

盾构无障碍始发土舱压力计算模型研究

刘军¹ 南志领^{1,2} 金鑫³

(1北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 100044;2北京城建投资发展股份有限公司,北京 100125;

3山东高速地产集团有限公司,济南 250098)

摘要 常规的盾构始发需预先凿除钢筋混凝土围护结构,土舱压力无法及时建立,即便对洞口处土体进行了止水加固处理,仍无法彻底改变洞口处土体坍塌、涌水、涌砂等问题。文章基于洞口处采用玻璃纤维钢筋混凝土围护结构,建立了盾构无障碍始发土舱压力计算模型,提出了盾构无障碍始发土舱压力计算公式。通过在北京地铁16号线工程中的实际应用表明,所建立的计算模型能够反映土舱压力的建立过程,可实现土舱压力的快速建立;此外始发掘进前外加泥土等材料的加入量对于建立土舱压力极为关键。

关键词 地铁隧道 盾构无障碍始发 土舱压力 理论分析 计算模型 加泥量

中图分类号:U231+.3 **文献标识码**:A

1 引言

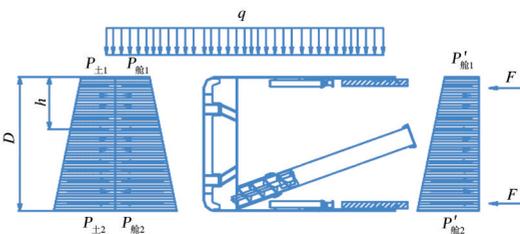
土压平衡盾构掘进过程中,土舱压力应与土舱前方的水土压力保持相对平衡状态(图1)^[1]。土舱压力不足,会发生掌子面涌水和坍塌,导致地层沉降过大、地表沉陷等严重后果;土舱压力过大时,则会导致地表隆起。目前在盾构土舱内建立平衡压力的方式主要有以下两种:一是在土舱内充满渣土以产生压力;二是向土舱内加注辅助材料,如泡沫、泥土等来产生一定的压力。

土压平衡盾构施工中,土舱压力是一个极为重要的参数,开挖面支护土压力是保证其顺利掘进的关键^[1,2]。土舱压力可以通过平衡挖土量和出土量来加以调节,进土量和出土量则分别由盾构的掘进速度和螺旋输送机的转速进行控制^[2]。然而,在盾构始发阶段,土舱压力为零,因此开挖面形成不了支护压力,刀盘开口率大时开挖面土体下滑进入土舱,造成地表塌陷、洞口坍塌,这也是始发阶段事故频发的一个重要原因^[3]。

修改稿返回日期:2018-10-02

基金项目:北京市自然科学基金项目;北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ20131001601);北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(IDHT20130512)。

作者简介:刘军(1965-),男,教授,博士后,主要从事岩土与地下工程教学与研究工作, E-mail: liujun01@tsinghua.org.cn.



注: q 为土体自重应力; D 为盾构隧道开挖直径; h 为距离开挖面顶部高度; $P_{\pm 1}, P_{\pm 2}$ 为土体土压力; $P_{舱1}, P_{舱2}$ 为土舱内土压力; $P'_{舱1}, P'_{舱2}$ 为土舱内土压力对土舱隔板的压力。

图1 土压平衡盾构工作原理

Fig.1 Work principle of EPB shield

为了防止盾构始发时出现上述问题,常规做法是在始发前进行洞口处土体的止水加固,提高土体的自稳能力,以利于土舱压力的建立,但常规做法仍然无法彻底改变洞口土体坍塌、涌水、涌砂等问题。

盾构始发端竖井预留洞口处的围护结构采用玻

玻璃纤维混凝土代替钢筋混凝土的做法已经在国内外得到了较为广泛的应用^[3-6]。该方法仍然保留洞口处的围护结构,维持开挖面的稳定,盾构可直接切割玻璃纤维混凝土,实现连续掘进,并能快速建立土舱压力,这种盾构始发方法称为无障碍始发^[7]。

本文建立了盾构无障碍始发土舱压力计算模型,进而推导出了土舱压力的计算公式,并应用工程实测数据进行了验证。结果表明,所建立的土舱压力公式是可行的,可为今后盾构施工提供借鉴和参考。

2 土舱压力建立模型概述

从土压平衡盾构工作原理可知,土体通过刀盘旋转由刀具切割下来,然后通过刀盘上的开口进入土舱。推进油缸产生的压力传递给土舱壁,然后再传递给土舱内的土体,产生支护压力。该压力与土舱前方的水土压力相平衡,从而保证了开挖面的稳定。

Kiwamu 等^[8]采用离散元法研究了土舱内土体的运动规律,并认为土体在搅拌棒的作用下对形成土压意义重大;侯永茂等^[9]研究认为土压平衡盾构土舱压力的设定对于控制盾构掘进对周围环境的影响意义重大,并结合某超大直径隧道工程,揭示了土压平衡盾构掘进过程中土舱压力和开挖面水土压力分布和发展特性,发现土舱压力增量可以通过螺旋机转速、盾构掘进速度等施工参数计算得到;张子新等^[10]以钱江隧道工程为背景,详细分析了开挖面支护压力7种确定方法的计算结果,论证了各计算方法的工程实用性,并对计算参数的选取进行了讨论;缪林昌等^[11]基于 Kirsch 室内模型试验,采用颗粒流计算分析,从细观角度解释了砂土中盾构隧道开挖面失稳机理,分析了砂土中盾构隧道掘进时土体破坏形态与分布范围,进而提出了计算开挖面极限支护力的改进楔形体分析模型;金大龙等^[12]为研究刀盘开口率对盾构土舱内外压力的影响,利用土压平衡盾构模型机,在多种不同刀盘开口率条件下进行模拟掘进试验,分析不同刀盘开口率条件下的土舱内外压力的变化规律。试验结果表明,随着刀盘开口率的增加,土舱压力传递系数逐渐增大,土舱内外压差逐渐减小;申林方等^[13]研究结果表明,随着隧道上覆土厚度的增加,被动极限支护压应力逐渐增加,且变化速率越来越快,两者之间近似呈指数函数关系;金大龙等^[14]通过测量不同覆土厚度情况下的扰动区域范围,建立了开挖面前方土体沉降和隆起破坏模型,提出了以0.2%开挖洞径变形量作为实际支护压力设定的参考点,并结合朗肯土压力公式给出

了维持开挖面稳定的极限支护压力上下限值。

理论上,土舱压力等于地层静止土压力与水压力之和,目前工程上一般通过表1所示方法进行土舱压力的计算^[15]。

表1 土舱压力常用计算方法

Table 1 Common calculation methods of earth chamber pressure

土压计算方法	基准荷载	使用理论和方法
作用于开挖面前方的水土压力	覆盖土荷载	Rankine 土压力理论
		Brooker 静止土压力理论
		B.B.Broms 的理论
作用于开挖面前方滑动力的矩	松动土压 块土重量	Terzaghi 的理论 Rankine 土压力理论
		对数螺旋线
作用于开挖面前方滑动力的矩	松动土压滑 块土重量	试算法
		村山校正法
		简便法

目前建立土舱压力模型适用于图2所示的正常掘进段,并不适宜于始发段。

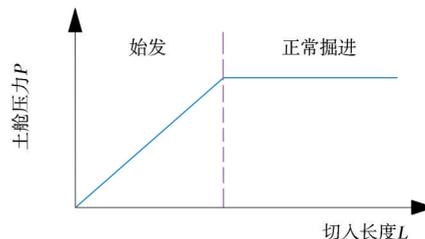


图2 盾构始发、掘进阶段土舱压力变化

Fig.2 Changes of earth chamber pressures during launching and driving of EPB Shield

3 无障碍始发土舱压力计算模型

从图1可知,开挖面稳定是通过切口环内土舱充满碴土而获得,但盾构贴近玻璃纤维筋桩体时土舱压力为0,在切削玻璃纤维筋桩体后才逐步产生压力。从理论上讲,桩体被磨碎后与添加的泥土、泡沫等能够充填整个土舱。当碴土充满土舱时,其被动土压与开挖面上的土压、水压基本相同,此时盾构掘进可认为进入正常掘进阶段。

由于在盾构推进过程中土舱压力是由土舱内碴土体积变化所产生的,因此土舱内总体积可表示为:

$$V=V_1+V_2 \quad (1)$$

式中: V 为土舱内碴土总体积; V_1 为碴土体积; V_2 为后期添加的泥土体积等。

碴土因自重往往聚集在土舱的底部。由于搅拌棒的作用,可假定土舱内的碴土等均匀分布在土舱内^[8],如图3所示。

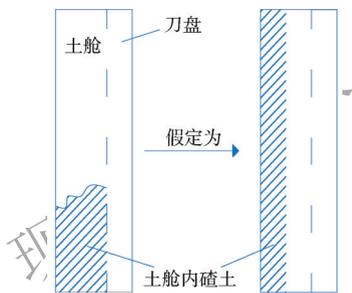


图3 土舱内碴土等均匀分布示意

Fig.3 Schematic diagram of uniform distribution of soil muck

由此,建立如图4所示的土舱压力计算模型图,图中, h 为经过简化后土舱内碴土(包括玻璃纤维筋混凝土及后期添加的泥土等)的高度。

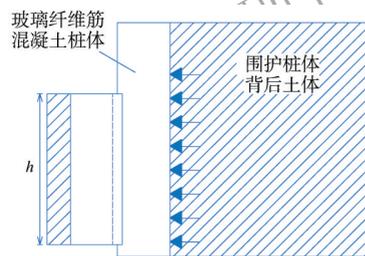


图4 盾构无障碍始发土舱压力计算模型

Fig.4 Calculation model of earth chamber pressure during non-barrier launching of EPB shield

式(1)可转化为:

$$V = \int_0^L \frac{\pi}{4} D^2 ds + V_2 \quad (2)$$

式中: D 为刀盘直径; L 为切入桩体、土体的长度,其中 $L = \sum \Delta s$; s 为贯入度。

土舱内碴土总体积 V 又可以表示为:

$$V = Fh \quad (3)$$

且:

$$P = h\gamma \quad (4)$$

则:

$$P = \frac{4\gamma}{\pi D^2} \left(\int_0^L \frac{\pi}{4} D^2 ds + V_2 \right) \quad (5)$$

式(5)即为土舱压力计算公式,其中 F 为盾构土舱截面积; P 为土舱内碴土产生的侧压力(即为土舱压力); γ 为土舱内碴土重度。

4 工程验证

4.1 工程概况

北京地铁16号线某标段盾构区间单线隧道长约2 km,隧道埋深14.0 m,采用普通衬砌环形结构,环宽1 200 mm。盾构为加泥式土压平衡盾构,外径为6 280 mm,切口环长度为1 700 mm,总推力40 000 kN,推进速度60 mm/min,工作扭矩6 300 kN·m,脱困扭矩7 600 kN·m;采用辐条式刀盘,开口率为50%,刀盘采用中心支撑,并设置了搅拌棒。

盾构始发处所在土层深度范围内,共观测到三层地下水,主要为上层滞水(一)、潜水(二)、层间水(三),其中上层滞水(一)位于结构顶板一倍洞径以上,潜水(二)基本位于区间结构顶板附近,层间水(三)基本位于区间结构底板以下,主要穿越粉质粘土层,局部为粉土夹层。

盾构隧道洞口处采用玻璃纤维筋混凝土围护桩体加固,对于地下水采用桩间注浆止水措施。玻璃纤维筋混凝土围护桩体混凝土强度等级为C30,桩体直径 $d=0.8$ m,主筋配筋为18 ϕ 25,每个洞口处直接切削的玻璃纤维筋桩有6根。

4.2 土舱压力建立过程

盾构无障碍始发过程如图5所示。

从负10环管片开始(此时拼装负6环管片),盾尾内始终有3环管片。随着盾构的掘进,当拼装负5环管片时,刀盘开始接触玻璃纤维筋混凝土围护结构,并对其切割,盾构持续掘进;当拼装负4环管片时,玻璃纤维筋混凝土围护结构被切穿,此时刀盘刚进入土层。

当盾构开始拼装负3环管片时,盾构开始建立土舱压力;当拼装负1环管片时,盾构土舱内压力与前方水土压力逐步达到平衡状态;当盾构机开始拼装第1环管片时,开始同步注浆,土压平衡稳定;当盾构机开始拼装第3环管片时,盾尾脱离围护结构区,盾构无障碍始发完成,进入盾构掘进段的施工。

盾构无障碍始发时,土舱压力变化的实测数据如图6所示。

由图6可知:盾构在拼装负5、负4环管片之间时开始进行切割桩体,此时盾构土舱压力为零。切桩结束后,土舱压力逐渐增大,在拼装负1环管片时土舱压力逐渐达到0.08 MPa,此时土舱压力与前方水土压力保持平衡;当开始拼装第1环管片时,盾构开始同步注浆。第1环管片脱离盾尾后,盾构土舱压力始终保持在0.08~0.10 MPa左右,表明盾构无

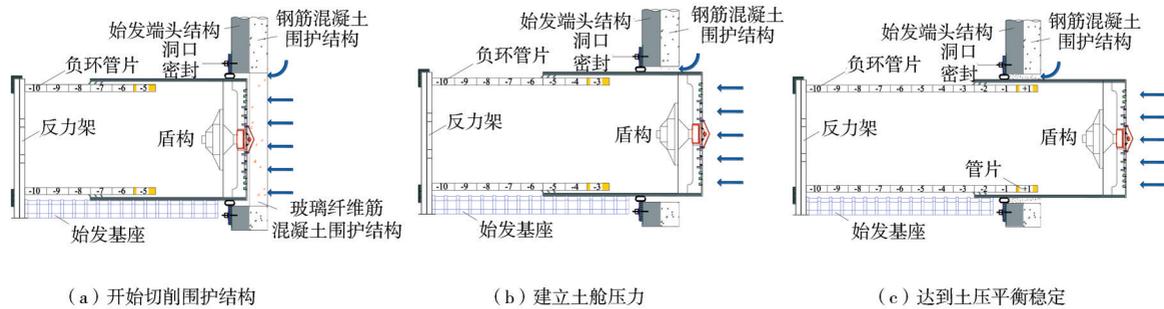


图5 盾构无障碍始发施工掘进过程

Fig.5 Construction process of EPB shield at non-barrier launching phase

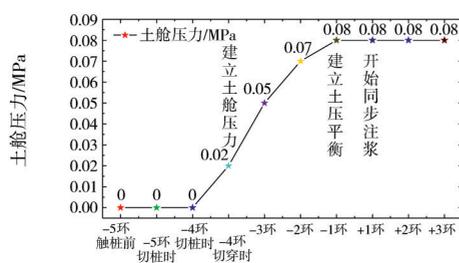


图6 盾构无障碍始发土舱压力变化

Fig.6 Changes of earth chamber pressures during non-barrier launching of EPB shield

因此,盾构始发段的土舱压力 $P=\gamma L+P_2$,为关于 L 的一次函数。该表达式中 P_2 为控制盾构始发土舱压力的一个极为重要的参数,决定着能否快速建立土舱压力,是始发掘进过程中可以控制的一个变量。

由图6可知,盾构掘进从负4环至负1环之间开始建立土舱压力,在拼装第1环管片时,开始同步注浆,此时土压平衡稳定。根据式(7),土舱压力建立过程如图7所示,在刀盘接触玻璃纤维筋桩体时,不添加泥土。在掘进切穿桩体时添加泥土量为 12 m^3 ;在掘进负3环时,土舱逐渐被碴土充满,此时开始出土,掘进至负1环时开始正常出土。

障碍始发在盾构开始同步注浆时便达到了土压平衡的稳定,因此可认为从第2环管片的拼装开始进入正常掘进阶段。

4.3 理论计算

某盾构外形尺寸为 $\phi 6\ 280\text{ mm}$,切口环外形尺寸为 $\phi 6\ 250\text{ mm}$ (直径) $\times 1\ 700\text{ mm}$ (长) $\times 60\text{ mm}$ (板厚),土舱体积约为 55 m^3 ,有效空间按70%计为 38.5 m^3 ,考虑1.2倍切削下来的碴土松散系数,则充满土舱需要的碴土量为 46.2 m^3 。

式(5)又可以表示为:

$$P=P_1+P_2 \quad (6)$$

式(6)又可以转化为:

$$P=\gamma L+P_2 \quad (7)$$

式(5)、式(6)中, $P_1 = \frac{4\gamma}{\pi D^2} \int_0^L \frac{\pi}{4} D^2 ds = \gamma L$,为切削下的碴土产生的土舱压力; L 为贯入度 s 的总和; P 可计算每贯入度切削下的碴土产生的压力,此次计算为与现场实测数据比较, L 取环宽,即 1.2 m ; γ 按经验取值为 22 kN/m^3 ; $P_2 = \frac{4\gamma}{\pi D^2} V_2$,为事先加注的辅助材料(泥土)产生的土舱压力;若不事先加入泥土等,则 $P_2=0$ 。

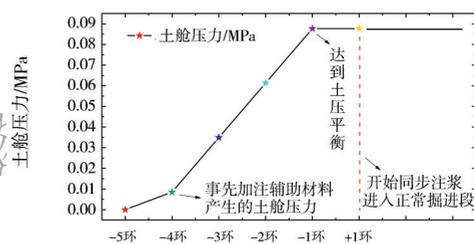


图7 始发阶段土舱压力建立过程

Fig.7 The build-up process of earth chamber pressure during launching of EPB shield

由图8可知,现场实测值与理论计算值略有差异,其主要原因在于参数设定上。一方面,盾构在实际掘进过程中需要根据监控量测反馈回的信息及时调整掘进参数;另一方面,事先加注的辅助材料以及切削下来的碴土,其参数 γ 的取值也会与理论设定存在偏差。但总体而言,二者数值相差在允许、可控的范围内,且现场实测曲线也基本满足关于 L 的一次函数关系,因此可以认为,所提出的理论计算公式 $P=\gamma L+P_2$,能够真实反映盾构无障碍始发土舱压力快速建立的过程。

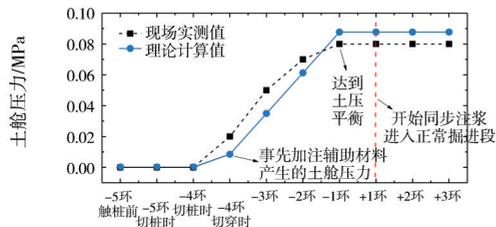


图8 土舱压力实测值与理论计算值对比

Fig.8 Contrast of measured earth chamber pressures and theoretic values

进入正常掘进阶段后,采用公式(8)所示的土压平衡比^[16]的方式来控制土压平衡。

$$P_{i0} = P_{(i-1)0} + \Delta P = P_{(i-1)0} - K \frac{4k_c \eta k Q}{\gamma_0 \pi D^2} \left[\frac{N}{v} - \left(\frac{N}{v} \right)_B \right] \quad (8)$$

式中: K 为单位挤压率造成的土舱压力变化; k_c 为出土中原状土所占比例; k 为把出土体积换算为重量的参数,是与土层性质有关的参数; Q 为螺旋机一转

出土量; γ_0 为土的天然密度; D 为盾构外径; N 为螺旋机转速; V 为推进速度; $\left(\frac{N}{v}\right)_B$ 为土压平衡比。

5 结论

本文在分析研究盾构始发土舱压力计算模型的基础上,建立了盾构无障碍始发土舱压力的计算模型,并得到工程验证,研究结果表明:

(1) 建立的盾构无障碍始发土舱压力计算模型,计算过程简单,能够反映土舱压力的建立过程,具有较强的工程应用价值及工程指导意义。

(2) 盾构无障碍始发可实现土舱压力的快速建立,始发掘进前外加泥土等材料的加入量极为关键。因此建议始发前预先加入一定量的泥土等辅助材料,可一次性加入,也可根据切割玻璃纤维筋围护结构的情况分批加入。

(3) 土舱内搅拌棒对土舱压力的快速建立起到主要作用。

参考文献

References

- [1] 杨永强. 土压平衡盾构土舱压力设定与控制方法探讨[J]. 施工技术, 2012, 41 (8): 22-26.
YANG Yongqiang. Study on the Method of Setting and Control Earth Pressure in the Earth Pressure Balance Shield [J]. Construction Technology, 2012, 41(8): 22-26.
- [2] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (1): 57-62.
LV Xilin, WANG Haoran, HUANG Maosong. Limit Theoretical Study on Face Stability of Shield Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (1): 57-62.
- [3] 刘军, 原海军, 李京凡, 等. 玻璃纤维筋在盾构工程中的研究与应用[J]. 都市轨道交通, 2014, 27 (1): 81-85+103.
LIU Jun, YUAN Haijun, LI Jingfan, et al. Current State of Research and Application of GFRP in Shield Engineering[J]. Urban Rapid Transit, 2014, 27 (1): 81-85+103.
- [4] ASCIONE L, MANCUSI G, SPADEA S. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars[J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 46 (5): 460-469.
- [5] WEBER A, JUTTE B. GFRP-reinforcement ComBAR in Diaphragm Walls Fort the Construction of Subway and Sewer Tunnel[C]// Proceedings of 3rd International Conference on Composites in Construction, 2005.
- [6] ANDRE WEBER, JORG SCHWEINFURTH, BEN JUTTE. Newly Developed GFRP Rebar in Diaphragm Walls of Large Tunnelling Projects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3-4): 437-437.
- [7] 金鑫. 盾构无障碍始发与接收施工力学行为及施工工艺[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
JIN Xin. Construction Mechanical Behavior and Construction Technology of Shied Machine Barrier-Free Launching and Receiving [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [8] KIWAMU ARIKAWA, KOUJI SATAKE, FUMIO KOBAYASHI. Analysis of Soil Behavior in Earth Pressure Balanced Shield Machine[J]. Technical Review, 1996, 33 (1): 35-39.
- [9] 侯永茂, 杨国祥, 葛修润, 等. 超大直径土压平衡盾构土舱压力和开挖面水土压力分布特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33 (9): 2713-2718.
HOU Yongmao, YANG Guoxiang, GE Xiurun, et al. Study of Distribution Properties of Water and Earth Pressure at Excavation Face

- and in Chamber of Earth Pressure Balance Shield with Super-large Diameter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (9): 2713-2718.
- [10] 张子新, 胡文. 黏性土地层中盾构隧道开挖面支护压力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (3): 606-614.
ZHANG Zixin, HU Wen. Investigation on Excavation Face Support Pressure Calculation Methods of Shield Tunnelling in Clayey Soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (3): 606-614.
- [11] 缪林昌, 王正兴, 石文博. 砂土盾构隧道掘进开挖面稳定理论与颗粒流模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (1): 98-104.
MIAO Linchang, WANG Zhengxing, SHI Wenbo. Theoretical and Numerical Simulations of Face Stability around Shield Tunnels in Sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (1): 98-104.
- [12] 金大龙, 袁大军, 李兴高. 盾构土仓压力变化规律测试试验与理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (增1): 2960-2967.
JIN Dalong, YUAN Dajun, LI Xinggao. Test and Theoretical Analysis of Change Laws of Earth Chamber Pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (S1): 2960-2967.
- [13] 申林方, 王志良, 魏纲, 等. 盾构隧道开挖面被动极限支护压力的三维解析解[J]. 现代隧道技术, 2014 (6): 35-40.
SHEN Linfang, WANG Zhiliang, WEI Gang, et al. Three-dimensional Analytical Solution for Passive Limit Support Pressure during Shield Tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014 (6): 35-40.
- [14] 金大龙, 李兴高. 砂土地层盾构隧道开挖面支护压力与地表变形关系模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (2): 44-51.
JIN Dalong, LI Xinggao. Model Test of the Relationship between the Face Support Pressure and Ground Surface Deformation of a Shield-driven Tunnel in Sand Stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (2): 44-51.
- [15] 鲍绥意, 关龙, 刘军, 张国京. 盾构技术理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
BAO Suiyi, GUAN Long, LIU Jun, ZHANG Guojing. Theory and Practice of Shield Technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] 陈立生, 王洪新. 土压平衡盾构平衡控制的新思路[J]. 上海建设科技, 2008 (5): 19-22.
CHEN Lisheng, WANG Hongxin. New Idea about Balance Control of Earth Pressure Balance Shield[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2008 (5): 19-22.

Calculation Model of Earth Chamber Pressure during Non-Barrier Launching of EPB Shield

LIU Jun¹ NAN Zhiling^{1,2} JIN Xin³

(1 School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044; 2 Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100125; 3 Shandong High-speed Real Estate Group Co., Ltd., Jinan 250098)

Abstract Pressure in earth chamber can't be built up in time during conventional launching of EPB shield since it needs to manually remove the retaining structure of steel reinforced concrete in advance. Even though water stopping and reinforcement are carried out at the tunnel entrance, but the problems of soil mass collapse, water inflow and sand gushing can't be thoroughly solved. In view of this a calculation model of earth chamber pressure during non-barrier launching of EPB shield was established by building retaining structure of fiber glass reinforced concrete at tunnel portal, and a formula to calculate earth chamber pressure during non-barrier launching of EPB shield was presented. The application of this calculation model to Beijing metro line 16 shows the calculation model can reflect the build-up process of earth chamber pressure, and the volume of added material like soil and so on before launching is a key factor related to build-up of earth chamber pressure.

Keywords Metro tunnel; Non-barrier launching of EPB shield; Earth chamber pressure; Theoretic analysis; Calculation model; Volume of added soil