

局部腐蚀对 Q550E 工字形钢梁失效模式的影响分析

周煦¹, 王国华², 王茜茜², 彭建新¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广佛高速公路有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:为了研究局部腐蚀对高性能 Q550E 钢梁力学性能退化的影响,利用壁厚折减法建立腐蚀后的高性能钢(HPS)梁模型,在考虑钢梁几何初始缺陷和残余应力分布的基础上,采用弧长法对高性能钢梁的极限承载力进行计算,同时根据已有的试验结果验证该模型在腐蚀 HPS 工字形截面梁抗弯性能退化研究中的实用性。在此基础上,对 HPS 梁的顶板、腹板和底板进行腐蚀参数分析。模拟结果表明:模拟梁的主要失效模式表现为受压翼缘板的局部屈曲;顶板和底板处的腐蚀不会改变腐蚀梁的失效模式,且腐蚀梁的残余极限承载能力与其顶板或底板的腐蚀程度线性相关,其中顶板腐蚀比底板腐蚀对高性能钢梁性能退化的影响更大;当腹板的腐蚀程度达到 30%后,腐蚀梁的失效模式发生改变,承载能力迅速下降。

关键词:高性能钢;局部腐蚀;失效模式;极限承载力;数值模拟

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

自 2008 年中国将 Q460 高强度钢应用在国家体育场(鸟巢)中以后,金属高性能材料开始在中国桥梁结构、高层建筑结构中普及起来^[1-2]。施钢等^[3]对高强度钢材(屈服强度 690 MPa)及构件的性能进行了研究,结果表明:中国现行的钢结构设计规范不适用于高强度钢材结构的设计,有些条文甚至限制了此类钢材的工程应用,因此亟需对现行设计规范进行相应的完善和修订。

锈蚀是导致钢构件承载能力、使用寿命退化的主要损伤因素^[4-5]。徐善华等^[6-7]、史炜洲等^[8]以锈蚀 H 形钢梁为研究对象,发现板厚的减损是诱发 H 形钢梁腐蚀后受力性能退化的重要因素,翼缘或腹板厚度越小,承载力下降越严重对应挠度值增加越多;Rahgozar^[9]通过截面锈蚀率来表征腐蚀钢梁的失效荷载,提出了基于“最小曲线法”来评估钢梁最不利失效模式下的极限承载能力;曹嘉丽^[10]对局部腐蚀钢梁的端部局压承载力进行了评估,利用不同工况下钢梁端部局压承载力的有限元计算结果,提出了通过折减系数来计算腐蚀钢梁端部局压承载力的实用计算方法。尽管学者们对导致腐蚀构件性能退化的因素进行了分析^[11-12],但对于腐蚀工况与构件性能退化及其破坏模式之间的关系缺乏进一步的了解,如何从失效模式去看待构件承载能力的退化需要进一步阐述。

该文在以往团队针对 Q550E 钢材及其构件进行

腐蚀研究的基础上^[13-19],通过 Abaqus 软件及 4 片弯曲段腐蚀高性能钢梁,对腐蚀梁的失效模式及其承载力退化之间的关系进行研究。

1 腐蚀高性能钢梁参数

研究中,4 片 Q550E 高性能钢试验梁的尺寸和腐蚀安排分别如图 1、2 和表 1 所示。在腐蚀完成后,利

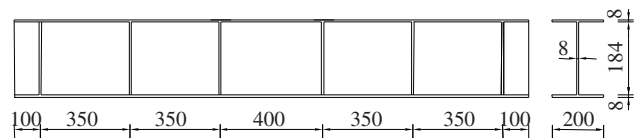


图 1 试验梁截面尺寸图(单位:mm)

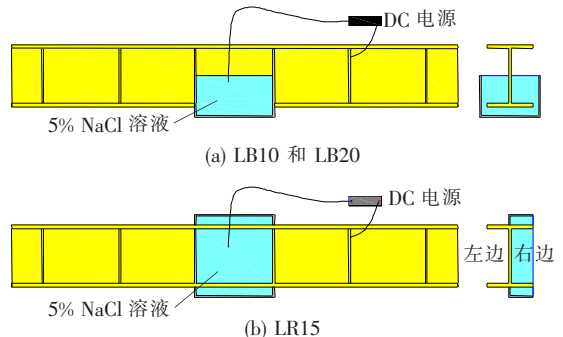


图 2 电化学加速腐蚀示意图

收稿日期:2020-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078056);湖北省自然科学基金资助项目(编号:2022CFB558);长沙理工大学校级研究生“实践创新与创业能力提升”项目(编号:SJXC201925)

作者简介:周煦,男,硕士研究生. E-mail:576863700@qq.com

用 3D 扫描仪获取了试件腐蚀区域的残余几何参数, 见表 2。

表 1 构件设计及分组

编号	腐蚀位置	预期锈蚀率/%	材料	数量	实际腐蚀率/%
MN1	未腐蚀	0	Q550E	1	0
LB10	纯弯段受拉区	10	Q550E	1	8.16
LB20	纯弯段受拉区	20	Q550E	1	21.54
LR15	纯弯段右半区	15	Q550E	1	14.79

表 2 试验梁锈蚀纯弯段的残余尺寸

编号	锈蚀率/%	上翼缘		腹板		下翼缘	
		剩余厚度/mm	剩余率/%	剩余厚度/mm	剩余率/%	剩余厚度/mm	剩余率/%
MN1	0	8.00	100	8.00	100	8.00	100
LB10	8.16	8.00	100	7.05	88.13	6.26	78.25
LB20	21.54	8.00	100	6.31	78.88	4.46	55.76
LR15	14.79	8.00(5.66)	100(70.75)	6.03	75.38	8.00(4.43)	100(55.38)

注:LR15 中数据,括号外为左侧,括号内为右侧。

表 3 Q550E 钢材的材料参数

弹性模量	屈服强度	屈服应变	强化应变	极限强度	极限应变
E/GPa	f_{yc}/MPa	ϵ_{yc}	ϵ_{hc}	f_{uc}/MPa	ϵ_{uc}
2.087	654.11	0.004 12	0.032 96	840.06	0.186 98

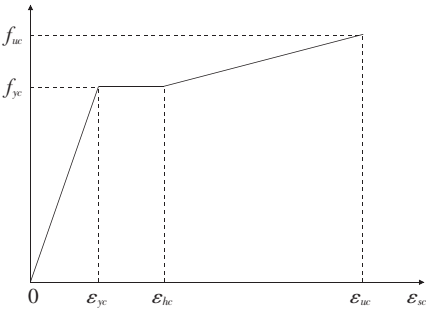


图 3 三阶段本构模型

(3) 加载及约束设置

约束设置如图 4 所示,梁端约束为简支约束,且约束了支座处对应腹板和上翼缘的横向位移。加载设置为两点加载,图 4 中顶板距跨中位置处划分两个 50 mm×150 mm 区域面,将其与加载点耦合绑定,以此通过将荷载作用于加载点上从而在两加载区域实现均匀加载。

2.2 几何初始缺陷

采用特征模态法(Buckle 分析步)用一个等效的

2 锈蚀钢梁数值模型

2.1 模型的建立

(1) 模型尺寸

如图 1 所示,由于该文研究目前更侧重于腐蚀部位的参数化研究,故通过均匀削减构件尺寸进行模拟。

(2) 材料参数

高性能钢材定义为弹塑性材料,具体的材料力学性能参数见表 3,其本构模型如图 3 所示。

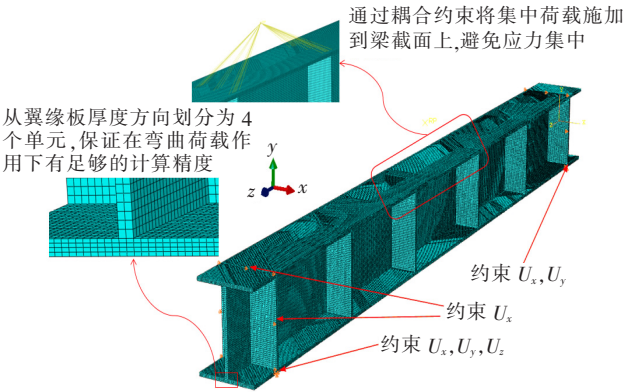


图 4 有限元模型

缺陷代替各种缺陷的影响。用构件的 1 阶特征值屈曲模态作为构件的几何缺陷,更新构件的坐标,对结构将产生最不利的影响。因而,此处采用这种方法考虑几何缺陷,随后通过弧长法(Risk 分析步)进行非线性分析计算钢梁的抗弯行为。采用自动增量迭代求解过程,直到分析达到预定的终止极限。

目前针对屈曲模态因子的选取还未有统一标准,

部分规范规定最大缺陷值为梁长 $L/1\,000$, 通过对 0.05 mm、0.10 mm、0.40 mm、2.00 mm 4 种缺陷值进行对比, 发现当模态因子小于 0.1 mm 以后(图 5), 所得结果基本变化不大, 且与实际结果较为切合, 固在该研究中模态因子取值为 0.1 mm。

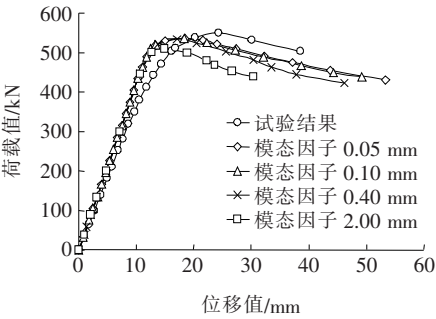


图 5 不同模态因子作用下的结果对比

2.3 残余分布应力

由于钢梁是通过焊接拼装而成, 其内部存在自相平衡的内应力, 即残余应力。薛加烨^[20] 针对 Q550 钢 H 形梁的残余应力分布进行了研究, 结果表明: 残余应力的分布沿纵向是相似的, 而沿横向的分布如图 6 所示。根据图 6, 在 Abaqus 软件的预定义场功能中通过切割块的方式, 分节点输入其相应的初始应力值, 以模拟残余应力的分布。

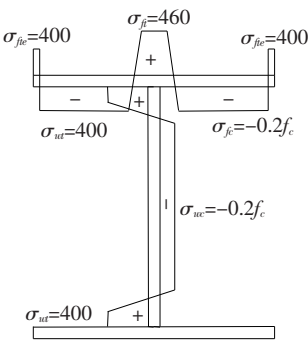


图 6 残余应力分布示意图(单位:MPa)

3 有限元模型验证

图 7 为模拟结果和试验结果的荷载—跨中挠度曲线。由图 7 可以发现: 试验结果和模拟结果在整体上存在一定的偏差, 尤其是在曲线的初始上升段, 前者的弯曲刚度要稍小于后者, 但是其曲线的变化模式和其极限荷载值比较接近。这可能是因为试验过程中钢梁和支撑设备之间的预压不够, 导致试验过程中试验梁产生了一定程度的虚位移及变形。表 4 为试验结果、模拟结果的对比, 可以看出两者之间较为吻合。

图 8 为试验梁失效模式。

由图8可知: 局部腐蚀梁的有限元分析和试验结

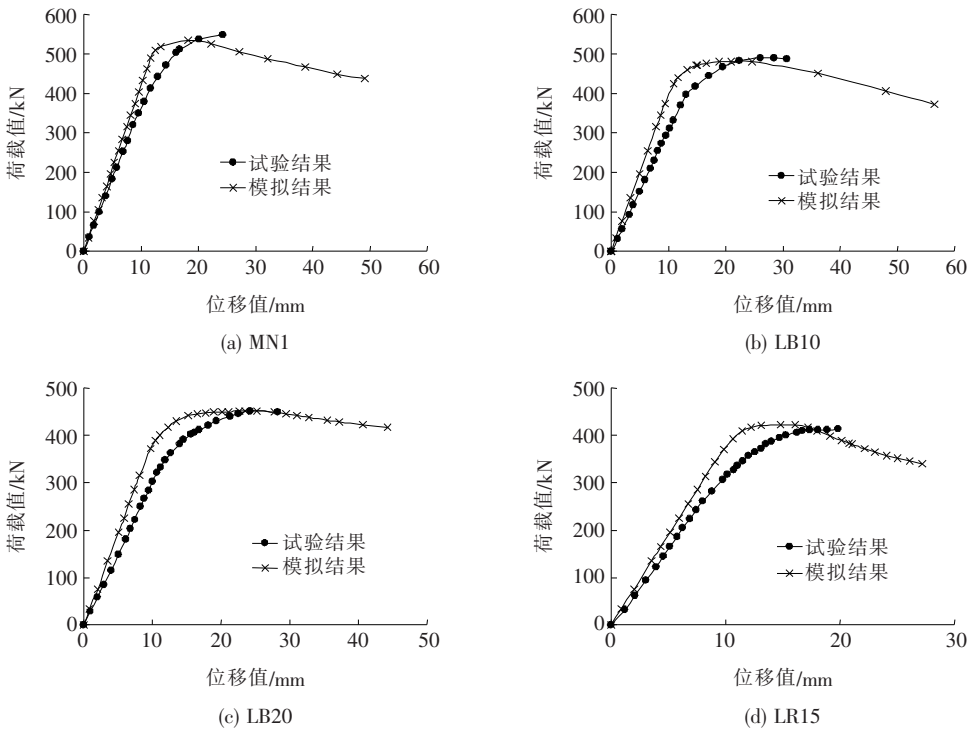


图 7 试验结果和模拟结果的对比

表 4 试验结果、模拟结果对比

编号	极限荷载/kN		F_{um}/F_{ue}
	试验结果 F_{ue}	模拟结果 F_{um}	
MN1	549.0	535.4	0.960
LB10	490.0	481.3	0.980
LB20	451.5	450.4	0.997
LR15	413.6	423.7	1.020

果的失效模式基本一致,均表现为弯曲段受压翼缘板的局部屈曲。综合考虑,这些对比验证了有限元分析方法的可靠性,能够使用此有限元分析方法对局部腐蚀梁进行参数化计算。

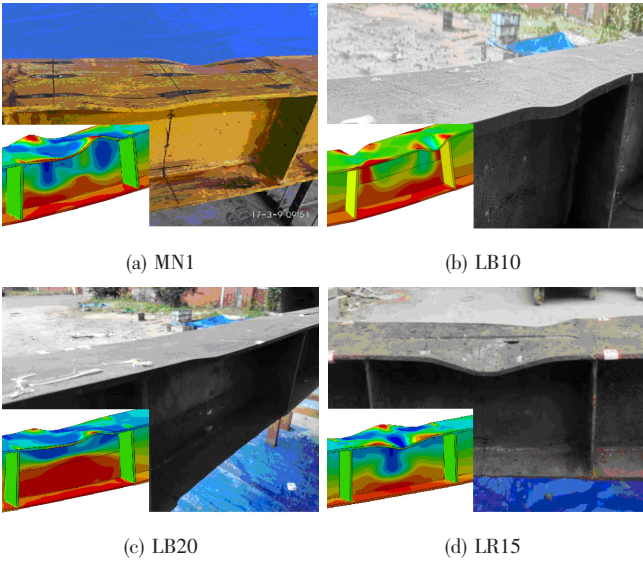


图 8 失效模式对比

4 参数分析结果

4.1 底板腐蚀的影响

图 9 为底板腐蚀模拟梁的荷载—挠度曲线,腐蚀梁曲线的增长模式与对比梁的基本一致,说明底板腐蚀对模拟梁的弯曲行为没有太大的影响。图 10 为模拟腐蚀梁的承载力演变情况,可以直接观察到屈服荷载和极限荷载的退化情况与底板的腐蚀程度线性相关。值得考虑的是,当腐蚀位置集中于底板时,可否通过折减系数去估算腐蚀梁的残余承载力。图 11 反映了不同腐蚀程度下模拟梁的失效模式,可以观察到底板腐蚀模拟梁的失效模式均表现为顶板的局部屈曲。这说明了当腐蚀梁的腐蚀位置位于底板处时,其失效模式不受影响。

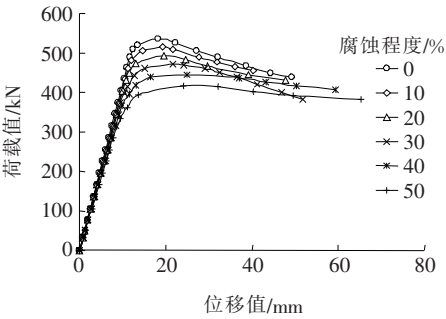


图 9 底板腐蚀对承载力的影响

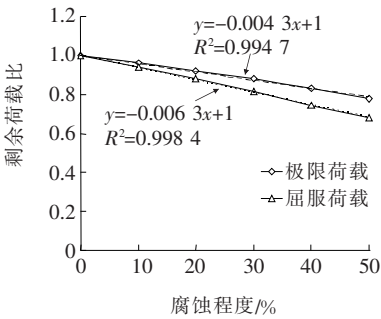


图 10 底板腐蚀程度与剩余承载力关系

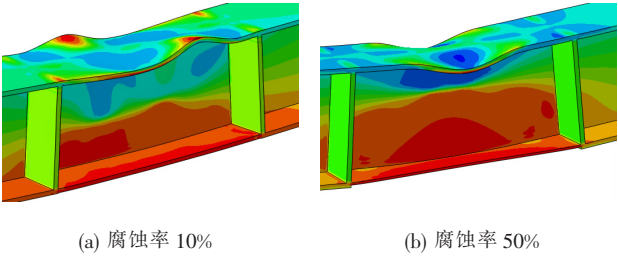


图 11 底板腐蚀程度对失效模式的影响

4.2 腹板腐蚀的影响

图 12 为各腹板腐蚀模拟梁的荷载—挠度曲线。由图 12 可知:腐蚀梁曲线的增长模式受到腐蚀程度的影响,当腐蚀程度低于 10% 时,腐蚀对模拟梁承载力和抗弯刚度的影响不大。随着腐蚀程度进一步增长,模拟梁的极限承载力出现明显的下降,在腐蚀程度达

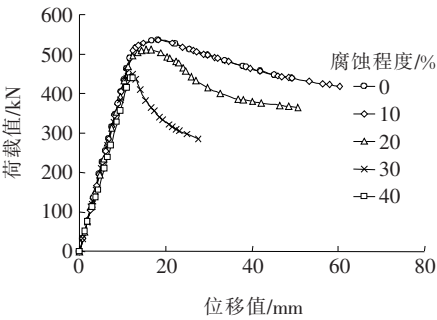


图 12 腹板腐蚀对承载力的影响

到40%时,模拟梁的下降平台消失,此时的失效模式表现为腹板受压侧的局部屈曲。

图13为腹板腐蚀程度与剩余承载力关系。从图13可知:腹板腐蚀对模拟梁承载力的影响不存在线性关系,且在腐蚀程度超过30%后,模拟梁达到失效状态时,其仍然处于弹性阶段。

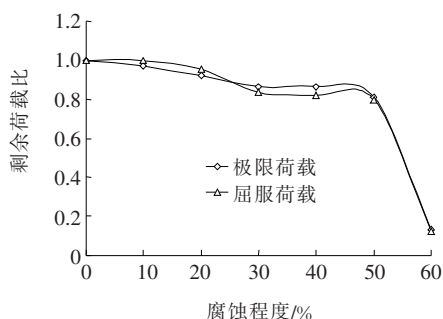


图13 腹板腐蚀程度与剩余承载力关系

图14为模拟的失效破坏示意图。由图14可知:当腐蚀程度小于30%时,模拟梁的失效模式为受压翼缘板的局部屈曲,当腐蚀程度超过30%时,失效模式由受压翼缘的局部屈曲开始向腹板屈曲演变,当腐蚀程度接近40%后,模拟梁的失效模式已经完全转变为腹板的局部屈曲,当腐蚀程度为60%时,模拟梁的极限承载力迅速下降,腐蚀梁的承载力退化程度超过80%。

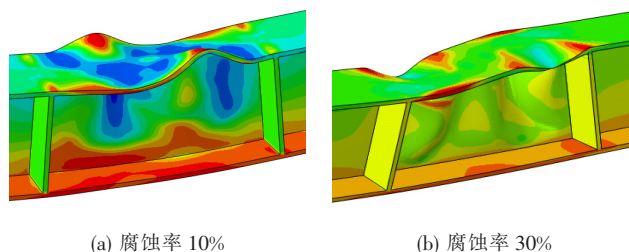


图14 腹板腐蚀程度对失效模式的影响

4.3 顶板腐蚀的影响

图15为各顶板腐蚀模拟梁的荷载—挠度曲线,各曲线的变化趋势基本一致。图16为顶板腐蚀程度与剩余承载力关系示意图,与底板腐蚀一样,模拟梁的剩余极限荷载和剩余屈服荷载与顶板的腐蚀程度保持线性关系。剩余屈服荷载的下降速率稍大于剩余极限荷载。图17为各顶板腐蚀梁的失效模式示意图,其失效模式均表现为明显的受压翼缘局部屈曲,说明受压翼缘腐蚀不改变模拟梁的失效模式。顶板腐蚀对剩余承载力的影响系数为0.007,比底板腐蚀的影响因子0.0063大,说明顶板对HPS梁的剩余承载力影响

更大。

从底板、腹板、顶板单独腐蚀对模拟梁承载力的影响可发现,当腐蚀HPS梁的失效模式不改变时,腐蚀HPS梁的剩余承载力与其对应腐蚀部位的腐蚀程度呈线性相关,但腐蚀HPS梁的失效模式改变后,这两者不再保持线性关系,因此从试件的失效模式去判断腐蚀HPS梁的剩余极限承载力是可行的。

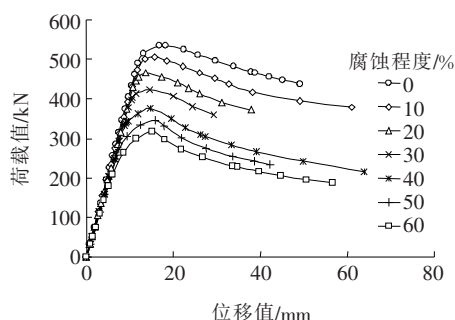


图15 顶板腐蚀对承载力的影响

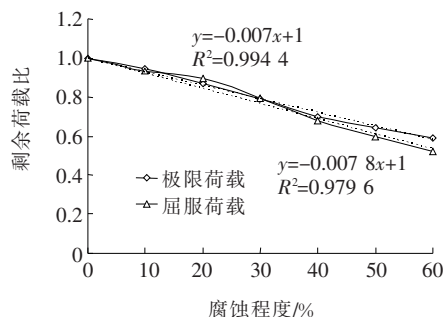


图16 顶板腐蚀程度与剩余承载力关系

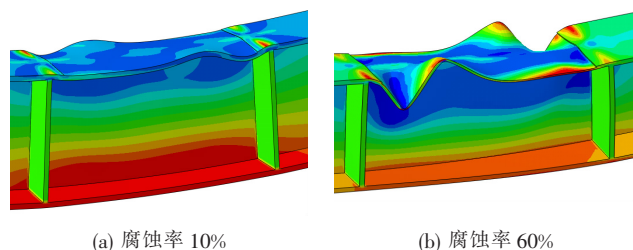


图17 顶板腐蚀程度对失效模式的影响

5 结论

基于Abaqus有限元模拟软件,利用3D扫描仪获取的残余几何尺寸进行建模计算,同时模拟了HPS梁在各板件独自腐蚀情况下的性能退化情况,得到以下结论:

(1) 腐蚀对高性能钢梁的弯曲行为有显著影响,其中顶板腐蚀对高性能H形钢梁弯曲性能的影响最

为明显,其主要原因在于顶板的抗屈曲能力下降,快速屈服,降低试验梁的极限承载力。

(2) 底板和顶板腐蚀不影响 HPS 梁的失效模式,但底板腐蚀 HPS 梁的屈曲面积会随腐蚀程度的增长而趋向于平缓,此外,底板和顶板腐蚀 HPS 梁的剩余极限承载力退化与腐蚀程度呈线性关系,其中顶板腐蚀对剩余承载力的影响更大。

(3) 腹板腐蚀会影响到 HPS 梁的失效模式转变,腐蚀程度达到 30% 后,HPS 梁的失效模式开始由受压翼缘的局部屈曲转向于腹板屈曲,在 HPS 梁的腐蚀程度达到 60% 后,梁的极限承载力迅速下降,此时承载力的下降程度达到了 80% 以上。

参考文献:

- [1] 赵秋,吴冲.桥梁高性能钢发展与展望[J].中国市政工程,2007(2):64—68.
- [2] 王萌,石永久,王元清,等.循环荷载下钢材本构模型的应用研究[J].工程力学,2013,30(7):212—218.
- [3] 施刚,王元清,石永久.高强度钢材轴心受压构件的受力性能[J].建筑结构学报,2009,30(2):92—97.
- [4] 许红胜,吴佳东,黄娟,等.基于蚀坑参数的既有斜拉索钢丝腐蚀程度分级评价研究[J].中外公路,2015,35(6):148—151.
- [5] 许红胜,胡亚斯,颜东煌.既有腐蚀拉索钢丝蚀坑形态参数的分布特征[J].中外公路,2020,40(1):80—84.
- [6] 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.
- [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—163,169.
- [8] 史炜洲,童乐为,陈以一.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.
- [9] RAHGOZAR R. Remaining Capacity Assessment of Corrosion Damaged Beams Using Minimum Curves[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 299—307.
- [10] 曹嘉利.局部腐蚀 H 型钢梁的端部局压性能及加固研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [11] 盛杰.荷载与地下环境耦合作用下 H 型钢梁锈蚀特征及力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [12] 潘典书.锈蚀 H 型钢构件受弯承载性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- [13] 彭建新,张伟,阳逸鸣,等.腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标影响的试验研究[J].公路交通科技,2018,35(10):56—62.
- [14] 彭建新,阳逸鸣,张建仁.锈蚀钢筋截面面积分析及强度概率模型[J].中外公路,2015,35(5):124—129.
- [15] PENG J X, XIAO L F, ZHANG J R, et al. Flexural Behavior of Corroded HPS Beams [J]. Engineering Structures, 2019, 195: 274—287.
- [16] XIAO L F, PENG J X, ZHANG J R, et al. Comparative Assessment of Mechanical Properties of HPS between Electrochemical Corrosion and Spray Corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117735.
- [17] XIAO L F, PENG J X, ZHANG J R, et al. Mechanical Properties of Corroded High Performance Steel Specimens Based on 3D Scanning [J]. Advanced Steel Construction: An International Journal, 2019, 15(2): 129—136.
- [18] 刘新华,张建仁.锈蚀对 Q550E 高性能钢梁抗弯承载力影响的试验研究[J].中国公路学报,2019,32(11):184—191,201.
- [19] 陆森强,赵伟,蒋锦毅.腹板局部锈蚀对钢板中钢板梁受力性能的影响分析[J].中外公路,2018,38(2):103—108.
- [20] 薛加焯.高强度钢材受压构件整体稳定性能试验研究[D].南京:东南大学,2014.