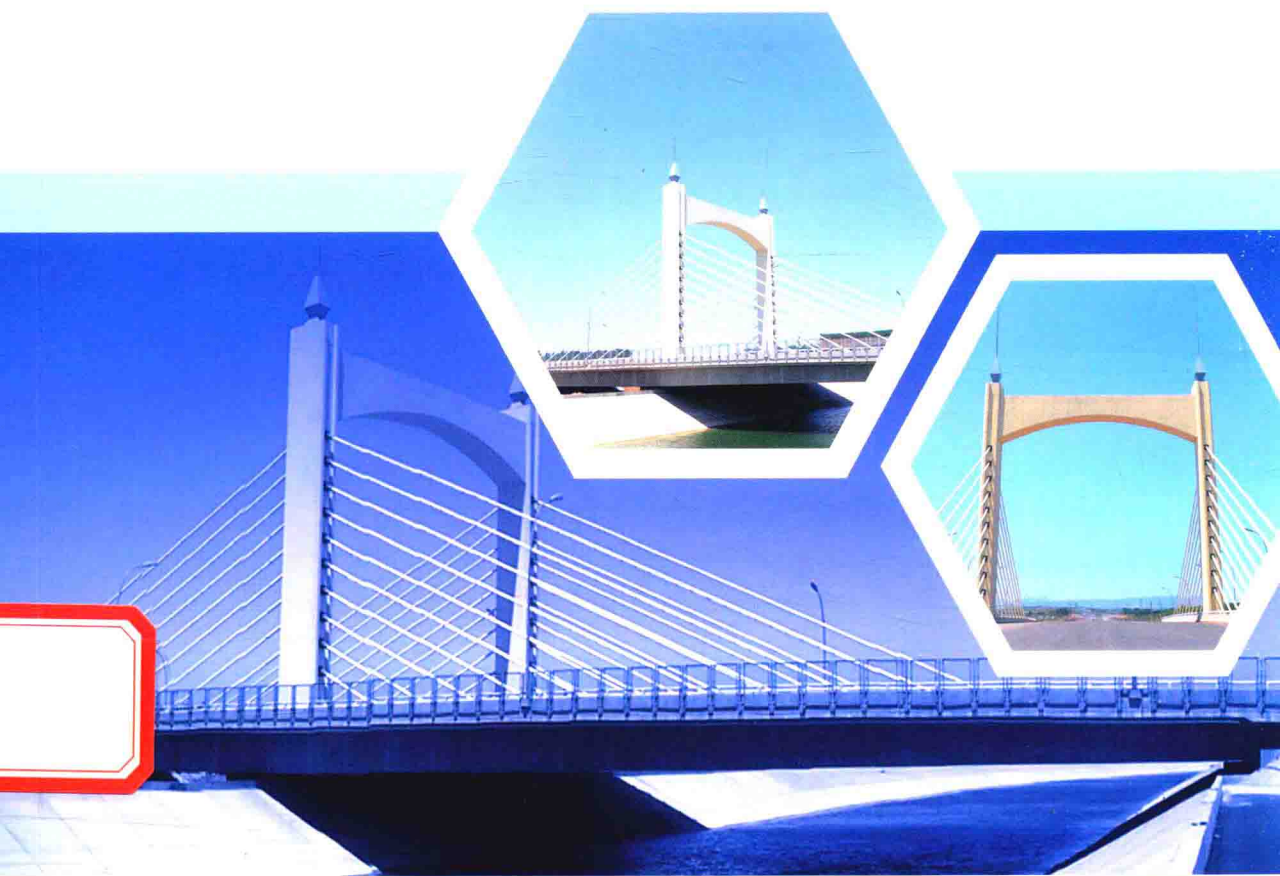


DUTA BUFEN XIELAQIAO

SHEJI SHILI FENXI

独塔部分斜拉桥 设计实例分析

刘世明 李晓克 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

独塔部分斜拉桥 设计实例分析

刘世明 李晓克 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了独塔部分斜拉桥的基本概念和特点、国内外发展现状与典型桥梁概况,阐述了其上部结构、下部结构、支座及附属设施设计方法。以南水北调中线工程总干渠百泉大道独塔部分斜拉桥为例,介绍了该桥总体设计,详细阐述了采用 Midas Civil 2013 桥梁专用有限元软件建立全桥静力和动力有限元分析模型的过程与方法,对桥梁进行了内力计算、配筋设计、静力验算、动力验算及抗震性能分析。

本书适合于桥梁工程相关专业在校学生的学习和教师教学用书,也适合于桥梁技术人员学习运用 Midas Civil 进行工程设计的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

独塔部分斜拉桥设计实例分析/刘世明,李晓克著. —北京:中国电力出版社,2016.5
ISBN 978-7-5123-9184-0

I. ①独… II. ①刘…②李… III. ①斜拉桥-桥梁设计 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 071387 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 联系电话:010—63412610

责任印制:蔺义舟 责任校对:朱丽芳

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2016 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·8 印张·220 千字·5 插页

定价:48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

独塔部分斜拉桥以其独特的受力模式、优美的造型、良好的工作性能、优越的性价比和成熟的施工技术，逐步占据了城市和风景区桥梁的一席之地。本书结合南水北调中线工程总干渠邢台市百泉大道桥梁建设，对独塔部分斜拉桥的设计进行了概括总结，并提供了这一桥型的详细设计资料，希望能为该桥型的发展起到推动作用。

本书共 5 章。第 1 章主要阐述了独塔部分斜拉桥的概念、结构特点及国内外典型工程概况。第 2 章介绍了独塔部分斜拉桥总体设计原则、结构布置和体系确定方法以及拉索、主梁、桥塔、下部结构等设计方法，简述了独塔斜拉桥主要的施工方法。以百泉大道桥为例，总结了上部结构、下部结构、支座及附属设施设计方法及主要构造尺寸，并配以相关施工图纸。第 3 章阐述了桥梁设计计算荷载及荷载组合方法，详细介绍了采用 Midas Civil 2013 有限元分析软件建立百泉大道桥纵向和横向有限元静力计算模型的过程和方法，总结了该类桥梁建模要点和计算项目。第 4 章进行了百泉大道桥荷载组合及内力计算，介绍了预应力钢筋布置的原则和方法，配以相关图纸，进行了主梁预拱度计算、预应力伸长量的计算、斜拉索安全系数和换索及断索验算；并根据支座反力选择支座型号，进行了持久状况承载能力极限状态、正常使用极限状态及短暂状况构件应力验算，以及箱梁横向验算。第 5 章建立了百泉大道桥动力计算模型，分析了全桥的模式，进行了 E1、E2 地震作用下的反应谱验算，论述了桥梁抗震性能。

本书著者为华北水利水电大学刘世明博士和李晓克教授。河北省工程设计大师、河北省水利水电第二勘测设计研究院院长乔裕民教授级高工对本书编写工作提出了指导意见，华北水利水电大学博士生导师、河南省优秀专家赵顺波教授对书稿进行了审阅并提出了具体修改建议，参加邢台市百泉大道桥梁设计工作的还有河北省水利水电第二勘测设计研究院杨建中教授级高工、杨竹林教授级高工、赵辉工程师和华北水利水电大学李凤兰教授、结构工程学科硕士研究生赵艳红等，河北省水利水电第二勘测设计研究院副院长马述江教授级高工对本书编著与工程设计也给予了关心指导，在此一并致以衷心谢意。研究工作得到了河南省重点一级学科——土木工程学科、生态建筑材料与结构工程河南省高校科技创新团队建设经费的支持。

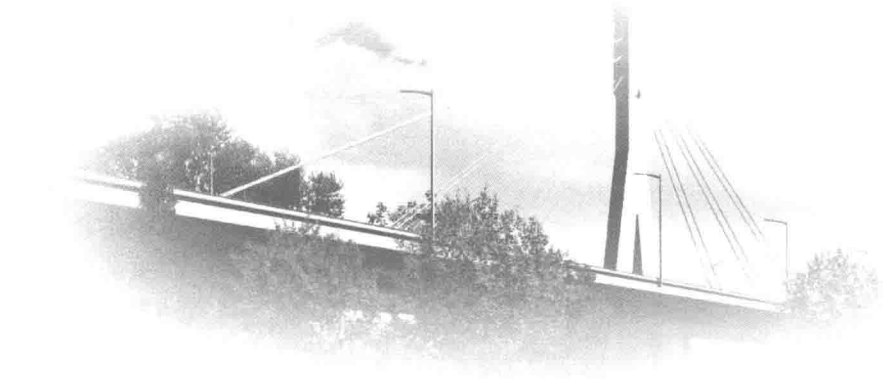
由于著者水平所限，本书不足之处，敬请读者批评指正。

著者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 塔部分斜拉桥概述	1
1.2 独塔部分斜拉桥的国外发展状况	2
1.3 独塔部分斜拉桥的国内发展状况	5
第 2 章 独塔部分斜拉桥总体设计	25
2.1 总体设计原则和思路	25
2.2 上部结构体系与总体设计	28
2.3 下部结构及附属设施设计	35
2.4 施工方法简介	36
2.5 百泉大道桥总体设计	37
第 3 章 独塔部分斜拉桥计算模型	54
3.1 计算荷载	54
3.2 百泉大道桥计算模型建立	56
3.3 独塔部分斜拉桥建模注意事项和计算项目	73
第 4 章 独塔部分斜拉桥静力分析	77
4.1 斜拉索初拉力和调整力	77
4.2 作用效应组合	82
4.3 结构内力计算及预应力钢筋布置	84
4.4 主梁预拱度设置	91
4.5 支座反力的计算	91
4.6 预应力钢筋伸长量的提取	94
4.7 斜拉索安全系数和换索、断索验算	94
4.8 设计验算参数输入	95
4.9 持久状况承载能力极限状态验算	96
4.10 持久状况正常使用极限状态验算	98
4.11 持久状况和短暂状况应力验算	100
4.12 箱梁横向验算	103
第 5 章 独塔部分斜拉桥的动力分析	108
5.1 抗震措施及动力分析有限元模型	108
5.2 独塔部分斜拉桥模态分析	110
5.3 桥梁抗震性能分析	115
参考文献	122



第 1 章

绪 论

1.1 塔部分斜拉桥概述

部分斜拉桥是介于梁式桥和斜拉桥之间的一种过渡性桥型^[1]。与常规斜拉桥相比,部分斜拉桥在斜拉索设计、预应力钢筋布置、材料选择、施工方法等方面具有自身特点^[2]。

部分斜拉桥通常采用较矮的桥塔与桥梁上部结构刚性连接,并通过穿过桥塔鞍部的拉索吊住预应力混凝土主梁,主梁与桥墩可以采用刚性连接或支座连接。与其他形式的桥梁相比,其主要特点如下:

(1) 部分斜拉桥的塔身较矮,可采用钢材或钢筋混凝土结构形式。常规斜拉桥的塔身高度与跨度之比为 $1/5 \sim 1/4$,而部分斜拉桥为 $1/12 \sim 1/8$,塔身高度是常规斜拉桥的 $1/2$,塔身一般不存在失稳问题。

(2) 部分斜拉桥的拉索长度短、垂度小。通常采用单面索,在外观上拉索无交错、重叠现象,造型轻盈优美,车辆和行人通行时,视野开阔,不会产生压抑感。部分斜拉桥的拉索仅承担部分荷载作用(一般承担竖向永久作用与 30% 以内可变作用的组合值),可以按照体外预应力设计,拉索的应力幅为常规斜拉桥的 $1/3$ 左右,拉索的抗疲劳性能大大增强,拉索的设计强度值采用 $0.6f_{pk}$ (f_{pk} 为钢绞线或钢丝抗拉强度标准值),比常规斜拉桥采用 $0.4f_{pk}$ 经济性显著。拉索锚头一般放置于梁内,外观整洁、美观。

(3) 部分斜拉桥主要由主梁承载,主梁多采用预应力混凝土箱梁结构形式,高跨比介于连续梁和斜拉桥之间。由于拉索的存在,支座处主梁梁高是连续梁的 $1/2$ 左右,跨越能力大于连续梁,具有桥梁建筑高度小的优势,可有效增加桥面标高受限时的桥下净空、减少桥面纵坡以及桥头引道的高度和长度。

(4) 部分斜拉桥的结构整体刚度较大。塔顶的水平及竖向位移、主梁的挠度较小,适用于活荷载大、对结构变形要求高的桥梁。

(5) 部分斜拉桥可采用多种施工方法。主梁施工接近梁式桥主梁施工,可以利用拉索进行悬臂法施工、转体法施工和满堂支架法施工。主塔、拉索施工接近常规斜拉桥,但减少桥塔与拉索锚固施工的工序。

(6) 工程造价低,养护维修方便。桥面每平方米造价比连续梁高 20% 左右,但大大低

于常规斜拉桥造价,经济效益明显。与常规斜拉桥相比,拉索的利用效率高,更换维修方便,降低桥梁管理养护成本。

(7) 外形美观。与梁式桥相比,桥塔造型多样,可创造出标志性景观,且矮塔具有亲近感。主梁结构线条流畅、轻盈美观,在一定程度上克服了连续梁高度过大带来的压迫感和上下部结构尺寸的不协调现象。同时,主塔的挺拔气势与主梁的轻盈飘逸相互衬托,进一步体现了部分斜拉桥刚柔相济的结构美观性。

按照桥塔在纵断面上的个数可分为单塔、双塔和多塔斜拉桥,如图 1-1 所示,本书将具有单塔的部分斜拉桥界定为独塔部分斜拉桥。

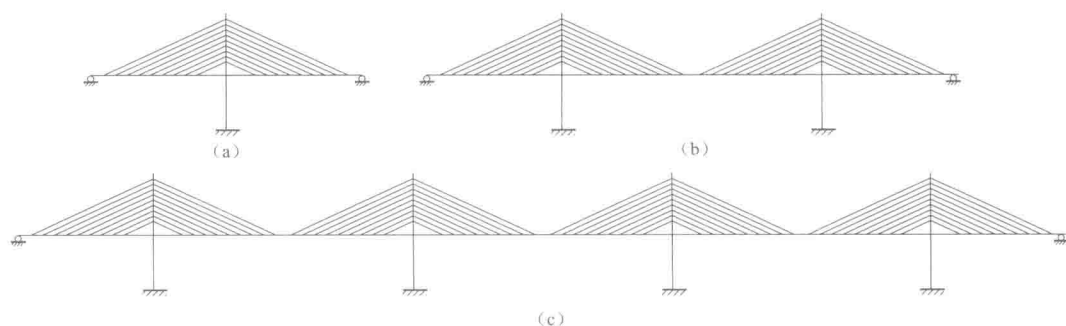


图 1-1 斜拉桥类型

(a) 单塔; (b) 双塔; (c) 多塔

1.2 独塔部分斜拉桥的国外发展状况

独塔部分斜拉桥的发源地为法国,1997 年世界第一座独塔部分斜拉桥——Saint-Remy-de-Maurienne Bridge 建成通车,该桥位于法国东南部萨瓦 (Savoie) 省,跨越 A43 号高速公路和 Maurienne 河,在美丽的阿尔卑斯山脉的环抱中,如图 1-2 所示。桥梁总长为 101m,跨径布置为 48.5m+52.5m,位于曲线半径为 500m 曲线上,塔梁固结,梁底设支座。索塔为混凝土结构,高 5m。主梁为预应力混凝土,高度为 2.15m,截面为 U 形,宽度为 13.4m。斜拉索采用双索面,呈竖琴形布置。

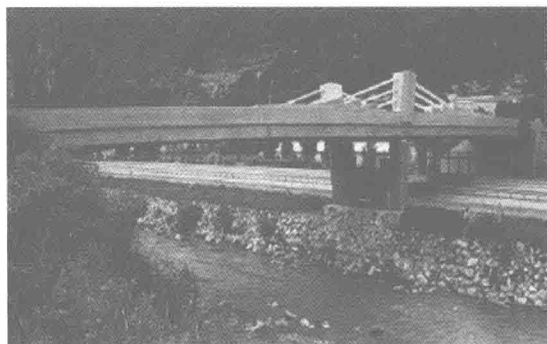


图 1-2 法国 Saint-Remy-de-Maurienne 桥

1999 年,日本修建了跨径为 52m+59m 的新川高架桥和跨径为 57.9m+92.9m 的三谷川二桥。三谷川二桥位于日本北海道德岛高速公路美马一川之江东 JCT 间,跨越河流,距井川池田 IC 约 13km,是一座预应力混凝土部分斜拉桥,如图 1-3 所示。该桥桥长 152m,桥面宽度 20.4m,塔高 12.8m,支座处梁高 6.5m,跨中处梁高 2.5m。该桥首次对索塔鞍部进行了足尺模型试验,积累了一定的经验。

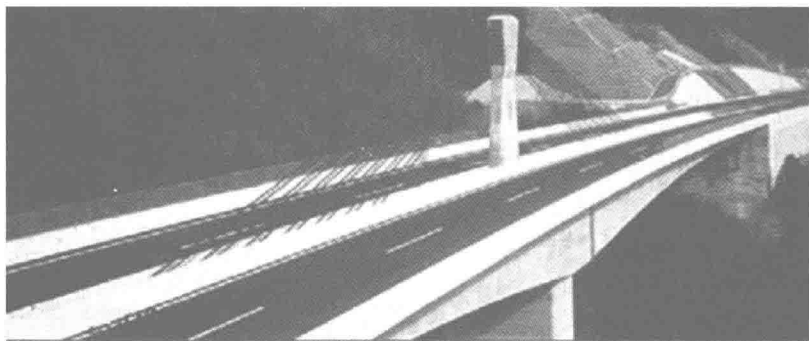


图 1-3 日本三谷川二桥

2000 年,日本修建了 Matakina 桥、Suriagegawa Dum 桥、雪泥三号桥和中的池桥。其中 Matakina 桥位于日本冲绳县,桥位处有两座著名的山峰,均为当地著名的风景名胜,跨越已规划建设的 Yanbaru 水库,为独塔部分斜拉桥,跨径布置为 $110\text{m}+90\text{m}$,塔墩固结,如图 1-4 所示。桥梁主塔采用双柱形,塔高 26.5m ,塔高跨比为 $1/7.43$,为典型高塔型部分斜拉桥。主梁采用单箱双室截面,根部梁高 6m ,跨中处梁高 3.5m ,主梁顶板宽 11.3m 、厚度 27cm ,底板宽 7m 、厚度为 $27\sim 80\text{cm}$,边腹板厚度为 $30\sim 60\text{cm}$,中腹板厚度为 30cm 。

设计方案评估时,考虑与周边环境协调的因素,采用桥塔高耸、梁体纤细的斜拉桥方案显然要比梁体高大、略显笨重且跨径较小的连续梁桥更为合适,但斜拉桥过高的桥塔可能会对山峰景观造成破坏。如果桥塔过矮,斜索过坦,其上部结构将淹没于周围的山地之中,也谈不上有较佳的景观效果,因此,高塔型独塔部分斜拉桥就成了较为合适的桥型形式。

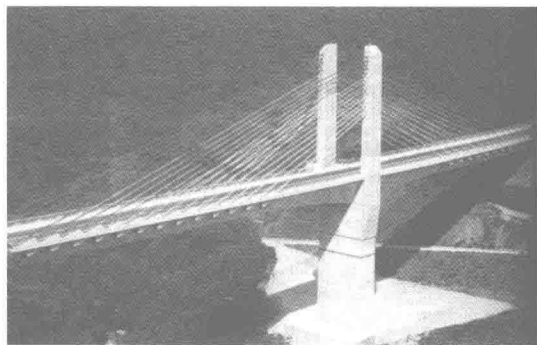


图 1-4 日本 Matakina 桥

由于桥址处于山谷的最狭窄部分,结构布置时,采用了黄金比例构图法,如图 1-5 所示。由于地处宗教圣地,于是将日本的风土工学(我国称风水)理论引入设计,结构为独塔非对称结构,通过优化设计索塔的高度及外观、拉索容许应力和主梁高度,使主塔接近 Y 形,并配以装饰。视觉上表现为既有整体连续性又有一定的柔和感。同时,该桥以白色为主色调,在林木苍翠的山峦中显得鲜明而有生气,为景区平添几分乐趣,达到美学、效率与经济的最佳平衡。

Suriagegawa Dum 桥位于日本福岛县,跨径为 84.2m ,跨越公路;雪泥三号桥位于日本秋田县,跨径布置为 $70.3\text{m}+71\text{m}$,位于山区;中的池桥位于日本大阪府,跨径布置为 $60.6\text{m}+62.4\text{m}$,位于山区。

2001 年,日本修建了都田川桥,总长度为 266m ,跨径布置为 $2\times 133\text{m}$,桥宽 16.5m 。如图 1-6 所示。该桥位于日本静冈县滨松市滨北区,是第二 Tomei 高速公路上的一座桥梁,跨越日本二级河流,桥址处是著名的观光和娱乐区,同时还是地震高发区。设计时,既要考虑桥梁的高抗震性能,也要考虑美学设计。

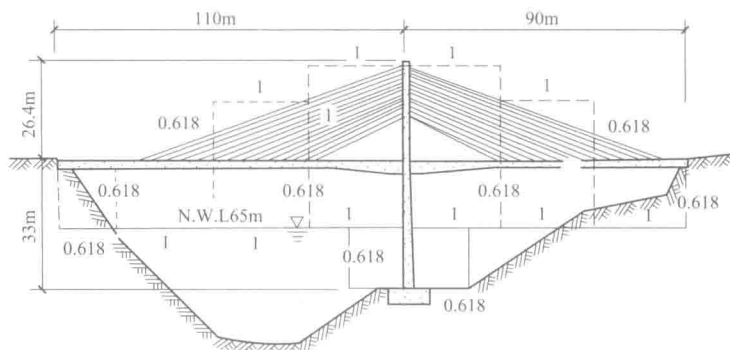


图 1-5 日本 Matakina 桥的黄金比例构图



图 1-6 日本都田川桥

桥梁采用三索塔支承的双幅梁组成的独塔部分斜拉桥，主梁采用单箱双室截面，根部处梁高 6.5m，跨中处梁高 4.0m，主梁顶板宽 19.9m、厚度为 30cm，底板宽 15.5m、厚度为 24cm，边腹板厚度为 45cm，中腹板厚度为 35cm。塔高 20m，高跨比为 1/11.9。拉索采用扇形三索面结构，每幅桥梁有 44 根间距为 6m 的斜拉索。桥墩总高度为 56.5m，由下到上截面尺寸由 9m×7m 过渡到 5m×7m，桥梁采用悬臂法和固定支架法架设。因采用多塔柱形式，使得整个结构显得刚劲有力，直线形塔柱给人以力度感。

都田川桥塔墩和索塔都采用钢管混凝土结构，由外部的钢筋笼和内部的大钢管组成，其中内部钢管和四周箍筋提供高剪切刚度及延性，钢管四周混凝土保护钢管不致发生屈曲破坏。同时，在建造过程中内部的钢管可以用作支架和模板，在浇筑混凝土时可以承受混凝土的自重，该类型截面简洁且便于施工，该理念在日本后来的地震区高墩桥梁建造中得到广泛采用。

2002 年，日本修建了久保桥，跨径布置为 2×114m，采用预应力钢筋混凝土主梁，位于山区。2004 年，修建了 Tatekoshi 桥，跨径布置为 56.3m+55.3m，采用钢筋混凝土主梁。2005 年，修建了栗东桥，该桥位于第二名神高速公路大津 JCT 至信乐之间、琵琶湖东南的崇山峻岭中，如图 1-7 所示。由于桥址处于滋贺县自然公园内，且有陡峭的地貌，西侧为栗东隧道，在地形上为一陡坡，且该区域具有部分罕见珍贵植物，在考虑地形及生态保护等因素后采用部分斜拉桥方案。为更好地与自然环境与特色融合，桥塔侧面采用丹顶

鹤造型设计。桥梁为上行、下行分离,上行线桥总长 495m,跨径布置为 67.6m+115m+170m+137.6m,下行线桥总长 555m,跨径布置为 72.6m+90m+75m+160m+152.6m,桥宽均为 19.3m,梁高 4.5m,桥墩高约 70m,主桥桥塔高 31m。为减少结构自重、提供施工效率、便于管理养护及维修等,主梁采用了波形钢腹板与钢筋混凝土顶板相结合的复合式箱形梁结构设计。

2006 年,日本修建了柳川(Yanagawa)桥和 Tagami 桥,跨径布置分别为 $2 \times 130.7\text{m}$ 和 $2 \times 80.2\text{m}$ 。2010 年,日本修建了新横山桥,跨径布置为 $88.2\text{m}+142\text{m}$ 。

匈牙利在研究独塔部分斜拉桥的基础上,在 2004 年修建了布达佩斯市 Korong 桥,跨径布置为 $52.26\text{m}+61.98\text{m}$,主梁采用预应力钢筋混凝土主梁。

另外,美国、加拿大、韩国也进行了部分斜拉桥的相关研究工作,也分别设计了几座部分斜拉桥,多为双塔或多塔部分斜拉桥,但未见独塔部分斜拉桥相关文献报道。

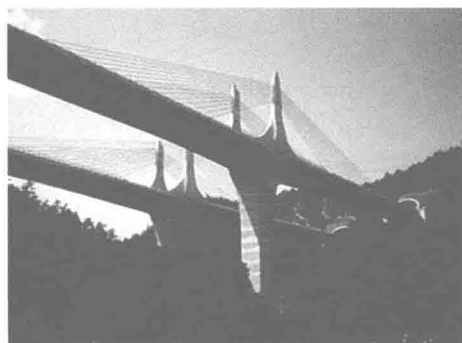


图 1-7 日本栗东桥

1.3 独塔部分斜拉桥的国内发展状况

我国目前正值桥梁建设高峰期,在对已建桥梁进行总结的基础上,充分吸收了国外的成功经验,独塔部分斜拉桥以其独特的优势备受关注。据不完全统计,截止 2014 年,已建成有 20 余座,相关研究和建设也在持续进行中,一些独塔部分斜拉桥的情况见表 1-1。

表 1-1 国内典型独塔部分斜拉桥

桥名	地点	建成时间	跨径/m	备注
银湖大桥	厦门市	2002	80+80	PC 主梁,城市湖泊
兰墅大桥	余姚市	2003	75+45	PC 主梁,公路
石景山南站高架桥	北京市	2003	45+65+95+40	PC 主梁,公路
北二环路一号桥	银川市	2004	70+70	PC 主梁,城市河流
吴淞江大桥	昆山市	2005	100.1+100.1	PC 主梁,城市河流
十里河大桥	大同市	2005	72.5+72.5	PC 主梁,城市河流
开发路湛河一桥	平顶山	2006	88+72	PC 主梁,城市河流
英溪大桥	德清县	2006	35+65+60	PC 主梁,城市河流
清水河商务大桥	张家口	2008	70.5+70.5	PC 主梁,城市河流
仙神河大桥	晋城	2008	136+131	PC 主梁,山区
浦河斜拉桥	沈阳		55+55	PC 主梁,城市河流
妈祖大桥	台湾	2008	125+125	PC 主梁,城市河流
涡河四桥	怀远县	2008	55+55	PC 主梁,城市河流
龟韭沟大桥	石嘴山市	2009	70+70	PC 主梁,城市河流
中山路斜拉桥	余姚市	2010	76+76	PC 主梁,城市河流

续表

桥名	地点	建成时间	跨径/m	备注
宛溪河大桥	宣城市	2010	45+88+88+45 (左幅) 45+88+88+55 (右幅)	PC 主梁, 城市河流
青弋江大桥	泾县	2011	70+70	PC 主梁, 城市河流
旗山大桥	台湾	2011	100+100	PC 主梁, 城市河流
百泉大道桥	邢台市	2012	60+60	PC 主梁, 南水北调干渠
宗湾子大桥	吴起县	2013	30+78+35	PC 主梁, 公路
四方碑桥	绥江县	2013	85+85	PC 主梁, 城市河流
和州大桥	和县	2013	70+70	PC 主梁, 城市河流
津保铁路子牙河特大桥	天津市	2014	84+56+32	PC 主梁, 公路

国内典型独塔部分斜拉桥概况介绍如下。

1. 厦门市银湖大桥

银湖大桥为我国首座独塔部分斜拉桥, 处于厦门市中心的银湖公园上, 桥头边为厦门市同安新区政府^[3]。桥梁平面位于直线上, 立面设+3%和-1%的双向纵坡, 竖曲线半径 $R=2000\text{m}$ 。主桥采用两跨预应力混凝土部分斜拉桥, 西引桥为一孔 32m 预应力混凝土简支箱梁, 东引桥为四孔 32m 预应力混凝土连续箱梁, 桥梁全长 327.6m, 跨径布置为 32m+2×80m+4×32m, 桥宽 27m, 行车道净宽为 20m 的双向四车道, 人行道宽度为 2.5m, 如图 1-8 所示。桥梁设计荷载采用汽车—超 20、城市—A 级, 验算荷载为挂车—120, 设计行车速度为 60km/h。人群荷载为 3.5kN/m^2 。地震烈度为 7 度, 设防烈度 8 度。



图 1-8 厦门市银湖大桥

主梁采用单箱三室大悬臂截面, 腹板采用斜向布置, 顶宽 27m, 底宽 16.24~17m, 悬臂长 4.5m, 中支点处梁高为 3.8m, 边支点处梁高为 2.4m, 梁高按二次抛物线变化; 箱梁采用纵、横、竖三向预应力布置。

主塔结构在桥面以上高度 30.25m, 采用实心 H 形截面, 顺桥向宽为 3.5m, 横桥向宽为 2m, 布置在中央分隔带上, 塔底采用 $R=4\text{m}$ 的圆弧加宽至 11.48m,

塔顶呈三角形, 两侧预留射灯孔。斜拉索采用竖琴式单索面形式, 顺桥向集中布置在梁体的 1/3 跨度附近。

2. 余姚市兰墅大桥

兰墅大桥为我国首座双索面不等跨弯塔部分预应力斜拉桥, 位于余姚市西郊的最良江上, 是最良江拓浚防洪工程的重要组成部分^[4]。该桥西南侧规划为余姚体育公园, 桥梁对景观的要求高。桥梁全长 760m, 主桥跨径布置为 75m+45m, 如图 1-9 所示。

桥梁设计荷载采用城市—A级；人群荷载按《城市桥梁设计准则》规定选用；行车道净宽为24m，双向六车道；人行道宽度为3m；地震基本烈度为6度，按7度设防；设计行车速度为40km/h。

主梁主跨采用双实心边主梁形式，边跨截面采用箱形截面，双向预应力布置。主跨桥面总宽度为35.5m，边跨桥面宽度为29m，比主跨减少了人行道的宽度。主梁设1.5%的双向横坡，主跨纵向每隔6m设一道横隔梁，边跨纵向每隔4~6m设一道横隔梁，横梁采用预应力结构，整个桥面系为纵横向的梁格结构。为与结构受力相适应，边跨箱梁内填充铁砂混凝土。边跨梁端设牛腿，引桥箱梁压在主梁牛腿上，以提供压重。



图 1-9 余姚市兰墅大桥

主塔采用预应力混凝土结构，桥面以上塔高41.6m，横桥向尺寸为2.5m，为增强桥梁美观效果，立面上采用变宽度曲线形式，主梁以下桥塔采用 $8\text{m} \times 2.5\text{m}$ 实心矩形截面，主梁以上按内半径80m、外半径82m的弧形逐渐变化为 $0.768\text{m} \times 2.5\text{m}$ 。为满足曲塔受力要求，在塔身布置了预应力钢筋，同时，在两塔间设一道预应力混凝土横梁，以加强塔柱的横桥向联系。根据现代美学理论，横梁设于塔柱的下1/3高度处，横梁上刻桥名，横梁采用矩形截面，高4m，宽2m。考虑美观、斜拉索养护及换索要求，在桥塔顺桥向表面设凹槽，并用深蓝色塑钢板嵌面。

斜拉索采用双索面扇形布置，主跨9根，边跨2根索1对，共4对。主跨梁上索间距为6m，边跨梁上索间距为8m。拉索采用 $\phi 7\text{mm}$ 镀锌平行钢丝索，两端采用冷铸锚，索外包黑色及彩色PE防护套各一层。

主桥施工采用满堂支架法施工，先浇筑主塔，后浇筑主梁，最后张拉斜拉索。

大桥造型独特，主塔似两根象牙，又似弯弓，主梁如弦上之箭，力度感强烈，桥塔高出桥面42m，显得十分雄伟、壮观。桥的整体形态既似一艘航行中的船，又似一把竖琴，其新颖而巧妙的构思令人耳目一新。大桥成为余姚市的标志性工程，是最良江上一道靓丽的风景。

3. 北京石景山南站高架桥

石景山南站高架桥为我国首座采用转体施工的单索面独塔部分斜拉桥，位于北京西南五环快速路上，上跨石景山南站编组站的咽喉区^[5]。铁路南侧为货场、平房等，北侧为衙门口村菜地。桥梁全长1180m，主桥跨径布置为 $45\text{m} + 65\text{m} + 95\text{m} + 40\text{m}$ ，四跨连续独塔单索面预应力混凝土结构，采用塔、梁、墩固结体系，如图1-10所示。

桥梁平面位于半径为1900m的平曲线上，竖曲线半径为16000m；设计荷载采用汽车—超20级，验算荷载为挂车—120；人群荷载按《城市桥梁设计准则》规定选用；桥面宽度为29m，双向六车道；桥下铁路通行净空为9m；地震基本烈度为8度，按9度设防；设计行车速度为100km/h。

主梁采用单箱三室大悬臂C50预应力混凝土箱梁结构，结构顶板宽28.76m、底板宽

17m、梁高 2.5m。箱梁顶、底板厚 26cm,悬臂板根部厚 60cm,端部厚 20cm。为了将曲线箱梁的重心尽量调整到箱梁中线处,将内、中、外腹板厚度分别定为 50cm、35cm、75cm。主梁纵向预应力钢筋为 1860 级高强度低松弛 M15-27、M15-19、M15-5 钢绞线,锚具分别为 OVM15-27、OVM15-19、OVM15-5 夹片锚。锚下控制应力 1358MPa;横向预应力钢筋为 1860 级高强度低松弛 BM15-3 钢绞线,锚具为 OVB15-3,锚下控制应力 1358MPa;竖向预应力筋为 JL875 级高强度精轧螺纹钢筋,采用 YGM-32 锚具,锚下控制应力 700MPa。

为了加强主塔的顺桥向刚度,改善景观效果,采用了顺桥向“倒 Y 形”结构,采用 C50 混凝土,顶部高 19.0m,倒 Y 形交叉部高 6.0m,下部高 14.0m。主塔厚度为 2.0~2.4m,主塔上部顺桥向宽度为 4.2~5.7m。为了加强主塔的横桥向刚度,下部采用变宽度的结构形式,由交叉点的 3.27m 变为根部的 4.0m,并在内部设置有宽翼缘热轧 T 型钢劲性骨架。主塔顶部的斜拉索锚固区环向预应力采用极限强度为 1860MPa 高强度低松弛的 M15-7 钢绞线,锚具采用 BSM15-7 与 OVM15-7P 夹片锚具。

全桥共设斜拉索六组,每组斜拉索由 2 根 OVMPE (FD) 7-451 低应力索体的双层 PE 热挤聚乙烯拉索构成 (1670 级高强度低松弛镀锌钢丝),呈扇形布置。为了更换斜拉索的需要,在主梁、主塔上预留了临时斜拉索的张拉锚固构造。

主墩采用下部中心距为 10m、上部中心距为 8m 的 C50 混凝土双薄壁墩,墩高约 10m、宽 12m、厚 2.0m。为了方便桥梁的转体施工,将主墩根部 3m 部分连成边长为 12m 的正方形实体段,转体完成后与承台固结,形成塔、梁、墩固结的斜拉桥体系。

在箱梁顶面 (不含中央带) 涂刷 2mm “中核 2000” 高效弹性防水层后铺装 78mm 厚的改性沥青混凝土,中央带内则喷涂 2mm 厚的防水涂料并铺卷材防水。桥面外侧采用 PL3 级、中央分隔带采用 PL2 级防撞护栏,铁路上方的外侧防撞护栏上设总高 2.2m 的防抛网。

主墩承台厚 5m,其中转体施工阶段浇筑 4m,余下 1m,在转体施工完后现浇。承台下共有 18 根 $\phi 1.5\text{m}$ 的钻孔灌注桩,承台主体部分边长为 15.2m,桩的中心距为 4.2m,桩长为 30m。为了放置转体施工牵引索,承台两侧各增加长 4m、宽 4.4m、厚 4m 的平台并与承台共同受力。承台除球铰附近区域采用 C50 混凝土外,其余部分均为 C40 混凝土,桩基均为 C30 混凝土。由于本桥位于半径 1900m 的圆曲线上,转体结构的重心偏向曲线内侧,球心与承台中心的水平距离为 105mm。主墩实体段及其承台为大体积混凝土工程。中心转盘球面半径为 8m,上转盘球缺高 1.230m,下转盘球缺高 0.228m,直径 3.8m,定位中心转轴的直径为 260mm。球铰由上下两块 40mm 厚钢质球面板组成,上面板为凸面,通过圆锥台与上部的牵引转盘连接,上盘就位于牵引转盘上;下面板为凹面,嵌固于下转盘顶面。上下面板均为 16Mnq 钢板压制而成的球面,背部设置 8 条发射形肋条和 3 条圆形肋条,防止在加工、运输过程中变形,并方便球铰的定位,加强与周围混凝土的连接。下面板上嵌四氟乙烯片,上下面板之间填充黄油四氟粉。上转盘共设有 8 组撑脚,每组撑脚由两个 $\phi 800 \times 24\text{mm}$ 的钢管混凝土组成,撑脚中心线的直径为 10m。为了增强转动过程中的稳定并确保桥下净空不减少,让转体重心后移 0.05m 左右,转体时实际是球铰与后支腿共同支承。转体上转盘受力复杂,采用了三向预应力结构:顺桥向、横桥向预应力钢筋为 1860 级高强度低松弛 M15-19 钢绞线,锚具为 OVM15-19 夹片锚,锚下控制应力为 1358MPa;竖向预应力钢筋为 JL875 级高强度精轧螺纹钢筋,采用 YGM-32 锚具,锚下控制应力为

675MPa。为了改善上转盘在转体施工阶段的受力状况,在转体上盘的球铰上方与主梁梁底还设有6个 $\phi 800 \times 24\text{mm}$ 的钢管混凝土撑架。牵引索固定端采用OVM15-19P型固端锚具锚固在上转盘内,并环绕上转盘约3/4周。对应上转盘的撑脚,下转盘设有直径为10m的下滑道及12组千斤顶反力座,撑脚与下滑道的间隙为4~6mm,千斤顶反力座用于转体的启动、止动、姿态微调等。

大桥采用单球铰转体施工,先平行铁路线完成斜拉桥的现浇,再将其转体 49° 到桥位,转体重量重达14000t。高高耸立的倒Y形主塔与6组斜拉索为北京立交桥增添了一道靓丽的风景。



图1-10 北京石景山南站高架桥

4. 银川市北二环路一号桥

银川市北二环路一号桥为我国单幅最宽的部分斜拉桥,位于银川市北部,跨越西湖景观水道^[6]。该桥所处北二环路为银川市城市主干道,是东西向一条宽60m的交通大动脉,东与109国道相通,西跨宝兰铁路与西夏区兴庆路相连,是集交通、旅游于一体的景观大道,桥梁对景观的要求高。桥梁一联长200m,跨径布置为30m+70m+70m+30m,如图1-11所示。

桥梁设计荷载采用城市—A级;人群荷载采用 2.4kN/m^2 ,局部荷载采用 5kN/m^2 ;桥梁宽度为60m,行车道宽度32m,两边各4m宽分隔带、5m宽非机动车道及5m宽人行道;桥梁纵坡为2%;桥下净空大于4.5m,地震基本烈度为8度,按9度设防;设计行车速度为60km/h。

主梁采用两箱鱼腹式断面,每箱为四室结构,两箱之间用横梁连接,横梁厚27cm,横梁底部与梁底平。梁顶分别设1.5%和1.0%横坡,在分隔带4m范围内梁顶面为平坡。梁底面采用圆曲线,主梁在拉索处高2.18m。主梁采用纵横双向预应力体系,混凝土采用C50。全桥共划分为7个梁段,其中一个0号段,6个左右对称梁段,各梁段间以湿接缝连接,第5号段为合龙段。

主塔采用钢筋混凝土结构,C50混凝土,采用双圆构成的哑铃形截面,两主塔布置在分隔带上,塔高30m,顺桥向宽4.8m,横桥向宽2.4m,圆柱直径为2.4m。塔内设斜拉索转向鞍座,以便拉索通过。

斜拉索采用双面索,每个索面共9对索,拉索为M15-55高强度钢绞线。梁上拉索间距

为 5m, 塔上拉索间距为 1.2m。

桥墩由 4 个圆呈花瓣形组成, 边墩为钢筋混凝土圆形墩, 桥台采用耳墙式轻型桥台。主墩承台为直径 18m 的圆形承台, 厚 3.5m。

大桥设计美观, 经济适用, 在同类桥梁宽度上有新的突破, 推动了该桥型在我国的发展和应用。

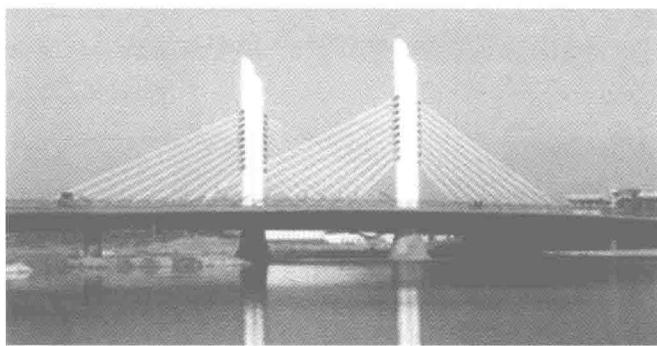


图 1-11 银川市北二环路一号桥

5. 昆山市吴淞江大桥

吴淞江大桥位于江苏省昆山市吴淞江跨河处, 是昆山市重点基础设施建设项目^[7]。主桥跨径为 100.1m+100.1m, 如图 1-12 所示, 两侧引桥为 8×22m 先张法预应力简支空心板梁桥, 全长 554m, 宽度为 33m。

桥梁设计荷载采用城市—A 级, 人群荷载采用 2.4kN/m², 地震基本烈度为 7 度, 按 8 度设防; 设计行车速度为 50km/h。

主梁采用单箱五室变截面箱梁, 箱底宽 25.4m, 顶宽 33m, 悬臂长 3.8m。塔根处梁高 5m, 顶板厚度 25cm, 其中拉索锚固箱室顶板厚度 50cm, 边腹板厚度 70cm, 中腹板厚度为 60cm, 底板厚度 60cm; 跨中梁高 3m, 顶板厚度 25cm, 其中拉索锚固箱室顶板厚度 50cm, 边腹板厚度 50cm, 中腹板厚度为 40cm, 底板厚度 25cm; 梁高变化段在塔根无索区段, 变化线形为半径 16229m 的圆曲线。



图 1-12 昆山市吴淞江大桥

主塔截面为椭圆形, 下大上小逐渐变化, 造型别具一格。索塔布置于中央分隔带, 与主梁及桥墩固结。索塔总高度 42.091m, 分上下两段, 其中下段高 27.411m, 椭圆变化段, 下端椭圆的断面尺寸为 5.2m×3m, 上部椭圆断面尺寸为 4.2m×2m, 椭圆长轴与桥梁纵轴线重合; 上段高为 14.68m, 断面尺寸由 4.2m×2m 的椭圆变化为直径为 0.5m 的圆。塔顶设不锈钢饰件, 塔身采用凹形线条变化。

斜拉索采用单索面, 呈竖琴式布置, 水平倾角为 20°, 全桥共 14 对 28 根, 主梁上索

间距为4m,近塔端设有28m的无索区段,边墩附近设有20.67m的无索区段。拉索采用OVM200型钢绞线群锚体系,每根拉索由M15-73高强度钢绞线组成。拉索采用三层防护体系,分别为环氧树脂涂层、PE护套和PE管。拉索连续通过塔顶的鞍座,两侧对称地锚固于主梁的横梁上,每对拉索对应一个鞍座。鞍座采用集束管式,其中每根钢绞线相互平行,受力明确,与双套管鞍座内的钢绞线相互挤压在一起相比,在受力上具有明显的优点,但施工工艺复杂一些。

大桥结构新颖,设计美观,经济适用,效果较好,成为了昆山市标示性景观工程。

6. 大同市十里河大桥

十里河大桥位于大同市同泉路,跨越十里河^[8]。道路分左右两幅,桥梁位于直线段上,主桥为两跨现浇独塔部分斜拉桥,塔—梁—墩固结体系,全长145m,跨径布置为72.5m+72.5m,如图1-13所示,桥宽28.5m,其中单侧人行道宽2m,单侧行车道宽11m,中央分隔带宽2.5m。

主梁采用等截面现浇预应力混凝土单箱三室截面,梁高1.8m,采用纵横双向预应力布置,纵向预应力采用M15-12钢绞线,横向采用BM15-2钢绞线。

主塔高29m,采用预应力混凝土结构,实心矩形截面,布置于中央分隔带上,塔身上设鞍座,斜拉索从塔身鞍部通过,锚固于主梁中央分隔带上;在两侧斜拉索出口处设抗滑锚板,以防止钢索的滑动。

斜拉索为单索面布置,采用 $\phi 7-181$ 平行钢丝,考虑到张拉设备、施工能力及施工方便,单索面横向分两排,鞍座处也分为两排。



图1-13 大同市十里河大桥

7. 平顶山市湛河一桥

湛河一桥位于河南省平顶山市城东开发区,是平顶山城市发展规划中跨越湛河的三座大桥之一^[9]。主桥跨径为88m+72m,采用塔—梁—墩固结体系,如图1-14所示,南侧引桥采用2×20m先张法预应力简支空心板梁桥,全长205.75m。桥梁宽度为30m,人行道宽2.75m,非机动车道宽2.75m,机动车道宽15m,双向四车道,中央分隔带宽2m;主桥纵坡1.5%,引桥纵坡2.3%;桥面横坡1.5%。

桥梁设计荷载采用汽超—20,验算荷载挂—120,人群荷载采用3.5kN/m²。设计洪水频率为100年一遇;地震基本烈度为6度,按7度设防;设计行车速度为40km/h。

主梁采用变截面C50预应力混凝土箱梁,梁高按1.6次抛物线变化,单箱三室截面,箱梁顶宽30m,两侧腹板采用1.5:1的等斜率腹板,梁高由4.2m变化到2.2m,相应底宽由16.31m变化到18.71m。箱梁设计按A类部分预应力设计,纵、横、竖三向预应力布置。

由于主塔高度和断面都较小,故主塔采用实心混凝土矩形截面,截面大小为2m×3.4m(横桥向×顺桥向)。塔总高22.7m,结构高度为19.2m。

斜拉索采用扇形布置,布置在中央分隔带上,顺桥向集中布置在主梁箱梁梁体约1/3跨度附近,梁上索间距为4m,塔上索间距为0.8m。拉索采用双排索,平行布置,中心距

为 0.8m。拉索在塔上通过鞍座，两侧对称锚固于箱梁横隔板上。全桥共计 2 排 18 根，斜拉索采用 M15-37 高强度钢绞线，HVM200 张拉端锚固体系。



图 1-14 平顶山市湛河一桥

桥梁建成在方便两岸居民出行的同时，也延长了湛河两岸风景长廊，促进了城市经济的腾飞。

8. 浙江省德清县英溪大桥

英溪大桥是浙江省德清县迎宾大道中的重要节点，它跨越英溪河，贯通了出入县城的东大门，有德清“门户、小关口”作用^[10]。英溪大桥为双幅单索面独塔部分斜拉桥，桥梁总长 160m，跨径布置为 35m+65m+60m，采用塔—梁—墩固结体系，主桥如图 1-15 所示。桥梁宽度为 70~72.468m，采用分离式桥面，中间分隔带变宽。人行道及设施带宽 6.5m，非机动车道宽 5.5m，机动车、非机动车隔离带 4m，机动车道宽 16m，中央分隔带宽 6~8.468m。桥梁纵坡 3‰；桥面横坡 2‰。

桥梁设计荷载采用城市—A 级，设计洪水频率为 100 年一遇，地震基本烈度为 7 度、按 8 度设防，桥梁所在道路属于城市主干道，设计行车速度为 60km/h。

主梁采用等高度单箱六室截面，箱梁采用斜腹板。箱梁顶板宽 32.3m，顶板悬臂长度 3.5m，梁高 2.4m。顶板一般板厚 25cm，锚固斜拉索处板厚 50cm；底板宽 17.3m，一般板厚 25cm，在主塔墩两侧各 5.5m 范围加厚至 45cm；边腹板厚 25cm，中腹板厚 40cm。悬臂板端部厚 15cm，根部板厚 45cm。在支点和斜拉索锚固处设置横隔板。中间两室横隔板厚度为 50cm，其余厚度为 30cm。1 号墩支点横梁厚度为 200cm，2 号墩支点横梁厚度为 300cm，端横梁厚度为 150cm。顶板、底板横坡均为 2‰，通过箱体绕箱梁中心线刚性旋转来实现。

主塔布置在机动车、非机动车分隔带上，相对主梁中心线不对称，偏人行道侧 1.3m，采用钢筋混凝土结构，截面为矩形实心截面，塔高 21.5m，顺桥向宽 2.5m，横桥向宽 1.8m，主塔上部锚索区段立面配以线条装饰，形成麦穗造型的外轮廓，顺桥向尺寸为 4m，横桥向尺寸为 2m。

斜拉索在塔顶的锚固采用双钢管鞍座结构，内外钢管均为圆弧形，外钢管预埋在主塔混凝土内，内钢管在外钢管内，斜拉索穿过内钢管。在斜拉索出主塔处设抗滑锚头，以防止内外钢管相对滑动。斜拉索在内钢管、锚头内为裸索，待斜拉索施工完后，在内钢管和锚头内灌注高强度环氧树脂水泥砂浆封固。每根斜拉索对应一个鞍座。斜拉索为单索面布