

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.014

双层均布荷载作用下混凝土伸臂箱梁 剪力滞效应试验研究

祝明桥, 魏伏佳, 赵振中, 石卫华

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:通过对大比例双层均布荷载作用下单箱三室混凝土伸臂箱梁在弹性范围内的抗弯性能模型试验研究与分析,探讨了双层均布荷载作用下单箱三室混凝土伸臂箱梁剪力滞效应分布规律:在不同荷载工况作用下,其伸臂根部产生正剪力滞效应,1/2伸臂处产生负剪力滞效应;正、负剪力滞临界位置离伸臂根部的距离是伸臂长度的18%~23%,其中在顶板均布加载作用下产生的剪力滞效应最明显,正、负剪力滞临界位置离伸臂根部最近,顶板、底板同时均布加载作用下次之,而底板均布加载作用下最弱;该双层交通混凝土伸臂箱梁抗弯结构在设计时,按照顶板均布加载时产生的剪力滞效应考虑偏安全。

关键词:桥梁工程;剪力滞效应;试验研究;混凝土伸臂箱梁;双层均布荷载

中图分类号:U442

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2014)08-0077-06

Experimental Research of Shear Lag Effect of Cantilever Concrete Box Girder under Double-deck Uniform Load

ZHU Ming-qiao, WEI Fu-jia, ZHAO Zhen-zhong, SHI Wei-hua

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Through the experimental research and analysis on the flexural behavior model of single-box 3-room cantilever concrete box girder within elastic range under large proportion of double-deck uniform loads, we discussed the shear lag effect distribution pattern of such kind of box girder under double-deck uniform loads. It shows that (1) in different load cases, its cantilever roots generate positive shear lag effect, the position at 1/2 cantilever generates negative shear lag effect; (2) the distance of the positive and negative shear lag critical points from the cantilever roots is 18% to 23% of the cantilever length respectively, the shear lag effect is most obvious under the roof uniform load, the distance of positive and negative shear lag critical points from the cantilever roots is the shortest, it is less obvious under the double-deck uniform load, and it is least obvious under the floor uniform load. It is recommended that the bending structure of the double-deck traffic concrete cantilever box girder designed in accordance with the shear lag effect under the roof loads are partial safety.

Key words: bridge engineering; shear lag effect; experiment research; cantilever concrete box girder; double-deck uniform load

收稿日期:2013-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51378202)

作者简介:祝明桥(1968-),男,安徽太湖人,教授,博士后。(1531290279@qq.com)

0 引言

随着我国城镇化建设日益加快,交通流量快速增长,多数已建城市桥梁日益拥堵,成为阻碍城市交通顺畅的瓶颈,城市土地资源的稀缺及桥梁建设用地紧张日显突出,城市桥梁发展面临创造可持续发展的神圣使命^[1-2]。在有限的土地资源及布置空间内极大地提高城市交通的使用效率、改善桥梁通行条件,采用双层交通的城市桥梁设计不失为一种较佳方案。混凝土箱梁桥具有整体性好,抗扭刚度大,结构动力特性优越,施工方法多样等优点,特别适用于中等跨度的城市桥梁;通过合理改善普通混凝土箱形梁截面形式,保证必要的净空要求,取消箱内常规设置的横隔板,使其顶、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,从而实现双层交通。因此,开展面向城市双层交通混凝土箱梁桥研究具有重要的现实意义^[1-2]。

本文以实现双层交通单箱三室混凝土箱梁为研究对象,其顶板设计为双向双幅机动车道,两侧人行道,中间为绿化隔离带兼各类检修孔、排水孔、

逃生孔等;其底板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,中室设计为城市综合管沟、检修通道及消防逃生通道,从而改善城市公共交通的社会服务能力。按照1:6的比例浇注了试验模型,重点试验研究了双层均布荷载作用下模型伸臂箱梁在弹性范围内不同截面顶、底板应变分布规律和荷载-挠度曲线;建立了模型伸臂箱梁的ANSYS有限元模型和全过程试验模拟分析,在分析结果与试验结果吻合的基础上,探讨了双层均布荷载作用下单箱三室混凝土伸臂箱梁剪力滞分布规律,得出一些有益的结论,为面向双层交通混凝土箱梁设计、应用,提供了试验数据和理论依据^[3-4]。

1 试验概况

1.1 试验模型及测点布置

该模型箱梁采用宽顶板、窄底板、斜腹板的单箱三室截面形式。混凝土顶板宽为4 m,底板宽为2.54 m,全长为8 m;混凝土顶板厚为0.06 m,底板厚为0.06 m,腹板厚为0.15 m。混凝土强度等级采用C50,钢筋采用HRB335级钢筋和HPB235级钢筋,箱梁模型设计尺寸如图1所示。

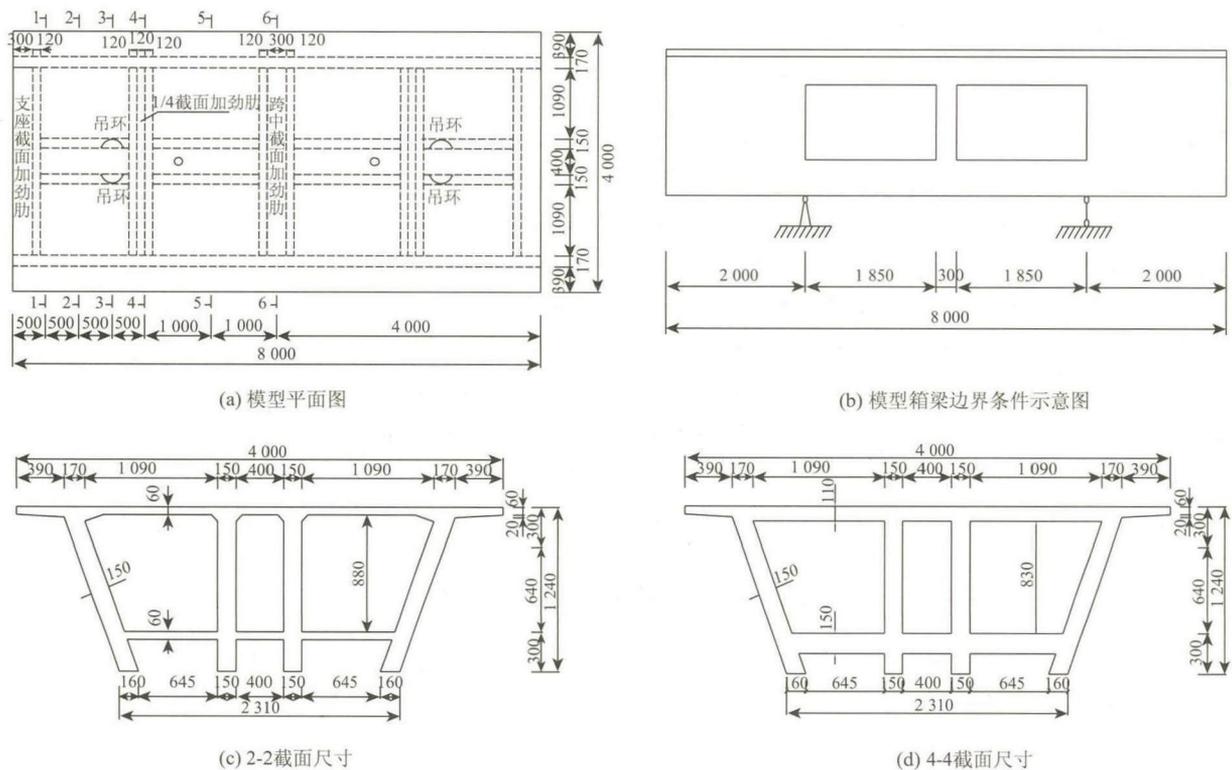


图1 模型箱梁截面尺寸及配筋(单位: mm)

Fig. 1 Sectional dimensions and reinforcement of box girder model (unit: mm)

为了研究该双层交通混凝土伸臂箱梁模型在双 层均布荷载或单层均布荷载作用下的剪力滞现象,

同时模拟实际工程情况, 取箱梁模型伸臂部分作为研究对象, 并利用模型的对称性, 取 2-2 截面、4-4 截面作为具体的研究对象 (其中 2-2 截面为 1/2 臂长截面, 4-4 截面为支座截面), 每个控制截面顶板均布有 15 片混凝土应变片, 如图 2 所示。为了测得伸臂箱梁模型在双层均布荷载或单层均布荷载作用下的纵向变形, 在伸臂部分端部截面双向对称各布置 4 个百分表, 同时在 6-6 截面布置 4 个百分表^[5]。

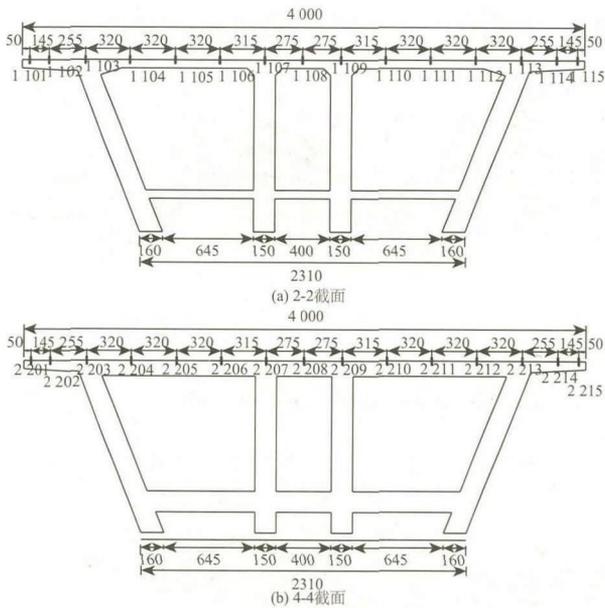


图 2 控制截面混凝土应变片布置 (单位: mm)
Fig. 2 Arrangement of strain gauges on control section of concrete (unit: mm)

1.2 试验加载方案

试验采用沙袋 (40 kg/袋) 和砝码, 沿模型梁长度方向对模型梁全跨进行均布加载。具体加载工况分为: 工况 1, 模型左右边室顶板和底板同时加载 (双层加载); 工况 2, 模型左右边室顶板加载 (上层加载); 工况 3, 模型左右边室底板加载 (下层加载)。加载试验图如图 3 所示。

2 试验结果与分析

针对模型梁试件在弹性阶段进行了上述 3 个荷载工况作用下的试验后, 经过试验数据整理、分析, 得出测试结果主要有: 模型伸臂部分自由端截面在不同荷载工况下的荷载-挠度曲线和模型各控制截面顶板纵向混凝土应变在不同荷载工况作用下的横向分布。利用 ANSYS 有限元分析程序, 混凝土采用 solid65 实体单元, 钢筋采用 link8 单元^[6], 对试验各类荷载工况进行了全过程模拟分析, 在分析对比吻合的基础上, 对双层均布荷载作用下单箱三室混凝土伸臂箱梁剪力滞效应及分布规律进行了研究。

2.1 荷载-挠度曲线

在工况 1、工况 2、工况 3 作用下, 该模型伸臂端截面, 即 1-1 截面弹性阶段范围内的荷载-挠度实测和分析曲线如图 4 所示。从中可知, 在 3 种不同的荷载工况下, 即在双层均布荷载或者单层均布荷载作用下, 该双层交通混凝土伸臂箱梁模型的挠度随着荷载的增加都呈现出线性增长的趋势, 说明该模型梁处于弹性工作状态。

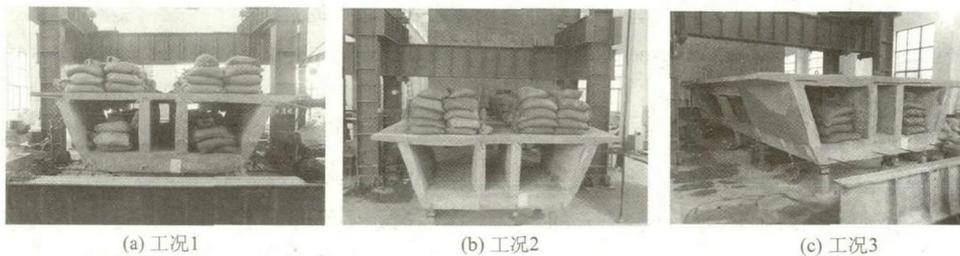


图 3 箱梁模型加载试验图
Fig. 3 Loading test of box girder model

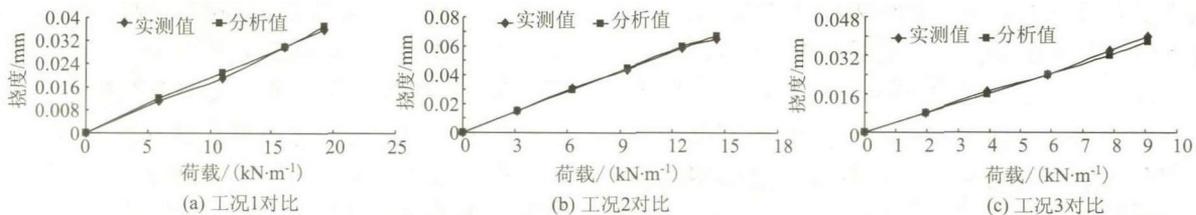
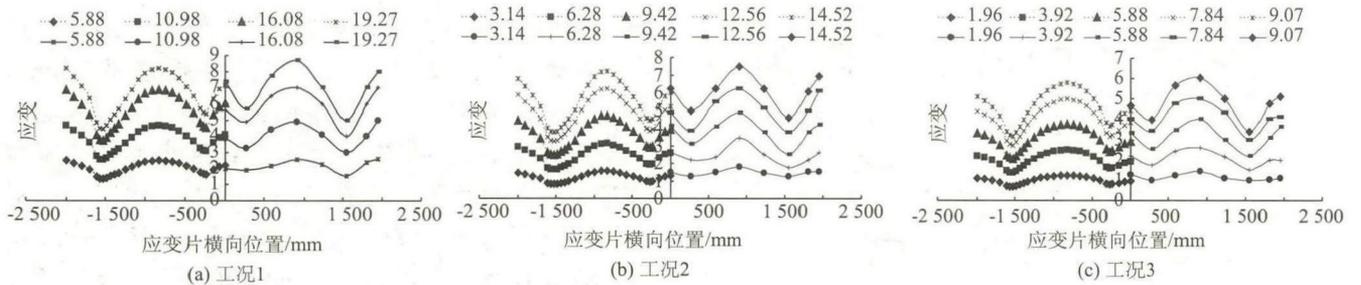


图 4 1-1 截面荷载-挠度曲线
Fig. 4 Load-deflection curves of section 1-1

2.2 不同截面顶板混凝土纵向应变的横向分布

伸臂箱梁模型在3种荷载工况作用下, 2-2截面和4-4截面顶板混凝土纵向应变分布实测及分析数据如图5、图6所示, 图中规定拉应变为正, 压应变为负。为便于对比, 利用模型截面对称性, 左边为分析数据, 右边为实测数据。从图5、图6可知: 该箱梁模型在3种不同的荷载工况作用下, 即在双层均布荷载或单层均布荷载作用下, 其4-4截面顶

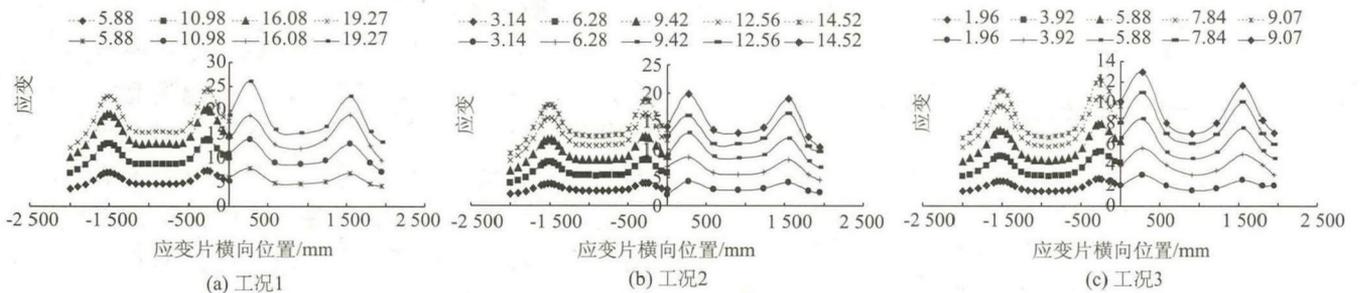
板纵向应变的横向分布趋势基本一致, 随着荷载等级的增加, 其顶板纵向应变横向分布的不均匀性越来越明显, 在腹板与顶板相交处应变最大, 愈往两边应变愈小, 即呈现出明显的正剪力滞现象^[7-9]; 其2-2截面顶板纵向应变的横向分布趋势基本一致, 随着荷载等级的增加, 其顶板纵向应变横向分布的不均匀性越来越明显, 在腹板与顶板相交处应变最小, 愈往两边应变愈大, 即呈现出负剪力滞现象。



注: 图中荷载单位为 kN/m

图5 2-2截面顶板应变横向分布规律对比

Fig. 5 Comparison of transverse distribution patterns of strain of top slab at section 2-2



注: 图中荷载单位为 kN/m

图6 4-4截面顶板应变横向分布规律对比

Fig. 6 Comparison of transverse distribution patterns of strain of top slab at section 4-4

2.3 剪力滞效应分析

为了方便地描述箱形梁剪力滞效应的影响程度, 工程上引入剪力滞系数 λ 的概念: $\lambda =$ 考虑剪切变形所求得的法向应力/按初等梁理论所求得的法向应力, 它是衡量剪力滞效应大小的主要指标; λ_c 表示翼板与腹板交界处的剪滞系数; λ_m 表示翼板中点处的剪滞系数。显然, 当 λ 值大于1时, 属于正剪力滞; 当 λ 值小于1时, 属于负剪力滞^[10-11]。

在已得到箱梁模型2-2截面及4-4截面顶板纵向应变横向分布规律的基础上, 进一步对其剪力滞系数进行分析, 从而得知该双层交通混凝土伸臂箱梁模型在双层均布荷载或单层均布荷载作用下剪力滞效应的影响程度。

图7为2-2截面和4-4截面在3种工况作用下的剪力滞系数对比情况。

由图7可见, 该箱梁模型2-2截面在工况2即顶板均布加载作用下, 负剪力滞效应最明显, 在工况1即顶板、底板均布加载作用下次之, 而在工况3即底板均布加载作用下最弱, 左边室边腹板与顶板交界处的剪力滞系数分别为0.82(工况2), 0.84(工况1), 0.87(工况3), 可见工况2下的负剪力滞效应相对工况1、工况3增长2.3%、6.1%; 同样4-4截面在工况2即顶板均布加载作用下, 正剪力滞效应最明显, 在工况1即顶板、底板均布加载作用下次之, 而在工况3即底板均布加载作用下最弱, 左边室顶板中点处的剪力滞系数分别为1.22(工况2), 1.20(工况1), 1.17(工况3), 可见工况2下的正剪力滞效应相对工况1、工况3增长1.7%、4.3%。3类工况的剪力滞系数相差均在(± 5)%范围内, 且偏安全考虑, 建议双层交通混凝土伸臂箱

梁在针对某一截面结构设计时, 剪力滞效应系数取其顶板均布加载工况。

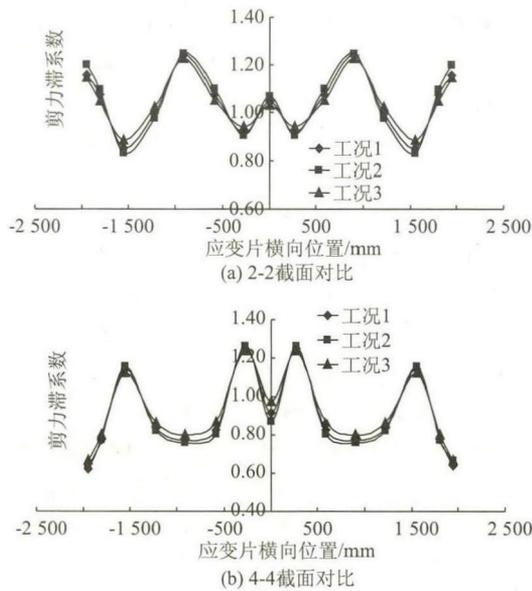


图7 不同工况剪力滞系数对比

Fig. 7 Comparison of shear lag coefficients in different load cases

2.4 剪力滞系数沿伸臂长度变化情况

以上的对比分析结果表明有限元数值模拟结果与试验结果吻合良好, 在此前提下以试验研究的双层交通伸臂混凝土箱梁试件作为分析模型, 模拟箱梁模型在工况1、工况2、工况3即双层或单层均布荷载作用下的实际试验过程, 对其1-1截面、2-2截面、3-3截面、4-4截面4个控制截面剪力滞系数沿伸臂长度方向的变化规律进行有限元分析。以左边室边腹板与顶板相交处的剪力滞系数 λ_s 与左边室顶板中点处的剪力滞系数 λ_c 为代表, 在工况1作用下1-1截面~4-4截面的 λ_s 平均值分别为0.59, 0.84, 0.96, 1.13, λ_c 平均值分别为1.33, 1.2, 1.06, 0.77; 在工况2作用下1-1截面至4-4截面的 λ_s 平均值分别为0.56, 0.82, 0.94, 1.15, λ_c 平均值分别为1.35, 1.22, 1.10, 0.74; 在工况3作用下1-1截面至4-4截面的 λ_s 平均值分别为0.62, 0.87, 0.99, 1.11, λ_c 平均值分别为1.29, 1.17, 1.04, 0.80, 则该伸臂箱梁模型剪力滞系数 λ_s 与 λ_c 沿伸臂长度方向的变化情况如图8所示。

由图8可见, 在均布荷载作用下, 该伸臂箱梁模型伸臂部分出现正、负剪力滞交换的现象, 除了在其根部产生明显的正剪力滞效应外, 随着控制截面与固定端距离的增大, 会出现负剪力滞效应, 且越靠近自由端负剪力滞效应越明显, 因此对于均布

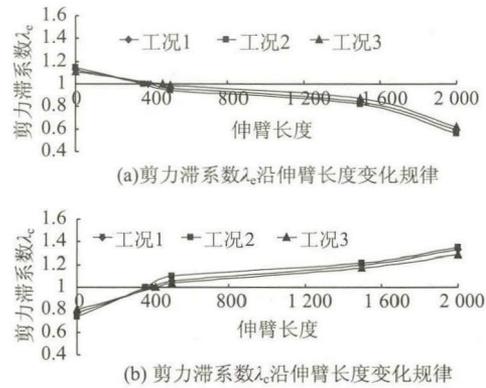


图8 顶板剪力滞系数沿伸臂长度变化规律

Fig. 8 Variations of shear lag coefficient of top slab along cantilever length

荷载, 应考虑其正负剪力滞交换现象对结构设计计算中的影响。同时比较3种工况下的剪力滞系数沿伸臂长度的变化规律可知, 在工况2即顶板均布加载作用下的正、负剪力滞效应的临界点距离伸臂根部357 mm, 是伸臂长度的18%, 离伸臂根部最近; 在工况1即顶板、底板均布加载作用下次之, 临界点离伸臂根部有397 mm, 是伸臂长度的20%; 而在工况3即底板均布加载作用下最远, 临界点离伸臂根部有459 mm, 是伸臂长度的23%。由此可知该双层交通伸臂箱梁模型伸臂部分正、负剪力滞效应的临界点位置与加载位置有关。

3 结论

本文通过对双层交通混凝土伸臂箱梁模型弹性范围内进行双层和单层均布加载的试验研究, 同时利用ANSYS有限元软件对其试验过程进行数值模拟分析, 从试验研究和理论分析两个角度初步了解了该模型梁在均布荷载作用下模型梁顶板纵向应变的分布规律, 取得了以下结论:

(1) 在不同荷载工况作用下, 该双层交通混凝土伸臂箱梁模型支座截面均呈现出正剪力滞现象, 而1/2伸臂截面均呈现出负剪力滞现象, 其中在顶板均布加载作用下产生的剪力滞效应最明显, 顶板、底板同时均布加载作用下次之, 而底板均布加载作用下最弱。

(2) 均布荷载作用下的伸臂箱梁在沿伸臂方向会出现正、负剪力滞交换的现象, 其中在顶板均布加载作用下的正、负剪力滞效应的临界点离伸臂根部的距离是伸臂长度的18%, 在顶板、底板均布加载作用下的临界点离伸臂根部的距离是伸臂长度的20%, 在底板均布加载作用下的临界点离伸臂根部

的距离是伸臂长度的23%。

(3) 建议该双层交通混凝土伸臂箱梁抗弯结构设计时按照顶板均布加载时产生的剪力滞效应考虑偏安全。

参考文献:

References:

- [1] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论 [M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, ZHENG Zhen. Design Theory of Box Girder [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
XIANG Hai-fan. Advanced Theory of Bridge Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] 张元海, 白昕, 林丽霞. 箱形梁剪力滞效应的改进分析方法研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (11): 153-158.
ZHANG Yuan-hai, BAI Xin, LIN Li-xia. An Improved Approach for Analyzing Shear Lag Effect of Box Girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (11): 153-158.
- [4] ALGHAMDI S A. Static and Modal Analysis of Thin-walled Box Girder Structures [J]. AIAA Journal, 2001, 39 (7): 1406-1410.
- [5] 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 Zhen-zhong. Experimental Study on Shear Lag Effect of Double Deck Traffic Cantilever Concrete Box Girder [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.
- [6] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG Xin-min. ANSYS Numerical Analysis for Engineering Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [7] 祝明桥. 混凝土薄壁箱梁受力性能的试验研究与分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
ZHU Ming-qiao. Experimental Research and Analysis on Mechanical Behavior of Concrete Thin-walled Box Girder [D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [8] 李法雄, 聂建国. 钢-混凝土组合梁剪力滞效应弹性解析解 [J]. 工程力学, 2011, 28 (9): 1-8.
LI Fa-xiong, NIE Jian-guo. Elastic Analytical Solutions of Shear Lag Effect of Steel-Concrete Composite Beam [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (9): 1-8.
- [9] 罗旗帜. 基于能量原理的薄壁箱梁剪力滞理论与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
LUO Qi-zhi. Theory and Test Studies of Shear Lag in Thin Walled Box Girders Based on Energy Principle [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [10] 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 Jian-bin. Research of Shear Lag Effect on Double-level Loaded Continuous Box Girder [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [11] 狄谨, 乔朋, 张茜. 单箱三室薄壁箱梁剪力滞效应分析的能量变分法 [J]. 公路, 2009 (10): 61-65.
DI Jin, QIAO Peng, ZHANG Qian. Energy-Variation Method of Shear Lag Effect in Thin Walled Girder of Single Box with Three Cells [J]. Highway, 2009 (10): 61-65.
- [12] 李法雄, 王晓夫, 黄厚卿, 等. 钢-混凝土组合梁斜拉桥收缩徐变影响 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (10): 54-60.
LI Fa-xiong, WANG Xiao-fu, HUANG Hou-qing, et al. Impact of Shrinkage and Creep on Steel-concrete Composite Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (10): 54-60.
- [13] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Pre-stressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [10] 王恩来. 钢-混凝土组合梁的长期性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
WANG En-lai. Research on Long-term Performance of Steel-concrete Composite Beams [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [11] 谢峻, 曾丁, 郑晓华. 基于收缩徐变自辨识的大跨径梁桥长期挠度预测 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (8): 88-91.
XIE Jun, ZENG Ding, ZHENG Xiao-hua. Long-term Deflection Prediction of Long-span Beam Bridge Based on Shrinkage Creep Self-identification [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (8): 88-91.

(上接第70页)