

# 海底隧道断层破碎带信息化施工

杨会军<sup>1</sup>, 王梦恕<sup>2</sup>, 卓越<sup>2</sup>, 罗嵩<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道股份有限公司, 郑州 450003; 2. 中铁隧道集团, 河南洛阳 471009)

[摘要] 海底隧道开挖支护施工难度很大、安全风险极高, 结合国内第二条海底隧道断层破碎带施工。采用地质调查、隧道地震勘探法(TSP法)、隧道内超前钻孔等方法, 通过数据分析处理, 预测了掌子面前方45 m范围内的基本地质条件, 如岩性、规模、位置的长期超前地质预报, 以及精度较高的短期超前地质预报, 据此综合超前地质预报结果, 采取上半断面全断面超前预注浆加固地层、台阶法开挖、加强支护。同时, 对施工中水平收敛、拱顶下沉等监控量测数据进行分析, 动态反馈于施工过程中, 此即海底隧道断层破碎带信息化施工。该方法在施工中取得令人满意的结果。

[关键词] 海底隧道断层破碎带; 综合超前地质预报; 超前预注浆; 信息化施工

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0057-08

## 1 前言

世界发达国家自20世纪30年代起就开始修建海峡海底隧道。1975年日本采用钻爆法在关门修建了长18.7 km的海峡铁路隧道, 1988年在津轻海峡又用钻爆法建成了53.85 km的迄今为止世界上最长的海峡隧道——青函隧道。近30年来, 挪威建成了40座累计约130 km的海底隧道, 目前在建海底隧道2座, 还有10座在计划中, 基本都是采用钻爆法施工。目前国外建成的海底隧道采用钻爆法的占90%以上, 均是基于钻爆法的安全风险易于控制和经济性的原因。

海底隧道在我国尚处于起步阶段, 采用钻爆法施工的福建厦门翔安海底隧道和山东胶州湾海底隧道已经投入运营, 更多的海底隧道工程正在计划之中。已建工程的经验表明, 海底隧道采用钻爆法施工是安全可靠的。但同陆地隧道或其他的地下结构相比, 海底隧道显得更为复杂, 包括由于断层和破碎带引起的不稳定性和海水渗漏。

海底隧道的特殊要求与水的存在有关, 这需要密切关注地质风险, 包括隧道上方足够厚度的不透水地层; 地层的地质特性; 各地层中裂隙的特性; 断

层破碎带的位置、性质、规模等; 风化深槽特性、位置、规模等。造成的影响主要包括海底隧道预计到的突水可能引发灾难性后果, 掌子面围岩崩塌、流失、隧道埋没等。

因此, 除了遵守一般技术要求外, 还应采取针对性较强的辅助方法施工, 通过综合地质超前预报技术预测预报前方地质条件, 并采取超前预注浆加固地层、台阶法开挖、加强支护<sup>[1~3]</sup>。同时, 对施工中水平收敛、拱顶下沉等监控量测数据进行分析<sup>[4,5]</sup>, 动态反馈于施工过程中, 反馈用于修改超前加固、开挖、支护设计参数, 指导施工<sup>[6,7]</sup>, 这就是海底隧道断层破碎带的信息化施工。本文运用信息化施工方法对青岛胶州湾海底隧道工程F4-4断层破碎带(右线YK6+961~YK6+915区段)施工进行指导, 效果十分显著。

## 2 工程概况

### 2.1 工程概况介绍

胶州湾隧道北连青岛市团岛, 南接青岛经济技术开发区薛家岛, 下穿胶州湾湾口海域, 主隧道全长6 170 m, 跨海域总长度约3 950 m, 设两条三车道主隧道和一条服务隧道, 主隧道中轴线间距55 m。隧

[收稿日期] 2011-04-07

[作者简介] 杨会军(1969—), 男, 甘肃天水市人, 博士, 主要从事隧道、地下水渗流科研和施工工作; E-mail: hjyang\_2001@163.com

道断面为椭圆形,主隧道开挖断面高 11.2 ~ 12.0 m,宽 15.23 ~ 16.03 m,隧道纵断面呈 V 型,最大纵坡 3.5%,海域段主隧道埋深一般为 24 ~

35 m。隧道通过海域段最大水深约 42 m。图 1 为胶州湾海底隧道主隧道与服务隧道示意图。

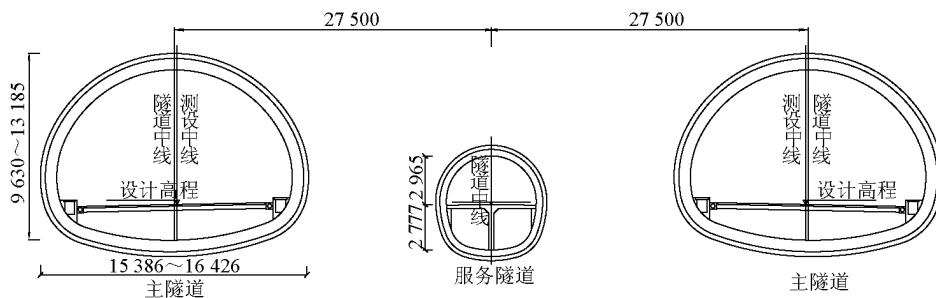


图 1 胶州湾海底隧道主隧道与服务隧道示意图

Fig. 1 Schematic layout of main tunnel and service tunnel map of Jiaozhouwan subsea tunnel

## 2.2 地质条件

### 2.2.1 工程地质条件

隧道通过区主要岩性为侵入岩及火山岩,岩质坚硬、脆,属硬质岩石,完整性好,节理较发育,在构造带附近岩体破碎,节理密集,岩石呈碎石、角砾状,部分断裂带内呈角砾或土加石散状结构。

### 2.2.2 水文地质条件

隧址区地下水为孔隙水和基岩裂隙水。低山丘陵基岩地下水位随降雨变化明显,变幅可在 1 ~ 5 m 左右,残坡积层地下水变幅一般在 1 ~ 3 m 左右。滨海地带地下水位主要受海潮影响产生周期性变化,变幅一般在 2 ~ 4 m。

### 2.3 工程重难点分析

1)地质条件复杂。围岩级别变化频繁,IV、V级围岩比例较大,占主隧道的 42%,占服务隧道的 28%,围岩情况变化频繁,并且隧道多次穿越断层(裂)破碎带。在断层(裂)带、断层(裂)影响带、节理裂隙密集带,裂隙贯通性较好,存在易发生坍塌和突涌水的可能。在隧道通过的岩体中,存在大量后期侵入的岩脉,这些岩脉主要有花岗岩岩脉、正长斑岩脉、煌斑岩脉、流纹斑岩脉等。因其多数沿张裂隙侵入,故其接触面附近存在岩石软化带,隧道通过沿岩脉裂隙贯通性好易引发突涌水。

2)地质构造作用强烈。隧址区地质构造以中、新生代脆性断裂构造最为醒目,韧性断裂及褶皱不甚发育。隧道共穿越 9 条大断层破碎带,其衍生的小断裂带有数十条之多。断层附近因岩体破碎,风化也相对严重,部分地段弱风化岩层底面在海底

20 m 以下,已进入隧道内部,岩体自稳能力差,极易产生坍塌和大量涌水。而且,隧道通过区的构造主要是高角度的断层,走向为北东和北西,断层带内多为压碎岩、角砾碎石,是地下水径流的通道。在断层带及两侧影响带内地下水量较大。给施工带来很大困难。

3)覆跨比小。海域段隧道埋深 24 ~ 35 m 之间,最大跨度 16.426 m,最大断面积达 170 m<sup>2</sup>,覆跨比小。隧道开挖极易出现涌水、坍塌等灾害。为降低地质风险,施工中采取施工地质调查、TSP 探测、高分辨直流电法、地质雷达、超前探孔等综合地质预测预报技术,以及超前小导管、超前自进式管棚、超前预注浆、局部注浆、径向注浆等多种辅助施工措施。并采用双侧壁导坑法、中隔壁开挖法(CD 法)、台阶法等多种施工方法。

4)海域段施工风险大。海域段有多处断层(裂)破碎带,断层(裂)带内岩体强度低,自稳能力差。在这些不良地质地段,存在渗透破坏、发生突涌水或隧道坍塌的可能,施工风险巨大。

## 3 信息化施工

### 3.1 信息化施工流程

从 20 世纪 70 年代起,各国学者就开始运用岩体位移进行反分析研究<sup>[8]</sup>,主要有岩体反馈理论、优化反馈理论<sup>[8]</sup>、被动阻力方法<sup>[9]</sup>等。研究手段和侧重点有一定差异,但都是根据现场弹塑围岩的变形资料,以及其他地质信息,通过计算分析,建立围岩本构关系和数学模型,确定实际岩(土)体的力学

参数、地层初始地应力、支护结构的边界荷载及岩体弹性参数等<sup>[10~12]</sup>。动态反馈于隧道开挖支护的设计与施工中,进而进行工程预测和评价,并进行工程

决策和确定采取措施,最后进行监测并检验预测结果。图2为海底隧道断层破碎带信息化施工流程图。

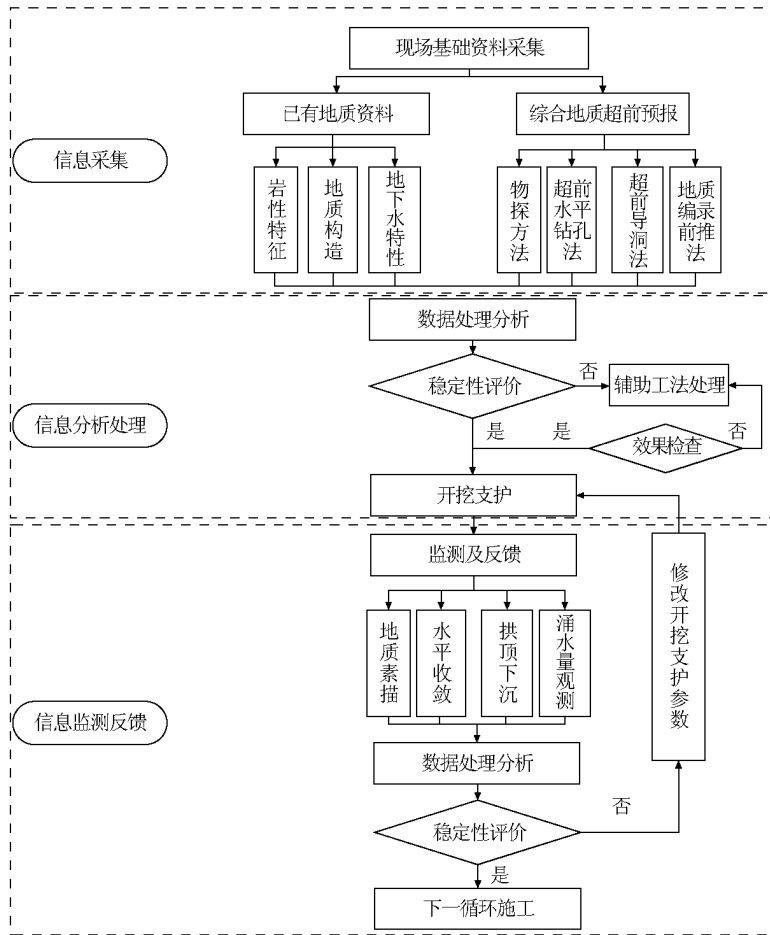


图2 海底隧道断层破碎带信息化施工流程图

Fig. 2 Flow chart of information construction of the subsea tunnel in a fracture breaking zone

### 3.2 信息采集——现场基础资料采集

#### 3.2.1 已有地质资料

YK6+961~YK6+915段,长46m,属F4-4断裂,高潮时水深27~30m;海床呈缓坡状。海底覆盖层较薄,一般2~3m,主要为砂砾,局部沉积有淤泥。隧道拱顶覆盖层仅24~26m。基岩以含晶屑火山角砾凝灰岩为主,局部夹凝灰岩,并有较多辉绿岩脉、石英正长岩脉侵入。破碎带内岩体为碎裂~镶嵌碎裂结构,裂隙以密闭型为主,少数为微张型,裂隙面浸染迹象不甚明显。岩体受构造影响严重,岩体完整程度和风化带厚度差异很大,含晶屑火山角砾凝灰岩和石英正长岩抗风化能力强,其顶部强~弱风化带一般不超过10m;辉绿岩抗风化能力

差,其顶部有较厚的全~弱风化带,最大风化厚度可超过25m,而且辉绿岩及其两侧岩体往往较破碎或发育小断层。围岩在松弛变形时抗渗性能易恶化,可能发生渗透变形破坏。

#### 3.2.2 综合地质超前预报

隧道施工综合地质超前预报是从宏观和微观上去把握整个隧道通过区的地质条件并进行综合预报。把中长期地质预报成果和短期预报成果想结合对比分析得到施工地质超前预报成果。中长期预报和短期预报成果相参照对比分析,形成隧道工程的预报体系(见图3)。隧道施工综合地质超前预报技术的核心在于对地质条件的理解掌握程度。

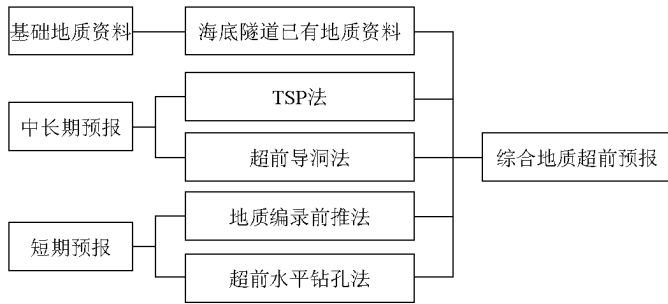


图3 海底隧道综合地质超前预报体系

Fig. 3 Pre-geological prediction synthetic system of the subsea tunnel

在 YK6 + 961 ~ YK6 + 915 段, 分别采用 TSP 法、超前导洞法(服务洞超前)、超前水平钻孔法进行地质超前预报, 再将各自预报结果综合形成综合地质超前预报。

在 YK6 + 961 前方实施超前水平钻孔, 在开挖断面的上台阶共完成探孔 3 个(拱顶 1 个, 左、右侧拱腰各 1 个)。超前水平钻孔布置如图 4 所示。

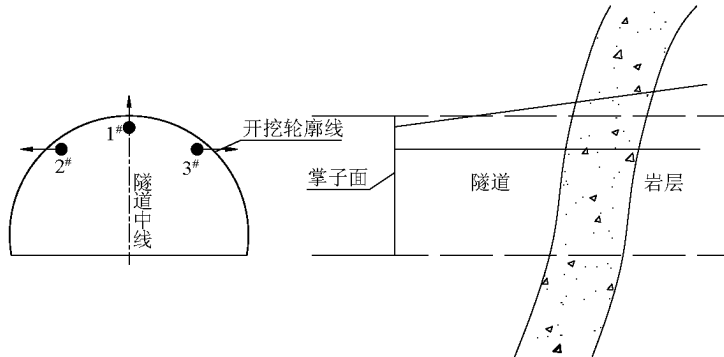


图4 超前水平钻孔示意图

Fig. 4 Schematic layout of advance horizontal borehole

### 3.3 信息分析处理

#### 3.3.1 综合地质超前预报结果分析

1) TSP 法。根据 TSP 法测得的掌子面前方 70 m 范围内围岩传播速度和相应的物理力学指标, 依据相关规范判断该范围内围岩等级为 IV 级。表 1 为 TSP 法成果汇总表。

表 1 TSP 法成果汇总表

Table 1 Summary of TSP method

项目	最大值	最小值	平均值
纵波速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	4 328	3 832	4 100
泊松比	0.32	0.17	0.28
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.31	2.22	2.27
弹性模量/GPa	35	29	30.56

2) 超前水平钻孔。该段岩体整体较差, 岩性单一, 主要为凝灰岩, 围岩破碎, 难以成孔, 易发生卡

钻, 取芯难度大, 总体岩芯获得率为 63.42%, 岩石质量指标(RQD)为 35.90%, 含裂隙水。表 2 为超前水平钻孔法成果汇总表。

表 2 超前水平钻孔法成果汇总表

Table 2 Summary of advance horizontal borehole

项目	最大值	最小值	平均值
取芯率/%	98	15	63.42
RQD /%	85	12	35.90
钻孔时间/min	62	52	56
单孔涌水量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	36.5	16	23.2

3) 综合地质超前预报结果。根据已经完成的超前地质预报的成果, YK6 + 961 ~ YK6 + 915 段整体上岩体破碎, 节理裂隙密集发育, 节理面中风化到强风化, 围岩强度低, 有岩脉侵入, 断层切割, 并发育有多组高角度较大规模结构面, 围岩等级以 V 级为

主,局部IV级,裂隙含水,遇水围岩强度明显降低。

建议谨慎开挖,加强支护,对该段进行超前注浆加固措施,为确保隧道施工生产安全,须进行全断面超前预注浆。

### 3.3.2 超前预注浆处理

考虑胶州湾海底隧道覆盖层薄,右线隧道 F4-4

断层破碎带覆盖层仅 24~26 m,长度 46 m,围岩地质条件差,容易出现突泥、涌水险情。所以胶州湾隧道注浆应以堵水和加固为目的,采用以工作面预注浆为主,辅以洞内径向后注浆。上半断面全断面帷幕注浆,以加固为主,兼顾堵水,如图 5 和图 6 所示。表 3 为第一循环全断面超前预注浆参数表。

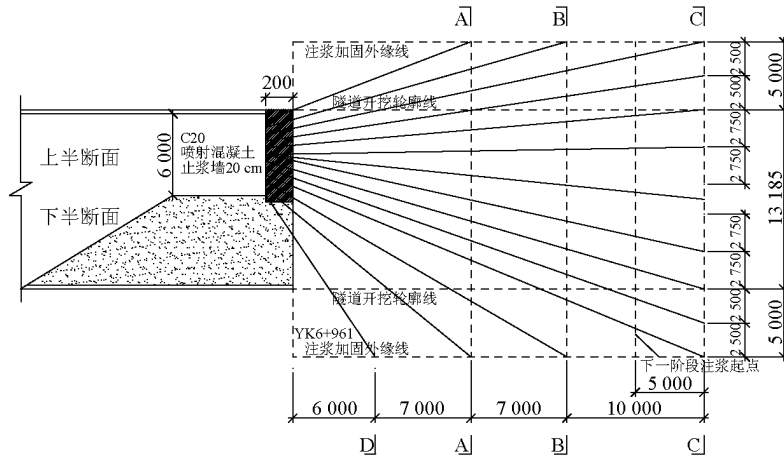


图 5 上半断面全断面注浆纵断面示意图

Fig. 5 Schematic profile of upper half full-face grouting

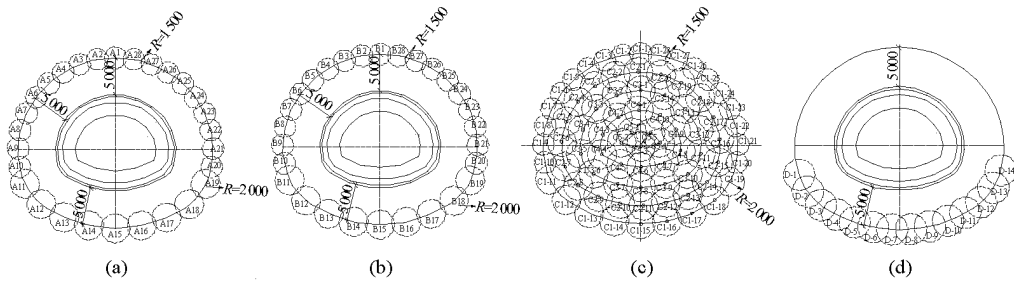


图 6 注浆终孔交固圈布置图

Fig. 6 Consolidated region of grouting

表 3 第一循环全断面超前预注浆参数表

Table 3 Parameters of full-face grouting at the first cycle

序号	参数名称	参数值	备注
1	纵向注浆加固长度/m	30	
2	加固范围	开挖面及开挖轮廓线外 5 m	
3	浆液扩散半径/m	1.5~2.0	
4	注浆材料	超细水泥单液浆, W:C=0.6:1~1.2:1	
5	注浆压力/MPa	2~3 MPa, 最大不超过 5 MPa	
6	注浆孔直径/mm	90	
7	开孔直径/mm	130	
8	注浆速度/(L·min <sup>-1</sup> )	5~110	
9	终孔间距/m	≤3.5	
10	注浆方式	前进式分段注浆	分段长度 5~7 m
11	注浆孔数量	147 孔	
12	孔口管	φ108 无缝钢管, L=2.2 m	

### 3.3.3 注浆效果评价

采用 TSP 超前地质预报监测表明,前方围岩经全断面超前注浆后断层破碎带密度有所提高,完整性较以前变好,裂隙充填较为密实。

钻孔检查显示,10 个检查孔,除 3 个滴水外,其余均无水,成孔良好,无塌孔,最大滴水量为 1.8 L/h,注浆堵水率 98% 以上。

### 3.3.4 开挖支护

采用台阶法施工,下台阶分左右两部分,左右侧错开开挖,其施工工序(见图 7)及要点如下。

1)超前支护:拱部采用  $\phi 76$  中空自钻式管棚超前预支护, $L=10\sim 25$  m,间距 40 cm; $\phi 32$  小导管超前支护, $L=3.0$  m,环向间距 40 cm;底部  $\phi 80$  小导管超前支护, $L=7.0\sim 10$  m,环向间距 40 cm。

2)上台阶开挖:采取减振控制爆破,开挖进尺控制在 1.5 m。

3)上台阶初期支护:钢拱架,间距 50 cm,拱部

$\phi 8$  钢筋网,网格间距@150 mm $\times$ 150 mm,C35 喷射混凝土厚度 30 cm。

4)开挖两侧下台阶:左右交错开挖下台阶,错开距离 5~10 m,开挖进尺控制在 1~2 m。

5)边墙初期支护:初喷混凝土,拱架接腿,挂网,复喷混凝土至设计厚度。

6)仰拱施工:仰拱紧跟开挖工作面,尽快封闭成环,仰拱距开挖面应不超过 40 m。应超前拱墙衬砌,其超前距离宜保持在 2 倍以上衬砌循环作业长度。仰拱填充严禁与仰拱同时施工,宜在仰拱混凝土终凝后施作。

## 3.4 信息监测反馈

### 3.4.1 开挖面地质情况

爆破开挖后可以清楚看到浆液随节理裂隙面扩散,扩散的痕迹明显,掌子面干燥无渗水和滴水现象(见图 8)。

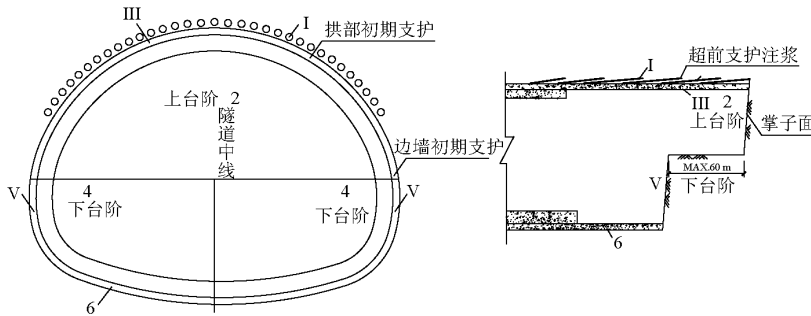


图 7 施工工序图

Fig. 7 Construction process chart

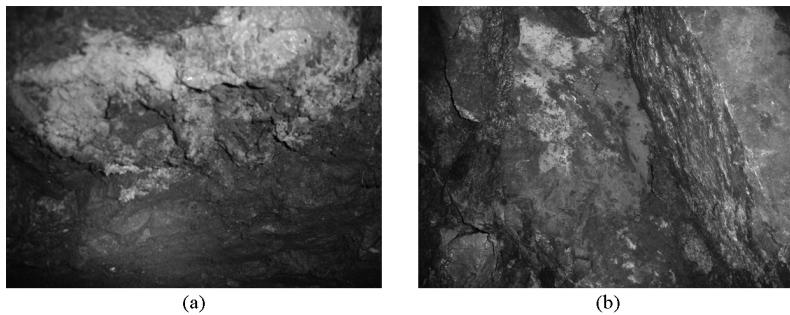


图 8 开挖后掌子面围岩照片

Fig. 8 Photos of surrounding rock after excavation

### 3.4.2 监控量测成果

隧道施工监控量测能及时掌握围岩的变形发展动态,监测施工过程中的安全程度,是检验围岩和支护是否稳定的主要手段之一,同时也是指导施工,进行施工管理,提供设计信息的主要手段。

分别在断层破碎带内布设测线进行水平收敛和拱顶下沉量测。其量测频率开始时 1 h 量测一次,后期量测时,间隔时间可加大到半天、一天量测一次不等,监测结果如图 9、图 10 所示。

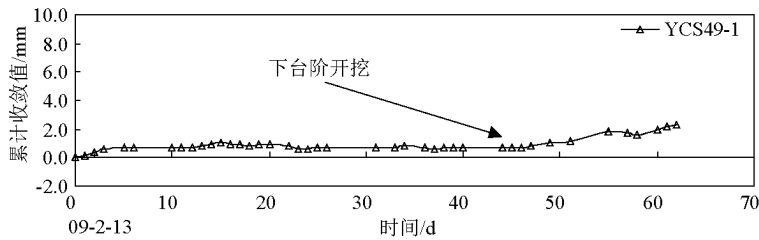


图9 收敛变形-时间曲线

Fig. 9 Curves of convergence displacement-time

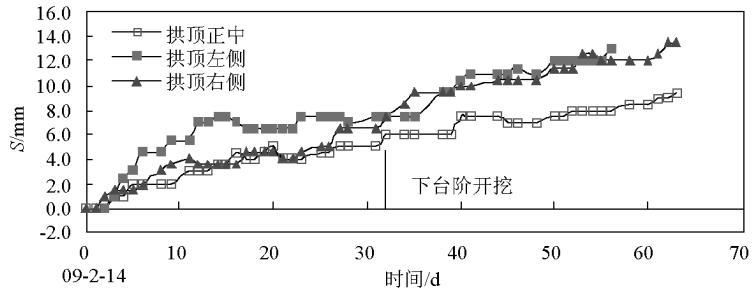


图10 拱顶下沉-时间曲线

Fig. 10 Curves of crown subsidence-time

监测结果显示,断层破碎带隧道开挖引起的水平收敛较小,最大达 2.2 mm,拱顶下沉累计值为 14.0 mm,且下台阶的开挖对其影响较小。可见,下台阶开挖后对上台阶开挖的影响控制比较理想,在下台阶开挖过程中拱顶下沉及收敛没有出现明显的变化。分析发现,围岩变形分为 3 个阶段:a. 急剧变形阶段:主要发生在量测断面开挖后 10 d 内,即距开挖面 20 m 内,围岩发生急剧变形,其变形量占总变形量的 50% (含开挖时掌子面已产生的位移) 以上;b. 缓慢增长阶段:随着初期支护系统发挥作用,限制了隧道围岩的收敛变形,该阶段收敛速率在 0.2 mm/d;c. 基本稳定阶段:这时开挖面与观测断面的距离一般已超过 2 倍洞径,空间效应的影响基本消除,收敛变形速度趋缓,收敛速率 < 0.2 mm/d。

#### 4 结语

海底隧道断层破碎带的信息化施工,对保证施工的顺利进行,减少重大安全事故的发生起到积极作用,真正做到动态施工和施工过程及围岩性态的全程监控。

1) 通过运用 TSP、超前导洞、超前水平探孔等综合超前地质预报技术,对海底隧道断层破碎带岩体结构特征、地下水特性等进行了综合预报,为制订超前预加固措施提供了依据。

2) 采用上半断面全断面注浆,加固了围岩,兼顾堵水,实施效果良好。

3) 开挖面地质情况和监控量测数据表明,上半

断面超前预注浆效果显著,开挖支护参数合理。

#### 参考文献

- [1] 王梦恕. 大瑶山隧道——20 世纪隧道修建新技术[M]. 广州:广东科技出版社,1994.
- [2] 黄成光,于敦荣. 公路隧道施工[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 吕康成. 隧道工程试验检测技术[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 覃仁辉,王成,杨其新. 隧道工程[M]. 重庆-乌鲁木齐:重庆大学出版社-新疆大学出版社,2001.
- [5] 刘志刚. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [6] 祁生文,伍法权,兰恒星. 盘石头水库泄洪洞、导流洞进出口高边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):357-358.
- [7] 苏华友,杨有玉. 隧道施工中围岩收敛观测及分析[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(2):198-200.
- [8] 高大钊,孙钧. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [9] Najm K, Ishijima Y. Back analysis of tunnel lining deformation: Development and application of passive resistance method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993,26(1):71-79.
- [10] Tonon F, Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002,35(3):141-160.
- [11] Oda M, Yamabe T, Ishizuka Y, et al. Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993,26(2):89-112.
- [12] Nie X, Zhang Q. A system of monitoring and dimensioning tunnel support [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1994, 27(1):23-36.

## Information construction of the subsea tunnel in a fault and crush zone

Yang Huijun<sup>1</sup>, Wang Mengshu<sup>2</sup>, Zhuo Yue<sup>2</sup>, Luo Song<sup>1</sup>

(1. China Railway Tunnel Stock Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

[**Abstract**] The construction of the excavation and support of the subsea tunnel is very difficult, and safety risk is also very high. Relying on the construction of a fault and crush zone of the second subsea tunnel inland, using the method of geologic survey, TSP, flank holes, and analyzing the data, predicting basis geology condition within 45 meters ahead of working face. Combining long-term geology prediction with short-term geology prediction, comprehensive pre-geology prediction is reported. According to its geological property, adopting full sectional grouting upper section in the fault and crush zone in order to strengthen stratum, bench excavation method, and strong support. At the same time, monitoring and measuring convergence, subsidence of crown, and pressure of surrounding rock, by processing of data, and to the construction, is called the information construction of the subsea tunnel in a fault and crush zone. The method is applied to the construction, produces a satisfactory effect.

[**Key words**] a fault and crush zone of subsea tunnel; comprehensive pre-geology prediction; full sectional grouting; information construction

---

(上接 56 页)

## Wind profiler radar to monitor the dust weather

Wei Wenshou<sup>1,2</sup>, Wang Minzhong<sup>1,2</sup>, He Qing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA (China Meteorological Administration), Urumqi 830002, China; 2. Taklimakan Desert Atmospheric Environment Observation

Experimental Station, Tazhong, Xinjiang 841000, China)

[**Abstract**] The Urumqi Institute of Desert Meteorology of China Meteorological Administration (CMA) carried out an atmospheric scientific experiment on the detection of dust weather using a wind profiler radar in the hinterland of the Taklimakan Desert in April 2010. Based on the wind profiler radar data obtained from this experiment, this paper analyzes the characteristics of the horizontal wind field and vertical velocity of a breaking dust weather in a desert hinterland, calculates and gives the radar echo intensity and vertical distribution of a dust storm, blowing sand and floating dust weather, and discusses the atmospheric dust counts/concentration derived from the wind profiler radar data. Studies show that a wind profiler radar is an upper-air atmospheric remote sensing system that effectively detects and monitors dust. It captures the beginning and ending of a dust weather process as well as monitors the sand and dust being transported in the air in terms of height, thickness and vertical intensity. The echo intensity of a blowing sand and dust storm weather episode in Taklimakan is about  $-3 \sim -10$  dBZ while that of floating dust is  $-15 \sim -3$  dBZ, indicating that the dust echo intensity is significantly weaker than that of precipitation while stronger than that of clear air.

[**Key words**] wind profiler radar; dust weather; echo intensity; monitoring