

Shijie Zuihongwei Dixiagongcheng
——Yingfa Haixia Suidao

世界最宏伟地下工程
——英法海峡隧道

邓 德 全

人民交通出版社

内 容 提 要

英法海峡隧道是当今世界上最宏伟的地下工程项目,于1994年5月正式营运。该项工程主要由三条相互平行,间距为15m,长度均为51km的隧道组成;南北两侧为运行隧道,中间为辅助隧道。项目的业主是欧洲隧道公司(ET),总承包是TML公司。海峡隧道所处的地形、地质条件和施工环境非常复杂和困难,工程量之浩大令世人瞩目。该项目在资金筹集、工程招标、合同管理及工程实施过程中的质量控制、投资控制、工期控制各方面均达到预计目标。本书可供从事地下工程项目的工程技术人员、监理工程师、管理人员和有关院校的师生参考。

全书插图由夏捷描绘。

(京)新登字 091 号

世界最宏伟地下工程

——英法海峡隧道

邓 德 全

插图设计: 佘文利 正文设计: 周 圆 责任校对: 张 莹

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

三河曙光印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 2.375 字数: 55 千

1995 年 8 月 第 1 版

1995 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2000 册 定价: 3.50 元

ISBN7-114-02153-4

U · 01469

目 录

导言 世纪工程——英法海峡隧道	1
第一章 海峡隧道工程的规划与范畴	9
一、现行方案	9
二、方案的主要部分	10
第二章 计划的开展、组织与进度	14
一、设计过程	14
二、设计的开展	14
三、开发研究阶段	14
四、初步设计阶段	17
五、定性设计阶段	17
六、详细设计阶段	17
七、现场调查和地质情况	17
八、材料与装备定货	20
九、相互关系	24
十、工程项目和施工组织	24
十一、进度	28
第三章 主要设计和施工的特点	30
一、莎士比亚崖角地下开掘	30
二、海洋工程	34
三、穿过 Castle 山区的隧道与 Holywell 峡谷 的明挖回填隧道	36
四、隧道掘进	39
五、横向通道、装备室和减压管道	43

六、泵站..... 46

七、渡线洞室..... 47

八、固定设备安装..... 52

第四章 施工安全 59

一、施工安全组织与方法..... 59

二、具体安全措施..... 60

三、控制室..... 62

第五章 进度 63

第六章 质量保证与质量管理 64

结束语 65

参考文献 66

附录 英法海峡隧道兴建大事记 67

导言 世纪工程——英法海峡隧道

在晴朗无云的日子里,站在英国多佛尔市古城堡上,可以远眺隐约于海平线的法国海岸。古城堡下,就是一碧万顷,洪波涌起的英吉利海峡的峡口——多佛尔海峡。8000年前,这里与欧洲本有陆地相连,但地球上始于2.5万年前的一期冰川的消融使海平面升高了一百多米。于是,地峡变成海峡。海峡(英国人称为英吉利海峡,法国人称为拉芒什海峡)最宽处180km,最窄处(即多佛尔海峡,法国人称为加莱海峡)33km,海水平均深度约60m,最深处172m。海峡贯通大西洋和北海,沟通大不列颠岛与欧洲大陆,是世界上最繁忙的海上航道之一,也是英法历史上多次激烈海战的战场。在现代和平时期,海滨细软的沙滩与碧波荡漾的海水又使这一海域成为著名的疗养胜地。不少游泳者曾游过海峡,更多的人是乘船、乘筏、乘飞机横渡海峡,有史以来还不曾有人徒步走过海峡——直至1993年,英法修建海峡隧道协议签字之后第八年。

1993年的2月12日,118个情绪高昂的男子和女子从法国海滨Coquelles出发,步入海底50m深处的海峡隧道。英吉利海峡的寒风和狂涛在海面怒号,隧道里却温暖如春,只有他们的话语和脚步声。12小时之后,他们踏上了英国多佛尔海滨。正如阿波罗登月号“飞船”宇航员是最早由地球飞临月球的人那样,他们是自冰川期以来第一批从诺曼底步行到大不列颠的人。他们是壮观的海峡隧道的第一批游客。

海峡隧道是人类有史以来最巨大的工程。这条世界上目

前最长的海底通道耗工 1.7 亿工时,5000 名隧道掘进工人从总长 150km 的隧道里掘出土石方 7500000m^3 ,相当于从海底挖出三座埃及大金字塔。

隧道成为欧洲联盟成员国紧密相连的铁路与公路网络的咽喉。它将伦敦与巴黎的旅行时间缩短一半,改变了欧洲旅行的方式。横越英吉利海峡将不再受天气风浪的影响。它说明人类可以战胜海洋的阻隔,将岛与陆地连为一体。

雄心勃勃的拿破仑是提议修建海峡隧道的第一人。1802 年,他手下的采矿工程师提出了第一个海峡隧道设计。设计隧道长 37.4km,穿越瓦恩,班克浅滩。这最早的设计,与 190 年后的最后实施方案有着令人惊异的近似。

1802 年后近两个世纪中,有过 27 次开挖的筹划与尝试。直到本世纪 80 年代,兴建这一宏大工程的条件,才从政治、经济、技术等各方面臻于成熟。首先,是欧洲共同体与英国的贸易量的增长(英国货物包括油料和劳务输出有 64% 输往欧共体)已使海峡轮渡和航道不堪重负,海峡现有的运输方式已日益成为贸易与经济增长的障碍;其次,是现代技术已能保证成功地修建隧道并建成一个可以消除海峡障碍的现代化高效运输体系。

1985 年 4 月,英法两国政府就建设“海峡通道”公开招标。招标的要求是:1. 通道必须是固定的;2. 投标者必须论证技术上的可行性和经营的利润;3. 英法两国政府既不出钱,也不承办,完全由私营公司筹集资金,但给中标者营运海峡通道 50 年的特权。招标后收到四个可选方案,最终选定的是现已成功实施的双隧道铁路运行方案:在海底地表 40m 深处平行修建三条长度均为 51km 的隧道,其中二条是铁路隧道,直径 7.6m;两铁路隧道中间是一条直径 4.8m 的辅助隧道(用于

通风、维护和应急);每隔 375m 建一条贯通辅助隧道和两条铁路隧道的横向通道;小汽车,公共汽车,卡车由被称为“穿梭列车”(shuttle)的专用平台列车运过隧道,而不是象公路隧道那样让汽车驶过隧道,这是防止事故与空气污染的最佳方式。

中标的(英法)欧洲隧道公司(ET)承担起隧道的建设与经营。他们通过国际财团贷款和发行股票筹集了近百亿美元建设资金。施工由英法两国 10 家工程公司联合组成的 TML (Transmanlink)集团公司承担。

隧道路线的选定是很幸运的。工程师们在海底 40m 下发现有一条跨越整个海峡的白垩系泥灰岩层——一种理想的几乎不透水地层。欧洲隧道公司技术主管 Colin Kirkland 额手称庆“天助我也”,上帝冥冥之中似乎为隧道作了铺垫。

工程于 1987 年 5 月展开,分别从法国加莱附近的桑加特和英国多佛尔附近的莎士比亚崖角相向挖掘。虽然白垩系泥灰岩层大大减少了掘进的难度,但工程依然维步维难。长期使工程师们头痛的是后勤方面的难题,为此不得不反复修改,将人员、器材往里送,同时把碴土往外拉的方案。

工程师们踏遍世界,专门设计创造了 11 台隧道掘进机(TBM)。这种庞然大物,是一台重达 1200t,价值 2250 万美元,长达 250m 的“隧道制造厂”。它一面掘削岩层,一面喷注水泥混凝土衬砌,一面通过输送带出碴,一面还铺设双线工作轨道,后援列车紧随其后,车上有发电站、器材库、休息室和急救室。因日本已有 20 年修建海底隧道(从本洲到北海道)的经验,这种机器有 5 台向日本定制,6 台由英国生产。

每台掘进机配备 50 名操作人员,分四班 24 小时连轴转。操作人员都是出类拔萃、富有地下恶劣环境工作经验的工人,被称为“隧道虎”。他们的薪金高达每周 1800 美元。掘进机庞

大的碳钨合金钢牙盘旋转着以每小时 4.5m 的速度向前推进,隧道工作台面的温度超过 30℃,空气中弥漫着浓密的粉尘。当功率强大的液压柱塞驱动牙盘削进岩层时,噪音刺耳欲聋。在这样的环境中,耳朵不起作用,眼睛要有一千双才够用。

特别危险的是那些压送拱形水泥衬模的机械臂,如果站错了位置或时间上差错,它一秒钟就可以把人压成肉浆。另一危险是在忙碌的隧道中嘶叫着来来往往的工作列车。隧道施工中牺牲的 10 人中有 4 人是丧生在火车轮下。

当工程大军在海底夜以继日地掘进时,欧洲隧道公司的主管人员也在另一战场与投资者和政治家们战斗。开工之后不久,设计变更,提高了对安全性和环境保护的要求,造价大幅上涨,欧洲隧道公司原先通过发行股票和向国际财团借贷的 75 亿美元根本不足以维持到工程的完成,实际需要超过 150 亿美元,使隧道工程成为世界上最大规模的私人筹资项目。他们不得不向一家家银行求助,以增加贷款。欧洲隧道公司与承担施工的 TML 公司围绕财政发生争执,银行停止增拨资金。很多次工程面临停工。1990 年的一次会议尤其有爆炸性。面临工程中止而受破产威胁的欧洲隧道公司在这次会议上告知 TML 公司:若双方不能达成共同分担资金风险,压缩成本的协议。隧道工程将被迫放弃,欧洲隧道公司将倒闭。持怀疑态度的 TML 公司虽然最终还是在协议书上签了字,但双方的争执在整个工程期间始终未曾终止。

在地下,工程日夜兼程。英法两国的掘进机采用计算机程序控制激光束引导,相向推进,月掘进进度最高达 1500m。多亏这种高技术的导向系统,当三条隧道贯通时,水平位置贯通误差 0.5m,垂直位置偏差 5cm。

1990 年 12 月 1 日,英国的“隧道虎”Graham Fagg 和法

国的“隧道虎”Philippe Cozette 用空气钻将辅助隧道中最后一层岩石钻穿了。英法掘进工人首次在隧道会合。两“虎”各用对方的语言互致问候,交换国旗;摄影留念。由于隧道两端的气压差,贯通的洞口风鸣如笛,英国的米字旗和法国的三色旗在风中哗哗作响。

与隧道虎们在波涛汹涌的海峡的地层之下掘进的同时,英法两国数千名工人也在忙着制造隧道专用的铁路穿梭列车和建设两端的车站。法国的终点站建在加来的 Coquelle,占地约 70000000m^2 (1729 英亩),是欧洲最大、最堂皇的运输枢纽站。高架公路从一座人工湖上空把汽车流导入枢纽,旅客可以将汽车径直开到穿梭列车上,也可以先逛逛免税购物中心。英国的终点站则局促地挤在福克斯通的 Cheriton,只有法国终点站的 $\frac{1}{5}$ 大小。

终点站是在隧道运行的穿梭列车的始发站。待运的汽车先向自动售票机购票,经过海关或移民机构办手续,通过坡道驶向装车站台。全封闭的空调穿梭列车分双层和单层两种车厢。双层车厢用于运载高度不超过 2m 的小车,单层车厢运载公共汽车和卡车,卡车连带拖车最长允许 21m,最重 44t。小汽车由穿梭列车的侧门驶入车厢,卡车从穿梭列车的尾部驶入车厢。到达终点站后,所有汽车由列车前方驶向站台,又通过坡道进入公路。每趟穿梭列车可装运 120 辆小车和 12 辆卡车。穿梭列车装满汽车约 10 分钟,卸载约 8 分钟,穿越海峡隧道需时 33 分钟。

穿梭列车时速 160km。途中旅客可以坐在自己的汽车里,也可以在梭车车厢内走动。梭车有窗户,由于隧道里不开灯,窗外看不到什么。每节车厢的数字显示屏幕会随时报告列车的运行状况、位置及抵达终点的时刻。隧道一年运行 365

天,一天运行 24 小时,每个方向 1 小时开出 20 趟以上列车,其中载运汽车的穿梭列车 10~20 分钟一趟,其余为货运列车或旅客列车。

货运列车和旅客列车是纳入英法及欧洲国家铁路网的高速列车。由法国、英国、比利时国家铁路公司联营的“欧洲之星”(Europstar)超级列车将以每小时 300km 的速度往来巴黎和伦敦。如果计入乘飞机要返机场的时间,则乘超级列车比乘飞机更快捷。

但这还有待英国修建伦敦与隧道之间的高速铁路线路。在此之前,超级列车以每小时 330km 的速度从巴黎呼啸而出,通过隧道时速限制在 160km,隧道进入英国线路,速度要进一步降低到 100km。因为英国端的铁路迄今还是 19 世纪的路基,无法运行高速列车。

英国的这种状况,典型地说明了该国某些人士对海峡隧道的矛盾心态。英国人自立国以来就视英吉利海峡为天然战略屏障。没有隧道时,面对海上的风浪,他们想修隧道;修成了隧道,面对长驱直入的列车车流,他们又若有所失。甚至当隧道修通之后,英国人还以隧道可能会把狂犬病引入英伦三岛,而掀起一场舆论风波,以至隧道当局不得不在隧道两端增设动物隔离网和电网。实际上法国过去三年来只有一人死于狂犬病,而且此人还是在墨西哥被狗咬的。

法国方面就迥然不同,其一半土地被用于建造隧道终端枢纽的 Coquelle 市的市长办公室主任 Michel Niemann 的话代表了法国人的观点:“隧道为我们提供的是机遇,而不是危机”。统计数字支持他的观点:欧洲隧道股票的 63.7 万名持有者中,75% 是法国人。

海峡隧道的安全性如何?在海底 50m 地下绝无海面的汹

浪排空，樯倾楫摧之虞。怕炸弹吗？即使是最大的炸弹也不能穿透隧道的衬砌，因为爆炸力会沿阻力小的路径扩散，亦即沿隧道纵向缓解。穿梭列车的车厢是防火材料制成的，即使车厢内起火，车厢内的灭火系统不能扑灭（这种可能性是极小的），乘客也可由辅助隧道逃生。每列隧道列车前后都各有一台电力机车，一个车头出了故障，另一个车头立即投入运行，确保畅通正点。

世界各国都关注和赞赏这一宏大工程。人类是依附陆地生存的。海洋运输受无法控制的天气、海浪的影响，不随人愿，艰险莫测。海难事件令人胆丧，且往往有油轮倾覆造成大区域的长期的生态污染。英法海峡隧道的成功，使世界的许多岛国和滨海国家受到启发和鼓励。紧随其后动工或开始勘探规划的已有日韩（日本北九州至韩国釜山，182km）、日俄（日本北海通经萨哈林岛至俄国西伯利亚，60km）、美俄（美国阿拉斯加西沃德半岛至俄国亚伯利亚西梦克奇半岛，87km）、丹麦大海峡（丹麦西南岛至菲英岛，71.5km）、巽他海峡（印尼苏门答腊至爪哇，26km）、马六甲海峡（马来西亚至印尼苏门答腊，91km）等海底隧道。这些工程一旦完成，世界除大洋洲（大洋洲与其他大陆之间的海域水深 2000m 以上）以外，都可由陆路相通，不仅可以稳定而高效地输送各大陆、各国间的人员、物资、能源和信息，且可避免能源及运输中可能发生的局部甚至大地域的环境损害。美国和俄国这两个大国，在人们印象中是世界的两极，但通过一条 87km 的海底隧道变成陆路相通的“邻国”，这真是改天换地、重构世界的奇迹。

事实上英法海峡隧道尚未开始营运，旅行者就已从隧道受惠了。面对隧道每年可能夺走 3000 万人次客流的前景，海峡轮渡公司未雨先缪，投入 15 亿美元来改进轮渡服务，增设

了载客 2000 多人的超级高速轮渡,以与隧道竞争。竞争将导致海峡各类运载工具收费降低。

旅客们可能永远也不会注意到,在隧道内的国界线(这里有块彩色铜牌,以纪念这条世界上最新的边界线的出现)附近的水泥墙上书写着数百个人的名字,这是“隧道虎”们庆贺隧道建成留下的签名。这些签名会褪色,但工人们的业绩将永存。正如法方隧道负责人 Andr'e Be'nard 所言:“隧道的决策,政府用了近 200 年;我们的工人,6 年就把它建成。工人万岁!海峡隧道万岁!”

译自:Robert Kiener;A New link for Europe Rehder's Digest,july 1994
(英文)

第一章 海峡隧道工程的规划与范畴

英法海峡隧道工程已经让工程师们思索了几乎两百年。该项工程根据合同,其工作范围包括:隧道设计、施工、检测、验收和隧道维修,还包括所有必要的临时工程、隧道衬砌安装、大量废石方的处理和大量活动施工工厂的迁移等。在合同包定总价的限额内通过安装固定设备之后,隧道就成为了一个铁道系统。该系统包括钢轨、信号系统、链形悬挂、动力设备、通风系统、排水系统、通讯和控制网络等。这项工程一开始人们就认识到工程项目面临的主要挑战在于解决复杂的后勤供应,以求保证隧道施工的高速度。另一个主要任务是设计、施工合同控制的快速跟踪特性。笔者试图对英国方面承担的英法海峡隧道设计、施工诸多项目进行论述。

一、现行方案

1. 现行方案提出了一个穿越海峡的固定联接系统。该方案是1985年英法两国政府联合招标的结果。参与投标竞争的三个方案分别由不同的重要机构提出。其中包括采用不同的方法兴建一个铁路或公路的固定联接系统。建造和营运固定联接系统的许可权被授予海峡隧道组织(CTG)[随后变成Eurotunnel(ET)和Transmanche—Link Jy]。同时,设计、施工、安装固定联接系统的委托合同被授予Transmanche Link(TML)集团公司。

2. Eurotunnel公司和TML公司的合同条文要求TML公司在1993年中期使固定连接系统进入营运,这对设

施的发展、设计、施工、项目验收是一个富有挑战性的安排计划。这个计划影响到工程的每一个方面,新增了许多重要的经营任务。

3. 该方案是采用铁路运输,把英国的铁路网与欧洲的洲际铁路网连接起来;采用直达列车和专用区间列车两种,后者包括用托板式集装运输来运载公路车辆。固定连接系统是在英国的福克斯通(Folkestone)和法国加莱(Calais)附近的科凯勒(Coquelles)这两个站之间。两站之间的隧道长度为51km,其中在两边海岸线之间的海底隧道长38km。

4. 1972年英法两国政府提出了一个相似的计划。该计划的第一个施工阶段开始于1973年,包括英国方面的莎士比亚(Shakespeare)崖角上部和其底部的工作场地的开发和估算,从低处的场地开挖垂直坑道到隧道水平面,使用隧道掘进机开挖辅助隧道。尽管这个工程在1975年早期被放弃了(由于政府行政上的原因),但还是做了许多有用的工作,收集了许多资料,便利了日后计划的快速进展。特别是开挖隧道时收集的白垩泥灰岩性能的数据、隧道衬砌所承受的装配荷载、预制混凝土衬砌节段在荷载作用下的反应都具有直接实用价值。

二、方案的主要部分

5. 主隧道。该方案包括两条运行隧道,每条有一副单轨,两条运行隧道之间有一条辅助隧道,通过横向联络通道连接起来。采用两条单独的运行隧道,而不是采用一个大直径的有双轨的隧道,这是为了减小施工危险,给营运和保养提供更大的安全。通过技术开发和优化设计最后确定了隧道直径和净空;同时还考虑了最后功能和营运,施工速度和造价,特别是施工时,从海岸工作场地到现场的不寻常的长距离的后勤服务。

6. 辅助隧道有一个主要功能,就是在正常和紧急情况下,沿运行隧道的全长提供来往于运行隧道和辅助隧道之间的通道。辅助隧道还能使火车在任何紧急停车时,90 分钟内隧道被疏空。辅助隧道有自己的引导交通系统。另外,它还设有抽水干道和排水通道,在正常营运时可给隧道体系提供新鲜空气。它被设计为保持正压力,使运行隧道在任何情况下可防止吸入废气。

7. 施工时,辅助隧道是作为导挖隧道,以便使运行隧道开挖前对地层情况有更彻底的了解。辅助隧道还被用来做地层注射以改善区间隧道的开挖条件,这在靠近英国海岸的地方是需要的。

8. 除了铁轨、高架线路设备,每个运行隧道还包括动力设备,第二套排水系统、冷却管、人行道以及其它附属设备。运行隧道是用作补充通风系统的主要空气通道。特别是用于控制火灾发生时的烟的方向。

9. 横向联络通道及设备室。横向联络通道以 375m 的间距连接运行隧道和辅助隧道,以便从三个通道都可以直接通到停止的区间列车。横向联络通道与防火安全门联在一起,防火安全门在所有营运条件下都能开启和关闭。

10. 装有变压器、开关齿轮和信号设备的设备室位于辅助隧道和运行隧道之间,从辅助隧道进入。

11. 减压管道,当列车在很长的隧道中以一定速度行驶时,空气压力差和空气阻力迅速产生,区间列车有很高的阻塞率(列车截面积与隧道截面积的比值)。如果不降低压力,列车以运营速度行驶所需的能量将大大提高。

12. 采用的减压系统是直径为 2m 的管道以 250m 的间距连接两个运行隧道,在辅助隧道的上方通过。减压系统的功

能在设计阶段就进行了周全的模拟实验,以达到空气动力的有效性和管道中足够低的风速之间的平衡,来避免过度振颤。管道中填充了全封闭式的阻尼物质以防止在火灾时,烟从一条隧道窜入另一条隧道。

13. 泵站。五个泵站为地下工程服务;三个在海底下,一个在英国莎士比亚崖角(Shakespeare Cliff),一个在法国桑加特(Sangatte)。

• 14. 转线轨道。为了满足运营维修需要,两个隧道间有四条双向转线轨道,供火车从一条运行轨道转到另一条上。两条转线轨道离两个终点站很近;另两条位于海底,将隧道分成三个大致相等的部分。海底转线轨道有一个很大的空间,称为渡线洞室,两条运行轨道的路轨岔尖到此共同终止,辅助隧道则转向到此地的一侧。每个渡线洞室有设计时速为 60km 的菱形转线轨道。渡线洞室装有防火门;可以在正常运营时关闭运行轨道间的所有通道。

15. 隧道掘进。英国方面三条隧道,向海和向陆地方向的掘进都是从莎士比亚崖角(Shakespeare Cliff)开始。所有泥土废渣都倾泻在位于莎士比亚崖角下面的一道新筑的海墙后。施工交通进出隧道水平面是从低的现场通过一个新的倾斜的横向坑道(A_2)。运送人员的竖井是从高的现场下降到隧道水平面,在隧道水平面建有一个隧道调度网络,为主隧道的掘进服务。

16. 英国方面的向海隧道掘进长度为 18km 至 22km,是从莎士比亚崖角到与法方隧道的中间交汇点。英方的陆向隧道掘进长度有 8km,从 Sugarloaf 山到 Holywell 的东部。Holywell 是 Sugarloaf 与 Castle 山之间的一个 500m 宽的峡谷,它具有较高的生态、环境价值。因而采用明挖回填的施工方法,最后恢复土地表面到原来的样子。Castle 山是 Folke-