

# 断索作用下悬吊桥面系结构动力响应试验研究

余印根

(福建省永正工程质量检测有限公司, 福建 福州 350012)

**摘要:** 中、下承式拱桥吊杆破断引起桥面系垮塌的事故时有发生, 现有的相关研究主要集中于吊杆。为研究悬吊桥面系的强健性, 以一座下承式钢管混凝土拱桥为工程背景, 建立缩尺试验模型, 测试悬吊桥面系结构在断索作用下结构的动力响应。试验结果表明, 吊杆初始力对断索形态和断索时间均有影响; 断索失效时间越短, 断索动力效应越大; 短吊杆断索动力响应大于长吊杆; 断索对加劲纵梁产生的最不利截面位于破断吊杆及相邻吊杆截面处。建立有限元模型, 通过断索试验研究验证了数值模拟分析断索动力响应的方法可行性, 并提出了数值分析中断索时间和阻尼比参数取值, 为断索动力响应分析提供了条件。

**关键词:** 中、下承式拱桥; 悬吊桥面系; 断索; 动力响应

**中图分类号:** U446; U448.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2021)06—0088—06

## Experiment Study on the Dynamic Responses for a Suspended Floor System with Broken Hangers

YU Yingen

(Fujian Yongzheng Construction Quality Inspection Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350012, China)

**Abstract:** There have been accidents of bridge floor system collapse due to hanger fracture occur in half-through and through arch bridges from time to time. Hence, current researches have mainly focused on the design of hangers. In order to analyze the robustness of suspended floor systems in half-through and through arch bridges, a scale test model of a half through bridge and a through arch bridge is established. The dynamic response of the bridge deck structures which have setting the stiffening girder after cables losing was tested. The test results are as follows. The initial tensile forces in hangers have effects on their fracture patterns and time to break. The less time to break the hangers increases the dynamic response of the system due to the hanger break. The system dynamic response with the fracture of longer hanger is larger than that with the fracture of shorter hanger. The most unfavorable stress sections due to the static effects produced by broken hangers includes the sections in broken hangers as well as the section of stiffening girder between two neighboring hangers. A finite element model is then established to test the feasibility of numerical simulation method for analyzing the dynamic response of broken cable by the experimental study of broken cable. The parameters of cable interruption time and damping ratio are proposed for numerical analysis.

**Keywords:** half-through and through arch bridges; suspended floor system; broken hangers; dynamic responses

中、下承式拱桥常采用悬吊桥面系结构, 由于吊杆断索引起的桥面系垮塌事故时有发生, 诸如武夷山公馆大桥、宜宾小南门桥及保果大桥等桥梁的断索垮塌事故。以上断索事故的发生均引起桥面系的局部或连续垮塌, 因此, 中、下承式拱桥悬吊桥面

系的强健性(也称鲁棒性)<sup>[1]</sup>问题也逐渐被重视, 并在一些行业规范中增加了相应的条文。《钢管混凝土拱桥技术规范》<sup>[2]</sup>(GB 50923—2013)中规定“中承式和下承式拱桥的悬吊桥面系应采用整体性结构, 以横梁受力为主的悬吊桥面系必须设置加劲纵

梁,并应具有一根横梁两端相对应的吊索失效后不落梁的能力”;《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[3]</sup>(JTG 3362—2018)也规定“采用柔性吊杆的拱桥,宜在桥面系设置连续纵梁”。其目的均为增强桥面系的整体性,防止局部吊杆失效引起桥梁整体垮塌。可见,桥面系的整体化、连续化是拱桥的一个发展趋势<sup>[4]</sup>。然而,无论是新建桥梁的桥面系强健性设计还是既有桥梁的桥面系强健性改造,强健性分析仍是以概念设计及静力计算为主,对断索引起的动力效应尚无明确规定<sup>[5]</sup>。

悬吊桥面系的强健性计算,首先要解决的是断索作用下桥面系的动力响应问题,断索效应甚至应成为结构设计的控制因素<sup>[6-7]</sup>。美国规范<sup>[8]</sup>对拆除构件法动力分析移除构件时间的上限规定(1/10 剩余结构周期);美国 PTI<sup>[9]</sup>斜拉桥的设计,提出断索等效静力计算冲击放大系数取值 2.0。构件拆除法是经典理论研究方法,但对于不同结构鲁棒性研究成果较为有限<sup>[10]</sup>,断索时间、动力放大系数取值是否通用,引起了诸多学者的质疑<sup>[11-12]</sup>,在中、下承式拱桥悬吊桥面系强健性领域更缺乏相关的试验研究。

本文以一座下承式钢管混凝土拱桥为工程背景,建立缩尺试验模型并进行断索试验,研究以横梁受力为主的悬吊桥面系结构在断索作用下结构的动力响应。建立有限元模型,通过试验结果对有限元断索动力计算方法进行验证,并在试验基础上对影响断索动力效应的断索时间和结构阻尼进行分析,提出断索动力分析的合理参数取值。

## 1 试验概况

### 1.1 模型设计

以某下承式钢管混凝土系杆拱桥为原型,该桥计算跨度为 95.5 m,矢跨比 1/4.5,每片拱肋由 2 根  $\Phi 1\ 000\text{ mm} \times 16\text{ mm}$  钢管和腹板组成高 2.4 m 的哑铃型断面。模型拱(见图 1)按 1:10 的比例进行设计。

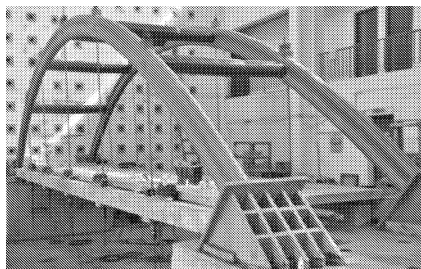


图 1 试验模型

拱的净跨径 8.5 m,矢跨比为 1/4.5,拱肋中心距 1.5 m,拱肋截面为  $\Phi 108\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  钢管和 4 mm 厚腹板,钢管内填充 C50 混凝土。拱肋 6 分点处设一道一字横撑,采用  $\Phi 152\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$  的空腹钢管。模型总体布置如图 2 所示。

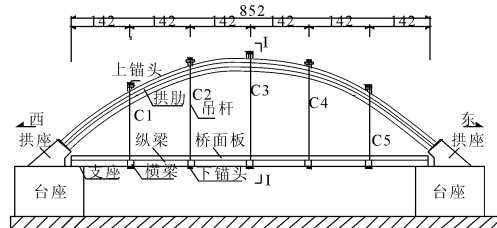


图 2 模型总体布置(单位:cm)

桥面系模型由纵、横钢筋混凝土矩形梁和桥面板组成,纵梁中心间距 1.5 m,截面尺寸 15 cm  $\times$  12 cm,横梁中心间距 1.42 m,截面尺寸 20 cm  $\times$  16 cm。桥面板为 6 cm 厚混凝土板,宽 1.3 m,长 1.26 m ~ 1.40 m,配筋构造配筋,桥面板简支在横梁上。

试验模型共设置 5 对吊杆,纵向间距为 1.42 m,采用 1-7 $\Phi 5$  预应力钢绞线,材料抗拉强度标准值 1 860 MPa,单根吊杆破断力为 255.6 kN。锚具采用 JM12-1,上端固定,下端张拉。南侧吊杆编号 SC1—SC5,北侧吊杆编号 NC1—NC5。

拱肋拱脚采用固结约束;加劲纵梁两端采用简支模式,在梁端设置橡胶支座。

### 1.2 加载方法与试验工况

吊杆破断由于受力和环境因素决定了其破坏往往具有对称性,从已发生的断索事故分析也表明,断索均出现一根横梁的两端吊索同时破断<sup>[1]</sup>。为此,本文对一根横梁两端相对应吊杆同时失效情形进行试验研究,采用气割方式来实现吊杆的突然破断。

采用混凝土配重块加载,荷载的确定按断索静力效应不超过加劲纵梁材料按标准强度取值所确定的承载能力,并考虑不小于 1.5 倍的安全系数,通过计算得每对吊杆对应截面加 5 个配重块。分两级加载,第一级每对吊杆对应截面加 3 个配重块,第二级各加 5 个配重块。单块混凝土配重尺寸 90.0 cm  $\times$  45.0 cm  $\times$  40.0 cm,单块重量约 4.1 kN。

根据结构对称性原则,依次选取 C1 ~ C3 吊杆对作为破断失效对象试验,共四个工况,各工况对应的加载量和试验内容见表 1。

### 1.3 测点布置

吊杆力变化采用压力传感器测试,传感器安装于锚头和锚座之间,每根吊杆下端锚头处布置一个

压力传感器,累计 10 个测点;加劲纵梁动位移采用位移计测量,位移测点布置在北侧加劲纵梁与横梁相交处底面,加劲纵梁布设 5 个位移测点;采用应变片测量吊杆破断过程加劲纵梁底面主筋应变的变化,应变测试截面布置在横梁所在截面主筋上,南北侧加劲纵梁累计布置 10 个应变测点。

表 1 试验工况

试验工况	断索位置	加载数量/块	试验内容
工况 1	NC1 和 SC1	3	吊杆力变化、加劲纵梁的内力和变形变化
工况 2	NC1 和 SC1	5	
工况 3	NC2 和 SC2	5	
工况 4	NC3 和 SC3	5	

## 2 有限元模型与计算参数设置

现有的断索动力分析方法有全动力分析法和半动力分析法,其基本思路采用瞬时刚度退化法和动态加卸载法,即采用随时间变化的物理量(分别为刚度和荷载)进行时程分析。本文采用瞬时刚度退化法,采用 ANSYS 软件的生死单元技术<sup>[13]</sup>及 Full(完全法)瞬态分析功能对断索引起的结构动力响应分析。

### 2.1 有限元模型

利用 ANSYS 建立有限元模型,钢管混凝土拱肋主管采用换算截面法将混凝土的截面积按抗压刚度等效的原则换算成钢管的面积,其它构件均按设计尺寸和材料进行模拟。边界条件根据实际约束施加,拱肋拱脚固结,加劲纵梁端按简支处理。

吊杆采用 1-7Φ5 预应力钢绞线,拱肋采用 A3 钢,加劲纵梁、横梁和桥面板均采用 C25 混凝土。吊杆采用 Link8;拱肋、加劲纵梁和横梁采用 beam4;桥面板采用 Shell63 模拟。

### 2.2 计算参数设置

结构在冲击荷载作用下动力响应不仅受结构固有特性影响,还与破断吊杆断索时间、结构的阻尼等因素相关。

各工况断索时间根据试验断索时间结果取值。

采用 Rayleigh 阻尼<sup>[14]</sup>作为结构的黏性阻尼模型,假设阻尼 $[C]$ 为质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的组合见式(1)。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

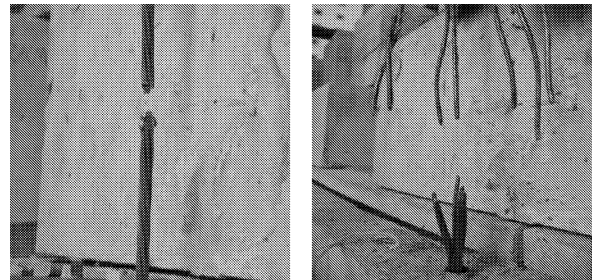
通过环境振动试验,测得前两阶实测竖向振动频率和阻尼比来确定 $\alpha$ 和 $\beta$ ,计算得 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为

0.007 2 和 0.012 3。

## 3 试验与计算结果分析

### 3.1 破断吊杆特征分析

工况 1 破断吊杆在断索过程中两根吊杆逐根破断,钢绞线断口基本平整,表明破断过程未发生应力瞬间释放现象,吊杆破断前内力重分布基本完成;工况 2—工况 4 破断吊杆在断索过程中基本表现为吊杆逐根破断,但钢绞线各钢丝崩断散开,最后破断的几根钢丝破断面呈尖状破口,表明钢丝在高应力状态下瞬间崩断破坏,现场照片见图 3。



(a) 工况 1

(b) 工况 2~工况 4

图 3 吊杆破坏形态

工况 1—工况 4 破断吊杆的吊杆力时程曲线如图 4,可以看出,因断索过程各钢丝逐渐破断,吊杆破断过程吊杆力变化分多个台阶。根据吊杆力变化,将整个断索过程分为两阶段:

阶段 1:在吊杆破断初期,各钢丝逐渐破断,吊杆力出现多次下降平台,该阶段由于各破断钢丝索力与索的抗力之比较小,吊杆力变化缓慢,取最后发生破断的吊杆在阶段一吊杆力发生突变的最短时间作为该阶段最短断索时间。

阶段 2:随着剩余钢丝数量的逐渐减小,吊杆面积减小,在最后断索时刻,破断钢丝索力与索的剩余抗力之比达到最大,吊杆最后一根或多根钢丝同时发生崩断,索力发生近似阶跃式的突变,断索时间最短,对应的持续时间 $\Delta t = T_1 - T_0$ ,如图 4(注:图中小图为圈内图形的局部放大图,下同)。

分析破断吊杆的吊杆初始力和各阶段断索时间见表 2。可以看出,工况 1 破断吊杆释放的内力明显小于工况 2—工况 4,工况 1 在断索阶段 1 和阶段 2 的断索时间均较长;工况 2—工况 4 吊杆破断最后时刻出现应力瞬间释放现象,吊杆力出现瞬间突变,断索时间较短。工况 1 与工况 2 比较可知,相同的断索位置,破断吊杆内力越大,阶段二断索时间越短。

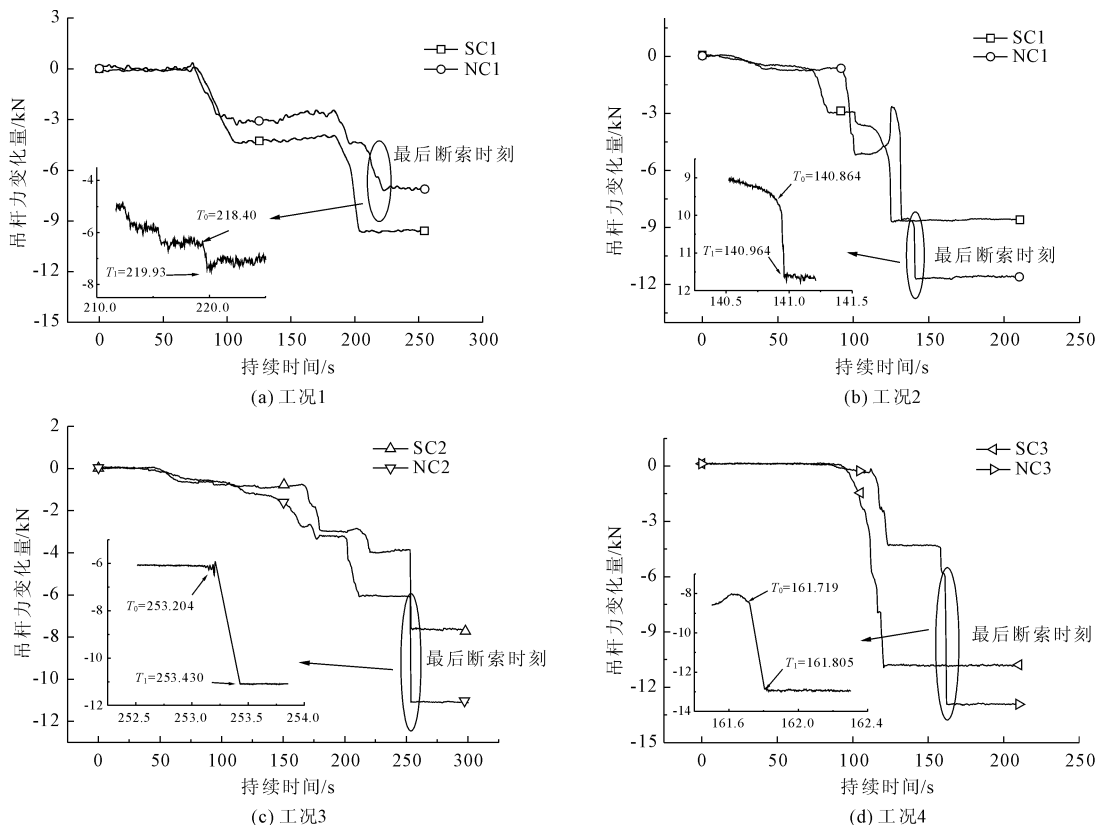


图 4 吊杆力时程曲线

表 2 各试验工况吊杆力及断索时间汇总

工况	破断吊杆内力/kN	阶段 1 最短断索时间/s	阶段 2 断索时间/s
1	6.4	2.688	1.530
2	11.7	0.680	0.100
3	11.1	0.336	0.226
4	12.9	1.716	0.086

3.2 断索过程悬吊桥面系结构动力时程响应分析

取 C1—C3 吊杆及对应的加劲纵梁截面作为本文分析对象,加劲纵梁测点应变时程曲线如图 5。

各试验工况,分析剩余吊杆吊杆力、加劲纵梁测点应变及位移时程响应,得断索过程悬吊桥面系结构动力响应结果:

(1) 由于工况 1 施加荷载较工况 2 小,在断索第二阶段钢丝破断时间较长,断索过程剩余结构各动力响应未出现明显的正弦波振荡现象,无动力增大效应;工况 2—工况 4 施加荷载较大,在断索第二阶段均出现明显的动力响应振荡现象,断索瞬间剩余结构各动力响应发生正弦波振荡,随后振荡逐渐衰减至稳态。

(2) 工况 2—工况 4 三个工况中剩余吊杆的吊杆力在断索相邻吊杆增量最大,最不利均出现在在相

邻吊杆,次相邻吊杆减小,其中工况 3 最不利为相邻较短的 C1 吊杆;加劲纵梁正应变在断索截面增量最大,负应变在相邻较短吊杆截面增量最大;加劲纵梁位移在断索截面增量最大,相邻的较长吊杆次之。

3.3 计算结果与试验结果的对比分析

3.3.1 静力结果对比分析

结构各内力响应在断索完成后最终均趋于稳定平衡状态,取该稳态时的结构响应作为断索作用的结构静力响应,将试验结果与有限元分析结果进行比较。各试验工况结构各内力响应静力计算结果与试验实测值比较结果如下:

在不同断索工况下剩余吊杆和加劲纵梁内力试验与计算值变化分布规律基本一致,且实测值与计算值吻合较好,吊杆内力变化实测值与计算值比值为 0.92 ~ 1.02,加劲纵梁位移变化实测值与计算值比值为 0.89 ~ 0.99,加劲纵梁应变变化实测值与计算值比值为 0.89 ~ 1.18。

3.3.2 动力结果对比分析

取工况 2—工况 4 断索最后时刻产生的动力响应与有限元模拟的动力响应进行对比分析,有限元模拟时破断时间按各工况实测的第二阶段断索时间取值,见表 2。图 6 给出了工况 2 和工况 3 加劲纵梁最大正弯矩截面应变变化时程曲线。

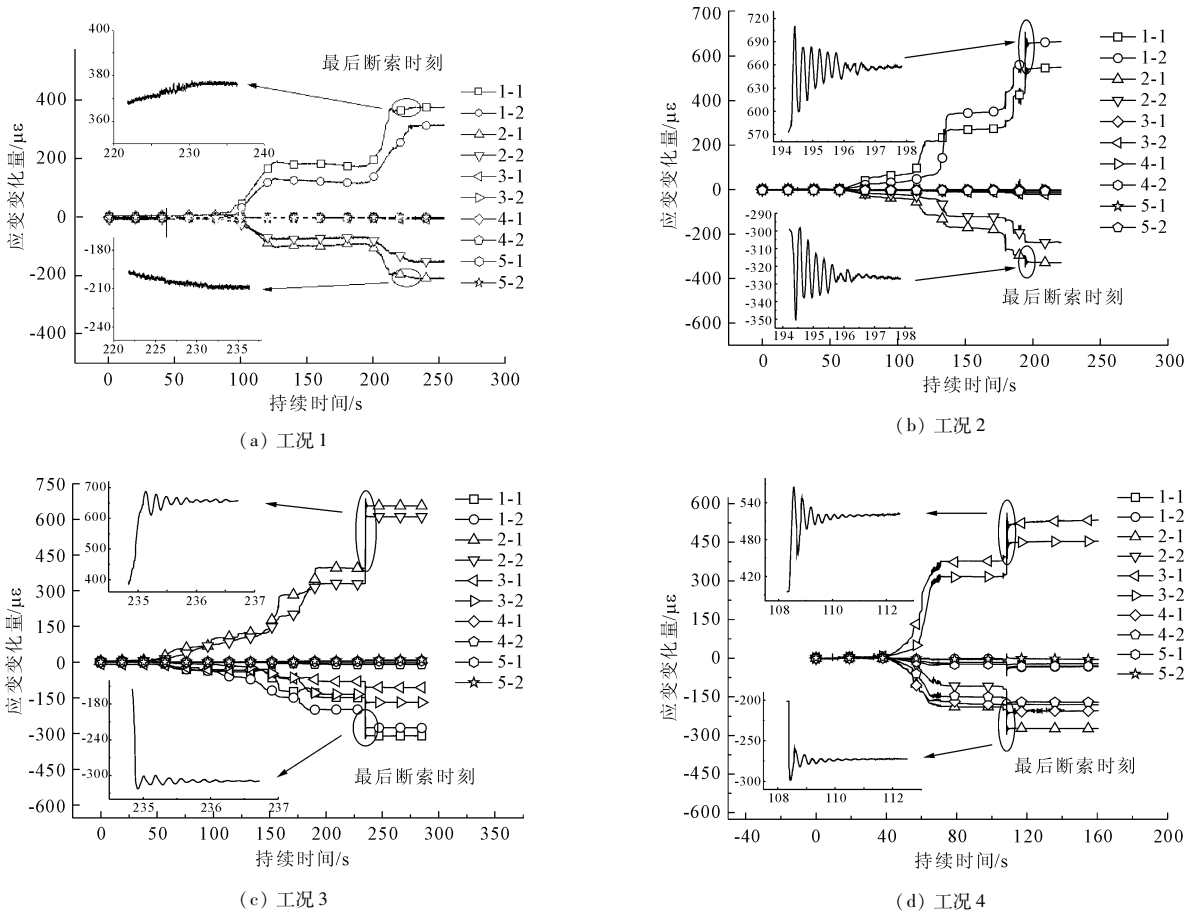


图 5 加劲纵梁测点应变时程响应曲线

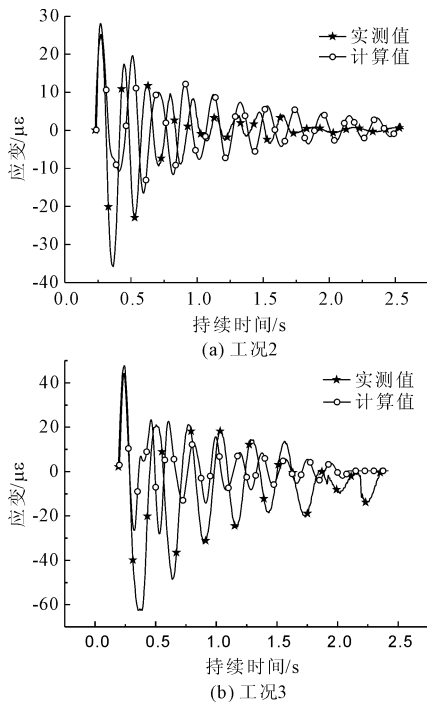


图 6 加劲纵梁最大正弯矩截面应变变化时程曲线

设定动力放大系数  $\eta_d = \Delta S_d / \Delta S_j$ , 其中  $\Delta S_d$  表

示剩余结构构件考虑断索冲击作用时的效应最大变化量,  $\Delta S_j$  表示相应结构构件在吊杆破断后的静力效应变化量。

在三个工况作用下剩余吊杆吊杆力动力放大系数最大值为 1.101, 加劲纵梁位移动力放大系数最大值为 1.092, 加劲纵梁应变动力放大系数最大值为 1.088, 其中剩余吊杆力的动力放大系数比加劲纵梁稍大。

基于 ANSYS 有限元动力响应分析结果表明, 计算的动力时程响应与实测时程响应基本一致, 计算动力放大系数与实测动力放大系数偏差率绝对值为 0.00% ~ 5.74%。

因此, 静动力结果分析表明, 本文所建立的有限元模型及分析方法能准确地模拟分析悬吊桥面系吊杆破断后剩余结构的动力响应。

#### 4 断索动力计算的参数取值分析

断索时间和结构阻尼是进行结构断索动力分析前需输入的两个重要参数, 二者的取值影响到动力效应计算结果的可靠性, 因此, 有必要对断索时间和

结构阻尼两参数取值进行分析研究。

#### 4.1 断索时间

由试验研究可知,结构动力响应与断索时间存在直接的相关关系。对于无阻尼单自由度体系,在具有上升时间的阶跃荷载  $F(t)$  作用下,  $R_d$  大小与  $\Delta t/T$  ( $\Delta t$  为阶跃荷载上升时间,  $T$  为结构基本周期) 存在对应关系。因此,在断索动力分析时,以断索时间  $\Delta t$  与结构基本周期  $T$  之比作为参数,选取  $0.001T$ 、 $0.005T$ 、 $0.01T$ 、 $0.05T$ 、 $0.1T$ 、 $0.5T$ 、 $T$ 、 $5T$ 、 $10T$  作为吊杆破断断索时间,利用试验模型的有限元模型,对工况 2(即 C1 吊杆破断工况) 剩余结构动力放大系数进行计算,研究  $\Delta t/T$  对结构动力反应的影响。

通过数值分析得破断吊杆断索时间对动力放大系数影响,见图 7。从图可得,随  $\Delta t/T$  减小,动力放大系数总体上呈增大趋势, $\Delta t/T$  与动力放大系数关系可大致分成三个阶段:

(1) 第一阶段: $\Delta t > 5T$ ,  $\eta_d$  逐渐减小且趋于平稳,动损分析结果趋近静损分析结果。

(2) 第二阶段: $0.01T < \Delta t \leq 5T$ , 随  $\Delta t$  减小,  $\eta_d$  增大明显。

(3) 第三阶段: $\Delta t \leq 0.01T$ ,  $\eta_d$  趋于稳定值。

实际桥梁发生断索事故的原因并不确定,断索时间无法估计,从上面动力反应分析可知,在实际设计中,在没有更精确的研究结果之前,  $\Delta t$  建议偏安全地按剩余结构基本周期  $T$  的 0.01 倍来计算。

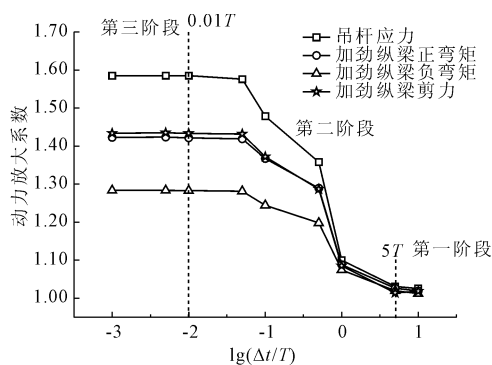


图 7 动力放大系数  $\eta_d$  随  $\Delta t/T$  的变化

#### 4.2 结构阻尼

本文采用 Rayleigh 阻尼作为结构的比例粘滞阻尼,为确定结构阻尼,关键在于选择合理的阻尼比,结构阻尼比一般根据动力测试的实测结果确定<sup>[15]</sup>。因此,为分析中、下承式拱桥结构阻尼比的取值,本文对国内 15 座中、下承式拱桥面内一阶的阻尼比进行了实桥测试,结果汇总见图 8。

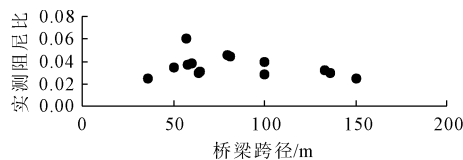


图 8 15 座桥实测阻尼比

由图 8 可知,调查的 15 座中、下承式拱桥面内一阶实测阻尼比处于 0.025 ~ 0.060 之间。考虑到阻尼的存在会消耗振动体系的能量,抑制结构的振动,因此,本文进行断索有限元计算时偏安全的取阻尼比为 0.020。

## 5 结 论

(1) 模型试验表明,同一断索位置,吊杆破断时内力越大,断索时间越短,产生的动力冲击作用越大。

(2) 不同的吊杆对破断产生的静力效应均为断索截面和断索相邻截面最不利,相邻较短吊杆内力变化最大,加劲纵梁各截面最不利内力变化均出现在短吊杆和次短吊杆对破断工况。

(3) 基于 ANSYS 有限元软件瞬态分析功能及生死单元技术的结构动力响应分析结果与试验结果对比分析表明,静动力结果实测值与计算值吻合较好,说明本文所建立的有限元模型及分析方法能准确地模拟分析悬吊桥面系吊杆破断后剩余结构的动力响应。

(4) 对断索时间取值分析结果表明,当断索时间  $\Delta t$  和剩余结构基本周期  $T$  的比值  $\leq 1\%$  时,即  $\Delta t \leq 0.01T$  时,动力放大系数  $\eta_d$  趋于稳定值,且最不利。因此,建议断索时间取值  $\Delta t = 0.01T$ 。

(5) 通过实测 15 座中、下承式拱桥得到面内一阶阻尼比为 0.025 ~ 0.060,考虑到阻尼会抑制结构的振动,在无实测值时建议断索动力分析偏安全地取阻尼比为 0.020。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春,黄冀卓,余印根. 桥梁抗倒塌能力鲁棒性设计研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(1):1-7.
- [2] 福州大学. 钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [3] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

(下转第 216 页)

- [3] 仲志煜,李建春,张琦,等. 基于神经网络的基坑紧邻环境多因素预测[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):214-220.
- [4] 严佳捷,樊秀峰,吴振祥. 淤泥深基坑开挖下土体的变形特征[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):61-65.
- [5] 祁瑞武,邓会元,戴国亮. 巨型基坑开挖对周围环境空间效应影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):178-184.
- [6] 罗志华. 基坑开挖前降水对围护变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):185-190.
- [7] 赵 锟,吉爱国,张冬梅,等. 交叉学科研究型课程设计与教学方法初探[J]. 电子技术,2017,46(5):20-22,14.
- [8] 王冬梅. 美国高校交叉学科教育历史发展与理论探索[J]. 现代大学教育,2006(4):73-78.
- [9] 王冬梅. 美国高校交叉学科教育研究综述[J]. 比较教育研究,2007(3):38-43.
- [10] 柴 干,郭建华. 新型交叉学科工程人才培养的协同模式探究[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版),2019,21(S2):137-141.
- [11] 宋亚卿. 浅议“新工科”背景下的教材建设与改革[J]. 新闻研究导刊,2020,11(6):228,232.
- [12] 王转利,周 妃. 关于“新基建”下信息通信高校学科发展的探讨[J]. 经济研究导刊,2019(16):139-140.
- [13] 杨 鹏,张征宇. 美国高校教学实施学科交叉与知识融合的经验及启示[J]. 黑龙江教育学院报,2019,38(10):47-51.
- [14] 刘 立,胡德鑫. 新兴理工科大学交叉学科人才培养机制及特征研究[J]. 中国高校科技,2020(3):57-61.
- [15] 包绍华,史佩栋. 介绍国外一门交叉学科——法律土木工程学[J]. 岩土工程界,2005(6):21-22.
- [16] 郑 鑫,杨 光,葛建锐. 农业工程与土木工程交叉学科研究生课程体系研究[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估),2013(8):40-41.
- [17] 赵望达,黄建陵,徐志胜,等. 培养土木建筑交叉学科专业大学生创新能力的实践[J]. 长沙铁道学院学报(社会科学版),2009(1):3-5.
- [18] 管翠中,范爱红,曾晓牧. 学科评估中院系设置与学科交叉的矛盾与对策——以清华大学土木工程学科为例[J]. 大学图书馆学报,2019,37(6):85-88.

(上接第 93 页)

- [4] 陈宝春,刘君平. 世界拱桥建设与技术发展综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.
- [5] 陈宝春,范冰冰,余印根,等. 钢管混凝土拱桥强健性设计[J]. 桥梁建设,2016,46(6):88-93.
- [6] Ted Zoli, Justin Steinhouse. Some considerations in the design of long span bridges against progressive collapse [C]//HNTB Corporation,2010(1):6-14.
- [7] Ted Zoli, Woodward. Design of Long Span Bridges for Cable Loss [C]//Iabse Symposium, Structures and Extreme Events, Lisbon, Portugal, September14 - 16th, 2005:1-9.
- [8] United facilities criteria design of buildings to resist progressive collapse:UFC 4 - 023 - 03[S]. Washington Department of Defense,2013.
- [9] Recommendations for Stay Cable Design,Testing and Installation[S].5th. ed. Farmington Hills: Cable - stayed Bridges Committee,Post - Tensioning Institute( PTI) ,2007.
- [10] 朱志辉,罗思慧,张 磊,等. 车桥耦合振动的拱桥吊杆应力冲击系数分析[J]. 振动. 测试与诊断,2019,39(6):1169-1176,1356-1357.
- [11] 郑高明,李红明,唐柏鉴,等. 预应力钢绞线断裂冲击响应谱研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(3):105-111.
- [12] 张 羽,方 志,卢江波,等. 大跨混凝土斜拉桥施工过程中结构的断索动力响应[J]. 振动与冲击,2021,40(5):237-246.
- [13] 肖国丰,马思琪,刘 洋,等. 基于 ABAQUS 生死单元技术的平衡地应力方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):47-52.
- [14] Ray W Clough,Joseph Penzien. Dynamics of Structures [M]. Computers and Structures, Inc, 2003.
- [15] 关孝文,张 莉,胡世浩,等. 基于行车激励的桥梁动力性能测试与状态评估[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):226-230.