

# 无管冷系统厚壁衬砌的水化热影响

## Heat of Hydration in Thick Wall Lining without Tube Cooling System

胡保刚, 董建辉

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 明挖隧道厚壁衬砌大体积混凝土厚度在 1.0~1.5 m 之间, 厚度不同于大跨径桥梁的承台和锚碇, 通过研究厚壁衬砌水化热温度场规律, 避免其结构产生裂缝。以某 1.2 m 厚现浇连拱明挖隧道衬砌大体积混凝土为研究对象, 通过现场实测温控数据了解其温度场规律, 并采用有限元软件 Midas Fea 进行温度场模拟, 结果吻合良好。利用验证后的有限元模型开展应力分析, 提出厚壁衬砌无管冷系统温控施工法, 通过控制变量进行数值模拟验证其可靠性。结果表明: 厚壁衬砌的水化热温度场温度上升快下降慢, 结构整体降温速率平均为 5.0 °C/d, 高于 2.0 °C/d, 但不会引起结构裂缝; 该施工法能够适用于 1.2 m 及以下厚度的隧道衬砌施工, 对于同等类型的明挖隧道施工具有指导意义。

**关键词:** 大体积混凝土; 明挖隧道; 水化热; 管冷系统; 温度场; 应力场

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0026-07

**DOI:**10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.006

HU Baogang, DONG Jianhui

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The thick-wall lining of mass concrete open-cut tunnel is between 1.0 m ~ 1.5 m, and its thickness is different from that of the pier and anchorage of long-span bridges. By studying the law of hydration heat temperature field of thick-wall lining, cracks can be avoided in its structure. Taking a 1.2 m thick cast-in-place open-cut tunnel lined mass concrete as the research object, the temperature field law was understood through the field measured temperature control data and the finite element software Midas Fea was used to simulate the temperature field. The measured temperature field data was in good agreement with the simulation results. The verified finite element model was used to carry out stress analysis. Based on the measured results and stress field data, the temperature control construction method of the tubular cold system with thick wall lining was proposed, and its reliability was verified by numerical simulation with control variables. The results show that the temperature of hydration heat field of thick-walled lining rises quickly and decreases slowly, and the overall cooling rate of the structure is 5.0 °C/d on average, higher than 2.0 °C/d, but it does not cause structural cracks. The temperature-controlled construction method of pipeless cold system can be applied to the tunnel lining construction with thickness of 1.2 m and below, which has guiding significance for the construction of the same type of open-cut tunnel.

**Keywords:** mass concrete; open cut tunnel; heat of hydration; pipe cooling system; temperature field; temperature stress

## 0 引言

随着我国基础设施建设的快速推进, 明挖隧道广泛应用于交通建设项目。当衬砌厚度的最小尺寸大于 1 m 时, 为厚壁衬砌, 属于大体积混凝土, 需

作者简介: 胡保刚 (1997—), 男, 硕士, 研究方向: 桥梁与隧道工程结构分析。

收稿日期: 2023-03-14

要考虑其水化热影响, 温度裂缝是大体积混凝土结构的普遍病害<sup>[1]</sup>。水泥水化热导致混凝土出现内外温差, 内外温差过大导致混凝土的拉应力产生, 当拉应力大于混凝土的抗拉强度时, 结构就会产生裂缝<sup>[2-3]</sup>。裂缝影响结构的整体性、安全性和耐久性<sup>[4-5]</sup>, 尤其是具有防水性要求的隧道。

目前, 国内外许多学者对大体积混凝土水化热开展研究, 在管冷优化及裂缝控制方面已形成了较为全面的研究成果。李之达等<sup>[6]</sup>研究了大体积混凝土承台早期温度场及冷管入水温度对温度场的影响; 侯炜等<sup>[7]</sup>研究了承台大体积混凝土温度时变效应, 优化了现场管冷系统布置; Huang 等<sup>[8]</sup>研究了大型桥墩水化热温度场, 提出了管冷系统的热控制方法; 黄海东等<sup>[9]</sup>精确分析了承台混凝土水化热瞬态温度场, 提出了考虑冷却温度沿程变化的精细化冷管分析模型; 汪建群等<sup>[10]</sup>研究了海洋环境下斜拉桥承台水化热温度场情况, 通过数据分析得出复掺技术能够降低混凝土的绝热温升。上述研究基于现场实测和数值模拟, 以桥梁工程的大体积混凝土结构水化热研究为主, 提出了温度控制方法, 然而关于明挖

隧道厚壁衬砌大体积混凝土水化热影响的研究很少, 同时厚壁衬砌的温度场边界存在内外钢模同时散热, 缺乏相应温度场规律和有效的温控施工方法指导温度监测及工程施工。基于此, 以某现浇明挖隧道为例, 实测温度场分布规律, 并与 Midas Fea 水化热温度场模拟计算进行了比较, 开展应力分析, 提出了 1.2 m 厚衬砌无管冷系统的水化热温控施工方法。

## 1 工程实例

某明挖隧道位于广东省汕尾市, 隧道长度 175 m, 由两个车行隧道和两个人行隧道组成。设计为双向 6 车道, 预留双向 8 车道宽度。车行隧道内轮廓采用承载能力较好的三心圆曲墙式衬砌断面, 无仰拱, 人行隧道采用半圆直墙式断面。车行隧道衬砌厚度为 1.2 m, 连拱中隔墙厚度为 2.572 m, 人行隧道衬砌厚度为 0.6 m。主体结构采用 C40 防水混凝土, 防渗等级为 P8, 基础采用 C30 混凝土。主体施工采用明挖顺筑法, 两个车行隧道同步施工, 人行隧道先施工右幅, 再施工左幅。隧道的洞门结构图如图 1 所示。

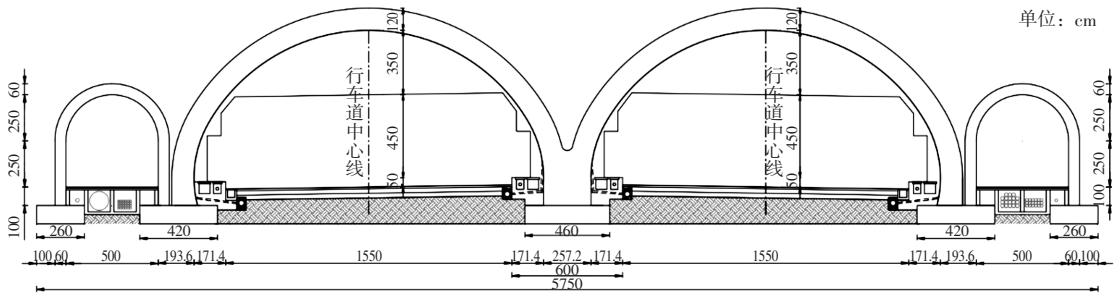


图 1 隧道洞门结构图

Fig. 1 Structural drawing of tunnel portal

### 1.1 隧道衬砌施工概况

明挖隧道施工工况分三个步骤进行施工: 模板台车前移定位; 绑扎普通钢筋、封装外侧钢模并浇筑混凝土; 3 d 拆除外模, 达到预定强度后拆除内模, 继续养护 28 d。衬砌施工的标准长度为 10 m。内模为模板台车 12 mm 厚围缘钢板, 外侧封装模板由 10 mm 钢板与型钢组合而成, 端模板为木板, 拱顶顶部 2 m 无模板区域覆盖土工布, 拆除外模后剩余部分覆盖土工布。由于施工现场温度较高, 每 3 h 对外模进行 1 次洒水降温。C40 防水混凝土的配合比水泥: 水: 砂: 石: 粉煤灰: 减水剂

为 380:158:738:100:70:13.5。胶凝材料由 P·O 42.5 水泥和粉煤灰组成, 水胶比为 0.35。细骨料为中砂, 粗骨料为花岗岩碎石。C40 混凝土拌合物 7 d 的抗压强度为 34.0 MPa, 28 d 抗压强度为 48.5 MPa。

### 1.2 测点布置及温控数据采集

采用热敏电阻式温度传感器监测混凝土内部的温度分布。考虑到两车行隧道具有对称性, 在单个隧道的纵向 1/2 宽度和横向 1/2 宽度布设温控测位, 纵横向合计 8 个测位, 每个测位 5 个测点, 共 40 个测点。为了保证能够测量连拱中隔墙的最高温度, 对 H1、H2 测点位置进行了优化, 如图 2 所示。此

## 材料科学

外, 1 个温度传感器位于混凝土之外, 以测量环境温度。温度测试数据由自动化测试系统进行数据采集和保存, 采集频率为每 60 min 1 次。

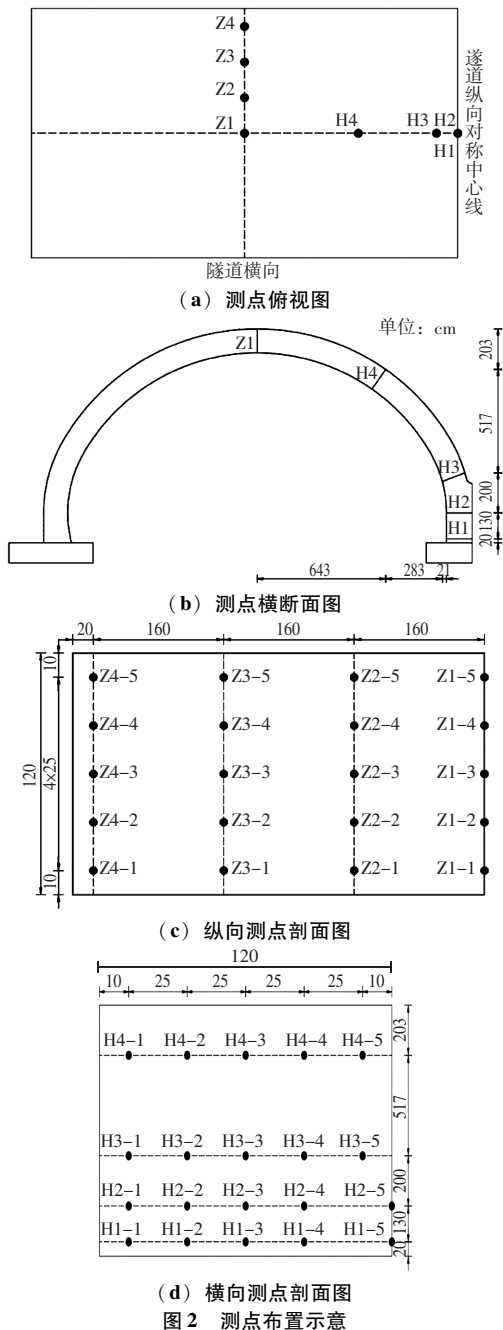


Fig. 2 Schematic diagram of measuring points

## 2 水化热温度场模拟

### 2.1 温度场有限元模型

采用 Midas Fea 对明挖隧道衬砌进行水化热分析。考虑到结构具有对称性, 建立了 1/4 尺寸的车行

隧道衬砌有限元模型模拟水化热。由于基础与隧道衬砌主体存在热传递, 故对基础部分也进行了模拟, 不考虑基础的收缩徐变, 不计结构自重。采用空间八节点实体单元模拟混凝土, 使用 Midas Fea V3.7 建立模型, 共建立 24 525 个节点, 19 608 个混凝土实体单元。模型如图 3 所示。

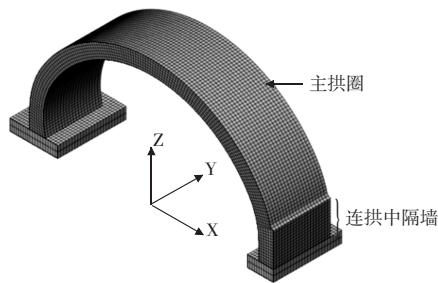


Fig. 3 1/4 连拱有限元模型

Fig. 3 One half multiple arch finite element model

### 2.2 温度场模拟控制参数确定

混凝土的绝热温升总量  $Q$  和温升系数  $\alpha$  与水泥类型有关。根据 GB 50496—2018 《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup> 进行计算, 采用 P·O 42.5 水泥 C40 混凝土的绝热温升  $Q$  为 52 °C, 温升系数  $\alpha$  为 1.951, 入模温度取 30 °C; 内外模对流系数均取 10 W/(m<sup>2</sup>·K), 外侧钢模由于受到日照作用, 吸收部分日照热量, 散热效率略降低, 散热效率降低值通过提高外模环境温度的方式进行弥补, 内外模的对流环境温度均采用正弦函数变化, 基础恒温 20 °C; 有限元模型的其他参数取值依据 GB 50496—2018 《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup>、GB/T 50081—2019 《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[12]</sup>, 并根据现场的实际情况调整参数取值。

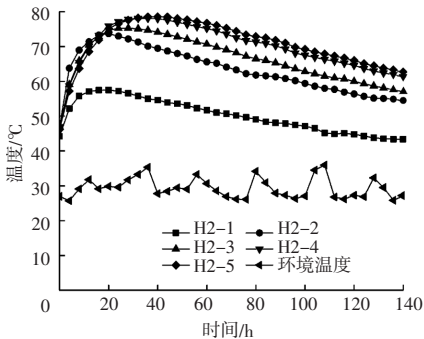
## 3 测试与分析

### 3.1 温度场实测结果

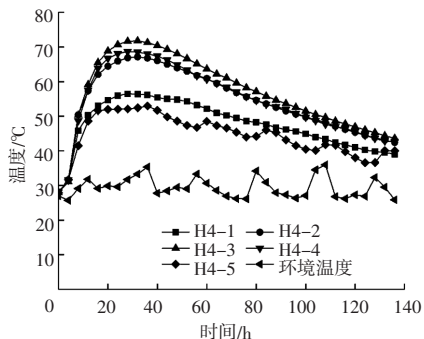
为了保证数据的有效性, 在混凝土浇筑 5 h 后作为温度数据起点, 部分测点的实测结果如图 4 所示。

整体来看, 结构温度前期随着时间的增加而快速增加, 在达到峰值后开始缓慢下降。在混凝土浇筑 42 h 时, 混凝土的水化热达到峰值; 个别测点的水化热峰值由于内侧钢模的散热效果显著提前达到峰值进入降温阶段; 在 140 h 时, 温度继续下降, 相对于环境温度还未达到稳定值。从测位 H4、Z1 和

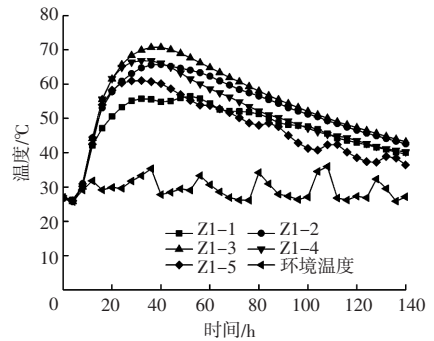
Z4 的数据可以看出,混凝土的温度从表面向内递增,核心 3 号测点混凝土温度最高,内部测点 2、3 和 4 温度高于外部测点 1、5。测点 H2 表现为 H2-1 温度最低, H2-5 温度最高。因为 H2 测位位于连拱中隔墙,厚度为 2.5 m,处于对称边界,只有单边能够散热;纵向测位整体表现为由中心向两边递减的趋势, Z1、Z2、Z3 和 Z4 的实测最高温度为 70.8、70.6、69.7 和 74.5 °C, Z4 测位由于位于已浇筑混凝土前端,散热相对缓慢,导致温度高于 Z1 测位; H1、H2、H3、H4 和 Z1 的实测最高温度为 68.9、78.1、72.5、71.9 和 70.8 °C, H1 位于中隔墙底部,可以更快的扩散热量,温度最低, H2 位于中隔墙热源中心,温度最高, H3、H4、Z1 由于 H2 处热源中心热量向外扩散,温度随着与 H2 距离增加而降低。外部 5 号测点位于结构表层,温度随环境温度出现周期性波动,且测点温度越低,受环境温度变化越明显,内部测点因与环境不接触,温度时程曲线不受环境温度影响;测位 H1~H4、Z1~Z4 的最高温差依次为 23.9、25.3、16.9、19.6、16、19、19.9 和 18.2 °C, H2 测位里表温差超过规范标准 25 °C,其余测位的温差均满足 GB 50496—2018 《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup>和 GB/T 51028—2015 《大体积混凝土温度测控技术规



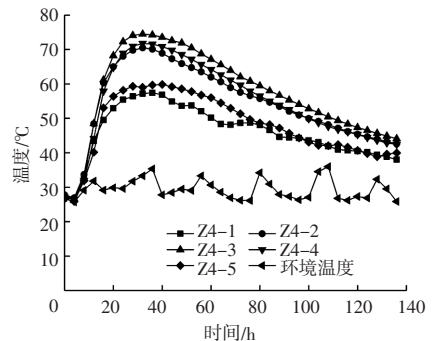
(a) H2 测点



(b) H4 测点



(c) Z1 测点



(d) Z4 测点

图 4 实测温度时程曲线

Fig. 4 Measured temperature time history curve

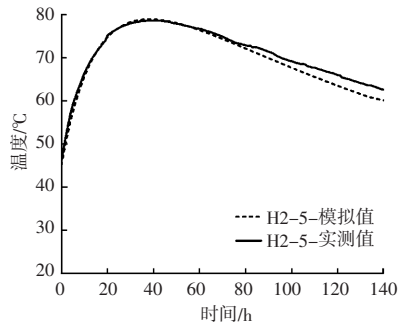
范》<sup>[13]</sup>, H2 测位由于内侧钢模散热较快导致里表温差超限,为防止热裂缝产生,对连拱中隔墙段覆盖多层土工布保温。整个结构因为内外钢模的散热效果显著,整体降温速率约为 5.0 °C/d,大于规范要求的 2.0 °C/d。降温速率过快可能对结构产生不利影响。

### 3.2 温度场模拟结果与实测结果比较

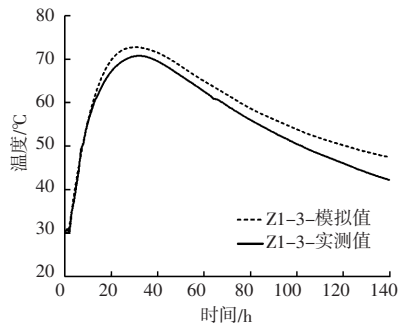
将关键测点 H2-5、Z1-3 的有限元模拟温度时程与实测温度时程进行对比分析,如图 5 所示。随着时间的增加,有限元模拟结果和实测结果吻合良好,均表现为温度迅速上升,在达到最大温升后开始缓慢下降。模拟数据曲线平滑,而实测温度受到各种环境因素的影响,曲线起伏不平。部分测点实测温升峰值与有限元模拟温升峰值的误差见表 1。从表中数据可以看出,模拟数据与实测数据接近,两者差值不超过 5 °C,其中 Z1-1 测点在夜间环境温度较低和风速的双重影响下,增加了内模的散热速率,温升峰值偏低,而有限元分析无法将环境情况完全模拟,导致差值偏大。总体来看,有限元模拟数据与实测数据趋势相契合,数据误差较小,验证了有限元模型的准确性。



## 材料科学



(a) H2-5 测点对比



(b) Z1-3 测点对比

图5 有限元模拟结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison between finite element simulation results and measured results

表1 实测温升峰值与有限元模拟温升峰值对比

Table 1 Comparison between measured peak temperature rise and finite element simulation peak temperature rise /°C

测点	模拟值	实测值	差值
H2-1	60.8	57.7	3.1
H2-5	78.9	78.6	0.3
Z1-1	60.8	55.8	5.0
Z1-3	72.8	70.8	2.0

## 3.3 降温速率与里表温差对衬砌开裂的影响

验证后的有限元模型可以用于应力分析, 根据实测结果, 整个结构的降温速率大于 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup>要求的 2.0 °C/d, 降温速率过快极易引起混凝土开裂, 连拱中隔墙里表温差超限, 也会引起混凝土开裂, 为了确定里表温差过大和降温速率过快对于开裂的影响程度, 需要对隧道衬砌的温度应力进行分析, 通过评估热应力是否大于特定龄期混凝土的抗拉强度进行判断。GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup>规定, 是否发生裂缝可由下式判断:

$$\sigma_T(t) \leq f_{tk}(t)/K \quad (1)$$

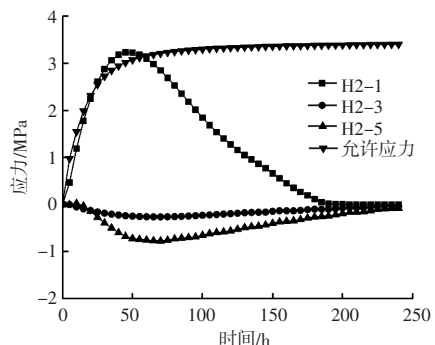
$$f_{tk}(t) = \lambda f_{tk}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_T(t)$  为  $t$  时的热应力 (MPa);  $f_{tk}(t)$  为

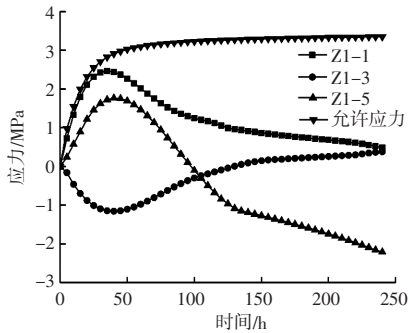
混凝土龄期  $t$  时的抗拉强度标准值 (MPa);  $K$  为防裂安全系数, 取 1.15;  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值 (MPa);  $\gamma$  为系数, 应根据所用混凝土试验确定, 当无试验数据时, 可取 0.3。

连拱模型不利测位 H2 和 Z1 部分测点应力情况如图 6 所示。结构的应力随着时间的增加先增加, 在达到应力峰值后开始下降; 外部测点 H2-1 在 45 h 时拉应力达到温升峰值, 内部测点 H2-3、H2-5 分别在 65、70 h 压应力达到峰值; 底层测点 Z1-1、表层测点 Z1-5 同为外部测点, 分别在 40、45 h 拉应力达到峰值; 内部测点 Z1-3 在 45 h 时压应力达到峰值, 混凝土在浇筑 42 h 达到温升峰值, 说明最大热应力与峰值温度对应的时间点接近。在 45 h 之前, 混凝土外部处于受拉状态, 内部处于受压状态, 这是因为混凝土内部因温升引起的膨胀受到了混凝土外部的约束。在应力峰值之后, 相应的温度发育也在减弱, 各测点的应力开始下降, H2 测位内部测点随时间增加压应力逐渐变为 0, 并未出现拉应力, 更有利于结构安全; 外部测点随时间增加拉应力逐渐为 0, Z1-5 测点在 95 h 拉应力出现逆转, 最后趋于 -2.5 MPa; Z1-3、Z1-1 应力随时间转为微受拉, 趋势同 H2 测位一致, 因为只在早期表面混凝土受拉, 因此早期温度是评估大体积混凝土裂缝发生的关键。将给定龄期的热应力与混凝土的抗拉强度进行比较, 判断是否有裂缝产生。测点 H2-1 在 25~55 h 之间热应力大于抗拉强度, 衬砌的内表面有开裂风险, 其余测点的热应力均小于材料的抗拉强度, 衬砌结构不会开裂。

在整体降温速率接近 5.0 °C/d 的情况下, Z1 测位各测点的应力均小于抗拉强度, 无开裂风险; 而 H2 测位表面部分时段里表温差超限, 拉应力超标,



(a) H2 测点应力



(b) Z1 测点应力

图6 连拱模型测点应力图

Fig. 6 Stress diagram of measuring point of multi arch model

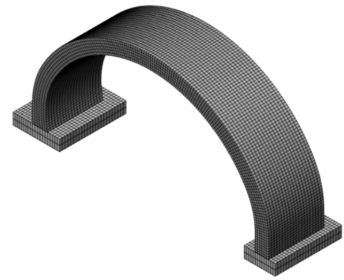
有开裂风险。由此可知：厚壁衬砌结构整体降温速率接近  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$  时不会引起结构开裂，开裂主要与结构里表的里表温差过大有关。

### 3.4 厚壁衬砌无管冷系统温控施工方法验证

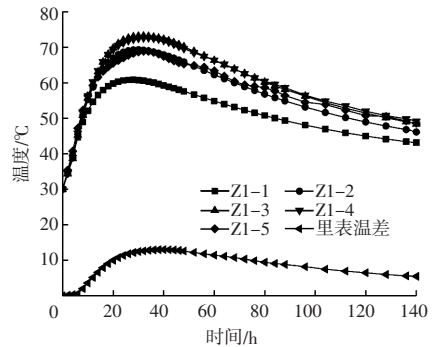
基于实测温控数据和应力数据，隧道主拱圈  $1.2\text{ m}$  厚度段在无管冷系统装配的情况下温控参数能够达到规范要求，连拱中隔墙  $2.5\text{ m}$  厚度段里表温差超限，须采取保温措施避免温度裂缝产生，因此，提出  $1.2\text{ m}$  及以下厚度厚壁衬砌无管冷系统温控施工方法。为了验证该施工方法的可靠性，控制厚度变量，研究  $1.2\text{ m}$  厚单拱明挖隧道衬砌无管冷系统施工的温度场。

只对连拱模型连拱中隔墙的结构形式略作改变，使其与另一侧的结构形式相似，保证整个隧道衬砌的厚度在  $1.2\text{ m}$  左右，形成一个单拱隧道，外侧全部封装钢模，建立  $1/4$  模型。采用连拱模型设计参数并进行混凝土水化热分析，如图7所示。

最不利测点位于拱顶中心，按照 Z1 测位布置将模拟数据绘制温度时程曲线。Z1-3 测点的温度峰值为  $73.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度最高；Z1-4、Z1-5 测点温度分别高于 Z1-2 和 Z1-1，内模由于遮阴散热效果比外模显著导致内侧混凝土温度低于外侧。结构里表温差最大为  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，小于 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup> 规定的里表温差限值  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度应力相应地小于材料的容许拉应力，模拟数据验证了  $1.2\text{ m}$  厚明挖隧道衬砌无管冷系统温控施工方法的可靠性，对于厚度在  $1.2\text{ m}$  以下的隧道衬砌，由于其衬砌壁薄，总体热量减小，无需管冷系统，该方法依然适用。



(a) 隧道分析模型



(b) 温度时程图

图7 单拱明挖隧道温控分析

Fig. 8 Temperature control analysis of single arch open cut tunnel

## 4 结论

以同步现浇施工连拱明挖隧道为基础，对衬砌浇筑养护过程中混凝土水化热产生的温度场和温度时程进行了数据实测和数值模拟，同时进行应力分析，通过研究得出以下结论：

(1) 厚壁明挖隧道衬砌的温度场温度上升快，下降慢，在降温阶段，结构的整体降温速率约为  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ，大于 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》<sup>[11]</sup> 要求的  $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

(2) 当热应力小于材料的抗拉强度时，混凝土不会开裂，早期温度场是评估大体积混凝土裂缝产生的关键，同时，厚壁衬砌整体降温速率大于  $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$  不会引起热裂缝。

(3)  $1.2\text{ m}$  及以下厚度衬砌可以采用无管冷系统温控施工工艺，该工艺为同类的隧道衬砌施工提供参照。

## 参考文献

- [1] YEON J H, CHOI S, WON M C. In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development [J]. Construction and (下转第 37 页)

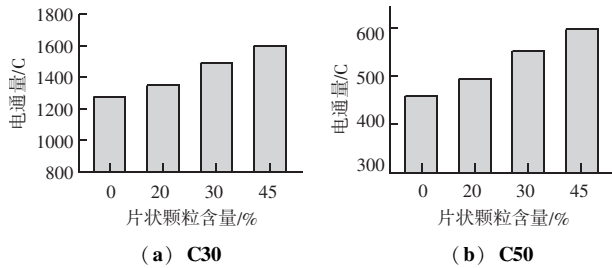


图8 不同片状颗粒含量的混凝土电通量  
Fig.8 Strength of machine-made sand concrete with different content of flake particles

### 3 结论

(1) 相比于 GB/T 14684—2022《建设用砂》中规定的颗粒所属粒级的平均粒径的 0.45 倍筛孔宽度, 筛孔宽度为颗粒所属粒级范围的平均粒径 0.55 倍的条形筛, 可以提高不良粒形的检出效率。用该条形筛筛除片状颗粒后的规则颗粒对胶砂的流动性和强度更有利。

(2) 当使用筛孔宽度为颗粒所属粒级的平均粒径 0.55 倍的条形筛作为片状颗粒检测方法时, 对于

I 类机制砂而言, 片状颗粒含量应控制在 20% 以下, 建议相应的机制砂片状颗粒定义调整为粒径 1.18 mm 以上的机制砂颗粒中, 最小一维尺寸小于该颗粒所属相应粒级的平均粒径 0.55 倍的颗粒。

### 参 考 文 献

- [1] 建设用砂: GB/T14684—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [2] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [3] 周新文. 机制砂对水泥砂浆流变性能的影响及作用机理 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [4] 宋少民, 刘娟红, 郭丹, 等. 一种混凝土机制砂片状颗粒含量测定方法: CN104390879A [P]. 2015-03-04.
- [5] 宋少民, 郭丹. 机制砂片状颗粒含量对水泥胶砂与混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2015 (12): 60-62.
- [6] 黄志刚, 徐志华, 李北星, 等. 机制砂片状颗粒对砂浆和混凝土性能与微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (6): 1981-1989.
- [7] 季韬, 李锋, 庄一舟, 等. 机制砂比表面积对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2011 (2): 80-82.

(上接第 31 页)

Building Materials, 2013, 38: 306-315.

- [2] WEI D, DU C, LIN Y, et al. Impact factors of hydration heat of cemented tailings backfill based on multi-index optimization [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 18: 100601.
- [3] CHU I, KWON S H, AMIN M N, et al. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 171-182.
- [4] DO T A, HA L M, NGUYEN Q T, et al. Evaluation of methods for analyzing early-age cracking risk in concrete walls of tunnel structures [J]. Transport and Communications Science Journal, 2020, 71 (7): 746-759.
- [5] SCHACKOW A, EFFTING C, GOMES I R, et al. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration [J]. Applied thermal engineering, 2016, 103: 1362-1369.
- [6] 李之达, 孙绪涛. 考虑管冷的大体积混凝土水化热初期温度场研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (6): 1-7.
- [7] 侯炜, 宋一凡, 马超. 基于管冷系统的大体积混凝土水化热时

变温度效应 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (4): 65-67.

- [8] HUANG Y, LIU G, HUANG S, et al. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 240-252.
- [9] 黄海东, 徐名遥, 李鸣, 罗超. 含有冷管的混凝土承台瞬态温度场及精细化分析模型研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (8): 102-111.
- [10] 汪建群, 魏桂亮, 刘杰, 陈杰, 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.
- [11] 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [13] 大体积混凝土温度测控技术规范: GB/T 51028—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.