

引文格式:徐鑫乾,魏来,俞小衍,等.考虑腐蚀损伤的冷弯薄壁型钢立体货架受力分析及安全监测[J].太原理工大学学报,2026,57(4):793-799.

XU Xinqian, WEI Lai, YU Xiaoyan, et al. Force analyses and safety monitoring of cold-formed thin-wall steel three-dimensional shelf considering corrosion damage[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4):793-799.

考虑腐蚀损伤的冷弯薄壁型钢立体货架受力分析及安全监测

徐鑫乾¹, 魏 来², 俞小衍¹, 邱 冶³

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京; 2. 南京远能电力工程有限公司, 江苏 南京;
3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京)

摘 要:【目的】冷弯薄壁型钢立体货架因自重轻、易于组装拆卸和空间利用率高等优点被广泛应用于仓储行业。但这类结构对腐蚀损伤的敏感性高,随着服役时间的增长,由腐蚀引发的货架安全问题日益突出。【方法】为此,本文以考虑腐蚀损伤为前提,开展了立体货架结构的受力分析及安全监测研究。【结果】文中分析并验证了随机非均匀腐蚀损伤模型与均匀腐蚀损伤模型对冷弯薄壁型钢的适用性;以考虑腐蚀损伤的货架受力分析为基础,确定了既有立体货架服役期安全监测方案,提出了应力和变形监测点位的布设原则及多安全等级下结构监测阈值的确定方法;对某冷弯薄壁型钢立体货架实际工程进行了受力分析和安全监测,验证了本文方法的可行性和有效性。

关键词:立体货架;冷弯薄壁型钢;腐蚀损伤;受力分析;安全监测

中图分类号:TP277 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240427

文章编号:1007-9432(2026)04-0793-07

Force Analyses and Safety Monitoring of Cold-Formed Thin-Wall Steel Three-Dimensional Shelf Considering Corrosion Damage

XU Xinqian¹, WEI Lai², YU Xiaoyan¹, QIU Ye³

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing, Jiangsu, China; 2. Nanjing Yuanneng Power Engineering Co. Ltd, Nanjing, Jiangsu, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, China)

Abstract:【Purposes】Cold-formed thin-wall steel shelves are widely used in the storage industry owing to their light weight, easy assembly and disassembly, and high space utilization. However, this type of structure is highly sensitive to corrosion damage, and as service time increasing, the safety issues caused by corrosion become increasingly prominent. 【Methods】Therefore, mechanical property analyses and safety monitoring of the three-dimensional shelf structure were conducted, taking corrosion damage into account. 【Results】The applicabilities of random non-uniform corrosion damage model and uniform corrosion damage model to cold-formed thin-walled steel structures are analyzed

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2024-09-06

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51978240)

第一作者:徐鑫乾,副高级工程师,主要研究方向为电力工程结构设计,(E-mail)xuxq@js.sgcc.com.cn

通信作者:邱冶,副教授,主要研究方向为钢结构设计,(E-mail)qiuye@hhu.edu.cn

and verified. Based on the mechanical analysis of the corrosion shelf, the safety monitoring scheme for existing three-dimensional shelf during service life is determined. The principles for the layout of stress and deformation monitoring points and the method for establishing the monitoring threshold under multiple safety levels are proposed. The mechanical analyses and safety monitoring of cold-formed thin-wall steel shelf are performed, and the feasibility and effectiveness of the proposed method are validated.

Keywords: three-dimensional shelves; cold-formed thin-walled steel; corrosion damage; mechanical analysis; safety monitoring

与传统仓库相比,立体仓库具有自动化存取货物的功能,货位分配更为合理,占地面积更小,因此在当前仓储业获得了广泛应用。立体货架通常为冷弯薄壁型钢结构,随着服役年限的增加,钢材腐蚀导致的安全问题日益突出。

国内外学者已对腐蚀冷弯薄壁型钢结构力学性能进行了研究。文献[1-4]开展了腐蚀冷弯薄壁型钢的材料力学性能试验研究,建立了腐蚀指标与力学性能的关系;徐吉民等^[5]针对全面腐蚀冷弯薄壁卷边槽钢轴压和偏压短柱开展了试验研究,发现腐蚀损伤会改变构件的屈曲部位,且腐蚀率对轴压试件承载力、偏压试件刚度的影响较大;徐善华等^[6]开展了全面腐蚀冷弯薄壁C形钢梁受弯承载力试验研究,发现腐蚀会改变钢梁的破坏模式,且导致屈服荷载、屈曲荷载和极限荷载降低。上述研究均表明,腐蚀会导致冷弯薄壁型钢材料性能和构件力学性能的退化。

为保障货架服役期的安全,对其进行监测是一种有效手段。Yu等^[7]采用数字摄影系统,监测穿梭式货架在校车开始运动、加速和匀速移动时的动态变形;赵永谦^[8-9]利用时间基线视差法处理货架变形测量数据,开展了货架变形监测研究。通过对货架监测的研究和应用发现,货架结构具有构件繁多、工况多样的特点,这给监测方案的确定带来难度。同时,安全监测一般需以货架结构的受力分析为基础,但目前的受力分析大多未考虑腐蚀影响,这使得监测方案的合理性和安全性难以保证。因此,有必要开展考虑腐蚀损伤影响的立体货架结构的受力分析,然后以此为基础,结合货架结构的特点提出经济合理的监测方案。

为此,本文对全面非均匀腐蚀随机场模型和均匀腐蚀损伤模型进行分析,验证两种模型对冷弯薄壁型钢的适用性;根据货架构件受力水平的不同,定义安全等级和相应的行为响应,提出应力和变形监测点位及监测阈值的确定原则,构建立体货架结

构监测方案;将本文的分析方法和监测方案应用于某货架实际工程,以验证方法的可行性和有效性。

1 腐蚀损伤模型研究

1.1 基于随机场理论的非均匀腐蚀损伤模型

实际工程中,腐蚀深度通常是非均匀的且具有显著的随机性。为了体现实际构件这一腐蚀特征,本节采用随机场理论对腐蚀深度进行模拟,该理论可同时反映腐蚀深度的随机性和空间相关性。随机场模型常采用蒙特卡罗、自相关插值和谱表示等方法进行模拟。其中,谱表示法是将随机场表示为一个基于频域的积分或和的形式,具有在时间和空间上保持一致性的优势,能更好地描述各态历经性^[10]。因此本节采用谱表示法进行腐蚀深度随机场模型的构建。

在进行谱表示法分析前,为了满足随机场理论的平稳性假设,便于比较不同信号的频域特性,将腐蚀深度处理成均值为0的样本函数 $h(x, y)$ 。

$$h(x, y) = d(x, y) + \mu. \quad (1)$$

式中, x 和 y 为腐蚀表面上的位置坐标; μ 为平均腐蚀深度; $d(x, y)$ 为腐蚀深度值; $h(x, y)$ 为腐蚀深度相对均值的偏离值。

假设腐蚀表面各方向的随机特征相同,可采用下式拟合腐蚀深度功率谱密度函数 $S(\omega_1, \omega_2)$:

$$S(\omega_1, \omega_2) = \sigma^2 \frac{a^2}{4\pi} \exp[-(b\omega_1)^2 - (b\omega_2)^2]. \quad (2)$$

式中, σ^2 为腐蚀深度标准差; ω_1 、 ω_2 分别为 x 、 y 方向上的谐和分量波数; a 、 b 为腐蚀程度相关的拟合参数, a 与功率谱密度峰值有关,在1.3~2.6的范围内波动, b 与谐和分量波数上限有关,通过下式计算拟合参数 a 和 b ^[11]。

$$a = 2.33[1 - \exp(-0.022\mu)]. \quad (3)$$

$$b = 0.62a. \quad (4)$$

基于腐蚀深度随机分布特征及二维功率谱密度函数,采用第二类随机谐和函数构建腐蚀深度随

机场函数:

$$h(x, y) = \sqrt{2} \sum_{p=0}^{M_c-1} \sum_{q=0}^{N_c-1} \left[\sqrt{2S(\omega_{1p}, \omega_{2q}) \Delta\omega_1 \Delta\omega_2 \cos(\omega_{1p}x + \omega_{2q}y + \theta_{1pq})} + \sqrt{2S(\omega_{1p}, -\omega_{2q}) \Delta\omega_1 \Delta\omega_2 \cos(\omega_{1p}x - \omega_{2q}y + \theta_{2pq})} \right]. \quad (5)$$

$$\int_0^{\omega_{1a}} \int_{-\omega_{2a}}^{\omega_{2a}} S(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = (1 - \epsilon) \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty S(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2. \quad (6)$$

$$\Delta\omega_1 = \frac{2\pi}{L_x}, \Delta\omega_2 = \frac{2\pi}{L_y}. \quad (7)$$

$$\omega_{1p} = p\Delta\omega_1, \omega_{2q} = q\Delta\omega_2. \quad (8)$$

$$M_c = \frac{\omega_1}{\Delta\omega_1}, N_c = \frac{\omega_2}{\Delta\omega_2}. \quad (9)$$

式中, M_c 、 N_c 分别为 x 、 y 方向上的谐和分量各数; ω_{1p} 、 ω_{2q} 分别为 x 、 y 方向上第 u 、 v 个谐和分量波数; L_x 、 L_y 分别为表面 x 、 y 方向的尺寸; $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_2$ 为 x 、 y 方向上谐和分量波数微量; θ_{1pq} 、 θ_{2pq} 为均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 之间的随机相位角; ω_1 、 ω_2 分别为 x 、 y 方向上的上限截至波数, 决定了网格间距, 通过式(6)确定, 其中, $\epsilon < 1$, 如 0.000 1。

1.2 均匀腐蚀损伤模型

均匀腐蚀损伤模型即假设钢构件的截面腐蚀是均匀的, 通过同时减小截面厚度和降低钢材力学性能指标来模拟腐蚀的影响。截面厚度的减小值即为腐蚀深度, 基于幂函数的腐蚀深度模型为:

$$D = At^n. \quad (10)$$

式中: D 为钢材的腐蚀深度, mm, t 为钢材在大气中暴露时间, 年, A 、 n 为常数。

将腐蚀后钢材力学性能指标与失重率进行关联, 失重率定义为:

$$D_w = \frac{(\omega_0 - \omega_1)}{\omega_0}. \quad (11)$$

式中: D_w 为失重率; ω_0 、 ω_1 分别为腐蚀前后试件的质量。腐蚀钢材屈服强度、抗拉强度、弹性模量与失重率的关系式^[3]如下:

$$f'_y/f_y = 1 - 0.985 2D_w. \quad (12)$$

$$f'_u/f_u = 1 - 0.973 2D_w. \quad (13)$$

$$E'_s/E_s = 1 - 0.75D_w. \quad (14)$$

式中: f_y 、 f_u 和 E_s 为未腐蚀钢材的屈服强度、极限强度和弹性模量; f'_y 、 f'_u 和 E'_s 为腐蚀后钢材的屈服强度、极限强度和弹性模量。

1.3 腐蚀损伤模型适用性验证

为验证上述随机非均匀和均匀腐蚀损伤模型对冷弯薄壁型钢的适用性, 分别采用这两种模型对全面腐蚀的单向拉伸试件进行模拟, 并将结果与文

献[4]的试验结果进行对比。

有限元模拟引入随机非均匀腐蚀损伤模型的方法如下: 首先, 采用 MATLAB 与 ABAQUS 联合仿真通过写入节点坐标建立有限元模型; 然后, 计算随机非均匀腐蚀损伤模型参数, 包括腐蚀深度均值、腐蚀深度标准差(即平均腐蚀深度与腐蚀深度变异系数 cov 的乘积, $cov=0.44$ ^[12])、 x 和 y 方向的上限截至波数 ω_1 和 ω_2 、拟合参数 a 和 b ; 基于腐蚀深度随机场模型生成试验段对应单元的随机深度数据, 将试验段节点坐标与随机板厚数据一一对应; 在 ABAQUS 的材料属性模块将试验段节点坐标与板厚数据引入模型; 将多组随机生成的腐蚀深度样本数据导入到该试件的有限元模型中, 将其有限元结果的均值作为试件力学性能的代表值。

建立随机非均匀腐蚀拉伸试件有限元模型时, 材料本构模型采用双线性各向同性硬化模型。材料属性根据文献[4]中未腐蚀试件的力学性能参数确定。单元类型选择 S4R 壳单元。通过网格敏感性分析, 试验段(50 mm×25 mm)单元尺寸取 1 mm, 端部网格尺寸取 2.5 mm。钢材密度、柔性损伤参数、加载方式及边界条件的设置与文献[4]一致。这里共计生成 3 组随机腐蚀样本, 图 1 以其中一个样本为例给出了腐蚀后构件厚度的云图。

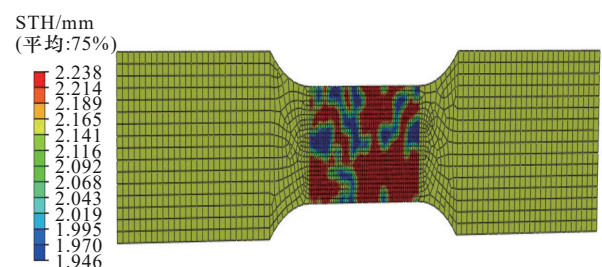


图1 随机非均匀腐蚀拉伸试件样本的厚度云图

Fig. 1 Thickness of random non-uniform corrosion tensile specimen

建立均匀腐蚀拉伸试件有限元模型时, 根据未腐蚀试件的力学性能参数、质量损失率($D_w=0.258 6$)及式(12)~(14)计算冷弯型薄壁型钢试件的力学性能参数。柔性损伤参数、网格类型尺寸、加载方式及边界条件的设置与文献[4]一致。

采用显示动力学方法对两种腐蚀损伤模型的试件进行单向拉伸过程模拟, 获得破坏形态及应力-应变曲线, 如图 2 和图 3 所示。

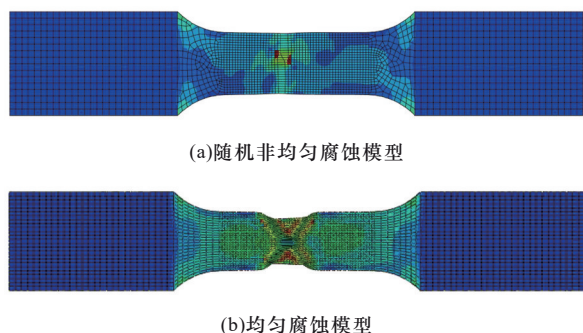


图 2 拉伸试件破坏模式对比

Fig. 2 Comparison of failure modes of tensile specimens

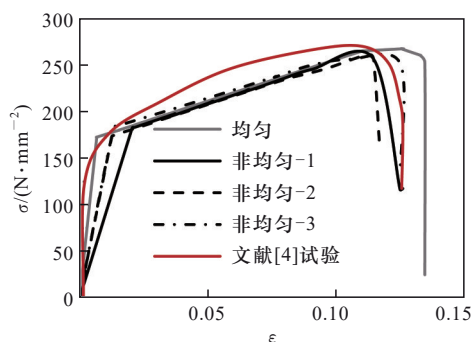


图 3 拉伸试件应力-应变曲线对比

Fig. 3 Stress-strain curves of tensile specimens

通过图 2 可以看出,基于随机非均匀腐蚀模型的试件存在局部应力集中,使得该区域塑性发展水平高于其他区域,构件颈缩相对不明显,而基于均匀腐蚀损伤模型的试件颈缩现象较为明显。与文献[4]对比发现,随机非均匀腐蚀构件的破坏形式与试验构件更为接近。通过图 3 发现,采用两种腐蚀损伤模型的应力-应变曲线较为接近,屈服强度均略高于试验结果,极限强度均略低于试验结果,误差均不超过 5%。可见,对于本文研究的冷弯薄壁型钢,两种腐蚀损伤模型的模拟误差均较小。

对于实际立体货架结构,其杆件数量多、计算工况多,若采用基于随机场理论的腐蚀损伤模型将导致计算量偏大。而且在确定货架监测方案时,货架的受力分析更关注应力应变关系及材料强度等指标,这时采用均匀腐蚀损伤模型即可满足要求。因此,下文在进行货架有限元分析时采用均匀腐蚀损伤模型。

2 既有立体货架安全监测研究

2.1 监测指标及关键部位确定

为了保障长期服役的立体货架的结构安全,本文以考虑腐蚀的有限元力学性能分析为基础,开展货架安全监测研究。与其他结构形式相比,立体货架具有以下特点:一方面构件数量多,例如对于一

个大型高层的立体货架,包含立柱、横梁、支撑、吊梁等在内的构件数量达上万;另一方面,由于货物的存储情况具有随机可变性,使得货架结构工况众多。因此,合理选取监测指标并确定关键部位,对于货架安全监测的有效性、经济性尤为重要。

由于结构的上述特点,仅对单一指标进行监测,很难兼顾监测的有效性和经济性。为此,本文采用对结构应力和变形同时进行监测的策略。在布置应力监测点时,首先根据构件的重要程度选择监测的构件类型,再通过受力分析获取构件的关键部位。对于立体货架结构,立柱是主要承重构件,立柱的破坏可能引起货架较大范围内的连续倒塌,因此应力监测构件首选立柱。若多种工况下某货架长期固定放置货物,可对其横梁进行应力监测。确定监测的重要构件后,以应力最大和应力比最大的原则选取构件的监测部位。

结构变形的监测指标包括位移和倾角两种。位移主要监测横梁跨中的竖向位移,并根据受力分析结果选择位移最大处作为监测点。此外也对底层柱柱子下端位移进行监测,用于反映结构的基础沉降情况。倾角监测主要用于反映结构垂直度,包括结构不均匀沉降、立柱倾斜以及层间位移。如图 4 所示,不均匀沉降通过 1 层梁倾角传感器进行监测,以梁两端倾角均值进行描述: $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$;立柱倾斜通过柱顶倾角传感器监测获得,以柱顶处倾角 β 进行描述;层间位移通过截面形式改变处层间倾角传感器监测获得,以层间柱两端倾角均值进行描述 $\gamma = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$ 。

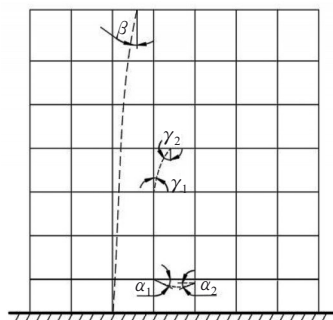


图 4 倾角传感器监测示意图

Fig. 4 Diagram of angle sensor monitoring

2.2 安全等级评估及监测阈值确定

通过监测系统获取应力和变形数据后,根据构件负载水平对安全等级进行评估。如表 1 所示,本文将安全等级划分为三级,分别为“安全”“重点关注”和“预警”,各等级之间以阈值 t_1 、 t_2 为界。

分级阈值的计算是安全等级确定的关键。目

前常用的阈值确定方法有 3 种:基于统计理论将期望值作为阈值、人为指定承载力的某个百分比为阈值、依据各种荷载工况分析结构确定阈值。其中第三种方法具有一定的概率统计依据^[13],因此本文选择该方法对监测阈值进行计算,阈值确定对应的工况如表 2 所示。在确定最不利荷载组合时,依据《工业货架设计计算》GB/T 28576—2012^[14]对正常、地震和偏载 3 类工况下 8 种荷载组合进行有限元分析,将应力及变形最大的工况作为最不利工况。上述 8 种荷载包含了实际货架结构可能遇到的最不利工况。

表 1 安全等级与行为响应

Table 1 Safety levels and behavioral responses

安全等级	应力或变形值	描述	行为响应
一级	$\leq t_1$	安全	负载水平较低,可正常使用
二级	$> t_1$ 且 $\leq t_2$	重点关注	负载水平较高,需限制使用,并检查是否出现异常
三级	$> t_2$	报警	负载已超设计限值,需降低负载或停止使用,检查异常排除可能险情

表 2 阈值确定对应工况

Table 2 Corresponding conditions of threshold determinations

阈值	t_1	t_2
工况	1.0*恒载荷+1.0*活载荷	最不利荷载组合工况

3 工程应用

3.1 工程概况

将本文考虑腐蚀损伤的冷弯薄壁型钢结构受力分析方法及安全监测方案应用于某立体货架实际工程,用以验证本文方法的可行性和有效性。该货架的结构形式为组装式冷弯薄壁型钢立体货架,位于南京,已服役 10 年,目前存在腐蚀问题(图 5)。钢材型号为 Q235,立柱和支撑采用 C 型截面,横梁采用双 C 型抱和梁。货架长度为 93.12 m,高度为 21 m,宽度为 8.5 m,货架的货格共 48 列、12 层、4 排,总计 2 304 个,设计载荷为每货格 14.7 kN。架片立柱和支撑的截面尺寸第 7 层中部发生改变。

3.2 考虑腐蚀的有限元受力分析

采用有限元分析软件 SAP2000 建立货架有限元模型。考虑到大气环境相似性,该结构腐蚀的相关参数参考文献[15]武汉地区的参数确定。采用均匀腐蚀损伤模型进行腐蚀模拟,参数 A 取 0.049, n 取 0.24, t 取 10 年。材料属性根据未腐蚀构件的力学性能参数(弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 235 MPa,极限强度为 370 MPa)及式(11)



图 5 某服役期立体货架实际工程
Fig. 5 Practical three-dimensional shelves in service

一式(14)确定。

构件采用杆单元进行模拟,立柱和横梁的连接方式为刚接。由于货架同地面的连接采用“预埋件二次浇灌”的形式,立柱与地面的约束类型定义为刚接。

依据《工业货架设计计算》GB/T 28576—2012^[14],对正常、地震和偏载 3 类工况下 8 种荷载组合进行有限元分析。由于篇幅有限,仅给出静态荷载工况 1 的内力及变形云图(图 6),图中拉应力为正号,压力为负号,沿坐标轴正方向的位移为正,反之为负。

3.3 监测方案确定

对 8 种荷载组合下的有限元结果进行分析发现,结构的应力和应力比最大点主要位于下立柱,位移最大点主要位于顶部横梁。据此确定该立体货架的监测方案,如图 7 所示。对于应力传感器,在柱底处布设 44 个,4 层立柱处布设 48 个,两立柱连接处布设 32 个;对于位移传感器,在横梁跨中处布设 64 个,柱底处布设 16 个;对于倾角传感器,在 1 层相邻梁转角处布设 32 对,柱顶处布设 32 个,7 层柱两端布设 20 对。进一步地,根据有限元模拟结果确定应力、位移传感器监测阈值,如表 3、表 4 所示。倾角传感器监测阈值(表 5)则依据相关规范对基础沉降和柱轴线垂直度的要求确定,由于该角度较小,故以此作为三级报警阈值,不再设置二级阈值。

3.4 监测结果

传感器的现场布设情况如图 8 所示。目前监测系统已投入使用,并获取了实际监测值。此处以满载工况下的监测值为例,与相应阈值进行对比,如图 9 所示。其中,图 9(a)和 9(b)的应力和变形监测结果表明,货架最不利构件处于二级安全状态,图 9(c)的倾角监测值未超出监测阈值。这说明在满载

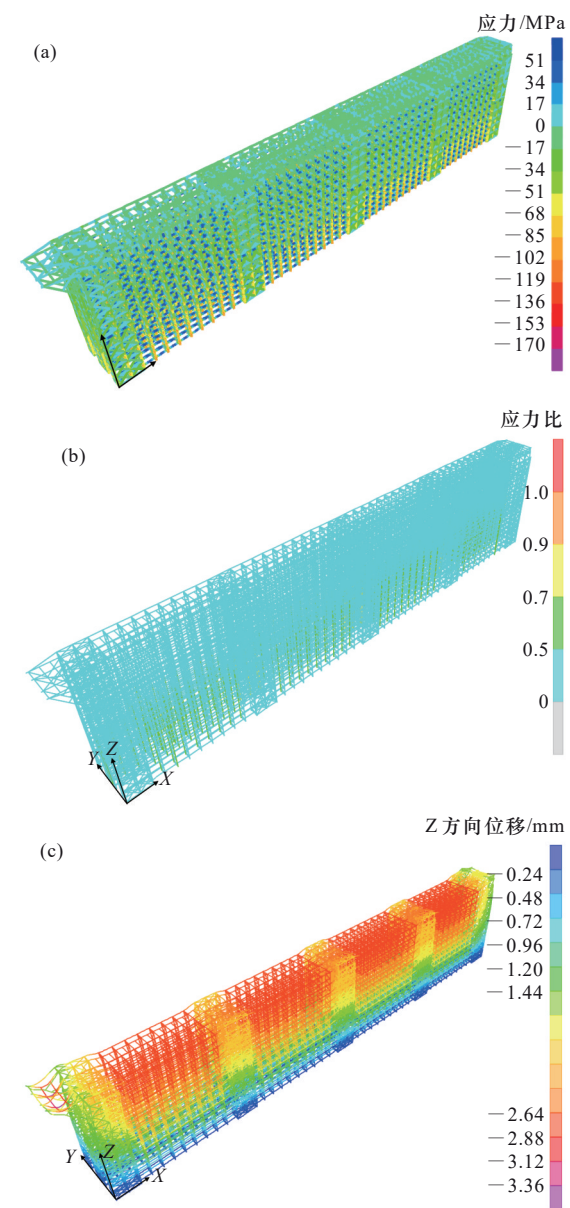


图6 工况1有限元分析结果
Fig. 6 Results of finite element analysis

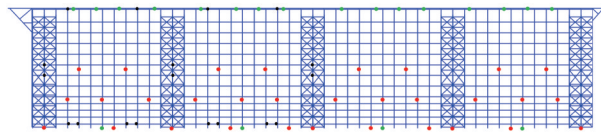


图7 监测点位布设(红色:应力传感器,绿色:位移传感器,黑色:倾角传感器)
Fig. 7 Layout of deformation monitoring points (red:stress sensor, green: displacement sensor, black: inclination sensor)

表3 应力传感器监测阈值 Table 3 Stress monitoring thresholds		
构件	压应力 t_{s1} /MPa	压应力 t_{s2} /MPa
柱底	-80.95	-126.57
4层立柱	-33.08	-48.65
两立柱连接处	-18.49	-34.79

表4 位移传感器监测阈值 Table 4 Displacement monitoring thresholds		
构件	t_{d1} /mm	t_{d2} /mm
横梁跨中	-2.5	-3.4
柱底	-1.6	-2.2

表5 倾角传感器监测阈值 Table 5 Inclination sensor monitoring thresholds	
构件	$t_{a2}/(^{\circ})$
1层相邻梁转角均值 α	0.59
柱顶倾角差值 β	0.23
7层柱两端倾角均值 γ	0.23

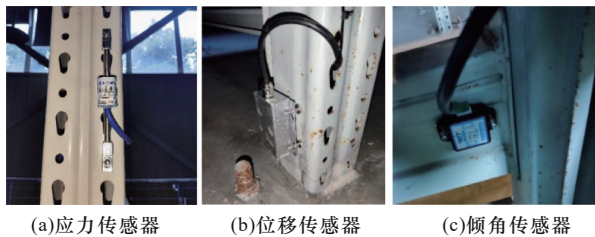


图8 传感器布设
Fig. 8 Sensor layout

工况下,结构整体处于二级状态,需重点关注。目前该安全监测系统已使用1年,达到了预期的功能和目标。

4 结语

本文针对冷弯薄壁型钢立体货架结构,采用有限元方法对随机非均匀腐蚀损伤模型和均匀腐蚀损伤模型进行了适用性验证,以受力分析为基础提出了货架安全监测方案,并开展了实际工程应用。具体结论如下:

1)通过对基于谱表示法的随机非均匀腐蚀模型和基于幂函数法的均匀腐蚀损伤模型进行分析发现,两种模型获得的应力-应变曲线均与试验结果较为接近,屈服强度、极限强度的误差均在5%以内。在确定货架监测方案时,综合考虑计算精度和效率,建议采用均匀腐蚀损伤模型进行货架受力分析。

2)根据货架的结构特点,采用对结构应力和变形同时进行监测的策略。结合货架受力分析,提出了监测关键点的确定方法,定义了三级安全等级和相应的构件行为响应,给出了结构监测阈值的计算方法。

3)对某服役10年的冷弯薄壁型钢立体货架实际工程进行了受力分析,构建了监测方案,并据此进行传感器布设。目前该监测系统已投入使用1年,获得了预期的效果,验证了本文方法的可行性和有效性。

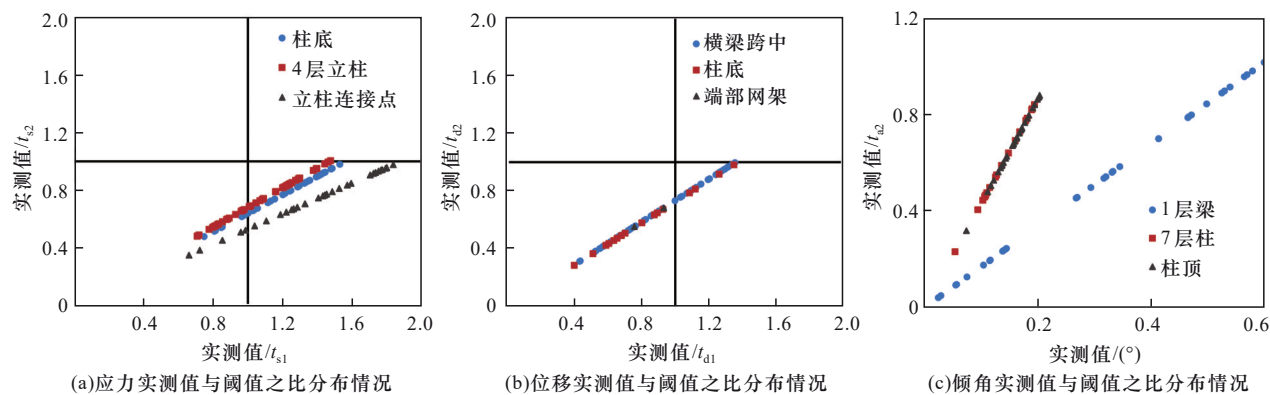


图9 实测值与阈值之比分布情况

Fig. 9 Distributions of ratio between measured value and threshold value

参考文献:

- [1] 傅本钊,林瑞宗,赵贻,等.基于点蚀演化的Q235钢材强度退化行为研究[J].太原理工大学学报,2024,55(2):356-364.
- [2] Woloszyk K, Garbatov Y. Random field modelling of mechanical behaviour of corroded thin steel plate specimens[J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110544.
- [3] 史伟洲,童乐为,陈以一,等.钢材腐蚀对住宅钢结构性能影响的评估[J].建筑结构,2013,43(16):88-92,72.
- [4] 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.
- [5] 徐吉民,幸坤涛,高向宇,等.锈损冷弯薄壁卷边槽钢短柱受压承载力试验研究[J].工程力学,2021,38(4):191-199,210.
- [6] 徐善华,牟林,张宗星,等.锈损冷弯薄壁C形钢梁受弯承载力试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):9-15.
- [7] Yu C X, Zhang G J, Ding X H, et al. Monitoring dynamic deformation of shuttle steel shelves by digital photography[J]. Civil Engineering Journal, 2019, 28(2): 136-150.
- [8] 赵永谦,于承新.密集储分货架系统变形监测数学模型应用研究[J].山东建筑大学学报,2018,33(5):31-35,41.
- [9] 赵永谦.密集储分一体货架系统稳定性及变形监测研究[D].济南:山东大学,2016.
- [10] 文齐.基于谱表示法的非高斯随机过程模拟[D].深圳:深圳大学,2020.
- [11] 王友德,周晓东,马蕊,等.模拟近海大气环境下结构钢锈蚀表面特征随机模型[J].金属学报,2021,57(6):811-821.
- [12] 陈尧.腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究[D].南京:东南大学,2021.
- [13] 蔡茂,倪建公,熊家才,等.船厂结构健康监测研究与应用[J].建筑结构,2023,53(10):113-121.
- [14] GB/T 28576-2012工业货架设计计算[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [15] 梁彩凤,侯文泰.碳钢、低合金钢16年大气暴露腐蚀研究[J].中国腐蚀与防护学报,2005(1):2-7.

(编辑:万 佳)