

# 厦门翔安海底服务隧道 F1 风化槽注浆堵水技术

李治国<sup>1</sup>, 孙振川<sup>2</sup>, 王小军<sup>2</sup>, 牟松<sup>1</sup>, 徐海廷<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道集团有限公司 科学研究所, 河南 洛阳 471009; 2. 中铁隧道集团股份有限公司, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 厦门翔安海底隧道是我国大陆自行设计与施工的第一座海底隧道, 隧道全长 5.948 km。地勘资料表明, 隧道要穿越海底 F1, F2, F3, F4 四个风化深槽(囊), 风化深槽(囊)中地层为全~强风化软弱围岩。该地层透水性强, 出水量大, 水压高, 海水补给无限, 隧道涌水、突泥的风险很大, 隧道穿越风化深槽(囊)时的安全是本工程建设的关键。目前海底隧道已掘进至 F1 风化槽。为保证海底隧道顺利通过 F1 风化槽, 采用全断面帷幕注浆的方法对 F1 风化槽进行堵水和加固, 第一循环全断面帷幕注浆取得了较好的效果, 并顺利开挖 18 m。主要介绍 F1 风化槽的地质情况, 注浆机制、方案、参数, 施工工艺及注浆效果的检验、评价情况。

**关键词:** 隧道工程; 海底隧道; 风化槽; 软弱围岩; 注浆; 堵水

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3841 - 08

## GROUTING TECHNOLOGY FOR WATER BLOCKAGE OF WEATHERED SLOT F1 IN XIAMEN XIANG'AN SUBSEA SERVICE TUNNEL

LI Zhiguo<sup>1</sup>, SUN Zhenchuan<sup>2</sup>, WANG Xiaojun<sup>2</sup>, MOU Song<sup>1</sup>, XU Haiting<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>

(1. *Institute of Science and Technology, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang, Henan 471009, China;*

*2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Xinxiang, Henan 453000, China*)

**Abstract:** Xiamen Xiang'an subsea tunnel, with the total length of 5.948 km, is the first subsea tunnel designed and constructed by mainland China. According to the geological exploration data, the tunnel will pass through four deep weathered or slots troughs, F1, F2, F3, F4, where the strata are complete or strong weathered weak rocks. These strata have high permeability coefficients, huge water amount, high water pressure, and high risk of water and silt pouring in tunnel with infinite seawater supply. As a result, the safety of weathering slot F1 during tunnel construction is the key in the project. At present, the tunnel has been excavated to the weathered slot. In order to assure that the subsea tunnel can pass the weathered slot F1 successfully, the full-section curtain grouting technology is adopted to reinforce the weathered slot F1 to block up the water. The effect of the full-section curtain grouting in the first cycle is good; and the tunnel has been excavated for 18 m successfully. The geological condition, grouting mechanism, scheme and parameters, and the verification and appraisal of the construction techniques and grouting effect are introduced.

**Key words:** tunneling engineering; subsea tunnel; weathered slot; weak surrounding rock; grouting; water blockage

## 1 引言

高压涌水在海底隧道施工中是一个重大的灾难

性事件, 在日本青函海底隧道的施工中曾出现过 4 次大的涌水, 最大涌水量达 70 t/min, 远远超出了水泵抽水率。其中最大的一次涌水曾迫使连接辅助隧道和超前导坑的一个通风井立即被关闭, 该段辅

**收稿日期:** 2007 - 07 - 11; **修回日期:** 2007 - 10 - 11

**作者简介:** 李治国(1967 -), 男, 硕士, 1989 年毕业于石家庄铁道学院隧道与地下工程专业, 现为教授级高级工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究、设计与施工工作。E-mail: xhthero@163.com

助隧道和主隧道成为一个巨大的储水库，该事故付出了新增一个旁通道的高昂代价<sup>[1~3]</sup>。

地下水流入海底隧道通常是在高压之下并有无穷无尽的水源，排水和抽水或提高隧道内部大气压力(施工在增压下进行)都将是无效的，而控制地下水的基本方法是注浆法。注浆方案的设计、注浆压力、材料、工艺技术等均需要认真研究，加以妥善处理；另外，因地层条件、水量大小、防排水设计等方面的差异，采用的涌水防治技术也有所不同，国外有采用冻结法的，也有采用压气法的，但基本方法是注浆止水方法，超前钻孔排水减压，采用全断面帷幕注浆法对地层进行加固与止水<sup>[4~6]</sup>。

本文通过厦门东通道(翔安海底隧道)服务隧道 F1 风化槽第一循环帷幕注浆实例，结合注浆施工工艺及工程地质条件，对全~强风化花岗岩软弱地层中注浆堵水加固技术进行研究，提出几点粗浅的看法。

## 2 工程概况

翔安海底隧道位于福建省厦门市，是连接厦门本岛和翔安区的重要通道，是我国大陆自行设计和修建的第一座大断面海底隧道，全长 8.695 km，其中隧道长 5.948 km，两岸接线长 2.747 km。该隧道工程穿越深海地段长 2 860 m，潮间带长 1 540 m，陆域地段长 1 548 m，设计为双向六车道公路隧道，并在两主隧道之间修建一服务隧道，主隧道 F1 风化槽开挖断面为 17.04 m×12.56 m，隧道建筑限界为 13.5 m×5 m，服务隧道 F1 风化槽开挖断面为 7.92 m×7.39 m，衬砌后净宽 5.5 m，高 6.5 m。设计行车速度为 80 km/h。3 个隧道的横断面布置见图 1，服务隧道 F1 风化槽纵断面见图 2。

该隧道采用钻爆法修建，地质条件比较复杂，

隧道从进口到出口依次要穿越海底 4 个风化槽(囊)F1, F4, F2, F3, 涌水突泥风险很大。目前服务隧道已开挖至 F1 风化槽影响带(里程 NK8+300)，为了保证海底隧道顺利通过 F1 风化深槽，采用全断面帷幕注浆的方法对 F1 风化槽进行堵水和加固，并取得了较好的效果，目前隧道已顺利开挖了 18 m。

## 3 F1 风化槽地质条件

### 3.1 工程地质

F1 风化槽岩性以全~强风化花岗岩为主(W3, W4)，夹有强风化二长岩岩脉：全~强风化花岗岩长岩以褐黄色为主，杂少量白斑，岩石风化严重，呈硬塑砂质黏性土状，并含有中粗砂；强风化二长岩脉因高岭土矿物含量较高，具有弱膨胀趋势，含少量风化残块。

服务隧洞 F1 风化槽覆盖层厚 36.0~53.7 m，最大水深 18 m，设计拱顶最大静水压力为 0.68 MPa，设计勘探纵向长度为 109 m，地勘报告提供的全~强风化花岗岩力学参数见表 1。

### 3.2 水文及气象条件

F1 风化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；该段地下水主要受海水的垂直入渗补给。F1 风化槽渗透系数见表 2。

厦门港 1995 年海水平均温度为 21.3℃，最高月平均温度为 28.8℃(8 月)，最低月平均温度为 12.6℃(2 月)。1995 年海水平均含盐度为 27.6‰，最高月平均含盐度为 30.8‰(7 月)，最低月平均含盐度为 22.5‰(5 月)。工程海域海水水质分析表明，海水对混凝土具有结晶类弱腐蚀及分解类强腐蚀作用。

服务隧道 NK8+300 掌子面超前钻探 25 m 探孔测试表明，F1 风化槽最大水压力为 0.3~0.5 MPa，单孔最大涌水量为 50 m<sup>3</sup>/h。

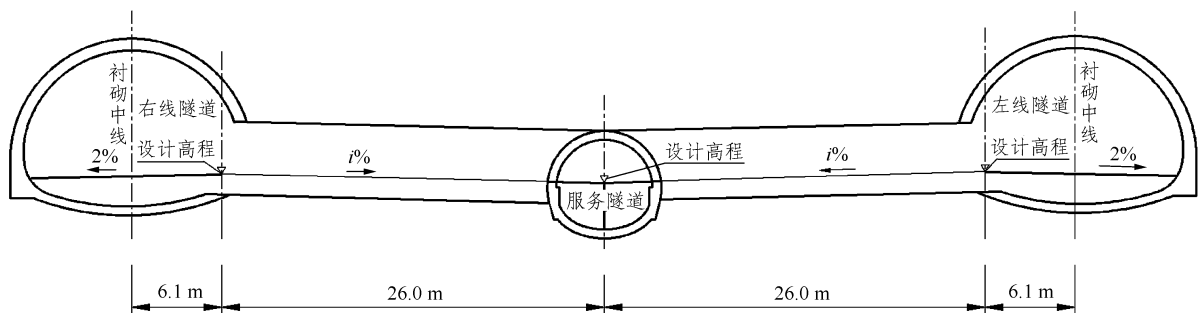


图 1 隧道横断面布置图

Fig.1 Layout of tunnel cross-section

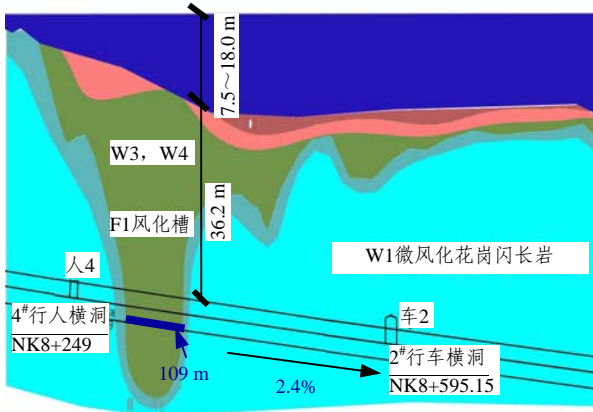


图 2 服务隧洞 F1 风化槽纵断面图

Fig.2 Longitudinal section of weathered slot F1 in service tunnel

表 1 风化花岗岩力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of weathered granites

地层代号	岩土名称	工程特性	容许承载力 $\sigma_0/kPa$	压缩模量 $E_c/MPa$	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	动弹性模量 $E_d/GPa$	静弹性模量 $E/GPa$	计算摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
W4	全风化带	中等压缩性, 承载力较高	220	9.0	18.0	0.7	0.1	25
W3	强风化带	中等压缩性, 承载力较高	300	10.0	19.0	2.4	1.0	30
W1	微风风化带	中等压缩性, 承载力较高	>4000	-	26.5	63.0	40.0	70

表 2 F1 风化槽渗透系数

Table 2 Permeability coefficients of weathered slot F1

工程位置	岩性	渗透系数均值/( $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )			渗透系数建议值/( $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
		室内测试 1	室内测试 2	室内测试 3	
F1 风化槽	全风化岩层	29.4	13.8	8.2	17.1
	强风化岩层	30.1	12.7	-	21.4

## 4 注浆机制

F1 风化槽注浆机制为挤密、劈裂注浆。

挤密注浆是指通过钻孔在土中注入极浓的浆液, 随着注浆量的增加, 在持续压力作用下, 注浆点处土体被压密而形成浆泡。压密注浆的主要特点之一是它在较软弱的土体中具有较好的效果。此法最常用于中砂层, 黏土地层中若有适宜的排水条件也可采用。经研究得出: 注浆体的扩大会导致土体内出现复杂的径向和切向应力体系, 在紧靠浆泡处的土体存在大的破裂、剪切和塑性变形带, 这一带的土体密度由于扰动而降低, 随着从土体到浆泡距离的增加, 土体变形主要为弹性变形, 从而使得土

体密度、强度有明显的增加<sup>[7, 8]</sup>。

劈裂注浆指在压力作用下, 浆液克服地层的初始应力和抗拉强度, 引起岩石土体结构的破坏和挠动, 使其沿垂直于小主应力平面上发生劈裂, 使地层中原有的裂隙或孔隙、浆液的可注性和扩散距离都增大, 而所有的注浆压力相对较高。在岩层中, 一般假定地层为一各向同性、均匀连续的线弹性体, 因而可用下述方程表达钻孔孔壁处开始发生水力劈裂的条件<sup>[9, 10]</sup>:

(1) 垂直劈裂:

$$\frac{p_0}{\gamma h} = \frac{1-\nu}{(1-N_1)\nu} \left( 2K_3 + \frac{S_t}{\gamma h} \right) \quad (1)$$

(2) 水平劈裂:

$$\frac{p_0}{\gamma h} = \frac{1-\nu}{(1-N_1)\nu} \left( 1 + \frac{S_t}{\gamma h} \right) \quad (2)$$

式中:  $p_0$  为注浆压力(MPa);  $\gamma h$  为由岩石重力产生的垂直应力(Pa);  $\nu$  为岩石的泊松比;  $K_3$  为侧压力系数;  $S_t$  为岩石的抗拉强度(MPa);  $N_1$  为用来扩张孔劈的液体压力比例系数, 与地层渗透性和浆液黏度等有关, 取值为 0~1, 对不透水岩石  $N_1=1$ , 透水性较大的岩石  $N_1$  值接近 0。

在实际注浆过程中常常发生水平劈裂, 其主要标志是注浆时岩层表面出现不同程度的上抬或耗浆量突然增加。有时出现低压劈裂的现象, 那是因为岩层存在不同形式的软弱构造。

现场注浆情况证明, F1 风化槽内浆液扩散主要分为 3 个阶段。第 1 个阶段为挤密灌浆阶段, 即在较低注浆压力作用下, 浆液均匀地压缩注浆孔周围土体, 钻孔周围土体中的部分水被挤出, 含水量和空隙率减小, 密度增加。根据弹性力学和土力学的有关理论, 注浆压力  $p_0$  与土体径向位移  $r$  之间存在一定的关系, 注浆压力越大, 土的径向位移越大。现场开挖观察到, 在 2~4 MPa 的注浆压力作用下, 孔壁径向位移一般为 0.5~3.0 cm。第 2 阶段为劈裂阶段, 当灌浆压力  $p_0$  增加到一定程度时, 土体沿薄弱面或应力集中点(注浆孔壁上的尖角等)发生劈裂(剪切或张拉等)破坏, 浆液在这些部位发生劈裂和流动, 形成浆脉, 浆脉位置、方向和宽度除与圆孔周围的应力状态、土体性质有关外, 还与注浆孔径及形状有关。第 3 阶段为浆脉流动阶段, 浆液劈开地层后, 在高压作用下, 沿某一个或几个方向流

动, 在流动过程中, 不断劈开地层中的其他薄弱部位, 进行充填, 形成主脉, 由于重复钻注以及地层的不均匀性、应力状态的复杂性、邻近钻注孔的影响, 浆液在主脉周围再次劈开地层, 形成宽度不等和方向不同的副脉, 浆液在地层中反复劈裂、流动和充填, 主、副脉在地层中胶结并相互交错, 从而形成网状浆脉体系, 起到加固与堵水作用<sup>[11, 12]</sup>。

### 5 钻孔注浆施工方案

服务隧洞 F1 风化槽采用全断面帷幕注浆加固和堵水, 帷幕注浆加固范围为掌子面内及隧道开挖轮廓线外 4 m, 隧道纵向加固长度为 22 m(不含止浆

墙), 设计钻孔 106 个, 检查孔 15 个, 其中取芯孔 5 个, 此外另增加了 6 个补充注浆孔, 共完成 127 个孔。

#### 5.1 钻孔布置

服务隧洞 F1 风化槽钻孔布置如图 3, 4 所示。

#### 5.2 注浆参数

全断面帷幕注浆以前进式分段注浆为主, 结合钻杆后退式注浆和钢管孔底注浆。注浆参数见表 3。

#### 5.3 注浆材料

注浆材料主要选用超细水泥单液浆、HSC 水泥单液浆和超细水泥 - 水玻璃双液浆。浆液配比参数见表 4。

#### 5.4 钻孔注浆施工工艺

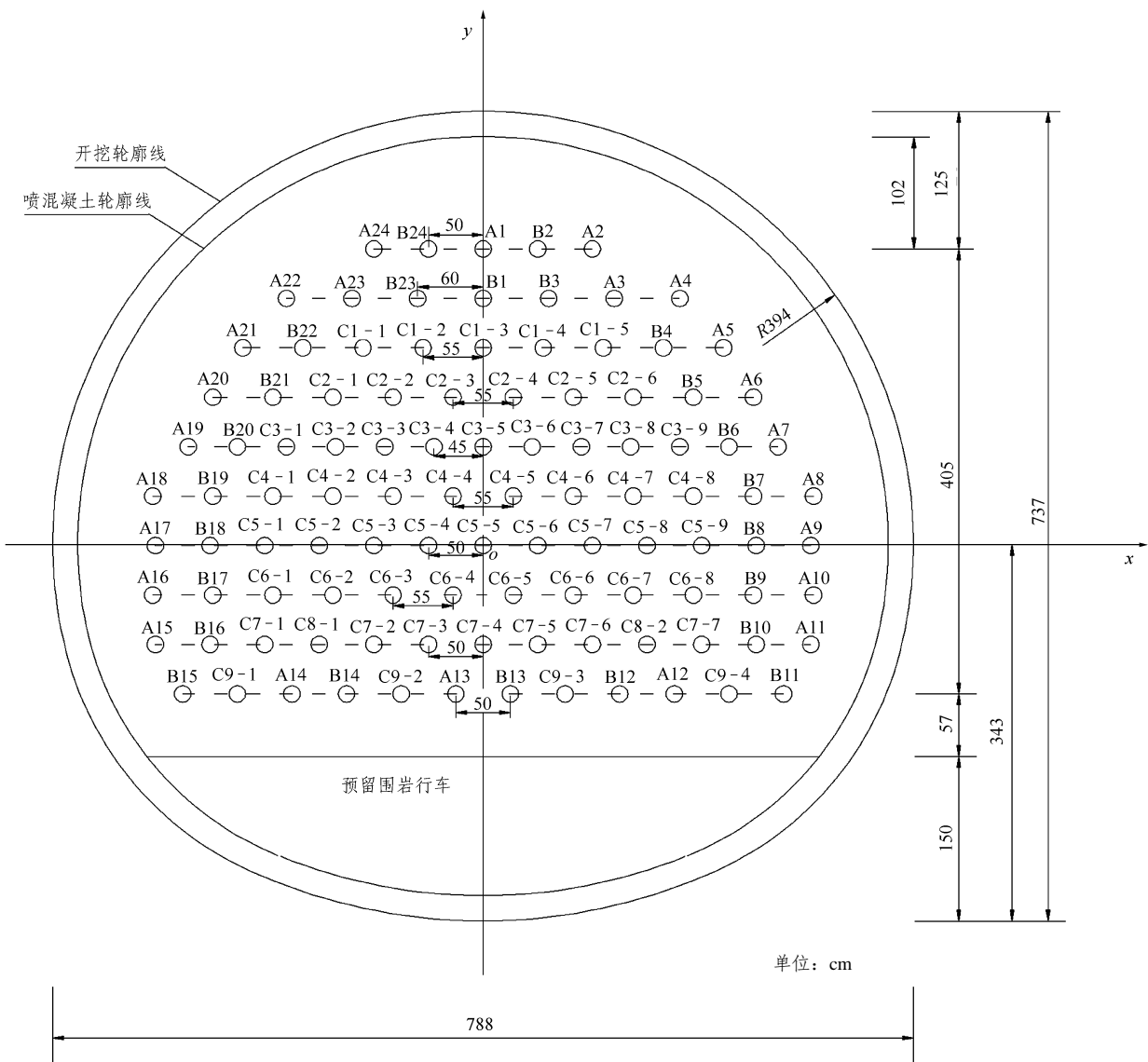


图 3 服务隧洞 F1 风化槽注浆钻孔布置图

Fig.3 Layout of grouting borehole at weathered slot F1 in service tunnel

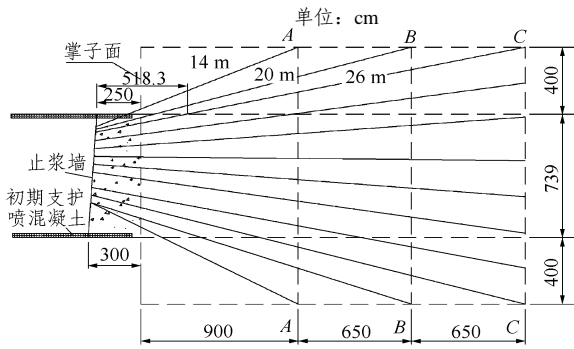


图 4 服务隧道 F1 风化槽注浆钻孔纵断面图

Fig.4 Longitudinal section of grouting borehole at weathered slot F1 in service tunnel

主要采用了前进式注浆、钻杆后退式注浆、钢管孔底注浆 3 种工艺。前进式注浆时, 浆液从孔口流向孔底, 如地层涌泥涌砂, 钻孔过程中出现塌孔, 浆液往往流不到孔底, 钻孔后部注浆效果往往不好。此时, 可通过钻杆后退式注浆和钢管孔底注浆进行孔底送浆, 浆液从孔底向孔口流动, 通过在孔口安装止浆装置, 提高注浆压力, 使浆液在流动过程中进入地层的薄弱部位, 以改善钻孔底部和中部的注浆效果。通过这 3 种工艺的综合应用, 可大大改善注浆效果<sup>[13, 14]</sup>。

#### 5.4.1 前进式分段注浆

主要采用安装孔口管分段前进方式进行, 首先钻直径较大的孔, 安装孔口管和高压球阀及止水装置, 然后钻 3~5 m 后退出钻杆, 进行注浆, 注浆完成后再钻下一段, 如此往复, 直到完成该孔所有段的注浆。

#### 5.4.2 钻杆后退式注浆

主要采用安装孔口管钻杆后退方式进行, 首先钻直径较大的孔, 安装孔口管和高压球阀, 然后钻杆向前钻进, 钻到设计孔深后, 在孔口安装上排砂和止浆装置, 并将钻杆后的水便接头拆下, 换成注浆装置, 进行注浆。注浆过程中边旋转边后退, 根据地层吸浆情况, 决定后退速度, 防止浆液黏住钻杆。

#### 5.4.3 钢管孔底注浆

在成孔条件较好的情况下, 浆液通过特制钢管注入孔底, 在较大压力作用下, 浆液通过注浆管外壁和钻孔壁之间的空隙返回孔口, 孔口安装止浆装置进行止浆, 从而保证钻孔全长范围内都有浆液, 隧道周边安装的钢管还能起到棚架作用, 从而改善注浆效果, 提高地层的稳定性。

#### 5.4.4 几种注浆工艺的优缺点比较

前进式注浆、钻杆后退式注浆、钢管孔底注浆 3 种工艺的比较见表 5。

## 6 钻孔注浆施工情况简述

本循环注浆自 2007 年 3 月 3 日开始施工超前探孔, 3 月 6 日探孔结束; 3 月 8 日施作止浆墙; 3 月 14 日搭设工作平台; 3 月 15 日正式开始钻孔注浆, 5 月 25 日结束, 历时 70 d。钻孔及注浆情况如图 5 所示。

从钻孔及注浆情况来看, F1 风化槽内地层风化严重, 软弱破碎, 出水量大, 最大出水量达 50 m<sup>3</sup>/h。注浆过程中, 前期施工的大部分孔成孔困难, 涌水、涌泥比较严重, 注浆量较大, 注浆压力上升慢, 钻孔之间串浆比较严重; 随着注浆的进行, 地层得到逐步改良, 空隙率和含水量逐步减小; 后期施工的大部分注浆孔注浆量逐渐减小, 注浆压力上升较快, 串浆现象减少。全断面注浆结束后情况如图 6 所示。

## 7 注浆效果检验与评价

注浆效果检查主要采用钻检查孔法, 根据注浆状况, 选择注浆范围内可能存在薄弱环节的注浆部位布设检查孔, 检查孔数量一般应达到注浆孔数量的 5%~10%。对检查孔进行钻孔检查, 测定涌水量, 根据检查孔涌水量、取芯率和强度来决定是否需补充注浆。如果检查孔涌水量大于 0.15 L/(min·m) 或局部孔涌水量大于 3 L/min 时, 需进行补充孔注浆,

表 3 注浆参数

Table 3 Grouting parameters

纵向注浆加固长度/m	径向加固范围	浆液扩散半径/m	注浆压力/MPa	注浆孔直径/mm	注浆速度/(L·min <sup>-1</sup> )	终孔间距/m	注浆方式	注浆孔数量	孔口管
22	开挖面内及开挖轮廓线外 4 m	1.5	2~4	94	5~110	2.0~2.5	前进式、钻杆后退式、钢管孔底注浆	127	L = 2.0 m, φ 121 mm, 壁厚 5 mm

表 4 浆液配比

Table 4 Mixture ratio of slurries

序号	名称	配比		
		水灰比	水泥：水玻璃	水玻璃浓度 /Be'
1	MFC 超细水泥单液浆	(0.6~1.0) : 1		
2	HSC 水泥单液浆	(0.6~1.0) : 1		
3	MC 超细水泥单液浆	(0.6~1.0) : 1		
4	超细水泥 - 水玻璃双液浆	(0.6~1.0) : 1	1 : (1.0~0.3)	30~40

表 5 3 种注浆工艺的比较

Table 5 Comparison of three kinds of grouting schemes

注浆方式	优点	缺点	适用地层
分段前进式注浆	适用性强, 操作简便, 易保证注浆效果	重复扫孔次数多, 工量大, 工效低	地层软弱破碎, 水量较大, 成孔困难
钻杆后退式注浆	工效高, 重复扫孔工作量小, 能实现定位、控域注浆	易卡钻杆, 操作复杂, 对孔口密封要求较高	地层软弱破碎, 水量较小, 成孔困难
钢管孔底注浆	能保证孔底及钻孔全长均有浆液, 能起到棚架作用	工艺比较复杂, 成孔要求高, 地层加固作用强	地层软弱破碎, 基本无水, 成孔比较容易



图 5 钻孔及注浆情况图  
Fig.5 Drilling and grouting



图 6 服务隧洞 F1 风化槽全断面注浆结束后情况  
Fig.6 Weathered slot F1 in service tunnel after completion of full-section grouting

直到达到设计要求为止。本次注浆检查孔数量为 15 个, 其中取芯孔 5 个, 钻孔的取芯率达到了 70% 左右, 大部分孔的涌水量达到了设计要求, 另外对于不合要求的部位进行了补充注浆, 共增加了 6 个补充注浆孔。

(1) 检查孔出水量情况

通过检查孔钻孔情况看, 左侧出水量稍大, 最大出水量为 0.14 L/(min·m); 右侧出水量较小, 最大出水量为 0.1 L/(min·m), 注浆的堵水率达到 95% 以上, 出水基本无压, 满足注浆设计要求。

(2) 检查孔取芯情况

取芯情况为: 0~7 m 基本无水, 为破碎岩石, 含水泥结块较多; 7~10 m 为全风化花岗岩, 基本无水; 10~15 m 为全风化花岗岩, 出水量较小, 含泥量较高; 15~18 m 含中粗砂量较多, 出水量稍大, 比较密实; 18~22 m 含泥量较大, 比较松软, 稳定性较差, 岩芯不完整; 22 m 以后, 取芯率降低较多。检查孔取出岩芯情况见图 7。



图 7 服务隧洞检查孔取芯照片  
Fig.7 Photo of cores from examination hole in service tunnel

(3) 检查孔取芯率

检查孔取芯率为 70% 左右, 说明地层加固比较均匀。

(4) 注浆效果总体评价

服务隧洞开挖面注浆效果如图 8 所示。总体来看, 开挖面前方左侧地质条件稍差, 右侧相对较好, 芯样中含水泥浆块, 尤其是前 15 m, 含浆块较多, 注浆加固效果较好, 取芯率较高, 对开挖安全比较有利, 后 20 m 注浆效果相对较差。

## 8 大管棚施工

注浆结束后, 为确保开挖安全, 自 2007 年 6





图 8 服务隧洞开挖面注浆效果

Fig.8 Grouting effect of excavated face in service tunnel

月 1~10 日, 在服务隧道周边共施工  $\phi 108\text{ mm}$  大管棚 35 根, 每根长度 18 m, 环向间距 30 cm, 为了给下一循环全断面预注浆创造条件, 大管棚角度比较大, 一般控制在  $16^\circ$  左右。大管棚纵断面和横断面布置分别见图 9, 10。

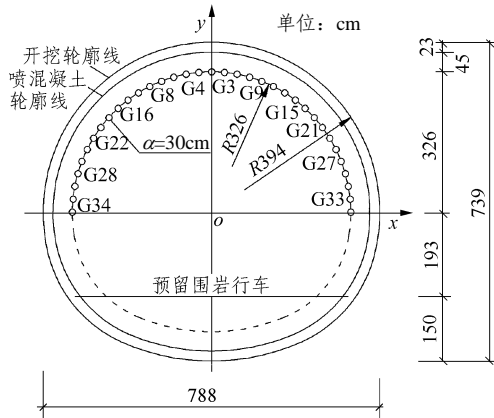


图 9 大管棚横断面布置

Fig.9 Arrangement of big shed pipe cross-section

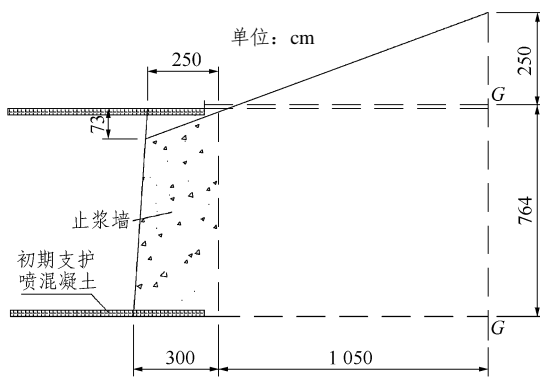


图 10 大管棚布置纵断面图

Fig.10 Arrangement of big shed pipe longitudinal section

较干燥, 无水, 地层内含浆脉较多, 注浆效果较好; 开挖至 5.5 m 时, 掌子面拱顶偏左部位有少量滴水, 中部出现湿痕, 进入含水交界面; 开挖至 11.0 m 时, 开挖面基本能自稳, 但掌子面左上侧出现较大渗水, 流量达到  $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ 。为了保证隧道开挖的施工安全, 做到万无一失, 封闭掌子面, 进行小导管补充注浆后, 继续开挖, 最后顺利开挖至 18 m。开挖结果证明, 全断面帷幕注浆的堵水效果比较明显, 注浆效果是值得肯定的。

### 10 结 论

(1) 通过服务隧道 F1 风化槽第一循环全断面帷幕注浆、探孔取芯检查和地层开挖后揭露的状态, 证明了全断面超前预注浆技术的可行性。通过注浆使浆液对地层进行挤密、劈裂和填充, 提高了地层的承载能力, 浆液在地层中劈裂填充形成的较大的浆脉及结石体, 跟地层中的砂土黏结在一起形成承载力较高的混合物, 可以把水堵在开挖轮廓线以外较远位置。对隧道围岩进行加固, 使得地层的涌水量从注浆前单孔涌水量  $50\text{ m}^3/\text{h}$  降至注浆后单孔涌水量  $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ , 堵水率达 98.8%。通过开挖面局部和补充注浆, 基本使隧道在无水或渗水很小的情况下开挖, 有效地保证了隧道的开挖安全。

(2) 为了提高注浆质量和效率, 必须对注浆方案、材料、参数、工艺、注浆效果检验方法认真思考、研究, 及时总结, 不断改进和优化。

(3) 海水对注浆材料的影响很大, 主要表现在: 凝结时间增长, 强度降低。因此, 对厦门东通道风化槽内的海水情况下的注浆材料, 继续研究和选择性能优良的耐腐蚀注浆材料是目前需要进一步研究和解决的问题。

(4) 该循环注浆方式以前进式为主, 该工艺的特点是重复扫孔, 反复注浆, 一方面工效低, 速度慢, 钻注成本高; 另一方面, 注浆段初始端重复钻注次数较多, 注浆效果较好, 而注浆段末端, 钻注次数相对较少, 注浆效果相对较差。因此注浆工艺需要进一步研究, 应进一步完善钻杆后退式注浆和钢管孔底注浆工艺, 从而进一步提高注浆质量和效率。

### 参考文献(References):

[1] 李治国. 隧道岩溶处理技术[J]. 铁道标准设计, 2003, (增 1): 36 - 40.(LI

### 9 开挖情况

从开挖揭示的情况看, 注浆段内, 0~5.5 m 比

- Zhiguo. Technology of treatment for karst encountered in tunnel[J]. Railway Standard Design, 2003, (Supp.1): 36 - 40.(in Chinese)
- [2] 傅子仁, 查念祖, 薛文城. 新永春隧道高压涌水段处理过程之探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 5 053 - 5 061.(FU Robert, CHA Niansu, HSUEH Wencheng. Study on treatment of high-pressure water gushing in new Yungchung tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 5 053 - 5 061.(in Chinese))
- [3] 高延法, 牛学良, 廖俊展. 矿山覆岩离层注浆时的注浆压力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 5 244 - 5 247.(GAO Yanfa, NIU Xueliang, LIAO Junzhan. Analysis of grouting pressure when grouting in overburden bed-separations in mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 5 244 - 5 247.(in Chinese))
- [4] 林登阁, 吴新华. 千米立井锚注堵水加固技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 1): 4 666 - 4 668.(LIN Dengge, WU Xinhua. Study on water blocking and reinforcing by grouting and anchoring method in a shaft about one kilometer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.1): 4 666 - 4 668.(in Chinese))
- [5] 伍振志, 傅志锋, 王 静, 等. 浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机制及效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 025 - 1 029.(WU Zhenzhi, FU Zhifeng, WANG Jing, et al. Study on support mechanism and effect of shed-pipe grouting technology for tunneling construction in shallow-buried soft stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1 025 - 1 029.(in Chinese))
- [6] 王 哲, 龚晓南, 程永辉, 等. 劈裂注浆法在运营铁路软土地基处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 619 - 1 623.(WANG Zhe, GONG Xiaonan, CHENG Yonghui, et al. Application of fracturing grouting method to treat soft foundation of operating railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 619 - 1 623.(in Chinese))
- [7] 刘招伟, 张顶立, 张民庆. 圆梁山隧道毛坝向斜高压富水区注浆施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 728 - 1 734.(LIU Zhaowei, ZHANG Dingli, ZHANG Mingqing. Grouting technique for high-pressure and water-enriched area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 728 - 1 734.(in Chinese))
- [8] 汤德刚. 灌浆技术在涌水溶洞处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 583 - 3 586.(TANG Degang. Application of grouting technique to treatment of limestone cave surge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 583 - 3 586.(in Chinese))
- [9] 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]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 909 - 3 918.(ZHANG Mingqing, ZHANG Wenqiang, SUN Guoqing. Evaluation technique of grouting effect and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 909 - 3 918.(in Chinese))
- [10] 张民庆, 黄鸿健, 殷怀连, 等. 宜万铁路别岩槽隧道 F<sub>3</sub> 断层突发性涌水治理[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(2): 68 - 71.(ZHANG Mingqing, HUANG Hongjian, YIN Huailian, et al. Water outburst treatment at fault F<sub>3</sub> in Bieyancao tunnel on Yichang—Wanzhou Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(2): 68 - 71.(in Chinese))
- [11] 吕 明, GRØV E, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(LU Ming, GRØV E, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(in Chinese))
- [12] 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): 1 513 - 1 521.(SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 513 - 1 521.(in Chinese))
- [13] 黄明琦, 王渭明, 林 毅. 某海底服务隧道施工中涌水处理及风险控制措施[J]. 铁道建筑技术, 2007, (4): 15 - 18.(HUANG Mingqi, WANG Weiming, LIN Yi. Disposal of subsea tunnel water inflow and risk control[J]. Railway Construction Technology, 2007, (4): 15 - 18.(in Chinese))
- [14] 张旭东. 关于岩溶隧道帷幕注浆材料选择的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 432 - 434.(ZHANG Xudong. Study on material for curtain grouting in karst tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(3): 432 - 434.(in Chinese))