

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905048

局部点蚀损伤下H型钢柱承载能力研究*

杨明飞¹, 王辛^{1,2}, 陈宜网³, 沙志平¹, 朱克川¹

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 悉地国际设计顾问(深圳)有限公司, 上海 200433;
3. 安徽圣沃建设工程有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了研究局部点蚀损伤对H型钢柱承载能力的影响, 建立数值模型并理论验证了其合理性。以实际结构中损伤位置为参考, 分别在柱脚和柱中位置的翼缘和腹板上布置不同腐蚀程度的点蚀坑, 并对各组模型进行特征值屈曲分析和非线性屈曲分析, 得到其屈曲模态和极限承载能力。研究表明: 不同分布位置、不同腐蚀程度下的H型钢柱屈曲模态并未发生明显改变, 均表现为在弱轴平面的弯曲失稳; 极限承载力折减系数(r)与壁厚损伤度(α)近似呈现线性关系, 与点蚀损伤强度(DOP)之间的关系可用二次多项式较为准确的描述, 且随着 α 和 DOP 增长, r 的降低速度有逐渐加快趋势; 局部点蚀范围越靠近柱中, H型钢柱承载力损失越多, 故柱中为局部点蚀敏感区; 用失重率(D_w)可较好的综合考虑 α 和 DOP 对钢柱承载能力的影响, r 和 D_w 在各工况下均表现出较好的近似线性关系, 在实际工程中, 可用失重率对局部点蚀损伤下H型钢柱进行安全性评级。

关键词: H型钢柱; 局部点蚀损伤; 极限承载能力; 特征值屈曲分析; 非线性屈曲分析; 点蚀损伤强度

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1020-08

Study of Bearing Capacity of H-Shaped Steel Column with Local Pitting Damage

YANG Mingfei¹, WANG Xin^{1,2}, CHEN Yiwang³, SHA Zhiping¹, ZHU Kechuan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. China Construction Design International Consultant (Shenzhen) Co., Ltd, Shanghai 200433, China;
3. Anhui Shengwo Construction Engineering Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the influence of local pitting damage on the bearing capacity of H-shaped steel columns, a numerical model is established and its rationality is verified by theory. Meanwhile, the damage location in the actual structure is taken as a reference, and the pitting corrosion pits with different corrosion degrees are arranged evenly on the flange and webs in the feet and middle of the steel column, respectively. Then, the buckling mode and ultimate bearing capacity are evaluated by the eigenvalue buckling analysis and non-linear buckling analysis of each group model. The results show that the buckling modes of steel columns with different corrosion pits and corrosion degrees have not changed and are bent in the weak axis plane. The reduction coefficient (r) of ultimate bearing capacity is approximately linear with the depth of corrosive pitting (α), and the relationship between r

* 收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-08-01

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点资助项目(KJ2016A209)、安徽理工大学人才引进基金项目(ZY044)资助

作者简介: 杨明飞(1979—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事结构抗震和防灾减灾方面的研究。

E-mail: yangmf_aust@163.com

and the degree of corrosive pitting (DOP) can be accurately described by a quadratic polynomial. The closer the local pitting range is to the middle of the column, the more the bearing capacity of the H-shaped steel column is lost, so the local pitting sensitive location is in the middle of the column. The effect of α and DOP on the bearing capacity of the H-shaped steel column can be comprehensively considered by using the weightlessness rate (D_w). And the r and D_w show a good approximate linear relationship under various working conditions. In practical engineering, the D_w can also be used to evaluate the safety of H-shaped steel columns under local pitting damage.

Keywords: H-shaped steel column; local pitting damage; ultimate bearing capacity; eigenvalue buckling analysis; non-linear buckling analysis; degree of corrosive pitting

引言

既有钢结构经历了较长的服役周期后,由于气候和人为等因素,会逐渐产生锈蚀。尤其在工业和海洋大气环境中,因锈蚀造成的钢结构可靠性降低对人身安全产生潜在威胁。目前关于钢结构的锈蚀,在材料方面研究相对较多,在构件和结构层面研究相对较少。文献[1-3]针对锈蚀后的钢材,进行了材性实验,得出了锈蚀量与材性折减的一些关系。构件方面:文献[4-6]分别针对不同构件进行了实验和数值分析,分析了整体锈蚀情况下构件的承载和变形能力。文献[4-9]的研究均对构件全局设置腐蚀,但在实际的结构检测项目中发现:由于局部使用环境(如地面)较为恶劣,钢柱往往只在局部(如柱脚)位置腐蚀较为严重,结合以往的一些工程事故报告,这种局部锈蚀对结构的影响是相当严重的,尤其会造成应力集中的点腐蚀^[10]。为研究这种局部腐蚀对H型钢柱承载能力的影响,利用ANSYS参数化建模功能得到一系列的局部损伤钢柱,对各构件分别进行特征值屈曲和非线性屈曲分析。统计分析了局部腐蚀参数、点蚀位置与钢柱的屈曲模态及承载能力之间的一些关系,并针对实际应用指出了较为方便的评价指标。

1 钢柱损伤模型

1.1 原构件选择及模型

采用SHELL181单元模拟翼缘和腹板,选用理想弹塑性材料,设置两端边界条件为简支,轴心加载全截面屈服应力。钢柱取自某实际工程,柱高 $L=4\text{ m}$,截面为HW200×200×8×12,材料为Q235钢。引入1阶屈曲模态作为构件的初始缺陷,柱中变形值

(v_0)取值按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)^[11]规定的挠度最大允许值,取 $v_0=L/1000$,通过在两端设置刚域实现精确模拟边界条件,构件信息及有限元模型如图1所示。

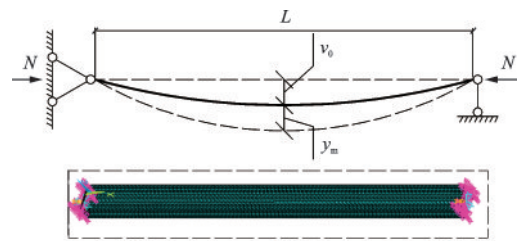


图1 钢柱及有限元模型

Fig.1 Steel column and finite element model

1.2 合理性验证

基于相同的工况分别使用欧拉公式和《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[12]规范方法计算其稳定系数,得出特征值屈曲荷载和极限承载力,验证模型合理性,计算结果见表1。

表1 计算结果统计

Table 1 Calculation results

	理论解/kN	有限元/ kN	误差
特征值屈曲荷载(P_c)	2 034.09	1 980.10	-2.65%
极限承载力(P_{w0})	1 015.04	1 101.91	8.56%

从表1可见,模拟结果与理论误差较小,误差产生原因分析为:欧拉公式只适用于无缺陷的大柔度杆件,文中H型钢柱长细比 $\lambda=78.77 < \lambda_p=102$,为中小柔度杆;规范方法计算同时考虑了构件的初始缺陷和残余应力影响(图2),而有限元分析中所用模型皆未考虑残余应力的影响,模拟结果最大误差不超过10%。所以用SHELL单元建立的模型精度达到使用要求。

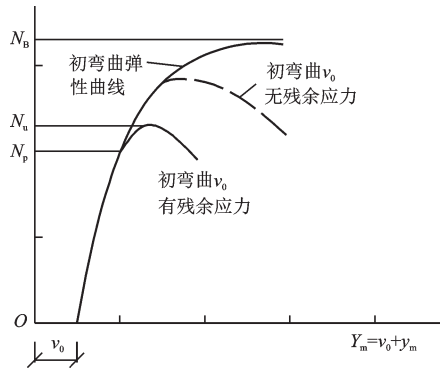


图2 极限承载力理论

Fig.2 Ultimate bearing capacity theory

1.3 局部点蚀损伤模型

进一步建立损伤模型,根据文献[13]可知腹板与翼缘锈蚀对钢柱承载力折减贡献不同,为讨论点蚀作用于腹板或翼缘时的效果,分别建立翼缘、腹板点蚀模型。在对无损H型钢柱模拟时发现柱中位置形成明显塑性铰,针对这一变形形态,参考文献[14]关于结构敏感区的讨论,并考虑到施工和设计使用期内的各种人为因素,增设柱中点蚀作为一种极限工况展开对比研究。根据文献[8,15-17]和工程实例,选用圆柱形点蚀坑,点蚀坑直径范围为(20~70 mm),点蚀深度取为(0.1~1.0)倍板厚,建立不同位置的局部点蚀损伤钢柱模型,如图3所示。

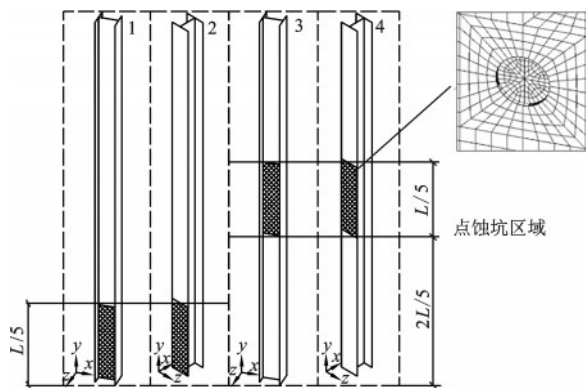


图3 局部点蚀损伤钢柱模型

Fig.3 Model of steel column with local pitting damage

注:图中序号表示不同点蚀位置,其中1-柱脚腹板,2-柱脚翼缘,3-柱中腹板,4-柱中翼缘。图4同

参考文献[8],以点蚀损伤强度(DOP)和壁厚损伤度(α)作为点蚀控制参数,分别用式(1)、(2)计算各参数:

$$DOP = \frac{\sum_{i=1}^n A_{pi}}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{\pi d_i^2}{4})}{A} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - \frac{t_r}{t} \quad (2)$$

式中, d_i 为第*i*个点蚀坑的直径; A_{pi} 为第*i*个点蚀坑的面积; t_r 为损伤后构件厚度; t 为构件原始厚度; A 为腐蚀发生部位表面积,这里 $A=200 \times L/5$ 。

每组钢柱各设置24个模型,共4组96个局部损伤模型和一个无损对照组,各组模型设置见表2。

表2 钢柱模型设置

Table 2 List of model setting of steel column

模型编号	DOP/%	α	模型编号	DOP/%	α
1/2/3/4-01	3.14	0.1	1/2/3/4-13	19.63	0.1
1/2/3/4-02	3.14	0.4	1/2/3/4-14	19.63	0.4
1/2/3/4-03	3.14	0.7	1/2/3/4-15	19.63	0.7
1/2/3/4-04	3.14	1.0	1/2/3/4-16	19.63	1.0
1/2/3/4-05	7.07	0.1	1/2/3/4-17	28.27	0.1
1/2/3/4-06	7.07	0.4	1/2/3/4-18	28.27	0.4
1/2/3/4-07	7.07	0.7	1/2/3/4-19	28.27	0.7
1/2/3/4-08	7.07	1.0	1/2/3/4-20	28.27	1.0
1/2/3/4-09	12.57	0.1	1/2/3/4-21	38.48	0.1
1/2/3/4-10	12.57	0.4	1/2/3/4-22	38.48	0.4
1/2/3/4-11	12.57	0.7	1/2/3/4-23	38.48	0.7
1/2/3/4-12	12.57	1.0	1/2/3/4-24	38.48	1.0
00(无损)	0	0			

注:模型编号“1-01”表示:第1组(柱脚腹板处点蚀)第1个模型,各組内相同序号的模型点蚀控制参数相同,只是点蚀发生位置不同

2 损伤模型计算分析

2.1 特征值屈曲分析

为得到钢柱在局部点蚀损伤下的失稳变形形式,首先对各组模型进行特征值屈曲分析,得到了各组钢柱的屈曲模态,部分屈曲模态如图4所示。

通过观察各组模型的1阶屈曲模态发现:钢柱

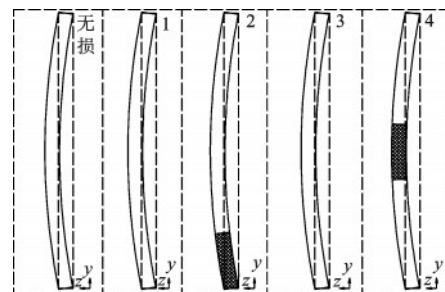


图4 各组模型1阶屈曲模态

Fig.4 First order buckling mode of each group

在局部点蚀损伤下的屈曲模态并未发生明显变化, 同原结构, 都是在弱轴平面内整体弯曲失稳。

2.2 非线性屈曲分析

进一步讨论局部点蚀损伤后钢柱的极限承载力, 为衡量局部点蚀损伤对试件极限承载能力的削弱效果, 定义极限承载力折减系数 r :

$$r = P_u / P_{u0} \quad (3)$$

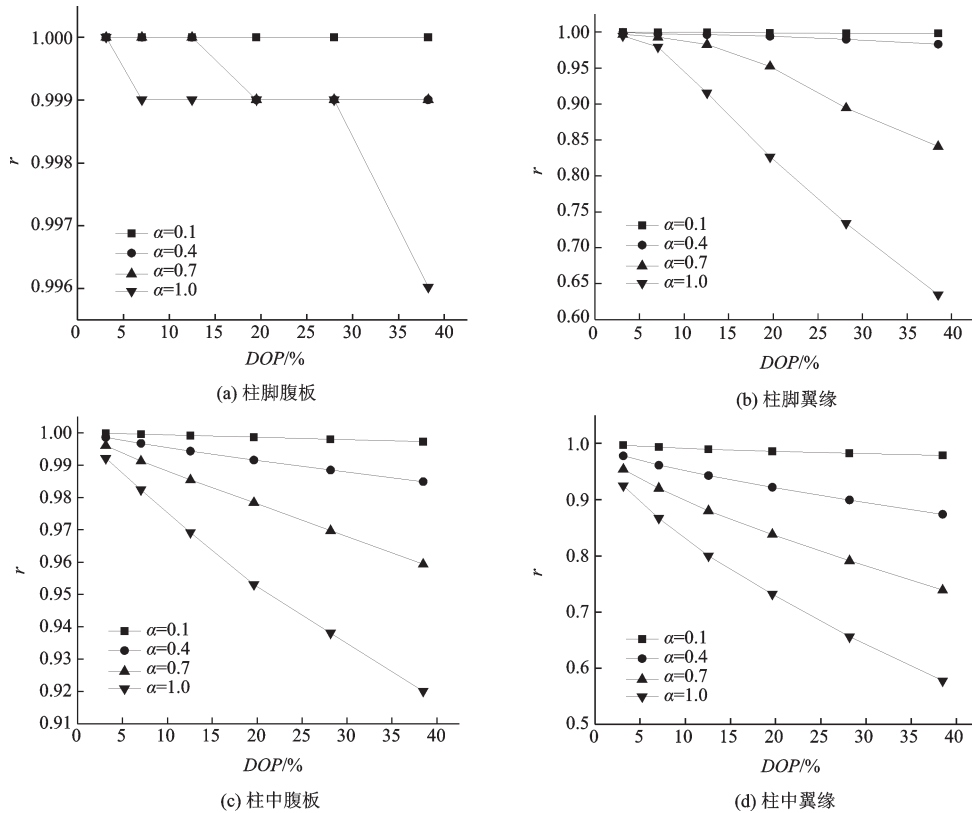


图5 钢柱局部点蚀损伤极限承载力

Fig.5 Ultimate bearing capacity of steel columns with local pitting damage

2.2.2 柱脚翼缘处局部点蚀

点蚀布置于柱脚翼缘时, 对H型钢柱绕弱轴弯曲的极限承载力产生明显影响(图5(b)), 随着DOP的增长, r 近似呈现出线性下降, 且 α 越大, r 的下降速度越快。全组24个模型中, 构件极限承载力损失最多的为模型2-24, 此时的极限承载力折减系数仅为 $r=0.635$, 极限承载力损失了36.5%。

2.2.3 柱中腹板处局部点蚀

点蚀发生在柱中腹板时, 对H型钢柱绕弱轴弯曲的极限承载力影响规律明显(图5(c)), r 的降低与DOP的增长近似呈现线性关系, 且 r 的下降速度与 α 成正比。但折减效果有限, 第3组实验模型中, 构件极限承载力损失最多的为模型3-24, 此时的极限承载力

式中, P_u 和 P_{u0} 分别代表点蚀损伤构件和无损构件极限承载力。对4组损伤模型分别进行非线性屈曲分析, 各组分析结果如图5所示。

2.2.1 柱脚腹板处局部点蚀

点蚀发生在柱脚腹板时, 对H型钢柱绕弱轴弯曲的极限承载力影响不明显(图5(a)), 全组24个实验模型中, 模型1-24极限承载力折减系数最小($r=0.9959$), 极限承载力仅损失了0.41%, 基本没有影响。

折减系数 $r=0.9201$, 极限承载力仅损失了7.99%。

2.2.4 柱中翼缘处局部点蚀

点蚀布置于柱中翼缘时, 对H型钢柱绕弱轴弯曲的极限承载力的影响较为明显(图5(d)), P_u 的变化趋势与点蚀作用于柱脚翼缘时相似, 全组24个模型中, 构件极限承载力损失最多的为模型4-24, 此时的极限承载力折减因子仅为 $r=0.578$, 极限承载力损失42.2%。

2.3 数据统计与分析

2.3.1 局部腐蚀位置的影响

通过以上分析发现, 相对于柱脚, 极限承载力对柱中的局部点蚀损伤更加敏感, 为直观体现出这

二者的差异,定义1,2,3,4组损伤模型对应的极限承载力分别为 $P_{u1}, P_{u2}, P_{u3}, P_{u4}$,承载力折减系数分别为 r_1, r_2, r_3, r_4 。

$$-(P_{u3} - P_{u1})/P_{u0} = r_1 - r_3 = \Delta_{1,3} \quad (4)$$

$$-(P_{u4} - P_{u2})/P_{u0} = r_2 - r_4 = \Delta_{2,4} \quad (5)$$

通过式(4)体现点蚀作用在腹板上时柱中局部点蚀造成的额外削弱效果,通过式(5)体现点蚀作用在翼缘上时柱中局部点蚀造成的额外削弱效果,整理得到图6。

从图6中可以看出,点蚀作用在腹板上时,相对于柱脚,柱中局部点蚀对钢柱的承载力削弱能力最大提高7.58%;点蚀作用在腹板上时,最大提高11.52%,柱中局部点蚀对钢柱的承载能力削弱效果

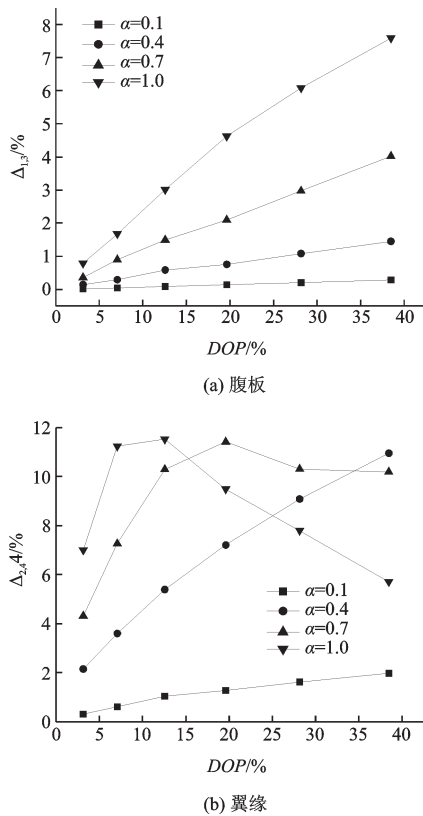


图6 局部点蚀位置影响

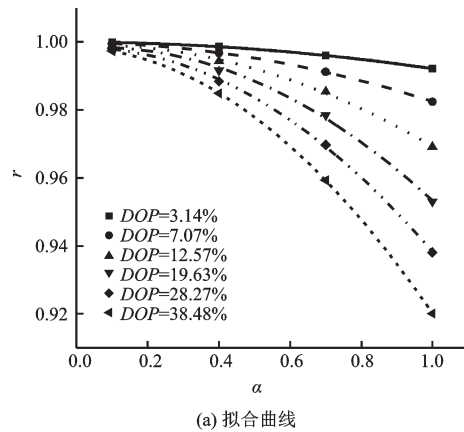
Fig.6 Influence of the position of local pitting erosion

更强,即钢柱的承载力退化还与局部腐蚀沿柱高方向的位置有关。

2.3.2 承载力与点蚀参数关系

处理上述实验数据,发现当 α 为常量时,除第1组模型(柱脚腹板局部点蚀)外,其余均表现为: r 的降低与 DOP 的增长近似呈现线性关系。基于Origin软件对 r 和 α 进行拟合,分析当 DOP 为常量时 r 的降低规律,发现:当 DOP 为常量时, r 的降低与 α 增长可用二次多项式较为准确的拟合,且随着 DOP 增长, r 的降低速度呈逐渐加快趋势,以第3组模型(柱中腹板局部点蚀)为例绘制了图7,并给出拟合结果。

进一步,为综合考虑文中点蚀控制参数 DOP 和 α 与钢柱承载能力之间的联系,对4组模型计算数据进行非线性曲面拟合(第2组拟合曲面见图8),各组拟合公式见表3,可见拟合效果良好。



(a) 拟合曲线

方程	R^2
$y = -0.007 2x^2 - 0.000 7x + 1$	1.000 0
$y = -0.016 6x^2 - 0.000 8x + 0.999 8$	0.999 8
$y = -0.031 7x^2 - 0.001 9x + 0.999 2$	0.999 0
$y = -0.050 8x^2 - 0.005 9x + 0.998 3$	0.998 4
$y = -0.061 4x^2 - 0.001 3x + 0.998 3$	0.999 6
$y = -0.074 5x^2 - 0.003 8x + 0.998 4$	1.000 0

(b) 拟合方程

图7 r - α 数据拟合

Fig.7 Data fitting of r and α

表3 拟合结果

Table 3 Fitting results

组号	拟合公式($z = ax^2 + by^2 + cx + dy + fry + z_0$)						R^2
	a	b	c	d	f	z_0	
1	-0.001 46	$-8.394 81 \times 10^{-7}$	0.002 05	$5.423 35 \times 10^{-5}$	$-9.384 29 \times 10^{-5}$	0.999 4	0.681 43
2	-0.191 49	$2.248 00 \times 10^{-5}$	0.220 79	$6.008 31 \times 10^{-4}$	-0.010 5	0.989 72	0.944 92
3	-0.040 36	$4.773 36 \times 10^{-6}$	0.040 21	$1.188 82 \times 10^{-4}$	-0.002 18	0.994 55	0.987 78
4	-0.079 42	$2.717 18 \times 10^{-5}$	0.013 32	$-2.249 18 \times 10^{-4}$	-0.010 27	1.003 92	0.990 71

注:拟合公式中参数 x, y, z 分别对应 α, DOP, r

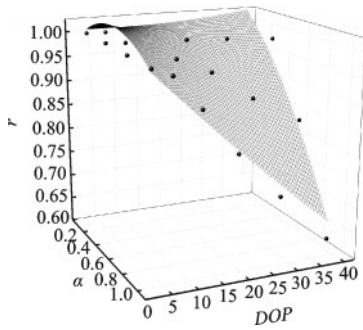


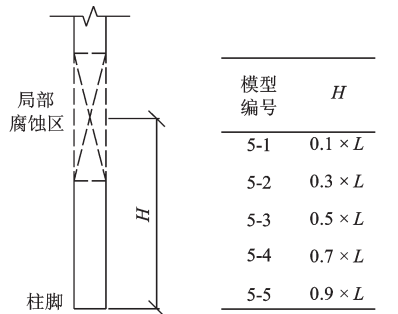
图8 第2组模型 r - α - DOP 曲面拟合

Fig.8 r - α - DOP surface of the second set of models

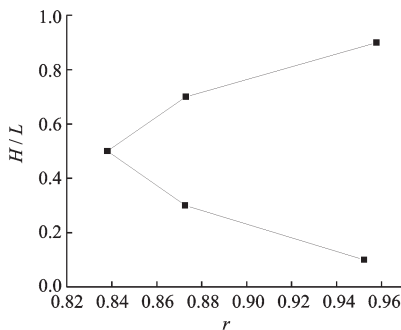
3 柱高方向腐蚀敏感位置判断

根据2.3.1节初步分析,为明确H型钢柱高度方向上局部腐蚀敏感位置,选取 $DOP=19.63\%$, $\alpha=0.7$, 翼缘腐蚀,通过改变局部腐蚀区域的中心高度(H), 再增设了5个损伤模型进行计算,结果如图9所示。

由图9(b)可见:H型钢柱上,相同的局部点蚀损伤沿柱高度方向分布时, H 值不同时钢柱的承载力会出现不同程度削弱。分析可知:当局部腐蚀由柱端向柱中靠近时,对钢柱的承载力削弱能力逐渐增长。实际钢结构防腐施工中,应着重注意柱中敏感位置的防护。



(a) 增设模型



(b) H - r

图9 柱高方向腐蚀敏感位置

Fig.9 Corrosion-sensitive positions on the column

4 实用评价方法

在2.3.2节对点蚀控制参数与钢柱承载力之间拟合可以得到一些规律,但是拟合方程形式复杂,变量较多,若同时运用 DOP 和 α ,不利于应用在实际安全性评估工作中,且在实际检测时,不容易准确测算这两个量。文献[8]中运用参数 $DOPV$ (点蚀体积损伤强度)综合评价全面点蚀损伤下圆管腿柱的承载力,文献[9]中运用 D_w (失重率,与 $DOPV$ 等价)作为均匀腐蚀关键参数描述钢材性能的损失。基于前文分析结果和实际检测经验,相对于参数 DOP 和 α ,失重率的获取较为简单,尝试进一步使用参数 D_w 综合评价局部点蚀损伤与钢柱承载力之间的联系,对各组损伤模型的 r 与 D_w 之间建立对应关系:

$$D_w = DOP \times \alpha \quad (6)$$

图10为 r - D_w 数据拟合的散点图。可见,用线性函数可以取得较好的拟合效果,即失重率与钢柱承载力之间可以建立较简单的换算关系,在既有钢结构检测项目中,可以采用构件失重率评估其承载力。根据现有《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)^[18]对钢结构构件的鉴定评级,假定其作用效应(S)与结构重要性系数(γ_0)不变。为考虑腐蚀的影响,对轴压H型钢构件,用函数 $f(D_w)$ 表示 r ,其抗力(R)可表示为 $f(D_w)P_{u0}$,此处 P_{u0} 即为原轴压构件抗力。综上,可用 $f(D_w)R/\gamma_0 S$ 考虑腐蚀影响,对轴压H型钢构件进行鉴定评级。

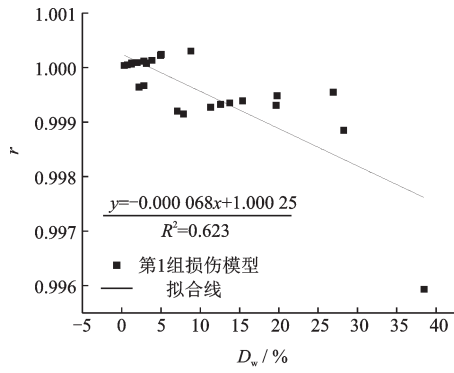
5 结论

(1)H型钢柱在局部点蚀损伤下的屈曲模态与无损时相似,均为在弱轴平面内整体弯曲失稳。

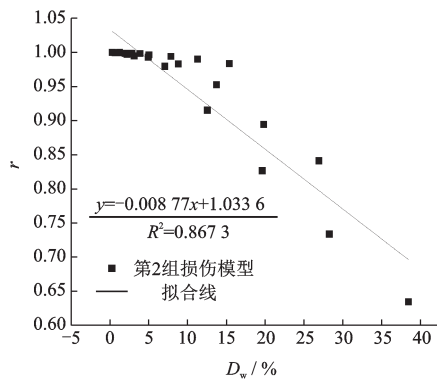
(2)点蚀损伤强度(DOP)和壁厚损伤度(α)的增加均会加速H型钢柱的承载能力的降低,当 α 为常量时, r 的降低与 DOP 的增长近似呈现线性关系;当 DOP 为常量时, r 的降低与 α 增长可用二次多项式较为准确的描述。

(3)当局部腐蚀由柱端向柱中靠近时,对钢柱承载力的削弱逐渐增长,局部点蚀损伤下,柱中是腐蚀敏感位置,应注意防护。

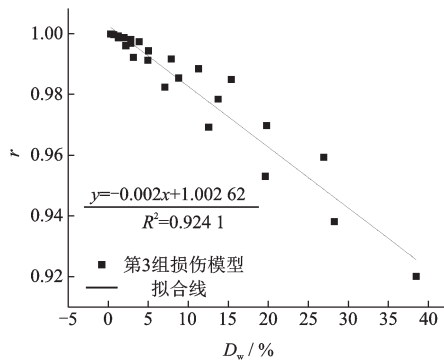
(4)以失重率(D_w)为关键参数,可以对局部点蚀损伤H型钢柱进行安全性鉴定评级。



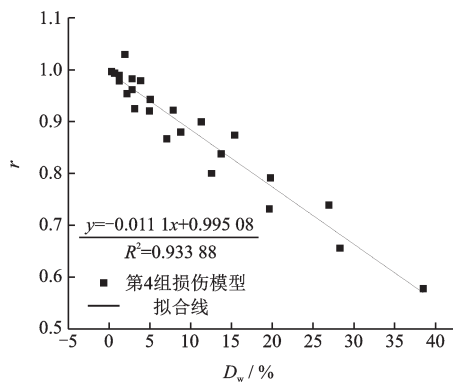
(a) 柱脚腹板



(b) 柱脚翼缘



(c) 柱中腹板



(d) 柱中翼缘

图10 $r-D_w$ 数据拟合

Fig.10 Data fitting of r and D_w

参考文献:

- [1] Garbatov Y, Guedes S C, Parunov J, et al. Tensile strength assessment of corroded small scale specimens [J]. Corrosion Science, 2014, 85: 296-303.
- [2] 徐善华, 任松波. 锈蚀后钢材弹性模量与屈服强度的计算模型[J]. 机械工程材料, 2015, 39(10): 74-78.
Xu Sh H, Ren S B. The calculation model of elastic modulus and yield strength for corroded steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(10): 74-78. (in Chinese)
- [3] 徐善华, 李柔, 苏超, 等. 锈损冷弯薄壁型钢材料力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12): 74-80.
Xu Sh H, Li R, Su Ch, et al. Mechanical property tests on cold-formed thin-walled steel materials with rust loss [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(12): 74-80. (in Chinese)
- [4] Saad-Eldeen S, Garbatov Y, Guedes S C. Effect of corrosion severity on the ultimate strength of a steel box girder [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 560-571.
- [5] Ranji A R. Buckling analysis of corroded angle beams with irregular random surfaces [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2016, 16(5): 912-918.
- [6] 叶继红, 申会谦, 薛素铎. 点蚀孔腐蚀钢构件力学性能劣化简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 70-75.
Ye J H, Shen H Q, Xue S D. Simplified analytical method of mechanical property degradation for steel members with pitting corrosion [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 70-75. (in Chinese)
- [7] 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.
Xu Sh H, Wang H, Xue N. Deterioration law of bearing properties for corroded eccentric steel columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 157-163. (in Chinese)
- [8] 王仁华, 方媛媛, 窦培林, 等. 点蚀损伤下桩基式平台腿柱轴压极限承载力研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(3): 29-35.
Wang R H, Fang Y Y, Dou P L, et al. Investigation on ultimate strength of pile-foundation platform legs with pitting corrosion subjected to axial compression [J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(3): 29-35. (in Chinese)

- [9] 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.
Shi W Zh, Tong L W, Chen Y Y, 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. (in Chinese)
- [10] 王仁华,赵沙沙. 随机点蚀损伤钢板的极限强度预测[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 248-256.
Wang R H, Zhao Sh Sh. Ultimate strength prediction of steel plate with random pitting corrosion damage [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12): 248-256. (in Chinese)
- [11] 钢结构工程施工质量验收规范:GB 50205—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
Standard for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [12] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [13] 徐善华,邱斌. 锈蚀H型钢偏心受压承载性能试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4): 536-541.
Xu Sh H, Qiu B. Experimental study of bearing performance of corroded H-type steel member subjected to eccentric compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4): 536-541. (in Chinese)
- [14] 王仁华,方媛媛,林振东,等. 点蚀损伤下海洋平台结构剩余强度的多尺度分析方法[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 238-245.
Wang R H, Fang Y Y, Lin Zh D, et al. Multi-scale analysis of residual strength of offshore platforms with pitting corrosion [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 238-245. (in Chinese)
- [15] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report) [J]. Marine Structures, 2004, 17(5): 403-432.
- [16] 张岩. 含腐蚀损伤船体结构屈曲评估方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
Zhang Y. Research on buckling assessment method of hull structure with corrosion damification [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [17] 刘博. 腐蚀形貌对井架底座主承载梁应力影响规律研究[J]. 钢结构, 2018, 33(3): 118-122.
Liu B. Research on influence of corrosion features on the stress of the substructure main bearing beam [J]. Steel Construction, 2018, 33(3): 118-122. (in Chinese)
- [18] 工业建筑可靠性鉴定标准:GB 50144—2008 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
Standard for appraisal of reliability of industrial buildings and structures: GB 50144—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)