

基于MIDAS FEA的横门西特大桥主墩承台大体积混凝土温控技术

杨雁君, 周锡海, 韦宇宁, 张 勇, 殷泽武

(保利长大工程有限公司, 广东 广州 511431)

摘 要: 基于中山横门西特大桥主墩承台及塔柱首节施工实践, 运用MIDAS FEA建立大体积混凝土施工仿真模型, 系统研究温度场与应力场演变特征。数值结果显示: 混凝土内部最高温度控制值 $\leq 75^{\circ}\text{C}$; 对混凝土内表温差的控制值 $\leq 25^{\circ}\text{C}$; 承台及塔柱预浇段各龄期温度应力模拟值均显著低于混凝土容许应力限值, 结构抗裂安全裕度达到设计要求。研究成果为大体积混凝土温控参数优化及裂缝防控提供了技术依据。

关键词: 有限元分析; 承台; 大体积混凝土结构; 水化热分析; 温控措施

中图分类号: U444; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0236-06

Temperature Control Technology for Mass Concrete in Main Pier Base Slab of Hengmen West Grand Bridge Based on MIDAS FEA

YANG Yanjun, ZHOU Xihai, WEI Yuning, ZHANG Yong, YIN Zewu

(Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511431, China)

Abstract: Based on the construction practice of the main pier base slab and the first pylon segment of the Zhongshan Hengmen West Grand Bridge, a construction simulation model of mass concrete is established by using MIDAS FEA to systematically study the evolution characteristics of the temperature field and stress field. The numerical results show that the maximum temperature control value inside the concrete is $\leq 75^{\circ}\text{C}$, and the control value of the temperature difference between the inside and the surface of the concrete in this project is $\leq 25^{\circ}\text{C}$. The simulated values of the temperature stress at each age of the precast sections of the base slab and the pylon are significantly lower than the allowable stress limit of the concrete, indicating that the crack-resistant safety margin of the structure meets the design requirements. The research results provide a technical basis for the optimization of temperature control parameters and the preventive control of cracks of the mass concrete.

Keywords: finite element analysis; base slab; mass concrete structure; hydration heat analysis; temperature control measures

0 引 言

近年来, 伴随施工工艺的进步以及工程规模的持续扩大, 大体积混凝土在各类工程实践中应用渐增, 其内部与表面混凝土水化热的散发速率存在差异, 由此产生内表温差。较大拉应力导致结构裂缝, 进而对结构的耐久性造成不利影响。近年来桥梁承台水化热分析研究聚焦施工过程水化热分析与控制、材料对水化热分析中的作用及特殊气候条件下

水化热分析与控制, 显著提升了承台施工的质量与稳定性。如杨新浩, 吴冬兰等对大体积水化热分析与控制进行研究^[1-6], 刘尧等对钢筋在承台水化热的作用进行研究^[7]。刘华东对高寒地区大体积水化热分析与控制进行研究^[8]。

本研究以中山横门西特大桥主墩基础及塔柱初始节段施工为项目背景, 介绍其基于MIDAS FEA的主墩承台水化热分析方案。

1 工程概况

南中高速作为大湾区跨珠江通道的关键一环, 且与深中通道实现高效衔接, 强化区域交通网络。全长32.398 km, 设独立特大桥3座, 大桥41座。

横门西特大桥全长2 518 m, 主桥跨径组合为

收稿日期: 2025-05-06

作者简介: 杨雁君(1993—), 男, 学士, 工程师, 从事路桥施工管理工作。

通信作者: 周锡海(1971—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥施工技术管理工作。电子信箱: 793416337@qq.com

390 m+324 m的独塔钢箱梁斜拉桥,该桥系国内在建项目中跨径最大的独塔整体式钢箱梁斜拉桥。索塔承台为尺寸 33.8 m×47.8 m×9 m,主墩承台采用 C45 海工混凝土、塔柱预浇段采用 C55 海工混凝土,鉴于水化热效应易诱发结构裂缝,需系统开展温控参数设计及施工过程控制。强化控裂保障体系,从而确保桥梁承台结构耐久性与安全。横门西特大桥主墩承台及塔柱结构图见图 1。为减轻温度应力对结构的负面影响,承台分三层浇筑,每层均为 3 m,承台第三层与塔柱预浇段 50 cm 一起浇筑。

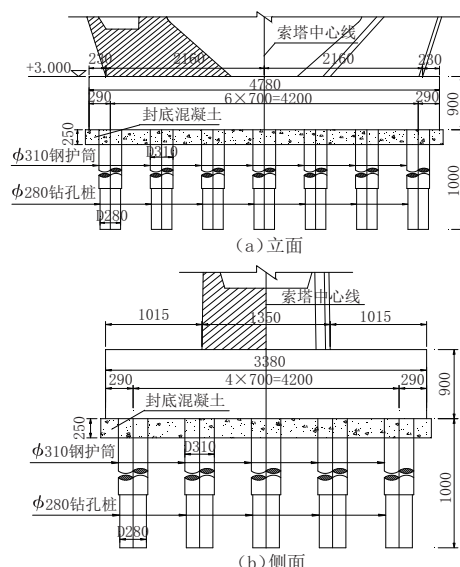


图 1 横门西特大桥主墩承台及塔柱结构图(单位:cm)

2 控裂重难点

(1)主墩承台混凝土体积较大、水化热较高,若未优化混凝土内部温控措施,结构内部与表面形成的显著温差将产生强烈温度应力,最终引发

开裂现象。

(2)承台仓面较大,单层摊铺时间较长,与桥梁所在区域及混凝土浇筑季节关系较大。分层浇筑工序间隔时间过久容易造成层间水分快速散失,从而产生收缩裂缝。

(3)主墩承台预计施工时间为9—11月份,气温较高,混凝土入模温度控制难度较大。

(4)塔柱预浇段标号高(C55)、存在变截面,开裂风险较大。

3 抗裂安全性评价标准

3.1 温度评价标准

根据参考文献[11-12]的规定,可综合确定入模温度(控制值为: $\geq 10^{\circ}\text{C}$,且 $\leq 30^{\circ}\text{C}$)、内部最高温度(控制值为: $\leq 75^{\circ}\text{C}$)及内表温差(控制值为: $\leq 25^{\circ}\text{C}$)等。

3.2 应力评价标准

本工程混凝土容许应力取混凝土劈裂抗拉强度,详见表4。

4 混凝土配合比及性能指标

4.1 大体积混凝土配合比

承台采用 C45 海工混凝土、塔柱预浇段采用 C55 海工混凝土,混凝土配合比设计见表1。

4.2 混凝土各项性能指标

混凝土塌落度、抗压强度为实测值,弹性模量根据混凝土配合比进行计算,结果见表2。混凝土物理热学参数根据混凝土配合比进行计算,线膨胀系数为经验取值,结果见表3。

表 1 大体积混凝土配合比

单位:kg/m³

标号	水泥 英德海螺 P·O42.5R	粉煤灰 谏壁 F 类 I 级	矿粉 曹妃甸 S95	砂 II 类 II 区机制砂	碎石 5~10:10~25=3:7	水 饮用水	减水剂 强仕 JB-ZSC
C45	155	155	130	750	1 080	150	8.8
C55	318	74	98	670	1 093	147	5.88

表 2 大体积混凝土实测工作性能及力学性能指标

标号	容重/ (kg·m ⁻³)	坍落度/ mm	抗压强度/MPa		弹性模量/ MPa
			7 d	28 d	
C45	2 400	200	53.9	63.5	3.5×10 ⁴
C55	2 400	200	—	—	3.8×10 ⁴

表 3 大体积混凝土物理热学参数

标号	比热/ [kJ·(kg·°C) ⁻¹]	导热系数/[kJ/(m·h·°C) ⁻¹]	最终绝热温 升/°C	线膨胀系数/ (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
C45	0.95	9.02	47.0	10
C55	0.95	8.92	55.0	10

表 4 大体积混凝土容许应力

单位:MPa

龄期/d	3	7	28	180
C45	2.30	2.80	3.30	3.70
C55	2.60	3.10	3.50	3.90

其中:

(1)混凝土弹性模量根据参考文献[12]附录 B 进行计算。

$$E(t) = \beta E_0 (1 - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为混凝土龄期为 t 时,混凝土的弹性模

量, N/mm^2 ; E_0 为混凝土的弹性模量, 可取标准养护条件下 28 d 的弹性模量; ϕ 为系数, 取 0.09; β 为掺合料修正系数。

(2) 混凝土比热、导热系数依据参考文献[9] 2.6 节进行计算。

(3) 混凝土绝热温升依据参考文献[12] 附录 B 进行核算, 其中 m 取入模温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的值。

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

式中: $T(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; W 为每立方米混凝土的胶凝材料用量, kg/m^3 ; C 为混凝土的比热容, 可取 $0.92 \sim 1.00 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})]$; ρ 为混凝土的质量密度, 可取 $2\,400 \sim 2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$; t 为混凝土龄期, d ; m 为与水泥品种、用量和入模温度等有关的单方胶凝材料对应系数。

(4) 参考日本水化热规范, 混凝土的抗压强度 f_t 随龄期变化符合(3)式规律, 通过试验数据反向拟合参数, 可预测任意龄期强度; 抗拉强度 f_{tk} 可按(4)式拟合, α 值通常取 0.44, 也可根据试验结果进行调整。

$$f_t = \left(\frac{t}{a + b \cdot t} \right) \cdot d \cdot f_{cuk} \quad (3)$$

式中: f_t 为混凝土龄期为 t 时的抗压强度, N/mm^2 ; t 为混凝土龄期, d ; a 、 b 为取决于水泥品种和养护条件的参数; f_{cuk} 为混凝土龄期为 28 d 时的标准抗压强度, N/mm^2 。

$$f_{tk} = \alpha \sqrt{f_t} \quad (4)$$

式中: f_{tk} 为混凝土龄期为 t 时的抗拉强度, N/mm^2 ; α 为混凝土的线膨胀系数; f_t 为混凝土龄期为 t 时的抗压强度, N/mm^2 ; MIDAS FEA 仿真分析中针对普通硅酸盐水泥, a 取 4.5, b 取 0.95, d 取 1.11。

依据计算结果获取各龄期混凝土抗拉强度值, 并参考混凝土配比参数及抗压强度数据进行相应调整(文献[13]“混凝土轴心抗拉强度与抗压强度的比值一般为 $1/6 \sim 1/15$ ”)得到 C45、C55 大体积混凝土劈裂抗拉强度。

5 仿真计算

5.1 模型参数

(1) 构件尺寸: 主墩承台平面为 $33.8 \text{ m} \times 47.8 \text{ m}$ 的矩形, 厚 9.0 m 。

(2) 约束条件: 采用 C30 水下混凝土进行承台封底, 厚度为 2.0 m 。

(3) 分层分块: 分三次浇筑成型承台, 前两次浇筑厚度为 $3.0 \text{ m} + 3.0 \text{ m}$, 第三层 3.0 m 与塔柱 0.5 m 预浇段同时浇筑。

鉴于结构对称性特征, 针对承台(含塔柱预浇段)混凝土, 取四分之一区域进行温度应力分析, 仿真分析结构 1/4 模型图见图 2。

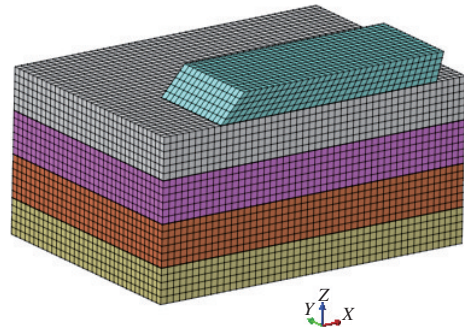


图2 仿真分析结构 1/4 模型图(附带封底约束、含塔柱预浇段)

5.2 边界条件

混凝土边界条件见表 5 所示。

表5 混凝土边界条件

浇筑层	预计工期	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇筑温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇筑间歇期/ d	冷却水管布设
一	9月中下旬	28 ± 3	30	7	水平管间距 100 cm, 竖管间距 100 cm
二	10月中上旬	25 ± 3	28	7	水平管间距 100 cm, 竖管间距 100 cm
三	11月上旬	22 ± 3	26	7	水平管间距 100 cm, 竖管间距 100 cm

其中:

(1) 环境温度: 主墩承台预计于 2021 年 9—11 月份施工, 施工期平均气温根据中山市月平均气温确定。

(2) 浇筑温度: 主墩承台预计于 2021 年 9—11 月份施工, 第二、第三浇筑层为常温期施工, 浇筑温度按照气温上限估算; 第一浇筑层为高温期施工, 浇筑温度按照 3.1 节控制为 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (控制措施见 6.2 节)。

(3) 模板材质: 等效散热系数 β_s 计算根据为参考

文献[9]:

$$\beta_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{(1/\beta) + \sum (h_i/\lambda_i)} \quad (5)$$

式中: β_s 为混凝土通过保温层对空气进行散热的等效散热系数; R_s 为若干保温层的总热阻; β 为固体表面在空气中的放热系数; h_i 为保温层厚度; λ_i 为保温层的导热系数。

风速计算取 4 m/s , $\beta = 82.2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。钢模板厚为 6 mm , 导热系数 $\lambda = 163.29 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 模板外

为土工布+防雨布,导热系数 $\lambda=0.167\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$,求得 $\beta_s=75\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

(4)养护方法:上表面蓄水,侧面带模板并覆盖防雨布。

(5)冷却水:每一浇筑层冷却水管布设3层,单层承台水管竖向布置为 $0.5\text{ m}+1.0\text{ m}\times 2+0.5\text{ m}$,详见图3,单支塔柱预浇段水管竖向布置为 $0.5\text{ m}+1.0\text{ m}+0.5\text{ m}$ 见图4,水循环周期为7 d,入水水温维持在 28°C ,管道内径为 32 mm ,水流量定为 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

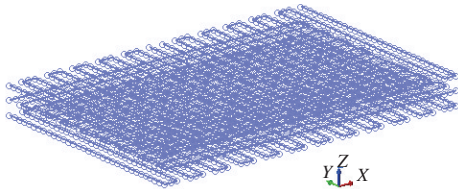


图3 单层承台仿真计算冷却水管布置(1/4)

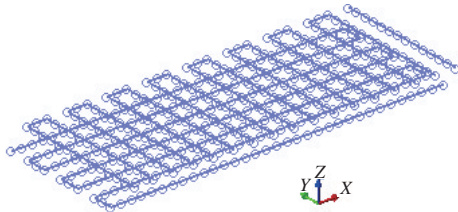


图4 单支塔柱预浇段仿真计算冷却水管布置(1/2)

5.3 结果分析

(1)温度计算结果

在给定条件下,温差计算结果见表6,所有数据均达标,满足温控要求。

表6 混凝土温度计算结果			单位: $^{\circ}\text{C}$
浇筑层	内部最高温度	最大内表温差	
承台第一层	68.52	22.72	
承台第二层	66.71	22.24	
承台第三层	66.24	22.12	
塔柱预浇段	70.19	23.23	

主墩承台180 d内部最高温度包络图见图5,其中内部温度达到峰值,而表面温度较低。承台混凝土内部温度最高点出现在第三天左右,表面温度最高峰出现较早。

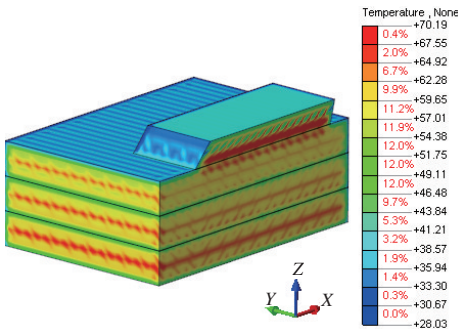


图5 主墩承台内部最高温度包络图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(2)应力计算结果

在既定条件下,主墩承台大体积混凝土在特定龄期的温度应力通过计算得出,数据见表7。承台以及塔柱预浇段的混凝土,在不同龄期的应力值均保持在容许应力值以下,抗裂安全性较高。

表7 主墩承台温度应力								单位:MPa
构件	温度应力/MPa				容许应力/MPa			
	3 d	7 d	28 d	180 d	3 d	7 d	28 d	180 d
承台第一层	1.50	1.74	2.32	2.10	2.30	2.80	3.30	3.70
承台第二层	1.53	1.46	1.76	1.70	2.30	2.80	3.30	3.70
承台第三层	1.68	1.84	1.90	1.64	2.30	2.80	3.30	3.70
塔柱预浇段	1.73	1.96	2.01	1.63	2.60	3.10	3.50	3.90

6 温度控制及施工措施

6.1 混凝土浇筑质量控制

(1)混凝土原材料质量控制

大体积混凝土配制所采用的原材料质量特性应与其技术指标形成对应关系。在混凝土施工全周期内,进场材料性能需合规且批次波动率 $\leq \pm 10\%$,确保工程质量,以最大限度抑制因材料品质异常波动引发的混凝土性能不均衡现象。原材料质量关键控制指标参见表8。

表8 混凝土原材料质量关键控制指标	
原材料	关键控制指标
水泥	比表面积($300\sim 380\text{ m}^2/\text{kg}$)、强度、C3A含量、碱含量、温度($\leq 60^{\circ}\text{C}$)
粉煤灰	烧失量($\leq 5\%$)、需水量比($\leq 95\%$)、细度
磨细矿渣粉	强度活性、流动度比、比表面积
细骨料	含泥量($\leq 2\%$)、泥块含量、细度模数、级配
粗骨料	含泥量($\leq 0.5\%$)、泥块含量($\leq 0.2\%$)、级配、压碎值($\leq 16\%$)
外加剂	减水率($\geq 25\%$)、适应性、凝结时间、含气量($\leq 3\%$)

(2)混凝土生产质量控制

混凝土生产时,原材料需专仓储存以防潮、防污、防混。搅拌前,精测粗细骨料含水率,确保配比准确。实时监测骨料含水率波动并据此调整配比参数。

搅拌机内混凝土总搅拌时间(从投料完毕至卸料完成的全程计时)应 $\geq 90\text{ s}$ 。

(3)混凝土运输、浇筑和振捣质量控制

保障混凝土运输质量稳定性:运输期间需保持搅拌罐低速匀速转动,运输频率应与施工连续性相匹配。罐车到达浇筑点搅拌后需高速旋转 25 s 方可完成卸料。同步采取密封措施防止水分渗入或蒸发,严格禁止运输途中掺加水。

优化浇筑布料工艺:实施整体水平分层连续浇筑方案,采用由四周向中心推进的布料。浇筑过程中保持构件周边混凝土面略高于中心区域,利用汽车泵布料杆沿模板均匀布料,强化边角区域振捣作业,确保材料均质密实,防止浆体远距离流动堆积引发温度与收缩应力,从而降低结构侧面和边角开裂概率。

优化分层浇筑厚度:每层承台施工时混凝土浇筑层厚控制在30~50 cm之间。结合拌合系统产能及现场泵送效率动态调整浇筑层厚度,确保上下层浇筑间隔短于下层初凝时限,既有效抑制温度反弹及塑性收缩裂缝,同时规避低温环境下表层混凝土冻损风险。

规范振捣作业:采用垂直插入、快插慢拔的操作方式,振捣深度需穿透当前浇筑层抵达下层界面。实施行列式或交错式布点振捣,确保间距均匀,杜绝

漏振与过振现象。严禁通过振捣棒横向推移调整拌合物料,防止远端砂浆富集导致的离析开裂问题。

6.2 混凝土浇筑温度控制

承台大体积混凝土施工时间较长,施工时应依气温差异调控原材料温度以确保质量满足温控标准要求。

(1)浇筑温度上限对应气温条件确定

根据抗裂安全性评价标准要求,混凝土入模温度需控制为 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。承台混凝土为高温期、常温期施工,需着重控制混凝土浇筑温度上限。

高温期施工水泥和矿粉温度设定为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,粉煤灰温度设定为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,骨料经过常规措施处理后,温度比气温低 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。自来水比气温低 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对大体积混凝土出机口温度进行计算。计算得到最高气温 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时C45混凝土出机口温度为 $29.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,在混凝土的运输和泵送阶段,需注意温度上升约 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况。

表9 原材料与C45混凝土出机口温度对照(气温 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$)

原材料	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	自来水	出机口温度计算
温度/ $^{\circ}\text{C}$	60	40	60	25	25	24	29.0
单方重量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	225	135	90	729	1 096	125	—

注:考虑砂约4%的含水率。

由以上计算可知,当气温 $\leq 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,采用常规原材料温度控制措施,即可保证混凝土入模温度 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。常规原材料温度控制措施如下。

骨料经增储、遮阳、通风措施冷却,温度可比气温低 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。必要时可对料仓进行喷雾,以降低储存环境温度。

水泥采用冷却储罐延长储存时间至10 d以上,配合转运、倒仓等措施冷却,将水泥温度 $\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,粉煤灰温度 $\leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,以维护材料性能。采用自来水作为拌合水,水温可维持在比外界气温低 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)高温期原材料温度控制措施

气温超 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,需调控出机口温度以适应施工,本项目采用制冷水作为拌合水,制冷水温度为 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。制冷水提前2 h生产,且应对拌和水输送管道采取保温措施。

根据最大制冷能力 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拌合水对大体积混凝土出机口温度进行计算,计算得到气温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时C45混凝土出机口温度为 $28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑浇筑过程中的温升(约 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$),在气温介于 $29\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,通过采用制冷水或添加冰块来冷却拌合水,可以确保浇筑温度不超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足特定的温控标准。

气温超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,为控出机口温度,采取温控措

表10 原材料与C45混凝土出机口温度对照(气温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

原材料	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	自来水	出机口温度计算
温度/ $^{\circ}\text{C}$	60	40	60	31	31	5	28.9
单方重量/kg	225	135	90	729	1 096	125	—

注:考虑砂约4%的含水率。

施,如以片冰代拌合水降温等。

6.3 承台与塔柱交界面处置

承台与塔柱交界面为变截面,早期应力集中明显。于交界面(承台最上层50 cm+塔柱起步段50 cm)混凝土拌合物中掺入 $0.6\sim 0.9\text{ kg/m}^3$ 的聚丙烯单丝纤维 $2.7\sim 3.0\text{ kg/m}^3$ 聚丙烯粗纤维。单丝纤维与粗纤维的混杂,可以充分发挥两种纤维的防裂阻裂与增韧特性,可以提高混凝土的劈裂抗拉强度约 $20\%\sim 30\%$ 并增强混凝土的韧性和延伸率,由此提高混凝土的抗裂能力、降低混凝土开裂敏感性,从而达到结构耐久性的目的。

6.4 拆模时间控制

混凝土拆模时间需同时满足龄期与温度双重控制标准:浇筑完成后须经过5 d养护期方可拆模,养护期内禁止任何松动或拆除模板行为。

禁止在夜间时段或温度骤降情况下进行拆模作

业,拆模操作应安排在每日气温较高时段实施,拆模后尽早回填砂土,避免侧面热量流失过快导致混凝土内表温差过大。

6.5 养护控制

强化保温措施以缩小内表温差,同步实施保湿管理来缓解收缩导致的表面应力。低温施工着重保温养护,中高温施工则保湿养护为核心。

6.6 现场温度监控

为验证施工质量与温控成效,动态掌握温控数据,需对混凝土实施温度监测。通过分析不同施工阶段的温度变化规律及温控指标,及时优化调整温控方案,实现施工过程信息化控制。监测涵盖混凝土内部温度场分布监测与环境体系温度同步采集,双维度数据支撑温控措施的科学实施。

7 结 语

横门西特大桥主墩承台及塔柱首节施工实践表明,混凝土温度实测与仿真计算基本一致,拆模质量优良,大体积混凝土施工达标,经验可供同类工程参考。

基于MIDAS FEA的大体积承台混凝土温控分析技术未来有着广阔的发展前景。一方面,随着计算机技术的飞速发展,MIDAS FEA的计算效率和精度将进一步提升。其算法将不断优化,能够处理更复杂、大规模的模型,实现更精细的温度场和应力场模拟,为超大型工程的温控分析提供更强大的支持。

另一方面,与物联网等技术结合,实现对施工数

据的实时采集与传输,再利用MIDAS FEA进行实时分析,及时调整温控措施,实现智能化施工。此外,随着绿色环保理念的深入,该技术将在优化温控措施、降低能耗和减少环境影响方面发挥更大作用,推动大体积承台混凝土施工向更加绿色、可持续的方向发展。

参考文献:

- [1] 杨新浩,董军,张凌云,等.大体积混凝土承台分次浇筑层间水化热效应的相互影响研究[J].公路,2025,70(3):156-163.
- [2] 胡佳鑫,王江营,李世雄.大体积混凝土承台水化热分析与控制[J].工程建设,2024,56(9):24-29.
- [3] 郑佳.异形拱座大体积混凝土水化热分析及施工应用[J].青海交通科技,2023,35(4):146-152.
- [4] 惠宝龙,曹梦云,李丹.桥梁大体积混凝土承台水化热分析及水管设计[J].河南科技,2021,40(19):91-93.
- [5] 胡桂海.大体积混凝土承台温控设计与现场应用效果研究[J].科学技术创新,2023(17):159-162.
- [6] 吴冬兰.大体积混凝土温度效应控制中的冷却管优化研究[J].西部交通科技,2020(10):104-107.
- [7] 刘尧,潘权,杨蕾.钢筋在大体积混凝土承台水化热分析中的作用及简化方法[J].公路与汽运,2023(1):111-115.
- [8] 刘华东.高寒地区转体斜拉桥承台大体积混凝土温控研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(9):126-128.
- [9] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第2版.北京:中国电力出版社,2012.
- [10] JTS202-1—2010,水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范[S].
- [11] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [12] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].
- [13] 水利电力部水利水电建设总局组织编.水利水电工程施工组织设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,1990.