

专题情报资料

斜张桥专辑

XIEZHANGQIAOZHUANJI

第五集

辽宁省交通科学研究所情报室

1982.1

目 录

斜拉桥近年来的发展.....〔日〕 成井信...	1
柜石岛、岩石岛公路铁路合用斜张桥的设计.....	14
在伦敦万国博览会上的PC斜张桥	53
根据振动频率计算拉索拉力的计算公式.....〔日〕 新家彻等...	60
双跨非连续梁斜张桥的结构特性和实桥试验——合掌大桥（旧名新龙桥）〔日〕 令岛收等...	71
予应力混凝土斜拉桥（多1、3、2—1号桥）的加载试验.....〔日〕 景野郡同等...	83
斜拉桥的缆索与锚固.....〔日〕 译自《予应力混凝土》...	92
斜张建筑用的耐疲劳锚具.....	98

斜拉桥近年来的发展

原译者 成井 信*

本论文是著者Fritz Lenhardt向IABSE (国际桥梁结构会议, 1980年5月) 提出的报告。于1980年5月29日送交译者的。著者Lenhardt氏于1975年从Stuttgart大学结构讲座 (Institut für Massivbau) 的正教授退休, 留任该大学名誉教授, 同时作为Lenhardt und André设计事务所所长, 活跃在土木、建筑的广大领域中。本文是Lenhardt氏与Zellner氏, 根据过去多数斜拉桥的设计施工经验编写的。从文中可以看出桥梁技术界第一流人物关于斜拉桥的研究、见解及展望等。内容是很丰富的。

日本准备从本州四国連絡新幹線开始, 接着有东京湾、伊势湾、大阪湾各环境公路, 都要修建长大斜拉桥。为了给今后参加斜拉桥设计施工的桥梁技术工作者作为参考, 在此予以介绍。

概 说

斜拉桥与梁桥 (beam bridge) 不同, 它是一种用相隔不长距离的多根缆索将主梁吊起的新型桥梁。所以梁高和抗弯刚度较小亦可确保对主梁压屈的安全性和挠曲的容许曲率。构成斜拉桥的主要构件, 基本是单纯受拉和受压的, 致于受弯和受剪则是第二性的。因此, 如果选用抗拉强度很高的钢丝做缆索, 则主梁的断面以及缆索的固定都可以变得很简单, 施工也容易, 并且有可能建成在空气动力弹性学上稳定性很好的桥梁。

这种新体系桥梁——斜拉桥如系混凝土桥, 主跨跨长可达到700米, 如为钢桥, 主跨长可达1700米。另外比起同条件的吊桥, 工程费要低很多。本论文准备探讨有关斜拉桥的一些主要问题。

(1) 斜拉桥的梁结构

1) 向密索体系发展

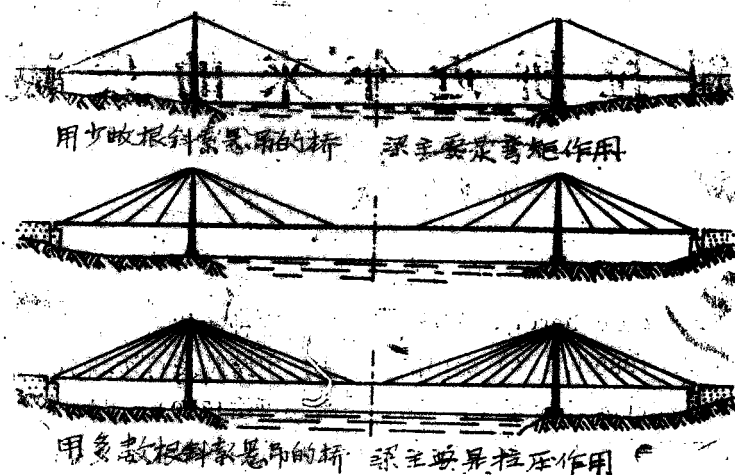
用倾斜缆索将大梁由塔架吊起的想法很早就有过, 其发展历史, 在文献(1)与(2)中已有论述。

此类桥型得以发展, 多亏指出高强度缆索优越性的 F. Disinger (3)。最初的现代斜拉桥, 其主跨仅用少数几根缆索吊着主梁。斜缆索在梁上的间距为30~60米, 梁高为3~4米。这种桥的主梁也需要有较大的抗弯刚度。同时由于缆索承受的拉力甚大, 必须将多根钢绞索结合成束使用, 又因为缆索粗大, 锚固结构也很复杂, 并且架设主梁时, 还需要辅助的临时缆索。及至近年拉索间距已由原来的30~60米缩小到8~15米, 这样很多问题得到了解决, 架梁时也不需辅助缆索直接采用悬臂工法施工 (图-1)。这种密索斜拉桥标志着一种与一般梁桥性质完全不同的新型的桥梁结构体系诞生了。

密索斜拉桥具有下述特性:

由过去的梁结构变成被斜拉索吊着的悬臂结构, 此时大梁近似于桁架的下弦杆。由于塔、索、梁三者构成一个稳定的三角形体

* 本州四国連絡新幹線設計部, 設計第一課主査, 工学博士。



图一 从稀索斜张桥向密索斜张桥发展

系，同时被拉索（支承）分开的梁段很短，因此主梁对抗活载有充足的抗弯刚度。换言之，主梁不需要多大的抗弯刚度。当然梁高也就不受主跨的跨径支配了。由于顺桥方向不发生巨大弯矩，梁高可以显著减小。主梁需要的顺桥方向抗弯刚度的大小，主要取决于以下几个因素：

（甲）拉索传来的桥轴方向的巨大压力的压屈安全性——当然，此安全性必须用考虑荷载安全系数的二次理论（考虑梁的下挠变形和纵坡变化）进行验算。

（乙）集中活载引起的局部变形，加以抑制的必要性（将主梁弹性曲线的曲率控制在容许范围内）——由于索的相互间隔很小，静载引起的弯矩是很小的。

这种密索体系斜拉桥，是一种与梁桥、拱桥或具有加劲梁的吊桥等古典型式的桥梁完全不同的新型桥梁。通过计算比较发现，这种新型桥梁的垂度甚至比纤细的连续梁或吊桥小。它具有大的体系阻尼，在动态性能方面有很大的优越性。

如采用充分倾斜的大拉力缆索，可以获得这种优越性，能使垂直变形很小。拉索的抗拉刚度在密索斜拉桥中成为主要参数，它一般可用下式表示：

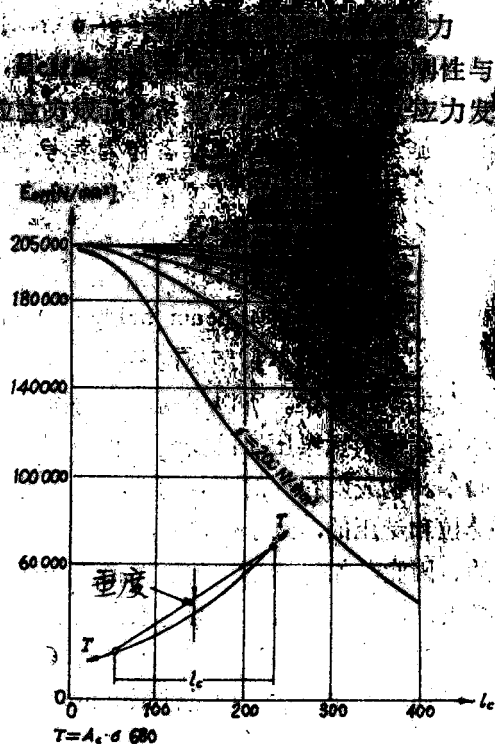
$$A_s E_{eff} = \frac{A_s E_0}{1 + \frac{r^2 l_c^2 E_0}{12 \sigma^3}} \dots \dots \dots (1)$$

式中： A_s ——索断面积

E_0 ——直线索的弹性模量

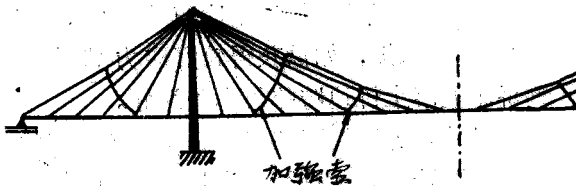
r ——索的比重

l_c ——索的垂直投影长度



图一 拉索的刚度和应力以及长度之间的关系

生变化垂度也随之变化)时水平长度的平方成反比。动载和静载的比例,影响拉索的尺寸,影响静载状态的刚性。拉索刚性为 P (动)与 g (静载)的比的函数,当 $l_c > 250\text{m}$ 或主跨跨径 $> 500\text{m}$ 时就不那么符合了。然而由于采用如图一3所示的加强索,可使较长斜索的垂度影响,轻而易举地得到了减小。用此法对特大跨径的拉索也可以保证有较大的刚性。根据我们的设计经验,在公路、铁路并用桥上,主跨跨长可以达到1500米左右。



图一3 为提高缆索刚度的加强索（补索）

遵守下述原则,可以得到最佳的设计条件和施工条件。

① 确定斜拉索的根数时,要使它在塔和梁上的锚固结构简单。可按每根拉索承担 20MN (2000吨)的拉力进行设计。

② 斜拉索在梁上的锚固点间距应小一点,施工时可免用辅助缆索或临时支柱,按悬臂工法架梁。

③ 梁高尽量小些,但须验算,当桥轴方向压力最大时,乃须满足屈服安全度要求。梁的抗弯刚度小,可减小活载弯矩。

④ 确定梁高时,应注意满足梁的挠曲曲率规定,并保证重车车轮作用时,梁结构仍在弹性范围内工作。但也不应保留超过荷载需要的梁高。对于应力混凝土桥,最好局部予加应力。

⑤ 斜拉索必须使用与予应力混凝土钢丝性质相同的高强钢丝或钢绞线(抗拉强度 $1500\text{N/mm}^2 \approx 150\text{kg/mm}^2$),这样能取高些的容许应力值。当拉索的疲劳成为主要问题时,如应力取值接近安全界限,对钢材的2%屈服点强度,安全率取1.7已足够。

⑥ 拉索最好沿梁的两侧边缘上吊,这时对梁不要求抗扭刚性。当然也能从桥板中心上吊(单面式拉索),但需配以具有较大抗扭刚度的箱梁,同时必须考虑对扭曲振动的抗风稳定性。

ii) 斜拉索的纵向布置

拉索的布置可以有多种组合,作为代表性的例子,有将拉索全部集中到塔顶部的扇形索(图一4)。在竖琴形布置中(图一5)每道拉索互相平行,塔上的各拉索锚固点间距基本相等。这种布置,拉索重量大,梁受的压力大,塔身还要产生弯矩。这种竖琴形布置无论在结构上或经济上都劣于扇形布置。不过从侧面看去,斜拉索都是平行的,桥的外观较好。有名的莱茵河上Düsseldorf的桥(Theodor Heuss桥 Oberkassel桥, Knie 桥)为了使桥梁美观,都选择了竖琴形拉索⁴⁾。



图4— 斜索的扇形布置(索在塔顶一点集中)



图5— 索斜的竖琴式布置

然而,扇形布置的拉索,如系颜色鲜明的多根细索,则不须任何整形,悬在空中,看上去很像一层薄膜,并不有损桥的外观。

如准备应付某种事故,有必要更换拉索时,采用拉索集中于塔顶的纯扇形布置就有困难了。若使拉索能够更换,塔顶拉索的锚固应留出一定间隔,例如象图6那样布置。虽然锚固区的布置间隔可以放得更长一些,但是这样一来,由活载引起的拉索拉力的水平方向分力差将使塔产生弯矩。

当然根据桥位处条件、主跨与边跨的不同比例,也可以考虑他种合适的拉索布置。

一个相协调的拉索布置,对桥梁外观是很重要的,所以选定拉索布置形式必须细心注意,慎重从事。

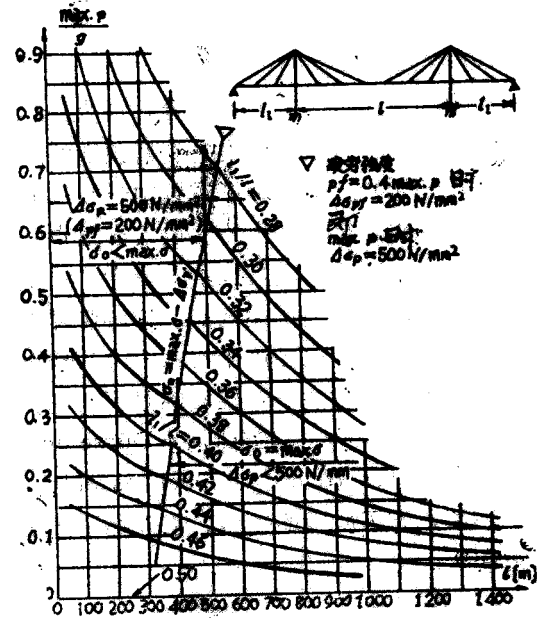


图 7— 为选择最佳 L_1/L 的图示

iii) 主跨和边跨的跨长比

边跨长 l_1 与主跨长 l 的比,主要是影响塔顶与锚墩间的拉索(边跨最上面的一根拉索)或称后牵索的应力变化,当主跨作用活载时,其应力增加,边跨加载时其应力减小。当 $l_1/l > 0.4$ 即边跨较长时,此后牵索的垂度变大。在所有拉索中,后牵索的应力变化最大,这种由活载产生的应力变化次数,可达到百万次级,必须注意务必要低于拉索的疲劳强度(例如对公路桥为最大活载的40%)。

l_1/l 的比值,还影响着锚墩的负反力,反力大小随 l_1/l 的增加而减小。这是假定主跨两侧有塔的情形,当主跨的一侧有塔时(二跨非对称斜拉桥)主跨长为1.81左右即可。

恰当地选择主跨与边跨跨长的比例,在设计上就会很经济。图一7的诺模图,可以

帮助我们选择好这个比值。图中纵轴表示 p/g ,横轴表示主跨长(m)。相对于 l_1/l 各个数值的曲线是按式(1) $E_{eff} = 180,000 \text{ N/mm}^2$ ($\approx 18,000 \text{ kg/mm}^2$)计算的,它表示拉索刚性降低时反牵索的应力减小。图中接近垂直的线段表示后牵索的应力变化量为活载的40%,即表示 $\Delta\sigma = 200 \text{ N/mm}^2$ (20 kg/mm^2)时的情形。此应力变化接近平行索的疲劳强度,它的安全率约为1.1。一般来说,只有 p 中的一部分影响疲劳强度。

对公路桥钢桥的 $p:g$ 约为0.4,混凝土桥约为0.2。对于铁路桥这个比值各为1.1和0.6。由图可知,如欲获得较好应力状态,钢桥比混凝土桥边跨跨长小些为好。

另外,此诺模图还表明,即便选择出恰当的边跨跨长,主跨跨长也是有一定限制的,原因是锚墩的负反力变得非常之大,就要增加较多的额外费用。它的界限规定是由后牵索的刚性不得低于 $E_{eff} = 180,000 \text{ N/mm}^2$ 这一假定出发的。但这也不是必要条件,可以按图一3所示办法——用加强索提高拉索的刚度。图一8的诺模图,表示在扇形索的每侧布置一根至二根加强索的情况。采用此种加强索,即使主跨长达1700米,也能选出适当的边跨跨长。

边跨与主跨比的选择,当然与水深、地质情况、塔的布置(如只在主跨的一侧设置索塔)等条件有关。

如果在主跨外侧不需设置大的自由跨时,边跨最好采用跨长较小的连续梁。这样几乎可使所有边跨上的拉索都能作为锚固索发挥作用(图一9)。Düsseldorf(西德)的二桥;Knie桥oberkassel桥边跨的竖琴形拉索,就固定在引桥的桥墩上(图一10)。在这种情况下,引桥采用予应力混凝土结构有利,Mannheim的Kurt-Schumacher桥⁵⁾与莱茵河的Flehe桥,就利用梁重作为配重,两桥的主跨是钢桥,由于塔附近承受较大轴向压力,因此容易由钢结构变为混凝土结构。

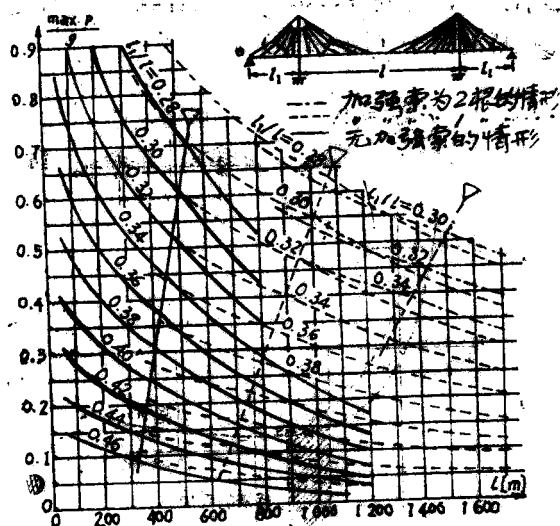
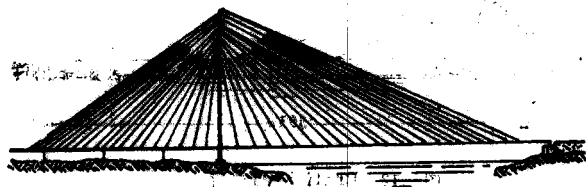
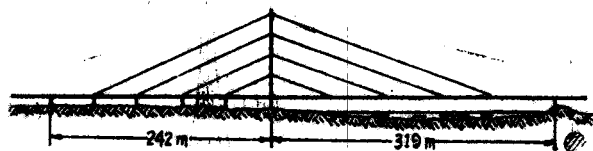


图8 选择最佳 L_1/L (图示)

(备注) 上图据以下假定作成 $E_s = 210\,000\text{N/mm}^2$, $E_{eff\ min} = 180\,000\text{N/mm}^2$, $\sigma_{max} = 750\text{N/mm}^2$, p_{max}
 $\Delta\sigma_p = \sigma_s - \sigma_a = 500\text{N/mm}^2$
 疲劳强度为 $0.4p_{max}$: $\Delta\sigma_{pf} = 200\text{N/mm}^2$



图一9 在引跨上抵消负反力的情形例 (Rnie桥)



图一10

的力矩, 造价为之二倍。为避免此事, 有几座斜拉桥, 在塔的下部设置铰, 使基础只受垂直力的作用。(建于莱茵河上的Kurt-Schumacher桥及Oberkassel桥⁵⁾就是实例。)

V) 塔 的 斜 倾

有几座斜拉桥, 塔向边跨倾斜, 例如捷克Danube河上的Bratislava桥⁷⁾(图一12)和意大利Firenze处的ArnQ桥就是这样。这种向边跨倾斜的塔, 使后牵索变短且坡度

IV) 塔的最优高度与刚度

塔的高度影响拉索的重量和主梁的轴向压力。塔高, 则拉索的重量小, 主梁压力小。图一11的曲线显示出塔高超出 $0.2l \sim 0.25$, 这个范围就没有什么意义了。因为塔过高, 需要增加额外的用钢量。只在主跨单侧设塔的斜拉桥(2孔), 其 h/l 相当于1.8。

塔相对于桥轴方向应该做得纤细一些, 以使抗弯刚度变小一些。这样不仅减小活载引起的塔柱弯矩, 使后牵索充分起作用。而且可以通过塔顶和后牵索将左右两侧拉索的水平分力的差值, 传达到锚墩上。这比利用塔的抗弯刚度来抵抗水平分力差要经济得多。

塔的桥轴向刚度较大的Morandi形初期斜拉桥(如Maracaibo桥), 基础产生很大

变陡, 但在经济上并无优越性。同时, 这种塔是很不易施工的, 必须先做成垂直的, 然后再使之倾斜。

把塔做成向主跨倾斜的Tasmania(澳大利亚)的Batman桥, 并无任何意义, 外观也不算好。

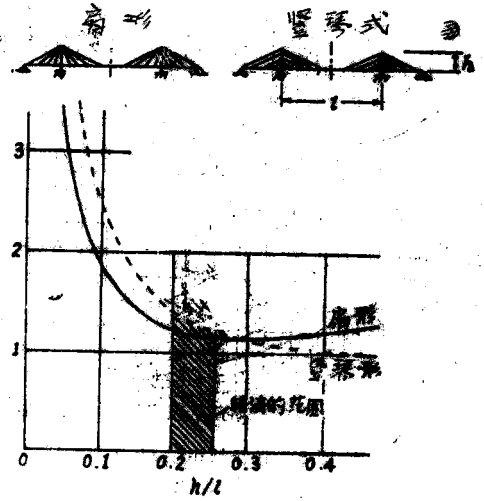
vi) 拉索的横方向布置和主梁的断面形状

一般拉索是从主梁的两侧斜向上吊较

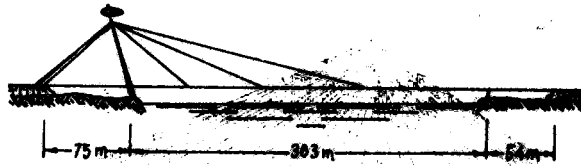
好。这时拉索是两个面的，两根塔柱布置在栏杆的外侧。塔身断为非对称面，重心应偏向主梁，使整个塔身断面更有效地承受荷载。拉索面可以做成垂直的或略带倾斜的（图—13a, b），塔根带锥形，当塔柱固定于基础时，拉索传向塔柱的风荷载较小，二塔柱间不必设水平联系。当塔比起桥宽大很多时，可使索面或塔根略略倾斜，塔顶用水平梁联结效果较好，拉索面能保持垂直（图—13c）。

对大跨径桥，将所有拉索都集中于塔顶的A形塔，外观是优美的（图—13d）。作为实例有架设在劳尔河口的主跨404m的 St. Nazaire 桥²³）从路面看去，异常美观（图—14照片略）。二个索面集中于塔顶处，增加了塔的抗扭刚性。当桥面较高时，为使基础横桥方向变窄，桥面以下的塔的下柱部分缩

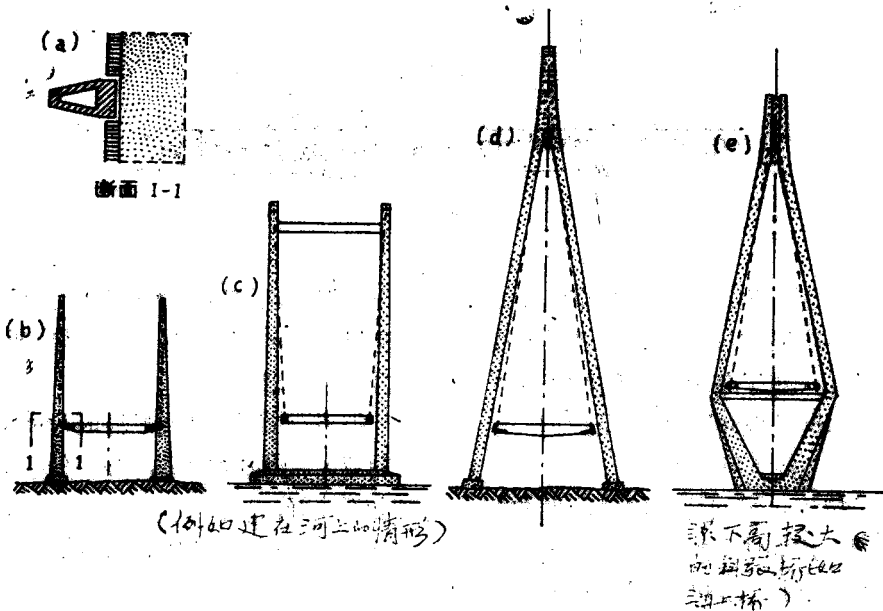
小为宜，丹麦 Farol 桥的设计就是这种斜拉桥的例子（图—13e）。



图—11 h/e (塔高: 跨长) 和索重的关系



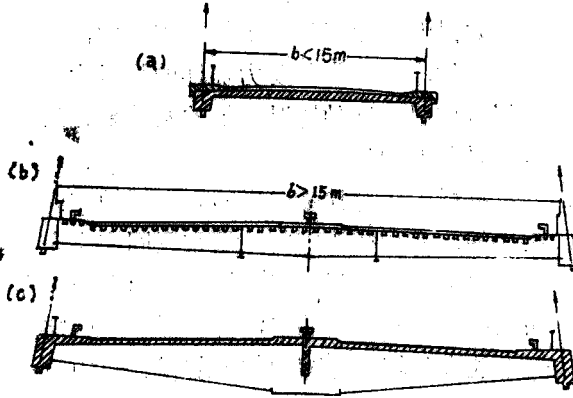
图—12 Bratislava 桥 (捷克)



图—13 两面索斜拉桥的塔的形状

当主梁由两侧悬吊时，梁断面可以非常简单，不需抗扭刚性。因为梁的两侧有拉索的有力支持，垂直变形又很小，即便受到偏心荷载的作用，也仅能使桥面沿桥轴直角方向有微小的倾斜。另外，这种桥从空力弹性学的稳定性方面考虑，也不需抗扭刚性。因此，桥宽15m的斜拉桥，如桥侧具有边肋加劲部)的简单的混凝土充实断面或中空断面，就能满足需要(图—15a)。这种加劲部分不仅使拉索在任何位置都能锚固，对压屈的安全性也有充分保证。

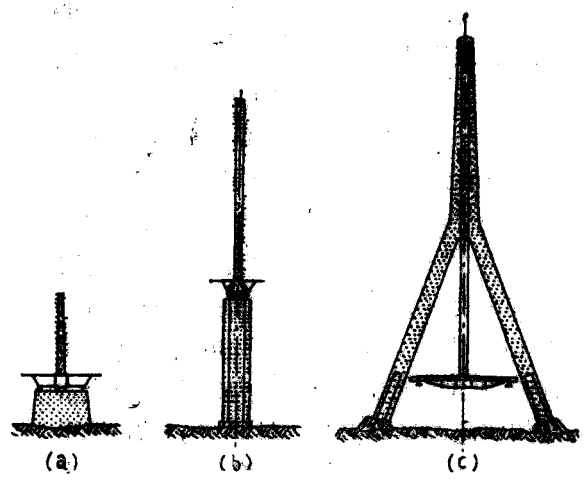
当桥宽大于15m时，须每隔3—5m设一道横梁。这用混凝土桥板或钢桥板即可容易做到。此时配置于桥轴方向的钢筋或钢制加劲肋，可起承担一部分压力(图—15b.c)。



图—15 (a)桥宽 $b < 15\text{m}$ 时 混凝土斜拉桥的梁断面
(b)(c)桥宽 $b > 15\text{m}$ 时混凝土斜拉桥或钢斜拉桥的梁断面

由施工上的原因，直到主跨长 600m 左右混凝土桥板使用钢横梁也是有效的此时应考虑其联合作用。桥板如是混凝土的，桥轴向主梁也应是混凝土的，但要注意桥轴向压力引起的混凝土徐变问题。具有联合作用的最大斜拉桥是正在施工中的加尔各答Secod Houghly桥($l = 457\text{m}$ 印度)，它根据特殊理由，采用了钢纵梁。

当跨径大时，采用静载小的钢桥面板是有利的。在道路桥、边梁 (edge girder) 梁高有1.0~2.5m就足可以锚定拉索，如再附



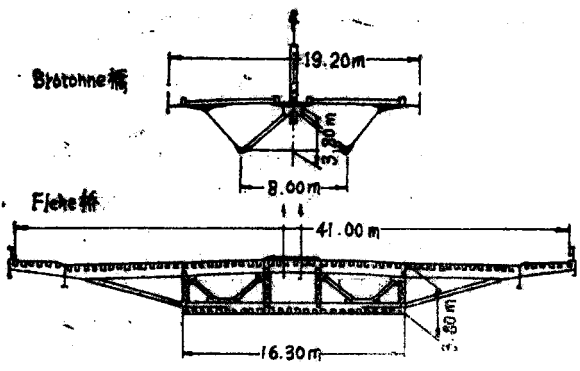
图—16 单面索斜拉桥塔的形状

加 1~2 根纵梁，可使大的集中荷载分散到几根横梁上去，同时可以作为架梁施工中放置转臂起重机之用(图—15 b.c)

对桥宽特大的公路铁路两用桥，也可采用 3~4 个索面。

有许多斜拉桥修成沿桥板中心有单个索面的。这种拉索布置，需要采用对偏心荷载有较高抗扭刚性的箱形梁(图—16)。其实例请见文献(9—10)。另外为防止交通事故须留有一定的宽度。为建筑保护拉索的护栏等都须要较宽的中央分离带。

在箱形断面上锚固拉索有种种方法(图—17)，例如塞努河河口的Brotonne桥¹¹⁾，它是具有两根为一组的斜拉索的钢斜拉桥，拉索是从两侧夹着一块中央腹板进行锚固的。



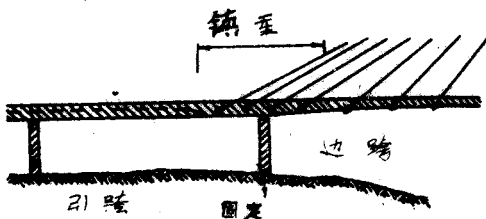
图—17 单面索斜拉桥的梁断面

也可像Flehc桥(图—16c)⁶⁾那样,使塔柱张开成逆Y形,从路面上看去,我并没有感觉它有什么迷人的魅力。

下列三座桥—Kurt-Schumacher⁵⁾桥,第二Main桥¹²⁾,第三Caroni桥(委内瑞拉),为了在二个索面和二根塔柱之间通行火车与电车,将塔柱稍微扩大了一些,公路路面放在索面的外侧。单索面形式能适用于300m以下的短跨径,像Flehc桥(主跨360m)那样的更大跨径桥也能采用一个索面,如将此桥换算成对称斜拉桥,相当于 $l=670\text{m}$ 。但对钢箱梁的大跨径斜拉桥来说,这种体系要增加钢重和造价,是不经济的。

vii) 斜拉桥的端部

边跨以及只有单塔的中跨的端部附近,有产生较大弯矩的部分。在那种梁端,梁的折角变大,对公路桥问题倒不算大,但对铁路桥就成为问题了。应使梁高随着接近引跨而逐渐增大,并做成连续结构,这样折角就可以被控制住。这种方法可用在引桥为边跨以及引桥与主跨相邻接的情况下。如此将梁作成连续的则后牵索的负反力可被增加跨自重和锚墩附近梁断面内所填的镇重用混凝土所抵消(图—18)。另外,将契端做成悬臂



图—18 使斜拉桥和引桥连续进而抵消负反力的情形例

式的,有时引跨本身就能平衡。如让斜拉桥与引桥连续,则后牵索的锚固可以分散到锚墩后面的某处。

viii) 支座和EJ(伸缩装置)的布置

将垂直方向的支座布置在两边跨的梁端,而不设在中间(塔的位置),使由斜拉索构成的弹性支承条件保持连续较好。如在

塔的位置设置垂直刚性支座,则此处将产生较大的顺桥向弯矩,那样塔处的梁就需比他处具有更大的抗弯刚性。

为对抗像风荷载那样的横向荷载(桥轴直角方向)所设的支座,必须是在水平面上有转角的结构。设在塔处的风载支座,可使用直接按装到塔上的简单橡胶垫片,它与梁中间要留有3mm的间隙,当没有风荷载时,梁可以在垂直方向和桥轴方向移动。在梁端,风支座设在桥中心位置上,支座必须能在水平,垂直方向作角变位(转动),同时也必须能在桥轴方向移动。

对于承受主要由制动力产生的桥轴方向水平荷载的支座,有另外的布置方法。对于对称斜拉桥,可在边跨端部使用特制的油压垫片,而不用一般的固定支座。这种支座,对诸如由温差而产生的那样的缓慢力,不作任何抵抗,但对像制动力那样的瞬时力,就起抵抗作用。这种情况,桥的两端都要设置EJ(伸缩装置)。

斜拉桥(尤其是扇形的)在桥轴方向是柔性的,亦可在边跨的一端布置固定支座。那时由温度变化等引起的桥轴方向的全部伸缩量都集中到另一端去,所以那一端就需要一个能进行较大伸缩的伸缩装置。例如架在哥伦比亚河上的Pasco-Kennewich桥就把固定支座设在离开一端763m的较短引跨侧的梁端。

有时固定支座设在塔的位置上,像铁路桥,它须要承受巨大的制动力,如将此力通过油压垫片分散到两根塔柱上是有利的。阿根廷的Zarate与Brazo Largo间的两座Parana桥¹⁴⁾就按装了油压垫片。

在地震区,采用以角钢,螺栓加固的支座来控制,日常营运中的变位,如迂由地震而产生巨大振幅,此支座能够自行破坏,特别是当地震时产生的更大变位时,通过减振器进行衰减,使具有巨大质量的上部构造不致损伤桥墩和塔。采用此种方法设计的

斜拉桥，对地震是非常安全的。

在对称斜拉桥中，如在主跨的中央设置铰和伸缩装置，则能在边跨的两端设置固定支座。采取这种布置时，主跨中央对弯矩是断开的，故用悬臂梁架会使闭合更为容易。采取大的塔高跨度比，并将最上面的一条拉索锚固在中央铰附近，梁轴挠度曲线中的相对转角可以变小，Mannheim 的 Neckar 河（西德）上的步道斜拉桥，即在 $1/2$ 处设置

了那种伸缩装置¹⁵⁾。西班牙道路桥 Florida 的 Jacksonville 附近的 Damepoint 桥，就是按照中央有铰设计的（图—19）。但对桥宽不大的大跨径桥，必须注意由风引起的此处的水平变位。

ix) 多跨斜拉桥

在地基条件不好，洪水水位高，水面又特别宽的河流上建桥，例如：Indus, Ganga, Brahmaputra 河（印度）那种情况，采用

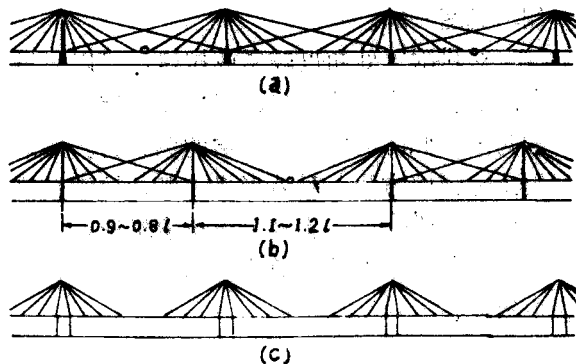


图—19 中间有铰的 Dame Point 桥（建设中）

跨长 $200 \sim 300\text{m}$ 的多跨桥较经济。它能充分利用大而深的沉箱（ $50 \sim 70\text{m}$ 深），具有的垂直方向上的大承载力。对于矮桥墩，后牵索可锚固于邻接的桥墩上，如能控制住塔顶两个水平变位，可以采用等跨径的形式。

向是 A 形的，每座塔有两个沉箱，但此桥后来没有施工（图—20c）。此类塔，最好采用桥轴方向刚性小，弯矩小，沉箱只受垂直力的系统。

(2) 最大跨径



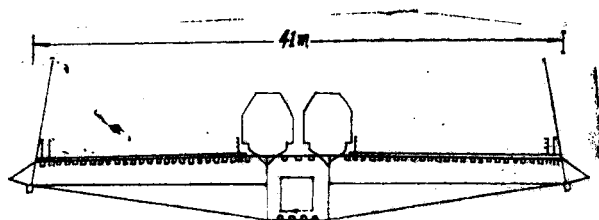
图—20 多跨斜拉桥

此时，被吊的梁两跨一连续，每两跨的中央部设一个伸缩装置（图—20a）。当梁的位置高，桥墩高时，按 $1.1L$ 的长跨与 $0.9L$ 的短跨组合成连续梁较好。只在短跨中，后牵索相互交叉，锚固在塔外的梁上，后牵索的垂直方向分力传到基础上（图—20b）。

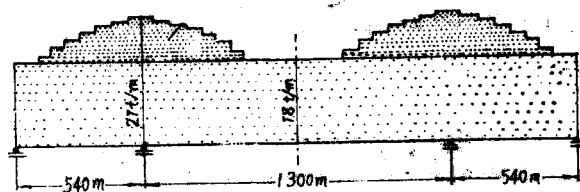
最早的多跨斜拉桥是1966年设计的 All-aaad 的 Ganga（印度），它的塔沿桥轴方

近二十五年来，设计、建造了多座斜拉桥，根据这些经验，采用密索式预应力混凝土斜拉桥，最大跨径在道路桥可做到约 700m ，在铁路桥可达 500m 左右。跨越墨西哥拿海峡（意大利）的钢斜拉桥，其主跨跨径是按 1300m 和 1500m 设计的，在构造上没有发生任何问题。其主梁断面示于图—21中。当然在拉索上需设加强索。为了抵抗较大的桥轴方向压力，钢桥面板需要额外增加些钢材。如采用厚 12mm 至 20mm 的钢板，并做成大的肋形，也是容易得到处理的。主跨为 1300m 的斜拉桥，其索塔附近处所需增加的用钢量示于图—22中。

对大跨径的悬索桥与斜拉桥比较发现，斜拉桥不但在变形与动力功效方面较悬索桥有明显的优越性，而且也非常经济。为了比较，下面举出一例：该桥桥长为 $680\text{m} + 1500\text{m} + 680\text{m}$ ，桥宽为 38m （垂度：跨径 = $1:10$ ），



图—21 公铁路并用斜拉桥（主跨1500m）的梁断面



图—22 主跨1300m公铁路并用斜拉桥（公路6车道、铁路复线）

采用悬索桥型式其重量为四万六千吨，而斜拉桥（ $ht:l=1:4.5$ ）仅为二万零二百吨。斜拉桥在桥面结构方面要少许多费一些钢材，并且斜拉桥的塔柱较悬索桥的为高，要多费25%的混凝土。但在悬索桥中，为了锚住力量巨大的缆索，需要非常大的锚块。这在斜拉桥中是不需要的。而这种锚却是造成桥梁造价差额的主要因素。

（3）索 塔

索塔往往作为桥梁美观的考虑对象，我们工程师为了获得美好的外观或者将塔作成带有锥形的，或者通过采取调和的外形比例以及适当的轮廓形状，尽量注意使之保有简洁的外形。

根据经验，混凝土塔较之钢塔要便宜，其造价的差额随桥梁的加大而愈益增加。若在塔的顶部锚定缆索，采用空心断面可以将锚碇结构全部放进塔柱断面以内，比实心的好。

关于缆索的锚碇，过去已设计出多种型式，现在在设计上主要是考虑使缆索容易更换，这一点正在成为常识，按图—23所示，这一点并不难解决。缆索的锚碇通常是将锚头（或称索座）插进混凝土内的钢管中，然后用环形螺母将锚头固定到所定位置。为了

满足锚定操作需要，在塔顶的锚定处，必须保有一定的空间。由于相对着的缆索锚碇后要产生水平方向的拉力，为消除这些拉力，必须在锚碇点外侧配上予应力高强钢丝，使该处出现水平压缩状态。

在配置缆索时，必须考虑如何避免，因其偏心而使塔柱出现扭转。有一种方法可以解决，就是使缆索交差地锚碇在塔的两个外侧，见图—24。

对塔附近处角度较紧的缆索，可以将塔内的钢管做成弯曲形状，以缓和锚碇部分处的角度。此时需要考虑缆索的侧压力。如采用上述锚碇方法，对A形塔，既使缆索在锚碇处倾斜大一些，也容易将缆索锚碇。

如何在锚碇处避免出现弯矩，将在（5）中叙述、

（4）缆索与其锚碇

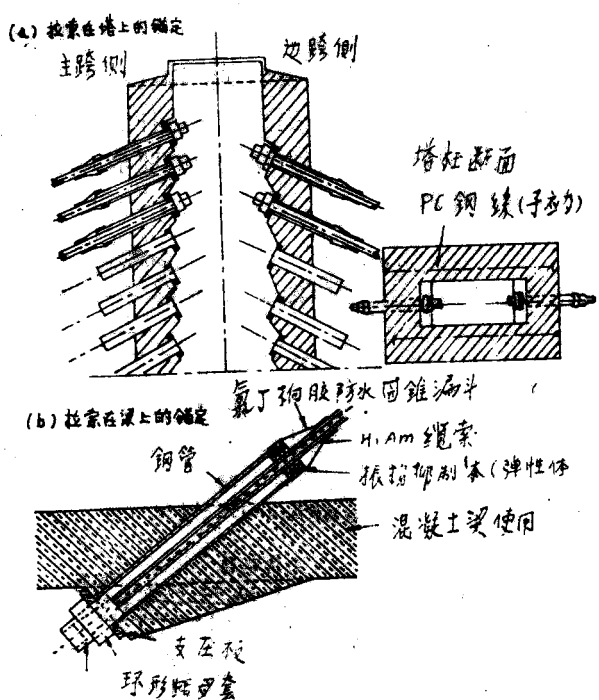
缆索是斜拉桥的重要构件，在疲劳和防腐方面必须保证安全，所以一定要选用品质优良的。究竟那种类型的缆索最适于斜拉桥，可根据多次试验的结果和实际经验加以判断。

由于此论文没有足够的篇幅来详叙此类内容，故仅择其要点述之于下：

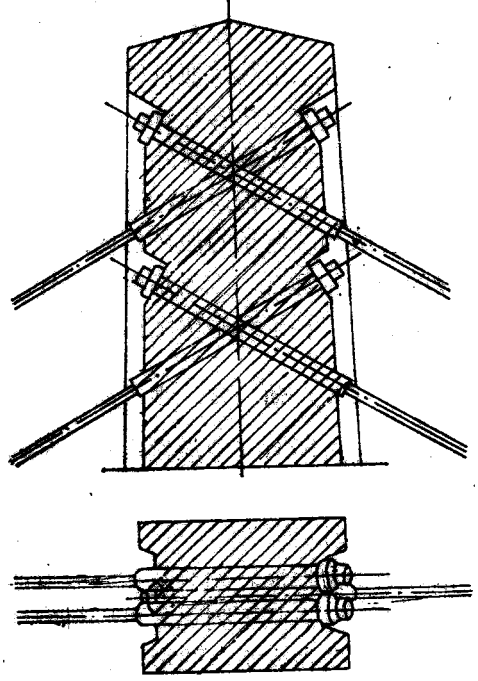
（甲）用涂料与钢丝机械地咬合在一起

的方法进行防腐的杆状螺旋索，已经证实不能用在长大斜拉桥中，因为有几座使用这种

拉索的长大斜拉桥中，拉索都已不耐使用，因为拉索生锈必须更换。



图—23 混凝土斜拉桥拉索在梁和塔中的锚固方法



图—24 拉索在塔顶交叉锚固的一侧

(乙) 平行钢丝索或平行股绞线索有可靠的弹性性能和明确的弹性模量，所以比钢丝绳好。

(丙) 拉索的锚固部位，必须结合严密，使水不能浸入，拉索外面必须采用以套管完全罩住的防腐方式。套管是黑色聚乙烯的最好。最少20年材料性质不会改变，如果运输、安装以及灌浆等操作做得好，估计40年至50年不需维修。套管可以容易地用外刷涂料的方法防腐。用钢管也可，不锈钢或其他金属管也可。如果从安装方面考虑，最好是选用聚乙烯管。因为这种管在工厂制成后卷在卷筒上，到施工现地可以很简单地展开安装。套管内钢丝或钢绞线周围的空隙必须用水泥浆之类的防腐材料充填。当注入水泥浆时，在注入方法方面要充分注意。

(丁) 拉索的强度取决于锚固部分的强度。镀锌锚头疲劳强度较低。因为钢丝不可

避免要受到镀锌高温的影响。对直径大于80mm的粗索进行试验，结果表明这种镀锌锚头的疲劳强度降低到 $100\sim120\text{N/mm}^2$ ($10\sim12\text{kg/mm}^2$)。使用钢套管外罩拉索时，钢管能在承担活载中发挥一定的作用，同时还可以减小钢丝的应力振幅。这种钢套管在第二美因桥及 Brotonne 桥中使用过。

(戊) 现在已创造出特别的锚固方法了。例如：向锚头中进行冷铸入的 BBR HiAm 锚，以及弗氏国际锚等。西班牙的 Vigo 桥是采用弗氏方式锚固的。今后还会创造出另外的锚固方法。7 mm 钢丝的 HiAm 锚固方式，平均应力为 700N/mm^2 ，其疲劳强度能保持 $200\sim220\text{N/mm}^2$ 。根据日本最新的报告，对粗的平行线拉索进行 200 万次疲劳试验，其结果疲劳强度为 300N/mm^2 。具有高疲劳强度的拉索，对钢斜拉桥的牵索尤其需要。

(己) 因为由于交通事故完全避免拉索受到损伤是困难的, 所以设计时必须考虑使更换拉索更为简单。钢索在梁上和塔上锚碇的例子示于图23中。拉索的长度必须能够调整, 图一23所示结构, 便可借助油压千斤顶用调整螺丝扣的方法容易解决。

(庚) 拉索的颜色对外观是很重要的。应与其背景的天空相适应, 过暗或过亮都不好。著者认为暖色系的淡灰色或浅绿色能与一般的环境相适合。聚乙烯管可以外用色带缠裹, 便于根据景观来确定拉索的颜色。

(5) 动力性能

如果使用 E_{eff} (考虑拉索垂度时的拉索弹性模量) 大于 $18 \text{ 万 } \text{N/mm}^2$ ($1.8 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$) 的大刚度拉索, 可以期望斜拉桥有非常好的动力性能。尤其是空气动力性能也是这样。这一点从下列现象可以得到证实:

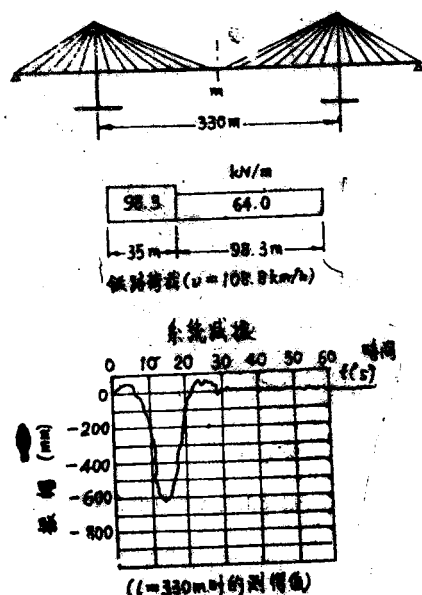
(甲) 受拉索垂度的影响, 拉索的变形成为非线性的, 就要产生弯曲共振, 所以垂度以小些为好。

(乙) 担负主梁重量的多根斜拉索, 各有不同的周期。如发生某种使桥按某种模式振动的作用力, 由于不同周期拉索的干涉, 振幅就要很快衰减, 其结果使多索体系的系统减振较之普通的混凝土结构或钢结构梁桥、拱桥以及悬索桥所产生的系统减振都要大。由于有这种系统减振, 对长大桥梁最为危险的大振幅共振, 就不会轻易出现。

这种所希望的动力性能, 最初是通过建于 Stuttgart 的希拉大街上的长 90m 的人行斜拉桥的试验得到证实。此桥为轻量斜拉桥 (恒载重仅 150 kg/m^2) 容易出现大的振幅, 但实际并没有大于 5 mm 的振幅。第二个例子是在 Bergamo 的 ISMES 研究所 (意大利) 进行的阿根廷的铁路、公路并用斜拉桥的动力模型试验中得到证实, 图一25为其试验结果。这里显示出典型的系统减振效果。这种好的动力性能在其他桥的悬臂架设施工中也

得到了证实。另外, 通过列车行驶也同样可以得到证实。

如果采用多条拉力较大的刚性拉索, 且桥梁的跨径和桥宽的比小于 40 时, 这种系统减振对任何的共振振动都能抑制, 使空气动力弹性学的稳定性提高。在这种情况下, 就不再需要按空气动力弹性学的要求, 对断面进行整形了。



图一25 从斜拉桥振动模型试验中得到的振动图

有长的列车从桥上通过时, 使用悬索桥创造出来的断面就不行了。这是因为在强风作用下, 桥上的列车很容易使悬索桥发生振动。因此, 为了解悬索桥空气动力弹性力学的稳定性而发展起来的理论, 用于密索斜拉桥时, 其适用范围是有一定限制的。只要系统减振在那种试验中不再现, 在部分风洞试验中也同样是吻合的。

对沿桥梁中心线由单面拉索吊住的斜拉桥出现的扭转振动, 系统减振是抑制不了的, 并且弯曲和扭转的振动频率之间, 没有任何关连。如果箱形梁断面有较大的 C_M 系数, 则有发生扭转共振振动的危险。此时, 有因风力而发生扭转变形的可能性。关于这一点, 我们的知识还是有限的, 希望能尽快

加以研究。

再有一个动力问题，就是拉索自身的振动，从几座斜拉桥上都观测到了。尤其在 Brotonne 桥中，作为防止拉索振动的办法，于路面上设置了汽车用的减振器。著者们还采用了在拉索锚碇部附近的钢管端部，装上了氯丁橡胶减振器，见（图—23）。

此氯丁橡胶减振器阻止拉索在碇处的角度变化，使拉索免受附加的弯曲应力。实践证明这种减振器可将长 150m 以内的拉索振幅限制在 20mm 以内。如果使用聚乙烯管，其内充填水泥浆，则拉索会产生大的减振，使拉索不易振动。即使拉索振动了，如专家们所掌握的，已有数种限制方法是可以解决的。

（6）铁路斜拉桥

密索斜拉桥具有的大的系统减振显示出它对铁路桥非常适合。尤其对行驶近代高速列车的铁路桥，它有高的拉索恒载应力及为了得到足够刚性必须有大的恒载质量。这一点如在铁路桥上采用道碴轨道，是容易得到足够的恒荷载的。再有当主跨跨径 $l < 400\text{m}$ 时，桥面最好采用预应力混凝土结构。为了使挠角变化及曲率尽量变小，主梁梁高须比道路桥大一些。边跨短些及与道路桥并用，都对减小拉索应力振幅有效。

前已修建过数座长大铁路斜拉桥，有的还正在施工。今举出数例如下：

- 单塔主跨 148m 的第二美因桥。
- 主跨 330m 的 Parana' 桥（同跨径桥有两座）。
- Belgrade 的 Save 桥，主跨 254m。
- 架于委内瑞拉 Caroni 河上的 Angosturite 桥，主跨 280m。
- 阿根廷 Posadas—Encarnacion 的 Parana 桥，主跨 250m（施工中）。
- 架于本州四国路线上的柜石岛、岩黑岛桥、为主跨 420m 的双桥面桁架斜拉桥。

从上举各例可以看出，斜拉桥是适于作铁路桥的，今后还会修建为数众多的铁路桥。

（7）架桥方法

过去，斜拉桥一般都采用以塔为起点的悬臂法施工。在某些这情况下，边跨也有采用支架法施工的。由塔向主跨和边跨两个方向悬臂架设时，以及在设计包括塔柱本身，辅助支柱、支撑以及包含基础在内的塔身结构时，都必须考虑在可能发生非对称垂直荷载，及对称非对称风荷载下，都能保证安全。

如果拉索间隔较小，拉索直接吊住块件的前端，则悬臂架桥法便是一种简便的方案。在塔顶可利用固定钢丝与绑扎在另一塔上的补助缆索来控制它的变形。如系予应力混凝土，像帕斯科—肯尼威克桥那样，也可以使用预制构件。这时可以利用浮船将重的块件运往现场。这种方案在一般桥梁中，因有大的剪力以及因温度变化对弯矩很是不利，但在斜拉桥中剪力和弯矩都非常小，同时接头部分因有由拉索传来的较大桥轴向压力，所以是不成问题的。

最好是使用较小的预制块件和可移动的钢模，用混凝土接缝。为了吊住悬臂前端处的移动钢模，可以利用最上段的拉索锚碇设备。

当然对拉索应力，塔的变形以及各架设阶段的位置变化等，必须事前进行计算，并在架桥现场进行严格的核对。这方面的技术情报是很需要的。

从悬臂架桥的这些经验显示出，将来可以架设长大桥梁，作为用悬臂法架设的最长桥梁的一例，举出 Fleche 桥，跨长为 368m。如系两侧建塔，此桥主跨相当于 730m。当然，因为跨径和宽度的比值很小，梁必须努力设计成空气动力弹性稳定性较好的形状。因为在悬臂架设过程中，还不 下转 97 页

柜石岛岩黑岛公路铁路合用斜张桥的设计

(日) 成井信 松下贞义 山根哲雄 八田政一

前 言

柜石岛·岩黑岛桥架设在本洲四国连络桥儿岛坂出路线海峡部分约9km中的柜石岛——岩黑岛——羽佐岛处。是按公路铁路合用桥设计的。

本桥设计开始时取悬臂桁架桥，斜张桥，拱桥及悬索桥四种桥型方案进行比较，从中选出了悬臂桁架桥和斜张桥二个方案。其后对两个方案又做了比较详细的研究由于二者在工程费上无甚差别，从而选中了施工经验多，技术问题少的悬臂桁架形式。其后对斜张桥需要解决的几个技术问题不断进行了探讨，同时于1976年、1979年又委托土木学会进行研究，还引入最新技术，对存在问题，进行了反复研究。

通过探讨解决了防震设计，钢索系统及其防腐措施，架设过程抗风稳定性的保证，列车运行性质等有关斜张桥型式的主要技术问题。在此基础上对两种桥型又重新进行比较，认为斜张桥型式在列车运行，船舶航行及养护维修等方面有利，而且在经济性方面也优越，所以改而采用斜张桥了。

此两桥的上路部分为公路，下路部分为

铁路，是双层桁架密索型式的三跨连续斜张桥，中央跨长420m。桁架上弦杆和钢桥面板联合在一起，塔是基部两脚弯回的刚架结构。中跨部分准备采用正式的悬臂施工法。本桥顺桥方向抗震固定，是采用皿形弹簧，固定于两端桥墩的方式，下部工程采用天然基础或设置潜函基础。

以下对本斜张桥的概要，设计上的主要问题及探讨结果等进行介绍。

1. 柜石岛桥，岩黑岛桥的基本条件

本桥设计基本条件如下

(1) 线型

公路路面和铁路钢轨顶面的高低差：

12.510m

纵断坡度：1%为直线形

公路横向坡度：2%直线形

平面线型：直线

(但在柜石岛侧及羽佐岛侧的两端加入一部分缓和曲线，图1)

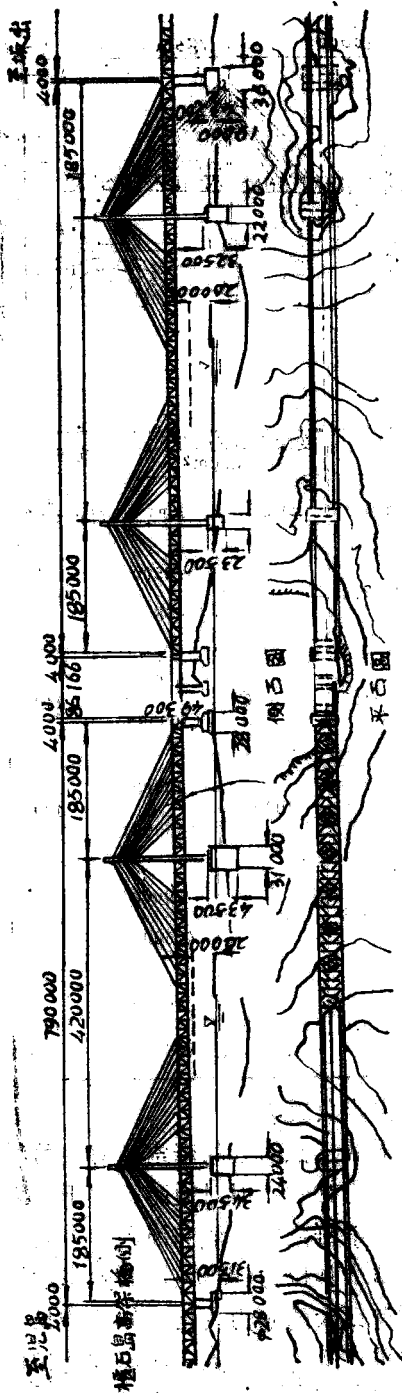
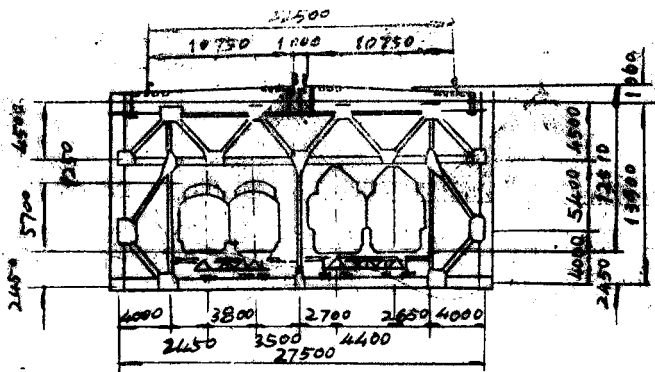


图1 柘石岛桥、岩黑岛桥一般布置图



主塔断面图

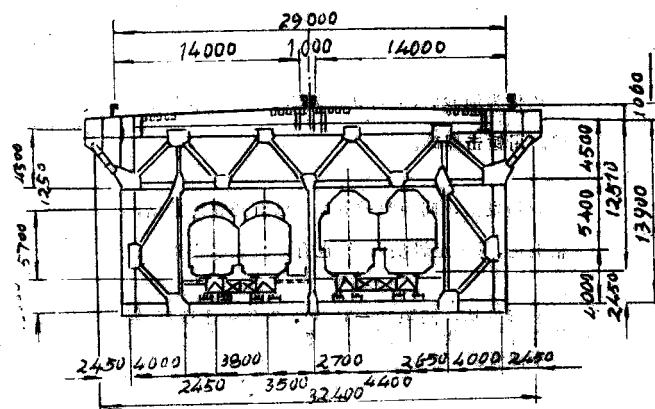


图2 横断及建筑界限

铁路部分：

原线(甲线)复线	$V = 120$ 公里/小时
新干线 复线	$V = 160$ 公里/小时

(3) 设计荷载

公路部分(1种2级): TT-43、TL

—20

铁路部, (列车 { 原线复线(KS-18)
4车线荷载 } 新干线复线(N-18,P-19)

(4) 上部结构各种指标

跨径比: $185 + 420 + 185 = 790m$

主桁架: 上承 联合钢板

: 下承 纵梁直结轨道

: 主构造 带垂直杆华伦式桁架

钢索: 平行钢丝束(钢丝径 $\phi 7mm$)

塔: 钢造刚构塔

(2) 标准

公路部分: 第1种第2级 $V = 100$ 公里/小时, 全宽(4车道) $22.5 \sim 29.0m$ (图2)