

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.06.004

# 吊杆拱桥考虑结构缺陷及交通量增加的受力特性

赵 虎,蒲黔辉

(西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

**摘 要:**为研究吊杆拱桥考虑结构缺陷及交通量增加条件下受力特性,以攀枝花保果金沙江大桥为工程背景建立有限元分析模型进行相关计算分析。首先介绍了系杆类桥梁常见损坏模式及其影响因素,然后以保果大桥为研究对象分别对由拱肋线形缺陷、吊杆线形缺陷、吊杆失效以及交通量增加引起的吊杆力变化进行计算分析。结果表明:吊杆力对拱肋竖向缺陷比对横向缺陷更为敏感;吊杆线形缺陷对短吊杆的影响比对长吊杆更为显著,在短吊杆中容易激起较大的次生弯矩及剪力;单吊杆失效将显著改变临近杆件的力学特性,短吊杆区域较长吊杆区域失效蔓延速度更快。交通量增加加速了结构的疲劳破坏。

**关键词:**桥梁工程;吊杆拱桥;受力特性;初始缺陷;线形缺陷;吊杆失效

**中图分类号:**U448.22

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)06-025-08

## Mechanical characteristics of tied-arch bridge under structural defects and traffic increase

ZHAO Hu, PU Qianhui

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To study the mechanical performance of tied-arch bridge under structural defects and traffic increase, a limited element model of Panzhihua Luoguo Jinshajiang Bridge is established and analyzed. Firstly, common damage models and their influence factors are presented. Then, based on established engineering model, changes of suspender force caused by arch rib lineation defect, hanger lineation defect and boom failure are calculated and analyzed respectively. Calculation results show that, suspender forces are more sensitive to arch's vertical defect than to its transverse defect. While, short hangers are more sensitive to lineation defect than long ones, and secondary moment and shear force in short ones are bigger than in long ones. The results also tells that single boom failure can fiercely change neighbor booms' forces, at the same time, boom failure spreads faster in short boom area than in long boom area. Traffic increase accelerates structure's fatigue fracture.

**Key words:** bridge engineering; tied-arch bridge; mechanical characteristics; initial defect; lineation defect; boom failure

迄今为止,中国已建成近百座带吊杆的中、下承式拱桥<sup>[1]</sup>。早期吊杆多采用刚性杆,施工较为复杂,不便于后期维护更换。随着高强度预应力材料的发展,柔性吊杆被越来越多地应用。高强材料的应用,使得人们可以根据需要在比较大的强度包线内灵活调整吊杆力,以达到优化拱桥结构受力的目标。吊杆由于长期处

**收稿日期:**2013-12-06

**基金项目:**铁道部科技研究开发计划—重大课题资助项目(2008G032-10)

**作者简介:**赵虎(1986-),男,西南交通大学博士研究生,主要从事既有桥梁的损伤检测与性能评定方向研究,  
(E-mail)zhaohu19860412@126.com。

于风雨锈蚀及车辆冲击荷载和反复疲劳荷载作用状态下,容易发生吊杆腐蚀型破坏与疲劳型破坏,使其成为吊杆拱桥受力薄弱环节。为了更好地利用吊杆拱桥这一桥型,对如何提高吊杆拱桥的安全性进行了探索。杨晓滨等<sup>[2]</sup>探讨通过增强吊杆锚固区防水防锈性能,并通过在吊杆锚固处设置销铰、球铰等措施避免吊杆反复弯折引起的疲劳破坏。刘汉勇等<sup>[3]</sup>通过疲劳试验从应力层面探讨吊杆锚固端疲劳破坏疲劳裂纹源及开裂规律。姜瑞娟等<sup>[4]</sup>借鉴航空船舶领域已较成熟的破损设计经验,提出吊杆破损设计的思路。刘峰<sup>[5]</sup>通过对吊杆及锚具的可更换设计研究,达到提高吊杆拱桥整体使用寿命的目的。为探讨吊杆拱桥加固前后结构可靠度,张东娇<sup>[6]</sup>建立了钢筋混凝土吊杆拱桥工作状态的判断准则,基于时变可靠度理论及蒙特卡洛法对某经过加固的中承式吊杆拱桥加固前后结构可靠度及工作状态进行了分析和预测。吊杆拱桥吊杆力与结构工作状态密切相关,准确测试吊杆力对此类结构的施工控制及结构整体内力优化显得十分必要。毛亚娜等<sup>[7]</sup>建立了考虑吊杆弯曲刚度影响的吊杆振动方程,基于弦振动理论,得出了基于频率法测试吊杆索力的实用计算公式。为研究拱桥吊杆在风致振动下的动力特征,李龙安<sup>[8]</sup>以某钢桁拱桥的 H 型吊杆为工程背景,对影响吊杆振动特性的因素进行了对比分析。

鉴于吊杆拱桥在我国应用的时间并不长,目前虽已对吊杆拱桥的受力特性及施工方法进行了一些研究<sup>[9-12]</sup>,但专门针对吊杆拱桥考虑核心构件缺陷及交通量显著增加条件下结构受力特性的研究还很少,随着我国吊杆拱桥逐步进入服役后期,各种结构损伤逐渐暴露,进入了结构安全问题高发期。所以,有必要掌握结构存在缺陷及交通量增加条件下受力的变化,为桥梁运管部门日常维护及运营提供参考和依据。

## 1 典型案例分析及影响因素探讨

吊杆拱桥的损坏主要集中在吊杆、桥面、锚固构件以及桥面下支承横梁等位置。结合国内外近年来发生的吊杆拱桥破坏案例可以发现,虽然破坏形式多种多样,但本质基本一致。吊杆的使用寿命大多比整体结构短<sup>[13]</sup>,国内外由于吊杆或吊缆失效导致的桥梁安全事故很多,其中较为典型的案例包括 1967 年美国俄亥俄州的 Silver Bridge 在交通高峰时段垮塌,造成重大人员伤亡<sup>[14]</sup>;主要是因为桥梁在 39 年持续加重的交通荷载下,俄亥俄端一处吊杆突发应力断折,即常说的疲劳断裂,导致结构整体垮塌。委内瑞拉 Maracaibo 桥由于类似的原因,在使用 16 年后,斜缆失效,不得不耗资 5 000 余万美元进行换索<sup>[15]</sup>。国内广州海印大桥建成几年后,由于经济快速发展,桥梁长期超负荷运营导致斜拉索疲劳断裂不得不提前换索。宜宾南门大桥在运营 11 年后,由于交通量比设计预期增加了几十倍,同时吊杆严重腐蚀,导致大桥两端共计 4 对 8 根短吊杆骤断,致使桥面板大面积坍塌。与宜宾南门桥极其相似的是,不久前的 2012 年 12 月,四川攀枝花倮果金沙江大桥也因建成时间较长,长期超负荷运营及腐蚀等原因导致中央吊杆下端传力锚具失效,致使桥面下刚性承重横梁落江,桥面塌陷,幸无人员伤亡。宜宾南门大桥与攀枝花倮果金沙江大桥结构形式完全相同,只是宜宾桥跨度更大一些,此类桥在我国具有一定代表性,目前大多进入服役后期,结构在缺陷及带伤状态下的受力性能应引起重视。

众多案例显示,此类桥型多出现吊杆的损坏,主要表现为钢束锈蚀、吊杆防护层破损、吊杆与锚头连接处破损、锚头锈蚀以及短吊杆破坏等。引起防护层破损主要以材料老化开裂、物理刮磨磨损以及钢材与塑料材料热胀冷缩性不一导致伸缩拉裂等为主。防护层破损将钢束暴露于大气中,引起锈蚀断束。另外,钢束在活载长期反复作用下,即使强度低于极限强度甚至低于钢材的屈服强度,也会发生疲劳破坏。锚具的破损也不容忽视,主要是疲劳及材料锈蚀为主。此外,短吊杆破坏也是吊杆拱桥失效的主要表现形式。

## 2 核心构件缺陷及损坏分析

为分析吊杆拱桥核心构件破损引起的结构受力变化,以攀枝花倮果金沙江大桥主孔部分为工程背景,该桥为中承式箱型肋拱桥,拱跨 160 m,矢跨比 1/4,拱轴系数 1.543,设计荷载为汽车超-20,人群荷载 3.5 kN/m<sup>2</sup>。结构纵向设置 13 对吊杆,吊杆间距均为 8 m。吊杆下设置刚性横梁以兜吊桥面。拱肋在桥面以上设 2 道横撑,桥面以下拱脚附近设置 2 道 X 型撑。拱肋截面为矩形箱,吊杆采用 2215-GB5224-85 钢绞线,拱上立柱为双柱式排架。通过空间有限元分析软件,建立如图 1 所示有限元分析模型。其中采用梁单元对拱肋、桥面板以及拱上立柱进行模拟,用轴向受力的桁架单元对吊杆进行模拟。吊杆与拱肋及桥面间的锚固效应通过刚性连接进行模拟,拱脚全约束以模拟无铰拱受力特性。全桥共建立 225 个节点,208 个单元,其

中包括梁单元 182 个,桁架单元 26 个。恒载作用下吊杆力如图 2 所示。该桥现处于垮塌抢修状态,结构真实状态无法获得,但实践表明,通过有限元方法分析吊杆拱桥吊杆力及其在荷载作用下的增量变化是可行的。为便于叙述,以图 1(b)中左侧起对吊杆依次进行编号:T1,T2,⋯,T13。由于材料老化、锈蚀属材料工艺问题,在此不作讨论。该结构属于密杆体系,主拱受力较均匀,假定主拱处于弹性工作状态,吊杆采用高强度材料,设计安全系数较高,两者不考虑材料非线性,同时不考虑几何非线性的影响。以下对拱肋线形、吊杆线形以及吊杆进行损坏分析。

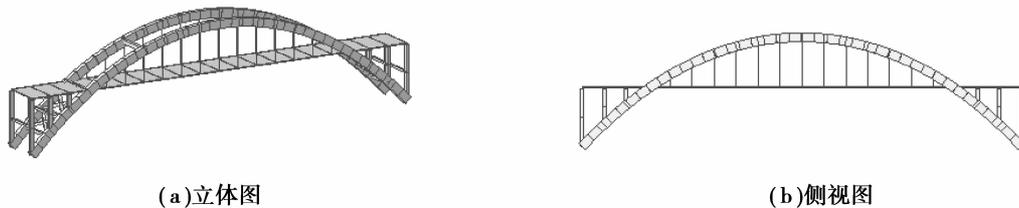


图 1 有限元分析模型

### 2.1 拱肋线形缺陷分析

拱肋在生产预制或者施工吊装过程中容易产生初始缺陷,初始缺陷一般包括初偏心、初始应力等。而初始缺陷可能会导致拱肋线形偏离设计线形,即所谓拱肋线形缺陷。为定量分析拱肋线形缺陷对吊杆力的影响,分别对模型中长吊杆区域及短吊杆区域拱肋进行竖向(Z向)及横桥向(Y向)偏位缺陷分析,偏位量值均设定为 3 cm。拱肋偏位在模型中通过施加强制位移加以模拟。拱肋缺陷下吊杆力变化如表 1 所示。

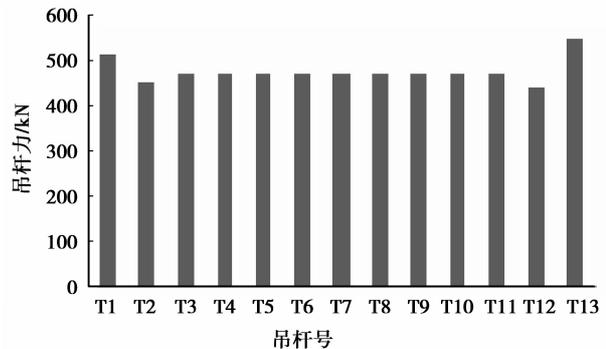


图 2 恒载作用下吊杆杆力

表 1 拱肋偏位引起吊杆力的变化

杆号	无缺陷杆力	kN			
		长杆区拱肋缺陷		短杆区拱肋缺陷	
		Z向缺陷杆力	Y向缺陷杆力	Z向缺陷杆力	Y向缺陷杆力
T1	511.23	511.23	511.22	511.93	511.24
T2	451.12	451.12	451.11	450.72	451.11
T3	469.83	469.83	469.83	469.89	469.83
T4	468.17	468.18	468.17	468.17	468.17
T5	468.13	468.13	468.13	468.13	468.12
T6	468.14	467.87	468.14	468.14	468.13
T7	468.02	468.54	468.02	468.02	468.02
T8	468.14	467.87	468.15	468.14	468.14
T9	468.10	468.09	468.10	468.10	468.09
T10	468.13	468.14	468.13	468.13	468.13
T11	471.54	471.54	471.53	471.53	471.54
T12	438.96	438.91	438.96	439.02	438.96
T13	546.08	546.22	546.08	545.91	546.09

计算结果表明,无论是在长吊杆区域还是短吊杆区域,吊杆力对拱肋 Z 向缺陷较 Y 向缺陷更为敏感。在本桥算列中,3 cm 的偏位对 160 m 的跨径而言已足够微小,所以 Y 向缺陷仅产生难以观测的微量影响,而 Z 向缺陷导致吊杆力变化幅值也不足 1%,仅为 1.1%。但若引入缺陷跨度比概念,即结构缺陷与拱跨的比值,可以从相对大小的角度发现,缺陷跨度比仅为万分之一,却能在算列中引起 10 倍于此比值的吊杆力变化。可以预见,当缺陷量值增大时,吊杆力的变化将更加明显。通过对比长、短吊杆力变化可以发现,拱肋缺陷导致的吊杆力变化与吊杆的长短呈现一定的负相关,表中计算数据显示,相同量值的拱肋 Z 向缺陷,导致长吊杆区吊杆力最大变化幅值为 0.11%,而短吊杆区则达到 0.14%,短吊杆反应显得更为敏感,这主要是由于相同量值的缺陷在短吊杆中将引起更大的相对变形造成的。拱肋缺陷能直接导致缺陷处附近相邻几根吊杆的吊杆力变化,但计算结果表明这种影响并不能传递很远。这种关系可以通过影响曲线图直观地加以表示。

图 3 反映了长杆区拱肋缺陷及短杆区拱肋缺陷对吊杆力的影响变化关系曲线。图中峰值处即为拱肋缺陷所在,峰值两旁存在 2 个反向极值,离峰值越远,影响幅值也越小。

## 2.2 吊杆线形缺陷分析

由于该桥属漂浮体系,桥面梁体可能会因为环境温度、收缩徐变等因素发生纵向变形,而梁体纵向变形则会导致吊杆在上下两端存在相对位移,产生吊杆线形方面的缺陷,引起吊杆力变化。为定量分析吊杆线形缺陷对吊杆力的影响,对模型中长、短吊杆上下端相对位移进行缺陷分析,考虑到桥的结构漂浮特性,相对位移值设定为跨径的千分之一即 16 cm,通过施加节点强制位移进行模拟。吊杆力变化如表 2 所示。

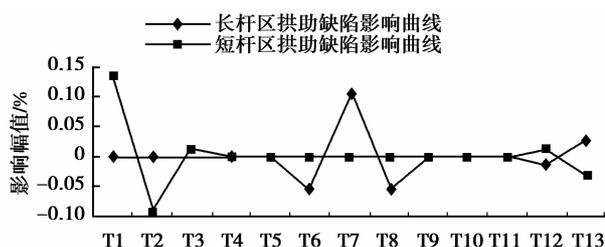


图 3 拱肋缺陷影响曲线图

表 2 吊杆线形缺陷引起吊杆力的变化

杆号	基准杆力	长杆力	短杆力
T1	511.23	511.18	512.63
T2	451.12	451.13	443.24
T3	469.83	469.86	471.20
T4	468.17	468.03	468.11
T5	468.13	467.74	468.10
T6	468.14	473.64	468.14
T7	468.02	468.70	468.02
T8	468.14	461.81	468.14
T9	468.10	468.63	468.10
T10	468.13	468.29	468.13
T11	471.54	471.50	471.53
T12	438.96	439.01	439.06
T13	546.08	545.95	545.81

分析计算结果,同样的相对位移量对长吊杆及短吊杆的影响幅值是不一样的。在千分之一的缺陷跨度比条件下,算例中对长吊杆的影响幅值为 1.18%,而对短吊杆的影响幅值达到 1.75%。这种关系可以通过影响曲线图直观表明(如图 4 所示)。

可以看到,吊杆线形缺陷对短吊杆的影响强于长吊杆,除此之外,吊杆上下端相对位移还会造成杆身次

生弯矩的激增。如图 5 所示,当桥面受到某水平力  $F$  作用发生纵向位移时,假定不考虑拱肋变形及桥面变形,吊杆上下端也将产生等量的相对位移。由结构力学相关知识,此时吊杆的受力类似于两端固结的杆,由位移法形常数可知,杆端将产生量值为  $\frac{6EI\Delta}{L^2}$  的次生弯矩,其中  $EI$  为吊杆的抗弯刚度,柔性吊杆中为钢丝束外包覆层的抗弯刚度, $L$  为吊杆长度。可以看到,当吊杆外包覆层刚度相等时,次生弯矩与吊杆长度的平方成反比,从力学的角度决定了短吊杆次生弯矩明显大于长吊杆。进一步计算表明,在吊杆线形缺陷量值相等条件下,模型中短吊杆次生弯矩达到  $37.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,而长吊杆次生弯矩仅为  $1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ;同时,短吊杆中次生剪力达到  $17.2 \text{ kN}$ ,而长吊杆仅为  $0.46 \text{ kN}$ ,次生弯矩及剪力互比关系与该算例中长吊杆长度 5 倍于与短吊杆长度的结构参数吻合。结合工程实际和计算分析可以看到,短吊杆的破坏本质在于,实际结构中虽大都采用柔性吊杆,但吊杆防护层多灌注有砂浆且吊杆外表面多采用外包不锈钢刚性套筒等防护措施,次生弯矩与剪力会加速吊杆刚性外保护层上的破坏,进而使吊杆钢束暴露于大气环境中发生锈蚀破坏。次生弯矩对长、短吊杆这种不对称影响使得工程实践中短吊杆的破坏几率大于长吊杆,宜宾南门大桥的破坏就属于短吊杆破坏的典型案列。

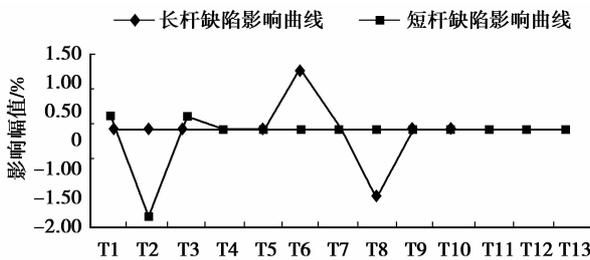


图 4 吊杆线形缺陷影响曲线图

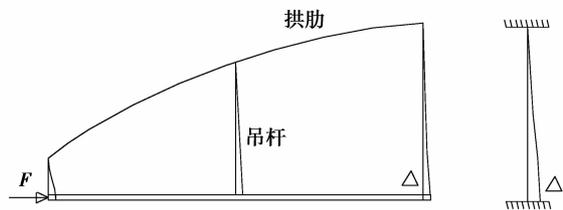


图 5 吊杆次生弯矩成因

### 2.3 吊杆失效分析

实际中吊杆的设置往往较多,有一定力学冗余,能有效将桥面荷载均匀地分配到拱肋,同时削减桥面弯矩极值。运营中往往会碰到个别吊杆失效的情形。为区分单根长、短吊杆失效对结构受力的影响,对算例进行吊杆失效分析。模型中以吊杆刚度降低到原有刚度的 5%对失效状态进行模拟。吊杆力计算结果如表 3 所列。

表 3 单根吊杆失效引起吊杆力的变化 kN

杆号	基准杆力	长杆力	短杆力
T1	511.23	511.21	3.74
T2	451.12	450.86	799.42
T3	469.83	472.23	360.51
T4	468.17	465.69	476.93
T5	468.13	399.72	469.48
T6	468.14	732.22	467.80
T7	468.02	77.37	468.01
T8	468.14	732.22	468.15
T9	468.10	399.68	468.09
T10	468.13	465.65	468.13
T11	471.54	473.95	471.60
T12	438.96	438.65	438.55
T13	546.08	546.21	547.25

计算结果显示,模型中无论长吊杆抑或短吊杆失效,对临近杆件受力将产生显著的影响。长吊杆失效导致临近杆杆力最大变化幅值达 56%,而短吊杆失效导致临近杆杆力最大变化幅值则高达 77%。这样大的变化幅值足以加速甚至直接导致临近杆的失效,使失效杆件数量增加,失效区域蔓延。需要指出的是,长吊杆在逐步失效过程中,通过内力重分布可以将荷载分摊给临近两侧的吊杆;而短吊杆由于处边缘位置只能向一侧吊杆分摊桥面荷载。这导致长、短吊杆逐步失效过程中对临近吊杆影响幅值不同,短吊杆幅值更明显,而长吊杆的失效更不易被发现,更具隐蔽性。这也成为保果大桥中央吊杆锚固区长期锈蚀而未被及时发现,最终导致中央吊杆骤断的原因之一。吊杆失效蔓延趋势可通过图 6 直观表明。

从图 6 中曲线特征可以作以下推断,当某根吊杆失效而结构尚未整体失效时,失效杆附近紧临吊杆杆力将迅速增加,幅值可观。而较外侧吊杆力将下降,幅值稍小。越往外延,变化幅值越来越小。这一变化特征,提供了一种关于吊杆拱桥日常维护的直观方法:即在周期性的吊杆力观测中,若发现某处杆力明显增大(或减小),而其临近杆件杆力变化与之恰恰相反,则很可能此处杆件存在锈蚀或断丝等刚度降低的病害,应引起及时的关注。另外,从数值上来看,短吊杆区域单杆失效对临近杆件受力的影响更大,失效区域蔓延得更快。通过进一步计算可以发现,适当加密吊杆,能一定程度上减缓失效蔓延速度,但吊杆密度受到客观因素的限制不能无限加密,所以并不能从根本上杜绝此类情形的发生。

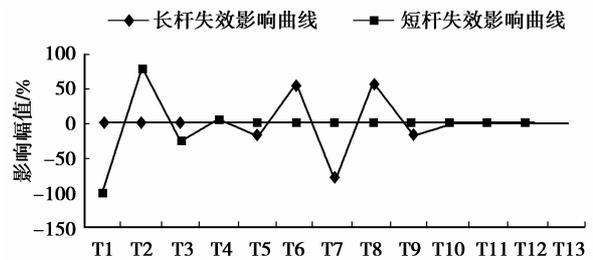


图 6 吊杆失效蔓延曲线

### 3 固有振动特性及活载影响分析

为研究结构在活载下的动力响应,需首先计算结构固有振动特性。结构前 6 阶固有振动特性计算如表 4 所示。

表 4 结构固有振动特性

模态号	频率/Hz	模态特征
1	0.650 6	拱一阶横倾
2	0.744 7	拱一阶竖向
3	1.324 8	拱脚立柱失稳
4	1.324 8	拱脚立柱失稳
5	1.338 8	拱二阶竖向
6	1.340 9	拱二阶横倾

进一步计算表明,局部结构缺陷及单根吊杆失效对固有振动特性的影响很小。对结构损伤的识别不具有实际意义。

为分析活载显著增大对吊杆受力的影响,在设计荷载基础上增加 50%(就本桥实际情况,增幅早已超过该值),与原设计水平进行比较。计算结果如表 5 所示。

表5 活载下吊杆力

kN

杆号	原设计荷载下杆力	交通加剧后杆力
T1	347.06	398.39
T2	323.45	371.49
T3	320.95	368.34
T4	316.80	363.57
T5	315.19	361.67
T6	314.16	360.44
T7	313.73	359.89
T8	314.10	360.40
T9	314.95	361.48
T10	316.37	363.23
T11	320.25	367.81
T12	323.31	371.83
T13	363.90	416.92

计算表明,交通量增大后,吊杆力均显著增大,增幅均在15%左右。这无疑加剧了杆件的受力,加速了破坏的进程。另外,考虑活载的动态交变效应,交通量的增加一方面大幅增加了结构疲劳交变受荷次数,另外也显著增大了吊杆的疲劳应力幅值。若将吊杆在活载作用下最大、最小杆力作为疲劳加载上、下限;吊杆疲劳应力幅值的增加可等效为吊杆力的变化幅值。通过比较原设计荷载下及交通量加剧后吊杆最大、最小杆力;可得到吊杆疲劳应力幅值。计算表明,在假定的交通量50%增幅条件下,吊杆疲劳应力幅值增加均超过15%,最大增幅达到17%。可以预见,当充分考虑活载冲击效应时,上述增值还将进一步放大。以上分析说明,交通量的加剧无疑加速了吊杆拱桥的疲劳破坏进程。归结以上分析可以看到,交通量增加导致的吊杆破坏的本质是疲劳破坏,因为交通量增加实质上显著加剧了结构疲劳加载次数,同时大幅提高了疲劳加载幅值。

## 4 结 论

- 1) 吊杆力对拱肋Z向缺陷较Y向缺陷更为敏感。
- 2) 吊杆线形缺陷对短吊杆的影响更明显,短吊杆次内力明显大于长吊杆。
- 3) 单吊杆失效将导致临近杆件力学特性显著变化,而长吊杆在失效过程中具有一定的隐蔽性;加密吊杆能减缓失效,但不能根本解决问题。
- 4) 吊杆破坏的本质在于腐蚀和疲劳,而短吊杆次内力容易导致钢束保护层破损从而加速钢束腐蚀;而交通量增加会显著加剧结构疲劳加载次数同时大幅提高疲劳加载幅值,加速了吊杆的疲劳骤断。

### 参考文献:

- [1] 龙跃,左毅,吴秋凡,等.拱桥拉索病害研究与对策[J].预应力技术,2004(6):3-7.  
LONG Yue,ZUO Yi,WU Qiufan,et al. Study and countermeasures for deterioration of arch bridge cable hangers[J]. Prestress Technology,2004(6):3-7.
- [2] 杨晓滨,侯斌.吊杆拱桥安全设计探讨[J].公路,2012(8):114-118.  
YANG Xiaobin,Hou Bin. Safety design for suspender on arch bridge[J]. Highway,2012(8):114-118.
- [3] 刘汉勇,宋玉普,李龙.拱桥新型不锈钢吊杆疲劳试验和螺纹连接应力分析[J].建筑结构,2012,42(4):162-165.  
LIU Hanyong,SONG Yupu,LI Long. Fatigue test of arch bridge stainless steel suspender and stress analysis of threaded

- connection[J]. Building Structure, 2012, 42(4): 162-165.
- [4] 姜瑞娟, 吴启明, 陈宜言, 等. 现代吊杆拱桥设计的新思路[C]. 第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册), 2010: 812-821.
- [5] 刘峰. 吊杆拱桥吊杆可更换设计研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2010(8): 221-223.  
LIU Feng. Study of replaceable suspender on arch bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2010(8): 221-223.
- [6] 张东娇. 基于时变可靠度理论的吊杆拱桥加固评价[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 85-89.  
ZHANG Dongjiao. Reliability estimation of reinforced tied-arch bridge based on time-dependent reliability theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(9): 85-89.
- [7] 毛亚娜, 刘世忠, 叶丹. 基于频率法对系杆拱桥吊杆索力测试的分析[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(1): 124-128.  
MAO Yana, LIU Shizhong, YE Dan. Analysis of determining suspender tension of tied-arch bridge on frequency method [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(1): 124-128.
- [8] 李龙安. 钢桁拱桥吊杆风致振动影响因素分析[J]. 桥梁建设, 2008(3): 19-23.  
LI Longan. Analysis of influential factor of wind-induced vibration of steel truss arch bridge hangers [J]. Bridge Construction, 2008(3): 19-23.
- [9] 杜国华, 姜林. 斜拉桥的合理索力及其施工张拉力[J]. 桥梁建设, 2006(3): 18-22.  
DU Guohua, JIANG Lin. Reasonable cable force and construction pre-stress[J]. Bridge Construction, 2006(3): 18-22.
- [10] 陆楸, 徐有光. 斜拉桥最优化索力的探讨[J]. 中国公路学报, 1990, 8(1): 38-49.  
LU Qiu, XU Youguang. Optimum tensioning of cable-stays[J]. China Journal of Highway and Transport, 1990, 8(1): 38-49.
- [11] 陈盛水, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥动力特性分析[J]. 公路, 2001(2): 10-14.  
CHEN Shenshui, CHEN Baochun. Dynamic characteristic analysis of concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Highway, 2001(2): 10-14.
- [12] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究[J]. 桥梁建设, 2003(3): 55-59.  
CHEN Baochun. Study on construction of concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Bridge Construction, 2003(3): 55-59.
- [13] 汤国栋, 杨宏, 朱正刚, 等. 桥梁吊杆及拉索的健康诊断[J]. 公路, 2002(9): 82-87.  
TANG Guodong, YANG Hong, ZHU Zhenggang, et al. Behavior diagnosis of bridge suspender and guy[J]. Highway, 2002(9): 82-87.
- [14] Pbares B M, Rolander D D, Graybeal B A, et al. Studying the reliability of bridge inspection[J]. Public Road, 2000, 64(5): 15-19.
- [15] Collacott R A. Mechanical fault diagnosis and condition monitoring[M]. London: Chapman and Hall, 1997.

(编辑 陈移峰)