

# Research on the Evolution Law of Early Performance of Concrete Column

Yangchun Zhou He Zhuang

Road&Bridge South Engineering Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong, 528403, China

## Abstract

The mathematical model of adiabatic temperature rise of concrete structure under the action of hydration heat is established, the generation and change law of hydration heat is obtained through finite element analysis. Through the field temperature measurement, the center temperature of column section appears the peak value of 72 °C when pouring 63h, and then the temperature decreases slowly. The result is basically consistent with the simulation analysis. Finally, the relationship between hydration degree and early performance of concrete is obtained by concrete performance test. The research results provide a reference for the curing time and technology of concrete structure.

## Keywords

concrete; adiabatic temperature rise; heat of hydration; performance test

# 混凝土立柱早期性能演变规律研究

周杨春 庄贺

中交路桥华南工程有限公司, 中国·广东 中山 528403

## 摘要

论文建立了混凝土构造物在水化热作用下的绝热温升数学模型, 通过有限元分析得出了水化热产生及变化规律。通过现场温度测, 立柱截面中心温度在浇筑 63h 时出现 72°C 的峰值, 然后温度缓慢降低, 与仿真分析基本一致。最后的混凝土性能测试得出了水化程度与早期性能的关系。研究结果为混凝土构造物养护时间和养护工艺提供了参考。

## 关键词

混凝土; 绝热温升; 水化热; 性能测试

## 1 引言

混凝土出现硬化并产生一定的抗压强度性能, 得益于水泥水化反应, 因此控制好混凝土浇筑温度和水化反应, 能提高混凝土构造物的结构性能, 所以在混凝土构造物成型过程中对其进行养护已变得非常重要<sup>[1]</sup>。

有实验研究发现, 快硬硅酸盐水泥的最佳养护温度需控制在 4°C 左右, 普通硅酸盐水泥则需控制在 13°C 左右<sup>[2]</sup>。

水泥的水化会导致较高的混凝土温度以及内外表面之间的较大温差。由于温度梯度引起的拉伸应力升高, 增加了开裂的可能性<sup>[3-4]</sup>。

早期混凝土中的应力变化是一个复杂的过程, 不仅取决于热梯度, 还取决于其他因素, 包括弹性模量, 热膨胀系数 (CTE), 收缩和蠕变以及混凝土中的约束条件等<sup>[5-6]</sup>, 其计算表达式如 (1):

$$\sigma = K_c \cdot CTE \cdot E_{eff} \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为应力;  $K_c$  为约束系数;  $E_{eff}$  为考虑蠕变行为的有效弹性模量;  $\Delta T$  表示温差。

公式表明, 在约束系数  $K_c$ 、考虑蠕变行为的有效弹性模量  $E_{eff}$  和热膨胀系数 CTE 一定的情况下, 混凝土的应力变化  $\sigma$  与温差即绝热温升呈线性密切相关。

## 2 绝热温升计算

混凝土在水化过程中, 水化热量取决于混凝土的浇筑温度。较高的温度加快了胶凝材料水合反应的速度<sup>[7]</sup>。有相关文献指出, 水泥的水化度与释放的热量成正比, 如方程式 (2) 所示:

$$a(t) = \frac{H(t)}{H_u} \quad (2)$$

式中:  $a(t)$  为水化度,  $H(t)$  为水泥释放的累积热量 (J/g),  $H_u$  是根据水泥的胶凝特性计算的可用于反应的总热量 (J/g), 可由公式 (3) 和 (4) 得出:

$$H_u = H_c p_c + 461 p_s + 1800 p_F p_{FC} \quad (3)$$

$$H_c = 500 p_1 + 260 p_2 + 866 p_3 + 420 p_4 + 624 p_5 + 1186 p_6 + 850 p_7 \quad (4)$$

式中:  $H_c$  为水泥的总水化热 (J/g);  $p_c$  为胶凝材料中水泥的百分比;  $p_F$  为胶凝材料中粉煤灰的百分比;  $p_{FC}$  为粉煤灰中氧化钙的百分比;  $p_s$  为胶凝材料中矿渣的百分比;  $p_{sf}$  表示胶凝材料中硅粉的百分比;  $p_x$  表示水泥中  $x$  成分的百分比 (分别为  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$ 、 $SO_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ )。

通过拟合公式 (3)(4) 的计算化累积热量, 最后得到下式:

$$H(t) = \frac{m_s}{m_{cm}} c_p T(t) \quad (5)$$

式中:  $m_s$  为混凝土试样的质量;  $m_{cm}$  为样品中胶凝材料的质量;  $T(t)$  表示理论计算绝热温升。

### 3 实验测试

#### 3.1 依托工程

中国佛山地铁 2 号线林岳车辆段 TOD 综合开发项目为多层框架结构, 从下到上依次是架空车库层、车辆段层、TOD 开发层等, 东南侧有一栋综合楼和综合维修中心。地下车库层为社会车辆停车场, 层高 4.23m~5.43m; 车辆段结构层根据高度不同, 划分为 9.5m 和 13.5m 两个区域, 布置有轨道、试车线以及检修主厂房、运用库、物资总库等 17 个单体结构, 主要服务于地铁车辆的检修、保养; 综合楼为 18 层框架结构, 建筑高度 80.6m; 综合维修中心为 5 层框架结构, 建筑高度 26m。

#### 3.2 实验材料

实验主要针对项目工程现场的混凝土立柱进行测试实验, 如表 1 所示, 施工现场混凝土立柱的混凝土配合比设计。表 2 和 3 分别列出了水泥的化学和矿物成分组成。

表 1 混凝土配合比设计 (kg/m<sup>3</sup>)

| 混凝土   | 水 / 水泥 | 水   | 水泥  | 煤灰粉 | 粗骨料  | 沙子  | 减水剂  |
|-------|--------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| 普通混凝土 | 0.5    | 166 | 329 | -   | 1013 | 860 | 2.65 |

表 2 水泥化学成分 (%)

| 成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> | Blaine (m <sup>2</sup> /kg) |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 合计 | 21.43            | 5.41                           | 3.48                           | 63.49 | 1.41 | 1.63            | 0.15              | 0.69             | 0.60                            | 374                         |

表 3 水泥的矿物组成 (%)

| 成分 | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|----|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 合计 | 51.75            | 24.1             | 8.15             | 10.36             |

#### 3.3 绝热温升测试

首先, 如图 1 所示, 通过有限元理论计算, 得到如图 2 所示的混凝土立柱绝热温升的规律, 其初凝温度为 26.3°C, 大约浇筑 63h 后, 绝热温升趋于平稳, 最大温升约为 44.4°C。

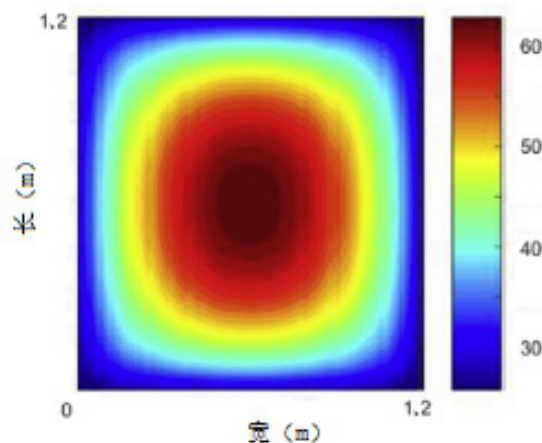


图 1 混凝土立柱 60h 温度分布

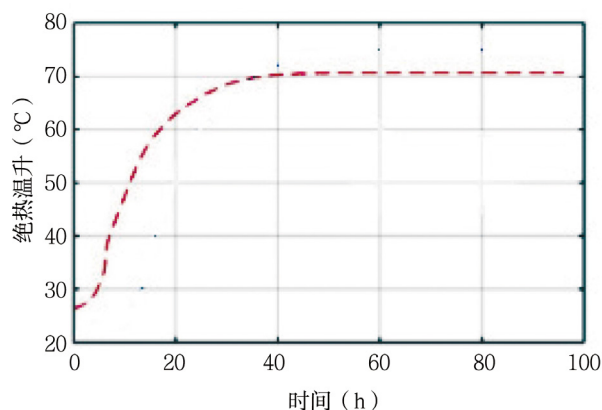


图 2 混凝土立柱绝热温升规律

通过在混凝土立柱中心处安装温度传感器, 测试实时温度变化规律如图 3 所示。图示结果表明, 截面中心的混凝土浇筑约 63h 后出现 72°C 的峰值温度, 然后温度缓慢降低, 这与理论分析结果基本一致。在这个峰值之后, 由于水化热趋于稳定, 通过混凝土自身散热, 混凝土核心温度缓慢降低。

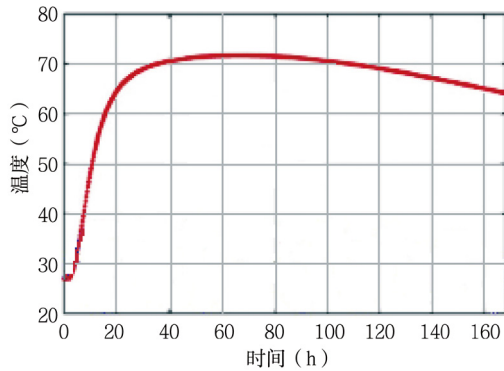


图3 混凝土立柱中心温度变化规律

### 3.4 混凝土性能测试

施工现场混凝土立柱抗压强度和劈裂抗拉强度的测试结果如表4所示。测试结果显示,混凝土性能前期变化很快,72h的抗压强度就已经接近规范值的80%。28天的性能已完全达到规范性能要求。同时也可以发现混凝土的早期性能与水化程度呈线性关系,这与相关文献的研究结果一致。

表4 混凝土的抗压强度

| 龄期(天) | 抗压强度(MPa) | 劈裂抗拉强度(MPa) |
|-------|-----------|-------------|
| 1     | 19.2      | 2.38        |
| 2     | 30.0      | 2.86        |
| 3     | 36.7      | 3.28        |
| 7     | 40.2      | 3.47        |
| 28    | 45.4      | 4.45        |

### 4 结语

混凝土在凝固成型过程中会产生大量的水化热,水化热

的产生,将导致混凝土构造物温度升高,如不及时降温,会使混凝土构造物产生热开裂的可能性。论文通过理论计算和有限元分析,仿真得出混凝土大约浇筑63h后水化热产生将达到最高值,之后趋于稳定状态,最大温升达到44.4°C。现场温度测试结果也表明,立柱截面中心温度在此时间也出现72°C的峰值,然后温度缓慢降低,与仿真分析基本一致。最后的混凝土性能测试得出了水化程度与早期性能的关系。研究结果为混凝土构造物养护时间和养护工艺提供了参考,为混凝土构造物施工中采取措施以降低结构开裂风险和优化施工进度具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 赵纪,王安德.混凝土养护工作对混凝土强度的影响研究[J].安徽建筑,2018(02):95-96.
- [2] 张华,段华勇,周兴政.水泥混凝土养护对混凝土性能影响的研究[J].公路交通科技,2017(04):4-7.
- [3] 武修乐.在外力和温度作用下塔架基础立柱的开裂机理及加固措施研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [4] 张寅,郑丹.基于MATLAB的早期混凝土湿度分布研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012(01):59-62.
- [5] 尹自立.高性能混凝土早龄期自收缩与开裂敏感性的研究[D].杭州:浙江工业大学,2012.
- [6] 郭保林,姜瑞双,邢又家,等.基于实体温度匹配养护的混凝土性能研究[J].混凝土,2020(10):1-5.
- [7] A.K. Schindler, K.J. Folliard, Heat of hydration models for cementitious materials[J].ACI Mater. J, 2005(01)102-113.