



“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B04)

港珠澳大桥混凝土结构 耐久性评估与再设计

Durability Assessment and Redesign for the Concrete Structures of
Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

李克非 苏权科 王胜年 等 著



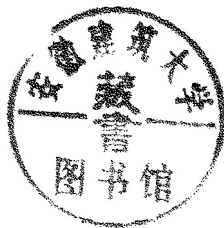
人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B04)

港珠澳大桥混凝土结构 耐久性评估与再设计

Durability Assessment and Redesign for the Concrete Structures of
Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge



李克非 苏权科 王胜年 等 著



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

图书在版编目(CIP)数据

港珠澳大桥混凝土结构耐久性评估与再设计 / 李克非等著. — 北京 : 人民交通出版社股份有限公司, 2018.3

ISBN 978-7-114-14619-0

I. ①港… II. ①李… III. ①跨海峡桥—桥梁结构—混凝土结构—耐久性—研究 IV. ①U448.193

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 057757 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B04)

书 名: 港珠澳大桥混凝土结构耐久性评估与再设计

著 作 者: 李克非 苏权科 王胜年 等

责任编辑: 吴有铭 丁 遥 等

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: 北京雅昌艺术印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12

字 数: 234 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14619-0

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)

内 容 提 要

本书以国家科技支撑计划项目“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究示范”之课题四“跨海集群工程混凝土结构 120 年使用寿命保障关键技术”(课题编号 2011BAG07B04)为背景,系统提出了港珠澳大桥结构混凝土耐久性的质量控制原理和验收准则,并建立了以氯离子扩散系数为目标的混凝土质量控制流程;然后在广泛收集施工阶段混凝土构件检测数据的基础上,完成了施工期混凝土构件耐久性性能水平评估;最后从耐久性评估和再设计角度建立了港珠澳大桥混凝土结构全寿命管理的基本框架,介绍了支撑耐久性检测的长期暴露试验站、使用期耐久性评估的模型、原则与方法以及使用期的基本维护方案。

本书汇集了港珠澳大桥建设的工程经验和研究成果,可作为同类跨海集群工程建设的技术参考,也可作为工程技术人员解决施工期混凝土耐久性控制问题的参考文献。

Abstract

This book is based on the National Science and Technology Support Plan Project No. 2011BAG07B04 “Key Technologies Assuring the 120-Year Service Life of Sea-Link Complex Projects and the Technical Demonstrations”. The theoretical basis and compliance criteria for the durability quality control of concrete elements in Hong Kong-Zhuhai-Macao (HZM) sea-link project are proposed, and the quality control procedure based on the chloride ion diffusion coefficient is established. On the basis of the measurements on the in-situ concrete elements, the durability assessment is performed for the achieved durability performance. Further, the life-cycle management of the concrete structures is elaborated through the durability assessment and redesign processes, including the long-term exposure tests, assessment methods and the preliminary maintenance scheme.

This book includes the return of experiences and research results in HZM project, the methods and principles can be applied to similar sea-link projects, and it can also serve as references for engineers and technical staff for durability quality control of structural concretes.

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：陈 健 周 伟 成 平 姜明宝

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金 凌

李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科 严云福

港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

编审委员会

顾问：冯正霖
主任：周海涛
副主任：袁鹏 朱永灵

执行总编：苏权科

副总编：徐国平 时蓓玲 孟凡超 王胜年 柴瑞

委员：(按专业分组)

岛隧工程：孙钧 钱七虎 郑颖人 徐光 王汝凯

李永盛 陈韶章 刘千伟 麦远俭 白植悌

林鸣 杨光华 贺维国 陈鸿

桥梁工程：项海帆 王景全 杨盛福 凤懋润 侯金龙

陈冠雄 史永吉 李守善 邵长宇 张喜刚

张起森 丁小军 章登精

结构耐久性：孙伟 缪昌文 潘德强 邵新鹏 水中和

丁建彤

建设管理：张劲泉 李爱民 钟建驰 曹文宏 万焕通

牟学东 王富民 郑顺潮 林强 胡明

李春风 汪水银

《港珠澳大桥混凝土结构耐久性评估与再设计》

编 写 组

组 长：李克非

副 组 长：苏权科 王胜年

编写人员：李全旺 董桂洪 范志宏 张秦铭 苏宗贤

杨海成 方 翔 王翩翩 汤雁冰 陈 龙

李 超 熊建波 邓 法 张 弛 曾俊杰

倪静姁 高文博 江晓霞

总 序

General Preface

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版“交通运输建设科技丛书”,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版“交通运输科技丛书”,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!



杨伟光

2016年6月24日

序

Preface

2003年,港珠澳大桥工程研究启动。2009年,为应对由美国次贷危机引发的全球金融危机,保持粤、港、澳三地经济社会稳定,中央政府决定加快推进港珠澳大桥建设。港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,东接香港特别行政区,西接广东省珠海市和澳门特别行政区,是“一国两制”框架下粤、港、澳三地合作建设的重大交通基础设施工程。港珠澳大桥建设规模宏大,建设条件复杂,工程技术难度、生态保护要求很高。

2010年9月,由科技部支持立项的“十二五”国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”项目启动实施。国家科技支撑计划,以重大公益技术及产业共性技术研究开发与应用示范为重点,结合重大工程建设和重大装备开发,加强集成创新和引进消化吸收再创新,重点解决涉及全局性、跨行业、跨地区的重大技术问题,着力攻克一批关键技术,突破瓶颈制约,提升产业竞争力,为我国经济社会协调发展提供支撑。

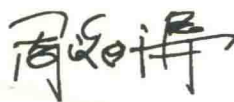
港珠澳大桥国家科技支撑计划项目共设五个课题,包含隧道、人工岛、桥梁、混凝土结构耐久性和建设管理等方面的研究内容,既是港珠澳大桥在建设过程中急需解决的技术难题,又是交通运输行业建设未来发展需要突破的技术瓶颈,其研究成果不但能为港珠澳大桥建设提供技术支撑,还可为规划研究中的深圳至中山通道、渤海湾通道、琼州海峡通道等重大工程提供技术储备。

2015年底,国家科技支撑计划项目顺利通过了科技部验收。在此基础上,港珠澳大桥管理局结合生产实践,进一步组织相关研究单位对以国家科技支撑计划项目为主的研究成果进行了深化梳理,总结形成了“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系”。书系被纳入了“交通运输科技丛书”,由人民交通出版社股份有限公司组织出版,以期更好地面向读者,进一步推进科技成果公开,进一步加强科技成果交流。

值此书系出版之际,祝愿广大交通运输科技工作者和建设者秉承优良传统,按照党的十八大报告“科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置”的要求,努力提高科技创新能力,努力推进交通运输行业转型升级,为实现“人便于行、货畅其流”的梦想,为实现中华民族伟大复兴而努力!

港珠澳大桥国家科技支撑计划项目领导小组组长

本书系编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '周兴' (Zhou Xing), written in a cursive style.

2016 年 9 月

前 言

Foreword

港珠澳大桥是举世瞩目的跨海集群工程,跨越珠江口伶仃洋海域,连接香港、澳门、珠海三地,全长约 55km。工程设计使用年限 120 年,构件所处腐蚀环境严酷。为确保工程整体服役寿命达到 120 年,需要一套系统的耐久性保障技术体系。

本书旨在总结国家科技支撑计划项目“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”之课题四“跨海集群工程混凝土结构 120 年使用寿命保障关键技术”的研究内容,重点介绍混凝土结构的耐久性评估与再设计技术,利用施工过程检测数据、实体构件监测数据,建立耐久性评估的不确定性数学模型,实现对混凝土实体构件的寿命评估,进而以失效概率为基准,提出耐久性“检(监)测-评估-再设计”一体化维护方法,提出耐久性维护基本制度,形成以原位监测、动态评估、主动维护为原则的全寿命运营维护技术。本书与系列丛书中的《港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计与施工技术》相结合,形成港珠澳大桥混凝土结构 120 年使用年限的设计保障技术体系。

参与本书撰写的人员有:第 1 章李克非,第 2 章王胜年,第 3 章王胜年、范志宏,第 4 章李克非、董桂洪,第 5 章李克非、李全旺,第 6 章李克非、杨海成、汤雁冰。本书编写过程中采用了王翩翩、邓法等人在施工现场开展的大量测试研究数据,得到了张宝兰、李超等人的大力协助,在此一并致谢。

限于作者的水平和经验,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 6 月

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 工程概况	1
1.2 耐久性评估和再设计	2
1.3 实施情况及成果	3
第 2 章 混凝土结构 120 年耐久性可行性研究	4
2.1 概述	4
2.2 海洋环境典型混凝土结构耐久性措施分析	4
2.2.1 丹麦大贝尔特海峡工程	4
2.2.2 丹麦—瑞典厄勒海峡交通工程	6
2.2.3 加拿大联盟大桥	8
2.2.4 中国香港青马大桥	10
2.2.5 中国东海大桥	11
2.2.6 中国杭州湾跨海大桥	13
2.2.7 中国昂船洲大桥	15
2.2.8 中国金塘大桥	16
2.2.9 中国青岛海湾大桥	18
2.2.10 中国深港西部通道工程	20
2.2.11 韩国釜山—巨济连接线工程	20
2.2.12 海洋环境混凝土结构耐久性措施总结	22
2.3 港珠澳大桥混凝土结构环境作用与使用年限分析	23
2.3.1 基本环境类别与作用等级	23
2.3.2 耐久性极限状态	25
2.3.3 混凝土构件的设计使用年限	25
2.4 可行性分析	26
第 3 章 混凝土结构耐久性设计与施工技术分析	28
3.1 概述	28

3.2 基于可靠度理论的混凝土结构耐久性设计过程	28
3.2.1 耐久性设计原则	28
3.2.2 耐久性设计模型和参数	30
3.2.3 混凝土结构耐久性指标	32
3.3 混凝土施工质量控制	33
3.3.1 混凝土原材料控制与要求	33
3.3.2 混凝土配合比设计原则	35
3.3.3 混凝土拌和物水胶比检测	37
3.3.4 混凝土构件接触海水时间控制	38
3.3.5 钢筋的混凝土保护层厚度控制措施	39
3.3.6 沉管全断面浇筑大体积混凝土裂缝控制	40
3.4 防腐蚀措施设计与施工	41
3.4.1 基于全寿命的防腐蚀措施设计	41
3.4.2 防腐蚀施工质量控制	43
第4章 施工过程混凝土耐久性质量分析	49
4.1 概述	49
4.2 混凝土耐久性测试参数与关系	49
4.2.1 混凝土氯离子扩散与迁移理论基础	49
4.2.2 混凝土强度质量评定标准	53
4.2.3 氯离子扩散系数质量评定标准	56
4.3 混凝土耐久性参数检测	61
4.3.1 结构混凝土强度	61
4.3.2 结构混凝土氯离子扩散系数	66
4.3.3 表面电阻率测试	72
4.3.4 沉管模型检测	73
4.4 基于检测数据的结构混凝土质量分析	79
4.4.1 混凝土强度	79
4.4.2 混凝土氯离子扩散系数	83
4.4.3 沉管实体模型	86
4.4.4 基于现场数据评价的混凝土质量控制技术	89
第5章 实体构件耐久性检测与评估	98
5.1 概述	98
5.2 实体构件耐久性检测	98
5.2.1 保护层厚度	98

5.2.2	混凝土表面电阻率	101
5.2.3	混凝土表面透气性	105
5.3	基于无损检测数据的构件耐久性质量分析	110
5.3.1	保护层检测结果分析	110
5.3.2	表面透气性-电阻率质量分析	111
5.3.3	电阻率-表面透气性-氯离子扩散系数相关性研究	113
5.4	基于检测数据的混凝土结构耐久性评估	115
5.4.1	耐久性评估基本模型	115
5.4.2	施工图设计阶段耐久性措施	118
5.4.3	实体结构耐久性评估	125
5.4.4	耐久性评估结论	133
第6章	服役期耐久性评估和再设计	135
6.1	概述	135
6.2	耐久性检测与监测	136
6.2.1	暴露试验	136
6.2.2	结构长期耐久性检测与监测	141
6.3	混凝土结构与构件服役期维护方案	147
6.3.1	维护方案确定原则	147
6.3.2	维护方案建议	148
6.3.3	混凝土构件服役期基本维护制度	148
6.4	服役期耐久性评估原则与方法	154
6.4.1	评估原则与方法	154
6.4.2	数据更新的理论基础	155
6.4.3	服役期评估示例	157
6.5	服役期耐久性再设计	160
6.5.1	耐久性再设计原则	160
6.5.2	耐久性再设计理论与方法	160
6.5.3	混凝土构件耐久性再设计示例	163
参考文献		166
索引		169

第 1 章 绪 论

1.1 工 程 概 况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,连接香港、澳门、珠海三地,全长约 55km,其中位于海上的主体工程长 29.6km,包含了隧道、桥梁、人工岛等多种结构形式,工程设计使用年限 120 年,因其技术复杂、环保要求高、建设要求及标准高,在中国交通建设史上占据重要地位。港珠澳大桥项目平面示意图见图 1-1,沉管隧道预制总览见图 1-2。

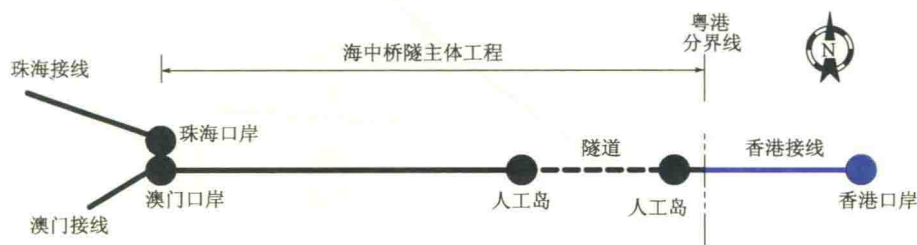


图 1-1 港珠澳大桥项目平面示意图



图 1-2 港珠澳大桥沉管隧道预制总览

港珠澳大桥工程所处的伶仃洋海域属于典型的亚热带海洋性季风气候(年平均气温 22.3 ~ 23℃,最高温度 38.9℃,最低温度 -1.8℃,年平均相对湿度 78% ~ 80%)^[1],具有气温高、湿度

大、海水盐度高的特点,受海水、海风、盐雾、潮汐、干湿循环等众多因素影响,混凝土结构的腐蚀环境严酷,耐久性问题突出。此外,港珠澳大桥混凝土结构包括了预制沉管管段、非通航孔桥预制桥墩与承台、预制桥面板、通航孔桥现浇墩台、沉管隧道现浇敞开段和暗埋段等,施工工艺复杂。构件分布于海平面以下 40m 到海平面以上 200m 的空间,环境条件和构件表面局部环境多样。处于如此严酷的环境条件,又同时具有多种结构形式和严格的耐久性要求的跨海集群工程混凝土结构,在国内外工程中实属罕见。

港珠澳大桥整体设计使用年限为 120 年。自然地理位置及工程结构决定了港珠澳大桥的混凝土结构处于严酷的腐蚀环境中,工程环境和场址存在的腐蚀因素至少包括^[2-3]:①海水氯离子对混凝土结构和构件形成的强腐蚀环境;②在 40m 深水头压力下沉管隧道混凝土结构的抗渗和氯盐等化学侵蚀;③水下及海泥中潜在的硫酸盐、镁盐等对结构混凝土的化学侵蚀及盐结晶侵蚀;④环境及交通车辆尾气引起的混凝土结构和构件表层混凝土的碳化作用。这些腐蚀因素作用于混凝土构件的局部或混凝土结构的整体,都会影响混凝土结构在设计使用年限内的耐久性能。

从港珠澳大桥工程全寿命周期考虑,混凝土结构将经历设计、施工、运营维护和修复等过程,而混凝土结构耐久性能的维持及其保障贯穿整个全寿命周期,涉及耐久性初始设计、施工质量完成水平以及运营周期中的耐久性检测和维护措施等技术方面,是一个复杂的系统工程。因此,本书围绕保障港珠澳大桥混凝土结构 120 年使用年限的主题,详尽介绍了强腐蚀海洋环境中混凝土结构 120 年耐久性使用寿命的可行性研究、混凝土结构 120 年使用年限耐久性设计与施工、施工阶段的结构混凝土质量控制、施工阶段的混凝土实体构件检测和耐久性评估,以及服役期间保障混凝土结构 120 年使用年限的评估、措施与再设计技术。

1.2 耐久性评估和再设计

由于环境因素的复杂、工程材料的变异性以及目前对于混凝土结构耐久性认识的局限,设计使用年限较长的混凝土结构通过一次耐久性设计往往不足以保障其在使用周期内的耐久性能。这时,耐久性设计过程就需要向施工阶段和使用阶段延伸:在施工阶段通过对材料与构件施工质量的控制和检测得到材料真实的变异性,在使用阶段通过建立合理的维护制度和维护设计来消除初始耐久性设计带来的偏差^[4]。混凝土结构的耐久性评估和再设计技术就是长寿命混凝土结构耐久性设计在施工阶段和使用阶段的具体体现。

对于港珠澳大桥工程,针对不同阶段的建设目标进行混凝土结构的耐久性评估和耐久性再设计是保障混凝土结构 120 年使用年限的重要技术手段。在初步设计阶段,开展 120 年耐久性设计的可行性研究与评估,解决使用年限能否达到以及如何达到的问题;在详细设计阶段,混凝土结构耐久性评估结合结构和构件的环境作用、服役特点和使用年限,分析材料与结