

TBM盾构机在上软下硬地层的施工技术研究

康 斌, 李慧鹏, 朱燕毕, 滕春俑, 李华平, 张进益

中国水利水电第十四工程局有限公司设备运营中心, 云南 昆明

收稿日期: 2022年2月26日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年3月28日

摘 要

上软下硬复合地层是盾构施工过程中的不良地层之一, 对盾构的正常施工造成了比较大的影响。文章针对此类地层的主要特征, 分析了在施工过程中造成滚刀偏磨、刀圈断裂的原因, 并且从刀盘转速设计、使用硬度梯度刀圈和不同宽度的刀圈等方面提出了上软下硬复合地层盾构掘进施工方法, 可为类似工程提供参考。

关键词

上软下硬, 复合地层, 滚刀偏磨, 刀圈断裂

Research on Construction Technology of TBM Shield Machine in Upper Soft and Lower Hard Strata

Bin Kang, Huipeng Li, Yanbi Zhu, Chunyong Teng, Huaping Li, Jinyi Zhang

Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Equipment Operation Center, Kunming Yunnan

Received: Feb. 26th, 2022; accepted: Mar. 21st, 2022; published: Mar. 28th, 2022

Abstract

The upper-soft lower-hard composite stratum is one of the unfavorable strata in the shield construction process, which has a relatively large impact on the normal construction of the shield. In view of the main characteristics of such formations, this paper analyzes the reasons for the eccen-

tric grinding of the hob and the fracture of the cutter ring during the construction process, and puts forward the above aspects from the design of the cutter head rotation speed, the use of the hardness gradient cutter ring and the cutter ring of different widths. The construction method of shield tunneling in soft-under-hard composite stratum can provide reference for similar projects.

Keywords

Upper-Soft Lower-Hard, Composite Stratum, Hob Eccentric Grinding, Knife Ring Break

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

随着我国城镇化水平的发展,城市人口的增长也引发了一些社会问题。其中,最具代表性的问题是:随着城市规模的不断扩大,土地资源越发紧张,可利用土地短缺问题颇为严重。因此,越来越多的人把目光转向地下空间[1]。盾构法施工作为隧道施工工程技术的一种,由于其在施工时的干扰较小、技术相对比较成熟、施工过程安全可靠等优点,应用越来越广泛[2]。但是随着城市化的进一步发展,盾构法在施工中会遇到更为复杂的地层条件,复合地层便是复杂地层的一种。所谓的复合地层指的是在隧道开挖面内或隧道开挖轴线上存在两种或两种以上工程地质、水文地质条件差异较大的岩土体[3],常见的复合地层是上软下硬地层,盾构机在上软下硬复合地层中掘进时由于上下层土体之间的物理力学性质差异很大,软土超挖、掘进姿态不易调制、刀具偏磨严重、刀圈易断裂等问题容易发生。葡萄牙 Oporto 地铁 C 线和 S 线在盾构施工时遇到软硬不均的岩层,造成了刀盘与刀具的磨损严重[4]。很多学者对盾构机在上软下硬地层施工技术进行了研究,宋天田[5]对切刀进行了研究,分析了其在盾构施工时的运动形式,然后确定其受力,最后提出了切刀在盾构施工时的切削力计算模型。包建新[3]等人对刀盘进行分析、研究了刀具的选型与磨损等问题,最后提出了在上软下硬复合地层刀盘和刀具的优化方案。刘招伟[6]等提出了上部软土、下部极硬岩石复合地层盾构快速掘进方法,解决了复合地层盾构推力大、易结泥饼、刀具易损坏和破岩效率低等难题。苏继峰[7]等人对软土刀盘在上软下硬地层掘进施工技术进行了研究,在侵入隧道的基岩凸起段,预先针对性钻孔处理,来降低刀局部刀具受力超载,合理选择盾构掘进参数,在盾构施工进行时,需要加强地面监测。虽然很多研究学者对上软下硬地层进行了研究,但是对 TBM 盾构施工在上软下硬地层的研究还不是特别多。基于此,本文以上软下硬地层为工程背景,通过对 TBM 盾构刀盘掘进参数和滚刀刀具选择方面进行研究,以期增加盾构滚刀的耐用度。

2. 滚刀主要损坏形式及原因分析

上软下硬地层在盾构施工过程中较为常见,其在盾构掘进过程中的具体表现是:多种特性差异明显的地层同时出现在盾构开挖面,导致地层软硬不均,刀具在软岩与硬岩的交界处非常容易发生磕碰岩面的现象,最终造成刀圈破损,破损形式主要有滚刀偏磨与刀圈破裂两种。上软下硬地层盾构滚刀破岩受力如图 1 所示,图中: F_n 为盾构刀盘作用于滚刀上的推力; F_r 为滚刀跟随刀盘公转引起的滚动力; F_c 是滚刀与开挖面接触而产生的接触反力; f 是由接触反力而引起的摩擦力; F_d 为上软下硬地层引起的软硬地层交界面而产生的冲击荷载。

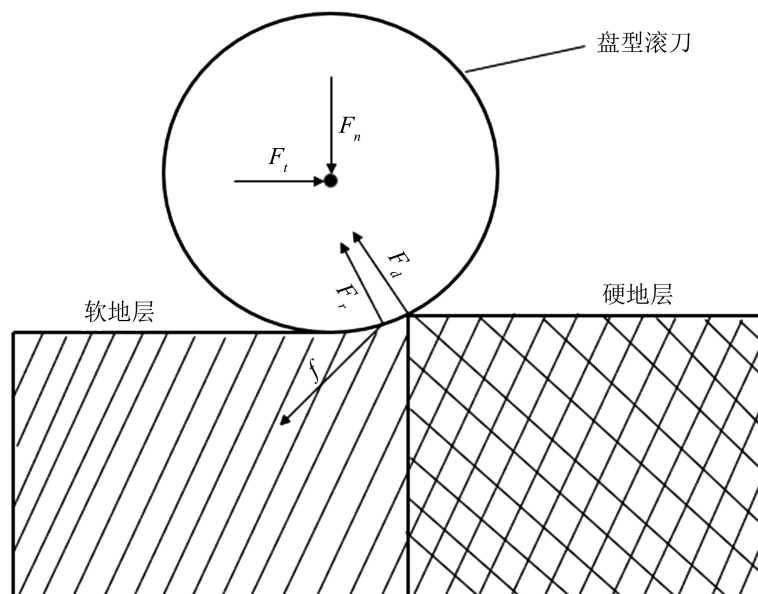


Figure 1. Force diagram of disk hob in upper soft and lower hard formation
图 1. 上软下硬地层盘型滚刀受力图

2.1. 刀圈偏磨

刀圈偏磨是指盘型滚刀刀圈的不同部位磨损的程度不同,严重偏磨是盾构滚刀破坏的主要形式之一。在施工过程中若盾构滚刀不能自转,导致滚刀由转动变为滑动,长时间滚刀一侧与开挖面摩擦最终使滚刀的不同部位磨损不同,即滚刀偏磨(图 2),刀圈不能自转的原因有:滚刀本身的转动扭矩不足以使滚刀转动;滚刀轴承被损坏。其中,滚刀本身的转动扭矩不足以使滚刀转动是主要原因。

在单一硬岩条件下,TBM 盾构机盘形滚刀很少出现偏磨问题。TBM 盾构机在单一硬岩条件下进行施工时,盾构滚刀受力条件比较简单,受到的力矩主要是开挖面提供的转动力矩。所以,当转动力矩大于阻动力矩便可使滚刀转动。TBM 盾构机在上软下硬复合地层施工时,不同土体的力学性能不同,滚动阻力比较复杂,转动力矩小于滚动阻力原因可能是:当滚刀公转到软土层时,由于软土层的开挖面较松散,开挖面提供给滚刀的动力矩过小,滚刀不足克服阻动力矩,导致滚刀无法转;上软下硬地层中,软岩层渣土容易在刀箱内结块,产生结泥饼的现象,使滚动阻力增大,导致滚刀无法转。



Figure 2. Knife ring eccentric grinding
图 2. 刀圈偏磨

2.2. 刀圈断裂

刀圈断裂是指刀圈崩口或者开裂，逐步发展直至脱落，也是盾构滚刀破坏的主要形式(图 3)。刀圈断裂的产生原因有：刀圈材质、锻造工艺、刀盘转速和地层特性等因素有关，地层的硬度超过了刀圈所能承受的极限，而刀盘仍在持续工作，容易导致刀圈断裂。

TBM 盾构机在开挖面为比较均匀一致的岩层盾构施工时，刀圈所受到的载荷较为平缓，不易产生刀圈断裂；当 TBM 盾构机在开挖面的岩层硬度分布不均的岩层施工时，可能会导致刀圈局部载荷瞬时增大，而最终造成刀圈断裂。



Figure 3. Knife ring break
图 3. 刀圈断裂

3. 解决方案

本论文对刀圈材质、锻造工艺等因素对刀圈破损的影响不进行研究，结合盾构机滚刀的受力特点和上软下硬地层特性，优化方案我们从刀圈转速设计和合理选用与布局滚刀方面入手。

3.1. 复合地层刀盘转速设计

上软下硬复合地层盾构掘进断面，需要通过计算软硬地层分布系数 K 进而反映掘进断面软硬地层的分布情况，以隧道中心为原点，建立掘进断面地层分布如图 4 所示，软土层为强风化基岩，硬岩部分为中风化基岩。

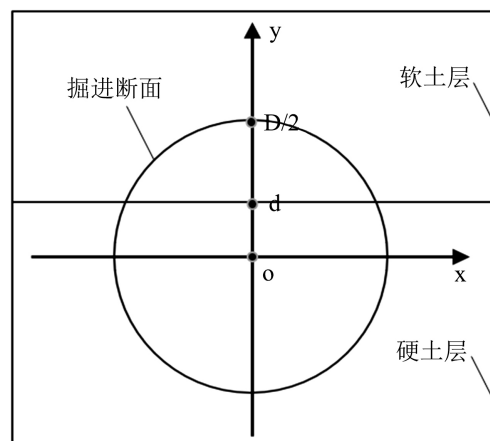


Figure 4. Strata distribution map of driving section
图 4. 掘进断面地层分布图

首先, 确定冲击荷载影响最小的刀盘合理转速, 进而有效避免刀圈破损, 严重影响滚刀使用寿命的磨损情况发生。复合地层中, 在开挖面存在多种地层, 使得单一地层刀盘转速公式不再适用, 需要在单一地层公式的基础上加一个安全系数 β 进行修正, 修正公式如公式(1)。

$$n_u = \beta \sqrt{\frac{\alpha * D}{1.2q_u^v}} \quad (1)$$

式中: n_u ——复合刀盘转速; q_u ——复合地层强度; β ——安全系数; α ——刀盘扭矩系数; D ——盾构刀盘直径; v ——盾构掘进速度。

复合地层强度的计算如公式(2)所示。

$$q_u = Kq_{ui} + (1-K)q_{uj} \quad (2)$$

式中: K ——地层分布系数; q_{ui} , q_{uj} 软硬地层强度。

地层分布系数的计算如公式(3)所示。

$$K = \frac{4}{\pi D^2} \int_d^{\frac{D}{2}} \sqrt{D^2 - 4y^2} dy \quad (3)$$

新疆 YE 供水二期输水工程 KS 段 IX 标, 以 IV 类围岩为主, 局部为 III 类围岩。IV 类岩石包含凝灰质砂岩; 凝灰角砾岩夹石英斑岩, 属于坚硬岩; IV 类围岩包含砂岩、砂砾岩夹泥岩, 属于较软岩。根据地面地质测绘结合沿线钻孔资料分析, 本文中盾构参数以及岩土性能参数取值如表 1 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 盾构参数以及岩土性能参数

β	α	D (m)	d (m)	q_{ui} (MPa)	q_{uj} (MPa)	v (m/h)
0.9	15	6.44	1.1	5.8	27.6	1.8

通过计算, 复合地层分布系数 $K = 0.3$, 复合地层强度 21.4, 复合刀盘转速 1.5 r/m。

3.2. 滚刀的选型与布局

在硬岩盾构施工时, 滚刀是主要的破岩工具。滚刀在刀盘旋转和推力作用下对岩石产生冲击压碎和剪切碾碎的作用, 以此实现岩石破碎目的。滚刀在刀盘面板上按分布位置的不同分为中心滚刀、边滚刀和正面滚刀。滚刀靠近刀盘的中心越远, 刀具的线速度越大, 滚刀随着刀盘公转一周后, 其自转时所行进的距离越长, 磨损量也相对较大。

1) 在耐冲击性上, 采用梯度刀圈。外刀圈的刃部硬度高达 HRC58-62, 刀圈中部硬度为 HRC52-56、刀圈内部的硬度为 HRC50-53, 刀圈部位的硬度由外到内梯度变化, 自由过度。较高硬度一方面可以对硬岩部分进行压碎、剪切和碾碎, 另一方面也可以提高刃口的耐磨性。但是如果硬度过大, 容易导致刀圈刀圈脆断, 因此这样的硬度可以使刀圈具有极好的抗冲击性能, 也能吸收外部冲击功, 防止刀圈断裂。

2) 在耐磨损性上, 在滚刀距离刀盘的不同位置处磨损量有所不同。中心滚刀选用窄型滚刀圈, 一方面, 中心滚刀行进距离较短, 磨损量相对较小; 另一方面, 窄型滚刀圈便于切入盾构的岩石面, 最后将岩石碎块切削下来。边滚刀和正面滚刀采用宽刀圈, 一方面其行进距离和中心滚刀比较长, 磨损量也相对较大, 较宽的滚刀圈有利于提高其耐磨性; 另一方面, 边滚刀与掌子面并不是垂直, 它的开挖面是圆角, 用来对隧道边缘进行成型, 较宽的滚刀圈也减少了刀圈由于冲击荷载而导致断裂的可能性。

4. 结论

研究了上软下硬地层特性和盾构机滚刀的受力特点, 为避免盾构机在上软下硬地层施工引起的刀具损坏风险, 提出了复合地层刀盘转速设计方法与滚刀选型与布局得到具体结论如下:

1) 复合地层较单一地层滚刀受力条件更加复杂, 在硬岩过度到软岩时容易出现刀圈局部载荷瞬时增大现象; 在硬岩过度到软岩时容易导致动力矩瞬时减小。

2) 根据盾构机在上软下硬地层掘进时开挖面的地层分布特点, 提出了在此地层下刀圈破损形式主要有滚刀偏磨与刀圈破裂两种, 滚刀本身的转动扭矩不足和滚刀不合理选型与布局是导致这两种破损形式的主要原因。

3) 提出复合地层刀盘合理转速的计算方法, 这种方法为上软下硬地层的刀盘转速设定提供可靠依据, 能有效避免因不合理施工参数造成的刀圈偏磨严重等问题, 最终得出在本工程这种复合地质下刀盘合理转速为 1.5 r/m。

4) 根据盾构机在上软下硬地层刀的受力特点, 提出了在此地层下采用梯度刀圈, 刃部硬度 HRC58-62, 中部硬度 HRC52-56、内部的硬度 HRC50-53; 滚刀布局上, 中心滚刀选用窄型滚刀圈, 边滚刀和正面滚刀采用宽刀圈。

参考文献

- [1] 孙红宇. 上软下硬地层结合面盾构滚刀破岩机理研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [2] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] 包建新. 上软下硬地层土压平衡盾构掘进技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [4] 王恒. 上软下硬复合地层盾构施工掘进参数研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑工业学院, 2012.
- [5] 刘高峰, 宋天田. 成都地铁盾构刀具磨损分析研究[J]. 隧道建设, 2007(6): 89-93.
- [6] 刘招伟, 王炜, 杨硕, 等. 上软下硬复合地层盾构空舱快速掘进技术[J]. 施工技术, 2020, 49(1): 51-56.
- [7] 苏继峰. “软土刀盘”在上软下硬地层掘进施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2020(23): 181-182.