

文章编号: 1006 - 2106(2016) 03 - 0060 - 05

## 变截面波形钢腹板 PC 箱梁桥的动力特性分析\*

冀伟<sup>1\*\*</sup> 邓露<sup>2</sup> 刘世忠<sup>1</sup> 蔺鹏臻<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学, 兰州 730070; 2. 湖南大学, 长沙 410082)

**摘要:** 研究目的: 为研究变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥的动力特性的特点, 选择已建的变截面波形钢腹板 PC 箱梁桥——鄄城黄河公路大桥的两跨, 按 1 : 10 的比例缩尺制作 (3 + 3) m 变截面波形钢腹板 PC 室内模型试验梁, 采用模型试验及 ANSYS 有限元仿真分析的方法对模型试验梁的动力特性进行研究。

**研究结论:** 通过研究得出如下结论: (1) 横隔板数量的改变对变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥扭转振动频率的影响较大, 对其弯曲振动频率的影响较小; (2) 采用《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015) 中连续梁基频的估算公式对室内试验梁的竖向基频进行了计算, 并与实测值及有限元值对比后发现现行规范中连续梁竖向基频的估算公式不适用于该类型桥梁竖向基频的计算; (3) 在现行规范估算公式中考虑波形钢腹板剪切变形的影响后, 得到了适用于变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥竖向基频计算的修正估算公式; (4) 该研究成果可为公路桥梁工程中变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥动力特性的分析提供参考。

**关键词:** 波形钢腹板; 组合箱梁; 变截面; 动力特性; 模型试验

**中图分类号:** U448.21 + 6 **文献标识码:** A

## Dynamic Characteristics Analysis of the Variable Cross - section Continuous Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

Ji Wei<sup>1</sup>, Deng Lu<sup>2</sup>, Liu Shi - zhong<sup>1</sup>, Lin Peng - zhen<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract: Research purposes:** In order to study the dynamic characteristics of the PC box girder bridge with corrugated steel webs (CSWs) with variable cross - section, the bridge model with the span (3 + 3) m used in the experiment testing is a one - to - ten scale model developed for the Juancheng Yellow River Bridge. The model test and ANSYS finite element simulation are used to study the dynamic characteristics of the PC continuous box girder bridge with CSWs with variable cross - section.

**Research conclusions:** The results show: (1) The number of diaphragm has great influences on the torsional vibration frequencies of this type bridge, while has little influences on the vertical bending vibration frequencies. (2) The fundamental frequency formulas from the JTG D60 - 2015 code for the continuous girder are used to calculate the PC box girder bridge with CSWs with variable cross - section. The measured values and FEA values have big differences with the JTG D60 - 2015 code values, so vertical fundamental frequency formulas of the continuous girder in current code are

\* 收稿日期: 2015 - 09 - 14

基金项目: 国家自然科学基金 (51368032, 51208242); 中国博士后科学基金 (2014M562103); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”资助 (IRT - 15R29); 甘肃省高等学校科研项目 (2015A - 053); 甘肃省基础研究创新群体项目 (1506RJIA029)

\*\* 作者简介: 冀伟, 1982 年出生, 男, 副教授。

not suitable for this kind of bridge. (3) Considering the shear deformation of the CSWs, the correction formulas are obtained for the PC box girder bridge with CSWs with variable cross-section. (4) The research conclusions can provide references for the analysis of dynamic characteristics of variable cross-section PC continuous box girder bridges with CSWs in highway bridge engineering.

**Key words:** corrugated steel web; composite box girder; variable cross-section; dynamic characteristic; model test

波形钢腹板 PC 箱梁桥是一种新型的钢-混组合结构桥梁(如图 1 所示),该桥型由于使用波形钢腹板取代传统箱梁的混凝土腹板,可以有效减轻梁体的自重;波形钢腹板在桥梁纵向具有手风琴效应,可以提高预应力的施加效率,还具有钢腹板抗剪强度高、桥型美观等优点,已在国内外的桥梁建设中得到了广泛应用。

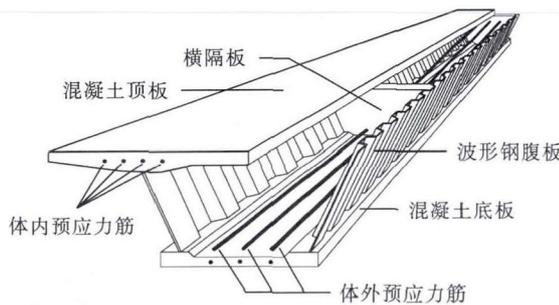


图 1 波形钢腹板 PC 箱梁桥的构造示意图

已有研究文献表明,国外的研究主要集中在波形钢板和波形钢腹板 I 型钢梁的抗剪、抗弯和屈曲性能方面<sup>[1-4]</sup>,针对波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性的研究较少;国内学者已经在波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性方面开展了研究,研究成果主要有:陈海波等<sup>[5]</sup>运用有限元分析方法分析了波形钢腹板的结构参数对波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性的影响规律;任红伟等<sup>[6]</sup>基于梁体横隔板对扭转振动的影响,给出了波形钢腹板 PC 筒支箱梁桥扭转振动的计算方法;刘保东等<sup>[7]</sup>针对波形钢腹板 PC 箱梁桥扭转刚度偏低的缺点,提出适当增加横隔板的数量可以改善其动力特性;张永健等<sup>[8]</sup>以能量变分原理为基础,在考虑波形钢腹板 PC 箱梁桥剪切效应和剪力滞效应的基础上,获得了该结构自振频率的计算公式。但在上述国内文献中主要是针对等截面波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性的研究,目前国内建成的此类桥梁多为变截面连续箱梁桥,因此开展变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥动力特性的研究,将会有更好的代表性和应用前景。

在桥梁动力特性的研究中,最重要的桥梁本身的特性就是自振频率,自振频率的大小反映了结构的尺寸、类型、建筑材料等动力特性内容,本文采用室内模型试验和三维有限元仿真分析方法研究了变截面波形

钢腹板 PC 连续箱梁桥的动力特性,并对现行桥梁规范中连续梁竖向基频的估算公式进行了修正,使之适用于变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥竖向基频的计算,本文的研究结论可以为实际工程中波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性的分析提供参考。

### 1 变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥的制作

国内已建的鄆城黄河公路大桥是一座变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥,参考其横截面尺寸并按照 1:10 的比例缩尺得到了室内模型试验梁的截面尺寸。试验梁边支点和中支点横截面尺寸如图 2、图 3 所示。在实验室制作了两跨模型试验梁,跨径布置为(3+3)m,顶板全宽为 1.35 m,底板宽度为 0.65 m,两侧悬臂长度为 0.35 m。试验梁采用的混凝土材料为 C40,弹性模量为 32.5 GPa,泊松比 0.2,密度为 2 550 kg/m<sup>3</sup>。波形钢腹板采用 Q235 钢,厚度为 1.2 mm,波形钢腹板的示意图如图 4 所示,其弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>。

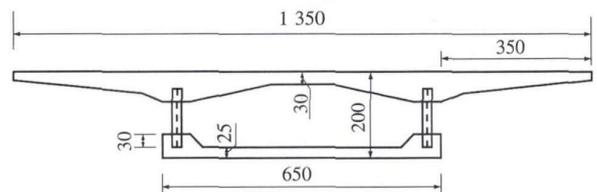


图 2 边支点横截面布置图(单位:mm)

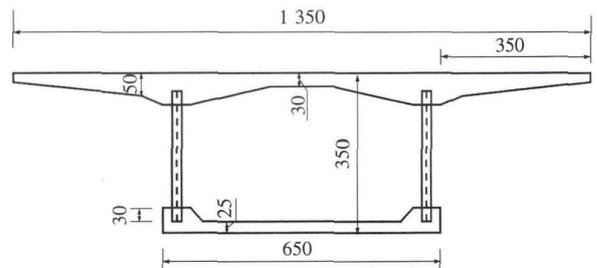


图 3 模型梁中支点横截面布置图(单位:mm)

图 5 为一跨试验梁的桥跨布置图,另一跨与其对称布置。梁中设有端横隔板和两道中横隔板,详细尺寸如图 5 所示。

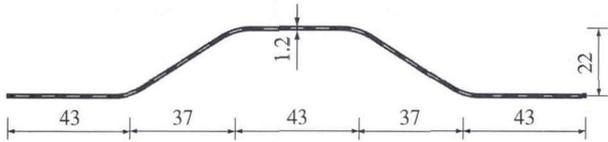


图4 波形钢腹板尺寸示意(单位:mm)

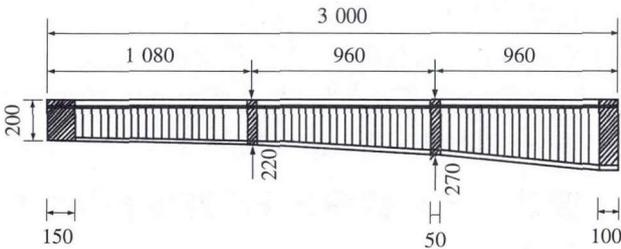


图5 桥跨布置图(单位:mm)

模型试验梁的体外预应力筋共计2根,采用7φ5 1860级钢绞线,公称截面面积为139 mm<sup>2</sup>,分为2批左右对称张拉,张拉力为160 kN。为了获得预应力筋张拉后的有效预应力,在试验梁预应力筋的锚固位置分别布置了压力传感器,制作完成的试验梁如图6所示。

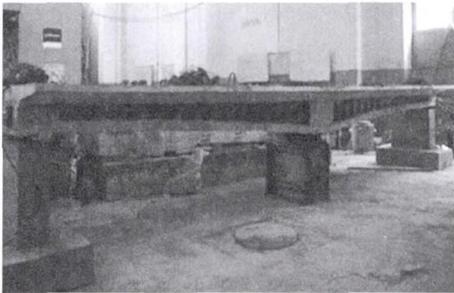


图6 模型试验梁

## 2 试验梁的动力特性测试与有限元模型对比

采用东华DHDAS信号测试分析系统对室内模型试验梁进行了动力特性测试,传感器的布置如图7所示。通过动力特性测试,获得了试验梁的前3阶自振频率和振型,如表1所示。

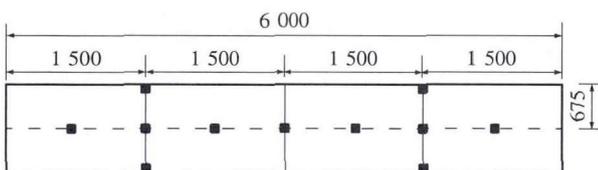


图7 传感器布置图(单位:mm)

ANSYS有限元软件是分析结构动力特性常用的分析软件<sup>[9]</sup>,因此变截面波形钢腹板PC试验梁的空间有限元模型采用ANSYS12.0有限元软件建立,波形钢腹板PC试验梁的上、下翼板及横隔板均为钢筋混凝土材料,采用实体单元SOLID45来建模;波形钢腹板为钢材,厚度为1.2 mm,采用SHELL63壳单元来模拟;采用LINK8单元来模拟变截面波形钢腹板PC试验梁的预应力筋,并通过初应变来施加预应力。

在波形钢腹板PC试验梁上、下翼板与波形钢腹板交界位置需要考虑两者的嵌入式效应,在有限元模型建立过程中通过将波形钢腹板的SHELL63单元嵌入箱梁上、下翼板的SOLID45单元3 cm,并合并相应的节点,形成嵌入式效应。试验梁跨中截面的支座为固定铰支座,约束试验梁的纵向、横向与竖向位移,梁端支座为活动铰支座,约束试验梁的竖向和横向位移。建立好的试验梁三维有限元模型如图8所示,波形钢腹板的有限元模型如图9所示。



图8 模型试验梁的有限元计算模型



图9 波形钢腹板的有限元模型

将试验梁通过动力特性测试和有限元数值模拟所获得的自振频率和振型进行对比分析,对比结果如表1所示。

由表1可以看出,试验梁实测的自振频率和振型与有限元数值模拟所获得的自振频率和振型吻合良好,一阶扭转振动频率的实测值略大于ANSYS数值结果是由于试验梁浇筑中横隔板时,部分中横隔板的模板未拆除。

表 1 试验梁的自振频率和振型对比

频率阶数	ANSYS 计算值/Hz	实测值 /Hz	振型
1	49.44	50.85	竖向一阶弯曲振动
2	65.48	65.81	竖向二阶弯曲振动
3	115.54	125.12	一阶扭转振动

### 3 模型试验梁的动力特性分析

#### 3.1 横隔板设置对动力特性的影响

本文提出四种方案来研究横隔板的数量变化对变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥动力特性的影响:保留所有的横隔板;去掉一道中横隔板;去掉两道中横隔板,只考虑端横隔板的影响;去掉所有的横隔板,即不考虑横隔板的影响。四种方案的有限元计算结果如图 10 所示。

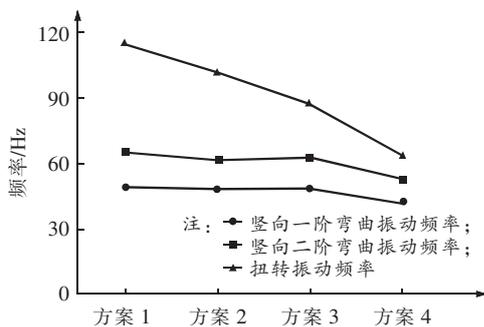


图 10 横隔板数量对试验梁动力特性的影响

由图 10 可以看出,横隔板的数量变化对变截面波形钢腹板 PC 箱梁桥扭转振动频率的影响较大,对其竖向弯曲振动频率的影响较小,当横隔板数量减少时,其扭转振动频率急剧下降。因此,在实际工程中应合理设置横隔板数量以提高该桥型的抗扭稳定性,增加截面的扭转刚度。

#### 3.2 与现行规范比较

现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定采用结构的基频来计算桥梁结构的冲击系数<sup>[10]</sup>。规范中给出了桥梁结构的自振频率(基频)获取的两种方式:一是有限元方法;二是规范给出的估算公式。对于该类型桥梁采用有限元方法费时费力,不利于大面积推广,估算公式是否适用于该类型桥梁需要进行验证,若不适用,需要给出修正公式。

按照规范,连续梁桥竖向基频的估算公式如式(1)与式(2)所示,当计算连续梁的冲击力引起的正弯矩效应和剪力效应时,采用 $f_1$ ;计算连续梁的冲击力引起的负弯矩效应时,采用 $f_2$ :

$$f_1 = \frac{13.616}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{23.651}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (2)$$

式中  $l$ ——结构的计算跨径;  
 $E$ ——结构材料的弹性模量;  
 $I_c$ ——结构跨中截面的截面惯性矩;  
 $m_c$ ——结构跨中处的单位长度质量。

以本文制作的变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥为例,采用式(1)计算了 $f_1$ ,并与实测值和有限元所得结果进行了对比,对比结果如表 2 所示。

表 2 变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥竖向基频对比

频率阶数	有限元计算值/Hz	实测值/Hz	$f_1$ /Hz
1	49.44	50.85	73.57

由表 2 可以看出,《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的估算公式所得变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥竖向基频与有限元值和实测值差别较大,这是由于波形钢腹板的剪切变形对其动力特性的影响较大,而规范中的估算公式未考虑波形钢腹板剪切变形的影响,针对这一问题本文提出了考虑波形钢腹板剪切变形的修正估算公式:

$$f_{11} = \frac{13.616}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \left| \sqrt{1 + \frac{EI_c}{G_s A_s} \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \right| \quad (3)$$

式中  $G_s$ ——波形钢腹板的剪切模量;  
 $A_s$ ——波形钢腹板的剪切面积。

按式(3)所得频率为 52.176 Hz,与有限元值和实测值吻合良好,验证了修正估算公式的正确性,同理可对式(2)进行修正:

$$f_{12} = \frac{23.651}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \left| \sqrt{1 + \frac{EI_c}{G_s A_s} \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \right| \quad (4)$$

### 4 结论

结合本文的研究,可得出以下结论:

(1) 本文设计制作了变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥的模型试验梁,并采用 DHDAS 动态信号测试分析系统对其动力特性进行了实测,所得结果与 ANSYS 有限元仿真结果差别较小,验证了有限元模型的正确性,同时也验证了测试结果的可靠性。

(2) 运用有限元方法研究了横隔板数量对变截面波形钢腹板 PC 连续箱梁桥动力特性的影响,结果表明横隔板的数量对变截面波形钢腹板 PC 箱梁桥扭转振动频率的影响较大,对其竖向弯曲振动频率的影响

较小,因此在实际中应合理设置横隔板的数量,增强该类型桥梁的抗扭刚度以改善其动力特性。

(3)《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中关于连续梁竖向基频的估算公式不适用于变截面波形钢腹板PC连续箱梁桥的基频计算,本文针对钢腹板剪切变形较大的特点,提出了该类型桥梁竖向基频的修正公式,并通过模型试验和有限元验证了修正公式的正确性,研究成果可为公路桥梁工程中变截面波形钢腹板PC连续箱梁桥动力特性的分析提供参考。

## 参考文献:

- [1] Jiho Moon, Jongwon Yi, Byung H. Choi, etc. Shear Strength and Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009(65): 1198–1205.
- [2] M. E. A – H. Eldib. Shear Buckling Strength and Design of Curved Corrugated Steel Webs for Bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009(65): 2129–2139.
- [3] Ngoc Duong Nguyen, Seung – Ryong Han, Gyu – Sei Lee, etc. Moment Modification Factor of I – girder with Trapezoidal – web – corrugations Considering Concentrated Load Height Effects [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011(67): 1773–1787.
- [4] Ngoc Duong Nguyen, Seung – Ryong Han, Jung – Hun Kim, etc. Moment Modification Factors of I – girder with Trapezoidal Web Corrugations under Moment Gradient [J]. *Thin – Walled Structures*, 2012(57): 1–12.
- [5] 陈海波,刘保东,任红伟. 波形钢腹板混凝土箱梁动力特性研究[J]. *公路交通科技*, 2007(2): 80–83.  
Chen Haibo, Liu Baodong, Ren Hongwei. Research on Dynamic Characteristic of Concrete Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007(2): 80–83.
- [6] 任红伟,刘保东,陈海波. 波形钢腹板混凝土箱梁的扭转振动分析[J]. *中国公路学报*, 2008(6): 64–68.  
Ren Hongwei, Liu Baodong, Chen Haibo. Analysis of Torsional Vibration of Concrete Box – girder with Corrugated Steel Webs [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008(6): 64–68.
- [7] 刘保东,陈海波,任红伟. 波纹钢腹板混凝土箱梁动力特性改善研究[J]. *中国铁道科学*, 2008(3): 29–33.  
Liu Baodong, Chen Haibo, Ren Hongwei. Improvement Study of the Dynamic Characteristics for Concrete Box – girder with Corrugated Steel Webs [J]. *China Railway Science*, 2008(3): 29–33.
- [8] 张永健,黄平明,狄谨,等. 波形钢腹板组合箱梁自振特性与试验研究[J]. *交通运输工程学报*, 2008(5): 76–80.  
Zhang Yongjian, Huang Pingming, Di Jin, etc. Free Vibration Characteristics and Experiment Study of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008(5): 76–80.
- [9] 周长东,刘斌. 简支铁路桥梁加固前后共振响应分析[J]. *铁道工程学报*, 2015(9): 60–66.  
Zhou Changdong, Liu Bin. Research on the Resonance Response of Simply – supported Railway Bridge Before and After Reinforcement [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015(9): 60–66.
- [10] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].  
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].