

# 葡萄牙亨里克拱桥的设计与施工

编译 陈宝春,黄卿维

(福州大学土木建筑工程学院,福建 福州 350002)

**摘要:** 介绍葡萄牙波尔图市杜罗河上几座世界闻名的拱桥,详细介绍新建成的亨里克桥。亨里克桥是一座主跨为 280 m 的上承式混凝土坦拱桥,矢跨比仅为 1/11.2。该桥采用悬臂桁架与辅助墩组合法进行施工,并利用现代化的监控设备进行施工实时监测与控制,从而保证了施工的安全。

**关键词:** 拱桥;钢筋混凝土结构;桥梁设计;桥梁施工;施工监控

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

文章编号: 1671-7767(2006)03-0001-04

## 1 葡萄牙波尔图杜罗河上的拱桥简介

葡萄牙波尔图市的杜罗(Douro)河上有几座世界闻名的拱桥,如玛利亚·皮亚(Maria Pia)桥、路易一世(Luis I)桥、阿拉比迪(Arrábida)桥以及亨里克(Infant Henrique)桥,这几座形态优美的拱桥连接着两岸的波尔图与加亚新城,与杜罗河构成了当地美丽的风景线(见图 1)。



图 1 杜罗河上的拱桥<sup>[1]</sup>

玛利亚·皮亚桥和路易一世桥为 19 世纪建成的铁拱桥,分别由 Gustave Alexandre Eiffel 和他的学生 Theophile Seyrig 设计,是典型的埃菲尔拱。玛利亚·皮亚桥(见图 2)为一座直线形单线桁式铁路桥,建于 1877 年,全长 354.4 m,桥宽 6 m。主拱为 160 m 的上承式两铰铸铁拱,拱上立柱采用截棱锥形的桁式结构,交界墩高 62.4 m。该桥使用了 115 年,直到 1991 年圣若昂(São João)桥(混凝土刚构桥)建成通车,才停止使用<sup>[2]</sup>。

路易一世大桥(见图 3)位于玛利亚·皮亚桥下游大约 500 m 处,为一座双铰锻铁公路拱桥,建于 1886 年,至今仍然保持着铁拱桥跨径第一的纪录。该桥具有双层桥面,上层桥面全长 395 m,简支于 7

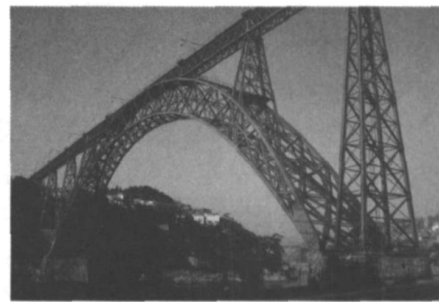


图 2 玛利亚·皮亚拱桥<sup>[3]</sup>

个墩柱之上,其中 5 个为截棱锥形锻铁墩(2 个支撑于拱上),其余 2 个为圪工桥墩;下层桥面由 4 组吊杆与主拱相联。主拱的跨径为 172 m,矢高为 44.6 m,拱肋高度从拱脚的 16.7 m 变到拱顶的 7.1 m,其竖平面与水平面均为抛物线形<sup>[2,4]</sup>。



图 3 路易一世拱桥<sup>[4]</sup>

直到 20 世纪 60 年代,为了改善杜罗河两岸间日益拥挤的交通状况,波尔图市才在杜罗河出海口处修建一座新的拱桥——阿拉比迪桥(见图 4)。该桥为一座主跨 270 m 的上承式钢筋混凝土公路拱桥,由 Edgar Cardoso 教授组织设计,于 1963 年建成。主拱圈为用混凝土横向桁架连接的双拱肋,每根拱肋为 8 m 宽的双箱结构,其上支撑着 4 根 1.2

收稿日期:2005-08-08

编者简介:陈宝春(1958-),男,教授,1982 年毕业于福州大学路桥专业,工学学士,1986 年毕业于福州大学结构工程专业,工学硕士,2003 年获日本九州大学工学博士学位。

m × 1.2 m 的矩形立柱。主梁为 12 等跨布置,每跨主梁长 21.2 m,高度从跨中处的 1.1 m 变化到支承处的 1.8 m<sup>[5]</sup>。

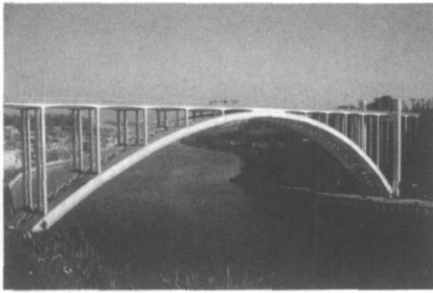


图 4 阿拉比迪拱桥<sup>[3]</sup>

## 2 亨里克桥的设计

亨里克桥坐落于路易一世桥与玛利亚·皮亚桥之间,是以引领着欧洲文化与其它几种文化融合的葡萄牙知名人士——亨里克亲王的的名字命名的,因此,在设计中要考虑新桥与旧桥之间的技术与美学景观上的相互协调。对于结构工程师来说,这些责任和要求都是严峻的挑战,在桥梁设计中需要进行认真的结构选取以及精细的设计。

该桥是以设计-建设(Design and Building,简称 DB)形式进行公开招投标文件的。设计方案选用主跨为 280 m 的钢筋混凝土坦拱一跨跨越杜罗河(见图 5),与上下游的两座铁拱桥互相衬托,和谐地融入了周围的环境之中。该桥结构没有进行任何的修饰,所有的构件要么是出于结构上的要求,要么是功能上的需要,给人以简洁明了的感觉。因此,该桥最为显著的优点就是其结构简单、几何形状规则。

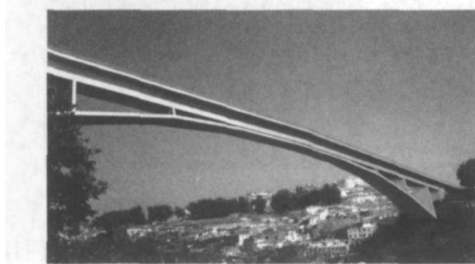


图 5 亨里克拱桥<sup>[6]</sup>

亨里克桥全长为 371 m,跨径布置为 (28 + 35 + 280 + 28) m,桥面为双向 4 车道,总宽为 20 m,主跨为 280 m,矢高为 25 m,矢跨比为 1/11.2,其拱轴线由几段直线段组合而成。主拱圈为等高变宽的箱形结构,高度仅为 1.5 m,结构异常轻巧纤细。拱圈宽度从拱脚处的 20 m 线性变化到拱顶处的 10 m,主梁为刚度非常大的预应力混凝土单室箱梁,梁高

4.5 m。在 70 m 长的跨中节段,主拱圈与主梁结合在一起,形成一个 6 m 高的箱形结构,该结构的侧面被挖成槽状,从而给人以主梁与拱圈连续的感觉。其总体布置与结构横截面详见图 6。

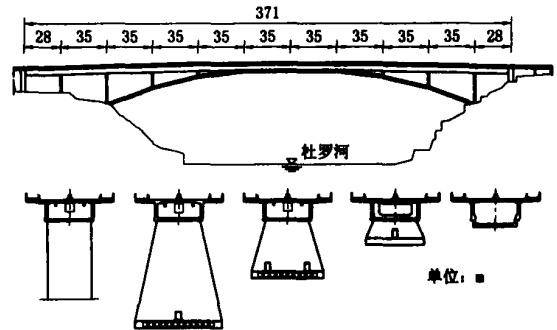


图 6 亨里克拱桥总体布置与结构横截面示意<sup>[1]</sup>

亨里克桥为上承式的刚性梁柔性拱(倒朗格尔拱)结构,该桥具有以下几个结构特点:

(1) 除了拱脚处存在着较大的弯矩外,其余截面的弯矩不大,而且拱圈轴力沿拱轴线变化也不大。

(2) 由于温度效应以及收缩徐变的影响,拱矢高会有一定的降低,而刚性梁则可以在一定程度上缓解这种趋势。

(3) 桥面结构就如同弹性支承上的连续梁,柱的间距是 35 m,刚性主梁对于抵抗竖向荷载起到了较大的作用。在永久荷载及对称活载作用下,它所承担的荷载占总荷载的 15% 左右,而在非对称活载作用下,该值可以达到 20%,这样可以避免活载作用下拱的压力线与拱轴线偏离太大,有利于结构受力。

(4) 跨中节段采用了拱圈与主梁组合的结构,截面为单室箱形式,大大减轻了结构自重,其每延米的自重仅为其它节段的一半。

(5) 在跨中节段中,主梁与主拱圈的形心存在着偏离,这种偏离在主拱圈较大的压力作用下会产生较大的局部负弯矩,在一定程度上降低了主拱圈跨中的正弯矩,不过其余节段的正弯矩会有所增加。

(6) 跨中节段组合结构存在着较高压应力,其主要部分无需施加预应力,施工比较方便。

## 3 亨里克桥的施工

柔性坦拱只有与桥道结构组合才能发挥其结构作用。因此,亨里克桥采用了桥道主梁与拱肋同时施工的悬臂桁架法,为了缩短施工中临时桁架的悬臂长度,在河的两岸各修建了一个临时墩,从而使拱桥的施工跨径从 280 m 降低到 210 m。与以往的悬

臂桁架施工不同的是,该桥作为刚梁柔拱结构,施工时先施工主梁,然后再利用支承在主梁上的挂篮进行拱圈的悬臂施工(见图7)。

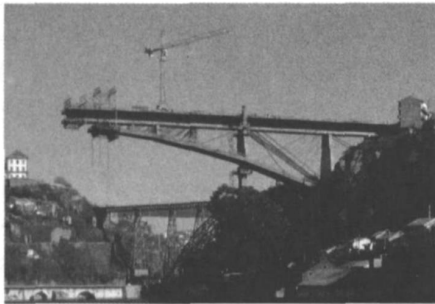


图7 亨里克拱桥悬臂施工<sup>[6]</sup>

该桥的施工步骤如下:进行边跨、辅助墩以及主拱座和交界墩的施工,并锚固背索于桥墩(台)的基础处,为主跨的悬臂施工提供抗力。利用移动挂篮进行主跨第1孔的主梁悬臂施工,通过支承在主梁上的挂篮进行主拱圈的悬臂施工。在完成第1孔的施工后,通过拱圈、主梁以及两者间增加的斜拉杆(由临时索提供)和竖向压杆(由钢筋混凝土柱及临时钢支柱来提供)组成的桁架,向跨中悬臂施工主梁与拱圈,具体施工方法同步骤。同样利用移动挂篮进行跨中节段的悬臂现浇施工,直至合龙。将背索、斜拉杆、临时立柱与辅助墩按照一定的程序拆除,完成全桥施工。亨里克拱桥施工步骤见图8。

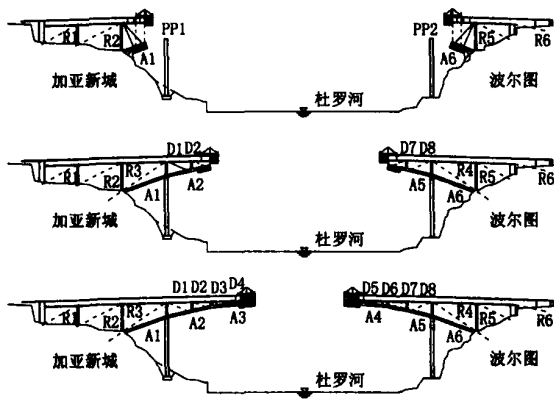


图8 亨里克拱桥施工步骤<sup>[6]</sup>

#### 4 亨里克桥的施工监控

亨里克桥跨径大、结构纤细,施工难度大。为此,为保证该桥施工的安全与顺利,进行了详细的施工设计,并安装了现代化的监控设备,以进行施工过程中的在线实时监测和干预控制。监控系统分为3个独立的部分,分别监控着岸边的花岗岩斜坡、临时的拉索以及混凝土构件。其中混凝土构件监控系统

是利用120个设置在关键截面的传感器(包括应变计、测角仪、温度传感器以及测力传感器)收集数据,通过对相关参数、可视化信号以及统计程序进行分析,系统修正起决策作用的数值模型,从而对每个施工阶段进行精准的实时监控<sup>[6]</sup>。

监控设备采用了计算机辅助控制系统,能够精确地评估不同结构类型的性能,包括拱圈、主梁与立柱(包括临时的钢立柱)主要截面的支承反力、轴力、弯矩、扭矩和温度效应,以及临时的构件(背索、斜拉杆)的轴力,从而把构件的内力控制在允许范围内。

亨里克桥的施工监控涉及到了以下几个方面:

(1) 利用传统的测力传感器监测拉索张力的成本将非常昂贵,因此通过检测拉索的振动频率来间接地获取索力<sup>[6]</sup>。

(2) 在拱圈每个节段混凝土浇筑前,通过使用两个计算机辅助的自动液压系统,使拱圈的浇筑平台的就位精度达到毫米级。

(3) 施工期间对桥梁结构的监控是由计算机中央系统进行的,它通过监测设备所收集到的信息资料进行存储、管理和分析来实现。

(4) 辅助墩顶部标高的微调及其拆除也是由在线的监测与计算机系统来控制的。

(5) 重达8000 kN的辅助墩的拆除(见图9)是通过一个旋转和转移系统来完成的。千斤顶支承着悬挂在临时墩中部的旋转轴,通过在线控制和调整千斤顶的力来实现辅助墩的拆除与转移。

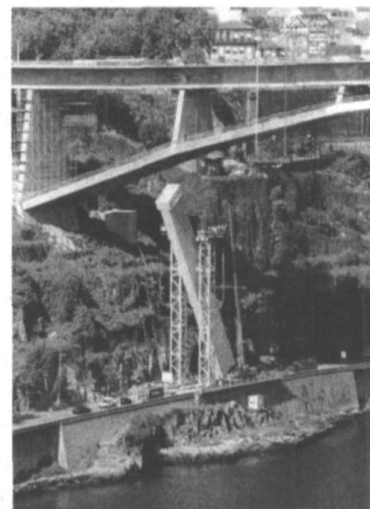


图9 辅助墩拆除<sup>[11]</sup>

#### 5 结语

经过近3年的施工,亨里克拱桥于2002年10月建成。该桥具有较高的技术含量以及良好的美学

景观效果,而且在施工上也采用了先进的施工技术和设备,主要体现在以下几个方面:

(1) 该桥为欧洲第二大跨径的拱桥,跨径达到了280 m,仅次于克罗地亚克尔克(Krk)桥(跨径为390 m)。

(2) 该桥为拱圈直线节段施工中跨径最大的拱桥,而且其构件异常纤细,拱高仅为1.5 m(约为 $L/187$ ),远远低于普通的刚性拱的拱高( $L/40 \sim L/60$ )。

(3) 在大跨径范畴内,该桥为世界上最坦的拱桥,其矢高仅为25 m,矢跨比为 $1/11.2$ 。

(4) 作为比较和评价拱桥的规模、设计和施工的复杂与难易程度的指标之一的大胆度( $L^2/f$ ),该桥达到了3 000以上,位于世界拱桥之首。

(5) 该桥采用的施工方法和施工监测监控对今后拱桥施工具有参考价值。

#### 参 考 文 献:

[1] Ant nio Ado da Fonseca, Francisco Millanes Mato. In-

fant Henrique Bridge over the River Douro, Porto[J]. Structural Engineering International, 2005, 15(2): 85 - 87.

[2] Cruz Paulo J S, Cordeiro, J M Lopes. Audacious and elegant 19th century Porto bridges[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2003, 8(4): 217 - 225.

[3] Leonardo Fernandez Troyano. Bridge Engineering - A Global Perspective[M]. Thomas Telford, 2003.

[4] Calcada R, Cunha A, Delgado R. Dynamic analysis of metallic arch railway bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(4): 214 - 222.

[5] Appleton J. Arrabida bridge- Inspection and assessment [A]. Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge[C]. Paris, France, 2001. 29 - 34.

[6] Ant nio Ado da Fonseca, Renato Bastos, lvvaro Cunha, et al. Monitoring of Temporary Cables in " Infante D. Henrique" Bridge[A]. Proceedings of the First European Workshop on Structural Health Monitoring SHM 2002[C]. Paris-Cachan, 2002.

## 欢迎订阅 2007 年度《世界桥梁》

《世界桥梁》是中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中文核心期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国期刊全文数据库全文收录期刊、中国学术期刊(光盘版)入编期刊、万方数据-数字化期刊群入网期刊、CEPS 中文电子期刊服务全文收录期刊、《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊,是国内唯一刊载世界桥梁工程的科技综合性期刊。《世界桥梁》重点突出报道世界各国桥梁工程领域的新理论、新技术、新工艺、新设备、新材料、新方法及最新科研成果。本刊已成为国内桥梁界传播世界桥梁科技最具权威性的刊物,在桥梁工程领域享有较高的知名度。

《世界桥梁》(刊号 ISSN 1671-7767/CN 42-1681/U,邮发代号 38-55)季刊(每季末月 17 日出版),大 16 开本(80 页),每册定价 8.00 元·全年 32.00 元。

全国各地邮局均可订阅,编辑部也可办理邮购。

《世界桥梁》持有广告经营许可证,代办广告设计,收费合理,时效持久,欢迎洽谈。

编辑部地址:武汉市建设大道 103 号

邮编:430034

电话:(027)83553912(编辑部),83550081(广告部)

传真:(027)83360005

E-mail: sjqlbjb@public.wh.hb.cn

sjql@ztmbec.com

《世界桥梁》编辑部

2006年9月