

文章编号:1671-1637(2016)02-0018-09

承台大体积混凝土里表温差梯度与 温差应力有限元模拟

孙增智¹, 田俊壮¹, 石 强², 刘 伟², 陈华鑫¹, 徐勤武³, 张 奔¹

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 鄂尔多斯万里路桥集团有限责任公司,
内蒙古 鄂尔多斯 071000; 3. 奥斯汀交通建设集团, 德克萨斯 奥斯汀 78731)

摘 要:针对大体积混凝土因水化热引起的早期开裂问题,以内蒙古老山沟公路大桥承台为依托,建立了大体积混凝土三维有限元模型,分析了粉煤灰掺量、浇筑温度、环境温度与养护措施对承台中心温度、里表温差与表面拉应力的影响。模拟结果表明:混凝土表面拉应力随粉煤灰掺量增大而减小,当掺量超过30%时,降幅增大,中心温度、里表温差和表面拉应力均随其掺量增大而减小,可见掺加粉煤灰可有效降低混凝土水化热,防止表面温差裂缝的产生;当浇筑温度从5℃到30℃变化时,中心最高温度从40.3℃升至58.1℃,里表最大温差从8.6℃升至19.0℃,表面最大拉应力从0.93 MPa升至1.66 MPa,且随浇筑温度的增大,中心最高温度和里表最大温差产生的时间有所提前,表面拉应力呈线性增大趋势;里表温差和表面拉应力都随环境温度增大而减小,且表面拉应力与环境温度基本呈线性关系;养护条件越好,里表温差越小,表面拉应力明显降低,且前期表面拉应力增速减慢,峰值出现时间推迟,有利于裂缝控制。

关键词:材料工程;大体积混凝土;温度场;温差应力;数值分析;裂缝

中图分类号:U443.2

文献标志码:A

Finite element simulation of inside-outside temperature gradient and thermal stress for abutment mass concrete

SUN Zeng-zhi¹, TIAN Jun-zhuang¹, SHI Qiang², LIU Wei², CHEN Hua-xin¹,
XU Qin-wu³, ZHANG Ben¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Ordos Wanli Bridge Group Co., Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China;
3. The Transtec Group, Austin 78731, Texas, USA)

Abstract: Aimed at the earlier temperature cracks of mass concrete during construction, a 3D finite element model of mass concrete was built based on the abutment of Laoshangou Highway Bridge in Inner Mongolia, and the effects of content of fly ash, pouring temperature, environmental temperature, and maintenance measure on central temperature, temperature difference between inside and outside, and surface tensile stress of abutment were analyzed. Simulation result shows that the surface tensile stress of concrete increases with the content decrease of fly ash, the decline increases when the content exceeds 30%, and the central temperature, the temperature difference between inside and outside, and the surface tensile stress decrease with the increase of adding dosage of fly ash, so effective adding fly ash can reduce the

收稿日期:2015-12-13

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAE27B04);内蒙古自治区交通科技项目(20130333)

作者简介:孙增智(1969-),男,陕西商洛人,长安大学高级工程师,工学博士,从事道路材料研究。

hydration heat of concrete and prevent the occurrence of cracks due to the surface temperature difference. When the pouring temperature increases from 5 °C to 30 °C, the highest central temperature of concrete increases from 40.3 °C to 58.1 °C, the maximum temperature difference between inside and outside increases from 8.6 °C to 19.0 °C, and the maximum tensile stress increases from 0.93 MPa to 1.66 MPa. The highest central temperature of concrete and the maximum temperature difference between inside and outside appear in advance, and the surface tensile stress increases linearly along with the increase of pouring temperature. The temperature difference between inside and outside and the surface tensile stress decrease with the increase of environmental temperature, and the relationship between the surface tensile stress and the environmental temperature is linear basically. The better curing condition is, the smaller the temperature difference between inside and outside is, the slower the increase speed of surface tensile stress is, the later the occurred time of maximum surface tensile stress is, which are beneficial to control the cracks. 1 tab, 31 figs, 23 refs.

Key words: material engineering; mass concrete; temperature field; thermal stress; numerical analysis; crack

Author resume: SUN Zeng-zhi(1969-), male, senior engineer, PhD, +86-29-82334440, zzsun@chd.edu.cn.

0 引言

大体积混凝土浇筑后,由于水泥水化热大量释放且较为集中,导致中心温度急剧上升,当里表温差过大时,在大体积混凝土表面产生温差应力,会使混凝土表面出现温度裂缝,并进一步扩展为深层裂缝,影响结构安全与寿命,因此,大体积混凝土的裂缝控制问题已成为混凝土界关注的焦点^[1-3]。

关于大体积混凝土裂缝控制技术与理论研究是随着计算科学和试验检测技术的不断进步而逐步发展的,可追溯至19世纪,当时世界各国的科技工作者就以结构材料强度理论为基本出发点,研究混凝土开裂的基本原理与裂缝扩展演化机理,最早提出的唯象理论以均质、弹性、连续为基本假定,结合一些简单的基本试验,推导出各种计算材料强度的公式,后来又引进了材料流变学与塑性理论,对解决实际问题起到了巨大的理论支撑作用^[4]。科技的发展使得材料微观结构的研究测试手段日益先进、精密,伴随着对物质微观结构研究的深入,混凝土结构构造理论和分子强度理论被提了出来,但研究还不够系统、成熟。相比之下,采用热力学原理对混凝土结构内部由于水化反应放热引起的温度场变化进行理论计算、推演得到了较好运用^[5-6]。在计算温度变化规律的基础上建立科学合理的仿真模型,根据求解的温度应力采取相应的裂缝控制措施,在设计和施工过程中得到了普遍认可^[7-12]。

国内外已有一些关于大体积混凝土内外温度与裂缝控制的研究报导,李潘武等研究了大体积混凝土温度应力随浇筑温度的变化规律,得出温度应力随浇筑温度的升高而增大^[13-15];苗胜军等采用有限元方法分析了选择不同的混凝土对比对温度应力产生的影响^[16-17];Klemczak等对大体积混凝土早期水化热进行了模拟分析,总结了一些温控措施,但在裂缝控制有效程度上缺乏数据支持^[18-19];袁广林等分析了水泥品种对混凝土表面拉应力的影响,得出采用低水化热复合水泥能够有效地降低混凝土表面拉应力^[20-21];闫海华等研究了水泥品种和强度等级对混凝土温度应力的影响,分析结果表明在配置混凝土时采用高标号普通硅酸盐水泥有利于裂缝控制^[22]。

综上所述,国内外对于大体积混凝土温度场与应力的模拟大都是对单一因素的分析,对混凝土配比、环境温度、浇筑温度和养护条件等进行系统研究的较少,因此,本文以内蒙古自治区老山沟公路大桥为依托,利用ANSYS对承台大体积混凝土进行模拟,系统分析粉煤灰掺量、浇筑温度、环境温度与养护条件对承台大体积混凝土中心温度、里表温差与表面拉应力的影响规律,为大体积混凝土温差裂缝的控制提供参考。

1 承台三维有限元模型

1.1 模型建立与材料参数

老山沟公路大桥承台使用C30混凝土浇筑,设

计尺寸为 $8.0\text{ m} \times 17.2\text{ m} \times 2.4\text{ m}$, 采用 ANSYS 有限元软件研究大体积混凝土在施工期间的水化温度场和温差应力, 当灌注桩施工至地表设计高程后, 承台一次性浇筑于土基上, 土基尺寸为 $20\text{ m} \times 40\text{ m} \times 5\text{ m}$, 根据对称性原则, 取承台与土基的 $1/4$ 建立模型, 赋予材料热力学参数(表 1), 并进行网格划分(图 1)与温差应力计算^[23]。

表 1 材料计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of materials

参数	数值	参数	数值
混凝土密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 400	混凝土导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	2.97
土基密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 750	土基导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	2.39
混凝土比热/ [$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	0.976	混凝土线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	8.0×10^{-6}
土基比热/ [$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	0.995	混凝土导温系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	4.1×10^{-3}

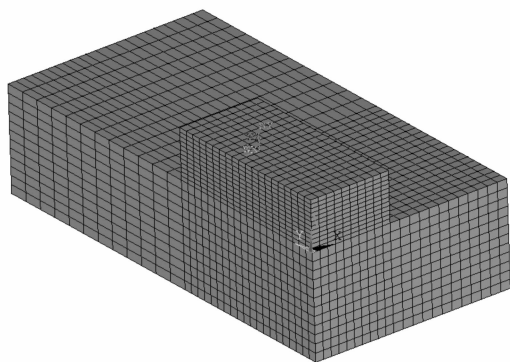


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

1.2 边界条件

(1) 热边界条件为假定承台底部与基底接触良好, 承台侧面及顶部与环境发生热交换。

(2) 位移边界条件为对称边界, 承台底部固定约束。

2 温度场与温差应力影响因素分析

早期表面裂缝是表面拉应力过大引起的, 影响早期表面拉应力的因素有混凝土配比、浇筑温度、环境温度与保温条件等, 各因素对承台中心温度峰值、内外温差与表面拉应力都有较大的影响。由于老山沟大桥位于薛家湾大路新区境内, 属于典型的中温带大陆性气候, 冬季寒冷, 夏季炎热, 春秋气温变化剧烈, 降水量少, 主要集中在夏、秋季。全年平均气温为 $6.2\text{ }^\circ\text{C} \sim 8.7\text{ }^\circ\text{C}$, 1 月份平均气温为 $-12.9\text{ }^\circ\text{C} \sim$

$-10.8\text{ }^\circ\text{C}$, 极端最低气温为 $-32.8\text{ }^\circ\text{C}$, 7 月份平均气温为 $25\text{ }^\circ\text{C} \sim 29\text{ }^\circ\text{C}$, 施工旺季 6~8 月份的平均气温约为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。本文在温度场模拟时, 外界气温取 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。在混凝土搅拌前对集料进行了冷水处理, 浇筑温度取 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1 粉煤灰掺量的影响

水泥采用冀东低水化热 425 矿渣硅酸盐水泥, 粉煤灰为 I 级粉煤灰, 外加剂采用聚羧酸高效减水剂, 砂为中砂, 石子采用 $4.75 \sim 31.5\text{ mm}$ 级配碎石, 拌合水为纯净河水。设计水灰比为 0.45 , 水泥、水、碎石、砂、外加剂的质量比为 $1.00 : 0.45 : 2.22 : 3.07 : 0.02$, 粉煤灰采用等量取代法, 掺量分别为: 0% 、 10% 、 20% 、 30% 、 40% , 浇筑温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 外界气温为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 2 cm 厚木板养护。由于施工中承台混凝土上表面容易产生早期裂缝, 因此, 取模型上表面中间节点为特征点做应力分析。由图 2~7 得出: 中心温度、里表温差和表面拉应力均随粉煤灰掺量增大而减小, 当粉煤灰掺量从 0% 到 40% 变化时, 承台中心最高温度从 $54.0\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $47.5\text{ }^\circ\text{C}$, 里表最大温差从 $16.4\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $12.8\text{ }^\circ\text{C}$, 表面最大拉应力从 1.60 MPa

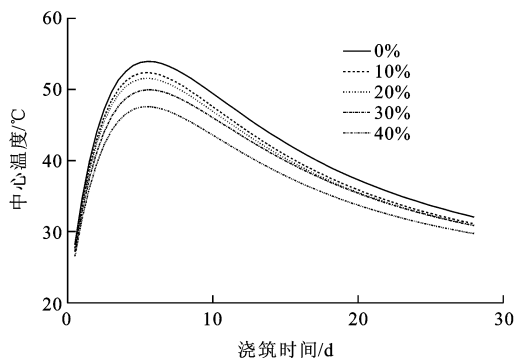


图 2 不同粉煤灰掺量下的中心温度与时间的关系曲线

Fig. 2 Relational curves of central temperature and time under different fly ash contents

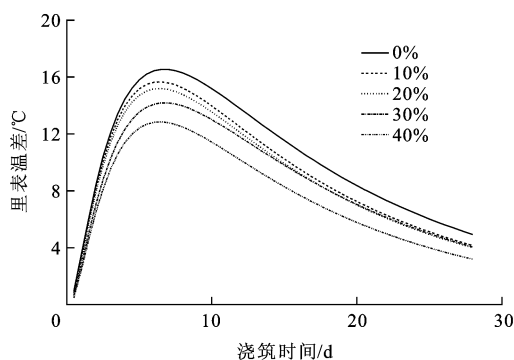


图 3 不同粉煤灰掺量下的里表温差与时间的关系曲线

Fig. 3 Relational curves of inside-outside temperature difference and time under different fly ash contents

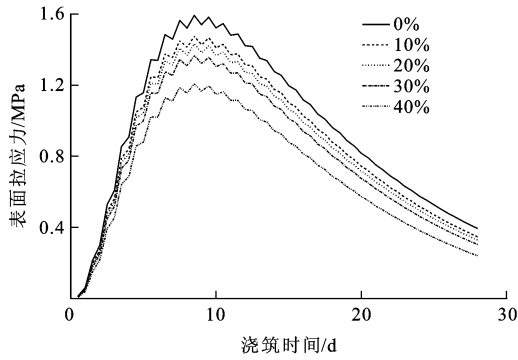


图4 不同粉煤灰掺量下的表面拉应力与时间的关系曲线

Fig. 4 Relational curves of surface tensile stress and time under different fly ash contents

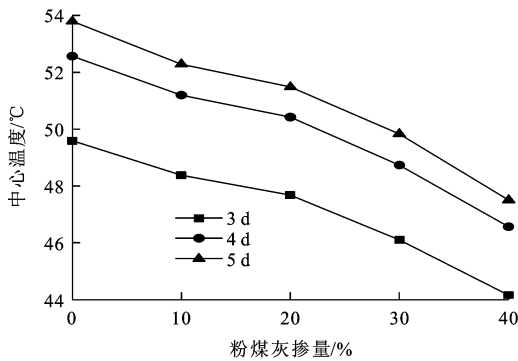


图5 中心温度与粉煤灰掺量的关系曲线

Fig. 5 Relational curves of center temperature and fly ash content

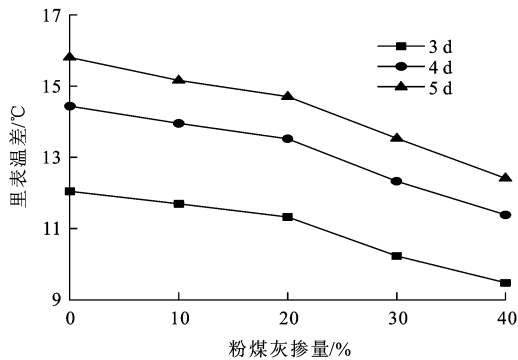


图6 里表温差与粉煤灰掺量的关系曲线

Fig. 6 Relational curves of inside-outside temperature difference and fly ash content

降至 1.20 MPa;掺量在 10%~30%变化时,混凝土表面拉应力随粉煤灰掺量变化基本呈线性关系,当掺量超过 30%时,降幅有所增大。由此可知:粉煤灰的掺加有效降低了混凝土水化热,中心温度、里表温差和表面拉应力均随其掺量增大而减小,能有效防止表面温差裂缝的发生。

2.2 浇筑温度的影响

当粉煤灰掺量为 30%,外界温度为 25℃,木板养护,浇筑温度在 5℃~30℃之间变化时,由图 8~13 得出;中心温度、里表温差和表面拉应力都随浇

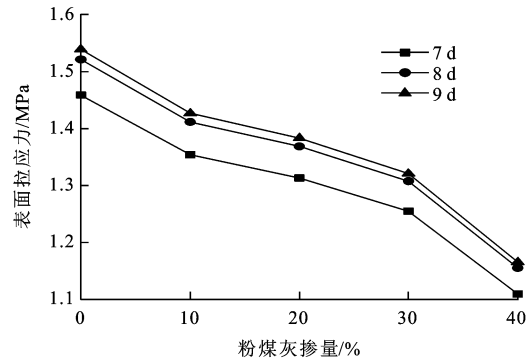


图7 表面拉应力与粉煤灰掺量的关系曲线

Fig. 7 Relational curves of surface tensile stress and fly ash content

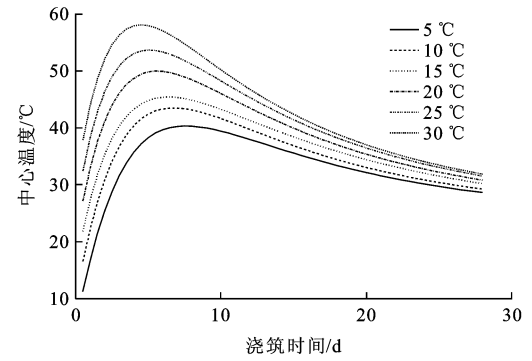


图8 不同浇筑温度下中心温度与时间的关系曲线

Fig. 8 Relational curves of central temperature and time under different pouring temperatures

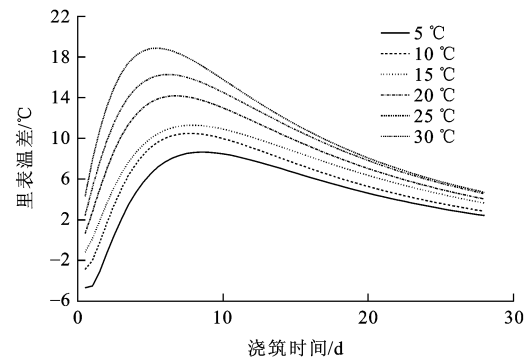


图9 不同浇筑温度下里表温差与时间的关系曲线

Fig. 9 Relational curves of inside-outside temperature difference and time under different pouring temperatures

筑温度增大而增大,且表面拉应力与浇筑温度呈线性关系,当浇筑温度从 5℃到 30℃变化时,中心最高温度从 40.3℃升至 58.1℃,前期升温速率逐渐增大,里表最大温差从 8.6℃升至 19.0℃,且中心最高温度和里表最大温差均随浇筑温度的增大使其发生的时间有所提前,表面最大拉应力从 0.93 MPa 升至 1.66 MPa。这表明:浇筑温度升高会使水泥的水化速度加快,从而使中心最高温度和最大里表温差发生的时间有所提前;浇筑温度对中心温度峰值

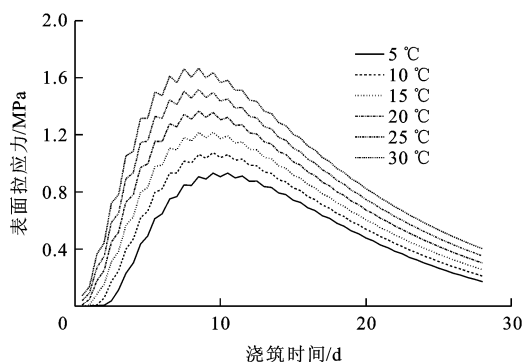


图 10 不同浇筑温度下表面拉应力与时间的关系曲线

Fig. 10 Relational curves of surface tensile stress and time under different pouring temperatures

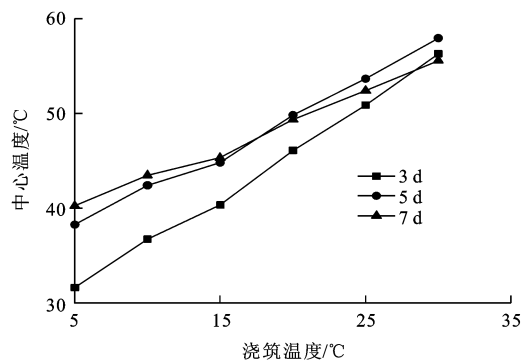


图 11 中心温度与浇筑温度的关系曲线

Fig. 11 Relational curves of center temperature and pouring temperature

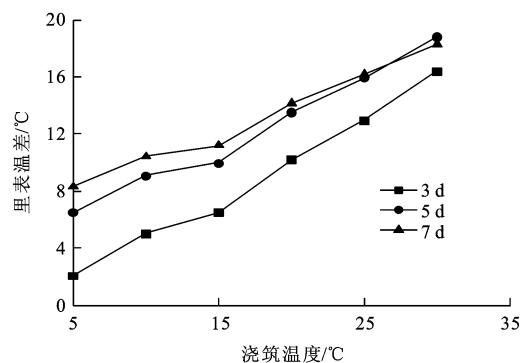


图 12 里表温差与浇筑温度的关系曲线

Fig. 12 Relational curves of inside-outside temperature difference and pouring temperature

与表面拉应力影响很大,当温度从 30 °C 降至 5 °C 时,中心最高温度降低了 18 °C,峰值出现时间推迟了 3 d,表面最大拉应力降低了 0.73 MPa。

2.3 外界环境温度的影响

当粉煤灰掺量为 30%,浇筑温度为 20 °C,木板养护,外界气温为 5 °C~30 °C 时,由图 14~19 得出:中心温度随外界环境温度的增大,中心温度前期温升速率相差较小,但峰值略有增大,后期降温速率明显减慢;里表温差和表面拉应力都随环境温度增大而减

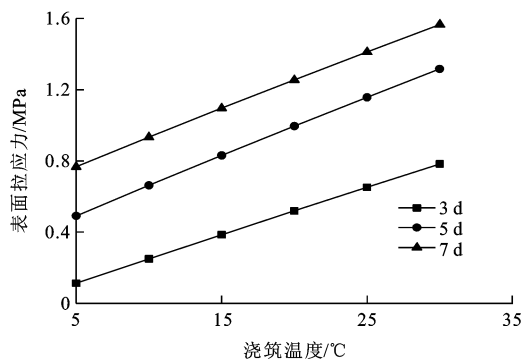


图 13 表面拉应力与浇筑温度的关系曲线

Fig. 13 Relational curves of surface tensile stress and pouring temperature

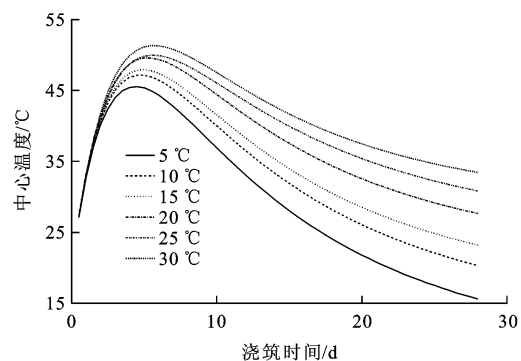


图 14 不同环境温度下中心温度与时间的关系曲线

Fig. 14 Relational curves of central temperature and time under different environmental temperatures

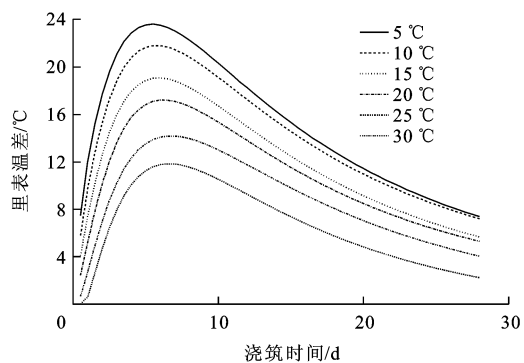


图 15 不同环境温度下里表温差与时间的关系曲线

Fig. 15 Relational curves of inside-outside temperature difference and time under different environmental temperatures

小,且表面拉应力与环境温度基本呈线性关系;当环境温度从 5 °C 升至 30 °C 时,混凝土内部最高温度从 45.5 °C 升至 51.3 °C,里表温差从 23.6 °C 降至 11.8 °C,表层拉应力从 2.3 MPa 降至 1.1 MPa,且应力峰值出现时间随环境温度升高有所推迟。由此表明:环境温度越高,混凝土放热量越大;环境温度较高时对防止温差开裂是有利的,但同时加快了水分蒸发,容易引起干缩开裂,所以夏季要注意混凝土表层保湿养护;环境温度较低时更易发生早期开裂,5 °C 时木板基本失去

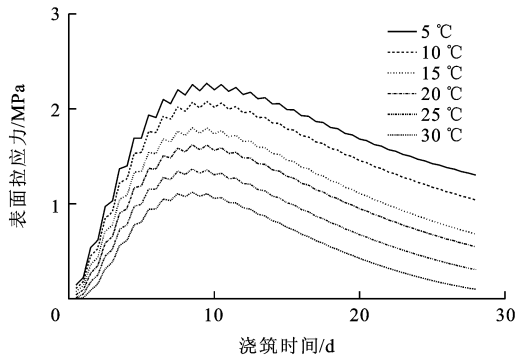


图 16 不同环境温度下表面拉应力与时间的关系曲线
Fig. 16 Relational curves of surface tensile stress and time under different environmental temperatures

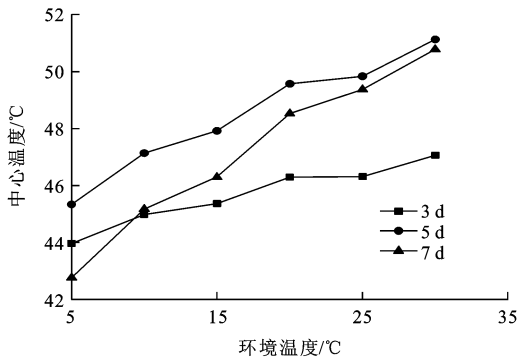


图 17 中心温度与环境温度的关系曲线
Fig. 17 Relational curves of central temperature and environmental temperature

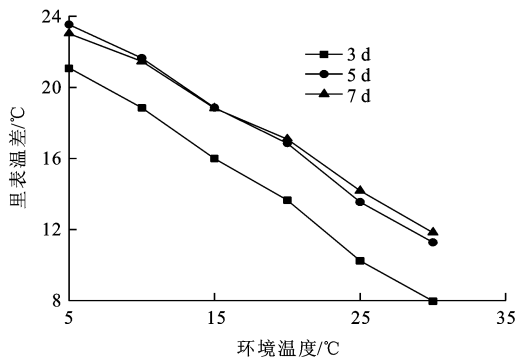


图 18 里表温差与环境温度的关系曲线
Fig. 18 Relational curves of inside-outside temperature difference and environmental temperature

防护作用,需加铺草袋或进行更好的养护措施,因此,冬季施工时,对保温养护措施的要求更严格。

2.4 养护条件的影响

当粉煤灰掺量为 30%,浇筑温度为 20 °C,外界温度为 25 °C 时,采取以下 5 种养护条件:裸露养护;2 cm 厚钢模养护;2 cm 木板养护;2 cm 钢模+2 cm 草袋养护;2 cm 木板+2 cm 草袋养护。图 20~27 显示:在 5 种不同的养护措施下,前期中心升温速率几乎是相同的,中心温度峰值为 49.1 °C~51.5 °C,

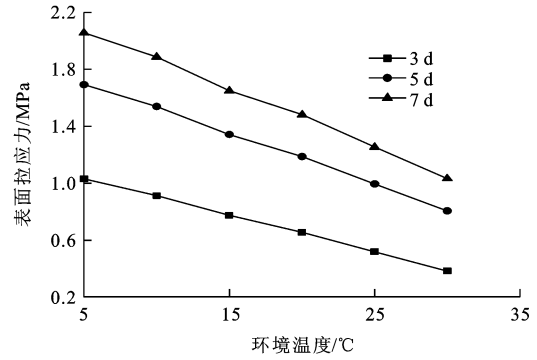


图 19 表面拉应力与环境温度的关系曲线
Fig. 19 Relational curves of surface tensile stress and environmental temperature

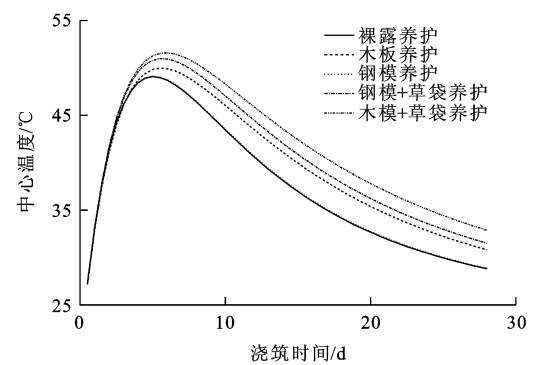


图 20 不同养护条件下中心温度与时间的关系曲线
Fig. 20 Relational curves of central temperature and time under different maintaining conditions

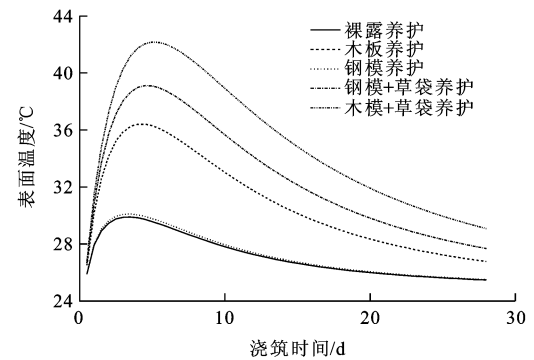


图 21 不同养护条件下表面温度与时间的关系曲线
Fig. 21 Relational curves of surface temperature and time under different maintaining conditions

变化不大,但降温速率有很大的差别,表面裸露与仅是钢模养护的降温速率最大,为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$,而 2 cm 木板加 2 cm 草袋养护的降温速率仅为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$;表面温度与里表温差随养护加强而变化明显,钢模基本无保温作用,与裸露相同,里表最大温差为 29.9 °C,木板+草袋保温效果最好,里表最大温差为 9.8 °C,且峰值出现时间推迟约 2 d,表面拉应力前期增速减慢,峰值出现推迟 2 d,仅有 1.06 MPa,但 16~28 d 应力降低速率较慢。由此得出:养护措

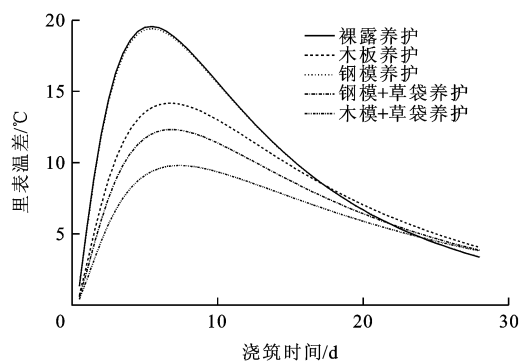


图 22 不同养护条件下里表温差与时间的关系曲线
Fig. 22 Relational curves of inside-outside temperature difference and time under different maintaining conditions

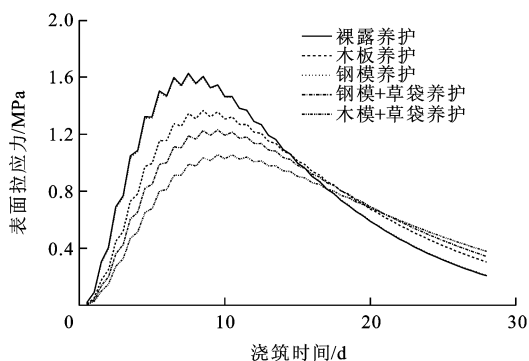


图 23 不同养护条件下表面拉应力与时间的关系曲线
Fig. 23 Relational curves of surface tensile stress and time under different maintaining conditions

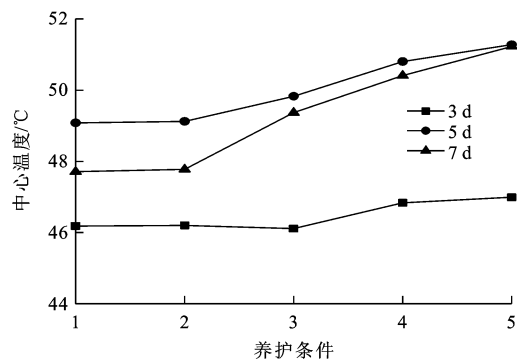


图 24 中心温度与养护条件的关系曲线
Fig. 24 Relational curves of center temperature and maintaining condition

施好则降温速率、里表温差与表面拉应力小，且应力峰值出现时间推迟，有利于裂缝控制；合理控制养护时间，在混凝土达到一定强度时，可以适当放松养护，使应力尽快释放。

3 基于模拟结果的大体积混凝土温差裂缝控制措施与实际效果

3.1 现场施工的裂缝控制措施

基于模拟结果，对老山沟大桥承台大体积混凝土

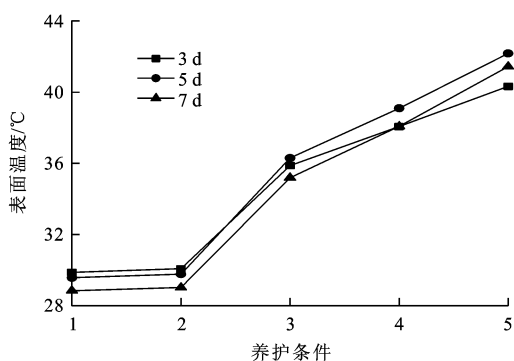


图 25 表面温度与养护条件的关系曲线
Fig. 25 Relational curves of surface temperature and maintaining condition

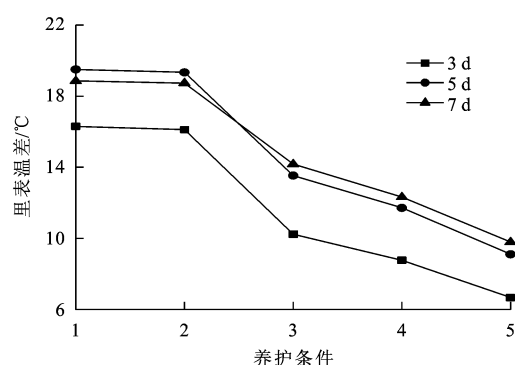


图 26 里表温差与养护条件的关系曲线
Fig. 26 Relational curves of inside-outside temperature difference and maintaining condition

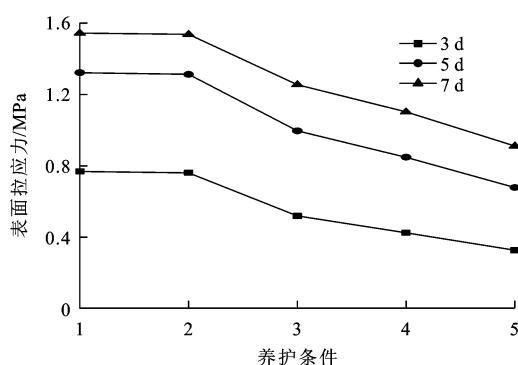


图 27 表面拉应力与养护条件的关系曲线
Fig. 27 Relational curves of surface tensile stress and maintaining condition

土采用了以下温差裂缝控制措施。

(1) 选用冀东低水化热 425 矿渣硅酸盐水泥，以便降低水泥水化热，减小混凝土绝对温升。

(2) 优化配合比，采用双掺技术，尽可能减少水泥用量。鉴于交通行业标准对掺量的限制，在老山沟大桥承台大体积 C30 混凝土中掺入 30% 的粉煤灰。

(3) 合理分层、分块，控制混凝土分层浇筑厚度。老山沟大桥承台施工采用泵送入模，严格控制混凝土

土分层浇筑厚度为每 40 cm 一层,自一侧向另一侧顺序错台浇筑(图 28),确保在进行上层混凝土浇筑时下层混凝土达到初凝,混凝土浇筑现场见图 29。

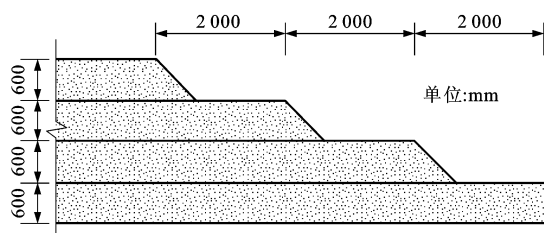


图 28 分层浇筑

Fig. 28 Layered pouring



图 29 浇筑现场

Fig. 29 Pouring scene

(4)选择浇筑时机,降低混凝土入模温度。采用冷水对粗骨料进行冲洗降温,并选择在夜间浇筑施工,现场混凝土入模温度基本控制在 20°C 以下。

(5)敷设冷却循环水管,内散外蓄降低内部温度。按照承台温差应力场特征,水平布置冷却水管,并埋设铂热电阻片测试混凝土内部的温度,采用 $\Phi 48\text{ mm}$ 的钢管,每个承台设 3 层,每层设 5 道,层距为 1.0 m,上、下层距表面和底面 0.5 m,同层间距为 1.0 m (图 30)。控制混凝土内外最大温差(混凝土浇筑块内最高温度与混凝土浇筑块的外表最低温度之差,其中混凝土浇筑块的外表温度为混凝土外表以内 50 mm 处的温度)不大于 25°C ,同时控制最大降温速率(浇筑混凝土内各点每天降温温差的最大值),

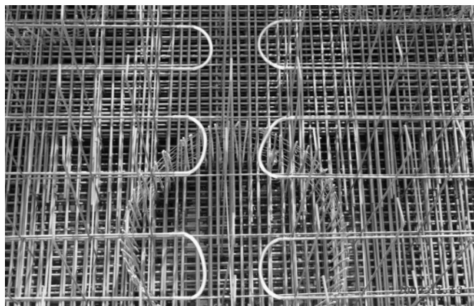


图 30 冷却循环水管

Fig. 30 Cooling circulating water pipes

小于 $2^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ 。通过测温点的实际测量值,根据内部各测点温度变化,及时调整冷却水的流量,从而控制温差。用水泵抽水,保证冷却水口有足够的压力,进出水管的水温相差在 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间。承台从开始浇筑至浇筑完混凝土后,保持半月内不间断注水,水压可根据天气和水化热温度情况适当调整,将出水口水温尽量控制在 40°C 以下。

(6)加强混凝土的振捣质量。在浇筑过程中配备 6 个插入式振动棒,分区负责,保证振捣质量,尤其是在钢筋密集处,必须保证其密实性和均匀性,防止出现过振与漏振现象。混凝土浇筑到设计标高后,除去表面浮浆,安排专人找平。为防止混凝土表面出现收缩裂缝,用木抹进行二次收浆找平(图 31)。



图 31 混凝土表面抹平

Fig. 31 Trowelling cement concrete surface

(7)及时保温养护。保温效果的好坏,对大体积混凝土温度裂缝控制至关重要。保护新浇混凝土的暴露面,以防止突然的降温,出现极端寒冷天气时,掩盖在棚内进行人工加热。在酷热季节,采用棚盖来防止新浇混凝土暴露面被日光直射,并同时用喷雾的办法来防止混凝土过早干燥。控制混凝土内外的温差及混凝土表面与空气的温差,避免出现深层裂纹和表面裂纹。考虑承台置于基坑内的条件,可采取蓄水养护,既可保温又可提供混凝土养护用水。在各种条件下,要求混凝土的养护至少在 14 d 以上。个别蓄水养护不到的部位应给予覆盖并经常洒水,保持混凝土表面湿润,不失水。

(8)加强温度监测。派专人对混凝土测温并做好详细记录,为下一次施工积累数据,并验证理论计算的准确性。

3.2 现场施工裂缝控制效果

通过以上措施控制,老山沟大桥承台大体积混凝土施工进度顺利,没有发生一起施工事故,混凝土表面平整光滑,没有出现温差裂缝,只出现少量肉眼不易分辨的细小表面裂纹,整体质量优良。从 2014 年大桥竣工运营至今,没有发现承台进一步出现裂缝

或旧裂纹扩展的情况,表明仿真模拟得出的规律对于指导实际施工具有实用价值。

4 结 语

(1)掺加粉煤灰有效降低了混凝土温升峰值和表面拉应力,当粉煤灰掺量超过 30%时,表面拉应力降幅有所增大。

(2)混凝土表面拉应力随浇筑温度的升高而增大,随气温的升高而减小,说明较低的浇筑温度和较高的外界温度有助于防裂。

(3)养护措施好则降温速率、温度梯度与表层拉应力小,且前期增速减慢,峰值出现时间推迟,有利于裂缝控制,在冬季更应该加强混凝土的保温养护。

(4)对承台大体积混凝土水化热的数值模拟计算得到的规律对指导实际施工具有实用价值,可供大体积混凝土施工参考。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1424-1432.
ZHU Bo-fang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1424-1432. (in Chinese)
- [2] 俞亚南, 张 巍, 申永刚. 大体积承台混凝土早期表面开裂控制措施[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(8): 1621-1628.
YU Ya-nan, ZHANG Wei, SHEN Yong-gang. Control measures for preventing crack on the surface of mass concrete abutment in early stage[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(8): 1621-1628. (in Chinese)
- [3] LIN Feng, SONG Xiao-bin, GU Xiang-lin, et al. Cracking analysis of massive concrete walls with cracking control techniques[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 12-21.
- [4] YIKICI T A, CHEN Hung-liang. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 802-812.
- [5] AMIN M N, KIM JS, LEE Y, et al. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stressmeasuring device[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3): 154-164.
- [6] CHU I, LEE Y, AMIN M N, et al. Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure[J]. Construction and Building Materials, 2013, 45: 192-198.
- [7] 罗超云, 李志生, 周 立. 嘉绍大桥承台超大体积混凝土无冷却水管温控技术研究[J]. 公路, 2012(7): 101-106.
LUO Chao-yun, LI Zhi-sheng, ZHOU Li. Technical research on temperature control of mass concrete without cooling water pipe of Jiashao Bridge pile cap[J]. Highway, 2012(7): 101-106. (in Chinese)
- [8] ZORDAN T, BRISEGHIELLA B, LIU Tao. Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 280-292.
- [9] LIU Xing-hong, ZHANG Chao, CHANG Xiao-lin, et al. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 449-459.
- [10] BRIFFAUT M, BENBOUDJEMA F, TORRENTI J M, et al. Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(4): 1390-1401.
- [11] MATTHIEU B, FARID B, TORRENTI J M, et al. Analysis of semi-adiabatic tests for the prediction of early-age behavior of massive concrete structures [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(5): 634-641.
- [12] HA J H, JUNG Y S, CHO Y G. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system[J]. Automation in Construction, 2014, 45: 16-24.
- [13] 李潘武, 曾宪哲, 李博渊, 等. 浇筑温度对大体积混凝土温度应力的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(5): 68-71.
LI Pan-wu, ZENG Xian-zhe, LI Bo-yuan, et al. Influence of placement temperature on mass concrete temperature stress[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 68-71. (in Chinese)
- [14] 李 涛, 张洵安, 高 娃. 基于 ANSYS 的大体积混凝土温度应力的研究[J]. 混凝土, 2010(12): 43-46.
LI Tao, ZHANG Xun-an, GAO Wa. Research on thermal stress of the mass concrete based on ANSYS[J]. Concrete, 2010(12): 43-46. (in Chinese)
- [15] LI Yan, NIE Lei, WANG Bo. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete[J]. Automation in Construction, 2014, 37: 203-210.
- [16] 苗胜军, 丛启龙, 任奋华, 等. 基于 ANSYS 的大体积混凝土的水化热模拟研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(2): 194-197.
MIAO Sheng-jun, CONG Qi-long, REN Fen-hua, et al. Simulation study of massive concrete hydration heat based on ANSYS[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(2): 194-197. (in Chinese)
- [17] KIM Y R, KHIL B S, JANG S J, et al. Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete[J]. Thermochimica Acta, 2015, 613: 100-107.
- [18] KLEMCZAK B A. Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures-comparative study of basic models[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 721-733.

(下转第 36 页)

- 67-73.
- [16] SINIBALDI M, BULIAN G. Towing simulation in wind through a nonlinear 4-DOF model: bifurcation analysis and occurrence of fishtailing[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 366-392.
- [17] 朱 升, 毛 军, 郗艳红, 等. 沉管隧道浮运水动力学性能的数值分析[J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1): 25-29, 34. ZHU Sheng, MAO Jun, XI Yan-hong, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of the immersed tube tunnel in tugging[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(1): 25-29, 34. (in Chinese)
- [18] 吕卫清, 吴卫国, 苏林王, 等. 港珠澳大桥沉管隧道长大管节水动力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(3): 138-144. LU Wei-qing, WU Wei-guo, SU Lin-wang, et al. Hydrodynamic experimental study on immersed tube tunnel element of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(3): 138-144. (in Chinese)
- [19] 胡晓明. 南京长江沉管隧道管节顶推浮运系统操纵性模型试验研究[J]. *武汉交通科技大学学报*, 2000, 24(4): 397-401. HU Xiao-ming. An experimental study of the maneuverability of a segment of submerged tunnel pushed by supernatant means[J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 2000, 24(4): 397-401. (in Chinese)
- [20] 沈浦根. 谈拖航阻力的估算[J]. *航海技术*, 2011(5): 9-12. SHEN Pu-gen. Discussion on the estimation of towing resistance[J]. *Marine Technology*, 2011(5): 9-12. (in Chinese)
- [21] KENNEDY J, EBERHART R. Particles swarm optimization[C]//IEEE. *IEEE International Conference on Neural Network*. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [22] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particles swarm theory[C]//IEEE. *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. New York: IEEE, 1995: 39-43.
- [23] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 129-134. XIE Xiao-feng, ZHANG Wen-jun, YANG Zhi-lian. Overview of particle swarm optimization[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 129-134. (in Chinese)
- [24] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//IEEE. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 1998: 69-73.

(上接第 26 页)

- [19] 季日臣, 夏修身, 陈尧隆. 承台大体积混凝土温度场计算与温控防裂措施[J]. *混凝土*, 2006(9): 92-94. JI Ri-chen, XIA Xiu-shen, CHEN Yao-long. Temperature field calculation and preventing crack measure in massive concrete about pillar abutment[J]. *Concrete*, 2006(9): 92-94. (in Chinese)
- [20] 袁广林, 黄方意, 沈 华, 等. 大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J]. *混凝土*, 2005(2): 86-88. YUAN Guang-lin, HUANG Fang-yi, SHEN Hua, et al. Research on temperature field and thermal stress of hydration heat in massive concrete of construction period[J]. *Concrete*, 2005(2): 86-88. (in Chinese)
- [21] 胡昌斌, 孙增华, 王丽娟. 水泥混凝土路面早龄期温度场性状与控制方法[J]. *交通运输工程学报*, 2013, 13(5): 1-9. HU Chang-bin, SUN Zeng-hua, WANG Li-juan. Characteristic and control method of early-age temperature field for cement concrete pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(5): 1-9. (in Chinese)
- [22] 闫海华, 李 东, 周红兵, 等. 大型基础承台水化热分析与裂缝控制[J]. *工业建筑*, 2005, 35(增): 862-866, 871. YAN Hai-hua, LI Dong, ZHOU Hong-bing, et al. Hydration heat analysis and crack control of large baseplate[J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(S): 862-866, 871. (in Chinese)
- [23] HONORIO T, BARY B, BENBOUDJEMA F. Evaluation of the contribution of boundary and initial conditions in the chemo-thermal analysis of a massive concrete structure[J]. *Engineering Structures*, 2014, 80: 173-188.