱离体写其静力平衡时, 其中有 5 个未知数, 即土条边的剪切力, 垂直侧边的力及其作用点位置, 土条底部的法向力以及安全系数; 因此 n 个土条就有 $(4n - 2)$ 个未知数。但静力平衡式只有 $\sum F_x = 0$ 、 $\sum F_z = 0$ 、 $\sum M = 0$ 三式, 总共有 $3n$ 个方程式, 少了 $(n - 2)$ 个方程, 因而问题是超静定的 (Huang, 1984)。要想使问题是正定的求解, 只有对土条间交界面上的力作某些假定使未知数减少或方程式增多。这就是一些学者给出不同滑坡计算公式的背景。但无论假定土条间作用力是水平的, 或是互相平行的, 或是平行于滑动面的以及其它常数或函数关系等, 根据计算经验, 用简化毕肖普法与其他复杂的方法比较, 安全系数的差别很小, 最大差 7%, 一般小于 2% (Whitman and Bailey, 1967)。

2.2 条分法计算中的问题

条分法对于手算提供了某些方便, 但是在结合渗流场计算方面却有其难以克服的困难, 以致必须作有损计算精度的一些假定。为了说明存在的问题, 还应从渗流的作用力谈起。如图 2 所示为平行于斜坡的渗流情况, 对于一个垂直土条所受各力处于平衡状态来说, 土条饱和重必须与其周边各外力组成闭合的力的多边形, 其中 ΔE_x , ΔE_z 为土条两侧边所受土压力差别的水平和垂直分量, 由于其值很小, 累加各土条后有抵消趋势, 影响很小, 习惯上多不考虑以求计算简单。此时可用下式的各力向量和来表示其平衡关系为

$$(\vec{G}' - \vec{G}_w) + (\vec{W}_1 - \vec{W}_2) + \vec{U} + \vec{N} + \vec{T} = 0 \quad (4)$$

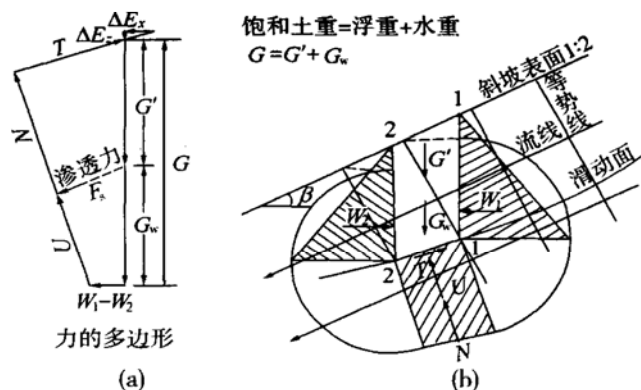


图 2 土条周边水压力与渗透力的关系

Fig. 2 Relation of boundary pressures on slice and seepage force

但渗流作用力的两种表示方法, 如图 3 所示任意三角形土体单元, 用图 3(a) 所示的体积力 (渗透力 F_s 与静水浮力 $-G_w$) 和用图 3(b) 所示的周边的水压力 p 表示是等价的。这是因为水对土作用力, $\vec{F} = -\text{grad} p$, 且 $h = \frac{p}{\gamma} + z$, 故有 $\vec{F} = -\gamma \text{grad} h + \gamma \text{grad} z$ 。式右边为两个分力: 渗透力 $\vec{F}_s = -\gamma \text{grad} h = -\vec{\nabla} h$, 与浮力 (与同体积的水重反向) $\vec{G}_w = -\gamma \text{grad} z = -\vec{\nabla} z$, 则表面水压力的合力 $\vec{F}$ 可用两个体积力 $\vec{F}_s$ 与 $-\vec{G}_w$ 表示。因此对于土条上的渗流作用力就有 (图 2 的力的多边形)

$$\vec{F}_s = \vec{G}_w + (\vec{W}_1 - \vec{W}_2) + \vec{U} \quad (5)$$

则式(4)的平衡关系就可用其等价的渗透力与土体浮重写平衡关系为

$$\vec{G} + \vec{F}_s + \vec{N} + \vec{T} = 0 \quad (6)$$

这种等价的计算关系也可以用格林定理从数学上严格证明, 参看文献 [3]。

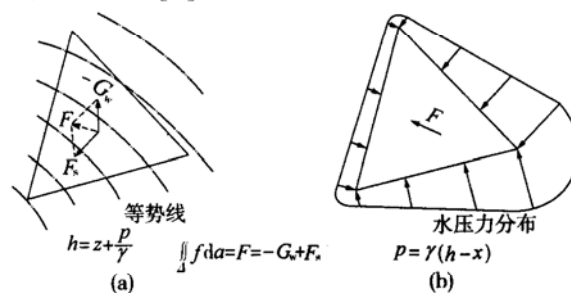


图 3 渗流作用力的两种表示方法

Fig. 3 Two methods to express acting seepage forces

因为渗透力 F_s 等价于所受浮力与作用在土条周边各水压力的总和。显然, 把土体单元各边上的几个水压力转换为一个渗透力会使问题简单得多 (Cedergren, 1977), 尤其是利用计算机在求得渗流场水头分布的同时, 连续计算渗透力进行滑坡稳定分析更为方便。

然而目前沿用的条分法仍采用土条周边的孔隙水压力考虑问题, 由于难于正确估算, 于是就只考虑土条侧边水压力大小而忽略作用点所发生的力矩影响, 甚

至略去侧边的水压力而只计算土条底部滑动面上水压力,并作一些土重不同取法的规定。这样不仅是很粗略近似,而且概念混乱不清,不少学者指出这容易造成错误。例如图 4 所示的滑动体,经常在滑动面上考虑孔隙水压力 W 的同时,又把浸润线以下的土体按浮重计算,对渗流作用力重复用了两次(Louis, 1977)。经常发生此错误的原因,可能是在条分法中没有把上述表面水压力与渗透力之间的转换关系交代清楚。

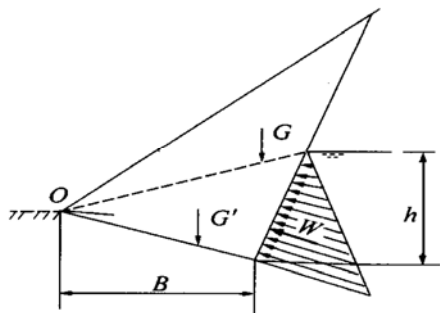


图 4 在坝坡稳定分析中考虑渗流作用力常犯错误示意图

Fig. 4 Misuse of seepage forces in stability analysis of dam slope

又如条分法计算既然是采用土条周边水压力,那么在流场内就应一律取饱和土体重量,如图 5 所示,若规定在库水位以下土取浮重(有些文献以及土石坝设计规范),可知就少算了 ABCD 的水体重,所以 Spencer (1979) 指出,此时应把土条底部孔隙水压力($u = \gamma h$)改为超孔隙水压力 $\gamma(h - h')$ 计算,来补偿这一段水柱造成的差错;说明这样的规定是自找麻烦徒劳无益的,这种在饱和渗流计算中区别对待土的容重,也是对孔隙水压力的一个近似补偿,当偏角 α 大时误差也大。此外还经常假定土条底部的孔隙水压力在浸润线以下符合静水压力分布规律也是不正确的,因为渗流场的土质分布和边界条件稍一复杂,就会使滑坡体内的水头分布发生急剧变化,特别是在库水位骤降时的上游坡,作这样的假定会导致严重误差。总之,对于这种细而高的土条单元,要想用一些平均水力因素来描述它而又能求得精确的计算结果,自然是很有局限的。然而,这些条分法的缺陷,将在下述的有限元法计算中得到克服,即以渗透力考虑问题时,就不需要对土容重作任何假定,只需取土的有效重即可。

3 滑坡计算有限元法^[4,5]

提出此种稳定分析的方法主要目的是要更好的结合有限元法计算,以便能连续求解,一次完成在渗流和地震等各种外力作用下的稳定分析计算。这里所要介绍的单元为三角形单元,如图 6 所示,当然也可以是包括上述条块划分在内的任意其它四边形。总的精神是根据渗流作用力概念,将作用在滑动面上和划分土块

的表面水压力转换为等价的体积力,换句话说,就是把各结点的水头值换算成各单元渗透力。这样,就不需要考虑各单元体接触边界上的孔隙水压力,而避免了象一般条分法计算略去土条侧边水压力的误差,同时也不需要考虑边坡的外水压力,从而简化了力的计算。

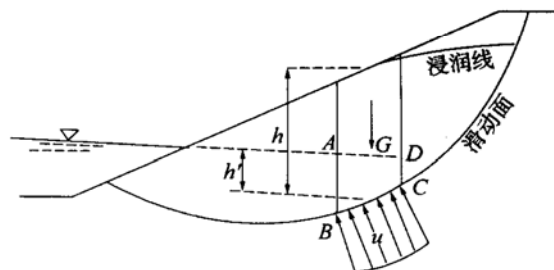


图 5 库水位以下取土浮容重时的孔隙水压力修正

Fig. 5 Rectification of pore water pressure when buoyant weight of soil below water level of reservoir is taken

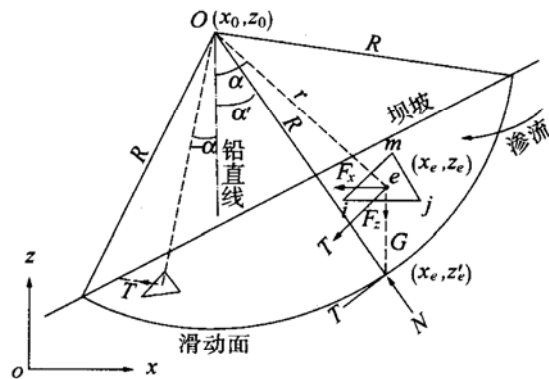


图 6 典型单元及其在滑动面上的力的图示

Fig. 6 Typical element and forces diagram on sliding plane

对于某一个典型三角形单元 $\bar{ijm}$ 来说,作用在其上的渗透力 $F_s = \gamma \Delta$, 或分解为两个分量(图 6):

$$\begin{aligned} F_x &= \gamma \Delta \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| \\ F_z &= \gamma \Delta \left| \frac{\partial \phi}{\partial z} \right| \end{aligned} \quad (7)$$

单元土体的有效自重

$$G = \gamma_1 \Delta \quad (8)$$

式中 γ 为水容重; γ_1 为土体容重(浸润线以下饱和区取浮容重, 浸润线以上非饱和区取自然容重); Δ 为三角形单元面积, 可以用其三结点的坐标表示

$$\Delta = \frac{1}{2} (b_i c_j - c_i b_j) \quad (9)$$

同样, 单元渗透坡降 J 也可用其结点的坐标和水头值表示, 分解两个分量时为

$$\begin{aligned} J_x &= (b_i h_i + b_j h_j + b_m h_m) / 2 \Delta \\ J_z &= (c_i h_i + c_j h_j + c_m h_m) / 2 \Delta \end{aligned} \quad (10)$$

式中 系数 $b_i = z_j - z_m$; $c_i = x_m - x_j$; 其他系数按照 i, j, m 次序轮换排列。

现在采用圆弧滑动的常规分析方法, 从总的力平衡式推导, 如图 6 所示, 各单元的渗透力和自重都作用

在单元重心上,并分解为沿圆弧滑动的切向力 T 与半径方向的法向力 N 。由力矩平衡式 $\sum M_0 = 0$,可得

$$\sum Tr - R \left[\sum \frac{N \tan \phi}{\eta} + \sum \frac{c'}{\eta} \right] = 0 \quad (11)$$

上式括号中为动用或所发挥的摩擦力和粘聚力,因此,因数 η 应为安全系数,则

$$\eta = R \left(\sum c' l + \sum N \tan \phi \right) / \sum Tr \quad (12)$$

引用式(7)和(8)的单元体的水平和垂直分力,并使上式分子项的抗滑力的分力都移到单元的正下方的滑动面上,再分解为法向力作为抗滑阻力。切向滑动力仍作用在单元形心上,则得

$$N = [(\gamma_1 + \gamma_z) \cos \alpha' - \gamma_x \sin \alpha'] \cdot \Delta$$

$$T = [(\gamma_1 + \gamma_z) \sin \alpha + \gamma_x \cos \alpha] \cdot \Delta$$

代入式(12)可得

$$\eta = \frac{R \left[\sum c' l + \sum [(\gamma_1 + \gamma_z) \cos \alpha' - \gamma_x \sin \alpha'] \cdot \Delta \cdot \tan \phi \right]}{\sum [(\gamma_1 + \gamma_z) \sin \alpha + \gamma_x \cos \alpha] \cdot \Delta \cdot r} \quad (13)$$

这里应注意,因为分子项的抗滑力矩,由单元重心移置到滑动面上计算,其中的垂直分力向下延伸到滑动面上,力矩效果不变;而水平分力 $F_x (= \gamma_x \Delta)$ 由单元重心移到下面的滑动面上时,如图7所示,可知相差一个力偶 $F_x (R \cos \alpha' - r \cos \alpha)$,此力矩尚应补充加到分子项中来修正;或者在分母项中减去来修正。两者计算结果相差很小,为求其简便,就从滑动力矩的分母项中减去此项力偶,则式(13)变为

$$\eta = \frac{R \left[\sum c' l + \sum [(\gamma_1 + \gamma_z) \cos \alpha' - \gamma_x \sin \alpha'] \cdot \Delta \cdot \tan \phi \right]}{\sum [(\gamma_1 + \gamma_z) r \sin \alpha + \gamma_x (2r \cos \alpha - R \cos \alpha')] \cdot \Delta} \quad (14)$$

式中 R 为滑动圆弧的半径; r 为计算单元重心的半径距; α 为其半径距与铅垂线所成的角度; α' 为单元重心正下方滑动面上交点的半径与铅垂线所成的角度,在铅垂线左边的角度应取负值(图6),一般情况 $\alpha' < \alpha$; γ 为水的容重; γ_1 为土的容重, γ_1 在饱和区取浮重,在渗流自由面以上的非饱和区取自然容重; c' , ϕ 都是有效强度指标。式(14)为考虑渗流作用力的坝坡稳定性有限元法计算公式,分子项为滑弧上的抗滑力矩,分母项为滑动土体的滑动力矩,分子中的第一项求和 $\sum c' l$ 为圆弧滑动面所交不同土质的粘聚力相加;第二项求和为滑动土体内所有单元在滑动面上产生的抗滑力的累加,其中摩擦角 ϕ 应为计算单元重心正下方交在滑动面上那一种土质,而不是单元所在的土质,分母项的求和为滑动体内各单元力矩累加。

应当指出,在条分法的常规计算中都没有考虑上述水平力移置所产生的力矩差值,即相当条块两侧水

压力不等或不在同一作用线上时所产生的力矩差额。因此在渗流作用下,特别是在库水位骤降时,条分法计算就会发生较大的误差。如果将各条块侧边水压力进行力矩差额补偿,就可得到与有限元法完全相同的结果(见后面的模型坝分析)。

式(14)中的各值计算,除单元的渗透坡降 J_x, J_z 由式(10)计算,三角形单元面积 Δ 由式(9)计算外;单元重心 (x_e, z_e) 、离开滑动圆心 (x_0, z_0) 、半径距 r 和偏离铅垂线的角度 α 以及单元下方在滑动面上交点的偏离角度 α' 等均可用坐标位置来表示。

若以 X 和 Z 代表每个三角形单元的体积力分量时,则可将式(14)写成

$$\eta = \frac{R \left[\sum c' l + \sum (Z \cos \alpha' - X \sin \alpha') \tan \phi \right]}{\sum [Z r \sin \alpha + X (2r \cos \alpha - R \cos \alpha')] } \quad (15)$$

当考虑地震力影响时,可设地震力

$$E = \begin{vmatrix} E_x \\ E_z \end{vmatrix} = \gamma_2 \cdot \Delta \cdot \begin{vmatrix} \xi \\ \xi \end{vmatrix} \quad (16)$$

式中 ξ 为包括地震系数、地震加速度分布系数在内的一个综合系数,一般7度地震烈度,由地面到坝顶渐升分布,可取 $\xi = 0.03 \sim 0.08$; γ_2 为包括孔隙水在内的土容重(注意 γ_1 的取法,在饱和区是浮重)。在最不利地震情况下可以认为地震力促使土体水平抛向坡外,即只取 E_x 。因而在计算单元所受的作用力时,只需公式中渗透力项加入地震力项即可,如果有任意方向的地震波或用促使坝孔隙水压力上升等其他考虑地震力方法等,同样能够很方便地引进公式计算。

同时考虑土的有效自重、渗透力和地震力三种体积力时,式(15)中的三角形单元体积力的水平及垂直分量 X, Z 应为

$$\begin{aligned} X &= (\gamma_x + \gamma_2 \xi) \cdot \Delta \\ Z &= (\gamma_1 + \gamma_z + \gamma_2 \xi) \cdot \Delta \end{aligned} \quad (17)$$

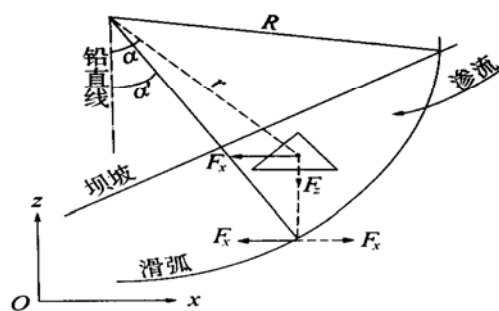


图7 单元力移置的误差

Fig. 7 Error of displacing the position of force from element to sliding plane

将滑坡稳定分析公式(14)或式(15)的算法编入渗流场的有限元法计算程序,就可连续算出各时段的渗流场水头分布及其危险滑动面的安全系数。以图8所

= 65.6 kN·m, $\sum \Delta M = 10.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。然后把按照毕肖普条分法式(3)已算得抗滑力矩 $M_1 = 312.03$, 滑动力矩 $M_2 = 241.47$ 进行补偿修正, 则得 $\eta = \frac{312.03}{241.47 + 65.6 - 10.63} = 1.052$, 可知与有限元结果 $\eta = 1.049$ 基本相同, 从而说明了条分法没有正确考虑条间水压力作用所致的误差。若不考虑渗流作用, 用条分法式(3)计算 $\eta = 1.55$, 用有限元法式(14)计算 $\eta = 1.56$, 相差甚微也说明有限元法略去三角形单元体间的土压力对计算精度影响很小。

表1 土条侧边水压力及其力偶矩的计算

Table 1 Calculation of lateral pressure on slices and its moment

土条 编号	左侧水 压力 W_1 / kN	右侧水 压力 W_2 / kN	W_1 与 W_2 间的距离 h / m	力偶 M $/ (\text{kN} \cdot \text{m})$	力矩差额 ΔM $/ (\text{kN} \cdot \text{m})$
1	0	9.41	0	0	6.59
2	9.41	23.03	1.15	10.82	17.71
3	23.03	27.54	1.4	32.24	8.12
4	27.54	11.27	2.0	22.54	-4.88
5	11.27	0	0	0	-16.91

注: $\sum M = 65.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $\sum \Delta M = 10.63 \text{ kN} \cdot \text{m}$

最后将几个实有水库土坝滑坡问题的有限元法计算结果列入表2。这些滑坡土坝在设计时都用过一般条分法的总应力法核验过, 安全系数 $\eta = 1.2 \sim 1.6$, 用有效应力法按照毕肖普简化法计算 $\eta > 1$, 只有按照流网修正毕肖普法才能取得与表2接近的 η 值。这就又一次说明必须正确考虑渗流场分布的重要性。

表2 几个实有土坝滑坡稳定性分析有限元法计算结果

Table 2 Calculation results of F. E. M. for sliding stability analysis of several actual earth dams

土坝名	江西七一水库	河北岳城	山西文峪河	陕西汉阴
η	0.99	0.923	1.02	0.93
运用情况	上游滑坡	上游滑坡	上游滑坡	上游滑坡
土坝名	福建红五一	福建岭里	江苏三河	河南弓上
η	0.999	0.96	0.91	1.01
运用情况	上游滑坡	上游滑坡	下游滑坡	上游滑坡

5 渗流方向对滑坡的影响

Brauns(1977)曾分析上游坝坡, 在固定坡角 β 和内摩擦角 φ 均为 30° 情况下对不同渗流方向的渗透力分析其滑动安全系数^[6]: 当渗流方向向下时, 渗流坡降 $J = 1$, 抗滑安全系数 $\eta = 1$; 当渗流方向平行坝坡时, 渗流坡降 $J = \sin \beta$, 抗滑安全系数 $\eta = 1/2$; 当渗流方向水平时, 渗流坡降 $J = \tan \beta$, 抗滑安全系数 $\eta = 1/3$ 。

随后 Bauer(1982)计算分析尾矿坝75组资料^[7], 包括5种不同的渗流场(图10), 以及不同坡比和坝高, 计算坝坡稳定性抗滑安全系数的结果与渗流方向与坝高密切相关, 图11是其中的一组计算结果可相对

比较流向和坝高的影响程度, 例如坝高20 m, 当平行坝坡渗流时抗滑安全系数 $\eta = 1$, 改为水平渗流 η 就减为0.8, 改为向下渗流 η 就增大为1.6, 说明渗流方向对坝坡稳定性也是至关重要的。

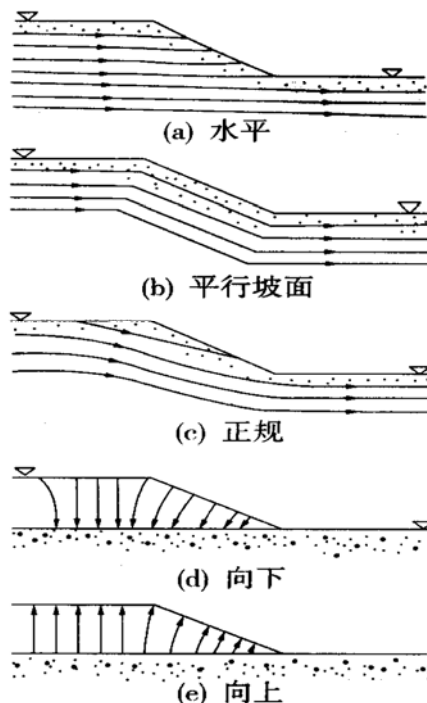


图10 坝坡五种不同的渗流方向

Fig. 10 Five different directions of seepage flow in dam slope

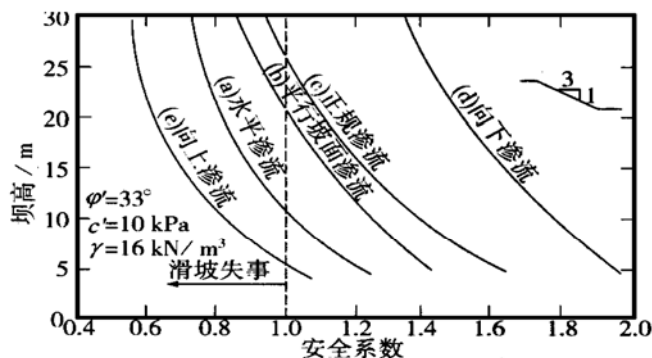


图11 坝坡抗滑安全系数与渗流方向和坝高的关系

Fig. 11 Relation of safety factor of sliding stability vs seepage direction and dam height

对于江河洪水回落时的崩岸问题, 也作了一些渗流方向对岸坡稳定性影响的计算, 如图12所示为土力学指标 $c = 10 \text{ kPa}$, $\varphi = 18^\circ$ 的一组计算结果, 当岸坡土饱和渗流朝向坡面流动时(图中虚线等势线所示), 图示圆弧滑动安全系数 $\eta \approx 1$, 若在岸堤上钻井一排(井间距20 m)抽水使岸坡渗流反向而朝向抽水井流动时(图中实线等势线分布所示), 图示圆弧滑动安全系数就提高到 $\eta = 1.6$ 。

由上述计算分析的结果可知, 渗流方向与孔隙水压力作用点位置, 对于坝坡稳定性的影响程度是何等严重, 特别是那些土层复杂的上游坡在库水位降落时的

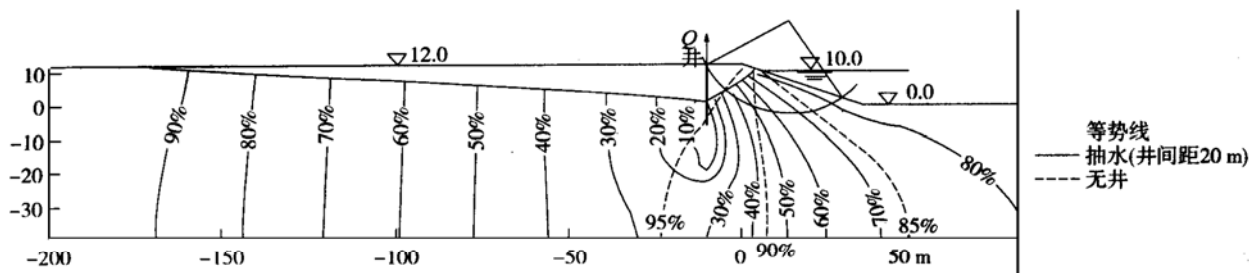


图 12 井孔抽水提高岸坡稳定性的渗流场比较

Fig. 12 Comparison of seepage fields in cases of increasing slope stability due to well pumping

渗流场分布远非静水压力所能描述。然而条分法计算的发展,迄今还没有正确考虑会导致百分之几十误差的渗流场问题,而只是注意到仅相差百分之几误差的土条间平均作用力模式问题。这种长期的研究结局,实质上说明了垂直条分法受限制已很难正确引用渗流场分布,无奈只好在孔隙水压力及其影响的土条重方面作一些规定(图 5)。甚至在土石坝设计规范中规定采用库水位向下游的稳定渗流场等势线估算库水位降落时垂直条块底部的孔隙水压力来计算上游坝坡稳定性,这样必然发生较大的误差,因为此时渗流场分布完全不同于向下游稳定渗流,而且渗流方向相反(参见图 8 的渗流场)。这也可能是在滑坡实例中多是上游坝坡的原因。因此欲克服这个困难,大幅度提高计算精度,自然是以引用有限元法结合渗流场计算最为方便可靠。

6 结 语

最后将土坡圆弧滑动的有限元法与常用的简化毕肖普条分法中的有效应力法,作一比较归纳。

(1) 有限元法按照土层分区划分成三角形单元,利用程序同时计算渗流及滑坡;垂直条分法沿水平向划分成垂直土条,渗流与滑坡分别计算。

(2) 有限元法略去单元侧边土压力,按渗流场计算孔隙水压力;垂直条分法略去条块侧边土压力的垂直分量,按浸润线高低的静水压力计算土条侧边水压力。

(3) 有限元法将孔隙水压力转换为各单元渗透力(体积力)计算渗流的作用;垂直条分法以土条周边的表面水压力计算渗流作用,侧边水压力设为水平方向。

(4) 有限元法在引用力矩方程 $\sum M_0 = 0$ 计算时考虑了各单元重心位置对滑动面上抗滑力矩的差额;垂直条分法在引用方程 $\sum M_0 = 0$ 计算时没有考虑土条侧边水压力作用点位置所产生抗滑力矩的差额。

(5) 有限元法各单元渗透力正确考虑了渗流方向;垂直条分法没有正确考虑渗流方向,特别是上游坡在库水位降落时。

(6) 有限元法对水的问题只需计算单元体的渗透力,不必计算外水的压力;垂直条分法计算土条周边水

压力,同时也得计算坝坡外的水压力。

(7) 有限元法对土重的问题,只要在浸润线以下渗流饱和区取土体浮重,以上非饱和区取自然土体重量即可;垂直条分法对于土重问题规定浸润线以下,库水位以上取湿土重,库水位以下取浮重。

(8) 有限元法计算公式明确,分母项为滑动力,滑动体包括土和孔隙水,分子项为抗滑力,只是滑动体的有效重量在滑动面上起抗滑作用;垂直条分法分母项的滑动土体以有效重出现,依此就必须以超静水压力取代土条底部的实有孔隙水压力来补偿。

(9) 有限元法采用各单元渗透力(体积力)的滑坡计算式,能精确方便地引入地震力以及坝顶行车等的均布或集中荷载;垂直条分法采用土条表面水压力的计算式引入地震力等荷载,处理不当将发生误差。

建议采用以渗透力取代表面水压力的有限元法计算程序研究分析土石坝及堤防岸坡的稳定性问题,再也不可停留在 70 年前的垂直条分法的框框上了,只有在手算时还可考虑划分少许土条的近似算法。至于应力应变的有限元计算以及土力学参数等方面,则另当别论。限于篇幅,只讨论最简单常用的圆弧滑动面。

参考文献:

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 毛昶熙, 陈平, 李祖貽, 李定方. 渗流作用下的坝坡稳定有限单元法分析[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 87~106.
- [3] 毛昶熙, 等. 关于“渗流作用下坝坡稳定有限单元法分析”一文的终结讨论[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(5): 96~100.
- [4] 毛昶熙, 李吉庆. 土坡渗流整体稳定性分析与控制[J]. 人民长江, 1990, (12).
- [5] 毛昶熙, 陈平, 李祖貽, 李吉庆. Analysis of slope stability of earth dam under seepage flow by FEM[J]. J Hydraulic Engineering, 1992, 2(4/6).
- [6] Brauns J. Der Lastfall Schneller Spiegelabsenkung bei kerngedichteten Staueämmen[J]. Wasserwirtschaft, 1977, (9).
- [7] Bauer G E. The stability of tailings structures[A]. Proc A, 1st Intern Mine Water Congress[C]. Budapest, 1982.