

文章编号:1671-8879(2017)01-0085-08

单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁 荷载横向分布

马磊^{1,2}, 章勇³, 万水⁴, 蒋正文⁴

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 郑州 河南 450045; 2. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096; 3. 南昌市政公用投资控股有限责任公司, 江西 南昌 330077; 4. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为提出简单可行的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁内力计算方法, 掌握其荷载横向分布规律, 为该类桥梁的设计工作提供参考, 将单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁等效为平板梁模型, 用刚性横梁法推导其荷载横向分布系数的计算公式; 通过 1 片单箱双室波形钢腹板 PC 组合箱梁的静载试验研究, 验证刚性横梁法在此类桥梁荷载横向分布系数计算中的适用性; 通过与 1 片单箱双室斜波形钢腹板 PC 组合箱梁及 1 片单箱双室 PC 箱梁的静载试验结果进行对比分析, 探讨腹板倾角及材质变化对单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁荷载横向分布的影响。研究表明: 刚性横梁法计算所得单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的剪力横向分布偏于保守, 而计算所得弯矩的横向分布精度高; 与单箱多室 PC 箱梁相比, 单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的荷载横向分布更不均匀; 边腹板倾斜与否, 仅影响弯矩横向分布, 对挠度和支反力横向分布的影响可忽略不计; 各模型梁的中支反力横向分布在端部不均匀, 边梁支反力横向分布沿桥梁全长基本相同, 边梁几乎分担了所有荷载。

关键词:桥梁工程; 单箱多室; 波形钢腹板; 刚性横梁法; 试验; 荷载横向分布

中图分类号: U448.213 **文献标志码:** A

Load transverse distribution of single box multi-cell PC composite girder with corrugated steel webs

MA Lei^{1,2}, ZHANG Yong³, WAN Shui⁴, JIANG Zheng-wen⁴

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Nanchang Municipal Public Group, Nanchang 330077, Jiangxi, China; 4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to get a simple and feasible method for internal force calculation, grasp the load transverse distribution law and provide reference for the design of single box multi-cell girder

收稿日期: 2016-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268013); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(201410); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题项目(CPCSME2015-06); 南昌市政公用投资控股有限责任公司科研项目(8521001313)

作者简介: 马磊(1982-), 女, 河南荥阳人, 华北水利水电大学讲师, 东南大学工学博士, E-mail: malei20010520@163.com。

with corrugated steel webs, a formula for calculating load transverse distribution coefficient of single box multi-cell PC composite girder with corrugated steel webs was deduced with rigid beam method on the basis of equivalent plane plate-girder model, and static load test for a single box double-cell girder with corrugated steel webs was conducted to verify the applicability of the rigid beam method. Impacts of inclination and material of web on transverse load distribution were discussed by static load tests for a single box double-cell girder with inclined corrugated steel webs and a single box double-cell PC girder. The results show that the rigid beam method is prudent for shear transverse distribution calculation, and it has the highest precision for calculation of moment transverse distribution. Load transverse distribution of single box multi-cell PC composite girder with corrugated steel webs is more uneven than that of PC box girder. Inclination of side web has effect on moment transverse distribution, but the effect on deflection and shear transverse distribution can be ignored. Transverse distribution of the middle-branch reaction force is more uneven at the ends. Transverse distribution of the side-beam reaction force is basically the same along the whole length of the bridge. The side girder shares almost all loads. 2 tabs, 9 figs, 22 refs.

Key words: bridge engineering; single box multi-cell; corrugated steel web; rigid beam method; test; load transverse distribution

0 引言

单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁桥桥面较宽,国外设计规范建议通过三维空间模型的节段分析进行内力计算^[1]。但建立三维模型较为繁琐,对计算机的性能要求较高,而利用荷载横向分布的方法将空间结构简化为平面结构,简单直观,便于设计人员应用。

目前,国内外学者在箱梁的荷载横向分布计算方面取得了一些研究成果。叶益军提出了适用于多室宽箱混凝土梁内力计算的修正刚接梁法^[2];Tarhini 等通过变化桥梁跨度、主梁间距等参数,回归得到内梁的横向分布系数计算公式^[3-6];孙广华提出了多室混凝土曲线箱梁桥内力横向分布计算的刚性截面法^[7];聂建国等用修正偏心压力法及修正刚接梁法计算变截面钢-混凝土连续组合箱梁桥横向分布系数^[8-12]。波形钢腹板 PC 组合箱梁荷载横向分布研究方面,胡洋等根据等刚度原则,将钢直腹板折算成混凝土直腹板,计算折算后的整体抗扭刚度^[13];谭中法基于能量变分法,考虑了波形钢腹板箱梁的约束扭转效应,推导得到多箱波形钢腹板梁荷载横向分布的计算公式^[14];Abbas 等对波形钢腹板梁在活载作用下的力学性能进行了研究^[15-18]。但上述研究均未涉及单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁荷载横向分布计算。马磊等曾采用刚接梁法及修正偏心压力法对该问题进行了研究,结果发现上述 2 种

方法用于弯矩横向分布计算时精度较高,且修正偏心压力法计算更简单,但两者用于剪力横向分布计算时误差均较大^[19-22]。

为提出简单可行的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁内力计算方法,以有效指导设计工作,本文在上述研究的基础上,采用刚性横梁法推导适用于单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁弯矩和剪力横向分布的计算公式,并通过试验研究,验证刚性横梁法计算荷载横向分布的适用性,探讨腹板参数变化对单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁荷载横向分布的影响。

1 计算理论

应用文献[19]的基本假定及计算模型,将单箱多室波形钢腹板箱梁视为横向联系较强的多梁式主梁,箱梁截面等效为如图 1 所示的平面板梁模型,该平面板梁模型满足条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sqrt[4]{\beta_i} \leq 1 \\ \beta_i = \frac{\pi^4 I_i d_i^3}{3l^4 I_{tri}} \end{cases} \quad (1)$$

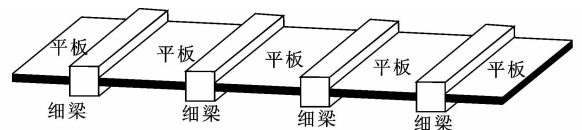


图 1 平面板梁模型

Fig. 1 Plane plate-girder model

式中: n 为主梁数; I_i 为主梁 i 的抗弯惯性矩; d_i 为主梁之间桥面板净跨度的一半; l 为主梁跨度; I_{m_i} 为主梁 i 单位宽度(沿桥纵向)的桥面板抗弯惯性矩。

假定在荷载作用下,箱梁横截面刚性不变,作用在平板梁模型主梁 j 上的单位正弦荷载 q_j 为

$$q_j = \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \quad (2)$$

式中: z 为主梁计算截面到梁端的距离。

将 q_j 平移到单箱多室箱梁的剪切中心,其竖向合力 q 与扭矩 m 分别为

$$\begin{cases} q = \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \\ m = e_j \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: e_j 为单位正弦荷载 q_j 到单箱多室箱梁截面剪切中心的偏心距。

在式(3)荷载的作用下,梁的剪切中心的挠度 ω 和扭转角 φ 为

$$\begin{cases} \omega = \hat{\omega} \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \\ \varphi = \hat{\varphi} \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \hat{\omega} = \frac{l^4}{EI\pi^4} \\ \hat{\varphi} = \frac{e_j l^2}{\pi^2 [EI_\omega (\pi^2/l^2) + GI_t]} \end{cases} \quad (5)$$

式中: E 、 G 分别为材料的弹性模量、剪切模量; I 、 I_ω 、 I_t 分别为横截面总的抗弯惯性矩、抗翘曲惯性矩、抗扭惯性矩。

设某一主梁 i 对剪切中心的偏心距为 e_i ,作用在平板梁模型主梁 j 上的单位正弦荷载为 q_j ,则主梁 i 的挠度 ω_{ij} 和扭转角 φ_{ij} 为

$$\begin{cases} \omega_{ij} = \omega + e_i q_j \\ \varphi_{ij} = \varphi \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可得任一主梁的挠度和扭转角,根据主梁的变形,其弯矩 M_{ij} 和剪力 Q_{ij} 为

$$\begin{cases} M_{ij} = EI_{ij} \omega_{ij} \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \\ Q_{ij} = \left[EI_{ij} \omega_{ij} \left(\frac{\pi}{l}\right)^3 + G(C_L - C_R) \cdot \right. \\ \left. (1 - \mu) \frac{\pi}{l} \varphi_{ij} \right] \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_{ij} 为任一主梁的抗弯惯性矩; C_L 、 C_R 分别为左右侧箱上下板的组合单宽抗扭惯性矩; μ 为材料的泊松比。

该主梁的弯矩(剪力)除以各主梁的总弯矩(剪

力),即得各主梁所分配到的弯矩(剪力)占总弯矩(剪力)的比值,这就是主梁 j 的弯矩(剪力)横向分布。

2 计算理论的验证

2.1 试验梁理论计算

根据波形钢腹板箱梁截面换算公式,将文献[19]的试验梁截面换算为全混凝土截面,换算后的截面划分为如图 2 所示的工字型截面,图中①、②、③为梁号。

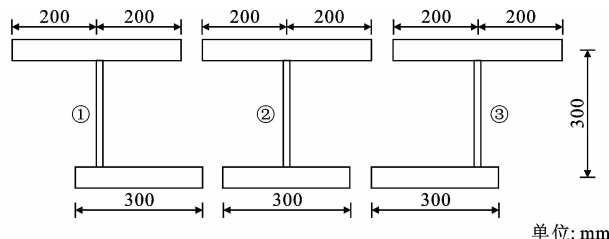


图 2 试验梁截面划分

Fig. 2 Cross-sectional division of test girder

对文献[19]的试验梁进行荷载横向分布计算,由刚性横梁法的适用条件

$$\beta_i = 0.000142, n \sqrt{\beta_i} = 0.3272 < 1.0$$

可采用刚性横梁法计算单箱双室波形钢腹板箱梁的荷载横向分布。当荷载作用在 1 号梁顶板与腹板相交处的顶板上时

$$\omega = \frac{l^4}{EI\pi^4} = 797.7549 \times 10^{-10}$$

$$\varphi = \frac{e_j l^2}{\pi^2 [EI_\omega (\pi^2/l^2) + GI_t]} = 607.7 \times 10^{-10}$$

从而解得

$$\begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1041 \\ 798 \\ 555 \end{bmatrix} \times 10^{-10}, \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{21} \\ \varphi_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 608 \\ 608 \\ 608 \end{bmatrix} \times 10^{-10}$$

刚性横梁法计算所得 1 号梁弯矩和剪力的横向分布系数见表 1。

表 1 各主梁跨中截面处荷载横向分布

Tab. 1 Load transverse distribution of cross section of each girder at midspan

主梁编号	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
1	0.434 8	0.766 2
2	0.333 3	0.333 3
3	0.231 8	-0.099 5

2.2 结果对比

利用 ANSYS 建立试验梁的三维有限元模型,如下页图 3 所示。混凝土采用 Solid45 单元,波形钢腹板采用 Shell63 单元,在一端底板支座垫板处约束 x 、 y 、 z 方向的线位移,另一端支座垫板处约束

x 、 y 方向的线位移。试验采用 500 kN 油压千斤顶进行单点加载,加载位置分别为端部、 $l/8$ 、 $l/4$ 、 $3l/8$ 、 $l/2$ 。每个加载位置分中心加载、偏载 2 个工况。 $l/2$ 、 $l/4$ 截面处加载时,分别测量相应截面处各测点的挠度、纵向正应变、端部支反力。端部、 $l/8$ 、 $3l/8$ 截面处加载时测量端部支反力。各工况加载位置及测点布置如图 4 所示^[19]。刚性横梁法、有限

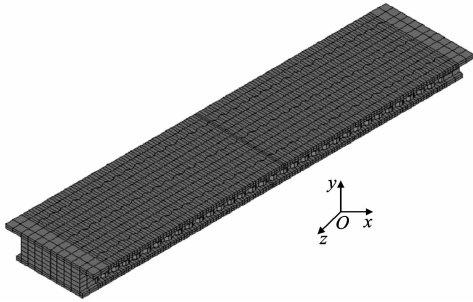
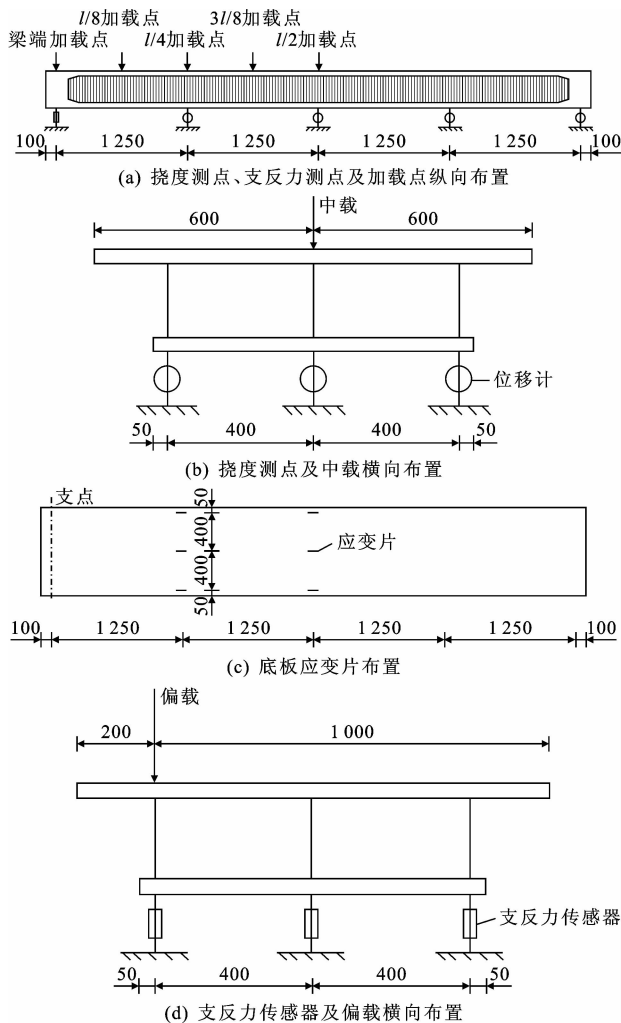


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model



单位: mm

图 4 各工况加载位置及测点布置

Fig. 4 Loading positions and measuring points arrangement

元法及试验实测所得荷载横向分布结果对比见表 2。

表 2 不同方法计算所得各主梁跨中截面处荷载横向分布

Tab. 2 Load transverse distribution of cross section of each girder at cross midspan by different methods

主梁 编号	弯矩/(kN·m)			剪力/kN		
	刚性横 梁法	有限 元法	试验值	刚性横 梁法	有限 元法	试验值
1	0.434 8	0.430 5	0.453 0	0.766 2	0.753 1	0.764 4
2	0.333 3	0.326 2	0.333 3	0.333 3	0.320 3	0.337 5
3	0.231 8	0.243 4	0.213 7	-0.099 5	-0.073 4	0.101 9

由表 2 可知,用刚性横梁法计算的弯矩横向分布结果与有限元及试验结果吻合较好,表明刚性横梁法计算所得单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布精度较高。用刚性横梁法计算的剪力横向分布结果与及有限元试验结果相比,误差较小且偏于安全。

3 荷载横向分布对比试验

为进一步认识荷载在单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁纵横向上的传递模式和规律,探讨其空间协同工作性能,本文制作了 1 片边腹板倾斜的单箱双室波形钢腹板 PC 组合箱梁和 1 片单箱双室 PC 箱梁,用以探讨腹板倾角对单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁荷载横向分布的影响。

3.1 试验概况

边腹板倾斜的单箱双室波形钢腹板 PC 组合箱梁编号为 SP1,单箱双室 PC 箱梁编号为 SP2,文献 [19] 中的试验梁编号为 SP3,见下页图 5。各模型梁的标准跨径为 5.2 m,计算跨径为 5 m,梁高为 0.35 m,波形钢腹板的厚度均为 3 mm,混凝土腹板的厚度均为 80 mm。

3.2 试验结果分析

测量各模型梁在各工况、各荷载等级下各截面的挠度、应变及梁端支反力,比较 SP1~SP3 梁的挠度、弯矩及剪力横向分布试验结果,如下页图 6~图 9 所示。

由图 6(a)、(b) 可见,荷载作用在边梁上时,单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的边梁挠度横向分布影响线竖标值最大,单箱多室 PC 箱梁的边梁挠度横向分布影响线竖标值最小,说明腹板刚度越大,荷载横向分布越均匀;边腹板垂直的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的挠度横向分布影响线竖标值与边腹板倾斜的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁相差甚小,这主要是因为波形钢腹板箱梁的挠度应考虑腹板剪切变形的影响。虽然腹板倾斜导致底板

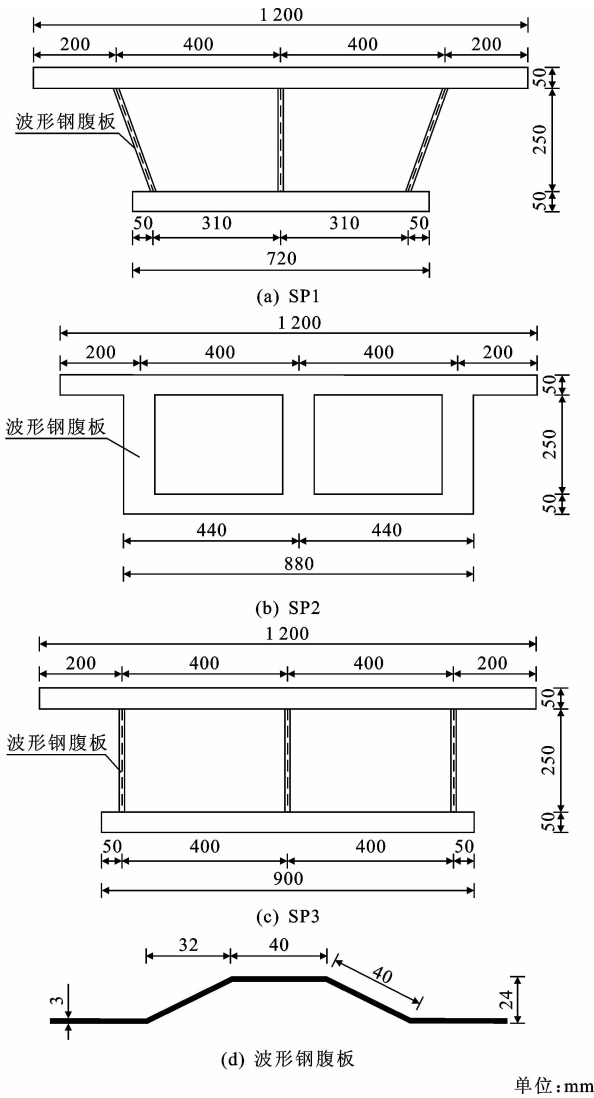


图 5 模型梁横截面

Fig. 5 Cross-section of model girders

变窄,截面抗弯惯性矩减小,挠度增大,但变化的幅度不大,可忽略,说明腹板倾斜对单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的挠度横向分布影响可忽略。由图 6(c)、(d)可见,荷载作用在中梁上时,各模型梁的荷载横向分布影响线竖标值差别不大,单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的挠度横向分布影响线竖标值比单箱多室 PC 箱梁大。

由图 7(a)、(b)可见,荷载作用在边梁上时,单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布影响线竖标值最大,单箱多室 PC 箱梁的弯矩横向分布影响线竖标值最小,说明腹板刚度越大,荷载横向分布越均匀;边腹板垂直的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布影响线竖标值与腹板倾斜的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁相差较大。究其原因:腹板倾斜后顶板宽度不变,而底板变窄,

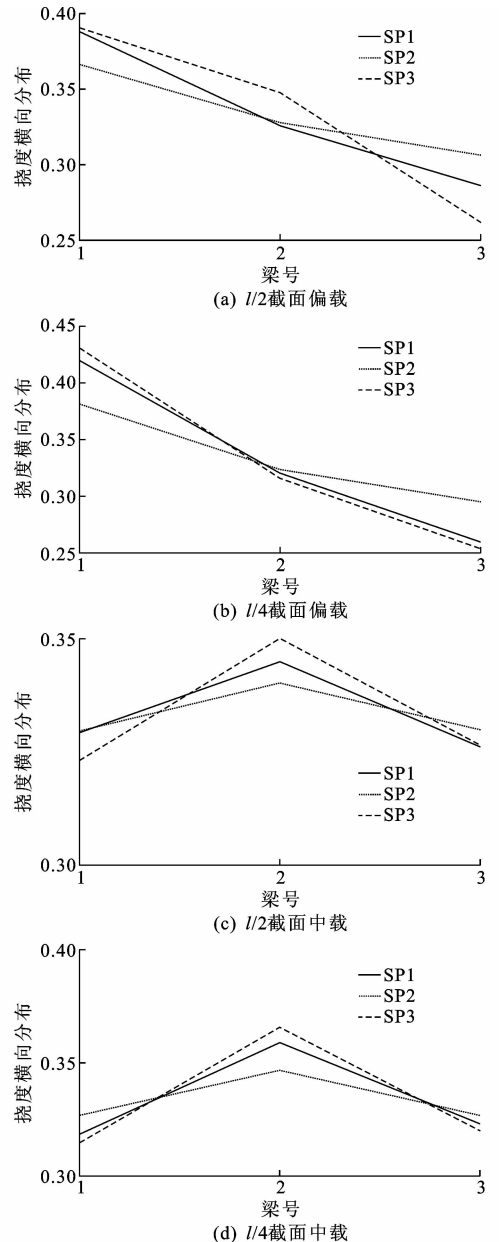


图 6 挠度横向分布

Fig. 6 Transverse distribution of deflection

梁高变低,相应截面的抗弯惯性矩变小,从而引起正应力变化,且测点间距变小,导致弯矩横向分布变化明显。由以上分析可知,腹板的倾角会影响单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布。由图 7(c)、(d)可见,荷载作用在中梁上时,各模型梁的荷载横向分布影响线竖标值差别不大,单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布影响线竖标值比单箱多室 PC 箱梁大。

由图 8 可见,单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的支反力横向分布影响线竖标值大于单箱多室 PC 箱梁的支反力横向分布影响线竖标值,说明腹板刚度越大,荷载横向分布越均匀;边腹板垂直的单

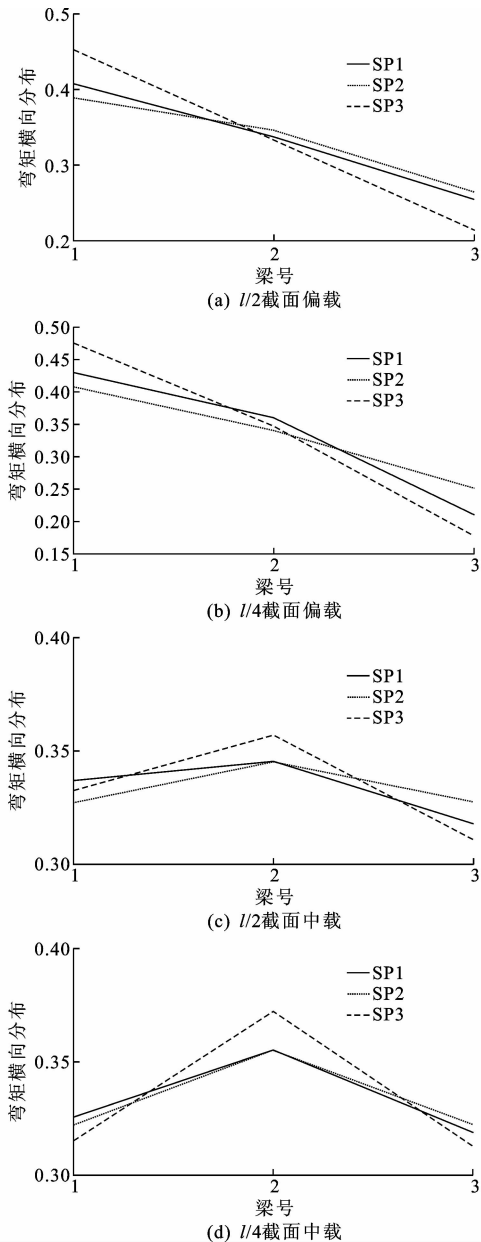


图7 弯矩横向分布

Fig. 7 Transverse distribution of bending moment

箱多室波形钢腹板PC组合箱梁的支反力横向分布影响线竖标值与边腹板倾斜的单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁相差甚小,支反力与剪力有关,波形钢腹板箱梁剪力主要由波形钢腹板承受,外腹板倾角虽有变化,腹板高度、厚度及波形均无变化,故对支反力影响较小,亦可忽略。说明腹板倾角对单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁支反力横向分布的影响可忽略; $l/8$ 截面及端部截面上的中梁支反力横向分布影响线竖标值比 $l/4$ 、 $l/2$ 截面大,这说明端部截面的支反力横向分布更不均匀。

由图9可见,各模型梁的边梁支反力横向分布规律沿桥梁全长基本相同,边梁几乎分担了所有荷载。

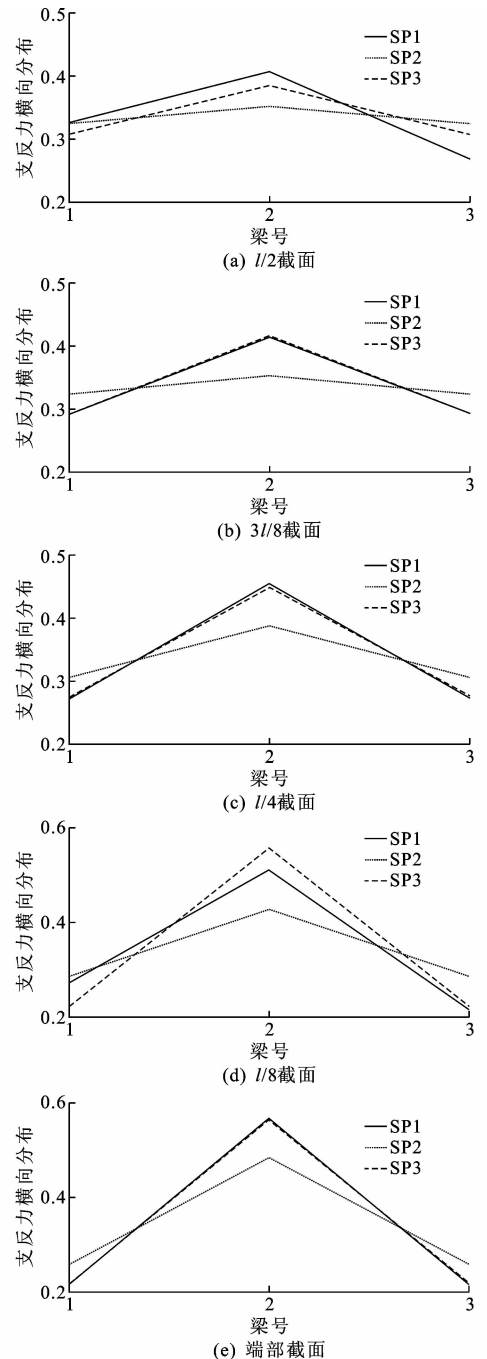


图8 中梁支反力横向分布

Fig. 8 Transverse distribution of support reaction of middle girder

4 结 语

(1)刚性横梁法计算所得单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁的弯矩横向分布精度高,而剪力横向分布的计算结果偏保守。

(2)单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁的荷载横向分布与单箱多室PC箱梁相比更不均匀,表明腹板刚度越大,荷载横向分布越均匀;单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁的腹板倾斜与否,仅影响单箱

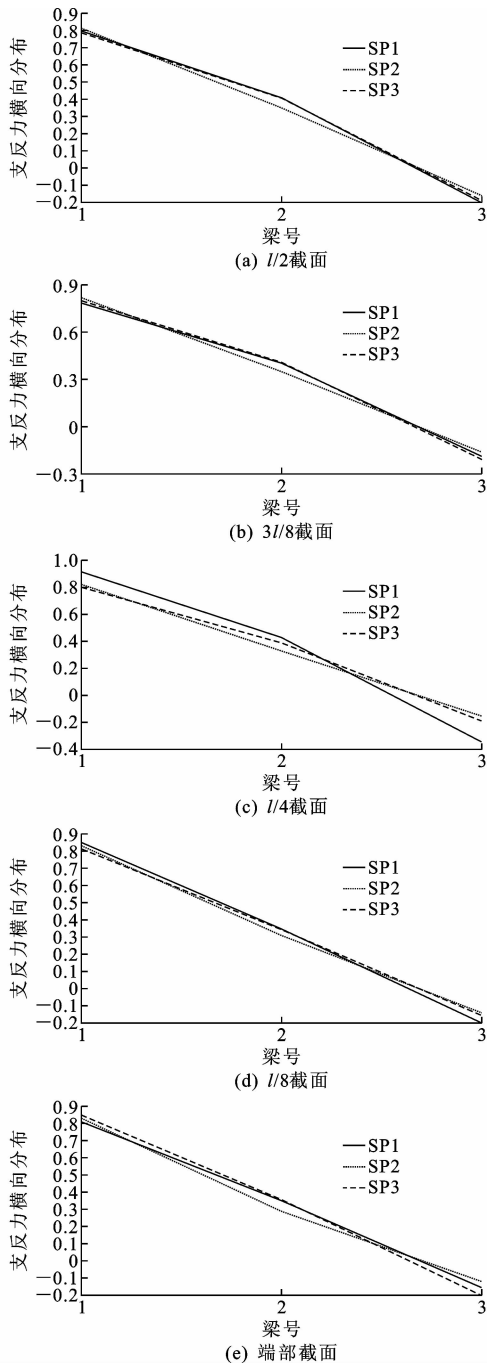


图 9 边梁支反力横向分布试验结果

Fig. 9 Support reaction transverse distribution of side girder

多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的弯矩横向分布,对挠度和支反力横向分布的影响可忽略。

(3)各模型中梁的支反力横向分布在端部更不均匀;边梁支反力横向分布沿桥梁全长基本相同,边梁几乎分担了所有荷载。

(4)本文研究结果仅适用于假定的板梁模型满足式(1)的情况,对于不满足该条件的单箱多室波形钢腹板 PC 组合箱梁的荷载横向分布需要做进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] DB 41/T 643—2010,公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范[S].
DB 41/T 643—2010, Code for design of the prestressed concrete box-girder highway bridge with corrugated steel webs[S].
- [2] 叶益军.多室宽箱梁横向分布计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
YE Yi-jun. Research on calculation method of the transverse distribution of multi room wide box girder [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [3] TARHINI K M K, FREDERICK G R. Lateral load distribution in I-girder bridges [J]. Computers and Structures, 1995, 54(2): 351-354.
- [4] TARHINI K M, FREDERICK G R. Wheel load distribution in I-girder highway bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(5): 1285-1294.
- [5] 项贻强,何余良,刘丽思,等.考虑滑移的多梁式组合小箱梁桥荷载横向分布[J].哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 113-118.
XIANG Yi-qiang, HE Yu-liang, LIU Li-si, et al. Lateral load distribution of multi-box steel-concrete composite girder bridges for considering slipping effect [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 113-118.
- [6] 项贻强,杨万里,潘仁泉,等.拱索体系加固的刚架拱桥荷载横向分布[J].中国公路学报, 2007, 20(4): 91-95.
XIANG Yi-qiang, YANG Wan-li, PAN Ren-quan, et al. Load lateral distribution of rigid frame arch bridge strengthened with arch and stayed cable system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 91-95.
- [7] 孙广华.公路曲线梁桥内力横向分配计算[J].南京工学院学报, 1988, 18(1): 94-104.
SUN Guang-hua. Calculation of transverse distribution of internal forces in highway curved girder bridges [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 1988, 18(1): 94-104.
- [8] 聂建国,张晓光,樊健生,等.钢-混凝土组合梁加宽混凝土梁桥的横向分布系数[J].清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(6): 805-809.
NIE Jian-guo, ZHANG Xiao-guang, FAN Jian-sheng, et al. Transverse distribution coefficient of concrete bridges widened with steel-concrete composite beams [J]. Journal of Tsinghua University: Science and

- Technology, 2010, 50(6): 805-809.
- [9] 聂建国, 张晓光, 樊健生. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 35-43.
NIE Jian-guo, ZHANG Xiao-guang, FAN Jian-sheng. Experiment on old concrete bridge widened with steel-concrete composite beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 35-43.
- [10] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声. 钢-混凝土简支组合梁变形计算的一般公式[J]. 工程力学, 1994, 11(1): 21-27.
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min, YUAN Yan-sheng. A general formula for predicting the deflection of simply supported composite steel-concrete beams with the consideration of slip effect[J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(1): 21-27.
- [11] 聂建国, 沈聚敏, 余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 11-17.
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min, YU Zhi-wu. A reduced rigidity method for calculating deformation of composite steel-concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 11-17.
- [12] 聂鑫, 樊健生, 付裕. 箱形截面连续组合梁桥的荷载横向分布[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(12): 1930-1933, 1938.
NIE Xin, FAN Jian-sheng, FU Yu. Transverse load distribution on box section continuous composite steel-concrete bridges[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 49(12): 1930-1933, 1938.
- [13] 胡洋, 万水. 波形钢腹板PC组合桥梁横向分布系数的计算[J]. 交通标准化, 2006(12): 53-56.
HU Yang, WAN Shui. Transverse distribution calculating of prestressed concrete composite box-girder[J]. Communications Standardization, 2006(12): 53-56.
- [14] 谭中法. 波形钢腹板箱梁桥的荷载横向分布系数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
TAN Zhong-fa. Research on transverse distribution coefficients of composite box-girder bridge with corrugated steel webs[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2015.
- [15] ABBAS H H, SAUSE R, DRIVER R G. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(8): 806-814.
- [16] KÖVESDI B, JÁGER B, DUNAI L. Stress distribution in the flanges of girders with corrugated webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 204-215.
- [17] 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.
- [18] MO Y L, FAN Y L. Torsional design of hybrid concrete box girders[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3): 329-339.
- [19] 马磊, 万水, 蒋正文, 等. 单箱多室波形钢腹板箱梁荷载横向分布[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 145-149.
MA Lei, WAN Shui, JIANG Zheng-wen, et al. Load transverse distribution of single box multi-cell girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(1): 145-149.
- [20] 马磊, 周林云, 万水. 波形钢腹板连续组合箱梁桥的荷载横向分布[J]. 公路交通科技, 2013, 30(5): 58-62.
MA Lei, ZHOU Lin-yun, WAN Shui. Lateral load distribution of continuous composite box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(5): 58-62.
- [21] 赵雨, 任亮, 张璟, 等. 大跨波形钢腹板小箱梁顶推施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(11): 76-79.
ZHAO Yu, REN Liang, ZHANG Jing, et al. Research on incremental launching technology of long-span box girders with corrugated steel web[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(11): 76-79.
- [22] 王飞, 刘之光, 任亮. 波形钢腹板小箱梁顶推设计与施工研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(8): 66-69.
WANG Fei, LIU Zhi-guang, REN Liang. Incremental launching design and construction of corrugated steel web small box girders[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2015, 32(8): 66-69.