风和演化车流下的桥梁-模数式伸缩缝分析框架及伸缩缝磨损分析

刘 宁[1,2],刘焕举[1],李鹏智[1],胡香群[1],詹雨昂[1]

(1.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2.长安大学 旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室,西安 710000)

摘 要:模数式伸缩缝的磨损本质上是其内部多构件在荷载作用下持续联动响应的累积结果,风荷载与车流构成其运动的主要外部动因。为实现磨损的精准分析,本文构建了融合动因荷载演化过程的“荷载-桥梁-伸缩缝”耦合分析系统。首先,针对桥梁-伸缩缝结构所处的风环境和车流演化两个运营场景,分别进行独立程序仿真;并从伸缩缝响应分析的需求出发,提出了主要方向车辆风荷载取值方法和统一简化的气动干扰处理方法,形成了结构的风场与车流演化场景及其荷载化关联模式。其次,采用多点约束联结同尺度的桥梁和伸缩缝模型,通过程序循环调用方式,将运营场景及其荷载化过程与桥梁-伸缩缝同尺度模型的响应分析环节相贯通,建立了风-车-桥梁-伸缩缝一体化分析系统,为伸缩缝磨损分析提供了计算平台。最后,选取斜拉桥-模数式伸缩缝结构,基于磨损指标,开展了风和演化车流共同作用下的伸缩缝磨损参数分析。结果表明:位移箱内滑动支承与压紧支承的设计参数可统一配置,而剪切弹簧及上、下层梁间的滑动支承和压紧支承则需差异化设计;位移箱内磨损在迎风面随风速增大而增大,在背风侧则呈减小趋势,剪切弹簧及上、下层梁间支承的磨损随风速增大而减小;双向车流密度之和对磨损起控制性作用,密度和越大磨损越严重,且车流分布越均匀磨损越大;与风速变化相比,车流对伸缩缝磨损的影响更为显著。

关键词:桥梁工程;模数式伸缩缝;磨损;风环境;演化车流;分析框架

中图分类号:U441.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2026)07-1870-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241359

Bridge-modular expansion joint analysis framework and expansion joint wear analysis under wind and evolutionary traffic flow

LIU Ning[1,2],LIU Huan-ju[1],LI Peng-zhi[1],HU Xiang-qun[1],ZHAN Yu-ang[1]

(1. *School of Civil Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*; 2. *Key Laboratory of Transport Industry of Bridge Detection Reinforcement Technology*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710000, *China*)

Abstract: The wear of modular expansion joints was essentially regarded as the cumulative result of continuous intercomponent interactive responses under external loads, with wind loading and traffic flow

收稿日期:2024-12-24.

基金项目:长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(JQJJ202408);国家自然科学基金项目(51908178).

作者简介:刘宁(1988-),女,讲师,博士.研究方向:风-车-桥耦合振动.E-mail:liuning_hbgc@163.com

通信作者:刘焕举(1987-),男,副教授,博士.研究方向:风-车-桥耦合振动.E-mail:huanjull@163.com

being identified as the primary external drivers of their motion. To enable precise wear analysis, a coupled "load-bridge-expansion joint" analysis system that integrates the evolutionary processes of the driving loads was established. First, the two operational scenarios, namely the wind environment and the traffic flow evolution around the bridge-expansion joint structure, were independently simulated by separate programs. For the purpose of expansion joint response analysis, a main-direction vehicle wind load estimation method and a unified simplified aerodynamic interference treatment were proposed, forming the wind-field and traffic-flow evolution scenarios along with their load-correlated association patterns. Subsequently, same-scale bridge and expansion joint models were connected through multi-point constraint couplings. By means of programmatic cyclic calls, the operational scenarios and their load-correlated processes were linked with the response analysis of the same-scale bridge-expansion joint model, and an integrated wind-traffic-bridge-expansion joint analysis system was developed, which provided a computational platform for wear analysis of the expansion joint. Finally, a cable-stayed bridge equipped with a modular expansion joint was selected, and wear parameter analyses under combined wind and evolving traffic flows were conducted based on prescribed wear indices. The results indicate that the design parameters of the sliding bearings and compression bearings inside the displacement box can be uniformly configured, whereas those of the shear spring and the sliding and compression bearings between the upper and lower beams require differentiated designs. Wear inside the displacement box increases with wind speed on the windward side but decreases on the leeward side, while the wear of the shear spring and the bearings between the upper and lower beams decreases as wind speed rises. The sum of bi-directional traffic flow densities plays a controlling role in wear: the greater the total density, the more severe the wear, and the more uniform the traffic distribution, the greater the wear. Compared with wind speed variations, traffic flow exerts a more significant influence on the wear of the expansion joint.

Key words: bridge engineering; modular expansion joint; wear; wind environment; evolutionary traffic flow; analytical framework

0　引　言

模数式伸缩缝因伸缩量大、适应性强等优点,广泛应用于大跨桥梁。运营环境下,其以多构件的复杂联动,同时持续实现直接承载和协调两侧非一致动态位移功能,构件间连接物质的磨损不可避免。为实现伸缩缝内部连接物质合理的设计配置和性能评估,连接物质的磨损分析方法研究亟待进行。伸缩缝构件间的连接物质磨损,本质是内部构件对应连接点在承载状态下的相对位移,欲实现磨损分析,伸缩缝上直接承受的荷载和被强制输入的运动缺一不可。风和汽车作用是桥梁-伸缩缝结构在役期间常见动力作用,是伸缩缝承受的直接作用和被传入运动的动因,风和演化车流下的伸缩缝磨损分析十分必要。风-演化车流-桥梁-模数式伸缩缝分析框架融合了荷载的形成、发展、传递和结构耦合,是荷载作用理论综合和结构响应计算平台,也是伸缩缝磨损分析的核心和前提。

当前运营荷载下的模数式伸缩缝的分析研究,主要采用现场实测、试验和数值仿真等方法。现场实测方法[1-3]采集的数据多以结构的整体效应数据为主体,进行温度因素影响规律或伸缩缝整体寿命等的判定,形式直观数据可信,但较难深入到构件层面进行局部构件的分析评估,也无法同时进行多工况的平行分析比判。试验方法[4,5]可直接进行伸缩缝荷载加载模式和结构响应规律探究,研究可达细部构造和实现多工况平行分析,但限于试验的空间和规模,多缺少桥梁侧的力和位移的强制传入,伸缩缝的响应动因不完全。在数值仿真方法的研究中,多集中于建立荷载-桥梁-伸缩缝分析系统,依据仿真缺失划分为3类:忽略伸缩缝结构、忽略桥梁强制响应传入和忽略伸缩缝承载过程。忽略伸缩缝结构的常规做法是把伸缩缝简化成多个弹簧、阻尼单元[6,7],以梁端位移作为伸缩缝总体响应,方法可用于进行伸缩缝总体响应分析,无法进行伸缩缝局部构件评估。

忽略桥梁强制响应传入做法,研究的焦点在于轮-缝接触面形状和力的分布,在仅有伸缩缝模型条件下,把伸缩缝的两侧边界条件均设定为固定状态,多是基于车辆过伸缩缝过程的数值仿真,确定伸缩缝上的车轮荷载模型[8-11]或轮-缝作用模式[12-14]。忽略伸缩缝承载过程,则是依据伸缩缝结构运动形式,基于机构运动学和几何理论,把梁端位移规律扩散至伸缩缝内部构件。模数式伸缩缝是多构件联动的承载结构,伸缩缝内部构件是受力状态的联动形变,因此伸缩缝响应分析时,承载、运动和变形缺一不可。刘宁等[15]对桥梁-伸缩缝一体建模,提出了伸缩缝磨损指标,对车流演化下的伸缩缝磨损进行了分析,但研究忽略了风作用,对伸缩缝磨损的主要动因考虑不全面。开展风和车联合作用下的荷载模式研究,建立风-车-桥梁-伸缩缝分析系统,是开展模数式伸缩缝磨损分析的必然选择。

风和汽车作用在各自演化上相互独立,在荷载形成时相互关联。从运营场景的独立性出发,本文对风环境和车流演化过程进行各自仿真,并结合风和车流演化的荷载化过程关联,形成桥梁-伸缩缝结构的荷载模式,尤其是车流演化过程的风荷载模式,实现运营场景仿真和荷载化。其次,建立桥梁-模数式伸缩缝"十"字同尺度有限元模型,在结构和车流演化荷载化的基础上,贯通风-车流演化-桥梁-伸缩缝分析系统,为伸缩缝磨损分析提供计算平台。最后,选用斜拉桥-模数式伸缩缝结构作为背景结构,依据磨损指标对背景结构的伸缩缝进行磨损分析。本文研究为模数式伸缩缝的磨损分析、性能评估和设计参数配置的确定提供了理论和技术参考。

1 风-演化车流-桥梁-模数式伸缩缝分析框架

风-演化车流-桥梁-模数式伸缩缝分析系统中,桥梁和伸缩缝为结构元素,与其上行驶车流一起沉浸于风环境。结构荷载效应分析系统建立时,车流演化过程中的多车动态并存持续场景中的风荷载,因涉及风场相干性和车辆间的运动遮挡,车流演化过程的风荷载合理处理是关键。从分析目的(伸缩缝磨损)出发,对车辆本身的风荷载和遮挡效应两个方面进行独立简化,实现车流演化过程风荷载确定,并程序贯通,建立风-车-桥-伸缩缝分析系统,为伸缩缝磨损分析提供分析平台。

1.1 风荷载

良态风是桥梁的持续风环境状态。确定模数式伸缩缝磨损分析的风荷载,是良态风场仿真及其荷载化的过程,涉及桥梁-伸缩缝结构风荷载和车辆风荷载两个部分。模数式伸缩缝布置在梁端,梁端支座下多有承台或桥台支撑,承台或桥台的遮挡使得伸缩缝处风速大幅减小,加之伸缩缝的阻风高度很小,因此结构风荷载部分忽略伸缩缝的风荷载,仅进行桥梁风场仿真和风荷载计算。

1.1.1 风场仿真

风场仿真是结构风荷载确定的前提。良态风场是平稳风场,其平均风为常数,风场模拟主要是脉动风部分的模拟。脉动风场可视为平稳随机过程,采用谐波合成法进行模拟。因抖振力计算用到顺风向和竖向的脉动风速,此处仅进行这两个方向的脉动风速计算。以离地面高度z处的节点i为例,顺风向和竖向的脉动风速为:

$$x_i(t)=2\sqrt{\Delta\omega}\sum_{j=1}^{i}\sum_{k=1}^{N}\left|H_{ij}(\omega_{jk})\right|\cos(\omega_{jk}t-\theta_{ij}(\omega_{jk})+\phi_{jk}) \tag{1}$$

式中:$x_i(t)(x=u,w;i=1,2,\cdots,m)$为$i$点水平顺风向和竖向脉动风速;$N$为一充分大的正整数;$\Delta\omega$为频率增量,$\Delta\omega=\dfrac{\omega_{\mathrm{up}}}{N}$,其中$\omega_{\mathrm{up}}$为截止圆频率;$\phi_{jk}$为随机相位角;$H_{ij}(\omega_{jk})$为对风功率谱$S_x(f)$$(x=u,w)$进行Cholesky分解获取矩阵$H(\omega_{jk})$中的元素;$\omega_{jk}$为双索引频率,$\omega_{jk}=(k-1)\Delta\omega+\dfrac{j}{m}\Delta\omega$;$\theta_{ij}(\omega_{jk})$为$H_{ij}(\omega_{jk})$的复角,$\theta_{ij}(\omega_{jk})=\tan^{-1}\left\{\dfrac{\mathrm{Im}\left[H_{ij}(\omega_{jk})\right]}{\mathrm{Re}\left[H_{ij}(\omega_{jk})\right]}\right\}$。

不同方向的脉动风速模拟方法基本相同,区别仅在风功率谱。水平顺风向和竖向风功率谱分别采用Simiu谱和Lumley-Panofsky谱。限于篇幅,在此仅对顺风向进行说明:

$$\frac{nS_u(f)}{U_{z*}^2}=\frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \tag{2}$$

式中:$S_u(f)$为风功率谱密度函数;$f=\dfrac{nz}{U_z}$为相似率坐标;U_z为z高度处的平均风速;风剖面采用指

数模型;$U_{z^*}=\dfrac{KU_z}{\ln(z/z_0)}$为时变摩擦风速,$K$=0.4。

不同空间节点的风速存在相干性,以相干函数Coh(ω)表示如下:

$$\mathrm{Coh}(\omega,t)=\exp\left(-\lambda\frac{\omega D}{2\pi U_z}\right) \tag{3}$$

式中:ω为圆频率;D为节点之间的空间距离;λ为衰减系数,取7[16]。

1.1.2　桥梁风荷载

桥梁结构风荷载主要考虑由平均风产生的静风力和脉动风产生的抖振力。桥梁气动力系数采用桥梁节段模型的风洞试验获取[17]。

(1)静风力

依据风环境下桥梁各部分的运动状态,桥梁主梁考虑平均风产生的静风升力、阻力和扭矩,索塔、桥墩部分则计算平均风产生的静风阻力。静风力为:

$$\begin{cases} L_{\mathrm{st}}=\dfrac{1}{2}\rho U_z^2 C_L(\alpha)B \\ D_{\mathrm{st}}=\dfrac{1}{2}\rho U_z^2 C_D(\alpha)B \\ M_{\mathrm{st}}=\dfrac{1}{2}\rho U_z^2 C_M(\alpha)B^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中:L_{st}、D_{st}、M_{st}分别为桥梁构件的静风升力、阻力和扭矩;ρ为空气密度;B为桥梁节段的参考长(宽)度;$C_L(\alpha)$、$C_D(\alpha)$和$C_M(\alpha)$分别为风轴系中的静风升力、阻力和扭矩系数;α为气流攻角。

(2)抖振力

抖振力主要由脉动风引起,采用Scanlan抖振力模型进行计算。对于主梁,作用在主梁单位展长的抖振力是升力$L_b(t)$、阻力$D_b(t)$和扭矩$M_b(t)$,分别表示为:

$$\begin{cases} L_b(t)= \\ \dfrac{1}{2}\rho U_z^2 B\left[2C_L(\alpha)\dfrac{u(t)}{U}+(C_L'(\alpha)+C_D(\alpha))\dfrac{w(t)}{U}\right] \\ D_b(t)= \\ \dfrac{1}{2}\rho U_z^2 B\left[2C_D(\alpha)\dfrac{u(t)}{U}+C_D'(\alpha)\dfrac{w(t)}{U}\right] \\ M_b(t)= \\ \dfrac{1}{2}\rho U_z^2 B\left[2C_M(\alpha)\dfrac{u(t)}{U}+C_M'(\alpha)\dfrac{w(t)}{U}\right] \end{cases} \tag{5}$$

式中:$C_L'(\alpha)$、$C_D'(\alpha)$、$C_M'(\alpha)$分别为三分力系数的导数。

对于桥塔和拉索,结合到其运动状态,只考虑抖振阻力,计算中代入相应的气动力系数和参考长(宽)度计算即可,不再赘述。

1.1.3　车辆风荷载

常规计算中,是把汽车风荷载分成纵向阻力、横风向侧力、竖向升力及倾覆力矩、翻转力矩和偏转力矩6个力(力矩),多用于车辆行驶安全性和舒适性评估。但对桥梁-伸缩缝结构响应,由于车辆尺寸相对于桥梁尺寸过小,倾覆力矩、翻转力矩和偏转力矩对结构响应的影响很小,因此可忽略不计。

车辆所受的气动力为:

$$F_p=\frac{\rho_{\mathrm{air}}\sqrt{(U_z+u)^2+v^2}\,c_q(\phi)A_{\mathrm{side}}}{2n} \tag{6}$$

式中:F_p(p=longre, verlifre, latre)分别表示纵向阻力、竖向升力和横向空气阻力;ρ_{air}为空气密度,ρ_{air}=1.25 kg/m^3;v为车速(m/s);$c_q(\phi)$(q=long, ver, lat)分别表示车辆的纵向阻力、竖向升力和横向阻力系数[16,18],$\phi=\arctan\left(\dfrac{U_z+u}{v}\right)$;$A_{\mathrm{side}}$为汽车在相应方向上的投影面积(m^2);$n$为车辆轴数。

1.2　演化车流荷载

桥上车流演化主要表现为车辆位置的动态分布和行驶行为的变化,车辆位置的动态分布影响主梁变形,车辆的行驶行为变化直接产生纵向力,影响主梁纵向移动,主梁的变形和运动行为带动伸缩缝形变,运动车流下桥时,更是直接行驶在伸缩缝上,为实现伸缩缝磨损的准确分析,仿真桥梁-伸缩缝结构上车辆的演化过程十分必要。车流的动态分布和车辆行驶行为是车流演化的细节体现,基于元胞自动机(Cellular automata, CA)的交通流微观仿真方法可实现桥上车流行为的“智能”仿真,本文采用CA交通流微观仿真方法,建立了车流演化仿真系统[6]。该系统把前、后悬长纳入车辆长度,优化了元胞尺寸,以影子车辆和多级变速方法分别实现了车辆行驶行为的过程化,以纳入车速差丰富了车辆微观行驶行为的决策因素,大幅提高了模拟的合理性和精确性,可实现桥梁-伸缩缝结构上车流的持续动态演化仿真。

演化车流产生的荷载主要包括车流的竖向重力和纵桥向的车辆变速惯性力(力矩)。车流演化

中的车流重力在结构上实时重分布,表现为各车辆的位置时变。依据演化规律和进程,采用车流演化仿真系统,可实现车轮所在元胞位置和重力作用点的实时确定。假设车辆重力在各车轮上均布,可确定桥梁-伸缩缝结构上各车轮位置的竖向车辆荷载。

车流演化,是车流中各车辆面临时变的行驶环境,对本车的运动状态做出的"智能"调整,运动状态的改变产生了纵桥向的车辆变速惯性力(力矩),以车辆速度作为重要标识。考虑到车速是车流演化的重要标识,惯性力以动量定理的形式确定,每个车轮的惯性力F_{inet}与车速的关系式为:

$$F_{\text{inet}}=\frac{m\cdot(v_{\text{end}}-v_{\text{start}})}{2tn} \tag{7}$$

式中:t为时步时长;v_{start}和v_{end}分别为车辆在每个时步的始、末时刻的速度(m/s)。

车辆质心具有一定高度,车辆在变速过程中,惯性力在车轮的桥面作用点位置产生力矩,各个车轮上M_{inet}表示为:

$$M_{\text{inet}}=F_{\text{init}}h_{\text{v}} \tag{8}$$

式中:h_{v}为车辆质心距车轮的桥面作用点位置的高度。

除惯性力及其产生的力矩外,还有车辆重力绕主梁纵轴和惯性力绕竖轴产生的力矩等,均可由相应力乘以力臂获得,不再赘述。

1.3 风-车-桥-伸缩缝分析系统

由于车流中车辆被赋予的"智能"行驶行为,车流演化就变成了一个多车变速、换道共存的持久"无序"过程,车流"无序"运动,导致车辆间距和遮挡效果的持续变化,很难再采用常规方法确定车辆间的气动干扰。为便于分析,只考虑气动干扰最严重的状况——车辆间的遮挡状态。同向车流中的超车现象,导致超车和被超车的迎风面追赶遮挡,异向车流的对向行驶,产生相向车辆的迎风面交错遮挡。风环境下,车流演化过程中迎风面的遮挡存在车型、相对速度、相对横向间距、周围车辆及与桥梁栏杆距离等的影响因素繁多和遮挡的过程性等问题,因此假定相邻车道车辆的重叠部分,背风侧车辆被遮挡完全,中间隔一个车道的车辆,背风侧的车辆被遮挡一半,其余干扰忽略不计,通过对遮挡车辆水平面上(纵向、横向)位置的时步识别,动态确定各个时步车辆的风荷载。在已有车流演化及其荷载化软件模块的基础上[6],实现风环境下的车流演化及其荷载化模块编制。

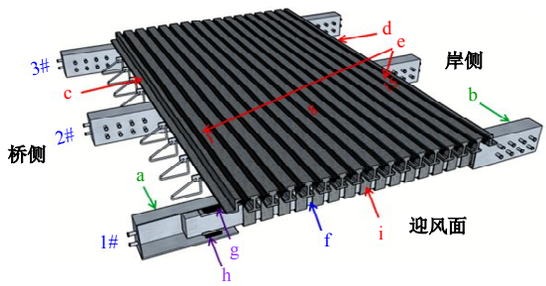
风环境下车流演化及其荷载化、桥梁风场及其荷载化均在Matlab软件中实现,桥梁-模数式伸缩缝有限元模型的建立和连接在ANSYS有限元软件中进行,实现风环境下车流演化运营场景及其荷载化和桥梁-伸缩缝结构响应计算流程模块的分别编制和程序贯通。为便于计算,把车辆所用力(纵、横和竖向力)均分在各个车轮上,依据车轮即时位置,以力(力矩)的形式多向线性插值并加载在桥梁-伸缩缝承载梁的有限元节点上。通过程序对各模块的循环调用,形成风-车-桥梁-伸缩缝分析系统,实现风环境下车流演化过程的桥梁-伸缩缝结构瞬态分析。

2 桥梁-伸缩缝同尺度"十"字有限元模型

2.1 伸缩缝结构及模型

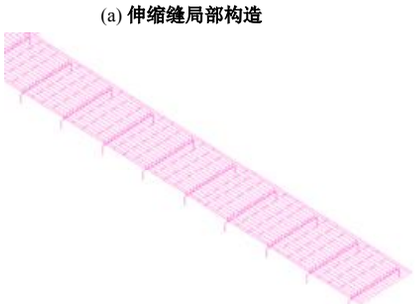
模数式伸缩缝的横桥向宽度为31 m,其基础骨架为上层梁和下层梁组成的承重骨架和位移箱组成的锚定骨架。下面以桥梁右侧的伸缩缝为例进行描述,左侧的伸缩缝同参数对称分布。上层梁由桥侧的左边梁、岸侧的右边梁和左右边梁之间的15根中梁组成,沿桥梁横向纵长摆放。左边梁锚固在主梁梁端,右边梁锚固在岸上,左边梁、中梁和右边梁的相邻梁间通过橡胶材料的剪切弹簧连接,相邻梁间位移范围为[0,80] mm。下层梁由21根支撑横梁按1.5 m间距等距沿桥梁纵向纵长摆放。各根中梁下焊有吊架,吊架串在支撑横梁上。每根支撑横梁的梁端位置处设有位移箱,桥侧的位移箱锚固在主梁梁端,岸侧的位移箱直接锚固在岸上。吊架内和位移箱内均填充有橡胶材料的滑动支承和压紧支承。模数式伸缩缝的局部构造如图1(a)所示。

模数式伸缩缝是多构件的联动结构,欲实现伸缩缝内部的磨损分析,需建立伸缩缝构件层面的模型。基于ANSYS进行有限元建模时,骨架梁采用BEAM188单元模拟,吊架内和位移箱内的压紧支承和滑动支承采用COMBIN14单元以3D轴向弹簧-阻尼器模拟,弹簧刚度取为6×10^4 kN/m。上层梁间的剪切弹簧也采用COMBIN14单元以3D轴向弹簧-阻尼器模拟,弹簧刚度取为4×10^2 kN/m。岸侧的位移箱直接固结,桥侧的位移箱采用刚臂,先顺次连接,再与梁端连接。模数式伸缩缝的局部有限元模型如图1(b)所示。



a-左位移箱; b-右位移箱; c-左边梁; d-右边梁;e-中梁;f-支撑横梁;
g-压紧支承;h-滑动支承;i-吊架;c、d、e和i为上层梁;f为下层梁

(a) 伸缩缝局部构造



(b) 局部有限元模型

图 1　模数式伸缩缝构造和有限元模型

Fig. 1　Construction and finite element model of modular expansion joints

2.2　桥梁-伸缩缝同尺度“十”字有限元模型

取某位于由江入海喇叭口位置的五跨双塔双索面斜拉桥-模数式伸缩缝结构为背景结构,桥长908(70+160+448+160+70) m。主梁为流线型封闭扁平钢箱梁,与伸缩缝等宽范围内,横向布置有双向六车道 6×3.75 m,左右路肩 2×3.25 m,中央分隔带 2 m,共 31 m。基于 ANSYS 建立桥梁-伸缩缝同尺度“十”字有限元模型。桥梁模型中,桥塔、主梁和桥墩采用 BEAM4 梁单元模拟,斜拉索采用 LINK10 单元模拟,主梁节点与斜拉索以刚臂单元连接,桥墩底部固结。桥梁-伸缩缝同尺度“十”字有限元模型的关键在于桥梁模型与伸缩缝模型的连接问题。因伸缩缝与梁端存在运动和力的传递,因此采用多点约束(Multipoint constraint,MPC)法进行处理。建模过程中伸缩缝的桥侧边梁的各节点,采用多点约束法与主梁梁端节点连接[15]。桥梁-伸缩缝同尺度“十”字有限元模型如图 2 所示。

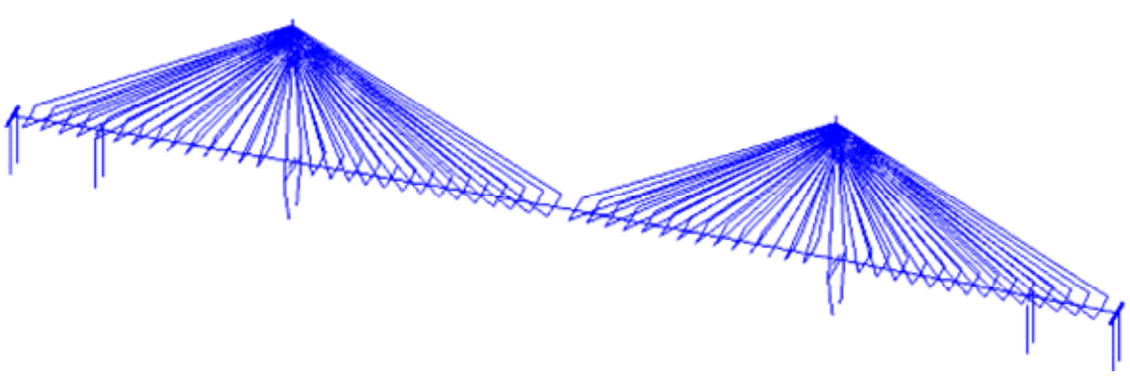


图 2　桥梁-伸缩缝有限元模型

Fig. 2　Finite element models of bridges and expansion joints

3　风和演化车流联合作用下的伸缩缝磨损分析

桥梁运营过程中,多处于常规荷载状况下,因此进行风和演化车流联合作用下的伸缩缝磨损分析,是在良态风场和常规车流条件下进行的。因背景结构建在由江入海的喇叭口位置,“窄管”效应使得桥址风速较大,常年风速多在 4 级以上,因此风速范围取[10,30] m/s,间隔为 5 m/s。汽车荷载以车流密度为变量,进行多密度下的车流组合,车流密度选取 0.069、0.115 和 0.217 三种密度组合,对应稀疏、密集和拥堵 3 种状态。风速范围和车流密度范围均是桥梁运营过程中的常规风和汽车荷载的合理范围。依据磨损评估指标,采用建立的分析系统,先进行典型风-车组合工况下的评估指标规律分析,选取每个指标的代表性分析目标,然后进行风和演化车流联合作用下的伸缩缝磨损评估。

3.1　磨损分析指标

模数式伸缩缝是多构件的联动体系,磨损评估时,不能以笼统的整体指标进行。模数式伸缩缝的主要骨架是上层梁(中梁)、下层梁(支撑横梁)和位移箱,彼此之间通过支承弹簧元件相连。本文以支承弹簧元件为目标,以支承弹簧元件连接的构件点对的相对运动为分析对象,针对其多构件联动的突出特征,建立了伸缩缝磨损分析指

标体系。分析指标主要包括3个:位移箱和相应支撑横梁端头的相对位移、上、下层梁对应点对间的相对位移和相邻中梁之间的相对位移,此处的相对位移是三维空间的相对位移。第一个分析指标反映的是位移箱内位移箱壁和支撑横梁间滑动支承和压紧支承的橡胶的磨损,第二个分析指标表示的是支撑横梁和中梁吊架间滑动支承和压紧支承的橡胶的磨损,第三个分析指标体现的是相邻中梁间剪切弹簧橡胶的拉压磨损。

为获取风和演化车流联合作用下各磨损分析指标的规律,选取风速为20 m/s、车流密度为0.115-0.115(上、下行车流密度分别为0.115和0.115,下同)组合成典型荷载工况,采用建立的风-车-桥梁-伸缩缝分析系统,依据分析指标体系,进行典型荷载工况下的分析指标规律分析。

(1)位移箱和相应支撑横梁端头的相对位移

位移箱和相应支撑横梁端头的相对位移,反映了位移箱内处于位移箱和支撑横梁之间的压紧支承和滑动支承的磨损,相对位移的累计是支承持续磨损的体现。典型荷载工况下的相对位移累计规律如图3所示。

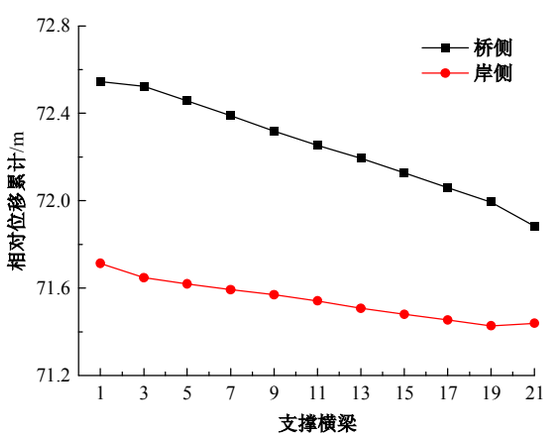


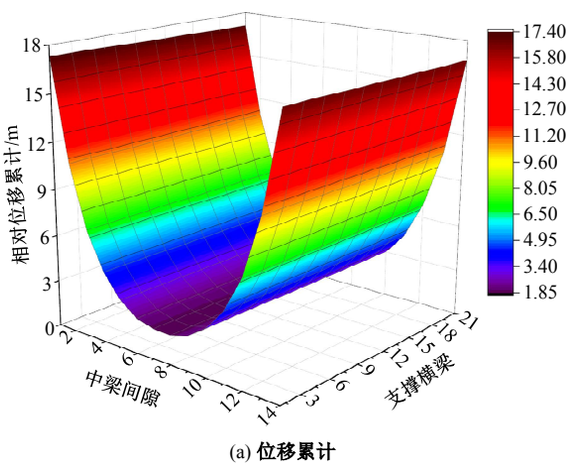
图3 位移箱和支撑横梁端头的相对位移累计

Fig. 3 Cumulative relative displacement of support crossbeam and displacement box

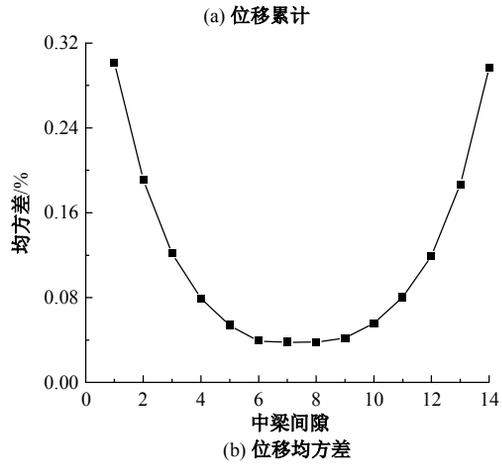
图3给出了风和车流下的伸缩缝位移箱和支撑横梁端头的小时相对位移累计。由图3可知,风和演化车流下,位移箱和支撑横梁端头的相对位移累计,总体呈现的规律为:桥侧大于岸侧,迎风侧大于背风侧且递减较为均匀,在桥侧的迎风面位置出现最大值,为72.55 m,最小值出现在背风侧的19#支撑横梁的岸侧位置,为71.42 m。位移箱和支撑横梁的相对位移,桥侧位移箱随梁端的被迫运动是主要发动因素,通过支承联带支撑横梁运动,纵向传递过程中能量消耗衰减,因此桥侧的位移箱和支撑横梁端头的相对位移累计大于岸侧。桥梁主梁在风作用下,迎风侧梁体运动幅度大于背风侧,带动梁端产生同样的形变趋势,导致迎风侧的位移箱和支撑横梁端头的相对位移累计大于背风侧。

(2)相邻中梁间的相对位移。

剪切弹簧安装在中梁间隙,通过自身的压缩和拉伸,平衡纵向位移在各根中梁的分布,其使用寿命主要受拉压变形总量和变形的均匀性影响,以相对位移累计及相对位移均方差表示。典型荷载工况下的指标规律如图4所示。



(a) **位移累计**



(b) **位移均方差**

图4 相邻中梁间的相对位移

Fig. 4 Relative displacement between adjacent middle beams

图4给出了风和演化车流下的伸缩缝相邻中梁间的小时相对位移累计。由图4可知,风和随机车流下,相邻梁中间的相对位移累计,在桥梁纵向方向上,呈U型分布,即从伸缩缝两端向伸缩缝中间逐渐减小,在桥梁横向方向上,从迎风侧到背风侧呈单调递减趋势,在1#和2#中梁间隙的迎风面处出现最大值,为17.30 m,在8#和9#中梁

间隙的背风面处出现最小值,为 1.89 m,最大值是最小值的 9.15 倍。位移均方差也呈现相似规律。与支撑横梁和梁端位移箱的相对位移不同,中梁在桥梁纵向方向上的运动,是伸缩缝两端运动状态(一端运动,一端静止)在伸缩缝内双向传递结果的叠加,两端的运动和静止互为相对。后文进行风和车流参数分析时,选取 1#和 2#中梁间隙的迎风和背风面处的相对位移累计为分析目标。因中梁具有刚度,相邻两根中梁间的相对位移,从迎风侧到背风侧是线形过渡,因此不考虑中间点的相对位移间的关系。

(3)上、下层梁对应点对间的相对位移

上层梁通过悬吊系统串在下层梁(支撑横梁)上,中间填充了橡胶材质的滑动支承和压紧支承,取上、下层梁相交点分别在上、下层梁上的投影点构造点对,支承的持续磨损以点对的相对位移累计进行计量。典型工况下上、下层梁对应点对的相对位移累计规律如图 5 所示。

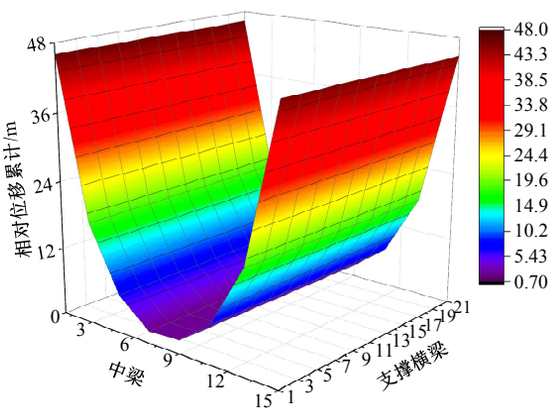


图 5　上、下层梁对应点对的相对位移累计

Fig. 5　Cumulative relative displacement of point pairs between upper and lower beams

图 5 给出了风和演化车流下的伸缩缝上、下层梁对应点对的小时相对位移累计。由图 5 可知,上、下层梁对应点对的相对位移累计在桥梁纵向上呈 U 型分布,从伸缩缝两端向伸缩缝中间逐渐减小。在伸缩缝横向上,同一根中梁对应目标点对的相对位移,从迎风侧到背风侧,在桥侧总体呈递增趋势,在岸侧总体呈递减趋势。在各根中梁中,1#中梁对应的点对的相对位移累计均最大,其中 1#中梁和 19#支撑横梁对应的目标点对出现最大值,为 46.16 m,在 7#中梁和 1#支撑横梁对应位置处出现最小值,为 2.09 m,最大与最小相差近 22.09 倍。后文进行风和随机车流的参数分析时,选 1#中梁对应目标点对的相对位移累计为分析目标。

3.2　伸缩缝磨损与风速的关系

依据位移箱和相应支撑横梁端头的相对位移、上下层梁对应点对间的相对位移和上层梁相邻梁之间的相对位移三个分析指标和各个指标的分布规律,采用建立的分析系统进行车流密度 0.069-0.069 组合时,以阶梯风速下(10、15、20、25、30 m/s)的指标量分析,探究伸缩缝磨损与风速的关系。

图 6 给出了不同风速下的支撑横梁与相应位移箱的小时相对位移累计。

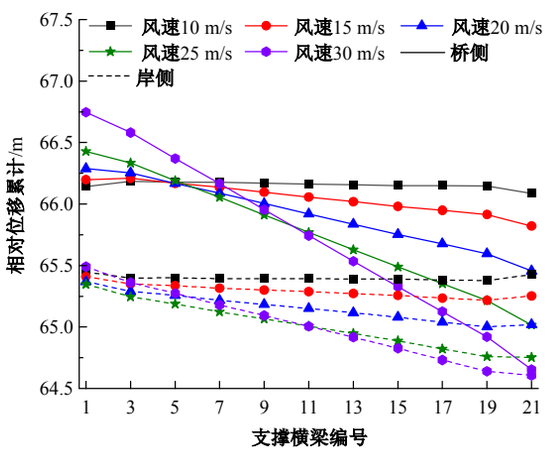


图 6　多风速下的支撑横梁与位移箱的相对位移累计

Fig. 6　Cumulative relative displacement of support crossbeam and displacement box under different wind speeds

由图 6 可知,桥侧和岸侧的相对位移累计的规律不同,桥侧的相对位移累计大于岸侧,迎风面位置的相对位移累计大于背风面。随风速的增大,桥侧迎风面的相对位移累计逐渐增大,岸侧迎风面规律不明显,两侧背风面则逐步减小且规律显著。随着风速的增大,桥侧和岸侧的差值从迎风面到背风面的变化趋势为从总体相对稳定到逐渐减小。在风速较小时,总体相对稳定,10 m/s 风速时的迎、背风侧的差值分别为 0.70 m 和 0.66 m,在 30 m/s 风速时,差值从迎风侧 1.26 m 逐渐减小至背风侧的 0.04 m。风速较小时,桥梁主梁变形主要受车流荷载控制,以竖向、纵向变形为主,迎风侧和背风侧的主梁变形差别不大,主梁联带位移箱运动,因此支撑横梁和位移箱的相对运动在迎风侧和背风侧差别不大。随着风速的增大,主梁产生较大的横向形变和运动,迎风侧和背风侧的差别也逐渐增大,联带位移箱运动,产生了

迎风侧和背风侧的较大差值。

图7给出了相邻中梁(1#和2#)间的小时相对位移累计和均方差随风速的变化关系。

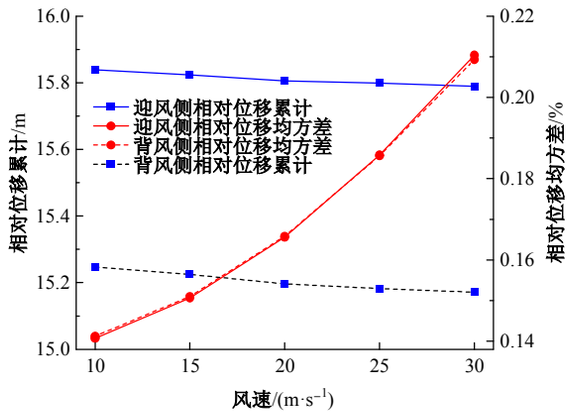


图7 不同风速下相邻中梁间的相对位移累计

Fig. 7 Cumulative relative displacement between adjacent middle beams at different wind speeds

由图7可知,1#梁和2#梁的相对位移累计随风速的增大,呈小幅减小趋势,且迎风侧的相对位移累计大于背风侧,迎、背风侧的差值比例随风速也呈增大趋势,最大差值比例在30 m/s处取得,达到4.07%。相对位移的均方差随风速的增大,呈增大趋势,30 m/s对应的均方差比10 m/s对应的均方差,增大约49.6%,迎、背风侧对均方差的影响非常小,在0.5%以内。相对位移累计随风速的增大呈减小趋势,主要是因为风和车流共同作用时,桥梁主梁传递到伸缩缝的变形以竖向变形为主,竖向变形由风和车流共同产生,以车流为主,车流自身重力对主梁产生竖直向下的作用力,风产生的升力抵消了车流产生的部分竖向作用力,减小了主梁变形,风速越大,抵消作用越明显。

图8给出了1#中梁上的对应点对,点对内两点的小时相对位移累计随风速的变化规律。

由图8可知,在迎风侧,风速越大,点对内两点的相对位移累计越小,在背风侧则规律不明显。从迎风面到背风面,随风速的增大,点对内两点的相对位移大体呈增大趋势,风速越大趋势越明显,不同风速间点对的相对位移累计差值逐渐减小。上、下层梁间点对的相对位移,是上、下层梁共同运动的结果,上层梁受梁端的直接带动运动,下层梁则是通过支承受到与梁端固结的位移箱运动的间接带动,是多运动的复杂糅合,在迎风侧表现出了较强的规律性,背风侧则规律不明显。

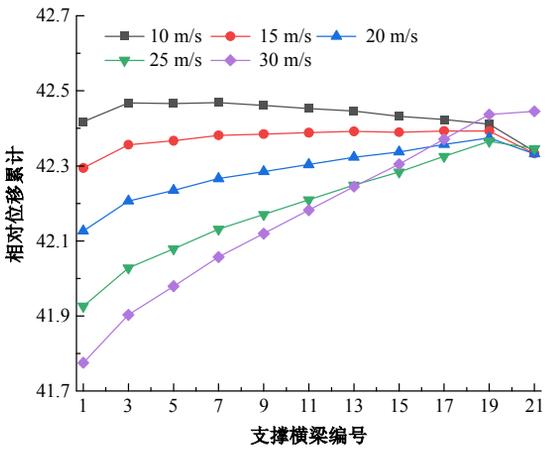


图8 不同风速下上、下层梁间点对的相对位移累计

Fig. 8 Cumulative relative displacement of point pairs between upper and lower beams at different wind speeds

3.3 伸缩缝磨损与车流密度的关系

依据建立的伸缩缝磨损指标体系内的3个分析指标和各个指标的分布规律,采用建立的风-车-桥-伸缩缝分析系统,进行10 m/s风速环境中3个密度车流(0.069、0.115、0.217)组合下的指标量分析,探究伸缩缝磨损规律与车流密度的关系。

图9给出了支撑横梁与相应位移箱的小时相对位移累计随车流密度的变化规律。由图9可知,桥侧的支撑横梁和位移箱的相对位移累计大于岸侧,同侧的相对位移累计则差别很小。随着车流密度增大,相对位移累计明显增大,双向车流密度均为0.217的车流下的小时相对位移累计达到74.05 m,与双向车流密度均为0.069时的

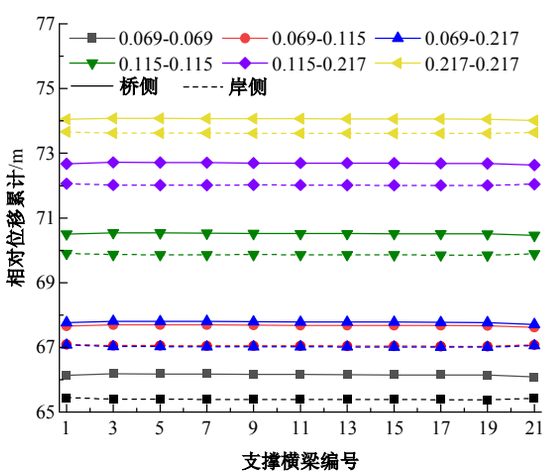


图9 多车流组合下支撑横梁与位移箱的相对位移累计

Fig. 9 Cumulative relative displacement between supporting crossbeam and displacement box under multi traffic combination

66.14 m相比,增大了约12.0%。与风速变化状况相比,车流对支撑横梁与位移箱的相对位移累计的影响更为显著。对比车流密度组合为0.069-0.217和0.115-0.115两种工况,发现当双向车流密度之和相当时,车流密度差越大,相对位移累计越小,这主要是因为当车流密度之和相当时,对主梁产生的竖向形变进而联带伸缩缝变形的效果相当,但两侧密度一侧过大一侧过小,密度过大则车流速度较小变速几率也小,密度过小时车辆少变速几率也小,二者产生的纵向力总体较小所致。

图10给出了相邻中梁(1#和2#)间小时相对位移累计和均方差随车流密度的变化规律。由图10可知,随车流密度的增大,1#和2#中梁间的相对位移累计和均方差均呈明显增大趋势。双向车流密度为0.069和0.217时的相对位移累计分别为15.83 m和17.76 m,增大幅度约为12.2%,均方差分别为14.1%和34.4%,增大幅度约为1.44倍。与风速变化状况相比,车流对相邻中梁间相对位移累计和均方差的影响更为显著。

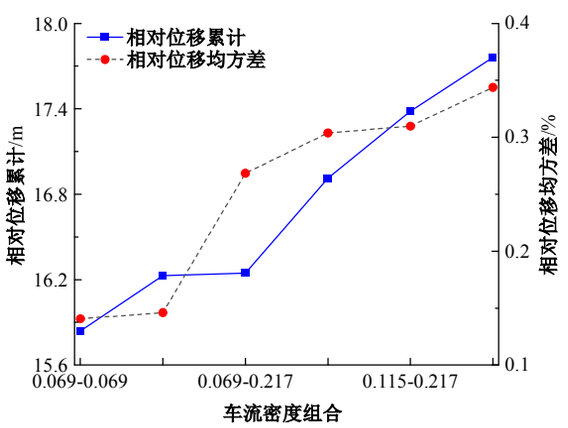


图10　多车流组合下相邻中梁间相对位移

Fig. 10　Relative displacement between adjacent middle beams under multi traffic combination

图11给出了1#中梁上与相应支撑横梁对应点对内,两点的小时相对位移累计随车流密度的变化规律。

由图11可知,上、下层梁对应点对的相对位移累计随车流密度增大,呈增大趋势,而在横桥向方向上,则变化不大。在双向车流密度均为0.069时,小时相对位移累计最小,为42.41 m,在双向车流密度均为0.217时最大,为47.05 m,增大幅度约为10.92%。在车流密度总和相当时,

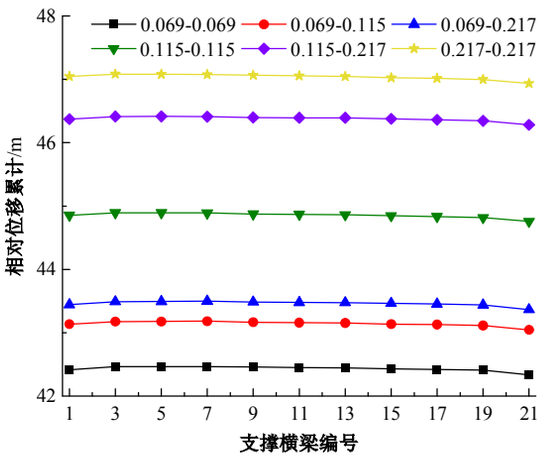


图11　多车流组合下上、下层梁相对位移

Fig. 11　Relative displacement of upper and lower beams under multi traffic combination

上下行车流分布越均匀,相对位移累计越大。与风速变化状况相比,车流密度变化对上、下层梁间的相对位移累计影响更为显著。

4　结　论

(1)确定了运营场景演化的持续荷载模式,建立了风-车-桥梁-伸缩缝分析系统。以伸缩缝磨损分析为目标:采用车辆主要方向风荷载和统一简化气动干扰的方法,解决了风环境下车流演化过程中风荷载时变和车辆持续动态遮挡的计算和实现问题;以多点约束联结同尺度的桥梁和伸缩缝模型,满足了力和位移在伸缩缝和桥梁间的双向传递以及伸缩缝构件层面响应分析的需要;建立的分析系统兼顾了分析的精细度和计算效率,是伸缩缝磨损分析的有效计算平台。

(2)风和车流演化下,岸侧位移箱内的磨损基本相当,桥侧位移箱内的磨损从迎风侧到背风侧逐渐减小,但相差百分比较小;剪切弹簧和上、下层梁间的滑动支承和压紧支承均在伸缩缝两侧磨损最严重,从两侧到中间磨损逐步减轻,最大和最小分别相差近9.15和22.09倍。位移箱内的滑动支承和压紧支承的设计参数可统一配置,剪切弹簧和上下层梁间的滑动支承和压紧支承则需差异化设计。

(3)随着风速的增大,位移箱内相对位移累计:桥侧迎风面的逐渐增大,岸侧迎风面的不明显,两侧的背风面都是逐渐减小;桥侧和岸侧的差值从迎风面到背风面的趋势为,从总体相对稳定到逐渐减小。随着风速的增大,相邻中梁的相对

位移:位移累计呈小幅减小趋势,且迎风侧的相对位移累计大于背风侧,均方差随风速的增大,呈增大趋势。上下层梁的相对位移,在迎风侧随风速增大呈减小趋势,背风侧规律不明显,不同风速间点对的相对位移累计差值逐渐减小。

(4)随车流密度增大,位移箱内的相对位移累计明显增大。当双向车流密度之和相当时,车流密度差越大,相对位移累计越小。随车流密度增大,相邻中梁间的相对位移累计和均方差均呈明显增大趋势。上、下层梁的相对位移累计,随车流密度增大,呈增大趋势,在同密度车流下的横桥向方向上,则变化不大。在车流密度总和相当时,上下行车流分布越均匀,相对位移累计越大。与风速变化状况相比,车流对3个相对位移累计影响更为显著。

参考文献:

[1] Sun Z, Santos J, Caetano E, et al. Interpreting cumulative displacement in a suspension bridge with a physics-based characterisation of environment and roadway/railway loads[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023, 13: 387-397.

[2] Hu Jian-hua, Wang Lian-hua, Song Xiao-peng, et al. Field monitoring and response characteristics of longitudinal movements of expansion joints in long-span suspension bridges[J]. Measurement, 2020, 162: 1-13.

[3] Guo Tong, Liu Jie, Huang Ling-yu. Investigation and control of excessive cumulative girder movements of long-span steel suspension bridges[J]. Engineering Structures, 2016,125: 217-226.

[4] 丁勇, 王佩, 游玖昂, 等. 桥梁伸缩缝跳车冲击荷载计算方法与模型实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 129-135, 146.
Ding Yong, Wang Pei, You Jiu-ang, et al. Numerical methods and model experiment for impact load induced by vehicle bumping at bridge expansion joint [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 129-135, 146.

[5] Guo Tong, Huang Ling-yu, Liu Jie, et al. Damage mechanism of control springs in modular expansion joints of long-span bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(7): No. 04018038.

[6] 刘焕举, 武隽, 刘宁, 等. 精细微观车流-桥梁耦合系统构建及伸缩缝纵向变形分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 115-128.
Liu Huan-ju, Wu Jun, Liu Ning, et al. Construction of fine microscopic vehicle-bridge coupling system and analysis of longitudinal deformation of the expansion joint[J]. Cina Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 115-128.

[7] 韩大章, 郭彤, 黄灵宇, 等. 随机车辆荷载下大跨钢桥伸缩缝纵向位移响应及病害控制研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 172-178.
Han Da-zhang, Guo Tong, Huang Ling-yu, et al. A study on longitudinal displacements and damage control of expansion joints of long-span steel bridges under stochastic traffic loads [J]. Journal of vibration and shock, 2019,38(24):172-178.

[8] 严情木, 王少华, 杨刚, 等. 大位移桥梁伸缩缝的垂向动力学响应研究[J]. 机械设计与制造, 2013(7): 41-43, 46.
Yan Qing-mu, Wang Shao-hua, Yang Gang, et al. Research of vertical dynamic response of the large displacement bridge expansion joint[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(7): 41-43, 46.

[9] Yuan Xin-zhe, Li Rui-qi, Wang Jian-guo, et al. Dynamic numerical analysis of single-support modular bridge expansion joints[J]. Steel and Composite Structures, 2016, 22(1): 1-12.

[10] 孙正峰, 王少华, 李冰, 等. 基于ABAQUS的大位移桥梁伸缩缝垂向动力学分析[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 228-232.
Sun Zheng-feng, Wang Shao-hua, Li Bing, et al. Vertical dynamic analysis of the large displacement bridge expansion joint[J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(2): 228-232.

[11] Hou Jian-ling, Wang Jin, Xu Wei-bin, et al. An analysis method of vehicle-bridge coupling vibration considering effects of expansion joint parameters and its application[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(11): No. 3065.

[12] Ding Yong, Zhang Wei, Au F T K. Effect of dynamic impact at modular bridge expansion joints on bridge design[J]. Engineering Structures, 2016, 127: 645-662.

[13] 丁勇, 韩凌霞, 吕建华, 等. 模数式桥梁伸缩缝疲劳寿命分析与结构优化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 265-275.

Ding Yong, Han Ling-xia, Lü Jian-hua, et al. Fatigue life analysis and structural optimization of modular bridge expansion joint[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2):265-275.

[14] 张露, 李冰, 王少华, 等. 载重车辆-伸缩缝耦合系统的垂向振动数值模拟方法[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(5): 1032-1039.
Zhang Lu, Li Bing, Wang Shao-hua, et al. Numerical simulation method for vertical vibration of heavy vehicle-expansion joint coupled system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(5): 1032-1039.

[15] 刘宁, 刘焕举, 史赛威, 等. 车流作用下大跨桥梁-伸缩缝一体仿真方法及动力分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2025, 52(1): 149-159.
Liu Ning, Liu Huan-ju, Shi Sai-wei, et al. Integrated simulation method and dynamic analysis of long-span bridge-expansion joint under traffic flow[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2025, 52(1):149-159.

[16] 韩万水. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006.
Han Wan-shui. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge system[D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2006.

[17] Han Wan-shui, Liu Huan-ju, Wu Jun, et al. Dynamic analysis of long-span cable-stayed bridges under wind and traffic using aerodynamic coefficients considering aerodynamic interference[J]. Wind and Structures, 2017, 24(5): 405-430.

[18] 陈晓冬. 大跨桥梁侧缝行车安全分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
Chen Xiao-dong. Analysis of vehicle safety under cross wind on long span bridge[D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2007.