

卡拉贝利水利枢纽工程止水结构抗震性能研究

王长征 哈德尔·阿布都哈力克 贾兴龙

新疆维吾尔自治区塔里木河流域库尔干水利枢纽工程建设管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6789

[摘要] 本研究通过应用抗疲劳耐久性试验机,采取物理模型试验,开展了卡拉贝利水利枢纽工程止水结构在地震作用下的抗震性能评估。结果显示,工程采用的表层止水体系和底部铜止水结构均展现了良好的抗震能力,验证了设计方案的合理性,为同类工程提供了重要的参考依据。

[关键词] 卡拉贝利水利枢纽; 止水结构; 抗震性能; 物理模型试验

中图分类号: TV640.34 文献标识码: A

Research on the Seismic Performance of the Waterstop Structure in the Kalabeili Water Control Project

Changzheng Wang Hadeer·Abuduhalike Xinglong Jia

Kurgan Water Control Project Construction Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] This study conducted a seismic performance evaluation of the waterstop structure in the Kalabeili Water Control Project under seismic action by employing a fatigue-resistant durability testing machine and performing physical model tests. The results demonstrate that both the surface waterstop system and the bottom copper waterstop structure adopted in the project exhibit good seismic performance, verifying the rationality of the design scheme and providing an important reference for similar projects.

[Key words] Kalabeili Water Control Project; Waterstop structure; Seismic performance; Physical model testing

前言

新疆地处我国西北,属于干旱和半干旱地区,水资源分布极不均匀。合理调配和利用水资源,特别是跨流域调水工程的建设与维护,是新疆水利工作的重点。卡拉贝利水利枢纽工程是新疆重点水利工程,主要作用为防洪、灌溉,该项目建设对促进当地经济发展具有重要意义。与此同时新疆地震多发,其地震特点为频度高、震级大、范围广。2024年乌什县爆发7.1级地震,专家据此推测天山地震带将进入新的地震活跃期。水利枢纽工程在地震活跃区域面临着严峻的考验,大坝震损预防成为大坝结构设计与管理中的重点。在水利枢纽工程中,止水结构承担着极为关键的任务,其主要功能是防止水体在结构缝隙渗出或泄漏,从而确保水利工程的密封性。在大坝与基础的连接部位,止水结构的有效性直接关系到整个工程的安全性与稳定性。

地震作用可能引发止水材料的变形、破坏,以及止水结构与周边结构连接的松动等问题。一旦止水结构在地震作用下破坏失效,将会导致渗流量增加,进而影响大坝的整体稳定性,甚至引发更为严重的工程事故。工程区地震活动频繁,抗震设防烈度高,因此研究其止水结构的抗震性能具有重要的现实意义。目前,针对水利枢纽工程止水结构抗震性能的研究还相对较少,这使

得此类工程在面临地震风险时存在不确定性。郇能惠等对混凝土面板堆石坝的接缝止水试验,提出接缝止水应力应变性状计算方法。窦向贤提出在堆石坝合理位置选择部分压性垂直缝设置膨胀橡胶复合沥青木板,吸收地震荷载能量。涂江静在砼面板坝设计中,采取塑性填料下设波浪形橡胶止水带的方案,以减小周边缝位移,增强其在地震作用下的适应性。通过试验评估卡拉贝利水利枢纽工程表层止水与底部铜止水结构的抗震性能,以确保工程在地震多发区的安全性,且为类似工程的止水结构设计提供参考。

1 工程概况

卡拉贝利水利枢纽工程位于喀什和克州交界处的中低山丘陵地带,是拦截克孜河径流的主要枢纽工程。大坝为混凝土面板砂砾石坝,最大坝高92.5m,坝顶长度760.7m,库容2.62亿 m^3 ,坝址区地震基本烈度为VIII度,地震设防烈度为9度。本工程场地按照基准期50年超越概率2%及100年超越概率2%的基岩地震动水平向峰值加速度为375.1gal、424.4gal。大坝表层止水体系采用8mm厚的GB复合三元乙丙盖板;止水铜片采用紫铜片T2M型加工,具有良好的耐腐蚀性和延展性,从而具备较强的变形适应能力。其中垂直缝采用W1型复合铜止水,周边缝采用F型复合铜止水。

2 表层止水体系抗震性能分析

为确保表层止水的抗震安全,根据工程场地地震特征,开展表层止水体系的抗震试验研究。试验采用柔性填料与传统橡胶盖板止水结构、涂覆型柔性盖板止水结构的不同组合,通过不同方案的对比试验,获取震后材料变形情况,以评价表层止水结构抗震特性。

2.1 试验方法

为了校核表层止水在地震过程中的可靠性,采用专门研制的抗疲劳耐久性试验机,通过调整振动机振动频率,进行止水结构的疲劳性能试验。根据卡拉贝利大坝止水设计,橡胶盖板采取8mm厚的GB复合三元乙丙盖板;根据梨园大坝、太湖水库大坝工程实践经验,涂覆型柔性盖板采取4mm聚脲复合两层胎基布。

2.2 模拟地震参数选择

试验采用卡拉贝利场地谱地震波,工况设置见表1。

表1 计算工况

工况	水平向峰值加速度/gal	超越概率	地震波
工况1	375	50年2%	场地谱
工况2	424	100年2%	

其中,场地谱50年2%下的地震加速度时程曲线见图1~图3。由图可知,地震加速度时间大概持续30s,本次试验取3倍时间,即90s开展试验研究。

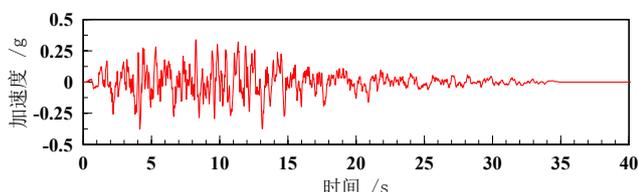


图1 顺河向地震加速度时程(场地谱50年2%)

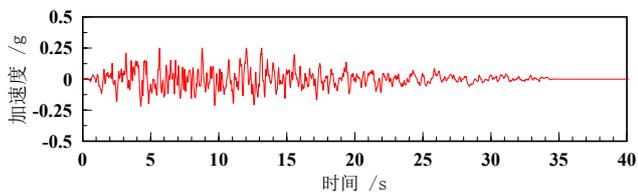


图2 竖向地震加速度时程(场地谱50年2%)

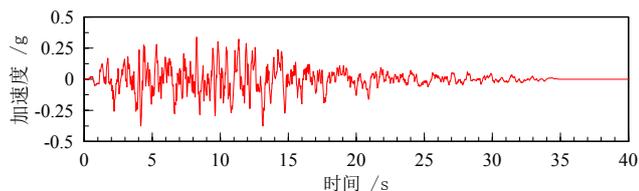


图3 坝轴向地震加速度时程(场地谱50年2%)

2.2.1 振幅选择

大坝的极限抗震能力能达到0.50g。将试验机输入不同地震

峰值加速度(0.43g、0.50g、0.55g、0.60g),观测周边缝及垂直缝最大位移,结果如下表。

表2 震后大坝缝的变形极值

地震峰值加速度	周边缝最大位移(cm)				垂直缝最大位移(cm)			
	剪切	沉陷	张开	压缩	剪切	沉陷	张开	压缩
0.43g	3.82	3.22	3.66	0.04	2.35	0.61	3.24	1.05
0.50g	4.48	3.57	4.28	0.06	2.71	0.72	3.81	1.15
0.55g	5.07	4.02	4.65	0.06	2.98	0.8	4.3	1.2
0.60g	5.56	4.46	5.01	0.07	3.21	0.88	4.75	1.26

0.43g比较接近复核地震峰值加速度424gal,其试验结果可用于估算在工况2条件下大坝面板接缝的永久变形。该工况下测得周边缝的最大张拉位移36.6mm、最大沉陷位移32.2mm、最大剪切位移38.2mm,所以模拟工况2条件,振幅取值40mm。当坝体处于极限抗震工况下,即0.50g峰值加速度时,周边缝的最大张拉位移42.8mm、最大沉陷位移35.7mm、最大剪切位移44.8mm。模拟极限工况条件,振幅取值45mm。

2.2.2 频率选择

基于中国水利水电科学研究院针对新疆吉林台一级面板坝止水抗震研究,得出对于张开位移和剪切位移,频率为0.88Hz下的幅值较大;对于沉陷位移,频率为1.46Hz下的幅值较大。在云南小湾拱坝铜止水抗震研究项目中,采用振幅为50mm,频率分别为1Hz、5Hz、8Hz振动,开展铜止水的抗疲劳耐久性试验,得出试件发生疲劳破坏所经历的振动次数随频率的增大而增加的结论。得出1Hz频率下,试件发生疲劳破坏经历的振动次数最少,为最不利条件。基于以上试验经验,本次疲劳性能试验采用振动频率为1Hz。本次试验中,振幅取值45mm,频率取值1Hz,振动时间取值90s。

2.3 试验结果

通过对传统橡胶盖板结构与涂覆型柔性盖板结构试件开展疲劳性能试验,结果表现为:在振幅45mm、频率1Hz、振动时间90s条件下,二组均未破坏,止水结构处于安全状态。大坝表层止水体系采用8mm厚的GB复合三元乙丙盖板满足工程抗震需求。

3 底部铜止水结构抗震性能分析

铜止水作为大坝的关键防水构件,在长期服役过程中需适应由水压、温度变化以及不可预测的地震活动所引起的变形,以保障大坝结构的稳定性和安全性。研究针对铜止水的铜鼻子部分,开展外防护与内隔离措施进行实验研究、分析与对比,选择合适的防护材料并制定了防护方案。通过开展抗震性能的物理模型试验,验证并确定更为可靠的底部铜止水结构方案。

3.1 试验方法

试验以垂直缝铜止水为研究对象,对比分析无防护与有防

护铜止水在接缝往复位移作用下的疲劳性能。依据卡拉贝利面板坝的止水设计参数,选取的垂直缝铜止水鼻高60mm、鼻宽20mm,由1.2mm厚的T2M型紫铜片加工而成。

试验利用抗疲劳耐久性试验机进行。在无防护铜止水试验部分,分别设置混凝土与铜鼻之间无隔离膜和有隔离膜(隔离膜采用1mm厚聚脲涂层)两种工况进行对比研究。在有防护层铜止水试验中,选取GB柔性填料作为防护材料,并分别设置1cm和2cm两种不同厚度防护层的工况进行对比试验,以评估其疲劳性能。试验振幅45mm,频率1Hz,振动时间90s。

3.2 模型试件

铜止水的模型试件示意图见图4至图7。

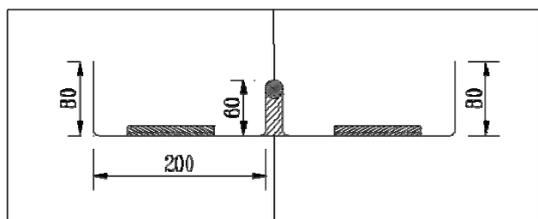


图4 无防护铜止水试件(无隔膜)示意图

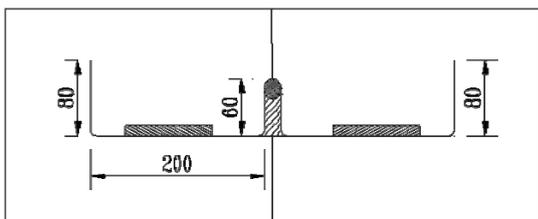


图5 无防护铜止水试件(有隔膜)示意图

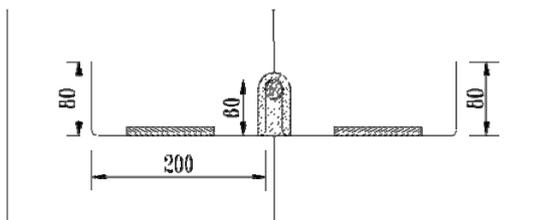


图6 防护层厚度1cm铜止水试件示意图

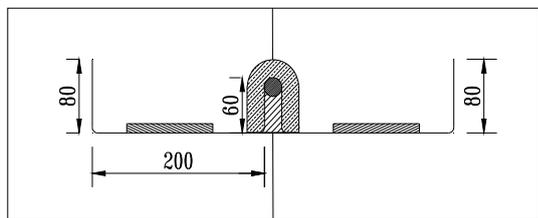


图7 防护层厚度2cm铜止水试件示意图

3.3 试验结果

无防护与有防护铜止水四种试件在接缝往复位移作用下的疲劳性能,试验结果见表3。

表3 铜止水张拉、剪切疲劳试验结果

编号	铜止水试件	持续时间	次数	张拉破坏情况	剪切破坏情况
1	无防护铜止水(无隔膜)	90s	90	无破坏	无破坏
2	无防护铜止水(有隔膜)	90s	90	无破坏	无破坏
3	1cm厚防护层铜止水	90s	90	无破坏	无破坏
4	2cm厚防护层铜止水	90s	90	无破坏	无破坏

结果表现为:在振幅45mm、频率1Hz、振动时间90s条件下,试件均未发生破坏,铜止水结构安全。卡拉贝利大坝垂直缝所采用W1型复合铜止水及周边缝所采用F型复合铜止水结构满足工程抗震需求。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究通过物理模型试验,深入探讨了新疆卡拉贝利水利枢纽工程止水结构在地震作用下的抗震性能。主要结论如下:(1)采用抗疲劳耐久性试验机模拟的地震波有效地反映了实际场地地震作用的特性,为抗震性能评估提供了可靠的基础。(2)试验结果表明,在模拟地震波作用下,表层止水体系和底部铜止水结构均展现出了优异的抗震性能,尤其是在振幅45mm、频率1Hz、振动时间90s的条件下,试件未发生破坏,证实了设计的合理性和工程应用的可行性。

4.2 建议

基于本研究的结果,提出以下建议以供后续工程参考:(1)在同类工程设计和施工阶段,应进一步考虑地震波的频谱特性,对止水结构进行优化设计,确保材料选择和构造设计的科学性。同时,建议实施定期监测,预防潜在的结构变形超限风险。(2)针对底部铜止水结构,建议对其保护层厚度进行优化,以提高其在地震作用下的稳定性和耐久性。此外,建议开展更多基于不同地震波特性的试验研究,以全面评估止水结构的抗震性能,为类似工程提供更可靠的技术支持。

[参考文献]

[1]侯国金.卡拉贝利水利枢纽工程运行效果分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(02):102-105.

[2]赵小艳,苏有锦,孟令媛,等.2024年新疆乌什7.1级地震和中国台湾花蓮7.3级地震前的大震长期平静及中国大陆强震危险性研究[J].地震研究,2025, 48(01):32-40.

[3]季静,梁晓敏,付豪,等.新疆喀什原场地地震动频谱特性研究[J].地震工程学报,2023,45(06):1425-1431.

作者简介:

王长征(1976--),男,汉族,湖南邵阳人,大学本科,水利工程高级工程师,研究方向为水利工程建设与管理。