

郭欣,刘恒,李立坤,等. 跨海大桥桥墩大体积混凝土温控[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(2):48-57. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.007

GUO X, LIU H, LI L K, et al. Research on Temperature Control of Mass Concrete for Piers of Cross Sea Bridge [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2):48-57. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.007

# 跨海大桥桥墩大体积混凝土温控

郭欣<sup>1</sup>, 刘恒<sup>2</sup>, 李立坤<sup>3</sup>, 毛奎<sup>3</sup>, 汪建群<sup>2\*</sup>

(1. 中交二公局第二工程有限公司, 陕西 西安 710119; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
3. 中交二公局第一工程有限公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 实心桥墩为典型的大体积混凝土制件, 其温控容易被忽视, 因此, 在施工过程中容易产生温致裂缝。跨海大桥桥墩面临海水和浪溅工作环境, 桥墩裂缝将影响结构的耐久性和安全性。以深中通道非通航孔桥为工程背景, 对跨海大桥桥墩大体积混凝土进行了温控研究。该桥为(89×90) m长联多跨桥梁, 采用整体式现浇桥墩, 翻模法施工, 模板周转周期快, 拆模时间短; 施工面临大风、潮汐和昼夜温差大的环境; 桥墩为扁平结构, 表面失温快, 保温困难; 上述条件均不利于大体积混凝土的施工养护。文章从配合比设计和冷却管布置等方面对桥墩大体积混凝土进行了温控优化设计, 并模拟施工全过程进行了有限元分析, 结果表明: 实测与仿真吻合良好。温控方法节约了造价, 节省了工期, 相关优化思路可为桥墩大体积混凝土施工提供参考。

**关键词:** 大体积混凝土; 桥墩; 配合比设计; 冷却管布置; 仿真分析

**中图分类号:** U455.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)02-0048-10

## Research on Temperature Control of Mass Concrete for Piers of Cross Sea Bridge

GUO Xin<sup>1</sup>, LIU Heng<sup>2</sup>, LI Likun<sup>3</sup>, MAO Kui<sup>3</sup>, WANG Jianqun<sup>2</sup>

(1. CCCC-SHEC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710019, China;  
2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
3. CCCC-SHEC First Highway Engineering Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

**Abstract:** Solid bridge piers are typical mass concrete parts, but their temperature control is easily ignored, so temperature induced cracks are prone to occur during the construction process. The piers of cross sea bridges work in the environments of seawater and waves. Thus, the cracks in the piers will affect the durability and safety of the structure. Taking the non-navigable span bridge of the Shenzhong Link as the engineering background, temperature control research is conducted on the mass concrete of the pier of the cross sea bridge. The bridge is (89×90) m long multi-span bridge, using integral cast-in-place piers and flip formwork construction method, with fast formwork turnover cycle and short formwork removal time. Construction faces environments with heavy winds, tides, and large temperature differences between day and night. The bridge pier is a flat structure, which causes rapid surface temperature loss and difficulty in insulation. The reasons mentioned above are not conducive to the

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408218); 湖南省科技厅项目资助(14JJ2094; 18A202)

\*通信作者, E-mail: 121095359@qq.com

construction and maintenance of large volume concrete. This paper optimizes the temperature control design of large volume concrete for bridge piers from the aspects of mix proportion design and cooling pipe layout, and simulates the entire construction process for finite element analysis. Results show that the measured and simulated results are in good agreement. The temperature control method in this paper has saved money and time. The relevant optimization ideas can provide references for the construction of large volume concrete for bridge piers.

**Keywords:** mass concrete; pier; mix design; cooling pipe arrangement; simulation analysis

近年来,我国经济高速发展,大批的基建项目(如跨海大桥等)正在规划和建设,大体积混凝土在跨海桥梁工程中应用广泛<sup>[1]</sup>.跨海大桥桥墩处于海水和浪溅区工作环境,对耐久性要求极高,不允许带裂缝工作<sup>[2]</sup>,但跨海大桥大体积混凝土设计强度高,水泥用量大,加之面临大风、潮汐和昼夜温差大的环境,不利于施工养护<sup>[3]</sup>.因此,在施工和养护过程中经常出现早龄期温致裂缝.这些裂缝将成为腐蚀通道,引起钢筋锈蚀并降低结构的承载能力,严重影响结构的耐久性和安全性<sup>[4-5]</sup>.

国外大体积混凝土温度控制的相关研究最早起始于20世纪30年代初期.随着经济的发展与电能需求的扩大,大坝体积与修建高度随之增大,大体积混凝土施工产生的缺陷逐渐暴露<sup>[6-8]</sup>.20世纪50年代,我国在修建佛子岭水坝和梅山水坝时,开始应用大体积混凝土温度控制技术<sup>[9]</sup>.在桥梁工程中,承台和主梁的水化热受到广泛的关注,相关研究已有较多报道<sup>[10-12]</sup>.桥梁主墩由于混凝土方量一般不大,处于高空作业环境,其水化热容易被忽略<sup>[13-15]</sup>.然而实心桥墩为典型的大体积混凝土,如果不采取针对性的温控和养护措施,容易产生温致裂缝<sup>[16]</sup>.因此,有必要对桥墩大体积混凝土温控进行研究,揭示其发展规律并为施工养护提供参考.

本文以“粤港澳”大湾区深中通道非通航孔桥为工程背景,针对桥墩大体积混凝土温度控制展开相关研究.对墩身大体积混凝土进行施工配合比优化和冷却管优化设计,并进行现场强度及温度实测.在保证墩身结构强度的情况下降低水泥用量,有效降低混凝土绝热温升的同时降低造价;结合结构形状特征对冷却管布置进行针对性的优化,优化方案的冷却管布置更节省原材料,方便安装、温控效果良好.本文的温控优化思路和研究结论可为同类工程施工提供借鉴.

## 1 工程背景

### 1.1 设计概况

深中通道项目是国家“十三五”重大工程,位于广东“粤港澳”大湾区,毗邻港珠澳大桥的又一个世界级“桥、岛、隧、地下互通”超级工程,其设计效果图如图1所示.

位于浅滩区的非通航孔桥长达5.4 km,为89孔60 m跨的长联多跨梁桥.主梁为预制混凝土箱梁,采用亚洲最大的中心架梁起重船“天一号”浮吊吊装.下部结构采用整体式桥墩+整体式承台+群桩基础,均位于海水环境.桥墩均为实心截面,墩高44.5~56.5 m,墩身截面顺桥向厚达4.0 m,横桥向墩柱顶宽为9.0 m,以1:28放坡到墩底.桥墩采用翻模法施工,每次浇筑6.0 m,为典型的大体积混凝土施工.代表性的桥墩(152#墩)设计如图2和图3所示.

项目桥址北靠亚洲大陆,南临热带海洋,属典型的南亚热带海洋性季风气候区.工程区域处于热带气旋路径上,天气特点是气温年差不大、温暖潮湿、多风(每年的6月—10月份有台风).工程区域降水量多且强度大,平均降水量为1 646.2~2 005.3 mm.



图1 深中通道设计效果

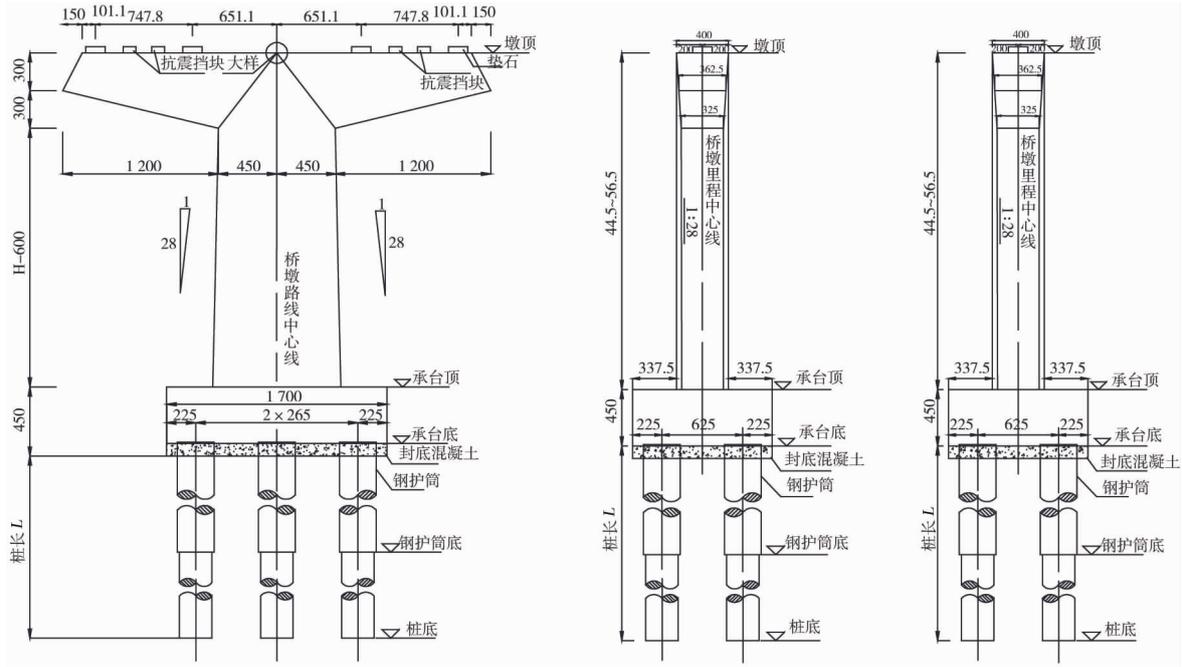
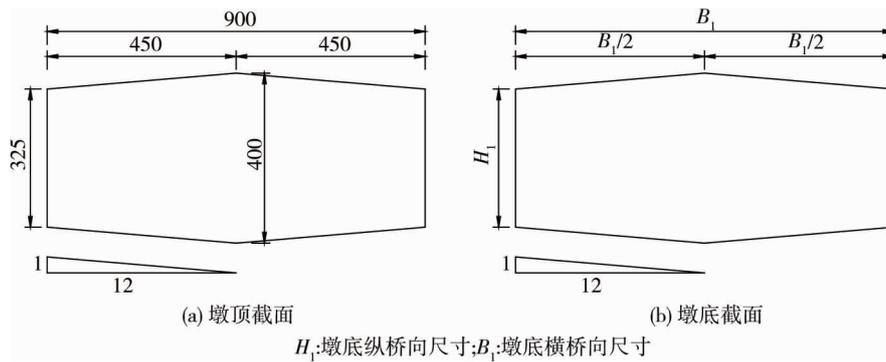


图2 深中通道非通航孔桥桥墩典型设计立面(单位:cm)



$H_1$ :墩底纵桥向尺寸; $B_1$ :墩底横桥向尺寸

图3 深中通道非通航孔桥桥墩典型设计横截面(单位:cm)

### 1.2 桥墩施工工艺

非通航孔桥墩施工工艺:施工准备→墩身预浇段顶部凿毛→测量放线→墩身钢筋部品化安装→拼装模板→检查验收→墩身混凝土浇筑→养护、等强→拆除模板→绑扎上层钢筋→循环施工→墩身变截面模板安装→墩身变截面施工→检查验收.主要流程如图4所示.

需要说明的是,墩身钢筋安装采用部品化施工技术,如图5所示.即墩身主筋按6 m分节,墩身钢筋在工厂提前下料.墩身钢筋采用胎架工厂化预制,绑扎成型后用定制墩身钢筋运输车运至现场,由135 t履带吊整体吊装,采用锥套进行接长.墩身模板采用定制的不锈钢模板.模板配套配置,标准节为3 m,底部设置调节段模板.

混凝土由拌合站配送中心拌制供应,高温季节采用冰水拌制等温控措施控制入模温度,在墩身内部布设冷却水管并通水冷却,控制内外温差以防止墩身开裂.混凝土运送至现场后用泵车泵送入模,人工振捣密实.浇筑完成后在顶部覆盖洒水养护,侧面带模板养护,必要时采用土工布覆盖保水养护.

本项目桥墩大体积混凝土施工难点如下:(1)墩身混凝土设计强度等级高(C45),混凝土绝热温升高;单次浇筑厚度较大,如未采取针对性的养护措施,极易产生过大的内外温差产生温致裂缝;(2)项目所在地气温较高、日晒充足,混凝土原材料温度高,因此入模温度控制难度较大.施工面临大风、潮汐和昼夜温差大的环境,养护难度大;(3)桥墩采用翻模法施工,模板周转周期快,拆模时间短;(4)桥墩为扁平结构,其表面失温快,保温困难.

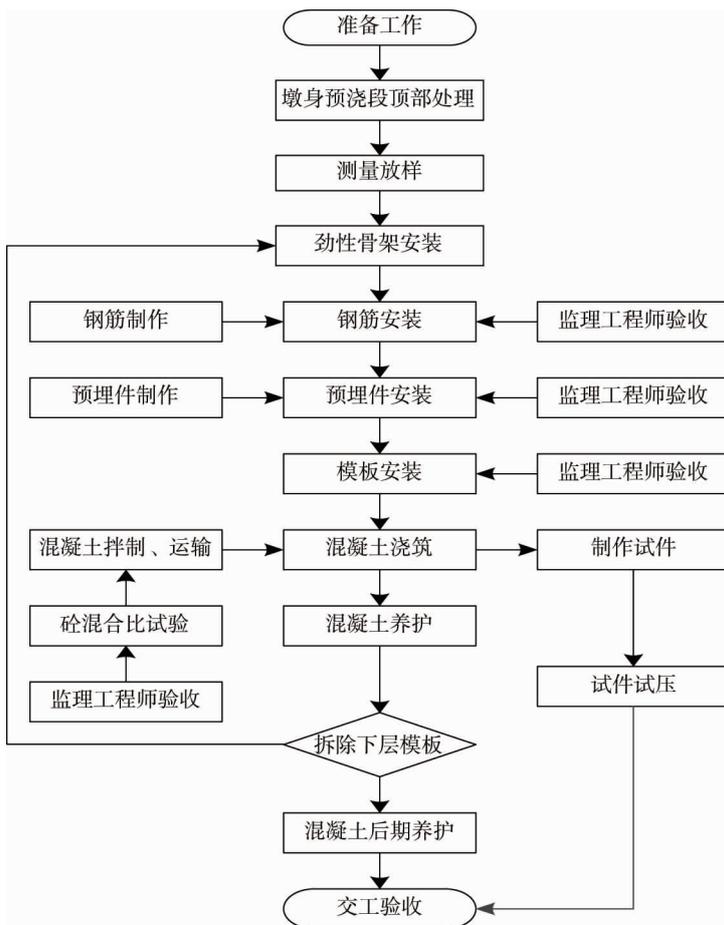


图 4 非通航孔桥桥墩施工流程

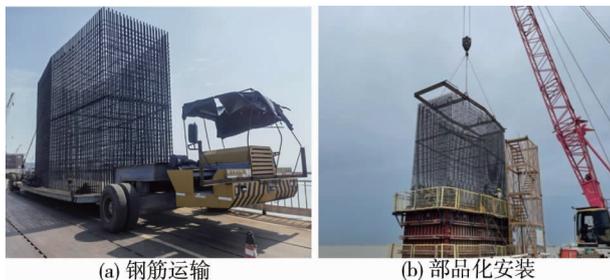


图 5 桥墩钢筋部品化施工

## 2 桥墩大体积混凝土温控优化设计

非通航孔桥桥墩混凝土强度等级为 C45,采用双掺技术设计.由于耐久性要求高,需要严格控制原材料质量.具体控制指标如下.

胶凝材料首选强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普硅水泥.根据深中通道混凝土的强度等级,矿物掺合料的品种宜为粉煤灰、矿渣粉.掺合料必须质量稳定、来料均匀、来源固定.矿物掺合料应由生产厂家进行产品检验并出具产品合格证书.粗骨料宜选用压碎指标低、颜色均匀、表面洁净、级配良好的碎石,如裹粉、裹泥或被污染等必须清除,含泥量小于 0.5%,泥块含量小于 0.2%,针、片状颗粒含量小于 7%.细集料宜采用细度模数 2.6 的中砂,含泥量小于 2.0%,泥块含量小于 0.5%,不得采用海砂,要求产地、细度、颜色必须一致.外加剂宜采用低含气量、高保塑、高减水率聚羧酸减水剂.外加剂需具备一定的减缩功能,降低混凝土胶凝浆体内部毛细孔张力而有效抑制混凝土收缩,提高混凝土早期抗开裂敏感性.原材料要有稳定来源、稳定的供应商,保证施工期间原材料供应连续稳定.对混凝土颜色影响较大的原材料(如粉

煤灰),每批应留样作颜色比对.原材料进场应具备防晒、防雨措施.

原设计水胶比为 0.33,每立方混凝土各组分(水泥、粉煤灰、矿渣粉、水、砂、碎石和外加剂)的质量比为 245.00 : 111.00 : 89.00 : 148.00 : 717.00 : 1 075.00 : 5.56.原设计冷却管水平分层布置,如图 6 所示,沿墩高方向的间距为 75 cm,同一平面内水平间距为 70~130 cm.墩柱按照每 6 m 一个节段施工,每个节段在高度方向上有 7 层冷却管.

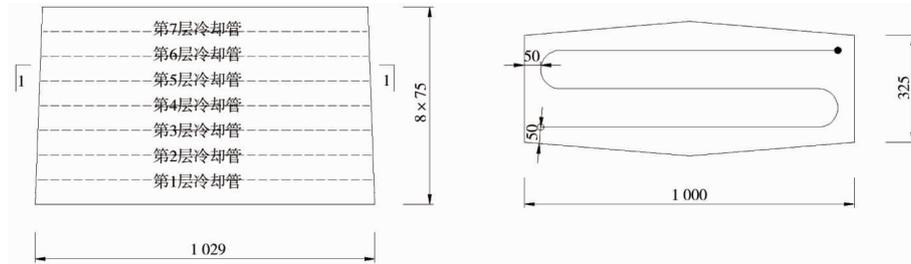


图 6 墩身 1# 节段冷却管布置(单位:cm)

按照上述温控措施进行温控,实施一段时间后发现存在以下问题:混凝土峰值温度过高,有时超过规范规定的 75 °C,且到达峰温的时间短;最大内外温差难以控制,有时超过规范要求;海上大风,导致表面降温速率过快,超过规范要求;冷却管量大,进出水口偏多,不便于现场施工,如安装冷却管时与钢筋碰撞;温度监控测点偏多,不经济.

鉴于现场温控效果不佳,拟提出针对性的优化方案.主要从配合比优化和冷却管优化等方面进行了温控优化设计.

## 2.1 配合比优化设计

桥墩设计采用 C45 混凝土,对原配合比进行了测试和分析发现:(1)立方体 28 d 抗压强度(标养)高达 71.9 MPa,为设计强度的 159.8%,远超过设计要求,混凝土强度存在富余;(2)水泥用量较大,导致水化热过大,绝热温升高达 52.4 °C;(3)配合比中粉煤灰和矿渣粉掺量可以适量提高,以降低成本并控制水化热.

基于对桥墩混凝土原配合比的强度实测结果,对配合比进行了优化设计.维持水胶比为 0.33,用粉煤灰和矿渣粉等量替换水泥以提高其掺量.优化前、后的配合比如表 1 所示.

表 1 优化前后混凝土配合比设计

种类	水泥	粉煤灰	矿渣粉	水	砂	碎石	外加剂	水胶比
指标	P II	F 类 1 级	S95	/	/	/	苏博特	/
优化前	245	111	89	148	717	1 075	5.56	0.33
优化后	219	114	105	140	721	1 081	5.26	0.33

本文采用参考文献[17]中的方法来计算放热总量和绝热温升.单位体积混凝土的总放热量为

$$Q = kQ_0 \quad (1)$$

式中:  $k$  为水化热调整系数,具体取值见表 2;  $Q_0$  为水泥水化热, kJ/kg.

表 2 不同掺量掺合料水化热调整系数

掺量	0	10%	20%	30%	40%	50%
粉煤灰	1	0.96	0.95	0.93	0.82	0.75
矿渣粉	1	1.00	0.93	0.92	0.84	0.79

混凝土龄期为  $t$  时的绝热温升  $T_{(t)}$  为

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

式中:  $W$  为水泥用量, kg/m<sup>3</sup>;  $Q$  为水泥 28 d 水化热, kJ/kg;  $c$  为比热容, kJ/(kg · °C);  $\rho$  为混凝土质量密度, kg/m<sup>3</sup>;  $m$  为与浇注温度有关的系数;  $t$  为时间, s.

混凝土配合比优化前后的绝热温升如图7所示.由图7可知:优化后计算得到混凝土的绝热温升为 $50.1^{\circ}\text{C}$ ,绝热温升降低 $2.3^{\circ}\text{C}$ .

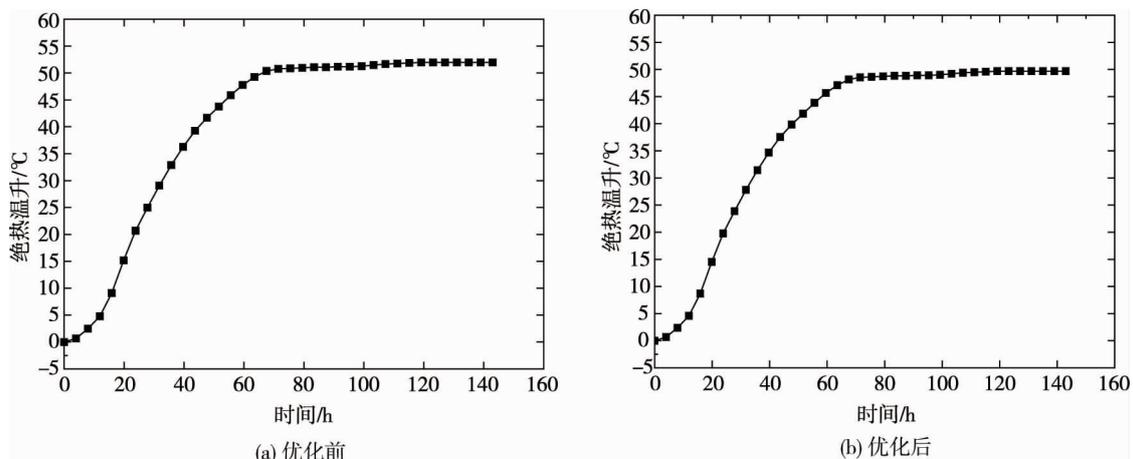


图7 墩身C45混凝土7d绝热温升曲线

## 2.2 冷却管优化设计

桥墩原冷却管设计如图6所示.由图6可知原冷却管设计存在以下弊端:(1)每节墩身需要布置7层冷却管,每层冷却管均需要设置单独的进出水口,进出水口偏多,且容易与钢筋发生碰撞,耽误施工进度;(2)横向布置冷却管对混凝土内外均匀降温,缺少针对海域环境中的保温功能;(3)非通航孔桥桥墩横向为扁平结构,冷却管设置存在优化空间.

结合桥墩结构外形,对其冷却管布置进行了针对性的优化设计,如图8所示.优化后的冷却水管布置具有以下优点:(1)冷却管竖向布置3层,仅有3个独立的进出水口,便于控制,且有效节省了工期;(2)3层冷却管分为核心冷却管和表面冷却管,核心冷却管给内部降温,外层冷却管可以选择性关停,在

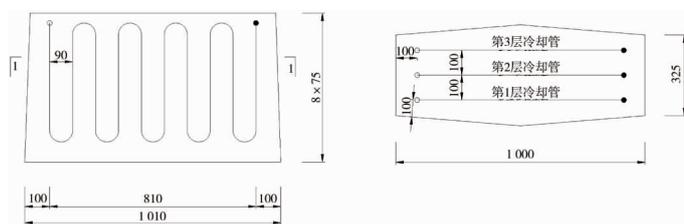


图8 墩身1#节段优化后冷却管布置(单位:cm)

大风或极端温度条件下可以调整表面冷却管流量延缓表面降温速率;(3)单个墩身优化前后的冷却管参数对比如表3所示,可节省冷却水管120 m,减少弯头8个.非通航孔桥桥墩可节省冷却水管1.8万 m.此外,优化冷却管布置提高了安装效率,节省了工期.

表3 单个墩身冷却管优化前后各项参数统计

方案	长度/m	弯头数量/个	安装时间/d
原方案	588	35	2.0
优化方案	468	27	1.5
节省	120	8	0.5

## 2.3 现场实测

### 2.3.1 混凝土强度实测

在78#墩身1#节段施工时进行混凝土取样,制作了 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 立方体和 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 棱柱体试块,实测了C45混凝土3 d,7 d和28 d立方体极限抗压强度,在测试时同步在现场墩身进行了强度回弹.强度测试结果汇总如表4所示.根据实测强度结果,绘制强度发展曲线如图9所示.

由实测结果可知:

1)立方体3 d标养试件强度达 $35.6\text{ MPa}$ ,达到设计强度的79.1%;同养试件强度为 $32.1\text{ MPa}$ ,达到了设计强度的71.3%.现场回弹强度达 $30.7\text{ MPa}$ ,达到设计强度的68.2%.

2)立方体7 d 标养极限强度超过 45 MPa,完全达到设计强度;同养试件极限强度达 42.2 MPa,达设计强度的 93.8%.

3)立方体 28 d 标养试件强度达 59.5 MPa,为设计强度的 132.2%;同养试件强度达 55.5 MPa,达设计强度的 123.3%.现场回弹强度亦达到设计强度的 120.4%.

因此,优化配合比满足强度要求.

表 4 优化后混凝土强度实测值

龄期/d	立方体抗压强度				现场回弹强度	
	标养/MPa	标养:设计/%	同养/MPa	同养:设计/%	回弹强度/MPa	回弹:设计/%
3	35.6	79.1	32.1	71.3	30.7	68.2
7	45.3	100.7	42.2	93.8	42.4	94.2
28	59.5	132.2	55.5	123.3	54.2	120.4

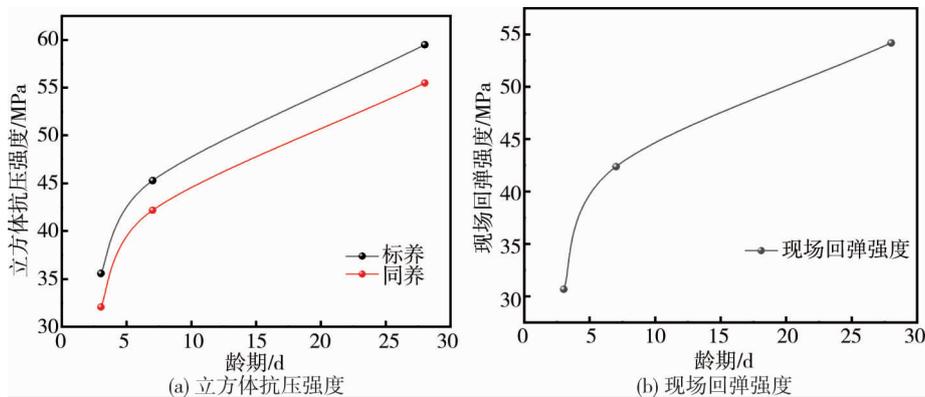


图 9 墩身混凝土优化后强度发展规律

2.3.2 现场温度实测

在桥墩埋入温度传感器,利用自动采集设备在混凝土浇筑完后每隔半小时自动采集温度(如图 10 所示).

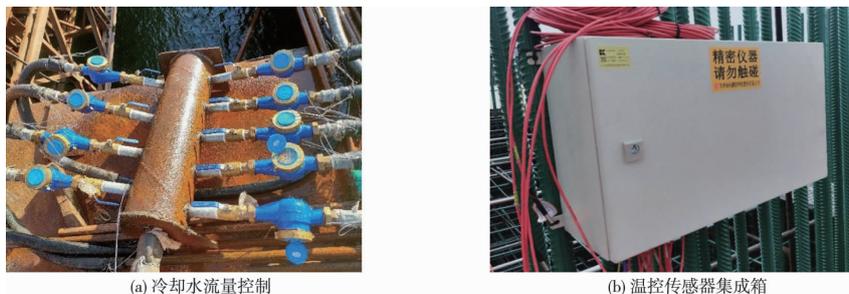


图 10 现场温控实施

72#墩身 1#节段(优化前试验段)和 78#墩身 1#节段(优化后试验段)的温度时程测试结果分别如图 11 和图 12 所示.

由图 11 可知:72#墩身 1#节段实测入模温度为 29.9~33.6 °C,峰值温度为 74.4 °C(72 h 达到),实测最大温差为 28.9 °C(86 h);最大降温速率达 3.2 °C/d.峰值温度接近规范限值,降温速率超过了温控规范要求,结构有开裂风险.

由图 12 可知:78#墩身 1#节段实测入模温度为 28.9~29.6 °C,峰值温度为 72.4 °C(72 h 达到),实测最大温差为 24.5 °C(86 h);最大降温速率<2.5 °C/d,符合温控规范.

现场采用自来水作为冷却水,升温阶段为控制升温速率,冷却水中加入了适当冰块控制冷却管进水温度.降温阶段时,收集冷却管排出的热水,用温水循环,控制降温速率.现场确保养护 3~4 d 才能拆模,在高温(如中午)时拆模;先拆背风面,再拆迎风面.如遇大风,应延缓拆模时间.节段温控效果良好,未发现温致裂缝.

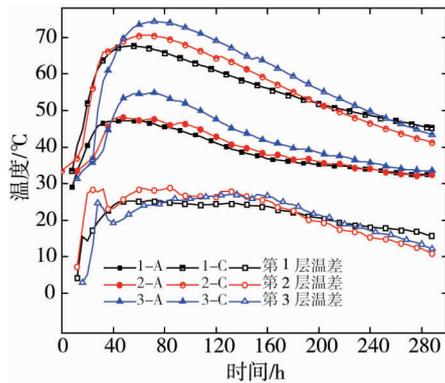


图 11 72#墩身 1#节段各层核心点与表面点温度时程曲线

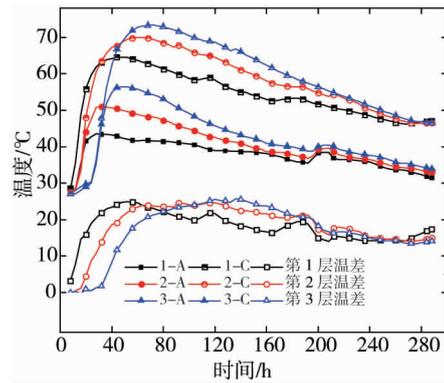


图 12 78#墩身 1#节段各层核心点与表面点温度时程曲线

### 3 有限元仿真

#### 3.1 温度场基本理论及热物理参数

##### 3.1.1 初始条件和边界条件

初始条件:混凝土的初始温度取现场浇筑时的入模温度并假定入模温度均匀.考虑到现场气候条件,取环境温度为 $(28\pm 5)$  °C.

边界条件:桥墩节段设置垫层,垫层及底部全部固结,即约束全部转动和平动.

##### 3.1.2 对流系数函数

参考文献[17]对对流系数进行计算:

$$\beta_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_u}} \quad (3)$$

式中: $\beta_s$ 为混凝土表面散热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\delta_i$ 为第*i*层保温材料厚度, $\text{m}$ ;  $\lambda_i$ 为第*i*层保温材料的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\beta_u$ 为模板材料的散热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ .

##### 3.1.3 热传导方程

混凝土热传导方程<sup>[17]</sup>可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

式中: $T$ 为温度, $^\circ\text{C}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $\lambda$ 为导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $c$ 为比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho$ 为质量密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\theta$ 为绝热温升, $^\circ\text{C}$ .

#### 3.2 模型的建立

采用有限元分析软件 Midas FEA 基于现场施工流程建立有限元模型,对深中通道非通航孔桥桥墩大体积混凝土进行水化热仿真分析.混凝土的材料力学性能和相关施工参数均采用现场测试结果.混凝土物理热学参数根据其配合比进行计算,线膨胀系数、泊松比根据经验取值.

混凝土的导热系数和比热与配合比中各原材料重量百分比有关.根据预估浇筑温度计算原材料热学性能,再依据配合比设计混凝土各原材料重量百分比,计算得出混凝土热学性能.浇筑温度按实测考虑,环境温度参考桥址所在地中山市全年月平均气温取值,为 $(28\pm 5)$  °C;混凝土表面散热系数根据式(4)进行计算.根据墩身 C45 海工混凝土配合比,计算墩身的导热系数 $\lambda$ 和比热容 $c$ ,相关计算参数如表 5 所示.

表 5 计算参数

比热容/ ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ )	导热系数/ ( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ )	线膨胀系数/ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	泊松比	侧面等效放热系数/ ( $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ )	顶面等效放热系数/ ( $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ )
0.98	8.93	10	0.17	50	29.5

兼顾计算效率和分析精度,采用六面体网格单元建模.72#墩身 1#节段模型共有节点 50 508 个,单元 45 276 个.78#墩身 1#节段模型共有节点 506 302 个,单元 45 368 个.其中 72#墩身 1#节段模型三维视图及冷却管布置如图 13 所示.

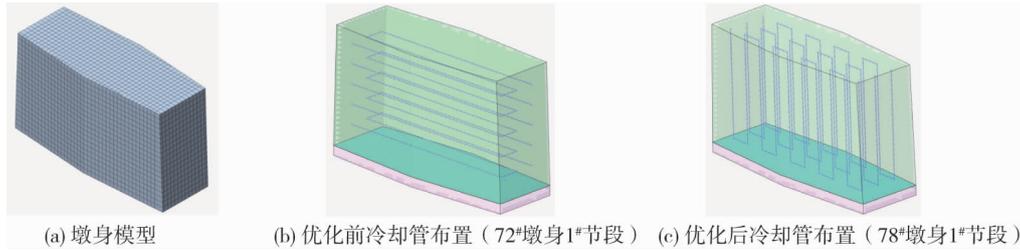


图 13 墩身三维仿真模型

### 3.3 优化前仿真结果

按照上述建模思路建模并进行有限元分析.取出 72#墩身 1#节段各层核心点与表面点温度时程曲线,并与实测结果进行对比,详见图 14 所示.72#墩身 1#节段实测峰值温度为 74.4 ℃(72 h 达到),实测最大温差为 28.9 ℃(86 h);对应的计算值分别为 73.8 ℃(70 h 达到)和 27.2 ℃(33 h 达到).各温度测点的仿真计算值与实测值吻合良好,且变化规律一致.受环境条件(如温度)的影响,表面测点的温度时程计算值与实测值均有一定幅度的波动,但两者变化规律趋于一致且吻合较好.这说明所建立的仿真模型较好地模拟了桥墩大体积混凝土水化时程.

### 3.4 优化后仿真结果

取出 78#墩身 1#节段各层核心点与表面点温度时程曲线,并与实测结果进行对比,详见图 15 所示.78#墩身 1#节段实测峰值温度为 72.4 ℃(72 h 达到)实最大温差为 24.1 ℃(86 h);对应的计算值分别为 72.1 ℃(70 h 达到)和 23.2 ℃(32 h 达到).

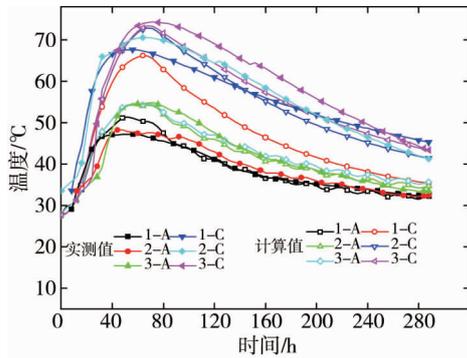


图 14 核心与表面点实测与分析结果(优化前)

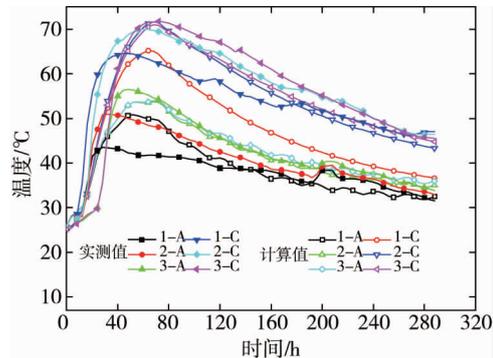


图 15 核心与表面点实测与分析结果(优化后)

对外层冷却管进行关停控制分析,结果见图 16.由图 16 可知:是否关停表面冷却管,对核心点和的峰值温度影响不大,但对表面测点的降温速率有一定影响.选择性地关闭外层冷却管后,降温速率减小,内表温差减小至 21.5 ℃,比原来降低了 1.7 ℃,这有利于结构保温.

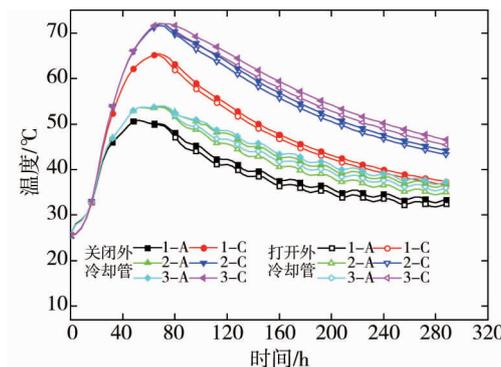


图 16 核心点与表面点开关外层冷却管分析时程曲线(优化后)

## 4 结论

1) 基于强度实测结果,维持水胶比不变,采用双掺技术对配合比进行了优化设计.配合比在保证墩身结构强度的同时降低水泥用量(单方混凝土降低水泥 26 kg),有效降低混凝土的绝热温升(降低 2.3 °C),节省了造价.

2) 结合大体积桥墩结构特征和施工特点,采用竖向分层布置冷却管对冷却系统进行了优化.标准节段可节省冷却管 120 m,减少弯头 8 个.优化方案的冷却管布置更节省原材料和弯头,节省了项目工期,产生了直接的经济效益.

3) 优化方案冷却管布置的降温效果可以有效对墩柱大体积混凝土施工进行降温,外层冷却管可以选择性关停,甚至在海风极端施工条件下可以对外层冷却管通循环热水进行表面保温,可以有效减少温致裂缝.

4) 温控优化前后的温度场实测和仿真分析结果吻合良好,且优化后的现场温控效果良好,有效降低了峰值温度和降温速率,更好地控制了内外温差.这说明本文提出的温控优化思路具有较好可行性,可应用于同类工程.

### 参考文献:

- [1] 王俊颜,郭君渊,肖汝诚,等.高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J].土木工程学报,2017,50(11):10-17.
- [2] 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.
- [3] 张宝胜,干伟忠,陈涛.杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案[J].土木工程学报,2006(6):72-77.
- [4] 周仁忠,黄灿,郑建新.福厦高铁泉州湾跨海大桥主桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2022,52(6):131-139.
- [5] 干伟忠,RAUPACH M,金伟良,等.杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性原位监测预警系统[J].中国公路学报,2010,23(2):30-35.
- [6] YANG J. Heat transfer coefficient in floe convection of pipe-cooling system in massive concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2011, 9(1): 103-114.
- [7] FREITAS J, CUONG P, RUI F. Modeling of cement hydration in high performance concrete structures with hybrid finite elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2015, 103(5): 364-390.
- [8] HAN S. Assessment of curing schemes for effectively controlling thermal behavior of mass concrete foundation at early ages[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230(10):117004.
- [9] 魏桂亮.跨海大桥承台大体积混凝土温度控制研究[D].湘潭:湖南科技大学,2020.
- [10] 汪建群,方志,刘杰.大跨预应力混凝土箱梁水化热测试与分析[J].桥梁建设,2016,46(5):32-37.
- [11] 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.
- [12] 陈桂林,姜玮,刘文超,等.大体积混凝土施工温度裂缝控制研究及进展[J].自然灾害学报,2016,25(3):159-165.
- [13] 杜杰贵.连续刚构桥高墩实心底混凝土裂缝成因分析及处理措施[J].世界桥梁,2017,45(5):86-91.
- [14] 何鑫,雷尊贵.独柱墩长悬臂隐式盖梁施工方法及抗震性能[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):51-59.
- [15] 王志美,舒小娟,汪旭.斜拉拱桥异形箱梁截面温度梯度效应分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(2):50-55.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土施工标准:GB 50496—2018[S].2018.
- [17] 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,1999.