

厦门翔安海底隧道富水砂层注浆试验

陈铁林, 滕红军, 张顶立

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对我国第一条海底隧道——厦门翔安海底隧道富水砂层段进行注浆试验, 采用钻孔取芯和压水的方法对注浆效果进行检验, 摸索该条件下的一些注浆规律, 提出注浆量、注浆压力、注浆速度、扩散半径等注浆参数。通过试验研究海水对浆液强度的影响。研究表明, 海水延长初凝时间、减缓浆液强度上升的速度、稀释浆液并加剧不均匀扩散。结合翔安海底隧道施工注浆的经验可以得出, 以上几个问题是在海水注浆中值得深入研究的, 其研究结果可为厦门海底隧道注浆的设计、施工提供指导, 并可为相关工程提供重要的参考。

关键词: 隧道工程; 海底隧道; 注浆; 富水砂层

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3711 - 07

GROUTING TEST ON WATER-ENRICHED SAND LAYER OF XIAMEN XIANG'AN SUBSEA TUNNEL

CHEN Tielin, TENG Hongjun, ZHANG Dingli

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Water-enriched sand layer will bring difficulty for grouting and therein result in failure of grouting. The influence of the seawater increases the difficulty of grouting. This paper presents grouting in water-enriched sand layer of the first subsea tunnel—Xiamen Xiang'an subsea tunnel, China. Drilling and pushing water are used to check the grouting result. Some grouting rules are obtained and some parameters such as grouting amount, grouting pressure, grouting speed and diffusion radius are suggested. This paper also finds the results of an experimental investigation applied to the study of the effects of seawater. The result indicates that the seawater will delay the time of initial setting, slowing down the speed of gain in strength, diluting the density of slurry and aggravating differential pervasion of grouting. Several problems of grouting in seawater are discussed from the test and the construction experiences of Xiamen Xiang'an subsea tunnel. The study can provide instructional advice for both design and construction of grouting of the Xiang'an subsea tunnel. Meanwhile it can also provide important reference to similar project.

Key words: tunnelling engineering; subsea tunnel; grouting; water-enriched sand layer

1 工程概况

厦门翔安隧道是连接厦门岛和陆地翔安区之间的通道, 主要穿过陆域、浅滩、全强分化花岗岩和

海底弱、微风化花岗岩中, 场区基岩埋藏不深, 但全~强风化带厚度相差悬殊, 微风化顶面多处于 0~-55 m, 穿越 3 条全~强风化基岩深槽和一条风化囊, 总长度约 360.2 m, 个别风化深槽低于 100 m, 海水最深处为 30 m, 全水头高度设计采用 65 m。设

收稿日期: 2007 - 07 - 14; **修回日期:** 2007 - 09 - 08

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2006AA11Z119)

作者简介: 陈铁林(1970 -), 男, 博士, 1993年毕业于淮南矿业学院采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: geotlchen@163.com

计方案采用三孔形式修建，两侧为行车主洞(按三车道设计，开挖断面面积为 160.3~170.1 m²)，中间孔为服务隧道(开挖断面面积为 40.0~46.6 m²)，三洞中心距均为 26 m。隧道穿越 F1, F4 风化槽(囊)，洞身通过总长度主线隧道为 132 m，服务隧道为 122 m。

根据中铁大桥局 2006 年 1 月份提供的地质资料，厦门东通道(翔安隧道)工程翔安端服务隧道 NK11+780.00~NK12+096.44 段下穿砂层。该段砂层底面高程-12.44~-21.45 m，顶面高程为-11.29~-16.75 m，砂层厚度为 0.00~6.12 m，砂层底面距服务隧道拱顶开挖线 4.02~8.96 m。该砂层富水性强，渗透性好，且与海水连通，受潮汐影响。

注浆是隧道穿越富水砂层的主要手段，已有学者^[1~5]对富水砂层的注浆技术、机制和材料进行了探讨，这些研究无疑丰富了注浆在富水砂层中加固、堵水方面的技术和工艺，特别是我国圆梁山隧道的施工在高压富水砂层中的注浆，在注浆工艺、设备、材料等多方面都取得研究成果，但是针对富含海水砂层注浆的研究还是空白。为确保施工安全，并为风化层注浆试验提供经验，在 NK12+066~NK12+038 段进行了现场注浆试验。表 1 为服务隧道 A 围堰下方砂层分布情况。

表 1 服务隧道 A 围堰下方砂层分布情况

Table 1 Distribution of sand layer below the coffer A of service tunnel m

里程桩号	拱顶开挖高程	砂层底面高程	砂层顶面高程	砂层厚度	拱顶与砂层底面距离
NK12+056.2	-20.8	-16.3	-13.0	3.2	4.6
NK12+036.1	-20.8	-16.8	-12.7	4.1	4.0
NK12+016.1	-21.4	-16.6	-12.3	4.1	4.7

该试验段范围内地层主要有：上覆第四系人工填筑层(Q₄^{me})，冲洪积(Q₄^{al+pl})黏土、砂，全风化花岗岩。部分海相沉积淤泥由于人工填筑土的挤压，已混入填筑土中。现将其工程地质特征分述如下：

(1) 填筑土：为隧道洞口开挖的弃土，成分主要为砂质黏性土、全~强风化黑云母花岗岩，棕黄色，褐红色，稍湿，松散，厚薄不均，底部含较多淤泥。

(2) 黏土：以白色为主，局部为棕黄杂灰白色，可塑~硬塑，含较多的砂粒，局部夹有较细腻的黏土层。

(3) 粗砂：黄色为主，局部为白色，饱和，密实，成分以石英、长石为主，含少量黏粒，局部为砾砂。

(4) 全风化花岗岩：一般呈棕黄~灰白色，硬塑，含 25%~30%石英颗粒，为花岗岩风化而成。

表 2 给出了土层力学特性。

表 2 土层力学特性

Table 2 Mechanical characteristics of soil layers

地层代号	岩性	工程特性	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	内摩擦角/(°)	内摩擦力/kPa	承载力/kPa	压缩模量/MPa
Q ₄ ^{me}	填筑土	疏密不匀，工程特性相差悬殊		10.5	21.0		
	淤泥黏土		1×10 ⁻⁶	7.0	10.0	70	3.0
Q ₄ ^{al+pl}	泥炭质土	低强度，高压缩性，灵敏度高	4×10 ⁻⁵	8.0	12.0	90	4.0
	亚黏土		2×10 ⁻⁶	9.0	23.0	140	6.0
	黏性土		1×10 ⁻⁶	18.5	36.0	200	7.0
Q ₃ ^{al+pl}	黏土质砂	中等压缩性，承载力较高	3×10 ⁻³	30.0	2.0	300	
	粗砂		2×10 ⁻²	23.0	30.0	200	7.0
W ₄	全风化带	中等压缩性，承载力较高	1×10 ⁻⁴	22.0	24.0	220	9.0

2 注浆试验

2.1 注浆材料及注浆参数的初步选择

本试验段为富水砂层，以堵水为主，按低压渗透注浆设计，选用注浆材料的种类及配比见表 3。本次试验采用 32.5R 普通硅酸盐水泥。

表 3 注浆材料性能

Table 3 Performance of grouting material

名称	m 水 : m 水泥	V 水泥浆 : V 水玻璃	凝结时间/s	结石体强度/MPa	
				3 d	28 d
双液浆	1 : 1	1 : 1	60	1.5	4.0

注：表中的水为淡水。

注浆机械采用 KBY80/7.0 - 11 型液压注浆泵。NK12+066 地面高程为+7.00 m，按注浆孔深入砂层下部全风化花岗岩计算：注浆管深度为 26~31 m，外露地表 1.0~1.5 m 高，便于注浆操作。

(1) 钻孔：采用 XY - 100 型地质钻机引孔，孔径为 90 mm，然后下 φ42.0 mm×3.5 mm×26.0 m 和 φ42.0 mm×3.5 mm×31.0 m 的 TSS 型注浆管，钻孔、下管时按照 2 m×2 m 梅花形间隔作业，以免串浆，1 序孔深 25 m，2 序孔深 30 m。

(2) 封孔: 采用柔性封孔材料, 1 序孔在地表以下 12 m 深处布设封孔材料, 2 序孔在地表以下 18 m 深处布设封孔材料, 在封孔材料以上注入双液浆, 双液浆凝固后封孔结束(见图 1)。此种方法简单、实用, 可操作性强。

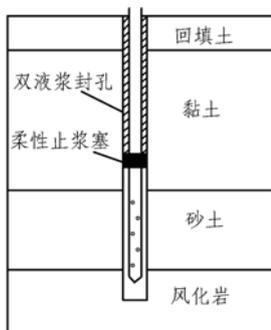


图 1 封孔示意图
Fig.1 Plugging sketch

(3) 参照手册^[6], 试验孔布孔方式是采用 1.0 m × 1.0 m, 梅花形布置。钻孔布置情况如图 2 所示。

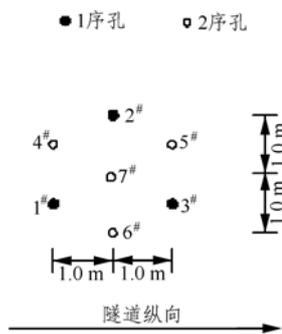


图 2 钻孔布置示意图
Fig.2 Layout sketch of drilling hole

2.2 注浆过程描述

1#孔注浆量为 9.42 m³ 时地表产生裂纹, 此时注浆压力为 0.40 MPa; 注浆量为 10.37 m³ 时发生地表串浆, 此时注浆压力为 0.22 MPa。降低注浆压力至 0.1 MPa, 保持 30 min 后, 增大注浆压力未再发生串浆现象。该孔共灌入浆液 16 m³, 最高压力达 0.5 MPa。

2#孔初始注浆压力为 1.0 MPa, 后降到 0.2 MPa 左右, 第一遍注浆量为 13 m³, 第二天该孔第二遍注浆量到 4 m³ 时, 地表出现裂纹, 注浆结束。

3#孔第一遍注浆量为 13 m³, 第二天该孔第二遍注浆量为 4 m³。3#孔和 2#孔的 P-Q-t 曲线很相似, 但 3#孔的平均注浆压力大于 2#孔的平均注浆压力。

4#孔第一遍注浆量为 5.3 m³, 在 10 m 远处地表串浆, 串浆处地表出现多道裂缝, 地表微有隆起, 注浆结束。后又第二遍注浆, 灌注浆液 8 m³, 注浆过程中在 6 m 远处一小孔冒出少量泥浆, 但未见浆液。

5#孔注浆量为 2.2 m³ 时, 在 10 m 远处(与 4#孔第一遍注浆串浆同一位置)地表串浆, 原有地表裂缝延伸、扩大, 注浆结束。第二天该孔第二遍注浆, 注入浆液 14 m³, 未发生串浆现象。

6#孔第一遍浆量为 2.2 m³ 时, 在 10 m 远(与 4#孔第一遍注浆串浆同一位置)处地表串浆, 地表隆起明显, 裂缝宽处达 3~4 mm, 注浆结束。第三天该孔第二遍注浆, 改为用单液浆, 注入量约 4 m³, 压力达到 0.8 MPa, 注浆结束。

7#孔第一遍灌注浆量为 1.0 m³ 时, 在 6 m 远处地表串浆, 注浆结束。第三天该孔第二遍注浆, 改为用单液浆, 注入量约 3.7 m³, 压力最高达到 2.0 MPa, 附近 4 m 处地表出现裂纹, 压力降为 0.2 MPa 左右, 保持 25 min 后注浆结束。

2.3 注浆过程分析

(1) 注浆压力

3 个 1 序孔注浆时, 在 0.2~0.3 MPa 的压力下, 地层吸浆量很大, 1#孔瞬时最高压力达到 0.5 MPa, 2#和 3#孔瞬时最高压力达到 1.0 MPa。2 序孔注浆时, 压力明显大于 1 序孔注浆压力。总的来说, 2 序孔注浆压力大于 1 序孔注浆压力, 复注压力大于初注压力, 其中 7#孔初注时压力一直保持在 0.8 MPa 左右, 复注时 1.5 MPa 以上的压力可连续保持 20 min 之久, 最大压力可达到 2.0 MPa。通过总结发现, 该处地层正常注浆压力应该为 0.2~0.3 MPa, 一时的压力升高可在地层中产生劈裂, 劈裂后压力就会下降, 持续较久的高压力会使地表产生隆起、裂缝, 最终地表串浆。

(2) 浆液注入量

本次试验中, 根据实际情况, 每孔分 1~2 遍注浆, 每遍注浆以注浆量或地表串浆为结束标准。各孔注浆量见表 4 和图 3。总的来说 1 序孔初注量大于复注量, 2 序孔复注量大于初注量, 1 序孔单孔总注浆量大于 2 序孔单孔总注浆量。

分析各孔的 Q-t 曲线可以看出, 地层的吸浆量并不随时间的增加而减少, 因此应对每孔的注浆量进行控制。

总的来说, 本次注浆试验的 P-Q-t 曲线大部分

表 4 各孔注浆量

Table 4 Grouting amount of each hole m^3

孔号	初注	复注	单孔合计
1#	16.0		16.0
2#	13.0	4.0	17.0
3#	13.0	4.0	17.0
4#	5.3	8.0	13.3
5#	2.2	14.0	16.2
6#	2.2	4.0	6.2
7#	1.0	3.7	4.7
单孔平均	7.5	5.4	12.9

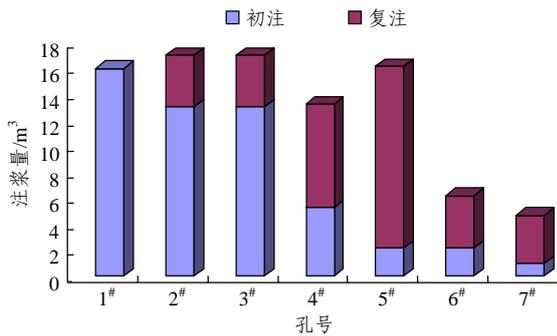


图 3 各孔注浆量

Fig.3 Grouting amount of each hole

时间保持为 II 型曲线, 即注浆压力和注浆量基本保持不变, 注浆过程中 $P-Q-t$ 曲线有时会呈现 I 型, 但很快会转变为 II 型曲线。

(3) 浅深交替加固土 - 岩结合面机制

鉴于本砂层中浆液的扩散半径较大, 可以采用浅深交替的方法进行注浆(见图 4)。1 序孔深 25 m, 2 序孔深 30 m, 首先对 1 序孔进行注浆, 然后对 2 序孔进行注浆, 完成上部砂层的加固, 封闭上部的串浆通道, 待结石体的强度提高以后, 对 2 序孔进行复注, 此时可以获得较高的注浆压力, 实现对土 - 岩结合部的注浆。

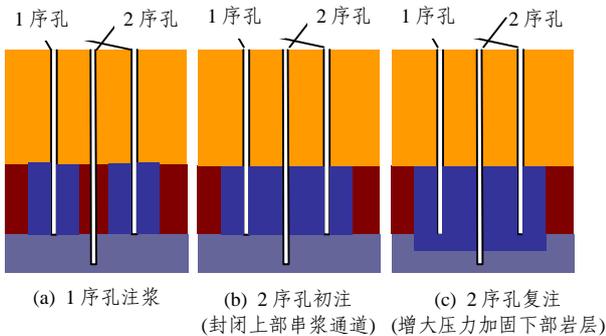


图 4 浅深交替注浆机制

Fig.4 Mechanics of staggered grouting with deep and shallow holes

从试验中获得的单孔注浆量拟和曲线图 5 中可以看出, 2 序孔(4#, 5#, 6#, 7#孔)的注浆量明显小于 1 序孔(1#, 2#, 3#孔), 且 1 序孔初注量占单孔总注浆量的比例较大, 2 序孔复注量占单孔总注浆量的比例较大。另外, 从单孔注浆压力曲线图 6 中还可以看出, 2 序孔的注浆压力高于 1 序孔的注浆压力。以 7#孔为例, 初注量为 $1.0 m^3$, 复注量为 $4.7 m^3$, 初注时注浆压力保持在 $0.8 MPa$, 复注时注浆压力保持在 $0.8 MPa$ 以上, 持续保持在 $1.5 MPa$ 以上 20 min 左右, 最大压力达到 $2.0 MPa$, 初注时封闭了上部的串浆通道, 使得复注时压力和注浆量都有所提升, 加固了土 - 岩结合部位。

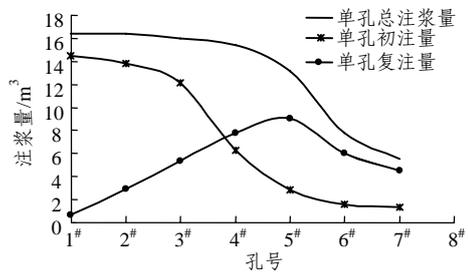


图 5 单孔注浆量拟和曲线

Fig.5 Fitting curves of grouting amount of a single hole

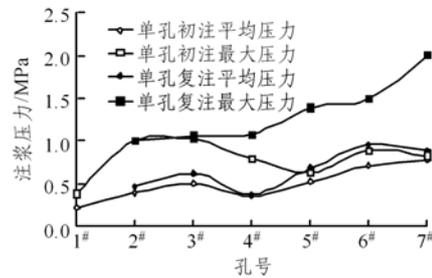


图 6 单孔注浆压力曲线

Fig.6 Grouting pressure curves of a single hole

2.4 注浆效果检测

(1) 取芯

通过钻孔, 从灌浆体内取出样品, 进行必要的试验研究。取芯结果显示, 注浆前岩芯为散状, 注浆后岩芯呈柱状(见图 7), 提取率在 80% 以上, 其中砂层内为渗透注浆, 黏土层中有一条劈裂的浆脉, 劈裂浆脉的厚度约为 5 cm(见图 8)。未注浆前砂层芯样的渗透系数为 $2.4 \times 10^{-2} cm/s$, 注浆后砂层芯样的渗透系数为 $6.2 \times 10^{-4} cm/s$, 渗透系数大大降低。注浆前孔隙比为 0.87, 注浆后孔隙比 0.42。

(2) 压水试验

注浆前后对地层进行压水试验。注浆前地层的



(a) 注浆前



(b) 注浆后

图 7 砂层芯样

Fig.7 Cores of sand layer



图 8 劈裂浆脉

Fig.8 Splitting vein slurry

单位吸水量 $\omega = 18 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$, 注浆后地层的单位吸水量 $\omega = 0.39 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$, 单位吸水量定义为

$$\omega = \frac{Q}{LHt} \quad (1)$$

式中: Q 为地层总吸水量(L); L 为压水试验段长(m); H 为压水压力, 指水头(m); t 为试验时间(min)。

从试验结果可以看出, 注浆后砂层的透水性大大降低。

2.5 试验中存在的问题

(1) 强度较低。注浆结束以后, 采用钻孔取芯的方式检验注浆效果, 与同类淡水砂层相比注浆加固体的强度较低。在本砂层中进行的高压旋喷桩试验也有相同的结论, 取出的芯样强度较低。

(2) 扩散范围较大。注浆过程中的大部分时间 $P-Q-t$ 曲线为 II 型曲线, 虽然注浆量很大, 单孔平均为 12.9 m^3 , 总注浆量为 90.3 m^3 , 但注浆压力长时间不上升, 因而在此环境下浆液的流动性较强。钻孔取芯也表明浆液的范围较大。

(3) 扩散不均匀。取芯钻孔较为密集, 通过对比相邻钻孔芯样(相距 50 cm), 可以发现浆液的不均匀扩散现象较为严重, 这不仅与砂层中富水有关, 和海水的影响也有很大的关系。

为了解存在以上问题的具体原因, 针对注浆材料在海水中的强度特性进行了试验。试验分为两组, 第一组试验浆液在淡水中养护, 第二组试验浆液在海水中养护, 分别测定 1, 4, 7, 28, 90, 180, 240 d 浆液的抗压强度。试验结果见图 9。

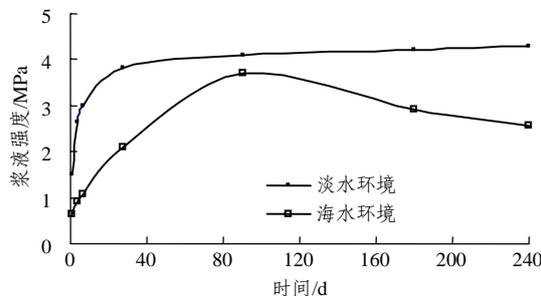


图 9 浆液强度随时间变化曲线

Fig.9 Relationship curves between strength of grouting slurry and time

淡水中养护的浆液, 初期(0~7 d)强度上升较快, 28 d 以后强度基本保持不变。海水中养护的浆液强度上升一直都很缓慢, 90 d 左右达到最大值, 在此以后强度下降, 也表明了浆液在海水的耐久性很差。定义强度损失系数为

$$D = 1 - \sigma_d / \sigma \quad (2)$$

式中: σ_d 为海水中养护浆液的强度, σ 为淡水中养护浆液的强度。

图 10 为强度损失系数随时间变化曲线。4~7 d 的强度损失系数最大, 达到 0.65。在此以后逐渐下降, 到 90 d 时强度损失系数降到 0.10, 随后又逐渐增大。

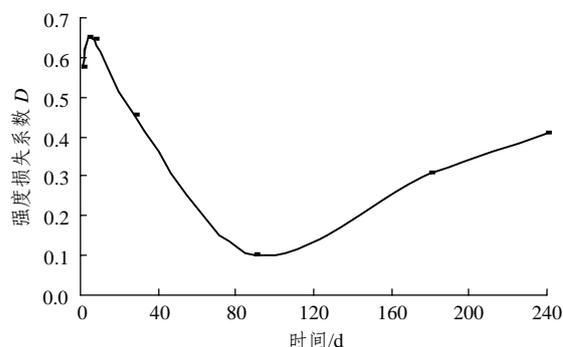


图 10 强度损失系数随时间的变化曲线

Fig.10 Relationship curve between strength deterioration and time

注浆理论的研究对象, 主要是浆液在被载体中流动时所经历的 2 个过程: 物理化学过程和流体

力学过程。物理化学过程包括浆液材料的凝结和硬化机制、浆液的流变性能等。流体力学过程包括浆液沿注浆管及在被注载体中沿孔隙、裂隙或空洞的流动扩散规律。对这两个过程的研究,最终是为了了解注浆后结合体(被注载体与浆脉)的渗流特性和力学特性。

和注浆有关的水包括注浆浆液中的水和注浆环境中的水^[7, 8]。注浆浆液中水的作用,对固粒灌浆材料来讲,掺加的水主要起 2 种作用:

(1) 载运作用。在固粒灌浆材料中加入水,使固粒材料在水中分散构成悬浮液,借其流动而压送到孔隙中去。而后,一部分水从浆液结石中析出,这部分水可称为析出水,它仅起载运浆液的作用。

(2) 化合作用。浆液中的一部分与固粒灌浆材料,主要是水泥起化学反应及水化作用,使浆液凝固变成具有一定密实性和强度的结石,封堵裂隙,这一部分水称为化合水。

注浆环境中的水主要起如下作用:

(1) 对化学浆液来说,注浆环境中的水可与化学浆液起化学反应。

(2) 对固粒材料和化学材料起到稀释作用。

(3) 产生水压力,为浆液的扩散提供水压力边界。

(4) 为浆脉的养护提供环境。

从试验结果可以看出,海水减缓了浆液强度上升的速度,同理也可以推测在海水中浆液的初凝时间也会增加。正因为浆液的初凝时间增加,浆液的流动增强,所以在海水中浆液的扩散半径较大,扩散不均匀。由此也可以看出,海水主要是通过化合作用对注浆产生影响,为减弱海水的影响也必须由此入手。

现有的研究资料^[9~13]表明,海水对水泥浆材的性质确实会产生很大的影响,但对其影响机制的研究还不够,而且只是集中在对纯水泥浆材的研究上,对复合浆材的研究还未开始。大部分关于机制方面的研究^[14, 15]都是针对混凝土如何抗海水腐蚀的,这显然与海水对注浆的影响有很大的不同,因而这方面的研究工作亟待加强。

2.6 注浆工艺与参数的确定

通过总结发现,该处地层正常注浆压力应该为 0.2~0.3 MPa。本砂层中注浆影响范围较大,为保证注浆的均匀性,注浆影响半径可定为 1.0 m,钻孔按照梅花形布置,孔间距可定为 1.7 m,排距可定

为 1.5 m,单孔注浆量可确定为 4.2 m³。

注浆过程中,应做到慢快结合,反复注入,间隔进行,浅深交替。慢——保持浆液的均匀扩散,不发生串浆;快——压密均匀扩散的浆液,提高结石的致密性。初注——充填大的孔隙;复注——充填小的孔隙。1 序孔——形成扩散边界;2 序孔——完成整体固结。浅——封闭上部串浆通道,深——提高注浆压力,加固土岩结合部。

慢速可控制在 10 L/min,快速可控制在 30 L/min,注浆速度不宜超过此速度,平均注浆速度保持在 20 L/min 左右。注浆压力宜控制为 0.2~0.3 MPa,初注时不应将注浆压力长时间保持为 0.5 MPa 以上,复注时注浆压力可适当提高。

本段富水砂层的注浆特点主要表现为,因富含海水而造成浆液扩散的不均匀性和浆液被大量的稀释。对现有的注浆工艺可进行如下 2 个方面的改进:

(1) 采用抗分散性好的浆液,或者提高水泥浆的浓度,采取先浓后稀的方式,促进浆液均匀的扩散。

(2) 为保证浆液的均匀渗透,可适当提高钻孔的密度。

3 结 论

正在建设中的厦门翔安海底隧道的注浆经验表明,海水对注浆效果的影响是很严重的,即使采用淡水拌合浆液,环境中海水的影响还是超出了想象。

虽然混凝土在海水中的抗腐蚀性能已经被大量地研究,但其机制和海水对注浆效果影响机制有着很大的不同。

现有的研究表明,海水的影响主要表现在 4 个方面:(1) 增加了浆液的初凝时间;(2) 大幅度地降低了结石的强度,并延缓了养护期中结石强度上升的速度;(3) 极大地稀释了浆液,降低了浆液的抗分散性;(4) 加剧了浆液的不均匀扩散。

参考文献(References):

- [1] 韩占波,张民庆. 圆梁山隧道溶洞段动水砂层注浆施工技术[J]. 隧道建设, 2003, 23(6): 41 - 43. (HAN Zhanbo, ZHANG Mingqing. Construction technology of grouting in sand layer with flowing water in karst cavity of Yanliang mountain tunnel[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(6): 41 - 43. (in Chinese))

- [2] 石 雷. 中深孔注浆技术在饱和富水砂层暗挖地道中的应用[J]. 铁道建设, 2005, (2): 19 - 23.(SHI Lei. Application of grouting with mid-depth hole in sand layer with abundant water[J]. Railway Construction, 2005, (2): 19 - 23.(in Chinese))
- [3] 任记华. 注浆技术在少水或无水中粗砂层中的应用[J]. 山西建筑, 2006, 32(4): 147 - 148.(REN Jihua. Application of injected technology in less-water medium-sand seam[J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(4): 147 - 148.(in Chinese))
- [4] 卓 越. 饱水砂层渗透注浆加固理论探讨[J]. 西部探矿工程, 2003, (3): 98 - 101.(ZHUO Yue. Discussion on filter grouting theory in saturated sand layer[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, (3): 98 - 101.(in Chinese))
- [5] 曾 蔚, 张民庆. 高压动水粉细砂层充填型溶洞注浆材料研究[J]. 铁道工程学报, 2005, (6): 60 - 65.(ZENG Wei, ZHANG Mingqing. Research on grouting materials for filling karst cave with high pressure hydrodynamic silt layer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, (6): 60 - 65.(in Chinese))
- [6] 杜嘉鸿. 地下建筑注浆工程简明手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.(DU Jiahong. Grouting hand book of underground structure[M]. Beijing: Science Press, 1992.(in Chinese))
- [7] 孙 钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.(SUN Zhao. Grouting of dam bedrock[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.(in Chinese))
- [8] 彭振斌. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.(PENG Zhenbin. Calculation and construction of grouting projection design[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.(in Chinese))
- [9] DOMONE P L. The properties of low strength silicate/Portland cement grouts[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(1): 25 - 35.
- [10] KUMAR S, RAO C V S K. Sulfate attack on concrete in simulated cast-in-situ and precast situations[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(1): 1 - 8.
- [11] KUMAR S. Influence of water quality on the strength of plain and blended cement concretes in marine environments[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 345 - 350.
- [12] SANTHANAM M. Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(12): 2 132 - 2 137.
- [13] YIGITER H. Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete[J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 1 770 - 1 776.
- [14] BROWN P W, DOERR A. Chemical changes in concrete due to the ingress of aggressive species[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 411 - 418.
- [15] SANTHANAM M. Studies on sulfate attack: mechanisms, test methods, and modeling[Ph. D. Thesis][D]. Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2001.