

新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展

李江¹, 柳莹¹, 何建新²

(1. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 鉴于已建碾压式沥青心墙土石坝工程系统监测资料较少, 而部分工程运行过程中已暴露出一些问题, 如坝体与基础变形对沥青心墙的安全性影响, 大坝渗流与渗漏以及沥青心墙施工缺陷等, 因此及时进行工程建设经验和设计技术经验总结非常必要。根据新疆近30年来土石坝中碾压式沥青混凝土心墙坝建设特点及发展趋势, 新疆“高严寒、高海拔、高地震、深厚覆盖层、多泥沙”的特殊环境及水文地质条件, 梳理了碾压式沥青混凝土心墙坝的筑坝技术与应用进展, 对坝体结构分区、心墙力学性能与耐久性、砾石骨料应用、低温季节施工与层间结合技术、深厚覆盖层防渗处理技术等问题进行阐述, 总结筑坝技术已取得的成就, 提出未来技术发展展望及下一步需要研究的问题。实践表明, 在新疆山区苛刻的自然环境条件下, 百米级以上的沥青心墙坝是安全的, 只要认真总结经验、精心设计、精心施工, 未来突破150 m是完全有可能的。

关键词: 沥青混凝土心墙坝; 深厚覆盖层; 砾石骨料; 筑坝技术; 综述

中图分类号: TV641.2⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)01-0082-08

Advances in construction technologies of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang/LI Jiang¹, LIU Ying¹, HE Jianxin² (1. *Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830000, China*; 2. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China*)

Abstract: Considering that the systematic monitoring data for existing roller compacted asphalt concrete core wall dams is insufficient and some problems have been exposed for several projects during operating, such as the impacts of deformation of dam body and foundation on the safety of asphalt core wall, seepage and leakage, construction defects and so on, it is very necessary to summarize the experience of the engineering construction and design techniques for roller compacted asphalt concrete dams in time. According to the characteristics and development of roller compacted asphalt concrete core wall dams among earth and rockfill dams in Xinjiang for nearly 30 years, combined with the special environment and hydrogeological conditions of “severe freezing, high altitude, high earthquake intensity, deep overburden, and excessive sediment”, the construction technologies and applications of asphalt concrete core wall dams are summarized. Structural partitioning of the dam body, mechanical properties and durability of the core wall, application of the gravel aggregate, techniques of construction during cold weather and interlayer bonding, and techniques of seepage prevention treatment of deep overburden are reviewed. The achievements of dam construction are summarized and the technical development in the future as well as the problems for further study are proposed. Practice shows that asphalt concrete core wall dams of 100 m are safe in the severe natural environmental conditions in Xinjiang and it is absolutely possible to break through 150 m in the future with carefully summarized experience, elaborate design and meticulous construction.

Key words: asphalt concrete core wall dam; deep overburden; gravel aggregate; damming technology; review

新疆山区水库建设近年来呈现迅速发展的趋势, 根据水利发展相关规划, 2010—2030年规划建设大中型水库近百座, 其中绝大多数是山区水库。在山区水库建设过程中, 新疆高严寒、高海拔、高地震、深厚覆盖层、多泥沙等特殊条件形成了以建设当地材料坝为主的筑坝趋势^[1]。近年来沥青心墙坝发

展独树一帜, 当前正在建设中的沥青心墙坝百米级高坝有尼雅水库(坝高131 m)、大石门水库(坝高128 m)、阿拉沟水库(坝高105.26 m)、五一水库(坝高102.5 m)、吉尔格勒德水库(坝高101.5 m), 2015年开工建设的大河沿水库坝高仅为75 m, 但混凝土防渗墙最大墙深186 m, 属世界第一深墙^[2]。经过

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划科学研究重点项目(XJEDU20141016)

作者简介: 李江(1971—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程规划设计工作。E-mail: lj635501@126.com

20多年的发展,沥青混凝土心墙砂砾石坝已成为土石坝中极具竞争力的坝型,针对特殊不良环境及地质条件,在坝体结构及抗震结构设计、低温季节施工技术、层间结合技术、心墙沥青混凝土砾石骨料的应用、深厚覆盖层坝基防渗处理及坝体变形控制等方面不断取得进步,沥青心墙坝建设取得了显著的成就。

鉴于已建碾压式沥青心墙土石坝工程系统监测资料较少,沥青混凝土心墙坝检查维修较为困难,部分工程运行过程中也已暴露出一些问题,如坝体与基础变形对沥青心墙安全性的影响,大坝渗流与渗漏以及沥青心墙施工缺陷等,因此及时进行工程建设经验和设计技术经验总结是非常必要的。

笔者搜集整理了20多座已建、在建碾压式沥青心墙坝的设计和施工资料,结合笔者设计、审查、咨询中所发现的有关技术问题,尤其是业界关心的百米级以上沥青心墙坝的争论,统计分析了坝体抗震设计参数、坝坡比、心墙与过渡层厚度、沥青心墙配合比、填筑材料等设计施工试验指标,梳理了碾压式沥青混凝土心墙坝的筑坝技术与应用进展。

1 “三高一深一多”的筑坝条件

1.1 特殊的筑坝环境

新疆山区具有“高严寒、高海拔、高地震、深厚覆盖层、多泥沙”的筑坝环境,俗称“三高一深一多”,建设者在沥青混凝土心墙坝理论研究和施工技术等方面不断取得新进展,使其成为当前最具推广应用前景的当地材料坝,很多关键技术和施工工艺都有所创新。如在覆盖层厚150 m、海拔3000 m的叶尔羌河上游建成了下坂地水库沥青心墙坝(坝高78 m),属于高严寒、高海拔地区的典范工程;2013年在多年平均气温3℃的高严寒地区建成了克孜加尔沥青心墙坝(坝高64 m);拟建的尼雅水库沥青心墙坝坝高达131 m,所在河流多年平均含沙量(质量浓度,下同)高达10.9 kg/m³。该区2014年完工的定居兴牧水源工程就有15座为沥青混凝土心墙坝^[3]。

1.2 高严寒地区建坝

新疆南疆、北疆气候差异很大,在温度、湿度、风力、太阳辐射等方面有很大区别,北疆相对更加寒冷。筑坝区海拔2000 m以上的南疆山区及北疆大部分地区均处于严寒区,气候条件极其恶劣。独特的地质、水文、气候条件形成了该区“冷、热、风、干”这四大特点。以北疆富蕴县为例,“冷”主要表现为冬季气温低,持续时间长,温度低于0℃多达5个月之久,多年平均气温为2.7℃,12月至次年2月多年月平均气温在-20℃以下;“热”主要表现为夏季气温高,太阳辐

射强,蒸发强烈,持续高温期集中在6—8月;“风”主要表现为风力强劲,年平均大风日数为33 d,7月平均风速最大,为20.2 m/s,多年平均最大风速为25 m/s;“干”主要指空气干燥,相对湿度低,其中4—9月平均相对湿度低于50%。过冷、过热、大风、干燥的气候条件对工程施工及质量控制的影响是显而易见的。

1.3 高地震地区建坝

新疆及其邻区是地壳运动和构造应力场多样化的地区之一,构造运动强烈,地震频繁发生,北疆的富蕴、精河、昭苏、乌鲁木齐,南疆的乌恰、伽师、于田、库车等均是比較有名的地震频发地带。新疆地震断裂带多,大致分为三大片,即北部阿勒泰断裂带、中部帕米尔高原—天山南北地震带和南部昆仑山断裂带。20世纪,新疆发生6级以上地震102次,7级以上地震12次,其中8级大震2次^[4-5]。该区2010年在克州乌恰建成的开普太希水库(沥青心墙坝,高48.4 m)地震基本烈度达到Ⅸ度。在建的大石门水库、石门水电站、五一水库、吉尔格勒德水库等百米级以上沥青心墙坝地震烈度均为Ⅷ度^[6]。

1.4 高海拔地区建坝

在高海拔地区(一般指海拔2000 m以上)进行水利水电工程施工,其受气候、地理环境的限制因素较多,对水利工程质量控制及投资控制均带来了许多困难。因高海拔地区大气压力较低,供氧量不足,形成了低氧、寒冷、干燥、紫外线强、气候多变等特点,对作业人员的体力造成严重影响,并诱发各种高原疾病。下坂地水库坝顶海拔近3000 m,工程区地处帕米尔高原,自然条件恶劣,地质条件复杂,在认真吸取国内外类似工程成功经验的基础上,参加工程建设者们提出了符合工程实际的方案和措施,成功应对了高原气候给工程建设带来的挑战^[7-8]。

1.5 深厚覆盖层上建坝

新疆山区主要建坝河流覆盖层厚度一般为数十米至百余米,尤其在昆仑山、天山区域,河谷深切使覆盖层巨厚,如新疆下坂地水库坝址区河床覆盖层厚150 m。深厚覆盖层的存在对坝址、坝型的选择是一项巨大的挑战^[9]。深厚覆盖层坝基防渗一般多采用垂直防渗墙或倒挂井施工技术。已建的下坂地水库坝基河床覆盖层主要由冲积砂砾石层、湖积软黏土层、土砂层、冰碛及冰水积层组成,渗透系数为10⁻¹ cm/s,采用“上墙下幕”垂直防渗形式,防渗墙深85 m、厚1 m,灌浆帷幕深70 m,布置4排灌浆孔。工程建设观测资料表明,成墙质量和帷幕灌浆质量均满足设计对坝基渗流控制预期目标的要求^[10-14]。

1.6 多泥沙河流建坝

新疆中小河流较多,流程较短,纵坡较大,由于

上游植被条件差、水土流失严重,造成水流含沙量高、洪水陡涨陡落和泥沙危害等问题。南疆河流含沙量普遍较大,如叶尔羌河含沙量为 4.35 kg/m^3 ,盖孜河含沙量为 6.2 kg/m^3 ;北疆河流大多较小,阿勒泰和伊犁等地区的河流含沙量相对较小,如布尔津河含沙量仅为 0.066 kg/m^3 ,但天山北坡河流含沙量较大,如玛纳斯河含沙量为 4.35 kg/m^3 。在多泥沙河流上修建水利工程,泥沙问题往往会对工程寿命及安全运行造成极大影响。在多泥沙河流上建坝应根据泥沙特点,认真研究减少水库淤积的措施,尽可能减少进入供水隧洞(管道)及发电引水建筑物的泥沙,提高工程使用寿命。

2 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝建设及技术进展

2.1 建设进展

新疆山区早在 20 世纪 70 年代就在水利工程领域引进了沥青防渗技术,进入 90 年代,我国沥青品质显著提高,促进了沥青防渗技术的发展,沥青混凝土在新疆坝工建设中进入了一个新的历史时期。经初步统计,当前新疆沥青心墙坝已建、在建的浇筑式和碾压式沥青心墙坝近百座,表 1 统计了近年来已建和在建的 20 座碾压式沥青心墙坝工程,其中坝高大于 100 m 的就有 8 座。大石门水库沥青心墙坝坝高 128 m,是目前水利行业在建最高沥青心墙坝;正在开展前期工作的尼雅水库沥青心墙坝坝高达 131 m。百米级沥青心墙高坝的心墙变形、坝体防渗体系、坝基防渗技术等问题面临更大挑战^[12-25]。

随着工程建设的不断推进,百米级沥青混凝土力学性能研究技术、过渡层与沥青同步上升施工技术、心墙沥青混凝土砾石骨料筑坝技术、冬季低温施工技术、150 m 级超深覆盖层防渗技术不断取得突破创新,对多座水库渗漏、变形等的观测表明,沥青心墙运行情况良好。

2.2 坝体与心墙结构设计技术进展

表 2 统计了 20 座已建、在建碾压式沥青心墙坝的设计参数。工程实践表明,碾压式沥青心墙坝坝体设计与黏土心墙坝基本相同,由于沥青防渗心墙的特殊性,使得筑坝材料分区设计与黏土心墙坝、面板堆石坝相比更为容易,一般不需要设置反滤层和单独的排水体,仅需在心墙上下游设置厚 1.5 ~ 3 m 的过渡层,根据坝料级配情况,个别工程也采取了 2 层过渡层,如吉尔格勒德水库、坎尔其水库。坝体填筑材料来源也更为丰富,大多采用河床砂砾石筑坝,坝后干燥区部分利用开挖石渣料填筑。

从表 2 可知,防渗心墙厚度一般仅为 0.5 ~ 1.2 m 左右,多数以等厚度或将不同高程段进行分级厚度布置,其迎水面为直立形式;百米级高坝一般在高度上设置 3 ~ 4 个变化层次,级差 0.2 m 左右;50 m 以上的坝主要采用碾压式沥青心墙,50 m 以下的坝一般多采用浇筑式沥青心墙。心墙底部基础与混凝土基座连接一般采用台阶式放大脚形式,部分工程采用了 T 形过渡连接形式。目前新疆山区已经建设的各类沥青心墙坝基于施工方便均采取直心墙方式,还没有工程考虑轴线向上游凸起的设计形式^[13]。

表 1 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝典型工程

序号	水库大坝名称	建成年份	河流	地点	最大坝高/m	坝长/m	总库容/亿 m ³	装机容量/MW
1	尼雅水库	可研	尼雅河	民丰县	131	352	0.422	6
2	大石门水库	在建	车尔臣河	且末县	128	205	1.27	60
3	巴木墩水库	在建	巴木墩河	哈密市	128	306	0.099 6	
4	八大石水库	在建	庙尔沟河	哈密市	115.7	313	0.099	
5	石门水电站	2013	呼图壁河	呼图壁县	106	312.5	0.797 5	95
6	阿拉沟水库	在建	阿拉沟河	托克逊县	105.26	365.5	0.445	
7	五一水库	在建	迪那河	轮台	102.5	374	0.968	15
8	吉尔格勒德水库	在建	四棵河	乌苏市	101.5	345	0.61	20
9	库什塔依水电站	2014	库克苏河	特克斯县	91.1	439	1.59	100
10	奴尔水库	2015	奴尔河	策勒县	80	740	0.68	62
11	下坂地水库	2010	塔什库尔干河	塔什库尔干县	78	406	8.67	150
12	照壁山水库	2007	板房沟河	乌鲁木齐	71	121	0.075 3	
13	加那杂什水库	在建	别列则克河	哈巴河县	69	432	0.619 6	
14	二塘沟水库	在建	二塘沟	鄯善	64.8	337	0.236	
15	克孜加尔水库	2014	克兰河	阿勒泰市	64	355	1.767	5
16	坎尔其水库	2001	坎尔其河	鄯善县	51.3	320	0.118	
17	开普太希水库	2010	库孜洪河	乌恰县	48.4	195	0.099	
18	米兰河山口水库	2015	米兰河	若羌县	83	415	0.41	2.4
19	38 团石门水库	在建	莫勒切河	且末县	75.5	565	0.736 2	8
20	努尔加水库	2015	三屯河	昌吉市	81	486	0.684 4	

表2 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝典型工程设计参数

序号	水库大坝名称	地震烈度	最大坝高/m	坝长/m	顶宽/m	坝体坡比(上/下)	沥青心墙厚度/m	过渡层厚度/m	过渡层最大粒径/mm	坝体填筑材料
1	尼雅水库	Ⅶ	131	352	10	1:2.25/1:2.0	0.6~1.4	3	$D_{max} \leq 80$	堆石+砂砾石
2	大石门水库	Ⅷ	128	205	10	1:2.25/1:1.6~1:1.8	0.6~1.4	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
3	巴木墩水库	Ⅶ	128	306	10	1:2.25/1:2.01	0.6~1.2	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
4	八大石水库	Ⅶ	115.7	313	10	1:2.25/1:2.18	0.6~1.21	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
5	石门水电站	Ⅷ	106	312.5	10	1:2.2/1:2.0	0.5~1.5	4	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
6	阿拉沟水库	Ⅶ	105.26	365.5	9	1:2.2/1:2.0	0.6~1.1	3	$D_{max} \leq 60$	砂砾石+石渣利用
7	五一水库	Ⅷ	102.5	374	10	1:2.5/1:2.0	0.6~1.2	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
8	吉尔格勒德水库	Ⅷ	101.5	345	10	1:2.25~2.0/1:1.8	0.5~1.1	2+2	$D_{max} \leq 150/80$	堆石料
9	库什塔依水电站	Ⅶ	91.1	439	10	1:2.25/1:1.8	0.4~0.8	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
10	奴尔水库	Ⅷ	80	740	10	1:2.25/1:1.8	0.5~0.8	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
11	下坂地水库	Ⅷ	78	406	10	1:2.35/1:2.15	0.6~1.2	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
12	照壁山水库	Ⅶ	71	121	16	1:2.5/1:2.0	0.5~0.7	2	$D_{max} \leq 10$	砂砾石+石渣利用
13	加那尕什水库	Ⅶ	69	432	8	1:1.8/1.8	0.5~0.7	2+2	$D_{max} \leq 400/80$	堆石+砂砾石
14	二塘沟水库	Ⅶ	64.8	337	8	1:2.5/1:2.0	1.2~1.5	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
15	克孜加尔水库	Ⅵ	64	355	8	1:2.25/1:2.1~1:1.8	0.5~0.8	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石+石渣利用
16	坎尔其水库	Ⅶ	51.3	320	6	1:2.0/1:1.5	0.4~0.6	3+1	$D_{max} \leq 150/80$	砂砾石
17	开普太希水库	Ⅸ	48.4	195	10	1:3.0/1:2.0~1:2.5	0.5	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
18	米兰河山口水库	Ⅶ	83	415	10	1:2.0/1:1.7	0.5~0.8	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
19	38团石门水库	Ⅷ	75.5	565	10	1:2.5~1:2.25/1:2	0.6~1.0	2	$D_{max} \leq 80$	砂砾石
20	努尔加水库	Ⅷ	81	486	10	1:2.5/1:2.0	0.4~0.7	3	$D_{max} \leq 80$	砂砾石

注:表中部分水库设计了2层过渡层,M+N代表设计为2层; D_{max} 为过渡层最大粒径。

2.3 心墙力学性能与耐久性研究进展

尽管新疆沥青心墙坝发展极为迅速,但也存在不少问题,尤其是百米级以上沥青心墙高坝的建设争论不休,150 m级目前还处于研究阶段。新疆地处气候干燥炎热区,冬季漫长,有效施工期较短,已经建设的近百座沥青心墙坝,目前还没有发现因为心墙变形而导致的坝体渗水、漏水问题。表3统计了13座已建典型碾压式沥青心墙坝的沥青混凝土力学参数,从表3可知,最大骨料粒径19~20 mm;级配指数多在0.38~0.40之间;填料量多在11%~13%之间;油石比多在6.6%左右。早期修建的沥青心墙坝大多采用灰岩骨料,近年来由于砾石骨料开采加工方便,造价相对较低,部分沥青心墙坝采用了砾石骨料,且已建工程还未发现由砾石骨料配制的沥青混凝土出现质量问题,其应用正不断向百米级高坝突破。从已建的坎尔其水库、石门水电站等工程的渗漏及变形等观测资料分析得出心墙运行性态良好^[1]。

针对沥青心墙坝坝体的变形情况和抗震要求,需要进行心墙与坝体的相互作用研究,为选择沥青混凝土配合比提供依据。对百米级高坝而言,沥青心墙在坝体中的稳定至关重要,如果心墙稳定性能不佳,变形过大,则可能会导致心墙结构发生较大变化,影响其抗渗性能。碾压式沥青混凝土变形模量较大,强度较高,易于维持自身稳定,但过大的变形模量对承受地震动作用不利^[13]。

2.4 砾石骨料应用研究进展

新疆天然砾石分布范围广,多数属非碱性岩石,在心墙沥青混凝土中充分使用天然砾石骨料成为水利界关注的热点。多个工程的研究成果表明:沥青混凝土心墙与沥青混凝土路面工作性状不同,没有交通荷载的往复剥蚀和强烈的风化作用^[15];砾石骨料与沥青黏附性虽差,但通过掺加抗剥落剂等工程措施可有效改善沥青混凝土的水稳定性^[16]。

五一水库大坝围堰心墙沥青混凝土采用砾石骨

表3 新疆典型碾压式沥青混凝土力学性能

工程名称	油石比/%	填料用量/%	密度/(kg·cm ⁻³)	孔隙率/%	拉伸		压缩		弯曲				抗剪	
					强度/MPa	对应应变/%	强度/MPa	对应应变/%	强度/MPa	对应应变/%	强度/MPa	对应应变/%	强度/MPa	对应应变/%
五一水库	6.6	12	2.422	1.2	0.887	1.38	4.002	5.20	1.513	2.54	4.33	2.12	0.37	25.4
	6.9	14	2.414	1.21	0.779	1.32	3.384	6.87	1.225	4.18	6.98	3.49	0.25	26.9
米兰河山口	6.6	13	2.429	1.19	0.79	1.21	2.75	6.41	1.35	3.19			0.18	28.5
	6.9	13	2.419	1.29	1.03	1.12	2.84	7.36	1.74	3.08			0.17	28.0
照壁山水库	6.8	13	2.40	1.54	0.85	1.35	3.12	5.58	1.66	4.70	7.80	3.90	0.47	29.0
坎儿其水库	6.3	10	2.44		0.51	1.27	3.85	5.82	0.71	3.79			0.35	31.7
	6.6	11	2.44		0.55	1.74	3.62	7.99	0.50	4.65			0.28	28.4
克孜加尔水库	6.9	14	2.44	0.45	1.30	2.12	3.02	6.30	2.64	3.60	5.99	3.00	0.21	29.8
	6.9	14	2.42	1.11	1.25	2.20	2.91	7.02	2.63	3.86	6.44	3.22	0.22	33.5
下坂地水库	7.5	13	2.36	2.14	0.72	1.23	3.76	4.78	2.39	2.90	4.80	2.40	0.34	25.6
	7.2	13	2.37	2.21	0.92	1.05	3.89	4.84	2.32	2.20	3.60	1.80	0.32	26.1
开普太希水库	7.0	14	2.42	1.08	0.94	1.15	2.93	5.85	1.55	2.93	4.89		0.36	25.2
	7.0	14	2.42	1.07	1.04	1.22	2.88	7.58	2.49	3.54	5.90		0.34	25.3
八大石水库	6.6	11	2.42	0.90	0.59	1.60	2.82	4.04	1.22	5.67	5.67	2.83	0.54	28.2
阿拉沟水库	6.6	14	2.43	0.09			2.31	6.51	1.22	5.64	5.64	2.82	0.58	27.2
38团石门水库	6.7	13	2.41	0.90			2.55	2.92	2.55	4.10	4.10	2.05	0.54	28.2
二塘沟水库	7.2	16	2.368	1.00			2.10	6.30	0.90	5.96	5.96	2.98	0.39	26.8

料,以水泥作填料又兼作提高骨料黏附性的措施,通过恶化试验条件的方法(如延长浸水时间、提高浸水温度、增加冻融次数等)系统地评价了水泥对心墙沥青混凝土水稳定性的改善作用^[17]。近期建设的乌苏市特乌勒水库(最大坝高65 m)、吉木萨尔县水溪沟水库(最大坝高55.3 m)、呼图壁县齐古水库(最大坝高50.0 m)及青河县喀英德布拉克水库(最大坝高59.6 m)均应用了五一水库的研究成果。

策勒县奴尔水库心墙沥青混凝土采用了破碎砾石骨料,针对填料进行了更为深入的研究:对天然砂砾石作为沥青混凝土骨料进行了沥青混凝土的水稳定性、间接拉伸、小梁弯曲、单轴压缩、渗透、静三轴、动三轴及耐久性试验。研究表明:①采用新疆克拉玛依90号及库车90号沥青、以呈酸性的天然砂砾石(碱度模数 $M=0.21$)为骨料,推荐的沥青混凝土配合比的各项物理力学指标能够满足碾压式沥青混凝土心墙的技术要求;②掺加抗剥落剂的破碎砂砾石骨料沥青混凝土长期耐久性能与灰岩骨料沥青混凝土接近;③当酸性填料替代灰岩填料掺量增加到6%时,抗弯强度及挠跨比下降幅度明显增大,对沥青混凝土受拉应力情况下的耐久性能有不利影响,施工过程中需要严格控制。表4给出了奴尔水库不同酸

性填料用量下沥青混凝土各级矿料的质量百分比,从中可以看出,酸性填料增加,则抗剥落剂掺量也相应增加,考虑施工的波动性,为保证工程施工质量,加快施工进度,抗剥落剂掺量统一采用0.5%^[18]。

2.5 低温季节施工与层间结合技术进展

针对新疆地区冬季气候条件低温、多雪、大风及早晚温差较大的特点,研究表明碾压式沥青心墙在配合比和施工工艺上采取一定的措施后可在低温条件下施工,不仅可以缩短工程建设时间,而且可以提前发挥经济和社会效益。近几年建设的下坂地水库、克孜加尔水库、阿拉沟水库、库什塔依水电站沥青心墙坝在快速筑坝、心墙与坝体冬季施工、层间结合关键技术研究上取得了长足进步,沥青自动化控制拌和站、过渡料与心墙联合摊铺设备以及先进的检测手段得到成功应用。

阿拉沟水库工程为满足施工期防洪度汛高程要求需适当延长施工工期,对适合低温季节施工的沥青混凝土配合比进行了研究,并对心墙沥青混凝土低温施工(最低温度达到-17℃)的结合面温度控制进行了相关试验,通过现场钻取芯样的试验结果分析,沥青混凝土各项物理、力学性能指标均满足规范要求,为寒冷区碾压式沥青混凝土心墙的施工提供了

表4 奴尔水库不同酸性填料用量下沥青混凝土各级矿料的质量百分比

编号	级配指数	沥青质量百分比/%	抗剥落剂掺量/%	各级矿料质量百分比/%						
				19~13.2 mm	13.2~9.5 mm	9.5~4.75 mm	4.75~2.36 mm	2.36~0.075 mm	<0.075 mm 酸性 灰岩	
NT-9-1	0.39	6.7	0.3	13.2	10.4	18.0	13.9	32.5	2	10
NT-9-2	0.39	6.7	0.5	13.2	10.4	18.0	13.9	32.5	3	9
NT-9-3	0.39	6.7	0.5	13.2	10.4	18.0	13.9	32.5	6	6

依据^[19]。随后库什塔依水电站在环境温度-16~-5℃、风力3级的极端寒冷气候条件下,以碾压式沥青混凝土室内-25℃条件下配合比试验研究为基础,进行了室内外的各项试验研究工作。为满足冬季施工要求,配合比中沥青含量有所增加,但增幅不大,其他配合比参数不变。结果表明:沥青心墙上、下层面结合良好,结合面和非结合面的密度均匀,防渗性能满足规范要求^[20]。

2.6 深厚覆盖层坝基防渗处理技术进展

新疆山区深厚覆盖层坝基防渗一般采用垂直防渗墙或倒挂井施工技术。对于大多数大坝工程,一般均采用防渗墙至基岩,基岩下再接帷幕进行基础防渗处理,如吉尔格勒德水库、二塘沟水库、奴尔水库等。下坂地水库坝基覆盖层深达150 m,受当时施工技术的限制,经研究采用了防渗墙(85 m)和帷幕灌浆(70 m)组合的防渗形式。大河沿水库坝基防渗墙设计最大深度186 m,可参照的实例甚少,目前建成的是西藏旁多水利枢纽工程158 m防渗墙(试验段201 m)。大河沿水库大坝防渗线总长度711 m,两岸坡采用混凝土防渗墙结合帷幕灌浆防渗,河床深厚覆盖层采用封闭式混凝土防渗墙防渗方案。帷幕灌浆采用单排,孔距2 m,深入5 Lu线以下5 m;混凝土防渗墙厚度1 m,深入下部基岩1 m,最大墙深186 m。

通过对国内外深厚覆盖层上建坝经验、防渗方案比选和有关计算分析,大河沿水库大坝采用沥青混凝土心墙砂砾石坝、坝基深厚覆盖层采用封闭式防渗墙防渗方案是可行的。与帷幕灌浆、高压旋喷等覆盖层基础处理措施相比,混凝土防渗墙适应各种地层的变形能力较强,防渗性能好。通过对坝址区三维渗流分析可知,坝址区渗流场的分布规律明确,浸润面在沥青混凝土心墙上下游形成突降,防渗效果显著^[21]。

3 未来技术展望

3.1 心墙与过渡料的相互作用

沥青心墙的刚度小于坝壳料和过渡料的刚度,心墙的渗透系数在 10^{-8} cm/s数量级,具备低透水性,所有这些因素均将导致在防渗心墙中产生拱效应,甚至发展为水力劈裂。随着新疆山区沥青混凝土心墙坝的迅速发展,众多的百米级大坝正在兴建,其最高者已达130 m(尼雅水库、巴木墩水库等),随着坝高的增加,拱效应作用更强烈,产生水力劈裂风险的可能性更大。长江科学院的研究表明^[13],作为大坝防渗体,沥青混凝土心墙的安全稳定和完整至关重要,安全稳定的关键是确保心墙和过渡料之间

的变形协调,防止附加压应力过大导致心墙防渗性能降低。

当前新疆山区正在结合吉尔格勒德水库、大石门水库、尼雅水库的建设,通过试验求取各模型的计算参数,利用多种应力-应变模型对依托工程进行计算分析,并对安全检测资料进行对比,以进一步评价心墙与过渡料的相互作用。

3.2 配合比及高应力条件下的材料性状

沥青混凝土的工程性质完全取决于其材料配合比,它又控制着沥青混凝土心墙的工作性状。但其力学指标(如小梁弯曲、抗压强度等)是在确定了配合比以后的试验“记录值”,当前并没有将其作为沥青混凝土配合比设计时的控制指标,在研究沥青心墙的工程性状时也无直接使用意义。这种情况显然不符合作为受力材料的沥青混凝土的要求。为此,需要研究配合比对沥青混凝土工程性质的影响以及沥青混凝土在高应力条件下的材料性状,在坝高不断增加的趋势下,沥青混凝土材料的各项参数对大坝应力-应变的影响程度需要进一步试验研究^[13]。

3.3 长期水稳定影响机制

现行规范规定,当沥青混凝土采用酸性骨料时,必须进行试验研究和论证。室内外试验和实践结果表明,采用消石灰等对酸性骨料处理后,骨料与沥青的黏附性显著增强,长期水稳定性满足规范要求。采用天然砂砾石作为骨料的工程其运行工况尚未见到有异常情况的报道。水工沥青混凝土中沥青含量高于公路沥青混凝土,渗透系数很小,水分进入沥青混凝土内部的可能性极小,再加上合理选择矿粉种类、抗剥离剂等,使用酸性骨料和天然砂砾石作为水工混凝土的骨料是可行的,但需要注意填料成分对沥青混凝土力学性能的影响^[17]。

通过五一水库、奴尔水库的应用研究,尼雅水库等百米级以上的高坝还需进一步研究骨料颗粒界面与沥青黏附强度试验,探明砾石骨料与沥青的黏附性规律,提出增强骨料黏附性的工程措施和评价依据;通过沥青混凝土水稳定性试验,探索采用天然砾石骨料的沥青混凝土在高水头长期作用下的水损坏作用机制,完善心墙沥青混凝土长期水稳定性的评价方法。

3.4 建基面灌浆廊道的设置

早期的百米级沥青心墙坝均考虑设置底部灌浆廊道:一是方便灌浆施工;二是便于检修。当前新疆山区修建的下坂地大坝设置了灌浆廊道,其他百米级以上高坝均没有考虑。在深厚覆盖层上修建沥青心墙坝,如果采用悬挂式防渗墙加帷幕灌浆方案,由于复杂的河谷地形及上部坝体自重与水压力的作

用,可能不利于混凝土防渗墙墙体与沥青混凝土心墙的受力条件,为了保证施工工期则需要在防渗墙上设置专门的灌浆廊道,但设置廊道可能存在由于防渗墙复杂的变形分布使得廊道受力条件恶化的问题^[10]。因此对于百米级高坝是否设置灌浆廊道应引起足够重视。

3.5 150 m 级高坝建设展望

已经建设的土耳其 Cetin 坝,坝高 165 m,为世界最高的沥青心墙土石坝,埃塞俄比亚 Zarema 坝坝高 152 m,是当地第一座沥青心墙坝。我国在建的最高沥青心墙坝为四川硕曲河去学水电站大坝,坝高 165.2 m,受地形条件限制,底部狭窄河槽设置了重力式基座,心墙最大高度为 132 m,在建的新疆大石门沥青心墙坝坝高 128 m。

目前新疆山区新建和待建工程多位于偏远高山峡谷,工程地形地质条件复杂,自然环境较为恶劣,选定坝址多分布有丰富砂砾石、堆石料源,两岸具备布置泄洪建筑物条件。经多种坝型枢纽布置比选论证,考虑到混凝土面板和沥青防渗土石坝施工质量控制与工艺日趋成熟,两种坝型的比较引起各方的高度关注。沥青混凝土心墙土石坝在设计方案比选中已成为一种竞争性很强的坝型,已具备了开展大规模建设沥青混凝土防渗工程的基础和条件。相信在各方的共同努力下,150 m 级高沥青混凝土心墙坝的建成指日可待。

已建工程运行情况表明,坝高 100 m 级以下的沥青混凝土心墙土石坝已具备较为成熟的设计施工经验;对 100 ~ 150 m 级的高坝应认真设计和注重施工质量环节控制,对具有深厚覆盖层基础的高坝应充分考虑地基变形对心墙和坝体变形的影响。鉴于沥青混凝土材料物理力学性质的复杂性,坝高大于 150 m 的高坝沥青混凝土材料的变形与蠕变性能、破坏机理及施工应用技术仍处于进一步研究和发展阶段,尚缺乏较系统的安全评价指标。

4 结 语

多年来,新疆沥青心墙土石坝的建设取得了丰硕的成果,建设数量多达百余座,仅规划及在建百米级以上的就有 8 座,尼雅水库、大石门水库沥青心墙坝均属国内水利行业最高坝,这些工程的建设有力地推动了水利行业沥青心墙土石坝的发展与进步^[22]。但这些技术进步绝不是随意“拍脑门”得来,均是在大量科学研究、反复实践、稳步推进基础上取得。在这些新技术的应用和推广中,仍存在一定疑虑需要认真对待。

a. 百米级沥青心墙防渗体是大坝防渗的核心,

个别工程出现过心墙底座或坝肩结合部位的渗水问题,笔者曾处理过一个心墙底部漏水的工程,坝高仅 30 m,采用了坝顶灌浆的措施。由于高坝心墙检修极为困难,更应加强心墙底座与坝基防渗或坝肩防渗结合部位的设计施工,确保工程安全。

b. 出于对“廊道必裂”的认识,大多数沥青心墙坝底部一般不设检修廊道,这就造成了一旦坝基防渗墙或心墙底座与防渗墙结合部位出现问题,难以检修。对于沥青心墙坝底部基座廊道设置问题,建议进一步研究。

c. 新疆山区水库大多有丰富的砂砾石料即砾石骨料,研究表明,这些骨料大多呈中性或略偏酸性,而传统的灰岩骨料一般来自水泥厂或自行加工开采,投资增加较多,建议认真研究砾石骨料特性,尤其是当填料中酸性石粉含量较多时,应从黏附性角度考虑掺加抗剥离剂的处理措施。

d. 实践表明,在新疆山区苛刻的自然环境条件下,百米级以上的沥青心墙坝是安全的。目前正在建设 2 座 130 m 量级的沥青心墙坝,只要认真总结经验、精心设计、精心施工,未来突破 150 m 是完全有可能的。但国内外百米级沥青心墙高坝监测资料较少,心墙变形与大坝协调变形仍缺乏足够的说服力,这也是沥青心墙坝难以突破 150 m 的原因。为打消业界对高土石坝采用沥青心墙坝的疑虑,建议深入研究高震区基于心墙变形条件下的坝料分区设计及坝体协调变形问题。

参考文献:

- [1] 邓铭江,于海鸣. 新疆坝工建设[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 李江,黄华新,柳莹. 大河沿水库坝基深厚覆盖层防渗形式研究[C]//关志诚. 土石坝工程:面板与沥青混凝土防渗技术论文集. 北京:中国水利水电出版社,2015:395-404.
- [3] 邓铭江,李湘权,李江,等. 定居兴牧水源工程及技术支持[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [4] 岳跃真,郝巨涛. 水工沥青混凝土防渗技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [5] 高国英,聂晓红,龙海英. 近期新疆震源机制解与地震活动特性研究[J]. 西北地震学报,2012,34(1):57-63. (GAO Guoying, NIE Xiaohong, LONG Haiying. Study of Xinjiang Earthquake origin mechanism and seismic activity characteristic recently[J]. Northwest Earthquake Journal, 2012,34(1):57-63. (in Chinese))
- [6] 宋和平. 论新疆深大断裂特征与地震的关系(3) [J]. 内陆地震,2006,20(3):198-210. (SONG Heping. Expound the Relation of Xinjiang Huge Fracture Characteristic with Earthquake (3) [J]. Inland

- Earthquake, 2006, 20(3):198-210. (in Chinese))
- [7] 覃新闻,黄小宁,彭立新,等. 沥青混凝土心墙坝设计与施工[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [8] 姚机栋,巴合提瓦尔·马苏尔. 沥青混凝土心墙坝在大地震烈度、高寒地区的建设综述[J]. 水利水电技术, 2012, 43(10): 54-57. (YAO Jidong, PARHARTIVOR M. Summary of asphaltic concrete core wall dam construction in hard seismic intensity and high cold region [J]. Water and Hydropower Technology, 2012, 43(10): 54-57. (in Chinese))
- [9] 党林才,刘荣丽,王仁坤. 利用覆盖层建坝的实践与发展[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [10] 朱晟,林道通,胡永胜,等. 超深覆盖层沥青混凝土心墙坝坝基防渗方案研究[J]. 水力发电,2011,37(10): 31-34. (ZHU Sheng, LIN Daotong, HU Yongsheng, et al. Study for dam base seepage control plan of asphaltic concrete core wall dam with extra thick cover [J]. Hydropower, 2011, 37(10): 31-34. (in Chinese))
- [11] 丁树云,毕庆涛. 深厚覆盖层上沥青混凝土心墙土石坝的应力变形特征[J]. 水力发电,2011,37(4),43-46. (DING Shuyun, BI Qingtao. Stress deformation characterization of asphaltic concrete core wall dam on thick overburden layer [J]. Hydropower, 2011,37(4): 43-46. (in Chinese))
- [12] 郝巨涛. 国内沥青混凝土防渗技术发展中的重要问题[J]. 水利学报,2008,39(10):1213-1219. (HAO Jutao. Important problems for asphaltic concrete seepage control technology development internal[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2008, 39(10): 1213-1219. (in Chinese))
- [13] 饶锡保,程展林,谭凡,等. 碾压式沥青混凝土心墙工程特性研究现状与对策[J]. 长江科学院院报,2014,31(10):51-57. (RAO Xibao, CHENG Zhanlin, TAN Fan, et al. Status and methods of rolled asphaltic concrete core wall project features study [J]. Changjiang Academy of Sciences Journal, 2014, 31(10): 51-57. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国水利部. SL501—2010 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [15] 张应波,王为标,兰晓. 土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适应性研究[J]. 水利学报. 2012,43(4):460-466. (ZHANG Yingbo, WANG Weibiao, LAN Xiao, et al. Adaptability study for acid sand-gravel aggregate used in earth-rock dam asphaltic concrete core wall [J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2012, 43(4): 460-466. (in Chinese))
- [16] 何建新,朱西超,杨海华. 采用砾石骨料的心墙沥青混凝土水稳定性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(11):109-112. (HE Jianxin, ZHU Xichao, YANG Haihua, et al. Water stability experimental study for asphaltic concrete in gravel aggregate core wall [J]. China Rural Water and Hydropower Journal, 2014(11): 109-112. (in Chinese))
- [17] 杨耀辉,宋建鹏,何建新,等. 沥青混凝土水稳定性影响分析[J]. 新疆农业大学学报,2016,39(6):495-499. (YANG Yaohui, SONG Jianpeng, HE Jianxin, et al. Water stability influence analysis for asphaltic concrete [J]. Xinjiang Agriculture University Journal, 2016, 39(6): 495-499. (in Chinese))
- [18] 长江科学院,新疆奴尔工程沥青混凝土心墙应用天然砂砾石试验报告[R]. 武汉:长江科学院,2016.
- [19] 何建新,伦聚斌,杨武. 碾压式沥青混凝土越冬层面结合工艺研究[J]. 水利水电技术,2016,47(11):48-51. (HE Jianxin, LUN Jubin, YANG Wu. Study for rolled asphaltic concrete bedding-plane binding process in winter [J]. Water and Hydropower Technology, 2016, 47(11): 48-51. (in Chinese))
- [20] 朱西超,何建新,凤炜. 上层恒温下层变温浇筑时碾压沥青混凝土心墙结合面劈裂抗拉试验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 77-80. (ZHU Xichao, HE Jianxin, FENG Wei. Slitting tensile test study for rolled asphaltic concrete binding-plane with casting upper temperature constant and lower temperature variation [J]. Hydropower and Energy Science, 2014, 32(6): 77-80. (in Chinese))
- [21] 李江,钟世华,柳莹. 新疆尼雅水库坝型选择及高沥青心墙坝可行性研究[C]//关志诚. 土石坝工程:面板与沥青混凝土防渗技术论文集. 北京:中国水利水电出版社,2015:405-413.
- [22] 李江,李湘权. 新疆特殊条件下面板堆石坝和沥青心墙坝设计施工技术进展[J]. 水利水电技术,2016,47(3):2-8. (LI Jiang, LI Xiangquan. Technical advances in design and construction of concrete face rock-fill dam and dam with asphalt concrete core-wall under special condition in Xinjiang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(3): 2-8. (in Chinese))
- [23] 何建新,杨武,杨耀辉,等. 水泥填料对心墙沥青混凝土长期水稳定性的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):59-62. (HE Jianxin, YANG Wu, YANG Yaohui, et al. Influence of cement filler on long-term water stability of core wall asphalt concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 59-62. (in Chinese))
- [24] LIU Sihong, WANG Liujiang, WANG Zijian, et al. Numerical stress-deformation analysis of a cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 219-226.
- [25] CHEN Shengshui, FU Zhongzhi, WEI Kuangming, et al. Seismic responses of high concrete face rockfill dams: a case study [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 195-204.

(收稿日期:2017-10-13 编辑:骆超)