

复杂地形尾矿坝的三维渗流分析

路美丽¹, 崔 莉²

(1 北京交通大学 隧道与岩土工程研究所, 北京 100044; 2 大连理工大学 土木水利学院, 大连 116024)

摘 要: 对于复杂地形的尾矿坝, 由于二维模型不能充分反映复杂多变的渗流域, 也不能考虑到三个方向渗流因素同时作用的影响, 从而无法体现真正的渗流场。通过建立三维渗流数学模型, 并考虑复杂断面概化和地形的简化, 对实际工程进行了数值计算, 其结果与试验结果吻合较好。结果表明, 对复杂地形的尾矿坝渗流分析时必须采用三维模型, 三维数值计算中对复杂地形进行适当的简化和概化对结果的影响较小, 可以满足精度要求, 因此大大减小了计算的复杂程度和难度。

关 键 词: 尾矿坝; 复杂地形; 三维数值模拟; 断面概化; 渗流

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Three-dimensional seepage analysis for complex topographical tailings dam

LU Mei-li¹, CUI Li²

(1. Institute of Tunnel & Geotechnical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: For the complex topographical tailings dam, neither the complicated and changeable seepage field nor the action of three direction seepage factors at the same time can be fully reflected in the two-dimension model; as a result the real seepage field cannot be acquired. A three-dimension mathematical model is set up; and both section and terrain are simplified. An example is given; and the result is compared with that of the test. The better identical result indicated that the three-dimension model must be adopted in the seepage analysis of the complicated topographical tailings dam; and the appropriate predigestion can satisfy the precision and reduce the complicity and difficulty.

Key words: tailings dam; complicated terrain; three-dimension numerical simulation; simplified section; seepage

1 引 言

目前尾矿坝渗流分析有^[1]理论求解、物理模拟、数值模拟三种方法。理论求解浸润面是在对工程作适当概化的基础上采用相应的近似公式求解, 只能适应于均质的、简单的工程, 而对具有土工膜、排水褥垫等复杂边界条件的多介质尾矿坝计算时则显示了局限性。物理模拟从应用的广泛性看, 当属导电液模型(电模拟试验), 由于该模型保持了原型介质的连续性, 并能精确的模拟原型的复杂边界和内部结构, 因而是求解大型渗流场的有效工具, 但不足之处是制作模型的工作量大、费用高、而且费时费力; 数值模拟我国是在 20 世纪 60~70 年代就应用到渗流计算中, 常用的数值模拟方法^[2]有差分法、有限单元法、边界元法、随着计算机的高速发展, 数值模拟方法应用的越来越广泛。

尾矿坝多依山而建, 地形比较复杂, 这种情况下建立的二维物理或数值模型进行渗流分析都会带来较大的误差, 因此不能很好地指导工程实际。而采用三维电模拟试验费用高、工作量大、存在费工费时的问题, 本文尝试利用三维数值模拟对复杂地形尾矿坝的渗流进行分析。

2 三维渗流有限元计算原理

对于符合达西定律且非均质各向异性的土体, 当坐标轴方向与渗透主轴方向一致时, 其三维稳定渗流问题可归结为如下的定解问题^[2]:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \omega = 0, \text{ 在 } \Omega \text{ 内} \\ & H(x, y, z) \Big|_{\Gamma_1} = f(x, y, z), \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \\ & k_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q, \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \end{aligned} \right\} (1)$$

在浸润面上还应同时满足 $H = z$ 和 $\partial H / \partial n = 0$ 。式中 H 为水头函数; Ω 为渗流区域, 即为 Γ_1 和 Γ_2 所围成的区域; ω 为入渗或蒸发的水量; $H(x, y, z)$ 为域 Ω 内各点水头值, 为待求水头函数; $f(x, y, z)$ 为 Γ_1 上的已知水头函数; $q(x, y, z)$ 为边界上单位宽度流入的流量, 即 Γ_2 上的已知单宽流量; k_x 、 k_y 、 k_z 、 k_n 为相应方向上的渗透系数; n 为 Γ_2 的外法线方向; Γ_1 为已知水头值的边界曲面, 即第 1 类边界条件; Γ_2 为已知流量值的边界曲面, 即第 2 类边界条件。

对于所研究的渗流场, 根据变分原理, 上述定解问题的求解等价于求下列泛函 $x(H)$ 的极值问题^[3], 即

$$x[H(x, y, z)] = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \left\{ k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - 2\omega H \right\} dx dy dz - \iint_{\Gamma_2} q H ds = \min \quad (2)$$

确定渗流场的边界后, 采用空间八节点六面体等参数单元作为基本单元, 同时采用 9~19 节点的过渡单元, 对渗流域进行离散。对离散后的单元求泛函, 引入水头插值函数, 经过坐标转换和积分变换, 并引入雅可比矩阵, 形成各单元的渗透矩阵, 再将各单元进行综合, 最后形成求解渗流场水头函数 H 的代数方程组, 即

$$[K]\{H\} = \{F\} \quad (3)$$

式中 $[K]$ 为总渗透矩阵; $\{H\}$ 为未知水头结点的水头列向量; $\{F\}$ 为由已知水头结点水头形成的常数列向量。

因此用有限元法求解渗流场的问题就归结为求解线性代数方程式 (3) 的问题。

3 工程实例

3.1 工程概况

鞍钢弓长岭选矿厂尾矿库位于辽阳市安平乡, 选矿厂以西约 2.5 km 的前峪和后峪, 是我国特大型尾矿库之一, 由前峪和后峪两坝组成。设计总库容为 1.5 亿立方米, 总汇水面积为 11.2 km², 设计最终坝顶标高 132 m, 两坝在堆积标高达 109 m 时合一, 其平面如图 1 所示, 图中左-100, 右-100, 左-100, 右-80 分别为与坝体中心线的距离。前峪初期坝为 16 m 高的黏性土坝, 局部地段含少量碎石, 坝底宽 83 m, 坝顶宽 3 m, 坝顶长 205 m, 内外坡均为 1:2。后峪初期坝为透水堆石坝, 坝高 24 m, 坝底宽 146.5 m, 顶宽 5 m, 坝轴线长 230 m,

内坡 1:2, 外坡 1:2.5。

尾矿坝用上游法冲填, 子坝用人工池填筑成。在现有高度上, 坝外坡平均坡度: 前峪在标高 112 m 以下平均坡度为 1:4, 以上为 1:6; 后峪为 1:5.6, 设计高度平均外坡为 1:6。设计干滩平均坡度为 1%, 设计干滩长 500 m, 上游设计水位为 127.0 m。分析前峪和后峪的标准剖面 and 平面图发现: 前峪各特征剖面底坡最大差值为 7.585%, 最小差值为 3.38%, 后峪各特征剖面底坡最大差值为 6.3%, 最小差值为 0.97%, 无论前峪或后峪, 地形起伏变化都很大, 从整体上看尾矿库又呈现为特殊性的分叉地形。

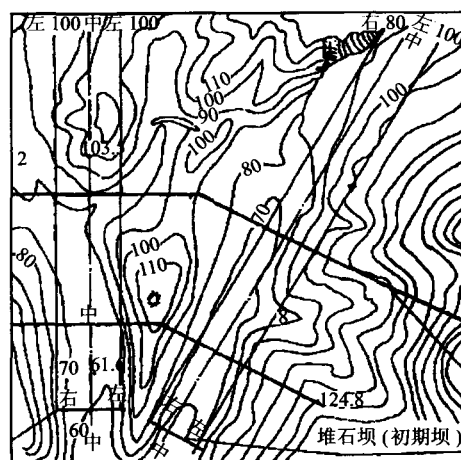


图 1 弓长岭选矿厂尾矿库的平面布置图 (单位: m)

Fig.1 Plan of Gongchangling Tailings Dam (unit: m)

3.2 三维渗流有限元分析

3.2.1 断面的简化和概化

为避免尾矿库呈现的分叉地形在整体计算中带来剖面信息、下游边界及断面信息的输入等困难问题, 数值模拟中忽略了前峪和后峪之间在标高 109 m 以上渗流场的相互影响, 即分别建立前峪和后峪的三维渗流数值模型。同时, 弓长岭尾矿库无论前峪或后峪, 其横断面地形起伏变化均较大, 这在网格剖分中可能会造成不规则空间网格的增多, 从而影响到有限元计算的收敛性和精度。因此数值模拟中考虑了断面的概化。

目前自然断面的概化常采用以下两种方法^[1]: 一是概化成规则的矩形或梯形断面, 另一种是由规则多边形曲线拟合。前者是遵守一维概念来进行的, 其做法任意性很大, 对同一自然断面可以概化出各种深宽不同的面积, 因此所得概化面积归一性差, 不能很好地反映出自然断面的特性, 而后者是用多边形面积逼近自然断面面积, 当选点较多时多边形面积就可以较好地逼近自然断面面积, 本文即采用

3.2.7 计算结果分析

图 4~7 分别给出了弓长岭前峪土坝和后峪堆石坝在有、无排渗设施情况下中-中剖面的三维数值模拟结果与试验结果^[5]的比较, 可以看出三维数值模拟结果与三维电模拟试验结果基本一致。

通过三维数值计算中对各特征剖面的结果分析得出以下认识:

(1) 在不考虑排渗设施情况下, 前峪土坝在渗透系数比 $k_1: k_2: k_3 = 5: 1: 0.01$ 情况下, 浸润线最大误差为 2.4%; 渗透系数比 $k_1: k_2: k_3 = 10: 1: 0.01$ 情况下, 最大误差为 3.9%。后峪堆石坝在 $k_1: k_2: k_3 = 5: 1$ 情况下浸润线最大误差为 3.1%; $k_1: k_2: k_3 = 10: 1$ 情况下, 最大误差为 1.0%。相对尾矿库长 880 m, 上下游水位差 $127 - 59 = 68$ m, 是可以满足精度要求的。

(2) 在考虑排渗设施情况下, 前峪各特征剖面最大浸润线误差为 7.4%, 后峪各特征剖面浸润线最大误差为 9.9%, 这在目前有排渗井三维计算处理还不太成熟的情况下是可以接受的。

(3) 三维数值计算中对整个尾矿库分叉地形

的简化对结果的影响不大, 分析其原因认为是由于两坝体相通时的标高 (109 m) 比较接近最高水位 (127 m), 浸润面很大一部分位于此标高以下, 而且位于浸润面以上的部分, 也由于渗流速度较小使得相互间的渗流影响不明显。同时还可以看到, 对横断面采用多边形面积逼近自然断面面积的概化是合理的。

3.3 三维与二维电模拟试验结果的对比分析

相比三维物理模型或者数值模型而言, 二维模型更容易进行, 花费的时间也比较少, 因此如果二维模型能够代替三维模型进行尾矿坝的渗流分析, 将是不错的选择。图 8 和图 9 比较了前峪中-中剖面在有、无排渗设施情况下的二维与三维试验结果。

由图可见, 复杂地形的尾矿坝的二维试验结果与三维结果差异较大, 其原因在于对于地形起伏变化较大的尾矿坝, 其三维渗流域复杂多变, 三个方向渗流因素同时作用的影响比较大, 而二维模型(物模和数模)由于不能考虑 3 个方向渗流因素同时作用的影响, 从而不能充分反映复杂多变的三维渗流域, 体现不了真正的渗流场。

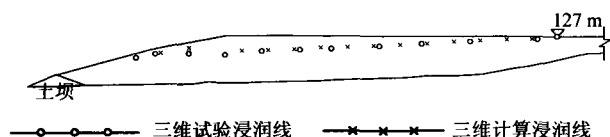


图 4 弓长岭前峪中-中剖面浸润线 (5:1:0.01 无排渗设施)
Fig.4 The mid-section seepage line of Qianyu
(5:1:0.01 without drainage)

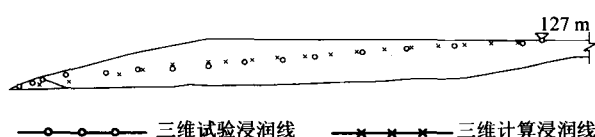


图 5 弓长岭前峪中-中剖面浸润线 (5:1:0.01 有排渗设施)
Fig.5 The mid-section seepage line of Qianyu
(5:1:0.01 with drainage)

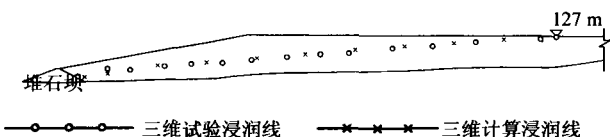


图 6 弓长岭后峪中-中剖面浸润线 (5:1 无排渗设施)
Fig.6 The mid-section seepage line of Houyu
(5:1 without drainage)

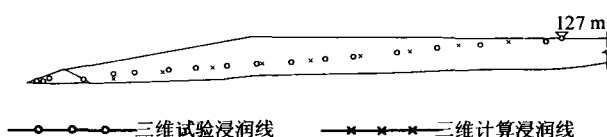


图 7 弓长岭后峪中-中剖面浸润线 (5:1 有排渗设施)
Fig.7 The mid-section seepage line of Hou-yu
(5:1 with drainage)

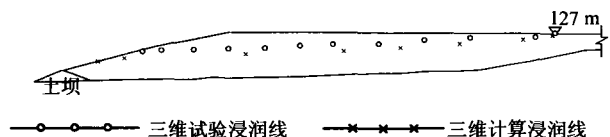


图 8 弓长岭前峪中-中剖面二维与三维试验浸润线对比
(5:1:0.01 无排渗设施)
Fig.8 The comparison two-dimension with three-dimension
testing seepage line of the Qianyu mid-section
(5:1:0.01 without drainage)

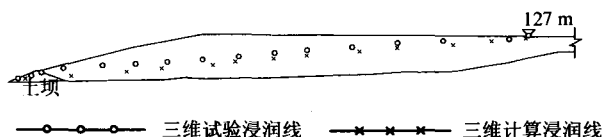


图 9 弓长岭前峪中-中剖面二维与三维试验剖面浸润线
(5:1:0.01 有排渗设施)
Fig.9 The comparison two-dimension with three-dimension
testing seepage line of the Qianyu mid-section
(5:1:0.01 with drainage)

4 结 论

(1) 本文尝试在对复杂地形进行简化和概化的基础上, 建立三维渗流数学模型对其进行分析, 并将计算结果与三维电模拟试验结果进行了比较, 吻合较好, 最大误差不超过 10 %。

(2) 三维与二维电模拟试验结果对比表明, 对于具有复杂地形的尾矿坝而言, 只有建立三维渗流模型才能比较真实地反映其渗流场; 三维数值模拟中对复杂地形进行适当的概化和简化, 对结果的影响不大, 可以大大减小三维计算的工作量。

参 考 文 献

[1] 程亮. 具有复杂排渗系统尾矿坝三维渗流计算[D]. 大

连: 大连理工大学, 1985.

[2] 杜延龄, 许国安. 渗流分析的有限元和电网络法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

[3] 魏泽光, 黄俊, 许国安, 等. 三维稳定渗流的有限元计算[J]. 水利学报, 1982, (1): 39—47.

WEI Ze-guang, HUANG Jun, XU Guo-an, et al. 3-D FEM analysis for steady seepage flow problem[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982, (1): 39—47.

[4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[5] 徐孟川, 崔莉. 弓长岭尾矿坝渗流稳定试验研究[R]. 大连: 大连理工大学, 1995.

中国预应力技术五十年（暨第九届后张预应力学术交流会）征集论文通知

混凝土及钢筋混凝土是我国乃至全世界广泛使用的土木工程结构材料, 而预应力混凝土则是钢筋混凝土的最高级应用。我国预应力技术起源于 1956 年, 五十年来随着我国预应力材料、工艺、设备和结构技术的发展, 预应力混凝土技术水平不断提高, 应用领域进一步扩大, 且已经从单一的结构材料技术发展成为具有结构材料功能、结构设计手段和特殊工艺方法的综合技术——预应力技术。

为了更好地回顾与总结我国预应力技术五十年发展成就, 进一步推动我国预应力技术的创新和发展, 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会联合中国建筑科学研究院共同发起召开“中国预应力技术五十年”暨第九届后张预应力学术交流会, 热烈欢迎广大工程技术和管理人员积极参加, 踊跃投稿。现将征文通知如下:

一、会议简介

会议名称: 中国预应力技术五十年——暨第九届后张预应力学术交流会

主办单位: 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会 中国建筑科学研究院

承办单位: 后张预应力结构委员会

会议时间: 2006 年 10 月中下旬

会议地点: 北京

二、征文内容

1. 预应力技术发展成就及典型工程应用; 预应力技术规范、理论分析及应用研究;
2. 预应力材料、设备及工艺技术的研发与创新;
3. 预应力结构设计、施工及工程应用;
4. 预应力工程检测、改造及加固技术;
5. 预应力特殊技术及特种工程应用。

三、联系地址

北京北三环东路 30 号主楼 邮编: 100013

中国建筑科学研究院结构所 冯大斌、张清杰、朱莹、陈茜

电话: 010-84282677, 84272233-2542

E-mail: fengdabin@cabr.com.cn/yingying1211@163.com