

基于灰度分析的大体积混凝土温升控制

高艺博, 祖国家

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要:为解决恒力造船(大连)2号、3号船坞坞口大体积混凝土冬季施工的温升控制与防裂难题,设计以水泥用量、浇筑层厚度、环境温度、冷却水温度为核心因素的 $L_{16}(4^4)$ 正交试验,结合温度应力仿真获取各工况下最高温升、温降速率,引入灰度分析量化因素影响权重。结果表明:各因素关联度排序为浇筑层厚度(0.701)>冷却水温度(0.663)>环境温度(0.589)>水泥用量(0.382),浇筑层厚度影响最显著,水泥用量影响最小;最优方案为水泥 280 kg/m^3 、浇筑层 0.8 m 、冷却水 $25\text{ }^\circ\text{C}$,冬季 $\leq -3\text{ }^\circ\text{C}$ 时叠加 30 mm 干棉絮保温。该方案应用于坞口施工后,混凝土内表温差 $\leq 25\text{ }^\circ\text{C}$,裂缝比率满足规范要求,可为类似冬季大体积混凝土工程提供试验依据与技术参考。

关键词:大体积混凝土;温升控制;灰度分析;温度应力仿真

0 引言

大体积混凝土因水泥水化热集中释放易产生较大温度应力,尤其在冬季低温环境下,内外温差与温降速率难以控制,易引发表面裂缝甚至贯穿裂缝,严重影响结构耐久性与安全性^[1-2]。环境温度最低达 $-6\text{ }^\circ\text{C}$ 。

传统大体积混凝土温控分析多采用方差分析,但其对数据正态分布与样本量要求严格,难以适应冬季施工中温度波动大、信息不完全的“灰色系统”特性^[3]。灰色系统理论中的灰度分析(灰色关联分析)可有效处理小样本、非正态分布数据,通过计算关联度量化因素与指标的相关性,弥补传统方法的局限性^[4-5]。

本文以恒力造船(大连)有限公司2号、3号船坞工程为背景,设计基于灰度分析的正交试验,系统研究水泥用量、浇筑层厚度等关键因素对温升控制的影响规律,旨在提出适配冬季施工的最优温控方案,为工程实践提供技术支撑。

1 工程背景与试验设计

1.1 工程概况

恒力造船(大连)2号、3号船坞均为规格 $860\text{ m}\times 80\text{ m}\times 13.5\text{ m}$ 的深水船坞,其坞口结构采用C35F300大体积混凝土浇筑,该部位作为船坞与水域衔接的关键承载结构,需重点控制施工阶段的温度应力与约束变形以保障结构耐久性。坞口底板采用分块浇筑方案,共划分为4个独立浇筑块,单块浇筑体积达 $2\,300\text{ m}^3$,坞墩分层浇筑厚度 4.4 m ,各浇筑块间的浇筑间隔不小于 7 d ,确

保已浇筑混凝土完成初期水化热释放与收缩变形。

参考大连市近5a气象统计数据^[6],坞口施工周期跨越12月—翌年3月,期间气温呈现显著季节性变化,12月—翌年2月平均气温约 $-3\text{ }^\circ\text{C}$,1月极端最低气温可达 $-6\text{ }^\circ\text{C}$,3月气温逐步回升至 $4\text{ }^\circ\text{C}$,同时区域地基温度恒定为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。温控防裂难度显著。在施工过程中,需结合地基稳定温度与环境气温波动规律,进一步优化混凝土配合比设计与施工过程温控措施,以降低温度应力对结构性能的不利影响。

1.2 试验因素与水平设计

结合工程实践与文献研究^[7],选取4个核心影响因素,各设4个水平,因素水平表如表1所示。其中,水泥用量覆盖工程实际配比范围,浇筑层厚度结合施工设备能力,环境温度匹配大连冬季至早春过渡期温度区间,冷却水温度结合现场冷却系统实际调控能力设定。

表1 试验因素与水平

因素编号	因素名称	水平1 (L1)	水平2 (L2)	水平3 (L3)	水平4 (L4)
A	水泥用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$)	280	300	320	340
B	浇筑层厚度/m	0.8	1.0	1.2	1.4
C	环境温度/ $^\circ\text{C}$	10	15	20	25
D	冷却水温度/ $^\circ\text{C}$	15	20	25	30

1.3 正交表选择与试验方案

采用 $L_{16}(4^4)$ 标准正交表,共16组试验。每组试验通过仿真分析计算28d温度数据,关键参数如表2所示,仿真计算模型如图1所示。

表 2 仿真计算关键参数

关键参数	C35F300	垫层	岩体	备注
密度/(kg·m ⁻³)	2 442.18	2 406.53	1 800	垫层于岩体为软件内嵌数据
大气温度/℃	12月及2月: -3℃; 1月: -6℃; 3月: 4℃			设定的平均温度
28 d 弹性模量/MPa	2.71×10 ⁴	2.05×10 ⁴		软件内嵌数据
热膨胀系数	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	软件内嵌数据
泊松比	0.2	0.2	0.2	软件内嵌数据
比热容/(kJ·(kg·℃) ⁻¹)	1.08	1.05	0.8	C35F300 为计算值, 其他采用参考值
热传导系数/(W·(m·K) ⁻¹)	2.7	2.7	3	采用参考值
28 d 抗压强度/MPa	40.0	20.0		采用 C40 强度等级
强度进展系数	a=4.5, b=0.95			软件内嵌数据
放热系数函数	K=50.7, a=1.1			水化热试验实测值

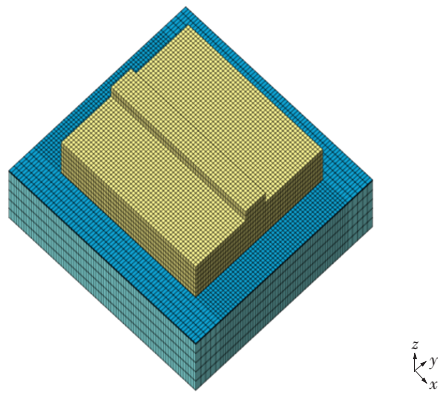


图 1 仿真计算模型

1.4 混凝土配合比与材料参数

试验采用工程实际双掺配合比, 胶材由水泥、矿粉、粉煤灰组成, 添加防冻剂与抗裂剂适配冬季施工, 其中矿粉、粉煤灰用量按胶材总量比例调整, 确保胶材总量一致。配合比如表 3 所示。

表 3 C35F300 混凝土配合比

kg/m ³								
水泥用量	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	碎石	水	防冻剂	抗裂剂
280(A1)	280	107.5	60.2	705	1 073	159.1	14.88	42.5
300(A2)	300	95.5	62.2	705	1 073	159.1	15.12	42.5
320(A3)	320	83.5	64.2	705	1 073	159.1	15.36	42.5
340(A4)	340	71.5	66.2	705	1 073	159.1	15.60	42.5

2 试验结果与灰度分析

2.1 试验原始数据

通过温度应力仿真计算(采用 Midas FEA 软件), 获取 16 组试验的 T_{max}(28 d 内混凝土中心最高温度)与 V_T(峰值温度后日均温降值)数据, 见表 4。仿真模型考虑混凝土水化热释放、边界约束与环境散热, 网格划分精度达 0.2 m, 时间步长 1 d。

表 4 正交试验原始数据

试验号	因素 A (水泥)	因素 B (厚度)	因素 C (环境)	因素 D (冷却水)	最高温升 T _{max} /℃	温降速率 V _T /(℃·d ⁻¹)
1	280(A1)	0.8(B1)	10(C1)	15(D1)	50	1.1
2	280(A1)	1.0(B2)	15(C2)	20(D2)	53	1.3
3	280(A1)	1.2(B3)	20(C3)	25(D3)	56	1.5
4	280(A1)	1.4(B4)	25(C4)	30(D4)	60	1.7
5	300(A2)	0.8(B1)	15(C2)	25(D3)	54	1.4
6	300(A2)	1.0(B2)	10(C1)	30(D4)	57	1.6
7	300(A2)	1.2(B3)	25(C4)	15(D1)	61	1.8
8	300(A2)	1.4(B4)	20(C3)	20(D2)	64	2.0
9	320(A3)	0.8(B1)	20(C3)	30(D4)	58	1.7
10	320(A3)	1.0(B2)	25(C4)	25(D3)	62	1.9
11	320(A3)	1.2(B3)	10(C1)	20(D2)	59	1.5
12	320(A3)	1.4(B4)	15(C2)	15(D1)	66	2.1
13	340(A4)	0.8(B1)	25(C4)	20(D2)	63	2.0
14	340(A4)	1.0(B2)	20(C3)	15(D1)	67	2.2
15	340(A4)	1.2(B3)	15(C2)	30(D4)	70	2.4
16	340(A4)	1.4(B4)	10(C1)	25(D3)	73	2.6

2.2 灰度分析方法与计算步骤

灰度分析通过构建参考序列(评价指标)与比较序列(影响因素), 计算关联系数与关联度, 确定因素主次顺序, 计算步骤为:

1) 序列确定

参考序列(母序列 X₀): 将多指标(T_{max}、V_T)加权合成单序列, 合成公式为:

$$X_0(j) = \omega_1 \times y_T(j) + \omega_2 \times y_V(j) \quad (j=1, 2, \dots, 16) \quad (1)$$

式中: ω 为各指标权重; y_T(j)、y_V(j)为指标标准化值, 采用极小型标准化公式:

$$y(j) = \frac{\max y - y_j}{\max y - \min y} \quad (2)$$

比较序列(子序列 X_i): 各因素水平原始数据, 即 X₁(水泥用量)、X₂(浇筑层厚度)、X₃(环境温度)、

X_4 (冷却水温度)。

2) 关联系数计算

关联系数 $\xi_i(j)$ 反映第 i 个因素在第 j 次试验中与参考序列的关联程度, 公式为:

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|}{|X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|} \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数, 取工程常用值 0.5; $\min_i \min_j |X_0 - X_i|$ 为两级最小差, $\max_i \max_j |X_0 - X_i|$ 为两级最大差。

3) 关联度计算

关联度 r_i 为同一因素 16 组关联系数的平均值, 反映因素对指标的综合影响, 公式为:

$$r_i = \frac{1}{16} \sum_{j=1}^{16} \xi_i(j) \quad (4)$$

关联度 $r_i \in [0, 1]$, 值越大, 因素影响越显著。

2.3 数据标准化与参考序列合成

根据表 4 可知, 16 组试验中 T_{\max} 的最大值为 73 °C, 最小值为 50 °C; V_T 最大值为 2.6 °C/d, 最小值为 1.1 °C/d, 根据公式(2)进行标准化计算, 得出 y_T 和 y_V 数值序列, 并设 T_{\max} 权重 $\omega_1=0.6$ (影响裂缝风险核心), V_T 权重 $\omega_2=0.4$ 按公式(1)合成参考序列 X_0 。

2.4 绝对差及两级差计算

按 $X_0(j) - X_i(j)$ 计算 16 组绝对差, 并按 $\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)|$ 确定两级最小差, 按 $\max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|$ 确定两级最大差, 得出:

两级最小差 $\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)| = |0.80 - 0.80| = 0.00$, (第 5 组因素 B);

两级最大差 $\max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)| = |0.00 - 340| = 340$, (第 16 组因素 A)。

2.5 关联度计算

按公式(4)计算关联度, 得出: 因素 A 关联度 $r_1=0.382$; 因素 B 关联度 $r_2=0.701$; 因素 C 关联度 $r_3=0.589$; 因素 D 关联度 $r_4=0.663$ 。

2.6 灰度分析结果

关联度排序为 $r_2(0.701) > r_4(0.663) > r_3(0.589) > r_1(0.382)$, 结合该工程冬季施工特性, 分析如下:

1) 因素 B: 影响最显著, 厚度每增加 0.2 m, T_{\max} 平均升高 4.5 °C, V_T 平均增大 0.22 °C/d;

2) 因素 D: 次显著因素, 水温每升高 5 °C, T_{\max} 平均升高 4.0 °C, V_T 平均增大 0.19 °C/d;

3) 因素 C: 中等影响, 环境温度每升高 5 °C,

T_{\max} 平均升高 3.7 °C, V_T 平均增大 0.16 °C/d;

4) 因素 A: 影响最小, 用量每增加 20 kg/m³, T_{\max} 平均升高 2.3 °C, V_T 平均增大 0.09 °C/d。

3 冬季施工温控方案优化与验证

3.1 基于灰度分析的最优方案确定

结合关联度排序与工程可行性, 确定最优温控方案:

1) 水泥用量: 采用水泥用量 280 kg/m³ 时水化热最低, 可避免用量过高导致温升超标;

2) 浇筑层厚度: 浇筑层厚度为 0.8 m 时散热面积最大, 可有效降低内部温升;

3) 冷却水温度: 冷却水温度控制在 25 °C, 强化内部降温效果, 同时避免出现“冷激”;

4) 保温措施: 环境温度 ≤ -3 °C 时, 采用 30 mm 干棉絮(导热系数 1.35 W/m·°C)覆盖顶面与侧面钢模板。

3.2 方案验证与工程应用

1) 温度场验证: 对最优方案进行温度场仿真, 结果如图 2 所示。环境温度 -6 °C 时, 混凝土内部最高温 64.3 °C (≤ 70 °C 规范限值), 表面最高温 42.9 °C, 内表温差 21.4 °C (≤ 25 °C 规范限值), 满足温控要求^[13]。

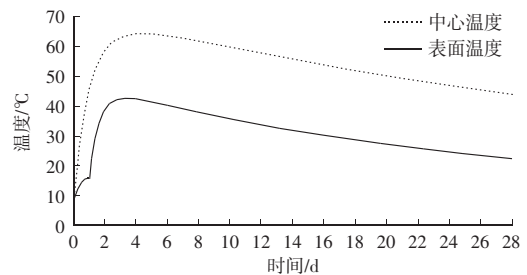


图 2 混凝土表面及中心点温度曲线图

2) 应力场验证: 温度应力仿真结果见图 3—图 5, 混凝土内部始终为压应力(峰值为 -4.89×10^6 N/m²), 表面拉应力峰值为 3.37×10^6 N/m² ($\leq C35$ 混凝土 28 d 抗拉强度 3.5×10^6 N/m²), 裂缝比率 $i > 1$ (规范要求 $i \geq 0.7$), 无裂缝风险^[14]。

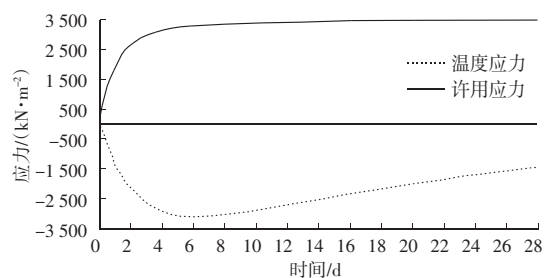


图 3 混凝土内部温度应力及许用应力曲线图

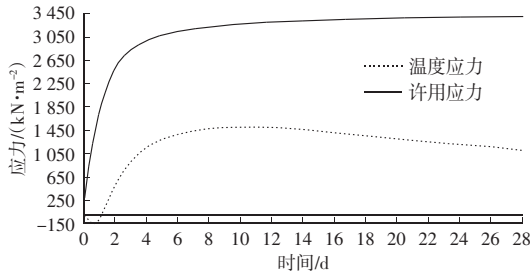


图4 混凝土表面温度应力及许用应力曲线图

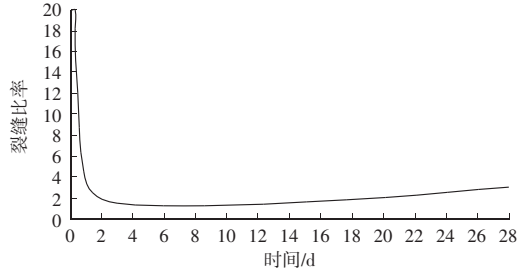


图5 混凝土上表面裂缝比率曲线图

3) 工程应用效果: 该方案应用于坞口底板 B 段施工, 并按图 6 布置测温点进行现场温度监测, 监测数据如图 7 所示, 现场监测内部最高温 64.8℃, 表面最高温 42.5℃, 内表温差 22.3℃; 7 d 内温降速率 2.8℃/d, 7 d 后 1.9℃/d, 均满足规范限值。28 d 后结构无损检测未发现裂缝, 混凝土强度达标(C35 抗压强度 42.5 MPa)。

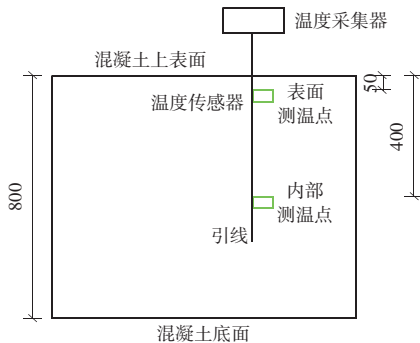


图6 现场混凝土温度监测点布置图(mm)

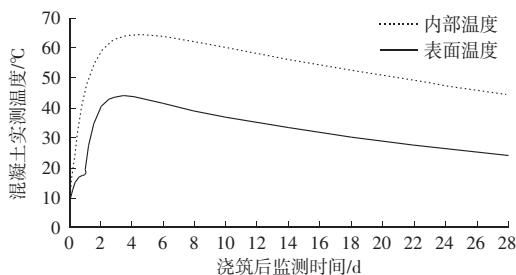


图7 混凝土实测温度曲线图

3.3 不同环境温度下的温控措施调整

基于工程实践, 提出分温度区间的温控措施调整建议, 如表 5 所示, 确保全冬季施工周期的温控稳定性。

表 5 不同环境温度下的温控措施调整表

环境温度/ ℃	浇筑层 厚度/m	冷却水 温度/℃	保温措施	内表温差 控制目标/℃
4	0.8~1.0	25~30	25 mm 干棉絮	≤22
-3	0.8	20~25	30 mm 干棉絮+ 钢模板泡沫喷涂	≤23
-6	0.8	20~25	30 mm 干棉絮+ 2 mm 塑料膜	≤24

4 结语

1) 灰度分析可有效量化大体积混凝土温升控制的影响因素, 关联度排序表明, 浇筑层厚度(关联度 0.701)与冷却水温度(关联度 0.663)仍是冬季大体积混凝土温升控制的关键因素, 水泥用量(关联度 0.382)影响较小;

2) 最优方案(水泥 280 kg/m³、浇筑厚度 0.8 m、冷却水 25℃、30 mm 干棉絮保温)可将冬季施工的混凝土内表温差控制在 25℃以内, 最高温升 ≤ 65℃, 满足规范要求, 为坞口结构施工提供数据支撑;

3) 本文确定方案在恒力造船船坞工程中应用效果显著, 现场监测与仿真结果一致, 结构无裂缝, 可为类似冬季大体积混凝土工程提供参考;

4) 后续研究可对“新型保温材料”进行探索, 进一步优化灰度分析的多目标权重, 提升与工程实践的适配性。

参考文献:

- [1] GB 50496—2018, 大体积混凝土施工规范[S].
- [2] 沈笑笑, 胡家兵, 张金龙. 大体积混凝土温度裂缝成因分析及控制方法[J]. 广州建筑, 2024, 52(9): 104-109.
- [3] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用(第 9 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 78-95.
- [4] 马军卫, 陈秀杰, 顾盛. 某核电站 4 号机组筏基大体积混凝土整浇施工温度监测研究[J]. 工程质量, 2026, 44(1): 65-70.
- [5] 陈星. 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): 112-114.
- [6] 大连市气象局. 大连市近 5 年冬季气象数据统计报告[R]. 大连: 2024.
- [7] 刘达, 张宇奇, 李雷鸣. 大体积混凝土模板性能对温度应力影响特性研究[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 421-424.