doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.004

索承式桥梁腐蚀吊索安全性能评估

乔　燕[1],李爱群[2],缪长青[2],孙传智[1]

(1.宿迁学院 建筑工程系,江苏 宿迁 223800;
2.东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,南京 210096)

摘　要:腐蚀蚀坑是索承式桥梁吊索力学性能退化的主要原因。基于断裂力学和蚀坑等效,考虑腐蚀蚀坑影响,以吊索在荷载作用下的安全系数小于 2.5 作为吊索失效判据,建立腐蚀吊索承载力安全性能评估方法,并以袁州大桥钢丝腐蚀速率数据为基础,进行参数敏感性分析和算例计算,研究了各工况下吊索失效时的断丝数量和安全系数小于 2.5 的时间。结果表明,该方法相比较均匀腐蚀理论模型,考虑了钢丝腐蚀蚀坑对吊索承载力的影响,能够预测钢丝断裂数量和安全系数小于 2.5 的时间。

关键词:索承式桥梁;腐蚀吊索;断裂力学;蚀坑等效;安全性能

中图分类号:U448.22　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1674-4764(2015)04-0028-08

Assessment on safety performance of corroded cable for cable-supported bridge

Qiao Yan[1], *Li Aiqun*[2], *Miao Changqing*[2], *Sun Chuanzhi*[1]

(1. Department of Architecture Engineering, Suqian College, Suqian 223800, Jiangsu, P. R. China; 2. Key Laboratory for Concrete and Prestressed Concrete Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: Corrosion pit is the main cause of mechanical performance degradation for the cable of cable-supported bridge. Considering corrosion pits andwith the safety factor of cable under load less than 2.5 as failure criterion, the method for assessing the safety capability for cable was established based on equivalent crack for corrosion pit and fracture mechanics. The Yuanzhou bridge wire corrosion rate data was taker to perform the parameter sensitivity analysis., The quantity of broken wires when cable failed and the time with safety coefficient less than 2.5 were studied. The results showed that this method could predict wire fracture number and the time with safety coefficient less than 2.5 and compared with uniform corrosion theory model, this mehtod provided theoretical reference for cable-supported bridge operation and

收稿日期:2014-12-29

基金项目:国家自然科学基金(51078080);江苏省自然科学基金(BK2012562);江苏省高校自然科学研究项目(10KJB58005);宿迁市交通科学研究基金(KJ2014-1)

作者简介:乔燕(1976-),女,副教授,主要从事大跨桥梁结构承载力评估研究,(E-mail)sqqiaoyan@163.com。
孙传智(通信作者),男,博士,(E-mail)schzh_xzh@163.com。

Received: 2014-12-29

Foundation item: Natiural Natural Science Foundation of China(No. 51078080); Natiural Science Foundation of Jiangsu Province of China(No. BK2012562); Natural Science Foundation for Colleges and Universities in Jiangsu Province(No. 10KJB58005); Traffic Science Research Project of Suqian(No. KJ2014-1)

Author brief: Qiao Yan (1976-), associate professor, main research interest: large-span bridge bearing capacity evaluation, (E-mail)sqqiaoyan@163.com.
Sun Chuanzhi(corresponding author), PhD, (E-mail)schzh_xzh@163.com.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

maintenance.

Key words: cable-supported bridge; corroded cable; fracture mechanics; equivalent corrosion pit; safety performance

吊索作为索承式桥梁连接桥道系与上部主体构件的关键构件，吊索受力是否安全将直接影响桥梁整体结构的安全性能。大量工程实例表明[1-5]，由于环境作用、防护不当、受力复杂等原因，吊索容易发生不同程度的损伤，从而导致桥梁结构安全系数降低或寿命缩短。目前，在进行吊索钢丝腐蚀承载力评估时，多是假设钢丝均匀腐蚀[6-8]，而没有考虑局部腐蚀蚀坑对钢丝力学性能的影响，从而导致评估结果偏于不安全。同时，在大桥运营过程中，吊索钢丝应力值很小，吊索钢丝蚀坑发展为疲劳裂纹扩展的临界尺寸较大，所以在腐蚀速率较大，而应力幅较小时，有可能在设计年限内只发生腐蚀蚀坑扩展，而不发生疲劳裂纹扩展的情况。所以，笔者基于断裂力学和蚀坑等效，提出考虑腐蚀蚀坑影响的吊索安全性能评估方法并进行算例计算。

1　吊索钢丝腐蚀类型

对于索承式桥梁，虽然设计文件要求吊索采取有效保护措施，但是桥梁结构长期处于户外，一般架立于江、海、河上，运营环境较为恶劣，特别是在大气污染严重地区、水污染严重地区、海滨及海洋环境，吊索极易发生腐蚀损伤。常见的吊索钢丝腐蚀损伤类型主要有化学腐蚀、电化学腐蚀、缝隙腐蚀和磨损腐蚀等。

1.1　钢丝均匀腐蚀

吊索钢丝均匀腐蚀通常指钢丝在非电解质溶液中纯化学作用引起的腐蚀，以吊索钢丝表面的均匀剥落为特征。通过袁州大桥拆除得到钢丝腐蚀数据可以看出，钢丝化学均匀腐蚀造成的钢丝直径减小只有 0.001～0.03 mm。由于均匀腐蚀后的钢丝表面较光滑，对钢丝力学性能影响不大，不会引起大的危害，所以化学腐蚀对钢丝影响可以忽略不计。

1.2　钢丝电化学腐蚀

吊索虽然采取一定的防水措施，但是水却不可避免地进入吊索内部。大桥在运营过程中，钢丝表面在拉应力或化学物质作用下，钢丝表面的保护层遭到局部破坏时，使钢丝基体直接暴露在腐蚀环境中，形成局部腐蚀小孔并向深入发展，成为腐蚀疲劳的裂纹源，如图 1 所示。孔蚀是破坏性和隐患最大的腐蚀形式。

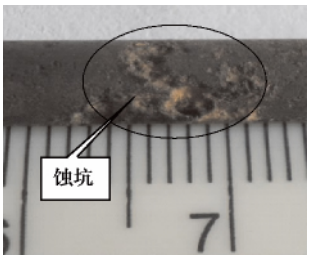


图 1　钢丝孔蚀

Fig. 1　Pit corrosion of wire

1.3　钢丝磨损腐蚀

由于吊索由若干根平行钢丝组合而成，钢丝与钢丝之间相接触。由于风雨和车辆荷载的作用，钢丝与钢丝之间必然存在相对运动，造成钢丝磨损损伤。磨损腐蚀是磨损与腐蚀综合作用下钢丝发生的一种腐蚀。如图 2 所示。钢丝磨损腐蚀和缝隙腐蚀在外观上的主要区别是：磨损腐蚀区域不连续，呈点状，而缝隙腐蚀区域连续，如图 2 和 3 所示。

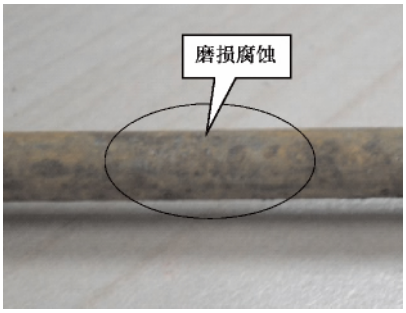


图 2　钢丝磨损腐蚀

Fig. 2　Wear corrosion of wire

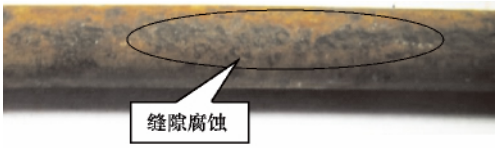


图 3　钢丝缝隙腐蚀

Fig. 3　Crevice corrosion of wire

1.4　钢丝缝隙腐蚀

在吊索结构中，由于吊索是由若干根钢丝组成，那么钢丝与钢丝之间形成缝隙，腐蚀介质就会进入并留存在钢丝之间的缝隙内，导致缝隙位置的钢丝基体腐蚀加速。钢丝表面缝隙腐蚀会在较长范围内

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

发生，如图3所示。

2 腐蚀损伤钢丝剩余强度分析方法

2.1 带有表面裂纹钢丝剩余强度计算方法

带有表面裂纹的钢丝剩余强度可以采用两种方法估算[9]。

1)基于净截面理论的强度估算。净截面理论是一种广泛应用于塑性破坏条件下对结构断裂强度进行估算的方法。临界名义应力 σ_{cr} 可用式(1)计算。

$$\sigma_{cr}=\frac{A_{net}}{A}\sigma_f \tag{1}$$

式中：A 为钢丝的名义横截面积，$A_{net}=A-A_{crack}$ 为钢丝净截面面积，A_{crack} 为裂纹所占据的截面面积；σ_f 为假定的材料特性称为流动应力，一般取值在屈服应力 σ_y 与极限应力 σ_u 之间。

2)基于线弹性断裂韧性准则的强度估算。另外一种估算断裂强度的方法是基于线弹性断裂韧性准则进行强度估算。断裂韧性是结构材料抵抗裂纹扩展的一种能力，是判定钢丝是否发生断裂破坏的准则。基于断裂力学，表面带裂纹的钢丝断裂强度可以用式(2)计算

$$\sigma_c=\frac{K_c}{Y\left(\frac{a}{D}\right)\sqrt{\pi a_c}} \tag{2}$$

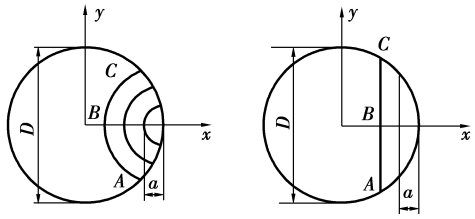
式中：K_c 为断裂韧性值；a_c 为临界裂纹深度；$Y(a/D)$ 为应力强度因子形状修正系数。对于断裂韧性的取值，2007年纽约桥梁管理局提出一种测试吊索钢丝断裂韧性的方法，高强钢丝断裂韧性的平均值为65.7 MPa·$m^{1/2}$[10]。

两种评估方法相比较，弹性断裂准则得到的剩余强度小于净截面理论计算所得剩余强度[9]。所以，在进行表面带有裂纹钢丝承载力评估时，采用线弹性断裂准则估算剩余强度，评估精度较高。

2.2 基于子模型法的带表面裂纹钢丝应力强度因子形状修正系数计算

学者多采用实验方法和有限元方法研究圆柱体试件拉伸载荷作用下裂纹的扩展行为，得出带表面裂纹钢丝应力强度因子形状修正系数表达式[11-15]。但无论是通过疲劳试验，还是传统有限元方法，对于钢丝裂纹应力强度因子计算都有各自缺点：通过疲劳试验获取数据费用高，钢丝裂纹不像平板试件容易量测，试验比较容易失败；传统有限元方法划分单元多，计算时间长，计算机硬件要求高，计算精度低。笔者基于子模型法研究拉伸荷载作用下带有表面裂纹的钢丝应力强度因子，并拟合得到拉伸荷载作用下带有表面裂纹的钢丝应力强度因子形状修正系数表达式。

2.2.1 钢丝计算模型 实际钢丝表面蚀坑形貌复杂，研究蚀坑对钢丝力学性能影响时，需简化处理，一般是把裂纹前端简化成半圆形、椭圆形和直线形，椭圆形裂纹前端应力强度因子处于半圆形和直线形之间，所以计算模型的选取如图4所示，图中 D 为钢丝直径，取值为5 mm；a 为半圆形或直线形表面裂纹深度。数值模拟时，利用有限元软件ANSYS建立模型，得到FRANC3D能够读写的模型数据，然后在FRANC3D模型中插入裂纹，划分模型网格，如图5所示，最后进行应力强度因子计算。单向拉伸应力为1 MPa，各向同性线弹性均质材料，弹性模量 $E=2\times10^5$ MPa，泊松比 $\upsilon=0.3$。



(a)半圆形计算模型 (b)直线形计算模型

图4 计算模型

Fig. 4 Calculation model

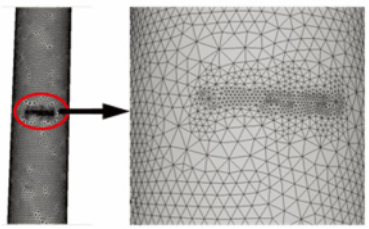


图5 钢丝表面裂纹有限元模型

Fig. 5 FEM of surface crack for wire

2.2.2 带表面裂纹钢丝应力强度因子形状修正系数 模拟所得的拉伸荷载作用下半圆形裂纹前端应力强度因子形状修正系数与已有文献研究结果比较如图6所示。从图中可以看出，模拟结果与已有研究成果[16-18]相差较小。但是在计算半圆形裂纹前端应力强度因子时，裂纹深度与钢丝直径比值 a/D 最小值可以达到0.01，而利用有限元方法和实验方法无法得到 a/D 为0.01时的半圆形裂纹前端应力强度因子，由此可知，基于子模型法计算半圆形裂纹前端应力强度因子的精度大大提高。同样，可得到拉

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

伸荷载作用下直线形裂纹前端应力强度因子形状修正系数。

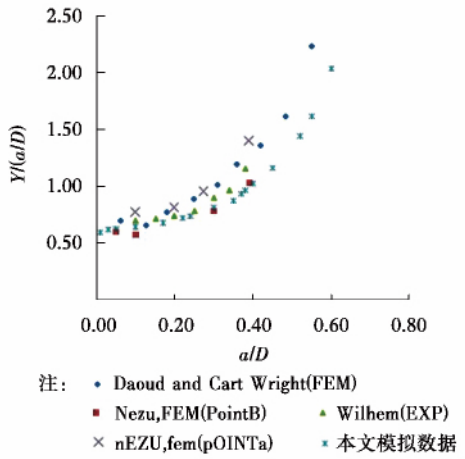


图 6　半圆形裂纹应力强度因子形状修正系数模拟结果与文献数据比较

Fig. 6　Comparison between simulated data with literature data for stress intensity factor correction coefficient of semicircle crack

钢丝裂纹扩展过程中，前期倾向于半圆形裂纹，随着裂纹扩展，裂纹形状逐渐变成直线型裂纹，综合以上两种情况，假定 a/D 达到 0.2 之前按照半圆形裂纹扩展[19]，而 a/D 达到 0.4 之后裂纹按照直线型裂纹扩展，中间利用幂函数过渡，图 7 中虚线为拉伸荷载作用下统一裂纹应力强度因子形状修正系数拟合曲线。拟合得到兼顾半圆形裂纹扩展和直线形裂纹扩展的应力强度因子形状修正系数计算式，如式(3)所示，拟合系数为 0.999。

$$Y\left(\frac{a}{D}\right)=0.587+1.133\left(\frac{a}{D}\right)-13.45\left(\frac{a}{D}\right)^{2}+64.44\left(\frac{a}{D}\right)^{3}-53.63\left(\frac{a}{D}\right)^{4} \quad (3)$$

2.3　腐蚀损伤钢丝剩余强度估算

已有的研究表明，由于蚀坑和等效裂纹对应力分布和应力强度因子的影响十分相似，应力强度因子在蚀坑等效前后数值大小和变化趋势不大，在进行定量评估结构表面含腐蚀坑老龄结构的剩余强度时，可以将腐蚀坑沿垂直于外荷载方向进行投影，从而使其等效为表面裂纹[20-22]。因此，在进行评估钢丝腐蚀后的强度时，可以先把蚀坑等效为表面裂纹，然后采取弹性断裂准则进行估算。其断裂强度如式(4)所示。

$$\sigma_c=\frac{K_c}{Y\left(\frac{\zeta c}{D}\right)_{pit}\sqrt{\pi a_c}} \quad (4)$$

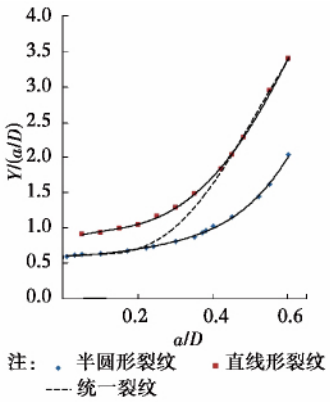


图 7　拉伸荷载作用下统一裂纹应力强度因子形状修正系数拟合曲线

Fig. 7　Fitting curve of uniform stress intensity factor of crack shape correction coefficient under tensile load

式中：c 为蚀坑深度，ζ 蚀坑等效裂纹折减系数，文献[21]采用数值模拟分析方法研究了老龄结构中腐蚀坑与等效裂纹间的量化关系，研究结果表明，等效表面裂纹的尺寸比腐蚀蚀坑的尺寸小 19.7%～22.5%，则 ζ 取值范围为 0.775～0.803，为了保证结构安全，保守取值为 0.85。K_c 为钢丝断裂韧性，a_c 取值临为界裂纹深度。$Y\left(\frac{\zeta c}{D}\right)_{pit}$ 为蚀坑等效裂纹应力强度因子形状修正系数。引进蚀坑等效系数，则由式(3)得到带蚀坑钢丝应力强度因子形状修正系数表达式，如式(5)所示。

$$Y\left(\frac{\xi c}{D}\right)=0.587+1.133\left(\frac{\xi c}{D}\right)-13.45\left(\frac{\xi c}{D}\right)^{2}+64.44\left(\frac{\xi c}{D}\right)^{3}-53.63\left(\frac{\xi c}{D}\right)^{4} \quad (5)$$

3　钢丝腐蚀概率速率

为了定量评估吊索钢丝承载能力，必须首先获取钢丝蚀坑扩展速率。梁雄[23]利用电化学工作站拟合得到应力作用下的钢丝腐蚀速率方程；笔者利用电化学工作站研究温度、含盐量和 pH 值等因素对钢丝电化学腐蚀的影响时，同样拟合得到了钢丝在温度、含盐量和 pH 值等多因素作用下的腐蚀速率方程。上述研究均是通过电化学工作站得到极化曲线，然后计算得到腐蚀速率，由于利用电化学工作站计算得到的钢丝腐蚀速率是短时间内的均匀腐蚀速率[24]，所以，上述两个公式均不宜直接用于实际工程。

对于钢丝腐蚀速率，比较合理的方法是根据大

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气腐蚀性区域划分图进行划分，对各区域内的实际桥梁拆除下来的钢丝腐蚀进行大量的样本统计处理，得到各区域内各桥龄大桥吊索钢丝腐蚀数据，建立钢丝腐蚀速率概率模型。由于样本数量少，笔者只能通过处理袁州大桥钢丝腐蚀蚀坑数据得到大气腐蚀性区域划分图中C4区域近似腐蚀速率概率模型。袁州大桥位于江西省宜春市袁州区，横跨秀江河，主桥为中承式系杆拱桥，采用平行钢丝吊索。全长507.4 m，主桥净宽20 m，引桥净宽15 m。主桥跨度85 m。1997年建成通车，2011年经江西省交通科学研究院检测，吊杆钢丝腐蚀严重，已有断丝现象，2012年3月进行吊杆更换，2012年10月1日竣工通车。

目前研究表明，金属腐蚀量与腐蚀时间呈指数关系[25]，如式(6)所示。

$$C_{(t)} = \alpha \cdot t^{\beta} \tag{6}$$

式中：$C_{(t)}$为t年后的钢丝直径腐蚀减少量；α为第1年的腐蚀量，mm；t为时间，a；β是趋势系数。对于α、β的取值，可首先假设β取值，然后利用袁州大桥钢丝蚀坑深度数据，反推得到α的平均值、标准差和变异系数，如表1所示。

表1 腐蚀速率估算比较

Table 1 Comparison of corrosion rate

β	α平均值/(mm·$a^{1/3}$)	α标准差	α变异系数
1/3	0.072	0.054 91	0.762 639
1/2	0.046 4	0.035 81	0.771 167
4/5	0.021 68	0.016 726	0.771 494

4 腐蚀吊索安全性能评估

为了说明问题，笔者只按照《公路斜拉桥设计规范(试行)》(JTJ 027—96)进行安全性评估，即恒载与汽车活载作用下吊索实际拉力的安全系数要大于2.5，当吊索安全系数小于2.5时，则需要更换吊索。安全系数表达式如式(7)所示。

$$f(A_i, \sigma_i, T_{\mathrm{D}}) = \frac{\tau \cdot \sum A_i \sigma_i}{T_{\mathrm{D}}} \tag{7}$$

式中：A_i为吊索钢丝腐蚀损伤后的截面面积；T_{D}为运营期间索力设计值；σ_i为考虑腐蚀损伤后钢丝断裂强度；τ为丹尼尔效应系数，丹尼尔系数可以利用蒙特卡罗方法模拟计算得到[26]。进行腐蚀吊索安全性能评估时，可分为以下几个步骤：1)根据钢丝腐蚀速率概率模型，利用蒙特卡罗方法随机生成各根钢丝的局部腐蚀尺寸，得到一年末各钢丝经过局部腐蚀后蚀坑处的尺寸；2)利用式(7)得到各腐蚀钢丝的断裂强度；3)判断各钢丝在外荷载作用下是否断裂；4)根据安全系数表达式进行吊索安全性评估；5)重复上述步骤，进入下一周期。评估流程如图8所示。

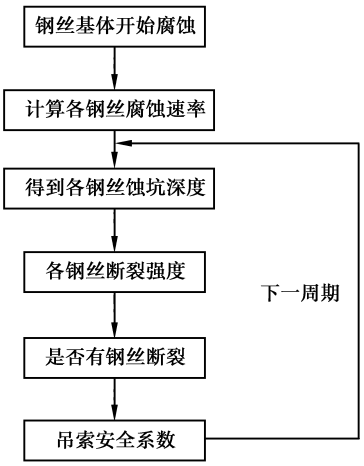


图8 腐蚀吊索安全性能评估流程

Fig. 8 Evaluating process of safety performance of corroded cable

在运营过程中时，由于腐蚀或疲劳裂纹，截面削弱，吊索整体上存在内力重分布现象，对于某根钢丝，其受力变化过程太复杂，进行简化处理，利用上述方法在进行腐蚀吊索安全性能评估时，假设某根钢丝断裂之前，不考虑吊索钢丝的内力重分布，是均匀分布。并参考文献[6]的处理方法，假设吊索不考虑钢丝断裂后的摩擦效应，某根钢丝断裂后立即退出承载。

5 算例及分析

一根吊索由150根直径为5 mm高强度低松弛镀锌钢丝组成，丹尼尔效应系数为0.879 9。单根钢丝公称横截面积$A=19.625\ \mathrm{mm}^2$，钢丝抗拉强度$f_y=1\ 570$ MPa。索力荷载设计值为1 100 kN，不考虑护套破裂和镀锌层腐蚀时间，在考虑吊索腐蚀损伤之前吊索安全系数为3.7。为了分析环境参数对吊索安全系数的影响，在袁州大桥吊索钢丝腐蚀数据的基础上进行参数分析，环境工况1、2、3、4、5和6的各参数如表2所示。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　不同环境工况

Table 2　Different environmental conditions

环境工况编号	第 1 a 腐蚀量均值/mm	腐蚀趋势系数	变异系数	横截面钢丝发生腐蚀数量/根
1	0.072	1/3	0.762 639	150
2	0.046 4	1/2	0.771 167	150
3	0.021 68	4/5	0.771 494	150
4	0.061 68	4/5	0.771 494	150
5	0.101 68	4/5	0.771 494	150
6	0.101 68	4/5	0.771 494	30
7	0.101 68	4/5	0.771 494	90

上述各环境工况下，吊索安全系数小于 2.5 的时间、出现断丝时间、第 30 a 安全系数和第 30 a 断丝数量如表 3 所示。

表 3　不同环境工况影响比较

Table 3　Effects comparison of different environmental conditions

环境工况序号	安全系数小于 2.5 的时间/a	出现断丝时间/a	第 30 a 安全系数	第 30 a 断丝数量/根
1	>30	4	2.605 4	6
2	>30	3	2.590 4	8
3	26	5	2.454 8	14
4	8	1	1.975 4	32
5	5	1	1.540 7	50
6	>30	2	3.339 0	6
7	19	2	2.344 3	35

环境工况 1、2 和 3 的安全系数和断丝数量如图 9、图 10 所示。

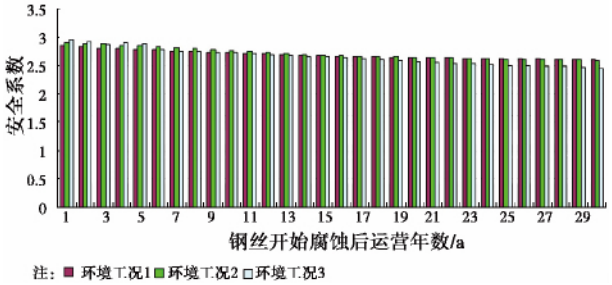


图 9　环境工况 1、2 和 3 作用时的安全性能评估

Fig. 9　Evaluation of safety performance when environmental conditions 1, 2 and 3

1）从图 9、图 10 可以看出，一方面由于受计算

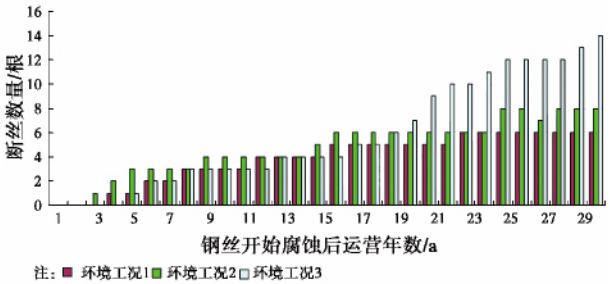


图 10　环境工况 1、2 和 3 作用时的断丝数量

Fig. 10　Number of broken wires when environmental conditions 1, 2 and 3

机硬件条件限制，模拟分析钢丝裂纹应力强度因子时，裂纹深度与钢丝直径之比（a/D）最小值为 0.01，当 $a/D \leqslant 0.01$ 时，计算得到裂纹应力强度因子形状修正系数产生一定的误差；另一方面在进行安全系数评估时，实际工程中在腐蚀初始阶段可能只有部分钢丝腐蚀，环境工况 1～3 是假设吊索横截面钢丝同时腐蚀损伤，利用该方法进行吊索安全性能评估，在腐蚀初始阶段会产生一定的误差，安全系数偏小，评估结果偏保守，但是到了腐蚀中后期，当横截面上钢丝全部腐蚀和钢丝腐蚀蚀坑深度较深时，由上述原因造成的误差基本为零，与实际承载力相符，能够反映吊索真实承载能力，保证桥梁结构安全，适合工程应用。

2）从表 3 可以看出，环境工况 1、2、3 虽然都是利用袁州大桥腐蚀钢丝反推得到，但是由于腐蚀趋势系数不同，导致吊索安全性能评估结果相差较大，其中第 30 a 安全系数和第 30 a 断丝数量随着腐蚀趋势系数的增加而增加，安全系数小于 2.5 的时间随着腐蚀趋势系数的增加而减小。

从表 3 可以看出，在腐蚀趋势系数相等的情况下，对于环境工况 3、环境工况 4 和环境工况 5，由于第 1 a 腐蚀量均值不同，安全系数小于 2.5 所需时间和第 30 a 安全系数随第 1 a 腐蚀均值的增加而降低，第 30 a 断丝数量和出现第一根断丝时间随第 1 a 腐蚀均值的增加而减小。

从表 3 可以看出，在第 1 a 腐蚀量均值不和腐蚀趋势系数相等的情况下，对于环境工况 5、环境工况 6 和环境工况 7，由于钢丝腐蚀率不同，安全系数小于 2.5 所需时间和第 30 a 安全系数随腐蚀率的增加而降低，第 30 a 断丝数量随腐蚀率的增加而增加，出现第一根断丝时间随腐蚀率的增加而减小。

3）在上述各环境工况中，安全系数从 3.7 减小

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到2.5，所需最长时间大于30 a，最短时间为5 a；第30 a年末安全系数最大为3.339，最小为1.540 7；第30 a年末吊索断丝数量最多为50根，最少为6根；出现断丝时间最少为1 a，最多为5 a。说明吊索在钢丝基体发生腐蚀后，由于吊索所处环境不同，吊索安全系数、断丝数量和出现断丝数量相差较大。

4)钢丝虽然由于腐蚀出现断丝，但是安全系数还比较高，如环境工况1，出现断丝时间为钢丝开始腐蚀第4 a，但是其安全系数小于2.5需要大于30 a。

6 结 论

提出了适合于工程应用的基于断裂力学的吊索承载力安全性能评估方法并进行了算例计算。与均匀腐蚀理论模型相比，该方法考虑了蚀坑对吊索承载力的影响，能够预测钢丝断裂数量、安全系数小于2.5的时间。算例研究表明，在桥梁运营过程中，吊索即使出现腐蚀和断丝，运营维护单位应该根据车辆荷载调查和吊索腐蚀情况，利用该方法进行吊索安全性能评估，做到即能保证桥梁结构安全，保护人民生命和财产安全，又能在合适的时间进行吊索更换，降低运营维护成本。

参考文献：

[1] Lichtenstein A G. The silver bridge collapse recounted [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1993, 7(4):249-261.

[2] Hamilton H R, Breen III J E, Frank K H. Investigation of corrosion protection systems for bridge stay cables [R]. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, November, 1995.

[3] 李宏江，王江，张永明，等. 天津永和斜拉桥换索后的索力调整 [J]. 公路交通科技，2008，25(10)：79-83.
Li H J, Wang J, Zhang Y M, et al. Cable force adjustment after cable replacement for Tianjin Yonghe cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2008, 25(10): 79-83. (in Chinese)

[4] 周诚华，梅秀道. 南昌市八一大桥斜拉桥换索工程施工监控[J]. 世界桥梁，2011(2)：73-76.
Zhou C H, Mei X D. Construction monitoring and control of cable replacement for cable-stayed bridge of Bayi Bridge in Nanchang City [J]. World Bridges, 2011(2):73-76. (in Chinese)

[5] 谢福君，廖龙辉. 衡山湘江公路大桥换索方案研究[J]. 公路，2013，4：21-24.
Xie F J, Miao L H. Research on scheme of cable replacement of Hengshan-Xiangjiang Highway Bridge [J]. Highway, 2013, 4:21-24. (in Chinese)

[6] 朱劲松，肖汝诚. 大跨度斜拉桥拉索安全性分析方法研究[J]. 土木工程学报，2006，39(9)：74-79.
Zhu J S, Xiao R C. A study on the safety assessment method for stay cables of long-span cable-stayed bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 74-79. (in Chinese)

[7] Elachachi S M, Breysse D, Yotte S, et al. A probabilistic multi-scale time dependent model for corroded structural suspension cables [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006, 21(3): 235-245.

[8] 马小利，王立彬，丁盛. 平行钢索的锈蚀时变失效概率分析[J]. 工程力学，2012，29(4)：210-216.
Ma X L, Wang L B, Ding S. Time-dependent failure probability analysis of corroded parallel wire cable [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 210-216. (in Chinese)

[9] Mahmoud K M. Fracture strength for a high strength steel bridge cable wire with a surface crack [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 48: 152-160.

[10] Bridge Technology Consulting. Main cable investigation at the mid-hudson suspension bridge-fracture toughness identification of main cable ire [R]. Technical Report Prepared for the New York State Bridge Authority, New York, 2007.

[11] James L A, Mills W J. Review and synthesis of stress intensity factor solution applied to cracks in bolts [J]. Engineering Fracture Mech, 1988, 30: 641-654.

[12] Din A S S E, Lovegrove J M. Stress intensity factors for fatigue cracking of round bars [J]. International Journal of Fatigue, 1981, 3(3): 117-123.

[13] Daoud O E K, Cartwright D J. Strain energy release rate for a circular-arc edge crack in a bar under tension or bending [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1985, 20(1): 53-58.

[14] Wilhem D, Fitzgerald J, Carter J, et al. An empirical approach to determining K for surface cracks [C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Fracture, Cannes, 1981: 11-21.

[15] Mackay T L, Alperin B J. Stress intensity factors for fatigue cracking in high-strength bolts [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(2):391-397.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[16] Daoud O E K, Cartwright D J. Strain energy release rate for a circular arc edge crack in a bar under tension or bending [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1985, 20(1): 53-58.

[17] Nezu K, Machida S, Nakamura H. SIF of surface cracks and fatigue crack propagation behavior in a cylindrical bar [C]// Proceedings of the 25th Japan Congress on Material Research, Metallic Materials, 1982: 87-92.

[18] Wilhem D, Fitzgerald J, Carter J, et al. An empirical approach to determining K for surface cracks [C]// Proccedings of the Fifth International Conference of Fracture, Cannes, 1981, 1: 11-21.

[19] 曾勇,陈艾荣,马如进. 带裂纹的悬索桥主缆钢丝的断裂强度分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 1010-1013.
Zeng Y, Chen A R, Ma R J. Fracture strength of wires with cracks in suspension bridge [J]. Journal of Tongji University: Naturnal Science, 2009, 37(8): 1010-1013. (in Chinese)

[20] Proost Domasky S A, Brooks C L, Honeycutt K T. The application of p-version finite element methods to fracture-dominated problems encountered in engineering practice [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2003, 46(1): 125-139.

[21] 任克亮,吕国志,张有宏. 老龄结构分析中腐蚀坑与等效裂纹间的量化关系[J]. 强度与环境, 2006, 33(2): 50-57.
Ren K L, Lyu G Z, Zhang Y H. The correlation between corrosion pit with equivalent initial surface crack [J]. Structure & Environment Engineering, 2006, 33(2): 50-57. (in Chinese)

[22] 郁大照,陈跃良,柳文林,等. 服役环境下腐蚀坑等效为表面裂纹的有效性分析[J]. 应用力学学报, 2011, 28(1): 79-84.
Yu D Z, Chen Y L, Liu W L, et al. Analysis of validation of real pit as surface crack under service environment [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(1): 79-84. (in Chinese)

[23] 梁雄. 斜拉桥拉索腐蚀行为及其使用寿命预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
Liang X. Corrosion behavior and service life evaluation study on cable of cable-stayed bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

[24] 杨文治. 电化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.

[25] Czarnecki A A, Nowak A S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges [J]. Structural Safety, 2008, 30: 49-64.

[26] 徐宏,黄平明. 平行钢丝拉索 Daniel 效应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(2): 38-41.
Xu H, Huang P M. Analysis of Daniel effect for parallel wire cable [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(2): 38-41. (in Chinese)

(编辑　胡英奎)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net