

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.02.059

# 大粒径富水卵石、漂石土地层大直径土压盾构掘进关键技术

李新伟

(中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:**为解决大直径土压盾构在大粒径富水卵石、漂石土地层条件下刀盘刀具磨损严重、刀盘被卡、地表塌陷、渣土喷涌等工程难题,结合都四山地轨道交通项目DSZQ-1标永丰站—蒲阳站区间盾构隧道工程的施工情况,从盾构选型设计、超前地质预警处理、掘进参数选择、渣土改良、螺机防喷涌等方面进行研究,总结出都江堰地区大粒径富水卵石、漂石土地层大直径土压盾构掘进关键技术,为后续工程在此类地层施工提供了借鉴依据。

**关键词:**大直径土压盾构;大粒径卵石;漂石土;地表塌陷;渣土改良

中图分类号:U455

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)02-0271-05

## 0 引言

相比一般软土地层盾构施工,大粒径富水卵石、漂石土地层因力学不稳定、易扰动坍塌、抗压强度高、渣土和易性及流动性差等因素,导致盾构在其中掘进的风险更高、难度更大。目前部分学者仅对成都地区砂卵石地层中已建地铁工程进行了相关研究。桂金翔等<sup>[1]</sup>依托成都地铁4号线工程,研究了盾构区间砂卵石地层的性质和大粒径漂石分布情况。仇文革等<sup>[2]</sup>以成都地铁5号线下穿宝成铁路为研究背景,采用工法比较、数值模拟、现场监测反馈等方法,阐明了地表沉降规律,提出了地表沉降的控制措施。韦生达等<sup>[3]</sup>以成都地铁17号线某盾构区间隧道为例,采用灰色理论对总推力、刀盘扭矩、同步注浆压力等9项控制参数的实测数据进行分析,总结出富水砂卵石地层盾构施工参数控制与地面沉降之间的关系。

都江堰地区大粒径富水卵石、漂石土地层具有卵石、漂石占比更高、粒径更大的特点,且未有盾构法施工的先例,施工中无经验可供参考。因此本文依托都江堰至四姑娘山地轨道交通项目(简称“都四项目”)DSZQ-1标永丰站—蒲阳站区间盾构隧道工程,针对施工中掌子面不平衡、刀具磨损严重、刀盘卡顿、螺机喷涌、地层超挖、地表沉陷等系列问题进

行深入研究,总结有效的应对措施,为大粒径富水卵石、漂石土地层盾构法隧道施工提供指导依据。

## 1 工程概况

### 1.1 设计概况

都四项目永丰站—蒲阳站区间线路沿都江堰市永安大道布设,如图1所示。区间隧道采用直径9 730 mm的土压平衡盾构施工。区间里程DOK3+820.5—DOK7+081.5,隧道全长3 261 m,区间最小曲线半径350 m,最大坡度17.753‰,纵断面为V字坡,区间最大埋深26.56 m。



图1 永蒲区间线路平面示意图

### 1.2 工程水文地质条件

该区间地层如图2所示,主要为<3-12-2>卵石土(漂石约占20%~30%, $\Phi$ 200~800 mm)、<3-12-3>卵石土(漂石约占20%~30%, $\Phi$ 200~800 mm)、<3-13-2>漂石土(漂石约占60%~80%,直径约200~1 200 mm)、<8-8-0>卵石土(中密)(漂石约占10%~20%,直径约200~800 mm)。其中,漂石最大粒径超过1 200 mm,分选性差,磨圆度良好,且具有强度高

收稿日期:2023-02-21

作者简介:李新伟(1979—),男,博士,高级工程师,从事隧道及地下工程施工工作。

特点(抗压强度不小于 107 MPa),如图 3 所示。石质成分主要为花岗岩、闪长岩、辉绿岩及少量砂岩,如图 4 所示。

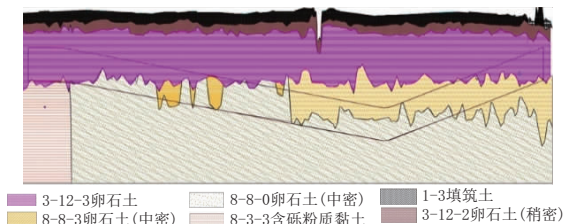


图2 永蒲区间地质纵断面



图3 漂石典型形状尺寸



图4 永蒲区间地层原状土

区间地下水主要有两种类型:一是赋存于黏土层之上的上层滞水,水量小;二是第四系松散岩类孔隙水,地下水位于地表下 5~7 m,主要存在于 <3-12-3> 卵石土地层中。

## 2 工程重难点分析

(1)掌子面较难平衡。盾构在富水大粒径卵石、漂石土地层中掘进时,由于掌子面水土压力大,开挖仓内渣土搅拌不匀且流动性差,很难形成与掌子面地层压力相平衡的水土压力,从而难以控制地层稳定性。

(2)刀盘易卡死。当地层中卵石、漂石粒径较大时,刀盘前方石块难以从刀盘开口处进入土仓,且掌子面地层强度不足以提供破岩反力,很难将大粒径卵石、漂石破碎。大粒径卵石、漂石在刀盘旋转切削作用下极易造成刀盘卡死。

(3)刀具异常磨损严重。一般大粒径卵石、漂石中石英含量较高,且破碎难度较大,在盾构掘进过程中,大粒径卵石、漂石对刀具磨损、撞击严重,导致刀具异常损坏风险增加。

(4)螺旋输送机易喷涌。该类地层富水段水头压力高,渣土改良效果差,难以形成土塞效应,同时大粒径卵石、漂石土渣土排除困难,极易出现卡闸门现象,造成螺旋输送机喷涌问题。

(5)地层超挖、地表沉降较难控制。盾构在大粒径卵石、漂石土地层掘进时极易形成空洞,螺旋输送机易被大粒径石块卡机,导致出土不畅。若增大螺旋输送机转速,将导致地层超挖及掌子面失稳。

(6)高富水地层突泥涌水。大粒径卵石、漂石土地层为强透水层,大直径盾构刀盘顶底面水土压力差较大,且隧道洞身多位于卵石土及含砾粉质黏土复合界面,极易发生突泥涌水。

## 3 盾构选型设计

根据工程地质条件,都四项目永蒲区间土压平衡盾构机采用辽宁三三盾构,遵循“以排为主,破碎为辅,排破结合”的设计理念。

盾构刀盘采用辐条面板式,开口率 38%,如图 5 所示。刀盘周边焊有耐磨条,外表面全贴合金耐磨块,设置 6 个磨损检测点+2 条带状磨损检测,充分保证刀盘在卵石层掘进时的耐磨性能。刀盘配置中心四联滚刀 1 套,19 寸中心双联滚刀 4 套,正面 19 寸单刀滚刀 48 把。滚刀的刀座可实现滚刀与撕裂刀互换,为复合式刀盘。增加滚刀韧宽,同轨迹边滚刀增加为 2 把,有效提高刀具使用寿命,减少换刀次数,增加盾构掘进距离。刀盘最大推力 94 825 kN,额定扭矩为 25 626 kN·m,脱困扭矩为 30 751 kN·m。泡沫注入口 10 个,膨润土注入口 2 个(与泡沫口共用)。



图5 盾构刀盘



考虑地层中大粒径卵石、漂石较多,为便于盾构机排土,选用带式螺旋输送机<sup>[4]</sup>(见图 6)。该设备配置 3 台低速大扭矩的液压马达,且由 4 台变量泵驱动,在慢速推进时只启动 2 台变量泵,达到慢速掘进的要求,可以满足 5 mm/min 左右推进速度。筒体内径直径 1 200 mm,叶片节距 900 mm,即排石最大尺寸为 1 200 mm×900 mm(见图 7),但带式螺旋输送机较轴式螺旋输送机止水性差,因此出闸口采用双闸门控制,延长渣土行走路径。螺机预留膨润土注入口。皮带采用小角度设计,当发生喷涌时可将稀渣快速带走,可有效控制渣土喷涌问题。



图 6 带式螺旋机

通过 1~59 环试验掘进,发现中心区域 30 个左右轨迹刀具出现异常磨损,掘进过程中可能是大粒径漂石无法正常进入土仓造成,想实现大粒径漂石顺利进入土仓,需要继续增加刀盘开口。因此,割除了刀盘辐条与面板之间的限径格栅,使渣土顺利进入土仓,减少中心区域的堆积。在面板增加主动搅拌棒,搅拌棒伸出长度 650 mm,搅拌螺机口上部渣土,使渣土顺利进入螺机,增加螺机上部渣土的流动性,仓内增加 2 路牛腿冲刷。取消辐条之间中心部分刮刀,增大刀盘开口。

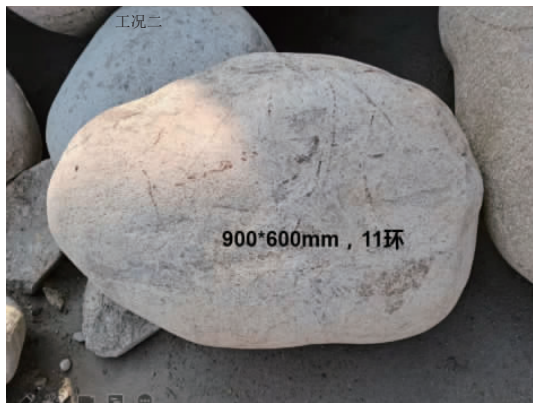


图 7 带式螺旋排出石块图

#### 4 超前地质预警技术

大粒径卵石、漂石直接影响盾构的安全掘进,掌握掘进前方卵石、漂石的分布及直径大小可以让管

理人员提前预警,采取控制掘进参数的措施,确保盾构掘进安全。采用瑞雷面波(见图 8)超前探测大粒径孤石、漂石,即在地面施一适当的竖向激振力(可用大锤敲击地面或吊高重物自由下落),地下介质中可产生纵波、横波和瑞雷波,可用波动方程式(1)来描述它们的运动。

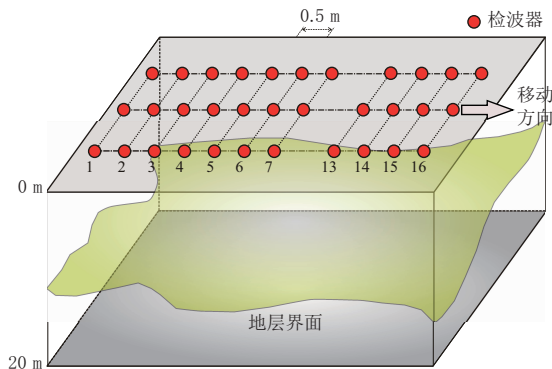


图 8 拖曳阵列式 3D 瑞雷面波探测测线布置示意图

$$\left[2 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right] - 4 \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (1)$$

式中: $V_R$ 、 $V_S$ 、 $V_P$ 分别为面波、纵波和横波的速度。对于平面波可得式(1)的一个解为:

$$\begin{aligned} \phi(X, Y, Z, t) &= A e^{-KV_1 z} e^{ik(x-V_1 t)} \\ \varphi(X, Y, Z, t) &= B e^{-KV_2 z} e^{ik(x-V_2 t)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $V_1 = [1 - (V_r/V_P)]$ ;  $V_2 = [1 - (V_r/V_S)]$ ;  $K$ 为波数; $V_r$ 为瑞雷波速; $A$ 、 $B$ 为常数。

依照瑞雷面波频谱图(见图 9),并绘制成探测结果三维视图,如图 10 所示。

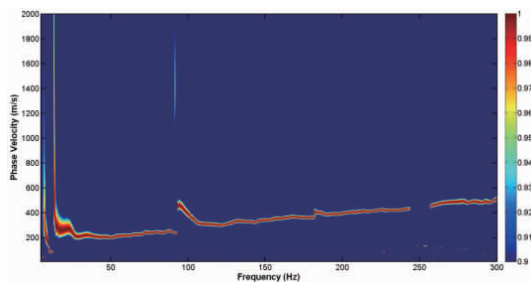


图 9 频谱图

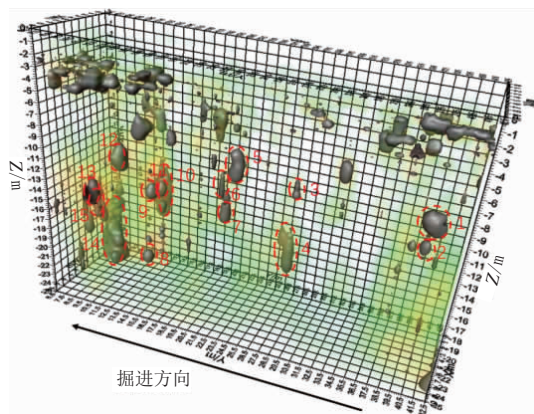


图 10 相对速度为 2 200 m/s 的三维显示图

对隧道范围内的大粒径孤石、漂石采用瑞雷面波超前探测,根据探测结果对范围内探明的大粒径石块分布提前掌握,采取有效措施将有利于盾构的安全快速掘进。

## 5 大粒径卵石、漂石土地层盾构掘进关键技术

### 5.1 盾构掘进参数控制

盾构式掘进过程中1~59环每环实际平均出渣量较理论值多20 m<sup>3</sup>左右。针对盾构通过区域进行垂直钻孔验证,发现道路水稳层以下出现不同程度的空洞或地层松散问题。该地层力学稳定性极差,空洞效应传至地表速度较快。

根据1~59环与60~147环掘进参数对比分析,适当提高刀盘转速,取1.2~1.4 r/min,减小贯入度及刀盘扭矩,并且保证掘进速度不小于60 mm/min,正常情况下总推力控制为额定推力的30%~40%。刀盘扭矩单次波动不大于控制值的10%,最大扭矩不超过额定扭矩的80%。可以降低刀盘对地层的扰动,减少地层空洞反应时间。针对掌子面压力平衡问题,盾构掘进过程中通过尝试对比微超压、保压、欠压3种掘进模式的优劣,最终选择欠压20%的掘进模式。这样在保证快速掘进、出渣量可控的前提下,能有效控制地表沉降。

### 5.2 同步注浆参数控制

通过盾构机注浆系统及盾尾注浆管,在盾构机向前推进盾尾空隙形成的同时进行,浆液在盾尾空隙形成的瞬间及时起到填充作用,使周围岩体获得及时支撑,有效防止岩体的坍塌,控制地表沉降。

注浆量按式(3)计算:

$$Q = V \times \alpha \quad (3)$$

式中: $V$ 为计算空隙量; $\alpha$ 为注浆率。

根据刀盘开挖外径9.73 m,管片的外径是9.4 m,环宽1.6 m,可计算得到每环理论注浆体积等于7.92 m<sup>3</sup>。按照注浆压密系数、土质系数、施工消耗系数、超挖系数等因素综合考虑,确定该地层注浆率 $\alpha$ 可取1.4~2.0,确保注浆填充饱满,浆液的凝结时间为4~6 h。

### 5.3 渣土改良技术

前1~59环试掘进渣土改良主要有泡沫+膨润土+水、泡沫+低浓度聚合物、泡沫+稠泥+水、泡沫+水4种类型,如图11所示。通过试验对比分析,决定采用泡沫+膨润土+水的改良方式,泡沫原液使用量150~180 L/环,泡沫配比:原液3%,水97%,

压缩空气35%~40%,膨润土8~10 m<sup>3</sup>/环。这样能将渣土成功改良,使渣土顺利排出。



图11 渣土改良试验

### 5.4 二次注浆参数控制

在盾构掘进过程中,利用预留径向注浆孔向盾构机上部注入经筛分的卵石土,注入系统使用盾构机注浆系统。注入卵石土同时可根据实际效果加入添加剂,来超前控制地表沉降,弥补超挖造成的空洞问题(见图12)。在掘进同时加大二次注浆控制滞后沉降问题。



图12 超挖示意图

同时在盾构掘进区间加强地面巡视,根据前59环掘进地表情况,提前将盾构机前方5 m及盾构机对应位置采用硬质围挡围蔽。为防止地面冒浆造成泡沫外泄至路面,对围挡底部500 mm采用水泥砂浆砖砌围蔽四周。盾构机穿越后,在对应地面位置铺设30 mm钢板。盾构掘进过程中,对切口环后3 m左右位置地表钻孔检查是否存在空洞。若存在空洞,暂时不做处理,将检查孔封闭,防止泡沫外泄,影响渣土



改良效果,也不回填,防止回填后造成土仓压力上涨过快,回填渣土流回仓内,造成循环出渣,阻碍掘进。同时对管片脱出盾尾区域钻孔检查是否存在滞后沉降造成的空洞问题。若发现存在空洞,及时使用混凝土回填,松散地层埋设注浆管,使用水泥浆注浆加固。

### 5.5 螺机防喷涌技术

螺旋机出口处设计为双闸门,且两道闸门之间的距离为30 cm,正常出渣时交替开放,可有效防止螺机喷涌。但由于地层中尺寸大于30 cm的卵石、漂石土含量较高,螺旋机出渣时双闸门需同时打开才能顺利排出石块。当石块粒径较大时,甚至出现两道闸门同时被卡的问题,从而造成螺机喷涌,如图13所示。



图13 闸门喷渣

使用优质泡沫对渣土进行改良。改良过程中减少水的使用量,使渣土的含水量尽可能得少。渣土含水量小时,可正常打开双闸顺利出土,不会发生喷涌风险。对无轴螺旋进行改造,将螺旋中心580 mm孔径缩小至260 mm左右,处理长度为两个螺旋节距,并对加焊挡块外部增加耐磨焊。

对皮带及磨损的滚筒全部更换,并对小滚轮支架更换为槽钢加强处理,增加皮带的携渣能力,避免出渣后渣土堆积在闸门口造成的喷涌问题。将滚轮的连接方式改变为经受力后不宜脱落的装置,增加限脱落装置,增加皮带携渣能力。

### 5.6 地表监控量测

沉降监测点在隧道轴线内的设置原则:测量范围需大于30 m,刀盘前不得小于10 m,做到盾体与

盾尾后均10 m。每隔5 m布置一个地表监测点,掘进4环进行一次量测,尽快汇报结果,不得延至6 h以上。预警值规定:累计隆起值需低于10 mm,速率小于3 mm/d;累计沉降值需低于25 mm,速率低于3 mm/d。

## 6 结论与建议

通过对都江堰地区大粒径富水卵石、漂石土地层盾构法隧道施工总结及分析,可以得出以下结论:

(1)采用瑞雷面波法对隧道范围内的大粒径卵石、漂石超前预报,提前掌握盾构掘进区间的大粒径卵石、漂石三维立体分布情况,提前确定盾构换刀位置,避免刀盘刀具长距离掘进过程中异常磨损,有利于盾构的安全快速掘进。

(2)大粒径卵石、漂石的有效破碎问题,是制约盾构掘进效率与地表环境安全的难点。要实现大粒径漂石的破碎,需要刀盘刀具具有足够的反力,建议增加刀盘、刀具的耐磨能力,增加刀具的抗冲击能力,可以适当考虑增加滚刀韧宽或配合使用重型撕裂刀。

(3)富水大粒径卵石、漂石土地层盾构掘进时地层反应很快,需采取更有力的方式来消除时空效应。特别控制出渣量,出渣量的多少直接决定地表的沉降或是否存在空洞。需特别注重空洞质量的回填及松散地层的加固质量。

(4)土压盾构在富水大粒径卵石、漂石土地层中掘进,渣土改良尤为重要,改良效果直接影响盾构出渣,避免螺机喷涌,通过渣土改良试验确定“泡沫剂+膨润土+水”更适用于都江堰地层。

#### 参考文献:

- [1] 桂金祥,李建强,王佳亮.成都地铁4号线二期盾构隧道漂卵石专项勘察分析[J].隧道建设,2017,37(4):476-485.
- [2] 仇文革,万世付,高刚刚,等.砂卵石地层盾构隧道下穿铁路咽喉区地表沉降控制研究[J].现代隧道技术,2021,58(5):37-45.
- [3] 韦生达,刘丹娜,彭鑫,等.基于灰色理论的砂卵石地层盾构施工参数控制对地表沉降影响分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(2):84-94.
- [4] 杨书江,孙谋,洪开荣.富水砂卵石地层盾构施工技术[M].北京:人民交通出版社,2011.