

文章编号: 1005-0523(2015)06-0014-06

富水卵漂石地层土压平衡盾构施工参数研究

王柳善¹, 杨龙才¹, 孟庆明²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中水电成都建设投资有限公司, 四川 成都 601212)

摘要: 针对富水卵漂石地层土压平衡盾构(EPBS)施工出土控制困难、掘进效率低问题, 依托成都地铁某盾构隧道区间的现场实验段, 对富水卵漂石地层中土压平衡盾构的实测关键施工参数进行了统计分析, 并探索了与地层相适应的掘进参数以及提高掘进效率的途径。研究参数包括: 出土量、土舱压力、贯入度、掘进速度等, 研究表明: 虽然富水卵漂石地层中的土压平衡盾构掘进易超出土, 但通过适当减少土舱压力和增大贯入度能够减少超出土量, 盾构法适用于该地层; 改善地层可掘削性能和适当降低土舱压力是提高掘进速度有效方法, 而增大总推力可能导致掘进速度下降。

关键词: 盾构隧道; 卵漂石地层; 施工参数; 适应性

中图分类号: U25 **文献标志码:** A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.003

近年来, 我国地铁建设大规模开展, 据统计, 截至 2014 年底, 地铁总运营里程达 2 361 km^[1]。在软土地区, 盾构法施工作为一种对周边环境影响较小的方法, 被广泛应用于地铁工程建设。而我国幅员辽阔, 各城市地质情况差异大, 许多城市面临着在黄土、砂卵石、卵漂石、复合地层等复杂地层中进行盾构施工的问题, 其施工参数的设定, 甚至盾构工法的适应性都值得探讨, 对此许多学者已经开展了不少有益的探索。对于盾构施工这一极为复杂的动态过程, 室内模型实验和现场掘进实验都是较为有效的研究手段。何川^[2]针对我国首例黄土地层中的城市地铁盾构隧道工程, 采用自主研发的土压平衡式模型盾构机, 开展了室内掘进实验研究黄土地层条件下盾构掘进对地层的扰动情况以及盾构施工关键参数的匹配问题, 研究表明盾构顶推力的变化直接影响隔舱土压力的变化, 而出土率有随顶推力的增大而呈减小的趋势, 并与推进速度成反比。徐前卫^[3]根据相似理论建立了盾构掘进试验模型, 进行了砂土地层不同盾构工作参数组合的掘削试验, 研究了盾构机工作参数对砂土地层的适应性。然而, 对于卵漂石地层, 由于其土体颗粒粒径大(可达几十厘米)、粒径分布极为不均, 模型实验难以模拟原状土层的性质, 国内外未见卵漂石地层盾构模型实验研究, 因而现场掘进实验成为研究卵漂石地层盾构法适应性的更为直接有效的方法。为了扩展盾构工法的应用范围, 以满足我国大范围地铁建设的需求, 在成都地铁某区间进行了土压平衡盾构在富水卵漂石地层中掘进的首次尝试, 并设立了现场试验段探索盾构法的适应性及与地层匹配的施工参数。

在富水卵漂石地层条件下进行盾构施工是一个世界级难题^[4], 富水卵漂石地层的主要特征呈现为岩体松散、弱胶结、自稳能力差、流动性差, 并且随机分布有高强度大粒径漂石。盾构在卵漂石层中掘进主要问题表现为: 高强度大粒径漂石难以破碎, 易引起刀盘和螺旋输送机卡死; 地层反应非常灵敏, 刀盘旋转切削时, 很易破坏原来的相对稳定或平衡状态而产生坍塌, 引起较大的地层损失和围岩扰动, 使开挖面失去稳定; 地层富水, 而卵漂石渗透性强, 易发生螺旋输送机喷涌; 渣土流动性差, 排土相对困难, 导致大颗粒卵石、漂石滞留土舱内或向盾构机四周动, 使得盾构机位置和姿态控制变得困难, 严重时会发生堵塞, 致使盾构机无法推进。这些问题在盾构施工过程中主要反映为出土控制困难、掘进效率低、刀具磨损严重等问

收稿日期: 2015-08-20

作者简介: 王柳善(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通研究。

通讯作者: 杨龙才(1971—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为轨道交通土工结构设计研究。

题。本文以现场掘进试验段实验结果为依据,在盾构机实际反馈数据的基础上,分析盾构掘进参数与出土控制的匹配性,并讨论了能适应高效掘进的施工参数,为土压平衡盾构穿越富水卵漂石地层施工参数的设定提供参考。

1 现场掘进实验概况

1.1 地质概况

现场掘进实验段采用海瑞克盾构机施工,开挖直径 6.3 m,面板式刀盘,开口率约 36%,配置单刃滚刀 35 把,中心双刃滚刀 4 把,刮刀 36 把,周边铲刀 8 把,边缘保护刀 4 把,出渣采用直径 850 mm 的单级螺旋输送机,能通过的漂石最大粒径为 300 mm。试验段长度为 300 m,以坡度为 25‰的下坡段为主,最小埋深 9.7 m,最大埋深 15.5 m,平面线型以直线段为主,仅第 43~82 环为转弯半径 400 m 的曲线段。隧道结构外径 6.0 m、内径 5.4 m,隧道管片分 6 块,采用螺栓连接,错缝拼装,直线段环宽 1.5 m,曲线段环宽 1.2 m。

区间地质纵断面图见图 1,由图可知盾构隧道所穿越的地层主要为密实卵石土地层<2-9-3>和<3-8-3>。根据地质勘察报告,该地层中漂石含量 5%~20%,粒径一般为 20~40 cm,地质勘察所揭露漂石的最大长度为 57 cm,最大抗压强度高达 170 MPa,破碎困难。并且该地层颗粒级配极为不良,级配曲线如图 2 所示;地质探坑揭露的<2-9-3>地层实况如图 2、图 3 所示。从图中可以看出地层中细颗粒含量较少,而粒径大于 20 mm 的颗粒占总质量的 70%~80%,这些大颗粒间的摩擦系数大,进入土舱后流动性差,易在土舱底部堆积造成出渣困难。并且由于土层内细颗粒少,大颗粒间胶结性弱,在外部扰动作用下易松散掉落,引起较大的地层损失。

区间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 5.6~8 m。

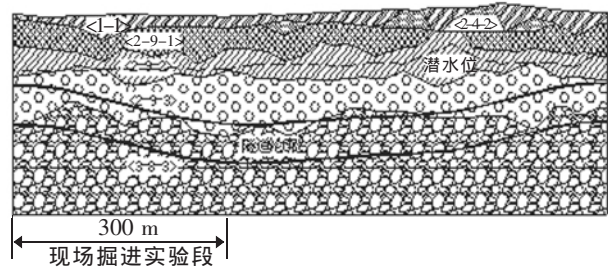


图 1 盾构区间地质纵断面图
Fig.1 Geological profile of shield zone

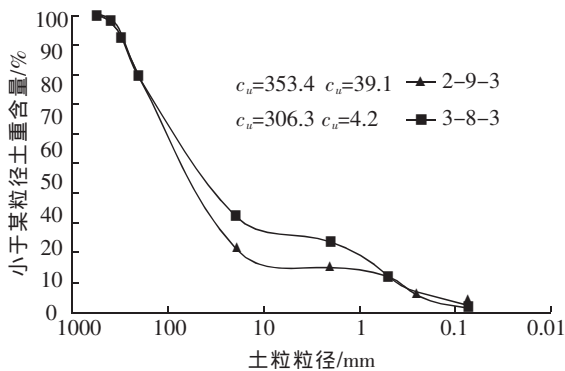


图 2 颗粒级配曲线
Fig.2 Particle grading curve



图 3 探坑揭露<2-9-3>地层实况
Fig.3 Geologic situation of layer <2-9-3>

1.2 现场掘进试验方案

土压平衡盾构掘进过程中施工参数较多,主要为主动控制参数(推进速度、刀盘转速、土舱压力等)和被动控制参数(推力、刀盘扭矩等),掘进过程中大多通过调整主动控制参数达到控制被动参数的目的。为尽量真实地反映盾构设备与地层的适应性特征,现场掘进试验应以实际工程施工标准为参考,以控制地层变形

为首要任务,通过调整、控制盾构关键参数来确保盾构正常掘进(即推力、刀盘扭矩不超过额定值),然后在此基础上优化施工参数以达到高效掘进的目的。

卵漂石地层中盾构超挖会引起盾构机上部一定范围内土体塌落形成松散带,盾构通过后难以通过同步注浆对这部分超挖量进行填充,松散带易向上发展引发地面沉降甚至塌陷^[5-6],因此,控制掘进过程中超挖量对于控制地层变形至关重要,现场掘进实验中以超挖量作为地层变形评价指标,而掘进效率主要通过掘进速度反映。

2 施工参数匹配研究

盾构始发后,由于施工参数设定经验不足,引发了大量的超出土,掘进至第5环时隧道上方土体塌陷,盾构长时间停机调整后恢复掘进,因此,本文仅选取了试验段内第10环到第214环的施工参数进行分析。

2.1 出土量

出土量控制是控制盾构施工对周围环境影响的重要手段,由于卵漂石地层松散系数取值可参照的工程经验较少,并且土方的计量方式也较为粗糙,本文采用每延米的出土净重来反映每环实际出土量的控制水平。采用下式计算:

$$W = \frac{W_a - \rho_g V_g}{L} \quad (1)$$

式中: W 为每延米出土净重; W_a 为每环渣土实际称重; ρ_g 为实际注入改良剂的密度; V_g 为实际注入改良剂体积; L 为每环实际掘进距离。

每延米的理论出渣重量为 $W_t = \pi R^2 \rho$,式中 R 为刀盘开挖半径; ρ 为掘进土层的土体密度。定义超出土系数 $e = (W - W_t) / W_t$ 来反映每环的超出土情况,掘进过程中各环的超出土系数如图4所示(数据中剔除了因卡刀盘处理而超出土等特殊情况),从图中可以看出多数环超出土系数大于0,说明卵漂石地层盾构掘进过程中出土量控制较为困难,多数环存在超出土现象。除了前述地层弱胶结、自稳定性差的特性易引发超出土外,在掘进过程中发现较多高强度的大粒径漂石未经破碎而直接被排出,而这些漂石可能只有部分在掘进断面内,整块漂石被刀具带入土舱不仅导致掘进断面外部分漂石的超挖量,而且引起上部小颗粒松动失稳,跟随漂石落入土舱内带来更多的超挖量。而且这些未破碎的大粒径漂石容易引起刀盘卡死,在实验段内发生过9次卡刀盘事故,均由此引起,卡刀盘处理易引发大量超挖。

2.2 土舱压力

盾构机土舱压力是土压平衡式盾构机掘进过程中的重要参数,是盾构推进过程中保持开挖面稳定性的重要指标^[7-8]。土舱压力通过布置在盾构土舱隔板上的土压力传感器监测,土舱隔板上共布置5个传感器,其中1#传感器位置最高,距离盾构横截面轴线高度为2.4m,本文以1#传感器的压力值为例来分析土舱压力的变化。实际掘进过程中实测的1#土舱压力值 p_1 如图5所示(注:1 bar=0.1 MPa)。

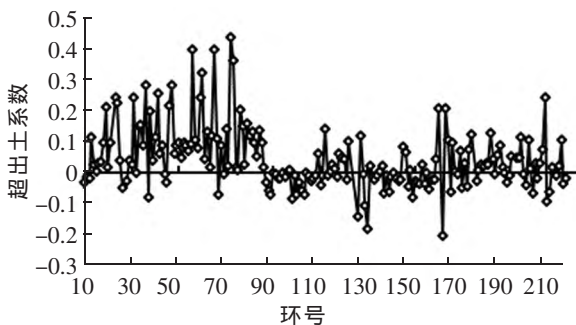


图4 各环的超出土系数

Fig.4 Over excavation coefficient of each ring

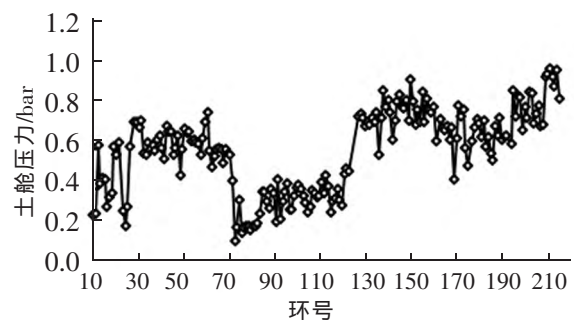


图5 各环的1#土压力值

Fig.5 1# earth pressure value of each ring

理论土舱压力采用静止土压力计算,由于土层渗透性强,采用水土分算,计算公式为

$$P_i = k_0 \sigma_v + \gamma_w h_w \quad (2)$$

式中: k_0 为静止土压力系数; γ_w 和 h_w 分别为水的重度和水头高度; σ_v 为掘进面上方垂直土压力,对于可以形成拱效应的砂性土,应采用松弛土压力计算,松弛土压力的计算一般采用太沙基公式,同时需考虑地下水作用,详细计算方法参见文献^[9],这里不再赘述。

图6为土舱内外压力差 $\Delta p = p_1 - p_i$ 与每环超出土系数 e 关系图,从图中可以看出并不是土舱内压力越大,出土量就越小,相反,适当的欠压更利于出土控制。因此,匹配卵漂石地层的盾构掘进模式为满舱欠压掘进,土舱内外压力差可设置为-0.3 bar左右。

2.3 贯入度

贯入度 P_{rev} 是表征设备掘进性能的一个重要指标,其定义为掘进速度 v 与刀盘转速 n 的比值,即 $P_{rev} = v/n$,其物理意义就是刀盘每旋转一圈后所推进的距离。图7为贯入度与超出土系数关系曲线,从图中可以看出,超出土系数与贯入度呈现出负相关性,较大的贯入度时出土控制较好。因此,在地层条件允许的情况下,掘进宜采用低转速、高掘进速度的模式掘进。一方面,降低刀盘转速可以减少刀盘对地层的冲击扰动;另一方面,保持较高的掘进速度,地层被刀盘搅动松散后,盾体可迅速起到支撑作用,减少松散颗粒落入土舱的时间,从而减少超挖量。

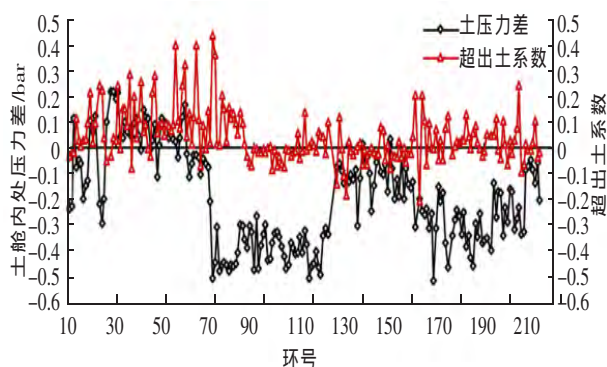


图6 土舱内外压力差与超出土系数曲线

Fig.6 Curves of pressure difference between inside and outside of chamber and over excavation coefficient

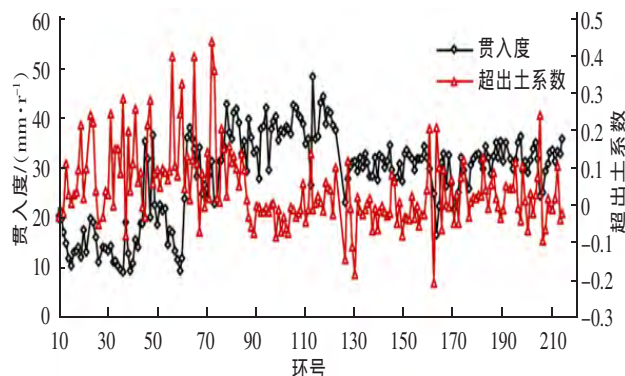


图7 贯入度与超出土系数曲线

Fig.7 Curves of penetration and over excavation coefficient

3 高效掘进参数分析

3.1 掘进速度与地层特性

掘进速度直接受设备性能的影响,在设备既定的情况下,地层特性是主要影响因素。许多学者都采用地层识别参数场切深指数(FPI)来反映地层的可掘削性能^[10-11],其定义为:

$$FPI = \frac{F}{P_{rev}} \quad (3)$$

式中: F 为盾构推力; P_{rev} 为贯入度。场切深指数表征单位贯入度所需的盾构推力,反映了地层抵抗刀具贯入地层的能力,具有非常明确的物理意义。 FPI 越大,则刀盘前方的地层密实度或者硬度越大,地层可掘削性能越差。试验段内掘进速度与场切深指数关系曲线如图8所示,由图可知,掘进速度与场切深指数的幂函数有较好的负相关性。对于卵漂石地层,影响其可掘削性能的主要是地层的密实程度和颗粒间的摩擦性能,因此,可以通过向刀盘前方注入泡沫等减摩剂来改善地层的掘削性能,从而提高掘进速度。现场掘进时,在刀盘前方注入了发泡倍数10~11倍的泡沫,注入率为40%~50%,取得了良好的效果。

3.2 掘进速度与土舱压力

以土舱内 1# 土压力为例分析,掘进速度与 1# 土压力的关系曲线如图 9 所示,从图中可以看出掘进速度与土舱压力有较好的负相关性,在能够维持开挖面稳定的情况下,降低土舱压力有利于掘进速度的提升。对于卵漂石地层,很难建立真正的土压平衡,当土压力升高时,掘进速度立刻下降,甚至造成刀盘扭矩不足而卡死,因此,无论从提高施工效率来说,还是出于减少对周围环境影响的考虑,适当欠压掘进都更为合适。

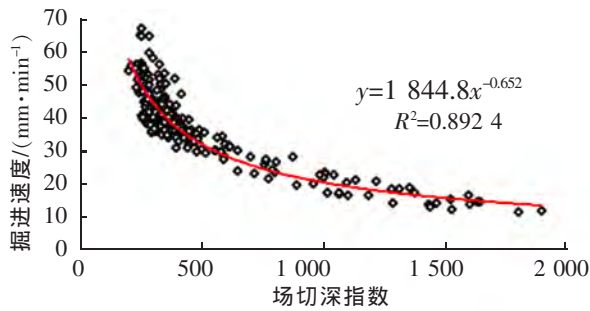


图 8 掘进速度与场切深指数关系曲线

Fig.8 Curves of advance speed and FPI

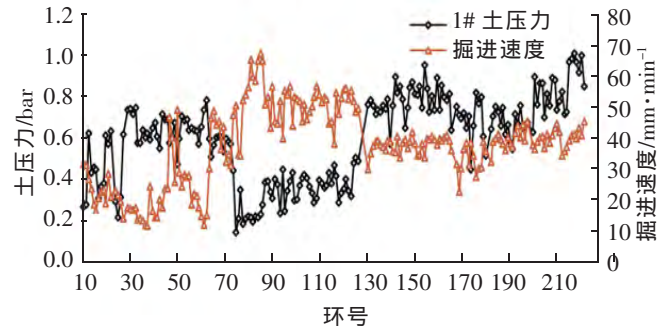


图 9 掘进速度与 1# 土压力曲线

Fig.9 Curves of advance speed and 1# earth pressure

3.3 掘进速度与总推力

图 10 为掘进速度与总推力的关系曲线,从图中可以看出掘进速度与总推力有一定的负相关性,这与文献^[12]统计得出的软土地层中盾构掘进速度与总推力成正比不同,在卵漂石地层中,过大的推力会挤密刀盘前方土体,造成卵漂石颗粒难以在被滚刀松动后由刮刀带入土舱内,而是需要破碎较多颗粒后才能被刮入土舱,从而刀具切深变浅,掘进速度下降。因此,在卵漂石地层中不宜采取软土地层中通过增大推力的方法来增加掘进速度。

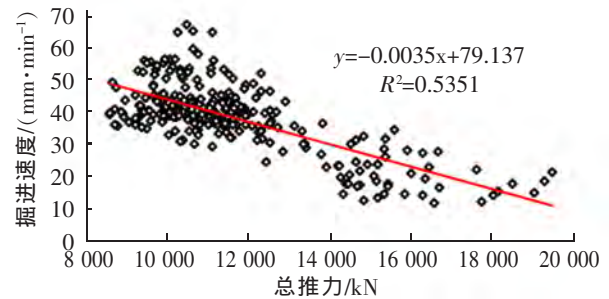


图 10 掘进速度与总推力关系曲线

Fig.10 Curves of advance speed and total thrust force

4 结论

在富水卵漂石地层中土压平衡盾构现场掘进实验的基础上,统计分析了现场实测掘进参数(包括土舱压力、贯入度等)与出土控制的匹配性,并探讨了提高盾构掘进速度的方法。研究表明:

- 1) 由于地层弱胶结、自稳定性差,加上盾壳周围难以破碎的大粒径漂石影响,卵漂石地层盾构掘进过程中出土控制困难。
- 2) 匹配富水卵漂石地层出土控制的盾构掘进模式为满舱欠压、低转速、高掘进速度模式。
- 3) 改良刀盘前方土体,增加其可掘削性能和适当降低土舱压力都是提高掘进效率的有效手段,而增大推力可能挤密刀盘前方土体,导致掘进速度下降。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2014 年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2015.
- [2] 何川, 李讯, 江英超, 等. 黄土地层盾构隧道施工的掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(9): 1736-1743.
- [3] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(25): 2902-2909.

- [4] 何川. 成都地铁盾构隧道工程建设关键技术[J]. 学术动态, 2013(4):17-24.
- [5] 白永学. 富水砂卵石地层盾构施工诱发地层塌陷机理及对策研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012:28-31.
- [6] 冯剑. 富水砂卵石地层盾构施工引起空洞的机理及对策研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013:38-43.
- [7] ANAGNOSTOU G, KOVARI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 1996(112):165-173.
- [8] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2):160-171.
- [9] 小泉淳, 官林星. 盾构隧道管片设计[M]. 中国建筑工业出版社, 2012:256-260.
- [10] 邢彤, 赵阳. 盾构掘进土层识别及刀盘转速控制策略研究[J]. 浙江工业大学学报, 2010(6):649-654.
- [11] 江华. 北京典型砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2012:67-68.
- [12] 张厚美, 吴秀国, 曾伟华. 土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(S2):5762-5766.

Research on the Key Construction Parameters for EPBS in Saturated Cobble and Boulder Stratum

Wang Liushan¹, Yang Longcai¹, Meng Qinming²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sinohydro Chengdu Construction Investment Co., Ltd., Chengdu 601212, China)

Abstract: Aiming at the problems of earth pressure balanced shield (EPBS) tunneling in saturated cobble and boulder stratum, the difficulty of over excavation controlling and low tunneling efficiency, this paper, based on one field experiment segment of shield tunnel interval in Chengdu metro, studied the measured key construction parameters by statistical analysis, then discussed the tunneling parameters corresponding to the stratum and the way of improving tunneling efficiency. Research parameters included volume of excavated soil, chamber earth pressure, penetration and advance speed. Results show that by properly reducing chamber earth pressure and increasing penetration, the volume of over excavated soil would decrease although over excavation occurs easily in EPBS tunneling in saturated cobble and boulder stratum. It finds that shield driving method is suitable for the stratum; improving the tunneling performance of stratum and reducing the chamber earth pressure properly are effective method to improve advance speed, but the increase of total thrust may reduce it.

Key words: shield tunnel; cobble and boulder stratum; construction parameter; adaptability

(责任编辑 王建华)