

厦门翔安海底隧道修建技术初论

瞿守信

(中国厦门东通道翔安隧道工程现场指挥部,福建厦门 361009)

[摘要] 对厦门翔安海底隧道从桥梁隧道方案比选到跨海隧道方案的确定进行研究。介绍了在此作海底隧道方案的优越性,以及该海底隧道的特点、难点和施工技术方案,并对隧道设计、施工中所存在的不足之处进行论述。

[关键词] 厦门翔安海底隧道;修建技术;经验初论

[中图分类号] U45 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0024-06

1 前言

厦门翔安海底隧道是我国大陆第一条海底隧道,也是第一条大断面海底公路隧道。该隧道地质复杂,特别是两端陆域浅滩段,长距离的不良地质杂填土、黏土、沙质黏性土、高岭土和全强风化花岗岩地层,地下水丰富,从洞门进洞开始就在海平面1.5 m以下。整个隧道在地下水和海水渗透的包围之中。特别在两岸陆域段,软土和硬岩相交错的地段,地下水沿软硬交界面涌出,给施工带来极大的困难。翔安端过450 m的富水沙层,该沙层正好在左右线主隧道的上半断面通过,沙层与大海连通,给隧道施工又带来一个极大困难。隧道通过海底段虽然岩层比较好,但是,有4条风化深槽(囊)成为隧道施工的拦路虎,是隧道修建成败的关键。我国的建设、设计、施工、监理等单位依靠科技进步,吸收国内外经验,出色地克服了以上困难,比较顺利地进行施工。开工四年来未发生过任何安全、质量事故,并总结出了不少成功的经验和存在的不足,不断进行改进和完善,隧道将安全优质地如期建成。

2 前期工作概要及工程概况

厦门翔安海底隧道的地理位置见图1。



图1 厦门翔安海底隧道的地理位置

Fig. 1 The location of Xiamen
Xiang'an subsea tunnel

厦门翔安海底隧道是厦门市本岛第三条进出岛公路通道,位于厦门岛东部,与对岸厦门市翔安区连通,并通过翔安区与福建省其他地区连通。

厦门岛北侧出岛通过厦门大桥,西侧出岛通过海沧大桥,东部出岛通过翔安海底隧道。

3 桥隧方案的比选

厦门岛东部通道最早通过桥梁(斜拉桥、钢拱桥、悬索桥等)方案和隧道方案(沉管法、TBM(tunnel boring machine)法、钻爆法)的比较,最后确定以隧道方案(钻爆法)通过。

隧道方案有以下优点:a. 隧道所通过的海域为白

[收稿日期] 2008-04-15

[作者简介] 瞿守信(1939-),男,河南卢氏县人,厦门翔安隧道副总监理工程师,教授级高级工程师,研究方向为隧道工程建设;
E-mail: qushuoxin@xmlq.com.cn

海豚保护区,如果修桥将会对白海豚产生影响,使海域环境受到破坏,修隧道不会影响白海豚的生存,不会破坏海域环境。b. 修桥要考虑港口和通航的要求,修隧道将不存在此类问题。c. 厦门是台风区,每年5月至12月份都有几十次台风的影响,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,如果通道都以桥梁通过,台风期间势必造成岛内交通瘫痪。修海底隧道,就不受台风的影响,全天候的通行,保证交通畅通。d. 厦门市特别是岛内地面有限,如果修建桥梁,其引桥很长,将占用很多地面空间。修海底隧道就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。e. 修建海底隧道在战时有利于桥梁,在抗震方面也优于桥梁。f. 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,海底地质情况复杂,沉管法断面大,预制管段重量大,施工技术和经验尚不够成熟。TBM法由于断面大、地质复杂、造价高,给予否定,最后确定用钻爆法施工该海底隧道。

3.1 前期工作概要

厦门翔安海底隧道项目于1996年10月正式启动前期工作,开始现场勘察和方案研究;2002年2月编制完成预可行性研究报告;2003年11月17日经国务院批准立项;2005年2月国家发改委批复了东通道工程工可报告,同意采用钻爆法暗挖海底隧道方案;2005年5月交通部批复了初步设计;2005年6月由厦门市交通委组织国内有关专家在厦门召开翔安隧道工程施工图及招标文件审查会;2005年7月底完成主体工程施工和监理招标;2005年9月6日正式开工建设。

3.2 工程概况

厦门翔安海底隧道(见图2和图3)长8.695 km,工程概算31.97亿元。工程场区以燕山早期花岗岩及中粗粒黑云母花岗闪长岩为主,穿插辉绿岩、二长岩、闪长玢岩等喜山期岩脉。主要不良地质现象包括隧道两端陆域及浅滩段全强风化层(其中翔安侧部分浅滩段存在透水砂层),海域段F1、F2、F3三处全强风化深槽和F4全强风化囊。本项目主要工程量包括左线隧道6.045 km,服务隧道

6.048 km,右线隧道6.051 km,通风竖井2座,五通互通(主线左线路基长0.631 km,右线路基长0.628 km,匝道长2.125 km,辅道长0.778 km,人行道长3.484 km),翔安部分接线(左线路基长0.755 km、右线路基长0.745 km)以及西滨互通立交一座。本工程海底隧道长约6.05 km,跨越海域宽约4.2 km。隧道设计采用设置服务隧道的三孔隧道方案,按双向6车道高等级公路标准建设,隧道最深处位于海平面下约70 m,最大纵坡3%。隧道施工以钻爆法为主,在不良地质地段采用浅埋暗挖法、CRD(cross diaphragm)工法、双侧壁导坑法等辅助工法。

本工程是国内第一条海底隧道,也是世界性的工程,具有建设规模大、地质条件复杂、工程经验少、开挖断面大、技术难度高、施工风险大、社会影响大等特点。施工重点与难点主要包括陆域及浅滩全强风化地段(含部分透水砂层)大断面浅埋(超浅埋)暗挖施工、海域全强风化深槽段施工、超前地质预报、施工防灾预案、防排水、工程耐久性保证措施等。

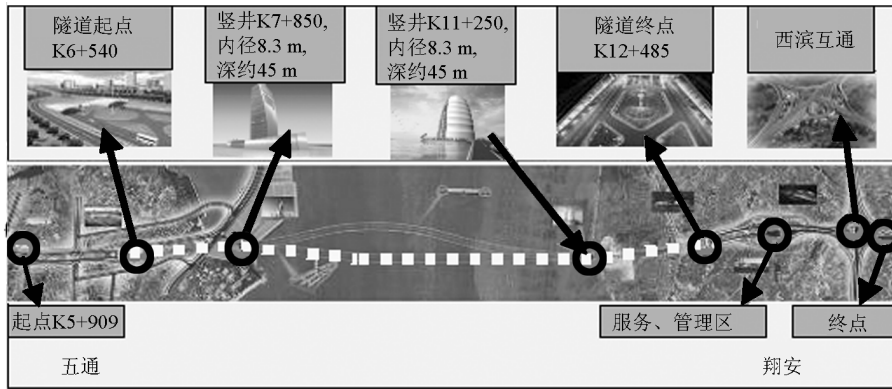
4 厦门翔安海底隧道的特点和难点

4.1 主要特点

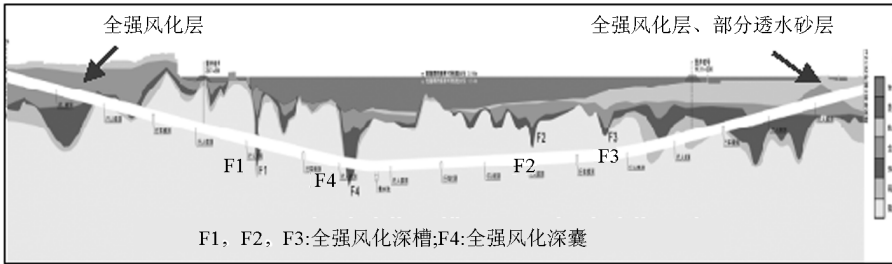
1)开挖断面大。该海底隧道在V级围岩段最大开挖宽度17.2 m,最大开挖高度12.8 m,最大开挖段面达170.7 m²,在世界海底公路铁路隧道断面中为比较大的断面。

2)长距离浅埋和超浅埋。该隧道在洞口段隧道埋置深度仅3~5 m,按2.98%的下坡向海底500 m范围内,隧道埋置深度在18~20 m范围内仍属浅埋暗挖法施工。厦门岛内五通端从洞口起860 m范围内均属不良地质段,岛外翔安端1 070 m均属不良地质段。

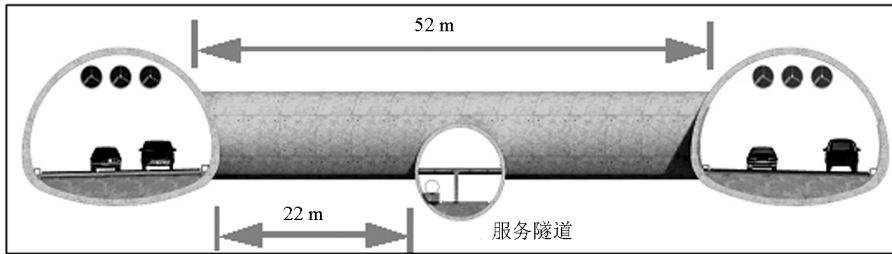
3)地质复杂、水量大、水压高、施工难度大。该隧道洞口陆域段和浅埋段多为杂填土(Q₄^{me}),局部为素填土,结构疏密不均,全新世海积淤泥(Q₄^m),全新世海积砂类土(Q₄^m),亚黏土(Q₄^{al+pl}),淤泥质亚黏土(Q₃^{al+pl})及泥灰质土,上更新世冲洪积黏性土及黏土质砂,第四纪残积层(Q^{cl})及全强风化花岗岩。地下水丰富,隧道在地下水和海水渗透水的包围之中,施工开挖困难。



(a)



(b)



(c)

图2 隧道平面(a)、纵剖面(b)、横剖面(c)图

Fig. 2 Plan map, profile map and cross section map

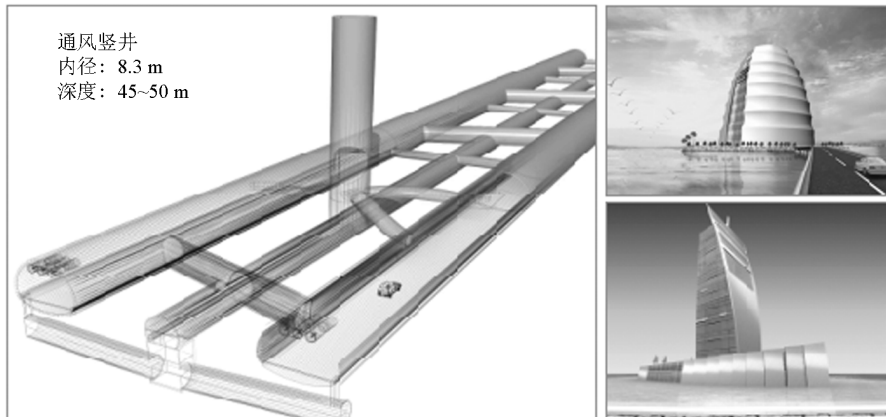
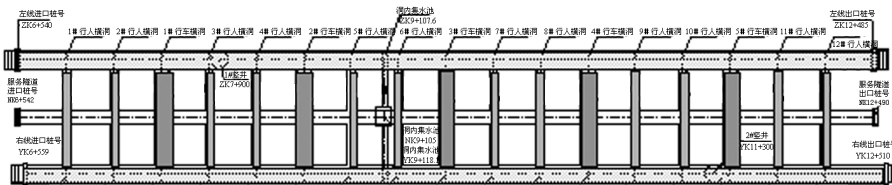


图3 通风竖井和人行、车行通道

Fig. 3 Ventilation shaft and the channels for pedestrian and vehicles

4)“V”型纵坡,下坡施工、排水困难。施工用水、围岩裂隙水、土层中的渗漏水都向开挖掌子面流,开挖时掌子面渗漏水都集中在掌子面,软弱围岩和黏土、砂土,在水的作用下软化、塑化、液化,易引起开挖工作面拱顶下沉、坍塌和初支变形,施工难度大。

5)施工风险大。陆域浅埋地质复杂易坍塌涌水、涌沙,在海域段有4条风化深槽(囊),风化深槽全强风化岩体破碎,强度低自稳能力差,风化深槽(囊)含有大量泥砂、碎石,富含地下水,且与海水直接连通。在极端地质条件下,存在发生渗透破坏的可能。其中,全强风化二长岩脉因高岭土矿物含量较高,具有若膨胀潜势。安全通过海底风化深槽(囊)是该隧道的施工重点和难点,能否安全顺利地通过4条风化深槽(囊)是该隧道修建成败的关键。

6)隧道结构防腐、抗渗要求高。本工程使用年限按100年设计,陆域段隧道二衬为C45防腐砼,抗渗等级为 S_8 ,海域段隧道二衬为 C_{45} 高性能防腐砼,抗渗等级为 S_{12} ,初期支护用 C_{25} 。 S_8 防渗透喷砼,要求初期支护达到不渗不漏,二次衬砌达到I级防水,即无湿迹。

4.2 工程施工的重点和难点

1)隧道穿越陆域浅埋全风化层段施工。浅埋段处于全风化地段,埋深浅,岩体强度极低,围岩自稳能力极差,且隧道处于地下水位以下。在浅埋区施工,其不良地质问题是渗水和围岩变形,如果施工措施不当,可能导致隧道坍塌和冒顶。

2)隧道穿越富水沙层段施工。浅滩隧道约450 m穿越砂层,由于砂层为良好的含水层且与海水连通,透水性强,稳定性差,易发生涌水、涌砂和坍塌(见图4)。

3)隧道穿越海底风化槽段施工。隧道通过海底F1,F2,F3,F4共4个风化槽(囊)时,岩层破碎含泥沙,并直接与海水连通。隧道顶部高水压(0.7 MPa)容易将隧道覆盖层击穿,从而发生坍塌、突水(见图5)。

5 施工方法

根据不同的地质情况采用不同的施工方法,确保施工安全。本海底隧道因地质情况比较复杂,采用了不同的施工方法。

5.1 CRD法

陆域浅滩不良地质段,穿越沙层段和海域风化

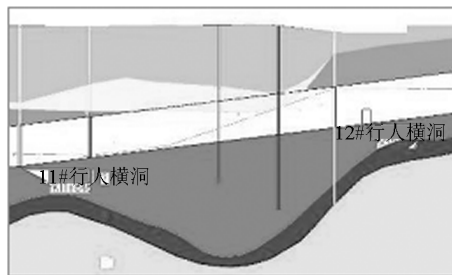


图4 翔安端富水沙层地段

Fig.4 The section of water riched sand stratum at Xiang'an part

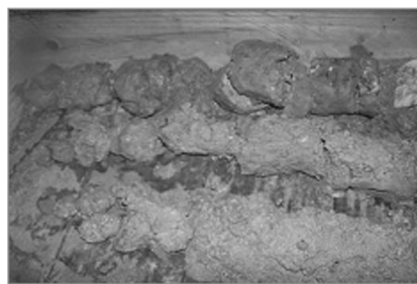


图5 F1 风化深槽水平钻孔取芯照片

Fig.5 Stratum samples by horizontal drilling in weathered stratum

深槽(囊)段。由于IV-V级围岩地质条件差,侧压力大,开挖断面大,所以采用CRD工法施工。其特点是:把大断面分成4个小断面进行分部开挖。

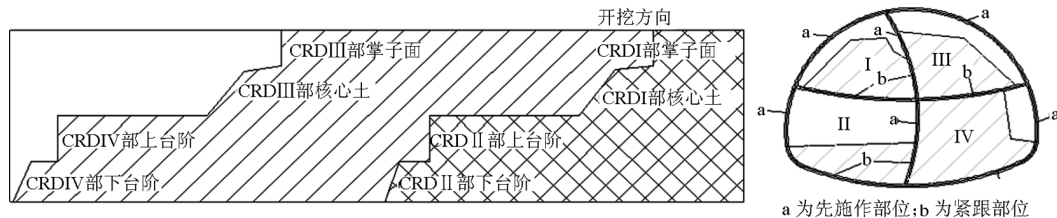
经施工实践证明,开挖顺序依I→Ⅲ→Ⅱ→Ⅳ部进行为好,每部应及时封闭成环。当I部封闭成环后,I部变形得到控制,挖Ⅲ部时除Ⅲ部变形外,Ⅲ部开挖时对I部的变形产生影响,同样挖Ⅱ部时除Ⅱ部自身的变形外,对I,Ⅲ部变形有影响,挖Ⅳ部时,对I,Ⅲ,Ⅱ部变形也有影响,影响逐步减少,直到Ⅳ部封闭后,整个隧道变形得到控制,每个掌子面的纵向间距应控制在8~10 m。从第I到Ⅳ部,即从第I部开挖到第Ⅳ部封闭,其间距离控制在30 m左右,不可拉得太长,隧道大断面早封闭早稳定。I部开挖时拱顶沉降值最大可控制在30 mm范围内;Ⅲ部开挖时拱顶沉降控制在15 mm范围内;Ⅱ部开挖时拱顶沉降控制在10 mm范围内;Ⅳ部开挖时拱顶沉降应控制在5 mm范围内。这样4部开挖完成,整个隧道断面封闭成环,拱顶沉降应控制在60 mm范围内。是可以达到的,也是比较安全的。

5.2 双侧壁导坑法(双侧洞法)

厦门翔安海底隧道A2标段即五通端右线,洞口刚开始施工时采用的是CRD工法施工(见图6)。但CRD工法施工将断面分为4块,施工时存在着上

下断面之间隔一层临时仰拱变为楼上楼下,人员上下要爬楼梯,且大型机械不宜在 I 部和 III 部施工,施工工序多、进度慢的缺点。所以改用双侧洞法施工,这样将整个大断面分为三块,即左导洞、右导洞和中导洞三部分,左、右导洞可以先进,中导洞滞后,大型开挖机、喷射机和装载机、载重汽车可以直接开到掌子面进行机械化施工。但在翔安海底隧道 A2 标段

实际采用双侧洞法施工中,由于地质条件比较差,地下水发育,在开挖时侧压力比较大,开始施工时并不顺利,平均月进度全断面开挖也在 40 m 左右。两侧导洞和中导洞在开挖时,实际上分了台阶式开挖,各导洞仍分上半断面先开挖,立刻喷射砼,架设钢支撑,连接纵向钢筋,安装钢筋网,喷射砼。同时与 CRD 法一样进行钢支撑拱背后的回填注浆。



说明: a. I, III 部预留核心土长度为 5 m, II, IV 部台阶长度为 3 m; b. I 部每循环进尺为 0.5 m, II, III, IV 部每循环进尺为 1 m, 临时仰拱每循环进尺为 1 m; c. I, II, III, IV 部间距不小于 10 m。

图 6 CRD 法施工方案示意图

Fig. 6 Construction processes of CRD method

为了控制拱顶沉降和拱腰收敛,同样要求小导管超前预注浆。小导管采用 $\phi 42$, 长 3.5 m 至 4 m 的无缝钢管,以对掌子面前方拱部周边进行超前预注浆堵水和对周边围岩进行加固,为下一步开挖创造条件。要求左右导洞初期支护及时进行封闭,预留台阶不能超过 6 m,在 6 m 范围内,初支及时封闭,左右导洞之间与中导洞掌子面之间距离不能超过 10 m,即在开挖的 30 m 范围内整个隧道断面应及时封闭成环,使整个隧道初期支护处于稳定状态。在开挖过程中,同样要进行真空降水和抽排水,使掌子面开挖时达到无水作业。同样按照“管超前、严注浆、短进尺、快支撑、早喷填、紧封闭”的十八字方针施工和“三严”管理。该施工方法在地质条件较好时,侧压力较小时才可使用,另外此施工方法在进行工序和施工方法改变时,比较麻烦,没有 CRD 法方便。

5.3 对 I—III 级围岩的施工方法

III 级围岩行车主隧道一般采用上下半断面法开挖施工。I—II 级围岩行车主隧道,一般采用导洞超前预留光爆层或大半断面开挖施工方法,但必做好光面爆破和减震爆破,不允许用全断面爆破开挖施工。

5.4 服务隧道的施工方法

对服务隧道围岩断面比较小 47 m^2 左右的情况(相当于单线铁路隧道断面),在开挖时 V—IV 级围岩用上下半断面开挖,III—I 级围岩基本上用大半断面开挖,随后进行底检底作仰拱。

6 不足之处

厦门翔安海底隧道是我国大陆第一条大断面浅埋暗挖法和钻爆法施工的海底隧道。在设计、施工、监理和管理方面缺少经验,所以存在一些不足之处也是难免的。

6.1 设计方面存在的不足

1) 关于翔安端的洞口位置选择(洞口全景见图 7)。笔者认为一般隧道洞口选择要避免将隧道洞口设在沟谷中心,因沟谷中心一般地质较差,逢沟必断,沟谷中心位置低、围岩破碎、地下水发育。而厦门翔安海底翔安端隧道洞口位置刚好设在沟谷中心,位置较低,洞口两侧位置较高,汇水面积比较大,两侧的地面水都往隧道洞口集中。使隧道洞口随时受地面水和地下水的威胁,且洞口开挖时土质较软,土体中含有高岭土,遇水膨胀变软,给施工带来很大的困难。且 3 个洞口各增加 100 m 明洞,如果设计时洞口向两侧偏移一点,或许情况会好得多。

2) 翔安端洞口和陆域浅滩富水沙层段。原设计在地面垂直旋喷桩和右线的洞内水平旋喷桩效果不佳,洞内水平旋喷桩更是经验不成熟,未能使用。经业主邀请全国专家共同研讨,最后确定用地下连续墙将沙层与海水隔断,然后分段进行地面深井降水,解决了隧道通过富水沙层的难题。

3) 翔安端右线通风竖井。原设计为钢板桩围护,钢板桩外侧设一单排垂直旋喷桩。结果竖井围



图7 翔安端洞口全景

Fig.7 The tunnel's entrance at Xiang'an

护结构作圆形钢板桩通过沙层段施工十分困难,钢板桩虽是进口的,在打钢板桩夯进十分困难,钢板桩都被打卷了、打弯了,也很难打进。结果使用钢板桩在沙层无法进入,钢板桩底部长短不齐。加之钢板桩外侧,单排垂直旋喷桩,旋喷桩效果不佳。导致竖井开挖止沙层段时突然涌水、涌沙,十分危险。为此竖井停工7个多月,直到进行设计多次变更。最后,还是以钻孔咬合桩作围护结构,加上钻孔咬合桩背后增加旋喷桩和钻孔咬合桩内外深井降水,才保证了竖井施工顺利进行。

6.2 施工方面存在的不足

1) 两端洞口进洞时和陆域浅滩段。对地质条件认识不足,抽排水不及时,出现了拱顶下沉,初支严重变形,多次进行换拱作业。

2) 对开挖时各分部封闭不及时。有的部距托的过长,有的封闭时间长,造成拱顶下沉和初支变形。

3) 施工工艺不严格。钢支撑连接不到位、钢支撑底部积水也是拱顶下沉的原因之一。

4) 超挖严重。岩层段光面爆破效果不佳、超挖严重造成喷射砼过厚、二衬过厚。

7 结语

厦门翔安海底隧道是中国大陆第一条用浅埋暗挖法和钻爆法施工的大断面海底公路隧道。该隧道地质情况复杂,施工难度大,安全风险高。经建设、

设计、监理、施工单位的共同努力和国内外专家的关心、支持和帮助,开工两年多已基本克服以上困难。3个难点地段已攻克两个,海底段风化深槽影响最大的是F1和F4风化深槽(囊)。其中F1风化深槽正在攻克中,服务隧道F1风化深槽已顺利通过,两主隧道风化深槽F1已各作了两个循环,正在施作第三个循环。现已基本总结出了通过风化深槽(囊)的管理、设计、监理、施工方面的经验,这对完成F4风化深槽(囊)有很大的好处。相信在此经验的基础上,3条隧道将顺利贯通。

厦门翔安海底隧道在现场管理上也创造了一套较完善的、高水平的现代化管理模式。遵循着“安全高于一切,质量同于生命,防范胜于补救,责任高于泰山”和“精心组织、科学管理”的原则。现场管理达到了国内外先进水平,成为国内示范工程。开工两年多未发生任何安全、质量事故,工程进展稳扎稳打,稳中求快。

厦门翔安海底隧道在施工中创造了很多先进的技术、先进的管理、先进的施工经验。例如:在不良地质段和海底段为了确保施工安全,首先做好地质和水文的超前预报。采取长距离100m和短距离20~30m的地质超前预报长短相结合;物探和地质水平超前钻探取芯相结合,做到对前方地质情况心中有数;采取相应的方案和措施,绝对保证施工安全;在过海底风化深槽段用全断面帷幕注浆和周围加固注浆与局部注浆相结合;注浆控制标准、检验标准、拱顶沉降和地面沉降控制标准等。

厦门翔安海底隧道因地质复杂,所以针对各种不同的地质情况采用不同的施工方法。几乎对浅埋暗挖法和钻爆法,以及所能使用的其他施工方法都用到了。对各种施工方法,特别是CRD法、双侧壁导坑法对拱顶沉降和拱腰收敛,确定了相应的安全标准。

(下转34页)