

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.04.061

沱江大桥塔梁固结段大体积 UHPC 温控仿真分析

杜杨¹,李元松¹,罗遥凌²,赵程¹,王传峰¹

(1.武汉工程大学,湖北 武汉 430073; 2.中建西部建设建材科学研究院有限公司,四川 成都 610000)

摘要:超高性能混凝土(UHPC)水胶比低,胶凝材料用量大,水化热高,大体积 UHPC 易形成较大的温度应力,导致结构开裂。基于 ANSYS 的仿真分析技术,采用 ANSYS 参数化设计语言(APDL)开发了一套大体积 UHPC 温度场及温度应力的计算程序,将其应用于沱江大桥塔梁固结段施工期温控分析。分析结果表明,采用分块分层浇筑方式并采取聚氨酯保温和通水措施后,浇筑块开裂风险较低,宜加强底板保温养护和优化实心区水管排布保证温控质量。

关键词:大体积 UHPC;仿真分析;温度场;温度应力;温控

中图分类号: U441+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0261-04

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)具有强度高、韧性高与耐久性良好的特点,可广泛应用于现代工程结构中,因此已成为土木工程领域备受关注的前沿技术和研究热点。由于其水胶比低,胶凝材料用量大,水化热高,大体积 UHPC 在约束条件下将产生较大的温度应力,引起结构开裂,其温度应力控制成为阻碍 UHPC 结构应用的一个关键问题^[1-2]。

目前,国内外关于大体积混凝土的研究成果丰富,但主要集中在普通混凝土,对于大体积 UHPC 的相关研究成果则相对匮乏,相应的理论研究和规范还存在许多不足^[3],运用仿真模拟技术分析大体积 UHPC 温度场和温度应力,对于指导大体积 UHPC 施工和提升大体积 UHPC 施工温控经验具有重要意义。现基于 ANSYS 的仿真模拟技术,开发了一套模拟大体积 UHPC 施工温控计算程序,将该程序应用于成都沱江大桥塔梁固结段施工期,分析其在边界条件下的温度场、温度应力分布特征,为塔梁固结段施工温控防裂提供指导。

1 工程概况

沱江大桥为成都市某项目重要节点工程,主桥桥跨布置:50 m+50 m+75 m(边跨)+280 m(主跨)=455 m,为空间双索面独塔斜拉桥,南引桥是 30 m

长的简支梁桥。该桥横断面设置双向 12 车道,标准桥面宽度 68 m。沱江大桥立面布置图如图 1 所示。塔梁固结段主梁应用超高性能混凝土(RPC140)。主桥桥塔下塔柱采用 C60 混凝土,塔梁固结段主梁长 49 m,宽 49.4 m,高 4 m,共计 6 558.3 m³,属大体积 UHPC 施工范畴。下塔柱为四肢分叉实心段,高 16 m,总高为 25 m。塔梁固结段纵剖面图如图 2 所示。

2 基于 ANSYS 的仿真模拟技术

2.1 热-应力耦合分析

大体积混凝土施工期温度场和温度应力计算属于耦合场分析,现采用的耦合分析方法为热-应力顺序耦合。首先通过热分析得到节点温度,然后将其作为“体荷载”施加到后面的结构分析中^[4-5]。热应力分析流程见图 3 所示。

2.2 APDL 的应用

在对大体积 UHPC 进行温控仿真模拟时,涉及到复杂的边界条件和结构模型,且需要对多种浇筑方案进行分析,仅靠 ANSYS 中的 GUI 难以满足需求。APDL 可将计算模型参数化,在建模时通过修改参数可以快速调整有限元模型;在加载求解时应用 APDL 及内部函数,创建气温、初始材料、初始数据、初始设置等宏文件,能够考虑各种时变参数和边界条件,完成一个完整的分析过程。

对于多种浇筑方案的评估,先针对典型浇筑方案构建一个完善的分析方案,再批量处理其计算文件中的参数,即可应用于其他浇筑方案的分析,从而极大地提升了温控仿真分析的效率。

收稿日期:2023-05-28

作者简介:杜杨(1998—),男,硕士研究生,从事桥梁结构研究工作。

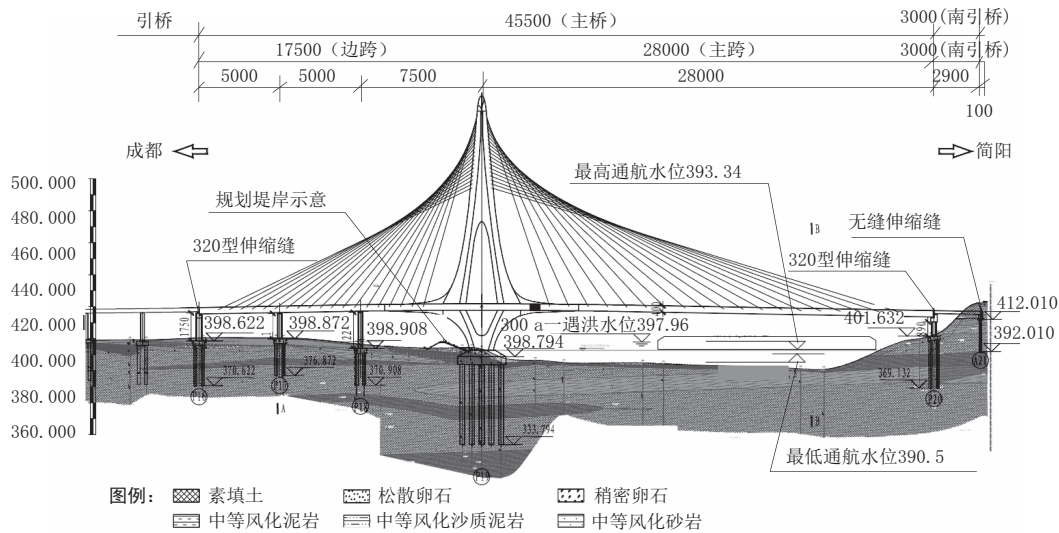


图 1 沱江大桥立面布置图(单位:mm)

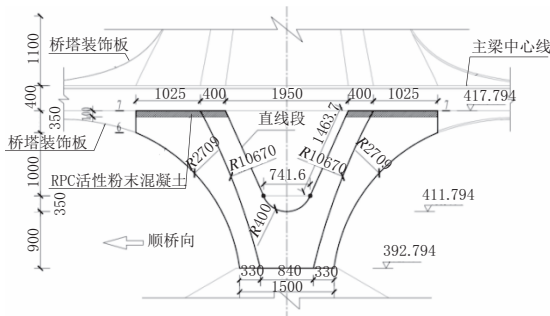


图 2 塔梁固结段纵剖面图(单位:mm)

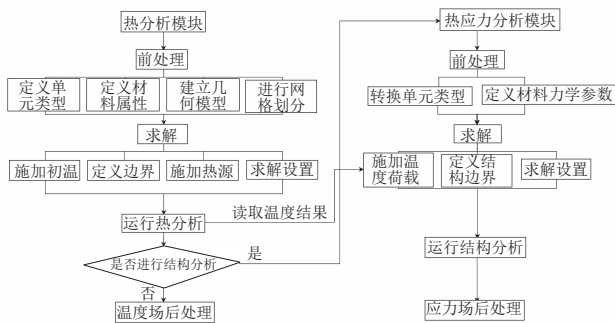


图 3 热应力分析流程图

2.3 施工过程的模拟

采用 ANSYS 的单元生死功能可反映混凝土在分层浇筑过程的动态变化。在 ANSYS 模拟过程时,在一次性生成结构全部单元后,再杀死全部混凝土浇筑块单元,然后按照施工进度,在相应荷载步内,逐步激活相应阶段的混凝土浇筑层单元,并对其施加荷载及定义边界条件。用以模拟浇筑块随施工阶段循环激活的命令如下:

```
*DO, LAYER, 1, CS      !开始循环
CMSEL, S, JZC%LAYER% !选择浇筑层组件
ALLSEL, BELOW, ELEM  !选择相应单元
EALIVE, ALL          !激活单元
.....
```

*ENDDO !结束循环

应用 ANSYS 单元生死功能应注意的问题:

(1) 为防止不与任何激活单元相连的节点出现“漂移”(自由度浮动),进而导致计算失真,应约束此类节点。在分析大体积混凝土分层浇筑施工期温度场时,可将所有未激活节点的温度设置为浇筑温度(相应的命令为 D, ALL, TEMP, TJ1(I))。对于自由度被约束的节点,当单元被激活后须先删除在其节点上的所有约束(相应的命令为 DDELE, ALL),再施加此阶段所需的荷载。同样,在进行温度应力仿真分析时,对浮动节点自由度也要采取相应的约束及删除约束操作。

(2) 在分析过程中,单元被“杀死”后一直存在于模型中,进行后处理时,它们将被包含在单元显示及输出列表的结果中。为避免未激活的单元“污染”节点平均结果,应在后处理操作的选择集中将未激活单元排除^[6]。

2.4 热源和冷却水的施加

热源和冷却水是大体积 UHPC 温度场分析的关键荷载,在 ANSYS 中水化热通过利用 BFE 命令施加生热率来实现,生热率按下式计算:

$$HGEN = \frac{dQ}{d\tau}$$

式中:HGEN 为生热速率, kJ/m^3 ; Q 为水化热, kJ/kg 。

取前后相邻两时间步的水化热之差计算水化生热增量: $\Delta Q(t) = Q(t_n) - Q(t_{n-1})$; 结合工程实验资料,将 $Q(t)$ 拟合为双曲线: $Q(t) = \frac{Q_0 t}{n+t}$ 。

与水化放热过程相反,水管的冷却效果考虑为混凝土的吸热,在 ANSYS 中以施加负水化热的方式

处理,其计算包括两个部分:一是混凝土和冷却水的温差产生的降温过程,二是混凝土绝热温升产生的降温过程。计算时所求荷载步的初始温度为混凝土的平均温度,计算出通水冷却的降温对应的等效绝热温升 ΔT , ΔT 将转化为水化热并采用命令 BFE 施加。

2.5 气温和边界条件的施加

混凝土与外界的热交换为第三类边界条件,须先定义气温函数和等效放热系数(对流系数),然后通过施加节点面荷载命令 SF 实现。截取部分边界条件施加命令如下:

```
ESEL,S,LIVE           !选择激活单元
NSLE,S                !选择相应节点
CMSEL,S,C1NODE       !选择一层对流节点组
SF,ALL,CONV,WBC(LAYER),%QIWEN%
                        !施加对流系数,气温
CMSEL,S,JUERENODE    !选择绝热节点组
SFDELE,ALL,CONV     !删除节点面荷载
```

3 塔梁固结段温控仿真分析

以沱江大桥塔梁固结段施工期温控为例,应用基于 ANSYS 的仿真模拟技术,实现参数化仿真分析并对其施工期温度场及温度应力进行研究。

3.1 计算参数和计算模型

混凝土材料的热学及力学性能相关参数通过室内试验与现场足尺试验整理得出,RPC140 和 C60 热学及力学性能参数见表 1 所列。浇筑温度设为 22℃,浇筑块设置十字分缝后浇带对称分为四块,单块从下往上分五层浇筑,浇筑层厚依次为 0.5、0.4、2、0.5、0.6 m(腹板一次浇筑成形),浇筑间歇时间依次为 0.5、0.5、1、0.5 d,采用混凝土外表面喷射聚氨酯保温,表面等效放热系数取为 2.7 W/(m²·℃),通水间距 1 m×1 m。

选取塔梁固结段为仿真对象,包括固结段主梁 RPC 浇筑块和 C60 下塔柱,浇筑块采用空间 8 节点实体单元,下塔柱采用六面体和四面体混合单元网格,计算域共离散为 226 609 个节点和 627 816 个单元,其中浇筑块 105 966 个节点和 94 960 个单元。下塔柱底部为全约束,浇筑块底部为竖向约束。塔梁固结段有限元计算模型见图 4 所示。

3.2 温度场分析

选取四分之一浇筑块,绘制温度云图分析前后温度空间分布特征,浇筑 3 d 温度云图和浇筑 28 d 温度云图分别见图 5 和图 6 所示。

表 1 RPC140 和 C60 热学及力学性能参数表

材料	RPC140	C60
最终绝热温升 θ /℃	105	/
导热系数 λ / [kJ·(m·h·℃)]	8.36	6.72
导温系数 α / (m ² ·h)	0.003 6	/
比热 c / [kJ·kg·℃]	0.973	0.96
线膨胀系数 α / (10 ⁻⁵ ·℃)	1.15	1
容重 γ / (kg·m ³)	2 500	2 500
泊松比 μ	0.2	0.167
28 d 弹性模量 /MPa	4.8 × 10 ⁴	3.6 × 10 ⁴
28 d 抗拉强度 /MPa	7.9	2.84

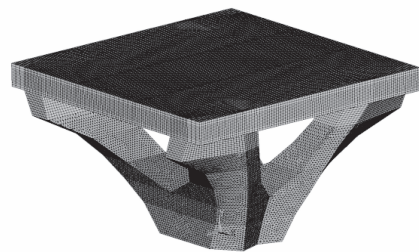


图 4 塔梁固结段有限元计算模型

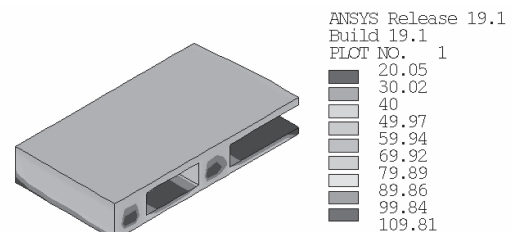


图 5 浇筑 3 d 温度云图

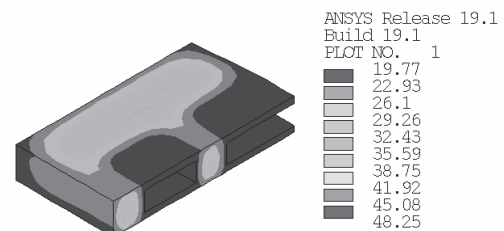


图 6 浇筑 28 d 温度云图

浇筑块在浇筑 3 d,由于水化热量大,温度迅速升高,内部最高温达到 110℃,最高温度出现在实心区横梁内部,此时顶板温度高于底板温度。浇筑块在浇筑 28 d,各浇筑层持续降温,内部最高温降低至 48℃,温度分布较均匀,在通水冷却和保温措施下横梁内表温差显著缩小。

选取浇筑块横梁底部、中心、表面三个特征点,绘制其温度历程曲线并分析温度随时间的变化特征,特征点温度历程曲线图如图 7 所示。

底部和表面温度在其浇筑层浇筑后 12 h 达到温峰,温度峰值约为 72℃,之后进入降温阶段,至 700 h 温度均降低至 22℃;中心温度以极高的速率上升,至

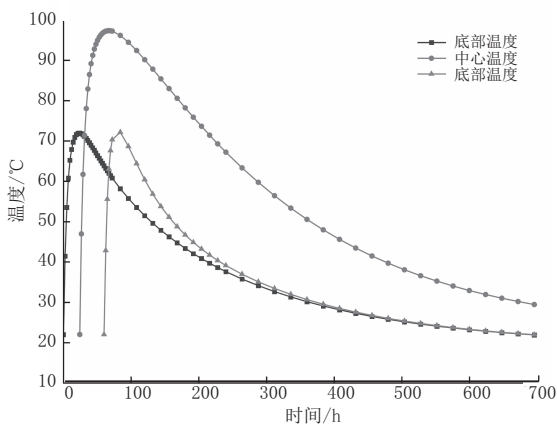


图 7 特征点温度历程曲线图

其浇筑后 36 h 达到峰值 97℃, 之后进入降温阶段, 至 700 h 温度降低至 29℃。

3.3 温度应力分析

选取四分之一浇筑块, 绘制应力云图分析前后后期应力空间分布特征, 浇筑 3 d 应力云图和浇筑 28 d 应力云图分别见图 8 和图 9 所示。

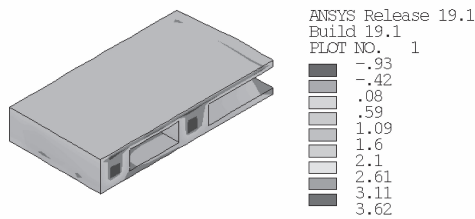


图 8 浇筑 3 d 应力云图

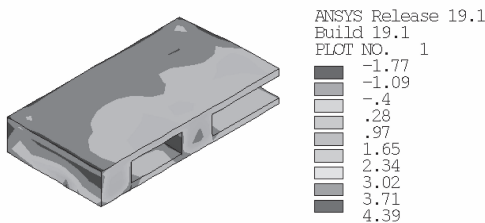


图 9 浇筑 28 d 应力云图

浇筑块在浇筑 3 d 后, 由于早期中心温度高, 温升引起的膨胀受到约束在内部产生压应力, 在表面产生较大拉应力, 最大拉应力为 3.62 MPa, 低于相应允许拉应力 4.44 MPa; 浇筑块在浇筑 28 d, 随着散热的持续, 内部的收缩大于外部收缩, 不协调变形在内部引起较大拉应力, 最大拉应力为 4.39 MPa, 低于相应的允许拉应力 4.94 MPa。前后期最大拉应力均低于相应的允许拉应力, 满足应力控制标准。前期底板拉应力水平高于顶板, 后期实心区内部应力水平高于空腔区。

选取浇筑块横梁底部、中心、表面三个特征点, 绘制其应力历程曲线并分析应力随时间的变化特征, 应力历程曲线图见图 10 所示。

浇筑期间拉应力因分层出现波动, 底部、顶部最

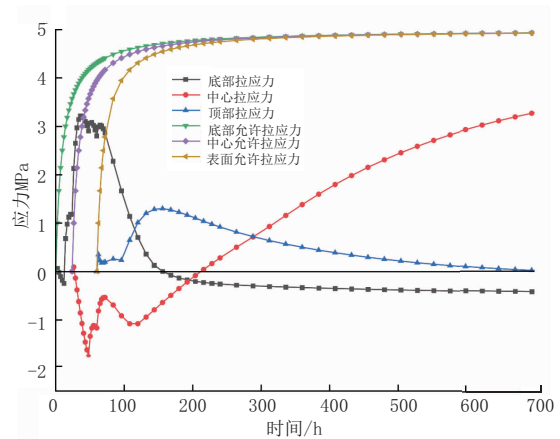


图 10 特征点应力历程曲线图

大拉应力分别出现在第 36 h、第 132 h, 最大拉应力值分别为 3.21 MPa、1.29 MPa, 早期底部拉应力增长较大, 其拉应力峰值高于顶部; 中心的压应力逐渐变为拉应力, 随着降温速率趋于同步和弹性模量的低速增长, 后期内部拉应力增长速率较低, 中心点在 700 h 拉应力为 3.35 MPa。

4 结语

研究了运用 ANSYS 进行温控仿真分析的相关技术问题, 采用 APDL 开发了大体积 UHPC 温度场及温度应力的计算程序, 并以沱江大桥塔梁固结段施工期为例计算分析, 得出以下结论。

(1) 在 ANSYS 的热分析模块和热应力耦合分析模块中, 进行大体积 UHPC 施工期温度场、温度应力场仿真分析是可行的, 参数化仿真分析的实现, 关键在于利用 APDL 语言特性模拟施工过程、描述时变参数、定义边界条件。

(2) UHPC 水化温升极高, 采用分块分层浇筑方式并采取聚氨酯保温和通水措施后, 浇筑块温度应力满足应力控制标准, 开裂风险较低, 为保证施工温控质量, 应注意加强底板保温养护和优化实心区水管排布。

参考文献:

- [1] 胡功球. 不同养护条件下超高性能混凝土(UHPC)的收缩性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [2] 许宝丹. 超高性能混凝土柱抗震性能及构筑物水化热温度场的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [3] 黎维良. 超高性能混凝土材料在桥梁工程中的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(1): 147-149.
- [4] 杨磊. 混凝土坝施工期冷却水管降温及温控优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [5] 游志雄. 大体积混凝土温度应力场分析与温控措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [6] 李立峰. CAE 分析大系: ANSYS 土木工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.