

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.011

尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价

王 东^{1,2}, 沈振中^{1,3}, 陶小虎³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据某尾矿坝的实际情况, 建立尾矿坝三维有限元计算模型, 计算并分析其渗流场, 对尾矿坝进行渗流安全评价, 将评价结果与工程地质勘测所得的资料进行对比分析, 以验证尾矿坝渗流场数值模拟方法和计算模型的合理性. 计算结果显示, 数值模拟所得渗流场与工程地质勘测实测值吻合, 计算方法和计算模型合理, 可以为尾矿坝的加高工程提供参考.

关键词: FEM; 尾矿坝; 渗流; 安全评价

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)03-0307-06

Three-dimensional finite element analysis and safety assessment for seepage field of a tailings dam

WANG Dong^{1,2}, SHEN Zhen-zhong^{1,3}, TAO Xiao-hu³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A three-dimensional finite element model was established for a tailings dam based on its actual conditions. The seepage field of the tailings dam was analyzed and a safety assessment was conducted. Compared with the data from a geological survey, the numerical simulation method and calculation model for the seepage field of the tailings dam were verified to be reasonable. The calculated results show that the simulated values were in agreement with the measured ones, and the calculation method and proposed model could provide references for the tailings dam's heightening.

Key words: FEM; tailings dam; seepage; safety assessment

尾矿坝是矿山生产中的重要设施, 其运行状况的好坏不仅仅涉及矿山生产的经营管理和效益, 更重要的是直接影响人民生命和财产的安全^[1]. 近年来, 我国尾矿坝溃坝事故屡有发生, 如位于山西省临汾市襄汾县陶寺乡的新塔矿业有限公司塔山铁矿尾矿库, 总库容约 30 万 m³, 坝高约 50 m. 2008 年, 该尾矿库突然发生溃坝, 尾砂流失量约 20 万 m³, 沿途带出大量泥沙, 流经长度达 2 km, 最大扇面宽度约 300 m, 过泥面积 30.2 hm², 遇难或失踪共 276 人^[2].

渗流控制是影响尾矿坝安全运行的重要因素, 浸润面位置过高, 会使坝面或下游发生沼泽化, 导致坝体、坝肩和不同材料结合部位有渗流水流出, 渗流量增大, 引起管涌, 最终导致溃坝^[3-7]. 因此对尾矿坝渗流场进行有限元分析和渗流安全评价, 对于尾矿坝安全运行有着重要的意义. 本文根据某尾矿坝的实际情况, 采用三维渗流有限元法^[8-10], 建立三维有限元计算模型, 计算并分析渗流场特性, 将结果与实际渗流场进行对比, 以验证尾矿坝三维有限元计算模型的合理性.

收稿日期: 2011-05-07

作者简介: 王东(1986—), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要从事水工结构计算与安全评价研究. E-mail: thehaiwangdong@163.com

通讯作者: 沈振中(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工结构工程和岩土工程研究. E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

1 渗流基本原理

1.1 饱和渗流基本理论

饱和渗流计算是依据达西定律：

$$q = ki$$

式中： q ——渗流流速； k ——渗透系数； i ——水力坡降。

饱和渗流基本微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) = 0$$

式中： H ——总水头； k_x 、 k_y 、 k_z ——不同方向下的渗透系数，当材料为各向同性时 $k_x = k_y = k_z$ ，各向异性时 $k_x \neq k_y \neq k_z$ 。

1.2 定解条件

对于饱和渗流场^[10]，整个渗流区域定解条件包括已知水头边界、不透水边界和出渗边界。

已知水头边界：

$$H = \bar{H}$$

不透水边界：

$$k \frac{\partial H}{\partial n} = 0$$

出渗边界：

$$H = z \quad \frac{\partial H}{\partial n} = 0$$

式中 $\bar{H}$ 为已知水头值。

2 工程概况

某尾矿库场地地形处于东、南、北三面低山剥蚀及丘陵区环绕地区，地形标高 145 ~ 350 m，形成里大口小的似葫芦状谷地，谷底东高西低，地面标高为 142 ~ 110 m，谷底坡度约为 2%。尾矿库由主坝和 2 座副坝以及尾矿堆积坝组成。主坝坝顶标高 150.0 m，为透水堆石坝，坝高 41.5 m；其中 1 座副坝坝顶标高 150.0 m，为透水堆石坝，坝高 18.8 m；另一座副坝坝顶标高 180.0 m，为均质土坝，坝高 7 m（由于渗透系数较小，对尾矿库的渗流影响可以忽略不计，计算中不考虑该副坝）。整个库区沉积滩内水体的补给来源主要为经常性排放的尾矿水和季节性大气降水。尾矿库区设置了溢洪道，可以比较稳定地控制库内水位。在地质勘测期间，尾矿沉积滩内水位标高为 192.44 m。该尾矿坝平面布置如图 1 所示。根据工程地质和水文地质资料，尾矿砂按粗细程度和密实程度分为若干个地层，包括尾中砂（松散状态）、尾中砂（稍密状态）、尾中砂（中密状态）、尾粉细砂（松散状态）、尾粉细砂（稍密状态）、尾粉细砂（中密状态）、尾粉细砂（密实状态）、尾粉质黏土等。

2.1 三维有限元计算模型

三维有限元计算模型主要考虑实际工程地形、地质和结构状况。根据工程地质和水文地质资料，以大地坐标为基准建立如下坐标系：以大地坐标（500 000 4 440 000）为有限元计算模型坐标原点（0 0）； X 方向为垂直主坝初期坝坝轴线方向，指向库内为正； Y 方向为平行主坝初期坝坝轴线方向，指向正北为正； Z 方向为垂直方向，向上为正，以高程为坐标。

计算模型边界类型主要有^[11-12]（a）已知水头边界，包括库区上游水位淹没线以下的尾矿坝面、山体和河道等；（b）出渗边界，为尾矿坝下游坡面、初期坝下游坡面等；（c）不透水边界，包括坝体与山体交界面，以及模型截取边界面。计算模型边界条件如图 2 所示。

计算区域包括尾矿坝的初期坝、堆积坝以及坝基相对透水地层，即坝基截至相对不透水层顶部，四周截至山体（视为不透水体）和初期坝顶部到尾矿坝堆积坝坝顶。由于库区内设有排洪设施，水位长期处于稳定状态，可认为尾矿坝渗流场处于稳定状态。尾矿坝渗流场有限元分析取工程地质勘测时尾矿库正常运用水位，即库内水位标高 192.44 m，主坝初期坝和副坝初期坝下游均无水。

在综合分析计算区域地形和地质条件的基础上^[13]，根据建筑物布置、尾矿堆积坝和坝基岩体分层、构造

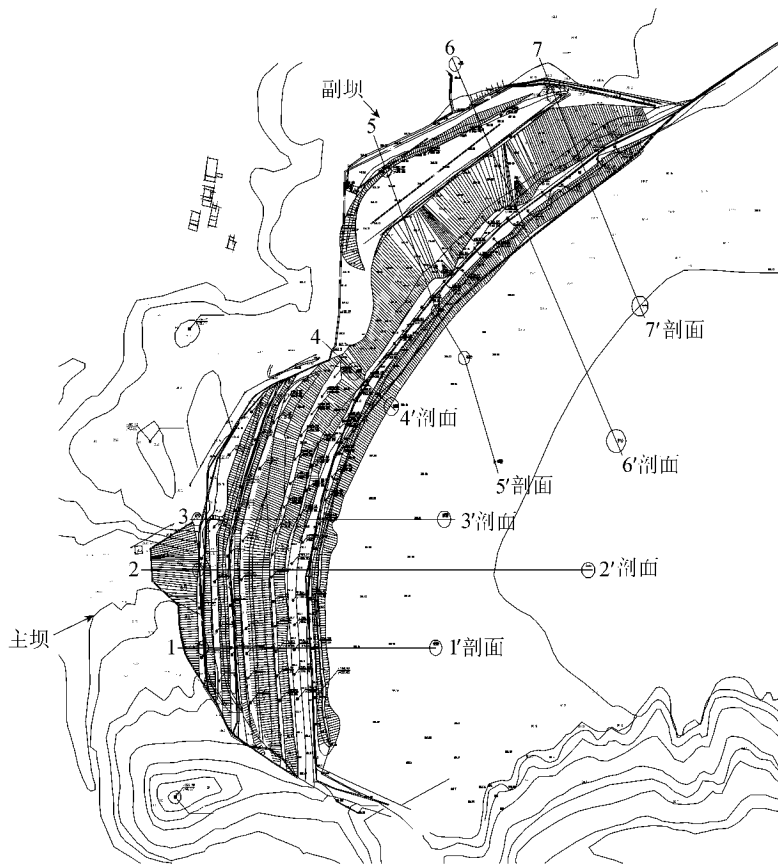


图 1 尾矿坝平面布置

Fig. 1 Plan layout of tailings dam

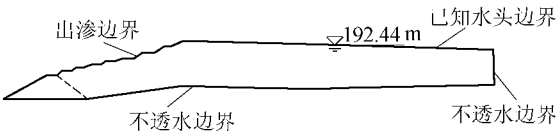


图 2 计算模型边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of boundary conditions of model
以及计算要求等信息,取控制断面 19 个,采用控制断面超单元法自动生成有限元网格.(a)根据控制断面将计算区域离散成超单元网格,超单元结点总数为 1 340 个,超单元数为 1 054 个.(b)进一步离散形成有限元网格.最终三维有限元计算模型有限元网格结点总数为 24 356 个,单元总数为 23 852 个.尾矿坝三维有限元网格如图 3 所示.

2.2 尾矿坝体各部位渗透系数及典型剖面

根据工程地质勘测报告提供的资料,尾矿坝主坝典型地质剖面如图 4 所示,初期坝和尾矿堆积坝各分区以及坝基岩体的渗透系数如表 1 所示.

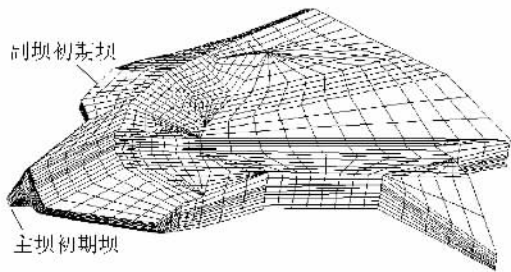


图 3 尾矿坝三维有限元网格

Fig. 3 Three-dimensional finite element meshes of tailings dam

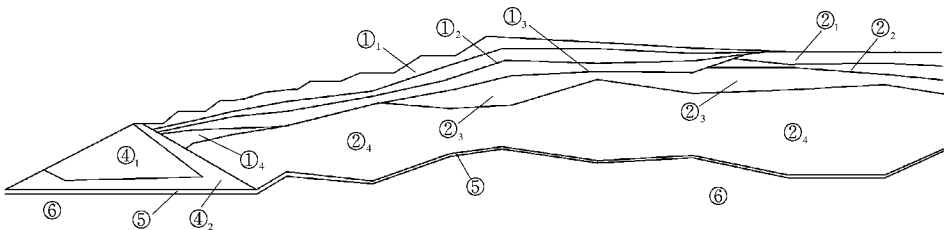


图 4 主坝最大剖面地质状况

Fig. 4 Geological conditions of maximum profile of main dam

表1 渗流计算参数
Table 1 Seepage coefficients

岩土层 编号	岩土层名称	分布部位	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		综合渗透系数 k ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
			水平向 k_H	竖向 k_V	
① ₁	尾中砂 松散状态)	沉积滩、堆积坝	2.0×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}
① ₂	尾中砂 稍密状态)	沉积滩、堆积坝	10.0×10^{-3}	7.5×10^{-3}	1.25×10^{-2}
① ₃	尾中砂 中密状态)	沉积滩、堆积坝	7.5×10^{-3}	5.5×10^{-3}	9.5×10^{-3}
① ₄	尾中砂 密实状态)	堆积坝	5.0×10^{-3}	4.5×10^{-3}	6.5×10^{-3}
② ₁	尾粉细砂 松散状态)	沉积滩、堆积坝	3.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}
② ₂	尾粉细砂 稍密状态)	沉积滩、堆积坝	2.0×10^{-3}	1.8×10^{-3}	2.5×10^{-3}
② ₃	尾粉细砂 中密状态)	沉积滩、堆积坝	1.8×10^{-3}	1.5×10^{-3}	2.3×10^{-3}
② ₄	尾粉细砂 密实状态)	沉积滩、堆积坝	1.5×10^{-3}	1.2×10^{-3}	2.0×10^{-3}
③	尾粉质黏土	沉积滩深部	1.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.8×10^{-6}
④ ₁	风化石	初期坝	0.1	0.1	0.15
④ ₂	块石	初期坝	0.3	0.3	0.40
⑤	碎石混粘性土	库基天然土层	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.5×10^{-5}
⑥	中风化基岩	库基基岩	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}

3 渗流场有限元计算结果分析

a. 图5为现状尾矿坝地下水位等值线图. 图中 x 为垂直主坝轴线方向, y 为平行主坝轴线方向. 通过分析比较可得: 尾矿坝沉积滩后集水池中的水通过尾矿堆积坝由库内向库外下游排泄, 在接近主坝初期坝和副坝初期坝附近位势迅速下降. 这是因为初期坝由风化石和块石堆积建成, 坝体材料的渗透系数远大于尾矿堆积坝坝体的渗透系数, 具有良好的排渗性能, 可以较好地控制浸润面.

在主坝和副坝之间的部分堆积坝段, 地下水位势较高, 浸润面从堆积坝坝坡出逸. 在此正常运用情况下, 该部位浸润面出逸范围为高程 165.3 ~ 160.4 m. 根据现场勘测资料, 该部位曾发生过渗透破坏, 形成了冲沟, 因而, 计算成果与实际情况是吻合的. 可以推测, 在更高的水位情况下, 该部位浸润面出逸程度更高, 范围更大, 威胁尾矿坝的安全, 应采取必要的加固处理工程措施.

主坝区和副坝区沉积滩内浸润面的坡度在集水池地段比较平缓, 约为 0.025, 往下游初期坝方向, 坡度逐渐变大为 0.050 ~ 0.075. 在尾矿堆积坝坝体下游坡附近浸润面坡度变化不大, 为 0.125 ~ 0.150. 在初期坝附近渗透坡降最大, 为 0.20 ~ 0.25, 表明主坝初期坝的透水排渗性能良好. 渗流数值模拟结果表明, 尾矿坝体最大渗透坡降均未超过尾矿砂的临界水力坡降 0.29, 满足安全要求.

b. 图 6(a) 为主坝初期坝及主坝堆积体最大剖面地下水位势分布. 由图 6(a) 可见: 尾矿堆积坝内的浸润线自库内水位 192.44 m 向下游逐渐降低, 在初期坝附近迅速降至最低 108.5 m 左右, 其变化速率由慢变快; 等势线由疏变密, 渗透坡降逐渐增大, 在初期坝与堆积坝相连接处最大, 约为 0.17. 这是由于初期坝坝体材料的渗透系数远大于尾矿堆积坝坝体的渗透系数, 排渗效果良好, 数值模拟结果与实测结果的趋势相同.

图 6(b) 为副坝最大剖面, 其浸润线及渗透坡降分布和变化规律与主坝相同. 副坝尾矿堆积坝内的浸润面自库水位 192.44 m 向下游逐渐降低至 131.2 m 左右, 且先缓后陡, 下降速率逐渐加快, 等势线由疏变密, 渗透坡降逐渐增大, 最大渗透坡降发生在初期坝与堆积坝连接处附近, 其中, 最大渗透坡降约为 0.19. 在副坝范围内, 堆积坝坝坡比较缓, 浸润面埋深浅, 为小于 6 ~ 8 m 的安全埋深, 因此该区域需要采取必要的工程措施, 以增大浸润面埋深, 使其满足规范要求.

c. 钻孔水位实测值与计算值比较. 尾矿坝主坝最大剖面地下水钻孔水位实测值与有限元计算值的比较

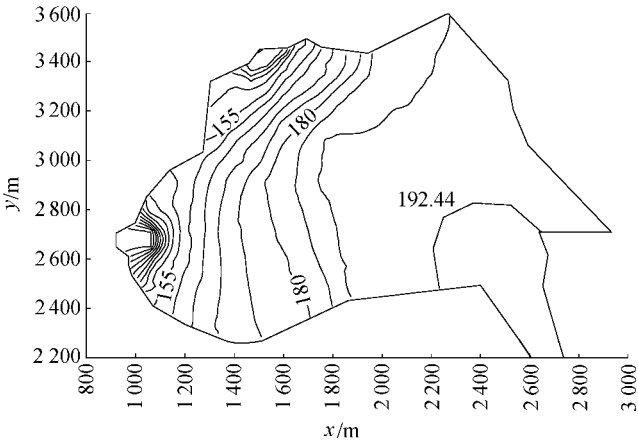


图5 现状尾矿坝地下水位等值线(单位:m)
Fig. 5 Contour of groundwater level of tailings dam(Unit :m)

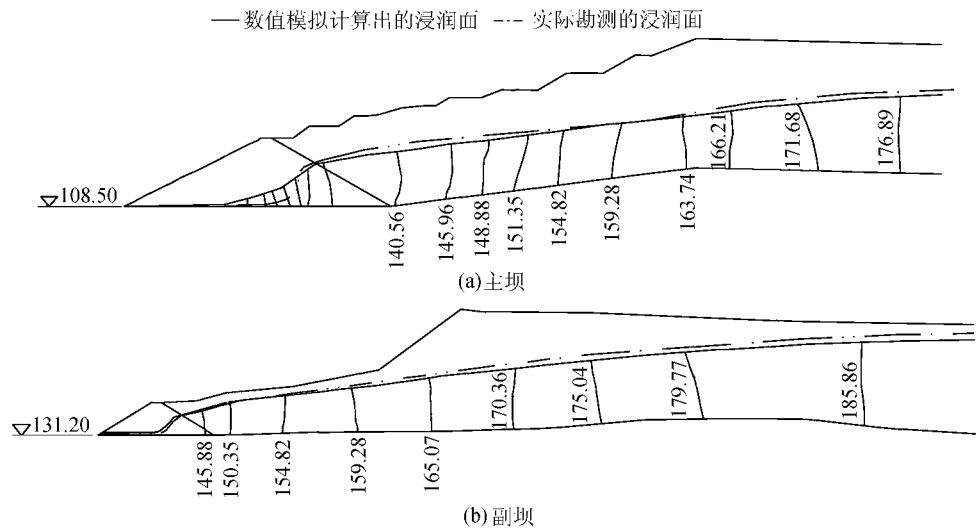


图 6 最大剖面地下水位势分布(单位:m)

Fig. 6 Geopotential distribution of groundwater at maximum profile(Unit :m)

如表2所示,相对误差是指地下水位实测值与计算值的差与最大水头的比值,即

相对误差 = (实测值 - 反演计算值) / (尾矿库水位 - 下游水位) × 100%

尾矿坝在 192.44 m 水位运行下的渗流场数值模拟结果与实测资料基本吻合,各钻孔水位计算误差均不超过 5% .因此,通过有限元法计算得到的地下水浸润面较好地拟合了尾矿坝渗流场,基本反映了尾矿坝的实际情况,同时也表明本文的计算方法和计算模型是合理的.

表 2 主坝最大剖面地下水位实测值与计算值的比较

Table 2 Comparison of measured and calculated groundwater level at maximum profile of main dam

钻孔编号	地下水位勘察值/m	地下水位计算值/m	绝对误差/m	相对误差/%
ZK15	192.06	191.35	0.71	0.85
ZK16	191.73	189.65	2.08	2.48
ZK17	190.79	187.86	2.93	3.49
ZK18	189.46	185.58	3.04	3.62
ZK19	187.87	184.82	3.05	3.63
ZK20	186.09	182.92	3.17	3.78
ZK21	184.32	181.45	2.87	3.42
ZK22	181.87	179.28	2.59	3.09
ZK23	176.12	172.78	3.34	3.98
ZK24	164.42	167.16	- 2.74	- 3.26
ZK25	160.98	164.20	- 3.22	- 3.84
ZK26	156.18	169.22	- 3.04	- 3.62
ZK27	150.87	152.46	- 1.59	- 1.89
ZK28	145.42	144.87	0.55	0.66
ZK29	138.81	137.55	1.26	1.50

4 结 论

- a. 由于主坝设置了透水的初期坝,其尾矿堆积坝坝体内的浸润面埋深均较大,因此,该区域渗透水不会从堆积坝坡出逸,浸润面满足安全埋深要求.副坝附近堆积坝坝坡比较缓,浸润面埋深小于安全埋深,在后续加高工程中,也应采取工程措施进行加固处理,并提高其排渗能力.
- b. 勘测资料的实测水位资料与库内现状水位工况下的渗流数值模拟结果基本吻合,因此渗流数值模拟结果是可信的,可以为以后尾矿坝的加高工程提供依据.

参考文献：

[1] 宁民霞,王振伟,殷新宇.水对尾矿坝的稳定性影响研究[J].矿业快报,2006(5):43-44.(NING Min-xia ,WANG Zhen-wei ,YIN Xin-yu. Study on the effect of water on stability of tailings dan[J]. Express Information of Mining Industry , 2006(5):43-44.(in

Chinese))

- [2] 魏勇,许开立,郑欣.浅析国内外尾矿坝事故及原因[J].金属矿山,2009(7):139-142.(WEI Yong,XU Kai-li,ZHENG Xin. Discussion on the causes for tailings dam accidents at home and abroad[J].Metal Mine,2009(7):139-142.(in Chinese))
- [3] 郑欣,秦华礼,许开立.导致尾矿坝溃坝的因素分析[J].中国安全生产科学技术,2008,4(1):52-54.(ZHENG Xin,QIN Hua-li,XU Kai-li. Analysis of the factors inducing the tailing dam falling[J].Journal of Safety Science and Technology,2008,4(1):52-54.(in Chinese))
- [4] 李书涛,余宏明.尾矿坝排渗方法对比分析与研究[J].矿业工程,2004,24(4):33-35.(LI Shu-tao,YU Hong-ming. Analysis and research of methods treating water seepage from tailings dan[J].Mining Engineering,2004,24(4):33-35.(in Chinese))
- [5] 吕庭刚,庙延钢.尾矿库坝体渗透稳定性分析[J].云南冶金,2005,34(2):12-15.(LV Ting-gang,MIAO Yan-gang. Stability analyzing on penetration of tailing dan[J].Yunnan Metallurgy,2005,34(2):12-15.(in Chinese))
- [6] 李根,王来贵,陈雷,等.某尾矿库渗流稳定性的数值模拟[J].金属矿山,2008(9):123-124.(LI Gen,WANG Lai-gui,CHEN-Lei,et al. Numerical simulation of the seepage stability of a tailing reservoir[J].Metal Mine,2008(9):123-124.(in Chinese))
- [7] 陈明健.尾矿坝设计中排渗措施的应用[J].亚热带水土保持,2006,18(4):52-53.(CHEN Ming-jian. Design of drainage measures in application of tailings dan[J].Subtropical Soil and Water Conservation,2006,18(4):52-53.(in Chinese))
- [8] 郭振世,仵彦卿,詹美礼,等.高堆尾矿坝堆积特性及三维渗流数值分析研究[J].水土保持通报,2009,29(6):189-192.(GUO Zhen-shi,WU Yan-qing,ZHAN Mei-li,et al. Seepage parameter selection and three-dimensional seepage inverse analysis for Lixigou high stack dan[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2009,29(6):189-192.(in Chinese))
- [9] 沈振中,陈小虎,吴越建.求解堤坝渗流场的罚函数无单元法[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):48-52.(SHEN Zhen-zhong,CHEN Xiao-hu,WU Yue-jian. Penalty function element-free method for solving seepage field of embankment[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2008,36(1):48-52.(in Chinese))
- [10] 速宝玉,赵坚.影响上游法尾矿坝渗流场的诸因素分析[J].河海大学学报:自然科学版,1991,19(6):57-63.(SU Bao-yu,ZHAO Jian. Analysis of factors affecting seepage field of upstream method-tailing dan[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,1991,19(6):57-63.(in Chinese))
- [11] 赵坚,沈振中.尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法的改进[J].河海大学学报:自然科学版,1997,25(2):110-113.(ZHAO Jian,SHEN Zhen-zhong. Improved calculation method of seepage of tailings dam complex drainage[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,1997,25(2):110-113.(in Chinese))
- [12] 速宝玉,沈振中,赵坚.用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J].水利学报,1996,27(3):22-29.(SU Bao-yu,SHEN Zhen-zhong,ZHAO Jian. The cut-off negative pressure method for solving filtration problems based on the theory of variational inequalities[J].Journal of Hydraulic Engineering,1996,27(3):22-29.(in Chinese))
- [13] 周桂云,李同春.渗流场排水子结构法有限元分析的局部非协调网格解法[J].水利水电科技进展,2007,27(2):30-33.(ZHOU Gui-yun,LI Tong-chun. Local incompatible meshes for finite element analysis in drainage substructure method for solution of seepage field[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(2):30-33.(in Chinese))