

考虑随机腐蚀的钢柱受压承载性能研究

郭俊辉¹, 陈安康¹, 吴祖咸², 万君¹, 郑泽臻³, 张惊宙^{3*}, 王彦博⁴

(1. 台州宏远电力设计院有限公司, 浙江台州 318001; 2. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310014; 3. 广州大学土木与交通工程学院, 广州 510006; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对钢柱在使用过程中会遭受不同程度的腐蚀, 进而造成其承载能力发生变化的问题, 文中以遭受随机点蚀的H型钢长柱为研究对象, 采用蒙特卡洛方法和有限元分析来模拟长柱的整体失稳行为, 从而研究随机点蚀对钢柱轴压承载能力的影响。以蒙特卡洛方法来解决点蚀的随机分布问题, 建立了蒙特卡洛随机点蚀数值模型, 并通过已有的钢柱压缩试验文献, 验证其可靠性。为全面评估点蚀对柱体承载力的影响, 文中共建立了1080个随机点蚀模型, 并基于这些模型对柱体承载力开展非线性屈曲分析, 研究了边界条件、长细比、蚀坑深度及腐蚀率这4个因素对钢柱承载能力的影响。研究表明: 在腐蚀程度相同时, 不同长细比、蚀坑深度以及边界条件均会对受压钢柱的承载能力产生影响; 受压钢柱的承载能力退化规律与腐蚀率呈负相关。

关键词: H型钢柱; 随机点蚀; 蒙特卡洛法; 折减系数; 参数分析; 非线性屈曲分析; 腐蚀率

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0101-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240622001

Study on Compressive Bearing Capacity of Steel Columns Considering Random Corrosion

GUO Junhui¹, CHEN Ankang¹, WU Zuxian², WAN Jun¹, ZHENG Zezhen³,
ZHANG Jingzhou^{3*}, WANG Yanbo⁴

(1. Taizhou Hongyuan Electric Power Design Institute Limited Company, Taizhou 318001, China; 2. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design and Consultation Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: 205352@gzhu.edu.cn

Abstract: In view of the problem that steel columns will suffer different degrees of corrosion during service, resulting in changes in bearing capacity, this paper takes steel columns subjected to random pitting corrosion as the research object, and adopts Monte Carlo method and finite element analysis to study the influence of random pitting corrosion on the axial bearing capacity of steel columns. Monte Carlo method was used to solve the random distribution problem of pitting corrosion, and a numerical model of Monte Carlo random pitting corrosion was established, and its reliability was verified by the existing literature on steel column compression tests. In order to comprehensively evaluate the influence of pitting corrosion, a total of 1080 random pitting models were established to perform nonlinear buckling analysis on the bearing capacity of columns. The influences of four factors, namely boundary conditions, slenderness

收稿日期: 2024-06-22

作者简介:

郭俊辉(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网工程防灾减灾方面的研究。E-mail: 447555@qq.com。

陈安康(1994—), 男, 学士, 工程师, 主要从事电网工程防灾减灾方面的研究。

通信作者:

张惊宙(1992—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构倒塌、腐蚀、抗火、模块化方面的研究。E-mail: 205352@gzhu.edu.cn。

ratio, pit depth and corrosion rate, on the bearing capacity of steel columns were studied. The results show that the slenderness ratio, pit depth and boundary conditions all affect the bearing capacity of the steel column under compression at the same corrosion degree. There is a negative correlation between the degradation law of bearing capacity and the corrosion rate of steel columns under compression.

Keywords: H-shaped steel column; random pitting corrosion; Monte Carlo method; reduction factor; numerical analysis; nonlinear buckling analysis; corrosion rate

钢构件由于其强度高、延性好而被广泛应用于各类建筑结构中。随着现代工程建筑在复杂环境中的持续发展,对于长期处于腐蚀性较强的海洋大气、工业大气等恶劣环境中的钢构件,会因高盐雾、干湿交替等的影响,不可避免地发生腐蚀,腐蚀引起的承载力退化会对结构的耐久性(剩余使用寿命)产生显著影响,严重威胁人们的生命财产安全。因此,有必要对钢构件在腐蚀后的承载能力进行研究。

近年来,针对腐蚀环境下钢构件承载性能的研究已逐步推进,徐善华等^[1]、史炜洲等^[2]对腐蚀环境下受弯构件承载性能的主要影响因素开展了研究;WEI等^[3]、WU等^[4]分别对均匀腐蚀和局部腐蚀圆钢管的承载性能进行了研究;WANG等^[5]、CHEN等^[6]研究了H形截面短柱在轴向压力作用下的承载性能。

在实际的腐蚀环境中,随机腐蚀更符合钢构件在发生腐蚀时的实际情况,腐蚀的产生和发展受到多种因素的影响(空气湿度、温度、盐浓度等)^[7-8],致使钢构件产生各种各样的蚀坑,其形状、位置、大小都具有高度随机性。王波等^[9]对锈蚀钢筋上1 063个蚀坑形状进行了统计,发现通过几何简化,蚀坑的形状可大致分成深椭球形、圆球形、长椭球形和凹槽形4种。腐蚀钢构件中这些点蚀坑的存在会使其产生局部应力集中,从而导致承载力降低,对于受压构件还容易发生局部失稳的现象。OSZVALD等^[10-11]通过人工开凿的方式模拟了角钢构件的均匀腐蚀、点蚀和局部腐蚀,研究腐蚀对角钢屈曲和承载力的影响;KOLIOS等^[12]建立随机点蚀板模型后发现,点蚀坑的形状及分布形式均会引发应力集中,严重影响构件的极限强度;王仁华等^[13]通过建立精细的点蚀圆管构件模型,发现在同等腐蚀体积条件下,随机分布点蚀对构件承载力的影响,显著强于均匀分布点蚀对其的影响。ZHANG等^[14]在研究点蚀对加颈板极限承载力的影响中发现,与腐蚀导致的体积损失相比,点蚀坑的密集程度对加颈板极限承载力的影响更为显著。

由于点蚀的高度随机性和不确定性,目前国内外尚缺乏较合理的点蚀模型^[15]。针对点蚀的随机性,许多研究人员应用了蒙特卡洛与有限元相结合的方法。李猛等^[16]基于蒙特卡洛方法和Weibull模型提出了钢管轴压构件考虑腐蚀的时变可靠度预测方法;陈汉琳^[17]通过蒙特卡洛方法模拟不同腐蚀时长下拉索钢丝的腐蚀,研究了腐蚀钢丝的力学性能及疲劳特性;WANG等^[18]对考虑随机点蚀

的钢板开展极限抗压强度蒙特卡洛数值计算,结果表明:腐蚀性损伤会导致钢板失效,而这种失效主要是由钢板表面凹坑所引发的局部形变所导致的。

随着钢构件在工程中的应用日益广泛,对腐蚀钢构件的承载性能进行研究是十分有必要的。因此,本文建立了蒙特卡洛随机点蚀模型并验证了其有效性,研究各种参数对腐蚀H型钢长柱轴心受压稳定承载力的影响,最后探讨了极限承载力折减系数与腐蚀率的关系。

1 有限元模型建立

本文采用有限元模拟软件ABAQUS中的壳单元构建模型,考虑到构件在实际腐蚀后表面形态复杂,若需模拟其真实形貌进行建模,不仅成本较高,且几乎难以实现,因此需要对腐蚀模型进行简化。本文有限元模型通过减小单元厚度的方式模拟腐蚀,同时,结合腐蚀具有随机性的特征,点蚀坑会随机地分布在钢柱的表面,因此采用随机函数来随机生成点蚀坑。图1展示了构件截面点蚀坑的生成(与构件长度方向点蚀坑的生成类似)。其中 W 、 H 、 t_w 、 t_f 、 t_d 、 l_s 分别为截面宽度、高度、腹板厚度、翼缘厚度、腐蚀深度以及网格大小。随机腐蚀后构件的体积损失率 η_v 的计算公式可以表示为:

$$\eta_v = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} t_{di} A_{di}}{\sum_{i=1}^n t_i A_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 、 t_d 、 t 、 n_d 、 n 分别为网格面积、腐蚀深度、初始厚度、腐蚀网格数、初始网格数。

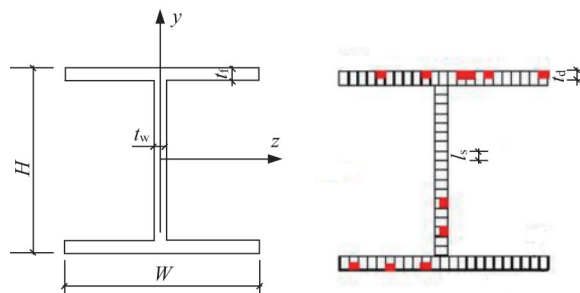


图1 随机点蚀模型

Fig. 1 Random pitting corrosion model

本研究选用双线性随动强化本构模型,并结合Mises屈服准则与随动强化准则开展分析,屈服强度设置为

415 MPa,泊松比为 0.3,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,切线模量为 0。考虑到网格尺寸的大小会影响模型的计算效率和计算结果,文献[19]对网格尺寸为模型长度的 0.25%、0.5% 以及 1% 的 H 型钢柱进行了研究,结果表明:网格尺寸为模型长度的 0.5% 时可以较好地平衡计算效率和精度,因此本文模型采用的网格尺寸为模型长度的 0.5%。对于构件的初始几何缺陷,将通过特征值屈曲分析,以构件的一阶线性屈曲模态的 1/1 000 引入到初始模型中。采用文献[20]中提出的 H 形截面残余应力分析模型考虑残余应力对构件极限承载力的影响。

本文采用蒙特卡洛法与 ABAQUS 软件相结合的方法对腐蚀 H 型钢的极限承载力开展研究。首先建立未腐蚀模型并进行屈曲分析,得到其一阶屈曲模态,基于此模态引入初始缺陷,然后通过 python 编程语言赋予模型特定腐蚀率及腐蚀深度,据此基于式(1)计算需腐蚀的网格数量,再将这些腐蚀的网格随机分配到腹板和翼缘上,随后对腐蚀后的钢柱开展非线性分析,最终得到其极限承载力,持续进行该过程,直到满足蒙特卡洛模拟所需样本量后终止。

本研究中蒙特卡洛样本的数量会影响计算效率及计算精度。若样本数量过少,所构建的腐蚀模型不仅可能遗漏极端腐蚀情况,还会导致分析结果的可靠性与精度较低;反之,若样本量过多,则会显著降低模型的计算效率。因此,本文为确定兼顾模型计算精度与效率的最佳样本量,研究并分析了蒙特卡洛样本量对钢构件极限承载力的影响。选择了截面为 $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$,体积损失率为 20%,腐蚀深度为腹板厚度的 50% 的 H 型钢柱。图 2 为蒙特卡洛样本量为 10、20、30 时模型极限承载力的箱形图,表 1 对比了这三种样本量下模型的极限承载力。

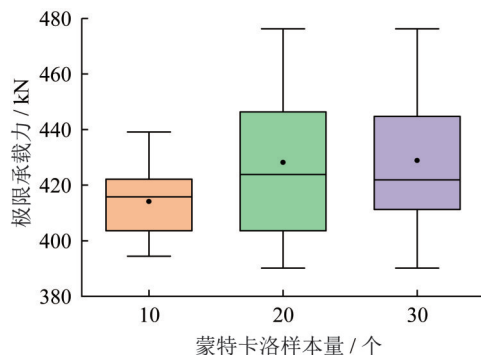


图 2 蒙特卡洛样本计算箱形图对比

Fig. 2 Comparison of box plots of Monte Carlo sample calculations

结果表明,当蒙特卡洛样本量从 10 增大为 20、30 时,10 个样本量下的极限承载能力,与 20、30 个样本量下的

表 1 不同样本量下极限承载力的对比结果

Table 1 Comparison of ultimate bearing capacity results under different sample sizes

样本量/个	最小值/kN	平均值/kN	中位数/kN	最大值/kN
10	394.44	414.13	415.77	439.17
20	390.16	428.17	423.83	476.27
30	390.16	428.88	421.91	476.27

极限承载能力相比,其平均值及中位数会存在明显差距;而当样本量从 20 个增至 30 个后,二者的极限承载力平均值差值仅为 0.66%,即计算精度无实质性提升。因此,本研究后续的蒙特卡洛样本量均采用 20 个。

2 有限元模型验证

为验证本文所用方法建立的有限元模型的准确性,将有限元模拟结果与文献[19]中的试验结果进行了对比验证。文献[19]中对 Q235 热轧 H 型钢柱进行了腐蚀试验,其截面尺寸为 $\text{HW}125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$,原长度为 2 000 mm,试验装置见文献[19]。取其中腐蚀率为 0、6.49%、12.73% 及 18.32% 的试件,利用本文使用的随机点蚀有限元建模的方法对这些试件开展有限元建模并进行计算求解,将其计算结果与试验结果进行对比,以验证本文建模方式的可行性。图 3 展示了各组试验与蒙特卡洛模拟的极限承载力对比结果。结果表明:试验与模拟中构件的破坏形态一致,且试验测得的极限承载力均处于蒙特卡洛模拟的数值范围内,由此验证了所建模型的正确性。

3 参数敏感性分析

腐蚀 H 型钢长柱的承载能力降低受各种因素的影响,本文将采用控制变量法,讨论不同边界条件、长细比及蚀坑深度对随机点蚀 H 型钢轴压极限承载力的影响。本文定义腐蚀折减系数 C ,以在体积损失率相同的情况,评价其对模型承载力的影响,计算公式为:

$$C = \frac{N_c}{N_0} \quad (2)$$

式中: N_c 为腐蚀后的稳定承载力; N_0 为无腐蚀模型的稳定承载力。

在该分析中各模型命名所使用符号定义如下:H 表示铰接,F 表示固接,T 表示腐蚀的厚度,R 表示长细比。例如“HT50R100”表示边界条件为铰接,腐蚀深度为腹板厚度的 50%,长细比为 100 的模型。

3.1 边界条件

在结构受力分析中,边界条件是关键因素,不同边界条件会使结构受力方式产生差异,进而影响结构的整体性

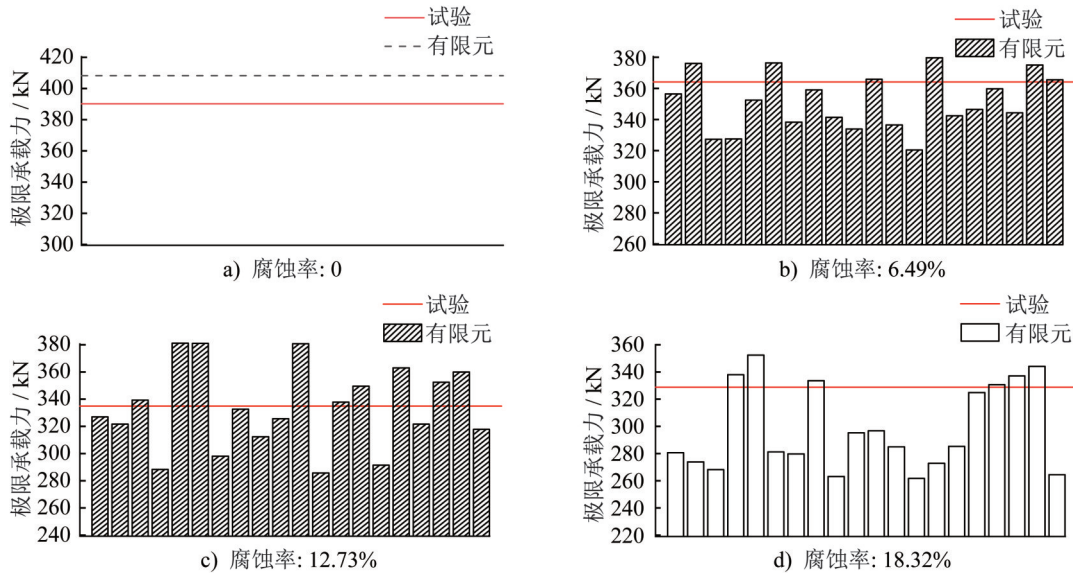


图3 试验与蒙特卡洛模拟的极限承载力对比

Fig. 3 Comparison of ultimate bearing capacity between test and Monte Carlo simulation

能与稳定性。因此,本节对H型钢两端设定固接和铰接两种边界条件,分析不同边界条件对腐蚀折减系数的影响。各腐蚀率下不同边界条件的构件其腐蚀折减系数的平均值如图4所示;图5将所有蒙特卡洛样本的折减系数绘制成了半箱形图,其数理统计结果如表2所示。

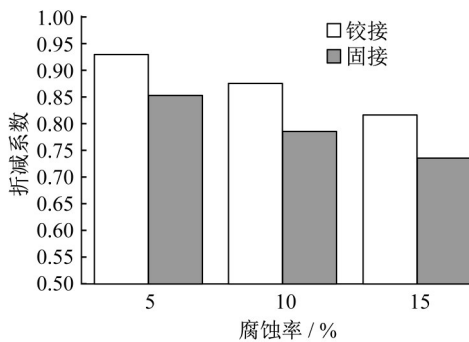


图4 边界条件引起的折减系数变化

Fig. 4 Variation of reduction factor caused by boundary conditions

从图4、5和表2可以看出:控制其他变量不变的条件 下,铰接边界条件下构件的腐蚀折减系数平均值大于固 结边界条件下构件的腐蚀折减系数的平均值,这表明腐 蚀对固接边界条件下构件承载力的影响比较接边界条件 下构件承载力的影响更严重。此外,固接边界条件下腐 蚀折减系数的标准差普遍小于铰接边界条件下的标准 差,说明腐蚀对固接边界条件构件的承载力影响更剧烈。 随着腐蚀率的增大,两种边界条件下腐蚀折减系数平均 值的差值变化幅度较小,说明腐蚀率增大对两种边界条 件下构件的影响趋势一致。

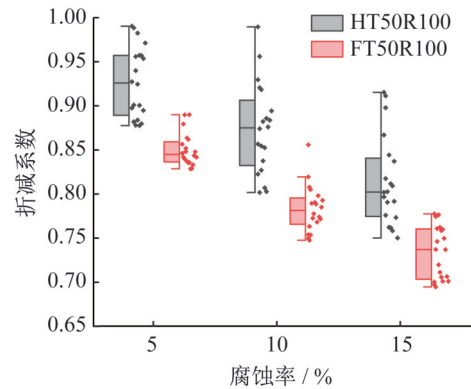


图5 边界条件引起的折减系数变化半箱形图

Fig. 5 Semi-box plot of reduction factor caused by boundary condition

表2 边界条件引起的折减系数变化统计

Table 2 Statistics of reduction factor caused by boundary condition

模型	腐蚀率 / %	最大值	平均值	最小值	标准差
HT50R100	5	0.991	0.928	0.878	0.040 3
FT50R100		0.890	0.850	0.829	0.018 5
HT50R100	10	0.990	0.874	0.802	0.051 5
FT50R100		0.856	0.783	0.748	0.026 4
HT50R100	15	0.916	0.814	0.750	0.050 6
FT50R100		0.778	0.734	0.695	0.030 0

3.2 长细比

长细比是衡量构件刚度大小的因素,对于受压构件, 过大的长细比会降低其承载能力。在《钢结构设计标准》

(GB 50017—2017)中对受压构件的容许长细比进行了严格的规定,以此来控制构件的整体稳定,避免构件在未达到其承载力时就发生破坏,而长细比在计算中常常用于计算稳定系数 ψ 。本小节中将通过模拟不同长细比(50,100,150)的随机点蚀H型钢长柱轴心受压工况,在控制其他条件保持一致的前提下,研究长细比对其承载力的影响规律。依据有限元计算结果,图6为各腐蚀长细比不同的条件下,构件腐蚀折减系数的平均值。图7将所有蒙特卡洛样本的折减系数绘制成了半箱形图,其统计结果如表3所示。

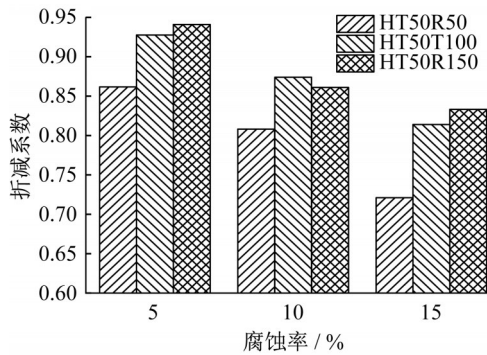


图6 长细比引起的折减系数变化

Fig. 6 Variation of reduction factor caused by slenderness ratio

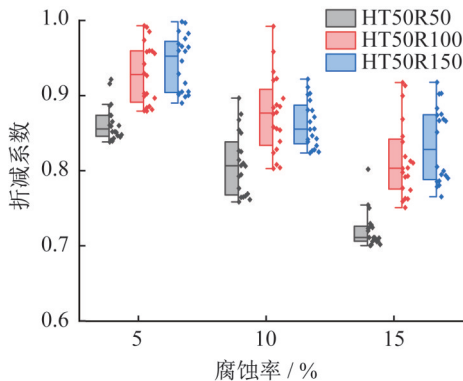


图7 长细比引起的折减系数变化半箱形图

Fig. 7 Semi-box plot of reduction factor caused by slenderness ratio

结果显示:从总体来看,在控制其他变量不变的情况下,随着长细比的减小,钢柱的腐蚀折减系数呈下降趋势,即当长细比较小时,钢柱受腐蚀影响的程度,相较于长细比较大的钢柱更显著。随着腐蚀率的增大,长细比较小的钢柱,其承载力折减系数降低的也比较快。造成以上现象的原因是:当钢柱发生腐蚀时,其截面的有效面积会减少,长细比较小的钢柱承载力主要由截面的面积和材料的强度决定,而长细比较大的钢柱其承载力更多地受到屈曲的影响。

表3 长细比引起的折减系数变化统计

Table 3 Statistics of reduction factor caused by slenderness ratio

模型	腐蚀率/%	最大值	平均值	最小值	标准差
HT50R50	5	0.920	0.862	0.837	0.023 8
HT50R100		0.991	0.928	0.878	0.040 2
HT50R150		0.996	0.941	0.889	0.037 0
HT50R50	10	0.895	0.808	0.758	0.041 8
HT50R100		0.990	0.874	0.802	0.051 5
HT50R150		0.920	0.861	0.823	0.031 3
HT50R50	15	0.801	0.721	0.700	0.024 0
HT50R100		0.916	0.814	0.750	0.050 6
HT50R150		0.916	0.833	0.765	0.050 0

3.3 蚀坑深度

对于受到腐蚀的构件,蚀坑深度也是一个衡量腐蚀程度的重要参数。在实际腐蚀环境中,蚀坑深度会随时间推移而变化,这种变化具有显著的不确定性。因此,本节将讨论蚀坑深度对腐蚀折减系数的影响。假定蚀坑深度分别为腹板厚度的20%、50%和80%,其余条件保持一致。各腐蚀率下不同蚀坑深度模型其腐蚀折减系数的平均值如图8所示,图9将所有蒙特卡洛样本的折减系数绘制成了半箱形图,统计结果如表4所示。

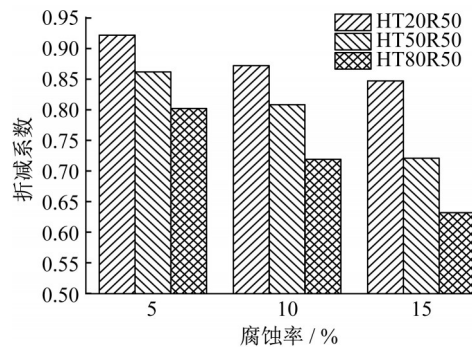


图8 蚀坑深度引起的折减系数变化

Fig. 8 Variation of reduction factor caused by pit depth

从图8、9和表4能够看出:控制其他变量不变的情况下,钢柱的腐蚀折减系数平均值随着蚀坑深度的增大而减小,即蚀坑深度越深,承载力退化更显著。例如,在腐蚀率为5%时,蚀坑深度从腹板厚度的20%增大到80%,平均折减系数下降了0.12。这是由于蚀坑深度越大,模型的有效截面面积越小,应力集中效应也越强,几何不连续性愈发明显,这些因素共同作用进而导致承载力快速退化。

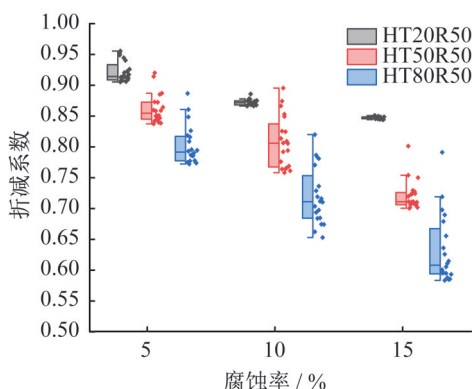


图9 蚀坑深度引起的折减系数变化半箱形图
Fig.9 Semi-box plot of reduction factor caused by pit depth

表4 蚀坑深度引起的折减系数变化统计

Table 4 Statistics of reduction factor caused by pit depth

模型	腐蚀率/%	最大值	平均值	最小值	标准差
HT20R50	5	0.955	0.922	0.905	0.016 7
HT50R50		0.920	0.862	0.837	0.023 8
HT80R50		0.887	0.802	0.772	0.031 9
HT20R50	10	0.887	0.872	0.866	0.004 8
HT50R50		0.900	0.808	0.758	0.041 8
HT80R50		0.820	0.719	0.653	0.046 6
HT20R50	15	0.850	0.847	0.844	0.001 9
HT50R50		0.801	0.721	0.700	0.024 0
HT80R50		0.791	0.632	0.583	0.056 3

4 参数分析

根据上一节的研究内容,为系统研究随机点蚀对钢柱承载能力退化的影响,本节将结合长细比、蚀坑深度、边界条件及腐蚀率这4个关键参数进行分析。具体参数

的选择如表5所示,对这些值进行正交组合后,针对每种腐蚀情景各开展20次蒙特卡洛模拟,最终生成1 080个蒙特卡洛模型。将所有蒙特卡洛模型按腐蚀率进行分类,其正态分布半箱形图如图10所示。

表5 参数选择

Table 5 Parameter selection

截面尺寸/mm	125×125×9×6.5
边界条件	固接、铰接
蒙特卡洛样本量/个	20
腐蚀率/%	5、10、15
长细比	50、100、150
蚀坑深度	腹板厚度的20%、50%、80%

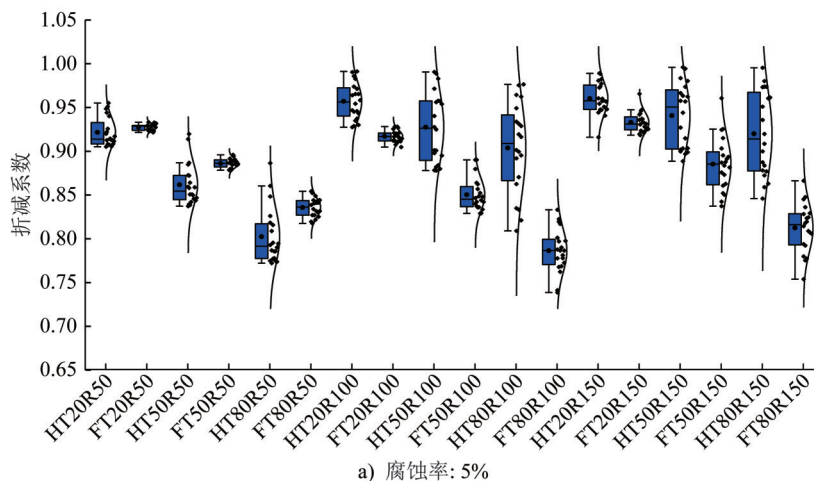
根据图10可以看出:对于腐蚀率相同的模型,折减系数受蚀坑深度、长细比与边界条件的影响更为显著。相较于长细比变化、边界条件变化对钢柱承载力的影响而言,蚀坑深度对钢柱承载力的影响相对更大。同时,随着腐蚀率从5%增大至15%时,折减系数的最小值从0.74降低为0.55。

5 腐蚀率与折减系数的关系

根据前一节的计算分析,随机点蚀钢柱承载力退化规律与构件的腐蚀率相关。本节将采用一次函数对折减系数与腐蚀率进行拟合,同时拟合出一倍标准差与两倍标准差的直线,拟合结果如图11所示。考虑到腐蚀率为0时,承载力折减系数为1,拟合出的随机点蚀钢柱的腐蚀率与折减系数的关系式为:

$$y = 1 - 1.64x \quad (3)$$

可以看出,钢柱的承载力折减系数随钢柱腐蚀率的增大而减少,当钢柱的腐蚀率增大10%时,其承载力折减系数降低0.164。



a) 腐蚀率:5%

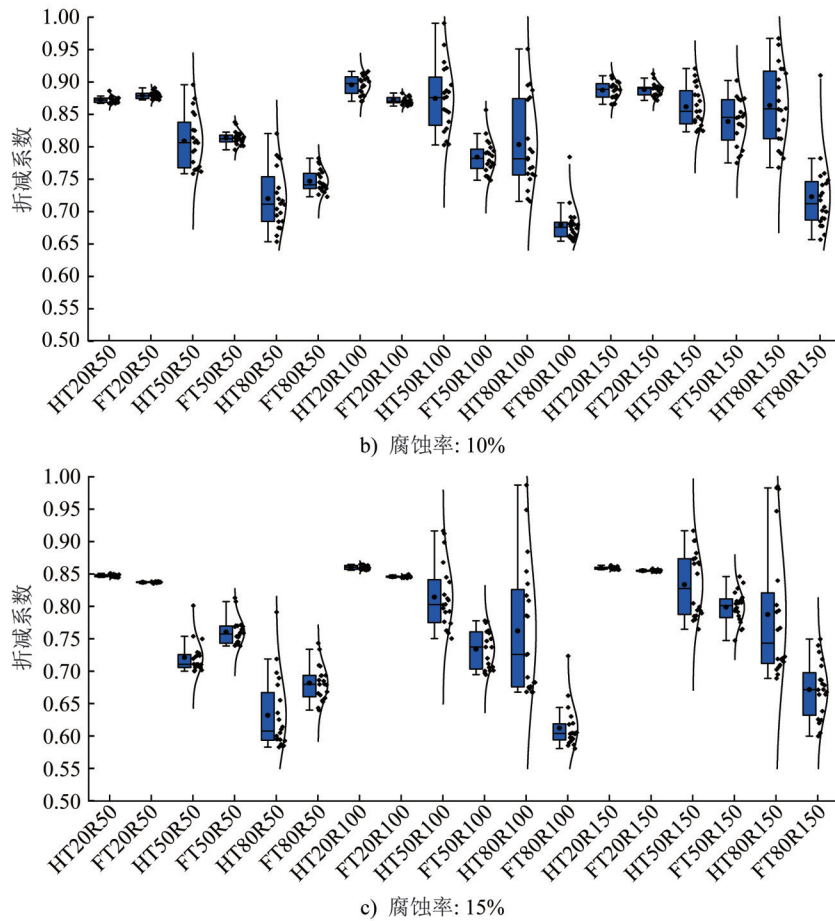


图 10 蒙特卡洛模拟正态分布箱形图

Fig. 10 Box plot of normal distribution in Monte Carlo simulation

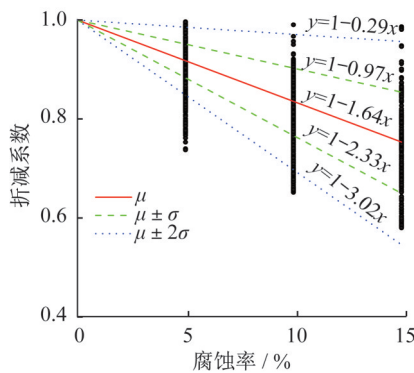


图 11 腐蚀率与折减系数的关系

Fig. 11 Relationship between corrosion rate and reduction factor

将文献[19]中试件的腐蚀率数据,代入本文提出的承载力折减系数计算公式中进行计算,并将其与文献[19]中的试验结果进行比较分析,所得结果如表6所示。

可以看出,公式计算所得承载力折减系数与试验结果较为接近,最大误差不超过10%,且公式值相对试验值较低,表明其较为安全,利用式(3)计算随机锈蚀H型钢柱的承载能力是可行的。

表 6 折减系数公式结果与试验结果比较分析

Table 6 Comparison of reduction factor between formula results and test results

试件编号	腐蚀率/%	公式值	试验值	误差/%
A1	6.49	0.894	0.934	4.2
A2	7.67	0.874	0.904	3.3
A3	9.93	0.837	0.899	6.8
A4	11.49	0.812	0.882	7.9
A5	12.73	0.791	0.860	8.0

6 结论

本文通过建立蒙特卡洛随机点蚀有限元模型,对随机点蚀H型钢长柱轴心受压极限承载力退化规律进行了数值研究,该研究探讨了边界条件、长细比、蚀坑深度及腐蚀率对钢长柱整体失稳承载能力的影响,并研究了腐蚀率与折减系数的关系。最终得到以下结论:

(1) 边界条件为固接的钢柱受腐蚀的影响程度更严重,而边界条件为铰接的钢柱受腐蚀的影响波动更明显,增大腐蚀率对两种边界条件的影响程度一致。

(2) 长细比越大, 腐蚀对钢柱承载力的影响越小, 即对于长细比较小的腐蚀钢柱, 其承载力退化程度更大。

(3) 相较于长细比变化、边界条件变化对钢柱承载力的影响而言, 蚀坑深度对钢柱承载力的影响相对较大。进一步来看, 蚀坑深度越深, 构件的应力集中效应越明显, 进而导致承载力退化程度更严重。

(4) 本文通过分析推导, 建立了随机点蚀钢柱承载力折减系数与腐蚀率的关系式, 其计算结果与试验结果较为接近, 验证了所提公式的可行性。

参考文献:

- [1] 徐善华, 任松波, 崔焕平, 等. 锈蚀槽钢受弯承载力试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4): 506-512. DOI: 10.7520/1001-4888-13-103.
XU Shanhua, REN Songbo, CUI Huanping, et al. Experimental study of bending capacity of corroded channel steel member[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4): 506-512. DOI: 10.7520/1001-4888-13-103. (in Chinese)
- [2] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 53-60. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.07.006.
SHI Weizhou, TONG Lewei, CHEN Yiyi, et al. Experimental study on influence of corrosion on behavior of steel material and steel beams[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 53-60. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.07.006. (in Chinese)
- [3] WEI Y, WU Z Q, WANG X T, et al. Mechanical behavior of locally corroded circular steel tube under compression [J]. Structures, 2021, 33: 776-791. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.04.063.
- [4] WU Z Q, WEI Y, WANG X T, et al. Mechanical behavior of circular steel tubular beam-columns corroded uniformly in atmospheric environment [J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 1998. DOI: 10.3390/app10061998.
- [5] WANG F Y, WANG R H, JU J J. Ultimate compressive strength of H-section stub columns subject to random pitting corrosion damage [J]. Applied Sciences, 2023, 13(19): 11051. DOI: 10.3390/app131911051.
- [6] CHEN S Y, ZHANG W P, XU Y Y, et al. Experimental study on the degradation of mechanical properties of H-shaped steel columns in the chloride salt environment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 217: 108670. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108670.
- [7] ZSGHI A E, MCMULLEN K. Repair for steel bridge girders with corrosion damage utilizing UHPC [C]//Proceedings of the Ultra High Performance Concrete Workshop. Albany: UCONN School of Engineering, 2017.
- [8] WANG Y K, WHARTON J A, SHENOI R A. Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage: A review [J]. Corrosion Science, 2014, 86: 42-60. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.04.043.
- [9] 王波, 袁迎曙, 李富民, 等. 氯盐锈蚀钢筋的屈服强度退化分析及其概率模型 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 597-603. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.05.004.
WANG Bo, YUAN Yingshu, LI Fumin, et al. Deterioration analysis of yield strength and its probabilistic model of steel bar corroded by chloride [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 597-603. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.05.004. (in Chinese)
- [10] OSZVALD K, DUNAI L. Effect of corrosion on the buckling of steel angle members-experimental study [J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2012, 56(2): 175. DOI: 10.3311/pp.ci.2012-2.04.
- [11] OSZVALD K, TOMKA P, DUNAI L. The remaining load-bearing capacity of corroded steel angle compression members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 188-198. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.01.003.
- [12] KOLIOS A, SRIKANTH S, SALONITIS K. Numerical simulation of material strength deterioration due to pitting corrosion [J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 230-236. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.040.
- [13] 王仁华, 郭海超. 局部随机点蚀下圆管截面极限强度退化规律 [J]. 海洋工程, 2019, 37(3): 111-119. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2019.03.013.
WANG Renhua, GUO Haichao. Degradation law of ultimate strength of tubular sections with random pitting corrosion in local region [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 111-119. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2019.03.013. (in Chinese)
- [14] ZHANG J, SHI X H, GUEDES SOARES C. Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression [J]. Engineering Structures, 2017, 152: 70-86. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.069.
- [15] 王雪飞, 郭耀杰, 孙云, 等. 随机点蚀对 Q460 等边角钢受压性能的影响 [C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 17 届 (ISSF-2021) 学术交流暨教学研讨会论文集. 西安, 2021: 218-222.
WANG Xuefei, GUO Yaojie, SUN Yun, et al. Effect of random pitting corrosion on compressive performance of Q460 equal angle steel [C]//Proceedings of the 17th Academic Exchange and Teaching Seminar of the Structure Stability and Fatigue Branch of the China Steel Structure Association (ISSF-2021). Xi'an, 2021: 218-222. (in Chinese)
- [16] 李猛, 麻胜兰, 姜绍飞. 考虑腐蚀影响的钢结构轴压构件可靠度预后分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2016, 44(2): 259-265. DOI: 10.7631/issn.1000-2243.2016.02.0259.
LI Meng, MA Shenglan, JIANG Shaofei. Reliability prognosis analysis on axial compressed members of steel structures with corrosion into consideration [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 259-265. DOI: 10.7631/issn.1000-2243.2016.02.0259. (in Chinese)
- [17] 陈汉林. 交变荷载-氯盐环境耦合条件下拉索钢丝腐蚀疲劳行为研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
CHEN Hanlin. Research on corrosion fatigue behavior of cable wires under alternating load and chloride environment [D]. Chongqing: Chongqing Jiantong University, 2024. (in Chinese)

- [18] WANG R H, AJIT SHENOI R, SOBEY A. Ultimate strength assessment of plated steel structures with random pitting corrosion damage [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 143: 331-342. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.01.014.
- [19] 徐善华, 王皓, 薛南. 锈蚀钢材偏心受压钢柱承载性能退化规律 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 157-163, 169. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.025.
XU Shanhu, WANG Hao, XUE Nan. Deterioration law of bearing properties for corroded eccentric steel columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 157-163, 169. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.025. (in Chinese)
- [20] 李建伟. 不均匀腐蚀后H形截面高强度钢柱偏压承载力及可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Jianwei. Research on the eccentric compression bearing capacity and reliability of H-shaped high strength member with pitting corrosion damage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)

.....

(上接第100页)

- [14] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规程: DL/T 5486—2020 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
National Energy Administration. Technical Specification for the Design of Steel Supporting Structures of Overhead Transmission Line: DL/T 5486—2020 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 高繁. 考虑中间断开节点的输电塔等边角钢主材稳定承载力研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
GAO Fan. Research on the stability capacity of equal angle steel main member in transmission tower considering middle disconnected joint [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [17] 屈可明. 输电角钢塔主材断开节点稳定承载力试验研究与有限元分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
QU Keming. Experimental and numerical study on the stability capacity of angle column connection joints in transmission towers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [18] 薛素铎, 王立帅, 李雄彦, 等. 输电塔等边角钢轴压稳定承载力有限元分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 1431-1435. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1757.
XUE Suduo, WANG Lishuai, LI Xiongyan, et al. Finite element analysis of axial pressure stability bearing capacity of angle steel such as transmission tower [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 1): 1431-1435. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1757. (in Chinese)
- [19] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and Steel Products-Location and Preparation of Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)