

大跨度索桥的技术现状及发展趋势

Niels J GINSING

丹麦技术大学 教授

概 述

大跨度索桥的鼎盛时期始于 20 世纪末。目前的桥梁技术已发展到能较好地解决现存问题,但也面临着挑战。如果桥梁跨度不断增长的趋势持续到下一世纪,则要求改进现有技术,以确保桥梁的可靠性、耐久性和施工简易性。

I. 前言

90 年代,大跨度索桥工程领域取得了显著的发展,表 1 和表 2 分别列出了 10 座最长的斜拉桥和悬索桥。从表中看到,所列的斜拉桥均在 90 年代建成,同期建成的悬索桥有 5 座,其中 2 座是 20 世纪桥梁史上跨度最大的。

尽管仍存在单索振问题的耐久性问题,这些大跨度桥梁工程取得的成绩清楚表明,索桥的建设是安全可靠的,而且不断改进的设计、制造和施工方法,使结构性能进一步改善,工程造价进一步降低。

随着跨度不断增加,桥梁的宽跨比将不断减小,对于斜拉桥而言这将给常用的单向悬臂架施工增加难度。因此桥梁整体设计要有所改进以获得更可靠的方法并确保施工安全性和建成后的使用可靠性。

跨度的增加引起拉索自由段垂度的显著增加,从而降低了单索就振性能。这消除了跨度增加带来的负面影响,可以考虑采用由主拉索和辅助强索组成的较可靠的拉索系统。

拉索的增长将使拉索的制造、运输和安装架设难度加大,因此对拉索的改进迫在眉睫。同样,拉索的防腐和拉索的表面型式(以抑制风雨激振)也需进一步改进。

桁架仍被多数大跨度双层面结构悬索桥采用。最新的应用实例是在建中的丹麦和瑞典间的 Øresund 跨海大桥,490m 的斜拉桥跨度使该桥成为最长的公路—铁路两用斜拉桥。

表 1 20 世纪 10 座最长的斜拉桥

序号	名称	跨度	类型	国家	年份
1	Tatar 桥	890m	公路桥	日本	1999
2	诺曼底桥	856m	公路桥	法国	1995
3	青州闽江桥	605m	公路桥	中国	1996
4	杨浦桥	602m	公路桥	中国	1993
5	Meiko chuo 桥	590m	公路桥	日本	1997
6	徐浦桥	590m	公路桥	中国	1996
7	Skarnsund 桥	530m	公路桥	挪威	1991
8	Tsurumi 航道桥	510m	公路桥	日本	1994
9	Øresund 桥	490m	公路/铁路桥	丹麦/瑞典	2000
10	Lguchi 桥	490m	公路桥	日本	1991

表 2 20 世 10 座最长的悬索桥

序号	名称	跨度	类型	国家	年份
1	明石大桥	1991m	公路桥	日本	1990
2	Storebaelt 东部桥	1624m	公路桥	丹麦	1998
3	Humber 桥	1401m	公路桥	英国	1981
4	江阴桥	1382m	公路桥	中国	1998
5	青马大桥	1377m	公路—铁路桥	香港	1997
6	Verrazano 奈洛斯海峡大桥	1298m	公路桥	美国	1964
7	金门大桥	1280m	公路桥	美国	1937
8	Hoga Kusten 桥	1210m	公路桥	瑞典	1997
9	Mackinac 桥	1158m	公路桥	美国	1959
10	Minami Bisan Seto 桥	1100m	公路—铁路桥	日本	1988

II. 悬索桥

在 20 世纪的头 30 年时间里,悬索桥的应用取得了显著的发展,其跨度从 Brooklyn 桥的 483m 增加到金门大桥的 1280m,跨度增长比大于 2.50。在随后的 61 年中,从金门大桥到明石大桥,其跨度增长比仅约为 1.6。

在 20 世纪,悬索桥的主要结构没有显著变化;其主要形式还是在—对单(双)抛物线形主缆端部用锚碇锚固,并通过吊杆承担整桥面(或仅为主跨)承重,两个索面通常垂直安置于桥面侧缘上方,桥塔由两个垂直(准垂直)的梁柱组成,梁柱间用撑杆或用对角拉杆连接。



图 1 明石大桥

20 世纪悬索桥最重要的变革无疑是用流线型薄壁箱梁取代了最初为解决空气动力稳定性问题的庞大笨重的桁架。流线型箱梁由英国工程师设计,最早应用于 60 年代初建造的 Severn 桥,见图 2。流线型箱梁的主要特点是重量轻、制造简便、维护费用低。特别是后期,在流线型薄壁箱梁内部安装空气干燥装置,可起到防腐作用,该方法始用于 1970 年建造的 Lillebaelt 悬索桥。

传统的 3 跨箱梁悬索桥被桥塔处的伸缩缝

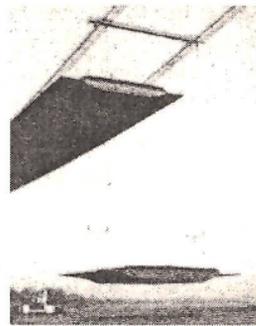


图 2 1964 年施工中的 Severn 桥

分隔开,这样,两端锚碇之间的全部跨度实际上被分成三段简支架。当然,有些工程方案用全

跨连续箱梁取代了 3 跨箱梁方案。连续箱梁的应用始于 1959 年建造的 Tancarville 桥,之后,葡萄牙的 Tagus 河桥及日本的 Bisan Seto 桥也分别采用该型式,采用连续箱梁可以消除因在桥塔处安置伸缩缝所造成的较大偏转角——这是影响上述桥梁原计划通过高速火车的重要因素。

连续箱梁整桥挠度大,因为刚性垂直支撑以及缆索挠曲导致严重变形,桥塔附近区域形成高应力区。因此当时 Bisan Seto 桥的双层桁架采用屈服应力为 700MPa 的高强钢作为加劲桁架是很有必要的。

继 Severn 桥和 Lillenelt 桥应用流线型箱梁之后,许多著名的悬索桥也采用了该型式,如土耳其两座跨越 Bosporns 海峡的大桥,英国的 Humber 桥,日本的 Ohshima 桥和 Karushima 桥,瑞典的 Hoga Kusten 桥,中国江阴大桥,最典型代表是丹麦的 Storebaelt 东部桥,其主跨为 1624m,见图 3。

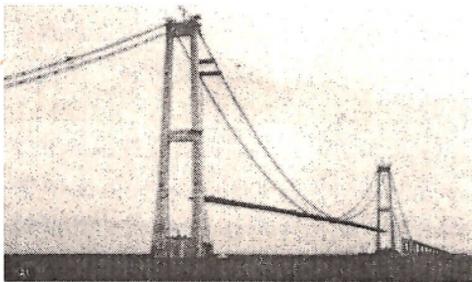


图 3 Storebaelt 东部桥

Storebaelt 东部桥的箱梁从一端锚碇连续至另一端锚碇,锚碇处的纵向位移用大型阻尼

器约束。由于在中跨的主缆上用中心锁紧装置从而使桥在受到不均匀冲击载荷时有较高的刚度,而且在受到活载时伸缩缝的位移减少。在桥塔处设有垂直支撑的薄壁箱梁其受到的弯曲应力在许用极限范围内,因此屈服应力为 350MPa 的普通钢完全可以适用。连续箱梁的采用免去了传统的在加劲梁下方的塔柱间加横梁的作法。

除了流线型箱梁的应用,悬索桥在设计上的其它进步并不显著。为提高吊杆系统的性能,尝试采用斜缆索以构成三角形缆索系统的方案未能付诸实行。

因采用焊接以及大型组合箱梁架设,悬索桥的施工方法有一定的进步。预制平行钢丝索(PPWS)的应用在某种程度上改善了缆索的架设施工方法,该法每次一般从丝盘抽拉出 127 束钢丝。当然,传统的空中纺丝法经改进也证明是成功的。因此不能确定哪种是较好的。

对单箱梁悬索桥的设计及施工的改良无疑增加了该型式的竞争力,但存在的局限性也表现出来。大量研究表明,当跨度接近 2000m,甚至更长时,单箱梁悬索桥很难解决空气动力稳定性。如果分离成双箱或三箱梁同样可以具备箱梁的多数优点,如重量轻,制造简单,维护方便等。三箱梁作为西西里岛和意大利本土间 Messina 海峡大桥的研究的一部分,已研制并得到论证(如图 4)。尽管跨度大至 3300m,该设计方案使桥梁具有良好的空气动力稳定性。

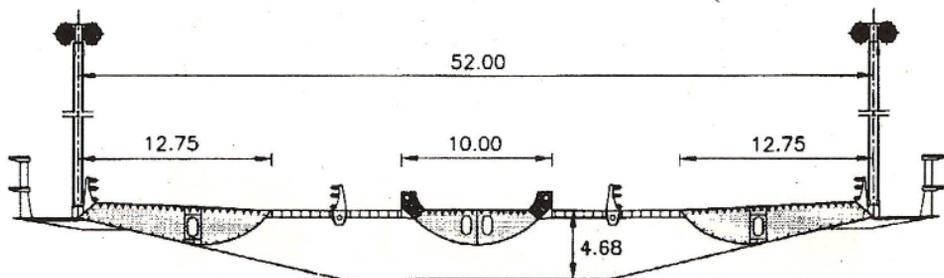


图 4 Messina 海峡大桥截面图

为 Messina 海峡大桥设计的三箱梁形式应用,使桥中部设置双向铁道、桥面边分别设置三汽车道得以实现,对跨度超过 200m 的纯公路桥,双箱梁是比较适合的。

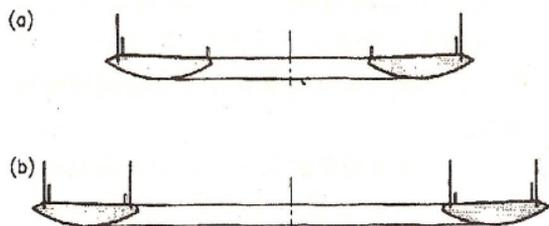


图 5 双箱梁截面图

对双箱梁的最新研究基于图 5 (a) 示截面图,两个箱梁由 2 个垂直的索面承担。双箱梁最大的特点是两箱梁之间有较宽的地带,且降低了空气动力扭转与举升力之比,同时每个箱梁均可取较小的深度以降低阻力。

如图 5(a) 所示的双箱梁,其外缘只连接 2 对垂直索面,这就要求箱梁之间在每一吊杆位置用横梁连接,比如距离为 30~40m。如果每个箱梁由 2 对垂直索面承载(这种形式最早由 Ridhard 提出,如图 5 (b) 所示)。垂直载荷则无需通过横梁来传递,因此可以减少横梁的数量,从而保证整桥的空气动力稳定性。横隔梁间的翼板距离在纵向上可以是悬吊装置间距的几倍。

每个箱梁由双索面承载的型式无疑在几百米长的跨度上具有良好的空气动力稳定性,因此用单索面承载每个吊杆处用横隔梁连接的形式可以大大减少横隔梁的数量。同时可将垂直载荷从每个箱梁传递给缆索系统而不会在横隔

梁处产生弯矩,这意味着两个箱梁间宽度的选择范围更大。最后强调的是有 4 索面的系统,每个箱梁的架设可独立进行,且每个架设单元更简单易操作,而不像双索面系统那样,两边箱梁需与中间横梁同时进行。

当然,此方案有将垂直载荷传递到缆索系统以及简化施工的优点,同时也产生索股增加以及由于内索面引起的整体抗扭力下降的不利情况,应控制以利大于弊。

如果材质选择正确且进行有效维护,悬索桥结构元件的最大特点便是经久耐用。因此数座应用镀锌钢丝主缆的悬索桥,使用期已将近 100 年,有的甚至超过了 100 年。对吊杆而言,安全可靠度相对低些。不少悬索桥的吊杆都已被更换。可喜的是,更换吊杆的操作比更换主索相对简便多了。

为使吊杆更耐用,在 Storebaelt Eas 桥上应用的吊杆全由镀锌钢丝外挤压聚乙烯层的封闭式拉索制成。

为利用空气干燥法达到主缆的防腐,进行了多方面的调查,现已在明石大桥上进行了实体测试。测试结果将引起世界桥梁工程师们的极大兴趣。

主缆及大型组合箱梁的安装技术的发展促进了悬索桥在 500~1000 米跨长范围中的作用。该范围正是斜拉桥在 90 年代达到的跨度范围。对桥型进行选择时,设计中带入想象度也将产生重要影响。对桥塔、锚碇、梁的形状的不同构思将产生许多独特的悬索桥,具有各式各样的生动外观(如图 6)。相对于斜拉桥的在形状、索塔以及拉索体系的多样式,现代悬索桥的形式设计变化较少。



图 6 伦敦泰晤士河上的人行天桥,独立式索承受压应力。

Ⅲ. 斜拉桥

20 世纪中期以来,斜拉桥型式得到了充分发展。在现代 200~500 米跨长的公路桥应用中,斜拉桥仍为较佳方案,甚至跨长不在此范围内的一些公路桥也同样采用这一方案。

与悬索桥相比,斜拉桥的外形结构及构件材料的选择范围很大,尤其是索塔的形状,有独立式柱或是 A 型、倒 V 型、菱形等等。主梁可由实心混凝土板块、带纵横肋的混凝土板、I 型钢梁、混凝土箱梁或钢箱梁等构制。拉索体系可设计成中部单索面、双垂直索面或双倾斜索面。

也有一些为了追求独特效果的斜拉桥设计。但刻意的设计构思导致了其结构系统的低效性。(图 7)。

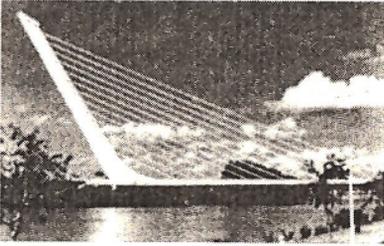


图 7 Sevillain Alamillo 桥,在静载作用下,较重的呈倾斜状的混凝土索塔与较轻的桥面巧妙地相互平衡,但在交通荷载作用下,索塔及其基础将产生较大弯矩。

对中等跨度和相对较宽主梁的斜拉桥,将没有必要把梁制成流线型,因为即使是非流线型梁截面,也可以达到空气动力稳定性要求。但当跨度大到一定程度时,应用悬索桥中发展的流线型箱梁就十分必要了。新近的实例,如法国的诺曼底大桥和日本的 Tatanz 大桥,这两座桥主跨均超过 850m。

斜拉桥存在的不足是单索的自振及其耐用性。索振现象,特别是由风雨引起的振动,会导致一些意外。尽管自 80 年代中期第一次发现此现象以来,进行过许多调查研究,但是至今仍未得出一个圆满的答案。

当然,虽说目前仍没有一个可行的分析方

法来确定一根斜拉索是否易引起风雨致振,但人们已经认识到:在斜拉索表面形成的雨流以及拉索表面平整度与之有关。风洞试验也表明,一根崭新干净的聚乙烯管比一根陈旧的脏管更容易避免引起振动。

一个有效的抑制风雨致振的方法是通过在索表面设置肋条来阻止索面水流的形成。通过对 \varnothing resund 桥拉索进行的风洞试验清楚得出,不散的较小肋条能明显抑制风雨致振的形成。进行风洞试验的拉索直径为 250 毫米。而索表面的双螺旋状肋条高度仅为 2.1 毫米,仅如此普通的肋条便消除了发生在一般光滑拉索上的风雨致振的现象。

在一些工程应用中,为消除拉索上的各种振动,在拉索上又增加了辅助加固索。这样,斜索面变成了网状索面。然而,目前缺乏可靠的理论来设计辅助索以及辅助索与拉索间的接头。因此出现了一些辅助索断丝或接头断裂的情况。如果对辅助索的预紧不正确,因此引起的脉动冲击力可能是该断裂的原因。这样,每当主拉索受力发生位移时,辅助索就绷紧一次,引起严重冲击力。为加强垂直于索面方向的稳定效果,很有必要对所有辅助索采取保护措施。

在一些工程中,采用了在主、辅索连接点处设置缓冲器的措施来提高辅助索承载效果,但这要求缓冲器具有很高的强度。在主梁和索塔的锚碇处,已应用了不同类型的缓冲器,都具有很好的效果。在这些部位可以很方便地安装高强度缓冲器,同时,也利于有效地进行检测、维修与更换工作。

辅助索的安装一般是在所有主拉索安装完毕之后进行的,在桥面上进行张拉并施加应力。如果在张拉前已把辅助索安装到主拉索上,那么这种张拉程序会使从桥面锚固处到上部索结点段的辅助索张应力降低,因此,在辅助索上端点处最需加强稳定保护。为保持辅助索上的高张应力,很有必要对辅助索相对于最高处的主拉索进行张拉。这意味着这根主拉索将被拉下一定距离,呈现出下垂状。如图 8 所示。

也说明了辅助索应垂直于最高处主拉索且从主拉索到桥面应呈直线状。

除了最高主拉索处结点外,其余结点在静载下将不存在力传递问题。如果辅助索采用两股刀置于主拉索两侧的连接形式,结点可得到最大的简化。这样,接头可由二小一大的三部分夹具组成,夹具间可绕水平轴相互转动。同时此类接头具有应用于其它索的通用性,只需选定索径规格。另外接头夹具可以在辅助索张拉时开启,从而保证从桥面到最高拉索间的直接预张拉。

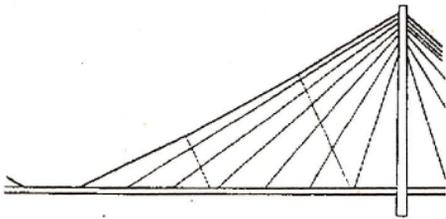


图 8 相对于最高主拉索进行的辅助索张拉

在 80 年代,由于腐蚀和断丝原因,已更换了不少斜拉桥的拉索。人们因此进行了许多尝试,力图提高拉索的耐久性。其中多数采取双层防护措施,即应用镀锌钢丝外包聚乙烯护套或是应用套管加内注防腐材料来实现。

防腐措施无疑增强了拉索的寿命,但同时增加了成本。斜拉索的安装、防腐,加上各种为提高动力稳定性措施的费用将会是悬索桥主索的费用的 1.5~2 倍。这便抑制了斜拉桥向更大跨度范围发展。目前认为在超出跨长 500m~600m 范围内的斜拉桥的建造取决于对拉索的制作、防腐、安装以及单索的抗振稳定性各种高效可靠措施的相应发展。

至于采用斜面拉桥还是悬索桥,这取决于在实际应用中它们具体体现出的独特优势。对斜面拉桥而言,其明显特点是整桥刚性高,以及其自锚的拉索系统(而不需要大型的拉索锚碇)。

IV. Øresund 大桥简述

自 20 世纪中期以来建造的斜拉桥,几乎都

属公路桥类型,但也有少数建成了公路-铁路两用桥。其中最突出的是 Øresund 大桥,具有 400m 的最长主跨。能同时通行荷载为 80kN/m 的两列货运列车或是时速高达 200km/h 的客运列车。该桥方案最早于 1993 年提出,总长为 7.8km,西面引桥长 3014m,主桥 1092m,东面引桥长 3739m。

因主桥长度仅占整桥总长很小的比例(约 15%),很显然,应采用一个解决方案使引桥的连续桁架与主桥能有效自然结合而不致使产生太大结构、材料改变及外观上的突变。另外双列货运列车及高速客车产生的载荷也对主桥设计有严格要求。

与引桥的结构类似,斜拉主跨的梁板由钢桁架及桁架上部混凝土桥面组成,拉索的倾斜相对更陡,并在边跨设置中间支撑来达到其刚度要求。

应用中改变了原设计中的所有引桥对称桁架结构件都等长的做法,把拉索支撑区内与拉索相接的桁架杆件的倾角制成与拉索的倾角相同。这样这些杆件便具有不同的倾角及长度。通过将上弦杆的原长由此及 20m 增加到 25m,便使原来桁架结构由等腰三角形变成了非等腰三角形,而下弦杆的长度 20m 保持不变。

垂直索面相距 30.5m,包括其中桥面宽 23.5m。将索面设置在桥面外目的是为了使其与索塔重心相重合,从而免去了桥面上塔柱间的加劲横梁。无加在横梁塔柱不仅增强美观,同时简化了塔柱上部的浇注工作。

索面移出上部公路桥面外,便形成了悬壁结构,因此有必要增添辅助结构使索力能够传递到主桁架上来。因此主桁架外侧安装了三角形结构托架,该托架与主桁架长杆的倾斜面一致。

三角形格构托架以及桁架结构的调整,使主跨形成一个独特的外观。同时从桥面至拉索直至 203m 高的索塔,结构受力清晰,不愧为一例成功巧妙的结构设计。

(李其燕、陈云翔译)