

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202211072024101969

文章编号:1674-599X(2024)06-0001-08

引用格式:余钱华,高齐松.上承式钢管混凝土拱桥动力响应分析[J].交通科学与工程,2024,40(6):1-8.

Citation: YU Qianhua, GAO Qisong. Dynamic response analysis of deck-type concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 1-8.

上承式钢管混凝土拱桥动力响应分析

余钱华,高齐松

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了探讨钢管混凝土拱桥在车辆荷载作用下的动力响应,以湖南省湘西州涂乍特大桥为工程依托,利用MATLAB软件编写车-桥耦合振动数值分析迭代程序,提取车辆对桥梁的作用力,利用ANSYS软件中的瞬态动力分析模块对钢管混凝土拱桥车-桥耦合振动进行分析。结果表明:相较于拱肋完全黏结状态,拱肋完全脱黏后一阶频率下降,面内一阶振型提前出现,且频率下降幅度比面外的大;桥面不平顺度对钢管混凝土拱桥动力响应的影响比其他因素的大;行车速度对钢管混凝土拱桥动力响应的没有明显规律,但存在一个车辆与桥梁共振的行车速度,对于涂乍特大桥而言,行车速度为20 m/s时的动力放大系数最大;完全脱黏后的动力放大系数有所减小,其中 $L/4$ (L 为桥长)处的减小幅度要比拱顶的大。

关键词:车-桥耦合振动;动力响应;拱肋脱黏;钢管混凝土拱桥

中图分类号:U448.23

文献标志码:A

Dynamic response analysis of deck-type concrete-filled steel tubular arch bridge

YU Qianhua, GAO Qisong

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: This study aims to discuss the dynamic response of concrete-filled steel tubular arch bridges under vehicle loads. With the Tuzha Bridge in Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Hunan Province as the engineering background, an iterative program for numerical analysis of vehicle-bridge coupling vibration was compiled using MATLAB software, and the force of vehicles on the bridge was extracted. The vehicle-bridge coupling vibration of the concrete-filled steel tubular arch bridge was analyzed using the transient dynamic analysis module of ANSYS software. The results show that the first-order frequency decreases for the completely debonded arch rib compared with the fully bonded one. In addition, the first-order vibration mode appears in advance in the plane after the arch rib is completely debonded, and the frequency decrease is greater than that out of the plane. The influence of bridge deck unevenness on the dynamic response of the concrete-filled steel tubular arch bridge is greater than those of other factors. While no obvious law is found in the influence of driving speed on the dynamic response of concrete-filled steel tubular arch bridges, there is a driving speed at which the vehicle resonates with the bridge. For the Tuzha Bridge, the dynamic amplification factor is largest when the driving speed is 20 m/s. The dynamic amplification factor decreases after complete

收稿日期:2022-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52078058)

通信作者:余钱华(1969—),男,教授,主要从事桥梁工程方面的研究工作。E-mail:1594519760@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

debonding, and the reduction at $L/4$ (L is length of the bridge) is greater than that at the arch crown.

Key words: vehicle-bridge coupling vibration; dynamic response; arch rib debonding; concrete-filled steel tubular arch bridge

随着国家大力推进交通基础设施的建设,钢管混凝土拱桥已成为交通运输线不可或缺的桥型之一。对于在役的钢管混凝土拱桥,不仅要承受桥梁结构自重和桥上车辆荷载的作用,还要承受桥上车辆行驶过程中对桥梁产生的动力放大作用。而桥梁所受振动又反过来对桥上行驶的车辆产生影响,这会对桥上行驶过程中的车辆的平稳与安全造成威胁。这类问题可以归纳为车-桥耦合振动问题^[1-2]。

郭薇薇等^[3]研究了风荷载对列车行驶过程中安全性能的影响;刘扬等^[4]以某大跨度斜拉桥为例,以车辆加速度为评判标准探究了桥面平整度和行车速度对行车舒适度的影响;蔺鹏臻等^[5]研究了桩-土相互作用对车-桥耦合振动的影响;刘勇等^[6]以某一连续刚构桥为例,探讨了车重、车辆数量和车辆间距对跨中截面动力响应的影响;陈水生等^[7]考虑车速、桥面粗糙程度等对钢管混凝土拱桥主梁跨中和 $L/4$ (L 为桥长)位置处冲击系数的影响。

在以往研究中,多采用双单元方法对钢管混凝土拱肋进行模拟,未考虑钢管混凝土中钢管与核心混凝土之间的相互作用。本文采用两种不同的方法对钢管混凝土拱肋进行模拟,并采用 MATLAB 软件编写车-桥耦合振动迭代分析程序,提取车辆对桥梁的作用力,利用 ANSYS 软件中的瞬态动力分析模块对钢管混凝土拱桥进行车-桥耦合振动分析,探讨桥面不平顺等级、行车速度和拱肋黏结状态对钢管混凝土拱桥动力响应的影响。

1 车-桥耦合振动理论

1.1 车辆模型

本文采用双轴车辆模型进行模拟,将车辆模型简化为弹簧-阻尼-质量体系。双轴车辆模型的侧视图和正视图如图 1 所示。图 1 中, z_v 为车体质心竖向位移; L_1 为前后轴之间的距离; z_{wi} 为桥面与车轮接触位置各车轮的竖向位移, $i=1, 2, 3, 4$ 。图 1 中车辆模型其余参数的含义和取值见表 1。

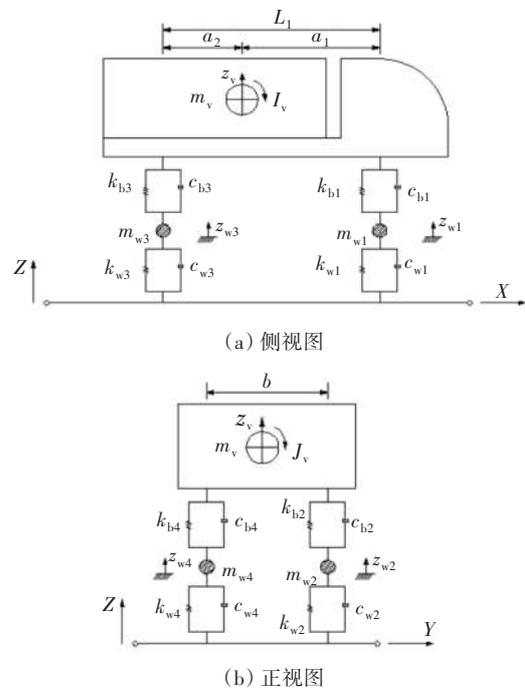


图 1 车辆模型

Fig. 1 Vehicle model

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

车身质量 m_v / kg	前轮质量 m_{w1} 、 m_{w2} /kg	后轮质量 m_{w3} 、 m_{w4} /kg	车身俯仰惯性 I_v /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	车身侧倾惯性 J_v /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	前轴到车身重心的距离 a_1 /m	后轴到车身重心的距离 a_2 /m	轮距 b / m
24 990	335	670	6 140	3 200	4.78	1.18	1.80
前轴悬架阻尼 c_{b1}, c_{b2} /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	后轴悬架阻尼 c_{b3}, c_{b4} /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	前轴悬架刚度 k_{b1}, k_{b2} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	后轴悬架刚度 k_{b3}, k_{b4} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	前轴轮胎阻尼 c_{w1}, c_{w2} /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	后轴轮胎阻尼 c_{w3}, c_{w4} /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	前轴轮胎刚度 k_{w1}, k_{w2} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	后轴轮胎刚度 k_{w3}, k_{w4} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
240 570	240 570	718 050	1 651 590	2 340	2 340	2 679 570	4 809 060

1.2 车-桥耦合振动方程

1.2.1 位移条件

假设车辆在行驶过程中车轮始终不与桥面脱离,即两者在接触点具有相同的竖向位移协调关系。该位移协调关系为:

$$\Delta_i = z_{wi} - z_{bi} - r_i(x) \quad (1)$$

式中: Δ_i 为第*i*个车轮与桥面接触点处桥面等效平整度; z_{bi} 为桥面与车轮接触点处桥梁的竖向位移; $r_i(x)$ 为第*i*个车轮处的桥面不平顺值。

1.2.2 力学条件

根据牛顿第三定律可知,在车辆与桥梁接触的过程中,桥面系与车辆接触点的位置会因为车轮的作用力而产生一个反作用力,其大小可表示为:

$$F_{wi} = k_{wi}\Delta_i + c_{wi}\dot{\Delta}_i \quad (2)$$

式中: k_{wi} 为第*i*个轮胎的刚度; c_{wi} 为第*i*个轮胎的阻尼。

1.2.3 车-桥耦合运动方程

将车辆运动方程和桥梁运动方程组合在一起得到车-桥耦合振动方程:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}_v = \mathbf{G}_v + \mathbf{F}_{bv} \\ \mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{Z}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{Z}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{Z}_b = \mathbf{F}_{vb} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}_v 、 \mathbf{M}_b 分别为车辆和桥梁的质量矩阵; \mathbf{C}_v 、 \mathbf{C}_b 分别为车辆和桥梁的阻尼矩阵; \mathbf{K}_v 、 \mathbf{K}_b 分别为车辆和桥梁的刚度矩阵; \mathbf{Z}_v 、 \mathbf{Z}_b 分别为车辆和桥梁的位移向量; \mathbf{F}_{bv} 、 \mathbf{F}_{vb} 为轮对与桥面接触点之间的相互作用力向量。

根据位移条件和力学条件对车-桥耦合振动方程采用迭代法求解,即可得到桥梁和车辆的动力响应值。

2 桥面不平顺值

众多研究^[8-10]表明,桥面不平顺度对桥梁结构动力响应有明显的影 响,其中桥面不平顺常用的模拟方法有:自回归滑动平均法、白噪声法、傅里叶逆变换法、三角级数法等。本文采用三角级数法及功率谱函数^[11]进行模拟。

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (4)$$

式中: n 为空间频率; $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$,为参考空间频率; w

为频率指数; $G_d(n_0)$ 为路面平度系数; $G_d(n)$ 为位移功率谱密度。

不同等级路面所对应的路面平度系数见表2。

表2 路面平度系数

Table 2 Road flatness coefficient

路面等级	路面平度系数/(10 ⁻⁶ m ³)		
	下限	几何平均	上限
A		16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1 024	2 048
E	2 048	4 096	8 192
F	8 192	16 384	32 768
G	32 768	65 536	131 072
H	131 072	262 144	524 288

用三角级数法求解桥面各位置的不平顺值的计算公式为:

$$r(x) = \sum \alpha_k \cos(2\pi n_k x + \phi_k) \quad (5)$$

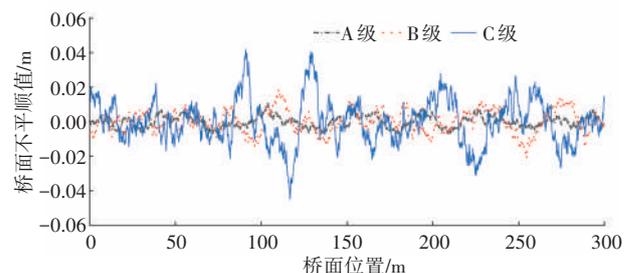
$$\alpha_k^2 = 4G_d(n_k) \Delta n \quad (6)$$

$$n_k = n_1 + (k - 1/2) \Delta n, k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

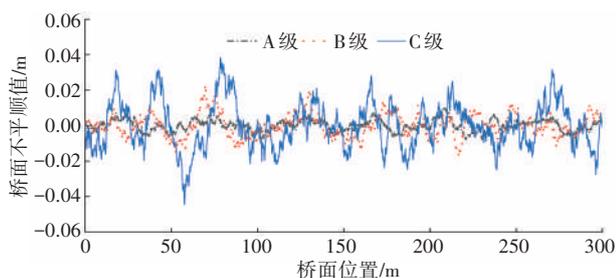
$$\Delta n = (n_2 - n_1) / N \quad (8)$$

式(5)~(8)中: $r(x)$ 为桥面不平顺值; ϕ_k 为在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机相位角; x 为桥面纵向位置坐标。

根据路面平度系数并结合三角级数法,采用MATLAB编写代码得到桥面不平顺值。通过对公路桥梁桥面不平顺情况进行调查后发现,大多数公路桥梁桥面不平顺等级在B与C之间,故本文取桥面不平顺等级为A、B、C,各等级桥面不平顺值如图2所示。由图2可知,在这三个等级下,左车轮桥面不平顺度峰值分别为8.44、16.80、44.79 mm,右车轮桥面不平顺度峰值分别为8.61、19.22、44.52 mm。



(a) 左车轮桥面不平顺值



(b) 右车轮桥面不平顺值

图2 各等级下桥面不平顺值

Fig. 2 Bridge deck unevenness at each grade

3 实例分析

3.1 工程概况

本文以涂乍特大桥为工程依托。该桥为钢管混凝土拱桥,主引桥以(2×35+252+2×35) m布置,计算跨径为252 m,矢高为45.82 m,矢跨比为2/11,拱轴系数为1.167。桥梁总体布置图见图3。

主拱圈截面采用变截面形式,拱肋主弦管采用1 100 mm(直径)×26 mm(壁厚)、1 100 mm(直径)×22 mm(壁厚)、1 100 mm(直径)×18 mm(壁厚)的钢管,管内灌注C55自密实补偿收缩混凝土;连接主弦管采用的是508 mm(直径)×16 mm(壁厚)的竖腹杆、斜腹杆和711 mm(直径)×16 mm(壁厚)的横缀管(图4)。桥面采用13×20 m先简支后桥面连续的T梁,梁高1.5 m(图5)。

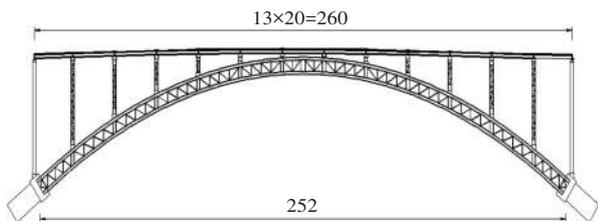


图3 涂乍特大桥总体布置图(单位:m)

Fig. 3 Overall layout plan of Tuzha Bridge (unit: m)

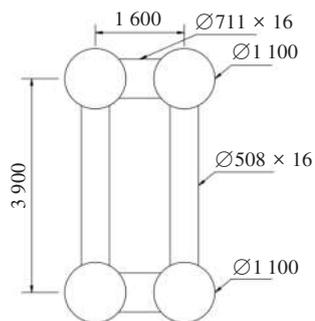


图4 拱肋截面示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of arch rib section (unit: mm)

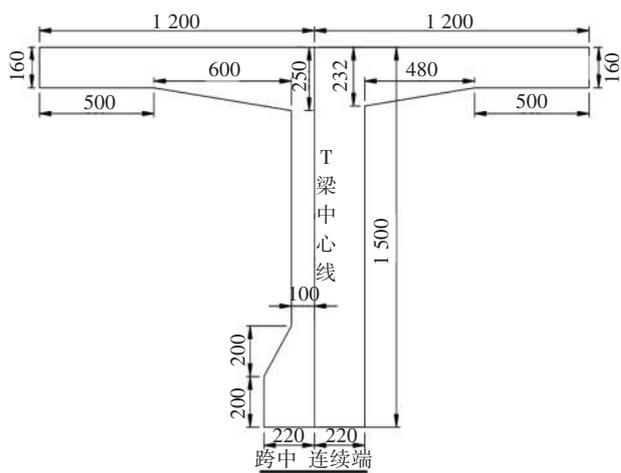


图5 T梁横断面图(单位:mm)

Fig. 5 Cross-section of T-beam (unit: mm)

3.2 有限元模型的建立

采用ANSYS建立涂乍特大桥整体模型,如图6所示。对于完全脱黏的情况,采用双单元法进行拱肋模拟,即在钢管与核心混凝土的相同位置处选取两个节点,然后改变节点的局部坐标系,通过ANSYS中的弹簧单元将这两个节点连接;对于完全黏结的情况,采用统一理论^[12]进行拱肋模拟,将钢管和核心混凝土视为一种材料,并考虑钢管与核心混凝土之间的套箍作用。对于拱肋主弦管截面,采用统一理论换算得到的组合材料参数见表3。



图6 涂乍特大桥有限元模型图

Fig. 6 Finite element model diagram of Tuzha Bridge

表3 组合材料特性

Table 3 Composite material characteristics

截面	钢管钢材型号	混凝土强度等级	组合弹性模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)
1 100 mm(直径)×26 mm(壁厚)	Q345	C55	55 989.05	27.80
1 100 mm(直径)×22 mm(壁厚)	Q345	C55	52 309.46	29.08
1 100 mm(直径)×18 mm(壁厚)	Q345	C55	48 538.68	28.35

3.3 两种状态下的全桥自振频率

在拱肋完全黏结和完全脱黏情况下对全桥进行动力特性分析,并提取一阶面内、面外频率,结果见表4。

表4 两种状态下成桥后的自振频率对比

Table 4 Comparison of natural vibration frequencies after bridge completion under two conditions

拱肋黏结状态	一阶面外振型		一阶面内振型	
	模态序列	频率/Hz	模态序列	频率/Hz
完全黏结	1	0.401 734	3	0.781 113
完全脱黏	1	0.388 185	2	0.728 569

从表4可以看出,在拱肋核心混凝土完全脱黏后,一阶面内和面外频率均有所下降,其中一阶面外频率下降了3.4%,一阶面内频率下降了6.7%,且完全脱黏后的一阶面内振型提前发生。由此可见,拱肋完全脱黏对钢管混凝土拱桥面内的影响大于对面外的影响。

3.4 桥面等级的影响

为考虑桥面等级对车-桥耦合振动的影响,取车辆行驶速度为20 m/s,桥面等级分别为A、B、C,得到各桥面等级下拱顶和L/4处竖向位移响应曲线,见图7~8。

从图7~8可以看出,对于钢管混凝土拱桥而言,随着桥面等级的降低,拱肋最大动力响应值逐渐增加。对于拱顶,静力响应最大位移为-1.649 mm,桥面等级A、B、C的最大动力响应分别为-1.779、-1.987、-2.193 mm;对于L/4位置,静力响应最大位移为-2.411 mm,桥面等级A、B、C的最大动力响应分别为-2.627、-3.303、-3.311 mm。

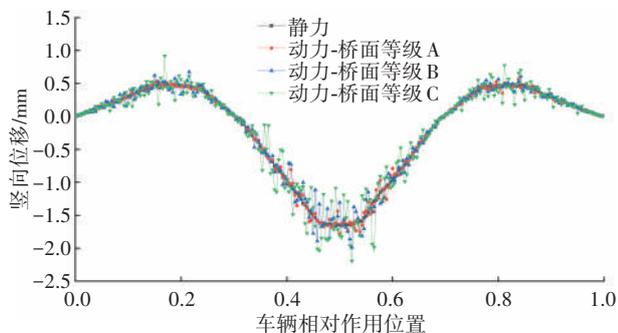


图7 不同桥面等级下拱顶竖向位移响应曲线

Fig. 7 Response curves of vertical displacement of arch crown at different deck levels

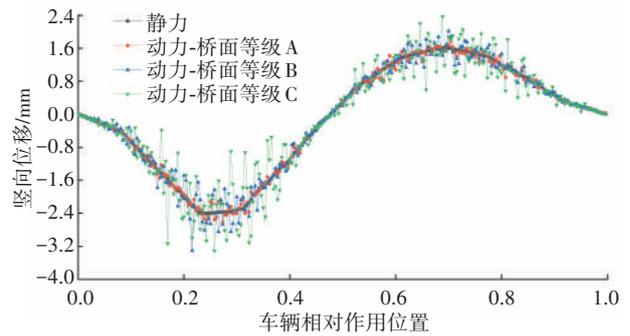


图8 不同桥面等级下L/4处竖向位移响应曲线

Fig. 8 Response curves of vertical displacement at L/4 at different deck levels

3.5 车速度的影响

设置桥面等级为B,车速分别为10、15、20、25 m/s,对钢管混凝土拱桥车-桥耦合振动中桥梁拱肋的动力响应进行分析,其中拱顶和L/4位置处竖向位移响应曲线见图9~10。

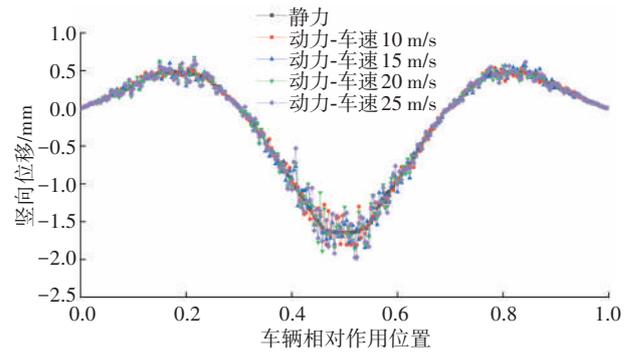


图9 不同车速下拱顶竖向位移响应曲线

Fig. 9 Response curves of vertical displacement of arch crown at different vehicle speeds

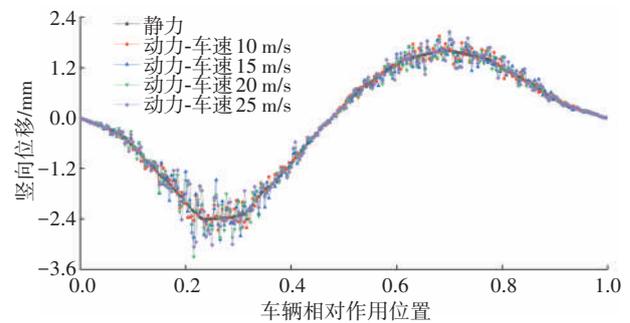


图10 不同车速下L/4处竖向位移响应曲线

Fig. 10 Response curves of vertical displacement at L/4 at different vehicle speeds

由图9~10可知,对于拱顶,车速10、15、20、25 m/s下的最大动力响应值分别为-1.809、-1.846、

-1.987、-1.976 mm;对于L/4位置,车速10、15、20、25 m/s下的最大动力响应值分别为-2.664、-2.890、-3.303、-3.067 mm。对比不同车速下拱肋竖向位移动力响应值可以发现,最大动力响应值并不是随着车速的增加而增加的,而是存在一个车辆与桥梁发生共振的车速,此时拱肋动力响应值达到最大。

3.6 拱肋黏结状态的影响

对于运营期钢管混凝土拱桥,钢管与核心混凝土之间的接触状态处于完全黏结与完全脱黏这两种极限状态之间^[13-15]。因此,本文借助不同的材料本构关系对拱肋进行模拟,然后对这两种极限状态下的动力响应进行分析,为运营期钢管混凝土拱桥拱肋黏结状态的判断提供依据。拱肋不同黏结状态下拱顶和L/4位置处竖向位移响应曲线见图11~12。

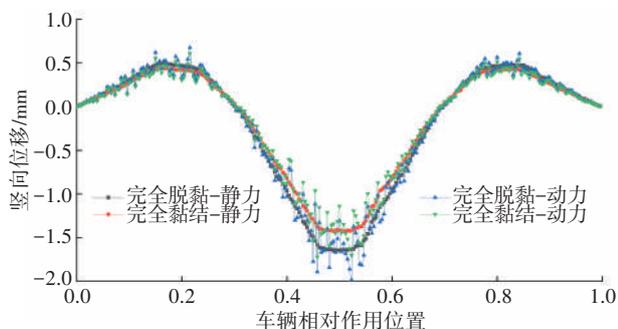


图11 拱肋不同黏结状态下拱顶竖向位移响应曲线

Fig. 11 Response curves of vertical displacement of arch crown under different bonding states of arch ribs

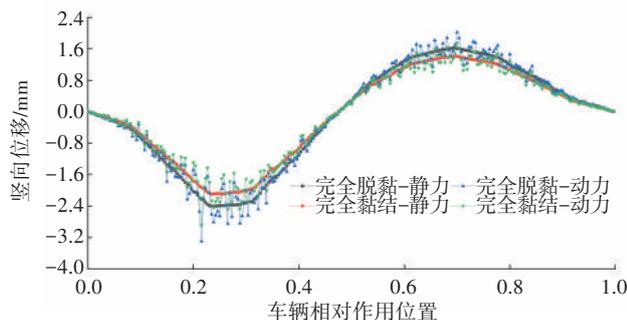


图12 拱肋不同黏结状态下L/4处竖向位移响应曲线

Fig. 12 Response curves of vertical displacement at L/4 under different bonding states of arch ribs

对于拱肋不同黏结状态下钢管混凝土拱桥车-桥耦合振动而言,拱肋竖向位移动力响应的整体趋势相同。在拱肋完全黏结的状态下,拱顶的最大动力响应为-1.723 mm,L/4位置处的最大动力响应为-2.888 mm;在拱肋完全脱黏的状态下,拱顶的最大动力响应为-1.987 mm,L/4位置处的最大动力响应为-3.303 mm。

4 拱肋竖向振动响应分析

对上述不同桥面等级、不同行车速度、不同拱肋黏结状态下拱肋竖向位移的最大动力响应进行分析,得出相应的动力放大系数,结果见表5~7。

从表5可以看出,拱肋竖向位移动力放大系数随着桥面不平顺等级的增加而增加。在桥面不平顺等级由B增加到C时,拱顶的动力放大系数增幅较大,L/4位置处的增幅较小。由此可以推断,随着桥面不平顺等级的增加,拱顶的动力放大系数可能会超过L/4位置处的动力放大系数。

从表6可知,随着行车速度的增加,动力放大系数无明显变化规律。其中,车速为20 m/s时,拱顶和L/4位置处的动力放大系数分别为1.205、1.370,此时动力放大系数为所分析情况中的最大值。由此可以看出,桥梁与车辆之间存在一个速度共振点。

从表7可以看出,拱肋完全脱黏后动力放大系数变小,其中拱肋L/4位置处的动力响应对拱肋黏结状态更加敏感。对于运营期的钢管混凝土拱桥而言,拱肋钢管与核心混凝土之间的黏结状态介于完全黏结与完全脱黏之间,故实际动力放大系数也应介于这两种状态所对应的放大系数之间。

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)计算得到涂乍特大桥的理论冲击系数分别为0.050、0.062,而根据《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)计算得到的完全黏结和完全脱黏状态下钢管混凝土拱桥的冲击系数分别为0.120、0.117。对于钢管混凝土拱桥而言,前者偏小,后者在桥面等级较高时可采用。但随着桥面等级变低,其所对应的冲击系数也会变大。根据目前的调查结果,对于大多数公路桥梁而言,桥面等级一般介于B、C之间,即实际桥梁的冲击系数均大于规范中的规定值。

表5 各桥面不平顺等级下的动力放大系数

Table 5 Dynamic amplification factors for each unevenness deck level

桥面不平顺等级	动力放大系数	
	拱顶	L/4
A	1.079	1.090
B	1.205	1.370
C	1.330	1.374

表6 不同行车速度下的动力放大系数

Table 6 Dynamic amplification factors at different driving speeds

行车速度/ (m·s ⁻¹)	动力放大系数	
	拱顶	L/4
10	1.097	1.105
15	1.120	1.199
20	1.205	1.370
25	1.199	1.272

表7 不同黏结状态下的动力放大系数

Table 7 Dynamic amplification factors under different bonding states

拱肋黏结状态	动力放大系数	
	拱顶	L/4
完全黏结	1.206	1.377
完全脱黏	1.205	1.370

5 结论

通过对钢管混凝土拱桥动力特性和车-桥耦合振动进行分析,得到如下结论:

1) 钢管混凝土拱桥在拱肋完全脱黏后,其面外频率和面内频率均有不同程度的下降,其中面内频率下降得较为明显;拱肋完全黏结状态下的一阶面内振型出现在模态序列3,而完全脱黏状态下的一阶面内振型出现在模态序列2,即完全脱黏后的一阶面内振型提前发生,由此可以看出拱肋完全脱黏对钢管混凝土拱桥面内的影响比对面外的影响大。

2) 通过对拱肋完全脱黏状态下的车-桥耦合振动进行分析后发现,桥面平整度对桥梁结构动力响应的影响相较于行车速度而言要大;车辆与桥梁之间存在一个速度共振点,而不是单纯的动力放大系数随着车速的增大而增大。对于涂乍特大桥而言,行车速度为20 m/s时动力放大系数最大。

3) 在现行规范中,对于一般桥梁采用基频计算其冲击系数,对于钢管混凝土拱桥还可以采用拱桥净跨径和一阶竖向频率计算其冲击系数。本文将这三种方法计算得到的结果与模型分析结果进行比较后发现,在桥面平整度较好的情况下,采用钢管混凝土拱桥一阶竖向频率计算所得冲击系数与本文数值模拟结果较为接近;但随着桥面等级变

低,本文数值模拟计算所得冲击系数均大于规范中的规定值,故在对冲击系数进行取值时,可适当将其增大。

参考文献(References):

- [1] 夏禾,张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2005.
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic interaction of vehicles and structures[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 余浩然,鲁乃唯,刘扬. 交通量持续增长下既有拱桥车载效应极值概率[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.009.
YU Haoran, LU Naiwei, LIU Yang. The probability of vehicle-effect extreme value of existing arch bridges with continuous increase of traffic volume [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.009.
- [3] 郭薇薇,夏禾,徐幼麟. 风荷载作用下大跨度悬索桥的动力响应及列车运行安全分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 103-110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.02.018.
GUO Weiwei, XIA He, XU Youlin. Dynamic response of long span suspension bridge and running safety of train under wind action [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 103-110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.02.018.
- [4] 刘扬,赵鹏,殷新锋. 基于桥面平整度大跨度斜拉桥的货车行车舒适性[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(2): 27-33. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2014.02.004.
LIU Yang, ZHAO Juan, YIN Xinfeng. The driving comfort of the long-span cable-stayed bridge based on bridge deck roughness [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2014, 30(2): 27-33. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2014.02.004.
- [5] 蔺鹏臻,王亚朋. 基于车-桥耦合振动的铁路钢管混凝土系杆拱桥冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 115-120. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.06.015.
LIN Pengzhen, WANG Yapeng. Impact factor calculation of railway concrete-filled steel tubular tied-arch bridges based on vehicle-bridge coupling vibration analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6): 115-120. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.06.015.
- [6] 刘勇,殷新锋. 重车作用下大跨度连续刚构桥动力响应分析[J]. 公路与汽运, 2021(3): 140-142. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.034.
LIU Yong, YIN Xinfeng. Dynamic response analysis of long-span continuous rigid frame bridge under the action of heavy vehicles [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(3): 140-142. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.034.
- [7] 陈水生,孙百传. 基于车桥耦合钢管混凝土拱桥车辆的

- 冲击系数[J]. 南昌大学学报(工科版), 2017, 39(1): 32-36. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdg.2017.01.007.
- CHEN Shuisheng, SUN Baichuan. The impact coefficient of the concrete filled steel tube arch bridge based on the vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2017, 39(1): 32-36. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdg.2017.01.007.
- [8] 周潮泳. 钢管混凝土拱桥在桥面激振频率下的动力特性[J]. 山西建筑, 2019, 45(17): 133-136. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2019.17.065.
- ZHOU Chaoyong. Dynamic characteristics of concrete-filled steel-tube tied arch bridge under vibration frequency of bridge deck[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(17): 133-136. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2019.17.065.
- [9] 薛宇欣, 周勇军, 赵煜, 等. 基于空间桥面不平顺的简支梁桥冲击系数研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 389-395. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2021.03.017.
- XUE Yuxin, ZHOU Yongjun, ZHAO Yu, et al. Research on dynamic load allowance of simply supported girder bridge based on spatial bridge deck roughness[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(3): 389-395. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2021.03.017.
- [10] 顾洪江. 基于桥面状况退化的车桥耦合振动分析[J]. 北方交通, 2017(3): 43-46. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2017.03.012.
- GU Hongjiang. Analysis on coupled vibration of vehicle bridge based on bridge deck status degeneration [J]. Northern Communications, 2017(3): 43-46. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2017.03.012.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机械振动 道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Mechanical vibration: road surface profiles (reporting of measured data): GB/T 7031—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [12] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [13] 鲁力, 李敏. 基于CSO-ABC算法的系杆拱桥吊杆内力优化[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 95-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.002. LU Li, LI Min. Internal force optimization of the suspender of a tied-arch bridge based on CSO-ABC hybrid algorithm [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 95-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.002.
- [14] 万成福, 曾文莉. 多跨连续钢管混凝土拱桥拆除关键技术研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 164-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.02.018.
- WAN Chengfu, ZENG Wenli. Study on key technology of demolition of multi-span continuous concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 164-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.02.018.
- [15] 吴学伟, 周倩, 刘睿, 等. 钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工的无应力状态控制法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 131-139. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240122002.
- WU Xuewei, ZHOU Qian, LIU Rui, et al. Unstressed state control method for cable-stayed construction of concrete-filled steel tube arch bridges [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2024, 21(4): 131-139. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240122002.

(责任编辑:石月珍)