

文章编号:1674-2869(2014)012-0039-05

# 不同荷载作用下直线箱梁剪力滞效应分析

卢海林,朱松波,周小龙,乾超邦,万崇勇  
(武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**利用有限元分析软件分析了在集中荷载、均布荷载和地震作用下简支直线箱梁的剪力滞效应.保持简支直线箱梁的长度、弹性模量、泊松比、密度等参数不变,仅通过改变作用其上的荷载类型,探讨了不同荷载作用下直线箱梁的剪力滞效应;重点分析了简支直线箱梁的跨中横截面顶板上不同荷载作用下的应力分布及剪力滞系数变化规律.结果表明在3种不同荷载的作用下,简支直线箱梁跨中截面顶板的剪力滞系数均在顶板与腹板交接处最大;集中荷载和均布荷载大小的改变对直线箱梁剪力滞效应的影响可以忽略不计;地震作用下直线箱梁的剪力滞效应较为明显.

**关键词:**直线箱梁;剪力滞效应;集中荷载;均布荷载;地震作用

**中图分类号:**U448.42

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.012.008

## 0 引言

箱梁截面具有自重轻、截面抗扭和抗弯刚度大,在施工阶段和实际使用过程中能保持良好的稳定性等优点,因而在实际工程中广泛应用.箱梁不同于矩形截面梁受弯时,按照梁弯曲初等理论,弯曲正应力沿梁宽方向是均匀分布的,但在箱型梁中,腹板将剪应力传递给翼缘板,而这些剪应力在翼缘板上分布并不均匀,一般表现为腹板和翼缘板交接处最大,翼缘板上距离交接处越远,剪应力越小,这就造成了剪切变形沿翼缘板宽度方向的非均匀分布,产生剪力滞效应.针对箱梁的剪力滞效应,近些年来,许多专家、学者做了许多的研究,取得了一些富有成效的成果,大致可以归纳为以下5类:**a.**基于弹性理论的经典解析法,如调谐函数法等;**b.**基于简化结构图形的比拟杆法;**c.**基于能量原理的能量泛函变分法;**d.**基于有限元的数值解法;**e.**基于模拟实际工程的模型试验和实桥试验研究法.其中,以有限元为基础的数值解法可较全面考虑各种影响因素,从而获得较精确而又全面的应力分布,是解决各种复杂工程问题中的一种行之有效的分析方法.本文基于ANSYS12.0,以简支直线箱梁为例,分析了其跨中截面剪力滞效应在集中荷载、均布荷载和地震作用下的变化规律.结果表明在3种不同荷载的作用下,简支直线箱梁跨中截面顶板的剪力滞系数均在顶板与腹

板交接处最大;集中荷载和均布荷载大小的改变对直线箱梁剪力滞效应的影响可以忽略不计,地震作用下直线箱梁的剪力滞效应较为明显.便于桥梁设计和施工时参考.

## 1 剪力滞系数的计算

按照初等梁理论的平截面假定,当不考虑剪切变形对纵向位移的影响,箱梁的两腹板处在受到对称竖向荷载作用时,翼缘上、下板的正应力沿梁宽度方向是均匀分布的.对于腹板间距较宽的箱梁,由于沿翼缘板宽度方向的剪切变形是非均匀分布的,引起弯曲时,远离腹板的翼板纵向位移滞后于靠近腹板的翼板纵向位移,即使弯曲正应力的横向分布呈现曲线形状<sup>[1]</sup>.这种由于翼缘板的剪切变形造成在截面上沿梁宽度方向的弯曲正应力呈现非均匀分布的现象(如图1),在美国称为

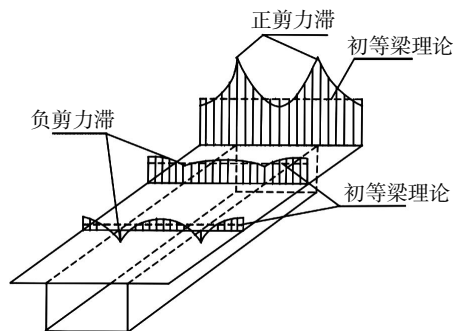


图1 剪力滞现象

Fig. 1 Phenomenon of shear lag

收稿日期:2014-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51378404);武汉工程大学研究生创新基金项目(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、建筑结构抗震与加固.

“剪力滞效应”<sup>[2-3]</sup>,在英国称为“弯曲应力离散”。通常对于横截面上的正应力,若位于靠近腹板的翼板的应力大于位于翼板中点处的应力,则称之为“正剪力滞”;反之,则称之为“负剪力滞”<sup>[4]</sup>。

工程中为了定量研究剪力滞效应的大小,引入了剪力滞系数的概念,其计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$\lambda = \sigma / \bar{\sigma} \quad (1)$$

其中, $\sigma$ 为截面上的真实应力值, $\bar{\sigma}$ 为初等梁理论计算出来的应力值。

$\sigma$ 的值可以由有限元软件 ANSYS 分析计算得到。而 $\bar{\sigma}$ 的值在结构形式以及受力较为简单时,在直线箱梁剪力滞系数的计算中,已有将 $\bar{\sigma}$ 的值用截面平均法线应力值代替以计算剪力滞系数的简化计算方法<sup>[6]</sup>;但荷载作用较为复杂时,按照理论进行计算将变得十分繁琐。考虑到箱梁在地震作用下的不规则,需要考虑采用较为简单的计算方法求得 $\bar{\sigma}$ 以计算剪力滞系数。

## 2 有限元计算模型的建立

### 2.1 箱梁结构形式

本文选用模型为直线箱梁,并将整个箱梁结构视为均质弹性体,选用材料为有机玻璃,其跨径为 1.04 m,弹性模量为 3 000 MPa,泊松比为 0.385, $\rho=1\,180\text{ kg/m}^3$ ,模型的横截面尺寸如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

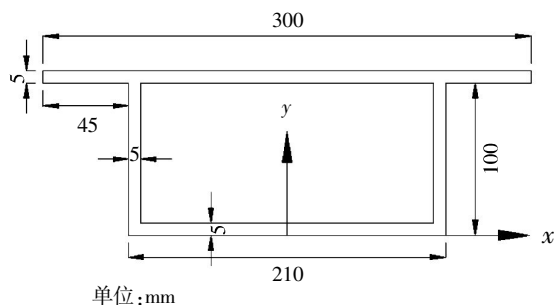


图 2 箱梁横截面尺寸

Fig. 2 Dimensions of box girder cross-section

### 2.2 箱梁计算模型的建立及边界条件

单元模型和网格划分精细度作为影响有限元法精度的主要因素,其中单元模型的影响相对关键些。为了确保精度,以及方便数据分析,本文采用弹性平板壳单元划分<sup>[8]</sup>,单元类型为 shell63,箱梁约束为简支建立的箱梁模型。

## 3 荷载及计算结果

对集中荷载、均布荷载和地震作用下的箱梁剪力滞效应进行分析,其中有机玻璃在常温下压

缩时屈服强度为  $\sigma=77.2\text{ MPa}$ <sup>[9]</sup>,本文集中荷载、均布荷载取值如图 3、图 4 所示。由于简支结构中跨中部位处应力、应变一般较大,所以选箱梁自跨中截面应力为研究对象。

### 3.1 集中荷载

在模型跨中部分顶板和腹板交接处作用一对称集中荷载,大小分别为  $P=10\text{ kN}$ 、 $15\text{ kN}$  及  $20\text{ kN}$ 。利用 ANSYS 分析得到的结果计算剪力滞系数,结果如图 3 所示。

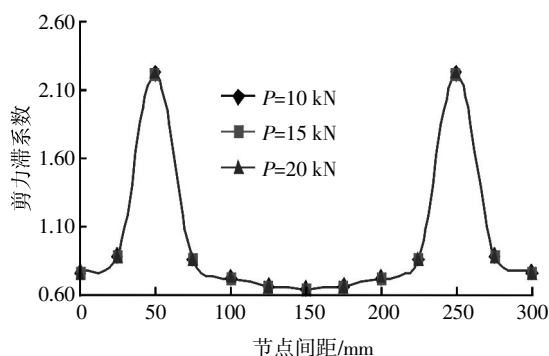


图 3 集中荷载作用下的剪力滞系数

Fig. 3 Shear lag coefficient of concentrated load

从图 3 中可以看出,在不同大小集中荷载作用下,3条曲线基本上重合,也就是说相同位置处的节点剪力滞系数相接近,即表明集中荷载大小的改变对剪力滞效应的影响较小,可以忽略;顶板与腹板交接处外侧节点处的剪力滞系数最大,其余各节点处的剪力滞系数基本上相接近,主要集中在 0.8 附近。

### 3.2 均布荷载

在模型整个顶板上施加均布荷载,总大小为  $0.1\text{ MPa}$ 、 $0.3\text{ MPa}$  及  $0.5\text{ MPa}$ 。利用 ANSYS 分析得到的结果,计算剪力滞系数,结果如图 4 所示。

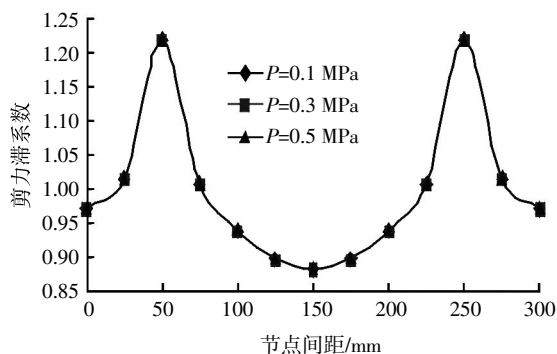


图 4 均布荷载作用下的剪力滞系数

Fig. 4 Shear lag coefficient of uniform live load

从图 4 中可以看出,在不同大小均布荷载作用下,3条曲线基本上重合,也就是说相同位置处的节点剪力滞系数相接近,即表明集中荷载大小

的改变对剪力滞效应的影响较小,可以忽略;顶板与腹板交接处外侧节点处的剪力滞系数最大,其余各节点处的剪力滞系数都有一定的变化但变化趋势较缓,主要在 0.89~1.02 之间变化,其剪力滞效应的影响较集中荷载要明显些。

### 3.3 地震作用

地震波采用典型强震记录中的天津波进行分析,记录时长为 19.19 s,时间间隔为 0.01 s,场地类别为Ⅲ类,记录信号取其南北向加速度,如图 5 所示。从记录值中取 5~19 s 时间段进行分析,每个节点的分析结果按时间间隔 0.1 s 记录一个值,即每个节点一共 140 个值。依据国家地震局批准的烈度表,当基本烈度为 7 度、8 度、9 度时,对应的地面运动的最大水平加速  $a$  度为 0.125 g、0.25 g、0.5 g。而实际上天津地震记录的最大峰值  $A_{\max} =$

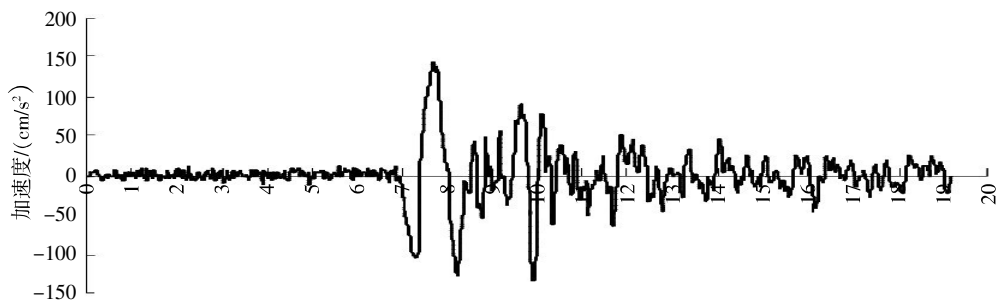
145.80  $\text{cm/s}^2$ 。因此,需要对原始的记录数据进行以下处理,然后再导入 ansys 中分析计算,即将实际地震记录的峰值折算成计算所需的基本烈度。若为 7 级地震,一般  $A'_{\max} = a/2^{[10]}$ ,则对于天津波记录

$$A'_{\max} = 0.125 \text{ g}/2 \quad (2)$$

$$A'_{\max}/A_{\max} = (0.125 \text{ g}/2)/145.80 = 0.420 5 \quad (3)$$

将天津波的记录数据值乘以 0.420 5 后就得到修正后的加速度值,水平加速度取修正后的竖直加速度的两倍使用。

箱梁由于剪力滞效应的存在而使得顶板与腹板交接处的应力值可能较大,因此,地震响应的结构主要取自跨中截面的这些交接处,按照前面提到的剪力滞系数简化计算方法,计算得到该处的剪力滞系数,如图 6 所示。



如图 5 天津波

Fig. 5 Tianjin wave

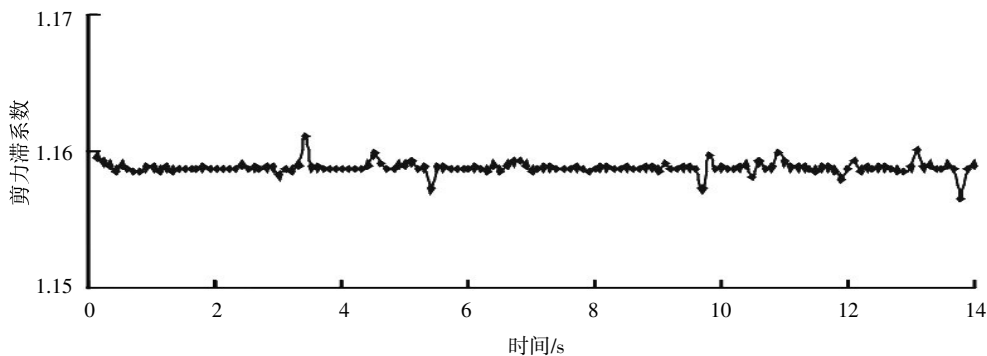


图 6 顶板与腹板交接处外侧节点剪力滞系数随时间变化

Fig. 6 Shear lag coefficient of roof and web junction lateral node changing with time

从图 6 可以看出,随着地震时间的变化,节点剪力滞系数也不断变化,但节点的剪力滞系数大部分都集中在某一直线附近(图 6 中剪力滞系数大部分集中在 1.158 附近),也就是说,虽然在地震作用这种不断变化的外荷载作用下,箱梁腹板和顶板交接处节点的剪力滞系数趋近于某一固定的值,即剪力滞效应在此处将趋于稳定。在取截面上其他节点分析时,也存在相同的现象,由此可以认

为,在地震作用下,该横截面上剪力滞效应横向分布趋于稳定,绝大多数时间内不会有太大的变化。基于此,在分析某一节点的剪力滞系数时,取其平均值作为这一固定值,即该节点最终的剪力滞系数。

在 ANSYS 中导入修正后的天津波,利用 ANSYS 分析得到的结果,计算剪力滞系数,结果如图 7 所示。

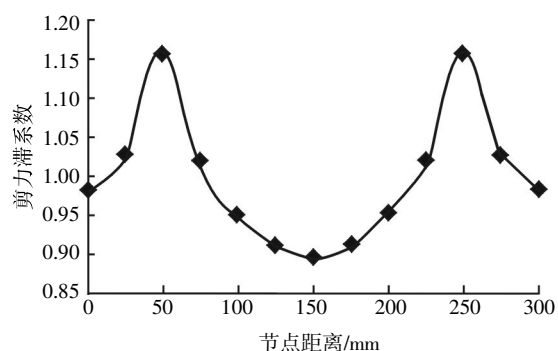


图 7 地震作用下的剪力滞系数

Fig. 7 Shear lag coefficient of earthquake action

从图 6 和图 7 可以看出,在地震作用下,各测点的剪力滞系数在不同时刻的剪力滞系数不同;顶板与腹板交接处外侧节点处的剪力滞系数最大,其余各节点处的剪力滞系数都有一定的变化但变化趋势较陡,主要在 0.9~1.05 之间变化,即复杂的受力情形的剪力滞效应较为明显。

## 4 结 语

本文运用 ANSYS 分析了集中荷载、均布荷载和地震作用下简支直线箱梁的剪力滞效应,得到以下结论:

a. 在 3 种不同荷载的作用下,简支直线箱梁跨中截面顶板的剪力滞系数均在顶板与腹板交接处最大,从箱梁顶板与腹板交接处到悬臂翼缘和中轴线两边的剪力滞系数均逐渐减小,在中轴线处剪力滞系数最小;

b. 在其他条件相同的情况时,集中荷载和均布荷载作用下,单纯的改变荷载的大小,箱梁的剪力滞大小的变化很小,甚至可以忽略,但均布荷载的影响较集中荷载影响要明显些;

c. 地震作用较为复杂,复杂的受力情形的剪力滞效应较为明显。

## 致 谢

本研究同时得到国家自然科学基金委员会和武汉工程大学的支持,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] 廖宇. 大悬臂弧线底板城市高架箱梁桥剪力滞效应研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

LIAO Yu. Analysis of shear lag in arc bottom urban elevated box girder bridge with large cantilever[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)

[2] FOUTCH D A, CHANG P C. A shear lag anomaly [J]. Structural Engineering (ASCE), 1982, 108 (7): 1653-1658.

[3] SUNG C L, CHAI H Y, DONG Y. Analysis of shear lag anomaly in box girders [J]. Structural Engineering (ASCE), 2002, 128(11): 1379-1386.

[4] SHUSHKEWICH K W. Negative shear lag explained [J]. Structural Engineering (ASCE), 1991, 117 (11): 3543-3546.

[5] 陈利鹏. 地震荷载作用下曲线箱梁剪力滞效应研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014.

CHEN Li-peng. Analysis of shear lag in curved box girder under seismic loads [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[6] 邹毅松, 李成君, 易祥军. 薄壁箱梁剪力滞效应计算方法研究 [J]. 桥梁与隧道工程, 2012(5): 93-98.

ZOU Yi-song, LI Cheng-jun, YI Xiang-jun. Calculation of shear lag effect of thin-walled box girder [J]. Bridge & Tunnel Engineering, 2012(5): 93-98. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 卢海林. 预应力混凝土曲线箱型梁剪力滞效应理论分析与试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.

LU Hai-lin. Theoretical analysis and experimental study on shear-lag effect of prestressed concrete curved box beam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

[9] 程军, 扶名福, 林治平. 有机玻璃的力学与光塑性性能 [J]. 天津大学学报, 2000, 1(33): 85-87.

CHENG Jun, FU Ming-fu, LIN Zhi-ping. Mechanical and photo plasticity research of polymethyl methacrylate [J]. Journal of Tianjin University, 2000, 1(33): 85-87. (in Chinese)

[10] 彭聪, 张鹏梁, 孙凯. 基于 ANSYS 的桥梁地震响应有限元分析 [J]. 山西建筑, 2007, 5(15): 53-54.

PENG Cong, ZHANG Peng-liang, SUN Kai. FEA of bridge's earthquake response on ANSYS [J]. Shanxi Architecture, 2007, 5(15): 53-54. (in Chinese)

## Shear lag effect of straight box girder under different loads

*LU Hai-lin, ZHU Song-bo, ZHOU Xiao-long, QIAN Chao-bang, WAN Chong-yong*

(School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** We analyzed the shear lag effect of simply-supported straight box girder under the concentrated load, the uniform live load and the earthquake action using the finite element analysis software. Keeping the same parameters of simply-supported straight box girder such as length, elastic modulus, Poisson ratio, density and so on, only changing the types of loads, we analyzed the distribution of section stress and the variation of shear lag coefficient in the roof of the mid-span of simply-supported straight box girder under different loads. The results show that shear lag coefficient of roof and web junction of simply-supported straight box girder in the roof of the mid-span is maximum under the three different loads; the effect of changing the concentrated load and the uniform live load on the shear lag of straight box girder can be neglected; the shear lag effect of straight box girder under the earthquake action is more obvious.

**Keywords:** straight box girder; shear lag effect; concentrated load; uniform live load; earthquake action

本文编辑: 龚晓宁