

Research on the Influence of Different Curing Combinations on the Early Temperature Field of Continuous Rigid Frame Box Girder Concrete

Long Long

Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110166, China

Abstract

In order to minimize the influence of the early wet temperature field in concrete caused by the problem of concrete hydration, scientific and effective curing measures must be taken. This paper through the summarization of the early temperature field theory of concrete, the effect of different combination curing methods such as “die paste method + natural curing method” “die stick method + automatic spray mist method” is analyzed by finite element software. Through comparison, it is found that the “die stick method + automatic spray mist method” have the best effect on temperature control of concrete box girder, which provides technical support for solving the difficult problem of temperature control in summer construction of box girder.

Keywords

concrete curing; continuous rigid frame; temperature field; die paste method; automatic spray mist method

不同养护组合对连续刚构箱梁混凝土早期温度场的影响研究

龙龙

辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 中国·辽宁 沈阳 110166

摘要

为使混凝土水热化问题引起的混凝土内部早期温湿度场变化的影响降至最低, 必须要采取科学有效的养护措施进行养护。论文通过对混凝土早期温度场理论概述, 运用有限元软件分析了“模贴法+自然养护法”“模贴法+自动喷水雾法”等不同组合养护方法下的作用效果, 通过对比, “模贴法+自动喷水雾法”对箱梁混凝土温控效果最佳, 为解决箱梁夏季施工中的温控难题提供了技术支持。

关键词

混凝土养护; 连续刚构; 温度场; 模贴法; 自动喷水雾法

1 引言

在混凝土工程施工中, 水热化问题是最为常见的问题, 水热化问题的出现会引起混凝土内部早期温湿度发生改变, 从而产生混凝土温度应力及自收缩变形, 导致早期裂缝问题的出现。而导致混凝土工程出现早期裂缝的根本原因是在混凝土初凝期没有做好养护工作。在应对混凝土早期裂缝问题上, 相关人士已做了大量研究, 其中, 研究最多的当属养护方法的研究。混凝土养护方式方法较多, 养护方法是否合理, 在很大程度上决定着混凝土结构整体质量, 而随着高性能混凝土的出现, 对养护提出了更高的要求, 尤其在连续刚构箱梁混凝土养护上, 传统的自然养护法已无法满足养护标准,

必须根据桥梁实际情况选择最适当的养护方法。

学者石常龙^[1]结合试验重点分析了养护条件对超高性能混凝土耐久性 & 强度的影响, 研究表明, 在开展连续刚构箱梁混凝土施工中, 合理控制箱梁截面温度可对预防混凝土开裂、提升箱梁结构质量起到积极的促进作用。为进一步验证养护方式选择对混凝土早期温度场变化的影响, 论文重点分析了“模贴法+自然养护法”“模贴法+自动喷水雾法”等不同组合养护方法下的作用效果, 以为同类型工程项目管理人员做出正确的选择提供帮助。

2 混凝土早期温度场理论

混凝土浇筑施工完成后, 任意一点在 t 时刻的瞬时温度用 $T = f(x, y, z, t)$ 表示。某具体时刻的瞬时温度 T 与 t 时刻坐标空间相关。假定混凝土质量为均质, 在混凝土热传导中, 由 Fourier 热传导理论总结为:

【作者简介】龙龙(1981-), 男, 中国安徽淮南人, 高级工程师, 从事桥梁结构研究。

$$q_x = -\lambda \partial T / \partial x \quad (1)$$

式中： λ 为混凝土导热系数， $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ； q_x 标志通过 x 轴方向单位时间、面积的热量， kJ/m^2 。参考热量平衡原理可得：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{cp} \quad (2)$$

式中： a 表示混凝土导温系数， $a = \frac{\lambda}{cp}, \text{m}^2/\text{h}$ 。

在绝热条件下，水化作用会使混凝土内部温度上升，上升速度可用下式表示：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{Q}{cp} = \frac{Wq}{cp} \quad (3)$$

式中： θ 表示混凝土绝热温升； Q 表示单位时间内单位体积水泥水化作用下的热量产出； W 表示单位体积混凝土水泥用量； q 为单位时间内单位质量水泥所释放的水化热。如果 y 和 z 方向的温度均为常数，三维温度场问题就会转化为单向温度场问题，式（2）就可被简化为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

3 不同养护组合对连续刚构箱梁混凝土早期温度场的影响

传统的自然养护法就是在混凝土浇筑后的初凝期，采用人工洒水或覆盖保湿材料。例如，在连续钢构箱梁混凝土养护施工时，拆模前，将特殊保湿材料或湿麻袋覆盖于箱梁顶板顶面、底板顶面，并间歇性洒水，确保混凝土表面始终保持湿润状态。拆模后，底模依然紧贴箱梁底板，其他部位与钢模板松开，底板顶面与顶板顶面依然采用此方法进行养护，而腹板外表面及底板底面无需进行养护。应用实践表明，在进行大体积混凝土结构养护时，该方法并不能达到理想的效果，混凝土结构裂缝问题异常突出。为改善这一现状，业内结合实践研究，总结出两套组合养护方法，均对控制混凝土早期裂缝起到较好的作用^[2]。

3.1 模贴法 + 自然养护法

在运用此养护方式进行养护时，需在混凝土施工阶段就在箱梁外表面模板上粘贴一层透水模贴，拆模时随模板一起拆除。拆除后，用 1cm 厚的保湿材料进行覆盖，并定期洒水，确保保湿材料始终处于湿润状态，从而达到理想的养护效果。

对流系数的选取应根据对流放热系数及等效对流放热系数计算式进行。当采用洒水养护方式进行养护时，混凝土表面温度与水温相同，而贴膜与钢板间存有水与空气，故拆模前贴膜等效放热系数 $\beta_s = 40 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。计算数据见表 1。

表 1 箱梁表面放热系数 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

	β_1	β_2	β_3	β_4
拆模前	28.2	16.3	39.9	21.8
拆模后	28.2	23.8	65.9	23.7

注： β_1 为箱梁顶板顶面放热系数； β_2 为箱梁底板顶面等效放热系数； β_3 为箱梁外表面等效放热系数； β_4 为箱梁内表面等效放热系数。

通过现场测量研究，发现箱梁结构各节点温度对龄期变化趋势大致相同，72h 内即可达到温度峰值，其中，底板与上倒角中部节点温度峰值达到 45.1°C 、 45.3°C ；在环境温度影响下，混凝土节点温度变化较大，呈现出周期性变化趋势；拆模后，温度会出现“突变”现象，这是因为混凝土表面与大气接触，温度会迅速降低，造成箱梁内外温差瞬时变大，其中，下倒角和与底板内外温差最大，最高可达到 17.6°C ，因此拆模后必须及时进行混凝土表面养护，以降低对温度场的影响^[3]。

3.2 模贴法 + 自动喷水雾养护法

同上，在混凝土浇筑前就在箱梁外表面模板上粘贴一层透水模贴，拆模时随模板一起拆除。拆除后，用 1cm 厚的保湿材料进行覆盖，并采用自动喷水雾系统洒水养护底板下表面和腹板外表面，确保保湿材料始终处于湿润状态，从而达到理想的养护效果。根据朱伯芳^[4]院士的对流放热系数和等效对流放热系数计算式计算对流系数，计算数据见表 2。

表 2 箱梁表面放热系数 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

	β_1	β_2	β_3	β_4
拆模前	28.2	16.3	39.9	21.8
拆模后	28.2	23.8	40.0	23.8

因自动喷水雾养护水温度可实现调控，在进行喷水雾养护时，混凝土表面放热系数选取为 $\beta_s = 40 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

通过“模贴法 + 自动喷水雾养护法”养护工艺的应用，箱梁各节点温度变化规律一定，72h 内即可达到温度峰值，其中，底板与上倒角中部节点温度峰值最大，温度峰值并随着截面面积尺寸加大而升高，达到温度峰值时间也会有所延迟^[5]；拆模后，因喷水雾养护及时，温度曲线没有出现“突变”现象，下倒角和底板内外温差最大，分别为 17.1°C 、 16.0°C 。

4 不同养护方法箱梁各板内外温差对比分析

通过对比“模贴法 + 自然养护法”“模贴法 + 自动喷水雾养护法”应用后的箱梁截的腹板、底板以及上下倒角内外温差，差峰值变化量如表 3、4 所示。由表 4 可知，两种组合养护法的应用均在拆模前显著降低了箱梁截面内外温差，腹板温差峰值由 13.2°C 降低到 11.1°C ，减少了 15.9%。上倒角温差峰值也由 14.1°C 减降至 11°C ，减少了 21.9%。箱梁模板内黏模贴在拆模前可以有效降低混凝土内外温差。

表 3 拆模前 - 不同养护方法截面温差峰值变化量

拆模前 龄期	底板		腹板		上倒角		下倒角	
	36h/°C	减少率/%	36h/°C	减少率/%	36h/°C	减少率/%	36h/°C	减少率/%
自然养护法	17.8	—	13.2	—	14.1	—	18.6	—
模贴法+自然养护法	14.8	16.8	11.2	15.2	11.0	21.9	15.8	15.1
模贴法+自动喷水雾养护法	14.8	16.8	11.1	15.9	11.0	21.9	15.8	15.1

表 4 拆模后 - 不同养护方法截面温差峰值变化量

拆模前 龄期	底板		腹板		上倒角		下倒角	
	84h/°C	减少率/%	84h/°C	减少率/%	84h/°C	减少率/%	84h/°C	减少率/%
自然养护法	15.8	—	8.1	—	11.6	—	15.8	—
模贴法+自然养护法	17.8	-12.6	10.1	-24.6	12.9	-11.2	17.9	-13.2
模贴法+自动喷水雾养护法	14.5	13.4	7.0	13.5	9.1	21.5	14.0	11.3

拆模后，“模贴法+自然养护法”下，箱梁混凝土结构截面温差值突变逆增，比自然养护下温差值还高。而“模贴法+自动喷水雾养护法”下，温差值仍能有效降低，上倒角温差值由 11.6°C 降为 9.1°C，减少了 21.5%。因此，拆模后采用自动喷水雾养护能很好地达到降低内外温差目的。早期养护可实现箱梁内外温差的有效降低，“模贴法+自动喷水雾养护法”可有效适用于夏季连续刚构箱梁的早期养护施工中。

5 结语

①通过对比两种组合养护方法，综合提出适合目前钢构箱梁混凝土施工常用养护方法，综合提出目前钢构箱梁混凝土施工的两种组合方式：“模贴法+自然养护法”与“模贴法+自动喷水雾养护法”^[6]。

②拆模前，“模贴法+自然养护法”能有效降低底板内外温差，底板温差由 17.8°C 降低至 14.8°C，降低了 16.8%，腹板和上下倒角分别降低了 15.2%、21.9%、15.1%。

③拆模后，内外温差及降反升，养护效果不佳。“模贴法+自动喷水雾养护法”拆模前后都取得了良好的降温效果，拆模前与“模贴法+自然养护法”效果一致。拆模后，底板温差减少了 13.4%，腹板与上下倒角分别减少了 13.5%、21.5%、11.3%。

④“模贴法+自动喷水雾养护法”能有效地降低混凝土箱梁内外温差，推荐在夏季箱梁早期养护工程中广泛应用。

参考文献

- [1] 石常龙. 养护制度对超高性能混凝土强度和韧性的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [2] 方吕. 大体积混凝土早期温度效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [3] 崔澈, 吴甲一, 宋慧芳. 考虑水化度对热学参数影响的早期混凝土温度场分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 792-798.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [5] 沈德建, 吴胜兴, 张莉, 等. 模板类型对混凝土温度影响分析[J]. 施工技术, 2010, 39(12): 63-66.
- [6] 江东, 曾勇, 曾渝荷, 等. 养护工艺参数对连续刚构桥 0-# 块混凝土早期温度场影响[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(2): 8-18.