

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.025

引用格式:汪林,袁炜,李旭辉,等.基于压电陶瓷智能传感器的大体积混凝土温控计算与监测研究[J].公路与汽运,2024(3):117-121+134.

Citation: WANG Lin, YUAN Wei, LI Xufei, et al. Research on temperature control calculation and monitoring of mass concrete based on piezoelectric ceramic intelligent sensor[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 117-121+134.

# 基于压电陶瓷传感器的大体积混凝土温控计算与监测研究

汪林<sup>1</sup>, 袁炜<sup>1</sup>, 李旭辉<sup>2</sup>, 殷新锋<sup>2</sup>

(1.四川公路桥梁建设集团有限公司 大桥工程分公司, 四川 成都 610041;

2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 建立大体积混凝土有限元仿真模型,对某桥主墩承台大体积混凝土温控设计方案进行计算,并采用嵌入式压电陶瓷传感器对大体积混凝土温度和应力进行监测。仿真计算结果和监测结果表明,承台温度、应力均满足规范要求,仿真计算所得承台温度与压电陶瓷监测温度十分接近,二者内部最高温度的最大差值仅 0.48 °C,最大内表温差的最大差值仅 0.58 °C,基于压电陶瓷等效电路参数特性的监测方法可用于大体积混凝土温度和应力监测。

**关键词:** 桥梁;大体积混凝土;承台;温度;应力;压电陶瓷传感器

中图分类号:U446.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)03-0117-05

在大体积混凝土浇筑中,由于水泥水化热和混凝土收缩产生的温度变化会导致混凝土内部产生较大温度应力,若温度应力超过混凝土的抗拉强度,结构可能出现裂缝<sup>[1]</sup>。大体积混凝土裂缝是目前国内外混凝土领域的研究热点之一<sup>[2]</sup>,对大体积混凝土进行有效监测,有利于防止结构在施工过程中发生破坏。陈雨等利用压电陶瓷技术,通过测量压电材料中等效电路参数反映混凝土结构中静态或准静态应力及温度变化<sup>[3]</sup>。Chen Y.等将压电传感器埋置于水泥基体中监测混凝土的受力状态,结果显示,压电传感器的等效回路与受力之间存在一种接近于直线的关系,利用等效电路参数测试方法可以实现对混凝土材料的应力监控<sup>[4-6]</sup>。上述研究主要针对普通体积混凝土的温度与应力监测,对大体积混凝土的监测研究较少。本文对某桥主墩承台进行温控仿真计算,并采用压电陶瓷传感器对大体积混凝土浇筑中的温度和应力进行监测,分析压电陶瓷传感器用于大体积混凝土施工监测的可行性。

## 1 工程概况

某桥包括南岸边跨、主桥、北岸边跨 3 段,主桥为跨度 770 m 的双塔钢-UHPC(超高性能混凝土)

组合混合梁斜拉桥。主塔基础采用分离式承台配群桩基础,塔基顶部标高为 43.380 m,桩顶高度为 7.5 m,在桩顶设置 2 m 高塔基。承台体采用 C40 混凝土,呈八角形,横桥方向宽度为 43.5 m,顺桥方向宽度为 28.9 m。塔座为八角形多角平台,采用 C40 钢筋混凝土,底部横桥方向宽度为 43.5 m、顺桥方向宽度为 28.9 m,顶部横桥方向宽度为 18.0 m、顺桥方向宽度为 20.2 m,上、下端底部水泥层厚度为 3 m。本文以北岸承台为研究对象,北岸主墩承台的一般构造见图 1、图 2。

考虑冷却水管的降温效果<sup>[7]</sup>,北岸承台采用直取水,冷却水管的水平管间距为 150 cm,垂直管间距为 150 cm,管径为  $\phi 50 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。冷却水管布置见图 3、图 4。

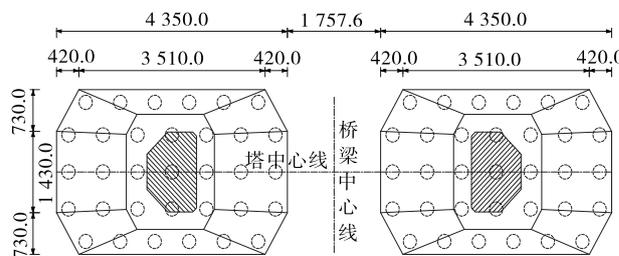


图 1 北岸主墩承台的平面布置(单位:cm)

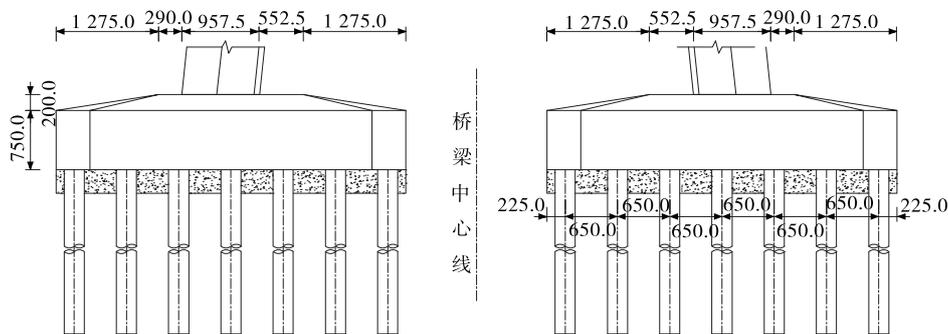


图 2 北岸主墩承台的立面布置(单位:cm)

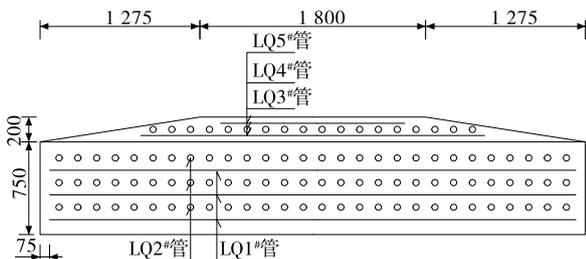


图 3 北岸主墩承台冷却水管的立面布置(单位:cm)

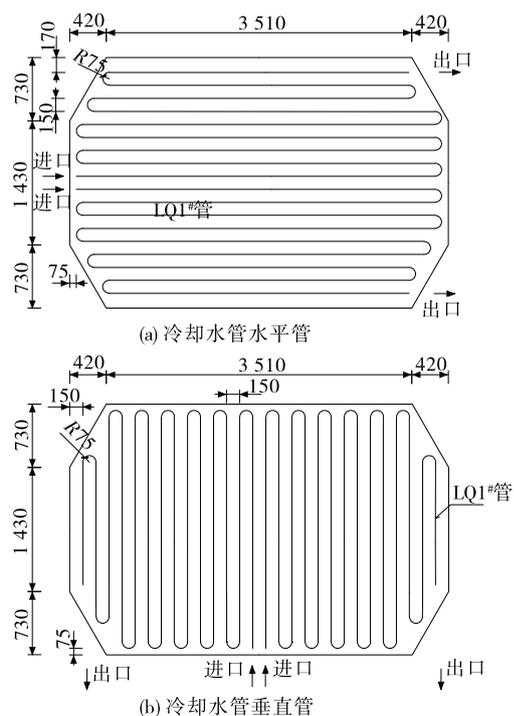


图 4 北岸主墩承台冷却水管的平面布置(单位:cm)

况,在模型底部设置一个固定的限制温度  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并在承台各边及承台顶采用对流边界。根据现场实测气温,将平均气温设定为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的正弦函数约束。考虑到在混凝土拌制时已采取了多项降低水化热的措施,将混凝土温升(热源)设定为  $49.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,确保混凝土拌制质量。

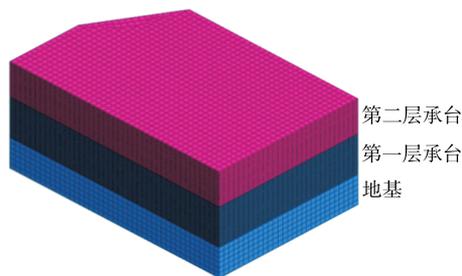


图 5 北岸主墩承台仿真计算 1/4 模型

## 2.2 北岸主墩承台温度仿真

分别对无冷却水管和有冷却水管两种工况进行承台温度仿真计算,分析冷却水管对承台温度控制的重要性<sup>[8]</sup>。仿真结果见表 1、图 6、图 7。

表 1 有无冷却水管时主墩承台

		温度仿真结果		单位: $^{\circ}\text{C}$
工况	施工阶段	内部最高温度	最大内表温差	出现时间
无冷却水管	浇筑第一层承台	60.79	21.45	混凝土浇筑后 4 d
	浇筑第二层承台	60.14	20.73	混凝土浇筑后 4 d
有冷却水管	浇筑第一层承台	58.41	18.21	混凝土浇筑后 3 d
	浇筑第二层承台	57.51	16.61	混凝土浇筑后 3 d

注:混凝土最大内表温差指混凝土内部最高温度与同一时刻距表面 50 mm 处混凝土最低温度之差。

由表 1、图 6、图 7 可知:1) 在混凝土浇筑过程中,构件内部温度呈上升趋势,然后逐渐下降并在构件中心达到最大值;在构件中心,混凝土浇筑后 3~

## 2 大体积混凝土温控计算

### 2.1 北岸主墩承台仿真模型

使用 MIDAS FEA 软件建立北岸主墩承台水化热仿真分析模型(见图 5),模拟承台的二次浇筑成型,浇筑间隔期为 14 d。根据施工现场的实际情

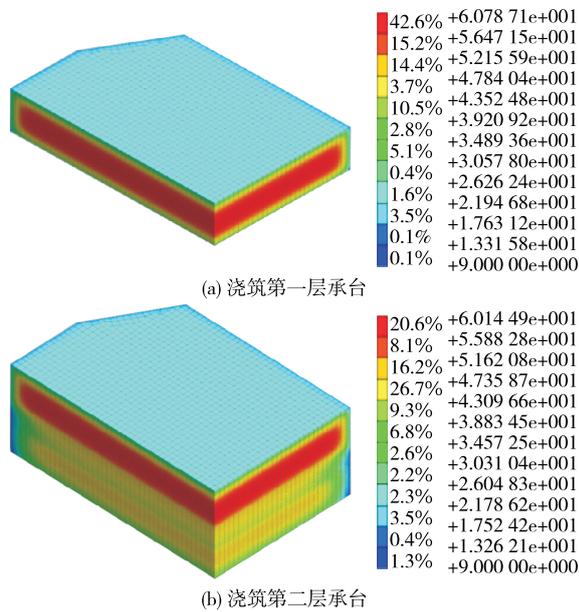


图 6 无冷却水管时各施工阶段的最高温度场(单位:℃)

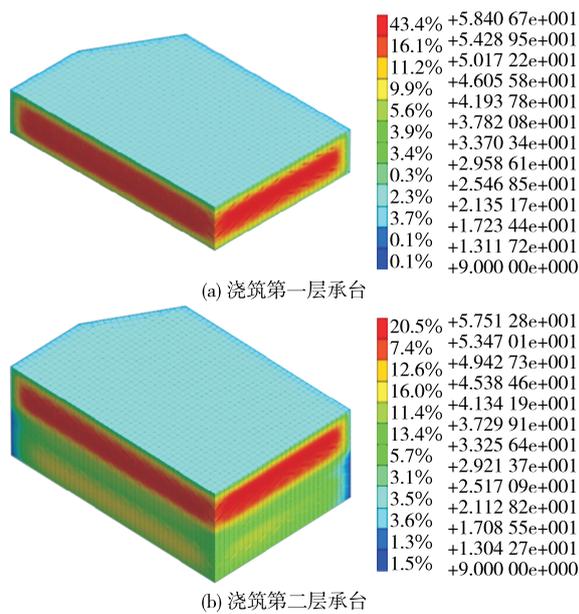


图 7 有冷却水管时各施工阶段的最高温度场(单位:℃)

5 d 出现最大温升值;随着内部温度的增加,内表温差逐渐增大,中心部位温峰出现时,内表温差达到最大,之后逐渐降低。2) 有冷却水管的工况下,温峰和最大内表温差均出现在混凝土浇筑后 3~5 d。室内最高温度满足 GB 50496—2018《大体积混凝土施工规范》<sup>[2]</sup>中混凝土实际温升不大于 50℃的要求,内表最大温差满足 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》<sup>[8]</sup>中大体积混凝土内表温度差不超过 20℃的要求。3) 在其他条件都相同的情况下,与无冷却水管时相比,有冷却水管时降温速率更快,

内表温差更小。布置冷却水管后,第一层、第二层承台内部最高温度分别下降 2.38℃、2.63℃,能有效降低裂缝概率。

### 2.3 北岸主墩承台应力仿真

不同龄期时主墩承台应力场、应力计算结果见图 8、图 9、表 2。由表 2 根据 JTS/T 202-1—2022《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》<sup>[9]</sup>计算承台大体积混凝土的抗裂安全系数,结果见表 3。

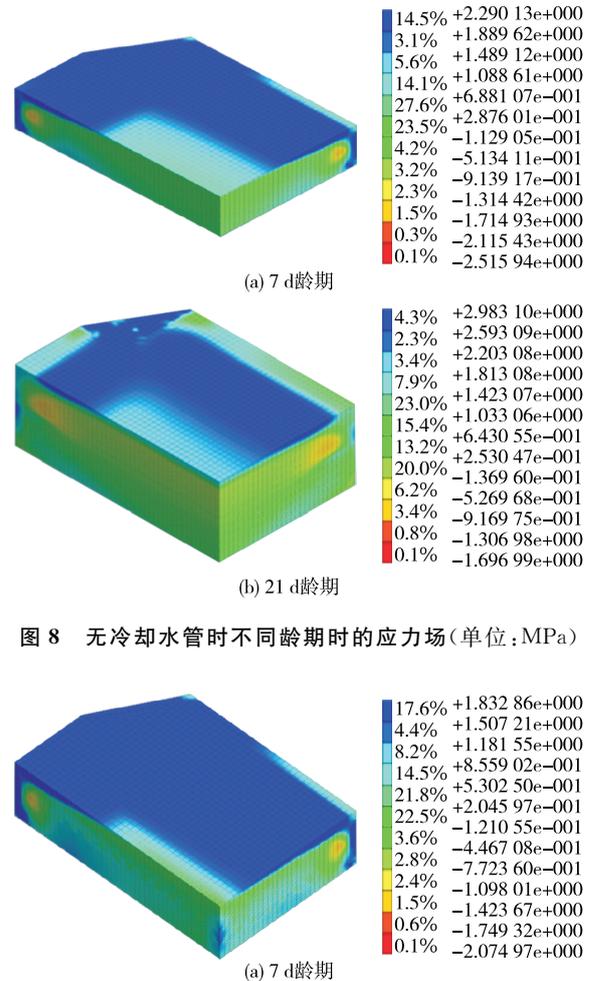


图 8 无冷却水管时不同龄期时的应力场(单位:MPa)

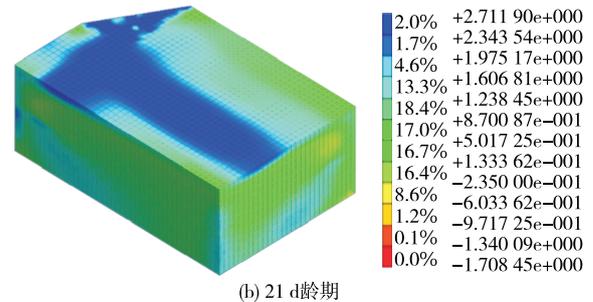


图 9 有冷却水管时不同龄期时的应力场(单位:MPa)

由图 8、图 9、表 2、表 3 可知:1) 承台每一层混凝土在早期都出现膨胀现象,混凝土浇筑后 3 d 左

表 2 主墩承台应力仿真结果 单位:MPa

工况	施工阶段	不同龄期时承台混凝土最大拉应力				
		3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
无冷却	浇筑第一层承台	1.76	2.29	2.51	2.62	2.71
	水管 浇筑第二层承台	1.78	2.31	2.64	2.98	3.22
有冷却	浇筑第一层承台	1.47	1.83	2.39	2.45	2.51
	水管 浇筑第二层承台	1.62	2.16	2.45	2.71	3.06

表 3 主墩承台大体积混凝土抗裂安全系数计算结果

工况	施工阶段	不同龄期时主墩承台抗裂安全系数				
		3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
无冷却	浇筑第一层承台	1.45	1.45	1.52	1.65	1.79
	水管 浇筑第二层承台	1.43	1.43	1.45	1.45	1.50
有冷却	浇筑第一层承台	1.73	1.81	1.60	1.78	1.93
	水管 浇筑第二层承台	1.57	1.53	1.56	1.60	1.58

右应力发展迅速,主要分布在构件上部表面,是由于内外温差产生的张应力;3 d后,混凝土出现明显收缩,产生局部应力传递,并逐步达到稳定。在其他条件相同的情况下,有无冷却水管时应力存在一定差异。2) 有冷却水管时承台抗裂安全系数在各个施工阶段都高于无冷却水管时安全系数。有冷却水管时,在不同龄期,承台的最小抗裂安全系数均在 1.52 以上,满足 JTS/T 202-1—2022 中抗裂安全系数  $\geq 1.4$  的要求<sup>[9]</sup>。混凝土浇筑完成后在承台周围安装冷却水管,通过循环水的冷却作用可降低混凝土温度,防止混凝土过早硬化。

由于早期混凝土上表面和侧面的内表温差较大,会产生一定应力集中,须通过冷却水降低混凝土内部温度,并加强对该部位的保温养护以减少内表温差,防止出现累积开裂现象。仿真计算中混凝土浇筑间隔时间为 14 d,施工过程中要注意防止混凝土浇筑间隔时间太长而导致承台受力过大。

### 3 大体积混凝土施工监测

#### 3.1 压电陶瓷传感器

压电陶瓷(PZT)具有特殊的压电特性及应力波传输和检测双重功能,既可以作为驱动器,也可以作为传感器<sup>[10]</sup>。但压电陶瓷易碎,须采用特殊的处理方法来保证其正常工作。由于信号在结构中以纵向波形传播,要求 PZT-5A 型双电极同侧压电陶瓷贴片处于压缩振动模式。

采用环氧树脂将带引线的压电陶瓷贴片夹在两块大理石块之间制成智能骨料<sup>[11]</sup>,引线的一端焊接到 PZT 补丁,另一端连接到 Bayonet Neill-Concelman (BNC)连接器,监测数据通过 BNC 连接器传输到数据分析终端。压电陶瓷贴片尺寸为 15 mm  $\times$  10 mm  $\times$  0.3 mm,智能骨料的直径为 25 mm、高度为 20 mm(见图 10)。

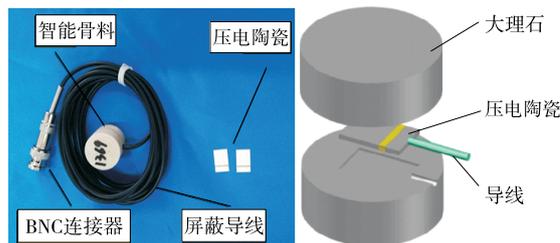


图 10 智能骨料的结构

当外部环境(温度、应力等)改变时,压电材料的性能会在晶粒层次上发生变化,体现其性能的等效电路参数也随之改变。根据这一特性,可以通过测量等效电路参数来反映外部物理条件的变化,实现对大体积混凝土温度和应力监控。

#### 3.2 不同嵌入深度下压电陶瓷传感器的温度和应力特性

嵌入深度为 0、50 mm、100 mm、150 mm 时压电陶瓷传感器的等效电路参数见图 11。

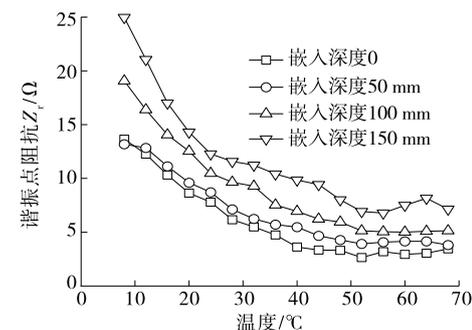
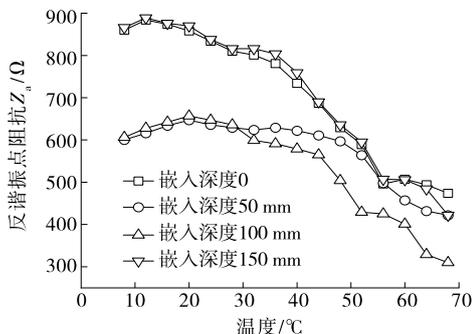
(a) 谐振点阻抗  $Z_r$ (b) 反谐振点阻抗  $Z_a$ 

图 11 不同嵌入深度下压电陶瓷传感器的特性

由图 11 可知:不同嵌入深度下,PZT-5A 传感器的谐振点阻抗  $Z_r$  的初始值不同,但变化趋势相同,均随着温度的升高而降低,可通过拟合不同嵌入深度下谐振点阻抗  $Z_r$  与温度之间的关系实现对大体积混凝土的温度监测。不同嵌入深度下 PZT-5A 传感器的反谐振点阻抗  $Z_a$  的变化趋势与  $Z_r$  类似。将  $Z_a$  监测结果与  $Z_r$  监测结果进行校对,可提高温度监测的准确性。

由于嵌入混凝土中压电陶瓷传感器的等效电路参数对应力的响应具有近似线性的特性,拟合关系方程更简单,压电陶瓷更易于应力监测。

综上,可以采用基于压电陶瓷等效电路参数特性的监测方法监测大体积混凝土的温度和应力。

### 3.3 监测步骤

基于压电陶瓷等效电路参数特性的大体积混凝土温度和应力监测步骤:1) 制作能保护压电陶瓷的智能骨料。2) 在大体积混凝土浇筑施工时将智能骨料嵌入预定位置。3) 通过 BNC 连接器将测得的数据传输到分析终端,提取压电陶瓷等效电路参数的温度和应力特性。4) 根据等效电路参数的温度和应力特性,实现大体积混凝土温度和应力监测。

以该桥承台大体积混凝土浇筑施工温度和应力监测为例搭建智能监测系统(见图 12),分别在第一层和第二层承台表面、距离表面 50 mm 处、承台内部形心周围按权重各布置 10 个智能骨料,取 10 处数据的加权平均值作为监测结果。

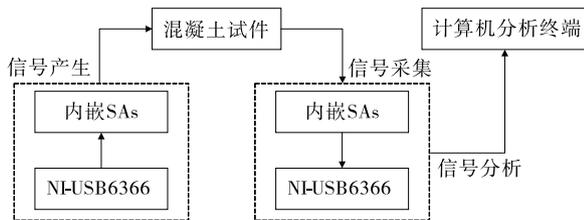


图 12 大体积混凝土温度智能监测系统

### 3.4 监测结果

承台大体积混凝土温度和应力监测结果分别见表 4、表 5。

表 4 承台大体积混凝土温度监测结果 单位:℃

施工阶段	内部最高温度	最大内表温差
浇筑第一层承台	57.93	17.85
浇筑第二层承台	57.03	16.03

表 5 承台大体积混凝土应力监测结果 单位:MPa

施工阶段	不同龄期时承台混凝土最大拉应力				
	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
浇筑第一层承台	1.42	1.81	2.34	2.42	2.42
浇筑第二层承台	1.57	2.10	2.42	2.61	3.05

对比表 4 和表 1,仿真计算的承台温度与压电陶瓷的监测温度十分接近,二者内部最高温度的最大差值仅 0.48 ℃,最大内表温差的差值仅 0.58 ℃,验证了基于压电陶瓷等效电路参数特性的监测方法用于大体积混凝土温度监测的可行性。

由表 5 根据 JTS/T 202-1—2022<sup>[9]</sup> 计算承台大体积混凝土的抗裂安全系数,结果见表 6。

表 6 承台大体积混凝土抗裂安全系数计算结果

施工阶段	不同龄期时主墩承台抗裂安全系数				
	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
浇筑第一层承台	1.79	1.83	1.63	1.79	2.00
浇筑第二层承台	1.62	1.57	1.58	1.66	1.59

对比表 5 和表 2,仿真计算的承台应力与压电陶瓷的监测应力十分接近。对比表 6 和表 3,抗裂安全系数监测值大于仿真计算值,监测应力具有较高的安全性,验证了基于压电陶瓷等效电路参数特性的监测方法用于大体积混凝土应力监测的可行性。

## 4 结论

本文以某桥主墩承台大体积混凝土浇筑为依托建立大体积混凝土有限元仿真模型,对其设计温控方案进行计算,同时采用压电陶瓷传感器监测大体积混凝土的温度和应力。结论如下:

(1) 压电陶瓷传感器的监测结果与仿真计算结果均表明该桥承台温度和应力满足规范要求。

(2) 仿真计算的承台温度和应力与压电陶瓷传感器的监测温度和应力十分接近,以温度为例,二者内部最高温度的最大差值仅 0.48 ℃,最大内表温差的差值仅 0.58 ℃,基于压电陶瓷等效电路参数特性的监测方法可用于大体积混凝土温度和应力监测且效果显著。

### 参考文献:

[1] 赵健,田亮,高伟.混凝土水化效应的抗裂性能优化与数值模拟分析[J].铁道建筑技术,2017(8):5-8+17.

(下转第 134 页)