

2

预应力混凝土桥

结构形式

梁式桥

板式桥

《OVM通讯》2000年 第2期 (总第19期)

桥梁建设

6-12

桥梁用预应力系统的应用与发展

胡崇武

U 448.35

桥梁作为一种跨越性承重建筑物，以它多姿多彩的形式存在于现代社会的山川、河流、海湾与城市，发挥着它无与伦比的社会功效。随着材料工业、建筑设备、施工技术的发展，以及新的测试手段、质量控制方法与现代计算机技术的发展与广泛应用，桥梁工程的技术发展达到了前所未有的高度。

预应力混凝土桥梁作为桥梁工程大家族中重要的一员，经过五十多年的应用、完善与发展，在桥梁建设中占有重要的地位。特别是在中国特殊的自然、经济环境中，还不可能在桥梁建设中广泛采用钢结构，因而在中小跨径及一般大跨径桥梁结构中，预应力混凝土桥梁仍将占据主导地位，具有非常广泛的应用与发展前景。

一、公路预应力混凝土桥梁的常用结构形式

公路预应力混凝土桥梁常用的结构形式按张拉体系可分为先张拉预应力混凝土结构与后张拉混凝土结构两类。先张混凝土结构主要用于梁板式混凝土桥梁结构。后张混凝土桥梁结构形式则较多，主要有：板式桥、梁式桥、斜拉桥、悬索桥甚至拱式桥等，几乎涵盖了所有的混凝土桥梁结构。这方面的介绍文献较多，这里只作一简要综述。

1、板式桥

板式桥梁在公路上主要用于20米以下的桥梁结构，特殊情况下也有用于25米甚至30米跨径的。一般认为板式桥跨径太大并不经济，主要是因为结构自重较大。为了减轻结构自重，板式桥通常采用空心断面，早期的空心板多为圆形或椭圆形挖空，采用橡胶气囊或钢芯、木芯模成型。

胡崇武 交通部第一勘测设计研究院副总工程师

为了追求更大的挖空率，现在较多地采用矩形宽式断面，特别是矩形或折角形橡胶芯模的采用，减小了此类结构的施工难度，其经济指标亦有了较大的提高。

2、梁式桥

梁式桥以其形式多样、适应面广、跨越范围大等特点，在公路桥梁结构中得到了最广泛的应用，是20~300米跨径范围内的主要桥型结构。

常用的梁式桥按结构体系可分为：简支梁、悬臂梁、连续梁、T型刚构、连续刚构以及刚构连续组合梁桥等；按截面型式可分为：I型梁、T型梁、箱型（或槽型）梁、Π型梁及桁架梁等。

预应力混凝土梁式桥的预应力体系，几乎都采用后张预应力混凝土结构，这样也增加了此类桥型的适应性。

(1) 简支梁桥

简支梁桥主要有简支T梁与简支I梁，近年也有采用简支箱梁的。由于其结构一般采用多梁式体系，以及为保证结构的整体刚度而设置的横梁与桥梁下部结构的盖梁等多暴露面，影响了桥梁结构的美观效果。近年来，由于设计及施工注意到了结构的细部处理及结构表面混凝土的光洁度，使得其美观效果有了一定的改善。此类桥型目前以及今后一定时间内，由于其结构简单、受力明确、施工方便、技术成熟，仍将是我国公路中小跨径桥梁的首选结构，特别是在对桥型美观要求不是很高的非城市桥梁。

该类桥型的合理跨径范围为20~50米，尽管在我国其最大跨径已经达到了62米，但无论是在结构受力上，还是在经济指标上都不甚合理，对施工设备及场地要求也较高，失去了此类结构的

桥梁建设

主要特点。因此,本人认为,超过50米的桥梁应尽量采用其他型式。

近年来,由于高速公路的广泛兴建,对公路桥梁行车的舒适性要求愈来愈高。因而,陆续发展了各种不同形式的简支桥面连续、先简支后连续以及先简支后连续刚构等结构体系,丰富和发展了此类桥型结构。

(2) 连续梁桥

连续梁桥的主要断面形式是连续箱型梁桥。箱型梁所具有的结构特点,使期能适合各种桥梁形式的变化。通过采用改变截面宽度或高度以及增减悬臂板长度,可以适应各类建设条件,能设计出各种轻巧、飘逸、美观的桥梁。再加上结构形心基本居中,特别适合预应力力筋的布置,且截面刚度大、抗扭性能好、桥梁接缝少,是大型立交桥以及城市桥梁中广泛使用的桥型。

连续箱型梁桥的主要跨径一般在25米~180米之间,小于25米跨径一般采用钢筋混凝土结构。为了适应特殊需要,有时候箱梁要造成各种变宽、超高、甚至S型、Y型与X型。一般情况下,50米以下跨径多采用等截面(等高度)箱梁,超过50米跨径主要采用变高度箱梁,以达到使结构受力合理、节约材料、提高经济指标的目的。

由于大跨度预应力混凝土连续梁桥需要采用大吨位桥梁支座(例如:正在施工的南京长江第二大桥北汊桥,主跨跨径165米,支座吨位达65000kN),且支座寿命与桥梁使用寿命不匹配,使支座养护、更换困难。因此,一般150米跨径以上的连续箱梁较少采用。目前,世界上最大跨径的连续箱梁是葡萄牙1986年建成的、跨径250米的连续箱梁桥。

连续箱梁桥施工方法主要有:支架现浇、预制拼装(悬拼)、悬臂浇注、顶推、水平滑模逐孔浇注等。悬拼或悬浇主要用于较大跨径的变截

面桥梁,其他多用于等截面桥梁。水平滑模逐孔浇注法,近年来由于国外施工设备的引进有上升势头;顶推法则由于施工场地及设备限制,且经济指标不好而逐渐稀少;但我国高速公路的联网,为了降低建筑高度、减少对现有交通的干扰,一种平衡转体施工方法正在悄然兴起。

(3) T型刚构桥

预应力混凝土T型刚构桥是我国70~80年代修建较多的一种桥梁,也是当时我国预应力混凝土桥梁结构向大跨度发展的主要桥型之一。以主跨174米的重庆长江大桥为代表,我国曾在各地修建了大量的T刚构式桥梁。但由于此类桥型中间采用简支桩孔,结构的变形难以控制,行车条件也不好,现在此类桥梁结构已较少采用。

(4) 预应力混凝土连续刚构桥

预应力混凝土连续刚构桥近年来在我国发展势头较猛,自1988年广东主跨180米的洛溪大桥建成以后,我国大跨径连续刚构桥梁发展较快,1995年建成了主跨245米的黄石长江大桥,1997年又建成了主跨270米的虎门辅航道桥。目前正在设计的福建宁德下白石大桥为双孔260米,以及正在规划的奉节长江大桥主跨计划达288米。目前,世界上最大的预应力混凝土连续刚构桥是挪威的Stolma桥,主跨达301米。

预应力混凝土连续刚构桥之所以能得到较快的发展,一方面取决于此类结构由于桥墩(甚至基础)与主梁共同变形,形成多点支承的框架结构,改善了结构的受力及使用性能,增加了结构的跨越能力;另一方面,由于高标号混凝土与大吨位群锚以及高强低松弛预应力钢绞线的研制与应用,改变了结构的设计限制,改善了施工条件,使此类结构有可能朝更大跨度发展。

一般认为,超过150米的混凝土桥梁宜采用连续刚构桥型,特别是跨越山沟、河谷、海湾的高墩大跨桥梁。就目前的设计施工水平,该类桥

桥梁建设

梁已达到了301米的水平,可以肯定,随着高强轻质混凝土以及更有效的预应力材料的出现,此类桥梁的跨越能力还将提高。但就目前的材料水平,过大跨径的预应力混凝土连续刚构桥梁,由于混凝土的收缩徐变引起的过大变形问题,以及深水、通航水域桥墩防撞问题,主梁根部过高所引起的造型及施工问题等没有得到很好地解决。本人认为超过300米跨径的桥梁应与其他可能的桥型结构(如:斜拉桥、组合拱桥等)进行综合比较,由于此时结构的自重所引起的弯矩已占总荷载的90%以上,在没有新的特殊材料出现时,显然已不经济。

3、混凝土斜拉桥

斜拉桥近十几年来在我国得到了飞速发展,自1956年世界第一座现代斜拉桥斯托姆松特桥(瑞典Stromsund,主跨182米)建成以来,六十年代即发展到了320米跨径(德国Knei桥)。我国1975年建造的四川云阳桥(主跨72米),开始了中国斜拉桥的建设历史。特别是自二十世纪九十年代初,我国斜拉桥的设计建设得到了飞速发展,建成了重庆长江二桥(主跨444米)、铜陵长江大桥(主跨432米)、郧县汉江桥(主跨414米)等一大批具有世界水平的混凝土斜拉桥,使我国的混凝土斜拉桥跻身到了世界斜拉桥建设的先进行列。目前世界最大跨径的混凝土斜拉桥是挪威1991年建成的斯卡尔松德桥(Skarnsundet),主跨达530米。我国正在建设的荆州长江大桥主跨已达500米,建成后将成为世界上第二大跨径的混凝土斜拉桥。

混凝土斜拉桥预应力体系一般可分为拉索与主梁预应力体系两大部分。拉索现使用较普遍的有平行钢丝与钢绞线拉索体系两大类:

平行钢丝拉索体系主要采用预应力平行镀锌钢丝外包热挤PE与PU护套、冷铸锚头锚具形成。其特点主要是:工厂化整体制索,冷铸锚头

锚体系,下料准确,锚固牢靠。但运输、挂索所需设备及条件较高,施工中容易造成对防腐护套的破坏。

钢绞线拉索体系主要用多股无粘结预应力钢绞线与索夹、PE护套、钢绞线锚固系统组成。其与平行钢丝拉索体系的主要区别在于:防腐性能得到提高,可以根据不同的外部环境选用不同的防腐方式(普通无粘结筋OVM-A型、环氧全涂装无粘结筋OVM-B型、环氧全涂装无粘结筋OVM-C型);单根穿索编束,单根张拉(现也有采用整根张拉工艺的),整体调索,现场制索,实现了运输、安装的轻量化,有利于狭小空间及高空作业;经济性及锚固性能有所提高。但钢绞线拉索锚固体系的低应力疲劳问题尚需更进一步研究解决。

混凝土斜拉桥主梁除由于斜拉索提供的预应力外,还要根据受力需要施加梁体预应力,多以纵、横向布索为主,主要采用大吨位预应力钢绞线群锚系统与精轧螺纹钢轧丝锚系统。

混凝土斜拉桥达到一定跨径以后,将受到钢主梁斜拉桥(包括钢主梁、钢—混凝土迭合梁以及钢—混凝土结合梁斜拉桥)及悬索桥的冲击,但在500米跨径以内还有较强的竞争力。目前世界最大跨径的斜拉桥是日本的多多罗(Tatara)桥,主跨890米。1997年建成的法国诺曼底(Normandy)桥,主跨为856米。中国已建成的最大跨径的斜拉桥是1993年建成的上海杨浦大桥(主跨602米),正在建设的南京长江第二大桥主跨达628米。预计不久的将来,世界斜拉桥将超过1000米跨径(如:规划中的伶仃洋大桥就有主跨900米的斜拉桥方案;跨意大利墨西拿海峡大桥就规划有1470米斜拉桥方案)。林元培在《斜拉桥》一书中认为,按照当前的理论水平、材料水平、工艺水平可以建造跨径达1600米的斜拉桥。据有关专家分析,钢主梁(主要指结

桥梁建设

合梁)斜拉桥跨径可达2000米或更大。

一般说来,跨径1000米以内的斜拉桥与悬索桥(主要指重力式锚碇系统悬索桥)相比,斜拉桥具有用钢量省、造价低、刚度大等优势。著名桥梁专家莱翁哈特(F. Leonhardt)认为:跨径1400米的斜拉桥(钢主梁)要比同跨径悬索桥高强钢丝节约约二分之一;对于大跨径斜拉桥要比悬索桥的造价低30%左右。

4、其他预应力混凝土桥梁

除了上述预应力混凝土桥梁外,还有混凝土悬索桥及预应力混凝土桁式组合拱桥与系杆拱桥,也采用预应力结构体系。所不同的是,这类桥梁的主要受力结构一般采用非预应力结构。目前,我国最大的混凝土悬索桥是1995年12月建成通车的广东汕头海湾大桥,主跨452米,1995年建成的贵州江界河桥,主跨330米,是我国最大跨径预应力混凝土桁式组合拱桥;钢管混凝土系杆拱桥,近年来发展较快,目前,正在施工的江苏京航运河桥,主跨达235米,其预应力混凝土系杆长度达400米。

二、桥梁用预应力体系的发展与现状

1、预应力混凝土桥梁的发展简况

预应力混凝土桥梁已有五十多年的历史,我国自二十世纪五十年代开始这方面的试验与研究,在1956年建成了第一座跨径20米的预应力混凝土简支梁桥,随后预应力混凝土简支梁桥在公路上得到了广泛应用。六十年代中,开始采用先进的悬臂施工方法,建成了第一座预应力混凝土T型刚构桥;七十年代后,在桥梁建设中,各种体系的预应力混凝土桥梁得到了迅猛发展,特别是预应力混凝土连续梁桥发展尤为迅速,掌握了如顶推法、移动模架法、逐跨架设法等先进的桥梁施工技术,先后在国内外建成了几十座质量较好的桥梁;进入八十年代,随着悬臂施工法在大跨度桥梁施工中的应用与发展,我国开

始了预应力混凝土桥梁的黄金发展时期,先后于1983年建成了主跨90米的广东容奇大桥,1984年建成了主跨110米的广州海珠三桥,1985年建成了主跨111米沙洋汉江桥,1986年建成了主跨120米的常德阮水大桥等一大批具有当时世界先进水平的预应力混凝土连续梁桥以及当时位居亚洲第一的主跨180米的预应力混凝土连续刚构桥——广东洛溪大桥。同时,以1982年建成的主跨200米上海柳港大桥与主跨220米的济南黄河大桥为代表的混凝土斜拉桥也开始得到迅速发展。此外,还结合我国国情,在钢筋混凝土桁架拱建设经验基础上发展起来的预应力混凝土桁架拱与桁架T构桥也取得很大的成绩,于1985年建成的贵州剑河大桥,为主跨150米的预应力混凝土桁架拱—梁体系桥梁。

二十世纪末,是中国桥梁建设飞速发展时期,不仅建成了以江阴长江大桥、上海扬浦桥、广东虎门桥、重庆长江二桥为代表的一批具有世界先进水平的桥梁,而且在建的或即将建成的如南京长江二桥、武汉军山桥、荆州长江大桥等将标志着我国桥梁建设水平,包括设计水平、施工工艺、控制技术、材料水平、预应力工艺、检测水平、科研试验能力等进入了世界桥梁建设先进行列。

2、预应力体系的分类及其主要用途

随着桥梁建设水平的不断提高,桥梁用预应力体系也在不断的更新与发展。根据不同的预应力筋,可将预应力体系划分为三类:钢丝体系、钢绞线体系与钢筋体系。

(1) 预应力钢丝体系采用 $\Phi 5$ 高强钢丝,其最小极限强度为1570MPa,最大有效预应力从2根到208根,所采用锚具有较早的弗氏锚、墩头锚和现在斜拉索用的冷铸锚。

这类预应力系统在预应力使用的开始阶段应用较多,主要用于梁体预应力,现在仍用的主要

桥梁建设

是平行钢丝斜拉索。弗氏锚具由于其锚固工艺的落后, 预应力损失大、可靠性差等, 目前已基本淘汰。

镦头锚具系统在一段时期内曾大量使用, 特别是先期的预应力混凝土顶推连续梁中应用更多, 由于其张拉方便、预应力损失较小, 特别是连接器尺寸小, 大大地减小了连接部分的构造尺寸及应力集中效应。但由于采用现场冷镦头, 钢丝长度须精确下料以及丝口型锚环由人工紧锚, 质量难以控制。因此, 这类锚具在桥梁结构中的应用越来越少, 现主要用于岩体或土体加固用的预应力锚杆中。

冷铸(也有热铸)镦头锚, 目前仍然是斜拉索的主打型锚具。现在, 尽管钢绞线体系斜拉索发展较快, 但估计镦头锚在一段时间内还无法淘汰。

(2) 钢绞线体系采用直径为3/8、7/16、0.5或0.6in(我国主要使用后两种)的极限强度为1860MPa的7丝钢绞线。该体系预应力筋的最大有效预应力从单根到55根, 其锚固体系主要由锚环及夹片(二片式或三片式)组成, 预应力管道多采用钢波纹管或橡胶抽拔管成型, 近年也已出现采用塑料波纹管的。

钢绞线体系预应力有有粘结和无粘结之分。其锚具种类主要有:

①用于张拉锚固端的夹片式锚固系统, 由夹片、锚垫板、锚板、预应力筋及螺旋筋组成。根据不同的应用现状可分为用于一般结构的群锚、用于扁平结构的扁锚以及用于环状预应力结构的环形锚具。通常来讲, 前者应用范围较广, 可从单根变化到55根、最大张拉吨位可达1074吨。主要用于结构主要受力方向的预应力中。

②用于扁平结构的扁锚系统, 也由夹片、锚垫板、锚板、预应力筋及螺旋筋组成, 所不同的是预应力筋成“一”字排列, 锚具及波纹管呈

扁平状。主要用于箱梁桥面板横向预应力; 连续梁局部加强预应力筋; 简支连续结构的负弯矩预应力筋以及桥塔环向预应力等断面尺寸受到限制的地方。

扁锚一般可锚固1~5根预应力筋, 由于受构造特征的限制, 该型锚具采用单根张拉, 容许预应力筋竖向弯曲, 但不能有侧向变形, 否则将会影响预应力的张拉效果。

③用于张拉锚固与接长端的连接器, 主要用于单根或多根预应力筋的接长用。一般由挤压接头、夹片、连接体、外罩、约束圈、预应力筋及螺旋筋组成。目前连接器的主要问题是较大吨位的群锚连接器尺寸太大、容易造成应力集中, 对结构尺寸影响较大等, 现已有厂家在采取措施进行改进。

④用于锚固端的锚具。主要有: H型锚具, 由约束圈、预应力钢绞线螺旋自锚头、支架、排气管及螺旋筋组成; P型锚具, 由约束圈、预应力筋、固定锚板、挤压套、排气管及螺旋筋组成; U型锚具, 由约束圈、预应力筋、U形板及排气管组成。这些锚具主要用于一端张拉预应力索的固定端, 预埋在梁体混凝土中。

⑤用于体外预应力索的锚具。由于体外预应力完全靠锚具与托架实现预应力由预应力筋向梁体的传递, 因此, 其锚固能力必须牢固、持久。除采用上述类型锚具外, 还需加设压紧装置及防腐护罩, 以防止夹片松脱造成预应力失效及在大气环境下对锚固系统的腐蚀。

体外预应力系统除充当桥梁结构预应力外, 目前应用在旧(危)桥加固与改造方面较多, 也有用于较主要的临时工程或施工设备(如斜拉式架桥机等)上的。根据发展趋势判断, 中小跨径结构用体外预应力体系将越来越多。

(3) 钢筋体系采用极限强度750MPa, 直径多采用25~32mm精轧螺纹粗钢筋。一般采用单

桥梁建设

根钢筋,近年也已出现多根群锚系统。精轧螺纹钢钢筋的外形具有螺纹,可在钢筋的任何部位切断,用锚具或连接器锚固或接长。

钢筋体系预应力主要用于桥梁结构上部构造的箱梁竖向预应力、分段浇注混凝土梁的桥面板以及预应力墩柱及桥塔的骨架预应力中,现德国已经建造出了这种拉索体系的斜拉桥,我国也有厂家及设计单位在进行这方面的尝试。

三、二十一世纪桥梁预应力技术的展望

桥梁工程的发展历程表明,每一次材料革命都将给桥梁工程带来一次质的飞跃,桥梁工程也因此获得了一次又一次的发展机遇。公元前5世纪至公元前3世纪,由于砖在中国的出现,实现了桥梁工程的第一次飞跃,出现了砖、木结构的桥梁时代;19世纪波特兰水泥和现代钢材在欧洲的出现,实现了桥梁工程的第二次飞跃,桥梁的结构形式与规模得到了空前的发展;20世纪初,由于预应力混凝土的出现,实现了桥梁工程的第三次飞跃,开始了混凝土桥梁结构的时代;从20世纪70年代开始,出现了以碳纤维为代表的高级纤维复合材料。它首先应用于航空、航天等高科技领域,现在已开始应用于桥梁工程中,可能正孕育着桥梁工程的第四次飞跃。

预应力的思想被喻为20世纪最为革命的结构思想,自1910年法国工程师金·弗来西奈建造的跨径72.5米足尺试验拱桥后,预应力技术在混凝土结构中得到了广泛地推广与应用,在桥梁工程建设中,这种技术几乎存在于所有桥型结构中,除带动中小跨径桥梁的迅猛发展外,也大大地促进了大跨度桥梁的进步与发展。特别是在斜拉桥中,这种思想达到了极致。可以肯定,在21世纪,预应力技术思想在桥梁建设中仍将发挥其巨大而深远的作用。

纤维复合材料(FRP)是20世纪后期发展起来的一种高技术材料,近年已开始应用于桥梁工

程中。日本和欧美等国在这方面进行了较多的试验与研究,并制定了有关行业规程。以碳纤维复合材料为例,其容重为 1.7t/m^3 ,是高强钢丝和螺纹钢的 $1/4.6$;抗拉强度为 1910MPa ,比高强钢丝略高,是螺纹钢的 $3\sim 3.9$ 倍;弹性模量为 150GPa ,为高强钢丝的 0.75 倍,螺纹钢的 0.714 倍;延伸率为 1.6% ,为高强钢丝的 $1/2.2$,螺纹钢的 $1/11.25$ 。显然,FRP材料具有①比强度(强度/容重)、比刚度(模量/容重)大;②抗疲劳性能好;③减振性能好;④与混凝土及钢材的热膨胀系数相近;⑤破损安全性能好;⑥可设计性和工艺性能好等优点,有关专家们称:未来将是复合材料的时代。

纤维复合材料在桥梁工程中的应用始于20世纪70年代,主要是根据碳纤维易变形的特点,将碳纤维缠绕在已有的桥梁墩柱表面,即所谓纤维缠绕墩柱加固技术。这样利用两者之间的紧密接触,以高强度和高弹性模量的碳纤维对混凝土的强大约束作用,大大地改善了桥梁墩柱在水平地震荷载作用下的延性,而碳纤维本身的延伸量很小,这样就避免了墩柱脆性破坏的发生。美国与日本已用此技术加固了数以万计的桥梁墩柱,取得了良好的效果。此外,用轻质的CFRP层合板代替钢板加固已有桥梁梁板是另一项新技术。试验表明:采用 $0.3\text{mm}\times 200\text{mm}$ CFRP层合板加固的2m长的钢筋混凝土梁比同尺寸的一般钢筋混凝土梁承载能力增大 100% ,而最大挠度只是后者的 $3/8$ 。瑞士卢赛恩市一座39m跨径的箱梁桥,在加固时若采用钢板加固,则要将 175kg 的钢板搬运至一定高度的施工部位。而最终采用的CFRP层合板加固却仅重 6.2kg ,大大地节省了人工及机械费用。由此可见,此项技术将具有广阔的应用前景。

近十年来,美、日等国把FRP材料以钢筋或预应力索的形式应用于桥梁工程中。1989~1992

桥梁建设

年四年间,日本国内修建了一批应用FRP材料作为预应力筋的预应力混凝土工程,完成了包括FRP力筋性能、锚固系统、FRP混凝土构件的承载能力与耐久性以及疲劳试验等一系列的试验与研究。这些结果被用作制定FRP力筋预应力混凝土桥设计与施工准则,其中包括:材料性能、设计原理、容许应力、试验与材料检验、FRP力筋混凝土桥的施工步骤等。

应用FRP材料最早的桥梁跨径只有5.76m,宽7.0m,采用了上缘2根、下缘6根 $\Phi 2.5\text{mm}$ 的先张CFRP绞线;1989年第一次在公路桥梁中采用8根 $\Phi 8.0\text{mm}$ 的CFRP力筋棒应用与一孔18.25m的先张梁及一孔17.55m的后张梁中;1990年在日本的茨城县高尔夫球场修建了一座长54.5m、宽2.1m的后张预应力悬臂板梁桥,采用的是16根CFRP编束的预应力筋;1992年又采用聚乙烯醇缩醛CFRP棒作为箍筋,修建了一座长56.37m、宽4.0m的浮桥。

所有这些桥梁均安装有检测FRP力筋拉应力、锚固系统的可靠性、FRP棒的弹性性能以及预测桥梁在使用荷载作用下的结构性能的装置。初步搜集的数据表明,这些桥梁的性能是优良的。

纤维复合材料在大跨度斜拉桥中的应用前景更加广阔,相对来讲也更能发挥它的优势。21世纪人类除要继续发展常规桥梁外,将要完成“跨海通道”和“贯通海峡”的历史使命,特别是跨越直布罗陀海峡的建议,桥梁跨度达8400m。而常规的材料只能达到3000~4800m,要达到8400m或更大跨度,只能靠CFRP材料来实现。

分析认为:在相同的拉索长度、倾角与垂度的情况下,CFRP拉索的拉应力只有钢拉索的20%,即CFRP拉索的有效承载能力可提高80%;采用CFRP拉索替代常规的钢拉索,其承受活载的比例可由常规材料的10%~20%提高到60%~

65%,这就是特大跨径斜拉桥要采用CFRP材料最为重要的一个原因。

另外的一个重要原因是CFRP拉索在跨度与应力增大时的相对等效弹性模量比钢拉索要大得多,有关资料表明,CFRP斜拉桥的理论极限跨度为6900~11400m,甚至有文献认为最大可达13400m,这个跨度可满足直布罗陀海峡桥梁的跨度要求。

还有一个重要原因是,CFRP拉索的实际垂度比钢拉索小,动力性能优,特别是抗疲劳性能远优于钢拉索,试验表明相同条件下CFRP拉索的疲劳强度约为钢拉索的4倍左右。

影响CFRP材料广泛使用的一个主要原因是材料价格昂贵,但施工与维护费用要比常规桥梁少得多。仅从材料价格比较,1991年CFRP材料与其他材料桥梁造价持平的跨径是4200m,而后已达到3900m。可以肯定,随着材料工业的发展,这个水平将迅速得到提高。

综上所述,21世纪桥梁工程将随着预应力材料的革命,出现第四次飞跃,从而使桥梁预应力技术达到一个新的高度。可以肯定,在将来一个相当长的时期内,常规的钢材料预应力体系仍将发挥其主导作用。在超常跨度桥梁中,将是CFRP等FRP材料的发挥空间。常规预应力系统,将朝着锚固牢靠、施工方便、体量轻巧、抗腐防变等方面发展。短期内体外索、钢绞线拉索、真空吸浆等技术将得到推广与发展。锚具构造,特别是连接器的构造将得到进一步的改进。桥梁预应力思想将更加广泛地渗透到桥梁结构、临时工程、旧桥加固以及工程设备等各个领域,为桥梁工程的发展发挥更加重要的作用。

编者注:本文原载于1999年《预应力技术应用与发展研讨会会议交流论文集》。