

钢箱-混凝土组合曲线梁桥长期爬移分析方法

杨祥¹, 李雨默², 朱劲松², 王震阳²

(1.河北雄安荣乌高速公路有限公司, 河北保定 071700; 2.天津大学建筑工程学院, 天津市 300072)

摘要: 为了分析钢箱-混凝土组合曲线梁桥的长期爬移规律及其影响因素, 并提出可能的防控措施, 采用Abaqus有限元软件建立了钢箱-混凝土组合曲线梁桥的有限元分析模型, 分别提出了支座摩擦滑移、长期精细温度场以及车辆离心力的模拟方法, 分析了在这几种因素共同作用下曲线梁桥支座连续2 a的切向、径向位移变化规律, 为钢箱-混凝土组合曲线梁桥的爬移防治提供了理论依据。

关键词: 钢箱-混凝土组合曲线梁桥; 长期精细温度场; 支座摩擦滑移; 爬移

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)03-0045-06

0 引言

钢-混凝土组合梁能够充分发挥钢与混凝土两种材料的优势, 具有自重轻、承载力高、动力性能好、经济性突出及方便工业化建造等优点, 已成为中小跨径桥梁极具竞争力的桥型。但曲线梁桥受力较为复杂, 其在施工和运营过程中仍存在一些有待研究解决的问题。其中曲线梁桥的爬移是近年来备受关注的重要问题之一。所谓爬移, 简单来说就是曲线梁桥在环境影响以及支座摩擦滑移作用下发生的不可恢复位移。它是引发桥梁墩身开裂、支座脱空、主梁倾覆、抗震挡块开裂等诸多病害的主要原因之一^[1-2]。已有研究^[3-8]指出, 曲线梁桥爬移的影响因素主要包括车辆离心力作用、温度荷载作用、混凝土收缩徐变效应、曲线半径、支承布置等, 其中温度变化对曲线梁桥爬移的影响最为突出。然而, 针对钢箱-混凝土组合曲线梁桥的爬移研究报道匮乏。在进行曲线梁桥爬移累积量分析时, 常忽略支座摩擦的影响, 将桥梁支座简化为线性支座模型^[9-12], 致使分析结果误差较大; 另外, 常将钢箱-混凝土组合梁桥的空间温度分布简化为二维竖向温度梯度, 这种简化无法满足钢箱-混凝土组合曲线梁桥长期爬移分析的需要。

本文以某高速公路2跨连续钢箱-混凝土组合曲线梁桥为例, 基于钢箱-混凝土组合梁桥有限元分析模型, 提出长期精细温度场以及爬移分析方法, 研究在支座摩擦滑移、长期精细温度场以及车辆离

心力共同作用下钢箱-混凝土组合曲线梁桥的长期爬移变化规律, 以期提出有效的钢箱-混凝土组合曲线梁桥爬移病害的防治措施提供理论依据。

1 曲线梁桥长期爬移分析方法

1.1 桥梁长期精细温度场模拟方法

如图1所示, 桥梁的温度场主要由桥梁结构内部热传导、结构表面所受各种辐射以及结构与外界环境交流换热决定^[13]。

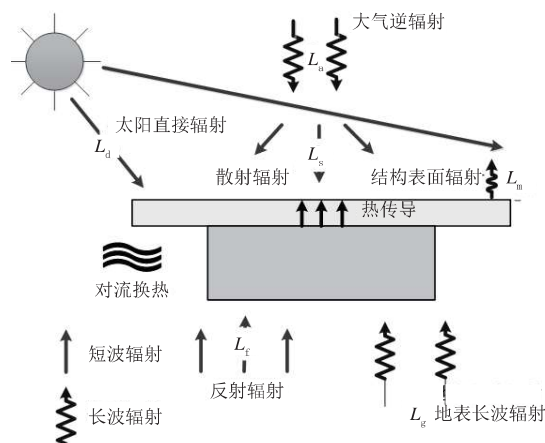


图1 桥梁日照温度场考虑因素

根据Fourier导热定理, 直角坐标系下三维导热微分方程的一般形式为:

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

式中: T 为结构温度; t 为时间; λ 为结构热传导率; ρ 为结构密度; c 为结构比热容。

桥梁结构在日照作用下所受的自然辐射按辐射类型一般可分为短波辐射和长波辐射^[14]。短波辐射一般分为太阳直接辐射 I_d 、散射辐射 I_s 和地表反射辐射 I_r 。

太阳直接辐射 I_d (W/m^2) 来自穿过大气层直接到达桥梁表面的太阳光, 其取值为:

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 河北省交通运输厅科技项目(RW-202011); 国家自然科学基金(52078333)

作者简介: 杨祥(1969—), 男, 学士, 高级会计师, 从事道路桥梁相关科研与管理工作。

$$I_d = I_0 P^m \quad (2)$$

式中: I_0 为太阳常数, W/m^2 ; $P=0.9^{t_{k+}}$ 为大气透明度系数,取值可参考文献[15],其中 t_u 为林克浑浊度系数, k_a 为大气压力相对值; m 为大气光学质量,可近似取值为 $m=\csc \beta_s$,其中: β_s 为太阳高度角。

散射辐射 I_0 (W/m^2) 来自经过大气中雾、灰尘等粒子散射的太阳光,其取值为^[14]:

$$I_s = 0.5I_0(1-P^m)/(1-1.4 \ln P) \sin \beta \quad (3)$$

来自经过地面反射到结构表面的太阳光的反射辐射 I_r (W/m^2) 为^[14]:

$$I_r = R_e (I_d \sin \beta_s + I_s) \quad (4)$$

式中: R_e 为地面反射系数,一般地面取 0.2。

与短波辐射来自太阳光不同,长波辐射的辐射源为大地、大气以及结构表面。长波辐射一般分为大气逆辐射 I_a 、地表长波辐射 I_g 、结构表面辐射 I_m ^[16]。

大气逆辐射 I_a (W/m^2) 为大气与结构表面交换热量的辐射荷载,其取值为^[16]:

$$I_a = \varepsilon_{sa} c_0 (T_a + 273.15)^4 \quad (5)$$

式中: ε_{sa} 为大气辐射系数,一般取 0.8; c_0 为黑体辐射常数; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

地表长波辐射 I_g (W/m^2) 包括地表反射的大气逆辐射以及地表发射的长波辐射,其取值为^[16]:

$$I_g = c_0 (T_a + 273.15)^4 \quad (6)$$

结构表面辐射 I_m (W/m^2) 为结构表面以电磁波形式向外发出的长波辐射,其取值为^[16]:

$$I_m = \varepsilon_s c_0 (T_s + 273.15)^4 \quad (7)$$

式中: ε_s 为结构材料的长波辐射发射率; T_s 为结构表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

桥梁结构与外界空气的对流换热系数的理论基础为热力学的冷却定律,对流换热在桥梁结构表面形成的热流密度 q_a 为^[16]:

$$q_a = h_c (T_a - T_s) \quad (8)$$

式中: h_c 为对流换热系数, $h_c = 2.5 (\sqrt{T_a - T_s} + 1.54v)$,其中 v 为工程所在地的地表日平均风速, m/s 。

实际环境中桥梁温度场不仅由热传导、太阳辐射、对流换热产生,也由桥梁结构自身或构件间相互遮挡产生。根据课题组前期研究,可将桥梁的三维遮挡分为永久遮挡、自遮挡和相互遮挡 3 种类型^[17]。

依托桥梁日照温度场理论对通用有限元软件 Abaqus 中的子程序 Dflux 与 Dfilm 进行二次开发,以实现桥梁日照温度场的模拟。在 Dflux 子程序中,对结构表面进行分类,将处于永久遮挡的内表面点坐标储存于集合中,在温度分析前进行永久遮挡判

断,将永久遮挡的辐射荷载设置为 0,实现永久遮挡;定义构件表面法线与太阳光线之间的夹角为太阳入射角,将太阳入射角为钝角时刻的太阳辐射设置为 0,实现自遮挡;确定桥梁表面所受太阳光线方程的方向向量以及潜在的对该表面存在相互遮挡的表面,根据光线追踪检测原理^[17],对太阳光线以及潜在的遮挡表面进行相交判断,如果相交则说明两表面存在相互遮挡,将被遮挡的表面所受太阳直接辐射设置为 0,实现互遮挡。在 Dfilm 子程序中通过定义与风速、环境温度相关的对流换热系数函数,实现非均匀对流换热系数的定义与施加。

上述桥梁日照温度场模拟方法适用于桥梁短期温度场的模拟。为获得曲线梁桥长期爬移计算所需的桥梁长期精细温度场,采用 Abaqus 软件按以下 4 步进行:

(1) 在建立钢箱-混凝土组合曲线梁桥温度场分析模型的基础上,应用前述桥梁日照温度场模拟方法,模拟不同季节的典型气象条件下组合曲线梁桥的全天瞬态温度场。

(2) 应用 Python 语言编写温度场计算结果提取程序,提取不同季节的典型气象条件下组合曲线梁桥瞬态温度场中各节点的温度值及与其相邻日序数的正弦插值温度增量。

(3) 编写 Utemp 子程序,利用上述温度提取结果,应用正弦插值方法计算得到整个分析时间段内的温度场数据,并将该长期温度场数据储存为 ODB 文件。

(4) 将插值之后得到的长期温度场文件导入组合曲线梁桥有限元模型中进行温度效应计算,实现桥梁温度场长期时变精细化预测。

1.2 支座模拟方法

现有曲线梁桥爬移研究中,进行支座模拟时将支座简化为线性弹簧单元,仅考虑支座的线性变形刚度,忽略梁底与支座之间的摩擦滑移。这种模拟方法得到的桥梁爬移是可恢复的,无法模拟支座的长期累积位移。但在实际桥梁的爬移病害调研中已经发现,由支座摩擦滑移引起的支座偏位无法恢复。因此在曲线梁桥爬移研究中,不应忽略桥梁支座的摩擦特性。

为了模拟桥梁支座的摩擦滑移特性,参考桥梁抗震研究中常用的非线性支座模拟方法^[18],建立三向摩擦滑动支座单元。竖向以及切、径向 2 个水平方向为三向摩擦滑动支座单元的 3 个自由度;竖向弹

簧单元采用线性本构模型,水平方向弹簧采用双线性本构模型。

三向摩擦滑动支座单元见图2。

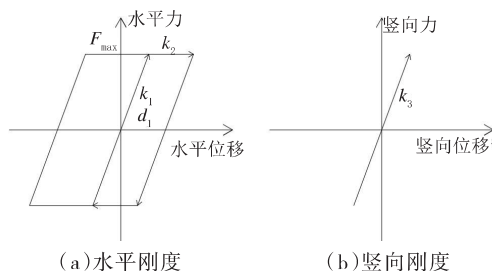


图2 三向摩擦滑动支座单元

图2中: k_1 为只发生剪切变形时支座的水平向刚度; k_2 为发生摩擦滑移后的支座水平向刚度; $F_{\max}$ 为支座与梁底之间的最大静摩擦力; d_1 为支座水平方向上的不可恢复位移; k_3 为支座竖向刚度。可参考《公路桥梁盆式橡胶支座》(JT/T 391—2019),确定桥梁支座模拟的相关参数。

1.2.1 支座竖向刚度

根据规范规定,公路桥梁盆式橡胶支座在竖向力作用下,支座的竖向变形不得大于支座总高度的2%。鉴于此,其抗压刚度 SD_z 可用下式近似计算:

$$SD_z = \frac{R}{0.02h} \quad (9)$$

式中: R 为支座竖向承载力,N; h 为支座总高度,mm。

1.2.2 支座水平刚度

由于聚四氟乙烯板的存在,使得双向活动支座在2个水平方向均可发生滑移,在计算其水平方向刚度时考虑四氟乙烯板与曲线梁底面之间的摩擦。当支座未发生滑动时,双向滑动盆式橡胶支座在水平方向的最大静摩擦力 $F_{\max}$ 和水平方向刚度 SD_x 、 SD_y 分别为:

$$F_{\max} = \mu R \quad (10)$$

$$SD_x = SD_y = \frac{F_{\max}}{x} \quad (11)$$

式中: μ 为梁底与盆式橡胶支座之间的摩擦系数,当缺少实测数据时可参考规范取值为0.06; x 为盆式橡胶支座的屈服位移,一般取为5mm。

当支座发生滑动时,盆式橡胶支座的水平刚度为:

$$SD_x = SD_y = 0 \quad (12)$$

由于固定支座在水平面上不允许有滑移,对于固定支座的水平刚度取值按下式近似取得:

$$SD_x = SD_y = \infty \quad (13)$$

则活动方向水平刚度按照双向活动支座的水平

刚度式(12)计算;固定方向水平刚度按固定支座式(13)进行计算。

1.3 离心力模拟

参考《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),曲线桥设计过程中应考虑车辆荷载离心力的影响,离心力 F 计算公式如下:

$$F = P_k C n u_k \quad (14)$$

式中: P_k 为车道荷载; C 为离心力计算系数; n 为车道数; u_k 为横向折减系数。

离心力计算系数 C 按下式计算:

$$C = v^2/127r \quad (15)$$

式中: v 为桥梁设计行车速度,km/h; r 为曲线桥梁的曲线半径,m。

1.4 曲线梁桥长期爬移分析方法

曲线梁桥长期爬移具体分析流程见图3。

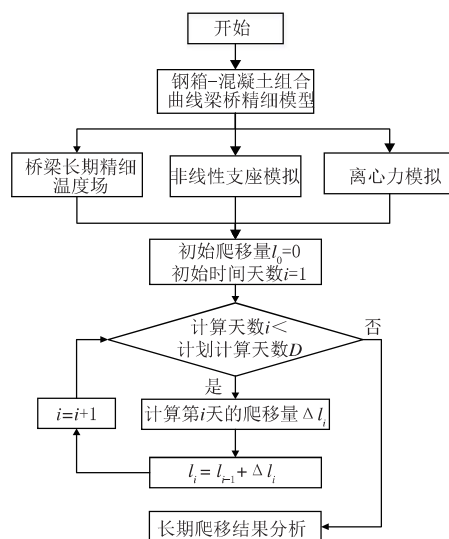


图3 曲线梁桥长期爬移分析流程

2 钢箱-混凝土组合曲线梁桥长期爬移分析案例

2.1 有限元模型建立

以河北省某高速公路某跨径布置为 2×41 m的钢箱-混凝土组合曲线连续梁桥为例来阐述本文提出的计算曲线梁桥长期爬移的过程。桥梁横断面形式为单箱3室,桥面宽度13.9 m,悬臂长度1.35 m,钢箱梁底宽3.5 m,钢梁高度1.6 m,桥面板厚度0.4 m,桥面铺装为厚0.1 m的沥青混凝土。

钢箱-混凝土组合曲线梁桥跨中截面示意图、平面布置图见图4、图5。

工程所在地地理坐标为 $E116.10^\circ$, $N39.16^\circ$,桥梁中心线曲线半径为120 m。由图5可知,桥梁的梁端支座为双向活动盆式橡胶支座,梁中支座为固定

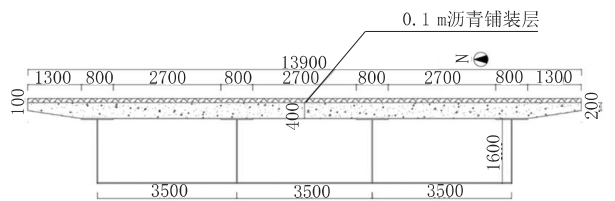


图4 钢箱-混凝土组合曲线梁桥跨中截面示意图(单位:mm)

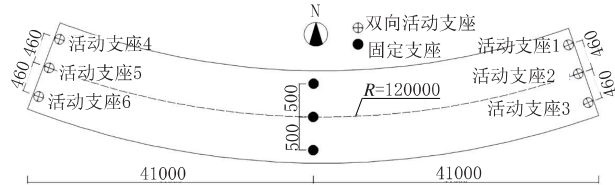


图5 钢箱-混凝土组合曲线梁桥平面布置图(单位:mm)

盆式橡胶支座。桥面布置单向2车道,设计活载为公路Ⅰ级,设计车速60 km/h。

采用大型通用有限元软件Abaqus,建立2跨钢箱-混凝土组合曲线梁桥有限元分析模型,分别用于温度场与温度效应模拟,如图6所示。本文的温度效应问题为力场与温度场弱相关的计算场景,为了提高计算效率,选用热-力顺序耦合的方法对温度效应进行求解。



图6 有限元模型

进行热-力顺序耦合计算时,温度场与力场的计算网格划分相同,选择的单元类型以及计算参数不同。进行温度场计算时,混凝土桥面板与沥青铺装层采用传热实体单元DC3D8,钢箱梁采用传热壳单元DS4,忽略预应力钢束的导热作用,仅在组合梁力场计算模型中建立预应力钢束单元。温度场计算模型中材料热物性参数见表1。建模过程中,默认铺装层与桥面板结合良好,将铺装层与桥面板通过Tie连接,钢箱-混凝土组合梁的栓钉等连接件按照完全抗剪设计,建模时忽略组合梁钢混界面的相对滑移,将钢箱梁翼缘板与混凝土桥面板底部也采用Tie连接。预应力钢束通过Embedded嵌入连接的方式嵌入混凝土桥面板,预应力采用变温法施加到预应力钢束上。在温度效应分析模型中,混凝土桥面板与沥青铺装层采用实体单元DC3D8R,混凝土的热膨胀系数为 1.0×10^{-5} 、弹性模量为34.5 GPa、泊松比为0.2;钢箱梁采用SHELL模拟,钢材热膨胀系数为

1.18×10^{-5} 、弹性模量为206 GPa、泊松比为0.3;预应力钢束采用TRUSS桁架单元模拟,其热膨胀系数为 1.18×10^{-5} 、弹性模量为195 GPa、泊松比为0.3。

表1 材料热物性参数

材料	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	热传导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	辐射吸 收系数	辐射发 射系数
钢	7 850	460	50.0	0.685	0.80
混凝土	2 600	925	2.0	0.650	0.88

2.2 分析工况

通过调查当地气象资料,确定工程所在地四季典型天气的气象参数(见表2),以此作为短期桥梁温度场模拟分析工况,计算四季典型气候条件下桥梁的四季日温度场。应用前述桥梁长期温度荷载模拟方法,将四季日温度场正弦插值得到桥梁年温度场,在此基础上分析曲线梁桥长期爬移规律。

表2 四季典型气象参数

典型日期	地表日均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	日温变化范围 / ℃
春分	2.4	5~17
夏至	2.2	22~33
秋分	1.7	19~27
冬至	1.8	-8~-1

2.3 曲线梁桥长期爬移结果分析

对钢箱-混凝土组合曲线梁桥有限元模型施加2 a温度场以及车辆荷载,进行长期温度效应计算,获得2 a内桥梁支座径向、切向位移时程曲线。

2.3.1 曲线梁桥径向位移分析

提取长期温度场作用下曲线梁桥温度效应中的梁端6个双向滑动盆式支座的径向位移数据进行分析,得到曲线梁桥的支座径向位移长期时变曲线,如图7所示。

由图7可见,曲线梁桥支座径向位移发展具有很强的季节性,不同季节内曲线梁桥支座径向位移近似呈线性变化,但不同季节的发展趋势不同。从夏至到秋分,桥梁支座径向位移增长速率较小,仅为0.003 mm/d,这可能是曲线梁桥的温度场在夏秋两季之间变化幅度较小;而径向位移在冬季有一定减小,原因是冬季温度较低,曲线梁桥在热胀冷缩作用下产生了向曲线半径内侧的收缩,使支座径向位移发展规律与其他季节相反。春夏两季支座径向位移的增长速率相近,为0.02 mm/d,较秋冬两季变化速率大,这是由于春夏两季温度场变化剧烈,则曲线梁桥的径向位移在全年时间尺度上呈现较明显的向外侧积累的趋势。

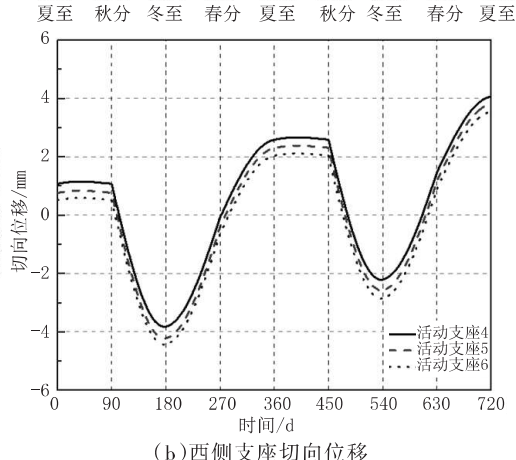
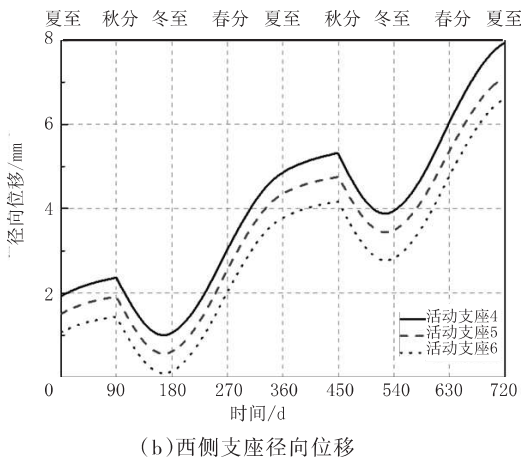
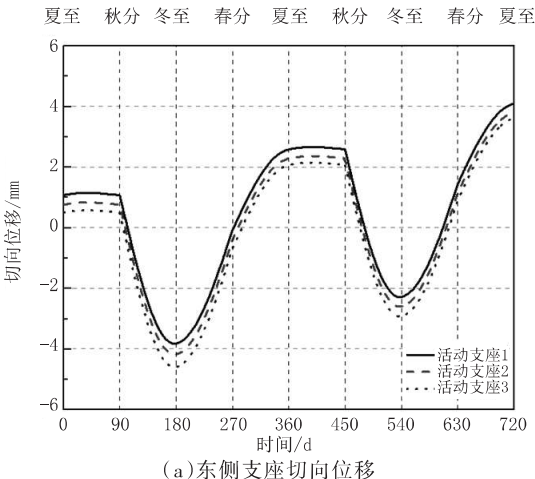
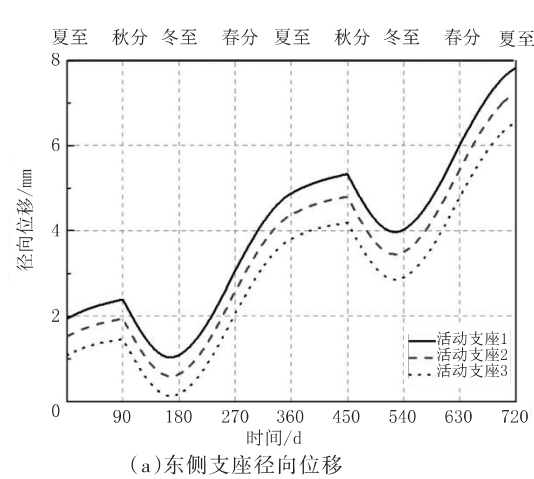


图7 梁端支座径向位移长期变化

图8 梁端支座切向位移长期变化

曲线梁桥径向位移变化也具明显的年周期性,即每年的不同季节中曲线梁桥的径向位移变化趋势与变化速率相似,且支座每年累积的径向位移量相近,约为2.8 mm。

曲线梁桥不同位置支座的径向位移具有一定的差异,靠近曲线内侧的支座径向位移较大,但不同位置支座的位移积累速率相近,且东西两侧支座的径向位移具有明显的对称性。

2.3.2 曲线梁桥切向位移分析

曲线梁桥梁端6个双向滑动盆式支座的切向位移时变曲线如图8所示。

由图8可见,与径向位移类似,曲线梁桥切向位移的发展变化 also 具有很强的季节性。由于曲线梁桥的温度场在夏秋两季之间的变化幅度较小,桥梁支座切向位移在夏至到秋分时段内的增长速率较小;由于冬季温度显著降低而使得曲线梁桥在热胀冷缩作用下产生了较大的切向收缩。相较秋冬两季的支座切向位移变化速率,桥梁支座切向位移在春夏两季具有较大的增长速率,为0.035 mm/d。与径向位移类似,曲线梁桥切向位移变化同样具有明显的年

周期性,曲线梁桥支座处每年累积的切向位移量均为1.5 mm左右。不同位置支座的切向位移大小不同,靠近曲线内侧的支座切向位移较大,但不同位置的支座切向位移在积累速率上相近,且东西两侧支座的切向位移变化呈现出明显的对称性。

综上所述,钢箱-混凝土曲线梁桥的支座位移处在不断累积的状态中,桥梁支座每年累积的径向位移约为2.8 mm,切向位移约为1.5 mm。随着桥梁运营时间的增长,曲线梁桥的支座位移会变得不可忽略,因此在曲线梁桥的运营阶段应重视曲线梁桥爬移现象,定期检查以防止支座脱空、桥梁倾覆等事故的发生;曲线梁桥位于曲线内侧的支座位移大于外侧支座位移,因此在曲线梁桥的设计施工过程中应对曲线内侧支座进行相应的加固处理。

3 结 语

(1)针对现阶段研究中缺少曲线梁桥长期爬移分析以及在爬移分析中常忽略支座摩擦滑移影响的不足,本文提出了基于长期精细温度场模拟方法以及双线性支座模拟方法的曲线梁桥长期爬移分析方法。

(2)应用曲线梁桥长期爬移分析方法,对河北省某高速公路的钢箱-混凝土组合曲线梁桥进行温度荷载、车辆荷载作用下的长期爬移分析,发现钢箱-混凝土组合曲线梁桥的支座位移发展具有季节性、年周期性、位置差异性的特点,实例曲线梁桥支座处径向、切向位移的年累积量分别约为 2.8 mm、1.5 mm。

参考文献:

- [1] 何海.某连续弯梁桥的偏位成因及处理[J].城市道桥与防洪,2008(9):68-70.
- [2] 刘华.预应力混凝土连续弯箱梁的侧向位移研究[D].南京:东南大学,2004.
- [3] 孙宗光.曲线连续梁桥侧向失稳破坏机理与行为分析[J].公路交通科技,2006,23(7):58-62.
- [4] 赵景周.独柱支撑曲线混凝土连续箱梁桥侧向位移及其加固和限位措施研究[D].西安:长安大学,2011.
- [5] KIM Kyungsik. Effects of external bracing on horizontally curved box girder bridges during construction[J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1650-1657.
- [6] 王新定.混凝土连续弯梁桥侧向位移分析及对策研究[J].公路交通科技,2006,11(23): 64-67.
- [7] EBEIDO T. I. Behaviour of horizontally curved reinforced concrete beam-and-slab bridges [J]. Alexandria Engineering Journal, 2006, 45(5): 569-593.
- [8] 范振华.径向力作用下弯梁桥横向爬移数值模拟分析[D].西安:长安大学,2016.
- [9] 刘梦莹.二维温度梯度效应下的曲线梁桥支座设计[J].江苏大学学报(自然科学版),2015,36(6):722-727.
- [10] 林丽娟.曲线梁桥的横向爬移分析[D].郑州:郑州大学,2015.
- [11] 郑国华.曲线梁桥日照温度场和离心力效应研究[D].广州:广州大学,2018.
- [12] 赵宇翔.温度变化作用下的曲线梁桥支座偏移分析及维修加固技术[D].南京:东南大学,2014.
- [13] 彭友松.混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [14] 朱劲松,陈科旭,孟庆领.大跨度悬索桥空间温度场精细分析方法[J].天津大学学报(自然科学版),2018,51(4):339-347.
- [15] ZHOU Linren , XIA Yong , BROWNJOHN J M W . Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1): 04015027.
- [16] XIA Y , CHEN B , ZHOU X Q , et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma suspension bridge temperature behavior[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2013, 20(4): 560-575.
- [17] MENG Q, ZHU J. Fine temperature effect analysis based time-varying dynamic properties evaluation of long-span suspension bridges in natural environments[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(10): 04018075
- [18] 李悦,李冲,李茜.地震作用下板式橡胶支座滑移对中小跨径梁桥抗震性能的影响[J].土木工程学报,2014,47(增刊1):124-129.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com