

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.005

双层均布荷载作用腹板开孔混凝土筒支箱梁 模型试验研究分析

祝明桥,汪建群,王凡,孙康杰

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南湘潭 411201)

摘要:为实现城市双层交通,以1:6比例设计了腹板开孔混凝土箱梁,对其在双层均布荷载作用弹性工作状态下的受力性能进行了试验研究。基于试验结果建立有限元模型对其进行分析,在理论值与试验值吻合的基础上,讨论了开孔与否对试验梁弹性阶段受力性能的影响。研究表明:均布荷载作用在双层箱梁底板其实测跨中挠度比相同荷载作用于顶板时增大9.7%,底板加载对腹板开孔混凝土筒支箱梁的挠度有较大影响;较不开孔箱梁而言,各工况作用时开孔箱梁跨中挠度增大22.9%~28.1%,且开孔梁在各工况作用下截面剪力滞系数增大,最大增大量值达62.0%。因此,腹板开孔对承受双层荷载钢筋混凝土筒支箱梁抗弯受力性能有较大影响。

关键词:双层交通;箱梁桥;腹板开孔;均布荷载;剪力滞

中图分类号:TU375.1;U441.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0029-05

Experimental Analysis of Simply-Supported Concrete Box Girder with Web Openings model Under Double Uniformly Distributed Load

Zhu Mingqiao, Wang Jianqun, Wang Fan, Sun Kangjie

(College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China)

Abstract: In order to satisfy the demand of the double-deck traffic in city, a concrete box girder model with rectangular web openings was designed with ratio of 1:6. Experimental study was carried out to investigate the flexural capacity of the model girder with double uniformly distributed load. The finite element model was established based on the experiment and the results agreed with measurement results. The effect of the web openings on the girder was explored. The results demonstrated that the deflection caused by load on bottom plate of box girder was 9.7% more than that of load on the top plate. The deflection of girder with web opening is 22.9%~28.1% greater than that of girder without web opening. Compared with girder without web opening, the shear lag of girder with web opening increased, of which the maximum value was 62.0% in various working conditions. simply-supported concrete box girder with web openings under double uniformly distributed load affect the flexural capacity.

Key words: double-deck traffic; box girder bridges; web opening; distributed load; shear lag

混凝土箱梁因具良好受力性能而特别适用于中等跨度城市桥梁。通过取消其横隔板,使顶、底板均成为桥面系,同时在腹板上开设必要的孔洞以满足通风、采光及消防等要求,可实现双层交通^[1]。该种

形式的双层桥可有效缓解当前城市土地资源紧张及交通拥堵等现状^[2]。

20世纪60年代出现了混凝土箱梁双层桥的雏形^[3],其上层为公路桥面,下层底板两侧设悬臂板作

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金(51378202)

作者简介:祝明桥(1968-),男,博士,教授,主要从事混凝土新材料及其应用研究,(E-mail)1531290279@qq.com。

为行人道。中国的南昌大桥^[4]、重庆嘉悦大桥^[5]和长沙营盘东路浏阳河大桥^[6]均采用了类似的结构形式。因需克服箱梁腹板开孔、取消横隔板等一系列难题,在混凝土箱梁室内实现交通较为困难。而目前的相关研究较为滞后。学者们对双层荷载作用箱梁受力性能研究多见于有机玻璃模型试验或数值模拟分析^[7-9],对腹板开孔混凝土梁的研究多见于 T 梁或深梁^[10-11]。中国有少数学者对双层荷载作用箱梁或腹板开孔梁受力性能进行了探讨。郭建斌运用有机玻璃模型试验和有限元分析方法对双层荷载连续箱梁剪力滞效应进行研究并得到其规律^[12];黄泰赞和蔡健等^[13-14]对腹板开设圆孔和矩形孔钢筋混凝土简支矩形梁进行了系列试验研究,为开孔梁力学模型和设计方法的建立提供了试验依据。随后祝明桥等^[15]对腹板开有矩形孔的钢筋混凝土简支梁建立空间有限元模型进行非线性数值分析,并对其孔洞高度、孔侧加强筋等参数进行分析,得出了一些有价值的结论。对于面向双层交通混凝土箱梁而言,抗弯受力性能为其最主要设计参数之一,而目前相关试验数据较为缺乏。

笔者按 1:6 比例设计了腹板开孔单箱三室钢筋混凝土简支箱梁,对其在双层均布荷载作用弹性工作状态下的受力性能进行了试验测试。主要研究了双层均布荷载作用下简支箱梁关键截面变形和应变分布规律;并建立有限元模型对试验进行模拟分析。在有限元分析与试验结果相吻合的基础上,探讨了双层均布荷载作用下腹板开孔对结构抗弯受力性能的影响。

1 试验概况

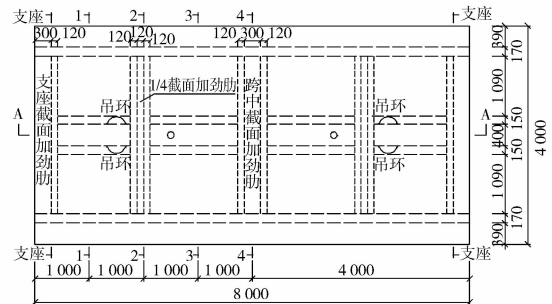
1.1 试验模型及测点布置

在模型设计之前,采用混凝土简支箱梁设计了一座中等跨度城市双层桥,该桥上层道路为 II 级主干路,双向 4 车道;下层为 C-I 型列车,双向通行。试验模型箱梁为该双层桥的 1:6 缩尺模型。模型箱梁混凝土强度等级为 C50,采用 HPB235 和 HRB335 钢筋。试验模型考虑因底板通车取消了箱梁内部常规设置的横隔板,在模型支座截面、1/4 跨及跨中设置了环向加劲肋;考虑采光、通风及消防安全需求,在腹板开设了矩形孔。试验模型箱梁实物及平面图如图 1 所示。

为测试模型箱梁在双层均布荷载作用下关键截面变形和应变分布规律,分别在 1/8 跨、1/4 跨、3/8 跨和跨中截面布置混凝土应变片;在支座截面及跨内八分点截面安装百分表,具体布置如图 2 所示。

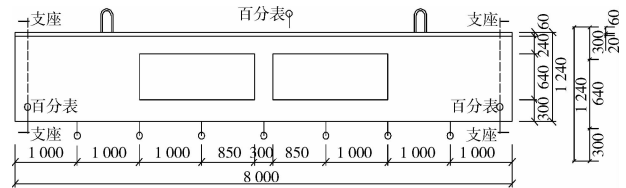


(a) 双层交通混凝土箱梁试验模型

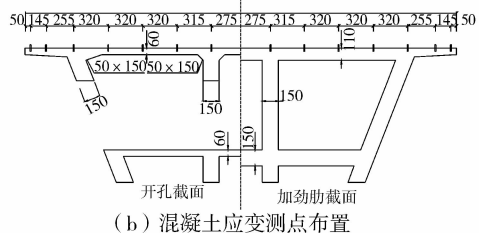


(b) 模型平面图(单位: mm)

图 1 试验模型箱梁实物及平面图



(a) 挠度测点布置



(b) 混凝土应变测点布置

图 2 箱梁试验模型截面尺寸及测点布置(单位: mm)

1.2 加载方案

采用均布荷载模拟桥梁的汽车及列车活荷载,本试验采用砂袋和砝码堆载实现均布荷载加载。以箱梁跨中弯矩等效为原则,按设计荷载等级计算其正常使用极限状态效应组合下等效均布荷载 $q_1 = 16.91 \text{ kN/m}$,承载能力极限状态作用效应组合下 $q_2 = 35.98 \text{ kN/m}$,开裂时对应的均布荷载 $q_3 = 26.81 \text{ kN/m}$,加载最大均布荷载 $q = 18.84 \text{ kN/m} = 111\% q_1 = 52\% q_2 = 70\% q_3$ 。由于仅针对双层均布荷载作用腹板开孔混凝土简支箱梁在弹性范围内受力性能进行试验研究,综合考虑试验目的,并保证箱梁不开裂,兼顾箱梁顶板、底板加载的可操作性和安全性,加载荷载设置如下:1)分 3 种工况加载,其中工况 1 和工况 2 仅分别在箱梁顶板和底板加载,工况

3 在箱梁顶板和底板同时加载。工况 3 加载装实物如图 3 所示。2)各工况均分 4 级加载,不同工况的同一级荷载大小一致。具体加载制度如表 1 所示。



图 3 工况 3 实物图

表 1 加载制度

工况	加载位置	荷载等级/(kN·m ⁻¹)			
工况 1	顶板	6.04	12.08	17.34	18.84
工况 2	底板	6.04	12.08	17.34	18.84
	顶板	3.92	7.84	10.98	11.96
工况 3	底板	2.12	4.24	6.36	6.88
	合计	6.04	12.08	17.34	18.84

说明:工况 1 在箱梁顶板加载;工况 2 在底板加载;工况 3 在箱梁顶板和底板同时加载;“合计”为工况 3 加载时顶、底板荷载集度之和。

1.2 测试方法

试验主要对模型关键截面的挠度和应变进行测试。考虑到结构受力处于弹性范围内,相同试验进行多次,同时利用截面的对称性,取其平均值作为最终的试验结果。据试验结果建立三维有限元模型,与实测数据进行对比分析。

2 试验结果与分析

为节省篇幅,此处将实测结果与有限元结果进行同步阐述。采用 ANSYS 对试验梁建立三维有限元模型,钢筋和混凝土分别采用 link8 和 solid65 单元模拟,边界条件和加载制度与试验一致,材料力学性能采用试验实测值。基于材性试验,得到各材料加载时刻的特性如下:

混凝土标准立方体抗压强度 $f_{cu0} = 58.1$ MPa,轴心抗压强度 $f_{c0} = 48.8$ MPa,弹性模量 $E_{c0} = 4.61 \times 10^4$ MPa。

普通钢筋 R235 的屈服强度 $f_{y0-R235} = 318$ MPa,弹性模量 $E_{S0-R235} = 2.03 \times 10^5$ MPa;HRB335 的屈服强度 $f_{y0-HRB335} = 400$ MPa,弹性模量 $E_{S0-HRB335} = 2.06 \times 10^5$ MPa。

有限元模型如图 4 所示。

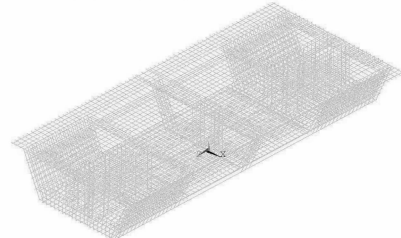
2.1 挠度结果

不同工况作用模型梁挠度曲线的试验值和有限

元对比分析如图 5 所示。图中利用了截面的对称性,分析与试验结果各取一半,以箱梁中轴线为对称轴,左边为实测数据,以虚线表示;右边为分析数据,以实线表示。需要说明的是,由于各种工况作用下第 3 级荷载与第 4 级荷载差值较小,图中未给出第 3 级荷载对应的挠度。



(a) 混凝土单元-Solid65单元



(b) 钢筋单元-Link8单元

图 4 腹板开孔混凝土筒支箱梁有限元模型

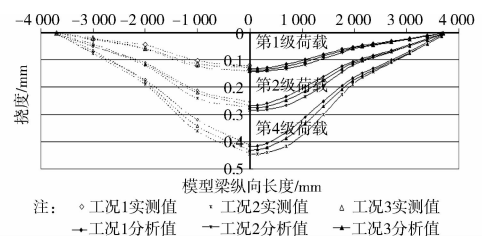


图 5 试验梁挠度实测值与分析值比较

由图 5 可知:

1)在不同工况均布荷载作用下,模型梁挠度随加载等级的提高呈比例增长,表明试验梁处于弹性工作范围内。

2)荷载作用在底板时(工况 2)在跨中产生的挠度最大,为 0.45 mm,荷载同时作用于顶、底板时(工况 3)次之,为 0.43 mm,荷载作用于顶板时(工况 1)最小,为 0.41 mm。工况 2 作用下跨中挠度值较工况 1 偏大 9.7%。说明底板加载对腹板开孔筒支箱梁的挠度影响较大。

3)由有限元结果与试验值对比分析可知,在相同荷载作用下,分析值较实测值偏大 3%~6%。试验工况作用下各关键截面挠度计算值与实测值吻合良好,因此建立的有限元模型可反映试验梁的受力性能。

2.2 应变

试验梁在各级荷载作用下,各截面应变实测值

与分析值对比结果如图 6 所示。为节省篇幅,此处仅给出 1-1 截面(未开孔)和 3-3 截面(开孔)结果,同样利用截面的对称性对其进行描述。即试验实测值与分析结果各取一半,以箱梁横截面中轴线为对称轴,左边为实测数据,以虚线表示;右边为分析数据,以实线表示。

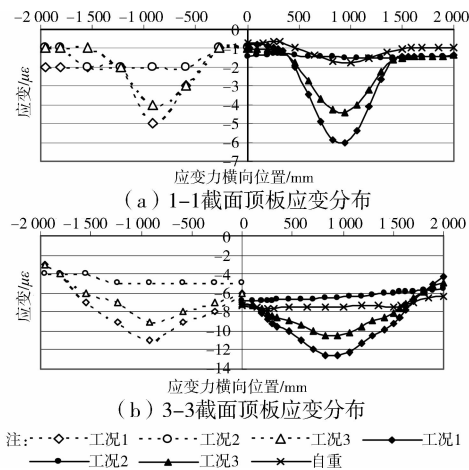


图 6 试验梁应变实测值与分析值比较

由图 6 可知:

- 1) 各级荷载作用下,应变实测值与有限元计算规律一致,实测值较计算值偏小 5%~15%。
- 2) 不论是 1-1 截面还是 3-3 截面,工况 1 作用下(荷载直接作用于顶板)顶板应变最大,工况 2 作用下(荷载直接作用于底板)顶板应变最小,工况 3 作用时其应变居二者之间。

3 开孔对双层交通混凝土筒支箱梁受力性能影响分析

在上述模型梁受力性能实测与有限元分析结果相吻合的基础上,探讨了模型梁腹板开孔与否对其受力性能的影响。

3.1 挠度

开孔与否对试验梁挠度影响比较结果如图 7。

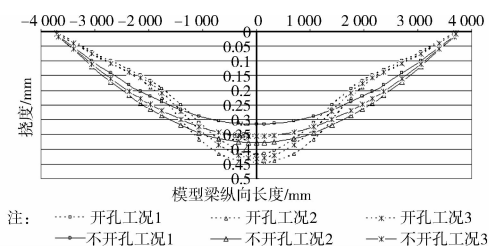


图 7 开孔与否对试验梁挠度影响比较

由图 7 可知:工况 1~工况 3 开孔箱梁的跨中挠度分别为 0.41、0.45、0.43 mm,不开孔箱梁对应的

挠度分别为 0.32、0.37、0.35 mm。就试验模型梁而言,对于工况 1~工况 3,开孔箱梁相对比不开孔箱梁其跨中挠度分别增大了 28.1%、21.6% 和 22.9%。因此,腹板开孔对承受双层荷载钢筋混凝土筒支箱梁变形性能有较大影响。

3.2 应变

开孔与否对试验梁应变影响比较结果如图 8。为明确表示应变分布规律,作出截面对应的剪力滞系数分布图。为节省篇幅,仅给出 1-1 截面和 3-3 截面结果,同样利用截面的对称性对其进行描述。其中左侧虚线和右侧实线分别表示开孔和不开孔梁的应变值或剪力滞系数。

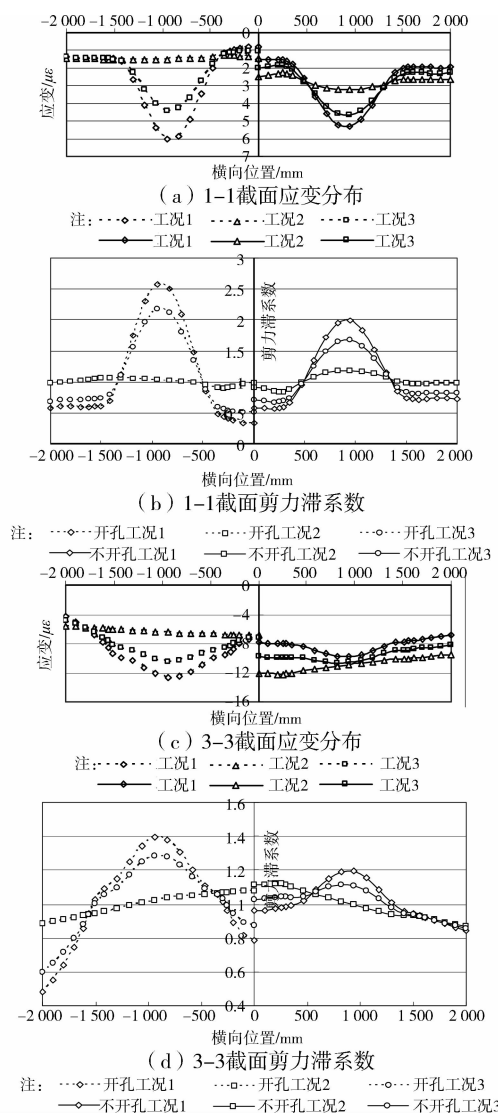


图 8 开孔与否对试验梁应变影响比较

由图 8 可知:相对于腹板开孔筒支箱梁而言,腹板未开孔时其截面应变分布较为均匀。对应的剪力滞系数也较小。由于工况 1 作用下剪力滞效应最大,此处以工况 1 剪力滞系数为例展开阐述。对于

开孔和未开孔梁而言,工况1作用下1-1截面剪力滞系数变化范围分别为0.34~2.58和0.59~2.00,3-3截面对应的数值分别为0.50~1.39和0.81~1.19。因此,腹板开孔对简支箱梁剪力滞有较大影响。

4 结论

1)对双层均布荷载作用腹板开孔混凝土简支箱梁在弹性范围内受力性能进行了大比例模型试验研究,并就腹板开孔与否对其受力性能影响进行了有限元分析。

2)均布荷载作用在双层箱梁底板时(工况2)在跨中产生的挠度最大,荷载同时作用于顶、底板时(工况3)次之,荷载作用于顶板时(工况1)最小;底板加载对腹板开孔简支箱梁的挠度影响最大。

3)就腹板开孔与否对双层均布荷载作用简支箱梁抗弯受力性能的影响进行了有限元分析。分析结果表明:腹板开孔对承受双层荷载钢筋混凝土简支箱梁抗弯受力性能有较大影响。实际设计可考虑采取如下措施减小腹板开孔对箱梁受力产生的不利影响:优化开孔方式、考虑在箱梁内设置加劲环、在开孔处设置钢结构桁架等。

参考文献:

- [1] 祝明桥,蒋伟中,霍海强. 混凝土巨型箱形截面梁及其设计理论[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):85-88.
Zhu M Q, Jiang W Z, Huo H Q. Concrete huge box section girder and its design theory [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3):85-88.
- [2] 杨永贤,张天明,于长皓,等. 重庆高家花园复线桥公轨双层交通方案构思[J]. 交通科技,2013(5):100-103.
Yang Y X, Zhang T M, Yu C H, et al. Conception of design scheme of double-deck traffic for the double-line bridge of Gaojiahuayuan [J]. Transportation Science & Technology, 2013(5):100-103.
- [3] Alali S, Li J Z, Guo G Z. Double deck bridge behavior and failure mechanism under seismic motions using nonlinear analyzes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(3):447-461.
- [4] 李焕尧. 南昌大桥工程简介[J]. 公路,1992(4):30-31.
Li H Y. The introduction of Nanchang Bridge [J]. Highway,1992(4):30-31.
- [5] 邓宇,漆勇. 重庆嘉悦大桥设计与施工[J]. 中外公路,2011,31(4):90-92.
Deng Y, Qi Y. The design and construction of Chongqing Jiayue Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(4):90-92.
- [6] 何斌,蒋田勇,田仲初,等. 斜度及纵曲率对类双层斜连续箱梁顶推施工的影响[J]. 中外公路,2012,32(4):186-188.
He B, Jiang T Y, Tian Z C, et al. The effects of slope and longitudinal curvature in incremental launching construction for double-deck continuous box girder [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(4):186-188.
- [7] Humpf K, Müller M, Silingardi C. Design, analysis and construction of Puente Mercosur-third bridge across the Orinoco River [C]//Proceedings of the 7th New York City Bridge Conference, 2013. CRC Press:1745-1752.
- [8] Clot A, Romeu J, Arcos R, et al. A power flow analysis of a double-deck circular tunnel embedded in a full-space [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 57:1-9.
- [9] Sung Y C, Chiu Y T, Chang T H, et al. An in-situ experiment of f-bent double-deck free way bridge [C]//The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013:1206-1235.
- [10] Keun-Hyeok Y, Heon-Soo C, Ashraf F A. Influence of inclined web reinforcement on reinforced concrete deep beams with openings [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(5):580-589.
- [11] Keun-Hyeok Y, Ashraf F A. Effectiveness of web reinforcement around openings in continuous concrete deep beams [J]. ACI Structural Journal Volume, 2008, 105(4):414-424.
- [12] 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,2003.
- [13] 蔡健,黄泰赞,李静. 腹部开有圆孔的钢筋混凝土简支梁的试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(10):27-35.
Cai J, Huang T Y, Li J. Experimental study of simply supported reinforced concrete beams with circular web openings [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10):27-35.
- [14] 黄泰赞,蔡健. 腹部开有矩形孔的钢筋混凝土简支梁的试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(10):36-45.
Huang T Y, Cai J. Experimental study on simply supported reinforced concrete beams with rectangular web openings [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10):36-45.
- [15] 祝明桥,霍海强,蒋伟中,等. 腹部开孔钢筋混凝土简支梁非线性数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(1):199-202.
Zhu M Q, Huo H Q, Jiang W Z, et al. The non-linear analysis of simply supported reinforced concrete beams with rectangular web opening [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1):199-202.

(编辑 胡英奎)