

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022030124021969

文章编号:1674-599X(2024)01-0079-11

引用格式:江羽习,王鹏,张峰,等.宽幅箱梁0号块混凝土浇筑方式对水化热影响研究[J].交通科学与工程,2024,40(1):79-89,126.

Citation:JIANG Yuxi, WANG Peng, ZHANG Feng, et al. Study on the influence of concrete pouring methods on hydration heat for wide-flange box girder zero block[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 79-89, 126.

## 宽幅箱梁0号块混凝土浇筑方式对水化热影响研究

江羽习<sup>1</sup>,王鹏<sup>2</sup>,张峰<sup>3</sup>,黄成<sup>1</sup>,黄文武<sup>1</sup>

(1.广西路建工程集团有限公司,广西 南宁 530001;

2.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067;

3.山东大学 岩土与结构工程研究中心,山东 济南 250061)

**摘 要:**针对0号块大体积混凝土因水化热引起的早龄期开裂问题,以预应力混凝土箱梁部分斜拉桥广西壮族自治区培森柳江特大桥0号块工程为背景,基于ABAQUS有限元软件,建立了三维有限元模型,分析水化模型与浇筑次数对混凝土温度和最大主应力的影响。研究表明:相比于一次浇筑的方式,使用分层浇筑可使混凝土峰值温度降低11.8%;相比指数型模型,双曲线模型和复合指数型模型可使混凝土峰值温度分别降低13.7%和10.8%;考虑早龄期弹性模量和抗拉强度的影响,第一主应力最大位置依次出现在新旧混凝土交接处、中腹板导角处和人孔导角处;相比于一次浇筑的方式,分层浇筑的新旧混凝土交接处、中腹板导角处和人孔导角处第一主应力分别降低的2.0%、36.7%和39.8%;考虑不同水化模型的影响,在新旧混凝土交接处和中腹板导角处,第一主应力峰值与该时刻水化热量之间近似呈线性关系。

**关键词:**水化热,箱梁,温度,混凝土,数值模拟

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

### Study on the influence of concrete pouring methods on hydration heat for wide-flange box girder zero block

JIANG Yuxi<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>3</sup>, HUANG Cheng<sup>1</sup>, HUANG Wenwu<sup>1</sup>

(1. Guangxi Road Construction Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530001, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd.,  
Chongqing 400067, China;

3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In order to study the early age cracking of zero block concrete due to heat of hydration, a three-dimensional finite element model was established based on the secondary development of ABAQUS for the zero block of the Peisen Liujiang Special Bridge in Guangxi Province, and the effects of hydrating model and the number of pouring operations on the concrete temperature and maximum principal stress were investigated. The simulation results show that: layered casting reduces the peak concrete temperature by 11.8% compared to one casting; The hyperbolic and composite exponential models can reduce the peak concrete temperature by 13.7% and 10.8% respectively compared to the exponential model the maximum location of the first principal stress appears at the

收稿日期:2022-03-01

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB2603303),山东省自然科学基金项目(ZR2021QE216, ZR2021ME077)

作者简介:江羽习(1969—),男,广西路建工程集团有限公司正高级工程师。E-mail:jiangyuxi@mail.gxljjt.com

interface between old and new concrete, taking into account the effects of early age modulus and tensile strength. The first principal stress is reduced by 2%, 36.7% and 39.8% respectively at the intersection of old and new concrete, at the centre web leading angle and at the manhole leading angle compared to the single pouring method; There is an approximately linear relationship between the peak first principal stress and the heat of hydration at the intersection of the old and new concrete and the centre web guide angle, taking into account the effects of different hydration models.

**Key words:** hydration heat, box girder, temperature, concrete, FEM

箱梁的混凝土顶板和梗腋在浇筑早期容易产生横向裂缝,这些裂缝通常是贯穿的,沿着箱梁长度可扩展1~3 m<sup>[1]</sup>。这些横向裂缝降低了混凝土结构的使用寿命,大大提高了维修和养护成本。尽管导致混凝土箱梁顶板早期裂缝的原因尚不明确,但在早期混凝土水化热过程中,温度与湿度的变化已被认为是导致混凝土早期开裂的主要原因<sup>[2-4]</sup>。单位体积混凝土中水泥含量越高,水化效应越剧烈;构造物浇筑体积越大,水化热效应越明显。因此,对于高强度、大体积混凝土结构而言,水化热分析是十分必要的。

目前,对水化热的研究主要聚焦在桥梁结构的墩柱和桥面板方面<sup>[5-7]</sup>。HUANG等<sup>[8]</sup>采用1:5的比例,进行了拱桥节段模型试验,研究了大体积墩混凝土的温度时程。KIM等<sup>[9-10]</sup>采用ANSYS软件,建立了考虑水管冷却的精确计算模型。LI等<sup>[11-12]</sup>研究了新、旧混凝土在施工缝处的温度梯度。ABID<sup>[13]</sup>通过ABAQUS有限元软件,建立三维模型,研究了早期混凝土热膨胀系数的变化趋势,发现箱梁截面的结构和热边界条件与墩柱和桥面板的结构和热边界条件截然不同。箱梁截面的顶板、底板与腹板均表现出独特的水化热分布特征。

许多学者对桥梁结构水化热数值模拟进行了研究<sup>[14-18]</sup>。阮静等<sup>[19]</sup>建立了ANSYS有限元模型,发现一次浇筑0号块混凝土模型的最高温度出现在底板和横隔板相交位置处。缪长青等<sup>[20]</sup>建立了ANSYS有限元模型,发现0号块混凝土的顶板和底板处由于厚度较小,内外温差较大,该处的温度应力也相对较大。王琛等<sup>[21]</sup>建立了Midas有限元模型,发现一次浇筑0号块混凝土模型的最大应力出现在人孔导角位置处,但该模型仅分析了一次浇筑0号块混凝土温度与应力的分布状态,未基于不同

工况进行分析。

部分学者研究了不同工况对0号块早龄期温度或应力的影响。刘守成<sup>[22]</sup>建立了ANSYS有限元模型,讨论了分层浇筑对0号块混凝土早龄期应力的影响。任更锋等<sup>[23]</sup>基于Midas有限元模型,讨论了水泥种类对0号块混凝土早龄期温度的影响。陈志清等<sup>[24]</sup>基于Midas有限元模型,提出了减少水泥用量和控制混凝土入模温度的方法来减小0号块混凝土的早龄期应力。但这些研究仅基于现有有限元软件对给定公式进行计算,可能与实际情况有较大差别。目前,广泛使用的水泥水化计算模型有3种,早龄期混凝土弹性模量与抗拉强度的计算模型更是多样。因此,亟须基于对多种计算公式进行比较,找出最符合实际情况的计算公式。

本研究基于ABAQUS二次开发平台,考虑早期混凝土弹性模量和抗拉强度随龄期的变化,开发了HETVAL水化放热子程序和UMAT应力场计算子程序,研究了不同水化放热模型与不同浇筑方式对混凝土早龄期0号块混凝土应力分布的影响,以期为类似宽幅箱梁0号块混凝土浇筑提供参考。

## 1 工程概况

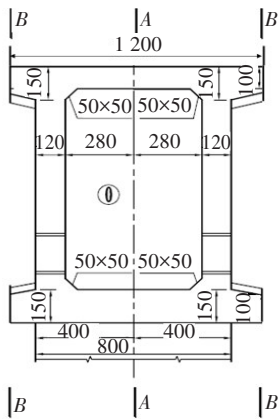
培森柳江特大桥位于广西壮族自治区来宾市象州县,为世界第一跨径公路预应力钢筋混凝土部分斜拉桥。该桥主桥采用145 m+280 m+145 m跨径布置的矮塔斜拉桥,桥宽29.0 m,跨中梁高4.5 m,根部梁高11.5 m,如图1所示。箱梁为整幅单箱三室直腹板形式,箱梁顶板宽度29.0 m,底板宽度20.0 m,两侧翼板悬臂长度4.5 m。顶板顶面设置了2.0%的双向横坡,底板水平。箱梁根部梁高11.5 m,梁高及底板厚度均以1.8次抛物线变化。

该工程悬臂施工的0号块混凝土截面尺寸较大,内部设有人洞,其结构较为复杂。该桥的0号块混凝土构造如图2所示,其主桥的0号块混凝土现场如图3所示。在其横隔板与腹板、底板交汇处特别容易因水化热温度梯度过大而产生温度裂缝。若平时养护湿度不到位,则可能导致0号块混凝土在凝结强度形成过程中因缺水产生干缩裂缝。因此,对该部位进行水化热温度场的数值计算是十分有必要的。

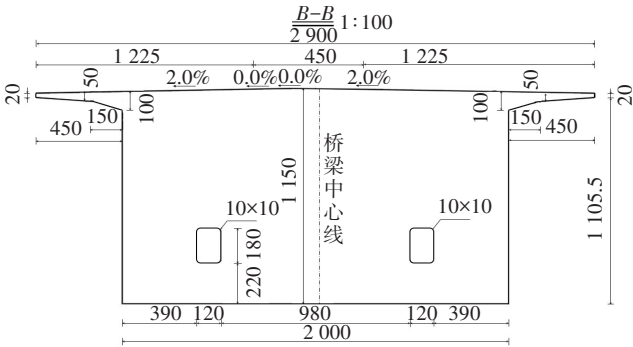


图1 培森柳江特大桥效果图

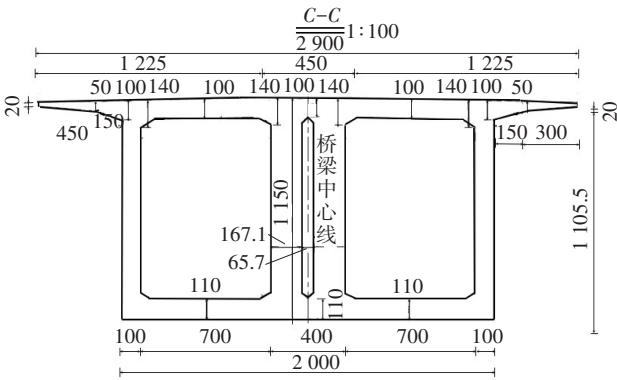
Fig. 1 Rendering of Peisen Liujiang Bridge



(a) 0号块立面图



(b) B-B截面



(c) C-C截面

图2 0号块构造图(单位:cm)

Fig. 2 Dimension of zero block (unit:cm)



图3 培森柳江特大桥0号块现场

Fig. 3 Site plan of zero block of Peisen Liujiang Bridge

## 2 数值分析

### 2.1 建模过程

#### 2.1.1 材料性质

混凝土的水化热源采用HETVAL子程序添加。目前,常用的水化放热公式主要有《大体积混凝土温度监控计算规范》(GBT 51028—2015)中的指数型计算式、水利水电科学研究院提出的双曲线型计算式和朱伯芳院士提出的复合指数型计算式<sup>[25]</sup>,混凝土绝热温升曲线计算式分别为

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

$$Q(t) = Q_0 \frac{t}{n + t} \quad (2)$$

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-at}) \quad (3)$$

式中:  $Q_0$  为单位体积水泥水化放热总热量,本文取为350 kJ;

$m$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $c$  为与水泥品种、用量和入模温度等有

关的系数,本研究分别取为0.40、0.86、0.36和0.74。

各组分配合比见表1,绘制混凝土单位体积水化放热全过程,如图4所示。

表1 混凝土配合比

Table 1 Mixing ratio of concrete

因素	水	水泥	砂	石	减水剂
百分比/%	5.27	19.70	28.30	46.50	0.23

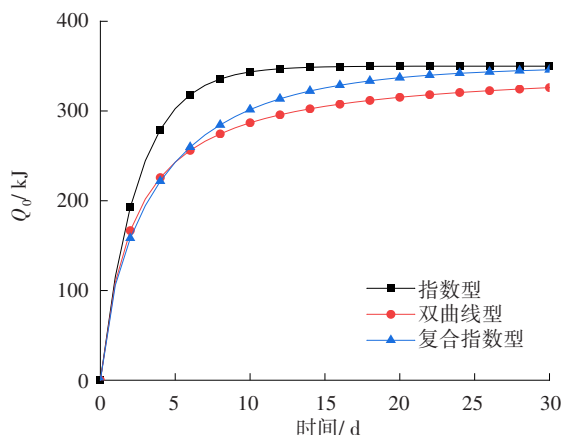


图4 水化放热曲线

Fig. 4 Hydration exothermic curve

采用UMAT子程序添加混凝土弹性模量和抗拉强度随时间的变化规律,按照《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)对该规律进行分析,该规范对早龄期弹性模量与抗拉强度随时间的变化公式与水化热指数公式相似,其表达式为

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \cdot (1 - e^{-0.09t}) \quad (4)$$

$$f_t(t) = f_t \cdot (1 - e^{-0.3t}) \quad (5)$$

式中: $E_{ci}$ 取为36.0 GPa;

$f_t$ 取为2.85 MPa。

#### 2.1.2 整体模型的组装

由于该工程的0号块混凝土及墩柱为对称结构,故仅建立1/4模型。先使用Solid Works软件,依据0号块混凝土的实际尺寸,建立三维模型,如图5所示;再将其导出为sat文件;最后,将模型导入ABAQUS软件中,并在材料属性中调用HETVAL和UMAT子程序。由于0号块混凝土的下方与墩柱固结,故在ABAQUS软件中建立2.0 m高的墩柱部件,在材料设置中仅需在二次浇筑的1.4 m墩身处调用

HETVAL和UMAT子程序即可。根据各部件在全局坐标中的具体位置,组装成一个整体模型。

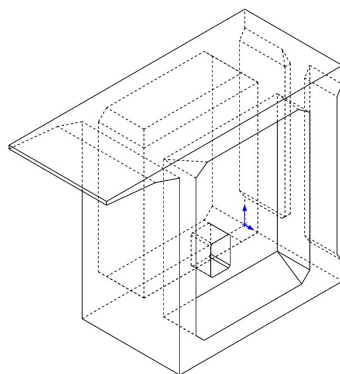


图5 Solid Works模型

Fig. 5 Solid Works model

#### 2.1.3 单元选择与网格划分

在ABAQUS有限元模型中,模拟温度场时,选择DC3D8实体单元来模拟混凝土;模拟应力场时,选择C3D8单元。划分网格后的有限元模型如图6所示。该模型共有17 821个单元。

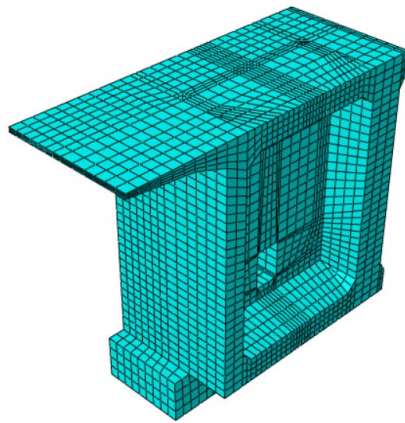


图6 有限元网格划分

Fig. 6 Finite elements mesh partitioning

#### 2.1.4 边界条件设置

在进行温度场计算时,混凝土对称面通过第二类边界条件进行约束,设置对称面上的热流量为 $0.0 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。除对称面外,其他混凝土表面通过第三类边界条件进行约束<sup>[11]</sup>。其表面放热系数 $\beta$ 与风速 $v$ 有关,其计算式为

$$\beta = 21.80 + 13.53v \quad (6)$$

若混凝土表面覆盖如模板等保温层,则 $\beta_c$ 的计算式为



$$\beta_c = \frac{1}{R_c} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \frac{h_i}{\lambda_i}} \quad (7)$$

按该模型计算,得到覆盖模板的放热系数为  $66.2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ,与空气直接接触的混凝土表面的放热系数为  $71.8 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

在进行热应力计算时,混凝土对称面设置位移约束,混凝土墩底部设置为固结边界条件。

### 2.1.5 初始条件设置

广西壮族自治区来宾市象州县气象站 30 a 资料显示,该桥位于柳江河段属亚热带北缘气候与亚热带北缘向中亚热带南缘的过渡带气候地区,年平均大气温度约为  $30^\circ\text{C}$ ,当地夏季施工选取初始温度为  $30^\circ\text{C}$ 。浇筑时混凝土的初始温度约为  $20^\circ\text{C}$ 。本研究分别采用一次浇筑和分层浇筑两种浇筑模式进行讨论。

### 2.2 用户子程序的编制

HETVAL 作为生热子程序,需要将其调用到 CAE 主程序中来模拟水化放热。HETVAL 子程序是定义生热率 FLUX 来生热的,设置较为简单,仅需在子程序中将放热式(8)赋予给 FLUX 即可实现,以指数型为例,其放热公式为

$$q(t) = -m_c m Q_0 (1 - e^{-mt}) \quad (8)$$

式中: $m_c$  为每  $1 \text{ m}^3$  中水泥含量,按照现场工况取为  $422 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

用户材料子程序 (user-defined material mechanical behavior, UMAT), 是一种利用 ABAQUS 提供的 Fortran 程序接口,来定义 ABAQUS 材料库未定义的材料类型。

在编写的 UMAT 程序代码段中,最重要的编程代码段步骤为:

1) 确定 Jacob 矩阵,即应力偏量对应变偏量的变化率;

2) 根据增量步的弹性模量和增量步长求解该步用到的相关变量,利用本构方程公式计算应力增量,进而对应力进行更新;

3) 将该增量步的应力增量存储到状态变量 STATEV 中,供下一个增量步使用。依次循环求得最终的弹性应力。

在进行混凝土桥梁应力场的分析时,通常采用有限元分析软件 ABAQUS 的温度场-应力场顺序耦合,进行模块分析,即在混凝土早龄期计算时,先导

入 HETVAL 子程序计算水化放热温度场,在得到混凝土的温度数据 odb 文件后,将该 odb 文件导入含 UMAT 子程序的应力场分析模型中,进而完成对应力场的分析。

## 3 温度场计算结果

### 3.1 一次浇筑温度场云图

以指数型为例,绘制 0 号块混凝土一次浇筑水化热温度场分布云图,如图 7 所示。

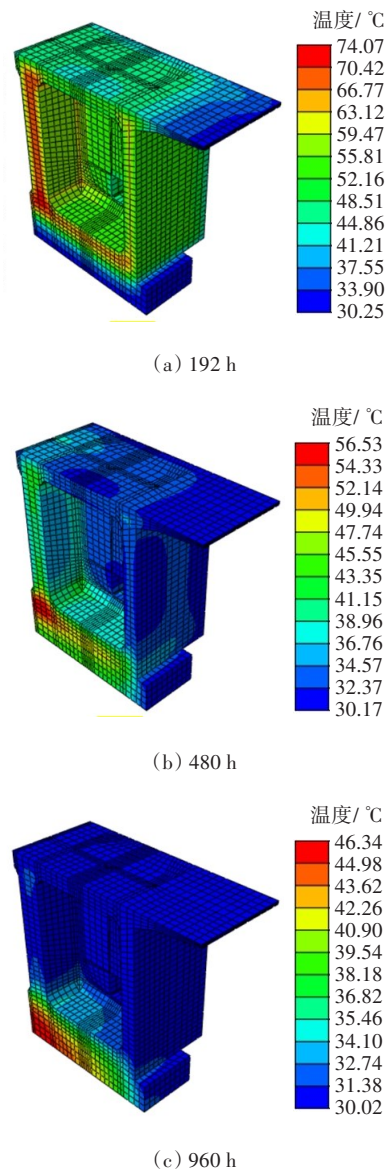


图7 一次浇筑温度场云图

Fig. 7 Temperature contours of one pouring

从图7可以看出,指数型模型温度场云图可被分为三个阶段:

1) 阶段I [0~192 h]:在该段时间,0号块混凝土的温度均显著大于外界大气的温度(本模型取为30℃),边腹板对流散热速率显著上升,而中腹板和底板由于受到对称约束和墩柱约束,对流散热速率较慢,热量集中在中腹板和底板区域。

2) 阶段II [192~480 h]:在该段时间,由于0号混凝土顶板温度与大气温度接近,中腹板的热量迅速向顶板方向传递,底板向墩柱热传递速率较慢,热量集中在底板区域。

3) 阶段III [480~960 h]:在该段时间,0号混凝土底板的热量逐渐传入混凝土墩柱,热量集中在墩梁固结区域。

### 3.2 分层浇筑温度场云图

以指数型为例,绘制0号块混凝土第一层浇筑水化热温度场分布云图,如图8所示。

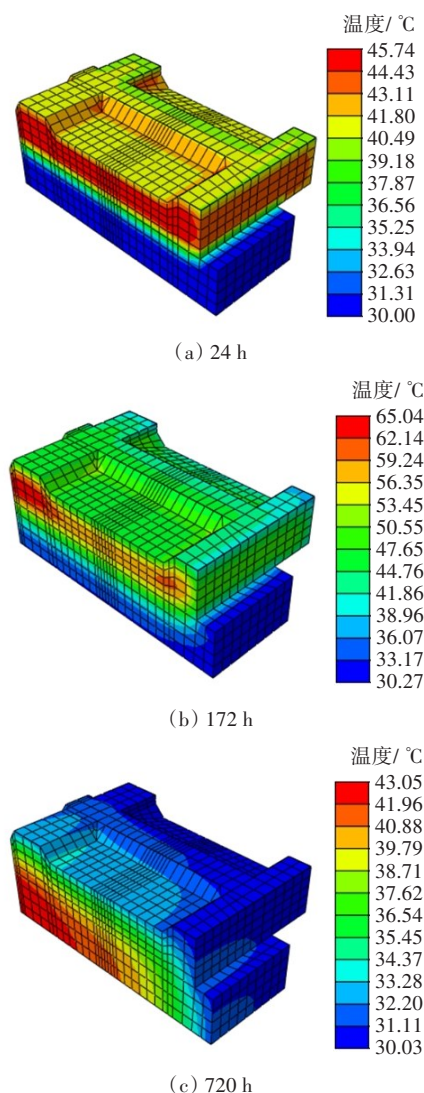


图8 第一次浇筑温度场云图

Fig. 8 Temperature contours of the first pouring

从图8可以看出,指数型模型第一层温度场云图主要分为三个阶段:

1) 阶段I [0~24 h]:在该段时间,混凝土水化放热速率最快,0号块混凝土第一层各部位均处于温度迅速增加阶段,热量分布较为均匀。

2) 阶段II [24~172 h]:在该段时间,由于0号块混凝土顶部和边腹板对流散热速率较快,而中腹板和底板由于受到对称约束和墩柱约束,对流散热速率慢,热量集中在中腹板和底板区域。

3) 阶段III [172~720 h]:在该段时间,混凝土底板热量逐渐传入混凝土墩柱,热量集中在墩梁固结区域。

以指数型为例,绘制0号块混凝土第二层浇筑水化热温度场分布云图,如图9所示。

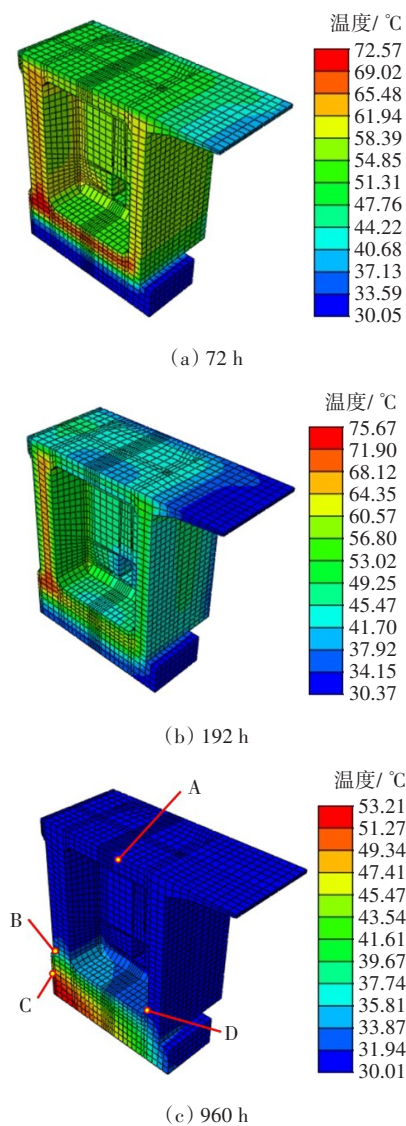


图9 第二次浇筑温度场云图

Fig. 9 Temperature contours of the second pouring

从图9可以看出,指数型模型的温度场云图也可分为三个阶段:

1) 阶段I [0~72 h]:在该段时间,混凝土水化放热速率最快,0号块混凝土各部位均处于温度迅速增加的阶段,底板浇筑热量向墩柱传热速率最慢,热量主要集中在底板区域。

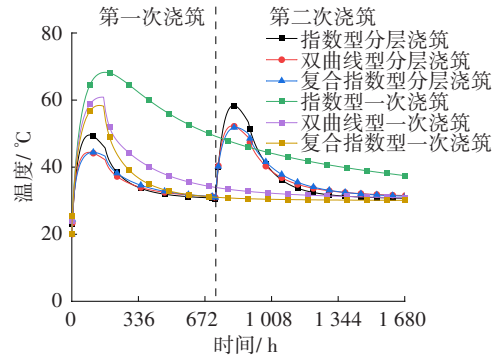
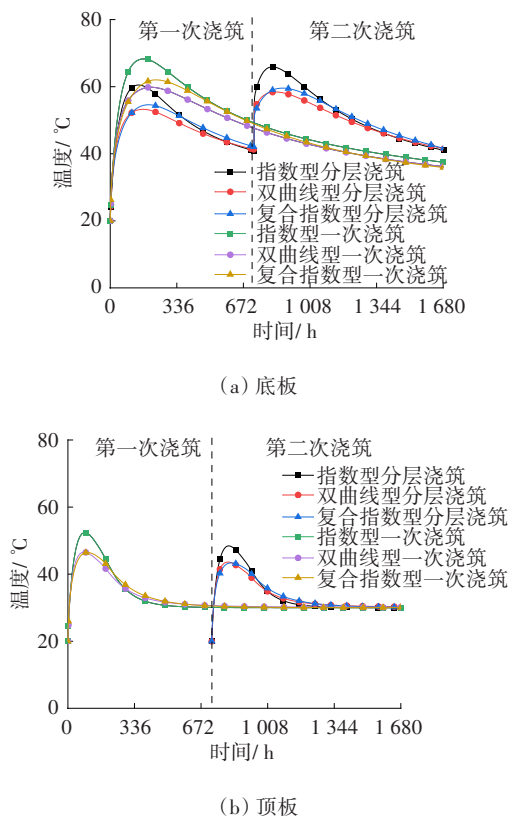
2) 阶段II [72~192 h]:在该段时间,0号块混凝土温度均显著大于外界大气温度(本模型取为30℃),边腹板对流散热速率显著,而中腹板和底板由于受到对称约束和墩柱约束,对流散热速率慢,热量集中在中腹板和底板交接区域。

3) 阶段III [192~960 h]:在该段时间,底板热量缓慢向墩柱方向传递,直至第960 h时,水化热量才全部从箱梁传递至墩柱位置处。

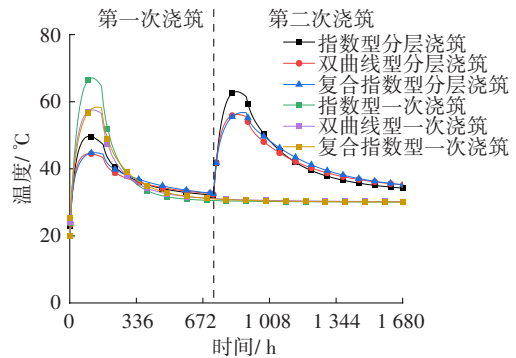
尽管各模型水化放热总量相同,但各水化热模型的放热速率不同,各阶段的分界时间和峰值温度也存在差异,因此,需针对不同模型进行比较和讨论。

### 3.3 不同水化热计算模型温度对比

分别选取两次浇筑模型的顶板、中腹板、底板和边腹板部位最高温度测点处(图9中A、B、C和D点),绘制不同水化热计算模型温度时程曲线,如图10所示。



(c) 中腹板



(d) 边腹板

图10 不同水化热计算模型时程曲线

Fig. 10 Time course curves of different heat of hydration calculation models

从图10可以看出:

1) 一次浇筑模型温度峰值大于分层浇筑模型的温度峰值。以中腹板为例(图10(c)),一次浇筑模型最高温度为68.2℃,分层浇筑模型最高温度为58.1℃,该温度比一次浇筑模型的温度降低14.8%。一次浇筑模型水化散热速率慢于分层浇筑模型的水化散热速率,以中腹板为例(图10(c)),在939 h后,使用指数模型的一次浇筑中腹板温度高于使用指数模型的第二次浇筑时的中腹板温度。

2) 指数型模型峰值计算结果显著大于另外两种模型的计算结果。以二次底板为例(图10(a)),指数型模型的第一次浇筑温度最高值60.5℃,而双曲线型和复合指数型计算第一次浇筑温度最高值分别为53.2℃和54.6℃,分别比指数型模型计算结果减小了12.07%和9.75%。

3) 指数型模型峰值时刻与另外两种模型相近。以中腹板第一次浇筑为例(图10(c)),指数型和双曲线型模型峰值时刻均出现在90 h,复合指数型峰值时刻出现在96 h。指数型模型水化热消散速率较



快,以中腹板为例(图 10 (c)),在 240 h 时,指数型模型温度低于复合指数型的温度,在 312 h,指数型温度低于双曲线型的温度。

## 4 应力场计算结果

### 4.1 一次浇筑应力场云图

将不同水化热模型温度测试结果导入应力场,讨论水化热公式对 0 号块混凝土早龄期开裂的影响。在显示应力场云图时,将小于该时刻抗拉强度的部分用深色显示,将大于该时刻抗拉强度的部分用浅色显示。以指数型温度场为例,绘制 0 号块混凝土一次浇筑水化热应力场分布云图,如图 11 所示。

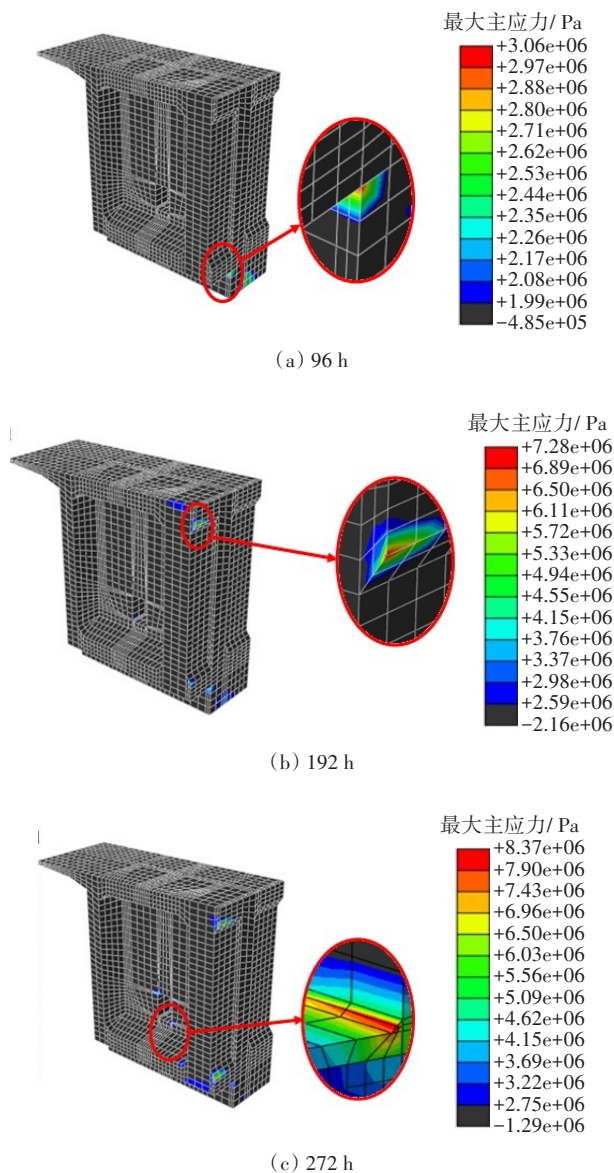


图 11 一次浇筑应力场云图

Fig. 11 Stress distributions of one pouring

从图 11 可以看出,规范计算得到的一次浇筑最大主应力主要出现在导角位置和墩梁固结区域。在 0~96 h 时,最大主应力出现在墩梁固结区域(图 11 (a))。在 96~272 h 时,最大主应力出现在中腹板上梗腋位置(图 11 (c)),这是由于在该段时间(图 9 阶段 II),中腹板的热量迅速向顶板方向传递,竖向温差较大,使中腹板梗腋比边腹板梗腋更易产生开裂。272 h 后,由于拆模的影响,人孔附近对流换热速度较快,人孔导角处将产生较大应力。

### 4.2 分层浇筑应力场云图

第一层浇筑混凝土体积较小、无开裂风险,以指数型温度场为例,仅绘制 0 号块沪宁图分层浇筑水化热应力场分布云图,如图 12 所示。

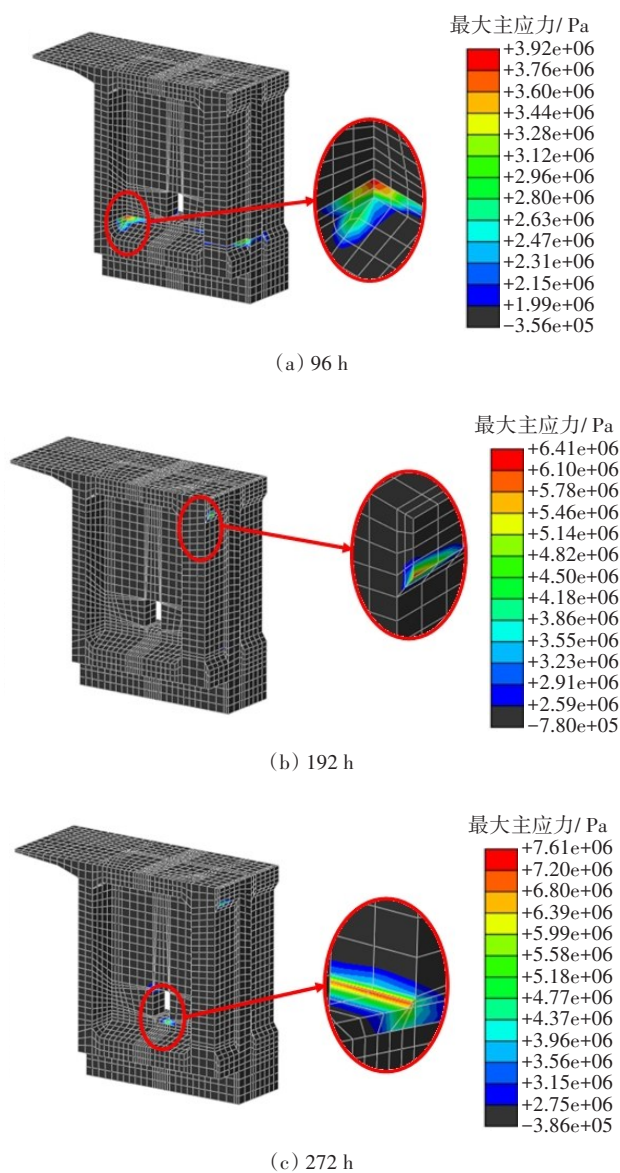


图 12 第二次浇筑应力场云图

Fig. 12 Stress distribution of second pouring



从图12中可以看出,在96~192 h时,第一主应力最大位置分别出现在中腹板梗腋和人孔导角位置处,分层浇筑最大主应力发展规律与一次浇筑的最大主应力发展规律类似。但在0~96 h时,新旧混凝土之间的温差导致的最大主应力出现在横隔板新旧混凝土交接位置(图12(a))。

#### 4.3 不同浇筑方式应力对比

分别绘制一次浇筑和分层浇筑中腹板导角、新旧混凝土交界和人孔导角处最大主应力与抗拉强度时程曲线,如图13所示。

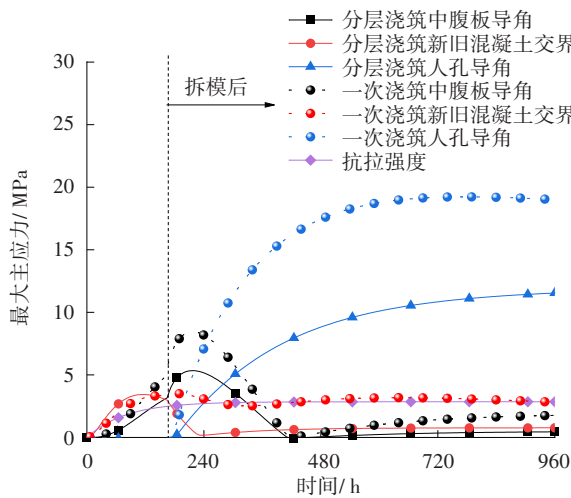


图13 浇筑方式对强度的影响

Fig. 13 Influence of pouring method on strength

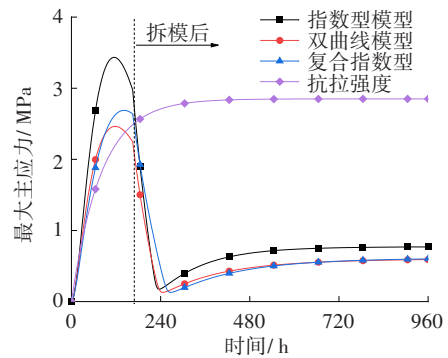
从图13可以看出,各点处最大主应力峰值均大于该时刻混凝土抗拉强度,特别在拆模以后,由于对流速度显著加快,混凝土表面温差明显增加,使人孔部位和中腹板梗腋部位均出现较大应力变化。一次浇筑最大主应力峰值比分层浇筑最大主应力峰值要明显偏大,一次浇筑的中腹板导角、新旧混凝土交界和人孔导角处分别为分层浇筑的1.58、1.02和1.66倍,这表明分层浇筑有助于减小混凝土最大主应力。

#### 4.4 不同水化热模型应力对比

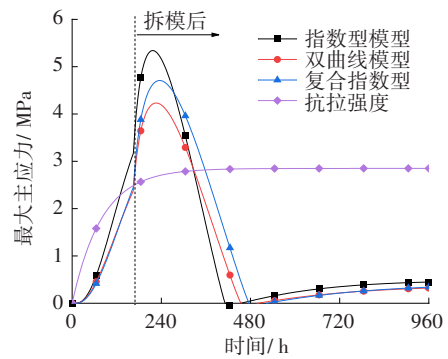
以分层浇筑为例,绘制新旧混凝土交接位置、中腹板导角和人孔导角处各模型的最大主应力与抗拉强度时程曲线,如图14所示。

从图14可以看出,指数型模型在新旧混凝土交接位置、中腹板导角和人孔导角处均会产生最大第一主应力。这是由于在边界条件相同的情况下,在

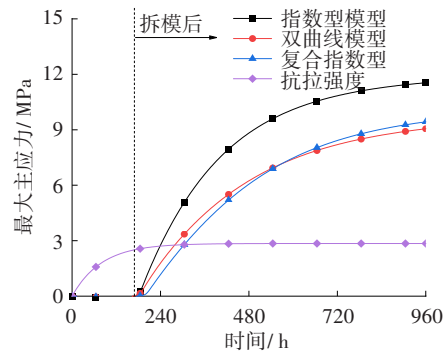
某一时刻产生的水化热量越大,混凝土内部温度越大,使混凝土的强度也越大。



(a) 新旧混凝土交接处



(b) 中腹板导角处

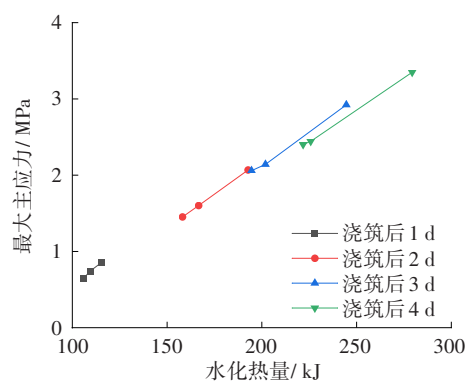


(c) 人孔处

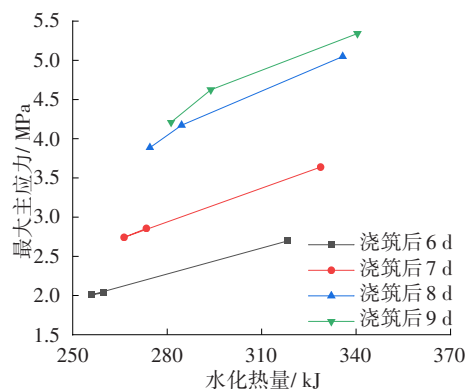
图14 最大主应力-抗拉强度时程曲线

Fig. 14 Maximum principal stress-tensile strength time course curves

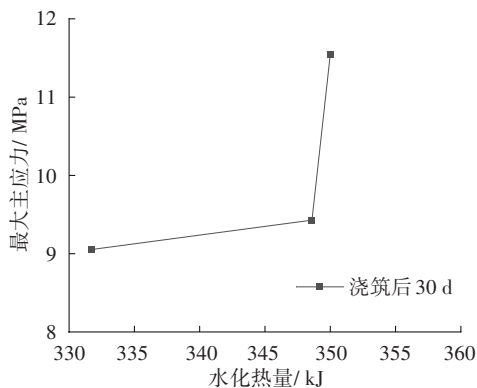
为证明该结论,绘制新旧混凝土交接位置、中腹板导角和人孔导角处第一主应力和该时刻水化热量 $Q_0$ 关系曲线,如图15所示。



(a) 新旧混凝土交接处



(b) 中腹板导角处



(c) 人孔处

图15 最大主应力-水化热量对比图

Fig. 15 Comparisons of maximum principal stress - heat of hydration

从图15可以看出,随着该时刻水化热量的增大,第一主应力也逐渐增大。特别是在新旧混凝土交接位置与中腹板导角处,水化热量与第一主应力之间近似呈线性关系,表明第一主应力受该时刻水化热的影响明显。在人孔处,水化热量与第一主应力之间未呈现线性关系。这是由于在人孔处,第一主应力达到应力峰值时,混凝土已完成浇筑30 d,各

模型水化放热速率趋近于0,第一主应力受该时刻的水化热量影响较小。

## 5 结论

1) 使用分层浇筑方法可降低混凝土峰值温度。相比于采用一次浇筑的方式,使用分层浇筑可使混凝土峰值温度降低11.8%。使用指数型模型温度峰值计算结果分别比指数型模型计算结果减小了12.07%和9.75%。

2) 基于UMAT二次开发,考虑早龄期弹性模量和抗拉强度的影响。在0~96 h时,新浇筑混凝土受到旧混凝土约束作用,最大主应力出现在新旧混凝土交接处。在96~272 h时,由于中腹板热量集中,最大主应力出现在中腹板导角位置。272 h后,由于拆模的影响,人孔附近对流换热速度较快,最大主应力出现人孔导角位置处。

3) 相比于一次浇筑的方式,分层浇筑可使新旧混凝土交接处、中腹板导角处和人孔导角处第一主应力分别降低的2.0%、36.7%和39.8%。考虑不同水化模型的影响,在新旧混凝土交接处和中腹板导角处,第一主应力峰值与该时刻水化热量之间近似呈线性关系。

4) 在具体实际工程施工时,建议分层浇筑,以便降低水化热温度峰值,降低因温度过高受到约束产生开裂风险;其次可在浇筑时降低入模温度,防止水化放热期间温度梯度过高的现象。

## 参考文献(References):

- [1] CHOI S, CHA S W, OH B H. Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings. Part 2: strain and stress[J]. Materials and Structures, 2011, 44 (7): 1347-1367. DOI: 10.1617/s11527-011-9752-7.
  - [2] MOORTY S, ROEDER C W. Temperature-dependent bridge movements[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118 (4): 1090-1105. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1992)118: 4(1090).
  - [3] 常赞. 箱梁0#块大体积砼施工水化热分析及现场降温应用[J]. 公路与汽运, 2021(3):106-109. DOI:10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.026.
- CHANG Zan. Analysis of hydration heat of mass

- concrete construction of box girder block 0<sup>#</sup> and application of field cooling[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2021 (3) : 106-109. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.026.
- [4] 张清旭, 宁晓骏, 陈旭, 等. 大体积混凝土承台水化热分析[J]. *交通科学与工程*, 2019, 35(2): 33-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.007.
- ZHANG Qingxu, NING Xiaojun, CHEN Xu, et al. Analysis of hydration heat of the mass concrete cap[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2019, 35 (2) : 33-37. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2019.02.007.
- [5] CHOI S, CHA S W, OH B H. Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings. Part 1: temperature and relative humidity [J]. *Materials and structures*, 2011, 44: 1325-1346.
- [6] FLAGA K, KLEMCZAK B, JEDREZEJEWSKA A. Early-age thermal-shrinkage crack formation in bridge abutments. Experiences and modelling [C]//Fib Symposium. Tel Aviv, Israel: Agnieszka Jedrzejewska, 2013.
- [7] LEE Yun, KIM J K. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model[J]. *Computers & Structures*, 2009, 87 (17-18): 1085-1101.
- [8] HUANG Yonghui, LIU Guoxing, HUANG Shiping, 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(12): 240-252.
- [9] KIM Jinkeun, KIM Kookhan, YANG Kyoung. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system[J]. *Computers & Structures* 2001, 79 (2): 163-171
- [10] 王解军, 李辉, 卢二侠. 大体积混凝土桥墩水化热温度场的数值分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(1): 124-128.
- WANG Jiejun, LI Hui, LU Erxia. Numerical analysis of hydration heat temperature field of mass concrete pier [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27(1): 124-128.
- [11] LI Fangyuan, SHEN Yin. Full-scale test of the hydration heat and the curing method of the wet joints of a precast segmental pier of a bridge [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017, 21(3): 348-370
- [12] GILLILANG JA, DILGER W H Monitoring concrete temperature during construction of the Confederation Bridge [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1997, 24(6): 941.
- [13] ABID S R. Three-dimensional finite element temperature gradient analysis in concrete bridge girders subjected to environmental thermal loads [J]. *Cogent Engineering* .2018, 5(1): 1-15.
- [14] GU Bin, ZHOU Fengyi, GAO Wang, et al. Temperature gradient and its effect on long-span prestressed concrete box girder bridge [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(9) : 1-18.
- [15] DONG Wei, LIU Yinghua, XIANG Zhihai. A numerical method for estimating the maximal temperature gradients reached in fire-damaged concrete structures based on the parameter identification [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2009, 46(1): 77-106.
- [16] TONG Yifei, GE Zhihao, ZHOU Xingchen, et al. Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elastic-plastic theory [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10 (5) : 1-12.
- [17] XU Hanzheng, YAN Xiaofeng. Numerical analysis of temperature influence on transverse cracks in concrete box-girder bridges [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 1-11.
- [18] LUKAS Krkoska, MORAVCIK Martin. The measurement of thermal changes on concrete box girder bridge [C]//MATEC Web of Conferences, Baghdad, Iraq: EDP Sciences, 2016.
- [19] 阮静, 万水, 叶见曙, 等. 混凝土箱梁温度场有限元分析[J]. *公路*, 2001, 46 (9) : 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2001.09.015.
- RUAN Jing, WAN Shui, YE Jianshu, et al. Temperature field finite element analysis of concrete box girder [J]. *Highway*, 2001, 46 (9) : 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2001.09.015.
- [20] 缪长青, 孙传智, 李爱群. 混凝土箱梁桥零号块水化热过程分析研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(4):



- intersections [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [27] 夏亮, 郭廷龙, 刘仰, 等. 基于多值CA模型的两轮车加速过程建模与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 112-119. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2017.01.016.
- XIA Liang, GUO Tinglong, LIU Yang, et al. Simulation and analysis of two-wheel vehicle acceleration based on multi-value CA model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 112-119. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2017.01.016.
- [28] 杨海飞, 陆建, 祁玥. 基于宏观运动波和微观元胞自动机的双车道交通流混合建模[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 773-778. DOI: 10.3969/j. issn.1001-0505.2012.04.037.
- YANG Haifei, LU Jian, QI Yue. Hybrid modeling of two-lane traffic flow based on macroscopic kinematic wave and microscopic cellular automata [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(4): 773-778. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2012.04.037.
- [29] 林琴, 龙科军. 基于改进CTM模型的城市快速路交通流仿真[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.008.
- LIN Qin, LONG Kejun. Urban expressway traffic flow simulation based on improved CTM model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 52-58. DOI: 10.3969/j. issn.1672-9331.2018.04.008.

(责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:刘至真)

(上接第89页)

- 407-413. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2010.04.006.
- MIAO Changqing, SUN Chuazhi, LI Aiqun. Analysis of hydration heat for block number zero of reinforced concrete beam bridge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 407-413. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2010.04.006.
- [21] 王琛, 高晓华, 边旭辉. 预应力混凝土单箱双室箱梁桥零号块水化热研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(10): 59-62.
- WANG Chen, GAO Xiaohua, BIAN Xuhui. Study on hydration heat of No. 0 block of prestressed concrete single-box double-chamber box girder bridge [J]. (Applied Technology Edition), 2011, 7(10): 59-62.
- [22] 刘守成. 预应力混凝土水化热结构耦合场分析: 以白河特大桥主桥箱梁0号、1号块为例[J]. 建筑, 2008(21): 41-43. DOI: 10.3969/j.issn.0577-7429.2008.21.015.
- LIU Shoucheng. Analysis of coupling field of hydration thermal structure of prestressed concrete—taking box girders No.0 and No.1 of main bridge of Baihe bridge as an example [J]. Construction and Architecture, 2008(21): 41-43. DOI: 10.3969/j. issn. 0577-7429.2008.21.015.
- [23] 任更锋, 常仕东, 张锦凯. 连续刚构桥零号块高强混凝土水化热效应分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 309-319. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2017.0309.
- REN Gengfeng, CHANG Shidong, ZHANG Jinkai. Analysis on high-strength concrete hydration heat effect of the zero block of continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(1): 309-319. DOI: 10.13624/j.cnki. issn.1001-7445.2017.0309.
- [24] 陈志清, 刘荣桂, 蔡东升, 等. 青弋江某特大桥箱梁零号块水化热温度场分析[J]. 混凝土, 2015(9): 142-145, 150. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2015.09.039.
- CHEN Zhiqing, LIU Ronggui, CAI Dongsheng, et al. Study on the hydration heat and temperature field in zero block of Qing Yi River Bridge [J]. Concrete, 2015(9): 142-145, 150. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3550.2015.09.039.
- [25] 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, 1999.
- ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

(责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)