

混凝土箱梁桥断面竖向温度梯度的测试与分析

王 勇

(广东省建筑设计研究院, 广东广州 510010)

摘 要:随着热量的流动, 裂缝会出现和扩展, 从而抑制热量流动, 并引起结构的应力重分布。此外, 对桥梁的温度分布及由此引起的变形规律的正确认识, 有助于在施工中修正桥梁的定位偏差。该文介绍测试技术和热电偶在横向坡度 4% 的混凝土箱梁桥沿桥墩附近及四分之一跨截面的布置情况。当天气晴朗或多云时, 修建期间桥面混凝土温度分布曲线不再是直线, 而是呈抛物线, 最大值出现在高度较高的腹板顶面。此外, 该文通过对大量试验数据的分析, 总结出桥梁断面温度梯度分布与气候条件的关系, 这些气候资料来自现场实测和当地气象局。最后, 根据气候条件提出在广州地区横坡为 4% 的混凝土箱梁桥的温度梯度模式。

关键词:混凝土箱梁桥; 预应力混凝土; 温度梯度; 测试

中图分类号:U441.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0162-06

1 混凝土箱梁桥竖向温度梯度研究概述

桥梁结构长期处于自然环境中, 不可避免要受到各种自然条件的影响, 其中日照温度变化对桥梁的影响比较明显。

20 世纪 60 年代以来, 国内外都发生由于温度应力而导致混凝土桥梁严重裂损的事故。在联邦德国, 由温度引起损伤的预应力混凝土桥梁中, 有两座几乎坍塌; 新西兰一座市场高架桥的预应力混凝土箱梁, 因日照产生的温差而导致该桥发生严重裂损, 不得不耗资 30 万美元进行修复^[1]。我国铁路上的通惠河 40 m 连续箱梁桥和九江大桥 40 m 简支箱梁桥也因温差效应而发生严重的开裂现象^[2]。Fritz Leonhardt 曾提到: 在箱形桥梁和肋板桥梁的顶面和下缘之间温差可达到 27℃ ~ 33℃, 预应力混凝土箱形桥梁大都因温差应力而损坏^[3]。随着大跨径预应力混凝土箱梁桥的发展、建筑材料的更新、跨度增大、壁厚相对减少, 温度应力可以达到甚至超过由活载引起的应力, 温度对混凝土结构的影响已越来越引起工程界的广泛重视。

地理位置不同, 气候条件不同, 混凝土桥梁内部的温度分布和由温度产生的应力也不完全相同, 我国的《公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)》中规定的温度竖向梯度模式是否符合广州地区的实际情况, 且该模式是根据横向坡度不大的 T 梁桥提出的, 对于横向坡度较大(4%)的箱梁桥是否适用, 值得进一步研究。

2 温度梯度的测试

收稿日期: 2006-03-07

作者简介: 王勇(1964-), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 副总, 主要从事市政道桥设计及技术管理工作。

2.1 工程概况

观音沙大桥位于京珠国道主干线广州(新洲)至番禺(坦尾)段高速公路上, 上部结构为跨径 65 m+2×120 m+65 m 的预应力混凝土连续刚构, 主桥平面位于左偏缓和曲线和圆曲线内反公切, 缓和曲线参数 A=1050, 圆曲线半径 R=2100 m; 纵断处于竖曲线范围内, 竖曲线半径 R=18000 m, 桥面纵坡两侧坡度分别为 1.9% 和 -3%。主桥桥面宽 35 m, 分 2 幅, 每幅桥箱梁采用单箱单室断面, 箱梁顶板宽 17 m, 底板宽 9 m, 桥面均设 4% 的全超高横坡。

桥址所在地区属亚热带季风气候, 具有四季分明、气候温暖、多雨、无霜期长等特点。根据 1960 年~2001 年气象资料, 多年平均气温为 21.8℃; 极端最高气温 37.4℃; 最高月平均气温: 7 月份 28.6℃, 8 月份 28.5℃; 极端最低气温 -0.4℃; 最低月平均气温: 1 月份 13.8℃, 2 月份 14.7℃; 降雨量: 4~9 月为雨季, 占全年降雨量的 81.8%, 年平均降雨量 1702.5 mm; 累计 10 min 平均最大风速: 24 m/s, 东南向; 累年瞬间最大风速: 37 m/s, 东北向; 近 10 年平均相对湿度: 78%。

2.2 传感器的选择和测点布置

目前在梁桥中广泛采用热电偶作为温度测量仪表的原因, 在于它具有下列优点: 能将温度量转换为电量信号, 因而信号的放大、变换、传送容易; 结构简单、制造容易、价格便宜; 惰性小、精度高、检测范围广, 一般为 -200~1300℃; 能满足各种测量场所的要求, 如狭小、弯曲场所或特定部位、点温、表面温度的测量。当然, 作为一种仪表, 它也有其缺点: (1) 测量精度难于超过 0.2℃; (2) 参比端温度需要保持恒定; (3) 在高温场所或长期使用时, 因受氧化、还原介质的腐蚀作用会发生劣化^[4]; (4) 在实际使用时, 特别是在高精度多点测温系统

中,参比端温度的补偿、非线性校正和整个系统零位的变化等许多因素都会直接影响其精度^[5]。

热电偶的测温原理为:用 2 根不同材质的导体 A 和 B 构成一个闭合回路(如图 1),当两个接点 1 和 2 的温度 $T > T_0$ 时,回路中有电动势产生,此种现象叫热电效应。导体 A 和 B 叫热电极,它们的组合叫热电偶。通常接点 1 焊接在一起,置于被测温度场所,叫做测量端;接点 2 分开,用于接入显示仪表或变送器,但要求接点处温度保持恒定,叫做参比端。热电偶就是利用热电效应产生的热电动势测量温度的温度仪表^[4]。

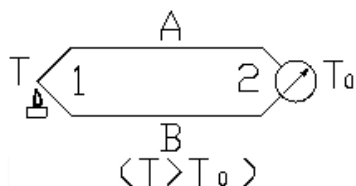


图 1 热电效应示意图

观音沙大桥就是使用热电偶来测试混凝土内部的温度,在主跨的 1# 块(悬臂端附近)和 6# 块(1/4 跨)中部截面布置热电偶,其中,1# 块截面的测点布置见图 2 所示^[6],6# 块截面只在腹板位置布置测点。其中,桥面测点 2~9 都是位于桥面以下 4 cm 处,测点 26 和 28 分别距离底板上下面各 4 cm。

2.3 当地天气资料的收集

收集所研究桥梁所在地区的天气情况,包括全日热辐射、每隔 1 h 的环境温度变化、箱梁内部气温变化、风向、风速(或风力)、相对湿度、当地

每日各时段太阳照射角等^[7,8]。

其中全日热辐射、风向、风速(或风力)、相对湿度、日雨量、时雨量可查番禺气象局在网上公布的资料,而环境温度变化、箱梁内部气温变化则是通过现场测试得到,采用水银温度计测量,每隔 1 h 测一次,连续测量 1~3 a^[6]。另外,若遇到下雨则及时记录下雨和停雨时间。

3 测试结果分析

3.1 桥面板的温度分布规律

根据在观音沙大桥主体结构施工期间(2004 年 10 月至 2005 年 1 月),对预应力混凝土箱梁顶板温度测试发现,每天 10:00 至 17:00 时,环境气温对混凝土桥面测点温度的影响非常显著,气温的最高值一般在每天的 13:00~15:00,14:00 时达到最大值的可能性最大。桥面测点的相对最高温差 ΔT_i (指混凝土内部温度与箱梁外气温的差值)出现在每天的 12:00~15:00,一般在较高的腹板顶面处测点(即图 2 中测点 7),最高温差受相对湿度的影响最大,受环境温度的影响相对较小。如 2004 年 11 月 28 日的相对湿度为 30~66%,最高气温为 24℃, ΔT_i 最大值达到 12.3℃;11 月 29 日的相对湿度为 40~76%,环境温度为 25.2℃, ΔT_i 最大值只有 11.2℃;而 11 月 17 日、11 月 22 日、11 月 14 日的相对湿度都是 50~90%,环境温度则分别为 22.7、24.7、31.5℃, ΔT_i 最大值更是分别只有 6、7、7.2℃,远小于 11 月 28 日的测试结果。可见,环境温度的增大,虽然可以

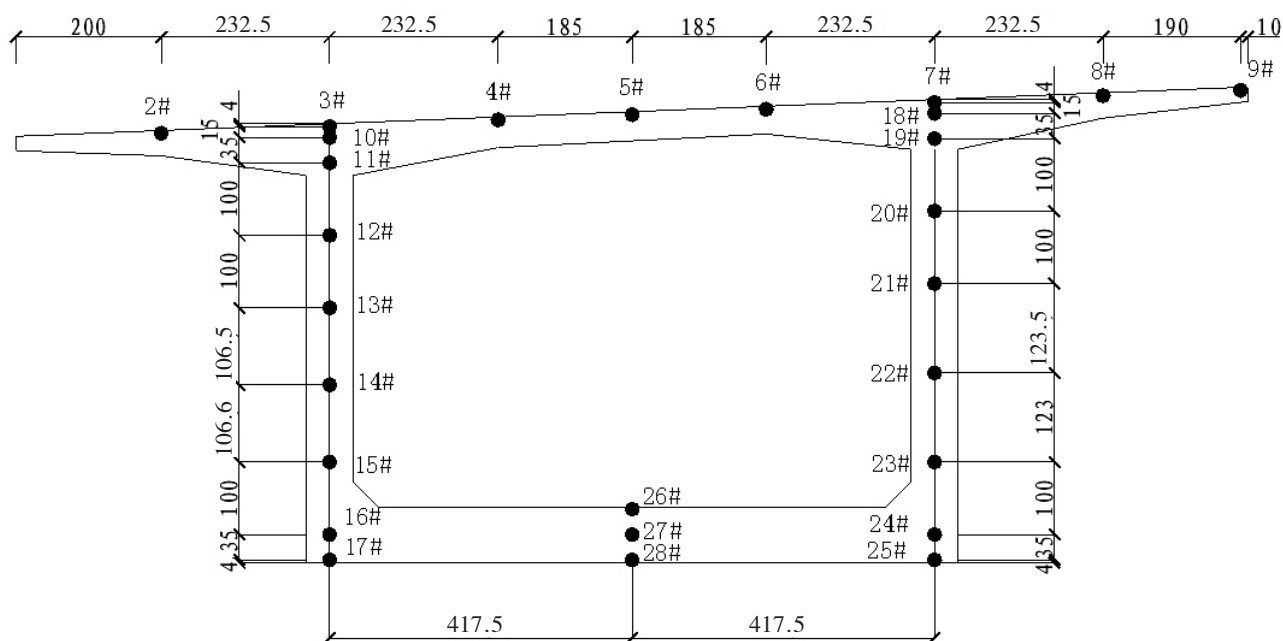


图 2 1# 块热电偶测点布置图(单位:cm)

使测点最大相对温差 ΔT_1 相应增大,但是温度越高,增长速度较慢,而相对湿度的减小,却较大地增加了测点的 ΔT_1 最大值。左右腹板顶测点的最大温差 ΔT_2 和所有桥面测点的最大温差 ΔT_3 都出现在每日的12:00~15:00,而且都在同一时间发生,但是一般不出现在同一对测点上,因为桥面测点温度的最大值一般在测点7,而最小值则出现在悬臂端的测点。

随着风速的增大,测点的 ΔT_1 、 ΔT_3 的最大值都相应减少,当风速达到3.5 m/s时,两侧腹板顶测点的温度几乎相等,即 $\Delta T_2 \approx 0$ 。对于下雨甚至是只是零星小雨的天气,桥面各测点的温度也基本上相等。

每天晚上18:00至次日凌晨7:00,桥面温度分布基本保持相等,各测点的温度相差基本上在2℃以内。

图3为2004年11月17日桥面测点的测试结果,从图可以看出,早上10:00以前,由于太阳辐射的影响相对较小,所以桥面测点的温度基本相等,而10:00以后,曲线变得越来越明显。

3.2 腹板的温度分布规律

为了拟合腹板的竖向温度梯度模式,现先以图2中的右腹板为研究对象,取番禺气象局发布的相对湿度为30~80%、风力为轻微的日子所测试出的结果来分析比较,图4所示为其中温度在22℃和25℃时的测试结果,图中横坐标的相对温度值由测点温度减去腹板最低温度得到。图中“5/12/04”表示测试时间为2004年12月5日,根据各天测试结果的最大值拟合出右腹板的温度梯度的拟合曲线。从拟合曲线可以看出(图5a),当温度气温低于24℃时,温度分布可以用类似于《公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)》的三段折线表示,离桥面0.55 m以下为0℃,桥面以下0.1~0.55 m和0~0.1 m分别为两段折线,与规范区别在于规范是桥面以下0.4 m为折线的分界线(见图6c)。当温度大于24℃时,拟合曲线变成四段折线,跟美国AASHTO规范类似,在底板位置增加一段折线,其它跟气温<24℃时的类似。其中,图5a的横坐标相对温度值为图4的拟合曲线各测点的温度相对值减去拟合曲线中最低温度相对值得到。

根据图5a的拟合结果,当气温分别为22℃、24℃、25℃时,测点3的测试结果分别为7.8℃、10.4℃、11.6℃,而根据从2004年10月至今收集到的番禺区气象局公布的天气实况发现,该地区的最高气温为37℃,可推测此时测点3的温度会

达到26.9℃,而在该温度下,测点10、11的温度分别为13.4℃、0.4℃,将这段推测出的折线反向延长至桥面,则得到桥面的温度为33.8℃(见图6a),即超过我国《公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)》规定的桥面温度25℃(混凝土铺装)。同样,可以拟合出与右腹板相同的气候条件下,气温不同时左腹板温度分布的拟合曲线(见图5b),其规律与右腹板非常相似,只是顶板的温度值不同。根据不同气温时,各测点得到的拟合曲线,进而可预测出

腹板在37℃时的竖向温度梯度,见图6b。

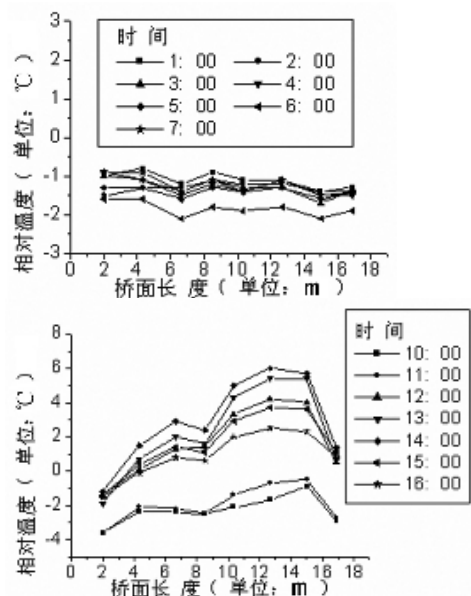


图3 2004年11月17日混凝土桥面测点的温度分布情况

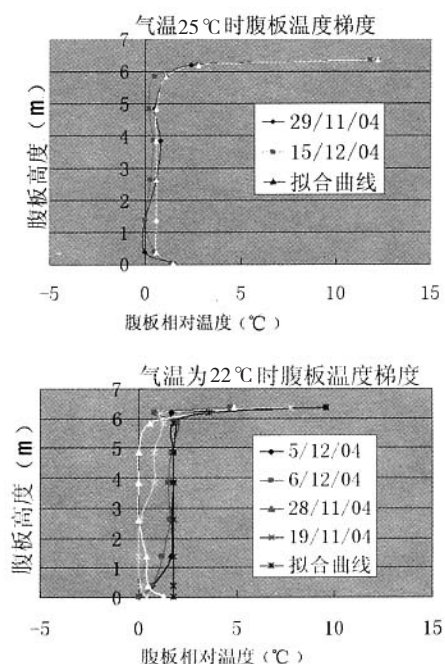
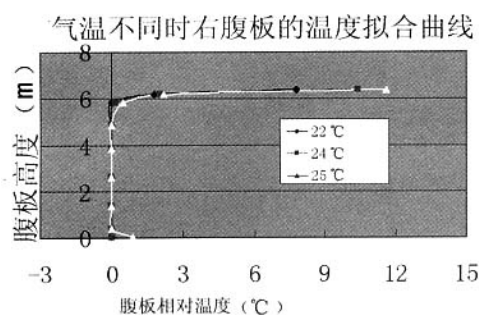
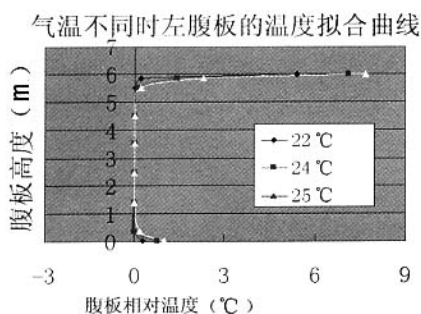


图4 气温为25℃和22℃时的右腹板温度分布

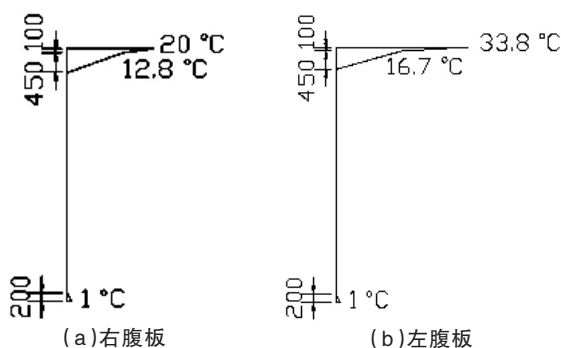


(a) 右腹板



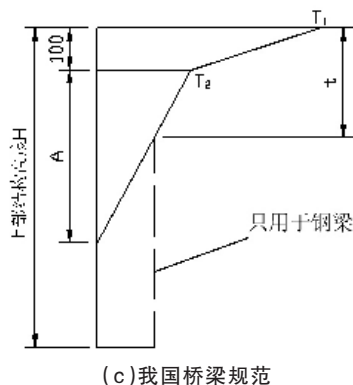
(b) 左腹板

图 5 不同气温条件下左、右腹板的温度拟合曲线



(a) 右腹板

(b) 左腹板



(c) 我国桥梁规范

图 6 我国桥规、气温 37℃ 时预测左、右腹板的竖向梯度温度 (尺寸单位: mm)

从图 6 可以看出, 当温度达到番禺地区的全年最高气温 37℃ 时, 上述气候条件下, 左右腹板顶的温度分别为 33.8℃ 和 20℃, 两者的平均值为 26.9℃, 很接近我国桥梁规范的规定值。这就涉及到如何合理地定义温度梯度, 是按温度梯度较大的右腹板来定义, 还是取两者的平均值。建议按以

下两个原则来确定: (1) 根据这一竖向温度梯度模式进行桥梁结构仿真计算得到的挠度与实测相等; (2) 在温度荷载作用下, 两者得到的最大应力 (最大应变) 相等。

3.3 底板的温度分布规律

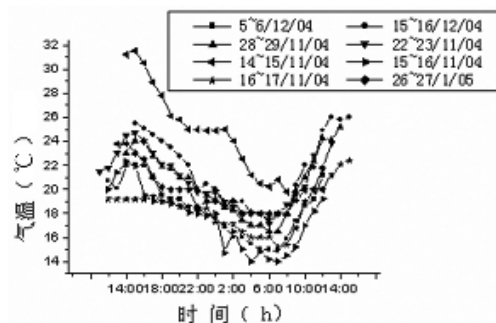
底板温度与左右腹板底的温度比较接近, 基本上 < 腹板底 1℃。这是由于该桥是南北走向, 左右腹板分别位于西侧和东侧, 日出和日落时会照射到腹板底, 使其温度略大于底板。可见, 若综合考虑底板温度分布来拟合该桥的竖向温度梯度模式, 可忽略截面下端的折线, 近似认为从箱梁底面到桥面以下 0.55 m 之间的温度都为 0℃。

3.4 箱梁内外气温的变化

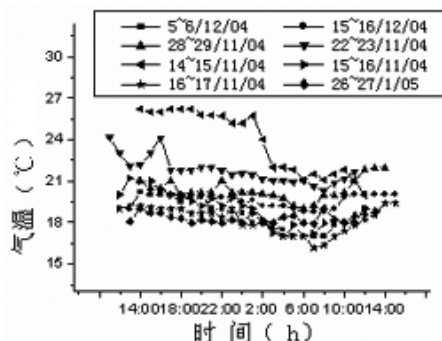
从图 7a 来看, 每日的环境气温与时间基本上呈正弦曲线的规律变化, 当最高气温小于 26℃ 时, 日温差不超过 8℃, 当最高气温达到 30℃ 时, 日温差达到 12℃, 可见环境气温越高, 当日的日温差越大。每天气温最高值一般出现在下午 13:00 ~ 15:00, 最低值则出现在每日凌晨 6:00 ~ 7:00。

由图 7b 可见, 由于箱梁内没有受到阳光的直接辐射, 混凝土又是导热的不良导体, 从而使每日箱梁内的气温变化不大, 外界最高气温在 26℃ 以内时, 箱梁内日温差基本在 2℃ 以内, 当外界气温达到 30℃ 时, 其温差也仅仅是在 3℃ 左右。

3.5 相对湿度对混凝土温度梯度的影响



(a) 箱梁外气温



(b) 箱梁内气温

图 7 24 h 箱梁内外气温变化曲线

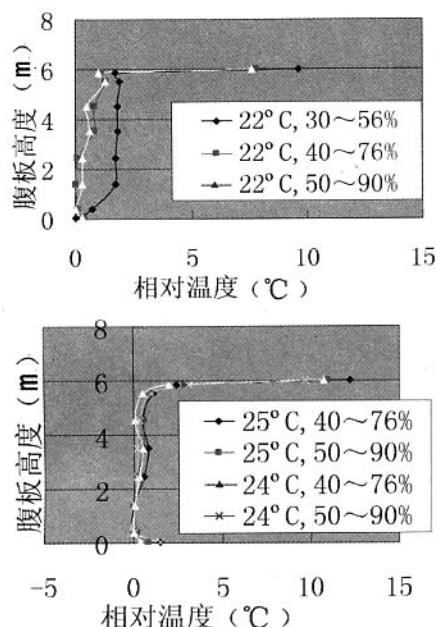


图8 不同温度,相对湿度时右腹板的温度分布曲线

根据各测点几个月的测试结果来看,相对湿度对桥面温度的影响不容忽视,而我国现行的桥梁规范并没有提到混凝土梁桥的竖向温度梯度是根据相对湿度是多少时确定的,也没有说明当相对湿度的不同时,如何对竖向温度梯度进行修正。对于右腹板来说,环境温度在22~26℃时,相对湿度的影响较大,但随着温度的升高,相对湿度对其影响则越来越小;而左腹板随着温度增大,相对湿度减小,与右腹板温度更接近,从而在温度较高时其内部的温度也增长较快。可参考图6来定义横向坡度为4%的预应力混凝土箱梁桥两侧腹板的竖向温度梯度模式,但应根据气温、相对湿度等气候条件的不同进行修正。

根据右腹板的数据结果,可拟合出平均相对湿度(指当日气象局公布的相对湿度的平均值,如相对湿度为50~90%,则其平均值为70%)、箱梁外气温、腹板高度坐标之间的计算公式如下:

当 $0.1 < H \leq 0.6$

$$y = 0.046(H - 0.54)(T - 22.163)(T - 25.13) \cdot RH - 2.6032H(T - 22.61)^2 + 14.63 \quad (3-1)$$

当 $0 < H \leq 0.1$

$$y = -0.25(T - 21.74)(T - 27.73) \cdot H \cdot RH + 14.625H(T - 20.77)(T - 29.54) + 0.0047RH(T - 21.59)(T - 37.23) - 0.316(T - 20.01)(T - 43.50) \quad (3-2)$$

式中: H ——腹板高度坐标,以桥面为坐标零点;

RH ——相对湿度平均值,单位: %;

T ——环境气温,单位: °C。

按照上述公式,可以根据实测的气象资料,对

左右腹板的温度分布进行预测,从而定义出如图6的腹板竖向温度梯度模式。从公式可以看出,气温达到37℃,若相对湿度平均值越小,则左右腹板顶的温度越接近,偏离我国桥规的温度梯度越远,所以施工最好不要选择在7、8月份,这段时间气温很接近37℃,施工应提前完成桥面铺装,若桥面铺装为沥青铺装层,则可降低混凝土的温度,从而避免在设计时按规范公式计算偏小,而出现温度裂缝。

3.6 竖向温度梯度沿桥梁纵向的变化

根据对1#块和6#块测点的测试结果发现,两个断面腹板对应的测点的温度相差不大,全部数据都不超过2℃的偏差,故可不考虑温度沿纵向的分布不同,只需要考虑横截面的竖向温度梯度模式。

4 结语

通过对观音沙大桥的现场测试结果,得到以下结论和提出一些需要解决的问题:

(1)要测量每日混凝土箱梁桥横截面的最大温度梯度,最适合的时间是下午13:00~15:00。

(2)要测试广州地区全年最高温度对应的温度梯度,可选择在每年的7、8月份。

(3)对于位于广州地区,横向坡度较大的混凝土单室箱梁,由于其两侧腹板测试出来的竖向温度梯度模式不同,如何使用有限元软件建立杆系模型仿真分析这种实桥的温度分布,成为目前迫切要解决的问题。

(4)温度在22~26℃时,相对湿度对竖向温度梯度的影响较大,随着温度的升高,相对湿度的减少,两侧腹板的温度趋向相等,规范是否基于这一考虑而不同时考虑横坡与相对湿度两个因素对箱梁桥的影响,没有作出明确说明。

(5)根据测试结果来看,目前我国桥梁规范规定的竖向温度梯度模式对于广州地区来说,是偏不安全的,建议对规范的模式进行修正。

参考文献

- [1] 康为江. 钢筋混凝土箱梁日照温度效应研究.[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2000
- [2] 周光伟. 大跨预应力混凝土连续刚构桥施工控制研究及温度效应分析.[D]. 湖南大学硕士论文, 2003
- [3] 项海帆. 高等桥梁结构理论.[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [4] 林开华. 热电偶的测温原理和基本定则.[J]. 氮肥设计, 1995, (33)
- [5] 杨振江, 曾余庚. 热电偶测温系统中的误差分析与处理.[J]. 化工自动化及仪表, 1996, 23(3): 49-52
- [6] 陈国雄. 预应力混凝土连续刚构桥施工过程中箱梁温度场与

温度效应分析.[D].华南理工大学硕士学位论文,2005

[7]Carin L. Roberts-Wollman,M.ASCE,John E.Breen,F.ASCE,Jason Cawrse,Measurements of Thermal Gradients and their Effects on Segmental Concrete Bridge.[J].Journal of Bridge Engineering,2002

[8]Mamdouh M.Elbadry,Amin Ghall,M.ASCE, Temperature Variations in Concrete Bridges.[J].Journal of Structural Engineering,ASCE 1983,109(10):2355-2374

[9] 中华人民共和国交通部.公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004).[S].2004

[10]Mamdouh,M.Elbadry,A.Ghali,Temperature Variations in Con-

crete Engineering.[J].,1983,109(10)

[11]Branco, F.A.,Martins, L.,TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CONCRETE BOX GIRDER BRIDGES,Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures.[M].Split,Yugosl,1984

[12]Barr,P.J.,Stanton, J.F.,Eberhard,M.O.,Effects of temperature variations on precast.[J].prestressed concrete bridge girders,Journal of Bridge Engineering,2005,10(2):186-194



(上接 161 页)满足图 7 的要求:

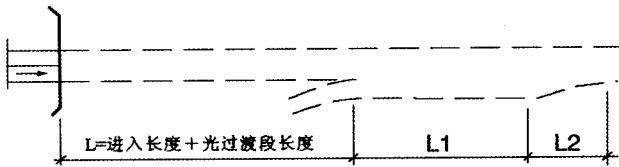


图 7 进入长度和过渡段长度示意

此处,进入长度是指司机进入地下道路后的视觉变化反映时间内车辆行驶的距离。光过渡段一般分为两段,亮度逐渐变暗。参考国外的研究,不同速度下的进入长度和光过渡段的长度要求如表 1:

表 1 地下道路入口附加长度推荐值		
速度(km/h)	进入长度(m)	光过渡段长度 (m)
50	40	70
60	50	80
70	60	100
80	70	110
90	75	120

地下道路出入口处和地面道路的 T 型、X 型交叉口的距离应不小于 2 个停车视距。在视觉条件很好、具有明显标志的条件下,可以适当降低至 1.5 个停车视距。

4 结论

地下道路出入口设计应该在满足交通工程设计的前提下,与需要缓解拥挤的主要道路实现有效衔接,通过多点进出的布置方法,协调地下道路与地面道路通行能力,并增强地下道路的辐射范围。此外,地下道路的出入口设计还需要综合考虑空间的合理利用和工程的造价,选择匝道和合流分流的布置形式,并满足视距、光过渡等一系列安全要求。

参考文献

[1]陈志龙,王玉北.城市地下空间规划[M].南京:东南大学出版社,2005,1-8

[2]顾民.城市地下道路规划研究[D].同济大学硕士论文.2005,14-18

[3]Maunsell, Brisbane City Council. North-South Bypass Tunnel Traffic and Transport[R]. 2005,(1):22-26

[4]SKM Connell Wagner. North-South Bypass Tunnel, Phase2-Feasibility Study, EIS-Chapter 4-Project Description [R]. 2005,(2):18-38

[5]Mott MacDonald/L í nuh?nnunPublic Roads Administration. Independent Review of a Tunnel Connection to Vestmannaeyjar [R]. 2004,(3):28-43



石家庄拟启动城内京广铁路“入地”工程

长期以来,石家庄市城区被京广铁路一分为二,造成诸多不便,今年拟启动的城内铁路“入地”工程将使这种局面得到改变。

据介绍,城内铁路下穿工程在国外已不是什么新鲜事,但在国内尚无先例。石家庄市的铁路下穿工程,是将京广线上 6 条铁路正线,采用地下敷设方式,自城区北二环“入地”至槐安路“出地”。工程将在既有铁路以东 50 m 范围内,采用明挖法施工,修建 6 条铁路正线,建成全长 5 000 m 地下铁路隧道。该段地面铁路及站台等设施拆除后,将作为绿化带及道路。同时搬迁石家庄市既有火车站和铁路货运系统,在现石家庄编组站位置建设全国一流的新火车站,在玉村建设设施先进、配套齐全的铁路货运站。

这一工程实施后,不仅可避免铁路噪音,改善城市环境,还将彻底解决因铁路分割给城市带来的诸多问题,对城市布局和省会发展产生积极而深远的影响。