

# 移动荷载速度对悬臂曲线箱梁剪力滞效应的影响

卢海林<sup>1</sup>, 张 伟<sup>1</sup>, 颜昌雄<sup>2</sup>

(1. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北交通投资有限公司江南高速公路有限公司, 湖北 公安 434300)

**摘 要:**利用三维有限元通用软件 ANSYS, 设置相同的悬臂长度、弹性模量、泊松比和密度等参数, 分别考察了 7 种不同的移动荷载速度对悬臂曲线箱梁和悬臂直线箱梁中剪力滞效应的影响. 重点分析了荷载以不同速度移动到悬臂箱梁  $L/2$  处时该横截面上应力分布及剪力滞系数变化规律. 结果表明:在移动荷载作用下, 两种悬臂箱梁  $L/2$  处横截面上均出现正剪力滞现象;剪力滞系数随着移动荷载速度的增大而增大, 当移动荷载速度小于  $2\text{ m/s}$  时, 剪力滞系数增长缓慢;当移动荷载速度超过  $2\text{ m/s}$  时, 剪力滞系数增长较快;悬臂曲线箱梁内侧剪力滞系数明显大于外侧剪力滞系数, 悬臂直线箱梁剪力滞系数分布曲线介于悬臂曲线箱梁内侧与外侧剪力滞系数分布曲线之间.

**关键词:**箱梁;剪力滞效应;有限元;移动荷载速度

**中图分类号:**U448.42

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.03.004

## 0 引 言

曲线箱梁是一种常见的桥梁结构形式. 在桥梁结构工程中, 其能够实现各方向的交通连接, 满足公路线形和美学的要求. 箱梁截面具有自重轻, 截面抗扭、抗弯刚度大等特点, 在施工阶段和实际使用过程中能保持良好的稳定性<sup>[1]</sup>. 由于曲线箱梁几何形状和截面的复杂性, 除了常见的抗弯曲、抗压等行为外, 箱梁横截面还会出现剪力滞效应. 由于曲率半径的存在使弯矩和扭转相互耦合, 受力情况更为复杂. 因此曲线箱梁除具有一般直线箱梁剪力滞效应的普遍规律外, 更具有其特殊性<sup>[2]</sup>.

传统直线箱梁剪力滞效应分析时, 通常采用集中荷载和均布荷载两种静载形式<sup>[3]</sup>, 而对于曲线箱梁在移动荷载作用下剪力滞效应研究少有文献报道. 刘建新等<sup>[4]</sup>以曼哈顿原理为基础, 研究了剪力滞效应作用下薄壁箱梁强迫振动时的微分方程及其边界条件, 得出任意外荷载作用于箱梁时的差分解, 并论证了差分解的收敛性和稳定性;张永健等<sup>[5]</sup>根据能量变分原理, 推导了简支箱梁的自振动频率公式, 在考虑剪切变形及剪力滞效应的情况下, 求出各阶自振频率解析解;甘亚南等<sup>[6]</sup>在研究薄壁箱梁的动力反应特性时考虑了剪力滞

后和剪切变形效应的影响;N Taysi 等<sup>[7]</sup>基于有限条法和网格自动生成技术进行了曲线箱梁的弹性自由振动分析;Hugo C 等<sup>[8]</sup>通过长期的现场检测研究了某曲线箱梁桥在行车荷载作用下的自振特性和振动模式. 可以看出, 这些研究仅限于研究剪力滞剪切变形对自振特性的影响, 对于移动荷载作用下考虑剪力滞效应的动力响应研究较少. 本文主要研究移动荷载速度对箱梁剪力滞效应的影响, 便于桥梁设计和施工时参考.

## 1 箱梁剪力滞效应

箱梁在对称荷载作用下, 如果按照初等梁弯曲理论的平截面假定, 在箱梁翼板相同高度处的弯曲正应力沿箱梁宽度方向是均匀分布的. 但是, 箱梁中实际产生的弯曲横向力会从腹板传递到翼板, 从而会出现剪力在翼缘板的不均匀分布, 而在翼板和腹板交接位置处最大, 离腹板越远剪力将越小. 因而, 剪切变形沿翼板的分布也不是均匀的. 这种翼板上剪切变形的不均匀性, 导致弯曲时远离腹板的翼板纵向位移会滞后于靠近腹板的翼板纵向位移, 从而弯曲正应力的横向分布呈现曲线形状的分布, 这种由翼板的剪切变形引起的弯曲正应力沿梁宽度方向上不均匀分布的现象被称为“剪力滞效应”<sup>[9]</sup>. 在衡量剪力滞效应这一现象

收稿日期:2014-02-12

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(CX201239)

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、建筑结构抗震与加固.

时,引入剪力滞系数  $\lambda$ 。剪力滞系数  $\lambda$  定义为翼板与腹板交接处截面上实际产生的应力  $\sigma_{\max}$  与按照初等梁理论计算出的应力  $\bar{\sigma}$  之比,即  $\lambda = \sigma_{\max} / \bar{\sigma}$ 。若  $\lambda > 1$ ,则称为“正剪力滞”;反之,称为“负剪力滞”。

## 2 有限元计算模型的建立

### 2.1 箱梁结构形式

为探究移动荷载速度对箱梁剪力滞效应的影响及进行曲线箱梁与直线箱梁剪力滞效应的对比分析,分别选取长度为  $L=1.308\text{ m}$  的悬臂曲线箱梁和悬臂直线箱梁模型,曲线箱梁曲率半径为  $2.5\text{ m}$ ,圆心角为  $30^\circ$ 。弹性模量均为  $E=3\,000\text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu=0.385$ ,密度  $\text{dens}=1\,180\text{ kg/m}^3$ 。箱梁模型的横截面尺寸如图 1 所示。

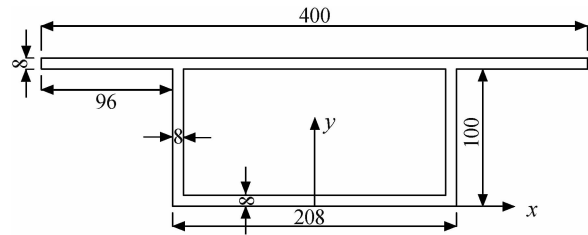


图 1 箱梁横截面尺寸(单位:mm)

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

### 2.2 移动荷载加载形式

因为将移动荷载施加于节点时是一种冲击荷载,其特点是瞬间作用后立刻消失,故在有限元模型中采用阶跃荷载形式<sup>[10]</sup>,具体采用总量为  $P=50\text{ N}$  大小的移动荷载,沿着两侧腹板与顶板交接线移动。

### 2.3 箱梁计算模型的建立及边界条件

根据以上参数,建立了在移动荷载作用下悬臂曲线箱梁的模型如图 2 所示,单元类型采用四节点的 shell63 单元,一共划分为 1 664 个单元,1 696 个节点,直线箱梁的单元类型、单元个数及节点个数与曲线箱梁相同。曲线箱梁与直线箱梁均为一端固定、另一端自由的悬臂结构形式。

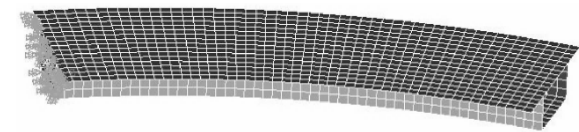


图 2 曲线箱梁 shell63 有限元计算模型

Fig.2 Calculating model of shell63 element of curved box beam

## 3 有限元模型计算结果及分析

### 3.1 移动荷载作用下箱梁顶板和底板应力值

移动荷载总量  $P=50\text{ N}$  以速度  $v=1\text{ m/s}$  分

别通过曲线箱梁和直线箱梁,记总运动时间为  $t$ ,以箱梁  $L/2$  处横截面应力为研究对象,考虑剪力滞效应的情况下,可以绘出移动荷载行驶  $t/2$  时刻曲线箱梁和直线箱梁  $L/2$  处顶板和底板横截面应力图,如图 3 和图 4 所示。

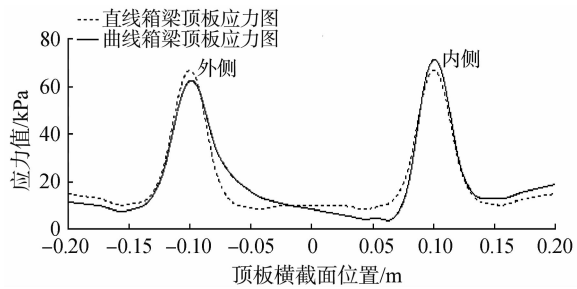


图 3 箱梁顶板横截面应力图

Fig.3 Cross-section stress diagram of box girder at top

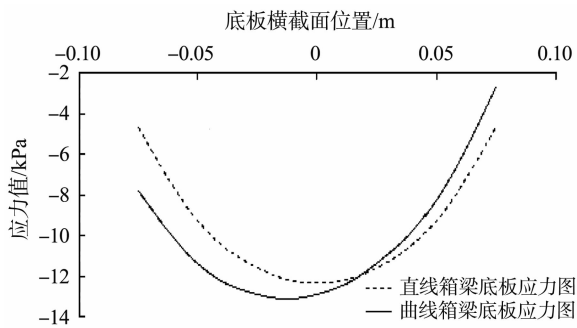


图 4 箱梁底板横截面应力图

Fig.4 Cross-section stress diagram of box girder at bottom

根据图 3 和图 4 可以看出:

a. 当荷载以同一速度沿曲线箱梁和直线箱梁移动到  $L/2$  截面位置时,在箱梁腹板与顶板交接处应力均达到最大值,并向两侧递减,出现正剪力滞现象,这说明集中荷载附近截面应力越集中;

b. 在移动荷载作用下,曲线箱梁顶板横向  $-0.2\text{ m}$  到  $-0.1\text{ m}$  和  $0.1\text{ m}$  到  $0.2\text{ m}$  对称区域,曲线箱梁内侧应力大于外侧应力,且曲线箱梁应力最小值出现在靠近内侧的位置,直线箱梁两侧应力对称;

c. 在两处腹板与顶板交接位置,曲线箱梁内侧应力大于曲线箱梁外侧应力,曲线箱梁内侧应力大于直线箱梁对应位置应力,直线箱梁上的应力大于曲线箱梁外侧对应位置应力;

d. 直线箱梁底板应力两侧对称,曲线箱梁底板应力最大值靠近底板中心外侧。

### 3.2 移动荷载速度对箱梁剪力滞效应的影响

为探究移动荷载速度对箱梁剪力滞效应的影响及曲线箱梁与直线箱梁剪力滞效应的对比分析,在移动荷载总量  $P=50\text{ N}$  不变的情况下,分别

求出  $v=0, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$  m/s 七种速度作用下,荷载移动到曲线箱梁和直线箱梁  $L/2$  处横截面顶板与腹板交界处实际产生的最大应力,然后根据材料力学,计算出初等梁顶面的应力,

从而求得剪力滞系数,其中  $v=0$  m/s 表示集中荷载直接作用在  $L/2$  处顶板与腹板交接处,如表 1 所示.

表 1 不同移动荷载速度下  $L/2$  处截面剪力滞系数

| 移动荷载速度 $v/(m/s)$ |              | 0           | 0.1     | 0.5     | 1       | 1.5     | 2       | 2.5     |
|------------------|--------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 曲线箱梁             | —0.1 m 处(外侧) | 3.131 4     | 3.149 4 | 3.158 0 | 3.168 7 | 3.179 1 | 3.179 7 | 3.257 9 |
|                  | 剪力滞系数        | 0.1 m 处(内侧) | 3.587 5 | 3.629 6 | 3.639 6 | 3.650 3 | 3.664 9 | 3.706 0 |
| 直线箱梁             | —0.1 m 处     | 3.348 3     | 3.353 9 | 3.355 9 | 3.365 0 | 3.366 9 | 3.370 4 | 3.485 8 |
|                  | 剪力滞系数        | 0.1 m 处     | 3.348 3 | 3.353 9 | 3.355 9 | 3.365 0 | 3.366 9 | 3.370 4 |

根据表 1 可以绘出移动荷载速度对剪力滞系数的影响图,如图 5 所示.

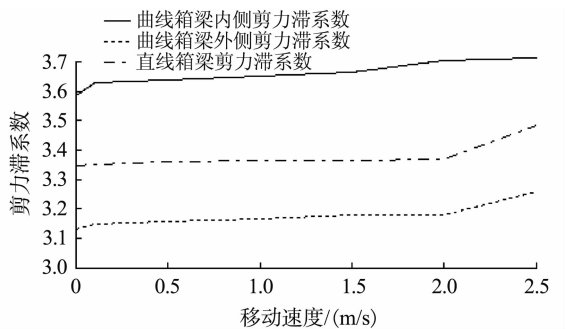


图 5 移动荷载速度对剪力滞系数的影响

Fig. 5 Dynamic static shear lag coefficient of mid-span section in different moving load speed  
根据表 1 和图 5 可以看出:

- a. 不同移动荷载速度下,箱梁的剪力滞系数随着移动荷载速度的增大而增大,移动荷载速度越小,剪力滞系数增长越缓慢.
- b. 在相同移动荷载速度下,曲线箱梁内侧剪力滞系数大于外侧剪力滞系数,同时也大于直线箱梁剪力滞系数.
- c. 直线箱梁两腹板与顶板交界处剪力滞系数对称,直线箱梁剪力滞系数曲线处于曲线箱梁内侧和外侧剪力滞系数曲线之间,说明曲线箱梁曲率的存在影响剪力滞系数在箱梁横截面的分布.

4 结 语

分析表明:在移动荷载作用下,悬臂箱梁均出现了正剪力滞现象,离集中荷载作用点越远,箱梁的剪力滞效应越小;移动荷载速度对悬臂箱梁剪力滞系数的影响较小,但是当移动荷载速度超过 2 m/s 时,剪力滞系数增长明显;不同速度移动荷载作用下曲线箱梁内侧剪力滞系数都明显大于外侧剪力滞系数和直线箱梁剪力滞系数,说明曲线箱梁内侧剪力滞效应更为明显.

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经费支持,武汉工程大学交通研究中心为本研究提供软件帮助,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] 万海滨. 曲线预应力混凝土箱梁剪力滞效应研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
WAN Hai-bin. Study on shear lag effect of curved prestressed concrete box girder[D]. Xian: Changan University, 2008. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 刘建新,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]. Zhengzhou: Journal of Zhengzhou University, 2008, 29 (3): 122 - 128. (in Chinese)

[5] 张永健,黄平明,狄谨,等. 波形钢腹板组合箱梁自振特性与试验研究[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):76-80.  
ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming, DI Jin, et al. Free vibration characteristics and experiment study of composite box girder with corrugated steel

webs[J]. Journal of Traffic and Transportation, 2008,8(5):76-80. (in Chinese)

[6] 甘亚南,周广春. 基于能量变分原理的薄壁箱梁自振特性分析[J]. 中国公路学报,2007,20(1):73-78.  
GAN Ya-nan, ZHOU Guang-chun. Analysis of free vibration characteristics of thin-walled box girder based on energy variation principle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(1):73-78. (in Chinese)

[7] TAYSI N, OZAKC M. Free vibration analysis and shape optimization of box-girder bridges in straight and curved planform [J]. Engineering Structures, 2002 (24):625-637.

[8] GOMEZA H C, FANNING P J, FENGA M Q, et al. Testing and long-term monitoring of a curved concrete box girder bridge[J]. Engineering Structures, 2011(33):2861-2869.

[9] 项海帆,姚玲森. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
XIANG Hai-fan, YAO Ling-sen. The theory of higher bridge structure[M]. Beijing:China Communications Press, 2001. (in Chinese)

[10] 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)

# Moving load speed on shear lag effect of cantilever curved box girder

*LU Hai-lin<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, YAN Chang-xiong*

(1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Jiangnan Expressway Co., LTD, Hubei Provincial Communications Investment Co., LTD, Gong'an 434300, China)

**Abstract:** Using general software of a three dimensioned finite element ANSYS, the shear lag effect under seven different moving load speed was respectively investigated in the cantilever curved and straight box girder while setting up the same parameters such as length, elastic modulus, Poisson's ratio and density. The distribution of section stress and shear lag coefficient was mainly analyzed when the loads moved to the mid-span of the cantilever box girder. The results show that under the effect of moving load, the positive shear lag phenomena are confirmed in mid-span sections of the two box girders; the shear lag coefficient increases with the increase of moving load speed, it increases slowly when moving load speed is less than 2 m/s, but it increases quickly when moving load speed exceeds 2 m/s; the inside shear lag coefficient of curved box girder is obviously bigger than that of the outside; the shear lag coefficient distribution curve of cantilever straight box girder was between the curves of inside and outside coefficient distribution of the curved box girder.

**Key words:** box girder; shear lag effect; finite element; moving load speed

本文编辑: 龚晓宁