

面向双层交通的混凝土箱梁桥弹性试验研究

祝明桥, 颜泽峰, 陈 林, 刘 涛

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411100)

摘要: 为适应当前公路、铁路运输量的急剧增长, 本文设计出一种面向双层交通的钢筋混凝土箱梁桥. 该桥梁取消了箱梁内部横隔板, 同时利用箱梁顶板和底板作为桥面系, 从而实现双层交通. 本文对该箱梁缩尺模型(1:6)进行了多工况的拟静力加载试验, 对其弹性工作性能进行了初步研究. 结果表明: (1) 腹板孔洞对箱梁整体及局部变形均有影响; (2) 箱梁内横向加劲肋的刚度较弱; (3) 上、下加载时箱梁顶底板剪力滞效应区别明显. 因此, 今后对该类箱梁进行结构设计时需要重点考虑腹板孔洞、横向加劲肋以及上下加载情况的影响.

关键词: 桥梁; 箱形梁; 双层交通; 钢筋混凝土; 实验

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0198-08

Study on the elastic behavior of a novel RC box girder oriented to the double-deck bridges

ZHU Mingqiao, YAN Zefeng, CHEN Lin, LIU Tao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411100, China)

Abstract: In order to adapt to the rapid growth of the highway and railway consideration, a novel reinforced concrete (RC) box girder oriented to double-deck bridges was designed. The internal diaphragm of the box girder was eliminated so as to achieve the double-deck traffic function. In this paper, a scaled model (1:6) of the box girder was tested with various loading conditions, and the static elastic properties were studied. The results show that: (1) the web holes have significant influence on both the global and local deformation of the box girder; (2) the stiffness of the transverse stiffener for the tested girder is not large enough; (3) The shear-lag effect of the box girder with loads applied on the top plate is quite different from that on the bottom plate. Therefore, the influence of the web holes, transverse stiffeners and loading positions should be taken into special consideration in designing such kind of box girder.

Key words: bridges; box girder; double-deck traffic; reinforced concrete; experiment

桥梁作为重要的交通枢纽, 其通行能力及设计形式对城市交通状况影响很大. 为适应当前公路、铁路运输量的急剧增长, 多车道、宽桥面桥梁越来越多. 然而建造宽桥需要提供较大的桥梁用地并付出高昂的下部工程费用, 同时还常常造成施工上的许多困难. 为此, 桥梁工作者在很早就提出了双层桥的概念. 与单层宽桥相比, 双层桥具有以下显著的优点: (1) 减少工程投资. 因为双层桥共用主体结构, 充分发挥主体结构的能力, 减少基础工程. (2) 实现土地、空间的节约和资源共享. (3) 有利于解决人车分流, 减少交通事故. 目前在实际工程中应用较多的双层桥类型主要是钢桁架桥或钢-混凝土组合桁架桥^[1]. 虽然双层钢桁架桥具有受力性能好、施工速度快、结构重量轻等优

点, 但也具有造价高、梁高大、噪音大等缺点. 随着近几十年混凝土箱梁桥^[2]的大规模应用, 混凝土箱梁具有的造价低、刚度大、噪音低等优点已被熟知. 因此, 采用混凝土箱梁结构形式建造双层交通桥梁开始受到关注. 1980年建成的奥地利的帝国桥是世界上第一座真正多功能的混凝土箱梁双层桥, 该桥的建成为混凝土箱梁桥发展的一个里程碑^[3]. 2005年建成的澳门西湾大桥^[4]是世界上第一座实现箱内外交通的预应力混凝土箱梁斜拉桥, 该桥上层顶板设为双向六车道公路, 下层底板设为双向两线的轻轨和两线机动车道.

与传统 RC 箱梁结构相比, RC 箱梁双层交通桥梁结构存在明显的不同: (1) 为满足内部采光和通风要求, 腹板需要大面积开孔; (2) 为满足内部

通车功能,箱梁内部无横隔板;(3)箱梁底板需要承受荷载。这些特征导致其具有独特的受力特征,其设计方法显然也与传统箱梁不完全相同。Shun-ichi Nakamura^[5]提出了一种新型的部分混凝土填充钢箱梁。采用这些新型梁进行静态弯曲载荷试验,并使用有限元软件开发了简单的计算方法。计算结果与试验结果一致,计算方法已经过验证。Xin Ruan^[6]研究了一例连续预应力混凝土刚架桥的数值模拟,建立了线弹性和非线性非弹性分析,并通过计算揭示了裂缝形貌的路径。Guo Tong^[7]等研究了用 SMPM 加固钢筋混凝土(RC)桥梁箱梁的可行性,对三层钢筋混凝土箱梁进行了弯曲试验,在此基础上提出了预测钢筋混凝土箱梁弯曲和脱粘能力的公式。Kim^[8]对钢筋混凝土组合箱梁进行了三维有限元分析和材料的强度研究,确定复合箱梁在弯曲和扭转中的极限强度及其相互作用。方志^[9]等对一座 30 m 跨径的预应力混凝土简支箱梁进行了足尺模型破坏性试验,用 5 种相关规范对箱梁抗弯极限承载力及正常使用极限状态下的变形、裂缝进行验算。汪建群^[10]等在双层集中荷载作用下对双层交通 RC 箱梁进行了受弯全过程破坏试验。结果表明:弹性工作状态下按照不同工况在箱梁顶、底板施加均布荷载作用时,存在不同剪力滞效应;双层集中荷载作用破坏性试验证实了宽跨比、高跨比均较大的双层交通混凝土箱形截面梁的受弯破坏过程可分为弹性阶段、弹塑性发展阶段、最终破坏阶段。郭建斌^[11]和郑为明^[12]通过有机玻璃的模型试验分别对腹板开孔双层交通箱梁桥的剪力滞效应和畸变效应进行了研究。魏伏佳^[13]对双层交通 RC 伸臂箱梁进行了大比例(1:6)模型试验,并探讨了该结构在双层荷载下的剪力滞效应。另一方面,在腹板开孔 RC 梁的研究方面,已有许多文献报道。

对交通需求较大的桥梁(例如大中型城市的桥梁)进行双层交通设计可以在有限的土地上构建综合性的立体交通,大大提高其运输能力。然而,目前面向双层交通的 RC 箱梁桥结构体系的理论研究大大滞后于实践应用。该结构的受力特点和设计方法研究几乎处于空白。有鉴于此,本研究设计了一种可以满足上部公路、下部轨道交通功能要求的 RC 箱梁,并采用大比例(1:6)模型对其静力弹性性能进行了初步探讨。

1 面向双层交通的混凝土箱梁桥

实现双层交通混凝土简支箱梁作为全新类型

的箱形截面梁,与普通箱梁具有明显的区别,目前尚无特别针对双层交通箱梁设计的理论或技术规范。本文参考现有的箱梁设计理论^[14]、城市道路桥梁相关技术规范以及实际工程经验,设计出一种能够满足双层交通功能需求的箱梁结构形式^[15]。

本设计所考虑的桥梁为中等城市的中等跨径桥梁,需要满足公路车辆、轨道交通以及人流通行等多种功能需求。

桥梁跨度选为 48 m,且考虑到跨径较小且为方便后期试验和分析,该桥采用混凝土简支箱梁的结构形式。箱梁截面采用常见的单箱三室等截面斜腹板形式,见图 1。箱梁顶板(上层交通)宽度确定为 24.5 m,具有双向双幅机动车通行、人行及紧急逃生等功能。箱梁高度和底板宽度分别确定为 7.4 m 和 13.2 m。由于本双层交通混凝土箱梁设计为斜腹板,箱梁斜腹板的斜率一般不超过 $\text{tg}30^\circ$ 。本文取斜腹板斜率为 $\text{tg}20^\circ$,底板中室需要的功能宽度为 2 m,而中腹板间距根据中室的跨度决定,腹板厚度取 0.15 m,故中腹板间距为 2.3 m。底板(下层交通)边室设计为双向城市轻轨交通、紧急停车情况下疏散人群用的消防通道,底板中室设计为城市电缆管线等布置、检修通道及消防逃生通道。

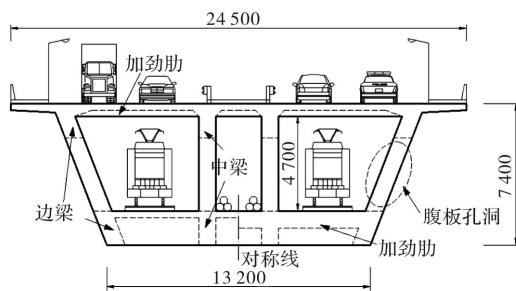


图1 面向双层交通的混凝土箱梁桥图(左视图)

Fig. 1 Illustration of the RC box girder oriented to double-deck bridges (left view)

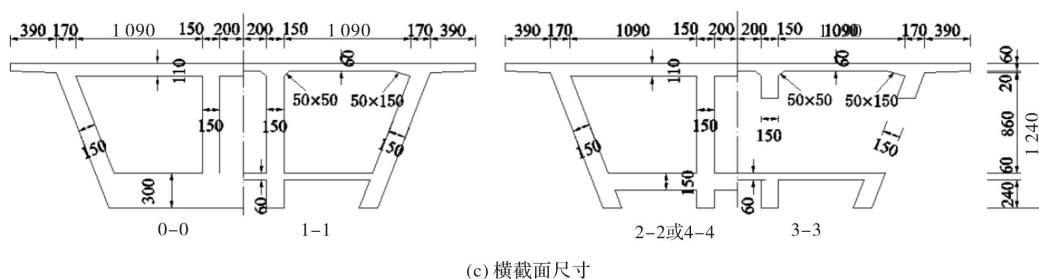
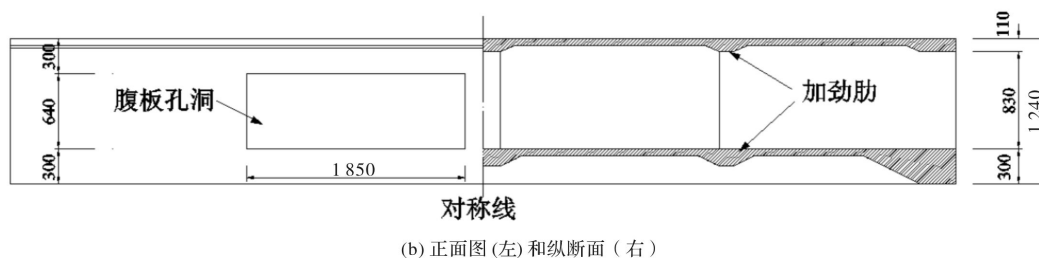
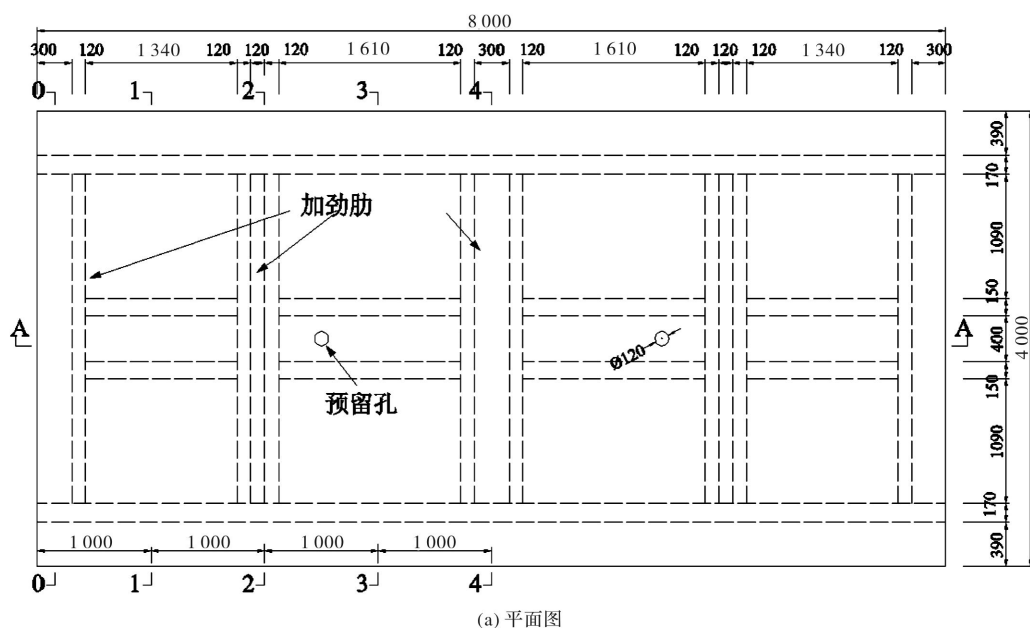
考虑到箱梁内部通车的功能需求,箱梁内部(包括梁端)不设置横隔板,取而代之的是每隔 12 m 设置一道横向加劲肋,从而提高箱梁的横向刚度。在四根腹板跨中截面两侧各设置一个较大的矩形孔洞,这是考虑到:(1)作为中小跨度的城市桥梁,宜采用自然通风的方式,因此孔洞面积比较大;(2)相对于圆孔,开方孔箱梁的受力分析相对简单;(3)考虑了后续模型试验中底部加载的方便性。箱梁结构横断面如图 1 所示。

2 试验方案

2.1 钢筋混凝土箱梁模型

考虑到试验场地及试验成本的限制,对上述设计的双层交通 RC 箱梁进行 1:6 比例的缩尺.如图 2 所示,模型箱梁总长 8 m,梁高 1.24 m,顶板宽 4 m,悬挑 390 mm,底板宽 2.31 m,顶板和底板厚度均为 60 mm,腹板厚度 150 mm,顶板悬挑根部厚度 80 mm.顶板支座截面、1/4 截面与跨中截面处加劲肋宽度(不计入渐变段宽度,下同)×高度分别为 300 mm×110 mm,120 mm×110 mm 和 300 mm×110 mm.底板支座截面、1/4 截面与跨中截面处加劲肋宽度×高度分别为 300 mm×300 mm,120 mm×150 mm 和 300 mm×150 mm.腹板孔洞宽

度×高度为 1 850 mm×640 mm.边腹板与顶板交接处承托宽度×高度为 150 mm×50 mm,中腹板与顶板交接处承托宽度×高度为 50 mm×50 mm.为了对底板进行加载,在顶板预留了两个直径 120 mm 的小孔.顶板的纵、横向的分布筋,底板的纵、横向的分布筋及箍筋都是采用直径是 6 mm 的 HPB235 级钢筋;腹板与顶板交接处的四根梁的顶层钢筋与腹板与底板交接处的四根梁的底层钢筋均采用直径是 22 mm 的 HRB335 级钢筋,腹板与顶板交接处的四根梁的底层钢筋与腹板与底板交接处的四根梁的顶层钢筋均采用直径是 12 mm 的 HPB235 级钢筋,具体的配筋图如图 2(d)所示.整个试验模型分两次浇筑.先浇筑底板,后浇筑顶板及腹板.混凝土搅拌方式采用机械搅拌.



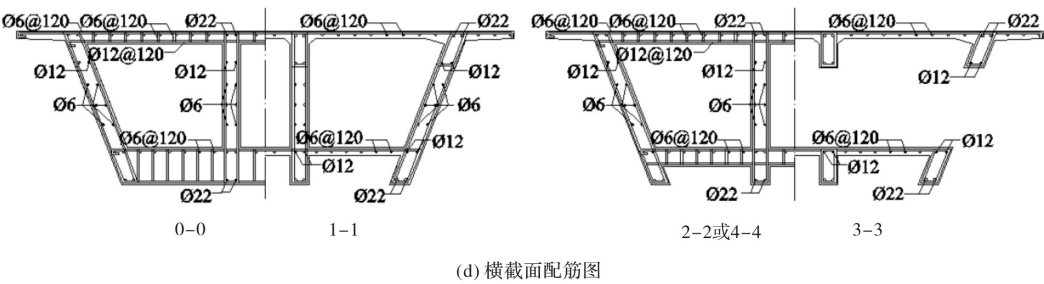


图 2 钢筋混凝土箱梁模型(1 : 6)
Fig. 2 RC box-girder model (1 : 6)

2.2 材料

本试验按照中国《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)的规定进行混凝土材料性能试验。在每次进行混凝土浇筑的同时预留相应的混凝土试块。混凝土试块尺寸有 150 mm×150 mm

×150 mm 的立方体试件和 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试件, 混凝土各项力学性能如表 1 所示。试验模型采用 HPB235、HRB335 两种型号钢筋, 钢筋规格有 Ø6、Ø12、Ø22 三种, 实测钢筋各项力学性能指标如表 2 所示。

表 1 混凝土材料特性
Tab. 1 Material properties of concrete

| 位置 | 立方体抗压强度/MPa | 轴心抗压强度 /MPa | 劈拉强度/MPa | 弹性模量 /MPa |
|-------|-------------|-------------|----------|-------------------|
| 底板 | 60.0 | 56.0 | 3.7 | 4.6×10^4 |
| 腹板和顶板 | 55.8 | 48.9 | 4.0 | 4.9×10^4 |

表 2 钢筋材料性能
Tab. 2 Material properties of reinforcements

| 型号 | 直径/mm | 屈服强度/MPa | 极限强度/MPa | 伸长率/% |
|-----|-------|----------|----------|-------|
| Ø6 | 5.8 | 398 | 620 | 25.2 |
| Ø12 | 11.7 | 318 | 451 | 39.5 |
| Ø22 | 21.2 | 400 | 544 | 26.9 |

2.3 加载和测试方案

本试验实际包括两组试验, 共 6 个工况, 如图 3 所示, 其中, 试验 I-a 和 I-b 采用砂袋堆载的方式进行均布加载, 加载位置分别位于边室顶板和底板。试验 II 采用集中加载方式, 在距离支座 2 500 mm 位置的顶底板进行四点对称加载。如图 3 所示, 试验 II-a、II-b、II-c 和 II-d 分别为顶板边

部加载、顶板中部加载、底板边部加载和底板中部加载。图 4 以试验 II-c 为例给出了加载装置的示意图。试验构件两端均为简支边界条件, 且其计算宽度为 7.4 m。其中一端支座处放置四个固定橡胶支座, 另一端支座处放置四个四氟乙烯滑板支座。考虑到本试验仅针对箱梁的弹性工作性能, 测量变量主要包括箱梁顶板(1-1~4-4 截面)混凝土

纵向应变以及底板挠度, 钢筋应变则不在本次测量范围, 应变计和位移计的设置情况如图 4 所示。

每个工况下每一级的顶、底板荷载增量以及顶、底板最大荷载值见表 3。

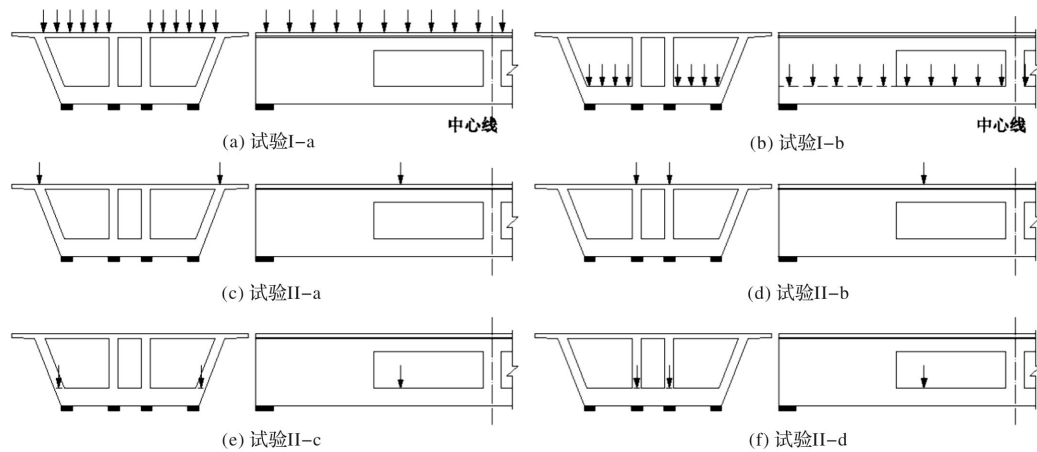


图 3 加载方式图

Fig. 3 Illustration of the loading regime

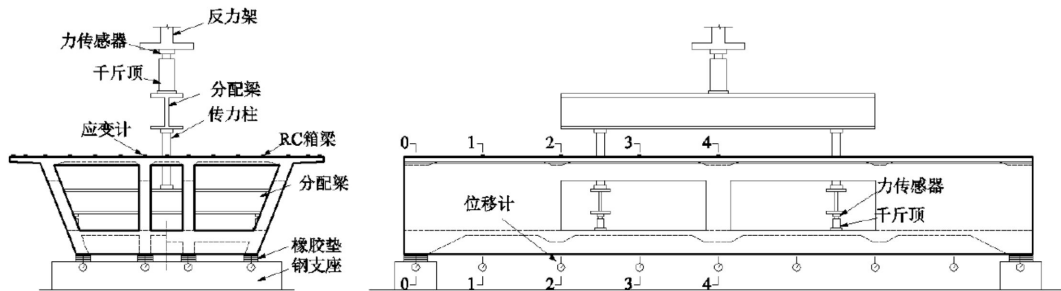


图 4 试验 II-c 的测试设置

Fig. 4 Illustration of the test setup for test II-c

表 3 试验工况

Tab. 3 Test conditions

| 试验工况 | 加载形式 | 加载位置 | 加载级别 | | | | | | 最大总荷载 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | | 一级 | 二级 | 三级 | 四级 | 五级 | 六级 | |
| I-a | 均布加载 | 顶板 | 3.14 | 3.14 | 3.14 | 3.14 | 3.92 | 1.76 | 18.24 |
| I-b | 均布加载 | 底板 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 1.2 | N/A | 9.68 |
| II-a | 集中加载 | 顶板边部 | 25 | 25 | 25 | 25 | N/A | N/A | 100 |
| II-b | 集中加载 | 顶板中部 | 25 | 25 | 25 | 25 | N/A | N/A | 100 |
| II-c | 集中加载 | 底板边部 | 25 | 25 | 25 | 25 | N/A | N/A | 100 |
| II-d | 集中加载 | 底板中部 | 25 | 25 | 25 | 25 | N/A | N/A | 100 |

注: 1. 测试 I 的加载单位为 kN/m, 其他为 kN; 2. N / A 表示“不可用”。

3 试验结果

3.1 混凝土应变

图 5(a)~图 5(d)所示分别为试验 I 中箱梁 1-1、2-2、3-3 和 4-4 截面处顶板混凝土纵向应变沿横向的分布曲线, 其中应变方向以受压为正。由图可知, 在均布荷载作用下, 箱梁加劲肋截面

及非加劲肋截面顶板均呈现出正剪力滞^[16]现象; 且荷载作用于顶板较荷载作用于底板而言, 其应变的横向分布更不均匀。例如 2-2 截面见图 5(b), 当荷载作用于顶板时(Test I-a), 中腹板与顶板交接处最大压应变为 $20\ \mu\epsilon$, 腹板间顶板最小压应变为 $13\ \mu\epsilon$, 二者相差 42.4%; 当荷载作用于底板时(Test I-b), 相应的最大压应变为 $9.9\ \mu\epsilon$, 最小压

应变为 $8.1 \mu\epsilon$, 二者相差 20.0%。同时可以看到, 同一荷载工况下, 离梁端支座越近的截面顶板应变变化程度越显著。

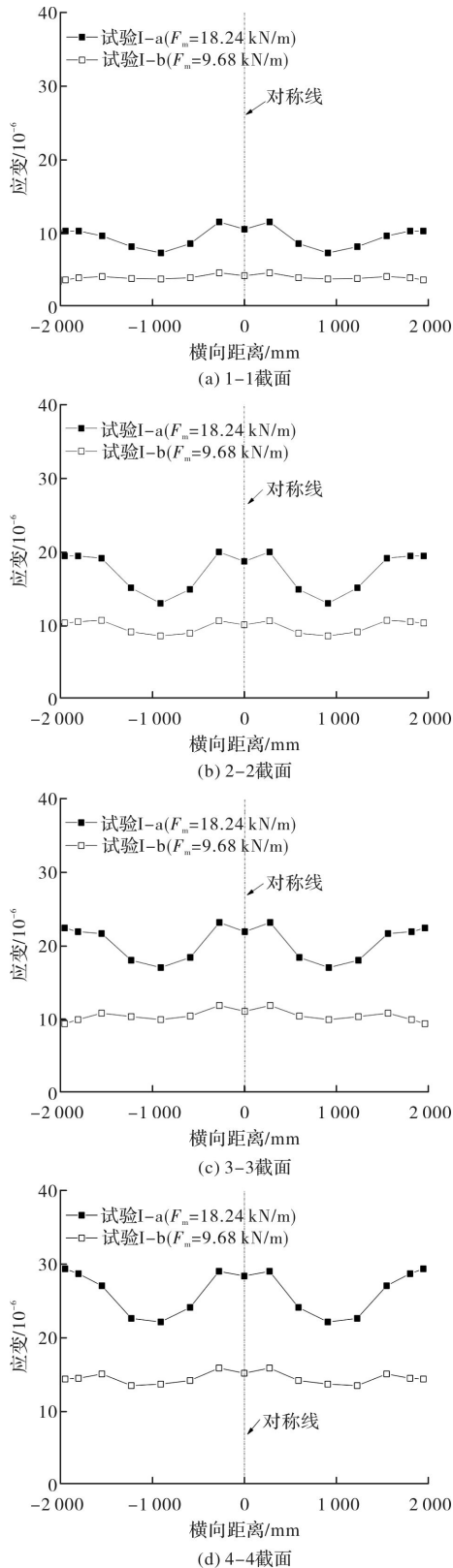


图5 顶板纵向应变的横向分布(试验 I)

Fig. 5 Transverse distributions of longitudinal strain on top plate (Test I)

图 6(a)~图 6(b)所示分别为试验 II 中箱梁顶板 3-3 和 4-4 截面处混凝土的纵向应变沿横向的分布曲线。由图可知, 试验 II 四种工况对应的两个截面处混凝土顶板应变分布都不均匀。荷载作用于边梁时, 其边梁应变较中梁应变要大; 反之亦然。其主要原因在于该箱梁的横向刚度不够大, 因此在集中荷载作用下箱梁的竖向变形沿横向差异较大。特别地, 当荷载作用于顶板边梁和中梁时, 孔洞截面(即 3-3 截面)处顶板应变的横向分布差异分别为 94.7% 和 99.6%。其原因除了上述箱梁整体变形存在差异外还包括孔洞处发生了明显的局部□形。

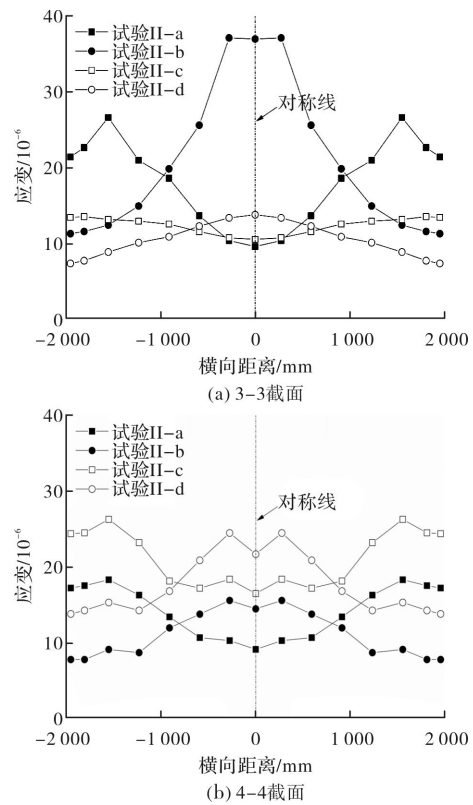


图6 顶板纵向应变的横向分布(试验 II)

Fig. 6 Transverse distributions of longitudinal strain on top plate (Test II)

3.2 挠度

集中荷载作用于顶板边梁(即 Test II-a)和底板边梁(即 Test II-c)时, 底板边梁挠度沿纵向的分布曲线如图 7(a)所示。顶板中梁(即 Test II-b)和底板中梁(即 Test II-d)加载时底板中梁挠度沿纵向的分布曲线如图 7(b)所示。其中, 图 7 利用了构件的双轴对称特性, 即图中挠度值为边梁或中梁挠度在纵、横两个方向平均后的结果, 且图中仅绘制一半长度的挠度曲线。如图所示, 当顶板加载(即 Test II-a 和 Test II-b)时, 其挠度分布曲线

呈近似直线的形态,这与一般受弯构件的抛物线形挠度曲线具有明显区别.这是因为矩形孔洞显著增加了箱梁的剪切变形.对于底板加载(即 Test II-c 和 Test II-d),孔洞处的挠度值出现突变,这说明在孔洞处加载时产生了明显的局部变形.此外,由图可知,荷载与挠度基本呈线性增长,说明构件处于弹性工作范围,这与本次实验目的是契合的.

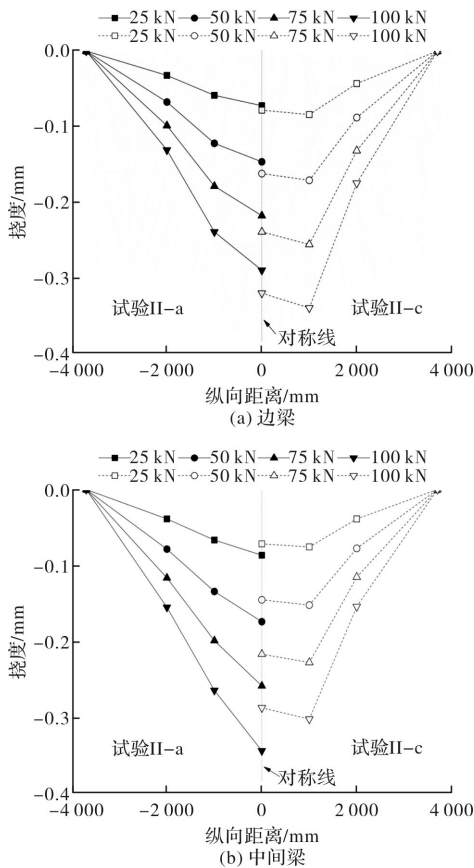


图7 底板梁挠度的纵向分布(试验 II)

Fig. 7 Longitudinal distributions of beam deflections on bottom plate (Test II)

图8所示为箱梁底部四根梁的跨中挠度最大值沿横向的分布曲线.其中,图中挠度值为边梁或中梁挠度沿横向平均后的结果.由图可知,同一位置在不同工况下的挠度差异明显,且同一工况下边梁和中梁的挠度值差异较大,即挠度横向分布不均匀.当荷载作用于某一位置时,其对应位置的挠度较大.这与前述混凝土顶板应变分布规律是对应的.由此可知,虽然该箱梁模型在跨中截面处设置了横向加劲肋,但其横向刚度仍然较小.

4 结论

根据使用功能和相关规范要求设计了一种新

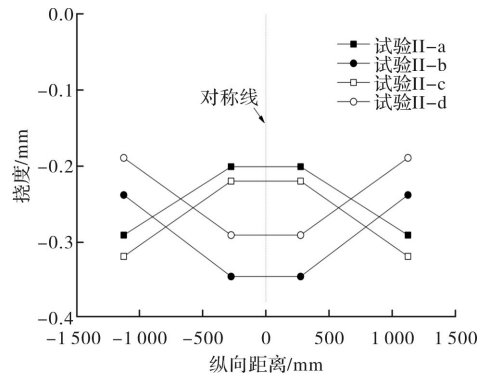


图8 4-4截面底板梁挠度的横向分布(试验 II)

Fig. 8 Transverse distributions of beam deflections on bottom plate for Section 4-4 (Test II)

型的双层交通桥梁.该桥梁采用钢筋混凝土箱梁作为桥梁上部结构,通过取消箱梁内部横隔板来实现箱梁内部通车.本文对该双层交通箱梁进行了缩尺(1:6)模型试验,对其静力弹性工作性能进行了初步研究.主要结论如下:

(1)腹板孔洞对箱梁整体及局部变形均有较大影响,说明该箱梁的腹板孔洞设置偏大,因此今后优化设计时应减小孔洞大小.

(2)集中荷载作用下箱梁底板挠度沿横向分布极不均匀,说明该箱梁的横向加劲肋刚度偏小,因此今后应尽可能加大横向加劲肋的尺寸.

(3)均布加载时箱梁顶板呈现出正剪力滞现象,且顶部加载时的剪力滞效应较底部加载时要大.因此,今后结构设计时应考虑上下加载情况的影响.

本文是对这类双层交通桥梁进行探索性研究,虽然试验结果并不十分理想,但为后期相关研究奠定了基础.诚然,为了建立合理有效的结构体系,还需要完成大量的基础研究工作.例如结构的参数优化、动力性能研究等,这些将在后续研究中陆续展开.

参考文献 References

- [1] MACHACEK J, CUDEJKO M. Composite steel and concrete bridge trusses[J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3136-3142.
- [2] 吕志涛,潘钻峰.大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J].土木工程学报,2010(1):70-76.
LU Zhitao, PAN Zuanfeng. Several problems in the design of long span prestressed concrete box girder bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(1): 70-76.
- [3] 池田甫,戴振藩.利用部分预应力的混凝土桥[J].世

- 界桥梁, 1982(4):10-29.
- CHI Tianpu, DAI Zhenfan. Using partially prestressed concrete bridges[J]. World Bridge, 1982(4): 10-29.
- [4] 张强. 澳门西湾大桥设计的若干关键技术问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- ZHANG Qiang. Research on some key technical issues in the design of the West Bay Bridge in Macau[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [5] NAKAMURA S I, MORISHITA H. Bending strength of concrete-filled narrow-width steel box girder[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(1):128-133.
- [6] XIN R, SHI X, LI X. Failure analysis of tendon breakout on bottom slab of a pre-stressed concrete box girder during construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 25(4):291-303.
- [7] GUO T, CHEN W H, SONG Y S. Bending capacity of reinforced concrete box-girders strengthened with smpm laminates[J]. Advanced Materials Research, 2012, 368-373:2235-2240.
- [8] KIM K, CHAI H Y. Ultimate strength interaction of bending and torsion of steel/concrete composite trapezoidal box girders in positive bending[J]. Advances in Structural Engineering, 2006, 9(5): 707-718.
- [9] 方志, 汪建群, 何鑫, 等. 预应力混凝土简支箱梁受力性能足尺模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6):49-56.
- FANG Zhi, WANG Jianqun, HE Xin, et al. Full-scale model test of mechanical behavior of prestressed concrete simply supported box girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 49-56.
- [10] 汪建群, 谢子蓉, 祝明桥, 等. 面向双层交通的混凝土箱梁抗弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(S1):196-200.
- WANG Jianqun, XIE Zirong, ZHU Mingqiao, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete box girder facing double-deck traffic[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S1):196-200.
- [11] 郭建斌. 双层荷载连续箱梁剪力滞效应研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
- GUO Jianbin. Research on shear lag effect of double-layer continuous box girder[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [12] 郑为明. 上下行分层矮斜拉连续箱梁桥静力分析及畸变研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- ZHENG Weiming. Static analysis and distortion of stratified low-slanted continuous box girder bridges in up and down[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [13] 魏伏佳. 面向双层交通的混凝土简支箱梁横向受力性能试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- WEI Fujia. Experimental study on lateral behavior of concrete simple box girder facing double-deck traffic[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [14] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论[M]. 第2版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- GUO Jinqiong, FANG Yizheng, ZHENG Zhen. Box beam design theory[M]. 2nd ed. Beijing: People's Transportation Office, 2008.
- [15] 孙康杰. 面向双层交通混凝土简支箱梁的抗弯性能研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
- SUN Kangjie. Research on the bending resistance of double-concrete concrete simple box girder[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.
- [16] 赵振中. 面向双层交通混凝土伸臂箱梁剪力滞效应试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
- ZHAO Zhenzhong. Experimental study on shear lag effect of double-beam traffic concrete outrigger box girder[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.

(编辑 沈 波)