

文章编号:1673-2049(2019)01-0067-09

相变混凝土箱梁温度-应力场耦合分析

郭增伟, 陈旦, 周建庭, 王宇

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:为控制混凝土箱梁日照温度梯度所产生的主拉应力,采用稻壳灰封装石蜡作为相变材料制备具有“结构+功能”一体化功效的相变混凝土,通过试验探究了稻壳灰-石蜡相变混凝土的热稳定性及其热工、力学参数,并以实际工程为背景讨论了相变混凝土铺设厚度和位置对单箱多室箱梁的梯度温度效应影响。结果表明:稻壳灰-石蜡相变混凝土具有良好的相变稳定性,多次相变循环后石蜡不会出现大量渗漏现象,但相变混凝土强度会有所下降;将铺装层下一定厚度普通混凝土替换为相变混凝土后,箱梁顶板内温度有明显降低,且梯度温度拉应力有10%的下降;铺装层厚度相等条件下,箱梁顶板最大温度应力随着相变混凝土厚度的增加先减小后增加,边腹板和中腹板内温度应力则随着相变材料厚度的增加呈现单调递减的趋势;随着沥青铺装层厚度的增加,相变混凝土层对温度应力的改善效果逐渐下降;腹板和承托对应的顶板区域是影响箱梁梯度温度应力场的敏感部位,而悬臂板和内箱上部所对应的顶板区域内相变混凝土则基本不影响箱梁最大温度应力;箱梁内室数量虽然不能改变边腹板内温度竖向分布规律,但箱梁最大温度应力会随箱梁内室的增多而增大,在箱梁顶板活载强度能满足要求的前提下应尽量减少中腹板的数量,以减小温度自应力。

关键词:桥梁工程;相变混凝土;单箱多室箱梁;梯度温差;温度应力

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Coupling Analysis of Temperature and Stress Field of Phase Change Concrete Box Girder

GUO Zeng-wei, CHEN Dan, ZHOU Jian-ting, WANG Yu

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to control the principal tensile stress of concrete box girder induced by temperature gradient of sunshine, phase change concrete with “structure and function” integration effect by mixing rice husk ash encapsulated paraffin as phase change material. Thermal stability of the rice husk ash-paraffin phase change concrete as well as its thermal and mechanical parameters were tested by experiment, and the influence of thickness and laying position of phase change concrete on principal tensile stress of concrete box girder induced by temperature gradient of sunshine were discussed based on practical project. The results show that the rice husk ash-paraffin phase change concrete has good phase change stability, and there is no serious leakage of paraffin after multiple phase change cycles, while the concrete strength decreases. The temperature on the top of box girder decreases obviously and the tensile stress of the gradient temperature decreases by 10% when the ordinary concrete with a certain thickness

收稿日期:2018-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51878106);重庆市前沿与应用基础研究计划项目(cstc2015jcyjBX0022);

桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金项目(201501)

作者简介:郭增伟(1985-),男,河南林州人,副教授,工学博士,E-mail:zengweiguoc@cqjtu.edu.cn。

under the pavement is replaced by the phase change concrete. When the thickness of the pavement is equal, the maximum thermal stress on the top of box girder firstly decreases and then increases with the increase of the thickness of phase change concrete, while the thermal stresses in side web and middle web decrease monotonously with the increase of the thickness of phase change material. However, with the increase of the thickness of asphalt pavement, the improvement effect of phase change concrete layer on temperature stress decreases gradually. The roof area corresponding to the web and chamfer are sensitive parts which affect the gradient temperature stress field of box girder, while the roof area corresponding to the cantilever plate and upper part of the inner box does not affect the maximum temperature of the box girder basically. Although the number of chambers in the box girder can't change the vertical distribution of temperature in the side web, the maximum temperature stress of the box girder will increase with the increase of the chamber. The number of web slabs maybe as little as possible if the live-load bearing capacity of roof slab can meet the requirement, so the temperature self-stress can be reduced.

Key words: bridge engineering; phase change concrete; multi cell concrete-box girder; temperature gradient; thermal stress

0 引言

预应力混凝土箱梁在大跨径桥梁中应用广泛,但混凝土热传导性能很差,在太阳辐射或骤然降温时,箱梁结构表面温度迅速上升或下降,而内部大部分区域仍处于原来的温度状态,从而在箱梁内形成较大的温度梯度。这种温度梯度将导致箱梁截面各部分膨胀或收缩量不同,当截面应变差受到约束时梁体内均会产生可观的温度拉应力。郭能荣^[1]指出温度应力最大可达到 2.2 MPa,而箱梁内部分布钢筋对于克服温度应力所起的作用是非常有限的;顾斌等^[2]指出受阳光直射的箱梁腹板壁厚方向的温度梯度可达到 9 °C,由此引起的温度自应力可达 3.2 MPa,混凝土的抗拉强度仅有 2~3 MPa,因此混凝土结构经常会存在以温度裂缝为代表的“损伤”,严重时将会成为桥梁结构的重大安全隐患,造成巨大的经济损失^[3-4]。

目前国内外很多专家学者针对混凝土箱梁的日照温度梯度及其效应已开展了大量卓有成效的研究,也取得了很多研究成果,对太阳辐射作用下混凝土箱梁温度场、应力场分布及其影响因素已有较为清晰的认识^[5-6]。聂玉东^[7]以寒冷地区混凝土箱梁桥实测温度数据为基础,结合有限元数值仿真分析,提出了适合寒冷地区混凝土箱梁桥的竖向温度梯度模式;何俊荣^[8]以怀通高速江市特大桥为研究对象,提出了多室箱梁的日照正温差梯度和温降负温差梯度的分布模式;丁笑笑^[9]指出箱梁顶板下侧存在较

大的横向温度应力,而现行规范对该横向温度应力可能估计不足,使用中箱梁顶板会出现纵向裂缝;王永宝等^[10]指出短翼缘板箱梁底板也有较大的横向温度梯度,且温度梯度取值可能比顶板高。目前桥梁工程中温度应力的控制措施主要是从原材料的选择、混凝土配合比的优化、构造钢筋的布置等方面入手,但大多数方法都存在工艺复杂、工程造价高、“调温”效率低、效果不明显等问题。

相变材料(Phase Change Materials, PCM)可以随温度变化改变其物理状态并能储存和释放潜热,是一种具有良好发展前景的新型节能建筑材料,目前建筑工程中比较可行的相变材料是固-液相变材料,即利用固-液相变材料熔化过程中吸收并储存大量的潜热以降低其最高温度,并在环境温度低于相变温度时发生逆相变,将储存的相变潜热释放以提高其最低温度。从 20 世纪 70 年代开始,相变材料在建筑墙体中的研究工作和研究成果相对较多,Voelker 等^[11]将一种相变石膏板放置于墙体内表面,试验结果表明采用相变墙板的房间室内温度可降低 4 °C。Castell 等^[12]将制得的一种石蜡类相变材料板放置于墙体中的多孔砖与保温材料之间,试验测试结果表明墙体内安装有相变材料的房间内最高温度可降低 1 °C,而且温度波动较小,在整个夏季,房间电能消耗降低约 15%。Diaconu 等^[13]提出了一种适用于全年的相变蓄能墙体,该墙体有 2 层相变材料层,外层的相变材料相变温度高,适宜于夏季,而内层的相变材料相变温度低,适宜于冬季,但

相变材料与混凝土结合应用于桥梁工程中则并不多见。

本文拟将相变材料作为外加剂制备相变储能混凝土,通过试验研究了相变混凝土的热力学参数及热稳定性,并通过数值计算分析了相变储能混凝土的温度控制效果及其铺设位置和厚度对温度应力控制效果的影响。

1 相变储能混凝土制备

固-液相变材料在实际使用中存在封装问题,如果封装不好可能会导致相变材料的流失。近年来,有学者尝试采用多孔材料作为基材制备相变储能建筑材料^[14-18],取得了较为满意的储能效果,但是将相变材料直接用于桥梁工程中以降低梯度温差效应的研究并不多见,研究和应用的难点在于相变材料的封装技术以及基体掺料对混凝土强度的削弱。本文尝试制备一种“结构+功能”一体化的相变储能材料,这种材料既有良好的力学性能,又具有“自调温”的作用。

根据相变储能材料的相变温度、相变潜热以及材料的生产制造成本,本文采用熔点为 43~47 ℃ 的 45# 石蜡为相变材料,无机多孔材料稻壳灰(Rice Husk Ash,RHA)作为基体材料(图 1),将石蜡加热熔化后直接与稻壳灰基体混合制备出相变储能稻壳灰(PCM-RHA),在混合之前要对稻壳灰进行干燥处理以减弱水分对吸附效果的影响。微距镜头下稻壳灰表面石蜡的附着情况如图 2 所示。



图 1 稻壳灰基体材料
Fig. 1 RHA Substrate Material

为考察 PCM-RHA 的稳定性,将制作好的相变储能稻壳灰放入烘箱中加热至 80 ℃ 并保持 4 h,然后取出冷却至 15 ℃ 并保持 4 h,完成一个相变循环,采用多次相变循环后稻壳灰的质量损失率作为指标评价其稳定性,试验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在经历 50 次相变循环后,相变储能稻壳灰的质量损失率在 1% 左右,而对于没有掺入稻壳灰的

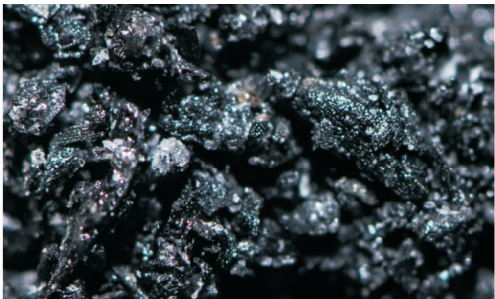


图 2 微距镜头下稻壳灰表面的石蜡附着情况
Fig. 2 Adhering Condition of Paraffin to RHA Observing Under Macro Lens

石蜡,50 次相变循环后质量损失率达到 5%~6%。原因在于稻壳灰内部的石蜡受到基体材料内部孔隙的“吸附”作用,形成了一层白色封装层,阻止了石蜡的进一步析出。

表 1 多次相变循环后的 PCM-RHA 质量
Tab. 1 PCM-RHA Mass After Certain Phase Change Cycles

材料种类	不同相变循环次数下的材料质量/g					
	0	1	5	10	20	50
石蜡	200.0	199.8	199.4	198.1	196.3	189.5
PCM-RHA	200.0	200.0	200.0	199.8	199.2	198.6

在制备好 PCM-RHA 后,采用绝对体积法进行混凝土配合比设计,并按照质量相等的原则使用相变储能稻壳灰代替 10% 的水泥制备相变储能混凝土(图 3),试验中采用的 C50 相变混凝土配合比如表 2 所示。



图 3 相变混凝土试块
Fig. 3 Phase Change Concrete Test Block

为考察掺入稻壳灰后混凝土抗压强度的变化,采用相同的配合比制作 5 组(每组 3 个)共 15 个掺入比为 10% 的 100 mm×100 mm×100 mm 的 C50 相变混凝土标准试块(图 3),并使用相同配合比的普通混凝土试块作为对照进行试验,不同相变循环次数下 3 个试块抗压强度均值作为最终强度^[19],试验结果如表 3 所示。从表 3 可以发现:掺入稻壳灰后混凝土强度有所下降(10% 掺入比情况下混凝土强度下降 15% 左右),但相变循环对试块抗压强度

表 2 PCM-RHAC 试验配合比
Tab. 2 Mixing Proportion of PCM-RHAC

混凝土种类	水灰比	各材料用量/kg					
		水	水泥	PCM-RHA	砂	碎石	减水剂
C50 普通混凝土	0.39	160	410	0	793	1 052	4.51
C50 相变混凝土	0.39	160	369	41	793	1 052	4.51

表 3 不同相变循环次数下 PCM-RHAC 强度
Tab. 3 Compression Strength of PCM-RHAC
After Certain Phase Change Cycles

普通混凝土 强度/MPa	不同相变循环次数下 10% 储能稻壳灰的相变 混凝土强度/MPa				
	0	5	10	20	50
50.2	43.5	43.2	44.0	43.7	42.6

的影响不大,原因在于稻壳灰的“吸附作用”保证了相变循环中石蜡并未发生大量的渗漏析出(图 4),不会对稻壳灰-水泥石界面产生扰动。实际工程中,可以通过降低混凝土标号使用或者仅在温度应力较大部位的局部使用等方式避免混凝土强度降低带来的问题。

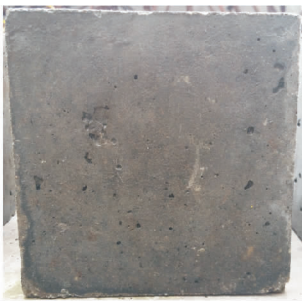


图 4 相变循环 50 次后相变混凝土试块
Fig. 4 Phase Change Concrete Test Block
After 50 Phase Change Cycles

2 混凝土箱梁温度-应力场耦合分析

混凝土是热不良导体,外界温度变化时混凝土内部会出现较大的梯度温差,箱梁截面内各部分热膨胀或收缩量也将不同,由此产生的应变差受到约束时梁体内将产生所谓的温度自应力。混凝土结构中的温度场按其时间响应的性质可以分为稳态温度场和瞬态温度场,温度-应力场耦合分析是通过瞬态热力学分析获取梁体稳态温度场,并以此作为力学分析的温度边界条件求解结构应力场,在此过程中不同辐射条件和对流条件下梁体稳态温度场的求解是箱梁温度-应力场耦合分析中最为关键的环节。

由于太阳与地球的距离非常遥远,太阳光可以看成是平行射向地球,而且桥梁一般为狭长结构,可以近似地认为桥梁纵向的温度分布一致,这一假定

已被诸多研究证实。根据瞬态二维温度场的固体导热微分方程,无内热源时箱梁热传导方程可表示为

$$\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中: λ 为导热系数; x, y 分别表示箱梁截面上横桥向和竖向坐标; T 为箱梁截面内某一点(x, y)在 t 时刻的瞬时温度; ρ 为混凝土的密度; c 为比热容。

当自然环境条件变化时,箱梁表面热交换形式包括与空气的对流换热、辐射换热,因此其传热边界条件可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_s) \tag{2}$$

式中: n 表示箱梁表面外法线方向; T_a 为空气温度; T_s 为箱梁表面温度; h 为综合换热系数, $h = h_r + h_c$,反映物体与外界的热交换效率, h_r, h_c 分别为混凝土表面辐射换热系数及对流换热系数,辐射换热系数 h_r 与材料本身的辐射率、箱梁壁面-环境气温的温差有关,对流换热系数 h_c 取决于箱梁表面的风速、壁面粗糙度、壁面温度与气温的温差等因素。

根据凯尔别克的论述^[20],对于对流换热系数,风速 $v < 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时箱梁各表面的对流换热系数可按式(3)计算

$$h_c = 4v + 5.8 \tag{3}$$

对于辐射换热系数 h_r ,凯尔别克的实测^[13]结果表明,在 1 d 内的 h_r 平均值对于箱梁各壁面来说基本一致,且建议在进行混凝土温度场分析时取 $h_r = 4.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

$$h = h_r + h_c \tag{4}$$

根据式(3),(4)中相关参数设置传热边界条件后进行热力学瞬态分析以获取梁体稳态温度场,然后以此为荷载边界条件进行力学分析即可得到箱梁截面内温度应力的分布。

2.1 计算模型及参数选取

为检验计算模型的正确性和相变储能混凝土温控效果,参考王波^[20]于 2013 年 6 月 28 日在某混凝土连续弯箱梁桥上实测的温度记录及当地气象参数,利用 ANSYS 建立相应的有限元模型并开展温度-应力耦合场分析。该桥为三跨一联的现浇预应力混凝土连续弯箱匝道桥,每跨 25 m,共 9 联,位于

北纬 34°附近,夏季平均最高气温 32 ℃,极端天气最高气温 42.9 ℃,年平均日照时间 1 398.5~2 126.7 h,上部结构为单箱三室预应力混凝土连续箱梁,主梁混凝土采用 C50,在温度场观测中所选用的测试断面位于跨中位置附近,温度测点布置方案如图 5 所示。

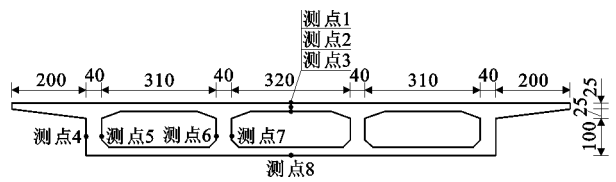


图 5 温度测点布置(单位:cm)

Fig. 5 Arrangement of Temperature Measuring Points (Unit:cm)

鉴于桥梁温度场分布的二维特性,使用 ANSYS 中的平面单元 Plane13 建立有限元模型(图 6),为保证网格质量,使用映射网格技术划分模型网格,单元最大尺寸为 25 mm(顶板厚度的 1/10),

表 4 热工及力学参数

Tab. 4 Thermal and Mechanical Parameters

混凝土种类	弹性模量/ 10^4 MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	导热系数 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	比热容 $c/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	线膨胀系数/ 10^{-5}
C50 普通混凝土	3.45	0.2	2 600	3.00	925	1.0
C50 相变混凝土	3.45	0.2	2 400	0.79	1 214	1.0
沥青混凝土	2.00	0.2	2 100	0.93	920	1.0

$4.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,箱梁各表面的换热系数如表 5 所示。

表 5 箱梁各表面换热系数

Tab. 5 Heat-transfer Coefficients of Different Box Girder Surfaces

位置	对流换热系数 $h_c/$ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	辐射换热系数 $h_r/$ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	综合换热系数 $h/$ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$
顶板	11.8	4.0	15.8
腹板	11.8	4.0	15.8
底板	11.8	4.0	15.8
内箱	5.8	4.0	9.8

外界气温采用文献[20]于 2013 年 6 月 28 日的现场实测值(表 6)。初始温度采用混凝土箱梁温度分布较为均匀时刻的平均温度(一般可取日出前后的时刻),即取 7:00 箱梁内外气温的平均值 31 ℃作为有限元计算的初始温度。

表 6 实测气温

Tab. 6 Measured Temperatures

时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
气温/ $^\circ\text{C}$	30.7	32.4	34.1	34.5	35.4	36.0	37.0	35.0	33.6	32.5	30.0	26.8



图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model

共划分 18 880 个单元和 20 026 个节点。

为方便与 2013 年 6 月 28 日的混凝土连续弯箱梁桥温度场实测结果[20]进行对比,C50 普通混凝土的导热系数和比热容参考文献[20]中的取值,而相变混凝土的导热系数和比热容则采用 XH-PDR 300 导热系数测定仪进行测定[21],并假定掺入相变材料“稻壳灰-石蜡”后混凝土的力学参数不会发生显著变化,计算中所采用的热工和力学参数如表 4 所示。

为保证数值计算结果和实测结果吻合,依据该桥所处位置的太阳辐射角及当日气温情况设置温度边界条件,其中对流换热系数选取时,风速按文献[20]中的 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 取用,箱内各表面的风速取 $0.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,辐射换热系数 h_r 选用凯尔别克建议值

2.2 正确性验证

为验证计算模型的正确性,使用如表 5 所示的热力学参数和表 6 所示温度边界条件,初始温度选定为 31 ℃,计算初始时间设定为 7:00,之后每 1 h 作为一个荷载步并逐步计算至 18:00,为保证计算精度,在每个荷载步内设置 100 个荷载子步进行计算,每个荷载步下箱梁各测点温度稳态值如图 7 所示。作为对比,图 7 也一并给出了 2013 年 6 月 28 日的温度场实测结果[20],通过对比可以发现本文的数值计算结果与文献[20]的实测结果基本一致,这也证实了本文数值模型的正确性。

3 相变储能混凝土箱梁的梯度温度效应分析

混凝土作为热不良导体,日照温差导致的箱梁温度自应力主要诱因在于箱梁内部较大的温度梯

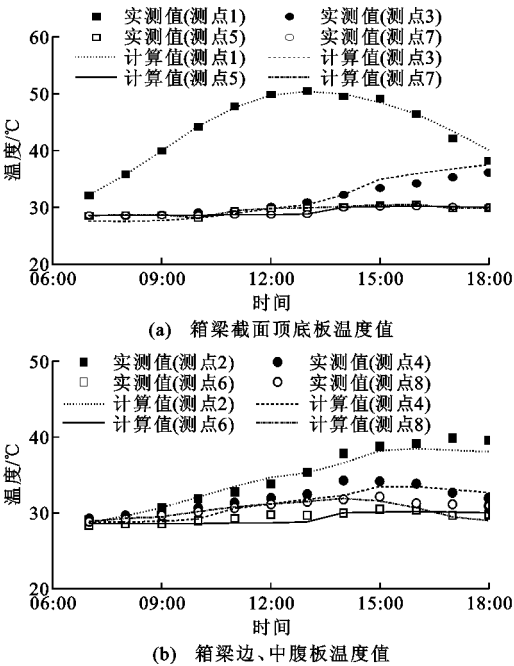


图 7 箱梁测点 1~8 处温度实测值与计算值对比
Fig. 7 Comparison Between Measured and Calculated Temperatures at Measuring Points 1-8 of Box Girder

度,只要能降低箱梁内部的温度梯度,即可削弱由此产生的温度自应力,因此从控制箱梁温度自应力的原理上看也没必要全部采用相变混凝土,仅在箱梁外表面一定厚度范围内设置相变混凝土即可减小温度自应力。

为考察相变混凝土铺设厚度对箱梁日照温度场和应力场的影响,将铺装层下 0~140 mm 厚度范围内的箱梁顶板混凝土替换为相变混凝土(图 8),并通过对比箱梁顶板相变混凝土铺设位置和厚度不同时箱梁温度场和应力场的变化,优化相变混凝土的铺设位置和厚度。

为研究相变混凝土对箱梁日照梯度温度场和应力场分布的影响,参考文献[20]实测结果中顶板上表面(测点 1)温度最高时对应的时间(13:00)作为分析时刻,计算了沥青混凝土铺装层厚度在 50~140 mm、相变混凝土厚度在 0~140 mm 范围内变化时的箱梁温度应力场,并以箱梁顶板、边腹板和中腹板内最大的主拉应力为指标对相变混凝土的温控效果进行评价。

图 9 给出了铺装层和相变混凝土层的厚度不同时箱梁顶板、边腹板和中腹板内梯度温差主拉应力的等值线图。从图 9 可以看出:箱梁顶板上不设相变混凝土时,箱梁顶板和中腹板内的梯度温度应力均随铺装层厚度的增加而减小,而边腹板内温度应力则随铺装层厚度的增加而增大,加厚铺装层虽然可以有效控制箱梁截面温度应力,但铺装层的加厚势必导致二期恒载的急剧增加(对于 30 m 宽的箱梁,铺装层厚度每增加 1 cm,二期恒载集度将增加 $7.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$),这对于大跨径、宽箱梁混凝土梁桥是不能接受的;铺装层厚度相同条件下,箱梁顶板最大温度应力随着相变混凝土厚度增加先减小后增加,边腹板和中腹板内温度应力则随相变材料厚度的增加呈单调递减的趋势;沥青混凝土铺装层较薄时,相变混凝土层能更为有效地减小梯度温度应力,但随着沥青铺装层厚度的增加,相变混凝土层对温度应力的改善效果逐渐下降,当沥青铺装层厚度超过 100 mm 时相变混凝土的温控效果已不再明显。

当沥青混凝土铺装层和相变混凝土厚度均为 50 mm 时,箱梁顶板温度拉应力从 4.64 MPa 降到 4.24 MPa(减少 9%),边腹板处温度拉应力从 2.26 MPa 降到 2.06 MPa(减少 9%),中腹板处温度拉应

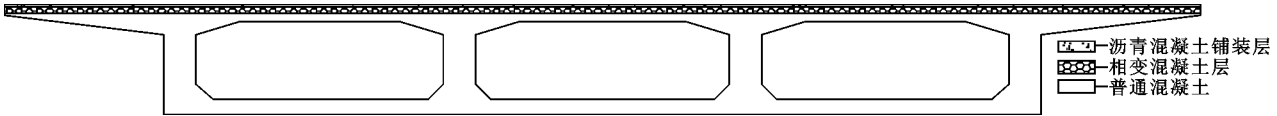


图 8 相变混凝土铺设位置
Fig. 8 Laying Location of Phase Change Concrete

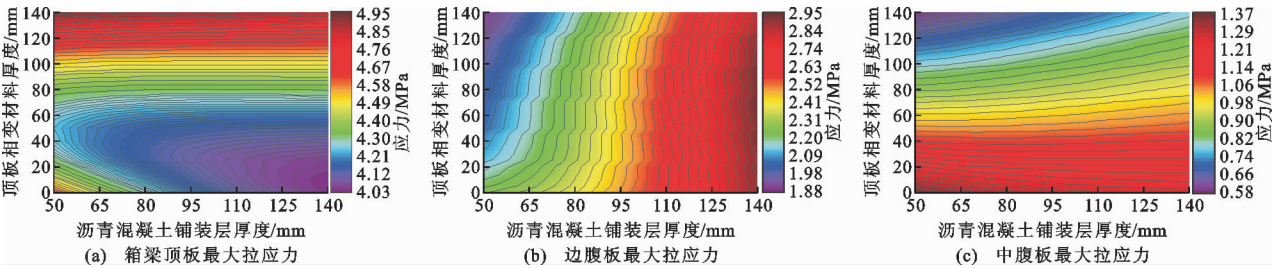


图 9 相变材料和沥青混凝土铺装层组合下的箱梁截面应力等值线

Fig. 9 Stress Contours of Box Girder Under Combination of Phase Change Material and Asphalt Concrete Pavement

力从 1.37 MPa 降到 1.04 MPa(减少 24%),即 50 mm 厚相变混凝土层与 50 mm 厚沥青铺装层组合的温控效果与 85 mm 的沥青铺装层效果基本相当,但沥青铺装层厚度减少了 35 mm(对于 30 m 宽的箱梁,二期恒载集度减小 $26\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$)。

为考察相变混凝土铺设位置对箱梁温度应力的

影响,选取箱梁顶板温度最高的 13:00 作为分析时刻,在沥青混凝土铺装层和相变混凝土层厚度均为 50 mm 的情况下,将箱梁顶板分为悬臂板、承托和腹板上部以及内箱上部 3 个区域(图 10),并将相变混凝土分别铺设于相应区域,计算不同铺设方案下箱梁温度应力场。

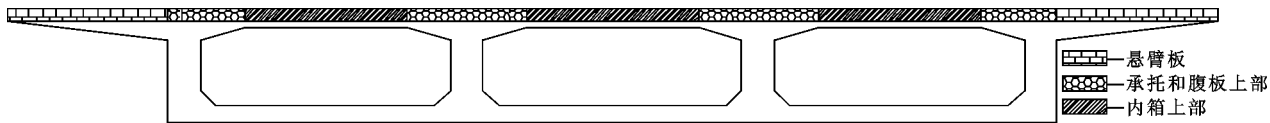


图 10 顶板相变混凝土区域划分示意图

Fig. 10 Schematic Diagram of Partition of Roof Phase Change Concrete

图 11 给出了 13:00 时箱梁边腹板内温度场的竖向分布。从图 11 可以看出,在承托和腹板所对应的顶板区域铺设相变混凝土后,相变混凝土层起到了一定的“吸热”和“隔热”作用,包括 50 mm 厚相变混凝土层在内的距离顶板 0.5 m 竖向范围内,腹板温度均明显低于相应高度处的普通混凝土。作为对比,图 11 还给出了《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中混凝土梁体的梯度温度场分布模式,在沥青铺装层以下 100 mm 范围内,该规范中温度梯度明显大于数值计算结果,但超出 100 mm 后两者温度场的变化趋势和数值基本一致。

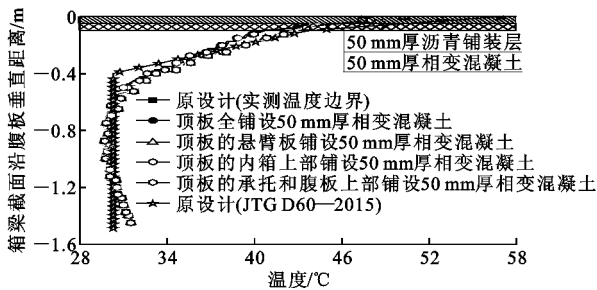


图 11 13:00 时箱梁边腹板内温度场竖向分布

Fig. 11 Internal Temperature Field Distribution of Box Girder at 13:00

图 12 给出了不同铺设方案下箱梁最大温度拉应力随时间的变化规律及其与 JTG D60—2015 规范的对比。从图 12 可以看出:采用通用规范规定的温度模式计算得到的梯度温度应力略大于基于实测温度边界计算的温度应力;悬臂板和内箱上部位置的相变混凝土层基本不影响梁体最大温度应力,仅在承托和腹板上部铺设相变混凝土时箱梁最大温度应力与全铺相变混凝土时基本一致。究其原因在于箱梁梯度温度变形只有在受到限制时才能产生温度自应力,且受到的约束越强温度自应力越大,而顶板梯度温度变形仅在邻近腹板区域受到约束,对箱梁

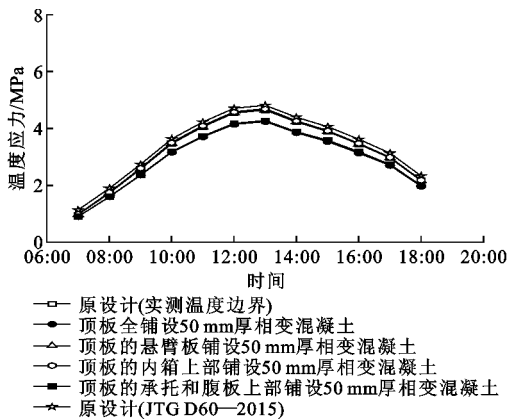


图 12 箱梁截面最大温度应力随时间变化

Fig. 12 Maximum Temperature Stress of Box Girder Section Varies with Time

温度自应力影响最为明显,因此在承托和腹板上部区域铺设相变混凝土可以更为有效地控制箱梁温度自应力。

4 箱梁内室数量的影响

前文研究表明,腹板对顶板梯度温差变形的约束是温度自应力产生的根本原因,单箱多室箱梁的内室数量决定了箱梁中腹板数量,中腹板数量的增多必然导致顶板梯度温度变形受到更强的约束,温度自应力也将随之增大。为详细分析相变混凝土的温控效果受箱梁内室数量的影响,仍然以前文中单箱三室箱梁为分析对象,通过增减箱梁中腹板改变箱梁内室数量,分析时沥青铺装层厚度取 50 mm,并在箱梁整个顶板范围铺设 50 mm 厚相变混凝土。

图 13 给出了 13:00 时箱梁内室个数不同时,铺设相变混凝土前后箱梁边腹板内温度竖向分布规律。从图 13 可以发现:箱梁内室数量不影响箱梁边腹板内温度场分布模式。图 14 给出了不同箱室数量下最大温度应力随时间变化曲线。从图 14 可以

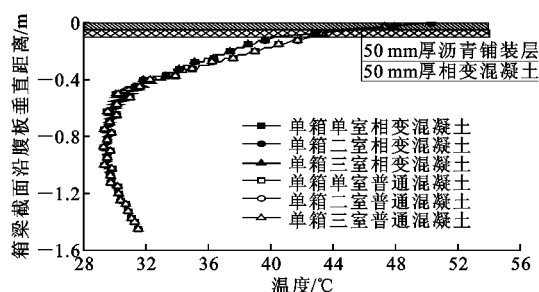


图 13 13:00 时不同箱室个数下的箱梁内部温度场分布

Fig. 13 Temperature Distribution in Box Girder with Different Number of Box Rooms at 13:00

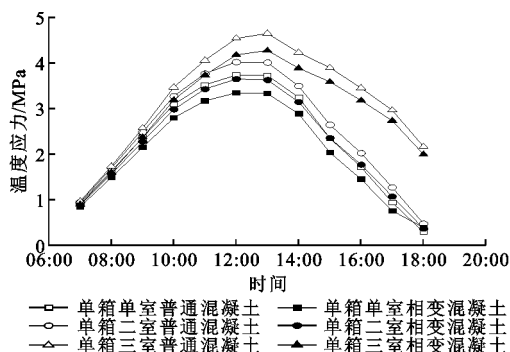


图 14 不同箱室个数下最大温度应力随时间变化曲线

Fig. 14 Maximum Temperature Stress Varies with Time Under Different Number of Box Rooms

看出,箱梁最大温度应力随箱梁内室数量的增多而增大,在铺设相变混凝土条件下箱梁从单室变为三室后,最大温度自应力增加了 0.94 MPa (增大 22%),因此在箱梁顶板活载强度能满足要求的前提下应尽量减少中腹板的数量,以减小温度自应力。

5 结 语

(1)铺装层厚度相同条件下,箱梁顶板最大温度应力随着相变混凝土厚度的增加先减小后增加,边腹板和中腹板内温度应力则随着相变材料厚度的增加呈现单调递减的趋势;沥青混凝土铺装层较薄时,相变混凝土层能更为有效地减小箱梁梯度温度所产生的主拉应力,随着沥青铺装层厚度的增加,相变混凝土层对温度应力的改善效果逐渐下降。

(2)腹板和承托对应的顶板区域是影响箱梁梯度温度应力场的敏感部位,而悬臂板和内箱上部所对应的顶板区域内相变混凝土则基本不影响箱梁的最大温度应力,原因在于腹板对顶板梯度温差变形的约束是温度自应力产生的根本原因,距离腹板较远的顶板变形受腹板约束较弱,不容易产生温度自应力。

(3)箱梁内室数量虽然不能改变边腹板内温度

竖向分布规律,但箱梁最大温度应力会随着箱梁内室的增多而增大,在箱梁顶板活载强度能满足要求的前提下应尽量减少中腹板的数量,以减小温度自应力。

(4)相变储能混凝土用于控制混凝土桥梁日照温度梯度效应的研究还不多见,本文所做的工作也仅是初步探索,还存在许多问题,比如稻壳灰-石蜡相变混凝土强度在多次相变循环后会有所下降,如何通过调整混凝土配合比加以弥补,如何选择适用于大体量铺设的经济廉价相变材料,如何实现工业化大规模制备都将是之后的研究课题。

参考文献:

References:

- [1] 郭能荣. 异形混凝土箱梁桥温度场与温度应力分析[D]. 西安:长安大学,2014.
GUO Neng-rong. Study on the Temperature Field and Thermal Stress in the Special-shaped Concrete Box Girder Bridges[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.
- [2] 顾 斌,陈志坚,陈欣迪. 大尺寸混凝土箱梁日照温度场的实测与仿真分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(3):1252-1261.
GU Bin, CHEN Zhi-jian, CHEN Xin-di. Measurement and Simulation on Solar Temperature Field of Large Size Concrete Box Girder[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44 (3): 1252-1261.
- [3] 肖建庄,宋志文,赵 勇,等. 基于气象参数的混凝土结构日照温度作用分析[J]. 土木工程学报,2010,43(4):30-36.
XIAO Jian-zhuang, SONG Zhi-wen, ZHAO Yong, et al. Analysis of Solar Temperature Action for Concrete Structure Based on Meteorological Parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (4): 30-36.
- [4] 赵人达,王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究[J]. 中国公路学报,2016,29(7):52-61.
ZHAO Ren-da, WANG Yong-bao. Studies on Temperature Field Boundary Conditions for Concrete Box-girder Bridges Under Solar Radiation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 52-61.
- [5] CHEN B, SUN Y Z, WANG G J, et al. Assessment on Time-varying Thermal Loading of Engineering Structures Based on a New Solar Radiation Model [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014: 639867.
- [6] LARSSON O, THELANDERSSON S. Estimating Extreme Values of Thermal Gradients in Concrete Struc-

- tures[J]. Materials and Structures, 2011, 44 (8): 1491-1500.
- [7] 聂玉东. 寒区大跨径混凝土箱梁桥温度场及温度效应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- NIE Yu-dong. Analysis of Temperature Field and Temperature Effect for Long Span Concrete Box Girder Bridges in Cold Regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [8] 何俊荣. 混凝土多室箱梁的温度作用及其效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- HE Jun-rong. The Research on Temperature Field and Temperature Effect of the Multi Cell Concrete-box Girder[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [9] 丁笑笑. 混凝土箱梁桥梁截面温度应力场分析研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- DING Xiao-xiao. Analysis of the Stress Field of Concrete Box Girder Bridge Section Temperature[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [10] 王永宝, 赵人达. 混凝土箱梁温度梯度取值研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 43-47, 61.
- WANG Yong-bao, ZHAO Ren-da. Study of Temperature Gradient Values for Concrete Box Girder[J]. World Bridges, 2016, 44(5): 43-47, 61.
- [11] VOELKER C, KORNADT O, OSTRY M. Temperature Reduction Due to the Application of Phase Change Materials[J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (5): 937-944.
- [12] CASTELL A, MARTORELL I, MEDRANO M, et al. Experimental Study of Using PCM in Brick Constructive Solutions for Passive Cooling[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(4): 534-540.
- [13] DIACONU B M, CRUCERU M. Novel Concept of Composite Phase Change Material Wall System for Year-round Thermal Energy Savings[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1759-1772.
- [14] 孟多. 定形相变材料的制备与建筑节能应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- MENG Duo. Preparation and Building Energy Conservation Application of Form-stable Phase Change Material[D]. Dalian: Dalian University of Technology 2010.
- [15] 王建昌. 相变储能建筑材料的制备与节能评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- WANG Jian-chang. The Preparation and Energy-saving Assessment of a Phase Change Building Material[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [16] 王文涛, 马芹永, 白梅, 等. 活性炭储能骨料对相变混凝土压拉强度和导热性能影响的试验与分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 95-99.
- WANG Wen-tao, MA Qin-yong, BAI Mei, et al. Experiment and Analysis on Compressive and Tensile Strength and Thermal Conductivity of Phase Change Concrete with Active Carbon Energy Storage Aggregate[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 95-99.
- [17] 石宪, 崔宏志. 相变储能混凝土制备及其力学性能研究[J]. 混凝土, 2013(1): 48-50, 54.
- SHI Xian, CUI Hong-zhi. Phase Change Energy Storage Concrete Preparation and Its Mechanical Properties[J]. Concrete, 2013(1): 48-50, 54.
- [18] 李悦, 鲍振洲, 谢静超, 等. 含相变储能材料石膏板的物理力学及热工性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(9): 88-93.
- LI Yue, BAO Zhen-zhou, XIE Jing-chao, et al. Mechanical Properties and Thermal Performance of Gypsum Wallboards Incorporated with Composite Phase Change Materials[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(9): 88-93.
- [19] JGJ 51—2002, 轻骨料混凝土技术规程[S].
- JGJ 51—2002, Technical Specification for Lightweight Aggregate Concrete[S].
- [20] 王波. 混凝土连续弯箱梁桥温度梯度及效应分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG Bo. Two-dimension Temperature Gradient and Affection Analysis on Concrete Curve Box-girder Bridge Continuous[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [21] 王宇. 桥梁箱体结构自调温固液相变材料研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- WANG Yu. Research of Solid-liquid Phase Change Material in Temperature Auto-adjusting Box-girder Bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.