

斜拉桥拉索腐蚀情况研究进展

杨海翼 仲 震 张寅峰 吴璞涵

(南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要 斜拉索是斜拉桥的主要受力构件, 其使用情况可直接影响到一座斜拉桥的安全情况。由于拉索长期暴露于空气中, 因此常常会受到腐蚀作用的影响, 从而导致其耐久性的下降, 造成不良影响。本文从斜拉桥面临的严峻现状、斜拉索的腐蚀性质、腐蚀对力学性能的影响和拉索防腐研究这四个角度, 介绍了目前国内外部分学者的研究进展。

关键词 斜拉索 力学性能 防腐蚀

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)02-0112-03

斜拉桥是一种将主梁用许多拉索直接吊在桥塔上的桥梁, 主要是由承压的塔、受拉的索和承弯的梁体组合起来的一种结构体系。作为一种拉索支撑体系, 斜拉桥的跨越能力比梁式桥更大, 在技术、结构合理的跨径范围内, 斜拉桥的经济性比悬索桥更为优越。斜拉索是斜拉桥的重要受力构件, 长期承受桥梁结构的自重和移动荷载, 但同时又因为其长期暴露在风雨等自然环境中, 容易受到不同原因的腐蚀, 进而演变成不同程度的破坏甚至断裂。通常情况下, 一座斜拉桥的设计使用年限为40年, 但受到以上种种因素的影响, 斜拉桥往往都很难达到其设计的使用寿命。下文从斜拉桥面临的严峻现状、斜拉索的腐蚀性质、腐蚀对力学性能的影响和拉索防腐研究这四个角度, 综述了目前国内外部分学者的研究现状。

1 斜拉桥面临的严峻状况

从目前各国已经建成的斜拉桥拉索的情况来看, 斜拉桥正在经受拉索耐久性问题的严峻挑战和威胁。1987年, 美国人Stafford和Watson对世界上近百座斜拉桥斜拉索进行了外观调查。之后在ASCE的刊物《Civil Engineering》上发表文章, 称“全球范围内过去几十年建造的近200座斜拉桥因拉索腐蚀正面临危险”^[1]。如在布鲁克林大桥、威廉斯堡大桥和其它桥上就曾进行过大量的腐蚀钢丝维修工作。

我国第一座预应力钢筋混凝土斜拉桥——红水河铁路斜拉桥, 运营十多年后发现如拉索防护套有深度裂纹等问题, 并对其中部分拉索进行了更换。济南黄河大桥由于拉索腐蚀相当严重, 在通车十三年后更换了全部88根拉索。广东南海九江大桥在通车九年后的

详细的检测中发现部分拉索腐蚀严重, 先后更换了98根拉索^[2]。

据不完全统计, 20世纪70至90年代初, 我国修建的30余座斜拉桥中, 已经加固修复的桥占65%, 有4座斜拉桥已经拆除或已经改成其它桥型, 有46%的斜拉桥已全部或部分更换了斜拉索, 尚有10余座90年代后修建的斜拉桥需要换索。

2 腐蚀性质

可以看出, 腐蚀是影响斜拉桥拉索的一大重要因素, 为了研究分析拉索腐蚀损伤甚至失效对其性能所产生的影响及斜拉索防腐的具体措施, 首先便要从腐蚀其本身性质出发, 研究腐蚀的特征及其机理, 从而能够更加精准地进行后续研究, 对症下药。下面先对腐蚀的特征及目前研究现状进行介绍。由于腐蚀是影响拉索性能的化学变化, 其作用机理不容忽视, 其次便是介绍目前腐蚀机理相关的研究现状。

2.1 腐蚀特征

乔燕、孙传智、缪长青利用袁州大桥拆下的39根腐蚀旧钢丝, 分析了蚀坑的物理分布特征与发展规律, 对每一个蚀坑的长度、宽度、深度等集合参数进行了测量与统计。最终研究结果表明腐蚀蚀坑的长度与深度都随着失重率的增加而增加, 宽度随着失重率的增加而降低^[3]。

黄娟针对拉索高强钢丝的腐蚀进行了实验研究, 对不同腐蚀样本中的钢丝表面蚀坑的尺寸及宏观参数和集合参数进行了统计分析, 研究了无氧情况下不同蚀坑的分布情况, 并与氧气充足时的实验结果对比。进而发现蚀坑典型形态下的离散型较小, 以及无氧条件下

的蚀坑生长速率显著小于氧气充足时的生长速率^[4]。

冯兆祥、于杰、缪长青结合了实际的换索工程,对斜拉索的腐蚀情况进行了评定与分析,并对蚀坑的发展进行了讨论,最终根据蚀坑分布特征分析总结了蚀坑的发展演变规律^[5]。

2.2 腐蚀机理

李涛通过在室内盐雾加速腐蚀的实验,研究分析了加速腐蚀中钢丝在不同条件下的多种动力学特征和性质。在实验的基础上,同时运用细观损伤力学和断裂力学强度准则对电缆的周围环境腐蚀、应力腐蚀和疲劳腐蚀的性质特点和机理等问题进行了综合分析,得出“阳极的腐蚀原电池反应是交变应力状态下拉索损伤的主要机理”的结论。拉索的腐蚀疲劳损伤主要的原因是钢丝表面产生蚀坑,进而导致应力集中,最终引起损伤开裂^[6]。Yao Guowen 等利用钢丝有限元分析腐蚀疲劳模拟试验,从理论上分析了拉索的损伤和失效机理,并且进一步使用盐雾室模拟了酸雨环境。结果表明,在腐蚀环境和交变应力共同的相互作用下,拉索发生了具有腐蚀性和疲劳性的损伤。这导致了腐蚀损伤的强化,降低了拉索的延展性,增加了脆性,最终导致了拉索的脆性断裂。同时,在相同的腐蚀条件中,交变应力作用下所产生的腐蚀性能程度最高^[7]。Shun-ichi Nakamura 等人在实验室生产了具有不同腐蚀缺陷的腐蚀镀锌钢丝,并对其力学性能和剩余强度进行了研究,结果表明氢脆不太可能发生。而疲劳试验表明,只有镀锌层被腐蚀时,疲劳强度没有变化,但在镀锌层以下的钢被腐蚀后,疲劳强度显著降低,从而可能导致断裂^[8]。

3 腐蚀对力学性能的影响

拉索是斜拉桥的主要受力构件,拉索的腐蚀现象会严重影响其力学性能,从而造成斜拉桥的安全性与耐久性显著下降,以下介绍目前在腐蚀对拉索力学性能影响方面的研究现状。

李文治在室内模拟了沿海一些地区的斜拉桥拉索遭受锈蚀的现象和情况,以此来研究钢绞线在流体动力学和机械性能等方面的变化现象,分析其锈蚀产生的根本原因。运用了有限元的分析对不同长宽深的裂纹进行模拟分析,他发现在腐蚀率相差不大时,力学性能中的受拉性能下降退化的原因中,最重要的就是蚀坑产生的应力集中效应或截面削弱效应^[9]。钟力介绍了对拉索损伤程度检测评估及安全控制性能等相关技

术的重点研究与应用现状,对斜拉索高强度钢丝在无受力、静态应力和交变动态应力这三种不同受力方式情况下进行了酸性盐雾的试验,建立拉索模型库并进行实验研究等,模拟它的演化过程并深入地分析研究了如何可靠的分析确定其安全性能特性^[10]。徐阳并未从拉索整体出发,而是去专门地研究了有关斜拉索内部高强钢丝的退化状态情况,从而考虑对力学性能等方面的影响,进行了人工加速腐蚀试验,发现均匀加速腐蚀深度分布是一种服从于对数的正态深度分布,再通过对锈蚀后高强钢丝进行单轴力学拉伸试验,得到了众多关于材料的力学指标的分布规律,最后还对实际的情况进行研究,确保所得结果的一致性^[11]。于杰对不同蚀坑分布的钢丝进多种实验,研究了拉索钢丝表面蚀坑分布对钢丝力学和疲劳性能的影响规律。并且从应力分布的角度对他所得出的结论进行了解释^[12]。黄成研究了拉索长期处于恶劣自然环境下所受的破坏程度并推理其安全寿命。他以某实际斜拉桥工程为基础,建立该桥对应的有限元模型,详细分析了不同高度位置的拉索在受到相同损伤的情况下对主梁线形、主塔偏移、拉索索力的影响^[13]。

4 拉索防腐蚀研究

基于以上对于斜拉桥腐蚀情况与拉索腐蚀不良性的分析,可以看出防治拉索腐蚀的工作已刻不容缓,以下介绍拉索防腐蚀方面的研究情况。

叶觉明和钟建驰结合国内的工程实例分析了悬索桥的保护措施,并且从热挤高密度聚乙烯(PE)防护和外套 HDPE 护套管这两种我国常用的斜拉索防护系统出发,讨论了缆索的腐蚀防护方法^[14]。彭建锋研究了 OTC(氧化聚合包覆技术)结构的特点、优点及其在其他领域的保护实例,并且通过实验研究了钢丝在不同状态下的腐蚀行为,从中发现了在 OTC 防护下的钢丝腐蚀速率更低、腐蚀形成的蚀坑特点不同于其他、腐蚀产物较少的现象。最后提出可将 OTC 包裹技术作为一种主动、绿色的拉索长效防腐技术^[15]。常彬彬对国内外腐蚀失效的斜拉桥做了统计,并以此分析了造成拉索损伤从而导致斜拉桥腐蚀失效的原因,又在充分了解 HDPE 护套管的保护特点的基础上,研究了玻璃纤维和纳米级粒子对 PE 材料性能改善的影响,发现两者能十分显著地改善 HDPE 材料的力学性能。还研究了控制拉索内部微腐蚀环境的方法,提出将电加热除湿的方法应用于拉索的腐蚀防护^[16]。徐超和方海等五

人从交变应力、HDPE材料性质、自然环境、施工作业方式等可造成的HDPE防护套损伤破坏的因素分析,提出了优化斜拉索防腐保护效果的建议,可使用长纤维来加强保护套的结构,同时在保护套和斜拉索之间设置粘弹性隔离层,以此来加强腐蚀防护的效果^[17]。

5 综合分析与发展

上述的现有研究在设置拉索腐蚀因素时不再局限于单一变量,而是从多变量平衡的角度模拟真实条件下的拉索腐蚀环境。多组研究采用对真实腐蚀的拉索进行疲劳试验,并且用有限元软件模拟真实受力情况,两种方法可互相验证,并能够进行误差分析。

但是在对钢丝抗拉强度的研究中,所得出的数据离散性较大,仍然需要大量的实验才能拟合出更加准确的变化曲线。同时实际钢丝腐蚀坑分布情况较为复杂,需要分析多个蚀坑更加复杂的分布情况,才能更加准确地评估钢丝的力学性能与疲劳寿命。

同时,目前的防腐蚀方法也较为空缺,相关的研究并不足够深入,大多数学者对于防腐蚀的研究还停留在拉索保护套材料性能的方面,研究的方面较为单一。

在未来的研究中,学者可以结合更多现有桥梁拉索的实际数据,进行理论研究,以得到更加准确并且更加具有现实意义的成果。国内外对桥梁耐久性的研究时间并不久,所积累的数据文献还称不上丰富,对于现有斜拉桥以及在役和卸下的拉索,应该有更多的学者对其腐蚀形貌、疲劳情况做更多的统计和数据收集工作,以总结更多文献资料,对于后继研究亦大有裨益。不仅如此,防腐蚀的相关工作也应从更多的方面入手,而不仅仅局限于保护套的材料性能。

6 结语

对于斜拉桥的拉索往往达不到它的设计使用寿命方面的问题,人们常常会因为担心拉索受腐蚀疲劳影响而提早更换拉索。而实际上,拉索的腐蚀是在所难免的,在大部分更换拉索的时候,往往并没有对受腐蚀拉索的承载力以及剩余寿命进行进一步的研究,以至于常在非最佳换索时刻对拉索进行了更换。这就会造成高额的换索费用(直接经济损失)。很多斜拉桥处于高速公路以及城市主干道上,行使着交通枢纽职能,而在换索的过程中,会实行交通管制甚至封闭交通,这就会导致交通系统的局部紊乱(间接经济损失)。但同时,如果因为研究成果的匮乏而引起的疲劳寿命

预测错误,而导致错过最佳换索时机,也会造成隐性甚至直接的危害。拉索的腐蚀往往会对其疲劳寿命产生负面影响,最终造成社会以及经济的不良影响与损失,所以相关部门和企业应该重视研究拉索的腐蚀对斜拉桥性能及寿命的影响问题。

参考文献:

- [1] H. R. Hamilton III, J. E. Breen and K. H. Frank. Investigation of Corrosion Protection Systems for Bridge Stay Cables. Research Report No. 1264-3F. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research[Z]. University of Texas at Austin. November, 1995.
- [2] 王文涛. 斜拉桥换索工程(第2版)[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [3] 乔燕, 孙传智, 缪长青. 索承式桥梁腐蚀吊索钢丝蚀坑特征研究[J]. 公路工程, 2015, 40(06): 13-16.
- [4] 黄娟. 模拟酸雨环境下拉索钢丝腐蚀发展规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [5] 冯兆祥, 于杰, 缪长青. 桥梁缆索钢丝腐蚀特征[J]. 山西建筑, 2015, 41(24): 152-153.
- [6] 李涛. 交变应力与环境耦合作用下拉索腐蚀疲劳损伤机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] Yao Guowen, Yang Shicong, Zhang Jinqian, Leng Yanling. Analysis of Corrosion-Fatigue Damage and Fracture Mechanism of In-Service Bridge Cables[J]. Hangers, Advances in Civil Engineering, 2021(04): 1-10.
- [8] Nakamura, S., & Suzumura, K. (2009). Hydrogen embrittlement and corrosion fatigue of corroded bridge wires[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(02): 269-277.
- [9] 李文治. 盐雾环境下斜拉索应力腐蚀与腐蚀疲劳试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [10] 钟力. 斜拉索腐蚀损伤与安全性能评定方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [11] 徐阳. 腐蚀环境下斜拉索高强钢丝退化状态研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [12] 于杰. 腐蚀环境下桥梁拉索疲劳可靠性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [13] 黄成. 拉索腐蚀损伤对斜拉桥结构的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [14] 叶觉明, 钟建驰. 桥梁缆索系统的腐蚀与防护[J]. 钢结构, 2005(02): 85-89.
- [15] 彭建锋. 基于OTC技术的桥梁缆索长效腐蚀防护研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [16] 常彬彬. 斜拉桥拉索损伤机理及预防构造措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [17] 徐超, 方海, 刘伟庆, 等. 斜拉桥斜拉索防腐保护问题分析与建议[J]. 世界桥梁, 2012, 40(06): 87-91.