

文章编号: 1672-3031(2006)04-0227-05

# 各向异性渗流对堤坝稳定性的影响

何秉顺, 留谦

(中国水利水电科学研究院 防洪减灾研究所, 北京 100038)

摘要: 在大多数边坡稳定分析中, 对于浸润线下的水压力分布多按静水压力考虑, 即假设水头等势线与浸润线垂直, 水压力沿深度呈线性分布。本文使用条分法与有限元法, 考虑非饱和区土体渗透性和抗剪强度, 对水平渗透能力大于垂直渗透能力的土坝进行了渗流与稳定计算。计算结果表明: 堤坝渗流的水平渗透性相对于垂直渗透性越高, 浸润线越高, 但水头等势线越倾斜, 相应点处的孔隙水压力却会降低, 从而导致稳定安全系数的升高。计算结果说明各向异性渗流是有利于边坡稳定的。当坝体渗流各向异性程度较大时, 按照静水压力计算稳定, 有可能导致错误的结果。

关键词: 各向异性; 渗流; 稳定; 孔隙水压力; 静水压力

中图分类号: TV139.1

文献标识码: A

## 1 研究背景

堤坝分层碾压以及天然地层的分层沉积, 都可以使坝体坝基土层在渗流性质上表现为各向异性。羊角碾碾压时, 堤坝横向渗透系数  $K_x$  与纵向渗透系数  $K_z$  之比为 2~10, 平均在 4 左右。用气胎碾碾压时,  $K_x$  与  $K_z$  之比为 20~30<sup>[1]</sup>。以发生溃坝事故的青海省沟后面板砂砾石坝为例, 事后调查坝体的各向异性倍数达到了 45<sup>[2,3]</sup>。

当计算坝体在稳定渗流期和水位消落期的安全系数时, 工程上一般采用简化方法忽略或粗略地计算地下水渗流的作用, 常使用静水压力法, 其假设等势线垂直于浸润线, 浸润线以下水压力沿深度呈线性分布。但在实际工程中, 特别是堤坝横向渗透系数远大于纵向渗透系数 ( $K_x/K_z > 10$ ) 时, 虽然浸润线很高, 但并不会产生很大的孔隙水压力, 采用简化方法计算出的结果脱离实际较远, 有时甚至会得出错误的计算结果。

要准确地考虑渗流在边坡稳定分析中的作用, 必须以实际的孔隙水压力分布参与边坡的稳定分析。本文采用有限元法求解饱和-非饱和渗流场方程, 得到各个结点上水头的大小, 在边坡稳定分析时将条分法和有限单元法结合起来, 把总水头转化为孔隙水压力并且进行差值, 得到滑弧底部的孔隙水压力分布, 从而进行稳定分析计算。

## 2 堤坝各向异性渗流场特征

在大多数堤坝稳定性研究中, 浸润线下的孔隙水压力分布一般认为是静水压力或者来自于流网, 但是将其假设为静水压力并不总是正确的。而使用流网计算孔隙水压力, 在分析水位降落的上游坡时, 不能及时反映孔隙水压力的变化, 而且不适宜电算。本文分析横向、纵向渗透能力不同的渗流场时, 通过编制有限元程序计算出饱和-非饱和渗流场任意时刻的孔隙水压力的分布。

### 2.1 饱和-非饱和渗流控制方程 数值模型所采用的控制微分方程如下

收稿日期: 2006-06-01

基金项目: 世界银行贷款项目(FDPC-01)

作者简介: 何秉顺(1980-), 男, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事边坡稳定方面的研究。E-mail: hebs@iwhr.com

$$m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \tag{1}$$

式中:  $x$  和  $z$  为水平、垂直坐标;  $K_x$  与  $K_z$  分别为  $x$  和  $z$  方向渗透系数;  $T$  为时间,  $H$  为总水头(位置水头和压力水头之和);  $\gamma_w$  为水的容重;  $m_w$  为水土特征曲线在某一特定孔隙水压力处的斜率;  $\theta$  为体积含水率。

**2.2 计算参数** 设一均质土坝, 堤高 12.00m, 库水位 11.00m, 上游坡设为定水头边界, 下游坡设为渗流出逸边界。令  $\alpha = K_x / K_z$ , 分析  $\alpha = 1、5、10、20$  共 4 种情况, 其中横向渗透系数  $K_x$  和纵向渗透系数  $K_z$  并非一成不变, 它们是体积含水率的函数。图 1 为渗透系数与基质吸力关系曲线, 图 2 为堤坝土体水土特征曲线, 这两条曲线用于计算非饱和区的渗流。

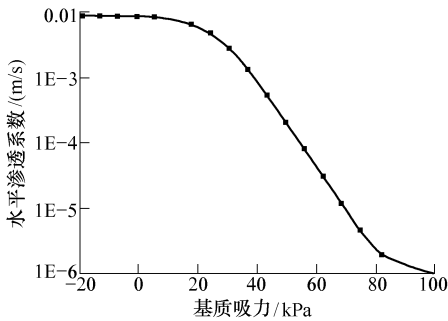


图1 渗透系数与基质吸力关系曲线

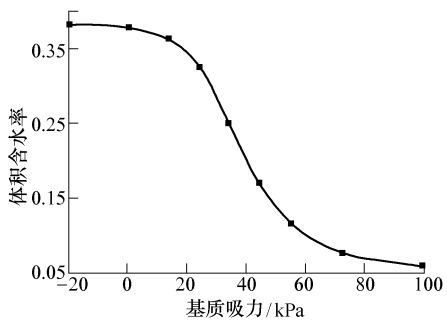


图2 水土特征曲线

**2.3 稳定渗流期渗流计算结果** 库水位保持 11.00m 不变, 分别对  $\alpha = 1、5、10、20$  计算, 在图 3 中可以看到, 浸润线依各向异性的不同而不同, 各向异性越大, 浸润线越高。对土坝中部 A-A' 断面、下游坡 B-B' 断面的孔隙水压力与浸润线以下沿深度线性分布的静水压力的比较如图 4。

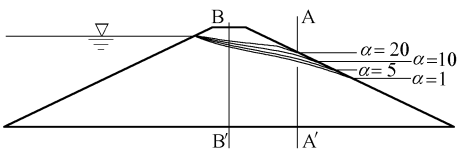
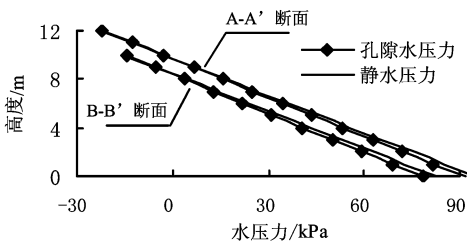
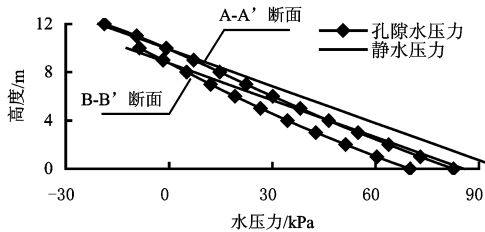


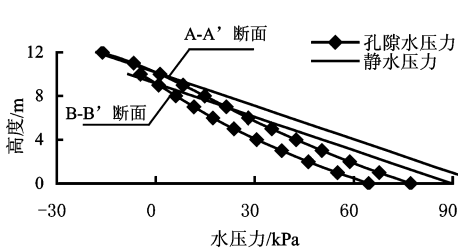
图3 各向异性不同时的浸润线高度分布(稳定渗流期)



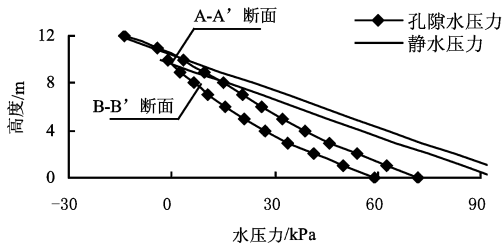
(a)  $\alpha=1$



(b)  $\alpha=5$



(c)  $\alpha=10$



(d)  $\alpha=20$

图4 各向异性渗流对孔隙水压力的影响(稳定渗流期)

由图 4 可以看出, 坝体各方向渗透能力相同时(  $\alpha = 1$  ), 孔隙水压力基本等同于静水压力, 随着各向异性的增大, 相应点上的孔隙水压力与静水压力的差值越来越大。对于 A-A'、B-B' 断面, 当各向异性达到 20 倍时, 孔隙水压力与按照垂直分布的静水压力差值达到 30kPa。因此, 使用静水压力计算位于稳定渗流期的堤坝, 一定会产生较大的误差。图 5 对各向异性  $\alpha$  为 1 和 20 时的流网进行了比较。

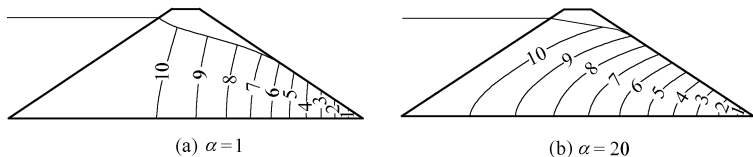


图5 各向异性不同时的流网(稳定渗流期)

图5中可以看到明显的浸润线上升和流网倾斜,等势线的倾斜抵消了由于浸润线上升而产生的孔隙水压力的增加,反而使得相应点上的孔隙水压力减小。

**2.4 水位降落期渗流计算结果** 假设库水位在30d之内由11.00m降至0m,在之后的时间内保持不变。计算第30d库水位降落结束时的浸润线的位置和孔隙水压力。对土坝进行非稳态饱和-非饱和渗流计算,计算所得浸润线位置图6所示。

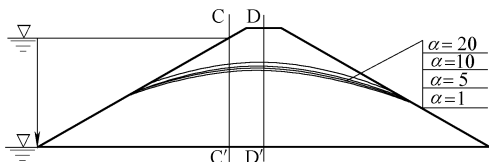


图6 各向异性不同时的浸润线高度分布(水位降落期)

随着各向异性的增加,浸润线高度相对于稳定渗流期提升的幅度不大,但是土坝内部的孔隙水压力的变化却非常明显。与稳定渗流分析相同,对堤坝中部D-D'断面和上游坡C-C'断面做了孔隙水压力与静水压力的比较,如图7。

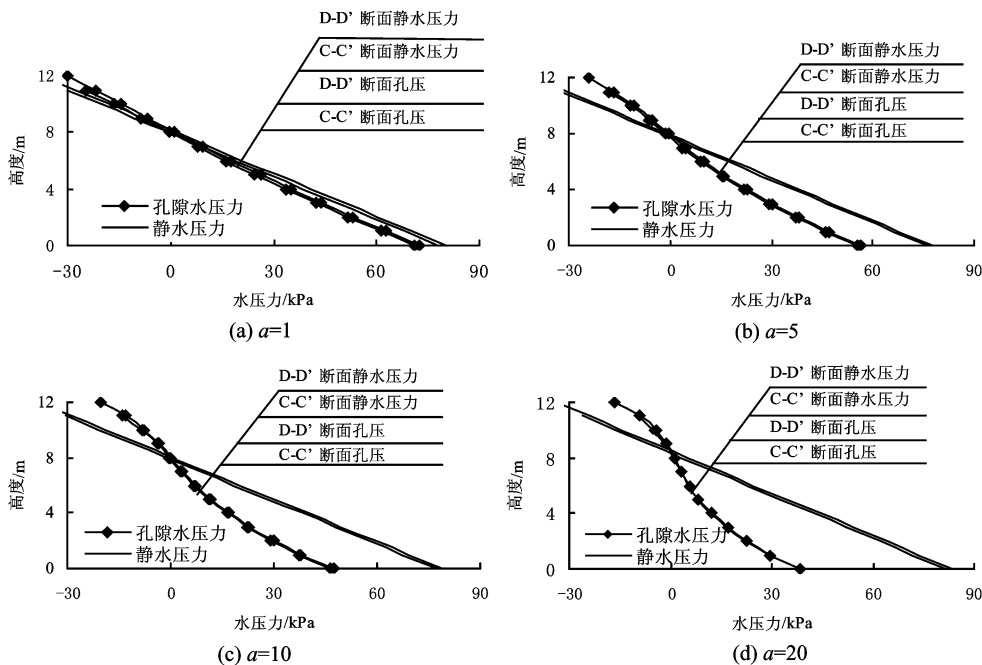


图7 各向异性对孔隙水压力的影响(水位降落期)

在图7中,C-C'断面和D-D'断面相比,无论是静水压力和孔隙水压力相差都不大,但是就C-C'断面或D-D'断面自身而言,水位降落期间的孔隙水压力和静水压力的差值相比稳定渗流期的差值更大,在堤脚处,孔隙水压力与静水压力最大有40kPa的差距。原因是在水位降落期间,由于各向异性渗流导致的流网更加倾斜所致。图8为第30d时 $\alpha$ 分别为1和20的流网。

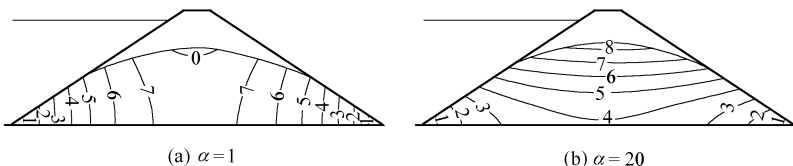


图8 各向异性不同时的流网(水位降落期)

从图 8 可以看出, 各向异性倍数的不同, 在其它水力条件都相同的情况下, 导致了流网形状的不同。在同一垂直方向上, 各向异性倍数越大, 同样深度经历的水头等势线条数越多, 相应点上孔隙水压力就越小。

3 稳定分析

土坝的稳定分析采用简化 Bishop 法<sup>[4]</sup>, 同时考虑非饱和土体的强度在稳定分析中发挥的作用。在稳定计算中, 孔隙水压力选取两种方案, 一是选用上节有限元计算的孔隙水压力分布结果, 二是选用静水压力。

3.1 稳定计算控制方程 考虑到浸润线上面的非饱和区土体强度, 对于每一个试算的滑弧, 计算安全系数如下

$$\begin{cases} F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_a} [c'_i b_i + [b_i(\gamma H_1 + \gamma_{sat} H_2) - S_e u_i b_i] \tan \phi'_i]}{\sum_{i=1}^n b_i (\gamma H_1 + \gamma_{sat} H_2) \sin a_i} \\ m_a = [1 + (\tan \phi'_i \tan a_i) / F] \cos a_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n$  为土条总数;  $c'_i$  为滑弧处土体的有效内黏聚力;  $\phi'_i$  为滑弧处土体有效内摩擦角;  $b_i$  为土条宽度;  $\gamma$  和  $H_1$  分别为浸润线上土体的容重和高度;  $\gamma_{sat}$  和  $H_2$  分别为浸润线到滑弧之间土体的容重和高度;  $S_e$  为土体饱和度;  $u_i$  为土条底部的孔隙水压力;  $a_i$  为滑弧的倾角。

假设坝体有效内黏聚力  $c'$  为 15kPa, 有效内摩擦角  $\phi'$  为 20°。

3.2 稳定计算结果 对内部水压力分别选用有限元计算结果和静水压力, 按式(2) 对安全系数进行计算, 结果对比如表 1。

表 1 稳定计算结果

| $\alpha = K_y / K_z$ | 下游坡安全系数( 稳定渗流期) |          | 上游坡安全系数( 水位降落期) |          |
|----------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|
|                      | 本文提供的方法         | 按照静水压力计算 | 本文提供的方法         | 按照静水压力计算 |
| 1                    | 1. 206          | 1. 177   | 1. 330          | 1. 247   |
| 5                    | 1. 267          | 1. 151   | 1. 426          | 1. 246   |
| 10                   | 1. 303          | 1. 123   | 1. 479          | 1. 242   |
| 20                   | 1. 337          | 1. 103   | 1. 520          | 1. 149   |

由表 1 可以看出, 当土体的渗流各向异性增大时, 安全系数也会增加, 但是如果按照静水压力计算, 却会得到相反的结果。虽然由于各向异性所致, 浸润线的高度有所提升, 但是在同一位置孔隙水压力值反而降低。

上面计算结果表明, 当土坝的横向渗透系数与纵向渗透系数比值较大时, 按照静水压力计算稳定安全系数会得到偏于保守的结果, 当土体各向异性倍数达到 20 时, 水位降落期间对于安全系数计算产生的误差有 24%。因此, 为避免错误的计算结果, 建议先对坝体进行渗流场分析, 利用渗流场分析得到的孔隙水压力进行坝坡稳定评价。

4 结论

(1) 本文把有限元法计算饱和- 非饱和渗流和条分法计算边坡稳定结合起来, 分析了土坝在各向异性渗流场下的稳定。(2) 通过对算例的分析研究表明, 虽然各向异性渗流能够在稳定渗流期和水位骤降期提升浸润线的高度, 但是并不意味着相应点处的孔隙水压力能够增加, 反而是有一定程度的降低。(3) 把各向异性渗流场的孔隙水压力分布参与边坡稳定分析, 得到的安全系数比通过静水压力计算的安全系数大。堤坝渗流的横向渗透能力相对于纵向垂直渗透能力越大, 稳定安全系数越高, 说明各向异性渗流是有利于堤坝稳定的。对具有各向异性渗流的边坡, 采用简化算法, 将可能导致较大的误差。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] SL274- 2001, 碾压土石坝设计规范[S].
- [ 2 ] 刘杰,丁留谦,缪良娟,等.沟后面板砂砾石坝溃坝机理模型试验研究[J].水利学报,1998,(11):69-75.
- [ 3 ] 刘杰,缪良娟.大坝砂砾料的力学特性试验研究[M].北京:中国水利水电出版社,1996.18-25.
- [ 4 ] Bishop A W. The use of slip circle in the stability analysis of the slope[J]. Geotechnique, 1955, 5(1):7-17.

**Effect of hydraulic seepage anisotropy on the stability of earth dams**

HE Bing-shun, DING Liu-qian

(Department of Water Hazard Research, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In most cases of slope stability analysis, the distribution of water pressure under phreatic line was considered as a hydrostatic one, the isopiestic lines of water head was perpendicular to the phreatic line and the hydraulic pressure would increase linearly along water depth. The authors analyze seepage and stability of an earth dam with hydraulic anisotropy by applying the Finite Slice Method and the Finite Element Method, taking into account of the seepage feature and shear strength of unsaturated zone. The results show that, as the degree of hydraulic anisotropy increases (i. e. the horizontal permeability coefficient is higher than the vertical permeability coefficient), the height of phreatic line would go up, while the pore water pressure would go down, thus resulting in a larger safety factor. The analysis demonstrates that high degree of hydraulic anisotropy is helpful for the stability of earth dams. On the other hand, in the case of high degree of hydraulic anisotropy, if the pore water pressure was calculated by considering the phreatic line as hydrostatic one, the stability analysis may get a wrong result for the slope.

**Key words:** anisotropy; seepage; stability; pore water pressure; hydrostatic pressure

(责任编辑:韩昆)