

列车动载下腐蚀钢桁架桥力学性能研究

王占飞¹, 宋俊江¹, 任浩²

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要 目的 探究列车动载作用下腐蚀铁路钢桁架桥的力学性能。方法 基于车桥耦合理论,通过建立纵梁及上、下节点腐蚀等三种形态下的车桥耦合模型,获得了列车过桥时不同部位腐蚀后的桁架桥动力响应及构件应力分布的影响。结果 当桁架桥纵梁严重腐蚀,列车通过时桥梁的位移峰值增长了10%,桁架桥各构件的应力均有所上升;而当上节点严重腐蚀,桥梁的位移峰值约为未腐蚀时的2.3倍,桥梁跨中的上平联杆件与跨中、边跨的纵梁应力分别增长500%、25%及66%;当跨中下节点严重腐蚀,跨中的纵梁将承担更大的荷载。结论 纵梁及节点区域的严重腐蚀会影响桁架桥的变形能力及构件的应力分布,并威胁桥梁的运营安全;根据腐蚀桁架桥的构件应力分布规律,提出了预加固建议。

关键词 铁路钢桁架桥;大气腐蚀;车桥耦合;数值模拟

中图分类号 TU391;U445.7⁺3

文献标志码 A

Mechanical Behaviour of the Steel Truss Bridge with Corrosion Damage under Train Loading

WANG Zhanfei¹, SONG Junjiang¹, REN Hao²

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, China, 210098)

Abstract: To investigate the mechanical properties of corroded railroad steel truss bridge under the action of train dynamic load. Based on the theory of vehicle-bridge coupling, the dynamics response of the truss bridge and the influence of stress distribution of the members are obtained by establishing the vehicle-bridge coupling model under the corrosion of the longitudinal beam and the upper and lower nodes in the three forms after corrosion in different parts of the bridge when the train crosses the bridge. When the longitudinal girder of the truss bridge is seriously corroded, the peak displacement of the bridge increases by 10% when the train passes through, and the stresses of the truss bridge members increase. At the same time, when the upper node is seriously corroded, the peak displacement of the bridge is about 2.3 times that of the non-corroded one. The stresses of the upper flat link members in the bridge span and the longitudinal girders in the center and side spans increased by 500%, 25%, and 66%, respectively, when the lower nodes in the center of the

收稿日期:2022-06-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介:王占飞(1976—),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震及钢桥腐蚀疲劳等方面研究。

span were severely corroded, the longitudinal girders in the center of the span would bear greater loads. It is concluded that severe corrosion of longitudinal girders and node areas will affect the deformation capacity and stress distribution of members of truss bridges and threaten the operational safety of bridges. Finally, according to the stress distribution law of the members of the corroded truss bridge, a pre-strengthening proposal is put forward.

Key words: railway truss bridge; atmospheric corrosion; vehicle-bridge coupling; numerical simulation

当前全球范围内钢桥“老龄化”问题凸显,由于长期经受大气腐蚀环境影响,现役桥梁均出现了不同程度的腐蚀现象^[1-2]。钢桁架桥纵梁多为工字形梁,因受构造限制,其腐蚀主要出现在工字梁腹板-底部翼缘板交界区域,严重威胁了桥梁的安全^[3]。为避免腐蚀引起桥梁损伤破坏、保证结构安全耐久,我国众多学者逐步开展了关于桥梁腐蚀方面的研究,徐俊等^[4]通过检测斜拉桥缆索的腐蚀病害,明确了缆索腐蚀的分布规律,并提出了腐蚀缆索剩余寿命的计算公式;基于我国相关规范^[5-6]给出的碳钢腐蚀速率公式,王占飞等^[7]研究了防落梁钢圈限位装置在不同腐蚀率下的力学性能,并提出大气腐蚀下钢圈限位装置剩余承载力计算方法;万吕等^[8]通过建立不同腐蚀率下的钢板梁有限元模型,分析了加劲肋-腹板腐蚀与下翼缘-腹板腐蚀两种腐蚀形态对钢板梁屈曲承载力的影响。尽管当前针对桥梁的腐蚀问题开展了一定研究,但是对于移动车辆荷载作用下,带有腐蚀损伤的铁路桁架桥力学性能尚不明确。为此,作者基于车-桥耦合振动理论,建立不同腐蚀条件下的车-桥耦合模型,探究了带有腐蚀损伤铁路桁架桥的力学性能,分析了大气腐蚀对桁架桥构件应力分布的影响,并结合分析结果,针对铁路桁架桥的腐蚀耐久防护,提出了维修加固及预防建议^[9],研究成果以期为我国既有

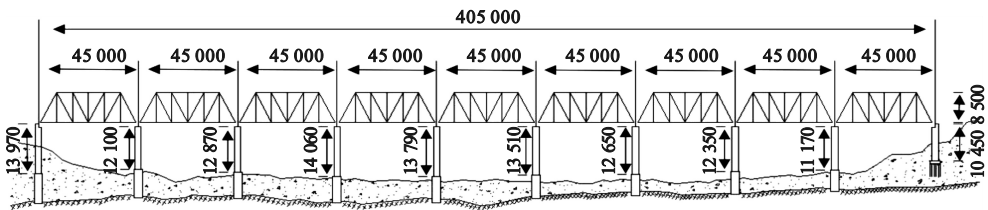
铁路桥梁维护及未来铁路桥梁设计建造提供一定参考。

1 车桥耦合模型建立

1.1 腐蚀状态下桥梁模型

以吉林市跨松花江铁路桥为工程实例,采用 ABAQUS 软件瞬态分析 (Standard) 中的 Newmark 法求解模型,列车车速考虑为分析步长与加载时间之比,而轮载作用下轮-轨接触点的变形则参考文献[10-11]。求解过程与准确性验证详见文献[12]。该桥为九跨简支钢桁架桥,始建于 1926 年,桥梁全长 405 m (9 × 45 m)、高 8.5 m,纵、横梁为工字形梁,弦杆为闭口箱型杆,除两侧直腹杆为工字形杆外,其余腹杆为箱型杆,上平联为工字形杆、下平联为薄壁角钢。经实地调查,该桥多处已出现不同程度的腐蚀现象。

取其中一跨,采用 ABAQUS 软件中的实体单元 C3D10 建立桥梁有限元模型 (见图 1)。桥梁两端简支约束,同时考虑节点刚域效应,将各杆与节点板间设置为刚性连接;轨枕依照实际尺寸设置,按每千米 1 760 根布置。所涉及材料均考虑为线弹性,其中钢材的弹性模量为 206 GPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3;混凝土弹性模量为 35 GPa,密度为 2 400 kg/m³,泊松比为 0.2。



(a)整体示意图

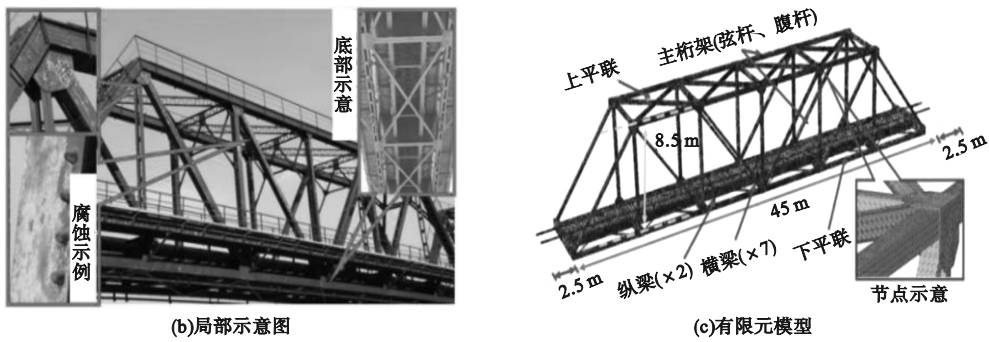


图1 桥梁有限元分析模型

Fig. 1 Finite element model of the truss bridge

在上述桥梁模型基础上,通过改变相关部件的形态,建立纵梁及上、下节点腐蚀后的桥梁模型。腐蚀对结构力学性能的影响主要表现为构件有效工作截面的变薄^[12-13]。假定大气腐蚀在腐蚀区域内的影响均匀、一致,采用削减构件的厚度来模拟结构腐蚀后的截

面状态。假定局部构件完全腐蚀失效不利状况为桁架桥的严重腐蚀模式,按构件分为纵梁严重腐蚀及上、下节点严重腐蚀三种腐蚀形态(见图2)。纵梁严重腐蚀通过削减两根纵梁腹板底部的厚度来模拟,节点严重腐蚀通过削减左右两幅节点区域的相关杆件来模拟。

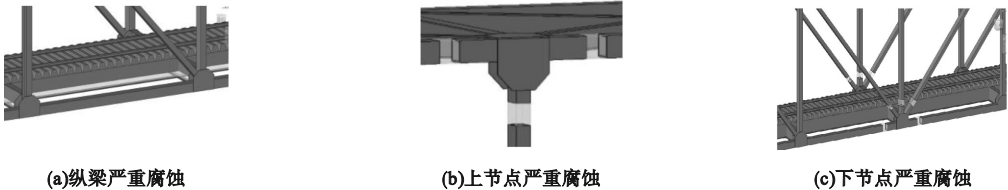


图2 单侧部件腐蚀形态示意图

Fig. 2 Corrosion simulation of members

1.2 车辆模型

采用 ABAQUS 软件建立 6 节不考虑货载的 4 轴轻车有限元模型,图 3 为轴重 14 t 的单个车辆有限元模型^[14]。将车辆视为质量-弹簧-阻尼体系,其中车体、转向架及轮对由耦合质量单元的刚体模拟,一、二系悬挂由弹簧-阻尼单元模拟。由于研究重点是车辆、桥梁的竖向形变,因此通过约束车体及转向架沿 x、y 方向的平动及绕 x、z 方向的转

动,约束轮对沿 x、y 方向的平动及绕 x、y 和 z 方向的转动,将车辆模型设置为能够考虑车体、转向架浮沉和点头运动及轮对浮沉运动的 10(2+2×2+4) 自由度运动体系。

1.3 桥面不顺程度

桥面不平顺的生成可视为均值为零的 Gauss 随机过程,可通过给定的谱密度函数逆变换生成^[15]。笔者根据德国低干扰不平顺轨道谱,采用三角级数法,确定了桥面不平顺程度表达式^[14]:

$$\omega(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\omega_k)} \Delta\omega \times \cos(\omega_k \cdot x + \varphi_k).$$
 (1)

式中: $\omega(t)$ 为桥面竖向不平顺程度序列; $S(\omega_k)$ 为不平顺轨道谱; φ_k 为 0 ~ 2 π 均匀分布的随机相位角; $\Delta\omega$ 为空间频率间隔。

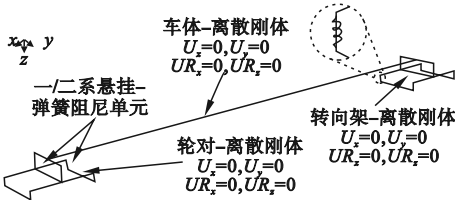


图3 车辆有限元分析模型

Fig. 3 Finite element model of the vehicle

根据钢轨长度生成了 50 m 轨道不平顺曲线(见图 4)。为消除相位角随机性的影响,共生成了 30 组随机相位角,然后取平均值计算。

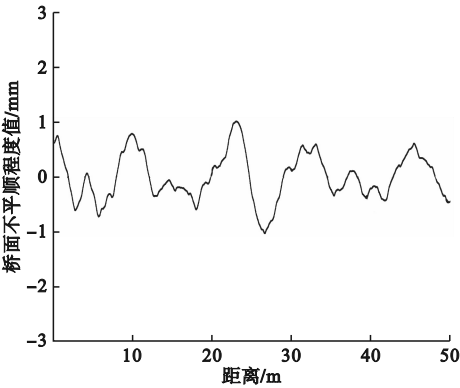


图 4 桥面不平顺

Fig. 4 Roughness of the deck

2 结果分析

考虑不同车速 (25 km/h, 50 km/h, 75 km/h)、腐蚀形态(腐蚀、未腐蚀)、腐蚀位置(左右两侧的上、中、下节点腐蚀)等因素影响,共设置 24 种分析工况。为便于研究,对主要构件进行编号(见图 5),其中1~5#为弦杆,6~11#为腹杆,12~18#为上平联杆件。

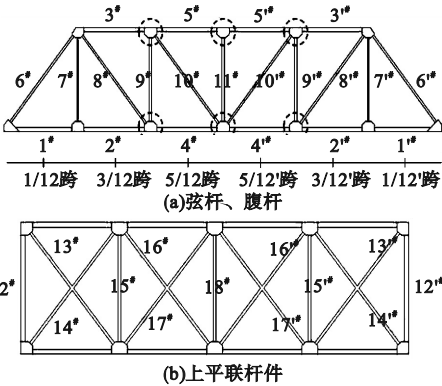


图 5 主要构件编号

Fig. 5 Number of main members

2.1 位移响应分析

2.1.1 位移时程响应

图 6 为 3 种车速下,纵梁及跨中上、下节点腐蚀后的桁架桥跨中位移响应。未腐蚀时,桥梁的跨中位移为随时间变化的简谐式

曲线。随车速增加,桥梁的整体位移趋势保持不变,但振动程度逐渐提升。这是由于车速增加,导致车辆对桥梁的作用频率逐渐接近桥梁的固有频率所致。考察纵梁及节点腐蚀后的跨中位移可知,同一车速下腐蚀桁架桥与未腐蚀桁架桥相比,平均位移及振动幅值变化明显。在不同车速下,腐蚀桁架桥间的整体位移趋势对比无明显变化、且均未出现振动,这与未腐蚀时不同。说明腐蚀导致

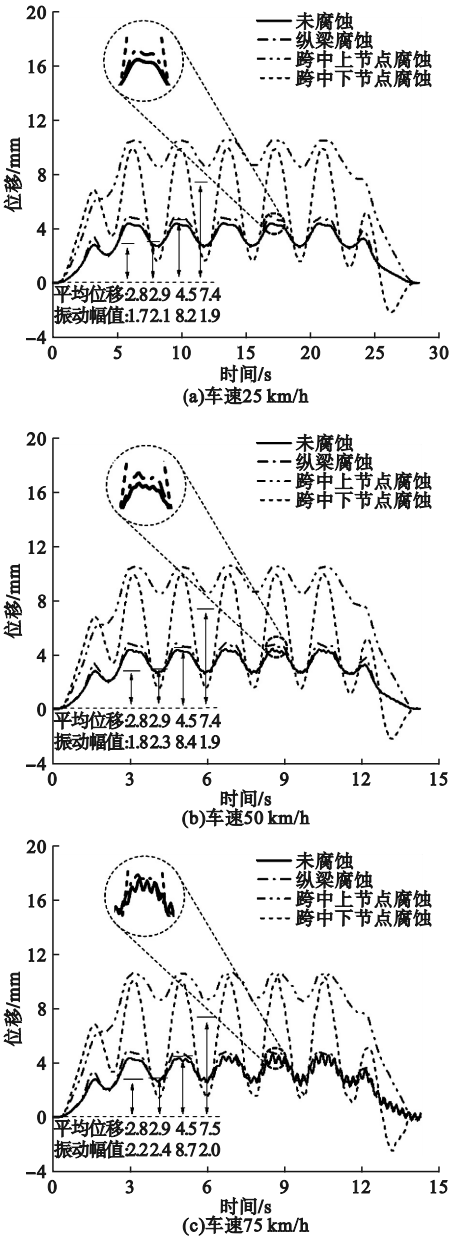


图 6 腐蚀桁架桥跨中位移时程响

Fig. 6 Mid-span displacement of the corroded bridge

的构件材料损伤改变了桁架桥的刚度,进而影响了结构的固有频率。

当车速为 25 km/h 时,未腐蚀桁架桥的位移振动幅值为 1.7 mm,位移平均值为 2.8 mm。当纵梁严重腐蚀后,桥梁的位移振动幅值增长至 2.1 mm,位移平均值增长至 2.9 mm;当跨中上节点严重腐蚀后,桥梁的位移振动幅值增长至 1.9 mm,位移平均值增长至 7.4 mm;当跨中下节点严重腐蚀,位移振动幅值增长至 8.2 mm,位移平均值增长至 4.5 mm。车速为 50 km/h 和 75 km/h 时,位移的变化规律相同。由此说明,当桁架桥纵梁严重腐蚀后,列车通过时桥梁的位移振动幅值、位移平均值会少量上升;当上节点严重腐后,则表现为桥梁的平均位移增长,但振动幅值基本不变;而下节点严重腐蚀后,列车通过时不仅桁架桥的整体变形会增长,且桥梁出现共振的概率也会提升。

2.1.2 位移峰值

位移峰值是桥梁检测、维护过程中的重要考察指标。图 7 为纵梁及跨中上、下节点腐蚀后的桁架桥跨中位移峰值。3 种车速下,未腐蚀桁架桥的位移峰值分别为 4.3 mm、4.4 mm 及 4.7 mm。由图 7 可知,纵梁严重腐蚀后,桥梁的位移峰值随着车速的变化,分别增长至 4.8 mm、4.9 mm 及 5.2 mm,增长了 10%。可见,纵梁区域的严重腐蚀,会导致列车通过时桁架桥的位移峰

值出现上升。对于节点区域的腐蚀:当跨中上节点严重腐蚀,桥梁的位移峰值随着车速的变化,分别增长至 10.5 mm、10.6 mm 及 10.7 mm,约为未腐蚀时的 2.3 倍。腐蚀后的中下节点位移峰值,发现有类似规律。由此说明:当桁架桥节点区域严重腐蚀、列车通过时,桥梁的位移峰值会呈倍数增长。

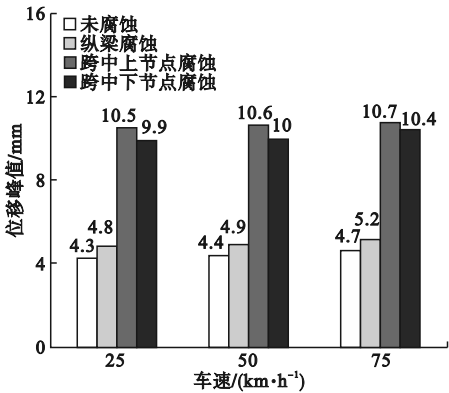


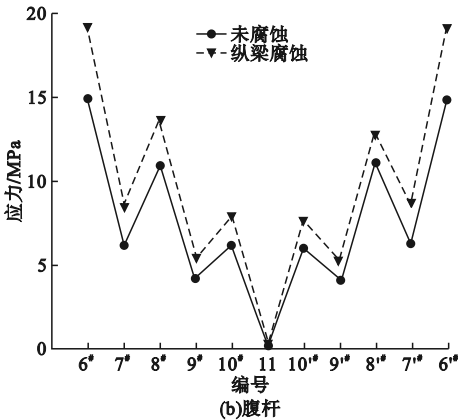
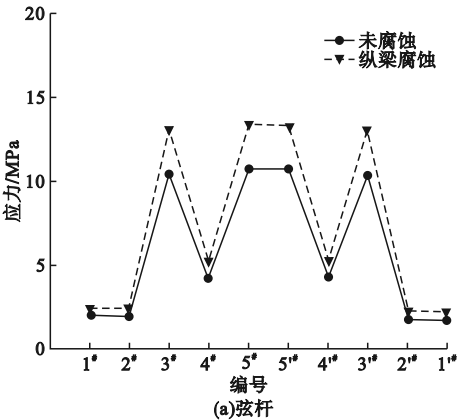
图7 腐蚀桁架桥跨中位移峰值

Fig.7 Mid-span displacement peak of the corroded bridge

2.2 构件应力分析

2.2.1 纵梁腐蚀

不同车速下,腐蚀桁架桥构件的应力分布规律相同,以 75 km/h 为例进行分析。图 8 为纵梁严重腐蚀后桁架桥主要构件的应力包络图。未腐蚀时,桥梁上平联杆件及纵梁受力均匀,其应力保持在 6~12 MPa。而弦杆、腹杆则应力波动明显,其中上弦杆(3#,5#)的应力大于



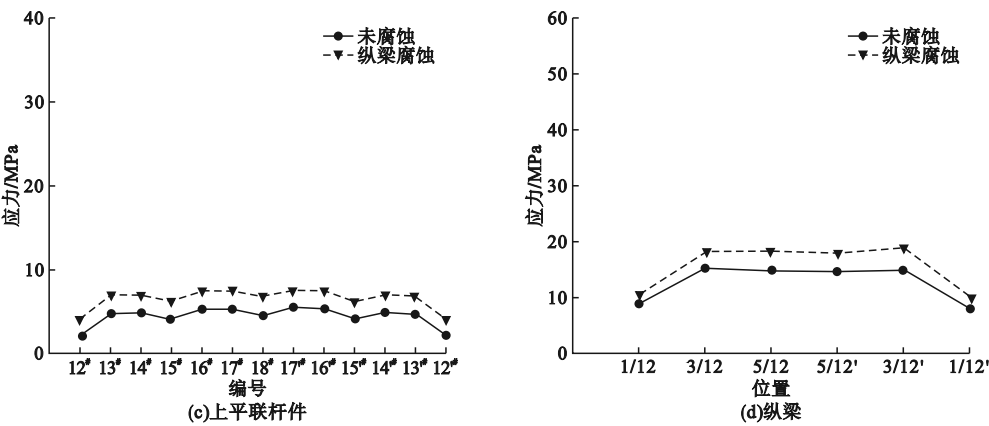


图8 纵梁严重腐蚀后桁架桥构件应力包络图

Fig. 8 Stress maximum of members of the truss bridge when the girder is corroded

下弦杆(1#,2#,4#),斜腹杆(6#,8#,10#)的应力大于直腹杆(7#,9#)。与未腐蚀时相比,腐蚀后各弦杆、腹杆、上平联杆件的应力分别增长了约21%,25%和23%,同时各跨纵梁的应力也有所增长。可见,当桁架桥纵梁严重腐蚀,列车通过时桥梁弦杆、腹杆、上

平联杆件及纵梁的应力会增长。
2.2.2 上节点腐蚀
图9为上节点严重腐蚀后,桁架桥主要构件的应力包络图。当跨中上节点严重腐蚀,桥梁靠近跨中的上平联杆件(15#~15'#)应力增长了5倍,同时跨中(5/12跨、5/12'

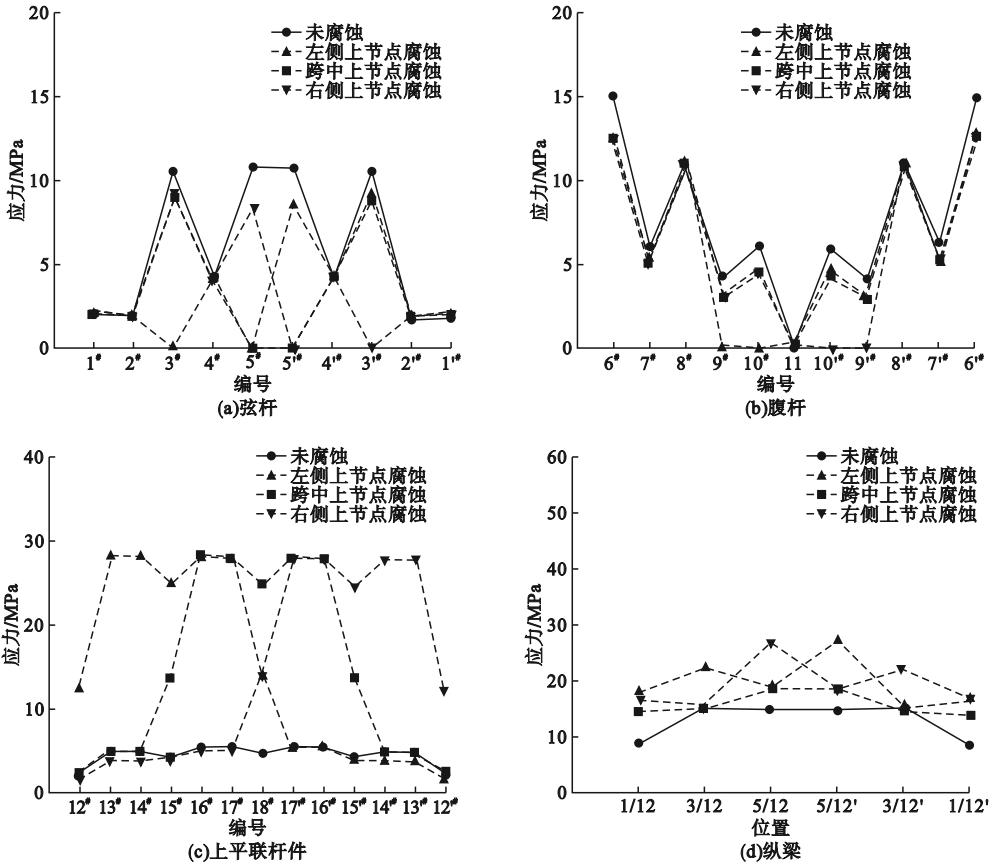


图9 上节点严重腐蚀后桁架桥构件应力包络图

Fig. 9 Stress maximum of members of the truss bridge when the upper joint is corroded

跨)与边跨(1/12跨、1/12'跨)的纵梁应力也增长了25%及66%。而剩余构件,除部分因腐蚀导致承载力下降外,其余应力仅略有变化。从图9中发现,不同腐蚀位置所得的构件应力分布规律不同,当左侧上节点严重腐蚀,桥梁12#~18#上平联杆件的应力增长了5倍,5/12'跨的纵梁应力也增长了84%。观察右侧节点腐蚀后的构件应力,也得出类似规律。基于上述研究可知,当桁架桥跨中上节点严重腐蚀,列车通过时桥梁跨中的上平联杆件与跨中、边跨的纵梁应力会增长;而当左侧(右侧)上节点严重腐蚀,则表现为靠近左侧(右侧)上平联杆件及相反侧的纵梁应力会增长。

2.2.3 节点腐蚀

下节点严重腐蚀后,桁架桥主要构件的

应力包络如图10所示。当跨中下节点严重腐蚀,桥梁1#、2#、2'#、1'#下弦杆的应力增长了1.7倍;同时各跨纵梁的应力也有所增长,以跨中(5/12跨、5/12'跨)纵梁应力涨幅最为明显,接近100%。而剩余弦杆、腹杆及联结系杆件的应力均不同程度下降。可见,当桁架桥跨中下节点严重腐蚀,列车通过时桥梁剩余的下弦杆与靠近跨中的纵梁将承担更大的荷载。当左侧下节点严重腐蚀,桥梁右侧下弦杆(1'#、2'#)的应力增长了1.9倍,且6#、7#腹杆及5/12跨的纵梁应力也明显上升,而剩余杆件的应力均下降。由此说明,当桁架桥某侧下节点严重腐蚀,桥梁远侧的下弦杆与靠近腐蚀区域的腹杆与纵梁的应力会增长。

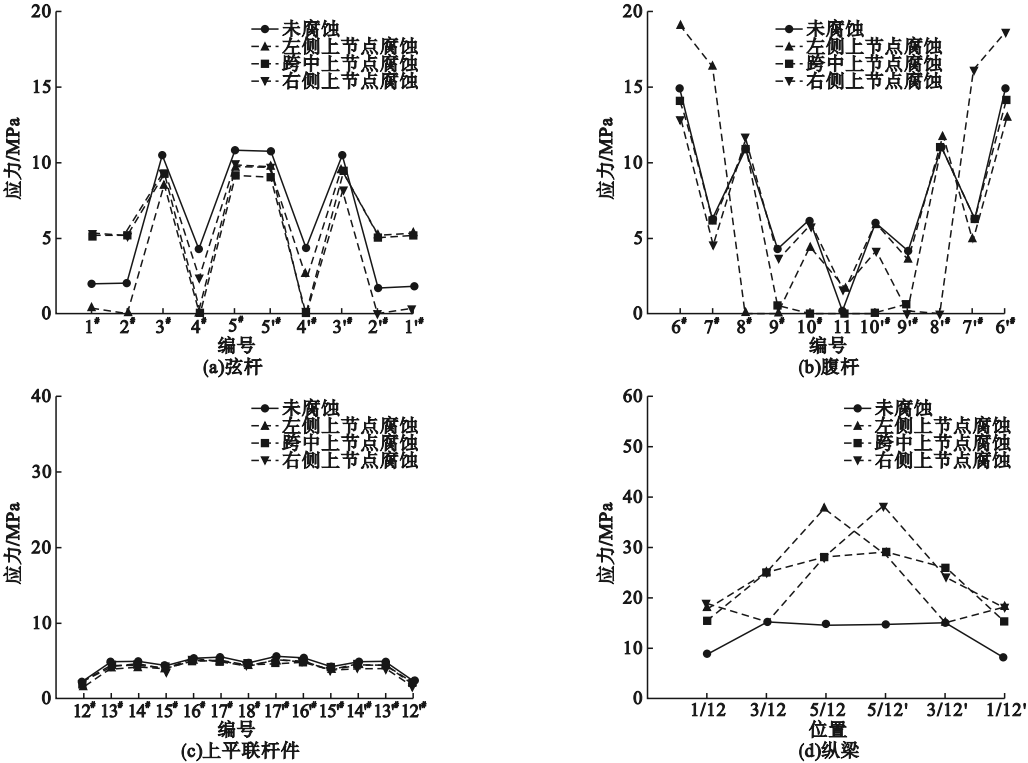


图10 下节点严重腐蚀后桁架桥构件应力包络图

Fig. 10 Stress maximum of members of the truss bridge when the lower joint is corroded

3 结 论

(1)当桁架桥纵梁严重腐蚀,列车通过时桥梁的位移振动幅值、位移平均值及位移峰值会少量增长。而当上、下节点严重腐蚀,

桥梁的位移平均值及位移峰值会明显上升,且下节点严重腐蚀还易引起桥梁共振。

(2)纵梁严重腐蚀后,桁架桥各构件的应力会增长;跨中上节点严重腐蚀后,桥梁靠近跨中的上平联杆件与跨中、边跨的纵梁应

力会增长;而当左侧(右侧)上节点严重腐蚀,桥梁靠近左侧(右侧)的上平联杆件及相反侧的纵梁应力会增长。

(3)当跨中下节点严重腐蚀,桥梁其他下弦杆与靠近跨中的纵梁将承担更大的荷载;但若一侧下节点严重腐蚀,则另一侧的下弦杆与靠近腐蚀区域的腹杆与纵梁的应力会增长。

(4)笔者研究对象为无货载空车,而在此荷载水平下腐蚀桁架桥的位移、应力便呈倍数增长;若考虑车辆重载及结构恒载,则桥梁个别构件将可能进入塑性,从而导致桥梁发生倒塌的危险。因此,为保证桥梁的安全,建议钢桁架桥在出现腐蚀后及时加装防塌装置。

参考文献

- [1] KIMI T, LEE M J, AHN J H, et al. Experimental evaluation of shear buckling behaviors and strength of locally corroded web [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 83(4): 75–89.
- [2] AHN J H, KIMI T, KAINUMA S, et al. Residual shear strength of steel plate girder due to web local corrosion [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89(10): 198–212.
- [3] KAINUMA S. Issues and countermeasures for recovering anti-corrosion performance of steel structures in atmospheric environment [M]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineering, 2019.
- [4] XU J, CHEN W Z. Behavior of wires in parallel wire stay cable under general corrosion effect [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 85: 40–47.
- [5] 全国钢标准化技术委员会. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第1部分: 分类、测定和评估: GB/T 19292.1—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
(The Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. Corrosion of metals and alloys – atmospheric of corrosion – part 1: Classification, Determination and Evaluation; GB/T 19292.1—2018 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018.)
- [6] 全国钢标准化技术委员会. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第2部分: 腐蚀等级的指导值: GB/T 19292.2—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
(The Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. Corrosion of metals and alloys—atmospheric of corrosion—part 2: Guideline values for corrosion grades; GB/T 19292.2—2018 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018)
- [7] 王占飞, 任浩, 张强, 等. 局部腐蚀下钢圈限位装置力学性能及使用年限预测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 823–831.
(WANG Zhanfei, REN Hao, ZHANG Qiang, et al. Mechanical behaviour and service life of a novel steel ring restrainer with local corrosion [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(5): 823–831.)
- [8] 万吕, 傅中秋, 王雅曼, 等. 支座腐蚀对钢板梁桥屈曲和承载力的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 55–60.
(WAN Lü, FU Zhongqiu, WANG Yaman, et al. Influence of support corrosion on buckling and bearing capacity of steel plate girder bridge [J]. Journal of China three gorges university (natural science), 2020, 42(5): 55–60.)
- [9] GOTO Y, MIZUNO Y, WANG Q Y, et al. Application of cable-type collapse prevention device to overall failure of upper-deck type truss bridges [J]. JSCE, structural engineering & earthquake engineering, 2021, 77(1): 73–92.
- [10] 姜平, 曾庆元. 2节点6自由度直梁单元[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004(4): 29–32.
(LOU Ping, ZENG Qingyuan. A straight beam element of two node with six degrees of freedom [J]. Journal of Hu'nan university of science and technology, 2004(4): 29–32.)
- [11] 姜平, 曾庆元. 车辆—轨道—桥梁系统竖向运动方程的建立[J]. 铁道学报, 2004(5): 71–80.
(LOU Ping, ZENG Qingyuan. Formulation of equations of vertical motion for vehicle-track-bridge system [J]. Journal of the China railway society, 2004(5): 71–80.)
- [12] 任浩. 基于车桥耦合大气腐蚀下铁路钢桁架桥力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
(REN Hao. Study on mechanical performance of the railway steel truss bridge under the atmospheric corrosive environment based on the vehicle-bridge coupling [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.)
- [13] WANG Z F, REN H, ZHANG Q, et al. Mechanical performance of steel ring restrainers with corrosion damage [J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 26(3): 1295–1315.
- [14] 张楠, 郭薇薇, 夏禾. 高速铁路车桥耦合动力学[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2019.
(ZHANG Nan, GUO Weiwei, XIA He. Dynamic interaction of train-bridge systems in high-speed railway [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2019.)
- [15] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 车桥耦合振动的非平稳桥面激励的模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 808–818.
(CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Simulation of nonstationary bridge deck excitation of vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 808–818.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)