

# 悬索桥主缆的施工

## ——现状与展望——

铁道部大桥局设计院 技术室 严国敏(译)

**【内容提要】** 现代悬索桥的主缆采用平行钢丝索股来组成。平行钢丝索股的施工则可采用 PWS 法或 AS 来制造与架设。本文从一些桥梁的实例来对 PWS 法与 AS 法进行比较,并介绍一些桥梁采用新的变通方法。最后对今后更大跨度悬索桥的主缆施工方法作一展望。

**译者前言** 今年 11 月下旬,译者出席在广州召开的《第 12 届全国桥梁与结构工程学术会议》后,应厦门路桥公司之邀,专程由广州转赴厦门,参加该公司与日本长大桥梁株式会社专家组(由森田泰生、山崎康嗣、山科三归、安部善宪等组成)讨论有关厦门海沧大桥的技术标准。

在告别宴会上我碰巧与山崎康嗣先生相邻而坐。在用英文交谈中我告诉他曾译过他在各个刊物上发表的文章。山崎先生很高兴,并客气地感谢我将他的作品译成中文介绍给中国的同行们。

山崎先生回到日本的次日,即邮寄了三篇文章给我希望我有兴趣将它们译成中文,并表示希望今后经常保持联系。三篇文章中的两篇我早已于 1994 年 3 月及 1996 年 3 月分别译成中文,编为《桥梁信息资料》的 N94—9 与 N96—4 期。另篇题为:《Cable Construction—Now and Future》为山崎与山科两位先生用英文在 IABSE 刊物上发表的论文。现将此文译出供国内同行们参考。

### 1. 引言

在丹麦、瑞典、香港、中国和日本正在修建许多大跨度的悬索桥,并且有些跨度更大的悬索桥正在计划与设计。

大跨度悬索桥上部结构施工的主要问题是空气动力稳定与主缆的架设。

现代悬索桥的主缆主要有两种施工方法;一是主缆由预制的索股(包括封闭式卷制索股、旋扭索股和平行钢丝索股)组成,另一是主缆在工地用钢丝编制成索

股,然后再组成主缆。跨度在千米左右或大于千米的大跨度悬索桥,其主缆都是用很多的平行钢丝索股编制而成,这些索股或用预制索股(PWS 法)或用空中编丝索股(AS 法)。

PWS 法主要用于日本的悬索桥以及最近的中国悬索桥,而 AS 法则在过去的 10 年中用于欧洲的一些悬索桥。两种方法各有其优点和缺点,上述一些桥梁的主缆,其主缆施工方法的选择可能是取决于

工程方面与经济方面的考虑。然而,对今后更大跨度的悬索桥来说,须要开发效率更高的施工方法。

## 2. 悬索桥

表 1 所列为过去 10 年中世界上已建成或正在修建的主跨超过 500m 的大跨度悬索桥。

表 1. 现代悬索桥(1988 年至今)

年代	桥名	国家或地区	主跨(m)	PWS/AS法	主缆钢丝截面组成(直径×丝数×股数)	钢丝强度(MPa)
1988	下津井桥	日本	940	AS	5.37×552×44	1568~1764
1988	南备赞桥	日本	1100	PWS	5.12×127×271	1568~1764
1988	北备赞桥	日本	990	PWS	5.18×127×234	1568~1764
1988	第二博斯普鲁斯桥	土耳其	1090	AS	5.38×504×32	1570~1770
1993	彩虹桥	日本	570	PWS	5.37×127×127	1568~1764
1993	阿斯库桥(Askoy)	挪威	850	LCR	D99×21	
1996	西陵桥	中国	900	PWS	5.00×91×110	min 1700
1996	虎门桥	中国	888	PWS	5.2×127×110	min 1600
1997	高海岸(Hoga Kusten)桥	瑞典	1210	AS	5.27×320×37	1600~1800
1997	青马桥	香港	1377	AS	5.38×368×92	min 1570
1997	白鸟桥	日本	720	PWS	5.20×127×52	1568~1764
1997	大贝尔特东桥	丹麦	1624	AS	5.38×504×37	1570~1810
1998	明石海峡桥	日本	1990	PWS	5.23×127×290	min 1764
1999	江阴桥	中国	1385	PWS	5.35×127×169	1600~1800
1999	来岛一号桥	日本	600	PWS	5.16×127×44	1568~1764
1999	来岛二号桥	日本	1020	PWS	5.13×127×102	1568~1764
1999	来岛三号桥	日本	1030	PWS	5.00×127×102	1568~1764

译注:LCR=Locked Coil Rope=封闭式卷制钢缆。D99=每股 LCR 的直径为 99mm。

D99×21 的主缆截面形式与传统的圆形主缆不同,可能是每根主缆的截面为 3 行×7 列=21 股的所谓露索式(open bundle),详情请参考 N95—03 期《桥梁信息资料》P.1 的图 1—1。该桥年代与国家皆与表中所列一致,但主跨 623m 与表中的 850m 不一致。译者估计两者可能是同一座桥,主跨长度的不同有待核实修正。



### 3. AS 法与 PWS 法

#### 3-1 AS 法与 PWS 法的比较

主缆的施工方法可从主缆的质量、施

工所用的临时装置与设备、主缆的施工工期,以及锚固主缆所需的空间等各个方面进行比较。表 2 所示为比较的概要。

表 2 AS 法与 PWS 法的比较概要

施工方法	质 量	猫道装置	施工时间	锚固空间
PWS	工厂制	重 型	较 短	较 大
AS	工地控制	轻 型	较 长	较 小

平行钢丝索股的质量要求各钢丝之间没有拉力差与不交错。通常,用 PWS 法制造的平行钢丝索股因为是在工厂内预制的关系,各钢丝之间的拉力差值能保持在容许范围之内,并且由索股的制造线来保证钢丝之间没有交错。AS 法的平行钢丝索股是在猫道上制造的关系,传统的 AS 法平行的钢丝索股的钢丝之间拉力差是用调整每根钢丝的垂度的方法来控制的,而各钢丝的不交错是用所谓的摇抖分出(shake out)方法来保证的。PWS 法与 AS 法相比,似乎 PWS 法的钢丝拉力差值可以做到比较小一些,但这没有得到证明;而钢丝的不交错在 PWS 法中完全可以做到,但在 AS 法中则不一定。

主缆施工所需的临时装置与设备,无论是 PWS 法或 AS 法,都包括有猫道装置(猫道、抗风缆索、拉索与锚固件等)以及牵引设备。除此之外,AS 法在工地要有卷放与卷收装置,PWS 法在工厂内要有索股制造场地。PWS 法需要有较重型猫道装置与牵引设备,这是因为每股预制钢丝索的 127 根或 91 根钢丝是一起在猫道上被牵引的关系。相反,AS 法则不需重型猫道与牵引设备,因为在同一时间只有少量的若干根钢丝在空中或猫道上编拉(译注:一般是从每个方向最多只有 3 对或 4 对钢丝被牵引)。表 3 所列为 AS 法与 PWS 法所用猫道装置差别的一些桥例。

表 3 PWS 法与 AS 法的猫道装置

方法	桥 名	猫道宽度 (m)	设计荷载 (kg/m)		猫道缆索		
			恒载	活载	根数	直径 (mm)	破断力 (t)
PWS	南备赞大桥	4.5	319	20.5	10	56	208
PWS	明石海峡大桥	5.0	319	48.0	12	54	284
PWS	虎门大桥	4.0	217	31.0	8	48	150
AS	下津井大桥	4.5	396	108	10	62	254
AS	博斯普鲁斯二桥	3.125	126	10.0	10	26.9	65
AS	大贝尔特东桥	3.0	110	10.0	8	26.9	65

注:表中带有 \* 记号的为估计值

主缆的施工时间,PWS 法由预制索股的牵引时间来控制,而 AS 法则由钢丝编

拉的时间来控制,后者的钢丝编拉时间取决于一次可以编拉多少根(几对)钢丝及编拉的速度。两者的时间并受索股调整工作时间的控制,调整时间又取决于索股的数量。对PWS法来说,127根钢丝(一根索股)可以一次用每分钟约30m的速度来牵引,而对AS法则以每次编拉8根(4对)钢丝为例,其编拉速度约为每分钟240m。因此,包括在锚碇处锚固索股或钢丝的时间在内,AS法的编拉时间大约为PWS法牵引时间的2倍左右。但是在大多数情况下,PWS法每股平行钢丝索的钢丝根数是

127根,而AS法的每股钢丝根数则为其3倍或4倍之多,因而PWS法的平行钢丝索的根(股)数要比AS法多3~4倍,这意味着PWS法的索股调整时间要比AS法长3~4倍。

主缆的施工方法还影响到锚碇处平行钢丝索股所需的锚固空间。由于PWS法的钢丝索股根数较AS法多,故PWS法所需的锚固空间也比AS法大。图1所示为一些桥例的锚碇处钢丝索所需的锚固空间的比较。

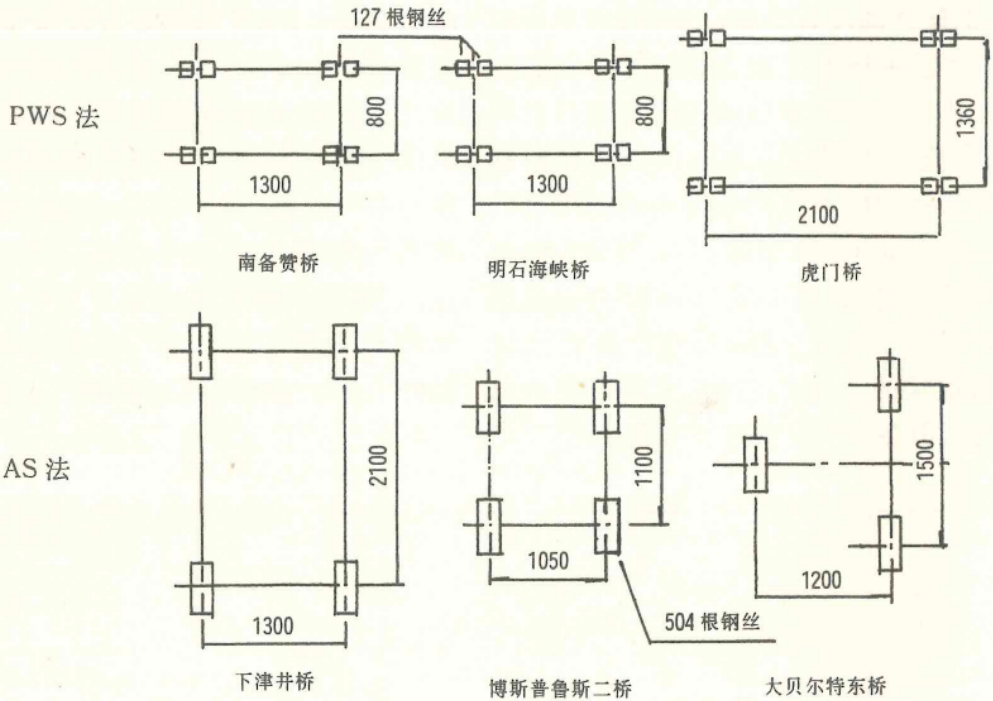


图1 锚碇处钢丝索股的布置(尺寸以mm计)

很难讨论PWS法与AS法的费用比较。PWS的施工过程是在工厂内预制平行钢丝索股、将它们运到工地、并在猫道上牵引;而AS法的施工过程则是将钢丝收绕在大卷筒上、将钢丝在猫道上编拉制成平行钢丝索股。目前正在施工中的一些

桥梁(译注:可能是指大贝尔特东桥与青马桥等)的中标承包商们可能会指出:即使将PWS法可以缩短工地施工时间的因素考虑在内,它也不比AS法经济。但是,这不一定能说明AS法在任何情况下总是经济的。



### 3—2 改良的 AS 法与工地制造的平行钢丝索股(PWS)

#### 3—2—1 改良的 AS 法

在日本的下津井桥与土耳其的博斯普鲁斯二桥曾采用改良的 AS 法,此法并将应用到大贝尔特东桥。

改良的 AS 法是当钢丝从一端的锚碇向另一端锚碇编拉时,将一部分的钢丝重量置于猫道上。此法的优点是钢丝不会交错(不需摇抖分出),并且由于钢丝在编拉时不是处于自由悬挂状态,因而可以在有风的情况下进行。然而,由于有一部分钢丝的重量要置于猫道上,在编拉钢丝时猫道会向下产生挠度,这说明将编送来的钢丝长度与已置于猫道上的钢丝长度不完全相同。为了使此长度差值保持在容许范围内,猫道的线形必须用一些方法来加以控制(如博斯普鲁斯二桥采用调整缆索,大贝尔特东桥采用控制缆索)或者猫道必须具有足够的刚度使其挠度较小而将前后编拉的钢丝长度差保持在容许范围之内(如下津井桥)。采用调整缆索或控制缆索时,改良 AS 法的猫道尺寸可以做到与传统 AS 法的一样大,即不必加大。

改良的 AS 法可以由编拉和控制装置来保证主缆的质量,使钢丝之间没有拉力差与交错,它在猫道上的工人无需经过训练;而传统的 AS 法要在每次编拉钢丝时依靠调整钢丝的垂度与进行摇抖分出的作业来保证主缆的质量,这就需要训练有素的工人。

#### 3—2—2 在工地制造的平行钢丝索股(PWS)

现代悬索桥的主缆预制平行钢丝索股仅由日本的厂商供应,因而采用 PWS 法来施工的悬索桥也只局限于日本的桥梁。然而,正在修建的中国三座悬索桥(西陵桥、汕头海湾桥及虎门桥)是用中国制造的预制平行钢丝索股采用 PWS 法来施工。西陵桥与汕头海湾桥的平行钢丝索股是在一家制造厂商的工厂内制成后运到工地的,而虎门桥的平行钢丝索股是在工地利用长约 300m 的引桥部分来作场地制造的。

在工地制造平行钢丝索股可以省去索股的运输,但在工地需要有面积约 40m × 500m 的场地来制造索股与存放制成后盘绕成卷的索股。同时所有的制索工作要细心地控制以取得合格的质量。这种可搬移的平行钢丝索股制造工场,可以设在工地,并能移到别的桥梁再次使用。它能使 PWS 法不仅在中国,而且在别的国家成为具有更大竞争优势的施工方法。制造平行钢丝索股的重要事项:①索股的各钢丝应力均匀;②钢丝的原始弯曲度不再存在;③索股盘绕在卷筒上要有足够的紧度,并且要在工地临时制造工场内细心谨慎地管理。

#### 4. 主缆施工方法的展望

表 4 中重复地列出了 PWS 法与 AS 法的优缺点。

表 4 PWS 法与 AS 法的优缺点

方法	优点	缺点
PWS	施工时间较短	重型临时设施与较大锚固空间
AS	轻型临时设施与较小锚固空间	施工时间较长

当今后的悬索桥跨径发展到更大长度时,采用 PWS 法来施工主缆就要变得困难了。这是因为在卷筒上要用更多的层数来盘绕一根索股,每根索股连同卷筒的吊装与运输重量要超过 100t,以及要用更大的力来牵引索股。如果索股是在工地制造,且不用盘绕成卷而能直接送到桥梁,这样就可以免除盘绕与运输,但是施工速度将受制索的速度来控制。如果将每股索的钢丝根数减到 91 或再少一些,猫道结构与牵引设备就可以轻型化一些,但施工时间将增长,且所需锚固空间将加大。如果采用单位重量较轻的新材料(译注:如碳纤维加筋塑料线材,即 CFRP 线材)来制造主缆,则情况就会大大改变。否则,对更大跨径的悬索桥来说,AS 法的地位将

不会有很大的变化。钢丝的牵引力将有所增大,但将较传统的 AS 法与改良的 AS 法仍不会大得太多。钢丝的每盘重量将加大,以减少钢丝的接头数量。

另外,如果能采用强度更高的钢丝,则总的钢丝根数将减少,这样可避免加大锚固空间与保持较短的施工时间。如能开发新的简单的锚固体系,每根索股的钢丝根数可以减少而不增大锚固空间,并可减小调整垂度所需的拉力。

### 5. 结束语

许多具有一般跨径长度与更大跨径长度的悬索桥正在规划中,它们的主缆将根据先修建桥梁的工艺技术的积累与改变来进行施工。

(1)1998 年 5 月 23 日至 29 日,第八届 FIP 世界大会将在荷兰首府阿姆斯特丹国际 RAI 会议中心举行。FIP 是一个国际组织,成立于 1952 年,现有会员国 36 个,其目的是发展建筑混凝土,总部设在英国伦敦。本次会议主题是挑战下一千年的混凝土。

(2)1998 年 6 月 21—24 日,第二届关于在恶劣条件下的混凝土的国际会议将在挪威 Troms 举行,会议由挪威科技大学、挪威公路局和挪威混凝土协会共同举办。

(3)1998 年 9 月 2 日~4 日,长跨度高上沿建筑 I-ABSE 专题讨论会将在日本神户举行。会议由 IABSE 日本集团主办,会议内容为:旨在研讨结构工程,包括设计、分析、工程规划及管理、建筑调研,范围不仅限于线性测量长且高的建筑,也包括空间结构、地下及船用建筑结构。



书

本编辑部邮售以下书籍(邮寄费另加收 10%),欢迎选购。《岩土锚固工程技术的应用与发展》16K 精装本:41 元

《岩土锚固工程技术》16K 简装本:35 元

讯