

厦门翔安
海底隧道施工
关键技术

XIAMEN XIANG'AN
HAIDI SUIDAO SHIGONG GUANJIAN JISHU

林作雷 著



人民交通出版社
China Communications Press

Xiamen Xiang'an Haidi Suidao Shigong
厦门翔安海底隧道施工

关键技术

Guanjian Jishu

林作雷 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书辅以大量、翔实、科学、适用的数据和图片,较系统地梳理、总结、阐述了厦门翔安海底隧道施工关键技术。主要介绍了长距离浅埋大跨软弱富水围岩CRD和双侧壁两种施工工法以及防腐蚀混凝土、海底风化深槽、透水砂层、通风竖井、质量控制、施工风险等内容。

本书所述相关技术全面体现了由我国自主设计、施工、监理、监督的第一座钻爆法海底隧道工程建设的水平,对我国海(水)底隧道工程建设的技术进步和发展具有借鉴意义,可供从事隧道及地下工程的建设、设计、施工、监理、科研、检测、监督等技术人员以及高等院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

厦门翔安海底隧道施工关键技术 / 林作雷著. —北京: 人民交通出版社, 2011.6
ISBN 978-7-114-08961-9

I. ①厦… II. ①林… III. ①水下隧道—隧道工程—施工技术—厦门市 IV. ①U459.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第042289号

书 名: 厦门翔安海底隧道施工关键技术
著 作 者: 林作雷
责任编辑: 沈鸿雁 丁润铎 李 喆
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: 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: 880 x 1230 1/16
印 张: 29.5
字 数: 810 千
版 次: 2011 年 6 月第 1 版
印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08961-9
定 价: 150.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

作者简介



林作雷，生于1954年3月22日，福建省霞浦县人，1972年12月入伍中国人民解放军铁道兵，1979年6月毕业于中国人民解放军石家庄铁道兵工程学院，教授级高级工程师，华侨大学兼职教授，福建省交通建设质量安全监督局总工程师，从事铁路、公路桥隧工程的施工、设计、监理、监督等技术工作38年。著有厦门翔安海底公路隧道《施工关键技术要点》及《长距浅埋大跨不良地质CRD工法施工技术》、《超浅埋大断面长距离富水

软弱围岩双侧壁工法施工技术》等技术丛书共计70万字，主编《公路水运质量监督管理技术丛书》共计70万字。主持的《海底隧道长距离浅埋大跨软弱富水围岩CRD工法施工技术研究》课题，荣获2009年度福建省人民政府科学技术奖二等奖；主持的《海底隧道超浅埋大断面富水全~强风化岩新双侧壁工法施工技术研究》课题，荣获2010年福建省人民政府科学技术奖三等奖；主持编写制订我国第一部地方标准《海（水）底隧道工程质量检验评定标准》，并于2011年2月20日实行。

Sequence

厦门翔安海底隧道是我国第一座埋深较浅、采用钻爆法设计施工的超大断面双向六车道公路隧道。隧道两端穿越全风化软弱围岩、富水砂层，海域段隧道在花岗岩、风化深槽等地层中穿过。该海底隧道是一座风险极高、工程规模和工程技术难度极大的世界级示范工程。安全、优质、快速、经济地建成百年寿命工程是每个参战者的责任。

作者林作雷，教授级高工，系福建省交通建设质量安全监督局总工程师，厦门翔安海底隧道质量安全监督组组长。他求真务实、踏实工作，与隧道参建者携手并肩奋战1500多个日日夜夜，用虚心、协作的精神和施工单位共同研讨，实现了整个施工过程无伤亡事故发生的重大建设成果。作者以一个参战者的身份和各施工建设方、设计方、监理方进行安全、质量、技术、工艺的交流，边施工、边研究、边总结、边改进，这种工作方法是值得大力推崇的。作者以一个参战者的心态进行该书的写作是很真实的，其推广、应用价值是无可非议的。他用了近六年的时间，从工程实践、分析、总结到理论提高，完成写作的过程，符合工程哲学的思想，符合工程认识论的规律。带着对工程的责任感，客观而科学地将建设过程的宝贵财富聚集起来，形成一本可以启迪思路的宝贵专著。

作者亲自参与了该工程每个阶段工程难点的讨论，每个工点风险化解的论证。全书共9章48节，如实写出了现场各种施工方法的确定原则和应用演变过程；重点对各种辅助工法的应用条件、参数确定、施工要点进行了较详细地分析；对海水中钢筋混凝土、素混凝土抗氯离子机理进行了分析，提出了应用工艺对策；对施工安全风险控制方法和管理技术等进行了详细论述。

本书以珍贵翔实的资料、数据、照片为素材，进行系统梳理，形成了专著。这本书的出版，对指导我国今后的隧道工程，尤其是海底隧道的设计、施工、科研，都具有很高的指导价值和应用价值。在我国工程建设界，本书将是一本闪亮的重要专著。

中国工程院院士



2011年1月

厦门翔安海底隧道是我国自主设计、施工、监理、监督的第一座海底隧道，是我国第一座钻爆法长距离大断面海底公路隧道，也是世界上第一座暗挖法双向六车道海底公路隧道。该工程于2005年9月开工，2009年6月隧道右洞顺利贯通，同年11月左洞顺利贯通。2010年4月26日，厦门翔安海底隧道顺利建成通车，这一天将载入我国海底隧道建设史册。

值得自豪和难忘的是，在施工期间党和国家领导人先后莅临视察厦门翔安海底隧道：2010年春节期间，中共中央总书记、中央军委主席胡锦涛同志莅临视察；中共中央政治局常委、全国政协主席贾庆林同志分别于2006年、2008年两次莅临视察；中共中央政治局常委、中纪委书记贺国强同志于2009年3月莅临视察；中共中央政治局委员，中组部部长李源潮同志于2009年2月莅临视察；交通运输部部长李盛霖同志分别于2006年、2009年两次莅临检查指导工作。

厦门翔安海底隧道设计为左右主行车隧道和两主洞间服务隧道，隧道单洞长6 050m，其中陆域两端长约1 850m，海域段长4 200m，隧道开挖最大断面 170m^2 ，最大跨度17.2m。海底隧道工程地质水文条件极为复杂，集中体现在“三难”、“三险”。“一难”：左右洞主行车道V级围岩占56%以上，总长度约6 500m；“二难”：翔安端左右洞1 510m为砂层、淤泥且含高岭土（膨胀性）、超浅埋、浅埋；“三难”：厦门端左右洞1 180m为杂填土、黏质砂土、土石交界层、富水全~强风化花岗岩、超浅埋、浅埋，并穿过环岛路、桥梁、民房。“一险”：4 200m海域6条风化深槽（囊）总长1 089m，直接与海水相连通，头顶汪洋大海，存在坍塌、冒顶、涌沙、涌水、突泥、突水等安全风险；“二险”：翔安端450m透水砂层侵入隧道轮廓线内，且直接与海水相连通，存在坍塌、涌沙、涌水等安全风险；“三险”：翔安洞口高程在海平面以下1.5m，陆域两端地下水位高、地下水丰富，土石交界层受海水垂直补给与海水连通，整个隧道在地下水和海水渗透的包围之中。以上“三难”、“三险”成为隧道施工的拦路虎，是海底隧道施工成败的关键。

为确保中国第一座钻爆法施工的大断面特长海底公路隧道的工程质量和安全，作者针对上述“三难”、“三险”，主持开展了“海底隧道长距离浅埋大跨软弱富水围岩CRD工法施工技术研究”、“海底隧道超浅埋大跨软弱富水全~强风化围岩新双侧壁工法施工技术研究”、“海底隧道混凝土二衬施工技术研究”和“海（水）底隧道工程质量检验评定标准（地方性标准）技术研究”（我国第一部相关标准）等课题研究。通过理论研究和施工实践，以及经过全体参建者的辛勤劳动，有效地战胜了各种风险，施工过程未发生塌方、冒顶、涌沙、涌水、突泥、突水等工程质量安全事故，连续安全生产1 500d，实

现零死亡事故目标，展示了福建省交通建设技术管理的风采，创造了修建海底隧道的世界奇迹，受到了交通运输部和国家安全监管总局的联合全国通报表彰。为未来我国建设类似工程提供了强有力的技术支撑和工程范例！

在我国第一座钻爆法长距离双向六车道海底公路隧道——厦门翔安海底隧道工程建设期间，作者有幸和中国隧道与地下工程界的著名大师王梦恕先生和孙钧先生结下友谊，大师们的科学精神、治学风范、大家风度、朴实谦逊和“物我两忘，荣辱不惊”的座右铭深深“熔”入我的心灵，让我一生受益！在厦门翔安海底隧道工程建成通车后，怀着对海底隧道的深切感情，怀着对并肩奋战 1 500 多天同仁及好友的深情厚谊，作者历时一年辛勤耕作，辅以大量、翔实、科学、适用的数据和图片，较系统地梳理、总结、阐述了厦门翔安海底隧道施工关键技术。

全书共 9 章 48 节，主要介绍了长距浅埋大跨软弱富水围岩 CRD 和双侧壁两种施工工法以及防腐蚀混凝土、海底风化深槽、通风竖井、质量控制、施工风险等内容。第一章论述了厦门翔安海底隧道工程概况、极为复杂的工程地质与水文地质，指出工程施工特点与难点；第二章从理论分析入手，对防海水衬砌混凝土防腐蚀、氯离子扩散性能试验、配合比试验技术及防海水衬砌混凝土施工质量控制等内容进行阐述；第三章提出了 CRD 工法优化技术，系统论述了复杂地质水文条件超前支护、施工技术和辅助施工方法、超浅埋洞口施工技术、设备选型配备技术及 CRD 工法科研成果；第四章针对各种不良地质条件，创新并总结了施工技术参数、超前支护体系、初期支护体系、特殊地层支护技术和施工步序步长、施工组织管理以及双侧壁工法科研成果及其在福建省高速公路三、四车道推广应用技术；第五章阐述了海底隧道 6 条总长 1 089m 风化深槽（囊）洞身开挖和辅助施工技术，并以成熟的施工技术案例和成功的施工经验介绍给广大读者；第六章较系统地阐述了地下连续墙、砂层降排水、砂层加固、高压旋喷等施工技术。第七章介绍了我国目前隧道与地下工程地质水文条件最为复杂、施工技术难度最大且最具特色的第一座通风竖井工程，其成功的施工技术和施工工法为我国在同类条件下设计施工提供可靠技术支持；第八章创新地提出洞身开挖、超前支护体系、初期支护等质量控制技术标准，是对我国现行的《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1—2004）的补充；第九章施工安全风险评估与管理技术，针对近年来隧道与地下工程施工安全风险和厦门翔安海底隧道工程特殊性、复杂性、艰巨性、技术性等特点，从施工安全风险评估、两种施工工法安全稳定性评估、洞身开挖松动圈安全性评估、施工风险应急管理和施工安全风险辅助管理技术等九个方面进行全面分析总结。

本书是作者对我国第一座钻爆法长距离双向六车道海底公路隧道——厦门翔安海底隧道工程实践经验和体会的粗浅总结，也是作者从事铁路、公路隧道工程技术工作 38 年的回顾。

由于作者水平所限，书中错误难免，恳请专家、同仁和广大读者批评指正！

林作雷

2011 年 1 月

目录

Contents

第一章 厦门翔安海底隧道工程概论	001
第一节 工程概况	002
第二节 工程地质与水文地质	007
第三节 工程施工特点与难点	017
第二章 防海水衬砌混凝土施工技术	019
第一节 防海水衬砌混凝土腐蚀分析技术	020
第二节 防海水衬砌混凝土氯离子扩散性能试验	026
第三节 防海水衬砌混凝土配合比技术	036
第四节 防海水衬砌混凝土施工质量控制技术	045
第五节 防排水施工技术	052
第三章 CRD 工法施工技术	061
第一节 CRD 工法设计方案及优化技术方案	062
第二节 超前支护施工技术	081
第三节 洞内真空降水施工技术	088
第四节 支护辅助施工技术	092
第五节 土石交界层施工技术	095
第六节 临时拱架支护结构拆除技术	100
第七节 CRD 工法设备选型配套技术	103
第八节 CRD 洞口段施工技术	108
第九节 CRD 工法科技成果	127
第四章 双侧壁工法施工技术	139
第一节 双侧壁施工技术参数	140
第二节 超前支护施工技术	151
第三节 初期支护体系施工技术	166
第四节 步序步长施工技术	172
第五节 洞身开挖降排水施工技术	174
第六节 特殊地层加固支护施工技术	179
第七节 双侧壁工法施工组织管理技术	192
第八节 双侧壁工法研究成果	197

第九节 双侧壁工法应用技术	205
第五章 海底风化深槽（囊）施工技术	239
第一节 风化深槽（囊）辅助施工技术	240
第二节 风化深槽（囊）开挖支护施工技术	262
第三节 风化深槽施工案例	272
第六章 浅滩浅埋透水砂层施工技术	307
第一节 工程水文地质条件	308
第二节 地下连续墙施工技术	309
第三节 降排水和加固砂层施工技术	315
第四节 高压旋喷施工技术	324
第七章 通风竖井施工技术	329
第一节 翔安端通风竖井施工技术	330
第二节 厦门端通风竖井施工技术	355
第八章 施工质量控制技术	369
第一节 洞身开挖质量控制技术	370
第二节 超前支护体系质量控制技术	376
第三节 初期支护质量控制技术	379
第四节 二次衬砌混凝土质量控制技术	385
第五节 防排水及管沟质量控制技术	389
第九章 施工安全风险评估与管理技术	395
第一节 不良地质施工安全风险源评估技术	396
第二节 双侧壁与 CRD 工法安全稳定性评估技术	399
第三节 双侧壁工法松动圈围岩施工安全稳定性评估技术	409
第四节 施工安全风险组织管理技术	419
第五节 施工安全风险应急管理技术	430
第六节 施工安全监控量测技术	439
第七节 超前地质预报技术	447
第八节 洞口安全环保管理技术	450
参考文献	461
致谢	462



第一章

厦门翔安海底隧道工程概论

第一节 工程概况

一、海底隧道地理位置

厦门翔安海底隧道是厦门市本岛第五条进出岛的公路通道，位于厦门岛东部五缘湾附近，与对岸厦门市翔安区连通，并通过翔安区与沈海高速公路福建境内泉州至厦门段连通。

厦门岛北侧出岛通过厦门大桥、集美大桥、杏林大桥，西侧出岛通过海沧大桥，东部出岛通过翔安海底隧道，南侧出岛通过正在建设的厦漳大桥。厦门翔安海底隧道的地理位置见图 1-1。



图 1-1 厦门翔安海底隧道的地理位置

二、工程平纵横布置

1. 路线方案

(1) 路线起终点

根据厦门市城市总体规划，厦门翔安隧道起点接仙岳路，终点接翔安大道。在初步设计阶段，厦门市已对仙岳路进行了拓宽改造，仙岳路与东通道起点的衔接位置距离隧道洞口仅为 0.631km。翔安大道作为翔安区的第一条东西向城市主干道，道路等级较高，已修建至林前村附近，距离翔安岸隧道洞口 2.119km。该路段设置互通立交和收费站各 1 处。

(2) 主要地质灾害

根据翔安隧道地质资料显示，在翔安隧道确定的路线走廊带内，海域段南北向有 F1、F2、F3 断裂带风化深槽和 F4 风化囊与之交叉，路线无法避开，该段主要地质表现在隧道洞身穿越断裂带风化槽。

2. 平面线位设计与优化

1) 平面线位主要控制点

平面线位主要控制点见图 1-2。

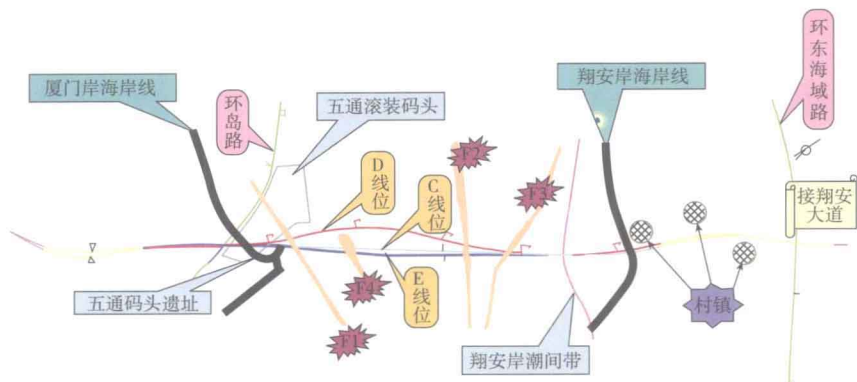


图 1-2 平面线位主要控制点

2) 平面线位比选及优化

初步设计阶段根据最新的海底基岩等深线图,结合海底 F1、F2、F3 断裂带风化深槽和 F4 号风化囊地质研究专题,本着经济合理的原则,对原工可 C 线位提出了两种优化处理方案,平面线位比选见图 1-3。

(1) E 线方案:主要是将穿越 F4 风化囊处路线局部偏移,对 C 线位的主要地质问题——F4 风化囊以穿越处理为主,基本避开了 F1 断裂带风化深槽。

(2) D 线方案:主要是采用 S 形曲线对 F4 风化囊进行绕避。该方案利用了工可 B 线位的初勘成果,路线穿越 F4 风化囊的地质条件有一定改善,但是路线穿越 F1 断裂带风化深槽的问题也较为突出。

根据路线所穿地质分析, D 线方案避开了 F4 风化囊,但左右线都从 F1 风化槽通过; E 线方案避开 F1 风化槽,但左线穿越了 F4 风化囊。由于 D 线、E 线方案在海底不良地质情况的宽度和深度相差并不明显,而 D 线方案为绕行方案,以曲线为主,线形指标相对较差,隧道长度要增加 50m 以上,因此,初步设计阶段推荐 E 线方案,并以 D 线方案作为比较方案。

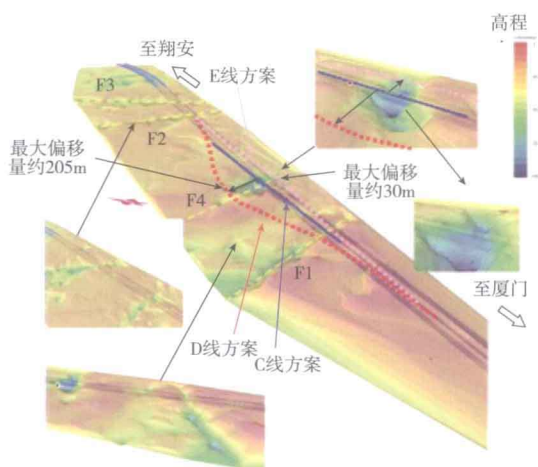


图 1-3 平面线位比选

3) 平面线位设计

施工图设计阶段结合详勘地质报告,对初步设计推荐方案(E线)进行了再优化,具体路线走向如下:路线在厦门岛高林村南侧,从城市快速主干道仙岳路 K4+751 起,经高林农场、店里村北,沿下边村南侧与环岛路相交,穿五通码头以 S 形曲线跨海,跨海经下店村南、肖厝村北与规划的海湾大道、窗东路相交,最后在林前村南侧接翔安大道。其中隧道进口左线、右线、服务隧道分别采用左偏圆曲线($R_1=2\,800\text{m}$ 、 $R_2=5\,000\text{m}$ 、 $R_3=3\,600\text{m}$)进洞,再以直线—右偏圆曲线($R_1=7\,060\text{m}$ 、 $R_2=7\,000\text{m}$ 、 $R_3=7\,030\text{m}$)—左偏圆曲线($R_1=5\,000\text{m}$ 、 $R_2=5\,052\text{m}$ 、 $R_3=5\,026\text{m}$)线形方式绕避 F1 风化深槽和 F4 风化囊后,以直线穿越海底 F2、F3 断裂带,最后以直线出隧道。以左线计路线全长 8.695km,路线增长系数为 1.006,平均每公里转角数为 0.805,平曲线最小半径为 998m,直线最大长度为 1 962.491m(隧道),平曲线占路线总长的 68.79%。

3. 纵面线位设计与优化

1) 隧道最低点设计高程的确定

海底隧道最低点设计高程的确定主要受隧道穿越海域岩层的最小岩石覆盖厚度的影响。最小岩石覆盖厚度也是影响海底隧道造价和安全的最重要的设计参数之一。最小岩石覆盖厚度越小,海底隧道就越短,静水压力就越低,作用在衬砌上的势能荷载也就越小。另一方面,覆盖层越厚,在海底和隧道之间的渗流通道就越长,就会降低流向隧道的渗水量。所有确定最小岩石覆盖层厚度的方法,都是建立在详细的地质调查资料基础上的,然而海底地质勘察工作的开展远比陆地上困难得多,地质资料中的误差和不确定因素会造成许多意外。从这个意义上讲,事先很难确定一个绝对安全的最小岩石覆盖厚度,但也应该认识到最小岩石覆盖厚度并没有技术上的限制,即不会因为最小岩石覆盖厚度的问题,在技术上使海底隧道无法修建,无非是采用较先进的开挖技术和投入较高的费用。当然在可能条件下,应将隧道设置在岩层中,并且要求洞顶具备一定较为完整的岩体保护层厚度。

选择最小岩石覆盖厚度通常采用以下两种途径和方法:工程类比分析和围岩稳定分析(数值分析)。以钻爆法设计和修建的海峡铁路、公路隧道主要集中在日本和挪威。日本的关门海底隧道和青函海底隧道,为世界海峡海底隧道修建历史上的里程碑。关门隧道海底长 1.14km,覆盖层平均厚度约 11m;青函隧道海底长 23km,覆盖层平均厚度约 100m,为两极端情况。挪威是世界上采用钻爆法修建海底隧道最多的国家,工程经验丰富,特别是在海底隧道最小覆盖厚度的问题上曾经作了专门研究,其海底隧道的覆盖层厚度基本为 30m 左右。这些对于翔安隧道设计有很好的借鉴作用。

根据地质勘察报告,翔安隧道洞身穿越区域的岩层为弱风化~微风化花岗岩,参照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)有关围岩分类的标准,其围岩级别可达Ⅱ~Ⅲ级。对于拟建的三车道隧道,毛洞跨度将达到 15m,如果按照最不利的施工方法考虑,即矿山法施工,其洞周扰动层厚度小于 4.0m。本隧道推荐采用新奥法施工,要求光面爆破,及时支护,考虑以上有利施工因素,可以大大减少对围岩的扰动破坏,根据“暗挖隧道方案最小安全顶板厚度研究”(中科院武汉力学研究所),隧道洞顶岩层顶板厚度初步确定如下:海域地段洞顶岩层厚度大于 15m,潮间带洞顶岩层厚度大于 10m。据此确定厦门翔安隧道最低点设计高程为 -69.5m。

2) 隧道最大纵坡的确定

本项目海域段南北向有 F1、F2、F3 断裂带风化深槽和 F4 风化囊,同时在靠近翔安的滩头地段还存在一处与海水连通的透水砂层,平面布设无法避免,不同纵坡的选定对施工风险及工程造价影响较大。在初步设计阶段,设计单位从减少工程造价、降低施工风险的角度做了大量的纵坡优化工作,对隧道最大纵坡分别采用 3%、3.5%、4.0% 几种情况进行了综合比选,最后形成以下结论。

(1) 考虑到本项目定位为高等级公路,设计车速为 80km/h,3% 及 3% 以上纵坡的最大坡长有限制。在不过大增加隧道长度的情况下,通过不同坡度坡长的组合分析,本项目采用 3.5% 或 4.0% 的最大纵坡对工程地质环境改善不是很明显;相反,采用 3.5% 或 4.0% 的纵坡,需在隧道内频繁变换纵坡,对行车舒适性有一定的影响。

(2) 由于在特定纵坡上坡路段中,大型车的车辆换算系数较大,导致当量交通量增大,使该路段成为基本路段上运行质量较差甚至最差的部分。考虑到本项目大型车较多,在初步设计阶段对路线纵面拟订了三个方案:方案一特定纵坡路段坡度(坡长)为 3%(1 050m),方案二特定纵坡路段坡度(坡长)为 3.5%(1 050m),方案三特定纵坡路段坡度(坡长)为 4.0%(900m)。通过对特定纵坡路段大、中型车的车辆换算系数 E_{HV} 进行计算,结果表明:相对于 3.0% 纵坡,采用 3.5% 纵坡,通行能力降低 6%~8%;采用 4.0% 纵坡,通行能力降低 11%~15%。

(3) 根据运行速度理论,对于特定坡长的载货汽车上坡地段行驶速度的降低值进行验算,结果表明:最大纵坡为 3% 时,载货汽车的行驶速度在洞口已接近路段容许最低车速;采用最大纵坡为 3.5%

时,载货汽车的行驶速度在洞口将降低 5% 左右;采用最大纵坡为 4.0% 时,载货汽车的行驶速度在洞口将降低 11% 左右。

考虑到本项目不可能设置爬坡车道(工程费用增加),因此隧道内行驶速度的降低直接影响隧道的服务水平和通行能力。同时,根据规范,本项目厦门岸右线连续下坡段,平曲线半径 $R=2\ 600\text{m}$,若纵坡采用 3.5% 或 4%,应对平曲线超高予以加强,以保证行车安全,势必增加工程费用。

(4) 根据经验,当交通流以汽油车为主即以稀释 CO 浓度控制风量时,纵坡可适当加大;当以柴油车为主即以稀释烟雾浓度或 NO_x 控制风量时,则应尽可能降低纵坡(隧道内车速过低, NO_x 排放量会增加)。

计算分析表明,本项目各个时期以稀释烟尘所需风量为主要控制指标。初步估算:采用最大纵坡 3.5%、4% 时,左线需风量分别增加 2%、5% 左右,但是各段需风量变得不均衡,上下段需风量比约为 56 : 44;右线需风量与最大纵坡 3.0% 时基本相当,其中上坡段增加 5%,下坡段减小 10%。

因此,通过上述分析后综合权衡,厦门翔安隧道最大控制纵坡采用 3.0%。

3) 纵面线位设计与优化

初步设计阶段,根据上述确定的海底隧道最大埋深和隧道最大纵坡,结合地质报告,以 3.0% 为最大控制纵坡,将厦门岸洞口定在五通村附近,在厦门岸采用了 -2.86% 的长坡段后接 -2.479% 的下坡到达海域深处,海域段采用了 0.632% 的上坡,在翔安岸采用了 3%-2.5%-3% 的组合坡度,隧道长 6.05km。

在施工设计阶段,从改善 YK11+300 处通风竖井的地质条件出发,对隧道纵坡进行了优化,将 3%-2.5%-3% 的组合坡度,优化为 2.92% 的长坡段(左线隧道优化为 2.9%、服务隧道优化为 2.91%),平纵配合更为合理,行车较为顺畅。

以左线计,路线全长 8.695km,平均每公里纵坡变更次数为 0.88,最大纵坡为 2.9%,最短坡长 450m,最小凸形竖曲线半径为 18 000m,最小凹形竖曲线半径为 12 000m,竖曲线占路线总长 39.76%。

4. 横断面布置

1) 设置服务隧道的理由

翔安隧道为双向六车道海底隧道,设计车速为 80km/h,其设计断面宽度之大为世界罕见,设计施工难度大且经验欠缺。结合工程需要,本工程设置了服务隧道,具有以下几点好处。

(1) 服务隧道作为紧急避难通道,在隧道运营期间突发灾害时供人员避难、逃生和救援;同时,作为检修通道,便于隧道管理人员的用于日常维护。

(2) 利用服务隧道掘进可有效地超前探明地质情况,取得对局部不良地质地段处理的方法和工艺,保证主洞的掘进安全和速度。

(3) 利用服务隧道,通过设置的行车横洞,可为主隧道开辟多个工作面;同时,对于局部不良地质地段,可借助服务隧道先行处理,不影响其余地段的施工。

(4) 服务隧道设置后可利用其作为检修通道,其上下空间又可作为管线通道,因此,行车主隧道断面可适当缩小。

(5) 根据厦门市城市供水用电规划,厦门翔安海底隧道将作为连通厦门岛与东侧大陆岸的过海通道,利用服务隧道还可方便布设自来水管和电力管线,解决岛内的电力缺口和岛外的用水需要。

2) 三孔隧道断面的设置间距

厦门翔安隧道采用三孔建设形式修建,两侧为行车主隧道,中间一孔为服务隧道。两相邻隧道最小净距应视围岩类别、断面尺寸、施工方法、爆破振动影响等因素确定,在初步设计阶段,设计人员运用有限元,以弹塑性法分析了不同净间距下岩体屈服应力分布情况,认为净间距大于 22m 时,两隧道之间相互影响很小。因此,从减少占地,节省造价的角度出发,将厦门翔安隧道海域段主洞左

右线的测设线间距调整为 52m，中间设置服务隧道。

根据隧道功能、远近期通风、养护维修及运营管理等要求，推荐采用设置服务隧道的三孔隧道方案，布置形式见图 1-4~ 图 1-7。



图 1-4 隧道平面图

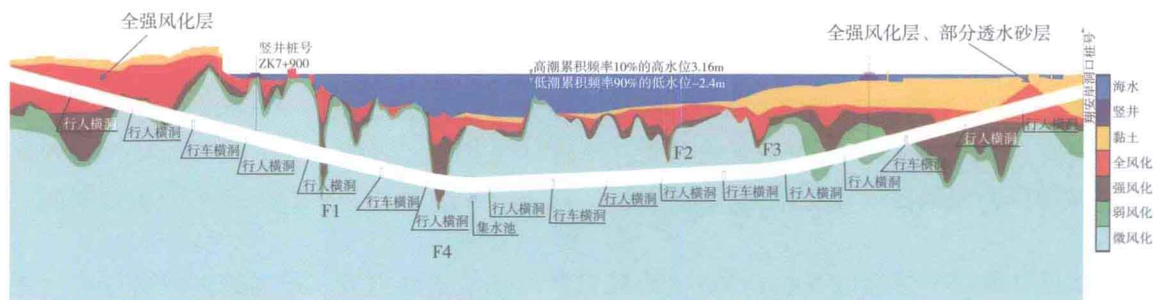


图 1-5 隧道纵剖面图

F1、F2、F3- 全强风化深槽；F4- 全强风化深囊

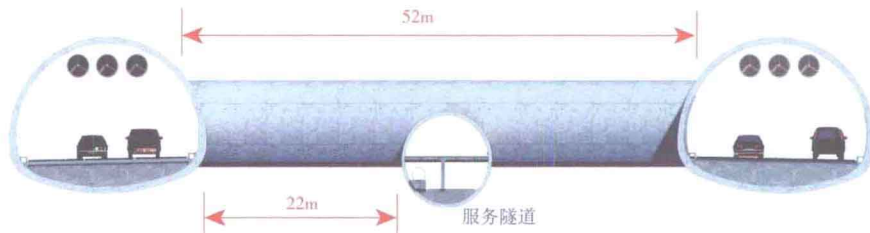


图 1-6 隧道横剖面图

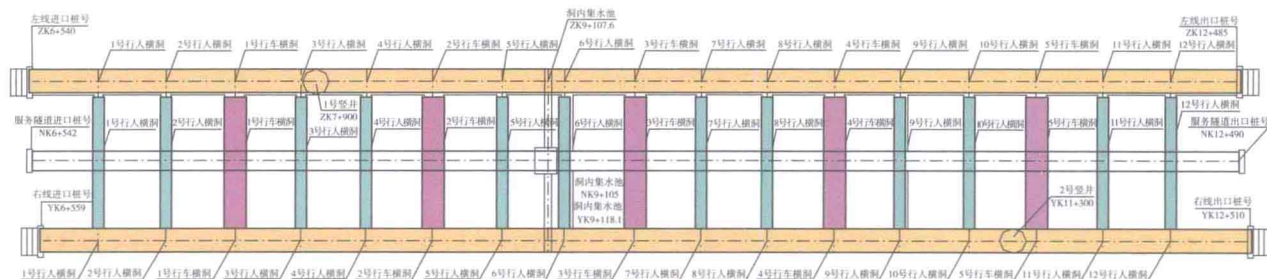


图 1-7 人行横通道和车行横通道平面位置示意图

5. 主要工程数量

厦门翔安海底隧道工程全长 8.695km，工程概算 31.97 亿元。左线隧道长 6.045km，中间服务隧道长 6.048km，右线隧道长 6.051km，通风竖井 2 座。五通左线路基长 0.631km、右线路基长 0.628km，互通匝道长 2.125km、辅道长 0.778km，人行道长 3.484km；翔安左线路基长 0.755km、右线路基长 0.745km，另有西滨互通立交桥 1 座。海底隧道跨越海域宽约 4.2km，设计采用中间设置服务隧道的三孔隧道方案，按双向六车道高等级公路标准建设。隧道最深处位于海平面下约 70m，最大纵坡 3%。隧

道施工以钻爆法为主,在不良地质段采用浅埋暗挖法、CRD 法、双侧壁导坑法等施工工法。

三、桥隧方案比选

厦门岛东通道早期曾开展桥梁(钢拱桥见图 1-8、斜拉桥见图 1-9、悬索桥见图 1-10)和隧道两种方案(沉管法、TBM 法、钻爆法)的比选研究工作,经多次论证最后确定采用钻爆法隧道方案,主要考虑如下。



图 1-8 钢拱桥方案示意



图 1-9 斜拉桥方案示意

(1) 隧道所通过的海域为白海豚保护区,如果建桥将会对白海豚产生影响,使海域环境受到破坏,修建隧道不会影响白海豚的生存,不会破坏海域环境。

(2) 修桥要考虑港口和通航的要求,桥址西侧海域为厦门机场,东侧海域为港湾及旅游区,修建隧道不影响机场、港口、旅游远景发展。

(3) 厦门是台风多发区,每年 5~10 月是台风的高发期,特别是强台风来后大桥要封锁。为保证交通安全,大桥上不准车辆通行,台风期间势必造成交通瘫痪。修建海底隧道,就可以不受台风影响,全天候的通行,保证交通畅通。

(4) 厦门岛内陆地面积有限,如果修建桥梁,其引桥长,占用陆地面积大。修建海底隧道不会占用大量的地面空间,而且还可以填海造地,绿化、美化地面环境。

(5) 修建海底隧道在战争时优于桥梁,在抗震方面也优于桥梁。

(6) 海底隧道使用期 100 年,耐久性方面优于桥梁。

根据翔安海底隧道所通过的地段,海底地质条件复杂。沉管法断面大,预制管段质量大,施工技术和经验尚不够成熟;用 TBM 法由于断面大,工程地质复杂,造价高,予以否定;最后确定该海底隧道采用钻爆法施工。



图 1-10 悬索桥方案示意

第二节 工程地质与水文地质

一、区域地质

厦门地区所处大地构造单元为闽东中生代火山断拗带(二级构造单元)之闽东南沿海变质带(三

级构造单元)。在此构造单元内,对隧址区地质构造具有控制意义的断裂构造为长乐—诏安断裂带和九龙江断裂带。

长乐—诏安断裂带位于东南沿海丘陵地带,呈北东向平行海岸线展布,北起闽江口,经长乐、惠安、泉州、厦门、诏安,向南延伸至广东南澳、惠来入海,长约450km。该断裂带由一系列近于平行、长短不一的断层组成,带宽38~58km。该断裂带上地震活动较弱,最新活动年代为晚更新世早期。

九龙江断裂带分布于厦门、漳州和南靖等地,北西至东西走向,由2~3条次级断裂组合而成,长120km以上。断裂形成于晚侏罗世,沿断裂片理化、糜棱岩化现象明显。在晚第四纪时期,该断裂某些地段有较强活动,扭断水系,断错上更新统地层。此外,沿断裂带也是地热异常带,多次发生过5~6.5级地震。

本次海域地震反射勘探发现,数条轴向测线均有3条强风化基岩深槽,呈北西及近南北向展布,F1走向北西276°,F2走向北西304.5°,F3走向北西345.5°。经钻孔验证,强风化层深厚,部分岩芯可见密集的高角度裂隙及碎裂特征。

二、工程地质

地质调绘和钻探揭示,勘察场区地层主要为第四系覆盖层及燕山期侵入岩两大类。

1. 第四系地层

第四系地层以侵入岩残积土为主,其次为上更新统冲洪积,以白色基调为主的黏性土(当地称白土)和黏土质砂,少量全新统冲坡积或海积砂土、黏性土、淤泥等。

各类土体特征及分布情况如下。

(1) 填筑土(Q_4^{me}):多为杂填土,局部为素填土,结构疏密不均,主要分布于五通岸人口居住区,厚度一般不超过3m,西滨岸仅以海堤、塘埂、路堤等形式出现。

(2) 全新统海积淤泥(Q_4^m):灰色~灰黑色,含贝壳碎片,土质均匀,黏性较强,流动~流塑状,局部混少量砂;主要分布于港湾及沿海潮间带,陆域沟、塘中有少量分布。场区潮滩前缘地带此类土较厚,钻孔揭示最厚处达6m左右。

(3) 全新统海积砂类土(Q_4^m):多呈灰色,局部呈浅黄色,多为中、粗砂,结构松散,成分以石英为主,分选性差;局部含较多泥质和贝壳碎片,呈淤泥混砂状。其主要分布于海岸边及浅海暗礁群内,厚度一般不超过7m。

(4) 全新统亚黏土、淤泥质亚黏土及泥炭质土:场区丘间洼地表部一般均有全新统冲洪积亚黏土(Q_4^{al+pl}),颜色以黄褐色居多,洼地边缘过渡为棕红色,软塑状为主,局部流塑或硬塑状,层厚一般小于2m;滨海低凹处常有湖沼相灰色淤泥质黏土(Q_4^l)或黑色泥炭质土(Q_4^f)分布其下,流塑~软塑状。翔安岸XZK25孔、XZK26孔及连接线段ZSK7孔、YSK16孔揭示了此类地层,分布高程在0~7m,泥炭层厚度一般小于1m,淤泥质黏土厚度小于3m。五通岸低洼处局部地段也可能有此类土分布。

(5) 上更新统冲洪积黏性土及黏土质砂(Q_3^{al+pl}):此类土以白色为主基调,残丘边缘过渡为棕黄杂灰白色,以砂质黏性土为主,某些深度可出现细腻的黏土夹层,硬塑~半干硬状。下部往往夹密实的黏土质中粗砂透镜体,该土层砂粒含量及粒径垂向变化大;海域中翔安岸养殖场区XZK15、XZK16、ZTK18、XZK19~XZK21孔揭示的更新统冲洪积中粗砂局部含卵、砾石,最大粒径可达10cm左右,反映出山前古冲沟或古洼地的沉积特征。前者在场区丘间洼地均有所分布,揭示最大厚度近15m。翔安岸揭示该类土顶界最高点为4.88m(初勘ZSK5孔),五通岸YSK15孔于高程5.72m即揭露该类土。

(6) 第四系残积层(Q^{cl}):表部均为棕红色,往下过渡为棕红杂黄色、灰白色花斑状,以砂质黏土、亚黏土居多,硬塑~半干硬状,广泛分布于残丘台地,厚度多为5~10m(注:本次勘察以矿物风化程度、原岩结构以及标准贯入击数等综合因素作为残积土与全风化层的划分标准)。