

大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定

王晓燕, 党发宁, 田 威, 张建友, 肖耀廷

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 以稳定渗流有限元分析方法为基础, 结合优化设计中的参数敏感性分析方法和目标函数分析方法, 将施工工期作为目标函数, 将堰体下游出溢处水力坡降和围堰施工时间作为约束条件, 进行大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的优化研究。分析了悬挂式防渗墙不同深度计算条件下的施工工期、下游出溢处水力坡降和堰体流量等敏感性因素, 进而通过归一化思想得到它们分别与防渗墙深度的关系, 再根据约束条件求取悬挂式防渗墙的最优化深度, 并给出了优化深度的计算结果图。对悬挂式防渗墙深度的研究, 不仅对于工程建设的时效性和安全性是必要的, 而且为全面、合理的评价悬挂式防渗墙的功效提供了理论依据。

关键词: 参数敏感性分析; 悬挂式防渗墙; 水力坡降; 工期; 堰体流量

中图分类号: TU753.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1564-05

作者简介: 王晓燕(1982-), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟研究。E-mail: wxy0710@163.com。

Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River

WANG Xiao-yan, DANG Fa-ning, TIAN Wei, ZHANG Jian-you, XIAO Yao-ting

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the FEM for steady seepage, and combining with the analyse of parametric sensitivity and the objective function in optimal design, the construction schedule was taken as the objective function and the overflow hydraulic gradient and the construction time as the restrictive conditions, the optimization of depth of suspended anti-seepage wall in the cofferdam of a hydraulic power station in the Dadu River was performed. Variation of some sensitive parameters including the hydraulic gradient and the schedule with depth of suspended anti-seepage wall was analyzed, and the relationship among them was obtained through the normalization of thinking. The anti-seepage depth was obtained through the restraint condition, and the optimized depth was then yielded. The results were not only necessary for the economy and safety of the engineering construction, but also reasonable for the theoretical basis of the evaluation to suspended cut-off walls.

Key words: parametric sensitivity analysis; suspended anti-seepage wall; hydraulic gradient; schedule; cofferdam seepage amount

0 引 言

防渗墙对于围堰工程是有效的防渗措施之一, 悬挂式防渗墙已广泛应用于围堰工程的设计中。在工程建设中, 工程的时效性和安全性是大家共同关注的问题, 也是渗流分析的主要任务之一。围堰工程, 其特点一是必需在一个枯水期完成工程, 这样才能发挥其围护作用, 特点二是必须在一定洪水标准下有足够的稳定性、抗渗性和抗冲刷性能。围堰工程应力求工期短, 安全实用, 造价低, 易于拆除^[1]。所以, 在围堰工程建设中, 工期和安全实用性对于设计方和施工方来说, 都是一个十分关心的问题。目前, 对悬挂式防渗墙满足一定施工时间要求的防渗效果研究以及如何合理选取防渗墙深度的研究还不深入, 所以还需进一

步的研究和讨论。

文献[2]对半封闭式防渗墙作了较为详细地研究; 文献[3]对悬挂式防渗帷幕的防渗效果作了详细的分析, 认为当悬挂式防渗帷幕达到一定的深度和厚度要求时, 除帷幕底部小范围内存在较大的渗流速度外, 其它部分的渗流速度以及下游出溢处的水力梯度均有显著降低; 文献[4]对三峡工程二期土石围堰一系列不同防渗设施的布置方案的防渗效果进行研究。悬挂式防渗墙主要依靠延长渗径、改变渗流出口处的流态达到防渗效果, 具有投资小、施工快、有利于在一个枯

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50879069); 国家自然科学基金面上项目(50679073)

收稿日期: 2007-08-01

水期完成施工等优点, 所以广泛应用于围堰、大坝、堤防等工程建设中。但由于悬挂式防渗墙没有达到截渗的目的, 墙后的渗透流量和渗透水力坡降仍然很大, 因此投资方、施工方往往会产生悬挂式防渗墙深度是否可以随意减小, 甚至取消的疑问。

在结构的优化设计中, 对可选方案按一定的目标进行比选, 使目标达到“最优”, 称为比较优化。当系统中的问题获得最优解时, 如果改变系统中的参数, 会对最优解产生一定的影响, 通过改变系统参数来反映系统问题最优解变化的方法就是优化计算中的参数敏感性分析方法^[5]。本文运用结构优化设计的参数敏感性分析方法和目标函数分析方法, 对悬挂式防渗墙的深度进行最优化设计, 以期找到经济合理的最优化防渗深度, 为工程建设服务, 同时为更全面、合理的评价悬挂式防渗墙的功效提供了理论依据。

1 工程概况和计算模型

1.1 工程概况

该水电站装机 330 万 kW, 枢纽由高 186 m 的砾质土心墙堆石坝、左岸地下厂房、左岸岸边溢洪道、左岸泄洪隧洞和右岸放空隧洞组成。

该工程上游围堰为土工膜斜墙土石围堰, 堰体与拦河大坝相结合。堰顶高程为 722.50 m, 最大堰高约 47.50 m, 堰顶宽 10.00 m, 迎水面边坡 1:2.50, 背水面边坡 1:1.75; 堰基采用悬挂式混凝土防渗墙防渗, 防渗墙顶高程按 12 月~次年 3 月施工要求确定为 684.00 m, 防渗墙底高程拟为 640.00 m, 防渗墙最大深度拟为 54.5 m, 防渗墙厚 0.8 m; 堰体采用复合土工膜斜墙防渗, 最大挡水水头约 38.50 m。

上游围堰堰基覆盖层最大厚度为 64.55 m 和 66.55 m, 由漂卵石层、卵砾石层、含漂卵石层夹砂层透镜体和漂(块)卵石层 4 大层组成。

上游围堰堰体堆筑量大, 基础防渗深度较大, 由于涉及按时发电和安全度汛等重大问题, 要求围堰在一个枯水期必须完成防渗墙的施工及堰体的堆筑, 并达到挡水要求, 工期紧难度大。防渗墙的设计施工工期为 2005 年 11 月 16 日至 2006 年 3 月 31 日。

1.2 计算模型

根据如上所述的工程概况和计算条件, 选取计算模型如图 1 所示。

计算区域的选择: 根据渗流计算的规范要求, 取堰体宽 215 m, 堰高 54.5 m, 从围堰迎水面堰脚向上游延伸 70 m, 从围堰背水面堰脚向下游延伸 115 m, 从堰底向地下延伸 100 m。

计算区域内共涉及到 11 种材料, 在模型中分别用不同的灰度表示。它们分别为, 堆石 I 区料、堆石 II 区料、复合渗透体、混凝土防渗墙、过渡区料、水平反滤料、漂(块)卵石层 Q_4^{1-1} 、含漂卵石层 Q_4^{1-2} 、卵

砾石层 Q_4^2 、基底岩体、压坡体。计算中各种材料的渗透系数值见表 1。

由于土工膜的厚度相比围堰体很小, 若对其进行单元划分, 将导致当前计算机无法承受的计算量, 同时由于各单元矩阵的主元相差很大, 也容易导致有限元解的不稳定, 计算中将混凝土面层、土工膜、砂卵石垫层当成一个复合渗透体, 对复合渗透体整体进行单元划分。复合渗透体的渗透系数按照土力学中有关成层土竖直方向的渗透系数的计算公式

$$k_y = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3} + \dots}$$

进行求取。

研究工况: 30 a 一遇设计洪水时, 围堰最大水位差即上游设计水位 51.60 m, 堰后设计水位 0 m。

计算网格如图 2 所示, 共划分了 39538 个节点, 39138 个单元。网格的划分过程中, 对复合渗透体和混凝土防渗墙进行了细化处理, 以满足计算精度要求。

表 1 材料渗透系数表

Table 1 Hydraulic conductivity of test materials			
材料	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	材料	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
堆石 I 区料	1.00×10 ⁻²	Q_4^{1-1}	5.00×10 ⁻²
堆石 II 区料	4.63×10 ⁻³	Q_4^{1-2}	9.00×10 ⁻²
复合渗透体	2.50×10 ⁻⁹	Q_4^2	9.00×10 ⁻²
混凝土防渗墙	3.00×10 ⁻⁷	基底岩体	5.00×10 ⁻⁵
过渡区料	3.00×10 ⁻³	压坡体	5.00×10 ⁻¹
水平反滤料	5.00×10 ⁻³		

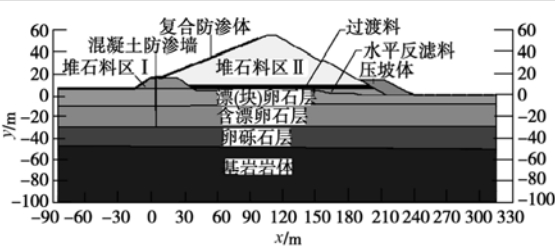


图 1 计算模型

Fig. 1 Computation model



图 2 计算网格图

Fig. 2 Computation grid

2 有限元模拟

2.1 有限元解法

本文采用的方法是稳定渗流的有限元解法。研究

稳定渗流需要求解稳定渗流场,也就是要对式(1)进行求解^[6]。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0, & \text{在 } \Omega \text{ 内,} \\ H|_{\Gamma_1} = H_1(x, y), & \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上, 水头边界,} \\ k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) = q, & \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上, 流量边界.} \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_x, k_y 为当坐标轴方向与渗透主轴方向一致时, x, y 方向上的渗透系数; Ω 为渗流区域, 即为 Γ_1 和 Γ_2 所围成的研究区域; Γ_1 为已知水头值的边界, H_1 为边界水头。一般称为第一类边界, Γ_2 为已知流量情况的边界, q 为单位时间边界法向流量(流入为正, 流出为负), $\cos(n, x), \cos(n, y)$ 为边界面外法线方向的方向余弦, 一般称为第二类边界。

以上渗流问题可以化为求解以下泛函的极小值问题

$$\begin{aligned} \chi(H) &= \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + \int_{\Gamma_2} q H d\Gamma \\ &= \iint_{\Omega} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} H_{,x} \\ H_{,y} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{,x} \\ H_{,y} \end{bmatrix} dx dy + \int_{\Gamma_2} q H d\Gamma \quad (2) \end{aligned}$$

先对计算区域进行离散, 用结点水头表示单元内部任意点的水头, 代入公式(2), 对泛函进行变分, 即令 $\chi(H)$, 得以单元为单位的渗流有限元方程, 再增加一个自由面上有效排水孔隙率的项, 用所得单位有限元方程装配起来形成总体方程体系, 从整个体系的方程组求解各结点处的水头, 最后采用迭代法求解得到其他从属量, 如孔隙水压力、水头梯度和水流速度等。

2.2 优化设计思路

优化设计的对象是悬挂式防渗墙深度, 目标函数为防渗墙工程所涉及的施工工期, 即既要求工期短、又要求达到较好的防渗效果。

本文具体方法, 分 3 步:

(1) 对防渗墙深度从 10 m 到 62.5 m, 以 2.5 m 为增值, 21 个工况, 再加上防渗墙到达基岩(防渗墙深度为 63.6 m), 共 22 个工况进行敏感性分析。

主要探讨堰体出溢处水力梯度随防渗墙深度的变化规律^[7], 依据工程设计经验和文献[7]的分析结果, 本文拟选用的敏感性因素为①堰体下游出溢处的水力坡降; ②22 个工况某一工况对应的施工工期; ③22 个工况某一工况对应防渗墙的深度。

计算分别得到下游出溢处水力坡降随防渗墙深度的变化、施工工期随防渗墙深度的变化图等结果图, 然后运用归一化思想, 求取水力坡降、工期、防渗墙

深度三者作用的最合理效果, 即求取某深度对应水力坡降与 22 个工况中得到的最大水力坡降之比得到归一坡降, 某深度对应施工工期与 22 个工况中得到的最大施工工期之比得到归一工期, 然后再求取它们随防渗墙深度的变化图, 两者的交点对应的防渗墙深度即为所求的初步最优化设计深度 H_0 。

(2) 计算约束条件深度。

约束条件深度包括两个: ①设计最优施工工期所对应的深度 H_1 ; ②堰体下游出口处发生管涌时, 即达到临界水力坡降时所需的防渗墙深度 H_{cr} 。

(3) 最终得到最优化设计深度。

最优化设计深度为初步最优化设计深度 H_0 、最优施工工期所对应的深度 H_1 和达到临界水力坡降时所需的防渗墙深度 H_{cr} 这 3 者的最大值, 如下式:

$$H_{\max} = \{H_0, H_1, H_{cr}\} \quad (3)$$

目标函数防渗工程所涉及的施工工期的表示式为

$$M = \alpha \beta \lambda H^\gamma \quad (4)$$

式中 M 为防渗墙 H m 时所需施工工期(d); α 为防渗墙每标准米深的施工工期; β 为混凝土防渗墙厚度; λ 为混凝土防渗墙的宽度; H 为混凝土防渗墙深度; γ 为大于 1 的常数

防渗墙不同深度所对应的施工工期是非线性的, 根据工程经验和该工程设计防渗墙施工工期, 本文的 α 值拟取为 0.75 d/m³, β 值为 0.8 m, λ 拟取为 1 m (防渗墙宽度取单位宽度), γ 值拟取为 1.36。对于不同的工程, 可通过改变 α 和 β 的值来描述其施工工期。

由上可得, 目标函数施工工期表达式为

$$M = 0.75 \times 0.8 \times 1 \times H^{1.36} = 0.6H^{1.36}。$$

2.3 防渗墙深度优化设计的有限元模拟

有限元计算结果如下: 图 3 为围堰下游出溢处水力坡降与防渗墙深度的关系图, 反映敏感性因素堰体出口处水力坡降值和 22 个工况某一工况对应防渗墙的深度关系; 图 4 为施工费用随防渗墙深度的关系图, 反映敏感性因素 22 个工况某一工况对应的施工工期 22 个工况某一工况对应防渗墙的深度关系; 图 5 为归一坡降和归一工期随防渗墙深度的变化图, 即本文提出的防渗墙深度的确定研究方法所依据的标准。

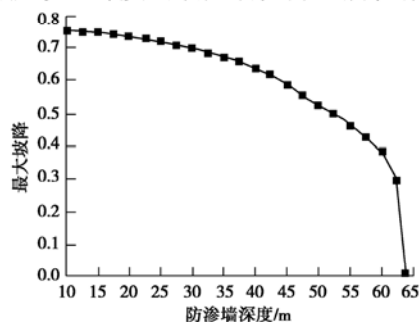


图 3 围堰下游出溢处水力坡降与防渗墙深度的关系图

Fig. 3 The relationship between the hydraulic gradient of overflow and the depth of cut-off wall

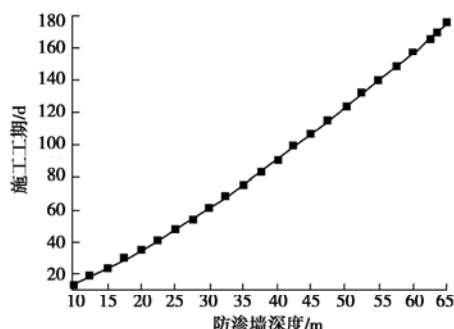


图 4 施工工期随防渗墙深度的变化图

Fig. 4 The relationship between the construction schedule and the depth of cut-off wall

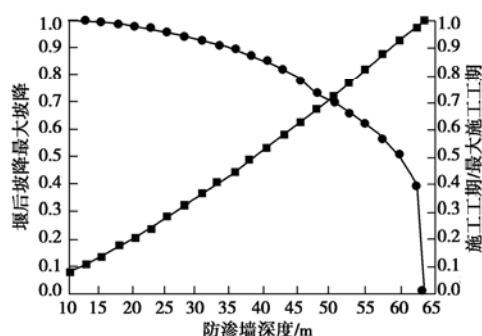


图 5 归一坡降和归一深度随防渗墙深度的变化图

Fig. 5 The variation hydraulic gradient of overflow and

construction schedule with the depth of cut-off wall

从图 3 可以看出: 随着防渗墙深度的增加, 围堰下游出溢处的水力坡降值不断降低, 且水力坡降值均小于 1.0, 说明了防渗墙深度的变化对降低围堰下游出溢处水力坡降有明显作用, 也就是说对减小下游坡脚处水力破坏有明显的作用, 进而说明工程的安全合理性。从图 4 可以看出: 随着防渗墙深度的增加, 施工工期不断增加, 从工程的时效性角度出发, 深度取值必须满足枯水期施工时间的要求。从图 5 可以看出: 归一深度随防渗墙深度的变化是呈递减趋势, 归一工期随防渗墙深度的变化是呈递增趋势, 两者有一个交点, 依据本文的设计思路, 则该交点所对应的防渗墙深度即为初步作优化深度, 两者的交点对应深度约为 49.5 m, 根据施工工艺取 50 m, 故该围堰工程防渗墙初步优化设计深度 H_0 的取值为 50 m。

根据该工程概况, 悬挂式防渗墙设计最优施工工期所对应的深度 H_t 为 51 m。

由于该围堰工程下游出口点的临界水力坡降值为 0.45, 计算分析得下游出口点的水力坡降值有些工况达到了允许水力坡降值 0.45, 但是由于围堰下游压坡体的作用, 水力坡降大于 0.45 的一定范围内堰体出溢处也不会发生破坏。经计算, 防渗墙深度必须满足 ≥ 47 m, 即防渗墙深度不小于 47 m, 围堰下游压坡体与水平反滤料交界部位才不会发生管涌破坏, 故选取其临界破坏深度为 47 m。

最终得到最优化设计深度, 如式 (5) 所示:

$$H_{\max} = \{H_0, H_t, H_{cr}\},$$

因为 $H_{\max} = \{50, 51, 47\}$, 故取 $H_{\max} = 51$ m, 即得到该工程悬挂式防渗墙的最优化设计深度为 51 m。

图 6 为围堰堰体流量随防渗墙深度的变化值, 堰体流量是指围堰全断面流量与堰后覆盖层流量差, 即如图 7 所示的截面 A-A 流量与截面 B-B 流量的差值。本文的确定方法也可以选取堰体流量作为敏感性因素, 其步骤和上同, 在此不作详细讨论。

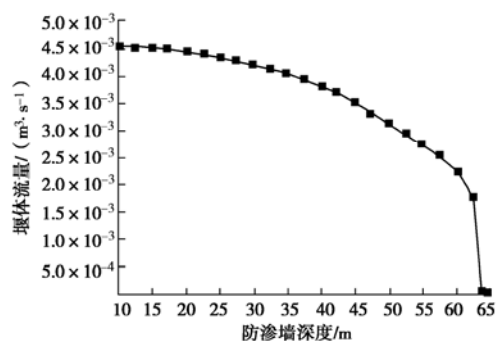


图 6 堰体流量随防渗墙深度的变化图

Fig. 6 The relationship between the seepage of cofferdam and the depth of cut-off wall

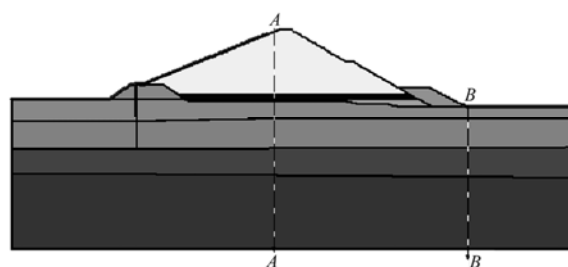


图 7 堰体流量模型图

Fig. 7 The model for seepage of cofferdam

经过上面的优化分析, 该水电站上游围堰防渗墙的最优化设计深度为 51 m。下面给出围堰防渗墙设计深度为 51 m 时的计算结果图, 如下所示: 图 8 为防渗墙深度是 51 m 时, 围堰的水头等值线图; 图 9 为防渗墙深度是 51 m 时, 围堰堰后水力坡降等值线图; 图 10 为防渗墙深度是 51 m 时, 围堰下游出溢处流速图。

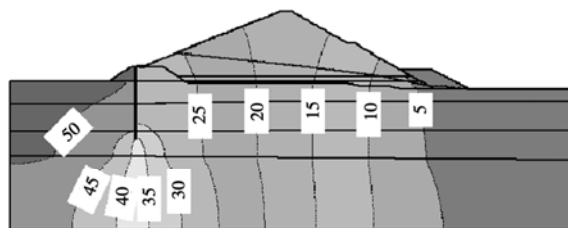


图 8 防渗墙深度是 51 m 时, 围堰水头等值线图

Fig. 8 The water head at depth of ctt-off wall = 51 m

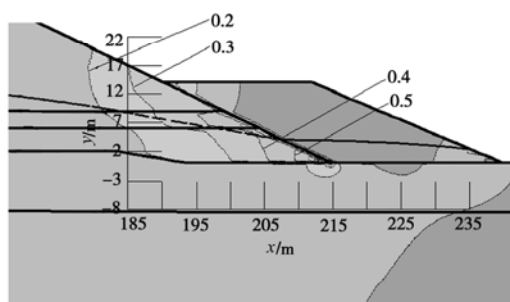


图 9 防渗墙深度是 51 m 时, 围堰堰后水力坡降等值线图

Fig. 9 The overflow hydraulic gradient at depth of cut-off wall = 51 m

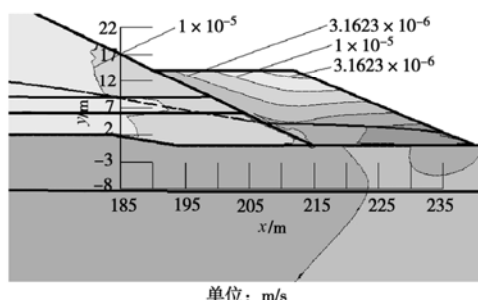


图 10 防渗墙深度是 51 m 时, 围堰下游出溢处流速图

Fig. 10 The overflow hydraulic velocity at depth of cut-off wall = 51 m

3 结 论

本文通过对某工程悬挂式防渗墙的深度确定, 得出如下结语:

(1) 采用有限元方法、优化设计中的参数敏感性分析方法和目标函数法, 研究了悬挂式防渗墙深度的优化问题, 最终建立了一种确定悬挂式防渗墙深度的方法。

(2) 优点是从安全和时效的角度出发, 对悬挂式垂直防渗墙深度的优化分析, 不仅为工程建设提供理论研究意义, 而且充分肯定了悬挂式防渗墙的设计研究对国家建设的重大意义。

(3) 渗透破坏往往是水工建筑物遭受破坏的主要原因之一, 所以围堰敏感性因素的选择问题要围绕这个要领展开。本文围堰敏感性因素的选择遵从该点, 并结合工程的时效性共同考虑。

(4) 不足之处在于只是提出一种确定方法, 对目标函数的选择、表达式的确定方法的进一步完善等还需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 郑守仁, 王世华, 夏仲平, 等. 导流截流及围堰工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHENG Shou-ren,

WANG Si-hua, XIA Zhong-ping. Diversion and closure and cofferdam project[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))

[2] 许季军, 张家发, 程展林. 堤防半封闭式防渗墙防渗机理及设计参数研究[J]. 人民长江, 2001, 32(5): 42 - 48. (XIU Ji-jun, ZHANG Jia-fa. Anti-seepage principle and design parameters of cut-off wall used for dyke[J]. Yangtze River, 2001, 32(5): 42 - 48. (in Chinese))

[3] 杨秀竹, 陈福全, 等. 悬挂式帷幕防渗作用的有限元模拟. 岩土力学, 2005, 26(1): 105 - 107. (YANG Xiu-zhu, CHEN Fu-quan, et al. FEM simulation of impervious effects of suspended curtain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 105 - 107. (in Chinese))

[4] 孙开畅, 李 军. 三峡工程二期围堰渗流分析和防渗体系的优化布置[J]. 中国水运, 2006(4): 81 - 83. (SUN Kai-chang, LI Jun. The seepage analysis and optimized design of watertight system of stage II cofferdam of Three Gorges Project[J]. China Water Transport, 2006(4): 81 - 83. (in Chinese))

[5] 秦士元. 系统分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. (QIN Shi-yuan. System study[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987. (in Chinese))

[6] 顾慰慈. 渗流计算原理及运用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (GU Wei-ci. Computing principle and application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese))

[7] 顾小芳. 深层覆盖层上水闸渗流分析与防渗结构优化设计研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (GU Xiao-fang. Study on seepage and anti-seepage structure design of sluice on deep gravel cover[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))

[8] 党发宁, 刘云贺, 陈军强, 等. 浑水渗流理论及其工程应用[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2006, 36(9): 1029 - 1036. (DANG Fa-ning, LIU Yun-he, CHEN Jun-qiang. Muddy water seepage theory and its application[J]. Science in China: Series E Technological Science, 2006, 36(9): 1029 - 1036. (in Chinese))

[9] 党发宁, 王晓章, 等. 求解渗流自由面的一种新方法[J]. 水力发电学报, 2004(23): 88 - 91. (DANG Fa-ning, WANG Xiao-zhang. A new method to solve seepage free[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004(23): 88 - 91. (in Chinese))