

文章编号:1674-2869(2018)02-0197-06

基于下承式钢管混凝土系杆拱桥冲击系数的分析

陈旭勇¹, 汤杰¹, 杨宏印^{*1}, 宋腾腾², 易蓓³

1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074;

2. 温州市市政工程建设开发公司, 浙江 温州 325002;

3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056

摘要:采用有限元软件 ANSYS 建立了该桥的立体模型和双轴汽车模型,使用相关约束方程使轮子和系杆拱桥桥梁接触点位移相同,运用 APDL 语言编写车-桥耦合的振动计算命令流,采用瞬态动力学进行求解。分析了桥面不平顺、汽车行驶速度、汽车数量以及汽车之间间距对钢管混凝土系杆拱桥的动力响应和冲击系数的影响。结果表明:桥面粗糙程度、行车快慢、行车数目以及汽车之间的距离均会对大桥的冲击系数产生影响;桥梁最大动位移随车速的增加变化很小;随着车速的增加钢管混凝土系杆拱桥与简支梁桥冲击系数变化趋势相同。

关键词:钢管混凝土系杆拱桥;车-桥耦合振动;约束方程;冲击系数

中图分类号:U44 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.02.015

Impact Coefficient of Supported Steel Pipe Concrete Tied Arch Bridge

CHEN Xuyong¹, TANG Jie¹, YANG Hongyin^{*1}, SONG Tengting², YI Bei³

1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wenzhou Municipal Engineering Construction and Development Company, Wenzhou 325002, China;

3. CCCC Second Highway Survey and Design Institute Co., LTD, Wuhan 430056, China

Abstract: The three-dimensional bridge model and two-axis vehicle model were established in the present paper by the finite element software ANSYS. With the relative constraint equations guaranteeing that the wheel displacement is consistent with the tied arch bridge point, the vehicle-bridge coupling vibration command flow was written by the ANSYS Parametric Design Language and solved by transient dynamics. Effects of the irregularities of bridge deck, the vehicle speed, the vehicle number and the distances between vehicles on the dynamic response and impact coefficient of concrete-filled steel tube arch bridge were also analyzed. The results showed that the irregularities of the bridge deck, the vehicle speed, the vehicle number and the distances between vehicles influenced the impact coefficient of the bridge. With increasing vehicle speed, the maximum dynamic displacement of the bridge varied little, and variation tendencies of the impact coefficients for the concrete-filled steel tube arch bridge and the simply supported beam bridge were the same.

Keywords: concrete-filled steel tube arch bridge; vehicle-bridge coupled vibration; constraint equation; impact coefficient

钢管混凝土系杆拱桥具有承载荷载能力高、跨越山川江河的能力强、结构优美等优点,近几年在实际工程中运用的越来越多。城市建设过程

中,受自然条件的限制,钢管混凝土系杆拱桥一般选用中、下承式结构,其吊杆相对较长,活载相对总荷载比例较大,所以动力地质作用明显。由于

收稿日期:2017-10-23

基金项目:国家自然科学基金(51708429,51408444);武汉工程大学科学研究基金(K201734)

作者简介:陈旭勇,博士,副教授。E-mail:cxyl314kl@126.com

*通讯作者:杨宏印,博士,讲师。E-mail:yanghongyin@hust.edu.cn

引文格式:陈旭勇,汤杰,杨宏印,等.基于下承式钢管混凝土系杆拱桥冲击系数的分析[J].武汉工程大学学报,2018,40(2):197-202.

这类桥的结构繁杂多变,使得车-桥耦合振动机理更加复杂。为今后评估类似桥梁结构的动力响应,研究在车辆行驶时此类系杆拱桥的冲击效应具有一定的指导意义。许多学者对梁式桥进行了比较多的研究^[1-5],对钢管混凝土系杆拱桥的研究目前相对较少。吴庆雄等^[6]研究了钢管混凝土拱肋、桥道系的加速度、速度动力响应与冲击系数;Huang^[7]对上承式钢管混凝土拱桥的动力特性与冲击系数进行了探讨;袁小钦等^[8]对基于半主动控制的MR-TMD对钢箱梁桥冲击系数进行了研究;蒋培文等^[9]研究了简支梁车-桥耦合振动及其相关的影响因素;朱劲松和杨建荣等^[10-11]研究了系杆拱桥吊杆的冲击系数;李岩等^[12]对异形钢管混凝土拱桥的冲击系数进行了探讨;陈灏等^[13]研究了在各种要素下系杆拱桥冲击系数的相关变化规律;韩艳等^[14]研究了钢管混凝土中承式拱桥的冲击系数;广大学者对冲击系数进行了较多的研究,但很

少综合考虑桥面不平顺等一系列因素对冲击系数的影响。本文针对某下承式钢管混凝土系杆拱桥,运用ANSYS建了该桥的三维立体模型和双轴汽车模型,研究了桥面不平顺、汽车行驶速度、汽车数量及汽车之间的间距对钢管混凝土系杆拱桥的动力响应和冲击系数的影响,为后续相似桥梁设计提供借鉴。

1 工程概况

以某系杆拱桥为分析对象,整座桥梁结构的跨径组合为4×(4×30)m+280 m+3×(4×30)m,全桥总长1 120 m,起点和终点的桥台均采用肋板式桥台。整座桥梁主桥选用计算跨径265 m且结构为下承式的一种系杆拱桥,计算矢高58.89 m,矢跨比1/4.5。引桥采用装配式小箱梁,跨径为30 m,先简支后连续。桥跨布置如图1所示,该桥拱脚为桩基础。

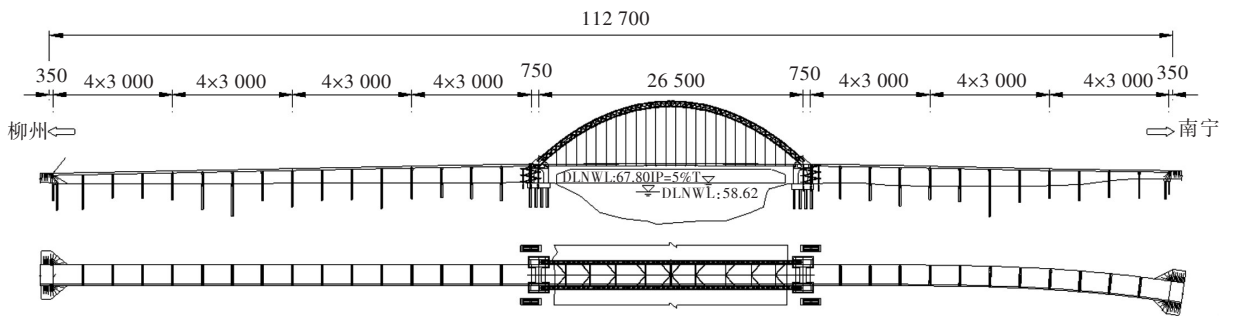


图1 桥梁布置图(单位:cm)
Fig. 1 Layout of bridge span (unit:cm)

2 车-桥耦合振动分析原理与方法

2.1 车辆模型

选用MASS21单元以及弹簧阻尼器COMBIN14单元共同模拟三维立体7自由度的线性汽车模型,车包含3个自由度(竖向、俯仰及侧滚三个方向的振动),汽车模型的每一个轮子均具有单个竖向的自由度,可以上下移动,如图2所示。车辆模型参数^[7]见表1。

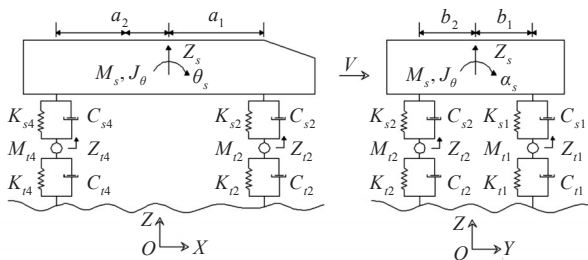


图2 车辆模型
Fig. 2 Vehicle model

表1 车辆参数

Tab. 1 Vehicle parameters

计算参数	数值
车体质量 / t	$m_s = 25.53$
俯仰转动惯量 / (t·m ² /rad)	$J_\theta = 55.259$
侧滚转动惯量 / (t·m ² /rad)	$J_\phi = 6.893$
前轴悬架阻尼系数 / (kN·s/m)	$C_{s1} = C_{s2} = 20$
后轴悬架阻尼系数 / (kN·s/m)	$C_{s3} = C_{s4} = 20$
前轴悬架刚度系数 / (MN/m)	$K_{s1} = K_{s2} = 4.0$
后轴悬架刚度系数 / (MN/m)	$K_{s3} = K_{s4} = 8.0$
前轴轮胎质量 / kg	$M_{t1} = M_{t2} = 445$
后轴轮胎质量 / kg	$M_{t3} = M_{t4} = 890$
前轴轮胎阻尼系数 / (N·s/m)	$C_{t1} = C_{t2} = 20$
后轴轮胎阻尼系数 / (kN·s/m)	$C_{t3} = C_{t4} = 20$
前轴轮胎刚度系数 / (MN/m)	$K_{t1} = K_{t2} = 2.25$
后轴轮胎刚度系数 / (MN/m)	$K_{t3} = K_{t4} = 8.0$
X向前轴-重心间距 / m	$a_1 = 3.479$
X向后轴-重心间距 / m	$a_2 = 1.021$
Y向车轴-重心间距 / m	$b_1 = b_2 = 0.915$

2.2 桥梁模型

本文采用 ANSYS 建立桥的三维立体分析模型,见图 3。下承式钢管混凝土系杆拱桥的结构如拱肋、横梁及横撑等构件均选用 BEAM188 模拟;吊杆采用空间杆单元 LINK10 模拟;桩基和土之间的约束采用 COMBIN14 单元模拟,其中弹簧的刚度采用 m 法进行推算。

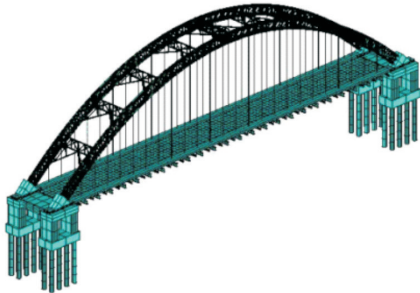


图3 桥梁有限元模型
Fig. 3 Finite element model of bridge

对整座钢管混凝土系杆拱桥的主桥运用 ANSYS 中的模态分析进行分析,大桥模型的前 10 阶振动频率列在表 2 中。

表2 桥梁振动频率
Tab. 2 Vibration frequency of the bridge

序号	频率 / Hz	振型描述
1	0.622	拱圈对称横弯
2	0.749	反对称竖弯
3	0.987	对称竖弯
4	1.130	拱圈反对称横弯
5	1.347	对称竖弯
6	1.432	拱圈反对称竖弯
7	1.688	对称竖弯
8	1.712	拱圈正对称扭转
9	1.808	拱圈反对称扭转
10	1.904	拱圈反对称竖弯

2.3 车桥耦合方法

2.3.1 平顺情况 图 4(a)为平顺情况^[15]下车轮与桥面的耦合模型:

弹簧在整个移动过程中轮子和大桥的接触点位移相等。

车轮和桥梁接触点处的竖向位移用公式(1)进行计算:

$$\begin{cases} V_B(x) = V_{B1}N_1(x) + \theta_{B1}G_1(x) + V_{B2}N_2(x) + \theta_{B2}G_2(x) \\ N_1(x) = 1 + 2(x/l)^3 - 3(x/l)^2 \\ N_2(x) = 3(x/l)^2 - 2(x/l)^3 \\ G_1(x) = x\{1 - 2(x/l) + (x/l)^2\} \\ G_2(x) = x\{(x/l)^2 - (x/l)\} \end{cases} \quad (1)$$

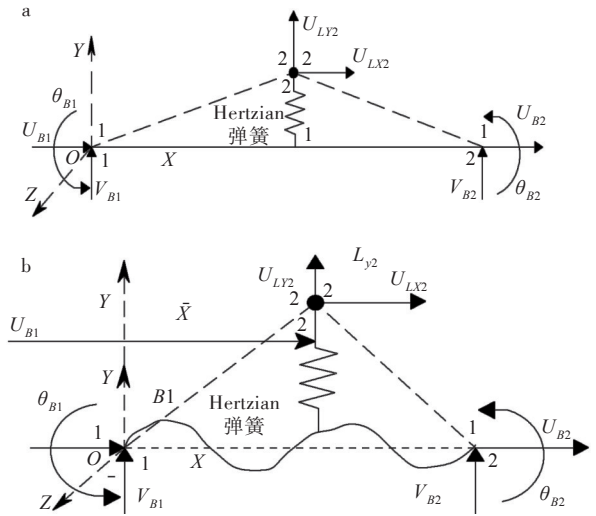


图4 车轮-桥梁耦合模型:(a)平顺情况;(b)不平顺情况
Fig. 4 Wheel-bridge coupling model at (a) smoothness and (b) irregularities of bridge deck

式(1)中: l 为梁单元的长度, x 为弹簧单元距单元左节点的距离, N_1 和 N_2 是竖向位移形状函数, G_1 和 G_2 是转角形状函数。弹簧单元 1 节点位于梁单元 x 处,可知:

$$U_{Ly1} = V_B(x) \quad (2)$$

2.3.2 不平顺情况 当车轮在不平顺的桥面上行走时,竖向位移随桥面的不平顺情况的改变而改变,对车的行驶速度有较大影响。在此模型中,不平顺功能函数 f 是一系列正弦曲线的总和,如式(3)所示:

$$f = \sum_{j=1}^n a_j \sin \frac{2\pi \bar{x}}{r_j} \quad (3)$$

式(3)中: a_j 和 r_j 分别为第 j 个波的振幅和波长, n 为正弦曲线的总数量; \bar{x} 为从梁的左边支点到弹簧的水平距离。图 4(b)为不平顺情况下车轮与桥面的耦合模型,由图 4(b)可知, Hertzian 弹簧随不平顺轨道前行, \bar{x} 和不平顺功能函数 f 均包含在图 4(b)中。由图 4(b)可知,式(2)需修改成式(4):

$$U_{Ly1} = V_B(x) + f(\bar{x}) \quad (4)$$

则式(1)转化为:

$$\begin{cases} V_B(x) + f(\bar{x}) = V_{B1}N_1(x) + \theta_{B1}G_1(x) + V_{B2}N_2(x) + \theta_{B2}G_2(x) \\ N_1(x) = 1 + 2(x/l)^3 - 3(x/l)^2 \\ N_2(x) = 3(x/l)^2 - 2(x/l)^3 \\ G_1(x) = x[1 - 2(x/l) + (x/l)^2] \\ G_2(x) = x[(x/l)^2 - (x/l)] \end{cases} \quad (5)$$

利用 APDL 语言 CE 约束方程来实现方程的耦合,建立在任何时刻汽车和钢筋混凝土系杆拱桥

位移之间的位移协调关系,其中式(5)的约束形式为:

CE, NEQN, CONST, NODE1, Lab1, C1, NODE*i*, Lab*i*, C*i*

其中,NEQN表示约束方程编号;CONST表示不平顺功能函数 $f(\bar{x})$ [平顺情况下 $f(\bar{x})$ 为常数 0];NODE*i*表示桥梁相关节点号;Lab*i*和 C*i*分别表示自由度标签 (*UX*, *UY*, *UZ* 或 *ROTX*, *ROTY*, *ROTZ*)与系数,可根据式(5)来确定,当约束方程中的项数多于3项时(即 $i > 3$ 时),在该方程中通过用多行CE命令来增加其他项。

2.4 桥面不平顺激励

桥面不平顺情况采用功率谱来表示:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left| \frac{n}{n_0} \right|^2 \tag{6}$$

式中: $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$,为参考空间频率; n 为空间频率; $G_q(n_0)$ 为桥面不平顺功率谱,取值与桥面等级有关。

通过三角级数叠加的方法模拟大桥桥面粗糙程度的相应情况。图5模拟的是桥面不平顺样本曲线,A、B、C、D为桥面的粗糙程度。

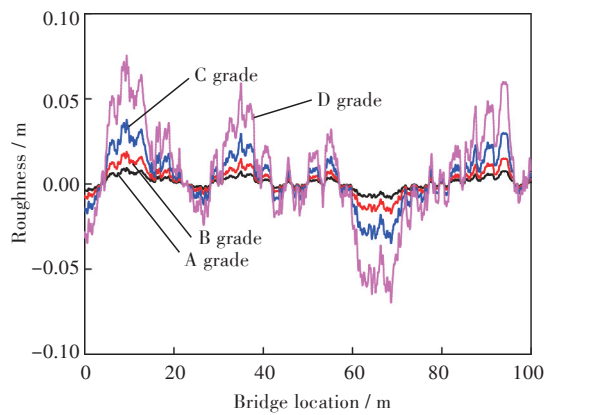


图5 不平顺样本函数
Fig. 5 Function of irregular sample

3 结果与讨论

采用上述车辆与桥梁的耦合方式,对本文所述的系杆拱桥进行汽车与桥梁的耦合振动分析,探讨桥面粗糙程度、汽车行驶速度、汽车数量及行车间距对钢管混凝土系杆拱桥动力响应与冲击系数的影响。

汽车荷载的冲击系数可表示为:

$$\mu = \frac{R_{dm}(xi) - R_{sm}(xi)}{R_{sm}(xi)} \tag{7}$$

式中: $R_{dm}(xi)$ 和 $R_{sm}(xi)$ 分别为汽车在桥面行驶时截面 x_i 处桥梁结构的最大动力响应和最大静力

响应。

3.1 桥面粗糙程度对桥梁冲击系数的影响

选取4种桥面粗糙不平(A、B、C、D级)的情况研究桥面的粗糙程度对桥和汽车动力响应的影响。汽车行驶速度为80 km/h,汽车中心处与大桥中央处间隔9 m,最初的位置汽车后轮在大桥左侧200 m的地方,车辆数量为1辆,以车辆和桥梁原始位置为坐标原点。图6(a)为不同路面等级时跨中位置桥梁竖向位移时程曲线。

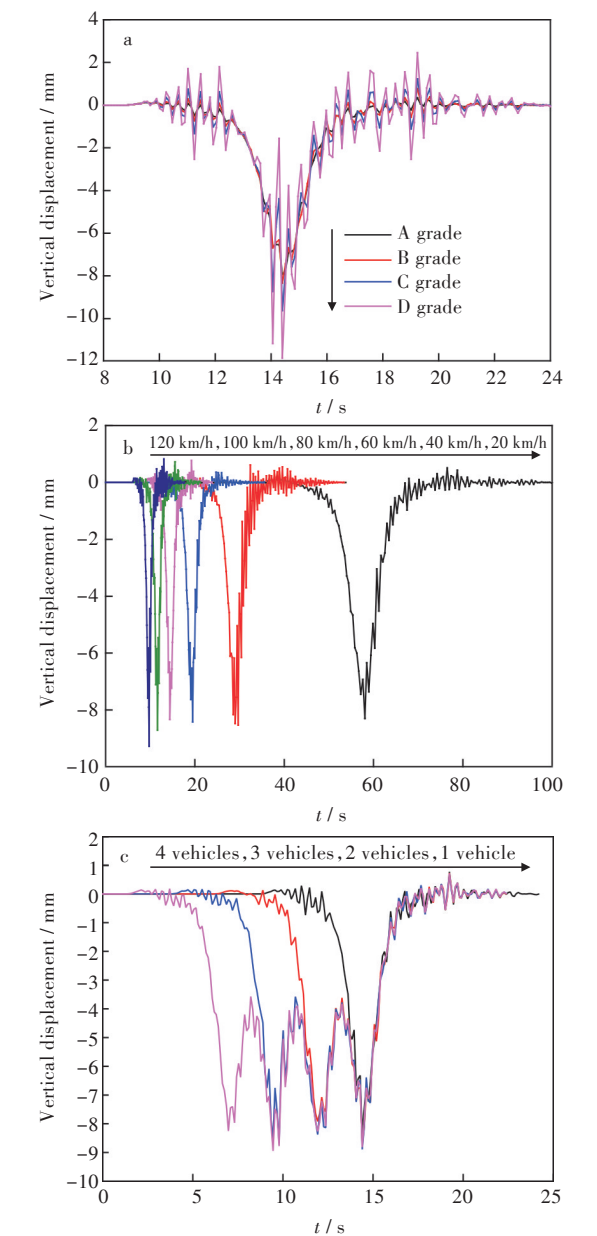


图6 桥梁跨中竖向位移时程:(a) 桥面粗糙程度;
(b) 车辆行驶速度;(c) 汽车数量
Fig. 6 Time history of bridge mid-span vertical displacement at (a) bridge roughness, (b) speeds of vehicles and (c) numbers of vehicles

由图6(a)可知,车辆行驶速度相同时,桥面等级越低,跨中位置桥梁动挠度相对静挠度波动越

大,桥的最大位移随桥面等级的降低而变大。表3为1辆车辆以80 km/h的速度通过不同桥面等级的桥面时大桥跨中处的最大动位移以及冲击系数。由表3可知,汽车在相同的行驶速度下,冲击系数随桥面等级的下降反而变大,桥面等级越低,冲击系数反而越大。

表3 桥面粗糙程度对桥梁跨中最大动位移与冲击系数的影响

Tab. 3 Effects of bridge roughness on maximum dynamic displacement and impact coefficient of bridge mid-span

桥面等级	最大动位移 / mm	冲击系数
A	7.92	0.055
B	8.33	0.109
C	9.62	0.281
D	11.80	0.571

3.2 车辆行驶速度对桥梁动力响应的影响

确定行驶速度为20 km/h、40 km/h、60 km/h、80 km/h、100 km/h及120 km/h,探讨汽车行驶速度对桥梁动力响应的影响。汽车数量为1辆,汽车与桥中心线相距9 m,桥面不平顺采用B级桥面,考虑汽车初始位移的影响,最初时车辆后轮置于大桥桥梁左侧200 m的地方,以车辆和桥原始位置作为坐标原点。

图6(b)为汽车以不同行驶速度经过大桥时,系杆拱桥桥梁跨中的竖向位移时程曲线图。表4是1辆汽车以不同行驶速度经过桥梁时,系杆拱桥跨中处的最大动位移与冲击系数。

表4 车辆行驶速度对桥梁跨中最大动位移与冲击系数的影响

Tab. 4 Effects of vehicle speed on maximum dynamic displacement and impact coefficient of bridge mid-span

行驶速度 / (km/h)	最大动位移 / mm	冲击系数
20	8.30	0.105
40	8.53	0.136
60	8.42	0.121
80	8.33	0.109
100	8.71	0.160
120	9.28	0.236

由图6(b)和表4可知,系杆拱桥的最大动位移不随汽车行驶速度的增加而变大:当汽车行驶速度从20 km/h增加至100 km/h时,桥梁的最大动位移变动很小;当汽车行驶速度增加至120 km/h,桥梁的最大动位移明显变大。钢管混凝土系杆拱桥冲击系数随车辆行驶速度的增加先增加后变小

再增加,与简支梁桥冲击系数变化趋势相同。所以,合理地控制车辆行驶速度能够提高桥梁的安全性。

3.3 车辆数量对桥梁冲击系数的影响

为探讨车辆数量对桥梁冲击系数的影响,依次选取1辆、2辆、3辆和4辆双轴的车辆进行分析研究,汽车速度为80 km/h,汽车前后间距50 m;汽车与桥中心线相距9 m,采用B级不平顺桥面,考虑到汽车初始位移的影响,最初时最后一辆汽车后轮置于桥梁左侧200 m的地方,以车辆和桥梁原始位置为坐标原点。图6(c)是不同数量的汽车经过桥梁时,系杆拱桥跨中处的竖向位移时程曲线。

表5是不同数量的汽车以相同速度经过桥梁时,系杆拱桥跨中处桥梁最大动位移与冲击系数。由表5可知,当汽车数量小于3辆时,桥梁最大动位移随汽车数量增加而变大,冲击系数随汽车数量增加而变小;但当汽车大于3辆时,桥梁最大动位移和冲击系数基本不变;表5中最大冲击系数为1辆车辆计算的冲击系数。因此,可取1辆汽车计算桥梁冲击系数。

表5 车辆数量对桥梁跨中最大动位移与冲击系数的影响

Tab. 5 Effects of vehicle number on maximum dynamic displacement and impact coefficient of bridge mid-span

车辆数量	最大动位移 / mm	冲击系数
1	8.33	0.109
2	8.74	0.104
3	8.89	0.069
4	8.95	0.070

3.4 行车间距对桥梁冲击系数的影响

为了探讨汽车间距对系杆拱桥最大动位移与冲击系数的影响,汽车数量采用5辆,车辆行驶速度为80 km/h,汽车前后间隔距离选取为50 m、60 m、70 m、80 m、90 m、100 m、110 m和120 m,汽车与系杆拱桥的中央距离为9 m,桥面不平顺采用B级桥面,综合考虑到汽车初始位移的影响,最初时最后一辆汽车后轮置于系杆拱桥左侧200 m处,以车辆和桥梁原始位置为坐标原点。表6是行车间距不同的5辆汽车以相同速度经过桥梁时,系杆拱桥跨中处桥梁最大动位移与冲击系数。

由表6可知,车辆间距对系杆拱桥跨中的竖向位移的影响较小,但总体上系杆拱桥跨中竖向位移随汽车间距的加大而变小。当多辆汽车通过桥梁时,冲击系数随车辆间距的加大先变大后减小:在汽车间距小于100 m时桥梁的冲击系数随间距的加大而变大,在汽车车距大于100 m时桥梁的冲

击系数随汽车间距的加大而降低。

表 6 行车间距对桥梁跨中最大动位移与冲击系数的影响

Tab. 6 Effects of vehicle spacings on maximum dynamic displacement and impact coefficient of bridge mid-span

车辆间距 / m	最大动位移 / mm	冲击系数
50	8.95	0.076
60	8.82	0.094
70	8.97	0.144
80	8.75	0.151
90	8.81	0.179
100	8.74	0.179
110	8.61	0.162
120	8.56	0.153

4 结 语

- 1)桥面等级越低,大桥的跨中位移的动挠度相对静挠度上下摆动的越剧烈,最大动位移随桥面等级的降低而变大。在运营阶段应及时对桥梁进行养护,特别是桥面铺装层的养护。
- 2)桥梁最大动位移随车辆行驶速度的增加变化很小,钢管混凝土系杆拱桥与简支梁桥的冲击系数随车辆行驶速度的增加变化趋势相同。
- 3)当汽车数量小于 3 辆时,桥梁最大动位移随汽车数量增加而变大,冲击系数随汽车数量增加而变小;但当汽车数量大于 3 辆时,桥梁最大动位移和冲击系数基本不变。
- 4)汽车间距对桥梁跨中的竖向位移的幅值影响较小,但总体上大桥跨中竖向位移随汽车间距的加大而降低;当多辆汽车通过桥梁时,冲击系数随汽车间距的增加先增大后减小。在能确保行车安全的情况下,汽车间距可控制在 60 m。

参考文献:

[1] 桂水荣,陈水生,任永明. 先简支后连续梁桥车辆冲击系数影响因素研究[J]. 公路交通科技,2011,28(5): 54-60.

[2] 李运生,史莉莉,王铮峰. 钢-混凝土简支组合箱梁桥在车辆荷载作用下的动力响应及冲击系数研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(1): 7-13.

[3] 许华东. 车辆作用下桥梁冲击系数分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(1):5-8.

[4] 邓露,何维,王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击,2015,34(14):70-75.

[5] 冀伟,邓露,何维,等. 公路波形钢腹板 PC 简支箱梁桥冲击系数的计算分析[J]. 桥梁建设,2016,46(3): 35-39.

[6] 吴庆雄,黄宛昆,陈宝春. 中-下承式钢管混凝土拱桥车振调查与动力分析[J]. 工程力学,2013,30(1): 147-155.

[7] HUANG D Z. Vehicle-induced vibration of steel deck arch bridges and analytical methodology [J]. Journal of Bridge Engineering,2011,17(2):241-248.

[8] 袁小钦,陈中治,望开潘.基于半主动控制的 MR-TMD 对钢箱梁桥冲击系数的研究[J].交通科技,2014(6): 5-8.

[9] 蒋培文,贺拴海,宋一凡. 简支梁车-桥耦合振动及其影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(1):59-66.

[10] 朱劲松,邑强. 中下承式拱桥吊杆应力冲击系数不均匀性研究[J]. 振动与冲击,2012,31(13):5-10.

[11] 杨建荣,李建中,申俊昕. 钢管混凝土系杆拱桥车桥耦合振动分析[J]. 北京工业大学学报,2012,38(6): 847-853.

[12] 李岩,陈彦江,黄新艺. 大跨异形钢管混凝土拱桥车载冲击效应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(1):109-114.

[13] 陈灏,陈水生. 下承式钢管混凝土系杆拱桥的冲击系数研究[J]. 工程建设与设计,2012(2):117-121.

[14] 韩艳,李浩,薛繁荣. 基于车桥耦合的钢管混凝土拱桥车桥冲击系数研究[J].铁道科学与工程学报, 2016,13(3):493-499.

[15] BOWE C J, MULLARKEY T P. Wheel-rail contact elements incorporating irregularities [J]. Advances in Engineering Software,2005,36(11):827-837.

本文编辑:苗 变