

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.012

活载作用下空间三索面斜吊杆异形拱桥 吊杆可靠度研究

朱利明¹, 申昆^{1*}, 王兴赞²

(1.南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2.南京交通技师学院, 江苏 南京 210049)

摘要:异形拱桥结构复杂,其吊杆的疲劳可靠度研究较少,为了研究活载作用下复杂桥型的吊杆疲劳问题,结合一座157 m下承式空间三索面斜吊杆异形系杆拱桥工程实例,应用基于Weibull(威布尔)分布的疲劳可靠度公式,对吊杆在不同活载工况下的疲劳可靠度进行分析。结果表明:设计活载保证了较高的安全储备,满足规范对容许应力的要求,但部分跨中短吊杆活载应力幅值较大,疲劳可靠指标接近临界值,规范中给定的目标值可适当放宽。施工及运营期间应尤其关注短吊杆受力情况以确保结构安全。

关键词:异形拱桥;吊杆;活载;应力幅;疲劳可靠度

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

0 引言

结构疲劳可靠度是桥梁设计中的重要组成部分,据美国土木工程学会统计,80%~90%的钢结构

破坏与疲劳损伤有关^[1]。目前关于钢桥面板的可靠性分析较多,对吊杆的疲劳损伤、疲劳寿命研究较少;关于悬索桥吊索和斜拉桥斜拉索的可靠性分析较多,对系杆拱桥吊杆的研究较少^[2-4]。由于受力特性和布置形式的差别,拱桥吊杆特别是短吊杆无法

- [5] 邵旭东,罗军,曹君辉,等.钢-UHPC轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J].土木工程学报,2019,52(3):65-79.
- [6] French Standand.Ultra-high performance fibre-reinforced concrete[S].France:AFNOR-French Standard Institute,2016.
- [7] 庞芝炯,周志祥.基于塑性损伤模型的PBL推出试件数值分析方法[J].中外公路,2014,34(5):110-114.
- [8] KMIECIK P, KAMISKI M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11 (3):623-635.
- [9] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [10] 单波.活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D].长沙:湖南大学,2002.
- [11] 丁发兴,倪鸣,龚永智,等.栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J].建筑结构学报,2014,35(9):98-106.
- [12] 曹君辉.钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [13] 汪炳,黄侨,荣学亮.基于ABAQUS的栓钉连接件承载能力分析及验证[J].中外公路,2017,37(2):126-131.
- [14] 秦搏聪.高速铁路斜拉桥钢-混凝土叠合箱梁受力特性及剪力钉抗剪性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [15] 上海市城市建设设计研究总院,同济大学.钢-混凝土组合桥梁设计规范:GB 50917—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

收稿日期:2020-12-16

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅科技指导性项目(编号:2019ZD001118);江苏省重点研发计划(社会发展)项目(编号:BE2019613);2021年江苏省交通运输职业教育研究项目(编号:2021-C22)

作者简介:朱利明,男,教授级高工.E-mail:zhulm@njtech.edu.cn

*通信作者:申昆,男,硕士研究生.E-mail:1803610137@qq.com

照搬大跨径斜拉桥长索的研究成果,故有必要完善这一方面的研究。

对于活载疲劳可靠度的研究,针对已建桥梁,多采用现场监测索力值获得时程曲线,分析其应力变化趋势并进行数据统计分析;或根据动态称重系统(WIM)等实测方式获取交通流数据^[5]后,将车流简化为荷载频率谱,计算各参数的概率密度并应用蒙特卡罗随机模拟方法对有限元计算模型进行加载,分析其结构响应;目前规范中未给出供公路桥梁疲劳设计使用的疲劳车辆荷载谱^[3],因而对于未通车桥梁的研究较少,已有研究多借用其他地区给出的荷载谱进行计算。

异形拱桥造型优美,是近年来国内外景观桥梁常用桥型之一。此类桥梁拱肋空间结构不对称,受力复杂,线形控制难度大,吊杆力控制要求高。该文基于某异形系杆钢拱桥,分析其不同活载工况下的吊杆等效应力幅,应用基于威布尔分布的疲劳可靠度理论分析其疲劳性能,为规范中目标可靠指标及疲劳荷载谱的制定提供参考,对类似结构系杆拱桥的吊杆抗疲劳设计验算提出建议。

1 可靠度计算理论

1.1 基于Weibull分布的疲劳可靠度

吊杆作为系杆拱桥的主要传力构件,容易在风、车、人群等随机反复荷载作用下发生疲劳破坏,研究疲劳可靠度及疲劳寿命需要引入随机变量来表示^[6]。疲劳寿命采用的分布函数主要有两类:正态分布和Weibull(威布尔)分布。

正态分布理论对于中短寿命情况的分析效果较好,而威布尔分布处理循环次数为 1×10^6 次以上的疲劳问题结果较为理想^[7]。故本文基于威布尔分布进行研究。

早在1992年,曾超^[8]就基于威布尔分布给出了疲劳可靠度公式:

$$P(N) = \exp \left\{ - \left[\frac{N}{CS^{-b} \exp[-\ln(\ln 2)/k]} \right]^k \right\} \quad (1)$$

式中: S 为应力幅; N 为设计疲劳寿命,取 2×10^6 次^[6]。

对不同应力下的材料疲劳试验结果拟合得到S-

N曲线以描述其疲劳性能:

$$NS^b = C \quad (2)$$

式中: b 和 C 为与材料、应力比、构造细节及加载方式有关的参数^[9]。

马林^[10]根据23组钢绞线的疲劳试验结果得出 $b=3.5$, $C=1 \times 10^{13.84}$,给出了预应力钢绞线S-N曲线的建议表达式:

$$\lg N = 13.84 - 3.5 \lg S \quad (3)$$

形状因子 $k=V_N^{-1.08}$ ^[11]。 V_N 为结构构造细节的变异系数,文献[12]中测得了27个变异系数,平均值为0.53。

1.2 等效应力幅理论

根据式(1),只要确定拉索的应力幅值 S ,即可得到相应的疲劳可靠度,再根据标准正态函数表得到疲劳可靠指标^[13]:

$$\beta = \Phi^{-1}(P) \quad (4)$$

式中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数的反函数。

对于常幅循环,采用古德曼(Goodman)准则对上述S-N曲线进行修正以较好反映平均拉应力对拉索疲劳寿命的影响,将式(2)修正为:

$$NS_{eq}^b = C \quad (5)$$

$$S_{eq} = K_e S \quad (6)$$

$$K_e = 1 / (1 - S_m / S_b) \quad (7)$$

式中: S_{eq} 为修正后的应力幅; K_e 为换算系数; S_m 为平均应力; S_b 为材料强度极限。

实际情况下,结构承受的应力循环为变幅应力循环,而非试验中的常幅应力循环。根据Miner线性累积疲劳损伤理论,结构的累积损伤与应力循环次数呈线性累积关系,当损伤累积到临界值时即发生破坏^[1]:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (8)$$

式中: D 为累积损伤; n_i 是第 i 级应力水平作用的次数; N_i 为第 i 级应力水平下的疲劳寿命,由S-N曲线确定。

构件中各变幅应力产生的疲劳累积损伤等于某个常幅应力值产生的疲劳累积损伤,这便是等效应力幅^[6],通过下式换算:

$$S_{eq} = \left[\frac{\sum n_i (S_i)^b}{\sum n_i} \right]^{1/b} \quad (9)$$

式中: $\sum n_i$ 为应力谱中的总循环次数。

2 算例

2.1 工程概况

该文研究对象为某一跨简支下承式空间三索面非对称斜吊杆异形系杆钢拱桥(图1),全长157 m,桥宽42 m,采用钻孔灌注桩基础,结构造型优美,但空间效应显著,结构受力复杂。

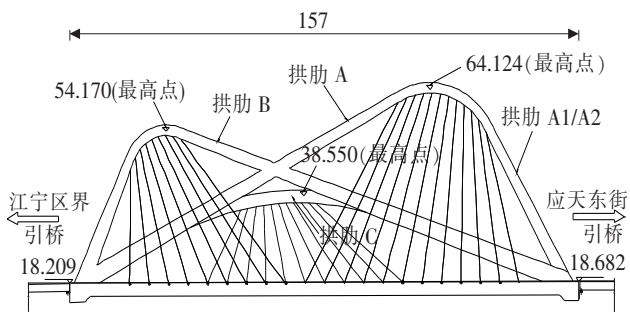
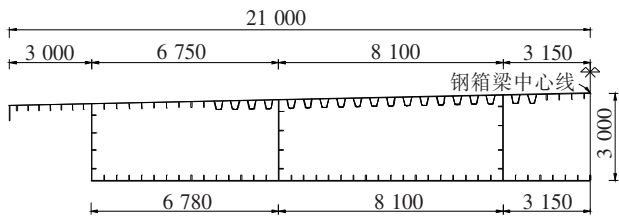
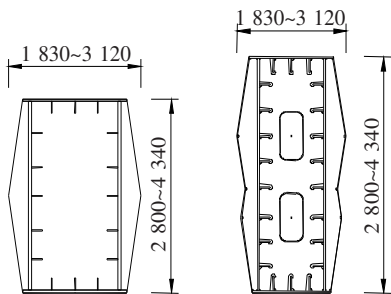


图1 主桥立面图(单位:m)

系杆为正交异性板扁平钢箱梁,梁高3 m,顶底板、腹板厚度为16 mm,横隔板厚为14 mm、18 mm交替布置。拱轴线由直线和圆曲线组成,拱肋采用四边形钢箱,根据不同受力要求采用30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 4种板厚,外侧焊接12 mm厚装饰板形成六边形钢箱拱(图2)。



(a) 钢箱系杆



(b) 钢箱拱

图2 主桥断面图(单位:mm)

主桥共53根吊杆,每根吊杆钢索由55/61根 $\phi 7$ 镀锌高强度低松弛预应力钢丝组成,钢丝强度为

1 670 MPa。与拱肋A1、A2相连的吊杆各12根,拱肋B两侧各9根吊杆,拱肋C有11根吊杆,从小里程向大里程侧依次编号,分别为B1~B9、C1~C11和A1~A12,如图3所示。

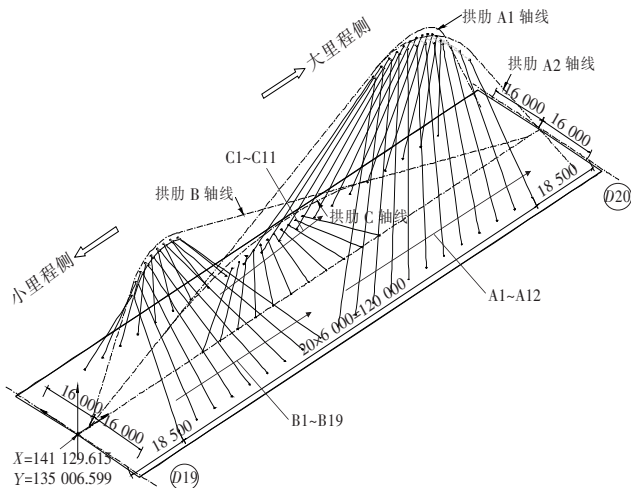


图3 吊杆空间位置图(单位:mm)

2.2 有限元建模

该桥桥面较宽,采用Midas/Civil 2019有限元模拟软件建立全桥空间梁格模型,以较好地分析其空间受力性能。以梁单元模拟6片纵梁及钢箱拱肋,以桁架单元模拟吊杆。全桥共有节点705个,单元985个,有限元模型见图4,主要构件的材料特性和截面参数见表1。

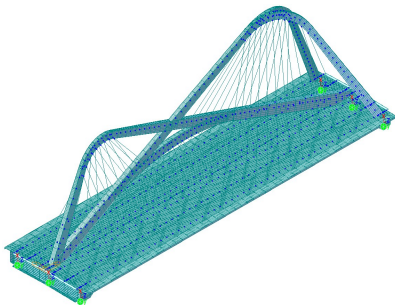


图4 有限元梁格模型

3 吊杆疲劳可靠度分析

3.1 设计活载下的可靠度分析

实例桥梁技术标准及荷载设计值如下:道路等级为城市主干道;双向六车道;设计车速50 km/h;荷载等级为汽车荷载城-A级;非机动车和人行道荷载按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)人群荷载取

表 1 主要构件材料特性及截面几何特性

构件	材料类型	截面积/ m ²	截面惯性 矩/m ⁴	弹性模 量/GPa	重度/ (kN·m ⁻³)
系梁	Q345 钢材	2.281	3.782	206	76.98
拱肋	Q345 钢材	0.387~0.684	0.490~1.336	206	76.98
吊杆	Wire1670 钢绞线	0.011	0	195	78.50

值。设计安全等级为一级,环境类别为Ⅰ类,设计使用年限为桥梁主体结构 100 年、可更换吊杆 20 年。吊杆初拉力使用设计单位给出的成桥吊杆力设计值。

基于以上空间有限元分析模型,计算得到正常使用状态作用效应组合下吊杆最大应力及设计活载下的应力幅,并代入式(1)得到疲劳可靠指标如表 2 所示。

表 2 设计活载下的吊杆疲劳可靠指标

吊杆 编号	最大应 力/MPa	应力幅/ MPa	疲劳可靠度 $P(N)$	疲劳可靠 指标 β	吊杆 编号	最大应 力/MPa	应力幅/ MPa	疲劳可靠度 $P(N)$	疲劳可靠 指标 β
B1	374.68	29.17	0.999 999 995	4.24	C8	310.43	22.79	0.999 999 999	4.61
B2	408.43	29.29	0.999 999 990	4.23	C9	293.72	19.30	1.000 000 000	4.84
B3	424.29	32.09	0.999 999 979	4.09	C10	281.99	16.70	1.000 000 000	5.04
B4	427.39	33.87	0.999 999 966	4.00	C11	272.89	14.56	1.000 000 000	5.22
B5	424.12	34.96	0.999 999 948	3.95	A1	395.12	38.49	0.999 999 898	3.78
B6	415.43	34.89	0.999 999 942	3.95	A2	408.75	40.15	0.999 999 854	3.71
B7	402.79	33.53	0.999 999 953	4.02	A3	413.68	41.32	0.999 999 810	3.66
B8	387.19	31.25	0.999 999 970	4.13	A4	426.52	42.14	0.999 999 771	3.62
B9	369.53	28.62	0.999 999 984	4.27	A5	427.01	43.38	0.999 999 721	3.57
C1	331.91	26.73	0.999 999 997	4.37	A6	436.20	44.18	0.999 999 691	3.54
C2	359.34	38.59	0.999 999 948	3.78	A7	432.21	44.31	0.999 999 695	3.53
C3	457.76	59.18	0.999 998 641	2.96	A8	434.84	43.40	0.999 999 745	3.57
C4	507.53	69.97	0.999 995 201	2.58	A9	425.84	41.02	0.999 999 834	3.67
C5	426.70	54.24	0.999 999 195	3.14	A10	407.35	36.71	0.999 999 926	3.86
C6	348.59	36.78	0.999 999 949	3.86	A11	376.55	30.27	0.999 999 982	4.18
C7	336.94	28.24	0.999 999 993	4.29	A12	366.57	22.02	0.999 999 998	4.66

由表 2 可知:拱肋 A、B 吊杆最大应力分布较为均匀,拱肋 C 吊杆出现峰值且整体波动较大。C4 吊杆应力值最大,但也仅达到抗拉标准强度的 30.4%。参照《公路斜拉桥设计细则》(JTJG D65-01—2017)中对安全系数不小于 2.5 的规定,实例桥吊杆满足容许应力的要求。

现有的《公路桥涵设计通用规范》(JTJG D60—2015)尚无针对斜拉索、吊杆疲劳破坏的可靠性指标规定,已有针对斜拉桥的研究^[6,14]多将其定为 4.0,文献[15]中将安全等级为一级的铁路桥梁目标值取为 3.5,持久状况承载能力极限状态设计有关规定^[16]中

则取为 4.7。考虑系杆拱桥吊杆的重要性,实例桥吊杆的目标可靠值取为 4.7。

拱肋 C 吊杆均为短吊杆,且布置形式特殊,均接近跨中位置,在桥梁承受活载时跨中挠度更大,短吊杆内力增量更大,应力幅值大。尤其是 C4、C3、C5 吊杆的疲劳可靠度较低,无法满足规范要求,有必要对其做进一步计算分析。

3.2 典型加载工况计算

利用吊杆应力时程曲线计算不同活载工况下的应力幅值。获得应力时程曲线一般有两种途径:①按照依次到达的时间将车流荷载施加给有限元计算

模型的各节点,提取应力时程曲线;② 将车流荷载对吊杆的应力影响线进行加载。本文采用方法②,算得端部及跨中 3 根典型吊杆在 100 kN 下的应力影响线见图 5。由于吊杆数量较多,不再绘出其他吊杆的应力影响线。

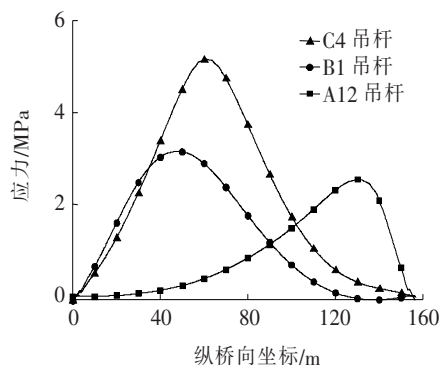


图 5 吊杆应力影响线

选择 3 种工况进行分析计算,得到典型吊杆的应力时程曲线见图 6~9,以反映某一段时间内吊杆应力随时间的变化趋势。

(1) 工况 1:疲劳加载工况。采用《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)疲劳荷载计算模型中给出的双车模型进行计算,每辆车总重 445 kN,两辆

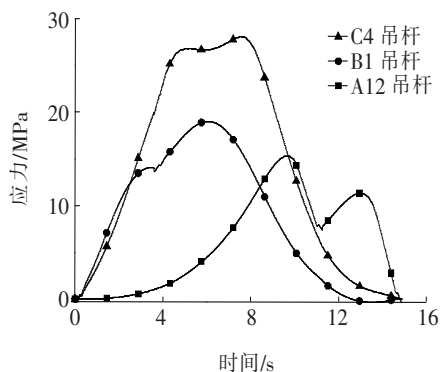


图 6 工况 1 应力时程曲线

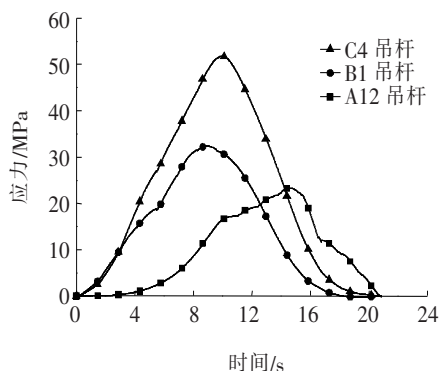


图 7 工况 2 应力时程曲线

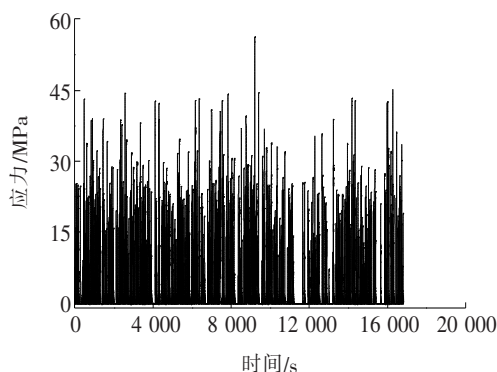


图 8 工况 3 C4 吊杆应力时程曲线

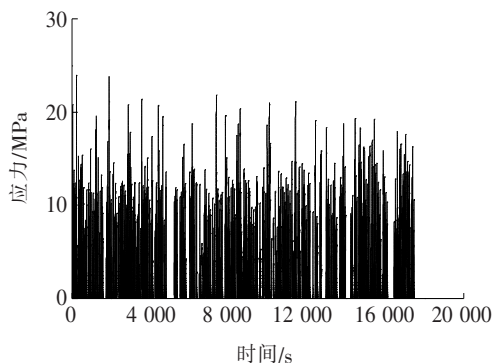


图 9 工况 3 A12 吊杆应力时程曲线

车中心距为 50 m,车速为 50 km/h。

(2) 工况 2:超载工况。考虑目前公路运营中的车辆超载情况,采用《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)中的汽车超-20 级荷载进行计算。汽车超-20 级荷载是一列车队,包含一辆 550 kN 的重车,其余车总重均为 200 kN,车队行驶速度为 50 km/h。

(3) 工况 3:随机车流加载工况。桥梁运营中,通过的车辆是随机的,统计研究结果表明,车型、车重、车间距均为服从一定分布的随机变量^[17]。由于验算时该桥尚未通车,无法对交通情况进行调查统计,且规范中对车辆荷载谱无明确的规定,故根据文献[6]及文献[18]中南京地区车辆荷载谱的统计结果,按总重服从均匀分布,车距服从 $\mu_{\ln x}=4.83, \sigma_{\ln x}=1.12$ 的对数正态分布,车速为 50 km/h 的车队进行加载,随机抽取 1 000 辆车通过时的吊杆应力绘制曲线。

应力-时间关系的具体计算式为:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^N y_{x_i(t)} G_i \quad (10)$$

$$x_i(t) = x_i(t_0) + \int_{t_0}^t v_i(t) dt \quad (11)$$

式中: $x_i(t)$ 为 t 时刻车辆 i 的纵桥向位置; $\sigma(t)$ 为 t 时刻

的应力; $y_{x_i(t)}$ 为 $x_i(t)$ 位置处影响线竖坐标值; G_i 为车辆 i 的总重; N 为车辆总数。

为了直观表示各级应力幅对吊杆的作用次数,对工况3得到的应力时程曲线进行雨流计数统计,得到的应力幅值-循环频次见图10(以跨中及端部2根典型吊杆为例)。

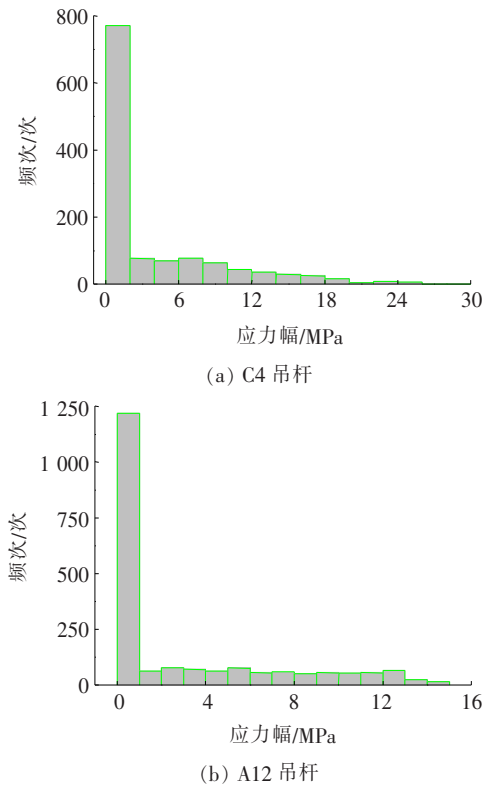


图10 工况3吊杆应力幅频次图

分析图10可知:该例吊杆应力幅值总体不高,主要分布在10 MPa以下,跨中短吊杆C4受到的应力循环次数相对端部长吊杆A12更少,承受的交变疲劳应力幅值较大。

3.3 疲劳可靠度计算分析

使用100%的活载应力幅值计算时,C3、C4、C5吊杆 $\beta < 3.5$,小于上述各项规定中的最小值。党志杰^[19]指出:实测公路活载强度一般仅达设计活载的13%,特殊情况下达37%。因此斜拉索疲劳设计一般不采用活载满值,而是取0.5~0.6倍的活载应力幅值。故本文取0.6倍设计活载进行计算作为对比分析。

根据上述应力时程统计结果,结合式(9)得到不同工况下吊杆的等效力幅列于表3,由于篇幅限制仅列出部分典型吊杆。疲劳可靠指标与活载应力幅

值近似呈反比关系,各吊杆疲劳可靠指标如图11所示。

表3 不同工况下吊杆等效力幅

吊杆 编号	应力幅值/MPa				
	设计活载	60% 设计活载	工况1	工况2	工况3
B1	29.17	17.50	9.50	16.19	10.21
B9	28.62	17.17	10.00	17.43	11.36
C1	26.73	16.04	5.09	8.65	7.69
C4	69.97	41.98	14.02	25.92	11.37
C11	14.56	8.74	2.36	4.13	4.88
A1	38.49	23.10	12.54	23.04	7.41
A12	22.02	13.21	7.65	11.64	8.51

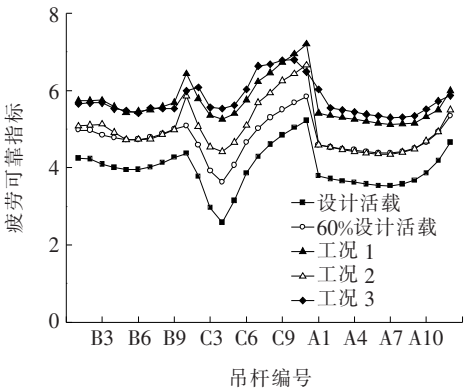


图11 不同活载工况下的疲劳可靠指标

分析可得:

(1) 该例中工况1与工况3的应力幅较为接近;而有文献指出对于大跨度桥梁,其吊杆影响线较长,单一疲劳车下的应力幅较小,无法反映实际情况^[6,20]。因此该加载方式适用于类似该例的中等跨径桥,在未通车无法获取实测数据时可采用该模型进行初步验算,而不适用于大跨径桥梁。

(2) 即使取60%设计活载应力幅计算得到的疲劳可靠指标仍较低,多根吊杆未达到规范^[16]中的目标值4.7。对于拱肋A、B,工况2与60%设计活载下指标较为接近,而拱肋C工况2下的指标介于其余工况与60%设计活载之间,可知为了考虑最不利荷载作用,设计活载下的应力幅较大,能较好地兼顾超载等状况下的吊杆疲劳性能,按此荷载进行设计能保证结构拥有充分的安全储备。

(3) 工况1、3下的吊杆疲劳可靠性较好,而超载工况(工况2)下多根吊杆疲劳可靠度接近临界值,运

营中应关注对短吊杆的受力监测及交通流控制,以避免超载工况的发生。

设计活载满载下最大应力幅值约为 70 MPa,而材料供应方给出的吊杆容许应力幅值为 200 MPa,这表明设计活载的取值保证了较高的安全储备,而材料工艺的发展能够很好地满足结构抗疲劳要求,故规范中给定的目标值可适当放宽。且目前规范对于公路桥梁结构的疲劳可靠指标给出了统一的目标值,未区分桥型及构件,因此在确定时需加以考究或适当调整。

4 结 论

为了研究复杂结构拱桥吊杆在活载作用下的疲劳性能,应用基于威布尔分布的疲劳可靠度公式,对某空间三索面斜吊杆异形系杆钢拱桥在不同活载工况下的吊杆疲劳可靠度进行分析,得到以下结论:

(1) 该桥桥型特殊,虽然满足规范对容许应力的要求,施工及运营期间仍应尤其关注短吊杆的受力情况以确保结构安全;类似桥梁在设计时不仅需要保证容许应力不超限,同时也应进行抗疲劳设计验算以确保结构的可靠性。

(2) 目前规范仅给出疲劳加载车的定义,该加载模型的吊杆应力幅值与多车随机加载下的应力幅值较为接近,可作为类似中等跨径桥梁初步验算的参考,而不适用于大跨径桥梁。

(3) 规范中给定的疲劳可靠指标目标值 4.7 可适当放宽,且对于随机车流荷载谱的规定有待明确。

参考文献:

- [1] 李春祥,李薇薇.斜拉索风致动力疲劳损伤的研究[J].振动与冲击,2009,28(11):61-66.
- [2] 郭立成,冯峥,李传习,等.基于规范理解的正交异性钢桥面横隔板弧形缺口局部区域疲劳验算[J].中外公路,2019,39(4):77-82.
- [3] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.
- [4] 朱忠,徐发生,周燕强,等.带板肋的钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能理论与试验研究[J].中外公路,2018,38(6):97-102.
- [5] 邓扬,颜巍,刘扬,等.基于 WIM 数据的公路桥梁车辆疲劳荷载模型研究[J].中外公路,2018,38(1):164-171.
- [6] 谭冬梅,罗素珍,瞿伟廉,等.斜拉索在随机风-车-覆冰联合作用下的疲劳可靠度分析[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(2):91-99.
- [7] 张运波,孙立伟.车辆超载对矮塔斜拉桥可靠度影响分析[J].铁道工程学报,2012,29(11):49-53,77.
- [8] 曾超.钢桥构件按疲劳寿命服从威布尔分布的可靠度计算[J].西南交通大学学报,1993,28(5):20-23.
- [9] BERGMEISTER K, SANTA U. Global monitoring concepts for bridges[J]. Structural Concrete, 2001, 2(1): 29-39.
- [10] 马林.国产 1860 级低松弛预应力钢绞线疲劳性能研究[J].铁道标准设计,2000,20(5):21-23.
- [11] 刘沐宇,涂开智,孙向东,等.基于疲劳可靠度矮塔斜拉桥拉索容许应力分析[J].武汉理工大学学报,2009,31(14):52-56.
- [12] 常大民,江克斌.桥梁结构可靠性分析与设计[M].北京:中国铁道出版社,1995.
- [13] 陈艾荣,陈华婷,项海帆.大跨桥梁风致抖振疲劳可靠度近似分析及寿命估算[J].土木工程学报,1999,32(3):28-33.
- [14] 杨美良,李波,张建仁.车辆荷载作用下部分斜拉桥拉索疲劳可靠度研究[J].公路交通科技,2007(12):66-68,103.
- [15] 李铁夫.铁路桥梁可靠度设计[M].北京:中国铁道出版社,2006.
- [16] 中交公路规划设计院有限公司.公路工程结构可靠性设计统一标准:JTG 2120—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [17] 李扬海,鲍卫刚,郭修武,等.公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [18] 李文杰.公路桥梁车辆荷载研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [19] 党志杰.斜拉索的疲劳抗力[J].桥梁建设,1999,29(4):18-22.
- [20] 郑万山,唐光武,郑罡.大跨度斜拉桥拉索疲劳参数分析中移动荷载的选定[J].公路交通技术,2010,26(5):52-55.