

文章编号: 1001-4888(2006)06-0742-05

基于应变测量的大跨度桥梁 预应力损失的计算与分析^{*}

劳晓春, 何庭蕙, 汤立群^{**}, 梁颖晶

(华南理工大学 交通学院, 广州 510640)

摘要: 多座桥梁施工的监控结果表明, 随着预应力索长度的增大, 预应力张拉后所产生的反拱与理论计算值的偏离逐渐加大, 预应力损失呈非线性增长。因此, 如何正确估计预应力损失产生的主要原因和预应力损失率, 对设计和施工都很有意义, 目前这方面的研究中定量化描述的较少。本文基于肇庆西江大桥的应变监测结果和预应力索的布置图分析, 指出预应力损失的一个重要因素是预应力索的弯角, 并给出了预应力损失率与预应力索弯角之间的拟合经验公式, 这为工程上预应力损失的准确估算提供了一种新的参考方法。

关键词: 预应力损失; 应变测量; 非线性

中图分类号: O34 **文献标识码:** A

0 引言

大跨度连续刚构混凝土桥梁在施工和成桥后都大量使用后张拉法预应力技术, 即预先在施工过程中埋入管道, 等混凝土凝固达到规定的强度再进行预应力的张拉。在后张法中, 预应力的损失一般包括: 预应力钢筋与管道壁的摩擦, 锚具变形、钢筋回缩和拼装构件的接缝压缩, 混凝土的弹性压缩, 预应力钢筋的应力松弛, 混凝土的收缩和徐变等。规范中明确地给出了各项预应力损失计算公式, 目前的理论计算模型一般按照规范说明对预应力损失进行考虑, 相关的计算参数按照经验和实测结果给定。但是, 从多座实桥^[1-4]的监测情况来看, 随着预应力索长度的增大, 预应力损失呈非线性增长, 即预应力张拉后所产生的桥梁挠度反拱与理论计算值的偏离逐渐加大, 可见理论计算对预应力损失估计不足的情况普遍存在。目前国内外对预应力损失的研究主要关注点是如何合理地估计摩擦、混凝土的收缩徐变等因素的影响等, 以及混凝土的过压影响等^[5-6], 其中文献[5]进行了很好的归纳总结。对预应力损失的测量有直接测量方法^[5,7]和间接测量方法^[1-5,8,9], 直接测量法暂时还不具备全索分布式测量, 因此绝大部分的是采用间接测量方法。

为了更清楚地了解预应力损失随预应力索长的变化规律, 本文以肇庆西江大桥扩建工程为例, 提出了基于应变测量的方法, 对预应力损失进行分析。

1 工程概况

肇庆西江大桥扩建工程主桥为(51.4+94+4×144+87)m 预应力混凝土刚构—连续组合箱梁桥, 主桥长 812.48m, 有五个主墩。主桥上部箱梁全宽 12.5m, 横断面为单箱单室带双悬臂, 箱梁底板宽

^{*} 收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2006-09-30

^{**} 通讯作者: 汤立群, 男, 华南理工大学交通学院教授、博导。主要从事冲击动力学、材料本构关系以及路桥力学相关领域的研究。

E-mail: lqtang@scut.edu.cn

6.8m,两侧悬臂 2.85m。箱梁支点根部梁高 8.0m,跨中及支架现浇段梁高 2.8m。箱梁 0、1 号块纵向长度分别为 5.4m、3.3m,悬浇施工的梁段长度,2、3 号为 3.0m,4~9 号为 4.0m,10~16 号为 5.0m,合拢段长均为 2.0m。

2 预应力损失的监测与分析

2.1 预应力张拉前后箱梁挠度的变化

如前面所述,随着预应力索长度的增大,预应力损失呈非线性增长,肇庆西江大桥在预应力张拉前后的实测挠度变化值也显示类似的规律,如图 1 所示。由于影响箱梁挠度变化的因素较多且具有不确定性,挠度值的变化具有一定的离散性,所以单纯通过箱梁挠度的变化来分析预应力的损失情况比较困难,有必要通过其他手段来辅助分析预应力的损失。

2.2 预应力张拉前后箱梁关键截面的应变监测

2.2.1 预应力张拉前后应变变化的测量

连续刚构桥挂篮悬臂浇筑法施工,一般每一块箱梁分为三个施工阶段,即挂篮前移阶段、浇筑混凝土阶段和预应力张拉阶段。为了监测箱梁在各重要施工阶段中真实的受力状态,在位于主梁悬臂根部、L/4、L/2 等 20 个关键截面上共布置了 58 个应变传感器测量桥的纵向应变,如图 2 所示。横截面上传感器的布置及编号方式如图 3 所示。由于监测系统采用集中式智能采集系统,能每 10 分钟采样一个点,基本上实现不间断的测量。

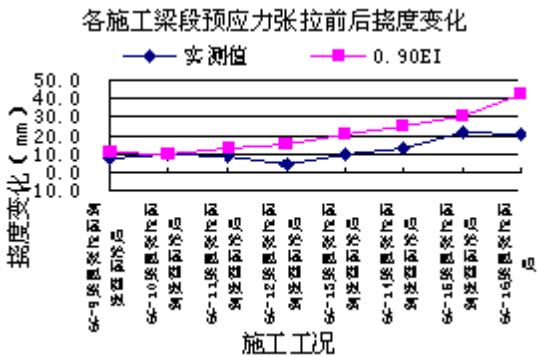


图 1 预应力张拉前后挠度变化的实测值与计算值比较

Fig. 1 Comparison between the measured deflection variation and the corresponding theoretical value, after the tension construction of each segment

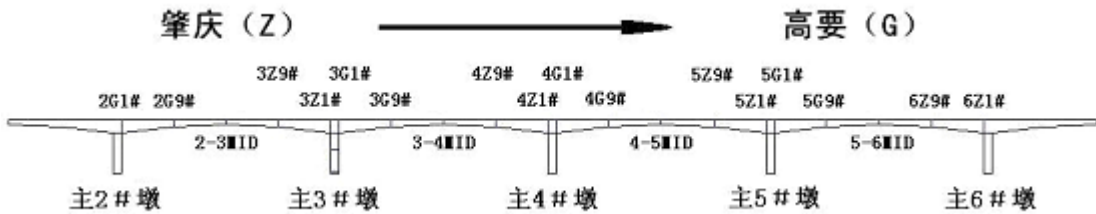


图 2 主梁上埋设传感器截面的布置

Fig. 2 The cross section embedded sensors on the main box beam

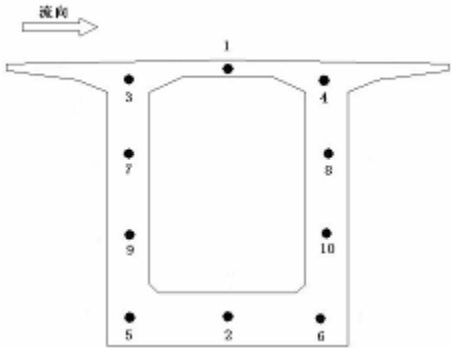


图 3 横截面上传感器布置

Fig. 3 The position of embedded sensors on the cross section

预应力张拉后,结构的内力将产生明显的变化,传感器的测量值能较准确地反映预应力张拉的效果。将预应力张拉前后实测的应变变化值,取为预应力张拉完成 6 小时后凌晨时的测量应变与预应力张拉前凌晨时的测量应变的差值。在这段时间内,混凝土的徐变不能忽略,因此需要合理估计混凝土在预应力张拉过程产生的徐变;结构内部的温度场分布基本相似,温度引起的结构内力能大体消除,通过温度修正能消除温度对应变的影响;由于预应力张拉前后时间跨度比较小,收缩对应变的影响也可忽略。根据计算分析,修正预应力张拉前后实测的应变值中的徐变部分,可求得预应力张拉前后由预应力荷载产生的应变。

2.2.2 预应力张拉前后应变变化的理论计算

利用上海同豪土木工程咨询有限公司开发的桥梁专用设计和分析软件——《桥梁博士》建立主桥施工计算模型,除了 0、1 号梁段根据截面形状的突变而设置了

两个单元外,其余的基本上按照各悬臂施工梁段来离散单元,主桥桥面部分离散为 226 个梁单元,227 个节点。各墩墩底采用固结方式,桥墩和主梁之间通过主从约束关系来设置相应的连接,根据全桥的施工工况进行施工阶段的划分,施工过程主要有挂篮前移、浇筑混凝土以及张拉预应力三个循环施工阶段,模型中根据一些设计或实验参数考虑了预应力张拉损失等的影响。由计算模型算出预应力张拉前后各埋设传感器截面的内力变化,在圣维南原理的影响范围外根据材料力学公式推算出传感器埋设点的应变变化值,以此作为预应力张拉前后由预应力荷载引起的应变理论计算值。这种方法的计算结果与相对应的三维模型的计算结果相比较,误差在 5% 以内,说明该理论计算结果准确。

2.2.3 实测值与计算值的比较与分析

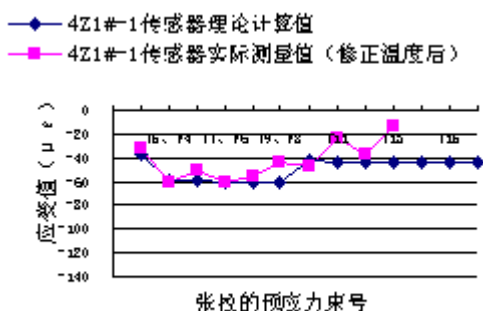


图 4 张拉预应力前后实测和理论应变变化比较

Fig. 4 Comparison between the measurement strain and the theoretical strain at each tension of prestressed cable

分析预应力张拉前后由预应力荷载引起的应变变化的实测值与计算值的差值随预应力索长增加的变化规律(如图 4 所示,以 4Z1#-1 传感器的测量结果为例),可看出,随着预应力索长的增加,实际预应力张拉的效果逐渐减弱,达不到理论计算值。由于计算模型中已考虑了规范中关于预应力损失的影响部分(除了预应力索平弯转角的影响),相关的参数通过实验或经验进行确定,可知实测值与计算值的差值反应了规范中没有考虑到的预应力损失的一些其他影响因素。由于在预应力张拉前后,顶板上传感器的应变变化较明显,而底板上传感器的应变变化基本在十几个应变内,因此在分析时可只取顶板上的传感器进行分析。

预应力索与管道壁的摩擦的损失与预应力索的长度和转角有较密切的关系^[4],考虑到《桥梁博士》模型中没有考虑预应力索平弯转角的影响,但实际工程中预应力索的平弯转角随着索长的增加而增大(如图 5 所示)。初步认为,平弯转角的大小对预应力损失值有一定的贡献。定义预应力损失率为:

$$r_s = \frac{\epsilon_{\text{实物}} - \epsilon_{\text{理论}}}{\epsilon_{\text{理论}}} \times 100\% \quad (1)$$

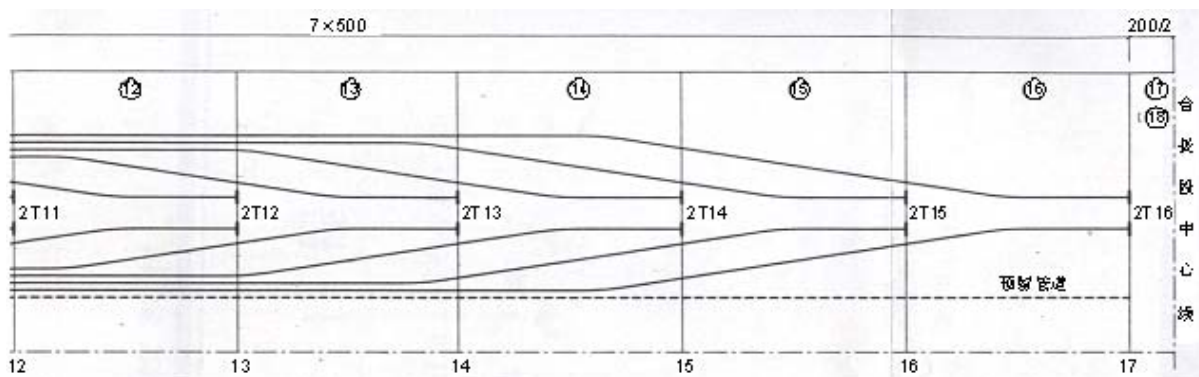


图 5 部分预应力束的平弯布置图

Fig. 5 Arrangement plan of the horizon curved angle of part of the prestressed cable

图 6、图 7 为主 4#、5# 墩预应力索的平弯和竖弯转角及其预应力损失率沿预应力索长的变化情况。可见,预应力损失率的整体变化趋势与平弯转角的变化趋势基本一致,同时,预应力损失率也跟随竖弯转角的大小变化而呈现出跳跃变化的规律。通过主 4#、5# 墩 4 个悬臂中应变传感器的实测数据,近似拟合出预应力损失率与弯角(竖弯和平弯转角之和)的之间的二次曲线关系(如图 8、图 9 所示):

$$r_s = a\theta^2 + b\theta \quad (2)$$

其中, θ 表示预应力索的平弯和竖弯转角之和,其二次项 a 的变化范围在 20~25 之间,一次项 b 的变化范围在 -2~-4 之间。公式(2)可作为估算预应力张拉损失率与预应力弯角关系的一个经验公式。由

于没有其他大桥的数据作对比,本文提出公式的有效性及其适应范围有待于进一步研究和验证。

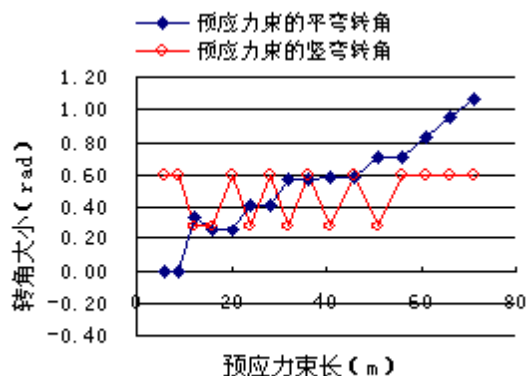


图6 预应力平弯和竖弯转角随预应力索长的变化

Fig. 6 Horizon or vertical curved angle of prestressed cable against its length

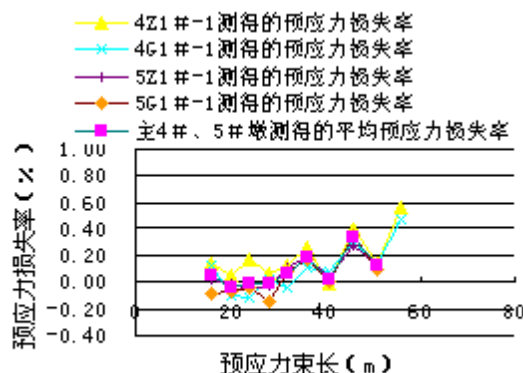


图7 预应力损失率随预应力索长的变化

Fig. 7 Pre-stress lose rate against the length of prestressed cable

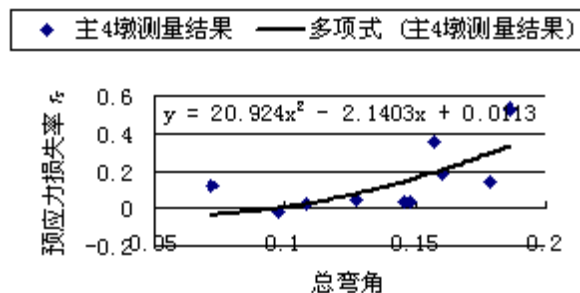


图8 主4墩上的预应力损失率与弯角的关系

Fig. 8 Pre-stress lose rate against the sum of horizon and vertical curved angle of prestressed cable of Pier 4

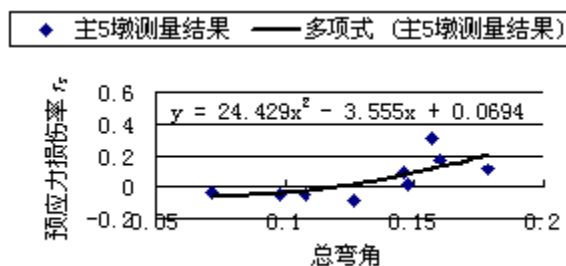


图9 主5墩上的预应力损失率与弯角的关系

Fig. 9 Pre-stress lose rate against the sum of horizon and vertical curved angle of prestressed cable of Pier 5

2.2.4 预应力损失的准确测量方法

由于混凝土的非均匀性及周围钢筋的影响,埋设在混凝土内的传感器在各种因素的影响下,应变测量值受到不可预测的干扰,其只能反映出预应力张拉效果的大体变化规律。要准确确定预应力损失率随预应力索长度和索弯角的变化规律,切实可行的方法还是在沿预应力索长度方向上布置足够数量的传感器进行应变跟踪测量,这对于传统的传感器有一定困难,但是,随着光纤光栅传感器技术的迅速发展,由于光纤光栅传感器天生的优点以及在工程中应用的一些成功例子^[7]来看,对预应力索进行沿长的应变测量这种方法在工程中是可以实现的。

3 结论

(1) 从肇庆西江大桥扩建工程以及多个工程实例来看,预应力张拉前后挠度的变化都反映出预应力损失与预应力索长度之间的非线性变化关系。

(2) 埋设在桥梁混凝土内部的应变传感器,能够较好地监测预应力张拉前后结构实际受力状态的变化,利用实测手段得到预应力损失对结构实际受力状态的影响,从受力方面也反映出预应力损失率与预应力索长度之间的非线性关系。

(3) 预应力索的平弯转角以及计算模型中对预应力索竖弯转角所造成的预应力估计不足,是导致预应力实际损失率比理论计算值偏大的一个重要原因,在工程中应充分注意预应力索平弯和竖弯转角对预应力损失的影响。并得到预应力损失率与预应力索弯角(平弯和竖弯转角之和)的经验公式,作为

估算预应力损失率的一个参考,具有工程应用价值。

参考文献:

- [1] 陈世锋, 刘志峰. 镇海湾大桥主桥施工挠度变形监测[J]. 广东公路交通, 2000, 66: 239~241 (CHEN Shifeng, LIU Zhifeng. Monitoring of Box Girder Deformation in Construction of ZHEN HAI WAN Bridge. Guang Dong Highway Traffic, 2000, 66: 239~241(in Chinese))
- [2] 陈建阳, 向木生, 郭峰祥, 沈成武. 大跨度桥梁施工控制中的神经网络方法[J]. 桥梁建设, 2001, 6: 42~45, 57 (CHEN Jianyang, XIANG Musheng, GUO Fengxiang, SHEN Chengwu. Nerval Network Method in Construction Control for Long span Bridge. BRIDGE CONSTRUCTION, 2001, 6: 42~45, 57(in Chinese))
- [3] 黄建跃, 王树林, 刘成龙, 高淑照. 大跨度连续刚构桥施工主梁变形监测的必要性与方法[J]. 桥梁建设, 2003, 1: 48~51 (HUANG Jianyue, WANG Shulin, LIU Chenglong, GAO Shuzhao. Necessity and Method for Monitoring of Box Girder Deformation in Construction of Long Span Continuous Rigid Frame Bridges. BRIDGE CONSTRUCTION, 2003, 1: 48~51(in Chinese))
- [4] 郭举, 李光瑞, 马杰. 预应力损失计算及其简化[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2004, 18(3): 264~266 (GUO Ju, LI Guangrui, MA Jie. Calculation Method of Losses in Prestress. JOURNAL OF JINAN UNIVERSITY (Sci. & Tech1), 2004, 18(3): 264~266 (in Chinese))
- [5] Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders. NCHRP Report 496, 2003.
- [6] Hale W M, Russell B W. Effect of allowable compressive stress at release on prestress losses and on the performance of precast, prestressed concrete bridge girders[J]. PCI Journal, 2006, 51(2):14~25.
- [7] 劳晓春, 汤立群, 任鹏, 罗立峰. 桥梁内部预应力钢绞线应变的长久监测与分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 2003, 11: 53~56(Lao Xiaochun, Tang Liqun, Ren Peng, Luo Lifeng. Long Monitoring and Analysis on the Strain of Prestressed Twist Steel Cables Inside a Bridge. Journal of South China University of Technology, 2003, 11: 53~56(in Chinese))
- [8] Yang Y M, Myers J J. Prestress loss measurements in Missouri's first fully instrumented high-performance concrete bridge[C]. Transportation Research Record, 2005, 1928: 118~125.
- [9] Czaderski C, Motavalli M. Determining the remaining tendon force of a LargeScale, 38-year-old prestressed concrete bridge girder[J]. PCI Journal, 2006, 51(4): 56~68.

Pre-stress Lose Calculation and Analysis of Long Span Bridge Base on Monitoring of Strain

LAO Xiao-chun, HE Ting-hui, TANG Li-qun, LIANG Ying-jing

(College of Traffic & Communications, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

Abstract: The monitored results from many bridges under construction showed that the deflections of the building bridge caused by tension of the prestressed cables becomes smaller gradually than these of theoretical prediction as the length of the prestressed cable increases. It seems that lose of the pre-stress has nonlinear relation with the length of the prestressed cables. Therefore, how to determine the main causes inducing the pre-stress lose and the lost rate has great significant for both design and construction, by now the relative researches were seldom involved the quantitative description. Based on the strain measurement results and the analysis of the collation of the prestressed cables in the construction engineering of Zhao Qing West River Bridge, it is found that one of the main reason of pre-stress lose is the curved angles of the prestressed cables An empirical formulation about the relationship between pre-stress lose rate and the curved angle is suggested. A new method of estimation of the pre-stress lose rate in engineering application is proposed.

Key words: pre-stress lose rate; strain monitoring; nonlinear relation