

文章编号:1674-2869(2015)05-0023-05

移动荷载作用下曲线箱梁剪力滞效应

卢海林, 南子俊, 张 伟

武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074

摘 要: 采用大型通用有限元软件 ANSYS 分析了移动荷载作用下曲线箱梁的剪力滞效应. 分别设置了 3 种不同大小的移动荷载和 3 个不同的作用位置, 研究了荷载移动到曲线箱梁 $L/2$ 跨时该截面的剪力滞效应分布情况. 结果表明: 荷载沿箱梁中心线移动时, 截面内外侧剪力滞效应分布不均匀; 荷载沿外侧腹板移动时, 外侧腹板处正剪力滞现象明显, 内侧腹板以及翼缘板上负剪力滞现象明显; 荷载沿内侧腹板移动时, 内侧腹板处正剪力滞现象明显, 外侧腹板以及翼缘板上负剪力滞现象明显. 移动荷载大小的改变, 对曲线箱梁剪力滞效应的分布情况影响较小. 但随着移动荷载的加大, 局部剪力滞效应会少量地增大.

关键词: 曲线箱梁; 剪力滞; 移动荷载; 有限元

中图分类号: U448.42

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.05.005

0 引 言

在公路立交及城市道路和桥梁工程中, 曲线箱梁桥是实现各方向交通连接的必要手段. 曲线箱梁桥正常作用时箱梁中存在着剪力滞效应. 对曲线箱梁剪力滞效应的研究, 一直以来都是桥梁专家所关心的问题. 已有的研究成果多数是静载作用下的剪力滞效应, 包括集中荷载和均布荷载作用下曲线箱梁剪力滞效应^[1-2]. 但实际工程中, 桥梁结构绝大部分是受动荷载作用的. 因此, 开展动荷载作用下箱梁剪力滞效应的研究是十分有必要的. 陈鸿鸣等^[3]根据箱梁剪力滞过去的研究, 总结了当前箱梁剪力研究的主要方向, 包括几何和材料的非线性效应、荷载作用形式等. 刘健新等^[4]用变分原理推导了考虑剪力滞效应的箱梁强迫振动时的微分方程、边界条件, 建立了方程解的差分格式, 得出了薄壁箱梁强迫振动剪力滞效应分析的理论方法. 徐勋^[5]等利用有限元分析了扁平曲线箱梁考虑剪力滞效应和剪切变形影响的静动力特性, 特别地对移动荷载作用下结构的弯扭耦合振动特性进行了研究. 长沙理工大学的蔡汶珊^[6]建立了曲线箱梁的动力分析模型, 验证了一种双脊骨有限元模型的可靠性, 并分析了地震作用下曲线箱梁的剪力滞效应. 武汉工程大学的卢海林^[7]利用大型通用有限元软件 ANSYS 建立了悬臂曲线箱梁模型, 并分析了移动荷载速度对曲线箱梁剪力滞效应的

影响. Hugo C 等^[8]通过大量的现场检测, 研究了在行车荷载作用下某曲线箱梁桥的自振特性. 本文利用有限元软件 ANSYS, 选取不同大小的移动荷载在不同位置移动到跨中截面时, 分析跨中截面上剪力滞分布规律.

1 模型的建立

1.1 模型尺寸

模型尺寸来源于文献[1], 为一采用以有机玻璃加工而成的曲线箱梁模型. 模型截面形状和尺寸如图 1 所示, 模型空间形态示意如图 2 所示, 图中中心线全长 $L=1.047$ m, 曲率半径 $r=2$ m, 圆心角角度 $\theta=30^\circ$. 有机玻璃板厚为 8 mm, 上、下顶板宽分别为 400 mm 和 192 mm, 腹板高 $h=100$ mm. 有机玻璃材料弹性模量为 $E=3\ 000$ MPa, 泊松比 $\mu=0.385$, 密度 $d_{\text{ens}}=1\ 180$ kg/m³.

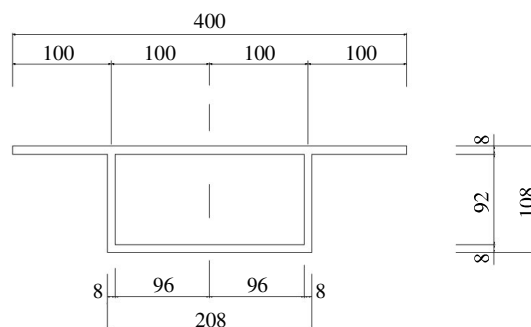


图 1 箱梁横截面尺寸(mm)

Fig.1 Dimensions of box girder cross-section(mm)

收稿日期:2015-03-23

基金项目:国家自然科学基金(51378404);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2013115)

作者简介:卢海林(1965-),男,湖南安乡人,教授,博士.研究方向:桥梁结构分析、建筑结构检测与加固.

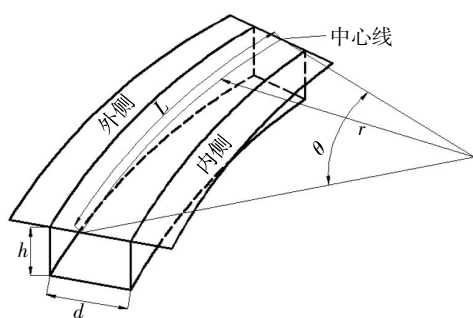


图 2 箱梁空间示意图

Fig.2 Space diagram of box girder

1.2 选择荷载

进入 ANSYS 瞬态分析,在节点上施加瞬间作用以模拟移动荷载,荷载步采用阶跃荷载^[9],使移动荷载中心由箱梁一端沿箱梁中心线匀速移动至另一端,完成加载过程,并进行数据采集分析。

根据文献[7]的荷载总量使用,为了使模型上剪力滞效果更加明显,分别采用总量为 $G_1=200\text{ N}$ 、 $G_2=400\text{ N}$ 、 $G_3=600\text{ N}$ 均匀分布在 4 个集中力 (F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4) 上的移动荷载以模拟实际车辆荷载,分前后两排间距 10 cm 沿着顶板与腹板交接处以 1 m/s 的速度移动如图 3 所示。随后将 3 组移动荷载分别向内外两侧横向各偏移一次,偏移距离为 10 cm (在有限元软件中大约为 5 个划分网格的距离),沿着外侧和内侧的腹板移动如图 4 所示,共得到移动荷载分别偏向内侧、沿箱梁中心线和偏向外侧移动时的九组数据,具体工况设计如表 1 所示。

表 1 移动荷载加载工况

Table1 Moving load work condition

横截面位置	$G_1=200\text{ N}$	$G_2=400\text{ N}$	$G_3=600\text{ N}$
偏向外侧	工况一	工况四	工况七
沿交接线	工况二	工况五	工况八
偏向内侧	工况三	工况六	工况九

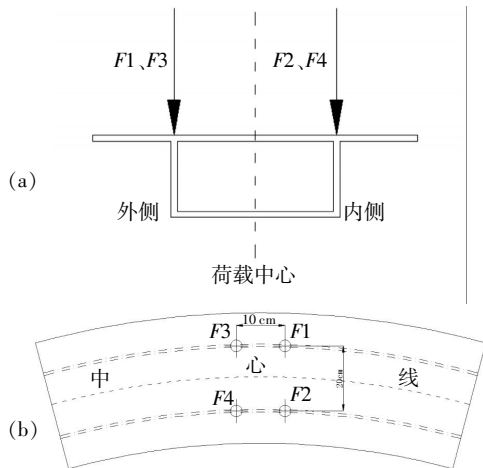


图 3 荷载中心沿箱梁中心线移动

Fig.3 Load center moving along box girder midline

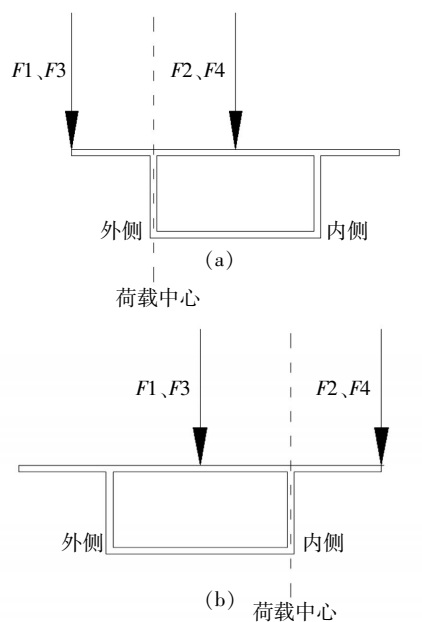


图 4 荷载中心分别沿外侧和内侧腹板移动

Fig.4 Load center moving along both inside and outside web

1.3 有限元模型

箱梁模型有限元模型如图 5 所示。由于梁单元不能完全满足计算精度的需求,而采用三位实体单元建模时其节点数较多较为繁杂,综合来看壳单元最为符合^[10]。因此,该箱梁有限元模型采用单元类型为四节点 shell63 单元,模型结构一共划分为 1 664 个单元,1 696 个节点。约束条件采用文献[10]中的简支约束条件。

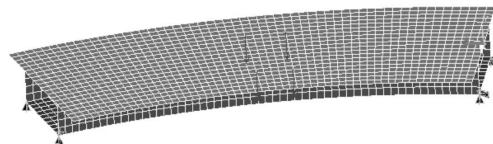


图 5 箱梁有限元模型

Fig.5 Finite element model of box girder

2 数值结果及分析

2.1 移动荷载作用下箱梁跨中截面顶板和底板剪力滞系数

当荷载移动完毕时,进入后处理,若记整个运动时间为 T 、荷载步为 N ,将荷载加载时间调至 $T/2$ 或将荷载步调至 $N/2$ 时,移动荷载重心刚好经过跨中 $L/2$ 截面处,此时该截面上的作用影响效果最大^[11],因此选择跨中截面为研究对象。为了研究其剪力滞效应,取出该截面上的顶板与底板节点号,读取应力数据换算为剪力滞系数后,进行整理分析,分别得出各个工况下截面剪力滞系数曲线分布比较如图 6~图 17 所示(数据横轴正数为曲线

箱梁横截面内侧),并列出顶板主要节点处的剪力滞系数值如表 2 所示.

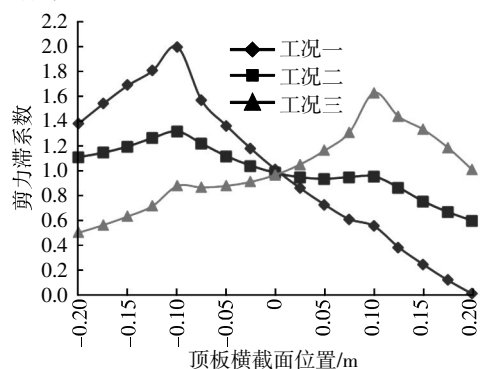


图 6 $G=200\text{ N}$ 时箱梁顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.6 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top when $G=200\text{ N}$

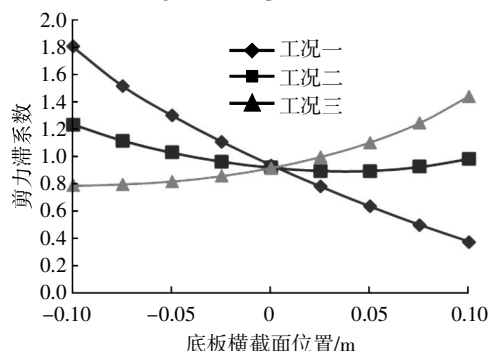


图 7 $G=200\text{ N}$ 时箱梁底板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.7 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom when $G=200\text{ N}$

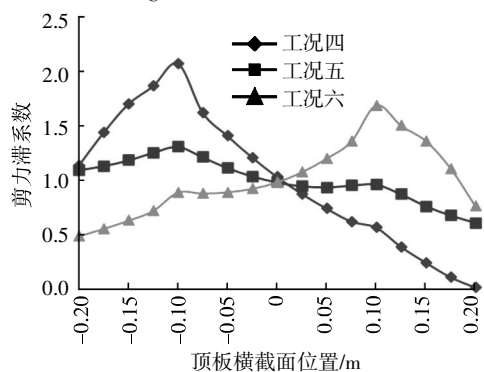


图 8 $G=400\text{ N}$ 时箱梁顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.8 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top when $G=400\text{ N}$

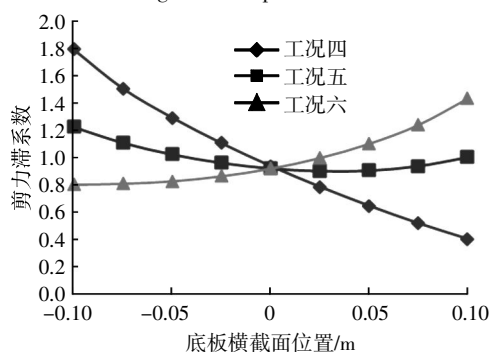


图 9 $G=400\text{ N}$ 时箱梁底板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.9 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom when $G=400\text{ N}$

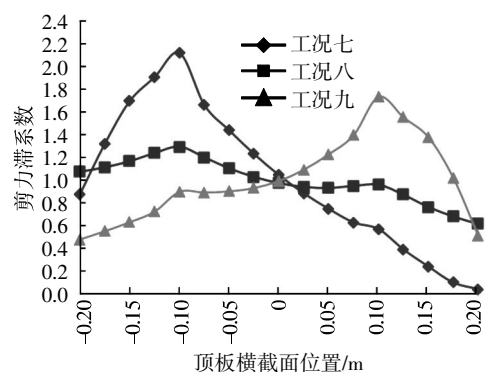


图 10 $G=600\text{ N}$ 时箱梁顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.10 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top when $G=600\text{ N}$

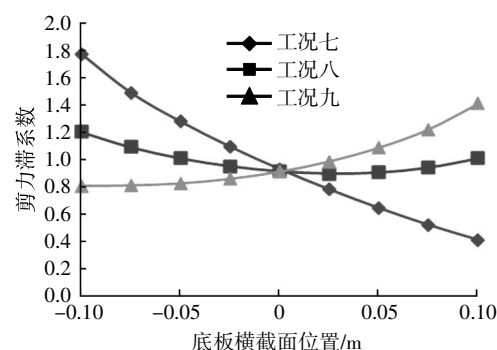


图 11 $G=600\text{ N}$ 时箱梁底板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.11 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom when $G=600\text{ N}$

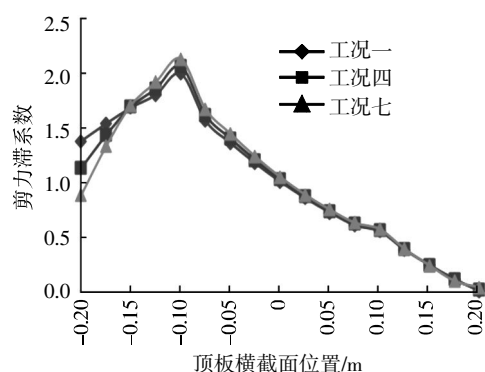


图 12 不同荷载沿外侧腹板移动时顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.12 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top under the different load moving along outside web

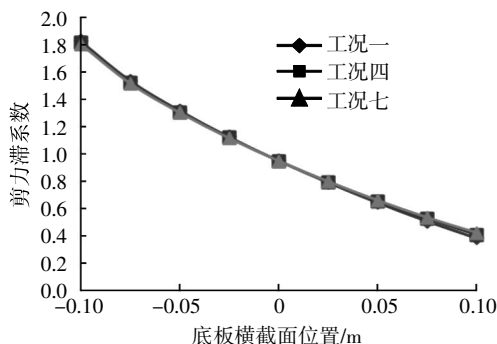


图 13 不同荷载沿外侧腹板移动时底板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.13 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom under the different load moving along outside web

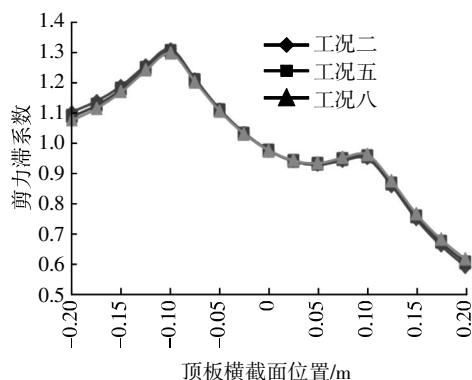


图 14 不同荷载沿中心线移动时顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.14 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top under the different load moving along center line

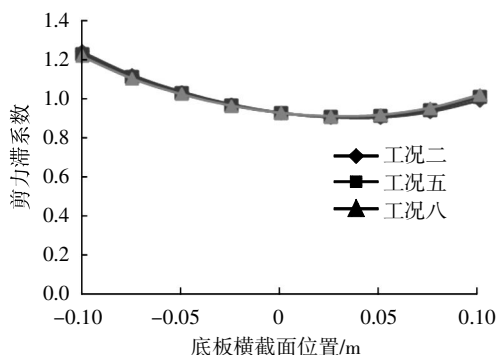


图 15 不同荷载沿中心线移动时顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.15 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom under the different load moving along center line

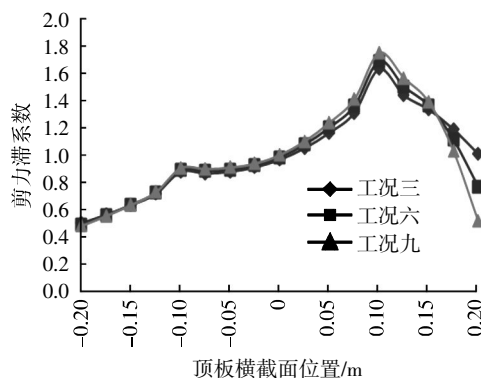


图 16 不同荷载沿内侧腹板移动时顶板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.16 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at top under the different load moving along inside web

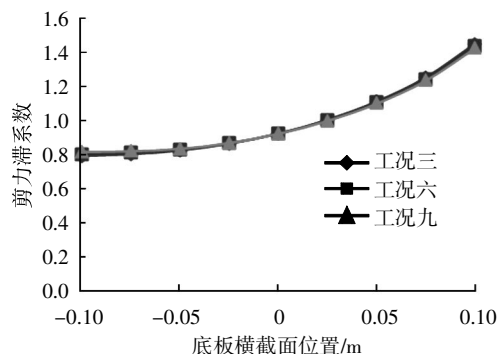


图 17 不同荷载沿内侧腹板移动时底板 $L/2$ 截面剪力滞系数

Fig.17 The shear lag coefficient of mid-section of box girder at bottom under the different load moving along inside web

2.2 数据分析

从图 6~图 17 中很容易看出, 由于该模型是曲线箱梁, 所以数据呈现明显的非对称性, 荷载作用在哪一侧, 哪一侧的剪力滞效应就会越明显, 并且从图表中可以归纳得出以下结论:

a. 无论荷载大小多少, 荷载作用在 3 种不同的位置时曲线箱梁顶板剪力滞效应曲线的分布规律近似, 均在腹板与顶板的交接处达到一个极大值, 呈现近似 M 的形状。

b. 从图 6、图 8 和图 10 中看出, 当荷载沿箱梁中心以及外侧腹板移动时, 外侧顶板上出现正剪力滞现象, 内侧顶板上出现负剪力滞现象, 荷载沿外侧腹板移动时剪力滞效应更为明显; 当荷载沿内侧腹板移动时, 内侧顶板上出现正剪力滞现象, 外侧顶板上出现负剪力滞现象。

c. 从图 12 和图 14 中看出, 当荷载沿箱梁中线以及外侧腹板移动时, 外侧翼缘的端部随着荷载的加大, 剪力滞系数呈减小趋势, 在内侧翼缘端部均非常小; 从图 16 中看出, 荷载沿内侧腹板移动时, 内外侧翼缘端部剪力滞现象同外侧。

d. 从表 2 中的各工况下重要节点剪力滞系数值可以看出, 剪力滞效应与荷载大小没有特定的单调关系, 各处数值近似, 表明在模型上任意位置, 荷载大小对其剪力滞效应的数值影响程度不大。但当荷载加大时, 荷载偏心作用情况下, 剪力滞系数分化较大, 在腹板与顶板交接处越来越大, 而在翼缘端部越来越小。

e. 荷载作用在 3 种不同位置对曲线箱梁底板剪力滞分布有明显影响: 从图 13 中看出, 当荷载沿外侧腹板移动时, 底板上剪力滞规律由外到内越来越小; 图 15 中, 当荷载沿箱梁中线移动时, 底板上剪力滞规律呈现开口向上的抛物线趋势; 图 17 中, 当荷载沿内侧腹板移动时, 底板上剪力滞规律由外到内越来越大。其剪力滞数值亦同顶板, 与荷载大小无明显联系, 基本近似。

3 结 语

本文主要采用有限元软件 ANSYS 进行研究分析了 3 种不同大小的移动荷载在结构上改变横向作用位置时, 移动到曲线箱梁跨中 $L/2$ 处时该截面的剪力滞效应分布规律。分析结果表明: 当荷载沿箱梁中线移动时, 内外侧剪力滞效应分布不均。由于偏心距较大, 使得偏向外侧的顶板剪力滞效应更为明显。荷载沿两侧腹板作用时, 截面上的剪力滞效应分化较为严重。荷载作用的一侧反应明显, 在

表 2 各个工况下顶板主要节点剪力滞系数值

Table 2 Shear lag coefficient of main roof node in each work condition

	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2
工况一	1.380 549 4	2.000 751 7	1.007 828 7	0.550 847 5	0.002 572 1
工况二	1.106 921	1.315 268	0.979 262	0.951 280 8	0.591 812 5
工况三	0.498 123 7	0.875 328 1	0.965 362 8	1.628 231 1	1.005 047
工况四	1.134 496 6	2.071 776 4	1.030 726 2	0.564 595 9	0.014 494 4
工况五	1.092 405	1.308 193	0.979 263	0.958 858	0.605 387
工况六	0.486 749 3	0.887 503 9	0.981 852 7	1.688 102 5	0.760 966 5
工况七	0.882 342 3	2.138 714 4	1.050 957 7	0.571 048	0.036 718 5
工况八	1.079 679	1.302 156	0.979 316	0.965 33	0.617 314
工况九	0.477 867 9	0.901 793 7	0.998 141 7	1.746 841 5	0.511 354 7

靠近腹板的顶板上呈现较大正剪力滞现象,而在另一侧腹板以及翼缘板上呈现负剪力滞现象.此外,不同大小的荷载作用在结构上任意位置时,随着荷载的加大,使得顶板上受力在顶板与腹板处较为集中,呈现局部应力集中现象,使得局部剪力滞效应增大,但对整体剪力滞规律的变化影响较小.

致 谢

本研究得到国家自然科学基金委员会和武汉工程大学的资助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 卢海林. 预应力混凝土曲线箱梁剪力滞效应理论分析与试验分析[D]. 天津:天津大学,2005.
LU Hai-lin. Theoretical analysis and experimental study on shear-lag effect of prestress concrete curved box beam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

[2] FABRIZIO Gara, GRAZIANO Leoni, LUIGINO Dezi. A beam finite element including shear lag effect for the time-dependent analysis of steel-concrete composite decks[J].Engineering Structures,2009,31:1888-1902.

[3] 陈鸿鸣,乔静宇. 混凝土箱梁剪力滞研究现状与发展[J]. 结构工程师,2011,27(1):161-166.
CHEN Hong-ming, QIAO Jing-yu. State of the art about shear lag effect of concrete box girder bridges[J]. Structural Engineering,2011,27(1):161-166. (in Chinese)

[4] 刘健新,马麟,胡庆安.薄壁箱梁振动时的剪力滞效应[J].郑州大学学报,2008,29(3):122-128.
LIU Jian-xin, MA Lin, HU Qing-an. The research of analysis method of shear lag's effect on forced vibration of thin-wall box-girder[J]. Journal of Zhengzhou University, 2008, 29(3): 122-128. (in Chinese)

[5] 徐勋,卫星,刘德军,等.扁平曲线箱梁静动力分析[J].

公路交通科技,2007,24(12):60-65.

XU Xun, WEI Xing, LIU De-jun,et al. Analysis for static and dynamic characteristics of flat curved box beam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(12):60-65. (in Chinese)

[6] 蔡汶珊. 薄壁曲线箱梁剪力滞数值计算与实验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2010.
CAI Wen-shan. Numerical calculate and experimental research about shear lag effect of curved thin wall box girders[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)

[7] 卢海林,张伟,颜昌雄. 移动荷载速度对悬臂曲线箱梁剪力滞效应的影响[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(3):18-21.
LU Hai-lin, ZHANG Wei, YAN Chang-xiong. Moving load speed on shear lag effect of cantilever curved box girder[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014,36(3):18-21. (in Chinese)

[8] HUGO C Gomeza,PAUL J Fanning,MARIA Q Fenga, et al. Testing and long-term monitoring of a curved concrete box girder bridge[J]. Engineering Structure, 2011(33):2861-2869.

[9] 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 of engineering structural[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)

[10] 李洪. 曲线连续箱梁桥梁剪力滞效应分析及实用计算[D]. 北京:北京交通大学,2010.
LI Hong. Analysis of the shear lag effect in curved continuous box-girder bridge and the research on practical calculating method[D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2010. (in Chinese)

[11] 赵云安,王炎. 车辆荷载作用下连续箱梁桥剪力滞效应分析[J]. 铁道建筑,2013(2):9-11.