

基于复合式连续皮带机的盾构出渣质量计算研究

周标¹, 丁小彬^{2*}, 孙文坚¹, 任续锋²

(1. 中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京市 101500; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要:为使盾构施工渣土管理精准化, 该文利用盾构施工中连续皮带机的施工数据, 对两种常见的盾构渣土质量计算方法(基于松散系数的盾构渣土质量结算法、考虑外加剂的盾构渣土质量结算法)进行评价与分析, 并根据盾构每环出渣的变化规律, 提出一种改进的盾构渣土质量估算方法。研究结果表明: 基于松散系数的盾构渣土质量计算方法误差显著; 采用考虑外加剂的渣土质量计算方法时, 计算值总小于实际出渣质量, 两者差值趋近于某值, 且与所研究的两主要地层条件和渣土称量方式相关性不大。该文提出的改进的渣土计算方法提高了渣土质量估算准确性, 与实际盾构出土质量吻合良好。

关键词: 盾构施工; 连续皮带机监测; 精准出渣量估算; 计算方法创新; 智慧渣土管理

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Calculation of Slag Weight in Shield Construction Based on Compound Continuous Belt Conveyor

ZHOU Biao¹, DING Xiaobin^{2*}, SUN Wenjian¹, REN Xufeng²

(1. China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 101500, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: Based on the construction data of continuous belt conveyors in shield construction, this paper evaluates two common calculation methods of slag weight (slag weight calculation based on loosening coefficient and slag weight calculation based on external additives) to accurately manage slag in shield construction. According to the law of slag discharged from each ring in shield construction, an improved slag weight estimation method in shield construction was proposed. The results show that there is a big error in the slag weight calculation based on the loosening coefficient. When slag weight calculation based on external additives is used, the calculated value is always smaller than the actual slag weight, and the difference between them tends to be a definite value, which is also not strongly related to the two main formation conditions and the weighing mode of slag. The improved slag calculation method improves the accuracy of slag weight estimation, which is in good agreement with the actual slag weight in shield construction.

Keywords: shield construction; continuous belt conveyor monitoring; accurate slag weight estimation; calculation method innovation; smart slag management

0 引言

随着盾构技术的发展, 盾构施工技术广泛地应

用于城市轨道交通建设中。其中, 盾构施工对周边环境的影响一直是盾构施工过程中被关注的重点问题之一^[1-3]。研究发现, 盾构的出渣量是影响地表沉

收稿日期: 2023-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 41827807); 广东省现代土木工程技术重点实验室项目(编号: 2021B1212040003)

作者简介: 周标, 男, 大学本科. E-mail: R1564023390@163.com

*通信作者: 丁小彬, 男, 博士, 副教授. E-mail: dingxb@scut.edu.cn

降的关键因素之一^[4],若出渣量超方将导致地层形成空洞,处理不及时将引起塌陷。因此,准确预估盾构出渣量并指导现场施工,对避免盾构超挖和管控盾构施工中地层变形过大的风险具有重要意义。

连续皮带机出渣技术是目前较为先进的盾构施工出渣方式,对盾构的掘进效率、施工工期有重要影响,也是目前盾构出渣量测量的主要方式之一^[5]。罗栋等^[6]基于皮带机动态监测系统对长沙某地铁区间盾构中的实时出渣进行分析,并根据实时出渣数据指导现场施工,效果显著;熊令芳等^[7]通过对盾构出渣能力的设计计算,分析了皮带机对盾构出渣的影响;杨永刚^[8]对广州市轨道交通 22 号线中的复合式波纹挡边皮带机进行了研究,证明了这一新的出渣模式的有效性;韩兵^[9]研究了煤矿斜井隧道具有深埋、超长、连续下坡的特点,并分析了连续皮带机出渣技术。当前,对于皮带机技术的研究已经十分详细,但大部分都是围绕皮带机出土效率展开,极少有研究基于连续皮带机技术对盾构出渣量进行计算和评价^[10-12]。并且,目前对于盾构施工出渣量的计算和评价还未形成理论体系^[13]。

本文依托广州城市轨道交通 22 号线祈福站风

井—广州南站的风井盾构工程,利用该工程累积的大量的皮带机出渣数据,对常见的盾构出渣量计算方法进行评价,对土压平衡盾构出渣量变化规律进行分析。旨在形成更有效的盾构出渣量预估方法,为其他类似的工程提供借鉴。

1 工程背景

1.1 地质概况

广州城市轨道交通 22 号线祈福站风井—广州南站风井区间施工范围的主要地层由上至下依次为:人工填土、淤泥质土、中粗砂层、可塑状碎屑岩残积土、全风化混合花岗岩、强风化泥质粉砂岩、强风化混合花岗岩、中等风化泥质粉砂岩、中等风化混合花岗岩以及微风化泥质粉砂岩。泥质粉砂岩中黏粒含量较高,施工范围内岩体工程等级Ⅳ~Ⅴ。其中,全风化混合花岗岩呈坚硬土状,遇水易软化与崩解;强风化岩体风化裂隙发育,遇水易软化和崩解;中等风化岩体较破碎,裂隙较发育;微风化岩体节理裂隙发育,锤击易碎。场地水文地质条件复杂,主要含水层是粉砂层和破碎风化层,稳定水位埋深 0.40~9.76 m,高程—2.67~25.13 m。详细的土层特性列于表 1。

表 1 祈福站风井—广州南站风井区间施工范围的主要地层特性

Table 1 Main formation characteristics of construction area between air shafts of Qifu Station and air shafts of Guangzhou South Station

土层名称	厚度范围/ m	平均厚度/ m	底层标高/ m	天然抗压强度/ MPa	密度/ (g·cm ⁻³)	岩体 等级
人工填土	0.50~9.80	5.97	-0.59~27.54	—	1.93	—
淤泥质土	0.50~9.90	2.81	-10.63~4.98	—	1.72	—
中粗砂层	0.90~3.70	1.95	-10.54~-0.65	—	—	—
可塑状碎屑岩残积土	0.50~12.00	4.62	-13.10~1.53	—	2.02	—
全风化混合花岗岩	1.70~27.00	9.61	-17.24~23.22	—	1.91	V
强风化泥质粉砂岩	0.50~19.90	3.92	-26.77~0.49	0.5~5.3	2.06	V
强风化混合花岗岩	0.90~31.30	15.10	-28.98~22.54	5.0~7.6	1.94	V
中等风化泥质粉砂岩	0.60~18.80	4.21	-31.55~0.93	3.7~18.8	2.57	V
中等风化混合花岗岩	2.40~10.30	6.03	-15.67~12.54	18.8~21.9	—	Ⅳ
微风化泥质粉砂岩	1.00~21.00	6.73	-34.05~-7.07	9.7~38.7	2.61	Ⅳ

1.2 盾构机与皮带输送机概况

祈福站风井—广州南站风井盾构区间采用 2 台盾构机进行掘进,区间单线长 4 020 m。盾构机为土压平衡盾构,设备型号 ZTE 8800,刀盘开挖直径 8 840 mm,刀盘开口率为 35% 左右,盾构机出渣采用

较为先进的复合式提升连续皮带机。连续皮带机出渣输送工艺流程为:盾构机主机皮带机→连续皮带机→复合提升皮带机→渣池。连续皮带机带宽 1 000 mm、最大带速 3.15 m/s、运量 800 t/h、水平长度 4 020 m。连续皮带机与盾构出闸口部分装有皮带

称重装置(ICS-FH型浮衡秤),如图1所示。ICS-FH型浮衡秤称重桥架为悬浮式传力结构(图2)。由支撑梁、托辊支架梁、连接板、2组称重托辊和2只称重传感器组成。积算器通过处理来自称重传感器的重量信号和速度传感器的速度信号,计算并显示出物料的瞬时流量和累计量。

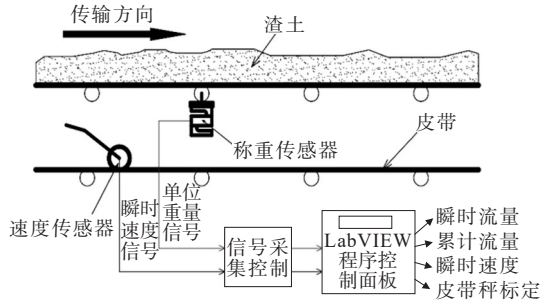


图1 皮带机称重装置示意图

Figure 1 Belt conveyor weighing device



图2 悬浮式称重桥架示意图

Figure 2 Floating type weighing bridge frame

2 土压平衡盾构渣土质量分析

在盾构各个掘进参数中,盾构出土量是影响地表沉降的重要因素之一^[4],控制盾构出渣量在合理范围将对周边环境风险管控具有重要意义。以一环盾构隧道为计算单位,评估一环盾构出渣量的大小,并与实际出渣量进行比较。当盾构出渣量大于预估情况时,盾构处于超挖状态,地表沉降风险增大;反之,则为欠挖,地表隆起。这一判定方法的核心问题就是如何准确计算出盾构每环的理论出渣量。目前,盾构出渣量计算的研究主要围绕盾构出渣质量开展,计算每环盾构出渣质量主要有两种方法^[14]:① 基于松散系数的盾构渣土质量估算;② 考虑外添加剂的盾构渣土质量估算。本节将依托祈福站风井—广州南站风井盾构区间盾构施工的大量出

渣数据,对这两种计算方法的合理性进行探讨。

2.1 基于松散系数的盾构渣土质量估算

基于松散系数的渣土质量估算是以盾构隧道一环为单位,利用松散系数计算每环盾构出渣渣土的体积范围,进而计算渣土质量范围^[15]。自然状态下的土,经过开挖以后,其体积因松散而增加,之后虽然振动夯实,但仍不能恢复到原来体积的性质叫做土体的可松性,通常用松散系数 k 来表述。根据松散系数,可以对一环盾构隧道的渣土体积的最大值 V_{\max} 和最小值 V_{\min} 进行估算,并以此为基础,计算出渣质量的最值,通过对比真实的出渣质量 M ,对盾构施工的超挖($M_{\max} < M$)或欠挖($M < M_{\min}$)情况进行判断,进而判定盾构施工对周边环境的影响的大小。基于松散系数,估算盾构渣土质量最大值与最小值的计算式分别如式(3)、(6)所示,计算示意图如图3所示。

$$k_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

$$V_{\max} = k_1 V_1 = k_1 \frac{\pi D^2}{4} l \quad (2)$$

$$M_{\max} = V_{\max} \bar{\gamma} = k_1 \frac{\pi D^2}{4} l \bar{\gamma} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{V_3}{V_1} \quad (4)$$

$$V_{\min} = k_2 V_1 = k_2 \frac{\pi D^2}{4} l \quad (5)$$

$$M_{\min} = V_{\min} \bar{\gamma} = k_2 \frac{\pi D^2}{4} l \bar{\gamma} \quad (6)$$

式中: V_1 为土体自然状态下的体积; V_2 为土挖出后松散状态下的体积; V_3 为土经回填压实后的体积; V_{\max} 为每环最大渣土体积; V_{\min} 为每环最小渣土体积; M_{\max} 为每环最大渣土质量; M_{\min} 为每环最小渣土质量; k_1 为最初松散系数; k_2 为最终松散系数; D 为盾构开挖横截面直径,应考虑超挖刀在刀盘径向上的长度; l 为盾构管片宽度; $\bar{\gamma}$ 为盾构一环内自然土体的加权重度, $\bar{\gamma} = a_1 \gamma_1 + a_2 \gamma_2 + \dots + a_n \gamma_n$, a_n 为一环内重度为 γ_n 的加权系数,由每环土层所占比例确定, $a_n \leq 1$ 。土壤与岩石的松散系数经验值如表2所示。

祈福站风井—广州南站风井盾构区间右线盾构隧道200~500环主要经过泥质砂岩地层(图4),盾构掘进范围内土体属于第五、六类土。因此,取土体最初松散系 $k_1=1.35$,最终松散系数 $k_2=1.15$ 。该区

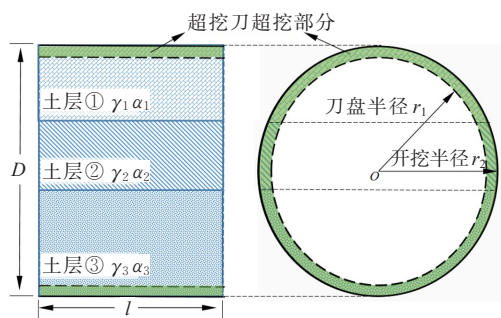


图3 每环盾构出渣质量计算示意图

Figure 3 Slag weight calculation of each ring in shield construction

段内盾构机掘进情况正常,盾构超挖刀在刀盘径向上伸出长度达 50 mm,盾构刀盘直径 $D_0=8\ 840$ mm;开挖直径 $D=8\ 940$ mm,盾构管片长度 $l=1\ 600$ mm;每

环渣土质量由复合式连续皮带机称量。该区段盾构渣土质量估算值与真实出渣质量的比较如图 5 所示。

由图 5 可知:渣土质量最值相差 40 t 左右,可达每环出渣质量的 $1/6\sim 1/8$,较大的理论估值区间降低了盾构出渣质量的预估值的准确性,并且大部分实际出渣质量位于理论最小值质量的下方。表明该盾构机在 200~500 环间基本处于“欠挖”状态,这与实际工程中该区间内盾构所处的正常掘进状态相矛盾。

对于基于松散系数的盾构渣土质量估算方法而言,其计算原理简单,但是存在理论值计算误差大的缺点,分析主要原因如下:

(1) 复合地层的土体松散系数 k 的计算误差较大。表 2 中的松散系数多为单一地层的工程经验值,但对于复合地层而言,特别对于上软下硬地层,盾构

表2 土壤与岩石的松散系数^[16]Table 2 Loosening coefficient of soil and rock^[16]

土的类别	土的名称	最初松散系数	最终松散系数
第一类(松软土)	砂土;粉土;冲击砂层土;疏松的种植土;淤泥	1.08~1.17	1.01~1.04
第二类(普通土)	粉质黏土;潮湿的黄土;夹有碎石、卵石的砂;粉土混卵(碎)石;种植土;填土	1.14~1.28	1.02~1.05
第三类(坚土)	软及中等密实黏土;重粉质黏土;砾石土;干黄土、含有碎石卵石的黄土、粉质黏土;压实的填土	1.24~1.30	1.04~1.07
第四类(砾砂坚土)	坚硬密实的黏性土或黄土;含碎石、卵石的中等密实的黏性土或黄土;粗卵石;天然级配砂石;软泥灰岩	1.26~1.37	1.06~1.09
第五类(软石)	硬质黏土;中等的页岩、泥灰岩、胶结不紧的砾岩;软石灰岩及贝壳石灰岩	1.30~1.45	1.10~1.20
第六类(次坚石)	泥岩;砂岩;砾岩;坚实的页岩、泥灰岩、密实的石灰岩;风化花岗岩、片麻岩及正长岩	1.30~1.45	1.10~1.20
第七类(坚石)	大理岩;辉绿岩;玢岩;粗、中粒花岗岩;坚实的白云岩;砂岩、砾岩、片麻岩、石灰岩、微风化安山岩、玄武岩	1.30~1.45	1.10~1.20
第八类(特坚石)	安山岩;玄武岩;花岗片麻岩;坚实的细粒花岗岩、闪长岩、石英岩、辉长岩、辉绿岩、玢岩、角闪岩	1.45~1.50	1.20~1.30

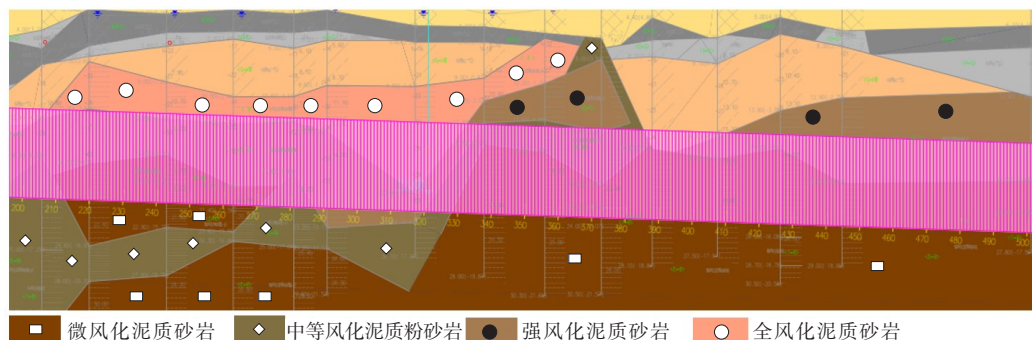


图4 祈福站风井—广州南站风井盾构区间右线盾构隧道 200~500 环地质剖面图

Figure 4 Geological section of shield tunnel from 200~500 rings in right line of shield section of air shafts of Qifu station and air shafts of Guangzhou South Station

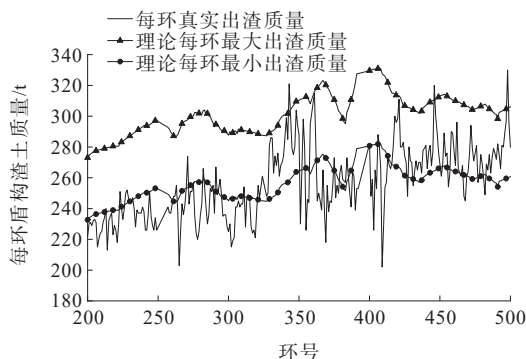


图5 基于松散系数的盾构隧道右线200~500环每环渣土理论最值与真实值比较

Figure 5 Comparison of theoretical extreme value and actual value of slag weight discharged from 200~500 rings in right line of shield tunnel based on loosening coefficient

掘进范围内多种土体的松散系数的变化范围较大,现场人员仅能根据盾构隧道所经过的主要地层对松散系数进行估算,增大了理论出渣质量的计算误差。

(2) 未能考虑外添加剂对土体重度的影响。式(3)、(6)中所采用的重度为土体的自然重度,未能考虑盾构掘进过程中外添加剂对渣土重度的影响。盾构在掘进过程中,为了减小盾构机的机械损耗,需要向前方土体与刀盘之间注入大量的外添加剂。外添加剂的使用将改变渣土的重度,若采用土体自然重度计算渣土的质量,不仅会增大计算误差,还会忽略渣土中包含的外添加剂质量。

(3) 盾构掘进范围内,地层划分存在误差。地层加权重度计算的基础是合理划分计算范围内各层土的权重,地层划分的误差增大了加权系数的计算误差,导致加权重度计算存在误差。

2.2 考虑外添加剂的盾构渣土质量估算

由于松散系数的盾构渣土质量估算方法中所采用的加权重度为土的自然重度,未能充分考虑盾构机在使用外添加剂时所导致的渣土重度的改变,这是导致该方法计算精度低的原因之一。在盾构掘进过程中,为了减少盾构机的机械消耗,往往需要向土体内注入大量的外添加剂,常采用的外添加剂为水、泡沫以及膨润土。因此,外添加剂的质量不能忽略。考虑外添加剂的盾构渣土质量估算的计算原理是直接

的估值误差。考虑外添加剂的盾构渣土质量计算公式如式(7)~(9)所示,计算示意图如图3所示。

$$M_{\text{总}} = M_{\text{自然}} + M_{\text{添}} \quad (7)$$

$$M_{\text{自然}} = \bar{\gamma} \frac{\pi D^2}{4} l \quad (8)$$

$$M_{\text{添}} = M_{\text{水}} + M_{\text{泡沫}} + M_{\text{膨润土}} \quad (9)$$

式中: $Q_{\text{自然}}$ 为盾构一环管片内自然土体的质量; $Q_{\text{添}}$ 为盾构一环管片内所添加的外添加剂的质量。

祈福站风井—广州南站风井盾构区间右线使用的外添加剂包括:水、泡沫剂、膨润土,外添加剂每环均采用人工统计各项使用量。盾构刀盘直径 $D_0=8\,840\text{ mm}$,开挖直径 $D=8\,940\text{ mm}$,盾构管片长度 $l=1\,600\text{ mm}$ 。每环渣土质量由复合式连续皮带机称量。盾构隧道200~500环区间内的盾构出渣理论估算值与真实出渣质量的对比如图6所示。

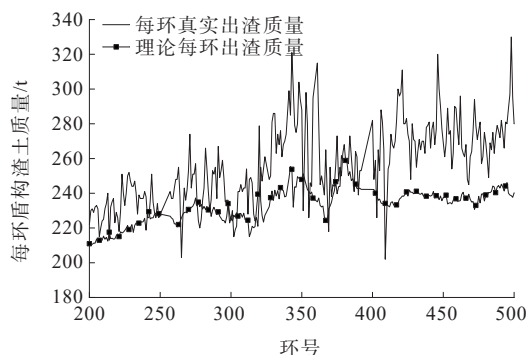


图6 考虑外添加剂的盾构隧道右线200~500环每环渣土质量理论值与实际值比较

Figure 6 Comparison of theoretical and actual values of slag weight discharged from 200~500 rings in right line of shield tunnel considering external additives

由图6可知:理论上盾构每环出渣质量与实际的出渣质量较为接近,理论值整体上小于实际值,实际值减去理论值的差值约29.91 t。这与其他施工线路盾构理论出渣质量和实际出渣质量的变化趋势相似。不同施工区间和渣土称量方式条件下,盾构渣土质量理论值与实际值的比较如表3所示。

2.3 改进的考虑外添加剂的盾构渣土质量估算

渣土理论值与实际值差值形成的原因并不单一,可能包括:盾构姿态纠偏或曲线掘进时超挖土体、上方土体塌陷、土仓保压模式调整、地下来水以及因地质剖面图存在误差而导致的理论土重计算错误等。与此同时,这些因素所引起的渣土质量的变

表 3 不同地层条件和称重方式下盾构理论和实际出渣质量差值比较

Table 3 Comparison of difference between theoretical and actual slag weights in shield construction under different formation conditions and weighing modes

地层条件	区间	称重方式	环数	理论质量/t	实际质量/t	差值/t	平均值/t
泥质砂岩地层	祈福站风井—广州南站风井右线	皮带输送机	300	233.38	263.29	29.91	30.08
	祈福站风井—广州南站风井左线		150	232.07	262.32	30.25	
混合花岗岩地层	番祈中间风井—番祈2号井左线	龙门吊	108	219.16	246.67	27.51	30.16
	番祈中间风井—番祈2号井右线		98	206.63	239.43	32.80	

化也难以量化。因此,某一地理区域内稳定的盾构渣土差值的存在,为提高盾构渣土质量预判精度提供了可能,即如式(10)的盾构每环渣土质量理论计算方法。

$$M_{\text{总}} + \Delta M = M'_{\text{总}} \quad (10)$$

式中: $M_{\text{总}}$ 为考虑外添加剂的每环盾构渣土质量理论值; ΔM 为正常掘进状态下盾构每环渣土理论值与实际值差值的经验值,一般取大量差值的均值; $M'_{\text{总}}$ 为每环渣土最终理论值。

以祈福站风井—广州南站风井盾构区间右线盾构隧道 200~500 环所获得的渣土差值 29.91 t 为基础,对该施工线路 600~870 环盾构出渣最终理论值进行计算,结果如图 7 所示。

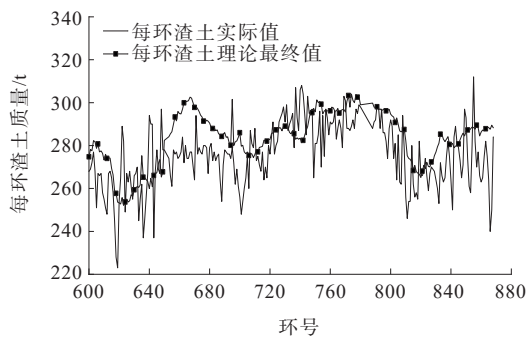


图 7 考虑外添加剂的盾构隧道右线 600~870 环每环渣土质量理论值与真实值比较

Figure 7 Comparison between theoretical and actual values of slag weight discharged from 600~870 rings in right line of shield tunnel considering external additives

由图 7 可知:渣土理论计算最终值的变化趋势与实际值的变化趋势除 650~700 环外基本一致,两条曲线较为接近,理论估值精度有一定提升,这表明在 600~900 环区间内盾构出渣理论值与实际值的差值同样基本稳定在 30.0 t 左右,也表明了同时考虑外添加剂和出渣差值计算方法的有效性。

3 结论

本文利用广州城市轨道交通 22 号线祈福站风井—广州南站风井区间土压平衡盾构施工过程中连续皮带机累积的数据,对基于松散系数的盾构渣土质量估算方法和考虑外添加剂的盾构渣土质量估算方法进行了分析,根据盾构出渣的规律对考虑外添加剂的盾构出渣质量估算方法进行了改进,并验证了改进方法的有效性。得到以下结论:

(1) 基于松散系数的盾构渣土质量估算方法存在较大误差,其计算结果往往大于实际出渣质量。存在误差的原因主要为:复合地层松散系数的计算误差,渣土重度计算误差和土体加权系数的计算误差。

(2) 采用考虑外添加剂的盾构渣土质量估算方法时,每环渣土理论计算值总是小于每环的实际出渣质量,且理论值与实际值的差值可能趋近于某稳定值。

(3) 考虑外添加剂估算方法的理论值与实际值的差值 $\Delta M = 30.0$ t 趋近稳定值, ΔM 与所研究的两种主要地层条件(泥质粉砂岩地层和混合花岗岩地层)和渣土称量方式相关性不大。改进的考虑外添加剂的盾构渣土质量估算方法考虑到 ΔM , 与前两种方法相比,提高了估值精度,较好地反映出每环盾构出渣质量的变化趋势。

参考文献:

References:

- [1] 王思伟,林立科.盾构隧道下穿铁路刚架桥安全影响分析[J].中外公路,2021,41(3):251-256.
WANG Siwei, LIN Like. Study on underpass shield tunnel construction on safety effect of railway rigid frame bridge construction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3):251-256.

- [2] 刘招伟,王梦恕,董新平.地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1297-1301.
LIU Zhaowei, WANG Mengshu, DONG Xinping. Analysis on ground surface subsidence of metro tunnel induced by shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1297-1301.
- [3] 郭双喜,金平,汲广坤,等.复合地层盾构上方建筑物沉降特征及原因[J].中外公路,2020,40(3):16-21.
GUO Shuangxi, JIN Ping, JI Guangkun, et al. Settlement characteristics and reasons of buildings above shield tunnel in mix ground[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 16-21.
- [4] 卢浩,孙善政,施焯辉,等.基于Apriori算法对地面沉降影响因素的数据挖掘及分析[J].隧道建设(中英文),2018,38(增刊2):104-110.
LU Hao, SUN Shanzheng, SHI Yehui, et al. Data mining and analysis of influencing factors of land subsidence based on apriori algorithm[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(sup 2): 104-110.
- [5] 徐道亮.土压平衡盾构高含水量渣土出渣技术研究[D].长沙:中南大学,2014.
XU Daoliang. Study on the water-rich soil transportation technique of earth pressure balance shield[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [6] 罗栋,朱考飞,肖衡,等.皮带出渣量动态监测系统在盾构出渣控制中的应用[J].施工技术,2018,47(增刊1):572-575.
LUO Dong, ZHU Kaofei, XIAO Heng, et al. Application of dynamic monitoring system of belt slag quantity in slag control of shield machine[J]. Construction Technology, 2018, 47(sup 1): 572-575.
- [7] 熊令芳,王睿.φ6 250土压平衡盾构机出渣能力设计计算[J].科技创新与生产力,2014(6):98-100,102.
XIONG Lingfang, WANG Rui. Design and calculation of φ6 250 slagging ability of earth pressure balance shield tunneling machine[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2014(6): 98-100, 102.
- [8] 杨永刚.复合式波纹挡边皮带机在盾构施工中的应用[J].铁道建筑技术,2020(2):93-95,119.
YANG Yonggang. Application of compound corrugated belt conveyor in shield construction[J]. Railway Construction Technology, 2020(2): 93-95, 119.
- [9] 韩兵.煤矿斜井隧道连续皮带机出渣系统选型配置[J].施工技术,2016,45(21):107-110.
HAN Bing. Selection and configuration for slag system of continuous belt conveyor in colliery inclined shaft tunnel [J]. Construction Technology, 2016, 45(21): 107-110.
- [10] 王可强.马蹄形盾构连续皮带机的动态分析与研究[D].成都:西南交通大学,2017.
WANG Keqiang. Dynamic analysis and research of horseshoe shield continuous belt conveyor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [11] 齐梦学.垂直皮带机用于地铁TBM施工的可行性探讨[J].隧道建设,2016,36(8):1004-1010.
QI Mengxue. Feasibility analysis of vertical belt conveyor used in TBM construction of metro[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 1004-1010.
- [12] 孙亚婷,梅志荣,文志勇,等.隧道连续皮带机出渣施工技术[J].现代隧道技术,2013,50(4):42-49,62.
SUN Yating, MEI Zhirong, WEN Zhiyong, et al. Study of continuous-belt conveyor mucking technology during tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 42-49, 62.
- [13] 郭自敏.漂卵石地层盾构掘进出渣量控制及超方判断技术[J].铁道建筑技术,2019(8):104-108.
GUO Zimin. Slag volume control and exceeding excavation judgment technology for shield tunneling in gravel-boulder foundation[J]. Railway Construction Technology, 2019(8): 104-108.
- [14] 周冠南.土压平衡盾构螺旋输送机排土及保压作用分析[J].隧道建设,2012,32(3):302-308.
ZHOU Guannan. Analysis on earth conveying and pressure maintaining of screw conveyors of EPB shields [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 302-308.
- [15] 北京土木建筑学会.建筑工程施工技术手册[M].武汉:华中科技大学出版社,2008.
Beijing Civil Architecture. Practical handbook for architectural engineering construction technician [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2008.
- [16] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.