

文章编号:1003-4722(2016)03-0035-05

公路波形钢腹板 PC 简支箱梁桥冲击系数的计算分析

冀伟^{1,2}, 邓露¹, 何维¹, 刘世忠², 蔺鹏臻²

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 为科学计算和合理评估公路波形钢腹板 PC 简支箱梁桥在移动车辆荷载作用下的冲击系数, 以一座计算跨径为 30 m 的单箱单室波形钢腹板 PC 简支箱梁桥为研究对象, 运用 MATLAB 软件编写了车桥耦合振动的计算程序。运用所编制的程序计算分析了车辆类型、行车速度及路面平整度等因素对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥冲击系数的影响, 并将计算所得的冲击系数与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015) 规范值进行对比。结果表明: 波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数应依据路面平整度的情况合理确定; 冲击系数并不一定随车重的增加而增大, 可能与车型有关; 车重和车速对冲击系数的影响较为复杂, 无明显规律; 总体的超规范工况数和相应的最大超规范百分比与车辆类型有关。

关键词: 简支梁桥; 波形钢腹板; 组合箱梁; 振动频率; 车桥耦合振动; 有限元法; 冲击系数

中图分类号: U441.3; U448.213 **文献标志码:** A

Calculation and Analysis of Impact Factors of Highway Simply-Supported PC Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

JI Wei^{1, 2}, DENG Lu¹, HE Wei¹, LIU Shi-zhong², LIN Peng-zhen²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To scientifically calculate and reasonably evaluate the impact factors of the highway simply-supported prestressed concrete (PC) box girder bridge with corrugated steel webs subjected to the moving vehicle load, a simply-supported PC single-cell single-box girder bridge with corrugated steel webs and with calculated span length of 30 m was taken as the study object and the calculation program for the vehicle and bridge interaction vibration was compiled, using the software MATLAB. The complied program was then used to calculate and analyze the influences of the vehicle types, vehicle travelling speed and road surface roughness on the impact factors of the bridge and the impact factors obtained from the calculation were compared to the corresponding values in the *General Code for Design of Highway Bridges and Culverts* (JTG D60-2015). The results demonstrate that the impact factors of the simply-supported PC box girder bridge with corrugated steel webs should be reasonably determined according to the road surface roughness. The impact factors do not necessarily increase with the increase of the vehicle weight, but the increase of the impact factors is probably related to the vehicle types. The influences of the vehicle weight and vehicle traveling speed on the impact factors are complex and not regular and the general numbers ex-

收稿日期: 2015-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368032, 51208242); 中国博士后科学基金项目(2014M562103); 甘肃省高等学校科研项目(2015A-053)

Project of National Natural Science Foundation of China (51368032, 51208242); Project of China Postdoctoral Science Foundation (2014M562103); Project of Research Program of Gansu Higher Education Institutions (2015A-053)

作者简介: 冀伟, 副教授, E-mail: jiwel1668@163.com。研究方向: 公路桥梁车桥耦合振动。

ceeding the load cases and the corresponding maximum percentage exceeding the provisions in the code are related to the vehicle types.

Key words: simply-supported girder bridge; corrugated steel web; composite box girder; vibration frequency; vehicle and bridge interaction vibration; finite element method; impact factor

1 引言

波形钢腹板 PC 箱梁桥具有自重轻、预应力施加效率高、钢腹板抗剪强度高等优点,在国内外的桥梁建设中得到了广泛应用。目前国外学者对波形钢腹板和波形钢腹板 I 型钢梁的研究较多,研究成果主要集中在结构的抗弯性能、抗剪性能和手风琴效应方面^[1-3];国内学者对波形钢腹板 PC 箱梁的研究较多,研究成果主要集中在抗剪、挠度计算^[4]及抗扭^[5]等静力性能方面,对波形钢腹板 PC 箱梁桥在车辆荷载作用下冲击系数的研究却相对滞后^[6]。冲击系数是指移动车辆通过桥梁时,对桥梁结构产生的竖向动力效应的增大系数,一般用车辆的重力乘以冲击系数来计算车辆荷载作用的动力影响。冲击系数取值的合理性会直接影响到桥梁结构的安全性^[7],但现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015,以下简称 15 规范)中还未明确波形钢腹板 PC 简支箱梁桥在移动车辆荷载作用下的冲击系数该如何取值。

为科学计算和合理评估在移动车辆荷载作用下公路波形钢腹板 PC 箱梁桥的冲击系数,以一座计算跨径为 30 m 的单箱单室波形钢腹板 PC 简支箱梁桥为例,基于车桥耦合振动的分析理论,利用 MATLAB 软件编制了车桥耦合振动计算程序(该计算程序可考虑车辆类型、阻尼比、路面平整度及行车速度对冲击系数的影响),计算了标准车辆在不同行驶速度和路面情况下波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数,并与 15 规范值进行对比分析,考察了规范定义冲击系数的安全性,为移动车辆荷载作用下同类型桥梁动力响应的设计与评估提供参考。

2 工程背景

本文研究的单箱单室波形钢腹板 PC 简支箱梁桥设计跨径 30.9 m,计算跨径 30 m,其横截面布置见图 1。主梁采用 C50 混凝土,桥面净宽 9.0 m。沿桥长方向设置 2 道中横隔板和 2 道端横隔板。波形钢腹板采用 Q345c 钢,厚 9 mm,其几何尺寸见图 2。

3 数值模拟

3.1 车桥耦合振动方程的建立

车桥耦合动力响应分析时,首先需将波形钢腹

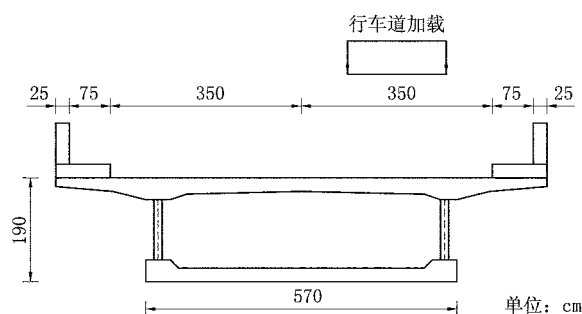


图 1 波形钢腹板 PC 简支箱梁桥横截面布置
Fig. 1 Cross Section of Simply-Supported PC Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

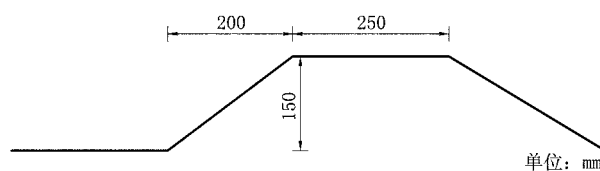


图 2 波形钢腹板的几何尺寸
Fig. 2 Geometric Dimensions of Corrugated Steel Web

板 PC 简支箱梁桥和车辆分为 2 个子系统,分别建立各自的动力方程,再通过桥面与车轮接触点处的作用力与位移的协调关系形成两者耦合体系的动力学方程^[8]。车桥耦合振动方程可采用 MATLAB 软件编制四阶龙格库塔方法求解,求解车桥耦合方程后获得波形钢腹板 PC 简支箱梁桥在车辆荷载作用下的动位移,进而可求得冲击系数。

3.2 波形钢腹板 PC 简支箱梁桥有限元模型的建立

采用 ANSYS 14.0 有限元软件建立波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的有限元模型(图 3),模型中的上、下翼板和横隔板为钢筋混凝土材料,采用 Solid45 实体单元模拟;波形钢腹板采用 Shell63 壳单元模拟。波形钢腹板壳单元按照实际尺寸嵌入上、下翼板实体单元,在嵌入深度范围内合并壳单元和实体单元的节点,形成嵌入式连接。波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的边界条件为一端活动铰支座,约束梁的竖向、横向位移;另一端为固定铰支座,约束梁的竖向、纵向和横向位移。对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥有限元模型进行模态分析,并提取其频率向量和模态振型矩阵,以用于车桥耦合振动计算。

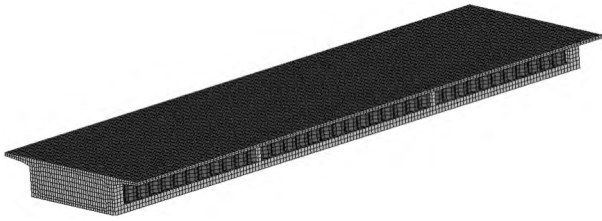


图3 波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的有限元模型
Fig.3 Finite Element Model for Simply-Supported
PC Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

3.3 移动车辆与路面平整度模拟

采用 MATLAB 软件模拟移动车辆以及路面平整度的信息。为了研究移动车辆类型以及车重、轴数、基频等重要参数对冲击系数的影响,选用了在车桥耦合振动研究中广泛采用的两轴车和三轴车的车辆模型^[8-9],这 2 种车辆模型参数合理,且车辆轴数、轴重、轴距等参数具有较好的代表性,具体见文献^[8]和文献^[9]。路面平整度是车桥耦合振动动力响应的一个重要激励源,国际标准化组织(ISO, 1995)将路面平整度从非常差到非常好分为 5 级^[8-9]。路面平整度为随机过程,其频谱也是随机过程。为揭示冲击系数的本质规律,降低路面平整度的影响,采用 20 个路面平整度样本计算,获得桥梁结构的多个动力响应值,最后求其平均值。

3.4 冲击系数的计算

利用 MATLAB 软件,编写车辆耦合振动的计算程序^[8-9]。采用该程序计算路面平整度为好、中、差 3 种情况下,移动车辆以单车道行驶(图 1),以 6 种速度(10, 15, 20, 25, 30, 35 m/s)通过波形钢腹板 PC 简支箱梁桥时,桥梁的动力响应及相应跨中截面挠度的冲击系数。

4 计算结果分析

4.1 路面平整度对冲击系数的影响

在求得桥梁自振频率(基频)后,便可按 15 规范定义的公式求得桥梁的冲击系数。15 规范中规定获得桥梁基频的方式有 2 种:可采用有限元方法计算(简称 15 规范有限元法);给出了常规桥梁结构的基频估算公式(简称 15 规范估算公式法)。同时,文献^[10]中也提出了波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的基频求解公式(简称文献^[10]公式法)。

为分析不同路面平整度对冲击系数的影响,采用车桥耦合振动计算程序,计算 3 种(好、中、差)路面情况下波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数,

将移动车辆在不同行驶速度下计算所得的冲击系数求均值(2 种车型 \times 6 种行驶速度=12 个冲击系数计算工况),并与 15 规范和文献^[10]基于桥梁结构基频所求得的冲击系数进行对比分析,结果见表 1。

表 1 不同路面平整度下桥梁冲击系数的
计算值、文献值与规范值

Tab.1 Calculation, Literature and Code Values of Impact Factors of Different Road Surface Roughness Levels

计算方法	冲击系数	
本文车桥耦合计算程序计算	路面平整度差	0.448
	路面平整度中	0.224
	路面平整度好	0.119
文献 ^[10] 公式法	0.224	
15 规范有限元法	0.235	
15 规范估算公式法	0.271	

由表 1 可知:① 路面平整度为好时,采用车桥耦合振动计算程序所得的冲击系数值小于 15 规范的 2 种计算值;② 路面平整度为差时,采用车桥耦合振动计算程序所得的冲击系数值比 15 规范的 2 种计算值大很多;③ 路面平整度为中时,采用车桥耦合振动计算程序所得的冲击系数值与 15 规范有限元法及文献^[10]公式法求得的冲击系数吻合良好,而与 15 规范估算公式法求得的冲击系数有较大差异。

以上结果说明波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数应依据路面平整度的情况合理确定。在路面平整度为好和中的情况下,波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数可采用 15 规范有限元法和文献^[10]公式法获取桥梁基频后,再根据规范定义的基频与冲击系数的关系求得该类型桥梁的冲击系数;在路面平整度为差的情况下,波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数宜采用车桥耦合计算程序计算。

4.2 车辆类型对冲击系数的影响

采用车桥耦合计算程序计算了波形钢腹板 PC 简支箱梁桥在不同车速和不同路面平整度下的冲击系数,并分别对每种车型在不同路面平整度下的 6 种车速对应的冲击系数求平均值。结果表明:在路面平整度为好、中、差 3 种情况下,两轴车的冲击系数分别为 0.137、0.244、0.489;三轴车的冲击系数分别为 0.101、0.204、0.406。在同样的路面平整度下,两轴车引起的冲击系数大于三轴车引起的冲击系数,但两轴车的车重(27.72 t)却小于三轴车的车重(32.63 t),说明波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的冲击系数不一定随车重的增加而增加,还可能受车型等其他因素的影响。

4.3 车速对冲击系数的影响

在路面平整度等级为好、中、差 3 种情况下,2 种车型的冲击系数随车速变化情况见图 4。由图 4 可知,对于两轴车,当路面平整度为好和差时,冲击系数的最大值出现在速度为 15 m/s 时,当路面平整度为中时,冲击系数的最大值出现在速度为 25 m/s 时;而对于三轴车,当路面平整度为好、中和差时,冲击系数的最大值均出现在速度为 10 m/s 时。因此,行车速度对波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥冲击系数的影响较为复杂,无明显规律。

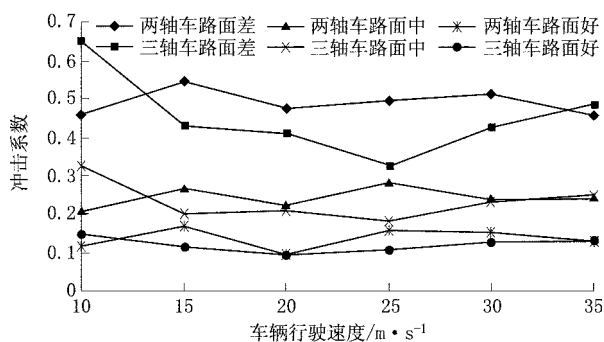


图 4 不同路面等级和车辆类型下的冲击系数
Fig. 4 Impact Factors of Different Road Surface Roughness Levels and Vehicle Types

4.4 冲击系数超规范工况数和超规范百分比统计

为了考察冲击系数与 15 规范设计值差异的随机性,定义冲击系数计算值大于相应的规范设计值时的工况为超规范工况,定义超过规范相应工况的次数为超规范工况数;定义冲击系数计算值超过规范设计值的百分比为超规范百分比。在不同路面平整度下,将两轴车和三轴车冲击系数的计算值与 15 规范值进行比较分析,并统计超规范工况数与超规范百分比的情况,结果见表 2。

由表 2 可知:① 在路面平整度为好的情况下,未出现超规范工况;② 随着路面状况的恶化,超规范工况数和最大超规范百分比急剧增加;③ 总体的超规范工况数和相应的最大超规范百分比与车辆类

表 2 超规范工况数与最大超规范百分比
Tab. 2 Numbers Exceeding Load Cases and Max. Percentage Exceeding Provisions in Code

车型	路面平整度	超规范工况数/个	超规范百分比/%
两轴车	好	0	—
	中	4	20
	差	6	132
三轴车	好	0	—
	中	1	27
	差	6	158

型有关,两轴车(重量较小,但基频与本文研究的桥梁接近)引起的超规范工况数多于三轴车(重量较大,但基频与本文研究桥梁差值比两轴车的大)引起的超规范工况数;④ 在路面平整度为中和差的情况下,三轴车引起的最大超规范百分比大于二轴车引起的最大超规范百分比。

5 结论

(1) 波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥的冲击系数应依据路面平整度的情况合理确定。在路面平整度为好和中的情况下,波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥冲击系数的计算可以采用《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中基于有限元法和文献[10]提出的自振频率估算公式获取桥梁基频后,再根据规范定义的基频与冲击系数的关系求得该桥梁的冲击系数;而对于路面平整度为差的情况下,波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥冲击系数的计算宜采用车桥耦合振动分析所得的冲击系数。

(2) 波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥的冲击系数并不一定随车重的增大而增大,与车型等其他因素也有一定关系。

(3) 2 种车型引起的冲击系数最大值分别对应着不同的行驶速度,说明车速对波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥冲击系数的影响较为复杂,无明显规律。

(4) 总体的超规范工况数和相应的最大超规范百分比与车辆类型有关;在路面平整度为好的情况下,未出现超规范的工况,但随着路面状况的恶化,超规范工况数和最大超规范百分比急剧增加。因此,保持路面平整,对于桥梁结构自身的安全具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Nguyen N D, Han S R, Kim J H, *et al.* Moment Modification Factors of I-Girder with Trapezoidal Web Corrugations Under Moment Gradient [J]. *Thin-Walled Structures*, 2012(57): 1—12.
- [2] Hassanein M F, Kharoob O F. Shear Buckling Behavior of Tapered Bridge Girders with Steel Corrugated Webs[J]. *Engineering Structures*, 2014(74): 157—169.
- [3] Jae-Yuel Oh, Deuck Hang Lee, Kang Su Kim. Accordion Effect of Prestressed Steel Beams with Corrugated Webs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012(57): 49—61.

- [4] 聂建国,李法雄. 考虑腹板剪切行为的波形钢腹板梁理论模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 40-48.
(NIE Jian-guo, LI Fa-xiong. Theory Model of Corrugated Steel Web Girder Considering Web Shear Behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 40-48. in Chinese)
- [5] 江克斌,丁勇,杨建奎,等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭作用下抗扭承载力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 175-182.
(JIANG Ke-bin, DING Yong, YANG Jian-kui, et al. Experimental Study on Ultimate Torsional Strength of PC Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs Under Pure Torsion [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 175-182. in Chinese)
- [6] 陈志兴. 波形钢腹板箱梁桥车桥耦合振动冲击系数研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(13): 176-178.
(CHEN Zhi-xing. Study on Impact Coefficients of Vehicle and Bridge Coupling Vibration of Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(13): 176-178. in Chinese)
- [7] 王宗林,高庆飞, KOH Chan Ghee, 等. 移动车辆荷载作用下大跨径连续梁桥动力响应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(2): 46-52.
(WANG Zong-lin, GAO Qing-fei, KOH Chan Ghee, et al. Dynamic Responses of Long Span Continuous Girder Bridges Under Action of Moving Vehicle Loads [J]. Bridge Construction, 2015, 45(2): 46-52. in Chinese)
- [8] 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.
(DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Study of Dynamic Impact Factors for Simply-Supported Girder Bridges with Different Cross Section Types[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 70-75. in Chinese)
- [9] Deng L, Cai C S. Development of Dynamic Impact Factor for Performance Evaluation of Existing Multi-Girder Concrete Bridges[J]. Engineering Structures, 2010(32): 21-31.
- [10] 冀伟,刘世忠,蔺鹏臻. 波形钢腹板组合箱梁振动频率分析与试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 102-107.
(JI Wei, LIU Shi-zhong, LIN Peng-zhen. Analysis and Experiment for Vibration Frequency of Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 102-107. in Chinese)

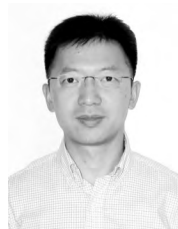


JI Wei

冀伟

1982-，男，副教授

2004年毕业于兰州交通大学土木工程专业,工学学士,2010年毕业于兰州交通大学桥梁工程专业,工学硕士,2013年毕业于兰州交通大学桥梁工程专业,工学博士。研究方向:公路桥梁车桥耦合振动
E-mail:jiwei1668@163.com



DENG Lu

邓露

1984-，男，教授

2005年毕业于华中科技大学土木工程专业,工学学士,2009年毕业于美国路易斯安那州立大学土木(结构)工程专业,工学博士。研究方向:公路桥梁车桥耦合振动及桥梁超载安全
E-mail:denglu@hnu.edu.cn



HE Wei

何维

1988-，男，博士生

2010年毕业于吉林大学信息与计算科学专业,理学学士,2015年毕业于湖南大学土木工程专业,工学硕士。研究方向:车辆桥梁耦合振动及车辆动态称重
E-mail:hewei.hnu@qq.com



LIU Shi-zhong

刘世忠

1962-，男，教授

1983年毕业于兰州铁道学院铁道工程专业,工学学士,1989年毕业于兰州铁道学院结构力学专业,工学硕士,1999年毕业于西南交通大学桥梁与隧道专业,工学博士。研究方向:桥梁结构有限元分析
E-mail:Liusz2000@163.com



LIN Peng-zhen

蔺鹏臻

1977-，男，教授

1999年毕业于甘肃农业大学建筑工程专业,工学学士,2003年毕业于兰州交通大学桥梁与隧道工程专业,工学硕士,2011年毕业于兰州交通大学桥梁与隧道工程专业,工学博士。研究方向:桥梁结构设计理论
E-mail:pzhlin@mail.lzjtu.cn

(编辑:王娣)