

## 下承式系杆拱桥吊杆应急维修措施

李海洋<sup>1</sup> 王恒武<sup>2</sup>

1 中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430070

2 武汉理工大设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430061

**[摘要]** 为保证短时间内具有吊杆病害的下承式系杆拱桥运行安全, 提出临时吊杆应急维修方案。文章以某主跨 70m 下承式系杆拱桥为例, 对施加临时吊杆系杆拱桥的运营安全进行研究。运用 MIDAS 软件建立全桥有限元模型, 分析临时吊杆张拉后和中间一组吊杆断裂后, 体系应力变化规律。结果表明: 临时吊杆张拉力被钢套管吸收, 吊杆钢丝应力基本不变; 中间吊杆断裂, 吊杆索力被临时吊杆和钢管吸收, 附近吊杆索力略有增加, 因此临时吊杆方案对保证结构运营安全具有可行性。

**[关键词]** 下承式系杆拱桥; 吊杆病害; 应急维修

DOI: 10.33142/sca.v5i8.8153

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

## Emergency Maintenance Measures for Suspenders of through Tied Arch Bridges

LI Haiyang<sup>1</sup>, WANG Hengwu<sup>2</sup>

1 Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430070, China

2 WHUT Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430061, China

**Abstract:** In order to ensure the safe operation of through tied arch bridges with suspender diseases in a short period of time, an emergency maintenance plan for temporary suspenders is proposed. Taking a through tied arch bridge with a main span of 70m as an example, this paper studies the operational safety of tied arch bridges with temporary suspenders. The finite element model of the entire bridge was established using MIDAS software to analyze the stress changes of the system after the temporary suspension rods were tensioned and the middle group of suspension rods were broken. The results show that the tensile force of the temporary suspender is absorbed by the steel casing, and the stress of the suspender steel wire is basically unchanged; The middle suspender is broken, and the cable force of the suspender is absorbed by the temporary suspender and steel pipe. The cable force of the nearby suspender is slightly increased. Therefore, the temporary suspender scheme is feasible to ensure the safe operation of the structure.

**Keywords:** through tied arch bridges; suspender diseases; emergency maintenance

### 引言

近几年随人们对桥梁健康检测的日益重视, 早期建设的下承式系杆拱桥由于施工方法、防护技术的落后以及后期养护不重视等原因, 导致的吊杆病害开始逐渐暴露<sup>[1-2]</sup>。对于吊杆病害传统的维修方案是更换吊杆, 但对于近几年内改扩建即将拆除新建的桥梁, 传统的更换吊杆法费用高、施工难度大<sup>[3-4]</sup>。为保证这些桥梁在短期内运行安全, 减少安全隐患的发生, 因此吊杆的应急维修方案的研究显得尤为重要。本文以主跨 70m 下承式系杆拱桥为例, 介绍吊杆应急维修措施, 为类似工程提供参考。

### 1 工程概况

某大桥建成于 2002 年, 设计荷载等级为汽-20, 挂-100, 单幅桥面净宽 11.25m, 全宽 14.0m, 主桥为下承式预应力混凝土系杆拱, 计算跨径  $L=70.0\text{m}$ , 拱轴线为二次抛物线, 矢跨比为 0.17, 矢高为 12.0m, 系杆为箱形截面, 高 1.5m, 宽 1.0m, 拱脚处加高至 1.7m; 拱肋为等截面矩形截面, 高 1.35m, 宽 1.0m, 为钢筋混凝土构件; 每片拱片设间距为 5m 的吊杆 13 根, 吊杆为刚性吊杆, 采用 73  $\phi$  5 碳素钢丝; 风撑采用 3 片 135cm 高矩形空心梁; 行车道板

采用 20cm 高预制板; 中横梁、系杆为预应力混凝土结构。系杆拱桥立面见图 1。

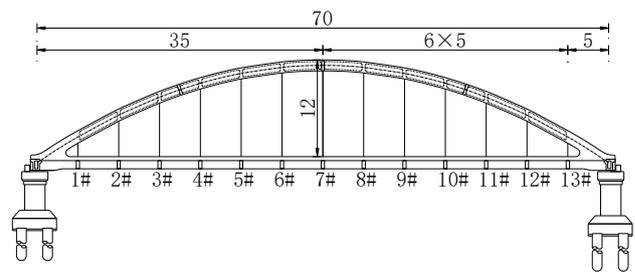


图 1 系杆拱桥立面

Fig.1 elevation of tied arch bridge

### 2 吊杆病害及分析

#### (1) 吊杆病害

根据 2020 年特检报告: 左、右幅下锚头封锚砼中夹杂红砖的现象较多, 其中有 9 根吊杆锚头封锚砼表面存在一定的缺陷 (破损、开裂、露筋); 49 根吊杆下锚头平行钢丝墩头存在锈蚀现象, 其中 29 根吊杆下锚头平行钢丝墩头严重锈蚀, 占抽检总数的 58%; 40 根吊杆下锚头锚具

存在锈蚀，其中 24 根吊杆下锚头锚具严重锈蚀；9 根吊杆下锚头平行钢丝墩头存在回缩趋势或已部分回缩，其中局部墩头存在回缩趋势吊杆 6 根；部分完全回缩吊杆共 3 根，占抽检总数的 6%，吊杆病害分布见图 2。

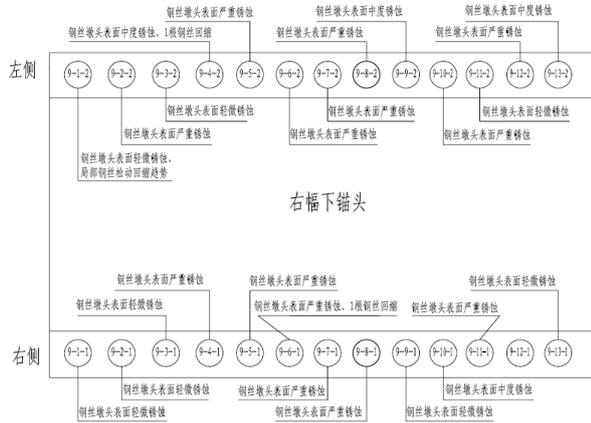


图 2 吊杆病害分布

### (2) 吊杆技术评定

根据特检报告：吊杆技术状况等级评定为 4 类构件，技术状况得分别为 50.83 分（左幅）和 51.1 分（右幅），吊杆存在严重病害。

### (3) 病害产生原因

①吊杆下锚头表层锈蚀，是由于吊杆防水、防腐措施不当，导致雨水顺着吊杆索体下渗，引起下锚头封锚处渗水、下锚头表层锈蚀等<sup>[5]</sup>。

②钢丝回缩主要是由于锚丝表面锈蚀或施工不当引起。

### 3 吊杆维修加固设计

本桥已通车运行近二十年，吊杆已达到设计使用寿命，鉴于吊杆技术状况等级为 4 类构件，结构安全值得忧虑。考虑到目前国内已有多座类似型式的桥梁更换了吊杆，为切实保障桥梁安全，需要对全桥吊杆进行维修加固。根据《公路斜拉桥设计细则》3.4.1 条规定及《公路桥梁加固设计规范》11.3.8 条规定吊杆安全系数不应小于 2.5<sup>[6-7]</sup>。

#### (1) 结构有限元分析

根据原设计图纸，采用 Midas 建立本桥的三维有限元模型见图 3。其中拱肋、系杆、端横梁、中横梁和风撑采用梁单元模拟，吊杆和钢套管采用桁架单元模拟，截面尺寸按原设计图取值，横梁间湿接缝、桥面铺装及护栏等桥面系结构按照荷载加载，拱脚与桥墩固结，桥墩底部固结，全桥单元总数为 366 个，包括桁架单元 156 个，梁单元 210 个，节点 400 个，模型中参与荷载组合的主要包括恒载（结构自重、混凝土收缩、徐变作用等）、汽车荷载（汽-20 级、挂车-100（原设计荷载、公路-I 级）、温度作用（整体升温、整体降温、拱肋温度梯度）等。吊杆承载力验算如表 1 所示。

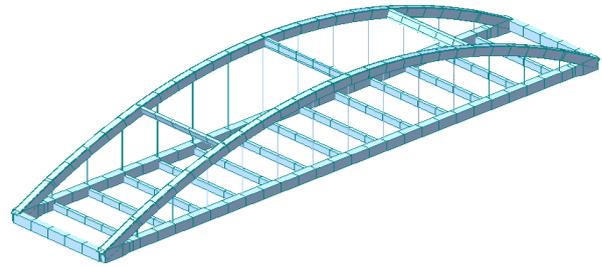


图 3 系杆拱桥三维有限元模型

表 1 吊杆承载力验算表

吊杆编号	吊杆截面面积 (mm <sup>2</sup> )	汽-20 级、挂车-100			公路-I 级		
		轴力 (kN)	应力 (Mpa)	安全系数	轴力 (kN)	应力 (Mpa)	安全系数
1#、13#	1432.6	953.7	665.7	2.51	1119.7	781.17	2.14
2#、12#	1432.6	1002.9	700	2.39	1176.7	821.37	2.03
3#、11#	1432.6	979.7	683.9	2.44	1141.1	796.52	2.10
4#、10#	1432.6	998.7	697.1	2.4	1160.6	810.14	2.06
5#、9#	1432.6	1020.9	712.6	2.34	1185	827.17	2.02
6#、8#	1432.6	984.6	687.3	2.43	1139	795.06	2.10
7#	1432.6	1027.3	717.1	2.33	1190.8	831.22	2.01

由吊杆承载力验算表可知，公路-I 级和汽-20 级、挂车-100 汽车荷载作用下，吊杆安全系数均小于 2.5，吊杆安全系数不满足规范要求。

#### (2) 吊杆维修方案

由于本桥为规划改扩建桥梁，更换新吊杆不仅施工难度而且造价相对较高，为保证本桥在相对短时间内的安全，本文推荐采用临时吊杆法，将每根吊杆增设 4 根 JL32 精轧螺纹钢（ $f_{pk}=785\text{MPa}$ ， $E=2.0\times 10^5\text{MPa}$ ），精轧螺纹钢上端通过刚性横梁固定在拱肋上，下端通过刚性横梁兜吊于系梁上<sup>[8-11]</sup>。临时吊杆通过施加预加力使旧吊杆承担的部分荷载转移到临时吊杆上来，提高旧吊杆的安全系数；在吊杆断裂时临时吊杆能吸收全部旧吊杆荷载，保证结构安全。临时吊杆方案如下图 4 所示。

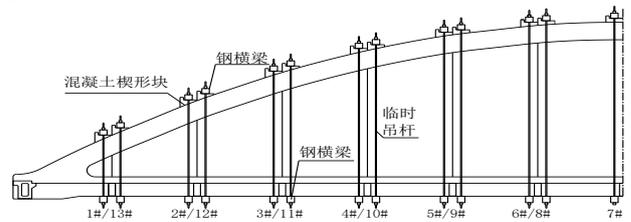


图 4 临时吊杆方案

#### (3) 临时吊杆计算分析

为确定临时吊杆张拉后和中间一组吊杆断裂后，体系应力变化规律，本文分别对每个精轧螺纹钢施加 20kn、50kn、100kn 预加荷载。分析吊杆、系梁、拱肋的内力变化规律。

##### ①吊杆内力计算结果

临时吊杆张拉后吊杆、吊杆钢管、临时吊杆应力如表

2 所示, 中间 7#吊杆断裂后吊杆、吊杆钢管、临时吊杆应力如表 3 所示。

由表 2 可知, 当临时吊杆预加荷载为 20kN、50kN 时, 吊杆应力变化较小, 分别减小 2.5%、4.6%, 吊杆钢管吸收临时吊杆荷载比例分别为 24.4%、53.0%, 当临时吊杆预加荷载在 100kN 时, 吊杆应力减小 23.6%, 吊杆钢管吸收临时吊杆荷载比例为 69.2%, 因此随吊杆预加荷载增加吊杆钢管吸收吊杆荷载能力接近限制, 部分荷载由吊杆吸收。原吊杆安全系数随临时吊杆预加荷载增加而增加。

由表 3 可知, 当中间 7#吊杆断裂后, 7#临时吊杆、吊杆钢管和临近 6#、8#吊杆应力显著增加, 其余应力基本不变。当临时吊杆预加荷载 20kN 时, 7#吊杆断裂后 6#、8#吊杆应力与临时吊杆安装前基本相等。

### ②系梁内力计算结果

临时吊杆张拉后系梁支点、1/4 桥跨、跨中内力如表 4 所示, 中间 7#吊杆断裂后系梁支点、1/4 桥跨、跨中内力如表 5 所示。

表 4 临时吊杆张拉后系梁支点、1/4 桥跨、跨中内力 (单位: kN·m)

验算位置	承载力	kN·m					
		预加荷载 20kN		预加荷载 50kN		预加荷载 100kN	
		内力	安全系数	内力	安全系数	内力	安全系数
支点	15181.3	2037.9	7.45	1918.7	7.91	1720.2	8.83
1/4 桥跨	10604.7	7114.6	1.49	7097.7	1.49	7069.6	1.50
跨中	10649.5	5585.6	1.91	5571.7	1.91	5548.5	1.92

表 2 临时吊杆张拉后吊杆、吊杆钢管、临时吊杆应力 (单位: Mpa)

吊杆编号	安装前		预加荷载 20kN			预加荷载 50kN			预加荷载 100kN		
	吊杆	吊杆钢管	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆
1#、13#	781.2	-12.9	764.2	-37.8	83.7	748.9	-50.6	128.4	595.6	-134.7	168.1
2#、12#	821.4	-15.0	800.9	-42.0	74.0	783.2	-56.9	116.7	626.1	-132.5	154.4
3#、11#	796.5	-14.2	775.7	-40.9	73.8	758.0	-55.8	115.8	607.0	-131.1	152.6
4#、10#	810.1	-12.8	789.3	-39.5	74.1	771.7	-54.2	115.9	618.4	-129.8	152.4
5#、9#	827.2	-10.7	806.3	-37.5	74.1	788.9	-52.0	115.7	633.1	-127.6	151.9
6#、8#	795.0	-12.3	774.3	-39.0	74.6	757.2	-53.3	116.6	607.8	-128.8	152.9
7#	831.2	-12.4	810.7	-38.9	72.4	794.1	-52.8	110.2	638.8	-127.8	142.2

表 3 中间 7#吊杆断裂后吊杆、吊杆钢管、临时吊杆应力 (单位: Mpa)

吊杆编号	安装前		预加荷载 20kN			预加荷载 50kN			预加荷载 100kN		
	吊杆	吊杆钢管	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆	吊杆	吊杆钢管	临时吊杆
1#、13#	781.2	-12.9	764.3	-37.7	83.7	748.9	-50.6	128.5	595.6	-134.7	168.1
2#、12#	821.4	-15.0	801.0	-41.9	74.1	783.2	-56.8	116.8	626.1	-132.4	154.4
3#、11#	796.5	-14.2	775.1	-41.3	73.3	757.4	-56.2	115.3	606.5	-131.5	152.3
4#、10#	810.1	-12.8	786.9	-41.2	72.2	769.4	-55.8	114.0	616.6	-131.7	150.8
5#、9#	827.2	-10.7	806.4	-37.4	74.3	789.0	-51.9	115.8	633.2	-127.5	151.9
6#、8#	795.0	-12.3	799.6	-21.4	96.2	782.0	-36.1	137.5	627.7	-109.2	169.2
7#	831.2	-12.4	0.0	9.8	131.6	0.0	-5.2	168.1	0.0	-74.8	187.1

由表 4 可知, 系杆安全系数均满足承载力要求, 随预加荷载增大系梁内力逐渐减小。

表 5 中间 7#吊杆断裂后系梁支点、1/4 桥跨、跨中内力 (单位: kN·m)

验算位置	承载力	预加荷载 20kN		预加荷载 50kN		预加荷载 100kN	
		内力	安全系数	内力	安全系数	内力	安全系数
支点	15181.3	2037.9	7.45	1918.4	7.91	1719.8	8.83
1/4 桥跨	10604.7	7099.3	1.49	7085.2	1.50	7057.7	1.50
跨中	10649.5	7322.0	1.45	7293.6	1.46	7246.2	1.47

由表 4 对比表 3 可知, 中间 7#吊杆断裂后邻近的跨中系梁单元内力增大, 支点、1/4 桥跨处系梁内力基本不变; 由表 4 可知, 随预加荷载增大系梁内力逐渐减小。

### ③拱肋内力计算结果

临时吊杆张拉后拱脚、1/4 拱肋、拱顶内力如表 6 所示, 中间 7#吊杆断裂后拱脚、1/4 拱肋、拱顶内力如表 7 所示。

表 6 临时吊杆张拉后拱脚、1/4 拱肋、拱顶内力 (单位: kN·m)

验算位置	承载力	预加荷载 20kN		预加荷载 50kN		预加荷载 100kN	
		内力	安全系数	内力	安全系数	内力	安全系数
拱脚	3725.9	1294.9	2.88	1438.7	2.59	1678.4	2.22
1/4 拱肋	3725.9	2544.8	1.46	2545	1.46	2545.3	1.46
拱顶	3725.9	1972.2	1.89	1957.3	1.90	1932.6	1.93

由表 6 可知, 拱肋安全系数均满足承载力要求, 拱脚

内力随预加荷载增大而增大,拱顶内力随预加荷载增大而减小,1/4拱肋处内力基本不变。

表7 中间7#吊杆断裂后拱脚、1/4拱肋、拱顶内力(单位:kN·m)

验算位置	承载力	预加荷载 20kN		预加荷载 50kN		预加荷载 100kN	
		内力	安全系数	内力	安全系数	内力	安全系数
拱脚	3725.9	1294.9	2.88	1438.7	2.59	1678.4	2.22
1/4拱肋	3725.9	2572.2	1.45	2571.8	1.45	2571.1	1.45
拱顶	3725.9	1270.4	2.93	1262.7	2.95	1249.9	2.98

由表7对比表6可知,中间7#吊杆断裂后邻近的拱顶的单元内力减小,拱脚和1/4拱肋处拱肋内力基本不变。由表7可知,拱脚内力随预加荷载增大而增大,拱顶内力随预加荷载增大而减小,1/4拱肋处内力基本不变。

以上分析可知,临时吊杆的预加荷载的大小对实施后结构安全影响较大,对于拱脚承载力不足、吊杆钢管锈蚀严重的桥梁建议采用较小的预加荷载,对于吊杆安全系数较小、系梁承载力不足的桥梁建议采用较大的预加荷载。

#### 4 已实施的类似工程

本文介绍两座已实施的类似工程分别为无锡市G312直湖港大桥和盐城市射阳河大桥,实施后的照片如图5所示。



无锡市G312直湖港大桥

盐城市射阳河大桥

图5 已实施的类似工程

#### 5 结语

综上所述,临时吊杆方案可有效增加既有吊杆安全富裕度,保证结构运营安全。桥梁设计人员应结合桥梁的实际情况,选择合适临时吊杆预加荷载。

#### 【参考文献】

[1]吴文清,余江昱.系杆拱桥吊杆的破损安全设计方法研究[J].桥梁建设,2016,46(1):35-39.  
 [2]滕军,涂俊,陈宣言,等.吊杆布置对拱桥破损安全性能的影响[J].工程抗震与加固改造,2009(3):1.  
 [3]罗向荣.某系杆拱桥新增吊杆替代旧吊杆技术研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2012(3):1.  
 [4]熊伦.某中承式钢管混凝土拱桥吊杆加固方案对比分析[J].四川建筑,2022,42(2):143-144.  
 [5]涂俊.拱桥吊杆的破损安全研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2008.  
 [6]张运清,吴军鹏,刘康,等.下承式系杆拱桥吊杆更换技术研究[J].山东交通科技,2019(3):1.  
 [7]唐建荣,周云岗,窦勇芝,等.下承式系杆拱桥吊索更换设计和施工关键技术[J].黑龙江交通科技,2018(2):1.  
 [8]李正嘉,孙广俊,李鸿晶,等.系杆拱桥吊杆更换数值模拟与方案优化[J].公路工程,2017(6):1.  
 [9]杨旺,王福敏,李琦.拱桥吊杆更换工艺及其力学特性分析[J].公路交通技术,2015(1):1.  
 作者简介:李海洋(1988-)男,研究生、硕士,毕业于石家庄铁道大学,就职于中南勘察设计院集团有限公司,目前职称工程师。