

均匀腐蚀下防落梁钢圈限位装置力学性能

王占飞¹,张强¹,佟舟²,任浩¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳城市建设学院土木工程系,辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 研究防落梁钢圈限位装置在不同均匀腐蚀率下的力学性能,建立腐蚀率与暴露时间关系式,提出均匀腐蚀下钢圈限位装置剩余承载力计算.方法 以均匀腐蚀率为设计参数,设计4个试验试件进行单调加载试验,建立4组共20个有限元分析模型,得到均匀腐蚀下钢圈限位装置的力-位移曲线和最终破坏形态,并分析均匀腐蚀率对装置力学性能的影响.结果 得出了工程常用的矩形截面钢材均匀腐蚀深度和均匀腐蚀后钢圈限位装置剩余承载力的计算方法.随着均匀腐蚀率的增加,钢圈限位装置的一阶稳定刚度 K_1 和极限承载力均呈现下降趋势;均匀腐蚀率对构件的二阶稳定刚度 K_2 和极限位移无明显影响.结论 均匀腐蚀对钢圈限位装置的力学性能影响较大,矩形截面均匀腐蚀深度和均匀腐蚀后钢圈限位装置剩余承载力的计算方法降低了工程实际应用时的计算难度.

关键词 均匀腐蚀;钢圈限位装置;腐蚀率;力学性能;落梁震害

中图分类号 TU317.1;TU391

文献标志码 A

Study on Mechanical Properties of a Steel Ring Anti-Fall Restrainer with Uniform Corrosion

WANG Zhanfei¹, ZHANG Qiang¹, TONG Zhou², REN Hao¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction, Shenyang, China, 110167)

Abstract: The purpose of this paper is to study the mechanical properties of the steel ring restrainer with uniform corrosion, build the relationship of corrosion rate and exposure time, and deduce the calculation method of uniform corrosion rate and remaining bearing capacity of the steel ring restrainer. The uniform corrosion rate was used as the parameter, and 4 test specimens were used to load experiments and 20 finite element analysis models were designed. The force-displacement curve of the steel ring restrainer with uniform corrosion was obtained. The mechanical properties and the failure modes with uniform corrosion are analyzed. The calculation method of uniform corrosion depth of rectangular section and the remaining bearing capacity of the steel ring restrainer

收稿日期:2019-12-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介:王占飞(1976—),男,教授,博士,主要从事钢结构桥梁抗震方面研究.

with uniform corrosion were established. The stiffness K_1 and ultimate bearing capacity of the steel ring restrainer decrease as the uniform corrosion rate increases. The uniform corrosion rate has slight effect on the stiffness K_2 and the ultimate displacement of the restrainer. The uniform corrosion has a great influence on the mechanical properties of the steel ring restrainer. The calculation method of uniform corrosion depth of rectangular section and remaining bearing capacity of the steel ring restraine after uniform corrosion decrease the complexity of calculation in engineering application.

Key words: uniform corrosion; steel ring restrainer; corrosion rate; mechanical properties; bridge unseating

桥梁是基础设施的重要组成部分,在使用期间一旦发生严重的破坏,将会带来巨大的财产损失^[1]. 桥梁结构往往具有更长的设计使用年限,桥上的钢构件长时间暴露于大气环境中难以避免腐蚀^[2]. 随着时间的推移,钢构件表面的腐蚀损伤会越发严重,造成力学性能下降,成为影响结构耐久性的主要原因之一^[3-6]. 又由于腐蚀所引起的结构损伤难以观测和修复,故应在构件设计和维护时考虑其剩余承载能力^[7-8]. 为了控制桥梁上部结构位移,避免落梁震害的发生,国内外学者研发了多种防落梁限位装置和具有一定耗能能力的阻尼器. 陈之毅等^[9]对新型剪切板阻尼器的滞回性能参数进行研究,给出了设计建议参数并验证了阻尼器具有较好地耗能和限位能力. 赵玉坤等^[10]提出了一种填充式钢管阻尼器并验证了其在横桥向优越的耗能和限位能力. 王占飞等^[11-12]提出一种构造简单造价低廉的防落梁钢圈限位装置,并通过有限元模拟对不同设计参数下的力学性能进行研究,发现该装置具有较好地限位能力和缓冲能力. S. Mahjoubi 等^[13]发现双管阻尼器可以有效减小地震发生时结构的位移响应,从而减小结构的损伤. 限位装置长时间暴露在大气环境之中发生严重的腐蚀损伤后其极限承载力、刚度等力学性能是否可靠有效,仍需进一步研究. 鉴于此,笔者建立了腐蚀率与暴露时间关系式和工程常用的矩形截面钢材均匀腐蚀深度计算方法,并进一步通过试验及有限元模拟对防落梁钢圈限位装置在不

同均匀腐蚀率下的力学性能进行研究,最终提出了均匀腐蚀下钢圈限位装置剩余承载力计算方法,以期为实际工程提供参考.

1 腐蚀率及均匀腐蚀深度

1.1 腐蚀率研究现状

T. Kaita 等^[14-19]通过试验证明了腐蚀所造成的有效截面积缩减是钢结构承载力、延性等力学性能退化的主要原因,且在均匀腐蚀条件下腐蚀深度基本相同,并建立了多参数影响下的腐蚀率与暴露时间关系式,目前广泛采用的钢材腐蚀率计算方法为^[17]

$$\eta = \eta_1 t^n. \tag{1}$$

式中: η 为钢材均匀腐蚀率; η_1 为钢材在大气环境中暴露第 1 年的均匀腐蚀率; t 为钢材在大气环境中暴露时间, $a; n$ 为与钢材所处大气环境相关的常数.

1.2 腐蚀率与暴露时间的关系

由于钢材质地均匀,无论以何种方式造成的腐蚀,其腐蚀率均可由质量损失比既失重率表示,且可以近似等同于钢材截面面积减小量之比. 因此可推导出腐蚀率与体积及面积间关系:

$$\eta = \frac{m - m_c}{m} = \frac{V - V_c}{V} = \frac{A - A_c}{A}. \tag{2}$$

式中: A 、 V 和 m 分别为腐蚀前钢材的截面面积、体积和质量; A_c 、 V_c 和 m_c 分别为腐蚀后钢材的有效截面面积、体积和质量.

因此,当确定钢材体积或有效截面面积随时间变化关系时,即可建立腐蚀率与暴露

时间关系式. 对于空间中任意形状几何体, 其任一截面的轮廓线均可由有界函数 f 表示, 在该有界函数 f 的投影区域中可划分大量微小单元 $d\sigma$. 在 $d\sigma$ 中任取一点 $f(\xi, \varphi)$ 作乘积, 并求和, 既 $\sum f(\xi, \varphi) d\sigma$. 当微小单元数量 x 接近于无限时, 既 $\lim_{x \rightarrow \infty} \sum f(\xi, \varphi) d\sigma$ 时, 将求得该几何体体积, 此时记作 $\iint f d\sigma$.

笔者采用微积分法并基于式(1)、(2)建立具有普适性的任意形状钢材腐蚀率与暴露时间关系式:

$$\eta = \frac{\iint f d\sigma - \iint f_1 d\sigma}{\iint f d\sigma} t^n.$$

(3)

式中: f 和 f_1 为腐蚀前钢材和大气环境中暴露第 1 年后的钢材截面轮廓线的有界函数.

1.3 矩形截面均匀腐蚀深度计算方法

对于常见的矩形截面钢材. 在均匀腐蚀条件下, 由式(2)可得均匀腐蚀深度:

$$a = \frac{C - \sqrt{C^2 - 16\eta A}}{8}.$$

(4)

式中: a 为均匀腐蚀深度; C 为未腐蚀时截面的周长.

联立式(1)、式(2)与式(4), 可建立均匀腐蚀深度与暴露时间关系:

$$a = \frac{C - \sqrt{C^2 - 16(A - A_1)t^n}}{8}.$$

(5)

式中: A_1 为均匀腐蚀条件下暴露第 1 年的截面积.

由于工程上构件截面大多为矩形、圆形等规则形状, 且截面的边长和周长 C 往往作为设计参数之一, 故在均匀腐蚀条件下有界函数 f 或截面面积 A 将易于求得, 因此笔者建立的均匀腐蚀率和矩形截面均匀腐蚀深度计算方法降低了工程实际应用时计算难度.

2 试验及结果分析

2.1 试验试件

为分析均匀腐蚀率对钢圈限位装置力学性能的影响, 设计 4 个由 Q235 钢材制作的均匀腐蚀率分别为 0%, 11%, 22%, 33% 的

试验试件. 钢圈限位装置构造如图 1 所示.

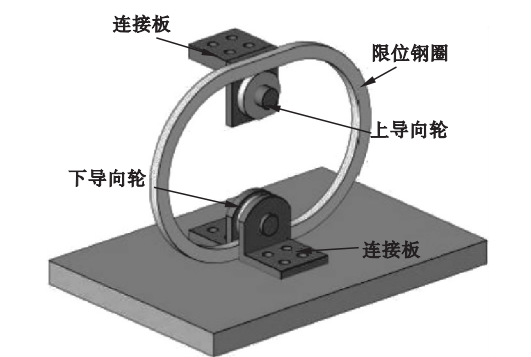


图 1 钢圈限位装置构造

Fig. 1 Details of steel ring restrainer

通过直接改变限位钢圈截面面积来模拟因发生均匀腐蚀而引起的有效截面积削减. 试验试件的削减面积由式(2)和式(4)求得, 试件主要参数如表 1 所示.

对于用于制作试验试件的钢板母材取样并按照规范标准进行材性试验, 得到基本材料参数: 屈服应力 f_y 为 293.71 MPa、极限应力 f_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%.

表 1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

试件 编号	圆弧段 半径/mm	导向轮 直径/mm	直线段 长度/mm	截面面 积/mm ²	均匀腐 蚀率/%
SR2C0	120	40	25	180	0
SR2C11	120	40	25	160	11
SR2C22	120	40	25	140	22
SR2C33	120	40	25	120	33

2.2 试验装置

为模拟钢圈限位装置在地震发生时的工作状态, 笔者设计试验加载装置进行单调加载试验(见图 2). 导向轮分别由置于滑块和底座之上的高强钢螺杆代替, 其中设置的直线导轨既能使滑块沿设计方向产生水平位移, 又能大大减小摩擦对测量结果的影响. 采用 MTS 加载系统带动连接臂使滑块产生水平位移, 而下导向轮固定于底座保持不动. 试验过程中反力由 MTS 直接输出, 位移通过图 2 中所示的 3 个位移计测得.

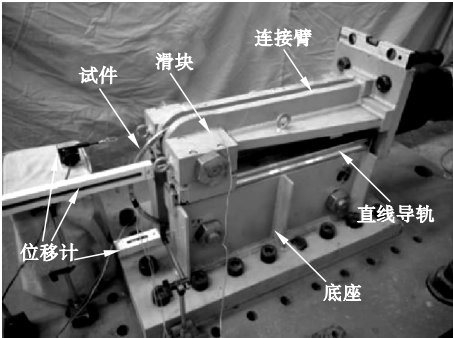


图2 试验装置

Fig. 2 Details of test setup

2.3 试验结果

4个试验试件的力-位移曲线如图3所示. 试件达到极限状态时的承载力和位移以

坐标的形式在图3(a)中标出. 试验加载过程中,所有试件的破坏特征趋于一致,且力-位移曲线呈现出如图3(b)所示的规律:加载初期,试件圆弧段发生塑性变形,在此过程中力-位移曲线呈现出较小的承载力且具有第1个较为稳定的刚度 K_1 ,此时钢圈处于弯曲阶段;当加载位移达到极限位移的约60%~80%时,刚度开始逐渐增大,此时试件圆弧段基本被拉直,处于缓冲阶段;随着位移加载的继续进行,试件承载力快速增大且具有第2个较为稳定的刚度 K_2 时,处于拉伸阶段;最终当达到极限承载力 N_{ex} 后在试件与上下导向轮(高强度螺杆)接触位置发生断裂破坏.

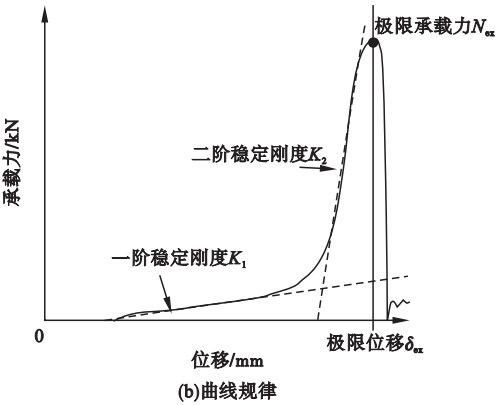
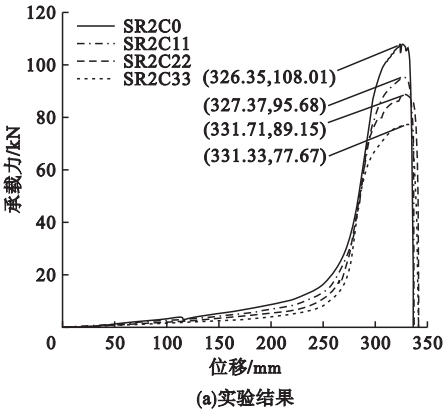


图3 钢圈限位装置的力-位移曲线

Fig. 3 Force-dispalcementcurves of steel spring restrainer

4个试验试件的刚度 K_1 、 K_2 、极限承载力 N_{ex} 和极限位移 δ_{ex} 结果如表2所示. 刚度 K_1 、 K_2 分别为处于弯曲阶段和拉伸阶段上两点的斜率. 笔者采用退化比来反映均匀腐蚀率对钢圈限位装置力学性能的影响,以SR2C0试件既未腐蚀试件的试验结果为标准,将其余3个试验试件结果与之相比,得到

退化比与腐蚀率间关系(见图4). 随着腐蚀率增大,试验试件的刚度 K_1 和极限承载力有明显下降趋势;刚度 K_2 略有上升;极限位移基本保持不变. 由此可知,均匀腐蚀导致试件有效截面积削减,改变了截面的几何属性,从而影响了装置的力学性能.

表2 试件试验结果

Table 2 Test results of specimens

试件编号	$K_1/(kN \cdot mm^{-1})$	K_1 退化比	$K_2/(kN \cdot mm^{-1})$	K_2 退化比	N_{ex}/kN	N_{ex} 退化比	δ_{ex}/mm	δ_{ex} 退化比
R2C0	0.054	1	2.650	1	108.01	1	326.35	1
SR2C11	0.039	0.722	2.635	0.994	95.68	0.886	327.37	1.003
SR2C22	0.030	0.556	2.784	1.051	89.15	0.825	331.71	1.016
SR2C33	0.024	0.444	3.073	1.160	77.67	0.719	331.33	1.015

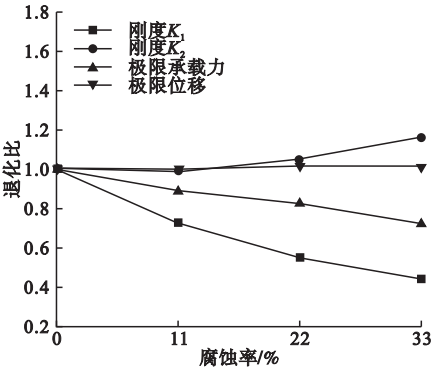


图4 退化比与腐蚀率关系

Fig. 4 The relationship between the degradation ratio and the corrosion rate

3 有限元模拟分析

3.1 有限元模型建立

利用有限元软件 ABAQUS 对防落梁钢圈限位装置的荷载 - 变形全过程进行有限元分析. 有限元模型及边界条件如图 5 所示.

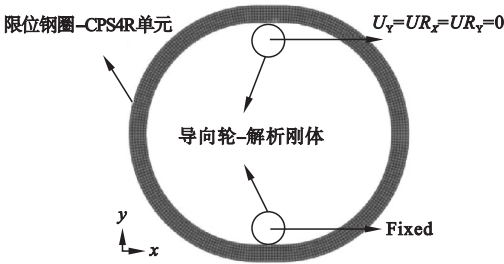


图5 有限元模型及边界条件

Fig. 5 FE model and boundary conditions

采用 CPS4R 壳单元模拟钢圈, 上、下导向轮由两个大小相同的解析刚体进行模拟. 钢圈与上下导向轮的接触: 法向采用硬接触,

切向采用库仑摩擦模型. 有限元模型的边界条件, 与试验相同, 既下导向轮采用固定约束, 上导向轮仅释放 X 轴方向位移.

3.2 钢材材料本构

钢材的屈服法则采用等方性法则. 其真应力 - 应变关系曲线根据材性试验结果采用 PLT 法^[20] 计算:

$$\sigma_t = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} \right) \cdot \varepsilon_t^{\varepsilon_n}, & \varepsilon \leq \varepsilon_n; \\ \sigma_n (1 + \varepsilon_t - \varepsilon_n) - \frac{\sigma_n}{1 + n} \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_n)^{1+n}, & \varepsilon > \varepsilon_n. \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_t 和 ε_t 分别为真应力和真应变; σ_n 和 ε_n 为颈缩时真应力和颈缩时真应变, n 为韧性参数.

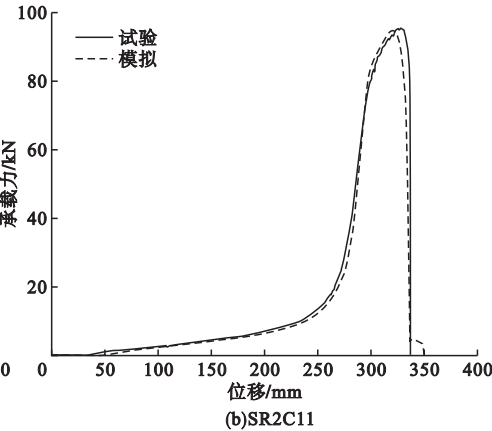
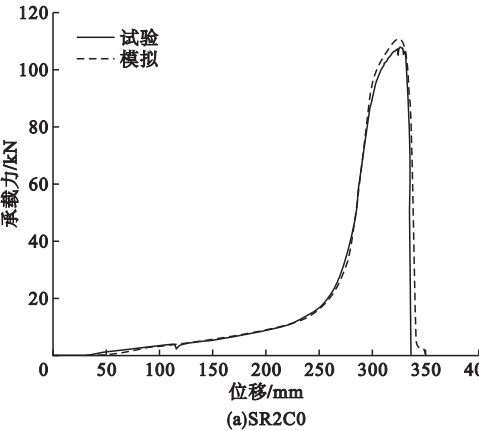
断裂模型采用 SMCS 断裂准则:

$$\varepsilon_p - \alpha e^{-1.5T} > 0. \quad (7)$$

式中: ε_p 为等效塑性应变; T 为应力三轴度; α 为断裂参数.

3.3 有限元模型正确性验证

图 6 为 4 个试件的试验结果与有限元模拟结果的对比. 由图可知, 试验结果与有限元模拟结果基本吻合, 力 - 位移曲线变化规律一致, 部分模型的极限位移值 δ_{fe} 与试验值略有偏差, 这可能是由于试验装置和加载过程中的误差所致. 有限元模拟结果的最终断裂位置与试验试件一致, 均发生于限位钢圈与导向轮接触区域 (见图 7).



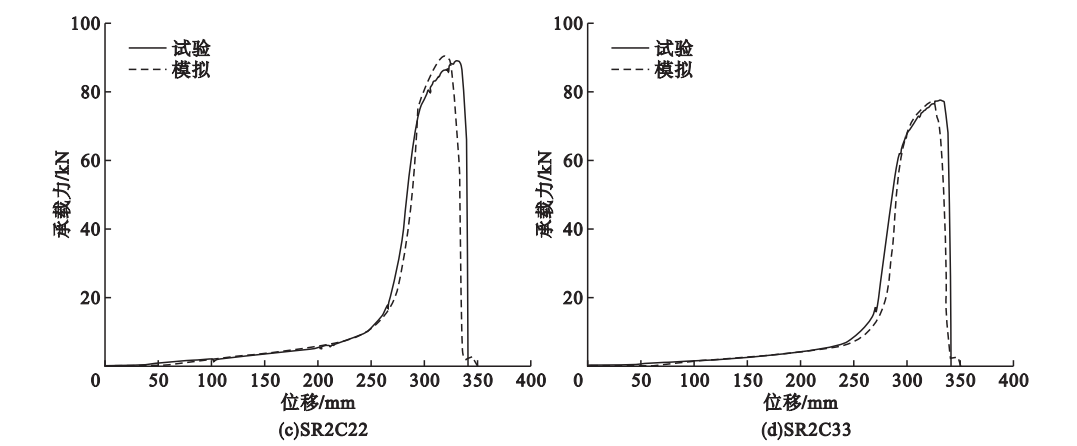


图6 试验与有限元模拟力-位移曲线结果对比

Fig. 6 Comparison of force-displacement curves results by finite element simulation and test



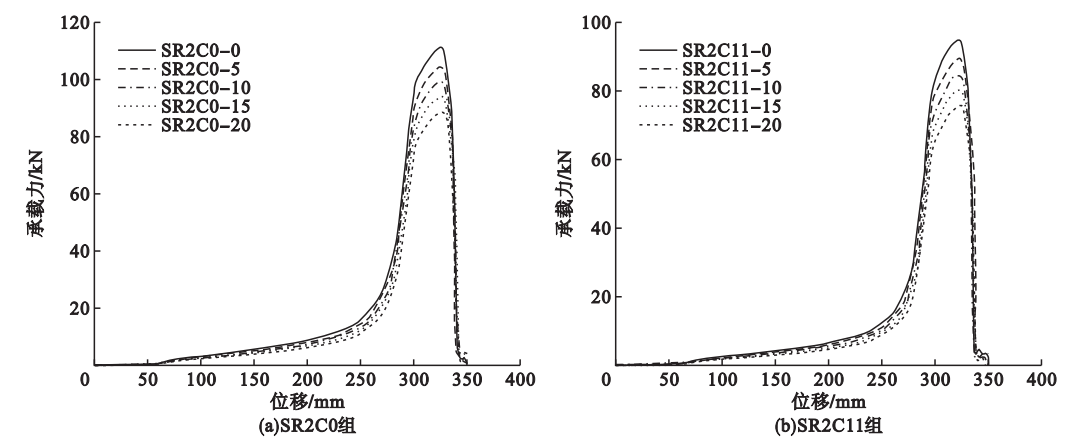
图7 有限元模型与试验试件的最终破坏形态

Fig. 7 Failure modes of finite element model and specimens

由图6和图7可知,该有限元模型与试验具有较好的吻合度,可以进一步用于探究均匀腐蚀率对钢圈限位装置力学性能的影响.

3.4 均匀腐蚀率的影响

有限元模型的反力-位移曲线如图8所示.其中 N_{fe} 为有限元模型的极限承载力.



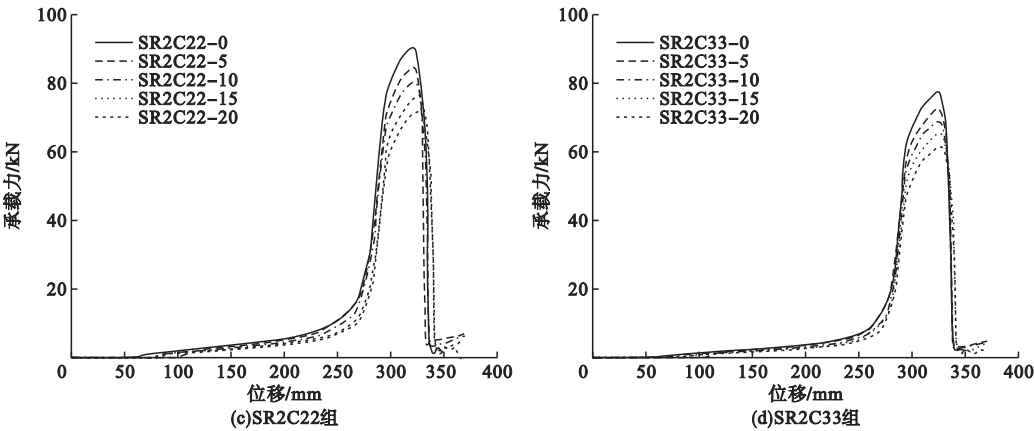


图 8 有限元模型的力 - 位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curves of finite element model

采用有限元模型分别以 4 个试验试件的设计参数为基础,保持其直线段长度、导向轮直径和圆弧段半径等其他设计参数不变,设计均匀腐蚀率分别为 0%、5%、10%、15% 和 20% 的 4 组共 20 个有限元模型,来探究均匀腐蚀率对钢圈限位装置的一阶稳定刚度 K_1 、二阶稳定刚度 K_2 、极限承载力和极限位移的影响。

3.4.1 刚 度

对应于每个试验试件的 4 组共 20 个有限元分析模型的刚度 K_1 、 K_2 结果与均匀腐蚀率之间关系如图 9 所示。图中退化比均为

每个模型分析结果除以该组腐蚀率为 0% 时的分析结果,既不考虑试件的初始尺寸差异只探究均匀腐蚀率对其刚度的影响。由图 9(a)可知,随着均匀腐蚀率增加钢圈限位装置的刚度 K_1 呈现出下降趋势,与试验结果所得规律相同。其中以 SR2C11 组刚度 K_1 下降程度最大,最多下降了 34.1%。由图 9(b)可知,均匀腐蚀率对刚度 K_2 的影响并无明显规律性,而试验中得到的刚度 K_2 具有略微上升趋势可能是由于试验位移计测量结果存在微小误差。其中 SR2C33-15 刚度 K_2 退化最为严重,退化为未腐蚀状态的 86.9%。

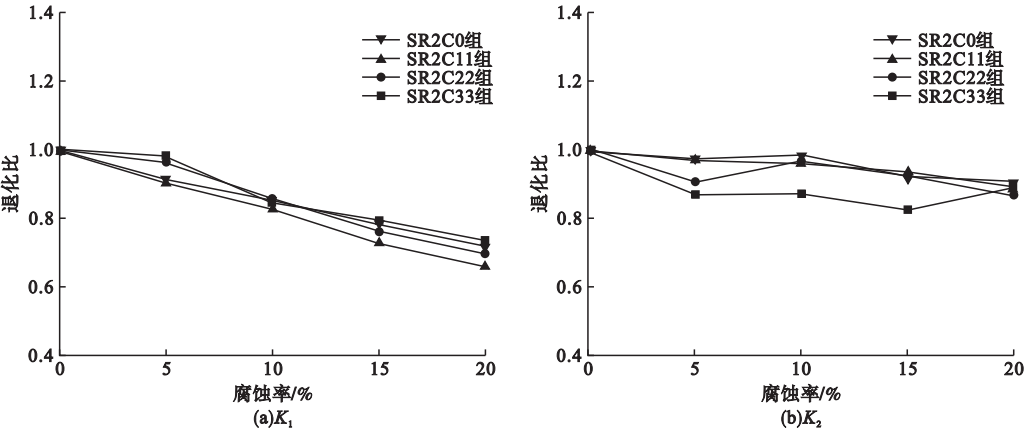


图 9 刚度退化比与腐蚀率间关系

Fig. 9 Relationship between stiffness degradation ratio and corrosion rate

3.4.2 极限位移、极限承载力

图 10 为有限元分析模型的极限位移 δ_{fe} 、极限承载力 N_{fe} 与均匀腐蚀率之间关系。由图 10(a)可知,当均匀腐蚀率超过 10% 时极限位

移有微小的上升,最大变化幅度为 1.6%。由图 10(b)可知,随着均匀腐蚀率增加,极限承载力呈下降趋势,与试验结果所得规律相同,且每组分析模型的退化比下降程度相同。

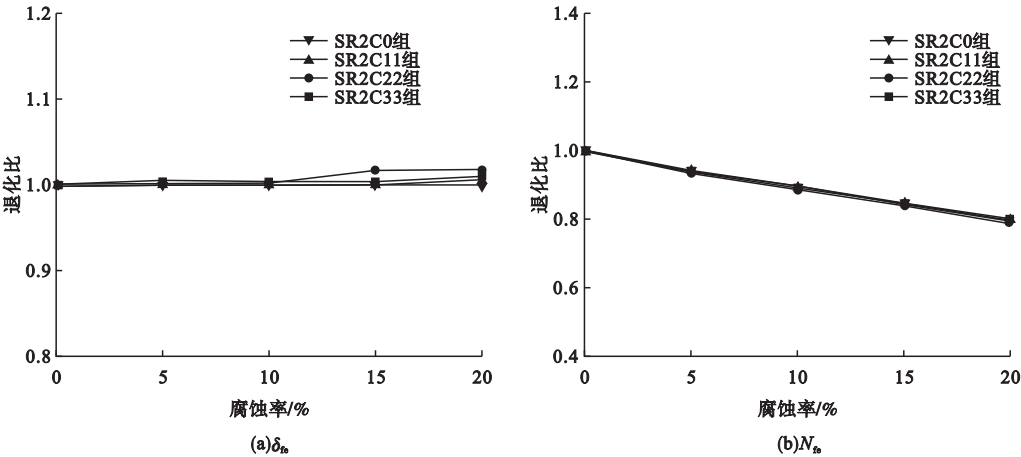


图 10 δ_{fe} 退化比、 N_{fe} 退化比与腐蚀率间关系

Fig. 10 Relationship δ_{fe} , N_{fe} and corrosion rate

3.4.3 剩余极限承载力计算方法

对有限元分析结果及试验结果进行线性拟合,得到基于均匀腐蚀率和试件母材本构的腐蚀后钢圈限位装置剩余承载力:

$$\frac{N_{au}}{N_u} = 1 - \frac{94.56}{N_u} \alpha. \tag{8}$$

式中: N_{au} 为均匀腐蚀下钢圈限位装置的剩余承载力,kN; N_u 为初始设计极限承载力,kN; α 为均匀腐蚀率.

由式(8)计算所得结果 N_{au} 与试验结果 N_{ex} 进行比较(见表3).

表 3 计算结果与试验结果对比

Table 3 Comparison of calculation and test results			
试件编号	N_{ex}/kN	N_{au}/kN	N_{ex}/N_{au}
SR2C0	108.01	111.34	0.97
SR2C11	95.68	100.94	0.95
SR2C22	89.15	90.53	0.98
SR2C33	77.67	80.13	0.97

将由式(8)计算所得结果 N_{au} 与模拟结果 N_{fe} 进行比较(见表4).

N_{ex} 与 N_{au} 的平均比值为 0.96; N_{fe} 与 N_{au} 的平均比值 1.01; 式(8)计算结果 N_{au} 的最大误差为 5%. 表明笔者提出的均匀腐蚀后剩余承载力计算方法具有较高的准确度,可以为均匀腐蚀下钢圈限位装置的剩余承载力预测提供参考.

表 4 计算结果与模拟结果对比

Table 4 Comparison of calculation and simulation			
模型编号	N_{fe}/kN	N_{au}/kN	N_{fe}/N_{au}
SR2C0-0	111.34	111.34	1.00
SR2C0-5	104.77	106.61	0.98
SR2C0-10	99.47	101.88	0.98
SR2C0-15	94.04	97.15	0.97
SR2C0-20	88.59	92.43	0.96
SR2C11-0	95.06	95.06	1.00
SR2C11-5	89.80	90.33	0.99
SR2C11-10	85.03	85.60	0.99
SR2C11-15	80.48	80.87	1.00
SR2C11-20	75.85	76.15	1.00
SR2C22-0	90.86	90.86	1.00
SR2C22-5	85.06	86.13	0.99
SR2C22-10	80.69	81.40	0.99
SR2C22-15	76.61	76.67	1.00
SR2C22-20	72.05	71.95	1.00
SR2C33-0	77.75	77.75	1.00
SR2C33-5	73.06	73.02	1.00
SR2C33-10	69.40	68.29	1.02
SR2C33-15	65.61	63.57	1.03
SR2C33-20	61.83	58.84	1.05

4 结 论

(1) 建立具有普适性的腐蚀率与暴露时间关系式,降低了工程常用的规则截面形状钢材的计算难度. 并给出了具有一定工程应用价值的矩形截面均匀腐蚀深度计算式.

(2) 均匀腐蚀的发生并未改变钢圈限位装置的最终破坏形态. 不同均匀腐蚀率的钢圈限位装置具有近乎相同的力-位移曲线规

律.随着均匀腐蚀率增加,钢圈限位装置的刚度 K_1 和极限承载力具有明显的下降趋势,而对刚度 K_2 和极限位移无明显影响.

(3)提出了具有一定准确性的均匀腐蚀后钢圈限位装置剩余承载力计算方法,降低了工程实际应用时的计算难度.

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术综述·2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.
(Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research:2014[J]. China journal of highway and transport,2014,27(5):1-96.)
- [2] APPUHAMY J M, KAITA T, OHGA M, et al. Prediction of residual strength of corroded tensile steel plates[J]. International journal of steel structures,2011,11(1):65-79.
- [3] 徐善华,李柔,苏超,等.锈损冷弯薄壁型钢材力学性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):74-80.
(XU Shanhua, LI Rou, SU Chao, et al. Mechanical property tests on cold-formed thin-walled steel materials with rust loss [J] Journal of Harbin institute of technology,2018,50(17):74-80.)
- [4] WANG H, XU S, WANG Y, et al. Effect of pitting degradation on ductile fracture initiation of steel butt-welded joints [J]. Journal of constructional steel research,2018,148:436-449.
- [5] WANG Y, XU S, WANG H, et al. Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology [J]. Construction and building materials,2017,152:777-793.
- [6] SHENG J, XIA J. Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel[J]. Construction and building materials,2017,131:90-100.
- [7] 姜绍飞,李猛,麻胜兰.考虑腐蚀影响的H型钢梁寿命预测研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(2):193-199.
(JIANG Shaofei, LI Meng, MA Shenglan. Lifetime prediction of H-shaped steel beam with consideration of corrosion effect [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2016,32(2):193-199.)
- [8] 徐善华,夏敏,董黎明.工业大气环境下钢结构耐久性模糊综合评判[J].工业建筑,2018,48(11):19-24.
(XU Shanhua, XIA Min, DONG Liming. Fuzzy comprehensive evaluation of durability of steel structure in industrial atmospheric environment [J]. Industrial construction,2018,48(11):19-24.)
- [9] 陈之毅,葛汉彬,宇佐美勉,等.剪切板阻尼器的滞回性能参数研究[J].土木工程学报,2008(11):13-17.
(CHEN Zhiyi, GE Hanbin, USAMI T, et al. Parametric study on the hysteretic behavior of shear panel dampers [J]. China civil engineering journal,2008(11):13-17.)
- [10] 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.)
- [11] 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 restrainer with buffer capacity [J]. Bridge construction,2018,48(6):18-23.)
- [12] 王占飞,孙巨搏,吴江,等.钢圈限位装置力学性能有限元分析[J].北方交通,2018(5):10-14.
(WANG Zhanfei, SUN Jubo, WU Jiang, et al. Finite element analysis of mechanical properties of steel ring restrainer [J]. Northern communications,2018(5):10-14.)
- [13] MAHJOUBI S, MALEKI S. Seismic performance evaluation and design of steel structures equipped with dual-pipe dampers [J]. Journal of constructional steel research,2016,122:25-39.
- [14] KAITA T, APPUHAMY J M, 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.
- [15] APPUHAMY J M, OHGA M, KAITA T, et al. Influence of corrosion damage on prediction of residual strength capacities - an experimental analysis [J]. Journal of solid mechanics and materials engineering,2012,6(6):454-465.
- [16] APPUHAMY J M, KAITA T, OHGA M, et al. Analytical study on significance of corroded surface measurement on residual strength prediction [J]. Procedia engineering,2011,14:2260-2268.
- [17] NIE B, XU S, WANG Y. Time-dependent reliability analysis of corroded steel beam[J]. KSCE journal of civil engineering,2020,24(1):255-265.
- [18] CORVO F, PEREZ T, DZIB L R, et al. Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres [J]. Corrosion science,2008,50(1):220-230.
- [19] MA Y, LI Y, WANG F, et al. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment [J]. Corrosion science,2010,52(5):1796-1800.
- [20] 贾良玖,陈以一,葛汉彬.日本高强度结构钢SM570的弹塑性和延性断裂特性[J].工业建筑,2016,46(7):10-150.
(JIA Liangjiu, CHEN Yiyi, GE Hanbin. Elastoplastic and ductile fracture properties of Japanese high strength steel SM570 [J]. Industrial construction,2016,46(7):10-15.)
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)