

Disease and comprehensive disposal of rigid boom of tie-rod arch bridge

Honglei Zhang

Jiangsu Wutong Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210006, China

Abstract

The tie-rod arch bridge, with its beautiful structure, low building height and good economy, has been widely used in the field of domestic bridge construction. However, in recent years, a series of worrying structural safety accidents have occurred in the pole arch bridge in China. After further analysis, it is found that the direct cause of these accidents is mainly anchor head failure or steel strand fracture. The root cause of the problem is the common quality problems in the construction process and the lack of necessary maintenance measures during the operation period. To solve these problems, after the finite element calculation and analysis and multiple scheme comparison, the final decision is to replace the permanent boom, directly to improve the safety of the bridge, and maintain the upper and lower anchor heads to enhance the durability. This scheme can provide a valuable reference for similar projects.

Keywords

rigid boom; rust; fracture; permanent boom; prevention and reinforcement

系杆拱桥刚性吊杆病害及综合处置

张红雷

江苏吾通工程科技有限公司, 中国 · 江苏 南京 210006

摘要

系杆拱桥凭借其结构美观、建筑高度低以及良好的经济性等突出特点, 在国内桥梁建设领域得到了广泛应用。然而, 近年来国内系杆拱桥却接连出现一系列令人忧心的结构安全事故。深入剖析后发现, 这些事故的直接原因主要为锚头失效或者钢绞线断裂。究其根源, 问题在于施工过程中存在的质量通病以及运营期缺乏必要的养护措施。为解决这些问题, 经过有限元计算分析及多方案比选, 最终决定采取全桥增设永久吊杆的预防加固措施; 对于部分病害严重的吊杆, 则直接进行更换, 以此提高桥梁的安全度; 并对上下锚头进行维护处理, 以增强耐久性。该方案可为类似工程提供宝贵的参考借鉴。

关键词

刚性吊杆; 锈蚀; 断裂; 永久吊杆; 预防加固

1 引言

系杆拱桥以结构美观、建筑高度低、经济性较好等特点在国内广泛应用。然而, 近年来因吊杆锈蚀断裂等原因, 国内拱桥相继出现桥梁倒塌安全事故。其中, 2001 年四川宜宾小南门大桥桥面系坍塌^[1], 该桥主跨为 240 米的提篮式钢筋混凝土中承式拱桥, 4 对 8 根吊杆在下锚头区以上横梁顶面附近脆性断裂, 致使北端长约 10 米、南端长 20 余米的桥面预制板坍塌; 2011 年新疆库尔勒孔雀河大桥桥面坍塌, 主跨 150 米中承式钢管拱桥第二根吊杆在下锚头区以上横梁顶面附近脆性断裂; 2011 年江苏滨海县通榆河大桥主跨 60 米预应力系杆拱桥全桥垮塌, 停在桥面上的两辆重型货车坠

入河中; 2011 年福建武夷山公馆 301 米中承式钢架拱桥垮塌, 一辆旅游大巴坠桥造成 1 死 22 伤, 原因系吊杆在下锚头区以上横梁顶面附近脆性断裂; 2019 年台湾南方澳跨海大桥 8 号吊杆断裂造成 20 多人受伤; 2021 年浙江绍兴某下承式拱桥吊杆断裂, 导致桥面局部坍塌; 2022 年重庆鹅公岩轨道大桥仅仅运营 3 年吊杆就发生断裂。

刚性吊杆作为系杆拱桥的重要承重构件, 其安全性和耐久性直接影响桥梁的正常使用寿命。然而, 早期桥梁吊杆设计存在先天不足, 锚头进水导致钢绞线锈蚀, 疲劳应力作用下可能发生断裂或强度破坏。由于吊杆构造的特殊性, 隐蔽区域难以检测, 钢绞线和锚头成为检测盲区, 增加了桥梁的安全隐患。

随着时间推移, 吊杆的腐蚀、疲劳等问题日益突出。钢绞线在长期使用中可能因腐蚀、疲劳等因素降低承载力, 而锚头作为连接吊杆与桥梁主体的关键部位, 其性能直接影响桥梁的安全性。如果锚头出现松动、锈蚀等问题, 将

【作者简介】张红雷 (1981-), 男, 中国江苏启东人, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁检测和健康监测、桥梁维修加固设计研究。

严重影响吊杆的受力状态，进而危及桥梁的正常使用和正常运行^[2-4]。

为切实解决刚性吊杆的安全隐患问题，必须采取一系列行之有效的措施。其一，大力加强对刚性吊杆检测技术的研究，致力于开发更为先进、高效的检测手段，从而能够精准地检测出钢绞线和锚头处存在的潜在问题。此外，在桥梁养护过程中，采取安全可靠的加固措施至关重要，例如更换吊杆或增设永久吊杆等，这是预防此类结构垮塌的关键所在^[5-8]。

本文将深入探讨系杆拱桥刚性吊杆的病害及安全隐患，并提出综合处置措施。

2 工程概况

某高速公路桥梁，左右幅布置，主桥上部结构采用71.6 m单跨预应力混凝土系杆拱桥，为刚性系杆刚性拱，计算跨径 $L=70$ m，拱轴线为二次抛物线，矢跨比为1/5，拱肋采用钢筋混凝土等截面“**I**”字型截面；系杆采用预应力混凝土等截面箱形；全桥设13对吊杆，吊杆采用直径 $D=375$ mm的无缝钢管，内穿15.2钢绞线，配相应的夹片锚和挤压锚；风撑为一字型钢管混凝土结构。

在检查过程中，发现吊杆下锚头有渗水情况，油脂乳化且变质，钢绞线呈现浮锈状态；多处钢绞线于挤压锚处存在内缩现象。此外，吊杆中上部压浆不密实，普遍存在钢绞线锈蚀的问题。

3 综合处置

经管理单位与专家论证后，一致认定应采取相应措施以确保桥梁的安全运营：

其一，增设永久吊杆。在原吊杆四周增设吊杆，以此

作为当前运营状态下的安全保障，并且在后期更换吊杆时可充当临时兜吊系统。

其二，更换吊杆。选取病害较为严重的左幅内侧8#、9#吊杆以及左幅外侧11#吊杆这三根吊杆进行更换，并对原吊杆进行打开检测，以评估吊杆的使用状况。

其三，上下锚头维护处理。凿开上下锚头的封锚混凝土，采用无缝钢管与吊杆钢束锚垫板进行焊接，作为锚头防护罩，并在内部填充锚头防腐油脂。

增设吊杆的材料可选用高强度钢绞线成品吊杆或精轧螺纹钢。考虑到增设吊杆在更换吊杆时需要二次张拉，而高强度钢绞线成品吊杆二次张拉较为困难，因此推荐采用精轧螺纹钢吊杆。增设的永久吊杆采用四根精轧螺纹钢。对精轧螺纹钢锚固位置及布置形式进行三个方案的优缺点比较后，最终选定方案一。

在进行吊杆选型及锚固布置时，必须考虑吊杆更换、正常运营以及个别原吊杆断裂这三种工况下增设的吊杆系统的安全性。

3.1 三种工况分析

①更换吊杆工况：依据增设吊杆替换原成桥吊杆内力的准则，成桥工况下最大单根吊杆力约为452kN。

②正常运营工况：原吊杆正常工作，增设吊杆仅施加25kN的初紧力，在运营状态下最大吊杆力为69kN。

③个别原吊杆突然断裂工况：原吊杆断裂退出工作，原吊杆力转移至增设吊杆及相邻吊杆，此时增设吊杆最大吊杆力为216kN。

由此可见，增设吊杆的设计吊杆力在更换吊杆工况下最为不利，为452kN。

表1 方案比选

Tab. 1 Comparison of schemes

方案	锚固位置及方式	优点	缺点
方案一	上吊点采用型钢支撑梁锚固，下吊点与系杆外贴钢板锚栓锚固	锚固措施可靠，不压缩桥下净空，造价较低	/
方案二	上下吊点均采用型钢支撑梁锚固	对原结构影响较小，施工简单，锚固措施可靠，造价低	压缩桥下净空，对通航有影响
方案三	在拱肋和系杆中心位置钻孔，精轧螺纹钢穿过钻孔，上吊点锚固在拱肋顶面，下吊点锚固在系杆底面	吊杆数量少，对桥面视野影响较小，造价较高	钻孔位置在系梁的空心段，增设吊杆下吊点锚固可实施性较差

3.2 增设吊杆系统设计计算方面

①增设吊杆强度验算：吊杆采用PSB930 Φ 40精轧螺纹钢，单根吊杆极限强度为1168kN，经计算安全系数为2.6，满足要求。

②支撑钢梁强度验算：在设计控制吊杆力452kN作用下，支撑梁的最大正应力为25.1MPa，小于270MPa；最大剪应力为62.0MPa，小于110MPa。在正应力与剪应力共同作用时，也满足要求。

③吊杆下吊点锚固验算：建立吊杆下吊点局部有限元

模型，以分析下吊点型钢及锚栓的受力安全性。在吊杆力的作用下，下吊点型钢的最大应力约为174.2MPa，此应力值符合Q345钢材的强度要求。依据《混凝土结构加固设计规范》（GB50367-2013）以及《混凝土结构后锚固技术规程》（JGJ145-2013），分别对锚栓钢材拉剪复合受力承载力以及基材混凝土拉剪复合受力承载力进行验算，结果显示两者均满足规范要求。

4 吊杆更换设计

目前，国内常用的吊杆方案主要有三种：一是平行钢

丝+上下刚拉杆组合体系；二是平行钢丝+冷铸墩头锚成品索体系；三是钢绞线整束挤压拉索体系。原刚性吊杆预埋的内侧钢管尺寸为 $\Phi 102\text{mm}$ ，若采用方案二和方案三，需要对锚头进行扩孔，在扩孔过程中取出锚垫板及组合构件，这将会对拱肋和系梁造成较大损伤。而且该部位对局部承压要求极高，损伤处的恢复难度较大。因此，最终选用方案一，即平行钢丝+上下刚拉杆组合吊杆。此方案中，吊杆在拱肋及系梁内的部分为刚拉杆，中间索体采用平行钢丝+冷铸墩头锚成品索，刚拉杆与索体之间通过接头连接，接头连接拉杆外螺纹和平行钢丝锚具的外螺纹。

原吊杆钢绞线的破断力为 2604kN，新更换的吊杆拉索规格为 55 ϕ 7，钢丝强度为 1670MPa，破断力为 3535kN，其拉索技术要求满足 GB/T18365-2001 中的相关规定。

5 吊杆外观和性能检测

左幅外侧 11# 吊杆病害最为典型，下面分上锚头、拱肋导管内、吊杆中间段、系梁导管内和下锚头五个部位进行描述。

1) 上锚头情况：锚环表面干燥，存在锈蚀，外露钢绞线不齐整，存在明显高差。

2) 拱肋导管内情况：拱肋导管内未压浆。导管内钢绞线表面干燥，钢绞线表面锈蚀严重，未发现明显锈坑。

3) 吊杆中间段情况：距系梁顶面 0-4.1 m 区间压浆密实，4.1 m 到拱肋底面未压浆；1 根钢绞线在距系梁顶面 5.9 m 处，断裂 4 丝，缩颈 3 丝；未压浆钢绞线表面干燥，钢绞线锈蚀严重，存在明显锈坑。

4) 系梁导管内情况：系梁钢导管内压浆密实；钢绞线表面混凝土包裹，未发现明显锈迹。

5) 下锚头情况：下锚头表面黄油包裹，表面无明显锈迹；锚垫板表面干燥，存在明显锈迹。钢绞线多束内缩，内缩最大值 11.3 mm，远大于《公路桥涵施工技术规范》(JTG T F50-2011) 要求的挤压后的锚固头的钢绞线外露挤出挤压套筒 2 mm~5 mm。

6) 进一步对吊杆钢绞线锈蚀、力学性能、上锚头锚固性能试验测量。

1#、4# 和 5# 钢绞线锈蚀严重，在明显锈坑位置取 3 个试件，测量其表面 6 根钢丝直径变化，经计算得出锈蚀钢丝断面损失率最大值为 21.69%。

依据《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T14370-2015 第 6.1.1 节规定，预应力钢材用锚具效率系数应大于 0.95。对吊杆上锚头的 6 束钢绞线夹片锚具进行整体锚固性能试验后发现，锈蚀后的锚具效率系数离散性较大，其中有 3 个锚具效率系数大于 0.95，而另外 3 个锚具效率系数分别为 0.87、0.59 和 0.50。出现锚具效率系数低的原因在于钢绞

线从夹片锚中完全滑出。

综上所述，左幅外侧 11# 吊杆的病害可总结为：中上段完全无砂浆包裹，一根钢束断裂，钢绞线严重生锈并出现锈坑，致使截面被削弱；锈蚀的夹片锚具效率系数显著下降。依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21-2011) 表 6.3.3-7，左幅外侧 11# 吊杆处于标度 4 的较差状态，即部分吊杆钢丝锈蚀或损坏较严重，个别有断裂现象。由此可见，该桥梁存在极为严重的安全隐患。

6 结语

系杆拱桥的刚性吊杆安全隐患问题举足轻重，不容小觑。当前，刚性吊杆饱受压浆不密实、钢绞线锈蚀以及锚固性能降低等多种病害困扰，安全隐患极为严峻。

其一，若刚性吊杆存在未压浆的施工缺陷，将会致使吊杆刚度与承载能力减弱，进而加速钢绞线锈蚀，导致截面受损甚至断裂。

其二，锈蚀后的夹片锚具效率系数明显下降，会对吊杆的锚固性能带来不良影响，降低桥梁的安全程度。

其三，对于运营多年的拱桥，应加大检测频率，做好吊杆维护工作。采用增设永久吊杆进行预防性加固，一方面能够降低安全隐患，另一方面在更换吊杆时可充当兜吊系统。

本文详尽地描述了未压浆吊杆的病害情况，评估了吊杆技术状况。通过全桥增设永久吊杆、更换病害严重的吊杆以及对上下锚头进行维护等综合处置措施，有效地提升了系杆拱桥的安全度，为类似工程提供了极为宝贵的参考借鉴。

参考文献

- [1] 张晓昕,朱贺,刘遥路,李冬生.基于监测数据的拱桥吊杆疲劳寿命评估方法及其应用[J].防灾减灾工程学报,2010,30(S1):314-317.
- [2] 李承昌,刘以谦.吊杆钢丝锈蚀分布规律及检测试验[J].公路交通科技(应用技术版),2010,64(04):9-11+14.
- [3] 李鑫,李斯涵,位东升,等.中承式拱桥吊杆专项检测及可靠性分析[J].建材技术与应用,2022,(05):40-44.
- [4] 吴万忠.柔性吊杆拱桥吊杆锚头病害特征及检测指标[J].城市道桥与防洪,2016,208(08):264-267+298+25-26.
- [5] 江越胜,邹玲,王勇.增设吊杆主动加固混凝土系杆拱桥[J].公路,2013,(09):141-144.
- [6] 陈建兵,熊秉贤,李夏元,包光明.钢管混凝土拱桥新增吊杆加固设计[J].世界桥梁,2016,183(05):83-88.
- [7] 窦勇芝.中承式钢管混凝土桁架拱桥新增吊杆加固技术[J].施工技术,2014,43(10):69-72.
- [8] 勾红叶,李凯强,滕凌,等.中承式钢管混凝土拱桥新增吊杆法加固技术研究[J].中外公路,2017,37(01):79-84.