

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.01.013

车辆荷载对中承式拱桥吊杆体系的冲击效应分析

邵元, 孙宗光, 陈一飞, 李焕兰

(大连海事大学 道路与桥梁研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为深入研究中承式拱桥吊杆体系的耐久性, 针对发生破坏的实例中短吊杆更易疲劳破坏的现象, 考虑不平度影响, 采用车桥耦合迭代方法, 对某中承式钢管混凝土拱桥吊杆体系在车辆荷载下的冲击效应进行了数值模拟。分析了不同车速和桥面不平度下, 吊杆动态内力(应力)的变化规律; 比较了不同长度(位置)的吊杆在车辆荷载下所受冲击效应的特点和差异; 根据车速分布模型, 对吊杆在各种车速下的冲击效应进行了加权分析和综合评价。结果表明, 在车辆荷载作用下, 桥面不平度对吊杆的冲击效应影响明显; 短吊杆的动态内力显著大于长吊杆, 二者之间的最大差别幅度可达到28%。

关键词: 桥梁工程; 中承式拱桥; 车桥耦合迭代; 冲击效应; 车辆荷载

中图分类号: U441

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)01-0082-07

Analysis of Impact Effect of Vehicle Load on Hanger System of Half-through Arch Bridge

SHAO Yuan, SUN Zong-guang, CHEN Yi-fei, LI Huan-lan

(Road and Bridge Engineering Institute, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: Among the destruction instances of half-through arch bridges, the shorter hangers are more likely to be ruined. To thoroughly investigate the hanger system durability of half-through arch bridges, the vehicle impact effect on a hanger system of a half-through CFST arch bridge under vehicle load is numerically simulated by using vehicle-bridge coupling method. The variation of dynamic internal force (stress) in hangers under different vehicle speeds and road surface roughnesses are analysed. The characteristics and differences in impact effect on the hangers with different lengths (positions) under vehicle load are compared. The weighted analysis and the comprehensive evaluation are conducted to research the impact effects of different vehicle speeds on the hangers based on the vehicle speed distribution model. The result shows that (1) the influence of bridge surface roughness on impact effect of hangers is significant under the vehicle load; (2) the dynamic internal forces in the shorter hangers induced by moving vehicles are significantly greater than those in the longer ones, the largest difference of dynamic internal forces among the hangers could be as high as 28%.

Key words: bridge engineering; half-through arch bridge; vehicle-bridge coupled iteration; impact effect; vehicle load

0 引言

中承式拱桥因其简洁明快的曲线、较大的桥梁跨径和通航能力, 在近几年内得到了广泛使用。

在这类桥梁结构中, 吊杆体系是重要的承重构件之一, 其运行状况直接关系到桥面系的安全。然而, 吊杆体系恰恰又是这类桥梁结构中耐久性较为薄弱的部分。近年来中承式拱桥发生的一些破坏事故中,

收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178070); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132014326)

作者简介: 邵元(1985-), 女, 黑龙江明水人, 博士研究生. (shaotuo@163.com)

多为吊杆体系的破坏所导致。如 2001 年的宜宾南门大桥 (图 1)、2011 年的新疆库尔勒孔雀河大桥 (图 2)、2011 年武夷山公馆大桥 (图 3) 等, 都是因为吊杆的断裂导致桥面系的坍塌。其中, 孔雀河大桥于 2008 年做过试验检测, 有关吊杆的结论是: 吊杆总拉力 (荷载增量 + 桥面自重) 不足设计拉力 (约 3 400 kN) 的一半, 吊杆设计满足强度要求^[1]。而吊杆的断裂仅仅发生在桥梁建成 3 a 后, 针对这些事故发生的原因, 桥梁工作者做出了许多研究分析。



(a) 整体破坏情况

(b) 局部吊杆断裂

图 1 宜宾南门大桥坍塌后照片

Fig. 1 Photos of collapsed Nanmen Bridge in Yibin



图 2 库尔勒孔雀河大桥坍塌后照片

Fig. 2 Photos of collapsed Kongquehe Bridge in Korla



图 3 武夷山公馆大桥坍塌后照片

Fig. 3 Photos of collapsed Gongguan Bridge in Wuyishan

这些事故有一个共同特点, 都是短吊杆发生或首先发生断裂。孔庆凯^[2]通过对南门大桥短吊杆断裂事故的研究, 认为温度、腐蚀和疲劳是导致短吊杆断裂的主要因素。姚志强^[3]分析认为南门大桥北端短吊杆在长期交变荷载作用下达到了一定的疲劳损伤程度, 在偶然扰力作用下发生断裂引起桥面垮塌。有关专家在对武夷山公馆大桥垮塌事故的分析后给出的初步结论是长期超载造成吊杆疲劳断裂。吊杆作为中承式拱桥的关键受力构件, 一旦失效轻则引起吊杆张力重分布^[4], 重则引起桥面坍塌造成

恶性事故的发生。

而引起吊杆疲劳甚至失效破坏的原因是复杂的, 吊杆普遍存在护套开裂、进水、锚固端腐蚀等问题^[5]。车辆荷载通过桥梁时产生的汽车冲击荷载易导致吊杆护套断裂, 加剧了吊杆的应力疲劳腐蚀程度。与长吊杆相比, 短吊杆处刚度较大, 固有频率较高, 其下锚固端处于反复弯剪状态, 受到的汽车冲击荷载更大, 更容易开裂破坏^[6-7]。所以车辆荷载作用对短吊杆的冲击响应是影响短吊杆应力疲劳腐蚀速率的一个不容忽视的因素。Malm^[8]对铁路拱桥研究的结论是列车过桥时吊杆截面应力不均匀分布较明显, 吊杆约 60% 的变幅循环应力源自车桥振动。显然, 只有考虑车桥动力耦合作用, 才能对这种冲击效应获得合理的分析结果。李岩等^[9]以某大跨异性钢管混凝土拱桥为例, 从理论上分析了桥面粗糙度、车速、结构阻尼对桥梁主梁、拱肋挠度和吊杆内力冲击效应的影响。顾安邦等^[10]通过对结构频率及冲击系数的计算分析, 阐述了中下承式拱桥短吊杆受力行为以及破坏机理, 并提出改进意见。朱劲松等^[11]对中下承式拱桥吊杆应力冲击系数的不均匀性进行了研究, 分析结构阻尼、桥上路面粗糙度、车重及车速对吊杆应力冲击系数的影响。大部分研究都集中在各种不同因素下移动车辆对吊杆的冲击作用, 而对不同长度 (位置) 的吊杆在不同车速下的冲击效应及其差异性还缺乏研究, 尤其是定量的深入研究。而上述几例事故和相关研究表明, 对于不同位置的吊杆, 车辆荷载所产生的冲击效应也不一致^[12]。

本文建立了钢管混凝土拱桥的三维模型并根据实测数据对模型进行修正, 采用车桥耦合数值模拟方法, 分析了不同车速和桥面不平度下, 吊杆动态内力的变化规律; 比较了不同长度的吊杆在车辆荷载作用下所受冲击效应的特点和差异; 根据车速分布模型, 对吊杆在各种车速下的冲击效应进行了加权分析和综合评价, 为进一步对吊杆体系的疲劳分析和使用寿命评价提供依据。

1 车桥耦合振动模型及分析

基于通用有限元软件 ANSYS, 分别建立桥梁模型和车辆模型, 通过车桥耦合迭代方法计算车桥间相互作用, 并利用实测结果对模型进行调试。

1.1 桥梁振动模型

以 G203 国道某三跨中承式钢管混凝土拱桥 (图 4) 为例, 根据其施工图建立三维有限元模型。根

据钢管混凝土拱桥的结构特点,采用换算截面方法模拟钢管与混凝土间的协同作用。由于结构构造具有复杂性及较大模糊性,为保证模型精度,详细分析了主要建模因素对结构静动态响应的影响,并对比分析了主要静动态响应的计算结果与实桥现场试验检测结果,以校正和修改有限元模型^[13]。桥梁的动力方程为:

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + K\delta = F, \quad (1)$$

式中, M , D , K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵及刚度

矩阵; $\ddot{\delta}$, $\dot{\delta}$, δ 分别为节点位移、速度及加速度向量; F 为桥梁结构所受的荷载向量, $F = F_g + F_v$, F_g 为作用在桥梁上的车辆自重,与车辆的运动无关, F_v 为车辆运动对桥梁产生的作用力,随车辆在桥梁上的移动而不断变化。结构采用瑞利阻尼^[14]:

$$D = \alpha M + \beta K, \quad (2)$$

式中, α 取值 0.26, β 取值 0.01。

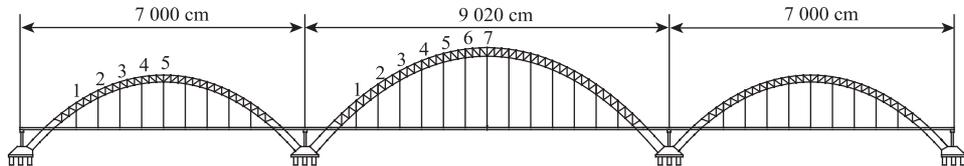


图4 拱桥总体布置立面图

Fig. 4 Elevation view of layout of arch bridge

1.2 车辆振动模型

黄新艺等^[15]专门研究了车辆模型等因素对车桥耦合分析中冲击效应的影响,指出几种车辆模型的计算结果总体上均能反映车桥耦合振动的响应规律,但响应幅值差别较大。由文献[16]可知,当车辆模型满足一定精度要求后,其差异对计算结果的影响较小。因此,针对本文主要研究目标,采用不同简化模型试算后,本文选用弹簧-阻尼-质量系统的4自由度1/2车辆模型,如图5所示。 M 为车体质量; J 为车体绕横向轴旋转的质量惯性矩; m 为车架与轮对质量和; Z_1 , Z_2 为竖向位移自由度; K 为垂向刚度; C 为垂向阻尼。车辆模型参数分别为: $M = 17\,500\text{ kg}$, $J = 42\,480\text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $m = 1\,250\text{ kg}$, $k_{t1} = k_{t2} = (2.0 \times 10^7)\text{ N/m}$, $k_{s1} = k_{s2} = (1.0 \times 10^7)\text{ N/m}$, $c_{t1} = c_{t2} = (1.0 \times 10^5)\text{ (N} \cdot \text{s)/m}$, $c_{s1} = c_{s2} = (4.0 \times 10^4)\text{ (N} \cdot \text{s)} \cdot \text{m}_0$ 。

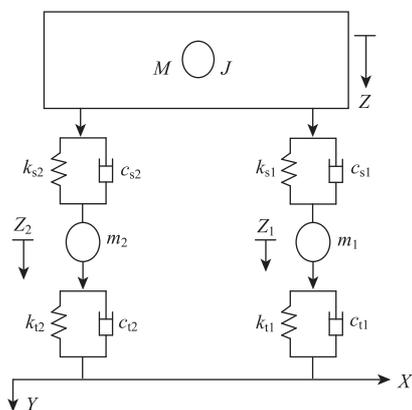


图5 车辆模型

Fig. 5 Model of vehicle

应用广义虚功原理^[17]和有限元法推导车辆的振动方程,将其统一描述为矩阵形式^[18]:

$$Mv\ddot{z} + Cv\dot{z} + Kvz = Fv, \quad (3)$$

式中, Mv 为车辆模型的质量矩阵; Cv 为车辆模型的阻尼矩阵; Kv 为车辆模型的刚度矩阵; Fv 为车辆运动方程的荷载向量; \ddot{z} , \dot{z} 和 z 分别为车辆系统的广义位移、广义速度和广义加速度向量。

1.3 桥面不平度

桥面不平度采用中国标准《车辆振动输入路面平整度表示方法》(GB7031—86)^[19]所给定的位移功率谱密度函数:

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

式中, n 为空间频率; n_0 为参考空间频率,其值为 0.1 m^{-1} ; $G_d(n_0)$ 为参考空间频率下的路面谱值,根据不同的路面等级的取值范围及其几何平均值取得; $G_d(n)$ 为位移功率谱密度; ω 为频率指数,取值 2。采用傅里叶变换对位移功率谱密度函数进行离散变换,即可得到路面不平度样本,得到的 A~E 级不平度,如图 6 所示。

1.4 车桥耦合迭代方法

首先,将桥面不平度作为位移激励源施加给车辆模型。假设车轮与桥面始终接触,基于给定车速,接触点位置随时间而变化,通过车辆模型计算桥面不平度激励作用下的车辆轮压荷载;然后,将各个接触点的车辆轮压荷载按照对应的时间步长依次加载到桥梁模型的相应位置上,计算桥面的竖向位移,完成一次迭代。将上次迭代得到的桥面位移再次加入不平度作为车辆的位移激励进行新一轮迭代,直

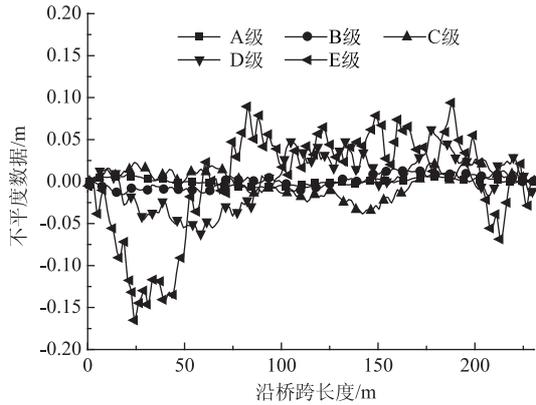


图 6 路面不平度

Fig. 6 Road surface roughness

到前后两次迭代计算的桥面位移误差满足精度要求。具体流程见图 7。这种计算方法概念清晰, 通用性强, 易于编程计算, 可直接利用既有的软件求解线性及非线性车桥系统的响应。

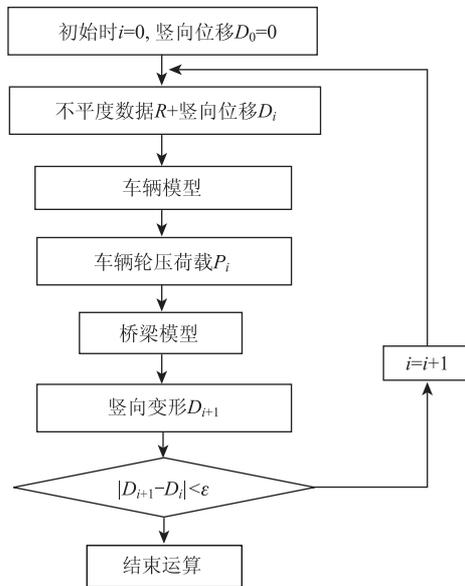


图 7 车桥耦合迭代方法流程图

Fig. 7 Flowchart of iteration of vehicle-bridge coupling

1.5 动态响应

取 C 级桥面不平度计算拱桥动态响应。车辆荷载作用在桥梁横向中心位置自左向右匀速行驶通过全桥, 车速范围为 10 ~ 60 km/h。为确保计算结果的准确性, 避免发散, 计算时间步长取值为每步 0.03 s, 并对计算模型进行校正。桥跨的动态位移如图 8 所示。根据该桥的荷载试验结果, 边跨的冲击效应较大。经模型校正, 其挠度冲击系数的计算结果与实测值吻合较好, 通过跑车, 获得的桥面竖向振动基频的计算值和实测值基本吻合,

见表 1。

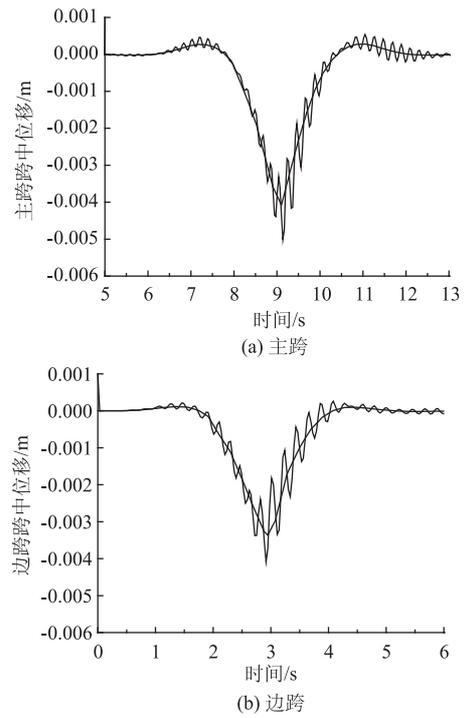


图 8 桥梁的跨中挠度

Fig. 8 Deflection at bridge mid-span

表 1 挠度冲击系数与频率

Tab. 1 Impact coefficient and frequency of deflection

车速/(km · h ⁻¹)	冲击系数		频率/Hz	
	计算值	实测值	计算值	实测值
10	1.231	1.148		
20	1.379	1.349	4.4	4.1
30	1.369	1.369		
40	1.330	1.354		

2 吊杆的冲击效应分析

选择主跨的最短和最长吊杆为代表(吊杆编号如图 4 所示), 其截面应力时程如图 9 所示。可知, 长吊杆与短吊杆的静态应力接近, 但动态应力差别显著。因此, 研究冲击效应在吊杆间的差异是十分必要的。

冲击系数(1+μ)反映了行驶中的车辆对桥梁结构产生的动力放大效应。μ的取值定义为:

$$\mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{jmax}} - 1, \quad (5)$$

式中, Y_{jmax} 为车辆作为静荷载时产生的最大静力效应值; Y_{dmax} 为车辆以某一速度过桥时产生的相应最大动效应值。

下面分别探讨不平度和吊杆长度对吊杆冲击效应的影响。

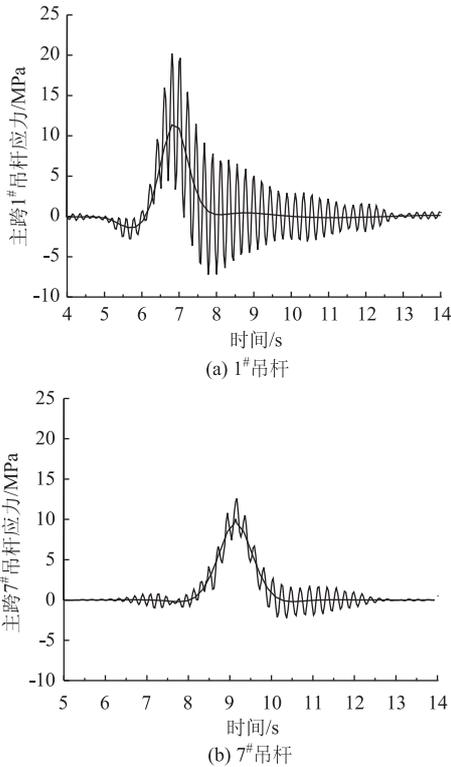


图9 主跨吊杆内力

Fig. 9 Hanger stresses of main span

2.1 桥面不平度影响

采用上述不平度样本和迭代方法,分别计算6种不同车速、5种不平度等级条件下的吊杆内力冲击系数。图10列出了主跨和边跨的短吊杆内力冲击系数的变化情况。可见,随着不平度等级的增大,各个车速情况下的短吊杆冲击系数均增大。同时,冲击系数受车速影响的变化规律得到保持,说明桥面的粗糙程度对桥梁动力响应起到了整体放大的作用。桥面的破损不平因素会通过振动影响桥梁的运营状态,加速结构的疲劳,所以定期对桥面铺装进行养护维修是十分必要的。在模拟计算过程中,根据不平度系数取值范围,对于正常使用和养护的公路桥梁,一般桥面不平度等级可采用C级进行计算。

2.2 吊杆长度影响

取C级桥面不平度,计算桥梁结构在车速为10~60 km/h范围内的动力响应情况。主跨1[#],3[#],5[#],7[#]及边跨1[#],3[#],5[#]吊杆冲击系数情况如图11所示。可见,主跨及边跨短吊杆(1[#])的冲击系数明显大于其他吊杆,这说明短吊杆在结构运营中受到更大的冲击作用,也是更易疲劳破坏的部件。短吊杆的冲击系数在各个车速情况下分布情况稳定,处于1.3~1.4之间,在边跨中略大一些。较大值出

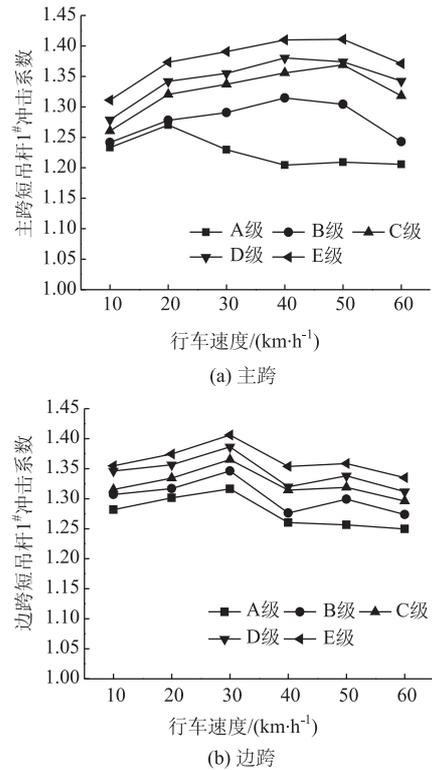


图10 不平度对吊杆冲击系数的影响

Fig. 10 Influence of roughness on hangers' impact coefficient

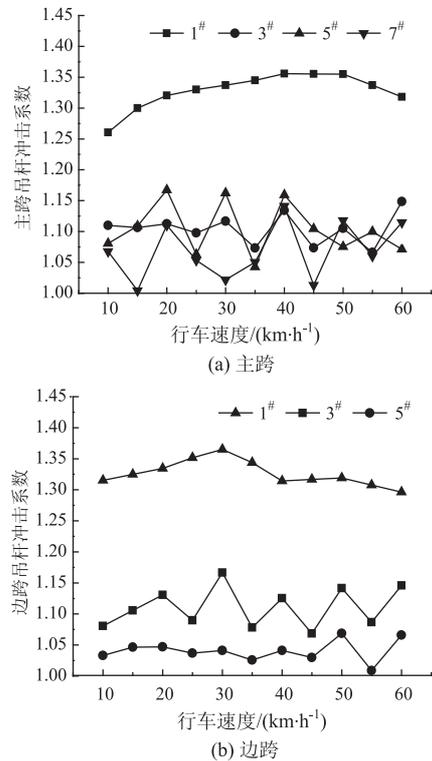


图11 吊杆应力冲击系数

Fig. 11 Stress impact coefficients of hangers

现在30~40 km/h车速情况下,这与结构自身基频有关,车辆与桥梁产生共振,冲击作用放大。由上

述结果可知, 不同长度 (位置) 的吊杆的应力冲击效应明显是不同的。图 12 给出主跨吊杆在不同车速下应力冲击系数较为详细的结果。

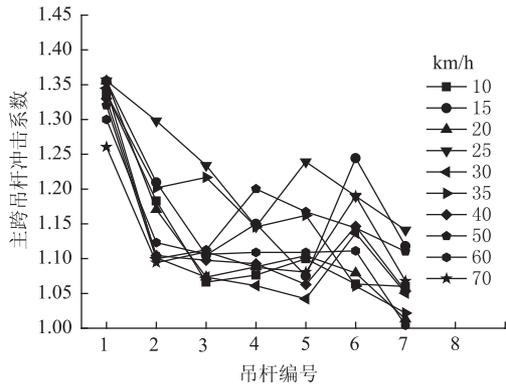


图 12 不同长度吊杆的应力冲击系数

Fig. 12 Stress impact coefficients of hangers with different lengths

为了对吊杆在运营状态下的冲击效应做一个初步的探讨和评价, 采用文献 [20] 提供的车速分布模型, 对吊杆的应力冲击系数按车速分布比例加权平均, 得到每个吊杆的综合冲击系数。文献 [20] 给出了 2003 年某地区 11 条公路 42 段区间内的交通量统计数据, 其中平均车速占总交通量的百分比如图 13 所示, 基于图中数据按车速加权的主跨和边跨吊杆的综合应力冲击系数如图 14 所示。

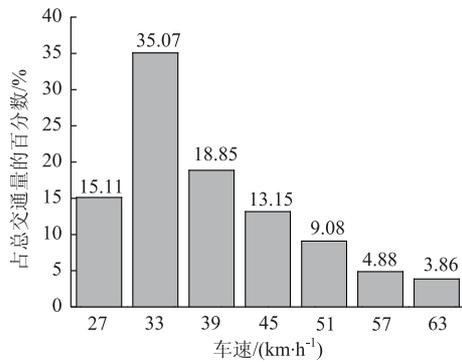


图 13 车速分布图

Fig. 13 Vehicle speed distribution

3 结论

桥面不平度对吊杆冲击作用有明显的放大作用, 且随着路面情况变差而增大。定期对桥面进行养护能够降低由此产生的冲击, 这对桥梁结构是十分重要的。

在车辆荷载作用下, 运营中短吊杆的动态应力水平要明显高于长吊杆, 短吊杆与长吊杆之间的最大差别幅度可达到 28%。这一结论从侧面解释了在

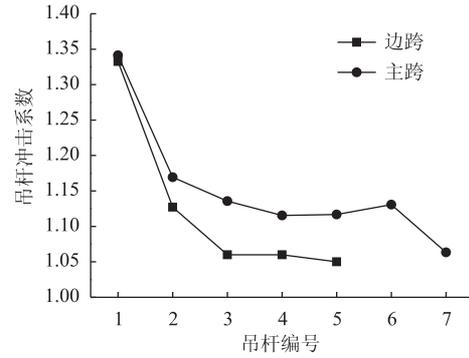


图 14 按车速分布加权的吊杆应力冲击效应

Fig. 14 Vehicle-speed-based weighted impact effect of hangers

实际发生的破坏现象中不同长度 (位置) 吊杆具有不同的使用寿命。针对这一现象, 就目前的初步分析结果而言, 在设计中调整短吊杆的局部刚度是一个改进短吊杆冲击性能的可行途径。本研究为进一步对吊杆体系的疲劳分析和使用寿命评价提供了依据, 为这类桥梁的设计、管理维护、监测与评价提供了参考。

参考文献:

References:

[1] 蒋新亭, 再努拉·库尔班. 国道 314 线库尔勒孔雀河大桥检测与荷载试验 [J]. 山西建筑, 2008, 34 (11): 299 - 300.
JIANG Xin-ting, KUERBAN Z. Detection and Load Experiment of the Kongque River Bridge in the National Highway 314 in Kuerle [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (11): 299 - 300.

[2] 孔庆凯. 大跨中承式拱桥短吊杆结构行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
KONG Qing-kai. Structural Behavior Study on Short Hangers of Half-through Arch Bridge with Large Span [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.

[3] 姚志强, 阮小平, 邓清. 拱桥吊杆变形差异引发桥面断裂及类似事故的预防措施 [J]. 公路, 2002, 7 (7): 73 - 75.
YAO Zhi-qiang, RUAN Xiao-ping, DENG Qing. Distortion Difference of Arch Bridge Suspenders Leading to Bridge Surface Rupture and Preventive Measure for Analogy Accidents [J]. Highway, 2002, 7 (7): 73 - 75.

[4] 朱劲松, 邑强. 拱桥新型吊杆安全性及其静动力影响研究 [J]. 桥梁建设, 2011 (1): 39 - 42, 51.
ZHU Jin-song, YI Qiang. Study of Safety of New Type Suspenders and Their Impact on Static and Dynamic Performance of Arch Bridge [J]. Bridge Construction,

- 2011 (1): 39-42, 51.
- [5] 龙跃, 左毅, 吴秋凡, 等. 拱桥拉索病害研究与对策 [J]. 桥梁建设, 2005 (3): 70-72, 80.
LONG Yue, ZUO Yi, WU Qiu-fan, et al. Study and Countermeasures for Deterioration of Arch Bridge Cable Hangers [J]. Bridge Construction, 2005 (3): 70-72, 80.
- [6] 李文琪, 贺立新. 对宜宾小南门桥事故的思考 [J]. 中国公路, 2002 (22): 47-48.
LI Wen-qi, HE Li-xin. Pondering of Accident of Xiaonanmen Bridge in Yibin [J]. China Highway, 2002 (22): 47-48.
- [7] 杨建喜, 陈惟珍, 古锐. 拱桥短吊杆动力特性分析 [J]. 桥梁建设, 2014, 44 (3): 13-18.
YANG Jian-xi, CHEN Wei-zhen, GU Rui. Analysis of Dynamic Characteristics of Short Hangers of Arch Bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44 (3): 13-18.
- [8] MALM R, ANDERSSON A. Field Testing and Simulation of Dynamic Properties of a Tied Arch Railway Bridge [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (1): 143-152.
- [9] 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.
LI Yan, CHEN Yan-jiang, HUANG Xin-yi. Impact Effect Study on Long-span Irregular Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge under Moving Vehicles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 (1): 109-114.
- [10] 顾安邦, 徐君兰. 中、下承式拱桥短吊杆结构行为分析 [J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21 (4): 1-3.
GU An-bang, XU Jun-lan. Structural Analysis of Short Hangers of Half Through or Through Arch Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21 (4): 1-3.
- [11] 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.
ZHU Jin-song, YI Qiang. Non-uniformity of Stress Impact Factor of Suspenders on Half-through or Through Arch Bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (13): 5-10.
- [12] LI D S, ZHOU Z, OU J P. Dynamic Behavior Monitoring and Damage Valuation for Arch Bridge Suspender Using GFRP Optical Fiber Bragg Grating Sensors [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44 (4): 1031-1038.
- [13] SHAO Y, SUN Z G. Error Sensibility Analysis of Finite Element Model of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 178-181: 2393-2397.
- [14] LEITÃO P N, DA SILVA J G S, VELLASCO P C G D, et al. Composite (Steel-concrete) Highway Bridge Fatigue Assessment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67 (1): 14-24.
- [15] 黄新艺, 卓卫东, 盛洪飞, 等. 车桥耦合振动系统模型下桥梁冲击效应研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (3): 59-63, 68.
HUANG Xin-yi, ZHUO Wei-dong, SHENG Hong-fei, et al. Investigation of Impact Effect on Bridge in Model of Vehicle-bridge Coupled Vibration System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (3): 59-63, 68.
- [16] 申永刚. 大跨度 CFRP 拉索斜拉桥的模态阻尼特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
SHEN Yong-gang. Modal Damping Character of Long-span Cable Stayed Bridges with CFRP Cables [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [17] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理 [J]. 华中理工大学学报, 2000, 28 (1): 1-3, 14.
ZENG Qing-yuan. The Principle of Total Potential Energy with Stationary Value in Elastic System Dynamics [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2000, 28 (1): 1-3, 14.
- [18] 桂水荣, 陈水生, 许士强. 移动荷载下简支梁桥 3 种车桥耦合模型研究 [J]. 华东交通大学学报, 2007, 24 (1): 35-39.
GUI Shui-rong, CHEN Shui-sheng, XU Shi-qiang. Comparison of Three Models for Vehicle-bridge Coupled Vibration of Simple Beam Bridge Subjected to Moving Load [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24 (1): 35-39.
- [19] GB7031—86, 车辆振动输入路面平度表示方法 [S]. GB7031—86, Vehicle Vibration-describing Method for Road Surface Irregularity [S].
- [20] 石荣英. 车速调查及区间车速资料的整理分析 [J]. 甘肃科技, 2004, 20 (11): 124-127.
SHI Rong-ying. Investigation on Vehicle Speed and Arrangement Analysis of Interval Speed Data [J]. Gansu Science and Technology, 2004, 20 (11): 124-127.