# 深厚砂层坝肩绕坝渗流规律及防渗方案研究

吕海东<sup>1</sup>, 王瑞骏<sup>1</sup>, 李章浩<sup>2</sup>, 王党在<sup>3</sup>

(1 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;
2 云南金沙江中游水电开发有限公司,云南 昆明 650051;
3 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川 成都 610072)

[摘 要] 为了研究深厚砂层坝肩绕坝渗流的规律,结合拟建的陕西省王圪堵水库土石坝工程,进行了左坝 肩绕坝渗流的三维有限元分析,并以坝肩砂层渗透稳定为控制条件,进行了防渗墙延伸长度方案的比较研究,同时 对传统的绕坝渗流计算方法水力学法所存在的问题进行了分析。结果表明,水力学法计算的绕坝渗流量结果偏小, 据其进行防渗墙延伸长度方案的比较与选择缺乏理论依据:绕坝渗流沿河道方向的影响范围是有限的,主要影响 发生在坝趾处的左岸坡上;随着防渗墙延伸长度的增加,坝趾处左岸横断面砂层的最大渗透坡降及出逸面的渗透 坡降均逐渐减小;深厚砂层坝肩的绕坝渗流主要发生在砂层内,且随着防渗墙延伸长度的增加,砂层及左坝肩整体 的绕坝渗流量均逐步减小,但差异不显著。

[关键词] 深厚砂层; 坝肩; 绕坝渗流; 防渗墙延伸长度方案; 有限元分析

[中图分类号] TV 640 31 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2006)12-0215-06

由于开发条件等因素的限制, 许多水库尤其是 在北方沙漠和半沙漠地区修建的水库,施工时不得 不面对具有强透水性的深厚砂层坝肩特殊地质条 件。由于坝肩深厚砂层的分布往往具有空间特征,且 砂层内部结构及其颗粒组成又往往呈现多变性,因 此采取何种防渗措施以有效削减坝肩的绕坝渗流, 往往是此类工程的一个关键技术难题[1]。目前,对于 深厚砂层坝肩的绕坝渗流问题,实际工程大多采用 混凝土防渗墙防渗形式,以期增大绕坝渗流渗径,削 减绕坝渗流量并减小砂层渗透坡降。但是,目前在工 程实际中,围绕防渗墙延伸长度方案的选择问题所 进行的绕坝渗流计算,仍大多采用半经验半理论的 水力学法[2-3]。此方法将复杂的空间绕坝渗流问题简 化成二维平面问题,将绕坝渗流流线简化为圆弧曲 线,且只能计算确定绕坝渗流量,而不能确定诸如砂 层各点的渗流水头、渗透坡降等渗流要素。 本文结合 陕西省榆林市王圪堵水库土石坝工程的设计,根据 其左坝肩砂层的实际空间分布及各混凝土防渗墙延 伸长度方案,建立了包含壤土层,砂岩,泥岩层,砂层 和坝基在内的三维有限元模型,针对水库正常蓄水 工况,对其进行左坝肩整体三维绕坝渗流有限元分 析,并以砂层的渗透稳定为控制条件,进行防渗墙延 伸长度方案的比较研究, 以期较为全面和准确地了

解砂层的绕坝渗流规律及其特征,并为混凝土防渗 墙延伸长度方案的选择提供依据。

# 1 绕坝渗流计算的基本原理

## 1.1 有限元法

假定渗流服从达西定律,并忽略水的压缩性和 空隙气体对水流运动的影响,则非稳定渗流的基本 控制方程<sup>[4]</sup>为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$
(1)

式中, *h*= (*x*, *y*, *z*, *t*),为待求水头函数; *k*<sub>x</sub>, *k*<sub>y</sub> 和*k*<sub>z</sub> 分 别为*x*, *y* 和*z* 主轴方向的渗透系数; *S*<sub>s</sub> 为单位贮水 量。大坝坝肩绕坝渗流问题属于稳定渗流问题。在 稳定渗流条件下,式(1)可变为拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0 \quad (2)$$
  
其边界条件水头边界:

 $h \mid_{\Gamma_1} = f(x, y, z) \tag{3}$ 

流量边界:

$$- k_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z)$$
 (4)

通过任一断面的渗流量:

2

<sup>\* [</sup>收稿日期] 2006-05-10

<sup>[</sup>作者简介] 吕海东(1982-), 男, 陕西礼泉人, 在读硕士, 主要从事水工结构应力分析及数值仿真。

<sup>© 1994-2010</sup> China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$Q = \prod_{i=1}^{n} q_i = \prod_{i=1}^{n} \overline{v_i} \cdot A_i$$
 (5)

式(2)~(5)中, f(x, y, z)为已知边界 $\Gamma_1$ 上的水 头函数; q(x, y, z)为已知边界 $\Gamma_2$ 上的渗流量函数; n为边界 $\Gamma_2$ 的外法向;  $q_i$ 为通过渗流计算断面上单元i的渗流量;  $\overline{v_i}$ 为通过单元i的平均渗流速度;  $A_i$ 为单 元i的断面面积。

对于存在深厚砂层的库岸及坝肩,水库蓄水以 后沿坝肩的绕坝渗流问题是不可避免的。同时,库岸 及坝肩往往有一定高度的地下水,地下水渗流和沿 库岸及坝肩中深厚砂层的绕坝渗流具有一定的耦合 作用。对于不同的地下水位分布高程及不同的水库 水位组合情况,其耦合作用的机理往往是截然不同 的,因此绕坝渗流分析必须考虑地下水与库水的耦 合作用。尤其是在地下水位高于库水位的情况下,水 库蓄水后坝肩存在地下水和库水的双渗流场作用, 对坝肩渗流水头和绕坝渗流量均有很大影响,因此 在进行绕坝渗流三维有限元分析时,坝肩及库岸的 计算边界应取至地下水位高于库水位的位置,即应



图 1 水库绕坝渗流示意图 Fig 1 Schematic drawing of

a dam bypass seepage

图 1、图 2 所示的绕坝渗流计算模型的绕坝渗流 量近似计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$Q = 0 \ 366KH \ (H_1 + H_2) \lg \frac{b}{r}$$
(6)

式中,*Q* 为绕坝渗流量 (m<sup>3</sup>/d); *K* 为土层的渗透系数(m/d); *H* 为有效水头高度 (m),  $H = H_{1} - H_{2}; H_{1}$  为库水位高出隔水层的高度 (m);  $H_{2}$  为河流水边线的含水层厚度 (m); *r* 为坝肩绕坝渗流半径 (m); *b* 为水库沿岸渗漏长度 (m),  $b = L /\pi$ , 其中*L* 为绕坝渗流 宽度 (m)。

## 2 应用实例

拟建的王圪堵水库位于陕西省榆林市黄河一级 支流中游,沿坝轴线方向的地质剖面如图3所示。左 坝肩地层中,在与大坝设计桩号坝0+000相距约 2000m处,地下水位与水库正常蓄水位为1055m。 使模型在坝肩一侧的计算范围足够大,以涵盖地下 水与库水的耦合作用区。在大坝上、下游方向及坝基 深度方向,则应根据库岸、坝肩及坝基的工程地质特 性,选取足够长度或深度的计算范围。对于与坝肩相 邻的坝体,也应选取足够长度的计算范围。在进行模 型的有限元法网格剖分时,在渗透坡降变化比较大 的部位,如岸坡处、坝体与上下游库岸及坝肩的衔接 部位等,单元网格应适当加密。边界条件的选取原 则<sup>[5]</sup>为:上、下游库岸及坝体的迎水面按已知水头边 界选取;模型底面及上、下游侧面按已知流量边界选 取;坝肩及库岸远端侧面的地下水位处,按等水头边 界选取。计算时,可不考虑土体和水的压缩性,渗透 系数按各向同性考虑,材料的渗透系数按试验结果 取值。

1.2 水力学法

根据均质透水层渗漏计算公式,假定绕坝渗流 流线为半圆形曲线,则绕坝渗流水力学法在平面及 沿坝轴线方向的计算模型分别如图1和图2所示。



图 2 水库绕坝渗流计算简图

Fig. 2 Calculation scheme of

a dam bypass seepage

左坝肩的主要地层及其岩性从上到下依次为: 壤土 层,分布于1045m高程以上,厚度约8m;厚砂层, 分布于10033~1045m高程处,其底板在坝 0+000处高程为10033m,在坝0+000以左 2000m处为10165m,属强透水层,其允许最大渗 透坡降为010;砂岩、泥岩层,其顶板高程约997m, 属弱至中等透水岩层。坝基的主要地层及其岩性从 上到下依次为:冲积粉细砂层,顶高程为1008m,底 高程为99615~10033m;砂岩、泥岩层,属左坝肩 砂岩、泥岩层的延展部分。河道左岸坡平均坡度为 12,高程1020m处有一渠道,其宽度为115m。 坝下游河床面高程沿河道方向的高程变化范围为 1006~1008m。距坝轴线约4200m的左岸下游, 有一冲沟,沟底高程为1006~1012m。



#### 图 3 拟建的王圪堵水库沿坝轴线地质纵剖面

Fig. 3 Longitudinal profile of geology along dam axis of a proposed W anggedu earth dam

大坝为沥青混凝土心墙土石坝,坝顶高程1052 m,最大坝高47m,坝顶长度900m,上游平均坝坡1

3 75, 下游平均坝坡1 3; 沥青混凝土心墙厚 1m, 其底部深入坝基砂岩、泥岩层强风化线处。左 坝肩防渗采用混凝土防渗墙, 其厚度为1m, 底部深 入左坝肩砂岩、泥岩层强风化线处。水库正常蓄水位 为1046m。

#### 2 1 计算模型及计算参数

2 1.1 计算模型 根据设计图纸及计算需要,确定 渗流计算范围为:从坝踵向上游取1000m,坝趾向 下游取4200m,至左岸下游冲沟处;沿坝轴线方向 向左取2000m,相应的左坝肩地下水位为1055m; 模型底高程取950m,模型顶高程取1060m,坝下游 河床面高程沿河道方向取1008~1006m的变坡。 左坝肩地层的计算范围按其实际分布情况选 取,下游河床横河向宽度按与左岸坡等距原则确定。 大坝心墙底部高程从左至右取996 15~1003 30 m (渐变),其顶部高程为1052 m,厚度为1 m。左坝肩 防渗墙底部高程在设计桩号坝0+000处取996 15 m,向左延伸部分取砂层底板高程(渐变),厚度为1 m。由于缺乏相关资料,忽略坝基(含上下游河床)和 左岸山体各地质层沿河道方向的起伏变化。大坝上 下游水位及地下水位按已知水头边界条件施加,模 型底面及侧面按已知流量边界施加。采用8结点等 参单元进行剖分,为保证计算精度,将坝体与坝肩的 衔接部位及左坝肩防渗墙的有限元网格适当加密, 模型的有限元网格如图4 所示。其中,单元总数为3 758,结点总数为4 782。



#### 图4 拟建的王圪堵水库有限元网格图

Fig. 4 Finite element mesh of

a proposed W anggedu earth dam

2 1. 2 计算参数 混凝土采用线弹性材料,材料渗透系数<sup>[7]</sup>见表1。坝下游水位河床高程取1 008 m (无水)。

Table 1 Material parameter of seepage calculation of a proposed Wanggedu earth dam

材料分区 Subzone of material	材料性质 Property of material	渗透系数/ (cm · s <sup>-1</sup> ) Penneability coefficient
坝体防渗心墙、左坝肩防渗墙 Core-cutoff wall, left abut- ment cutoff wall	碾压沥青混凝土 Roller compaction asphalt concrete	1. 0 × 10 <sup>-7</sup>
坝壳料Dam material	碾压砂料 Roller compaction sand material	1. $0 \times 10^{-2}$
河床覆盖层 R iver bed overlying layer	冲积粉细砂 A lleviation silty fine sand	7. 68 × 10 <sup>-3</sup>
砂岩、泥岩层 Sandstone and mudstone layer	砂岩、泥岩 Sandstone and mudstone	1. 5 × 10 <sup>-4</sup>
左岸砂壤土层Left bank sandy loam layer	砂壤土 Sandy loam	9. 47 × 10 <sup>-5</sup>
左岸砂层Left bank sand layer	冲湖积砂A lleviation sand	3 4 × 10 <sup>-2</sup>

## 2 2 防渗墙延伸长度方案的拟定

地质勘测 分析结果表明,该水库左坝肩砂层渗 透破坏类型为流土型,砂层允许渗透坡降为0 10,防 渗墙延伸长度选择的前提条件是确保砂层出逸面不 致发生流土型破坏。因此,坝下游左岸坡砂层出逸面 的渗透坡降是各方案绕坝渗流分析的重点。一般情况下,防渗墙向左坝肩延伸长度越长,相应的渗径越长,砂层出逸面的渗透坡降应越小。参照同类工程防 渗墙布置经验,并结合该工程入渗水头及左坝肩砂 层分布特征,以设计桩号坝0+000为基准,拟定防

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

渗墙向左延伸长度分别为0(不延伸),50,80,100及 150m 等5种方案,各方案除防渗墙长度不同外,防 渗墙的其他布置形式相同。 度方案的砂层绕坝渗流量,结果见表2。由表2 可知, 随着防渗墙延伸长度的增加,按水力学法计算得到 的砂层的绕坝渗流量逐渐减小。

2 3 计算结果与分析

231 水力学法 根据式(6)计算各防渗墙延伸长

表2 各防渗墙长度延伸方案不同断面的绕坝渗流结果及水力学法与有限元法渗流量对比表

Table 2 Bypass seepage calculation results of different cross sections of each cutoff wall extending length andbypass seepage quantity contract with hydraulic method and finite element method

_	断面位置 Cross section position								
防渗墙延伸 长度/m Cutoff wall extend length	坝下0+150 Dam downstream 0+150			坝下2+000 Dam downstream 2+000			左坝肩疣坝彦沭重/(m <sup>3</sup> ・d <sup>-1</sup> ) Left dam abutment bypass seepage quantity		
	砂层最大 渗透坡降		出逸坡隆	砂层最大 没店最大 <sup>免坡路</sup> 参透坡降	河岸出逸点	出逸坡隆	水力学法 (砂层)	有限元法 Finite elementmethod	
		Exit Seep age gradient gradient in sand lay	M ax m um seep age gradien t in sand layer	Bank exit elevation	Exit gradient	Hydraulic method (sand layer)	砂层 Sand layer	左坝肩 Left abutment	
0	0 121 6	1 009. 8	0 117 4	0 092 0	1 008 4	0 055	-	30 382 a	31 030 b
50	0 104 5	1 008 9	0 102 5	0 078 0	1 007. 3	-	24 573	26 292 a	28 105 b
80	0 085 0	1 008 0	0 095 3	0 063 5	1 007. 3	-	20 034	23 029 a	25 095 b
100	0 082 3	1 008 0	-	0 063 5	1 007. 3	0-	17 879	22 237 a	24 429 b
150	0 078 2	1 008 0	-	0 063 5	1 007. 3		13 964	20 389 a	22 804 b

注: - . 表示在河岸坡处未出现出逸面, 出逸点高程与河床高程相同; 表中同列数据后标注相同小写字母者表示差异不显著。

Note: - . shows exit surface did not appear at the bank slope, exit elevation and riverbed elevation are the same; V alues with same superscripts within same columns don't differ significantly

2 3 2 有限元法 用三维有限元法计算上述各个 防渗墙延伸长度方案的绕坝渗流量,结果见表2。其 中,防渗墙向左延伸80m 方案的砂层水头等值线和 坝趾处(坝下0+150)水头等值线分别如图5和图6 所示。



图 5 拟建的王圪堵水库防渗墙向左延伸 80 m 方案砂层水头等值线图

Fig 5 Water head equivalent line in sand layer when cutoff wall extends 80 m left of a proposed Wanggedu earth dam



Fig 6 Water head equivalent line at dam downstream 0+ 150 section when cutoff wall

extends 80 m left of a proposed W anggedu earth dam

表2表明,各种防渗墙延伸长度方案,有限元法 计算得到的绕坝渗流量均大于水力学法的计算结 果,二者相差6 53%~31.51%。这说明,若单纯依据 绕坝渗流量的大小来进行防渗墙延伸长度方案的选 择,缺乏说服力,而且水力学法不能给出砂层各点的 水头分布情况,也就无法对各种防渗墙延伸长度方 案的砂层渗透稳定性作出必要的判断,因而在此情 况下无法进行防渗墙延伸长度方案的比较与选择。

从表 2 可以看出,随着混凝土防渗墙向左坝肩 延伸长度由0m(不延伸)增加到150m,沿砂层及左 坝肩整体的绕坝渗流量均逐步减小,砂层的绕坝渗 流量从不延伸时的30382m<sup>3</sup>/d减小到延伸150m 时的20389m<sup>3</sup>/d,沿整个左坝肩的绕坝渗流量则由 不延伸时的31030m<sup>3</sup>/d减小到延伸150m时的22 804m<sup>3</sup>/d。而且就各混凝土防渗墙延伸长度方案而 言,绕坝渗流主要发生在砂层内,沿砂层的绕坝渗流 量大体占整个左坝肩绕坝渗流量的8941%~97. 91%。由此可知,在坝肩存在深厚砂层的情况下,绕 坝渗流主要发生在砂层内。同时,由于砂层本身具有 强透水性,而防渗墙长度又较砂层延长度小得多,因 此尽管随着防渗墙延伸长度的逐渐增大,左坝肩砂 层绕坝渗流量逐渐减小,但差异不显著。

由表2、图5 及图6 可以看出, 左岸地下水入渗位 置与库水入渗位置处的渗透坡降相对较大, 但由于 流土型破坏通常发生在出逸面上, 因此这两处不致 使砂层发生渗透破坏。对于坝趾处(坝下0+150)左 岸横断面, 随着混凝土防渗墙延伸长度的增加, 砂层 最大渗透坡降由0 1216逐渐减小到0 0782; 左岸 坡的渗流出逸点位置逐渐降低, 在防渗墙长度为80 m 以上时, 渗流出逸点高程与坝下游河床高程一 致; 同时, 砂层出逸坡降也由不延伸时的0 117 4 减 小到延伸80 m 时的0 095 3, 小于砂层的允许渗透 坡降0 1。对于坝下2+000 左岸横断面, 各方案的砂 层最大渗透坡降均小于允许渗透坡降, 且除不延伸 方案外, 其余方案渗流出逸点位置均基本与此处河 床高程(1 007.3) 相同, 说明绕坝渗流沿河道方向的 影响范围是有限的, 主要影响发生在坝趾处的左岸 坡上。

# 3 结 论

本文结合拟建的王圪堵土石坝工程,进行了左 坝肩绕坝渗流的三维有限元分析,并以坝肩砂层渗 透稳定为控制条件,进行了防渗墙延伸长度方案的 比较研究,同时对传统的绕坝渗流计算水力学法所 存在的问题进行了分析。结果表明:(1)由于水力学 法只能通过渗流模型简化、近似计算绕坝渗流量,无 法对砂层的渗透稳定性作必要的判断,因此不但绕 坝渗流量的计算结果偏小,而且据此进行防渗墙延 伸长度方案的比较与选择缺乏理论基础。(2)有限元 计算结果表明,绕坝渗流沿河道方向的影响范围是 有限的,主要影响发生在坝趾处的左岸坡上。其中, 随着防渗墙延伸长度的增加、坝趾处左岸横断面砂 层出逸点逐渐下降,砂层的最大渗透坡降及出逸面 的渗透坡降均逐渐减小。对该工程而言,使砂层不致 发生流土型破坏的防渗墙延伸长度应在80m以上。 (3) 有限元计算结果还表明, 沿深厚砂层坝肩的绕坝 渗流主要发生在砂层内,且随着防渗墙延伸长度的 增加, 沿砂层及左坝肩整体的绕坝渗流量均逐步减 小、但其变化幅度并不显著。

#### [参考文献]

- [1] 毛昶熙 渗流计算分析与控制[M] 2版 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 323-330, 408-412, 510-516
- [2] 陈书文, 高义军, 苏红瑞 万家寨水利枢纽绕坝渗漏分析[J] 水利水电工程设计, 2003, 22(2): 31-36
- [3] 李江海 横泉水库左岸古河道绕坝渗漏分析[J] 山西水利科技, 2005(4), 11-12
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998: 3-21, 44-74.
- [5] 王世夏 水工设计的理论和方法[M] 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 343-362

2

- [6] 武汉水利电力学院水力学教研室 水力计算手册[M] 北京:水利电力出版社, 1983: 336-352
- [7] 陕西省水利电力勘测设计研究院 陕西省榆林市王圪堵水库工程项目建议书[R] 西安:陕西省水利电力勘察设计研究院, 2005: 1-55.

# Finite element analysis of bypass abutment seepage in deep and thick sand layer

LU Ha i-dong<sup>1</sup>, WANG Ru i- jun<sup>1</sup>, LI Zhang-hao<sup>2</sup>, WANG Dang-za i<sup>3</sup>

(1 Institute of W ater Resources and Hydro-electric Eng ineering, X i'an University of Technology, X i'an, S haanx i 710048, China;
2 Yunnan J inshaj iang M id-stream Hydroelectric D evelopm ent Conpany, Kumm ing, Yunnan 650051, China;
3 Chengdu Hydroelectric Investigation & D esign Institute, China Hydrop ov er Consulting Group, Chengdu, S ichuan 610072, China)

Abstract: Three-dimensional finite element analysis of left dam abutment seepage is carried out based on a proposed earth dam in order to study the bypass seepage law of deep and thick sand layer W ith the sand layer's seepage stability as control condition, cutoff wall extending length scheme is comparatively studied, and the problem in the traditional hydraulic method is also analyzed. The result shows that the dam bypass seepage quantity using hydraulic method is small, virtually the comparison and selection for cutoff wall extending length scheme is short of theory gist. The influence of bypass seepage is limited along the direction of river stream, but the effect on the left bank around the dam toe is great W ith the increase of cutoff wall's extending length, maximum seepage gradient of sand layer and seepages mostly occur in deep and thick sand layer of dam abutment, moreover with the increase of cutoff wall's extending length, bypass seepage quantity in sand layer and the whole left dam abutment gradually decreases, but without remarkable difference.

Key words: deep and thick sand layer; dam abutment; bypass seepage; cutoff wall's extending length scheme; finite element analysis

(上接第214页) Abstract D: 1671-9387(2006)12-0209-EA

## Equivalent quasi-continuum seepage model of face slab with intensive cracks

#### WANG Rui-jun, LU Hai-dong, LIYan-long

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi an University of Technoligy, Xi an, Shaanxi 710048, China)

Abstract Based on the motion laws of equal-width slit's steady flow, the seepage model of single slab joint is established. Then equivalent quasi-continuum seepage model of face slab with intensive cracks is studied and established. For the face slab with intensive cracks, the calculation example indicates that accurate seepage results of dam body can be obtained. The finite element grid meshing of face slabs is simple, and the calculation process of dam body seepage is quick with equivalent quasi-continuum mode.

Key words: face slab with intensive crack; seepage of face slab; seepage calculation; seepage model