



中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

海底隧道工程 耐久性技术

赵铁军 姜福香◎编著

Durability of
Subsea Tunnels



人民交通出版社
China Communications Press



中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

海底隧道工程耐久性技术

Durability of Subsea Tunnels

赵铁军 姜福香 编著



1535267

人民交通出版社

... 1447234-37

内 容 提 要

本书在分析海底隧道工程耐久性影响因素的基础上,系统介绍了不同结构形式的海底隧道工程初期支护、二次衬砌结构、防排水系统等的耐久性问题,以及耐久性防护、监测和保障措施。全书共八章。

本书可作为隧道工程设计、施工、相关管理及科研人员的参考用书,也可作为土木工程专业高年级本科生或研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海底隧道工程耐久性技术/赵铁军,姜福香编著.

—北京:人民交通出版社,2010.8

ISBN 978-7-114-08658-8

I. ①海… II. ①赵… ②姜… III. ①水下隧道—隧道工程—施工技术—研究 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 173093 号

书 名:海底隧道工程耐久性技术

著 作 者:赵铁军 姜福香

责任编辑:王 霞(wx@ccpress.com.cn)

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:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:12.75

插 页:1

字 数:220千

版 次:2010年9月 第1版

印 次:2010年9月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08658-8

定 价:35.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



海底隧道工程耐久性技术

前言

海底隧道有许多独特的优点,故被公认为跨海峡交通的首选方式。自20世纪30年代起,世界发达国家就不断修建海底隧道。我国海底隧道建设起步较晚,但发展势头很好。随着世界经济的发展和全球交通运输需要的增加,海底隧道必将在世界范围内迎来更大规模的建设高潮。然而,从20世纪70年代起,发达国家的诸多基础设施工程过早破坏问题开始显现,并逐渐引起了国内外相关专家和学者的高度关注。海底隧道工程处在非常严酷的环境中,可以预见,如果不高度重视工程的耐久性,不建立可靠的耐久性保障体系,后果不堪设想。但迄今为止,世界范围内尚无系统阐述有关海底隧道工程耐久性的书籍。

本书是在国家“973”项目“环境友好现代混凝土的基础研究(2009CB623203)”、国家自然科学基金重点项目“海底隧道工程劣化机理与防护技术研究(50739001)”、教育部博士点基金“复合因素作用下海底隧道衬砌混凝土劣化机理与寿命预测研究(20070429001)”和青岛国信实业有限公司(隧道投资方)研究课题“青岛胶州湾隧道混凝土材料与结构耐久性研究及开发(20063702001811)”等的共同资助下研究编撰完成的。全书共分八章:

第一章阐述了海底隧道在当前跨海峡交通中的地位 and 作用,对海底隧道的建设现状和发展前景进行综合分析;针对海底隧道的工程和环境特点,阐明海底隧道耐久性研究的重要意义;并对全书的内容进行了简要介绍。

第二章分别从环境、设计、施工、养护管理及其他偶然因素等方面,分析了可能对海底隧道耐久性造成影响的诸多因素;结合胶州湾海底隧道的服役环境,简要分析了导致隧道耐久性劣化的潜在危险因素。

第三章结合海底隧道的服役环境特点,分析了支护结构对混凝土原材料的要求;从耐久性角度介绍了锚喷支护和管片(管段)支护结构的原材料选择、配合比设计以及施工质量保障措施。

第四章从耐久性角度介绍了二次衬砌混凝土的原材料选择、配合比设计、结构设计参数确定和施工质量保证措施,并讨论了海底隧道二次衬砌混凝土结构的劣化机理及寿命预测理论方法;结合胶州湾海底隧道二次衬砌混凝土结构,进行了系统的分析与计算。

第五章分析了海底隧道防排水系统的重要性及其影响因素;针对钻爆、沉管和盾构施工隧道的特点,从混凝土结构的自防水和外防水技术两个方面分析了海底隧道防排水系统耐久性提升措施及防排水系统设计的原则。

第六章针对海底隧道工程服役期的环境特点,分析了渗透型涂料、成膜型涂料及饰面材料对海底隧道工程耐久性的防护效果;结合青岛胶州湾海底隧道,提出了表面防护处理方案的设计原则。

第七章介绍了结构耐久性监测技术和胶州湾海底隧道工程监测方案。

第八章初步探讨了海底隧道工程运营期的耐久性保障措施。

在本书的编撰过程中,博士研究生万小梅、曹卫群、张鹏、胡春红及硕士研究生王鹏刚等做了大量工作,F. H. Wittmann院士、张新华教授提供了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。同时,对国家科技部、自然科学基金委、教育部及青岛国信实业有限公司等的大力支持表示感谢。

由于作者的水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请同行和广大读者批评指正。

作者

2010年3月于青岛

海底隧道工程耐久性技术

目录

第1章 绪论	1
1.1 海底隧道的地位和作用	1
1.2 国内外海底隧道建设现状及发展前景	2
1.2.1 国外海底隧道建设现状及前景	2
1.2.2 国内海底隧道建设现状及前景	8
1.2.3 青岛胶州湾海底隧道工程简介	12
1.3 海底隧道工程特点及耐久性问题	13
1.3.1 海底隧道工程特点	13
1.3.2 海底隧道工程耐久性现状	14
1.3.3 海底隧道工程耐久性研究进展	17
1.4 本书的主要内容	19
参考文献	20
第2章 海底隧道耐久性影响因素分析	22
2.1 概述	22
2.2 环境因素对海底隧道耐久性的影响	23
2.2.1 工程区域环境类别及环境作用等级划分	24
2.2.2 区域气候条件	27
2.2.3 海水与地下水	30
2.2.4 其他环境因素影响	33
2.2.5 青岛胶州湾海底隧道工程服役环境分析	35
2.3 设计、施工及维修管理对海底隧道耐久性的影响	38
2.3.1 海底隧道施工方法简介	39
2.3.2 支护结构形式及其结构设计参数的选定	43

2.3.3	原材料选择及混凝土配合比设计	44
2.3.4	防排水设计	45
2.3.5	防腐蚀附加措施	46
2.3.6	施工质量管理	46
2.3.7	日常维修与运营管理	47
2.4	偶然因素对海底隧道耐久性的影响	47
2.4.1	火灾	47
2.4.2	地震作用	50
	参考文献	51
第3章	海底隧道初期支护耐久性	55
3.1	海底隧道初期支护形式概述	55
3.1.1	锚喷支护	56
3.1.2	管片(管段)支护	58
3.2	海底隧道支护结构混凝土的原材料	60
3.2.1	水泥	60
3.2.2	细骨料	62
3.2.3	粗骨料	62
3.2.4	拌和用水	63
3.2.5	矿物掺合料	63
3.2.6	外加剂	64
3.3	海底隧道锚喷支护耐久性设计	65
3.3.1	锚喷支护结构设计	65
3.3.2	原材料优选	67
3.3.3	喷射混凝土的收缩	71
3.3.4	喷射混凝土制备要求	73
3.3.5	喷射混凝土配合比优化	75
3.3.6	海底隧道锚喷支护的施工质量控制	75
3.4	海底隧道管片(管段)支护耐久性设计与施工	77
3.4.1	原材料要求	77
3.4.2	制作要求	78
3.4.3	附加防腐蚀措施	79
3.5	青岛胶州湾海底隧道锚喷支护	80
3.5.1	原材料	80
3.5.2	配合比设计	80

3.5.3 注浆超前支护	81
3.5.4 施工质量管理	83
参考文献	84
第4章 海底隧道二次衬砌混凝土耐久性	86
4.1 海底隧道二次衬砌结构概述	86
4.1.1 二次衬砌作用分析	86
4.1.2 二次衬砌结构设计	87
4.1.3 二次衬砌结构参数	87
4.2 海底隧道二次衬砌构造要求及混凝土配合比优化	88
4.2.1 钢筋混凝土衬砌构造要求	88
4.2.2 海底隧道二次衬砌混凝土耐久性研究	89
4.2.3 二次衬砌混凝土配合比设计优化	95
4.3 隧道衬砌混凝土的开裂及防控	99
4.3.1 隧道衬砌裂缝的外观分类	99
4.3.2 隧道衬砌裂缝的成因	100
4.3.3 胶州湾海底隧道混凝土收缩与抗裂性试验研究	101
4.3.4 隧道衬砌裂缝的防控原则	104
4.4 二次衬砌混凝土的施工及质量控制	105
4.4.1 二次衬砌混凝土的施工及质量验收	105
4.4.2 二次衬砌混凝土的施工质量检测	113
4.5 基于氯离子扩散模型的海底隧道二次衬砌混凝土结构耐久性设计	114
4.5.1 失效与锈蚀概率	115
4.5.2 氯离子扩散计算模型	116
4.5.3 模型中的参数及服役寿命预测	118
参考文献	123
第5章 海底隧道防排水系统耐久性	127
5.1 海底隧道防排水系统耐久性的重要性	127
5.2 钻爆法海底隧道防排水系统耐久性	128
5.2.1 防排水方案设计	128
5.2.2 防水系统耐久性保证措施	129
5.2.3 排水系统耐久性保证措施	133
5.3 沉管法海底隧道防水系统耐久性	134
5.3.1 防水设计原则与防水标准	134
5.3.2 防水系统耐久性保证措施	134

5.4 盾构法海底隧道防水系统耐久性	138
5.4.1 防水设计原则	138
5.4.2 防水系统耐久性保证措施	138
参考文献	139
第6章 海底隧道衬砌混凝土表面防护技术	141
6.1 混凝土表面防护材料	141
6.1.1 渗透型防护涂料	141
6.1.2 成膜型防护涂料	142
6.1.3 饰面材料	143
6.2 混凝土表面渗透型涂料防护	143
6.2.1 渗透型涂料的防水效果	143
6.2.2 渗透型涂料对氯离子侵入的抑制作用	145
6.2.3 渗透型涂料对碳化的影响	147
6.2.4 渗透型涂料对混凝土冻融的影响	147
6.2.5 渗透型涂料对钢筋锈蚀的影响	148
6.3 混凝土表面成膜型涂料防护	149
6.3.1 成膜型涂料的防水效果	149
6.3.2 成膜型涂料对氯离子侵入的抑制作用	149
6.3.3 成膜型涂料对碳化的影响	151
6.3.4 成膜型涂料对混凝土冻融的影响	151
6.4 青岛胶州湾海底隧道渗透型涂料防护建议方案	152
参考文献	155
第7章 海底隧道耐久性监测技术	159
7.1 耐久性监测的意义	159
7.1.1 耐久性监测的概念	159
7.1.2 耐久性监测的重要性	160
7.1.3 耐久性监测的发展	160
7.2 海底隧道工程耐久性监测技术	161
7.2.1 耐久性监测技术分类	161
7.2.2 阳极梯耐久性监测技术	165
7.3 青岛胶州湾海底隧道耐久性监测方案	169
参考文献	171
第8章 海底隧道工程运营期耐久性保障措施	174
8.1 海底隧道工程运营期的养护与维修管理	174

8.1.1 海底隧道工程日常养护与管理	174
8.1.2 海底隧道结构物维修管理	175
8.2 海底隧道工程运营期通风系统	178
8.2.1 运营通风对海底隧道耐久性的重要性	178
8.2.2 隧道通风方式	179
8.2.3 海底隧道通风方式选择	180
8.2.4 海底隧道通风节能技术	180
8.3 海底隧道工程运营期防灾保障措施	180
8.3.1 海底隧道防灭火及灾后修复加固措施	180
8.3.2 海底隧道抗震加固与震后修复措施	183
参考文献	186



DURABILITY OF SUBSEA TUNNELS

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Main Tasks of Subsea Tunnels	1
1.2 Overview on Subsea Tunnels in China and Abroad	2
1.2.1 Overview on Subsea Tunnels Abroad	2
1.2.2 Overview on Subsea Tunnels in China	8
1.2.3 Jiaozhou Bay Subsea Tunnel in Qingdao	12
1.3 Characteristics and durability of Subsea Tunnel Engineering	13
1.3.1 Characteristics of Subsea Tunnel Engineering	13
1.3.2 Durability Aspects of Subsea Tunnel Engineering	14
1.3.3 Research on Durability of Subsea tunnels	17
1.4 Main Contents of the Present Monograph	19
References	20
Chapter 2 Factors Affecting Durability of Subsea Tunnels	22
2.1 Brief Introduction	22
2.2 Influence of Environmental Factors on Durability of Subsea Tunnels	23
2.2.1 Regional Environmental Conditions and Classification of Environmental Actions	24
2.2.2 Regional Climatic Conditions	27
2.2.3 Seawater and Groundwater	30
2.2.4 Other Environmental Factors	33
2.2.5 Enviromental Analysis of Qingdao Jiaozhou Bay Subsea Tunnel	35
2.3 Influence of Design, Construction Technology, Maintenance and	

Management on Durability of Subsea Tunnels	38
2.3.1 Brief Introduction on Construction Methods of Subsea Tunnels	39
2.3.2 Different Types of Supporting Structures and Selection of Durability Design Parameters	43
2.3.3 Selection of Raw Materials and Design of Mix Proportion of Concrete	44
2.3.4 Design of Waterproof and Drainage	45
2.3.5 Additional Measures to Prevent Corrosion	46
2.3.6 Quantity Control During Construction	46
2.3.7 Maintenance and Operation Management	47
2.4 Influence of Accidental Factors on durability of Subsea Tunnels	47
2.4.1 Fire	47
2.4.2 Earthquake	50
References	51
Chapter 3 Durability of Initial Support in Subsea Tunnels	55
3.1 Main Types of Initial Support in Subsea Tunnels	55
3.1.1 Bolt and shotcret support	56
3.1.2 Segment Support	58
3.2 Raw Materials of Concrete Used in Subsea Tunnels	60
3.2.1 Cement	60
3.2.2 Fine Aggregate	62
3.2.3 Coarse Aggregate	62
3.2.4 Water	63
3.2.5 Mineral Binders	63
3.2.6 Chemical Admixtures	64
3.3 Durability Design of Bolting and Shotcreting	65
3.3.1 Structural Design of Shotcreting in Subsea Tunnels	65
3.3.2 Requirements for Raw Materials	67
3.3.3 Shrinkage of Shotcrete	71
3.3.4 Production Requirements of Shotcrete	73
3.3.5 Optimization of Mix Proportion of Shotcrete	75
3.3.6 Quality Control of Bolting and Shotcreting in Subsea Tunnels	75
3.4 Durability Design and Construction of Segment Support in Subsea Tunnels ...	77
3.4.1 Requirements for Raw Materials	77
3.4.2 Production Requirements of Segment Support	78

3.4.3	Additional Measures for Corrosion Prevention	79
3.5	Bolting and Shotcreting of Jiaozhou Bay Subsea Tunnel in Qingdao	80
3.5.1	Raw Materials	80
3.5.2	Mix Proportion	80
3.5.3	Grouting	81
3.5.4	Quality Control	83
	References	84
Chapter 4	Durability of Secondary Lining in Subsea Tunnels	86
4.1	Introduction	86
4.1.1	Function of Secondary Lining	86
4.1.2	Principles of Structural Design of Secondary Lining	87
4.1.3	Dimensions of Secondary Lining	87
4.2	Required Performance and Concrete and Optimized Mix Design	88
4.2.1	Required Performance of Secondary Lining	88
4.2.2	Experimental Data on Durability of Concrete	89
4.2.3	Required Composition of Secondary Lining Concrete	95
4.3	Crack Formation and Crack Control	99
4.3.1	Classification on the Crack Pattern of Lining in Tunnels	99
4.3.2	Origin of Crack Formation	100
4.3.3	Shrinkage and Crack Resistance of Lining Concrete for Jiaozhou Bay Subsea Tunnel	101
4.3.4	Crack Control of Lining Concrete in Tunnels	104
4.4	Construction and Quality Control of Secondary Lining Concrete	105
4.4.1	Construction and Quality Acceptance of Secondary Lining Concrete	105
4.4.2	Testing of Secondary Lining Concrete	113
4.5	Durability Design of Secondary Lining in Subsea Tunnels Based on Chloride Diffusion	114
4.5.1	Mathematical Models for Chloride Diffusion	115
4.5.2	Parameters in the Model and Prediction of Service Life	116
4.5.3	Prediction of Probability of Corrosion and Failure	118
	References	123
Chapter 5	Waterproof and Drainage Systems to Improve Durability of Subsea Tunnels	127
5.1	Significance of waterproof and Drainage Systms for Durability of Subsea	

Tunnels	127
5.2 Waterproof and Drainage Systems for Subsea Tunnels Built by Drillblasting Technique	128
5.2.1 Schematic Design of Waterproof and Drainage Systems	128
5.2.2 Measures to Obtain High Durability of Waterproof Systems	129
5.2.3 Measures to Obtain High Durability Immersed subsea Tunnels	133
5.3 Waterproof and Drainage Systems of Waterproof	134
5.3.1 Principles and Standards for Design of Waterproof Systems	134
5.3.2 Measures to Obtain High Durability of Waterproof Systems	134
5.4 Waterproof and Drainage Systems for Subsea Tunnels Built by Shield Technique	138
5.4.1 Principles for Design of Waterproof Systems	138
5.4.2 Necessary Measures to Obtain High Durability of Waterproof Systems	138
References	139
Chapter 6 Surface Protection of Lining Concrete in Subsea Tunnels	141
6.1 Materials for Surface Protection of Concrete	141
6.1.1 Protective Surface Impregnation	141
6.1.2 Film-forming Protective Coatings	142
6.1.3 Surface Decoration	143
6.2 Surface Protection of Concrete by Surface Impregnation	143
6.2.1 Water Absorption by Surface Impregnated Concrete	143
6.2.2 Influence of Surface Impregnation on Chloride Penetration	145
6.2.3 Influence of Surface Impregnation on Carbonation	147
6.2.4 Influence of Surface Impregnation on Frost Resistance	147
6.2.5 Influence of Surface impregnation on Steel Corrosion	148
6.3 Surface Protection of Concrete by Film-forming Coating	149
6.3.1 Water absorption of Film-forming coatings	149
6.3.2 Influence of Film-forming Coatings on Chloride Penetration	149
6.3.3 Influence of Film-forming Coatings on Carbonation	151
6.3.4 Influence of Film-forming Coatings on Frost Resistance	151
6.4 Proposal for Surface Protection of Concrete by Surface Impregnation at Jiaozhou Bay Subsea Tunnel	152
References	155

Chapter 7 Durability Monitoring of Subsea Tunnels	159
7.1 Significance of Durability Monitoring	159
7.1.1 Definition of Durability Monitoring	159
7.1.2 Importance of Durability Monitoring	160
7.1.3 Development of Durability Monitoring	160
7.2 Monitoring Technology for Durability of Subsea Tunnels	161
7.2.1 Classification of Monitoring Technology	161
7.2.2 Anode-ladder System for Durability Monitoring	165
7.3 Durability Monitoring at Qingdao Jiaozhou Bay Subsea Tunnel	169
References	171
Chapter 8 Guarantee Measures for the Durability of Subsea Tunnels in Services	174
8.1 Maintenance and Repair Management of Subsea Tunnels in Operation	174
8.1.1 Maintenance and Management of Subsea Tunnels	174
8.1.2 Repair Management of Subsea Tunnels	175
8.2 Ventilation System of Subsea Tunnels in Services	178
8.2.1 Significance of Ventilation for Subsea Tunnels	178
8.2.2 Different Types of Ventilation of Tunnels	179
8.2.3 Selection of a Type of Ventilation for Subsea Tunnels	180
8.2.4 Energy Saving Ventilation Technology for Subsea Tunnels	180
8.3 Measures for Disaster Prevention of Subsea Tunnels in Services	180
8.3.1 Measures for Fire Prevention, Extinguishing, and Post-Fire Rehabilitation ...	180
8.3.2 Measures for Seismic Strengthening and Rehabilitation	183
References	186



第1章 绪 论

海底隧道能使海峡间交通运输更加便捷,故被公认为跨海峡交通的首选方式。迄今为止,世界范围内已建成的海底隧道超过百座。还有一些大规模的海底隧道工程正在规划拟建中。当前,发达国家的诸多基础设施工程(包括海底隧道)已暴露出过早破坏的问题,工程结构服役寿命的过早衰减和失效已逐渐成为世界性的难题。海底隧道工程服役环境非常恶劣,如何保证海底隧道的百年服役寿命,应引起工程建设各方面的高度重视。

1.1 海底隧道的地位和作用

跨越海峡的方式主要有三种:轮渡、跨海大桥和海底隧道。轮渡受气象条件的影响较大,并且不能直接连通,交通运输量小,等候时间长,致使人员物资转运十分麻烦。跨越海峡的方式越来越多地在修建海底隧道与跨海大桥之间做出选择。选择桥梁还是隧道,主要应依据航运、水文地质及工程地质、生态环境以及工程成本等具体建设条件,经过全面的比较、论证而定^[1-5]。修建桥梁往往受跨度、水深的影响,且建成运营后还要受气象条件的影响。修建隧道最大的优点是直达、快捷、通过量大,无需中途装卸;在运营后既很少受台风、浓雾等气象条件的影响,具有稳定的运行能力,又不干扰海面通航;同时还具有较强的抗震能力,而且有利于战备安全,维修费用低,还可以做到一隧多用,长期效益显著。

海底隧道是在海底建造的连接海峡两岸,供人员及车辆通行的海工建筑物。一般来说,海底隧道分为海域段、陆域段和引道三部分。其中海域段是主要部分,两端与陆域段连接,再经过引道与地面线路接通。所以,海底隧道是陆地交通的组成部分,是“生命线”工程,对改变海峡间的运输性质有巨大的作用。

随着我国国民经济和交通运输事业的发展,建立四通八达的现代交通网络,对于进一步发展国民经济,促进文化交流,具有非常重要的意义。同时,随着世界经济的发展和交通运输的需要,从先进国家的国内交通运输网络发展到组成各洲际、各国间的主要联络线,必然存在跨越海峡的问题,海底隧道建设因此会受到越来越多的重视。

1.2 国内外海底隧道建设现状及发展前景

世界上最早的水下隧道是 1825~1843 年间施工的英国泰晤士河底隧道。后来,水下隧道“伸向”海底,长度也越挖越长。海底隧道以其诸多的优点,已被公认是跨海峡交通的首选方式^[6-8],兴建跨海隧道是世界各国海底交通发展的一种必然趋势,其建设量日益增加。有些国家为了满足海轮进内河和战备的需要,甚至在法律上明文规定跨海不准修建桥梁而只能建隧道。

1.2.1 国外海底隧道建设现状及前景

世界发达国家自 20 世纪 30 年代起就开始修建海底隧道。迄今有海底隧道的国家主要包括日本、英国、法国、美国、挪威、澳大利亚、丹麦、冰岛等^[5,8-10]。据不完全统计,国外近百年来已建成的跨海和海峡交通隧道超过百座。

日本是较早修建海底隧道的国家。20 世纪 40 年代,日本在关门海峡用盾构法修建了世界上最早的海峡隧道,全长 19.3km。之后又在关门海峡修建了两条海底隧道。1988 年日本在津轻海峡建成了迄今为止世界上最长的海峡隧道——青函海底隧道。青函海底隧道是一条单洞双线铁路隧道(主隧道直径 11m,高 9m),它实现了本州与北海道之间的铁路运输(图 1-1,图 1-2)。隧道全长为 53.85km,其中海底部分 23.3km,最大水深为 140m,海底埋深为 100m,其余为陆地部分。采用矿山法施工。青函海底隧道 1964 年开挖斜坑道,经过 24 年的施工,于 1988 年 3 月 13 日正式投入运营。工程总造价 100 亿美元。此外,于 1997 年 12 月通车的日本东京湾越湾公路隧道,全长 15.1km,海底部分 9.1km,历时 8 年修建,被称为 20 世纪日本的最后一项“超级工程”。

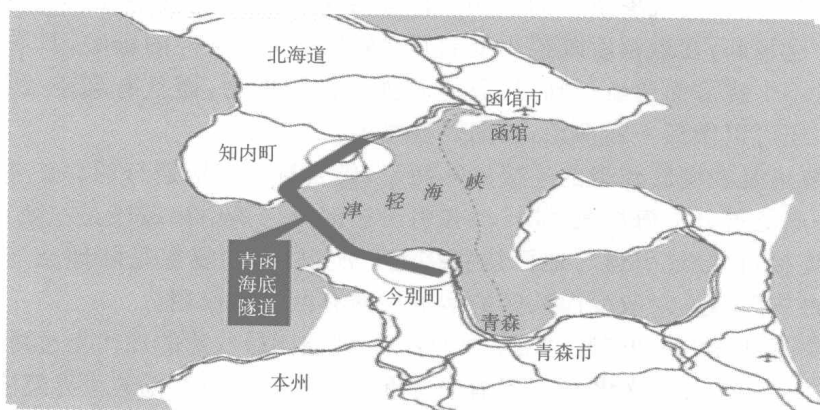


图 1-1 青函海底隧道地理位置