

文章编号: 1000-4750(2020)09-0161-12

单箱多室波形钢腹板箱梁的横向受力分析

乔 朋¹, 钟承星¹, 狄 谨², 秦凤江²

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西, 西安 710061; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 为研究单箱多室波形钢腹板箱梁桥在车轮荷载下的横向受力特点及有效分布宽度, 建立了单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的有限元模型, 对比分析了 3 种截面箱梁的横向应力和有效分布宽度的规律。通过缩尺模型梁试验, 验证了有限元分析结果。通过研究发现, 单箱多室波形钢腹板箱梁的横向受力可近似简化为单室箱梁, 但按照目前规范计算波形钢腹板箱梁的有效分布宽度存在较大误差。利用有限元模型, 研究了荷载横向作用位置、腹板中心间距、悬臂板长度、顶板厚度、波形钢腹板尺寸及类型等参数对单箱单室箱梁有效分布宽度的影响, 结果表明荷载横向作用位置和箱室腹板中心间距是最重要影响因素。通过对参数分析结果进行曲面拟合, 得到了单箱单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度计算公式; 单箱多室箱梁有效分布宽度可按 0.9 倍的单室箱梁有效分布宽度计算。最后, 以某单箱三室波形钢腹板箱梁桥为例, 按照该文公式求得有效分布宽度, 采用弹性框架法计算了横向单点和多点车轮荷载作用下箱梁的顶板横向应力, 并与有限元模型、桥规方法计算结果进行了对比, 发现: 横向多点车轮加载时, 忽略不同箱室有效分布宽度的差异会使横向应力计算结果偏不安全, 建议采用该文提出的应力折减系数考虑此因素影响; 按照该文方法计算的横向应力结果更精确, 与规范方法相比误差可减小 20%~40%。

关键词: 桥梁工程; 波形钢腹板箱梁; 有限元与试验方法; 横向受力; 有效分布宽度; 多点加载; 单箱多室
中图分类号: U441; U448 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.10.0627

ANALYSIS OF SINGLE-BOX MULTI-CELL COMPOSITE BOX GIRDER WITH CORRUGATED STEEL WEBS DUE TO TRANSVERSE FORCE

QIAO Peng¹, ZHONG Cheng-xing¹, DI Jin², QIN Feng-jiang²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To investigate the characteristics of transverse force in the top slabs of a single-box triple-cell composite box girder with corrugated steel webs (CBGCSW) and the effective distribution width under wheel loads, a finite element model of a single-box CBGCSW with single-cell, double-cell and triple-cell was established. The regulation of transverse stress and effective distribution width of three different box girders were compared. The results of finite element analysis, which had been verified by scaled-models tests, show that the transverse force in a single-box multi-cell CBGCSW can be approximately simplified as that of a single-box single-cell box girder. However, there is a big error in calculating the effective distribution width of CBGCSW according to the current code. Using finite element models, the influences of the transverse location of wheel load, the distance between webs, the length of flange slabs, the thickness of top slabs, the size and type of corrugated

收稿日期: 2019-10-31; 修改日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608069); 长安大学中央高校基本科研业务费资助项目(300102288110); 重庆市基础与前沿研究计划院士专项项目(cstc2015jcyjys0011)

通讯作者: 乔 朋(1982—), 男, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构与组合结构桥梁研究 (E-mail: qiaopeng@chd.edu.cn).

作者简介: 钟承星(1995—), 男, 江西赣州人, 硕士生, 主要从事组合结构桥梁研究 (E-mail: 1195928385@qq.com);

狄 谨(1972—), 男, 湖南汨罗人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构与组合结构桥梁研究 (E-mail: dijin@sina.com);

秦凤江(1983—), 男, 辽宁朝阳人, 副研究员, 博士, 硕导, 从事钢结构与组合结构桥梁研究 (Email: qinfengjiang@cqu.edu.cn).

steel webs on the effective distribution width of a single-box single-cell CBGCSW were analyzed. It is shown that the transverse location of wheel load and the distance between webs of loading chambers are the most important factors. The practical calculation formulas of the effective distribution width of a single-box single-cell CBGCSW were obtained by the surface fitting according to results of parametric analysis. The formulas of the effective distribution width of a single-box multi-cell CBGCSW were proposed to be 0.9 times of that of a single-cell CBGCSW. Finally, the transverse stress in the top slab of a single-box triple-cell CBGCSW were analyzed as an illustration under transverse single and multiple wheel loads, separately. The transverse stress was calculated by the elastic frame method, using the effective distribution width calculated by formulas proposed and the current code method. The results, compared with the finite element analysis, show that when transverse multiple wheel loads were imposed the calculated transverse stress may be unsafe, on the condition that the effective distribution width of different chambers were adopted as the same value. Consequently, the stress reduction factor of transverse stress in adjacent chamber which is presented in this paper are proposed to improve accuracy. The formulas presented are more accurate than those of current code, and the errors can be reduced by 20%-40%, comparing with current code method.

Key words: bridge engineering; composite box girder with corrugated steel webs; finite element method and experiment method; transverse force; effective distribution width; multiple wheel loads; single-box multi-cell

波形钢腹板组合箱梁桥起源于法国,与普通预应力混凝土梁桥相比具有自重轻、受力性能优越等特点,在日本和中国桥梁工程中得到了广泛的应用。据统计,我国已建和在建的波形钢腹板箱梁桥在 2018 年底已超过 100 座。为保证足够的桥面宽度,满足更大的交通流量,单箱多室波形钢腹板箱梁在城市和高等级公路桥梁中的应用越来越多,如单箱双室的青海三道河桥、单箱三室的合肥南淝河桥、单箱四室的郑州朝阳沟桥和单箱五室的山西运宝黄河桥等。单箱多室波形钢腹板箱梁的剪力滞效应^[1-2]、扭转畸变^[3-4]和荷载横向分布等力学性能^[5]与单箱单室箱梁有一定差异,在车轮荷载作用下其横向受力特点也可能不同,有待研究。

目前,国内外学者对箱梁桥横向内力的研究成果多针对单箱单室箱梁^[6-10],对单箱多室箱梁,特别是单箱多室波形钢腹板箱梁桥横向受力特点和应力计算方面的研究不多。从已有研究成果看,箱梁桥横向内力的计算方法主要包括影响面法^[11]、折板位移法^[12-14]、有限元法^[15]和框架分析法^[16-21]。其中,框架分析法应用的最多,可分为刚性框架法^[21-24]和弹性框架法^[25-27]。弹性框架法用弹性支承代替箱梁约束作用将空间问题转为平面问题,再采用荷载有效分布宽度对等效的平面框架结构进行分析,计算更简便、精度较高。该方法也被应用于波形钢腹板箱梁的横向内

力计算,有学者通过研究还提出了弹性框架分析法的修正公式^[28]。采用弹性框架法计算箱梁横向内力时,合理确定荷载有效分布宽度十分关键。目前,荷载有效分布宽度一般按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范》(后文简称:桥规)^[29]计算。但规范方法是基于箱梁顶板单独受力提出的,没有准确考虑箱梁腹板的约束作用、顶板与腹板的相互嵌固作用及扭曲变形的影响。国内外学者对箱梁桥的荷载有效分布宽度做了更加深入的研究。Cheung 和 Chan^[30]对混凝土箱梁的研究表明,桥梁跨度、截面宽度及桥面板厚度是影响有效分布宽度最主要的因素。蒋志刚等^[31]、吴海林等^[32]分别通过理论计算方法和有限元方法对混凝土箱梁进行研究,发现荷载作用的横向位置对有效分布宽度影响很大。方志和张志田^[15]的研究表明规范方法计算混凝土箱梁的有效分布宽度一般偏于安全但精度不足;方志和张志田^[33]还通过对箱梁顶板抗弯刚度与开口框架抗弯刚度的比、翼缘板抗扭刚度与箱梁整体抗扭刚度比对横向受力的影响进行分析,提出了适用于混凝土箱梁桥的有效分布宽度修正公式。Kurian 和 Menon^[34]提出了考虑荷载作用位置和腹板宽度影响的有效分布宽度修正公式,但该公式仅适用于混凝土腹板和顶板厚度比为 1 和 2 两种情况。赵品等^[35]、彭琨等^[36]、刘清^[37]、方太云^[38]采用试验与数值模拟结合的方法对单箱单室波形钢腹板箱梁的有效

分布宽度进行分析, 结果表明桥规的有效分布宽度计算结果与有限元分析和试验结果均存在较大差异, 横向应力计算精度有待提高。可见, 现有针对箱梁横向受力分析的研究对象多为单箱单室箱梁, 对单箱多室波形钢腹板箱梁的研究少见, 其有效分布宽度的准确计算方法亟待研究。

单箱多室波形钢腹板箱梁的箱室数量增加, 与单室箱梁相比其横向内力分布更为复杂。弹性框架法适用于单箱多室箱梁横向内力分析, 但计算时需准确计算该类组合箱梁的有效分布宽度, 并应合理考虑不同箱室同时在横向作用多个车轮荷载时的影响。本文结合试验和有限元法, 在对比单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁横向受力特点的基础上, 研究了不同参数对单箱单室波形钢腹板箱梁的荷载有效分布宽度的影响, 提出了单室与多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度的实用计算公式; 最后, 提出横向单点和多点荷载作用下单箱三室波形钢腹板箱梁横向内力的计算方法。

1 单室与多室箱梁横向内力对比

1.1 双室和三室组合梁模型试验

1.1.1 模型试验设计

为研究单箱多室波形钢腹板箱梁的横向受力特点, 参考跨径为 50 m 的青海三道河简支梁桥, 按照 1:10 的缩尺比设计了单箱双室和三室波形钢腹板箱梁模型。总长为 5 m, 计算跨径为 4.8 m, 梁高 0.3 m, 共设置 2 道端横隔板和 3 道中横隔板。波形钢腹板厚度为 2 mm, 高度为 24 mm, 标准段长度为 $2 \times (40 \text{ mm} + 32 \text{ mm}) = 144 \text{ mm}$ 。顶底板均采用埋入式连接件。箱梁顶底板采用 C50 混凝土, 波形钢腹板采用 Q235 钢材。模型梁和波形钢腹板构造如图 1 所示。图 1 中 WA、WB、WC、WD 为波形钢腹板编号。

为避免横隔板影响, 试验荷载的纵向位置在两中横隔板之间的 I-I 截面, 如图 1(c) 所示; 横向位置为箱室中心线处, 如图 2 所示。试验采用砝码进行 4 级单点加载, 加载面为 $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 最大加载值为 4 kN, 加载示意图如图 3 所示。

为测试波形钢腹板箱梁顶板横向应变, 在模型梁箱室顶面布置横向应变片, 如图 2 所示。测点横向位置与加载截面横向位置一致。由于加载点下不宜布置测点, 测点 3 和测点 7 纵向沿跨中

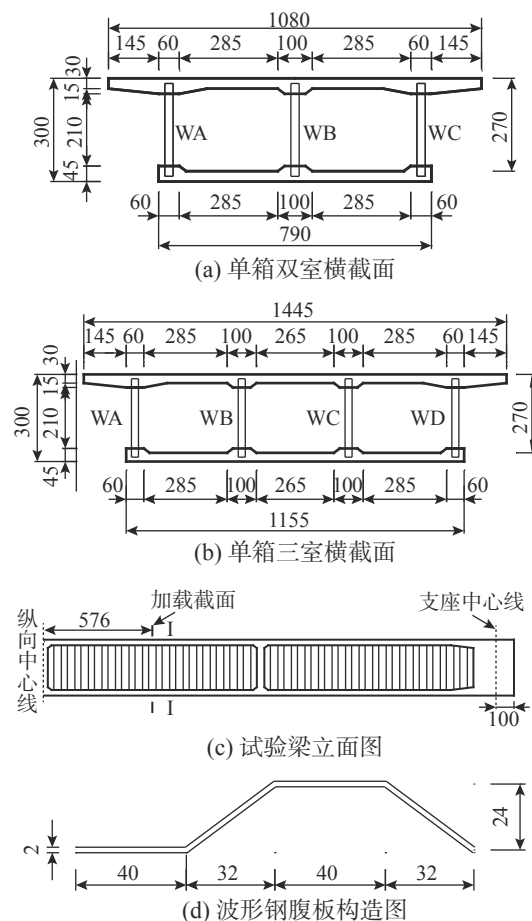


图 1 模型梁构造图 /mm

Fig. 1 Construction of model beam

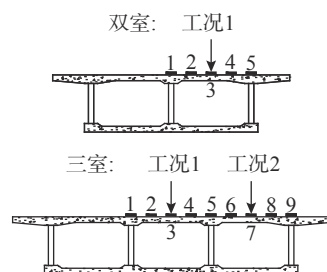


图 2 应变片布置及加载工况 /mm

Fig. 2 Strain gauges layout and loading conditions



图 3 砝码加载块示意图

Fig. 3 Diagram of weight loading block

偏移 20 mm。单箱三室模型梁试验加载如图 4 所示。



(a) 工况1 (第4级加载)



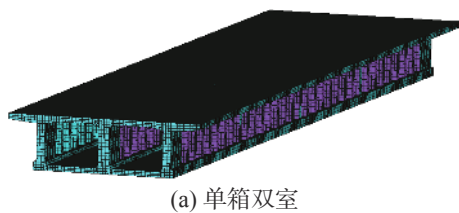
(b) 工况2 (第4级加载)

图 4 三室模型梁试验加载

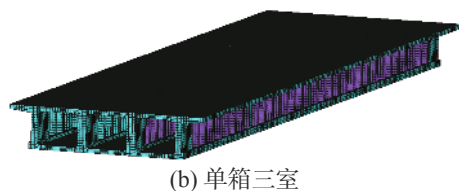
Fig. 4 Loading of model beam with triple-cell

1.1.2 模型梁有限元模型

建立缩尺模型梁的空间有限元模型，混凝土顶、底板及横隔板都采用 SOLID45 单元，波形钢腹板采用 SHELL181 单元，钢腹板与混凝土的连接采用将腹板伸入顶底板，且与混凝土板同节点的方式模拟，忽略钢与混凝土的相对滑移。按照支座位置施加简支边界。混凝土和波形钢腹板弹性模量分别为 34.5 GPa、206 GPa，泊松比分别为 0.2、0.3。荷载按照实际加载块尺寸施加均布面荷载。有限元模型如图 5 所示。



(a) 单箱双室



(b) 单箱三室

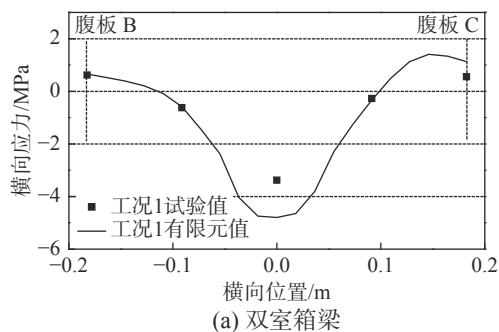
图 5 模型梁有限元模型

Fig. 5 FEA models of model beam

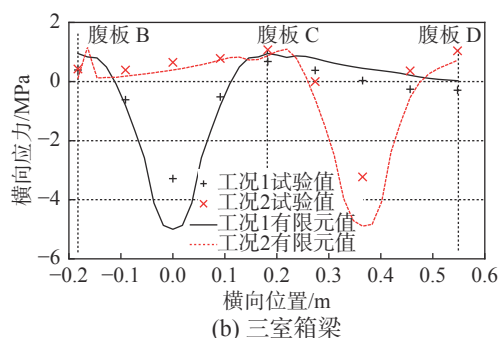
1.1.3 试验结果分析

在 4 kN 单点试验荷载作用下，单箱双室和三室模型梁的横向应力对比如图 6 所示。

由图 6 可知，模型梁顶板横向应力实测值与有限元值的分布规律一致，表明文中采用的有限元模拟方法可以用来分析波形钢腹板箱梁的横向受力性能。单箱双室工况 1 和三室模型梁工况 1、工况 2 的车轮荷载作用时的横向应力分布规律一致，最大应力分别为 -4.8 MPa、-5.0 MPa、-4.9 MPa。结果表明：单箱双室和三室箱梁在单点车轮荷载作用下的横向受力规律基本相同，且最大横向应力接近。



(a) 双室箱梁



(b) 三室箱梁

图 6 组合梁模型顶板的横向应力

Fig. 6 Transverse stress in top slabs of composite girders

1.2 单室、双室、三室组合箱梁有限元分析

为进一步对比单箱单室和多室波形钢腹板箱梁横向内力特点，以实际尺寸的波形钢腹板箱梁为对象，通过有限元法研究单室、双室、三室组合箱梁在单点荷载作用下的横向应力分布规律。

1.2.1 箱梁构造

参考波形钢腹板箱梁实桥，确定拟研究的单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的构造如图 7 所示。单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的腹板中心间距相同，均为 $B=4.5$ m，两侧悬臂长为 2.25 m。跨中梁高 2.2 m，顶板厚 28 cm，底板厚 24 cm。波形钢腹板为 1200 型，板厚 12 mm、波距 120 cm、波高 20 cm。顶底板选用 C55 混凝土，波形钢腹板选用 Q345 钢材。

1.2.2 有限元模型

分别建立单箱单室、双室、三室波形钢腹板

箱梁的空间有限元模型,建模方法与1.1.3节相同。为详细对比单室和多室箱梁的横向受力特点,分别将120 kN的车轮荷载采用面加载方式施加在不同箱室顶面的不同横向位置,加载面为0.6 m×0.2 m,分析单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的横向应力。其中,单室箱梁箱室顶面的车轮荷载分别作用在位置1~11,如图7(b)所示。双室箱梁左室、三室箱梁左室和中室加载位置与单室位置相同。

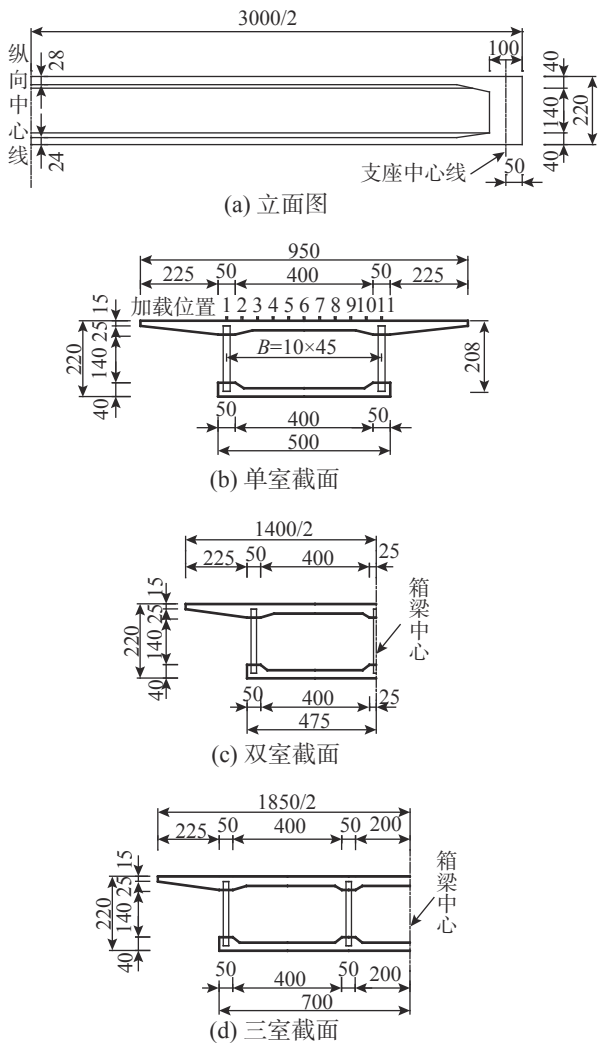


图7 波形钢腹板箱梁截面及尺寸 /cm
Fig. 7 Section and dimensions of CBGCSW

1.2.3 有限元分析结果

有效分布宽度^[39]是车轮荷载作用时沿桥梁纵向的等效分布长度。按照最大弯矩等效原则,有效分布宽度可按式(1)计算:

$$b = \frac{M}{m_{z\max}} = \frac{\int \sigma_z}{\sigma_{z\max}} \quad (1)$$

式中: b 为箱梁顶板有效分布宽度理论值; M 为车轮荷载所产生的沿纵向的横向总弯矩; $m_{z\max}$ 为沿

纵向顶板的横向单宽弯矩峰值; σ_z 为箱梁顶板沿纵向产生的横向应力值; $\sigma_{z\max}$ 为箱梁顶板沿纵向产生的最大横向应力值。

在不同位置的单个车轮荷载作用下,单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度和顶板顶面横向应力峰值如图8所示。纵向位置为箱梁跨中中心线处。

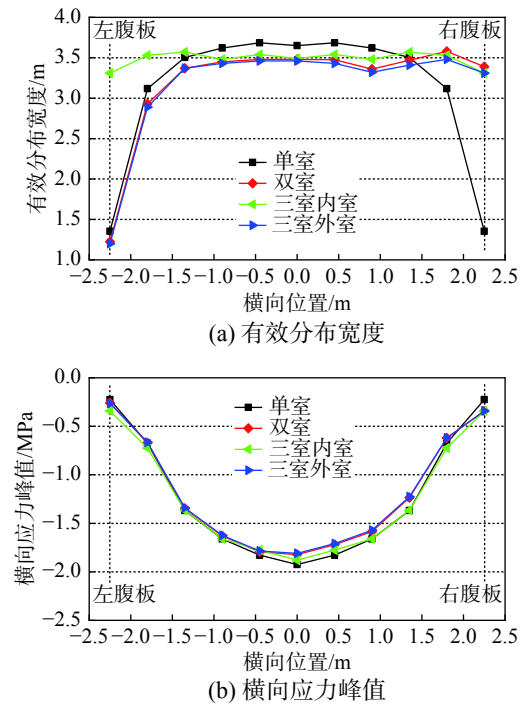


图8 单室、双室、三室有效分布宽度及横向应力峰值对比

Fig. 8 Comparison on effective distribution width and transverse peak stress of single-cell, double-cell and triple-cell girders

由图8(a)可知,对于箱室中部±1.5 m(约0.6B)范围内,单个车轮荷载作用时单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度基本上大于多室,单室与双室、三室内室和三室外室有效分布宽度相比差异最大分别为7.2%、4.4%、8.3%;双室与三室外室的有效分布宽度差异较小,最大差值仅为2.8%。由图8(b)可知,除腹板附近应力较小局部区域外,在箱室中部±0.3B范围内,单室的应力略大于双室和三室的应力;双室与三室外室的应力基本一致,最大差值小于1.0%;单室比三室内室最大高出2.2%,但比双室和三室外室最大高出近10.0%。

1.3 单箱多室箱梁横向受力特点

通过以上模型试验和有限元分析,发现单箱

多室波形钢腹板箱梁的横向受力特点如下:

1) 对于荷载作用的箱室, 单箱多室波形钢腹板箱梁的横向应力分布和有效分布宽度的规律与单箱单室箱梁基本一致, 而非荷载作用的箱室横向应力较小。

2) 当荷载作用在不同的横向位置时, 单箱多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度均略小于单室, 可偏安全地取单室有效分布宽度的 0.9 倍作为单箱多室的有效分布宽度。

因此, 对于单个车轮荷载作用时箱梁横向内力计算, 单箱多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度可近似取与荷载作用箱室具有相同腹板间距的单箱单室箱梁的有效分布宽度的 0.9 倍。

2 有效分布宽度参数分析

研究表明^[35-38], 按现行桥规中有效分布宽度分析波形钢腹板箱梁的横向应力结果存在误差, 计算方法有待改进; 另一方面, 现虽有关于箱梁的有限分布宽度参数分析的研究内容^[28, 32-33], 但往往分析不够全面, 故本文进行有限元分析。下面以图 7(b) 所示的单箱单室箱梁尺寸为基准, 对荷载横向作用位置、腹板间距、顶板厚度、悬臂长度、波形钢腹板尺寸及类型对单箱单室波形钢腹板箱梁在单个车轮荷载荷载作用下的有效分布宽度的影响进行分析, 从而拟合出有效分布宽度公式, 纵向位置为箱梁跨中。参考我国已建波形钢腹板箱梁桥实际尺寸, 确定参数变化范围如下: 箱梁高为 2.2 m~4.2 m, 腹板中心间距为 3.5 m~9.5 m, 悬臂长度为 1.5 m~4.5 m, 顶板厚度为 0.25 m~0.4 m, 波形钢腹板厚度为 10 mm~24 mm, 类型分别为 1000 型、1200 型、1600 型。

2.1 荷载横向作用位置与腹板间距影响

箱梁其他因素保持不变, 腹板中心间距分别为 3.5 m、4.5 m、5.5 m、6.5 m、7.5 m、8.5 m、9.5 m。荷载横向作用位置见图 7(b), 分别在腹板间距的 10 等分点。不同位置荷载作用下箱梁的荷载有效分布宽度分析结果如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知, 随着荷载位置的改变, 荷载有效分布宽度变化明显。有效分布宽度由中心向两边递减, 在腹板附近 $0.2B$ 范围内有效分布宽度的变化较大, 在距箱室中心 $0.3B$ 范围内变化较小, 且呈三次曲线变化, 与规范规定的呈水平直线变化有所不同。腹板间距为 3.5 m、4.5 m、5.5 m、

6.5 m、7.5 m、8.5 m、9.5 m, 当荷载作用于箱梁中心, 有效分布宽度分别为 3.35 m、3.65 m、3.93 m、4.20 m、4.41 m、4.60 m、4.73 m; 而当荷载作用于腹板中心处, 分别为 1.35 m、1.50 m、1.58 m、1.60 m、1.59 m、1.54 m、1.48 m, 变化较小; 腹板附近有效分布宽度比跨中附近小, 差值为 58.9%~68.7%。

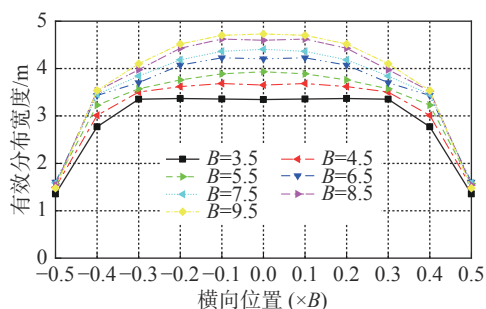


图 9 不同荷载作用位置的有效分布宽度

Fig. 9 Effective distribution width at different load locations

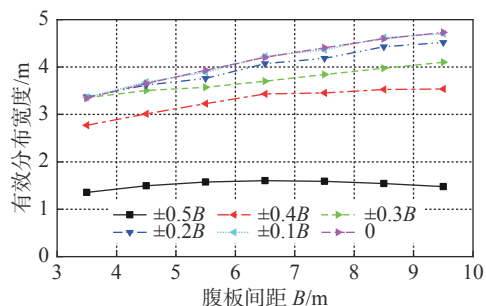


图 10 不同腹板间距的有效分布宽度

Fig. 10 Effective distribution width of different web spacing

由图 10 可知, 当荷载作用在 $0 \sim \pm 0.4B$ 时, 随着腹板中心间距的增大, 有效分布宽度近似以直线增长。当荷载作用在箱室中心处, 腹板中心间距从 3.5 m 增大到 9.5 m 时的有效分布宽度为从 3.35 m 变为 4.73 m, 增加了 41.4%; 荷载作用在 $0.1B \sim 0.4B$ 时对应的有效分布宽度变化量分别为 27.7%、22.3%、34.2%、40.0%。由此可知, 荷载作用位置与腹板中心间距的作用不可忽视。

2.2 悬臂板长度影响

其他因素保持不变, 腹板中心间距 B 为 4.5 m, 当悬臂板长分别为 1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、3.5 m、4.0 m、4.5 m 时, 箱梁的荷载有效分布宽度分析结果如图 11 所示。由图 11 可知, 荷载作用点远离腹板时, 除荷载作用在腹板位置处, 有效分布宽度基本不变。可见, 悬臂长度对有效分布宽度的影响可忽略。

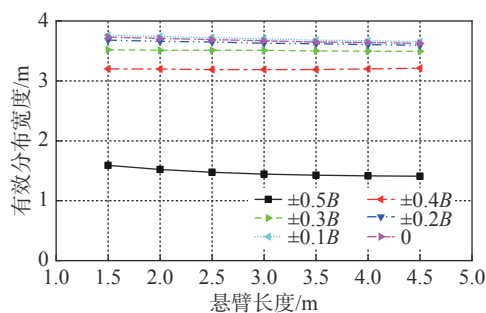


图 11 不同悬臂长度的有效分布宽度

Fig. 11 Effective distribution width of different flange slabs lengths

2.3 顶板厚度影响

其他因素保持不变, 腹板中心间距 B 取为 4.5 m, 当顶板厚度分别为 0.25 m、0.26 m、0.28 m、0.30 m、0.32 m、0.34 m、0.36 m、0.38 m、0.40 m 时, 箱梁的荷载有效分布宽度分析结果如图 12 所示。

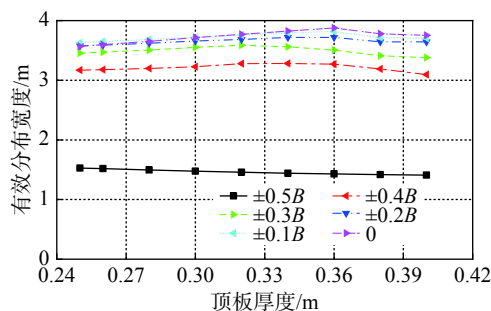


图 12 不同顶板厚度的有效分布宽度

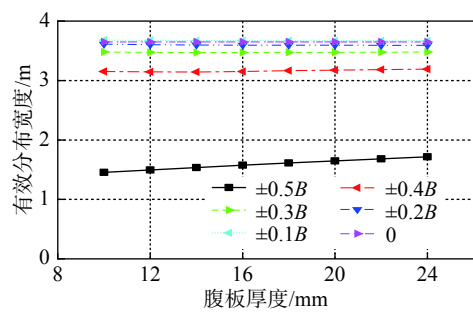
Fig. 12 Effective distribution width of different top slabs thickness

由图 12 可知, 荷载作用位置不同时, 有效分布宽度随顶板厚度有一定变化, 但变化幅度不大, 基本小于 5%。可见, 顶板厚度对有效分布宽度的影响可忽略。

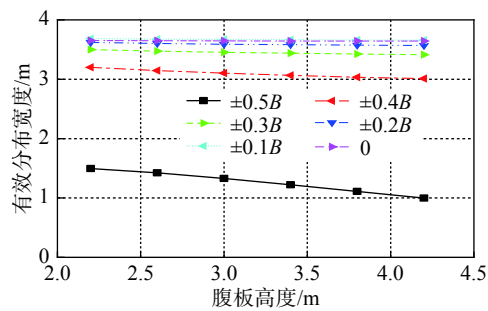
2.4 波形钢腹板尺寸的影响

其他因素保持不变, 腹板中心间距 B 取为 4.5 m, 分别研究了波形钢腹板厚度、高度和类型对有效分布宽度的影响。波形钢腹板厚度分别为 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm、22 mm、24 mm; 腹板高度分别为 2.2 m、2.6 m、3 m、3.4 m、3.8 m、4.2 m; 波形钢腹板类型分别为 1000 型、1200 型、1600 型。箱梁的荷载有效分布宽度分析如图 13 所示。

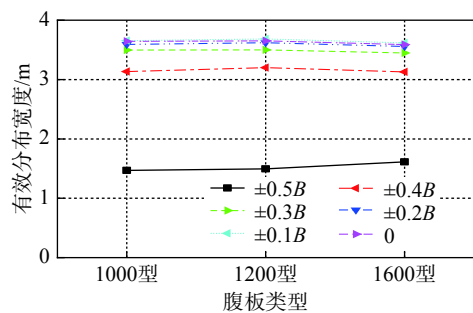
由图 13 可知, 除荷载作用在腹板位置外, 波形钢腹板的厚度、高度和类别对有效分布宽度影响很小, 变化小于 3%。可见, 波形钢腹板的尺寸及类别对箱梁横向受力的影响很小, 可忽略波形钢腹板尺寸对有效分布宽度的影响。



(a) 腹板厚度影响



(b) 腹板高度影响



(c) 腹板类型影响

图 13 不同波形钢腹板尺寸及类型的有效分布宽度

Fig. 13 Effective distribution width of size and categories of different corrugated steel webs

3 有效分布宽度的实用计算方法

3.1 单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度

上述参数分析结果表明, 腹板间距和荷载横向作用位置是对有效分布宽度影响最显著的两个参数, 其他参数影响可以忽略。根据不同腹板间距、不同荷载横向作用位置下空间有限元分析结果, 通过曲面拟合, 得到未考虑铺装厚度和车轮纵向着地尺寸的单箱单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度计算公式:

$$b_1 = 2.54 + 0.18B - 13.35(X/B)^3, \quad 3.5 \leq B \leq 9.5 \quad (2)$$

式中: B 为车轮荷载作用箱室处两相邻腹板中心间距; X 为车轮荷载横向位置距离箱室中心的距离, 式 (2) 用米为单位, 以下公式类同。式 (2) 的相关

系数为 94.4%。

根据桥规考虑桥面铺装厚度和车轮纵向着地尺寸的影响, 可得到单箱单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度实用公式为:

$$b_2 = (a_1 + 2h) + 2.54 + 0.18B - 13.35(X/B)^3, \quad 3.5 \leq B \leq 9.5 \quad (3)$$

式中: a_1 为垂直于板跨的车轮纵向着地尺寸; h 为桥面铺装厚度。

3.2 多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度

根据 1.3 节分析结果, 单箱多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度将式 (2) 乘以 0.9 进行折减, 即:

未考虑铺装厚度和车轮纵向着地尺寸的有效分布宽度计算公式为:

$$b_3 = 2.28 + 0.16B - 12.02(X/B)^3, \quad 3.5 \leq B \leq 6.5 \quad (4)$$

考虑桥面铺装厚度和车轮纵向着地尺寸的有效分布宽度计算公式为:

$$b_4 = (a_1 + 2h) + 2.28 + 0.16B - 12.02(X/B)^3, \quad 3.5 \leq B \leq 6.5 \quad (5)$$

由于荷载作用在腹板处产生的横向应力较小, 多室箱梁在拟合公式时未在考虑边腹板和中腹板加载时有效分布宽度的差异 (见图 8), 偏安全按式 (2)~式 (5) 采用统一宽度值。

3.3 波形钢腹板连续箱梁的有效分布宽度

式 (2)~式 (5) 是根据波形钢腹板简支箱梁分析结果提出的。为研究波形钢腹板连续箱梁的有效分布宽度, 建立了三跨连续箱梁的有限元模型进行了对比分析。连续梁跨径布置为 19.8 m+30.0 m+19.8 m, 箱梁横截面构造尺寸和参数变化与第 2 节简支梁桥箱梁相同。本文仅给出箱室宽度为 3.5 m、6.5 m、9.5 m 时有效分布宽度的计算结果 (如图 14

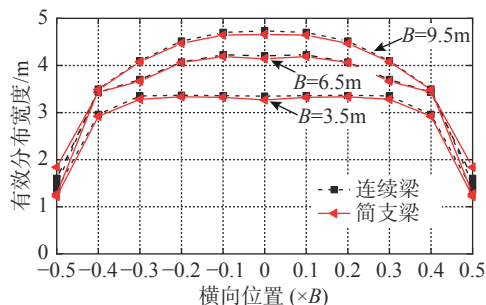


图 14 连续梁与简支梁应力对比

Fig. 14 Comparison of stress in continuous girders and simple supported girders

所示), 结果表明两类箱梁的差异不超过 3%。悬臂板长度、顶板厚度和波形钢腹板尺寸的影响更小, 可忽略。这与已有研究^[28, 39]表明连续梁和简支梁的有效分布宽度相差较小的结论一致。因此, 建议波形钢腹板连续箱梁桥的有效分布宽度可近似按照式 (2)~式 (5) 进行计算。

4 单箱多室箱梁横向受力计算方法比较

为验证本文公式的正确性, 分析如下尺寸的简支单箱三室波形钢腹板箱梁在单点和多点车轮荷载作用下的横向应力: 箱梁跨径为 50 m, 计算跨径为 48 m, 梁高 3 m, 箱梁总宽为 14.45 m, 三个箱室宽度相同, 为 $B=3.65$ m; 顶板厚 0.3 m, 底板厚 0.24 m, 采用 C50 混凝土; 波形钢腹板为 1200 型, 采用 Q235 钢材。

本文按照弹性框架法^[15]计算顶板横向应力, 主要步骤为: 根据横、竖向荷载作用下箱梁计算截面的位移, 求横、竖向弹性支座的刚度, 然后建立平面弹性框架有限元模型 (如图 15 所示), 其中波形钢腹板按横向弯曲刚度等效原则^[28]等效为工字型钢腹板; 计算荷载有效分布宽度 b_4 , 得到顶板车轮荷载 P 对应的单位宽度框架结构的等效荷载 F , 求解等效荷载作用下箱梁框架顶板的横向应力。

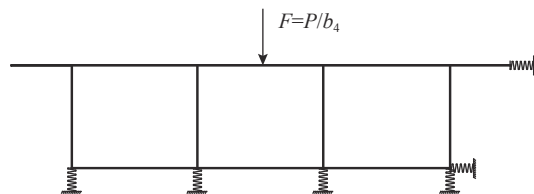


图 15 单箱三室弹性框架模型

Fig. 15 Elastic frame model of a single-box triple-cell girder

4.1 单点车轮荷载作用

在中室和边室横向顶板中线处分别施加单个车轮荷载 $P=120$ kN, 纵向加载位置为箱梁跨中, 计算单箱三室波形钢腹板箱梁在单点车轮荷载作用下的顶板横向应力。首先分别按照桥规^[29]和本文式 (5) 计算有效分布宽度, 并求得单位宽度箱梁对应的等效荷载, 再分别按照弹性框架法计算可得到单箱三室波形钢腹板箱梁顶板的横向应力。单点荷载作用下, 两种方法计算的横向应力结果与有限元分析结果如图 16 所示。

文中有效分布宽度计算的横向应力峰值与空

间有限元模型结果的误差分别为 1.6%、7.1%；而按桥规有效分布宽度计算的横向应力峰值比空间有限元模型结果分别大 35.4%、43.0%。结果表明，基于规范方法计算的横向应力偏于保守，本文提出的有效分布宽度公式计算精度更高。

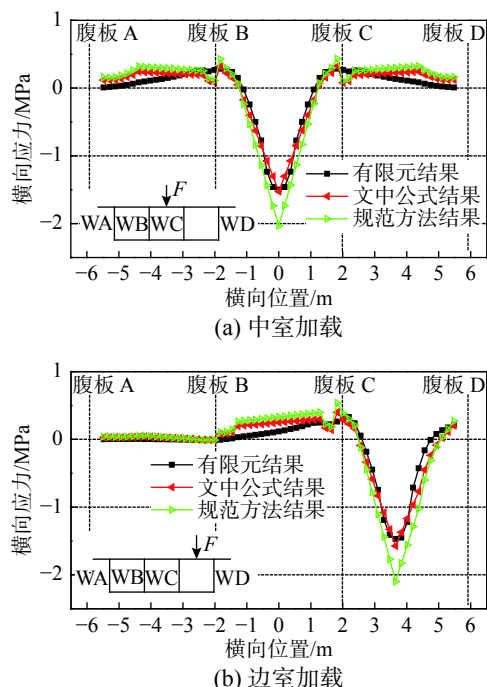


图 16 单点荷载作用下顶板横向应力

Fig. 16 Transverse stress of top slabs under single wheel load

4.2 多点车轮荷载作用

在顶板沿各箱室中线对称作用两个车轮荷载 $P=120$ kN，间距为 1.8 m，分别在中间、右侧箱室和三个箱室施加多点车轮荷载，计算单箱三室波形钢腹板箱梁的顶板横向应力。分别按照桥规和本文式 (5) 计算有效分布宽度和等效荷载，并求得单箱三室波形钢腹板箱梁顶板的横向应力。多点荷载作用下，两种方法计算的横向应力与有限元分析结果如图 17 所示。

如图 17 所示，在横向多点车轮荷载作用下，文中公式、规范方法的横向应力结果与空间有限元模型结果规律基本一致。图 17(a) 仅中间箱室加载时，本文方法和规范方法计算的横向应力峰值分别为 -1.36 MPa、 -1.81 MPa，与空间有限元模型结果的误差分别为 0.2%、33.1%；图 17 右侧箱室加载时，本文方法和规范方法计算的右室横向应力峰值分别为 -1.54 MPa、 -2.05 MPa，与空间有限元模型结果的误差分别为 15.6%、63.4%；图 17(c) 三室同时加载时，本文方法和规范方法计算的中

室横向应力峰值分别为 -0.65 MPa、 -0.87 MPa，与空间有限元模型结果的误差分别为 -9.7% 、 20.8% ；边室横向应力峰值分别为 -1.04 MPa、 -1.39 MPa，误差分别为 -6.3% 、 25.2% 。

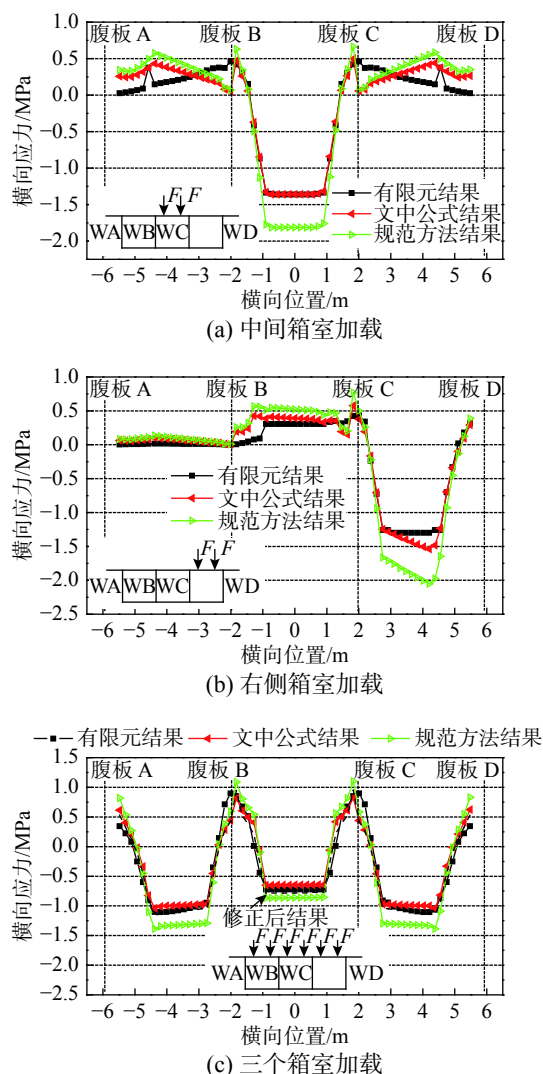


图 17 多点荷载作用下顶板横向应力

Fig. 17 Transverse stress of top slabs under multiple wheel loads

图 16 和图 17(a)、图 17(b) 的结果表明：当单箱多室箱梁的某个箱室受顶板车轮荷载作用时，相邻箱室顶板的横向应力结果与有限元结果存在一定差异，误差在 35% 左右，这是由于目前弹性框架法模型计算横向应力时取相同的有效分布宽度，未考虑不同箱室有效分布宽度的差异。虽然该横向应力较小，约为加载箱室顶板横向应力峰值的 20%，但忽略该误差影响可能使多个箱室加载时的应力结果偏不安全，这也是图 17(c) 中本文方法计算结果偏小的原因。

为保证本文提出方法的计算结果保证准确性

的基础上偏于安全, 建议对荷载作用的相邻箱室顶板横向应力进行折减。通过总结多点荷载作用下不同箱室宽度的单箱三室波形钢腹板相邻的横向应力结果, 提出相邻箱室横向应力折减系数 λ 的计算公式:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.15B}, \quad 3.5 \leq B \leq 6.5 \quad (6)$$

对于上述三个箱室的多点加载情况, 横向应力计算过程如下: 首先, 按照弹性框架法分别计算仅单个箱室(左、中、右箱室)的车轮荷载作用下箱梁顶板的横向应力; 然后, 按式(6)计算得到相邻箱室顶板横向应力的折减系数 λ 为 0.74, 保持荷载作用箱室的顶板横向应力不变, 对荷载作用的相邻箱室的顶板横向应力按式(6)进行折减; 最后, 将修正后的单个箱室车轮荷载作用下的顶板横向应力进行叠加, 得到三个箱室多点加载的计算结果, 见图 17(c) 中“修正后结果”。由图 17(c) 可知, 修正后按本文提出方法求得的横向应力与空间有限元模型结构误差减小为 4% 左右, 且偏于安全。

5 结论

基于试验及有限元方法, 发现了单箱单室与多室波形钢腹板箱梁的横向应力和有效分布宽度规律。通过参数分析, 提出单箱单室与多室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度计算公式, 并以某单箱三室箱梁桥为例采用弹性框架法进行计算, 验证本文公式合理性。具体得到以下结论:

(1) 单箱单室、双室、三室组合箱梁的横向内力分布规律具有一致性, 且单室与多室箱梁有效分布宽度差值不超过 10%, 可按单箱单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度的 0.9 倍计算得到多室箱梁的有效分布宽度。

(2) 荷载横向作用位置、腹板中心间距对波形钢腹板箱梁的有效分布宽度影响较显著: 当腹板中心间距变化时, 有效分布宽度基本上呈线性变化; 当荷载作用位置变化时, 有效分布宽度基本上呈三次曲线变化。波形钢腹板箱梁的悬臂长度、顶板厚度、波形钢腹板构造尺寸对荷载有效分布宽度的影响均小于 5%, 可忽略。基于分析结果, 通过曲面拟合提出了适用于单箱单室波形钢腹板箱梁的有效分布宽度计算公式, 该公式乘以 0.9 可计算单箱多室箱梁的有效分布宽度。

(3) 对于单箱多室波形钢腹板箱梁, 当某个箱室的顶板受荷载作用时, 相邻箱室的有效分布宽度大于加载箱室。目前弹性框架法计算时不考虑该影响, 会使多点荷载作用下多室箱梁顶板横向应力计算结果偏不安全。建议按弹性框架法计算时, 按照文中提出的折减系数公式对相邻箱室横向应力进行修正。与桥规公式相比, 应用本文方法计算单点和多点车轮作用下的横向应力, 结果精度可提高 20%~40%。

(4) 本文并未考虑箱梁中横隔板的影响, 横隔板设置对多室箱梁横向受力的影响有待进一步研究。此外, 为深入理解单箱多室波形钢腹板箱梁的横向受力机理, 有必要对其横向受力分析的理论进行修正和完善。

参考文献:

- [1] Zhang Y H, Lin L X. Shear lag analysis of thin-walled box girders adopting additional deflection as generalized displacement [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(4): 04014005.
- [2] Zhou W B, Jiang L Z, Liu Z J, et al. Closed-form solution to thin-walled box girders considering effects of shear deformation and shear lag [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(9): 2650 – 2656.
- [3] 陈卓异, 李传习, 黄侨, 等. 波形钢腹板组合槽形梁抗扭性能试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(3): 97 – 107.
Chen Zhuoyi, Li Chuanxi, Huang Qiao, et al. Experimental study on torsional property of composite trough girder with corrugated steel webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3): 97 – 107. (in Chinese)
- [4] 董桔灿, 吴庆雄, 陈康明, 等. 波形钢腹板(钢腹杆)-混凝土组合箱抗扭承载力试验与计算[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 220 – 230.
Dong Jucan, Wu Qingxiong, Chen Kangming, et al. Experimental and calculation on torsion bearing capacity of concrete composite box section with corrugated steel webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 220 – 230. (in Chinese)
- [5] 乔朋, 狄谨, 秦凤江. 单箱多室波形钢腹板组合箱梁的腹板剪应力分析[J]. *工程力学*, 2017, 34(7): 97 – 107.
Qiao Peng, Di Jin, Qin Fengjiang. Shear stress in the web of single-box multi-cell composite box girders with corrugated steel webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(7): 97 – 107. (in Chinese)
- [6] 李宏江. 波形钢腹板PC组合箱梁几个特殊问题研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(2): 440 – 454.
Li Hongjiang. Review on special issues in pre-stressed concrete box girders with corrugated steel webs [J].

- Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 440 — 454. (in Chinese)
- [7] Ishac I I, Graves S T R. Approximations for moments in box girders [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(11): 2333 — 2342.
- [8] Wang P X, Yu K X, Di J. Stress analysis of high thin-walled box girder bridge in Chonghe bridge [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 594-597: 1494 — 1497.
- [9] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton R W. Bending strength of steel beam with corrugated webs [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(6): 772 — 782.
- [10] 贾慧娟, 戴航, 张建东. 波形钢腹板组合梁桥横向受力研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(12): 76 — 82.
- Jia Huijuan, Dai Hang, Zhang Jiandong. Research on transverse internal forces in box-girder bridges with corrugated steel webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(12): 76 — 82. (in Chinese)
- [11] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 138 — 175.
- Guo Jinqiong, Fang Zhenzheng, Zheng Zhen. Design theory of box girder [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 138 — 175. (in Chinese)
- [12] 程翔云. 双室箱梁横向内力计算的有效宽度[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 1986, 13(1): 34 — 39.
- Cheng Xiangyun. Effective width in calculation of transverse internal force of box girder with twin-cells [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 1986, 13(1): 34 — 39. (in Chinese)
- [13] Bakht B, Jaeger L G, Chang S T, et al. Analysis of cantilever decks of thin-walled box girder bridges [J]. *Journal of Structure Engineering*, 1992, 118(3): 873 — 874.
- [14] 袁卓亚, 李立峰, 刘清, 等. 波形钢腹板组合箱梁横向内力分析及试验研究[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(11): 73 — 81.
- Yuan Zhuoya, Li Lifeng, Liu Qing, et al. Analysis and experimental study of transverse internal force in composite box-girder with corrugated steel webs [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(11): 73 — 81. (in Chinese)
- [15] 方志, 张志田. 钢筋混凝土箱梁横向受力有效分布宽度的试验研究[J]. *中国公路学报*, 2001, 14(1): 35 — 38.
- Fang Zhi, Zhang Zhitian. Research on the effective distribution width of transverse forces of reinforced concrete box beam [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(1): 35 — 38. (in Chinese)
- [16] 郑振, 郭金琼. 箱形梁桥横向内力计算的计算机方法[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 1995, 23(1): 60 — 66.
- Zheng Zhen, Guo Jinqiong. A computer method of calculating the transversal internal force in box girder bridge [J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science*, 1995, 23(1): 60 — 66. (in Chinese)
- [17] 郑振. 连续刚构弯箱梁桥横向内力计算方法[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(4): 57 — 61.
- Zheng Zhen. Calculation method of the continuous rigid frame curved box girder [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2000, 13(4): 57 — 61. (in Chinese)
- [18] 郭金琼, 郑震. 带伸臂箱梁桥横向内力分析[J]. *土木工程学报*, 1986, 19(3): 59 — 71.
- Guo Jinqiong, Zheng Zhen. Analysis of transverse internal forces in box girder bridges with cantilevers [J]. *Civil Engineering Journal*, 1986, 19(3): 59 — 71. (in Chinese)
- [19] 张同飞. 铁路矮塔斜拉桥单箱多室截面横向受力研究[J]. *铁道工程学报*, 2012, 29(4): 51 — 57.
- Zhang Tongfei. Research on the transverse force of railway low-pylon cable-stayed bridge with section by single box and multi-cell [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2012, 29(4): 51 — 57. (in Chinese)
- [20] 黄浩, 杨丙文, 万水. 波形钢腹板箱梁横向设计分析 [C]//第20届全国结构工程学术会议论文集(第二册). 北京: 《工程力学》杂志社, 2011: 149 — 154.
- Huang Hao, Yang Bingwen, Wan Shui. Analysis on transverse design of box-girder with corrugated steel webs [C]//Proceedings of 20th National Conference on Structural Engineering (volume II). Beijing: Engineering Mechanics Press, 2011: 149 — 154. (in Chinese)
- [21] 黎雅乐, 杨丙文, 张建东. 单箱室波形钢腹板梁桥横向弯矩计算方法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(8): 2802 — 2809.
- Li Yale, Yang Bingwen, Zhang Jiandong. Transverse moment of PC single box-girder bridge with corrugated steel webs [J]. *Journal of Central South University: Natural Sciences*, 2016, 47(8): 2802 — 2809. (in Chinese)
- [22] 贾慧娟. 变截面波形钢腹板PC组合箱梁桥结构性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- Jia Huijuan. Research on structural properties of the variable cross-sectional PC composite box-girder bridge with corrugated steel webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [23] 赵品, 叶见曙. 波形钢腹板单箱多室箱梁横向受力分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(6): 1109 — 1155.
- Zhao Pin, Ye Jianshu. Transverse force study of single box multi-chamber with corrugated steel webs [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(6): 1109 — 1155. (in Chinese)
- [24] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算方法[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(3): 467 — 474.
- Zhao Pin, Rong Xueliang, Ye Jianshu. Calculation method of transverse internal force in bridge deck of box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Tongji University: Natural Sciences*, 2019, 47(3): 467 — 474. (in Chinese)
- [25] 王晖, 项贻强. 梯形多室箱梁横向内力计算方法研究[J].

- 公路交通科技, 2007, 24(1): 83 — 86.
- Wang Hui, Xiang Yiqiang. Research on calculation method of the transverse internal force of trapezoid multi-cellular box girder bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(1): 83 — 86. (in Chinese)
- [26] 苏巨峰. 多箱室连续梁桥横向受力分析研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- Su Jufeng. Research of transverse effect of multi-box continuous girder [D]. Xi'an, Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [27] 赵品, 叶见曙. 轮载下的波形钢腹板箱梁顶板横向内力分析[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(10): 44 — 48+79.
- Zhao Pin, Ye Jianshu. Analysis of transverse internal force in deck of box girder with corrugated steel webs under wheel load [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(10): 44 — 48+79. (in Chinese)
- [28] 任虹昌. 大跨变截面波形钢腹板箱梁横向受力分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- Ren Hongchang. Analysis on transverse internal force of larger span variable cross-section composite box girder with corrugated steel webs [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [29] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018
- JTG 3362—2018, Code for design of highway reinforced concrete and pre-stressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China communication press, 2018. (in Chinese)
- [30] Cheung M S, Chan M Y T. Finite strip evaluation of effective flange width of bridge girders [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1978, 5(2): 174 — 185.
- [31] 蒋志刚, 罗旗帜. 双箱单室箱梁桥顶板横向弯矩分析[J]. *中国公路学报*, 1992, 5(1): 60 — 68.
- Jiang Zhigang, Luo Qizhi. An analysis of transverse moment in twin box girder bridge deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1992, 5(1): 60 — 68. (in Chinese)
- [32] 吴海林, 冯广维. 箱梁横向内力分析及有效宽度[J]. *石家庄铁道学院学报*, 2001, 14(2): 35 — 38.
- Wu Hailin, Feng Guangwei. Transverse internal force analysis of box girder and effective width [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2001, 14(2): 35 — 38. (in Chinese)
- Chinese)
- [33] 方志, 张志田. 钢筋混凝土变截面箱梁横向受力有效分布宽度分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2003, 30(6): 82 — 85.
- Fang Zhi, Zhang Zhitian. The effective distribution width of the transverse internal forces in RC box girders with varied section [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2003, 30(6): 82 — 85. (in Chinese)
- [34] Kurian B, Menon D. Correction of errors in simplified transverse bending analysis of concrete box-girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 10(6): 650 — 657.
- [35] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板组合箱梁横向受力有效分布宽度研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(7): 105 — 110.
- Zhao Pin, Rong Xueliang, Ye Jianshu. Research on the lateral effective width of composite box-girders with corrugated steel webs [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(7): 105 — 110. (in Chinese)
- [36] 彭鲲, 李立峰, 王文. 波形钢腹板组合箱梁的顶板横向受力有效分布宽度试验研究[J]. *中外公路*, 2009, 29(5): 164 — 167.
- Peng Kun, Li Lifeng, Wang Wen. Experimental study on lateral effective width of box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2009, 29(5): 164 — 167. (in Chinese)
- [37] 刘清. 波形钢腹板组合箱梁横向内力理论及试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- Liu Qing. Theoretical and experimental study on the transverse internal force of the composite box girder with corrugated steel webs [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- [38] 方太云. 波形钢腹板箱梁桥面板有效分布宽度及横向弯矩分析 [D]. 南京: 东南大学, 2002.
- Fang Taiyun. Bending moment analysis of the effective distribution width and the transverse of bridge slab of the box girder with corrugated steel webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2002. (in Chinese)
- [39] 程宏伟. 宽幅波形钢腹板组合箱梁桥横向受力研究[J]. 西安: 长安大学, 2015.
- Cheng Hongwei. Research on transverse internal force of wide girder bridge with corrugated steel webs [J]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)