

缆索承重桥的体系比选

肖汝诚, 姜 洋, 项海帆

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 从结构体系受力特点出发, 将斜拉桥和悬索桥与其他各种双塔三跨缆索承重桥进行对比分析, 并探讨在面对隧道竞争的情况下, 不同跨径范围内结构体系的合理选择; 比较了各种多塔缆索承重体系桥梁的力学与经济性能。分析表明, 对于双塔三跨的缆索承重桥, 主跨小于 1 100 m 时, 优先选择斜拉桥体系; 超过 1 100 m 时, 悬索桥将面对其余缆索体系及隧道的竞争, 可考虑锚碇和基础处水深及其他因素比较确定。

关键词: 缆索承重桥; 悬索桥; 斜拉桥; 适用跨径; 体系选择

中图分类号: U 448.25; U 448.27

文献标志码: A

Comparison Between Structural Systems of Cable Supported Bridges

XIAO Rucheng, JIANG Yang, XIANG Haifan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the force characteristics of structural system, a comparative analysis is made of the cable stayed bridge, suspension bridge and two-tower three-span cable supported bridges. In the face of the competition from tunnels, a reasonable selection of structural system within different spans is discussed. Finally, the mechanics and economic performances of multi-span cable supported bridges are compared. For two-tower three-span cable supported bridges, the analysis indicates that cable stayed bridge should be adopted within 1 100 m main span preferentially. When the span exceeds 1 100 m, the suspension bridge is facing the competition from both the cable supported bridges and tunnels. Suspension bridges can be adopted when the water depth of anchor, foundation and other factor are appropriate.

Key words: cable supported bridges; suspension bridges; cable stayed bridges; applicable span; structural system selection

德国 Leonhardt 教授曾预计斜拉桥的极限跨度可达 1 800 m^[1]。日本学者 Nagai 认为斜拉桥跨径的合理范围应在 1 400 m 以内, 跨度过大时拉索的垂度效应以及梁内轴力的 2 阶效应将使结构性能弱化, 从而影响斜拉桥的经济性^[2]。可以预期, 斜拉桥将在 200~1 400 m 的跨度范围内对其他桥型具有竞争优势。根据丹麦 Gimsing 教授的研究, 超过 1 400 m 的斜拉桥可采用部分地锚式斜拉桥, 利用较小的锚碇减小因梁中轴力过大而造成的不利影响, 从而进一步提升斜拉桥的经济跨越能力和对悬索桥的竞争力。

悬索桥的极限跨度一般认为可达 5 000~6 000 m, 但从实际航运要求看, 3 500 m 已能满足未来最大 50 万 t 巨型海轮的航行要求^[3]。根据直布罗陀海峡方案征集的结果看, 在水深 160 m 修建塔墩超深水基础的情况下, 3 500 m 将是多塔悬索桥主跨的经济跨度。然而面对技术日益成熟的隧道方案, 深水基础的巨大难度和造价, 将使大跨度悬索桥的竞争力居于下风。

由于难以克服深水锚碇基础的技术困难, 上世纪修建的许多悬索桥如英国 Severn 桥, 为了将锚碇放在岸上而被迫增加了跨度。然而, 因交通需要而稍后增建的 Severn 二桥改用了跨度较小的斜拉桥, 不仅能满足通航要求, 而且经济性能更好。随着斜拉桥跨越能力的提高, COWI 公司设计的智利 Chacao 桥已用更经济的多塔斜拉桥代替原来的多塔悬索桥方案^[4]。规划中的德国—丹麦之间的费马恩海峡桥, 为提高和隧道方案的竞争力, 也放弃了一孔 2 000 m 的悬索桥方案, 而选用四塔三跨 780 m 的桁架叠合梁斜拉桥方案, 以避免悬索桥深水锚碇^[5]。

在本世纪内, 我国将面临建设跨越渤海湾、琼州海峡、台湾海峡等工程的世界性难题, 合理选择桥型并解决好各种桥型建造中的关键问题, 不仅关系到

收稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA11Z120)

第一作者: 肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构体系、设计及计算理论。

E-mail: xiaorc@tongji.edu.cn

桥隧之争的成败,更关系到我国桥梁技术水平的提高^[6-7].本文将通过各种缆索承重体系在经济性、可施工性等方面的比较,得出各种体系的适用跨径,并探讨不同跨径范围内结构体系的合理选择.

1 斜拉桥与悬索桥基本体系的比较

基本体系是指双塔三跨布置的缆索体系桥梁,主要由4种受力构件——索、梁、塔和锚碇构成.在安全度满足要求的前提下,评判体系优劣的指标主要有:力学与经济性能、耐久性、桥跨布置灵活性、可施工性以及结构刚度等.其中,各种体系的耐久性、桥跨布置灵活性和可施工性可以体现在经济性能之中,而结构刚度则体现了体系的力学性能.在施工可以实现且结构的耐久性和刚度能够满足使用要求的情况下,选择何种桥梁体系则由其经济性能的优劣决定.

1.1 力学与经济性能

斜拉桥和悬索桥的用钢量可以通过与具有相同理论用钢量的两种等跨径纯缆索体系^[8](图1)比较来说明,图中 P 为均布荷载, h 为悬索体系的矢高.不难看出,悬索桥更接近于图1a所示的悬索体系,增设的加劲梁只起传力作用.通过对国内外主跨800 m以上钢箱梁悬索桥用钢量的统计,桥面单位面积用钢量一般为 $420\sim 580\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,在2 000 m跨度内用钢量随跨径的变化不大^[9].而斜拉桥的加劲梁则代替了纯缆索体系中的水平索受力(图1b),从而使拉索用钢量大大降低,仅相当于同跨径悬索桥的60%左右.斜拉桥跨径小于500 m时,主梁轴力对钢箱梁设计的影响不明显,主梁的多功能性提高了斜拉桥的经济性能.在小于400 m的跨径范围内,主梁可以采用预应力混凝土箱梁;在小于700 m的跨径范围内,可以采用结合梁,更能够提高其经济性能.随着跨径的进一步增加,主梁轴力迅速增加,轴力引起的应力成为加劲梁强度和稳定性的控制因素,由此增大了主梁的用钢量.如苏通大桥近塔处加劲梁用钢量超过 $800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,从而降低了斜拉桥的经济性能.

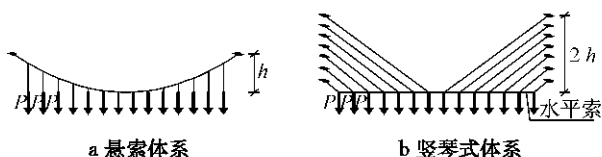


图1 具有全部受拉构件的纯缆索体系的基本形式

Fig.1 Basic forms of cable supported structural system with tension members

桥塔也是影响经济指标的重要构件.从受力上看,由于地锚悬索桥边跨主缆对塔顶的约束作用,塔顶水平变位较小,只要桥塔具有合适的柔度,便能使桥塔在较均匀的受压状态下工作.而斜拉桥则不然,塔上不平衡水平力主要由桥塔承担,并在塔内产生巨大的弯矩,桥塔必须有很好的抗弯能力,因此其横断面尺寸较悬索桥大.从桥塔的高度来看,悬索桥塔顶与跨中的高差由矢跨比确定,合理的矢跨比一般为 $1/12\sim 1/9$.而斜拉桥的高差则由最外索与主梁的夹角确定,一般最小取为 20° 左右,相当于矢跨比为 $1/6\sim 1/5$.可见,斜拉桥的塔高在相同跨度时为悬索桥塔高的1.5~2.0倍,加上其断面尺寸较悬索桥大,因此其桥塔造价将高于悬索桥桥塔.

悬索桥主缆需由庞大的锚碇锚固,在陆地上重力式锚碇的造价一般占悬索桥造价的25%左右.如果锚碇需要建在水中,则造价还将大幅增加.而斜拉桥的拉索直接分散锚固在梁上,形成自锚体系.

从耐久性方面看,悬索桥的主缆不可更换,是控制全桥寿命的关键构件,其养护就显得尤为重要,必须采用先进的除湿系统,从而增加了造价.

图2是根据我国目前已建缆索承重桥梁的材料用量和造价^[10],经过理论推导给出了在一定条件下斜拉桥和悬索桥单位桥面面积造价随跨径变化时的对比关系.由图可以看出,当锚碇条件为岸上岩石时,跨度超过900 m的悬索桥就会占优;对于岸上软土锚碇,则跨度1 100 m以上才对斜拉桥占优.随着跨度的增加,斜拉桥塔、梁的用材指标快速上升,斜拉桥和悬索桥的经济性对比将发生逆转.从这个意义上看,斜拉桥的跨度适用范围不是由其极限跨径确定的,而是由其力学和经济性能确定的.

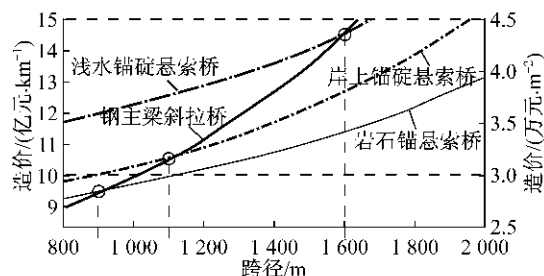


图2 斜拉桥和悬索桥单位桥面面积造价与跨径关系

Fig.2 Relationship between the span and the costs of per unit surface area of the deck of the cable stayed bridges and the suspension bridges

但若遇到软土地基或锚碇必须设置在水中的情况,悬索桥的造价将大幅增加.根据以往经验,一般浅水基础较陆上基础造价提高一倍,而深水基础造

价则成倍增加。图2中水中锚碇悬索桥的造价曲线是指水中锚碇为岸上锚碇造价两倍时的曲线,此时斜拉桥的经济性能优势范围将扩大。

1.2 桥跨布置及其他

从布跨上看,悬索桥边跨布置的灵活性大,除三跨悬索桥外,还可以布置成单跨和双跨(图3),边中跨比一般为0.2~0.5。而斜拉桥边跨要平衡中跨,边中跨比一般为0.35~0.50。对于主跨相同的两种桥型而言,斜拉桥的总长度则更长。

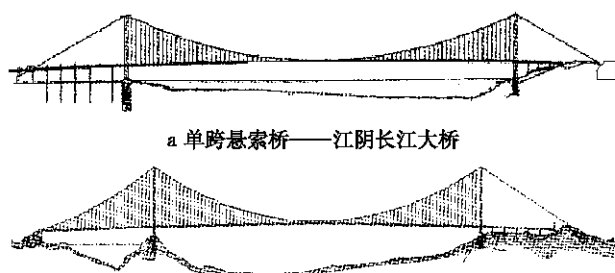


图3 悬索桥的边跨布置形式

Fig.3 Arrangement of side span for suspension bridges

当跨越同一水域时,为了避免水中锚碇,必须增大悬索桥的跨度;而斜拉桥的主跨跨度则可根据通航要求而定,相对较小。例如,1964年通车的英国Forth悬索桥,为利用地形采用隧道式锚碇,将主跨增加到1 006 m;由于交通量的增长和主缆钢丝的腐蚀问题,于2007年决定在Forth桥附近新建一座桥梁代替旧桥,新建方案采用了双向分孔通航的三塔四跨斜拉桥,跨径布置为325 m+650 m+650 m+325 m,如图4所示。斜拉桥方案既满足了通航要求,又减小了主跨跨径,从而降低了全桥造价。

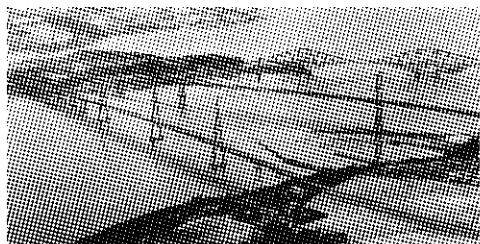


图4 Forth二桥效果图

Fig.4 The second Forth road bridge

对地质条件的适应性上,悬索桥锚碇若建在软土地基上,有时可能会因软基蠕变造成安全隐患,而且造价很高。这些也都是影响其竞争力的因素。

悬索桥是2阶稳定体系,不对称荷载作用下的变形较大,其刚度主要由恒载状态下主缆的初应力提供,与矢跨比有关。随着桥梁跨径的增大,结构自

重同步增加,因而结构刚度下降较缓慢。斜拉桥由于拉索的支承,与桥塔形成三角形稳定体系,因此主跨在千米以下时刚度大。但随着跨径的增大,长拉索的垂度效应增大,主梁因轴力增大而“软化”,斜拉桥的结构刚度快速下降。尽管如此,主跨小于1 400 m时,相同跨径下斜拉桥的刚度仍大于悬索桥。

对同跨度斜拉桥和悬索桥的4大基本构件施工特点比较如下:

(1) 锚碇。无论是隧道锚还是重力锚都是一项重大的基础工程,在地质条件好的锚位施工锚碇,技术相对成熟。但如果锚碇地处软基或只能设置在水中,沉井、沉箱等深水基础以及水面以下锚碇的施工均十分困难,将成为悬索桥建设的控制因素。而斜拉桥无需设置锚碇,对于水文和地质条件的适应性强,这是斜拉桥的一大优势。

(2) 桥塔。斜拉桥桥塔较悬索桥高,体量大,随着跨度的增加,桥塔高度增大,精确定位及保证施工期的稳定性都有一定难度。而悬索桥桥塔的施工方法与斜拉桥基本相同,但桥塔体积小。一般情况下,悬索桥的索塔施工难度略低。

(3) 悬索桥牵引索、猫道的架设和主缆的张挂及编制等与斜拉桥拉索施工均有成熟的施工工艺和方法。但斜拉桥的跨度增加时,超长索重量增加、垂度变大,增加了一定的施工难度。

(4) 悬索桥架梁不需要大型辅助施工设备,也不存在体系转换过程,施工过程中风险较小。斜拉桥一般采用悬臂法施工,随着跨度增加,悬臂长度不断增大,其施工难度和风险逐渐增加。

从施工方面看,斜拉桥上部结构施工难度一般要大于悬索桥,超大悬臂施工有一定的难度和风险;而悬索桥锚碇施工的难度较大,尤其锚碇处在软基或水中时,可能成为全桥建造的控制因素。

2 斜拉桥和悬索桥与其他缆索承重桥的比较

随着跨度的增大,要充分利用斜拉桥经济指标有利的一面,就要在结构体系上作变化,通过降低斜拉桥索塔高度,改善其受力性能来降低塔的造价。这样的体系就是部分地锚斜拉桥(图5)和斜拉悬吊协作体系(图6)。前者可有效降低主梁最大压力,后者不仅可降低主塔高度,改善主塔受力,同时可以减小主梁压力,改善总的经济性能。

2.1 结构刚度比较

部分地锚斜拉桥和斜拉悬吊协作体系的结构刚

度随自锚斜拉梁段长度与主跨比例的改变而改变。由于悬索桥与其他体系在 1 400 m 附近形成竞争,因此对主跨 1 400 m 的缆索承重桥进行分析,从而比较各种体系结构刚度的相对大小。

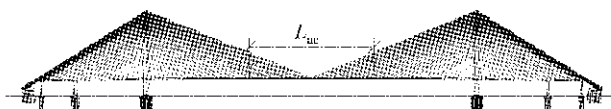


图5 部分地锚斜拉桥

Fig.5 Partially earth-anchored cable-stayed bridge

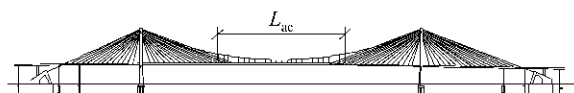


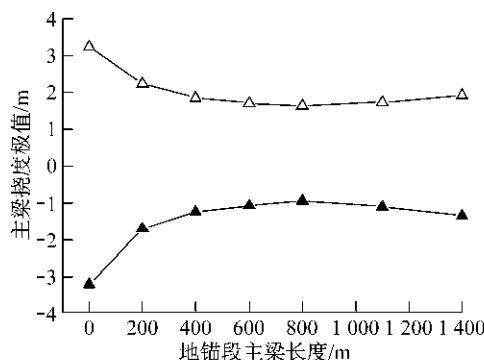
图6 斜拉悬吊协作体系

Fig.6 Combined cable-stayed and self-anchored suspension system

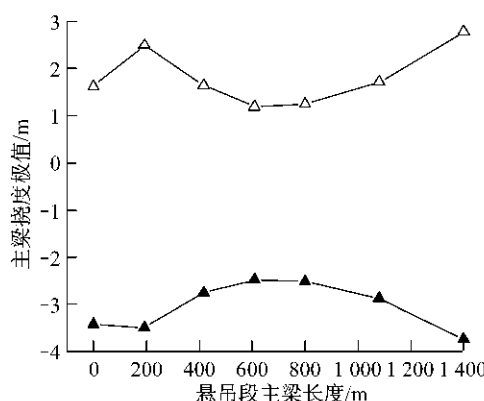
图7a为主跨 1 400 m 的部分地锚斜拉桥在活载作用下主梁挠度极值与地锚段主梁长度的关系曲线^[1]。地锚段主梁长度 L_{ac} 为 0 时,结构退化为斜拉桥;地锚段主梁长度为 1 400 m 时,结构退化为全地锚斜拉桥体系。跨中地锚段主梁自重由地锚拉索平衡,随着地锚段主梁长度的增大,减小了自锚梁段的轴向力,提高了结构刚度。但地锚段主梁长度超过 800 m 后,自锚段主梁边跨长度已经很小,结构刚度开始逐渐降低。由图可见,部分地锚斜拉桥的刚度要优于同跨径的自锚斜拉桥,当地锚段长度在 400~1 100 m 范围时,部分地锚斜拉桥的结构刚度大且变化平缓,为地锚段主梁长度的最佳取值区域。

图7b为主跨 1 400 m 的斜拉悬吊协作体系在活载作用下主梁挠度极值与悬吊段主梁长度的关系曲线。悬吊段主梁长度 L_{ac} 为 0 时,结构退化为斜拉桥;悬吊段主梁长度为 1 400 m 时,结构退化为悬索桥。如图所示,主跨同为 1 400 m 的斜拉桥和悬索桥相比较,斜拉桥的刚度更大。当悬吊长度由 0 逐渐增大到 200 m 时,由于悬吊长度很小,所需主缆直径也很小,主缆的重力刚度对于结构刚度的影响不明显,反而使得结构的总体竖向刚度下降;悬吊长度继续增加后,跨中悬吊部分的短吊索代替了自锚斜拉桥的长斜拉索,同时由于主缆具有较大的重力刚度,因此结构总体竖向刚度开始逐渐增大,主梁位移减小;随着新增吊索逐渐加长,这一优势逐渐减小,超过某一比例限值后结构总体竖向刚度反而开始下降。由图可见,当悬吊段长度在 400~1 000 m 范围时,结构刚度综合了斜拉桥刚度较大和地锚刚度较大两方面的优点取得最大值,结构刚度要优于斜拉桥和悬

索桥,为最佳协作区。



a 部分地锚斜拉桥



b 斜拉悬吊协作体系

图7 主梁挠度极值与地锚、悬吊段主梁长度关系曲线

Fig.7 Relationship curves between deflection extremum of the beam and the lengths of earth-anchor or suspension parts

2.2 经济性比较

本世纪我国的桥梁建设面临着琼州海峡、台湾海峡等跨海工程的巨大挑战,在与隧道的竞争中,选择合适的桥型组合关系到“桥隧之争”的成败。

意大利墨西拿海峡桥为主跨 3 300 m 的悬索桥,造价 30 亿美元,约合每公里 30 亿元人民币。上海崇明越江隧道为 10 亿元·km⁻¹,琼州海峡隧道预计造价为 25 亿元·km⁻¹,因此我国盾构隧道的造价约在 10~25 亿元·km⁻¹ 的范围内(视地质和水深情况而异),相对应的桥梁单位面积造价为 3~8 万元·m⁻²。根据我们的研究和预测,给出了各种斜拉和悬索体系以及混合体系的单位桥面造价与跨径关系的预测图(图8)。

由图8可以看出:

- (1) 主跨小于 1 100 m 时,斜拉桥具有优势,不同跨径范围内可采用相应的主梁结构形式,其中钢主梁斜拉桥的适用跨径为 700~1 400 m;
- (2) 跨度超过 900 m 后,岩石锚悬索桥始终占优,但此桥型对于桥位处的水文地质条件要求高,因

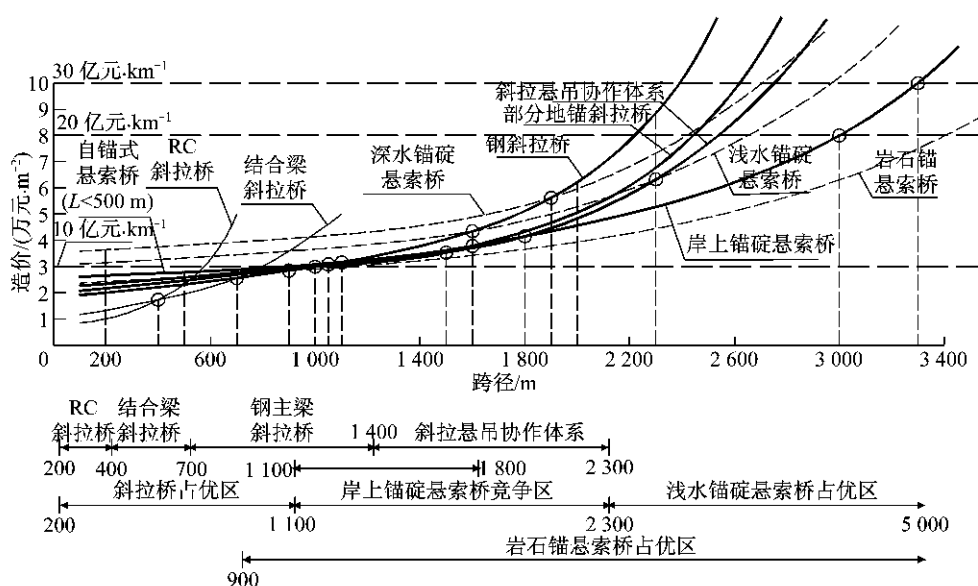


图8 各种桥型单位面积造价与跨径关系预测图

Fig.8 Relationship between the cost of per unit surface area of the deck and the span for various kinds of bridge

此适用性受到很大限制;

(3) 岸上锚碇悬索桥的适用跨径为 1 100 ~ 2 300 m,在此跨度范围内部分地锚斜拉桥和斜拉悬吊协作体系可以与之竞争,尤其部分地锚斜拉桥在 1 100~1 600 m、斜拉悬吊协作体系在 1 400~1 800 m 跨度内更具优势,而当跨度超过 1 800 m 后,岸上锚碇悬索桥占优;

(4) 跨度超过 2 300 m 时,一般是跨海工程的需要,锚碇可能设在水中,与部分地锚斜拉桥和斜拉悬吊协作体系相比,浅水锚碇悬索桥开始占据优势;

(5) 跨度超过 3 000 m 后,与隧道相比,单一主跨桥梁方案已经不占优势;

(6) 可以预计,桥隧竞争区将落在桥梁主跨约 1 000~3 000 m 的跨度范围内。

3 多塔缆索承重桥

多塔缆索承重体系包括多塔斜拉桥、多塔悬索桥和多塔协作体系等桥型。

如图 9 所示,多塔斜拉缆索体系是不稳定的,而多塔悬索缆索体系是 2 阶稳定,由于中间桥塔没有边跨主缆的锚固作用,只能通过中塔塔顶较大的水平位移,使两侧主缆的矢跨比发生变化而得到平衡。两个体系的中塔都缺少有效的水平约束,导致整体刚度不足。中塔失去缆索体系约束后,其不平衡水平力主要由塔身来承受,所以中塔塔身将承受巨大弯矩,并产生很大的塔顶位移,主梁的挠度因此增大,中塔与主梁的受力恶化。

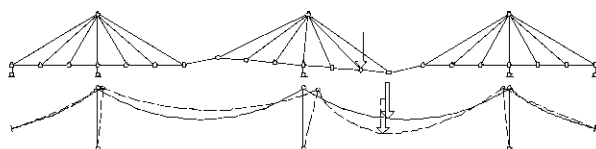


图9 多塔斜拉和多塔悬索缆索体系变形示意图

Fig.9 Deformation of multi-span cable-stayed and suspension bridges

为了提高缆索承重桥的整体刚度,常规的方法是提高中塔的纵向抗推刚度。但仅靠中塔塔柱截面增大,对于提高其抗推刚度作用不大。只有通过改变缆索系统或采用新的桥塔形式才能增强塔顶水平约束,解决结构的刚度问题。

如图 10a 所示(图中虚线为桥梁中心线,体系为对称结构),采用柱形中间塔柱,将所有塔顶用纵向水平缆索连结起来,能够获得足够的体系刚度。但随着跨径的增大,水平索的垂度效应更加明显,降低了其约束效率,因此这种方法只能用在中小跨径桥梁上。另外加设水平缆索显得较为凌乱,影响了桥梁景观,因此工程中很少应用。

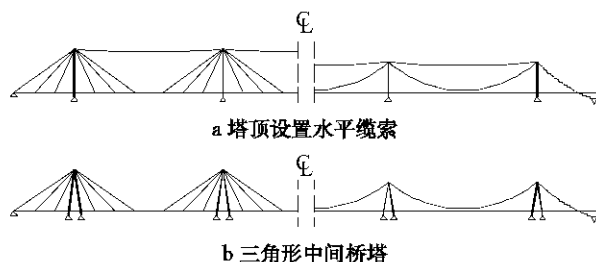


图10 提高多塔缆索体系刚度措施

Fig.10 Measures to increase the stiffness of multi-span cable supported bridges

如图 10b 所示,中间桥塔设计成三角形,这种桥塔有两根斜的塔柱,可以获得足够的水平抗推刚度。但在增加桥塔工程量的同时,也加大了桥塔基础的规模,增大了下部基础的造价。对于多塔悬索桥体系,采用完全刚性桥塔还需要采取一定的构造或体系措施来解决主缆与鞍座间的滑移问题。

综合比较以上两种方案,采用三角形桥塔方案经济性能更好。对于采用三角形结构桥塔的多塔体系,其中间塔较之传统双塔体系桥塔所需材料均要增大 1 倍以上。由前文对斜拉桥和悬索桥桥塔经济性能的比较可知,多塔斜拉桥的桥塔所需费用更多。

多跨斜拉桥是自锚体系,无需锚碇,对水文、地质条件适应性强。多跨悬索桥为地锚体系,需要设置大体积的锚碇,对于长距离跨海工程而言,需要解决深水锚碇的设计和施工问题。但多塔悬索桥随着一联跨数的增多,锚碇费用将分摊到单位桥长,其经济性能有所提高。主跨跨径越大,一联桥塔数量越多,

多塔悬索桥比多塔斜拉桥就越有优势。初步估算,三塔斜拉桥的优势跨径在 1 100 m 以内,四塔以上的优势跨径在 1 000 m 以内,具体跨径还要视桥位和布跨情况而定。

与双塔体系类似,为了充分利用斜拉桥经济指标有利的一面,可以考虑采用多塔斜拉悬吊协作体系。多塔协作体系的斜拉部分长度比多塔斜拉桥短,降低了主塔高度并减小了主梁轴向压力;与多塔悬索桥相比,仅跨中部分梁段恒载由主缆承受,减小了主缆和锚碇尺寸。因此多塔协作体系改善了这两种桥型的一些受力性能,其优势跨径在 1 100 m 以上。

为了进一步验证上述分析,对主跨跨径均为 1 000 m 的四塔五跨多塔斜拉桥、多塔悬索桥和多塔协作体系进行对比分析,各方案总体布置见图 11。各方案的中塔与边塔均为混凝土桥塔且结构形式相同,主梁采用流线型钢箱梁,全宽均为 39.1 m,主要计算参数见表 1,关键截面的受力见表 2。

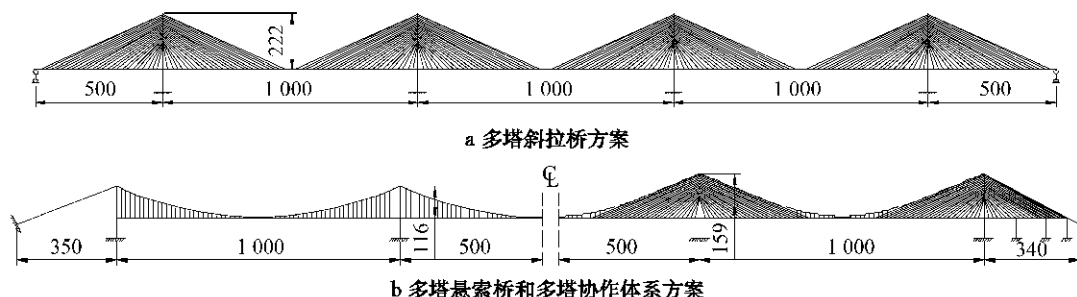


图 11 主跨 1 000 m 多塔缆索体系方案(单位:m)

Fig. 11 Proposals for multi-span cable supported bridges with main span of 1 000 m(unit:m)

表 1 主要计算参数表

Tab. 1 The main design parameters

体系	桥面以上桥塔高度/m	塔底处截面面积/m ²	塔底处截面纵桥向抗弯惯距/m ⁴	主缆钢丝面积/m ²	主梁高度/m	主梁面积/m ²	主梁抗弯惯距/m ⁴
多塔斜拉桥	222	48	1 386		4.5	2.43	7.88
多塔协作体系	159	48	1 386	0.224	4.5	2.22	7.37
多塔悬索桥	116	48	1 386	0.445	3.5	1.64	3.18

由表 2 可知,恒载下多塔协作体系的中塔塔顶主缆轴力仅为多塔悬索桥的一半,因此所需的锚碇规模和施工难度比悬索桥小,降低了主缆和锚碇的用量。但在活载作用下中塔塔顶主缆两侧轴力差比多塔悬索桥更大,两种体系均需要采取一定的构造或体系措施提高缆鞍防滑安全系数。

在恒活载共同作用下,边塔和中塔塔底轴力各体系差别不大;边塔塔底弯矩,多塔斜拉桥最大;中塔塔底弯矩,多塔悬索桥最大。活载作用下的塔顶位移,多塔斜拉桥远大于其他两种体系,多塔协作体系则与多塔悬索桥相差很小。多塔缆索体系的中塔较边塔受力恶化,多塔协作体系桥塔的受力以及塔高

均介于其他两种桥型之间。综合比较边塔与中塔的力学性能,在满足塔身应力和保持足够弯曲刚度的条件下,协作体系的桥塔材料用量最为经济。

活载作用下的跨中主梁挠度多塔悬索桥最大,而多塔斜拉桥最小;但恒活载共同作用下,多塔斜拉桥主梁的弯矩极值最大,多塔悬索桥的最小。

通过以上对比分析可知,多塔协作体系的力学性能介于多塔斜拉桥和多塔悬索桥之间,具有更好的适应性。主跨跨径在千米以下时,可与多塔斜拉桥进行力学和经济性能的比选;当主跨跨径超千米后,多塔斜拉桥逐渐失去原有的经济性,此时多塔协作体系可与多塔悬索桥进行比选。

表2 3种体系关键截面受力比较

Tab.2 Comparison of forces in the key sections among the three systems

荷载 工况	构件	内力和位移	斜拉 体系	协作 体系	悬索 体系
恒载	主缆	中塔塔顶两侧轴力/MN		90.7	190
	主缆	中塔塔顶两侧轴力差/MN 防滑系数		30.6 0.44	21.4 1.20
活载	边塔	塔顶位移/m	1.37	0.21	0.14
	中塔	塔顶位移/m	2.09	1.54	1.48
	主梁	跨中向上挠度/m	3.77	4.10	4.00
		跨中向下挠度/m	4.29	4.80	4.89
恒载 加 活载	边塔	塔底弯矩/(MN·m)	2 177	1 120	436
		塔底轴力/MN	457	597	490
	中塔	塔底弯矩/(MN·m)	3 073	4 080	4 880
		塔底轴力/MN	456	569	492
	主梁	最大弯矩/(MN·m)	395	312	236
		最小弯矩/(MN·m)	-333	-309	-123

综上所述,由于主缆不能更换、必须增加防腐费用以及水中锚碇基础技术的困难,悬索桥在千米以下已处于劣势。许多海峡工程如能避开深水区,并采用分孔航道的布置,如费马恩海峡和琼州海峡西线都可用主跨千米以内的多塔斜拉桥解决。如果公铁同时过海峡,刚度相对较大、抗风性能又好的斜拉桥将更有利,也能满足30万t海轮的通航要求,并且对隧道方案具有竞争优势。如果平均水深超过150m的海峡,如直布罗陀海峡,则只能采用跨度3000m左右的多塔连续悬索桥,但在经济性上难以和隧道匹敌。

可见,悬索桥的适用范围已受到限制,小于1000m时比不过斜拉桥;大于2000m时将面对隧道方案的有力竞争;而在1000~2000m范围内,随着水深的增加,采用部分地锚斜拉桥或斜拉悬吊协作体系,锚碇体量相对于悬索桥减小,施工难度也有所降低,因此悬索桥也不占优势。除非水中锚碇的技术有所突破,使造价降低。目前,悬索桥的使用可能只限于地形适合1孔或2孔跨越,且岸上锚碇处地质条件又有利的特殊情况,如舟山西堠门大桥。台湾海峡通道也只有采用多塔斜拉桥,以避免60~80m水深的锚碇基础,才能对隧道方案具有竞争力^[12]。

4 结论

本文从结构受力特点出发,分析了缆索承重桥的力学性能和经济性能,并就其耐久性、桥跨布置的灵活性、可施工性以及结构刚度等方面开展讨论。对于双塔三跨的缆索承重桥,得出以下主要结论:

(1) 主跨小于1100m时,斜拉桥在经济性能、结构刚度、抗风性能以及拉索可更换性等方面较其

他桥型具有优势,是优先选择的体系。

(2) 在1100~1800m跨度范围内,斜拉桥、协作体系和岸上锚碇的悬索桥这3种体系有竞争,可考虑锚碇和基础处水深及其他因素比较确定;主跨超过1800m时,悬索桥与隧道形成竞争,因此要慎用悬索桥。

(3) 对于多塔缆索承重桥,随着每联跨数增加,悬索桥的竞争力提高,其他桥型的优势跨径有所减小,但在千米以内,斜拉桥仍具有优势。

(4) 为提高缆索承重桥对隧道方案的竞争力,需要对以下两个方面进行深入研究——加强对深水基础的研发,降低各种缆索承重桥的适用跨径;对浅水锚碇的施工技术进行研究,为悬索桥和部分地锚斜拉桥及协作体系做好技术储备。

桥位地质水文条件、桥跨布置形式以及新材料的发展和施工新技术的发明,都会改变上述结论。在新一轮建桥工程中,应充分利用结构优势,扬长避短,用最合理的结构来实现新的跨越。

参考文献:

- [1] Leonhardt F, Zellner W. Past, present and future of cable-stayed bridges [M]// Cable-stayed bridges: recent developments and their future, Yokohama: Elsevier, 1991.
- [2] Nagai M, Fujino Y, Yamaguchi H, et al. Feasibility of a 1400 m span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004(9):444.
- [3] 项海帆,葛耀君. 悬索桥跨径的空气动力极限[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1):60.
XIANG Haifan, GE Yaojun. On aerodynamic limits to suspension bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1):60.

(下转第207页)