

# 深厚覆盖层心墙堆石坝坝基河床廊道结构缝设计

王晓安, 吕海东, 王平, 何兰

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川成都 610072)

**摘要:**以毛尔盖工程为例,对深厚覆盖层心墙堆石坝坝基河床灌浆观测廊道与两岸灌浆平洞结构缝的设计进行研究,在三维有限元分析和类似工程经验、教训的基础上,对结构缝位置、止水结构等进行了优化和改进,运行期监测结果表明:其基本达到了预期的效果,对后续类似工程设计、施工提供了一定的参考。

**关键词:**坝基河床廊道; 结构缝; 止水结构

中图分类号:TV223

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)01-0135-03

## Analysis of structural joint design of foundation river-bed gallery for core wall rockfill dam on deep overburden

WANG Xiaohan, LÜ Haidong, WANG Ping, HE Lan

(HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Taking the Maoérgai project for an example, the paper conducted research into the design of deep overburden layer core wall rockfill dam foundation bed grouting observation corridor and the grouting adit structure joints. Based on three-dimensional finite element analysis and similar project experience and lessons, the structure of joint position and sealing structure were optimized and improved, the monitor results achieved the desired effect and provided reference for the similar engineering design and construction.

**Key words:** foundation river-bed gallery; structural joint; sealing structure

## 0 前言

在深厚覆盖层心墙堆石坝坝基设置河床廊道不但可以在河床廊道内进行帷幕灌浆从而节省工程建设直线工期,而且可以为后期工程运行期间大坝防渗系统(防渗墙、灌浆帷幕等)的监测、检修、维护等提供施工通道,因此瀑布沟、跷碛、狮子坪等水电站均设置了坝基河床廊道。根据坝基河床廊道的结构特征和受力条件,随着坝体填筑以及水库蓄水,河床廊道在荷载作用下会产生较大的应力应变,导致廊道出现沉降、错动、拉裂缝、渗水、颗粒物带出等现象,甚至影响到大坝的安全运行。因此大多数工程以设置结构缝的形式减少廊道变形对结构的影响,但结构缝止水结构可靠与否直接关系到坝体的正常运行。根据类似工程设计中积累的经验、教训,毛尔盖坝基河床廊道结构设计进行了相应的加强与优化。

## 1 工程简介

毛尔盖水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州

黑水县境内,是黑水河流域规划“二库五级”的第三个梯级。拦河大坝采用砾石土心墙堆石坝,坝顶高程 2 138 m,河床建基面高程 1 991 m,最大坝高 147 m,河床覆盖层最大深度 52 m。

为便于后期大坝防渗系统检修维护、同时节省工程直线工期,在河床坝基防渗墙顶部设置河床灌浆观测廊道。廊道采用城门洞形,建基面高程 1 991 m,顶高程 1 999.50 m,廊道净空 3 × 3.5 m;廊道两侧及顶部设置接触粘土区以协调变形,底部与防渗墙扩大段进行连接,廊道与两岸灌浆平洞之间设置结构缝,廊道河床段只设置施工缝。

## 2 河床廊道结构缝设计

### 2.1 结构缝设置的必要性

坝基河床廊道位于坝体底部建基面覆盖层上,左右两端与两岸灌浆平洞相接,由于基础的不均匀性(灌浆平洞置于基岩上),随着坝体填筑,廊道在土压力荷载作用下会产生竖直方向的不均匀沉降,而且水库蓄水后,在水压力荷载作用下,还会产生向

下游的变形。当廊道变形量超过钢筋混凝土衬砌的承受能力时,将造成混凝土结构破坏,出现拉裂缝、渗水、颗粒物析出等现象,影响大坝的正常运行<sup>[1~2]</sup>。对此一般有以下两种处理思路:①通过提高廊道钢筋混凝土衬砌的抗剪、抗弯强度,使其能够承受设计荷载而不出现危害性的破坏;②沿廊道在两岸基岩、覆盖层分界线位置附近设置结构缝,部分释放廊道混凝土结构应力。

第①种处理思路在坝高较低、荷载较小的情况下,实现的难度不大,但随着深厚覆盖层上所建大坝坝高的增加,特别是目前国内土石坝坝高已突破200~300 m级别,仅通过提高混凝土结构强度来控制廊道应力应变的难度极大,甚至根本无法实现。

第②种处理思路是在坝高较高、荷载较大的情况下,通过设置结构缝部分释放廊道应力,以降低对混凝土结构强度的要求,但在结构缝部位会产生较

大的相对沉降和错动,因坝基河床廊道为坝体防渗体系的一部分,如变形量值超过止水结构的承受能力,将会出现渗水、颗粒物带出等现象,严重的将影响到大坝的正常运行。因而需要在控制廊道应力和变形之间寻找一个平衡点,通过结构缝位置、止水结构等设计,在降低对混凝土结构强度要求的同时,使廊道变形量值控制在设计允许范围之内,以满足心墙堆石坝坝体防渗的要求。

## 2.2 结构缝位置设计

毛尔盖砾石土心墙坝最大坝高147 m,覆盖层最大深度52 m,上下游水头差142 m。在坝基河床廊道结构设计过程中,对廊道的应力应变进行了计算分析,特别是结构缝设置位置对廊道应力应变的影响分析。根据大坝有限元应力应变分析研究<sup>[3]</sup>成果,河床灌浆观测廊道与左右岸灌浆平洞之间在不同位置设置结构缝的廊道应力应变对比见表1~表2。

表1 不同结构缝位置坝基河床廊道主要应力值汇总表

结构缝位置		MPa, m							
		0+159	0+184	0+204	0+224	0+244	0+264	0+284	0+296
左0+159	沿坝轴向应力	缝	-6.0	-2.5	1.5	0.5	-2.2	-1.6	
	顺河向应力	缝	-1.7	-1.7	-1.9	-1.8	-1.8	-1.2	
右0+294	竖向剪应力	缝	3.4	3.4	3.6	3.5	2.8	2.1	
左0+155	沿坝轴向应力	-1.6	-6.6	-2.1	2.3	1.3	-2.6	-1.9	-2.2
	顺河向应力	-0.3	-1.6	-1.6	-1.9	-1.7	-1.3	-1.0	0.2
右0+298	竖向剪应力	2.2	3.4	3.4	3.5	3.4	3.2	2.1	2.6
左0+152	沿坝轴向应力	-2.6	-6.0	-1.6	2.2	1.1	-2.5	-1.8	-2.4
	顺河向应力	0.3	-1.7	-1.7	-1.9	-1.7	-1.4	-1.0	0.2
右0+298	竖向剪应力	1.8	3.3	3.4	3.5	3.4	3.2	2.1	2.5
左0+148	沿坝轴向应力	-3.2	-6.1	-1.6	2.6	1.7	-2.3	-0.9	-4.5
	顺河向应力	-0.2	-1.6	-1.7	-1.9	-1.8	-1.5	-0.9	0.3
右0+302	竖向剪应力	1.8	3.3	3.5	3.5	3.4	3.3	2.1	3.0

表2 不同结构缝位置坝基河床廊道

主要应变值汇总表		m, cm			
结构缝位置		顺河向最大错动		最大沉降差	
		左岸结	右岸结	左岸结	右岸结
		构缝处	构缝处	构缝处	构缝处
左0+159	右0+294	7.8	6.1	4.5	2.8
左0+155	右0+298	4.9	3.2	3.5	2.4
左0+152	右0+298	3.7	3.2	2.3	2.5
左0+148	右0+302	2.0	2.0	0.3	1.5

从表1~2中可以看出,结构缝位置不同,两端对廊道的约束就不同,因此会影响到廊道的应力分布。结构缝位置对廊道两端沿坝轴向应力影响明显,但对顺河向应力、竖向剪应力影响不是很大。随着结构缝位置向两岸基岩内移动,廊道两端的约束加强,廊道

上游面的反弯拉应力逐渐增大,但在结构缝位置的错动、沉降差则逐渐减小;反之,当结构缝位置向河谷移动时,廊道应力逐渐减小,但相应的错动、沉降差则加大,这也与一般的工程经验判断相吻合。

根据结构缝设置位置对廊道应力应变的影响分析、廊道钢筋混凝土结构、止水结构适应能力,并结合其它类似工程的经验教训,毛尔盖工程坝基河床廊道与两岸灌浆平洞之间结构缝最终确定设置在桩号0+152 m(左)、0+300 m(右)位置,结构缝缝宽3 cm,河床廊道两端分别有7 m(左)、6 m(右)搁置在基岩上,底部受到基岩约束,但上下游侧为回填区域,不受基岩约束,其目的在于在变形量受控的情况下尽量降低廊道衬砌混凝土结构的应力水平。

### 2.3 结构缝止水结构设计

毛尔盖大坝防渗系统由砾石土心墙、混凝土防渗墙、防渗墙下及两岸山体帷幕灌浆等组成,防渗墙与心墙通过河床灌浆观测廊道进行连接。作为大坝防渗体系的组成部分,河床廊道与两岸灌浆平洞之间的结构缝止水结构设计至关重要,其直接关系到大坝的正常运行。

已建类似工程的结构缝止水结构通常采用止水铜片、橡胶止水带、GB(SR)板、GB(SR)填料等综合止水措施:在混凝土衬砌靠廊道外侧设置一道橡胶止水带和一道止水铜片,在结构缝外侧布置氯丁橡胶管、GB(SR)填料并以 GB(SR)板进行包裹,通过镀锌角钢、膨胀螺栓将 GB(SR)板固定在混凝土结构上。通过目前已建工程积累的经验,目前采用的结构止水结构存在如下问题:① 橡胶止水带、止水铜片(通常鼻子高度在 2~5cm)对结构缝这种变形量值较大的情况适应性稍差,止水效果与预期有差异;② 廊道外侧 GB(SR)板与衬砌混凝土接触面受制于镀锌角钢弯折成平顺圆弧的难度,而密封性稍差。

针对以上问题,毛尔盖工程在以往工程经验教训的基础上,对结构缝止水结构进行了加强(图 1)。

① 鉴于普通橡胶止水带可承受变形量值较小,毛尔盖工程廊道衬砌混凝土内止水未采用橡胶止水带,而采用两道止水铜片;② 根据混凝土面板堆石坝的经验,通常采用高鼻子的铜片止水以适应结构缝较大量值的变形,因此在河床廊道结构缝止水设计时将铜片止水鼻子高度加高到 14 cm,按照规范<sup>[4]</sup>要求,能保证在 60 mm 的接缝剪切位移下的应力水平不超过 0.74;③ 在廊道外侧 SR 板(填料)与衬砌混凝土之间增加一道波形橡胶止水带,波形橡胶止水带较大范围的可伸缩性能能够适应结构缝较大量值的变形;④ 在结构缝两侧廊道(平洞)底板基岩上设置 U 型槽,铺设 SR 板、SR 填料以及波形橡胶止水带,保证止水结构的完整性,改善了以往廊道底部防渗的薄弱环节。⑤ 两道铜片止水外侧采用 RCCanNCD 专用嵌缝胶嵌缝,止水之间采用沥青麻片进行填缝;⑥ 在两道铜片止水之间斜向预埋灌浆钢管,以便在后期出现异常情况时,对结构缝进行聚氨酯或其它化学材料灌浆,临时或永久堵漏。

### 2.4 其它细部结构设计

2.4.1 SR 板(填料)保护 结构缝外侧 SR 板与两岸基岩、混凝土盖板连接,在混凝土浇筑、钢筋安装过程中,可能会破坏 SR 板(填料),为保护 SR 板(填料),在 SR 板外侧设置接触粘土料保护区。接触粘

土料区不但可以保护 SR 板不被破坏,而且可以在止水系统出现破坏的情况下,对结构缝进行充填,避免严重渗漏。

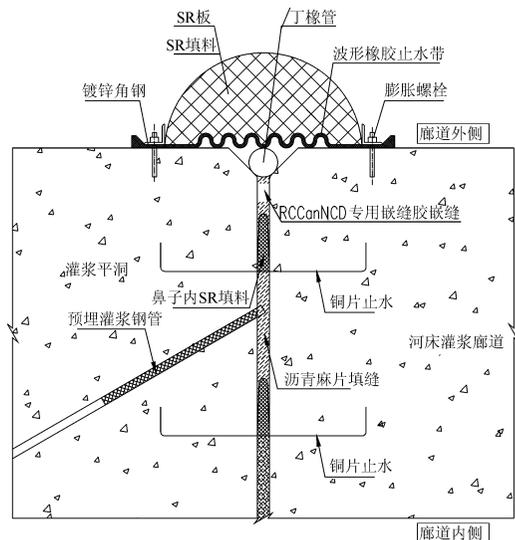


图 1 河床廊道结构缝止水结构布置

2.4.2 河床灌浆观测廊道基础加固 由于两岸基岩建基面均为强风化、强卸荷砂板岩,局部夹碳质千枚岩,为提高基础承载力,对河床灌浆观测廊道两岸搁置段基础进行了固结灌浆处理,灌浆参数为孔深 5 m,间排距 2 m,孔位呈梅花型交错布置。

## 3 河床廊道结构缝运行情况

毛尔盖工程河床廊道 2009 年 8 月开始施工,2009 年 11 月施工完成;大坝坝体填筑 2009 年 12 月开始施工,2011 年 4 月底填筑至砾石土心墙顶高程 2 136 m(距坝顶高程 2 m);水库 2011 年 3 月 20 日开始正式下闸蓄水,2011 年 9 月底已蓄至 2 093 m 高程(距正常蓄水位 40 m)。

2010 年 12 月底,在河床灌浆观测廊道巡视、检查过程中,发现结构缝局部有张开现象,但错动不明显,也未发现渗水现象。2011 年 1 月中旬,在两岸结构缝部位安装了测缝计,监测频率为每 3 d 监测一次,2 月 6 日首次测量左岸结构缝最大张开 18.19 mm、错动 0.12 mm,右岸结构缝最大张开 44.13 mm、错动 0.27 mm;5 月 7 日左岸结构缝最大张开 17.68 mm、错动 1.56 mm,右岸结构缝最大张开 45.93 mm、错动 1.67 mm,结构缝张开、错动均有所增加,但变形速率不大。

2011 年 5 月 8 日,右岸结构缝部位靠下游侧拱脚位置出现渗水现象,并伴有白色钙质析出物,水质

(下转第 146 页)

- and process model to generate motion of mobile cranes[J]. Automation in Construction, 2009, 18(4): 458-468.
- [37] Vineet R Kamat, Julio C Matinez. 3D Visualization of Simulated Construction Operations [C] // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, 2000.
- [38] Kathleen McKinney, Tennifer Kim, Martin Fischer. Interactive 4D - CAD [J]. Computing in Civil Engineering, 1996, 20: 381-389.
- [39] W Zhou, D Heesom, P Georgakis, et al, An interactive approach to collaborative 4D construction planning [J]. Journal of Information Technology in Construction, 2009 (14): 30-47.
- [40] Bansl V K, Mahesh Pal. Generating, Evaluating and Visualizing Construction Schedule with Geographic Information Systems [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2008, 22(4): 233-243.
- [41] Bansal V K, Mahesh Pal. Construction schedule review in GIS with a navigable 3D animation of project activities [J]. International Journal of Project Management, 2009, 27: 532-542.
- [42] Feng Chungwei, Chen Yijao, Huang Jiunru. Using the MD CAD model to develop the time - cost integrated schedule for construction projects [J]. Automation in Construction, 2009, 19(3): 347-356.
- [43] Feng C W, Chen Y J. Using MD CAD Objects to Automatically Generate A Contract - Driven Schedule [C] // Proceedings of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Tokyo, Japan, 2006.
- [44] Edward Goldberg H. The building information model is BIM the future for AEC design? [J]. CADalyst, 2004, 21(11): 56-58.
- [45] Succar B. Building information modeling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders [J]. Automation in Construction, 2009 13(3): 357-375.
- [46] Hu Zhenzhong, Zhang Jianping, Deng Ziyin. Construction process simulation and safety analysis based on Building information model and 4D technology [J]. Journal of Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(1): 266-272.
- [47] 何关培, 李刚. BIM 应用将给建筑业带来什么变化 [J]. 中国信息建设, 2010(2): 10-18.
- [48] Tulke J, Nour M, Beucke K. Decomposition of BIM objects for scheduling and 4D simulation [EB/OL] [2012-09-19]. <http://www.docin.com/p-484324377.html>.
- [49] 邓志鸿, 唐世渭, 张铭, 等. Ontology 研究综述 [J]. 北京大学学报, 2002, 38(5): 731-740.
- [50] AlesMrkela, Danije Rebolj. Automated construction schedule creation using project information model [EB/OL]. <http://itc.scinret/data/works/att/w78> [2009-01-03], 2010.

(上接第 137 页)

清澈未见浑浊物, 此时上游库水位在 2 046 m 高程, 上下游水头差约 50 m, 渗流量约 160 mL/min, 之后该部位渗流量逐渐减小, 5 月 28 日测得渗流量为 84 mL/min。为保证在高水位情况下河床灌浆廊道的正常运行, 在 6 月份通过廊道衬砌混凝土内预埋的灌浆钢管对结构缝进行了聚氨酯材料灌浆, 灌浆结束至今未再发现渗水现象, 结构缝运行正常。

## 4 结 语

毛尔盖工程河床廊道结构缝结构设计在以往类似工程的基础上进行了改进、加强, 从目前运行情况来看, 基本达到了预期的目的。但在设计、施工过程中也暴露了一些亟待解决的问题:

(1) 高鼻子的铜片止水, 在廊道顶拱弯折成圆弧必须分段进行焊接, 分段越多加工难度越小, 但出现搭接质量问题的几率就越大; 目前国内已经有一次成型的加工工艺, 但工期长、造价高, 需要专门定制。在后续工程设计、施工过程中可以对制作工艺

或其它替代止水型式进行研究。

(2) 结构缝止水结构的施工空间小, 工艺要求高, 在目前的施工方式、施工工期限制下, 很难做到精细化施工, 在后续工程施工过程中可以安排专项施工措施、专业技术人员, 精细化施工, 提高止水结构的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 郑培溪, 赵静, 崔会东, 等. 碛石大坝坝基廊道结构缝渗漏原因分析及处理效果 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(2): 72-76.
- [2] 尤士介, 袁长海, 王林, 等. 瀑布沟水电站坝基廊道结构缝渗水处理 [J]. 人民长江, 2011, 42(24): 38-40.
- [3] 朱俊高, 张富有. 毛尔盖水电站心墙堆石坝静力有限元应力应变分析研究 [R]. 南京: 河海大学, 2009.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工建筑物止水带技术规范, DL/T 5215-2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.