

Analysis the in and out of the Hole Region's Soil Reinforcement Technology of the Nanjing Subway Shield

Wei Xu¹, Jie Xu²

¹Nanjing University of Technology, Nanjing

²Nanjing Subway Operation Limited Liability Company, Nanjing
Email: jayjay2123@163.com, tommy238@126.com

Received: Jan. 20th, 2013; revised: Feb. 26th, 2013; accepted: Mar. 2nd, 2013

Copyright © 2013 Wei Xu, Jie Xu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper describes the shield tunnel's in and out of the hole region's soil reinforcement technologies, and introduces a common technique for soil reinforcement of Nanjing subway shield's in and out of the hole region, and gives them a comparative analysis from multiple perspectives. To provide a reference basis for selection of reinforcement technology, by combining with the results of previous studies, it summarizes the in and out of the hole area's longitudinal and transverse reinforcement range. Finally, it introduces a soil reinforcement project example of a Nanjing shield zone which used the bored pile, double-barreled churning pile and lowering technologies, and demonstrates the feasibility of this reinforcement technology which ensures the success of originating and reach of the shield. This study will have a certain guiding significance of the similar projects in the future.

Keywords: Shield; In and out of the Hole Area; Soil Reinforcement; Originating; Arrival

浅析南京地铁盾构进出洞区土体的加固技术

徐伟¹, 徐杰²

¹南京工业大学, 南京

²南京地铁运营有限责任公司, 南京
Email: jayjay2123@163.com, tommy238@126.com

收稿日期: 2013年1月20日; 修回日期: 2013年2月26日; 录用日期: 2013年3月2日

摘要: 本文详细阐述了盾构法隧道在进出洞区土体加固的各种技术, 介绍了南京地铁盾构进出洞区土体加固的常用技术, 并对他们从多个角度进行了对比分析, 对加固技术的选择提供一定的参考依据; 结合前人的研究成果, 对进出洞区的纵向和横向加固范围进行了归纳总结; 最后介绍了南京某一盾构区间运用素钻孔灌注桩加双管旋喷桩和降水技术来进行土体加固的工程实例, 论证了该加固技术的可行性, 确保了盾构的成功始发和到达, 对今后的类似工程具有一定的指导意义。

关键词: 盾构; 进出洞区; 土体加固; 始发; 到达

1. 引言

当今社会随着城市现代化的不断发展, 城市道路交通压力不断的增大, 越来越多的城市把修建地铁作

为改善城市交通状况的主要手段。而盾构法又是城市地铁区间隧道的主要施工工法之一, 它具有施工速度快、作业环境安全、成型隧道质量高、对周围环境影

响小、地表沉降易于控制、不受外界天气变化影响和对地面交通影响小等优点,因此盾构法在国内外城市地下轨道交通的施工中得到越来越多的应用^[1]。

盾构机自工作井进入隧道地层(简称出洞)或者从隧道推出进入工作井(简称进洞),首先要解决的是洞门进出洞区土体的加固问题^[1]。在盾构法施工中,盾构的进出洞施工是盾构隧道施工的关键技术,也是最容易发生事故的环节,这其中又以进出洞区加固土体发生事故为之最。当工作井和洞门范围内的土层为自稳能力差、透水性强的松散砂土或者是含水量高、强度低的粘土时,如果不对其进行加固处理,在端头井围护结构施工完成后,盾构机出洞或者进洞时拆除封门的瞬间,必将有大量的泥土和水涌向工作井,导致地面周围地表沉降,造成建筑物倒塌、管线断裂等严重后果,因此必须在盾构机出洞或者进洞前对进出洞区的土体进行加固改良来提高土的强度,这就是盾构进出洞区土体的加固技术。

2. 盾构进出洞区土体加固技术的分类以及适用条件^[2]

目前国内外地铁盾构法施工中常用的进出洞区土体加固技术有高压喷射注浆法、深层搅拌桩法、注浆法、SMW 桩法、冻结法、素混凝土人工挖孔桩法、素混凝土钻孔灌注桩法、素混凝土连续墙法、SEW 桩法、降水法等。

2.1. 高压喷射注浆法

所谓的高压喷射注浆法就是将带有特殊喷嘴的注浆管,置入土层的预定深度,以 20~40 MPa 压力的高压喷射流,通过冲切、劈裂、剪切、挤压、充填、渗变、搅拌、升扬、置换、固化等作用,强制性破坏原地层,让地层颗粒在一定范围内重新排列组合,并在其周边形成反滤层,使得浆液的扩散限制在有限范围内的方法。同时,射流带入固化剂与地层颗粒就地搅拌,形成所需形状的防渗固结体,最终达到加固改良土体的目的。

根据喷射流移动方式,可以将高压喷射注浆法分为旋喷、定喷、摆喷三种。目前,在盾构始发与到达端头加固的应用中,主要采用高压旋喷桩加固法,它可以在进出洞区土体中形成均匀的圆柱体或者异形

圆柱体以起到改良土体的作用。

高压旋喷桩加固是利用钻机钻孔至设计深度,用高压脉冲泵将一定压力的水泥浆液和空气通过钻杆下端的喷射装置,向四周以高速水平方式将水泥浆液喷入土体,借助流体的冲击力切削土层,使喷流射程内土体遭受破坏,使土体与水泥浆液充分搅拌混合,在固结硬化后能形成比较均匀并具有一定强度的圆柱体。我国于 1972 年开始研究和应用旋喷加固技术并取得了相当大的成果,目前在城市地铁盾构始发与到达端头土体加固工程中^[3],旋喷桩加固技术已经成为最主要的加固方法。

高压旋喷桩加固法按照钻孔和成桩的方向分为垂直旋喷和水平旋喷,按照喷射管的数量和方式可分为单(重)管旋喷注浆法、双(重)管旋喷注浆法、三(重)管旋喷注浆法。其中又以双(重)管旋喷注浆法和三(重)管旋喷注浆法使用最广泛。

旋喷桩加固技术主要适用于第四纪冲击层、残积层、人工填土等,能处理淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基。由于高压旋喷桩适用地质条件范围较广,既可用于软土地层又能用于地质相对较硬的地层,因此高压旋喷桩加固法具有非常广泛的应用。

但是当土中含有较多的大粒径块石、坚硬粘性土、大量植物根茎或有过多有机质时,应根据现场试验结果确定旋喷桩加固技术的适用范围,它的加固效果可能会相对较差,有时甚至不如静压的效果。对于地下水流速过大或已大量涌水,浆液无法在注浆管周围凝固的工程要慎重使用。对于无充填物的岩溶地段、永冻土及对水泥有严重腐蚀的地基,均不宜采用旋喷桩注浆加固法。

2.2. 深层搅拌桩法

所谓的深层搅拌桩,又称为水泥土搅拌桩,是加固饱和软粘土地层的一种常用方法。它通过钻孔将水泥、石灰等材料作为固化剂的主剂送入地层,依靠深层搅拌机在地层中将软土和固化剂(浆液和粉体)就地强制搅拌,利用固化剂和软土之间产生的一系列物理化学反应形成深层搅拌桩,使软土的物理力学性能得到改善。

随着城市地下工程的发展,深层搅拌桩加固技术

逐渐被用在软粘地层的加固中。在城市地铁盾构隧道的建设中, 深层搅拌桩加固技术广泛应用于盾构进出洞区土体的加固施工中。深层搅拌加固法形成的搅拌桩的桩径、间距必须根据设计要求、地质条件及使用设备来进行选择, 搅拌注浆范围不得小于隧道外轮廓线上下各 3 m。

按照固化剂材料的形态可将深层搅拌桩加固法分为浆液喷射深层搅拌桩加固法和粉体喷射深层搅拌桩加固法。

深层搅拌桩最适宜加固各种成因的饱和软粘土。目前国内适用深层搅拌桩法加固的土质有新吹填的超软土、沼泽地带的泥炭土、沉淀的粉土和淤泥质土。因此我国常用它来加固淤泥、淤泥质土、粉土和含水率较高且地基承载力标准值不大的粘性土等。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)规定搅拌法适用于处理: 正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、素填土、粘性土、饱和黄土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基。随着施工机械的改进、搅拌能力的提高, 其适用土质的范围在不断扩大。

深层搅拌桩法具有不存在挤土效应, 对周围地层扰动小; 可根据不同的土质和工程设计要求, 合理选择固化剂及配方, 应用较灵活; 施工无振动、无噪声、污染小, 可在市区和建筑物密集带施工; 土层经加固后, 重度基本不变, 不致产生较大的附加沉降; 加固桩体结构形式灵活多样, 可根据工程需要, 选用块状、柱状、壁状或格栅状等优点。同时它也有加固深度较浅, 在加固深度小于 10 m 时, 能取得较好的加固效果; 施工对操作要求较高, 类似于旋喷桩加固, 桩体的垂直度和咬合度较难保证; 在富水砂层中, 搅拌桩加固止水效果一般, 应谨慎使用, 或者必须和其他工法一起联合使用等的缺点。

2.3. 注浆法

所谓的注浆加固实质上是利用气压、液压或电化学原理, 把某些能固化的浆液注入地层土体的裂隙和孔隙中, 或挤压密实进出洞区土体, 以改善进出洞区土体的物理力学性质。

按照浆液在被灌注的载体中的作用机理, 可将注浆法分为充填注浆、压密注浆、渗透扩散注浆、劈裂注浆和电化学注浆五种方法。

工程中常用的分类是袖阀管注浆加固和水平注浆加固。

袖阀管注浆加固是目前一种比较先进的注浆加固技术和工艺, 它的适应性强, 对砂层、粉土、淤泥层等注浆加固效果较好。它综合了劈裂注浆、压(挤)密注浆与渗入注浆三种方法于一身, 能达到较好的注浆效果, 对地基加固处理和软基处理以及建筑物的纠偏加固效果较为显著。

袖阀管法具有可根据工程需要灌注任何一个注浆段, 还可以进行重复注浆; 可使用较高的注浆压力, 注浆时冒浆和串浆的可能性小; 钻孔和注浆作业可以分开, 使钻孔设备的利用率得到提高的优点。同时它也具有袖阀管易被具有一定强度的套壳料胶结, 难于拔出重复使用, 耗费管材较多; 每个注浆段长度固定为 33~50 cm, 不能根据地层的实际情况调整注浆段长度; 控制不当容易堵孔、卡管, 如浆液不会只按照设定的方向朝地层中扩散, 同时也会沿着套料管中滤料之间的缝隙向上扩散, 凝固后堵住二次出浆孔, 使得下个注浆段加固时, 管中的浆液无法正常向地层外侧扩散, 达不到加固目的等的缺点。

水平注浆法是利用气压、液压或电化学原理, 把某些能固化的浆液从盾构始发与到达工作井的洞门处水平地注入进出洞区土体的裂隙和孔隙中, 以改善进出洞区土体的物理力学性质, 提高土体的强度和稳定性, 并起到止水的作用。水平注浆加固法主要可以分为前进式分段注浆和后退式分段注浆两种, 两者的加固原理基本相同, 目的都是使加固土体满足强度、稳定性以及止水的要求。软弱地层中, 由于后退式分段注浆会受到止水塞作用的影响, 浆液扩散受到一定的限制, 因此注浆效果差, 不宜进行长段注浆。但前进式分段注浆不但能进行长段注浆, 而且由于孔口管密封好, 浆液能按设计规定的路径扩散, 注浆压力高, 注浆加固后土体的强度较高, 所以已经在地铁隧道、公路隧道等工程地层改良和堵水加固中得到比较广泛的应用, 并取得了较好的应用效果。

2.4. SMW 桩法

所谓的 SMW 桩(深层搅拌桩 + H 型钢)是利用专门的多轴搅拌机械就地钻进切削土体, 同时在钻头端部将水泥浆液注入土体, 经充分搅拌混合后, 再将 H

型钢或其他型材插入搅拌体内,形成复合的地下连续墙体,利用该墙体直接作为挡土和止水结构,该工法桩具有构造简单,止水性能好,工期短,造价低和环境污染小等特点。

SMW 桩法适用于淤泥、淤泥质粘土、粉土和砂砾石等地层。

2.5. 冻结法

所谓的冻结法是利用钻孔机械对进出洞区土体布置一定数量的冻结孔,利用氨压缩调节制冷,通过盐水媒介热传导原理进行冻结,它分为水平冻结和垂直冻结两种方法。

水平冻结法是采用水平圆筒体冻结的加固方式,它是在洞口的周围布置一定数量的水平冻结孔。经冻结后,可以在洞内形成封闭的冻土帷幕,起到盾构破壁时抵御水土压力,防止土层塌落、地表沉降和泥水涌入工作井内的作用。洞口冻结孔一般布置成圆形,为了有利于施工,冻结孔也有布置成方形的。根据冻土帷幕所需厚度、强度及工期安排,可采用单排孔、双排孔或多排孔冻结,以形成所需要的冻土帷幕厚度和强度。一般设计水平冻结深度为 5~10 m,冻结孔布置圈位比洞口直径大 1.6~2.0 m,采用水平钻孔机施工。

垂直冻结法是应用板状冻结加固理论而设计的。它在盾构进洞口上部的土体上布置一定数量的垂直冻结孔,盐水在热交换中不断循环,冻结管周围地层的冻土圆柱体直径不断扩展变大,并与相邻冻土圆柱体相交,在冷冻土体范围内形成完整的屏蔽,并在洞门处形成板状冻土帷幕来抵御盾构进洞破壁时的水土压力,防止土层塌落和泥水涌入工作井内,成为具有一定厚度和强度又能防渗的挡土墙或拱形体。垂直冻结可分为全深冻结和局部冻结,全深冻结是对所需要的冻结深度全部冻结,而局部冻结只对盾构穿越的土层范围进行冰冻加固。

人工地层冻结使地层中的水变成冰,冰与土颗粒共同形成冻结连续体,使不稳定的含水地层形成强度很高的冻土体,一般可达到 8~10 Mpa。冻结加固区是个完整、均匀、连续的区域,冻结体在洞门处形成板状冻土帷幕和完整的防水屏蔽,起到隔水作用,防止土层塌落和泥水涌入工作井;同时又能起到良好的挡

土墙作用,以便来承受外来的荷载。

冻结法适用于大深度、高水压、大土压、存在漏水塌方危险的地质,以及其他恶劣复杂的地质条件。

2.6. 素混凝土人工挖孔桩法^[3]

所谓的素混凝土人工挖孔桩法是指利用人工开挖土方,并支护护壁模板,然后浇注护壁混凝土,完成一节开挖成孔循环,由此再逐节开挖成孔,最后灌注混凝土成桩的一种基桩的土体加固技术。它具有施工方便,造价低廉,工期短,质量易保证,承载力高,在地下水很小或无地下水时一般能较安全地成孔成桩等特点。

素混凝土人工挖孔桩适用于全风化混合岩或强风化混合岩的地质,当地下水含量较大时需要采用一定的降水措施,以保证挖孔桩能顺利施工。

2.7. 素混凝土钻孔灌注桩法^[3]

所谓的素混凝土钻孔灌注桩法是指利用电机带动带有螺旋叶片的钻杆转动,使钻头螺旋叶片旋转切削土体,被切削的土体随螺旋叶片上升并排出孔口,在泥浆护壁条件下,钻头慢速往下钻至设计深度后,再进行清孔,然后浇注混凝土成桩的一种土体加固方法。

素混凝土钻孔灌注桩适用于地下水位以上的一般粘性土、粉土、黄土以及密实的粘性土和砂土等土层。

2.8. 素混凝土连续墙法^[3]

所谓的素混凝土连续墙法是指采用大型成槽机械,沿着深开挖工程的周边轴线,在泥浆护壁作用下,开挖出一条狭长的深槽,清槽后用导管法向槽内灌注水下混凝土筑成一个单元槽段,如此逐段进行,在地下筑成一道连续的混凝土墙壁,作为截水、防渗、承重和挡土结构的一种方法。它具有强度高,抗渗性能好,耐久性能强等特点。

素混凝土连续墙适用于各种地层,包括砂性土层、砂砾层和残积粘土层等。

2.9. SEW 桩法^[4]

所谓的 SEW 工法(Shield Earth Retaining Wall

System)的工作原理是在盾构始发洞门范围内的围护结构上,预先埋设一种玻璃纤维材料 Fiber Reinforced Formed Urethane(简称 FFU),这种 FFU 材料能被盾构机刀具顺利的切削,FFU 材料部件的形状大小结合围护结构形式进行预制,利用部件两端的钢结构与围护结构的钢筋连接,保证部件与围护结构钢筋笼的整体性,在围护结构施工时随钢筋笼一起放入槽段(孔)内,然后浇注混凝土。这样,在盾构始发时直接切削 FFU,从而免除洞门凿除的工序,考虑到其强度足以保证洞门的稳定性,在盾构始发前,也可适当取消部分端头加固。

SEW 工法适合于土压平衡式盾构。对于隧道埋深较深的盾构法隧道也适用,其相对于从地面进行搅拌桩和旋喷桩加固而言,会更经济、更安全、进度更快。因为后者随着深度加深,其加固效果更差而成本会更高,而 SEW 工法则基本上不会增加成本。

2.10. 降水法

所谓的降水法是指用人工的方法向地面以下打设井点降低地下水位的方法,具体是在施工范围内埋设一定数量的滤水管,通过抽水设备向井内抽水,降低地下水位到有利工程施工,并继续抽水,使工作面土体始终保持干燥,稳定开挖面土体,从根本上防止流砂现象的发生。同时,由于土体失水后,动水压力减少或消除,土体竖直面更为稳定。因此降水在一定程度上可视为土体加固。

降水主要分为轻型井点、喷射井点、电渗井点、管井井点、深井井点等。需要根据开挖面土体渗透系数,要求降低水位的深度、工程特点、设备条件及现场施工条件而选择具体的降水方法。其中轻型井点用于浅埋隧道,一般常用深度为 7~8 m,喷射井点深度为 20~24 m,深井井点深度可达 150 m。

使用井点降水时需要提前半个月实施降水,降水后地表沉降量较大。降水具有不受地下管线和地面道路的影响,且具有造价便宜,工法简单等特点。

降水适用于粉砂、砂质粉土、粘质粉土等土层;同时在地面环境对地表沉降量要求不高或因施工现场受地下管线和地面道路的影响,加固尺寸不能满足设计要求时采用。

由于降水简单便宜,因此它是国内最早使用的洞

门加固方法,上海地铁一号线洞门加固运用较多。现在由于城市地面环境对地表沉降量要求更严格,因此很少采用,有时只在复杂的地质条件下,降水法和其他加固方法配合使用。

3. 南京盾构进出洞区土体加固技术的选择

盾构进出洞加固方案的选择是在满足安全可靠的前提下,充分考虑施工场地、施工速度和施工成本,综合比较得出的。加固方案安全可靠的依据是洞门破除后能有效地抵挡洞门处的水土压力,能有效地封堵洞门围护结构侧的渗水和易破除加固体。

目前南京地区运用较多的是高压旋喷桩法、深层搅拌桩法、注浆法、SMW 桩法、冻结法、和素混凝土钻孔灌注桩法,如何选择以上加固方法可以参考下面表 1。

大多数地铁盾构进出洞区土体的加固方案是采用以上两种或两种以上加固方案相结合的方法。

4. 盾构进出洞区土体加固范围

无水始发时由于地层中没有地下水,纵向加固范围并不需要考虑防止水砂外流和渗透性问题,因此对于加固范围的确定不需要考虑盾构设备本身的几何尺寸,只需满足强度和稳定性准则对端头土体加固的要求,即满足强度 + 稳定性 + 变形特征(土压建立前)的条件,如图 1 所示。

有水始发时为了确保盾构始发的安全,规避风险,端头土体的纵向加固范围除了必须满足强度与稳定性、自身渗透性的要求外,从盾构自身的构造尺寸出发,还必须满足几何准则的要求,确保端头土体加固后能起到较好的堵水作用,端头土体的纵向加固范围等于盾构主机的长度加上 2~3 倍盾构管片的宽度,即满足强度+稳定性 + 变形特征(土压建立前) + 渗透性(水 + 沙 + 压力)的条件,如图 2 所示^[6]。

无水到达纵向加固长度需满足强度 + 稳定性 + 变形特征(土压消失后)的条件,如图 3 所示。

有水到达纵向加固长度需要满足强度 + 稳定性 + 变形可控特征(土压消失后) + 渗透性(水 + 沙 + 压力)的条件,如图 4 所示。

经前人研究总结盾构进出洞区土体横向加固范围满足下面表 2 的要求即可。

Table 1. Comprehensive comparative analysis the in and out of the hole region's soil reinforcement technology of the Nanjing subway shield^[5]
表 1. 南京地铁盾构进出洞区土体加固工法综合对比分析^[5]

加固方法	优点	缺点	适用条件	工期	造价
高压旋喷桩法	浆液注入部位和范围可以控制；抗渗性能较好；注入参数可调节；设备轻便；施工方法简单；操作容易；施工所需空间小；加固土体比较均匀；施工速度较快。	施工会影响附近管线及构筑物，冒浆较多，需要外排，对环境影响大；浪费水泥；砂砾地基和粘聚力大的粘土有时不能形成满意的改良桩；桩径在硬土地层中易变小，软土中易变大。	适用于淤泥、粉土、粘土层和砂土较软地层	工期短	造价较高
深层搅拌桩法	对土体扰动较小；水泥与土充分搅拌；桩体全长无接缝；止水性好；环境污染小，无泥浆污染；废土外运量比其他工法少；噪音小；振动小。	水泥土后期强度增长较大；会造成盾构切削土体困难。	适用于淤泥、粘土层和砂层，但在砂层中加固效果差。	工期短	造价低
注浆法	施工设备简单；占地面积小；噪音和振动较小。	土体加固质量可靠性不高。	适用于多种地层，尤其是较深的砂质地层、砂砾层。	工期短	造价较低
SMW 桩法	工艺简单，操作方便；对周围挤土作用较小；抗渗能力较强，止水性好；墙体的抗弯与抗剪能力强；H 型钢可回收，成本较低；加固质量高，桩体连续强度高；施工噪音小，振动小；无泥浆污染。	施工场地较大，影响地面建筑物和地下管线；对于硬土效果差。	适用于各类软土地层。	工期较短	造价高
水平冻结法	冻结长度短，所需制冷量小，成本低；冻土帷幕厚度均匀，止水效果好。	水平孔施工困难，操作不安全；钻孔与车站结构施工不能平行作业，影响总工期；集配液圈安装难度大。	适用于砂性土、粘性土及强风化基岩。	工期长	造价最高
垂直冻结法	施工安全可靠；安装工艺简单；冻土帷幕均匀性好，强度高，止水效果好。	土体的冻融对地面沉降有一定影响，场地大，影响建筑物和地下管线。	适用于含水量较高的砂性土层。	工期长	造价最高
素混凝土钻孔灌注桩	适用于各种地层；墙体的抗弯与抗剪能力较强；施工简单，设备要求低。	施工场地大；需要专门的泥浆处理设备。	适用于各种地层，包括软土、硬岩。	工期较短	造价低

Table 2. The soil lateral reinforcement minimum size table^[7]
表 2. 土体横向加固最小尺寸表^[7]

直径/m 范围/m	D < 1	1 < D < 3	3 ≤ D < 5	5 < D < 8	简图
B	1.0	1.0	1.5	2.0	
H1	1.0	1.5	2.0	2.5	
H2	1.0	1.0	1.0	1.0	

5. 南京盾构进出洞区土体加固的实例及后期监测结果

结合以上理论，下面详细介绍一下盾构进出洞区土体加固技术在南京某个地铁盾构区间的应用。

5.1. 工程概况

南京地铁三号线卡子门站 - 大明路区间位于南京市秦淮区卡子门大街东北侧，区间拟建场地起于卡子门广场，沿宁溧路高架桥东侧南行，下穿采轩家居布艺、国龙酒家、爱住商旅酒店及红星美凯龙全球

家居广场办公楼后，经过红星美凯龙全球家居广场到达大明路站，地下管线密集。本段区间采用盾构法施工，设计轨顶高程约在 15.72~28.6 m(吴淞高程系)之间。区间隧道左线设计起点里程为左 K28 + 214.117，终点里程为左 K28 + 868.099，设短链一处(左 HZ K28 + 630.907 = 左 HZ K28 + 635.847 短链 4.94 m)，左线长度 649.042 m；右线设计起点里程为右 K28 + 214.117，终点里程为右 K28 + 868.099，设短链一处(右 K28 + 635.708 = 右 K28 + 635.847 短链 0.139 m)，右线长度 653.843 m。区间隧道左、右线平面均设置一条半径 R

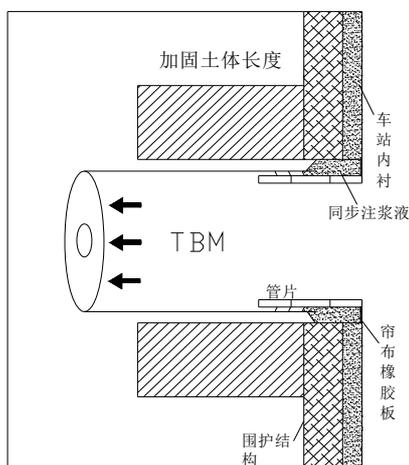


Figure 1. Anhydrous originating longitudinal reinforcement range figure
图 1. 无水始发纵向加固范围图

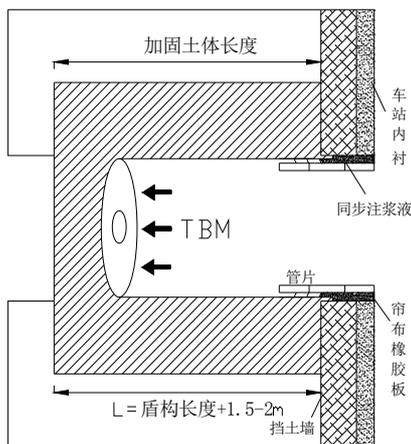


Figure 2. The water originating longitudinal reinforcement range chart
图 2. 有水始发纵向加固范围图

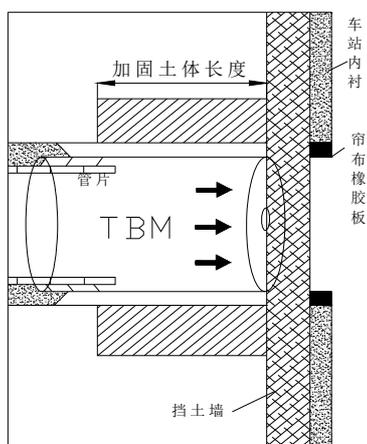


Figure 3. Anhydrous reach the longitudinal reinforcement range figure
图 3. 无水到达纵向加固范围图

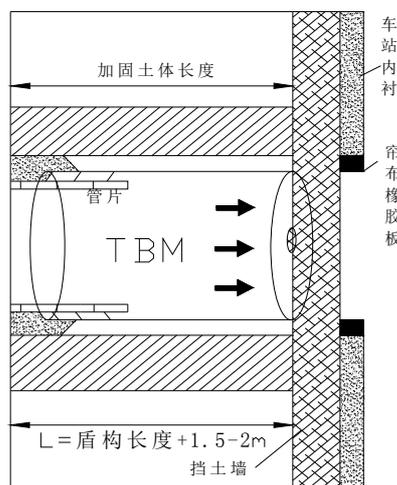


Figure 4. The water to reach the longitudinal reinforcement range figure
图 4. 有水到达纵向加固范围图

= 450 m 平曲线，左右线间距 16.2~13.7 m；区间隧道线路纵坡设计为“V”型坡，左右线最大纵坡分别为 4.983‰及 4.943‰，坡长 600 m，最小竖曲线半径 R = 3000 m，隧道拱顶覆土 10.72~23.6 m。

5.2. 工程地质

根据地勘报告，拟建场地自上而下地层主要为①-1 杂填土、①-2 素填土、②-1b2-3 粉质粘土、②-2b3-4 + c3 粉质粘土与粉土互层、②-3b2-3 粉质粘土、②-3b3-4 粉质粘土、④-1b1 粉质粘土、④-2b2 粉质粘土、④-3b1 粉质粘土、④-4e 含卵砾石粉质粘土、K1g-2 强风化泥质粉砂岩、K1g-3-2 中风化泥质粉砂岩。

5.3. 盾构机选型

区间隧道穿越地层主要为②-1b2-3 粉质粘土、②-2b3-4 + c3 粉质粘土与粉土、②-3b2-3 粉质粘土、②-3b3-4 粉质粘土、④-4e 含卵砾石粉质粘土、K1g-2 强风化泥质粉砂岩、K1g-3-2 中风化泥质粉砂岩(天然单轴抗压强度值为: 4.3 MPa)。场地地下水主要为赋存于粉质粘土中的孔隙潜水和基岩中的基岩裂隙水。坳沟范围(左线里程 K28 + 380、右线里程 K28 + 365 以北)水文地质条件较复杂，隧道穿过范围含水层渗透性相对较强(②-2b3-4 + c3 层中地下水具承压性)，厚度较大，对施工影响较大。而阶地上水文地质条件相对简单，上层滞水埋藏浅，④-4e 层承压水局部位于隧道掘进范围，施工中会出现涌水从而会增加掘进难

度和风险。根据以上岩土条件，决定采用复合式土压平衡盾构机。

另外由于采用宽度较大的管片(1.2米)，而且采用错缝拼装(千斤顶等长)，要求盾构机较长。为增大盾构机的灵敏性、利于线路控制并减小对地层的扰动，根据国内外工程的经验采用宽于 1.2 m 的错缝拼装管片的区间一般采用铰接型盾构，盾构机宜采用铰接型盾构。

根据以上分析最终决定采用铰接型复合式土压平衡盾构机。

5.4. 进出洞区土体加固

5.4.1. 加固方案

卡子门站南端头围护结构采用 $\phi 1000@1200$ 钻孔灌注桩 + $\phi 800@600$ 旋喷桩止水帷幕；洞门处大明路站北端盾构井围护结构采用 $\phi 1200@1500$ 钻孔灌注桩 + $\phi 800@600$ 旋喷桩止水帷幕。

本区间始发洞门存在工程性质较差的软土，到达洞门存在含水层，为保证盾构施工安全结合车站围护结构形式对进出洞区土体进行了如下加固：卡子门站南端头加固采用 $\phi 1500@1650C20$ 素钻孔灌注桩 + 注浆加固；大明路站北端盾构井端头加固采用 $\phi 1500@1650C20$ 素钻孔灌注桩 + $\phi 800@600$ 双管旋喷桩止水帷幕，并辅以降水措施。

注浆加固后的土体，具有良好的均匀性、自立性、止水性，其 28 天无侧限抗压强度 q_u 不小于 0.5 MPa，渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ cm/s。

盾构进出洞前对加固体进行了水平和竖向取芯检查。取芯芯样连续、均匀，且强度满足设计要求；水平取芯孔内无流水。

5.4.2. 加固范围

卡子门站南端头：加固长度为 10.5 m，加固宽度为盾构外径两侧和底部各 3 m。

大明路站北端盾构井：加固长度为 2.9 m，降水范围为加固体外侧 8 m，横向加固宽度为隧道外径两侧各 3 m。

5.4.3. 监测数据

左线隧道于 2012 年 3 月 7 日始发，3 月 10 日完成负环管片拼装并成功始发；2012 年 5 月 28 日达到

大明路站，并于 6 月 1 日成功接收，顺利到达，再此过程中对全线进行了各项数据的监测，在进出洞区的地表沉降监测中，所有数据均处于安全状态，见图 5 和图 6 所示，在始发和到达时也未出现涌水涌砂和土体坍塌情况，进一步论证了该进出洞区土体加固技术的合理性和安全适用性。

6. 小结

本文详细阐述了盾构法隧道在进出洞区土体加固的各种技术，并分析了各自的优缺点和适用性；同时介绍了南京地铁盾构进出洞区土体加固的常用技

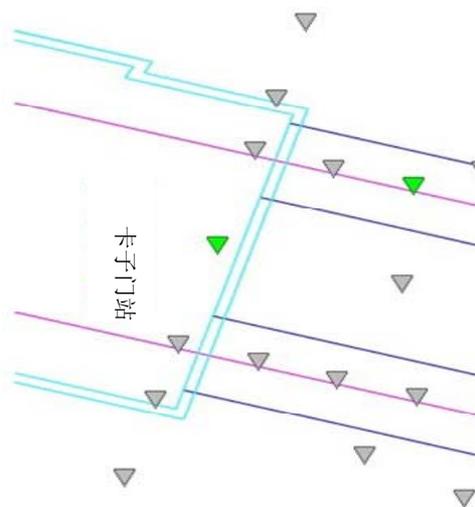


Figure 5. Out of the hole area surface subsidence monitoring points and security status (non-red is security)
图 5. 出洞区地表沉降监测点及安全状态(非红色即安全)

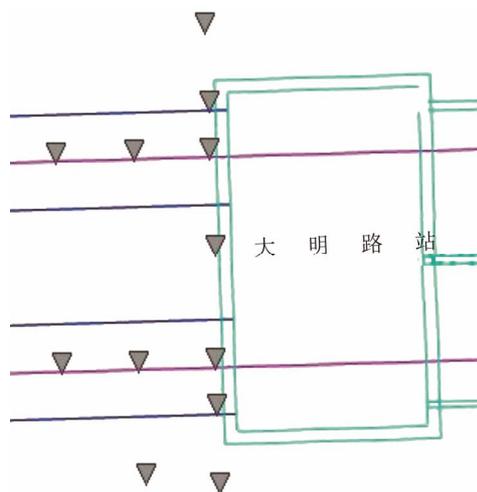


Figure 6. The hole area surface subsidence monitoring points and security status (non-red that security)
图 6. 进洞区地表沉降监测点及安全状态(非红色即安全)

术，并对他们从优缺点、适用性、工期和造价的角度进行了对比分析，对不同地质条件下土体加固技术的选择提供了一定的参考依据；结合前人的研究成果，对进出洞区的纵向和横向加固范围进行了归纳总结；最后介绍了南京某一盾构区间运用素钻孔灌注桩加双管旋喷桩和降水技术来进行盾构进出洞区土体加固的工程实例，论证了该加固方案的可行性，实现了由理论指导实践，实践又反馈论证理论的目的，最终使该盾构区间进出洞区土体的加固达到了预期目标，确保了盾构的成功始发和到达，对今后的类似工程具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 张瑞芬. 盾构施工中端头井加固技术[J]. 国防交通工程与技术, 2011, 1: 60-62.
- [2] 江玉生, 王春河, 江华, 米晋生. 盾构始发与到达 - 端头加固理论研究 with 工程实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995: 128-171.
- [3] 汪茂祥. 盾构洞门加固方法[J]. 工程机械与维修, 2008, 4: 110-114, 50.
- [4] 陈令强, 朱晨阳. SEW 工法在地铁盾构隧道施工中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2007, 4: 23-25, 29.
- [5] 吴韬. 大型盾构进出洞施工技术及其加固土体受力机理分析[D]. 同济大学, 2006.
- [6] 江玉生, 江华, 潘茁. 土压平衡盾构始发与到达端头加固研究[J]. 市政技术, 2012, 30(2): 17-20, 24.
- [7] 张庆贺, 唐益群, 杨林德. 盾构进出洞注浆加固设计与施工技术研究[J]. 地下工程与隧道, 1993, 4: 93-101.