

考虑吊杆锈蚀的下承式系杆拱桥地震响应

柴国贞

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司,广东 广州 510507)

摘要:为研究吊杆锈蚀对桥梁安全性的影响,文章基于 Midas Civil 的模拟试验分析方法,深入研究了不同锈蚀程度下吊杆损坏对下承式系杆拱桥的抗震性能产生的影响;通过运用钢筋锈蚀剥壳效应计算吊杆在锈蚀后的有效截面,建立基于有效吊杆截面尺寸的模型进行模拟计算。研究结果表明:1)吊杆锈蚀率的增加会导致拱桥的自振频率增加,而在地震作用下,拱桥的纵向位移减小,竖向位移增加;2)吊杆的锈蚀对拱桥的力学性能有一定影响,尤其对 Z 向剪力和 Y 向弯矩的影响较大。本文研究成果可为实际工程抗震设计提供一定的理论依据。

关键词:拱桥吊杆;下承式;锈蚀;抗震分析;有限元模拟

中图分类号:U443.38

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0011-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.030

Analysis on seismic response of a through tied arch bridge considering derrick corrosion

CHAI Guozhen

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the influence of derrick corrosion on bridge safety, the influence of derrick damage on the seismic performance of through derrick arch bridge under different corrosion degrees is researched based on the simulation test analysis method of Midas Civil. The effective cross-section of the derrick after corrosion is calculated by using the corrosion and shelling effect of the steel bar, and the model based on the cross-sectional size of the effective derrick is established for simulation calculation. The results show that: 1) The increase of the corrosion rate of the derrick will lead to the increase of the natural vibration frequency of the arch bridge, while the longitudinal displacement of the arch bridge decreases and the vertical displacement increases under the action of earthquakes; 2) The corrosion of the derrick has a certain impact on the mechanical properties of the arch bridge, especially the Z-direction shear force and Y-direction bending moment. The results can provide a theoretical basis for the actual engineering seismic design.

Key words: arch bridge derrick; through type; corrosion; seismic analysis; finite element simulation

随着城市化进程的快速发展,公路桥梁在交通运输中扮演着越来越重要的角色。然而,在长期的运行过程中,公路桥梁往往会受到自然环境和外部力的巨大影响,随着时间的推移,桥梁腐蚀、疲劳等劣化问题逐渐显现^[1]。吊杆锈蚀引起的桥梁坍塌事故屡见不鲜,2018年意大利莫兰迪大桥上的钢索吊杆出现严重锈蚀,导致桥梁失去承重能力突然坍塌,造成43人死亡^[2];2019年中

国台湾南方澳大桥由于吊杆锈蚀断裂发生垮塌,导致6人死亡,多人受伤^[3];2001年四川金沙江大桥两边跨8根吊杆因锈蚀断裂,引起部分桥面垮塌,导致两人死亡,两人失踪以及多人受伤^[4]。

频发事故引起了全球对公路桥梁安全的关注和反思,许多国家都加强了对桥梁的检测和维护工作。下承式系杆拱桥属于大跨径桥梁,其结构比较复杂,承受的受力作用也相对较大,因此其结构安全性

收稿日期:2023-08-10

作者简介:柴国贞(1988—),男,工程师,从事道路与桥梁工程设计。

能的研究至关重要。针对拱桥锈蚀问题,一些研究关注了腐蚀对钢丝性能的影响或吊杆腐蚀规律,如:MIAO 等^[5]针对钢丝腐蚀点分布特征与演变过程进行了研究,建立了不同形状腐蚀坑的分布模型,并探讨了局部参数与腐蚀程度的关系;ZHENG 等^[6]通过拉伸和疲劳试验对腐蚀钢丝的力学性能进行研究,发现腐蚀钢丝的极限应变随腐蚀程度的增加而减小,在相同应力范围内,腐蚀坑点蚀尺寸越大,寿命越短;吴敏慧等^[7]通过对下锚箱和钢丝锈蚀情况进行检查和分析,发现渗水导致了吊杆出现严重锈蚀,从而增加了吊杆危险性。另一些研究则关注了吊杆锈蚀对拱桥力学性能或使用寿命的影响,如:DENG 等^[8]选取钢管混凝土拱桥吊杆中的钢丝进行醋酸加速盐雾试验,得到不同腐蚀程度样品,并对这些样品进行疲劳试验,并建立了基于 Weibull 分布的应力-寿命-质量损失率的概率模型;LIU 等^[9]基于循环交通荷载及腐蚀作用而产生的疲劳损伤对吊杆安全性的影响,并结合钢丝劣化时变模型与基于裂纹深度和破坏面积的概率临界极限状态,提出了一种短吊杆的时变可靠度指标;马伟龙^[10]通过研究不同形式锈蚀对吊杆钢丝应力集中系数和疲劳寿命影响,发现径向锈蚀大大增加了应力集中,且锈蚀会大大降低吊杆抗疲劳寿命。而对于下承式系杆拱桥结构抗震性能研究,主要集中在静力和动力特性的分析上,如:何钰龙等^[11]采用 Ansys 对人行钢桁架桥进行了模态和反应谱分析,发现人行钢桁架桥较铁路钢桁架桥更易振动,且会较早出现扭转;刘钊等^[12]通过对比系杆拱桥不同形式的拱肋及吊杆,探讨结构形式对拱桥动力性能及抗震性能的影响;张乃明^[13]运用 Ansys 对某钢管混凝土系杆拱桥动力性能进行了分析,发现其横向刚度相对较弱,竖向地震力作用响应较大,为相关抗震设计提供了理论依据。但是鲜有关于吊杆锈蚀对下承式系杆拱桥结构的抗震性能产生的影响的研究。

本文基于 Midas civil 模拟试验分析方法,探讨不同腐蚀程度下的吊杆损坏对下承式系杆拱桥的抗震性能所产生的影响,以期为实际工程提供可靠的理论和试验依据。

1 工程背景

某下承式系杆拱桥,其跨径为 80 m、宽度为

16 m、拱桥矢跨比为 1/4,为二次抛物线形,采用 15 对吊杆将拱肋和纵梁连接。其中,最外侧边吊杆直径为 75 mm,其他吊杆直径为 65 mm。桥面荷载由两根纵梁承担,主梁使用箱型截面,尺寸为 1.8 m × 1.3 m,腹板厚度为 0.25 m,顶底板厚度为 0.35 m。拱圈截面采用工字形,上下板宽度为 1.3 m,厚度为 0.275 m,腹板厚度为 0.7 m。横梁采用带肋箱型截面,端横梁尺寸为 1.6 m × 1.6 m,中横梁尺寸为 1.6 m × 1.2 m,板厚均为 0.05 m。拱肋及纵梁采用 C50 混凝土,风撑及横梁采用 Q345 钢材,钢绞线采用 Strand1860 钢绞线,材料参数如表 1 所示^[14]。

表 1 材料参数

材料	弹性模量/ ($10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
C50 混凝土	3.45	26.0	0.20
Q345 钢材	20.60	78.5	0.31
Strand1860 钢绞线	19.50	78.5	0.30

2 锈蚀对吊杆的影响

吊杆作为支撑系杆拱桥的重要构件之一,在桥梁的正常使用过程中,长期受到外界环境腐蚀,导致其质量和强度下降。当受到地震作用时,由于吊杆的腐蚀破坏,桥梁产生了相应的刚度损失,进而影响到整座桥梁的动力特性,使得桥梁的抗震性能发生了变化,具体表现如下。

(1) 桥梁刚度的减小。吊杆受腐蚀后刚度急剧下降,导致整座桥梁的刚度减小,从而使得桥梁的自振周期变小,对地震反应的能力也相应下降。

(2) 桥梁阻尼的增大。由于吊杆质量较轻,当桥梁受到地震作用时,吊杆的振动会产生相对较大的阻尼作用,而吊杆的腐蚀破坏会使其变形能力降低,振动阻尼减小,从而对桥梁整体的减震能力产生影响。

(3) 桥梁位移的增加。吊杆的腐蚀破坏会使桥梁结构的刚度变小,从而增加桥梁在地震作用下的整体位移,对车辆和行人的通行造成安全隐患。

因此,准确评估吊杆锈蚀后的力学性能是分析其对桥梁整体抗震性能影响的关键要素。杨良等^[15]提出钢筋锈蚀剥壳效应,即锈蚀不会对钢筋

内部未锈蚀部分的屈服强度和极限强度造成影响,只会对钢筋表面造成破坏。本文将这一理论应用于吊杆的研究中。随着锈蚀程度的加剧,吊杆的有效作用面积会逐渐减小,但作用力保持不变,从而导致应力增大,承载能力下降。当应力超过承载能力时,吊杆就会发生破坏。对于锈蚀的吊杆,其有效作用截面积,即为从吊杆的外层锈蚀部分剥离后的其余面积,公式如下^[15]。

$$A_s(t) = A_0(1 - \eta_{\max}) \quad (1)$$

$$\eta_{\max} = (s_0 - s_{\min})/s_0 \quad (2)$$

式中: A_0 为锈蚀前截面, mm^2 ; $A_s(t)$ 为锈蚀后有效截面, mm^2 ; $\eta_{\max}$ 为最薄弱截面锈蚀率; s_0 为锈蚀前吊杆截面积, mm^2 ; $s_{\min}$ 为锈蚀后钢绞线最小截面积, mm^2 ; t 为锈蚀年份, 年。

3 有限元模型建立

为分析锈蚀吊杆对系杆拱桥抗震性能的影响,采用有限元软件 Midas Civil 建立模型,并采用吊杆不同锈蚀率下的模型进行地震动力分析。其中:纵梁、拱肋、横梁均采用梁单元进行模拟,风撑吊杆等采用桁架单元进行模拟,二期荷载采用虚拟纵梁进行模拟,参数均通过 Midas 直接选取。均布恒载大小为 11.5 N, 支承采用一般支承,全桥 1 008 个节点, 696 个单元, 模型如图 1 所示。

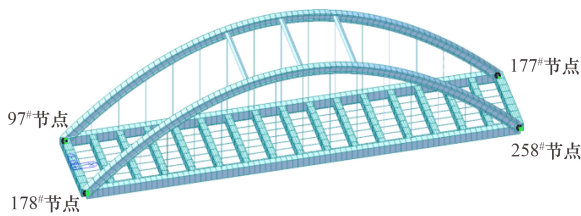


图 1 系杆拱桥有限元模型

为分析吊杆锈蚀率对拱桥地震响应的影响,分别对锈蚀率为 10%、20%、30%、40%、50% 的全桥模型进行动力特性和地震响应分析,其中,有限元建模用等效截面表示。吊杆锈蚀后等效截面尺寸如表 2 所示。

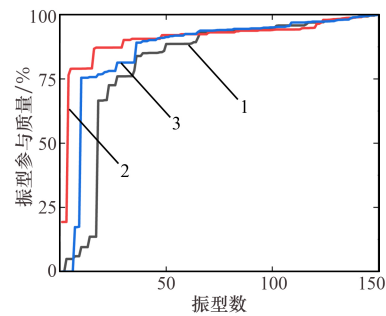
4 动力特性分析

为研究吊杆锈蚀率对全桥动力特性的影响,采用多重 Ritz 向量法进行结构振型分析。根据《城市桥梁抗震设计规范(2019 版)》(CJJ 11—2011)^[16]

表 2 吊杆锈蚀后等效截面

锈蚀率/%	最外侧边吊杆		内部吊杆	
	原直径/mm	等效直径/mm	原直径/mm	等效直径/mm
10	75	71.2	65	61.7
20	75	67.1	65	58.1
30	75	62.7	65	54.4
40	75	58.1	65	50.3
50	75	53.0	65	46.0

规定,振型阶数在计算方向给出参与质量应达到规定的 90%, 大桥模态分析采用 150 阶。在各桥向桥梁各阶振型的参与质量百分比如图 2 所示。由图 2 可知:顺桥向、横桥向、竖向的 150 阶振型参与质量分别为 99.98%、99.99%、100%。



1—顺桥向; 2—横桥向; 3—竖向。

图 2 各阶振型参与质量

大桥分为 1~5 阶振型(图 3),其中 1 阶振型表现为拱肋横桥向的侧倾;2 阶振型表现为拱肋的扭转;3 阶振型表现为顺桥向的弯曲;4 阶振型表现为横桥向梁的弯曲;5 阶振型表现为拱肋横桥向的弯曲。

表 3 为吊杆各锈蚀率下全桥前五阶自振频率。由表 3 可知:随着锈蚀率的增加,各阶自振频率均有所增加。这是因为锈蚀会导致杆件的质量减小,从而影响结构的固有频率。在一定范围内,不同阶振型的频率变化趋势相似。当锈蚀率从 0% 增加到 50% 时,1~4 阶自振频率的增加量相近,而 5 阶振型的变化较大。在不同锈蚀率下,不同阶振型的频率存在较大差异。当锈蚀率为 50% 时,5 阶振型的频率明显低于其他锈蚀率下的频率。这是因为随着锈蚀的增加,结构的刚度下降,导致高阶振型的频率减小。值得注意的是,尽管锈蚀对桥梁的自振频率造成了一定的影响,但是前五阶的振型并未发生变化。

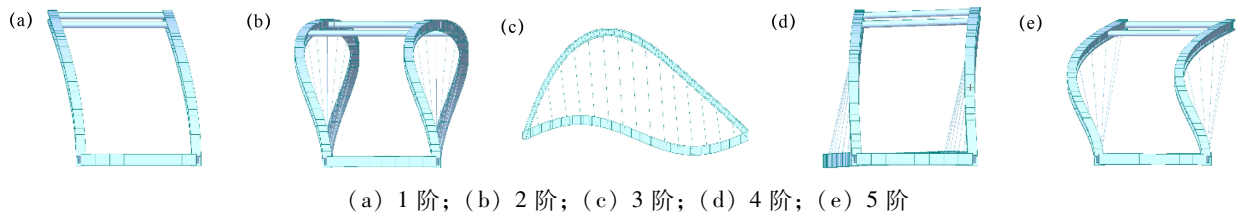


图 3 锈蚀率为 0 的 1~5 阶振型

表 3 各锈蚀率下前五阶自振频率

锈蚀率/%	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶		5 阶	
	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型
0	0.381 1	横倾	1.134 4	横扭	1.190 1	纵弯	1.566 5	横弯	2.294 7	横扭
10	0.381 3	横倾	1.134 9	横扭	1.190 4	纵弯	1.566 8	横弯	2.295 7	横扭
20	0.381 6	横倾	1.135 4	横扭	1.190 7	纵弯	1.567 1	横弯	2.296 7	横扭
30	0.381 8	横倾	1.136 0	横扭	1.191 0	纵弯	1.567 4	横弯	2.297 6	横扭
40	0.382 0	横倾	1.136 5	横扭	1.191 3	纵弯	1.567 7	横弯	2.298 6	横扭
50	0.382 2	横倾	1.137 0	横扭	1.191 6	纵弯	1.568 0	横弯	2.227 2	横扭

5 地震响应分析

5.1 地震波

以地震波输入为基础,考虑纵向、横向和竖向地震作用,采用时程分析方法进行地震响应分析。大桥的设计地震烈度等级为 8 度,场地特征周期为 0.4 s,水平峰值加速度为 0.3g,场地类别为 II 类。为了模拟罕遇地震作用,选择 El Centro Site, 270 Deg 地震波进行输入。该地震波的时程分析模拟 E2 级别的地震作用,地震组合为 1.0 纵桥向 +1.0 横桥向 +0.5 竖桥向的地震波组合。经过计算,得出大桥在此种地震作用下的响应情况,如图 4 所示。

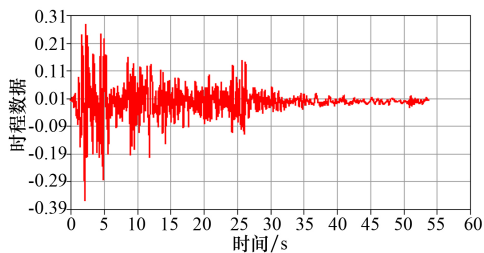


图 4 El Centro Site, 270 Deg 地震波

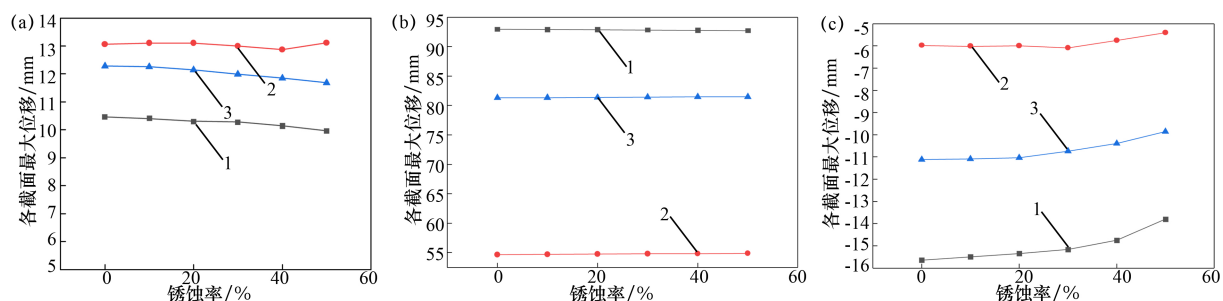
5.2 地震荷载响应分析

为了进一步探究吊杆锈蚀程度对下承式系杆拱桥动力特性和地震响应的影响,采用不同关键截面的最大挠度、弯矩、扭矩、轴力、剪力等力学指标来研究吊杆锈蚀后的力学特性改变。图 5 为拱肋关键截面的最大位移随吊杆锈蚀率的变化。由图 5 可

知:随着吊杆锈蚀率的增加,大桥的纵向位移呈现逐渐减小的趋势,横向最大位移相对未出现较大变化,而竖向位移则呈现逐渐增加的趋势,并且增加趋势相对于纵向位移更为明显。这种变化可能的原因:在地震作用下,锈蚀的吊杆会导致其结构刚度下降,从而造成拱肋的位移变形,降低了下承式系杆拱桥的地震抗力和稳定性。

图 6 为不同锈蚀率下拱肋关键截面的弯矩与剪力图。由图 6 可知:随着吊杆锈蚀率的增加,拱桥的弯矩与剪力的变化呈现出不同的趋势。具体地, z 向弯矩只出现了微小变化,而 y 向弯矩随着锈蚀率的增加,各关键截面出现了不同趋势的变化。拱顶弯矩随着锈蚀率的增加而增大,这可能是由于吊杆锈蚀导致拱桥整体刚度降低,从而使拱顶承受更多的荷载。1/4 处拱肋截面的弯矩随着锈蚀率的增加而出现减小趋势,而拱脚弯矩表现为先降低后升高的趋势。对于剪力而言, y 向的剪力基本未发生改变,这说明吊杆的锈蚀对结构的剪力承载能力影响较小。而 z 向剪力随着锈蚀率的改变而发生改变。拱顶、拱脚剪力随着锈蚀率的增加而增大,1/4 处拱肋剪力随锈蚀率增加而减小。综上,吊杆锈蚀对下承式系杆拱桥的轴力和扭矩产生一定的影响,其中扭矩大小基本不因锈蚀率的改变而改变。

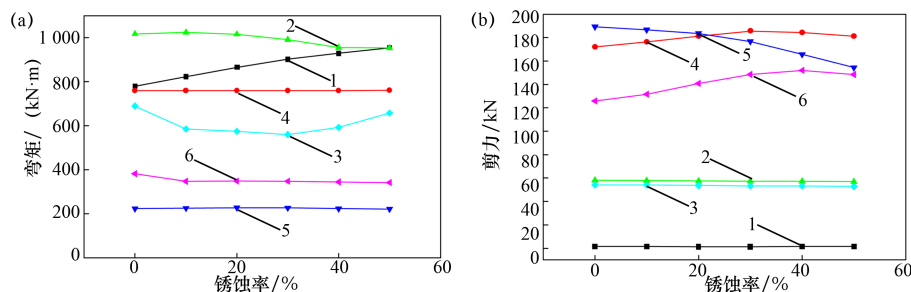
图 7 为不同锈蚀率下拱肋截面轴力及扭矩图。由图 7 可知:不同截面的轴力随着锈蚀率的增大



(a) 纵向; (b) 横向; (c) 竖向

1—拱顶截面; 2—1/4 拱肋截面; 3—3/8 拱肋截面。

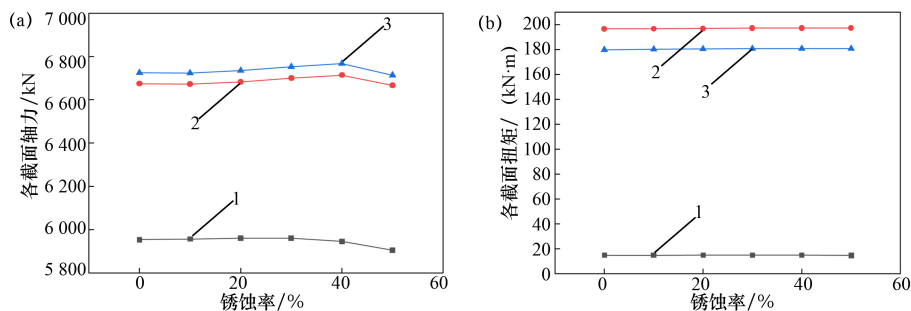
图5 不同锈蚀率下拱肋重要截面各向最大位移



(a) 弯矩; (b) 剪力

Y 方向: 1—拱顶; 2—1/4 拱; 3—拱脚; Z 方向: 4—拱顶; 5—1/4 拱; 6—拱脚。

图6 不同锈蚀率下拱肋截面弯矩与剪力



(a) 轴力; (b) 扭矩

1—拱顶截面; 2—1/4 拱截面; 3—3/8 拱截面。

图7 不同锈蚀率下拱肋截面轴力及扭矩

而出现小幅改变。1/4 和 3/8 拱肋位置轴力呈现先增后减的趋势,这可能与吊杆的锈蚀程度和位置有关。当吊杆表面有一定程度的锈蚀时,其横向和纵向刚度均会发生一定的变化,进而对结构的轴力产生一定的影响。当拱顶轴力在锈蚀率达到 30% 后出现了较为明显的减小。这是由于当吊杆表面存在一定程度的锈蚀时,拱桥会受到更多的荷载,吊杆所承受的轴力也会随之发生改变。

6 结论

(1) 在吊杆锈蚀率逐渐增加的情况下,下承

式系杆拱桥的动力特性和地震响应均受到一定的影响。随着锈蚀率的增加,各阶自振频率均会增加。这是因为锈蚀会导致杆件的质量减小,从而影响结构的固有频率。

(2) 吊杆锈蚀还会影响下承式系杆拱桥在地震作用下的力学特性,如拱肋关键截面的最大位移、弯矩、剪力、轴力和扭矩等。随着吊杆锈蚀率的增加,拱桥纵向位移表现出逐渐减小的趋势,竖向位移则逐渐增加,并且增加趋势相对于纵向位移更为明显。在剪力方面,吊杆锈蚀对结构的剪力承载能力影响较小,但对拱顶和拱脚的剪力

影响较大,可能是由于随着锈蚀率的增加,结构的刚度降低导致拱顶和拱脚承受更多的荷载。而在轴力和扭矩方面,吊杆锈蚀影响相对较小。

(3) 在设计下承式系杆拱桥时,需要充分考虑吊杆锈蚀对结构的影响。定期检查、维护和加固吊杆是维护结构安全和提高抗震性能的重要手段。

参考文献:

- [1] 潘晓宇. 中下承拱桥的吊杆锈蚀损伤研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [2] 中国新闻网. 意热那亚公路桥为何坍塌? 调查:桥梁养护缺失是主因[EB/OL]. (2019-08-07) [2019-08-07]. <https://www.chinanews.com.cn/gj/2019/08-07/8919389.shtml>.
- [3] 环球网. 台湾港务公司被曝 21 年未主动检修台垮塌大桥,负责人称“我刚来一年”被批卸责[EB/OL]. (2019-10-04) [2019-10-04]. <https://3w.huanqiu.com/a/c36dc8/9CaKrnKn7Md>.
- [4] 新浪网. 突降的灾难—四川宜宾南门大桥桥面断裂目击[EB/OL]. (2001-11-08) [2001-11-08]. <https://news.sina.com.cn/c/2001-11-08/394907.html>.
- [5] MIAO C, YU J, MEI M. Distribution law of corrosion pits on steel suspension wires for a tied arch bridge[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2016, 63(3): 166-70.
- [6] ZHENG X, XIE X, LI X. Experimental study and residual performance evaluation of corroded high-tensile steel wires[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(11): 04017091.
- [7] 吴敏慧,秦伟航,王润建. 某下承式钢管混凝土系杆拱桥吊杆锈蚀专项检查及病害成因分析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2012, 8(4): 7-9.
- [8] DENG Y, DENG L. Corrosion fatigue test and performance evaluation of high-strength steel wires based on the suspender of a 11-year-old concrete-filled steel tube arch bridge[J]. *Coatings*, 2022, 12(10): 1475.
- [9] LIU Z, GUO T, HEBDON M H, et al. Corrosion fatigue analysis and reliability assessment of short suspenders in suspension and arch bridges[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2018, 32(5): 04018060.
- [10] 马伟龙. 不均匀锈蚀对拱桥吊杆力学性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [11] 何钰龙,李超,申杨凡,等. 人行钢桁架桥动力特性及反应谱分析[J]. *黑龙江工程学院学报*, 2015, 29(1): 12-5.
- [12] 刘钊,李鹏,丁文胜. 大跨度系杆拱桥的结构形式对动力特性及地震响应的影响探讨[J]. *现代交通技术*, 2005(4): 30-33; 75.
- [13] 张乃明. 铁路钢管混凝土系杆拱桥动力特性及地震响应分析[J]. *国防交通工程与技术*, 2014, 12(3): 53-56.
- [14] 温智泉,饶家冀,马智慧. 下承式系杆拱桥地震响应分析[J]. *西部交通科技*, 2023(5): 129-133.
- [15] 杨良,孙立军. 钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀与疲劳耦合损伤[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 800; 1784-1787.
- [16] 城市桥梁抗震设计规范: CJJ 166—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [8] 张留俊,黄晓明,冯炜,等. 人工神经网络在路堤沉降预测中的应用[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(5): 7-10.
- [9] 尹利华,陈晓瑛,张留俊. 考虑多影响因素的 BP 神经网络预测软土地基沉降研究[J]. *公路*, 2018(2): 35-39.
- [10] 蔡冬军,谢文. CFG 桩处理山区公路软基的主要影响因素分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 33-38.
- [11] 李浩然,陆金桂. 基于 PSO-BP 神经网络的红外锁相缺陷属性识别[J]. *现代制造工程*, 2019(12): 117-123.
- [12] 胡卫东,曹文贵. 基于粒子群 BP 网络混合算法的边坡稳定性评价[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(1): 66-71.
- [13] 彭立顺,蔡润,刘进波,等. 基于遗传优化神经网络的高速公路路基沉降量预测[J]. *地震工程学报*, 2019, 41(1): 124-130.
- [14] 黄建国,罗航,王厚军,等. 运用 GA-BP 神经网络研究时间序列的预测[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(5): 687-692.
- [15] DING F J, JIA X D, HONG T J, et al. Flow stress prediction model of 6061 aluminum alloy sheet based on GA-BP and PSO-BP neural networks[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(6): 1840-1853.