

冬季大体积承台温度控制与仿真分析

田仲初¹, 宁琛¹, 马连枫², 钟忠¹, 许斌林¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中交第一公路工程局有限公司, 北京市 100024)

摘要:由于冬季大体积承台施工过程中,混凝土水化热反应,承台内外温差较大,冷却管入水温度难以控制,很容易产生较大的应力从而导致裂缝的产生。该文通过现场高频率温度监控和高密度的测点布置,使用有限元软件精细化仿真模拟承台大体积混凝土施工的湿度变化过程,计算结果与实测温度变化趋势一致,得出入水温度每降低5℃,峰值温度降低的百分比为最大1.60%,而冷却水管附近最大拉应力提升的百分比为4.98%,入水温度对冷却管附近混凝土拉应力的敏感度大于温度峰值;再结合自循环水箱,棉被保温等合理的温控措施;最后达到设定的控制目标,验证温控方案合理。建议冬季施工的大体积承台,冷却管入水温度应不低于5℃,以10~25℃为宜,承台四周拆模时间应控制为4~5d,拆模后立即对其进行保温养护,确保承台施工质量。

关键词:冬季施工;大体积混凝土;承台;水化热;温度控制

中图分类号:U442

文献标志码:A

0 引言

在中国已建成及在建的高速公路桥梁中,连续刚构桥的数量比重非常大,常用高墩以弱化墩的刚度,从而减小梁收缩对墩产生的次内力。墩身有着较高的高度,而混凝土重度较大,所以产生的自重较大,因此墩台基础施工是此类桥梁的重点关注工序。在连续刚构桥中,大部分设计都是以桩基础配合承台,承台作为桩基础和桥墩的连接构件,其混凝土用量大,起着“承上启下”的作用。在承台施工过程中,水泥凝结和硬化会释放大量水化热,且混凝土导热性差,内部水化热不易传导至外部,但表面热量散发较快,则会导致温度梯度的出现,使结构产生温度应力,引起开裂,降低耐久性。对于承台水化热问题,中国许多学者分析了最高温度,温度梯度,最大应力,以保证承台整体的质量,但对冷却水管附近的局部应力研究较少。冬季施工的承台因气温低,表面热量散失得更快,更易产生表面开裂。承台深层裂缝的产生可能来自冷却管周围自约束效应,多产生于升温期,由于水冷带走热量,导致管壁周围混凝土

产生过大收缩,内部混凝土约束其变形,引起沿管壁的开裂^[1]。鉴于此类问题,因此施工前要进行承台大体积混凝土水化热分析,冬季施工中不仅要对整体的水化热进行控制与监测,还应在冷却管局部布置测点,同时更要注意表面的养护和内部的降温。该文针对此类问题进行研究。

1 工程概述

桥址区位于余庆县龙溪镇跨越小乌江,桥梁与小乌江呈大角度斜交,走向约163°。小乌江走向整体呈南西至东北向。主桥跨径组成为(70+130+130+70)m,采用二次抛物线变截面箱梁,为预应力混凝土连续刚构桥。右幅桥4[#]~6[#]桥墩、左幅桥6[#]~8[#]桥墩为主桥桥墩,采用等截面矩形实体双肢薄壁墩,在其底部设有V形开口的加劲板,肢间纵向净间距为5m,单肢矩形截面尺寸为9m×2.5m。左、右幅主桥都采用分离式承台,桩径为2.0m的钻孔灌注桩作为基础,桩基排列为横向3排、纵向3排,每个承台下方共计9根摩擦桩。承台长宽均为12.2m,高4.5m,混凝土用量为669.78m³,采用C30混凝土依

收稿日期:2022-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078058)

作者简介:田仲初,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:382525361@qq.com

次浇筑所有承台。

2 承台温度控制措施和指标

2.1 温度控制措施

承台顶部混凝土暴露于空气中,且此处风速较大,为避免冬季气温较低可能引发的顶面混凝土开裂现象,采用工程布垫于承台顶面作为第一层,再用棉被覆盖在其上方,互相搭接,使敞露的承台表面覆盖严密,营造良好的保温养护环境,同时保持工程布内有凝结水。避免模板拆除时温度骤降引起温度裂缝,提前做好棉被和彩条布用以即时养护。

在内部布置冷却水管,直径为 35 mm,竖向每层的间距为 1.25 m,采用循环水,控制进水温度,水箱直径 1.5 m,高 2 m。在低水位布置水箱,即水箱位置低于冷却管高度,进出水口利用接头连接软管,减少水循环时水的损失。用小功率的水泵将水箱中的水压入进水口,出水口通过水位差的压力加速循环。水经过承台内部吸收热量后将热量带入水箱,从而缓慢提高水箱温度,进而提高进水口温度。防止冬季水温过冷,水冷带走大量热量,导致管壁周围混凝土产生过大收缩,内部混凝土约束其变形,引起的沿管壁开裂^[2]。

2.2 温度控制指标

通过初步温度控制理论分析,结合相关规范^[3]和文献^[4-8],制定适应本承台施工的温度控制标准:① 承台最高温度 $\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$;② 承台里表温差 $\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;③ 承台降温速率 $\leq 22.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$;④ 控制入水口温度 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,进出水管的温差 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 模型建立

3.1 计算参数的选取

因为外业现场试验条件受限,未进行混凝土相关热参数的试验,依据大体积混凝土水化热方案计算单与热工参数手册及相关文献选取有限元仿真模型参数^[9-13]。本次承台 C30 混凝土的比热取 $9\,506\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,热膨胀系数取 $1.0\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,传导率取 $2.8\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,泊松比为 0.2,暴露表面对流系数取 $13.955\,6\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,数值分析时采用 Kim 等^[14]提出的线单元解耦算法进行模拟,用线单元建立冷却管,

通过共同节点来实现水管与承台混凝土的热交换。恒温地基温度取 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,并考虑其具有比热和热传导性,可以反映承台与地基的水化热传递过程。根据实际测量值设置环境温度函数。冷却水管直径 35 mm,流量 $0.871\text{ m}^3/\text{h}$,冷却水对流系数取 $371.667\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,混凝土入模温度取 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。承台混凝土理论材料用量及配合比见表 1。

表 1 主墩承台材料用量				kg/m ³
水泥	砂子	碎石	水	外加剂
313	850	1040	162	3.68

由表 1 可知其配合比为:水泥:砂:碎石:水:外加剂=1:2.716:3.323:0.518:0.012。

3.2 有限元模型的建立

由于本承台冷却水循环方向非对称,为准确进行计算分析,针对承台与地建立整体模型,尺寸为 $12.2\text{ m}\times 12.2\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ 。承台模型采用 Midas/Fea 中的 8 节点实体单元建模,全承台水化热模型节点共 108 819 个,单元共 105 516 个,在冷却管附近对网格进行了加密,便于提取冷却管附近的应力值。地基忽略桩基础对承台的影响,地基地面与四周采用一般约束。承台混凝土有限元模型图及冷却管布置图如图 3、4 所示。

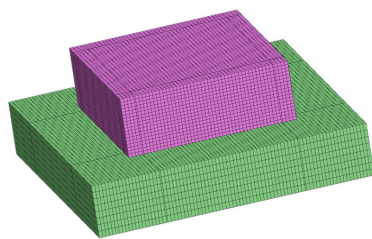


图 3 有限元模型图

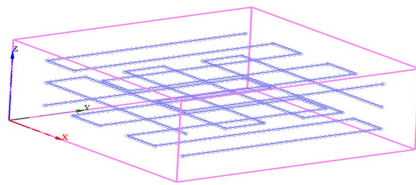


图 4 冷却水管布置图

3.3 计算结果

通过降低入水温度对降低混凝土内部温度作用有限,但入水温度过低会导致混凝土内部冷却水管周围形成较大温差,从而使应力增加^[13]。冬季水温较低,但循环水会不断提高水温,所以对可能出现的

水温情况进行分析,针对性地研究5℃、10℃、15℃、20℃、25℃和30℃ 6种不同入水温度情况,提取其对应的内部最高温度和冷却水管附近应力。结果如图5、6所示。

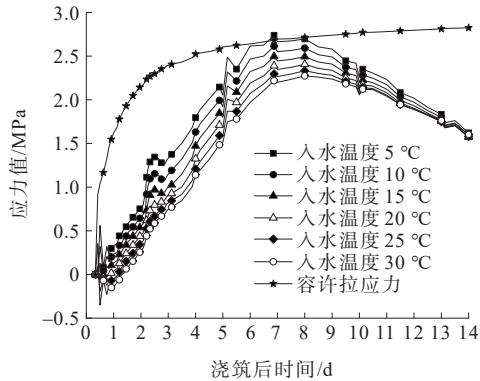


图5 承台冷却水管附近应力时程曲线

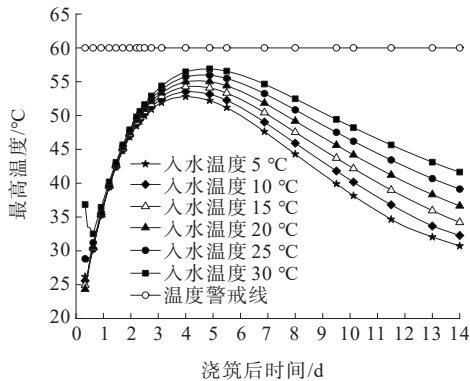


图6 承台内部最高温度时程曲线

由图5、6可知：

(1) 入水温度为5℃、10℃、15℃、20℃、25℃和30℃时,承台内部最高温度分别为52.81℃、53.55℃、54.32℃、55.14℃、55.99℃和56.90℃,温度每降低5℃,最高温度降低的百分比为1.38%、1.42%、1.49%、1.52%和1.60%。对应的冷却水管附近混凝土最大拉应力分别为2.74 MPa、2.61 MPa、2.50 MPa、2.41 MPa、2.33 MPa和2.27 MPa,温度每降低5℃,最大拉应力提升的百分比为2.64%、3.43%、3.73%、4.40%和4.98%,反映降低入水温度对混凝土内部的降温作用有限,但对拉应力的提升明显,为了防止承台沿着管壁开裂出现深层裂缝,建议冬季承台施工时冷却水管入水温度不应低于5℃。

(2) 过低的入水温度不仅会对最大拉应力造成影响,还会影响到一开始的冷却管附近混凝土的初始应力。同时,过高的温度也会造成冷却管附近混凝土的初始拉应力较大,其原因可能是混凝土入模

温度相比于冷却水温度较低,形成的反向温差导致拉应力的产生,在25℃以上较为明显,所以冬季大体积混凝土施工时入水温度应保持为10~25℃为宜。

4 温度场的监测

4.1 传感器的布置

为了准确监控混凝土内部温度场的改变量,从而对混凝土的养护起反馈指导作用,务必在承台混凝土内布设合理的测温元件进行测温采样。根据初步理论模型的计算结果,为了更真实地反映混凝土内部的温度场,在右幅6#承台的1/4结构中埋置温度传感器,在每层的中心点,距离中心点沿顺桥向方向302.5 cm、605 cm处以及距离中心点沿横桥向302.5 cm、605 cm各1个,共5个;由纵向开始,对同一层的横向传感器分别编号为1、2、3、4和5号;距承台底部每5 cm、115 cm、225 cm、335 cm、445 cm、各一层,共5层,从上至下分别为A、B、C、D和E层,总共25个测点。兼顾底面、中心和顶面,以应对冬季气温温度骤降等不利工况产生。测点具体布置如图7、8所示。

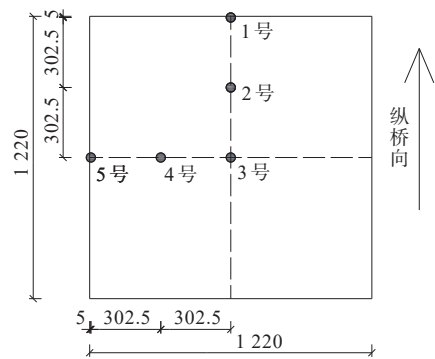


图7 测点布置俯视图(单位:cm)

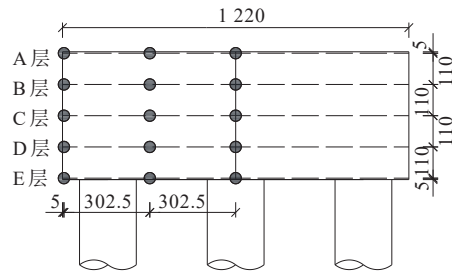


图8 测点布置侧视图(单位:cm)

为了防止传感器线路被混凝土浇筑时打断和振捣时的撞击损坏,将竖向埋置的温度传感器固定在钢筋上,将线沿着钢筋从上方伸出。

4.2 测试方法

从混凝土结构浇筑开始至混凝土结构浇筑施工完成后 14 d 都应是承台浇筑监测的工作时间,依据养护期间混凝土的温度测量数据采取对应的采样频率。目前的资料与文献表明,大部分大体积混凝土水化热的释放是在浇筑完成后的 72 h 内完成,所以在承台浇筑完成后的 72 h 内采取高频率测试采样,从初凝开始每间隔 2~3 h 进行一次温度采样,避免错过峰值温度;当承台达到峰值温度后每间隔 4~5 h 采样一次;承台温度下降斜率较为平缓后,每间隔 8~12 h 采样一次,环境温度的测量至少应保证中午与晚上各一次。在 14 d 之后,待承台附近环境温度与承台内部温度差值小于 25℃ 时停止温度监测。监测工作需要记录的数据包含承台混凝土内部温度传感器的温度值、冷却管入出水口的温度值、环境温度值、混凝土表面温度值。

4.3 温度场监测结果分析

混凝土浇筑完成后,承台顶部混凝土稍微硬化,即初凝后,开始进行温度采样。经过高频率的监测,获得了许多数据,限于篇幅,选择具有代表性(温度峰值出现的地方)的 D 层和 2 号处,分析其温度监测结果及内表温差,坐标“0”点代表浇筑完成的时间。监测结果如图 9~12 所示。

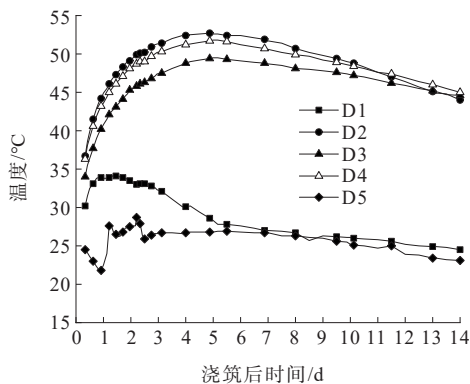


图 9 D 层横向测点温度曲线

由图 9、11 可知:承台混凝土内部实测最高温度为 52.9℃,未超过温度容许值 60℃,总体上符合承台内部混凝土温度的变化趋势。D1、D5 和 E2 温度普遍较低,说明承台表面水化热容易受到外界环境热交换的影响;由图 10、12 可知:横向温度内部测点温差较小,而竖向温差较为均匀,在连续刚构桥承台尺寸中,长和宽一般都大于高墩,进一步说明承台横向

散热慢,竖向散热良好,在冬季承台施工中,即使钢模板没有拆除,也应在承台四周表面采取必要的保温养护措施。

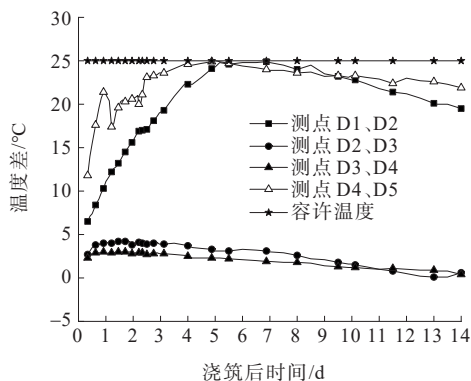


图 10 D 层横向测点温差曲线

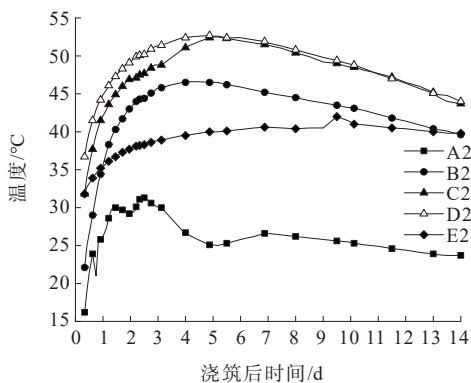


图 11 2 号竖向测点温度曲线

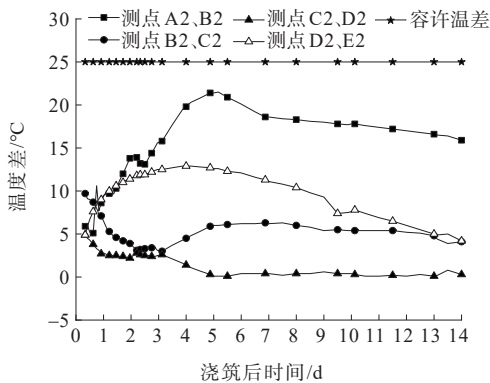


图 12 2 号竖向测点温差曲线

4.4 计算与监测结果对比

根据进水箱水温测量结果,采用 3 次抛物线拟合,算出均值为 25.46℃,遂采用 25℃ 入水温度模型计算理论值与实测值进行对比,用以验证。结果如图 13 所示。

由图 13 可知:实测最高温度在浇筑完成 108 h 左右出现,为 52.7℃,而仿真计算模型也在浇筑完成

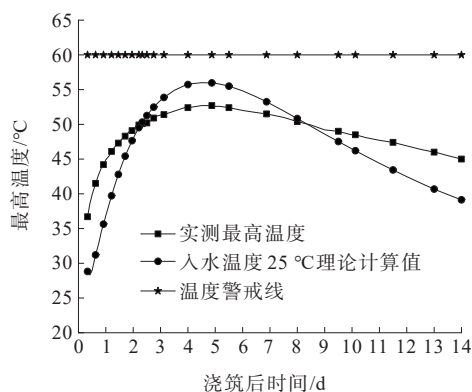


图13 最高温度理论值与计算值比较

108 h左右出现最高温度56.0℃,承台峰值温度实测值比计算值低3.3℃,相差5.9%。前半段(上升段)的差异主要是因为入模温度的测量组数较少,未能准确地反映混凝土的入模温度,最高点及后半段的差异主要是因为水温的上升导致内部散热能力的减弱以及模型的绝热温升值考虑稍微保守。若能在计算软件中引入变化的冷却水温输入功能,最终复核的仿真计算结果将更为准确。

5 结论

利用有限元仿真计算软件Midas/Fea建立小乌江大桥承台的仿真模型,对不同水温情况下的最高温度和冷却管附近拉应力进行了监测分析,制定了相应提高入水温度的措施,通过高频率温度监测采样数据与仿真计算值比对分析,得出以下结论:

(1) 降低冷却管入水温度能降低混凝土内部最高温度,但不如冷却水管附近拉应力峰值的增长幅度大,说明降低入水温度对混凝土内部降温作用有限,冬季承台施工,冷却水温应高于5℃。

(2) 较高或较低的入水温度均能对承台浇筑初期造成一个小的拉应力峰值,随后迅速降低。

(3) 承台内部最高位温度在浇筑后4~5 d达到最大值52.7℃。温降速率远小于温升速率,混凝土水化热热量释放时间相对集中在前3~4 d。实测温度场的变化走向与仿真计算结果契合良好,表明仿真模型能较准确地模拟整个承台水化放热过程,实测混凝土的里表温差、进出水温度等各项温控指标满足相关规范要求。

(4) 大桥承台峰值温度实测值与仿真模型计算值基本吻合。说明线单元建立冷却管,板式构造模拟地基是可行的,采用的热力学参数和边界条件能较好地符合现场实际情况。

(5) 建议在冬季浇筑承台混凝土时,应在5 d左右拆除模板,并对四周采取保温措施;对冷却水温度进行高频率监控确保水温不超过理论阈值,可采用循环水箱提高温度;在冬季承台水化热监控时,应在冷却管附近混凝土中增设应力传感器进行应力监测,以防止深层裂缝的出现。

参考文献:

- [1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] 王伟方.冬季施工大体积承台温度控制[J].公路,2019,64(8):131-134.
- [3] 中冶建筑研究总院有限公司,中交武汉港湾工程设计研究院有限公司.大体积混凝土工程施工规范:GB50496—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [4] 王博.大体积混凝土承台水化热效应及温控措施研究[D].西安:长安大学,2019.
- [5] 魏剑峰.武汉青山长江公路大桥承台大体积混凝土温控技术[J].桥梁建设,2019,49(S1):80-85.
- [6] 潘胜平.厦漳跨海大桥主塔承台大体积混凝土温控施工技术[J].四川建材,2015,41(2):179-182.
- [7] 贺云,贺金龙,余棚,等.索塔承台大体积混凝土温度控制研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(2):372-378.
- [8] 张永健,李鸥.洞庭湖大桥承台大体积混凝土温控试验研究[J].桥梁建设,2016,46(4):45-50.
- [9] 刘鹏.桥梁承台大体积混凝土温度分析与裂缝控制[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [10] 刘继,周勇军,杨勃,等.连续刚构桥承台水化热有限元分析与控制[J].中外公路,2017,37(4):121-125.
- [11] 卢二侠.大体积混凝土承台水化热温度分析与控制[D].长沙:湖南大学,2007.
- [12] 汪建群,魏桂亮,刘杰,等.跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J].桥梁建设,2020,50(3):25-31.
- [13] 王琼,陈昌哲,胡志坚,等.梁式承台大体积混凝土水化热温度场工程实测与数值仿真[J].混凝土,2020(9):139-143,147.
- [14] KIM J K, KIM K H, YANG J K. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system[J].Computers and Structures,2001,79(2):163-171.