

矮塔斜拉桥

Extradosed Cable-stayed Bridge

陈从春 著



中国建筑工业出版社

矮塔斜拉桥

Extradosed Cable-stayed Bridge

陈从春 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

矮塔斜拉桥/陈从春著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-112-19266-3

I. ①矮… II. ①陈… III. ①斜拉桥 IV. ①U448. 27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 059898 号

矮塔斜拉桥是一种较新的桥型, 本书介绍了矮塔斜拉桥起源、发展, 其力学特性, 特别重点介绍了其设计理论、拉索及预应力优化方法。本书共分 9 章, 包括: 绪论, 矮塔斜拉桥的体系分类与特征参数, 矮塔斜拉桥的刚度, 矮塔斜拉桥设计参数分析, 矮塔斜拉桥经济特性分析, 矮塔斜拉桥平面分析与空间分析, 矮塔斜拉桥分解荷载下的空间应力分布, 矮塔斜拉桥索力与体内预应力优化, 矮塔斜拉桥的设计与施工。

本书可作为高校研究生学习用书和工程设计人员的参考书, 也适合于各类桥梁施工及管理单位的技术人员参考使用。

* * *

责任编辑: 石枫华 王 磊

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

矮 塔 斜 拉 桥

陈从春 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{3}{4}$ 字数: 363 千字

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-19266-3

(28454)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

为了满足人们对桥梁的使用功能、景观功能、力学和经济性能等方面的不同需求，工程师们对传统的梁式桥、拱式桥，悬桥和斜拉桥进行组合、变化、发展和创新，形成了当今丰富多样的桥梁形式。矮塔斜拉桥便是其例。

矮塔斜拉桥属于索辅梁桥，也称部分斜拉桥，是介于连续梁与斜拉桥之间的一种梁、索组合体系桥。矮塔斜拉桥具有许多独特的性能：因其塔矮梁刚，弱化了拉索的疲劳问题，提高了拉索材料的利用率，使其具有良好的经济性能；布跨灵活，单跨合理跨径在100~300m，施工简便，使其具有较大的应用空间；主梁高度是连续梁的1/2左右，克服了主梁高度过大带来的压抑感，实现了其景观功能。

矮塔斜拉桥诞生于国外，但在国内得到迅速认可和应用，特别是在中、大跨度桥梁选型中，成为颇具竞争力的桥型之一。但是，由于系统性资料的欠缺，给矮塔斜拉桥的推广应用和发展带来了一定的障碍。

陈从春博士早年以矮塔斜拉桥为研究方向完成了同济大学博士论文，是国内较早研究矮塔斜拉桥的工程师之一。今天高兴地看到他经过十余年的研究和积累，编撰完成了《矮塔斜拉桥》一书以殒同仁，在向作者表示祝贺之余草就此文，是以为序。

萧汝诚

2016年7月于同济园

前 言

人类对事物的认识是逐渐发展的，技术的进步也是由此而嬗变。现代桥梁技术的发展也概莫能外。

矮塔斜拉桥就是在连续梁、体外预应力连续梁以及斜拉桥的建设和应用中发展起来的。法国工程师首先提出这一概念，日本工程师将其变为现实，接着国内工程师也很快跟进，和世界其他各国工程师一道为发展这一新桥型做出了贡献。由于国内工程师的努力和这种桥型本身的优越性，目前国内建设的矮塔斜拉桥的数量和规模已居世界之首位。

随着大量的矮塔斜拉桥的修建，更多的技术人员希望了解这种技术，但由于相关资料有限，使他们无法全面和深入地了解这种桥型。笔者从 2003 年开始着手研究矮塔斜拉桥，后在同济大学肖汝诚教授指导下，以此为研究对象完成了博士论文，此后在科研和教学工作中，也一直延续这一方向的研究工作。为了让更多的人了解矮塔斜拉桥，也为了相关工程技术人员和科研工作者更容易获得相关资料，在中国建筑工业出版社的鼓励下，特编写此书。

本书在撰写的过程中，为了使内容更丰富，结构更完整，引用了同济大学杨洪波、邢晓辉等几位研究生硕士论文中的研究成果，同时还参考了其他研究者的成果，并在各章参考文献中一一列出，在此一并感谢！

技术发展历程是一点一点前进的，集合众人的智慧，才能精益求精。在我国，矮塔斜拉桥虽已建造 100 多座，但仍然有很多问题没有很好地解决，作者以此书抛砖引玉，希望看到同仁更多的真知灼见。

鉴于作者水平有限，书中错误在所难免，如有疏漏，望不吝赐教（邮箱：chencongchun@163.com），不胜感激！

陈从春

2016 年 7 月于上海应用技术大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 矮塔斜拉桥的起源	1
1.2 矮塔斜拉桥的名称与界定	3
1.3 矮塔斜拉桥的发展现状	5
参考文献	23
第 2 章 矮塔斜拉桥的体系分类与特征参数	26
2.1 矮塔斜拉桥的体系分类	26
2.2 矮塔斜拉桥特征参数的提出	29
2.3 索梁活载比对比研究	36
2.4 不同体系的索梁活载比与结构参数的关系	37
2.5 索梁活载比对静力特性的影响	39
参考文献	41
第 3 章 矮塔斜拉桥的刚度	42
3.1 矮塔斜拉桥的名义刚度和塔梁刚度比的概念	42
3.2 矮塔斜拉桥的名义刚度计算公式的推导	43
3.3 矮塔斜拉桥名义刚度、塔梁刚度比的讨论	44
参考文献	48
第 4 章 矮塔斜拉桥设计参数分析	49
4.1 边中跨比对结构体系的影响	49
4.2 桥墩刚度对结构体系的影响	52
4.3 主梁参数对结构的影响	53
4.4 索塔参数对结构体系的影响	56
4.5 无索区对结构体系的影响	60
4.6 拉索布置设计参数	63
4.7 拉索设计参数确定	67
参考文献	74
第 5 章 矮塔斜拉桥经济特性分析	76
5.1 连续梁和连续刚构桥造价与跨径的关系研究	76
5.2 斜拉桥造价与跨径的关系研究	78

5.3 矮塔斜拉桥造价与跨径的关系研究	82
5.4 矮塔斜拉桥经济跨径的确定	85
参考文献	87
第6章 矮塔斜拉桥平面分析与空间分析	88
6.1 平面分析与空间分析基本理论	88
6.2 矮塔斜拉桥动力分析	100
6.3 矮塔斜拉桥主梁应力	103
6.4 特殊（开裂）状态空间应力分析	119
参考文献	129
第7章 矮塔斜拉桥分解荷载下的空间应力分布	130
7.1 矮塔斜拉桥拉索索力传递规律	130
7.2 最大双悬臂状态自重荷载空间应力	135
7.3 最大双悬臂状态重力和拉索荷载下空间应力分布	149
参考文献	156
第8章 矮塔斜拉桥索力与体内预应力优化	157
8.1 概述	157
8.2 基于拉索与预应力筋综合造价最小的最优分配比例研究	158
8.3 基于 ANSYS 二次开发的计算程序	163
8.4 索力和预应力优化配置的应用	168
参考文献	175
第9章 矮塔斜拉桥的设计与施工	176
9.1 概述	176
9.2 总体布置设计	177
9.3 主梁的构造	179
9.4 塔与墩的构造	189
9.5 拉索构造与设计参数	196
9.6 拉索锚固类型与构造	200
9.7 设计过程与内容	206
9.8 矮塔斜拉桥施工	208
参考文献	209
附录 背景桥资料	210

第 1 章 绪 论

纵观桥梁发展的历史，可以发现，促进桥梁技术进步的两大因素是材料的发展和计算能力的提高。工业革命后，高强钢材的应用使得桥梁跨径越来越大，而计算能力的提高表现在计算理论的完善和计算机技术的发展，二者的结合发展使得复杂的桥梁结构分析成为可能；前者最为突出的表现是 20 世纪初期悬索桥就跨越了千米大关，后者最为突出的成就是使得复杂的高次超静定的组合结构桥梁如斜拉桥等结构得到普遍应用。材料和计算技术的进步，促进了各种新型结构的出现，矮塔斜拉桥就是在这种背景下产生的新桥型，这类新型结构的出现同时带来了新的理论难题。

1.1 矮塔斜拉桥的起源

随着桥梁技术的发展，桥梁结构的两大趋势是十分明显的，其一是结构尺寸越来越轻薄，其二是在梁桥、拱桥、索式桥等基本桥型之间组合，发展成为一种组合体系^[1]。组合体系桥梁极大地丰富了桥梁造型。组合体系桥中比较有代表性的是拱梁组合体系、斜拉—连续梁（刚构）体系等，其中矮塔斜拉桥就是介于斜拉桥和连续梁（刚构）之间的一种组合体系桥型，近 20 年来应用较多，受到广泛的关注。

矮塔斜拉桥的雏形是反拱形梁，这种桥型的主要受力构件尺寸与结构弯矩图相似，因而是一种受力合理的桥型，如图 1-1 所示 [Fathy A. Saad, 2004；杨鸿波, 2005]^[2,3]。反拱形梁桥适合于中小跨径桥梁，一般用于桥下净空受到限制的地方。

反拱形梁桥还是属于梁式桥的概念，但其外形已经比较接近后来的板拉桥了。普遍认为，由 Christian Menn 设计的建于 1980 年的甘特（Ganter）大桥，是斜拉—连续梁（刚构）体系桥的先驱，其混凝土箱形梁由预应力混凝土斜拉板“悬挂”在非常矮的塔上，这种板可以看成是一种刚性的斜拉索，该桥的出现形成了斜拉桥的一个分支——板拉桥，由于其与环境的完美结合，成为一道风景（图 1-2）。板拉桥与反拱形梁桥虽然在外形上相似，但其力学意义已出现质的变化。

Ganter 大桥之后，又有墨西哥的帕帕加约（Papagayo）大桥、美国得克萨斯州的巴顿河（Bar-ton Creek）大桥及葡萄牙的索科雷多斯（Socorridos）大桥等相继建成 [申明文, 2002]^[4]。这类桥梁的建成为其后的矮塔斜拉桥的出现奠定了基础。

1988 年法国工程师 Jacques Mathivat 在设计位于法国西南的阿勒特·达雷（Arrêt Darré）高架桥的替代方案时，首次明确地提出了 Extradosed Prestressed Bridge 的概念^[5]（图 1-3）。他的主要设计构思为：跨度为 100m 的预应力混凝土箱梁和较低的索塔固结，斜拉索不是锚固在索塔上，而是穿过设置在索塔上的索鞍而锚固于主梁。从外形上来说，该方案与斜拉桥相似。而从受力特性方面来说，斜拉索则与预应力混凝土体外索很相似，索鞍相当于体外索的转向块，并且这些拉索的拉应力变幅与一般的斜拉索相比大大的减

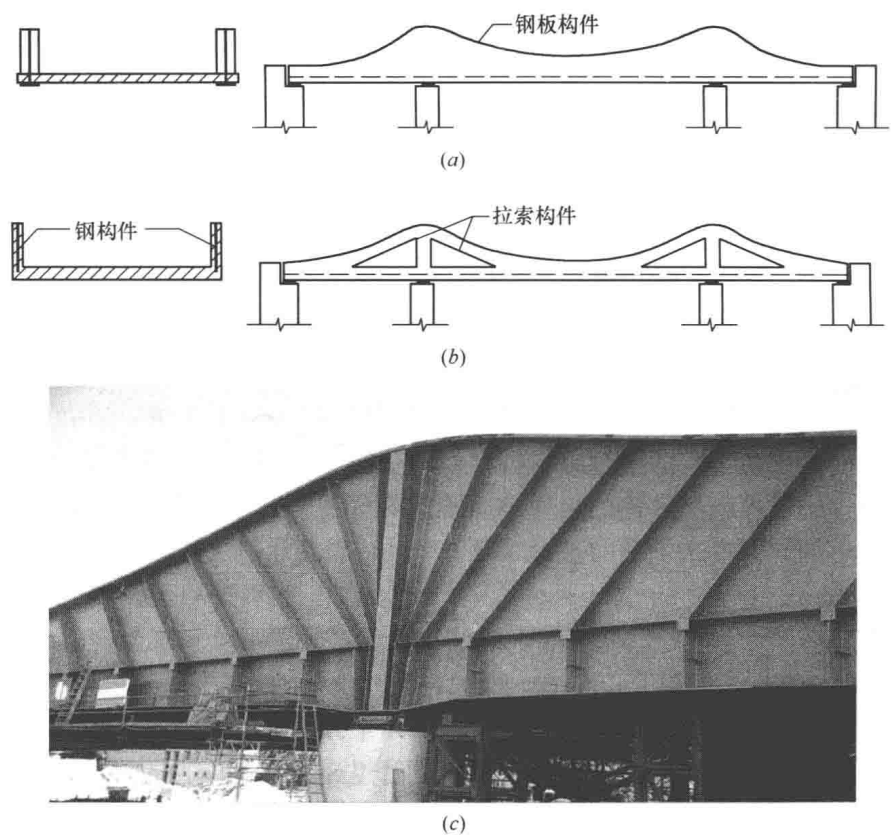


图 1-1 反拱形梁桥
(a) 实腹反拱梁；(b) 空腹反拱梁；(c) 德国 HAVEL 河铁路桥

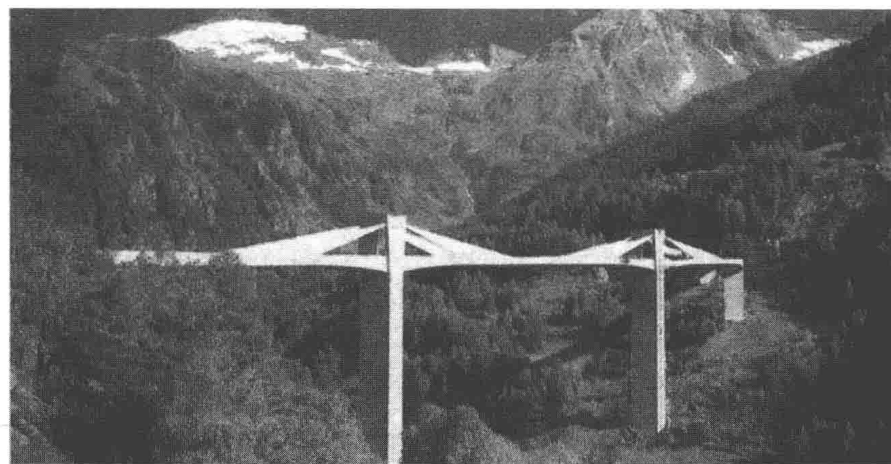


图 1-2 甘特 (Ganter) 桥

少，因而可以不考虑拉索的疲劳而提高容许拉力值，同时拉索的竖向分力可以平衡梁体的自重引起的竖向荷载，可以达到减小主梁高度的目的，水平分力的作用与一般斜拉桥拉索水平分力作用一样可以更好地抵消主梁靠索塔附近梁段负弯矩引起的拉力 [Mathivat, 1989]。虽然这个方案没有实施，但影响却是深远的。

与此同时，1990 年，德国的 Antonie Naaman 提出了一种组合体外预应力索桥，体外

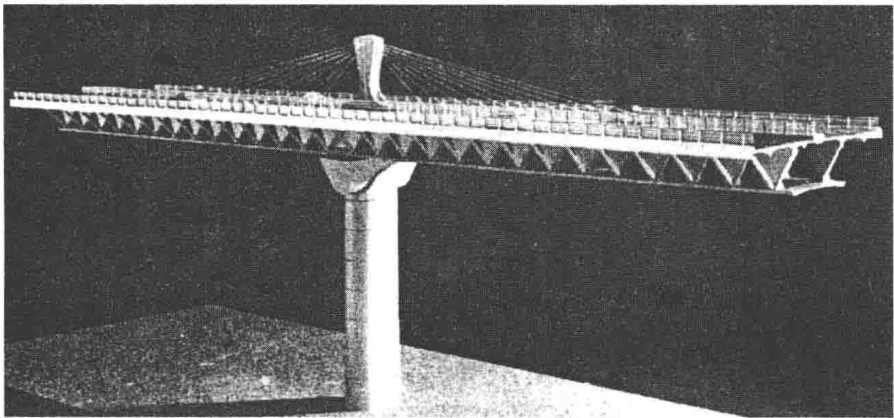


图 1-3 Arrêt Darré 高架桥设计模型

索的一部分伸出主梁之上，锚固在墩顶处主梁上的刚柱上 [王伯惠，2003]^[6]。主梁为钢桁架梁，主梁架好后再在其上立模浇筑上下混凝土顶板、底板。这种桥式通过加大偏心距来提高体外预应力的效率，从而降低造价。这一种体系与法国 Jacques Mathivat 的方案十分类似（图 1-4）。

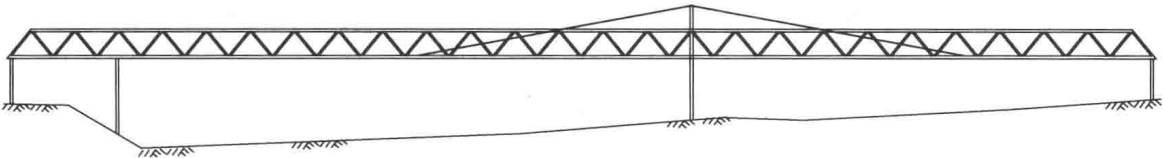


图 1-4 德国的 Antonie Naaman 桥示意

从发展的历程看，直到 1990 年，都是矮塔斜拉桥的起源及萌芽期。

1.2 矮塔斜拉桥的名称与界定

1.2.1 矮塔斜拉桥的称谓

到目前为止，这种桥型的名称十分混乱。法国设计师 Jacques Mathivat 在提出他的方案时，命名为“extra-dosed PC bridge”，直译为“超剂量预应力混凝土桥梁”；日本就是采用这种名称，他们直接翻译为日语是“エクストラドーゾド橋”，日本工程界一直使用这一称呼，这与日本的翻译习惯有关，日本对于外来语一般都是根据其读音用片假名来翻译；在美国，这种桥有称为“extra-dosed PC bridge”的，也有称为“extradosed cable-stayed bridge”的；在我国台湾地区，最初将这种结构称为“外置预应力桥”，后来根据其外形类似恐龙高耸的脊背，而称谓“脊背桥”、“拱背桥”。国内的称呼一直存在争论，学者严国敏将其称为“部分斜拉桥”，理由是这种桥型受力特性介于斜拉桥和连续梁之间，桥的刚度主要由梁体提供，斜拉索主要起体外预应力的作用；王伯惠、顾安邦、徐君兰认为应该称为“矮塔斜拉桥”，而“部分斜拉桥”不够明确，没有道出其外在的形状与内在的结构特征，早期的稀索斜拉桥结构主梁也是刚性的，也有“部分”的性质。

目前，这种体系与最初相比又丰富了很多，主梁不仅采用预应力混凝土结构，还可采用钢结构（如中国的芜湖长江大桥），以及钢筋混凝土的组合结构（如波形钢腹板梁及结合梁），不仅可以采用刚性梁，也可以采用柔性梁（如瑞士的 sunniberg 桥），所以无论是英文的“extra-dosed PC bridge”，还是中文的“超剂量预应力混凝土桥梁”、“外置预应力桥”都不合适；而“脊背桥”、“拱背桥”使人有一种体系上的误解。

界定一类桥梁，应抓住这种桥型的特点，概念明确而不引起歧义。桥梁结构的基本形式，根据主要受力构件分为三种，即梁式桥、拱式桥和悬索桥。梁式桥的主要承重结构是水平放置的梁，在竖向荷载作用下，结构无水平力；拱式桥的主要承重结构是拱圈或拱肋，在竖向荷载作用下，拱脚产生水平推力，这个推力会显著减小拱肋中的弯矩；悬索桥是以悬挂在塔架上的缆索作为主要承重结构，缆索主要受拉。由几个不同体系的结构组合而成的桥梁称为组合体系桥，斜拉桥就是一种主梁与斜缆相结合的组合体系，塔、梁、索是主要结构。悬挂在塔上的斜缆和吊扣的主梁紧密协作，使主梁像多点弹性支承的连续梁一样工作，这样既发挥了高强材料的作用，又显著减小了主梁截面，使结构减轻并具有很大的跨越能力。在这个体系里，塔成为索、梁两个基本构件协作受力的关键。改变塔的高度，就会改变索、梁两个基本构件受力的协作关系；当塔矮到一定程度，拉索的作用更像一种体外预应力筋，这就是矮塔斜拉桥的本质，同时也成为最重要的特征之一。

因此，“矮塔斜拉桥”是比较贴切的称呼，不仅从外形上概括了这种结构最主要的特征，而且能将其与常规斜拉桥分开，不会发生歧义，也能为工程界接受。同样基于上述的原因，认为比较合适的英文名称是“extradosed cable-stayed bridge”，既有继承，也有扬弃^[1,7]。

1.2.2 矮塔斜拉桥的界定

塔的高度变小使得拉索更像体外预应力筋，对拉索而言，其最大的不同就是应力变幅显著变小。因此，可以用应力变幅来界定矮塔斜拉桥。

日本学者研究表明，日本的矮塔斜拉桥的拉索应力幅（表 1-5），小田原港桥（Odawara）为 38.2MPa，冲原桥（Tsukuhara）为 37.3MPa，またきな大桥（Matakina）为 29MPa，士狩大桥（Shikari）为 45MPa，大都在 50MPa，但新唐柜桥（Shin-Karato）为 88MPa，蟹沢大桥（Kanisawa）为 107MPa，超过 50MPa；国内矮塔斜拉桥中，漳州战备大桥为 42MPa，兰州小西湖黄河大桥为 84.5MPa，吴淞江大桥为 34.7MPa。而斜拉桥一般最大应力幅都达到 150MPa。可见，矮塔斜拉桥的最大应力幅一般为常规斜拉桥的 1/3~1/2。

瑞士的 Sunniberg 桥主梁高跨比值为 1/175（图 1-12），有人将其归为常规斜拉桥行列，但其拉索容许应力为 $0.5R_y^b$ （大于斜拉桥的 $0.4R_y^b \sim 0.45R_y^b$ ），说明其拉索的容许应力变幅小，以拉索应力变幅作为矮塔斜拉桥的重要评判指标的话，该桥应归入矮塔斜拉桥一类。

因此，矮塔斜拉桥是一类塔高约为跨度的 1/2~1/18，拉索应力幅值一般小于 50MPa，为常规斜拉桥的 1/3~1/2 的斜拉体系结构^[1,7]。

1.3 矮塔斜拉桥的发展现状

1.3.1 矮塔斜拉桥国外发展情况^[1,3,4,8-19]

矮塔斜拉桥在法国诞生之后,并没有得到应用,而日本却对此高度重视,通过深入的研究,认为其在技术、经济和景观方面有很多优点,并将其付诸实践。日本于1994年建成了第一座真正意义上的矮塔斜拉桥——小田原港(Odawara Blueway)桥(图1-5),其跨度为 $(74+122+74)$ m,桥面宽13.0m,双塔双索面,塔、梁、墩固结,拉索通过塔顶的鞍座后锚固在主梁上。其后这种桥在日本得到迅速发展,先后建成了屋代南、北铁路桥、冲原桥、蟹泽大桥、新唐柜大桥等[田原,1993;城野,1994;中川,1996;梅原,1997]。



图 1-5 小田原港 (Odawara Blueway) 桥

2001年,日本木曾川(Kiso)桥(图1-6)和揖斐川(Ibi)桥(图1-7)中首次引入单索面、混合梁、多塔的概念,标志着矮塔斜拉桥发展又达到一个新的高度。木曾川(Kiso)桥和揖斐川(Ibi)桥的跨径布置分别为 $(160+3\times 275+160)$ m、 $(154+4\times 271.5+127)$ m,多塔、单索面,主梁为预应力混凝土箱梁和钢的混合结构。以木曾川桥为例,275m的主跨,靠近桥塔87.5m为预应力混凝土箱梁,跨中110m为钢箱梁,接头位置在上翼缘受压的正弯矩区段内[严国敏,1997;王伯惠,2003]。混合梁结构的采用,使得矮塔斜拉桥的跨径推进了一大步。

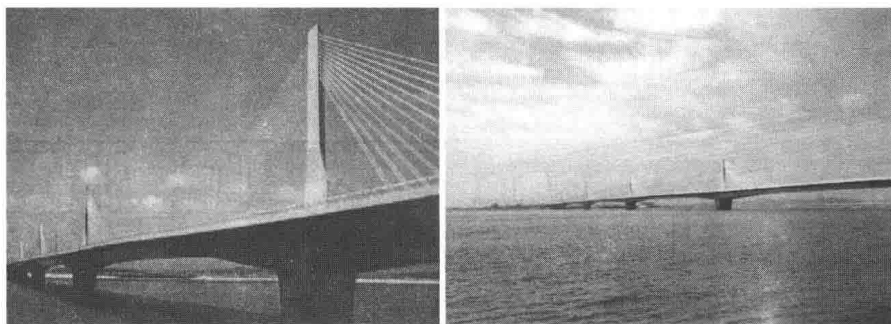


图 1-6 木曾川 (Kiso) 桥

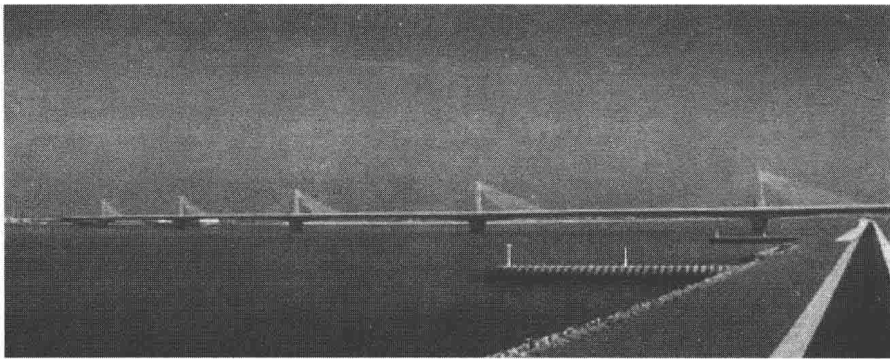


图 1-7 揖斐川 (Ibi) 桥

矮塔斜拉桥的应用在向大跨径方向推进的同时，也在向小跨径方面尝试。1999 年建成北海道 JR 新川高架桥主跨 59m，2000 年建成的大阪东南部的中心池桥跨径为 (60.6+62.4) m，福岛县的高山沢桥主跨为 84.2m，秋田县的雪沢三号桥主跨为 71m。尽管这些小跨径的矮塔斜拉桥创新点不多，但其应用范围得到拓展 [杨鸿波，2005]。

近年来，日本又将体外预应力和波形钢腹板梁结合应用到矮塔斜拉桥中。2000 年建成的土狩大桥 (图 1-8) 是一座 4 塔的矮塔斜拉桥，跨径为 (94+3×140+94) m，塔梁固结，梁体预应力施加采用梁内体外索、大偏心连续体外索 (连续拉索)、大偏心锚碇体外索 (拉索) 三种方式，是一种尝试 (图 1-9)。同时该桥还首次使用反力分散型叠合橡胶支座，进行后期应变调整，消除支座变形 [渡边，1997；刘岚，2001]。

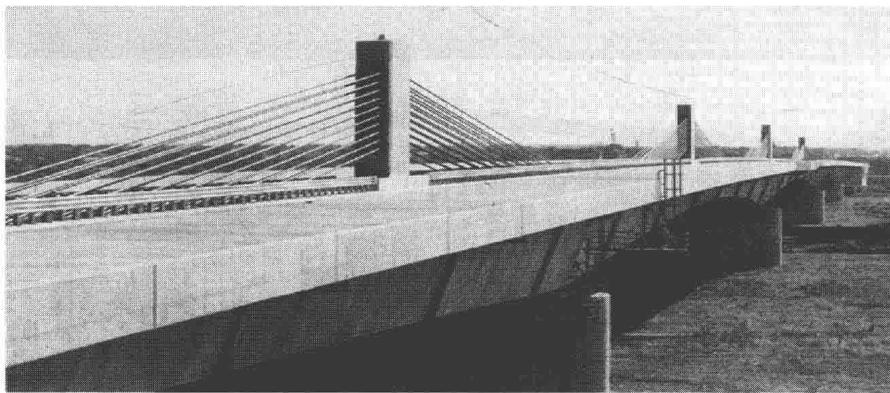


图 1-8 土狩大桥

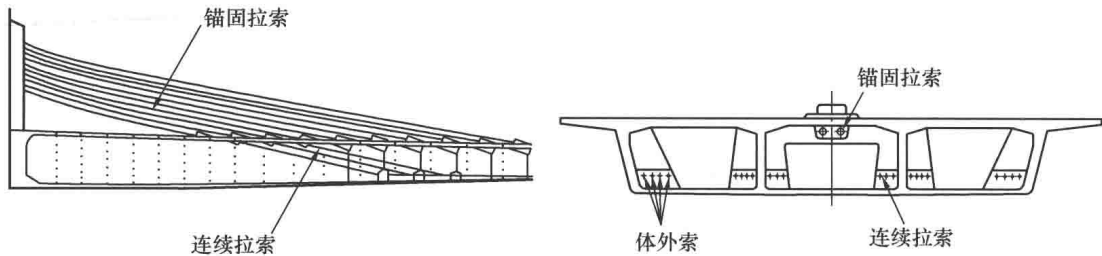


图 1-9 三种体外索布置

为了减轻结构重量，更好地发挥材料性能，日见桥（Himi Bridge）（图 1-10）首次采用了波形钢腹板主梁（图 1-11）和体外预应力索。这种复合结构具有施工容易、维修简单的特点，并具有良好的经济性能 [佐川，2003]。



图 1-10 日见桥（Himi Bridge）

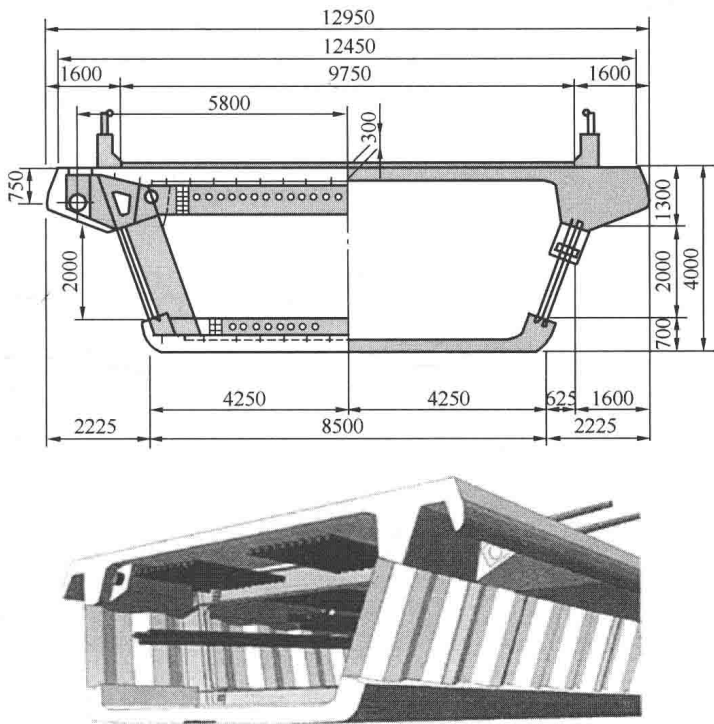


图 1-11 波形钢腹板主梁示意图

20 世纪 90 年代中期至其后的十余年时间是矮塔斜拉桥在日本发展最快的时间段。这段时期内，日本建成了 27 座这种桥梁，桥梁跨度从初期的 122m 发展至 275m，桥宽从 13m 发展到 33m，主梁从单纯的预应力混凝土梁发展到波形钢腹板的结合梁，以及预应力混凝土与钢梁的混合梁结构，极大地丰富了桥梁结构。

日本不仅自己国内发展这种桥型，还在积极向国外推广。他们分别于1999~2002年间援建了2nd Mandaue-Mactan Bridge, Pakse Bridge (Lao-Nippon Bridge), New Koror-Babeldaop Bridge 三座矮塔斜拉桥。

其中于1999年建成的2nd Mandaue-Mactan Bridge 位于菲律宾南部的经济中心 Cebu 市，是连接 Cebu 与 Mactan 岛的第二座桥梁，2nd Mandaue-Mactan Bridge 为 H 形索塔，双平行索面，总长 410m，主跨 185m。

2000 年建成的 Pakse Bridge (Lao-Nippon Bridge) 位于老挝南部的最大城市 Pakse，跨越湄公河，桥梁总长达到 1380m ($70+9\times120+123+143+91.5+34.5$) m，桥宽 11.8m，主跨为 143m。

2002 年建成的 New Koror-Babeldaop Bridge (Japan-Palau Friendship Bridge) 位于帕劳群岛，是连接 Koror 岛和 Babeldaop 岛的桥梁，桥梁总长 411m，桥面宽 21m，主跨 247m，为混合梁结构。同时由于主梁的边跨与主跨的比例为 0.33，在边跨主梁的箱内灌注混凝土压重。

在日本之外，瑞士于 1998 年建成的 Sunniberg 是另一种类型的矮塔斜拉桥（图 1-12）。该桥位于瑞士阿尔卑斯山区的旅游胜地 Kloster 镇，5 跨 4 塔，跨径布置为 ($59.0+128.0+140.0+134.0+65.0$) m，全长 526m，位于半径为 500m 的曲线上。Sunniberg 桥主跨为 140m，主梁为肋板式梁，跨中板高 0.32m，塔根部板高 0.4m，两个边肋高为 0.80m。Sunniberg 桥梁高跨比只有 1/175，远较日本模式的矮塔斜拉桥高跨比（一般 1/70~1/55）小。Sunniberg 桥发展了矮塔斜拉桥的另一个分支，其主梁更接近于斜拉桥而不是连续梁。



图 1-12 Sunniberg 桥

2002 年，在东欧克罗地亚的 Zagreb 的 Save 河上也建了一座矮塔斜拉桥，主跨布置为 ($72+120+72$) m，主梁高 3.24m，索距 6m，双塔双索面，桥上荷载为汽车、轻轨和行人。

2007 年韩国修建的 2nd Pyung-Yeo Bridge 是第一座矮塔斜拉桥，位于韩国南部 Yeosu，桥梁总长为 250 m ($65+120+65$)，桥面宽为 23.5m（图 1-13）。2008 年建成的 Geumga Bridge 位于韩国南部 Chungcheongnam-do，桥梁总长为 795.6m ($85.35+5\times$

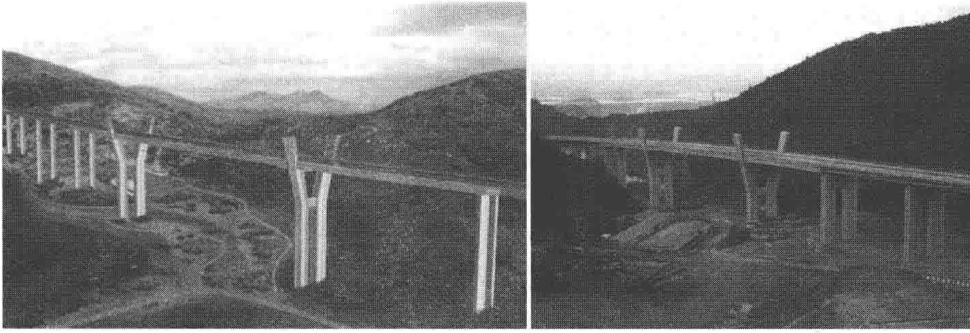


图 1-13 2nd Pyung-Yeo Bridge

125+85.25), 桥面宽为 25m, 索塔高度为 8.5m (图 1-14)。2009 年建成的 Keong-An Bridge 位于韩国南部 Keong-An, 桥梁总长为 270m ($70+130+70$), 桥面宽度达到 30m, 索塔位于桥面中央, 单索面, 扇形布置 (图 1-15) [杨鸿波, 2005]。2012 年建成的 Hag-Na-Rae Bridge 是一座多塔矮塔斜拉桥, 桥梁总长 740m ($100+3\times 180+100$), 倒 A 形塔, 塔高 26m (图 1-16)。

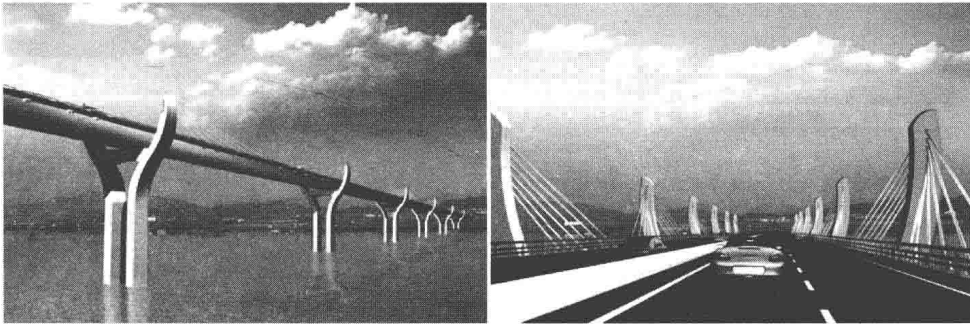


图 1-14 Geumga Bridge

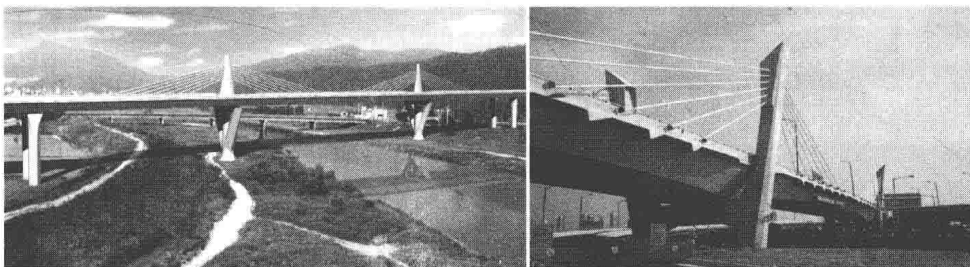


图 1-15 Keong-An Bridge (左) 和 Approach to inchon Bridge (右)

加拿大于 2009 年建成主跨 180m 的 The North Arm Bridge 和主跨 244m 的 The Golden Ears Bridge (图 1-17)。2010 年玻利维亚建成了主跨为 113m 的 The Triplets bridge。拉脱维亚于 2013 年建成 The Southern Bridge, 该桥为多塔矮塔斜拉桥, 跨径布置为 ($49.5+77+5\times 110+77+49.5$) m, 桥长 803m, 宽度 34.28m, 为六车道。2013 年波兰建成了目前世界上最宽的矮塔斜拉桥——The Mszanie Bridge, 该桥主跨 204m, 桥长 808.5m (图 1-18)。2014 年巴基斯坦建成全长 246m 的 The Earthquake Memorial Bridge。

另外美国在珍珠港修建的一座矮塔斜拉桥, 主桥全长 308.7m, 主跨 157.0m, 于

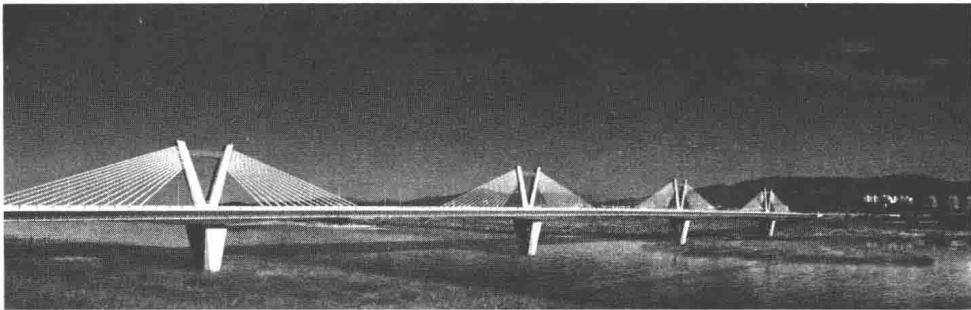


图 1-16 Hag-Na-Rae Bridge

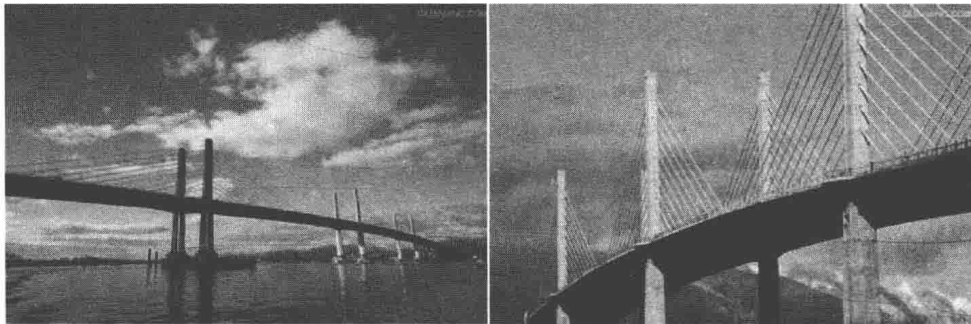


图 1-17 加拿大 The Golden Ears Bridge



图 1-18 波兰 The Mszanie Bridge

2012 年建成，还有两座正在建设中。已建或在建的国外矮塔斜拉桥的情况详见表 1-1~1-5 所列。

1.3.2 矮塔斜拉桥国内发展情况^[1,3,4,19-26]

我国的矮塔斜拉桥起步较晚，但一开始就令人瞩目。2000 年建成的芜湖长江大桥是一座钢桁梁的矮塔斜拉桥，双层桥面，上层行驶汽车，下层行驶火车，主桥为（180+312+180）m，是目前为止世界上跨度最大的矮塔斜桥，也是世界上首次采用钢桁梁作主梁；2001 年建成的福建漳州战备大桥，主梁为预应力混凝土箱形梁，其孔跨径布置为（80.8+132+80.8）m，桥面宽 27.0m，单索面，当时就其规模而言，在世界上亦名列前茅（图 1-20）。此后，矮塔斜拉桥在国内发展很快，厦门同安银湖大桥、兰州小西湖黄河大桥等桥相继建成（图 1-21），标志着国内矮塔斜拉桥技术已日臻完善。而惠青黄河公路