

跨越
中国大型桥梁
建设工程技术总结丛书

The Key Techniques and Management of Cross-sea Bridge Construction under Complicated Sea Conditions and Hazardous Weather Conditions

南澳大桥

复杂海况与恶劣气象条件下 跨海大桥建设 关键技术与管理

傅光奇 方成武 林少波 康松涛 崔然 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

非
外
借

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书

复杂海况与恶劣气象条件下跨海大桥 建设关键技术与管理

傅光奇 方成武 林少波 康松涛 崔然 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书依托南澳大桥工程建设项目,凝练了行业共性技术,阐述了海上超长大直径钢管桩试验方法与承载力确定规则、基于海上移动平台的墩身施工技术、高温强风下悬臂浇筑混凝土开裂控制技术、FSCM 拉索的工程应用、高耐候木塑材质交通标志板、南澳大桥建设质量控制技术及海上超长桥梁建设组织管理模式等内容,形成了具有鲜明特色的外海长桥建设管理与技术成果,为保障南澳大桥顺利建成提供了强有力支撑,同时对于推动行业技术进步,提高我国在复杂海况与恶劣气象条件下的跨海桥梁建设水平,增强我国在国际桥梁建设领域的竞争力和认可度具有重要价值。

本书可供桥梁设计、施工、科研及管理人员借鉴,也可供高等学校相关专业学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂海况与恶劣气象条件下跨海大桥建设关键技术与管理 / 傅光奇等编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.9

ISBN 978-7-114-13974-1

I. ①复… II. ①傅… III. ①跨海峡桥—桥梁工程
IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 155205 号

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书

书 名: 复杂海况与恶劣气象条件下跨海大桥建设关键技术与管理

著 者: 傅光奇 方成武 林少波 康松涛 崔 然

责任编辑: 尤 伟

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.5

字 数: 369 千

版 次: 2018年9月 第1版

印 次: 2018年9月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13974-1

定 价: 80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前 言

FOREWORD

南澳大桥工程地处开阔海域,工程规模大,恶劣的水文、气象条件,复杂的地质条件和长设计使用寿命等,都对大桥建设提出了严峻考验。为解决南澳大桥主、引桥在结构设计、架设安装和建设管理等方面遇到的难题,南澳大桥建设总公司组织交通运输部公路科学研究院、广东省公路勘察规划设计院、中交第二航务工程局、汕头公路工程质量监督站、江西省路桥工程集团有限公司、中交第一航务工程局、四川大学、汕头市欣源低碳木业有限公司等对复杂海况与恶劣气象条件下跨海大桥建设和管理关键技术进行了研究。这些研究依托南澳大桥的工程建设凝练了行业共性技术,形成了具有鲜明特色的外海长桥建设的管理与技术成果,为保障南澳大桥顺利建成提供了强有力支撑,同时对于推动行业技术进步,提高我国在复杂海况与恶劣气象条件下的跨海桥梁建设水平,增强我国在国际桥梁建设领域的竞争力和认可度具有重要价值。

本书集中汇集了上述研究成果的主要内容,可供类似桥梁建设借鉴和应用。

作 者
2017年3月

目 录

CONTENTS

1	世界著名跨海桥梁工程建设概况	1
2	南澳大桥工程	3
2.1	建桥条件	4
2.2	主要技术难点	5
3	国内外技术现状及发展趋势	6
3.1	海上钢管桩试验技术现状及发展趋势	6
3.2	海上墩台施工技术现状及发展趋势	8
3.3	预制大跨径小箱梁技术现状及发展趋势	12
3.4	悬臂浇筑混凝土开裂控制技术现状及发展趋势	14
3.5	FSCM 斜缆的工程应用技术现状及发展趋势	16
3.6	海上桥梁耐候木塑材质交通标志板技术现状及发展趋势	17
3.7	海上超长桥梁建设组织管理模式现状及发展趋势	18
4	海上超长大直径钢管桩试验方法与承载力确定规则研究	21
4.1	钢管桩试桩试验方法	21
4.2	高应变测试结果	27
4.3	静载荷试验结果	27
4.4	试验结果综合分析	37
4.5	承载力确定规则	38
4.6	小结	38
5	基于海上移动平台的墩身施工技术研究	40
5.1	海上移动平台结构形式及装备研究	40
5.2	基于海上移动平台的墩身施工工艺研究	53
5.3	小结	57
6	南澳大桥引桥 45m 小箱梁成套技术标准研究	58
6.1	45m 小箱梁设计技术标准研究	58



6.2	45m 小箱梁预制装备与施工技术研究	73
6.3	45m 小箱梁运输装备与技术研究	85
6.4	45m 小箱梁架设装备与施工技术研究	89
6.5	45m 小箱梁与 T 形梁的综合比较	97
6.6	小结	99
7	高温强风下悬臂浇筑混凝土开裂控制技术研究	100
7.1	标准试验条件下混凝土的抗裂性试验研究	100
7.2	混凝土箱梁抗裂试验研究	107
7.3	常规施工合龙段混凝土水化热温度及热应力计算分析	119
7.4	南澳大桥主桥合龙段水化热反应阶段预防开裂措施	130
7.5	采用微膨胀混凝土浇筑合龙段预防水化热反应阶段开裂过程模拟 分析与实际施工操作监测	137
8	FSCM 拉索的工程应用研究	150
8.1	桥梁钢索破损安全理论与试验验证	150
8.2	钢索损伤(断丝)信号控制	154
8.3	桥梁钢索的安全维护	156
8.4	技术展望	156
8.5	南澳大桥破损安全斜缆钢索的设计与施工	157
8.6	破损安全斜缆钢索的施工	159
8.7	破损安全钢索技术经济分析	159
8.8	小结	160
9	高耐候木塑材质交通标志板研究	161
9.1	概述	161
9.2	热磨长纤维(木絮)的应用	162
9.3	渗插反应技术	162
9.4	相互贯穿的木塑网络结构和相互屏蔽的木塑两相体系	163
9.5	高性能的高聚物及其改性或合金的引入	163
9.6	多相复合体系	163
9.7	多层复合的整体模压成型技术	164
9.8	小结	164
10	南澳大桥建设质量控制研究	165
10.1	概述	165
10.2	钢管桩沉桩贯入度控制和桩位控制质量检验指标	165



10.3	钢管桩防腐涂层·····	171
10.4	钢管桩牺牲阳极阴极保护·····	174
10.5	混凝土构件表面防护·····	175
10.6	矮塔斜拉桥的实测项目·····	178
10.7	桩底压浆·····	180
10.8	桥面防水层·····	183
10.9	用海上移动平台进行墩身施工的质量控制·····	186
10.10	结论与展望·····	187
11	海上超长桥梁建设组织管理模式研究·····	188
11.1	现行工程建设组织管理模式研究·····	188
11.2	国内外海上超长桥梁工程建设组织管理模式分析·····	194
11.3	南澳大桥工程建设组织管理模式分析·····	200
11.4	技术代管模式的推广应用·····	231
11.5	小结·····	237
	参考文献·····	238

1 世界著名跨海桥梁工程建设概况

20 世纪是人类文明发展的重要时期,人们在两次世界大战后为重建家园、恢复生产以及经济大发展而实施的土木工程建设中,桥梁工程建设取得了辉煌的成就。这其中跨海大桥的建设,由于其所处地理位置的特殊性,不仅在设计上体现出不同于陆上桥梁的特点,而且在施工中也凸显了大量的技术难点和工艺难点,一般而言跨海大桥因其技术难度高,条件复杂而被认为是代表了桥梁建设的最高科技水平。目前,世界上较大的跨海大桥已达 30 多座,其中比较著名的包括:

(1)巴林—沙特阿拉伯跨海大桥[图 1-1a)],曾经是世界上最长的海面高架跨海大桥,全长 25km。整个工程总费用近 10 亿美元,建设工期历时 5 年零两个月,于 1986 年 11 月正式通车。

(2)大贝尔特桥(Great Belt Bridge),也叫斯托伯特桥[图 1-1b)],按意思可译为“大带桥”,位于哥本哈根正西 120km 处,是横穿丹麦大贝尔特海峡,将菲英岛和西兰岛连接在一起的交通动脉。它于 1987 年 6 月开始动工兴建,1997 年 6 月全线铁路通车,1998 年 8 月公路桥启用,整个工程全部竣工。大桥为公路、铁路两用桥。该工程总投资 55 亿美元,由西桥、海底隧道和东桥三部分组成,全长 17.5km。

(3)瑞典与丹麦间的厄尔松海峡大桥,亦译为厄勒海峡大桥[图 1-1c)],连接瑞典和丹麦,总长 16km,于 2000 年通车。

(4)日本濑户内海大桥[图 1-1d)],横跨日本濑户内海,连接本州的冈山县和四国的香川县。全长 37.3km,海面部分 13.1km,由三座悬索桥、两座斜拉桥和一座桁架桥组成。日本濑户大桥于 1978 年 10 月 10 日动工,1988 年 4 月 10 日通车,历时 9 年 6 个月,耗资 11000 亿日元(约 84.6 亿美元)。

(5)杭州湾跨海大桥,是横跨中国杭州湾海域的跨海大桥,它北起浙江嘉兴海盐郑家埭,南至宁波慈溪水路湾,全长 36km,自北向南由北引桥、北通航孔桥、中引桥、南通航孔桥、南引桥水中区、南引桥滩涂区和南引桥陆地区等组成。该桥于 2008 年 5 月 1 日试运营通车,参见图 1-2。

(6)东海大桥,是中国首座外海跨海大桥。全长 32.5km,起始于上海南汇区芦潮港,北与沪芦高速公路相连,南跨杭州湾北部海域,直达浙江嵊泗县小洋山岛,是上海国际航运中心深水港工程的一个组成部分。东海大桥工程于 2002 年 6 月 26 日正式开工建设。历经 35 个月的艰苦施工,实现全线贯通。大桥宽 31.5m,分上、下行双幅桥面,双向 6 车道,设计时速为 80km。大桥全线按高速公路标准设计,设计基准期为 100 年。大桥的最大主通航孔,离海面净高达 40m,参见图 1-3。

(7)青岛海湾大桥,是国家高速公路网青岛至兰州高速公路的起始段,大桥全长约 35.4km,其中海上部分长 27.089km,2011 年正式建成通车,参见图 1-4。



a) 沙特阿拉伯跨海大桥



b) 大贝尔特桥



c) 厄勒海峡大桥



d) 日本濑户内海大桥

图 1-1 世界著名跨海大桥



图 1-2 杭州湾跨海大桥



图 1-3 东海大桥



图 1-4 青岛海湾大桥

2 南澳大桥工程

南澳岛坐落在闽、粤、台三省交界海面,是我国第 11 大海岛,也是广东省唯一的海岛县,由 37 个大小岛屿所组成,陆地面积 130.90km^2 (其中主岛面积 128.35km^2),海域面积 4600km^2 ,独特的地理位置和丰厚的自然资源,使南澳岛具备了优越的地理区位优势和丰富的资源优势。

南澳岛处于香港、高雄、厦门三大港口的中心点,濒临西太平洋国际主航线,是海上贸易的重要通道,素有“海上互市之地”的称谓,具有作为华南第二出海点的区位优势。南澳岛岸线曲折,港湾众多,有大小港湾 66 处,其中烟墩湾、长山湾、布袋澳等 7 处具备兴建深水港、辟建万吨泊位码头的优越条件,具有丰富的港口资源。南澳岛山海相映,气候宜人,历史悠久,古迹众多,海、山、史、庙立体交叉,具有丰富的旅游资源。南澳岛附近可供开发的渔场约 5万 km^2 ,具有丰富水产资源。南澳是广东省靠近台湾的突出部,两地语言相通,习俗相同,历史上交往十分密切,有着源远流长的地缘、人缘关系。

南澳岛与大陆一海相隔,是广东省唯一没有公路联网的县,陆岛之间往来只能靠轮渡交通,受天气影响较大,经常因台风影响而中断,经济和社会发展受到极大制约,陆岛交通难的问题成为制约南澳发展的首要障碍,建设南澳大桥是解决这一问题的根本途径。

南澳大桥位于广东省汕头市东部海面,跨越后江湾海峡,东接南澳环岛公路,西连省道 S323,建成后将成为海岛县—南澳县与大陆连接的唯一通道。桥梁全长 9341m ,主桥宽度 14.4m ,引桥宽度 12.0m ,采用二车道二级公路标准修建,设计速度 80km/h ,设计荷载为公路—I 级,航道等级为 5000t 级海船,通航净高 H_m 应不小于 35m ,通航净宽 B_m 应不小于 200m ,单孔单向通航。根据桥址的地形、地貌、气象、水文、地质、潮汐、波浪、水深、通航等建设条件,南澳大桥采用了连续梁和矮塔斜拉桥两种桥型,连续梁按小箱梁预制、吊装简支、结构连续程序施工,矮塔斜拉桥采用悬臂浇筑施工。现浇承台和实体柱式墩身,基础为钻孔灌注桩或打入钢管桩。除主桥采用沥青混凝土桥面铺装外,其余均为水泥混凝土桥面铺装,总体效果,参见图 2-1。

引桥具体结构形式:澄海侧陆地区、浅水区引桥为 $88 \times 35\text{m}$ 预制 PC 小箱梁,先简支后结构连续,钻孔灌注桩基础;澄海侧和南澳岛侧深水区引桥为 $88 \times 45\text{m}$ 、 $32 \times 45\text{m}$ 预制 PC 小箱梁,先简支后结构连续,打入钢管桩基础;南澳岛侧浅水区引桥为 $6 \times 45\text{m}$ 移动模架施工 PC 箱梁,钻孔灌注桩基础;南澳岛侧变宽度引桥为支架施工的 $2 \times 20\text{m}$ 现浇 PC 箱梁,钻孔灌注桩基础。

南澳大桥主桥为 $(126 + 238 + 126)\text{m}$ 悬臂施工 PC 箱梁矮塔斜拉桥,主梁与塔、墩分离,纵向设活动支座 + 液压阻尼器形成全漂浮体系,钻孔灌注桩基础,其跨径位列国内同类桥梁的前茅,参见图 2-1。主桥主梁横断面采用单箱单室断面,C55 混凝土浇筑,设置纵、横、竖三向预应



力体系。箱梁顶板宽度 14.4m,顶板厚 0.28m,两侧翼缘悬臂长 1.55m。梁高采用两次抛物线变化,跨中梁高 4m,高跨比为 1/59.5;根部梁高 8m,高跨比为 1/29.75。腹板为斜腹板,腹板厚度为 40~70cm,底板厚度为 30~100cm,底板宽 7.5~9.707m。斜拉索锚固于箱梁两侧翼缘上,索距为 5m,在斜拉索锚固处设置高 1.5m 横梁,其余无索区不设置横隔墙。箱梁节段长度根据施工条件划分为 4m、5m 两种长度。



a)



b)

图 2-1 南澳大桥

2.1 建桥条件

桥址区属于南亚热带季风气候,海洋性气候明显,常年气候温和,光照充足,雨量较充沛,热量丰富,霜冻很少,但台风、强风等灾害性天气频繁出现,南澳气象站记录的年平均 6 级(10 分钟最大风速 $\geq 10.8\text{m/s}$) 以上大风日数 54.6d,热带气旋年平均 1.28 个,除 1 月外年内各月均可能出现暴雨天气,气象条件恶劣。南澳、澄海至汕头一带沿海是广东省风暴潮最严重岸段之一,在粤东及珠江口沿海一带登陆的强台风,对桥址处的潮位变化影响特别显著,台风风暴潮引发增水,由此形成超高潮位,造成灾害。结合历史查测资料可知,20 世纪 80 年代,发生过多 次比较大的风暴潮。其中潮位较高,影响范围较大的有三次,首先是 1922 年 8 月 2 日的大海潮,查测最高潮位为 4.07m,估算风暴增水 3.0m 左右;其次是 1969 年 7 月 28 日由 6903 号台风引起的风暴潮,实测最高潮位为 3.67m,风暴最大增水为 2.47m;第三次是 1979 年由 7908 号台风引起的风暴潮,实测最高潮位为 2.84m,风暴最大增水为 1.94m。南澳海域表层海流由于受地形影响,东海区潮流运动形式呈往复流,且涨落因地形而异,旋转方向近岸沿逆时针旋转得多,远岸为顺时针旋转,落潮流速大于涨潮流速。根据实测海流资料分析得出,南澳大桥海域涨潮、落潮最大流速为 0.73~1.102cm/s,表层流速大于底层流速。

桥址附近海面的波浪,冬季主要受东风季风影响,夏季主要受西南季风和台风影响。冬季海浪以风浪为主,自 10 月至次年 1 月风浪频率为 95% 左右,涌浪较少,仅为 35%~40%,而 6~8 月涌浪频率增大,达 66%~87%。风浪方向:10 月至次年 3 月以东北方向最多,4、5 月为东北偏东方向最多,6~8 月风浪方向比较杂乱,各方向风浪频率相差不大。浪高大都在 4m 以



下,最大浪高出现在夏秋台风季节,有73%的年份最大波高出现于台风影响期内。当台风中心在南澳岛附近登陆,海面吹强烈西南风时,便产生西南向大浪;而当台风中心在南澳岛的南部或东部海面经过时,则产生偏东向或东南向大浪。浪高2.0m以上的占全年3.8%,主要分布在秋季和春季。1.0m以上的波高,占秋季波高的27%和冬季波高的26%,而春、夏两季各占11%和10%。波高观测值,基本上集中在0.5~2.0m之间,占全部波高值的80%。根据钻探揭露,桥址场地内的地层自上而下可分为第四系全更新统海相沉积层(Q^{4m})、第四系风化残积层(Q^{el})、燕山期花岗岩(γ^{52})。海相沉积层主要为淤泥、淤泥质土及砂砾层;第四系风化残积亚黏土表现为青灰、紫红、灰黄等色,呈湿、硬塑状,以粉黏粒及石英质砂、砾为主,由中、粗粒花岗岩风化残积层而成,局部呈砾质黏性土,原岩结构局部仍清晰可见,层厚1.80~31.85m,层顶面高程-69.10~-67.10m;强风化燕山期花岗岩为紫红、黄、浅灰、灰黑等杂斑色,岩芯呈半岩半土状,以土状为主,局部见有不规则短柱状,原岩结构清晰可见,主要矿物成分见有石英、长石、黑云母等。微风化花岗岩为灰黑色,岩石裂隙稍发育,岩体完整,岩芯呈短柱状,岩块坚硬, $RQD=80\sim90$ 。

桥位区特殊岩土有软土、风化土;不良地质现象有砂土液化、软土震陷工程地质效应等,未见可溶岩地层、土洞、崩塌、滑坡及泥石流等不良工程地质现象。地下水及海水对钢结构具有中等腐蚀性。

2.2 主要技术难点

(1) 桥址台风暴潮对主桥施工是一个严峻考验。主桥中跨径为238m,悬臂施工长度达118m,为应对台风暴潮带来的风险及对结构的影响,应采取合理有效的技术措施,化解风险,保障成桥质量。

(2) 本桥下部结构工程量占有很大比例,在复杂海况与恶劣气象条件下,传统的施工方法难于适应,受潮汐、天气影响大,施工的机具、设备重复利用率低,工期长,费用高。提高机具、设备可重复使用率、移动便利性,避免潮汐干扰是下部结构施工中需要解决的主要问题。

(3) 主桥采用悬臂浇筑施工,承台、墩身亦采用现浇,桥位处的大风和高温极易引起混凝土开裂,降低桥梁的耐久性,需要从材料组成和施工工艺中寻找解决措施,提高混凝土的性能。

(4) 由于南澳大桥的特殊施工条件及对桥梁的特殊要求,其质量标准与其他桥梁不同,应建立相应的标准和管理体系,为工程质量提供保障。

3 国内外技术现状及发展趋势

3.1 海上钢管桩试验技术现状及发展趋势

对于大直径超长钢管桩的划分,目前还没有统一的标准。一般将桩直径 $\geq 800\text{mm}$ 的钢管桩视为大直径钢管桩,将桩长 $\geq 50\text{m}$ 的钢管桩视为超长钢管桩。超长大直径钢管桩因其单桩承载力高、沉桩工艺简单、排土量较小、抗弯能力强等优点而被广泛应用于跨海大桥工程。目前,超长大直径钢管桩的承载力试验及研究资料较少,其沉降确定方法仍有待深入研究。

3.1.1 竖向荷载作用下单桩承载力的确定方法

竖向荷载作用下单桩承载力确定的方法有规范法、静载荷试验法、高应变动力测试法和自平衡测试法。

(1)《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)对超长大直径钢管桩竖向极限承载力的计算还没有进行具体的规定。《港口工程桩基规范》(JTS 167-4—2012)只规定了 $D < 600\text{mm}$ 的钢管桩的极限承载力的计算方法。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中对钢管桩的竖向极限承载力进行了详细的规定,考虑了桩端土塞效应,并在承载力计算公式中引入影响系数。

(2)静载荷试验是确定桩基极限承载力最直接、最有效、最可靠的方法,《港口工程桩基规范》(JTS 167-4—2012)中规定超长大直径钢管桩的承载力首先应根据静载荷试验确定。杭州湾跨海大桥、金塘大桥、宁波象山港大桥、东海大桥等工程均进行了不同数量的超长大直径钢管桩静载荷试桩。静载荷试验需要专门的反力系统,对于超长大直径钢管桩来说,静载荷试验的施工难度很大。

(3)高应变动力测试法用动态的冲击荷载代替静态的持续荷载对试桩进行试验。对于超长大直径钢管桩而言,由于其承载力高,很难实现真正意义上的高应变,且采用应力波理论求解极限承载力时所需要的参数很难确定。

(4)自平衡测试法是在桩身埋设可用于加载的荷载箱,促使桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥,是确定大直径桩承载力的一种比较有效的方法。但目前还没有一种准确的方法,实现测试结果向传统静载荷试验结果的精确转换。

3.1.2 竖向荷载作用下单桩沉降的确定方法

竖向荷载作用下单桩沉降的确定方法主要有荷载传递法、弹性理论法、剪切变形法和规范经验关系法等。

(1)荷载传递法是从规定的荷载变形传递方式来计算桩对荷载的反应。荷载传递法虽然



考虑了桩土间的非线性、接触面特性等问题,但忽略了侧阻力向下传递时所引起的桩端沉降,在理论上具有一定的局限性。

(2)弹性理论法视桩周土体为均质、连续、各向同性的弹性半空间体,考虑了土体的连续性及桩与桩之间的相互作用,但忽视了土的非线性和成层性,且假定桩土之间无相对位移,这显然是不够完善的。

(3)剪切变形法的基本原理是假定桩的沉降只与桩周土的剪切变形有关,不考虑桩土间的相对位移,桩周土体的上下层之间没有相互作用,这显然不符合实际情况。

(4)规范经验关系法是目前多数规范采用的计算方法,我国《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)和《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)中确定单桩沉降的公式均为经验公式。

3.1.3 竖向荷载作用下单桩承载力预测方法

工程中常采用静力学算法、原位测试法、规范经验关系法、静载试验法和动力法等方法计算或确定单桩竖向承载力。其中,桩的静载荷试验是确定单桩竖向承载力最可靠的方法,但其试验费用高、试验时间长、做试验的桩数量少。

钱晓丽利用弹性力学中的位移法和有限单元法对大直径单桩基础在竖向荷载下的模拟分析,并通过对 20 根不同背景的大直径灌注桩静载荷试验资料的拟合分析,建立了单桩基础在竖向荷载作用下的非线性模拟分析方法。方鹏飞根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)给出了单桩竖向极限承载力的确定方法。Meyerhof 提出了地基、基础与上部结构共同工作的概念。共同作用计算理论把结构上部和下部统一进行考虑,使结构理论分析更贴近于工程实际,是当前工程应用研究的热点。但由于理论研究进展和原形试验的局限性,土体本构模型的应用研究还有待进一步完善和改进。

现有的地基承载力理论一般依据弹塑性理论,假设地基土是均匀各向同性的线性变形体。但实际工程中,地质条件千差万别,很难用某种统一的假定来涵盖所有情况,用理论公式计算的地基承载力值与实际值的误差较大。因此,地基承载力计算理论应与相应工程条件相结合。

地基承载力计算理论存在着许多不同的观点,不同的计算理论适用条件也有所区别,由于目前还没有足够的原形基础试验支持,无法对各理论公式做出有效的检验。因此,用理论公式计算的地基承载力值与实际值往往差别较大,在实践中还要与工程试验参数以及统计资料相结合。

3.1.4 竖向荷载作用下单桩基础沉降预测方法

工程界常采用有限元等数值计算方法对桩周介质和边界条件进行模拟,来计算桩基的沉降。这种方法具有较强的理论分析价值,但其计算需要土体的本构模型参数复杂,有些参数很难实际测得;并且,不同地区必须建立不同模型。

工程界常采用传递函数法、数值分析法来确定受压单桩承载力及沉降性能。传递函数法从本质上讲属于经验方法。陈龙珠和梁国钱等曾对双折线硬化型的荷载传递函数推导出均匀地基中桩的轴向荷载—沉降曲线的解析算式,并由此分析了桩周及桩端土特性参数对曲线形状的影响。朱金颖和陈龙珠等利用线弹性—塑性荷载传递函数导出成层地基中桩的轴向荷



载—沉降曲线的解析递推公式,采用通过拟合实测 $Q-S$ 曲线得到桩土系统的工程力学参数,并计算桩身轴力,得到侧摩阻力分布曲线。实测分析发现:当侧摩阻力尚未完全发挥时,超长桩的荷载传递具有纯摩擦桩特性,桩端分担荷载很小,钢管桩或大直径钻孔灌注桩的侧摩阻力发挥相对较早,后续荷载将主要由桩端阻力分担,表现为端承摩擦桩。对于长桩,由于桩端阻力难以充分发挥,桩周土刚度是影响 $Q-S$ 曲线形状的主要因素。阳吉宝对上海地区超长桩(桩长大于 50m)的静载荷试验数据,给出了 $Q-S$ 曲线公式,并用灰色系统理论确定公式中的参数。

土的渗透性、排水距离和土的压缩性一般是决定沉降量大小的主要因素,并且基于两点条件下的沉降计算模型和地基沉降的真实性状之间存在差距,所以,许多学者从土的变形机理、土体实际应力状态、土体应力历史的影响对沉降计算进行改进,或者通过对大量沉降观测值的统计分析,求解沉降修正系数,并用修正系数对理论计算进行校正,以便消除因为土的非线性特性、土体侧向变形、次固结变形、计算参数测试不确定性等对地基沉降的影响。李珍玉利用分层总和法计算最终沉降量,采用简化的平均附加应力系数规范修正公式,提出了沉降计算经验系数。张仪萍基于 Bayesian 理论,提出采用概率的方法来估计沉降拟合曲线—泊松曲线参数的估计,用计算出的参数后验分布进行沉降预测分布的计算。

目前,由于超长大直径钢管桩的试桩数据量少,很难对单桩的承载力和沉降进行准确的预测。在实际工程中,桩的设计经常偏于保守,由此造成了很大的浪费。

3.1.5 发展趋势

随着跨海大桥建设的发展,超长大直径钢管桩以其施工风险较小、沉桩工艺简单、承载能力较大和抗弯能力较强等优势而日益受到工程师们青睐,特别是对于地质条件恶劣、施工困难、所需桩基承载力高的工程。对超长大直径钢管桩的理论研究与工程应用,未来发展趋势如下:

(1) 经验法确定的钢管桩实际极限承载力都比理论计算承载力大,因而往往偏于安全,不够经济,如何提高超长大直径钢管桩理论计算精度是提高钢管桩应用的发展趋势。

(2) 现行规范关于超长大直径钢管桩的设计理论仍然局限在普通桩的承载变形机理基础上,开展系统性研究,建立比较系统的、可广泛应用于工程计算的参数和理论公式是超长大直径钢管桩的承载特性研究的发展趋势。

(3) 静载荷试验是确定超长大直径钢管桩承载力的唯一准确方法,但可查询的试桩数据有限,制约了超长大直径钢管桩研究的发展,建立钢管桩试验数据库是钢管桩研究的一个发展趋势。

深入研究超长大直径钢管桩的承载特性,探讨其承载力和沉降的影响因素,确定可广泛应用于工程计算的理论公式,是超长大直径钢管桩研究的发展趋势。

3.2 海上墩台施工技术现状及发展趋势

跨海大桥海上墩台施工面临许多不利自然条件的影响,包括气象因素和水文因素。施工受大风、雨雾、雷暴、高温、严寒、波浪、潮位、海流和台风的影响较大,施工难度较高,特别是墩台混凝土施工。在以往类似跨海特大桥工程施工中,传统水中墩身施工方法有:搭设栈桥并采用流动吊机施工、采用浮吊施工和采用塔吊施工等。



3.2.1 技术现状

高集海峡大桥是我国首座跨海大桥,其深水桩基、承台、墩身采用起重船、打桩船、挖泥船、搅拌船、拖船、方驳等水上工程船舶配合的施工方法,其承台、墩身采用海底筑岛、钢套箱围堰、混凝土封底后排水的干法施工,如图 3-1 所示。尖山跨海大桥受潮水影响较大,涨潮时桩基施工困难,退潮时浮箱搁浅无法移动,在桩基和墩台施工中也采用了筑岛围堰的施工方法。

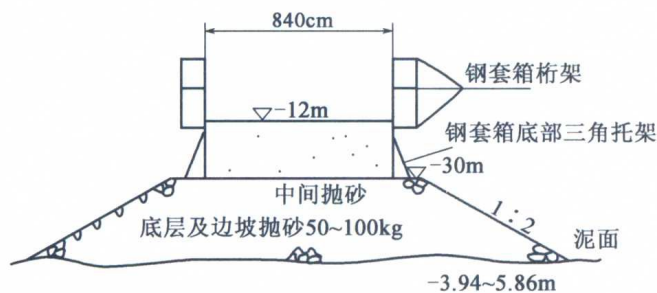


图 3-1 高集海峡大桥海底筑岛与钢套箱

对于宽滩涂跨海长大桥梁基础和墩身的施工,在水深较浅的情况下,一般采用施工钢栈桥(图 3-2)和作业平台(图 3-3)的方法施工。

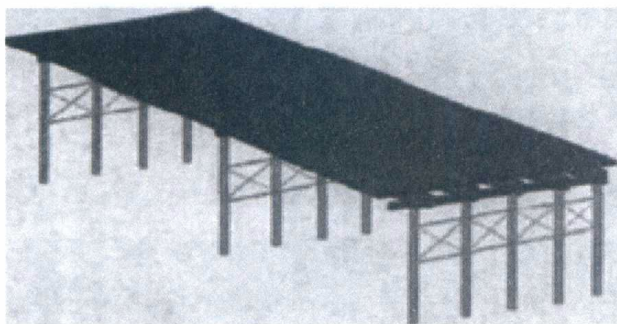


图 3-2 钢栈桥

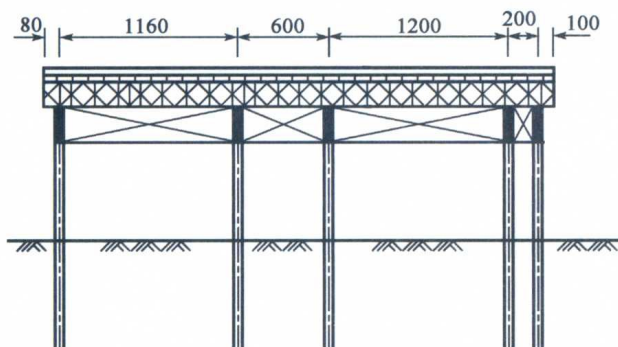


图 3-3 施工作业平台(尺寸单位:cm)

东海大桥是我国第一座真正意义上的跨海大桥,施工海域风大、浪高、流急、海况条件恶劣,其主桥斜拉桥主墩平台采用了打桩船直接插打大直径钢护筒作为平台主要承重构件的施工方法,如图 3-4 所示。主桥辅助墩施工海区属非正规半日浅海潮区,风大浪急,施工条件恶劣,为克服施工困难,采用整体式钢浮箱作为辅助墩和防撞墩的施工平台,如图 3-5 所示。

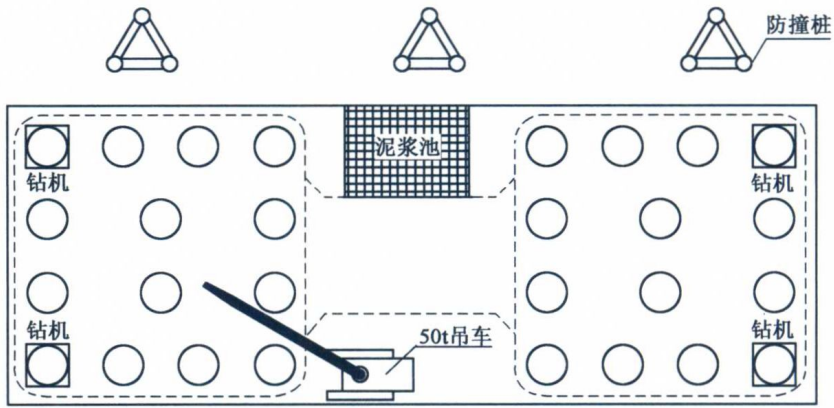


图 3-4 东海大桥主桥斜拉桥主墩施工平台平面布置

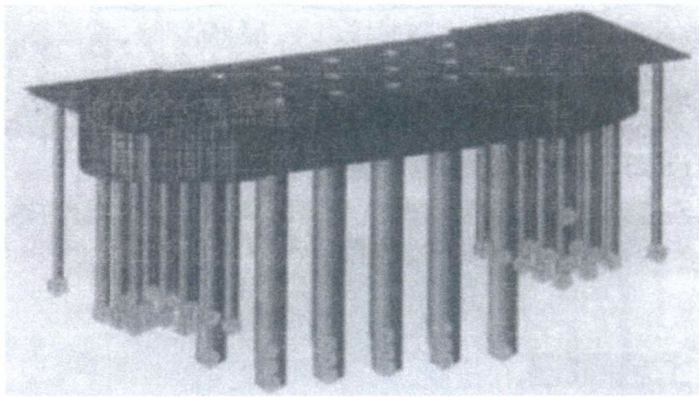


图 3-5 东海大桥主桥斜拉桥辅助墩整体式钢浮箱施工平台

东海大桥海上中高墩采用了分节预制海上拼装施工的方法,用陆上 350t 龙门吊吊墩柱预制节段运出码头,浮吊吊装落驳,用 3400HP 拖船拖带驳船运输,用浮吊吊装就位。

杭州湾跨海大桥 IV 高程墩身施工采用大型浮吊船作为起重设备,并利用浮吊甲板为现场作业和施工生活平台的施工方法,如图 3-6 所示。

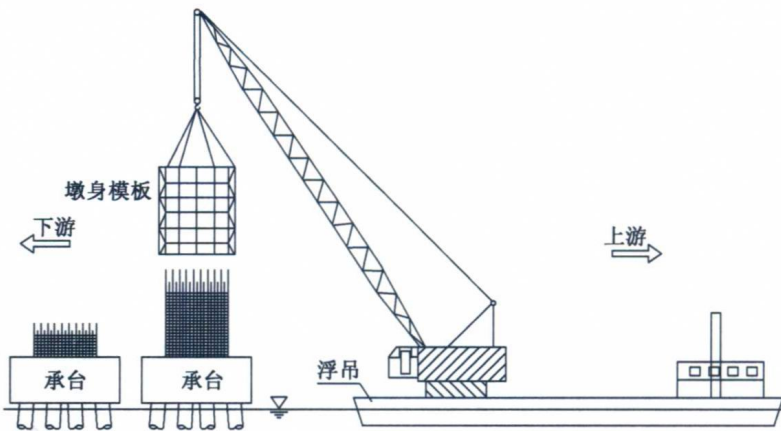


图 3-6 杭州湾跨海大桥 IV 高程墩浮吊施工示意