

# 隧道二次衬砌表面纵向温度变化规律研究

刘光学 才旭 刘馨泽

中铁三局集团第四工程有限公司 北京 102300

**摘要:** 本文研究了隧道二次衬砌表面水化热温度场的纵向分布规律。利用有限元建立等比例模型进行温度场模拟,通过现场监测数据验证模拟结果的准确性,并分析二次衬砌在不同时期的温度变化规律。分析表明,二次衬砌表面温度变化可分为三个阶段,且由于水化放热导致纵向温度梯度显著,与中心区域相比,温差维持在大约4℃。研究发现,纵深方向的热量管理是实现温度均匀性的关键,同时指出衬砌与上一版衬砌间导热缓慢,并对此提出相应的优化建议。针对拆模后的养护阶段,建议采取适当的温控措施,特别是对于纵深方向的表面保温。

**关键词:** 二次衬砌;水化热;表面温度;纵向规律

## 前言

隧道建设是现代交通基础设施中至关重要的一环,其施工质量与运营性能直接关系到人民生命财产的安全和社会经济的持续发展<sup>[1-4]</sup>。在隧道施工的关键阶段——二次衬砌过程中,水泥水化热引发的温度场变化问题尤为突出。水泥水化过程中释放的热量会导致二次衬砌表面温度场出现复杂的变化,这不仅影响衬砌结构的力学性能,还可能对其耐久性造成不利影响。特别是在结构养护阶段,由水化热引起的温度梯度及其对结构完整性的潜在威胁,成为了工程技术人员必须面对和解决的重大挑战。

为了准确模拟和分析这一问题,ABAQUS软件提供了一系列的功能,使得能够综合考虑包括环境温度、初始和边界条件以及水化生热等多种施工因素<sup>[5]</sup>。通过FORTRAN语言编写的用户自定义子程序,可以进一步分析混凝土结构的温度分布,并研究热量传递的动态过程<sup>[6]</sup>。这种模拟方法对于捕捉施工过程中温度和应力的微妙变化,优化施工策略,制定有效的温控措施,确保隧道的长期稳定性和安全性具有极其重要的意义。

本研究的目标是通过对二次衬砌水化热温度场进行详细的分析和模拟,揭示其纵向分布规律,为隧道拆模和养护提供理论依据和实用指导。这不仅有助于预防隧道结构早期损伤,延长其使用寿命,还能确保交通安全,实现隧道工程经济性与安全性的最佳平衡。因此,本研究的成果将具有重要的理论价值和现实意义,对隧道工程领域的技术进步和创新发展具有积极的推动作用。

## 1 工程概况

金岗隧道位于辽宁省抚顺市新宾满族自治县境内,地处东北严寒地带,全长2348m,属于中等长度隧道。隧道二次衬砌主体结构厚度主要在0.4~0.55m,采用分段施工的方法,每段施工长度为9m。施工顺序为先从仰拱开始,然后是拱墙,最后是顶板,以确保逐步建立稳固的结构。

## 2 温度场模拟与监测

为了探究隧道二次衬砌表面水化热温度场的纵向分布规律,本文采用了数值模拟和现场监测相结合的方法。经过有限元深入分析,得到了温度随时间和空间的变化规律。同时,结合现场监测数据,验证了数值模拟结果的准确性。

### 2.1 水化热计算理论

#### 2.1.1 绝热温升

混凝土水化过程中,热量的主要来源是水泥的水化热作用。因此,为了准确计算衬砌混凝土表面的温度场分布,首先需要掌握水泥水化放热规律。目前,指数型与复合指数型是两种常见的表达式<sup>[7]</sup>。经过实际试算与比较,指数型表达式比较贴近实际,故采用指数型表达式进行计算与分析:

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt})$$

式中,  $Q(t)$  为龄期  $t$  时的累积水化热,  $\text{kJ/kg}$ ;  $Q_0$  为最终累积放热量,  $\text{kJ/kg}$ ;  $t$  为龄期,  $\text{d}$ ;  $m$  为水化系数。

#### 2.1.2 传热方程

假设在隧道衬砌结构中,混凝土具有相同的性质并且质地均匀,计算其内部温度分布归结为在既定的边界条件和初始状态下求解热传导方程,而传热的整个过程是一个随时间变化的非稳态过程,其传热方程为<sup>[7-9]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q(t)$$

式中,  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  为热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $c$  为比热容,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $q(t)$  为混凝土水化生热速率,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

#### 2.1.3 边界条件

假定混凝土表面的热流量与混凝土表面温度  $T$  和外

界气温  $T_0$  间的温差成正比:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_0)$$

式中,  $\lambda$  为导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\beta$  为表面放热系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。忽略钢模板的保温作用, 与空气接触时, 属于此类边界条件[10]。

### 2.2 模型选择

利用 ABAQUS 建立隧道等比例计算模型, 隧道围岩长宽设置为 40m, z 轴为进深方向, 隧道每一版进深为衬砌车长 9m。二次衬砌、初期支护厚度分别为 0.4m 和 0.25m, 二次衬砌网格划分如图 1 所示。

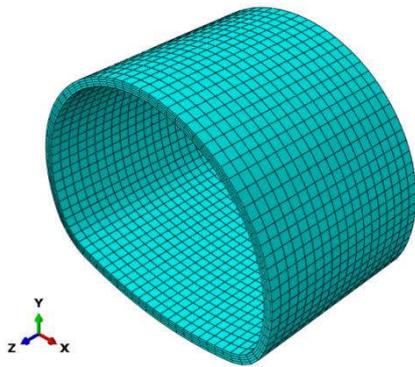


图 1 二次衬砌网格示意图

### 2.3 材料参数

模型浇筑采用与施工方案相同配合比的混凝土, 初期支护采用 C25 喷射混凝土, 二次衬砌采用 C40 现浇混凝土, 各部位混凝土所含材料及其对应的比例如表 1。选取位于隧道中部的 III 级围岩段作为研究对象, 洞内风速稳定在 0.2m/s, 同时气温恒定为 17 $^\circ\text{C}$ 。因此, 隧道温度场的理论计算模型主要划分为两个部分: 一是与隧道洞内的空气对流换热, 二是与初期支护之间的接触传热。

表 1 混凝土配合比

工程部位	混凝土标号	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	水/kg
初衬	C25	461	970	794	175
仰拱	C40	316	766	1060	148
衬砌	C40	327	792	1008	157

### 2.4 现场监测

在金岗隧道二次衬砌混凝土的施工监测中, 精确的数据获取是至关重要的。为此, 使用振弦式温度应变计埋设于衬砌内部, 并辅以便携式工程测试信号分析仪。将关键

监测点设置于拱顶二次衬砌部位, 取衬砌车长为一衬, 选取距离径向表面 5cm 的位置, 并在该位置上的同一衬砌中部和两侧距离衬砌施工缝 50cm 处分别布置了三个测点, 安排专人负责定时监测大气温度和测温点的温度数据, 以便捕捉关键的热变化信息。第 1~3d 每 4h 测温 1 次, 第 4d 后每 8h 测温 1 次, 待温度稳定后 1d 测温 1 次, 该监测持续至衬砌混凝土达到龄期 312h。

## 3 表面温度场结果分析

### 3.1 模型计算与验证

在现浇二次衬砌施工过程中, 通过热力学计算预测了混凝土的温度演变情况, 如图 2 所示。

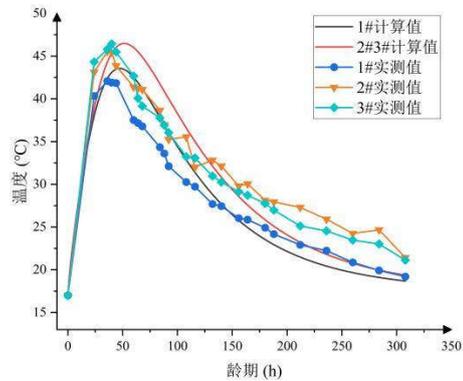


图 2 温度曲线计算与实测

根据计算结果, 得到衬砌表面最高温度为 46.5 $^\circ\text{C}$ , 该温度出现在隧道 2、3 号测点的位置, 约在施工开始后的 48h 达到峰值。实际测温数据表明, 表面最高温度为 46.3 $^\circ\text{C}$ , 发生在隧道 2 号测点处, 而 3 号测点的实测峰值温度为 45.9 $^\circ\text{C}$ , 这两个测点的峰值出现时间均为 40h。值得注意的是, 2、3 号测点的计算与实测温度曲线显示出相似的变化趋势, 表明计算模型较为准确地反映了实际情况。

此外, 1 号测点的计算最高温度为 43.5 $^\circ\text{C}$ , 于 44h 达到峰值, 相较之下, 实际测温的最高温度稍低, 为 42.1 $^\circ\text{C}$ , 且峰值的出现时间提前至 36h。这一差异可能源于混凝土在运输过程中损失了部分水化热以及环境因素的微小变化, 这些因素在理论模型中可能难以完全捕捉。混凝土的温度变化可分为三个阶段: 初始 1-2d 内温度迅速升高, 归因于水泥水化放热; 3-6d 的快速降温期, 热量迅速散失; 10d 后进入平稳降温期, 水化热逐渐释放完毕, 与环境达到热平衡。

### 3.2 衬砌温度云图分析

图 3 为二次衬砌龄期 24h、48h 与 72h 的表面计算温度分布云图。

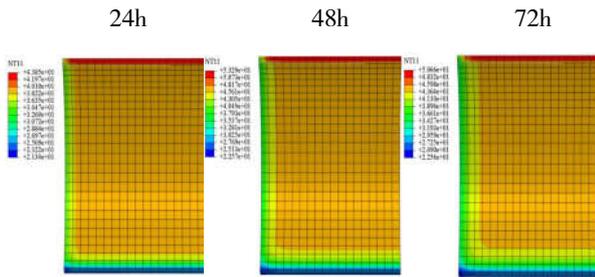


图3 不同龄期的温度分布云图

根据计算结果,二次衬砌的水化热导致纵向温度分布表现出明显的梯度。具体地,在二次衬砌的纵深方向,水化热引起的温度分布呈现出均匀性,温度向中部区域集中,形成显著的温度扩散现象。从这三个时间点的数据可以明显看出,温度影响的梯度分布在整个结构中形成了三个不同的层次,并且每两个相邻层次之间的温度差异维持在 $2^{\circ}\text{C}$ 左右。随着时间的推移,这种纵深方向上的热量逐渐散发,导致该区域的温度下降速率较快,与中心区域相比,温差大约维持在 $4^{\circ}\text{C}$ 。

此外,纵深反方向上的温度变化相对温和,该方向上的温度与中部基本保持一致,表明该侧的热传递较为缓慢。在24h,隧道衬砌结构的温度影响深度约为 $0.5\text{m}$ ,随着时间增长至48h,温度影响深度扩展至 $1\text{m}$ ,并在72h后进一步扩展至 $1.3\text{m}$ 。伴随着温度逐渐下降,影响深度的扩展速率呈现出递减趋势,纵深方向上的温度普遍低于其他区域,可能与衬砌侧面直接暴露于大气中,没有其他隔热层或障碍物,所以散热效果更为显著,导致该区域的温度较其他部分更低。特别地,在拱脚部位,也观察到了明显的热量传递现象,其中热量朝向仰拱部位传递,由于重力的影响,混凝土在这一区域呈现出良好的接触导热性。因此,在施工和养护阶段,需要采取适当的温控措施,特别是对于纵深方向的表面保温措施,以确保整个结构的质量和安

#### 4 结论

(1) 在混凝土浇筑完成后,其表面温度变化可归纳为三个阶段:起初的迅速温升,接着是快速的降温,最终逐渐过渡到平稳的降温期。同时,需要指出的是,混凝土运输至施工现场的过程中,由于外界环境和运输条件的影响,会有一定程度的热量损失。

(2) 在二次衬砌的水化热影响下,纵向温度分布呈现梯度变化。在纵深方向,由于衬砌侧面与空气的直接接触,散热过程得到了加速,导致该区域温度比其他部分低大约 $4^{\circ}\text{C}$ ,形成了持续的温度差异。这一现象表明,混凝土中的热量更倾向于通过对流散热释放到环境中。

(3) 研究发现,拱墙与上一版衬砌接触不佳,导热缓慢,反映了施工中可能存在接触面不平整或不密实,这

些问题阻碍了有效的热量传递。因此,施工时应注重改善二次衬砌间的接触质量,减少不必要的温度梯度,以促进更均匀的热流动和硬化。

(4) 在混凝土结构的早期硬化阶段,温度控制至关重要。研究显示,24h内受温度影响的深度为 $0.5\text{m}$ ,72h扩展至 $1.3\text{m}$ ,温度梯度扩展速率随温度的升降而变化。因此,纵深方向的热量管理是影响温度均匀性的关键因素。此外,为减少裂缝产生的风险,建议拆模后对纵深方向表面混凝土予以密切关注,并采取适当的保温措施。

#### 参考文献

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2012.

[2] J. D. Xin, G. X. Zhang, Y. Liu, et al. Effect of temperature history and restraint degree on cracking behavior of early-age concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,192: 381-390.

[3] 张翠强, 郭小红, 田力达,等. 约束对隧道二次衬砌早期温度应力分布的影响[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 67-71.

[4] 高焱, 朱永全, 赵东平,等. 隧道寒区划分建议及保温排水技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3489-3499.

[5] H. Zhu, Y. Hu, R. Ma, et al. Concrete thermal failure criteria, test method, and mechanism: A review[J]. Construction and Building Materials. 2021(283): 122-126.

[6] 高德风, 周欣, 费晓春,等. 现浇隧道大体积侧墙结构混凝土裂缝控制技术[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(3): 4-8+32.

[7] 刘德军, 仲飞, 黄宏伟,等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178-199.

[8] 张玉强, 杨勇, 夏才初,等. 衬砌水化热对隧道内热交换管换热量的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 31-36.

[9] Tan X, Chen W, Yang D, et al. Study on the influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1): 320-334.

[10] 李双洋, 牛富俊, 孙志忠, et al. 多年冻土区姜路岭隧道施工水热力数值研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(05): 966-973.