大跨钢桁梁桥加劲柔性拱施工阶段抗风性能

邓雄晖[1], 王玉银[2]

(1. 厦深铁路广东有限公司,518031 广东 深圳; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨)

摘　要: 为研究大跨度钢桁梁柔性拱桥在柔性拱施工阶段的抗风性能,以世界最大跨度的该类桥梁——厦深铁路榕江特大桥为例,对柔性拱施工阶段的抗风性能进行系统分析,研究柔性拱合拢点位置对拱肋抗风性能的影响. 基于分析结果开展不同抗风措施的比选和优化,并针对桥梁结构特征提出新型抗风措施. 结果表明,柔性拱施工阶段的抗风问题突出,需要采取必要的抗风措施对结构进行临时抗风防护. 本文提出的新型抗风措施(内部缆索法)效果明显,为类似工程的抗风设计提供参考.

关键词: 钢桁梁;柔性拱;铁路桥梁;抗风;施工

中图分类号: TU973　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0367 - 6234(2012)04 - 0145 - 04

Wind-resistant behavior of long-span steel truss bridge during construction of flexible arches

DENG Xiong-hui[1], WANG Yu-yin[2]

(1. Xiamen Railway Co. Ltd, 518031 Shenzhen, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To investigate the wind-resistant behavior of long-span steel truss bridge during construction of flexible arches, taking the world's longest steel truss bridge with flexible arches as an example, the influence of closure position on the wind-resistant behavior has been studied, and based on the analysis results, different wind-resistant measures are proposed and compared, and an innovative measure is proposed according to the mechanical characteristics of this bridge. The results show that the protection against wind damage should be placed in a prominent position especially during the erection of the flexible arches. The innovative measure is effective, and provides reference to similar projects.

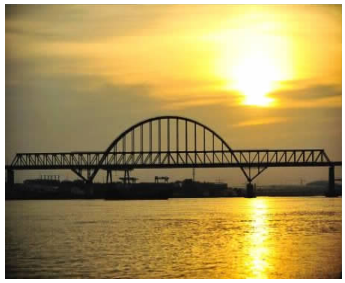
Key words: steel truss; flexible arches; railway bridge; wind-resistant; construction

近年来,高速铁路的大规模建设为钢桁梁桥[1-4]的发展带来了新的契机,同时,对其跨越能力的要求也不断增大. 为了提高跨越能力,钢桁梁桥从单纯的梁式桥向刚性加劲悬索钢桁梁桥及钢桁梁柔性拱桥等新型结构形式不断衍变[5]. 钢桁梁柔性拱桥由于同时具有钢桁梁桥与钢拱桥的优点,显著提高钢桁梁桥的跨越能力,近年来得到广泛应用. 已建成的钢桁梁柔性拱桥包括闽江特大桥(主跨 198 m)、黄河特大桥(主跨 132 m)和京沪高铁黄河大桥(主跨 168 m)等多座铁路桥梁(见图 1)[6].

厦深铁路榕江特大桥是一座在建的下承式钢桁梁柔性拱桥,跨度组合为 110 m + 220 m + 220 m + 110 m. 建成后,将成为世界上最大跨度的钢桁梁柔性拱组合桥. 钢桁梁由带竖杆 N 型三角桁架拼接而成,节间长度 11.0 m,其中边跨由 10 个节间组成,中跨由 20 个节间组成. 钢桁架节间高度和宽度均为 15.0 m,斜腹杆倾角为 53.7°,主桥立面布置如图 2 所示.

收稿日期: 2012 - 01 - 20.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178146);铁道部科技攻关重点项目(2010G004).
作者简介: 邓雄晖(1964—),男,工程师.
通讯作者: 王玉银, wangyuyin@hit.edu.cn.

(a) 闽江特大桥



(b) 黄河特大桥

(c) 京沪高铁黄河大桥

图 1　典型钢桁梁柔性拱桥

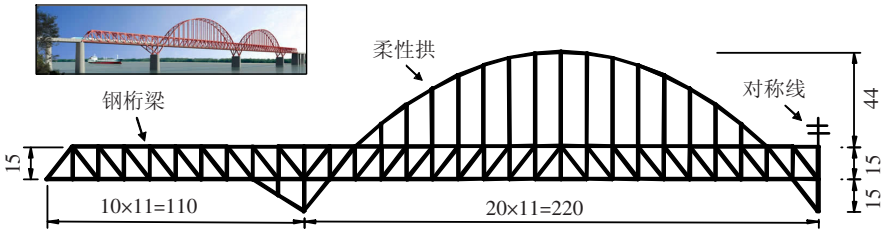


图 2　榕江桥立面布置图(单位:m)

为了增加钢桁梁的跨越能力,梁体上部采用柔性拱进行加劲以提高梁体刚度. 柔性拱按二次抛物线布置,矢高(上弦以上)44.0 m,矢跨比 1/5. 榕江桥所处场址位于台风区,该地区设计基本风压 0.95 kPa,5 ~ 10 月常有台风,风力一般在 10 级以上. 以 2009 年为例,该地区共经受大小台风及强热带风暴 22 次,最大风速达 38 m/s. 因此,榕江桥在悬臂拼装施工过程中很有可能遭受台风的袭击,尤其是柔性拱在合拢之前距水面高度最大达 97 m,施工阶段抗风问题突出,必须对拱肋的吊装方案进行充分的抗风验算并采取可行的抗风措施以保证该桥在施工阶段能够抵抗台风的侵袭[7-10].

1　有限元模型及风荷载

1.1　有限元模型

采用桥梁设计有限元软件 MIDAS (CIVIL2006)建立了榕江桥钢桁梁及上部钢拱吊装施工的有限元模型,采用梁单元建立钢桁梁的桁架杆件及拱肋杆件,采用板单元建立桥面系(见图 3). 钢桁梁桁架杆件和桥面系钢材强度等级均为 Q370qE,容许应力 220 MPa,材料弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$.

图 3　榕江特大桥有限元模型

1.2　风荷载计算

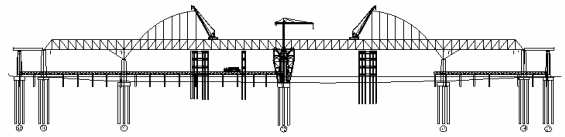
桥梁建设地点的基本风压按百年一遇基本风压 0.95 kPa 取值,根据《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1—2005)规定,风载体形系数取 1.3,风压高度变化系数取 1.37,地形、地理条件系数取 1.3,对应的设计基准风压为 2.2 kPa,相应的设计基准风速为 59.3 m/s. 根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60 - 01—2004)规定,施工阶段的设计风速应根据施工周期与台风出现频率进行折减. 根据榕江桥施工特点及施工单位要求,取风速重现期为 10 a 对应的折减系数 0.84,即施工阶段的设计风速为 49.8 m/s. 脉动风场基于蒙特卡洛(Monte - Carlo)法生成,动力时程分析中阻尼比取为 0.005.

2　拱肋合拢位置优化

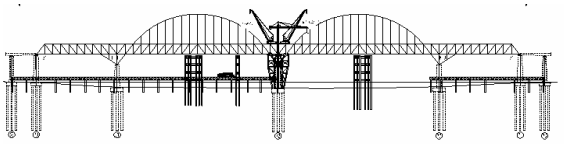
柔性钢拱外形与普通钢拱相同,但受力性能存在显著差异:在竖向平面内,钢拱承受通过吊杆(方钢管)传来的部分竖向荷载;在水平方向,钢拱与钢管吊杆共同抵抗水平荷载. 因此,柔性拱的抗风性能由钢拱和钢管吊杆的水平抗弯刚度综合决定. 这导致合拢位置的不同会显著影响结构的抗风性能,因为钢拱的面外抗弯刚度随着吊装节段的增加而降低,而钢管吊杆的抗弯刚度则在吊装至拱顶位置时最低(此时悬臂高度最大). 为了综合确定柔性拱的抗风性能,并选择合理的合拢位置,需针对合拢位置对柔性拱抗风性能的影响进行验算.

根据现场的施工条件和构件的运输条件,柔性拱采用 60 t 架梁吊机吊装施工,按 25 m 范围内起吊能力 60 t 设计. 吊机采用单桅杆方案,自质量约 200 t. 根据现场条件,选择自两边跨向中跨方向吊装柔性拱(见图 4). 合拢点自拱顶到拱脚共 9 个位置,编号如图 5 所示. 在没有任何抗风措施

情况下,拱肋在动风荷载作用下的最大应力如图 5 所示. 可以看出,此时各合拢位置对应的拱肋最大应力均已超过设计允许应力220 MPa,其中工况 4 对应的应力最大,达335 MPa. 这是因为,侧向风荷载作用下,未合拢的拱肋在竖向和水平向均为悬臂梁的受力状态,竖向弯曲应力和水平弯曲应力的耦合作用在工况 4 时达到最大值. 相反,最大应力在工况 6 以后明显降低且变化幅度趋缓. 因此,根据抗风性能和吊车施工需要,选择应力较低工况 7 位置进行拱肋合拢,如图 4(b)所示.



(a) 吊装至半跨



(b) 吊装至合拢点

图 4　柔性拱吊装方案示意图

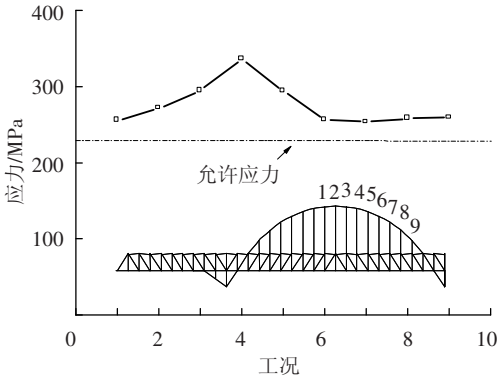


图 5　拱肋在动风荷载作用下的最大应力

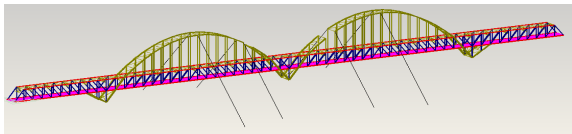
3　抗风措施比选及优化

3.1　抗风措施比选

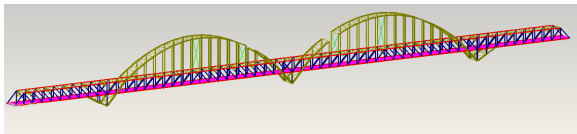
通过以上分析可知,在无任何抗风措施条件下,拱肋在动风荷载作用下的峰值应力已超过设计允许应力,因此,必须采取必要的抗风措施改善结构的受力性能. 根据该桥的结构特征及现场条件提出以下抗风措施并对其有效性进行比选:

1)外部缆索法. 常用于各类桥梁,尤其是拱桥施工阶段的抗风措施中,将钢绞线缆索一端连接于拱肋,另一端锚固于河床上,如图 6(a)所示.

2)内部缆索法. 是针对柔性拱结构特点提出的新型抗风措施,将钢绞线缆索一端连接于拱肋,另一端锚固于桥面系桁架弦杆上,如图 6(b)所示.



(a) 外部缆索法



(b) 内部缆索法

图 6　两种抗风措施示意图

采用相同截面尺寸(直径 12.7 mm)、相同布置位置(均为拱顶和合拢位置)和相同数量(20 根)的缆索对拱肋进行抗风验算,拱肋最大应力、最大变形与无抗风措施情况下的计算结果如表 1 所示. 可以看出,内部缆索法可以更加有效地改善拱肋的抗风性能,同时降低拱肋的最大应力和最大位移. 这是因为与外部缆索法相比,内部缆索法所需缆索长度较短,缆索的线刚度明显大于外部缆索,故而增加了结构的侧向抗弯刚度. 除受力性能方面的优势外,内部缆索法较外部缆索法材料用量更少,且施工方便易行,故选择该方案作为本工程的抗风措施.

表 1　抗风措施对比

抗风措施	最大应力/MPa	最大变形/cm
外部缆索法	229.5	48.6
内部缆索法	215.4	37.8
无抗风措施	253.6	69.2

3.2　抗风缆索布置位置与数量比选

上文的分析将 20 根缆索布置于同一位置,但在实际施工过程中,同一位置可布置的缆索数量有限,因此,需要对缆索的具体布置位置和数量进行优化,使结构受力合理且经济性能较好. 柔性拱在侧向风荷载作用下,决定其侧向刚度的部位主要是拱顶位置(悬臂高度最大)和合拢点位置(悬臂长度最大),因此,缆索布置于这两个区段内,如图 7 中的 a – e 吊杆之间. 具体设置了以下 4 种布置方法:

方案 1: $a + b + c + d + e = 7 + 10 + 7 + 12 + 12 = 48$; 方案 2: $a + b + c + d + e = 7 + 10 + 7 + 0 + 24 = 48$; 方案 3: $a + b + c + d + e = 8 + 8 + 8 + 0 + 24 = 48$; 方案 4: $a + b + c + d + e = 8 + 8 + 8 + 12 + 12 = 48$.

针对以上 4 种工况开展动力时程分析,计算结果见表 2. 可以看出,方案 4 对柔性拱的抗风性能改善作用最大,因此,选择该方案作为本项目的抗风布置方案.

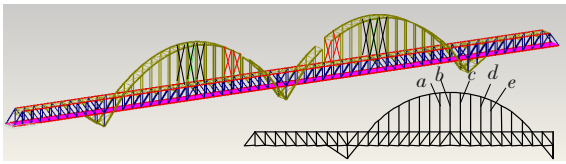


图 7　抗风缆索布置示意图

表 2　不同缆索布置方案对应风致动力响应结果

工况	最大应力/MPa	最大变形/cm
方案 1	210.6	39.0
方案 2	217.5	49.5
方案 3	215.1	48.7
方案 4	204.5	35.3

4　结　论

1)柔性拱的抗风性能由钢拱和钢管吊杆的水平抗弯刚度综合决定,这导致合拢位置的不同会显著影响结构的抗风性能:拱肋最大动应力随合拢位置的偏移(自拱顶到拱脚)先增大后减小,且在离拱顶 3 个吊杆间距时达到最大值.

2)柔性拱在未合拢前抗风能力最弱,在无任何抗风措施条件下,任何合拢位置的拱肋最大动应力均超过设计允许应力,因此,柔性拱在施工过程中必须采取抗风措施.

3)本文提出的新型抗风措施(内部缆索法)效果显著,适合作为类似工程的抗风措施.

参考文献:

[1] BIGNELL J L, M LAFAVE J, HAWKINS N M. Seismic vulnerability assessment of wall pier supported highway bridges[J]. Engineering Structures, 2005, 27 (14): 2044 – 2063.

[2] CETINKAYA T, NAKAMURA S, TAKAHASHI K. A static analysis-based method for estimating the maximum out-of-plane inelastic seismic response of steel arch bridges [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (5): 635 – 647.

[3] SPYRAKOS C C, RAFTOYIANNIS I G, ERMOPOULOS J C. Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(8): 1213 – 1225.

[4] AZIZINAMINI A. Full scale testing of old steel truss bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5/6/7/8): 843 – 858.

[5] YANG Hua, LIU Changyong, SUN Ying, *et al.* Wind suction effect on long span stiffened steel truss bridges during erection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71: 38 – 51.

[6] 王钰. 大跨度钢桁梁柔性拱组合桥施工阶段抗风性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (Sup 2): 344 – 348.

[7] SHAMA A A, MANDER J B, CHEN S S, *et al.* Ambient vibration and seismic evaluation of a cantilever truss bridge [J]. Engineering Structures, 2011, 23 (10): 1281 – 1292.

[8] MEHTA S. Evaluation and retrofit issues for steel truss bridges in Eastern united states [J]. Bridge Engineering ASCE, 2010, 15(5): 581 – 596.

[9] POPOV O A, MONOV B N, KOMOUKHOV G P, *et al.* Standard structural solutions in steel bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 46 (1/2/3): 60 – 61.

[10] BOSCH H R. Aerodynamic stability of a truss-stiffened cable-stayed bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990 (36): 1331 – 1340.

(编辑　刘　彤)