

局部腐蚀下钢圈限位装置力学性能及使用年限预测

王占飞,任 浩,张 强,侯雯峪

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究局部腐蚀后钢圈限位装置的力学性能,建立承载力退化比计算公式,并提出该装置使用年限的计算方法。方法 通过改变腐蚀率与腐蚀区域建立210个局部腐蚀钢圈限位装置有限元模型。通过有限元分析得到不同腐蚀率下、不同区域出现局部腐蚀后钢圈限位装置刚度、极限承载力与极限位移等力学性能。量化分析腐蚀率及腐蚀区域对其力学性能的影响。结果 随腐蚀率增加,钢圈限位装置的极限承载力显著下降,但其极限位移与刚度变化微小。腐蚀率相同情况下,随腐蚀区域改变,钢圈限位装置的极限承载力退化明显。结论 腐蚀敏感区能反映局部腐蚀区域对钢圈限位装置极限承载力的影响。承载力退化比与使用年限计算式能有效预测局部腐蚀钢圈限位装置的承载能力与使用年限。

关键词 局部腐蚀;钢圈限位装置;使用年限;力学性能;腐蚀率

中图分类号 TU997;U443.5

文献标志码 A

Mechanical Behaviour and Service Life of a Novel Steel Ring Restrainer with Local Corrosion

WANG Zhanfei, REN Hao, ZHANG Qiang, HOU Wenyu

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to explore the mechanical behavior of steel ring restrainers (SRR) with local corrosion damage, build formulas of the ultimate strength degradation ratio, and propose the calculation method of the service life of SRRs. A total of 210 finite element (FE) models of locally corroded SRRs were established by changing corrosion rates and corrosion regions. Then the stiffness, ultimate strength, and ultimate displacement of the SRRs corroded in different regions were obtained from FE analyses under different corrosion rates. Subsequently, the influence of corrosion rates and corrosion regions on the mechanical performance of SRRs were studied. The results show that, as the corrosion rate increases, the ultimate strength of SRRs

收稿日期:2020-11-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009);辽宁省教育厅高校人才创新项目(LR2019056)

作者简介:王占飞(1976—),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震及钢桥腐蚀疲劳方面研究。

degrades obviously, but the ultimate displacement and stiffness varies slightly. Under the same corrosion rates, the ultimate strength of SRRs degrades obviously with the variation of corrosion regions. The corrosion sensitive regions can reflect the influence of local corrosion regions on the ultimate strength of SRRs. The formulas of ultimate strength degradation ratio and service life can effectively predict the bearing capacity and service life of SRRs with local corrosion.

Key words: Local corrosion; Steel ring restrainer; Service life; Mechanical behavior; Corrosion rate

桥梁遭遇地震作用时,若上下部结构间的相对位移超过其设计限值,则会引起落梁震害^[1-2]。为减少落梁,韩强、袁万城等^[3-5]研究了多种桥梁限位装置。王占飞等^[6-8]提出了一种兼具多级设防水准与缓冲耗能能力的防落梁钢圈限位装置,并在静力加载试验下建立了该限位装置力-位移曲线的计算公式。限位装置能有效控制桥梁结构间相对位移、避免落梁,但这些研究均在理想条件下进行,而未考虑限位装置的腐蚀问题。限位装置常安装于桥梁上下部结构间,极易受环境影响出现腐蚀现象^[9]。腐蚀会降低结构的承载能力^[10-16],但因当前缺乏对限位装置腐蚀问题的研究,故各类限位装置在腐蚀后的力学性能尚不明确,其承载力退化程度如何,能否满足抗震要求尚未可知。笔者已分析研究了均匀腐蚀下钢圈限位装置的力学性能^[17],但与均匀腐蚀相比,因防腐涂层局部脱落、腐蚀因子局部积累而引起的局部腐蚀更易发生。对此,笔者通过建立局部腐蚀钢圈限位装置有限元模型,研究局部腐蚀条件下钢圈限位装置的力学性能,提出局部腐蚀钢圈限位装置承载力退化比计算式,并预测不同局部腐蚀条件下钢圈限位装置的使用年限。

1 防落梁钢圈限位装置

钢圈限位装置(SRR)如图 1 所示。由连接板、导向轮及限位钢圈 3 部分组成。地震作用下,连接板带动导向轮在限位钢圈内滑动,利用限位钢圈对导向轮的约束,限制桥梁上、下部结构的相对位移。

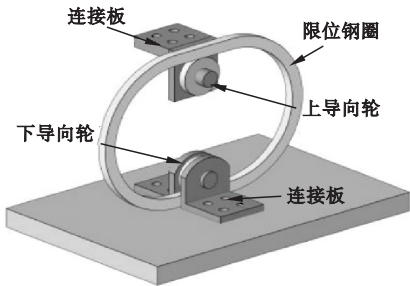


图 1 钢圈限位装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SRRs

该限位装置在水平外荷载下的典型力-位移曲线如图 2 所示^[6-8]。

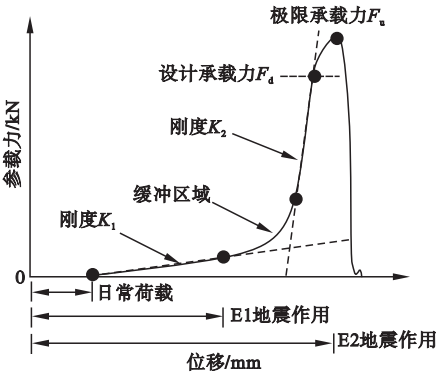


图 2 钢圈限位装置典型力-位移曲线

Fig. 2 Typical force-displacement curve of SRR

从图 2 可知,在日常荷载作用下,该限位装置无明显反力产生,且不会进入工作状态。在中小地震(E1 地震)作用下可提供较小承载力与刚度 K_1 ,维护桥梁的日常交通功能;在罕遇地震(E2 地震)下可提供较大承载力与刚度 K_2 ,避免落梁。同时,在刚度 K_1 向刚度 K_2 转变过程中会经历一段缓冲区域,可有效避免刚度突变而对桥梁带来冲击。由此可见,与传统限位装置相比,钢圈限位装置兼具多级多水准的抗震性能与一定的缓冲耗能能

力,其工作机理也符合韧性交通基础设施建设的需求。

2 钢圈限位装置局部腐蚀

在土木工程领域多采用截面削减法研究腐蚀对金属构件力学性能的影响^[9-10]。该方法能在一定程度上反映腐蚀构件的受力特征^[11-17]。对此,笔者结合 Q. ZHANG^[18]提出的局部截面缺陷分析方案,通过削减限位钢圈局部区域的截面厚度(见图3),研究局部腐蚀条件下钢圈限位装置的力学性能。

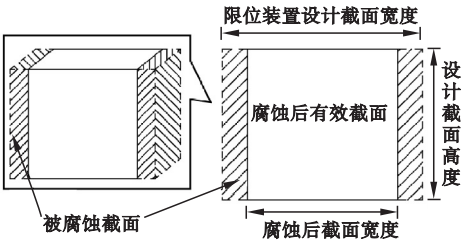


图3 钢圈限位装置局部缺陷分析方法
Fig.3 Analysis method of local defect of SRRs

2.1 局部腐蚀区域

图4为3号区域发生局部腐蚀,削减该区域截面厚度示意图。

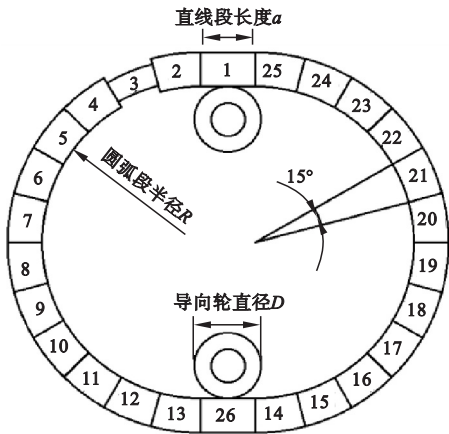


图4 钢圈限位装置局部腐蚀模拟
Fig.4 Local corrosion simulation of SRRs

局部腐蚀具有随机性,笔者在综合考虑模拟精度与分析模型数量的基础上,将限位钢圈圆弧段按15°划分成26个区域并编号,

随后根据编号顺序依次削减各区域的截面厚度,模拟钢圈限位装置在不同位置出现局部腐蚀后的截面状态。

2.2 局部腐蚀程度

笔者采用腐蚀率 η 反映钢圈限位装置的局部腐蚀程度:

$$\eta = \frac{m(\frac{l_c}{l}) - m_c(\frac{l_c}{l})}{m(\frac{l_c}{l})} = \frac{V(\frac{l_c}{l}) - V_c(\frac{l_c}{l})}{V(\frac{l_c}{l})} = \frac{\int A dl_c - \int A_c dl_c}{\int A dl_c} \quad (1)$$

式中: A 、 V 和 m 为限位钢圈的原截面面积、体积及质量; A_c 、 V_c 和 m_c 为腐蚀后腐蚀区域的截面面积、体积及质量; l 为限位钢圈总体弧线长度; l_c 为腐蚀区域的弧线长度。

3 数值模拟

3.1 局部腐蚀钢圈限位装置有限元模型

采用ABAQUS有限元软件研究局部腐蚀钢圈限位装置的力学性能。建立有限元模型如图5所示,其中限位钢圈采用CPS4R壳单元模拟,导向轮采用解析刚体模拟。限位钢圈与导向轮间径向为硬接触,切向为摩擦接触,摩擦系数为0.3。钢材的材料特性:屈服应力 σ_y 为293.71 MPa、极限应力 σ_u 为424.15 MPa、弹性模量 E 为209.79 GPa、泊松比 ν 为0.25、伸长率 δ 为38.14%^[17]。

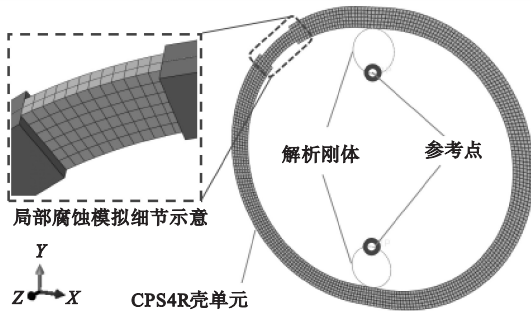


图5 局部腐蚀钢圈限位装置有限元模型
Fig.5 FE model of locally corroded SRRs

3.2 加载方案

局部腐蚀会改变钢圈限位装置的几何对称性,使得导向轮加载方向会影响其力学性能。对此,笔者以同一 SRR 为例建立可能发生的 4 种加载工况有限元模型,探讨局部腐蚀率 $\eta=5\%$ 时不同加载工况的影响,加载方式

及分析结果如图 6 所示。从图可知,不同加载方式有限元模型 A、B、C 和 D 获得力-位移曲线一致。表明模型存在对称关系时,加载工况不会对钢圈限位装置力学性能产生影响。因此,采用模型 A 加载工况进行分析,其他工况分析结果利用模型对称关系获得。

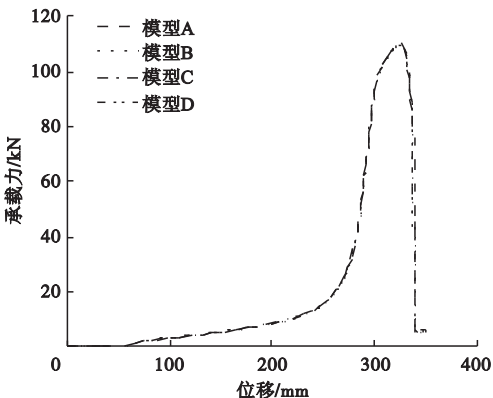
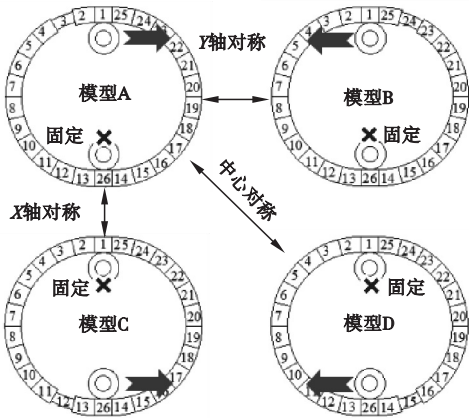


图 6 局部腐蚀率 η 为 5% 时钢圈限位装置的加载工况及有限元分析结果

3.3 有限元分析结果

以 $a=25\text{ mm}$ 、 $R=120\text{ mm}$ 、 $D=40\text{ mm}$ 、截面面积 $A=180\text{ mm}^2$ 和 $A=160\text{ mm}^2$ 为基本分析模型,依据区域编号顺序,按腐蚀率 0%、5%、10%、15% 及 20% 依次削减各区域的截面厚度,建立 I ($A=180\text{ mm}^2$) 组和 II ($A=160\text{ mm}^2$) 组共 210 个局部腐蚀钢圈限

位装置有限元模型。

3.3.1 局部腐蚀对力-位移曲线的影响
局部腐蚀对钢圈限位装置力-位移曲线的影响规律基本一致,笔者以 I 组有限元模型为例,分析腐蚀率及腐蚀区域对其力-位移曲线的影响趋势(见图 7)。

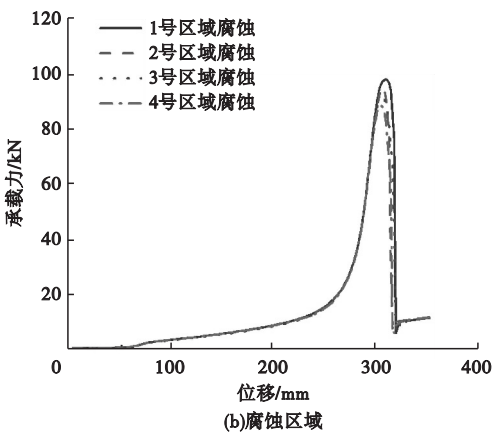
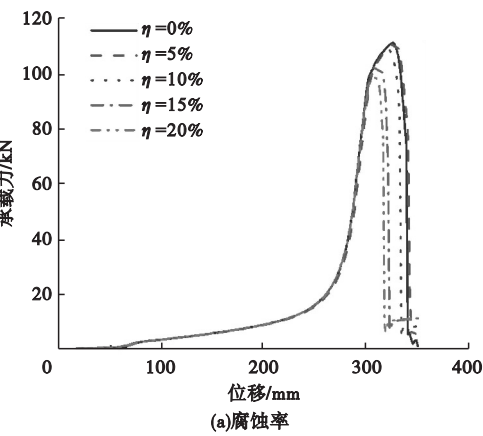


图 7 局部腐蚀对钢圈限位装置力-位移曲线的影响

Fig. 7 Influence of local corrosion on the force-displacement curve of SRRs

图 7(a)为限位钢圈 1 号位置发生腐蚀, 腐蚀率为 0%、5%、10%、15% 及 20% 时,钢

圈限位装置的力-位移曲线。图 7(b) 为腐蚀率为 20% ,1、2、3 及 4 号区域发生腐蚀时,钢圈限位装置的力-位移曲线。

从图 7 可知,不同局部腐蚀条件下钢圈限位装置的力-位移曲线,与未发生局部腐蚀钢圈限位装置的力-位移曲线的变化趋势基本一致:即加载初期,随位移增加,限位装置呈现较小的反力,并在此阶段形成第 1 个稳定的刚度 K_1 ;随位移继续增加,限位装置的承载力及刚度快速上升,并在此形成第 2 个稳定刚度 K_2 ;最终在该装置达到极限承载力 F_u 后,其承载力快速下降。可见,局部腐蚀并未对钢圈限位装置力-位移曲线的变化特征产生影响。此外还可看出:随腐蚀率增加,钢圈限位装置的刚度 K_1 、 K_2 基本不变,而极限承载力 F_u 及极限位移 δ_u 均有所降

低;改变腐蚀区域,刚度 K_1 、 K_2 同样变化微小,而极限承载力 F_u 与极限位移 δ_u 变化显著,这表明局部腐蚀对钢圈限位装置的 F_u 与 δ_u 影响显著,而对刚度 K_1 、 K_2 影响较小。因此在后续研究中,笔者系统分析了局部腐蚀对钢圈限位装置 F_u 与 δ_u 的影响。

3.3.2 腐蚀率对 F_u 与 δ_u 的影响

表 1 为部分局部腐蚀钢圈限位装置有限元分析结果。为直观反映局部腐蚀的影响趋势,分析结果以退化比 γ 的形式给出,即腐蚀后钢圈限位装置的极限承载力、极限位移与未腐蚀钢圈限位装置极限承载力和极限位移的比值。其中 I 组中未腐蚀钢圈限位装置的 F_u 、 δ_u 为 111.3 kN 和 326 mm;II 组中未腐蚀钢圈限位装置的 F_u 、 δ_u 为 95.1 kN 和 322 mm。

表 1 部分局部腐蚀钢圈限位装置有限元分析结果

局部 腐蚀 区域	I 组								II 组							
	$\eta=5\%$		$\eta=10\%$		$\eta=15\%$		$\eta=20\%$		$\eta=5\%$		$\eta=10\%$		$\eta=15\%$		$\eta=20\%$	
	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ	γ_F	γ_δ
1	1.00	1.00	0.98	0.98	0.92	0.95	0.89	0.94	1.00	1.00	0.97	0.97	0.92	0.95	0.88	0.94
2	0.99	1.00	0.97	0.98	0.92	0.96	0.88	0.94	0.99	1.00	0.97	0.98	0.92	0.96	0.88	0.95
3	0.99	1.00	0.99	1.00	0.93	0.96	0.89	0.95	0.99	1.00	0.98	0.99	0.93	0.96	0.89	0.95
4	0.99	1.00	0.99	1.00	0.94	0.97	0.90	0.95	0.99	1.00	0.99	1.00	0.94	0.97	0.90	0.95

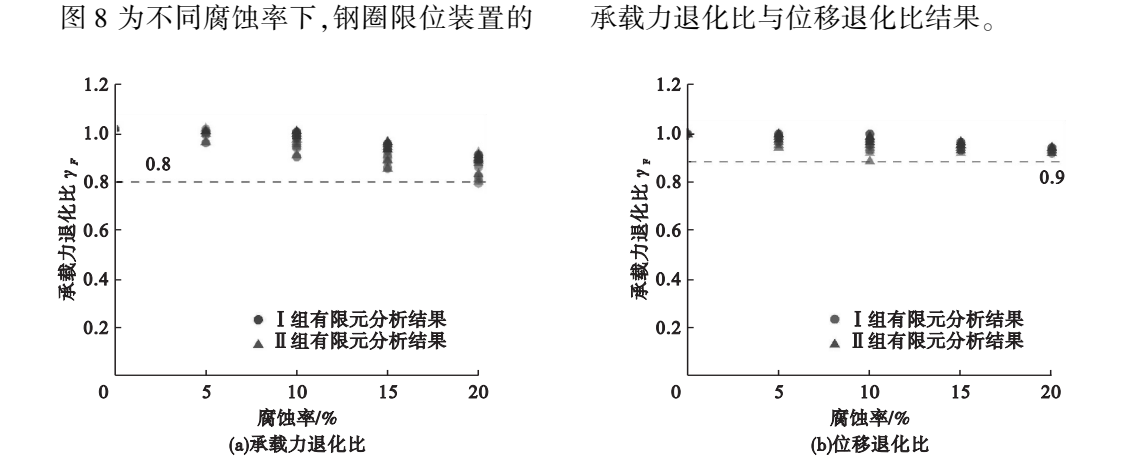


图 8 不同腐蚀率下钢圈限位装置承载力退化比及位移退化比

Fig. 8 Degradation ratio of ultimate strength and ultimate displacement of SRRs under different corrosion rate

从图8(a)可知,随腐蚀率增加,钢圈限位装置的极限承载力下降显著,当 η 达到20%时,个别钢圈限位装置的承载力退化比已降至0.8。而反观图8(b),随腐蚀率增加,钢圈限位装置的极限位移虽有所下降,但在 η 升至20%时,大部分钢圈限位装置位移退化比仍保持在0.9以上。可见,当钢圈限位装置出现局部腐蚀,随腐蚀率增加,其极限承载力会明显降低,而极限位移则变化较小。

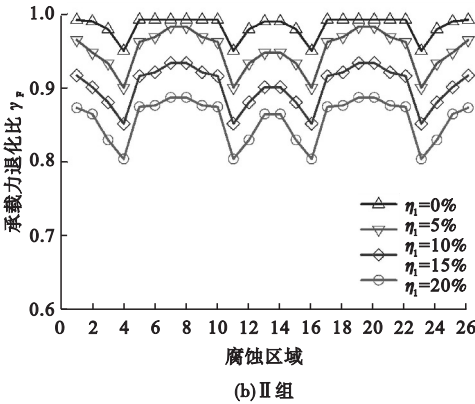
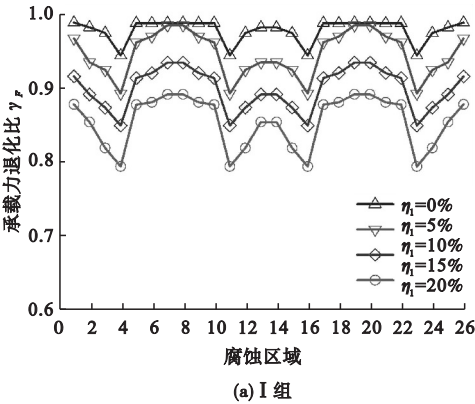


图 9 不同腐蚀区域下钢圈限位装置承载力退化比包络曲线

Fig. 9 Envelope curves of ultimate strength degradation ratio of SRRs under different corrosion regions

为直观反映这种影响,将发生局部腐蚀的区域定义为如图 10 所示的 4 类局部腐蚀敏感区域。

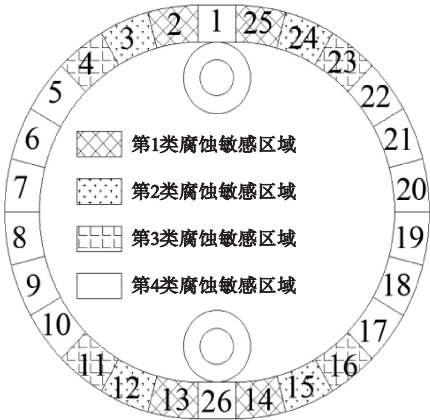


图 10 钢圈限位装置局部腐蚀敏感区域

Fig. 10 Corrosion sensitive regions of SRRs

第 1 类敏感区域表示,当该区域发生局部腐蚀时,钢圈限位装置极限承载力下降程

3.3.3 腐蚀区域对 F_u 的影响

图 9 为相同腐蚀率,不同区域局部腐蚀后,钢圈限位装置的承载力退化比。从图 9 可知,在相同腐蚀率下,改变腐蚀区域会对钢圈限位装置的极限承载力产生显著影响。其中当局部腐蚀发生在限位钢圈 4、11、16、23 区域时,钢圈限位装置承载力退化比下降幅度最大;其次为 3、12、15、24 区域与 2、13、14、25 区域、其他区域下降程度最小。

度最大;第 2 类敏感区表示极限承载力下降程度较大;第 3 类敏感区则表示下降程度一般;第 4 类敏感区为下降不明显。

3.3.4 腐蚀率及腐蚀区域对断裂位置的影响

不同局部腐蚀条件下,钢圈限位装置的断裂位置呈现出一定规律。以 A180 组局部腐蚀发生于 3 号(局部腐蚀敏感程度为 2 类)及 7 号(局部腐蚀敏感程度为 4 类)区域的有限元模型为例进行说明。所选模型最终断裂位置如图 11 所示。

当 η 仅为 5% 时,两钢圈限位装置的断裂位置均出现在与导向轮接触部位。但当 η 上升至 10%,腐蚀发生在 3 号区域的限位装置便开始在腐蚀区域内断裂,而发生在 7 号区域的限位装置依旧在与导向轮接触部位断裂。当 η 继续上升至 15% 及 20%,腐蚀发生在 7 号区域的限位装置也开始在腐蚀区域内断裂。由此可知,局部腐蚀下钢圈限位装置

的断裂位置受腐蚀区域及腐蚀率影响;轻微腐蚀时,无论任何位置出现局部腐蚀,其断裂均发生在与导向轮接触部位。腐蚀程度进一步增加,钢圈限位装置的断裂位置则由腐蚀

区域所主导。当腐蚀率达到一定程度,钢圈限位装置在外荷载下发生断裂的位置均发生在腐蚀区域。

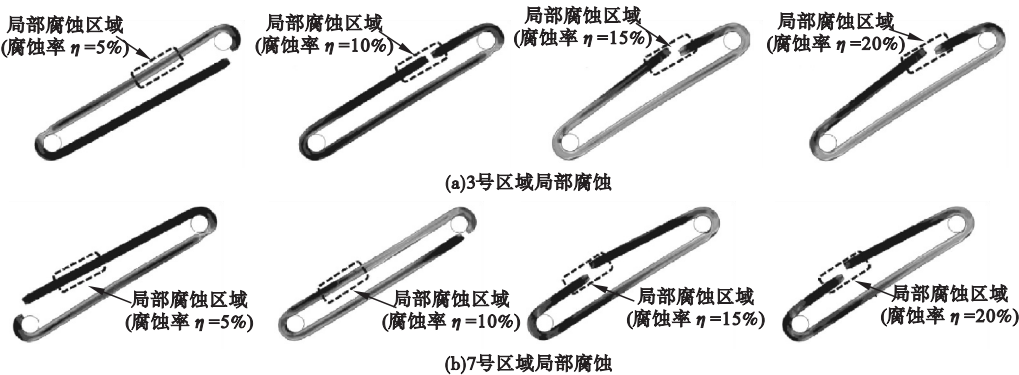


图 11 局部腐蚀钢圈限位装置截面断裂位置

Fig. 11 Fracturelocation of SRRs with local corrosion

4 耐久性分析

4.1 局部腐蚀钢圈限位装置承载力退化比

为保证地震下带有局部腐蚀损伤的钢圈限位装置能充分发挥限位功能,笔者运用 Origin 软件对 210 个有限元模型的承载力退化结果进行拟合,得到不同敏感区域出现局部腐蚀后钢圈限位装置承载力退化比。

(1) 第 1 类敏感区

$$\gamma_{F1} = \frac{F_{\eta 1}}{F_u} = 1 - 0.010\,23\eta. \tag{2}$$

(2) 第 2 类敏感区

$$\gamma_{F2} = \frac{F_{\eta 2}}{F_u} = \begin{cases} 1, & \eta < 2.8; \\ 1.028\,8 - 0.010\,37\eta, & \eta > 2.8. \end{cases} \tag{3}$$

(3) 第 3 类敏感区腐蚀

$$\gamma_{F3} = \frac{F_{\eta 3}}{F_u} = \begin{cases} 1, & \eta < 2.8; \\ 1.024 - 0.008\,57\eta, & \eta > 2.8. \end{cases} \tag{4}$$

(4) 第 4 类敏感区腐蚀

$$\gamma_{F4} = \frac{F_{\eta 4}}{F_u} = \begin{cases} 1, & \eta < 4.5; \\ 1.034\,6 - 0.007\,68\eta, & \eta > 4.5. \end{cases} \tag{5}$$

式中: γ_{Fi} , $F_{\eta i}$ 分别为在第*i*类敏感区出现局部腐蚀后,钢圈限位装置的承载力退化比和极限承载力; F_u 为未腐蚀状态下钢圈限位装置的极限承载力。

其中, F_u 可按照式(6)计算^[7]:

$$F_u = 0.923A \times \left(\frac{a}{2\,500} - \frac{R}{1\,800} + 0.615 \times 0.993^{0.75(C + \sqrt{C^2 - 16A})} + 0.536 \right) \times \frac{\sigma_u}{589}. \tag{6}$$

将两组有限元模型在不同敏感区域出现局部腐蚀后的极限承载力,与相应的公式计算结果进行对比(见图 12)。通过对比可知,公式计算结果与有限元分析结果最大误差不超过 5%,表明该公式具有较高精度。

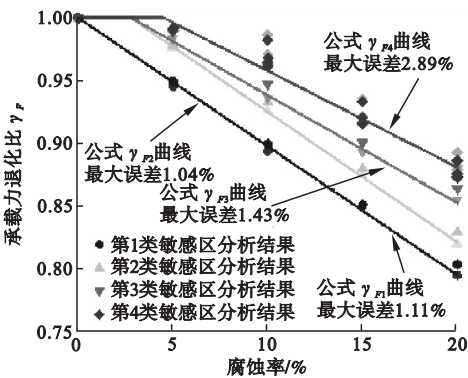


图 12 公式计算结果与有限元结果对比

Fig. 12 Comparison results of formulas and FEAs

4.2 局部腐蚀钢圈限位装置使用年限预测

局部腐蚀会降低钢圈限位装置的承载能

力,当其承载力降至原设计承载力以下时,将无法继续保证该装置在地震时限位功能的正常发挥。对此,笔者将钢圈限位装置极限承载能力退化至原设计承载力时经历的时间定义为该装置的使用年限,并对该限位装置使用年限的计算方法进行了探讨。

钢圈限位装置的设计承载力计算方法^[8]为

$$F_d=2\times\sigma_u\times A\times0.6.$$

(7)

根据《金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第2部分:腐蚀等级的指导值》(GB/T 19292.2—2018),碳钢腐蚀速率计算方法为

$$dD/dt=br_{\text{corr}}(t)^{b-1}.$$

(8)

式中: r_{corr} 为金属第1年的腐蚀速率, $\mu\text{m/a}$; b 为金属环境参数; D 为金属的腐蚀深度。

将式(7)与先前求得钢圈限位装置承载力退化比公式联立,可求得钢圈限位装置承载力退化至其原设计承载力时的临界腐蚀率。利用腐蚀率与腐蚀面积的关系,可推导出在临界腐蚀率下钢圈限位装置的腐蚀深度 D 。利用腐蚀深度与腐蚀速率的关系,即可获得钢圈限位装置使用年限的计算式:

$$t_{\eta_i}=t_1+\text{e}^{\ln\left(\frac{Cr_{\text{corr}}-\sqrt{C^2\cdot r_{\text{corr}}^2-16r_{\text{corr}}^2\times\eta_dA^4}}{8\times r_{\text{corr}}}\right)\times b-1}.$$

(9)

式中: t_{η_i} 为第 i 类敏感区出现局部腐蚀后,钢圈限位装置的使用年限; a ; t_1 为防腐涂层或等防腐措施的失效年限; a ; C 为未腐蚀状态下,钢圈限位装置的设计截面周长 mm 。

以 I 组的钢圈限位装置基本分析模型为例,假设在国内不同腐蚀环境等级地区使用时,在不同敏感区域发生局部腐蚀后的使用年限预测结果如表 2 所示。公式所需相关参数参考《金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第 1 部分:分类测定和评估》(GB/T 19292.1—2018),其中 r_{corr} 取 0.75 倍标准值、 b 取 0.575、 t_1 取 0 计算。

由表 2 可知:在不考虑防腐措施情况下,当钢圈限位装置应用于 C1 及 C2 类腐蚀环境时,其使用年限均能达到 120 a 以上;但随

腐蚀环境恶化,限位装置的使用年限会不同程度地缩减。当使用地区腐蚀环境达到 C5 时,无论任何区域发生局部腐蚀,其使用年限均不足 20 a。

表 2 钢圈限位装置使用年限预测

Table 2 Predicted service life of SRRs

腐蚀环境等级	国内典型地区	使用年限/a			
		第 1 类腐蚀敏感区	第 2 类腐蚀敏感区	第 3 类腐蚀敏感区	第 4 类腐蚀敏感区
C1	理想地区	>120	>120	>120	>120
C2	敦煌、漠河等	>120	>120	>120	>120
C3	沈阳、北京等	89	114	>120	>120
C4	广州、青岛等	37	47	64	86
C5	江津等	8	10	14	19

5 结 论

(1)局部腐蚀钢圈限位装置力-位移曲线的变化趋势与未腐蚀时一致。随腐蚀率增加,钢圈限位装置极限承载力显著下降,而刚度与极限位移变化微小。腐蚀率相同,不同区域出现局部腐蚀后,钢圈限位装置的极限承载力下降程度不同。定义的腐蚀敏感区域可有效反映局部腐蚀区域对钢圈限位装置极限承载力的影响。

(2)局部腐蚀钢圈限位装置的断裂位置受腐蚀率及腐蚀区域影响。轻微腐蚀时,断裂位置出现在与导向轮接触部位随腐蚀程度增加,其断裂位置则可能发生在高敏感区域;当腐蚀达到一定程度后,无论任何区域腐蚀,断裂位置均出现在腐蚀区域内。

(3)局部腐蚀钢圈限位装置承载力退化比公式具有较高精度。利用金属大气腐蚀原理预测了不同使用地区钢圈限位装置的使用年限。

参考文献

[1] LI J Z, PENG T B, XU Y. Damage investigation of girder bridges under the

- Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2008, 7(4): 337 – 344.
- [2] HAN Q, DU X L, LIU J B, et al. Seismic damage of highway bridges during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 8(2): 263 – 273.
- [3] 赵玉坤, 韩强, 王雪剑, 等. 填充式钢管阻尼器性能及在桥梁横向减震中的应用[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 90 – 100.
(ZHAO Yukun, HAN Qiang, WANG Xuejian, et al. Behavior of zinc-filled steel tube damper and its application for improving transverse seismic performance of girder bridges [J]. China journal of highway and transport, 2019, 32(9): 90 – 100.)
- [4] 袁万城, 谷屹童, 党新志, 等. 缓冲型拉索减震支座脉冲地震下减震性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1511 – 1516.
(YUAN Wancheng, GU Yitong, DANG Xinzhì, et al. Seismic performance of a buffer cable sliding friction aseismic bearing in pulse-type earthquakes [J]. Journal of Harbin engineering university, 2018, 39(9): 1511 – 1516.)
- [5] DENG K L, PAN P, SU Y K, et al. Development of an energy dissipation restrainer for bridges using a steel shear panel [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 101: 83 – 95.
- [6] 王占飞, 孙巨搏, 程浩波, 等. 缓冲型防落梁钢圈限位装置力学性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6): 18 – 23.
(WANG Zhanfei, SUN Jubo, CHENG Haobo, et al. Study on mechanical properties of a steel ring anti-fall restrainer with buffer capacity [J]. Bridge construction, 2018, 48(6): 18 – 23.)
- [7] 王占飞, 张强, 李航, 等. 缓冲型防落梁钢圈限位装置力学性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 256 – 264.
(WANG Zhanfei, ZHANG Qiang, LI Hang, et al. Experimental study on mechanical properties of steel ring restrainers with buffer capacity [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(2): 256 – 264.)
- [8] SUN J B, WANG Z F, XUE D W, et al. Concept and behavior of a steel ring restrainer with variable stiffness and buffer capacity [J]. Journal of earthquake and tsunami, 2020, 14(4): 205002001 – 205002027.
- [9] KIM I T, LEE M J, AHN J H, et al. Experimental evaluation of shear buckling behaviors and strength of locally corroded web [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 83: 75 – 89.
- [10] AHN J H, KIM I T, KAINUMA S, et al. Residual shear strength of steel plate girder due to web local corrosion [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89: 198 – 212.
- [11] LIU C, MIYASHITA T, NAGAI M. Analytical study on shear capacity of steel I-girders with local corrosion nearby supports [J]. Procedia engineering, 2011, 14: 2276 – 2284.
- [12] KAITA T, APPUHAMY J M R S, OHGA M, et al. An enhanced method of predicting effective thickness of corroded steel plates [J]. Steel and composite structures, 2012, 12(5): 379 – 393.
- [13] ALBRECHT P, HALL T T. Atmospheric corrosion resistance of structural steels [J]. Journal of materials in civil engineering, 2003, 15(1): 2 – 24.
- [14] XU J, CHEN W Z. Behavior of wires in parallelwire stay cable under general corrosion effect [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 85: 40 – 47.
- [15] BETTI R, WEST A C, VERMASS G, et al. Corrosion and embrittlement in high-strength wires of suspension bridge cables [J]. Journal of bridge engineering, 2005, 10(2): 151 – 162.
- [16] 潘晓宇, 谢旭, 李晓章, 等. 锈蚀高强度钢丝的力学性能与评级方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 1917 – 1924.
(PAN Xiaoyu, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Mechanical properties and grading method of corroded high-tensile steel wires [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2014, 48(11): 1917 – 1924.)
- [17] 王占飞, 张强, 佟舟, 等. 均匀腐蚀下防落梁钢圈限位装置力学性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 844 – 852.
(WANG Zhanfei, ZHANG Qiang, TONG Zhou, et al. Study on mechanical properties of a steel ring anti-fall restrainer with uniform corrosion [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 844 – 852.)
- [18] ZHANG Q, MA Y, FENG J, et al. Optimization for finite element model of a steel ring restrainer with sectional defect [C]. Shenyang: advances in simulation and process modelling, 2021.