

文章编号:1673-2049(2016)01-0113-07

高原高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥温度效应分析

季德钧¹, 刘江², 张琢芳², 刘永健²

(1. 青海省高等级公路建设管理局, 青海 西宁 810008; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:对比了当前各国规范对钢-混凝土组合梁竖向温度梯度形式及温度基数取值的相关规定, 其中英国规范和欧洲规范最为详尽合理。在英国规范的基础上, 通过桥位处太阳辐射强度的计算结果对温度基数的取值进行修正。以青海黄南地区哇加滩黄河特大桥为背景, 建立全桥有限元杆系模型, 对比分析了修正的英国规范温度梯度模式和中国规范的温度梯度模式作用下主梁的应力分布, 以及斜拉桥在整体温差、索梁(塔)温差、主梁竖向温度梯度和主塔顺桥向温差作用下的温度效应及各构件的温度敏感性。结果表明:在青海高原高寒地区, 进行桥梁设计时采用考虑地理位置修正的英国规范主梁竖向温度梯度模式进行计算并指导设计更偏于安全;对于主桥的某些构件, 温度作用已经成为仅次于恒载的第二大控制作用, 所得出的全桥各构件温度敏感性分析结果可为高原高寒地区同类桥梁的设计、计算提供参考和依据。

关键词:钢-混凝土组合梁斜拉桥;高原高寒地区;温度效应;竖向温度梯度;敏感性

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

Temperature Effect Analysis of Steel-concrete Composite Girder Cable-stayed Bridge in Arctic-alpine Region

JI De-jun¹, LIU Jiang², ZHANG Zhuan-fang², LIU Yong-jian²

(1. Qinghai Provincial Authority of High-grade Highway Construction Management, Xining 810008, Qinghai, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Authors compared vertical temperature gradient and its basis in composite girder of current codes of different countries, in which British standard and Eurocode were the most detailed. Based on British standard, temperature basis was revised by calculating the solar radiation of bridge position. With engineering background of Wajiatan Yellow River Bridge in Huangnan, Qinghai, the finite element model of a whole bridge was established to calculate the stress of the girder at vertical temperature gradient of revised British code and Chinese code. Meanwhile, the temperature effects and sensitivity of each structural member under different temperature loads of entire temperature difference, cable-girder (pylon) temperature difference, vertical temperature gradient of girder and along-span temperature gradient of pylon were analyzed. The results show that in Qinghai arctic-alpine region, design of composite girder cable-stayed bridge with vertical temperature curve of Chinese code is insecure; for some structural members, temperature effect plays the most important role except the dead load. The obtained sensitivity analysis results of different structural members in a whole bridge can provide references for the design and calculation of similar bridges.

收稿日期:2015-11-28

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014 318 363 230)

作者简介:季德钧(1965-),男,青海湟源人,高级工程师,E-mail:979723665@qq.com。

Key words: concrete-steel composite cable-stayed bridge; arctic-alpine region; temperature effect; vertical temperature gradient; sensitivity

0 引言

桥梁结构是暴露于自然环境中的结构物,在日照、气温和寒潮等气象因素的作用下,结构会产生非线性的温度分布^[1-2],这种非线性温差会在结构中产生较大的温度应力和变形,往往会超过荷载所产生的效应,从而造成结构的破坏。如加拿大西部曾发生某钢-混凝土组合梁桥垮塌事故,温度应力和变形是导致桥梁垮塌的主要原因之一^[3]。

钢-混凝土组合梁中钢材的导热系数约为混凝土的 10 倍,由于 2 种材料导热性能的巨大差别,会使钢梁和混凝土桥面板之间存在很大的温差,即存在较大的竖向温度梯度^[4],对于高原高寒地区,结构整体温度低,昼夜温差大,太阳辐射强,其作用尤为严重。然而,中国现行规范对钢-混凝土组合梁竖向温度梯度规定中温度基数的取值并未考虑桥位所在地理位置的影响,是否适用于高原高寒地区的钢-混凝土组合梁值得商榷。钢-混凝土组合梁斜拉桥为多次超静定结构,在复杂的应力场下温度对于索塔偏位、主梁变形、桥塔应力以及斜拉索索力的影响都比较显著^[5-6]。由于高原高寒地区的气候条件较一般平原地区更为恶劣,温度效应也更为显著;同时中国在高原高寒地区修建组合梁斜拉桥的经验相对较

少。因此,在高原高寒地区进行钢-混凝土组合梁斜拉桥建设,更应全面分析结构的温度效应。

本文针对各国规范的不同规定,在英国规范的基础上,通过桥位处太阳辐射强度的计算对温度基数的取值进行修正。同时以青海黄南地区哇加滩黄河特大桥为背景,建立全桥杆系有限元模型,分析温度作用对桥梁结构的影响,研究主桥各构件对不同温度作用的敏感性,为今后同类桥梁的设计、计算提供参考和依据。

1 考虑地理位置修正的钢-混凝土组合梁竖向温度梯度

1.1 各国规范的规定

不同国家地理位置不同,日照辐射强度不同,常用桥梁结构形式不同,因此各国规范对于钢-混凝土组合梁竖向温度梯度的规定也不尽相同,现对中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[7]、美国 AASHTO 规范^[8]、英国 BS 5400 规范^[9]及欧洲 EN 1991-1-5:2003 规范^[10]4 个规范规定的钢-混凝土组合梁竖向温度梯度进行对比,如图 1 所示,其中, t, h, h_1, h_2 均为混凝土桥面板厚度, $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, \Delta T_1, \Delta T'_1$ 均为进行温差计算的温度基数, H 为结构上部高度。

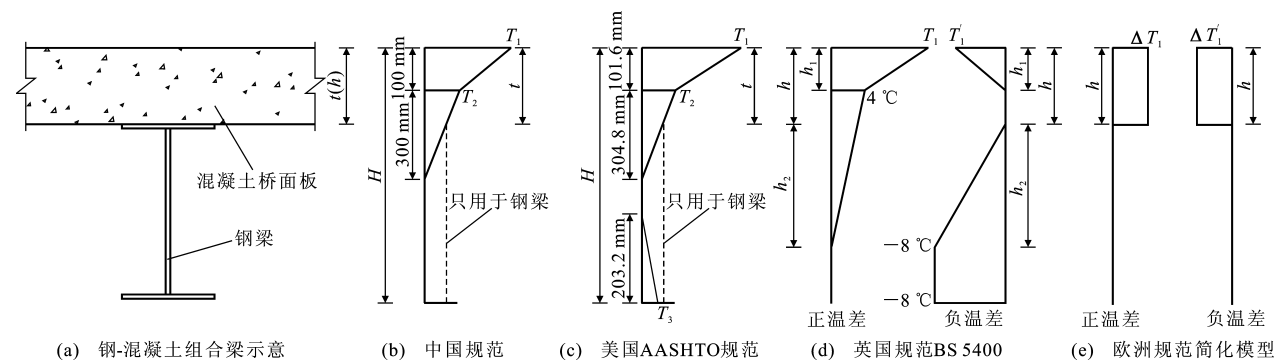


图 1 各国规范钢-混凝土组合梁竖向温度梯度曲线

Fig. 1 Vertical Temperature Gradient Curves of Composite Girder in Different Specifications

表 1 给出了各规范确定钢-混凝土组合梁竖向温度梯度的考虑因素。由表 1 可以看出,不同规范的区别在于温度曲线的形式不同和温度基数取值所考虑的因素不同。影响钢-混凝土组合梁竖向温度分布的主要因素有材料属性、桥面板厚度、太阳辐射强度、环境温度及桥面铺装的类型与厚度等,其中太阳辐射强度与环境温度主要由桥位所在地理位置确

定。《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)温度基数的取值不考虑桥面板厚度和桥位地理位置;美国 AASHTO 规范不考虑桥面板厚度和桥面铺装;欧洲规范分为常规与简化 2 种计算模式,其常规计算与英国规范相同;英国规范与欧洲常规计算确定温度基数时考虑因素最为全面,但并未考虑地理位置对温度基数取值的影响。

表 1 各规范钢-混凝土组合梁竖向温度梯度曲线形式及温度基数取值因素

Tab. 1 Forms of Vertical Temperature Gradient Curves and Factors of Temperature Basis Evaluation of Steel-concrete Composite Girder in Different Specifications

| 规范 | 温度梯度曲线形式 | 温度基数取值因素 | | | |
|---------------|-------------------|----------|------|------|------|
| | | 桥面板厚度 | 地理位置 | 铺装类型 | 铺装厚度 |
| 中国规范 | “3”折线 | 没有考虑 | 没有考虑 | 考虑 | 考虑 |
| 美国 AASHTO 规范 | “3”折线 | 没有考虑 | 考虑 | 没有考虑 | 没有考虑 |
| 英国 BS 5400 规范 | 升温“2”折线,降温“1+2”折线 | 考虑 | 没有考虑 | 考虑 | 考虑 |
| 欧洲规范(常规计算) | 升温“2”折线,降温“1+2”折线 | 考虑 | 没有考虑 | 考虑 | 考虑 |
| 欧洲规范(简化计算) | 竖线 | 没有考虑 | 没有考虑 | 没有考虑 | 没有考虑 |

1.2 竖向温度梯度

基于第 1.1 节对各规范的对比分析,现以英国规范为基础,考虑桥位地理位置与规范的差异进行温度基数的修正。纬度和海拔的差异决定了两地太阳辐射强度的不同,采用以下公式^[3]计算,即

$$I_b = 0.9 \frac{t_u K_a}{\sin(\theta)} G_{sc} \tag{1}$$

式中: I_b 为到达地球表面的太阳直接辐射强度; G_{sc} 为太阳常量; t_u 为林克氏浑浊度系数; K_a 为相对大气压,与海拔有关; θ 为太阳高度角。

现有研究表明,主梁竖向正温度梯度主要由太阳辐射引起,当混凝土箱梁顶板太阳辐射变化 $\pm 100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,顶板上缘竖向正温差变化 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而环境温度对于正温度梯度的影响较小^[11]。任意时刻到达顶板的太阳辐射 I_{bh} 为

$$I_{bh} = \sin(\theta) I_b \tag{2}$$

以英国伦敦为适用 BS 5400 规范的代表地区,可求得伦敦地区夏季主梁顶面最大太阳辐射强度为 $658.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,则太阳辐射对顶板温度基数的修正 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{I_{bh} - 658.5}{50} \tag{3}$$

修正后的顶板温度基数取值为 $T_1 + \Delta T$ 。正温差梯度各温度基数按顶板温度基数修正的相同倍数进行修正,负温差梯度则按正温差梯度的一 0.5 倍选取,即可得到考虑地理位置修正的钢-混凝土组合梁竖向温度梯度模式,如图 2 所示。

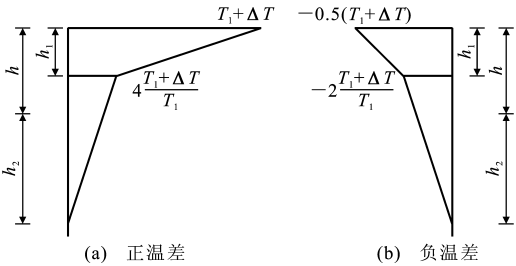


图 2 修正后的竖向温度梯度曲线

2 温度效应分析

本文以青海黄南地区哇加滩黄河特大桥为背景,建立全桥杆系有限元模型,分析温度作用对桥梁结构的影响,研究主桥各构件对不同温度作用的敏感性。

2.1 主桥概况

哇加滩黄河特大桥位于青海黄南地区,为青藏高原特殊型气候区;气温垂直分布差异明显,昼夜温差大,日照时间长,太阳辐射强,年际变化及季节分布不均匀。

主桥全长 1 000 m,为 104 m+116 m+560 m+116 m+104 m 的双塔双索面钢-混凝土组合梁半漂浮体系斜拉桥,桥总体布置如图 3 所示。桥面全宽 28.0 m,桥塔采用 H 型主塔,主梁采用双边“上”字形边主梁结合桥面板的整体断面,主梁断面如图 4 所示。“上”字形边主梁、横梁、小纵梁通过摩擦型高强螺栓连接形成钢梁段,架设预制桥面板,现浇混凝土湿接缝,通过焊于钢梁顶面的抗剪栓钉形成组合梁体系,斜拉索梁上采用锚拉板锚固。混凝土桥面板厚为 280 mm,分为预制和现浇部分,均采用 C60 混凝土。桥面铺装采用 9 cm 厚沥青混凝土。

2.2 修正竖向温度梯度与中国规范比较

采用第 1.2 节中给出的方法计算哇加滩黄河特大桥主梁竖向温度梯度。桥位处纬度为 35°N ,海拔为 2 158 m,可求得桥位处夏季主梁顶面最大太阳辐射强度为 $1\,030.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,则对顶板温度基数的修正 $\Delta T = 7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而得到主梁竖向温度梯度曲线,与中国《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)规定的温度曲线对比如图 5 所示。

采用 MIDAS/Civil 软件建立哇加滩特大桥全桥杆系模型,采用实际桥梁的边界条件,计算考虑地理位置修正的英国规范温度梯度模式和中国规范的温度梯度模式作用下主梁的应力分布,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出:修正的英国规范温度梯度

Fig. 2 Revised Vertical Temperature Gradient Curves

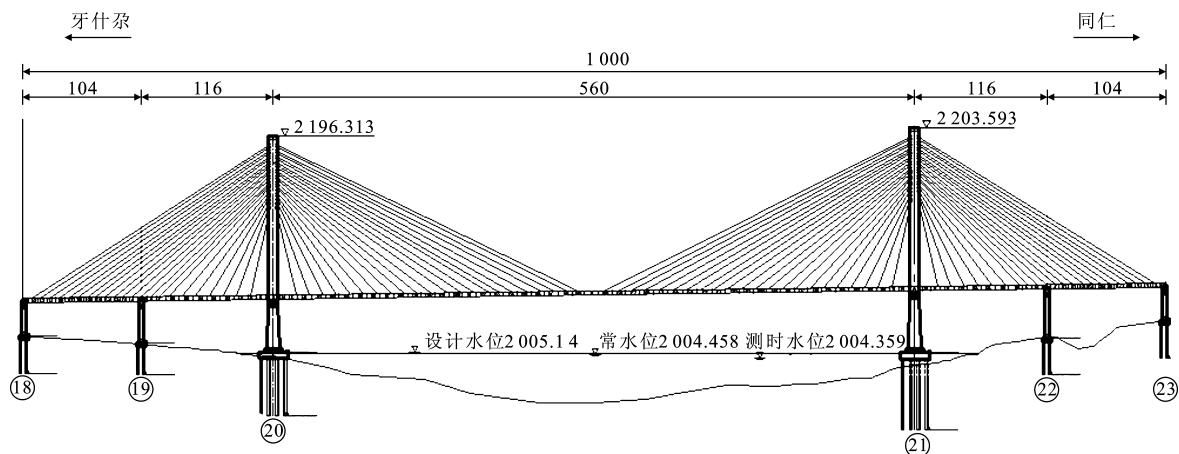


图3 哇加滩黄河特大桥总体布置(单位:m)

Fig.3 Overall Arrangement of Wajiatan Yellow River Bridge (Unit:m)

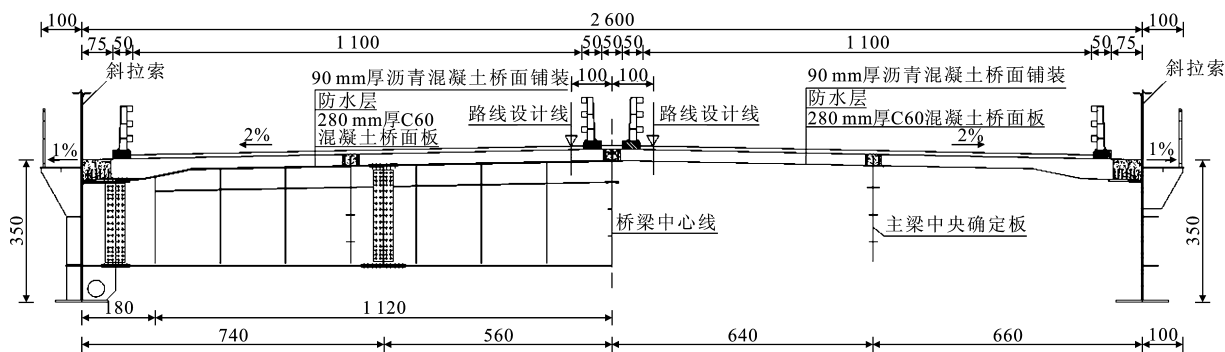


图 4 主梁断面(单位:cm)

Fig. 4 Cross Section of Girder (Unit:cm)

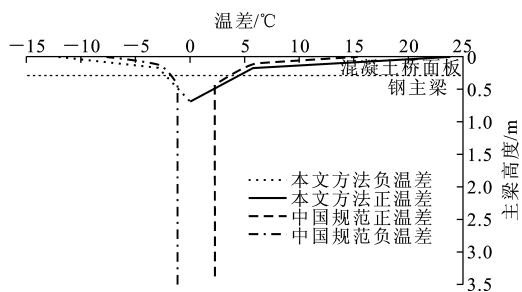


图 5 竖向温度梯度曲线对比

Fig. 5 Comparison of Vertical Temperature Gradient Curves

模式在主梁产生的应力较大,对于钢主梁,正、负温差作用下均较中国规范计算结果大 54.3%;对于混凝土桥面板,较中国规范计算结果大 29.9%。可见,对于青海高原高寒地区的组合梁斜拉桥,采用考虑地理位置修正的英国规范主梁温度梯度模式进行计算并指导设计是偏于安全的。

2.3 温度效应

针对高原高寒地区组合梁斜拉桥的温度效应, 为了便于分析, 将斜拉桥温度作用分为整体温差、索梁(塔)温差、主梁竖向温度梯度(主梁温差)及主塔

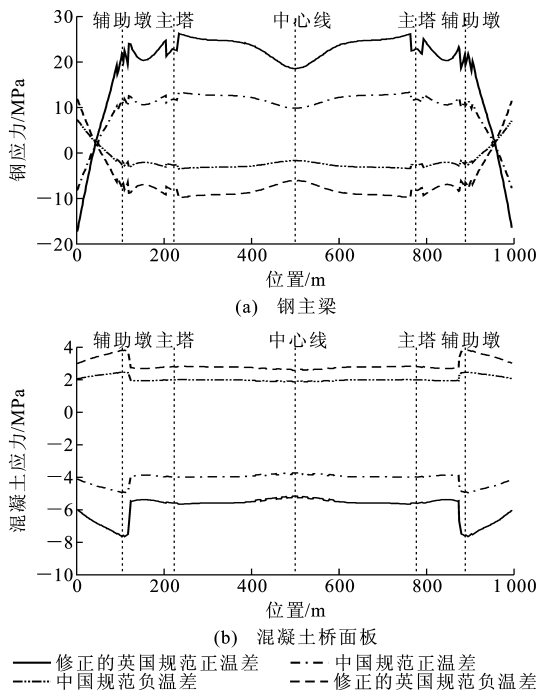


图 6 主梁应力对比

Fig. 6 Comparisons of Stresses in Girder

顺桥向温差等方面来计算。主梁竖向温度梯度按本

文方法选取,其他温度作用按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)和《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65-01—2007)^[12]中的规定选取,结构整体升温 28 ℃,整体降温 23 ℃;索梁(塔)温差取±10 ℃;索塔顺桥向温差取±5 ℃。

2.3.1 温度作用引起的结构内力

各温度作用下结构会产生较大的弯矩效应,温度作用下主梁弯矩计算结果如图 7 所示。由图 7 可以看出:竖向温度梯度直接作用在主梁上,因此对主梁产生的弯矩最大;主梁整体升温 and 降温受到边界条件的约束,索梁(塔)温差由于拉索变形也在主梁上产生弯矩,但两者较主梁竖向温度梯度产生的弯矩小;主塔温差对主梁产生的弯矩可以忽略。

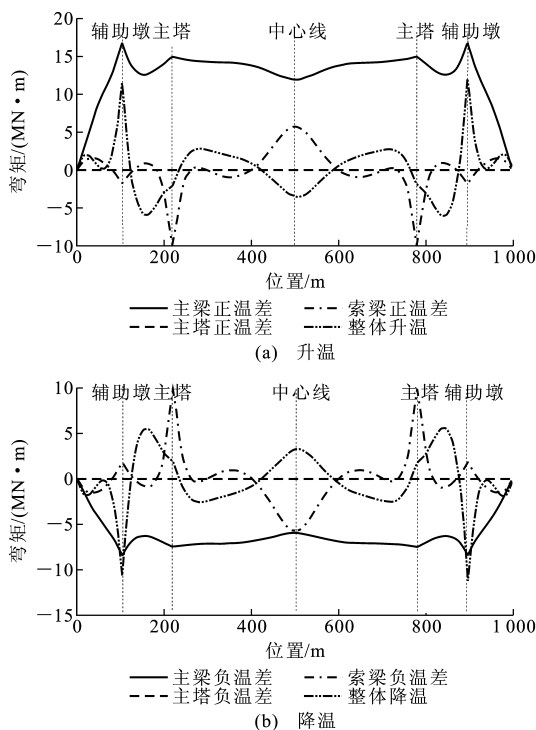


图 7 温度作用下主梁弯矩分布

Fig. 7 Bending Moment Distributions of Girder Under Temperature Actions

图 8 给出了混凝土桥面板在温度和活载作用下的最大应力分布。由图 8 可以看出:主梁正温差梯度下,在跨中和辅助墩位置产生的混凝土压应力为 -5.3 MPa 和 -7.8 MPa,分别为活载的 2.1 倍和 1.8 倍;主梁负温差梯度下,在跨中和辅助墩位置产生的混凝土拉应力为 2.6 MPa 和 3.8 MPa,分别为活载的 3.2 倍和 1.4 倍。可见,对于青海高寒地区的钢-混凝土组合斜拉桥,主梁竖向温度梯度作用对混凝土桥面板应力的影响已超过活载作用,因此,在进行设计计算时,不能忽略温度对结构的影响。

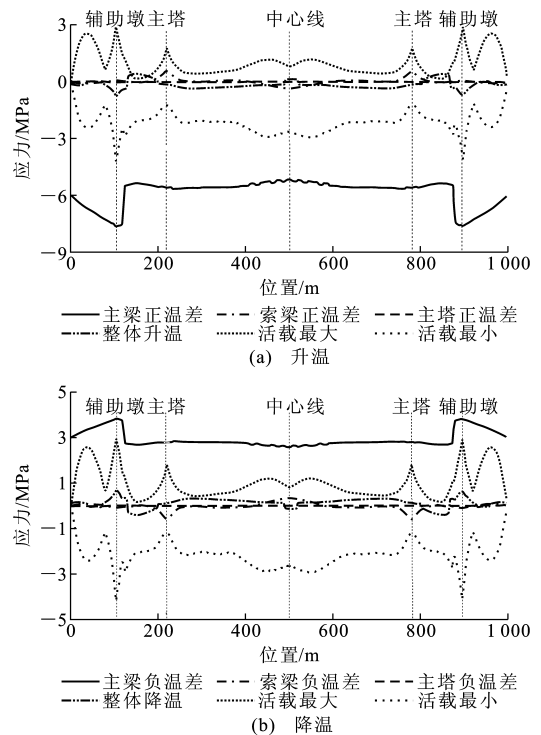


图 8 温度作用下混凝土桥面板应力分布

Fig. 8 Stress Distributions of Concrete Deck Under Temperature Actions

图 9 为温度作用下主塔应力分布。由图 9 可以看出,温度作用引起的主塔应力由塔顶至塔底逐渐变大,其中整体温度变化引起的应力最大,其次为主塔温差、主梁竖向温度梯度、索梁(塔)温差,各温度作用引起的主塔最大应力均可以与活载达到同一数量级。

2.3.2 温度作用引起的结构位移

温度变化引起的斜拉桥结构变形主要包括主梁的竖向挠度、梁端水平位移以及塔顶侧向位移。表 2 给出了各温度作用下上述结构位移的变化情况及在合计中所占的比例。由表 2 可知,在各温度作用下索梁(塔)温差对主梁跨中挠度影响最大,整体温差对主塔塔顶水平位移和主梁梁端水平位移影响最大;温度作用对结构位移影响明显,相对于恒载位移的比例较大,其中温度作用合计对于主梁梁端水平位移作用最明显,升温 and 降温作用均已超过了活载作用产生的位移。

2.3.3 温度作用引起的索力变化

哇加滩黄河特大桥为纵桥向不对称的双塔双索面斜拉桥,但其索力相差不大,现取半跨斜拉索进行温度效应分析。图 10 给出了主桥半跨斜拉索在各温度作用下的索力变化。由图 10 可以看出:在各温度作用下整体温差和主梁竖向温度梯度对靠近边墩

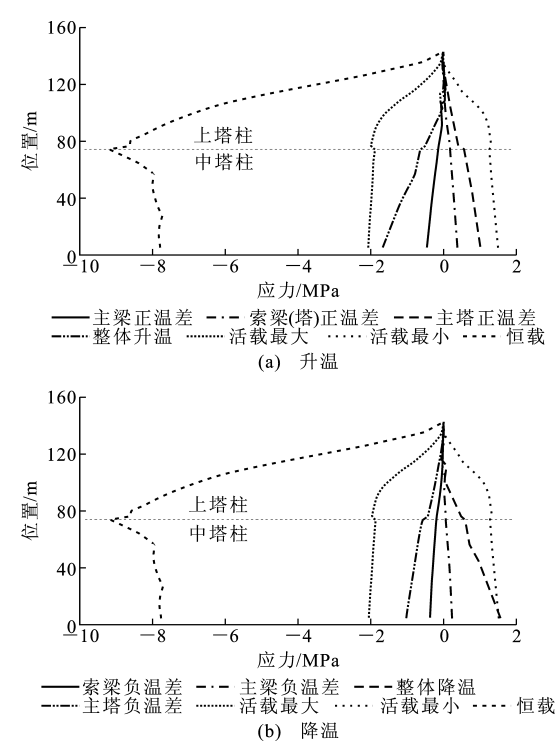


图 9 温度作用下主塔应力分布

Fig. 9 Stress Distributions of Pylon Under Temperature Actions

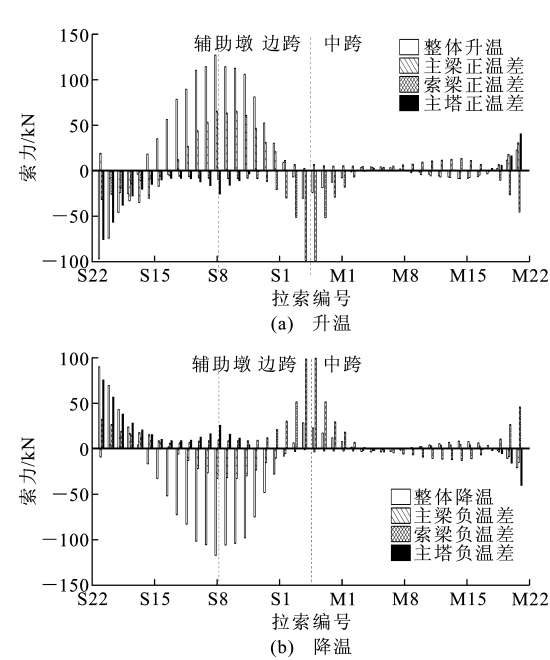


图 10 温度作用下索力变化

Fig. 10 Variations of Forces of Cables Under Temperature Actions

和辅助墩的斜拉索索力影响最大;索梁(塔)温差对靠近桥塔的斜拉索索力影响最大;主塔温差对边墩

表 2 温度作用下结构位移

Tab. 2 Displacements of Structures Under Temperature Actions

| 温度作用 | | 主梁跨中 | | 主塔塔顶 | | 主梁梁端 | |
|------|-------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | | 竖向挠度/cm | 占总效应比例/% | 水平位移/cm | 占总效应比例/% | 水平位移/cm | 占总效应比例/% |
| 升温 | 整体升温 | 2.5 | −52.0 | −11.0 | 87.3 | −16.6 | 79.4 |
| | 主梁正温差 | 5.8 | −120.8 | −3.6 | 28.5 | −4.2 | 20.1 |
| | 索梁正温差 | −13.1 | 272.9 | 3.1 | −24.6 | −0.1 | 0.4 |
| | 主塔正温差 | 0.0 | 0.0 | −1.1 | 8.7 | 0.0 | 0.0 |
| | 合计 | −4.8 | 28.5 | −12.6 | −112.5 | −20.9 | −200.9 |
| 降温 | 整体降温 | −2.0 | −24.3 | 9.1 | 102.2 | 13.6 | 86.0 |
| | 主梁负温差 | −2.9 | −35.3 | 1.8 | 20.2 | 2.1 | 13.2 |
| | 索梁负温差 | 13.1 | 159.7 | −3.1 | −34.8 | 0.1 | 0.6 |
| | 主塔负温差 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 12.3 | 0.0 | 0.0 |
| | 合计 | 8.2 | −48.8 | 8.9 | 79.4 | 15.8 | 151.9 |
| 活载最大 | | 4.8 | −28.6 | 7.1 | 63.4 | 8.1 | 77.9 |
| 活载最小 | | −42.4 | 252.4 | −17.4 | −155.4 | −9.3 | −89.4 |
| 恒载 | | −16.8 | 100.0 | 11.2 | 100.0 | 10.4 | 100.0 |

注:合计、活载及恒载后比例为项目占恒载的比例。

处斜拉索索力影响较大。拉索 S7 在合计温度作用下索力变化占恒载的比例最大,升温和降温作用下分别达到 5.47% 和 4.13%,索力变化值为 153.4 kN 和 −115.8 kN。

2.3.4 温度作用敏感性分析

根据上述的计算分析可以发现:无论是对于主

梁、主塔还是斜拉索,整体温差始终影响着其内力和位移的变化;相应的主梁竖向温度梯度对主梁影响最大,对于主塔和斜拉索影响均较小;主塔顺桥向温差对主塔内力影响最大,对于主梁和斜拉索影响均较小;索梁(塔)温差则主要影响结构跨中的挠度和斜拉索索力。表 3 给出了结构各部位的温度作用敏

表 3 哇加滩黄河特大桥各构件温度作用敏感性

Tab.3 Sensibility of Components to Temperature Actions in Wajiatan Yellow River Bridge

| 温度作用 | 主梁 | | | | 主塔 | | | 索力 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 弯矩 | 应力 | 挠度 | 水平位移 | 弯矩 | 应力 | 水平位移 | |
| 整体温差 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 敏感 | 敏感 | 敏感 | 敏感 | 敏感 |
| 主梁温度梯度 | 敏感 | 敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 |
| 索梁(塔)温差 | 一般敏感 | 一般敏感 | 敏感 | 不敏感 | 敏感 | 敏感 | 一般敏感 | 敏感 |
| 主塔温差 | 不敏感 | 不敏感 | 不敏感 | 不敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 | 一般敏感 |

感性。

3 结 语

(1)英国规范和欧洲规范对钢-混凝土组合梁温度梯度的规定最为详尽,建议在高原高寒地区钢-混凝土组合梁温度梯度在英国规范的基础上,正温差根据太阳辐射强度对温度基数进行修正,负温差取正温差的-0.5 倍进行计算。

(2)在青海高原高寒地区,采用考虑地理位置修正的英国规范主梁竖向温度梯度模式进行计算并指导设计更偏于安全。

(3)对于高原高寒地区大跨径组合梁斜拉桥,温度作用不可忽视,在桥梁结构的某些位置其引起的结构内力和变形甚至超过活载,成为仅次于恒载作用的第二大控制作用,因此在设计阶段就应给予重视。对全桥进行温度敏感性分析,有利于从整体把握大桥温度效应,为相似组合梁斜拉桥的温度效应分析提供借鉴。

参考文献:

References:

[1] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
LIU Xing-fa. Temperature Stress Analysis of Concrete Structure [M]. Beijing: China Communications Press,1991.

[2] KEHLBECK F. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法,译. 北京:中国铁道出版社,1981.
KEHLBECK F. Influence of Solar Radiation on Bridge Structures[M]. Translated by LIU Xing-fa. Beijing:China Railway Publishing House,1981.

[3] DILGER W H,GHALI A,CHAN M,et al. Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges[J].

Journal of Structural Engineering,1983,109(6):1460-1478.

[4] BERWANGER C, SYMKO Y. Thermal Stresses in Steel-concrete Composite Bridges[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,1975,2(1):66-84.

[5] 郭棋武,方 志,裴炳志,等. 混凝土斜拉桥的温度效应分析[J]. 中国公路学报,2002,15(2):48-51.
GUO Qi-wu,FANG Zhi,PEI Bing-zhi,et al. Temperature Effect Analysis of Concrete Cable-stayed Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2002,15(2):48-51.

[6] 蔡仕强. 大跨径钢箱梁斜拉桥温度效应研究[D]. 西安:长安大学,2010.
CAI Shi-qiang. Temperature Effect Research of Long-span Steel Box Girder Cable-stayed Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University,2010.

[7] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015,General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S].

[8] AASHTO,LRFD Bridge Design Specifications[S].

[9] BS 5400-2:2006,Steel,Concrete and Composite Bridges — Part2:Specification for Loads[S].

[10] EN 1991-1-5:2003,Eurocode1:Actions on Structures — Part 1-5:General Actions — Thermal Actions[S].

[11] 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.

[12] JTG/T D65-01—2007,公路斜拉桥设计细则[S].
JTG/T D65-01—2007,Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge[S].