

南水北调穿黄隧洞工程预应力混凝土施工技术

梁 岩, 罗小勇, 万翱宙

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:在简要介绍南水北调穿黄隧洞断面结构及锚索布置的基础上,详细介绍了该隧洞衬砌施工中采用的有黏结后张法环形预应力混凝土施工工艺,具体分析了混凝土浇筑、锚索张拉、锚具槽回填、孔道灌浆等工序的施工流程、方案及施工技术。施工实践表明,南水北调穿黄隧洞工程是有黏结后张法环形预应力混凝土施工技术在我国大洞径、高水头有压输水隧洞衬砌结构工程中的又一次成功应用,完全满足对预应力控制的条件,各项指标均达到设计要求,取得了较好的效果。

关键词:穿黄隧洞工程;输水隧洞;预应力混凝土;衬砌;南水北调工程

中图分类号:TV546;TV672⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0054-05

Construction technique of circular bonded pre-stressed concrete using post-tension method in Yellow River-crossing tunnel construction in South-to-North Water Diversion Project//LIANG Yan, LUO Xiaoyong, WAN Aozhou (Institute of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on a brief introduction of the section structure of the Yellow River-crossing tunnel in the South-to-North Water Diversion Project and the layout of anchor ropes, the construction technology of circular bonded pre-stressed concrete using the post-tension method adopted in the tunnel lining construction is described in detail. The construction processes and technologies of concrete pouring, anchor rope tensioning, anchorage slot backfill, and duct grouting are also analyzed. Practice shows that, in the Yellow River-crossing tunnel project, the construction technology of circular bonded pre-stressed concrete using the post-tension method has been successfully applied to the lining construction of a pressure water conveyance tunnel with a large diameter and high head. All the indexes of the project met the design requirements, and good effects were achieved.

Key words: project of the Yellow River-crossing tunnel; water conveyance tunnel; pre-stress concrete; lining; South-to-North Water Diversion Project

预应力混凝土是 20 世纪工程结构领域的重大发明之一^[1],现有的先张法、后张法、无黏结预应力等技术在工程领域发挥着重要作用。环形预应力筋主要通过张拉变形挤压孔道壁,使隧洞衬砌混凝土形成环向预压应力,部分或全部消除水压力荷载产生的混凝土环向拉应力^[2]。环形预应力筋技术是采用高强钢丝和钢绞线以及高强混凝土为特征的高效后张预应力混凝土技术,该技术在提高混凝土结构耐久性和适应性及降低造价和维护费用等方面的优越性,使其在房屋、桥梁、隧洞等工程领域得到了广泛的应用^[3]。南水北调穿黄隧洞内衬采用的是后张法环形预应力体系,主要由无黏结预应力钢绞线、锚具及夹片组成,该预应力体系可简化隧洞内衬的施工,方便机械化施工,加快施工进度,孔道灌浆也可使预应力筋与孔道黏结,传递部分或全部预应力,同时改善结构抗裂性能,保护预应力钢筋不被锈蚀^[4]。

南水北调穿黄隧洞工程是南水北调中线一期的控制性工程,位于郑州市以西、黄河上游约 30 km 的河段上,南起荥阳市李村村西,北至河南焦作市温县陈沟村西。该工程自南向北包括南岸连接明渠、退水建筑物、进口建筑物、穿黄隧洞(含过河段隧洞和邙山段隧洞)、出口建筑物、北岸河滩明渠与北岸黏结明渠等主要建筑物^[5-6],其任务是将中线调水从黄河南岸输送到黄河北岸,向黄河以北地区供水,工程完成后将使汉江、丹江口水库的水顺利下穿黄河,通过输水工程将汉江水输送到北京、天津、河北和河南等省市,解决城市生活和工业用水问题,并改善四省

市的生态和农业用水现状^[7]。穿黄隧洞包括过河段隧洞 3 450 m 和邛山段隧洞 800 m,总长 4 250 m。隧洞断面内径 7.0 m,隧洞外层为装配式普通钢筋混凝土管片结构,厚 40 cm;内层为现浇预应力钢筋混凝土整体结构,厚 45 cm,标准仓分段长度 9.6 m,使用泥水平衡式盾构机自北向南推进。隧洞坡度由北向南由 0.2% 变为 0.1%,其中邛山隧洞由北向南设计坡度为 4.91%,在 5+623.20~5+583.963 段,用半径为 800 m 的竖曲线将过河段隧洞与邛山段隧洞相连。

1 断面结构及锚具槽布置

因穿黄隧洞为穿越黄河河床覆盖层的输水隧洞,除承受外部水土荷载外,还需承受大于 0.5 MPa 的内水压力^[8],因此采用双层复合衬砌结构,衬砌分内衬及外衬,分别承担内水压力和外部水土压力。外衬为普通装配式钢筋混凝土管片结构,厚 0.4 m;内衬为现浇钢筋混凝土整体结构,由底板平台和边拱组成,每个标准衬砌单元长 9.6 m,厚 0.45 m;中间为弹性防水垫层。隧洞底部设车行道(供施工期及后期维修过程中运输机械通行使用),宽 3.1 m,车道平台内有 3 根埋管,中间埋管直径 0.25 m,用于光纤过黄河,断面结构见图 1。锚具采用由 OVM 生产的 HM15-12 环形锚具,锚具槽为上下左右不对称间隔布置,锚具槽长 1 000 mm、宽 320 mm、深 255 mm,相邻两束锚索中心线间距 450 mm。锚具槽分布见图 2。

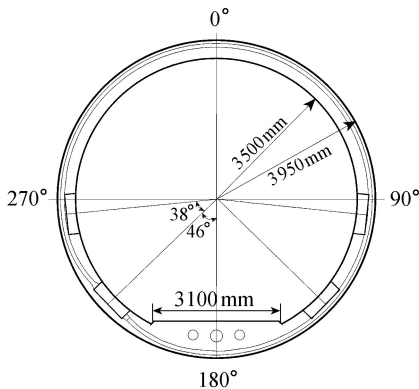


图 1 隧洞内衬断面

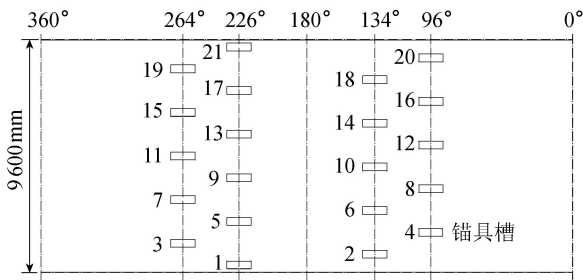


图 2 锚具槽分布

2 钢筋安装

内衬钢筋是内衬预应力混凝土的骨架,波纹管、锚具槽模板及预埋件直接固定于钢筋上,因此钢筋的安装质量和安装精度对整个工程质量控制至关重要。钢筋在工厂生产,成品钢筋通过 40 t 门吊和隧洞内的平板车运送至工作地点,这样可保证钢筋的加工精度,减少对其他工序的影响,加快施工进度并保证施工质量,同时可减少洞内的施工工序。

钢筋采用长 9.6 m 可移动式作业台车安装。边拱钢筋安装工艺流程为:测量放线定位→钢筋台车就位→钢筋外层绑扎→预埋件(波纹管、喇叭口等)安装→绑扎内层钢筋→拱顶排气管、预留槽安装。现场焊接或绑扎的钢筋网,其钢筋的交叉连接应按设计文件的规定进行。为了保证钢筋有足够的保护层,在钢筋和模板之间设置强度为 C40 的混凝土垫块,采用 1.2 m×1.2 m 梅花形布置。多排钢筋之间用短钢筋支撑以保证位置准确。边拱钢筋与外衬之间的连接通过在外衬管片手孔里设置 U 形插筋实现,内衬钢筋与 U 形插筋焊接连接,这样可保证内衬钢筋的安装精度,防止内衬钢筋笼的变形,也保证外衬和内衬通过这些剪力键有机结合为一体,共同受力。

3 波纹管安装

因钢绞线从预埋的波纹管中穿过,为了保证预应力施工顺利进行,要求波纹管安装时必须有良好的线形。波纹管安装前应按锚索曲线外形弯制样架钢筋,确保喇叭管前直线段长度和曲线段线形满足设计要求。为了使钢绞线能够顺利通过各管节接头,第 1 节波纹管架立在与锚具槽相面对的弧段上,其后管节套在前一节管节外侧面。对波纹管各管节接头、管节与拱顶排气管嘴接头以及管节与喇叭管接头均应采用防水胶带包裹,严防浇筑混凝土时渗入水泥浆,堵塞孔道。在混凝土初凝和终凝前,均采用高压风对波纹管扫孔清理,确保管内通畅,混凝土浇筑后,对锚具槽下端孔口加盖保护,严防泥水、污物、杂物进入。

4 混凝土浇筑

穿黄隧洞内衬预应力混凝土施工流程如下:手孔凿毛清理→手孔插筋焊接回填→手孔回填→排水垫层摊铺→边顶拱外层钢筋绑扎→波纹管、预埋管安装→内层钢筋、锚索槽模板及预埋管安装→钢模台车就位立模→边顶拱混凝土浇筑→拆模及混凝土养护→混凝土强度达到 100% 后回填灌浆→锚索张

拉施工→锚具槽回填→孔道灌浆。

为了增加内衬的抗渗性能,减小施工缝,隧洞内衬用混凝土整体浇筑。浇筑混凝土时采用钢模台车整体浇筑。台车模板由 1 块固定的弧形顶模、2 块活动的弧形边模、2 块活动的弧形底模组成,每块模板沿轴线方向长为 9.612 m,模板撑收由液压传动系统控制。台车上设置附着式振捣器及喂料窗口。

内衬混凝土浇筑时应左右对称分层进行,以确保两侧混凝土平行灌注,捣固采用插入式振捣器加高频低幅附着式振捣器配合进行。泵送混凝土入仓自下而上,从已灌注段接头处向未灌注方向,左右及分层对称浇筑,防止偏压使模板变形。封顶混凝土严格按规范操作,从内向模端方向灌注,排除空气,保证拱顶浇筑厚度及密实度。严格控制混凝土从拌和出料到入模的时间,当气温在 20~30℃ 时,不超过 1 h,10~19℃ 时不超过 1.5 h。严格控制混凝土的生产过程,加强振捣,增加混凝土的密实度,保证衬砌混凝土的抗渗等级达到设计要求。在混凝土振捣过程中,应注意对波纹管的保护,防止波纹管发生过大的变形或直接穿透,所用振捣棒的棒头为 5 cm,振捣波纹管两侧最小距离 15 cm,振捣波纹管上方最小距离 20 cm。混凝土浇筑施工中采用高压风对波纹管扫孔,防止水泥浆淤堵管内。

要保证混凝土浇筑质量,关键是保证混凝土质量,混凝土要有良好的和易性和足够的坍落度。为了满足设计和施工技术要求,在混凝土中添加适量外加剂,主要有上海马贝建筑材料有限公司生产的 X404 型聚羧酸减水剂、湖北省化学研究院生产的 HSPC-8A 型聚羧酸减水剂、山西黄河外加剂厂生产的 HJAE-A 型引气剂。混凝土配合比参数为:水胶比 0.36,粉煤灰掺量 20%,减水剂掺量 0.5%,引气剂掺量 0.003%。

隧道长距离运输混凝土要用搅拌车,搅拌车不断自行搅拌,防止混凝土离析,而且出料速度与泵送互相匹配。HZS90(HZS60)自动计量混凝土搅拌站生产、6 m³ 轨道式运输罐车运输、HBT60B 输送泵入模等措施保证了混凝土浇筑质量和浇筑的连续性。

5 预应力筋施工

预应力混凝土结构环向预应力筋施工流程为:锚具槽凿毛→锚束制作→锚索穿孔→锚具安装→锚索张拉锚固→锚具槽回填。

5.1 锚索制作与锚具安装

单根钢绞线的下料长度通过考虑孔道长度、锚夹具厚度、限位板厚度、弧形垫座长度、千斤顶长度、工具锚板厚度及其板外必要的安全长度后确定为

26 m。每束锚索由 12 根钢绞线编制而成。为了保证装锚时钢绞线不扭结,编束时应在每根钢绞线两端编号,钢绞线编束制作及编号如图 3 所示。成束预应力筋在编制过程中应使一端对齐,排列平顺,不得扭结,采用铅丝捆扎牢固,捆扎间距为 1.0 m,近张拉端头 2 m 以内,每隔 0.5 m 用铅丝捆扎一道。钢绞线安装采用穿束导向帽集束牵引就位。钢绞线安装时应检查钢绞线的外露端是否满足张拉要求。锚索被拉段钢绞线外露长度 800 mm,主拉段钢绞线外露长度 2 080 mm。

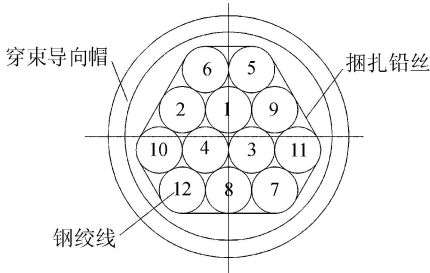


图 3 锚索结构

钢绞线安装完成后,安装锚板及夹片。为了避免在张拉时出现断丝,锚板上预应力筋的位置应对号入座,钢绞线在锚板上的安装位置如图 4 所示,不得出现预应力筋交叉现象。锚具安装时应保证被拉段长度 3~5 cm。

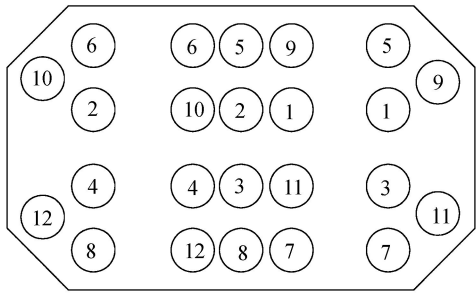


图 4 钢绞线在锚板上的安装位置

5.2 锚索张拉

当混凝土强度达 28 d 设计强度或混凝土强度达 40 MPa 时即可进行锚索张拉工作。锚索张拉以应力控制为主,同时进行变形控制。为防止锚具槽附近应力集中,相邻两束锚索的预应力差值不应超过设计值的 50%,因此施工中要求分两序张拉。根据技术规范,锚索的张拉控制力不应超过破断力的 75%,因此张拉控制力确定为 2 350 kN。

锚索张拉过程应按单根绞线预紧、整束张拉分序、同序荷载分级要求进行。为使每根钢绞线受力均匀,要对单根预应力钢绞线进行预紧,将钢绞线拉出一小段长度后,检查每根钢丝是否长度一致,如不一致应进行调整。预紧应力应为 42 kN,预紧及张拉应对称循环张拉,不得少于 2 次循环,各根预应力筋

预紧伸长值相差不超过 3 mm。预应力筋预紧受力均匀后,才能进行整束正式张拉。张拉时采用逐级加荷连续进行的方式,直至达到设计张拉力。张拉加载与卸载应缓慢、平稳、匀速,加荷速率每分钟不得大于设计张拉力的 10%,卸荷不得大于 20%。每级荷载下,持荷不应少于 2 min,最后一级持荷应不少于 5 min。张拉设备主要有千斤顶、延伸筒、偏转器、HM 工具锚(HM15-12)、油泵、HM 限位板。张拉千斤顶张拉示意图见图 5。

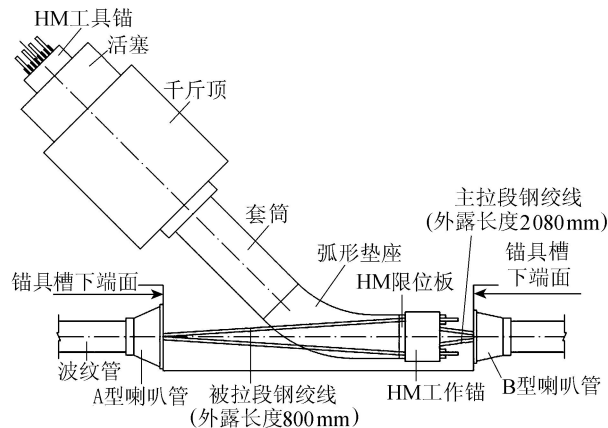


图 5 锚索张拉示意图

张拉时,左侧奇数号锚索(图 2)按 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21 顺序张拉,右侧偶数号锚索按 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 顺序张拉。张拉分 2 序进行:①第 1 序张拉。左侧奇数号锚索按序张拉后,再右侧偶数号锚索按序张拉。先对单根钢绞线预紧,预紧力为 42 kN;再对锚索整束张拉,分 2 级进行,第 1 级张拉力为 500 kN,第 2 级张拉力为 1 500 kN。②第 2 序张拉。张拉顺序与第 1 序相同,即左侧奇数号锚索按序张拉后,再右侧偶数号锚索按序张拉。锚索整束张拉分 2 级进行,第 1 级张拉力为 1 500 kN,第 2 级为 2 350 kN。

6 锚具槽回填

锚索张拉完毕使用手提砂轮机切割锚具槽外部钢绞线,进行锚具槽回填。锚具槽回填工序如下:安装注浆管嘴→封堵喇叭管口→安装止水条→回填锚具槽。锚具槽回填前要保证孔内畅通,无杂物堵塞,将孔道灌浆管嘴(图 6)插入到喇叭管内,再用砂浆封堵锚具槽两端的 A、B 型喇叭管口。在锚具槽上部的四周设置规格为 3 cm×2 cm 腻子型膨胀橡胶止水条。以上工序完成后需回填膨胀混凝土(采用微膨胀 C35 混凝土),回填时采用振动泵振捣。锚具槽回填后采用原浆收面,保持表面的平整、无缝隙,防止漏浆。锚具槽回填后需注意混凝土养护,与周边混凝土之间不得有裂缝。

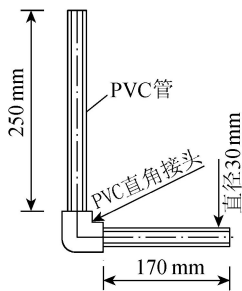


图 6 灌浆管嘴

7 孔道灌浆

锚具槽回填后,待回填混凝土达到设计强度后,尽早进行孔道真空辅助灌浆,以减少预应力损失。孔道灌浆是保证有黏结环形预应力体系耐久性的关键工序,应确保预应力钢筋与管道内壁紧密黏结,以改善构件的抗裂性能,保护预应力钢筋不被锈蚀,同时和锚具共同承担传递预应力的功能。因此孔道灌浆应该保证浆液质量满足要求,灌浆应饱满,稳压时间充足。

施工工序:①暂时关闭锚具槽灌浆管嘴 B(图 7),让锚具槽灌浆管嘴 A 接进浆管,拱顶排气管嘴接真空泵;②灌浆开始时,先启动真空泵,对孔道形成 -0.06 ~ -0.08 MPa 的真空度,接着打开进浆管阀门进浆,并施加 0.3 ~ 0.4 MPa 的灌浆压力,待拱顶排气嘴回浆后,关闭灌浆管嘴 A 和拱顶排气管嘴阀门;③锚具槽灌浆管嘴接进浆管,打开拱顶排气管嘴阀门,启动真空泵,对孔道形成 -0.06 ~ -0.08 MPa 的真空度,接着打开进浆管阀门进浆,并施加 0.3 ~ 0.4 MPa 的灌浆压力,待拱顶排气管嘴回浆后,关闭拱顶排气管嘴阀门;④对灌浆管嘴 B 继续加压进浆,延续灌注 10 min 后即可堵塞灌浆孔结束灌浆。每条孔道灌浆体积约 105 L,根据灌浆体积可判断灌浆饱满程度。

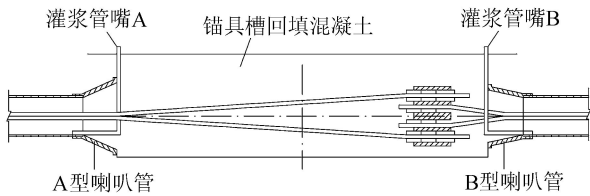


图 7 锚具槽回填示意图

8 结 语

南水北调穿黄隧洞工程采用的有黏结后张法预应力混凝土施工技术在国内外应用较少,相比同类张拉级别的清江隔河岩水电站(衬砌厚度 75 cm)^[9]、黄河小浪底水利枢纽(衬砌厚度 60 cm)^[10]有长足的进步。施工实践证明穿黄隧洞工程采用的复合预应

力混凝土衬砌结构有效解决了有压输水隧洞同时承受内外水土压力的难题,保证了隧洞顺利贯通。穿黄隧洞工程内衬预应力混凝土施工实践表明:隧洞有黏结后张法环形预应力混凝土技术工艺精湛、技术含量高,与普通混凝土相比预应力混凝土施工对混凝土浇筑质量提出了更高的要求;有黏结后张法环形预应力混凝土使衬砌混凝土原生裂缝达到了一定程度的闭合,提高了混凝土衬砌的防渗效果。穿黄隧洞工程有黏结后张法环形预应力混凝土衬砌施工中创建了一套完整的施工方案,该工程的设计思路和施工技术为今后水工隧洞衬砌结构及其他类型的结构设计提供了有益的参考。

参考文献:

[1] 江见鲸,李杰,金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[2] 晏军,曲兴辉. 大型有压输水隧洞环形高效预应力体系施工技术研究与应用[J]. 水利水电技术,2011,42(2): 46-48. (YAN Jun, QU Xinghui. Study and application of construction technology of annular high-effect pre-stressing system for pressure water conveyance tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2011,42(2):46-48. (in Chinese))

[3] 刘璇. 环形后张预应力混凝土技术在水电工程中的应用[J]. 甘肃水利水电技术,2002,38(3):195-196. (LIU Xuan. Annular post-tensioned prestressed concrete technology in the application of hydropower project[J]. Gansu Province Water Conservancy and Hydropower Technology,2002,38(3):195-196. (in Chinese))

[4] 赵顺波. 环形高效预应力混凝土技术与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2008.

[5] 罗毅,凌霄,代巧技. 南水北调中线一期穿黄工程北岸

填筑渠道设计[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(2):26-29. (LUO Yi, LING Xiao, DAI Qiaoji. Design of filling channel at north bank crossing Yellow River of South-to-North Water Diversion Middle Route Phase Project[J]. South-to-North Diversion and Water Science & Technology,2012,10(2):26-29. (in Chinese))

[6] 南水北调中线一期穿黄工程初步设计报告[R]. 郑州:黄河勘测规划设计有限公司,2004.

[7] 黄鹏. 南水北调中线一期穿黄工程穿黄隧道内衬边顶拱混凝土浇筑技术[J]. 科技风,2012(2):150-151. (HUANG Peng. South-to-North Water Diversion Middle Route Yellow River crossing project and tunnel lining arch concrete pouring technology[J]. Technology Wind,2012(2):150-151. (in Chinese))

[8] 钮新强,符志远,张传健. 穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究[J]. 人民长江,2011,42(8):9-13. (NIU Xinqiang, FU Zhiyuan, ZHANG Chuanjian. Study on structural properties of new type of composite lining in shield tunnel crossing Yellow River[J]. Yangtze River, 2011,42(8):9-13. (in Chinese))

[9] 汪健斌. 环形预应力锚束在隔河岩水电站发电引水隧洞衬砌中的应用[J]. 湖北水利发电,2004(4):54-56. (WANG Jianbing. Application of circular prestressed anchorage cables in lining of power tunnel of Geheyan Hydropower Station[J]. Hubei Water Power,2004(4):54-56. (in Chinese))

[10] 祖铁华. 小浪底水利枢纽工程排沙洞无粘结预应力混凝土施工[J]. 水利水电科技进展,2001,21(6):46-70. (ZU Tiehua. Construction of sand flushing tunnel with non-binding prestressed concrete in Xiaolangdi Project [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources,2001,21(6):46-70. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-25 编辑:熊水斌)

(上接第 53 页)

[4] 罗宗伟. 旁多水利枢纽大坝心墙碾压式沥青混凝土室内配合比设计及成果分析[J]. 四川水力发电,2011,30(增刊1):33-37. (LUO Zongwei. Laboratory mix design for roller compacted asphalt concrete in dam core of Pangduo Hydropower Project and test result analysis [J]. Sichuan Water Power, 2011,30(Sup1):33-37. (in Chinese))

[5] 向尚君,邱炽兴,赵兴安. 旁多大坝碾压式沥青混凝土心墙配合比设计[J]. 人民长江,2013,44(7):23-25. (XIANG Shangjun, QIU Chixing, ZHAO Xing’ an. Design of mix proportion of roller-compacted asphalt concrete core wall in Pangduo Hydraulic Complex [J]. Yangtze River, 2013,44(7):23-25. (in Chinese))

[6] 马智法,胡国兴,郭红娟,等. 碾压式沥青混凝土防渗心墙施工质量控制要点[J]. 东北水利水电,2009,21(5):13-14. (MA Zhifa, HU Guoxing, GUO Hongjuan, et al. Main

points of construction quality control for rolled asphalt concrete impervious core wall [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2009, 21 (5): 13-14. (in Chinese))

[7] 赵兴安,廖佼,向尚君,等. 旁多水利枢纽大坝碾压式沥青混凝土心墙现场施工模拟试验[J]. 水利科技与经济,2013,19(1):97-100. (ZHAO Xing’ an, LIAO Jiao, XIANG Shangjun, et al. Simulation experiment on construction of an earth-rock fill dam with asphaltic concrete core in Pangduo Hydraulic [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2013,19(1):97-100. (in Chinese))

[8] DL/T 5363—2006 水工碾压式沥青混凝土施工规范[S].

[9] 覃新闻,黄小宁,彭立新,等. 沥青混凝土心墙设计与施工[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

(收稿日期:2013-03-25 编辑:熊水斌)