

# 大断面海底隧道软弱地层施工方法研究

黄明利, 路威, 徐恒国, 谭忠盛

(北京交通大学, 北京 100044)

[摘要] 我国第一条大断面海底隧道——厦门翔安海底隧道在浅滩及陆地段穿越富水软弱地层, 围岩自稳能力差, 极易发生涌水突泥, 严重威胁施工的安全性。通过对隧道开挖方案的对比分析和根据施工现场监控量测的结果, 对隧道穿越富水软弱地层的开挖施工方案、降排水关键技术和超前预加固方案进行了研究, 为隧道施工提供技术支持。

[关键词] 厦门翔安海底隧道; 软弱地层; 施工方法

[中图分类号] U459 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0035-04

## 1 前言

20世纪40年代末日本修建第一条水底隧道以来, 水底隧道被广为应用, 其结构形式以水底深埋暗挖隧道或沉管隧道为主。从国内外海底(或江底)隧道施工现状和发展趋势看, 海底隧道施工领域积累了一定的成功经验<sup>[1]</sup>, 但不够成熟, 特别是在富水软弱地层中的开挖技术还不完善。基于此, 笔者结合厦门东通道的地质情况和隧道断面跨度大等特点, 深入对软弱地层开挖方法、辅助施工工法等技术的研究, 以期在确保隧道安全合理施工的同时, 对类似工程提供借鉴。

## 2 厦门翔安海底隧道概况

厦门翔安海底隧道位于厦门市东北端的湖里区五通村与翔安区西滨村之间, 总长约4 200 m, 是连接厦门市本岛和翔安区陆地的重要通道, 兼具高速公路和城市道路双重功能。设计为双向6车道, 采用钻爆法施工, 隧道开挖最大断面尺寸为16.74 m × 12.16 m(宽 × 高), 面积达122 m<sup>2</sup>, 上部覆土厚度平均为7.35 m, 是我国第一条大断面、超浅埋海底隧道。同时隧道在陆域浅滩段将会穿越富水砂层,

由于围岩自稳时间短, 自稳能力差, 极易发生涌水突泥。此外, 海底隧道水源补给无限, 且施工过程中不具备自然排水条件, 一旦发生大规模的涌水突泥, 可能严重威胁隧道施工的安全性, 这是此工程的最大难点<sup>[2]</sup>。

## 3 施工方案研究

### 3.1 隧道施工方法的选择

目前, 海底隧道施工常用的方法包括钻爆法、沉管法、盾构法和TBM(tunnel boring machine)法<sup>[3]</sup>。钻爆法施工的支护方法灵活多变, 能够根据不同的地层改变工法, 设计中也多采取此工法进行施工。同时对于大断面隧道采用的施工方法主要有台阶工法、CD(center diaphragm)工法、CRD(cross diaphragm)工法和双侧壁导坑超前中问台阶(简称双侧壁导坑)工法等。根据既有经验考虑到软弱地层的不良地质情况, 在海底隧道施工中最大限度保证安全的前提下, CRD工法和双侧壁导坑(眼镜)工法是相对较好的方法。下面将这两种工法进行对比分析。

1) CRD工法是日本吸取欧洲CD工法的经验, 将原CD工法先挖中壁一侧改为两侧交叉开挖、步

[收稿日期] 2009-02-09; 修回日期 2009-05-20

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50878019)

[作者简介] 黄明利(1969-), 男, 黑龙江双城市人, 北京交通大学副教授, 主要研究方向为隧道施工力学; E-mail: zstan@vip.sina.com

步封闭成环、改进发展的一种工法。该工法以台阶法为基础,将隧道断面从中间分成4~6部分,每一部分开挖并支护后形成独立的闭合单元,能够将大断面施工化成小断面施工,该工法各个局部封闭成环的时间短,更有利于控制早起沉降,同时支护结构受力均匀,变形小。

2) 双侧壁导坑超前中间台阶法也称眼镜工法,也是变大跨度为小跨度的施工方法,其实质是将大跨度(>20 m)分成3个小跨度进行作业,主要适用于地层较差、断面很大的隧道及地铁工程。但该法工序较复杂,导坑的支护拆除困难,可能由于测量误差而引起钢架连接困难。20世纪70年代至80年代初国内外多用此法,目前该法使用较少,当断面很大时,为了稳定工作面,经常和超前预注浆等辅助施工措施配合使用。

通过对比可知,在采用钻爆法施工软弱地层大断面隧道时,CRD法和双侧壁导坑法都是较为适用的方法,二者所需的费用也基本相当。但采用CRD工法,施工过程中步步封闭成环,各施工阶段风险较小,且各工作面可同时作业,有利于安排工序和劳力,相互干扰小,厦门海底隧道实际施工时也多采用这种工法<sup>[4,5]</sup>。

### 3.2 隧道开挖方法的优化研究

如图1所示,CRD工法分步设置中,常见的开挖顺序是1234和1324,为了选择更为合理的施工顺序,采用FLAC-3D程序对左线主洞里程ZK12+400~ZK12+280之间的120 m进行了开挖全过程数值模拟<sup>[6]</sup>。施工模拟各个开挖掌子面每个循环推进为1 m,将各洞室错距20 m,有限元模型见图2。不同工序条件下的拱顶沉降见表1。

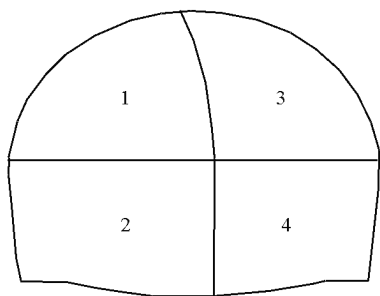


图1 CRD工法分步设置图  
Fig.1 Excavation steps of tunnel by means of CRD method

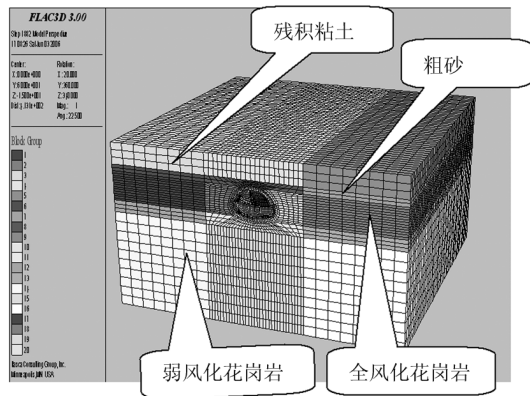


图2 数值模拟简图

Fig.2 Layout of numerical model

表1 不同工序条件下的拱顶沉降

Table 1 Crown settlement of different excavation steps

| ZK12+442.5 断面 | 工序1(1234 顺序) | 工序2(1324 顺序) |
|---------------|--------------|--------------|
|               | 累积沉降/mm      | 累积沉降/mm      |
| 1 导洞开挖完毕      | 65.5         | 65.5         |
| 2(3) 导洞开挖完毕   | 115.6        | 122.7        |
| 3(2) 导洞开挖完毕   | 140.1        | 160.7        |
| 4 导洞开挖完毕      | 159.3        | 185.4        |
| 拆撑、二衬完毕       | 182.2        | 206.2        |

根据数值模拟的结果可知,按照1324工序进行导洞开挖引起的拱顶总体沉降量比1234工序大13%,因此单纯从控制沉降的角度来看,1234工序更为有利。但在实际施工过程中,为了便于平行作业,提高施工进度,采用1324的顺序进行施工,地面的沉降可以通过增加支护结构刚度和快速封闭进行控制。

### 3.3 辅助工法的研究

#### 3.3.1 富水砂层地地降排水技术

海底隧道穿越浅滩及富水软弱地层时,需要对地下水和不良地层进行严格处理,防止涌水突泥现象。因此,厦门海底隧道施工过程中,在砂层影响范围内首先应采用帷幕止水,切断地下水的通道,并通过降水使该区域满足隧道施工要求。对隧道顶部穿越砂层处理方案分为两部分考虑,洞外地下水控制(防渗止水帷幕和设置疏干减压井)和洞内或洞外对砾砂层的加固处理。

根据观测井的观察记录,厦门海底隧道(东通道)降水的原始自然水位为 $-6.0 \sim -5.0$  m,经过两个星期的全面抽水实验,水位降到 $28.0 \sim 36.0$  m以下,水位标高稳定在 $-22.3 \sim -30.3$  m,该水位标高均低于砂层底标高以下 $4.0 \sim 7.0$  m,虽然受场地内全、强风化岩层风化程度差异的影响,连续墙底部仍然存在绕流通道,这就使得在隧道施工过程中,仍有部分水井间歇出水,但其对隧道及隧道二衬的施工已无危害性影响。

### 3.3.2 超前预加固方案的选择

伴随着各国在不稳定地层的隧道实践,国内外都相继提出了若干地层预加固技术措施。常见的主要包括锚杆、全断面注浆、小导管和管棚等。全断面注浆加固方法适用于无黏结性沙及沙卵石、亚黏土地层,对地面沉降要求严格,是一种适于采用台阶法的大跨度结构物施工方法。对于富水砂层,由于其自稳能力较差,不宜选用对地层扰动过大的加固方法。当遇到围岩特别破碎或有地下水时,也可辅之以周边小导管在初次支护背后注浆,以控制地面沉降<sup>[7]</sup>。

## 4 施工过程中的地层响应规律

为深入研究浅埋暗挖隧道工作面开挖的地层响应规律,并对前面的研究成果进行检验,结合厦门海底隧道工程,在现场选取了A3标段的两个监测断面进行重点观测研究。

### 4.1 地表沉降值及沉降速度变化

在A3标段选择ZK11+823和ZK11+825两个断面,对隧道开挖过程中的地表沉降进行研究。在隧道向前开挖过程中,监测断面地表沉降和沉降速度,其变化趋势如图3和图4所示。

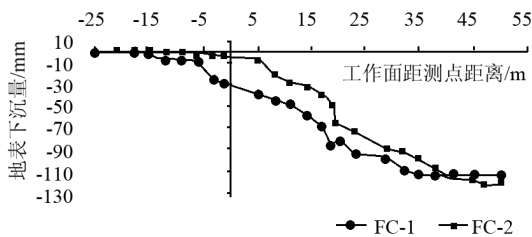


图3 监测断面地表沉降曲线  
Fig. 3 Surface settlement curves of monitoring section

通过上面的监测结果分析可知,隧道开挖对地表沉降具有超前影响,当掌子面距离监测断面 $-1.0$

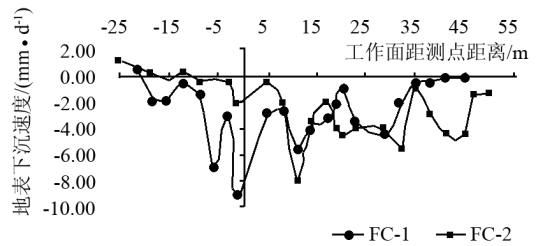


图4 监测断面地表沉降速度变化曲线  
Fig. 4 Velocity curves of surface settlement on monitoring section

$\sim -3.0 D$ 时,地表会发生微小的隆起,地表下沉速度为负值;当掌子面穿过监测断面(地表沉降速度急剧增长)直至掌子面距离监测断面 $2 \sim 3 D$ ,这一阶段产生的沉降值约占总沉降的65%,是施工过程中的重点控制阶段;当掌子面距离监测断面 $3 D$ 以上时,地表沉降速度趋于平缓,直至稳定,这一阶段的沉降约占总沉降的30%。

### 4.2 监测断面围岩压力变化

在隧道ZK11+823断面的拱顶、拱腰、侧墙和仰拱处布置6个测点,监测断面围岩压力的变化情况,结果如图5所示。

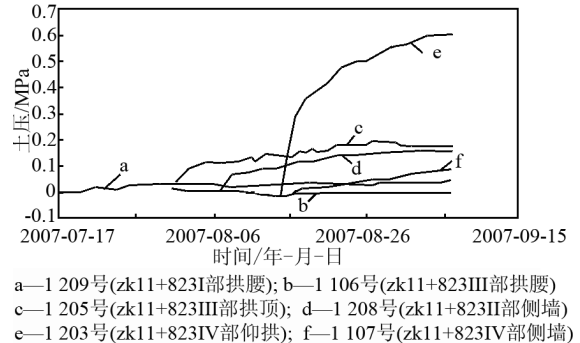


图5 监测断面土压力时间变化曲线  
Fig. 5 Curves of time - soil pressure on monitoring section

隧道开挖过程中,断面土压力变化有如下几个特点:

1)隧道的拱腰和底部的仰拱部位量测的围岩径向压力较大,其中尤以4部仰拱部位的为最大(610 kPa),远超过上覆土柱全部荷载。说明了浅埋隧道仰拱结构设计应具特殊性。

2)拱顶与两拱腰以及仰拱底与两仰拱侧相比较,拱顶与仰拱底处的围岩径向压力均较小。整个结构断面比较而言,最小值产生在两侧墙。按压力值大小排序为 $p_{\text{仰拱}} > p_{\text{拱部}} > p_{\text{边墙}}$ 。

3) 拱部压力在结构未封闭成环之前,初期由于喷砼强度关系及拱脚的下沉,造成变形过大,实测的压力值较小,随着时间的延长,初支结构刚度及强度的提高,其提供的支护抗力逐渐增大,反映为围岩施加于支护的径向压力也随之变大,符合“地层-支护”特征曲线的原理,反映了新奥法的理念。

4) 边墙与仰拱部位的压力变化趋势基本相同,不同的是断面结构封闭成环后,随着结构的逐步稳定,应力的调整和再分配,仰拱的压力值增长速率相对较大,从而使仰拱部位承受了较大的围岩压力。

## 5 结语

通过对比分析、数值计算和现场监测对在软弱地层中修建大断面海底隧道的施工关键技术进行研究,指出大断面海底隧道采用钻爆法施工时,采用CRD法(1324顺序)进行开挖,即能够满足沉降控制要求,又便于施工工序的展开;对于隧道穿越富水砂层地段,降排水需要考虑两个方面,即洞外地下水控制(防渗止水帷幕和设置疏干减压井)和洞内或洞外对砾砂层的加固处理;同时,现场的监测结果表明,隧道在距离监测断面 $-1.0 \sim 3.0 D$ 时,地表沉

降最为剧烈,是施工控制的重点。

通过采用一系列的技术手段,厦门海底隧道克服了软弱地层开挖后承载能力低,遇水软化,易发生涌泥、涌砂、坍塌等不利条件,顺利通过了软弱不良地质段。

## 参考文献

- [1] 王梦恕. 蓬勃发展的中国水底隧道[R]. 北京:北京交通大学, 2005
- [2] 沈荣喜, 吴秀仪, 刘长武, 等. 海底隧道施工过程中突水风险研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, (6): 385-388
- [3] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社, 2004
- [4] 孙振川. 海底隧道长距离全一强风化地层CRD施工方法研究[J]. 隧道建设, 2008, (2): 15-18
- [5] 赵太东. 厦门翔安海底隧道过风化深槽施工[J]. 隧道建设, 2008, (2): 66-69
- [6] 李利平, 李术才, 徐帮树, 等. 海底隧道施工设计及其数值优化研究[J]. 山东大学学报(工程版), 2008, (8): 63-68
- [7] 曾超. 大断面海底隧道异常变形控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (11): 2170-2175

# Study on construction technique of large section sub-sea tunnel crossing the weak stratum

Huang Mingli, Lu Wei, Xu Hengguo, Tan Zhongsheng  
(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Xiang'an sub-sea tunnel is the first large section sub-sea tunnel in China, and will cross the weak stratum with abundant water. As the low stabilizing capacity of the surrounding rocks, water inrush is the maximal risk during the sub-sea tunnel construction. In this paper, based on analyzing the excavation method of the tunnel and results of on site monitoring measurement, we studied the excavation method, drainage technique and pre-reinforcement method of the tunnel when crossing the weak stratum with abundant water, and offer technological support for construction.

[Key words] Xiamen Xiang'an sub-sea tunnel; weak stratum; construction technique