

文章编号:1673-2049(2016)06-0106-07

大跨径波形钢腹板组合箱梁桥剪力滞效应

李立峰,周 延

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究大跨径波形钢腹板组合箱梁桥的剪力滞效应,结合 1 座采用悬臂施工的大跨径波形钢腹板箱梁桥,分别建立平面杆系有限元模型和空间实体有限元模型,模拟施工过程,选取 3 个关键截面,研究了波形钢腹板组合箱梁桥在不同施工阶段的剪力滞效应分布规律。结果表明:大跨径波形钢腹板组合箱梁桥的剪力滞效应随着施工阶段的推移是一个动态变化过程,在悬臂施工阶段,剪力滞效应变化较快,在施工阶段后期,剪力滞效应变化缓慢;最大剪力滞效应发生在最大悬臂状态时的端部截面。

关键词:桥梁工程;剪力滞效应;大跨径波形钢腹板组合箱梁桥;施工阶段

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Shear Lag Effect of Large Span Composite Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

LI Li-feng, ZHOU Yan

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the shear lag effect of large span composite box girder bridge with corrugated steel webs, a large span composite box girder bridge with corrugated steel webs using cantilever construction was adopted, and the plane frame model and finite element model were established respectively. The construction processes were simulated and three key sections were selected. The distribution rules of shear lag effect of large span composite box girder bridge with corrugated steel webs at different stages of construction were studied. The results show that the shear lag effect of large span box girder bridge with corrugated steel webs is a dynamic process with the construction stage. The shear lag effect changes rapidly during cantilever construction stage, and changes slowly at the late stage of construction. The maximum shear lag effect occurs on the end section at the maximum cantilever state.

Key words: bridge engineering; shear lag effect; large span composite box girder bridge with corrugated steel web; construction process

0 引言

波形钢腹板组合箱梁是 20 世纪 80 年代出现的一种新型桥梁,采用波纹钢腹板代替传统的混凝土腹板,结构自重大幅减轻,腹板抗剪屈曲强度提高,

使结构具有受力明确、截面效率高、桥型美观等优点,同时彻底解决了混凝土梁桥腹板开裂问题,预应力效率也大幅提高。近年来,该桥型在中国开始大力推广,已建成多座,并且跨径在逐步增大,较有代表性的有山东鄄城黄河大桥、新密溱水桥、桃花峪跨

收稿日期:2016-05-01

基金项目:陕西省交通厅科技项目(12-21K)

作者简介:李立峰(1971-),男,湖南沅江人,教授,工学博士,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn。

大堤桥、深圳南头立交桥等^[1]。各国对波形钢腹板组合箱梁的研究较多^[2],中国很多科研单位对这种结构从模型试验、有限元分析和工程实践等多方面也进行了很多研究,得到一些重要结论^[2-7]。

近年来,中国大跨径波形钢腹板组合箱梁桥的建设开始逐渐增多,但是对于该桥型的研究极少。与普通混凝土箱梁受力类似,在对称垂直力作用时,其上、下翼缘板的正应力沿宽度方向分布是不均匀的,即存在剪力滞现象。吴文清等^[8-9]建立了空间有限元模型,分析了波形钢腹板组合箱梁桥剪力滞效应的分布规律以及影响因素^[8-9];李立峰等^[10]通过理论分析和试验研究并结合有限元计算,对中、小跨径的波形钢腹板箱顶板、底板的剪力滞效应进行了较为系统的研究^[10]。

本文以 1 座大跨径波形钢腹板组合箱梁桥为依托,分别建立平面杆系有限元模型、空间实体有限元

模型,研究大跨径波形钢腹板组合箱梁桥在不同施工阶段剪力滞效应的分布规律。

1 工程背景

1.1 桥跨布置

巴江河大桥为一座波形钢腹板预应力混凝土组合连续箱梁桥,跨径布置为 78 m+130 m+78 m,桥长 286 m,桥跨布置如图 1 所示。箱梁顶宽 19.25 m,底宽 12.5 m,单箱双室,箱梁顶板设置坡度为 2% 的单向横坡,底板水平,腹板铅直,主跨支点梁高 7.5 m,跨中及边跨现浇段梁高 3.5 m,梁高及底板厚度按二次抛物线变化,大桥典型横断面如图 2、3 所示。主梁采用 C55 混凝土,波形钢腹板采用 Q345qC 钢,钢腹板厚度在 14~22 mm 之间变化,图 4、5 分别为波形钢腹板的节段示意和单位波长标准构造。

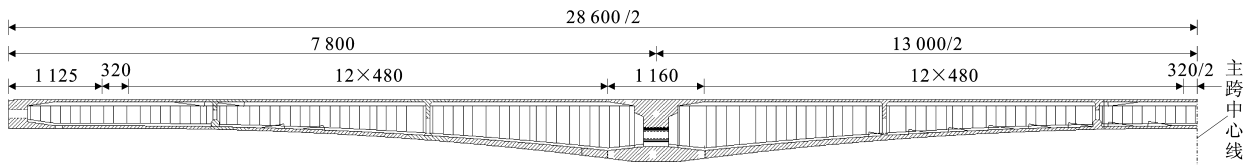


图 1 桥跨布置(单位:cm)

Fig. 1 Arrangement of Bridge Span (Unit:cm)

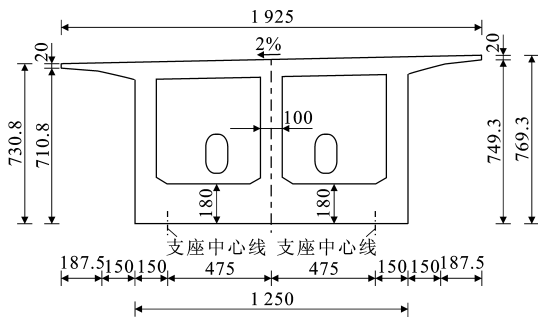


图 2 支座处箱梁横断面(单位:cm)

Fig. 2 Box Girder Cross Section at Support Position (Unit:cm)

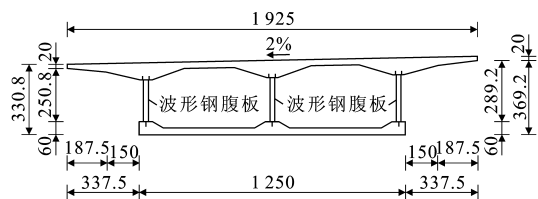


图 3 跨中箱梁横断面(单位:cm)

Fig. 3 Box Girder Cross Section in Middle Span (Unit:cm)

1.2 施工方法

连续箱梁的边跨直线段长 11.25 m,采用支架

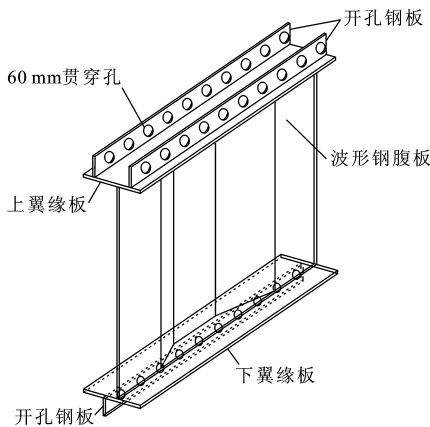


图 4 波形钢腹板节段

Fig. 4 Segment Corrugated Steel Webs

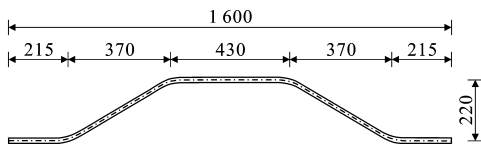


图 5 单位波长标准构造(单位:mm)

Fig. 5 Unit Wavelength Standard Structure (Unit:mm)

现浇施工,0 号节段长 11.6 m,采用墩旁临时支架现浇施工,合龙段长 3.2 m,采用吊架现浇施工,悬浇段共分为 12 个节段,每个节段长 4.8 m,采用挂

篮悬浇对称施工。钢腹板在工厂成批预制,现场安装。

2 分析方法

2.1 剪力滞效应问题常用研究方法

众多学者对剪力滞问题提出了许多研究理论与方法,综合起来主要有以下几种:①理论分析法,包括卡曼理论、弹性理论解法、能量变分法、比拟杆法;②数值计算法,主要包括有限元法、有限条法及有限段法;③模型试验。

2.2 研究技术路线

本文拟采用数值计算法,通过有限元计算,建立相应的空间实体有限元模型和平面杆系有限元模型,揭示大跨径波形钢腹板箱梁桥在施工阶段的剪力滞效应变化规律,为该种组合箱梁的应用推广提供依据。

为了描述剪力滞效应的变化规律,直观地反映应力的增大程度,引入剪力滞系数 λ 的定义,即

$$\lambda = \frac{\sigma}{\bar{\sigma}}$$

式中: σ 为考虑剪力滞效应所求得的截面实际正应力,可以通过 ANSYS 空间有限元模型求得; $\bar{\sigma}$ 为按初等梁理论求得的正应力,可以按照 MIDAS/Civil 建立平面有限元模型求得。

通过杆系模型,可以从计算结果中提取关键截面随着施工阶段推移按照初等梁理论计算所得的正应力。同时结合 ANSYS 空间实体模型,提取关键截面上任意一点的正应力数值。结合两者分析对比即可以判断出关键截面剪力滞系数沿大桥纵向和横向的分布情况。

3 有限元分析模型

3.1 平面杆系模型

采用有限元软件建立平面杆系模型,如图 6 所示,全桥共划分为 89 个节点、70 个单元。建立 38 个施工阶段对整个施工过程进行模拟。

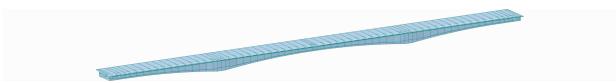


图 6 平面杆系有限元模型

Fig. 6 Plane Member Finite Element Model

3.2 空间实体模型

巴江河大桥全桥采用 ANSYS 进行模拟,主梁顶板、底板采用 3D 实体单元,因波形钢腹板厚度在 14~22 mm 之间变化,采用 2D 板单元模拟更为合

理,预应力筋采用空间索单元模拟。板单元与实体单元之间通过 MPC 法(多点约束方程)实现耦合,空间实体有限元模型如图 7 所示。全桥共划分为 38 个施工阶段进行模拟,并且各阶段的结构自重、挂篮荷载、边界条件等均模拟一致^[11-12]。选取关键截面(图 8),研究大桥在施工阶段顶板、底板正应力沿桥宽方向的变化规律。

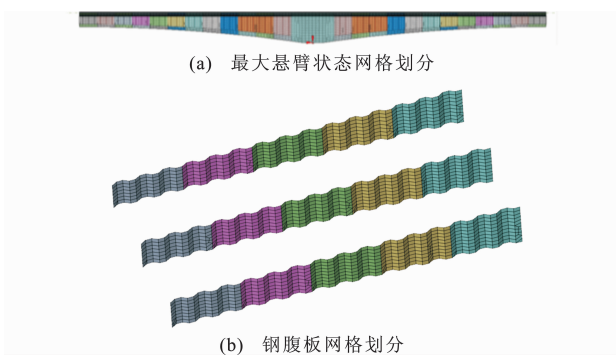


图 7 空间实体有限元模型

Fig. 7 Space Solid Finite Element Model

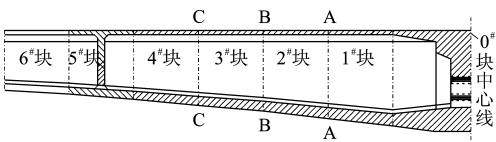


图 8 施工阶段分析控制截面

Fig. 8 Analysis Control Sections at Construction Stage

4 剪力滞效应分析结果

波形钢腹板组合箱梁桥的施工阶段作为一个连续动态的过程,其主梁截面内力和应力是不断变化的。为了探究施工过程中剪力滞效应的变化规律,在悬臂浇筑过程中选取 6# 块浇筑完成后(短悬臂状态)和 12# 块浇筑完成后(最大悬臂状态)以及大桥合龙后和桥面铺装完成后 4 个典型施工阶段进行研究。沿桥宽方向为 X 方向,以横断面中心点为 X 轴原点,分析计算截面剪力滞效应的变化情况,探究施工过程中计算截面剪力滞效应沿桥梁横向和纵向的分布规律^[13]。

4.1 6# 块浇筑完成后的剪力滞效应

6# 块施工完成后桥梁处于短悬臂状态,关键截面顶板、底板应力峰值及剪力滞系数分布如表 1 和图 9 所示。

计算求得 3 个关键截面的空间应力最大值均位于顶板、底板与梁肋交界处(表 1)。由图 9 可知,3 个关键截面顶板、底板均出现了明显的正剪力滞效应。由于巴江河大桥属于单箱双室截面,因而存在

表 1 6# 块浇筑完成后的关键截面应力峰值

Tab.1 Maximum Stress Values of Key Sections				
After 6# Segment Is Completed				MPa
截面	顶板		底板	
	梁肋处应力峰值	平面应力	梁肋处应力峰值	平面应力
A-A	－11.35	－10.30	－2.11	－2.01
B-B	－9.76	－9.04	－2.29	－2.18
C-C	－7.84	－7.47	－1.79	－1.72

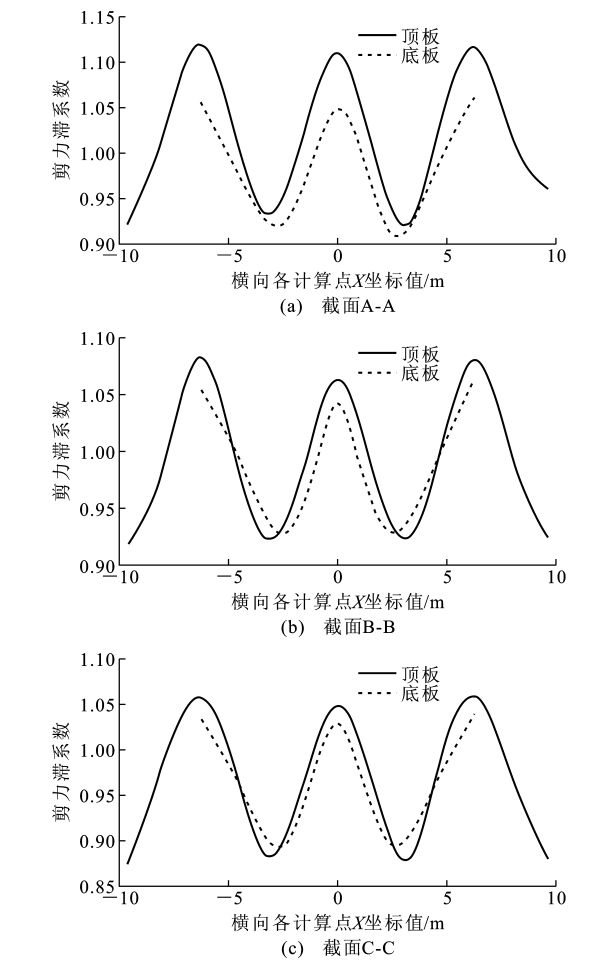


图 9 6# 块施工完成后的剪力滞系数分布
Fig.9 Shear Lag Coefficient Distributions After 6# Segment Is Completed

3 个峰值点^[14]。相比较而言,底板剪力滞效应要弱于顶板,且变化幅度较小。截面 A-A,B-B,C-C 顶板的剪力滞系数分别在 0.92~1.12,0.93~1.07,0.88~1.06 之间变化,且随计算截面离悬臂端距离的增加而有所减弱。

4.2 最大悬臂状态时的剪力滞效应

12# 块施工完成后桥梁已处于最大悬臂状态,整个结构在悬臂施工中已经处于最不利状态,此时 3 个关键截面顶板、底板应力峰值及剪力滞系数分布如表 2 和图 10 所示。

表 2 最大悬臂状态时的关键截面应力峰值

Tab. 2 Maximum Stress Values of Key Sections				
at Maximum Cantilever State				MPa
截面	顶板		底板	
	梁肋处应力峰值	平面应力	梁肋处应力峰值	平面应力
A-A	－15.46	－12.89	－9.47	－8.24
B-B	－14.24	－12.07	－9.60	－8.42
C-C	－12.81	－11.14	－9.34	－8.34

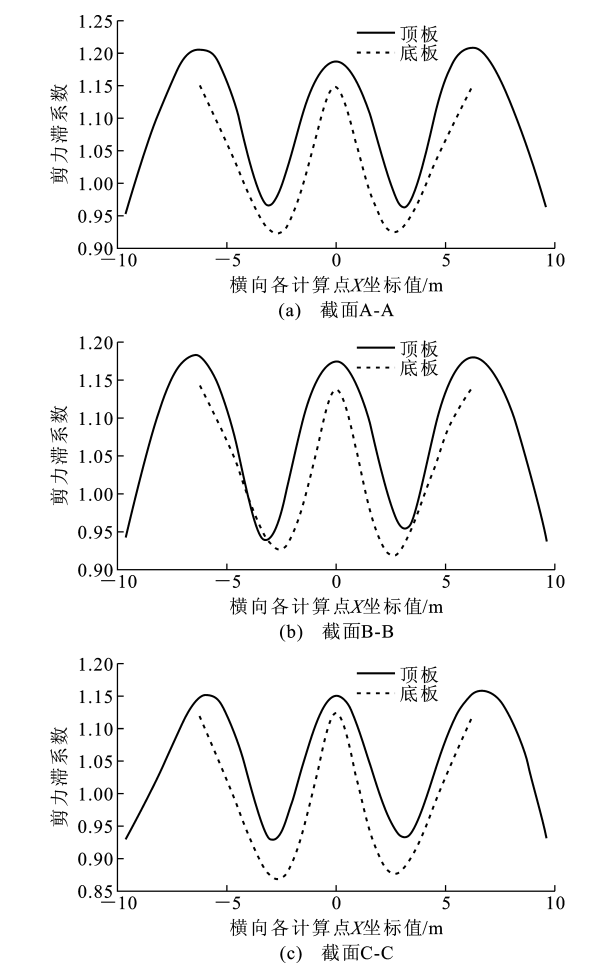


图 10 最大悬臂状态时的剪力滞系数分布
Fig.10 Shear Lag Coefficient Distributions at Maximum Cantilever State

由表 2 和图 10 可知,随着施工阶段的推移,计算截面的顶板、底板正应力均发生了很大变化,相应剪力滞效应也明显增强。截面 A-A,B-B,C-C 顶板的剪力滞系数峰值分别达到了 1.20,1.18,1.15。同时,底板的剪力滞效应也有所增强,但是剪力滞效应要弱于顶板。

4.3 合龙后的剪力滞系数分布

在全桥合龙之后桥梁的结构体系发生了变化,研究成桥后大桥关键截面的剪力滞系数分布规律具有极其重要的意义。经过计算后,在选取悬臂施工

阶段所取关键截面的基础上,选取中跨跨中截面,研究不同施工阶段剪力滞系数的分布规律。合龙后的应力峰值和剪力滞系数分布如表 3 和图 11 所示。

表 3 全桥合龙后关键截面的应力峰值

Tab. 3 Maximum Stress Values of Key Sections After Closure of Bridge

MPa

截面	顶板		底板	
	梁肋处应力峰值	平面应力	梁肋处应力峰值	平面应力
A-A	-17.68	-15.38	-9.63	-8.60
B-B	-16.36	-14.48	-9.70	-8.78
C-C	-14.82	-13.47	-9.52	-8.90
跨中截面	-4.84	-3.84	-15.25	-12.71

大桥中跨合龙之后结构体系发生了很大变化,与悬臂施工阶段相比,虽然计算截面的顶板、底板正应力均有所提高,但是 3 个关键截面的顶板、底板剪力滞效应均有所下降,同时中跨跨中截面处顶板的最大剪力滞系数达到了 1.26。

4.4 桥面铺装完成后的剪力滞效应

在全桥合龙之后将要进行桥面铺装,在有限元模型中二期恒载都以均布荷载的形式来进行模拟。由相关资料可以知道,荷载的布置形式是影响剪力滞效应的主要原因,因此,有必要对二期恒载作用下的剪力滞效应进行分析^[15]。

作为施工阶段的最后一个步骤,桥面铺装完成后的应力峰值及剪力滞系数如表 4 和图 12 所示,对比合龙后大桥的剪力滞系数可以看出,二期恒载对于剪力滞效应有减弱作用。

4.5 施工阶段全过程剪力滞系数分布

通过提取关键截面在整个施工阶段过程中的应力结果可以得到关键截面剪力滞系数随施工阶段推移的分布规律,如图 13 所示,其中施中阶段编号 1~12 代表 1#~12# 块浇筑完成,13 代表大桥合龙,14 代表桥面铺装完成。

由图 13 可知,关键截面在施工过程中其剪力滞系数逐渐增大,且在短悬臂施工阶段初期剪力滞系数变化较为缓慢,随着悬臂段的加长,剪力滞系数变化幅度开始变大,在最大悬臂状态时达到最大。

5 结 语

(1)随着施工阶段的推移,大跨径波形钢腹板组合箱梁桥的剪力滞效应是一个动态变化的过程,在悬臂施工阶段初期,剪力滞系数增长较为缓慢,而后期变幅开始增大,在结构达到最大悬臂状态时剪力滞系数达到峰值,且大桥处于长悬臂状态时剪力滞效应要远大于短悬臂状态。大桥从最大悬臂状态到

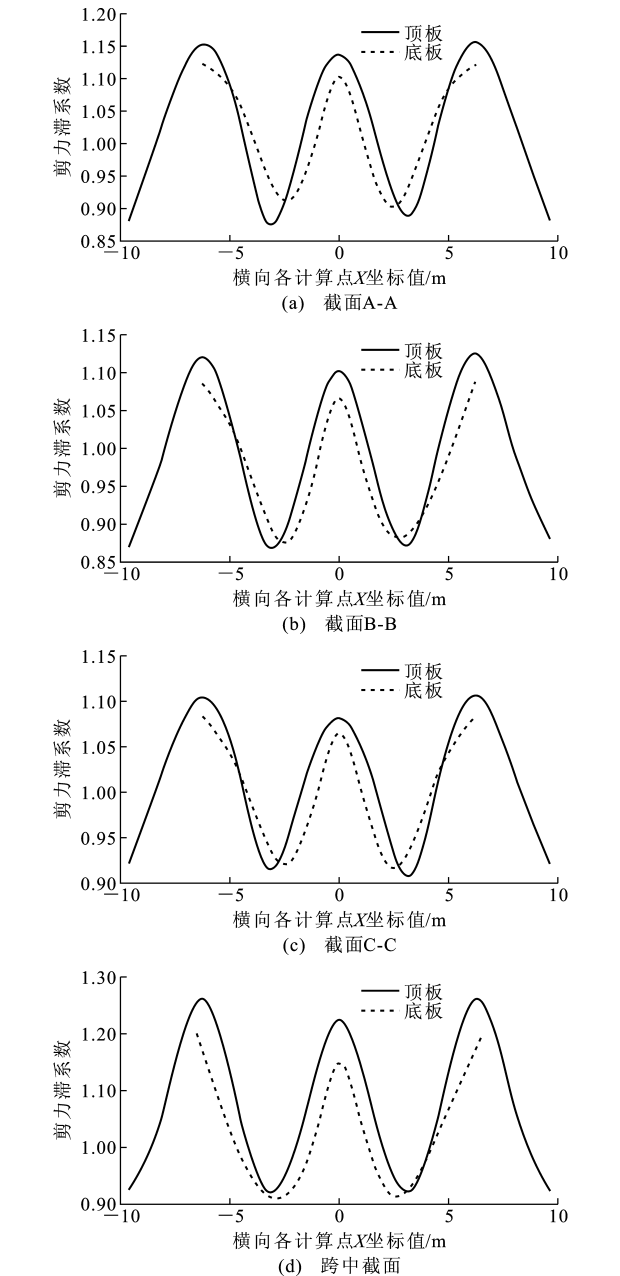


图 11 合龙后的剪力滞系数分布

Fig. 11 Shear Lag Coefficients Distribution After Closure of Bridge

表 4 二期恒载作用下关键截面的应力峰值

Tab. 4 Maximum Stress Values of Key Sections Under Action of Secondary Dead Load

MPa

截面	顶板		底板	
	梁肋处应力峰值	平面应力	梁肋处应力峰值	平面应力
A-A	-15.85	-14.03	-10.98	-9.98
B-B	-14.60	-13.28	-10.87	-10.16
C-C	-13.32	-12.45	-10.71	-10.20
跨中截面	-14.20	-11.83	-11.33	-9.85

桥面铺装完成剪力滞效应开始逐渐减弱,但是下降幅度较小。

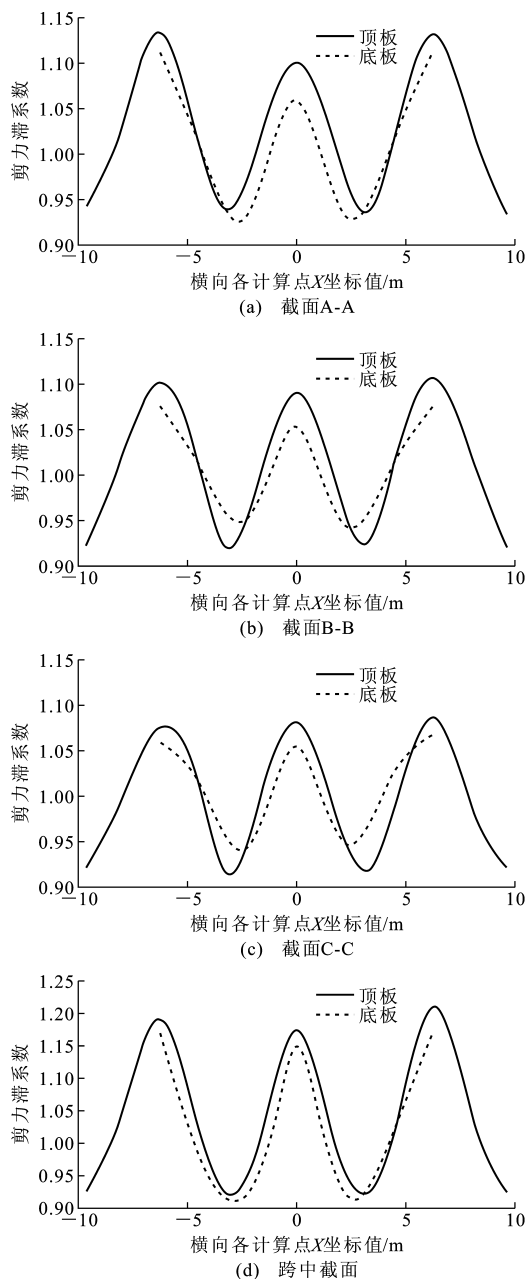


图 12 二期恒载作用下剪力滞系数分布

Fig. 12 Shear Lag Coefficients Distribution Under Action of Secondary Dead Load

(2)在大桥施工过程中顶板剪力滞效应要远大于底板,且随着施工阶段的推移,顶板剪力滞效应的变化幅度要强于底板。

(3)整个施工过程中端部截面顶板、底板最大剪力滞系数均出现在截面 A-A,分别为 1.20 和 1.15;跨中截面顶板、底板最大剪力滞系数分别为 1.26 和 1.20。

参考文献:

References:

[1] 万 水,李淑琴,马 磊.波形钢腹板预应力混凝土组

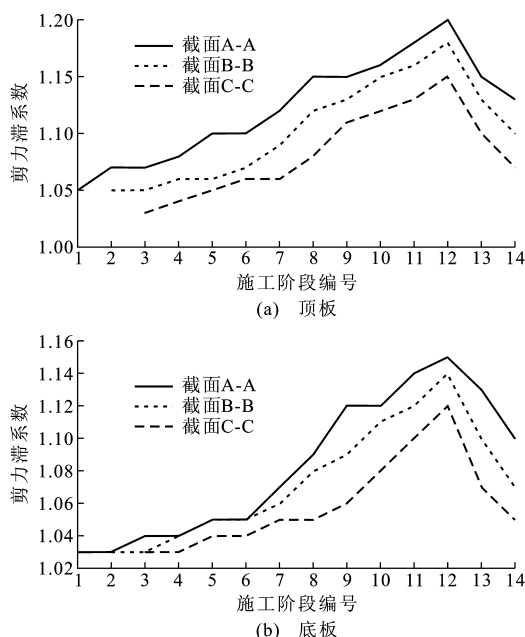


图 13 施工全过程剪力滞系数分布

Fig. 13 Shear Lag Coefficients Distribution During Whole Construction Process

合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(2):15-20.

WAN Shui,LI Shu-qin,MA Lei. Application of Prestressed Concrete Composite Box-girder Structure with Corrugated Steel Webs in Bridge Engineering in China [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009,26(2):15-20.

[2] JIANG R J, AU F T K, XIAO Y F. Prestressed Concrete Girder Bridges with Corrugated Steel Webs: Review[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141 (2):1-9.

[3] 吴文清. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应问题研究 [D]. 南京:东南大学,2002.

WU Wen-qing. Research on Shear-lag Effect in Combined Box-girder with Corrugated Steel Webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2002.

[4] 彭 鲲. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞的理论和试验研究 [D]. 长沙:湖南大学,2008.

PENG Kun. Theoretical and Experimental Study on the Shear Lag Effect of Box-beam with Corrugated Steel Webs [D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[5] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2013.

XIANG Hai-fan. Advanced Theory of Bridge Structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.

[6] 贺 君,刘玉擎,陈艾荣. 波折钢腹板组合箱梁预应力体系研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 65-70.

- HE Jun, LIU Yu-qing, CHEN Ai-rong. Research on Internal and External Tendon System of Composite Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 65-70.
- [7] METWALLY A E, LOOV R E. Prestressed Concrete Beams with Corrugated Steel Webs[C]//ASCE. Composite Construction in Steel and Concrete IV. Reston: ASCE, 2000: 81-92.
- [8] 吴文清, 万 水, 叶见曙, 等. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的空间有限元分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 31-36.
- WU Wen-qing, WAN Shui, YE Jian-shu, et al. 3-D Finite Element Analysis on Shear Lag Effect in Composite Box Girder with Corrugated Steel Web[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 31-36.
- [9] HU Z T, CHEN X. Finite Element Analysis on Shear-lag Effect in Curved Continuous Box Girder with Corrugated Steel Webs[C]//ASCE. ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management. Reston: ASCE, 2009: 1-6.
- [10] 李立峰, 彭 鲲, 王 文. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的理论与试验研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 78-83.
- LI Li-feng, PENG Kun, WANG Wen. Theoretical and Experimental Study on Shear Lag Effect of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4): 78-83.
- [11] 舒志云. 波形钢腹板 PC 组合箱梁剪力滞效应[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- SHU Zhi-yun. Corrugated Steel Web PC Composite Box Beam Shear Lag Effect [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [12] ZHOU S J. Finite Beam Element Considering Shear-lag Effect in Box Girder[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(9): 1115-1122.
- [13] 丁伟亮. 大跨度预应力混凝土连续箱梁桥剪力滞效应分析[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- DING Wei-liang. Analysis of Shear Lag Effect of Large-span Prestressed Concrete Continuous Box Girder Bridge[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [14] 蔺鹏臻, 孙理想, 杨子江, 等. 单箱双室简支箱梁的剪力滞效应研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(1): 59-63, 112.
- LIN Peng-zhen, SUN Li-xiang, YANG Zi-jiang, et al. Research on Shear Lag Effect of Twin-cell Box Girders[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(1): 59-63, 112.
- [15] 朱世峰, 舒志云, 李成君. 波形钢腹板 PC 组合箱梁剪力滞效应影响因素分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 267-270.
- ZHU Shi-feng, SHU Zhi-yun, LI Cheng-jun. Impact Factor Research on Shear Lag Effect of PC Composite Box-girders with Corrugated Steel Webs[J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 267-270.