

文章编号: 1002-0268 (2009) 03-0080-07

大跨悬索桥桁架加劲梁的选型和设计

彭旺虎¹, 邵旭东¹, 胡建华²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

摘要: 归纳国内外已建和在建的桁架加劲悬索桥的一般情况, 论述了加劲梁的受力特点, 分析了主桁、横联、水平联和桥面的各可选型式的特点, 根据统计数据得到了若干设计参数的经验取值规则。分析研究表明, 在大跨度悬索桥中, 抗扭能力是桥面结构最主要的加劲要求; 加劲桁梁的高跨比与桥面设计风速的平方存在线性回归关系, 因此可以由跨径和风速参数来初步拟定桁高; 桥面设置一定透空是桁式加劲梁增进气动稳定性的有效和简便手段; 上下平联采用 K 形撑比 X 形撑获得的扭转刚度要小, 但 K 形撑不参与主桁竖弯, 受力状态相对简单。对比混凝土桥面、钢桥面和合成型钢桥面 3 种方案的技术经济特点, 合成钢桥面有助于提高加劲梁扭转性能和结构轻型化。

关键词: 桥梁工程; 桁架加劲梁; 设计参数; 扭转性能; 合成钢桥面

中图分类号: U442.5⁺4; U448.25 文献标识码: A

Type Selection and Design of Stiffening Trusses for Long-span Suspension Bridge

PENG Wanghu¹, SHAO Xudong¹, HU Jianhua²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2 Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha Hunan 410008, China)

Abstract: The status of newly constructed and in-service truss-stiffened suspension bridges was summarized. The principal working behaviors of stiffening truss were disserted. The structure features of the types of main truss, transverse bracing, lateral bracing and the deck were expounded. Based on statistic data, the criterion on detemining on the key design parameters of stiffening truss was given. It is concluded that (1) the torsion resistance is the most important stiffness requirement for the long-span suspension bridges; (2) a linear regression relationship exists between the stiffening truss height-span ratio and the square of design wind speed at deck level, therefore the truss height can be determined via parameters of the main span and wind speed; (3) air gap on deck is one of the effective and convenient methods for enhancing aerodynamic stability of truss-stiffened suspension bridge; (4) the K-shape lateral bracing is weaker than the X-shape in improving the torsion resistance of stiffening truss, but it is not involved in the main truss resisting vertical loads and maintains a simpler working state. A comparative study on technology and economy among the reinforced concrete deck, the steel deck and the integral orthotropic steel deck were finally indicated. The latter provides superior structural torsion efficiency and reduces the overall weight of the superstructure.

Key words: bridge engineering; stiffening truss; design parameter; torsion behavior; integral orthotropic steel deck

0 引言

大跨悬索桥的桥面结构有钢箱梁和钢桁梁 2 种型式, 钢桁加劲是相对更为传统的结构方式, 从一开始

就伴随现代悬索桥的发展, 加劲钢桁梁的结构型式也历经演进发展。我国重要悬索桥的建设从 20 世纪 90 年代开始, 已建的多采用扁平钢箱作为加劲梁, 不过在建的西部地区的 4 座特大跨桥梁——贵州北盘江大

收稿日期: 2007-12-24

作者简介: 彭旺虎 (1975—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为新型和大跨径桥梁. (onehoo@163.com)

桥(主跨 636 m)、坝陵河大桥(主跨 1 088 m)、湖北四渡河大桥(主跨 900 m)和湖南湘西矮寨大桥(主跨 1 176 m)均选择了桁式加劲悬索桥方案,这几座悬索桥均跨越山区深谷,桁架梁方案相比钢箱梁拥有更为灵活的杆件运输和架设工艺,因而在设计时获得青睐。

全世界已建和在建的主跨径 700 m 以上的悬索桥

有 40 余座,采用钢箱梁和桁梁的数目基本各占一半。表 1 列出了全部 21 座桁梁加劲悬索桥的有关参数,着重列出加劲桁梁的结构数据,涵盖了现有大跨度悬索桥中加劲桁梁可以采用的结构型式和设计参数。本文将围绕悬索桥桥面结构的基本受力特点,针对加劲桁梁各类结构型式,对比分析它们的特点,从中把握相关的设计准则和规律。

表 1 悬索桥加劲桁梁参数

Tab. 1 Parameters of suspension bridge stiffening trusses

序号	桥名	修建时间	桥址	主跨度/ m	桁高/ m	桁宽/ m	主缆间距/ m	节间长/ m	横联 型式	平联 型式	桥面类型	交通荷载	设计风速/ (m·s ⁻¹)
1	明石海峡桥	1998	日本	1 991	14	35.5	35.5	14.2	横联桁架	K 形桁	钢桥面	公 6	59.8 ^[1]
2	青马大桥	1997	中国	1 377	7.7	26	36	9	框架	合成桥面	合成钢桥面	公 6 铁 2	63 ^[2]
3	维拉扎诺桥	1964	美国	1 298	7.35	30.63	31.39	7.62	框架	K 形桁	钢格填 混凝土板	公 12(双层)	44.7(T) ^[3]
4	金门大桥	1937	美国	1 280	7.62	27.43	27.43	7.62	简易斜撑	X 形	RC 桥面	公 6	34 ^[4]
5	麦金内克桥	1957	美国	1 158	11.58	20.73	20.73	11.89	横联桁架	X 形	RC 桥面	公 4	276(C) ^[5]
6	坝陵河桥	在建	中国	1 088	10	28	28	10.8	横联桁架	K 形桁	钢桥面	公 4	25.9 ^[6]
7	南备赞濑户桥	1988	日本	1 100	13	30	35	13	小组桁架	K 形桁	钢桥面	公 4 铁 4	66.2 ^[1]
8	华盛顿桥	1931	美国	1 067	9.14	32.31	32.31	9.145	框架	X 形	RC 桥面	公 14(双层)	44.7(T) ^[3]
9	4 月 25 日桥	1966	葡萄牙	1 013	10.65	21	23.5	11.51	小组桁架	K 形桁	RC 桥面	公 6 铁 2	64.8(T) ^[4]
10	福斯公路桥	1964	英国	1 006	8.37	23.77	23.77	9.06	敞开桁架	X 形	钢桥面	公 4	49.2 ^[4]
11	北备赞濑户桥	1988	日本	990	13	30	35	13	小组桁架	K 形桁	钢桥面	公 4 铁 4	66.2 ^[1]
12	下津井濑户桥	1988	日本	940	13	30	35	13.1	小组桁架	K 型桁	钢桥面	公 4 铁 4	60.8 ^[1]
13	四渡河桥	在建	中国	900	6.5	26	26	6.4	横联桁架	K 形桁	RC 桥面	公 4	28.0
14	大鸣门桥	1985	日本	876	12.5	34	34	10	小组桁架	K 形桁	钢桥面	公 6	73.0 ^[1]
15	塔科玛桥	1950	美国	853	10.06	18.29	18.29	9.42	小组桁架	X 形	RC 桥面	公 4	35.3 ^[7]
16	塔科玛新桥	在建	美国	853	7.16	21.64	23.77	6.09	简易斜撑	X 形	合成钢桥面	公 3	35.3 ^[7]
17	因岛桥	1983	日本	770	9	26	26	10	横联桁架	K 形桁	钢桥面	公 4	54.9 ^[1]
18	关门桥	1973	日本	712	9	29	29	10.35	小组桁架	K 形桁	钢格填 混凝土板	公 6	54.0 ^[4]
19	安哥斯吐拉	1967	委内瑞拉	712	7.62	17.6	17.6	—	—	X 形	—	—	未知
20	奥克兰海湾桥	1936	美国	704	9.14	20.12	20.12	9.2	横向框架	K 形桁	RC 桥面	公 10(双层)	未知
21	勃朗克斯-白石桥	1939	美国	701	7.62	22.6	22.6	—	板梁	K 形桁	RC 桥面	公 4	未知

注:设计风速中带尾注(T)为试验临界风速;(C)为设计考虑的检验风速;未标识文献的风速数据来自设计图纸。

1 加劲梁的受力特点

大跨悬索桥的桥面结构(或称加劲梁)在竖向挠曲、横向挠曲和扭转 3 种受力形态上均有显著响应。结构体系对桥面结构的加劲要求中,最为值得关注是加劲梁抵抗扭转的能力,与绝大部分竖向荷载由主缆承受的情况不同,扭转荷载中会有更大比例由加

劲梁来承受。

直接的扭转荷载由车辆偏载、风荷载升力矩带来,而横向风阻力作用下由于吊索吊点与加劲梁扭心的不重合也会带来扭转效应。动力性能方面,悬索桥最为重要检验项目就是控制以体系扭转振动或弯扭耦合振动为特征的颤振现象。

现以结构自由振动时加劲梁的刚度对整体刚度的

表 2 大跨悬索桥桥例主要参数

Tab. 2 Structure parameters of long-span suspension bridge examples

桥名	跨度/m	结构体系	垂跨比	全部恒载重量/ (t·m ⁻¹)	一侧主缆 面积 /m ²	主缆间距 / m	加劲梁			
							型式	梁高 /m	竖弯惯矩 /m ⁴	扭转惯矩 /m ⁴
关门桥	178+712+ 178	三跨简支	1/10.9	24.2	0.280	29	桁梁	9	3.260	3.904
塔科玛桥	335+853+ 335	三跨简支	1/10	13.3	0.163	18.29	桁梁	10.6	5.740	1.476
虎门大桥	320+888+ 348.5	单跨	1/10.5	23.1	0.270	33.4	箱梁	3	2.052	5.155
坝陵河桥	248+ 1088+ 228	单跨	1/10.3	28.8	0.402	28	桁梁	10	7.526	5.048
江阴大桥	369+ 1385+ 309	单跨	1/10	26.1	0.451	33.5	箱梁	3.02	1.709	4.554

比值,来衡量悬索桥体系中桥面结构的加劲作用。表 2 遴选了 5 座较为典型悬索桥,列出了它们的主要设计参数,图 1 示出了它们 1 阶自振中加劲梁对结构刚

度的贡献率,桥梁整体等代刚度为相同跨径的简支梁获得相应振型的相同频率时的刚度^[8],加劲梁的扭转刚度忽略了翘曲影响。

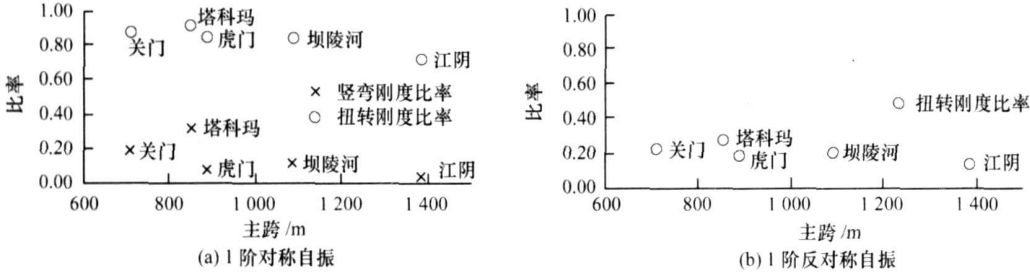


图 1 加劲梁对总刚度的贡献率

Fig 1 Ratios of stiffening girder's rigidity to whole bridge's rigidity

从图 1 中可以看出,加劲梁的刚度在 1 阶反对称扭转振动中占到了 70%~90%,而在竖弯振动中只占到总刚度的 30%以下。在 1 阶对称振动时,主缆会产生附加拉力,加劲梁对总体刚度的贡献率会比反对称振动时小些,其中扭转加劲作用在 20%左右,而竖弯加劲作用几乎可以忽略。

加劲桁梁的扭转效应最终转化成各桁片的剪接效应和弯曲效应,然后由上下弦杆承受弯曲效应,由腹杆系承担剪切效应。对于华伦桁架,竖杆对其剪切刚度没有影响,但竖杆的缺失不能形成整体的横联,对控制横截面畸变不利,因此虽然纯华伦桁架拥有更为简洁的立面外形,但其后还未见更大跨径的悬索桥采用。

因此,强化扭转是大跨度悬索桥中桥面结构的主要受力特点,扭转性能及气动稳定性是加劲梁设计的要点。与箱式加劲梁中能形成连续的扭转剪力流不同,在桁架加劲梁中,扭转效应是通过主桁、平联、横联中各杆件迂回曲折地传递的,各桁片以及桥面选择的构造型式不同,会拥有不同的受力特点和加劲效果。

主桁的总体设计参数包括桁高、节间长度、吊索间距等,其中最为重要的是桁高的确定。从表 1 可知,1 400 m 以上采用桁梁作为加劲梁的悬索桥目前仅有明石海峡大桥,因此本文以下着重讨论桥例密集的主跨 700~1 400 m 的情况。

2 加劲桁梁的构造和类型

2.1 主桁

悬索桥加劲桁梁的主桁型式均集中在平行华伦桁架,唯一的变化形式是竖杆的有无。绝大多数的主桁为带竖杆的华伦桁架,如图 2(a)、(b) 所示。少数几座如华盛顿桥、法国的 Tancarville 桥(主跨 608 m)采用的主桁形式则是如图 2(c)所示,它们的竖杆布置成间断型的,在没有吊索的位置取消竖杆。德国的 Emmerich 桥(主跨 501 m)中应用了纯华伦桁架^[5],完全取消了竖杆,见图 2(d)。

图 3 直观示出了这一跨径范围内各桥桁高的分布情况,3 座濠户内海大桥均采用相近的桁梁型式,桁高达到 13 m,为最大值;而最小的桁高为我国正在修建的四渡河桥,仅为 6.5 m。从加劲桁梁的高跨比情况来看,最小值为青马大桥,其桁高 7.7 m,主跨度是其 178 倍。高跨比最大的是日本大鸣门桥,12.5 m 的桁高是主跨度的 1/70。

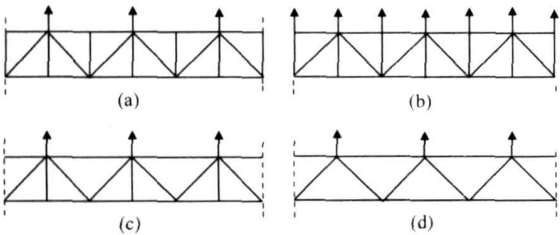


图 2 主桁型式

Fig 2 Main truss types

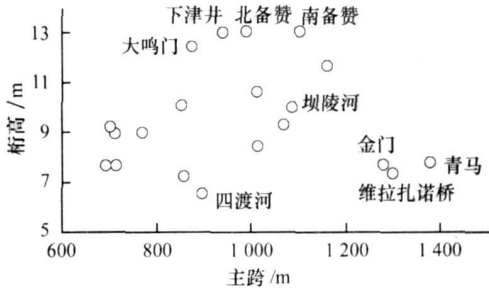


图 3 加劲桁梁高分布

Fig 3 Stiffening truss height

在悬索桥中桁高相对跨度的分布较为分散,体现不出太大的规律性。通常讨论梁的跨高比指标是从梁的承弯能力角度来考虑的,而在悬索桥体系中,以扭转控制设计的角度来看,桁高的选择与设计风速相关性

更大些, 因为扭转效应尤其是动力效应, 主要由风荷载产生。笔者以高跨比作为桥面结构强壮程度的衡量指标, 以风速的平方作为荷载(静力和动力)指标, 绘出图 4 所示的分布关系。需要说明, 未知设计风速的桥例在图中未绘出, 仅知检验风速或试验临界风速的桥例均按文献[9] 相关系数反算出准设计风速, 此外青马大桥桁梁断面很特殊, 亦未示出, 后文有述。

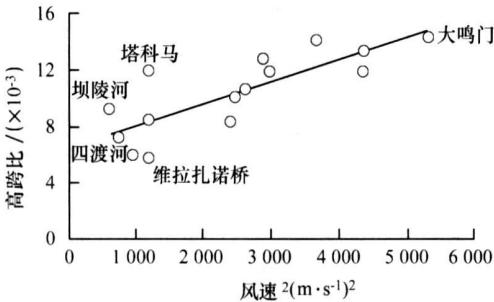


图 4 加劲桁梁高跨比与设计风速的关系

Fig 4 Relationship between ratio of stiffening truss height to span length and designed wind speed

图 4 中体现出较为明显的分布规律, 加劲梁的高跨比 h/L 基本与气动荷载指标呈现线性递增关系, 风荷载指标高, 高跨比愈大, 即要求桥面结构愈强壮。通过简单线性回归, 可以得到二者遵循如下关系:

$$\frac{h}{L} = \frac{1}{150} + \left[\frac{V_D}{820} \right]^2, \tag{1}$$

式中, V_D 为桥面处设计风速。

在悬索桥初步设计阶段, 式 (1) 可以初步拟定出符合要求的梁高参数。同时, 在满足受力和交通要求的前提下, 选择较矮的桁高可以减少材料用量, 获得更好的经济性。

图 4 中的塔科马桥和维拉扎诺桥的高跨比参数与回归线偏离略大些。前者高跨比偏大, 也正如图 1 中它的加劲梁刚度贡献率也比其他桥梁都大, 这体现了老桥垮塌后新设计矫枉过正的特点, 为获得需要的安全度其加劲梁似无必要做那么大的尺寸^[5]。后者高跨比偏小, 但其恒重是所有迄今建设的悬索桥中最重的, 因而主缆重力刚度的贡献率加大。

节间长度与桁高的比值分布在 0.8~1.17 之间, 对应斜腹杆的水平倾角在 50°~40°之间, 多数桥梁将该值取在 1.0 附近, 即对应斜杆倾角大致 45°的情况, 以便于节点的设计。吊索间距需要与节间长度相配合, 它取为节间长度的 1 倍或 2 倍, 正如图 2 (a)、(b) 示出的差别。

2.2 横截面

典型的加劲桁梁横截面型式见图 5, 其中图 5

(a) 将横联布置成桁架型式, 构造简单, 横联杆件效率高, 最易获得良好的横向剪切刚度, 因而是单层桥面的首选型式。图 5 (b) 中通过强大的上下横梁、主桁架竖杆和可能布置的中央竖杆形成横向刚性框架, 适用于双层桥面。图 5 (c) 为小组桁架型式, 将横向桁架分成上下 2 部分, 上部的小组副桁可以看作整体横向桁架的上横梁, 下部可通过变化斜杆的设置来适应于双层或单层交通。日本多座公铁两用悬索桥即采用这种横断面型式, 也有诸如关门桥和大鸣门桥等单层交通悬索桥采用。图 5 (d) 是青马大桥的加劲梁截面, 截面型式较为特殊, 其外形似箱梁, 横向刚性框架伸出主桁架外侧形成托架作为吊索吊点, 同时托架表面覆盖不锈钢薄板形成风嘴, 因此它可以像扁平箱梁一样获得良好的过流效果, 帮助结构在设计风速高达 63 m/s 的台风地带拥有足够的稳定性, 实际从受力结构来说, 仍然是钢桁架作为加劲梁^[10]。

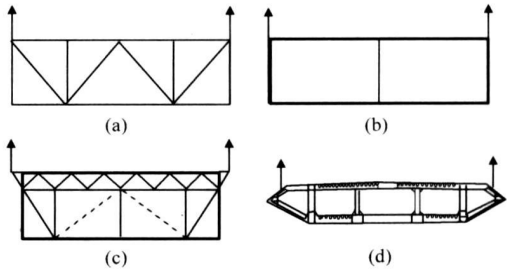


图 5 加劲桁梁横截面型式

Fig 5 Cross-section types of stiffening truss

横联的设计中, 其剪切刚度对加劲梁的扭转效应较大的影响。已有学者针对跨径组成为 (260+1 100+260) m 的三跨简支和连续的桁式加劲悬索桥的研究表明, 当换算成每延米的横联剪切刚度大于到 105 t 时, 截面畸变影响可以忽略^[11]。

桁式加劲梁横截面设计的主要参数包括横桥向的吊索间距 (即主缆间距)、桁宽的拟定和横联型式的选择。

图 6 示出了悬索桥跨宽比的分布情况, 此处桥宽取用的是主缆间距。跨宽比基本体现出随跨径增大的规律, 图中虚线为简单线性回归的趋势线, 跨度从 700~1 400 m, 跨宽比 32~44, 明石海峡大桥的跨宽比为 56, 也落在这根趋势线上。桥宽的增加可以直接降低结构的颤振稳定性指数, 这是一个有利的判定指标。不过, 直接加大桁宽虽然可以增大桁梁的扭转刚度, 但同时也增大了截面回转半径, 对提高体系的扭转频率的效果不显著。若如图 5 (c) 所示, 将吊点外移, 使桥宽 (主缆间距) 大于桁宽, 则更为有利。同时, 在满足受力和交通条件下, 取用较小的桁

宽可以获得更好的经济性。

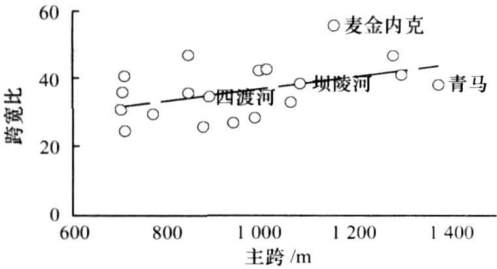


图 6 悬索桥跨宽比

Fig 6 Ratios of span length to distance between main cables

加劲桁梁的宽度除了满足车道和附属设施的空间需要外, 还需要考虑留出必要的透空区域, 作为提高抗风稳定性的构造措施。图 7 示出了桥面透空率的情况, 其中麦金内克桥和 4 月 25 日桥的数值较为特殊。麦金内克桥全部车道宽度为 16.45 m, 为桁宽的 78%, 设计者 D. B. Steinman 考虑临界风速达到过于极端的 $276 \text{ m/s}^{[3]}$, 在修建时又将中央 2 个车道做成开敞式格栅桥面, 最终桥面充实率仅为 44%。4 月 25 日桥也是由 Steinman 设计, 其加劲桁梁型式与麦金内克桥非常接近, 透空率大至 58%。该桥在 1996 年改造时, 将上层桥面拓宽占满整个桁宽, 仍保留部分车道为格栅型, 透空率减至 $1/4$, 通过风洞试验发现新的横截面仍可满足气动稳定要求^[12]。

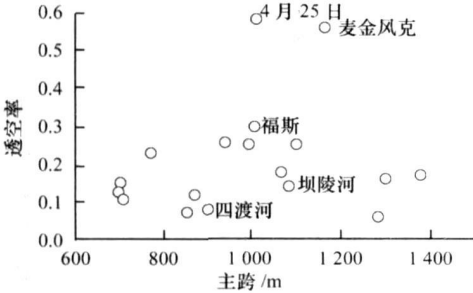


图 7 桥面透空率

Fig 7 Ratios of deck interspaces width to stiffening truss width

桥面透空是桁式加劲梁获得气动稳定性的有效手段, 相比加装风嘴、稳定板和气动翼板等导流装置, 该方法实施最为简便。比较常规的桥面透空率在 10%~25% 之间, 其值需要由结构振动特性和桥址检验风速的要求来确定, 也并非越大越好。格栅桥面显然会影响行车性能, 一般只将中央隔离带、检修道做成格栅型式。

由于桁架是若干杆件交错连接在一起形式, 实际桁高、桁宽和节间长是几个互相影响的参数, 调整其

中的一个往往需要跟着调整其他参数的取值, 以保证主桁和水平联斜杆的角度在适当的范围。

2 3 水平联

上下水平联是抵抗扭转的重要构件, 有助于形成扭转性能良好的闭合截面。早期悬索桥中对此重视不够, 如金门大桥的加劲桁梁最初就由 3 榀桁架组成——2 榀竖向主桁架和 1 榀桥面平联桁架。该桥在建立之后, 显示出非灾难性的风激振动, 1954 年大桥在竖向主桥架下弦之间添加下横撑, 改变成 4 榀桁架组成的闭合截面。

应用于加劲桁梁上的水平斜撑主要有如图 8 所示的 2 种型式: X 形撑 (或称为双华伦桁)、K 形撑。就传递扭转剪力而言, 当采用同样的杆件截面和结构尺寸时, K 形撑与 X 形撑在其平面内的抗剪刚度是不一致的, K 形撑在受到剪切力时, 竖杆参与受力变形, 其剪切刚度比 X 形撑小, 表 3 列出了按照理想桁架计算的 K 形撑和 X 形撑腹杆系数的代剪切刚度。

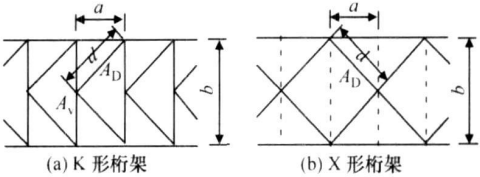


图 8 水平联型式

Fig 8 Types of lateral bracing

表 3 腹杆体系等代剪切刚度

Tab 3 Equivalent shear stiffness of web system

腹杆体系	剪切刚度
K 形撑	$K_Q = Eab^2 \frac{1}{2d^3/A_D + b^3/(4A_V)}$
X 形撑	$K_Q = Eab^2 \frac{A_D}{2d^3}$

注: 式中 E 为材料弹性模量; a 为节间距; b 为平联桁架宽度; d 为斜杆长度; A_D 为斜杆截面积; A_V 为竖杆截面积。

但是在由 2 片主桁和 2 片平联组成的类似箱形截面的加劲桁梁中, X 形撑对截面翘曲变形的约束更大, 因为它能约束两侧弦杆的相对纵向位移, 而 K 形撑则几乎无此效果。在加劲桁梁整体受到竖向弯曲时, X 形撑的平联还会参与弦杆的受力, 抵抗竖弯矩, 而 K 形撑不会参与受力。

笔者对矮寨悬索桥作了对比分析, 采用相同截面的杆件, 将水平联分别布置成 K 形撑和 X 形撑的型式, 采用 X 形撑平联的桁梁的扭转刚度比 K 形撑的高 6%, 竖弯刚度比 K 形撑的大 10%, 但同时平联杆件轴力加大。当然, 在悬索桥中并不会在意通过平联

提高加劲梁的竖弯刚度, 设计者从简化水平联的受力状态, 和简化平联中节点构造的角度, 会更乐意选择K形撑。

3 桥面型式的比较

桁式加劲梁的桥面可以选择钢筋混凝土或钢桥面, 选择钢桥面则可以选择合成型或非合成型。在合成型钢桥面板方案中, 桥面不仅作为支承局部车辆荷载的结构, 也构成主梁截面的一部分承担整体荷载。也说是说, 与只具有将车辆荷载传递到桥梁上的那种单一功能的非合成式桥面板不同, 合成型钢桥面同时起到桥面板、加劲梁和平纵联多种作用, 这样的结构构造, 有助于桥梁轻型化。

最早采用合成钢桥面的悬索桥是德国于 1965 年修建的 Emmerich 桥^[4-5]; 美国正在修建的位于塔科马桥一侧的塔科马新桥^[7]是最新的应用合成型钢桥面的工程。加拿大一座悬索桥 Lions Gate 桥在维修改造时将钢格混凝土桥面的桁梁更换为合成型钢桥面型式的加劲桁梁, 桥面拓宽为原来的一倍半, 恒载没有增加^[13]。如前所述, 青马大桥的加劲桁梁也是采用合成型钢桥面。

矮寨悬索桥现行方案采用钢筋混凝土 (RC) 桥面, 主缆的孔跨布置为 (252+1 146+126) m, 桥宽为 27 m, 加劲梁全长 986 m, 两端直接与从塔底穿过的隧道相连。笔者对比设计了钢桥面和合成钢桥面方案。各类型桥面方案的总体参数见表 4。图 9 示出了各型式横截面。其中 RC 桥面用工字形小纵梁支撑 16 cm 厚 RC 板; 合成钢桥面厚度 16 mm, U 形肋加劲, 横梁采用高度从 1.14 m 变化 1.40 m 的倒 T 形梁; 钢桥面由 10 个纵梁支承在上横梁上。表 5 列出了 3 种方案的上部结构用钢量, 其中合成钢桥面方案的材料用量最省, 同时由于主缆的拉力大幅减少, 锚碇的工程可大幅度减小。

表 4 不同桥面型式方案主要参数

Tab 4 Structure parameters of different deck types						
项目	主缆		加劲桁梁			
	垂跨比	面积/ m ²	桁高/ m	节间距/ m	吊索距/ m	全长/ m
RC 桥面	1/9.6	0.388	7.5	7.25	14.5	986
钢桥面	1/11	0.307	7.5	7.25	14.5	986
合成钢桥面	1/11	0.292	7.25	6.0	12.0	1 032

表 6 列出了 3 种方案的结构自振 1 阶频率。合成钢桥面形成连续的水平联, 提供更为强大的抗扭刚度, 结构的 1 阶扭转频率会有很大的提高, 对于控制结构

表 5 不同桥面型式的用钢量

Tab 5 Steel quantities for different deck types			
项目	主缆/t	桁梁/t	桥面/t
RC 桥面	9 991	7 414	4 790 *
钢桥面	7 980	7 414	5 900
合成钢桥面	7 600	7 010	5 990

注: 角标 * 数据中包含钢材 2 790 t 和钢筋 2 000 t。

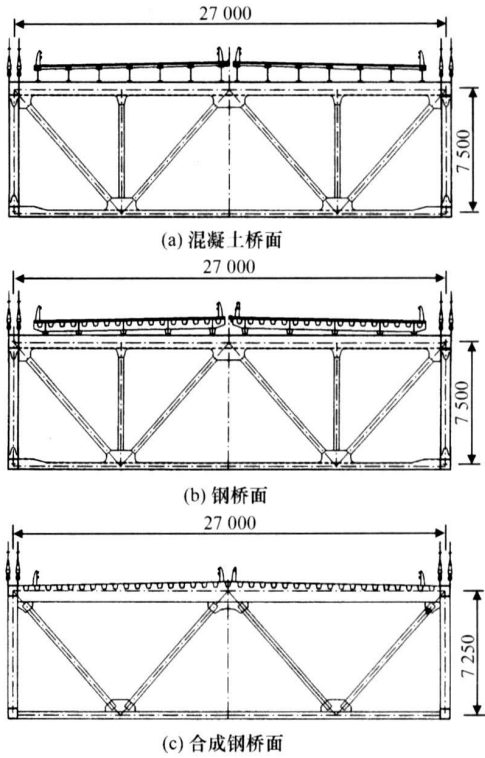


图 9 加劲桁梁横断面 (单位: mm)

Fig 9 Cross-section of stiffening truss (unit: mm)

颤振是一个有利的趋势。此外, 图 9 (c) 中拟定钢桥面与弦杆直接连结, 若桥面需要设置通风隙作为抗风手段, 可以将二者采用水平副桁结合, 中央分隔带部位亦可如此。

表 6 不同桥面型式的固有频率 (单位: Hz)

项目	1 阶对称		1 阶反对称	
	竖弯	扭转	竖弯	扭转
RC 桥面	0.151	0.255	0.108	0.296
钢桥面	0.143	0.290	0.106	0.230
合成钢桥面	0.164	0.310	0.126	0.363

另外, 与非合成型混凝土桥面方案相比较, 合成型钢桥面方案在体系形成过程中能够对桥面重量精确把握, 有利于成桥线形控制; 桥梁营运其间消除了桥面断缝可能漏水等病害风险; 由于省去了混凝土桥面板施工, 在建设工期上也略有优势。不过, 钢桥面铺装和防腐带来的维护费用将有所提高, 因而对其在矮

寨悬索桥上的应用仍持谨慎态度。

4 结论

(1) 加劲梁在大跨悬索桥中对抵抗扭转的加劲要求比抵抗竖向弯曲的加劲要求更大, 与竖向荷载的绝大部分由主缆承受的情况不同, 扭转荷载中会有更大比例由加劲梁来承受, 因此桁梁的扭转性能是设计时最为值得关注的力学指标。

(2) 加劲桁梁的主桁均采用平行华伦桁。由现有桥梁的统计数据进行回归分析, 加劲桁梁的高跨比与桥面设计风速的平方存在简单的线性递增关系, 因此可以利用风速和跨径初步确定桁高的数值, 用于桁架加劲悬索桥的初步设计。

(3) 加劲桁梁的横联的可选型式较为多样, 其设计以提供足够的剪切刚度为首要目标; 在桥面设置通风隙, 保证一定的透空率, 是提高桁架加劲悬索桥气动稳定性的有效构造措施。水平联一般采用 K 型撑或 X 形撑, 帮助形成扭转性能好的封闭截面; 采用 X 形撑, 获得的扭转刚度更大, 而 K 形撑相对受力状态更为明确简单。

(4) 合成型钢桥面与弦杆结合, 参与加劲梁整体受力, 形成了连续的水平联, 可以有效提高加劲梁的扭转刚度, 降低加劲梁重量。

参考文献

References

- [1] 秋山晴树. 耐风设计基准の变过 [J] . 桥梁と基础, 1998, 32 (8): 61—73.
AKIYAMA H. Transition of the Wind Resistant Code of Honshu Shikoku Bridge [J] . Bridge & Foundation Engineering, 1998, 32 (8): 61—73.
- [2] 刘扬. 青马大桥的空气动力稳定性 [J] . 国外桥梁, 1998, 18 (5): 29—34.
LIU Yang. Aerodynamic Stability of Tsing Ma Bridge [J] . Foreign Bridges, 1998, 18 (5): 29—34.
- [3] BRUMER M, ROTHMAN H, FIEGEN M, et al Verrazano-Narrows Bridge: Design of Superstructure [J] . ASCE's Journal of the Construction Division, 1966, 92 (2): 23—70.
- [4] 小西一郎. 钢桥: 第 5 分册 [M] . 戴振藩, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
KONISHI I. Steel Bridges: Fascicle 5 [M] . DAI Zhenfan,

translated Beijing: China Railway Publishing House, 1981.

- [5] 尼尔斯 I 吉姆辛. 缆索支承桥梁: 概念与设计 [M] . 2 版. 金增洪, 译. 北京: 人民交通出版社, 2002.
GIMSING N I. Cable Supported Bridges: Concept & Design [M] . 2nd ed JIN Zenghong, translated Beijing: China Communications Press, 2002.
- [6] 帅士章, 吴战平, 刘清. 坝陵河大桥桥区风参数初步分析与设计风速的确定 [J] . 贵州气象, 2005, 29 (2): 12—15.
SHUAI Shizhang, WU Zhanping, LIU Qing. Analysis of Wind Characteristics and Determination of Design Wind Speed for Baling River Suspension Bridge [J] . Journal of Guizhou Meteorology, 2005, 29 (2): 12—15.
- [7] SPOTH T, SERZAN K, CONDELL S The New Tacoma Narrows Suspension Bridge—Design of the Suspended Superstructure [C] // ASCE Structures 2005: Metropolis & Beyond New York: ASCE, 2005: 161—168.
- [8] 田中淳之. 吊桥上部工の设计 [J] . 桥梁と基础, 1984, 18 (8): 61—68.
TANAKA J. Design of Suspension Bridge Superstructure [J] . Bridge & Foundation Engineering, 1984, 18 (8): 61—68.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范 [S] . 北京: 人民交通出版社, 2004.
P. R. China Ministry of Communications JTG/T D60-01-2004 Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges [S] . Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] 刘正光. 香港大型悬吊体系桥梁的发展 [J] . 土木工程学报, 2005, 38 (6): 59—68.
LIU Zhengguang. The Development of Cable Supported Bridge in Hong Kong [J] . China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (6): 59—68.
- [11] 小松定夫, 西村宣男. 横荷重を受けり吊桥の変形と応力について [J] . 土木学会論文報告集, 1976, 29 (4): 55—67.
KOMATSU S, NISHIMURA N. Deformations and Stresses of Suspension Bridges under Lateral Loads [J] . Transactions of the Japan Society Civil Engineers, 1976, 29 (4): 55—67.
- [12] 严国敏. 现代悬索桥 [M] . 北京: 人民交通出版社, 2002.
YAN Guomin. Modern Suspension Bridges [M] . Beijing: China Communications Press, 2002.
- [13] BUCKLAND P G. Increasing the Load Capacity of Suspension Bridges [J] . ASCE's Journal of Bridge Engineering, 2003, 8 (5): 288—296.