

文章编号:1001-4888(2006)04-0502-11

# 连续曲线箱梁模型试验研究<sup>\*</sup>

罗旗帜<sup>1,3</sup>, 杜嘉斌<sup>2</sup>, 吴幼明<sup>1</sup>, 刘光栋<sup>3</sup>

(1. 广东佛山科学技术学院 土建系, 广东佛山 528000; 2. 广州城建开发设计院有限公司, 广东广州 510620;  
3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 建立一两跨连续曲线箱梁有机玻璃试验模型。二跨连续箱梁模型的跨径为 45cm+45cm, 分别进行了在集中荷载、均布荷载作用下的模型试验研究。垂直集中荷载采用杠杆法加载, 均布荷载采用特制条形砝码搁置加载。采用 YJ-25 静态电阻应变仪、平衡箱, 并用半桥测量, 温度自补偿方法测定应变值。各种测试值均取分级荷载下读数的平均值, 测量得到了沿横截面的应力、应变分布规律。用有限段法和有限元法对该模型进行了应力计算, 与试验结果比较吻合较好, 实验验证了理论的正确性。

**关键词:** 曲线箱梁; 模型试验; 有限段法; 有限元法

**中图分类号:** U448; TU317.1      **文献标识码:** A

## 0 引言

薄壁箱梁具有显著的空间结构特征, 目前国内外在工程设计中, 为了简化分析, 通常采用荷载等效分解法按薄壁杆理论进行结构分析<sup>[1]</sup>, 即将作用于箱梁顶面任意位置上的垂直荷载, 分解为对称纵向荷载、反对称扭曲荷载、局部荷载三种等效荷载。然后分别进行弯曲、扭转(包括纯扭转和约束扭转)、畸变和局部横向弯曲等四个部分计算, 最后予以叠加, 以得到截面上各点的纵向应力和横向应力。其中纵向弯曲和扭转主要计算纵向应力, 局部横向弯曲主要计算横向应力, 畸变则对两者都要计算。纵向弯曲还要考虑剪力滞问题<sup>[2-5]</sup>。薄壁曲线箱梁在纵向对称弯曲荷载作用下, 由于存在弯扭耦合作用, 使得应力分析变得复杂。作者曾以薄壁曲杆理论为基础, 运用能量泛函变分原理, 导出了弯、扭、剪力滞耦合的一般闭合解<sup>[6]</sup>, 并从理论上分析了剪力滞效应的影响, 但仅限于单跨曲线箱梁。在文献[6]的基础上, 作者进一步提出了以控制微分方程的齐次解作为梁段单元位移模式的有限段法<sup>[7]</sup>, 建立了适合于连续曲线箱梁弯、扭和剪力滞耦合的计算方法, 但需得到试验验证。

桥梁模型试验是研究桥梁结构应力分布状态的直接可靠手段, 模型试验对定性分析方面具有指导性意义, 是解决桥梁结构所产生的问题、验证理论计算结果的可靠途径之一。目前, 一些学者针对薄壁箱梁进行模型试验研究, 重点研究了在纵向对称荷载作用下的剪力滞问题<sup>[8-10]</sup>。但是模型试验多数限于直线箱梁, 对于连续曲线箱梁模型试验研究成果报导较少。为此, 本文建立了一两跨连续曲线箱梁有机玻璃模型桥, 自行设计了专门的实验台座和加载系统, 分别在对称集中荷载和均布荷载作用下的模型进行了试验研究。测量得到的横截面应力、应变分布规律, 与作者提出的有限段法结果进行比较, 以验证理论的正确性和可靠性, 为曲梁试验研究积累了有益的经验。

\* 收稿日期: 2005-09-13; 修订日期: 2006-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378019); 广东省自然科学基金资助项目(034066)

通讯作者: 罗旗帜(1955—), 男, 博士, 教授。主要从事结构与桥梁工程研究。

## 1 模型及试验

### 1.1 试验目的

通过有机玻璃两跨等截面曲线箱梁模型试验,探索在集中荷载和均布荷载作用下,对两跨等截面连续曲线箱梁的横截面应力分布规律,从而验证理论分析的正确性和可靠性,为理论研究和工程设计提供依据。

### 1.2 试验内容

(1) 在两跨连续曲线箱梁一跨跨中正对腹板位置的上翼板处对称地施加竖向集中荷载;然后测试此工况下跨中截面与内支座一侧截面的应力分布。

(2) 在两跨连续曲线箱梁正对腹板位置的上翼板处对称地施加均布竖向均布荷载;然后测试此工况下跨中截面与内支座一侧截面的应力分布。

### 1.3 模型设计与制作

根据理论分析和试验内容的要求,制作了一个两跨等截面连续曲线箱梁有机玻璃模型。桥跨的布置为45cm+45cm,曲箱梁桥的中线曲率半径为 $R_{\text{中线}}=42.97\text{cm}$ ,曲线梁桥的中心角 $\theta=120^\circ$ ,每一跨 $\frac{\theta}{2}=60^\circ$ 。分别在两端以及中间支座处设置一共三根横隔板。模型的示意图、截面尺寸、横隔板尺寸、桥板尺寸,分别见图1、图2、图3和图4所示。

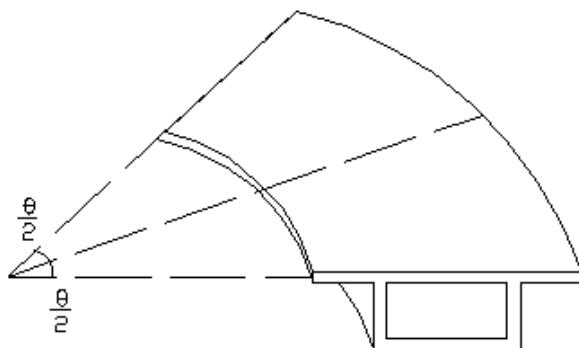


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

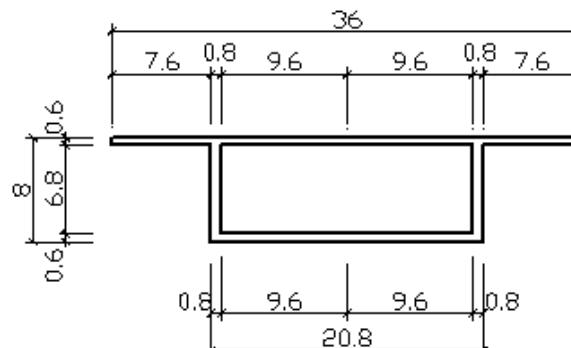
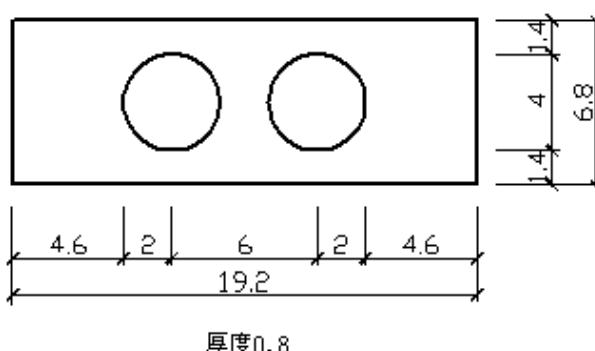


图2 截面尺寸(单位:cm)

Fig. 2 Diagram of cross section size (unit: cm)



厚度0.8

图3 横隔板尺寸(单位: cm)

Fig. 3 Diagram of diaphragm size (unit: cm)

### 1.4 测点布置

试验时,在典型横截面上布置了应变片。为了提高测试精度,减少加载点对测点应变的影响,在翼板的同一位置上下两面均贴双向应变片。为了测试该模型的应变分布,分别在图5所示的2个截面处布置了测点。截面I、截面II顶板上下面各贴11个测点,底板上下面各贴5个测点,共计64个测点。各测点在横截面上的布置见图6所示。试验时主要测试跨中截面II和靠近支座截面I的应变值。

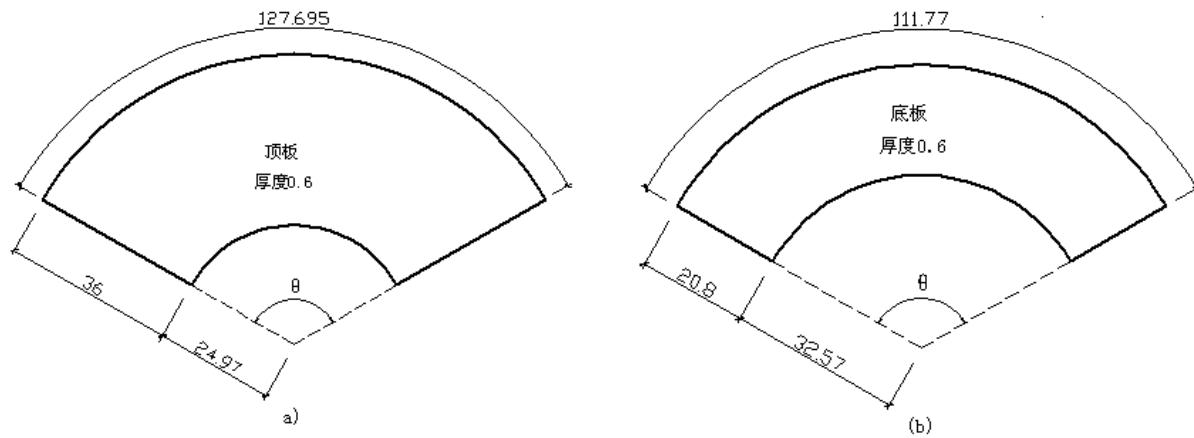


图4 桥板尺寸(单位:cm)  
Fig. 4 Diagram of deck slab size (unit: cm)

为保证测试准确,粘贴电阻应变片时尽量挤薄胶层,在15倍放大镜下校准方向并检查没有夹气泡或不透明区域;应变片贴胶在压力下固化,保证粘贴质量;因为接线端子有一定厚度,采用双面不干胶粘贴接线端子,以减小接线端子对测点应力的干扰。

应变片采用浙江黄岩测试仪器厂生产的同批 $2 \times (2\text{mm} \times 2\text{mm})$ 箔式双向(形)酚醛基应变片,电阻值为 $120\Omega$ 。采用环氧树脂胶粘剂粘贴,贴片区域用细砂纸打磨,保证粘贴牢靠。

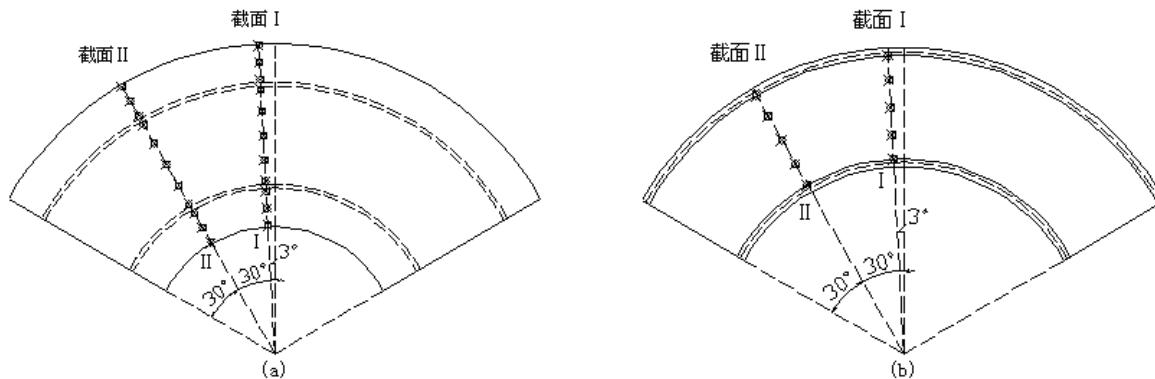


图5 测点布置图(a)顶板测点布置图;(b)底板测点布置图  
Fig. 5 Arrangement diagram of measuring point; (a) Arrangement diagram of measuring point of top slab  
(b) Arrangement diagram of measuring point of bottom slab

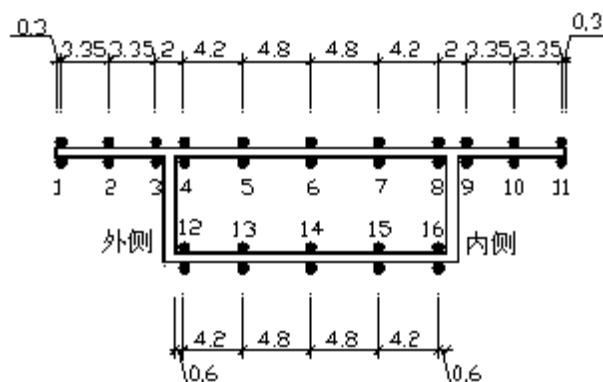


图6 横截面测点布置图(单位:cm)  
Fig. 6 Arrangement diagram of measuring point of cross section(unit:cm)

## 1.5 加载方案

### 1.5.1 坚向集中荷载

采用杠杆,并通过分配梁下垫小刚球传力加载,两小钢球分别对准腹板的上翼板处。为了测试施加荷载的大小在加力点处装一个拉压传感器。为保证荷载读数准确,试验过程中调整支点高度,保证杠杆的水平,如图7所示。

### 1.5.2 坚向均布荷载

先在两腹板上方放置两条Φ8mm橡胶垫条,保证荷载均布。然后将特制条形砝码对称地横跨搁置在两个垫条的上面,该特制条形砝码的尺寸为2×4×32cm,标准质量为2kg,如图8所示。

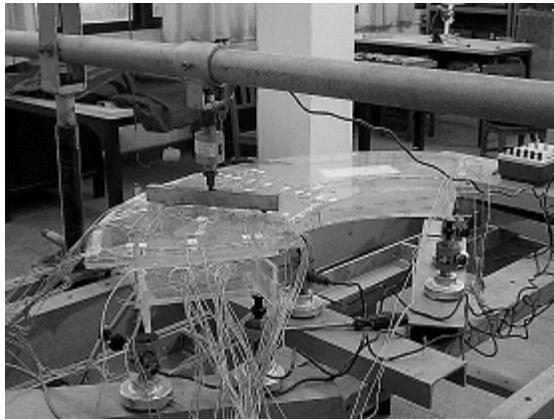


图7 坚向集中荷载示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vertical concentrated load

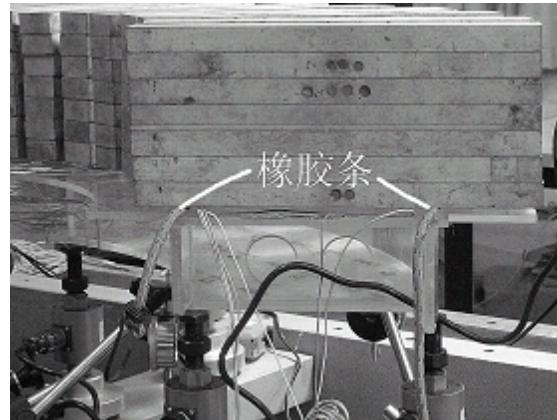


图8 坚向均布荷载示意图

Fig. 8 Schematic diagram of vertical uniformly distributed load

### 1.5.3 加载

试验分5级(集中荷载)和3级(均布荷载)加载,由于有机玻璃的变形持续时间较长,不易稳定,为保证数据的稳定性,每次加载后10分钟才开始读数,并记录下来。

## 1.6 支座

本试验采用特制的球状带传感器的支座,该支座由底座跟螺栓组成,通过调节螺栓可以调节支座的高度,螺栓的顶端做成球状,以模拟点支撑。利用传感器,可以通过仪表测出支点反力的大小。本试验通过在两端以及中间横隔板下放置两个支座来模拟曲线梁中常用的抗扭支座,如图9所示,特制球状支座分别放置在正对腹板的下翼板处。

## 1.7 测量方法

- (1) 采用静态电阻应变仪,并用半桥测量,数据通过电脑采集。
- (2) 特制自带传感器的支座,测其支座反力。
- (3) 用百分表对称地装置在跨中截面两腹板下缘的中心,以测定其最大挠度值。
- (4) 坚向集中荷载通过杠杆臂用砝码加载,其力的大小由拉压传感器校核。

## 1.8 材料试验

有机玻璃材料性能指标主要是弹性模量和泊松比,试验采用制作模型的同一批材料。材料的拉伸试件采用粘贴双向应变片于试件测点位置上下侧,以测定其轴向应变和横向应变,进而确定其拉伸弹性模量和泊松比。

材料的弯曲试件采用具有两块矩形板前后粘合而成的简支梁,应变片分别贴于两跨中的上下表面上,以测定其应变,进而确定材料的弹性模量。

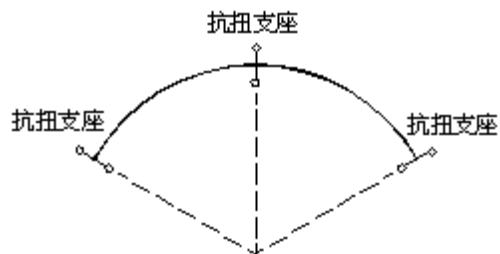


图9 支座布置图

Fig. 9 Arrangement diagram of support

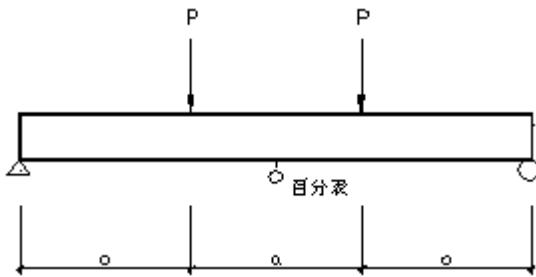


图 10 测量弹性模量简支梁示意图

Fig. 10 Schematic diagram of simply supported beam to measure Young's Modulus

如图 10 所示,两作用力  $P$  加载在梁的三等分点上,此时试件中段部分处于纯弯曲受力状态,弹性模量与泊松比根据式  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_x}$ ,  $\mu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$ , 求得,在前式中:弯曲时  $\sigma = \frac{6Pa}{Bh^2}$ ;拉伸时  $\sigma = \frac{N}{bh}$ ;  $b$  是试件截面宽度;  $h$  是试件截面高度;  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  分别为轴向应变和横向应变。

经过测量和计算,结果为:弹性模量  $E=2.6\text{GPa}$ , 泊松比  $\mu=0.32$ 。

### 1.9 数据处理

#### 1.9.1 试验数据

(1) 各种测试值均取分级荷载下读数的平均值。

(2) 采用半桥接法,直接测出测点上下表面应变值,然后取其均值。

(3) 应力数据是由实测的应变值  $\epsilon_x$  和按公式  $\sigma_x = E\epsilon_x$  求得,其中  $\sigma_x$  是应力平均值;  $\epsilon_x$  是实测应变平均值。

#### 1.9.2 有限段法

曲线箱梁在对称荷载作用下,受力比较复杂。箱梁截面的纵向应力包括了弯曲应力(包括剪力滞影响)、扭转(包括纯扭转和约束扭转)应力、畸变翘曲应力组成。有限段法<sup>[7]</sup>只是考虑了弯、扭、剪力滞耦合,忽略了畸变翘曲应力的影响。为了更好地与试验数据以及有限元计算所得结果进行比较,算出了有机玻璃模型在各种工况下的畸变翘曲应力,与有限段法算出的结果进行叠加得到箱梁截面的纵向应力。

#### 1.9.3 有限元法

本文根据试验模型梁的尺寸和荷载工况,应用有限元进行计算分析,结果与实测值作比较。

##### (1) 建模

采用通用有限元法对有机玻璃模型进行了分析,用实体单元模拟曲线箱梁的翼缘、腹板以及横隔板,共分 30708 个单元。曲线梁桥的尺寸、荷载工况以及支承条件均与试验情况一致。全桥的有限元分析计算模型如图 11 所示。

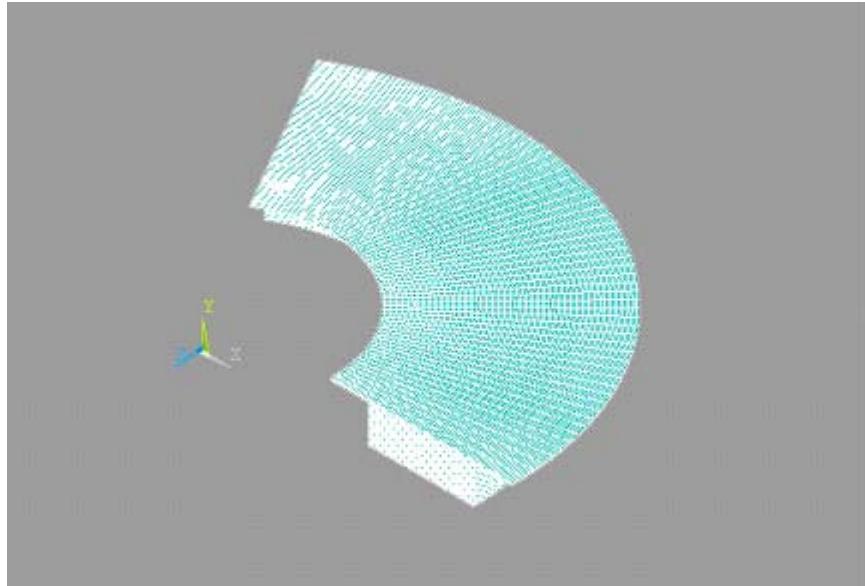


图 11 有限元计算模型图

Fig. 11 Calculation model diagram of finite element

## (2) 支座约束

通用有限元程序的支座约束是在加载求解模块中进行的。分别在 $0^\circ$ 、 $120^\circ$ 的底板的两端的节点在 $x$ (横桥向)、 $z$ (竖向)两个方向的位移进行约束,  $60^\circ$ 的底板的两端的节点在 $x$ (横桥向)、 $z$ (竖向)、 $y$ (纵桥向)三个方向的位移进行约束。

## 2 试验结果及比较

### 2.1 计算结果

#### 2.1.1 集中荷载

利用有限段法和有限元法,计算了在集中荷载( $P=0.172\text{kN}$ )作用下中间支座截面I、跨中截面II的正应力,与试验值一并列于表1和图12~图15。表中数据对应的测点号见图6所示。

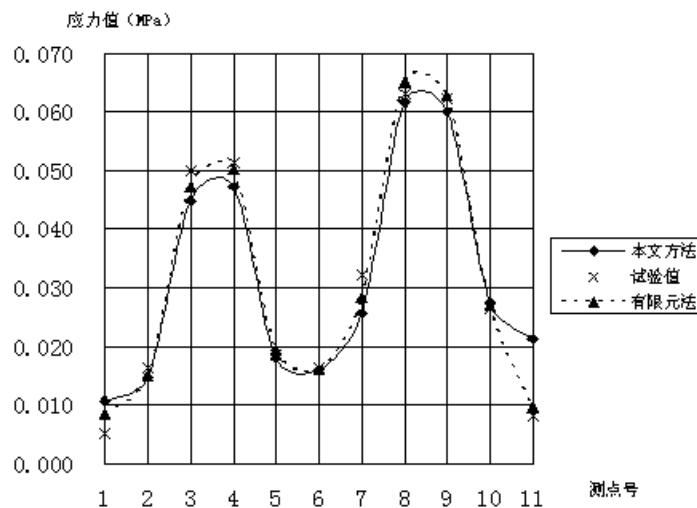


图12 集中荷载作用下截面I-I顶板应力

Fig.12 Top slab's stress diagram of section I - I under concentrated load

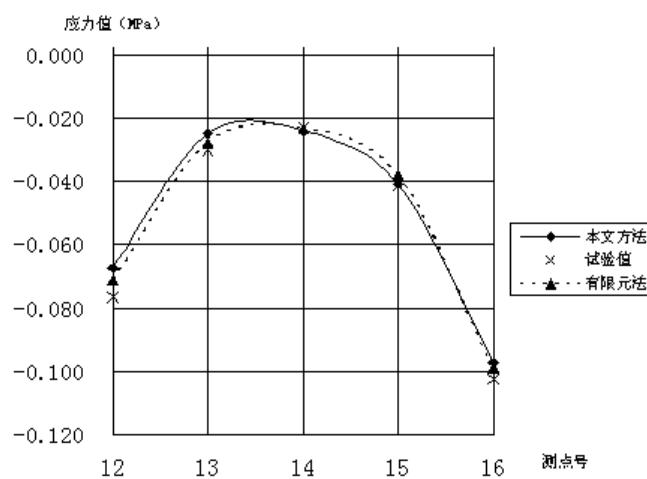


图13 集中荷载作用下截面I-I底板应力

Fig.13 Bottom slab's stress diagram of section I - I under concentrated load

表1 集中荷载作用下各截面的应力值(单位: MPa $\times 10^{-1}$ )  
 Tab. 1 Stress of sections under concentrate load (unit: MPa $\times 10^{-1}$ )

		截面 I-I			截面 II-II		
位置	测点	有限段法	实验值	有限元法	有限段法	实验值	有限元法
悬臂板	1	0.10779	0.05230	0.08560	-0.48430	-0.24180	-0.29619
	2	0.14821	0.16330	0.15036	-0.52312	-0.56160	-0.58298
	3	0.44879	0.48011	0.47320	-1.00907	-0.98080	-1.02440
顶板	4	0.47293	0.51350	0.50249	-1.05569	-1.01920	-1.08510
	5	0.18010	0.18570	0.19520	-0.61227	-0.61640	-0.63361
	6	0.16002	0.16310	0.16163	-0.64855	-0.66560	-0.65889
	7	0.25666	0.32150	0.28325	-0.88631	-0.85660	-0.83915
	8	0.61649	0.63210	0.65215	-1.56951	-1.51040	-1.53290
悬臂板	9	0.60084	0.62280	0.62818	-1.54746	-1.48940	-1.38090
	10	0.27526	0.26540	0.27114	-0.95253	-0.98210	-0.96051
	11	0.21230	0.08220	0.09708	-0.81290	-1.00020	-0.98124
底板	12	-0.67283	-0.76440	-0.71248	1.46252	1.62500	1.69879
	13	-0.25000	-0.30210	-0.27918	0.85430	0.90200	0.92751
	14	-0.24146	-0.22810	-0.23304	0.97862	0.95570	0.93211
	15	-0.40903	-0.41230	-0.37840	1.40695	1.38200	1.37891
	16	-0.97103	-1.02300	-0.98858	2.49873	2.39900	2.33625
简图							

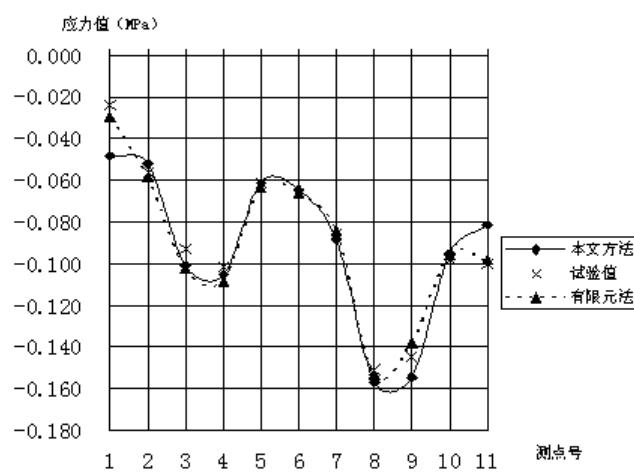


图14 集中荷载作用下截面II-II顶板应力  
 Fig. 14 Top slab's stress diagram of section II-II under concentrated load

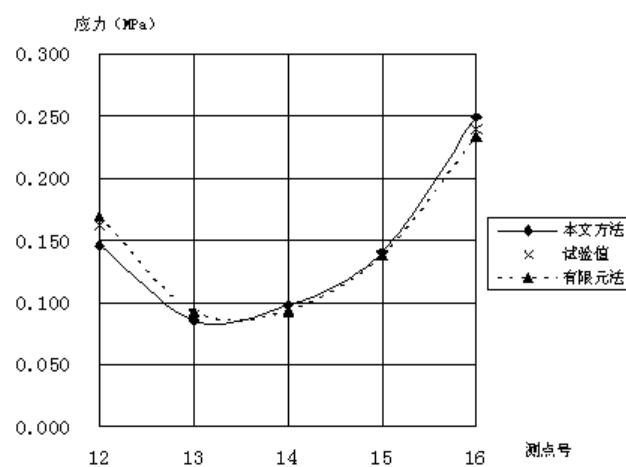


图 15 集中荷载作用下截面 II-II 底板应力

Fig. 15 Bottom Slab's Stress Diagram of Section II-II Under Concentrated Load

### 2.1.2 均布荷载

利用有限段法和有限元法,计算了在均布荷载( $q=0.5778\text{kN/m}$ )作用下中间支座截面 I、跨中截面 II 的正应力,与试验值一并列于表 2 和图 16~图 19。表中数据对应的测点号见图 6 所示。

表 2 均布荷载作用下各截面的应力值(单位:MPa $\times 10^{-1}$ )Tab. 2 Stress of sections under distributed load(unit:MPa $\times 10^{-1}$ )

		截面 I-I			截面 II-II		
位置	测点	有限段法	实验值	有限元法	有限段法	实验值	有限元法
悬臂板	1	0.43861	0.15201	0.18201	-0.24231	-0.27300	-0.25563
	2	0.48211	0.44231	0.49883	-0.25456	-0.36400	-0.30210
	3	1.04842	1.04607	1.10810	-0.44583	-0.46420	-0.47109
顶板	4	1.08080	1.01660	1.07680	-0.46645	-0.48430	-0.49025
	5	0.47203	0.40012	0.42001	-0.30118	-0.33300	-0.33293
	6	0.40587	0.36820	0.37095	-0.33034	-0.33760	-0.34820
	7	0.57330	0.56601	0.59282	-0.44040	-0.40320	-0.38219
	8	1.27068	1.34073	1.29210	-0.72748	-0.70100	-0.68528
悬臂板	9	1.22343	1.23023	1.32460	-0.72052	-0.69010	-0.67109
	10	0.53663	0.42300	0.47210	-0.47782	-0.48520	-0.45322
	11	0.37325	0.09930	0.13982	-0.41842	-0.39260	-0.41042
底板	12	-1.64661	-1.55200	-1.45620	0.63443	0.70230	0.73514
	13	-0.72066	-0.80321	-0.78633	0.41745	0.48250	0.46196
	14	-0.61243	-0.63216	-0.62284	0.49846	0.52030	0.49626
	15	-0.85666	-0.81204	-0.80236	0.70155	0.72980	0.67820
	16	-1.90161	-2.02330	-2.11149	1.16712	1.09000	1.06840
简图							

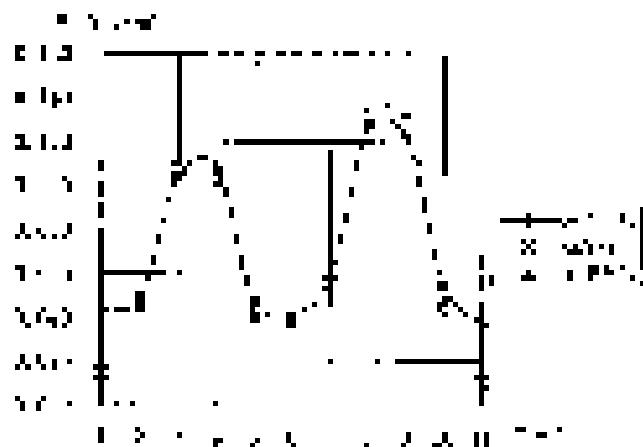


图 16 均布荷载作用下截面 I - I 顶板应力

Fig. 16 Top Slab's Stress Diagram of Section I - I Under Uniformly Distributed Load



图 17 均布荷载作用下截面 I - I 底板应力

Fig. 17 Bottom Slab's Stress Diagram of Section I - I Under Uniformly Distributed Load

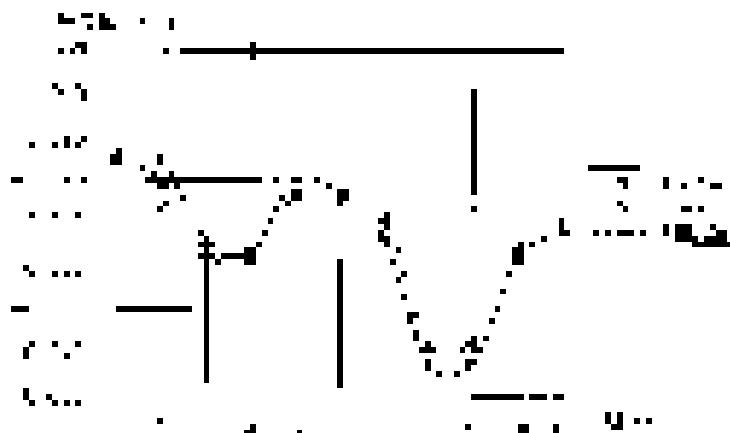


图 18 均布荷载作用下截面 II - II 顶板应力

Fig. 18 Top Slab's Stress Diagram of Section II - II



图 19 均布荷载作用下截面 II-II 底板应力

Fig. 19 Bottom Slab's Stress Diagram of Section II-II Under Uniformly Distributed Load

## 2.2 结果分析

(1) 有限段法与试验值以及有限元计算的结果吻合较好,特别是靠近腹板处翼板的最大应力值符合更好,例如,在集中荷载的作用下,II-II 截面顶板最大应力点(测点 8)的计算值与实验值只是相差 4%,其他截面最大应力点的误差也不大。说明本文方法能满足工程精度要求。

(2) 无论是在对称集中荷载还是对称均布荷载作用下,曲线箱梁内侧的正应力比外侧的大。

(3) 由于有限段法将翼板作了平面应力假定,忽略翼板的横向剪切变形( $\epsilon_s=0$ ),尽管所获得的最大应力值与试验应力值相接近,但是悬臂板的自由端仍存在较大的误差。

## 3 结语

(1) 建立一两跨连续曲线箱梁有机玻璃实验模型,分别进行了集中荷载、均布荷载作用下的模型试验研究,测量得到了横截面的应力、应变分布规律,给工程设计和施工提供了参考。

(2) 用有限段法和有限元法对该模型进行了应力计算,与试验结果比较吻合较好,实验验证了有限段法和有限元法的可靠性。

(3) 模型试验表明,两跨连续曲线箱梁存在显著的剪滞效应、畸变和扭翘效应,尤其对大曲率连续曲线箱梁设计时应注重考虑剪滞、畸变和扭翘效应。

(4) 对两跨连续曲线箱梁进行数值计算时,有限段法具有比有限元法简便实用和适合工程应用的特点。

**致谢:**本文研究得到佛山科学技术学院土木工程系以及饶德军老师和研究生熊稚军的指导和帮助,谨此致谢。

## 参考文献:

- [1] Kristek V. Theory of box girder[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979: 9~11.
- [2] Kuzmanovic B O, Graham H J. Shear lag in box girders[J]. J Struct. Div, ASCE, 1981, 107(9): 1701~1712.
- [3] 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. Journal of Civil Engineering, 1983, 16 (1): 1~13 (in Chinese))
- [4] 程翔云,罗旗帜. 箱梁在压弯荷载共同作用下的剪力滞[J]. 土木工程学报, 1991, 24(1): 52~64 (Cheng Xiangyun, Luo Qizhi. Shear lag of box girders under combined bending and axial loading. Journal of Civil Engineering, 1991, 24(1): 52~64 (in Chinese))

- [5] 吴幼明,罗旗帜,岳珠峰. 薄壁箱梁剪滞效应的能量变分法[J]. 工程力学,2003,20(4):61~65 (Wu Youming, Luo Qizhi, Yue Zhufeng. Energy-variational method of the shear lag effect in thin walled box girder. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 61~65(in Chinese))
- [6] Luo Q Z, Li Q S. Shear lag of thin-walled curved girder bridges[J]. J. Engng. Mech., ASCE, 2000, 126(10): 1111~1114.
- [7] 杜嘉斌,罗旗帜,张学文. 计算薄壁曲线箱梁剪滞效应的有限段法[J]. 华南理工大学研究生学报,2004,18(5):68 ~75 (Du Jiabin, Luo Qizhi, Zhang Xuewen. Finite segment method for calculating shear lag effect of thin-walled curved box girders. Postgraduate Journal of South China University of Technology, 2004, 18(5): 68 ~ 75 (in Chinese))
- [8] 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. Bridge Construction, 2000(4):1~3(in Chinese))
- [9] 刘山洪,何广汉,杨永贤. PPC 箱梁节段模型剪滞效应的试验研究[J]. 桥梁建设,2000(3):5~7(Liu Shanhong, He Guanghan, Yang Yongxian. Test study of shear lag effect in model of a PPC box girder segment. Bridge construction, 2000(3):5~7(in Chinese))
- [10] 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 Zhufen. An experimental study on the shear lag effect of continuous box girder with varying depth. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(1): 85~90(in Chinese))

## A Model Experimental Study of the Continuous Curved Box Girder

LUO Qi-zhi<sup>1,3</sup>, DU Jia-bin<sup>2</sup>, WU You-ming<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Foshan University, Guangdong 528000, China;

2. Guangzhou City Construction and Development Institute Co., Ltd., Guangdong 510620, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A two-span continuous curved box girder model was made with Perspex. The span of the two-span continuous box girder model was 45cm+45cm. Experimental studies were preformed with the model under vertical concentrated loading and vertical uniformly distributed loading respectively. Vertical concentrated load was applied through a lever system. Vertical distributed loads were applied with specially made standard strips of weights. Adopting the methods of semi-bridge measurement and temperature self-compensation, the strain values were measured by YJ-25 static resistance strain set, balance box, and all these data were the averages of the readings under different classified loadings. The distributions of stress and strain on cross section were obtained from the experiments. The experimental results were compared with the finite segment results and the finite element results. A good agreement is obtained. The accuracy of theory is verified by the experiments.

**Key words:** curved box girder; model test; finite segment method; finite element method