

风沙冲蚀钢混组合梁斜拉桥动力响应的 影响规律研究

黄亚男¹, 王芳军², 司 维¹

(1. 宁夏公路勘察设计院有限责任公司, 宁夏 银川 750000; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 由于风沙冲蚀, 斜拉桥钢梁涂层变薄甚至脱落会导致钢梁锈蚀。此外, 混凝土塔柱也会因风沙冲蚀面积减少而强度降低。为研究钢混组合梁斜拉桥在整个寿命周期内的变形以及抗震性能, 建立全桥计算分析模型, 输入12条地震波, 探究其抗震性能。结果表明: 考虑风沙冲蚀和地震共同作用对拉索的抗震性能影响较小; 地震作用下墩身易损部位为塔身底部, 考虑风沙冲蚀的时变作用后, 塔身底部的弯矩-曲率增大了10.39%, 地震强度的变化对弯矩-曲率的影响最大; 跨中挠度不仅随着风沙冲蚀的时间而增大, 也随着地面峰值加速度的增大而增大。研究成果为钢混组合梁斜拉桥在风沙地区的抗震设计提供支撑。

关键词: 钢混组合梁; 斜拉桥; 风沙冲蚀; 动力响应; 抗震性能

中图分类号: U44

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0083-04

Study on Influence of Sand Erosion on Dynamic Response of Steel-concrete Composite Girder Cable-stayed Bridge

HUANG Yanan¹, WANG Fangjun², SI Wei¹

(1. Ningxia Highway Survey Design Institute Co., Ltd., Yinchuan 750000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Due to the wind-sand erosion, the steel beam coating of cable-stayed bridge will become thin or even fall off, which will lead to the corrosion of steel beam. In addition, the strength of concrete pylon columns will also be reduced due to the reduction of sand erosion area. In order to study the deformation and seismic performance of steel-concrete composite cable-stayed bridge in the whole life cycle, a calculation and analysis model of the whole bridge is established, and 12 seismic waves are input to explore its seismic performance. The results show that the combined effects of wind-sand erosion and earthquake have little effect on the seismic performance of the cable. The vulnerable part of the pier under earthquake is the bottom of the pylon. Considering the time-varying effect of wind-sand erosion, the bending moment - curvature at the bottom of the pylon increases by 10.39%, and the change of earthquake intensity has the greatest influence on the bending moment - curvature. The mid-span deflection increases not only with the time of wind-sand erosion, but also with the increase of ground peak acceleration. The research results provide the support for the seismic design of steel-concrete composite cable-stayed bridges in wind-sand areas.

Keywords: steel-concrete composite beam; cable-stayed bridge; wind-sand erosion; dynamic response; seismic performance

0 引言

桥梁作为生命线工程的重要组成部分,一旦破

坏将导致不可估量的后果^[1]。因此,确保桥梁的安全具有重要意义。风沙冲蚀对钢混组合梁斜拉桥安全影响更是不可忽略。风沙冲蚀会导致钢梁涂层和混凝土有所损伤^[2-3],降低其抗震性能^[4]。

王彦平等^[5]采用风沙冲蚀混凝土试块,得出风沙冲蚀造成水泥石剥落;潘晓天等^[6]采用试验与模拟得到冲蚀后的混凝土强度会有所折减。虽然国内外学者对影响桥梁结构安全性方面,不管是在冲蚀作用下还是在地震作用下都做了大量研究,但是同时考虑风沙冲蚀和地震作用对结构地震响应的影响规

收稿日期: 2024-09-04

基金项目: 2022年自治区重点研发计划,黄河流域生态环境保护与高质量发展科技支撑专项黄河宁夏段公路斜拉桥绿色低碳建管养关键技术研究(2022BEG02056)

作者简介: 黄亚男(1988—),男,学士,工程师,从事桥梁工程研究及设计工作。

通信作者: 王芳军(1992—),男,硕士在读,从事桥梁工程及抗震研究工作。电子信箱: 1308075668@qq.com

律研究较少。为了掌握风沙冲蚀后桥梁在地震作用下的动力响应,建立全桥计算分析模型,考虑风沙冲蚀的影响,计算钢混组合梁斜拉桥在地震作用下的动力响应,探究风沙冲蚀对其动力响应的影响规律。

1 风沙冲蚀对材料的影响

风沙冲蚀会加速结构的锈蚀。如钢梁和索塔,在风沙冲蚀下,削减涂层厚度和混凝土保护层厚度,加快钢结构以及钢筋的锈蚀速度,因此以20 a为时间间隔,划分为6个工况,如0、20、40、60、80、100 a为时间节点,计算每个节点处钢梁的锈蚀量与混凝土的削减量。

1.1 拉索风沙冲蚀分析

根据对现有拉索桥拉索大量调查和查阅大量文献^[7-8],可知拉索护套在环境影响下平均使用寿命为12 a。

根据文献[9]的锈蚀计算公式:

$$C = C_1 t^n \quad (1)$$

式中: C 为总腐蚀厚度; C_1 为第一年的腐蚀厚度; t 为腐蚀持续时间,a; n 为与腐蚀材料与环境有关的常数, $n=1$,见表1。

表1 钢丝锈蚀速率参数表^[9]

材料	C 厚度/mm	$C_1/(mm \cdot a^{-1})$	n
锌层	0.006	0.001 1	1
铁丝	3.5	0.249	1

护套破损后,先腐蚀钢丝镀锌层。根据上述公式(1)便可计算拉索镀锌层寿命为 $0.006/0.001 1=5.45$ a,基于设计使用20 a换索,根据公式(1)式,可知剩余年限为 $20-(5.45+12)=2.55$ a,结合文献^[10]断丝率为1.45%,可以计算结构修建20 a钢丝锈蚀后剩余厚度 $C=3.5-C_1 2.55=2.87$ mm。

1.2 钢梁风沙冲蚀分析

依据文献[11-12]建立钢涂层受风沙冲蚀的寿命预测公式如下:

$$T = H/U(t) \quad (2)$$

式中: H 为涂层厚度, μm ; $U(t)$ 为涂层厚度损失速率, $\mu\text{m}/\text{a}$; T 为涂层寿命预测时长,a。

当涂层被冲刷之后,钢梁裸露与大气反应开始快速锈蚀。本文主要考虑结构钢的均匀腐蚀,钢梁腐蚀深度的指数模型,公式如下所示^[13-14]:

$$C = A \cdot t(\alpha) \cdot B \quad (3)$$

式中: C 为均匀腐蚀深度, μm ; $t(\alpha)$ 为服役时间; A 、 B 为回归系数,分别为115和1.271,计算结果见表2。

表2 环境对钢梁不同年限时锈蚀深度、减少面积及锈蚀率计算表

时间/a	侵蚀深度/mm	减少面积/ m^2	锈蚀率/%
20	2.92	0.11	5.10
40	5.85	0.22	10.18
60	8.77	0.33	15.26
80	11.70	0.44	20.35
100	14.62	0.55	25.44

1.3 索塔风沙冲蚀分析

Finnie^[15]和Bitter^[16]通过研究冲蚀磨损试验提出冲蚀磨损量计算公式。

(1)单位面积上的质量损失公式:

$$\zeta = \Delta m/A \quad (4)$$

式中: ζ 为风沙冲蚀率, kg/m^2 ; Δm 为质量损失,kg; A 为迎风面面积, m^2 。

(2)经简化得出冲蚀率的表达式^[16]:

$$\xi = \Delta m/(s \times t) \quad (5)$$

式中: ξ 为侵蚀率, kg/m^2 ; Δm 为经冲蚀磨损剥落的材料质量,kg; s 为单位面积, m^2 ; t 为单位时间,s。

该项目所在地风速为20.7 m/s,利用公式(4)和公式(5),计算风沙冲蚀混凝土面积减少量见表3。

表3 风沙冲蚀质量以及C50混凝土面积与时变年限之间的关系

时间/a	侵蚀量/kg	减少面积/ m^2
20	4.09×10^{-4}	2.86×10^{-2}
40	8.17×10^{-5}	5.72×10^{-2}
60	1.23×10^{-4}	8.58×10^{-2}
80	1.63×10^{-4}	1.14×10^{-1}
100	2.04×10^{-4}	1.43×10^{-1}

2 有限元模型建立

以宁夏下河沿桥大桥为工程背景,主桥是跨径为155+296+155=606 m的双塔双索面钢混组合梁斜拉桥,桥宽36.6 m,主梁采用双边工字钢组合梁,拉索用双层PE护套进行保护,如图1所示。

基于有限元软件建立斜拉桥全桥模型。塔柱用非线性纤维梁单元模拟,塔柱约束(保护层非约束)混凝土采用Mander模型模拟,主筋采用双折线模型模拟,对塔柱墩底节点约束6个方向的自由度;拉索采用桁架单元,只受拉模拟;支座采用一般类型,弹性连接。有限元模型如图2所示。

3 地震波选取

桥梁所处区域地震动峰值加速度0.20g,反应谱特征周期为0.45 s,项目场地类别为Ⅱ类。误差控制在5%,选出符合场地特性的12条地震波,规范与平

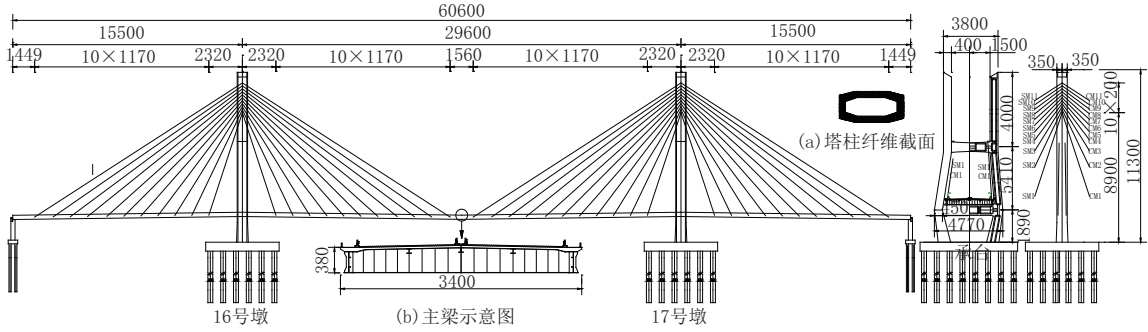


图 1 斜拉桥全桥纵断面图(单位:cm)

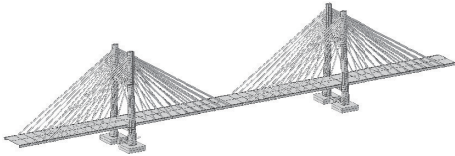


图 2 全桥有限元模型图

均反应谱如图 3 所示。

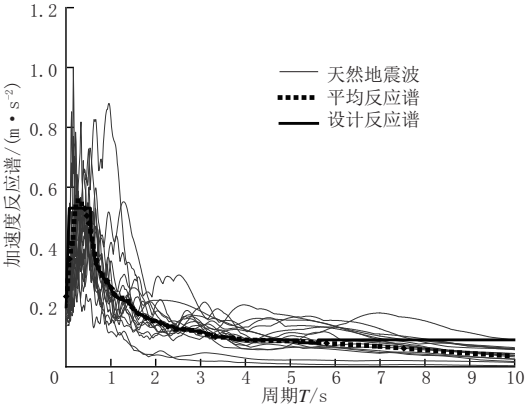


图 3 12 条地震波的反应谱图形(5%的阻尼)

4 地震响应分析

4.1 拉索地震响应分析

先通过 12 条天然地震波分析,确定第 1 个主墩右塔柱 S11 拉索损伤的概率为 33.3%,0.2g 时应力最大为 267.4 MPa,以及拉索对地震做出的响应,如图 4 所示。

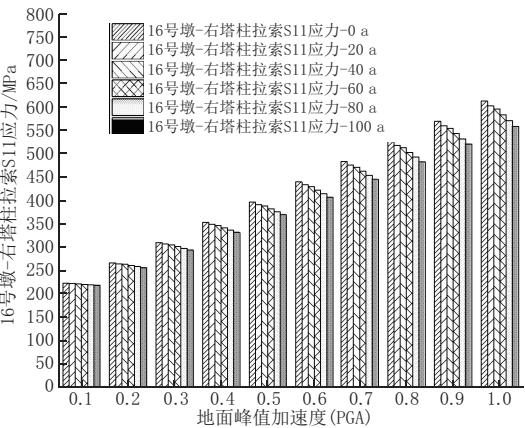


图 4 拉索应力与地震强度参数之间关系

由图 4 可知,随着峰值加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)的增大,拉索最大拉应力也会随着

增大。以 0 a 为例,当 PGA 由 0.1g 增加到 1.0g 时,拉索应力较 0.1g 时相比,分别增加了 19.22%、38.43%、57.65%、76.91%、96.12%、115.34%、134.55%、153.77% 和 172.98%。风沙冲蚀时间不同时拉索应力变化很小,如最大幅值为 8.82%,这也符合前文所述,拉索锈蚀的前提是拉索的护套首先破坏。根据规范,拉索在 20 a 后需要更换新的拉索,因此短时间的风沙冲蚀、锈蚀几乎不影响拉索的应力大小,拉索的应力只受地面加速度的影响。

4.2 索塔地震响应分析

先通过 12 条天然地震波分析,确定第 2 个主墩左塔身损伤的概率为 41.6%,及地震响应,如图 5 所示。

由图 5 可知,当 PGA 为 0.2g 时,最大曲率为 0.001 097 m⁻¹,随着风沙冲蚀时间变化,与初始相比弯矩影响分别增大了 1.55%、2.28%、3.92%、7.29% 和 10.39%;曲率影响分别增加了 159.33%、318.44%、478.01%、637.35%、796.69%、956.03%、1 115.37%、1 274.47% 和 1 434.04%。发现地震强度的变化对曲率的影响较为显著,地震动强度增大 10 倍,曲率增大了 14 倍多。

风沙冲蚀对弯矩-曲率影响较大,是因为风沙冲蚀改变了塔柱的截面特性,造成结构的周期发生了变化,结构周期改变的直接影响是加速度(谱加速度)的改变,但是结构并非在 PGA 最大时做出最大的地震响应,主要是风沙冲蚀对结构性能退化程度以及周期变化等因素的影响,使得结构对地震作用做出的响应也就不同。因此,风沙冲蚀会改变结构的地震响应,从而影响地震易损性分析结果,也会改变结构所承受的地震作用。

4.3 主梁地震响应分析

先通过 12 条天然地震波分析,确定主梁跨中挠度损伤的概率为 50%,在计算该部位在地震作用下的响应,如图 6 所示。

由图 6 可知,当 PGA 为 0.2g 时,初建成主梁最大

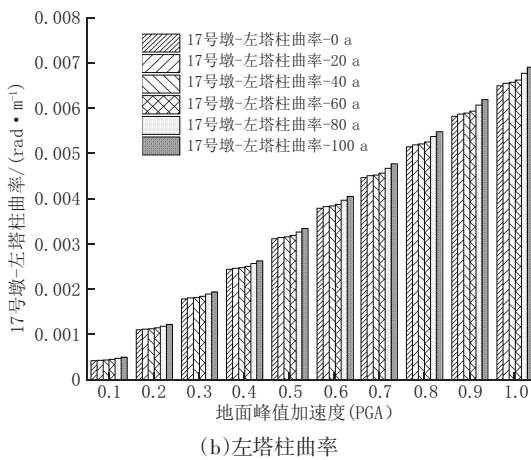
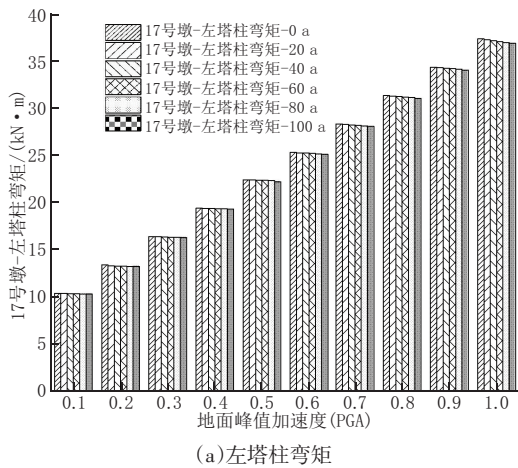


图5 索塔弯矩-曲率与地震强度之间的参数关系

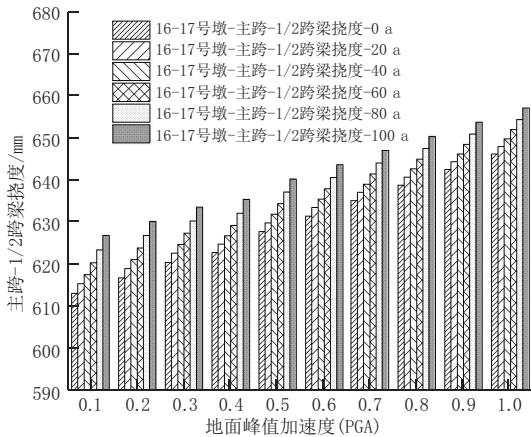


图6 主梁跨中挠度与地震强度参数之间关系

挠度为616.71 mm,在20、40、60、80、100 a时主梁挠度与初建成主梁挠度比,分别增加了0.36%、0.71%、1.15%、1.64%和2.18%;当PGA由0.1g增加到1.0g时,主梁挠度与0.1g相比增加了0.6%、1.20%、1.58%、2.40%、3.00%、3.60%、4.20%、4.80%和5.40%。由此可得,主梁跨中挠度不仅随着风沙冲蚀的时间变化而变化,也会随着地面峰值加速度的增大而增大略有增大。

5 结 语

通过对钢混组合梁斜拉桥的分析得到如下结论。

(1)12条天然地震作用下S11拉索损伤的概率为33.3%,但最大拉力较小,考虑风沙冲蚀和地震共同作用对拉索的抗震性能影响较小。

(2)地震作用下墩身易损部位为塔墩底部,风沙冲蚀时变作用下弯矩-曲率增大了10.39%,地震强度的变化对弯矩-曲率的影响最大。

(3)主梁跨中挠度不仅随着风沙冲蚀的时间增加而增大,也随着峰值加速度的增大而有所增大。

参考文献:

- [1] 李雯,陈文凯,周中红,等.中国大陆地震灾害生命损失时空特征分析[J].灾害学,2019,34(1):222-228.
- [2] 马志宏,汪浚.砂尘环境中军用装备磨蚀腐蚀进展的研究[J].腐蚀科学与防护技术,2005,17(2):112-115.
- [3] Wittmann, Stucture of concrete with respectnemck fomation Fmcture Mechusmies of Conerete [M]. Amstenda: Elsevies, 1983:43-74.
- [4] 金伟良,吕清芳,赵羽习,等.混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J].建筑结构学报,2007,28(1):7-13.
- [5] 王彦平,龚卓,王起才.风沙环境下混凝土桥梁墩身固体颗粒冲蚀磨蚀及防护材料试验研究[J].硅酸盐通报,2015,34(7):1941-1946.
- [6] 潘晓天.风沙冲蚀对混凝土桥墩磨蚀的试验与数值模拟研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [7] 柏伟.在役平行钢丝斜拉索剩余寿命分析[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [8] 杨新刚.索力变化对斜拉桥特性及承载能力的影响[D].大连:大连理工大学,2009.
- [9] 曹楚南.中国材料的自然环境腐蚀[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 王天鹏,张建仁,王磊,等.基于裂纹扩展的锈蚀拉索疲劳寿命评估[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):90-99.
- [11] 郝负洪,邢永明,赵燕茹,等.风沙环境下钢结构涂层侵蚀机理及评价方法[J].建筑材料学报,2011,14(3):345-349;361.
- [12] 李杰.风沙环境下钢-混组合梁表面涂层的冲蚀磨损性能研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [13] 代旷宇,于晓辉,李雨适,等.锈蚀钢筋混凝土结构地震易损性分析[J].建筑结构学报,2022,43(8):20-31.
- [14] Guo AX, Li HT, Ba X, et al.Experimental investigation on the cyclic performance of reinforced concrete pierswith chloride- induced corrosion in marine environment [J]. Engineering Structures, 2015 (105): 1-11.
- [15] Finnie, I Somere flection on the pastand futureo ferosion [J]. Wear, 1995 (186-187): 1-10.
- [16] Bitter J G A. A study of Erosion Phenomena Part 1[J]. Wear, 1963, 6 (1):5-21.
- [17] Bitter J G A. A study of Erosion Phenomena Part 2 [J]. Wear, 1963, 6 (3): 169-190.