

文章编号: 1000-7709(2009)02-0068-04

# 坝基防渗墙及墙下灌浆帷幕渗流及渗透稳定性分析

余 进<sup>1</sup> 张连明<sup>2</sup> 吴梦喜<sup>1</sup> 姜媛媛<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 采用三维有限元计算软件 SEEPAGE1.0 对扎雪水电站坝基进行了稳定渗流计算, 分析了悬挂式防渗墙下灌浆帷幕深度对渗流场的影响, 探讨了覆盖层中的渗透稳定性问题, 确定了经济合理的防渗方案, 并分析了防渗墙开裂对渗流场的影响。结果表明, 覆盖层中帷幕底部的渗透坡降最大, 并以此处为中心, 向四周迅速减小。整体渗透稳定性较好, 防渗墙底部出现交错裂缝对渗控效果影响不大。

**关键词:** 有限元; 深厚覆盖层; 悬挂式防渗墙; 灌浆帷幕; 渗透稳定性

**中图分类号:** TV139.14

**文献标志码:** A

在深厚覆盖层地段建坝, 坝基防渗处理至关重要。当覆盖层厚度 $<15\sim 20$  m时, 采用明挖方案较经济; 当覆盖层较厚时, 宜采用设置混凝土防渗墙和灌浆帷幕、高压旋喷和混凝土沉井等防渗处理方案<sup>[1,2]</sup>, 目前国内外多采用混凝土防渗墙方案<sup>[3]</sup>; 当覆盖层特别厚且透水性较强时, 现有混凝土防渗墙施工技术难以贯穿覆盖层, 仅能形成悬挂式防渗墙。由于悬挂式防渗墙未能隔断覆盖层, 致使覆盖层中的渗流量和渗透坡降仍较大, 若渗控措施不当, 可能会危及坝基安全。因此, 分析悬挂式防渗墙坝基的渗流量与渗透稳定性、确定安全经济的渗控方案就非常必要。

目前已有研究和实测结果<sup>[4~6]</sup>证明悬挂式防渗墙对较浅覆盖层坝基和闸基具较好防渗作用。而对深厚覆盖层坝基的悬挂式防渗墙的研究较少, 主要采用数值模拟方法。鉴此, 本文采用有限元模拟方法, 计算了西藏扎雪水电站坝基悬挂式防渗墙下设置不同深度帷幕时的稳定渗流场情况, 并对各方案的渗流量和渗透坡降进行了比较, 分析了坝基渗流场和渗透坡降的特点, 探讨了悬挂式防渗墙下局部覆盖层渗透坡降过大对整体渗透稳定性的影响, 确定了安全经济的渗控方案, 并对该方案防渗墙底部可能开裂对渗流场的影响进行了研究。

## 1 工程地质条件

扎雪水电站位于西藏墨竹工卡县扎雪乡拉萨

河下游约 3.8 km 处的白塔附近, 装机容量 132 MW。河谷底宽约 1.0 km。坝址区河床覆盖层厚度 $>200$  m, 自上而下分 3 层: ①含漂砂卵石层(层①)。分布于河床及左岸 I 级阶地, 厚 45.05~55.80 m, 具强透水性。②碎(卵)砾石土层(层②)。为洪、冲积沉积物, 一般厚度 15~30 m, 最厚达 38.06 m, 具中等透水性。③含漂砂卵(碎)砾石层(层③)。为冰水沉积物, 顶板埋深 63.20~92.00 m, 最大厚度 $>115.5$  m, 泥质胶结, 具中等透水性。覆盖层渗流参数建议值见表 1。

表 1 覆盖层渗流参数建议值

Tab.1 Proposed seepage parameters of overburden

地层编号	埋深/m	天然密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	渗透系数/( $cm \cdot s^{-1}$ )	允许坡降
层①	0~14	2.00~2.10	$5.40 \times 10^0 \sim 1.38 \times 10^{-2}$	0.10~0.12 (局部架空 0.07)
	>14		$1.38 \times 10^{-2} \sim 2.62 \times 10^{-4}$	
层②		1.85~1.90	$7.50 \times 10^{-3} \sim 6.50 \times 10^{-4}$	0.12~0.15 (局部架空 0.07)
层③		2.20~2.30	$4.00 \times 10^{-3} \sim 5.00 \times 10^{-4}$	0.12~0.17

## 2 防渗方案

扎雪水电站覆盖层为自上而下渗透性逐步降低的地层结构, 宜采用垂直防渗方式。覆盖层防渗采用一道厚 1.00 m 的混凝土防渗墙, 墙深 80.0 m。在防渗墙底部以下覆盖层中布置双排灌浆孔以形成防渗帷幕。覆盖层纵剖面和防渗措施见图 1。灌浆帷幕深度分别为 0、10、20、30 m 四个方案(编

收稿日期: 2009-01-04, 修回日期: 2009-02-20

基金项目: 科技部专项经费基金资助项目(0820)

作者简介: 余进(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程渗流数值计算, E-mail: tu-j02@126.com

通讯作者: 吴梦喜(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为岩土工程渗流与变形数值计算, E-mail: wumx@imech.ac.cn

号为 1~4),帷幕的有效厚度均为 3.5 m。

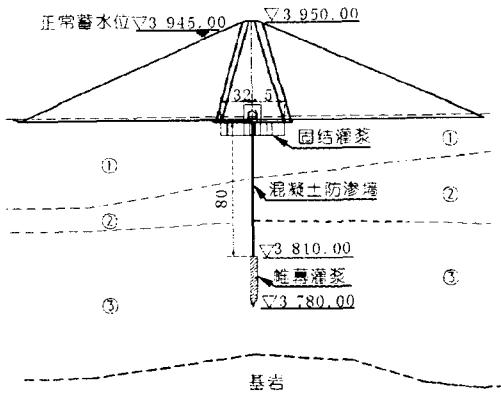


图 1 覆盖层纵剖面(单位:m)

Fig.1 Longitudinal profile of overburden

### 3 计算模型与方法

三维渗流有限元计算范围为垂直坝轴线自上游、下游各 500 m 范围内的覆盖层、两岸弱风化带及微风化带岩体,不包括坝体。防渗墙上游、下游已知水头边界处水位分别为 3 945、3 888 m;两岸岸坡为可能逸出边界;心墙与岩体截断处均为不透水边界。根据坝基地层岩性及钻孔注水试验资料,计算时可将坝基划分为 15 个渗透区(图 2),采用的渗透参数见表 2。计算程序采用土体饱和—非饱和和三维渗流有限元计算软件 SEEPAGE1.0<sup>[7]</sup>。该软件全部采用二次单元,其优点为渗透坡降在单元内为坐标的一次函数,故可用较少的单元数较准确模拟大范围的渗流场,同时能较准确地模拟剧变地段的渗透坡降(如防渗墙

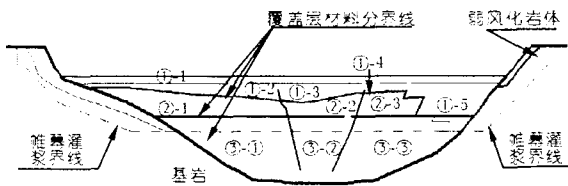


图 2 坝基渗透性分区

Fig.2 Subarea of osmosis of dam

表 2 岩石与覆盖层材料的渗透参数

Tab.2 Seepage parameters of rock and overburden materials cm/s

覆盖层编号	渗透系数	覆盖层编号	渗透系数
①-1	$1.0 \times 10^{-1}$	③-1	$6.0 \times 10^{-3}$
①-2	$7.0 \times 10^{-3}$	③-2	$5.0 \times 10^{-4}$
①-3	$1.0 \times 10^{-3}$	③-3	$2.0 \times 10^{-3}$
①-4	$2.0 \times 10^{-3}$	弱风化岩体(>10 lu)	$1.5 \times 10^{-4}$
①-5	$1.8 \times 10^{-2}$	微风化岩体(1~10 lu)	$3.6 \times 10^{-5}$
②-1	$8.0 \times 10^{-3}$	混凝土防渗墙	$1.0 \times 10^{-6}$
②-2	$5.0 \times 10^{-4}$	帷幕灌浆	$1.0 \times 10^{-5}$
②-3	$3.0 \times 10^{-3}$		

末端和灌浆区外沿、裂缝部位等),对渗流控制分析计算十分有利。

### 4 结果分析

#### 4.1 坝基渗漏量比较

各灌浆方案情况下通过坝基覆盖层及岩体的渗流量见表 3。各方案总渗流量均小于设计值( $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ),满足防渗设计要求。与方案 1(无帷幕)相比,帷幕深度增至 10、20、30 m,渗流量分别减小 18.3%、32.6%、44.7%,故灌浆帷幕深度对渗流量影响较大。以方案 3 为例(表 4),当帷幕深度达 20 m 时,坝基覆盖层渗流量占总渗流量的 91.8%,表明帷幕下部覆盖层为主要的渗流通道。

表 3 帷幕深度与渗流量的关系

Tab.3 Relationship between curtain's depth and seepage flow

方案	帷幕深度/m	渗流量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	0	1.151
2	10	0.940
3	20	0.776
4	30	0.646

表 4 坝基不同部位在方案 3 时的渗漏比重

Tab.4 Seepage proportion of different parts of dam under proposal 3

部位	渗流量占总渗流量的百分比/%
防渗墙	4.4
灌浆帷幕	2.7
覆盖层	91.8
岩体	1.2

#### 4.2 渗流场分析

图 3、图 4 分别为方案 1 防渗墙底部水平剖面与河谷中心垂直坝轴线剖面上的水头等值线。由图可知,防渗墙对水头的消耗较明显,水头损失随深度增加而减小,河床中间部位 1/2 防渗墙处水头损失约为总水头的 75%,防渗墙底部的水头损失约为总水头的 50%。方案 2~4 的渗流场与方案 1 类似。

#### 4.3 渗透稳定性分析

图 5 为方案 1 河谷中心剖面、河谷左侧纵剖面、河谷右侧纵剖面上的渗透坡降等值线。由图可知,防渗墙底部渗透坡降最大,最大值分别为 0.78、0.81、1.45。以防渗墙底为中心向渗透坡降四周迅速减小,至防渗墙下游层①-1 表面出口处渗透坡降小于 0.05,均小于该层土的允许渗透坡降(0.10~0.12),故层①-1 土体不会形成管涌。

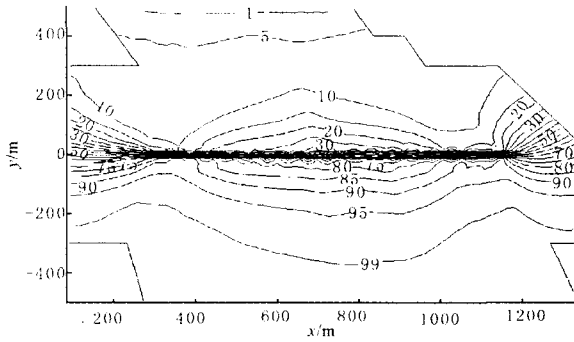


图 3 方案 1 防渗墙底水平剖面等水头线

Fig.3 Water head contour of horizontal profile at bottom of cut-off wall under proposal 1

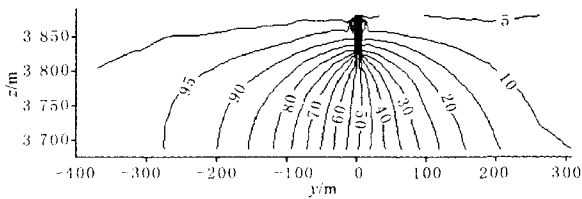
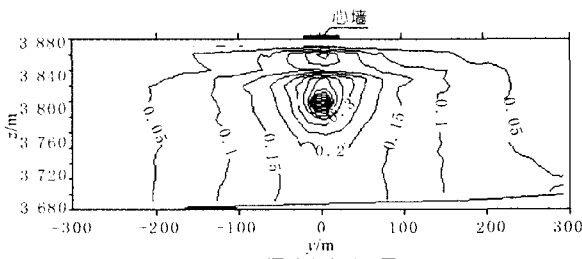
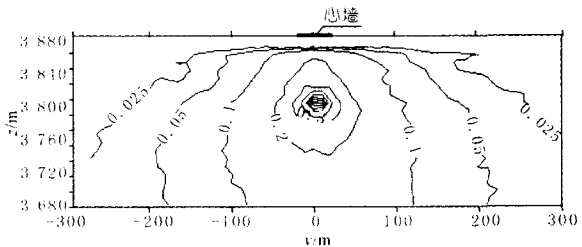


图 4 方案 1 河谷中心纵剖面等水头线

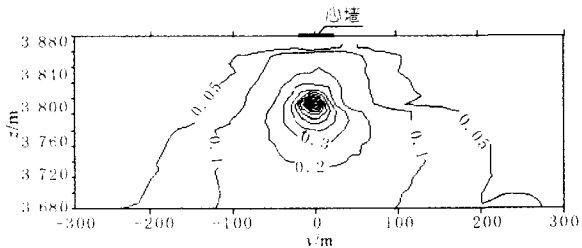
Fig.4 Water head contour of longitudinal profile of valley center under proposal 1



(a) 河谷中心纵剖面



(b) 河谷左纵剖面



(c) 河谷右纵剖面

图 5 方案 1 纵剖面渗透坡降等值线

Fig.5 Infiltration gradient contour of longitudinal section under proposal 1

防渗墙底部局部区域渗透坡降较大,可能会使局部土颗粒移动,但因防渗墙下游渗透坡降向周围

减幅较快,土颗粒在层间移动过程中土体渗透系数发生变化,使其渗透坡降下降,若无架空的贯通通道,就不会造成土体渗透破坏。防渗墙下游层①-1、层①-2~①-5的水平面渗透坡降最大值分别为0.048、0.335,层②、层③水平面渗透坡降最大值分别为0.504、2.49。垂直向渗透坡降自下向上逐步减小,层③渗透坡降最大值为1.45(位于右岸河谷内),其他部位渗透坡降<0.6,可满足坝基渗透稳定安全性要求。

采用方案3(即灌浆帷幕深20m)时,防渗墙下游覆盖层中各层的渗透坡降最大值普遍减小,其中出口处渗透坡降为0.03(<允许坡降0.10~0.12),河谷中心渗透坡降最大值为0.6,层①-2~①-5、层②、层③的渗透坡降最大值分别为0.249、0.349、0.64。由此可见,增加灌浆帷幕深度,渗透坡降比方案1小,不存在渗透变形破坏问题。

### 4.4 渗控方案

通过上述对比分析可知,坝基采用悬挂式混凝土防渗墙(墙厚1.0m,墙深80.0m)可满足渗透变形稳定的要求,但不能解决层①-5的渗漏要求(浪费水资源)。为此,须布置灌浆帷幕解决渗漏问题。根据地层分布规律及其渗透性,经计算分析可布置双排灌浆孔、孔深0~30.0m的防渗帷幕,即可解决层①-5的渗漏问题。

### 4.5 防渗墙开裂分析

假设防渗墙底部存在3、5、8cm宽交错缝时,且裂缝分别位于河谷左侧、河谷中部和河谷右侧的防渗墙底部,长为34.8、20.0、24.5m。综合考虑裂缝填充等因素,假设裂缝渗透系数为100cm/s,三种裂缝宽度下总渗漏量分别为1.11、1.12、1.13m<sup>3</sup>/s(无裂缝时的渗漏量为0.943m<sup>3</sup>/s),渗漏量增大18%,仍小于设计的最大渗漏量,满足要求。

在防渗墙三种裂缝情况下,层①-1~①-5、层②、层③渗透坡降最大值分别为0.340、0.660、4.400,因而裂缝处可能发生渗透变形,但远离裂缝处渗透坡降较小,因而亦满足渗透稳定要求。

## 5 结语

a. 针对扎雪水电站工程地质条件,对坝基渗透性进行了分区,提出了防渗方案,根据计算范围采用饱和-非饱和三维渗流有限元软件SEEAGE1.0模拟计算了渗流场。

b. 对比分析了防渗墙下有无灌浆帷幕时坝基渗漏量、渗流场变化、渗透稳定性,据此分析了防渗墙开裂的可能性及其渗透稳定性。

(下转第78页)

### 3 结语

a. 将误差项分解为满足条件的一个确定性关系向量与一个误差向量之和的形式,就易获得无偏估计。关系向量可为线性或非线性的函数,除使残差向量具有零均值条件外无任何限制。

b. 无偏回归结合脊峰回归估计既可消除误差对估计参数的影响,又可满足估计无偏、估计误差小于最小二乘法的估计,还能在已知真值参数模数时控制参数估计模数相同于真值,在实际中应用比单独应用效果好,值得研究推广。

#### 参考文献:

[1] 包为民. 具有有色噪声的模型参数估计[J]. 水利学

报,1991(12):47-52

[2] 丛树铮. 水文学的概率统计基础[M]. 北京:水利出版社,1980.

[3] 王振会,丁裕国,周胜鹏. 利用 PRESS 准则和岭回归方法建立大气遥感最优反演方程[J]. 南京气象学院学报,1994,17(1):101-109

[4] 何中市,何良材. 岭回归估计 k 值选取迭代算法的收敛性定理和极限[J]. 应用数学学报,1994,17(1):59-64

[5] 归庆明,黄顺玉. 半相依回归系统的岭型主成分改进估计[J]. 工程数学学报,1995,12(4):39-45

[6] 长青. 岭回归的均方差最小调整因子与 LS 估计均方差最小压缩估计[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),1994,13(4):63-66

### Study on Unbiased Rigid Regression Estimation

BAO Weimin<sup>1,2</sup> ZHANG Xiaoqin<sup>1,2</sup> XU Shijun<sup>3</sup> FU Senbiao<sup>4</sup> QU Simin<sup>1,2</sup> JIANG Peng<sup>1,2</sup>

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

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Office of Shao Xing Municipal Flood Control and Drought Relief Headquarters, Shaoxing 312000, China;

4. Shao Xing Municipal Vao'c River Floodgate Constuction Administratrolion Committee, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** Unbiased regression methods were developed. It was proven theoretically that the estimate errors of unbiased regression estimation are less than that of general regression estimation. After analysing the problems of rigid regression estimation, unbiased rigid regression method was developed and its merits were discussed.

**Key words:** unbiased regression; unbiased rigid regression; estimate error; theoretical proving

\*\*\*\*\*

(上接第 70 页)

#### 参考文献:

[1] 周厚贵,李焰. 三峡工程坝基灌浆与围堰防渗施工新技术[J]. 水电能源科学,2009,27(1):140-143,219

[2] 崔文娟,伍美华,邓祥辉,等. 遗传算法和复合形法确定坝基帷幕灌浆优化方案[J]. 水电能源科学,2006,24(4):60-63

[3] 周建平,陈观福. 深厚覆盖层坝基防渗处理及混凝土防渗墙设计[A]. 2004 年水力发电国际研讨会论文集(上册)[C]. 北京:中国水利学会,2004:299-306

[4] 张家发,吴昌瑜,朱国胜. 坝基渗透变形扩展过程及

悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报,2002(9):108-111,116

[5] 刘达,廖华胜,邹俊,等. 悬挂式防渗墙渗控特性的数值模拟及试验研究[J]. 广东水利水电,2008(5):8-10,17

[6] 蒋建国. 悬挂式防渗墙的防渗效果初探[J]. 中国水利,2005,(16):56-56,59

[7] 吴梦喜. 渗流有限元计算软件(SEEPAGE1.0)[EB/OL]. <http://www.imech.ac.cn/seepaqel.0/index.htm>,09-01-03

### Seepage and Seepage Stability Analysis of Dam Foundation Cut-off Wall and Grout Curtain under Cut-off Wall

YU Jin<sup>1</sup> ZHANG Lianming<sup>2</sup> WU Mengxi<sup>1</sup> JIANG Yuanyuan<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** A 3-D finite element software SEEPAGE1.0 was used to simulate the steady seepage field of the dam foundation in Zhaxue hydropower station. The influence on the seepage field of the depth of the grout curtain and cracks in the cut-off wall on the seepage field was analyzed. The seepage gradients and seepage stability in overburden layer were studied. Then a reasonable and economical technique for seepage control was proposed. The results show that the seepage gradient in the overburden layer reaches maximum just below the curtain, and decreases rapidly in the surrounding. The overburden layer is seepage stable. Besides, the intercrossing cracks in the bottom of the cut-off wall have little impact on the seepage control.

**Key word:** finite element method; deep overburden layer; suspended cut-off wall; grout curtain; seepage stability