

文章编号:1673-2049(2008)01-0116-06

## 斜拉桥 $\Pi$ 形主梁剪力滞影响因素分析

张永健<sup>1,2</sup>, 王 达<sup>2</sup>, 黄平明<sup>2</sup>

(1. 湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙 410001;

2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**通过三维有限元模型对  $\Pi$  形梁斜拉桥主梁剪力滞特性进行了参数分析, 主要考虑了预应力、桥面横坡以及小纵梁的影响, 并将有限元模型结果与实桥检测数据进行了对比, 验证了其可靠性。结果表明: 预应力对  $\Pi$  形截面斜拉桥主梁轴向应力的横向分布规律有明显影响, 计算中不可忽略预应力束的影响; 桥面横坡也是影响  $\Pi$  形截面主梁斜拉桥剪力滞效应的一个重要因素, 尤其是对顶板中央处的纵向正应力影响较大; 在桥面板沿纵向增设小纵梁是减小剪力滞效应的一种有效方法, 对于高度较小的纵梁可以显著改善应力分布。

**关键词:**桥梁工程; 斜拉桥; 剪力滞;  $\Pi$  形截面; 参数分析

中图分类号: TU448.224

文献标志码: A

## Effect Factor Analysis of Shear Lag of Cable-stayed Bridge with $\Pi$ -shaped Main Girder

ZHANG Yong-jian<sup>1,2</sup>, WANG Da<sup>2</sup>, HUANG Ping-ming<sup>2</sup>

(1. Freeway Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410001, Hunan, China; 2. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the shear lag effect in cable-stayed bridge with  $\Pi$ -shaped cross section, a parametric analysis using finite element analysis was carried out, in which the parameters, such as prestress, transverse slope of bridge deck and little longitudinal beams were considered. The credibility of the finite element model was validated by comparison of its results with the test results of the bridge. The results indicate that the prestress has much effect on the shear lag, and it should not be neglected during calculation. Transverse slope is another important factor to influence the shear lag effect, especially influence the longitudinal normal stress near the middle area of the deck. It also shows that adding longitudinal girders can improve the stress distribution obviously.

**Key words:** bridge engineering; cable-stayed bridge; shear lag;  $\Pi$ -shaped cross section; parametric analysis

## 0 引言

由于斜拉桥本身的结构特点, 大部分斜拉桥采用双索面布置, 而与其对应的是大量采用  $\Pi$  形截面

主梁。由于梁肋板结构中两边肋间距较大(公路桥梁多为 30 m 左右), 拉索锚固于两边肋上, 结构体系的传力途径为索力通过边肋传至主梁截面, 因而, 必然引起桥面板的剪力滞后<sup>[1]</sup>。最早涉入剪力滞研

究的是 Von Karman,后来 Reissner<sup>[2]</sup>成功地运用变分原理分析了具有 2 个对称轴的箱梁,假定翼板的纵向位移沿横向按二次抛物线分布,获得了应力和挠度的闭合解。其后郭金琼等<sup>[3]</sup>在 Reissner 微分方程的基础上,将翼板纵向位移沿横向分布函数修改为三次抛物线,并用模型和数值分析加以验证。而对于槽形截面主梁,由于截面的不对称,文献[4]中首先提出通过在截面上附加一均匀轴向位移来构成轴力的自平衡。文献[5]中应用最小势能原理,分别导出了在仅有轴向荷载作用及压弯荷载共同作用下的关于剪滞效应的基本微分方程。根据叠加原来计算压弯荷载作用下的剪力滞效应,对于斜拉桥主梁的剪力滞计算具有一定的实用价值。而文献[6]中将有限段法引入到了斜拉桥的剪力滞计算中。文献[7]中运用力法原理,将 II 形梁和翼板截开成矩形截面梁和平面应力板,在截面上取代赘余的分布剪力,将 II 形梁视为 Timoshenko 梁和平面应力板的组合,求得了在横向荷载作用下和轴向偏压荷载作用下满足全部边界条件和控制方程的弹性力学解析解,并与模型试验对比进行了验证。该方法虽然输入数据较少、精度较高,但计算公式较为复杂。虽然研究斜拉桥剪力滞的文献已经很多,但对影响斜拉桥剪力滞效应的参数分析却很少<sup>[8-14]</sup>,文献[15]中虽然分析了横坡对宽翼缘 II 形梁剪力滞效应的影响,但其分析并非针对斜拉桥进行,且只分析了横坡的影响。本文中笔者以山东德州新河大桥为研究背景,通过三维有限元全面研究预应力、桥面横坡以及纵梁等因素对斜拉桥剪力滞效应的影响,并将有限元结果与实桥检测数据进行对比,以验证有限元模型的正确性。

### 1 有限元模型

新河大桥为独塔双索面 2 跨预应力混凝土斜拉桥,为半漂浮体系,跨径组合为 90 m+90 m,桥面宽度为 31 m,主桥布置如图 1 所示。该桥设计荷载为汽车-超 20 级;验算荷载为挂车-120 级;人群荷载为 3.0 kPa。主梁采用双主肋 II 形截面,基本梁高为 2.3 m,设双向 1.5% 的横坡。斜拉索采用高强平行钢丝拉索,扇形布置,全桥共 10 对。为了准确考虑剪力滞影响,采用大型通用计算软件 ANSYS 进行计算。由于重点研究该斜拉桥的 II 形主梁受力,因此在建模过程中选择 ANSYS 中的空间实体模型 Solid45 模拟主梁,Solid45 为 8 节点 6 面体单元,每个节点具有 3 个平动自由度,可以准确模拟主梁的

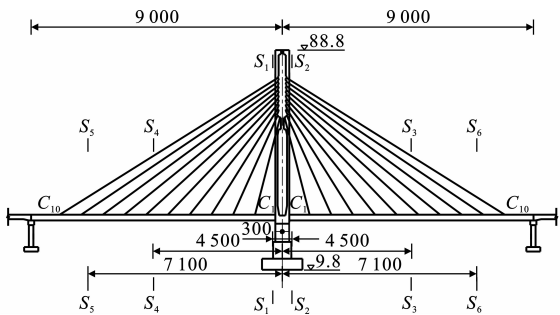


图 1 主桥立面(单位:cm)

Fig. 1 Elevation of Main Bridge (Unit:cm)

剪力滞效应。由于主塔不是本模型的主要研究对象,建模中采用了相对简单的 Beam4 单元模拟,以减小单元数量,控制计算规模。Beam4 的每个节点具有 3 个平动自由度以及 3 个旋转自由度,可考虑主塔的轴向变形、弯曲变形及扭转变形。斜拉索采用 Link10 单元模拟。主桥采用 C50 混凝土,重度取  $25\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量取  $3.45\times10^4\text{ MPa}$ 。拉索采用高强钢丝,重度取  $78.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量取  $1.95\times10^5\text{ MPa}$ 。由于该斜拉桥为半漂浮体系,主塔横梁上的 2 个主梁的限位支座通过主塔与主梁相对应节点的耦合来模拟。主梁中的预应力束使用考虑预应力损失后的等效集中力模拟。整个结构有限元模型如图 2 所示,其中主梁横截面的网格划分如图 3 所示;主梁共划分 31 392 个单元,斜拉索划分 40 个单元,主塔划分 128 个单元。

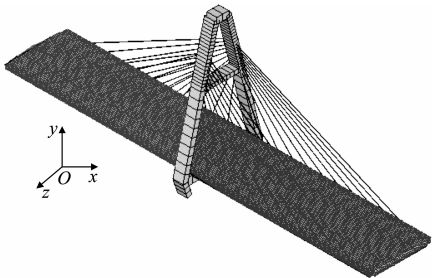


图 2 全桥有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model of Whole Bridge



图 3 主梁横截面的网格划分

Fig. 3 Meshes Division of Main Girder Cross Section

### 2 主梁测点布置

桥梁施工过程中,在主梁纵桥向选取几个关键测试截面,每个断面预埋设了多个钢弦式应变计以

测试主梁横向的应力分布情况。应力监测断面选取主塔两侧第 1 对索内侧梁段截面  $S_1$ 、 $S_2$ 、主跨跨中截面  $S_3$ 、 $S_4$ ，以及施工中应力控制截面  $S_5$ 、 $S_6$ 。主梁应变计埋设断面布置见图 1，各截面的应变计横向布置见图 4。

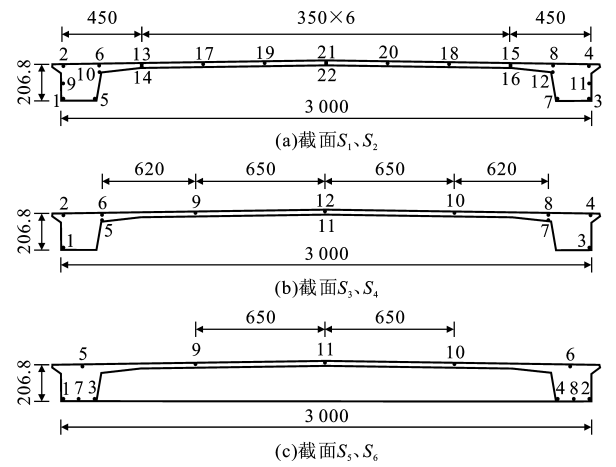


图 4 横截面传感器布置(单位:cm)

Fig. 4 Sensors Layouts of Cross Sections (Unit:cm)

3 试验数据及有限元结果分析

根据第 1 节建立的有限元模型进行计算，并将各截面的计算值与实桥监测数据进行对比。其成桥阶段监控截面的应力对比结果见图 5(原点取横桥中点，下文同)。

从图 5 可以看出，除其中个别点因混凝土应变计的测量精度会有一定的误差外，大部分数据吻合较好，主梁各个截面的轴向应力理论值与实测值在横桥向的分布规律也基本一致，这说明结构的有限元模拟是可靠的。

4 预应力对剪力滞效应的影响

为了研究预应力对 II 形截面斜拉桥主梁剪力滞效应的影响，另建一个无预应力束模型与第 1 节中的模型进行对比。成桥状态下有预应力与无预应力的对比结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出，施加预应力后，主梁横向轴向应力普遍大于无预应力钢筋的情况，这说明预应力钢筋给主梁储备了一定的预压力；同时，有预应力跟无预应力相比，其轴向应力的横向分布特点也明显不同，尤其在靠近桥塔主梁根部的截面  $S_1$ ，这说明预应力的施加不仅改变了主梁轴向应力的值，而且也改变了轴向应力的横向分布情况，即预应力对斜拉桥主梁剪力滞效应影响明显。施加预应力后，

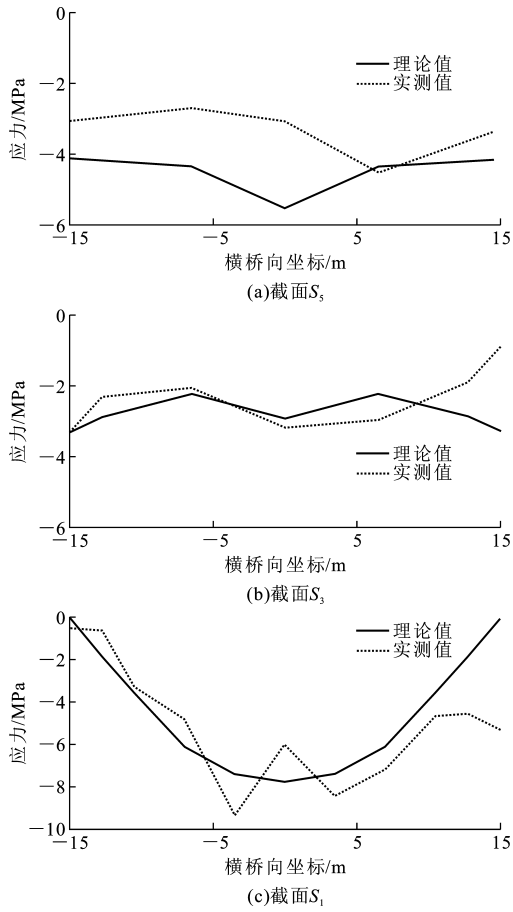


图 5 成桥阶段主梁横截面轴向应力理论值与实测值比较

Fig. 5 Comparisons of Theoretical Stresses and Test Stresses of Cross Sections Under Completed State

靠近桥塔的截面  $S_1$  应力分布比离桥塔较远的截面  $S_3$  应力分布更加不均匀，且主梁顶板中央的压应力比梁肋的压应力更大，因为该桥在靠近桥塔主梁的顶板上布置了较多的预应力束，预应力束张拉后，轴向力在传递到主梁的梁肋过程中，顶板发生了剪切变形，使得梁肋的轴向应力落后于中央的顶板。因此对于这种 II 形截面斜拉桥主梁预应力的设计，必须考虑到剪力滞后的影响，避免在顶板中央内产生过大的压应力。

5 横坡对剪力滞效应的影响

为了分析横坡对剪力效应的影响，同时排除其他因素的干扰，取无预应力模型进行计算，考虑到桥面横坡坡度很少超过 2%，因而计算中选择了坡度  $r=0.0\%$ 、 $0.5\%$ 、 $1.0\%$ 、 $1.5\%$ 、 $2.0\%$  五种情况的横坡，各截面计算结果见图 7。

从图 7 可以看出，桥面横坡对顶板的正应力产生了明显的影响。横坡使得纵向正应力曲线产生一个波峰，这使得应力分布规律变得更为复杂，且横坡

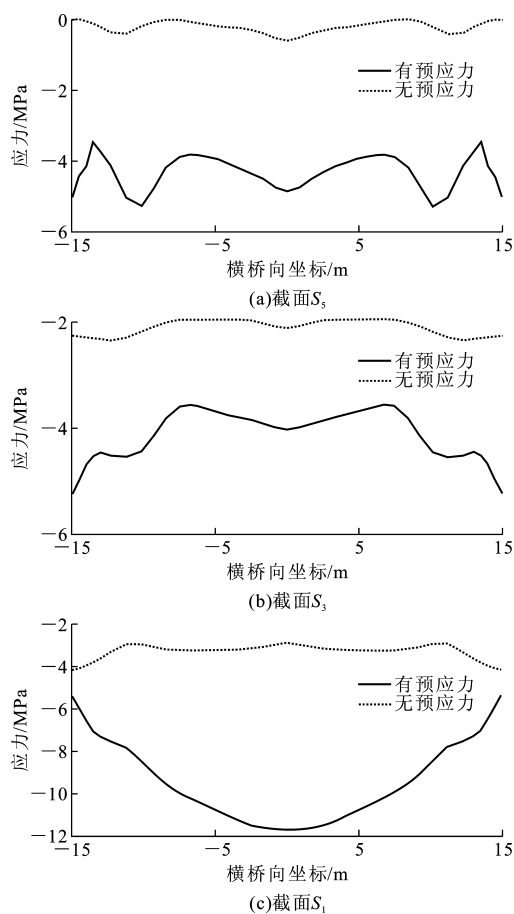


图 6 有、无预应力时主梁横截面轴向应力比较

Fig. 6 Comparisons of Axial Stresses of Cross Section with and without Prestress

主要影响桥面板中间部分的应力大小,而对梁肋附近的应力影响甚微。同时可以看出,截面  $S_5$ 、 $S_1$  横坡有减小中央顶板正应力的趋势,而截面  $S_3$  的应力有增加的趋势。因而对于 II 形斜拉桥主梁,计算梁肋处的正应力时可以忽略横坡的影响,而计算中央顶板的正应力时必须考虑横坡的影响。

以往采用变分法分析箱梁的剪力滞时,常假设其应力的横向分布为二次或三次抛物线,但该假设对于斜拉桥的主梁不太适合。箱梁的剪力滞效应往往通过一个剪力滞系数即可大概确定应力的横向分布情况,而斜拉桥的横向分布情况要复杂的多,其横向分布特点很难用单个参数加以描述。参照文献 [16] 中剪力滞系数的定义:  $\lambda = \sigma / \bar{\sigma}$ ,  $\sigma$  为考虑剪力滞效应所求得正应力,  $\bar{\sigma}$  为根据翼板实际应力图下的面积除以翼板宽度所得截面平均应力。

图 8 为梁肋处以及桥面板中央处的剪力系数同横坡的变化关系。从图 8 可以看出,剪力滞系数随着横坡大体呈线形变化,其中,截面  $S_1$ 、 $S_5$  梁肋处的剪力滞系数随着横坡增加而增加,而截面  $S_3$  与之相

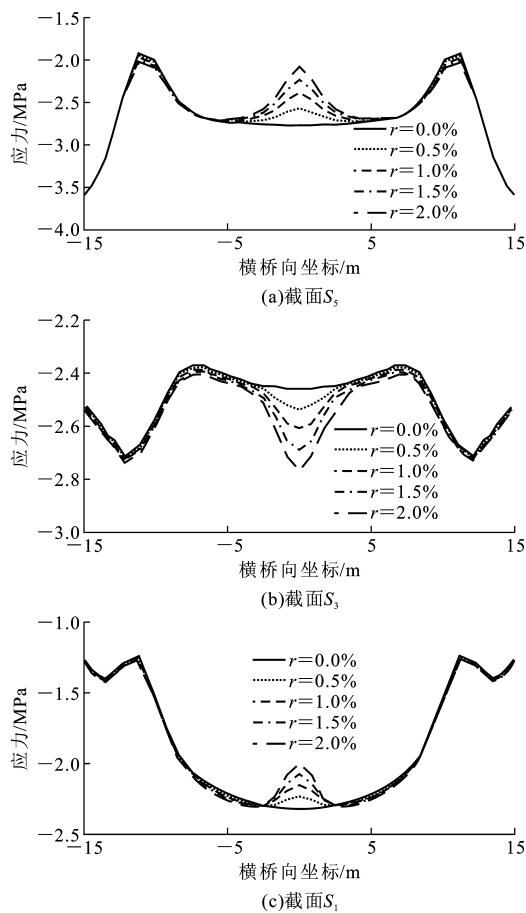


图 7 不同横坡坡度时主梁横截面轴向应力比较

Fig. 7 Comparisons of Axial Stresses of Cross Section Under Different Transverse Slope Gradient

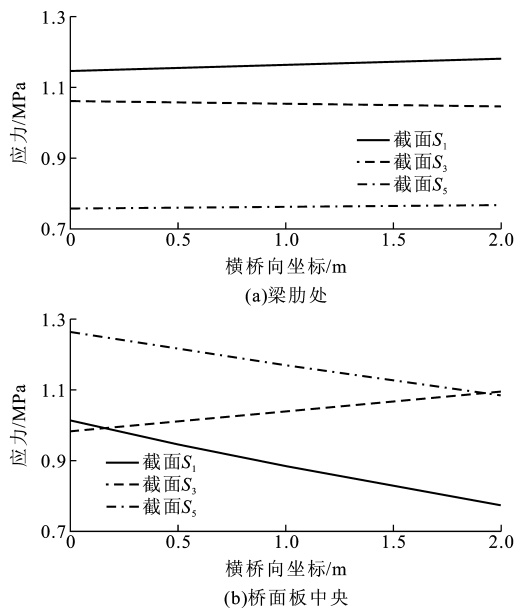


图 8 剪力滞系数曲线

Fig. 8 Curves of Shear Lag Coefficient

反。对于桥面板中央的剪力滞系数在截面  $S_3$ 、 $S_5$  处随着横坡的增加而减小,截面  $S_1$  与之相反,即对于

位置不同的截面,剪力滞系数的变化没有统一的规律,实际计算中须具体截面具体考虑。对比图8(a)、(b)可以发现,梁肋处剪力滞系数变化曲线接近于水平,而在桥面板中央处的剪力滞系数变化曲线较陡,即横坡主要影响横截面桥面板中央的剪力滞系数。

6 小纵梁对剪力滞效应的影响

在一些桥面较宽的Ⅱ形主梁斜拉桥中,常常在2道边梁肋之间增设小纵梁,以减小剪力滞效应。为了分析小纵梁的影响,在桥面板地面上对称地增设3道小纵梁(图9),小纵梁宽度为30 cm,高度分别为50、70、90 cm进行对比分析。按照平坡、无预应力钢筋进行计算,各截面的正应力计算结果见图10。

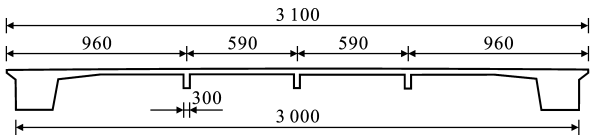


图9 小纵梁(单位:mm)

Fig. 9 Little Longitudinal Girders (Unit:mm)

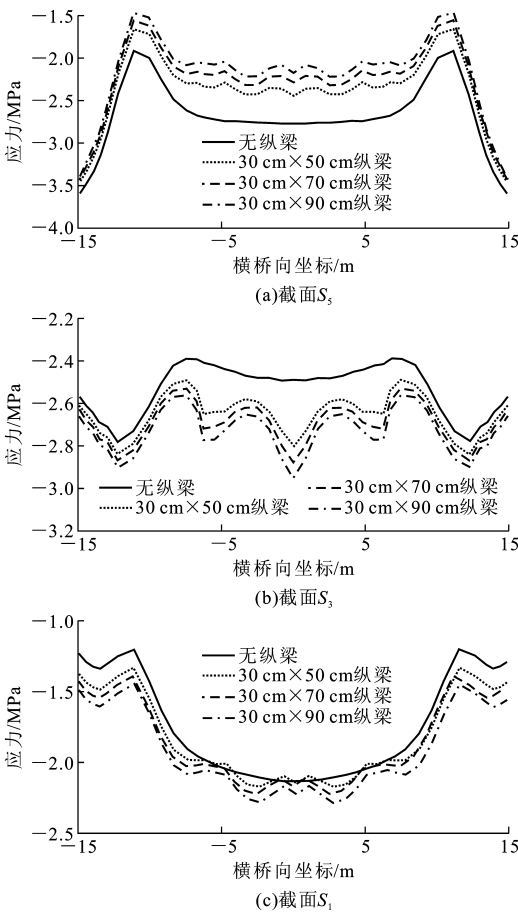


图10 主梁横截面轴向应力比较

Fig. 10 Comparisons of Axial Stresses of Main Girder Cross Section

从图10可以看出,增设小纵梁可使横截面正应力有变均匀的趋势,尤其使截面 $S_3$ ,即使增设3道30 cm×50 cm的小纵梁,也使得顶板增设纵梁处的正应力大大增加,从而使得整个截面应力分布更为均匀。当小纵梁梁高进一步增加到70、90 cm时,截面应力有进一步变均匀的趋势,但效果已不太明显。因此,对于桥面较宽的Ⅱ形主梁斜拉桥,可以考虑通过增设小纵梁来减轻剪力滞带来的影响,从而使应力分布更为均匀,且不需要太大的纵梁。

7 结 语

(1)预应力不仅对Ⅱ形截面主梁斜拉桥的轴向应力大小有影响,并且对其应力的横向分布规律也有影响,实际计算中不可忽略预应力束的影响。

(2)桥面横坡也是影响Ⅱ形截面主梁斜拉桥剪力滞效应的一个重要因素,尤其是对顶板中央处的纵向正应力影响较大,但其对Ⅱ形梁梁肋的纵向正应力影响甚微,可以忽略。

(3)沿纵向增设小纵梁是减小剪力滞效应带来的影响的一种有效方法,高度较小的纵梁可以显著改善应力分布。

参考文献:

References:

[1] 韦成龙,曾庆元,刘小燕.肋板结构受压构件的剪力滞效应分析[J].力学与实践,2001,23(2):41-43.  
WEI Cheng-long, ZENG Qing-yuan, LIU Xiao-yan. Shear-lag Effect Analysis for Beam-and-slab Deck Under Axial Load[J]. Mechanics in Engineering, 2001,23(2):41-43.

[2] REISSNER E. Analysis of Shear Lag in Box Beams by Principle of Minimum Potential Energy[J]. Quarterly of Applied Mathematics,1946,5(3):268-278.

[3] 郭金琼,房贞政,罗登孝.箱形梁桥剪力滞效应分析[J].土木工程学报,1983,16(1):1-13.  
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, LUO Deng-xiao. Shear-lag Effect Analysis of the Box Beam[J]. China Civil Engineering Journal,1983,16(1):1-13.

[4] 倪元增.槽形宽梁的剪力滞问题[J].土木工程学报,1986,19(4):32-41.  
NI Yuan-zeng. Shear Lag Question of the Wide Flange Beam[J]. China Civil Engineering Journal, 1986,19(4):32-41.

[5] 程翔云,罗旗帜.箱梁在压弯荷载共同作用下的剪力滞[J].土木工程学报,1991,24(1):52-64.  
CHENG Xiang-yun, LUO Qi-zhi. Shear Lag of Box

- Gird Bridge Under Axial Load and Bending Load[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(1): 52-64.
- [6] 罗旗帜. 压弯箱梁剪力滞计算的梁段有限元法[J]. 佛山大学学报, 1994, 12(2): 23-31.  
LUO Qi-zhi. Calculations of the Shear Lag in Box Girders Under Combined and Axial Loading by the Finite Segment Method[J]. Journal of Foshan University, 1994, 12(2): 23-31.
- [7] 蔡松柏, 程翔云, 邵旭东. Ⅱ形梁剪力滞效应的解析解[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 82-86.  
CAI Song-bai, CHENG Xiang-yun, SHAO Xu-dong. An Analytical Solution for Shear-lag Effects of Flat-arch-shaped Beam Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5): 82-86.
- [8] 吴文清, 叶见曙, 万 水, 等. 波形钢腹板组合箱梁在对称加载作用下剪力滞效应的试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 48-51.  
WU Wen-qing, YE Jian-shu, WAN Shui, et al. Experiment Study of Shear Lag Effect of Composite Box Girder with Corrugated Steel Web Under the Symmetrical Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 48-51.
- [9] 刘世忠, 欧阳永金, 吴亚平, 等. 变截面薄壁箱梁剪力滞剪切变形效应分析[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 61-63.  
LIU Shi-zhong, OUYANG Yong-jin, WU Ya-ping, et al. Non-uniform Thin Wall Box Analysis of Considering Both Shear Lag and Shear Deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 61-63.
- [10] 沈蒲生, 孟焕陵. 框筒结构梁柱截面基于剪力滞最小的合理高度[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 16-19.  
SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling. Reasonable Section Height of Beam and Column Based on the Minimum Shear Lag in Framed Tube Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 16-19.
- [11] 张永健, 黄平明. 考虑剪力滞效应的简支箱梁自振特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 40-42.  
ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming. Free Vibration Characteristics of Simply Supported Box Girder with Effect of Shear Lag [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 40-42.
- [12] 韦成龙, 曾庆元, 刘小燕. 薄壁曲线箱梁桥剪滞效应分析的一维有限单元法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 65-68.  
WEI Cheng-long, ZENG Qing-yuan, LIU Xiao-yan. One Dimensional Finite Element Method for Thin Walled Curved Box Beam Analysis Including the Shear Lag Effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 65-68.
- [13] 罗旗帜. 变截面多跨箱梁桥剪滞效应分析[J]. 中国公路学报, 1998, 11(1): 63-70.  
LUO Qi-zhi. Analysis of the Shear Lag Effect on Continuous Box Girder Bridges with Variable Depth [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(1): 63-70.
- [14] 张启伟, 张士铎. 单索面斜拉桥箱梁恒载剪力滞效应分析[J]. 中国公路学报, 1997, 10(1): 39-43.  
ZHANG Qi-wei, ZHANG Shi-duo. Analysis of Shear Lag Effect on Box Girder in P. C. Cable-stayed Bridge with Single Cable Plane [J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(1): 39-43.
- [15] 田仲初, 王 雷. 桥面结构横坡对宽翼缘Ⅱ梁剪力滞效应的影响[J]. 中外公路, 2003, 23(3): 52-55.  
TIAN Zhong-chu, WANG Lei. The Effect of Transverse Slope of Bridge Deck to the Shear Lag of II Section Girder with Wide Flange [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(3): 52-55.
- [16] 彭大文, 王 忠. 连续弯箱梁剪滞效应分析和实用计算方法研究[J]. 中国公路学报, 1998, 11(3): 41-49.  
PENG Da-wen, WANG Zhong. Analysis of the Shear-lag Effect in Continuous Curved Box Girder Bridges and the Research on Practical Calculating Method [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(3): 41-49.