高拱坝防渗排水设计浅析

陆马兰

（中国水电顾问集团公司成都勘测设计研究院工程分院，四川 成都 610072）

摘　要：高拱坝坝基帷幕防渗、排水设计的好坏，不仅影响拱坝的渗透稳定，还影响拱坝坝体的应力、稳定，和坝肩抗力体的抗滑稳定，是高拱坝设计的一项重要内容。在建的锦屏一级拱坝、溪洛渡拱坝坝高300m左右，均位于高山峡谷地区，地形陡峻，地质条件复杂。其坝区渗流，既有一般拱坝坝址的特点：渗流场受结构面、裂隙渗透控制等，又有高拱坝所带来的自身各自迥异的特性。通过对两拱坝的水文地质条件研究、三维渗流场计算分析、防渗灌浆帷幕结构验算，以及工程类比等手段，分析高水头作用下，防止发生渗漏破坏所采取的必要的防渗排水设计和处理措施，以保证拱坝防排系统设计的要求。

关键词：高拱坝；防排系统；帷幕防渗；灌浆帷幕

作者简介：陆马兰（1961－　），女，学士，高级工程师，主要从事水工结构、岩土工程方面的研究和设计工作。

1　工程概述

雅砻江锦屏一级混凝土双曲拱坝，最大坝高305.0 m，正常蓄水位1880.0 m时，库容约77.6亿m^3。坝址地形为高山峡谷，岸坡陡峻，地质构造复杂，按岩石建造特征分为绿片岩、大理岩、砂板岩等，拱坝建基面基础右岸由大理岩夹绿片岩组成，左岸1830.00 m高程以下是大理岩，以上为砂板岩。

金沙江溪洛渡混凝土双曲拱坝，最大坝高278.0 m，正常蓄水位600.0 m时，总库容约115.7亿m^3。河谷断面呈较对称地“U”型，谷底较宽阔平缓，坝址区两岸山体雄厚，谷坡陡峻，坝址区岩性单一，主要为二叠系上统峨眉山玄武岩，划分为14个岩流层，一般厚为25～40 m。二叠系下统茅口组石灰岩埋深于坝基以下70.0 m。

2　水文地质条件

2.1　锦屏一级拱坝

坝基及两岸按含水介质将坝基岩体划分为相对隔水岩体、裂隙含水岩体和岩溶裂隙含水岩体，坝基两岸地下水按赋存条件又可分为岩溶裂隙水和基岩裂隙水。坝基岩体透水性由岸坡浅表部卸荷带的中等—强透水岩体，往深部岩体透水性逐渐过渡到弱、微透水，局部含中等透水性透镜体。

河床坝基以弱偏微透水岩体和微透水岩体交互出现，以微透水为主，见图1。

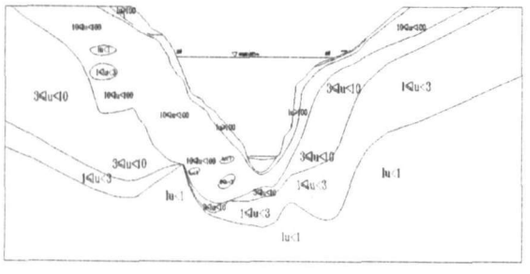


图1　锦屏一级拱坝坝址渗透地质分区

2.2　溪洛渡拱坝

拱坝坝基裂隙岩体透水性严格受构造、风化卸荷和岩溶发育程度诸因素控制，尤以缓倾角的层间、层内错动带影响最大。透水性有间隔式带状分布之特点，以中等和弱透水为主，深部存在微透水段，浅表局部为强透水段，见图2。

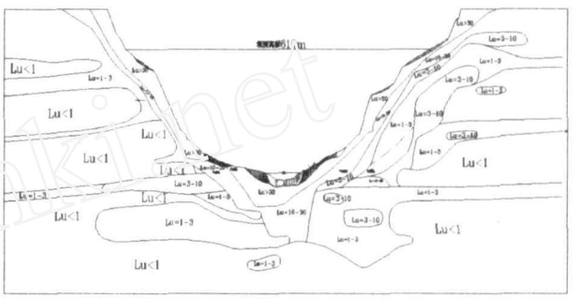


图2　溪洛渡拱坝坝址渗透地质分区

3　拱坝防渗排水系统设计

3.1　设计控制标准

对于锦屏一级、溪洛渡的拱坝防排系统设计，坝基防渗帷幕设计标准，依照我国混凝土拱坝设计规范并参考国内外已建工程经验，根据不同的地质情况，岩体的透水性和坝高，采用分高程以不同的单位吸水率吕荣值，来作为控制的设计标准。见表1拱坝防渗设计控制标准表。防渗帷幕允许水力坡降$I_a=30$，折减系数$\alpha_1 \leqslant 0.4$。

3.2　灌浆帷幕结构的验算

基岩透水率为$q=10\sim30$ Lu，帷幕厚度取$T=4.5$ m（布三排孔）。验算结果见表2灌浆帷幕结构的验算比较表。

通过对灌浆帷幕结构的验算，300 m高左右的水头，针对建基面基岩透水率$q=10\sim30$ Lu，防渗帷幕幕体渗透率q_c取为1 Lu时，验算幕体水力坡降I值，满足拱坝规范要求的允许水力坡降30；在帷幕厚度T一定情况下，幕体水力坡降大于30时，即为基岩和幕体间渗透率相差大，就要采取措施，减小幕体的水力坡降，以满足帷幕允许水力坡降$I_a=30$。

3.3　三维渗流场及渗透稳定分析

采用三维有限元法，对锦屏一级、溪洛渡坝区进行了三维渗流场

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 拱坝防渗设计控制标准表

工程名称	坝高/m	坝顶高程/m (顶—底)	允许渗流指标	
			$q\leqslant 1$ Lu	$q\leqslant 3$ Lu
锦屏一级拱坝	305	1885.00~1580.00	1830.00 m 高程以下	1830.00 m 高程以上
溪洛渡拱坝	278	610.00~332.00	563.00 m 高程以下	563.00 m 高程以上

表 2 灌浆帷幕结构的验算比较表

工程名称	基岩与防渗帷幕透水率之比	拱冠厚度/m	坝前水头/m	帷幕厚度/m	渗径总长/m	扬压力衰减系数 α_1	幕体水力坡降 I
锦屏一级拱坝	q/q_c=10	63	300	4.5	105.4	0.36	22.77
	q/q_c=20	63	300	4.5	150.40	0.25	31.91
	q/q_c=30	63	300	4.5	195.11	0.20	36.85
溪洛渡拱坝	q/q_c=10	60	268	4.5	102.40	0.34	21.68
	q/q_c=20	60	268	4.5	147.40	0.24	30.12
	q/q_c=30	60	268	4.5	192.40	0.18	34.62

表 3 帷幕渗流梯度比较表

工程名称	不同工况比较		拱冠厚度/m	坝前水头/m	局部最大渗流梯度	河床平均渗流梯度	有限元分析坝基局部最大渗流梯度
锦屏一级拱坝	幕体厚度	（三排）	63	300	20.08	16.86	—
	h=152 m	（二排）	63	300	23.03	19.30	—
	坝基帷幕深度	h=152.0 m	63	300	23.00	17.00	—
	（二排）	$\triangle h$<0 m	63	300	不明显		
溪洛渡拱坝	幕体厚度	（三排）	60	268	28.41	18.39	35.8
	h=152 m	（四排）	60	268	24.90	16.05	29.1
	坝基帷幕深度	h=152.0 m	60	268	28.41	18.39	35.8
	（三排）	h=172.0 m	60	268	27.90	15.32	34.7

计算分析，并进行了防排布置的敏感性分析。采用具有自由面渗流场分析的干区虚拟流动不变网格法，渗流控制分析中密集排水孔模拟，缝隙单元的界面元模拟计算。计算结果如下。

3.3.1 防渗幕布置分析

(1) 防渗幕渗透稳定分析结果见表 3 帷幕渗流梯度比较表。从中可得：坝基防渗帷幕深度一定，幕体厚度变化，（增减一排孔），帷幕渗流梯度满足要求，幕体厚度一定，防渗帷幕深度降低 20 m，渗流梯度的变化，均满足设计要求。

(2) 对锦屏一级拱坝左岸坝头地下水位与帷幕布置的关系如下：

a) 左岸防渗帷幕延伸长度比较见表 4、5，图 3、4。

表 4 左坝头地下水位与帷幕长度关系（代表点）

帷幕长度/m	600	450	375	200	100
地下水位/m	1729.74	1729.79	1729.99	1731.21	1731.79
水位差/m	0.0	0.05	0.25	1.47	2.00

表 5 左坝头渗流量与帷幕长度关系

帷幕长度/m	600	450	375	200	100
地下水位/m	1400.0	1450.0	1630.0	2310.0	2960.0
渗流量差/($m^3 \cdot d^{-1}$)	0.0	50.0	230.0	910.0	1560.0

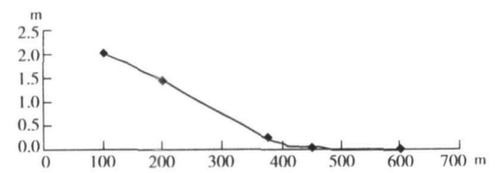


图 3 防渗帷幕长度比较结果图

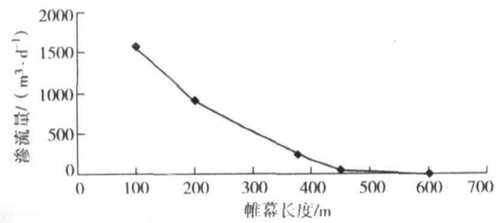


图 4 防渗帷幕长度比较结果图（渗流量关系）

b) 左岸防渗帷幕深度布置比较见表 6，图 5。

表 6 左坝头地下水位与帷幕深度关系（代表点）

帷幕孔深度/m	152	抬高 20 m	抬高 30 m	抬高 40 m
地下水位/m	1743.61	1743.81	1743.89	1744.17
水位差/m	0.0	0.200	0.280	0.560

通过计算得出：当防渗帷幕长度在 450 m 内，将对坝头地下水位的升高和渗流量变化较敏感，从左岸防渗帷幕底线抬高与地下水渗透压力水头变化的趋势看，防渗帷幕底线的抬高 20 m 以上，对坝头渗透压力水头的升高变得很敏感。

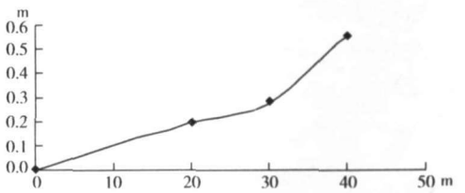


图 5 帷幕底线抬高与地下水位变化的敏感性

3.3.2 排水幕布置分析

(1) 由于坝基排水孔幕的渗控计算分析比较

排水孔幕不同孔距的计算分析，分别进行了孔距 3.0、6.0 m 的计算。从表 7 可以看出，孔距达到 3.0 m 时，由于排水孔的排水相互影响，其排渗流量比孔距 6.0 m 渗流量变化较少。分析结果对坝基排水孔幕所在位置扬压力水头值改变不大。

(2) 两岸抗力体排水孔幕布置比较

当抗力体排渗系统全面淤堵（或取消排渗系统），将导致抗力体的地下水位上升，尽管抗力体中的地下水位埋深较大，但抗力体中排渗系统的全面淤堵（或取消排渗系统）所导致的渗透压力升高极为显著，对坝头抗力体的稳定不利。

4 成果分析

根据锦屏一级高拱坝、溪洛渡拱坝的防渗灌浆帷幕结构验算、三

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表7 锦屏一级坝基排水孔不同孔距渗流量比较表

排水孔幕孔距	3.0 m 抽排	3.0 m 自排	6.0 m 抽排	6.0 m 自排
排水渗流量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	1047.0	246.0	988.0	253.0

维渗流场及渗透稳定分析的成果分析，得出以下结果。

(2) 由于坝基中的应力和位移状态受防排措施设置的方式影响大。高拱坝防渗帷幕与排水幕必须综合考虑；既要满足帷幕允许水力坡降的要求，又要满足拱坝的防渗要求。防渗帷幕与排水幕联合作用，降低扬压力，效果明显。

(2) 控制好基岩和防渗帷幕的渗透性之间比值，比值越大，降低扬压力效果明显。

(3) 增加幕体厚度,延长渗径,对坝基扬压力减小不明显,起到减小帷幕水力坡降的效果。

(4) 加深坝基主帷幕,增加整体渗压水头,对局部帷幕水力坡降减小并不明显；

(5) 坝基排水幕和左右岸抗力体排水系统的设置是必要的，不仅有效降低抗力体中的渗透压力水头，同时兼顾边坡排水，对边坡稳定有利。

5 高拱坝防渗处理主要措施

5.1 高拱坝坝基防排系统的布置

高拱坝防排系统的布置除了与一般拱坝防排系统布置相同以外，可结合两岸岩体情况，在一定高程以上，将防渗帷幕布置成斜帷幕，以阻止上游库水向下游和抗力体渗透，减小对抗力体的渗透压力，增强坝肩的稳定性；高拱坝抗力体排水平洞的布置不仅要与施工交通相结合，而且要与高边坡排水相结合，以达到一洞多用。

针对锦屏一级高拱坝建基面的岩体性状和地质条件，对断层、煌斑岩脉等进行特殊防渗处理，如混凝土防渗斜井、加密灌浆等措施。而对溪洛渡拱坝建基面的岩体条件，主要是对层间层内错动带等进行混凝土置换和加密灌浆等特殊防渗处理措施。

5.2 确定防渗帷幕范围

(1) 防渗帷幕的深度（河床深度）

锦屏一级高拱坝防渗帷幕深度：确定主帷幕深度为 150.0 m（是水头的0.5倍），最大帷幕灌浆孔深 170 m。

溪洛渡拱坝防渗帷幕深度：确定主帷幕深度为 152.0 m（是水头的0.6倍），最大帷幕灌浆孔深 172.0 m。

(2) 防渗帷幕向两岸的延伸长度

锦屏一级拱坝左、右岸防渗帷幕，在距坝肩向两岸的延伸长度分别为：600.0、266.0 m（可研阶段）；右岸防渗帷幕与厂房帷幕连为整体。

溪洛渡拱坝左、右岸防渗帷幕，在距坝肩向两岸的延伸长度分别为：110.0、90.0 m（招标阶段）。

5.3 延长渗径

延长渗径，增加幕体厚度，即在平洞内和基础廊道内，对基岩透水性大的部位，增加灌浆孔的排数，由一排增加二排，由二排增加三排或五排（局部）。

5.4 防渗帷幕幕体渗透性的控制标准

防渗幕体渗透性不仅要满足帷幕灌浆防渗标准 $q_c \leq 1$Lu，而且要考虑其基岩渗透性，两者之间相差不能太大，因此，防渗帷幕的渗透性标准，是帷幕灌浆好坏的一个重要指标。

防渗幕体渗透性的好坏，主要取决于帷幕灌浆参数，如灌浆浆液配比，灌浆压力的选取，注浆率与灌浆压力的控制，灌浆程序和方式等，防渗效果的检查，检查标准的确定，这些都需要结合坝基岩体特性，进行详细的研究，依据现场生产性灌浆试验来确定。因此，现场生产性防渗灌浆试验有其重要地位，应受到各方的重视。

参考文献：

[1] 詹美礼, 速宝玉 ,张祝添, 等. 雅砻江锦屏一级水电站拱坝厂坝区三维渗流场分析及防排系统优化研究[R]. 南京: 河海大学, 2005.

[2] 速宝玉, 詹美礼, 盛金昌,等. 溪洛渡水电站优化设计阶段坝厂坝区三维渗流场及渗透稳定分析[R]. 南京: 河海大学, 2005.

[3] 孙 钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社，2004.

[4] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

[5] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1990.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net