

# 预应力混凝土箱梁桥施工过程中剪力滞试验

黄敦文,舒小娟\*,沈明燕,陆志扬,张天予

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**国内外箱梁剪力滞研究多按结构一次成型进行分析,无法准确模拟自平衡施工过程中产生的累计效应.依托某连续梁桥的实桥测试,同步采集施工过程中的应变数据,分析研究预应力混凝土箱梁桥自平衡施工过程中的剪力滞特性.通过测试荷载作用前后的应变增量,归纳出累计剪力滞规律,并与块体有限元模型计算结果进行对比.总结出若干规律:梁段累计剪力滞系数随着长高比或长宽比的增大而逐渐减小并趋于稳定,其中自重和挂篮前移会增大剪力滞效应,预加力则减小剪力滞效应;剪力滞系数按结构一次成型计算平均小于考虑施工阶段的20%~30%,这一点在箱梁施工阶段分析时必须重视.

**关键词:**箱梁;自平衡施工;剪力滞特性;试验研究

**中图分类号:**U448.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)01-0042-05

## Experimental Study of Shear Lag Effect in the Construction of Prestressed Concrete Box Girder Bridge

Huang Dunwen, Shu Xiaojuan, Shen Mingyan, Lu Zhiyang, Zhang Tianyu

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The study at home and abroad about the shear lag of box girder conducted by the one-step forming structure analysis. And it wasn't able to accurately simulate the cumulative effect which self-balancing construction generated. Relying on a real continuous beam bridge test, synchronously collected strain data in the construction process, and the shear lag characteristics were analyzed which in the self-balancing construction of prestressed concrete box girder bridge. By testing strain increment before and after load application, the cumulative shear lag law was generalized, and the results were compared with the block finite element model. The following summarizes were as follow. Cumulative shear lag of beam gradually decreases with the increase of the ratio of length to width or length to height and tends to stable. Among them, the weight and hanging basket forward will increase shear lag effect and pre-energizing reduce it. The shear lag coefficient which considers the one-step forming structure is average of less 20%~30% than which considers the construction. This point must pay attention in the analysis of box girder in construction stage.

**Keywords:** box girder; self-balancing construction; shear lag characteristics; experimental study

在我国桥梁中,变截面预应力混凝土连续梁桥或连续刚构桥应用十分广泛.但是,近年关于大跨度预应力混凝土梁桥在施工和运营期间的开裂、挠度过大等病害报道很多<sup>[1-2]</sup>,表明大跨度、大悬臂的箱梁桥仍存在一些技术问题尚未解决.箱梁的剪力滞效应是预防箱梁顶底板横向开裂设计中不可忽视的重要方面.大跨径梁桥在施工时通常采用自平衡施工工艺.目前国内外虽然针对箱梁剪力滞特性开展的试验研究

收稿日期:2015-04-15

基金项目:湖南省教育厅重点资助项目(13A027)

\*通信作者, E-mail: 254528003@qq.com

成果丰富<sup>[3-10]</sup>,但试验模型基本上都是处于成桥状态,并以等截面箱梁居多,缺乏仿实际施工过程的试验模型,不能系统真实的反应悬臂施工桥梁的累计剪力滞效应。

实桥测试国内有少量研究工作,如徐弘亮<sup>[11]</sup>同步采集施工阶段的顶底板应变数据,分别讨论了各恒载对剪力滞特性的影响,比较了悬臂一次成型和分段施工下梁肋剪力滞效应的差异;徐培培<sup>[12]</sup>实桥测试分析了预应力混凝土连续箱梁悬臂施工过程中各工况对剪力滞效应的影响,并用有限元软件模拟了最大悬臂状态下沿桥梁跨度方向剪力滞分布规律;郭伶<sup>[13]</sup>利用差分法计算连续箱梁桥施工阶段剪力滞效应,并与实测数据进行对比,探讨了负剪力滞变化规律.本文开展了预应力连续梁桥自平衡施工过程中应变数据的同步采集,并通过科学分析方法,归纳出箱梁悬臂施工中剪力滞变化的若干规律。

## 1 剪力滞概念

宽翼缘箱梁由于翼缘板剪切变形沿其宽度的不均匀分布,导致箱梁弯曲时翼板纵向位移在远离腹板位置时滞后于靠近腹板位置,产生的弯曲正应力沿横向呈曲线分布形式,这种现象称为剪力滞效应.经典的剪力滞概念只涉及弯曲问题,本文分析的构件处于压弯状态,为此延伸剪力滞系数 $\lambda$ 的概念,即

$$\lambda = \frac{\text{压弯正应力}}{\text{初等梁理论下压弯正应力}}$$

“正剪力滞”定义为靠近腹板处翼板的纵向应力大于靠近顶板中点或悬臂板边缘处的纵向应力;反之,称为“负剪力滞”。

## 2 试验说明

某桥跨径(35.5+60+35.5) m,箱梁上翼板宽 17 m(顶板 8.5 m,悬臂板 4.25 m),底板宽 8.5 m,梁高按二次抛物线从根部 3.6 m 变至跨中 1.8 m.梁段采用悬臂浇筑法施工,主要材料为 C50 混凝土.本试验测试与自平衡施工过程同步,通过采集挂篮移动、阶段浇筑和张拉前后的应变增量,累加分析悬臂施工阶段剪力滞效应.每个工况完成前后较短时间内各测试 1 次,提取增量进行分析,以剔除大部分收缩徐变影响.在悬臂静定结构中,整体的温度变化不会引起应力,由振弦式应变计自带的温度测试功能可以消除温度影响。

应力测试断面选择在悬臂根部(位于临时固结墩与永久墩之间)和 8 分跨截面及加密点,分别为图 1 中的 I-I, II-II, IV-IV, V-V, III-III.测试截面顶板布置有 9 个振弦式应变计,底板布置有 5 个振弦式应变计,腹板沿高度方向布置有 2 个热敏式温度计,具体位置见图 1。

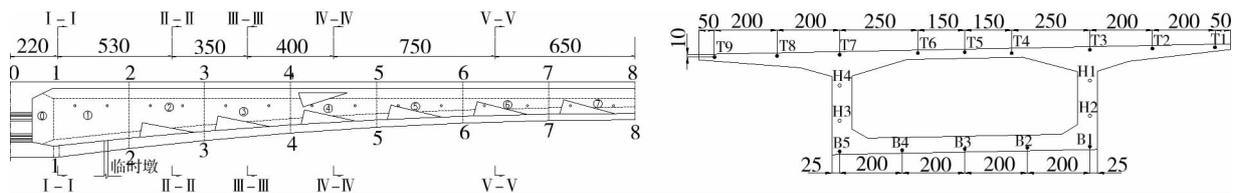


图 1 测点布置

## 3 有限元模型

全预应力混凝土梁在施工及运营期为线弹性工作状态,运用 Midas FEA 有限元软件将实体结构离散为块体单元进行分析.模型计算选用 6 面体块体单元,弹性模量,抗拉压强度等参数取设计值.按照设计几何截面控制网格尺寸来自动划分网格,混凝土网格尺寸控制为 50 cm,钢束为 10 cm.通过钢束单元和混凝土单元节点自动耦合的方式来考虑纵向预应力效应,钢束控制应力为 1 395 MPa,其损失按照相应规范算法自动扣除.实体模型在支座处铰接,在临时墩位置固结.工况模拟如下:0#, 1#浇筑→张拉 T1, W1→安装挂篮→2#浇筑→张拉 T2, W2→移动挂篮→…→张拉 T7→边跨合拢段浇筑→张拉边跨连续束→中跨合拢段浇筑→张拉中跨连续束.其中,通过激活梁段块体单元模拟浇筑,激活预应力钢束来模拟张拉,施加和反施

加前后支点力来模拟挂篮前移.块体模型见图 2.初等梁理论下的纵向正应力运用 Midas CIVIL 有限元软件进行计算,每 1 m 左右为 1 个单元,几何尺寸,材料参数以及工况安排和 Midas FEA 保持一致.杆件模型见图 3.

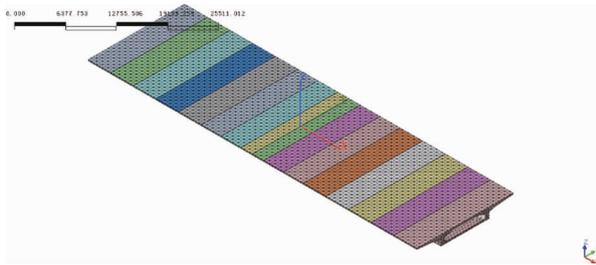


图 2 块体模型

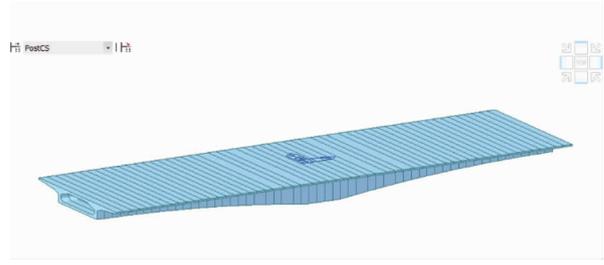


图 3 杆系模型

### 4 阶段累计应变

将实测的挂篮移动、阶段浇筑和阶段张拉的应变增量累计可得累加效应.为了简化分析数据,将实测的应变数据进行整理,把板中 2 边对称的点取平均值,作为实测的特征点应变代表值.*N* 号块(*N* 指测试截面所在梁段)浇筑受水化热效应的影响,此截面应变增量数据离散性较大,故剔除这组数据.

由于各截面顶底板反映规律基本一致,故只列举根部和自由端两个控制截面应变分布图,如图 4 和图 5.截面 I-I 处在临时固结墩和永久墩之间,实际悬臂根部截面应为 II-II 截面.悬臂阶段时,不管是根部截面还是自由端截面的顶底板,梁肋附近纵向应变始终大于顶板中点和悬臂板边缘,基本保持正剪力滞效应.当中跨合拢时,截面 V-V 顶板即靠近跨中区域,出现微弱的负剪力滞现象.值得注意的是截面 II-II 底板 200 cm 处的纵向应力逐渐大于底肋和底板中点,这是由于此处测点离下齿板较近,导致局部应力集中.若单独比较底板中点应力和底肋处,可以看出微弱的正剪力滞现象.

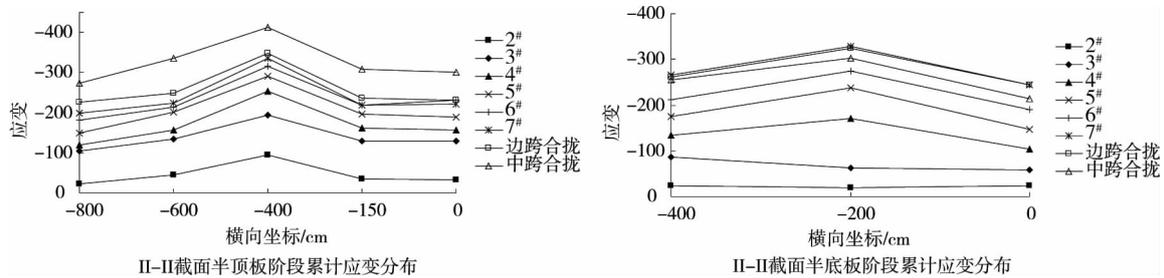


图 4 II-II 截面顶底板应变

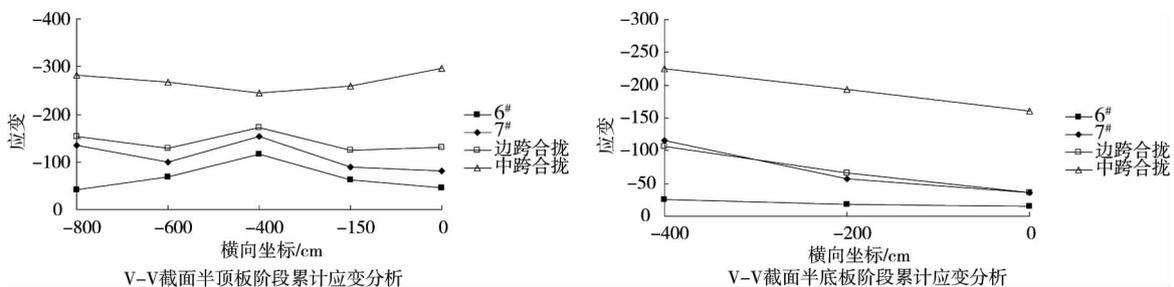


图 5 V-V 截面顶底板应变

### 5 剪力滞系数的影响因素

实测应变值乘以设计弹性模量可以得到顶底板纵向正应力实测值,而有限元软件 FEA 可以读取块体元模型正应力.二者数据分别除以 CIVIL 中杆件单元模拟的初等梁理论正应力值,可以得到有限元施工模拟剪力滞系数和悬臂施工实测剪力滞系数.

### 5.1 施工工况的影响

控制截面梁肋处累计剪力滞系数和块体元模型计算结果进行对比,见图 6.实测剪力滞系数变化趋势和块体元计算结果基本吻合,在初期相对误差较大,随着梁段的的增长,相对误差减小.主要是早期应力水平较低,而早期水化热、收缩徐变和施工因素对其影响大,导致其抗干扰能力弱.随着悬臂长度的增加,梁段自重和挂篮前移会增加剪力滞系数,而阶段张拉会使得剪力滞系数减小.由于阶段张拉导致剪力滞系数减小的幅度较大,故整体呈减小的趋势.

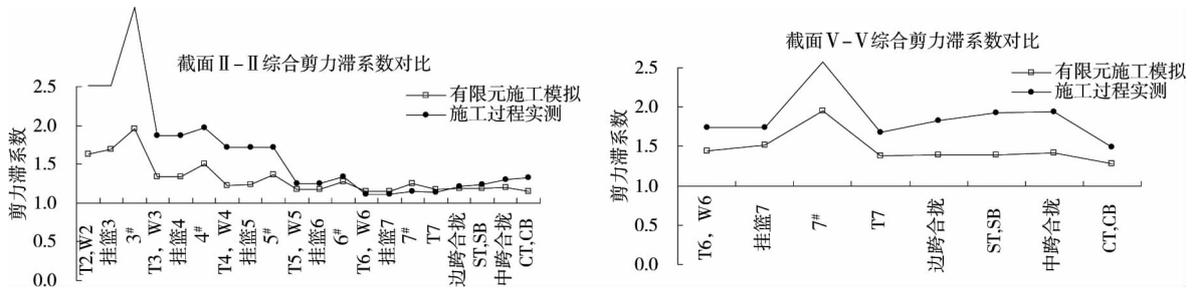


图 6 各测试截面剪力滞系数变化

### 5.2 长高比、长宽比的影响

为了分析锚固端预应力局段效应影响的区域,现将各测试截面剪力滞系数按外悬臂长度与梁高比值、外悬臂长度与梁宽比值进行绘图,截面参数见表 1.图 7 显示剪力滞系数分布曲线随着长高比或长宽比的增大而逐渐减小,这反映了“圣维南现象”.曲线在  $L/h=5$  或  $L/b=0.8$  左右时,趋近于 1.2.由此可推断锚固端预应力不均匀扩散的区域大致为  $L/h=0\sim 5$  或  $L/b=0.0\sim 0.8$  的范围内.

表 1 测试截面参数

截面	坐标/m	$h/m$	$b/m$
II-II	7.5	2.9	17
III-III	11.0	2.6	17
IV-IV	15.0	2.3	17
V-V	22.5	1.9	17

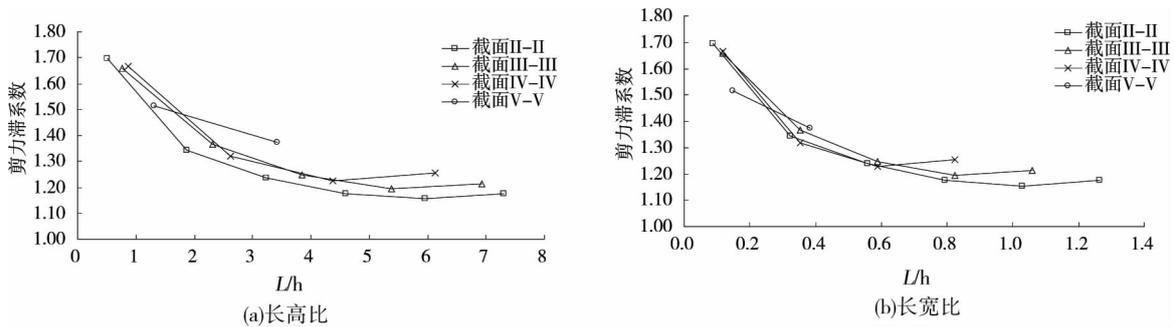


图 7 剪力滞系数变化

## 6 分段悬臂和一次成型对比

分段悬臂施工按照之前介绍工况进行,而一次成型采用一次激活所有单元和荷载的方式模拟.它们和实测值对比结果,见图 8.其中,有限元数据从临时固结墩 4 m 处开始.

从图形可看出实测值和有限元一次成型模型及分段施工模型剪力滞系数的纵向变化趋势一致,往自由端呈现阶跃式的增加.剪力滞系数越往自由端越大,正剪力滞效应越明显,这是因为阶段预加力的局段效应在自由端总荷载占比越大.实测值因为收缩徐变及施工临时荷载等的干扰,导致剪力滞系数水平偏

高.分段施工模拟数据最接近实测顶板剪力滞系数.

有限元一次成型和分段施工分析表明:是否考虑施工阶段对PC箱梁桥剪力滞系数的影响较大,分段施工剪力滞效应明显大于一次成型的.最大悬臂阶段若按一次成型进行分析,剪力滞系数比分段施工平均减小了20%左右.中跨合拢阶段,按分段施工的剪力滞系数同样大于一次成型,最大处出现在原最大悬臂处,主跨位置两者最大相差30%左右,边跨相差在20%左右.

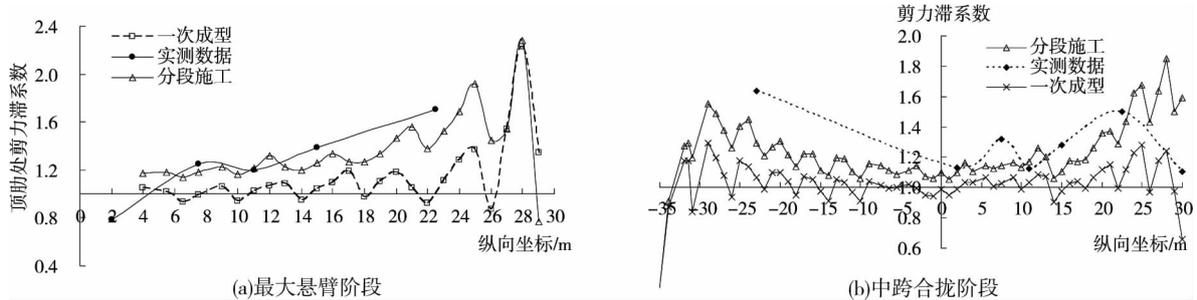


图8 累计剪力滞系数沿纵向分布

## 7 结论

1) 随着悬臂长度的增加,梁段自重和挂篮前移会增加剪力滞系数,而阶段张拉会使得剪力滞系数减小.

2) 截面剪力滞系数随外悬臂梁段长高比的增大或长宽比的增大而减小,锚固端预应力不均匀分布的区间大致在  $L/h=0\sim 5$  或  $L/b=0\sim 0.8$  范围内.

3) 梁段最大悬臂状态,剪力滞系数由固定端往自由端呈阶跃式增大.同时,考虑施工阶段的剪力滞系数明显大于结构一次成型的.若按一次成型进行分析,剪力滞系数平均减小了20%~30%,这一点在悬臂施工阶段分析时必须引起重视.

## 参考文献:

- [1] 周军生,楼庄鸿.大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J].中国公路学报,2000,13(1):31-36.
- [2] 刘超,徐栋.大跨径混凝土箱梁桥剪切开裂及下挠原因[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(1):1-6.
- [3] 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,2005.
- [4] Evnas H R, Ahmad M K H. A shear lag analysis for composite box girders[J]. Construct Steel Research,1990,16(1):1-21.
- [5] Zhou W B, Jiang L Z, Liu Z J. Closed-form solution to thin-walled box girders considering effects of shear deformation and shear lag[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2650-2655.
- [6] Zhou S J. Finite beam element considering shear-lag effect in box girder[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(9):1115-1122.
- [7] Luo Q Z, Wu Y M, Tang J, et al. Experimental studies on shear lag of box girders[J]. Engineering Structures, 2002,24(4): 469-477.
- [8] 牛斌,杨梦蛟,马林.预应力混凝土宽箱梁剪力滞效应试验研究[J].中国铁道科学,2004,25(2):25-30.
- [9] 方志,曹国辉,王济川.钢筋混凝土连续箱梁剪力滞效应试验研究[J].桥梁建设,2000(4):1-3.
- [10] 刘山洪,何广汉.PPC箱梁节段模型的试验研究[J].西南交通大学学报,2004,36(5):490-493.
- [11] 徐弘亮.大跨度预应力混凝土箱梁桥自平衡施工过程中的剪力滞后特性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2011.
- [12] 徐培培.预应力混凝土连续箱梁悬臂施工过程中的剪力滞效应研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [13] 郭伶.连续箱梁桥施工阶段负剪力滞效应研究[J].公路与汽运,2015(1):138-144.