

# 运营状态斜拉桥考虑拉索涡激振动的钢锚箱疲劳 实测研究

祝志文<sup>1,2</sup>, 李健鹏<sup>2</sup>, 蔡晶垚<sup>2</sup>, 王乙静<sup>2</sup>, 陈 魏<sup>2</sup>

(1. 汕头大学土木与环境工程系, 广东 汕头 515063; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为研究桥面随机车流通行和拉索涡激振动共同加载下斜拉桥钢锚箱应力响应特征,评价钢锚箱构造细节的疲劳性能,在某大跨度斜拉桥上开展了拉索涡激振动的现场观测和钢锚箱构造细节的应力实测。采用雨流计数法获得了构造细节应力幅,并基于名义应力法评估了钢锚箱的疲劳性能。研究表明,斜拉索在无雨和较低风速下发生了高阶多模态涡激振动,来流风向近似垂直桥轴线,面内振动明显大于面外,观测到的最大加速度达  $24 \text{ m/s}^2$ 。钢锚箱构造细节的应力影响线长,为主体构件受力特征,一辆货车通过桥梁在锚箱构造细节上仅产生一个应力幅。拉索涡激振动时,构造细节应力响应未见拉索涡激振动频率成分,因此拉索涡激振动对锚箱动力加载可忽略。应力监测表明,锚箱顶、底板与外腹板焊缝主要传递剪应力,桥面端应力响应大于其中部和下部,也明显大于其他构造细节。锚箱顶板与外腹板焊缝桥面端响应最大,应力幅达  $46.6 \text{ MPa}$ 。研究认为,除顶、底板与外腹板焊缝的桥面端构造细节外,其他构造细节均具有无限疲劳寿命。

**关键词:**斜拉桥拉索; 涡激振动; 疲劳; 钢锚箱; 应力实测

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.4; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)01-0009-11

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.002

## 1 概 述

斜拉桥是由索塔和墩、斜拉索和主梁组成的跨越能力很大的桥梁结构之一。斜拉索弹性支承主梁,将主梁大部分荷载传递给索塔,因而是斜拉桥的主要承重构件之一。由于斜拉索为柔性和低阻尼构件,拉索倾斜并存在垂度,在风、风雨及交通荷载作用下极易发生不同形式的风致振动,如风雨振、参数激振和涡激振动。斜拉索涡激振动是由于其尾流非定常漩涡脱落引起的,也即当斜拉索漩涡脱落频率  $f_v$  与斜拉索某阶固有频率  $f$  接近时,将激发斜拉索的涡激振动。斜拉索漩涡脱落频率  $f_v$  与其直径、来流风速和  $S_i$  数的关系为

$$f_v = S_i U / d \quad (1)$$

式中  $U$  为来流风速;  $d$  为拉索直径;  $S_i$  为涡脱 Strouhal 数,当拉索截面对应的  $Re \leq 1 \times 10^5$ ,  $S_i$  取 0.19-0.2。如假定拉索的直径为 0.15 m,  $S_i = 0.2$ , 来流风速为 3-25 m/s, 则对应的涡脱频率为 4-33 Hz。由于大跨度斜拉桥拉索的基频通常在 0.2-2 Hz, 因此涡激振动通常激发的是拉索的高阶模态,有时甚

至是由多个高阶模态共同参与的涡激振动<sup>[1-2]</sup>。观测到的斜拉索涡激振动峰峰值位移不大于  $d$ , 远小于拉索风雨振或参数振动振幅;但由于发生涡激振动的模态较高,高阶振动导致拉索模态加速度大 ( $a = (2\pi f)^2 r$ ,  $r$  为某阶涡激振动幅值),因而涡激振动的惯性力可能较大。这种振动惯性力将在拉索上产生较大的附加力,并通过拉索锚固端作用在钢锚箱上,因而钢锚箱可能会受到因拉索涡激振动而产生的波动加载作用。另外,桥面货车通行也将在拉索上产生变化的索力,并通过拉索锚固端作用在钢锚箱上,因此也将在钢锚箱上产生应力的变化。

钢锚箱结构复杂、传递荷载大且局部应力集中突出,其承载力是保障大跨度斜拉桥安全的重要考虑。刘庆宽等<sup>[3]</sup>开展了南京长江二桥南汉桥索梁锚固足尺模型试验研究,试验通过千斤顶作用于承压板,给出了承压板下部高应力分布的结果。颜海等<sup>[4]</sup>研究了锚垫板和承压板的模拟方法和应力分布,对非线性接触法和等效板厚法进行了比较。万臻等<sup>[5]</sup>组合实体单元和壳单元模拟了锚垫板和承压板的接触,对安庆长江大桥钢锚箱进行了有限元分析,并与模型试验结果进行了对比。吴冲等<sup>[6]</sup>建立

收稿日期: 2019-05-25; 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057701); 国家自然科学基金资助项目(51878269); 汕头大学科研启动经费资助项目(NTF18014)

了1:2的上海长江大桥斜拉桥钢锚箱试验模型,研究该斜拉桥锚箱式索梁锚固区的应力分布、大小和索梁锚固结构的极限承载力,提出了一种采用梁单元和壳单元模拟主梁整体和局部的混合有限元方法。李小珍等<sup>[7]</sup>开展了南京长江二桥南汊桥索梁锚固结构疲劳试验研究。满洪高等<sup>[8]</sup>分析锚固结构的传力机理和应力集中现象,提出了合理传递索力和减小应力集中现象的构造措施。张清华等<sup>[9-10]</sup>通过有限元分析研究了苏通大桥钢锚箱试验模型中锚箱体和与其相连腹板的刚度比对锚箱式锚固结构传力机理的影响。Lin等<sup>[11]</sup>以台湾某2×200 m单塔钢箱梁斜拉桥钢锚箱为研究对象,开展了静力承载力试验和有限元分析。蒲黔辉等<sup>[12]</sup>和刘振标等<sup>[13]</sup>对铁路钢箱梁斜拉桥的双挑式索梁钢锚箱的传力机理开展了分析。

当运营中的大跨度斜拉桥拉索发生涡激振动时,桥面通行货车加载与拉索涡激振动附加力将产生叠加,可能在斜拉索钢锚箱焊接构造细节上产生较大的应力幅。由于涡激振动能在较低的风速下发

生,而这种涡振风速在桥位常遇,因此这两种加载效应的叠加可能会在拉索锚箱上出现,是否对锚箱的疲劳性能带来影响值得关注。然而至今,关于桥面货车通行下,钢锚箱焊接构造细节的应力响应实测研究未见报道;在拉索涡激振动和桥面车辆通行共同加载下钢锚箱焊接细节的应力实测研究,同样未见相关报道。

## 2 桥梁概况及试验布置

某大跨度斜拉桥为双塔不对称混合梁斜拉桥,主跨跨度816 m,桥梁位于长江岳阳段,河道顺直、地势平坦;大桥主桥为西北-东南走向,桥轴线为北偏西42°。该桥主跨和北边跨主梁为PK断面钢箱梁,标准节段全宽38.5 m、高3.8 m。索塔横桥向为H形预应力混凝土结构,每个索面有26对高强度平行钢丝斜拉索,中跨和北边跨钢箱主梁顺桥向标准索距为15 m,横桥向索距为35 m,斜拉索下端锚固在主梁外腹板上的钢锚箱上,如图1所示。

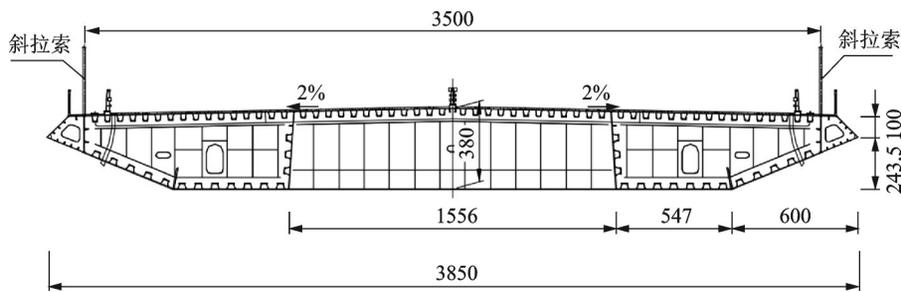


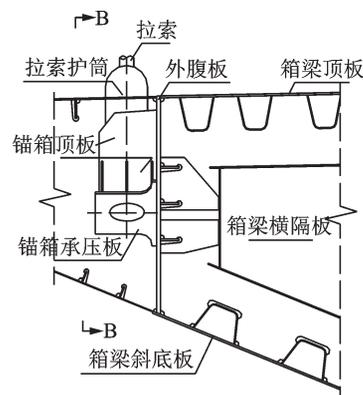
图1 钢箱梁横断面布置(单位:cm)

Fig. 1 Layout of cross section of steel box girder (Unit: cm)

该桥钢锚箱位于钢箱梁外腹板外侧的风嘴内,主要由锚箱顶板、锚箱底板、承压板(厚度均为30 mm)和锚箱内外侧板(厚度24 mm)等几部分组成,并通过顶板、底板及承压板的3条主焊缝焊接于钢箱梁外腹板(厚度32 mm)上。锚箱底板、顶板及承压板是锚箱结构的主要传力构件,三者组成的结构以受剪为主、受弯为辅的剪-弯联合受力方式传递斜拉索和主梁之间的力<sup>[3,5,7,10]</sup>。实桥观测发现,在无雨和低风速的天气条件下,大桥北塔北侧下游最靠近索塔的第一根斜拉索(编号JB01),长时间频繁地出现明显振动。JB01拉索外径为10.7 cm,长137.66 m,成桥状态索力2258 kN,与水平面倾角为82.2°,没有安装外置阻尼器。

图2和图3是JB01拉索梁端钢锚箱结构布置和实物,可见拉索锚头作用在锚垫板上的集中力将传递到承压板和顶底板上,并通过承压板和顶底板与钢箱梁外腹板的连接焊缝传递到钢箱梁外腹板上,并最终传递到由钢箱梁顶板、底板、外腹板和横隔板共同组成的钢箱梁主体结构上。

大桥健康监测系统在主跨跨中布设了螺旋桨风速仪,能获得跨中桥面高度处的平均风速和风向,如图4所示。为测量该拉索的涡激振动,并尽可能拾取较大的拉索振动加速度,通过架设梯子,在拉索距桥面6.22 m高度安装TST143A02P双向加速度传感器,如图5所示,并通过DH3817数据采集系统得



(a) 顺桥向视图

(a) Longitudinal view

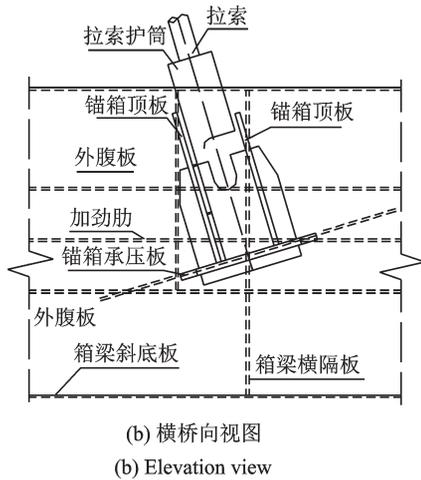


图 2 JB01 拉索梁端钢锚箱结构布置

Fig. 2 Structural layout of anchor box of cable JB01 at bridge girder



图 3 JB01 拉索锚箱实物

Fig. 3 On-site photo of anchor box of cable JB01



图 4 跨中桥面风速仪

Fig. 4 Anemometer installed on deck at span center

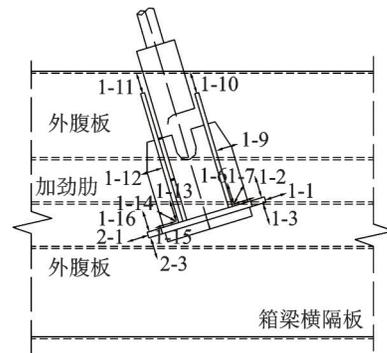


图 5 安装于 JB01 拉索的双向加速度计

Fig. 5 Bi-directional accelerometer installed on cable JB01

到拉索振动加速度时程。

参考钢锚箱模型试验结果<sup>[3,5,7,9]</sup>,并结合作者事先开展的锚箱有限元分析,在重点关注的钢锚箱焊接构造的应力集中处,如锚箱顶底板与外腹板连接构造的桥面端(后称之为上端)、承压板与钢箱梁外腹板连接构造的两端和两侧,锚箱顶底板、加劲板和承压板三条焊缝交叉的构造处,布设日本东京测试研究所生产的 UFLA-2-11-3LT 箔基温度自补偿应变片,如图 6 所示。参考疲劳评价的名义应力法要求<sup>[14]</sup>,所有单轴应变片均垂直于焊缝,并离开焊趾 6 mm;在上述三条焊缝交叉的角隅处,根据类似要求布设了应变花,以获得该区域复杂的应力状态。



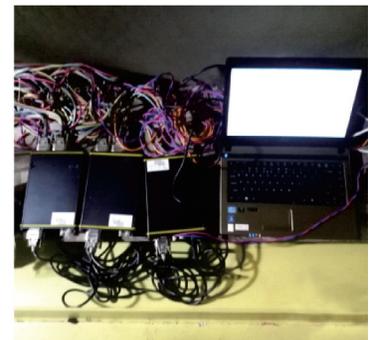
(a) 应变片布置

(a) Gauge arrangement



(b) 实桥应变片

(b) Gauges in real bridge



(c) 数据采集系统

(c) Data acquisition system

图 6 钢锚箱应力实测

Fig. 6 Stress measurement on anchor box

### 3 斜拉索涡激振动现场观测

2017年7月30日至8月1日,JB01拉索发生明显涡激振动,作者采用DH3817动态数据采集系统对拉索涡激振动进行了现场实测,同时根据桥梁健康监测系统风速仪,记录了相应的风速和风向。图7是7月30日,实测桥面风向为东北风,桥面风速2.9 m/s时,该拉索的面内外振动时程和对应的频域幅值谱分析。拉索面内加速度峰值为2.8 m/s<sup>2</sup>,面外加速度峰值约为0.9 m/s<sup>2</sup>,故面内振动幅值明显大于面外,也即拉索振动是以面内为主。该拉索基频为0.98 Hz,图7

(b)显示面内振动主要模态是第8、第9和第10阶,最大峰值频率对应的模态为第8阶。因拉索振动是在无雨的条件下发生的,因此不会是风雨振。另外,参数振动往往激发的是拉索的1/3、1/2、第1和第2倍基频<sup>[15]</sup>,因而也可排除拉索的参数振动,因此认为,本文观察到的拉索振动为高阶多模态涡激振动。

图8为实测桥面风向为东北风,桥面风速增大到4.6 m/s时,该拉索的面内振动时程和对应的归一

化幅值谱分析。数据分析表明,拉索振动仍然是以面内为主。但与图7相比,面内加速度显著增大,峰值加速度达到 $18 \text{ m/s}^2$ ,时程的谐波特性也较为明显。图8(b)显示振动主要以第11和12阶模态参与,2个参与模态为相邻模态,因而图8(a)的时程表现为“拍”的特征。因参与的多个主要模态均高于图7的振动模态,可见来流风速增大后,涡脱频率提高了,激发了更高阶的多模态涡激振动。

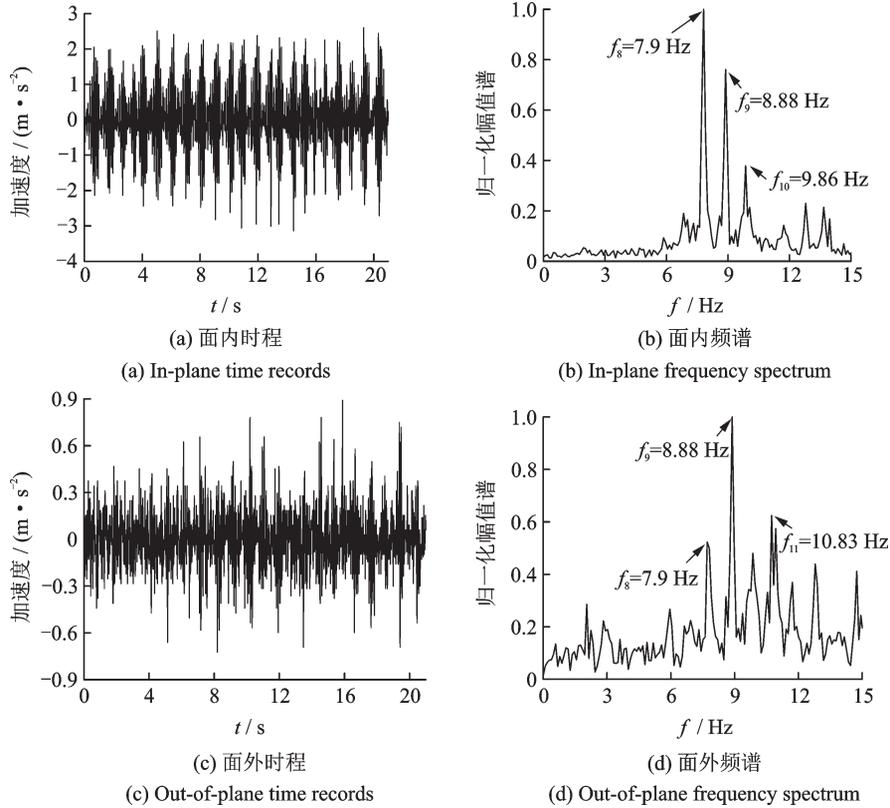


图7 东北风风速2.9 m/s拉索振动

Fig. 7 Cable vibration under northeast wind of speed 2.9 m/s

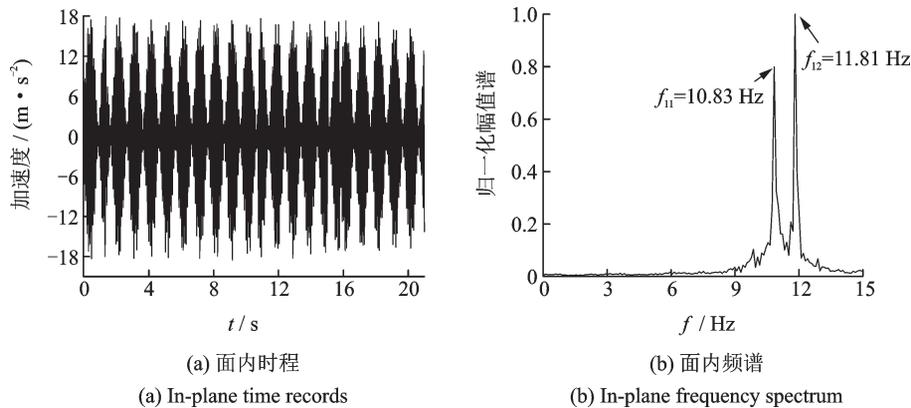


图8 东北风风速4.6 m/s拉索振动

Fig. 8 Cable vibration under northeast wind of speed 4.6 m/s

图9为实测桥面风向为东北风,桥面风速增大到6.7 m/s时,该拉索的面内振动时程和对应的频域幅值谱分析。可见虽然桥面风速进一步增大后,面内加速度峰值响应增大到约 $2g$ ,但与图8相比增大不明显。从图9(b)频率分析来看,拉索振动主要参与模态增

多,为第10、11和12阶3阶相邻的高阶模态,第11阶参与能量最大。从图7-9可见,拉索涡激振动的多模态特征表现为多个相邻高阶模态共同参与的振动。

图10显示了斜拉索振动峰值加速度随来流风速的变化。其基本特征是随着风速的增大,其振动

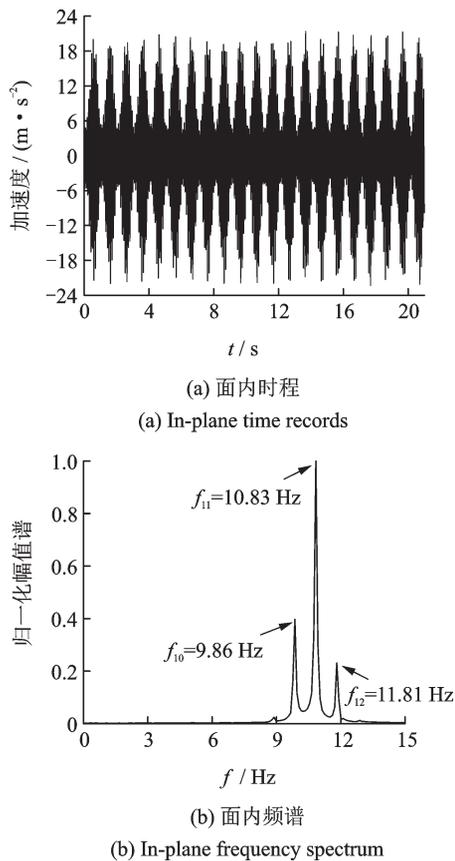


图 9 东北风风速 6.7 m/s 拉索振动  
Fig. 9 Cable vibration under northeast wind of speed 6.7 m/s

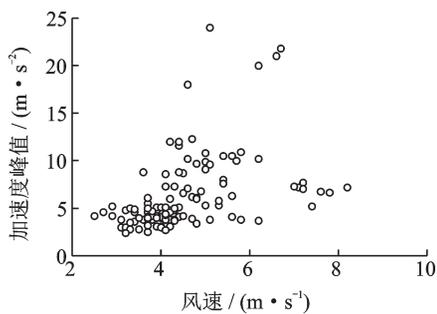


图 10 拉索振动峰值加速度与来流风速  
Fig. 10 Peak vibration acceleration of cable versus incoming wind speeds

峰值加速度先增大,在 5-6.8 m/s 范围内加速度峰值较大,最大峰值加速度达 24 m/s<sup>2</sup>。对比拉索涡振加速度峰值,可见风速较小时,斜拉索加速度峰值的离散性较小,而当风速大于 4.5 m/s 后,斜拉索加速度峰值的离散性增大,其中的原因可能与现场试验期间,拉索涡振的高风速测量数据少,且高风速上风向的差异有关。但风速进一步增大,峰值加速度又逐渐减小,表现出涡激振动的限幅特征。

### 4 锚箱构造细节应力实测

在开展拉索涡激振动实测的同时,开展了 JB01 拉索钢锚箱构造细节的应力实测。采集系统 DH-

3820 放置于钢箱梁内,因此应力实测对车辆通行无影响。试验采样频率为 100 Hz,从 2016 年 7 月 30 日 10:30 至 8 月 1 日 10:30,连续采样 3 天,包含上述发生拉索大幅涡激振动的时段。现场试验期间,桥面无车道封闭,桥面车辆正常通行,因此将获得拉索涡激振动加载和桥面车辆通行共同作用下,钢锚箱构造细节的应力时程,通过对时程进行时域和频域分析,将获得应力大小和变化特征。下面分别给出钢锚箱不同构造细节的应力实测结果。

#### 4.1 承压板与外腹板焊缝

图 11 是承压板与外腹板焊缝右侧 3 个应变片在 1 h 内的应力时程,含图 9 拉索大加速度振动的时段(后续其他应变片 1 h 应力时程为同次测量,均

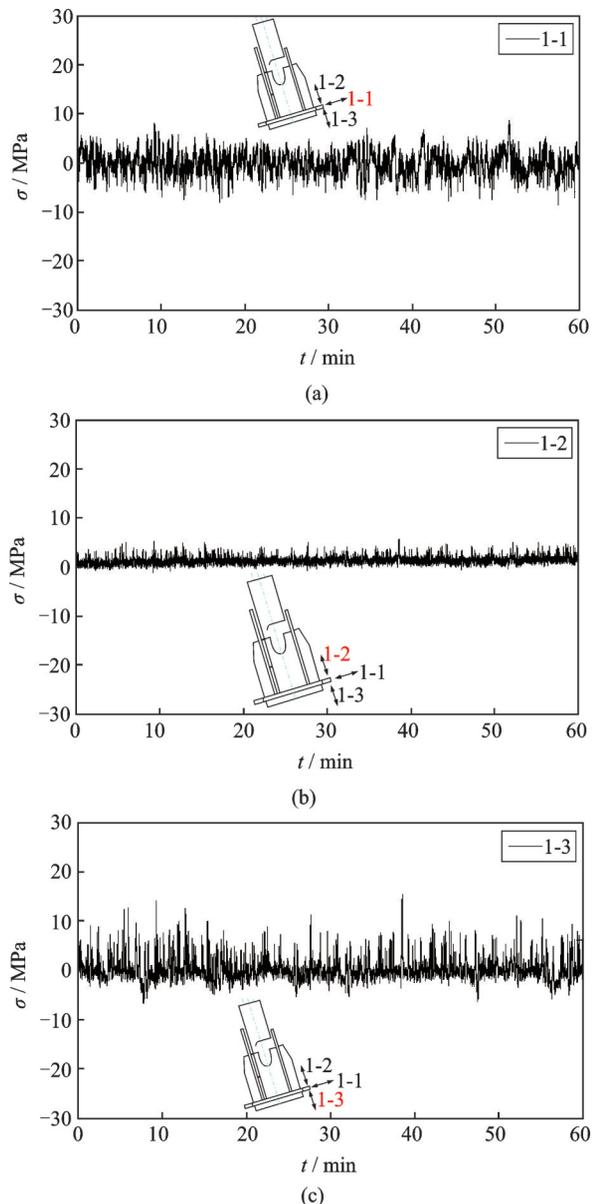


图 11 承压板与外腹板焊缝右端构造细节的应力时程  
Fig. 11 Stress records at detail of right end of welds between bearing plate and outer web

包含图9时段)。应变片1-1,1-2和1-3分别对应承压板焊缝端部和其上、下两侧,如图6所示。可见这3个位置应力均较小,其中1-1为拉压交替应力,1-2和1-3均为拉应力主导,但后者应力水平相对较大。

图12给出了承压板与外腹板焊缝左端应变片2-1和2-3应力时程,因左端上部应变片1-16应力很小,本文没有给出,可见左侧端部2-1应变片响应相对最大,也大于图11中1-1应力响应。因此,在承压板与外腹板焊缝的6个应变片中,焊缝左侧端部2-1的应力响应最大。

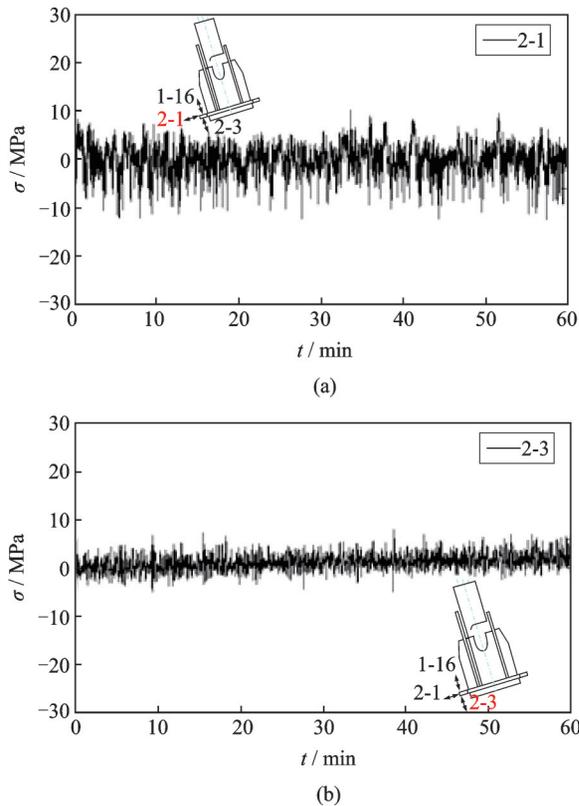


图12 承压板与外腹板焊缝左侧应力时程

Fig. 12 Stress records at left side of welds between bearing plate and outer web plate

图13为承压板与外腹板焊缝左、右端应变片在同一辆货车通行下的典型应力时程,可见2-1峰值应力响应大于1-1,但2-3峰值应力小于1-3。另外,虽然货车有多个车轴,但一辆货车通行下在这4个应变片上均仅产生一个应力峰,因此构造细节的应力响应表现为主要受力构件响应特征,不同于正交异性钢桥面板构造细节在货车通行下的应力响应<sup>[16-17]</sup>,这是由于锚箱焊接在钢箱梁外腹板上,已远离轮载直接作用的行车道桥面板。

#### 4.2 锚箱顶底板与外腹板焊缝

现有研究表明,锚箱最大应力往往发生在锚箱

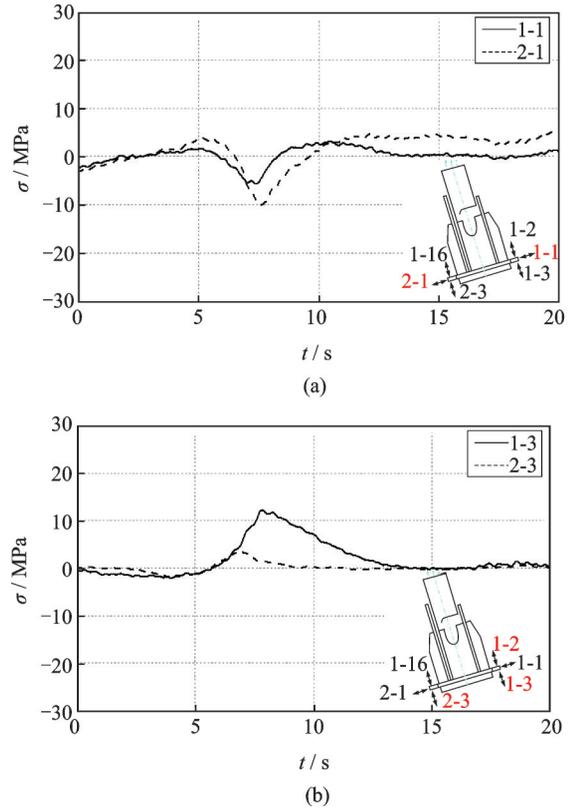


图13 承压板与外腹板焊缝货车通行的典型应力时程

Fig. 13 Typical stress records at welds between bearing plate and outer web plate under passage of one truck

顶底板与外腹板焊缝桥面端。从疲劳构造细节分类看<sup>[14]</sup>,锚箱顶底板属于钢箱梁外腹板上的焊连件,由于这个焊连件长度大,因而将在顶底板与外腹板焊缝末端产生显著的应力集中,通行车辆和拉索涡激振动加载可能会在该构造细节上产生较大的应力响应。图14是该构造细节的应力时程。与图11和12相比,可见在这2个位置上均产生了显著的应力响应,且均表现为压应力主导,而顶板与外腹板1-10应力水平高于底板与外腹板处1-11的应力水平。

图15是锚箱顶底板与外腹板焊缝中部2个应变片的应力时程。可见2个应变片应力同样为压应力主导,且1-9应力水平明显高于1-12应力水平。与图14相比,可见1-12应力水平低于1-11,1-9应力水平低于1-10,也即在锚箱顶底板与外腹板焊缝构造细节上,其中部应力响应小于其上部应力响应。

图16为顶底板与外腹板焊缝构造细节应变片1-10和1-11、1-9和1-12在同一辆货车通行下产生的典型应力时程,可见顶板侧的应力响应均大于底板侧,上端应力大于中部。另外,虽然货车有多个车轴,但货车通行在该构造细节上只产生一个应力幅,因此该构造细节的应力响应同样表现为主要受力构造响应特征。从应力响应曲线的变化来看,实测桥面货车通行速度不低于该高速公路的最低限速60 km/h(该锚箱位于行车方向的下坡段,实际货车时

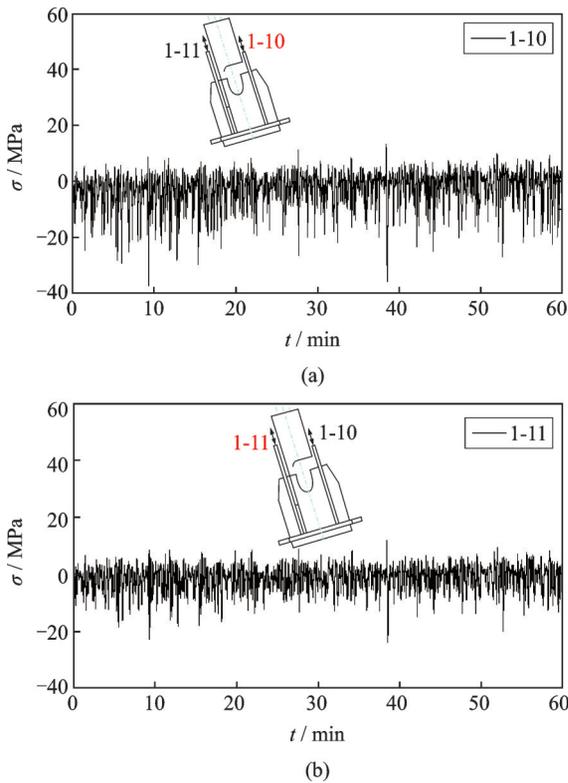


图 14 顶底板与外腹板焊缝桥面侧应力时程

Fig. 14 Stress records at deck side of detail of upper and lower plate to outer web weld

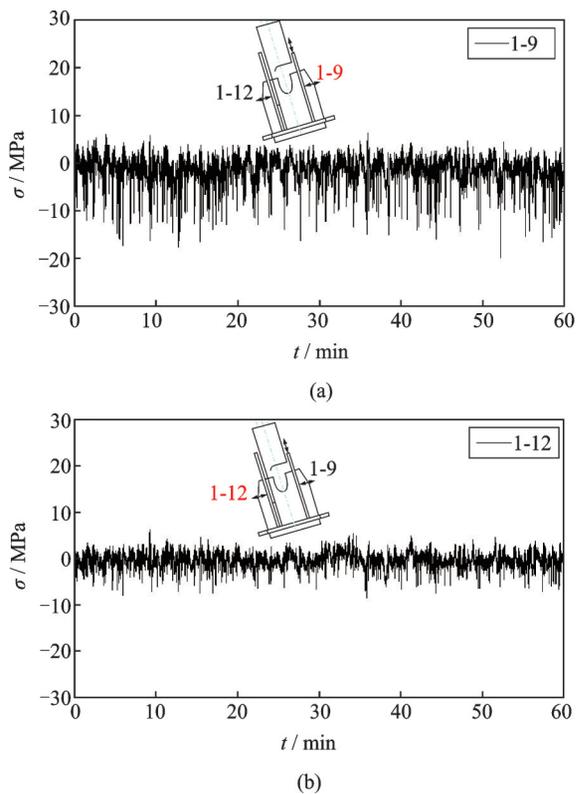


图 15 顶底板与外腹板焊接构造细节中部应力时程

Fig. 15 Stress records at detail at center of upper and lower plate to outer web weld

速较大),该货车通行的有效应力响应时长约 15 s,可得该构造细节应力影响线长度约 250 m。因此该锚箱构造细节的应力影响线长度远大于钢箱梁横隔

板的间距。

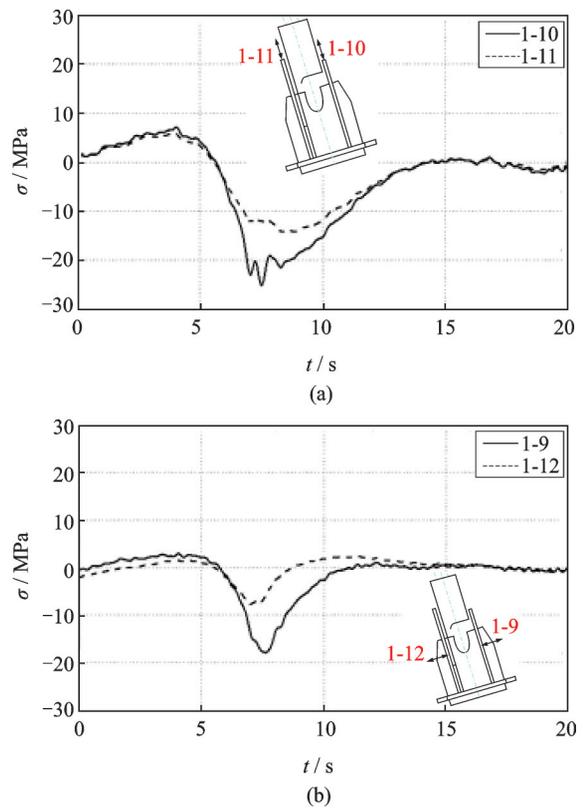


图 16 顶底板与外腹板焊缝构造细节典型应力时程

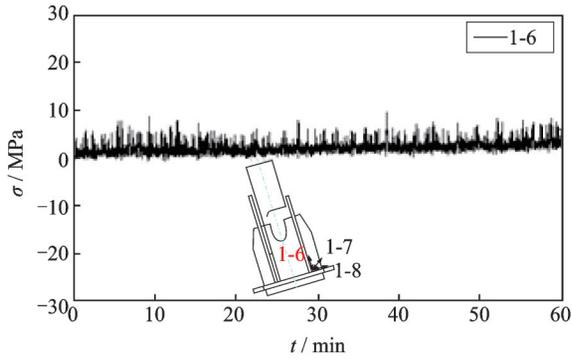
Fig. 16 Typical stress records at detail of upper and lower plate to outer web weld

### 4.3 顶底板-外腹板焊缝与承压板-外腹板焊缝角隅

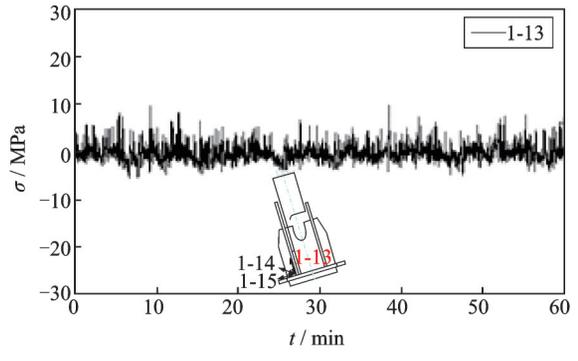
顶底板与外腹板焊缝,承压板与外腹板焊缝,这 2 条焊缝在承压板上方相交形成角隅,该处构造非常复杂。为考察该位置角隅的应力响应情况,在此处布置了应变花,如图 6 所示。其中平行顶底板的应变片离顶底板-外腹板焊缝焊趾 6 mm,并垂直于承压板-外腹板焊缝焊趾;平行承压板的应变片离承压板-外腹板焊缝焊趾 6 mm,并垂直于顶底板-外腹板焊缝焊趾;在上述二者之间沿 45°方向布设第 3 个应变片。

角隅位置应力相对较复杂,如图 17 和 18 所示。左右 2 个应变花应力状态不完全一致,其中与拉索轴线同相的应变片 1-6(右)和 1-13(左)均是拉应力主导的应力响应;与拉索轴线成 45°的应变片 1-7(右)为压应力主导,1-14(左)为拉应力主导;垂直拉索轴线的应变片 1-8(右)和 1-15(左)应力响应均极小。左右 2 个角隅应力响应差别不大,但应力水平均较低。

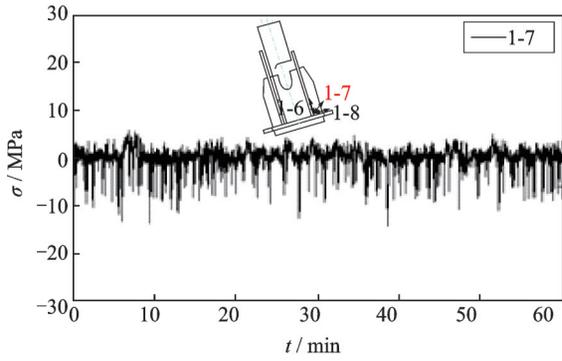
图 19 给出了图 17 和图 18 中应变片在同一辆货车通行下的典型应力时程,可见应变片应力非常接近,最大应力峰值不大于 15 MPa。从应力特征来



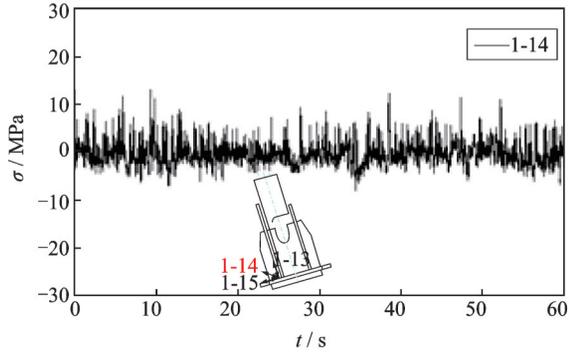
(a)



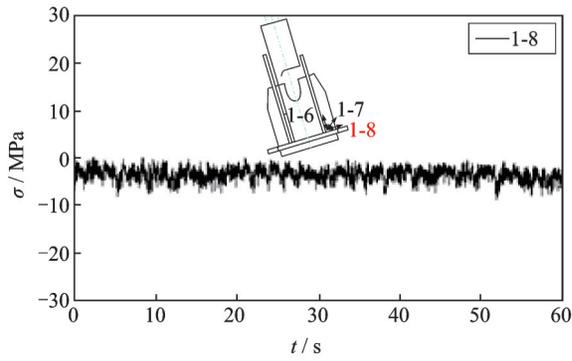
(a)



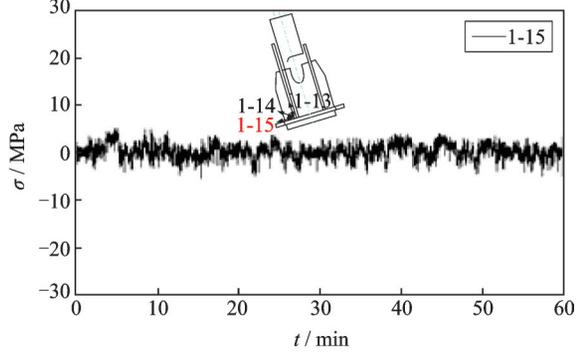
(b)



(b)



(c)



(c)

图17 顶板与承压板右侧角隅处焊缝附近应力时程

Fig. 17 Stress records close to corner of upper plate to bearing plate weld

图18 顶板与承压板左侧角隅处焊缝附近应力时程

Fig. 18 Stress records near welds at corner of upper plate to bearing plate weld

看,1-6和1-13均为拉应力响应;1-8和1-15均为压应力响应;但1-7为压应力响应,1-14为拉应力响应。

图20是根据图19中3个应变片的应力时程,由应变花计算的锚箱顶底板角隅第一、第二主应力、剪应力及第一主应力和剪应力的方向。可见在2个角隅的第一主应力不大于18 MPa,均为受拉;剪应力不大于15 MPa。在峰值应力时刻,右侧角隅第一主应力大致沿45°应变片方向,剪应力大致沿拉索方向(方向角定义以1-8逆时针为正);左侧角隅第一主应力大致沿右侧45°应变片方向,剪应力同样大致沿拉索方向(方向角定义以1-13逆时针为正)。因此,锚箱顶底板与外腹板的焊缝主要传递剪应力。

#### 4.4 拉索涡激振动对锚箱的加载作用

拉索涡激振动将产生振动惯性力,该惯性力的大小与模态质量、频率和振幅有关。因拉索并非完全柔性的弦,其在与锚箱连接的端部具有较大的弯曲刚度。因此如果拉索发生涡激振动,其振动的惯性力将通过拉索端部的弯曲作用加载在钢锚箱上;如果涡激振动的加载显著,锚箱应变片的应力响应时程将显示拉索涡激振动加载的时域和频域特征。

从图13,16和19可见,一辆货车通行下所有应变片均仅显示一个应力循环,这些时程曲线有细微的波动,是测量噪声还是涡激振动激励,需要从构造细节应力时程的频谱分析中判别。图21给出了锚箱应力响应较大的2个应变片,也即承压板两端1-1

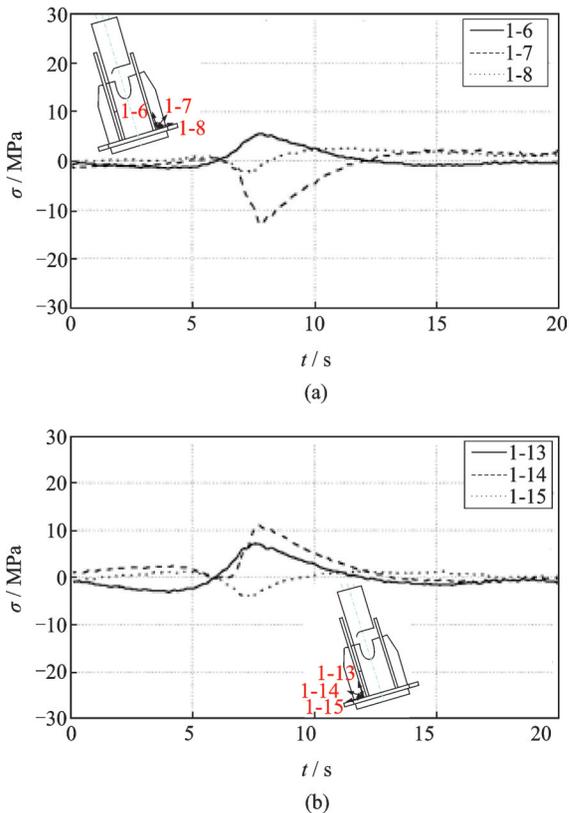


图 19 一辆货车通行下锚箱顶底板角隅典型应力时程  
Fig. 19 Typical stress records near corner of lower and upper plate to bearing plate weld under passage of one truck

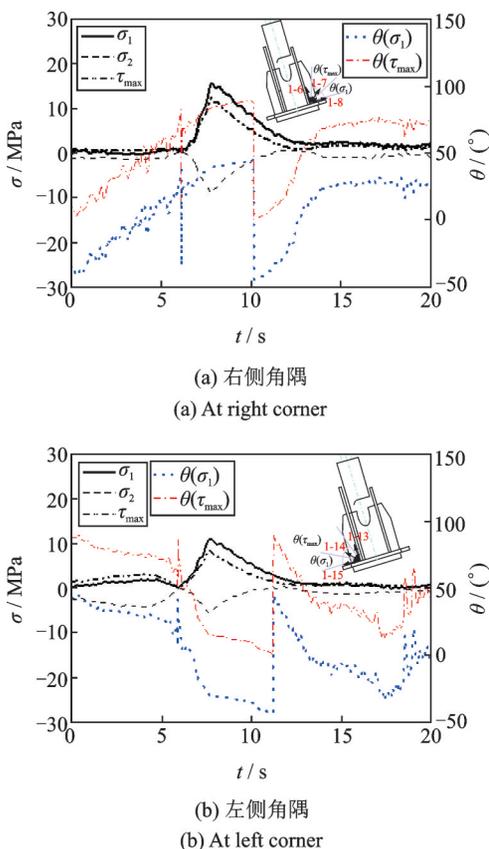


图 20 应变花应力分量及方向时程  
Fig. 20 Time histories of primary stress and direction of strain gauge rosettes

和 2-1 应力时程的频谱分析,可见纵轴即使采用对数坐标,在拉索高阶多模态振动对应的频率范围,未见明显的频谱峰值。上述时域和频域的特征表明,拉索涡激振动并未在锚箱焊缝构造上产生明显的波动应力响应,也即拉索涡激振动产生的应力幅可忽略。

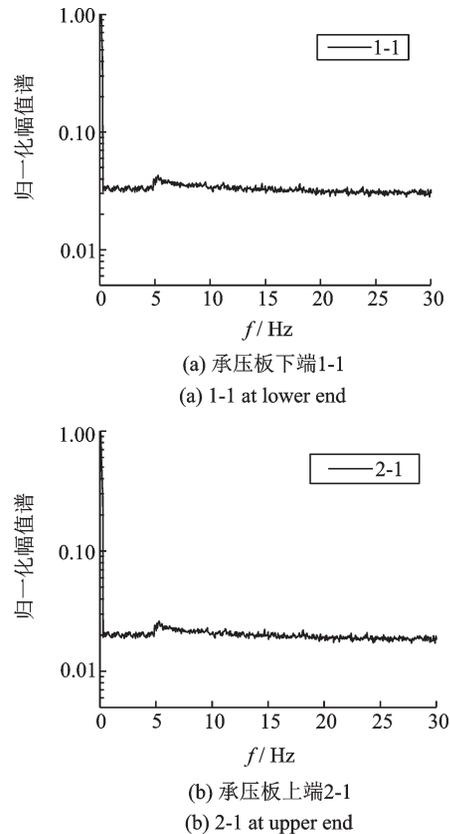


图 21 应力时程的频谱分析

Fig. 21 Spectrum analysis of stress records at bearing plate

#### 4.5 锚箱构造细节最大应力幅和疲劳性能

采用雨流计数法对采集系统获得的应力时程进行分析,可得到从 7 月 30 日至 8 月 1 日 3 天各个应变片的最大应力幅,该应力幅将包含了桥面车辆加载和拉索涡激振动加载的共同贡献。表 1 给出了锚箱上各个构造细节的最大应力幅。可见锚箱顶板与外腹板构造细节上端最大应力幅达 46.6 MPa,是全部实测构造细节的最大值,底板与外腹板焊缝构造细节上端最大应力幅次之,最大值分布与模型试验结果特征基本一致<sup>[3,5,7,9]</sup>。针对本文实测的锚箱,顶板侧的最大应力幅大于底板侧,这可能与顶板长度比底板短有关。对比承压板左右两端,可见其左端最大应力幅大于右端,达 25.9 MPa。上述两个构造细节之外的其他构造细节最大应力幅均小于 20 MPa。

该锚箱顶底板可看作是钢箱梁外腹板上的焊连件,因顶底板厚度均为 30 mm,其沿拉索轴线方向的受力长度远大于 100 mm 或者  $12t$  ( $t$  为外腹板厚度),根据美国 AASHTO LRFD 疲劳条文<sup>[14]</sup>,顶底板与

外腹板焊缝上端构造细节的疲劳等级为 E', 对应的常幅疲劳极限为 17.9 MPa, 因 1-10 和 1-11 的最大应力幅均大于该常幅疲劳极限, 因此顶底板与外腹板焊缝上端构造细节的疲劳寿命将不是无限的。因本次现场实测的时间仅 3 天, 获得的应力幅和加载次数可能无法反映工作日和周末的变化, 因此合理估算顶底板与外腹板焊缝上端构造细节的疲劳寿命存在一定困难。锚箱其他构造细节的疲劳等级为 C, 对应的常幅疲劳极限为 69 MPa<sup>[14]</sup>, 显然, 因这些细节的最大应力幅均显著低于常幅疲劳极限, 因此寿命将是无限的。

表 1 各测点最大应力幅

Tab. 1 Maximum stress range at various locations

应变片 编号	最大应力幅/ MPa	应变片 编号	最大应力幅/ MPa
1-1	19.4	2-1	25.9
1-2	5.8	1-16	13.7
1-3	16.9	2-3	11.8
1-6	8.2	1-13	12.5
1-7	18.4	1-14	16.5
1-8	8.5	1-15	9.4
1-9	28.8	1-12	19.2
1-10	46.6	1-11	33.5

## 5 结 论

1) 斜拉索在无雨和较低风速条件下发生的振动, 峰值加速度表现出随风速增大先增大后减小的限幅特征, 为高阶多模态涡激振动, 参与模态为相邻的两个或多个高阶模态, 面内振动加速度明显大于面外, 观测到的面内最大加速度达 24 m/s<sup>2</sup>。

2) 斜拉索涡激振动发生时, 桥面货车通行下钢锚箱构造细节的应力响应表现为主体构件受力特征, 所有构造细节上均仅产生一个应力峰, 锚箱应力影响线长度大于 250 m; 构造细节应力时程和频谱分析未见与拉索高阶模态对应的频率成分, 也即无需考虑拉索涡激振动对锚箱构造细节应力幅的贡献。

3) 斜拉索涡激振动加载和桥面货车通行共同作用下, 锚箱顶底板与外腹板焊缝构造细节主要传递剪力, 其在上端构造细节的应力响应大于其中部和下部, 也明显大于其他构造细节的应力响应; 顶板与外腹板焊缝构造细节在桥面端应力响应最大; 承压板与外腹板焊缝左侧端部应力响应次之。

4) 钢锚箱构造细节应力幅, 除其顶底板与外腹板焊缝的桥面端构造细节外, 其他构造细节拥有无限疲劳寿命; 前者不满足无限疲劳寿命, 但寿命估算需基于更长时间的应力观测。

未来将在该桥钢锚箱上建立拉索涡激振动和锚

箱构造细节应力的统一远程监测系统, 通过不少于 2 周的构造细节应力连续监测, 基于应力谱和等效应力幅, 根据相关规范开展钢锚箱焊接构造细节的疲劳寿命计算。

## 参考文献:

- [1] Chen W L, Li H, Ou J P, et al. Field monitoring of vortex induced vibration of stay cables of cable-stayed bridge[C]. 9th International Symposium on Cable Dynamics, Shanghai, China, 2011: 257-264.
- [2] Zuo D, Jones J P, Main J A. Field observation of vortex- and rain-wind induced stay-cable vibrations in a three-dimensional environment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6-7): 1124-1133.
- [3] 刘庆宽, 王新敏, 强士中. 南京长江二桥南汉桥索梁锚固足尺模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 50-54.  
Liu Qingkuan, Wang Xinmin, Qiang Shizhong. Full scale model test on anchor zone of the Second Yangtze River Bridge at Nanjing [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 50-54.
- [4] 颜海, 范立础. 大跨度斜拉桥索梁锚固中的非线性接触问题[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 46-49.  
Yan Hai, Fan Lichu. Research on nonlinear contact problem of cable-beam anchor for long-span cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 46-49.
- [5] 万臻, 李乔. 大跨度斜拉桥索梁锚固区三维有限元仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 41-45.  
Wan Zhen, Li Qiao. 3D finite element analysis of cable-girder anchor zone for long-span cable-stayed bridge[J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 41-45.
- [6] 吴冲, 韦杰鼎, 曾明根, 等. 上海长江大桥斜拉桥索梁锚固区静力试验研究[J]. 桥梁建设, 2007, (6): 30-33.  
Wu Chong, Wei Jieding, Zeng Minggen, et al. Experiment study on steel-anchor-box of cable-pylon in Shanghai Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2007, (6): 30-33.
- [7] 李小珍, 蔡婧, 强士中, 等. 南京长江二桥南汉桥索梁锚固结构疲劳试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 223-228.  
Li Xiaozhen, Cai Jing, Qiang Shizhong, et al. Fatigue test study of cable-girder anchor structure of South Bridge of the Second Nanjing Yangtze River Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 223-228.
- [8] 满洪高, 李乔, 唐亮. 钢斜拉桥锚箱式索梁锚固区合理构造形式研究[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(4): 23-27.  
Man Honggao, Li Qiao, Tang Liang. Study on the reasonable pattern of cable-girder anchorage for steel cable-stayed bridge [J]. China Railway Science, 2005, 26(4): 23-27.

- [9] 张清华,李 乔. 超大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9):71-80.  
Zhang Qinghua, Li Qiao. Experimental study on cable-girder anchor structures for super long-span cable-stayed bridges with steel box girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9):71-80.
- [10] 张清华,李 乔. 锚箱式索梁锚固结构受力特性研究 I: 理论模型[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7):120-126.  
Zhang Qinghua, Li Qiao. Mechanical features of cable-girder anchor for cable-stayed bridges with steel box girders I: Theoretical model [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7):120-126.
- [11] Lin Chihhan, Lin Kerchun, Tsai Kehchuan, et al. Full-scale fatigue tests of a cable-to-orthotropic bridge deck connection[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70(3):264-272.
- [12] 蒲黔辉,么超逸,施 洲,等. 新型铁路钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构传力机理及应力分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5):12-18.  
Pu Qianhui, Yao Chaoyi, Shi Zhou, et al. Load transfer mechanism and stress analysis of new type of cable-girder anchor for railway cable-stayed bridge with steel box girder [J]. China Railway Science, 2015, 36(5):12-18.
- [13] 刘振标,罗世东,潘茂盛,等. 主跨 468 m 铁路钢箱混合梁斜拉桥设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1):81-88.  
Liu Zhenbiao, Luo Shidong, Pan Maosheng, et al. Design of a railway steel and concrete hybrid box girder cable-stayed bridge with main span of 468 m [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1):81-88.
- [14] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D C, 2010.
- [15] 任淑琰,顾 明. 斜索-桥面耦合面内参数振动 II: 实例研究及参数分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5):85-89.  
Ren Shuyan, Gu Ming. Parametric vibration of inclined cable-deck system II: Case study and parametric analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5):85-89.
- [16] 祝志文,黄 炎,文鹏翔,等. 随机车流下钢-UHPC 组合铺装正交异性钢桥面板构造细节的应力响应特征和疲劳寿命评估[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):200-209.  
Zhu Zhiwen, Huang Yan, Wen Pengxiang, et al. Investigation on fatigue performance of orthotropic bridge deck with steel-UHPC composite system under random traffic flows [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3):200-209.
- [17] 祝志文,黄 炎,向 泽. 货运繁重公路上某正交异性板钢桥弧形切口疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):104-112.  
Zhu Zhiwen, Huang Yan, Xiang Ze. Fatigue performance of floorbeam cutout detail of orthotropic steel bridge on heavy freight transportation highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3):104-112.

## Field investigation on fatigue of steel anchor box in cable-stayed bridge under in-service condition considering vortex-induced cable vibration

ZHU Zhi-wen<sup>1,2</sup>, LI Jian-peng<sup>2</sup>, CAI Jing-yao<sup>2</sup>, WANG Yi-jing<sup>2</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Under joint action of vortex-induced vibration (VIV) of stay cable and random traffic loading on bridge deck, field observation on VIV of a stay cable and stress measurement at details of an anchor box are carried out to investigate its stress behavior and fatigue performance at all connection details of the steel anchor box in a long-span cable-stayed bridge. The rainflow counting method is employed to obtain the stress range at those details, while the nominal stress approach is used to evaluate fatigue performance of the anchor box. The research found that the multi-mode VIV occurs under weather condition of no rain and low wind speed with wind direction approximately normal to the bridge axis, and the VIV is characterized by participation of two or several sequent high-order modals or two groups of several sequent high-order modals, with the in-plane peak acceleration significantly larger than the out-of-plane one, and the measured maximum acceleration of 24 m/s<sup>2</sup>. Under one truck loading, details on the anchor box present stress behavior similar to main structural components, with only one stress cycle generated and a very long stress influence line at all details. For those measured stress time histories, the VIV of the stay cable does not impose on additional fluctuating stress cycles featured with high-order mode vibration, implying that loading by VIV on the steel anchor box can be ignored. It is recognized that the detail of the upper and lower plate to the outer web weld of anchor box mainly transfers shear stress, while its stress at the deck side is not only higher than that at the weld center and the lower end, but also higher than that at other details, with the maximum stress range of 46.6 MPa at the end of upper plate to the outer web at the deck side. It is concluded that except the detail at the deck side of the upper and lower plate to the outer web weld, other details own infinite fatigue.

**Key words:** stay cable in cable-stayed bridge; vortex-induced vibration; fatigue; steel anchor box; stress measurement

**作者简介:** 祝志文(1968-),男,博士,教授,博士生导师。电话:13574876655;E-mail: zhuzw@hnu.edu.cn