

文章编号: 1001-4888(2013)05-0614-09

钢筋混凝土箱梁非线性及剪滞效应的试验研究^{*}

林丽霞, 吴亚平, 丁南宏, 苏强

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 制作了钢筋混凝土简支箱梁模型, 试验包括模型梁开裂范围内的加载及开裂后的加载。在开裂范围内, 对该试验梁分别进行了顶板满布均布荷载、均布荷载作用于肋板上、集中力作用于跨中以及对称集中力作用下的加载; 对开裂后的试验梁, 进行了对称集中力作用下的加载。用应变采集仪与电脑连接, 并用半桥测量, 温度自补偿方法测取应变值, 采用百分表测试梁体挠度, 采用读数显微镜观测裂缝。测量得到应力、应变的分布规律, 验证了钢筋混凝土箱梁中存在剪滞效应。试验结果与考虑混凝土非线性的有限段法的计算结果吻合较好, 验证了有限段法在混凝土箱梁剪滞效应分析中的适用性。

关键词: 钢筋混凝土箱梁; 剪力滞; 模型试验; 非线性; 有限段法

中图分类号: U448, TU375.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-106

0 引言

由于箱形截面梁具有优越的空间受力性能, 因而在工程中得到广泛的运用^[1]。箱梁在承受对称弯曲荷载时, 会由于翼板产生剪切变形而导致翼板上的正应力沿宽度方向呈不均匀分布, 即剪滞效应^[2]。国内外学者对箱梁剪滞效应做了大量的研究工作, 其中试验研究可以验证数值分析和理论的正确性, 从而成为研究工作中的重要一环。试验研究采用的模型主要包括有机玻璃箱梁模型、钢箱梁模型及混凝土箱梁模型。文献[3—5]采用有机玻璃箱梁模型, 分别对变高度连续箱梁及曲线连续箱梁剪滞效应进行了试验研究, 验证了有限段法在变高度连续箱梁及曲线连续箱梁中的适用性。文献[6]采用室内钢箱梁模型试验结合空间有限元法, 对大曲率连续钢箱梁桥的剪滞效应进行了研究, 得到了剪滞系数沿纵、横桥向的变化规律。有机玻璃箱梁模型及钢箱梁模型具有制作简便、测试结果离散性小的优点, 但却不能反映混凝土结构非匀质、非弹性及开裂的性质。文献[7]进行了钢筋混凝土箱梁模型试验, 并结合空间有限元方法, 对弹性工作阶段混凝土箱梁的剪滞效应进行了研究。但已有文献中, 对钢筋混凝土箱梁弹塑性工作阶段的模型试验研究还较少。

目前, 对箱梁剪滞效应进行数值分析一般采用实体有限元法, 如采用板壳单元及块体单元。实体有限元法可以获得全面的应力分布情况, 从而检验分析理论的正确性或近似程度, 但其单元数目大, 单元自由度高, 若再考虑材料非线性将导致求解困难; 且所得到的应力结果, 虽然直观但应用并不方便, 工程实际中还是习惯于采用梁体内力(弯矩、剪力等)进行设计。有限段法考虑到实际工程的这种需要, 在传统梁单元的基础上, 增加剪滞翘曲自由度, 修改单元刚度矩阵及荷载列阵, 然后求解结构刚度方程得到剪滞翘曲位移及对应的剪滞矩, 进而可获得截面上的应力分布情况^[8], 但一般需要自编程序实现。

^{*} 收稿日期: 2012-08-31; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678076), 教育部长江学者与创新团队发展计划项目(IRT1139), 甘肃省自然科学基金项目(1107RJZA122), 甘肃省财政厅资助项目(620029)

通讯作者: 林丽霞(1975—), 女, 副教授, 博士, 主要从事桥梁设计理论方面的研究。E-mail: linlixia@126.com

本文结合钢筋混凝土箱梁模型,进行了整截面工作阶段及带裂缝工作阶段的试验,验证了考虑混凝土材料非线性、剪滞及腹板剪切变形的有限段法^[9]在混凝土箱梁中的适用性。

1 模型及试验

1.1 试验目的

试验以分析混凝土箱梁中的剪滞效应及材料非线性等问题为目的,主要测试钢筋混凝土箱梁截面纵向应力分布情况以及荷载一位移关系,通过对试验梁进行开裂范围内的加载及开裂后的加载,获得荷载一位移曲线及各级荷载作用下纵向应力分布规律,为进一步的理论研究提供试验基础,为有限段法的程序进行验证。

1.2 试验内容

试验内容包括两大部分:开裂前的加载及开裂后的加载。具体如下:

- (1)开裂前的加载:当荷载类型、荷载等级及荷载作用位置变化时,测试控制截面的应力和挠度。
- (2)开裂后的加载:随荷载等级提高,测试控制截面的应力和挠度。

1.3 钢筋混凝土箱梁模型

试验选用桥梁工程中常用的单箱单室矩形箱梁,参考实际桥梁的截面尺寸,同时结合试验场地及加载装置的条件限制,拟定了试验模型的尺寸。梁体长为 3.0m,计算跨度 2.8m,梁宽 600mm,梁高 300mm,顶板、底板和肋板厚度均为 70mm,箱梁模型截面尺寸如图 1 所示。

根据荷载情况进行配筋计算,按照 C35 的要求配制混凝土,全部采用 R235 级钢筋,顶板钢筋(受压区)为 5Φ10,底板钢筋(受拉区)为 8Φ16,两侧肋板各设两根 Φ10 的架立钢筋,箍筋为 Φ10@100,所设置的内侧加腋及承托尺寸均为 30mm×40mm。混凝土立方体抗压强度测试值为 43.4MPa,Φ16 钢筋屈服强度测试值为 265MPa。

1.4 测点位置

在混凝土浇筑之前,将钢筋应变片用特定的结构胶粘贴在钢筋上,用导线引出并做好防潮处理,浇筑完成后,用万用表对应变片进行逐一检查,确保应变片能有效工作。应变片粘贴位置为 L/2 和 L/4 处截面,应变片的位置如图 2 所示,具体编号如图 3 所示。

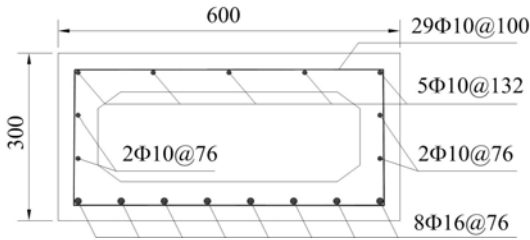


图 1 箱梁模型横截面图(单位:mm)

Fig.1 Section of box girder model (unit: mm)

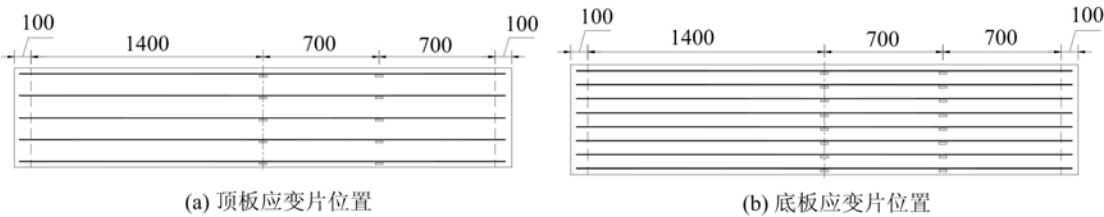


图 2 测点布置图(单位:mm)

Fig.2 Location of the measuring points (unit: mm)

1.5 加载方案

试验采用应变采集仪(DH3816)与电脑连接,并用半桥测量,温度自补偿方法测取应变值,采用百分表测试梁体挠度,采用读数显微镜观测裂缝。

为确定能顺利进行试验,加载前对荷载传感器进行标定,对所有应变片进行了检查,并进行了预加载。正式加载分为整截面工作阶段的加载(截面不开裂),以及带裂缝工作阶段加载(混凝土开裂至表面裂缝最大宽度 0.25mm)。

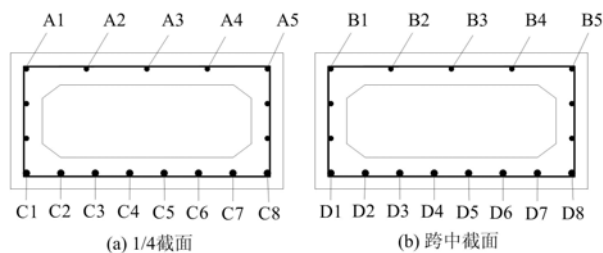


图 3 钢筋应变片编号示意图

Fig. 3 Strain measurement point number of the bar

1.5.1 整截面工作阶段的加载

加载工况如下:①工况一 顶板满布荷载(图 4);②工况二 均布荷载作用在肋板处(图 5);③工况三 集中荷载作用在跨中肋板处(图 6);④工况四 1/4 及 3/4 截面对称集中力作用在肋板处(图 7)。其中工况一及工况二采用红砖及钢板进行加载,以分级叠加砖块及钢板的方式进行试验。试验前,先称取 50 块砖块的总重量,然后取平均值以求得砖块的单重,同时称取同规格单个钢板的重量。试验过程中,依照不同砖块层数和钢板层数的递增加载,然后以同样的方式卸载。工况三施加跨中集中力过程中,采用千斤顶及荷载传感器,配合钢板、垫块分级加载来实现,之后同级卸载。工况四采用千斤顶及荷载传感器,分配梁配合钢板、垫块分级加载来实现,加载直至梁体开裂。



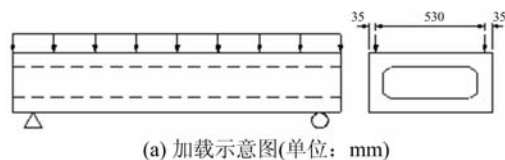
(a) 加载示意图



(b) 顶板满布荷载

图 4 加载工况一

Fig. 4 Loading condition 1



(a) 加载示意图(单位: mm)



(b) 均布荷载作用在肋板处

图 5 加载工况二

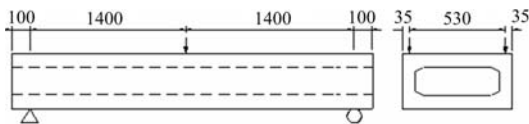
Fig. 5 Loading condition 2

1.5.2 带裂缝工作阶段的加载

仍采用如图 7 所示的加载方式,在开裂至裂缝最大宽度的加载过程中,在荷载位移曲线近乎直线段及挠度增长不快的阶段范围内,每一级荷载以 6kN 的数量递增,在挠度较大、裂缝发展较快阶段,每一级荷载以 3kN 的数量递增,加载至表面最大裂缝宽度达 0.25mm 后,停止加载,整个加载过程共分 24 级。随后,再以同样的荷载级数完成卸载过程。在每级荷载施加后,等待读数稳定十分钟再进行读数。

2 试验结果

对所研究的模型试验梁,用考虑混凝土非线性的有限段法^[9]计算了该梁分别在各级集中荷载、均布荷载作用下的剪滞效应及挠度,用有限段方法计算该梁时,沿梁纵向划分为 8 段,全梁共计 9 个节点,为

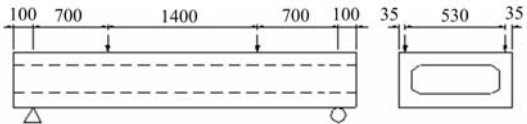


(a) 加载示意图(单位: mm)



(b) 跨中集中力作用在肋板处

图 6 加载工况三
Fig. 6 Loading condition 3



(a) 加载示意图(单位: mm)



(b) 1/4及3/4截面对称集中力作用在肋板处

图 7 加载工况四
Fig. 7 Loading condition 4

考虑材料非线性,每个梁段中顶板、腹板及底板各分为 10 层。

2.1 整截面工作阶段

按图 4 所示的工况一进行加载,所加荷载分别为 2661Pa、5321Pa、8132Pa 以及 10943Pa。跨中及 1/4 截面挠度分别如图 8、9 所示,荷载等级为 10943Pa 时的应力如图 10 所示。

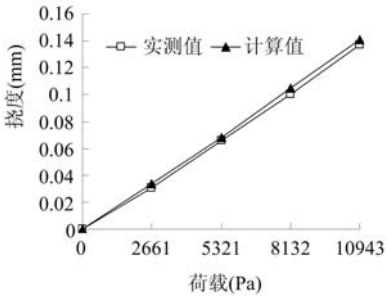


图 8 跨中截面挠度值(工况一)
Fig. 8 Deflection in section of span-middle (loading condition 1)

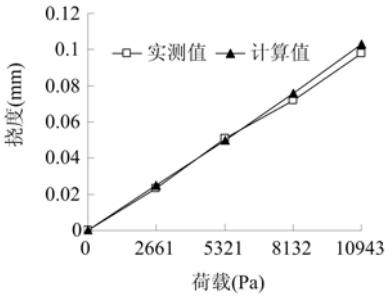


图 9 1/4 截面挠度值(工况一)
Fig. 9 Deflection in 1/4 section (loading condition 1)

从图 8、图 9 中能够看出,在顶板均布荷载作用下,由于施加的均布荷载值较小,荷载一位移关系近似为线性。从图 10 可以看出,在顶板均布荷载作用下,无论是在梁跨中截面,还是在 1/4 截面,顶板与底板均会出现纵向应力不均匀分布的现象(剪滞效应),即靠近梁肋板位置的纵向应力较大,而远离梁肋板位置的纵向应力较小。

按图 5 所示的工况二进行加载,所加荷载分别为 538N/m、1125N/m、1757N/m、2390N/m、3022N/m 以及 3655N/m。跨中及 1/4 截面挠度分别如图 11、图 12 所示,荷载等级为 3655N/m 时的应

力如图 13 所示。

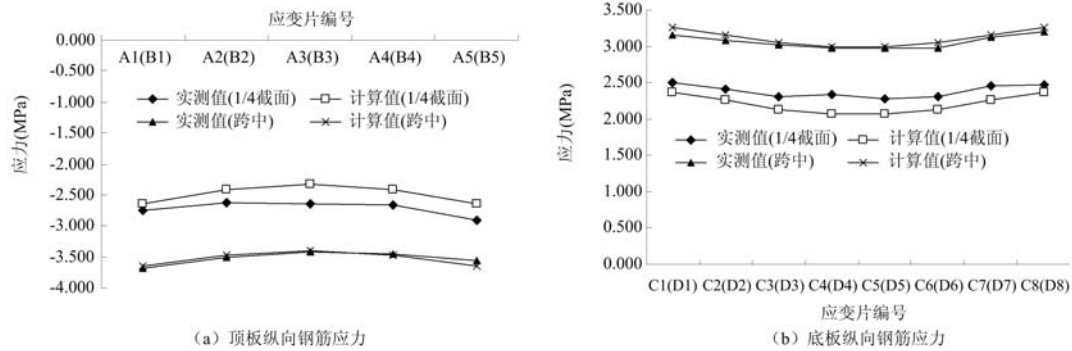


图 10 钢筋应力值(工况一)

Fig. 10 Stress of the bar (loading condition 1)

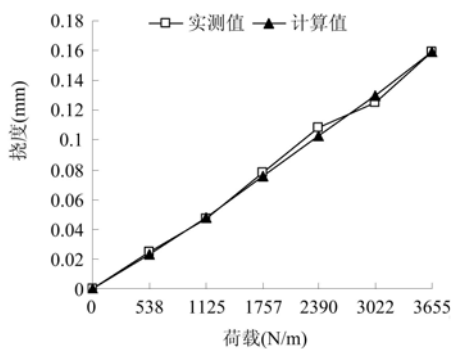


图 11 跨中截面挠度值(工况二)

Fig. 11 Deflection in section of span-middle (loading condition 2)

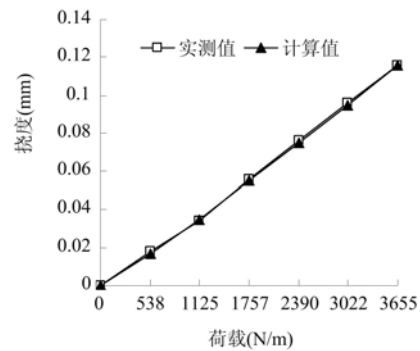


图 12 1/4 截面挠度值(工况二)

Fig. 12 Deflection in 1/4 section (loading condition 2)

从图 11、图 12 能够看出,均布荷载作用在肋板上方时,荷载一位移关系仍然近似为线性。从图 13 与工况一对应的图 10 对照中可以看出,均布荷载作用在顶板与均布荷载作用在肋板上方所出现的纵向应力不均匀分布的现象(剪滞现象)趋势一致,即靠近梁肋板位置的纵向应力较大,而远离梁肋板位置的纵向应力较小。

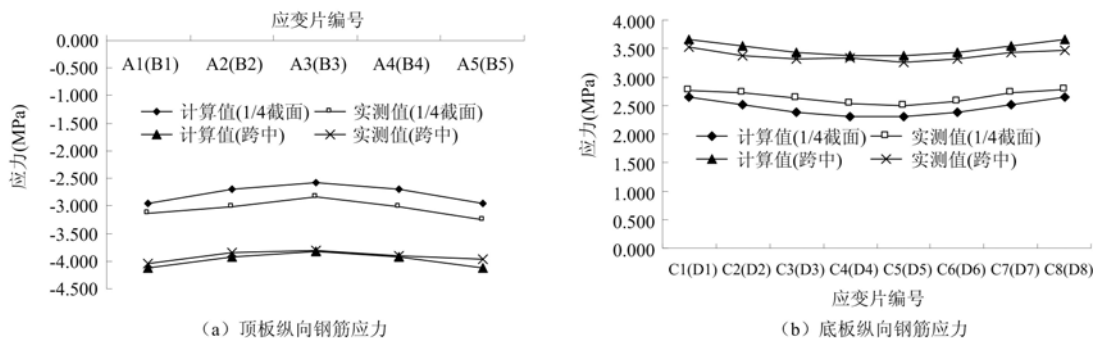


图 13 钢筋应力值(工况二)

Fig. 13 Stress of the bar (loading condition 2)

按图 7 所示的工况三进行加载,所加荷载(千斤顶读数)分别为 5kN、10kN、15kN 及 20kN。跨中及 1/4 截面挠度的测试结果分别如图 14、15 所示,荷载等级为 20kN 时的应力测试结果如图 16 所示。

从图 14、图 15 能够看出,在集中荷载作用在跨中时,荷载一位移关系近似为线性。从图 16 可以看出,在跨中截面表现出明显的剪滞现象,而 1/4 截面则几乎不发生剪滞现象。

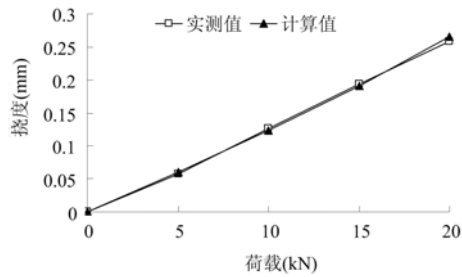


图 14 跨中截面挠度测试值与计算值(工况三)

Fig. 14 Deflection in section of span-middle (loading condition 3)

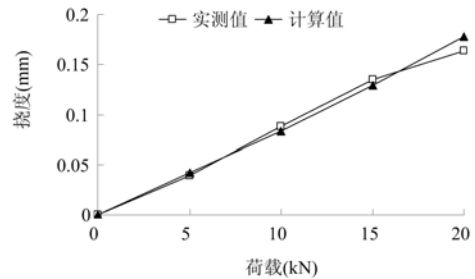
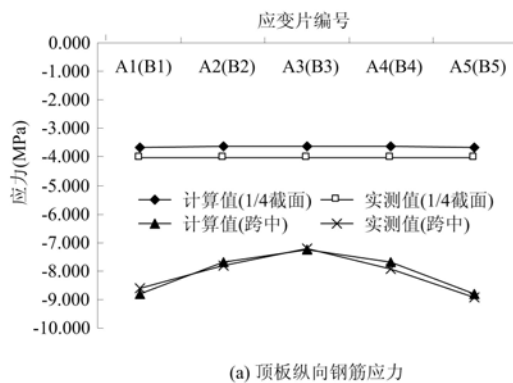
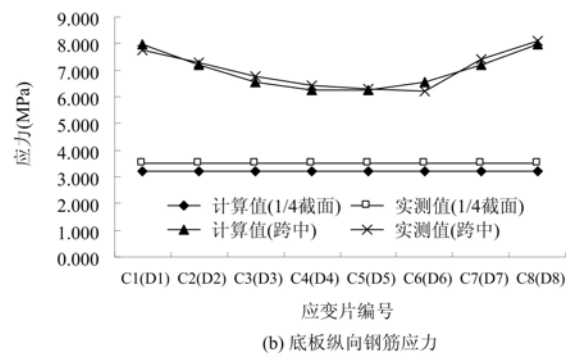


图 15 1/4 截面挠度测试值与计算值(工况三)

Fig. 15 Deflection in 1/4 section (loading condition 3)



(a) 顶板纵向钢筋应力



(b) 底板纵向钢筋应力

图 16 钢筋应力值(工况三)

Fig. 16 Stress of the bar (loading condition 3)

按图 8 所示的工况四进行加载,所加荷载(千斤顶读数)分别为 10kN、20kN、30kN 及 40kN,由分配梁将荷载传至 1/4 截面及 3/4 截面的集中力分别为 5kN、10kN、15kN 及 20kN。跨中及 1/4 截面挠度分别如图 17、图 18 所示,荷载等级(1/4 截面及 3/4 截面的集中力)为 20kN 时的应力如图 19 所示。

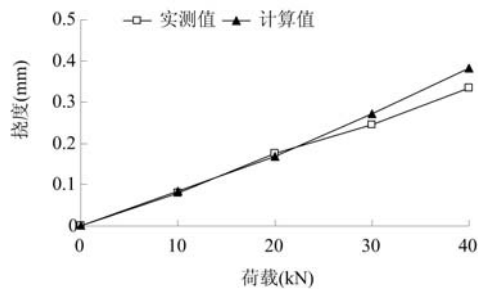


图 17 跨中截面挠度测试值与计算值(工况四)

Fig. 17 Deflection in section of span-middle (loading condition 4)

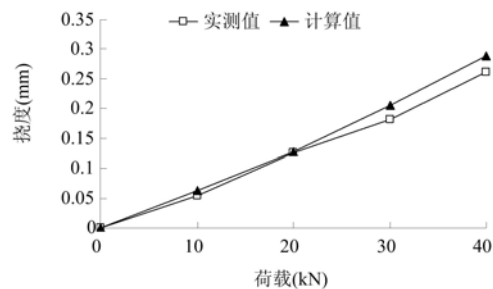


图 18 1/4 截面挠度测试值与计算值(工况四)

Fig. 18 Deflection in 1/4 section (loading condition 4)

从图 17、图 18 能够看出,在集中荷载作用在跨中时,1/4 截面与跨中截面荷载一位移关系仍然可以视为线性。从图 19 可以看出,在 1/4 截面(集中荷载作用截面)出现明显的剪滞现象,而跨中截面则几乎不出现剪滞现象。

2.2 带裂缝工作阶段

2.2.1 挠度

仍按图 7 的加载图示进行加载,所加荷载(千斤顶读数)从 0 增至 270kN(对应 1/4 及 3/4 截面的集中力均为 135kN),荷载一位移关系如图 20 所示。

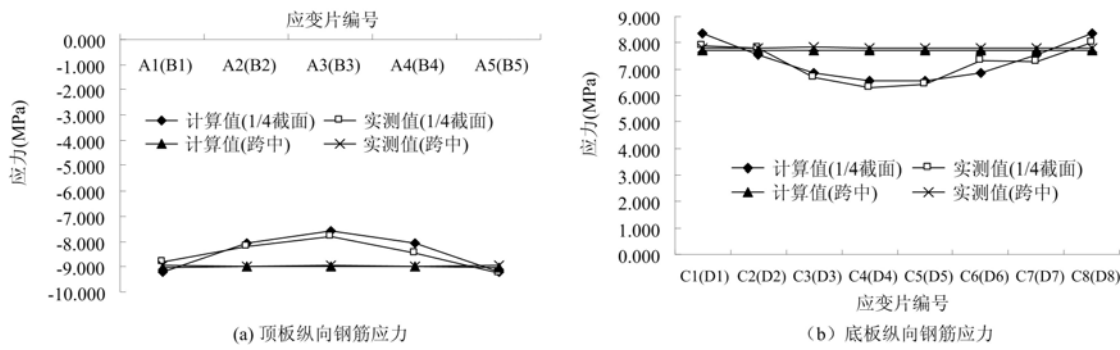


图 19 钢筋应力值(工况四)
Fig. 19 Stress of the bar (loading condition 4)

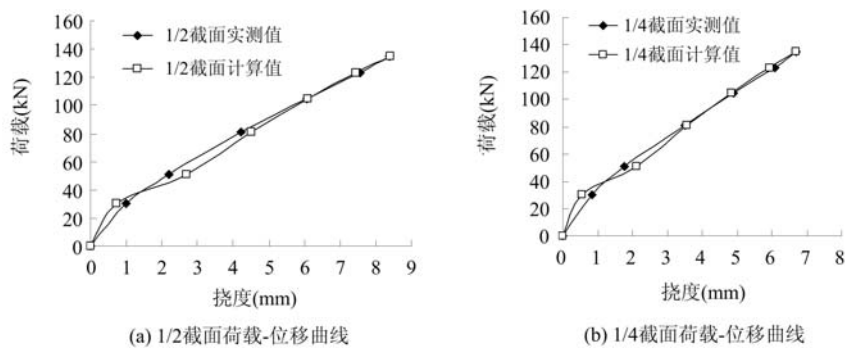


图 20 荷载—位移曲线
Fig. 20 Load - displacement relations

2.2.2 应力

在混凝土带裂缝工作阶段,钢筋应变片测试结果较为离散,对所测得的数据运用最小二乘法进行回归分析,由跨中截面应变结果得到的钢筋应力实测值与计算值的对比见表 1。

表 1 跨中截面的钢筋应力
Tab. 1 Stress in section of span-middle

荷载等级	位置	应力 (MPa)	
		试验值	计算值
30kN	顶板	-26.00	-23.56
	底板	18.53	17.23
51kN	顶板	-39.47	-35.88
	底板	57.13	61.59
81kN	顶板	-56.40	-58.80
	底板	111.67	133.78
105kN	顶板	-68.80	-66.12
	底板	195.60	193.18
123kN	顶板	-78.93	-76.30
	底板	240.00	246.04
135kN	顶板	-84.20	-82.42
	底板	263.20	264.58

从以上试验结果可以看出,在钢筋混凝土简支箱梁的整截面工作阶段,由有限段法得到的应力、挠度计算值与试验值吻合较好,在带裂缝工作阶段,挠度计算值与试验值吻合较好,但应力有较大的误差,主要原因是由于混凝土开裂所引起的数据离散,但随荷载等级增加,所表现出的应力变化总体规律仍符合较好,且一次加载的荷载一位移曲线与一般钢筋混凝土梁的规律一致。

3 结语

(1) 对所制作的钢筋混凝土简支箱梁模型,分别进行了开裂前及开裂后的剪滞效应及荷载一位移关系的试验研究,测量得到均布荷载、集中荷载作用下的应力及挠度的变化规律。

(2) 用可考虑材料非线性本构关系的有限段方法对该模型进行了应力及挠度的计算,与试验结果吻合较好,试验结果成功地用于评价有限段方法在混凝土箱梁中运用的有效性。

(3) 钢筋混凝土简支箱梁模型应力测试结果表明:整截面工作阶段,均布荷载及集中荷载作用于跨中肋板上时均产生剪滞效应,且施加集中荷载时的剪滞效应比施加均布荷载时的剪滞效应更明显;剪滞效应具有明显的局部性,即荷载作用位置附近(支座反力也可看作荷载)的剪滞效应明显,远离荷载作用位置的截面剪滞效应不明显。带裂缝工作阶段的应力测试结果较为离散,尤其是荷载作用位置处,今后进行剪滞效应试验研究时需要采用更稳定的测试器材。

参考文献:

- [1] 郭金琼, 房贞政, 罗孝登. 箱形梁桥剪滞效应分析[J]. 土木工程学报, 1983, 16(1):1-13(Guo Jinqiong, Fang Zhenzheng, Luo Xiaodeng. Analysis of Shear Lag Effect in Box Girder Bridges[J]. Journal of Civil Engineering, 1983, 16(1):1-13(in Chinese))
- [2] Reissner E. Analysis of Shear Lag in Box Beams by the Principle of Minimum Potential Energy[J]. Quart. J. Appl. Math, 1946, 4(3):268-278.
- [3] 吴幼明, 罗旗帜, 岳珠峰. 变高度连续箱梁剪力滞效应试验研究[J]. 实验力学, 2004, 19(1):85-90 (WU Youming, LUO Qizhi, YUE Zhufeng. An Experimental Study on the Shear Lag Effect of Continuous Box Girder with Varying Depth[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(1):85-90 (in Chinese))
- [4] 罗旗帜, 杜嘉斌, 吴幼明. 连续曲线箱梁模型试验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(4):502-512 (LUO Qizhi, DU Jiabin, WU Youming. A Model Experimental Study of the Continuous Curved Box Girder[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4):502-512(in Chinese))
- [5] Chang S T, Yung D. Shear Lag Effect in Box Girder with Varying Depth[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1988, 114(10):2280-2292.
- [6] 赵煜, 刘波. 大曲率连续钢箱梁桥剪力滞试验与分析[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(3):311-316 (ZHAO Yu, LIU Bo. Test and Analysis of Shear Lag for Continuous Steel Bridge with Large Curvature[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(3):311-316(in Chinese))
- [7] 方志, 曹国辉, 王济川. 钢筋混凝土连续箱梁剪力滞效应试验研究[J]. 桥梁建设, 2000(4):1-3 (Fang Zhi, Cao Guohui, Wang Jichuan. Experimental Study on Shear Lag Effect of RC Continuous Box Girder[J]. Bridge Construction, 2000(4):1-3(in Chinese))
- [8] Wu Yaping, Liu Shizhong, Zhu Yuanlin, et al. Matrix Analysis of Shear Lag and Shear Deformation in Thin-Walled Box Beams[J]. Journal of Engineering Mechanics. ASCE, 2003, 129(8):944-950.
- [9] 林丽霞. 钢筋混凝土箱梁非线性分析及剪滞、剪切效应的有限段法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2010:40-73 (Lin Lixia. A Finite Segment Method for Analyzing Shear Lag and Shear Deformation Effect and Non-linear Behavior of R. C. Box Beam[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2010:40-73 (in Chinese))

Experimental Study of the Nonlinear and Shear-lag Effect of R. C. Box Girder

LIN Li-xia, WU Ya-ping, DING Nan-hong, SU Qiang

(School of Civil Engineering Lanzhou jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A simply supported reinforced concrete (R. C.) box girder model was manufactured in order to study its nonlinear and shear lag effect. Experiments include both loading within cracking range of box girder model and loading after its cracking. The experiment before model cracking includes four different loading patterns: uniformly distributed load on the roof, uniformly distributed load acting on the rib board, concentrated force acting on the span middle section and symmetrical concentrated forces acting on 1/4 section and 3/4 section. The experiment after model cracking only includes symmetrical concentrated forces acting on 1/4 section and 3/4 section. During experiment, adopting half bridge measurement and temperature self compensation, the strain values were obtained by strain collection instrument connected with computer; using dial indicator, the beam deflection was measured; using reading microscope, the cracks were observed. The stress and strain distribution regularities measured in experiments verify the existence of shear lag in reinforced concrete box girder. Experimental results present better agreement with the calculation of finite segment taking into account nonlinear of concrete and confirm the applicability of finite segment method in R. C. box girder shear lag.

Keywords: reinforced concrete box girder; shear lag; model experiment; non-linear; finite segment method