

文章编号:1671-8879(2019)05-0048-11

基于实测车流的钢箱梁横隔板疲劳特性

李传习^{1,2}, 李游^{1,2}, 陈卓异¹, 贺君¹, 刘一鸣¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究车流荷载作用下钢箱梁横隔板弧形切口处母材的疲劳特性,以佛山平胜大桥为背景工程,基于动态称重系统(WIM)监测数据,得到了该桥 9 种车型的疲劳荷载谱,运用 ABAQUS 建立了钢箱梁节段模型,计算了横隔板弧形切口处疲劳应力时程曲线。通过模型试验验证,得到了设计弧形切口的疲劳寿命和裂纹扩展规律。研究表明:该悬索桥疲劳车型可简化为 V2~V10 共 9 类,不同车道的同一车型轴重差异较大,3[#]、4[#] 车道轴重普遍高于 1[#]、2[#]、5[#] 车道,最大轴重为 3[#] 车道的 V10 车型的 Z3 轴,重达 151 kN;重车道(3[#]、4[#] 车道)V2~V10 车型的比例明显高于其他车道;轮轴作用下弧形切口处沿纵桥向的应力影响线较短,约 3 个横隔板间距,动力响应始终为压应力,且仅能识别轴组,不能分辨轴组中的单根轴重,当 V10 车型后轴组通过时,弧形切口的压应力幅达最大,为 -169 MPa;考虑车辆超载时,弧形切口处的最小和最大疲劳应力幅分别为不考虑车辆超载时的 1.17 倍、1.75 倍;模型试件在膜压应力幅作用下弧形切口处母材出现疲劳裂纹,开裂位置与实桥一致,均萌生于横隔板弧形切口处起弧点附近,裂纹长度达 53 mm;裂纹扩展前期速率较快,后期逐渐减慢;轮载横向作用位置对弧形切口处应力幅影响很大,轮载作用于弧形切口正上方时,该位置应力幅最大。

关键词:桥梁工程;车辆荷载谱;模型试验;横隔板弧形切口;疲劳寿命;裂纹扩展

中图分类号:U441

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.006

Fatigue characteristics of steel box girder based on measured vehicle flow

LI Chuan-xi^{1,2}, LI You^{1,2}, CHEN Zhuo-yi¹, HE Jun¹, LIU Yi-ming¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. Key Laboratory of Safety Control for Bridge Engineering of the Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: To study the fatigue properties of the base material at the arc incision of a steel box girder under traffic load, Foshan Pingsheng Bridge was used for the engineering background, and based on the monitoring data of the weigh-in-motion (WIM) system, the fatigue load spectrum of nine vehicle types of the bridge was obtained. A steel box girder segment model was established

收稿日期:2019-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51778069;51708047);国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(2015CB057701,2015CB057702);广东省交通运输厅科技项目(201602010);湖南省研究生科研创新项目(CX20190635);桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金项目(16BCX12)

作者简介:李传习(1963-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:lichuanxi2@163.com。

通讯作者:李游(1991-),男,湖南岳阳人,工学博士研究生,E-mail:liyoub_2@163.com。

using ABAQUS, and the fatigue stress history curve of the arc incision of the transverse diaphragm was calculated. Validated by model tests, the fatigue life and crack propagation law of the design arc incision was obtained. The results show that the fatigue model of the suspension bridge can be simplified to V2 to V10, the axle weights of the same model vary in different lanes, the axle weights of lanes 3[#] and 4[#] are generally higher than lanes 1[#], 2[#], 5[#], and the Z3 axis of the V10 model in lane 3[#] has a maximum axle weight of 151 kN. The proportions of V2 to V10 models in heavy traffic lanes (lanes 3[#] and 4[#]) are significantly higher than in other lanes. The influence lines along the longitudinal bridge at the arc incision under the axles are shorter, about the spacing of the three diaphragms. The dynamic response is always compressive, and only the axis group can be identified. The weight of a single axle in the axis group cannot be distinguished when the rear axle group of the V10 model passes, and the compressive stress amplitude of the arc incision slit reaches a maximum of -169 MPa. When considering the vehicle overload, the minimum and maximum fatigue stress amplitudes at the arc incision are 1.17 and 1.75 times of that without vehicle overload, respectively. Under the action of the film compressive stress amplitude, the fatigue crack occurred in the base material at the arc incision of the model test piece, and the cracking position is consistent with the real bridge, and cracks both appeared near the arcing point of the arc incision of the diaphragm, and the length of the crack was 53 mm. The rate of crack propagation is faster in the early stage and gradually slowing down in the later stage. The lateral position of the wheel load has a significant influence on the stress amplitude at the arc incision. When the wheel load acts directly above the arc incision, the stress amplitude at this position is the largest. 3 tabs, 14 figs, 33 refs.

Key words: bridge engineering; vehicle load spectrum; model test; arc incision of transverse diaphragm; fatigue life; crack propagation

0 引言

日常运营中车辆荷载的反复作用是导致钢桥疲劳的主要因素,疲劳设计应采用典型的、具有代表性的日常运营车辆荷载谱,而不是采用在最不利条件下静力强度设计标准活荷载^[1-2]。公路桥梁交通荷载调查是推导桥梁疲劳荷载谱、交通流仿真模拟、桥梁可靠度评估的重要基础。目前,大部分国家均结合自己的国情开展这方面的研究,英国,美国,日本,欧盟等国家和地区的规范已给出了相应的疲劳设计荷载谱或疲劳车辆模型^[3]。与其他国家相比,中国具有地域辽阔,荷载谱在不同地区存在差异性,且交通流量大,货车通行比例高,超载现象严重等显著特点^[4-6],因此,必须制定符合中国国情的疲劳车辆荷载谱^[5]。

目前,已有不少学者开展了相关研究,文献[3]中首次系统地分析了中国公路钢桥疲劳荷载谱及应力谱,提出了一种用于设计标准疲劳车辆荷载模型。文献[7]研究表明,除轻型车辆,各种车型的车重均呈双峰分布,交通量在各车道上的分布相差悬

殊。文献[8]建立了车辆超载概率模型,提出了计算简支梁疲劳损伤的新方法。文献[9]研究了在超荷载谱作用下,RC桥梁的车辆荷载效应和控制截面应力谱。文献[10]以欧洲5条高速公路的车辆监测数据为基础,得到了相应的桥梁交通荷载特征指标。文献[11]基于美国高速公路上动态称重系统采集的车流数据,研究发现持续增长的超载车辆数加速了公路桥梁的疲劳损伤,增加了桥梁加固维修费用。总而言之,中国对桥梁疲劳设计荷载谱的研究起步较晚,近年来国内外学者在相关领域取得了一些研究成果^[12-16],但关于实际车辆荷载各参数的随机性研究较少。

正交异性钢桥面板疲劳开裂严重,是困扰工程界的世界性难题^[17-21]。在大量交通荷载反复作用下,疲劳裂纹在应力集中问题突出的疲劳易损部位萌生并扩展,其裂纹扩展模式和疲劳性能决定正交异性桥面板的疲劳性能,即该部位为正交异性桥面板疲劳性能的控制部位^[22]。已有文献表明,横隔板弧形切口处母材的疲劳裂纹在常见裂纹类型中占比最大^[23-27]。日本对2条高速公路调查表明,横隔板

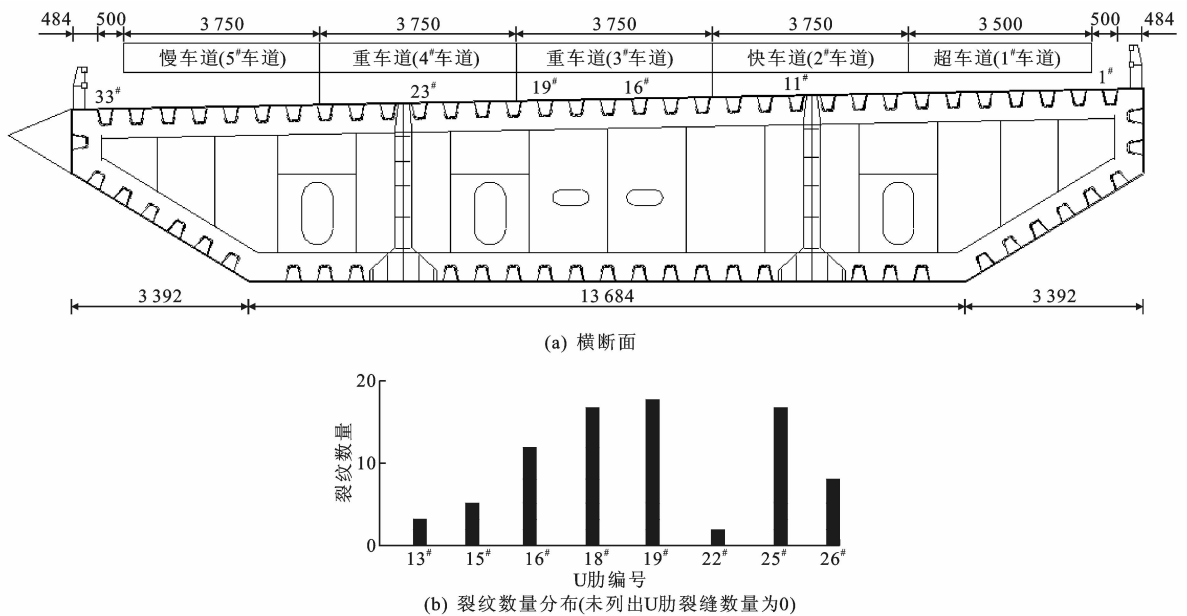
弧形切口处疲劳裂纹占全桥疲劳裂纹总数的比例高达 56.3%。文献[28]基于 AASHTO LRFD 规范的疲劳车模型,进行了有限元分析,对来自不同规范的 3 种弧形切口形状进行了疲劳性能比较,认为弧形切口形状欠佳是导致该细节疲劳开裂的原因之一。文献[29]通过有限元分析,初步推断了弧形切口处的疲劳开裂原因,本文在此基础上进一步考虑了实测车流荷载谱影响,并采取模型试验进行了验证。

本文首先依据动态称重系统采集的数据,对服役 9 年的公路悬索桥的实测车流荷载进行了统计,将该桥车型分为 V2~V10,共 9 类,对各车道过往车辆的轴距、轴重、总重、是否超载等进行了统计,建立了实际的交通流数据库,得到了对应各车道的疲劳荷载谱;然后,运用 ABAQUS 建立了钢箱梁节段模型,基于随机车流疲劳荷载谱计算了横隔板弧形切口疲劳应力时程曲线,并通过模型试验验证,明确

了横隔板弧形切口处疲劳特性,得到了设计弧形切口的疲劳寿命和裂纹扩展规律,以期为钢箱梁横隔板弧形切口抗疲劳设计及维修加固提供依据。

1 工程概况

佛山平胜大桥双幅 10 车道,主跨采用钢箱梁,高 3.5 m,单幅宽 20.468 m(不含风嘴);标准断面的顶板厚 16 mm,边腹板厚 16 mm,实腹式纵隔板厚 16 mm,底板厚 14 mm。顶板纵向 U 肋断面长、宽、高分别为 300、280、10 mm,中心距为 600 mm。横隔板间距为 3 m,非吊点处横隔板厚 10 mm(全桥单幅共 90 道横隔板),吊点处横隔板厚 12 mm(全桥单幅共 27 道横隔板)。U 肋、横隔板、顶板两两相交的焊缝喉高 6 mm。钢箱梁构造及裂纹在横桥向的分布见图 1。横隔板与 U 肋交界处的弧形切口尺寸见图 2。



单位: mm

图 1 钢箱梁标准横断面及左幅桥横隔板弧形切口母材裂纹数量分布

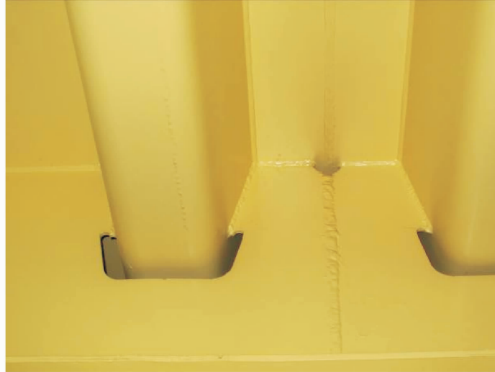
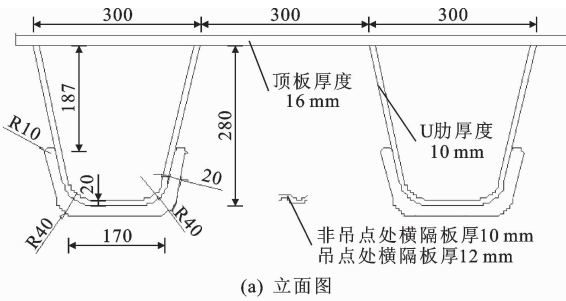
Fig. 1 Standard cross-sections of steel box girder and distributions of cracks in arc incision of diaphragm at left amplitude

该桥经过 9 年的运行,发现了 4 类疲劳病害,见图 3。由图 3 可知:①横隔板弧形切口处母材开裂,左幅箱梁(南行方向)82 处,右幅箱梁(北行方向)39 处,左幅桥该类裂纹数量分布见图 1,其主要集中于重车道,位于车道轮迹线下方;②纵隔板竖向加劲肋与桥面板的水平焊缝处开裂,全桥共 12 处;③U 肋与横隔板连接焊缝处开裂,全桥共计 5 处;④U 肋间桥面板与横隔板焊接处开裂,全桥共计 3 处。后 2 类病害数量少,发展慢,且与焊接质量有关,采取开坡口补焊或打磨重熔法处理即可。弧形切口处母材

疲劳裂纹占全桥裂纹总数的比例高达 77%,本文基于各车道实测车流荷载,重点对该位置的抗疲劳特性进行研究。

2 疲劳荷载谱统计

通过桥梁的车辆多种多样,可用代表车来反映桥梁的运营状况,依据该桥两岸的动态称重系统(WIM)统计数据,该桥各车型轴距参数差异较小,轴重参数差异较大,故本文根据实测车轴距将车辆划分为 10 类。各车型的轴距为该车型所有车辆



单位: mm

图 2 横隔板与 U 肋交界处构造

Fig. 2 Structural of diaphragm and U-rib juncture

车辆参数差异很大,故推导出各车道的疲劳荷载谱,旨在为该桥钢箱梁疲劳病害处治及可靠度评估提供指导。

根据欧洲规范 Eurocode 3,疲劳-应力曲线中应力幅在常幅疲劳极限应力幅与疲劳强度阈值之间时参数 m 取 5,V2 车型绝大部分车辆产生的疲劳应力幅均在常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 与应力极限值 $\Delta\sigma_L$ 之间,故按等效疲劳损伤分析方法进行等效轴重分析时,V2 车型 m 取 5,V3~V10 车型 m 取 3,分别计算出 V2~V10 共 9 种车型车辆模型的轴重参数,其等效轴重为

$$W_{ej} = \left[\sum f_i (W_{ij})^m \right]^{1/m} \quad (2)$$

式中: W_{ej} 为该车型的第 j 轴的等效轴重; W_{ij} 为第 i 辆车的第 j 个轴重。

最终得出该桥各车道的疲劳荷载谱,疲劳裂纹数量较多的左幅各车道的疲劳荷载谱见表 1。由表 1 可知,不同车道的同一车型轴重差异较大,3[#]、4[#] 车道轴重普遍高于 1[#]、2[#]、5[#] 车道轴重,最大轴重为 3[#] 车道的 V10 车型的 Z3 轴,重达 151 kN。

左幅各车道车型比例见图 4。由图 4 可知:各车道车型分布不均匀,除 V2、V3 车型比例较大外,V9 车型比例也较大;重车道(3[#]、4[#] 车道)V2~V10 车型的比例明显高于其他车道。5[#] 车道日总交通量为 10 337 veh,V2~V10 车型数量为 83,仅占总交通量的 0.8%;3[#] 车道日总交通量为 10 142 veh,V2~V10 车型数量为 8 073,占总交通量的 79.6%,2 个车道总交通量相差不大,但车型占有率相差较大。该桥单向货车通行量非常大,其所占比例明显偏高,并呈沿部分车道集中的现象。

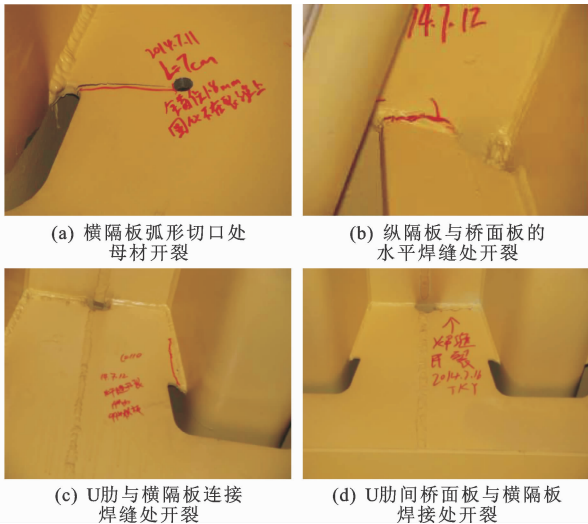


图 3 4 类病害典型照片

Fig. 3 Typical pictures of 4 types of diseases

轴距的加权平均值,其计算为

$$D_{ej} = \sum f_i D_{ij} \quad (1)$$

式中: D_{ej} 为该车型的第 j 个轴距; f_i 为归入同一车型的第 i 辆车出现的相对频率; D_{ij} 为该车型的第 i 辆车的第 j 个轴距。

由于 V1 车型的总重小于 30 kN,对桥梁的疲劳损伤很小,可以忽略,英国桥规 BS 5400 中也采用了这一处理方法,故本文中应用于疲劳分析的车型为 V2~V10,共 9 种车型。因桥幅和车道的不同,疲劳

3 有限元分析

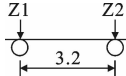
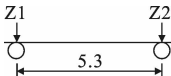
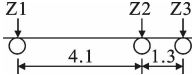
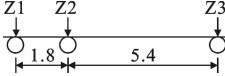
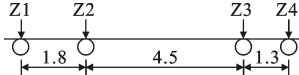
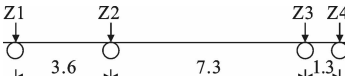
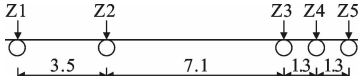
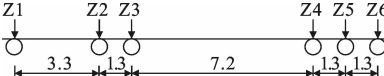
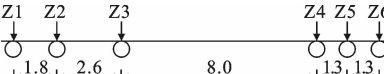
3.1 计算模型

采用通用有限元软件 ABAQUS 建立该悬索桥钢箱梁节段有限元模型,模型总长为 24 m。整个钢箱梁节段均采用 S4R 板壳单元,单元数为 157 251 个,整体网格尺寸为 0.3 m,弧形切口区域重点关注部位网格细化到 0.001 m,计算结果已收敛,网格模型见图 5。

3.2 加载工况与应力响应计算

利用第 3.1 节的疲劳荷载谱进行纵桥向加载计算,车辆中心横向位于各车道中心线,采用单迹线加载。根据疲劳荷载轴重与轴距布置情况,结合有限元分析结果,可知应力时程为 1 辆疲劳车辆荷载(V2~V10)完整通过考察横隔板前后各 4 个横隔板间距,共 24 m 长。以车辆后轴距考察横隔板的距

表 1 左幅各车道的疲劳荷载谱
Tab. 1 Fatigue load spectrum of left lanes

车型	各车型示意	轴编号	不同车道下的轴载质量/kN				
			1# 车道	2# 车道	3# 车道	4# 车道	5# 车道
V2		Z1	62	53	39	44	27
		Z2	64	89	87	101	46
V3		Z1	46	54	64	63	32
		Z2	93	107	129	125	72
V4		Z1	54	66	87	80	34
		Z2	67	95	113	111	45
		Z3	64	90	110	107	44
V5		Z1	47	71	75	69	36
		Z2	47	78	80	79	38
		Z3	116	113	151	144	83
V6		Z1	49	70	82	73	42
		Z2	54	78	89	84	40
		Z3	93	110	141	135	72
		Z4	97	107	143	137	68
V7		Z1	45	57	67	61	33
		Z2	70	96	132	125	36
		Z3	77	98	122	113	41
		Z4	78	93	120	117	45
V8		Z1	50	65	82	77	20
		Z2	93	99	135	127	42
		Z3	72	87	115	106	33
		Z4	73	83	111	107	34
		Z5	75	83	112	113	35
V9		Z1	52	62	83	77	32
		Z2	85	90	129	122	43
		Z3	81	87	124	117	42
		Z4	91	89	134	119	45
		Z5	87	86	129	120	44
		Z6	87	86	130	127	47
V10		Z1	41	50	66	62	28
		Z2	41	49	66	62	27
		Z3	103	108	151	147	41
		Z4	91	94	135	121	34
		Z5	86	91	129	119	31
		Z6	86	90	130	129	33

注:轴距单位为 m。

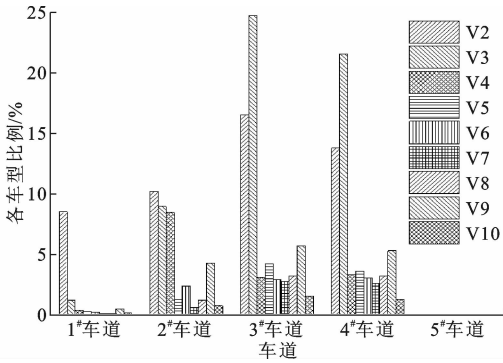


图 4 左幅各车道车型比例

Fig. 4 Ratios of vehicle models in each lane on left

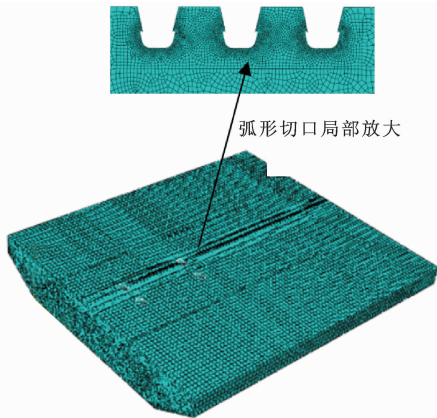
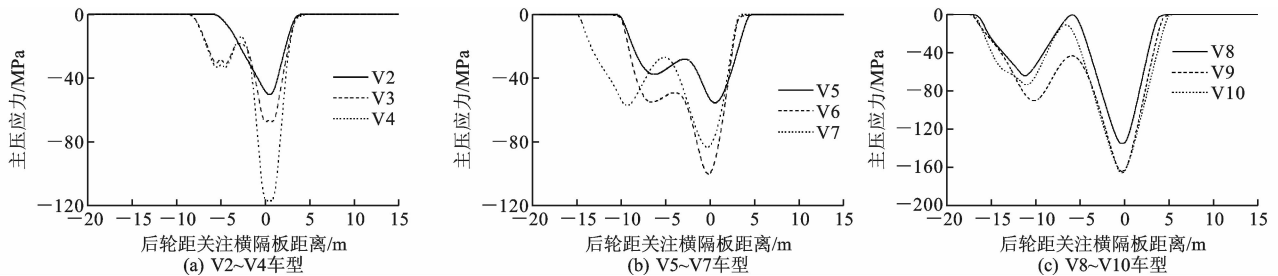


图 5 佛山平胜大桥钢箱梁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of steel box girder for Foshan Pingsheng Bridge

图 6 左幅 3[#] 车道关注横隔板弧形切口处疲劳应力时程曲线Fig. 6 Curve of fatigue stress history at arc incision of diaphragm in left 3[#] lane

4 模型试验

4.1 试件设计

由第 3 节应力时程曲线可知,横隔板弧形切口处母材主要受轮载压应力,这与文献[27]结论一致。为验证横隔板弧形切口处疲劳开裂破坏模式及裂纹扩展规律等,以该悬索桥的设计弧形切口作为研究对象开展了疲劳模型试验。试验模型共计 2 个试件,试件编号为 A-1、A-2。试件的整体尺寸及约束方式等均相同,尺寸为 1 360 mm(长)×300 mm(宽)×606 mm(高),横向设置 2 个 U 形纵向加劲

肋,模型通过底部双支架固定约束。试验模型构造及设计弧形切口尺寸见图 9。模型所用材料(Q345D)、制作工艺、板件厚度及构造参数均与实桥一致。同时为最大程度反映实际情况,本文中焊接工艺及弧形切口优化热切割工艺也均与实桥一致^[31]。

3.3 横隔板弧形切口处疲劳应力时程曲线

为比较疲劳荷载谱中不同车型的标准疲劳车作用对弧形切口细节的疲劳影响。通过对有限元分析模型进行不同标准疲劳车型加载计算,得到各车道相应的应力时程,疲劳裂纹较多的 3[#] 车道下非吊点横隔板弧形切口处应力时程曲线见图 6。可明显看出,V2~V10 车型依次通过桥面板时,轮轴对弧形切口处沿纵桥向的应力影响线较短,约 3 个横隔板间距,动力响应始终为压应力,且仅能识别轴组,而不能分辨轴组中的单根轴重,当 V10 车型后轴组通过时弧形切口的压应力幅达最大值,为-169 MPa。

3.4 横隔板弧形切口处疲劳应力谱

采用雨流计数法对各应力时程进行计数,根据欧洲规范 Eurocode 3,非焊接部位压应力考虑 60% 折减,即疲劳应力幅 $\Delta\delta = \delta_{\max} - 0.6\delta_{\min}$, δ_{\max} 、 δ_{\min} 分别为应力极大值和极小值。考虑超载和不考虑超载时左幅 3[#] 车道关注横隔板弧形切口处应力谱见图 7、图 8。可见,考虑超载时,弧形切口应力幅明显大于不考虑超载时的应力幅,考虑超载时最小和最大疲劳应力幅分别为-30.3、-102.4 MPa,不考虑超载时分别为-25.9、-58.6 MPa。

肋,模型通过底部双支架固定约束。试验模型构造及设计弧形切口尺寸见图 9。模型所用材料(Q345D)、制作工艺、板件厚度及构造参数均与实桥一致。同时为最大程度反映实际情况,本文中焊接工艺及弧形切口优化热切割工艺也均与实桥一致^[31]。

4.2 加载测试

疲劳试验在电液伺服(MTS)疲劳试验机上进行循环加载,模拟单轮加载方式,加载面积为 350(长)mm×300(宽)mm,纵向加载位置对称作用于横隔板正上方,偏差不超过 5 mm,确保弧形切口处

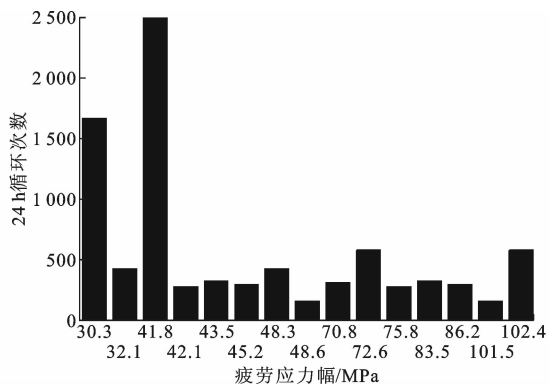


图7 左幅3#车道关注横隔板弧形切口处疲劳应力谱(考虑超载)

Fig. 7 Fatigue stress spectrum at concerned arc incision in left 3# lane (overload)

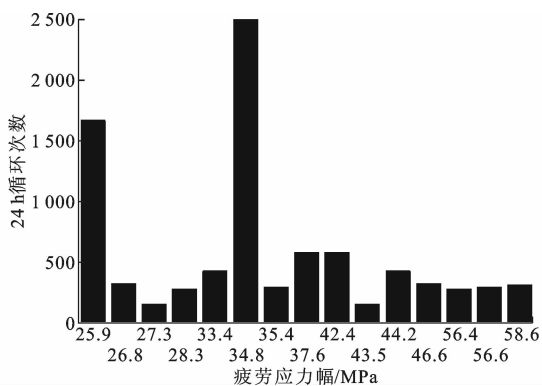


图8 左幅3#车道关注横隔板弧形切口处疲劳应力谱(不考虑超载)

Fig. 8 Fatigue stress spectrum at concerned arc incision in left 3# lane (ignoring overload)

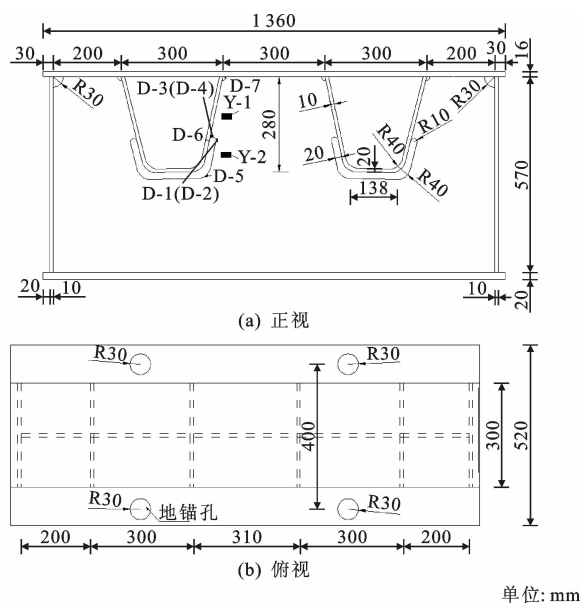


图9 疲劳试件尺寸与测点布置

Fig. 9 Dimensions of fatigue specimens and placement of measuring points

载幅 ΔP 为90 kN,加载最小荷载 P_{min} 为10 kN,最大荷载 P_{max} 为190 kN。整个试验过程中采用等幅疲劳加载,加载频率为4 Hz^[32]。动态数据用动态信号采集系统(DHDAS)采集,在弧形切口母材应力集中处正反面,横隔板与U肋连接处横隔板焊趾位置的正反面,横隔板下弧形切口处,横隔板与U肋连接处的U肋焊趾位置,横隔板与桥面板连接处的桥面板焊趾位置,共计7处布置应变片,编号为D-1~D-7,对关注细节进行实时动态应变监测,以应力幅值出现突变作为该细节出现疲劳裂纹时刻。同时采用PZT压电陶瓷传感器监测加载过程中弧形切口处裂纹扩展情况和损伤程度^[33]。应变片和压电陶瓷片的布置如图9所示。

4.3 试验结果与分析

对模型试件进行了静力加卸载,并将弧形切口处有限元计算的理论与实测值进行对比,试件A-1对比结果见图10。由图10可知:有限元计算时未考虑材料非线性,加卸载过程中,主压应力理论值呈线性;实测值中,加载至200 kN左右,由于材料屈服,卸载后存在部分残余应变。试件模型见图11。

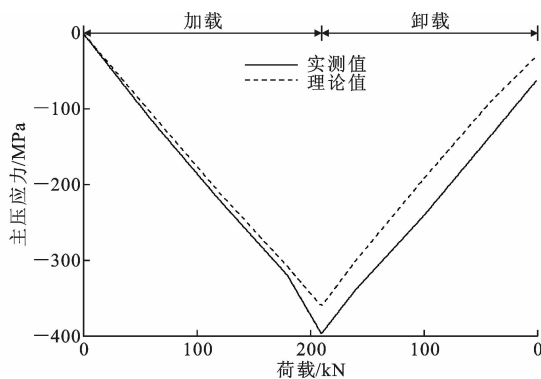


图10 试件A-1弧形切口处主压应力理论值与实测值对比
Fig. 10 Comparisons of theoretical and measured values of principal compressive stress at arc incision of specimen A-1

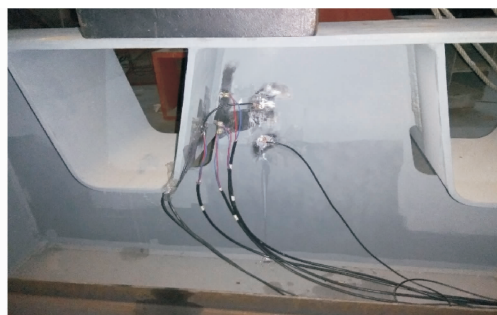


图11 原设计弧形切口试验模型

Fig. 11 Experimental model for original designed arc incision of analysis wheel load lateral loading position on cross beam arc incision

受面内应力为主。结合钢桥面板应力分布的实桥静载试验和有限元计算结果,确定本次疲劳试验的荷

应力幅的影响,针对试件 A-1 确定了 2 个加载工况:工况 1,荷载作用于横向位置 1(相邻两 U 肋间正上方),每隔 20 万次加载通过压电陶瓷采集一次小波包能量值,并通过放大镜观测是否出现裂纹,加载 130 万次未出现疲劳裂纹;工况 2,将荷载移至横向位置 2(弧形切口正上方),加载 30 万次后弧形切口处出现 39 mm 的疲劳裂纹,加载至 200 万次时裂纹扩展到 53 mm,其他构造细节处未出现疲劳裂纹。试件 A-2 直接将荷载作用于横向位置 2,加载 40.5 万次弧形切口处出现疲劳裂纹,加载 200 万次时裂纹扩展至 47 mm。试件疲劳寿命见表 2。

表 2 各试件横隔板弧形切口处疲劳寿命

Tab. 2 Fatigue lives at arc incision of diaphragm in each model

试件	试件 A-1		试件 A-2
	工况 1	工况 2	
疲劳寿命	130 万次加载未开裂	30 万次加载开裂 39 mm	40.5 万次加载开裂

循环荷载作用下,试件开裂前关键测点应力幅见表 3。由表 3 可知,D-1、D-2 测点在循环加载过程中弧形切口处正反面应力幅均为负值,且两面的应力幅大小基本相等,弧形切口处主要为膜压应力,面外变形引起的应力值极小。轮载作用于横向位置 1 时,设计弧形切口处应力幅较轮载作用于横向位置 2 时降低 30.7%,说明轮载横向作用位置对该处应力幅影响较大。

表 3 各试件开裂前各测点应力幅

Tab. 3 Stresses range of each test point before cracking of each model

测点	应力幅/MPa	
	试件 A-1	试件 A-2
D-1	-383	-553
D-2	-385	-556
D-3		179
D-4	81	169
D-5	-196	-297
D-6	51	137

4.4 裂纹形态与扩展规律

在局部轮载反复作用下,3 个试件弧形切口处母材均出现了疲劳裂纹,模型试件裂纹开裂位置与实桥开裂位置一致,均萌生于横隔板弧形切口处起弧点附近区域,观测到最长裂纹为 53 mm。模型试件裂纹形态见图 12。弧形切口表面裂纹萌生期,裂纹方向与主压应力方向成 45°;裂纹扩展期,裂纹方向与主压应力方向垂直。模型试件裂纹主要由轮载压应力幅导致,裂纹长度较实桥小,可推断实桥车辆荷载导致的横隔板面外反复变形会导致裂纹进一步

扩展。



图 12 弧形切口处疲劳裂纹

Fig. 12 Fatigue cracks at arc incision

试件 A-2 弧形切口裂纹扩展与荷载循环次数的关系见图 13。可知,裂纹扩展前期速率较快,后期速率逐渐减慢。图 14 为试件 A-2 弧形切口处部分动应变谱。由图 14 可知:未出现裂纹前应力幅值基本平稳不变;当应力幅值开始下降时即出现了疲劳裂纹,随裂纹的扩张,弧形切口处应力幅逐渐减小,且其应力逐渐释放;裂纹停止扩展时,应力幅值又基本平稳。

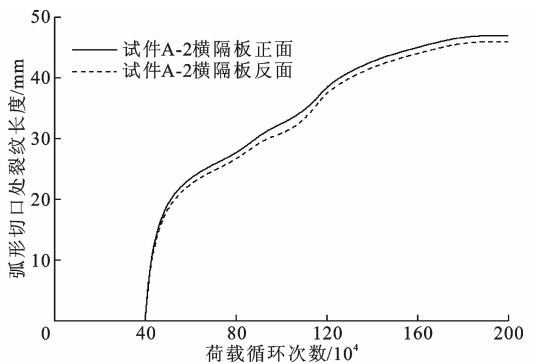


图 13 试件 A-2 弧形切口处裂纹扩展规律

Fig. 13 Propagation law of cracks arc incision of model A-2

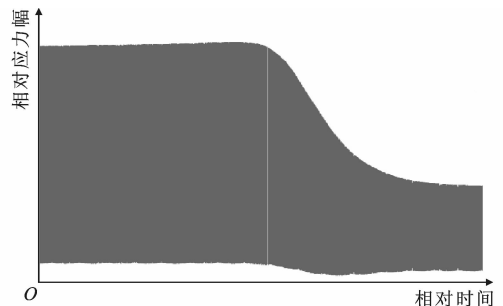


图 14 试件 A-2 弧形切口处部分动应变谱

Fig. 14 Partial dynamic strain spectrum at arc incision of model A-2

5 结 语

(1)该悬索桥疲劳车型为 V2~V10,共 9 类车

型,不同车道的同一车型轴重差异较大,3[#]、4[#]车道轴重普遍高于1[#]、2[#]、5[#]车道,最大轴重为3[#]车道的V10车型的Z3轴,重达151 kN。重车道(3[#]、4[#]车道)V2~V10车型的比例明显高于其他车道,检测结果也表明,横隔板弧形切口处病害主要集中在重车道。

(2)V2~V10车型依次通过左幅3[#]车道时,轮轴对弧形切口处沿纵桥向的应力影响线较短,约3个横隔板间距,动力响应始终为压应力,且仅能识别轴组,不能分辨轴组中的单根轴重,当V10车型后轴组通过时,弧形切口的压应力幅达最大,为-169 MPa。

(3)在膜压应力幅作用下,模型试件弧形切口处母材出现疲劳裂纹,开裂位置与实桥一致,均萌生于横隔板弧形切口处起弧点附近,裂纹长度达53 mm;开裂前期裂纹扩展速率较快,后期则较慢,若同时存在面外变形时会导致裂纹长度进一步扩展。

(4)轮载横向作用位置对弧形切口处应力幅影响很大,轮载作用于弧形切口正上方时应力幅最大。

(5)基于多尺度方法,综合考虑随机车流参数及钢材微观材质影响(材质均匀性、初始缺陷、焊接残余应力、焊接热影响区等),对钢桥疲劳断裂可靠性分析是进一步研究的重点。

参考文献:

References:

[1] LU N W, NOORI M, LIU Y. Fatigue reliability assessment of welded steel bridge decks under stochastic truck loads via machine learning[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(1):04016105.

[2] LIU Y, ZHANG H P, LIU Y M, et al. Fatigue reliability assessment for orthotropic steel deck details under traffic flow and temperature loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71:179-194.

[3] 周永涛, 鲍卫刚, 翟辉, 等. 公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11):79-85.
ZHOU Yong-tao, BAO Wei-gang, ZHAI Hui, et al. Study of standard fatigue design load for steel highway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11):79-85.

[4] 祝志文, 黄炎, 向泽, 等. 货车繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):104-112.

ZHU Zhi-wen, HUANG Yan, XIANG Ze, et al. Fatigue performance of floor beam cutout detail of orthotropic steel bridge on heavy freight transportation highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3):104-112.

[5] HAIDER S W, HARICHANDRAN R S. Relating axle load spectra to truck gross vehicle weights and volumes[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(12):696-705.

[6] LAMAN J A, NOWAK A S. Fatigue-load models for girder bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7):726-733.

[7] 邵雨虹, 吕彭民. 九江长江大桥疲劳车辆荷载谱[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2015, 35(5):50-56, 64.
SHAO Yu-hong, LU Peng-min. Fatigue load spectrum for Jiujiang Yangtze River Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(5):50-56, 64.

[8] 孙守旺, 孙利民. 基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(2):198-204.
SUN Shou-wang, SUN Li-min. Statistic model of vehicle loads for highway bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(2):198-204.

[9] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 考虑车辆超载的公路简支梁疲劳性能[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49(11):2172-2178.
LIU Yang, ZHANG Hai-ping, DENG Yang, et al. Fatigue damage analysis on simple supported bridge under over loading[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(11):2172-2178.

[10] O'BRIEN E J, ENRIGHT B. Using weigh-in-motion data to determine aggressiveness of traffic for bridge loading[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(3):232-239.

[11] FIORILLO G, GHOSN M. Procedure for statistic categorization of overweight vehicles in a WIM database[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(5):04014011.

[12] LIU Y, ZHANG H P, DENG Y, et al. Effect of live load on simply supported bridges under a random traffic flow based on weigh-in-motion data[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(5):

- 722-736.
- [13] LIU M, FRANGOPOL D M, KIM S. Bridge system performance assessment from structural health monitoring: A case study[J]. *Journal of Structural*, 2009, 135(6):733-742.
- [14] 孙晓燕,徐冲,王海龙,等.用于疲劳可靠性分析的公路桥梁荷载效应研究[J].*公路交通科技*, 2011, 28(5):80-85.
- SUN Xiao-yan, XU Chong, WANG Hai-long, et al. Investigation of highway bridge load effect for fatigue reliability analysis[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(5):80-85.
- [15] 祝志文,黄炎,向泽.货车繁重公路的车辆荷载谱和疲劳车辆模型[J].*交通运输工程学报*, 2017, 17(3):13-24.
- ZHU Zhi-wen, HUANG Yan, XIANG Ze. Vehicle loading spectrum and fatigue truck models of heavy cargo highway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(3):13-24.
- [16] 黄平明,袁阳光,赵建峰,等.重载交通下空心板桥梁承载能力安全性[J].*交通运输工程学报*, 2017, 17(3):1-12.
- HUANG Ping-ming, YUAN Yang-guang, ZHAO Jian-feng, et al. Bearing capacity safety of hollow slab bridge under heavy traffic load[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(3):1-12.
- [17] 曾志斌.正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J].*钢结构*, 2011, 26(2):9-15.
- ZENG Zhi-bin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck[J]. *Steel Construction*, 2011, 26(2):9-15.
- [18] 张允士,李法雄,熊锋,等.正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制[J].*公路交通科技*, 2013, 30(8):75-80.
- ZHANG Yun-shi, LI Fa-xiong, XIONG Feng, et al. Cause analysis and control measures of fatigue cracks in orthotropic steel deck[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(8):75-80.
- [19] HENG J L, ZHENG K F, GOU C, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joints in orthotropic steel decks with thickened edge U-ribs[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(9):04017059.
- [20] 王春生,付炳宁,张芹,等.正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J].*中国公路学报*, 2013, 26(2):69-76.
- WANG Chun-sheng, FU Bing-ning, ZHANG Qin, et al. Fatigue test on full-scale orthotropic steel bridge deck[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(2):69-76.
- [21] 张清华,崔闯,卜一之,等.港珠澳大桥正交异性钢桥面板疲劳特性研究[J].*土木工程学报*, 2014, 47(9):110-119.
- ZHANG Qing-hua, CUI Chuang, BU Yi-zhi, et al. Study on fatigue features of orthotropic decks in steel box girder of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(9):110-119.
- [22] 张清华,李俊,郭亚文,等.正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J].*土木工程学报*, 2015, 48(4):72-83.
- ZHANG Qing-hua, LI Jun, GUO Ya-wen, et al. Fatigue failure modes and resistance evaluation of orthotropic steel bridge deck structural system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(4):72-83.
- [23] 唐亮,黄李骥,王秀伟,等.钢桥面板U肋-横隔板连接接头应力分析[J].*公路交通科技*, 2014, 31(5):93-101.
- TANG Liang, HUANG Li-ji, WANG Xiu-wei, et al. Analysis of stress in U-rib-diaphragm joints of steel deck[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(5):93-101.
- [24] 高立强.横梁腹板切口形状对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响研究[J].*铁道标准设计*, 2014, 58(12):67-70.
- GAO Li-qiang. Influence of crossbeam web cutout shape on fatigue performance of steel orthotropic deck[J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(12):67-70.
- [25] 唐亮,黄李骥,刘高.正交异性钢桥面板横梁弧形切口周边应力分析[J].*公路交通科技*, 2011, 28(6):83-90.
- TANG Liang, HUANG Li-ji, LIU Gao. FEA of stress along cope hole edge of crossbeam in orthotropic steel deck[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(6):83-90.
- [26] 李传习,陈卓异,周爱国,等.钢箱梁横隔板疲劳裂纹

- 特征与实桥试验的轮载应力[J]. 土木工程学报, 2017, 50(8): 59-67.
- LI Chuan-xi, CHEN Zhuo-yi, ZHOU Ai-guo, et al. The fatigue crack characteristics and wheel load stresses of steel box girder diaphragms in an existing bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(8): 59-67.
- [27] 陈卓异, 李传习, 柯璐, 等. 某悬索桥钢箱梁疲劳病害及处治方法研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 91-100.
- CHEN Zhuo-yi, LI Chuan-xi, KE Lu, et al. Study on fatigue damages and retrofit methods of steel box girders in a suspension bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 91-100.
- [28] 祝志文, 向泽, 李健朋. 正交异性钢桥面板横隔板弧形切口疲劳性能[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 11-22.
- ZHU Zhi-wen, XIANG Ze, LI Jian-peng. Fatigue performance of floor beam cutout on orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 11-22.
- [29] 李传习, 李游, 陈卓异, 等. 钢箱梁横隔板疲劳开裂原因及补强细节研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 122-131.
- LI Chuan-xi, LI You, CHEN Zhuo-yi, et al. Fatigue cracking reason and detail dimension of reinforcement about transverse diaphragm of steel box girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 122-131.
- [30] XIANG Z, ZHU Z W, HUANG Y, et al. FEM analysis on fatigue cracking mechanism of floor beam cutout in orthotropic steel decks[C]//ASCE. Proceeding of the 4th Orthotropic Bridge Conference. Reston: ASCE, 2015: 125-136.
- [31] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 112-122.
- TANG Liang, HUANG Li-ji, LIU Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 112-122.
- [32] 张清华, 崔闯, 卜一之, 等. 正交异性钢桥面板足尺节段疲劳模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 72-83.
- ZHANG Qing-hua, CUI Chuang, BU Yi-zhi, et al. Experimental study on fatigue features of orthotropic bridge deck through full-scale segment models[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 72-83.
- [33] 唐亚鸣, 丁鑫, 张河. 桥梁监测无线传感压电电源[J]. 传感器技术, 2003, 22(9): 44-46.
- TANG Ya-ming, DING Xin, ZHANG He. Piezoelectric generator of bridge monitoring wireless sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(9): 44-46.