

# 海上潮变区大体积承台混凝土温控技术研究

陈时波

中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121

**摘 要 :** 大体积混凝土具有体积大、结构厚度大、温度应力大、施工时间长等特点。依托实际工程, 从原材料选择和配合比设计、混凝土质量及浇筑控制、混凝土入模温度控制以及冷却水系统布设方面对潮变区大体积承台混凝土施工中的温控措施进行了研究设计。实际应用得出, 混凝土浇筑后 72 h 内为升温阶段, 承台混凝土内部最高温度为 64.1℃, 浇筑完成 72 h 后, 进入降温阶段, 平均降温速率为 2.7℃, 满足承台温控标准要求。验证表明施工过程中所采用的措施具有较好的温控效果, 可以为类似工程提供参考。

**关 键 词 :** 桥梁承台; 大体积混凝土; 质量控制; 温度控制

## Temperature Control Technology for Mass Concrete Footings in Tidal Zones

Chen Shibo

China Communications 2Nd Navigational Bureau 2Nd Engineering Co., Ltd. Chongqing 401121

**Abstract :** Mass concrete is characterized by large volume, substantial structural thickness, significant thermal stresses, and long construction periods. Based on practical engineering projects, this study investigates temperature control measures for mass concrete footing in tidal zones, focusing on material selection and mix design, concrete quality and pouring control, temperature control during pouring, and cooling water system layout. Practical application results show that within 72 hours after pouring, the concrete undergoes a heating phase, with the maximum internal temperature reaching 64.1℃. After 72 hours, the concrete enters a cooling phase, with an average cooling rate of 2.7℃, which meets the temperature control standards for the footing. The results indicate that the employed temperature control methods are effective, and the research provides useful reference for similar projects.

**Keywords :** bridge footing; mass concrete; quality control; temperature control

## 引言

随着交通基础设施建设的快速发展, 大体积混凝土的施工规模和数量不断扩大, 存在的问题也日益突出。其中, 大体积混凝土施工过程中的温控技术是工程建设中一直以来重点关注的问题, 大体积混凝土中温度控制是保证工程质量的重要环节<sup>[1]</sup>。整体浇筑的大体积混凝土结构在养护期间, 因降温 and 水泥水化作用会产生温度收缩和水化收缩两种变形<sup>[2]</sup>。变形会导致混凝土结构内部及表面产生拉应力, 当拉应力大于混凝土相应龄期的抗拉强度时, 结构就会出现开裂<sup>[3]</sup>, 严重影响工程质量。因此, 控制温差、防止裂缝的出现是大体积混凝土施工亟须解决的重点和难点问题。

大体积混凝土内部的温度分布及变化主要受水泥水化热、外界环境、约束条件等因素影响。在大体积混凝土施工中的温控方法主要有分缝处理、使用低水化热水泥、在混凝土中预埋冷却水管等。当前大体积混凝土温控措施仍是施工的难点, 尤其是海上潮水变化区。本文依托在建跨海大桥实际工程项目, 对潮汐变化区承台大体积混凝土施工中的温控措施进行了研究设计, 并对实际应用效果进行了总结分析, 验证了温控措施的可靠性, 对类似工程具有良好的参考意义。

## 一、工程概况

大桥项目位于福建省福清市兴化湾, 全长 3920 m, 由主桥和引桥组成。其中主桥的两个主墩承台平面尺寸为 35.0×23.6 m, 圆端形结构, 厚度为 6.0 m, 如图 1 所示。单个承台混凝土方量为 4441 m<sup>3</sup>, 属于大体积混凝土。施工区位于潮汐变化区, 受潮水影响大, 大体积混凝土结构质量要求高, 施工期间必须分层施工,

采取有效的温控措施, 以防止产生裂缝。

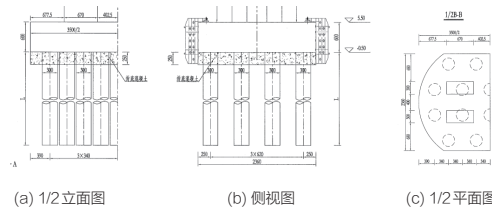


图 1 主墩承台结构示意图

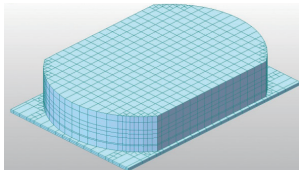
作者简介: 陈时波 (1989.09-), 男, 重庆市, 汉族, 大学本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程。

二、大体积混凝土施工温控技术

(一) 温度应力 Midas 模型仿真计算

1. 模型参数

主墩承台按照施工方案计划分三次浇筑成型，浇筑厚度分别为 1.0m、2.0m、3.0m。利用 Midas 软件根据设计结构尺寸及施工方案建立计算模型网格剖分如图 2。



> 图 2 承台计算模型图

根据施工安排，承台浇筑时间为 2 月初，根据工程区气象资料，浇筑气温接近 13℃。仿真计算中，混凝土入模温度按 20℃ 计算，环境温度设定为 13℃。承台内部自距底面 2.0m 起，沿厚度方向共布置 3 层 Φ50mm 冷却水管，各层水管沿厚度方向间隔布置，计算考虑冷却水管的影响。

在仿真计算中，其他参数参照类似项目温控经验参数执行，具体如下表所示。

表 1 热力学参数

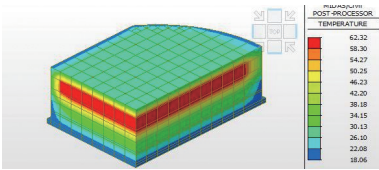
| 参数      | 取值                     | 说明                                          |
|---------|------------------------|---------------------------------------------|
| 水化速率参数  | 0.8                    | $Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-0.8\tau})$           |
| 弹模发展速率  | 0.3                    | $E(\tau) = E_c(1 - e^{-0.3\tau})$           |
| 强度发展速率  | 0.3                    | $\sigma(\tau) = \sigma_k(1 - e^{-0.3\tau})$ |
| 封底混凝土传热 | 1 W / m <sup>2</sup>   | 垫层混凝土                                       |
| 顶面散热    | 8 W / m <sup>2</sup>   | 覆盖保温                                        |
| 管冷散热    | 380 W / m <sup>2</sup> | 内部水管                                        |

温度及温度应力计算从混凝土浇筑开始，分层浇筑时间间隔按 14 天计算，模拟整个承台施工过程的温度应力发展，冷却水管通水时间仅考虑在浇筑后的 14 天内。

2. 模拟分析

(1) 温度计算结果

按照上述设定的条件，计算可得承台内部最高温度为 62.32℃，温度峰值出现时间约为第三层混凝土浇筑后第 96 小时（浇筑后第 4 天）。



> 图 3 承台第三层浇筑后最高温度（第 4 天）

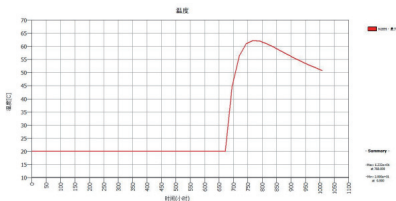
从计算结果可以得出：混凝土浇筑完成后，内部的温度相对较高，其表面自然散热较缓慢，其内部热量无法依靠自然降温进行快速释放，主要依靠冷却水管作用。按照本次浇筑混凝土的入模温度 20℃ 和绝热温升 49.46℃，最终温峰约为 62.32℃。

(2) 应力计算结果

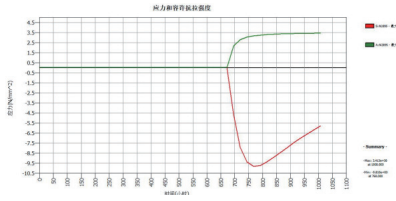
大体积混凝土完成浇筑后，随即开始水化反应，内表温度逐

渐升高，在反应前期主要表现为向各个方向膨胀变形，结构内部受外部混凝土约束，表现为压应力，结构表面受内部混凝土反作用力，表现为拉应力；而水化反应峰值过后，水化热小于放热，混凝土温度降低，体积变小，结构向中心收缩变形，混凝土表面温度趋于稳定，内层温度分层次分布，混凝土收缩变形从中心向外逐渐变大，表面受内层混凝土收缩变形，表现为压应力，压应力分布从外到内逐渐减小。

为了直观地分析承台的整个水化热过程，选取第三次浇筑承台内部中心节点节点进行时程曲线分析。



> 图 4 温度变化时程图（单位：℃）



> 图 5 温度应力（红色线）和容许抗拉强度（绿色线）变化时程图

由上图可知，在整个水化热过程中，承台内部和表面的温度始终小于 75℃，满足要求；且承台混凝土应力始终在容许抗拉强度以内，满足要求。

(二) 原材料选择与混凝土配合比设计

水泥水化热产生速率与水泥的比表面积有关。水泥比表面积大，水化反应就快，在浇筑完成前期阶段放出的水化热就高，故混凝土生产需选用合适细度模数的水泥。加入粉煤灰、粒化高炉矿渣等作为混凝土掺和料，既可降低水化热，还可以改善混凝土的施工性能和耐久性。

根据现场设计及大体积混凝土质量控制要求，对承台大体积混凝土的配合比进行了专项设计。主墩承台混凝土设计强度等级为 C40，配合比如表 2 所示：

表 2 承台混凝土配合比设计表

| 成分  | 用量 /kg · m <sup>3</sup> | 成分  | 用量 /kg · m <sup>3</sup> |
|-----|-------------------------|-----|-------------------------|
| 水泥  | 219                     | 粉煤灰 | 109                     |
| 水   | 153                     | 矿粉  | 109                     |
| 砂   | 770                     | 碎石  | 1020                    |
| 减水剂 | 8.3                     |     |                         |

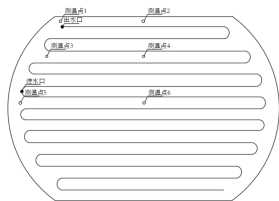
(三) 混凝土入模温度控制

在混凝土配合比及传热边界条件一定的情况下，混凝土内部温度峰值与入模温度正相关，而温度峰值越高会导致承台混凝土内表温差、温度变形和温度应力越大，因此混凝土入模温度控制非常关键。此外，入模温度也会影响混凝土水化反应速率，温度越高，水化反应越快，混凝土浇筑初期释放的水化热越多，对大体积混凝土温控不利。因此，施工中应尽可能地降低入模温度，施工中承台入模温度控制在 5~28℃。

#### (四) 冷却水系统

##### (1) 水冷管布置设计

冷却水管采用外径50mm,厚度2.5mm热传导性较好的钢管,并确保其具有一定的强度。承台每层冷却水管分别设置2个进水口和出水口。从上至下分别设置1~4层水冷管,各层水管交错布置。底层冷却水管距离承台底部及各层管间距均为130 cm,顶层冷却水管距离承台顶面80 cm。平面上冷却水管距离承台外边缘及相邻管中心距设置为150 cm。冷却水管布置如图6所示。



> 图6 冷却水管、温度测点布置图

冷却水管严格按照设计图纸进行定位安装,安装时应增加必要的辅助钢筋对其进行精准定位和固定。在浇注混凝土过程中应避免冷却水管出现堵塞、渗漏及移位等情况。采用与环境温度相近的自来水作为冷却水源,利用水箱建立循环系统,实现冷却水的输送及冷却水的回收降温。出水口的水充分降温后再重新循环进入入水口参与冷却;同时,在冷却水管系统中设置减压阀以控制后期通水速率。

混凝土浇筑覆盖冷却水管后开始通水,初始水流量控制在最大流量的50%,确保进出水口温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。浇筑完成后,冷却水设置为最大流量,流速 $> 25\text{ L/min}$ ,保证进出水口温差同样 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。随后根据实时测温结果调整降低冷却水流量,控制降温速率不大于 $2.0^{\circ}\text{C/d}$ (早期降温不大于2.5),进出水温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。整个养护过程中,需保证混凝土内部最高温度 $< 75^{\circ}\text{C}$ ,内表最大温差 $< 20^{\circ}\text{C}$ 。

##### (2) 测点布置

通过在混凝土中提前布置温度测点,并对浇筑完成的承台进行连续观测,指导后续养护。承台温度监控测点布置结合混凝土内部冷却水管的实际分布情况以及温度场特征等因素,同时需满足相关规范要求。本工程根据结构特点,选取1/4结构作为主要测试区域布置关键测点。采用智能化数字多回路温度巡检仪配合热敏电阻传感器进行温度检测。

温度测点布置在两层冷却管之间,分6层布置,沿承台高度方向距离承台底距离分别为10 cm,195 cm,295 cm,310 cm,455 cm,595 cm,测温点平面布置如图2所示。

水化热通常在混凝土浇筑后的100小时内达到峰值温度,因此在浇筑完成后的100 h内,每0.5h进行一次温度采集;待承台混凝土升温到最大值后,每2h进行一次温度采集。

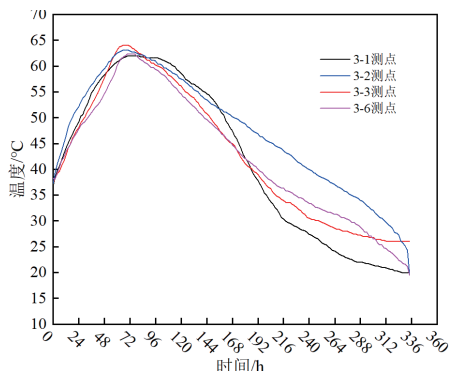


> 图7 温度检测仪及传感器

#### 三、温控养护结果分析

混凝土浇筑后,内部温度将随着水化反应而升高,达到峰值后进入降温阶段,直到趋于稳定。受边界条件的影响,大体积混凝土内部温度相对表面以及侧面均较高,并且持续时间最长。因此,选择第三层温度测点1、2、3、6作为代表性关键测点对大体积承台混凝土浇筑后内部温度随时间变化的规律进行分析。

第三层混凝土浇筑后不同测点处温度随时间的变化曲线如图8所示。



> 图8 第三层测点温度变化曲线图

由图,在浇筑后的72 h内,混凝土处于温度上升阶段,峰值出现在承台混凝土中心区域,并且随着与边缘距离的增加而降低。第3层中心区域峰值为 $64.1^{\circ}\text{C}$ 。内部最高温度小于标准控制温度 $\leq 75^{\circ}\text{C}$ ,满足承台温控标准要求。

浇筑完成72 h后,承台进入降温阶段,平均降温速率为 $2.7^{\circ}\text{C}$ ,满足降温速率不超过 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的要求。测温结果表明,所采用的温控措施具有较好的温控效果,与仿真计算结果基本吻合。

#### 四、结论

为保证大体积承台混凝土结构施工质量,结合项目实际情况,主要通过合理分层施工、原材料选择和配合比设计、混凝土质量及浇筑控制、混凝土入模温度控制以及冷却水系统布设等温控措施,防止大体积混凝土产生危害性的温致裂缝。通过原材料选择和配合比试验,降低混凝土绝热温升和最高温度峰值;通过在承台内部设置冷却水管循环系统,削减混凝土内部温度峰值,控制内部降温速率。并基于现场温度场连续观测,指导施工养护。实际应用表明,浇筑后72 h内为升温阶段,承台大体积混凝土内部最高温度为 $64.1^{\circ}\text{C}$ ,小于标准控制温度 $\leq 75^{\circ}\text{C}$ ,浇筑完成72 h后,进入降温阶段,平均降温速率为 $2.7^{\circ}\text{C}$ ,满足承台温控标准要求,验证表明本项目采用的温控措施具有良好的应用效果。

#### 参考文献

- [1]詹新彬,白晨阳,张羽,等.大体积混凝土低桩承台温度场分布及温度效应研究[J].混凝土,2024,(10):171-177.
- [2]辜光磊,许蔚,吴永红,等.大体积混凝土水管冷却温控技术的优化[J].混凝土,2021,(11):141-145.
- [3]叶晓正.大坝工程大体积混凝土施工的温控养护技术研究[J].四川水利,2024,45(05):96-100+126.