

## 大跨度飞燕式系杆拱桥常见病害成因分析

万林云

(长沙理工大公路工程试验检测中心, 湖南 长沙 410076)

**摘要:** 大跨度飞燕式系杆拱桥结构复杂, 其飞燕式拱式结构体系与系杆结构体系易产生局部病害, 但其作为新型桥梁体系具有较高的应用前景。文中通过对淞澧洪道桥主桥的检测, 对大跨度飞燕式系杆拱桥常见病害及成因进行分析, 并提出防治措施。

**关键词:** 桥梁; 飞燕式系杆拱桥; 常见病害; 成因分析

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0119-05

飞燕式系杆拱桥是拱桥中极具特色的桥型, 它不仅承受恒载, 还承受汽车活载和温度变化等的作用。该桥型根据主跨和边跨拱轴系数、矢跨比及截面形式的不同, 通过锚固于两边跨端部的系杆平衡主拱的水平推力, 以降低成本, 经济又美观。但其结构复杂, 超静定次数较多, 荷载作用传递路径较长, 影响其结构受力的因素很多。张磊等利用有限元软件对飞燕式钢管砼系杆拱桥成桥稳定性进行了分析; 王强对某钢管砼系杆拱桥运营期病害进行检测, 并提出了加固、维修措施; 丁岩从运营期桥梁的养护出发, 对系杆拱桥常见病害及处治方法展开了研究; 毛建方等结合工程实例, 对系杆拱桥吊杆病害展开分析, 提出相应更换方案, 并对更换过程中及更换后桥梁结构强度、刚度和稳定性进行了计算分析。该文将以淞澧洪道桥主桥为例, 对大跨度飞燕式系杆拱桥进行检测与评估, 分析其主要病害及成因。

## 1 工程概况

淞澧洪道桥长 982.96 m, 主桥长 528 m, 为 80 m+368 m+80 m 三跨连续自锚中承式钢管砼系杆拱桥, 俗称“飞燕式”(见图 1)。主拱圈由 4 根直径 1.0 m 钢管砼拱组成, 拱之间采用钢管砼连杆及钢管连杆连接, 共设有 2×37 根吊杆。边拱采用上承式双肋悬链线半拱, 边跨和中跨拱上设钢管砼立柱, 边跨、主跨拱脚固结于拱座, 边跨曲梁与边墩之间设

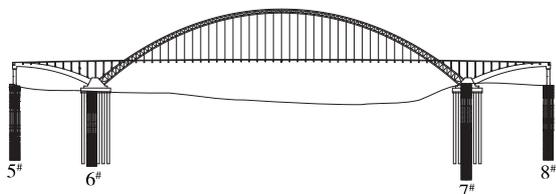


图 1 淞澧洪道主桥立面布置

置轴向活动盆式支座, 两边跨端部之间设置钢铰线系杆。采用桩柱式墩台, 桥面两侧设有钢筋砼和钢管防撞护栏。

## 2 上部结构主要病害及成因

### 2.1 边跨病害

两边跨主要存在锈胀露筋、横梁砼破损、拱肋侧面近拱脚处水平裂缝等病害, 最大裂缝宽度为 0.12 mm(见图 2、图 3), 与往年检查结果相比裂缝未发展。病害成因: 1) 砼施工质量不良, 造成桥梁运营期受力后拱肋处砼破损; 2) 砼保护层厚度不足, 表面砼破损后, 钢筋发生氧化反应; 3) 经自然环境和车载等活载作用后, 拱肋、横梁等出现水平裂缝、砼破损和锈胀露筋等病害。



图 2 边跨砼破损、锈胀



图 3 边跨侧面水平裂缝

### 2.2 吊杆保护套病害

吊杆热缩带存在腐蚀、破损, 外护套表面出现老化、开裂和破损等现象(见图 4、图 5)。病害成因: 1) 吊杆施工、安装过程中保护套被刮蹭造成破损; 2)

经日晒、雨水冲刷等自然环境和车辆荷载等作用,热缩带和保护套出现腐蚀、老化、开裂等现象。



图4 吊杆热缩带腐蚀、破损



图5 吊杆外护套表面老化、开裂

### 2.3 吊杆锚头病害

所有吊杆下锚头保护罩均存在轻微锈蚀,锚头黄油均已老化、失效,锚杯内存在积水、锚头保护罩破损等现象(见图6、图7);吊杆上锚头保护罩表面存在轻微锈蚀,锚头锚具保护罩有不同程度锈蚀,密封圈破损,黄油轻微老化。但吊杆封锚处外观质量良好,未见锈蚀现象。病害成因:1)吊杆锚头采用聚氨酯类防水层,这种防水层一般3~5年就会失效,极易造成吊杆锚头保护罩破损,导致锈蚀;2)钢制构件对水、温度等较敏感,在自然环境作用下,锚杯内产生积水,形成高湿度环境,进而造成锚杯、锚头保护罩等锈蚀;3)车辆荷载等活载作用下,桥梁结构产生疲劳效应,锚头密封圈老化破损,引起锚头漏油、黄油老化;4)养护不到位。



图6 锚杯内积水



图7 下锚头黄油老化

### 2.4 系杆病害

系杆存在多处由施工不当造成的保护套表面刮痕、破损及修补质量不良(见图8);部分系杆保护套表面存在起皮、开裂等现象,部分系杆小桩号端锚头保护罩表面存在轻微锈蚀,全桥的系杆限位装置钢条锈蚀(见图9)。其主要成因是施工不当、风吹日晒雨淋的作用及车辆荷载等的疲劳作用。



图8 系杆保护套表面破损



图9 系杆限位钢条锈蚀

### 2.5 桥面板梁病害

桥面板共有42处存在锈胀露筋(见图10),最大锈胀露筋面积为 $1.0\text{ m}^2$ ,其中横梁和纵梁上病害最严重,梁上最大锈胀露筋面积为 $0.4\text{ m}^2$ 。第5、第6跨桥面板底面存在4条纵向裂缝(见图11),裂缝长度及宽度均较小,属于砼收缩裂缝,与往年检查结果相比裂缝未发展。桥面板底面普遍存在细微横向裂缝,裂缝宽度为 $0.02\sim 0.06\text{ mm}$ ,裂缝长度均较小,为桥面板在荷载作用下产生的正弯矩裂缝,裂缝宽度均未超限,与往年检查结果相比裂缝未发展。桥面板左、右两侧防撞护栏下方均存在锈胀露筋,7#区间桥面板横梁上外悬挑端上翼缘钢板油漆脱落,钢板锈蚀(见图12)。主要是由于钢板外层防腐油漆剥落后,受到雨水冲刷、高温暴晒等作用。

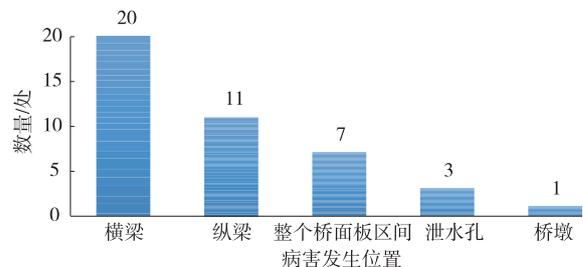


图10 桥面板梁病害统计



图 11 桥面板纵向裂缝



图 12 桥面板横梁底面局部油漆脱落、锈蚀

钢纵、横梁整体连接良好,未发现变形、螺栓脱离等缺陷;主拱圈横向联系节点连接良好,未出现焊缝脱落、锈蚀等缺陷;横向连接钢管未发现变形、脱落等缺陷;拱上立柱表观质量良好,未发现明显缺陷;支座表观质量良好,未发现剪切变形、老化、错位、脱空等缺陷。

### 3 下部结构病害及成因

#### 3.1 桥墩主要病害

桥台护坡存在梁间沉降、开裂,桥墩盖梁、挡块及立柱存在破损、锈胀露筋,桥墩盖梁存在竖向裂缝、渗水污染等病害。5#和8#桥墩盖梁锈胀露筋面积最大,共 $2\text{ m}^2$ (见图13)。造成该类病害的主要原因:1) 砼保护层较薄,导致钢筋锈胀,表面砼脱落,进而露筋;2) 施工工艺未达到设计要求,导致砼破损露筋。



图 13 8#桥墩盖梁破损

#### 3.2 拱座主要病害

6#桥墩右侧拱座存在1处锈胀露筋,左侧存在2处砼破损,其中1处破损面积达 $1.5\text{ m}^2$ 。7#桥墩右侧拱座存在2处大面积锈胀露筋、1处砼破损,最

大锈胀面积达 $7.0\text{ m}^2$ (见图14);左侧有1处锈胀露筋。造成该类缺陷的主要原因:1) 砼保护层厚度不足;2) 施工不当,如钢筋定位不准、工艺落后等。



图 14 拱座砼破损

6#、7#桥墩的拱座存在竖向裂缝、斜裂缝、U形裂缝等病害。6#桥墩右侧拱座存在3条竖向裂缝、1条竖向贯通缝,左侧有7条斜向裂缝、1条竖向裂缝、1条竖向贯通缝,拱座横系梁存在4条U形裂缝。以上裂缝两端窄、中间宽,均为大体积砼收缩裂缝,由砼内部自应力超过砼的允许拉应力而引起。

7#桥墩左、右侧拱座各有1条竖向贯通裂缝,最宽 $0.18\text{ mm}$ ,裂缝贯通至顶面且对称,与往年检查结果相比裂缝未发展。7#桥墩右侧拱座有4条竖向裂缝,最长 $2\text{ m}$ ,最宽 $0.2\text{ mm}$ ;右侧拱座小桩号右侧边缘有1条长 $1.5\text{ m}$ 斜向裂缝。7#桥墩左侧拱座存在7条竖向裂缝(裂缝表面局部析白)、7条斜向裂缝,拱座横系梁存在4条U形裂缝,宽度 $0.12\sim 0.2\text{ mm}$ 。以上裂缝均为大体积砼收缩裂缝,为由外界环境变化造成砼不能满足自身变形而产生的适应性裂缝。

### 4 桥面系主要病害及成因

#### 4.1 桥面铺装的主要病害

桥面铺装存在多条纵向、横向裂缝,最长达 $8.0\text{ m}$ ,均存在于沥青砼桥面,为桥面铺装表层裂缝。造成该类病害的主要原因:1) 沥青砼对温度变化较敏感,温度变化时,铺装层顶部易产生拉应力,底部易产生压应力,顶部的拉应力大于压应力时产生裂缝;2) 在车载及桥梁自重作用下,支座产生负弯矩,桥面铺装层受到拉应力,导致裂缝产生;3) 在反复荷载作用下,桥面铺装层产生微裂缝,并随着加载继续而逐渐扩展、延伸,形成疲劳裂缝。

桥面铺装还存在局部破损、坑槽、网裂等病害,主要发生在靠近护栏处车道上,最大网裂面积 $6\text{ m}^2$ 。主桥桥面沥青砼铺装多处存在刮擦、凹槽(见图15),局部存在粗骨料外露。主要原因如下:1) 局部沥青砼铺装与砼铺装之间黏性差,车载反复作用下形成网裂等;2) 随温度及车载变化,桥面铺装层产生裂缝,经

雨水冲刷渗透后形成坑槽、粗骨料外露等。



图 15 桥面铺装刮擦、凹槽

### 4.2 伸缩缝病害

5# 和 8# 墩台上方伸缩缝存在局部堵塞(见图 16);5# 桥墩处伸缩缝锚固区砼破损、露筋,面积为 0.02 m<sup>2</sup>。主要病害原因为:1) 车载反复作用造成伸缩缝锚固区砼破损、露筋;2) 运土车等未清洗干净上桥,掉落渣土等,在雨水等作用下沉积在伸缩缝中,造成伸缩缝堵塞。



图 16 伸缩缝堵塞

### 5 吊杆频率测试及分析

采用 JMM-268 索力动测仪对全桥吊杆(共 70 根)频率进行检测。检测结果见图 17、图 18。由于 1#、37# 吊杆较短,测值受外界因素影响较大、约束条件复杂及测值具有较大不确定性,未进行现场频率检测。1-2# 为上游侧 2# 吊杆,2-2# 为下游侧 2# 吊杆。1-20#、2-3#、2-6#、2-27#、2-36# 吊杆实测频率与设计频率的比值为 5%~10%,建议后期对其加强观测;其他吊杆实测频率与设计频率均不超过 5%,吊杆状态良好。

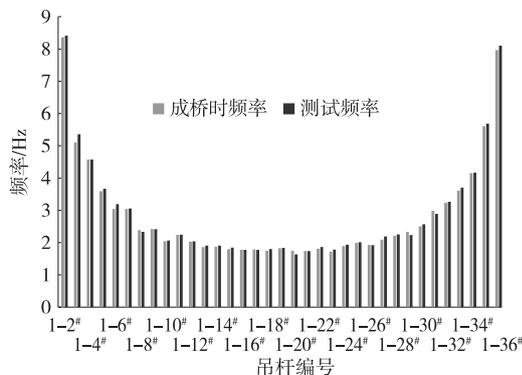


图 17 上游侧吊杆频率

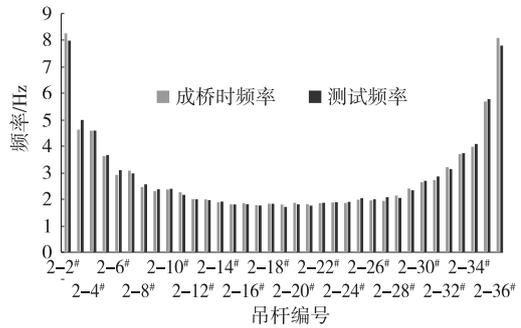


图 18 下游侧吊杆频率

### 6 桥梁技术状况评定

依据 JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》进行桥梁技术状况评定。根据检测结果,考虑桥梁各部件权重及桥梁重要部件的关键病害,对桥梁各构件缺损状况进行综合评定,确定桥梁的技术状况等级。评定结果(见表 1)显示:桥梁总体技术状况较好,评定为第 2 类,但需进行小修。

表 1 淞澧洪道主桥总体技术状况评定

部位	部件	部件得分	部位得分	权重	评定结果
上部结构	拱肋	85	89.9	0.4	全桥总体技术状况评分 $D_r = 88.9; 80 \leq D_r < 95$ , 评定为第 2 类
	横向联结系	100			
	立柱	100			
	吊杆	87			
	系杆(含锚具)	88			
	桥面板(梁)	83			
	支座	100			
	翼墙、耳墙	—			
	锥坡、护坡	—			
	桥墩	82			
下部结构	桥台	—	91.7	0.4	
	墩台基础	100			
	河床	100			
	调治构造物	—			
	桥面铺装	75			
桥面系	伸缩缝装置	72	81.1	0.2	
	人行道	—			
	栏杆、护栏	94			
	排水系统	100			
	照明、标志	100			

### 7 主要病害的处理

(1) 在砼破损、锈胀露筋处,对锈蚀钢筋进行除锈处理,将砼凿毛后采用环氧砂浆修补。

(2) 对钢构件防锈漆脱落、锈蚀处,除锈后重新涂刷防锈漆。

(3) 修补吊杆及系杆套管破损、开裂、起皮处。

(4) 对吊杆上、下锚头及系杆两端锚头进行除锈、防锈处理,并更换破损的吊杆下锚头保护罩,对锚头重新涂刷黄油。

(5) 对 T 梁、拱座、桥墩横系梁裂缝予以封闭。

(6) 对桥面铺装纵、横向裂缝及网裂采用改性沥青封闭,对桥面铺装及伸缩缝锚固砣破损处进行修补。

## 8 结语

根据淞澧洪道桥的检测结果,结合设计资料进行对比分析,对其主要病害进行分析,对桥梁总体技术状况进行评估,并提出病害修补及防治措施。检测结果表明该桥主桥桥面板、纵横梁、边跨拱肋及墩台、拱座存在局部砣破损和锈胀露筋,吊杆及系杆的套管、吊杆上下锚头保护罩存在轻微锈蚀,部分吊杆实测频率与设计频率百分比为 5%~10%,其他吊杆实测频率与设计频率百分比均不超过 5%,吊杆

整体受力良好。桥梁整体状态良好,初步说明大跨度飞燕式系杆拱桥具有较好的耐久性和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 张志明.大跨度飞燕式系杆拱桥结构参数优化和地震响应分析[D].成都:西南交通大学,2014.
- [2] 李闯,唐英.某飞燕式钢管混凝土系杆拱桥动力特性分析[J].铁道建筑,2012(1):14-16.
- [3] 陆军,肖春.某飞燕式系杆拱桥的设计简介[J].城市道桥与防洪,2012(2):34-37.
- [4] 张磊,张振伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥稳定性分析[J].低温建筑技术,2020,42(2):80-83.
- [5] 王强.钢管混凝土系杆拱桥病害分析与维修加固[J].能源与环保,2017,39(4):185-190.
- [6] 丁岩.中承式混凝土系杆拱桥的常见病害及加固方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015(8):14-16.
- [7] 毛建方,曹鹏飞.结合实例的系杆拱桥吊杆病害分析及更换方案应用[J].特种结构,2014,31(3):84-86+36.

收稿日期:2021-07-13

\*\*\*\*\*

(上接第 118 页)

再适用。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 487-499.
- [2] 赵羽习, 金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 939-945.
- [3] WIN P P, WATANABE M, MACHID A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [4] QI C Q. Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement[D]. West Lafayette: Purdue University, 2003.
- [5] GERARD B, MARCHAND J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials; Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 37-43.
- [6] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence

- of traversing cracking crack on chloride diffusion into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6): 877-886.
- [7] LIM C C, GOWRIPALAN N, SIRIVIVATNANON V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression[J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(5): 353-359.
- [8] MARSAVINA L, AUDENAERT K, DE SCHUTTER G, et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 264-269.
- [9] 万小梅, 苏卿, 赵铁军, 等. 单轴受压混凝土的微裂缝和氯离子侵入性[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(1): 104-110.
- [10] 何世钦, 贡金鑫. 弯曲荷载作用对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(2): 134-138.
- [11] 叶梦琦, 李扬. 开裂混凝土氯离子扩散性能研究[J]. 湖北工业大学学报, 2020, 35(2): 88-91.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

收稿日期:2021-01-30