

大漂石高富水地层土压平衡盾构施工控制策略

赵旭伟^{1,2}

(1. 中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都 // 高级工程师)

摘要 对成都地铁 4 号线某区间隧道穿越大漂石高富水地层易出现的“卡”、“磨”、“塌”等典型施工问题进行了系统分析。结合现场测试数据, 建议大漂石地层盾构施工采用动力配置较高的复合式盾构机, 盾构施工过程中每环超挖率控制在 3.3% 左右。

关键词 地铁; 卵漂石高富水地层; 土压平衡盾构; 施工控制

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.019

Control Strategy of EPB Shield Tunnel Construction in Saturated Cobble and Boulder Stratum

ZHAO Xuwei

Abstract Typical construction problems such as ‘stuck’, ‘erosion’, ‘subside’ that easily appear in tunnel of Chengdu Metro Line 4 certain interval passing saturated cobble and boulder stratum are systematically analyzed. Based on field tests data, it is suggested to use the composite shield tunneling machine with high dynamic configuration and high power, and the ratio of over excavation shall be limited to approximately 3.3%.

Key words metro; saturated cobble and boulder stratum; earth pressure balanced (EPB) shield; construction control

Author's address China Railway Shanghai Design & Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

卵漂石是指一种以漂石、卵石、砾石为主, 含有砂土及少量黏性土的松散粗碎屑堆积物。我国冲积层与洪积层地区, 以及江河沿岸广泛分布砂卵石地层和卵漂石地层, 如成都市域全境, 沈阳、北京市域大部, 兰州、广州、武汉、南京、深圳市域局部。

卵漂石地层具有离散性、强透水性、高磨耗性等特点, 盾构施工时易出现掘进失控 (如开挖面失稳、地面塌陷、盾构机“卡死”)、机具磨损失效 (如刀具磨损、螺旋输送机主轴断裂) 等现象, 这将会诱发

重大工程事故。因此, 极有必要开展卵漂石地层盾构施工控制研究^[1]。

成都地铁 4 号线穿越大漂石高富水地层, 施工过程中出现了多起地面塌陷、盾构机卡死等事故。针对此类问题, 文献[2]以成都地铁 1 号线为背景, 从地质、设备选型和施工工艺等方面分析了地层坍塌的原因。文献[3]建立了考虑刀盘切削土体的刀盘扭矩计算方法, 并通过室内试验对计算方法进行了验证。文献[4]在分析影响盾构刀盘扭矩因素的基础上, 提出了考虑渣土改良剂和土舱内外压力差的刀盘扭矩计算方法。文献[5]考虑进出土平衡关系, 建立了螺旋输送机转速的计算方法来控制地表变形。文献[6]对成都砂卵石地层不同边界条件下的地表沉降规律做了系统研究。

成都地铁 4 号线穿越地层相较于成都地铁 1 号线漂石含量更高、粒径更大, 室内模型试验难以模拟原状土层的性质^[7], 因此, 大漂石地层盾构施工控制有待进一步研究。本文以成都地铁 4 号线某区间为试验段, 对土压平衡盾构施工过程中出现的典型问题进行了研究, 结合现场试验提出大漂石地层盾构施工控制策略, 以期对类似地层盾构施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

成都地铁 4 号线主要穿越全新统冲积层 Q_4 和上更新统 Q_3 。第四系全新统 $Q_{4(2-9)}$ 和上更新统 $Q_{3(3-8)}$ 卵石土中水量较丰富, 主要为具微承压性的孔隙潜水。全新统冲积层 Q_4 主要由灰色砂及砂砾卵石构成, 上更新统 Q_3 由卵石土夹粉细砂构成, 且局部地段漂石富集。试验段地下水主要为孔隙潜水, 赋存于砂、卵石土中, 地层渗透系数大, 含水量丰富, 含水层总厚度大于 30 m, 其补给源主要为大气降水, 区间水位埋深为 5.6~8.0 m。试验段主要

穿越〈2-9-2〉和〈3-8-3〉层卵石土。

根据试验段漂石强度统计结果,漂石天然密度为 2.7 g/cm^3 ;漂石天然抗压强度为 $40 \sim 200 \text{ MPa}$,个别达到 299 MPa 。由于漂石单体抗压强度高、分布离散、破碎难度大,因此施工过程中易出现刀盘“卡死”、刀具磨损严重或滚刀崩裂等现象。根据地勘报告,卵石漂石地层内摩擦角较大,达到 $35^\circ \sim 40^\circ$,且渗透性较强。由于卵石漂石内摩擦角大且缺少细颗粒,在富水条件下渣土流动性差,改良难度大。试验段地层颗粒级配曲线呈斜 L 型分布,卵石漂石含量为 $70\% \sim 90\%$,其余为圆砾、砂充填;颗粒级配曲线不均匀系数 $C_u = 152.4$,曲率系数 $C_c = 30.3$;整个土层细颗粒含量较少,土层级配不良,渣土改良难度大。图 1 为土压平衡盾构推进过程中开仓取出的大漂石。



图 1 试验段大粒径漂石

1.2 漂石分布特征

为了保证施工安全及施工效率,施工前沿线路纵向布置了 8 个探坑,以详细了解线路沿线地质情况。图 2 为试验段探坑典型断面图。

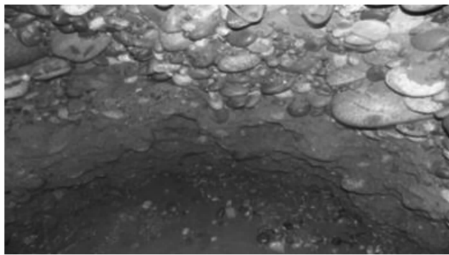


图 2 试验段探坑典型断面图

1.2.1 隧道穿越段沿线路走向漂石分布特征

隧道埋深主要集中在 $10 \sim 20 \text{ m}$ 范围内。结合现场勘测资料,采用漂石和其他土颗粒体积之比描述漂石的分布特征。从整体上来看,由西向东漂石含量具有越来越低的特征。

1.2.2 隧道穿越段沿线路走向最大粒径漂石分布特征

根据现场勘察揭示,最大漂石粒径沿线路纵向

呈波浪形变化趋势,漂石分布具有不均匀性、随机性的特性,漂石粒径大多为 $35 \sim 40 \text{ cm}$,最大漂石粒径达 110 cm ,这对盾构选型及施工安全提出了诸多挑战。

1.2.3 隧道穿越段沿线路深度方向漂石分布特征

漂石主要集中在地面下 $10 \sim 20 \text{ m}$ 。在隧道穿越区段,漂石粒径大多为 $30 \sim 40 \text{ cm}$,占总量的 $70\% \sim 90\%$;粒径大于 40 cm 的漂石较少,占总量的 $3\% \sim 7\%$ 。这无疑增加了施工难度。

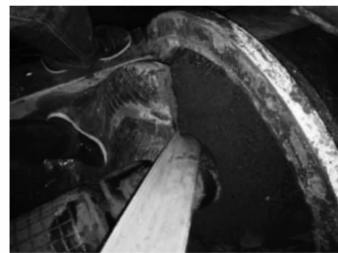
2 大漂石高富水地层盾构施工典型问题

2.1 漂石粒径大、强度高、含量高是施工过程易卡机的直接原因

试验段盾构穿越地层卵石漂石含量一般为 $70\% \sim 90\%$,漂石粒径主要集中在 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 范围内,最大粒径达 110 cm ;漂石平均抗压强度为 180 MPa ,个别漂石抗压强度达到 299 MPa 。这种大粒径、高强度漂石卡在刀盘开口处不能顺利进入土舱,且随着刀盘转动而不能被破碎,盾构掘进过程中容易造成刀盘扭矩加大,甚至导致刀盘无法转动,从而出现卡机故障(见图 3 a)),更甚者由于大漂石不能及时排除而造成螺旋输送机主轴断裂(见图 3 b));盾构施工中由于停机时间长,在富水环境下松散的土体颗粒变得密实,会使刀盘扭矩进一步加大造成盾构“卡死”;另外,渣土改良失效,刀盘转动困难也是刀盘“卡死”故障的原因之一。



a) 盾构刀盘“卡死”



b) 螺旋输送机主轴断裂

图 3 土压平衡盾构故障

2.2 漂石强度高及渣土改良效果差是刀具磨损严重的主要诱因

图 4 为盾构施工过程中更换下的刀具。由于漂石的抗压强度较高、粒径较大且细颗粒含量较少,大漂石区段渣土改良一直处于尝试阶段,渣土改良效果较差,刀具磨损严重。图 5 为盾构施工现场排出的渣土。



图 4 盾构施工过程中更换下的刀具

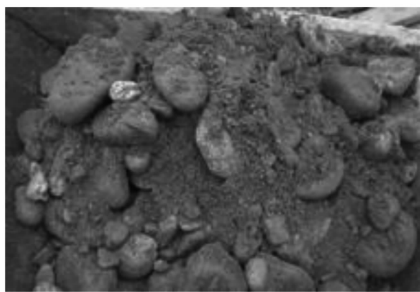


图 5 盾构施工现场排出的渣土

2.3 施工过程易超挖是造成地面塌陷的直接因素

超挖量 ΔV 是盾构掘进过程中每环实际出土量 V_r 与理论出土量 V_{th} 的差值。 V_{th} 计算时考虑刀盘转动导致土体颗粒松散的松散系数。则有:

$$\Delta V = V_r - V_{th} \quad (1)$$

$$V_{th} = \eta \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot L \quad (2)$$

式中:

D_1 ——隧道开挖直径, m;

D_2 ——隧道设计直径, m;

η ——土体颗粒的松散系数, 卵石土取 1.2;

L ——管片宽度, 取 1.5 m。

结合现场施工统计了试验段左、右线 640 环的出土情况。结果显示, 卵漂石地层盾构施工超挖量较大, 左线每环最大超挖量为 49 m^3 , 右线每环最大超挖量高达 80 m^3 , 证明卵漂石地层盾构掘进过程中出土量控制较为困难。由于施工控制难度较大, 施工过程中地面多次发生较大变形, 甚至塌陷, 通

常采用地面补填混凝土和砂的办法解决, 局部地段补填体积高达几百立方。这不仅严重影响了施工文明, 且增加了施工工期与成本。图 6 为成都地铁某区段盾构施工过程中地面坍塌的典型情况。



图 6 成都地铁某区段盾构施工引起的地面坍塌

另外, 卡机脱困清舱导致渣土涌入, 渣土中的大漂石因不能被破碎而进入土舱, 并随着盾构推进在刀盘前方转动。其中漂石含量分布的差异性和随机性也会导致盾构施工参数控制困难, 进而超挖造成出土过量, 并引起地面塌陷。

从施工环境看, 虽然卵漂石地层中土体颗粒之间的咬合作用具有成拱能力, 但富水地层受扰动后细颗粒被带走, 颗粒胶结作用减弱, 在刀盘切削扰动后, 土拱稳定性减弱, 也会造成地面较大滞后变形。

3 大漂石高富水地层盾构施工控制策略

要解决大漂石高富水地层盾构施工过程中面临的“卡”、“磨”、“塌”等问题, 关键要从施工机械和施工参数两方面入手进行控制。合理选择施工机械可以从源头上有效控制施工过程中刀盘易卡、刀具易磨的问题, 合理选择施工参数可以有效控制施工过程中地面易塌陷的问题。

3.1 盾构机选型

试验段左线采用海瑞克盾构机, 刀盘开口率为 36%; 右线采用辽宁三三盾构机, 刀盘开口率为 34%。这两种盾构机均为复合式刀盘, 螺旋输送机直径和最大排渣粒径基本相同。最大的区别主要体现在盾构机的动力配置上, 海瑞克盾构机的额定扭矩为 6 228 kNm, 脱困扭矩为 7 447 kNm; 辽宁三三盾构机的额定扭矩为 6 850 kNm, 脱困扭矩为 8 320 kNm。

从现场施工情况来看, 初步施工阶段右线盾构卡机次数和超挖量相较于左线要少。图 7 为施工稳定后第 400 环至第 600 环左、右线超挖统计结果。

由图7可知,右线超挖量明显少于左线。经试验统计,盾构机在大漂石高富水地层中掘进的平均扭矩约为6 000 kNm,平均脱困扭矩大于7 300 kNm。考虑1.1倍的储备系数,建议大漂石地层中盾构施工采用动力配置较高的复合式盾构机,即额定扭矩大于6 600 kNm,脱困扭矩大于8 030 kNm。

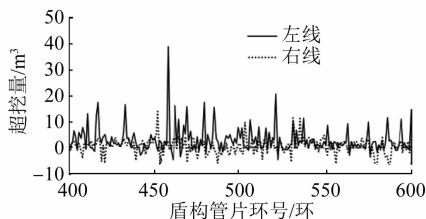


图7 试验段左、右线施工稳定时超挖量对比图

3.2 超挖量控制

文献[8-9]推荐将水土压力与波动压力之和作为土舱压力的设定值,建议波动压力取0.01 MPa。文献[10]在总结欧洲多个工程案例的基础上,认为波动压力取0.02 MPa较为合适。文献[11]采用将土舱压力 p_t 与开挖面静止水土压力 p_0 之差 Δp 控制在0.03 MPa的范围来控制超挖,即:

$$\Delta p = |p_t - p_0| \leq 0.03 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$p_0 = p_z + p_w \quad (4)$$

式中:

p_z ——开挖面静止土压力,MPa;

p_w ——开挖面静止水压力,MPa。

假设 Δp 和超挖率 β 间满足线性关系,即:

$$\beta = \alpha \Delta p \quad (5)$$

式中:

α ——斜率系数, $\alpha = 50/E$, E 为盾构穿越地层的变形模量。

计算中, Δp 取0.03 MPa, E 加权平均后的量纲一的量值为45,代入式(5)得到 β 为3.3%,即每环超挖量控制在 0.9957 m^3 左右。

图8为盾构施工第480环至第640环范围时的推荐超挖率与实际超挖率对比直方图。由图8可知,推荐超挖率与第480环后现场施工参数控制下的实际超挖率基本吻合,从而验证了该计算结果的合理性。

图9为控制超挖后的现场地表补填混凝土情况。从现场施工效果来看,由于施工过程中超挖的合理控制,第469环后约160环掘进范围内地表基本未进行补填,这也说明了合理控制超挖对控制地层变形具有良好的作用。

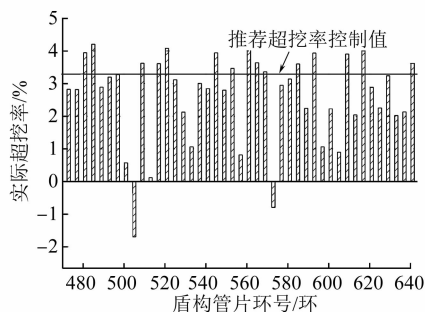


图8 推荐超挖率与实际超挖率对比直方图

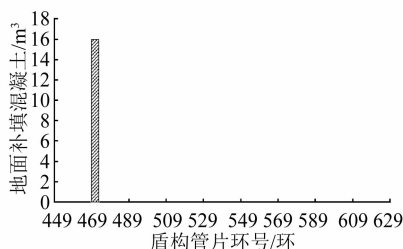


图9 控制超挖率后施工效果

4 结论

1) 盾构穿越大漂石高富水地层容易造成“卡机”,渣土改良效果差是刀具磨损严重的主因,盾构脱困过程中出土量较难控制是地面塌陷的主因。

2) 建议大漂石地层盾构施工采用动力配置较高的复合式盾构机,即额定扭矩大于6 600 kNm,脱困扭矩大于8 030 kNm。

3) 建议大漂石地层盾构刀盘开口率不小于33%,盾构施工过程中每环超挖率控制在3.3%左右。

参考文献

- [1] 范祚文,张子新.砂卵石地层土压力平衡盾构施工开挖面稳定及邻近建筑物影响模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013(12): 2506.
- [2] 杨书江.富水砂卵石地层盾构法施工地表坍塌原因及对策[J].都市轨道交通,2011(1): 77.
- [3] 吕强.土压平衡盾构掘进机刀盘扭矩模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006(增刊1): 3137.
- [4] 邢彤,龚国芳,杨华勇.盾构刀盘驱动扭矩计算模型及实验研究[J].浙江大学学报(工学版),2009(10): 1794.
- [5] 上官子昌.土压平衡盾构机密封舱压力控制机理模型及其实验研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [6] 赵旭伟,谈晶,于清浩.砂卵石地层盾构推进对地表沉降影响数值分析[J].城市轨道交通研究,2012(4): 33.
- [7] 王柳善,杨龙才,孟庆明.富水卵漂石地层土压平衡盾构施工参数研究[J].华东交通大学学报,2015(6): 14.

(下转第94页)

以内;水平偏差都为负值,向右偏,最大水平偏差为向右偏 11 mm,总体变化趋势也是偏差越来越小。

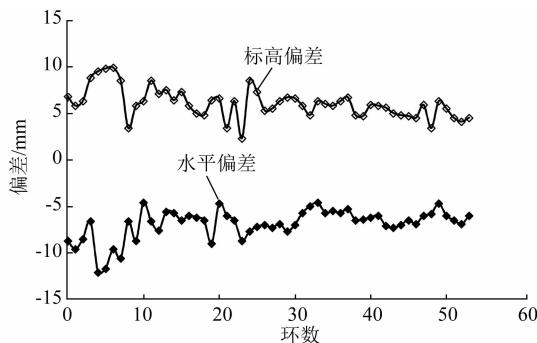


图5 右线盾构空推的管片安装偏差

由图5可以看出:右线隧道的管片拼装偏差情况与左线基本相同,但标高偏差都为正值,最大值为 10 mm;水平偏差都为负值,向右偏,最大值为 12 mm。

4.2 盾构空推施工的隧道拱顶变形

大直径盾构机空推既有矿山法暗挖隧道的施工难度很大,对周边土层的影响也较大,如果处理不好会使周边土层产生较大的变形。本次空推过程中隧道拱顶的竖向位移情况如图6所示(隆起为正,下沉为负)。

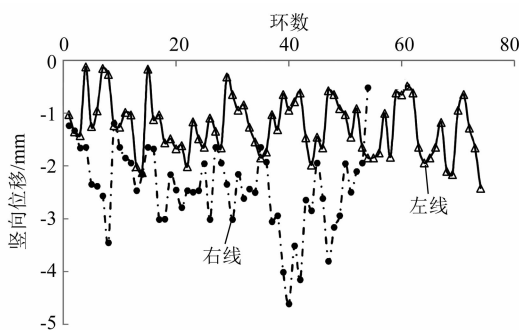


图6 盾构空推过程中左、右线管片拱顶竖向位移

由图6可以看出:空推施工过程中左、右线隧道拱顶变形均表现为下沉,左线最大沉降量为

2.42 mm,右线最大沉降量为 4.61 mm,远远低于规范的控制要求。

5 结语

本文研究直径 8.8 m 的大直径盾构空推通过既有矿山法暗挖隧道的施工工艺,施工完成后整个矿山法暗挖隧道的管片拼装左线水平方向最大偏差为 11 mm,高程方向的最大偏差为 9.6 mm;右线水平方向的最大偏差为 12 mm,高程方向上最大偏差为 10 mm;左线隧道拱顶位置的最大沉降位移为 2.42 mm,右线为 4.61 mm。管片拼装偏差及隧道的变形均满足现有规范的控制要求,解决了大直径盾构机空推通过矿山法暗挖隧道的难题,为以后类似项目的施工积累了经验。

参考文献

- [1] 赵运臣. 盾构始发与到达方法综述[J]. 现代隧道技术, 2008(增刊1): 86.
- [2] 王贺昆. 城市地下隧道盾构空推过矿山法段施工技术[J]. 土工基础, 2016(3): 375.
- [3] 徐延召, 李亚巍, 杨俊. 盾构空推过矿山法隧道施工技术及其质量控制[J]. 土木建筑工程信息技术, 2016(1): 53.
- [4] 李剑明. 盾构空推过矿山法隧道新工艺[J]. 铁道标准设计, 2011(11): 93.
- [5] 李锦富. 浅议盾构过矿山法隧道空推段施工质量控制[J]. 现代隧道技术, 2012(2): 65.
- [6] 李锦富, 罗忠. 盾构空推管片过矿山法隧道渗漏水控制[J]. 现代隧道技术, 2012(2): 71.
- [7] 邓洋. 地铁施工盾构空推过既有矿山法隧道施工组织设计——以广州地铁6号线二期工程为例[J]. 隧道建设, 2015(增刊2): 138.
- [8] 赵岗领, 王立川. 城市地铁盾构通过暗挖隧道施工案例[J]. 隧道建设, 2010(3): 298.
- [9] 王春河. 盾构机空推过矿山法段地铁隧道施工技术[J]. 铁道标准设计, 2010(3): 88.

(收稿日期:2018-09-27)

(上接第 89 页)

- [8] SRAMOON A, SUGIMOTO M, KAYUKAWA K. Theoretical model of shield behavior during excavation. II: Application[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002(2): 156.
- [9] SUGIMOTO M, SRAMOON A. Theoretical model of shield behavior during excavation. I: theory[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002(2): 138.
- [10] RUSSO G. Evaluation the required face support pressure balance

control for EPB shield[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 2840.

- [11] 孙钧, 易宏伟. 地铁隧道盾构掘进施工市区环境土工安全的地基变形与沉降控制[J]. 地下工程与隧道, 2001(2): 10.
- [12] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.

(收稿日期:2020-07-13)