

# 混凝土桥梁开裂机理和防裂措施研究

孙杰, 顾缙琴, 王浩, 李红, 刘玉龙

(长江航道规划设计研究院, 湖北武汉 430011)

**摘要:** 随着港区内桥梁建设日益发展和高性能混凝土广泛应用, 桥梁混凝土开裂问题越来越引起重视。在桥梁工程设计中往往提出混凝土连续浇筑等特殊要求, 导致桥梁工程中很多采用高墩、大跨结构, 从而使温度控制和防止裂缝问题成为桥梁设计和施工过程中必须重点考虑的问题之一。主要结合实际工程中桥梁的设计与施工实践, 利用有限元分析混凝土桥梁开裂机理, 并研究混凝土桥梁温度场和温度应力特点, 为桥梁工程混凝土开裂提供有效的防护措施。

**关键词:** 桥梁混凝土; 有限元仿真分析; 防裂方法

中图分类号: TU 528.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0215-07

## Cracking mechanism and prevention of concrete bridges

SUN Jie, GU Xie-qin, WANG Hao, LI Hong, LIU Yu-long

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** With the development of harbor bridge construction and wide application of high-performance concrete, the cracking of concrete bridges is attracting more and more attentions. The special requirements in bridge engineering design are often put forward, such as concrete continuous casting, and this lead to a lot of high pier and large-span bridge engineering structures, so that the temperature control and crack prevention become one of the key problems in the bridge design and construction. Combining with the practice of bridge design and construction, and applying FEM simulation and visual programming technologies, this paper analyzes the temperature and stress fields of some concrete bridges, makes relatively systematical and in-depth study on the cracking mechanism and prevention measures for the bridge concretes.

**Keywords:** bridge concrete; FEM simulation; crack-prevention method

混凝土因为原料来源广泛、耐久性高、价格低廉等优势被广泛运用在水运、交通、建筑领域。但它也有其弱点, 主要是抗拉强度较低, 在施工和使用期易产生裂缝。随着我国西部和海洋建设日益发展, 相关交通工程发展迅速。桥梁工程<sup>[1]</sup>作为水运港区以及交通工程中的咽喉工程, 在港区内工程占有极其重要地位。这些工程设计中往往提出混凝土连续浇筑等特殊设计要求, 且由于施工地区地质和地形限制, 如山高坡陡、河谷深切宽阔, 导致桥梁工程中越来越多采用高墩、大跨结构, 基础尺寸越来越大, 从而使温度控制和

防止裂缝问题<sup>[2]</sup>成为桥梁设计和施工过程中必须重点考虑的问题之一。因此, 结合实际工程中桥梁的设计和施工实践, 利用有限元<sup>[3]</sup>仿真分析对混凝土桥梁温度场和温度应力特点进行研究, 为桥梁工程混凝土开裂提供有效的防护措施。

## 1 研究内容

1) 结合某港区内大桥 8# 桥台的有限元应力分析结构及施工实际情况, 通过模拟现场工况及采用温控措施方案后的工况进行研究, 探寻桥台混凝土开裂机理并证明合理有效的温控措施在防止

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 孙杰 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工结构及试验检测工作。

温度裂缝方面的重要性。

2) 分析某港区内大桥 8# 桥台温度应力场的特点, 根据原位观测所得结果给出相应的防裂措施。

## 2 工程简介

该工程为国家重点港区大型滚装码头某段重要组成部分, 计有各类隧道 4 座、大桥 3 座。总投资约 20 亿元, 路基宽 24.5 m, 双向 4 车道, 设计时速 50 km/h。该大桥是全线控制性工程之一, 主要承担港区堆场与滚装码头的连接作用。最大桥高 30 m, 左幅桥长 321.8 m, 右幅桥长 367 m。上部结构均为 45 m 预应力混凝土连续 T 梁, 先简支后连续, 交角 90°; 下部结构为薄壁墩配桩基础, 桥台为肋板台配桩基础和 U 型台配扩大基础。本文计算分析主要针对其 8# 桥台的温度场和应力场。

## 3 桥台有限元计算分析

使用有限元仿真计算分析结构应力场和温度场时, 往往要给不同的材料赋值一些热学和力学参数。这些参数的得到有两种途径——现场试验和经验公式, 一般来说经验公式法因为其简便性而被广泛使用, 但考虑到此法存在误差以及本工程的重要性, 现场通过测定混凝土浇筑块特征点的温度值、环境温度和风速等数据反演得到了计算所需的主要参数, 其余次要参数使用经验公式。

### 3.1 计算模型与特征点分布

通过分析对以往常规的有限元网格模型进行细微的修改, 添加冷却水管。整体网格包含 6 100 个单元, 7 426 个节点 (图 1、2)。由于该桥台为工字型对称结构, 故选取特征点时只考虑选取在左侧 (图 3), 冷却水管布置见图 4。施工混凝土配合比见表 1, 通过经验公式计算结合反演参数得到 C30 混凝土热力学参数见表 2、3, 气温公式如式(1)所示:

$$T = 15.5 + 15(\tau - 7) \cos \frac{\pi}{6} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为时间。

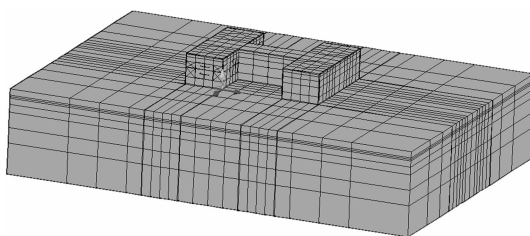


图 1 8# 桥台建模区域

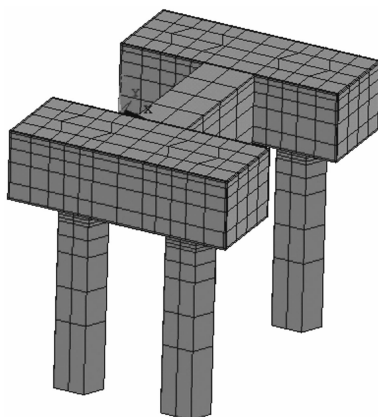


图 2 8# 桥台三维结构

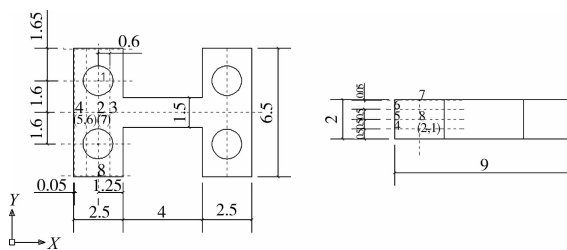


图 3 8# 桥台特征点布置 (单位: m)

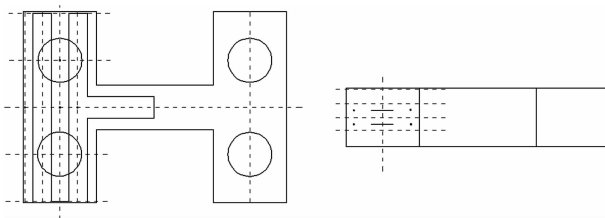


图 4 8# 桥台冷却水管布置

表 1 C30 混凝土配合比及主要参数

材料名称	品种规格	1 m <sup>3</sup> 混凝土材料用量/kg
水泥	P. O42.5 水泥	367
河砂	中砂	593
石子	一级配碎石	1 260
水	河水	180
外加剂	无	0

表 2 8#桥台 C30 混凝土热力学参数

导热系数 $\lambda/$ [kJ·(m·h·°C) <sup>-1</sup> ]	比热 $c/$ [kJ· (kg·°C) <sup>-1</sup> ]	导温系数 $a/$ (m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	线胀系数 $\alpha/$ (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	密度 $\rho/$ (kg·m <sup>-3</sup> )	表面放热系数 $\beta_1/$ [kJ·(m·h·°C) <sup>-1</sup> ]	最终绝热 温升 $\theta_0/$ °C	绝热温升 参数 $a$	绝热温升 参数 $b$	自身体积变形 终值/10 <sup>-6</sup>
11.05	1.01	0.004 5	6.5	2 400	19.79	51.7	2.6	2.2	64

表 3 地基和桥墩 C30 混凝土力学参数

混凝土类型	弹性模量 $E/$ GPa	弹模参数 $a$	弹模参数 $b$	泊松比
地基	10.0			0.20
C30	32.5	0.12	0.62	0.17

图 1 中网格加密处为试验浇筑层。以上述计算区域为研究对象, 进行有限元网格剖分, 取顺大桥轴线方向为  $X$  轴, 另一垂直大桥轴线方向为  $Y$  轴, 竖向为  $Z$  轴。 $X$  轴指向左岸方向为正,  $Y$  轴逆水流方向为正,  $Z$  轴向上为正。

### 3.2 计算工况分类

工况 1 模拟现场的施工情况, 工况 2 为采取水管冷却和表面保温相结合的温控措施的施工情况。通过计算分析并对比两种不同施工情况的温度应力, 研究桥台混凝土开裂机理并证明合理有效的温控措施在防止温度裂缝方面的重要性。

工况 1: 不采取水管冷却和表面保温措施, 施工中混凝土表面只是进行了简易遮盖, 保温效果可以忽略, 所以在计算中直接将混凝土暴露在空气之中。浇筑后 5 d 内考虑日平均气温  $\pm 5.0$  °C 的昼夜温差。混凝土浇筑温度采取实测值 17.5 °C。

工况 2: 采取水管冷却和表面保温相结合的温控措施。冷却水管采用内径 28 mm、外径 32 mm 的铁管, 铺设 2 层, 水管布置密度为 0.8 m  $\times$  0.8 m (竖直距离  $\times$  水平距离)。通水时间遵循浇筑开始即通水原则, 通水持续 4 d, 4 d 中每半天变换一次流向。浇筑后第 1 个冬季在混凝土表面覆盖 3.0 cm 厚聚乙烯泡沫卷材保温。

#### 3.2.1 工况 1 计算结果分析

C30 混凝土抗拉强度为 2.75 MPa, 取混凝土抗裂安全系数为 1.6。8 个特征点分为两类, 其中内部点包括 1#、2#、3# 点, 表面点包括 4#、5#、6#、7#、8# 点。这样设置是为了更好地分析不同影响因素对温度应力的影响。

图 5 和图 6 分别对比工况 1 同一高程上不同水平位置的内部点 1#、2#、3# 的温度和温度应力

历时曲线。此桥台的浇筑温度为 17.5 °C, 由温度历时曲线 (图 5) 可知, 虽然处在不同的水平位置, 3 个内部点在龄期 1.25 d 温度都达到峰值 67.7 °C, 峰值过后温度下降平缓, 混凝土内部在 2 月中旬达到最低温度 2.6 °C。根据图 3 的特征点位置可以得出 1# 的散热条件优于 3#, 更优于 2#。通过对比得出以下结论: 随着混凝土深度的加深, 散热效果降低, 温降幅度和速率减小。通过图 7 的工况 1 龄期 1.25 d 时的温度分布云图, 更可以直观地反映这点。

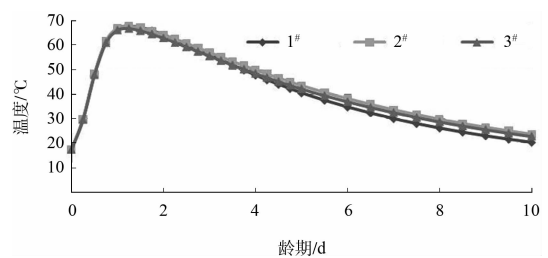


图 5 工况 1 内部点 1#、2#、3# 的温度历时曲线

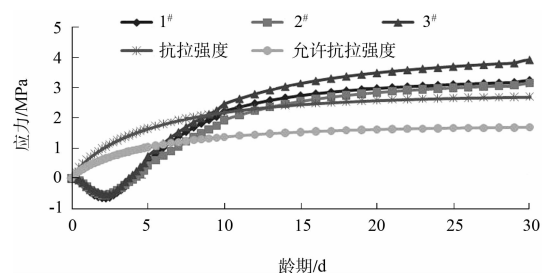


图 6 工况 1 内部点 1#、2#、3# 的应力历时曲线



图 7 工况 1 内部温度分布云图 (1.25 d)

由图 6 可知, 前期内部混凝土因为水化温升不断膨胀而外部混凝土膨胀量远小于内部, 内部

膨胀受到外部的约束，且早期混凝土弹模较小，故内部产生较小的压应力。中后期内部混凝土因为表面散热而温度缓慢下降，产生收缩，外部混凝土已经基本收缩稳定，内部收缩受到外部约束，故拉应力不断累积。其中1#和2#点最大拉应力为3.51 MPa，3#点最大拉应力为4.73 MPa，均超过抗拉强度2.75 MPa，开裂风险很大。

由于3个点的温度历时曲线并没有显著差别，那么3#点拉应力应该受温度影响较小，从图8的工况1龄期80 d时的应力分布云图来看，造成显著拉应力的潜在原因可能有两个：其一它更靠近工字体中部的两个棱角，在这些部位容易形成应力集中；其二中后期内部混凝土收缩时受到工字体中部混凝土的侧向约束更大，阻碍其收缩趋势，造成较大的拉应力。

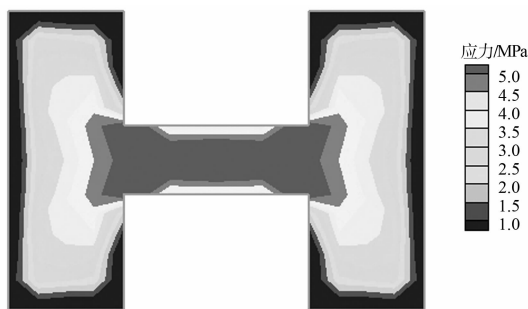


图8 工况1内部应力分布云图(80 d)

图9和图10分别对比工况1同一表面上相同水平位置不同高程的3个表面点4#、5#、6#的温度和温度应力历时曲线。从图9看出，3个点的温度历时曲线趋势基本相同，都在0.75 d时达到最高温度49.7℃。5#点散热略慢是因为它位于一个面的中心，而其他两点更靠近边缘，边缘有2个甚至3个散热面，故散热一般要略快一些。从图11工况1龄期0.75 d的表面温度分布云图也可以清晰看到这种趋势。后期3个点都随外温变化而变化。从图10上看，3个点在龄期1 d内拉应力十分接近抗拉强度，说明防裂安全系数不高，存在较大的开裂风险，现场观测到的表面裂缝正好印证了这一点。特征点4拉应力从最高0.75 MPa缓慢减小，在150 d时转变为压应力，稳定值约0.17 MPa。而5#和6#点在7 d内表面最高0.5 MPa

的拉应力就已转变为压应力，稳定后压应力为0.36 MPa。这是由于特征点4更靠近地基，地基线膨胀系数大于混凝土线膨胀系数，故地基膨胀量大，受到混凝土约束，产生压应力，而混凝土下部受拉应力。随着后期混凝土温度降低，内外温差减小，拉应力逐渐减小。特别需要指出的是，从图12工况1龄期0.75 d的表面应力分布云图来看，出现最大拉应力的地方往往在浇筑块的棱边处，这与现场发现的表面开裂情况比较符合。

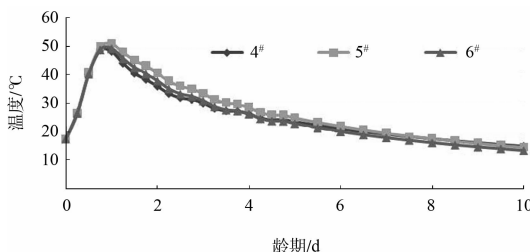


图9 工况1内部点4#、5#、6#的温度历时曲线

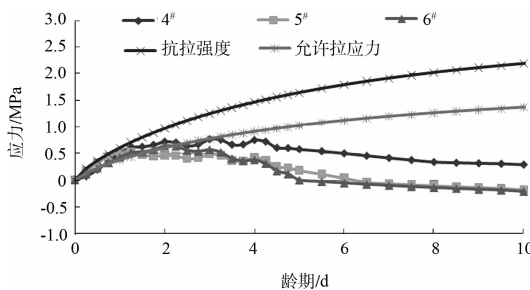


图10 工况1内部点4#、5#、6#的应力历时曲线

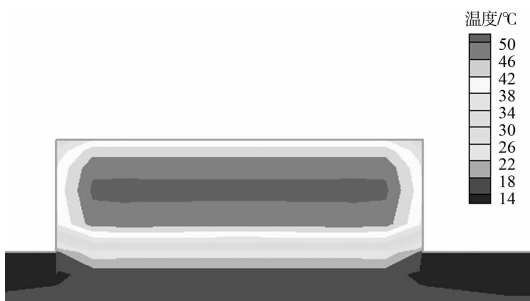


图11 工况1内部温度分布云图(0.75 d)

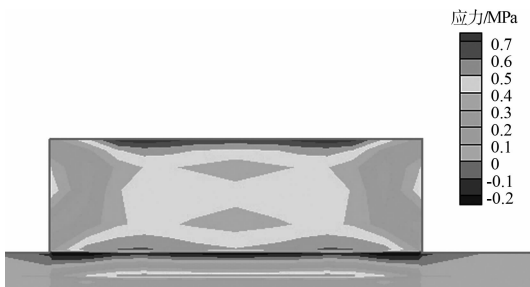


图12 工况1表面应力分布云图(0.75 d)

图 13 和 14 分别对比工况 1 不同面上的 3 个表面点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的温度和温度应力历时曲线。其中 5<sup>#</sup> 点位于较大侧表面中心, 7<sup>#</sup> 点位于最大仓面点中心, 8<sup>#</sup> 点位于最小侧表面中心。从图 13 可知, 尽管位于不同表面, 3 个特征点都在 1 d 达到最高温度 50 ℃, 而后温度缓慢下降。其中 8<sup>#</sup> 点温降幅度最大, 速率最快; 5<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 点温降幅度相同, 但 5<sup>#</sup> 点温降速率大于 7<sup>#</sup> 点。由图 14 可知, 表面最大拉应力 5<sup>#</sup> 点大于 7<sup>#</sup> 点大于 8<sup>#</sup> 点, 分别为 0.75、0.60、0.27 MPa, 略大于允许抗拉强度。7<sup>#</sup> 点位于顶面, 不受地基变形约束, 而 5<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 点都受到地基约束影响, 因此只比较 5<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 的温度应力。8<sup>#</sup> 点降温速度快, 随着内外温差的减小, 早期拉应力迅速转变为微小的压应力, 而 5<sup>#</sup> 点反之。

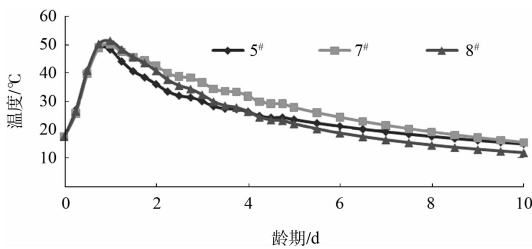


图 13 工况 1 内部点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的温度历时曲线

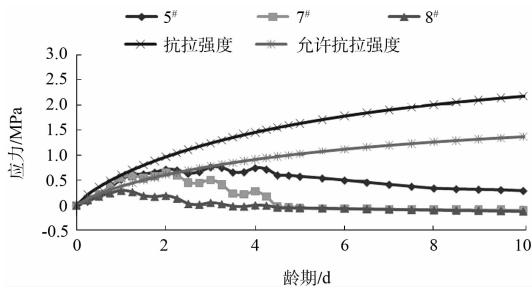


图 14 工况 1 内部点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的应力历时曲线

### 3.2.2 工况 2 计算结果分析

C30 混凝土抗拉强度为 2.75 MPa, 取混凝土抗裂安全系数为 1.6。图 15 和 16 分别对比工况 2 同一高程上不同水平位置的内部点 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的温度和温度应力历时曲线。对比温度历时曲线图 5 可知, 经过通水冷却后, 3 个内部点在龄期 1 d 左右温度都达到峰值, 较工况 1 的峰值温度 67.7 ℃ 有不同程度的下降, 其中 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 点下降到 44.7 ℃, 3<sup>#</sup> 点下降到 53.6 ℃。从图 17 工况 2 龄期 1.25 d 时温度分布云图中可以看到, 左侧通冷却水后和右侧

不通冷却水 (工况 1) 所形成的温度分布差异。这是由于 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 点位于水管网络的中部, 两侧都有水管, 散热效果较好, 3<sup>#</sup> 点虽只有一边有冷却水管, 但是采用铁管散热效果依旧较好。工况 2 混凝土在龄期 1~4 d 这段时间内温度下降速率明显加快, 幅度从工况 1 的 20 ℃ 增大到 30 ℃ 左右。对比温度应力历时曲线图 6, 通过通水冷却前期内部混凝土因为水化温升而产生的膨胀量减小, 受外部约束产生的压应力较工况 1 减小, 接近于零。对比工况 1, 1<sup>#</sup> 点最大拉应力 3.51 MPa 减小到 0.87 MPa, 未超过允许抗拉强度; 2<sup>#</sup> 点最大拉应力 3.51 MPa 减小到 0.69 MPa, 未超过允许抗拉强度; 3<sup>#</sup> 点最大拉应力 4.73 MPa 减小到 1.71 MPa, 未超过允许抗拉强度。通过上述对比分析, 通水冷却措施可以很好地降低混凝土最高温度, 减小内部拉应力。从图 18 工况 3 龄期 80 d 时应力分布云图中也能看到通水后内部拉应力显著下降。

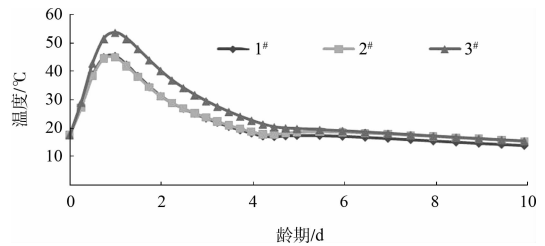


图 15 工况 2 内部点 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的温度历时曲线

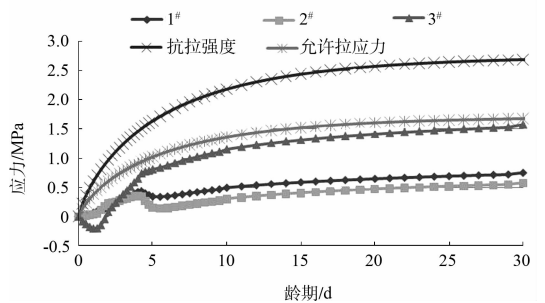


图 16 工况 2 内部点 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的应力历时曲线

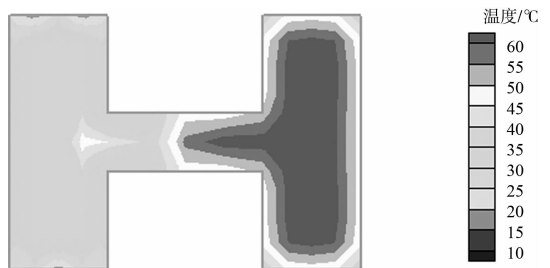


图 17 工况 2 内部点温度分布云图 (1.25 d)

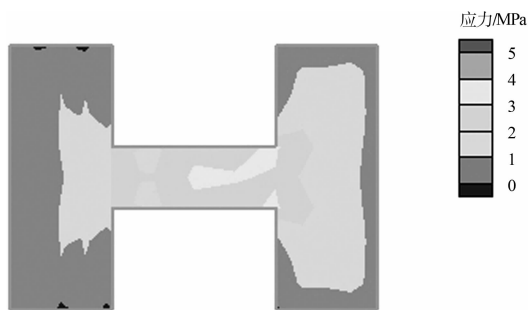


图 18 工况 2 内部点应力分布云图 (80 d)

图 19 和 20 分别对比工况 1 位于不同面上 3 个表面点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的温度和温度应力历时曲线。对比图 13 和图 19 可知，5<sup>#</sup> 点的最高温度降至 40 ℃，8<sup>#</sup> 点最高温度降至 28 ℃。7<sup>#</sup> 点的最高温度不变，仍为 50 ℃。对比图 14 和图 20 可知，通过表面保温和通水冷却，3 个特征点的拉应力都显著减小，均小于允许抗拉强度。后期 5<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 点拉应力稳定后约为 0.2 MPa，8<sup>#</sup> 点所受压应力稳定后约为 0.33 MPa。从计算结果来看，工况 2 所实施的表面保温和通水冷却方案是合理的，能够有效防止桥台产生温度裂缝。

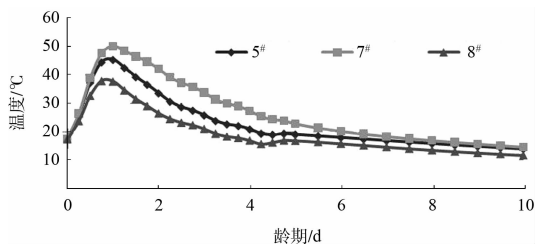


图 19 工况 2 内部点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的温度历时曲线

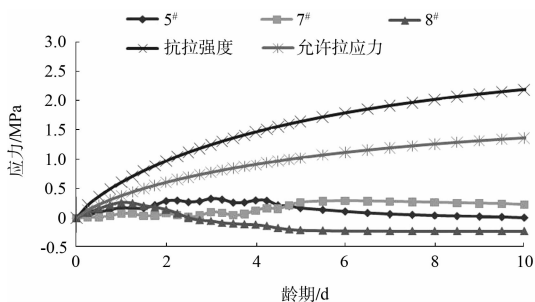


图 20 工况 2 内部点 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 的应力历时曲线

### 3.2.3 开裂机理分析

在本工程中，现场观察发现大量的从棱角不断开展的裂缝。通过上面 3 个工况的计算，可以对此类裂缝的开裂机理进行分析。混凝土散热最

剧烈的部位在结构的边缘及棱角处，这些部位多为 2 面散热和 3 面散热，因此温度比较低，容易在短时间内产生较大的收缩和拉应力，产生表面裂缝。

对于靠近地基的部位，混凝土受地基的约束较大，产生比较大的拉应力，故可能从地基连接处产生裂缝并不断向上发展。早期表面混凝土受外温影响较大，温升幅度和膨胀量相对较小，内部混凝土水化热难以消散而膨胀量相对较大，相互变形约束使得温升阶段外部受拉内部受压，故早期表面先产生裂缝并向深处发展。中后期表面混凝土收缩已趋于稳定，内部混凝土峰值温度过后温度回落产生较大幅度的收缩，相互变形约束使得内部混凝土的压应力缓慢转化为拉应力，后期内部易产生深层裂缝。另外桥台结构往往连接柱体桩基或上部结构，结构连接的转角处容易形成应力集中，造成较大的拉应力，也容易产生裂缝。

## 4 防裂措施

### 4.1 选择混凝土原材料、优化混凝土配合比

采用矿物掺合料能够节约水泥，从而降低水化热，同时提高混凝土的耐久性，改善施工性能，有效提高混凝土的初龄期抗裂性能。配制混凝土应优先考虑使用矿物掺合料。尽可能选用优质骨料，选用弹性模量高、含泥量少的骨料，可有效减少混凝土的收缩，提高抗裂性能。在混凝土配比设计时，应该以 68% 作为临界骨料体积含量作为基准，可以获得良好的控制收缩效果，外加剂对混凝土性能和收缩也有一定影响。

### 4.2 选择合理的结构形式、分缝分块以及浇筑时间

结构形式对温度应力和裂缝的出现具有重要影响。在设计阶段应充分重视结构形式对温度应力和裂缝问题的影响，应尽量少用对温度变化敏感的薄壁结构。浇筑块尺寸对温度应力有重要影响，浇筑块越大，温度应力也越大，越容易产生裂缝，需要特别注意合理的分缝分块。通常情况下，通仓浇筑的温控标准相对严格，对于结构突

变, 可采用分块和跳仓浇筑的方式来缓解应力集中。

#### 4.3 采取工程温控措施, 严格控制混凝土温度

通常采用表面保温及保湿, 水管冷却温控技术以及控制浇筑温度, 降低混凝土内部温度带走内部水化热, 减小内外混凝土温度差, 从而防止裂缝的产生。

### 5 结论

1) 在分析计算 8# 桥台施工期的应力场的过程中, 结合现场实际观察到的桥台桥墩棱角裂缝和中部裂缝情况, 从热力学和结构受力的角度阐释裂缝成因。而后提出合理的水管冷却和表面保温方案, 通过计算分析证明其合理性。

2) 结合 8# 桥台现场检测结果、分析计算以及裂缝成因机理理论分析发现, 混凝土裂缝主要有两类, 一类为启裂于早期混凝土表面的“由表及里”型裂缝, 另一类是温降期出现的“由里及表”型裂缝。前者为早期内外温差所致, 后者为上层混凝土降温时的冷缩变形、自生体积变形和底层老混凝土的变形约束所致。

3) 根据现场试验、仿真计算和理论分析, 深入研究混凝土开裂机理, 并提出混凝土施工期防裂措施。

#### 参考文献:

- [1] 湖北省高速公路实业开发有限公司. 山区高速公路桥梁混凝土耐久性设计与施工控制技术: 桥梁钢筋混凝土结构耐久性分析[R]. 湖北: 湖北省高速公路实业开发有限公司, 2011.
- [2] 李强明, 晏应. 公路特大型桥梁有关问题分析[J]. 现代交通技术, 2009(6): 37-41.
- [3] Fan S C, Liu X, Lee C K. Enriched partition-of-unity finite element method for stress intensity factors at crack tips[J]. Computers & Structures, 2004, 82(4-5): 445-461.
- [4] Vagelis G, Papadakis. Effect of fly ash on portland cement systems. Part II: High-calcium fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1 647-1 654.
- [5] 孙衍福, 郭治胜, 吴大宏. 大体积混凝土桥墩裂缝分析整治及建议[J]. 铁道工程学报, 2006(5): 67-69.
- [6] 朱伯芳. 高温季节进行坝体二期水管冷却时的表面保温[J]. 水利水电技术, 1997(4): 10-13.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(下转第 214 页)

针对该工程逐桩勘探的地质资料, 采用定性分析和定量分析相结合的分析方法对溶洞进行分析, 并依此在设计文件中确定嵌岩桩溶洞处理方案, 这种方法在施工过程中取得了良好的工程实践效果, 同时也为建设单位节省了工程投资。

### 4 结语

1) 根据逐桩钻探资料, 采用有限元方法对整个工程区域进行定量分析, 可以更加准确地判断溶洞的工程特征。

2) 结合现有溶洞处理方法并运用定性定量相结合的分析方法, 可以选择更加合理的溶洞处

理工程措施。

3) 采用本文所述方法对减少桩基工程造价、指导桩基施工有十分重要的意义, 同时也在实际工程中取得了良好的工程实践效果, 可为邻近工程以及类似工程桩基设计提供经验。

#### 参考文献:

- [1] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [2] JTS 167.4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [3] 李洪亮. 桥梁桩基溶洞勘测及处理技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)