



基于挠度及索力监测的斜拉索损伤敏感性分析

梁 柱, 李 娜, 郑 春, 刘晓东

(中交公路规划设计院有限公司 北京市 100088)

摘 要: 由于斜拉索的锈蚀断丝等损伤必然导致索力及结构内力状态的改变, 主梁的挠度也将随之发生变化, 本文以一座独塔斜拉桥为例, 从主梁挠度及索力的监测方法出发, 以拉索损伤的敏感性分析为手段, 探讨基于主梁挠度及索力监测的斜拉索损伤识别的方法及其适用性。

关键词: 斜拉索; 索力; 挠度; 损伤

对于斜拉桥而言, 斜拉索是关键受力构件, 斜拉索的受力状态直接影响到斜拉桥的受力状态。然而斜拉索锈蚀乃至断丝的危害却时有发生, 且其断丝的隐蔽性较强。随着近 20 年来国内斜拉桥的修建, 斜拉索已由过去的砂浆包裹发展成为以热挤 PE 防护的平行钢丝索和多层防护的钢绞线斜拉索为主流的斜拉索体系。然而尽管斜拉索厂家对斜拉索提出了 30~50 年的寿命指标, 但目前国内已有数座斜拉桥在建成不到 15 年内就进行了换索, 最近的一个案例为广东珠海淇澳大桥, 距建成仅 6 年时间。图 1 为某斜拉桥拉索 PE 保护层剥开后的拉索锈蚀情况。

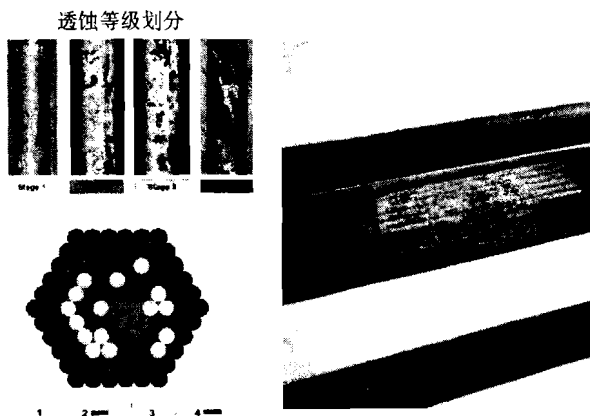


图 1 某斜拉桥斜拉索锈蚀断丝情况

由于斜拉索的锈蚀断丝等损伤必然导致索力及结构内力状态的改变, 严重时甚至导致结构的整体破坏, 因此加强对斜拉索的监测或检测是十分必要的。近十几年来, 越来越多的大型桥梁开始构建桥

梁结构健康监测系统, 希望通过对大桥运营环境和关键力学指标的实时监测达到掌控大桥安全状态的目的。考虑到一方面斜拉索的损伤必然导致斜拉索索力的变化及重分布, 另一方面, 斜拉索索力的变化也必然反映到桥面的挠度变化上。鉴于此, 本文以一座独塔斜拉桥为例, 从挠度及索力的监测方法出发, 以拉索损伤敏感性分析为手段, 探讨基于挠度及索力监测的斜拉索损伤识别的方法及其适用性。

1 索力监测方法

斜拉桥拉索张拉时的索力, 主要由张拉千斤顶的油压表进行控制, 而桥梁运营期间的索力监测, 目前主要有以下几种方法。

(1) 压力传感器测定法。

压力传感器材质通常为高强度弹性体, 安装在斜拉索张拉端锚环螺母下, 直接测得斜拉索锚下压力。传感器种类一般有电阻应变式、光纤应变式、油压式传感器等等。该方法的优点是直接测力, 精度高, 能达到 1% 以内。缺点是施工麻烦, 需要施工时进行埋设, 且不容易更换。安装示意图见 2 所示。

(2) 加速度传感器测振法。

加速度传感器测振法为目前最常用的测试方法。如图 3 所示, 将加速度传感器用索夹或绑带固定在斜拉索上, 通过对振动时程数据进行傅立叶变换获得拉索振动频率, 然后根据拉索频率与索力的理论公式换算索力。该方法的优点是容易更换, 使用成熟。缺点是有一定误差, 需要考虑拉索垂度、抗

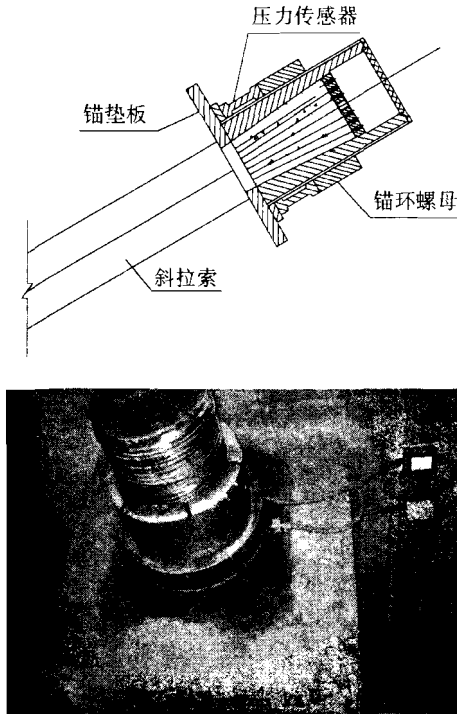


图2 压力环索力计安装示意

弯刚度、边界条件误差及拉索阻尼器的影响因素,修正后的精度一般认为在5%以内。

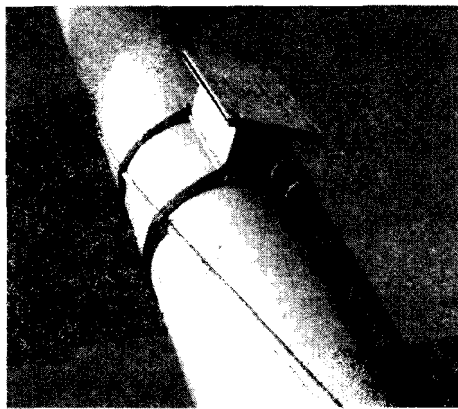


图3 索上加速度传感器安装

(3)激光测振法。

激光多普勒测速仪 LDV(Laser Doppler Velocimeter)是应用多普勒效应,利用激光的高相干性和高能量测量流体或固体流速的一种仪器。目前在外国已经少量应用到斜拉索的振动测量上,通过测得拉索的速度时程,进行傅立叶变换,获得索的振动频率,最终获得索力。测试原理基本同加速度传感器,因此精度相当。该方法优点在于无接触、无导线、并可长距离监测,但设备价格昂贵,不适合多点同时监测。

(4)EM 磁通量索力计。

磁通量索力计的原理,是当铁磁性材料受到外力作用时,其内部产生机械应力或应变,相应地磁导率发生改变,通过测定磁导率变化来反映应力变化。该方法的优点是传感器安装较方便、非接触测量、不损伤结构,缺点是对不同型号的拉索均需要各自进行参数标定,需要在斜拉索施工时安装,不宜更换,测试精度与振动法相当。

(5)筋式光纤光栅智能拉索。

筋式光纤光栅智能拉索,是将 FRP—OFBG 智能复合筋布设到平行钢丝或钢绞线拉索内,成为拉索的一部分,在索力作用下,智能筋与平行钢丝协同变形,感知拉索应力。该方法优点是测力直接,并可直接进行损伤分析,但传感器的安装在拉索生产时就需埋入,较为复杂,不易更换。

2 主梁挠度监测方法

斜拉桥运营期间的主梁挠度监测,目前可采用的方法有测量机器人、激光挠度仪、GPS 定位系统、开放连通管液位测量、封闭连通管压力测量等。

(1)测量机器人(自动跟踪的全站仪)。

测量机器人是一种能够自动校准目标并实现自动跟踪的全站仪。监测方法主要是通过沿主梁选择适当的点布置反射器,与测量用的全站仪配合使用,形成光载波通信系统,利用全站仪的红外激光探测功能,对反射器进行连续监测,测量每个反射器与全站仪的相对角度和距离,计算并存储主梁的变形情况。该方法具有高精度优点,即使在测站和测点距离为 1 km 的情况下,监测精度也能够达到 2 mm,但精度受到环境及天气,如海面、雨、雪、雾的影响较大。同时由于扫描定位将会耗去一定时间,因此,这种测试方法不适合于多点同步或实时监测。

(2)CCD 激光挠度监测系统。

CCD 激光挠度仪是建立在一个激光发射器和一个连接在目标上的光电接收器(CCD)的基础之上,操作者从接收器给出一道激光束并将其锁定在一个稳定的位置上,接收器可以接收识别光学目标反射回的光束并以高达 100 Hz 的频率精确测量出该目标的点位。

用激光挠度仪来监测结构变形具有精度高(mm 级),同步性好,温飘、时飘小等优点。但激光设备在长距离测量时与测量机器人一样容易受环境干扰,而且目前的激光挠度仪均为点光源产品,进行



多点测量时费用极其昂贵,目前还不太适合在土木工程长期监测使用。

(3)GPS 系统。

采用全球定位系统(GPS)进行主梁挠度的监测可以完全避免受环境干扰的问题。该方法的优点是无时漂、温漂,但目前 GPS 动态高程精度最高为 1~2 cm,静态精度为 3~5 mm,对斜拉桥挠度监测而言,显然动态精度不够。同时高精度 GPS 设备价格昂贵,因此通常可用于少量控制点如主跨跨中、塔顶的变形监测,不宜多点布设。

(4)开放式连通管系统(静力水准测量)。

静力水准测量变形是采用液位监测的方式,依据连通管原理的方法,测量每个测点容器内容器底面安装高程与液面的相对变化。再通过计算求得各点相对于基点的相对变形量。通过开放连通管来监测主梁高程变化,具有精度高、多点同步测量、性价比高等优点;但由于静力水准测量仪器在高程改变时伴随液体流动,液体流动受液体粘滞、管壁阻力等因素影响而存在严重滞后现象,在活载作用下动态响应相对较慢,监测过程中容易出现丢失峰值的情况,不适用于动态实时监测。

(5)封闭连通管压力监测系统。

如图 4 所示,封闭连通管监测系统原理,也是采用液压高差监测和连通管原理,但测量的是每个测站及基准站处液体压力的变化,液压通过压力变送器进行监测,再通过计算求得各点相对于基点的相对变形量。

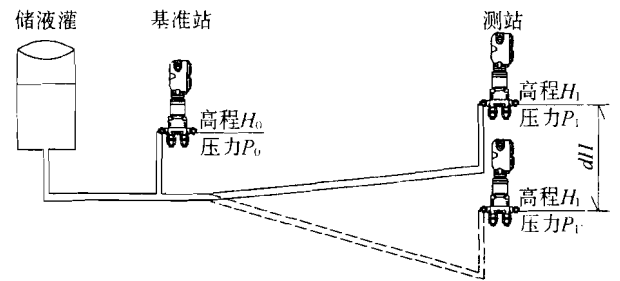


图 4 封闭式连通管压力监测系统原理

通过封闭连通管液压监测来获得主梁高程变化具有精度高(优于 1 mm)、能够实现多点同步测量、性价比高等特点,且避免了静力水准测量在高程改变时的液体流动造成滞后的问题,另外压力传感器的时间常数较小(100 ms)能够获得较好的动态监测效果。此方法对传感器及连通管路安装要求较高,对液体质量要求高,是目前斜拉桥挠度监测较适用的方法。

3 相关工程背景介绍

深港西部通道深圳湾公路大桥为独塔单索面钢箱梁斜拉桥,塔梁固结体系,桥跨布置为 180 m + 90 m + 75 m。钢箱梁顶板宽 38.6 m,底板宽 28.75 m,梁高 4.126 9 m。索塔为钢筋混凝土斜塔,单箱单室截面,承台以上塔高 139.053 m。全桥共 12 对斜拉索,非对称布置,采用直径为 7 mm 的低松弛高强平行钢丝斜拉索,标准强度为 1 670 MPa,拉索编号依次为 S01~S12, H01~H12,结构见图 5 所示。

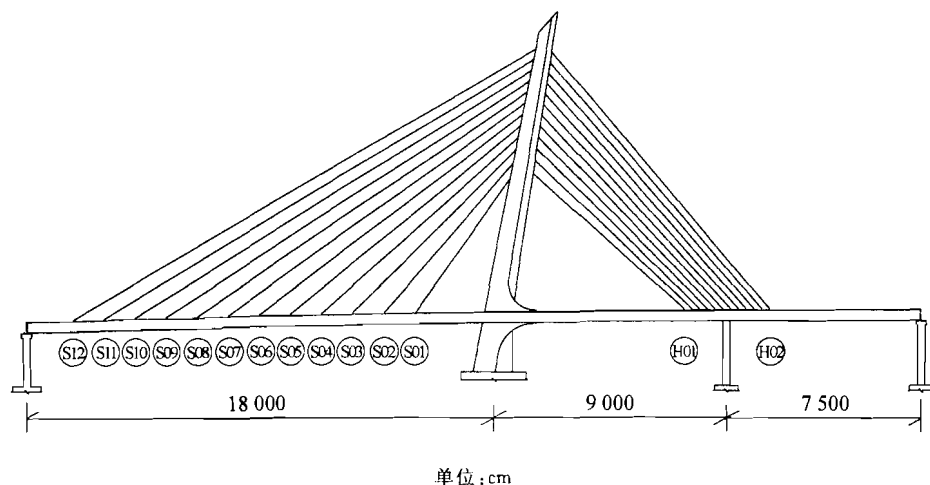


图 5 深圳湾公路大桥

在该桥的一半斜拉索上布设了加速度传感器进行索力在线监测,同时采用封闭连通管压力监测系

统监测挠度变化,测点主要布设在主跨四分之点、边跨跨中及次边跨跨中。



4 斜拉索损伤敏感性分析

利用通用有限元程序 ANSYS 建立该桥的平面杆系有限元模型,主梁和索塔采用梁单元进行模拟,斜拉索采用杆单元模拟。斜拉索的损伤通过索面积的折减进行模拟。

(1)索力对拉索损伤的敏感性分析。

当斜拉索发生锈蚀断丝等损伤时,该根斜拉索索力将发生变化,同时其他斜拉索均会产生索力重分布,从而达到新的平衡状态。分别模拟 24 根斜拉索各损伤 10%的情况下各索的索力变化情况,鉴于篇幅,选取了部分结果列于表 1。

表 1 拉索损伤 10%导致的索力变化 %

| 拉索 | 拉索损伤 10% | | | | | |
|-----|----------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | S2 | S6 | S12 | H2 | H6 | H12 |
| S1 | 0.47 | 0.34 | 0.14 | -0.04 | -0.06 | -0.06 |
| S2 | -9.43 | 0.57 | 0.17 | -0.04 | -0.05 | -0.05 |
| S3 | 0.66 | 0.80 | 0.21 | -0.04 | -0.05 | -0.04 |
| S4 | 0.60 | 0.97 | 0.28 | -0.03 | -0.05 | -0.04 |
| S5 | 0.47 | 1.01 | 0.33 | -0.03 | -0.06 | -0.06 |
| S6 | 0.36 | -9.13 | 0.40 | -0.03 | -0.07 | -0.10 |
| S7 | 0.28 | 0.87 | 0.48 | -0.04 | -0.09 | -0.15 |
| S8 | 0.20 | 0.71 | 0.55 | -0.05 | -0.11 | -0.21 |
| S9 | 0.15 | 0.57 | 0.62 | -0.06 | -0.13 | -0.28 |
| S10 | 0.11 | 0.43 | 0.69 | -0.07 | -0.16 | -0.35 |
| S11 | 0.08 | 0.30 | 0.70 | -0.08 | -0.18 | -0.41 |
| S12 | 0.05 | 0.19 | -9.36 | -0.09 | -0.21 | -0.48 |
| H1 | -0.08 | -0.10 | -0.50 | 0.32 | 0.41 | 0.40 |
| H2 | -0.07 | -0.11 | -0.54 | -9.73 | 0.42 | 0.45 |
| H3 | -0.08 | -0.13 | -0.70 | 0.34 | 0.51 | 0.60 |
| H4 | -0.07 | -0.11 | -0.63 | 0.26 | 0.43 | 0.56 |
| H5 | -0.06 | -0.12 | -0.67 | 0.24 | 0.43 | 0.61 |
| H6 | -0.06 | -0.12 | -0.71 | 0.22 | -9.61 | 0.67 |
| H7 | -0.05 | -0.12 | -0.78 | 0.21 | 0.45 | 0.76 |
| H8 | -0.05 | -0.12 | -0.84 | 0.20 | 0.45 | 0.84 |
| H9 | -0.04 | -0.11 | -0.83 | 0.17 | 0.41 | 0.84 |
| H10 | -0.04 | -0.12 | -0.99 | 0.18 | 0.46 | 1.03 |
| H11 | -0.03 | -0.11 | -0.99 | 0.16 | 0.43 | 1.04 |
| H12 | -0.03 | -0.10 | -1.02 | 0.15 | 0.42 | -9.03 |
| 合计 | 6.66 | -3.75 | -13.99 | -7.85 | -6.02 | -3.46 |

由表 1 结果可以看出:

①当斜拉索发生损伤 10%时,该斜拉索索力将显著减小,最大减小 9.73%;

②索塔同侧其他斜拉索索力将增大,索塔异侧索力将减小,但索力变化不大,基本在 1%以内;

③斜拉索索力总和减少,因此结构支座反力将增大,最长索 S12 拉索损伤时,索力总体变化最大,跨中拉索 S6 发生损伤时,其周围拉索产生较大的索力增量,因此索力总体变化较小;

④本桥采用振动法进行索力监测,认为测量误差在 5%以内,因此仅当单根拉索发生 10%损伤,索力测试对该根索的损伤是敏感的,但若索力计并未布设在该损伤索而布设在附近索上时,则无法对该索的损伤进行识别。

(2)主梁挠度对拉索损伤的敏感性分析。

当斜拉索发生锈蚀断丝等损伤时,除索力发生重分布达到新的平衡状态外,主梁挠度也会产生变化。分别模拟 24 根斜拉索分别损伤 10%时主梁的挠度变化情况,选取了部分结果列图 6。

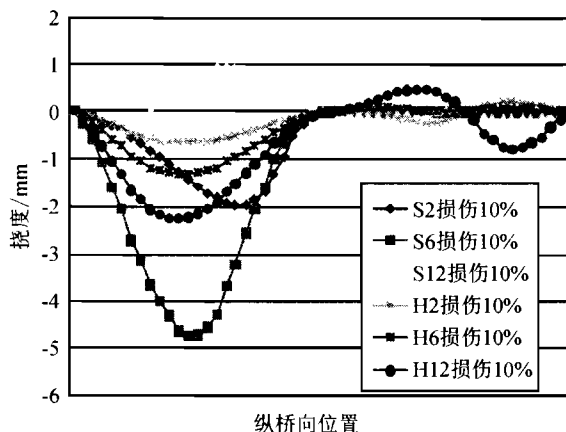


图 6 单根拉索损伤 10%时挠度变化

由图 6 结果可以看出:

①当主跨跨中附近斜拉索发生损伤 10%时,由于索力减小,该拉索位置主梁将产生下挠,但挠度变化不是十分明显,最大为 4.7 mm(S6 损伤 10%时);

②索塔右侧拉索发生损伤 10%时,同样拉索位置主梁将产生下挠,但变化不大,均小于 1 mm,同时由于主跨拉索索力下降,主跨也将产生下挠,最大为 2.3 mm 左右;

③本桥采用封闭连通管压力监测系统,挠度测量误差在 1 mm 以内,因此仅当单根拉索发生 10%损伤时,只有主跨挠度对跨中附近的拉索损伤较敏感。

同时模拟 24 根斜拉索均发生 10%损伤时,主梁的挠度变化情况,结果见图 7 所示。

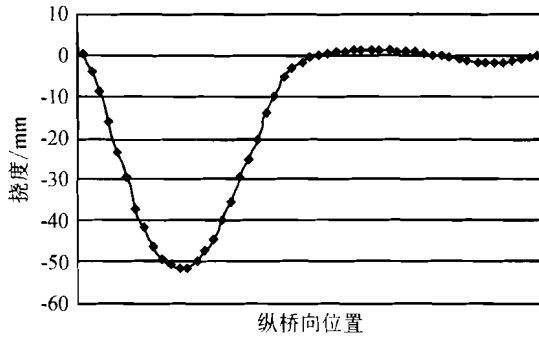


图7 拉索整体损伤10%时挠度变化

可以看出,当拉索发生整体损伤时,主梁跨中产生显著变形,跨中最大挠度为51.8 mm,但边跨跨中下挠和次边跨跨中上挠均不大,在2 mm以内,说明主跨挠度对斜拉索的整体损伤十分敏感。

5 结论

(1) 基于主梁挠度及索力监测的损伤识别效果与监测设备的测试精度息息相关,当采用较高精度的测试方法及设备时,该方法对一定程度的拉索损伤识别是有效的。

(2) 类似本桥的斜拉桥结构,当单根拉索发生损伤时,该拉索索力变化较大,但索力重分布导致的

其他索力的增量不明显,因此在当索力传感器未布设到发生损伤的拉索上时,索力监测并不能灵敏地识别出该拉索的损伤。

(3) 类似本桥的斜拉桥结构,当单根拉索发生损伤时,拉索位置的主梁产生下挠,且挠度对主跨跨中附近的拉索损伤最为敏感,同时当拉索发生整体损伤时,主跨挠度变化是十分明显的。

(4) 对其他结构形式的斜拉桥,也可运用此方法进行拉索损伤敏感性分析,为索力传感器及挠度测点的优化布设提供指导。

参考文献:

- [1] 王文涛. 斜拉桥换索工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] Keita KUBOTA, Takeshi MIYASHITA, Yozo FUJINO, Noriyuki MIYAMOTO, Shuji UMEMOTO, Hiroyasu SUEHIRO. Development of a Super Remote Laser Sensing System for Monitoring of Cable-Supported Bridges[C]. The 6th international cable supported bridge operators' conference. Takamatsu, Japan, 2008.
- [3] 郝超, 裴岷山, 强士中. 斜拉桥索力测试新方法—磁通量法[J]. 公路, 2000, (11).

Sensitivity Analysis of Cable Damage Based on Monitoring of Deflection and Cable Tension

LIANG Zhu, LI Na, ZHENG Chun, LIU Xiao-dong

(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Since the rust and damage of the cables will inevitably lead to the change of cable tension and internal structural change, the main beam deflection will subsequently change, so a means to the cable damage identification and its applicability based on the monitoring of deflection and cable tension of main beam are explored and a single tower cable-stayed bridge is given as an example.

Key words: cable; cable tension; deflection; damage