

# 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算方法

赵 品<sup>1,2</sup>, 荣学亮<sup>2</sup>, 叶见曙<sup>1</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 通过静力试验,对单箱双室波形钢腹板缩尺试验梁的桥面板横向受力特点和箱梁框架变形进行分析。结合试验结果和波形钢腹板箱梁的力学特点,提出了一种刚架模型,并将波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力计算结果与传统箱梁框架模型和公路桥规中的简支板与连续板模型的横向内力计算结果进行对比。结果表明:刚架模型和箱梁框架模型的计算结果与试验值较为吻合,误差均在 10% 以内;简支板与连续板模型的计算结果则较为保守,与试验值的误差在 20% 左右;与箱梁框架模型相比,刚架模型比较简单,并且考虑了波形钢腹板线刚度与混凝土桥面板线刚度比值对混凝土桥面板横向内力的影响。

**关键词:** 波形钢腹板箱梁;横向内力;模型试验;桥面板;刚架模型

中图分类号: U448.213

文献标志码: A

## Calculation Method of Transverse Internal Force in Bridge Deck of Box Girder with Corrugated Steel Webs

ZHAO Pin<sup>1,2</sup>, RONG Xueliang<sup>2</sup>, YE Jianshu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** A single-box double-cell test girder with corrugated steel webs was made to study the transverse force and girder frame deformation of bridge deck. In order to calculate the transverse internal force, a rigid frame model was put forward with a combination of test results and mechanical characteristics of corrugated steel box girder. Then, a comparative analysis was made among the method described above and girder frame model and board model of highway bridges. Furthermore, an outcome based on the comparison of the three models and test results was presented. The results of rigid frame model and girder frame model are close to test results, the differences are less than 10%. But board model

results are more conservative, the differences are about 20%. Compared to the rigid frame model, the girder frame model is more complicated, and the effects of relative ratios of web line stiffness to deck line stiffness on bridge deck transversal force are considered.

**Key words:** box girder with corrugated steel webs; transverse internal force; model test; bridge deck; rigid frame model

对于混凝土梁桥的桥面板内力计算,工程上一般采用简支板与连续板模型,不计入腹板等板件对桥面板内力的影响<sup>[1]</sup>。波形钢腹板箱梁为钢-混组合结构,波形钢腹板代替了传统的混凝土腹板,腹板材质、形状改变的同时厚度也降低很多,钢腹板对桥面板的支撑弱于混凝土腹板对桥面板的支撑。因此,波形钢腹板组合箱梁桥面板的约束及箱梁闭合框架的畸变、扭转与混凝土箱梁相比均有所不同,波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力和混凝土箱梁桥面板的横向内力相比有所变化<sup>[2]</sup>。

国内外学者针对箱梁的横向内力开展了大量研究。文献[3-4]中分别针对长悬臂等厚度和带边梁变厚度的混凝土箱梁行车道板提出了相应的横向弯矩分布表达式。文献[5-6]中对弹塑性状态下的钢筋混凝土箱梁的横向受力有效分布宽度进行研究,得出了桥面板的横向内力及横向内力有效分布宽度计算公式。文献[7]中认为箱梁的桥面板符合正交异性板的受力模式,将比拟正交异性板法运用于箱梁的桥面板有效分布宽度计算。文献[8]中以平面框架分析的基本计算模型为基础,采用箱梁横向框架效应有限单元法计算了箱梁的横向内力。对于波形钢腹板箱梁的横向内力也有一定研究。文献[9]中以弹性薄板理论为基础,结合波形钢腹板箱梁的结构特点,在

收稿日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51508348);河北省自然科学基金(E2017210191, E2017210183);河北省教育厅项目(QN2015134)

第一作者: 赵 品(1982—),女,讲师,工学博士,主要研究方向为组合结构桥梁。E-mail: zhaopin1115@126.com

通信作者: 荣学亮(1982—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为组合桥梁结构分析。E-mail: rongyihit@126.com

理论分析和模型试验的基础上对波形钢腹板箱梁的横向内力进行了分析, 得出了波形钢腹板预应力组合箱梁的横向内力。文献[10]中基于框架分析法的基本原理, 结合波形钢腹板箱梁的结构特点和力学特性, 建立了适用于波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的计算模型, 并通过模型试验及有限元分析获得了组合箱梁横向内力。由上述可知, 对于混凝土箱梁的横向内力计算已有简化方法及计算公式, 但是对于材质和结构特性都发生变化的波形钢腹板箱梁的横向内力计算, 并没有一种简便的计算方法可供采用。

对波形钢腹板箱梁桥面板的横向受力特性进行了试验研究, 在箱梁框架理论的基础上提出了刚架模型, 并结合试验和理论分析结果给出波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的计算公式, 为波形钢腹板箱

梁桥面板的横向内力分析提供了简便方法。

## 1 模型试验

依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[2]</sup>, 参考青海三道河桥, 按一定相似比设计并制作了试验梁, 对其进行了弹性阶段下的荷载试验。

### 1.1 模型概况

试验梁为波形钢腹板单箱双室箱梁, 总长 3 500 mm, 计算跨径 3 300 mm。波形钢腹板箱梁混凝土顶板的宽度为 2 000 mm, 厚度为 80 mm; 混凝土底板的宽度为 1 400 mm, 厚度为 70 mm。梁体一共设置了两道端混凝土横隔板, 端混凝土横隔板厚为 200 mm。具体尺寸如图 1 和图 2 所示。

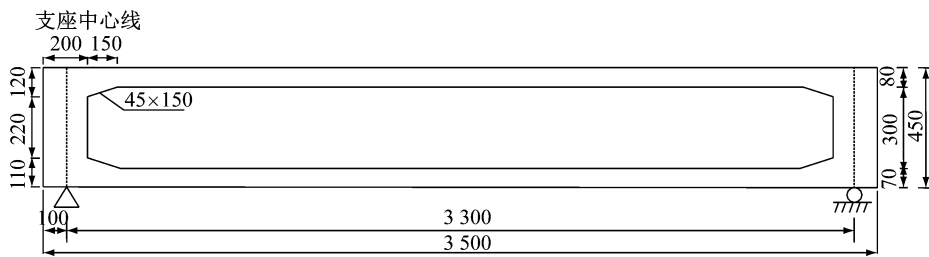


图 1 试验梁纵向布置 (单位:mm)

Fig.1 Elevation of test beam (Unit:mm)

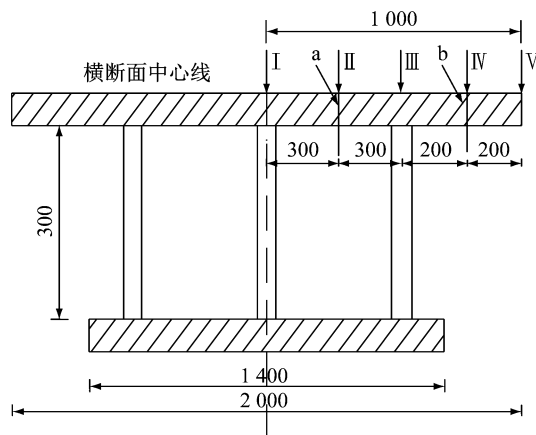


图 2 试验梁的横断面尺寸及加载位置 (单位:mm)

Fig.2 Cross section and loading position of test beam (unit:mm)

混凝土实测立方体抗压强度为 28.3 MPa, 弹性模量为  $2.8 \times 10^4$  MPa。波形钢腹板采用 Q235C 钢板, 钢板厚 2 mm, 波高 24 mm, 试验屈服强度为 194.5 MPa。

### 1.2 加载布置

本文试验为静载作用下的非破坏性试验。利用

反力架和油压千斤顶对试验梁进行加载; 采用与反力架接触的压力传感器控制试验加载吨位, 压力传感器在使用前进行标定。静载试验前首先进行预加载, 以消除加载系统各部分的间隙, 检验加载系统及观测仪表工作是否正常等, 然后进行正常加载<sup>[11]</sup>。加载设备如图 3 所示。

为了研究波形钢腹板单箱双室箱梁桥面板在车轮荷载作用下的横向内力分布, 将桥面板分为箱梁腹板间的桥面板及悬臂板。针对板的荷载有效分布宽度规定中的一个车轮荷载、两个车轮荷载, 相应的试验加载工况设置为单点加载和双点加载, 如图 3 所示。根据实际车辆的车轮着地尺寸 600 mm×200 mm, 将千斤顶作用下的条形钢板平面尺寸定为 200 mm×200 mm, 厚度定为 10 mm。

对应公路桥规中行车道板的加载位置, 横向加载工况有中腹板处加载(工况 I)、a-a 截面加载即边腹板和中腹板间的桥面板跨中位置加载(工况 II)、边腹板处加载(工况 III)、b-b 截面加载即悬臂长度的 1/2 位置加载(工况 IV)、悬臂翼缘端部加载(工况 V), 如图 2 所示。纵向加载位置为跨中单点加载和



a 单点加载



b 双点加载

图3 加载试验装置

Fig.3 Experimental setup under static load

双点加载(0.5 m 分配梁加载). 加载方式为分级加载,加载最大荷载根据加载工况的不同而异,加载等级分为5级或4级,前三种工况的单级加载量为5 kN,后两种工况的单级加载量为2 kN;最大加载量分别为40、25、20、10、8 kN.

考虑到不同工况的最大弹性加载量不同,以各种工况对应的单级加载量作为预加载量,在每级荷载施加时都必须在构件的变形以及测力计的读数稳定后才开始读数,读取试验梁在不同工况不同荷载等级作用下混凝土顶板、底板的相应位移值和应变值,同时观测加载过程中试验梁的整体变化情况<sup>[12-13]</sup>.

### 1.3 测试布置

在试验梁跨中截面和支点截面的混凝土顶板、混凝土底板、波形钢腹板上布设千分表,如图4a所示.为测得荷载作用下箱梁顶板的横向内力分布曲线,在横向加载位置、腹板处的顶板位置等横向位置均布设了应变片,在底板的相应位置也布设了应变

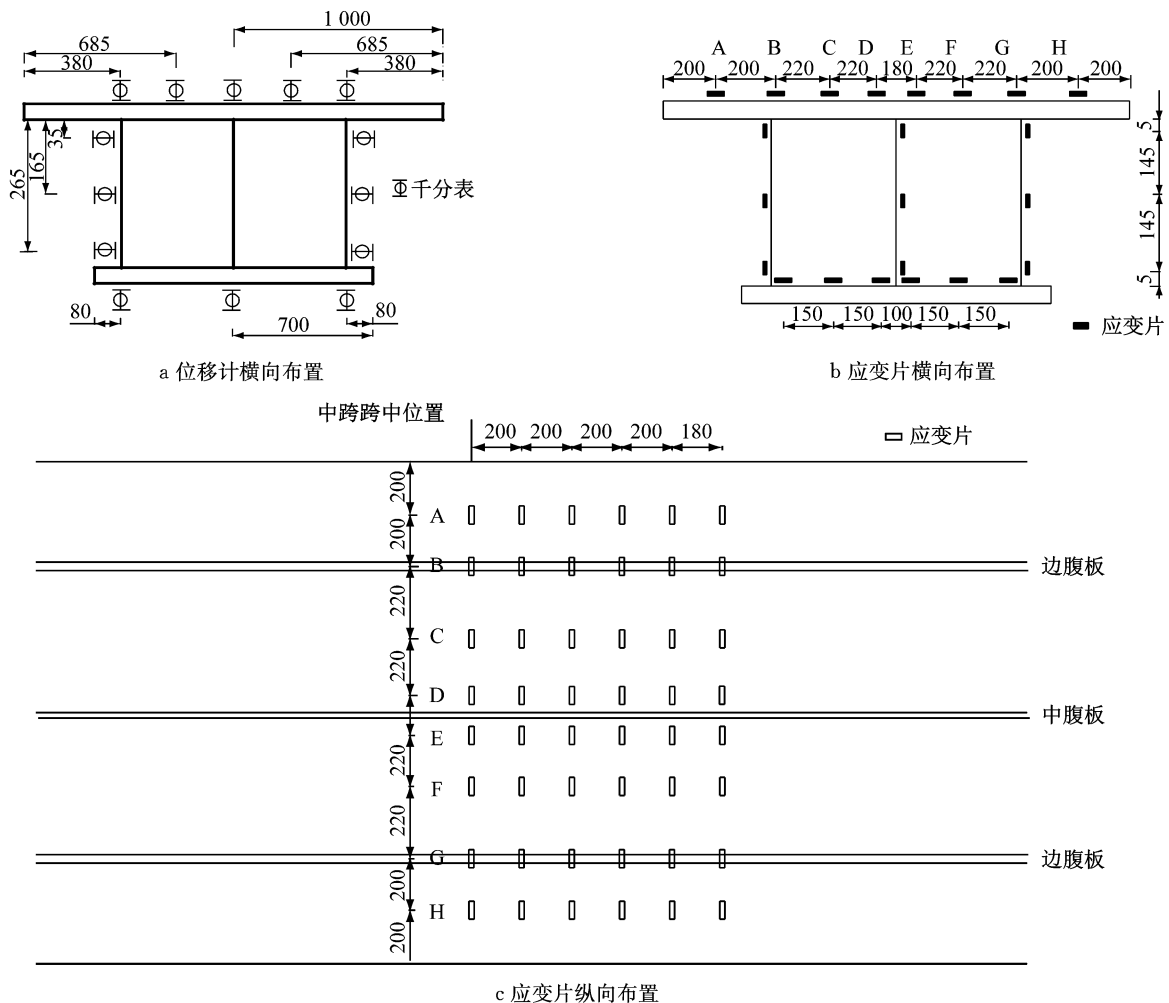


图4 位移计和应变片布置 (单位:mm)

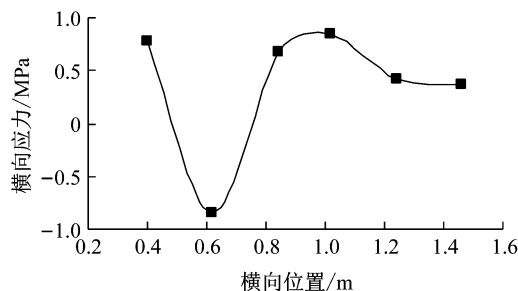
Fig.4 Layout of displacement meters and strain gauges (unit:mm)

片,如图 4b 所示. 根据有限元分析可知,不同荷载工况下顶板的有效分布宽度最大值为 2.0 m,由跨中向支座在 1.0 m 范围内沿纵向每隔 20 cm 布设应变片,如图 4c 所示.

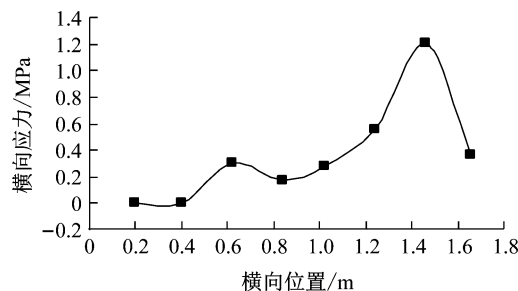
2 试验结果分析

2.1 箱梁顶板横向应力

试验时考虑到结构的对称性,在结构的纵向取半边进行测试,对于另外半边结构在数据分析时按



a 工况 II



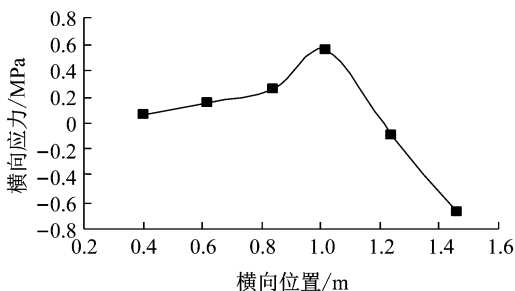
c 工况 IV

对称的原则处理.

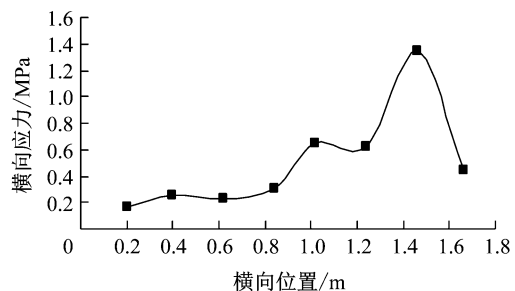
通过试验梁的弹性阶段试验,得出了不同工况下桥面板横向内力分布规律. 图 5 为四种工况下横向应力测试结果.

选取试验梁纵向跨中单点加载时跨中断面的横向应变,再将其转化为应力. 腹板间的两种加载工况即工况 II、工况 III,仅测试了腹板间的应变. 翼缘板上的两种加载工况即工况 IV、工况 V 则包括翼缘上的测点. 横坐标以沿顶板从左向右为正.

对于横向应力沿顶板横向板跨的变化情况,腹



b 工况 III



d 工况 V

图 5 单点加载时跨中断面的桥面板横向应力分布

Fig.5 Transverse stress distribution of bridge deck of midspan section under single point load

板间的两种加载工况下加载位置处的横向应力绝对值最大,翼缘部分加载时翼缘板根部的横向应力绝对值最大. 不同加载工况下腹板处的横向应力绝对值除小于荷载作用位置的应力外,均大于横向板跨其他位置的相应值.

以荷载作用于腹板间的桥面板(工况 II)为例,将试验值与框架分析法计算值、有限元分析结果进行对比,如表 1 所示,其他工况结果由于篇幅有限,本文中做了省略.

框架分析法计算值是指在箱梁框架模型的基础上结合波形钢腹板箱梁的结构特点和力学特性所建立的适用于桥面板横向内力的计算模型分析结果. 该计算模型中考虑了波形钢腹板箱梁的结构特点和力学特性,表现为以下几点:① 波形钢腹板畸变翘曲刚度低,只是在与顶、底板相交部位即 20%腹板高

表 1 工况 II 下桥面板横向应力

Tab.1 Transverse stress of bridge deck under loading condition II

项目	各测点横向应力						MPa
	B	C	D	E	F	G	
框架分析法计算值	0.83	-0.90	0.75	1.00	0.39	0.35	
有限元分析结果	0.73	-0.75	0.61	0.93	0.37	0.32	
试验值	0.78	-0.84	0.68	0.85	0.42	0.36	
试验值与有限元分析结果之比	1.07	1.12	1.12	0.91	1.14	1.13	
试验值与框架分析法计算值之比	0.94	0.93	0.91	0.85	1.08	1.03	

度上分布畸变翘曲应力,结合此特性推导了支撑释放后反对称荷载作用下箱梁的畸变剪力差;②对于波形钢腹板横向抗弯惯矩,考虑了波形钢腹板的构造特点,根据不同于普通混凝土板的计算公式,亦推导了支撑释放后反对称作用下的框架相对侧移公

式.在框架分析法中考虑上述公式,可得出荷载下波形钢腹板箱梁断面的横向内力<sup>[10]</sup>.

有限元分析是指采用有限元软件 Ansys12.0 建立的用于波形钢腹板箱梁桥面板横向应力计算的有限元模型.对于波形钢腹板组合箱梁,由于构件受力特性及厚度的不同,决定采用两种不同类型的单元来模拟箱梁结构,即三维实体单元和板壳单元.试验梁顶板、底板及端横隔板均为钢筋混凝土结构,采用实体单元 Solid95 模拟;腹板由波形钢腹板组成,厚度仅 2 mm,采用弹性板壳单元 Shell63 模拟;钢腹板与顶板、底板的连接采用节点耦合法,故单元的划分应保证钢腹板与顶板、底板之间,端横隔板与顶板、底板之间均有公共节点.

由表 1 可知,试验值与有限元分析结果、框架分析法计算值的误差在 10% 左右,三者吻合较好,可进一步证实如图 5 所示的桥面板横向应力分布的正确性.

## 2.2 箱梁框架变形

通常箱梁的外力可综合表达为偏心荷载来进行结构分析,箱梁在偏心荷载作用下,将产生纵向弯曲、扭转、畸变及横向挠曲四种基本变形<sup>[14]</sup>.一般情况下,箱梁框架在荷载下的横向挠曲变形如图 6 所示.图 6 中,实线为变形前的箱梁框架,虚线为变形后的箱梁框架.

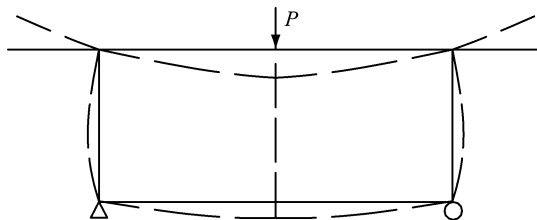


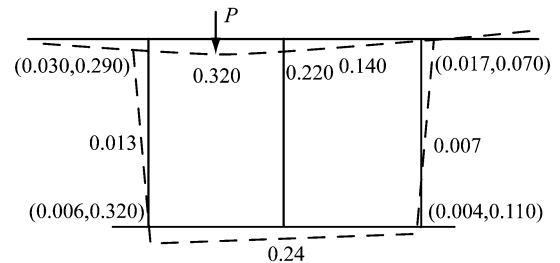
图 6 荷载作用下的框架变形

Fig.6 Frame deformation under load

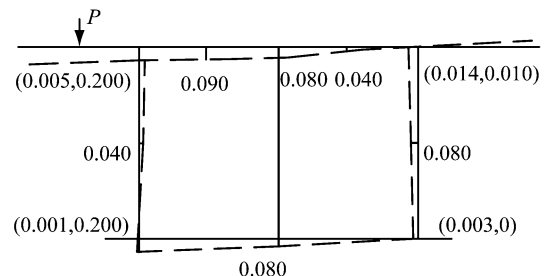
为了解波形钢腹板箱梁在横向不同位置加载作用下的变形特征,在试验梁跨中断面的顶板、底板及边腹板的相应位置架设了挠度计.根据已有试验数据绘出了试验梁纵向跨中断面在各种荷载下的横向变形图,以工况 II、工况 IV 作用下的箱梁框架变形为例,如图 7 所示.

由于试验条件的限制,仅测得两侧边腹板的侧向变形.图 7 中,单个数字为箱梁板件竖向或横向的位移值,对于带括号的两个数字,前者为横向位移值,后者为竖向位移值.顶板、腹板及底板的变形均随着横向加载位置的不同而变化,箱梁框架整体变形亦随之改变.

由试验梁的分析结果可知:对于横向不同位置荷载作用下的框架变形图,荷载作用位置处的顶板竖向位移最大;一般底板横向位移为顶板横向位移的 1/5~1/3,可见荷载作用下的横向位移基本由顶板承担,底板横向位移很小.



a 工况 II



b 工况 IV

图 7 试验梁跨中截面的实测位移 (单位:mm)

Fig.7 Actual displacement of midspan section of test beam (unit:mm)

对于顶板作用荷载并且腹板底部有约束的框架结构,底板的横向位移很小,相对于顶板的横向位移可忽略不计.

## 3 桥面板横向内力分析计算

### 3.1 简化模型的分析

上述试验方法得出了波形钢腹板箱梁的内力分布及变形特征,本文意在试验结论的基础上即在轮载下波形钢腹板箱梁横向受力特点确定的基础上,探讨适用于波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的简化计算模型,以便广泛应用于实际工程.

框架分析法是将箱梁空间三维问题转化为平面框架问题的一种求解方法.对于箱梁的横向内力分析,较之其他方法而言,该方法能考虑箱梁的整体框架效应对桥面板横向内力的影响,而且该方法既能考虑腹板及底板对桥面板横向挠曲的影响,又能反映构件纵向挠曲与畸变等因素对桥面板横向内力分布的影响<sup>[14]</sup>.已有研究曾将框架分析法应用于波形钢腹板箱梁的横向内力计算,并证实了该方法的正确性.然而,解析解在实际工程应用中比较复杂,因

此试图在考虑箱梁框架效应的基础上提出比较简单的计算模型,用以波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力计算<sup>[10]</sup>.

对于波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力分析提出了三种计算模型,分别是箱梁框架模型、刚架模型和桥规中的简支板与连续板模型,如图 8 所示.

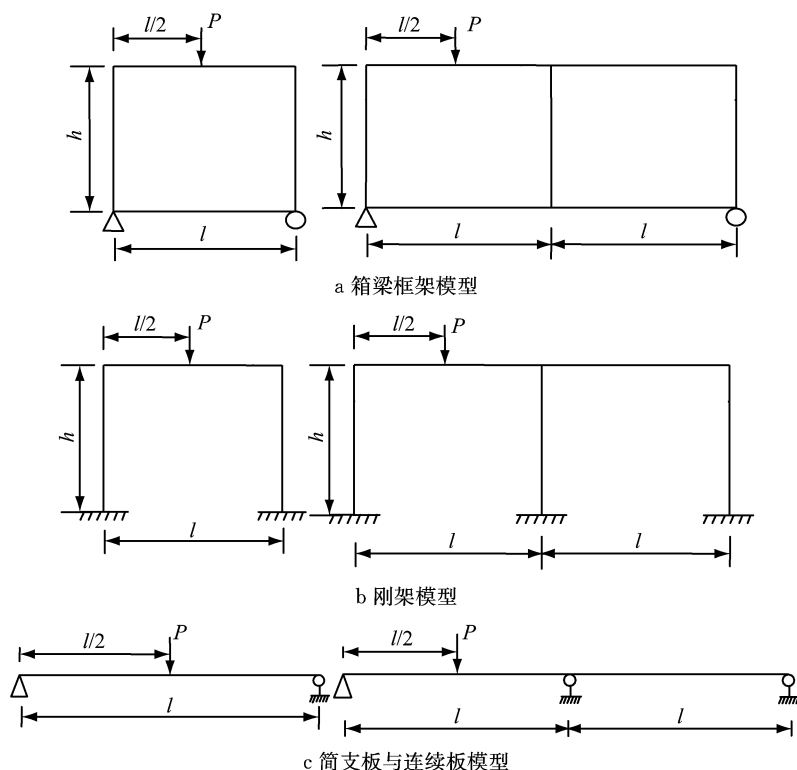


图 8 桥面板横向内力计算模型

Fig. 8 Computational model of transverse internal force of bridge deck

箱梁框架是指由梁和柱以刚接或铰接构成承重体系的结构,可作为竖向承重结构,并同时承受水平荷载.箱梁框架结构不但具有框架结构的力学基础,还具有箱梁的力学特性.刚架是由直杆(横梁和立柱)组成并具有刚节点的结构.通常在力的作用下横梁产生弯曲变形,立柱产生弯曲和拉压的组合变形,所以刚架的变形主要由拉压和弯曲组成,内力主要包括轴力、剪力和弯矩.刚架由顶板和腹板组成,不包含底板.由于腹板底部固结,刚架的底部横向位移为零,根据上述箱梁框架变形的结论可知荷载作用下的箱梁框架变形与刚架变形近似.简支板与连续板作为承重结构是以前其抗弯能力来承受荷载的<sup>[15-20]</sup>.将桥面板从箱梁结构中取出来单独作为一块板,并且将腹板对桥面板的支撑简化为支座支撑.

鉴于上述三种结构体系各自的力学特性,分别采用三种受力模型进行分析,以试验梁为对象研究桥面板横向内力的简化计算模型及方法.箱梁框架模型即框架分析法的计算步骤参照文献<sup>[21]</sup>.刚架模型和简支板与连续板模型的具体步骤如下所示:将有效分布宽度内单位宽板条上的荷载施加在如图

8b、c 所示的模型上,采用结构力学求解方法即可得出结果.

将试验梁简化为三种模型进行计算,同时将文献<sup>[9]</sup>中的单箱单室试验梁简化为相应模型.表 2 给出了两类试验梁的具体参数,其中  $h$  为箱梁顶板与底板的中心线间距, $l$  为单室边腹板与中腹板的中心线间距,荷载  $P$  分别采用波形钢腹板单箱单室试验梁的工况 II 下加载值、波形钢腹板单箱双室试验梁的工况 II 下加载值. $h$ 、 $l$  及  $P$  的作用位置均在图 8 中做了标示.

表 2 试验梁参数

Tab. 2 Parameters of test girder			
箱梁种类	$h/\text{m}$	$l/\text{m}$	$P/\text{kN}$
单箱单室	0.315	0.508	5.0
单箱双室	0.375	1.200	25.0

表 3 为如图 8 所示三种模型及试验实测的顶板横向内力(此处指的是弯矩值).其中,试验值是指试验梁荷载作用位置处的顶板横向应力所转化成的横向内力,即图 5a 中工况 II 的横向应力绝对值最大值转化为相应的横向内力值.

由表 3 可知,刚架模型和箱梁框架模型计算结

果与试验值比较接近,前两者与后者的差值均在10%以内.简支板与连续板模型的计算结果与试验值的误差在20%左右.由此可见,箱梁框架模型和刚架模型的计算结果较简支板与连续板模型而言更接近试验值.

表3 荷载作用位置的桥面板横向内力  
Tab.3 Transverse internal force of bridge deck at loading location

箱梁种类	各模型计算值			试验值
	箱梁框架模型	刚架模型	简支板与连续板模型	
单箱单室	-0.82	-0.84	-0.98	-0.81
单箱双室	-1.60	-1.63	-2.02	-1.49

由前述试验结果中的箱梁框架变形特征可知,荷载作用下的箱梁框架与刚架变形近似.刚架模型同箱梁框架模型一样,也可以考虑波形钢腹板线刚度与混凝土顶板线刚度比值对混凝土顶板横向内力的影响.

通过上述分析可知,刚架模型具备框架分析法中箱梁框架模型的基本优点.为了适用于实际工程,可将刚架模型代替计算较为繁琐的箱梁框架模型(框架分析法)来计算箱梁桥面板的横向内力.在车轮荷载作用下基于刚架模型的波形钢腹板箱梁桥面板横向内力简化计算公式建议为

$$M_b = M_G \quad (1)$$

式中: $M_b$ 为波形钢腹板箱梁的桥面板横向内力; $M_G$ 为波形钢腹板箱梁采用刚架模型计算的桥面板横向内力.

将刚架模型计算结果与我国桥规、日本规范和美国规范做对比<sup>[21]</sup>,如表4所示.

表4 公式值与规范值比较  
Tab.4 Comparison of formula results and specification values

箱梁种类	本文计算值	JTG-D62 2004	日本道路桥示方书	AASHTO
单箱单室	-0.84	-0.90	-1.03	-0.85
单箱双室	-1.63	-1.71	-1.82	-1.66

表4列出了采用式(1)计算所得的横向内力以及采用各国规范所得的结果.美国公路桥梁设计规范(AASHTO)的计算结果约为我国桥梁规范的90%左右,日本道路桥示方书的计算结果较前两者大;式(1)计算值均小于规范值.本文计算值考虑了刚架变形对桥面板的影响;我国桥规、日本规范和美国规范中的桥面板仅为简支,未考虑腹板对桥面板的影响,从力学角度来讲是偏安全的,但是实际工程验算最好采用本文公式.

### 3.2 波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力计算

以上桥面板横向内力分析是针对等截面梁而言,对于实际工程中的变截面梁,跨中与支座处截面的腹板线刚度存在很大差异,此种差异会形成对桥面板的不同约束程度.箱梁桥面板的横向内力与腹板的约束程度有关,所以桥面板的横向内力随着对桥面板约束的不同而变化.

从跨中到支座,随着腹板高度的增加,腹板的线刚度减小,腹板与顶板的线刚度比减小即为对顶板的支撑减弱,则支座附近桥面板的受力状态为最不利状态,对于变截面箱梁可取支座附近单位长度的桥面板横向受力状态作为全桥桥面板横向受力的标准,而非跨中截面的相应值.对于等截面箱梁,跨中与支座处的腹板线刚度相等,可选取沿梁跨任何位置单位长度的桥面板横向受力状态.

基于上述对于波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算时选取桥跨位置的讨论可得出以下结论:

车轮荷载作用下的桥面板横向内力可按式(1)计算.

## 4 结论

(1) 为研究波形钢腹板箱梁桥面板的横向受力特性,对波形钢腹板单箱双室试验梁的弹性阶段进行试验分析,得出了横向不同加载位置下的横向应力变化规律及箱梁框架变形特征.

(2) 通过三种计算模型的对比分析,提出了采用刚架模型可以代替框架分析法来计算波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力.刚架模型作为一种结构比较简单并且能体现波形钢腹板箱梁桥面板横向受力特征的计算模型,考虑了波形钢腹板线刚度与混凝土顶板线刚度比值对混凝土顶板横向内力的影响.该模型计算结果与箱梁框架模型结果及试验结果吻合较好,并且小于我国桥规、日本规范和美国规范值.

(3) 对于等截面箱梁,可选取沿梁跨任何位置单位长度的桥面板横向受力状态;对于变截面箱梁,可取支座附近(波形钢腹板高度较大处)单位长度的桥面板横向受力状态作为全桥桥面板横向受力的标准.可采用基于刚架模型的波形钢腹板箱梁桥面板横向内力简化计算公式  $M_b = M_G$  进行桥面板横向弯矩计算.

### 参考文献:

- [1] 黄侨.桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M].北京:人民交通

- 出版社,2004.
- HUANG Qiao. Design principle of steel-concrete composite bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press,2004.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] ELGAALY M, SESHADRI A, HAMILTON R. Bending strength of steel beams with corrugated webs[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 772.
- [4] BAKHT B. Simplified analysis of edge stiffened cantilever slabs [J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(3): 535.
- [5] 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.
- FANG Zhi, ZHANG Zhitian. Effective distribution width of the transverse internal force in R-C box girders with varied section [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(6): 82.
- [6] 方志,郑辉,刘双阳. 基于塑性分析的钢筋混凝土箱梁悬臂板横向受力有效分布宽度[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 35.
- FANG Zhi, ZHENG Hui, LIU Shuangyang. Plastic analysis of the lateral effective width of cantilever slabs of reinforced concrete box-girders[J]. Journal of China Civil Engineering, 2012, 45(3): 35.
- [7] 徐利平,胡世德,杜国华. G-M法在箱梁桥面板计算中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2000, 28(3): 353.
- XU Liping, HU Shide, DU Guohua. Application of G-M method in analysing the deck of box girders[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2000, 28(3): 353.
- [8] 钟新谷,舒小娟,张昊宇. 预应力混凝土箱梁横向框架效应有限元分析[J]. 计算力学学报, 2013, 30(4): 549.
- ZHONG Xingu, SHU Xiaojuan, ZHANG Haoyu. Finite element analysis on transversal frame-effect of prestressed concrete box-girder bridge [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(4): 549.
- [9] 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.
- [10] 赵品,叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算的框架分析法[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2012, 42(5): 940.
- ZHAO Pin, YE Jianshu. Frame analysis method of analyzing transverse internal force of the deck of box girders with corrugated steel webs [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(5): 940.
- [11] 李淑琴,王文伟,万水,等. 预应力混凝土组合梁界面粘结的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 141.
- LI Shuqin, WANG Wenwei, WAN Shui, et al. Experimental study bond behavior of interface between old and new concrete composite beam under prestressing forces [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 141.
- [12] 聂建国,朱力,唐亮. 波形钢腹板的抗剪强度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 97.
- NIE Jianguo, ZHU Li, TANG Liang. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 97.
- [13] 李立峰,侯立超,孙君翠. 波形钢腹板抗剪性能的研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2015, 42(11): 56.
- LI Lifeng, HOU Lichao, SUN Juncui. Research on shear mechanical property of corrugated steel webs[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 56.
- [14] KRISTEK V. Theory of box girders [M]. New York: Wiley, 1979.
- [15] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- NIE Jianguo. Steel concrete composite bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [16] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- LIU Yuqing. Composite structure bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [17] ELGAALY M, SESHADRI A. Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading [J]. Journal of the Structural Division: ASCE, 1997, 122(4): 783.
- [18] 徐向锋,张峰,韦成龙. 预应力混凝土箱梁开裂后的刚度损伤评估[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 95.
- XU Xiangfeng, ZHANG Feng, WEI Chenglong. Stiffness damage assessment of prestressed concrete box-girder after cracking[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 95.
- [19] 李立峰,王芳,刘志才. 体外预应力波形钢腹板组合箱梁徐变性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2008, 35(5): 1.
- LI Lifeng, WANG Fang, LIU Zhicai. Study on the creep behavior of externally prestressed composite beam with corrugated steel webs [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(5): 1.
- [20] 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.
- GUO Jinqiong, FANG Zhenzheng, ZHENG Zhen. Design theory of box girder [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [21] 程翔云. 梁桥理论与计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1986.
- CHENG Xiangyun. Theory and calculation of the beam bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1986.