

弘德大桥大体积混凝土承台施工期温控研究

但瑞强

(佛山市建盈发展有限公司, 广东 佛山 528315)

摘要: 以弘德大桥承台施工为例, 采用有限元桥梁软件 MIDAS Civil, 对大体积混凝土承台在施工期的温度场和应力场进行计算仿真模拟, 以期今后大体积混凝土工程的温控防裂提供参考。结果表明, 承台混凝土层在浇筑结束后 42 h 左右达到温度峰值 63.4 °C, 布置冷却水管有利于加快内部散热; 升温阶段的最大主拉应力分布在冷却水管周围, 降温阶段初期的最大主拉应力出现在顶面棱边附近, 降温阶段后期的最大主拉应力出现在长边中心附近。

关键词: 弘德大桥; 温度控制; 冷却水管; 有限元仿真

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0272-05

Study on Temperature Control in Construction Period of Mass Concrete Base Slab for Hongde Bridge

DAN Ruiqiang

(Foshan Jianying Development Co., Ltd., Foshan 528315, China)

Abstract: In order to provide a reference for temperature control and crack prevention of mass concrete projects in the future, and taking the construction of base slab for Hongde Bridge as an example, the finite element bridge software MIDAS Civil is used to calculate and simulate the temperature field and stress field in the construction period of mass concrete base slabs. The results show that the concrete layer of the base slab reaches a peak temperature of 63.4 °C about 42 hours after the pouring, and the layout of cooling water pipe is beneficial to accelerating the internal heat dissipation. The maximum principal tensile stress during the heating stage is distributed around the cooling water pipes. At the beginning of the cooling stage, the maximum principal tensile stress occurs near the top edge. In the later stage of the cooling stage, the maximum principal tensile stress appears near the center of the long side.

Keywords: Hongde Bridge; temperature control; cooling water pipe; finite element simulation

0 引言

桥梁大体积混凝土承台在施工期间, 会因温度下降而产生较大的收缩变形。这种变形在受到约束条件下, 会在混凝土内部和表面产生拉应力。若拉应力超过混凝土对应龄期的抗拉强度, 或者混凝土约束收缩变形程度超过混凝土的极限拉伸应变能力, 混凝土承台就会产生裂缝^[1-2]。因此, 在桥梁大体积混凝土承台施工时, 为避免温度应力过大, 防止混凝土结构开裂, 必须采取温控措施^[3-4]。

1 工程概况

弘德北路新建起点连接禅城区禅港路与弘德北

路平交口, 路线向北延伸, 跨越潭洲水道, 终点连接南海区现状荣星路。路线全长 1.654 km, 主线为双向 6 车道, 设计时速为 60 km/h, 采用一级路设计标准。弘德大桥主桥为单塔双索面钢箱混合梁斜拉桥, 桥跨布置为 33 m+98 m+190 m; 索塔采用分离式下塔柱风帆造型、分离式承台、群桩基础。过渡墩采用群桩基础。主塔承台尺寸为 19.2 m×15.1 m×4.5 m, 承台混凝土总量为 1 106.2 m³, 设计标号为 C40 混凝土, 一次整体浇筑成形。

2 温度控制原理和仿真模拟

随着桥梁技术的进步, 大型桥梁工程越来越多, 温度变化对承台、塔座等大体积混凝土结构的影响越来越受到重视。在本工程中, 温度控制采用桥梁有限元软件 MIDAS Civil 进行计算。该软件能够对大体积混凝土承台在施工期的温度场和应力场进行模

收稿日期: 2025-04-17

作者简介: 但瑞强(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事公路建设管理工作。

拟分析,不仅可以考虑混凝土浇筑方式、施工层厚度、入模温度、施工间歇、外界水温和气温变化等因素,还可以考虑混凝土向不同介质散热和徐变收缩等因素,其仿真模拟能够较为准确地展现弘德大桥大体积混凝土承台的施工过程^[5-7]。

2.1 混凝土热力学参数

2.1.1 混凝土配合比

由项目工地试验室提供的弘德大桥大体积混凝土承台 C40 混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比						单位: kg/m ³
水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂	
238	172	718	1 077	155	9.8	

2.1.2 混凝土的绝热温升

水泥和混凝土的有关技术参数,参照朱伯芳的绝热温升经验公式。

$$\theta(\tau) = \frac{Q(\tau)(W + kF)}{c\rho} \quad (1)$$

式中: $\theta(\tau)$ 为混凝土的绝热温升; $Q(\tau)$ 为每千克水泥最终水化热量, 52.5 级普通硅酸盐水泥最终水化热量取 350 kJ/kg; W 为每立方米混凝土中水泥的用量, kg/m³; k 为折减系数, 对于粉煤灰, k 可取 0.25; F 为混合材用量, kg/m³; c 为混凝土的比热容, 取 0.96 kJ/(kg·℃); ρ 为混凝土的质量密度, 取 2 369.8 kg/m³。

采用以上公式和参数取值, 可计算出承台 C40 混凝土水化热绝热温升值为 $\theta(\tau)=43.2$ ℃。

根据《大体积混凝土施工规范》(GB 50496—2018), 热源函数按如下公式计算:

$$T(t) = \frac{WQ}{c\rho}(1 - e^{-mt}) \quad (2)$$

式中: $T(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的绝热温升, ℃; Q 为每千克水泥最终水化热量, 52.5 级普通硅酸盐水泥最终水化热量取 350 kJ/kg; W 为每立方米混凝土中胶凝材料的用量, kg/m³; c 为混凝土的比热容, 取 0.96 kJ/(kg·℃); ρ 为混凝土的质量密度, kg/m³; M 为与水泥品种、浇筑温度等有关的系数, 其反映了混凝土的发热速率。

根据经验, 在入模温度分别为 15、20、25、28 ℃时, m 的取值分别为 0.8、1.1、1.3、1.4。

2.1.3 水泥混凝土热力学基本参数

水泥混凝土物理、热力学基本参数选取如表 2 所示。

2.1.4 边界条件

弘德大桥承台采用 C40 混凝土一次浇筑成形,

表 2 水泥混凝土物理、热力学基本参数

泊松比	比热/ (kJ·kN ⁻¹ ·T ⁻¹)	热传导率/ (kJ·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·T ⁻¹)	线膨胀系数/T ⁻¹
0.2	96	10.6	1.0×10 ⁻⁵

高度为 4.5 m。浇筑块体底面受到 1 m 厚 C15 混凝土的弹性约束, 侧面与顶面为与环境接触的热对流边界条件, 模型如图 1 所示。

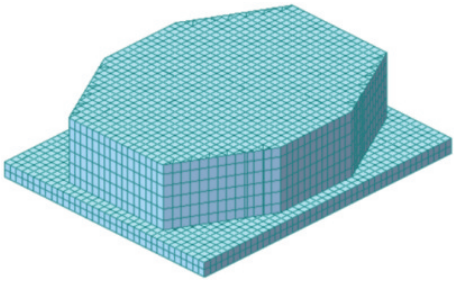


图 1 弘德大桥承台温度控制计算模型示意图

2.2 冷却水管布置

冷却管、测温元件和结构钢筋同步安装。本工程中, 冷却水管采用 A40×2.5 mm 且导热性能好的钢管。管道安装应保证接头牢固、可靠。当冷却水管和承台钢筋出现交叉干扰情况时, 管道位置可结合现场实际和结构钢筋的布置情况作出相应调整。安装完成后必须进行通水检验^[8-11]。当混凝土内部通水降温时, 进、出口的水温差应小于或等于 10 ℃。进水温度与混凝土内部最高温度的温差不超过 20 ℃, 通过改变冷却水的流量来调节冷却水带出的热量, 从而控制混凝土的降温速率。运用 MIDAS Civil 进行仿真模拟时, 在承台混凝土升温期通冷水, 每根管道流量按 2.4 m³/h 控制; 在承台混凝土降温期通热水, 每根管道流量按 15 m³/h 控制(见图 2)。

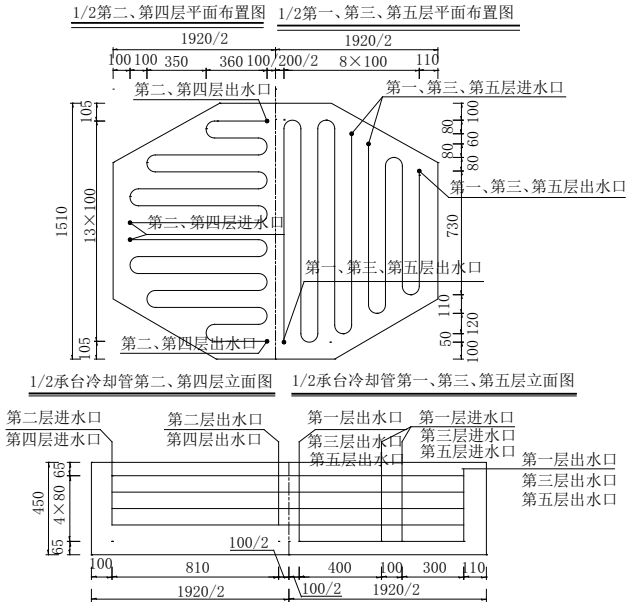


图 2 弘德大桥承台浇筑冷却水管布置示意图(单位: cm)

3 有限元模型仿真结果分析

3.1 温度场计算结果

根据施工组织设计,结合项目总体进度安排和佛山市禅城区的气温条件,弘德大桥承台温度控制计算的入模温度取 28℃,温度计算结果如表 3 所示。弘德大桥承台混凝土结构内部最高温度场分布云图如图 3 所示,混凝土结构芯部和表面等关键

测点的温度时程曲线如图 4 所示。为进一步体现冷却水管的降温效果,本文仿真模拟分别对布置冷却水管和不布置冷却水管的情况进行计算(见表 4)。

表 3 承台混凝土通冷却水时温度计算结果汇总表

浇筑块	入模温度/℃	温峰出现时间/h	温度峰值/℃	最大内外温差/℃	温升值/℃
承台(4.5 m)	28	42	63.4	21.6	35.4

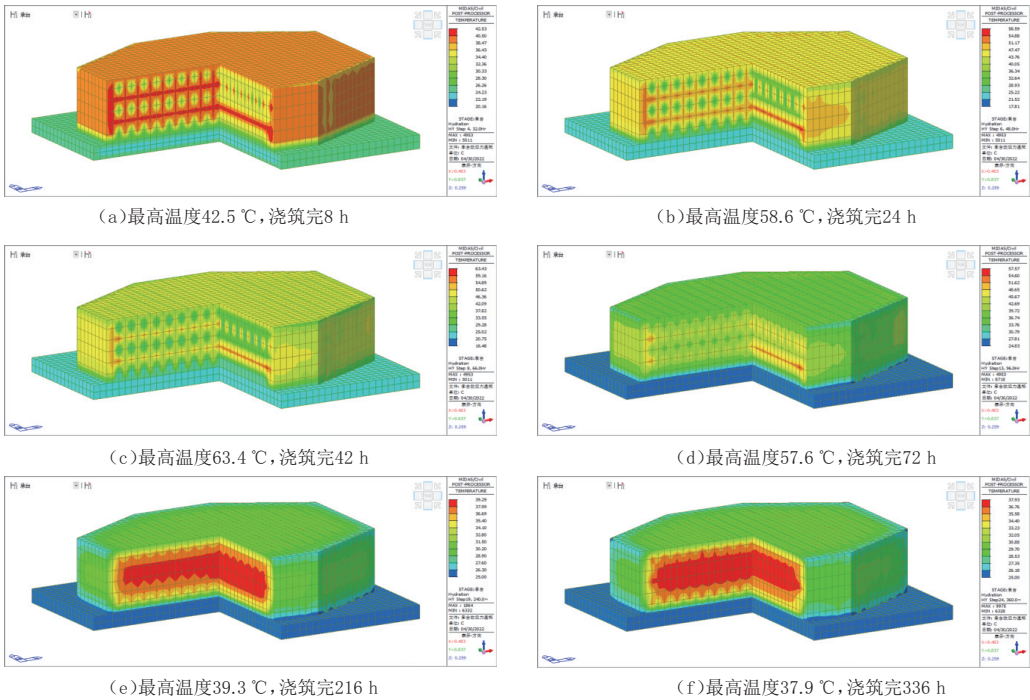


图 3 弘德大桥承台温度场分布云图

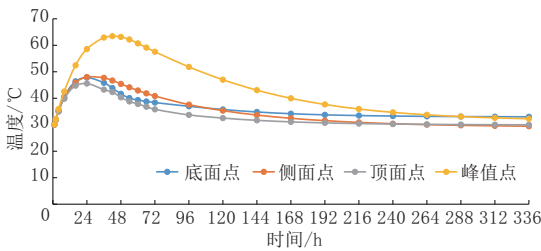


图 4 弘德大桥承台关键测点温度时程曲线

表 4 布置冷却水管对承台温度的影响

浇筑块	有水管		无水管	
	温峰出现时间/h	温度峰值/℃	温峰出现时间/h	温度峰值/℃
承台(4.5 m)	42	63.4	96	77.1

3.2 温度场计算分析

考虑到混凝土浇筑块的入模温度与温度峰值近乎同步变化,入模温度取规范限值 28℃。在现有原材料和配合比的前提下,计算得出承台最高温度为 63.4℃,满足规范对最高温度的要求。

水泥在水化过程中不断产生热量,冷却水管与

混凝土外表面在对流过程中散去热量。当承台结构内部温度上升速率与散热速率达成平衡时,承台混凝土温度达到温度峰值。当水泥混凝土的入模温度较高时,其放热速率也较快,温度上升并到峰值的时间会缩短,而通冷却水使温度到达峰值的时间更短。这不利于大体积混凝土的温度控制,因此,应尽可能降低混凝土的入模温度。

当混凝土的入模温度为 28℃时,弘德大桥承台混凝土层在浇筑结束后 42 h 左右达到温度峰值,为 63.4℃。温度峰值在入模温度的基础上上升 35.4℃。

对比不布置冷却水管的情况,在布置了冷却水管的情况下,弘德大桥承台混凝土最高温度降低 13.7℃,降低了 17.8%。且由于承台内部散热更快,温度上升到峰值时间缩短,降温阶段混凝土的徐变能力较强,对温度控制有利。

由于混凝土水化热集中生成期为 0~72 h,施工中应按要求布置水管并做好管冷降温系统。在升温阶段,应加大流量通冷水,充分利用管冷作用消减温

度峰值,减少整体温度变化造成的收缩变形,降低混凝土承台开裂的风险。在降温阶段,应通循环热水,降低水管与混凝土内部的温差,同时控制降温速率,以利于混凝土徐变作用的有效发挥。

3.3 应力场计算结果

分析弘德大桥承台在施工期的温度应力计算结

果(见表5),总结混凝土在升、降温阶段的最大主拉应力场发展变化情况和分布范围(见图5)。

表5 承台主拉应力计算结果汇总表			
浇筑块	入模温度/℃	最大主拉应力值/MPa	拉应力主要分布部位
弘德大桥承台 4.5 m	28	0.94	水管周围、棱边、表面、 长边中心附近

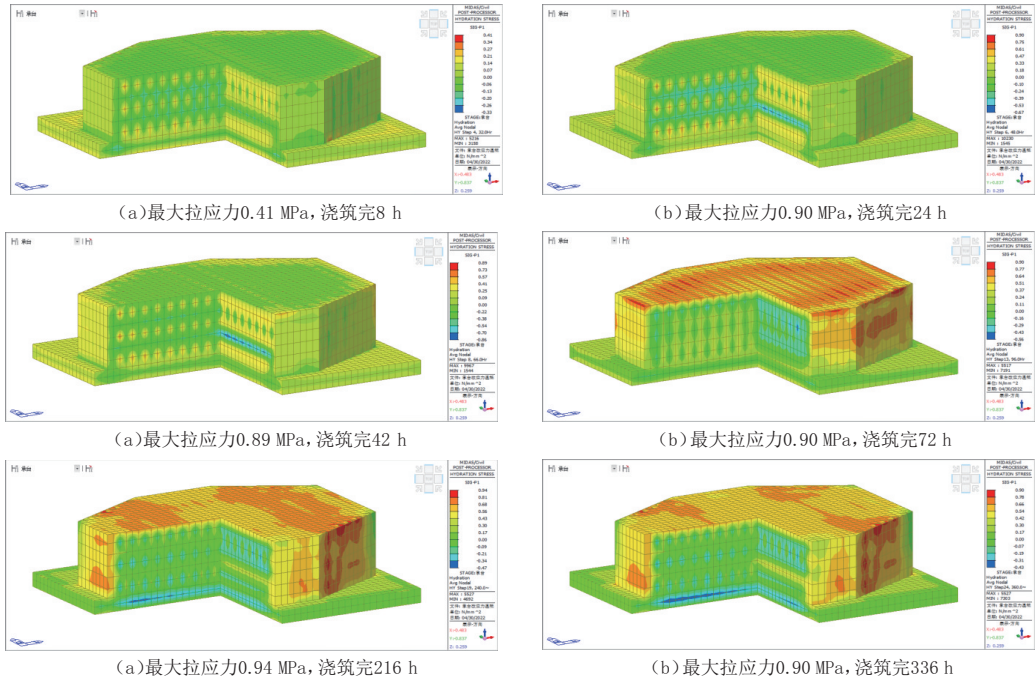


图5 弘德大桥承台应力云图

3.4 应力场计算分析

由图5可知,在温度上升期,承台混凝土最大主拉应力集中于水管周围。此时,循环通冷水,不断降低温度峰值,使得冷却管周围的温度呈梯度增加,混凝土自约束应力同时增大。在混凝土升温过程中,考虑到水泥水化反应持续进行,水化产物不断生成,产生的拉应力可忽略不计。另外,在承台混凝土降温期,为减少水管周围的温度梯度,应循环通热水,保证水管进水温度和混凝土结构芯部温度差值满足设计要求。

在温度下降期,承台混凝土主拉应力主要取决于混凝土层间由于降温不一致、温度收缩变形不协调而产生的自约束应力,以及地基和已浇筑混凝土的外约束应力。

各浇筑层在降温初期的最大主拉应力集中于承台顶面棱边附近。这主要是因为棱边处属于多面散热,温度梯度较大,自约束作用较强,容易出现表面裂纹,应注意做好表面保温、保湿养护。各浇筑层在降温后期的最大主拉应力集中于承台长边中心附近。这是由于新浇筑混凝土的降温收缩变形受地基

或已浇筑混凝土的约束作用,容易产生较大的温度裂缝。因此,在条件允许时,应采用中、低热硅酸盐水泥等,降低温度峰值,减小整体降温造成的收缩变形。

为控制大体积混凝土在施工期间的温度变化,防止裂缝产生,应采取缩短层间浇筑间歇期,优化配合比,选用中、低热硅酸盐水泥,降低混凝土入模温度,加强养护,在表面设置防裂钢筋网等措施。

4 温度测点布置与结果验证

温度测试系统采用JMWT-64多点自动综合测试仪。测点布置充分考虑温度控制指标的测评,并能够反映混凝土内部温度场的分布情况。承台布置了4层共14个测点,环境温度1个,进、出水口2个。

将混凝土浇筑现场的实测数据与有限元计算结果进行对比,可知承台中心处最高温度出现在浇筑完成后的第二天,最高温度为61.5℃,与理论计算温度峰值基本相符;3 d后,温度明显下降,降温过程中严格控制降温速率,浇筑完成7~8 d后,温度趋于平稳,且表层与中心层最大温差均未达到25℃。该模

型的计算结果与实测的混凝土温度变化基本吻合,温度控制措施效果良好。

5 结 论

当弘德大桥承台温度控制计算入模温度取 28°C 时,计算得出的承台最高温度为 63.4°C ,满足规范要求。当混凝土入模温度高时,放热速率加快,对温度控制不利。

对比不布置冷却水管的情况,在布置了冷却水管的情况下,弘德大桥承台混凝土最高温度降低 13.7°C ,降低了17.8%,对温度控制有利。

在承台施工期间,由于混凝土水化热集中生成期为 $0\sim 72\text{h}$,施工中应按要求布置水管并做好管冷降温系统,在升温阶段加大流量通冷水,在降温阶段通循环热水。

承台混凝土在升温阶段的最大主拉应力分布在冷却水管四周,在降温阶段初期,最大主拉应力出现在顶面棱边附近,在降温阶段后期,最大主拉应力出现在长边中心附近。

为控制大体积混凝土在施工期间的温度变化,防止裂缝产生,应采取缩短层间浇筑间歇期,优化配

合比,选用中、低硅酸盐热水泥,降低混凝土入模温度,加强养护,在表面设置防裂钢筋网等措施。

参考文献:

- [1] 解荣.大体积混凝土温度监控的研究[D].西安:长安大学,2011.
- [2] 黄旺明,缪玉卢.合福客专铜陵长江大桥主桥5号墩承台施工技术[J].铁道工程学报,2011,28(11):72-76.
- [3] 罗时宿,胡志莉,张晨,等.庙嘴长江大桥承台大体积混凝土施工温控措施[J].市政技术,2014,32(增刊1):58-61.
- [4] 侯炜,宋一凡,马超.基于管冷系统的大体积混凝土水化热时变温度效应[J].长安大学学报(自然科学版),2021(7):65-77.
- [5] 侯敏,陶燕,李立君,等.关于某桥梁工程混凝土的温度控制处理与研究[J].价值工程,2017,36(34):108-112.
- [6] 胡健中,李阳,张申昕.大体积混凝土施工水化热分析与控制[J].中外公路,2020(8):110-114.
- [7] 何立,赵圆圆,伏冠西,等.山区悬索桥索塔承台大体积混凝土温控研究[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2022(7):19-24.
- [8] 龚远.中高温C40大体积混凝土承台配合比设计及温度控制[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [9] 王建军,梁军林,周胜波,等.基于Midas的拱座基础大体积混凝土温度影响因素分析[J].中外公路,2019(4):89-93.
- [10] 林浩,伍浩,卢鉴钧.沉管隧道大体积混凝土现场施工质量控制[J].广东公路交通,2022(3):46-52.
- [11] 黄海东,徐名遥,李鸣,等.含有冷管的混凝土承台瞬态温度场及精细化分析模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022(8):102-110.