

青岛胶州湾海底隧道施工及机械配套技术

马 栋^{1,2}, 谭忠盛¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018)

[摘要] 青岛胶州湾隧道工程全长 7 800 m, 下穿海域 3 950 m。有两条主隧道和一条服务隧道, 在青岛端距离洞口 2 000 m 处设有进出海底隧道的匝道。主隧道海域段线间距约 55 m, 断面为椭圆形断面, 隧道断面宽 16 m, 高 12 m, 隧道洞身主要位于微风化花岗岩、辉绿岩、安山岩中, 纵断面采用“V”字坡, 最大海水深 42 m, 隧道最小埋深不小于 30 m。对钻爆法修建青岛胶州湾海底隧道的关键技术和大型施工机械配套进行了探讨。

[关键词] 胶州湾海底隧道; 钻爆法; 施工; 机械配套

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)07-0045-08

1 前言

海底隧道工程属高风险项目。目前, 日本、挪威建成的海底隧道较多, 技术较成熟, 我国则处于起步阶段。随着改革开放的不断深入和国力的逐年提高, 我国城市道路建设进入了快速发展阶段。近年来, 为减少交通压力, 带动城市经济的发展, 大批跨江、跨海通道需要修建。采用跨海隧道与修建海上桥梁方式相比, 海底隧道具有全天候通行的特点, 具有不破坏航运、不影响景观、不占地或少拆迁、交通不受大风大雾影响等优点, 是一种更好的交通设施。目前我国正在规划待建的海底隧道项目 17 个, 如大连海底隧道、中国台湾海峡海底隧道等。青岛胶州湾隧道是我国在建的第二条大型海底隧道, 也是目前我国最长的海底隧道, 受到国内外广泛关注。因该工程建设标准高、结构断面大、地质条件和施工工艺复杂, 加之其在技术、管理、设备、资金、材料、环境等方面与国外相比存在一定的差异, 为此, 探讨研究适合我国国情的海底隧道修建技术非常必要。文章结合青岛胶州湾隧道工程, 对采用钻爆法修建海底隧道施工中的关键技术和大型机械配套问题进行了探讨。

2 工程概况^[3]

2.1 隧道方案

青岛胶州湾隧道工程是连接青岛市主城区与辅城的重要通道, 南接薛家岛, 北连团岛, 下穿胶州湾湾口海域, 隧道全长 7 800 m, 其中海域段长 3 950 km。纵断面采用“V”字坡, 设双向 6 车道, 行车速度 80 km/h, 属城市快速通道。该工程主隧道线间距 55 m, 中间设服务隧道。主隧道之间每 250 ~ 300 m 设人行横洞, 每 750 ~ 1 000 m 设车行横洞。附属设施有地下泵站、风井、出入口接线、匝道等。隧道平面、纵断面见图 1, 横断面见图 2。

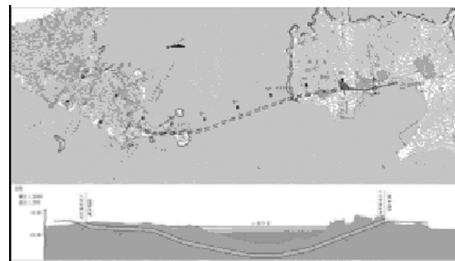


图 1 青岛胶州湾隧道平面、纵断面图
Fig. 1 The vertical section and planar graph of Qingdao Jiaozhou bay tunnel

[收稿日期] 2008-04-08

[作者简介] 马 栋(1963-), 男, 河南方城县人, 中铁十六局集团有限公司总工程师, 教授级高级工程师, 主要从事隧道与地下工程的施工、科研工作; E-mail: mading@crc. cn

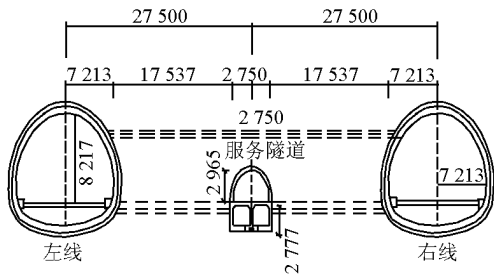


图2 青岛胶州湾隧道横断面图(单位: mm)

Fig. 2 The cross section graph of Qingdao Jiaozhou bay tunnel(Unit: mm)

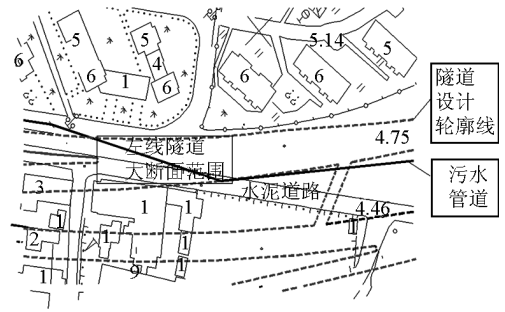


图3 超浅埋、超大断面隧道与建筑物关系图

Fig. 3 The relation picture of the super - shallow, surpass big section tunnel and the building

2.2 工程环境

胶州湾隧道地处胶州湾湾口,隧址区平均水深30 m,最大水深42 m。最小覆盖层厚30 m。地质为第四纪覆盖不甚发育,厚度在0~5 m之间,许多部位基岩裸露。基岩主要为下白垩纪青山群火山岩及燕山晚期崂山超单元侵入岩(中风化和微风化花岗岩与火山岩),中风化层很薄,岩石强度高,完整性较好。场地地震基本烈度为6度,场区地质构造主要为断裂构造,所发现18条断裂大部分为高角度、中新代脆性断裂构造,其宽度在数米至数十米不等。其中海域段穿越4组14条断裂带,断层内以压碎岩、碎裂岩、糜棱岩为主。主隧道Ⅱ~Ⅲ级围岩约占55.7%,Ⅳ级围岩约占38.1%,Ⅴ级围岩约占6.2%。

海域及距海较近处的地下水的化学成分与海水相似,具有强腐蚀性。基岩弱风化带多为中等透水性、少数弱透水性,微风化破碎岩体和断裂带大部分为弱透水性、部分为中等渗透性,绝大多数微风化岩体为微~弱透水性,局部为中等渗透性。

在团岛端陆域段左线与匝道结合处隧道长212 m,宽16.72~27.82 m,高12.60~18.05 m,断面呈喇叭口状。覆盖层厚12 m,三处断层破碎带,地质为杂填土、砂砾石、风化、断层破碎岩组成,属超浅埋,超大断面单孔隧道。结构下穿 $\phi 1.2$ m砼污水管线及建筑群,其影响范围12栋,均为住宅及办公楼,层高3~7层,砖混及框架结构,条形基础,深2~3 m。楼房与隧道之间的关系见图3。

2.3 设计标准

a. 设计使用年限:100年; b. 使用功能:城市道路交通; c. 主线设计车速:80 km/h; d. 车道数:双向6车道,主线行车道宽度:2×3.5 m+3.75 m; e. 隧道最大纵坡:4%,隧道最小纵坡:0.3%; f. 设计安全等级:一级; g. 防水等级:一级。

2.4 结构型式

主隧道结构采用复合式衬砌结构,根据不同围岩地段的结构受力要求,考虑到海域段隧道地下水压力大,海域段断面采用三心圆拱形断面,设置仰拱;陆域段采用三心圆拱形断面,Ⅳ、Ⅴ级断面设置仰拱,Ⅱ、Ⅲ级围岩不设仰拱,结构如图4,图5所示。

环填 $\phi 25$ 中空防腐锚杆, $L=3.5$ m, 间距 $\phi 1.0$ m $\times 1.0$ m
环填C35喷射混凝土, 厚度 $\phi 200$ mm $\times 200$ mm
C35喷射混凝土, S8
格栅钢架, 间距 $\phi 1000$ mm
无纺纤维衬层(600 g/m ²)
2 mm厚ECB防水板
C50钢筋混凝土, S12

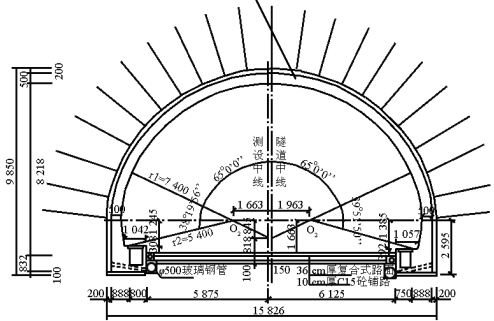


图4 无仰拱的断面(单位: mm)

Fig. 4 Non - inverted arch section(Unit: mm)

环填 $\phi 25$ 中空防腐锚杆, $L=3.5$ m, 间距 $\phi 1.0$ m $\times 1.0$ m
环填C35喷射混凝土, 厚度 $\phi 200$ mm $\times 200$ mm
C35喷射混凝土, S8
格栅钢架, 间距 $\phi 1000$ mm
无纺纤维衬层(600 g/m ²)
2 mm厚ECB防水板
C50钢筋混凝土, S12

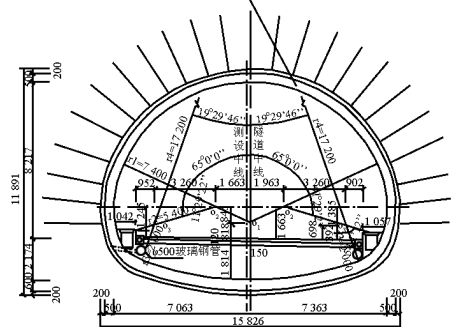


图5 有仰拱的断面(单位: mm)

Fig. 5 Inverted arch section(Unit: mm)

3 施工难点及施工组织

3.1 施工难点

1) 在海域段海水压力大,隧道断面大,地质资料具有不确切性,不可遇见因素多,开挖断层破碎带容易发生突泥突水,施工风险大。

2) 超浅埋,超大断面隧道下穿建筑群,扰民现象严重,施工工艺复杂。施工中极易引起楼房基础沉降、结构开裂,地下管线漏水等不良现象,造成安全事故及巨额经济赔偿。

3) 海水对钢筋砼有腐蚀性,由于隧道纵坡呈 V 形,渗漏水不能顺自然坡流出洞外,对砼耐久性和隧道防、排水质量要求较高。

3.2 施工组织

工程采用钻爆法开挖,喷锚构筑法支护。隧道 II、III 级围岩段采用四臂凿岩台车下导洞超前减震全断面爆破开挖作业;IV 级围岩采用台阶法开挖;V 级围岩陆域段和挤压型海底破碎带采用自进式管棚超前支护,CD(center diaphragm)工法施工。V 级围岩陆域过房屋段和张拉性海底断层破碎带采用管棚超前注浆加固止水,双侧壁导坑法或 CRD(cross diaphragm)工法施工。隧道薛家岛端由主隧道洞口作业面进入海底;团岛端由服务隧道及斜井进入海底;在隧道中部贯通,土建总工期约 36 个月。

胶州湾隧道工程地质大部分条件较好,比较适合大型机械化配套施工,因此选用全断面开挖的四臂液压凿岩台车设备和多功能凿孔台架,以加快施工速度,降低施工安全风险。出碴采用反向挖掘机配合、侧卸式装载机装碴,自卸汽车运输。仰拱初支封闭后,回填 20 cm 厚碴土,以防止机械走动时破坏初支。

钻爆法隧道施工的关键工序有钻炮眼、爆破、出碴、初期支护等。青岛胶州湾隧道工程岩石强度高、硬度大,且存在高压涌水的可能。因此,采用凿岩台车钻眼,施工速度快,需要人工少,工效高,且能完成锚杆的钻孔和安装,降低施工安全风险。同时配备多功能凿孔台架,反向挖掘机配合侧卸式装载机装碴,自卸汽车运输。本工程采用两台凿岩台车联合作业,以提高功效,保证施工速度和工期。凿岩台车配置型号为 T11S-315,主要性能参数如下:最小工作半径:不小于 10 m;冲击调节:无级变速;最大爬坡能力:不小于 6%。凿岩台车如图 6 所示。

为减少仰拱混凝土施工缝,提高混凝土耐久



图 6 T11S-315 凿岩台车

Fig. 6 T11S-315 rock bogie

性,保证仰拱施工不受干扰及开挖出渣运输正常进行,采用仰拱栈桥进行仰拱施工。栈桥净跨不小于 10 m,并和模板台车配套,设计通行荷载为 60 t。

4 超前地质预报

4.1 海域段不良地质范围

通过初步的地质探测资料表明,海域段 14 条断层破碎带,其中 6 条为张形裂隙,分别是 f2-3; f3-2; f4-1; f4-3; f4-4; f4-5。其影响范围: f2-3 为 86 m;其余为 35~50 m。岩体以破碎散装结构为主,带内有辉绿岩进入,岩石软硬不均,自稳能力差,裂隙被地下水侵蚀严重,水量较大,围岩级别为 V 级,是超前地质预报及施工防范的重点,如图 7(①~⑥)所示。

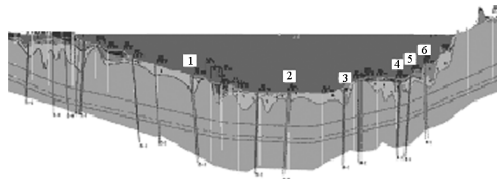


图 7 张性断层破碎带位置示意图

Fig. 7 The location of the tension fault fracture zone

4.2 超前地质预报的目的

地下水是影响隧道工程安全性的重要因素,而海水的补给是无限的,所以探明隧道前方地下水情况是施工安全的关键。超前地质预报是为了了解掌子面前方一定长度范围内的地质水文情况,为施工方法和安全提供依据。其目的是:a. 探明隧道前方地下水情况;b. 进一步查明前期没有探明的、隐伏的重大地质问题,进而指导隧道施工顺利进行,减少隧道施工的盲目性;c. 降低隧道施工地质灾害发生的机率,保证隧道施工安全;d. 为隧道动态设计和信息化施工提供基础资料,使隧道设计施工更科学、安全和快捷。

4.3 超前地质预报的方法

1) 建立由业主牵头组建的地质预报体系,制定完善的预报预警机制,明确第三方超前地质预报单位与施工单位的职责,进行密切协作,共同完成超前地质预报的实施工作。

2) 将超前地质预报纳入隧道施工的一项重要、必不可少的施工工序来完成。

3) 采取综合超前地质预报的方法。即服务隧道超前施工;TSP(tunnel seismic prediction)长距离探测(100~150 m);长探孔取芯(≥ 30 m)钻探;短探孔(≥ 10 m)钻探;以及地质素描、地质雷达、瞬变电磁等。根据具体情况,将其中几种方法结合起来,互相补充,互相验证,达到稳妥可靠,万无一失的目的。其主要做法是:

a. 地质素描:通过对掌子面的地质状况进行描述、记录、分析、判断预报掌子面前方地质状况。

b. TSP长距离探测:采用瑞士产TSP202超前地质预报仪,探测距离达100~200 m。具体操作是在掌子面50~60 m范围内靠边墙一侧布置 $\phi 40$ mm炮眼24个(深1.5 m,间距1.5 m,下倾角 15°);再距15~20 m布置一个 $\phi 50$ mm接收孔(深2.0 m,下倾角 15°);在炮孔内装上适量炸药,瞬发电雷管,利用接收器装置逐个起爆、接收信号,然后收集信号,进行解译。具体方法见图8。

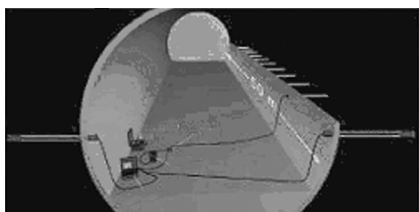


图8 超前地质预报方法示意图

Fig. 8 The method diagram of TSP

c. 超前地质钻孔:水平超前钻孔每断面3~5个孔,取芯钻孔长30 m,搭接5 m,为了提高工作效率,采用意大利C6多功能钻机实施。钻机见图9。



图9 C6多功能钻机示意图

Fig. 9 The C6 multi-function rig diagram

d. 瞬变电磁预报法:瞬变电磁预报法是一种时

间域电磁法,利用阶跃波形电磁脉冲激发,不接地回线向隧道掌子面前方发射一次场,在一次场断电后,测量由地下介质产生的感应二次场随时间的变化,来达到寻找各种地质目标的地球物理勘探方法,是探测地下水的主要方法。

e. 超前地质预报实行“三结合”和风险靶段划分原则,即“地质与物探、钻探结合;洞内外结合;长短距离及不同物探方法结合”,在对隧道风险分级的基础上,采用相对应的综合预报方案。实践证明,TSP,地质雷达对断层、破碎带有较好地预报效果;瞬变电磁、地质雷达是预报含水体的有效手段;钻孔取芯可以较好地了解未开挖岩体的围岩情况。

5 海域段断层破碎带施工方法

5.1 施工方法

海域段断层破碎带重点是V级围岩地段,其岩体破碎,自稳能力很差,裂隙与海水可能是连通的,开挖中极易发生坍塌,并可能产生突泥突水的危险。其穿越方案主要是采取超前预注浆加固堵水并结合超前管棚的方法,同时加强对爆破震动波的控制,做好防突泥涌水的风险管理,准备完善的防水闸门、排水设备、逃生路线规划和现场监控等防灾应急措施。

对于渗水量较少,压扭性一般断层地带,采用CD法施工,开挖面注浆加固地层,中长管棚超前支护;对于渗水量较大,张拉性严重断层地带,采用双侧壁导坑法施工,全段面超前帷幕注浆加固地层,自进式长管棚超前支护。全段面超前帷幕注浆是工程成败的关键。

5.2 全段面超前帷幕注浆方案

全断面超前帷幕预注浆每个循环共设置105个注浆孔,1#~22#孔深15 m,23#~44#孔深22 m,45#~105#孔深31 m。隧道超前注浆加固范围为隧道开挖轮廓线外5 m,每循环注浆段长30 m,开挖时预留10 m作为止浆岩盘(见图10)。

5.3 帷幕注浆参数的确定

1) 注浆压力。根据地质报告,裂隙岩体地层注浆设计压力一般比静水压力大0.5~1.5 MPa;当静水压力较大时,为静水压力的2~3倍。在海域段注浆终压为3.0~4.5 MPa。海底隧道封堵涌水时的注浆终压可根据公式 $p = (2 \sim 4) \text{MPa} + p_0$ (其中 p_0 为涌水压力)并结合工程经验确定。另外,注浆泵的压力应达到设计压力的1.3~1.5倍。现场根据实际情况,进行调整。

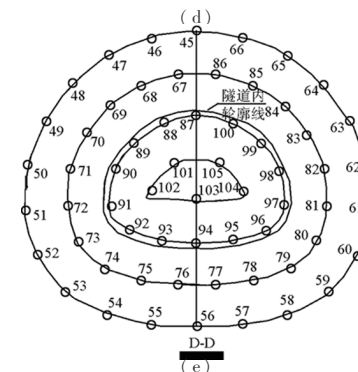
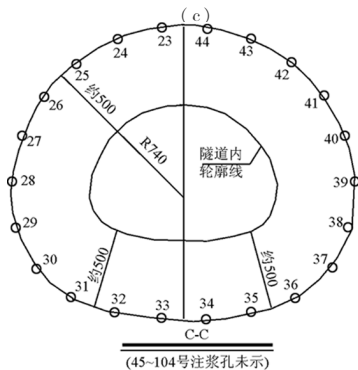
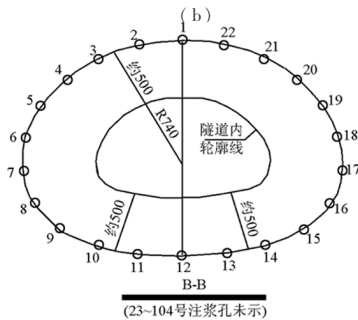
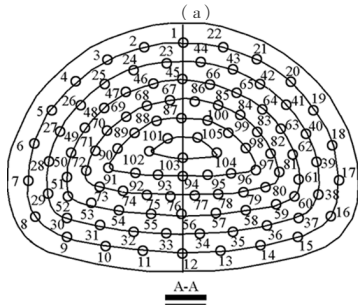
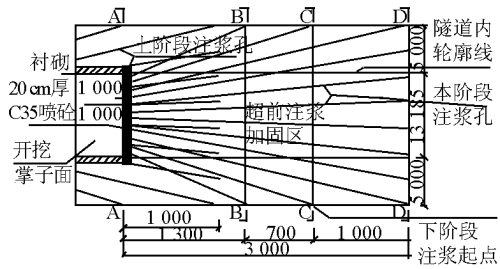


图 10 全段面前超前帷幕注浆布置图(单位:cm)

Fig. 10 The graph of curtain grouting ahead of full-face (Unit: cm)

2) 注浆材料。根据室内试验结果及本工程特点,选择普通水泥单液浆、普通水泥—水玻璃双液浆、超细水泥浆单液浆、特制硫酸盐水泥浆单液浆等作为注浆材料见表 1。

表 1 注浆材料及配合比选用

Table 1 Grouting materials and mix table

名称	配比参数			适用条件
	水灰比	体积比	水玻璃浓度	
普通水泥单液浆	0.6:1 ~ 1:1			一般软弱破碎地段,断层影响带
水泥—水玻璃双液浆	0.6:1 ~ 1:1	1:1 ~ 1:0.3	30 ~ 35 Be'	断层破碎带,水量较大,压力不长时间内上升时
超细水泥单液浆	0.8:1 ~ 1.2:1			海域强风化破碎段,裂隙较小段
特制硫酸盐水泥单液浆	0.8:1 ~ 1.2:1			海域断层破碎带,水量较大,压力较高,堵水要求较高段

5.4 帷幕注浆施工

5.4.1 钻孔

为防止承压水和受压浆液从工作面漏出,保证能用最大的注浆压力把浆液注入含水层的裂隙中,使之沿裂隙有效地扩散,钻孔前先施作厚 60 cm 的 C25 钢筋混凝土止浆墙,还要对止浆墙体附近一定范围内的隧道围岩进行加固。采用意大利 C6 多功能钻注一体机钻孔,按照设计及钻机所在位置,计算出各钻孔在工作面上的坐标,放线注浆孔的准确位置,钻机安装平整稳固,在钻孔过程中检查校正钻杆方向。孔底偏差应不大于孔深的 1/40,注浆检查孔的孔底偏差应不大于孔深的 1/80,其他各类孔底偏差应小于 1/60。

钻孔 2 m 后安装孔口管,孔口管是一端焊有法兰盘的钢管,长度根据需要确定,一般为 2 m。孔口管的作用:测量钻孔出水压力及涌水量;安装注浆栓塞;出现孔口涌水时及时关闭。

5.4.2 注浆

采用 ZJB(BP) - 30A 高压注浆泵(额定工作压力 30 MPa,流量 0 ~ 110 L/min,额定功率 55 kW),采用分段前进式注浆,分段长度:5 ~ 7 m。注浆速度为 5 ~ 110 L/min。具体经计算及现场试验后确定。注

浆顺序:先外圈后里圈,先上后下,间隔跳孔,后序孔兼作检查孔。注浆结束标准如下:

1)单孔注浆结束标准。a. 定量标准:当注浆量达到单孔设计注浆量的1.5~2倍,压力仍然不上升,可采取双液注浆等措施结束该孔注浆;b. 定压标准:注浆过程中,压力逐渐上升,流量逐渐下降,当注浆压力达到设计标准,即可结束该孔注浆。

2)全段结束标准。a. 设计的所有注浆孔均达到注浆结束标准,无漏注现象;b. 按总注浆孔的5%~10%设计检查孔,检查孔满足设计要求。

5.5 帷幕注浆效果检查

5.5.1 分析法

1) $P-q-t$ 曲线分析法。根据地质特征、注浆机理、设备性能、注浆参数等对 $P-q-t$ 曲线进行分析,从而对注浆效果进行评判。

2)浆液填充率反算法。通过统计注浆总量,反算注浆后地层的浆液填充率,根据填充率判断注浆效果。

3)注浆量分布特征法。根据注浆量分布时间效应,对注浆效果进行宏观评价;根据注浆孔注浆空间量分布效应,分析判断注浆加固的薄弱部位,对注浆效果进行宏观评价。

4)涌水量对比分析法。通过对注浆过程中各钻孔涌水量变化规律进行对比分析,或对注浆前后涌水量进行对比,判断堵水率,从而对注浆堵水效果进行评价。

5.5.2 钻孔检查法

1)检查孔观察法。通过对检查孔进行观察,察看检查孔成孔是否完整,是否涌水、涌砂、涌泥,检查孔放置一段时间后是否塌孔,是否产生涌水、涌砂、涌泥,通过观察,定性评定注浆效果。如果每孔每延米检查孔涌水量大于0.15 L/min或局部孔涌水量大于3 L/min时,进行补充钻孔注浆,再次注浆直到达到设计要求为止。

2)检查孔取芯法。通过对检查孔取芯率、岩芯的完整性、岩芯强度试验机浆脉充填情况,判断注浆效果。

5.5.3 开挖取样观察法

1)加固效果观察法。在开挖过程中,观察浆脉在地层中的充填胶结情况、分布规律、渗漏水情况和浆脉的宽度、长度等情况,与注浆前对比分析判断注浆效果。

2)注浆机理分析法。通过对掌子面注浆效果

观察,分析注浆机理,定性判断注浆效果。

3)力学指标测试法。对掌子面进行取样,对试件进行力学指标测试,通过分析力学指标,确定注浆效果。

6 大断面隧道下穿建筑物施工

大断面下穿楼房基础处围岩IV~V级。覆盖层厚12 m,确保楼房的安全及污水管线不渗漏是工程施工的关键。

6.1 施工方法

采用导洞法及双侧壁导坑法施工(见图11,图12)。

序号	施工项目	简图	简要说明
1-10	开挖1#-10#导洞		各导洞每循环进尺1-2 m,退后2-3 m安装锚杆、锚脚锚管、注浆、安装钢格栅、喷砼支护。 按超前支护方案标注的部位、参数,施作大管棚、小导管注浆,注意管棚作业面设置C6砼机作业平台,管棚钻孔位置断面加大。 各作业面之间距离:1#、3#相错2-3 m,4#、6#相错15 m,5#、8#相错15 m,上、下台阶相错8-10 m。
11	仰拱衬砌		(1)初期支护局部破除;(2)施作防水层;(3)绑扎钢筋;(4)立立模板,灌注砼;(5)恢复中隔墙。每循环4-8 m,操作期间,仰拱栈桥通行车辆。
12	拱墙衬砌		(1)破除局部填充;(2)初期支护局部破除;(3)施作防水层;(4)绑扎钢筋;(5)立立模板,灌注砼。 采用钢模架支撑,操作期间通道保持畅通,灌注砼时,补充支撑,车辆暂停。
13	底部回填,电缆沟施工		(1)拆除初期支护;(2)经浆液充填块。 (3)施工电缆沟。 经底部回填、右侧错开施工,每段回填20-30 m。

图 11 左线匝道结合处施工方案

Fig. 11 The shop drawing of left ramp junction

6.2 控制沉降的措施

1)上半断面采用超前帷幕注浆加固地层,自进式长管棚超前支护。施工方法参照全断面帷幕注浆。

2)采用短进尺、弱爆破、早封闭、多循环的方法施工,开挖进尺每循环控制在1.5 m以内。

3)加强对爆破震动波的控制。隧道爆破施工必然对围岩造成损伤和破坏,从而影响围岩的稳定性和渗透率。其震动波直接影响到楼房及地下管线开裂。在楼房基础处,爆破振动速度按 $v \leq 10$ cm/s控制。采用TC-4850爆破测震仪进行测试,施工中采取的减震措施主要有:

a. 施工前进行周密的爆破设计,一次齐爆药量

序号	施工项目	简图	简要说明
1-3	开挖1#-3#导洞		各导洞每循环进尺1~2 m, 退后2~3 m安装锚杆、铁脚锚管、注浆、交磁锚杆、喷射支护。1#, 2#相距2 m, 1#, 3#相距10 m。按超前支护方案标注的部位、参数, 施作大管棚、小导管注浆, 注意管棚作业面设置C6钻机作业平台, 管棚钻孔位置断面加大。
4	拱墙基础施工		注意电缆沟位置预留; 注意各种排水管、防水板接茬预埋。
5	拱墙衬砌		(1)初期支护局部破除;(2)施作防水层;(3)绑扎钢筋;(4)立立模板, 灌注砼。每循环5~6 m, 采用钢模架支撑。
6-7	开挖6#, 7#导洞		同1#-3#导洞 注意错短开挖尺寸, 减少装药量, 防止相邻岔开挖。
8	拱墙基础施工		注意电缆沟位置预留; 注意各种排水管、防水板接茬预埋。
9	拱墙衬砌		(1)初期支护局部破除;(2)施作防水层;(3)绑扎钢筋;(4)立立模板, 灌注砼。每循环6~8 m, 采用钢模架支撑。
10	底部回填、电缆沟施工		(1)开挖核心土, 拆除初期支护; (2)随底填充找坡; (3)施工电缆沟; 随底回填左、右错开施工, 每段回填20~30 m。

图 12 左线隧道分离处施工方案

Fig. 12 The shop drawing of left ramp separate junction

按式(1)进行检算, 并进行试爆, 对 K 值及 α 值根据实际进行调整。

$$Q = R^3 \left[\frac{v}{K} \right]^{3/\alpha} \quad (1)$$

式(1)中, Q 为一次齐爆药量, kg; R 为保护目标至爆点距离, m; V 为振动速度, cm/s; K 为与地质条件有关的系数; α 为地震波衰减系数。

b. 采用低威力、低曝速炸药, 或采用小直径不耦合装药。

c. 采用微差爆破, 减小震动波叠加。

d. 采用预裂爆破或预钻防震孔, 隔断及衰减震动波。

e. 减小炮眼装药密度, 限制一次起爆的装药量。

f. 采用分步开挖, 增加临空面。

4) 加强监控量测。随时掌握开挖过程中围岩的动态和支护结构的稳定状态, 并据此确定相应的施工措施, 确保施工安全。

7 耐久性砼施工

7.1 喷射混凝土施工

为使隧道结构抵抗海水的侵蚀, 满足使用 100 年的要求, 经过试验及论证: 设计初期支护为 C35, S8 抗海水侵蚀高性能防渗喷射混凝土; 二次衬砌为 C50, S12 耐久性防水混凝土。喷射混凝土物

理力学性能及配合比见表 2^[4]。

表 2 抗侵蚀高性能防渗喷射混凝土力学性能

Table 2 The mechanical function of the high - powered anti - erosive dampproof jet beton

强度等级	28 d	C35
C35	1 d	≥ 10 MPa
黏结强度		≥ 0.8 MPa
抗渗标号		$\geq S12$
耐久性指标	抗氯盐侵蚀	电通量 ≤ 1500 C 氯离子扩散系数 $\leq 4 \times 10^{-8}$ cm ² /s
	抗硫酸盐侵蚀	$K_6 \geq 0.8$
	水泥/ 硅粉/ 粉煤灰/ 砂/ 石/ 水/ 纤维/	(kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³) (kg· m ⁻³)
	夏季普通砼	334 22 84 951 778 176 -
	夏季纤维砼	334 22 84 951 777 176 0.9
	冬季普通砼	352 22 66 951 778 176 -
	冬季纤维砼	352 22 66 951 777 176 0.9

注: 减水剂 4.4 kg/m³, 速凝剂 35.2 kg/m³

操作工艺: 采用自动计量拌合站、强制式拌合机拌合, 搅拌输送罐车运输, 湿喷机喷射。混凝土坍落度: 拌和机出料口 (18 ± 2) cm; 湿喷机进口 12 ~ 15 cm。工作风压: 边墙 0.3 ~ 0.5 MPa; 拱部 0.4 ~ 0.6 MPa, 采用喷枪喷水养护。要求喷射混凝土密实、饱满、表面平顺, 各项试验指标合格。不允许出现空洞、漏筋、脱皮、表面坑洼不平等不良现象。

湿喷混凝土设备: 施工前期及喷射混凝土数量小的地段, 采用一台或多台 TK500 型湿喷机进行作业, 生产能力: 5 m³/h (每台)。为减轻劳动强度、提高产量、降低安全风险, 主隧道采用 PM500 - PC 喷射机械手进行喷射作业, 主要参数如下: 喷射最大高度: 11 m; 喷射最大宽度: 16.6 m; 最小工作隧道: 5 m 宽 × 3 m 高; 生产能力: 10 ~ 33 m³/h; 输送方式: 非转子式和非转子活塞式。

7.2 模注混凝土施工

模注混凝土物理力学性能及配合比见表 3。

表 3 耐久性防水混凝土物理力学性能

Table 3 The physics function of endure dampproof beton

		3 d ≥ 21 MPa
	强度	28 d ≥ 58 MPa
	抗渗等级	$\geq S12$
混凝土	水胶比	≤ 0.34
性能	28 d 氯离子扩散系数	$\leq 4 \times 10^{-8}$ cm ² /s
	水溶性氯离子含量	≤ 0.35 kg/m ³
	碱含量	≤ 3 kg/m ³
配合比	水泥 矿粉 粉煤灰 砂 石 水 减水剂	
/(kg· m ⁻³)	250 145 75 730 1095 150 ~ 155 5.2 ~ 6.0	

操作工艺:采用自动计量拌合站拌合,搅拌输送罐车运输,混凝土输送泵入模。模具采用自制(长度 10.5 m)衬砌台车,振动泵捣固,喷枪喷水养护。混凝土坍落度:拌和机出料口 ≥ 18 cm;进入输送泵前 ≥ 16 cm。要求严格控制入模温度及入模塌落度,防止温差、干裂收缩产生裂缝。要求混凝土密实、饱满、表面平顺,各项试验指标合格。不允许出现拱顶空洞、气泡、蜂窝麻面、开裂、错台、钢筋保护层不够等不良现象。

8 结语

青岛胶州湾隧道是我国在建的第一批海底隧道

工程,关键技术问题较多较新,如隧道的最小覆盖层厚度、防排水方案、外水压力的确定、耐久性要求、防灾系统等。海底隧道建设规模大,建设的思路应该是高标准、严要求和技术创新,大型机械化配套施工,促进我国隧道修建技术发展。目前我国海底隧道建设还存在经验不足、安全风险大等问题,笔者只是对施工关键技术和机械配套问题做了简要的探讨,更多的技术问题需要不断的摸索、积累和总结。

Key tunneling technology and configuring big machines in Qingdao Jiaozhouwan subsea tunnel

Ma Dong^{1,2}, Tan Zhongsheng¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway 16th Group Co., Ltd., Beijing 100018, China)

[Abstract] Qingdao Jiaozhouwan tunnel is 7 800 m, and subsea tunnel is 3 950 m. There are 2 main traffic tunnels and 1 serving tunnel. Accessorial tunnel passing in or out the main traffic tunnel is founded at 2 000 m part from gate in Qingdao. Space between the center lines of the 2 main traffic subsea tunnels is 55 m. The section is oblong, width is 16 m, and height is 12 m. The tunnel is through slightly weathering granite, dolerite and andesite. Its vertical section is "V" slope. The maximum seawater depth is 42 m and the minimal rock cover depth is 30 m. The key tunneling technology and configuring big machines of drilling and blast for constructing Qingdao Jiaozhouwan subsea tunnel were discussed in this thesis.

[Key words] Jiaozhouwan subsea tunnel; drilling & blast; construct; configuring big machines