

大跨悬索桥设计若干技术问题

⑧
27-29

陆宗林

11448.252.5

【摘要】我国已开始进入建设现代化大跨径悬索桥的进程。本文结合国情和工作实践, 对大跨径悬索桥的总体布置, 大缆和桥道梁构造和工艺的若干技术问题进行了探讨。

悬索桥是最古老的桥型之一, 在上世纪因设计理论的完善, 施工技术的开发和高强钢材的生产而使它步入现代化建设桥梁的行列, 成为大跨径的唯一可选桥型。在二次大战之后, 由于斜拉桥的重生和发展, 使悬索桥在一般大跨径桥梁范围内失去竞争优势。但在超大跨径 ($l \geq 1000\text{m}$) 范围内的桥梁, 仍是非它莫属。近年来正在兴建的跨径在千米左右的悬索桥有近十座。日本明石大桥的跨径已达到1990m。拟议中的悬索桥方案的跨径已达3000~5000m。

现代悬索桥的修建, 大体可分为三个阶段。它们的结构与工艺各有特色。30~40年代, 以Golden Gate桥为代表的美国悬索桥都采用多室截面的钢塔墩和较高的桁架桥道; 采用空中纺线(AS)法施工平行镀锌钢丝的大缆。60~70年代的Seven、Lillebaelt等桥为代表的欧洲悬索桥; 采用单室钢塔或混凝土塔墩, 扁平流线型钢箱桥道, 部分桥梁索桥采用钢塔墩和桁式钢桥道, 由预制平行钢丝束(PWS)组成的大缆。

我国从80年代后期亦已进入建设悬索桥阶段, 在本世纪内将建成一批大跨径的现代化悬索桥, 其中江阴长江公路大桥的跨径为1385m, 将是我国首座跨径超千米的桥梁。在工程实践中如何结合我国实情选定跨径布置、结构构造型式和工艺是个很值得探讨的问题。

一、总体布置

悬索桥的跨径与桥位的地形直接关联。主跨

陆宗林 同济大学教授级高工

大缆的矢跨比在1:10比较合适。Golden Gate桥的1/8.9及Severn桥的1/12可视为上、下限。又受到体系特征的限制, 通常布置成对称的三跨式, 中间一大跨, 两边各一小跨。配以一对塔墩和一对锚台。行车桥面悬吊于大缆之下。边跨径与主跨径之比约在0.25~0.5之间。亦有受桥位地形影响, 采取不对称的边跨, 甚至有一边的桥的桥道用多孔小跨渡过, 不悬吊于大缆之上, 大缆直接锚于锚台。Humber桥和青马桥即如此。更有只吊中间一大跨, 两边大缆的均直接锚于锚台, 成为单跨式悬索桥。Bosporus一桥及二桥以及我国的虎门桥、西陵桥和江阴大桥均采用这种型式。塔墩和桥台间的距离约为主跨的1/5左右。值得注意的是“边跨”的大缆由于未吊桥面, 自重垂度较大。若其倾角与主跨大缆相同, 则当主跨受荷时, 边跨大缆的非弹性变形会导致主跨刚度降低和塔墩内力的增加。特别是结合我国实情塔墩采用钢筋混凝土结构较为经济, 它的刚度较大, 将更为不利。调整措施是把边跨大缆的倾角加大一些(一般增大至 $25^\circ \sim 28^\circ$), 由此增加的缆力采用在边跨大缆上加索股的方法补偿。Humber青马等桥均如是, 江阴桥亦在边跨增加了8束钢丝, 使大缆的斜角达到 26° 左右。

二、大缆

组成大缆的热镀锌高强钢丝直径的取用, 与一般预应力结构或斜拉桥的拉索钢丝的选用不一样。后者一直选用标准的整数直径, 前者却是按照设计的每根大缆的最大拉力, 考虑了安全系数

桥梁建设

($K \approx 2.5$) 及把钢丝配置成正角形的钢丝束, 将各钢丝束按一定规律排成一个整圆, 并由此反算出钢丝的直径。故一般均不是整数, 如青马桥为 $\Phi 5.35\text{mm}$ 。江阴桥原为 $\Phi 5.2\text{mm}$, 后因钢丝强度降级, 相应地调整钢丝的直径为 $\Phi 5.35\text{mm}$ 。大缆的组成仍保持为169束127丝/束不变。每束钢丝的数量可以增多, 它只受限于锚靴上容纳钢丝位置的大小。青马桥为每束386根, Severn 桥为438根/束, 而美国的 Oakland Bay 桥更用到472根/束。架设方法的选择除了设计单位指定外, 还取决于承包商的设备和技術。如青马桥原设计为平行钢丝束法, 但承包商认为改为AS法可节省数千万港元的设备费而改用AS法了。一般说来PWS法由于束股在工厂制造质量容易保证, 在现场虽需整束吊运就位, 但调整比较容易, 而AS法则恰相反, 来回纺丝比较缓慢, 受气候影响较大, 但它不需购置定尺钢丝及专用锚具, 成本较低。我国因已有制作斜拉桥拉索的经验, 故多建议采用平行钢丝束法架设大缆。

大缆是通过设置于锚台前墙(或另设桥墩)上的散索鞍座, 分散锚于锚台内的。由于施工工艺和便于养护等原因, 现在已鲜有把钢索直接穿过锚台, 锚于台后(只有小跨径悬索桥的大缆, 尚有用此方法)。通常大缆的钢丝束均不伸入混凝土锚块内, 另外用型钢延伸到锚台后面锚固, 这些型钢锚杆均需用牢固的钢质桥支架定位和表面涂有隔离剂, 使与锚块混凝土分离, 能自由伸缩。这是美、日等国家的“经典”做法。制作锚杆和支架要耗费大量钢材。到六十年代, 因预应力技术的发展, 人们就开始用预应力锚固杆, 预应力值取索力的1.25倍。Severn 桥和Lillebaelt 桥采用Dywidag 式高强粗钢筋作锚杆, 锚杆张拉以后, 再在管道里压注水泥浆, 使与锚台连成整体。它不仅因采用高强钢材节省了钢材, 它的锚固性能比型钢拉杆更为良好。正在建设中的青马

桥采用强度更高的钢绞线预应力锚碇体系。江阴桥采用预应力锚碇比用型钢锚碇节省千吨钢材。这种锚碇方法是今后大缆锚碇的发展方向。

三、桥道结构

为减轻恒载, 悬索桥均采用钢质道结构。在Tacoma 老桥发生气动性失稳事故后, 高度较低的板梁式桥道结构已被否定, 几乎成了结构高度甚大的桁式桥道的一统天下, 那些高度偏小的桁架亦均予以加高, 加固和在桥面上垂缝, 以改善气动特性。随着箱形薄壁结构的发展和制造技术的完善, 1966年建成的Severn 桥采用了带导流风嘴的扁平箱形桥道结构, 使悬索桥的桥道结构产生了划时代的变革。扁箱结构要比桁架桥道节约20%左右钢材, 它的外观轻巧且大大地降低了桥道结构高度, 在这平原地区有很大的经济意义。接着一批大跨径悬索桥, 如Lillebaelt 桥、Humber 桥、Bosporus I 桥及II桥都采用类似的箱形桥面结构, 连采用双层桥道的青马桥亦把桁架高度压到最低而在外面包裹流线形的导流设施, 外观亦是梭子开头形状。只有日本在行走铁路车辆, 对刚度要求很高的双层桥道结构, 才仍用桁架桥道。我国现在正在建设的诸桥均采用较经济的扁箱结构。

江阴桥还专门针对扁箱的端部形状和箱梁的高度作了风洞的空气动力稳定断面选型试验(这在国内还是首次)。试验结果表明, Severn、Lillebaelt 及 Greatbaelt 三桥的箱端型式, 均有足够的气动稳定性。纠正了认为江阴桥的跨径比Severn 桥大许多, 要相应地增高箱高度的不正确观点。使江阴桥的桥道仍取较经济的比较低的(3m)箱高。由于箱梁的宽高比已达12:1故风嘴尖角度的大小对气动稳定性已无多大影响, 但考虑箱梁段拼接时, 要便于操作, 此角度不宜过小, 以接近 60° 为佳。

为尽量减薄桥面沥青铺装层的厚度, 大家一

桥梁建设

致认为箱梁的顶板(即桥面板)应该采用焊接结合。但对底板的联结方式却有人认为采用高强螺栓加拼接板结合更有把握。实际上由于底板的厚度较薄,一般只有12mm,即使采用目前直径最小的高强螺栓($\Phi 22$),它的夹紧效果仍较差。加之正交异性板的纵肋在与底板焊合时,会使底板产生难于校正的马肋形焊接变形,更降低了螺栓的夹紧效果。大量的拼接及在它们上面钻制密集的螺栓孔,不仅工作量大增,亦难于确保拼接工序能顺利进行。反不如焊接快速和方便,它的工艺精度与顶板(桥道板)是一致的,亦有充分的手段来检验焊接缝的质量,是发展方向。以往桥道梁均用骑跨于一对大缆上的钢丝绳卷扬机提升就位。受条件限制,每段箱梁的重量大都控制在200吨左右,相当于一个吊索距桥道梁的重量。现在青马桥把桥道结构预先在场地上拼成72m长的梁段,重量达2000吨,装船运到桥位下,采用钢绞线千斤顶(Strand Jack)提升就位,这就大地减少了在桥位上高空拼合作业,应是一个发展方向。

四、吊索

桥道结构都用柔性钢丝绳吊在大缆下,以往都用直吊索,Sever桥为增大结构的整体刚度,改用斜吊索。实际证明有利亦有弊,在局部荷载作用下,部分吊杆会退出工作,增加了杆件的疲劳作用。故现在又回复到采用直吊杆体系。

直吊杆钢绳以往都是上跨在大缆的索夹上,两边垂下,成对地吊住桥道结构。这种结构型式是与桁架式桥道结构相适配的。两边吊索垂下,正好扣吊于桁架节点的四个角上。当改用扁箱结构的桥道后,众多的吊点反而增加了箱梁制造的困难。需作相应的变更,采用与箱梁相适配的吊索。首先索夹改水平双合结构为垂直双合结构,在下半合作下伸出一个带孔的吊板。在箱梁相应的位置焊上带孔的吊板。吊索由外包PE护套

(一如斜拉桥的斜拉索)的平行钢丝束组成,两端套上带眼孔的冷铸或热铸锚头。只要用销钉与索夹和桥道上的吊板联结即成。这种联结方法不仅构造简单,由于吊索不需环加扣在缆上,不产生附加弯应力,可相应的降低安全系数,吊索也可做得更粗壮,一般每个吊点为1~2根。外包PE防护层也要比油漆层更为耐久。吊索的制造工艺一如斜拉桥的斜拉索,在我国是非常成熟的。只是这种构造的吊索在长度上不易调节,故它的长度要计算和制造得很准确。BospruII桥就采用这种吊索结构,江阴桥亦拟参照实施。

建设大跨径现代化的悬索桥,在我国还是首次实施。没有经验可资借鉴,一切需要从零开始,技术难度是很大的,本文提及的仅是其中主要的几项技术。实际上即便小到一个支座,一条伸缩缝均有其独特的难度,更不用说桥梁的下部结构因各桥位地质情况的差异,难度就更大,大跨悬索桥不仅技术难度大,它的投资亦是很大的。更需集中技术力量,认真对待,选取先进的、符合国情经济的设计和施工方案,才能完成建设任务。

参考文献

- [1] The Second Bosphorus Bridge in Republic of Turkey
- [2] 日本本(州)一四(国)连络线(尾道一今治)大岛大桥
- [3] Motorway Bridge Across Lilliecait
- [4] 中日大跨径桥梁技术研讨会演讲文集
- [5] 严国敏 悬索桥学术讲座资料
- [6] 小西一郎 钢桥(5)
- [7] Lautau Fixed Crossing Tsing Ma Bridge etc
- [8] 江阴长江公路大桥设计文件

注:本文原载于陕西土木建筑学会、陕西省公路学会、柳州市建筑机械总厂2000年3月主办的“预应力技术发展与应用研讨会”《论文集》