

预应力混凝土箱梁体外索应力损失监测研究

卢发亮

(山东交通学院 交通土建学院, 山东 济南 250357)

摘要:施加体外预应力是目前箱梁加固的主要措施之一,体外索在施工及运营期间的应力损失与体内索存在较大的差别,目前有关体外索应力损失方面的研究仍较少。该文结合浙江省湖州市符河大桥加固施工及运营期间的体外索应力监测,采用磁通量传感器对箱梁体外索进行了连续2年的应力监测,分析了影响体外索应力变化的关键因素及体外索应力分布特征。结果表明:体外索在施工及运营期间的总体应力损失较小,体外索应力沿索长分布较均匀,箱室内温度变化及应力松弛是影响体外索应力的主要因素。

关键词:连续箱梁;体外预应力;预应力损失;应力松弛;温度

预应力混凝土箱梁抗弯、抗扭刚度大,在中国公路桥梁建设中得到广泛的应用。但由于早期设计过程中对箱梁的预应力损失、温度应力等影响考虑不足,导致部分重载交通下的箱梁出现了严重的腹板裂缝及跨中下挠等病害。施加体外预应力是目前常用的箱梁加固方法之一,通过施加体外预应力,可有效改善箱梁截面应力分布状态,降低腹板主拉应力,阻止腹板斜裂缝的发生及发展。体外预应力加固法往往与腹板粘贴钢板、加厚腹板同时进行。从国内外的加固案例看,部分中、小跨径桥梁取得了较好的加固效果,但加固失败的例子也很多,特别是一些较大跨径、缺少腹板预应力筋的箱梁,往往采用多种方法加固后仍不能有效阻止裂缝的发展及下挠。

大、中跨径箱梁加固失败的案例反映出箱梁实际应力损失与理论计算值之间仍存在一定的差异,说明箱梁的预应力损失理论仍需通过实践、研究进一步发展完善。由于受到监测设备的限制,实桥状态下体外索预应力损失的研究尚处于初级阶段。该文结合符河大桥的加固施工,采用磁通传感器对体外索应力损失

进行长期的跟踪监测,对实桥状态下体外索应力损失的发展规律进行研究。

1 工程概况

符河大桥上部结构为三跨预应力混凝土变截面连续箱梁,跨径组合为(45+70+45)m,分左、右两幅。箱梁采用单箱单室断面,C50混凝土,箱梁顶板宽16.75m,底板宽8.5m,主跨支点截面梁高4.31m,跨中截面梁高2.06m。箱梁采用三向预应力结构,挂篮悬臂浇筑法施工,下部结构采用实体薄壁墩。

2015年定期检查发现:该桥梁体存在多条竖向、纵向和斜向裂缝,缝宽0.06~0.18mm。尤其是腹板上出现了较多的斜裂缝。

针对以上病害,设计部门提出了3项加固措施,即施加体外预应力、加厚腹板及腹板粘贴钢板。体外预应力索采用6束 $12\phi^{*}15.2$ 规格的低松弛钢绞线,通过钢锚箱锚固于边跨底板,体外索布置如图1、2所示。

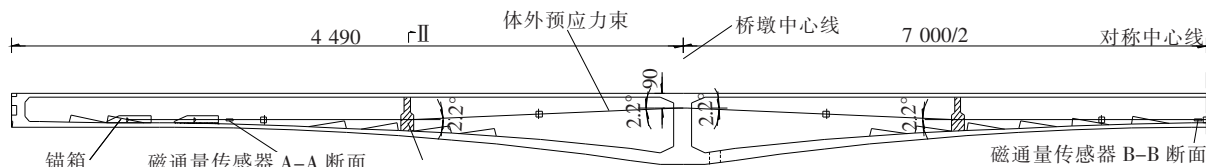


图1 体外索及磁通量传感器布置立面图(单位:cm)

收稿日期:2020-09-05(修改稿)

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(编号:2011-35)

作者简介:卢发亮,男,硕士,教授。E-mail:1812845221@qq.com

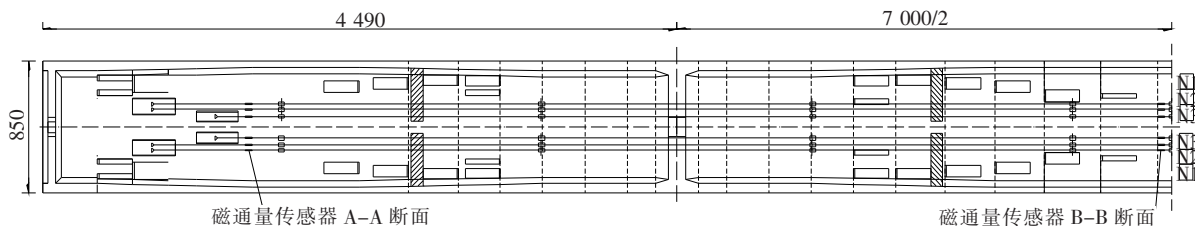


图 2 体外索及磁通量传感器布置平面图(单位:cm)

2 预应力监测方法

受到试验设备的限制,长期以来对预应力筋实际应力的长期监测始终是工程研究及试验的一个难题,过去最常用的锚索计及应变计均存在较大的缺陷,锚索计可在施工张拉前安装于锚下,能够实现施工阶段及运营阶段锚下应力的监测,但无法实现跨中断面的应力监测,而跨中断面的预应力损失往往是最大的。采用粘贴应变片或安装应变计的方式进行应力监测,往往由于施工过程中的碰撞、渗水等各种因素的影响导致应变计破坏或出现较大测量误差。考虑到以上两种方式的不足与缺陷,该文体外索预应力损失的长期监测采用磁通量传感器。

磁通量传感器的工作原理为:钢构件在机械力作用下内部产生弹性能量的变化,从而导致磁导率发生变化的现象称为磁弹效应。根据磁弹效应原理设计的磁弹应力传感器基本构造为在被测预应力筋外部预穿尼龙骨架,尼龙骨架上缠绕两个线圈,内部为感应线圈,外部为励磁线圈。根据法拉第感应定律,当励磁线圈组成的回路中有变化的电流通过时会产生一定的感应磁场,进而可测出感应线圈两端的感应电压。理论推导结果表明:预应力筋所受到的应力与感应电压的积分值一一对应。因此利用磁通量传感器再通过专门开发的磁弹应力监测设备——磁弹仪,即可实现对预应力筋进行实时监测或定期检测。磁通量传感器可以做成一个环形,也可以做成两个半环形,既可以在施工阶段进行安装,也可以在后期进行安装,特别适用于体外索预应力的长期监测。

该桥每幅布置 6 束 $12\phi^{*}15.2$ 体外索,由于体外预应力束各根钢绞线间存在一定的间隙,利用磁通量传感器进行整束监测可能会出现较大的误差,因此此次监测采用内径 18 mm 的小直径传感器进行单根监测,每束每断面选择一根钢绞线作为监测对象,每幅每断面布置 6 个磁通量传感器。

体外索采用逐根分级张拉的方式,为准确评判不

同断面位置索力的变化,同时选择两个断面进行索力监测。第 1 个断面布置在边跨钢锚箱的后端,即 A—A 断面,用以监测体外索在锚固端处索力的变化;第 2 个断面布置于中跨跨中断面,即 B—B 断面,用以监测体外索中心截面的索力变化。A、B 断面传感器布置如图 1、2 所示。

体外索张拉于 2016 年 12 月 24 日开始,并于当日结束。利用磁通量传感器对张拉过程进行了全程监测,并读取了张拉结束、张拉结束后第 3 d、第 7 d (2016. 12. 31) 的监测数据。此后每月月底读取一次监测数据,截止 2018 年底共读取 27 期监测数据。

3 监测结果分析

影响体外索应力变化的主要因素有温度的变化,张拉及运营阶段的预应力损失以及行车荷载的影响。对体内索而言,施工及运营阶段的预应力损失主要包括索与管道壁间的摩擦力引起的预应力损失、锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失、混凝土弹性压缩引起的预应力损失、预应力筋松弛引起的预应力损失、混凝土收缩和徐变引起的预应力损失。但体外索总体张力较小,由混凝土弹性压缩引起的预应力损失较小,在张拉阶段基本未测到此项应力损失。另外,混凝土的收缩徐变主要发生在混凝土浇筑的早期,该桥体外索施工时,混凝土龄期已超过 14 年,混凝土收缩徐变引起的预应力损失可忽略不计。

符河大桥左、右幅 12 条体外预应力索张拉控制应力均取 $0.65f_{ptk}$,即 1 209 MPa,单根钢绞线的张拉控制力为 169.3 kN,自 2016 年底张拉结束至 2018 年 12 月底,A、B 两个断面 27 期索力随时间变化关系曲线见图 3、4。图中:3 d 指张拉结束后第 3 d,7 d 指张拉结束后第 7 d,17—1 指 2017 年 1 月底;17—2 指 2017 年 2 月底;其他意义类似(下同)。

(1) 温度变化对体外索张力影响分析

温度变化的影响主要表现在两个方面:① 体外索与混凝土箱梁的温度线膨胀系数略有差别;② 体外索

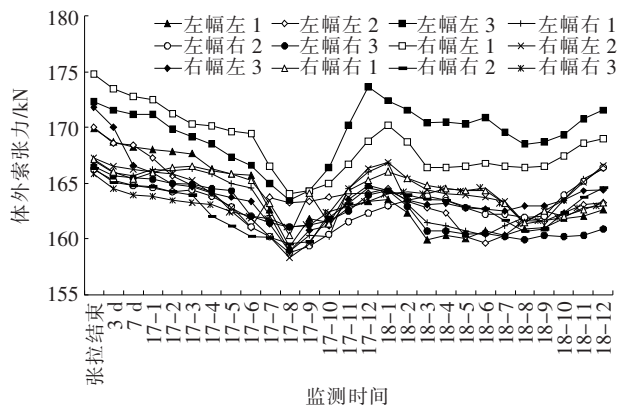


图3 A-A断面体外索张力-时间关系曲线

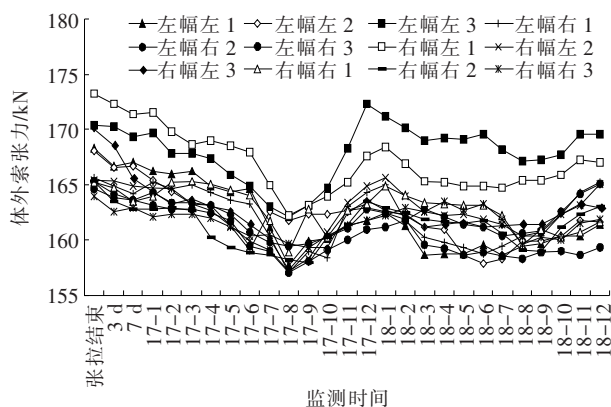


图4 B-B断面体外索张力-时间关系曲线

布置于梁体混凝土外,当气温变化时梁体温度变化与体外索温度变化不同步。

由图3、4可以看出:在2017年1月至2018年12月期间,左、右幅体外索张力变化呈现出较为明显的规律,即由2016年底张拉结束后体外索张力表现出逐月下降的趋势,至2017年8月底达到最低点,而后体外索张力开始回升,至2017年12月底体外索张力达到峰值,然后再次出现逐月下降的趋势,但下降的速度明显降低。至2018年8月底达到第2个低点后再次回升,直至2018年12月底再次达到峰值。

监测期间箱室内温度-时间关系曲线见图5。

由图5可以看出:箱室内温度随季节发生规律性变化。即由2016年12底逐月升高,至2017年7月底达到最大值,而后又逐月下降,至2018年1月底达到最低值,此后逐月回升,至2018年7月底达到最高值,而后逐月下降至2018年12月底再次达到最低值。

为便于分析体外索张力变化规律,作出A-A及B-B断面体外索张力均值与时间的关系曲线如图6所示。

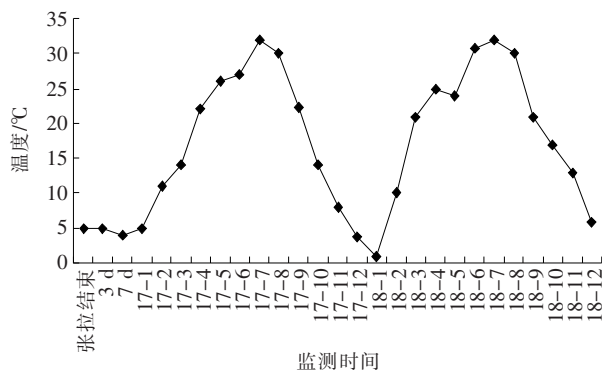


图5 箱室内温度-时间关系曲线

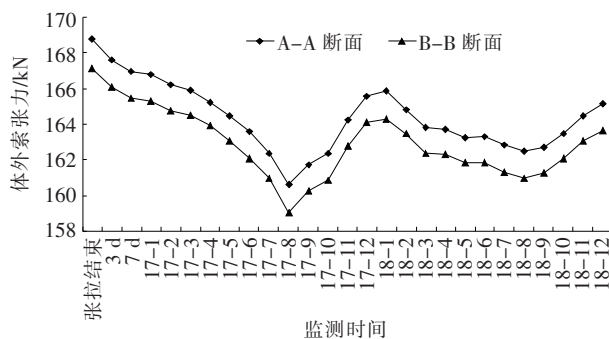


图6 A-A及B-B断面体外索张力均值-时间关系曲线

对比图5、6可以看出:体外索张力变化与箱室内的温度变化呈现出明显的负相关性,即随着箱室内温度的升高体外索张力呈现出明显的下降趋势,反之随着箱室内温度的降低,体外索张力呈现出明显的上升趋势。导致这一现象的原因为实测钢绞线的温度线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,而箱梁混凝土的温度线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,随着温度的升高预应力筋的伸长量大于箱梁的伸长量,体外索应力下降。但由于在体外预应力作用下箱梁应力改变具有一定的非线性特征,体外索张力变化与箱室内温度变化的关系也呈现出一定的非线性特征。

(2) 预应力筋松弛对体外索张力影响分析

前述分析表明,体外索张力与温度间存在明显的负相关性,但在温度上升阶段2017年体外索张力下降的速率明显快于2018年,说明温度不是影响体外索张力变化的唯一因素。为进一步分析影响体外索张力下降的因素,统计出A-A断面及B-B断面3 d、7 d、1年及2年的体外索张力损失值如表1所示。

由表1可知:A-A、B-B断面实测3 d、7 d、1年、2年预应力损失率均值分别为0.65%、1.01%、1.90%、2.08%。这4个观测时点对应的箱室温度分别为5、4、3.8和5.9 $^{\circ}\text{C}$,观测温度非常接近,温度对于

表 1 3 d、7 d、1 年及 2 年体外索张力损失统计

监测断面	实测张力平均值/kN					损失率/%			
	张拉结束	3 d	7 d	1 年	2 年	3 d	7 d	1 年	2 年
A—A	168.8	167.6	167	165.5	165.2	0.71	1.07	1.95	2.13
B—B	167.1	166.1	165.5	164.1	163.7	0.60	0.96	1.80	2.03
平均值	168.0	166.9	166.3	164.8	164.5	0.65	1.01	1.90	2.08

体外索张力的影响基本可以忽略不计,因此这 4 个点应力损失的差别应主要由其他因素所致。再看其发展规律,实测 7 d 预应力损失值即达到实测样品 1 000 h 松弛率的 50%,1 年的预应力损失率略大于 1 000 h 松弛率,2 年的预应力损失率比 1 年的损失率高出 0.2%。表明预应力损失早期发展较快,1 年后基本稳定。这一发展规律与预应力筋松弛损失的发展规律基本相符,因此可以得出结论:除温度变化外,预应力筋松弛是导致体外索应力损失的另一重要因素。

(3) 车辆荷载冲击疲劳作用对体外索张力的影响分析

由前述分析可知,扣除温度变化对预应力的影响后,实测预应力损失率与预应力筋松弛引起的损失基本一致,因此可以基本排除车辆荷载冲击疲劳作用对

预应力损失的影响。

(4) 体外索张力沿索长的分布特征分析

由于预应力筋与管道壁间的摩擦引起的预应力损失与管道的长度及累计转角有关,因此体内索预应力损失沿索长变化明显,对于较长的体内索,跨中断面与锚固端的体内索张力损失差值可达 20%以上。与体内索相比,体外索没有预应力筋管道,只在转向器处存在管道摩擦,从理论上分析体外索应力沿索长分布应较均匀。

该桥 A—A 断面处于边跨锚固端钢锚箱的后端,B—B 断面处于中跨跨中位置。左、右幅箱梁 12 束体外索 A、B 断面实测体外索张力均值及两截面体外索张力偏差统计结果如表 2 所示。

由表 2 可知:A—A、B—B 断面 27 期实测体外索

表 2 A—A、B—B 断面实测体外索张力均值及偏差统计

监测日期	张力/kN			监测日期	张力/kN		
	A—A 平均	B—B 平均	A、B 差值		A—A 平均	B—B 平均	A、B 差值
张拉结束	168.8	167.1	1.6	17—12	165.5	164.1	1.4
3 d	167.6	166.1	1.5	18—1	165.9	164.3	1.6
7 d	167.0	165.5	1.5	18—2	164.8	163.5	1.3
17—1	166.8	165.3	1.5	18—3	163.8	162.4	1.4
17—2	166.2	164.8	1.4	18—4	163.7	162.3	1.4
17—3	165.9	164.5	1.4	18—5	163.3	161.8	1.4
17—4	165.2	163.9	1.3	18—6	163.3	161.8	1.4
17—5	164.5	163.1	1.4	18—7	162.9	161.3	1.6
17—6	163.6	162.1	1.5	18—8	162.7	161.2	1.5
17—7	162.4	160.9	1.4	18—9	162.5	161.0	1.5
17—8	161.7	160.3	1.4	18—10	163.5	162.0	1.4
17—9	160.6	159.1	1.5	18—11	164.5	163.1	1.4
17—10	162.3	160.8	1.5	18—12	165.2	163.7	1.5
17—11	164.2	162.8	1.5				
平均值			1.5				

张力均值偏差最大值为 1.6 kN,最小值为 1.3 kN,平均值为 1.5 kN,B—B 断面的实测体外索张力平均值略小于 A—A 断面,偏差占初始张拉力的 0.89%。表明体外索预应力损失沿索长分布较均匀,这一点与体内索相差较大。

4 结 论

(1) 对于箱室内的体外预应力筋来讲,体外索张力变化与温度变化具有明显的负相关性,其他条件不