

空间大跨度钢结构下的大体积混凝土结构承台水化热影响因素探讨

Discussion on the Factors Influencing the Hydration Heat of Mass Concrete Cushion Cap under the Large-span Steel Structure

梁卓俊¹ 雷传章² 李小双³

Zhuojun Liang¹ Chuanzhang Lei² Xiaoshuang Li³

1. 西京学院 中国·陕西 西安 710000
2. 广东省建筑设计研究院有限公司 中国·广东 广州 510010
3. 惠州市鑫中正检测鉴定有限责任公司 中国·广东 惠州 516232

1. Xijing University, Xi'an, Shaanxi, 710000, China
2. Guangdong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510010, China
3. Huizhou Xinzhongzheng Testing and Identification Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516232, China

摘要: 大跨钢结构建筑日益增多, 大体积混凝土承台的使用亦伴随增加。大体积混凝土水化热的问题也随之而来, 其内部复杂的温度场, 导致结构内表温差、最大绝热温升以及表面温度等难以利用简单的公式计算, 大体积混凝土工程涉及冶金、电力、核电、石化、机械、交通和大型民用建筑等建设工程领域。大体积混凝土工程施工一次性施工体批大、工作作业面大、工序繁多、施工临时设施种类多且结构复杂、各专项过程中的检查要素多且技术含量高。GB50496—2018《大体积混凝土施工标准》中虽然具体给出了各个控制项目的控制参数和技术要求, 但施工过程中仍面临着依据的标准规范多、需检查确认文件资料多、检测检验指标多等难题, 对施工技术人员提出了很高的能力要求, 且目前工程中采用的控制措施也相对有限。论文以大跨度钢结构建筑(跨度为 100 m 的钢拱形钢桁架屋盖)为研究依托工程。通过前期有限元模拟分析。结合各类文献、资料以及现行国家规范、标准等, 采用大型有限元分析软件 Midas FEA 构建大体积混凝土承台有限元模型进行数值模拟分析。对影响大体积混凝土承台温度场的控制性因素(混凝土入模温度、混凝土表面对流系数、冷水管布置形式)进行对比分析, 探讨各因素对大体积混凝土水化热的影响规律以及程度等, 为后续课题深入研究、工程设计和施工提供可靠的参考依据。

Abstract: With the increasing number of long-span steel structures, the use of mass concrete cushion caps has also increased. The problem of hydration heat of mass concrete also follows. Its complex internal temperature field makes it difficult to calculate the temperature difference between the interior and exterior of the structure, the maximum adiabatic temperature rise, and the surface temperature by using simple formulas. The construction of mass concrete involves metallurgy, electric power, nuclear power, petrochemical, machinery, transportation, large civil buildings and other construction projects. The one-time construction of mass concrete works has a large construction volume, a large working area, a wide range of following procedures, a wide variety of temporary construction facilities and complex structures, and many inspection elements and high technical content in each special process. Although the GB 50496—2018 *Construction Standard for Mass Concrete* specifies the control parameters and technical requirements for each control item, the construction process is still faced with many problems such as many standards and specifications, many documents to be checked and confirmed, and many inspection indicators, which puts forward high capacity requirements for construction technicians, and the control measures adopted in the current project are relatively limited. This paper takes the large-span steel structure building (the steel arch steel truss roof with a span of 100 m) as the research supporting project. Through the preliminary finite element simulation analysis. Combined with various documents, data and current national codes and standards, the finite element model of mass concrete cushion cap is constructed by using large finite element analysis software Midas FEA for numerical simulation analysis. The control factors affecting the temperature field of mass concrete cushion cap (concrete casting temperature, concrete surface convection coefficient, cold water pipe layout) are compared and analyzed, and the influence rule and degree of each factor on the mass concrete hydration heat are discussed, providing a reliable reference for further research, engineering design and construction of subsequent topics.

关键词: 大体积混凝土承台; 水化热状态; 绝热温升; 内表温差; 温控措施

Keywords: mass concrete cushion cap; hydration heat state; adiabatic temperature rise; internal surface temperature difference; temperature control measures

DOI: 10.12346/etr.v4i9.7051

【作者简介】梁卓俊(1996-), 男, 中国广东开平人, 硕士, 助理工程师, 从事混凝土结构设计研究。

1 引言

在工业与民用建筑工程的大体积混凝土施工中，由于水泥水化热引起混凝土浇筑体内温度的升高和水分的丧失，导致混凝土浇筑体早期塑性收缩和混凝土硬化过程中的收缩，当混凝土浇筑体内部温度非常不均匀或内外温差过大，在内外约束的作用下，使混凝土浇筑体内部产生温度应力，当温度应力大于该龄期的混凝土抗拉强度时将导致混凝土浇筑体或构件产生裂缝。如何防止大体积混凝土施工中出现有害裂缝是大体积混凝土施工中的关键技术问题。

混凝土结构温度场受到自身水化热状态以及施工环境等内外因素的相互作用，结构存在内表温差。混凝土自身水化热状态以及环境温度、管冷系统水温也伴随着施工过程不断变化，这些因素综合导致大体积混凝土结构产生不断随时间变化的不均匀分布的温度场。影响大体积混凝土温度场的内部因素主要为混凝土的配合比、水泥放热量、外部环境因素及承台结构尺寸等。混凝土自身导热系数较低，热传递能力较差，这使得大体积混凝土温度场变化较慢，且不同部位呈现复杂的非线性温度状态，导致混凝土内部的温度、应力分布、变形等不均匀，裂缝问题更为突出。因此对大体积混凝土水化热的控制尤为重要。

2 工程概况

2.1 结构概况

建筑水平投影尺寸为 253 m × 63.55 m=16079 m²，建筑最高点标高为 27.55 m。结构为空间大跨度钢结构，主要竖向受力构件为位于建筑入口的两个主拱、两侧的斜柱以及主拱和斜柱中部的竖向链杆支座^[1]。

主拱南北跨度 100 m，屋面主梁支座间最大跨度 44 m。

承台尺寸：第一阶：27 m × 23.5 m × 6 m × 11.5 m（工字型）；第二阶：15 m × 11.5 m（矩形）。

冷水管：直径 0.04；壁厚 5 mm（见图 1）。

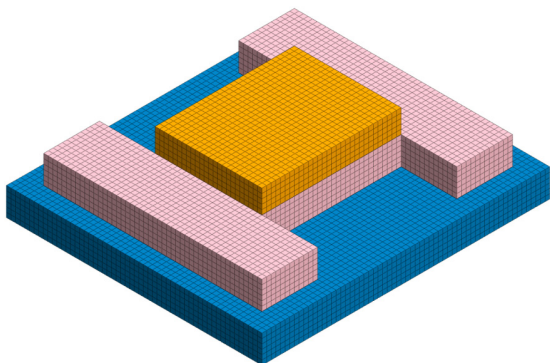


图 1 承台有限元分析模型

2.2 大体积混凝土水化热计算理论

水泥水化热可按下式计算：

$$Q_t = \frac{4}{Q_7/7 + Q_3/3} \quad (1)$$

上式根据水泥水化热放热双曲线公式 $Q_t = \frac{1}{n+1} Q_0 t^n$ 推导而出，式中 Q_t 为龄期 t 的累积水化热。

在有充分试验数据的前提下，也可根据指数公式 $Q_t = Q_0(1 - e^{-mt})$ 或双指数公式 $Q_t = Q_0(1 - e^{-at} - e^{-bt})$ 开展推算水泥水化热总量 Q_0 的工作。

$$Q = kQ_0 \quad (2)$$

Q ——胶凝材料水化热总量（kJ/kg）；

k ——不同掺量掺合料水化热调整系数。

混凝土绝热温升值：

$$T(t) = \frac{WQ}{C\rho}(1 - e^{-mt}) \quad (3)$$

2.3 混凝土裂缝控制措施

混凝土裂缝控制措施见图 2。

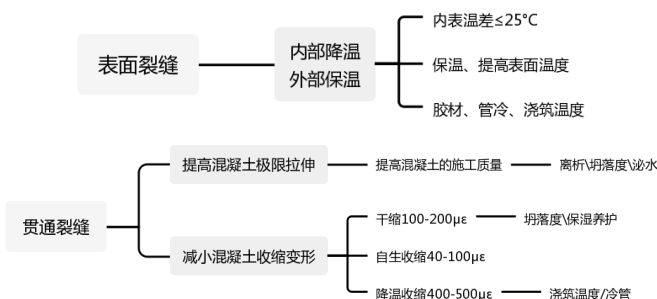


图 2 混凝土裂缝控制措施

2.4 水化热计算方法

采用有限元法进行求解，将混凝土结构的求解区域用有限单元和节点进行分割，然后列出所求节点关于温度的代数方程组。有限元法求解温度场时占用计算机资源较少因此求解相对容易，故有限元法可用来解决具有复杂边界条件的温度场问题^[2]。

拟采用实体单元（SOLD）模拟地基土和承台；采用管单元（PIPE）模拟冷水管。利用结构对称性，截取 1/4 承台为分析对象，减少计算量提高计算精度。地基土两侧及底部采用固定约束，地基土和承台 XZ 及 YZ 平面施加对称约束。承台分两阶浇筑，采用两个施工阶段进行模拟。计算模型及边界条件如图 3 所示。材料性能参数见表 1。

3 水化热影响评价

承台水化热趋势示意图如图 4 所示。

3.1 混凝土入模温度影响分析

混凝土入模温度直接影响大体积混凝土结构内部绝热温升最大值、表面绝热温升最大值、内表温差，该值的大小决定了混凝土水化热反应的温度基础值^[3]。

混凝土入模温度规范取值为 10 °C、20 °C 和 30 °C，以 C40 对入模温度对于大体积混凝土结构内部绝热温升、表面绝热温升以及内表温差的影响进行分析。不考虑保温效果，使混凝土表面自然散热，在大体积混凝土结构中不布置管冷系统，施工环境温度定分别为 10 °C、20 °C 和 30 °C。

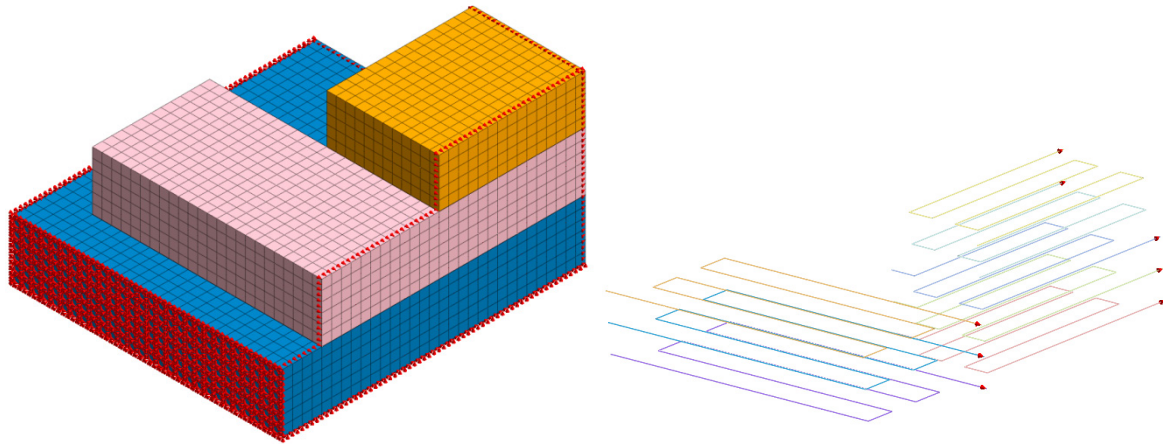


图3 计算模型及边界条件示意图

表1 材料性能参数

	弹性模量 (kgf/m ²)	泊松比	容重 (kgf/m ³)	热膨胀系数 (1/[T])	阻尼比	传导率 (kJ/(m · hr · [T]))	比热 (kJ/(kg · [T]))
地基土	1x10 ⁸	0.2	7849.7541	1.2x10 ⁻⁵	0.05	7.1159	0.8372
承台	3.3241	0.2	2549.2	1x10 ⁻⁵	0.05	9.2988	0.918
冷水管	4.140405x10 ¹⁰	0.3	1800	0	0.05	-	-

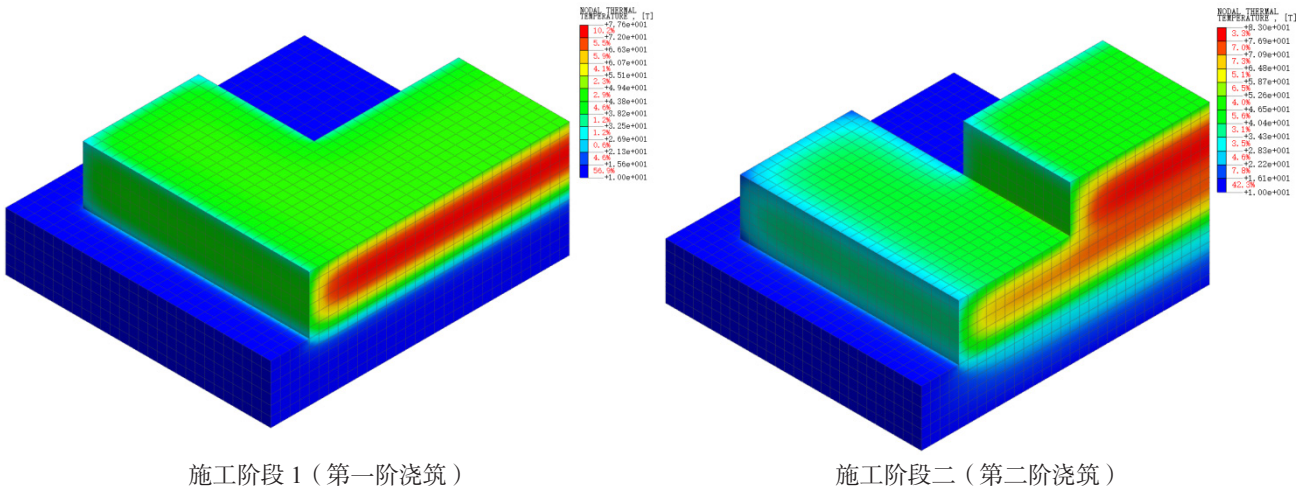


图4 承台水化热趋势示意图

由图5~图7可知,大体积混凝土结构内部和表面绝热温升最大值随混凝土入模温度的升高而增大。大体积混凝土结构内部温升最大值与混凝土入模温度具有近似线性相关,混凝土入模温度每提高1℃,混凝土内部所能达到的最高温近似提高1℃;大体积混凝土结构表温升最大值与混凝土入模温度也呈线性近似性相关;入模温度越高对大体积混凝土结构内表温差影响程度越大^[4]。

3.2 混凝土表面对流系数影响分析

大体积混凝土结构在施工过程中其温度场受施工环境温度以及不同保温措施下的表面对流系数的影响较大,在不同环境温度下选取合理的保温措施,可减少混凝土因内表温差所导致的混凝土温度应力引起的温度裂缝。

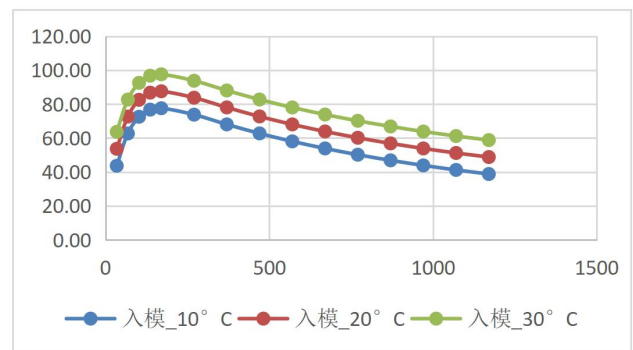


图5 不同入模温度下结构内部温升曲线

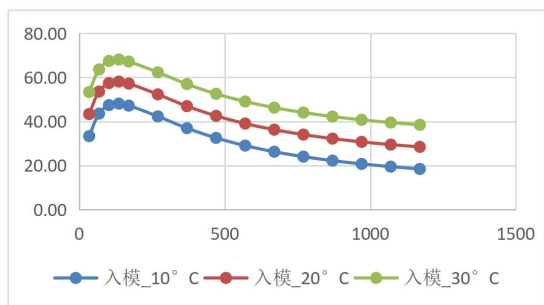


图 6 不同入模温度下结构表面温升曲线

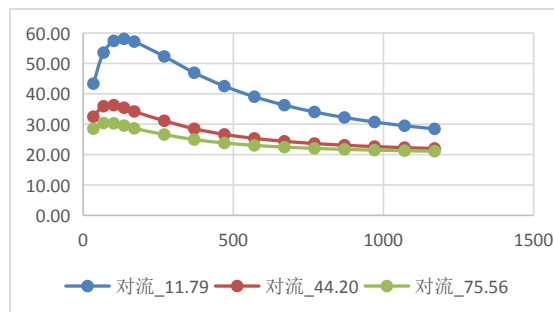


图 9 不同对流系数下结构表面温升曲线

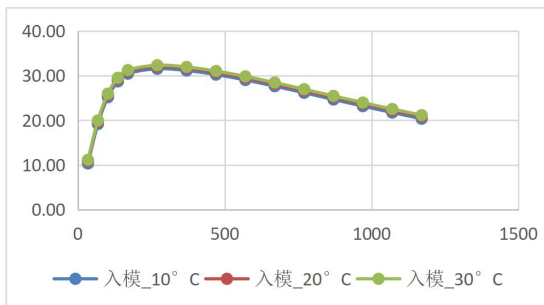


图 7 不同入模温度下结构内表温差曲线

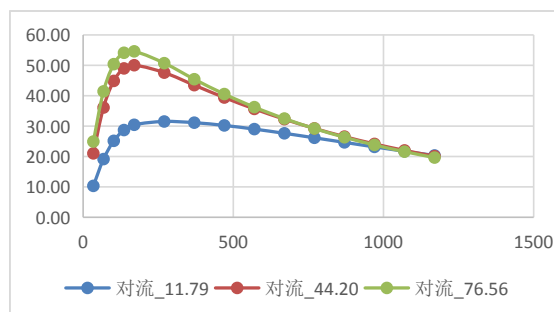


图 10 不同对流系数下结构内表温差曲线

混凝土采用 C40 级，不考虑采取降温措施，入模温度为 20℃，混凝土承台施工一般采用钢模板然后采用保温材料覆盖，覆盖厚度取 15 mm，忽略保温材料之间的比热容^[5]。根据不同情况对流系数可取 2.816~18.295(kcal/m²·h·C)，覆盖层越厚对流系数越小。经换算后的混凝土承台表面对流系数按 11.79、44.20 和 76.56 kJ/(m²·hr·[T]) 采用。

由图 8~图 10 可知，在环境温度一定的条件下，大体积混凝土结构表面对流系数的改变对于大体积混凝土结构内部绝热温升影响不大，大体积混凝土结构内部绝热温升最大差别不大，但在大体积混凝土结构内部绝热温达到峰值进入降温阶段后，大体积混凝土结构表面对流系数越大其内部降温速率越大^[6]。

当环境温度一定时，大体积混凝土结构表面对流系数的改变对于其表面温升影响较大。大体积混凝土结构表面对流系数越小其表面温升最大值越大。随着对流系数的持续减小，大体积混凝土结构表面温升最大值增率越大，但结构表面温升最大值的增大，结构进入降温阶段后，其表面温度降低速率越大。

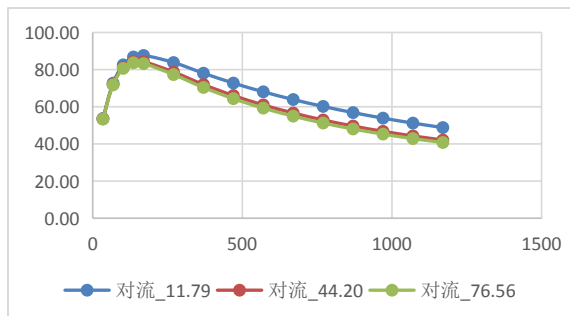


图 8 不同对流系数下结构内部温升曲线

当环境温度一定时，大体积混凝土结构表面对流系数的变化对大体积混凝土结构内表温差影响较大，但呈现非线性规律^[7]。对流系数越小，结构内表温差越小；对流系数越小，混凝土表面内表温差减小速率越大。

3.3 冷水管布置对比分析

降低大体积混凝土水化热效应的主要方法是在其内部布置管冷系统，冷水管系统可操作性较强，通过管径、水温、通水量等条件对温度进行调节，效果明显。近年越来越多的工程采用水管冷法降低大体积混凝土水化热，水管冷却法得到广泛的应用。

计算模型中，混凝土采用 C40 级，承台内布置管冷系统，入模温度定为 20℃，环境温度为 20℃，表面对流系数 11.79 kJ/(m²·hr·[T])。管冷系统中冷却管有效直径为 40 mm，管内水对流系数为 500 kJ/(m²·hr·[T])，管内水温度定为 15℃。对无降温措施、单排冷水管和多排冷水管（第一阶 3 排、第二阶 2 排）三种形式进行分析^[8]。

由图 11~图 13 可知，在环境温度一定的条件下，大体积混凝土结构设置管冷系统对内部绝热温升最大值影响较大，设置管冷系统的最高温度明显降低。其他条件相同的情况下，冷水管排数越多，降温效果越明显。

外部环境条件一致时，管冷系统对大体积混凝土结构表面温升有一定影响，设置管冷系统的最高温度有所降低，冷水管排数越多，降温效果越好^[9]。

当环境温度一定时，管冷系统对大体积混凝土结构内表温差影响较大，尤其在降温阶段，设置管冷系统时温差更小。此外，冷水管排数越多，温差越小。

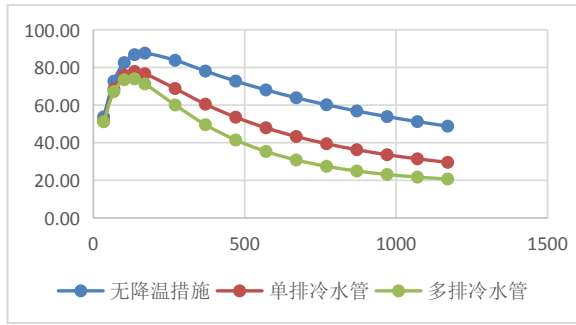


图 11 不同冷管布置下结构内部温升曲线

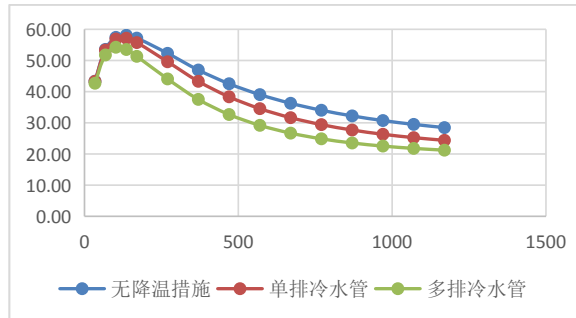


图 12 不同冷管布置下结构表面温升曲线

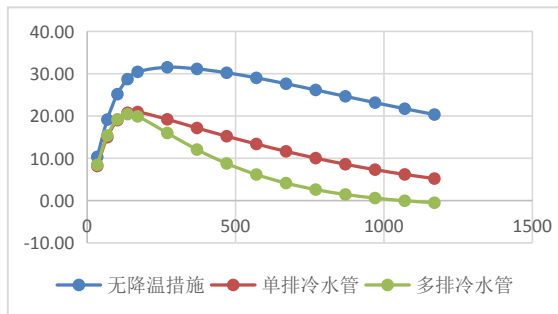


图 13 不同冷管布置下结构内表温差曲线

4 结论

论文对空间大跨度钢结构下的大体积混凝土结构承台的水化热进行数值模拟分析。结果显示：

①大体积混凝土结构内部绝热温升最大值与混凝土入模

温度呈线性相关。

②大体积混凝土结构内部绝热温升受表面对流系数影响较小。大体积混凝土结构表面绝热温升以及内表温差受表面对流系数的影响较大。

③管冷系统中冷却水水温的改变对于周围混凝土温度降低的影响范围以及周围混凝土温度降低值影响较大。冷水管排数越多，降温效果越明显，但不建议间距过密以影响构件承载力和混凝土的浇筑^[10]。

④论文研究的数值模型尚未对不同配合比和不同强度的混凝土构件进行对比分析，未能对大体积混凝土构件水化热的规律进行更为充分的探讨。此外，承台模型尺寸单一，若能结合不同尺寸承台进行分析，将能进行更系统更完善的分析。

参考文献

- [1] 大体积混凝土施工标准 GB 50496—2018[S].中国工业出版社,2018.
- [2] 林松涛.大体积混凝土施工标准解析与应用指南[M].北京:中国工业出版社,2018.
- [3] 王博.大体积混凝土承台水化热效应及温控措施研[D].西安:长安大学,2019.
- [4] 张小川.桥梁大体积混凝土温控与防裂[D].成都:西南交通大学,2006.
- [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,2003.
- [6] 林志祥.混凝土大坝温度应力数值仿真分析关键技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [7] 江昔平.大体积混凝土温度控制裂缝机理与应用方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [8] 朱岳明,徐之青,严飞.含有冷却水管混凝土结构温度场的三维仿真分析[J].水电能源科学,2003,21(1):3.
- [9] 朱岳明,徐之青.混凝土水管冷却温度场的计算方法[J].长江科学院院报,2003(3):3.
- [10] 梅善良,曾德顺.一期水管冷却效应的数值模拟新方法[J].计算力学学报,2003,20(4):508-510.