

文章编号:1671-6833(2007)04-0012-04

## 淮河大桥 35 m 先张折线形箱梁预应力损失的研究

刘立新<sup>1</sup>, 安鸿飞<sup>1</sup>, 于秋波<sup>1,2</sup>, 汪小林<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过对 35 m 折线先张梁施工监测, 来分析张拉横梁、反力梁的变形和转向器摩擦阻力对预应力损失的影响, 以及其他情况下预应力损失。结果表明: 先张折线形预应力箱梁的预应力损失的计算比后张法预应力损失的计算更准确, 避免了预应力值不可靠带来的工程病害, 而且先张折线形箱梁总的预应力损失值比后张法的预应力损失值要小, 确保了张拉应力。分析指出混凝土的收缩和徐变引起受拉区和受压区的应力损失在先折线形箱梁总预应力损失的比重最大, 所以采取办法减小混凝土的收缩和徐变是控制先张折线形箱梁总预应力损失的有效措施。

**关键词:** 先张折线; 张拉横梁; 反力梁; 转向器; 预应力

**中图分类号:** TU 378.2

**文献标识码:** A

### 0 引言

目前国内 30 m 以上跨径预应力混凝土连续梁均采用后张法施工, 尽管这种施工技术应用广泛, 但是后张法施工中经常出现的堵孔、压浆不实、预应力不足等影响结构承载力与耐久性的问题却始终不能避免, 许多预应力混凝土连续梁发生开裂、持续下挠现象, 造成安全隐患, 成为工程通病。为此工程界提出推广先张法, 无需管道, 省去压浆, 可以很好地避免上述问题。

相应于直线配束箱梁, 折线形能够有效降低梁端的主拉应力, 改善结构的受力性能, 并且能改善端部的抗剪能力。与后张法相比, 既可避免后张法压浆不实、预应力值不可靠带来的工程病害, 以及预应力损失的不确定性和预应力损失过大, 从而提高结构的耐久性, 又可以节省锚具管道, 减少施工工序, 降低维修费用, 从一定程度上节省工程造价, 同时便于工厂预制, 提高产品质量。

### 1 工程概况

本工程为泌阳至桐柏高速公路桐柏县八标段淮河大桥。先张折线形箱梁总数 88 片, 设计长度为 35 m, 实际长度为 34.8 m, 其中转向器至梁端距离为 12.92 m, 转向器至梁跨中距离为 4.50 m,

梁体混凝土强度等级为 C50, 预应力筋采用标准型高强度、低松弛钢绞线, 钢绞线直径为 15.2 mm, 强度标准值  $f_{pk} = 1\ 860\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{con} = 0.75 f_{pk} = 1\ 395\text{ MPa}$ , 弹性模量  $E_s = 1.95 \times 10^5\text{ MPa}$ 。边跨每片预应力箱梁共计 40 根钢绞线, 其中折线筋 24 根, 直线筋 16 根。

### 2 张拉台座

本台座为长线先张法施工 35 m 预应力箱梁的张拉台座, 可同时浇筑两片预制梁。台座反力梁采用 800 mm × 1 200 mm 截面的钢筋混凝土梁, 全长 72.54 m。预应力张拉分为上下两层, 有上下张拉横分别锚固折线预应力筋和直线预应力筋, 张拉横梁是受弯构件(图 1), 全长 6.8 m。本台座千斤顶选用 YDC240Q 型千斤顶与 QFSSD320-20 分离式机械锁紧油压千斤顶互相配合使用, 先将单根钢绞线张拉到 85% 设计拉应力, 再用分离式机械锁紧油压千斤顶整体张拉到设计张拉应力(包括锚口摩阻损失和转向器摩阻损失的应力)。箱梁梁体内埋置转向器将弯起预应力筋转向, 转向器锚固在埋入地下的长 5 m, 直径 1.8 m 的钻孔桩顶。因为先张法施工中张拉力完全由张拉横梁分配到两侧反力梁上, 故而本台座是受力较大主要构件。

收稿日期: 2007-08-01; 修订日期: 2007-10-10

基金项目: 河南省交通厅资助项目(2005P338)

作者简介: 刘立新(1947-), 男, 湖北汉川人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及研究。

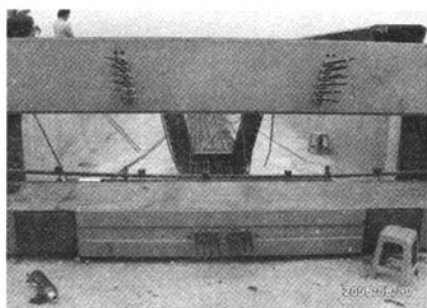


图1 张拉上、下横梁

Fig.1 Above and under tensioned beams

### 3 应力(应变)监测方案

#### 3.1 钢绞线应变片测点布置

根据淮河大桥施工现场考察结果,对长线张拉 35 m 箱梁进行施工监测,长线张拉箱梁拟选取 4 根钢绞线(3 根折线形,1 根直线形)进行施工阶段的应力(应变)监测,每片梁布置 20 个测点,黏贴 40 片电阻应变片,折线形钢绞线上所黏贴电阻应变片不仅可用作监测钢绞线的张拉应力,而且还可用作测量钢绞线穿过弯起器后实际发生的摩擦预应力损失。

#### 3.2 张拉横梁和反力梁百分表和应变片布置

为量测张拉横梁和反力梁在张拉过程中的变形,在张拉一端的两根反力梁上、下各布置 4 块百分表,以测量张拉过程中反力梁的压缩变形。在张拉上下横梁各布置 10 块百分表,以测量张拉时上下横梁的变形。张拉上横梁和张拉下横梁百分表的布置如图 2 所示。

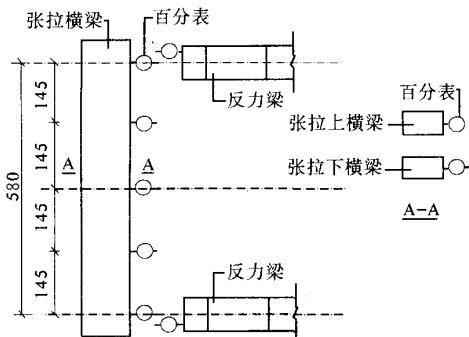


图2 张拉上、下横梁百分表布置图

Fig.2 Indicating layout of above and under tensioned beams

#### 3.3 监测内容和方法

##### 3.3.1 钢绞线应力(应变)

量测从钢绞线张拉开始至结束的全过程跨中

截面、钢绞线弯折处和自锚区的钢绞线应力(应变)变化的情况。同时测量不同张拉力下转向器的摩阻预应力损失如图 3 所示。



图3 转向器

Fig.3 Change direction device

##### 3.3.2 张拉横梁和反力梁的变形

测量从钢绞线张拉开始至结束全过程反力梁的压缩变形、张拉上横梁和张拉下横梁的变形。重点是后张拉的钢绞线锚固处的变形对先张拉钢绞线预应力损失的影响,为张拉工艺提供依据。

### 4 预应力损失计算分析<sup>[1-5]</sup>

#### 4.1 转向器引起的摩阻损失 $\sigma_{f1}$

转向器是先张法折线形预应力混凝土梁的关键组成部分,预应力钢绞线在转向器处的摩阻损失在整个先张法预应力损失中占有重要部分,因此准确计算预应力的摩阻损失是预应力损失计算的关键(图 4)。钢绞线弯折角度  $\alpha$  越大,摩阻损失  $\sigma_{f1}$  的值也越大,大致与  $\sigma_{con} \sin \alpha$  成正比。本箱梁的弯折角度为  $4.77^\circ$ ,根据建议公式  $\sigma_{f1} = 0.3 \cdot \sigma_{con} \sin \alpha$  算得本箱梁的摩阻损失  $\sigma_{f1}$  为 34.80 MPa,与实际测得的结果相符。

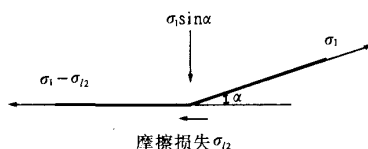


图4 转向器摩阻损失计算图

Fig.4 Friction loss calculation map of Change direction device

#### 4.2 横梁、锚具变形和预应力筋内缩引起的应力损失 $\sigma_{f2}$

上下张拉横梁是先张法中折线预应力筋和直线预应力筋锚固梁,是受弯构件。所以上下横梁变形影响预应力筋的应力损失。我们根据图 2 布置

百分表,分别量测了张拉控制应力 20%、40%、85% 3 个阶段的横梁变形值,并根据图乘法计算出 3 个阶段的理论变形值,图 5 是 3 个阶段的最终变形量的理论计算值和实测值的比较,从比较结果来看实测值和理论计算值接近。

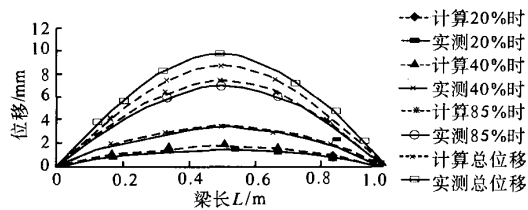


图 5 下横梁变形图

Fig.5 Deformation map of under beams

当单根钢绞线张拉时,横梁变形对最后一根张拉的钢绞线的应力损失没有影响,对第一根张拉的钢绞线的应力损失影响最大,如果按单根考虑情况比较复杂,所幸我们可以通过补张拉及时弥补后张拉钢绞线时横梁变形对前张拉钢绞线的应力损失,但工程上操作显然比较繁琐。为了确保预应力结构的抗裂性能,我们按第一根张拉的钢绞线应力损失计算。下横梁实测总位移 9.7 mm,反力梁的实测变形可忽略不计,锚具变形及钢绞线内缩值取 5 mm。锚具变形、预应力钢筋内缩和下横梁的变形引起的应力损失应根据公式计算。

$$\sigma_{\Omega} = \frac{\sum \Delta l}{l} E_p \quad (1)$$

式中:  $\sum \Delta l$  为横梁变形与锚具变形、预应力钢筋内缩之和;  $l$  指张拉端至锚固端之间的距离;  $E_p$  为钢绞线弹性模量。本箱梁按长线台座张拉,两点之间的张拉距离为 72.4 m。算得应力损失  $\sigma_{\Omega} = 39.05$  MPa。

#### 4.3 预应力钢筋与张拉台座之间温差引起的预应力损失 $\sigma_{\Omega}$

此监测梁是 10 月份施工,在自然条件下养护,所以预应力箱梁与张拉台座之间没有温度差,预应力钢筋与张拉台座之间温差引起的预应力损失忽略不计,即  $\sigma_{\Omega} = 0$ 。

#### 4.4 放松钢绞线时由混凝土弹性压缩引起的预应力损失 $\sigma_{\Omega}$

对于先张法预应力混凝土箱梁,放松钢筋时由混凝土弹性压缩引起的预应力损失,可按下式计算

$$\sigma_{\Omega} = \alpha_{EP} \sigma_{pe} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{EP}$  为预应力束与混凝土的弹性模量的比值;  $\sigma_{pe}$  为在计算截面钢筋重心处;由全部钢筋预加力

产生的混凝土法向应力。算得  $\sigma_{\Omega} = 74.89$  MPa。

#### 4.5 预应力钢筋应力松弛引起的预应力损失 $\sigma_{\Omega}$

预应力钢筋在持久不变的力的作用下,若保持其长度不变,会产生随持续加荷时间延长而增加的徐变变形,即钢绞线的应力松弛。预应力钢筋的松弛损失主要与张拉应力和预应力钢筋的品质有关。张拉应力越高松弛损失越大,钢材的松弛率越大,其预应力损失也越大。本箱梁采用低松弛 1 860 MPa 钢绞线,  $\sigma_{con} = 0.75 f_{ptk}$ , 则利用公式

$$\sigma_{\Omega} = \psi \cdot \zeta \left( 0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26 \right) \cdot \sigma_{pe} \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为张拉系数;  $\zeta$  为钢筋松弛系数。本箱梁按一次张拉  $\psi = 1.0$ , II 级松弛(低松弛),  $\zeta = 0.3$ ;  $\sigma_{pe}$  为传力锚固时的钢筋应力,对先张法构件  $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{\Omega}$ , 算得  $\sigma_{pe}$  的值为 1 355.95 MPa。则预应力钢筋应力松弛引起的预应力损失  $\sigma_{\Omega} = 48.44$  MPa。

#### 4.6 混凝土的收缩和徐变引起受拉区和受压区的应力损失 $\sigma_{\Omega}$

混凝土的收缩、徐变会使构件缩短,对于预应力混凝土构件将产生预应力损失。由于影响混凝土收缩与徐变的因数极为复杂,因此,混凝土的收缩与徐变引起的应力损失计算是各项预应力损失计算中最为复杂的一项。对于部分预应力混凝土构件,由于配置有一定数量的非预应力钢筋,非预应力钢筋对混凝土的收缩与徐变影响比较明显,部分预应力混凝土构件的混凝土收缩与徐变引起的预应力损失的计算应当考虑非预应力钢筋配筋率的影响。公路桥规 JTG D62—2004 的此项损失考虑非预应力钢筋含筋率的影响的计算公式为

$$\sigma_{\Omega}(t) = \frac{0.9 [E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \alpha_{EP} \sigma_{pe} \phi(t, t_0)]}{1 + 15 \rho_{ps}} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\Omega}$  为构件受拉区或者受压区受力钢筋重心处由混凝土收缩、徐变引起的预应力损失值;  $\sigma_{pe}$  为构件受拉区或者受压区先张预应力构件放松钢筋时,在计算截面上全部受力钢筋重心处有预加应力(扣除相应阶段的应力损失)产生的混凝土法向应力;  $\alpha_{EP}$  为预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;  $\rho$  为构件受拉区或者受压区全部纵向钢筋配筋率;  $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  为加载龄期为  $t_0$  时的混凝土徐变系数终值;  $\phi(t, t_0)$  为自混凝土龄期  $t_0$  开始的收缩应变终值。算得本箱梁由混凝土收缩、徐变引起的构件受拉区和受压区三预应力损失  $\sigma_{\Omega}$  为 160 MPa。

表 1 预应力损失组合

Tab.1 Prestressed loss portfolio

MPa

传力锚固时的损失 (第一批) $\sigma_{II}$	$\sigma_{II} + \sigma_{II} + \sigma_{II} + \sigma_{II} +$ $0.5\sigma_{IS}$	172.94
传力锚固时的损失 (第二批) $\sigma_{III}$	$0.5\sigma_{IS} + \sigma_{II}$	184.22
总的预应力损失 $\Sigma$	$\sigma_{II} + \sigma_{II} + \sigma_{II} + \sigma_{II} +$ $\sigma_{IS} + \sigma_{II}$	357.16

4.7 预应力损失计算组合

预应力损失的计算是按各影响因数分项计算,然后再分阶段组合.实际上,预应力损失对结构的极限强度影响很小,但是影响使用荷载下的结构性能.在使用荷载下,过高或者过低估算预应力的损失都是不利的,过高估算,将会使预应力构件产生过大的反拱;而过低估算,则导致拉应力甚至裂缝过早出现.在工程设计中,主要考虑的预应力损失组合一般按预加预应力阶段和正常使用阶段分别计算.本先张折线形预应力箱梁的永存预应力为 1 037.84 MPa.与我们用电阻应变片测量的钢绞线应力相符.

5 结论

(1)先张折线形预应力箱梁的预应力损失的计算比后张法的预应力损失的计算更准确,因为

后张法孔道摩擦损失计算中有反向摩擦影响长度范围内反向摩擦与正向摩擦相等的假定.先张折线法避免了预应力值不可靠带来的工程病害.

(2)先张折线形预应力箱梁的预应力损失值比后张法的预应力损失值要小.

(3)混凝土的收缩和徐变引起受拉区和受压区的应力损失在先张折线形预应力箱梁总的应力损失中占的比重最大.所以应该采用高标号的水泥,以减少水泥的用量,用级配好的骨料,并加强震导,使混凝土密实,减少混凝土的收缩.

4)应加强张拉上下横梁的刚度,减少变形,这样能减少预应力损失.

参考文献:

[1] GB 50010-2002,混凝土结构设计规范[S].  
[2] 熊学玉,黄鼎业.预应力工程设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.  
[3] 房贞政.预应力结构理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.  
[4] JTG D—2004.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社.  
[5] 刘立新,胡丹丹,于秋波,等.先张法折线形预应力梁钢绞线摩擦损失试验研究[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(4):6-9.

Research of Prestressing Loss about Huaihe River Bridge 35m Folding  
First - tensioned Box Beam

LIU Li-xin<sup>1</sup>, AN Hong-fei<sup>1</sup>, YU Qiu-bo<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-lin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Multifunctional Design and Research Academy, Zhengzhou University Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Through the construction monitoring of the 35 m folding first - tensioned box beam, this paper analyzes the deformation of tensioned beam, anti - power beam and the impact of steering gear friction on the prestressed loss. The results show: folding first - tensioned box beam in the calculation of the loss is more accurate than post - tensioned box beam, and it avoids the project diseases because of prestressed value unreliable. Moreover, the total prestressed loss of first - tensioned box beam is smaller than post - tensioned, thus ensuring the tension stress. The analysis pointed out that the loss of the compression and tensile stress caused by the concrete creep and shrinkage is the largest proportion. Therefore, the best way to control total prestressed loss is to reduce the concrete creep and shrinkage.

**Key words:** folding first - tensioned box beam; tensioned beam; beam resist the opposite power; device for changing direction