

基于检测与试验的柔性系杆性能退化研究

朱 军¹, 杨民益², 彭 正¹, 李 凌³, 朱利明³

(1. 无锡市市政设施建设工程有限公司, 江苏 无锡 214101; 2. 无锡市市政设施养护管理有限公司, 江苏 无锡 214062;

3. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 系杆是系杆拱桥中用于平衡拱脚水平推力的关键构件, 其长期性能直接影响桥梁结构的安全性与耐久性。以运营20年的无锡华清大桥为研究对象, 针对其柔性系杆系统出现的多种病害, 选取其中2根具有代表性的系杆, 开展现场检测与系统的室内力学性能试验。结果表明, 系杆内部钢绞线本体状态良好, 镀锌层完好, 锈蚀等级为I级; 但整索静载锚固性能的效率系数仅为0.91, 总伸长率为1.2%, 均低于规范要求; 整索疲劳寿命仅为设计预期的50%, 在约100万次循环后即出现钢绞线断裂。进一步分析表明, 系杆性能退化主要是由于锚固区密封失效导致其内长期积水, 引发锚具锈蚀与夹片握裹力下降, 以及拱脚处弯曲的锚固构造引起应力集中。单束钢绞线材料的性能退化速度较慢, 整索劣化多由系统性因素主导。

关键词: 系杆拱桥; 系杆; 病害机理; 静载锚固性能; 疲劳寿命

中图分类号: U448

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0052-06

Research on Performance Degradation of Flexible Tie Rod Based on Detection and Test

ZHU Jun¹, YANG Minyi², PENG Zheng¹, LI Ling³, ZHU Liming³

(1. Wuxi Municipal Facilities Construction Engineering Co., Ltd., Wuxi 214101, China; 2. Wuxi Municipal Facilities Maintenance and Management Co., Ltd., Wuxi 214062, China; 3. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210000, China)

Abstract: The tie rod is a key component in the bowstring arch bridge, which is used to balance the horizontal thrust at the arch feet. Its long-term performance directly affects the safety and durability of the bridge structure. Taking the Wuxi Huaqing Bridge under the operation for 20 years as the research object, and targeted on multiple diseases in its flexible tie rod system, two representative tie rods are selected to conduct the on-site inspections and systematic laboratory mechanical performance tests. The results show that the internal steel strands of tie rod are in good condition, the galvanized layer is intact and the rust grade is Grade I. However, the efficiency coefficient of the static load anchoring performance of the entire cable is only 0.91, and the percentage of total elongation is 1.2%, all being lower than the standard requirements. The fatigue life of the whole cable is only 50% of the design expectation, and the steel strands break after about one million cycles. The further analysis indicates that the performance degradation of tie rod is mainly due to the failure of the sealing in the anchoring zone, which leads to long-term water accumulation inside, causing rust on the anchor and a decrease in the grip force of the clamping plates, as well as stress concentration caused by the bent anchoring structure at the arch foot. The performance degradation rate of single-strand steel wire materials is relatively slow, and the deterioration of the whole cable is mostly dominated by systemic factors.

Keywords: bowstring arch bridge; tie rod; disease mechanism; static load anchoring performance; fatigue life

0 引 言

柔性系杆作为下承式系杆拱桥的核心受力构

件, 长期处于高应力、复杂环境耦合作用下, 其服役性能直接关系到桥梁结构的安全。随着我国大量系杆拱桥进入中后期服役阶段, 系杆耐久性问题日益受到关注。已有研究系统探讨了预应力钢绞线在潮湿、氯盐等环境下的腐蚀演化规律, 并指出水氧侵入是引发材料劣化的关键因素^[1-4]。同时, 针对系杆防护体系的有效性, 多项研究成果验证了HDPE护套与油脂填充在理想密封条件下具有长期隔离的

收稿日期: 2026-01-09

基金项目: 南京市建设行业科技计划项目(KS2304)

作者简介: 朱军(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁管养工作。

通信作者: 朱利明(1968—), 男, 学士, 教授级高级工程师, 从事桥梁检测、监测、施工监控工作。电子邮箱: zhulm@njtech.edu.cn

作用^[5-7]。

然而,在实际工程中,多重防护体系常因构造细节不当、施工质量不达标、材料老化而出现局部失效的问题。相关研究表明,锚头密封圈龟裂、护套接缝开裂等微小缺陷,可导致水分持续渗入,进而引发锚具锈蚀、油脂乳化及钢绞线—夹片界面性能退化^[8-11]。此类病害具有隐蔽性强、发展缓慢、引发的后果严重的特点,但常规外观检查方法或无损检测手段,往往难以准确评估其内部状态^[12-14]。尤其是当系杆外观完好、无明显断丝或变形时,很难评估其真实的承载能力,有可能其承载能力已显著低于设计预期,此时,其存在“隐性失效”风险^[15-16]。

在性能评估方面,现有研究多聚焦材料本体的力学退化或单一检测指标的敏感性分析^[17-18],对于整索系统在实际锚固构造与服役环境耦合作用下的综合性能演变机制,仍缺乏深入的探讨。部分现场试验和数值模拟工作,虽然揭示了锚固区应力集中、偏角效应等因素对整索疲劳寿命的影响^[19-20],但缺少对系杆在长期服役后,从病害表征到力学性能退化这一完整变化过程的系统性研究。此外,如何将现场检测现象与实验室试验结果有效关联,仍是当前工程评估面临的难题^[21]。

本研究以 1 座已建设运营 20 年的下承式系杆拱桥为例,分析其系杆出现典型病害的主要原因。通过近年对拱桥的检测发现,其多根系杆存在护套局部破损、锚头积水、密封失效和内部油脂变质等典型病害。尽管在外观上未观察到明显的结构损伤,但其内在是否仍满足现行规范的安全使用要求,亟待验证。因此,需关注 2 个核心问题:一是在钢绞线本体未发生显著材料退化的前提下,系杆整体静力与疲劳性能是否会因锚固系统劣化而下降?二是若性能退化属实,其主导因素是环境侵蚀引起的界面损伤,还是构造几何不连续导致的局部应力集中?

针对上述问题,本研究基于现场病害调查及对既有研究的综合分析,提出“锚头密封失效—积水腐蚀—锚固性能劣化”与“锚固区弯曲偏角—应力集中—疲劳寿命缩短”2 项核心假设,并通过开展整索静载锚固试验、疲劳试验和单束钢绞线对比试验,系统验证假设,同时量化性能退化程度。研究成果旨在揭示柔性系杆在真实服役条件下的退化路径,为同类桥梁的状态评估、养护决策及未来设计优化提供工程依据。

1 工程概况

华清大桥位于无锡市南部,地处华清路起点,横跨京杭大运河,整体呈南北走向,于 2005 年建成通车。桥梁全长 487 m,主桥采用下承式钢管混凝土系杆拱桥结构,净跨径为 132 m,净矢高为 33 m(见图 1)。

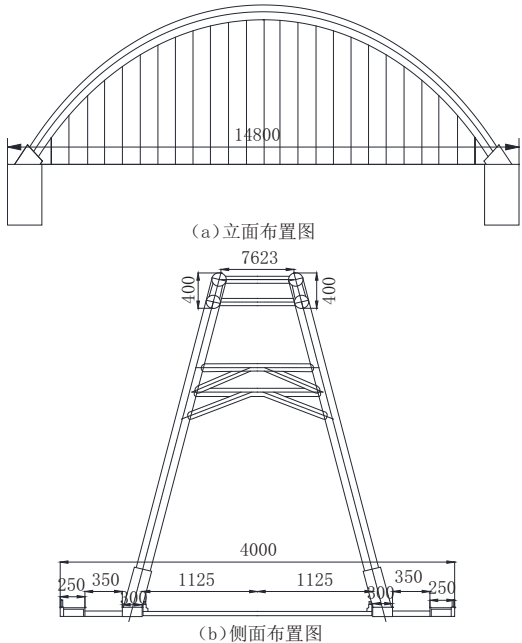


图 1 华清大桥立面及侧面布置图(单位:cm)

上部结构主要由拱肋、吊杆、系杆、横梁和桥面板等构件组成。该桥采用柔性系杆体系,系杆选用公称直径为 15.24 mm、标准强度为 1 770 MPa 的低松弛镀锌钢绞线。全桥共配置 24 束 $\phi 15.24-22$ 钢绞线,并配套可更换式锚具。为保障耐久性,系杆设置 3 层防护体系:内层为无粘结预应力筋专用防腐润滑脂,中层为双层聚酯带夹纤维丝增强复合带,外层为高密度聚乙烯护套。系杆布置及锚头构造如图 2 所示。

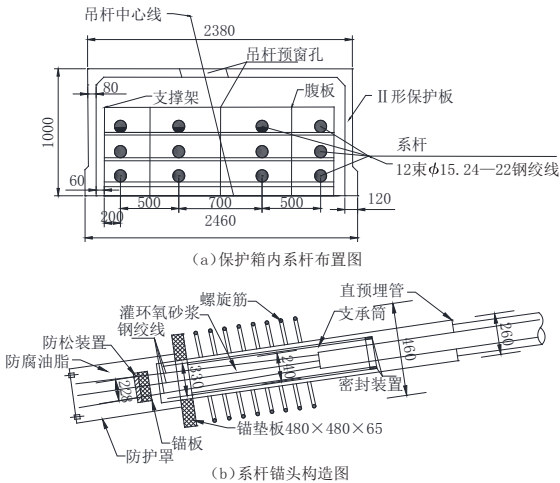


图 2 系杆布置及锚头构造图(单位:mm)

2 病害调查与退化机理初判

2.1 历年病害演化

该桥自2005年投入运营以来,系杆系统在长期荷载与环境作用下呈现明显的渐进式劣化。历年检测表明,病害由外向内逐步发展:早期(2013年)48个减震橡胶圈全部开裂,标志着其缓冲功能失效;随后橡胶护套破损数量从2015年的47处增至2021年的峰值233处,防护体系持续退化。支撑托架同步发生劣化,滚轴开裂数量由2018年的62处增至2022年的243处,并伴随锈蚀、护套脱落等并发损伤。尤为关键的是,锚固区密封性能呈现显著下降趋势——2021年,专项检查发现,31个锚头中有6个出现渗水、2个出现油脂覆盖不足现象;至2023年,已出现套筒严重积水与黄油变质现象,这表明其防水功能已基本丧失。上述病害演化,清晰地反映了系杆系统从外部防护失效到支撑构件损伤,再到核心锚固区锈蚀的系统性退化过程。典型病害如图3所示。



图3 系杆系统及附属构件典型病害

2.2 退化机理初步分析

结合桥型特点、构造细节与环境因素,本研究对病害成因进行如下推断。

一是构造位置不利。作为下承式系杆拱桥的关键构件,系杆位于桥面下方的封闭区域,这种区域的通风条件差,水分难以蒸发。而雨水易沿桥面板缝隙渗入并积聚于锚头附近,形成持续潮湿的微环境,这种环境对桥梁结构构成显著隐患。

二是密封体系失效。橡胶密封圈在长期的温度循环和机械应力作用下发生老化龟裂,使得外部水汽能够通过锚头缝隙持续渗入。

三是排水设计缺失。现有锚头构造未设置有效的排水通道,一旦进水便会长期滞留,从而加速油脂的水解乳化,并为电化学腐蚀提供电解质环境。

病害调查与机理分析表明,导致该桥柔性系杆性能退化的主要原因是锚固系统的环境侵蚀与应力集中,而非钢绞线本体老化,但尚缺乏直接的力学证据。常规无损检测难以量化锚固效率、握裹力损失或疲劳剩余寿命等关键指标。

为验证核心假设,本研究选取具有代表性的病害样本开展室内试验,即在可控的条件下复现系杆的关键服役状态,从而获取力学响应数据,并揭示其性能退化的主导因素,为后续评估与决策提供数据支持。

3 试验方案设计与实施

3.1 试验样本选取

试验索的选取遵循了代表性原则。具体而言,左侧的8#系杆存在PE护套破损的情况(Z-8#),右侧的10#系杆出现锚头积水和锈蚀的问题(Y-10#)。因此,本次试验选取左侧的8#系杆和右侧的10#系杆作为试验索。各系杆的布置及编号情况如图4所示。

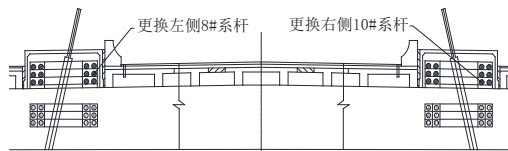


图4 系杆更换位置示意图

系杆全长约为151.8 m。在系杆更换施工过程中,由于不具备整索取出的条件,整根系杆被截成数段。本次试验选取其中最具代表性的4根带锚头段作为样本。对旧索进行加工,并加装锚头,最终制成2根长度为5 m的试验索。根据相关规范要求,单束钢绞线试验样本的长度应不低于0.5 m。因此,本次试验从样本中截取2束长度为0.5 m的钢绞线,分别作为疲劳试验和松弛试验的样本。

3.2 试验内容与方法

华清大桥系杆力学性能试验涵盖了系杆整索与单束钢绞线的力学性能检测。其中,系杆整索的力学试验包含静载锚固试验和疲劳试验;单束钢绞线的力学试验包括疲劳试验和松弛试验。具体试验内

容如表 1 所示。

表 1 试验内容

规格	直径/mm	检测项目	数量	位置
整索/根	97	外观检查	2	靠近锚头
		静载锚固试验	1	Z-8#系杆
		疲劳试验	1	Y-10#系杆
单束钢绞线/束	15.24	疲劳试验	1	Z-8#系杆
		松弛试验	1	Z-8#系杆

3.2.1 索体开窗检查

历年检测结果显示,锚头处积水严重。结合工程经验,研究人员判定该区域为系杆性能最薄弱部位,因此在锚头处开窗。研究人员依据《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》(JTG/T 5122—2021)^[22],按锈蚀分级标准评估钢绞线锈蚀等级。

3.2.2 系杆静载锚固性能试验方法

系杆静载锚固性能^[23]试验用于评估系杆(钢绞线—锚具组装件)在静载下的整体性能,获取极限抗拉力 F_{Tu} 和总伸长率等关键参数,用以判断其是否满足性能要求与可靠性要求。

(1)安装与调试:初应力取公称抗拉强度 F_{Pk} 的5%~10%,总伸长率测量标距 ≥ 1 m。

(2)加载程序:分级等速加载至 $0.2F_{Pk}$ 、 $0.4F_{Pk}$ 、 $0.6F_{Pk}$ 、 $0.8F_{Pk}$,速率 ≤ 100 MPa/min;加载至 $0.8F_{Pk}$ 后,持荷1 h,再加载至破坏状态。

(3)测量记录:记录 F_{Pk} 下标距与受力长度、 F_{Tu} 、 $0.1F_{Pk} \sim F_{Tu}$ 的伸长增量(用于计算总伸长率),以及钢绞线破坏形式。

(4)判定条件^[24]:破坏状态的表现应为钢绞线断裂,而非锚具失效;效率系数 ≥ 0.95 ;总伸长率 $\geq 2.0\%$ 。

3.2.3 系杆疲劳试验方法

系杆疲劳试验^[24]用于评估其在循环荷载下的疲劳寿命、应力幅影响和损伤累积规律,为系杆长期服役的可靠性及养护策略提供依据。具体操作方法如下。

(1)试件安装:将试件安装在疲劳试验机上,在锚具下方设置斜垫板,使锚固段的实际中心线与理论中心线约成 0.6° 夹角,以引入弯曲效应,并完成锚固。

(2)加载方式:以约100 MPa/min速率施加纵向荷载至 $0.45F_{Pk}$,随后在 $0.45F_{Pk} \sim [0.45F_{Pk} - (0.45F_{Pk} - 2\Delta F_a)]$ 范围内进行循环加载,对应应力幅为200 MPa(荷载范围为2 453.22~1 837.22 kN)。试验频率为3 Hz,总循环次数为200万次。

(3)判定条件^[24]:一是上限应力为 F_{Pk} ,应力幅为200 MPa,循环次数为200万次;二是当钢丝总数 > 100 根时,断丝率 $\leq 2\%$ 。

3.2.4 钢绞线疲劳试验方法

为评估系杆中单根钢绞线在循环荷载下的疲劳性能,本研究采用电液伺服动静疲劳试验机,开展拉伸疲劳试验^[25],并记录其断裂时的循环次数。具体操作方法如下。

(1)试样长度为0.5 m,两端夹持长度约为7 cm。

(2)施加应力范围为 $0.45F_{Pk} - (0.45F_{Pk} - 2\Delta F_a)$,对应荷载幅为110.71~69.0 kN(应力幅为300 MPa),目标循环次数为200万次,频率 ≤ 167 Hz(即 $\leq 10\ 000$ 次/min)。

(3)试验在钢绞线断裂或达到200万次循环时终止,以先发生情况为准。

3.2.5 钢绞线松弛试验方法

钢绞线松弛试验方法^[25]用于评估其在恒定应变下应力随时间衰减的特性,其核心指标为应力松弛率,反映材料长期的应力保持能力。试验流程和判定条件如下。

(1)试样准备:试样在松弛试验室内静置 ≥ 24 h,并粘贴应变片。

(2)试样夹持:牢固夹持于试验机上,确保受力均匀,无滑移或偏斜情况。

(3)试验条件设定:按设计要求设定荷载水平和温湿度环境。

(4)松弛试验:初始加载力为钢绞线最大力的70%;3~5 min内匀速加载至目标力;持荷1 min后设为零时刻,随即转入恒应变控制;试验期间,应变波动控制在 $\pm 5\ \mu\varepsilon$ 以内;数据采集时点为1、3、6、9、15、30、45 min,1、1.5、2、4、8、10、24 h,此后每隔24 h采集一次;若120 h数据满足推导条件,可据此预测1 000 h松弛率。

(5)判定条件^[24]:1 000 h松弛率 $\leq 2.5\%$ 。

4 试验方案设计与实施

4.1 开窗检查

对更换下来的Z-8#和Y-10#系杆进行开窗检查,检查结果如图5所示。检查中未发现钢丝镀锌层存在粉化或锈迹现象,图中所见黄色物质为防腐油脂。依据《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》对锈蚀程度的推荐分级标准,可将该系杆钢丝的锈蚀程度评定为I级。I级表示钢丝完好、无锈蚀,且钢丝表面呈现金属光泽,表明其处于良好的状态。该

系杆钢丝在历经近20年运营后仍能保持I级的完好状态,主要得益于其“镀锌层+防腐油脂+HDPE护套”的多重防腐体系长期发挥有效的防护作用。



4.2 整索静载锚固性能试验

本研究对Z-8#系杆进行静载锚固性能试验(见图6),试验结果如表2所示。



图6 系杆静载锚固性能试验

表2 系杆静载锚固性能试验结果

Z-8#系杆	实测极限 拉力/kN	效率 系数	总伸长率/ %	断丝数/ 根	断丝率/ %
技术要求	—	≥0.95	≥2.0	—	—
试验结果	4 942.1	0.91	1.2	7	4.46
判定结果	不合格				

由表2可知,Z-8#系杆的极限拉力为4 942.1 kN,效率系数为0.91,总伸长率为1.2%,断丝7根(断丝率为4.46%)。效率系数低于0.95,表明材料强度不达标;总伸长率不足2.0%,表明材料的脆性较大,变形能力差。这些问题可能导致系杆在承受设计荷载时发生过度变形或损坏,影响桥梁的安全性和稳定性。

静载锚固性能试验结果不合格。结合定期检测中的病害分析,本研究推测主要原因有3点:一是锚头外套筒积水导致锚头发生锈蚀,削弱了结构的完整性和锚固性能;二是钢绞线夹片长期接触水分,降低了握裹力;三是锚头锈蚀及夹片退化引起应力分布不均,增加了局部应力集中风险,并导致钢绞线断裂。综上所述,系杆性能不足主要是由锚头锈蚀与夹片退化共同作用的结果,而这两者出现问题皆因

长期水侵蚀所致。

4.3 整索疲劳试验

本研究对Y-10#系杆进行疲劳试验(见图7),试验结果如表3所示。



图7 系杆疲劳试验

表3 系杆疲劳试验结果

Y-10#系杆	疲劳次数/次	断丝数/根	断丝率/%
技术要求	2 000 000	3	2
试验结果	1 002 129	5	3.18
判定结果	不合格		

根据表3数据,Y-10#系杆在经历1 002 129次循环,应力上限为 $0.45F_{Pk}$,应力幅度为200 MPa(2 453.22~1 837.22 kN)的疲劳试验后,钢绞线断裂5根,断丝率达到3.18%,超出规范限定的2%标准,且未达到预期循环200万次的寿命,表明其疲劳性能显著下降,约为预期寿命的一半。

华清大桥系杆疲劳寿命显著降低,主要是因其被锚固于拱脚处,呈弯曲状态(见图8),使得钢绞线受力不均。而外侧钢绞线应力集中严重,在长期运营条件下,易产生微裂纹并持续扩展,最终削弱结构的完整性。

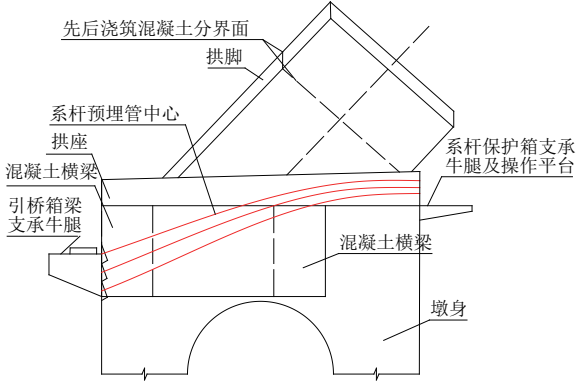


图8 系杆锚固区示意图

4.4 钢绞线疲劳试验

本研究对单束钢绞线进行疲劳试验(见图9),试验结果如表4所示。

由表4可知,试验钢绞线的剩余疲劳寿命满足规范要求($\geq 2\,000\,000$ 次),且断丝率为0,表明试验钢绞线的疲劳寿命符合规范设计要求。

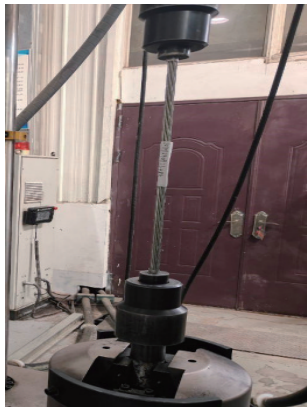


图9 钢绞线疲劳试验

表4 钢绞线疲劳试验结果

钢绞线疲劳性能	疲劳次数/万次	断丝数/根	断丝率/%
技术要求	200	3	2
试验结果	200	0	0
判定结果	合格		

4.5 钢绞线松弛试验

本研究对单束钢绞线进行松弛试验,松弛曲线如图10所示,试验结果如表5所示。

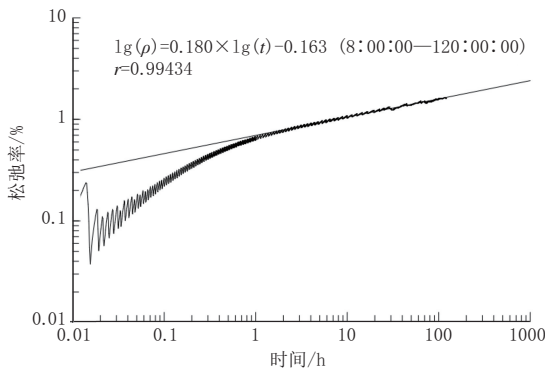


图10 钢绞线松弛曲线

表5 钢绞线松弛试验结果

钢绞线松弛性能	120 h 松弛力	120 h 应力 松弛率/%	1 000 h 应力 松弛率/%
技术要求	—	—	≤2.5
试验结果	2.7	1.6	2.4
判定结果	合格		

由表5可知,试验钢绞线松弛率符合规范要求(即≤2.5%),表明其松弛性能满足设计规范。调研发现,华清大桥钢绞线出厂时松弛率为1.71%,但本次松弛试验结果显示,其松弛率已升至2.4%,接近规范要求的上限值(2.5%)。这说明尽管当前松弛率仍在规范规定的范围内,但其松弛性能已出现显著退化。

5 结 论

本研究以某建设运营20年的系杆拱桥为例,对

其柔性系杆进行检测与试验,分析其性能退化特征,主要得出如下结论。

(1)对于采用了“镀锌+油脂+HDPE护套”多重防护措施的柔性系杆,其钢绞线本体在服役期内通常能够保持良好的状态。然而一旦HDPE护套破损或锚固密封失效,锚头处易发生水分积聚,从而导致局部发生锈蚀。因此,锚固区的密封完整性是影响系杆耐久性的关键共性因素。

(2)整索静载性能不达标主要是由于锚头积水引起锚具锈蚀与握裹力下降。对于可更换式锚固体系,锚固区的防水与排水构造设计与维护,直接决定整索的静力性能寿命。

(3)系杆在拱脚处采用弯曲锚固时,易产生应力集中问题,显著降低其疲劳寿命。此类构造细节是疲劳性能退化的共性诱因,应在设计阶段优化或在运维中重点监测。

(4)单束钢绞线材料的性能退化速度较慢,整索性能劣化多由系统性因素(如锚固失效、构造缺陷)主导。评估老旧系杆的状态时,应优先排查锚固与构造问题,而非仅关注材料老化。

参考文献:

[1] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
[2] 崔秀鹏. 柔性系杆拱桥系杆力损失与系杆更换技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
[3] 王解元,潘德鹏. 某拱桥系杆换索设计与施工[J]. 世界桥梁,2010(2): 66-69.
[4] 杨齐海,季跃华. 大跨钢管混凝土系杆拱桥更换系杆施工[J]. 施工技术,2006(3): 62-63.
[5] 郑强,孙国安. 佛陈大桥缺陷原因分析及加固[J]. 中国铁道科学, 2000(4): 23-31.
[6] 李烈佩,罗宇. 佛陈大桥系杆拱的加固及认识[J]. 广东公路交通, 2001(4): 10-11.
[7] 张海峰. 潮白河大桥加固技术及健康监测研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
[8] 廖德鸿,唐建荣,黄艳巧. 资阳沱江三桥系杆更换施工技术[J]. 预应力技术,2015(1): 29-32.
[9] 高欣,欧进萍. 钢管混凝土拱桥索类构件的常见病害与检测方法[J]. 公路,2012(3): 10-16.
[10] 龙跃,左毅,吴秋凡,等. 拱桥拉索病害研究与对策[J]. 桥梁建设,2005(3): 70-72;80.
[11] 唐钰昇,林阳子. 钢管混凝土系杆拱桥检测难点及技术分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2015,11(3): 224-225.
[12] 吴立新,龚桂仙,李立军,等. 桥梁系杆钢索中钢绞线断裂情况剖析[J]. 钢铁研究,2005(5): 51-54.
[13] 符晶华,常立新,姜德生,等. 系杆断裂对拱桥健康状况的影响[J]. 武汉理工大学学报,2006(10): 61-65.
[14] 康孝先,刘路,丁洪华. 系杆拱桥系杆更换关键技术与施工[J].