

考虑杆件弯曲与锈蚀影响的圆钢管轴压性能研究

徐志勇¹, 管浩²

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²青岛港(集团)港务工程有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年11月24日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

为了揭示初始缺陷与均匀锈蚀对圆钢管在轴压作用下的极限承载能力影响, 采用有限元方法对圆形钢管的极限抗压承载力规律进行研究。考虑了基于杆件一阶模态的初始缺陷大小、均匀锈蚀程度对圆钢管极限抗压承载力的削弱, 揭示了折减系数随初始缺陷大小和锈蚀程度对圆钢管杆件极限抗压承载力的变化规律, 可为评估既有圆钢管杆件极限抗压承载力提供理论基础。

关键词

初始缺陷, 锈蚀, 极限抗压承载力, 圆钢管

Study on Axial Compression Performance of Circular Steel Tubes Considering Initial Imperfections and Corrosion Effects

Zhiyong Xu¹, Hao Guan²

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Qingdao Port Affairs Bureau Port Affairs Construction Company, Qingdao Shandong

Received: November 3, 2025; accepted: November 24, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

To investigate the effects of initial imperfections and uniform corrosion on the ultimate axial compressive capacity of circular steel tubes, a finite element method was employed to study the corresponding load-bearing behavior. The study considered the reduction in ultimate compressive capacity

caused by initial imperfection amplitudes—based on the first-order buckling mode of the member—and various degrees of uniform corrosion. The variation of reduction factors with respect to imperfection size and corrosion level was revealed, providing a theoretical basis for evaluating the ultimate axial compressive capacity of existing circular steel tube members.

Keywords

Initial Imperfection, Corrosion, Ultimate Axial Compressive Capacity, Circular Steel Tube

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着钢结构在现代工程中的广泛应用,其服役期内的耐久性与安全性问题日益受到重视。钢结构在投入使用后,其自身性能会随着时间的推移和服役环境的变化而逐渐衰退[1],特别是在潮湿环境和滨海地区使用的钢结构更为显著。在这类环境中,极易引发钢构件和连接节点的锈蚀。锈蚀不仅会削弱构件的有效截面积,还可能导致构件发生弯曲变形,进而显著降低其承载能力,给结构整体安全带来潜在隐患[2]-[5]。

圆钢管构件因其优越的抗弯、抗压和抗扭性能,在大跨度空间结构、桥梁结构等工程中得到广泛应用。作为钢结构的重要构件形式之一,圆钢管在长期服役过程中发生锈蚀后,其力学性能变化对结构整体稳定性和承载能力有着重要影响。因此,深入研究锈蚀对圆钢管构件力学性能的影响机制,具有重要的工程实践意义和理论价值。

根据《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205-2020)[6],轴心受压构件的弯曲矢高不应超过构件长度的 1/1000。然而,在实际工程实践中,由于施工工艺不完善、构件运输过程中受力不当、现场安装精度不足等诸多因素影响[7],构件很可能出现超出规范限值的初始弯曲缺陷。这类缺陷不仅改变了构件的受力状态,还可能显著降低其稳定承载能力。因此,有必要对具有较大弯曲缺陷的轴心受压构件开展更加细致和全面的分析与评估,以确保结构的安全性与可靠性。

鉴于此,本文将圆钢管的锈蚀效应与初始缺陷进行耦合分析,综合考虑锈蚀造成的截面削弱与初始弯曲对构件承载性能的共同影响。通过有限元方法,系统研究了在锈蚀与弯曲缺陷同时存在的条件下,圆钢管在轴向压缩作用下的极限承载力退化规律,并构建了相应的性能折减曲线。研究成果可为既有圆钢管结构的安全评估与加固设计提供理论依据和技术支撑。

2. 有限元建模

2.1. 杆件材料参数

本文选取直径 60 mm,壁厚 3.5 mm,杆件长 1.5 m 的无缝钢管进行轴压模拟,杆件材料为 Q235 钢,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,材料密度为 7850 kg/m³,屈服强度为 235 MPa。

2.2. 弯曲方法

在有限元建模中,为考虑构件初始弯曲缺陷的影响,本文采用基于一阶屈曲模态的几何扰动方法。首先,对圆钢管模型进行屈曲分析,提取其第一阶屈曲模态作为缺陷形状的基础;随后,将该模态形状

按照一定的缺陷幅值叠加到几何模型中，从而形成包含弯曲的分析模型。该方法能有效反映构件在实际服役中可能出现的最不利弯曲形态，是评估结构稳定性和极限承载能力的常用手段之一。本文中弯曲幅值为 $L/1000$ 、 $L/900$ 、 $L/800$ 、 $L/700$ 、 $L/600$ 和 $L/500$ ， L 为杆件长度。

2.3. 锈蚀方法

本研究将钢材锈蚀效应简化为均匀损伤模式，重点关注几何特征变化对构件力学行为的影响。在数值模型中，锈蚀损伤通过均匀减薄钢管壁厚进行等效表征，具体表现为：有效截面厚度的线性折减。基于工程实际中锈蚀对钢材弹性模量、屈服强度等力学参数影响较小的特性，数值分析过程中未考虑材料性能的退化效应，以突显几何损伤对结构性能的关键作用。为系统评估锈蚀影响程度，选取 0%、10%、20%、30%四个典型锈蚀率梯度开展对比研究。

2.4. 计算方法

在引入锈蚀与弯曲缺陷后，采用静力弧长法(Static Arc-Length Method)进行分析。此方法能够有效模拟荷载 - 位移曲线的下降段，特别是在结构进入非线性行为阶段时，能够准确捕捉到结构的极限承载能力和稳定性问题。通过这一分析方法，能够更真实地反映锈蚀与弯曲对构件性能的影响，尤其是在荷载达到峰值后，构件可能出现的屈服、损伤或失稳现象。

2.5. 模型边界

如图 1 所示，(a)为模型边界条件设置，(b)为杆件加载耦合点，将杆件上缘耦合与点 RP-1，耦合点为轴压加载点。

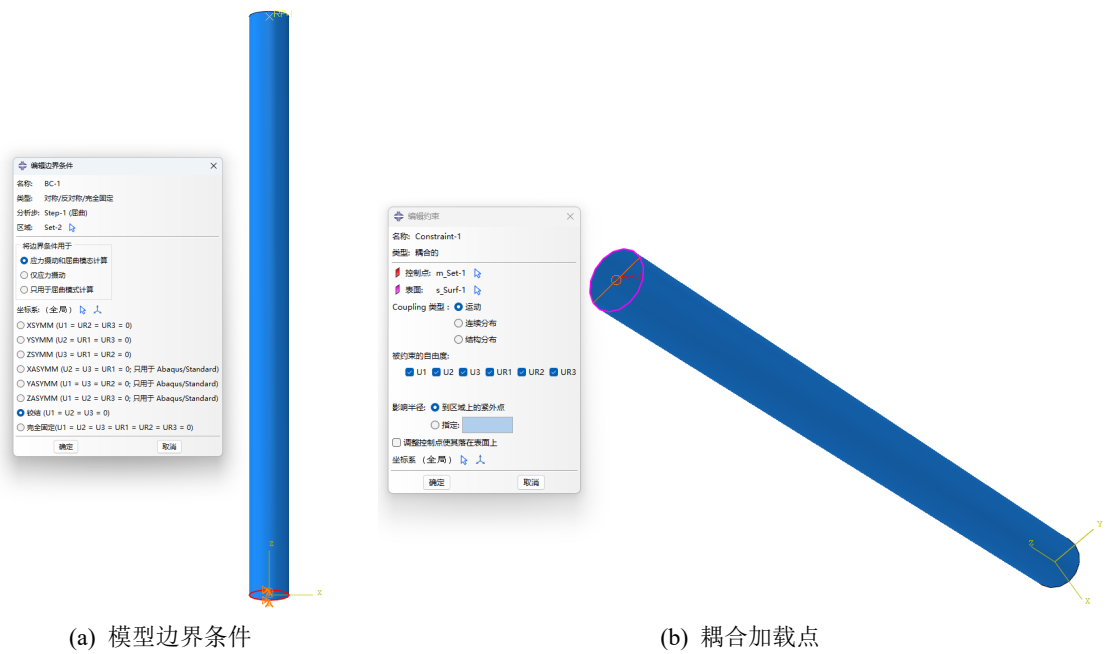


Figure 1. Boundary conditions and loading point of the model
图 1. 模型边界及加载点

2.6. 模型网格

本研究中选用的壳单元类型为 S4R，该单元为 ABAQUS 中常用的四节点、双线性插值、减少积分的

弯曲壳单元, 具备良好的几何非线性分析能力。S4R 单元适用于模拟薄壁结构的弯曲、压缩、剪切等多种受力状态, 能够有效平衡计算精度与效率, 尤其适合圆钢管类构件的力学性能模拟。网格大小取近似全局尺寸 0.015, 划分为 2178 个单元。模型网格如图 2 所示。

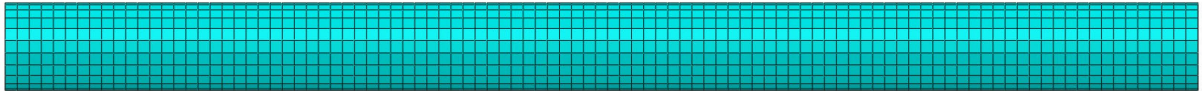


Figure 2. Mesh generation of the model
图 2. 模型网格划分

3. 模型线性屈曲分析

仅考虑杆件锈蚀, 不考虑杆件弯曲的情况下, 对模型进行线性屈曲分析, 得到杆件的屈曲模态和线性屈曲特征值, 线性屈曲特征值可以近似代表杆件在线性情况下的极限荷载值。

从图 3 可以看出, 每增加 10%的锈蚀率, 圆钢管在轴压作用下的线性屈曲极限荷载下降约 40%, 表明锈蚀对构件整体稳定性能具有显著削弱作用。该结果反映了截面削弱带来的刚度降低将直接影响构件的屈曲临界点, 特别是在圆钢管这类对稳定性较为敏感的受压构件中表现尤为明显。

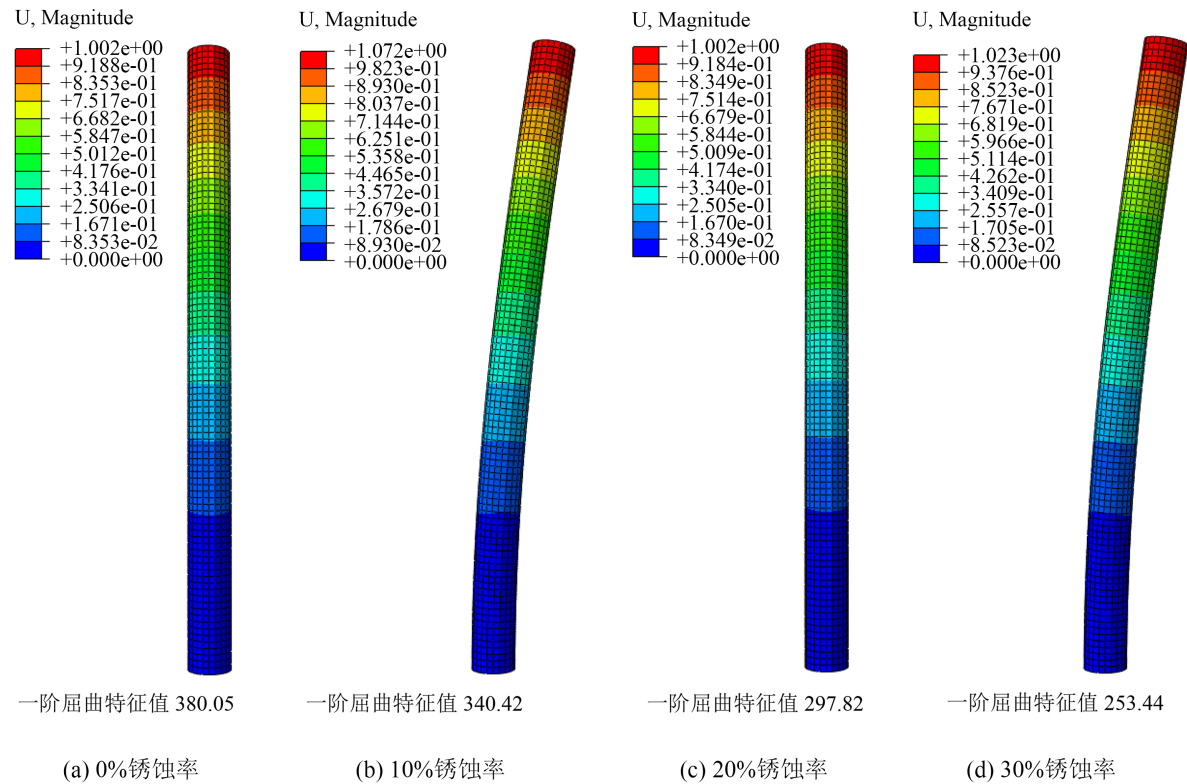


Figure 3. Linear buckling eigenvalues under different corrosion rates
图 3. 不同锈蚀率下的线性屈曲特征值

然而, 值得注意的是, 该结论基于线性屈曲分析, 其本质为理想化假设条件下的失稳预测, 未能考虑几何非线性及杆件弯曲等因素的耦合影响。因此, 该数值仅可作为趋势判断的定性参考, 并不能直接代表构件在实际服役条件下的真实极限承载能力。

4. 模型非线性极限承载能力分析

为获取更为准确的荷载 - 位移响应及极限承载能力。本文后续将基于考虑初始缺陷和均匀锈蚀的几何, 开展静力弧长分析, 进一步揭示构件破坏机制和荷载下降段行为, 为工程安全评估提供理论支撑。

如图 4 所示, 为不同锈蚀率和不同弯曲幅值情况下的荷载位移曲线。

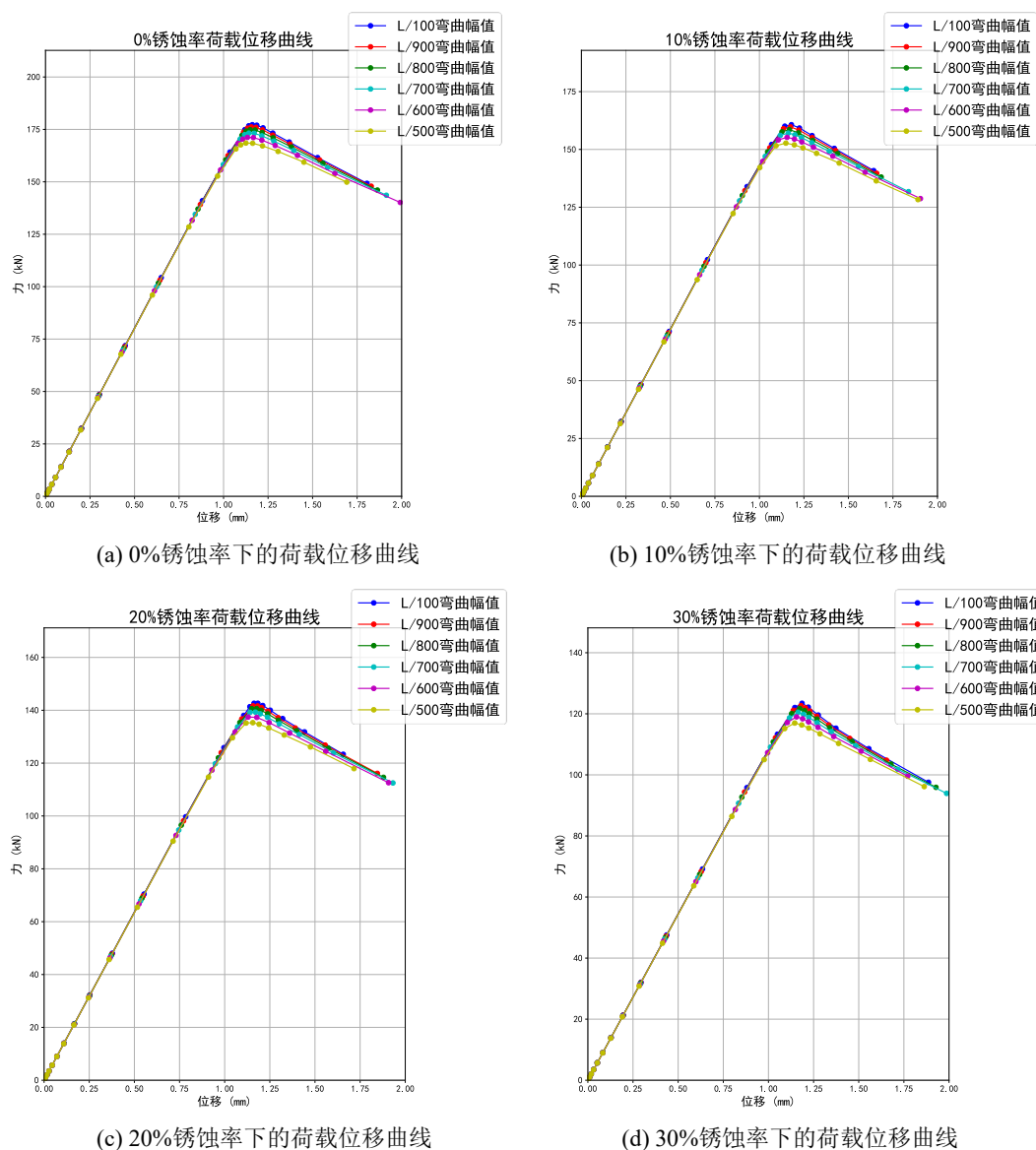


Figure 4. Load-displacement curves under different corrosion rates and initial bending amplitudes

图 4. 不同锈蚀率和不同弯曲幅值下的荷载位移曲线

通过图 4 可知, 在相同锈蚀率条件下, 随着初始弯曲幅值从 $L/1000$ 增加至 $L/500$, 杆件的极限承载力呈现出一定程度的下降趋势, 整体降低幅度约为 5%。这表明初始几何缺陷对圆钢管构件的稳定性具有一定影响, 但其作用相较于锈蚀程度仍较为有限。进一步地, 在相同初始弯曲幅值条件下, 随着锈蚀率每增加 10%, 构件的极限承载力约降低 10%, 说明锈蚀对承载能力的影响更加显著, 主要归因于锈蚀导致有效截面积减少及局部刚度削弱。

综合考虑锈蚀与弯曲缺陷的耦合作用, 研究结果表明圆钢管的极限承载力约为其第三节所给出的线性屈曲特征值的 40%至 49%。因此, 在实际工程评估中, 若忽略锈蚀及弯曲的影响, 易高估结构的承载能力, 需通过相应的折减系数加以修正, 以提高结构安全性和评估的可靠性。

5. 结论

基于本文对不同锈蚀率和初始弯曲缺陷圆钢管构件的线性屈曲分析与非线性极限承载力分析, 得出以下主要结论:

- 1) 锈蚀对构件承载力的影响显著: 随着锈蚀率的增加, 构件的线性屈曲特征值明显降低。每增加 10% 的锈蚀率, 构件轴压线性屈曲极限荷载约下降 40%, 反映出锈蚀对构件整体稳定性能具有显著削弱作用。
- 2) 初始弯曲对承载力的影响相对较小: 在相同锈蚀率下, 初始弯曲幅值从 $L/1000$ 增加至 $L/500$ 时, 构件极限承载力仅下降约 5%, 说明构件初始缺陷虽有影响, 但其作用程度小于锈蚀。
- 3) 锈蚀与弯曲的耦合作用不可忽视: 在非线性分析中, 锈蚀率每增加 10%, 构件极限承载力平均下降约 10%; 当锈蚀与初始弯曲共同作用时, 构件极限荷载值显著降低, 其值约为对应线性屈曲特征值的 40%至 49%。

参考文献

- [1] 董石麟, 罗尧治, 赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[J]. 空间结构, 2005(4): 4-11+16.
- [2] Rajabipour, A. and Melchers, R.E. (2013) A Numerical Study of Damage Caused by Combined Pitting Corrosion and Axial Stress in Steel Pipes. *Corrosion Science*, **76**, 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.07.002>
- [3] Zeinoddini, M., Peykanu, M., Varshosaz, M., Ezzati, M. and Zakavi, S.J. (2015) Ratcheting Behaviour of Corroded Steel Tubes under Uniaxial Cycling: An Experimental Investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, **113**, 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.06.007>
- [4] Yang, S., Song, X., Jia, H., Chen, X. and Liu, X. (2016) Experimental Research on Hysteretic Behaviors of Corroded Reinforced Concrete Columns with Different Maximum Amounts of Corrosion of Rebar. *Construction and Building Materials*, **121**, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.002>
- [5] Zhao, Z., Liu, H. and Liang, B. (2019) Probability Distribution of the Compression Capacity of Welded Hollow Spherical Joints with Randomly Located Corrosion. *Thin-Walled Structures*, **137**, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.031>
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收标准: GB 50205-2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [7] 王霄翔, 陈志华, 刘红波, 等. 弦支穹顶局部环索断索动力冲击效应试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(11): 1210-1220.