DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.024

石门沟 2# 水库黏土心墙堆石坝设计中几个关键技术问题

卢 小 波

(甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过对兰州新区石门沟 2# 水库工程黏土心墙坝采用的反设计法设计思路,从防渗体原状料场的颗粒级配入手,反方向推求保护料、过渡料及主堆料的包络线范围,根据工程区料场的分布情况及料源的可开采情况,经过比较,能够较容易达到工程设计要求,且能够最大化利用料场料源,使工程造价最经济合理。通过分析总结,打破了常规设计时保护料、过渡料采用人工轧制加工的常规设计方法,为工程设计提供了新的设计思路,供类似工程参考。

关键词: 石门沟 2# 水库;黏土心墙;坝体结构设计;坝料分区

中图分类号: TV641.4+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1144(2019)02—0130—05

Several Key Technical Problems in the Design of Shimengou 2# Clay Core Wall Rockfill Dam

LU Xiaobo

(*Gansu Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: This article adopts the anti-design method design method for the clay core wall dam of Shimengou 2# reservoir project in Lanzhou New District. It starts from the particle grading of the original material yard of the anti-seepage body, and derives the protective material, transition material and main pile. The line range, according to the distribution of the material yard in the project area and the mining conditions of the material source, can be easily compared to the engineering design requirements, and the material source can be fully explored, so that the project cost is most economical and reasonable. Through analysis and summary, the conventional design method of manual rolling processing for protective materials and transition materials in conventional design is hugely improved, which could provide a new design idea for engineering design.

Keywords: Shimengou 2# reservoir; clay core wall; dam body structure design; dam material partition

土石坝对坝址基础条件具有良好的适应性,能就地取材、节省投资,是坝工建设中最有发展前景的坝型之一[1]。黏土心墙土石坝出现于 20 世纪 40—50 年代,由于其使用当地材料、造价低、施工技术较为简单、抗震性能好而得到迅猛发展[2]。目前建成的黏土心墙土石坝数量众多,其中:最高的心墙土石坝是 1980 年前苏联建成的努列克(Hypek)心墙土石坝(坝高 300 m),我国已经建成的最高的心墙土石坝为的糯扎渡水电站大坝(坝高 261.5 m)[3]。在心墙土石坝建设中也出现过很多垮坝、塌陷及心墙水力劈裂等事故,如:1975 年建成的美国 Teton 心墙土石坝出现管涌而垮坝;1941 年建设的美国 Mud Mountain 坝渗流破坏造成垮坝;北京西斋堂斜心墙土石坝和河南玉马斜心墙土石坝蓄水后塌坑[4]等,Hyttejuvet 心墙堆石坝水力劈裂造成渗漏事故[5]等等,这些事故发生很多是设计过程中对一些关键问题的技术处理不恰当造成的,因此有必要对心墙土石坝的设计技术要点进行强调和重视。

本文依托兰州新区石门沟 2# 水库工程,从坝型选择、心墙和反滤层设计、坝基处理和坝体变形和

收稿日期:2018-10-31 **修稿日期:**2018-12-04

作者简介:卢小波(1978—),男,甘肃通渭人,高级工程师,主要从事水利水电工程规划与设计工作。E-mail:2477225671@qq.com

稳定分析等几个方面,论述了心墙土石坝设计需要重点把握的技术要点,供类似工程参考。

1　工程概况

兰州新区石门沟 2# 水库为注入式水库,水源为由引大入秦工程引来的大通河水。工程位于兰州新区秦川镇石门沟村以北约 3 km 的大麦湾沟,距兰州 104 km。主要由引水工程、水库枢纽工程及供水工程三部分组成。工程主要任务是通过与已建的石门沟 1# 水库和拟建的石门沟 2#、3# 两座水库联合调节向兰州新区生产及生活供水。

水库总库容 525 万 m^3,兴利库容 470 万 m^3,死库容 18.7 万 m^3。大坝为黏土心墙堆石坝,坝顶高程 2 161.00 m,最大坝高 55 m,坝顶长 324.58 m。工程为Ⅳ等小(1)型工程,大坝为 3 级建筑物,其他主要建筑物按 4 级设计,次要建筑物按 5 级设计。水库防洪标准按 50 年一遇洪水设计,1 000 年一遇洪水校核[6]。工程区相应的地震基本烈度为Ⅶ度,地震动反应谱特征周期 0.45 s。抗震设防烈度采用 7 度[7]。

坝址处沟道宽度 120 m ~ 200 m,沟谷呈略宽的“U”字型,沟底堆积较厚的风洪积及洪积层,最大厚度 27 m,坝址两岸基岩岩性为变质砂岩夹板岩及板岩夹变质砂岩,岩体表层风化强烈、破碎,表层风化后呈片板状,强风化层一般厚 4 m ~ 6 m,坝肩顶部岩体强风化层厚约 10 m。

2　坝体设计技术要点分析

受工程区地形地质条件、气象因素条件、工程区料场分布情况等因素影响,工程设计主要研究的技术要点为坝型选择、坝体结构设计、坝料分区设计及基础处理等[8-9]。

2.1　坝型选择

根据国内外已建和在建的高土心墙堆石坝设计经验,心墙型式和坡比将影响大坝应力变形、渗透稳定、工程投资等各个方面。针对黏土心墙坝和黏土斜墙坝,从抗震性能、施工难易程度、坝体防渗系统等方面[10]进行综合比较,比较过程见表 1。

由于覆盖层厚度适中,将心墙和斜墙的基础全部开挖至基岩基础进行同精度比较。斜心墙和直心墙方案从抗水力劈裂能力、抗震能力、变形协调能力、工程施工和投资等方面综合分析,两种方案在技术上均可行,不会产生水力劈裂破坏,斜心墙方案大主应力方向有利于心墙抗水力劈裂,但是其渗透坡降和永久变形相对较大,抗震能力略差,工程投资比心墙高 209.4 万元,经综合比较选择直心墙方案。

表 1　直心墙与斜心墙坝型优缺点比较

坝型	优　点	缺　点
直心墙坝	坝坡较陡,坝基垂直防渗线较短,坝体填筑和防渗处理工程量较少	心墙坡度较陡时,心墙与两侧可能出现不均匀沉降,易产生拱效应
	心墙坝抗震性能较好	大坝施工时,要求心墙和其上下游两侧坝壳料平起填筑,各种坝料填筑相互牵制,施工干扰相对较大
	心墙坝的心墙便于与岸坡、泄水建筑物或非土质建筑物的连接	多雨地区施工比较麻烦,对施工进度影响较大
	当运用要求库水位骤升骤降或库水位变幅大时,对坝坡稳定有利	
斜心墙坝	当河床段坝基岩层风化很深,或冲积层深厚,防渗体达到新鲜岩层或不透水层有困难,采用水平铺盖作为坝基的防渗措施时,斜心墙有利于与铺盖的连接	抗震性能较心墙差。在地震作用下,斜墙容易裂缝或滑塌,危及坝的安全
	由于防渗土料方量占坝体总方量的比例相对较小,适宜在严寒或多雨地区建此种坝型,可错开严寒或雨季,再次期间填筑坝壳,坝体施工干扰小。	建在可压缩层地基上的斜墙,由于坝体变形,易使斜心墙裂缝
		不利于与泄水建筑物和其他非土质建筑物的连接。
		坝体填筑及防渗帷幕灌浆工程量较心墙坝大

2.2　坝体结构设计

2.2.1　坝料设计

坝料设计中,由于防渗料料场及料源限制,为了节省工程投资,不在外运特殊防渗土料作为坝体的防渗结构,工程设计采用反设计法进行设计,即根据满足层间关系要求和渗透稳定要求,根据防渗土料的天然粒径分布,反过来设计需要的反滤料的级配曲线,再根据确定的反滤料的级配曲线,确定过渡料的级配曲线,根据过渡料的级配曲线,从而最终确定坝壳料的级配曲线,这样就能更加经济合理的实现工程的最优设计。

(1) 心墙土料。心墙土料优先考虑自 1# 土料场开采,不足部分自 2# 土料场开采。土料主要试验指标:天然密度 1.47 g/cm^3 ~ 1.62 g/cm^3,天然含水率 14% ~ 25%。心墙填筑铺层厚度为 40 cm,采用 16 t 凸块碾碾压 6 遍,碾压压实度标准要求不小于 98%,压实干密度要求不小于 1.68 g/cm^3,最优含水率 18% ~ 20%,土的渗透系数平均 2.48×10^{-7} cm/s。

(2) 反滤料。反滤料位于心墙土料与过渡料之间,主要承担传力结构,并形成对心墙土料的反滤保护,满足层间关系和渗透稳定要求[11-12],防止心墙土料细粒的流失。根据心墙黏土料的级配保护要

求,过渡料最大粒径不大于 20 mm,D_{15} = 0.1 mm ~ 0.5 mm,D_{85} = 10.0 mm ~ 2.4 mm,小于 5 mm 颗粒含量控制在 35% ~ 60%,小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 5%。根据对周围料场普查,发现工程区附近的振兴砂场或兰州新区纬三十二路砂场砂砾石料筛分系统的成品料,完全能够满足本工程所需过渡料要求,这样即减少了重新开辟料场的费用,减小对环境的破坏,又能够保证料源的供应,确保工程的顺利进展。反滤料设计宽度为 2 m,填筑铺层厚 40 cm,采用 16 t 振动碾碾压 6 遍 ~ 8 遍,相对密度不小于 0.80。反滤料设计级配曲线见图 1。

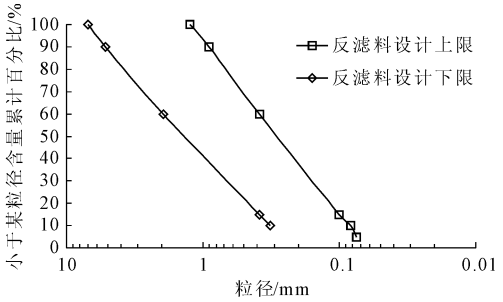

图 1 反滤料设计级配曲线

(3) 上下游过渡料。上下游过渡料位于心墙反滤料与大坝堆石料之间,承担部分受力和传力结构,并形成对反滤料粒径的过渡和反滤作用,满足层间关系和渗透稳定要求,防止反滤料中细颗粒的流失。根据垫层料的级配保护要求,过渡料要求级配连续,最大颗粒粒径不超过 300 mm,小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 5%。经过堆石料场的爆破试验,采用合理的爆破能够完全开采出复核过渡料要求的级配料。故过渡料采用料场爆破开采,宽度为等宽 3 m,填筑铺层厚 40 cm,采用 25 t 振动碾碾压 6 遍 ~ 8 遍,最大干密度不小于 2.2 g/cm^3,孔隙率不小于 20%。过渡料设计级配曲线见图 2。

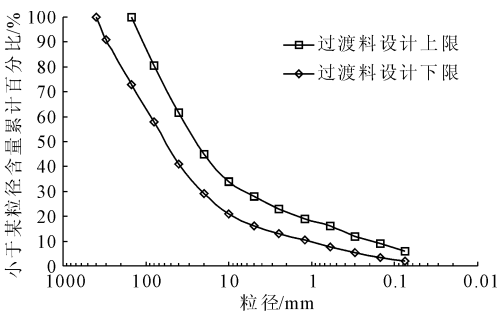

图 2 过渡料设计级配曲线

(4) 上下游堆石料。大坝上下游堆石料区是水荷载的主要传递区,是大坝的主要承载结构。根据过渡料的级配保护要求,堆石料要求级配连续,具有强度高、压缩性低、渗透性强等性能。最大粒径要求不超过 600 mm,粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量不大于 5%。根据过渡料的级配曲线要求,经过爆破试验,采用合理的爆破开挖能够完全开采出满足堆石料要求的填筑料,故堆石料采用料场爆破开采,填筑铺层厚 80 cm,采用 25 t 振动碾碾压 6 遍 ~ 8 遍,最大干密度不小于 2.2 g/cm^3,孔隙率不小于 20%。堆石料设计级配曲线见图 3。

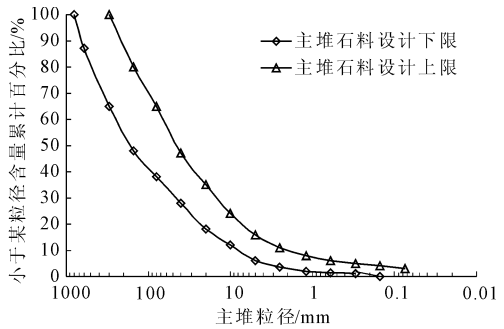

图 3 堆石料设计级配曲线

按照以上的反设计思路,合理的确定了各级料的级配区间范围,根据级配区间的颗粒级配要求,采用合理的爆破方式,能够互相有效的满足坝料之间的层间关系要求,节约工程投资,消除工程隐患,使坝体结构设计安全合理。

2.2.2 基础处理

(1) 基础固结灌浆。帷幕灌浆孔沿心墙轴向方向布置,基础固结灌浆孔沿心墙轴线两侧各布置一排,距心墙轴线距离均为 1.0 m。灌浆孔采用梅花形布置,孔距 1.5 m,孔深 5 m。

(2) 坝基防渗设计。工程防渗帷幕按照透水率 < 5 Lu 进行控制。结合坝基沟床地质条件及坝基岩体透水性,采用抗硫混凝土浆液对坝基进行防渗帷幕灌浆,帷幕灌浆轴线沿坝基心墙轴线布置,并左右岸坝肩山梁延伸布置,其中向右岸坝肩山梁延伸 92 m,向左岸坝肩山梁延伸 123 m。帷幕灌浆线按一排布置,灌浆孔深入相对不透水层(q < 5 Lu)以下 5 m,灌浆孔间距 1.5 m,灌浆压力 1.5 MPa。

3 大坝变形及稳定计算

3.1 应力应变计算

坝体应力变形计算分析采用平面非线性有限元计算方法,本构模型采用邓肯张 E – B 模型,筑坝材料的邓肯 E – B 模型计算参数见表 2 及表 3。

表 2　心墙土料邓肯模型参数

k	n	k_b	m	R_f	G	F	D
182	0.53	81	0.36	0.78	0.43	0.18	1.6

根据计算结果,可以得出以下结论:坝体竣工期、蓄水期位移、应力分布合理,量级处于合理范围。竣工期和正常蓄水期计算的应力、位移特征值列于表 4。

表 3　筑坝材料邓肯模型参数

试验方法	室内试验土样	控制干密度/(g·cm^{-3})	R_f	k	n	k_b	m	G	F	D
饱和固结排水(CD)	第一组	2.2	0.81	1000	0.25	350	0.15	0.15	0.54	3.11
	第二组	2.2	0.83	950	0.28	330	0.15	0.16	0.52	3.08
	平均值	2.2	0.82	975	0.26	340	0.15	0.15	0.53	3.10
不固结不排水(UU)	非饱和	2.2	0.88	1300	0.31					

表 4　坝体应力位移计算结果汇总表

方案	水平位移/cm	沉降/cm	大主应力/MPa	小主应力/MPa	应力水平
竣工期	-2.5/3.0	39.0	1.0	0.3	0.6
正常蓄水期	12.0	37.0	1.0	0.3	0.9

(1) 坝体竣工期的位移、应力等值线分布如图 4—图 6 所示。

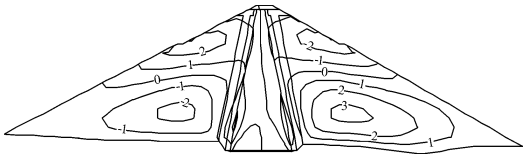

图 4　竣工期水平位移等值线图(单位:cm)

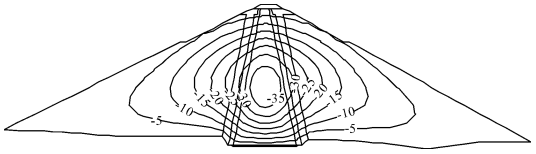

图 5　竣工期竖向位移等值线图(单位:cm)

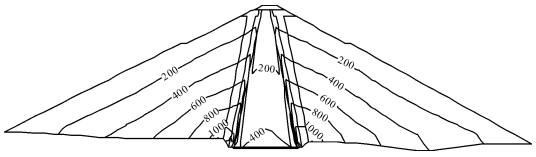

图 6　竣工期大主应力等值线图(单位:kPa)

由图可见,竣工期坝体水平位移相对于坝轴线基本上呈对称分布。在坝体自重的作用下,上游坝体水平位移最大值约 2.5 cm。下游坝体水平位移最大值约 3.0 cm。坝体顶部的水平位移呈向心墙内挤压的趋势,上游坝体上部向下游位移约 2 cm,下游坝体上部向上游位移也是 2 cm。从坝体竖向位移分布看,坝体填筑完成期的沉降基本上呈相对于坝轴线对称分布,坝体最大沉降发生在心墙中部,位移最大值为 39.0 cm,约为坝高的 0.7%。

从大、小主应力的等值线分布图可以看出,心墙的应力明显小于同高程两侧区域的应力,拱效应比较明显,同一高程处心墙的应力约为两侧坝壳应力的 40%。

(2) 正常蓄水期坝体的位移、应力等值线分布如图 7—图 9 所示。

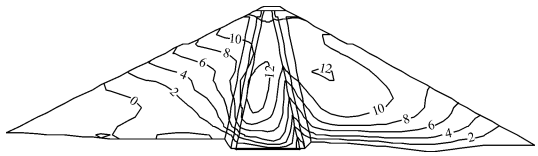

图 7　蓄水期水平位移等值线图(单位:cm)

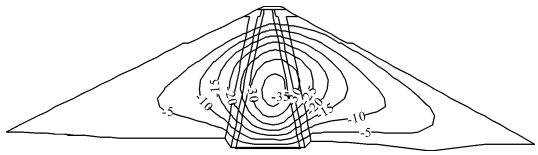

图 8　蓄水期竖向位移等值线图(单位:cm)

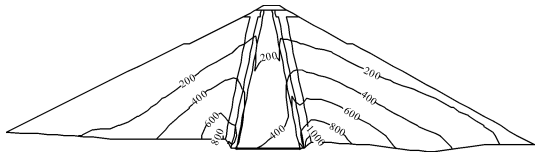

图 9　蓄水期大主应力等值线图(单位:kPa)

从图中可以看出,正常蓄水期坝体大部分区域的水平位移最大值约 12 cm,位于坝体中上部的下游坝壳堆石体中。正常蓄水期坝体最大沉降仍发生在心墙中部,偏于心墙下游侧,沉降最大值 37 cm,约为坝高的 0.7%。

从大、小主应力的等值线分布图可以看出,心墙的应力明显小于同高程两侧区域的应力,拱效应比较明显,同一高程处心墙的应力约为两侧坝壳应力的 40%。蓄水期,由于浮力和水压力的作用,心墙

上游侧坝壳的大主应力低于下游侧的大主应力。同时由于心墙在水压力作用下向下游变形,上游侧坝壳和心墙上游侧的小主应力减小,下游坝壳和心墙下游侧的小主应力增加。心墙上游侧坝壳中下部的应力水平较高,这是由于水压力作用使心墙向下游变形致使该区为主动土压力区,它不影响坝体稳定。

3.2 坝坡稳定计算

坝坡稳定计算采用刚体极限平衡计算方法,稳定分析采用中国水科院自主开发的土质边坡稳定分析程序 STAB2009,分析方法采用 Bishop 法[13],计算中采用拟静力法模拟地震荷载,堆石料计算参数采用线性强度与非线性强度指标分别对坝坡稳定进行计算分析。计算结果见表 5。

表 5 坝坡稳定计算结果

计算工况	安全系数			
	上游坝坡		下游坝坡	
	线性强度	非线性强度	线性强度	非线性强度
竣工期	2.46	1.99	2.24	1.81
稳定渗流期	2.83	2.03	2.2	1.79
水位骤降期	2.45	1.78	—	—
稳定渗流期遭遇地震	2.43	1.72	2.05	1.65

根据碾压式土石坝设计规范,在计算坝坡稳定时各材料参数的抗剪强度指标均应采用小值平均值。根据相关工程经验,计算中假定各材料强度指标折减[14-15]20%作为其小值平均值,在此基础上的稳定分析计算结果见表 6。

根据计算结果,可以得出:

(1) 竣工期、稳定渗流期、库水位骤降期及正常运用期遭遇地震工况,采用线性强度指标及非线性强度指标计算的坝坡稳定安全系数均满足规范要求。

表 6 修正后坝坡稳定计算结果

计算工况	安全系数			
	上游坝坡		下游坝坡	
	线性强度	非线性强度	线性强度	非线性强度
竣工期	1.88	1.51	1.70	1.37
稳定渗流期	2.18	1.56	1.70	1.36
水位骤降期	1.89	1.35	—	—
稳定渗流期遭遇地震	1.88	1.31	1.56	1.24

(2) 采用非线性强度指标计算的安全系数小于线性强度指标计算的安全系数。采用材料强度指标小值平均值计算的安全系数比采用均值计算的安全系数减小约 25%左右。

兰州新区石门沟 2# 水库工程于 2015 年 4 月正式开工建设,坝体自 2015 年 9 月开始填筑,2016 年 7 月坝体填筑至坝顶高程,2016 年 11 月 1 日开始下闸试蓄水,水库最高蓄水位 2 155.00 m(较正常蓄水位低 3.4 m),截止目前水库已蓄水运行一年多时间。根据大坝监测资料分析,坝体最大沉降量为 53 cm,截止目前大坝变形速率明显减缓,时效变形逐渐趋于收敛,大坝处于安全稳定运行状态。本工程坝基覆盖层深厚,无坝后截水设施,因此未在坝后设置量水堰。根据布置于坝体的三个监测断面测压管水位监测成果,自测压管埋设后取得监测初始值,水库蓄水运行期间测压管水位基本未发生变化,说明坝基及坝体的防渗效果较好。由于水库蓄水还没有真正达到设计水位的长期运行工况,所以目前的安全监测资料存在一定的局限性,不能代表坝体后期长期稳定运行的状况。

4 结 论

(1) 工程坝体结构分区设计思路,能够更加充分合理的利用当地料源,减小工程耗能,加快施工进度,节约工程投资,值得相似类型的工程借鉴设计思路。

(2) 根据有限元计算结果,坝体的各项指标均在坝体变形、受力可控范围之内,说明本工程设计思路合理正确,其坝体结构设计能够满足工程长期安全运行。

(3) 坝体结构设计中的坝料分区设计及控制指标,是当地材料坝设计中的重中之重,应紧密结合料场料源情况,合理分区,在满足层间关系和渗透稳定的前提下设计合理的坝料控制指标,能够最优的实现工程性价比设计。

参考文献:

[1] 汪小刚.高土石坝几个问题探讨[J].岩土工程学报,2018,40(2):203-220.

[2] 邓铭江,于海鸣,李湘权.新疆坝工技术进展[J].岩土工程学报,2010,32(11):1678-1687.

[3] 邓铭江,周小兵,万金平,等."635"水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性鉴定及改性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(6):673-677.

[4] 顾淦臣.国内外土石坝重大事故剖析——对若干土石坝重大事故的再认识[J].水利水电科技进展,1997,17(1):15-22,67.

(下转第 144 页)

采用小温差冷却原则,能够延长混凝土冷却时间,降低混凝土上下层温差及混凝土内部温差,控制坝体内部温度应力,有利的降低混凝土裂缝的产生。

3 结 论

(1) 正常通水冷却相比小温差通水冷却方案,会导致水管附近温度梯度过大,导致出现过大的拉应力,导致混凝土产生裂缝。

(2) 在中后期通水冷却中,在混凝土龄期结束后立即开始通水冷却,并且采用多档通水冷却措施能够延长冷却时间,有利于降低温度应力。由于中后期冷却是将冷却开始时间提前,并不会拖延施工进度,在施工中多改变几次水温对减小温度应力、防止裂缝的效果十分显著。

参考文献:

[1] 亢景付,赵蒙蒙,蒋元成,等.约束程度与温度应力之间的关系研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):21-25.

[2] 段 寅,胡中平,罗立哲,等.大型地下洞室衬砌混凝土温控防裂研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):107-110.

[3] 相昆山,张宏战,马震岳,等.寒冷地区碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):200-203.

[4] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.

[5] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.

[6] 刘 俊,黄 玮,周 伟,等.大体积混凝土小温差的长期通水冷却[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(5):549-553.

[7] 朱伯芳,张超然.高拱坝结构安全关键技术研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[8] 朱伯芳.论混凝土坝的水管冷却[J].水利学报,2010,39(5):505-513.

[9] 朱伯芳,吴龙 ,杨 萍,等.混凝土坝后期水管冷却的规划[J].水利水电技术,2008,39(7):27-31.

[10] 朱伯芳,李 玥,吴龙 ,等.关于混凝土坝基础混凝土允许温差的两个原理[J].水利水电技术,2008,39(7):21-26.

[11] 朱伯芳,吴龙坤,杨 萍,等.利用塑料水管易于加密以强化混凝土冷却[J].水利水电技术,2008,39(5):36-39.

[12] 朱伯芳,吴龙坤,张国新.混凝土坝水管冷却的利与弊[J].水利水电技术,2009,40(12):26-30.

[13] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3 – D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software, 2001,32(9):677-682.

[14] 李守义,张金凯,张晓飞.碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[15] 国家能源局.混凝土坝温度控制设计规范:NBT 35092—2017[S].北京:电力出版社,2017.

(上接第 134 页)

[5] 中国水电工程顾问集团公司、水电水利规划设计总院等.土石坝技术 2012 年论文集[[M].北京:中国电力出版社,2012:307-318.

[6] 中华人民共和国水利部.水利水电工程等级划分及洪水标准:SL 252—2017[S].北京:中国水利水电出版社,2017.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水工建筑物抗震设计标准:GB 51274—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.

[8] 中华人民共和国水利部.碾压土石坝设计规范:SL 274—2001[S].北京:中国水利水电出版社,2002.

[9] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册:第 6 卷土石坝[M].北京:中国水利水电出版社,2014.

[10] 张洪海,袁友仁.高心墙堆石坝结构设计中几个问题探讨[J].水电能源科学,2011,29(9):54 + 78-80.

[11] 刘玉玺,张忠辉,李吴昊潼.喀麦隆曼维莱水电站土石坝心墙反滤设计[J].水利水电工程设计,2017,36(3):48-51.

[12] 郭江涛,张少宏,康顺祥.亭口水库大坝反滤料选料研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):214-218.

[13] 王俊奇,李 闯,董 晔.Bishop 法的半解析解及其广义数学模型[J].水利与建筑工程学报,2015,13(12):127-132.

[14] 费野占,否 平.基于强度折减理论的水位下降坝坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):218-222.

[15] 齐小静,石自堂,等.基于强度折减法的土石坝稳定性分析及失稳判据选择研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):107-111.