

跨海大桥设计与施工

东海大桥

DONG HAI BRIDGE

黄 融 主 编



人民交通出版社

China Communications Press

跨海大桥设计与施工 ——东海大桥

黄 融 主 编



人民交通出版社

内 容 提 要

全书共分为十篇,主要以东海大桥为例介绍了国内跨海大桥的建设概况、跨海大桥的设计原理和计算方法、东海大桥的结构设计和计算、耐久性设计与防护技术应用、防撞结构设计以及东海大桥的施工等方面的内容。其中部分内容作为专题独立成篇,进行详细介绍。

本书是一本纯技术性的书籍,总结了东海大桥设计和施工整个过程中所采用的技术。它既可作为桥梁工程设计和施工相关技术人员的参考资料,也能作为桥梁和结构工程专业大学高年级学生和研究生课外学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

跨海大桥设计与施工——东海大桥/黄融
主编. —北京:人民交通出版社, 2009.6
ISBN 978-7-114-07647-3

I.跨... II.黄... III.①跨海峡桥-桥梁工程-设计-
华东地区②跨海峡桥-桥梁工程-工程施工-华东地区
IV.U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 028774 号

书 名: 跨海大桥设计与施工——东海大桥
著 作 者: 黄 融
责任编辑: 曲 乐
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.ccpres.com.cn>
销售电话: (010) 59757969, 59757973
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 880×1230 1/16
印 张: 83.75
字 数: 2505 千
版 次: 2009 年 6 月 第 1 版
印 次: 2009 年 6 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-07647-3
印 数: 0001—3000 册
定 价: 200.00 元
(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《跨海大桥设计与施工 ——东海大桥》

编写委员会

主 编:黄 融

副主编:邵长宇 章曾焕 皇甫熹 葛耀君

编 委:(以姓氏笔画为序)

丁建康 马名骅 王天华 过震文 司元政 卢永成

阮春生 许履庆 朱家祥 庄 勇 杨志方 杨思民

陈淦伟 邱毅平 周东生 张剑英 姜允肃 查义强

高振峰 高宗余 徐 强 康学增 黄国斌 黄少文

黄士柏 程为和 谭国顺

各篇主要编写人员及分工

第一篇

黄融、皇甫熹、杨志方、邵长宇、
丁建康、朱家祥、谭国顺、康学增、
马名骅、杨思民、高振峰、王启愚、
朱云龙、陈淦伟

第二篇

第一、二章 黄融、皇甫熹、丁建康

第三、四章 黄士柏、张剑英、刘小方、
艾伏平

第五章 皇甫熹、刘桦、黄士柏、夏军

第六章 黄融、葛耀君

第七章 毕桂平、李建中

第八章 黄士柏、卢永成、邓青儿

第三篇

第一、二、三章 黄国斌、杨志方、丁建康、
颜爱华、邱毅平

第四章 丁建康、刘小方

第五章 杨志方、卢永成、颜爱华、邵长宇、
丁建康、李振岭、夏军

第六章 刘小方、张剑英、阮春生

第四篇

第一章 杨志方、刘小方

第二章 刘小方、丁建康

第三章 刘小方、张剑英

第四章 卢永成、张剑英

第五章 邓青儿、颜爱华

第六章 高宗余、颜爱华

第七章 邵长宇、邓青儿、王天华

第八章 张剑英、艾伏平、丁建康

第五篇

第一、二章 黄融、杨志方、黄士柏、徐强

第三章 皇甫熹、刘小方、朱云龙、卢永成、
颜爱华、邱毅平、黄国斌

第六篇

第一、二章 皇甫熹、杨志方、刘小方

第三章 黄士柏、金允龙、卢永成

第四章 金允龙、颜爱华、邓青儿、王天华

第五章 张剑英、黄士柏、丁建康

第七篇

第一章 黄国斌

第二章 黄少文、冯一峰

第三章 季善标、黄士柏

第四章 司元政、陈重、李森平、杜强、
过震文

第五章 查义强、张君武、郭主龙、孟钢、
黄少文、杨志方

第八篇

第一、二章 黄融、高振峰、杨志方

第三章 黄融、高振峰、黄士柏、过震文、
陈淦伟、程为和、杨志方

第四章 毕桂平、张洪光

第五章 黄士柏、毕桂平、张洪光

第九篇

第一章 黄士柏、周东生、郭主龙、周先念

第二章 毕桂平、周先念、郭主龙

第十篇

第一、二章 姜允肃、黄国斌、黄士柏、
胡劲松

第三章 过震文、谢大圻、陈重、李森平、
郑机、张君武、崔革军、冯一峰

第四章 孟钢、黄士柏、谭国顺

第五章 谢大圻、刘国波、吉青克、郭主龙

序

上海市地处万里长江的出海口,又是长江三角洲经济区的龙头,为了在国际集装箱枢纽港的竞争中确立我国应有的地位,党中央和国务院提出了建设上海国际航运中心的战略目标。然而,上海地区的江海沿岸缺少建港的深水资源,于是上海市政府把目光投向了浙江嵊泗列岛中最靠近上海的大小洋山岛,提出了一个大胆而富有创意的设想:在洋山建设深水港区,再用一条快速通道把上海南汇芦潮港的临港新城和洋山深水港连接起来,从而形成这一项气势恢宏、世界少有的洋山港连岛工程——全长 32.5km 的东海大桥。

这一创议曾引起有关各方的争论,使中央一时难以决策。已故的同济大学名誉校长李国豪院士利用他和时任总书记的江泽民同志在上海工作时的同事关系亲自致函,力陈建设这一世纪工程的战略意义及其对中国未来经济发展和参与国际航运竞争的重大价值,终于使洋山深水港及与其配套的东海大桥和临港新城得到了国务院的批准,并于 2002 年 6 月正式开工兴建。

东海大桥是我国第一座在广阔的外海海域建造的、真正意义上的跨海大桥,因受风浪的影响,施工条件十分困难。以李国豪院士为组长的专家委员会经过反复论证评选,最终采用了先进合理的结构形式和成熟安全的施工技术,并调集了国内的精兵强将付诸实施。东海大桥有许多先进技术都是首次在国内应用,如 GPS 定位、抗风浪施工平台、带钢底板的混凝土套箱、桥墩整体预制安装、预应力混凝土箱梁的预制、运输和浮吊整体架设施工等,集成了一整套外海跨海大桥的设计和施工技术,为随后建设的杭州湾大桥、拟建的港珠澳大桥和其他海峡工程提供了十分宝贵的第一手经验。

为了保证在海洋环境下的桥梁使用寿命,东海大桥建设指挥部对提高混凝土的耐久性给予了特别的关注,采取多种技术保护措施,同时采用国内最先进的钢结构防腐技术,力争大桥安全使用 100 年。东海大桥的主通航孔和港桥连接段跨越深槽的颍珠山大桥,虽然跨度不大,但都采用了具有创意的结合梁桥面斜拉桥,全桥统一的桥面铺装和新型伸缩缝为大型集装箱卡车提供了平衡、耐久的良好通行条件。

经过三年半在海浪中的艰难施工和现代化管理,具有里程碑意义的东海大桥终于在 2005 年底胜利建成通车。曾经发挥特殊作用的李国豪院士会在天堂感到欣慰并祝福我们。这本浩瀚的工程总结也一定会在中国跨海大桥建设的历史中占有重要的地位。我衷心祝贺参与东海大桥建设的全国各单位的桥梁同仁所取得的成功,他们的业绩已经为提高中国桥梁的国际地位作出了不可磨灭的重要贡献。

同济大学土木工程学院顾问院长、荣誉资深教授
国际桥梁与结构工程协会副主席
中国土木工程学会桥梁与结构工程分会理事长

项海帆

二〇〇八年十二月

前 言

为使我国在一个高起点上主动参与东北亚国际航运中心的竞争,在国际集装箱枢纽港的竞争中确立应有的地位,党中央和国务院提出了建设上海国际航运中心的战略目标。上海市政府把目光投向了浙江嵊泗列岛中最靠近上海的大小洋山岛,提出了一个在洋山建设深水港区,再用一条快速通道将其与上海南汇芦潮港的临港新城连接起来的大胆而富有创意的设想。已故的同济大学名誉校长李国豪院士,也力陈建设这一世纪工程的战略意义及其对中国未来经济发展和参与国际航运竞争的重大价值。2002年3月洋山深水港及其配套的东海大桥和临港新城工程项目,终于获得了原国家计划委员会批准。根据党中央、国务院提出的建设上海国际航运中心的战略目标,洋山深水港定于2005年底开港投入运营。

东海大桥是洋山深水港区连接大陆的唯一一条快速交通集疏运通道,同时还担负起为港区供水、供电及通讯的使命。洋山深水港的建设目标也是东海大桥的建设目标,这是丝毫不能动摇的。我国第一座真正意义上的跨海大桥为顺应这一历史机遇而生,这也是我国桥梁从江河走向海洋的历史性一步。作为我国第一座在外海建造的桥梁,它起始于上海南汇芦潮港,跨越一无遮挡的宽广海域,在浙江省嵊泗县一片孤岛的小洋山上登陆,全长约32.5km,宛如一条巨龙横卧大海。大桥的终点是一座气势恢宏、世界一流的世纪工程——洋山深水港。

2002年6月26日中国港湾建设集团在海上打下了第一根桩,嘭嘭的锤击声吹响了东海大桥全面建设的号角,至2005年12月10日洋山深水港开港、东海大桥同步通车,实现了我国建桥事业从江河走向海洋的梦想。工程前后共经历了三年半时间。

作为一个建设者能有机会参与东海大桥的建设,是人生的一大幸运,也是几代造桥人的梦想。在建桥的日子里,建设者无不夙兴夜寐、殚精竭虑,不仅把东海大桥建设作为一种事业,而且把它当作自己生命的一部分,始终以强烈的使命感、责任感和紧迫感投身于工程建设。

如今,回想起1233天的历程,禁不住心潮起伏久久难以平静,对建设中的每一天每一夜都是记忆犹新。记得我第一次乘上快艇,沿着桥位线驶向波涛滚滚的茫茫大海,好多人经不起大海的颠簸,纷纷呕吐不已,使我深感大桥建设将面临艰险。在东海大桥建设之前,我国的大型桥梁主要都建在江河上,即使有些桥梁建在海上则都是在海湾中,其与在外海自然环境中建桥是无法相比的。有的建桥集团尽管常年在长江大河上摸爬滚打,可面对大海反复无常的海况条件也感到了困难重重。

东海大桥处于无遮挡的外海,台风、季风、波浪和涌浪数量多强度大,每年受大风影响时间达100天以上,最大浪高达13m,潮差高达5m多,每年不连续的可施工作业时间仅为

180天。在缺少大陆依托的海域中进行工程建设,只能通过船舶、平台等设备在海浪颠簸中开展工作,常规的施工工艺和施工设备已无用武之地,而依现有国力能适应海上施工的大型设备数量有限。在这样的施工环境和现有条件下,需要打下各类基桩9 000多根、浇筑海工混凝土160多万 m^3 、制作各类钢结构50万t。如此巨大的工程量要在规定的时间内完成,难度是可想而知的。

面对世界少有的施工难度和工程量,建设者们迎海风、战波涛、顶烈日、冒酷暑,用他们的聪明才智和心血进行科技创新,攻克了一道又一道技术难关,以他们的顽强斗志和汗水进行科技攻关,解决一个又一个施工难点,终于走出一条具有时代特征、科技创新的建桥之路。

如今一座承载着国家战略的海上大桥、一座承载着无限希望的通衢大道已经建成。而大桥在建设中所经历的曲折过程,它之所以取得成功的经验,以及它所得到的教训,更是一笔极其宝贵的财富。我们应该将其留下来以供我国今后海上工程建设者借鉴和参考,这也正是本书的编写初衷。

东海大桥的桥面宽度31.5m,分上下行双幅桥面,采用双向六车道加紧急停车道的高速公路标准。设计行车速度每小时80km,设计荷载等级为汽车—超20级、挂车—120,并按全桥集装箱重车满布,车辆轴距为10m进行计算复核。整座大桥的建设主要分为陆上段、跨海段和港桥连接段,其中跨海段约25.3km。大桥设主通航孔一处,通航能力为5 000t级;辅通航孔共有三处,其中1 000t级辅通航孔一处,500t级辅通航孔两处。

在东海大桥设计工作开始前,我们定下的目标是要依靠国内自己的力量建设大桥。为此,我们进行了大量的调查研究,对国内现有的海上施工技术及设备进行了解,对大桥沿线的地质状况,海流、波浪变化的周期,台风、暴雨发生的季节天数等作了大量的统计,这些工作为大桥的设计提供了充分依据。

东海大桥的设计充分考虑了国内的施工能力,并根据桥位沿线的海域环境和地质条件,采用了合理的结构形式和成熟适用的施工技术。其中:陆上段采用了满堂支架现浇一次落架施工的连续梁;近岸滩涂段采用了移动模架逐跨现浇施工的连续梁;深水区采用了整跨预制、浮吊简支安装、墩顶现浇混凝土接头施工的连续梁;近岛段浅水区采用了曲线顶推法施工的连续梁;跨径120m、140m和160m的三个辅通航桥梁,采用了挂篮悬臂浇筑施工的连续梁;跨径达420m的主通航孔桥梁,采用了双塔单索面结合梁斜拉桥,主梁为目前国际上首次采用的钢箱—混凝土结合梁,采用了工厂节段预制、现场桥面吊机安装、高强螺栓连接的施工方法;港桥连接段除了采用移动模架逐跨现浇施工的连续梁外,还设计了一座跨越一个长280m、水深38m海底深槽的结合梁斜拉桥。

东海大桥设计前还提出了另一个目标,即大桥的使用寿命为100年,这也是首次在国内明确提出的目标。围绕着这一目标,主要结构采用了全预应力混凝土,且主要是整体式结构,以减少结构拼接缝;根据不同的环境选择合适的钢筋保护层厚度,结构与大气接触面近可能小,并保证施工与养护便利;提高混凝土材料的密实度,减缓氯离子对混凝土渗透的速度,提高混凝土材料的耐久性;采用国内最先进的钢结构防腐技术,并综合应用在工程建设中;施工中以求务实的态度抓质量,确保在每一个施工环节达到设计要求的耐久性指标。

东海大桥建设之所以能够取得成功,最主要的原因在于技术突破与创新。以李国豪

院士、项海帆院士、范立础院士等国内著名专家组成的顾问委员会经过反复论证评选,调集了精兵强将,采用了先进合理的结构方案和成熟安全的施工技术,为大桥建成奠定了坚实的基础。在大桥施工过程中,项海帆院士、范立础院士等专家还多次到现场具体指导,解决了诸多技术难题,确保了大桥建设顺利进行。

本书对大桥建设中的技术突破与创新作了较为详细的总结,归纳起来有以下几个方面:

1. 外海跨海桥梁设计技术

大桥首次明确提出使用寿命 100 年,针对国内设计标准和规范的现状,开展了相关系列科研攻关。通过桥梁结构选型和细部构造优化,风、波浪潮与船撞等作用的确定、材料选用及性能设计,以及耐久性防护措施设计等,形成了一套较完整的外海跨海桥梁设计技术。

2. 海上施工测量定位技术

利用 GPS/RTK 技术研制了一套海上 GPS 打桩定位系统,较好解决了海上打桩快速测量定位问题,使测量结果达到了较高的精度,从根本上攻克了海上打桩的技术难题。在该系统准确定位的基础上,利用已完成测量的墩位不断加密修正测量控制精度,从而确保了大桥全线的测量精度,为大桥的顺利建成奠定了坚实基础。

3. 导管架结合钢浮箱建造海上施工平台技术

借鉴海上石油平台的建造经验,结合工程施工的现状,开创性地运用了导管架与钢浮箱结合的施工平台建造技术。工厂整体制造的导管架在桥墩两侧形成了海上机械作业、人员住宿及材料堆放的平台,其间的自浮式双壁钢套箱利用四周压水舱调整高程,形成能抗风浪潮的桩基础施工和承台混凝土浇筑的作业平台和模板,钢套箱的压水舱同时也对混凝土养护起到蓄热保温作用。这项施工技术快速提供了 $5\,000\text{m}^2$ 的施工场地,既解决了 $8\,200\text{m}^3$ 混凝土浇筑的模板问题,也解决了混凝土的养护问题。

4. 混凝土套箱承台施工技术

在恶劣的海湾环境下合理选择承台施工方案,是保证承台施工安全和质量的关键。东海大桥采用了刚度大、抗风浪能力强带钢底板的混凝土套箱,解决了钢管桩与套箱联结、箱底封闭阻水、承台内钢筋布置及混凝土浇筑的难题,为占大桥总工程量 $2/3$ 以上的 700 多个承台施工的全线铺开创造了条件。

5. 桥墩墩身一体化施工技术

为了在避免恶劣的海湾环境下进行墩身混凝土浇筑、确保施工质量与工期、保护海洋环境,非通航段桥梁的 800 余个墩身采用了整体预制安装一体化施工技术。在严格控制墩身预制尺寸、底面平整度、高度及垂直度前提下,配合安全平稳的海上运输和大型浮吊安装,再采用承台顶面的支承导向定位装置及可靠的墩与承台间联结构造,确保了非通航段桥梁 800 余个墩身快速、高质量地完成施工。

6. 大型混凝土箱梁场内运输技术

大桥非通航段 60m 和 70m 的预应力混凝土连续箱梁全桥共 670 段,箱梁的体积庞大、吊重约 1 600t 和 2 000t。施工中采用了从制梁台座到出海码头的一次横移、一次纵移及再次横移的运输方式。箱梁运输中无需大型吊机,并可实现运输方式的连续转换,这种大体积、大吨位箱梁在预制厂内长距离运输技术是国内首次采用的。

7. 整跨混凝土箱梁的海上安装施工技术

大桥非通航孔 60m 和 70m 的大体积、大吨位预应力混凝土箱梁,在国内属首次采用了

浮吊整跨架设施工技术。在成功解决了浮吊选型的基础上,施工中采用梁端底的导向对中装置和由砂箱制成的、可进行纵横向滑移的临时支座,使箱梁能够方便地临时支承并调至准确位置,很好解决了箱梁就位精度问题。

以上是本书中的一些主要内容。

本书是一本纯技术书籍,书中总结了东海大桥建设过程中所采用的技术,从这些大量文字的背后,我们可以隐约看到当时大桥建设参加单位与参加者夜以继日进行科技攻关、不畏艰险勇于拼搏的精神。这些参加单位包括:上海同盛大桥建设有限公司、上海建工(集团)总公司、中铁大桥局股份有限公司、中国交通建设集团有限公司、上海城建(集团)公司、上海市工程设计研究总院、中铁大桥勘测设计院有限公司、中交第三航务工程勘察设计院有限公司、同济大学、上海交通大学、中交第三航务工程局有限公司、中交第一航务工程局有限公司、路桥集团国际建设股份有限公司、上海隧道工程股份有限公司、上海市第二市政工程有限公司、上海船舶运输科学研究所、上海市测绘院、上海市建筑科学研究院(集团)有限公司、青岛双瑞防腐防污工程有限公司、中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司及浙江省围海建设集团股份有限公司等。这些单位及参加者在东海大桥建设期间,自始至终以主人翁的姿态推进大桥的科技进步,以只争朝夕的拼搏精神投入到大桥的建设中。本书的编写得到了上述单位及有关人员的大力支持,他们提供了大量的资料和图片,没有他们的支持是不可能完成的。在此,向他们致以崇高的敬礼,感谢他们为东海大桥所做的贡献。

上海市城乡建设和交通委员会主任



二〇〇八年十月

目 录

第一篇 绪 论

第1章 引言	3
1.1 跨海工程的缘起	4
1.2 国内外重大跨海工程计划	5
1.3 我国海岸线及其特点	11
1.4 跨海大桥建设的意义	15
第2章 跨海大桥的环境及特点	17
2.1 跨海大桥的海洋环境	17
2.2 跨海大桥的基本特点	29
第3章 世界跨海大桥建设概况	35
3.1 国外跨海大桥综述	35
3.2 中国跨海大桥综述	41
3.3 国内外主要跨海大桥简介	47
第4章 东海大桥简介	104
4.1 前期工作	104
4.2 自然条件和基本资料	105
4.3 设计概要	125
4.4 施工概况	131
4.5 主要科研工作	137

第二篇 设计原理、计算方法及相关研究

第1章 概述	143
第2章 桥梁概率极限状态设计计算原理	145
2.1 结构状态与极限状态	145
2.2 概率极限状态设计基本原理	146
2.3 极限状态设计原则	149
2.4 荷载设计值和荷载组合	150
第3章 跨海大桥作用(荷载)组合方法	152
3.1 荷载组合方法概述	152
3.2 基于可靠度的组合设计方法	156
3.3 跨海大桥荷载组合方法	158
第4章 跨海大桥车辆作用及其计算方法	159

4.1 桥梁车辆作用概述	159
4.2 集装箱车辆特征	161
第5章 跨海大桥水作用及其计算方法	163
5.1 静水作用	163
5.2 海流作用	164
5.3 潮汐作用	168
5.4 海冰作用	170
5.5 波浪作用	177
5.6 东海大桥水动力试验研究	192
第6章 跨海大桥风作用及其计算方法	213
6.1 桥梁抗风设计概述	213
6.2 东海大桥桥位边界层风特性研究	221
6.3 主通航孔抗风设计	227
6.4 辅通航孔箱梁抗风设计	238
6.5 非辅通航孔连续箱梁抗风设计	238
第7章 跨海大桥地震作用及其计算方法	239
7.1 抗震设防原则	239
7.2 抗震计算的地震力理论	241
7.3 抗震设计方法	246
7.4 东海大桥抗震总体设计	256
7.5 东海大桥主桥结构抗震性能研究	258
7.6 东海大桥辅航道桥结构抗震性能研究	264
7.7 东海大桥引桥抗震性能研究	270
第8章 跨海大桥船撞作用及其计算方法	272
8.1 典型船撞桥事故	272
8.2 跨海大桥防船撞设计方法	273

第三篇 结构设计

第1章 概述	283
1.1 总体概述	283
1.2 设计条件	283
1.3 设计概要	286
第2章 总体设计	288
2.1 总体设计原则	288
2.2 交通量预测及分析	288
2.3 工程规模	291
2.4 大桥路线设计	291
2.5 设计技术标准和技术指标	294
2.6 设计依据的规范和标准	295
2.7 基础冲刷深度分析	296
第3章 范围与标段划分	299
3.1 设计范围	299

3.2 工程标段划分	299
第4章 陆上段桥梁设计——5×30m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	300
4.1 上部结构构造	300
4.1 下部结构构造	304
第5章 海上段桥梁设计	310
5.1 7×50m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	311
5.2 6×60m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	327
5.3 5×70m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	350
5.4 8×50m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	375
5.5 500t 级辅通航孔 70m+120m+120m+70m 连续梁桥设计	385
5.6 1 000t 级辅通航孔 80m+140m+140m+80m 连续梁桥设计	397
5.7 辅通航孔 90m+160m+160m+90m 连续梁桥设计	411
5.8 主通航孔 73m+132m+420m+132m+73m 斜拉桥设计	425
第6章 港桥连接段桥梁设计	437
6.1 7×50m 预应力混凝土连续箱梁桥设计	437
6.2 颗珠山斜拉桥设计	445

第四篇 结构计算

第1章 概述	461
1.1 概述	461
1.2 工程规模	461
1.3 工程标段划分	461
1.4 技术标准	462
1.5 设计规范	463
1.6 本篇主要内容	464
第2章 支架现浇施工 30m 等截面预应力连续箱梁桥计算	465
2.1 上部结构	465
2.2 下部结构	474
第3章 支架现浇施工 50m 预应力混凝土连续箱梁桥计算	485
3.1 上部结构	485
3.2 下部结构	495
第4章 预制整跨吊装施工 60m 等截面预应力连续箱梁桥计算	508
4.1 上部结构	508
4.2 下部结构	519
第5章 悬臂浇筑施工 90m+160m+160m+90m 四跨变截面预应力连续箱梁桥计算	531
5.1 上部结构	532
5.2 下部结构	542
第6章 顶推施工 50m 等截面预应力连续箱梁桥计算	556
6.1 上部结构	556
6.2 下部结构	567
第7章 单索面钢—混凝土结合箱梁斜拉桥计算	577
7.1 主梁和拉索	577

7.2 桥塔及基础	589
第8章 双索面钢—混凝土结合梁斜拉桥计算	607
8.1 主梁与拉索	607
8.2 桥塔及基础	629

第五篇 耐久性设计与防护技术应用

第1章 概述	647
第2章 混凝土结构耐久性设计与防护技术应用	648
2.1 海洋环境中混凝土结构腐蚀破损情况调查	648
2.2 典型结构现场调研与分析	650
2.3 海洋环境中混凝土结构腐蚀机理	659
2.4 混凝土结构耐久性设计构思	663
2.5 混凝土结构耐久性设计方案	671
2.6 高性能海工混凝土技术	678
2.7 混凝土结构耐久性防护技术及其应用	697
第3章 钢结构耐久性设计与防护技术应用	721
3.1 钢结构腐蚀原因	721
3.2 钢管桩防腐蚀技术及其应用	723
3.3 钢结构电弧喷铝防腐技术及其应用	733
3.4 其他构件的防腐措施	747

第六篇 防撞设施设计

第1章 概述	751
第2章 防撞标准	753
2.1 通航船型和设计船型	753
2.2 设计碰撞速度	753
2.3 设计碰撞荷载	754
第3章 辅通航孔桥墩附着式防撞设施设计	756
3.1 防撞设施构造	756
3.2 船舶撞击力确定	758
3.3 三维船舶运动瞬态方程及船舶撞击力	758
3.4 开孔防撞钢套箱的波浪力	767
第4章 主通航孔桥墩分离式防撞设施设计	783
4.1 分离式防撞墩设计概况	783
4.2 防撞墩设计	784
4.3 防撞效果数值模拟分析	785
4.4 计算结果	787
4.5 数值计算结果分析	793
4.6 防撞设施物理模型试验	793
4.7 结论	794
第5章 防撞护栏设计	795
5.1 概述	795

5.2 防撞护栏设计原则	795
5.3 防撞护栏设计参数	795
5.4 防撞护栏构造	798
5.5 碰撞作用分析	800
5.6 碰撞过程数值仿真分析	807
5.7 防撞护栏设计结论	813

第七篇 工程控制网布设与工程测量

第1章 概述	817
1.1 GPS 全球定位系统及其工作原理	817
1.2 GPS 定位系统的基本特点	818
第2章 工程控制网的布设	819
2.1 工程控制网布设依据及要求	819
2.2 平面控制测量	819
第3章 跨海高程传递	824
3.1 重力测量高程传递理论简介	824
3.2 GPS 结合重力测量的高程传递理论方法	827
3.3 跨海高程传递实施	831
第4章 海上 GPS-RTK 沉桩动态定位	834
4.1 GPS-RTK 沉桩动态定位技术的理论依据及特点	834
4.2 沉桩定位原理	835
4.3 “GPS 远距离沉桩定位系统”的可靠性	844
第5章 墩身、箱梁安装施工测量	846
5.1 技术依据	846
5.2 墩身、箱梁安装施工控制网建立	846

第八篇 主通航孔桥梁施工

第1章 概述	851
第2章 主通航孔桥梁施工环境及条件	853
2.1 地质条件	853
2.2 海况水文条件	853
2.3 施工作业条件	854
第3章 斜拉桥下部结构施工	856
3.1 技术现状和基础施工难点	856
3.2 导管架施工平台设计	861
3.3 导管架平台施工	868
3.4 蜂窝式自浮钢套箱平台设计	871
3.5 钢套箱上作用的荷载	884
3.6 钢套箱结构验算	887
3.7 钢套箱制作	896
3.8 钢套箱施工	899
3.9 大直径钻孔灌注桩施工	909

3.10 大体积混凝土施工	918
3.11 主墩承台混凝土施工	937
第4章 斜拉桥桥塔施工	955
4.1 桥塔工程概况	955
4.2 桥塔施工	956
第5章 斜拉桥上部结构施工	962
5.1 钢—混凝土箱形结合梁制作	962
5.2 钢—混凝土箱形结合梁现场吊装施工	972
5.3 斜拉索安装施工	990

第九篇 辅通航孔桥梁施工

第1章 辅通航孔工程概述	995
第2章 辅通航孔桥梁施工	999
2.1 辅通航孔桥梁下部结构施工	999
2.2 辅通航孔桥梁上部结构施工	1025

第十篇 非通航段桥梁施工

第1章 非通航段桥梁施工内容概述	1057
第2章 浅海区非通航段桥梁施工	1058
2.1 浅海区非通航段工程概述	1058
2.2 临时栈桥设计与施工	1060
2.3 浅海区非通航段桥梁下部结构施工	1062
2.4 浅海区非通航段桥梁上部结构造桥机施工	1075
第3章 深海区非通航段桥梁施工	1114
3.1 深海区非通航段工程概况	1114
3.2 深海区非通航段下部结构施工	1116
3.3 深海区非通航段上部结构施工	1156
第4章 近岛区非通航段桥梁施工	1199
4.1 近岛区非通航段工程概述	1199
4.2 近岛区非通航段桥梁下部结构施工	1200
4.3 近岛区非通航段桥梁上部结构施工	1205
第5章 颗珠山斜拉桥施工	1222
5.1 颗珠山斜拉桥工程概述	1222
5.2 颗珠山斜拉桥钻孔灌注桩施工	1223
5.3 颗珠山斜拉桥承台施工	1229
5.4 颗珠山斜拉桥桥塔施工	1257
5.5 颗珠山斜拉桥上部结构施工	1266
附录	1309
后记——东海大桥建设的几点体会	1317
参考文献	1320