

富水砂卵石地层中大直径泥水盾构同步注浆技术

张长强, 翟志国, 陈明娟, 金仲祥

(中铁隧道集团北京地下直径线项目部, 北京 100045)

[摘要] 通过统计分析盾构掘进相关资料,综合考虑富水砂卵石地层中泥水盾构掘进参数、泥浆参数、盾构姿态、地层变形机理等信息,确定泥水盾构在砂卵石地层中掘进时,同步注浆主要技术参数间的经验公式,指导类似工程施工。

[关键词] 砂卵石地层;泥水盾构;同步注浆;施工技术

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0075-04

1 前言

盾构掘进、壁后注浆、管片拼装是现代盾构法施工中的主要施工内容,其中壁后注浆以同步注浆方式为主。鉴于同步注浆技术参数多根据施工经验设定,并无完善的统计结果做依据,且泥水平衡盾构应用于北京地区富水砂卵石地层中施工尚属首次。在实践的基础上结合相关统计资料,归纳总结出适合砂卵石地层条件下的同步注浆经验公式,为完善同步注浆技术,提高盾构施工质量提出技术性指导。

2 工程概况

北京铁路地下直径线工程全长 9 151 m,隧道长 7 230 m,其中,工程盾构施工区段全长 5 175 m,盾构隧道穿越的地层以圆砾、卵石土层为主,向西卵石粒径逐渐加大。

3 注浆设计

3.1 壁后注浆目的

盾构管片拼装完成后,随着盾构推进则因盾尾间隙、盾体钢壳厚度及盾体周围地层超挖部分等而出现尾部空隙,此间隙如不能及时有效填充则会产生较大地层沉降甚至出现地层坍塌^[1]。考虑到一

次注浆中同步注浆、立即注浆、后方注浆 3 种注浆方式的施工条件及成品质量等,该工程采用同步注浆方式(见图 1),以达到以下目的:a. 控制隧道周边地层松动,防止较大地层位移及坍塌。b. 稳定已拼装成形的管片,使作用于管片上的油缸推力顺利传递至地层中。c. 作为隧道防水系统的第一道屏障,防止地下水渗流到隧道内部。d. 作为隧道衬砌结构的加强层,使其具有耐久性和一定的强度。

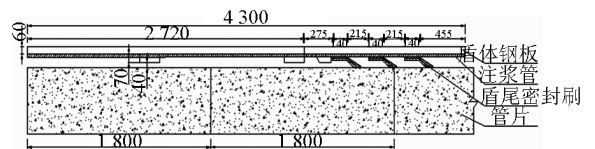


图 1 同步注浆示意图(单位:mm)

Fig. 1 Abriage general view of the synchronous grouting(unit: mm)

3.2 注浆压力设计

注浆压力应在综合考虑地质条件、盾构机型、管片强度、注浆材料特性、地层沉降机理等信息的基础上进行选择。泥水平衡盾构同步注浆压力理论中,国外多倾向于取孔隙水 + 200 kN/m² 左右,国内多取为开挖面水土压力和 + 20 kN/m² 左右,而土压力计算的理论公式及压力类型选择每个工程不尽相同^[2]。常规压力设定公式如下:

[收稿日期] 2010-8-10

[作者简介] 张长强(1984—),男,河南洛阳市人,工程师,主要从事隧道及地下工程方面的施工及研究工作;E-mail: z3c3q3@163.com

$$P = P_1 + P_2 + \Delta P \quad (1)$$

式(1)中, P 为注浆压力; P_1 为注浆孔处侧向土压力, 该工程采用静止土压力; P_2 为注浆孔所在处静止水压; ΔP 为注浆附加压力。

工程建设初期, 同步注浆压力设定以开挖面水土压力为基础, 采用固定附加压力设定法, 地层沉降控制不尽理想。

如表 1 及图 2 (本文统计数据图横坐标均为注浆位置) 所示, 采用零附加压力和等附加压力进行注浆施工中存在的主要问题是注浆率相对偏小, 地表沉降较大^[3]; 大直径盾构不同部位注浆量不均匀现象明显, 对衬砌结构受力性能不利, 常出现拼装成型的管片在纵接缝处脆性破坏现象。

表 1 ZJX 部分同步注浆数据统计表

Table 1 Statistical date of the synchronous grouting

附加压力设定						总量 /m ³	地表沉 降/mm
顶部		中部		底部			
$\Delta P /$ 10 ⁵ Pa	浆量/ m ³	$\Delta P /$ 10 ⁵ Pa	浆量/ m ³	$\Delta P /$ 10 ⁵ Pa	浆量/ m ³		
0	11.2	0	6.3	0	4.8	22.3	-5.2
0	10.5	0	6.4	0	6.1	23	-4.8
0.2	12.3	0.2	7.2	0.2	6.3	25.8	-3.5
0.2	12.5	0.2	6.4	0.2	5.7	24.6	-2.9
0.4	9.6	1.2	9.7	1.8	6.5	25.8	-2.7
0.4	10.3	1.2	8.9	1.8	7.3	26.5	-2.7

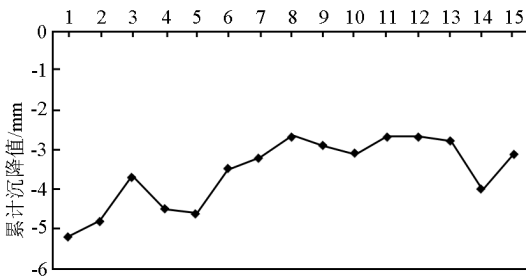


图 2 不同注浆附加压力条件下地表沉降观测值图
Fig. 2 Value of the ground subsidence during different additional pressure

通过分析研究相关施工经验采用变动附加压力设定法, 富水砂卵石地层中, 注浆附加压力在隧道顶部、中部、底部分别设定为 0.4×10^5 Pa、 1.2×10^5 Pa、 1.8×10^5 Pa 时, 地表最终沉降较小, 二次注浆钻孔过程也证实同步注浆满足其均匀密实性要求。当注浆附加压力加大时, 常出现尾盾密封刷破损、密封油脂消耗量大、管片脆性破损等现象, 且地表沉降量无明显减小。分析原因在于, 大直径盾

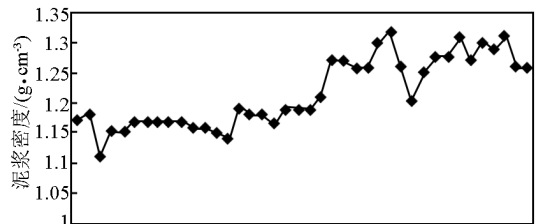
构注浆过程中, 浆液在重力作用下向低势能点流动, 而一定附加压梯度有效控制了浆液下流范围; 作为非牛顿体的砂浆在富水砂卵石地层的渗透过程中, 梯度附加压力不仅保证了浆液渗透半径, 而且优化了衬砌结构受力性能。

3.3 注浆量设计

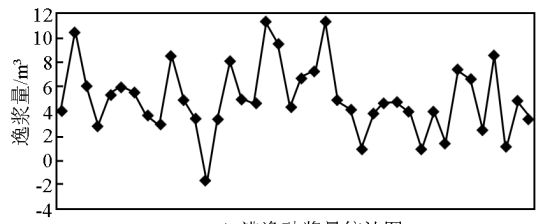
盾构施工过程中, 应进行注浆压力与注浆量双控的办法实施, 保证浆液及时有效填充地层空隙并具备设计强度。结合已有施工技术统计资料, 同步注浆量不仅与理论盾尾间隙量有关, 注浆率大小还与以下因素有相关性: 水文地质条件、注浆材料性质、泥浆参数、盾构姿态控制、盾构掘进参数、地层沉降指标等。

3.3.1 注浆量与泥浆参数的相关性分析

研究注浆量与泥浆参数关系时着重采集泥浆密度变化明显而其他施工条件基本相同的施工区段, 从而便于对数据进行一元回归分析。部分统计数据及处理结果见图 3。



(a) 泥浆密度统计图



(b) 逃逸砂浆量统计图

注: 逸浆量 = 实际注浆量 - 理论注浆量

图 3 同步注浆量与泥浆密度相关性统计图

Fig. 3 Analysis of correlation between grouting amount with slurry density

通过分析计算统计数据, 注浆逃逸量与泥浆密度呈现较明显的正相关性, 而变量之间的回归关系函数表达式却很难建立。导致这一现象的可能性原因是盾构施工中影响同步注浆量的因素的复杂多变性, 而以地层空隙率、地层水土压力为主的地层条件的变化会直接引起注浆量大范围的波动。在砂卵石地层中能够在开挖面形成良好泥膜, 提高盾构掘进过程中砂卵石地层受力性能是泥浆参数

设计中考虑的主要因素,泥浆参数与注浆关系并未作为主控项目进行研究。

3.3.2 注浆量与地表沉降相关性分析

盾构正常掘进地段的地表横向沉降槽曲线基本沿隧道轴线呈典型的正态分布,在轴线处的沉降值最大,沿隧道轴线两侧呈对称分布,地表沉降过程分为:先行沉降、开挖面前沉降、通过沉降、盾尾空隙沉降、后期沉降 5 个阶段^[4],相关数据统计及处理结果见图 4。

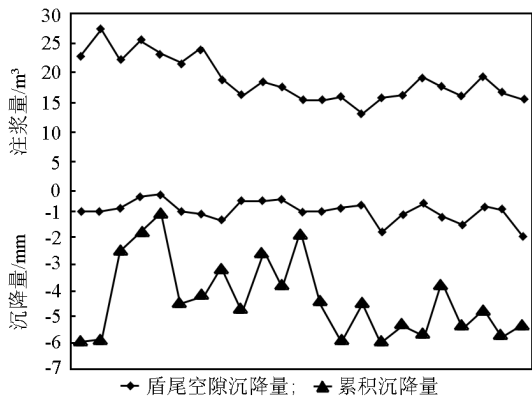


图 4 注浆量与地层沉降统计图

Fig. 4 Analysis for correlation between grouting amount and ground subsidence

以上结果表明,其他条件保持相对稳定的情况下,同步注浆量与地层沉降大小呈正相关性,其中盾尾空隙沉降与注浆量间相关性较小,而累计沉降量与注浆量有明显正相关性。可能性原因在于砂卵石地层的沉积条件及点对点的受力特点,提高了地层短时间内的自稳能力。当同步注浆率较小而不能使砂浆有效填充地层空隙并保持一定强度时,地层逐渐由掘进过程的压密状态渐变为松动、坍塌状态,从而导致其后期沉降加大。

3.3.3 注浆量与盾构纠偏量相关性分析

大直径盾构掘进过程中,盾构姿态控制主要以盾构自动导向系统为向导,通过调节推动系统不同区域的推动压力,保证盾构沿设计轴线掘进。结合以往施工经验,盾构沿曲线施工、盾构纠偏频率及纠偏速度等会不同程度地影响注浆量的变化。相关数据统计及处理结果见图 5。

以上统计结果显示,盾构纠偏量绝对值与同步注浆量呈现弱相关性。分析其原因在于,大直径盾构在直线段掘进与曲线段掘进产生的盾尾间隙差值较注浆理论空隙很小,致使统计数据并不能明确反映复杂施工条件下注浆量与盾构纠偏量之间的

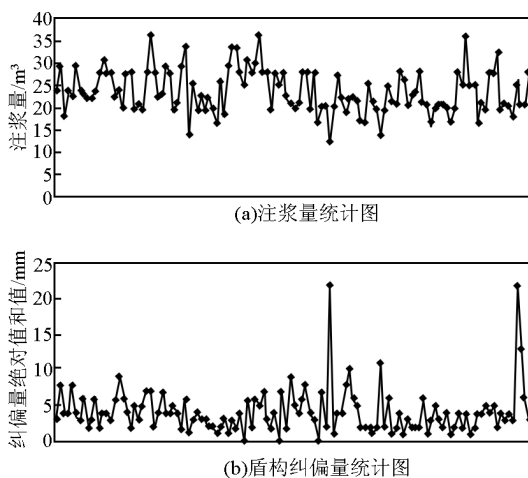


图 5 注浆量与盾构纠偏量统计图

Fig. 5 Analysis for correlation between grouting amount and the adjusted value of shield posture

关系。

3.4 同步注浆经验公式

盾构注浆量设计过程中在考虑理论盾尾空隙的基础上,必须考虑一定的注浆填充率。管片每环注浆量经验公式如下:

$$Q = \frac{1}{4} \pi D^2 l \alpha \quad (2)$$

式(2)中, $\alpha = (1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$; D 为盾构理论开挖直径; l 为管片环宽; α 为注浆率; α_1 为土质系数,砂卵石及砂层条件下取 0.1 ~ 0.4,粘土层取 0.05 ~ 0.35; α_2 为泥浆参数系数,泥浆比重为 1.05 ~ 1.30 时,取 0.25 ~ 0.10; α_3 为小曲线施工、盾构纠偏等产生的超挖系数,曲线段取 0.05 ~ 0.15,直线段可不予考虑; α_4 为盾构掘进参数及其他施工原因产生的扩大系数,取 0.05 ~ 0.10。

式(2)中各系数是在分析研究注浆量相关因素相关性大小的基础上,结合现行规范所确定。

4 注浆材料及配比设计

4.1 注浆材料及配比

为保证注浆效果,注浆材料选择及配比设计过程中必须充分考虑浆液与地层的适应性。强度低、自稳能力较差的地层,浆液配比要着重保证砂浆的固结率和强度,并适当缩短凝胶时间,使浆液在较短的时间内加固地层,增强地层的稳定性^[5]。

富水砂卵石地层中泥水盾构施工过程中,同步注浆浆液不仅要具有良好的和易性、填充性能、早

期强度等,而且对浆液的保水性提出更高要求。同步注浆材料及设计配合比见表2。

表2 同步注浆材料配和比

Table 2 The proportion of grouting material

水泥/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	砂/kg	水/kg	外加剂
80 ~ 200	381 ~ 241	60 ~ 50	600 ~ 780	460 ~ 600	需要根据试验加入

4.2 砂浆主要性能指标

在施工中,应根据具体地层条件、地下水情况及周边环境等,通过现场试验优化确定最合理的配合比。浆液主要物理力学性能应满足下列指标:

1) 胶凝时间:一般为3~10 h,对于强透水地层和需要注浆提供较高的早期强度的地段,可通过现场试验进一步调整配比,缩短胶凝时间。

2) 固结体强度:一天不小于0.2 MPa,28天不小于2.0 MPa。

3) 浆液结石率:大于95%,即固结收缩率小于5%。

4) 浆液稳定性:倾析率小于5%。

5 注浆施工

5.1 注浆流程

完善注浆工艺流程是实现注浆目的,保证地面建筑物、地下管线、盾尾密封及衬砌管片安全的重要环节,因此必须严格控制,并依据地层特点及监控量测结果及时调整各种参数,确保注浆质量和安全,做到万无一失(见图6)。

5.2 效果检验

检验壁后注浆效果的好坏,关键在于浆液能够均匀密实填充盾尾间隙并达到设计强度,从而有效控制地层沉降和衬砌变形。直径线工程采用以下方法检验壁后注浆的效果:

1) 注浆压力达到设计压力,注浆量达到设计注浆量的90%以上。

2) 注浆效果检查主要采用分析法,即根据 p (注浆压力)- Q (注浆量)- t (时间)曲线分析注浆效果。

3) 结合衬砌变形、地表及周围建筑物变形量测反馈信息,适时调整注浆参数。如成型管片出现明显上浮,常是因盾构底部注浆压力偏高所致。

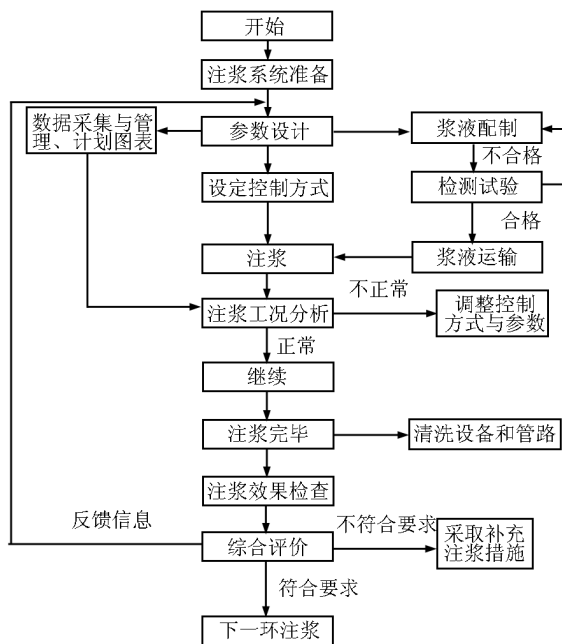


图6 同步注浆工艺流程图

Fig. 6 Technological process of the synchronous grouting

4) 拱顶采用超声波探测法通过频谱分析进行检查,对未满足要求部位,进行二次补强注浆。

6 结语

随着城市地铁发展及深埋大直径盾构技术的不断完善,盾构同步注浆技术必将日臻完善。该技术作为盾构工法施工的关键组成部分,对地表沉降控制、隧道防水、改善盾构衬砌结构受力环境等作用重大。以工程实践为基础,结合地下工程相关理论,逐渐完善盾构施工技术水平,从而科学有效开发地下空间,是所有工程技术人员的历史使命。

参考文献

[1] 陈 馈,洪开荣,吴学松. 盾构施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
 [2] 日本地盘工学会. 盾构法的调查设计与施工[M]. 朱清山等译. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
 [3] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
 [4] 殷宗泽. 高等土力学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
 [5] 刘 钊,余才高,周振强. 地铁工程设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

(下转 88 页)