

# 考虑材料渗透性各向异性的土石坝渗流分析

陈勇<sup>1</sup>, 汤用泉<sup>2</sup>

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 葛洲坝集团第一工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 土石坝渗流分析是大坝渗流安全评价和渗控方案设计的重要依据。根据海南省三亚市西部的宁远河中下游河段的大隆水利枢纽工程土石坝振冲填筑施工特点, 利用饱和-非饱和三维渗流理论, 分析了土石坝体在不同工况下的渗流场。将结果与材料各向异性时的渗流场进行对比分析后发现: 对于无基坑振冲碾压土石坝来说, 分层碾压造成的坝体材料渗透性各向异性特征, 对渗透系数较小的防渗区土料影响较大, 出现坝体上游防渗土料的渗流速度增大而坝体中部防渗土料的渗透速度降低的现象; 且材料各向异性使整个断面的渗流量有较为明显的降低; 坝内孔隙水压力分布主要与上游水位高度密切相关, 且大坝上下游水位差越大, 坝内流速和流量就越大。

**关键词:** 土石坝; 渗流场; 非饱和渗流; 各向异性, 振冲填筑

**中图分类号:** TV 641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0161-04

## Seepage Analysis of Earth Dam with Anisotropic Material Permeability

CHEN Yong<sup>1</sup>, TANG Yong-quan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University,

2. No. 1 Engineering Limited Company, China Gezhouba Group Corporation, Yi chang 443002, China)

**Abstract:** Seepage analysis of earth dam is the important basis for the evaluation of seepage safety and scheme design of seepage control. According to the vibration filling construction characteristics of the earth dam of Dalong water control project in the middle and lower reaches of Ningyuan River in Sanya city of Hainan Province, the seepage fields of earth dam under different working conditions were analyzed based on the three dimensional saturated-unsaturated seepage theory. The seepage fields based on the anisotropic and isotropic material permeability were compared and the results showed that (1) as for the earth dam under vibration compaction without foundation pit, layered compaction can cause the anisotropic material permeability, which can have greater impacts on the anti-seepage earth material with lower permeability and result in the phenomenon of increasing seepage velocity in the anti-seepage material upstream of earth dam and decreasing seepage velocity in the anti-seepage material in the middle stream of earth dam; (2) anisotropic material permeability can lower the seepage discharge significantly across the entire section of earth dam; and (3) distribution of pore water pressure in the earth dam is closely related to the upstream water level, and the seepage velocity and seepage discharge in the earth dam is affected by the difference of upstream and downstream water levels.

**Key words:** earth dam; seepage field; unsaturated seepage; anisotropic; vibration filling

土石坝是由各种材料填筑而成, 渗流引起的渗透破坏是土石坝工程面临的主要难题<sup>[1-4]</sup>, 因此渗流分析计算是大坝的渗流安全评价和材料分区设计的依据<sup>[5]</sup>。在采用无基坑振冲加密施工方法填筑大坝时, 分层碾压以及天然地层的分层沉积都使得坝体/坝基土层在渗流性质上表现为各向异性, 从而对坝体渗流场及渗流速度产生一定的影响<sup>[6-9]</sup>。本文结合海南省三亚市西部的宁远河中下游河段的大隆土石坝特点<sup>[10-12]</sup>, 考虑材料各向异性, 以饱和-非饱和三维渗流理

论为基础, 对土石坝进行渗流分析。

## 1 饱和-非饱和渗流理论

在有限元分析软件 ABAQUS 中, 将土体进行有限元网格划分, 然后假定流体可以在这些网格中流动, 且保持一种连续状态, 那么多孔介质中流体的运动方程可以用连续方程来表示<sup>[13-15]</sup>。根据质量守恒原理, 得到流体的连续方程为:

$$\int_V \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV = - \int_S \rho_w n_w \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_w dS \quad (1)$$

收稿日期: 2013-07-02 修回日期: 2014-02-17 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 湖北省教育厅重点科研项目(D20121303)资助

作者简介: 陈勇(1980-), 男, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 主要从事非饱和土力学及其应用研究。E-mail: cyonger@126.com

式中： $J^{def} = \left| \frac{dV}{dV_0} \right|$  表示土体体积的变化； $v_w$  为水流相对于固体颗粒的平均流速； $\Omega$  为  $S$  面的外法线方向。

根据有限元离散原理，连续方程可在每个单元土体上表达为：

$$\frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w n_w v_w) = 0 \quad (2)$$

根据变分原理并引入孔隙水压力的变分  $\delta u_w$ ，式(2)可写为：

$$\int_V \delta u_w \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV + \int_V \delta u_w \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w n_w v_w) dV = 0 \quad (3)$$

假设多孔介质中的流体遵循 Darcy 定律，且非饱和土体的渗透系数  $k$  与完全饱和土体的渗透系数  $K$  有如下关系： $k = k_s(S)K$ ，其中， $k_s(S)$  是土体饱和度的函数，且  $k_s(1) = 1.0$ 。将其代入式(1)得渗流场的微分方程：

$$\int_V \delta u_w \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV + \int_V \delta u_w \frac{\partial}{\partial x} [\rho_w (-k \frac{\partial \Phi}{\partial x})] dV = 0 \quad (4)$$

另外，在流固耦合场中，土体的渗透系数不再是常数，其数值大小是随着应力场的变化而变化的。

## 2 坝体结构

大隆土石坝坝顶长 535.0 m，坝宽 9.0 m。最大坝高

65.5 m。大坝上游坡分 4 级设置，分别在高程 63 m、48 m 和 34 m 处变坡，变坡处设置宽度为 20 m 的马道，坡比从上至下分别为 1:3.0、1:3.0、1:3.25、1:3.25；在 26.5 m 高程处设一宽为 16 m 的平台与坝相连，平台上游以 1:3.25 的边坡与 20.0 m 高程上游堆石钱堤平台相接。下游坝坡分 4 级设置，在高程 63 m、48 m、34 m 分设 2 m 宽的马道，坡比从上至下依次为 1:2.5、1:2.75、1:2.75、1:2.75；高程 25.0 m 以下为堆石排水棱体，其顶宽为 8.0 m，上游面坡度为 1:1.5，下游面坡度为 1:2；上游面在 20.0 m 高程与下游堆石钱堤相结合；棱体上游面及堆石钱堤顶层设 1.0 m 厚的砾料反滤层，在钱堤的上游侧设 3 个反滤层。

## 3 计算模型

计算模型包含防渗墙、高塑性土、防渗帷幕、防渗土料Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区、石渣Ⅰ区、石渣Ⅱ区、防渗土料Ⅰ区、填砂砾振冲层、下游堆石钱堤、堆石排水棱体、含泥砂砾卵石、基岩、中粗砂层共 14 种材料，见图 1。三维计算模型网格见图 2，其中： $X$  方向为水流方向、 $Y$  方向为竖直方向、 $Z$  方向为坝轴线方向。土石坝渗流计算工况见表 1，各向同性材料的渗透系数  $K_y = K_x = K_z$ ，各向异性材料渗透系数  $K_x = K_z$ ，而将  $K_y$  修正为  $0.5K_x$ ，见表 2。

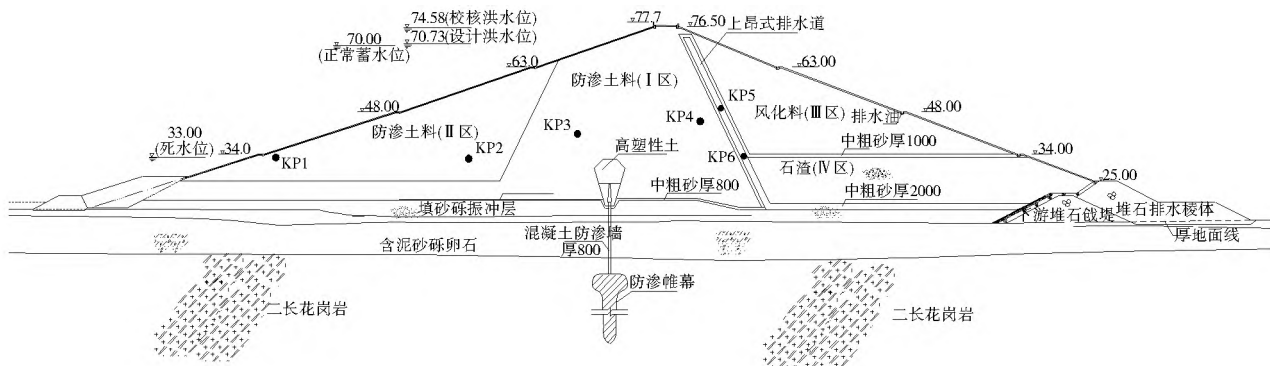


图 1 土石坝剖面及分区

Fig. 1 Cross section and zonations of earth dam

表 1 渗流分析工况

Table 1 The working conditions for seepage analysis

序号	工况	上游水位/下游水位/m	渗流参数
工况 1	正常蓄水	70/14.2	各向同性
工况 2	设计洪水	70.93/21.87	
工况 3	校核洪水	74.58/23.85	
工况 4	正常蓄水	70/14.2	各向异性

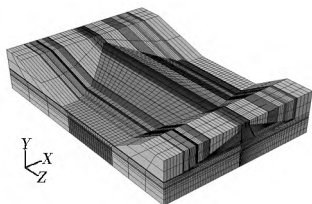


图 2 三维计算模型网格

Fig. 2 Meshes of three dimensional calculation

## 4 渗流计算结果分析

为了分析材料渗透性各向异性对大坝渗流场的影响，对

不同工况下大坝渗流场进行模拟、对比。

(1) 选择正常蓄水位条件下的两种工况(工况 1 和工况 4)进行对比，结果见图 3。两种工况下“防渗土料”和“堆石排水棱体”内的水流流速分布规律基本一致，但工况 4 的坝体局部流速出现突变现象，最大流速数值比工况 1 有显著的减小，其原因显然在于两种工况的唯一区别： $Y$  方向的渗透系数相差 1 倍，造成渗流场分布及不同方向的流速大小发生变化。

(2) 选择坝体中 6 个关键点见图 1，土石坝各工况下各关键点  $X$  方向流速对比结果见图 4， $Y$  方向流速对比结果见图 5，孔压对比结果见图 6，单宽总渗流量对比结果见图 7。

由图 4 可知：工况 2(设计洪水)与工况 3(校核洪水)下关键点  $X$  方向流速较接近，其中工况 3 略大；工况 1(正常蓄水位)下关键点  $X$  方向流速比工况 2 与工况 3 要大，其中 upstream 排水道中  $X$  方向流速相差最大，防渗土料Ⅰ区次之，防渗土料Ⅳ区相差最小，这就说明  $X$  方向流速除了受控于上下游水位差，还与材料自身的渗透系数相关；而工况 1(正常

表 2 各分区的材料参数  
Table 2 Material parameters of different zones

参数	材料													
	防渗墙	高塑性土	防渗帷幕	防渗土料(N区)	上昂式排水道	风化料(O区)	石渣(O区)	防渗土料(O区)	填砂砾振冲层	下游堆石戽堤	堆石排水棱体	含泥砂砾卵石	基岩	中粗砂
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.7	2.1	2.7	1.96	1.8	1.83	1.8	1.96	1.88	2.6	2.66	1.88	2.67	1.82
K <sub>z</sub> = K <sub>x</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )	1.E-12	1.E-6	1.E-10	1.2E-5	5.E-1	1.E-4	5.E-3	1.E-4	4.E-2	8.E-2	8.E-2	4.E-2	1.E-9	1.E-2
K <sub>y</sub> = 0.5K <sub>x</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )	5.E-13	5.E-7	5.E-11	6.E-6	2.5E-1	5.E-5	2.5E-3	5.5E-5	2.E-2	4.E-2	4.E-2	2.E-2	5.E-10	5.E-3
孔隙比	0.40	0.78	0.40	0.72	0.70	0.65	0.70	0.72	0.70	0.39	0.34	0.72	0.48	0.80

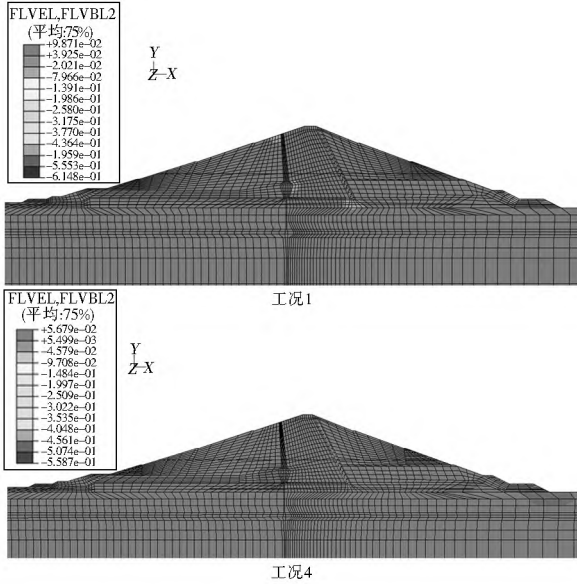


图 3 两种工况条件下某断面 Y 方向有效流速分布(单位: m/d)

Fig. 3 Distribution of effective velocity in Y direction of one cross section under two different working conditions(unit: m/d)

蓄水)与工况4(正常蓄水+材料各向异性)下大部分关键点 X 方向流速相差较小,防渗土料 O 区关键点 X 方向流速相差较大,其主要原因是该区域位于坝体上游坡面处,水力梯度变化和静水压力作用较大,竖向渗透系数的降低会导致 X 方向流速明显增大。

由图 5 可知:对于关键点 Y 方向流速,工况 1 下比工况 2 与工况 3 要大,工况 2 与工况 3 较接近;其中上昂式排水道中关键点 Y 方向流速向下,且不同工况相差较大,该现象也主要是因上游水压力不同导致的;而防渗土料中的 Y 向流速是向上的,但流速大小比 X 方向小 1 个数量级,原因是水流从上游面渗入后在防渗土料中流动并在帷幕处向上绕渗;工况 1 与工况 4 对比,防渗土料 N 区中关键点 Y 方向流速相差最大,其中 KP3 点 Y 向流速出现转向的主要原因是,当竖向渗透系数降低时,高塑性土周边局部水流在水压力作用下出现突变,该点流速改为向下。

联合图 4 和图 5 可知:各工况下,坝体下游 X 方向有效流速较大,形成良好的排水通道,减小了渗透压力。下游风化料 O 区与石渣 O 区中无渗透水,坝下稳定性不受渗透水的影响。防渗土料 O 区和 N 区中水平方向有效流速相比坝体下游要小。以防渗墙与高塑性土为界,坝上部分竖向有效流速竖直向上,坝下部分竖向有效流速向下,增加渗径长度,有效减小了渗透压力。

由图 6 可知:工况 1 下关键点孔压比工况 2 与工况 3 小,工况 3 下关键点孔压最大,主要原因是孔压主要受控于上游水位的高度,水位越高则孔压越大;而工况 1 与工况 4 下关键点孔压相差很小。

由图 7 可知:工况 1 下单宽总渗流量比工况 2 与工况 3 要大,其中工况 2 最小;当 Y 方向的渗透系数减小一半时,工况 4 单宽总渗流量比工况 1 减小约 11%。所以,上下游水位差和渗透系数直接影响大坝整体的渗流量。

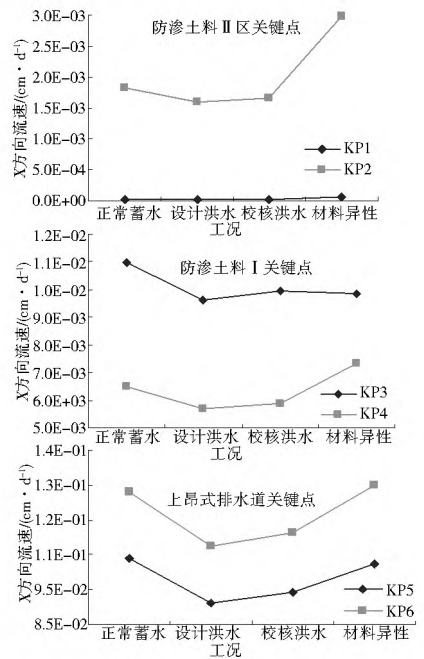


图 4 各工况关键点 X 方向流速对比

Fig. 4 Comparison of seepage velocities in X direction at two key points under different working conditions

## 5 结语

本文基于饱和-非饱和渗流理论,采用三维有限方法并考虑材料渗透系数的各向异性,对海南大隆水利枢纽工程土石坝进行渗流分析,得出以下结论。

(1) 材料各向同性时,土石坝中 X 方向流速和孔压的分布数值均与上下游水位差有关,水位差越大, X 方向流速和相应点的孔压也越大,所以,与正常蓄水位工况 1 相比,设计洪水位、校核洪水位工况下,对坝体的安全稳定相对不利。

(2) 在材料各向异性的工况 4 下,竖直渗透系数减半,导致坝体局部流速出现突变现象,但整体最大流速数值比工况 1 有显著的减小,对坝体稳定性有利。渗透系数变化对上昂

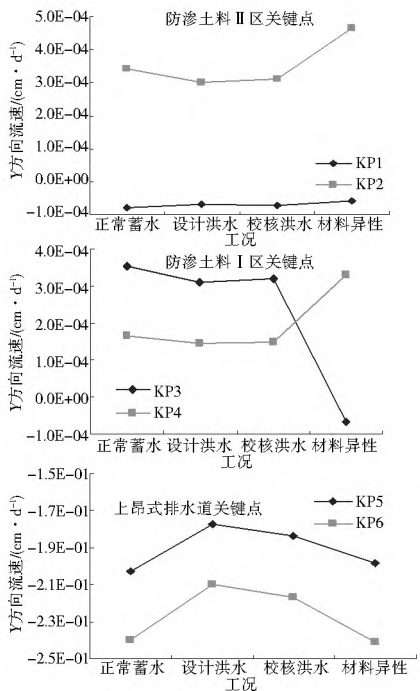


图 5 各工况下关键点 Y 方向流速对比

Fig. 5 Comparison of seepage velocities in Y direction at two key points under different working conditions

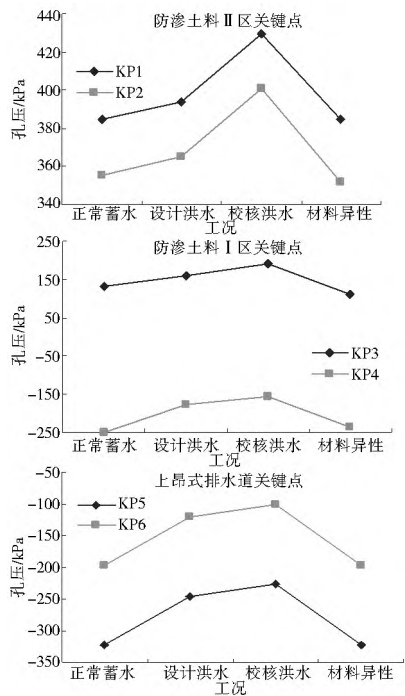


图 6 各工况关键点孔压对比

Fig. 6 Comparison of pore water pressures at two key points under different working conditions

式排水道的流速没有明显影响。

(3) 竖直渗透系数减半对整体 X 方向流速影响较小, 仅在防渗土料 II 区局部有所增大。

(4) 防渗土料 II 区和 I 区内 Y 方向流速比 X 方向流速小 1 个数量级, 且方向向上, 绕渗通过防渗墙与高塑性土为, 在转为向下流入上昂式排水道; 竖直渗透系数减半使靠近高塑性土上部的局部水流方向改为向下, 有效减小了向下游的

渗流。

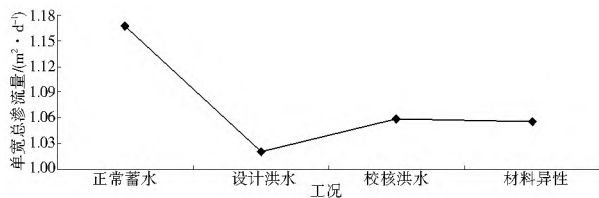


图 7 各工况单宽总渗流量对比

Fig. 7 Comparison of total seepage discharges under different working conditions

(5) 坝体内的孔压主要受控于上游水位的高度, 渗透系数变化对孔压分布影响较小。但竖直渗透系数减半直接导致单宽总渗流量比工况 1 减小约 11%, 对坝体稳定和水库蓄水有利。

参考文献 (References):

[1] Mohamed Abd El-Razek M Rezk, Abdel Aziz A A Senoon. Analytical Solution of Earth Dam With Upstream Blanket[J]. Alexandria Engineering Journal. 2012, 51(1), 45-51.

[2] Ozer AT, Bromwell LG. Stability Assessment Of An Earth Dam on Silt/Clay Tailings Foundation: A Case Study[J]. Engineering Geology. 2012, 151(1): 88-99

[3] 贺亚魏, 孟军省, 刘雪梅. 水位升降对粘土心墙土石坝渗流稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(5): 92-96 (HE Ya wei, MENG Jun sheng, LIU Xue mei. Analysis of Seepage Stability of Earth Rock Dam With Clay Core Under Ascending And Descending Water Table Conditions[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(5): 92-96. (in Chinese))

[4] 谢定松, 蔡红, 李维朝, 等. 库水位快速变动条件下心墙坝上游坝壳自由水面线变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1568-1573. (XIE Ding song, CAI Hong, LI Wei chao, et al. Variation Laws of Seepage Lines in Upstream Shell of Core Dams Under Rapid Drawdown of Reservoir Level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1568-1573. (in Chinese))

[5] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (LIU Jie. Seepage Stability and Seepage Control of Soil [M]. Beijing: Hydraulic and Power Press, 1992. (in Chinese))

[6] 何秉顺, 丁留谦. 各向异性渗流对堤坝稳定性的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报. 2006, 4(12): 227-231. (HE Bing shun, DING Liu qian. Effect of Hydraulic Seepage Anisotropy on The Stability of Earth Dams [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(12): 227-231. (in Chinese))

[7] 张坤勇, 殷宗泽, 梅国雄. 土体各向异性研究进展[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1503-1509 (ZHANG Kun yong, YIN Zong ze, MEI Guo xiong. Development of Soil's Anisotropy Study [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1503-1509 (in Chinese))

[8] 胡瑞, 曾胜利. 材料的各向异性对渗流场的影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 17-19. (HU Rui, ZENG Sheng. Analysis of Effect of Anisotropy of Materials on Seepage Field [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(2): 17-19. (in Chinese))

(下转第 172 页)

例以及示踪剂随时间的变化曲线,可以分析渗漏通道的渗漏量的大小。

#### 参考文献(References):

- [1] 袁道先,李彬,刘再华.中国岩溶[M].桂林:广西师范大学出版社,1996.(YUAN Daoxian, LI Bin, LIU Zaìhua. China Karst [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 卢耀如.岩溶地区主要水利工程地质问题与水库类型及其防渗处理途径[M].水文地质工程地质,1982.(LU Yaoru. The Main Hydraulic Engineering Geological Problems in Karst Areas with Impermeable Reservoir Types and their Treatment Approach [M]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982. (in Chinese))
- [3] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[K].2版.北京:中国建筑工业出版社,1992.(Engineering Geology Handbooks Committee. Engineering Geology Handbook [K]. Edition. Beijing: China Building Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [4] 戴树桂.仪器分析[M].高等教育出版社,1984.(DAI Shugui. Instrumental Analysis [M]. Higher Education Press, 1984 (in Chinese))
- [5] 李敬兰,李益民.广西龙布排泥库地下水多元示踪试验研究[J].安全与环境工程,2004(11):59-62.(LI Jinglan, LI Yimin. Experimental Study of Guangxi Mud Cloth Dragon Diverse Library Groundwater tracer [J]. Safety and Environmental Engineering. 2004(11): 59-62. (in Chinese))
- [6] 裴建国,谢运球,章程.湘中溶蚀丘陵地区示踪试验-以湖南新化为例[J].中国岩溶,2000,19(4):366-371.(PEI Jianguo, XIE Yunqiu, ZHANG Cheng. Dissolution Hilly Region in Central Hunan Tracer Tests [J]. China Karst, 2000, 19(4): 366-371. (in Chinese))
- [7] 黄保健,张之淦,陈伟海,等.高山峡谷岩溶水示踪试验-以川西锦屏地区为例[J].中国岩溶,1995,14(4):362-371.(HUANG Baojian, ZHANG zhiyu, CHEN Weihai, et al. Mountains and Canyons Karst Water Tracer Test-A Case Study in Western Sichuan Jinping [J]. China Karst, 1995, 14(4): 362-371. (in Chinese))
- [8] 梅瑛.荧光素钠试验方法与试验装置[J].核技术,2008,31(7):546-550.(MEI Ying. Sodium Fluorescein Test Methods and Test Equipment [J]. Nuclear technology, 2008, 31(7): 546-550. (in Chinese))
- [9] 罗云,刘刚.荧光素钠滴眼液的制备及质量控制[J].医院制剂,2008,19(4):284-285.(LUO Yun, LIU Gang. Preparation and Quality Control of Sodium Fluorescein Eye Drops [J]. Hospital Preparation, 2008, 19(4): 284-285. (in Chinese))
- [10] 刘贞,崔艳,胡志军,等.紫外分光光度法检测水中微量溴酸盐的含量[J].中国无机分析化学,2012,2(2):14-16.(LIU Zhen, CUI Yan, HU Zhijun, et al. UV Spectrophotometry Content of Trace Bromate [J]. China Inorganic Analytical Chemistry, 2012, 2(2): 14-16. (in Chinese))
- [11] 张祯武.岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系及在生产中的应用[J].中国岩溶,1990,9(3):211-219.(ZHANG Zhenwu. Karst Groundwater Pipe Flow Field Type Relationship and Application in Production with the Corresponding Curve Tracer [J]. China Karst, 1990, 9(3): 211-219. (in Chinese))
- [12] 杨立铮,刘俊业.试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J].成都地质学院学报.1979(4):211-219.(YANG Lizheng, LIU Junye. Try Tracer Concentration-time Curve Analysis of Structural Features of Karst Conduit [J]. Journal of Chengdu College of Geology. 1979(4): 211-219. (in Chinese))
- [9] 漆力健,廖华胜,李连侠.闸坝地基岩土体各向异性渗流边界条件的影响分析[J].水电能源科学,2012,30(8):56-59.(QI Lijian, LIAO Huasheng, LI Lianxia. Influence Analysis of Seepage Boundary Conditions of Anisotropy in Rock-soil Body of Gate Dam Foundation [J]. Water Resources and power, 2012, 30(8): 56-59. (in Chinese))
- [10] 陈松滨,陈共建.无基坑水下筑坝技术的探索和实践[J].人民珠江,2008(3):31-34.(CHEN Songbin, CHEN Gongjian. Non Foundation Pit Under water Dam Construction Technology Research and Practice [J]. Pearl River, 2008(3): 31-34. (in Chinese))
- [11] 汤用泉,王维忠.振冲加密砂砾石基础筑坝工艺[J].水利水电工程设计,2011,30(1):21-23.TANG Yongqun, WANG Weizhong. The Damming Technology of Vibrator Encryption on Sand Gravel Base [J]. Journal of Design for Hydropower Engineering, 2011, 30(1): 21-23
- [12] 刘武,何旭海.大隆水利枢纽坝体防渗土料利用研究与实施[J].水利水电技术,2005,36(12):20-23.(LIU Wu, HE Xuhai. Study and Implementation of Anti-seepage Earth Material Utilization for Dam Filling in Dalong Water Control Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36, (12): 20-23. (in Chinese))
- [13] Sam Helwany. Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications [M]. John Wiley & Sons, Inc 2007.
- [14] 费康,张建伟. ABQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Weijian. Application in Geotechnical Engineering of ABQUS [M]. Beijing: Hydraulic and Hydroelectricity Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 欧阳君,林飞,刘秋英,钟翔熹.基于 ABAQUS 的土石坝稳定渗流期应力应变分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):104-108.(OUYANG Jun, LIN Fei, LIU Qiuying, et al. Stress and Strain Analysis for Earth Rock fill Dam during Stable Seepage Period Based on ABAQUS [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 104-108 (in Chinese))

(上接第164页)