



文章编号:1671-2579(2002)02-0014-04

## Puente - Duarte 悬索桥的检测与加固

 颜 娟<sup>1</sup>, 段红波<sup>2</sup> 编译

(1 大连理工大学, 辽宁 大连 116023; 2. 大连市城建设计研究院)

**摘 要:** 介绍了 Puente - Duarte 悬索桥的检测、评估以及加固设计。该桥为双向 4 车道, 由钢桁架加劲梁和混凝土桥面板组成, 支撑在钢结构桥塔上。由于该桥的主要结构如桥塔和主缆都存在很大程度的锈蚀和破坏, 所以在加固的同时很多部分要进行更换重修。主塔通过贴补加强钢板并把一部分荷载传递到新增加的截面上来减少构件应力; 更换主缆和锚碇结构; 主跨桁架要调整线形和贴补钢板; 边跨桁架和墩柱也要做加固处理。

**关键词:** 悬索桥; 检测; 评估; 加固

### 1 概述

Puente - Duarte 桥是一座横跨奥萨马河的钢悬索桥, 奥萨马河将位于加勒比海附近的多米尼加共和国的首都城市圣多明哥分开。这座桥为双向四车道, 交通繁忙, 对该城市和国家的运输系统来说是一条非常有战略意义的交通干线, 是这个城市仅有的横跨奥萨马河的三座桥梁之一, 由于其他线路已经非常拥挤, 所以它的畅通对该城市尤为重要。1992 年迈吉尔和多

米尼加著名工程公司 SSCA 成立了一个联合机构来负责大桥的检测、评估和加固设计, 由多米尼加公共事务和交通部领导。

大桥是 1955 年由美国桥梁公司建造的, 全长 333 m, 桥面与河面距离大约 30 m, 架立在陡峭的山谷中。主跨 175.5 m, 边跨由 5 跨 31.5 m 跨径的简支桁架桥构成, 一岸三跨, 另一岸两跨。桥台和锚碇位于两岸山顶上, 桥梁钢构件均为铆钉连接, 主跨的混凝土桥面板支撑在纵向弦杆上。主跨桁架的上弦杆在桥面板之上, 桁架的竖杆和斜杆从桥面板中通过, 桁架两边的工

表 6 车辙试验结果汇总表

混合料类型	不浸水, 60℃, 0.7 MPa		
	1 h 总变形 /mm	D.S. /次·mm <sup>-1</sup>	D.S. 要求值
花岗岩 AC-20 I	5.68	1 540	> 1 500 次/mm
花岗岩 FAC-20 I	3.24	1 850	
玄武岩 SMA13 化纤	2.25	7 570	> 3 000 次/mm
玄武岩 SMA13 木纤	3.07	6 550	

### 6 小结

广州市北环高速公路水泥混凝土路面加铺沥青面层试验段于 2000 年 12 月 23 日竣工并交付使用, 开放

交通总计 180 天, 累积交通估算可达 3 000 万辆次, 行车道重车累积通过量约为 450 万辆/车道。调查结果表明, 试验段总体运行情况良好, 未见任何类型的损坏, 基本达到设计目的。目前正在继续进行室内研究, 以期得到规律性结论。

#### 参考文献:

- [1] Superpave Binder Specification and Test Methods. Canadian strategic highway research program, 1995.11.
- [2] 沈金安. 改性沥青 SMA 路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 吴旷怀. 按体积设计沥青混合料[D]. 哈尔滨建筑大学硕士论文, 1995.

收稿日期: 2001-08-16



字型截面梁通过节点板和翼缘相连。每一侧主缆由 20 根直径 55 mm 的螺旋钢丝排列而成,吊杆为单根直径 44 mm 的钢丝,塔柱高度大约 55 m,每一根塔柱由 3 块工字型钢板铆接在一起形成组合 H 型截面,索鞍固定在桥塔上,倾斜的背索直接锚固在两侧重力式

锚碇中。边跨简支梁虽然支撑在中间桥墩上但与悬索结构是分离的,边跨主桁的结构和主跨相似,但是它的横梁支撑在桁架上弦杆的上面,在两侧桥台后面是预应力混凝土引桥(图 1)。

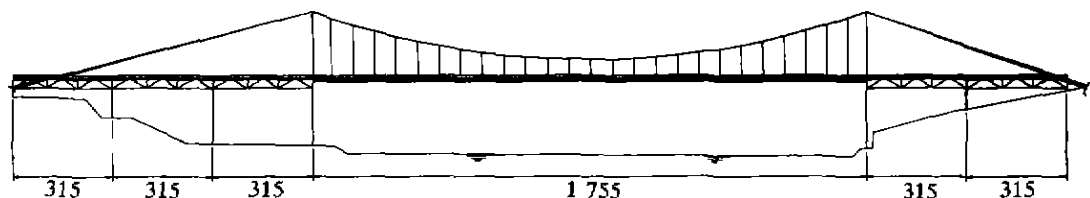


图 1 Puente - Duarte 桥型图(单位:dm)

## 2 检测

经过初步勘测之后,迈吉尔在 1992 年 11 月对 Puente - Duarte 桥进行了详细的检测工作,当地工作人员提供了特别制作的检测设备和交通管理方案。由于没有当时的施工图纸或其他记录,所以检测工作要包括测量复杂的构件尺寸、细部构造和整体几何线形以及对钢材及混凝土材料的试验,截面尺寸可以通过直接测量或超声波仪器测量得到。同时要对主缆和吊杆系统进行特殊的检测。

近年来一直没有进行过维修的这座桥问题很多,特别是桥塔、悬索结构、主跨根部和边跨的支撑体系,很多地方的防锈漆已经破坏或剥落。主塔在桥面板以下部位腐蚀非常严重,大多数用来连接三个工字型截面的铆钉头已经没有了,主跨根部和吊杆根部也都锈蚀严重,这种松散的结构在车辆通过时会发出巨响。其中一个锚碇已经变成了垃圾站,里面被各种各样的垃圾填充。经过清理后检测,这里的钢丝已经大面积的锈蚀并出现断丝。塔上索鞍处主缆也有锈蚀和断丝现象。因为一些残渣的堆积和积水,主跨桁架下弦杆也已经被严重腐蚀。两边的排水孔已经变大,当有重车通过的时候,连接纵梁和横梁之间的连接件就会吱吱作响。在塔根部两侧人行道的悬臂板也由于尿液的腐蚀而严重破坏,腹板和翼缘板的连接件已经没有了。边跨桁架和支撑墩之间的连接由摇摆支座构成,桁架下端与墩没有任何刚性的连接,所以整个结构很容易受损。在 1970 年左右桥面板更换过一次,然而,一部分顶层钢筋已经外露了。位于桥塔后面山谷一侧的 8 m 高的挡土墙面临倒塌的危险,已经存在很大的裂缝和变形。

## 3 悬索结构的特殊检测

在检测主体结构的时候就有计划要对悬索结构进行一项特殊的检测,但是直到 8 个月后,这项工作才开始进行。主索的情况非常糟,防锈漆已经失效,索上的镀锌层也已经剥落,涂在索丝中间的润滑油也没有了。这些问题使得索内部和表面锈蚀严重。在塔顶索鞍外面有的丝断裂,不过在索鞍面内,由于主缆被钢板有利的保护起来,所以情况比较好。吊杆通过减小内部应力来检测,把磁通密度测试仪放在每一个吊杆的下端来测量里面是否有断丝和隐藏的腐蚀现象,经过检测分析说明吊杆没有断丝和腐蚀。通过检测得出的结论是主缆的强度比原来大约降低了 30%。

## 4 评估结果

用 Ansys 计算程序建立了一个三维的桥梁有限元模型,这个程序可以计算索和塔的几何非线性以及在风荷载和地震荷载作用下的动力反应。先给主缆和背索一个初始索力,然后反复调整索力直到和所测量的主桥线形一致。边跨分别建立与主跨分离的 3 跨和 2 跨的结构体系,采用三维桁架单元来计入由于主塔和中间墩的横向位移所造成的影响。

评估基于 AASHTO 规范,业主想把桥梁升级到载荷 HS20-44 级,承载力要求比原来提高 25%,包括冲击荷载在内。圣多明哥地区又经常遭受狂风的袭击,所以要求桥梁的最大临界风速为 250 km/h。通过计算机计算,用结构的低阶振型(频率低于 1Hz)模态来分析由于风载引起的动力响应。一般情况下,频率在 1Hz 以内的由于风载引起的结构动力响应不是很严重,因为在这个频率范围内能量很小。设计地震荷



载取决于这个地区的地震历史,分析结果表明相对于风荷载而言,地震荷载是不严重的。

由于腐蚀和荷载的增加,主缆必须加固或更换。主塔的恒载由没有腐蚀的截面来承受,应力已经很高,所以在活载和风载作用下已经严重超应力。边墩在风载和地震荷载作用下竖杆和斜撑也已经超出应力范围。较高的墩柱在横向力作用下很不稳定,需要在根部加强。由于一条新的公路在桥下通过,所以边跨墩柱在地面高度容易受撞击。主跨纵梁和横梁的连接很薄弱,主跨桁架和部分边跨的桁架在活载作用下也已经超出允许应力值。

迈吉尔提出了一系列检测评估、可行性研究和加固建议的报告。

## 5 加固设计

桥梁的加固设计和施工由迈吉尔负责,要求在施工期间尽可能满足通车需要,至少要保证两个车道行车。在最初阶段,大家估计加固板的连接会受到空间的限制,尽管先前已经尝试着进行了一些焊接修复,但实验室对桥上样板的试验却指出这种钢材不适合焊接,因此,所有的加固工作都要依靠 HSFG 螺栓。

经过仔细研究决定彻底更换主缆,但也引出一些

问题需要解决,特别是要在更换主缆期间照常通车。迈吉尔的设计为在每一边更换主缆并将其一端锚固到位于旧锚碇后面的新锚碇上,主缆支撑在主塔上面的新索鞍上,新索鞍将跨过旧索鞍。这种方案使新旧主缆在荷载转移时能在竖向易位,吊杆通过一个连接在现有索夹上的在竖向可以调节长度的临时杆件来传递荷载,以保证旧索能够升高,同时千斤顶设备可以把新主缆拉下来。我们对现有主缆的几何线形进行了仔细的测量以便对新的主缆提供参考点。索鞍、索的端部、索夹以及吊杆下部连接装置都是在夜间测量的,以便减小温度的影响。最初的设想是当荷载传到新索时在锚碇中顶起旧索端部钢丝束,给新背索施力而释放旧背索应力。后来方案修改为向塔顶平移索鞍,通过相对新主缆把桁架位置上移来传递部分荷载,然后从索夹中分开钢丝束,允许他们从索鞍后面滑过以完成荷载传递,这样不用减小锚碇中索的应力。对新结构来说,每一根新主缆由 19 束直径 44 mm 的螺旋镀锌钢丝构成,主缆的保护措施为在钢丝制作时涂聚合亚麻子油,然后用传统的包丝技术使索截面呈圆形,最后的保护步骤为喷防锈漆以避免索在移动过程中受损。吊杆是固定在主梁上的单根直径为 48 mm 的螺旋钢丝(图 2)。

新主缆锚固到旧锚碇上是不行的,所以必须在旧

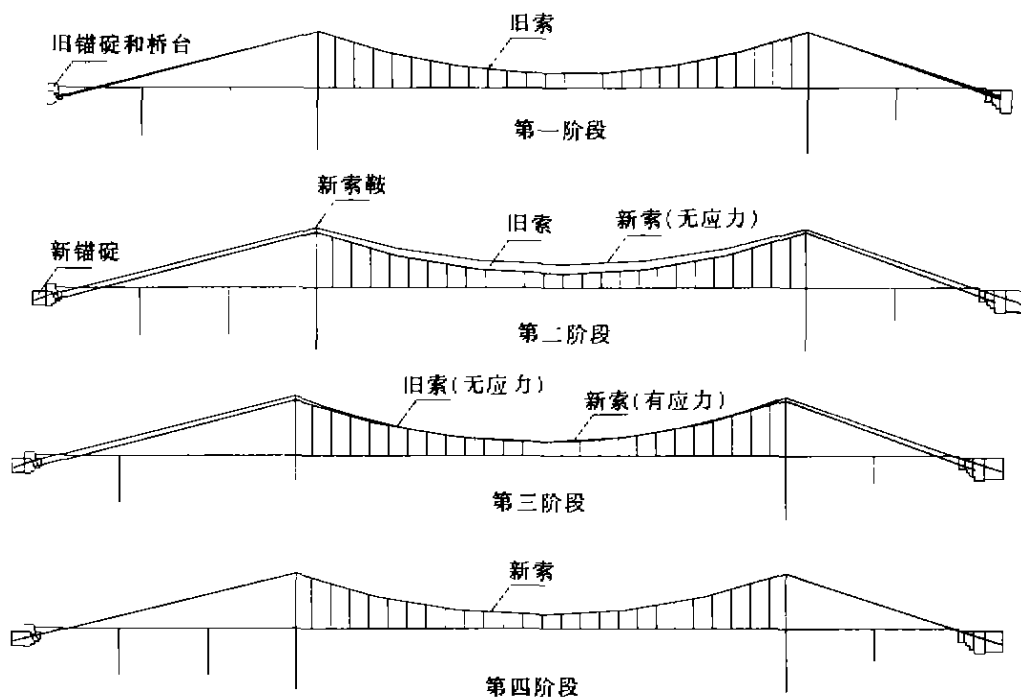


图 2 换索步骤示意图



锚碇后面建造一个新锚碇。现有锚碇由于建造在不同的位置所以尺寸各不相同。锚碇设置在两侧桥台的基础上,它们本身是一个庞大的箱子,上面有行车道,主缆锚固位置要尽量低以减小转动力矩。为了维持现有锚碇和桥台边墙的稳定,迈吉尔设计了一个分段把新旧结构连接起来的施工方法,以防止墙倒塌。

桥塔的关键是要加强它的刚度,加大受力截面面积。在两个 H 型塔柱的中空部分添加两上圆形实体截面(图 3),在高度方向通过撑杆连接起来。在腐蚀截面上安装加强板的地方,用环氧油灰来填充接缝。新的加固板要排列成需要的形状和在上紧螺栓之前环氧油灰能达到预期的强度。桥面高度处,为了避免再发生人为的腐蚀,在塔柱和主桁端部的地方安装了钢挡板和排水设施。

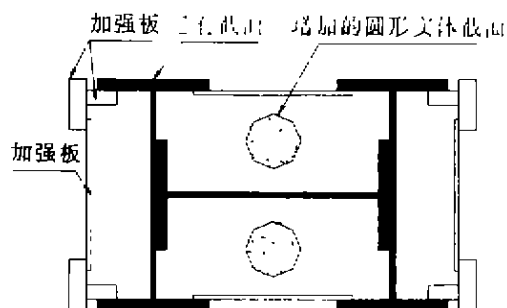


图 3 主塔加固截面

主桁的下弦杆需要彻底修复。只用贴钢板来加强主桁是不够的,这只能对减小活载应力有效而对恒载应力无用。一种新的方法既可以起到加强主桁的作用同时又能减少加强板的用量,那就是把主桁的线形调整为抛物线形状,在跨中向上调高 0.5 m。这种改变形状的方法是利用了换索时的作用结果,当在释放旧索应力之前吊起新索将会自动地使主桁曲线上升。主

跨根部严重的腐蚀使我们决定必须彻底更换根部的主塔连接部分构件,包括横梁连接、主桁端部与吊杆和塔的锚固部分。这些工作也要在允许两个车道通车的情况下进行。

边跨桁架沿着一部分上弦杆修复,主要是在上弦杆和行车道板之间增加工字钢。横撑和斜撑通过补强钢板来加强。现有的边跨支撑结构是一个非常简单的摇摆支座,下面的凸面嵌入上面的凹面只有 5 mm。除了摩擦力之外,这个摇摆支座是墩柱支撑上部桁架的唯一构件,所以支座的分离将导致灾难性的后果。桁架、墩以及支座的加固是非常复杂的,因为原来这些构件的端部节点板上就已经布满了螺栓,施工步骤是先部分拆散连接件然后用特殊形状的节点板连接,新节点板可以利用原有螺栓孔,这样的设计需要严格的施工控制。

整个钢结构要用环氧聚胺重新喷漆,还有一些其他繁杂的工作包括塔和墩的保护,人行道和人行道栏杆的维修等。在行车道板两侧安装防撞护栏既可以保护悬索结构和桁架上弦杆又可以提供交通保护。

## 6 工作进程及结果

迈吉尔最初接受工作是在 1991 年末,1992 年 11 月组织检测,1993 年秋天完成评估。施工图设计在 1995 年中期完成,具体的悬索结构检测完成于 1997 年初期,总体施工完成于 2000 年中期,花费约 2 500 万美元。材料用量为 6 375 m<sup>3</sup> 混凝土;500 t 钢筋;725 t 钢材;33 km 悬索和吊杆。施工完成后,该桥又恢复成为机场和首都之间的重要交通要道。

——编译自《The Structure Engineer》, Jan., 2000.

### ·信息·

#### 2001 年公路交通主要统计指标数据

指标名称	计算单位	2001 年	2000 年	2001 年为 2000 年 % 或增减
1. 全国公路里程	万 km	169.80	167.98	1.82
其中:高速公路	km	19 437	16 285	3.152
二级以上公路占总里程比重	%	13.4	13.1	0.3
2. 公路密度及通达情况				
以国土面积计算的公路密度	km/100 km <sup>2</sup>	17.7	17.5	0.2
以人口总数计算的公路密度	km/万人	13.1	13.0	0.1
不通公路的乡镇比重	%	0.7	0.8	-0.1
不通公路的行政村比重	%	8.2	9.2	-1.0

摘自:《中国交通报》2002.4.11