

# 厦门翔安海底隧道 F1 风化深槽注浆加固技术

郭小红<sup>1,2</sup>, 王梦恕<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

[摘要] 以厦门翔安海底隧道涌水量最大、施工难度最大的海域段 F1 风化槽为研究对象, 根据其围岩地质条件和突涌水特点, 采用全断面注浆加固和堵水, 注浆加固范围为掌子面内及隧道开挖轮廓线外 5 m, 隧道纵向加固长度为 70 m, 注浆材料以超细水泥单液浆为主的注浆加固方案。施工期现场监控量测与数值计算结果表明: F1 风化深槽围岩注浆加固效果均较为理想, 未发生涌水突泥, 达到了设计的技术要求。该项研究成果为今后开展类似工程的注浆加固提供了技术借鉴。

[关键词] 海底隧道; 注浆加固; 稳定性; 数值仿真

[中图分类号] TU 443 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0038-04

## 1 前言

修建海底隧道是一项风险很高的工程, 其主要问题是隧道坍塌和涌水突泥, 国内外在海底或者高水压、富水地层修建隧道发生涌水突泥的案例很多, 涌水和突泥往往会造成隧道坍塌、变形、侵限, 甚至导致人员和设备被埋、地表沉陷、建筑物倒塌、地下水疏干, 危及施工、运营和环境安全, 带来严重的工程灾难。对于海底隧道而言, 由于海水非常丰富, 一旦涌出, 很难控制, 因此其带来的危害和损失也很大<sup>[1,2]</sup>。

厦门翔安海底隧道是我国修建的第一条海底隧道, 海底隧道陆域全强风化岩地段和海底风化深槽地段岩体风化严重, 软弱破碎、节理和裂隙发育, 强度低, 含水量大, 无自稳能力或自稳能力差, 开挖时容易发生涌水突泥和坍塌, 因此注浆加固和堵水是保证施工安全和质量的重要手段, 也是工程成败的关键<sup>[3-6]</sup>。笔者以厦门翔安海底隧道涌水量最大

且施工难度最大的海域段 F1 风化槽为研究对象, 根据其围岩地质条件和突涌水特点, 制定了缜密细致的注浆加固方案, 并对其进行了注浆效果的检验和评价。

## 2 工程概况

厦门翔安海底隧道主洞 F1 风化槽起始里程为 ZK8+270, 覆盖层 36.9 m, 最大水深 30 m, 设计拱顶最大静水压力 0.68 MPa, 设计纵向长度为 70 m。

### 2.1 工程地质条件

F1 风化槽岩性以 W4 和 W3 全、强风化花岗岩为主, 夹强风化二长岩岩脉: 强风化花岗闪长岩以褐黄色为主, 杂少量白斑, 岩石风化严重, 呈硬塑砂质粘性土状, 并含有中粗砂和粉细砂; 强风化二长岩脉因高岭土矿物含量较高, 具有弱膨胀潜势, 含少量风化残块, 地勘报告提供的全、强风化花岗岩力学参数见表 1。从表 1 中可以看出, 全、强风化花岗岩力学参数较低, 隧道一旦开挖, 围岩稳定性很差。

[收稿日期] 2010-08-30

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(40772184)

[作者简介] 郭小红(1966—), 男, 湖南常德市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为隧道技术; E-mail: wuhangxh@vip.sina.com;

王梦恕(1938—), 男, 河南温县人, 中国工程院院士, 研究方向为隧道及地下工程设计、施工新技术; E-mail: wms3273@263.net

表1 F1 风化槽岩土物理、力学指标

Table 1 Geotechnical materials in F1 weathered trough

地层代号	岩土名称	工程特性	容许承载力 [ $\sigma_0$ ]/kPa	压缩模量 Es/kPa	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动弹模量 $E_d$ /GPa	静弹模量 E/GPa	计算摩擦角 $\phi/(\text{°})$
W4	全风化带	中等压缩性,承载力一般	220	9.0	18	0.7	0.1	25
W3	强风化带	中等压缩性,承载力较高	300	10.0	19	2.4	1.0	30

## 2.2 水文地质条件及 F1 风化槽突涌水特点

F1 风化深槽海域地下水总体上富水性弱,渗透性较差,为弱或微含水层,但全、强风化岩接触面处,节理裂隙发育,地层的透水性很大,地下水和海水的连通性极强;该段地下水主要受海水的垂直入渗补给,全、强风化地层渗透系数较大,见表 2。

表2 F1 风化槽渗透系数参数表

Table 2 Permeability parameters in F1 weathered trough

工程位置	岩性	渗透系数建议值/ ( $\times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
海域 F1 风化槽	全风化岩层	17.1
	强风化岩层	21.4

相比较而言,海域段在 F1 风化槽位置的涌水量较其他位置的涌水量值要高出很多, F1 风化槽最大水压力为 0.3 ~ 0.5 MPa,单孔最大涌水量为 50  $\text{m}^3/\text{h}$ 。又由于强风化基岩切过隧道,隧道围岩十分破碎,裂隙十分发育,因此发生突水的可能性很大,是隧道建设过程中施工难度最大、施工工艺最复杂、危险性相对最大的阶段。如果设计施工过程中不采取相应积极有效的措施,极有可能发生突水事故,给工程带来难以估量的损失。

## 3 注浆堵水方案设计

### 3.1 注浆方案

对于海底隧道而言,不同的地质条件和设计要求应选择不同的注浆方案,影响注浆方案选择的因素也很多,主要有地质条件、隧道埋深、设计要求、施工方法、机械设备等,其中地质条件对注浆堵水方案影响最大,在地质条件方面主要考虑开挖面稳定情况、水压力、涌水量、泥沙含量等。根据国内外海底隧道修建的工程经验和相关试验成果,不同地质岩层注浆方案的选择见表 3。

表3 注浆方案的选择

Table 3 Scheme choice of grouting

注浆方案	地层情况	探孔最大 出水量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	水压力/ MPa	水中泥 沙含量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
全断面超前 预注浆	整个断面 无法自稳	$\geq 20$	$\geq 0.3$	$\geq 100$
周边帷幕注浆	周边土体 无法自稳	$\geq 10$	$\geq 0.2$	$\geq 10$
小导管/大管棚 注浆	周边土体 自稳能力差	$\geq 5$	$\geq 0.1$	$\geq 1$
局部和补充 注浆	局部稳定性 差或水量大	$> 1$	$> 0.05$	$\geq 0.1$
径向注浆	初期支护后变形大或出水量不满足设计要求			

根据主洞 F1 风化槽的地质条件和突涌水特点,设计采用全断面注浆加固和堵水,注浆加固范围为掌子面内及隧道开挖轮廓线外 5 m,隧道纵向加固每循环长度为 23 m(含止浆岩盘)。共计钻孔 195 个,检查孔 28 个(其中取芯孔 7 个),此外另增加了 10 个补充注浆孔。注浆孔布置见图 1 和图 2。

### 3.2 注浆参数

注浆参数见表 4,分别对不同的注浆参数提出了具体的指标。

### 3.3 注浆材料

注浆材料以超细水泥单液浆为主,超细水泥—水玻璃双液浆及普通水泥—水玻璃双液浆为辅。浆液配比参数如表 5 所示。

表4 注浆参数

Table 4 Parameters of grouting

序号	参数名称	参数值
1	纵向注浆加固长度	23 m
2	径向加固范围	开挖面及开挖轮廓线外 5 m
3	浆液扩散半径	1.5 ~ 2.0 m
4	注浆终压	3.0 ~ 4.0 MPa
5	注浆孔直径	$\phi 90$ mm
6	注浆速度	5 ~ 110 L/min
7	终孔间距	2.0 ~ 2.5 m
8	注浆方式	前进式、后退式、钢管孔底注浆
9	注浆孔数量	195 个



## 4 F1 风化槽注浆加固后隧道工程稳定性评价

### 4.1 现场监测分析

F1 风化槽通过全断面注浆后,按照设计方案采用 CRD 工法进行施工。施工过程中对 F1 风化槽围岩开展变形和破坏特征的现场监测工作。监测结果表明:注浆加固后围岩体变形得到有效控制,拱顶沉降和位移收敛量值最大分别为 0.84 cm 和 2.48 cm,后期的围岩位移速率也非常小,均在设计允许范围之内。图 5 和图 6 为 F1 风化深槽 ZK270 断面的拱顶沉降和位移收敛趋势图。

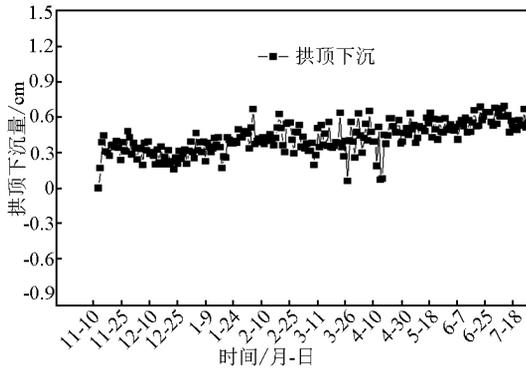


图 5 拱顶下沉位移曲线

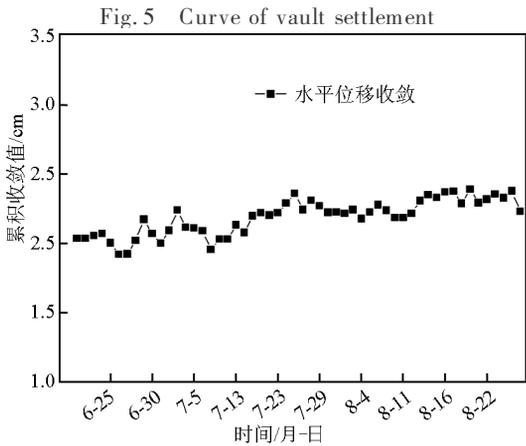


图 6 水平位移收敛曲线

Fig. 6 Curve of converging displacement

### 4.2 数值仿真分析

与此同时,对 F1 风化深槽段海底隧道 CRD 施工工法围岩稳定性开展三维数值仿真。计算结果表明:隧道围岩的水压力基本上在 0.45 ~ 0.57 MPa,二次衬砌的外水头范围为 31 ~ 54 m,均在设计允许范围之内。图 7 和图 8 为衬砌外水压力等值线图。

## 5 结语

1) 海域段 F1 风化槽是涌水量最大的区域,最大水压力为 0.3 ~ 0.5 MPa,单孔最大涌水量为

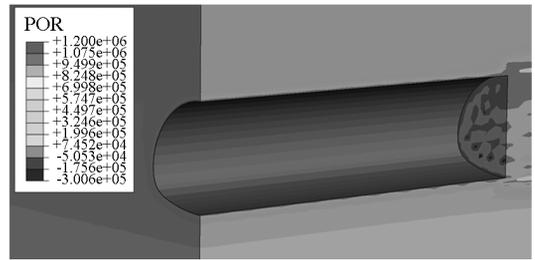


图 7 隧道轴线左侧区域水压力云图

Fig. 7 Pore pressure at zones of left tunnel

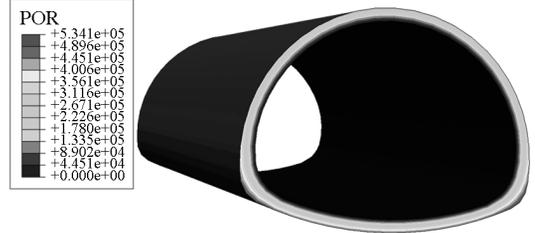


图 8 二次衬砌三维水压力云图

Fig. 8 Pore pressure of second liner

50 m<sup>3</sup>/h,隧道围岩变形很大,围岩稳定性很差,因此,必须采用相应合理的注浆加固措施。

2) 根据 F1 风化槽地质岩层特性和突涌水特点,采用全断面注浆加固和堵水,注浆加固范围为掌子面内及隧道开挖轮廓线外 5 m,隧道纵向加固长度为 23 m,注浆材料以超细水泥单液浆为主,并对注浆参数进行了详细的设置;注浆加固后,通过钻取岩芯检查,发现岩芯比较完整,基本无水,注浆加固效果较好。

3) 隧道施工开挖后,分别通过 F1 风化槽段现场长期位移监测结果和三维海底隧道的数值仿真,分析隧道围岩体的变形破坏特征和外水压力,结果表明:围岩变形和水压力均在设计允许范围之内,围岩稳定情况良好,达到了设计和施工开挖要求。

### 参考文献

- [1] 王梦恕,皇甫明.海底隧道修建中的关键问题[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):1-4.
- [2] 孙 钧.海底隧道工程设计施工若干关键技术的高榷[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1513-1521.
- [3] 孙 锋,陈铁林,张顶立,等.基于宾汉体浆液的海底隧道劈裂注浆机理研究[J].北京交通大学学报,2009,33(4):1-6.
- [4] 李治国.隧道岩溶处理技术[J].铁道工程学报,2002(4):61-67.
- [5] 岩土注浆理论与工程实例协作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001:115-118.
- [6] 李 蓉,李治国.海底隧道全、强风化花岗岩地层注浆技术研究[J].现代隧道技术,2008,45(1):21-29.
- [7] 张民庆,张文强,孙国庆.注浆效果检查评定技术与应用实例[J].岩土工程学报,2006,25(2):3909-3918.

(下转 50 页)