

文章编号: 1001-6791(2001)03-0385-05

# 增设排水廊道对大坝渗流场的影响分析

黄 蔚<sup>1</sup>, 刘迎曦<sup>2</sup>, 孙林柱<sup>1</sup>

(1. 温州大学建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325027; 2. 大连理工大学力学系, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 通过对大坝增设排水廊道设计方案的研究, 提出了两种含自由面的三维稳态渗流有限元分析算法, 即松弛型算法及丢单元法。并比较了两种算法的计算精度, 最后用丢单元法对丰满大坝进行了三维渗流分析, 得出了在大坝内增开排水廊道会降低下游渗出点的结论, 强度计算表明该方案的实施对大坝的安全性能不会造成很大影响。

**关键词:** 三维无压渗流; 有限元算法; 松弛型; 丢单元

**中图分类号:** TV 139.14 **文献标识码:** A

丰满大坝建于1937年, 至今已运行了半个多世纪。由于历史原因, 大坝的施工质量存在一定问题, 加之老化和病害, 如今大坝的维护和加固工程尤为必要。在大坝内增开排水廊道的设计方案就是大坝防渗工程的一部分, 其目的是缓解大坝目前渗漏严重的问题, 降低下游渗出点高度, 避免因冻融对下游坝面造成的损害, 减少坝面混凝土的剥落, 保护大坝坝面的完整。排水廊道拟开在与现有的检查廊道同一水平高程, 其中心线距下游面的水平距离为10 m, 尺寸与检查廊道相同(宽×高=2 m×2.5 m), 廊道向上还布置有排水孔, 孔径为108 mm。为确保大坝的安全, 开挖廊道后需对大坝进行强度计算。

## 1 渗流分析算法研究

### 1.1 渗流有限元基本理论

如果是各向同性均匀介质, 无源汇的稳定渗流场, 可建立如下泛函并对其取极值来求解表征渗流场的重要物理量——水头函数  $H$ :

$$\min I(H) = \min \left\{ \frac{k}{2} \int_V \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right\} \quad (1)$$

从上式可见, 求渗流场各点的水头与渗透系数的大小无关, 但如果渗流场介质不是均匀介质而是分区均匀的话, 则各点水头与各区渗透系数的比值有关。设  $k_1, k_2, \dots, k_m$  代表渗流域  $m$  个区的渗透系数, 则上式可改写为

$$\begin{aligned} \min I(H) = & \min \frac{k_1}{2} \left\{ \int_{V_1} \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right. \\ & \left. + \frac{k_2}{k_1} \int_{V_2} \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right. \end{aligned}$$

收稿日期: 2000-06-28; 修订日期: 2000-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779003)

作者简介: 黄蔚(1962-), 女, 湖南长沙人, 温州大学建筑与土木工程学院副教授, 主要从事水工结构渗流分析、有限元计算和工程反问题数值方法等研究。

$$+ \dots + \frac{k_m}{k_1} \int_{V_n} \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dV \quad (2)$$

将渗流场离散化, 采用八节点等参元, 可建立求解节点水头的线性代数方程组:

$$K_{n \times n} H_{n \times 1} = Q \quad (3)$$

引入第一类边界条件, 上式变为  $(K + K^*)H = Q^*$  (4)

式中  $K^*$  是一个对角矩阵, 如节点  $i$  的水头  $H_i$  已知, 则  $K^*$  对角线上第  $i$  个元素值  $k_i^* > k_{ii}$ , 否则对角线上元素为 0, 相应地在向量  $Q^*$  中的第  $i$  个值就为  $k_i^* H_i$ , 否则为 0。

## 1.2 算法研究

对含自由面的三维稳定渗流分析感到困难的是: 由于自由面边界位置未知导致要求解的渗流场区域大小未知, 属于几何边界不确定的非线性问题。目前常见的做法是将这种几何非线性问题转换成材料非线性问题来考虑, 所谓的调整传导矩阵做法就是这个思路。

(1) 松弛型算法 对含自由面单元组成的区域大小的研究是调整传导矩阵算法收敛稳定与否的关键。所谓单元传导矩阵调整法派生的各种算法都是围绕该区域单元传导矩阵的计算方法进行的。单元传导矩阵的计算公式为

$$k^* = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T M B |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (5)$$

式中  $B$  为几何矩阵;  $M$  为材料矩阵; 对各向同性材料  $M = kI$ ,  $k$  为材料渗透系数。利用高斯数值积分, (5) 式可转化为

$$k^* = \sum_{i=1}^{n_G} \sum_{j=1}^{n_G} \sum_{l=1}^{n_G} k^* w_i w_j w_l B^T B |J| \quad (6)$$

式中  $n_G$  为积分点数;  $w_i$ 、 $w_j$ 、 $w_l$  为积分权系数;  $J$  为雅可比阵;  $k^*$  是该单元高斯点上的渗透系数, 不同的高斯点上取值不同, 如果选择的材料非线性关系为阶跃函数的话, 则自由面以上的高斯点  $k^* = k/1000$ , 自由面以下的高斯点  $k^* = k$ ; 如果选择分段线性函数作为材料非线性关系的话, 则可以使渗透系数成为连续函数, 避免因自由面上材料参数突变造成计算结果的跳跃和不稳定, 如图 1 所示。对  $(-\epsilon, \epsilon)$  这个小邻域及在这个邻域上渗透系数取值的讨论是很有意义的, 其物理含义是自由面附近的窄带形区域, 若单元的高斯点落在这个区域, 则其上的渗透系数由图 1 中的斜直线确定; 反之, 则取  $k$  或  $k/1000$ 。该带形区域狭窄的话, 尤其对有限元网格各边长相差较大的算题可能会出现同一单元高斯点在相邻的两次迭代中或位于带中或逃离带中的情形, 从而引起单元传导矩阵的变化, 导致结果收敛的不稳定。带形区域如果太宽, 将扩大求解域, 计算精度要受到影响。 $\epsilon$  值原则上可根据网格尺寸的量级来定, 如果有限元网格均匀, 则  $\epsilon$  取一个比网格边长小二三个数量级的小值也不会对结果收敛产生什么影响; 如果网格很不均匀, 长短边相差很大, 则  $\epsilon$  要考虑取与边长同量级的值。如果将  $(-\epsilon, \epsilon)$  邻域改为  $(-\epsilon, 0)$  邻域, 即  $H \geq z$ , 渗透系数均取实际渗透系数,  $H - z \in (-\epsilon, 0)$  中渗透系数按  $k^* = w[1 + 0.999(H - z)/\epsilon]k$  计算, 其中加权因子  $w \geq 1$ , 当  $k^*$  大于  $k$  时取为  $k$ 。那么渗透系数的值将略大于前述方法的计算值, 导致自由面位置比实际位置略高。随迭代过程逐步稳定, 自由面位置将稳步收敛, 避免产生来回振荡的现象。

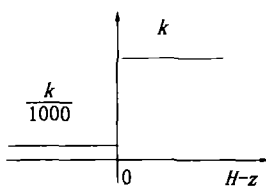


图1(a) 材料渗透系数在自由面处发生突变

Fig.1(a) Material leakage coefficient changed suddenly on free surface

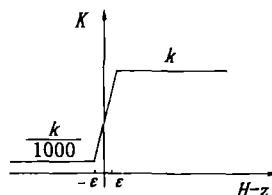


图1(b) 材料渗透系数在自由面附近线性过渡

Fig.1(b) Material leakage coefficient changed linearly near the free surface

对逸出边界的处理也采用了与放宽渗透系数取值邻域类似的思想,排水孔、新增排水廊道可与逸出边界同样处理。假定初始自由面时,逸出边界与自由面的交点定义为活动点。活动点以下的逸出段上每个节点都必须满足  $H = z$  的边界条件,这些点称为固定点。在迭代过程中,随着自由面位置的移动,活动点也不断下移,当活动点的计算水头小于邻近的固定点位置水头时,则解除固定点的固定边界值,定义该固定点为活动点继续下一次迭代;如果活动点的计算水头小于本身的位置水头,但大于邻近的固定点的位置水头时,活动点位置保持不动,逸出边界上各节点不作任何修改,迭代过程始终保持网格不变,避免由于网格的变动影响到高斯点位置的改变而导致计算结果的跳跃,影响求解精度,逸出边界这样的处理办法与理论上用节点流量的变化来判断逸出边界的逸出线或逸出点在这个课题的讨论中有异曲同工之处,而且实现简单,算例表明效果不错。

(2) 丢单元法 计算结果不稳定的现象是三维无压渗流分析算法的常见病,尤其在对丰满大坝含复杂排水系统的渗流分析中。含自由面单元的单元传导矩阵在前后相邻的两次迭代计算中会发生微小的变化,从而导致节点水头有较大的跳跃,影响到计算的收敛性。对不饱和区渗透系数取小值的处理往往也不是就意味着这部分区域对需求解的渗流场毫无贡献。丢单元法在迭代求解水头时,通过节点的计算水头与节点位置水头比较来划分以自由面为界的各区,然后保留含自由面及自由面以下的单元,将八节点完全处于自由面以上的单元扔掉,单元号、单元信息号、材料及一切与单元有关的信息要进行修改;单元上的节点在随单元一起丢掉的同时,注意与含自由面单元相邻的节点号应予保留,这样大大减少了计算中的自由度,从而加快了求解速度;对含自由面单元组成的区域,迭代过程中通过调整传导矩阵来间接规定新自由面的位置,传导矩阵的处理办法与松弛型算法类同,避免了每迭代一次形成一次自由面位置的麻烦,且自由面边界上下移动灵活自如。由于抛单元丢节点,渗流域重新改变了几何形状,相当于每次迭代算一个新的渗流域,为保证丢单元法的求解精度,对传导矩阵的调整注意到了使新的自由面位置通常高于实际自由面的位置。

对逸出边的处理严格遵守边界条件的约束进行抛单元和丢节点。第  $i$  步迭代时,活动点的水头若小于该点的位置势,但大于其下一个邻近固定点的  $z$  坐标,则该单元和活动点保留,继续下一步计算;如果活动点水头等于该点的  $z$  坐标,说明其上的单元刚刚被丢掉,该活动点成了有边界约束的固定点,因此要把其边界值放松,使该点成为真正的活动点参与下一步迭代计算;直到迭代过程收敛后,利用插值技术形成自由面,并令逸出段上活动点的  $z$  坐标等于该点的水头  $H$ ,  $x$  坐标通过插值确定在逸出边界上来确定逸出点的位置。

### 1.3 算 例

二维均质矩形断面坝(10 m×10 m)，上游水位 10 m，下游水位 2 m，底边为不透水边界，该问题自由面的解析表达式为  $z^2 = 100 - 8x$ ，取  $\epsilon = 0.01$ ， $w = 2$  两种算法的结果与精确解比较如表 1 所示：

表 1 自由面位置的结果比较

Table 1. Compared the results of the location of free surface

| X/m | 0  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 最大相对误差 |
|-----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 精确解 | 10 | 9.59 | 9.17 | 8.72 | 8.25 | 7.75 | 7.21 | 6.63 | 6.00 | 5.29 | 4.47 | -      |
| 松弛型 | 10 | 9.79 | 9.30 | 9.01 | 8.48 | 8.05 | 7.41 | 6.84 | 5.74 | 4.85 | 4.69 | 4.92   |
| 丢单元 | 10 | 9.70 | 9.33 | 9.01 | 8.52 | 8.10 | 7.53 | 6.83 | 6.13 | 5.39 | 4.50 | 0.67   |

结果表明两种算法都有较高的精度，尤其是逸出点的确定丢单元法与精确解十分接近，而且对大型结构作渗流分析时，该法在迭代过程中自由度不断减少，计算速度也越来越快，显示出良好的计算特性，在丰满大坝增设排水廊道的设计研究中采用了丢单元法。

## 2 溢流坝段增开排水廊道的结果分析

由工程提供的资料对坝体和坝基共划分六个区(图 2)。一区为坝体上游包层，二区为坝体防渗帷幕部分，三区为高程在 220 m 以上的坝体其余部分，四区为从坝基 190 m 到坝体 220 m 之间的部分，五区为坝基部分，六区为坝基防渗帷幕部分，各区渗透系数(表 2)是基于神经网络理论通过扬压观测孔的观测值反演得到。

对该方案的有限元模型进行了网格剖分，共剖分为 1 668 个单元，2 727 个节点，在上游水位 262 m，下游水位 193 m 的计算工况下对此用丢单元法进行了渗流有限元分析。

下游面逸出点高程较坝段降低了约 3 m，自由面穿过新增廊道上的排水孔位置在高程 206 m 附近(表 3)，说明孔深打 4 m 左右即可。强度计算结果表明新开廊道在各工况作用下应力变化仅对廊道口周围有一定影响，对其余各处影响很小，不会影响大坝的整体安全。

表 3 增设排水廊道后的溢流坝段自由面位置

Table 3. Location of the free surface on the section of spillway dam

| 序号  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 坝段逸出点 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X/m | -3.2  | -1.0  | 1.2   | 3.4   | 4.4   | 5.4   | 7.9   | 9.8   | 22.1  | 29.1  | 39.0  | 50.7  | 43.6  |
| Z/m | 262.0 | 261.9 | 257.6 | 255.8 | 247.1 | 246.7 | 240.3 | 223.2 | 212.9 | 209.8 | 205.7 | 204.0 | 207.0 |

## 3 结 论

丰满大坝溢流坝段新增排水廊道的方案经三维渗流有限元分析，对降低下游坝面的冻融点有一定的效果，在所设的计算环境下，新廊道上的排水孔孔深钻 4 m 左右即可，渗出点下降 3

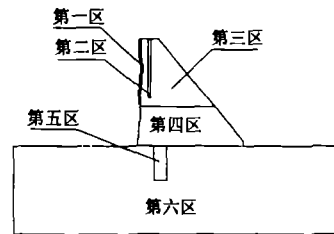


图 2 溢流坝段分区示意图

Fig.2. Spillway dam divided several parts

表 2 大坝各区的渗透系数

Table 2. Leakage coefficient of each division in dam

| 区域号                   | 1     | 2    | 3     | 4     | 5     | 6    |
|-----------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 渗透系数                  | 0.546 |      | 21.42 |       | 41.40 |      |
| /10 <sup>-9</sup> m/s |       | 5.88 |       | 20.58 |       | 3.78 |

m, 无论开或不开排水廊道在各种工况组合作用下坝体内应力在允许值之内, 不影响大坝的整体安全。但要实现将渗出点降至下游 193 m 水位以下几乎是不可能的, 因为下游面比廊道底部还低 7 m, 在上游面采取不透水贴面的防渗措施对降低渗出点效果比开排水廊道要好。

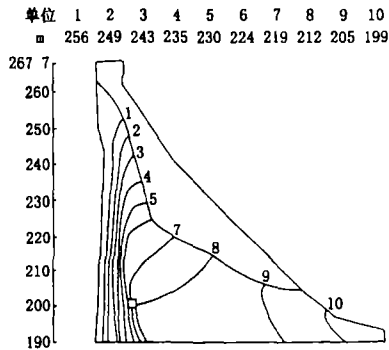


图 3(a) 新增排水廊道的坝体水头等势线  
Fig.3(a) Water head isopotential of dam body of excavating a new drainage corridor

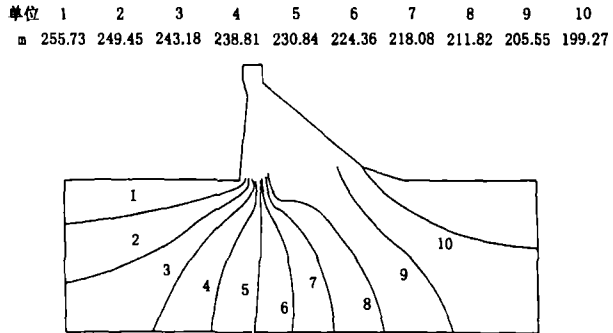


图 3(b) 新增排水廊道的坝基水头等势线  
Fig.3(b) Water head isopotential of dam ground of excavating a new drainage corridor

参考文献:

[1] 速宝玉, 朱岳明. 不变网格确定渗流自由面的节点虚流量法[J]. 河海大学学报, 1991, 19(5):113 - 117.  
 [2] 王 镭, 刘 中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水利学报, 1992, (4):15 - 20.  
 [3] 朱岳明, 张燎军. 混凝土坝中排水孔排水幕的分析[J]. 河海大学学报, 1997, 25(5):24 - 29.  
 [4] 彭 华, 罗谷怀. 有自由面渗流分析的子单元法及其应用[J]. 水电站设计, 1996, 12(4):24 - 27.  
 [5] 陈洪凯, 唐红梅. 渗流自由面求解的基本方法、修正及应用[J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(3):5 - 10.

### 3-Dimensional Seepage Analysis Caused by Excavating Another Drainage Corridor in Dam \*

HUANG Wei<sup>1</sup>, LIU Ying-xi<sup>2</sup>, SUN Ling-zhu<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China;  
 2. Department of Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Based on research of the design program of excavating another drainage corridor in the dam, two kinds of 3-dimensional static seepage algorithm, the loosen method and the abandoned element method, are given and compared them with analytic solution. Then the abandoned element method is used to research the seepage finite element of the dam of Fongmeng. The conclusion is that it can lower the frozen point at lower reaches for excavating another drainage corridor. The result of strength analysis shows that the program putting into practice will not influence the safety reliability of the dam.

**Key words:** 3-dimensional unconfined seepage; finite element algorithm; loosen method; abandoned element method

\* The Project is Supported by National Natural Science Fund of China(No.59779003)