DOI: 10.3901/JME.2021.21.279

基于 PFC3D 的北京砂卵石地层盾构刀盘选型及 刀具布置数值模拟研究*

江 华¹ 张晋勋² 苏一再¹ 张靖翎¹ 殷明伦² 朱家辰¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院 北京 100083;

2. 北京城建集团有限责任公司 北京 100088)

摘要: 砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层及强磨蚀性地层, 盾构在该类地层中掘进通常会面临刀盘、刀具磨损严重, 盾构推力与刀盘扭矩偏高且波动幅度大、地层变形不易控制等问题。砂卵石地层盾构掘进效率的高低及地层控制的好坏, 刀盘选型及刀具配置是关键。以北京地铁新机场线“磁各庄站~1#风井”盾构区间为工程依托, 利用 PFC3D 数值模拟及现场测试相结合的手段, 研究刀盘开口率、刀具组合高差、先行刀刀间距等参数对盾构掘进效率及地层变形的影响。研究结果表明: 相同掘进参数下大开口率辐条式刀盘比小开口率辐板式刀盘具有更好的掘进速度, 小开口率辐板式刀盘掘进时引起的地表变形更小, 对周围地层的扰动范围也更小; 先行刀与切削刀的组合高差为 70 mm 时盾构掘进效率较高且扭矩较低; 先行刀刀间距设定为 300 mm 时, 盾构有较好的掘进效率和较低的刀盘扭矩。工程实践表明: 要实现砂卵石地层盾构长距离高效掘进, 大开口率辐条式刀盘设计及大高差梯次化刀具布置是基础, 高贯入度、低转速的掘进控制是关键。研究结果可为类似工程的盾构刀盘选型与刀具布置提供借鉴。

关键词: 北京地铁新机场线; 砂卵石地层; PFC3D; 刀盘开口率; 刀具组合高差; 先行刀刀间距

中图分类号: U455

Numerical Simulation of the Type Selection of Cutterhead Selection and Tool Arrangement in Beijing Sandy Pebble Stratum Based on PFC3D

JIANG Hua¹ ZHANG Jinxun² SU Yiran¹ ZHANG Jingling¹ YIN Minglun² ZHU Jiachen¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing),
Beijing 100083;

2. Beijing Urban Construction Group Co. Ltd., Beijing 100088)

Abstract: Various difficulties are encountered in sand-pebble strata, which are typically mechanically unstable, and serious tool wear has been experienced during shield tunneling. The cutterhead selection and tool arrangement are the key to realize the long-distance and efficient shield driving in sand-pebble strata. Taking second section of the Beijing New Airport line tunneling project as background, this paper studied the influence of parameters such as cutterhead aperture ratio, tool combination height difference, and cutter spacing on shield tunneling efficiency and formation deformation by PFC3D and field test. The results show that the driving speed under the spoke-type cutterhead is better than that under the panel-type cutterhead for the same tunneling parameters, while surface deformation and disturbance range to the surrounding strata are less under the panel-type cutterhead with the small cutterhead aperture ratio; When the height difference between the ripper and the scraper is 70 mm, the shield tunneling efficiency is higher and the cutterhead torque is lower; when the ripper spacing is 300 mm, the shield tunneling efficiency is better and the cutterhead torque is lower. Engineering practice shows that the spoke-type cutterhead with large aperture ratio and multidimensional configuration method

* 国家自然科学基金青年基金(51608521)资助项目。20201123 收到初稿,
20210914 收到修改稿

for cutting tools are the foundation to realize the long-distance shield driving, and the tunneling parameter control with high penetration and low speed is the key. The results of this study provide a theoretical reference for cutterhead selection and tool arrangement in shield construction under similar projects.

Key words: Beijing new airport line tunneling project; sand-pebble stratum; PFC3D; cutterhead aperture ratio; height difference of tool combination; ripper spacing

0 前言

砂卵石地层普遍具有卵漂石含量高、粒径不均匀、咬合力强、磨蚀性强、流塑性差等特点,盾构在砂卵石地层中掘进常常出现刀盘扭矩偏高、掘进困难、地表沉降过大、刀具磨损严重等问题。根据工程地质条件合理选择刀盘结构型式及刀具类型并合理布置刀具,是解决此类问题的关键,针对砂卵石地层的盾构刀盘、刀具选型布置研究可以为工程实践提供理论依据。

国内外专家针对刀盘选型和刀具布置做了诸多研究,蒲毅^[1]依据刀具磨损的寿命原则,提出确定刀具数量的磨损系数法和掘进系数法。从理论上验证先行刀超出主切削刀伸长量的经验值,获得先行刀的理论布置曲线。尚艳亮^[2]通过对比同一地区的不同盾构,得出复合式刀盘型式、小刀盘开口率和小刀盘扭矩的盾构机对地表沉降的影响更小。郭伟等^[3]建立 CFD 模型,分析获得刀盘开口分布特征对刀盘前后渣土压力分布的影响,以及与刀盘前后渣土压力的映射关系。李向红等^[4]用大型盾构模拟试验平台上得到的试验数据,研究得出刀盘开口率较大,则对应的土舱内外土压力差值较小,刀盘开口率与刀盘扭矩成反比关系。竺维彬^[5]针对复合地层提出刀盘上滚刀与切刀之间应保留一定的高度差。杨洪杰等^[6]利用大型盾构掘进试验平台对不同土质与刀盘开口率条件下的盾构掘进过程进行研究。宋克志等^[7]在分类分析盾构机常用破岩刀具时提出了一种刀具主副刀高低分层布置的形式。刘晓毅^[8]在探究滚刀在复合地层中的磨损机理并改进刀具设计时,提出滚刀的安装高度应该能够为岩渣留出一定的空间并能保证出碴顺畅。何其平^[9]从盾构刀具的切削破岩原理出发,详细归纳了不同类型复合地层所适用的刀盘结构型式、刀具配置形式、刀具数量、切刀及滚刀的类型。李建斌等^[10]指出盾构在穿越石英含量高、磨蚀性高的地层时,刀盘应装配双刀碳化钨切刀和碳化钨镶嵌型特殊滚刀,实践证明能够大大提高刀具的耐磨性。LIU

等^[11]利用 CSM 预测模型建立了刀头载荷模型,并提出了一种新的刀盘布局设计和 TBM 隧道掘进方法。QI 等^[12]为了提高硬岩隧道掘进的破岩效率,提出了一种基于多级 TBM 刀盘的自由面破碎方法,可以显著降低和提高岩石的破断力和效率。HUO 等^[13]利用 TBM 多自由度耦合动力学模型研究冲击载荷下的刀盘动力学响应,为 TBM 动力学优化设计,振动控制和刀盘结构设计提供了理论依据。XIA 等^[14]采用了模糊数学理论与有限元分析相结合的方法,建立了盾构刀盘结构参数的优化设计模型,结果表明所获得的刀盘结构最优方案可以极大地提高刀盘的强度和刚度。

现有研究中,围绕刀盘的受力特性、地层适应性与掘进参数的关系等的研究内容较为匮乏,相应的研究维度比较单一,限制了对刀盘结构的改进与优化。关于盾构刀盘及刀具的研究多集中于硬岩地层的盘形滚刀,鲜有对松散地层中先行刀的研究;而关于刀具分层、数量与布置形式,目前的成果多数来源于工程实际应用,研究重点大多在于刀具磨损,考虑因素较单一。将离散元法应用于模拟软土盾构的研究较少,运用 PFC3D 数值模拟方法对盾构刀盘刀具选型研究也较为欠缺。本文运用 PFC3D 数值模拟软件研究刀盘开口率对掘进效率的影响,多角度分析了刀盘的工作性能及适用性,综合考虑了其对刀盘扭矩、开挖效率、地层变形等多重因素的影响。分别研究了先行刀与切削刀的组合高差及先行刀的刀间距布设对刀盘扭矩及掘进速度的影响,从侧面反映了刀盘的掘进效率,进一步完善砂卵石地层盾构刀盘选型和刀具布设研究。

1 颗粒流模型的建立

1.1 工程背景

本文实例验证是在北京地铁新机场线一期工程磁各庄站北侧盾构始发井至磁草 1#区间风井暗挖横通道盾构区间,下文简称为“磁~1#”区间,总长约 2 813 m。“磁~1#”区间盾构隧道主要穿越以卵石圆砾⑤、⑦为主的砂卵石地层,盾构隧道穿越砂卵石层的主要物理力学指标见表 1。

图 1 “磁~1#”区间线路走向

表 1 砂卵石地层的物理力学参数

岩土层名称	天然密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	变形模量 E_0/MPa	泊松比 ν	侧压力系数 μ_0
卵石圆砾⑤	2 020	4	38	45	0.35	0.32
卵石圆砾⑦	2 050	5	40	50	0.35	0.33

1.2 模型参数标定

采用颗粒流数值模拟软件 PFC3D 进行数值模拟分析时，需要通过参数标定的方式确定。如图 2 所示，由于本文所选用的砂卵石地层，颗粒间填充的大量细微颗粒和胶结物质产生了一定的黏结作用，故选用接触黏结模型来适当考虑卵石颗粒间的黏聚力，并采用三轴试验将对材料参数进行标定，参数标定结果见表 2。

图 2 数值三轴试验模型

表 2 参数标定结果

颗粒法向接触 模量/MPa	颗粒刚 度比	颗粒摩 擦因数	法向黏结强度/kPa	切向黏结强度/kPa
20	1.5	0.7	15	12.5

1.3 砂卵石地层模型建立

本文数值计算模型主要由砂卵石地层模型与盾构刀盘模型组成。砂卵石地层模型共包含 82 065 个球形颗粒，模型尺寸：长×宽×高=2.5 m×12 m×13 m。为了使模型的模拟状态与实际状态近似，需求解砂卵石地层模型初始平衡状态。在模型的四周和底面设置边界墙体约束，并添加重力场。颗粒与颗粒之间及颗粒与墙面之间均指定为线性刚度接触模型进行初始平衡。当模型达到初始平衡后，再将颗粒与颗粒之间的线性刚度接触模型替换为线性接触黏结模型，并为新的接触模型赋予本构参数，再次计算平衡后，此时即得到了数值计算所需与实际地层具

有相同物理力学性质的砂卵石地层模型。

如图 3 所示，为疏排被刀盘切削下来的土颗粒，将砂卵石地层模型的正面垂直于坐标系 y 轴置于 xoz 平面上，砂卵石地层模型正面的边界墙体约束替换为设置有“洞门”的边界墙体约束。

图 3 砂卵石颗粒流模型

1.4 刀盘模型建立

1.4.1 刀盘选型依据

如下图 4 所示，“磁~1#”盾构区间采用大开口率辐条式刀盘，刀盘由 6 根长辐条和 6 根短辐条组成，开口率约 60%，采用“切削刀+撕裂刀+中心刀”的刀具组合方式。

图 4 刀盘平面及剖面图

刀间距设定方面，撕裂刀的切削宽度为 70 mm，同臂相邻刀间距为 300 mm，切削轨迹间的径向净距

为 80 mm; 切削刀的切削宽度为 225 mm, 同臂相邻刀间距为 450 mm。刀具的高度布设利用立体切削原理进行多层刀高的设计, 刀盘的正面包括两层撕裂刀和一层切削刀, 撕裂刀高度分别为 190 mm 和 155 mm, 切削刀高度为 120 mm。刀盘外周配置三层保径撕裂刀, 高度分别为 220 mm、190 mm 和 155 mm。刀具高度组合参数详见表 3, 刀具的梯次化布置情况如图 5 所示。

表 3 刀具高度组合

	撕裂刀高度 /mm	切削刀高度 /mm	高差 /mm
第 1 层	220	—	—
第 2 层	190	—	30
第 3 层	155	—	35
第 4 层	—	120	35

注: 1) 高差表示意义为本层刀具与相邻高层刀具高度差值。

图 5 刀盘刀具梯次化布置情况图

1.4.2 刀盘模型

本文将在 Solidworks 中建立实体机械模型, 导入 PFC3D 进行数值计算, 如下图 6 所示, 为了减少计算时间, 在保证计算精度的前提下简化原刀盘中的短辐条。刀盘计算模型直径为 6 m, 刀盘上刀具的种类、尺寸以及布设方式与原刀盘一致。

图 6 刀盘实体模型

1.5 模拟计算过程

如图 7 所示, 在进行数值计算前在刀盘模型后部添加一个圆柱面墙体用以模拟盾壳, 为刀盘开挖通过后的地层提供刚性支护; 在刀盘模型后部距离辐条背面 0.5 m 处添加一个圆盘形墙体用来模拟土仓隔板。

图 7 计算模型

如图 8 所示, 刀盘模型垂直于 y 轴放置与砂卵石模型的正面平行, 将刀盘上中心鱼尾刀的顶端中心置于坐标原点, 刀盘的中心刀头刚好接触砂卵石地层模型。考虑到实验室工作站的计算能力, 模型尺寸确定为: 刀盘中心埋深 9 m(1.5 倍洞径), 刀盘侧面距离同侧的砂卵石地层模型边界 3 m(0.5 倍洞径), 刀盘下边缘距离砂卵石地层模型底面 1 m。

图 8 数值计算模型尺寸

在模拟开始时, 首先执行支护函数稳定开挖面然后计算至平衡, 此时可以让刀盘旋转切削砂卵石地层。先指定一个较小的恒定掘进速度让刀盘慢慢接触砂卵石, 然后为刀盘指定 2 r/min 的绕中心轴旋转速度让中心刀开始搅动砂卵石地层, 随着刀盘向前移动, 撕裂刀和切削刀依次接触到砂卵石地层参与切削。当刀盘位移达到 0.4 m 时, 刀盘与砂卵石地层已经充分接触, 再利用墙体伺服控制原理, 将刀盘受到的沿 y 轴方向接触力的合力保持在 1 800 kN 左右, 刀盘在相对稳定的推力作用下继续向前切削砂卵石地层, 模拟效果如图 9 所示。

图 9 数值模拟效果

为了研究盾构刀盘切削开挖对岩土体的变形影响,分析砂卵石地层盾构隧道开挖引起的地表沉降,本文在砂卵石地层模型的顶面设置了一条垂直于盾构前进方向的水平测线,并在测线上均匀选取了 9 个颗粒作为测点。如图 10 所示,测点 1 位于盾构掘进中轴线上,其余测点以测点 1 为中心对称分布,与测点 1 距离分别为 1、3、4、6m。记录测点的竖向位移可以得到地表变形沿横向的分布和地表变形的发展过程。

图 10 竖向位移监测点的布置

2 刀盘开口率对盾构掘进的影响

2.1 模拟工况的设定

为分析刀盘开口率大小对盾构掘进的影响,设定两种刀盘工况,如图 11 所示,本文分别针对大开口率辐条式刀盘和小开口率辐板式刀盘在砂卵石地层中掘进效率进行对比分析。文中考虑的大开口率辐条式刀盘,主要由刀盘“切削刀+撕裂刀+中心刀”组成,开口率约 60%。小开口率辐板式刀盘在开口处添加扇形辐板以减小刀盘开口率,刀盘的开口率约为 35%。刀盘开口最窄处的宽度约为卵石最大粒径的 5 倍。

图 11 两种开口率刀盘模型

2.2 计算结果分析

取刀盘的转速为 2.0 r/min, 盾构推力为 18 000 kN, 研究不同开口率条件下刀盘扭矩随时间的变化情况,如图 12 所示,在砂卵石地层掘进过程中,小开口率刀盘在刀盘碰到岩石的瞬间扭矩会发生突增。随着与颗粒接触范围的增大,两种开口率的刀盘扭矩保持稳定增长。

图 12 刀盘扭矩对比分析

盾构推进过程中 9 个测点的沉降曲线如图 13 所示,相对于大开口率刀盘,小开口率刀盘切削引起的地层损失率较低,地表沉降较少。测点 1 处的最终沉降仅为 5.79 mm,而大开口率刀盘的测点 1 地表沉降达到了 23.6 mm。在刀盘距离测点 0.4 cm 处,小开口率刀盘开挖地层损失率为 0.13%,而大开口率刀盘引起的地层损失率为 0.15%。距离刀盘越远,刀盘开口率对盾构施工引起的地表变形的影响越小,测点 9 距离隧道中心 6 m,此处刀盘开口率的影响差异仅为 5.19 mm。由此可知,采用小开口率刀盘不仅能够减小影响范围,还能减少由于开挖带来的地层损失率。

图 13 地表测点竖向位移时程曲线

由图 14 可以看出,随着掘进参数(转速和推力)的增加,小开口率辐板式刀盘需要克服的扭矩会显著增大,大开口率辐条式刀盘的扭矩变化较小。考虑到扭矩过大会加剧刀具磨损极大缩短刀具使用寿命,因此在实际工程中若选用开口率较低的刀盘结构时应以低转速低推力的方式掘进,并且需要考虑配备较大的额定扭矩和装机功率。

图 14 刀盘扭矩对比图

虽然小开口率刀盘能够有效地减小地层损失,但是在砂卵石地层中,小开口率辐板式刀盘的掘进速度仅为大开口率辐条式刀盘的 30%~50%。从图 15 中可以看出,大开口率辐条式刀盘随着掘进参数(转速和推力)增大,刀盘的掘进速度提升了 1.5 倍。由于小开口率刀盘不能及时疏排渣土,排渣效率受到影响,因此提高掘进参数(转速和推力)对掘进速度的提升十分有限。在实际工程中,面对类似的砂卵石地层,大开口率刀盘更能够满足工程中高效快速掘进的要求。

图 15 刀盘掘进速度对比

刀盘旋转切削会剧烈扰动周围的岩土体,当模型中的颗粒与颗粒之间的拉应力或剪应力达到了黏结抗拉或抗剪极限时将导致接触黏结断裂失效。如图 16 所示,黏结断裂的数量越多分布越密集表明扰动越强烈,岩土体发生变形和破坏的程度越严重。经计算结果得到大开口率辐条式刀盘造成的裂隙数量为 18 345 条,小开口率辐板式刀盘造成的裂隙数量为 14 876 条。大开口率辐条式刀盘对周围扰动剧烈,黏结断裂区域大,影响范围约为 1.5 m。小开口率刀盘影响范围小,为 1.0~1.2 m,更适宜在对周围环境变形要求较高的工程中使用,因此,实际工程中,刀盘选型应优先考虑开口率较低的刀盘。

图 16 刀盘切削引起的黏结断裂分布

3 刀具配置对盾构掘进的影响

3.1 刀具组合高差对盾构掘进过程的影响分析

盾构掘进过程中, 190 mm 先行刀对砂卵石地层进行犁松, 然后 155 mm 的先行刀对扰动土体进行二次破碎后, 切削刀对全断面松动土体进行切削。先行刀能够显著改善开挖面土体的流动性, 一方面降低了切削刀的切削扭矩, 刀具之间的受力

分配更合理; 另一方面避免切削刀受到过大的冲击荷载而损坏, 有效降低了切削刀的磨损。刀具布置的高差不仅对刀盘扭矩和盾构推进有影响, 也会影响掌子面的土体的破碎程度, 直接影响掘进效率。

本文为研究先行刀与切削刀的组合高差对掘进效率的影响, 分别将刀盘上的 57 把先行刀的高度设置为 155 mm、190 mm、225 mm, 其相应的组合高差为 35 mm、70 mm、105 mm, 如图 17 所示。

图 17 不同刀具高差的刀盘模型

如图 18 所示, 三种组合高差在提高掘进参数(推力和转速)后, 其要克服的扭矩也都相应增加。其中组合高差 35 mm 时的刀盘扭矩最大, 原因是在砂卵石地层中掘进, 刀具组合高度差太小, 导致先行刀未能在切削刀刮渣前有效地松动掌子面或将掌子面分块, 主切削刀直接接触并切削相互紧密咬合的卵石, 受力急剧增大, 成为刀盘主要的破岩刀具, 先行刀的先行量过小导致刀具几乎未能发挥破岩作用, 此时的切削机理与仅配备切刀开挖地层时的情况更类似。

图 18 刀盘扭矩对比

如图 19 所示, 刀具组合高差为 35 mm 的刀盘掘进速度较慢, 以 2.0 r/min 转速和 1 800 kN 推力掘进时, 掘进速度比高差 70 mm、105 mm 的刀盘减慢约 29.7%。刀具组合高差为 70 mm 和 105 mm 时刀盘掘进速度基本相当, 表明在某个范围外继续扩

大组合高差并不能提高刀盘的掘进效率, 反而会使先行刀因受力面积增大而受到更大的切削阻力与弯矩, 刀盘转动切削所需克服的扭矩也会随之增大, 刀具磨损也会因此加快。

图 19 刀盘掘进速度对比

在实际的刀盘选型过程中, 增加刀具之间的组合高差使先行刀在使用过程中能够接受更大的磨损量, 可以延长刀具的使用寿命。

3.2 先行刀刀间距对盾构掘进过程的影响分析

如图 20 所示, 为研究先行刀刀间距对盾构刀盘地层适应性的影响, 通过改变先行刀的刀间距进行对比分析。将先行刀的刀间距分为稀疏、中密、密集三类, 分别对应的刀间距为 500 mm、300 mm、150 mm, 刀间距越小, 刀盘上布设的刀具越多。

图 20 刀盘模型

如图 21 所示,刀间距由 300 mm 减小到 150 mm 时,刀盘正面的先行刀数量比原来增加了一倍。当先行刀刀间距由 300 mm 增大到 500 mm 时,刀盘正面的先行刀数量比原来减少了约 1/3,切削时刀盘扭矩有较大增幅。由于先行刀刀具数量不够,刀具在切削过程中所受的负荷增大。先行刀刀间距的大小决定了辐条上刀具的装配数量和布设密度,一定程度上会影响刀盘扭矩的大小。

图 21 刀盘扭矩对比图

如图 22 所示,先行刀刀间距由 300 mm 减小至 150 mm,刀盘的掘进速度略有提高,但不明显。将刀间距由 300 mm 扩大至 500 mm 后,刀盘的掘进速度明显放慢,当以 2.0 r/min 的转速和 1 800 kN 的推力掘进时,掘进速度最多减小约 20%。分析认为刀盘装配的先行刀数量过少刀间距增大后,刀盘扭矩变大,掘进效率降低,影响了先行刀犁松效率,切削刀成为切削破岩的主要刀具,切削机理完全改变。同时,先行刀装配较少会增加每把刀具的切削负担,结果导致先行刀磨损加快,刀具使用寿命缩短。将先行刀刀间距减小到 150 mm 对刀盘的掘进速度影响不大,这表明在原刀盘基础上减小刀间距装配更多的先

行刀对提升刀盘的切削效率作用有限,在实际工程中可以减少单把刀具的磨损,延长先行刀的有效切削距离。

图 22 刀盘掘进速度对比

4 工程验证

4.1 刀盘扭矩变化情况

由图 23 可知,盾构推进过程中,刀盘扭矩总体呈现出逐渐增大的趋势,与数值模拟的结果相符,这也证明了数值模拟结果的正确性。

图 23 刀盘实际扭矩变化图

4.2 盾构掘进模式选择

为了实现砂卵石地层长距离高效掘进, 基于本工程盾构刀具大高差设计理念, 采取高贯入度、低转速的掘进模式(以下简称高贯低转), 不采用高转速、低贯入度的掘进模式(以下简称高转低贯)。

如图 24 所示, 相对于高转低贯掘进模式, 高贯低转掘进模式下, 盾构掘进相同的距离, 刀具旋转的圈数减少, 切削长度较短, 从而磨损较轻。

图 24 不同掘进模式对比

以“磁~1#”盾构区间高贯低转掘进模式与某区间高转低贯掘进模式作对比, 以探究砂卵石地层不同掘进模式的优劣。始发掘进时, 刀具未磨损, 保持盾构掘进速度为 60 mm/min。如图 25 所示, 选取盾构掘进初始阶段 0~150 环刀盘扭矩进行对比, 可以看出高贯低转掘进模式下刀盘扭矩明显低于高转低贯掘进模式, 且变化幅度较小。

图 25 刀盘扭矩对比

随着盾构掘进环数的增加, 刀具磨损加大, 因此会降低对岩体的破坏能力, 导致盾构掘进速度下降, 刀盘扭矩增加。如图 26 和 27 所示, 选取盾构长距离掘进阶段 600~750 环盾构掘进速度和刀盘扭矩进行对比分析。高贯低转掘进模式下, 盾构掘进速度仍保持在较高水平, 约为 50 mm/min, 远高于高转低贯掘进模式; 同时, 高贯低转掘进模式下刀盘扭矩远低于高转低贯掘进模式。

综合以上分析, 砂卵石地层采用高贯低转掘进模式, 不仅在短距离掘进时优于高转低贯掘进模式, 且在掘进距离较长时仍能以较高掘进速度

和较小刀盘扭矩运行, 更有利于砂卵石地层长距离高效掘进。

图 26 盾构掘进速度对比

图 27 刀盘扭矩对比

5 结论

(1) 盾构在砂卵石地层中掘进时, 小开口率辐板式刀盘所需克服的扭矩要明显高于大开口率辐条式刀盘, 且其平均掘进速度远远低于大开口率辐条式刀盘; 同时小开口率刀盘的扰动范围及对地层变形影响也更小, 适用于对周围环境变形要求较高的工程, 而大开口率刀盘更能满足工程中高效掘进的要求。

(2) 先行刀与切削刀的组合高差设定为 35 mm 时刀盘扭矩偏高且开挖效率较低; 高差设定为 70 mm 时刀盘掘进效率显著提高, 组合高差的继续增加对掘进速率提升不明显, 刀盘扭矩略有增加; 刀具组合高差越大, 刀盘切削时上方地表变形和周围地层的扰动越大; 实际工程中, 建议适当增大先行刀与切刀的组高差最好大于 35 mm。

(3) 先行刀刀间距设定为 500 mm 时刀盘扭矩偏高且掘进速度较低; 刀间距缩小至 300 mm 时刀盘掘进速度显著提高且扭矩较小, 刀间距继续缩小

至 150 mm 时, 盾构开挖效率变化不大。改变先行刀刀间距对地表变形和扰动范围影响不大。因此, 盾构在砂卵石地层中掘进时, 先行刀刀间距应适当缩小, 尽量小于 500 mm。

(4) 工程实践表明, 高贯低转的掘进模式明显优于高转低贯掘进模式, 可实现砂卵石地层盾构长距离高效掘进。

参 考 文 献

- [1] 蒲毅. 盾构掘进机刀具运动特性及布局研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
PU Yi. Study on cutting tool motion characteristics and layout of shield roadheader [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [2] 尚艳亮. 无水砂层地铁盾构隧道施工环境影响机理及监测预警研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
SHANG Yanliang. Study on environmental impact mechanism and monitoring and early warning of metro shield tunnel construction in anhydrous sand layer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [3] 郭伟, 宋立玮, 朱殿华, 等. 基于能量原理的 TBM 刀盘掘进参数与刀间距匹配特性分析[J]. 天津大学学报, 2017, 50(2): 128-134.
GUO Wei, SONG Liwei, ZHU Dianhua, et al. Analysis of matching characteristics of TBM cutter head tunneling parameters and tool spacing based on energy principle[J]. Journal of Tianjin University, 2017 50 (2): 128-134.
- [4] 李向红, 傅德明. 土压平衡模型盾构掘进试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006(9): 1101-1105.
LI Xianghong, FU Deming. Experimental study on Shield tunneling with earth pressure balance model[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006 (9): 1101-1105.
- [5] 竺维彬. 复合地层盾构工程的技术创新与进展[J]. 城市轨道交通, 2017(3): 15-18.
ZHU Weibin. Technical innovation and progress of composite stratum shield engineering[J]. Urban Rail Transit, 2017 (03): 15-18
- [6] 杨洪杰, 傅德明, 葛修润. 盾构周围土压力的试验研究与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(8): 1652-1657.
YANG Hongjie, FU Deming, GE Xiurun. Experimental study and numerical simulation of earth pressure around shield[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(8): 1652-1657.
- [7] 宋克志, 李传明, 袁大军, 等. 盾构隧道施工盘形滚刀推力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3875-3881.
SONG Kezhi, LI Chuanming, YUAN Dajun, et al. Study on thrust distribution law of disc hob in shield tunnel construction[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008 (S2): 3875-3881.
- [8] 刘晓毅. 复合地层中盾构机滚刀磨损原因分析及改进[J]. 隧道建设, 2006(S2): 77-80.
LIU Xiaoyi. Cause analysis and improvement of hob wear of shield machine in composite stratum[J]. Tunnel Construction, 2006 (S2): 77-80.
- [9] 何其平. 土压平衡盾构刀盘结构探讨[J]. 工程机械. 2003(11): 10-16.
HE Qiping. Discussion on cutter head structure of earth pressure balance shield[J]. Construction Machinery, 2003 (11): 10-16
- [10] 李建斌, 何於琰. 盾构掘进机刀盘研制实例[J]. 隧道建设, 2005(6): 53-56.
LI Jianbin, HE Yulian. An example of development of cutter head of shield tunneling machine[J]. Tunnel Construction, 2005(6): 53-56.
- [11] LIU J, REN J, GUO W. Thrust and torque characteristics based on a new cutter-head load model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4): 801-809.
- [12] GENG Qi, WEI Zhengying, HE Fei, et al. Comparison of the mechanical performance between two-stage and flat-face cutter head for the rock tunnel boring machine (TBM)[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(5): 2047-2058.
- [13] HUO J, WU H, YANG J, et al. Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(8): 3043-3058.
- [14] XIA Y, TANG L, JI Z, et al. Optimal design of structural parameters for shield cutterhead based on fuzzy mathematics and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(3): 937-945.

作者简介: 江华(通信作者), 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要从事岩土工程、隧道工程、地下工程及盾构工程理论与技术等方面的教学和研究工作。
E-mail: jianghua@cumtb.edu.cn