

# 大跨径波形钢腹板箱梁桥截面竖向温度梯度研究

姜竹昌<sup>1</sup>, 高华睿<sup>2</sup>, 曹洪亮<sup>1</sup>, 张峰<sup>2</sup>

(1. 山东高速高广公路有限公司, 山东 滨州 256600; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心)

**摘要:** 依托山东省高广高速公路小清河3号桥为研究对象, 对其波形钢腹板箱梁横截面进行长期温度观测。基于全年温度较高时段(5—7月)现场实测数据, 采用数理统计的方式研究其截面竖向温度分布规律及温度标准值。结果表明: 波形钢腹板箱梁截面竖向温度呈非线性分布, 顶板温度变化最大, 波形钢腹板整体温度分布较为一致, 钢混连接部位温度变化最小; 通过分布拟合假设检验, 截面竖向温度服从对数正态分布; 以重现期为50年计算了小清河3号波形钢腹板连续箱梁桥的竖向温度标准值, 并提出了竖向温度梯度分布模式。

**关键词:** 桥梁工程; 波形钢腹板箱梁; 现场试验; 温度效应; 数理统计; 温度标准值分布模式

波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥具有自重轻、受力合理、经济性好等优势, 逐渐成为国内外大跨径桥梁建造领域极力推广和应用的新型桥梁结构形式之一。目前国内外学者主要针对波形钢腹板梁结构设计方面等开展研究, 而对波形钢腹板箱梁桥温度效应研究较少。

桥梁结构长期处于自然环境中, 经受周期性温度改变、太阳辐射等因素影响, 其内部形成明显的温度梯度。对于波形钢腹板组合箱梁而言, 钢腹板与混凝土的热传导系数存在差异, 温度梯度更为复杂, 当桥梁的顶、底板及钢腹板处于不同温度状态时, 各部位会产生不同的温度变形和应力, 当温度应力过大时, 容易导致开裂, 影响桥梁结构的安全性和耐久性。因此, 开展波形钢腹板组合箱梁桥温度效应研究极为重要。

温度对于桥梁结构的重要性, 很早便引起了国内外学者的关注。IM等通过对钢—混组合箱梁截面开展温度测试与分析研究, 认为箱梁存在横向及竖向温差, 且横向温差接近竖向温差的50%; Sallal R Abid开展了混凝土箱梁温度场测试研究, 建立了竖向及横向最大温度梯度计算经验公式; 朱志鹏采用数值模拟研究波形钢腹板梁的温度分布特点及变化规律, 但未与实际温度测试结果进行对比分析; 郭翔飞等基于中小跨径波形钢腹板箱梁进行研究, 提出了温度分布经验计算公式, 但是否适用于大跨径波形钢腹板箱梁桥

有待商榷; 徐向峰等基于一座8 m波形钢腹板梁开展9个月的温度测试, 进行温度场研究; 董旭等依托前山河特大跨波形钢腹板箱梁桥开展3 d的温度场观测, 研究其温度场分布规律并提出了波形钢腹板箱梁桥竖向及横向温度梯度数学计算模型; 姚晨基于陕西西咸高速人行桥及宁夏叶盛黄河大桥开展了极端气温下的波形钢腹板箱梁日照温度研究。综上所述, 目前关于大跨径波形钢腹板箱梁桥的温度效应研究较少, 其大部分温度实测时间较短。

该文依托山东省高广高速公路小清河3号大跨波形钢腹板连续箱梁桥, 对其波形钢腹板箱室横截面进行长达1 295 h的温度观测, 基于现场实测数据, 采用数理统计方法, 研究其1年中温度较高时段(5—7月)截面竖向温度效应分布规律及竖向温度代表值。

## 1 波形钢腹板箱梁桥温度测试

### 1.1 工程概况

高广高速公路小清河3号桥为3跨(90+150+90) m预应力波形钢腹板连续箱梁桥, 单幅主梁采用单箱单室直腹板变截面形式, 箱梁顶板宽度均为12.75 m, 底板宽为6.75 m, 跨中梁高为4.2 m, 支座位置梁高为9.2 m, 按1.8次抛物线过渡, 波形钢腹板厚度为16~30 mm。施工现场如图1所示。



图 1 小清河 3 号桥

波形钢腹板箱梁桥不同于传统 PC 箱梁,是一种顶、底板为混凝土,腹板为波形钢板的新型钢—混组合箱梁结构,由于受材料特性及钢腹板尺寸影响,其温度效应研究不能简单参考普通 PC 箱梁的规定。因此须基于实际温度测试数据,进而研究符合大跨波形钢腹板箱梁桥的温度效应。

1.2 测试内容及布置方案

桥址区域属暖温带亚湿润季风气候,气候温润,四季分明,冬冷夏热,光照充足,降水丰沛,雨热同期,年平均气温为 12~13℃。该桥呈东西走向,选择小清河大桥右幅靠近 39#墩 5#块箱梁截面(图 2),测试截面梁高为 772.9 cm,顶板宽度为 12.75 m,钢腹板高为 565.9 cm。竖向温度测点沿梁高方向对称布置,其中 1、2 及 7、8 测点均埋置于混凝土顶、底板内,3、4、5、6 号测点紧贴于钢腹板布置,共 16 个测点,如图 3 所示。

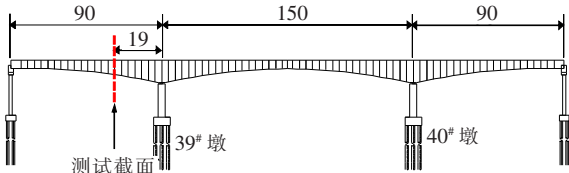


图 2 测试断面布置图(单位:m)

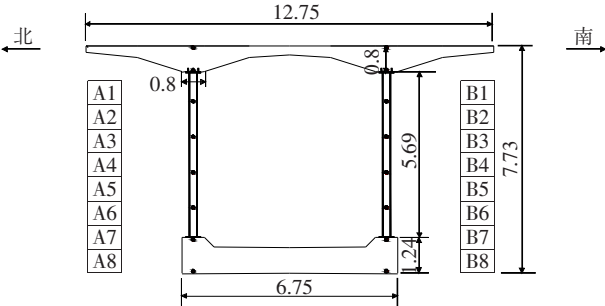


图 3 温度测点布置(单位:m)

混凝土顶底板内的温度测点采用的是预埋式 JMT-36B 智能温度传感器,现场预埋传感器如图 4 所示,采用无线远程自动化采集模块进行温度测试,采集频率为 1 次/h。

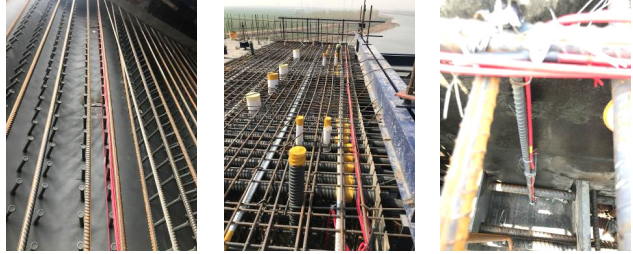


图 4 现场测试

1.3 测试结果

测试时间从 2019 年 5 月 18 日 10:00 至 2019 年 7 月 9 日 09:00,采集时长共计 1 295 h,各测点温度随时间变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:截面竖向各测点温度随时间变化具有一定周期性变化规律,为更清晰地反映各温度循环周期内温度变化情况,选取 24 h 一个温度循环(2019 年 5 月 18 日 10:00 至 5 月 19 日 10:00)的测试结果进行分析,温度随时间变化如图 6 所示。

由图 6 可知:① 24 h 内各测点温度随时间变化呈周期性正弦函数变化,中午 12:00 温度最高,04:00—05:00 温度最低;② 截面 A 侧及 B 侧温度变化规律基本一致,存在截面温度相似性分布特征;③ 竖向各测点温度值存在差异,说明沿截面高度方向存在温度梯度,其中混凝土顶板顶面测点(A1、B1)温度最高,1 个周期内温度变化量最大,钢腹板各测点(A3、A4、A5、A6、B3、B4、B5、B6)温度差异较小,且变化规律基本一致,混凝土底板底面(A8、B8)由于不直接受阳光照射,因此变化较小,靠近混凝土与钢腹板结合部位测点(A2、A7、B2、B7)温度变化最为平缓,变化量最小。针对以上测试结论,基于数理统计的方法进一步开展波形钢腹板箱梁桥竖向截面温度特性分析。

2 温度测试样本特性分析

2.1 聚类分析

聚类分析指将多个样本集合分为具有相似性特征类别组合的分析过程。为研究截面测点温度对称性特征,采用类平均法对各测点温度样本进行聚类。类平均法是把类与类之间的距离定义为所有样品对之间的平均距离,通过距离的大小判定不同样本之间的相关性,即:

$$D_{pq} = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{i \in G_p, j \in G_q} d_{ij} \quad (1)$$

式中: $D_{pq}$  为所有样品对的平均距离; $n_p$ 、 $n_q$  分别为类

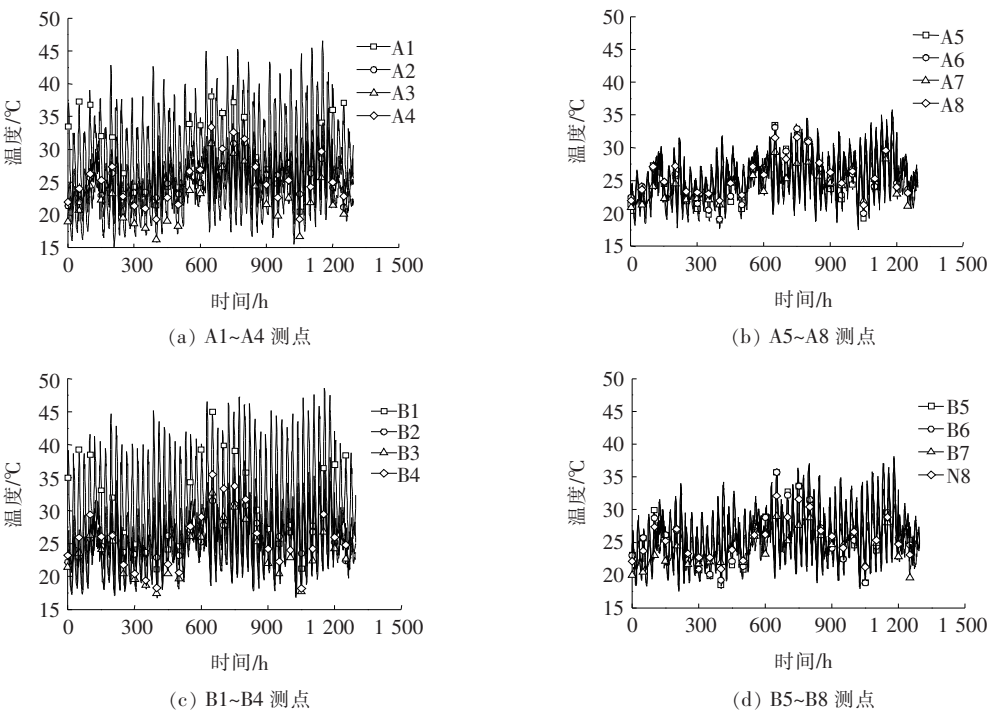


图5 各测点温度随时间变化曲线

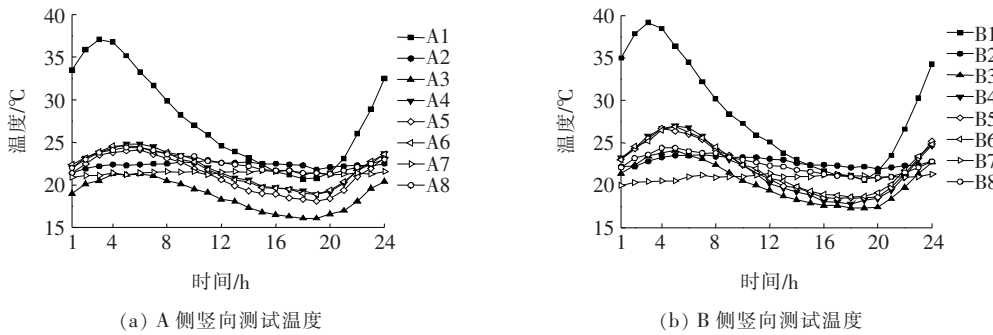


图6 24 h 温度随时间变化曲线

$G_p$ 、 $G_q$  的样品个数; $d_{ij}$  为每个样品对的距离。  
聚类分析结果如图 7 所示。

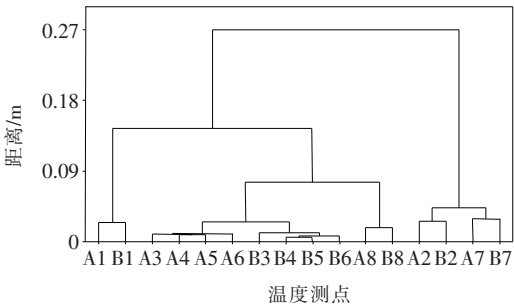


图7 竖向温度测点聚类分析

由图 7 可知:混凝土顶板温度样本 A1 和 B1,A2 和 B2,钢腹板 A3、A4、A5、A6 和 B3、B4、B5、B6,底板

A7 和 B7,A8 和 B8 分别在统计特性上最为接近,因此 A、B 两侧竖向截面温度变化规律存在相似性;温度变化规律可归为一类;混凝土与钢腹板结合部位变化与其他位置测点规律不相同,说明截面竖向温度存在差异,需进一步开展温度分布规律研究。

2.2 温度测试样本竖向温度特性分析

根据混凝土顶、底板和波形钢腹板竖向实测温度数据分析发现,波形钢腹板箱梁由于受到日照辐射影响,一个温度循环内中午 12:00 时各测点温差较大,总体分布规律较强,考虑到分析数据的合理性,选取具有代表性的 3 个观测日(2019 年 5 月 25 日、6 月 24 日、7 月 5 日)12:00 竖向温度测试数据,统计得到 3 个观测日的实测竖向温度场分布,如图 8 所示。

由图 8 可见:① 3 个观测日中,实测竖向温度场变

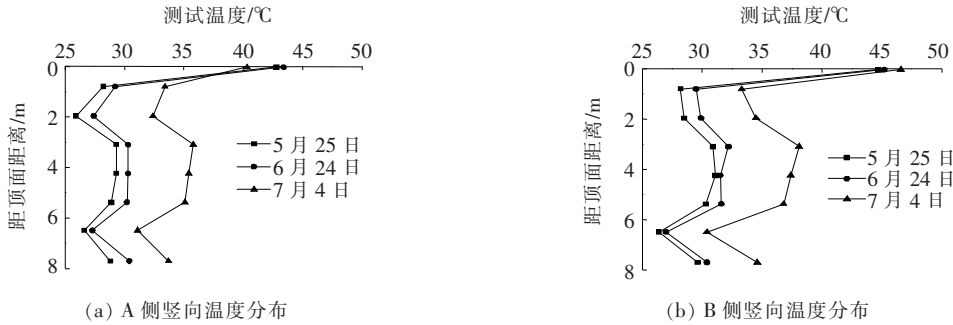


图 8 实测竖向温度分布

化趋势基本相同,夏季晴天观测日(7月4日)竖向温度梯度变化较大;② 实测竖向温度分布顶板顶面温度最高,腹板至梁底部温度逐渐降低,呈非线性分布,其原因为顶板表面直接受到太阳辐射作用,温度较高,而混凝土由于热传导性较差,因此远离顶面位置的其他区域温度迅速降低;③ 波形钢腹板由于受到顶底板混凝土温度影响,上下钢混结合位置附近温度较低,远离上下翼缘一定距离后温度迅速升高,且由于材料导热性较好,中间部分温度变化幅度较小;④ 混凝土底板整体温差较小,温度由底板上缘至下缘逐步升高。为进一步研究截面竖向温差特性,采用概率分布拟合的方式研究其截面竖向温度分布特征。

2.3 竖向温度概率分布拟合

采用柯尔莫哥洛夫检验法对截面竖向温度概率分布进行非参数假设检验,分别对截面竖向温度数据的

正态概率分布、对数正态概率分布及威布尔分布的累计经验分布函数和总体分布函数进行比较,越接近总体分布函数即可认为服从该分布,具体的概率分布拟合方法:设截面竖向温度  $X$  的分布函数为  $F(x)$ ,  $F(x)$  为  $x$  的连续函数。 $X_1, X_2, \dots, X_n$  为来自  $X$  的不同截面高度的温度值,利用样本不同分布形式下的经验分布函数  $F_0(x)$  和总体  $F(x)$  分布函数的最大差值( $D_n$  检验值)判断总体分布更适合哪种分布,即差值越小说明分布拟合程度越高,当  $D_n$  检验值小于临界值  $D_{n,\alpha}$  时,即认为样本服从该分布。选取置信水平  $\alpha=0.05$ ,样本容量  $n=1\,295$ ,查  $D_n$  检验临界值表可得  $D_{1\,295,0.05}=0.037\,8$ ,对各测点的累计经验分布函数与总体分布函数对比如图 9、10 所示(2、4、7 号测点数据图未示出),统计不同分布形式下的经验分布函数与总体分布函数最大差值如表 1 所示。

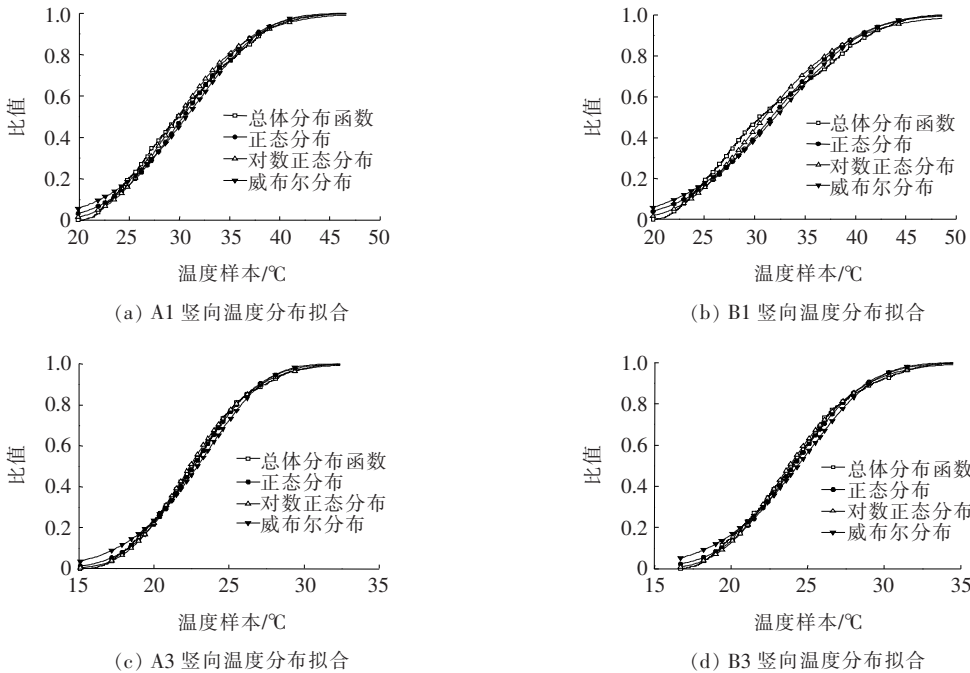


图 9 竖向温度经验分布函数图(1)

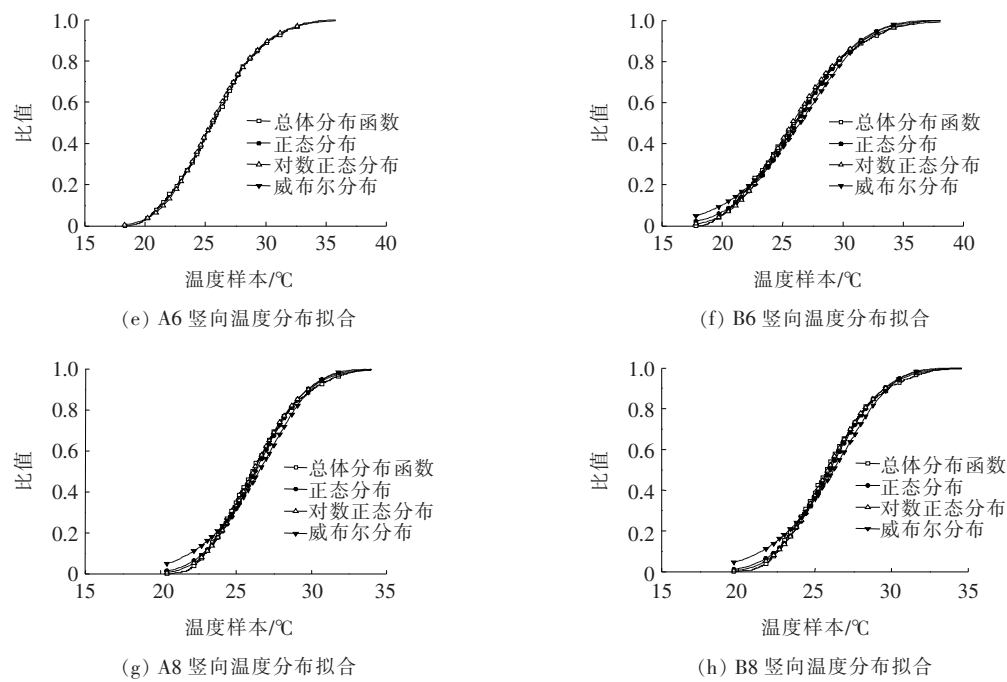


图 10 竖向温度经验分布函数图(2)

表 1 经验分布函数与总体函数最大差值统计

测点	A 侧温度分布检验值 $D_n$			B 侧温度分布检验值 $D_n$		
	正态分布	对数正态分布	威布尔分布	正态分布	对数正态分布	威布尔分布
1	0.063 7	0.044 1	0.069 4	0.086 9	0.064 6	0.094 1
2	0.061 8	0.052 5	0.082 8	0.060 7	0.054 1	0.079 9
3	0.028 9	0.029 7	0.057 3	0.032 2	0.030 7	0.066 6
4	0.036 0	0.025 4	0.063 4	0.050 2	0.033 0	0.061 0
5	0.033 8	0.026 3	0.059 7	0.040 7	0.031 5	0.062 2
6	0.031 5	0.026 0	0.059 9	0.036 0	0.029 8	0.060 0
7	0.090 5	0.085 1	0.094 0	0.071 3	0.063 3	0.086 9
8	0.053 6	0.039 4	0.077 7	0.046 9	0.029 4	0.078 7

由图 9 及表 1 可知:① 波形钢腹板位置处竖向温度对数正态分布  $D_n$  检验值相比其他两种分布形式,其值小于临界值  $D_{1\ 295,0.05}=0.037\ 8$ ,因此可认为对数正态分布拟合程度更优,竖向温度服从对数正态分布;② 混凝土顶、底板竖向温差对数正态分布检验值大于临界值,说明混凝土顶、底板温度规律分布特性相较波形钢腹板温度分布特性并不明显,其原因在于混凝土材料热传导效应较为复杂,而波形钢腹板材质均一,竖向温度概率分布特性更为明显;③ 虽然混凝土顶、底板分布拟合特性并不明显,但其对数正态分布概率特性较其他两种分布拟合程度较高,亦可认为同样服从对数正态分布。

3 波形钢腹板箱梁竖向温度标准值

该文以重现期为 50 年计算小清河 3 号波形钢腹板连续箱梁桥的竖向温度标准值。按照中国桥梁规范中规定的设计基准期 100 年考虑,设计基准期内最大温度作用超过标准值次数的数学期望为 2 次。令超越概率  $P$  为实际温差  $T$  大于给定温差标准值  $T_0$  的概率(即超越概率),则  $P$  可由以下公式求得:

$$P=\frac{2}{100\times N}\times 100\%$$

(2)

式中: $N$  为样本总量。

波形钢腹板竖向温度标准值  $T_0$ 。由式(3)计算:

$$P = 1 - F(T_0) = \int_{T_0}^{+\infty} f(T) dT \quad (3)$$

式中:  $F(T_0)$  为各测点竖向温度的对数正态分布经验累积分布函数;  $f(T)$  为竖向温度  $T$  的概率密度函数。

基于前节竖向温度分布拟合统计分析, 采用对数正态分布的经验分布函数代入式(3), 计算得到重现期为 50 年的竖向温度标准值, 其竖向温度分布模式如图 10 所示。

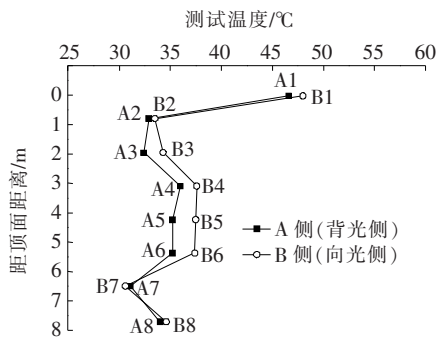


图 10 竖向温度代表值

由图 10 可知: ① 波形钢腹板箱梁桥截面竖向温度代表值呈现明显的非线性分布, 顶板上缘温度最高, 钢-混连接部位温度最低, 波形钢腹板除 3 号位置外, 其他位置温度基本一致, 其原因为受翼缘遮挡作用影响, 导致 3 号测点环境温度场影响存在差异; ② 受太阳辐射的影响, A 侧(向光侧)与 B 侧(背光侧)波形钢腹板温度存在明显差异, 因此不可忽略太阳照射对钢腹板温度场的影响。

选取竖向截面温度标准值的最低值作为竖向温度梯度的 0 值, 提出截面竖向温度梯度模式见图 11。

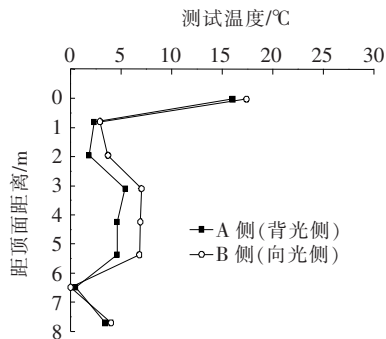


图 11 竖向温度梯度

## 4 结论

依托小清河 3 号波形钢腹板连续箱梁桥 5—7 月温度测试数据, 采用数理统计的方式开展截面竖向温

度分布规律及温度代表值研究, 得到以下结论:

(1) 波形钢腹板箱梁截面竖向温度分布沿梁高呈现非线性分布, 顶板温度变化最大, 波形钢腹板整体温度分布较为一致, 钢混连接部位温度变化最小, 存在明显的温度梯度。

(2) 基于数理统计的方法对截面竖向温度进行概率分布非参数假设检验, 检验结果表明, 波形钢腹板箱梁竖向温度服从对数正态分布。

(3) 以重现期为 50 年计算小清河 3 号波形钢腹板连续箱梁桥的竖向温度标准值, 并提出了竖向温度梯度分布模式, 由计算结果可知, 在进行桥梁温度作用效应设计时, 应考虑太阳辐射对钢腹板的影响, 该分布模式可为后续同类型桥梁温度效应研究提供参考。

## 参考文献:

- [1] 万水, 李淑琴, 马磊, 等. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009(2).
- [2] Nguyen N D, Han S R, Lee G S, et al. Moment Modification Factor of I-Girder with Trapezoidal-Web-Corrugations Considering Concentrated Load Height Effects [J]. Steel Construction, 2011, 67(11): 1 773—1 787.
- [3] 张峰, 陆小蕊, 叶见曙, 等. 波形钢腹板组合梁体外预应力极限应力模型试验及建议公式[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018(5).
- [4] 胡建华, 刘海波, 狄瑾. 波形钢腹板 PC 组合箱梁扭转性能分析[J]. 中外公路, 2017(3).
- [5] 盛焰正, 刘国坤, 赵海军. 单箱多室混凝土箱梁结构的温度场预测[J]. 中外公路, 2018(4).
- [6] Im C K, Chang S P. Estimating Extreme Thermal Loads in Composite Bridge Using Long-Term Measured Data [J]. Steel Structures, 2004, 4(1): 25—31.
- [7] Sallal R Abid, Nildem Taysi, Mustafa Özakaça. Experimental Analysis of Temperature Gradients in Concrete Box-Girders [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 523—532.
- [8] 朱鹏志. 特殊桥梁结构的温度问题研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2008.
- [9] 郭翔飞. 波纹钢腹板预应力混凝土箱梁温度效应研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 徐向锋, 张峰, 刘佳琪. 波形钢腹板箱梁温度分布[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018(12).
- [11] 董旭, 邓振全, 李树忱, 等. 大跨波形钢腹板箱梁桥日照温度场及温差效应研究[J]. 工程力学, 2017(9).
- [12] 姚晨. 极端气温下波形钢腹板 PC 组合箱梁温度效应研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2017.