

中国公路学会桥梁和结构工程分会

2014年

全国桥梁学术会议 论文集

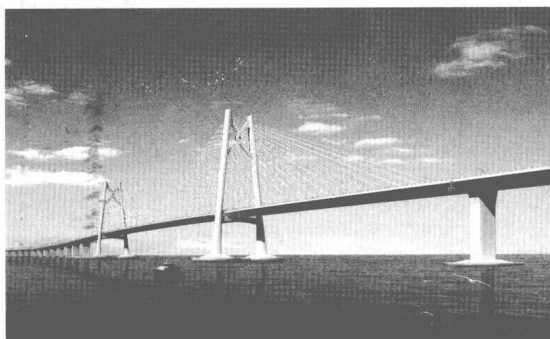


人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

中国公路学会桥梁和结构工程分会

2014年

全国桥梁学术会议 论文集



主办单位 中国公路学会桥梁和结构工程分会
广东省公路学会

支持单位 港珠澳大桥管理局

协办单位 中交公路规划设计院有限公司
广东省长大公路工程有限公司
中铁山桥集团有限公司
镇江蓝舶工程科技有限公司
江苏法尔胜缆索有限公司
柳州欧维姆机械股份有限公司
宁波路宝科技事业集团有限公司
中铁宝桥集团有限公司



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

内 容 提 要

本书为中国公路学会桥梁和结构工程分会 2014 年全国桥梁学术会议论文集。论文集分为规划与设计;施工与控制;结构分析与试验研究;管理养护、检测与加固四部分。其中包括了我国近年在建、完工的一些有代表性的桥梁所采用的新技术、新方法、新材料,值得业界学者和工程技术人员参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

中国公路学会桥梁和结构工程分会 2014 年全国桥梁学术会议论文集/中国公路学会桥梁和结构工程分会编.——北京:人民交通出版社股份有限公司,2014. 11

ISBN 978-7-114-11798-5

I. ①中… II. ①中… III. ①桥梁工程—学术会议—文集 IV. ①U44-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 241709 号

Zhongguo Gonglu Xuehui Qiaoliang he Jiegou Gongcheng Fenhui
2014 Nian Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji

书 名:中国公路学会桥梁和结构工程分会 2014 年全国桥梁学术会议论文集

著 作 者:中国公路学会桥梁和结构工程分会

责任编辑:张征宇

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:北京市密东印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:58.5

字 数:1698 千

版 次:2014 年 11 月 第 1 版

印 次:2014 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11798-5

定 价:180.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

中国公路学会桥梁和结构工程分会
2014 年全国桥梁学术会议论文集

编 委 会

主 编 张喜刚 陈冠雄 朱永灵

副 主 编 逯一新 苏权科 赵君黎

柴 瑞 谭昌富 杨志刚

审稿专家 王永珩 曾宪武

工 作 组 魏巍巍 闫 禹 杨红玲

责任编辑 张征宇 赵瑞琴

目 录

I 规划与设计

1. 港珠澳大桥桥梁工程总体设计及创新技术

..... 孟凡超 刘明虎 吴伟胜 张革军 张 梁 常志军(3)

2. 港珠澳大桥青州航道桥设计与创新技术

..... 刘明虎 孟凡超 李国亮 于高志 刘 昭 刘 磊(11)

3. 港珠澳大桥青州航道桥索塔设计

于高志 刘明虎 李国亮 刘 昭 刘 磊(19)

4. 港珠澳大桥江海直达船航道桥设计与创新技术 ...

张革军 孟凡超 文 锋 金秀男 赵 磊(26)

5. 港珠澳大桥江海直达船航道桥钢箱梁设计

赵 磊 张革军 金秀男 文 锋(34)

6. 港珠澳大桥江海直达船航道桥钢索塔设计

文 锋 张革军 金秀男 赵 磊(38)

7. 港珠澳大桥跨气田管线桥变截面连续钢箱梁设计

张 梁 孟凡超 赵英策(42)

8. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥上部结构创新设计

张 鹏 吴伟胜 孟凡超 张家锋(51)

9. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥下部结构创新设计

邓 科 吴伟胜 孟凡超 裴铭海(55)

10. 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥组合梁技术特点

罗 扣 张兴志 王东晖 张 强(60)

11. 港珠澳大桥浅水区桥梁设计

张 强 王东晖(65)

12. 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥下部结构设计

别业山 王东晖 张 强(77)

13. 港珠澳大桥沉管隧道消防性能化设计

杨秀军 顾思思 石志刚 金 蕊(84)

14. 中外联合咨询大型桥隧项目的历程与体会

戴建国 王 毅(91)

15. 我国公路桥梁建设成就和学科发展综述

魏巍巍 赵君黎(100)

16. 黄河上的桥梁

楼庄鸿 郭 佳(108)

17. 深水桥梁基础现状与展望

龚维明 杨 超 戴国亮(116)

18. 大跨径连续刚构桥梁深水基础设计

蒋建军(122)

19. 福州大学旗山校区景观人行桥设计

倪政斌(129)

20. 公路桥梁工程预应力技术发展综述

李会驰 冯 芑(134)

21. 大跨径柔梁矮塔斜拉桥的设计构思

王 雷 梁立农(135)

22. 东华大桥下承式提篮拱桥设计与施工技术

陈万里 梁立农(140)

23. 佛陈大桥(扩建)连续钢箱梁的结构与铺装设计

郑楷柱 何 海 梁立农(144)

24. 广州南沙凤凰三桥方案设计

梁立农 何 海 魏朝柱 陈万里(148)

25. 榕江大桥总体设计

王 雷 梁立农 罗新才 杨 钻(157)

26. 基于符号学原理的桥梁景观设计方法

龙 涛(163)

II 施工与控制

27. 港珠澳大桥桥梁工程钢结构总拼装技术概况
..... 张鸣功 张劲文 刘吉柱 钱叶祥 高文博 朴 洸(171)
28. 港珠澳大桥钢箱梁涂装关键工艺与质量控制 高文博 钱叶祥 张顺善(174)
29. 港珠澳大桥钢箱梁拼装线形及尺寸控制 韩小义 王 恒(180)
30. 港珠澳大桥钢箱梁拼装自动化焊接技术研究 李建国(182)
31. 港珠澳大桥信息化焊接数据管理系统 华 兴(185)
32. 港珠澳大桥 CB01 标大节段环口部位涂装施工方案及优化 苏艳慧(188)
33. 港珠澳大桥大节段装船技术与研究 孙海权(192)
34. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥施工方案创新 吴伟胜 孟凡超 邓 科 张 鹏(199)
35. 港珠澳大桥江海直达船航道桥钢索塔及深水区非通航孔桥钢箱梁制造线型控制分析
..... 宋绪明(203)
36. 港珠澳大桥 CB02 标钢箱梁小节段制造新工艺 阮家顺 胡海清 赫雨玲(209)
37. 港珠澳大桥钢箱梁节段拼装自动化焊接技术 张 华 阮家顺 胡海清 黄新明(215)
38. 132.6m 长大节段钢箱梁滚装装船技术 阮家顺 陈望民 祝李元 裴建顺 郑 慧(220)
39. 钢箱梁疲劳裂纹特征检测技术适用性研究 ... 袁周致远 陈雄飞 汪 锋 傅中秋 吉伯海(225)
40. 港珠澳大桥九洲桥钢主梁锚箱单元制作与安装技术 路玉荣(230)
41. 港珠澳大桥大节段组合梁钢主梁总拼自动化焊接技术 ... 车 平 刘治国 刘 雷 李军平(235)
42. 港珠澳大桥九洲航道桥钢塔制造技术 马增岗(241)
43. 港珠澳大桥跨气田管线桥变截面连续钢箱梁大节段吊装设计 赵英策 张 梁 孟凡超(247)
44. 港珠澳大桥钢箱梁总拼过程线形控制研究 骆佐龙 宋一凡 闫 磊 景 强(255)
45. 港珠澳大桥组合梁钢主梁大节段制作关键技术 刘治国 车 平 李军平(260)
46. 港珠澳大桥组合梁钢主梁制作测量控制技术 高斐斐(264)
47. 85m 钢—混组合梁架设施工关键技术 韩阿雷(269)
48. 环氧钢筋的施工质量控制方法 王红芹 万代勇(275)
49. 港珠澳大桥非通航孔桥现浇箱梁支架设计与施工 姚辉博 孟庆龙 沈永兴(281)
50. 港珠澳大桥岛隧工程东人工岛结合部非通航孔桥现浇箱梁模板工艺 宋 奎 刘宇光(285)
51. 港珠澳大桥深水区桥梁施工工艺创新 易有森 方燎原(294)
52. 港珠澳大桥基础及下部构造耐久性控制 方燎原 柴贺军(301)
53. 港珠澳大桥海工混凝土结构耐久性质量控制措施及施工技术 徐振山 杨衍振(308)
54. 防撞套箱和护舷制作及安装质量控制 方燎原 吴清发(319)
55. 港珠澳大桥 CB04 标非通航孔桥桩基础装配式施工平台设计及施工 谭一波 何振东(328)
56. 大型构件预制场地规划研究 刘洪胜 韦登超 汤 明 余同奎 申维刚(333)
57. 港珠澳大桥九洲航道桥围堰整体拼装下放浅谈 李 威(337)
58. 港珠澳大桥 CB05 标九洲航道桥临时墩钢管柱拼装技术 朱晓超(342)
59. 钢圆筒围堰海上运输与封固 冯宝强 徐 波 王文山(345)
60. 港珠澳大桥桥梁工程移动导向架沉桩施工技术 王文山 孙建波 史虎彬(354)
61. 港珠澳大桥超长钢管复合桩施工风险管理 卓家超 方燎原(370)
62. 港珠澳大桥岛隧工程东人工岛结合部非通航孔桥整体式钢套箱施工承台工艺
..... 吕艳涛 霍振东(376)
63. 港珠澳大桥非通航孔桥下部预制墩台设计与施工关键技术 方明山(384)

64. 港珠澳大桥墩身预制裂缝防治施工技术	孙业发 徐鸿玉 叶建州 白 虹 黎 敏(394)
65. 港珠澳大桥海中桥梁工程埋置式承台施工工艺对比分析	景 强 陈东兴(400)
66. 港珠澳大桥西人工岛非通航孔桥现浇承台温控技术	孟庆龙 游 川 姚辉博(406)
67. 干接缝匹配模具的研发及应用	王海波 叶建州 刘长义 孙业发 宋书东 白 虹 孙 凯(409)
68. 桥墩预制后浇孔甩筋内模设计与改进	陈冲海 孙 凯 孙业发 王海波 刘长义 宋书东(417)
69. 预制墩台粗钢筋二次张拉现场控制	方燎原 龙国胜(421)
70. 钢筋斜置对保护层厚度检测精度的影响研究	孟文专 吴海兵 华卫兵(428)
71. 港珠澳大桥混凝土电阻率控制指标探索	赵 伟 熊泽佳 温伟标(431)
72. 硅烷浸渍在跨海大桥墩台施工中的应用	方燎原 冯 浩(436)
73. 安全风险评估在港珠澳大桥主体工程土建施工图设计阶段的应用	陈 越 闫 禹(439)
74. 台风对大型跨海桥梁安全管理的影响与对策	曹汉江 陈 伟(445)
75. 港珠澳大桥岛隧工程设计施工总承包成本控制管理体系研究与实践	王金红(449)
76. HSE 管理在特大型跨海桥隧工程中的应用研究	曹汉江 胡敏涛(453)
77. 港珠澳大桥主体工程岛隧工程设计施工总承包项目计划管理	陶维理(457)
78. 港珠澳大桥主体工程建设期应急管理需求及对策研究	段国钦 胡敏涛(462)
79. 基于港珠澳大桥沉管隧道管节预制的 HAZOP 施工风险分析方法改进	徐三元 刘 坤 胡敏涛 解明浩(468)
80. 大型跨海桥隧工程通航安全风险与管理对策分析	段国钦 陈 伟 戴希红 郑向前(472)
81. 港珠澳大桥岛隧工程特种施工船舶安全风险分析及控制措施	李金峰 赵立新(478)
82. 沉管隧道内施工期安全风险评估及管控措施	赵立新 李金峰(484)
83. 工厂法超大断面预制沉管混凝土养护系统开发及应用	李进辉 刘可心 黄 俊 焦运攀 徐文冰(492)
84. 联合体模式的 SWOT 分析	方燎原 王中平(500)
85. 监理标准化管理模式的探索	方燎原(503)
86. 港珠澳大桥跨海三角高程控制测量	王国良(511)
87. 港珠澳大桥主体工程测量控制关键技术	吴迪军 熊 伟 熊金海(515)
88. 港珠澳大桥 GNSS 连续运行参考站系统的建设与应用	熊 伟(521)
89. 港珠澳大桥施工测量管理实践	郑 强(525)
90. 悬索桥索鞍设计制造主要问题及行业标准介绍	董小亮 叶觉明 李汉梅(532)
91. 波形钢腹板组合梁桥预制装配化技术	汤 意(538)
92. 沿海地区桥梁主墩超大零号块箱梁裂缝控制	鄢佳佳 房艳伟 刘可心 王文明(546)
93. 智能张拉系统的设计研究	肖 云 罗意钟 唐祖文 玉进勇 李建兰 曾世荣 吴松霖 冯达康(549)
94. 干热河谷地区重力式锚碇机械开挖施工工艺	付 兵 庄开伟 刘艳灵 周 密(556)
95. 黏土对聚羧酸减水剂的吸附及其解决措施	陈安亮 雷俊卿 王 林(563)
96. 特殊地质条件下灌注桩旋挖施工工艺探索	金广谦 王明峰(568)
97. 碗扣式钢管脚手架位移监测系统研制及预警值确定	张立奎 殷永高 孙敦华(573)

III 结构分析与试验研究

98. 港珠澳大桥跨境交通控制运作模式研究	刘 谨 孙明玲(581)
-----------------------------	--------------

99. 港珠澳大桥江海直达船航道桥约束体系研究与设计

..... 金秀男 冯清海 张革军 赵磊 文锋(586)

100. 港珠澳大桥钢箱梁最大悬臂状态可靠度分析

景强 骆佐龙 闫磊 宋一凡(593)

101. 基于 ABAQUS 的大节段吊装钢箱梁空间应力分析

刘鹏 余烈 贺拴海(597)

102. 港珠澳大桥青州航道斜拉桥索塔锚固区结构的数值分析

..... 王凌波 刘鹏 贺拴海 余烈(603)

103. 港珠澳连续钢箱梁桥减隔震设计与分析

..... 孔令俊 陈彦北 何俊 金杰 张银喜 郭强(609)

104. 多功能高阻尼橡胶隔震支座在港珠澳大桥中的应用研究

..... 周函宇 宁响亮 孔令俊 庾光忠 郭红锋 姜良广 陈娅玲 陈彦北(613)

105. 港珠澳大桥复合材料防撞护舷数值仿真研究

..... 郝红肖 陈彦北 卢瑞林 郭红锋 孔令俊 宋文彪(619)

106. 欧米茄橡胶止水带结构与性能研究 ...

罗勇欢 冯正林 王三孟 郭红锋 陈娅玲 陈彦北(627)

107. 欧米茄止水带材料寿命研究

..... 郭红锋 陈娅玲 冯正林 陈彦北 罗勇欢 王三孟 张保生(633)

108. 斜拉桥索塔竖向裂缝成因分析

刘清 肖汝诚(640)

109. 桥梁钢索破损安全理论与技术

汤国栋 田又强 严斌 付光奇 陈兵 刘恩德(647)

110. 钢桁梁斜拉桥运营期构件易损性分析

向中富 罗君 黄海东(666)

111. 鄂东长江公路大桥索塔钢锚箱受力计算

魏奇芬 叶文海 张晓明(675)

112. 混合梁斜拉桥混凝土梁过渡段抗裂性分析

陈聪 刘玉擎 刘荣 孙璇(679)

113. 斜拉桥状态评估系统的信息融合模型研究

刘小玲 黄侨 任远 林诗枫 樊叶华(684)

114. 超大跨斜拉桥变形几何非线性效应分析

宋涛 宋一凡 侯炜(688)

115. 三塔结合梁斜拉桥黏滞阻尼器参数分析

彭晶蓉 侯炜 贺拴海(692)

116. 基于悬链线理论的缆索吊装系统解析准确算法

..... 邓亨长 陈良春 张艳丽 卢伟 唐茂林(698)

117. 高烈度地震区大跨度悬索桥中央扣形式的选择与创新 ...

曹发辉 蒋劲松 庄卫林 陶齐宇(705)

118. 对纤维复合材料压毁耗能式桥梁防撞装置的评介

陈国虞(713)

119. 基于实测水泥生热率的水化热放热过程分析

李毓龙 殷永高 刘钊(718)

120. 铰支承箱梁桥倾覆机理和判别方法研究

石雪飞 周子杰 阮欣(722)

121. 温度和湿度耦合作用下混凝土早期裂缝开展的试验研究

..... 仲济涛 朱福春 王凯 张文明(727)

122. 长寿命桥梁结构体系及安全监测与维护技术研究

王春生 段兰(732)

123. 青岛海湾大桥自锚式悬索桥荷载试验与结构评价

李源 贺拴海 赵小星(737)

124. 特大跨径悬索桥空心桩锚碇的探索

李东 刘洪林 徐立成 石柱 方涛(741)

125. 国内桥梁防撞装置的研究与分析

蒋超 刘金涛(748)

126. 悬臂施工中内衬混凝土对波形钢腹板箱梁扭转性能的影响

..... 刘朵 张建东 杨丙文 万水(752)

127. 剪切变形对波形钢腹板箱梁桥挠度的影响规律研究

邓文琴 张建东 刘朵(756)

128. 连续组合梁负弯矩区栓钉剪力键受力性能分析

张兴志 罗扣 王东晖 张强(761)

129. 波纹钢腹板连续梁桥的剪力分布

雷俊 徐栋(766)

130. 缺陷压浆对预应力混凝土梁抗弯性能影响

王磊 张旭辉 张建仁(770)

131. 预应力次内力在梁格结构的体现

谭文韬 徐栋(777)

132. 既有铁路桥墩横向刚度特性与评价方法探讨

刘楠(781)

133. 箱梁桥转向块受力性能分析 王 伟 徐 栋(788)
134. 刚架拱桥的深入研究与重大改进 蔡国宏(791)
- 135 超大跨径活性粉末混凝土(RPC)拱桥试设计研究
..... 罗 霞 许春春 黄卿维 陈宝春 韦建刚 吴庆雄(796)
136. 国家工程建设标准《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923—2013 介绍
..... 陈宝春 韦建刚 吴庆雄(804)
137. 高墩大跨径连续刚构桥车桥耦合动态响应研究 冯 洋 王凌波 宋一凡(809)
138. 冲刷后群桩基础水平承载力计算研究 戴国亮 何泓男 龚维明(813)
139. 高烈度区桥梁抗震性能研究 韩 健(818)
140. 混凝土桥梁温度作用模式及效应规律研究 梁立农 肖龙峰 肖金梅(821)

IV 管理养护、检测与加固

141. 港珠澳大桥桥梁工程运营期维养理念与设计
..... 李国亮 刘明虎 孟凡超 吴伟胜 张革军 张 梁(831)
142. 港珠澳大桥钢箱梁梁外检查车创新设计
..... 孟凡超 常志军 熊劲松 皇甫维国 刘明虎 张革军(835)
143. 港珠澳大桥钢箱梁梁内检查车创新设计
..... 常志军 孟凡超 熊劲松 胥 俊 吴伟胜 张 梁(843)
144. 港珠澳大桥浅水区桥梁维养通道系统设计 张 强 郑清刚 王东晖(849)
145. 基于干涉雷达的桥梁快速评估方法研究 任 远 佟兆杰 黄 侨 李连友 汪 森(853)
146. 圯工拱圈增大截面面积加固承载能力验算方法研究 倪 玲 杨 峰(858)
147. 基于模糊数学理论条件下的铁路混凝土桥梁状态评估方法探讨 刘 楠(863)
148. 桥梁全寿命周期安全隐患预控探讨 张小葵 田海龙(870)
149. 浙江嘉绍大桥机电工程建设与运营实践 陶永峰(872)
150. 港珠澳大桥桥梁工程钢结构防腐施工首制件质量控制
..... 杨振波 杨海山 师 华 魏九桓 胡立明(876)
151. 四氟型高耐候自洁性氟碳漆在桥梁防护上的应用 刘 伟 白华栋 商汉章(884)
152. 港珠澳大桥混凝土结构 120 年使用寿命的耐久性保障体系
..... 范志宏 王胜年 李克非 苏权科 董桂洪(888)
153. 外海埋置式全预制桥梁墩台安装止水关键技术 陈儒发 谭 昱(895)
154. BIM 技术在桥梁领域中发展的思考 石雪飞 黄 睿(901)
155. 中外桥梁养护管理制度对比研究 许国杰 张建东 傅中秋 刘 朵 吉伯海(907)
156. 基于地基变形法的沉管隧道纵向抗震分析方法
..... 久保田真 陳復興 滝本孝哉(911)
157. 港珠澳大桥岛隧工程西小岛堆载预压法处理软地基的固结分析 肖志海(920)

I 规划与设计

1. 港珠澳大桥桥梁工程总体设计及创新技术

孟凡超 刘明虎 吴伟胜 张革军 张 梁 常志军
(中交公路规划设计院有限公司)

摘 要 本文介绍港珠澳大桥的工程概况、建设理念和桥梁工程总体设计方案,文中重点阐述了设计采用的新材料、新技术、新工艺、新设备。基础采用变直径钢管复合桩,钢管与混凝土组成组合截面共同受力;占全桥总量90%的非通航孔桥桥墩基础采用埋床法全预制墩台设计与施工;桥墩墩身采用工厂节段预制,现场采用 $\phi 75\text{mm}$ 预应力粗钢筋连接;钢箱梁采用耐疲劳大悬臂正交异性钢桥面板构造;占全桥总长65%的钢箱梁采用超大尺度梁段进行制作和安装;斜拉索采用抗拉强度1860MPa 平行钢丝索;全桥采用减隔震设计技术,分区段设计采用不同类型减隔震支座和阻尼装置;深水区非通航孔桥及江海直达船航道桥钢箱梁采用箱内设置调谐质量阻尼器(TMD)涡激共振抑制设计技术;全桥采用全自动、全覆盖的管养装备创新技术;全面采用120年设计使用寿命的耐久性设计保障技术。创新技术的应用,为提高工程品质、确保设计使用寿命提供了坚实基础和有力保障。

关键词 港珠澳大桥 “大型化、工厂化、标准化、装配化” 钢管复合桩 埋床法预制墩台 $\phi 75\text{mm}$ 预应力粗钢筋 正交异性钢桥面板 1860MPa 斜拉索 120年设计使用寿命

一、概 述

1. 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港、珠海、澳门的超级跨海通道,是列入《国家高速公路网规划》的重要交通建设项目,是我国具有国家战略意义的世界级跨海通道。项目西接京港澳高速公路,东接香港大屿山高速公路,是一项“桥、隧、岛”一体化多专业的超大型综合集群工程,包括:主体工程(粤港分界线至珠澳口岸之间区段)、香港界内跨海桥梁、内地和港澳口岸、内地与港澳连接线。主体工程总长29.6km,其中桥梁工程长约22.9km。

2. 主要技术标准

公路等级为双向6车道高速公路;设计行车速度100km/h;建筑限界为桥面标准宽度33.1m,净高5.1m;设计汽车荷载按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中规定的汽车荷载提高25%用于设计,并按香港《United Kingdom Highways Agency's Departmental Standard BD37/01》汽车荷载进行复核;抗风设计考虑运营阶段设计重现期120年,施工阶段设计重现期30年;地震设防标准:以重现期表征,工作状态(E1)均为120年,极限状态(E2)通航孔桥为1200年、非通航孔桥为600年,结构完整性状态(E3)均为2400年;设计使用寿命120年。

3. 建设条件

项目地处珠江伶仃洋入海口,属于近海离岸跨海通道工程,海域宽度超过40km。

大桥处于亚热带海洋性季风气候区,桥区热带气旋影响十分频繁,气象条件恶劣,台风多,风力大,高温高湿。桥区重现期120年10m高10min平均风速达47.2m/s。实测极端最高气温为38.9℃,极端最低气温-1.8℃。年内各月平均相对湿度均在70%以上。

水文条件复杂,水动力条件差,行洪、纳潮、防淤要求严。海床稳定性好,潮位变化平缓、流速不大。水深介于5~10m,局部最深点可达17m。桥区海域为不规则半日潮海区,潮差不大,平均潮差仅1.24m。实测垂线平均流速为0.5~1m/s,总体上本海区流速不大。

穿越桥区的航道多、航线复杂、通航船型类型众多、船舶通航密度大、通航要求高,航行安全管理要求高。

地震设防水准高。地质条件变化大。桥位处覆盖层较厚,最厚可达 89.3m;下伏基岩为花岗岩,岩面及风化厚度差异较大。软土分布范围广、厚度大。海水和地下水均具有较强的腐蚀性。

香港大屿山机场位于大桥东岸登陆点附近,澳门机场位于大桥西岸附近,机场航空限高严。

桥轴线穿越白海豚保护区,环保要求高。

二、设计理念

港珠澳大桥三大目标为:建设世界级的跨海通道;为用户提供优质服务;成为地标性建筑。每个目标均具有丰富和深刻的内涵和要求。

基于并服务于项目建设条件、建设目标 and 需求,设计提出了项目建设理念和指导方针,即“大型化、工厂化、标准化、装配化”。全面实现“四化”工法是项目的总体设计思想,以适应工程复杂建设条件,保证施工安全和航运安全、确保工程质量品质、减少现场工作量、减少海中作业时间、降低施工风险、保护海洋生物、保障工期。

“四化”理念是项目追求的最高境界,其本质是工业化。

港珠澳大桥是中国交通建设史上规模最大、技术最复杂、标准最高的工程,作为世界级挑战性的通道,它的建设必须采用世界先进技术和方法,以及与之匹配的先进建设理念,必须推行“以需求和建设目标引导设计”,推行先进的“四化”建设思想,依靠当代先进的科学技术和国家强大的工业化实力,确保其“新技术、高品质、长寿命”重要目标的实现。相对来说,桥梁建设的工业化水平在港珠澳大桥上达到了空前的高度,“四化”建设理念将引领中国桥梁及交通建设领域的工业化革命,是中国迈向桥梁强国的里程碑项目。

三、桥梁工程总体设计

港珠澳大桥为桥梁工程包括:三座通航孔桥及深/浅水区非通航孔桥五部分。

青州航道桥桥跨布置为 110m + 236m + 458m + 236m + 110m(图 1)的双塔斜拉桥,主梁采用扁平流线型钢箱梁,斜拉索采用扇形空间双索面布置,索塔采用横向 H 形框架结构,塔柱为钢筋混凝土构件,上联结系采用“中国结”造型的钢结构剪刀撑。

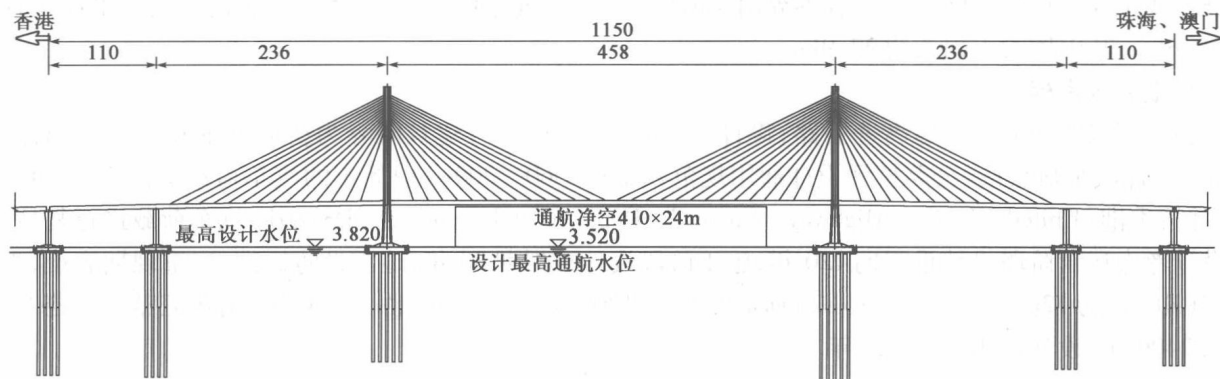


图 1 青州航道桥桥型布置(尺寸单位:m)

江海直达船航道桥为桥跨布置为 110m + 129m + 258m + 258m + 129m + 110m(图 2)的三塔斜拉桥,主梁采用大悬臂钢箱梁,斜拉索采用竖琴式中央单索面布置,索塔采用“海豚”形钢塔。

九洲航道桥为桥跨布置为 85m + 127.5m + 268m + 127.5m + 85m(图 3)的双塔斜拉桥,主梁采用悬臂钢箱组合梁,斜拉索采用竖琴式中央双索面布置,索塔采用“帆”形钢塔(下塔柱局部为混凝土结构)。

深水区非通航孔桥为 110m 等跨径等梁高钢箱连续梁桥(图 4),钢箱梁采用大悬臂单箱双室结构。为跨越崖 13-1 气田管线需要,其中一联采用 110m + 150m + 110m 变梁高钢箱连续梁桥。浅水区非通航孔桥为 85m 等跨径等梁高组合连续梁桥,主梁采用分幅布置。

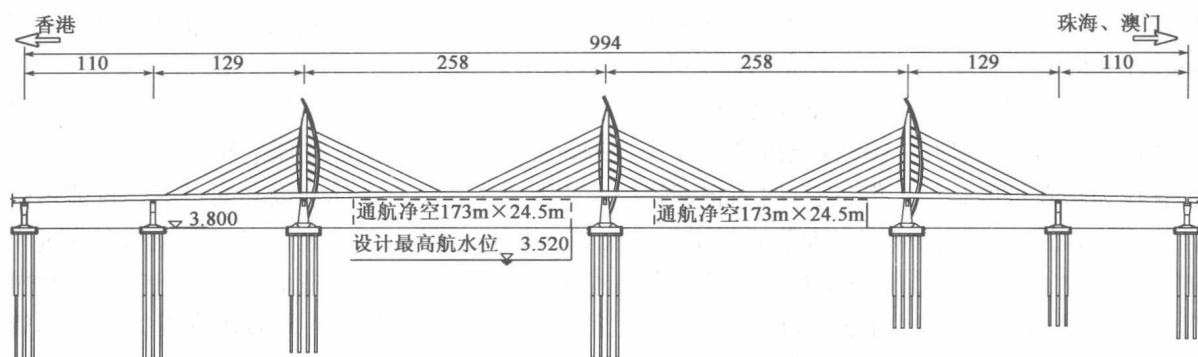


图2 江海直达船航道桥桥型布置(尺寸单位:m)

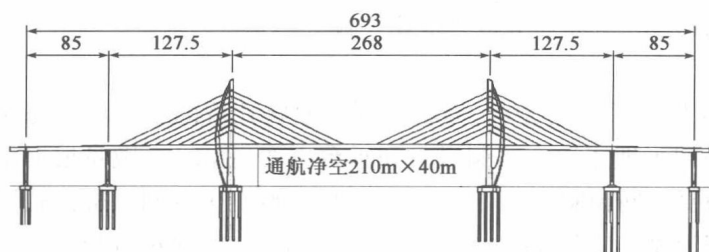


图3 九洲航道桥桥型布置(尺寸单位:m)

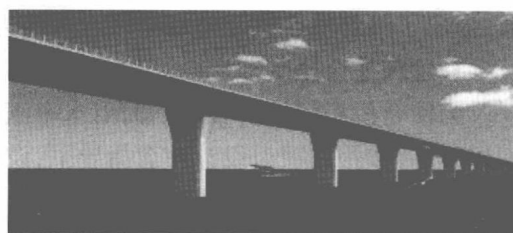


图4 深水区非通航孔桥桥型布置效果图

全桥基础采用大直径钢管复合群桩,通航孔桥采用现浇承台,非通航孔桥采用预制承台,全桥桥墩采用预制墩身。

四、桥梁工程创新技术

1. 地标性桥梁建筑景观设计

为建成地标性建筑,设计者进行了长期艰苦卓绝的建筑景观设计。其中,航道桥对全桥景观效果和地标性目标影响至关重要。在全桥桥墩造型、主梁线形协调一致的基础上,作为斜拉桥的索塔的建筑造型则成为控制性因素。基于全桥桥隧组合“珠联璧合”的总体景观设计理念,在对景观文化内涵、桥梁元素特征、视点进行研究分析的基础上,考虑中西、粤港、古今文化交融的地域文化特点,最终从众多套桥梁方案中筛选出以海洋文化元素为基础的“扬帆顺行”组合方案(图5)。三座通航孔桥桥塔造型既有统一的主题元素,又各具特色,体现了设计的原创性,极具可识别性。



图5 通航孔桥建筑景观效果图

2. 大型钢管复合桩研究与应用

在广泛吸收国内外跨海桥梁基础建设有益经验的基础上,通过对打入桩、钻孔灌注桩和钢管复合桩综合比选,最终采用钢管复合桩,钢管与钢筋混凝土共同组成桩结构主体。通航孔桥基础采用变直径钢管复合桩。桩身由两部分组成:有钢管段、无钢管段。有钢管段的长度根据地质条件、结构受力、沉桩能力、施工期承载等综合确定。复合桩钢管内径 2450mm,钢管壁厚分两种:下部约 2m 范围壁厚为 36mm,其余壁厚为 25mm。钢管对接时内壁对齐,采用全熔透对接焊。在顶部一定区段钢管内壁设置多道剪力

虽然钢管复合桩以其优越的力学性能越来越受到工程界的重视和青睐,但目前国内外对于钢管复合桩复合结构的受力机理、协同工作性能以及设计计算理论还不完善,缺乏系统理论研究。工程上常常只是把钢管作为钻孔桩的临时护筒,设计时未将钢管与核心混凝土作为复合体加以共同考虑。目前钢管复合桩计算理论和设计方法的研究大大落后于工程应用。一方面,实际工程中经常出现因桩基沉降过大等引起的工程事故,另一方面也暴露出桩基设计中存在着保守的趋势和现象。造成这种现状的原因是桩周介质(岩土)性状的复杂性,同时钢管和混凝土桩体之间的受力分析相对困难,导致现在对大直径钢管混凝土复合桩的荷载传递机理、变形规律等还未完全研究清楚。鉴于此,对钢管复合桩的变形分析、承载力计算理论以及桩的合理构造形式等方面开展了系统的理论分析和试验研究(制作了14根钢管复合桩试件开展模型试验),在充分了解其承载特性和受力机理的基础上,获取了大直径钢管复合桩的各项设计参数,提出了钢管复合桩竖向和水平承载能力计算方法,并将研究成果应用于设计。

为使全桥桥隧组合轴线断面阻水率满足不大于 10% 的要求,需将全部非通航孔桥的承台埋于海面以下。同时,在项目设计理念指导下,设计采用了埋床法全预制墩身和承台方案(图 6)。墩身根据吊装能力分成 1~3 节预制拼装,承台随同首节墩身一同预制,预留桩位孔洞和后浇混凝土空间。桩位孔洞用以实现止水、桩基与预制承台临时连接;后浇混凝土空间在抽水后浇注后浇混凝土,实现承台与桩基的整体化。预制承台既是承台主体结构,又是实现承台与桩基连接的围堰结构,除附着于预制承台之上的临时周转使用的围堰设施外,承台本身施工不需要额外的围堰结构。下节段墩身及承台整体最大吊装重量约 2850t,最大高度约 27m。



预制承台底板厚 0.6m, 底板开孔直径 2.13m, 孔壁设有槽口, 用于置入整体式止水胶囊, 通过充水后实现止水。需研制新型封堵止水装置及相应工艺解决 16m 水深处潜水预制承台与钢管复合桩间的止水问题, 确保后浇混凝土能够在干作业环境内进行施工。胶囊正常充水压力 0.3MPa, 极限充水压力 1.2MPa, 正常情况下可在水下大于 16m 深处工作。为确保整体式止水胶囊实现止水, 设计要求钢管复合桩竖向倾斜不大于 1/400 ~ 1/320, 桩中心平面位置允许绝对误差小于 150mm, 各桩之间允许相对误差小于 50mm。若施工能采取其他可靠措施实现止水和后续工序, 也可将上述精度要求降至常规要求。

为确保实现上述施工精度和工期要求, 设计提出了以下施工方案和保证措施:

- (1) 钢管沉桩施工宜采用在定位船上设置的导向架和大功率液压振动锤对钢管进行振动下沉。
- (2) 三次定位措施: 驳船首先采用锚索初定位; 再下放四根锚桩将驳船定位; 下放钢管, 桩底离泥面 50cm 左右时, 通过导向架的液压背板微调钢管平面位置及倾斜率, 进行精确定位。
- (3) 桩基施工采用可拆卸周转使用的整体式装配化钻孔平台(钻机、泥浆池、沉淀池、钻杆和工作房集成一体), 以缩短海上作业时间、节约造价、降低风险。

4. 预制墩身连接技术及 $\phi 75\text{mm}$ 预应力螺纹粗钢筋研发

全桥桥墩均采用工厂预制、现场安装。其中, 青州航道桥、江海直达船航道桥、深水区非通航孔桥的墩身根据吊装能力采用节段预制, 并通过预应力筋进行连接(图 7), 墩身接缝采用干接缝, 设置匹配的凹凸剪力键, 接缝处涂抹满足技术要求的环氧树脂。经技术经济综合比较, 并重点考虑施工的可操作性、寿命保证的可靠性, 预应力确定采用全螺纹粗钢筋体系(图 8)。由于受力所需及墩身断面限制, 粗钢筋直径需达 75mm。鉴于《预应力混凝土用螺纹钢筋》(GB/T 20065—2006)最大规格仅 50mm, 为此, 在广泛调研国内外相关技术水平及市场情况的基础上, 确定采用 $\phi 75\text{mm}$ 预应力螺纹粗钢筋(目前国内已研发成功并应用到本项目中, 钢筋屈服强度 830MPa, 抗拉强度 1030MPa)连接墩身节段。要求所采用的精轧螺纹钢或滚压连续外螺纹粗钢筋均符合国内外相关规范规定的尺寸、外形及技术性能要求。连接墩身节段的预应力粗钢筋采用“电隔离防护+真空灌浆”措施进行防腐, 并进行了详细的防腐构造细节设计。

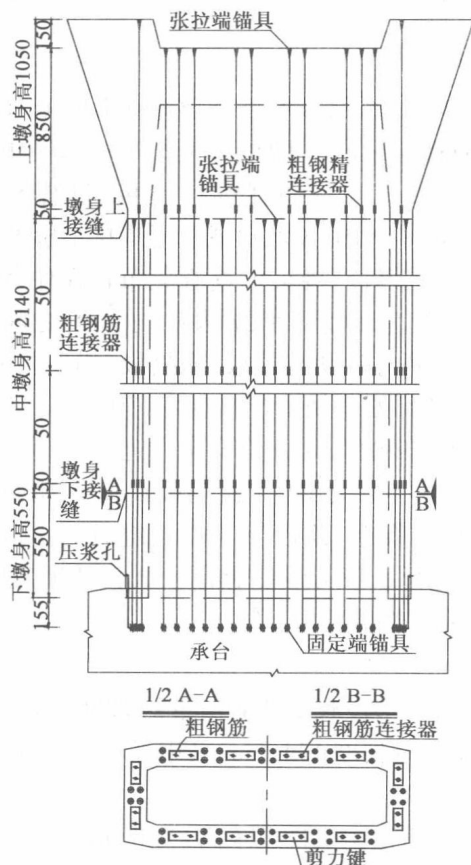


图7 预制墩身及连接构造(尺寸单位:cm)

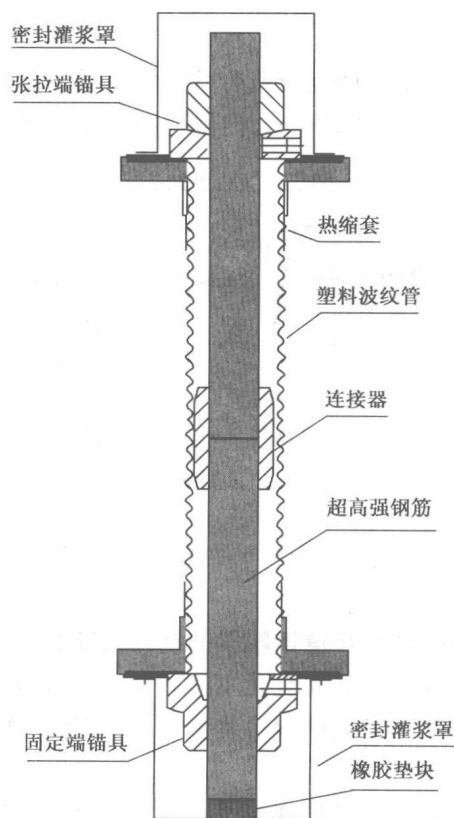


图8 预应力粗钢筋及体系

5. 大悬臂钢箱梁耐疲劳结构设计技术

全桥钢箱梁梁高 4.5m;箱梁设置边纵腹板和中纵腹板。中纵腹板采用实腹式,但开设了联通人孔方便出入,并联通箱室内干空气,利于除湿。为使箱室内部更加通透,采用了实腹式横隔板和横肋板交替布设的构造,通航孔桥横隔板间距 7.5m,深水区非通航孔桥横隔板间距 10m,中间每隔 2.5m 设置一道横肋板。深水区非通航孔桥钢箱梁横断面见图 9。

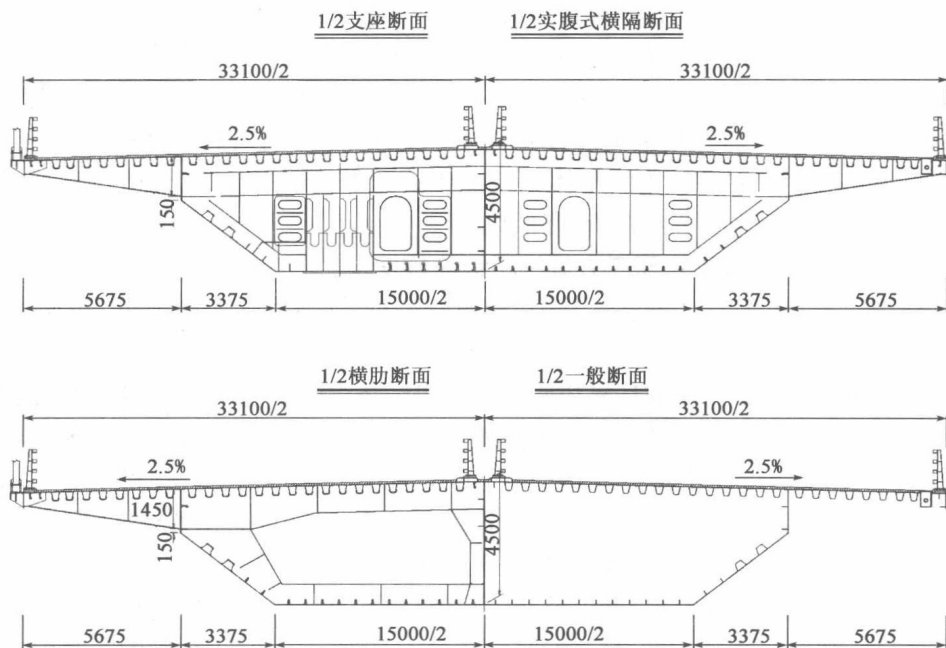


图9 深水区非通航孔桥主梁横断面(尺寸单位:mm)

在细节研究及疲劳验算的基础上,确定了钢桥面板的细部构造:桥面板厚度 $\geq 18\text{mm}$;纵向 U 肋间隔 300mm 、厚度 $\geq 8\text{mm}$ 、内侧弯曲加工半径不小于 5 倍板厚;桥面板与纵向 U 肋熔透量不小于纵肋板厚的

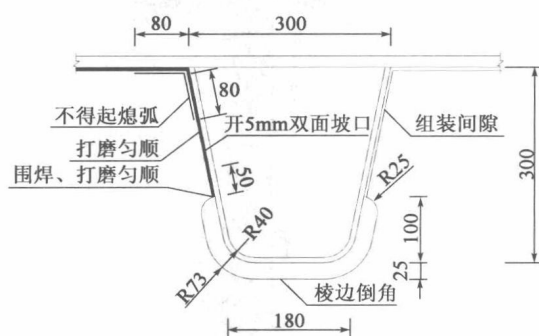


图 10 组装、焊接、细部处理要求(尺寸单位:mm)

80%;纵向 U 肋接头采用高强螺栓连接,过焊孔长度 80mm;桥面板的焊接利用 X 坡口或利用焊接垫板的 V 形坡口实施完全熔透焊接,接头位置避免布置在轮载正下方;横肋间隔 $\leq 2.5\text{m}$;竖向加劲构件与顶板之间设置 35mm 的间距;对纵向 U 肋与顶板、横隔板(横肋板)之间的组装、焊接及细部处理做了严格规定(图 10)。理论分析表明,该构造能够确保耐疲劳安全。进一步开展了试件疲劳试验,对病害最突出的“横隔板在 U 肋附近开槽处、横隔板与 U 肋焊缝、顶板与 U 肋焊缝、U 肋对接(栓接)”构造细节进行了疲劳性能验证。试验结果表明,构造完全满足耐疲劳性能要求。

6. 超大尺度钢箱梁的制作与安装

深水区非通航孔主梁架设采用大节段整孔逐跨吊装方案,标准节段长 110m,吊重约 2300t,最长节段长 133m,最大控制吊装重量约 2750t。通航孔桥边跨无索区大节段长度 134.5m,采用浮吊整体吊装,吊装重量约 3580t。

钢箱梁结构规模及数量巨大,健康、安全、环保、制造标准、品质及耐久性要求高,为此实施了“全新的厂房、尖端的设备、先进的技术、科学的管理”的工作方针,大幅度提升“车间化、机械化、自动化”水平。