

海底隧道盾构方案可行性研究

黄 俊, 刘洪洲

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 盾构法已经在国内外的地下工程中广泛运用,特别是国外著名的海底盾构隧道,如英吉利海峡隧道、日本东京湾海底公路隧道、荷兰 Westerschelde 隧道;国内先后用盾构技术建成大连路、复兴东路盾构过江隧道,还有在建的上海翔殷路越江公路隧道、上中路隧道和已经开工建设的上海长江桥隧工程。文中首先论述了国内外大直径、高水压、长距离推进等盾构施工关键技术,并结合珠江口海底隧道的建设条件与国内外的成功实例,对海底隧道盾构方案的可行性进行了初步研究。

关键词: 海底隧道; 盾构法; 大直径; 高水压; 长距离施工; 可行性研究

1 盾构隧道发展概况

1818 年法籍英国工程师布鲁纳尔设计了一台矩形盾构,高6.9 m,宽11.6 m,长2.74 m,1825 年研制成功并用于修建英国泰晤士河隧道(长 455 m),1843 年施工完成。1869 年英国工程师格利特赫得(Great head)研制了一台圆形盾构,直径为 2.2 m,推进隧道长 415 m,形成了现代盾构的雏形。1886 年,在伦敦含水松散地层,用气压盾构施工修建地下铁道,盾构直径为 3.47 m,隧道长 900 m,取得了成功。此后,盾构技术不断发展,成为修建城市地铁隧道、市政管线、海底隧道的一种主要施工方法。

20 世纪50 年代中期,我国东北煤矿修建疏水巷道和北京修建下水道曾使用过直径为 2.6 m 的小型盾构,上海自 20 世纪 60 年代起,开始研究开发盾构技术,已研制最小的直径为 3.0 m、最大的直径为 11.3 m 的盾构机。

随着社会的不断发展,地下空间的开发越来越引起重视,盾构法也在不断地改进和完善,对于地下水位高、流动性大的软弱土层施工,如何防止涌水和稳定开挖面成为主要问题。目前,泥水平衡盾构和土压平衡盾构为主要的两大机型,两者适用于不同的地层条件。

海底盾构隧道的建设可以从 1925 年布鲁纳尔父子首次采用盾构法在英国泰晤士河下修建隧道开始。1993 年全长 49.2 km(海底段长 37.5 km)的英吉利海峡隧道竣工,开创了盾构施工的世界之最。海底

隧道具备良好的防御自然灾害能力,并有对江、海环境及航运影响小等优点。因此,在铁路、公路建设大发展中,跨江、跨海的盾构隧道不断成功修建,为盾构设计、施工积累了丰富的经验,国内外部分优秀的大直径盾构隧道成功实例见表 1。盾构隧道正向着大直径、大埋深、高水压和长距离等关键技术不断发展。

表 1 国内外部分已建成的大直径盾构隧道

名称	长度 km	埋深 m	盾构外径 m	水压 MPa
日本东京湾 公路隧道	9.5	50~60	14.14	0.6
荷兰 Westerschelde 隧道	6.6	60	11.33	0.65
德国易北河 第四公路隧道	2.56	42	14.2	0.6
丹麦大带桥海底 盾构隧道	7.41	55	8.78	0.6
中国上海 大连路隧道	1.275	30~35	11.22	0.4

我国盾构隧道建设尚处于起步阶段,上海市在 1970 年建成打浦路越江隧道(1 300 m),1988 年建成延安东路北线越江隧道(2 261 m),2003 年建成复兴东路越江隧道,目前在建上海翔殷路越江公路隧道、上中路隧道和崇明南港越江隧道,海南、广东、青岛和武汉等地正在积极酝酿和规划越江及跨海隧道的建设,珠江口规划的海底隧道就是其中之一。

2 海底盾构隧道特点

海底隧道的施工方法基本可以分为钻爆法、盾构法、沉管法,也可以将三者混合使用。水中悬浮隧道也在研究应用中。

2.1 海底盾构隧道特点

海底盾构隧道与一般陆地地铁、市政管线盾构隧道相比,有其自身特点。

(1)建设难度大。隧道施工过程中承受较大水压、土压力,盾构施工需克服高水压,尤其是大直径盾构推进中需克服顶底压差,保持工作面稳定,施工难度较大。

(2)隧道出露海底后两端斜坡段类型复杂,盾构在人工岛、海堤或河堤中穿越,且存在软硬围岩的界面。因此,纵坡转换和地层突变处盾构推进难度较大。海中盾构隧道设计包括人工岛的结构及功能,满足桥隧转换功能和环保要求。

(3)海底盾构隧道需着重考虑隧道抗浮、耐久性、防水、抗渗等关键技术的设计、施工及效果评估。

(4)受航道及海(江、河)口天然口门宽度控制,海底隧道一般较长,盾构机设计需考虑长距离掘进、海底检修和海中对接等因素;隧道结构设计需充分考虑通风、照明、消防、防灾等因素。

(5)环境评价、风险性评估也是海底盾构隧道建设的突出特点。

(6)海底盾构隧道具有良好的防御自然灾害和战争破坏的功能

2.2 海底公路盾构隧道特点

随着我国生产力水平的不断提高,交通运输行业突飞猛进,其中高速公路发展迅速,技术指标也不断提高,双向4车道、6车道甚至8车道的高等级公路发展迅速,特别是沿海经济发达地区交通基础设施建设在全国领先,城市主干道、城际高速公路标准都很高。因此,作为高等级公路一部分的城市过江隧道、海底隧道投资较大,其建设规模、服务功能、标准必须符合总体路线要求。因此,与一般的海底铁路隧道、各种管道相比,海底公路盾构隧道有以下特点:

(1)对于双向4车道公路隧道而言,按照《公路工程技术标准》(JTGB01-2003),若设两条盾构隧道,则单条隧道直径达到了14 m左右,是地铁区间隧道直径的两倍,且隧道位于水底。盾构机直径较大和在饱水地层中推进是其主要特点。

(2)盾构隧道直径标准提高后,在满足盾构隧道施工、运营要求后,隧道埋深较深,水压较大是其突

出的特点。盾构设计要控制好工作面稳定,保证施工过程中不割裂地层、不冒浆。

(3)跨海公路规模较大,可以采用隧道和桥梁方案,而隧道方案对于航道航运几乎没有影响,因此,国内外很多著名的工程都采用隧道方案或者采用桥隧结合方案。相应的隧道规模一般较大,如东京湾海底公路隧道长9.5 km,直径14.14 m,其大直径盾构机设计,长距离盾构施工,海底对接技术及隧道结构防水等都取得了很大的突破,并充分考虑了海底地层勘探、超前地质预报、结构耐久性等特点。

(4)海水具有一定的腐蚀性,对于长期处于高压下的隧道结构而言,隧道结构防水和耐久性要求很高。

(5)公路隧道的通风、照明、消防、防灾等功能要求均比同等长度的铁路隧道高,是不可或缺的几部分。东京湾海底隧道中间建设了人工岛来修筑通风井。

3 珠江口海底盾构隧道方案

3.1 工程概况

珠江口海底隧道是香港连接西部的跨海通道的一部分,位于伶仃西航道、铜鼓航道交汇点北侧,大濠水道与榕树头航道交汇点南侧,隧道呈东西走向,从东侧人工岛桥隧转换后下穿铜鼓航道、伶仃西航道后从西侧人工岛出露与桥梁相接,两人工岛口门宽度在6 km左右,隧道基本位于伶仃洋三滩两槽的东槽下方。

3.2 建设条件

(1)地形地貌。

伶仃洋水下地形具有西部浅、东部深的横向分布趋势和湾顶窄深、湾腰宽浅、湾口宽深的纵向分布特点,滩槽分布呈“三滩两槽”的基本格局,三滩指西滩、中滩和东滩,两槽指东槽和西槽,伶仃洋内三滩两槽是海洋动力地貌长期作用的结果,这种格局还将长期存在下去。

海底隧道穿过珠江口东槽深水域,海底泥面起伏差为10 m左右。该深槽靠近珠海一侧水深15 m,靠近香港一侧水深14.2 m。

(2)海底地质条件。

隧址海底第四系地层发育,厚度大,分布广。按成因时代、岩性特征划分为4个大层组、14个亚层,其中:①层为全新统海相沉积物,其岩性为淤泥、淤泥质亚粘土;②层、③层为晚新统海相沉积物,其岩性主要为亚粘土、粘土、亚粘土夹砂、粉细砂、中砂、淤泥质

亚粘土、亚粘土夹砂;④层为晚更新统河流相冲积物,岩性自上而下变粗(粉砂~圆砾),上述地层中软土厚而分布广,而④层分布不均,厚度变化较大。

工程区基岩主要为燕山期花岗岩、局部夹震旦系变质岩岩脉。基岩风化差异显著,基岩面起伏较大,钻孔揭示的岩性主要为粗~细粒花岗岩、混合花岗岩,基岩分为2个大层组、10个亚层,其中⑤层属燕山细~粗粒斑状花岗岩,⑥层属震旦系,岩性主要为混合花岗岩,弱~微风化层工程性能较好,承载力高,可直接作为建筑物基础持力层。

(3)地下水。

场区地下水按含水介质类型划分为松散岩类孔隙潜水、承压水和基岩裂隙水三大类。海水对混凝土具有中等结晶类腐蚀和中等结晶分解复合类腐蚀,对钢结构具弱腐蚀性。

(4)气候概况。

工程区年平均气温 $22.3\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;年平均雨量为 $1\,800\sim 2\,300\text{ mm}$,年降雨日数(日雨量 $\geq 0.1\text{ mm}$)在140 d左右;风向以东南偏东和东风为主;年平均雾日 $6\sim 20\text{ d}$;年平均雷暴日 $34\sim 62\text{ d}$;年平均相对湿度 $78\%\sim 80\%$ 。1949年~2003年间,共有22次台风在该区登陆。

(5)通航要求。

隧址需考虑伶仃西航道、铜鼓航道的远期规划,两个航道宽度均为 $1\,000\text{ m}$ 左右。

伶仃水道已于2004年10月基本形成了底标高为 -13.5 m 的深水航槽。根据珠江口的航道规划,最大为30万t油轮。盾构隧道设计需考虑最大代表

船型的满载吃水、船舶航行所需要的富裕水深、局部可能冲刷深度和隧道覆盖层厚度。

(6)航空限高要求。

隧址东北侧为香港大屿山国际机场,在隧风塔设计中需满足航空限高要求。

3.3 主要技术标准

公路等级:高速公路,设计行车速度 100 km/h ;

设计车道规模:双向6车道;

荷载等级:公路—I级;

设计使用寿命:120年;

抗震设防烈度:7度(地震动峰值加速度为 0.10 g)。

3.4 盾构法隧道方案

(1)隧道平纵面布置。

考虑本工程隧址地质、水文条件、隧道规模及通航要求,隧道方案总体布置为:盾构隧道采用直线穿越伶仃西、铜鼓航道,总长 $8\,050\text{ m}$,盾构段长 $6\,432\text{ m}$,两侧均设人工岛与桥梁相接,人工岛水深在 8 m 左右,隧道最大纵坡为 2.98% ,纵断面呈坦U形,隧底最深处标高为 -70.73 m 。

(2)隧道横断面。

结合国内外同类工程的设计、施工经验,对于双向6车道高速公路,可以选择以三条或者两条盾构隧道构成。东京湾隧道就是采用前者方案,如图1所示,先修筑右侧的两条2车道隧道满足当前交通量需要,并在左侧预留一条2车道隧道,对于后者的方案,可以选择双层、单层两种车道布置形式。比较可知,双层车道布置隧道断面利用率高,断面面积较小,

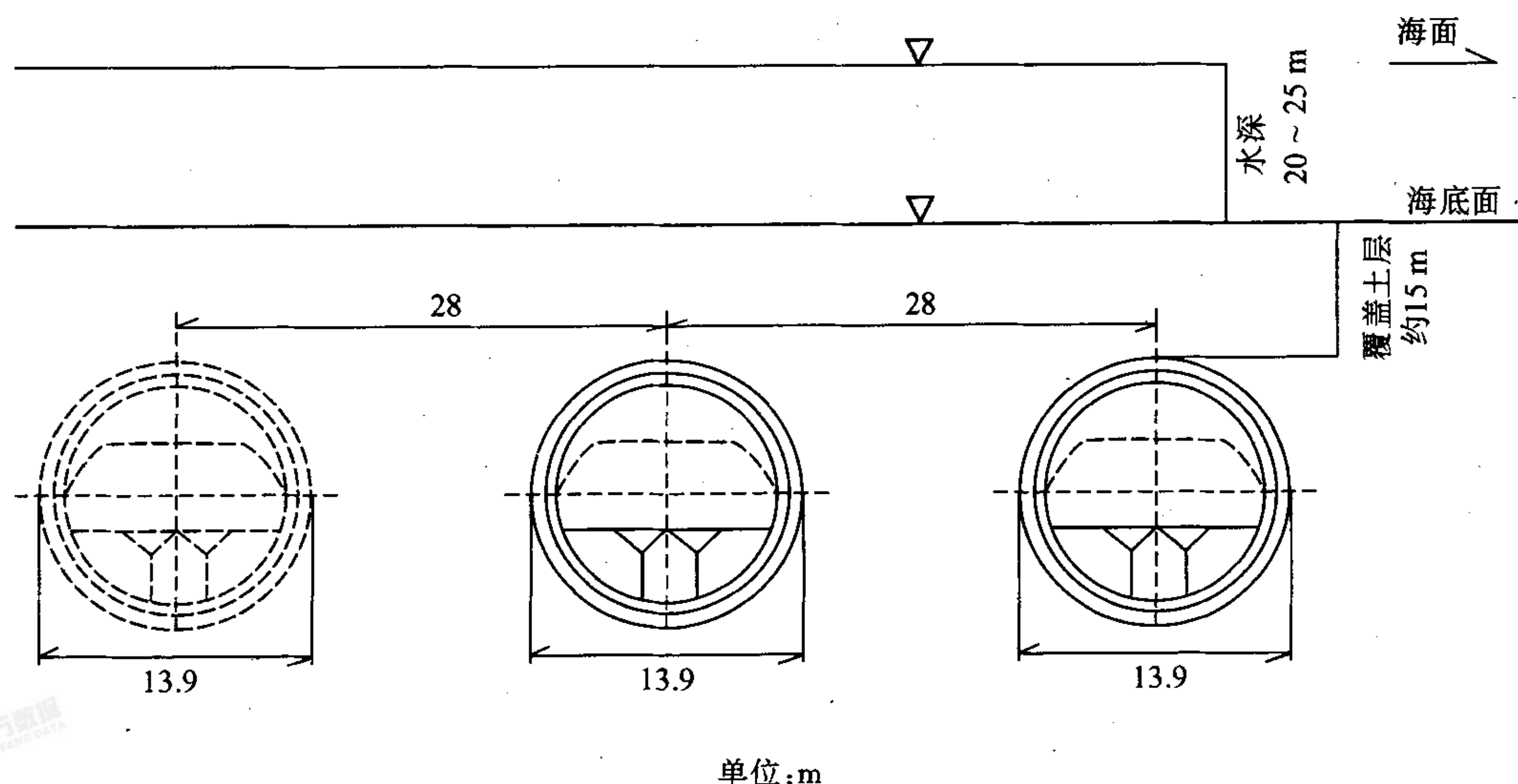


图1 东京湾公路隧道横断面布置

交通组织要求较高,而单层车道断面隧道直径较大,若严格采用《公路工程技术标准》(JTG B01—2003),则单层与双层车道隧道断面相差不大。

隧道建筑限界净宽取 13.25 m(0.25 m 余宽+0.5 m 左侧向宽度+3×3.75 m 行车道宽度+1 m 右侧向宽度+0.25 m 余宽),净高取 5.0 m。

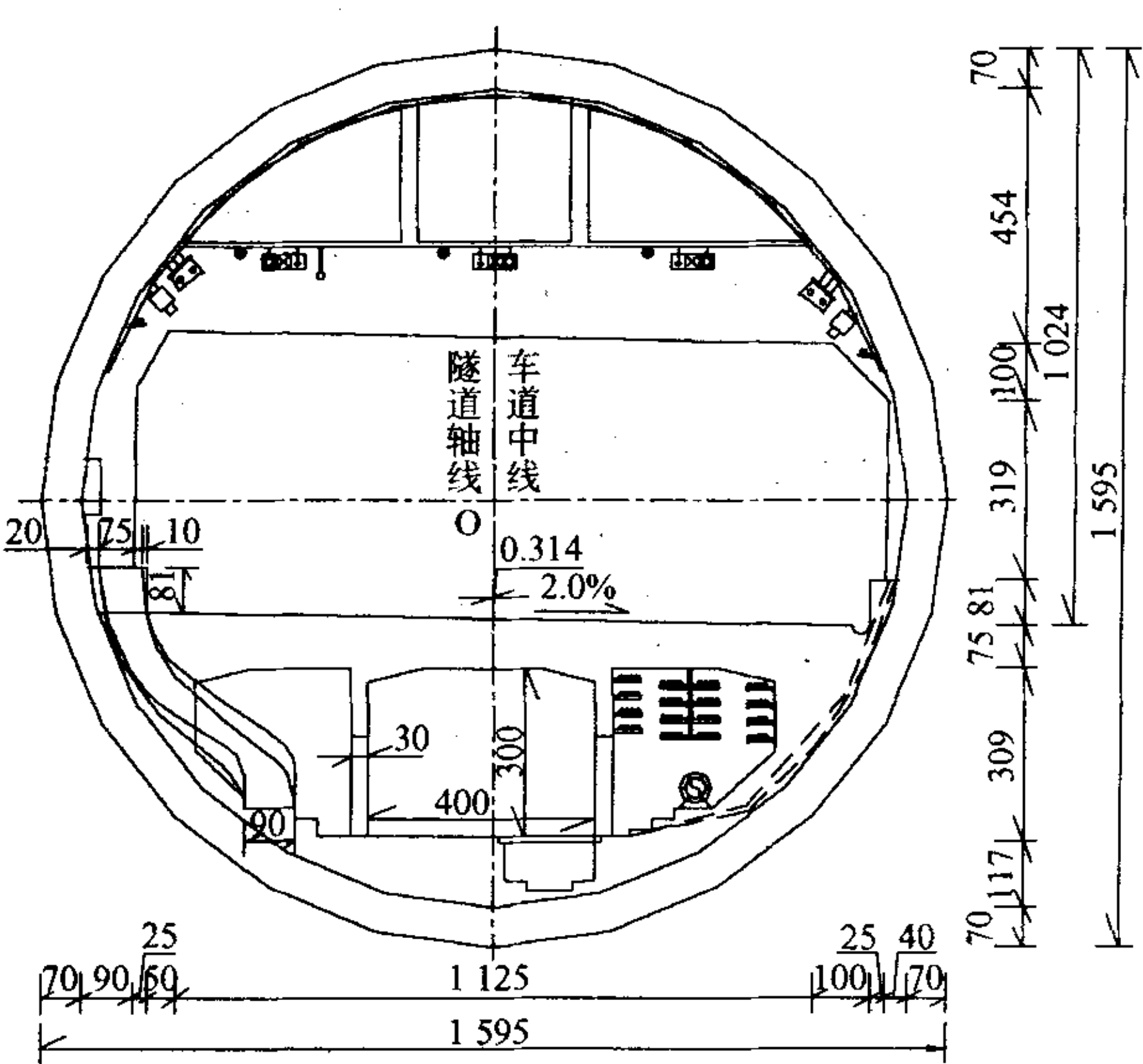
考虑盾构隧道的空间利用率,并结合隧道火灾逃生方案,每条盾构隧道内设置逃生滑梯,并在两条盾构隧道间设置横通道,盾构隧道外径为 15.95 m,内径为 14.55 m,管片厚度为 0.7 m。隧道横断面见图 2 所示。

3.5 关键技术

本工程盾构隧道方案的关键技术、难点、解决方法及相关成功实例分析见表 2。

3.6 方案可行性

盾构隧道穿越地层包括:淤泥、淤泥质粘土与亚



单位:cm
图2 盾构隧道横断面

表2 盾构隧道关键技术分析

关键技术	难 点	等级	解决方法	成功实例
盾构机设计	直径达 16 m	I	科研攻关可以解决	已建成直径 14.87 m
软硬岩掘进	初步勘探有一段基岩	I	盾构机刀盘设计	—
长距离掘进	单向掘进 6.4 km 或单向掘进 3.2 km、海中对接	I	盾构机设计考虑泥水舱水压差 盾构机耐久性设计包括刀盘、刀具、运转设备、盾尾密封设备、出渣系统的耐久性	Westerschelde 隧道 单向掘进 6.6 km,最大水压 0.65 MPa
高水压	最大水压力 0.7 MPa	I		
超前地质预报	局部不良地质段 软硬地层交接段	I	研究开发与盾构机设计配套的预报系统	—
结构防水	隧道不能自排水,地层不连续,并有斜坡段,隧道纵向差异沉降 隧道结构防水效果检测	I	地层及衬砌壁后注浆 衬砌结构及接缝防水隧道结构防水效果检测设备研究	东京湾公路隧道
结构耐久性	衬砌长期受高水压海水环境影响	I	管片混凝土耐腐蚀 接头螺栓防蚀 衬背注浆材料性能	Westerschelde 隧道 东京湾公路隧道
地质勘查	海底基岩及断层破碎带	II	采用各种手段探清海底地层分布	东京湾公路隧道等
泥水处理	泥水处理规模大	II	泥水分离机设计	Westerschelde 隧道 东京湾公路隧道
人工岛设计	与隧道设计关系复杂	II	人工岛填筑及盾构出、进洞斜坡段加固	东京湾公路隧道

注: I、II、III 分别表示困难、较困难、一般难度水平的三个难度等级

粘土、粘土及粉砂、中砂、粗砂、砾砂为主,局部穿过风化花岗岩层和含砾土层。大部分地段盾构穿越亚粘土和砂层,总体偏软,适于盾构机推进。

盾构隧道的关键技术及难点在于:高水压下盾构施工难度较大,同时要求盾构机长距离一次推进 6 000 m 以上,或者在海中对接,并且具有硬岩切割和刀具更换能力;直径达 16 m 的盾构机设计制造、管片结构要求密封防水及耐久性等技术难点。

英法海峡隧道创造了单向掘进 21.1 km 的最长掘进纪录,隧道最大埋深 100 m,水深 40 m,成功地解决了在深层高水压下的密封防水技术、钢筋混凝土管片衬砌结构和防水、长距离掘进的运输等技术难题;日本东京湾海底公路隧道最大埋深 50~60 m,水深 20~28 m,最大水压 0.6 MPa,海底为 20~30 m 厚的极软弱冲积和洪积粘土层,采用 8 台直径为 14.14 m 的泥水平衡盾构机施工,实现海中

对接;德国采用外径为 14.2 m 的混合式盾构,在硬粘土和砾石、砾岩为主的冰川物质中,建成易北河第四隧道,最大埋深 42 m,最大水压 0.6 MPa; Bouygues/Koop JV 采用世界上最大直径(14.87 m)的泥水加压盾构(NMF)在软弱的荷兰砂土中建成 7.2 km 长的单孔隧道;荷兰采用外径为 11.34 m 的泥水盾构,建成全长 6.6 km 的 Westerschelde 隧道;我国采用直径为 11.22 m 泥水平衡盾构机,建成上海大连路、复兴东路双层过江隧道。

可见,本工程的部分关键技术在国内外已有类似的成功先例,其他技术难点可以通过科研开发解决。

4 结语

在分析国内外海底盾构隧道特点和关键技术的基础上,论述了珠江口海底盾构隧道方案及其可行性,对大直径盾构隧道的应用提出了新的思考,需要

解决的问题很多,盾构机的国产化、盾构隧道的设计施工都是新世纪的新课题。

参考文献:

- [1] 赵宏,刘树年.海底隧道施工技术资料汇编[Z].铁道部隧道工程局科研所情报室.
- [2] 尹旅超,等.日本盾构隧道新技术[M].华中理工大学出版社.
- [3] 谭忠盛,王梦恕,杨小林.海底隧道施工技术及琼州海峡隧道方案的可行性[J].焦作工学院学报(自然科学版),20(4).
- [4] 耐久性与防蚀性的研究[J].隧道译丛.1994,(10).
- [5] 横贯东京湾的公路盾构隧道的设计[J].隧道译丛,1993,(12).
- [6] 上海市土木工程学会,等.城市交通隧道工程最新技术[M].上海:同济大学出版社.

Feasibility Research on Shield Scheme of Submerged Tunnel

HUANG Jun, LIU Hong-zhou

(China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC, Beijing 100010 China)

Abstract: Shield method has been used in underground engineering all over the world, especially in oversea submerged tunnel, such as English Channel Tunnel, Tokyo Bay Submerged Highway Tunnel, Holand Westerschelde Tunnel. Using the shield technic, Dalian Road and Fuxing East Road Shield Tunnel traversing the Changjiang River are completed, Shanghai Xiangyin Road Highway Tunnel and Shangzhong Road Tunnel are under construction. and Shanghai Yangtze Bridge-Tunnel Project is also constructing just now. First, the constructing technics of large diameter, high hydraulic pressure and long distance construction shield tunnel at home and abroad are discussed. Then according to the construction condition of Zhujiang River mouth and successful examples, the primary feasibility research on shield scheme of submerged tunnel is carried out.

Key words: submerged tunnel; shield method; large diameter; high hydraulic pressure; long distance construction; feasibility research