

# 有限元法在土坝浸润线计算中的应用

郭美英, 高贵全\*

(云南农业大学水利水电与建筑学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 对病险土石坝进行病害诊断及治理, 确定坝体浸润线位置是关键, 常用的计算浸润线的方法有实测方法和水力学计算法, 但这两种方法在实际工作中往往受到一定条件的制约。渗流有限元计算方法的出现, 为土石坝浸润线的确定提供了理想的计算手段。以马房水库大坝为例, 通过计算、比较, 渗流有限元计算方法确定的浸润线成果可靠性较高, 可以为大坝稳定性分析提供依据。

**关键词:** 浸润线; 有限元; 土坝

**中图分类号:** TV 641.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004 - 390X(2006)06 - 0826 - 05

## The Application of Finite Element Method in Earth-rock Dam Seepage Line Calculation

GUO Mei-ying, GAO Gui-quan

(Faculty of Water Resource and Hydraulic Power Architecture, Y A U, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The key to bring the earth-rock dam under control is to define the position of seepage line. Practice method and water power method are common calculate methods, however, this two methods are restricted by some factors in reality. Finite element method offers an ideal way for seepage line calculation. Take Mafang reservoir dam for example, after calculating and comparing, it shows seepage line results defined by finite element method have high reliability, therefore, it can supplies foundation for dam's stability analysis.

**Key words:** seepage line; finite element method; dam

土石坝坝体浸润线是大坝渗漏量计算及坝坡抗滑、抗震、抗渗能力复核的主要依据, 因此, 确定浸润线位置是病险土石坝病害诊断和治理中必须解决的关键问题。目前, 工程中确定土石坝坝体浸润线主要采用实测方法和水力学法计算求得。实测方法推求坝体浸润线成果可靠性高<sup>[1]</sup>, 但由于历史原因, 大部分病险土石坝在兴建时均未安设测压管, 部分土石坝虽安设有测压管, 但运行管理中并未测定坝体的实际浸润线, 因此, 采用实测方法推求坝体浸润线存在较大困难; 水力学法是建立在对大坝渗流条件做某些简化假设的基础上的一种解析计算方法, 只能计算出渗流场中某一渗流截面

上的平均渗流要素, 而不能计算出渗流场中任一点处的渗流要素, 同时, 由于其基本假设与实际情况常存在较大出入, 使得计算结果误差较大。

近年来, 随着计算机的普及和数值计算方法的发展, 出现了有限元计算方法。该方法是将实际的渗流场离散为有限个节点相互联系的单元体, 首先求得单元体节点处的水头, 同时假定在每个单元体内的渗透水头呈线性变化, 进而求的渗流场中任一点处的水头和其它渗流要素<sup>[2]</sup>, 因此, 采用有限元法确定土石坝坝体浸润线, 这种方法不受边坡几何形状的不规则和材料的不均匀性限制, 成果可靠性较高<sup>[3]</sup>。本文结合云南省宣威市马房水库大坝病

收稿日期: 2005 - 08 - 29

\* 通讯作者

作者简介: 郭美英(1981 -), 女, 蒙古族, 内蒙古赤峰市人, 在读硕士研究生, 主要从事水工结构的研究。

害诊断中的有关资料,采用有限元法计算确定大坝在非特征水位 2 076.53 m(地质勘探时水位)坝体的浸润线,通过计算结果与实测结果比较,有限元法计算浸润线与实测浸润线近于一致,据此,采用有限元法确定出大坝在特征水位(以正常蓄水位为例)下的浸润线,为大坝的病害诊断和治理提供依据。

1 工程概况

马房水库位于云南省宣威县城东北部龙场镇北盘江右岸一级支流龙场河上游,坝址以上控制径流面积 9.0 km<sup>2</sup>,水库按 30 年一遇洪水设计,300 年一遇洪水校核,水库校核洪水位 2 084.01 m,设计洪水位 2 083.24 m,正常蓄水位 2 081.00 m,死水位 2 062.81 m,水库相应的总库容为 227.7 万 m<sup>3</sup>,正常库容 153.72 万 m<sup>3</sup>。马房水库大坝坝型为均质土坝,最大坝高 27 m,坝顶高程 2 083.81 m,坝顶长 203.5 m,坝

顶宽 3.30 m,下游坝坡平均坡比为 1:2.19,上游坝坡平均坡比为 1:2.61。由于种种原因,水库自投入运行后,大坝出现严重的渗漏及变形等病害。为查清坝体结构及了解坝体土料的物理力学性质,根据大坝存在的病害情况,在大坝共布置钻孔 6 个,钻孔内进行了水文地质试验、孔内标准贯入试验及采取土样,钻孔中共采取原状土样 21 组,经蜡封处理后送实验室测试。大坝坝型虽为均质土坝,但施工中均采用人工挖运土方式,填筑施工方法落后,土料的均匀性差,坝体结构较为复杂。根据钻孔现场试验及室内试验结果,将坝体划分为 I、II、III 3 个区域,I 区为 2 071.3 m 高程以上的坝体上部,II 区为 2 071.3 m 高程以下的坝体下部,III 区为大坝下游的排水体,其土料成分及物理力学指标与 II 区相似;IV 区为坝基河床冲积物,V 区为坝基下伏的强风化泥岩。各区岩(土)物理力学指标见表 1,在库水位 2 076.53 m 时,大坝浸润线实测值见表 2。

表 1 大坝各区岩(土)物理力学指标统计值

Tab. 1 Statistics of mechanics targets of rock( soil) in different districts

项目 items	I 区 I district	II 区 II district	III 区 III district	IV 区 III district	V 区 V district	备注 remarks
成分 composition	粉土 silty soil	粉质土砾 silty soil fines	粉质土砾 silty soil fines	含砾粉质砂土 fines-bearing silty sand	强风化泥岩 nitosol mudstone	
天然容重/(kN·m <sup>-3</sup> ) natural unit weight	18.2	18	18	18.3	21.5	平均值 average
干容重/(kN·m <sup>-3</sup> ) dry unit weight	13.2	12.8	12.8	12.89	/	平均值 average
孔隙比 void ratio	1.125	1.028	1.028	1.155	/	平均值 average
比重 hydrostatic	2.79	2.75	2.75	2.78	/	平均值 average
粘聚力/kPa cohesive force	22.5	20.5	20.5	47	50	小值均值 mean minimum
内摩擦角/度 internal friction angle	11.9	14.2	14.2	18.9	25.5	小值均值 mean minimum
渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> ) permeability coefficient	0.142	5.815	8.815	3.596	12.67	加权平均 weighted means

2 大坝浸润线计算

2.1 理论模型及边界条件<sup>[3]</sup>

稳定渗流基本方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{其边界条件是} \begin{cases} h = h_0 \text{ (透水边界)} \\ \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \text{ (不透水边界)} \\ h = z \text{ (浸润线边界)} \end{cases}$$

其中, h<sub>0</sub> 为边界水头, n 为边界的外法线方向, z 为浸润线上各点的几何纵坐标值。

### 2.2 有限单元分析<sup>[4,5]</sup>

采用三角形单元法,如图 1,对于任一单元,单元三结点在  $x, z$  平面上按逆时针方向编号依次 1, 2, 3, 相应坐标为  $(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3)$ , 水头为  $h_1, h_2, h_3$ 。

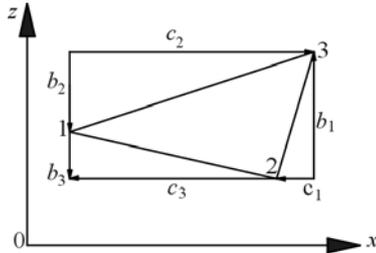


图 1 三角形单元  
Fig.1 Triangle unit

根据变分原理,可推出稳定渗流有限单元法计算渗流场中各节点水头的计算式为:

$$[K] \cdot \{h\} = \{F\} \quad (2)$$

$$\text{其中: } [K] = \frac{k_x}{4 \cdot \Delta} \cdot \begin{bmatrix} b_1 b_1 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_2 b_1 & b_2 b_2 & b_2 b_3 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3 b_3 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{k_z}{4 \cdot \Delta} \cdot \begin{bmatrix} c_1 c_1 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2 c_2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3 c_3 \end{bmatrix}$$

$$\{h\} = (h_1 \quad h_2 \quad h_3)^T$$

$$a_1 = x_2 z_3 - x_3 z_2$$

$$b_1 = z_2 - z_3$$

$$c_1 = x_3 - x_2$$

$$a_2 = x_3 z_1 - x_1 z_3$$

$$b_2 = z_3 - z_1$$

$$c_2 = x_1 - x_3$$

$$a_3 = x_1 z_2 - x_2 z_1$$

$$b_3 = z_1 - z_2$$

$$c_3 = x_2 - x_1$$

三角形面积,即  $\Delta = (b_2 c_3 - b_3 c_2)/2$ ;  $k_x, k_z$  是以  $x, z$  轴为主轴方向的渗透系数;  $F$  为已知常数项,由已知水头结点得出。

解线性方程组求得流场的水头分布,运用边界上各结点水头值即可绘制浸润线。

### 3 计算实例

#### 3.1 有限元法计算结果与实际勘测结果比较

以马房水库大坝为例,采用大坝最大横断面作为计算断面,取上游坝脚点为坐标原点,上游指向下游方向为  $X$  轴正向,垂直向上为  $Z$  轴正向,利用有限元方法计算出在库水位 2076.53 m (非特征水位) 条件下,大坝的浸润线位置见图 2, 计算结果和实测结果对比详见表 2。

从图 2 和表 2 可以看出,在库水位为 2076.53 m (非特征水位) 条件下,实测浸润线与有限元法计算浸润线相差极小,说明有限元法计算结果可靠,可采用有限元方法确定大坝在特征水位下的坝体浸润线及渗流场特性。

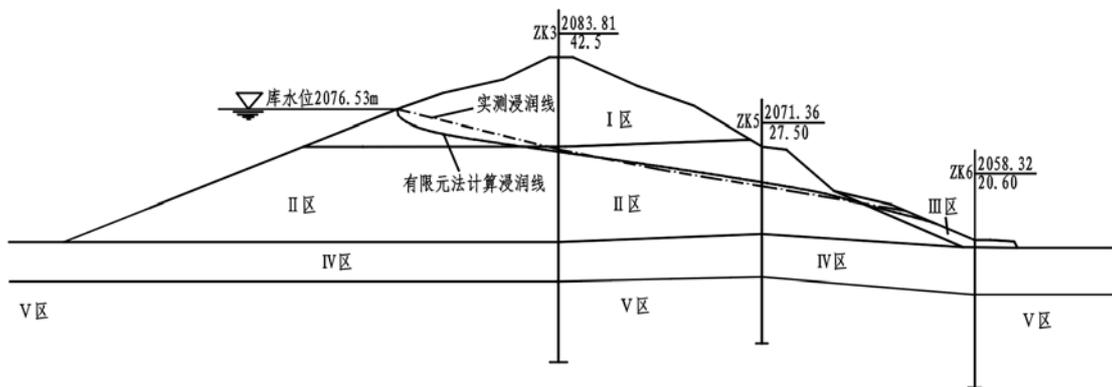


图 2 计算浸润线与实测浸润线比较图  
Fig.2 Comparison of calculated and surveyed seepage line

#### 3.2 特征水位下的坝体浸润线计算

仅以有限元法计算正常蓄水位下的浸润线为例,采用三角单元法对计算断面(大坝最大横断

面)进行剖分,取上游坝脚点为坐标原点,上游指向下游方向为  $X$  轴正向,垂直向上为  $Z$  轴正向,经计算获得浸润线上各点坐标,结果见表 3。

表 2 浸润线实测值与计算值比较表

Tab.2 Comparison of real observed and calculated results of seepage line

序号 ordinal number		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>x</i> 轴 <i>x</i> axis		46.31	46.46	47.51	48.96	50.82	54.42	59.03	68.70	74.59	84.40
<i>z</i> 轴 <i>z</i> axis	实测值 observed result								12.96	11.77	9.85
	计算值 calculated result	18.52	17.67	16.81	16.11	15.51	14.77	14.03	12.62	11.77	10.32
序号 ordinal number		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>x</i> 轴 <i>x</i> axis		93.44	96.93	101.60	105.85	110.37	110.90	111.21	115.96	116.95	120.70
<i>z</i> 轴 <i>z</i> axis	实测值 observed result	8.35	7.79	6.99	6.26	5.49	5.40	5.35	4.54	4.37	
	计算值 calculated result	8.91	8.34	7.54	6.71	5.49	5.35	5.27	4.05	3.78	2.77

表 3 正常蓄水位条件下的坝体浸润线

Tab.3 Coordinate exportation of seepage line under normal water level

序号	<i>X</i> /m	<i>Z</i> /m	序号	<i>X</i> /m	<i>Z</i> /m	序号	<i>X</i> /m	<i>Z</i> /m
1	61.609	22.990	37	73.710	15.265	73	90.126	12.084
2	61.389	22.289	38	73.715	15.264	74	90.456	12.026
3	61.339	22.044	39	74.607	15.048	75	91.047	11.924
4	61.520	21.562	40	74.950	14.970	76	91.635	11.822
5	61.604	21.215	41	75.502	14.841	77	91.968	11.765
6	61.671	21.119	42	76.175	14.691	78	92.812	11.620
7	62.007	20.594	43	76.401	14.640	79	92.889	11.607
8	62.082	20.503	44	77.037	14.501	80	93.167	11.559
9	62.404	20.139	45	77.301	14.443	81	93.821	11.447
10	62.442	20.098	46	77.394	14.423	82	94.028	11.411
11	63.023	19.572	47	78.204	14.250	83	94.644	11.306
12	63.060	19.537	48	78.606	14.167	84	95.288	11.195
13	63.111	19.500	49	79.110	14.061	85	95.447	11.168
14	63.842	18.950	50	79.813	13.918	86	95.683	11.127
15	64.474	18.563	51	80.017	13.875	87	96.209	11.036
16	64.605	18.482	52	80.646	13.749	88	96.566	10.973
17	64.727	18.418	53	80.929	13.699	89	97.074	10.885
18	65.346	18.073	54	81.010	13.684	90	97.597	10.794
19	66.085	17.723	55	81.848	13.536	91	97.848	10.750
20	66.148	17.692	56	82.192	13.475	92	98.078	10.710
21	66.198	17.672	57	82.767	13.374	93	98.373	10.659
22	67.000	17.321	58	83.373	13.267	94	98.951	10.560
23	67.534	17.117	59	83.687	13.212	95	98.971	10.557
24	67.857	16.989	60	84.554	13.060	96	99.010	10.551
25	68.635	16.715	61	84.606	13.050	97	99.792	10.419
26	68.653	16.708	62	84.791	13.018	98	100.343	10.325
27	68.662	16.705	63	85.526	12.889	99	100.699	10.269
28	69.417	16.453	64	85.735	12.852	100	101.153	10.194
29	69.832	16.327	65	86.446	12.727	101	101.676	10.104
30	70.218	16.206	66	86.916	12.645	102	102.132	10.022
31	70.924	16.001	67	87.366	12.566	103	102.644	9.938
32	71.051	15.964	68	88.096	12.438	104	103.188	9.842
33	71.125	15.944	69	88.286	12.405	105	103.604	9.765
34	71.920	15.723	70	88.958	12.288	106	104.017	9.683
35	72.448	15.586	71	89.206	12.244			
36	72.819	15.487	72	89.276	12.232			

#### 4 结论

通过计算、比较表明,渗流有限元法是计算土石坝浸润线的理想手段,计算成果可靠,可以为大坝的稳定性分析提供依据。

#### [参考文献]

- [1] 钱家欢,殷总泽. 土工原理及计算[M]. 北京:水利水电出版社,1996.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京:水利水电出版社,2003.
- [3] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京:建材工业出版社,2000.
- [4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利水电出版社,1990.
- [5] 新编云南省情编委会. 新编云南省情[M]. 昆明:云南人民出版社,1996.

(上接第 815 页)

- [5] 丁瑞华,傅天佑,叶妙荣. 中国鮡属鱼类二新种记述[J]. 动物分类学报,1991,16(3): 369-374.
- [6] 丁瑞华,方盛国. 鮡属三种鱼类 DNA 指纹图比较及一新种记述[A]. 鱼类学论文集[C], 1997. 15-21.
- [7] 周伟,褚新洛. 鮡科褶鮡属鱼类一新种兼论其骨骼形态学的种间分化[J]. 动物分类学报,1992,7(1):110-115.
- [8] SAXENA S C. Adhesive apparatus of an Indian hill stream sisorid fish *Pseudecheneis sulcatus* [J]. Copeia, 1961, (4):471-473.
- [9] SAXENA S C, CHANDY M. The pelvic girdle and fin in certain Indian hill stream fishes[J]. J. Zool., Lond., 1966, 148(2): 167-190.
- [10] 周伟. 褶鮡鱼类偶鳍、肢带、吸着器及其相互关系[J]. 四川动物,1990,9(4):12-13.
- [11] 周伟,刘德胜. 褶鮡鱼类吸着器表面的超微结构及其意义探讨[J]. 电子显微学报, 1991,10(1):6-9.
- [12] 褚新洛,郑葆珊,戴定远,等. 中国动物志·硬骨鱼纲·鮡形目[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [13] JAYARAM K C. The freshwater fishes of the Indian region[M]. Delhi: Narendra Publishing House,1999.
- [14] 孟庆闻,苏锦祥,缪学祖. 鱼类分类学[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
- [15] NG H H, WALTER J R. A review of the sisorid catfish genus *Oreoglanis* (Siluriformes: Sisoridae) with descriptions of four new species[J]. Occasional Papers of the Museum of Zoology University of Michigan, 2001: 732:1-34.
- [16] ROBERTS T R. Unculi (horny projections arising from single cells), an adaptive feature of the epidermis of Ostariophysan fishes[J]. Zoologica Scripta, 1982, 11(1): 55-76.
- [17] KLUGE A G. Chordate structure and function (2<sup>nd</sup> edition) [M]. New York: Macmillan Publishing Co., Inc,1977.
- [18] 褚新洛,周伟. 分类性状的类别及其对探索动物系统发育的意义[J]. 四川动物,1988,7(2):15-18.
- [19] 周伟. 云南湿地生态系统鱼类物种濒危机制初探[J]. 生物多样性,2000,8(2):163-168.