

山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书

海上独柱塔

自锚式悬索桥

邵新鹏 主 编

孟凡超 沈锐利 副主编



人民交通出版社
China Communications Press

山东高速青岛胶州湾大桥



海上独柱塔自锚式悬索桥

主 编 邵新鹏

副主编 孟凡超 沈锐利

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是青岛胶州湾大桥建设丛书第三册,共分为六章,系统介绍了青岛胶州湾大桥大沽河航道桥采用的自锚式悬索桥方案设计、施工及监控等相关技术内容,阐述了工程实施过程中的设计理念、设计思路及施工中所采用的关键技术和检测方法。

本书丰富了我国海上桥梁工程建设技术资料库,可供跨海工程、桥梁工程技术人员和高等院校师生参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

海上独柱塔自锚式悬索桥/邵新鹏,孟凡超,沈锐利主编. —北京:人民交通出版社,2012. 2
(山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书)
ISBN 978-7-114-09628-0

I. ①海… II. ①邵… ②孟… ③沈… III. ①跨海峡桥:悬索桥—桥梁工程—青岛市 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 015584 号

山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书

书 名:海上独柱塔自锚式悬索桥

著 者:邵新鹏 孟凡超 沈锐利

责任编辑:张征宇 刘永芬

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15

字 数:384 千

版 次:2012 年 2 月 第 1 版

印 次:2012 年 2 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09628-0

定 价:40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《海上独柱塔自锚式悬索桥》

编 委 会

主 编:邵新鹏

副主编:孟凡超 沈锐利

编写人员(按拼音为序):

蔡建军 陈文明 程建新 崔学涛 杜 清 贺拴海

黄新明 季 辉 荆玉才 李 鹏 栗怀广 刘 刚

刘国强 罗 玮 彭 霞 阮家顺 唐茂林 王 麒

王行耐 王晓乾 王兆星 魏家乐 吴 涛 霁建平

邢晓波 杨晓滨 张革军 赵 煜 赵小星

前 言

山东高速青岛胶州湾大桥是我国在北方寒冷冰冻海域建设的首座特大型桥梁集群工程,是青岛市交通规划中东西岸跨海通道“一路、一桥、一隧”中的“一桥”,是国家高速公路网青岛至兰州高速公路的起点段。青岛胶州湾大桥工程中的大沽河航道桥是世界首座独柱塔、分体式钢箱梁、中央空间索面自锚式悬索桥。该桥是青岛胶州湾大桥的标志性工程,取得了非常好的景观效果。

大沽河航道桥在计算方法、结构体系、材料运用、施工工艺等很多技术方面均有创新和突破,为了总结设计、施工、监控和科研成果并便于推广应用,由山东高速青岛胶州湾大桥建设指挥部组织编写了《海上独柱塔自锚式悬索桥》,系统地介绍了大沽河航道桥的设计思路、设计方案、科学研究和施工技术方面的成果。

《海上独柱塔自锚式悬索桥》是山东高速青岛胶州湾大桥建设丛书的第三册,共分六章。第一章介绍了悬索桥的发展和演变过程,自锚式悬索桥的结构特点,设计和施工中的关键或尚需验证的技术问题;第二章阐述了大沽河航道桥总体设计、桥塔设计、承台设计、缆索系统设计及加劲梁系统设计等内容;第三章阐述了桥梁下部结构及索塔的施工方法和关键技术;第四章阐述了钢箱梁的制造,悬索桥缆索系统用镀锌钢丝制造,鞍座、索股、吊索的制作和索夹的制造;第五章介绍了钢箱梁支架的制作与安装、钢箱梁的运输、钢箱梁安装、缆吊系统安装及体系转换等关键工序;第六章从施工监控的目的、方法、内容和控制精度等方面进行简述,重点介绍了独柱塔、分体式钢箱梁和中央空间索面主缆自锚式悬索桥结构的施工控制方法和监控结果。

本书由山东高速青岛胶州湾大桥建设指挥部策划,建设、设计、施工、监理、监控和科研等单位参与编写。参与编写的人员还有(以拼音为序):蔡建军、陈文明、程建新、崔学涛、杜清、贺拴海、黄新明、季辉、荆玉才、李鹏、栗怀广、刘刚、刘国强、罗玮、彭霞、阮家顺、唐茂林、王麒、王行耐、王晓乾、王兆星、魏家乐、吴涛、霁建平、邢晓波、杨晓滨、张革军、赵煜、赵小星。编者水平有限,本书难免存在不当之处,恳请读者指正。

邵新鹏 孟凡超 沈锐利

2012年5月

目 录

第1章 概述	1
1.1 悬索桥发展概况	1
1.2 典型自锚式悬索桥	2
1.3 自锚式悬索桥基本组成	3
1.3.1 加劲梁	4
1.3.2 索塔	4
1.3.3 主缆	4
1.3.4 吊索	4
1.3.5 索鞍	4
1.3.6 索夹	4
1.3.7 锚固构造	4
1.3.8 设计理论和尚需解决的问题	5
第2章 结构设计	6
2.1 总体设计	6
2.2 加劲梁设计	7
2.2.1 断面	7
2.2.2 梁段划分	8
2.2.3 主缆锚固构造	8
2.2.4 吊索锚固构造	8
2.2.5 横向连接箱	8
2.2.6 顶、底、腹板及横、纵隔板	8
2.2.7 散索套底座	10
2.2.8 工地嵌补段	10
2.2.9 散索罩	11
2.2.10 工地临时连接匹配件	11
2.2.11 压重布置	11
2.2.12 加劲梁主要材料	11
2.3 索塔及其基础设计	11
2.3.1 塔身及其基础	11
2.3.2 三角撑	12
2.4 墩身及其基础设计	13

2.5 缆索系统设计	14
2.5.1 主缆	14
2.5.2 吊索	15
2.5.3 主索鞍	15
2.5.4 散索套	16
2.5.5 索夹	17
2.6 主缆锚固区模型试验研究	17
2.6.1 研究目的	17
2.6.2 研究方法	18
2.6.3 研究结论	19
第3章 下部结构及索塔施工	20
3.1 钻孔平台	20
3.1.1 设计条件	20
3.1.2 平台结构型式	20
3.1.3 钻孔平台结构安全性	21
3.2 钻孔灌注桩施工	21
3.2.1 施工工艺流程	21
3.2.2 劳动力计划及工效分析	22
3.2.3 成孔施工	23
3.2.4 质量控制标准及意外预防措施	26
3.2.5 清孔	27
3.2.6 钻孔施工意外故障应急措施	28
3.2.7 钻孔灌注桩钢筋笼制造安装	28
3.2.8 水下混凝土浇注	32
3.2.9 桩基质量检测	34
3.3 承台与防撞钢套箱	34
3.3.1 总体施工流程	34
3.3.2 钢套箱结构设计	35
3.3.3 套箱加工	42
3.3.4 钢套箱施工	51
3.3.5 封底混凝土施工	55
3.3.6 主墩承台混凝土施工	58
3.4 辅助墩及过渡墩的施工	64
3.4.1 辅助墩、过渡墩钢套箱结构	64
3.4.2 钢套箱拼装及下沉	66
3.5 索塔施工	71
3.5.1 索塔施工简述	71

3.5.2 三角撑施工	76
第4章 钢箱梁的制造与安装	93
4.1 钢箱梁制造	93
4.1.1 钢箱梁概况	93
4.1.2 原材料、原材料复验与原材料管理	96
4.1.3 技术准备	98
4.1.4 制造工艺概述	101
4.1.5 施工采用的规范及标准	102
4.1.6 准备工序	103
4.1.7 钢箱梁节段及单元件划分	106
4.1.8 钢箱梁单元件制造	107
4.1.9 梁段组装	112
4.1.10 大节段的装船与转运	119
4.1.11 桥上装焊	119
4.2 钢箱梁支架的设计与施工	122
4.2.1 临时支架设计	122
4.2.2 临时支架施工	122
4.3 钢箱梁节段的运输	127
4.3.1 箱梁装船加固	127
4.3.2 箱梁海上拖运	128
4.3.3 拖带航行安全措施	128
4.4 钢箱梁的大块吊装施工	129
4.4.1 钢箱梁施工方案	129
4.4.2 钢箱梁架设施工工艺	133
第5章 缆索系统施工	157
5.1 猫道系统设计与施工	157
5.1.1 猫道总体布置	157
5.1.2 猫道构成	158
5.1.3 猫道施工流程	159
5.1.4 猫道架设	161
5.2 牵引系统架设	161
5.2.1 牵引系统总体设计	162
5.2.2 牵引系统施工	162
5.2.3 施工要点	163
5.3 散索套安装	164
5.3.1 散索套安装	164
5.3.2 散索套安装精度要求	165

5.4 主缆索股架设	165
5.4.1 概述	165
5.4.2 施工流程	166
5.4.3 主缆架设施工	166
5.5 主缆紧缆	169
5.5.1 施工流程	169
5.5.2 预紧缆	170
5.5.3 正式紧缆	170
5.5.4 质量安全保证措施	170
5.6 索夹、吊索安装	171
5.6.1 施工流程	171
5.6.2 索夹制作要求和放样方法	172
5.6.3 索夹安装	173
5.7 吊索张拉、体系转换	173
5.7.1 张拉加载顺序考虑因素	174
5.7.2 吊索安装、张拉施工	174
5.7.3 体系转换	174
5.8 主缆及钢结构防腐工程	174
5.8.1 主缆防护体系	174
5.8.2 施工流程	175
5.8.3 主缆防护施工工艺	176
5.8.4 重难点工艺	178
5.8.5 涂装	180
5.9 附属设施	183
5.9.1 钢箱梁除湿系统	183
5.9.2 检修小车设计及制造安装	187
5.10 主缆检修道设计与安装	196
5.10.1 工程概况	196
5.10.2 检修道施工组织	196
5.10.3 检修道安装施工	197
5.10.4 检修道施工安全、质量保证措施	198
5.10.5 文明生产与环境保护措施	199
第6章 施工控制	200
6.1 大桥施工控制目的与意义	200
6.2 施工控制的原则、方法和系统运行过程	200
6.2.1 施工控制的原则	200
6.2.2 施工控制的方法	201

6.2.3	施工控制的系统运行过程	201
6.3	施工控制工作程序和各阶段测量内容	202
6.3.1	施工控制工作程序	202
6.3.2	施工控制各阶段测量内容	202
6.4	施工控制精度	203
6.5	索塔的施工控制	203
6.5.1	主塔应力和温度测试断面的确定与测点布置	203
6.5.2	索塔塔顶位移测点的布置	206
6.5.3	索塔在各阶段的测试	206
6.6	加劲梁施工控制	206
6.6.1	加劲梁各阶段线形与应力的计算	206
6.6.2	加劲梁施工过程控制	207
6.7	悬索施工控制	208
6.7.1	主缆索股无应力下料长度计算	208
6.7.2	索鞍预偏量及基准索股线形计算与控制	208
6.7.3	空缆状态索夹安装位置计算与控制	209
6.7.4	吊索下料长度的计算	209
6.7.5	吊索张拉过程中的计算与控制	210
6.8	施工控制的实施结果	210
6.8.1	加劲梁工厂无应力拼装	210
6.8.2	加劲梁架设	210
6.8.3	主缆基准索股与一般索股的架设	211
6.8.4	索夹安装	212
6.8.5	吊索张拉	214
6.8.6	吊索张拉实施结果	221
6.8.7	二期铺装完成结果	222
6.9	组织、分工和数据的采集与传递	223
6.9.1	施工控制组织与分工	223
6.9.2	施工控制中数据的采集与传递	223
6.10	施工控制相关图表	224
6.10.1	施工控制仿真计算图表	224
6.10.2	施工控制中数据的采集与分析	225

1.1 悬索桥发展概况

悬索桥,又称吊桥,指的是以通过索塔悬挂并锚固于两岸(或桥两端)的缆索(或钢链)作为上部结构主要承重构件的桥梁。

悬索桥按主缆锚固形式的不同,可分为地锚式悬索桥和自锚式悬索桥。地锚式悬索桥主缆锚固于两岸的锚碇上,由锚碇来抵抗主缆的张力。自锚式悬索桥主缆锚固于主梁的两端,由主梁自身来抵抗主缆的张力,而不需要独立的锚碇构造。

早在 1000 年之前,我国四川省的灌县就出现了采用竹子制造的索桥,17 世纪,开始出现采用铁链作悬索的桥梁,到了 19 世纪,又发展为采用眼杆与销铰作悬索的桥梁,进入 20 世纪后,出现了采用钢缆绳、钢绞线和钢丝等现代钢材制造的现代悬索桥。

现代地锚式悬索桥是跨越能力最强的桥型。现代最大跨度的桥梁是日本明石海峡大桥,其主跨跨度为 1991m,其桥型就是地锚式悬索桥。地锚式悬索桥的主要承重构件——主缆,锚固在庞大的锚碇上,锚碇造价较高,且需要很好的地形和地质条件。随着跨度的减小,锚碇占全桥总造价的比例也不断增大,在此情况下,地锚式悬索桥在造价上相对于其他桥型将会有劣势。

19 世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫·朗金和美国工程师查理斯·本德分别独立地构思出了自锚式悬索桥构造。不同于地锚式悬索桥,自锚式悬索桥将主缆直接锚固于主梁上,取消了庞大的锚碇构造。这样,自锚式悬索桥相较于地锚式悬索桥节省了投资,也为在不便建造锚碇的地方修建悬索桥提供了一种很好的解决方法。

自锚式悬索桥作为一种特殊的桥型,以其结构造型美观,经济性好,对地形和地质状况适应性强等优点,越来越受到青睐,成为中小跨径桥梁较有竞争力的桥型。

1915 年,德国在科隆的莱茵河上建造了第一座大型的自锚式悬索桥——Deutzer Brücke,如图 1.1-1 所示。该桥主跨跨径为 185m,已于 1945 年被毁。此后,德国还陆续建造了近 10 座自锚式悬索桥,供人行或公路交通使用。1929 年,德国建成的 Köln - Mülheimer Brücke,其主跨跨径为 315m,它在其后很长一段时期内保持着自锚式悬索桥的跨径纪录。

1926 年,美国建成其第一座自锚式悬索桥——Seventh Street Bridge,如图 1.1-2 所示,其

主跨跨径为 135m,采用眼杆作主缆。其后美国还陆续建造了好几座自锚式悬索桥,计划于 2013 年建成的 San Francisco-Oakland Bay Bridge (East),其主跨跨径为 385m,将成为跨度最大的自锚式悬索桥。



图 1.1-1 Deutzer Brücke

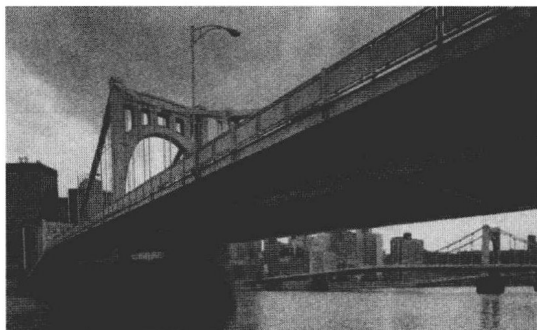


图 1.1-2 Seventh Street Bridge

1928 年,日本建成其第一座自锚式悬索桥——Kiyosu Bridge,如图 1.1-3 所示,其主跨跨径为 91.5m。1990 年,日本建成 Konohana Bridge,其主跨跨径为 300m,是当时跨径最大的自锚式悬索桥。



图 1.1-3 Kiyosu Bridge

2000 年,韩国建成 Yeongjong Grand Bridge,其主跨跨径为 300m,与日本 Konohana Bridge 跨径相同,是当时跨径最大的自锚式悬索桥。

2000 年之后,自锚式悬索桥在我国得到了蓬勃发展,先后建成了十几座。2006 年,广东建成的佛山平胜大桥,其主跨跨径为 350m,是世界上已建成的跨径最大的自锚式悬索桥。2008 年,湖南建成长沙三汊矶湘江大桥,其主跨跨径为 328m。

1.2 典型自锚式悬索桥

(1) 美国 San Francisco-Oakland Bay Bridge (East)

原来的 San Francisco-Oakland Bay Bridge (East) 为 1936 年建成的钢桁架梁桥,其在 1989 年的地震中损坏,在建的新桥就是为了替换损坏的旧桥。新建桥梁为独柱塔自锚式悬索桥,跨径布置为 385m + 180m,加劲梁采用分离式双箱构造,每幅梁均采用正交异性桥面板钢箱

梁,两幅梁之间用宽 10m、高 2.5m、间距为 30m 的横梁连接。索塔高 160m,由 4 根钢箱柱组成,沿高度方向用剪力杆连接。主缆采用空间双索面形式。

图 1.2-1 所示的 San Francisco-Oakland Bay Bridge (East) 计划于 2013 年建成,将成为跨度最大的自锚式悬索桥。

(2) 日本 Konohana Bridge

日本 Konohana Bridge 建成于 1990 年,如图 1.2-2 所示,其桥跨布置为 120m + 300m + 120m。加劲梁采用钢箱梁构造,索塔为花瓶形索塔,主缆采用平面单索面形式。

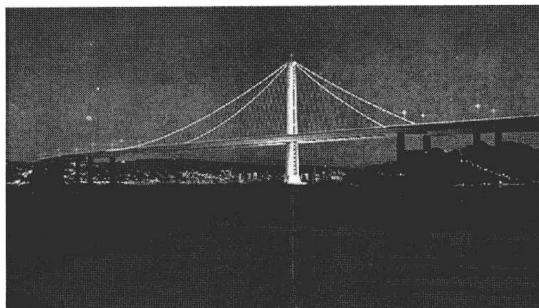


图 1.2-1 San Francisco-Oakland Bay Bridge (East)

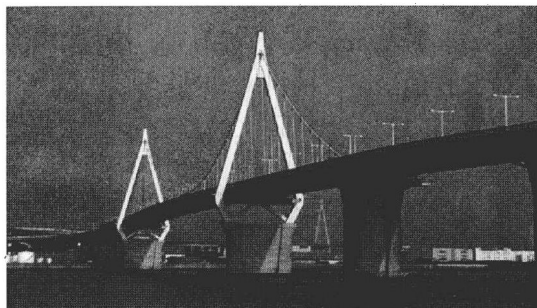


图 1.2-2 Konohana Bridge

(3) 韩国 Yeongjong Grand Bridge

韩国 Yeongjong Grand Bridge 建成于 2000 年,如图 1.2-3 所示,是世界上第一座双层通行的公铁两用自锚式悬索桥。加劲梁采用桁架构造,索塔为花瓶形索塔,主缆采用空间双索面形式。

(4) 佛山平胜大桥

佛山平胜大桥建成于 2006 年,如图 1.2-4 所示,其主跨跨度为 350m,是世界上已建成的跨径最大的自锚式悬索桥。加劲梁采用混合梁构造,主跨采用钢箱梁,边跨采用混凝土箱梁。索塔为 M 形三柱式混凝土索塔。主缆采用平面四索面形式。

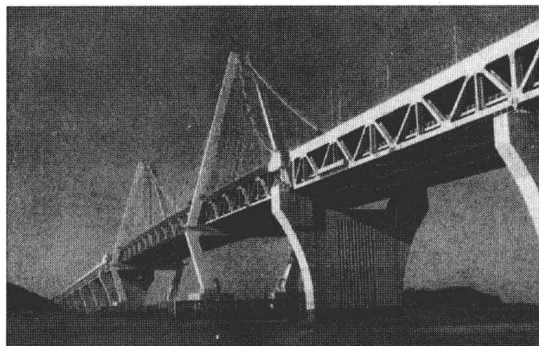


图 1.2-3 Yeongjong Grand Bridge



图 1.2-4 佛山平胜大桥

1.3 自锚式悬索桥基本组成

自锚式悬索桥是由加劲梁、索塔、主缆、吊索、索鞍、索夹和锚固构造等构件组成。

1.3.1 加劲梁

自锚式悬索桥的加劲梁的主要功能是提供桥面支承以及承受主缆轴向力,同时,加劲梁也是承受风荷载和其他横向水平力的主要构件。

由于自重的限制,通常加劲梁为钢结构,一般采用钢桁架和钢箱梁两种形式。

1.3.2 索塔

索塔是支承主缆的重要构件,主缆上传递而来的悬索桥的活载和恒载(包括桥面、加劲梁、吊索、索鞍、索夹等的重力)通过鞍座传递给索塔,加劲梁也支承在塔身上,索塔继而将这些荷载传递给下部的塔墩和基础。

索塔主要考虑塔顶上的鞍座布置以及加劲梁支承布置,索塔形式有独柱式、门架式、A形、倒V形以及倒Y形等。索塔可采用钢结构,也可采用混凝土结构。

1.3.3 主缆

主缆是悬索桥的主要承重构件,除承受自身恒载外,缆索本身通过索夹和吊索承受活载和加劲梁及桥面的恒载。此外,主缆还将一部分横向风荷载传递给索塔。

主缆在恒载作用下具有很大的初始张力,对运营阶段受力提供强大的重力刚度。

现代悬索桥通常采用高强度平行钢丝作为主缆。主缆架设主要有空中纺丝法(AS法)和预制平行索股法(PPWS法)两种。

1.3.4 吊索

吊索是联系加劲梁和主缆的纽带,其上端通过索夹和主缆相连,下端锚固于加劲梁上。吊索将活载和加劲梁及桥面的恒载传递给主缆,承受轴向拉力。

现代悬索桥通常采用柔性的钢丝绳或平行钢丝索作为吊索。钢丝绳吊索与索夹的连接形式为骑跨式,平行钢丝索与索夹的连接形式为销接式。

1.3.5 索鞍

自锚式悬索桥索鞍主要有主索鞍和散索鞍等形式。

主索鞍在索塔顶上,用来支承和固定主缆,以使主缆的拉力以竖直力和不平衡水平力形式均匀地传递到塔顶。

散索鞍位于主缆锚固处,其作用是将主缆索股散开,分别锚固在锚固区的锚块上。

1.3.6 索夹

索夹位于每根吊索和主缆的连接节点上,是主缆和吊索的连接构件。索夹以套箍的形式紧固在主缆上,通过夹紧后产生的摩阻力来抵抗滑移,从而固定吊索和主缆的节点位置。同时,索夹也是固定主缆外形的主要措施。

1.3.7 锚固构造

自锚式悬索桥的主缆锚固于加劲梁上,锚固构造用来锚固主缆索股,并使主缆的拉力匀

顺的传递到加劲梁构造上。

锚固构造可采用钢结构、混凝土结构及钢混组合结构。

1.3.8 设计理论和尚需解决的问题

自锚式悬索桥与地锚式悬索桥虽均为柔性悬吊组合体系,但结构受力和施工方法截然不同。自锚式悬索桥结构受力复杂,塔、梁、索受力高度耦合,且非线性效应显著。自锚式悬索桥与地锚式悬索桥的加劲梁和主缆施工顺序完全相反,自锚式悬索桥需要先安装主梁后架设主缆且吊索需要张拉。因此,设计中,首先需要确定合理成桥状态,其次需要确定加劲梁体系转换方案。

人们对地锚式悬索桥的理论研究和建造经验已经非常成熟和完善,但对自锚式悬索桥的理论和实践的认识还不够全面,需要进行认真的研究和探讨。

2.1 总体设计

针对大沽河航道桥的建设条件,通过多方案的比较,大沽河航道桥的桥型选用了独柱塔自锚式悬索桥。该桥型不仅很好地适应了桥位处的建设条件的要求,而且具有很好的景观效果,其航道桥模型如图 2. 1-1 所示。

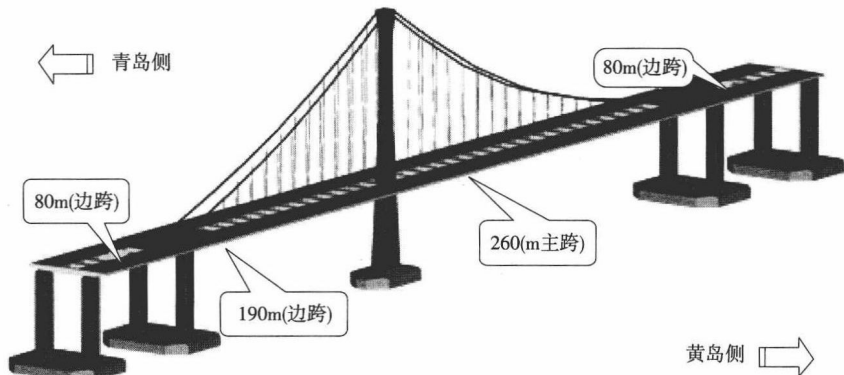


图 2. 1-1 海湾大桥大沽河航道桥模型

大沽河航道桥的桥跨布置为 $80\text{m} + 190\text{m} + 260\text{m} + 80\text{m} = 610\text{m}$,采用四跨连续半漂浮结构体系。索塔采用独柱式混凝土索塔,主梁采用分离式钢箱梁,主缆采用空间双索面形式,主跨和边跨为悬吊体系,主跨矢跨比为 $1/12.53$,边跨矢跨比为 $1/18.04$ 。大沽河航道桥的主缆直接锚固在加劲梁的两端,主缆的水平拉力由加劲梁来承受。

为改善结构的抗风和抗震性能,对结构的约束系统进行了优化设计。在索塔两侧三角撑上和辅助墩、过渡墩顶设置竖向支座,以增加全桥的抗扭刚度;在索塔横桥向塔身两侧和主跨侧辅助墩顶设置水平横向抗风支座,以共同承受横桥向风力作用;在顺桥向索塔塔身两侧的连接箱和塔身间设置纵桥向非线性限位阻尼装置,在温度、平均风载和活载作用下加劲梁可在阻尼装置的自由行程内伸缩,而在车辆制动、阵风和地震等快速荷载作用下,阻尼装置发生作用,可限制加劲梁的纵向位移并改善桥梁两端伸缩装置的受力状态;另外,为保护梁端的伸缩装置,在边跨侧(青岛侧)过渡墩顶设置了横向限位挡块,以限制梁

端在横风和侧向温差作用下的横向位移,保证伸缩装置不因受较大的横向剪切而破坏。大沽河航道桥桥型布置如图 2.1-2 所示。

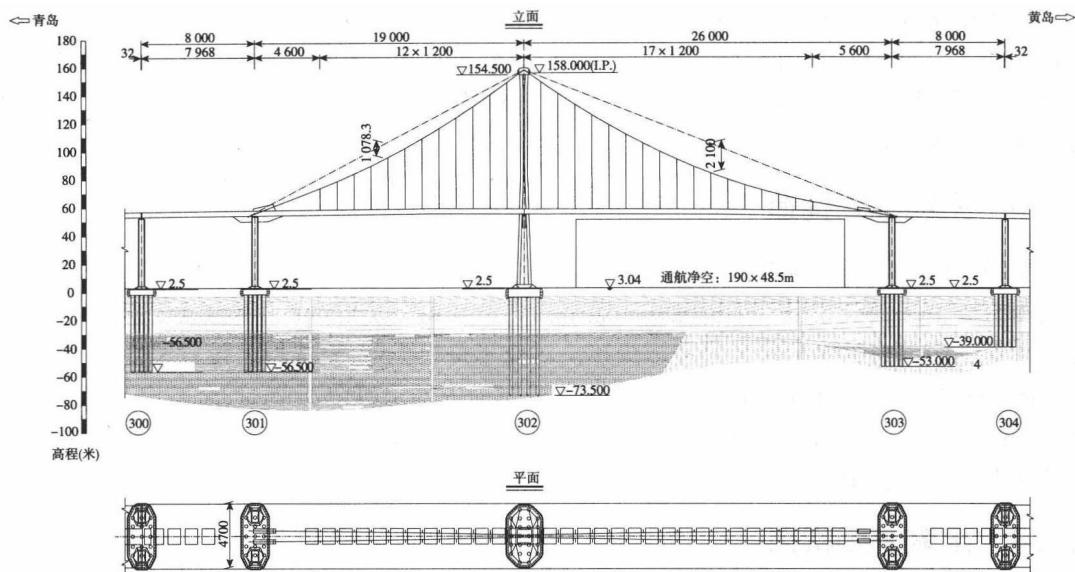


图 2.1-2 大沽河航道桥桥型布置(尺寸单位:cm)

2.2 加劲梁设计

2.2.1 断面

加劲梁采用分离式双箱断面,横向两个分离钢箱梁之间用横向连接箱加以连接,横向连接箱顺桥向标准间距为 12m,宽度为 3m。大沽河航道桥加劲梁标准横断面如图 2.2-1 所示。

加劲梁全宽 47.412m(外到外,含中央横向连接箱),标准梁高 3.6m;加劲梁在主缆锚固区域采用整体式箱梁,因索股锚固面的构造要求,梁高在整箱的横向中间位置增加到 7.995m,分为上、下两层,上层梁高(内缘)3.7054m,下层梁高(内缘)4.2596m。

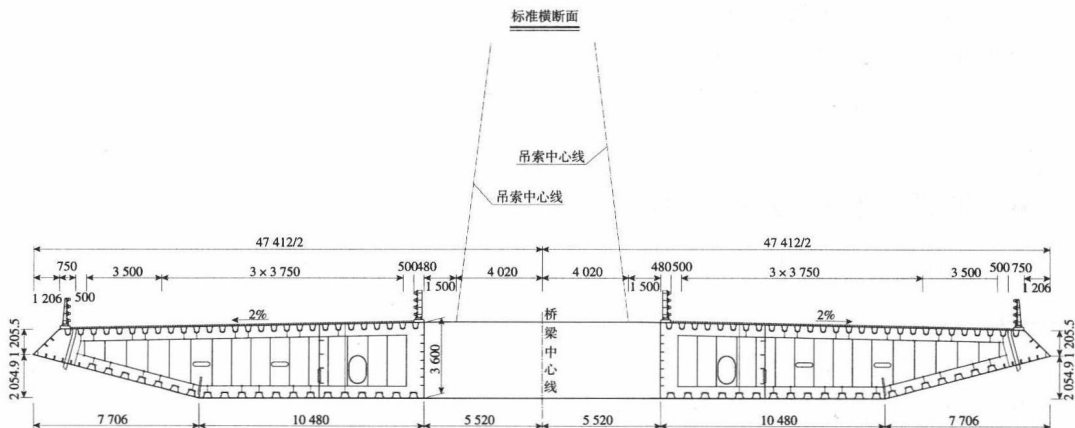


图 2.2-1 大沽河航道桥加劲梁标准横断面(尺寸单位:mm)