

张建华,胡荣金,赵云鹏,等.超长异形混凝土门库结构施工期应力特点研究[J].人民珠江,2026,47(2):118-129.

超长异形混凝土门库结构施工期应力特点研究

张建华¹,胡荣金¹,赵云鹏²,翁发根¹,强 晟^{2*}

(1. 中铁水利水电规划设计集团有限公司,江西省水工结构工程技术中心,江西 南昌 330029;2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对超长混凝土结构在施工过程中极易产生裂缝的问题,以超长异形混凝土门库为例,采用有限元方法对夏季和冬季不同浇筑方案的温度场和应力场进行仿真计算,研究了其在施工期的应力特点和防裂方法。结果表明,夏季和冬季的初始工况中,门库的不同部位均有拉应力超标的情况,尤其在高温区域。通过对比不同工况下的温度和应力变化,发现保温措施和掺入膨胀剂能显著降低表层混凝土的拉应力。门库的薄壁段温控措施相对简单,只需表面保温即可,而厚壁段则需要在表面保温的基础上进行水管冷却。根据仿真结果和工程经验,提出了冬季浇筑的最优温控指标,并建议避开夏季浇筑以减少施工难度。

关键词:超长异形混凝土;施工期;大体积混凝土;温控计算;应力场;有限元法

中图分类号:TV41 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)02-0118-12

超长异形混凝土结构在施工期间极易发生开裂,这不仅对工程质量和安全构成了严重威胁,还可能导致巨大的经济损失和环境影响^[1-3]。开裂的原因主要包括温度应力^[4-5]、化学收缩^[6-7]、干燥收缩^[8]和自收缩^[9]等。其中,混凝土在浇筑后的早期阶段会产生大量的水化热^[10-11],特别是在超长异形结构中,由于体积大、散热慢,内部与外部温差较大,容易导致温度应力集中,从而引发开裂^[12]。此外,复杂的几何形态和约束条件进一步加剧了温度和收缩应力的分布不均,增加了开裂的风险。

近年来,针对不同场景下混凝土结构的温度效应及温控技术开展了广泛研究:程井等^[13]以猴子岩水电站堵头为例,模拟了设计温控措施及蓄水方案下的施工运行全过程导流洞堵头与围岩交界面的接触和受力状态,揭示了复杂边界条件下大体积混凝土与围岩的温度耦合作用机制;钱萍萍等^[14]基于跨铁路高架桥 V 形刚构墩结构施工,研究高强异形大体积混凝土的温度控制措施,发现冷却水管与混

凝土能进行有效热交换,且热交换效率与混凝土温度呈正相关,为异形结构的主动温控提供了技术参考;郑豪杰等^[15]以珠海隧道大体积混凝土底板为对象开展热力耦合分析,提出冷却水管管径对降温效果影响较小,选择内管径 25~30 mm 的冷却水管可兼顾成本控制与结构整体性,优化了冷却系统的参数设计;殷新锋等^[16]针对大体积混凝土水化过程的多变性和非线性,提出基于数字孪生和长短期记忆神经网络的承台大体积混凝土水化热温度预测方法,为温度场的精准预判提供了新的技术路径。此外,采用水化历程与膨胀历程双重调控来降低混凝土的温升、补偿混凝土的收缩的技术在多个超长混凝土结构工程得到了应用^[17]。李华等^[18]认为膨胀剂可有效减小温降收缩对超长大体积混凝土结构的影响。糜凯华等^[19]根据非溢流坝对的施工特点并基于非线性有限元软件对施工期温度应力场进行数值模拟。张寒硕等^[20]针对超长混凝土结构的温度效应,提出一种针对混凝土结构全生命周期的

基金项目:中国中铁股份公司科技研究开发计划项目(2022-重大-08)

收稿日期:2025-06-07 **修回日期:**2025-08-18 **网络首发日期:**2025-09-26

作者简介:张建华(1970—),男,硕士,正高级工程师,主要从事水利水电工程设计工作。E-mail:171105973@qq.com

通信作者:强晟(1977—),男,博士,教授,主要从事大体积混凝土温控研究。E-mail:sqiang2118@hhu.edu.cn

温度场模拟方法,可有效指导超长混凝土结构施工。为降低超长大体积混凝土内部温度应力以控制裂缝的产生,张广彬^[21]将跳仓法施工技术与现场实践结合,可有效降低超长大体积混凝土温度变化幅度,减少温度裂缝的产生。黄必斌等^[22]通过对超长大体积混凝土进行裂缝、温度和应变数据监测,发现温降收缩和自生体积收缩是混凝土开裂的主要原因。因此,对超长异形混凝土结构在施工期间进行合理的温度控制显得尤为必要。

本文以赣江南昌水利枢纽工程中的超长异形混凝土门库结构为研究对象,探讨其在施工期间的应力特点,并提出有效的防裂方法。赣江南昌水利枢纽工程为大(Ⅱ)型水利枢纽工程,由主支枢纽、北支枢纽、中支枢纽及南支枢纽组成。主支枢纽位于赣江下游尾间赣江主支,新建区象山镇鸭洲村附近,距象山镇6 km,距南昌市约35 km。主支大体积混凝土结构中最长的结构为75 m宽泄水闸的门库,门库高度23.000 m,长度81.488 m,宽度17.000 m。对于混凝土防裂而言,结构尺寸越大,防裂难度越大^[23]。尽管前人对主支的常规闸墩已进行了较为深入的研究,但门库结构的温控防裂问题尚未得到充分解决。

通过对超长异形混凝土门库结构的系统理论分析,本文旨在探索适用于该类结构的温控技术,从而提高结构的整体稳定性和耐久性,确保工程质量和安全。为此,本文将进行温控仿真计算,并结合实际工程条件,提出相应的温控防裂建议。研究结果不仅为赣江南昌水利枢纽工程的施工提供科学依据和技术支持,还对类似工程的防裂技术具有重要的参考价值。

1 基本理论

在混凝土计算域 R 内任何一点处,不稳定温度

场 $T(x, y, z, t)$ 必须满足热传导控制方程^[18]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} (\forall (x, y, z) \in R) \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; a 为导温系数, m^2/h ; θ 为混凝土绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, d ; τ 为龄期, d 。

混凝土在复杂应力状态下的应变增量常常包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积变形增量^[24],因此有式(2):

$$\{\Delta \varepsilon_n\} = \{\Delta \varepsilon_n^e\} + \{\Delta \varepsilon_n^c\} + \{\Delta \varepsilon_n^T\} + \{\Delta \varepsilon_n^s\} + \{\varepsilon_n^0\} \quad (2)$$

式中: $\{\Delta \varepsilon_n^e\}$ 为弹性应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^c\}$ 为徐变应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^T\}$ 为温度应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^s\}$ 为干缩应变增量; $\{\varepsilon_n^0\}$ 为自生体积变形增量。

边界条件:混凝土结构温度场计算域 R 的边界常分为3类^[25]:

a)第一类为已知温度边界 Γ^1 :

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad (3)$$

b)第二类为绝热边界 Γ^2 :

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

c)第三类为表面热交换边界 Γ^3 :

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = \beta(T(x, y, z, t) - T_a(x, y, z, t)) \quad (5)$$

式中: β 为放热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; λ 为导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 基本资料

2.1 工程概况

赣江下游尾间综合整治工程门库地基为砂砾石地基,属于典型软基其热学参数见表1。

表1 地基计算参数

Tab. 1 Foundation calculation parameters

导热系数/ $(\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	比热/ $(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	导温系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	线胀系数/ $(10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	弹性模量/GPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
10.84	1.324	0.004 5	8.0	90.0	0.3	1 819

门库垫层采用 C20 混凝土,底板及门库采用 C30 混凝土。混凝土在有限元计算中的热力学参数见表 2。本次数值模拟中采用 20 GPa 作为 C20 弹模,在分析过程采用 2.0、3.0 MPa 作为 C20、C30 允许抗拉强度,是依据赣江下游尾闾综合整治工程的混凝土的专项测试数据。

混凝土绝热温升曲线:C20: $\theta(\tau) = 25 \times [1 -$

$e^{-0.62\tau^{0.84}}]^\circ\text{C}$;C30: $\theta(\tau) = 37.1 \times [1 - e^{-0.675\tau^{0.67}}]^\circ\text{C}$ 。

混凝土弹性模量曲线:C20: $E(\tau) = 20.0 \times [1 - e^{-0.31\tau^{0.74}}]$ GPa;C30: $E(\tau) = 31.5 \times [1 - e^{-0.4\tau^{0.34}}]$ GPa。

门库的当地多年月平均气温见表 3,多年平均气温 19.11℃。极端最高气温 41℃(2003 年 7 月),极端最低气温-10.3℃(1980 年 2 月 5 日),多年平均风速在 1.7~2.1 m/s。

表 2 混凝土计算参数
Tab. 2 Concrete calculation parameters

混凝土等级	导热系数/(kJ·(m·h·℃) ⁻¹)	比热/(kJ·(kg·℃) ⁻¹)	导温系数/(m ² ·h ⁻¹)	线胀系数/(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	最终绝热温升/℃
C20	9.580	1.100	0.003 8	8.5	25.0
C30	10.000	0.928	0.004 7	10.0	37.1

混凝土等级	最终弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	自生体积变形终值(10 ⁻⁶)
C20	20.0	0.170	2 280	90
C30	31.5	0.167	2 314	130

表 3 当地多年月平均气温
Tab. 3 Local monthly average temperature for years

单位:℃													
项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
气温	6.3	8.9	13.3	19.0	24.1	26.6	30.6	30.1	26.3	21.1	14.5	8.5	19.11
拟合	7.0	8.3	12.5	18.5	24.6	29.3	31.2	29.9	25.7	19.7	13.6	8.9	19.11

为了便于计算,将多年月平均气温拟合成余弦曲线,见图 1,拟合见式(6):

$$T_a(t) = 19.11 + 12.15 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 7.1)\right]$$
 (6)

式中:t为月份。

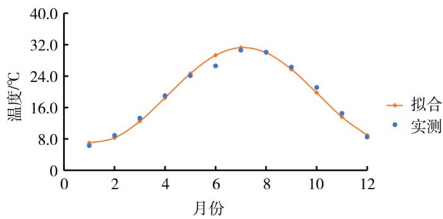


图 1 多年平均月气温曲线
Fig. 1 Curve of monthly average temperature for years

2.2 有限元模型与计算参数

门库的有限元模型见图 2,单元总数为 163 332 个,节点总数为 175 497 个。地基为图 2c 中绿色区域。通过检查,模型 99% 的单元 jacobian 大于等于 0.7(不含地基);99% 以上单元的纵横比小于等于 3(不含地基)最大值为 5.37(位于异形结构转折处),表明单元整体规整,无过度拉伸现象。网格质量满足仿真计算精度要求,可保证施工期温度场与应力场分析结果的可靠性。在温度场仿真计算时,假定坝基础底面及四周均为绝热边界,其他面为热量交换边界(即第三类热学边界条件)。在运行期,门库有限元模型的上游面是与其他结构相邻的缝面,为绝热边界,其他面散热。在应力场计算时,假定基础底面为铰支座,四周为连杆支撑,门库结构的临空面均自由^[26]。

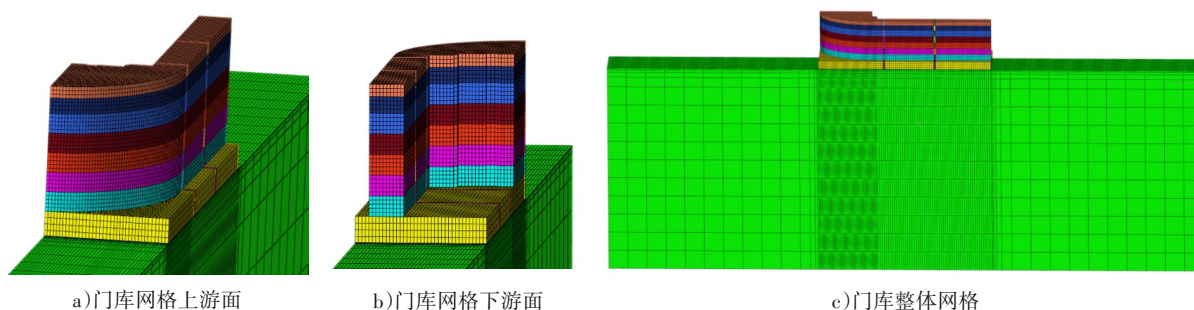


图2 门库结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of gate warehouse structure

为了显示典型关键位置的温度和应力随龄期的发展历时过程,选取图3所示的拉应力较大处的特征点1、2、3作为典型特征点进行分析,其中特征点1是底板表面点,特征点2是门库内部点,特征点3是门库表面点。

2.3 初拟施工进度和计算工况

2.3.1 浇筑进度

根据工程的环境参数、材料参数和结构有限元模型,初步拟定了门库浇筑进度方案,浇筑进度方案拟采用2个季度进行浇筑,分别是8月份开始浇筑(夏季),12月份开始浇筑(冬季)。通过对比不同浇筑方案所受拉应力和最高温的情况,确定该门库

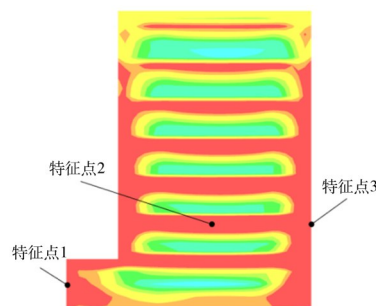


图3 特征点位置(面X=35.17)

Fig. 3 Characteristic point positions (face X=35.17)

的最优温控指标和温控方案,具体浇筑进度方案见表4,地基浇筑层号为1,高程为1.9 m。

表4 门库浇筑进度

Tab. 4 Gate warehouse pouring schedule

结构名称	浇筑层号	高程/m	浇筑层厚度/m	冬季浇筑时间(月-日)	冬季浇筑温度/℃	夏季浇筑时间(月-日)	夏季浇筑温度/℃	加层时刻/d	间歇期/d
垫层	2	2.0	0.1	12-1	20.19	8-18	32.00	0	0
底板层	3	5.8	3.8	12-21	17.93	9-7	32.00	20	20
墙体第1层	4	8.8	3.0	1-10	16.97	9-27	32.00	40	20
墙体第2层	5	11.8	3.0	1-30	17.45	10-17	28.51	60	20
墙体第3层	6	14.8	3.0	2-19	19.28	11-6	24.45	80	20
墙体第4层	7	17.8	3.0	3-11	22.28	11-26	20.93	100	20
墙体第5层	8	20.8	3.0	3-31	26.07	12-16	18.38	120	20
墙体第6层	9	23.2	2.4	4-20	30.22	1-5	17.08	140	20
墙体第7层	10	25.0	1.8	5-10	32.00	1-25	17.19	160	20

2.3.2 模拟工况

对门库进行了夏季和冬季气候条件下施工期

温度场和应力场仿真计算。

a)冬季初始工况。按照初拟的2025年12月份

浇筑进度进行施工。浇筑温度与气温相关,为经验值,且在 $[5, 32]^{\circ}\text{C}$ 范围内。浇筑块的龄期前5 d表面有钢模板,拆模前散热系数为 $400 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,拆模后散热系数为 $1\ 100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,对混凝土前20天施加保温措施散热系数 $400 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。11月至次年2月施加保温措施散热系数 $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。混凝土内部无冷却水管。墙体第6和第7层合并浇筑,设置2条横河向的永久缝。

b)冬季最优工况。在初始工况基础上加强保温措施。对混凝土拆模后的前90天施加保温措施散热系数 $100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。11月至次年2月施加保温措施散热系数 $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。C30混凝土掺入膨胀剂,根据《膨胀剂掺量对混凝土限制膨胀率的影响研究》的试验数据,掺入8%膨胀剂HEA可将自生体积收缩变形终值由130减小至50微应变。墙体第6层与第7层单独浇筑。取消永久缝。

c)夏季初始工况。按照初拟的8月份浇筑进度进行施工。浇筑温度与气温相关,为经验值,且在 $[5, 32]^{\circ}\text{C}$ 范围内,表面有钢模板,拆模前散热系数为 $400 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,拆模后散热系数为 $1\ 100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,拆模后无表面保温措施,混凝土内部无冷却水管。

d)夏季最优工况。底板混凝土厚壁段($X < 48.278 \text{ m}$)采取削峰 25°C (降低温度峰值)的温控措施,薄壁段削峰 15°C ;墙体第1层的厚壁段采取削峰 20°C 的温控措施,薄壁段削峰 10°C ;墙体第2层的厚壁段采取削峰 18°C 的温控措施,薄壁段削峰 10°C ;墙体第3层的厚壁段采取削峰 15°C 的温控措施,薄壁段削峰 10°C ;墙体第4层的厚壁段采取削峰 10°C 的温控措施,薄壁段削峰 5°C 。拆模后前150天施加保温措施散热系数 $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,11月至次年2月施加保温措施散热系数 $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。将墙体第6层与7层合并浇筑。设置2条横河向的永久缝。C30混凝土掺入膨胀剂,自生体积收缩变形终值由130减小至50微应变。

3 仿真计算结果

3.1 冬季初始工况模拟结果

大体积混凝土裂缝的起裂、扩展与抑制是温度

应力、材料性能及约束条件共同作用的结果。起裂多因降温收缩产生的拉应力超过混凝土抗拉强度,薄壁段常与短期温差骤升相关,厚壁段则与内部高温后的持续降温收缩有关;扩展受温度梯度和应力持续作用影响,温度梯度越大、应力持续时间越长,裂缝越易向纵深发展;抑制需通过温控措施调节温度变化、材料优化补偿收缩、施工控制减少约束等方式,阻断应力累积超过材料强度的过程,从而实现对裂缝的有效防控。从各特征点温度应力历时曲线(图4)计算结果来看,各浇筑层混凝土受外界气温影响,早龄期温度波动引起应力上升,容易超过极限抗拉强度值。以特征点3为例,初始工况中应力峰值达到了 3.2 MPa ,拉应力超过了C30混凝土抗拉强度极限值。从温度包络图(图5)来看,温度峰值主要受浇筑季节环境气温的影响。底板至最上层浇筑块,内部温度峰值分别为 50.8 、 48.5 、 49.2 、 51.5 、 54.4 、 58.8 、 65.8°C 。因此,有必要根据浇筑季节做好各区材料的保温措施。从裂缝起裂机制看,特征点3最大拉应力达 3.2 MPa ,超过C30混凝土抗拉强度(3 MPa),满足起裂临界条件(拉应力大于等于抗拉强度)。若未采取措施,持续的温度梯度为裂缝扩展提供了动力,裂缝将沿深度方向扩展。

3.2 冬季最优工况模拟结果

采取“表面保温+膨胀剂”措施后,特征点3拉应力峰值降至 2.69 MPa (图6),未达到起裂阈值。表面保温使内外温差降低,减少了温度应力累积,阻断了起裂的动力来源。膨胀剂掺入后,混凝土早期膨胀量抵消了温降收缩,同样对裂缝扩展具有抑制作用。从图7计算结果可以看出,门库内部和表面拉应力都低于 3 MPa ,符合安全标准。只有门槽等直角转弯处存在应力集中现象,可以考虑增加这些部位的限裂钢筋。整个结构应力总体满足低于极限抗拉强度值,实现了基本的防裂要求。且从应力包络图可以看出,取消永久缝后,门库整体拉应力仍低于 3.0 MPa ,符合拉应力强度标准,实现了基本的防裂要求,此工况为目前计算的最优工况。

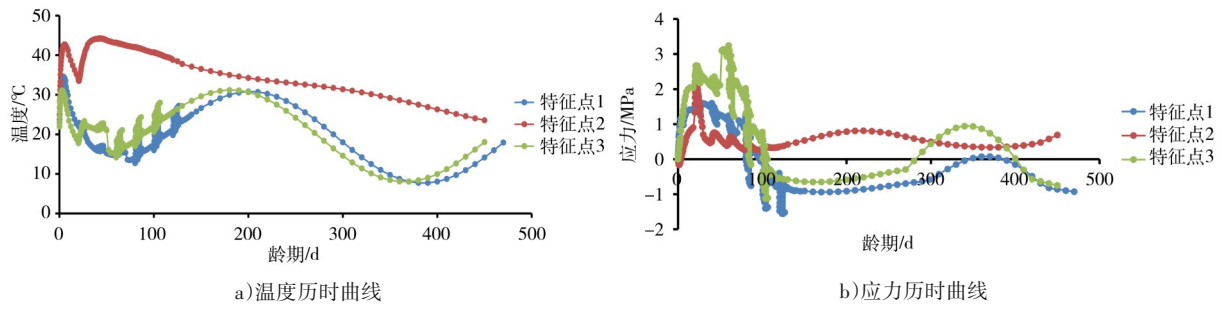


图4 冬季初始工况特征点的温度和应力历时曲线

Fig. 4 Temperature and stress duration curves of characteristic points

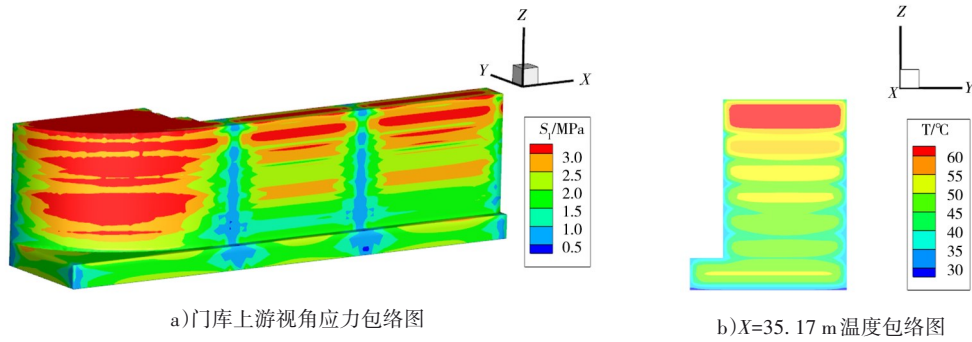


图5 冬季初始工况门库应力和温度包络图

Fig. 5 Envelope diagram of stress and temperature of gate warehouse under initial winter conditions

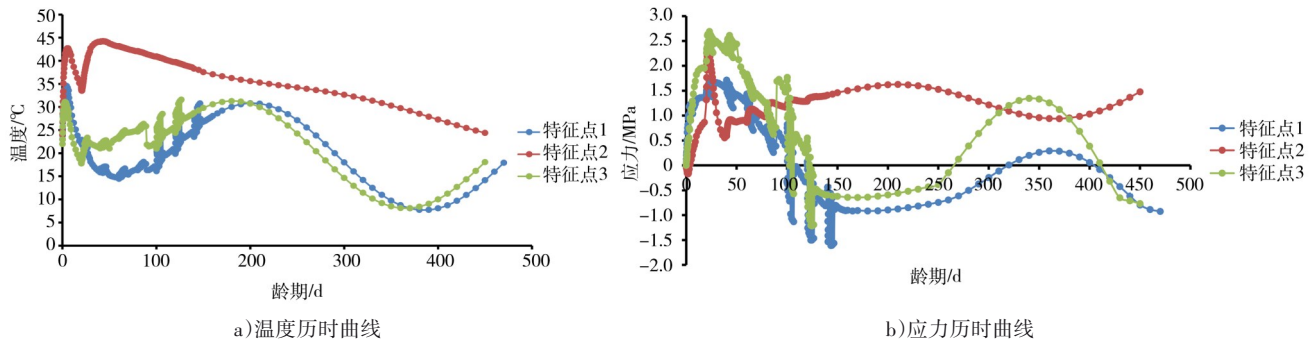


图6 冬季最优工况特征点的温度和应力历时曲线

Fig. 6 Temperature and stress duration curves of characteristic points

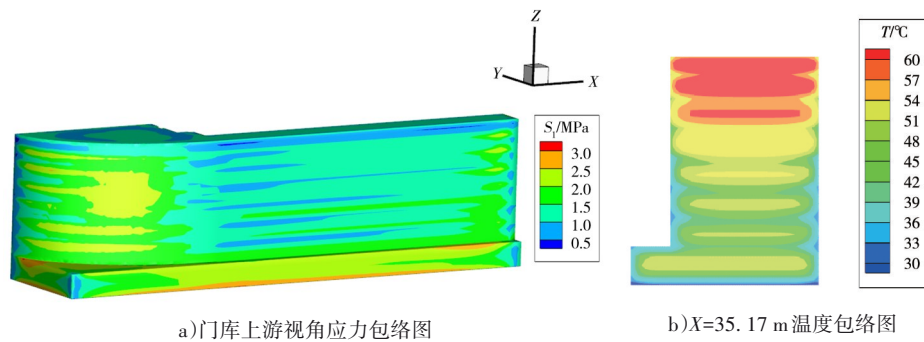


图7 冬季最优工况门库应力和温度包络图

Fig. 7 Envelope diagram of stress and temperature of gate warehouse under the optimal conditions at the beginning of winter

3.3 夏季初始工况模拟结果

从各特征点温度应力历时曲线(图8)计算结果来看,各浇筑层混凝土受外界气温影响,早龄期温度波动引起应力上升,容易超过极限抗拉强度值。以特征点2(墙体第1层C30内部点)为例,8月工况1中应力峰值达到了4.19 MPa,温度峰值达到了60.90℃,拉应力超过了C30混凝土抗拉强度极限值。从初始工况温度包络图(图9)来看,温度峰值主要受浇筑季节环境气温的影响。底板至最上层浇筑块,内部温度峰值分别为68.8、65.5、61.3、56.3、51.8、48.5、46.5、36.2℃。

夏季工况温控难度显著高于冬季,核心原因在

于高温环境对混凝土水化进程及温度场演化的多重不利影响:一方面,环境温度升高使混凝土入模温度基数增加,叠加高温加速水泥水化反应,导致内部温度峰值快速突破60℃,且高温持续时间延长;另一方面,夏季昼夜温差大,太阳辐射易引发表面温度骤升骤降,与内部高温形成剧烈温度梯度,同时高温环境下混凝土早期强度发展较慢,抗裂性能下降,进一步加剧了温控与防裂的难度。因此,有必要根据浇筑季节做好各区材料的保温措施,同时布置水管通水冷却来控制温度峰值以及内外温差。

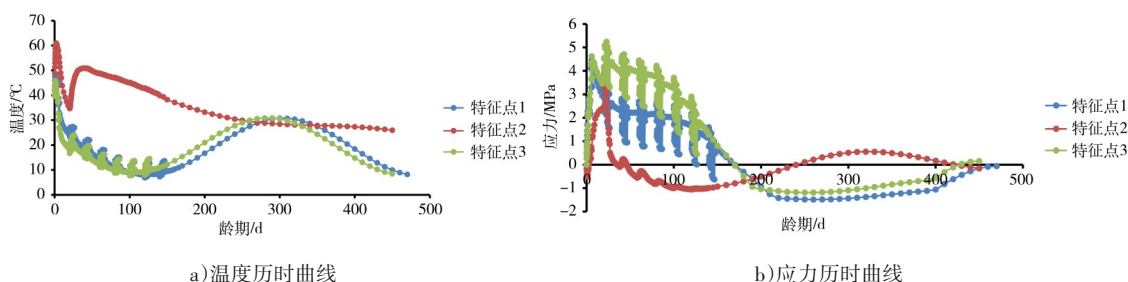


图8 夏季初始工况特征点的温度和应力历时曲线

Fig. 8 Temperature and stress duration curves of characteristic points

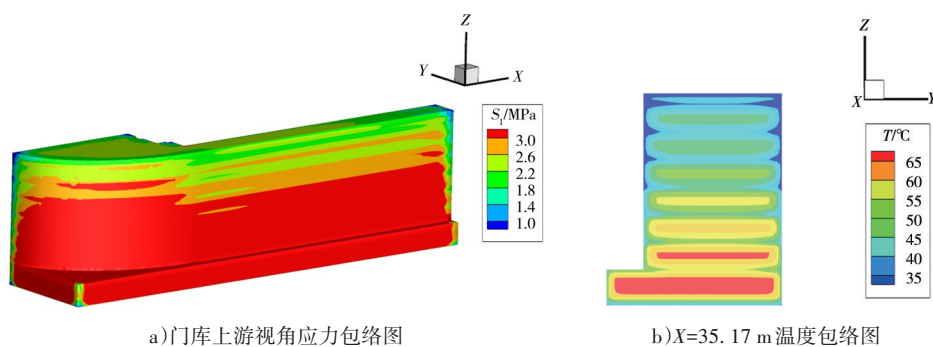


图9 夏季初始工况门库应力和温度包络图

Fig. 9 Envelope diagram of stress and temperature of gate warehouse under initial summer conditions

3.4 夏季最优工况模拟结果

从各特征点温度应力历时曲线(图10)计算结果来看,对比初始工况计算结果,对混凝土进行削峰之后,温度和拉应力下降明显。底板层厚壁段表面应力峰值下降至2.67 MPa,低于起裂阈值,满足了C30混凝土应力要求。特征点3(墙体第1层厚壁

段表面点)应力峰值下降至2.55 MPa,满足了C30混凝土应力要求。从图11来看,温度峰值主要受浇筑季节环境气温和冷却削峰的影响。底板至最上层浇筑块,内部温度峰值分别为43.5、47.5、45.7、44.4、45.4、50.8、51.9℃。从整体上来看,大部分区域都能达到安全标准。

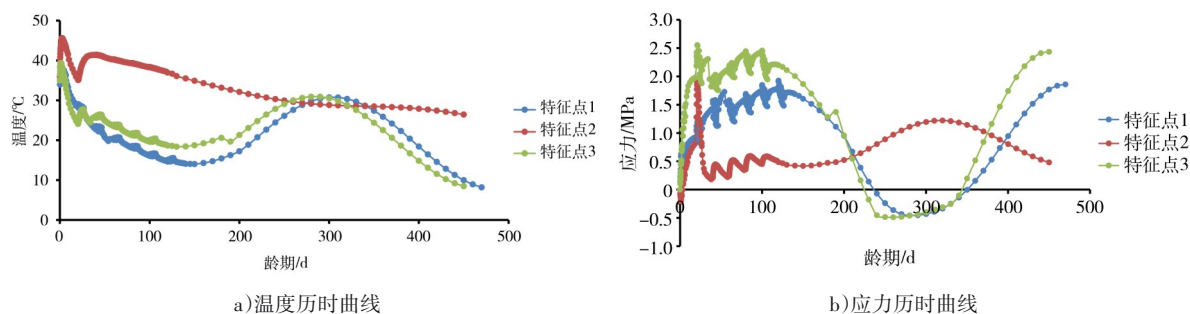


图 10 特征点的温度和应力历时曲线

Fig. 10 Temperature and stress duration curves of characteristic points

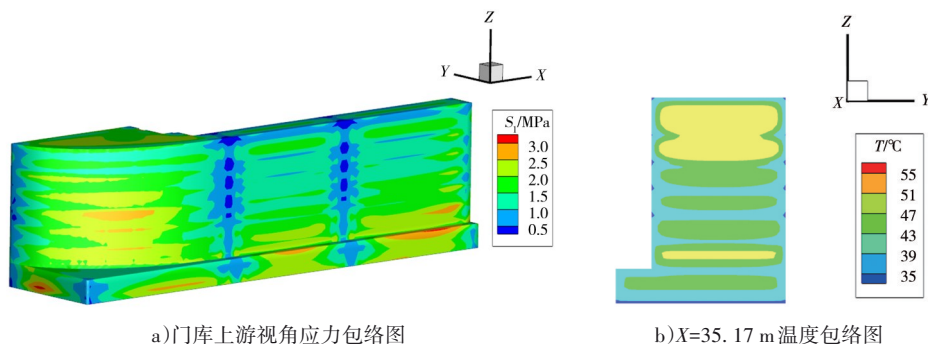


图 11 夏季最优工况门库应力和温度包络图

Fig. 11 Envelope diagram of stress and temperature of gate warehouse under the optimal summer conditions

混凝土允许抗拉强度与混凝土龄期相关,最大应力出现的龄期以及对应龄期的混凝土抗拉强度见表5,夏季和冬季最优工况下特征点对应的应力均小于对应龄期的抗拉强度。

表5 最大拉应力汇总

Tab. 5 Summary table of maximum tensile stress

工况	特征点	最大应力/MPa	龄期/d	抗拉强度/MPa
夏季最优工况	1	1.92	120	3.00
	2	1.94	21	2.88
	3	2.55	21	2.88
冬季最优工况	1	1.71	40	2.98
	2	2.40	22	2.89
	3	2.69	23	2.90

3.5 温度与应力峰值关联性分析

基于特征点1、2、3在不同工况下的温度峰值和应力峰值数据(表6),采用 Pearson 相关系数公式计算关联性,见式(7):

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (7)$$

式中: x 为温度峰值; y 为应力峰值; $n=12$ 为样本总量。

由式(7)计算可知整体相关系数为0.115。整体相关系数较低,主要因不同特征点的约束条件差异较大(如表面点受环境散热影响更显著,内部点受水化热累积影响更突出),需结合部位特性针对性分析。按照特征点位置计算相关系数,其特征点1的相关系数为0.92,特征点2的相关系数为0.94,特征点3的相关系数为0.87。分部位来看,各特征点的温度与应力均呈强正相关($r>0.85$),表明单个部位的应力峰值随温度峰值升高而显著增大,其中门库内部点(特征点2)关联性最强($r=0.94$)。

3.6 温控指标建议

根据仿真计算最优工况的结果,结合工程经验,确定门库大体积混凝土温控指标见表7。由于

门库结构主要是表层易裂,因此温控指标的控制重点是内外温差(混凝土内部和表面的温差)。计算结果表明,夏季浇筑底板等浇筑块的温控难度太高,建议避开夏季开浇,因此未给出夏季浇筑的温控指标。

表6 特征点数据统计

Tab. 6 Characteristic point data statistics

序号	特征点	工况	x	y	xy	x^2	y^2
1	1	夏季初始	48.48	4.48	217.19	2 350.31	20.07
2	1	夏季最优	38.29	1.92	73.52	1 466.12	3.69
3	2	夏季初始	60.90	4.19	255.17	3 708.81	17.56
4	2	夏季最优	45.64	1.94	88.54	2 082.01	3.76
5	3	夏季初始	45.85	5.23	239.80	2 102.22	27.35
6	3	夏季最优	39.34	2.55	99.32	1 547.64	6.50
7	1	冬季初始	34.60	1.66	57.44	1 197.16	2.76
8	1	冬季最优	34.60	1.71	59.17	1 197.16	2.92
9	2	冬季初始	44.22	2.29	101.26	1 955.41	5.24
10	2	冬季最优	44.22	2.40	106.13	1 955.41	5.76
11	3	冬季初始	31.19	3.24	101.06	972.82	10.49
12	3	冬季最优	31.57	2.69	84.92	997.66	7.24

根据热弹性理论及本文3.5节结果,单个部位的温度与应力呈强正相关(特征点相关系数均大于0.85),温差是表层拉应力超标的核心诱因。冬季初始工况中,特征点3(门库表面点)在内外温差超过15℃时,拉应力峰值达3.2 MPa,超过C30混凝土抗拉强度极限值(3 MPa);而在冬季最优工况下,通过保温措施将内外温差控制在15℃以内后,该特征点拉应力峰值降至2.69 MPa,未达到起裂阈值。因此,将最大内外温差设定为15℃,可直接关联防裂目标,确保表层拉应力处于安全范围。基于冬季最优工况仿真数据,各部位最高温限值对应应力安全状态。参考混凝土徐变特性及应力松弛规律,温降速率过大会导致徐变松弛不足,引发应力累积。最大上下层温差与20 d浇筑间歇期(表4)匹配,此时下层混凝土已完成70%水化热释放。由以上包络

图可知当前层与下层浇筑间隔20 d时,上下层温差小于等于25℃(墙1—4层)或30℃(墙5—7层)可避免附加约束应力。

表7 冬季开工门库大体积混凝土温控指标

Tab. 7 Temperature control index of large volume concrete for gate warehouse construction in winter

壁段	最高温/℃		最大内外温差/℃		温降速率/(℃·d ⁻¹)		最大上下层温差/℃	
	厚	薄	厚	薄	厚	薄	厚	薄
底板	50.0	50.0			1.0	1.0	25.0	25.0
墙1	50.0	50.0			1.0	1.0	25.0	25.0
墙2	50.0	50.0			1.0	1.0	25.0	25.0
墙3	52.0	52.0	15.0	15.0	1.0	1.0	25.0	25.0
墙4	56.0	56.0			1.2	1.2	25.0	25.0
墙5	60.0	60.0			1.2	1.2	30.0	30.0
墙6	64.0	64.0			1.5	1.5	30.0	30.0
墙7	65.0	65.0			1.5	1.5	30.0	30.0

注:①表内最大内外温差为混凝土内部最高温区域与表面的温差;②表内的温降速率不是最大控制值,各浇筑块的实际温降速率偏离相应温降速率指标不宜超过±0.3℃。

4 结论与防裂方案

4.1 施工期应力特点总结

- a)应力超标特征。夏、冬季初始工况下,门库拉应力超标集中于浇筑块表层(仓面、侧面),高温区域(如夏季初始工况特征点2应力达4.19 MPa)及早龄期(水化热集中阶段)超标更显著;内部拉应力始终低于C30混凝土抗拉强度(3 MPa),无贯穿性裂缝风险,裂缝深度随内外温差增大而增加。
- b)温差与应力的关联性。内外温差是表层拉应力超标的核心诱因,尤其在冬季低温环境下,温差骤增易导致表层应力失控;通过保温措施可将冬季表层拉应力控制在3 MPa以内,验证了温控对缓解应力的有效性。
- c)结构差异对垒应力的影响:薄壁段因散热快,内外温差较小(小于等于15℃),应力风险低;厚壁段(如底板、墙5—7)因散热慢,内外温差大(夏季初始工况达25℃以上),需复合温控措施(保温+冷

却)才能控制应力。

d)材料与工艺对应力的调控作用:C30 混凝土因温升速率慢、绝热温升终值低($37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),为简化冷却措施提供了有利条件;掺入膨胀剂可将自生体积变形终值从 130 微应变降至 50 微应变(等效减少 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温降收缩),直接降低拉应力约 20%。

e)季节施工的应力差异:夏季浇筑需大幅削峰(底板削峰 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)才能控制应力,导致冷却水管密度增加 30% 以上,施工难度显著提升;冬季浇筑通过优化保温可使应力达标,且可取消永久缝(应力仍小于等于 3 MPa),更具可行性。

4.2 防裂方案总结

a)薄壁段防裂方案。由于薄壁段内外温差较小,温控措施以表面保温为主。具体为:混凝土浇筑后,前 20 d 采用保温材料覆盖表面,确保散热系数控制在 $400\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$;11 月至次年 2 月期间,加强保温措施,使散热系数降至 $200\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$,以减少冬季低温环境下的表面散热,控制内外温差不超过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无需设置冷却水管,仅通过表面保温即可有效控制表层拉应力。

b)厚壁段防裂方案。厚壁段内外温差较大,需采用“表面保温+内部冷却”的复合措施。表面保温要求与薄壁段一致;同时,在混凝土内部布置冷却水管,夏季浇筑时按不同墙体层级控制削峰温度(底板削峰 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,墙 1 削峰 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,墙 2 削峰 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等),通过通水冷却控制内部最高温度,确保最大内外温差不超过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季浇筑时,可适当放宽冷却水管运行强度,利用低温环境自然散热,但需保证温降速率不超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

参考文献:

- [1] 徐小蓉,何涛洪,雷峥琦,等. 超长坝段堆石混凝土重力坝蓄水运行安全评价[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(9):1375-1387.
XU X R, HE T H, LEI Z Q, et al. Safety evaluation of rock-filled concrete gravity dam with long section during the impoundment operation period [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62 (9) : 1375-1387. (in Chinese)
- [2] 高全福,刘志发,胡元杰,等. 支承层裂缝诱发的轨道次生病害及车-轨动力响应影响研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报,2025:1-13.
GAO Q F, LIU Z F, HU Y J, et al. Investigation of track secondary defects induced by supporting layer cracks and their impact on vehicle-track dynamic response [J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025: 1-13. (in Chinese)
- [3] 刘爱荣,腾帅,陈炳聪,等. 桥梁水下结构检测研究进展与挑战[J]. 中国公路学报,2025,38(6):17-35.
LIU A R, TENG S, CHEN B C, et al. Advancements and Challenges of Underwater Structural Detection Research on Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(6):17-35. (in Chinese)
- [4] 仇安兵. 基于热-力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析[J]. 工程科学学报,2025,47(5):995-1004.
QIU A B. Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method [J]. Journal of Engineering Science, 2025, 47 (5) : 995-1004. (in Chinese)
- [5] 李松辉,段得超,杜宜斌,等. 中美标准体系下混凝土坝温控防裂计算方法分析[J/OL]. 工程力学,2025:1-11.
LI S H, DUAN D C, DU Y B, et al. Calculation method analysis of temperature control and crack prevention for concrete dams under Chinese and American standard systems [J/OL]. Engineering Mechanics, 2025: 1-11. (in Chinese)
- [6] 王天赐,孔纲强,刘汉龙,等. 高海拔地区桩基混凝土硬化时期热力响应特性现场试验[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(11):4140-4150.
WANG T C, KONG G Q, LIU H L, et al. Field tests on thermal response of pile foundation concrete in high altitude localities during hardening period [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(11): 4140-4150. (in Chinese)
- [7] 张超,方胜,黄伟,等. 混凝土环形收缩试验的研究进展[J]. 材料导报,2023,37(4):120-129.
ZHANG C, FANG S, HUANG W, et al. Ring Shrinkage Test of Concrete: A Review [J]. Materials Review, 2023, 37(4): 120-129. (in Chinese)
- [8] 段文聪,李英明,陶强胜. 基于 OFDR 的混凝土收缩与裂缝监测方法研究[J]. 建筑材料学报,2025,28(9):937-946.
DUAN W C, LI Y M, TAO Q S. Research on shrinkage and crack monitoring method of concrete based on OFDR. [J]. Journal of Building Materials, 2025, 28 (9) : 937-946. (in Chinese)
- [9] 蒋志鹏,高畅,汤金辉,等. 超高性能混凝土早期收缩性能及神经网络预测模型[J]. 硅酸盐学报,2025,53(5):1098-1109.
JIANG Z P, GAO C, TANG J H, et al. Early Shrinkage Performance and Neural Network Prediction Model of Ultra-High

- Performance Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(5): 1098–1109. (in Chinese)
- [10] 张国新, 刘有志, 刘毅. 特高拱坝温度控制与防裂研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 382–389.
- ZHANG G X, LIU Y Z, LIU Y. Temperature control and crack prevention of super-high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 382–389. (in Chinese)
- [11] 彭潜, 姚顺雨, 刘占领, 等. 防汛墙底板大体积混凝土温度控制与监测[J]. 人民珠江, 2021, 42(5): 104–108.
- PENG Q, YAO S Y, LIU Z L, et al. Temperature Control and Monitoring of Mass Concrete in Flood Control Wall Floor [J]. Pearl River, 2021, 42(5): 104–108. (in Chinese)
- [12] 刘毅, 辛建达, 张国新, 等. 大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1228–1233.
- LIU Y, XIN J D, ZHANG G X, et al. Intelligent Monitoring Technology of Anti-thermal Cracking for Mass Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(5): 1228–1233. (in Chinese)
- [13] 程井, 肖文俊, 周伟, 等. 基于接触模型的导流洞堵头温控仿真及稳定安全研究[J]. 水利学报, 2025, 56(2): 266–276.
- CHENG J, XIAO W J, ZHOU W, et al. Study on the temperature control simulation and stability safety of diversion tunnel plug based on contact model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(2): 266–276. (in Chinese)
- [14] 钱萍萍, 陈徐东. 异形高强度大体积混凝土施工温控研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 297–303.
- QIAN P P, CHEN X D. Research on temperature control of special-shaped and high strength mass concrete in construction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering (Chinese & English), 2025, 56(S1): 297–303. (in Chinese)
- [15] 郑豪杰, 梁思明, 李雁, 等. 大体积混凝土冷却水管布置优化与参数分析[J]. 铁道建筑, 2025, 65(3): 139–144.
- ZHENG H J, LIANG S M, LI Y, et al. Optimization and Parameter Analysis of Cooling Water Pipe Layout for Mass Concrete [J]. Railway Engineering, 2025, 65(3): 139–144. (in Chinese)
- [16] 殷新锋, 李旭辉, 黄胄, 等. 融合数字孪生与长短期记忆神经网络方法的混凝土水化热温度预测[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 167–173, 316.
- YIN X F, LI X H, HUANG Z, et al. Prediction of hydration heat temperature of mass concrete based on DT-LSTM hybrid model [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2025, 57(2): 167–173, 316. (in Chinese)
- [17] 李明, 徐思睿, 王育江, 等. 江阴靖江长江隧道大体积混凝土抗裂技术研究[J]. 混凝土, 2024(3): 140–142, 164.
- LI M, XU S R, WANG Y J, et al. Research on the anti-crack technology of mass concrete in Jiangyin Jingjiang Yangtze River Tunnel [J]. Concrete, 2024(3): 140–142, 164. (in Chinese)
- [18] 李华, 王育江, 高南箫, 等. 混凝土减缩抗裂外加剂的研究与应用进展评述[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(12): 1101–1111.
- LI H, WANG Y J, GAO N X, et al. Research and Application Progress of Chemical Admixtures for Shrinkage Reducing and Crack Resistance of Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(12): 1101–1111. (in Chinese)
- [19] 糜凯华, 李小五, 邓水明. 非溢流坝施工期温度应力场数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(S1): 76–80.
- MI K H, LI X W, DENG S M. Numerical Simulation of Temperature Stress Field during Construction of Non-Overflow Dams [J]. Pearl River, 2022, 43(S1): 76–80. (in Chinese)
- [20] 张寒硕, 卜凡民, 聂建国, 等. 超长混凝土框架结构温度场模拟与温度效应研究[J]. 工程力学, 2025, 42(10): 25–32.
- ZHANG H S, BU F M, NIE J G, et al. Temperature Simulation and Thermal Effect Research on Extremely Long-Span Concrete Frame Structure [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(10): 25–32. (in Chinese)
- [21] 张广彬. 跳仓法施工在超长大体积混凝土结构施工中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(11): 58–60.
- ZHANG G B. Research on the Application of Bin Hopping Method in the Construction of Super Long and Large Volume Concrete Structures [J]. Building Technology Development, 2024, 51(11): 58–60. (in Chinese)
- [22] 黄必斌, 徐卫春, 章艳, 等. 超长墙体大体积C50混凝土开裂特征与成因分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1589–1594.
- HUANG B B, XU W C, ZHANG Y, et al. Cracking characteristics and cause analysis of C50 concrete for super large volume wall [J]. Building Structure, 2023, 53(S1): 1589–1594. (in Chinese)
- [23] 程井, 孔垂穗, 邹科辉. 基于LSTM的泵闸工程混凝土施工期温度场预测[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 76–81.
- CHENG J, KONG C S, ZOU K H. Temperature field prediction during concrete construction period of pump and sluice project based on LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 76–81. (in Chinese)
- [24] 孙巧荣, 强晟, 裴华锋, 等. 渐变流道混凝土结构施工期温度应力特性[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 191–196.
- SUN Q R, QIANG S, QIU H F, et al. Characteristics of temperature stress of concrete structure with gradual flow channel during construction period [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 191–196. (in Chinese)
- [25] 倪德斌, 郭瑞, 张程鹏, 等. 热带地区大型竖井贯流泵站施工应力场特点及其控制方法[J]. 云南水力发电, 2024, 40(5): 130–134.
- NI D B, GUO R, ZHANG C P, et al. Characteristics and Control

- Methods of Stress Field during Construction of Large-scale Vertical Shaft Tubular Pumping Station in Tropical Region [J]. Yunnan Water Power, 2024, 40(5): 130–134. (in Chinese)
- [26] 袁敏,王碗琴,李敏,等. 台风暴雨季节混凝土坝施工期防裂措施研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 15–19.
- YUAN M, WANG W Q, LI M, et al. Study on Crack Prevention Measures for Concrete Dam during Construction in Typhoon and Rainstorm Season [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition), 2017, 39(6): 15–19. (in Chinese)

Stress Characteristics of Ultra-Long Irregular Concrete Gate Warehouses during Construction

ZHANG Jianhua¹, HU Rongjin¹, ZHAO Yunpeng², WENG Fagen¹, QIANG Sheng^{2*}

(1. China Railway Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Group, Jiangxi Provincial Hydraulic Structure Engineering Technology Center, Nanchang 330029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ultra-long irregular concrete structures are widely used in large-scale water conservancy projects (e. g., gate warehouses of hydraulic hubs), where cracking during construction has long been a critical challenge. Such cracking not only severely threatens project quality and structural safety but also causes substantial economic losses and potential environmental impacts. The primary causes of cracking include temperature stress induced by hydration heat accumulation (especially in large-volume structures with slow heat dissipation), chemical shrinkage, drying shrinkage, and autogenous shrinkage. Moreover, the complex geometric shape (e. g., variable cross-sections of gate warehouses) and constraints of irregular structures further exacerbate the uneven distribution of temperature and shrinkage stresses, increasing cracking risks. Although existing studies have explored temperature control technologies for concrete structures like dam plugs and viaduct piers, research on temperature control and crack prevention for ultra-long irregular gate warehouses—characterized by large dimensions and high requirements for structural integrity—remains insufficient. To address the issue of frequent cracking in ultra-long concrete structures during construction, this paper takes an ultra-long irregular concrete gate warehouse as an example and uses the finite element method to perform simulation calculations of the temperature field and stress field for different pouring schemes in summer and winter. The stress characteristics and crack prevention methods during the construction period are studied. The results show that in the initial conditions of both summer and winter, various parts of the gate warehouse experience tensile stress exceeding the allowable limit, particularly in high-temperature regions. By comparing the temperature and stress variations under different conditions, it is found that insulation measures and the addition of expansive agents can significantly reduce the tensile stress in the surface layer of concrete. The temperature control measures for the thin wall sections of the gate warehouse are relatively simple, requiring only surface insulation, whereas the thick wall sections need water pipe cooling in addition to surface insulation. Pearson correlation analysis confirms a strong positive correlation between temperature and stress peaks at individual positions, highlighting the core role of temperature control in stress management. Based on the simulation results and engineering experience, the optimal temperature control indicators for winter pouring are proposed, and summer pouring is recommended to be avoided to reduce construction difficulty. This study provides scientific support for the construction of practical engineering and offers valuable references for crack prevention in similar ultra-long irregular concrete structures worldwide, especially in large-scale water conservancy and transportation projects. Furthermore, it establishes an analytical framework for the temperature-stress correlation in such structures, which helps refine industry temperature control standards, enhance the durability and long-term safety of engineering structures, and further reduce potential economic losses and environmental risks caused by cracking.

Keywords: ultra-long irregular concrete; construction period; large volume concrete; temperature control calculation; stress field; finite element method