

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.016

温度与地震共同作用下溢洪道结构优化研究

于宪政, 陈健云, 徐 强, 李 静, 刘鹏飞

(大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 四川省高海拔地区某跨沟拱形溢洪道结构作为研究对象, 为减小温度和地震共同作用下的结构响应, 对结构温度缝的数量和位置进行优化设计。针对温度和地震作用分别研究了有无温度缝措施下的结构应力分布, 以该跨沟拱形溢洪道结构多个位置变权重下的应力组合作为目标函数, 采用遗传算法, 将温度缝的数量和位置作为设计变量进行结构优化。结果表明, 温度缝的设置对于减小结构的温度作用有利, 但会增大结构在地震作用下的应力; 基于遗传算法对温度缝的位置和数量进行优化研究, 可为同类型工程设计提供参考。

关键词: 溢洪道; 温度缝; 黏弹性边界; 地震作用; 遗传算法

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)05-0097-05

Optimization of Spillway Structural Under Temperature and Earthquake

YU Xianzheng, CHEN Jianyun, XU Qiang, LI Jing, LIU Pengfei

(Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Based on a ditch spillway arch structure in Sichuan as the research object, in order to reduce the structural response under the action of temperature and earthquake, the number and position of temperature joints are optimized. According to temperature and seismic action respectively studied the presence of temperature joint structure stress distribution under the measures, to the spillway structure multiple locations across the ditch arch stress under the variable weight combination as the target function, the number and position as a design variable temperature seam for structural optimization by using genetic algorithm. The results show that the temperature joint is beneficial to reduce the temperature effect of the structure, but will increase the stress of the structure under the earthquake. The location and number of temperature joints are optimized by genetic algorithm, which is very important improve the resistance of hydraulic structure under the action of earthquake and temperature.

Keywords: spillway; temperature seam; viscoelastic boundary; earthquake; genetic algorithm

当前,我国对水利水电工程的建设日益重视,水电站修建带来了许多经济和社会效益,其运行期的安全问题也被人们重点关注。溢洪道结构是水电站重要的附属结构,往往承担着泄洪的重任,溢洪道结构由于体型较狭长,在运行期间的温度应力往往不能忽视^[1-3]。特别是在一些高海拔地区,其昼夜温差较大,由此引发的温度裂缝导致结构破坏的案例

屡见不鲜。针对狭长型结构的温度作用,人们往往通过设置伸缩缝的方式降低结构的温度应力。大量的工程实例也表明在水工结构中设置温度缝是很好的举措^[4-6]。在水工结构中设置温度缝,虽然可以有效地减小温度收缩产生的变形,但会降低整个结构的防水性,同时在高烈度的地震区域,温度缝的存在也会降低结构的整体性,对结构的抗震十分不

收稿日期:2019-06-13

修稿日期:2019-07-15

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404900);国家自然科学基金项目(51679030)

作者简介:于宪政(1986—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,研究方向为水工结构的数值分析。E-mail:yuxianzheng1986@163.com

通讯作者:陈健云(1968—),男,辽宁大连人,博士,教授,主要从事工程结构动力分析及抗减振措施研究工作。

E-mail:dllgchenjy@163.com

利。目前对水工结构的研究主要侧重于温度或地震单独作用于结构^[7-13],对于同时考虑温度和地震作用下的结构优化研究较少,因此,如何在温度和地震作用下对水工结构进行优化设计,使结构在温度和地震作用下均具有较强的抗力,将对结构设计具有重要的参考意义。

遗传算法^[14-16]是一种基于“适者生存”的高度并行、随机和自适应的优化算法,通过复制、交叉、变异将问题解编码表示的“染色体”群一代代不断优化,最终收敛到最适应的群体,从而求得问题的最优解或满意解。其优点是原理和操作简单、通用性强、不受限制条件的约束,且具有隐含并行性和全局搜索能力,在组合优化问题中得到广泛应用。本文结合某泄槽溢洪道结构,比较了有无温度缝措施下在温度作用和地震作用下的结构应力分布特性,同时,对温度和地震共同作用下的温度缝的位置和数量进行优化设计,针对该跨沟拱形溢洪道结构的特殊性,采用遗传算法,考虑以多个位置的应力组合,通过变权重的方法进行优化。并得出最佳的优化设计方案,从而对水工结构温度缝的优化设计提供一定的参考。

1 工程背景及有限元模型

某水电站位于四川省雅砻江干流上,其洞式溢洪道进口位于左岸滑坡拉裂变形体右侧,出口正对雅砻江主河道,溢洪道总长 1 110 m(水平投影长度),由进水渠段、控制闸段、无压洞段、明槽段和出口段组成。受地形地质条件制约泄槽需跨越冲沟,因此采用跨沟拱形结构作为泄槽的基础,工程处于高海拔山区,昼夜温差大。洪道泄槽段地形波状起伏、沟梁相间,地形完整性较差,地基不均匀沉降问题突出。

计算模型为跨沟拱形结构,考虑了地层岩性的影响,按照实际地形以及场地条件进行建模。跨沟结构两侧场地平台全部考虑。整个计算模型见图 1。

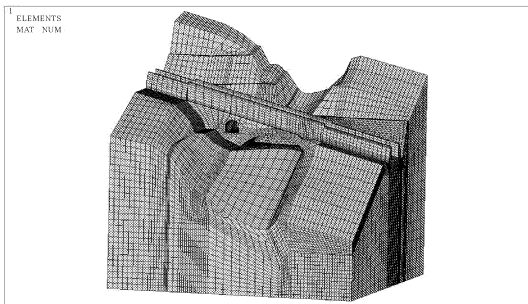


图 1 溢洪道结构有限元模型

查询该地区 2010 年 9 月至 2014 年 9 月的实测温度资料,得知该工区日温差较大(日温差最大可达 23℃左右),特别是当寒流来袭时,泄槽结构表面温度骤降对结构安全十分不利,因此对运行期该水工结构进行温度作用分析是十分必要的。结构热学和力学参数如表 1 所示。

表 1 溢洪道结构热力学参数

热力学参数	数值
比热/($J \cdot g \cdot N^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	0.9375
导热系数/($J \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	7020
对流系数/($J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	67430
热膨胀率	9×10^{-6}
弹性模量(溢洪道)/Pa	2.80×10^{10}
弹性模量(拱圈)/Pa	3.25×10^{10}
弹性模量(地基第一层)/Pa	1.90×10^9
弹性模量(地基第二层)/Pa	3.00×10^9
弹性模量(地基第三层)/Pa	7.00×10^9

2 温度作用下结构应力分析

2.1 未设置温度缝时结构应力分析

若整个泄槽结构未设置温度缝,以某典型日极端降温工况(昼夜温差达到 23℃)进行计算,有限元模型底面和四周侧面采用绝热边界,混凝土及山体与空气接触采用对流边界。考虑跨沟拱形结构的自重与极端温降工况共同作用,整个结构主拉应力如图 2 所示。

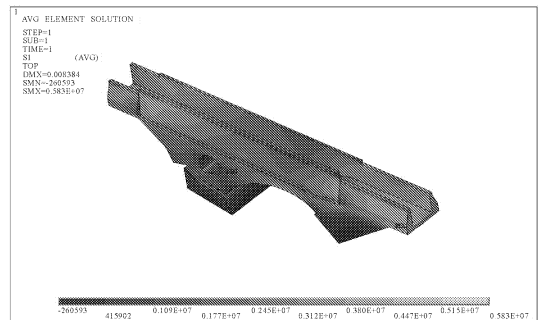


图 2 溢洪道结构主拉应力

由图 2 中可以看出整个泄槽结构最大温度应力达到 5.83 MPa,图中黑色区域为超出混凝土抗拉强度的区域,可以看出整个泄槽结构几乎全部处于超出抗拉强度状态。计算模型沿顺水流方向的最大应力为 5.61 MPa,横水流方向最大应力为 2.33 MPa,竖向最大应力为 2.67 MPa。计算模型沿顺水流方向长度超过 300 m,可知温度应力沿顺水流方向的累积效果十分明显。需要在顺水流方向设置温度缝

降低结构的顺水流向温度应力。

2.2 设置温度缝时结构应力分析

由于未设置温度缝时,整个泄槽结构温度应力较大,因此初步考虑沿顺水流方向设置 4 条温度缝,依旧采用上一节介绍的温降作用工况。泄槽结构的主拉应力如图 3 所示。

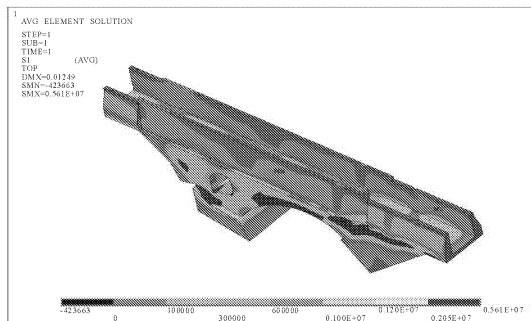


图 3 溢洪道结构主拉应力

由图 3 中可以看出整个泄槽结构最大温度应力达到 5.61 MPa,在设置了温度缝后在温度缝设置附近应力减小效果明显,超出抗拉强度范围大幅减少。计算模型沿顺水流方向的最大应力为 5.44 MPa,横水流方向最大应力为 2.24 MPa,竖向最大应力为 2.09 MPa。温度应力沿顺水流方向得到一定程度的释放,由此可知,考虑温度作用下温度缝的设置对整个结构的温度应力的减小是十分有必要的。

3 地震作用下结构应力分析

3.1 黏弹性边界算例验证

黏弹性边界是在边界处节点的法向和切向施加弹簧和阻尼器,来考虑无限介质的辐射阻尼和恢复性能。弹簧和阻尼器可以并连成一个元件,元件的一端与边界处的节点耦合,另一端设置为固定支座。图 4 为人工边界物理意义示意图。

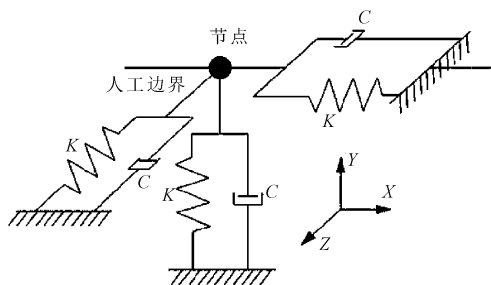


图 4 黏弹性人工边界

考察三维均匀弹性半无限空间,从底部人工边界入射平面 S 波的动力响应。入射位移脉冲波方程

为:

$$u(t) = \begin{cases} \sin(2\pi t) & 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \\ 0 & 1 \text{ s} < t \leq 2 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

从三维弹性半无限空间选取 600 m × 600 m × 600 m 的有限区域,在外侧和底侧的节点上施加三个方向的弹簧单元,模拟黏弹性边界。选择顶面中心和底面中心两点作为控制点,如图 5 所示。所有地基参数如表 2 所示。

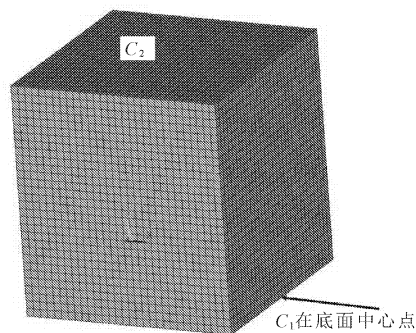


图 5 有限元模型

表 2 有限元模型物理参数

物理特性	数值
地基密度/(kg · m ⁻³)	2000
泊松比	0.2
弹性模量/GPa	2.4
压缩波波速/(m · s ⁻¹)	9 × 10 ⁻⁶
时长/s	2
时间步长/s	0.01

在 S 波入射情况下,两个控制点的位移时程的数值解和理论解分别如图 6、图 7 所示。

比较图 6 和图 7 可知,两个控制节点的水平位移时程数值解与理论解基本一致,顶点 C₂ 的水平位移最大值为入射 S 波位移最大值的两倍。

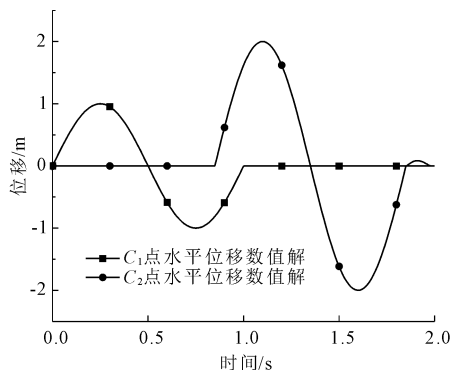


图 6 水平位移时程图

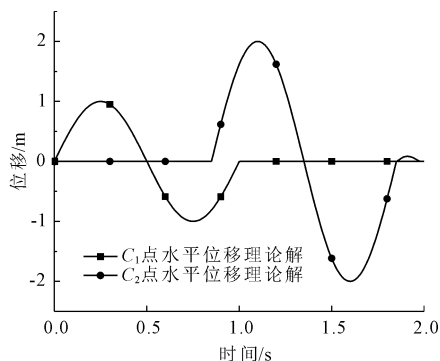


图 7 水平位移时程图

在 S 波入射时,地基底面中心点与表面中心点的位移时程曲线与理论解接近一致,可知本文所用黏弹性边界是准确的,可以将其应用于跨沟拱形结构的地震动分析中。

3.2 未设置温度缝时结构应力分析

计算中采用场地地震波,该结构地处四川境内,水平向设计地震动为 $0.287g$,竖向设计地震动为 $0.191g$ 。图 8 为归一化的横水流地震加速度时程。

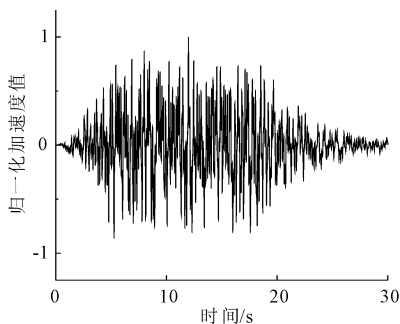


图 8 水平向地震动加速度时程图

提取设计地震动下,跨沟拱形结构在设计地震动下的主拉应力最大值如图 9 所示。

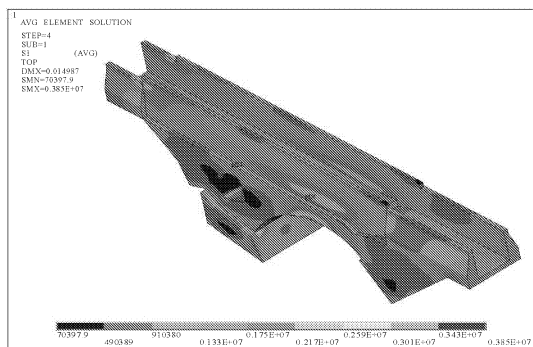


图 9 溢洪道结构主拉应力

由图 9 可知,在未设置温度缝时,在设计地震动作用下,泄槽结构沿顺水流方向最大拉应力达到 3.50 MPa 。横水流和竖向温度应力最大值为

1.85 MPa 和 1.55 MPa ,主拉应力的最大值为 3.85 MPa ,出现在拱圈圈顶附近。整个跨沟拱圈结构的整体性较好,拱圈圈顶附近结构应力较大,说明拱圈是整个跨沟拱形结构最重要的受力部位。

3.3 设置温度缝时结构应力分析

当采用上一节中同样的温度缝的位置和数量的设计工况,重新计算在设计地震动下整个跨沟拱圈结构应力,跨沟拱形结构在设计地震动下的主拉应力最大值如图 10 所示。

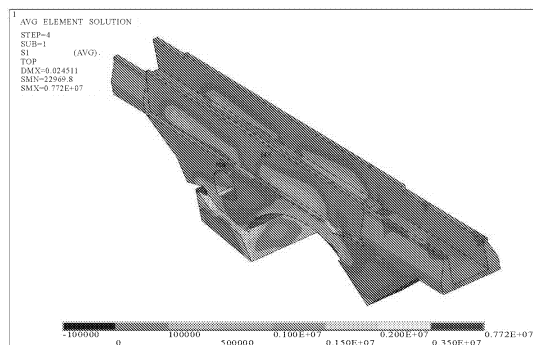


图 10 溢洪道结构主拉应力

由图 10 可知,设置了温度缝后,在设计地震动作用下,泄槽结构沿顺水流方向最大拉应力达到 2.58 MPa 。横水流和竖向温度应力最大值分别为 2.89 MPa 和 2.55 MPa ,主拉应力的最大值为 7.72 MPa 。泄槽结构顺水流方向的应力相比于没有温度缝时有一定程度减小,但是横水流方向的应力和竖向应力却存在显著增加,由此可知,温度缝的位置不同会引起整个跨沟拱形结构抗震性能的改变,因此需要对温度缝的位置进行优化设计,以便跨沟拱形结构具有较好的抗震能力。

4 温度地震共同作用下结构优化设计

4.1 设计变量

整个跨沟拱形结构的设计变量包括温度缝的位置和数量,将跨沟拱圈结构上部划分为 5 个区域,假设在 5 个区域内均可考虑设置一条温度缝或者不设置温度缝,其代表为 5 个影响因素。将每个区域均匀划分为 4 段,如图 11 所示。如果分别出现在 1、2、3 和 4 这四个位置,则对应的因素水平的变量值也分别为 1、2、3 和 4;每一段如果不设置温度缝,则该因素水平的变量值为 0。

4.2 目标函数

常规降温 and 地震共同作用与跨沟拱形结构,其应力最大值的出现位置主要集中在拱圈圈顶,左侧

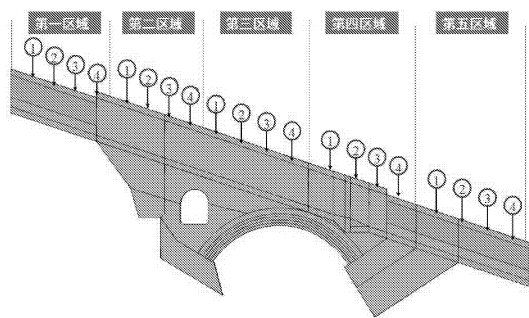


图 11 溢洪道结构优化区域图

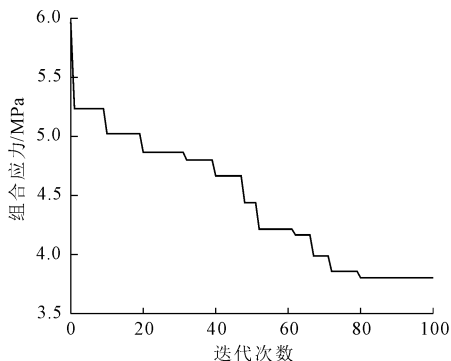


图 13 组合应力随迭代次数变化关系

拱脚处和回填区与拱圈基础平台段连接的变截面处,如图 12 所示。如果采用单一的三个控制位置选择其中最大的应力值作为评判依据,往往不能更好地显示出结构整体的受力特性。相反,如果采用多个控制位置的应力的有效组合,则可充分达到提高整个跨沟拱形结构的受力评价效果。此时三个区域的权重占比也是需要考虑的问题。考虑计算校核地震动和温度变化工况下的组合工况,基于两种工况下的三个位置主拉应力变化率作为权重的判断指标,建立目标函数如下:

$$\min F$$

$$F = \sum_i^n \gamma_i F_i \quad (2)$$

式中: γ_i 为 i 位置处的应力权重; F_i 为 i 位置处的主拉应力值。

4.3 遗传算法优化

按照上图所示的遗传算法的优化步骤对目标函数进行优化设计,种群规模设置为 10,根据预定的目标函数对每个个体进行适应度值的评价,采用随机联赛选择方法,并保留最佳个体的策略,交叉概率为 1,变异概率为 0.05,遗传算法设置最大遗传次数为 100,在迭代到 80 次时目标函数(见图 13)趋于稳定值 3.801 MPa。

遗传算法对整个跨沟拱形结构温度缝位置的优化结果如表 3 所示。

表 3 遗传算法优化前后对比

方案	因素变量值					目标函数最大拉应力 /MPa
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	
初始种群	1	2	3	4	1	5.966
最优设计	3	3	0	2	2	3.801

从表 3 中可以看出,采用遗传算法优化后,目标函数的最大拉应力从 5.966 MPa 减小到 3.801 MPa,优化率达到 36.3%。因此在拱圈结构优化设计时,选择合适的分缝位置和分缝数量对于整个跨沟拱形结构的综合抗力具有十分重要的意义。

5 结 论

本文以某实际泄槽溢洪道结构为工程背景,研究了温度缝对结构抗震能力的影响。结果表明,温度缝的存在对降低溢洪道结构的温度应力效果明显,但是会加大溢洪道结构在地震作用下的应力。针对这一问题,本文以温度缝位置和数量作为设计变量,并将不同工况下结构多个位置的应力进行变权重组合作为目标函数,通过遗传算法对结构的温度缝位置和数量进行了优化。本文的研究可为同类型工程设计提供参考。

参考文献:

[1] 汪泓吉,晏石林,杨晓翔,等.不同温降下渡槽温度应力模拟及保温层厚度设计[J].人民长江,2018,49(1):81-85.

[2] 潘崇仁.克孜河渡槽运行期温度应力耦合分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):224-227.

[3] 谭燕,韩宇,高俊涛.U型槽用于超长地下室结构温度应力优化[J].湖北工业大学学报,2017,32(4):94-96.

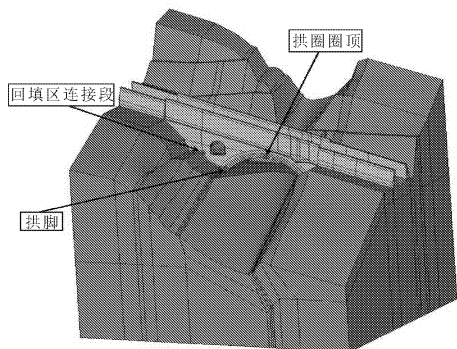


图 12 溢洪道结构图

证系统长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 朱 柯. 地下水源热泵系统综述[J]. 山东工业技术, 2017(11):233-233.
- [2] 倪 庆. 地下水源热泵在上海地区的应用前景分析[J]. 上海水务, 2018, 34(4):12-15.
- [3] 陈 阳, 王智伟, 刘 炜, 等. 地下水源热泵系统存在的问题及解决措施[J]. 建筑科学, 2016, 32(4):87-92.
- [4] 徐红霞, 黄 驰. 某地下水源热泵诱发地下水水质变异成因分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6):157-161.
- [5] 于 水, 公 辉, 冯国会. 地下水源热泵对地下水温度场影响模拟与分析[J]. 建筑节能, 2016, 44(10):1-4.
- [6] 王 琰, 骆祖江, 李 伟, 等. 浅层地温能开发与地下水环境影响模拟预测[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5):1231-1238.
- [7] 徐玉良, 贾 超, 贾佳佳, 等. 地下水源热泵抽灌系统优化布置[J]. 水科学与工程学报, 2017(6):54-59.
- [8] 王小清, 王 洋. 地下水地源热泵运行期地质环境监测与响应特征[J]. 工程勘察, 2019, 47(2):37-43.
- [9] 于丹丹, 骆祖江, 王 琰. 河北水勘院正定基地地下水水源热泵系统热平衡问题分析及对策[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(4):485-490.
- [10] 赖光东, 从 辉, 周维博, 等. 常温注水井对含水层热贯通的影响机理分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6):137-186.
- [11] 魏 静. 上海地区地源热系统对地质环境热影响的模拟分析[J]. 暖通空调, 2015, 45(2):102-106.
- [12] Zhao R R, Cheng J M, Zhang K N, et al. Numerical investigation of basin - scale storage of CO₂ in saline aquifers of Songliao Basin, China[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2015, 5(2):180-197.
- [13] Guo C B, Zhang K N, Pan L H, et al. Numerical investigation of a joint approach to thermal energy storage and compressed air energy storage in aquifers[J]. Applied Energy, 2017, 203:948-958.
- [14] 任 杰, 刘豪杰. 大坝下游河床潜流带温度场的影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1):244-247.
- [15] 张盼盼. 基于 FEFLOW 的水源热泵水热耦合数值模拟研究[J]. 地下水, 2018, 40(6):37-39.

(上接第 101 页)

- [4] 李明超, 张梦溪, 王孜越. 考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝控裂结构温度场与温度应力数值分析[J]. 水利学报, 2017, 48(5):551-559, 567.
- [5] 王晓辉, 邱超宇, 何文涛. 超长混凝土结构温度应力及裂缝控制研究[J]. 工程建设与设计, 2019(8):165-166.
- [6] 贾福杰, 姚 燕, 雷素素, 等. 基于温度应力开裂架的剪力墙混凝土抗裂性能研究及工程应用[J]. 混凝土, 2019(6):140-143.
- [7] 张 磊, 彭松涛, 田德智, 等. 混凝土坝温度应力实时反馈仿真系统研究[J]. 水力发电, 2019, 45(7):76-79, 107.
- [8] 柯玉伟, 李 斌, 马镇炎. 恒丰贵阳中心超长嵌固端楼板温度应力分析与设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(3):52-56.
- [9] 岳朝俊, 段 寅, 李 想, 等. 溢洪道控制段温度应力三维仿真分析——以卡洛特水电站为例[J]. 人民长江, 2018, 49(S2):173-175, 234.
- [10] 林建滨, 黄 巧, 黄达海. 碾压混凝土坝防渗面变态混凝土温度应力仿真[J]. 人民长江, 2018, 49(S1):229-234.
- [11] 黄劲柏, 蒋海英, 潘崇仁. 克孜河预应力渡槽工程顺槽向抗震减震技术方案研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2):124-129.
- [12] 谭鹏涛, 周 晶. 海底悬跨管道在波流和地震联合作用时的模型试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4):142-147.
- [13] 李伟鸿, 李桂元, 盛 东, 等. 大型矩形波槽结构地震响应分析[J]. 湖南水利水电, 2017(2):1-3.
- [14] 陶 涛, 肖 涛, 王林森, 等. 海绵城市低影响开发设施多目标优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1):92-96.
- [15] 武维维, 叶林海, 邵晓东, 等. 基于多目标遗传算法的虚拟人作业姿态仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1):155-164.
- [16] 程 明, 陈照波, 方宇娟, 等. 面向力学性能的并联隔振平台结构参数优化设计[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1):1-9.