

土压平衡盾构施工引起地面变形研究的评述^{*}

姚元¹ 陈梦成² 何彬彬² 许开成² 侯宇² 冯玉林²

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障
国家重点实验室, 330013, 南昌)

摘要 [目的]土压平衡盾构施工过程中会不可避免地产生土体扰动,引起地层变形,进而对周围建筑环境产生不利影响,开展土压平衡盾构施工引起地层变形的研究具有重要意义。[方法]通过整合各类相关文献,以施工各环节的联系为中心进行研究。阐明了土压平衡盾构施工工作机理,从隧道几何因素、土层地质条件和盾构掘进参数三方面研究地面变形诱因。论述了土压平衡盾构施工引起地面变形的预测方法,并分析了各方法的适用性与优缺点。以变形诱因和变形预测为基础,列举了土压平衡盾构施工致地面变形的控制措施。指出了土压平衡盾构施工研究中存在的不足,并对土压平衡盾构施工未来发展方向进行了展望。[结果及结论]土压平衡盾构施工引起地面变形的诱因为隧道几何因素、土层地质条件和盾构掘进参数。土压平衡盾构施工引起地面变形的预测方法有经验公式法、理论解析法、有限单元与有限差分的数值模拟法,模型试验法、人工智能法。基于对地面变形的监测,不断调整施工中的盾构参数,是目前控制土压平衡盾构地面变形的有效方法。

关键词 土压平衡盾构施工;地面变形;研究进展

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.014

Review of Ground Deformation Caused by Earth Pressure Balanced Shield Construction

YAO Yuan¹, CHEN Mengcheng², HE Binbin², XU Kaichen², HOU Yu², FENG Yulin²

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China; 2. East China Jiaotong University, State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, 330013, Nanchang, China)

Abstract [Objective] During the process of EPB SC (earth pressure balanced shield construction), inevitable soil disturbances occur, causing ground deformation and subsequently impacting the surrounding built environment negatively. Therefore, conducting research on the ground deformation caused by EPB SC holds significant importance. [Method] By integra-

ting various relevant literatures, the research is centered around the connections between each stage of the construction. The working mechanism of EPB SC is clarified, the causes of ground deformation are studied from three aspects: tunnel geometry factors, soil geological conditions, and shield tunneling parameters. The prediction methods for ground deformation caused by EPB SC are discussed, the applicability and pros and cons of each method are analyzed. Based on the causes of deformation and deformation prediction, control measures for ground deformation caused by EPB SC are listed. The shortcomings in the research of EPB SC are pointed out, and the future development direction of EPB SC is discussed. [Result & Conclusion] The causes of ground deformation induced by EPB SC are tunnel geometry factors, soil geological conditions, and shield tunneling parameters. The prediction methods for ground deformation caused by EPB SC include empirical formula method, theoretical analysis method, numerical simulation method of finite elements and finite difference, model test method, and artificial intelligence method. Based on the monitoring of ground deformation, continuously adjusting the shield parameters during construction is an effective method to control ground deformation by EPB shield.

Key words earth pressure balanced shield construction; ground deformation; research progress

土压平衡盾构施工过程中会不可避免地产生土体扰动,造成地面沉降等问题。如何弱化土压平衡盾构施工对周围土体的扰动及对周边建筑环境的影响,对土压平衡盾构施工引起的地面变形进行预测和控制,成为亟待解决的问题。

鉴于此,本文基于土压平衡盾构施工原理,归纳土压平衡盾构施工引起地面变形的因素,论述土压平衡盾构施工引起地面变形的预测方法,并讨论各方法的适用性与优缺点,列举土压平衡盾构施工

^{*} 国家自然科学基金项目(52268074, 52368047);江西省教育厅项目(GJJ2200646, GJJ2200675);华东交通大学科研启动经费项目(2003420001);江西省自然科学基金资助项目(20224BAB214073, 20232BAB204081)

致地面变形的控制措施,分析土压平衡盾构施工研究中的不足,并对土压平衡盾构施工发展方向进行了展望,以期为该领域的研究与应用提供一定参考。

1 土压平衡盾构原理

土压平衡盾构施工原理简图如图 1 所示。盾构推进中,前端刀盘切削开挖面前方土体至刀盘后方土舱内,进入土舱内的土体和辅料(泡沫、聚合物、膨润土等)相互混合;承压隔板作为介质;在千斤顶作用下,土舱内混合物产生舱内土压 F_2 。在盾构掘进中,通过螺旋输送机控制出土量保持土舱压力 F_2 与刀盘外土压力 F_1 的动态平衡。

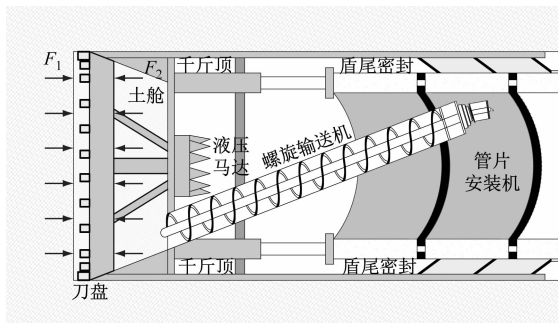


图 1 土压平衡盾构施工原理简图

Fig. 1 Diagram of earth pressure balanced shield construction principle

2 土压平衡盾构施工地面变形的诱因

土压平衡盾构施工中,地面沉降影响因素大致分为隧道几何因素、土层地质条件和盾构掘进参数。

2.1 隧道几何因素

地铁隧道施工时不同隧道埋深及外径等因素对地面沉降变形产生较大影响。文献[1]认为隧道埋深和隧道间距对砂卵石地层隧道施工引起地面沉降有显著影响;文献[2]发现随隧道埋深的增大,地面沉降先稳定增大后逐步减小;文献[3]求得双线隧道的几何参数与地面沉降的皮尔逊相关分析为 0.44,表明几何参数对地面沉降的影响至关重要;文献[4]认为双线平行盾构隧道地面沉降受隧道相对间距影响显著,建议重视该因素的影响。

2.2 土层地质条件

土层地质条件的差异是引起不同程度地面变形的原因之一。文献[5]发现地面沉降随地应力释放值的增大而增大,增大的趋势在开挖面周边围岩塑性区更明显;文献[6]发现拱顶下沉值与地面变

形呈线性;文献[7]发现盾构隧道下卧层含水率影响着施工后的地面沉降大小;文献[8]发现盾构施工地层中的地下管线和地下构筑物对地面沉降存在一定影响,管线及构筑物的埋深越浅,影响越明显。

2.3 盾构掘进参数

隧道几何因素和土层地质条件属于客观条件。盾构掘进参数属于主观条件,在施工中对地面沉降的影响可控。文献[9]模拟了盾构开挖动态过程,发现注浆开始时间、注浆压力和注浆量在很大程度上影响地面变形;文献[10]认为隧道开挖过程中引起的地面变形与掌子面压力关联最大;文献[11]通过数值模拟证实了适当增大注浆压力、及时注浆及在一定范围内增大注浆量都能有效地减少地面沉降;文献[12]发现,在一定范围内,土舱压力和注浆压力对地面变形有显著影响,超过该范围后影响效果不再明显。土压平衡盾构施工是一个复杂的系统工程,地面沉降影响因素众多,各方面间具有较强的关联性。但在研究过程中,通过假设使参数理想化,难以反映实际工况,研究结果与实际情况有一定偏差。此外,研究多集中于盾构施工中地面变形的影响因素,对引起工后地表滞后变形的原因还需进一步探究。

3 土压平衡盾构施工地面变形的预测

随着土压平衡盾构施工技术的广泛应用,国内外学者对施工过程中引起地面变形的预测方法进行了大量的研究,目前常用的有如下几种方法。

3.1 经验公式法

科学家 Peck 首次提出地层损失的概念。通过分析大量隧道地面变形的实测数据,Peck 发现横向地面沉降槽近似成正态高斯分布,在不排水的情况下,地层损失与隧道开挖所形成的地面沉降槽在体积数值上是相等的^[13]。对此,Peck 建立了地面沉降的经验估算公式,即 Peck 公式,为:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_j}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_j}{2.5i} \quad (2)$$

式中:

$S(x)$ ——距离隧道中心轴线为 x 处的地面沉降,单位 m;

S_{\max} ——隧道轴线位置处地面沉降值,单位 m;

x ——距隧道中心线的距离,单位 m ;

i ——沉降槽宽度,单位 m ;

V_j ——单位长度地层损失量,单位 m^3/m 。

Peck 公式因其使用简单明了的特性至今仍被广泛应用于工程实例中。

由式(1)及式(2)可以看出, i 对预测结果的合理性起关键性的作用。众多学者在 Peck 公式的基础上,围绕 i 展开了深入的研究。文献[14]将 i 的计算公式补充归纳为四类(24种): $i = f(z_0, \varphi)$ 、 $i/R = a(z_0/2R)^n$ 、 $i = a(bz_0 + cR)$ 、 $i = az_0 + b$, (其中, z_0 为隧道的埋深, φ 为土层内摩擦角, a 为长度常量, b 为大于 1 的常数(量纲为一), c 为常数, R 为隧道半径, n 为截面上的构件总数)明确了 i 的演变规律。文献[15]通过反分析-分析方法提出黏性土地区 i 值的拟合公式:

$$i = m \left[R_0 + h \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] - 0.0572 \quad (3)$$

式中:

m —— i 值的拟合系数,可取 0.45 ~ 0.50,平均值取 0.475;算例分析表明, m 较小的取值范围可减少经验参数较大取值范围所产生的误差;

h ——隧道轴线至地面深度,单位 m ;

R_0 ——隧道外半径,单位 m ;

φ ——隧道轴线以上土的内摩擦角,对于成层土按厚度取加权平均值,单位($^\circ$)。

此外,文献[16]通过对上海地区地面变形实测数据的归纳分析,提出了考虑土体扰动后固结沉降的 Peck 修正公式;文献[17]结合成都地铁 7 号线 9 个区间的地面监测数据,提出了适用于成都砂卵石地层的地面沉降预测经验公式。

经验公式的提出一般基于对现场实测数据的总结、分析和归纳,在使用中只需确定公式中固定的参数即可计算变形值大小,获得地面沉降槽曲线。该方法易懂、易用,但缺乏理论支撑,与工程实测数据有较大依附关系。因此,经验公式仅适用于特定的施工条件,且大多经验公式中参数较为单一。这导致该方法在复杂地层条件中的计算结果与实测数值偏差较大。

3.2 理论解析法

理论解析法是基于弹性、弹塑性等理论推导出的计算公式,对于计算量小,边界条件较为简单的地面沉降计算有一定的优势。文献[18]在平面应变条件下,根据不可压缩土壤土体流失情况的闭合

解和弹性各向同性均质体地层损失情况的应求解,提出了地面变形的理论计算方法;文献[19]对文献[18]的方法进行拓展,求解的过程中忽略了隧道的存在及其规定的位移,推导了地面损失引起均匀径向位移和隧道的椭圆化两种情况下的隧道变形近似解析解;文献[20]基于弹性力学 Mindlin 解,推导了关于刀盘摩擦力、盾尾同步注浆压力和土体损失等因素的地面变形解析式;文献[21]将地面下沉的三维问题转化为一维离散问题,推导出了地面沉降的半解析理论计算函数。随着随机介质理论的发展与应用,部分学者将该理论与土压平衡盾构施工相结合。文献[22]基于随机介质理论,结合实际数据,推导了土压平衡盾构隧道的纵向地面变形理论计算公式;文献[23]将地表下沉和地表隆起考虑为一种随机过程,结合随机介质理论推导了不考虑土体后期固结沉降的地面沉降计算公式。

理论解析法适用于边界条件和初始条件较为简单的问题,在量化研究地面变形各影响因素之间的关系方面具有一定的优势。理论解析法模型通常比较简单,考虑因素少,假设条件与施工现场实际情况相差甚远,所以仅具有理论参考意义,或作为其他方法(如数值模拟法、模型试验法或人工智能法)的理论验证,很少直接应用于实际工程。

3.3 数值模拟法

数值模拟法依托计算机强大的计算能力,解决了参数多、数据大的复杂问题,显著提高了计算速度和计算结果的准确性。目前,该方法中有限差分法和有限单元法的应用较为广泛。

3.3.1 有限差分法

有限差分法求解软弱地层内土压平衡盾构施工造成的地面沉降具有较强的可行性。文献[24]利用有限差分法建立了反映土压平衡盾构施工主要因素的 3D 模型,分析发现,数值模拟重点是选择合适的数值模拟技术、对细节进行处理及推进过程准确模拟;文献[25]基于有限差分数值模拟分析了深圳某地铁不同施工阶段的地面变形,表明适当增大土舱压力、及时注浆均能有效减少地面变形;文献[26]将土体假设为各向同性,具有与摩尔-库伦阻力准则相联系的完全弹塑性结构,假设衬砌为弹性结构,基于有限差分法模拟了隧道施工;文献[4]建立三维有限差分模型研究了双线平行盾构施工的地面变形影响因素,其结果表明,双线平行隧道盾构施工地面沉降受隧道相对间距影响较大。

3.3.2 有限单元法

有限单元法是求解具有已知边界条件或初始条件的偏微分方程组的一种通用数值解法。文献[27]建立二维平面模型,模拟了相应荷载下的盾头挤压、盾尾脱空、衬砌安装和衬砌固结4个阶段,其研究结果表明,采用非均布荷载计算地面变形更为合理。文献[28]基于plaxis 2D有限元软件建立复合地层沉降预测的数值计算模型,发现开挖隧道横向不均匀变形主要发生在隧道两侧1.5倍隧道直径范围内。

随着研究的深入,学者们发现二维平面应变有限元模型不能模拟复杂的三维几何形体及开挖过程等对地面沉降的影响。由此,建立三维隧道有限元模型研究地面变形机制至关重要。文献[29]基于三维有限单元法计算了盾构推进过程中影响地面沉降的多个因素与地面变形之间的关系,归纳了地面变形规律;文献[30]考虑到隧道结构的对称性,利用plaxis 3D软件建立了半边区域的三维有限元模型,揭示了隧道施工中土拱区的三维应力应变传递机理。文献[31]采用一种新的混凝土模型建立了三维有限元模型,解释了小变形下土壤刚度增加现象。

数值模拟法能有效地模拟盾构施工的实际过程,综合考虑影响地层变形的各种因素,但该方法要求研究人员应具备一定软件运用基础。模型的参数选择难以准确地反映实际情况,使用中也很难模拟地层因素及开挖因素,由此造成沉降预测值与实际情况有较大偏差。

3.4 模型试验法

由于土压平衡盾构施工现场条件复杂,影响地面沉降的参数难以准确掌握,部分学者开展了室内模型试验,易于控制相关参数,较好还原土压平衡盾构施工实际过程,有利于研究地面变形规律。文献[32]建立纵向隧道缩尺模型,提出了盾构隧道纵向变形分布监测策略,该策略可用于检测长期荷载作用下的实际隧道纵向变形。文献[33]通过相似材料模型试验得到盾构施工地层移动规律,明确了先行隧道对地层产生的扰动使地面沉降叠加。文献[34]建立了一个实验室规模的模型,通过对地面沉降分析发现,与黏土地层或砂土地层相比,富水卵石地层在横向和纵向上的地面沉降槽更窄,进而引入与横向不同的纵向宽度系数,修正了施工期间预测地面沉降的方程,使修正方程的结果更符合实

测数据。文献[35]开展了一系列的砂土层模型试验,得到了土体损失对地面变形的影响,结果表明,砂土中的土体损失与地面变形呈线性关系。

模型试验法用于研究地面变形,能够忽略施工过程中众多因素的影响,方便研究各个参数对地面变形的影响程度。此外,在试验过程中能清楚地观察到地面变形的引起机理和发展过程,有利于掌握地面变形规律。但模型试验法考虑的参数过于理想化,不能准确地模拟真实的地层条件,且模型试验的周期长、成本高,通过试验所得信息也比较有限。

3.5 人工智能法

人工智能法源于神经网络理论。该方法在使用前需结合大量土压平衡盾构施工地面变形实测数据,建立起地面变形与各个影响因素之间的映射关系,通过使用训练好的神经网络映射对地面变形进行预测。在使用过程中,还可不断通过新的数据来训练神经网络,提高预测精度。文献[36]建立了BP(反向传播)神经网络预测模型,结果表明,该预测模型经过训练后具有较好的泛化预测能力。文献[37]基于遗传算法对BP神经网络进行优化,提高了神经网络的训练稳定性。文献[38]建立了DEACO-WNN(差分进化与蚁群优化-小波神经网络)模型,提高了预测模型的收敛速度和预测精度;文献[39]基于敏感性分析方法确定了影响土压平衡盾构施工地面变形的参数,通过正交试验获得了用于网络模型的训练样本和测试样本,从而建立了径向基函数神经网络模型。

人工智能法通过神经网络的优势,在建立影响因子和变形量之间的非线性关系时,无需获得各影响因子与变形量之间确切的物理关系,从而避免了建立复杂本构模型的过程,并且在使用过程中可通过不断的训练提高预测精度,是一条不同于传统数学建模的研究思路。但该方法需要使用者具有一定的编写代码的能力,并且该方法的关键在于建立一个储存大量详实参数的数据库,而计算精度又过于局限数据库中的样本数量。因此,人工智能法虽为主流趋势,但仍有必要进一步深入研究。

4 土压平衡盾构施工地面变形的控制

合理的变形预测是盾构施工顺利开展的前提,而对地层扰动和变形的有效控制是保证施工安全的关键。因此,在工程中实现从变形预测到变形控制的转变至关重要。

地面变形控制一直是盾构施工中一个亟待解决的重要问题。受盾构总推力、千斤顶顶力、推进速度、排土量和注浆参数等掘进参数影响,土舱压力的设定是一个动态过程,土压平衡实质是一种动态平衡,而现有技术较难保持其动态平衡。因此,国内外众多学者致力于盾构掘进参数的研究,实现更具有操作意义的土压平衡,以保证掘进面相对稳定,减小地面沉降。

文献[40]针对西安地铁 2 号线某区间含细砂、中粗砂土层,使用质量比为 1:10 膨润土泥浆,以 2:10 的体积比加入到渣土,进行了改良试验。结果表明,当土舱压力、出土量、注浆压力和注浆量分别控制在 140~260 kPa、54~56 m³、210~300 kPa、每环 4 m³ 时,土压平衡盾构能较好适应改良后的含砂土层。针对卵石含量为 50%~75%,主要粒径为 20~80 mm 的砂卵石地层,文献[41]认为将刀盘转速控制在 1.0~1.2 r/min 较为适合,刀盘扭矩控制在 3 000~4 600 kNm 为宜;文献[42]通过对隧道平均埋深为 16.90 m,成型隧道管片外径为 6.0 m、内径为 5.4 m 的北京地铁 8 号线某区间进行检测,提出注浆压力与拱顶竖向土压力之比保持在 1.5 以上,注浆压力控制在 2.43 bar 较为安全;文献[43]研究了富水圆砾地层(粒径为 2~20 mm 的颗粒为主,最大粒径为 63 mm,粒间主要以中、粗砂填充)中不同盾构掘进参数对地面变形的影响,结果表明:圆砾地层盾构推力和土舱压力应分别控制在 12 000 kN 和 1 bar 左右,且正负波动不宜过大。

对土压平衡盾构施工所引起地面变形控制的现有研究,多局限于根据施工经验调整施工参数(通过对地面变形的实时监测,不断调整盾构施工参数),最终获得引起地面沉降较小的施工参数区间值。这类控制方法缺乏对工程状况的预测机制,且实际施工情况复杂多样,已有研究很难直接用于其他同类地层。此外,现有研究对施工后的地面沉降控制关注过少,且事后处理耗费高、延误工期。因此,对工后沉降控制方法应有进一步深入研究。

5 结语

地面变形的诱因可总结为隧道几何因素、土层地质条件和盾构掘进参数三方面,其中盾构掘进参数表现为可控性。

地面变形预测方法大多采用理想化模型,预测结果与实际情况存在一定偏差。地面变形预测模

型的选取,应从工程实际出发,同一工况,采取多种模型进行预测,最大程度保证预测结果的准确性与合理性。

基于对地面变形的监测,不断调整施工中的盾构参数,是目前控制土压平衡盾构地面变形的有效方法。对于工后变形,因其处理耗费高、延误工期长,故需对工后地面变形控制方法进一步研究。

未来土压平衡盾构施工的研究,将重点发掘施工各环节之间的相关性。在现有均质、单一地层地面变形研究的基础上,未来将进一步开展复杂地层条件下的地面变形研究,尽可能还原实际施工情况。在数值模拟和理论推导中,相关研究需考虑地下水影响,在地面变形控制方面开展工后预测机制与控制方法研究。

参考文献

- [1] 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, 15(4): 33.
ZHAO Xuwei, TAN Jing, YU Qinghao. Numerical analysis of shield tunneling influence on surface settlement in sandy cobble stratum[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(4): 33.
- [2] WU C, ZHU Z. Analytical method for evaluating the ground surface settlement caused by tail void grouting pressure in shield tunnel construction[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1.
- [3] KIM D, PHAM K, PARK S, et al. Determination of effective parameters on surface settlement during shield TBM[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 21: 153.
- [4] 邱明明,杨果林,段君义,等. 近距双线盾构隧道开挖诱发地层变形演变规律及数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 60.
QIU Mingming, YANG Guolin, DUAN Junyi, et al. Evolution rules and numerical simulation of stratum deformation induced by close-spaced twin tunnels shield construction[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 60.
- [5] 丁春林,朱世友,周顺华. 地应力释放对盾构隧道围岩稳定性和地表沉降变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1633.
DING Chunlin, ZHU Shiyu, ZHOU Shunhua. Influence of in situ stress release on the stability of surrounding rock masses and ground surface settlement for shield-driven tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1633.
- [6] 张项立,黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703.
ZHANG Dingli, HUANG Jun. Analysis and prediction of vault crown settlement in metro tunneling at shallow depth[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (10): 1703.
- [7] 杨兵明. 软土地层盾构隧道长期沉降规律及预测研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 87.
- YANG Bingming. Research on the law and prediction of long-term settlement of shield tunnel in soft soil stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 87.
- [8] 董昕. 土压平衡盾构施工引起地表横向不均匀沉降的因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- DONG Xin. Factor analysis of the uneven transverse surface settlement caused by EPB shield construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [9] 李曙光, 方理刚. 土压平衡盾构法隧道施工中影响地表沉降的因素浅析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(5): 72.
- LI Shuguang, FANG Ligang. Analysis on the factors affecting ground settlements caused by EPB TBM tunneling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(5): 72.
- [10] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C, KONSTANTINIDIS G K. Numerical assessment of subsidence and adjacent building movements induced by TBM-EPB tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140 (11): 1.
- [11] 雷华阳, 仇王维, 吕乾乾, 等. 盾构施工中注浆因素对地表沉降的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (5): 1303.
- LEI Huayang, QIU Wangwei, LYU Qianqian, et al. Study on the impact of the grouting factors on surface subsidence in the process of shield construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1303.
- [12] 戴志成, 封坤, 徐凯, 等. 土压平衡盾构水下始发段掘进参数对地表沉降的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63 (10): 99.
- DAI Zhicheng, FENG Kun, XU Kai, et al. Analysis on impact of underwater tunneling parameters of soil pressure balance shield on surface settlement[J]. Railway Standard Design, 2019, 63 (10): 99.
- [13] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// ICSMFE. Proc. of 7th ICSMFE, Mexico; ICSMFE, 1969.
- [14] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- HAN Xuan. The analysis and prediction of tunnelling-induced building deformations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [15] 魏纲. 盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 74.
- WEI Gang. Study on calculation for width parameter of surface settlement trough induced by shield tunnel[J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 74.
- [16] 侯学渊, 廖少明. 盾构隧道沉降预估[J]. 地下工程与隧道, 1993(4): 24.
- HOU Xueyuan, LIAO Shaoming. Settlement prediction of shield tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1993 (4): 24.
- [17] 周帅. 成都富水砂卵石地层土压盾构施工引起地层变形规律研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
- ZHOU Shuai. Study on stratum deformation law caused by EPA shield construction in Chengdu water rich sandy cobble stratum[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.
- [18] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301.
- [19] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 709.
- [20] 魏超, 武崇福, 徐双军. 考虑刀盘结构形式影响的盾构施工引起的地表沉降分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37 (6): 2446.
- WEI Chao, WU Chongfu, XU Shuangjun. Analysis of ground settlement caused by shield construction considering the influence of cutterhead structure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2446.
- [21] 施建勇, 张静, 余才高, 等. 隧道施工引起土体变形的半解析分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30 (6): 48.
- SHI Jianyong, ZHANG Jing, SHE Caigao, et al. Semi-analytical method for calculation of soil deformation caused by tunnel construction[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2002, 30(6): 48.
- [22] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 56.
- ZHU Zhonglong, ZHANG Qinghe, YI Hongchuan. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 56.
- [23] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 585.
- SHI Chenghua, PENG Limin, LIU Baochen. Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 585.
- [24] 王传琦. 成都地铁区间隧道盾构施工引发地表沉降的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- WANG Chuanqi. Chengdu Metro running tunnels in the shield construction caused the numerical simulation of surface subsidence[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [25] 洪源. 盾构法隧道施工地表沉降变形模拟分析[J]. 铁道建筑, 2012, 52(4): 65.
- HONG Yuan. Simulation analysis of surface settlement and deformation in shield tunnel construction[J]. Railway Engineering, 2012, 52(4): 65.
- [26] CHAKERI H, ÜNVER B. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft

- ground [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71 (7): 3195.
- [27] FINNO R J, CLOUGH G W. Evaluation of soil response to EPB shield tunneling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 155.
- [28] 李振, 魏丽敏, 彭富强. 复合地层盾构穿越机场诱发地层沉降计算及控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11 (5): 131.
- LI Zhen, WEI Limin, PENG Fuqiang. Construction control and calculation of settlement induced by mixed ground shield under-crossing airport[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(5): 131.
- [29] 刘洪洲, 孙钧. 软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(6): 24.
- LIU Hongzhou, SUN Jun. Study on numerical simulation of factors of ground settlement during shield driving in soft ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(6): 24.
- [30] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Three-dimensional stress-transfer mechanism and soil arching evolution induced by shield tunneling in sandy ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103104.
- [31] ZAKHEM A M, EL NAGGAR H. Effect of the constitutive material model employed on predictions of the behaviour of earth pressure balance (EPB) shield-driven tunnels [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100264.
- [32] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于改进共轭梁法的盾构隧道纵向沉降分布监测策略[J]. 土木工程学报, 2013, 46 (11): 112.
- SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, et al. A monitoring strategy for longitudinal settlement of shield tunnel based on the improved conjugate beam method[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 112.
- [33] 朱训国, 陈枫, 徐孟林, 等. 大连地铁盾构开挖地层移动规律的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 148.
- ZHU Xunguo, CHEN Feng, XU Menglin, et al. Study of strata movement law through similar model test in the Dalian City subway shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (S1): 148.
- [34] FANG Y, CHEN Z, TAO L, et al. Model tests on longitudinal surface settlement caused by shield tunnelling in sandy soil[J]. Sustainable Cities and Society, 2019.
- [35] HU X, HE C, WALTON G, et al. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(10): 1.
- [36] 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.
- BAI Yongxue. Research on ground collapse mechanism of shield tunnelling in saturated sandy pebble stratum and corresponding measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [37] 牟友滔. 土压平衡盾构施工引起的地表沉降非线性预测与控制分析[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- MU Youtao. Prediction and control of ground surface settlement due to EPB shield tunnelling using non-linear method [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [38] 郝如江, 季雁鹏, 倪振利. 基于 DEACO-WNN 的盾构施工地表沉降预测[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 12.
- HAO Rujiang, JI Yanpeng, NI Zhenli. Study on predicting the surface settlement for shield tunneling based on DEACO-WNN [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 12.
- [39] 杨欢欢, 杨双锁, 罗百胜. 地铁盾构施工地表变形的神经网络预测及应用[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 625.
- YANG Huanhuan, YANG Shuangshuo, LUO Baisheng. Prediction and application of neural network on surface deformation from subway shield tunneling construction[J]. China Science Paper, 2019, 14(6): 625.
- [40] 胡长明, 张文萃, 梅源, 等. 土压平衡盾构穿越含砂土层地表变形规律与控制技术[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(3): 341.
- HU Changming, ZHANG Wencui, MEI Yuan, et al. The earth surface deformation and control technology as EPB shield machine driving through layer with sand[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(3): 341.
- [41] 冯欢欢, 杨书江. 成都地铁 4 号线砂卵石地层土压平衡盾构施工技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 274.
- FENG Huanhuan, YANG Shujiang. Tunneling by EPB shield in gravel strata: case study on Line 4 of Chengdu Metro[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 274.
- [42] 徐前卫, 贺翔, 龚振宇, 等. 砂卵石地层盾构微扰动施工及掘进控制研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 72.
- XU Qianwei, HE Xiang, GONG Zhenyu, et al. Research on the micro-disturbance construction and tunneling parameters control of earth pressure balance shield machine in sandy cobble stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 72.
- [43] 杨旸, 谭忠盛, 彭斌, 等. 富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊1): 94.
- YANG Yang, TAN Zhongsheng, PENG Bin, et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in water-soaked round gravel strata[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 94.

· 收稿日期:2021-06-29 修回日期:2021-08-27 出版日期:2024-01-10
 Received:2021-06-29 Revised:2021-08-27 Published:2024-01-10
 · 第一作者:姚元,工程师, yaoyuansnow@126.com
 通信作者:何彬彬,讲师, hebinbin@lzb.ac.cn
 · ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
 © Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license