

无水砂卵石地层土压平衡盾构施工风险分析与控制

高丽娟

新疆维吾尔自治区交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年3月14日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月10日

摘要

文章依托乌鲁木齐轨道交通一号线工程实例, 针对在乌鲁木齐典型无水砂卵石地层进行地铁盾构施工所面临的问题, 阐述了无水砂卵石地层土压平衡式盾构施工中存在的主要风险因素以及相应的控制对策。

关键词

无水砂卵石地层, 土压平衡盾构, 风险分析, 策略

Risk Analysis and Control of Earth Pressure Balanced Machine in Anhydrous Sandy Pebble Stratum

Lijuan Gao

Traffic Construction Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 14th, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 10th, 2022

Abstract

Based on the example of Urumqi Rail Transit Line 1 project, this paper elaborates the main risk factors and corresponding control countermeasures in the construction of epum-balanced shield tunnels in the typical anhydrous sand pebble formations in view of the problems faced by subway shield construction in the typical anhydrous sand pebble formations in Urumqi.

Keywords

Anhydrous Sandy Pebble Stratum, Earth Pressure Balanced Machine, Risk Analysis, Countermeasures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地层土质对地铁施工影响巨大,地铁盾构施工掘进作为地铁隧道盾构施工持续时间最长的作业工序,是地铁施工的重点环节,因此如何保障盾构施工在复杂地层条件下更加安全可控地沿着隧道设计线路掘进作业成为盾构隧道施工亟待解决的问题。

无水砂卵石地层作为一种典型不稳定复杂地层,在掘进过程中由于其土质塑性差造成了一系列的问题,限制着城市轨道的发展。目前该类地层中的地铁盾构施工掘进通常采用土压平衡式盾构机,由于该地层中颗粒之间几乎无粘聚力使得盾构机的螺旋输送机很难保持正常运作,导致土舱内外的土压力难以建立动态平衡,因此对作业周边岩土体的扰动非常大。为了避免在施工掘进出现一系列施工风险,不仅需要对盾构机的工作压力、掘进速度和出土量提出要求,而且在盾构机的选型与刀盘质量、姿态控制、管片质量、同步注浆和渣土改良等方面都有相应的特殊要求。可见开展对无水砂卵石的盾构法施工风险分析与风险控制对工程的掘进速度与降低建设成本具有重要意义。本文针对无水砂卵石地层的特点,结合乌鲁木齐轨道交通一号线建设,阐述了土压平衡式盾构施工中存在的主要风险因素以及相应的控制对策,为无水砂卵石地层条件下的盾构施工提供参考。

2. 土压平衡盾构机原理与事故分析

土压平衡式盾构机主要由刀盘、轴承、驱动装置、开挖室和螺旋输送机构成,其工作原理如图1所示。掘进作业的盾构机前端刀盘通过旋转切削土体输送到土舱并填充土舱,利用液压缸的推力进行加压使得作业面保持稳定,实现不断掘进施工。在掘进过程中,需要避免出现刀盘或开挖室出现阻塞以保持开挖的土料可为开挖面稳定提供支撑,因此土料需要具有良好的软稠度与塑性,而由于无水砂卵石地层的特殊力学特性不满足盾构机的上述要求,所以在施工掘进中,盾构机需要对渣土进行改良,同步注浆、渣土改良和盾构姿态控制等问题[1]。若控制不当则易发生事故,如北京地铁9号线某区间盾构机在卵石地层穿越时,由于掌子面土压平衡过低导致了出土量增大,地层损失过度,引起地面的塌陷[2]。

3. 无水砂卵石地层盾构施工掘进风险分析

3.1. 盾构姿态控制风险分析

施工掘进过程中,盾构机常出现偏离隧道的设计隧道轴线现象,如何控制盾构姿态和进行纠偏一直是地铁盾构施工的难题之一,也直接影响着施工质量、衬砌结构安全以及工程费用等[3] [4] [5]。分析无水砂卵石地层中掘进控制盾构机姿态问题,主要可分为以下4个方面:

1) 无水砂卵石地层影响

对于中密-密实的无水砂卵石地层,由于地层的密度变化较快,盾尾管片与周边土体的摩擦力也随之变化,当遇到摩擦力较大的渣土更是会给刀盘带来较大偏心力矩,可见外围的土压力和开挖面之间的

土压力存在的不均衡性；刀盘上的土压力和各种摩擦力抵消了部分千斤顶的推力，其实际推力存在偏差；其次，掘进中经常遇到软硬不均的地层，也使得盾构机的状态控制参数实时变化着，导致盾构机容易偏离隧道的设计轴线。

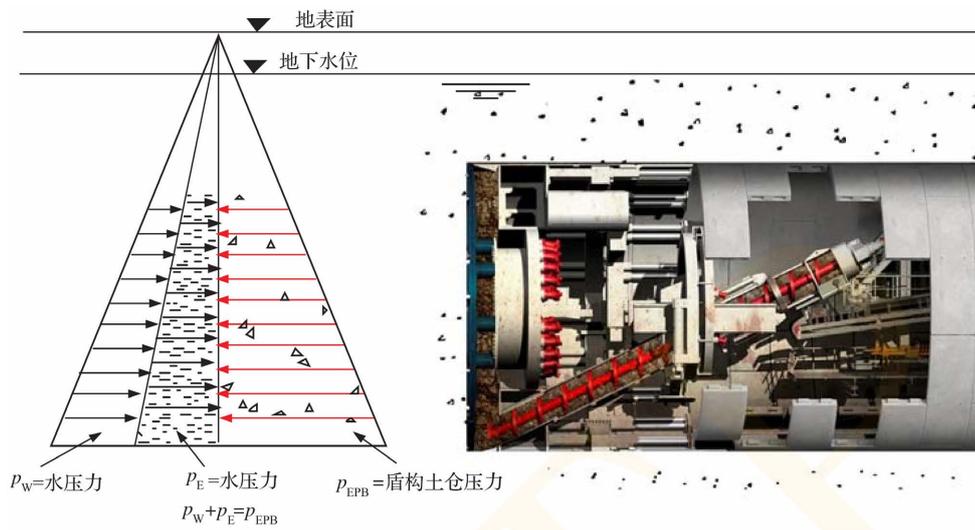


Figure 1. Working principle diagram of earth pressure balance shield machine
图 1. 土压平衡盾构机工作原理图

2) 管片姿态影响

盾尾是做管片拼接的作业区域，而成型后的隧道会对盾尾摆动产生影响，进而对盾构姿态产生影响。因此，在管片拼装时应严格控制其平整度、椭圆度，而由于其控制难度与地层的软硬变化是直接联系的，所以管片姿态控制也是盾构施工中的一大难点。

3) 同步注浆压力影响

在盾构机掘进时，盾尾管片与外围土体之间孔隙的需要采用同步注浆来填补，注浆的用量以及压力会使管片产生一定的位移，间接影响盾构姿态。

4) 盾构机运动特性影响

盾构机切削掘进时会使地层有较大变形，同时由岩土体带给盾构机的阻力容易使盾构机产生滚动转角，也直接影响盾构姿态。

3.2. 管片拼装质量风险分析

管片拼装质量与隧道结构的可靠性及使用寿命相关，作业时主要的风险来源有 2 个方面：① 拼装过程的操作不规范引起管片出现裂缝以及掉落；② 掘进过程操作不当造成错台，错台量过大会可能导致隧道结构的受力不均，成为不利的受力点，当不利点处的密封止水带也会破损而导致隧道的漏水渗水。

3.3. 同步注浆不足风险

盾尾空隙是造成地表沉降的主要原因之一，因而当管片与外围土体出现有空隙时，需要及时的进行同步注浆。因此，浆液有着长期保持稳定性、流动性以及合适的初凝时间成为有效的同步注浆作业的基础，在进行同步注浆作业，浆液在自重以及压力泵的作用下，流向盾尾的空隙处，并在一定时间内达到凝固状态，当掘进结束时候，停止注浆从而达到填充盾尾空隙的效果。然而在作业中，易出现同步注浆

不足,强度不够,抗渗性不足等问题使得常引起地表的沉降,围岩的变形,隧道偏移,隧道防水性下降等不利情况。

3.4. 渣土改良风险

在土压平衡式盾构机掘进过程中,为了保持开挖面的连续性动态平衡,以及切削的渣土顺利的排出,形成所谓的挤牙膏效应,一般要求渣土有较好的塑性变形、软稠度以及内摩擦小等特点,而无水砂卵石属无粘聚力土,因此需对渣土进行改良,避免出现刀具磨损严重、刀盘压力舱结饼,甚至出现因为扭矩和推力过大,导致发生卡机事件[6]。

3.5. 刀盘磨损风险

由于该地层局部含有大粒径漂石且类型多为花岗岩,所以盾构机常常出现切削困难,也加快了刀具与刀盘的损坏。而在刀具刀盘磨损后更换时,需作业人员进舱作业,若操作不当容易造成开挖面失稳坍塌,掌子面坍塌等,则会危及相关人员的生命安全。

4. 乌鲁木齐地铁一号线盾构施工风险控制策略

针对土压式平衡盾构在无水砂卵石地层施工掘进中可能存在的风险因素,以乌鲁木齐地铁一号线为例子,介绍保障盾构施工的质量和安全的策略。

4.1. 盾构姿态控制风险策略

针对正常段推进施工和小曲率半径段的施工,提出的盾构姿态控制策略如下:

在正常段推进施工时,因开挖面土体的密度及硬度变化小,所以盾构机按设计轴线作业难度相对较小,只需控制上下千斤顶的使用个数来调整坡度。

在小曲率半径段施工时,设计线路的曲线参数要求较为复杂,为了满足掘进要求,需对渣土排量,土压平衡,掘进速度,油缸伸缩度以及油压进行控制,以下为具体控制的策略:

- 1) 盾尾与管片间应留足够的间隙以便纠偏,纠偏时做到纠偏量小、纠偏频率多。
- 2) 计算出盾构机左右千斤顶的行程差,以提升纠偏时的准确性。
- 3) 加固隧道外侧土体,使盾构顺利沿设计轴线推进。
- 4) 严格控制浆液质量、用量及注浆压力,以减少曲线推进所引起的地层损失对土体变形的影响。

4.2. 管片质量风险控制策略

乌鲁木齐地铁一号线在施工过程中为控制管片质量风险,分别采用以下策略对管片选型、安装和控制渗漏进行控制策略如下:

1) 管片选型的基本原则为:① 根据掘进路线,进行管片拼装选型及拼装点位图的设计;② 需适应千斤顶组的油缸行程。

2) 管片拼装风险控制:① 严格控制衬砌环面的平整度,相邻环高差、环面的超前量以及椭圆度;② 控制成环后纵、环向的间隙并规范纵、环向螺栓连接顺序;③ 结合测量报表与管片间隙调整拼装姿态。

3) 管片渗漏风险控制:① 确保管片符合抗渗等级等各项指标设计要求,拼装缝符合防水质量要求;② 做好同步注浆加强防水措施。

4.3. 同步注浆风险控制策略

为了适应不同的掘进速度及注浆量,乌鲁木齐地铁一号线建设采用自动与手动的同步注浆系统并在

管路的注入端安装了压力传感器测注浆压力以实现自动注浆的功能并在每个活塞都安装指示器，使液压可以控制到活塞的速度，实现每条线上注浆量的可分开控制。如图 2 所示，设备桥安装二次注浆系统，可供管片背部二次注浆及超前注浆使用[7]。

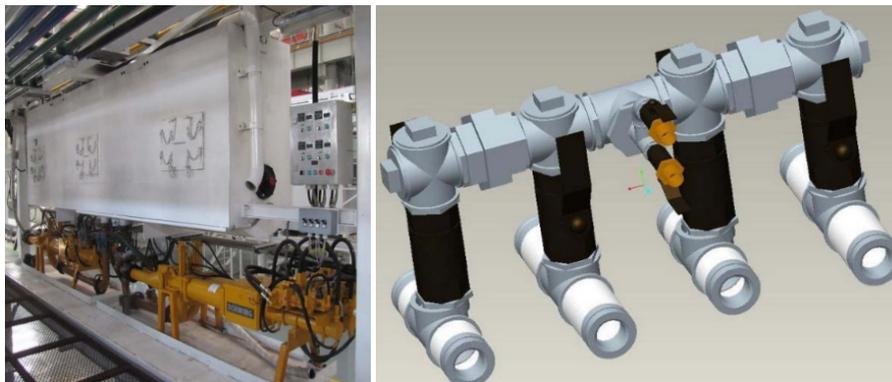


Figure 2. Synchronous grouting system
图 2. 同步注浆系统

乌鲁木齐轨道交通 1 号线在建设过程中采用以下措施：① 制定注浆作业指导书，与拌制单位进行技术交底；② 制订注浆施工组织和工艺流程及注浆质量控制程序。③ 根据洞内管片衬砌变形和地表建筑物变形监测结果，及时发现并解决问题；④ 定时清洗注浆设备与管路；⑤ 通过吊装孔对管片在背后补充注浆，采用双液浆。

4.4. 渣土改良风险控制策略

渣土改良措施是否合理直接影响盾构掘进速度，与刀具、刀盘、磨损螺旋机也影响密切，在控制施工风险具有重要作用。通过渣土改良，使渣土也具有更好的流塑性和稠度，可建立更稳定的压力平衡，降低透水性。在施工过程中，渣土改良质量的关键在于改良剂和压注措施。针对无水砂卵石地层流塑性差、磨蚀性强等特点，在乌鲁木齐地铁一号线施工中，采用泡沫剂、膨润土作为改良材料来提升渣土的和易性和流动性。

4.4.1. 渣土改良剂

1) 泡沫剂

① 基本原理：发泡剂产生的气体分散于溶液中会形成大量的微细气泡。泡沫的液膜与泡沫内的液体有一定的黏度，能减缓液膜变薄的速度，使泡沫产生一定的支撑力。泡沫注入土仓内或刀盘面后，在搅拌作用下微细气泡与开挖土混合均匀，既使得开挖土呈塑性流动又提高了其止水性。

② 基本功能：泡沫剂在土中造成的塑性变形可增加工作面的稳定性与可控性；降低内摩擦，减少砂卵石对刀盘的磨损，同时降低能耗；减少渗漏，加强工作面的密封性；提高渣土的工程性能；减少土体的内摩擦力；降低砂卵石的密实度；便于出渣。

2) 膨润土浆液

① 基本原理：利用膨润土拌制浆液，并添加化学添加剂，以形成稠性浆液。膨润土浆液注入土仓内或刀盘面，利用浆液的黏稠效果使开挖的砂卵石地层具有流动性和塑性，以到达土体改良的目的。

② 基本功能：增加土体流动性；降低开挖面的温度；减少土体对刀盘、螺旋机内的磨损；充实土仓，避免盾构超挖；提高螺旋机的防喷性。减少砂卵石的內摩擦力；降低土体的密实度；便于出渣。

4.4.2. 改良剂压注措施

改良剂压注设备采用盾构机的泡沫膨胀土注入系统,压注措施参考广州、成都地铁 1 号线的施工经验和砂卵石地质情况以及考虑在地下水丰富的情况,拟定泡沫剂的添加量为 3%~5%,拟定膨润土浆液的添加量为 15%~40%。

4.5. 刀盘磨损风险控制策略

在盾构掘进过程中,由于砂卵石地层的石英砂等物质使盾构刀具产生一定量的磨损撞击,加快了刀具与刀盘的损害,因此需要进行刀具的检查更换和合理的管理措施,可以将刀具更换产生的风险降至最小[8]。

1) 刀具更换位置要求

刀具更换是盾构施工过程中风险较大的环节之一,需制定合理的刀具更换方案及人员保护预案。在换刀作业时,换刀地点一般选在地层稳定性强,天然含水量小或已加固改良的区段。

2) 换刀作业施工要求

在换刀作业前,需对作业人员进行技术和安全交底以及进仓相关的培训考核;在换刀前应降低盾构机头推进速度,以免对土体的挤压造成降水井管壁损坏[9]。

换刀施工应该包括以下几部分内容:① 填塞管片与盾尾之间的间隙,盾尾油脂加压。在最佳换刀角度,停止刀盘旋转。② 调整水阀使水位降至盾构底部,保证土仓内有一定量渣土存在,停止刀盘旋转,将仓内剩余仓土出空后作业人员进入。③ 刀盘密封完进行刀具的检查记录与更换。④ 更换完成后将临时焊接钢板割除并拉出,土仓内压注厚浆填充空隙防止地表坍塌。

在换刀作业时,工作人员入仓检查、记录所有刀具磨损情况并根据更换标准进行换刀或修复;调整的刀盘角度,使更换的刀具处于最佳工作位置。

3) 刀具管理制度

在复合盾构施工中,刀具管理是影响盾构机掘进施工的一个重要因素。在乌鲁木齐轨道交通 1 号线施工过程中,建立了如下详细的刀具管理制度,以降低刀具的磨损风险。① 建立刀具档案:安装于盾构刀盘上每一把刀具,都应进行编号,作为后续技术分析的重要参考资料。② 刀具维修制度:换刀作业时,需仔细检查被更换刀具的状况,以便后续作为刀具使用调整的依据。

5. 结语

无水砂卵石地层土压平衡盾构施工风险分析与控制措施研究对于保证轨道交通的建设质量,减少施工费用乃至降低施工风险具有十分重要的作用。本文针对无水砂卵石地层的特点,结合乌鲁木齐地铁一号线建设,掘进时常见的风险来源与相应的控制对策,包括了:1) 对于盾构姿态风险分析及控制措施,可从正常段推进施工与小曲率半径段施工进行分类与制定。2) 对于管片质量风险分析及控制措施,可从管片选型、安装和控制渗漏进行分析与把控。3) 对于同步注浆风险及相关对策,可从浆液质量把控制度进行分析与完善。4) 对于渣土改良风险分析与控制,可从改良剂选用和压注措施进行分析与选择。5) 刀盘磨损风险分析与控制,可从刀具的更换、管理以及设置更换作业制度等环节进行分析与把控。

参考文献

- [1] 郭彩霞,王梦恕,孔恒,等. 无水大粒径砾漂石地层盾构选型研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 13-17.
- [2] 姜厚停,龚秋明,周永攀,马超. 北京地铁盾构施工遇到的工程地质问题[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2010 年全国工程地质学术年会暨“工程地质与海西建设”学术大会论文集. 中国地质学会工程地质专业委员会: 工程地质学报编辑部, 2010: 133-138.

-
- [3] 课题组建设部地下空间建设风险控制机制研究. 地铁及地下工程建设风险管理指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] 竺维彬, 鞠世健. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2009.
- [5] 朱宏海. 上软下硬复合地层地铁盾构隧道设计及施工探析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 144-148.
- [6] 张睿. 无水粉质黏土、粉细砂复合地层盾构机刀盘结泥饼成因分析及预防措施研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(9): 107-110.
- [7] 王晖, 李大勇, 夏广红. 盾构机盾尾注浆施工中存在的问题及其对策分析[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2004(1): 41-46.
- [8] 解立功. 砂卵石层盾构刀具损坏原因分析及国产化技术[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] 程新军. 盾构施工换刀风险控制技术[J]. 铁道建筑, 2011(9): 54-57.