

# 超大跨度桥——概念、材料和方案

Jean M. MULLER 法国

唐建国(译)

## 摘要:

对于 200m 到 1000m 大跨度桥,设计者可以在不同的方案中进行选择:梁、桁架、拱、斜拉索和悬索,然而,对于超大跨度即超过 1000m 的桥梁则需应用预应力技术,此时供选择的方案为斜拉索和悬索,若超过斜拉索所及的跨的限度,那悬索桥方案就是唯一的选择了。本文的双索概念对主跨为 3000m 甚至更长的桥梁提供另一种新选择,并简述在超大跨度桥梁设计中的一些方面,如弹性稳定性、抗风和抗震性能等。

## 1. 大跨度桥梁概况

以下给出了四种可行的重要实例:

(1) 混凝土弦杆和钢斜杆的复合桁架桥(图 1): 峡谷深度限制了只能举用单跨方案,从拱座处建造一个大型的悬臂桁架结构而不用在峡谷里施工。跨度至少 500m,此方案才可行;

(2) 单索悬索桥(图 2)有两个突出的特点:(a) 单悬索系统(索和吊杆)设置在桥面的中心;(b) 永久悬索系统,利用侧弦索施工钢桥面;

(3) 主跨 602m 的拱桥:主拱肋边段用临时索作成悬臂结构,中段拱采用一个 1000 t 的钢结构,在谷底安装,提升 230m,就位后与拱肋连接。与 Caracas 桥相比(152m),其跨度

在 50 年的时间里增加约 4 倍;

(4) 1000m 主跨的斜拉桥:为了减少风荷载,在桥梁的中心设置单索面。建成后,它将是世界上斜拉桥跨度最大的桥。

## 2、双索概念

因为拉索的水平分力造成了轴向压力载荷,而索塔附近的桥面的承载能力又有限,所以传统斜拉桥主跨的长度便受到了制约。对于采用普通的材料(例如:80MPa 高强混凝土和 500MPa 屈服应力的钢材),桥梁跨径限制在 1200m ~ 1500m 之间,这取决于设计者的设想和胆识。超过这个限度,只有悬索桥才能适应超大的跨度。但由于新颖的双索概念的提出,这种状况现在已经改变了。

桥面的建造仍然按照普通斜拉桥一样的模

(上接 26 页)

广泛。在东京——明古屋的高速公路上,大量采用了体外预应力结构。标准节段的混凝土箱形梁采用体外预应力结构使施工更为简便。钢腹板+混凝土顶底板结合梁结构,也大量采用体外预应力体系,使设计和施工都变得即简便又节约,大幅度降低了工程造价。此外,许多钢结构桥梁也大量采用了抗震性的体外索。

在日本,神钢钢线株式会社生产各种规格的成品体外索,可成批提供施工单位快速安装使用。

## (六)结构抗震问题

日本在 1995 年阪神大地震后,对结构抗震的研究给予了更大的重视,当地所研制的结构配套机具中,抗震支座及液压阻尼器已得到广泛应用,包括:

### 1、普通板式橡胶支座

本身只有弹性,无显著的阻尼性能,需与阻尼器一起使用;

### 2、铅芯叠层橡胶支座

在普通板式橡胶支座的中部沿竖向灌入铅后制成。该类支座的初始剪切刚度约为普通叠层橡胶支座刚度的 10 倍,具有很大的推广价值。

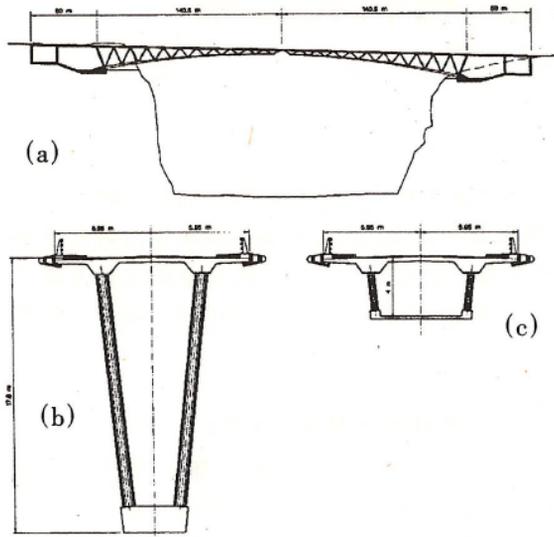


图 1 Reunion 岛上的 Bras de la Plaine 桥(1999)

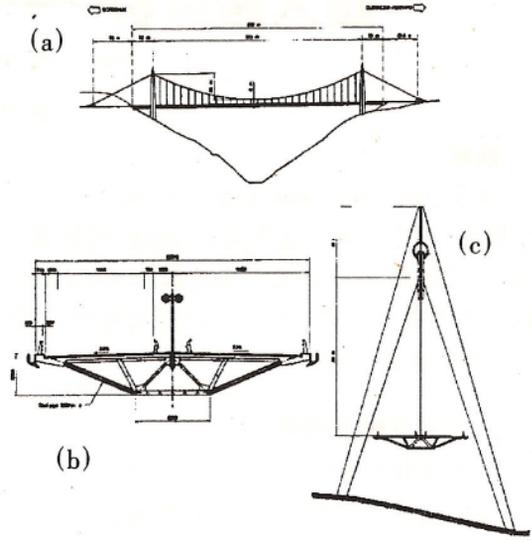


图 2 法国 Chavanon 高架桥(1999)

式,从塔开始按对称的顺序向外开始,桥面延伸到连续的索(图 3 标识的  $S_1$ ) 在建造到一定的程度(例如在任何一边塔等于  $a_1$  桥面长度)时,桥面轴向载荷将已吸收材料的全部性能(带有对未来活载的影响的预期储备),在不提高许用应力的情况下,桥面长度就不能增加了。此时,安装第二组索(图 3 标识的  $S_2$ ),以悬挂主跨的中间部分,这些索相对于主跨的中心线对称,而

不再是以塔为对称中心,而且它们不再锚固在桥面上,而是在桥的两端的锚碇处,这种方式与悬索桥主缆锚固方式一致。现在加到每一根索的垂直荷载与一个连续张力链相平衡,这个张力链开始于作为张力单元的桥面中心部分,接着是偏离塔顶的两对称索,终止于桥面外的锚碇。

沿着桥面:第一组索在塔附近产生了一

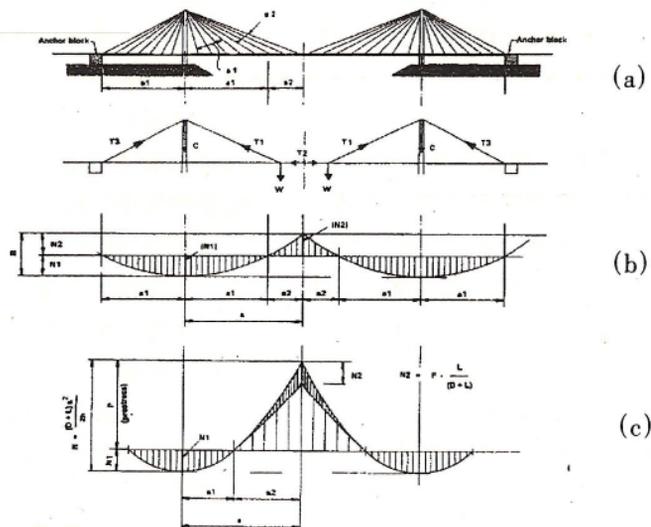


图 3 双索概念形式

个轴向受压荷载, 这个荷载在主跨的中心线被第二组索转变为一个张力轴向荷载, 在第一次应用这一新概念时, 人们最少可以增加主跨的比率大约为 1.5。

事实上, 当创造性地采用预应力来增加结构的性能时, 超越这个范围是可能的。在第二组索的桥面位置, 利用施加的预张应力可以抵消至少是所有由于恒载和活载产生的轴向张力。当活载没有施加的时候, 桥面受压缩荷载 P2 的作用, 荷载 P2 在桥梁全负荷时消失。根据通常恒载和活载的比例, 最大跨长可增加一个 2.5 的系数。那么, 人们可以有信心去考虑主跨 3000m 的结构。

新概念在东南亚建造的一座主跨为 1200m 的桥梁上得以应用, 桥面设 6 个高速公路车道和两列火车轨道及两个特别的紧急停车道。这座桥也易受强台风袭击, 按照稳定性悬吊方案, 双索桥在挠度方面比悬索桥具有更大的优势。

### 3. 拉索

#### 3.1 索的类型

钢索主要分为平行钢丝、钢绞线钢筋、封闭索或桥用钢绳。到现在为止, 防护措施归纳为:

- (1) 镀锌或环氧树脂喷涂;
- (2) 象 P/E 一样对每一根钢绞线或整束钢绞线加涂层钢管成塑料管;
- (3) 综合以上两种方法, 镀锌被认为是最重要的电镀防护措施。

超过 20 年的应用 (特别是 Brotonne 桥) 表明封闭在水泥灌浆钢管内的预应力钢绞索的性能仍很好。

但是, 增大了索径和索重, 对大跨度桥梁来说是一个非常不利的条件, 因为这样增加了索的垂度和承风面积, 镀锌 (或环氧树脂喷涂) 光面绞线能使这个问题得以解决; 同时,

尽可能压紧钢绞线以减少索的直径, 可减缓风荷载。在超大跨度桥的成本节约也相当可观。最后, 还可以应用复合材料。

#### 3.2 拉索的使用

索是结构的重要组成部分, 然而它们的重要性并没有反映在它们的造价比例里 (主跨 300m - 400m 的桥索造价仅占总桥的造价的 15%)。毫无例外, 如今所有的工程应遵循以下规则:

- (1) 设置的防护不仅可抵抗不利气候的影响, 而且能避免交通荷载的冲击作用;
- (2) 在结构寿命期内可对所有索进行张拉调整;
- (3) 在不危及结构的稳定性或使设备过载操作的前提下允许换索。

#### 3.3 索允许应力

悬索桥结构总是限制主缆钢丝的应力以控制桥面的挠度, 历史实践已显示在早期的斜拉索设计中, 斜拉索的应力被限制在极限应力的 0.42 (而钢管在结构上被进一步忽略)。

而现在不考虑结构类型的情况下许用应力仍然被限制为极限应力的 0.45 (不同规范有较少差异), 而没有任何科学论断来证明。若已对由锚具角偏移产生的局部弯曲进行应有防护, 为什么仍对拉索如此单独要求呢? 实践的结果很严峻: 刚性的重型结构 (如混凝土箱梁) 与轻巧柔性结构相比, 工况更恶劣。这种结构形成并不能提高结构的质量。

在实际索和锚具相协调的情况下, 索的应力极限应能达到疲劳应力 (轴向应力和弯曲应力)。

### 4. 斜拉桥桥面的弹性稳定性

超大跨度桥梁 (特别是斜拉桥) 设计遇到的三个重要问题是: (1) 弹性稳定性和挠度; (2) 抗风; (3) 相应的地震作用。根据这三个方面的问题进行的结构优化通常会得出矛盾

的结果,那么必须进行一个折衷选择。例如,重量对于抗风稳定性来说是一个好的因素,但对于地震来说它又变成一个不利的因素。结构刚度对前两点是有利的,但对第三点则有负影响,而对柔度和塑性则是有利的。关于这三个问题,一些建立在实践基础上的意见如下:

一个斜拉桥面受到索力水平分力产生的高轴向压应力,同时伴随着由于活载以及不利气候和地震影响引起的严重的弯曲力矩,悬索(所有的拉索)是一个复杂的系统,对以上因素的响应取决于:(1)沿着桥面在考虑之中的点的位置(当从中跨移至索时,悬索刚性提高);(2)恒载和外力的大小(比设计期来说,悬索在接近后期时,刚性变得更大);(3)考虑的因素(例如弯曲距或偏转等),这个问题是非常复杂的,用带不同弹性因素的弹性基础上的梁来类比地说明就会非常清晰了。

#### 4.1 桥面的弯曲轴向荷载

梁的弯曲系数基本上是依赖于索(每单位长度的刚性和索相对于桥面的角度)、塔的刚度,边跨索的锚点的响应也应考虑在内。因此,相应的特性长度以及弯曲波长就很容易进行计算。应当注意的是,索的总的响应在等波长下被严重地衰减,该波长与悬索刚度的 $1/4$ 开方根成正比,当索的刚度是双倍的时候,该波长只增加到22%。

事实上,柔性桥面通常是指其跨宽比率为90~100甚至更高,在这样一种情况下,考虑到弯曲防护,允许的轴向应力降低到5%。

#### 4.2 二级力矩

普通的实践已经考虑到由于结构外形尺寸变化对弯曲力矩产生的影响。通常引起梁弯曲的一个微不足道的因素,在巨大的压力和弯曲力下对墩柱则很重要。对于受压、变弯的墩柱,著名的由于二级影响而产生的力矩放大率的近似表达式为: $1/(1-P/P_{cr})$ 。对于拉

索桥面,应考虑延缓衰减影响,许多设计的经验表明,对于一个建立在弹性基础上的梁来说,其放大倍数系数可以认为是上面的表达式的平方根。

#### 4.3 应力检查

桥面易受以下荷载作用:(1)须与极限弯曲荷载 $P_{cr}$ 相比较的轴向荷载 $P$ ;(2)随着它的倍率因素增加的弯曲力跨 $M$ 。这两个因素,用一个相互作用公式,在使用状态和极限状态时的应力检查里应同时考虑。

应当承认这样一个过程会在极限状态的安全性分析方面产生偏差,大变位的研究表明因为体外荷载的增加通过隔膜作用被部分补偿,索结构在接近极限状态时变得具有更大的刚性。在一个普遍性的理论得到发展以及工程实践细致的实验之前,遵循正确的设计规范的精神是明智的,并根据受压弯作用柱的相交正作用过程,设计工程师通常被要求在这个方面进行计算。如果一个设计缺乏足够的安全性,那么进一步正确的测试将是浪费而困难的,我们经不住一个意外严重事故造成的危害。

### 5. 斜拉桥气动弹性稳定性

#### 5.1 气动弹性稳定性的不同方面

一旦风的特性被确定(基本风速和紊流增强),必须进行如下校核:(1)扭矩偏差;(2)跳动(受弯状态);(3)扭距脉动;(4)特性脉动(兼有竖向弯曲和扭矩)。对于这一点,弯曲和扭矩的有效率的比率是重要的;(5)旋涡尾迹除了结构的安全性之外,在使用舒适方面需取决于风的振幅,包括位移;(6)紊流的响应;(7)索的振动;(8)建造过程中的稳定性。这个课题非常重要,然而在一些特殊点上只有很少记录可以提供。

#### 5.2 桥面和塔

为了抵抗恒定和不稳定的风的影响,桥面和塔应被当作一个整体来看待,有两个重要的

因素：(1) 桥面跨—宽比（净跨度与宽度的比）以及桥面水平弯曲承受性；(2) 塔的刚度和横向抗力。对于净跨 300m~400m，桥面宽 20m~30m，（例如 Btorme 或是 Sunhine Skyway 桥），其跨—宽比是 10~15（风载引起的水平弯曲很小，且桥面增强了塔的稳定），而且一座单个中心塔便足以发挥它的功能，相反地，对于净跨 900m 和桥面只有 20m 宽的桥，大的跨—宽比（高达 45）使桥面的水平弯曲严重，现在塔必须与索一起来使桥面稳定，而不是桥面使塔稳定。

### 5.3 塔的刚度

最近的设计允许对在基础上建造相关的超过 100m 的钢筋混凝土细长塔的研究。非常不利的状况出现在建造过程中，在复合荷载（随机偏位的固定重量，建造设备的荷载，以及风载）的影响下，塔顶的水平变位为 0.78m（全节段混凝土），二期荷载的影响诱发了另一个变位，使其增加至 0.87m，当考虑到张拉区域由于混凝土裂缝而产生的刚度降低，这种状况发生急剧的变化，塔顶的位移增到 2.85m，近似于用传统方法计算的值的 3 倍，这样的结果应再一次引起注意，这个意见不仅应用于风荷载的影响，而且适用于地震的作用的影响。

### 5.4 振动分析

悬索桥建设者一直都承认桥面横向的移动对它抵抗横向的风荷载是有利的，“铅锤效应”可平衡大部份风荷载，并允许桥面跨—宽值通常达到 40 甚至是 50。

该稳定因素也同样出现在传统的斜拉桥，两个锚点的中心线（它承受由于索单元产生的桥面轴向荷载）跟着桥面发生位移。结果导致了二级弯矩，这必须要考虑到，尽管仍然没有被正式论证，人们发现这两个对称载荷的因素可互相平衡。最后，为防止桥面弯曲，设计应根据全风载来设计抗弯有效措施。（由于轴向

荷载产生的弯曲），对于大跨度（800m 或以上），建立在悬索桥设计实践基础上的桥面细长比的选择可能导致严重的问题——关于阻尼和过柔度的问题。这种状况由双索桥梁来校正，因为“铅锤效应”被再次全部的利用于悬吊于第二组索的桥面的位置。

## 6. 防地震设计

通过在最近出现在世界范围内的地震的危害结果的分析，工程师在此关键区域获得了大量的重要的知识，工程师们意识到，他们在不可阻挡的自然力量前的能力和知识有限，但以下基本原理是应遵循的。

(1) 避免接近响应频谱峰值的自然振动区域（参看图 8），超过一定值（通常是 2 或 3 秒）这种优势就不太严重，我们应该注意不要忽视低频地区的存在。

(2) 尽可能的在结构件间采用刚性连接，伸缩缝和支座应尽可能最小，问题经常在这些部位引起。

(3) 必要时设置液压阻尼器结构构件单元之间的过渡处——例如桥面和塔之间，或者在结构和地面之间，例如在桥墩上，当地震能量被吸收时，位移就被限制，在地震设计方面，辅助应力将是一个新的有希望的研究领域。

(4) 利用高塑性来承受结构实际位移。地震能量在弹性节点被很好的消除，封闭混凝土（装在钢或复合材料管内，或者用横向加强筋）是通常的方法，由 Eugene FREYSSINET 提出并命名的“辅助应力”混凝土的新概念将被使用，并将此独特方法发展到工业应用的阶段，在一个混凝土单元上设置封闭管或箍以产生一个永久性的横向应力，提高轴向荷载的承载能力，塑性提高了，而脆性清除了，这种设想对承受高震大型单元很适合。

(5) 在大型单元中弹性稳定性和二级弯

矩问题很突出,应再次留意前面提到的二个问题:1)第4段提到的弹性稳定性和弯曲的问题;2)在第5.3小节得到的混凝土裂缝对结构刚度的影响。

(6)基础(包括柱杆)应完好的保持在弹性的范围里,而没有永久性的损毁,因为修复或翻新的工作比较困难。

### 7. 辅助应力

到现在为止,民用工程结构基本上是被动的,它们的结构、尺寸以及制作的材料,都被设计者预先决定以安全地承受与预见的外部荷载(重力、风、地震作用等),预应力的基本思想是使结构存在一个有利的体内应力状态以达到承受外部荷载的目的。例如,在混凝土单元内的张拉区域人为地施加了一个永久的压应力。

辅助应力的思想则是更进一步:在操作结构的过程中积极调整体内应力,提高他们性能,如强度、刚度、适度、耐久性等。这个构思并不是新提出的,它已广泛地在其它工程领域内应用(浮动平台的动态定位,全电脑的航空操作等)。城建工程师已开始慢慢利用它的优点,但在许多可能性中,如下三点需要提出:

(1)梁桥的轮廓控制。早期中跨铰接的悬臂桥的外轮廓的变化对混凝土徐变和钢的松弛非常敏感,但通过铰接点设置一个力矩传递元件便可使之受控,调整将消除人行道上的裂缝。更进一步将是根据交通荷载通过铰接调整弯距的大小,受轮廓参数约束的传感器通过计算机来控制千斤顶动作。

(2)辅助防地震结构的主动减震器。典型的被动阻尼器将改成主动型的计算机控制的液压柱塞,随着大跨度桥梁的自然振动周期

(数秒)自动动作,开发设备系统的技术问题是完全可以克服的。

(3)斜拉桥的悬索桥的梁型控制,索或吊杆的荷载可用千斤顶根据交通荷载,进行相应调整,这个概念特别适用于铁路桥梁的轨道结构的控制。

### 8. 结束语

在中等跨度的范围内(100~200m之间),斜拉索设计具有创新性,最近在玻利维亚完成的两座斜拉桥,主跨分别为130m和110m,它的桥面利用了在新标准立交桥上改进的槽形截面,刚性更大、更经济(因为有隔板约束结构)。

对于大跨度(从200m到1000m),传统的斜拉桥保持其原有优点,当不限定跨度时,拉索设计就未必能保持其经济性,通常(箱梁或开放式腹板)梁板或拱桥(跨度严格按工程需要)更具有经济性。

对于大于1000m的超大跨桥,一般保守作法是采用悬索桥。但双索构思从技术上、经济上更上一层。何时接受此设想并推广采用有待将来证实。

同时,在使用复合材料上继续研究和发展的今天可利用的材料防腐性能良好,拥有钢的强度,类似于混凝土的变形能力并且单位重量仅稍比水重,工业化应用中重要问题是它们的长期稳定性和耐久性,工场预制单元安装成整体构件也必须解决,采用新材料设计大跨度结构将引导工程师在有限了解的领域进行开发,例如,由于恒载急剧减少混凝土或(甚至是钢)结构的风振的问题更突出,尽管面对这些新工程的挑战,复合材料的使用仍将是非常有前景的。

(校核 陈云翔)