

钢筋混凝土空心板桥预制梁水化热分析研究

唐 杨¹, 王国伟², 王大为³

(1.五峰土族自治县农村公路管理所,湖北 宜昌 443413;

2.济南金衢公路勘察设计研究有限公司,山东 济南 250101;

3.温州市交通规划设计研究院,浙江 温州 325000)

摘要:以某钢筋混凝土空心板预制梁为例,采用 Midas FEA 建立三维实体有限元模型,计算分析表明,空心板预制梁的板厚较小,内部混凝土的温度上升幅度不大;不采取温控措施的情况下,在环境温度变化较大的地区空心板预制梁发生混凝土开裂的风险较大,其温度应力不可忽视;采取粘贴保温板、覆盖岩棉等相应温控措施后,空心板预制梁的温度应力可以完全控制在混凝土的抗拉强度范围之内;空心板预制梁在养生期受环境温度的影响较大,在预算充足的情况下,建议采取适当措施控制环境温度的变化幅度。

关键词:公路桥梁;空心板;预制梁;水化热;有限元分析

中图分类号: U441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0036-07

0 引言

空心板梁桥是中、小跨径桥梁常见的结构形式,目前针对空心板梁桥的研究主要集中在结构设计^[1]、结构受力^[2]、理论计算方法^[3]、病害加固^[4]和施工新技术^[5]等方面。

由于空心板梁板结构不具有大体积混凝土结构厚度大、一次性混凝土浇筑量大的特点,因而目前关于空心板梁板结构的水化热研究较少。相关文献资料表明,姚杰^[6]通过研究空心板的早期裂缝,对其出现早期裂缝的内部原因和外部原因进行详细剖析,结果表明水泥的水化热就是空心板出现早期裂缝的主要内部原因之一;张鹏程等^[7]针对连续厚板,在内部均匀设置空腔,分析了空心板的温度场和应力场,研究表明空腔可以改善内部传热环境、控制内部温升和减小温度应力;刘国波^[8]通过分析预制预应力空心板梁常见的质量通病后认为:施工环境温度是造成空心板开裂的重要原因之一。综合来看,针对空心板结构的水化热研究大都集中在定性分析上,缺乏针对具体工程案例的定量分析,同时在实际施工中尚未引起工程技术人员的足够重视。

以一片钢筋混凝土空心板预制梁为例,对其温度场和应力场进行计算分析,可为空心板预制梁的施工期养护提供理论参考。

1 工程概况

某上承式钢筋混凝土箱型拱桥的拱上建筑采用 11.2 m 跨径的 C40 装配式空心板简支梁结构,其中空心板预制中梁的截面尺寸如图 1 所示,预制梁的梁高 0.6 m,顶板宽 1.39 m,底板宽 1.49 m,顶板与底板的厚度均为 0.08 m,空心板的空心截面形状为圆形,直径为 0.44 m。

空心板预制前首先需要整平场地、浇筑混凝土台座,混凝土台座浇筑采用 C25 混凝土,再于混凝土台座上铺

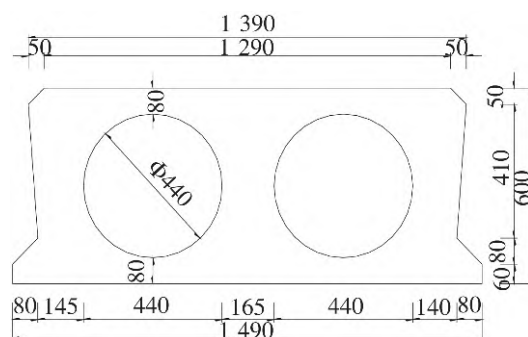


图1 空心板预制中梁截面尺寸(单位:mm)

收稿日期:2022-06-13 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20220168

作者简介:唐杨(1992—),男,助理工程师,研究方向为桥梁结构理论和工程结构数值仿真。E-mail:2312083669@qq.com

唐杨,王国伟,王大为.钢筋混凝土空心板桥预制梁水化热分析研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):36-41.

设 3 cm 厚的钢板作为底模,端模和侧模均采用 1 cm 厚钢板,内模采用 3.2 mm 厚度的固定气囊,固定气囊是采用橡胶和纤维织物结合硫化而成^[8-10]。

2 分析理论

2.1 热传导微分方程

混凝土结构在实际工作条件下的热传导微分方程^[11]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为温度场,表示温度在时间域和空间域的分布; t 为时间; λ 为导热系数; c_p 为质量定压热容; ρ 为密度; θ 为绝热温升; x 、 y 、 z 为空间域的 3 个坐标方向。

2.2 初始条件

大多数情况下,初始时刻的温度场可以视为一个常量,初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = C \quad (2)$$

式中, T 为温度场; C 为常量。

2.3 边界条件

边界条件通常有 4 类^[12]。

第 1 类边界条件为边界温度是时间的已知函数,数学表达式为

$$T = f(t) \quad (3)$$

式中, T 为温度场; $f(t)$ 为时间的函数。

第 2 类边界条件为物体表面的热流量是时间的函数,数学表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = f(t) \quad (4)$$

式中, λ 为导热系数; n 为表面外法线方向。

第 3 类边界条件为已知物体表面对流热交换情况,数学表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (5)$$

式中, β 为表面热交换系数; T 为物体表面温度; T_a 为环境温度。

第 4 类边界条件为 2 种固体接触良好,则接触面上的温度和热流量都是连续的,数学表达式为

$$T_1 = T_2, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \quad (6)$$

式中, T_1 、 T_2 分别为 2 种接触良好固体的温度。

3 关键分析参数确定

3.1 绝热温升

混凝土结构不与外界发生任何热交换,将混凝土的水化热全部转化为混凝土的温度值,称为绝热温升^[13],计算为

$$T(t) = \frac{WQ}{C\rho} (1 - e^{-mt}) \quad (7)$$

式中, $T(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的绝热温升; W 为单位体积混凝土的胶凝材料用量; Q 为单位质量胶凝材料的水化热总量; C 为混凝土的比热容; ρ 为混凝土的密度; t 为混凝土龄期; m 为常数,随水泥品种、比表面积及浇筑温度的不同而不同。

3.2 传热系数

根据混凝土表面采用不同的保温材料,其传热系数为^[14]

$$\beta = \frac{1}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_q}} \quad (8)$$

式中, β 为保温层的热传系数; β_q 为空气层的热传系数, 取 $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; λ_i 为各保温层材料的导热系数; δ_i 为各保温层材料的厚度。

3.3 混凝土弹性模量

根据文献[15]规定, 混凝土的弹性模量为

$$E(t) = kE_0(1 - e^{-ct^b}) \quad (9)$$

式中, $E(t)$ 为龄期 t 时的弹性模量; t 为计算混凝土龄期; k 为混凝土中掺合料对弹性模量的修正系数; E_0 为混凝土最终弹性模量, 一般近似取标准养护条件下 28 d 龄期的弹性模量; c 为系数, 应通过试验确定, 无试验数据时可近似取 0.4; b 为系数, 应通过试验确定, 无试验数据时可近似取 0.6。

3.4 混凝土抗拉强度

文献[13]表明, 混凝土的轴心抗拉强度在一定情况下是混凝土的真实抗拉强度, 控制混凝土开裂应以轴向抗拉强度为依据, 混凝土的轴心抗拉强度标准值为

$$f_{tk}(t) = f_{tk}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (10)$$

式中, $f_{tk}(t)$ 为 t 龄期的轴心抗拉强度; f_{tk} 为 28 d 龄期的轴心抗拉强度标准值; γ 为系数, 应通过试验确定, 无试验数据时可近似取 0.3。

3.5 环境温度

环境温度通常采用正弦函数和常数函数拟合。当昼夜温差较为显著时, 采用正弦函数拟合环境温度的变化, 正弦拟合函数为^[16]

$$F(t) = T \sin \left[\frac{2\pi}{24} (t + t_0) \right] + T_0 \quad (11)$$

式中, $F(t)$ 为环境温度; t 为时间; t_0 为迟延时间; T 为环境温度变化幅度; T_0 为平均温度。

当环境温度变化幅度不大时, 可简化为常数函数近似模拟环境温度。

3.6 抗裂性能评价

文献[13]表明, 混凝土的抗裂性能判断

$$\frac{\lambda f_{tk}(t)}{\sigma_1} \geq K \quad (12)$$

式中, λ 为掺合料对混凝土抗拉强度的影响系数; $f_{tk}(t)$ 为 t 龄期的轴心抗拉强度标准值; K 为混凝土抗裂安全系数, 通常取 1.15。

4 模型建立

空心板预制梁的水化热分析采用 Midas FEA NX 有限元分析软件, 该程序在水化热分析领域具有较为广泛的应用。

为了节约计算资源, 由于各种边界条件和荷载的对称性, 具体建模时仅仅建立 1/4 模型。建模时除了建立预制梁、钢板、混凝土台座的几何模型外, 考虑四周一定范围内土体的传热, 材料的属性参数见表 1。在几何模型建立中, 将 1/4 模型的土体几何大小设置为 $(1.49 \times 6.325 \times 1.0) \text{ m}$ 。几何模型采用自由网格划分技术划分网格, 有限元模型如图 2 所示。

在计算分析中, 考虑预制梁混凝土的收缩徐变, 根据文献[17]设置以下计算参数: 28 d 龄期的立方体抗压强度为 40 MPa, 开始收缩时的混凝土龄期为 3 d, 周围环境的相对湿度为 70%, 由于采用一般的硅酸盐水泥, 故而将水泥系数设置为 5。

在边界上, 施加 2 个方向的对称边界条件, 同时施加土体底部固结和土体四周边界的法向支撑。在荷载上, 考虑热源、固定温度和对流。由于空心板预制梁浇筑时混凝土台座已经浇筑较长时间, 其温度已经趋于稳定, 热源荷载仅仅考虑预制梁部分。热源根据预制梁 C40 混凝土的配合比: 水: 水泥: 砂:

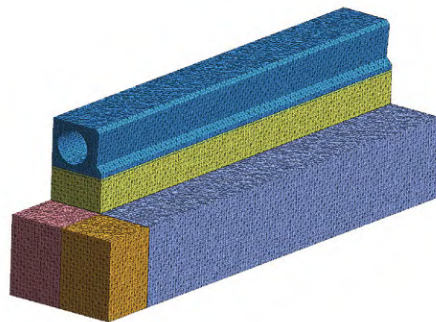


图 2 有限元模型

石=0.41 : 1 : 1.086 : 2.310, 换算得到单位体积混凝土中 42.5 级水泥用量为 513 kg, 查得 42.5 级水泥的最终水化热为 377 kJ/kg, 根据式(7)计算得到最大绝热温升为 80.58 ℃, m 根据入仓温度 15 ℃取 0.34, 从而得到完整的热源函数, 混凝土的绝热温升随龄期的变化规律如图 3 所示。

表 1 材料参数表

材料	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 弹性 模量/MPa	泊松比	热膨胀 系数/ 10^{-5}	比热容/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	导热系数/ $\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
C40 混凝土	25.0	32 500	0.2	1.0	0.960	10.600
C25 混凝土	25.0	28 000	0.2	1.0	0.960	10.600
钢板	78.5	210 000	0.3	1.2	0.460	208.800
周边土	20.0	10	0.2	1.0	0.784	7.128

对流系数采用式(8)进行计算, 根据钢材的热传系数 58 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 计算得到端模和侧模位置的对流系数为 22.9 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 由于空心板预制梁顶面浇筑后暂时直接与空气接触, 计算得到对流系数为 23 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 周边土的顶面同样与空气直接接触, 故而设定相同的对流系数; 参照与固定气囊的材料较一致的各种橡胶制品的导热系数, 将固定气囊的导热系数确定为 0.18 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 计算得到与固定气囊接触的空心板内腔的对流系数为 0.13 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由于空心板混凝土中不加入掺合料, 查询得到混凝土弹性模量的修正系数 $\beta=1$, 根据式(9)取 b 、 c 的近似值, 得到预制梁混凝土的弹性模量随龄期的变化规律如图 4 所示。由式(10)得到预制梁混凝土的抗拉强度随龄期的变化规律如图 5 所示。

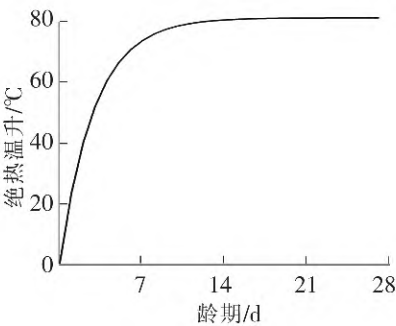


图 3 预制梁混凝土的绝热温升

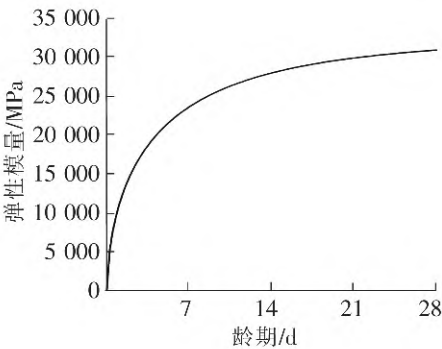


图 4 预制梁混凝土的弹性模量

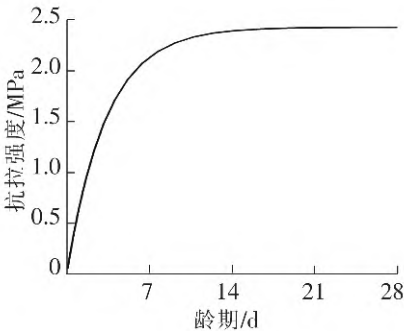


图 5 预制梁混凝土的抗拉强度

周边土的底面和四周不考虑温度的变化, 设定为固定温度 18 ℃。在环境温度的设置上, 根据近期的天气预报和计划浇筑时间计算得到环境平均温度为 20 ℃, 环境温度变化幅度为 9 ℃, 迟延时间为 0, 从而得到环境温度随龄期的变化规律如图 6 所示。

计算分析时间段设置为预制梁混凝土浇筑完成后 28 d 时间, 收敛判断准则设置为位移与内力双控。由于预制梁混凝土拌合时采用预冷骨料、加冰等办法^[13]控制混凝土的初始温度, 在计算中将初始温度设置为 15 ℃。

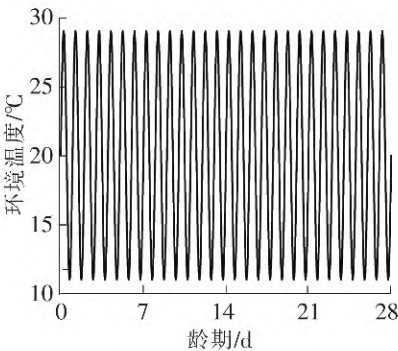


图 6 环境温度随龄期的变化

5 计算结果分析

通过计算,提取 28 d 内各龄期预制梁的温度变化情况和第一主应力变化情况,预制梁的最高温度与最低温度变化情况如图 7 所示;通过与 C40 混凝土相应龄期的抗拉强度对比,预制梁的拉应力最大值变化情况如图 8 所示。

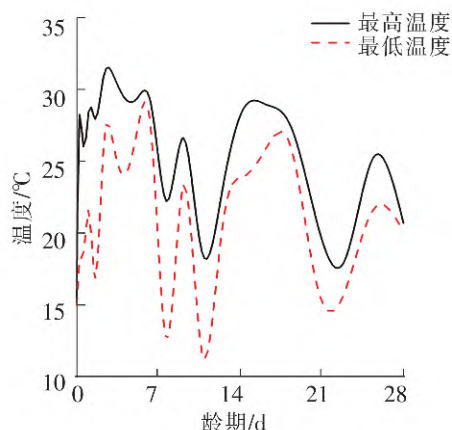


图 7 预制梁温度变化曲线

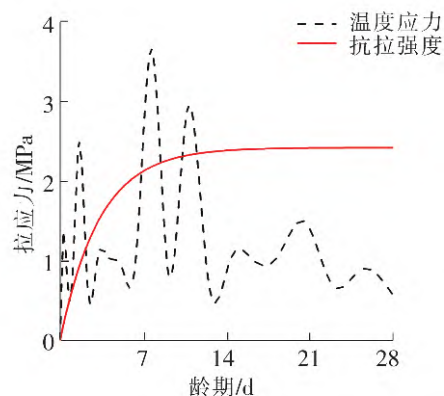


图 8 预制梁温度应力最大值变化曲线

由图 7 可见:预制梁的最高温度为 31 °C,出现在 3.1 d 附近;最大温差为 11.1 °C,出现在 1.59 d 附近。由此可见,预制梁在养生阶段未采用温控措施时,环境温度对预制梁的温度场影响较大。

由图 8 可见:预制梁在 28 d 内的温度应力存在较多时段超过其混凝土的抗拉强度,其主要时段为 0~2 d、7~8 d 以及 10.5~11 d;预制梁的温度应力最大值出现在 7~8 d 时间段,达到 3.64 MPa,远超预制梁此时的抗拉强度,发生开裂风险极大。

针对以上情况,对预制梁采取相应温控措施,具体措施如下:在侧模和端模表面粘贴 5 cm 厚的挤塑聚苯保温板,在预制梁的顶面覆盖 4 cm 厚的岩棉。相关资料表明挤塑聚苯保温板的导热系数为 0.028 W/(m²·°C)、岩棉的导热系数为 0.04 W/(m²·°C),根据式(8)计算得到侧模和端模表面的对流系数为 0.55 W/(m²·°C),预制梁顶面的对流系数为 1.26 W/(m²·°C)。

通过计算分析,得到预制梁的最高温度与最低温度变化情况如图 9 所示,拉应力最大值变化情况如图 10 所示,与之对应的预制梁抗裂情况如图 11 所示。

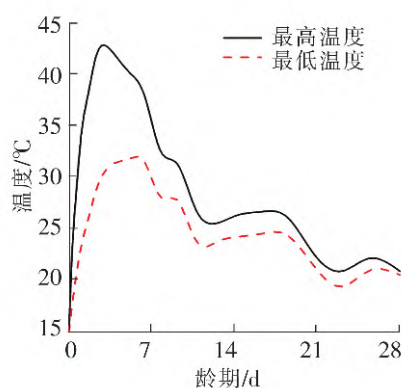


图 9 温控后预制梁温度变化曲线

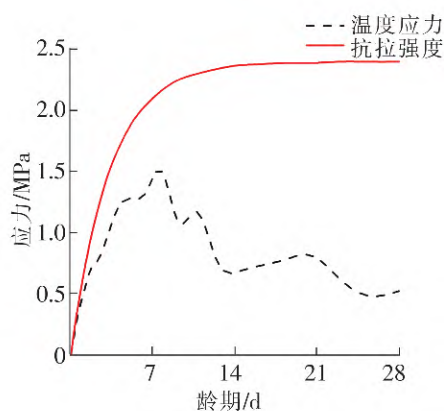


图 10 温控后预制梁温度应力最大值变化曲线

由图 9 可见:预制梁的最高温度为 42.82 °C,仍旧出现在 3.1 d 附近;最大温差为 13.06 °C,出现在 2.29 d 附近。从预制梁温度变化的总体趋势上看,在采取温控措施后,预制梁的温度变化波动减少,结构温度在 3 d 附近达到最大值后,温度总体呈现下降趋势。

由图 10 可见:采取温控措施后,28 d 龄期内预制梁的拉应力均控制在 C40 混凝土的抗拉强度范围以内;预制梁的温度应力总体上呈现先增大后减小的变化趋势;在养生阶段的初期,0~1 d 时间段,预制梁的温度应力与抗拉强度较为接近;在 1~7.68 d 时间段,预制梁的温度应力与抗拉强度开始缓慢拉开距离;7.68 d 以后,温度应力呈下降趋势,预制梁的抗拉强度仍在不断上升。

由图 11 可见:在整个 28 d 龄期内,仅仅在 0~0.25 d 时间段的计算抗裂系数(接近于 1 且大于 1)低于抗裂安全系数 1.15,0.25~9 d 时间段的计算抗裂系数处于较低状态(小于 2),龄期在 9 d 之后,计算抗裂系数整体呈现上升趋势。

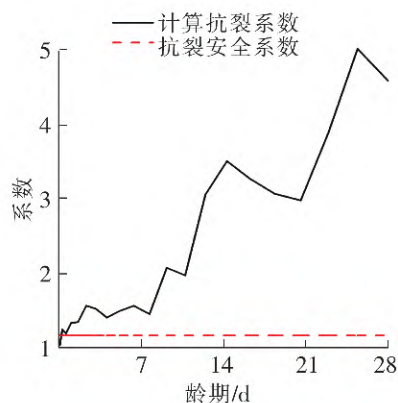


图 11 预制梁抗裂系数

6 结论

通过对空心板预制梁的水化热分析,可以得到以下结论:

(1)由于环境温度变化幅度较大,在空心板养生期间应采取相应保温措施,避免空心板预制梁温度应力过大造成混凝土开裂。

(2)采取相应保温措施后,空心板预制梁的温度受环境温度的影响变小,温度应力可以有效控制在混凝土的抗拉强度以内。

(3)空心板预制梁 0.25 d 以前的计算抗裂系数低于抗裂安全系数,其开裂风险仍然较大,此时除了加强保温措施以外还应当加强环境温度的监测,建议在预算充足的情况下采取措施控制环境温度的变化。

(4)空心板预制梁的板厚较小,混凝土内部的温度上升程度有限,当环境温度波动较大且保温措施不完善的情况仍然可能产生不容忽视的拉应力,需要引起更多工程技术人员的重视。

参 考 文 献

- [1]郑一峰,徐斌,雷刚.装配式空心板梁榫卯结构设计研究[J].世界桥梁,2021,49(5):52-58.
- [2]储兵.空心板梁桥深铰缝受力性能研究[J].公路,2021,66(11):178-181.
- [3]雷亮.基于梁格法的装配式简支空心板梁桥计算分析[J].黑龙江交通科技,2017,40(1):111-112.
- [4]赵洁,袁良东,宋福春.基于空心板梁桥的钢波纹板—混凝土拱加固体系简化计算方法研究[J].北方交通,2019(7):5-9.
- [5]王凯,单建军.南四湖二级坝除险加固工程预制空心板梁一次性浇筑施工方法[J].治淮,2021(12):50-51.
- [6]姚杰.钢筋混凝土空心板早期裂缝成因及防治[J].辽宁交通科技,2003(2):56-57.
- [7]张鹏程,徐继东.内部预埋空腔的混凝土厚板温度效应试验研究与计算模拟[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(3):302-306,375.
- [8]刘国波.浅析预制预应力空心板梁常见的质量通病及预防应对措施[J].建材与装饰,2016(9):243-244.
- [9]刘军,彭明.浅谈后张拉法预应力空心板梁预制施工技术[J].四川水力发电,2016,35(6):41-44,83.
- [10]万田泉,徐凤飏.预应力混凝土空心板的预制施工技术探讨[J].交通建设与管理,2014(14):132-134.
- [11]梁飞.混凝土箱形连续梁渡槽温度效应研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [12]朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [13]王新钢.大体积混凝土温度应力实用计算方法及控裂工程实例[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [14]葛俊颖.桥梁工程软件 Midas civil 使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [15]中交武汉港湾工程设计研究院有限公司. JTS 202-1—2010 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [16]王国炜,张国梁,唐杨,等.环境温度对空心墩墩底段水化热温度场和应力场的影响研究[J].中原工学院学报,2021,32(4):38-43.
- [17]中交公路规划设计院有限公司. JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2018.

(下转第 72 页)

2. Luoyang Traffic Engineering Quality Appraisal Station, Luoyang 471000, China;

3. Maintenance Department of Luoyang Highway Development Center, Luoyang 471000, China;

4. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co.Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The surface roughness of cement concrete bridge deck was characterized by structural depth index, and the influence of structural depth on the performance of bridge deck pavement was studied. Four kinds of concrete slabs with different surface structure depths (0, 0.4, 0.8, 1.2 mm) were designed indoors. The composite specimens of bridge deck pavement were prepared from the above concrete slabs. The pull-off strength, shear strength, interlaminar lateral seepage and fatigue characteristic of several composite specimens were measured. The results showed the pull-off strength varied with the increase of the structural depth due to the type of bonding materials. In a certain range, increasing the structural depth could improve the shear stability between the pavement layers, but might have adverse impact on the interlaminar lateral seepage and fatigue characteristics between the layers.

Key words: surface structure depth; pull-off strength; shear strength; interlaminar lateral seepage; fatigue characteristic

(上接第 41 页)

Analysis and Research on Hydration Heat of Reinforced Concrete Hollow Slab Bridge Precast Beams

Tang Yang¹, Wang Guowei², Wang Dawei³

(1. Countryside Highway Administration Bureau of Wufeng Tujia Autonomous County, Yichang 443413, China;

2. Jinan Jinqu Road Survey Design Research Co. Ltd., Jinan 250101, China;

3. Wenzhou Traffic Planning and Design Institute, Wenzhou 325000, China)

Abstract: With a reinforced concrete hollow slab precast beam as an example, Midas FEA was used to establish a three-dimensional solid finite element model. The calculation and analysis show that the thickness of the hollow slab precast beam is small, and the temperature rise of the internal concrete is not large. Under the condition that the temperature control measures are not taken, the concrete cracking risk of the hollow slab precast beam in areas with large changes in ambient temperature is high, and the temperature stress cannot be ignored. After taking corresponding temperature control measures such as pasting thermal insulation boards and covering with rock wool, the temperature stress of the hollow slab prefabricated beam can be completely controlled within the tensile strength range of concrete. Hollow slab precast beams are greatly affected by the ambient temperature during the curing period. Under the circumstance that the budget is sufficient, it is recommended to take measures to control the variation of the ambient temperature.

Key words: highway bridge; hollow slab; precast beam; hydration heat; finite element analysis