

盾构刀盘开口率对富水粉细砂层地表沉降的影响*

白云飞¹ 刘昊运² 张志强¹ 李五红¹ 廖霖²

(1. 中铁十二局集团第二工程有限公司, 030032, 太原;

2. 太原理工大学矿业工程学院, 030024, 太原//第一作者, 高级工程师)

摘要 针对盾构机在富水粉细砂层中修建地铁引起的地表沉降问题,基于地表沉降理论,以太原地铁2号线某富水粉细砂层的盾构掘进区间段为研究对象,模拟不同开口率的刀盘对地表沉降的影响。结果表明,土压平衡式盾构机采用大开口率刀盘更适用于掘进富水粉细砂层,选用50%开口率的刀盘的土压平衡盾构机可成功将地表沉降控制在2 cm以内;推导出的经验公式适用于盾构机掘进富水粉细砂层的地表沉降计算;根据盾构实测出土量最终确定刀盘开口率为51%的盾构机更适合掘进太原地区富水粉细砂层。

关键词 地铁盾构; 地表沉降; 刀盘开口率; 富水粉细砂层

中图分类号 U456.3⁺1; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.021

Effect of Metro Shield Cutter-head Aperture Rate on Ground Surface Subsidence of Water-rich Silty Fine Sand Layer

BAI Yunfei, LIU Haoyun, ZHANG Zhiqiang, LI Wuhong, LIAO Lin

Abstract Aiming at the problems of surface settlement due to metro construction in water-rich silty sand layer by shield machine, and based on the theoretical analysis of surface subsidence, the shield tunneling section in water-rich fine sand layer on Taiyuan metro Line 2 is taken as the research object, the influences of different aperture rate of the cutter-head on the ground surface subsidence are simulated. The research shows that the cutter-head with large aperture rate adopted in earth pressure balanced (EPB) shield machine is more suitable for driving in the water-rich silty fine sand layer. When the EPB shield machine select the 50% aperture rate cutter-head in the construction, the ground surface settlement could be successfully controlled within 2 cm, and the empirical formula obtained could be used to calculate the ground surface settlement of shield tunneling in water-rich silty fine sand layer. According

to the measured excavation volume of shield tunneling, the cutter-head with 51% aperture rate is proved to be more suitable for shield tunneling in the water-rich silty fine sand layer of Taiyuan City.

Key words metro shield; ground surface subsidence; aperture rate of cutter-head; water-rich silty fine sand layer

First-author's address The 2nd Engineering Co., Ltd., China Railway 12th Bureau Group, 030032, Taiyuan, China

目前,针对盾构刀盘开口率与富水粉细砂层的适应性研究较少。文献[1]认为,盾构刀盘的设计与优化取决于其对地层的适应性。文献[2-4]发现,盾构掘进参数主要与刀盘开口率有关,随着刀盘开口率增加,土舱压力、土压力传递系数增大,而开挖面处的支护压力、刀盘对前方土体的挤土效应,以及刀盘扭矩变小。文献[5]提出刀盘环向开口率的指标,发现刀盘直径越大,环向开口率越大;渣土会从开口率小的区域向开口率大的区域流动,因此渣土对刀盘的磨损区域常出现在开口率大的区域。文献[6]研究发现砂土极易液化的特性;文献[7-8]发现在含水量多的粉细砂层中施工存在掌子面不稳等问题;文献[9]对盾构机掘进黄河冲淤泥地层进行研究,发现刀盘开口率对掌子面维稳和土体流动性有重要作用。

本文结合太原地铁2号线某区间隧道盾构掘进富水粉细砂层的施工实例,以及控制地表沉降量在2 cm的施工成果,研究盾构机刀盘开口率对富水粉细砂层地表横向沉降的影响,发现盾构机刀盘开口率与出土率间的关系,通过分析得出经验公式。研究成果可对我国盾构机在富水粉细砂层施工提供借鉴。

* 国家自然科学基金项目(51604183);山西省自然科学基金项目(201703D111027)

1 工程概况

以太原地铁 2 号线(以下简为“2 号线”)某盾构区间左线隧道为工程背景进行研究。该区间地层为富水粉细砂地层,盾构机开挖直径为 6.43 m。粉细砂地层存在砂土液化特性,盾构机掘进施工对地层的扰动容易引起地层发生区域性液化。尽管液化范围、规模、影响力相较地震砂土液化要小很多,但是液化带来的破坏作用对地铁隧道工程的施工影响很大,甚至会导致不可恢复的灾难性后果。某区间隧道中各土层具体参数如表 1 所示。由表 1 可知,太原地区地质含水丰富,土层复杂多样,对施工扰动较为敏感。

表 1 2 号线某区间隧道地层力学参数

Tab.1 Mechanical parameter of tunnel stratum in a certain section of Line 2			
地层	含水量/%	相对密度	体积质量/(g/cm³)
<2-2> 粉质黏土	25.8	2.72	1.97
<2-3-1> 黏质粉土	22.9	2.71	1.98
<2-5> 中砂	14.5	2.68	1.99
<2-4> 粉细砂	19.3	2.71	2.02

2 地表沉降理论分析

由于隧道开挖所引起的沉降量与地层损失量相等,隧道开挖引起的地表沉降曲线近似呈正态分布。文献[10]计算并推导出了如下隧道开挖的地表沉降曲线公式:

$$s(x) = s_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2l^2}\right) \tag{1}$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{\sqrt{2\pi}i} \tag{2}$$

$$i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi}\tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})} \tag{3}$$

饱和塑性黏土沉降槽宽度系数可按下式进行计算:

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z}{2R}\right)^{0.8} \tag{4}$$

文献[11]通过现场隧道开挖模型试验与监测,提出了如下地层损失体积与地表最大沉降量的关系表达式:

$$S_{\max} = \frac{1.25R^2 V_i}{\left[0.175 + 0.325\left(1 - \frac{z_0}{Z}\right)\right]Z} \tag{5}$$

式中:

- $S(x)$ ——地表沉降量,m;
- S_{\max} ——地表最大沉降量,m;
- x ——距隧道中心线的距离,m;
- V_i ——施工单位长度时的地层损失量,m³/m;
- Z ——地表至隧道中心线的距离,m;
- z_0 ——计算点距地表的距离,m;
- i ——隧道中心线至沉降曲线反弯点的距离,m;
- R ——隧道半径,m;
- ϕ ——土体内摩擦角,(°)。

文献[12]对盾构掘进地层的出土量与出土率进行计算,得出每环最大出土量 Q_{\max} 与刀盘开口率 ξ 的关系表达式,以及最大出土率 e_{\max} 与 ξ 的关系表达式:

$$Q_{\max} = \frac{\pi \xi^2 D^3 d(p_0 - p_a)}{8\left[\frac{2c}{k_1} + (1 + K_0)\gamma H \frac{\tan \phi}{k_2}\right]L} \tag{6}$$

$$e_{\max} = \frac{\xi^2 D^3 (p_0 - p_a)}{2\left[\frac{2c}{k_1} + (1 + K_0)\gamma H \frac{\tan \phi}{k_2}\right]L} \geq 100\% \tag{7}$$

式中:

- k_1 ——黏聚力折减系数;
- k_2 ——内摩擦角折减系数;
- L ——土舱长度,m;
- ξ ——刀盘开口率,%;
- D ——土舱直径,m;
- d ——每环的管片宽度,m/环;
- c ——土体的黏聚力,kPa;
- H ——隧道中心埋深,m;
- γ ——隧道中心以上土体的加权平均重度,kN/m³;
- K_0 ——土体的静止侧压力系数;
- P_0 ——静止侧向土压力,kPa;
- P_a ——主动土压力,kPa。

综上可知,盾构掘进出土量与盾构刀盘开口率的二次方成正比。根据建设单位所给的盾构掘进出土量与沉降值,分别对不同刀盘开口率时盾构掘进含有富水粉细砂层的地表沉降值进行分析,推算出适用于富水粉细砂地层的经验公式。根据式(5)计算得到最大地表沉降量为 1.7 cm,且在 2 cm 以内。结合式(6),以开挖 1 环的出土量来计算, k_1 取 4.3, k_2 取 1.8, D 取 6.43 m,1 环掘进长度取 1.5 m,

H 取 14 m, c 按粉细砂取 2 kPa, ϕ 按粉细砂取 25° , γ 取 19 kN/m^3 , K_0 取 0.43, 实测 L 为 1.02 m。通过计算得到开挖面 P_0 为 1 210.62 kPa, P_a 为 1 097.65 kPa。2 号线某盾构区间掘进每环的实测出土量, 如图 1 所示。根据实测值, 盾构掘进稳定时开挖每环的出土量取 45 m^3 。

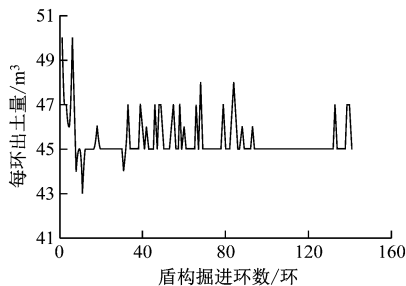


图 1 2 号线某区间左线盾构掘进环数与每环出土量关系图

Fig. 1 Relation diagram of shield tunneling ring number and unearthed quantity on the left line of a Line 2 section

3 2 号线某盾构区间隧道数值模拟分析

3.1 不同开口率时的刀盘受力模拟

刀盘开口率为刀盘开口区域面积与刀盘总面积的比值。根据上述理论分析可知, 盾构机刀盘开口率影响着出土量, 出土量越大地层损失越多。引起地表沉降最重要的原因就是地层损失, 因此, 研究刀盘开口率是必要的。复合地层需要布置大量刀具, 刀盘开口率一般取 10% ~ 35%; 软土地层均一性良好, 则配置开口率为 40% ~ 75% 的刀盘; 对于富水粉细砂地层, 建设单位选用刀盘开口率为 50% 的土压平衡式盾构机。

本文运用 Python 语言, 对 ABAQUS 软件进行二次开发。通过改变圆心角的度数, 实现对辅助刀梁的快速建模。刀盘由 4 个圆环、8 面板和 8 根辐条组成。采用 ABAQUS 软件分别建立 4 个圆环、8 根圆管装主刀梁, 以及 6 组刀盘开口率分别为 22%、30%、40%、50%、60%、65% 的辅助刀梁模型, 并采用布尔操作进行装配。刀盘选择 Q345C 的高强度钢, 设置刀盘模型的密度为 7.85 g/cm^3 , 弹性模量为 201 GPa, 划分网格为最优的四面体单元 C3D10M。盾构施工实测刀盘所受土压力见图 2 a)。由图 2 a) 可知, 盾构机掘进时, 初始挖掘阶段刀盘所受土压力较小, 而后从挖掘阶段至结束刀盘所受土压力仅平稳在 0.2 MPa 以内。盾构机掘进时刀盘主要承受土压力, 为研究刀盘的受力, 选择较大的侧向受力 0.2 MPa, 并在模型中设置垂直于

刀盘的纵向荷载。

根据工程实测得到盾构机的掘进速度, 见图 2 b)。对刀盘模型施加 60 mm/min 的掘进速度, 并控制其绕 z 轴旋转, 根据实测得到盾构机刀盘的转速, 见图 2 c)。设置刀盘转速为 1 r/s, 并保持速率不变。通过数值模拟, 选择具有明显特征的 3 组结果进行分析。

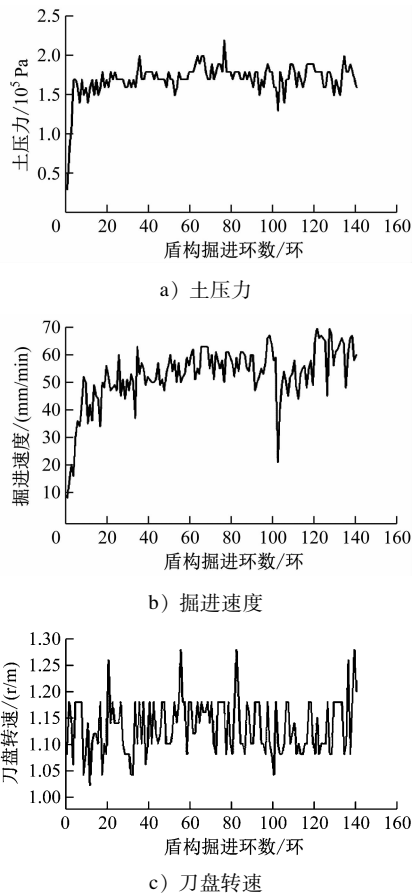


图 2 盾构掘进每环实测参数图

Fig. 2 Measured parameter diagram of each ring of shield tunneling

刀盘最小开口率为 22% 时, 其受力云图见图 3 a)。由图 3 a) 可知, 辅助刀梁几乎覆盖了主刀梁间的空白区域。通过读取主刀梁上的受力, 绘制主刀梁沿自身路径的受力曲线, 见图 3 b)。由图 3 b) 可知, 刀盘主刀梁的受力呈正态分布, 且在其中部出现几个突出的峰值力, 因此刀盘开口率过小时, 其受力会急剧增大。

当刀盘开口率为 50% 时, 其受力云图见图 4 a)。此模型是工程实际所用刀盘模型, 辅助刀梁与主刀梁间均存在均匀的空隙。读取主刀梁上的受力, 绘制如图 4 b) 所示沿其自身路径上的受力曲

线。由图 4 可知,当刀盘开口率增大到 50% 时,主刀梁沿其自身路径上的受力更趋近于正态分布,且受力完全集中于刀盘中心。

当刀盘开口率增大到 65% 时,其受力云图见图 5 a)。此时刀盘上已没有辅助刀梁,主刀梁沿其自身路径的受力如图 5 b) 所示。由图 5 可知,刀盘主刀梁上的受力已经出现多个突出点,受力不再集中,刀梁受力控制较困难,这将对盾构施工控制土舱压力造成极大困难。

综合分析不同开口率的刀盘受力可知,刀盘开口率变大或变小,主刀梁上的受力都会变得不集中;而当采用 50% 的刀盘开口率时,主刀梁的受力集中于其中部位置。因此,盾构施工推进时可以较为准确而简单地控制土舱压力于一点,而减少对刀梁受力突变的控制,这样可预防受力突变时刀盘对地层的超挖与无法控制的沉降发生,也可减少对地层的扰动,从而控制掘进区间的地表沉降及预防土壤液化的发生。

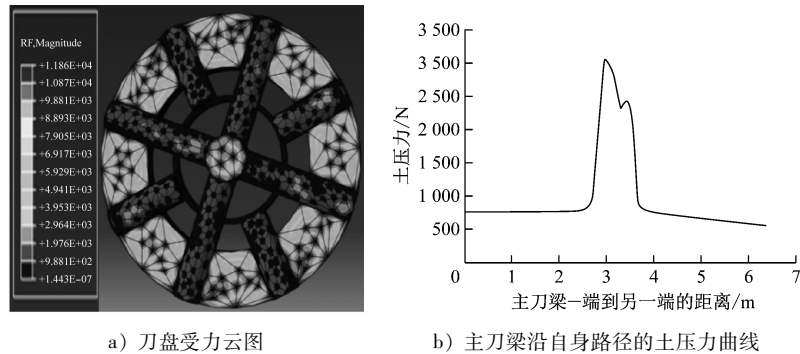


图 3 开口率为 22% 时的刀盘仿真受力图

Fig. 3 Cutter head simulation stress diagram with the aperture rate of 22%

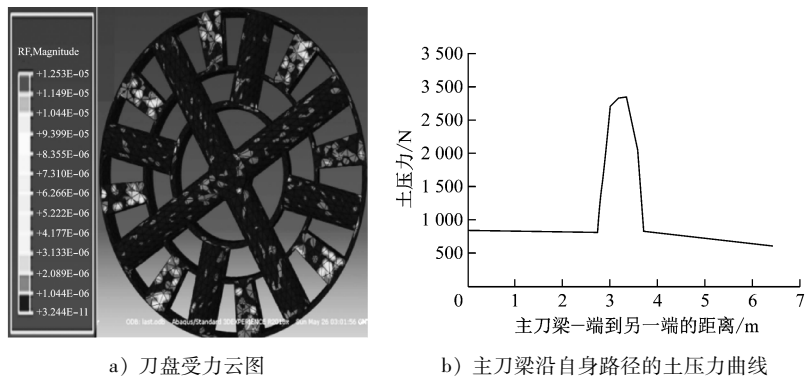


图 4 开口率为 50% 时的刀盘仿真受力图

Fig. 4 Cutter head simulation stress diagram with the aperture rate of 50%

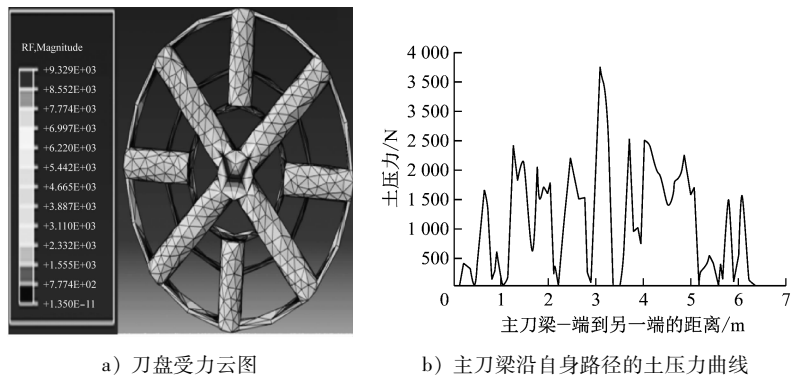


图 5 开口率为 65% 时的刀盘仿真受力图

Fig. 5 Cutter head simulation stress diagram with the aperture rate of 65%

3.2 某盾构区间隧道三维数值模拟分析

根据工程资料显示,2 号线某盾构区间隧道地层埋深为 10 ~ 17 m,盾壳长约 8 m,盾构掘进开挖直径为 6.43 m,注浆层厚度为 115 mm,管片衬砌厚度为 350 mm。图 6 为盾构机掘进模拟示意图,通过建立卸荷单元,可以模拟盾构机挖掘出土和继续掘进的过程。

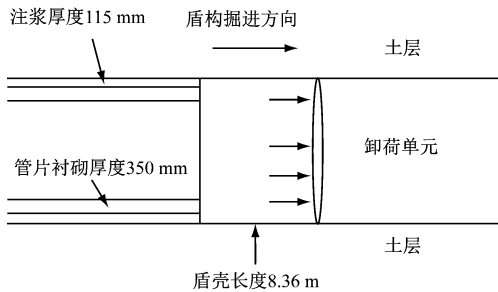


图 6 2 号线某盾构区间掘进模拟示意图

Fig. 6 Schematic diagram of shield tunneling simulation in a certain section of Line 2

首先,建立 100 m × 100 m 的网格,然后创建沿 X 方向 42 m、沿 Y 方向 25 m、沿 Z 方向 35 m 的土体模型。土的弹性模量设为 20 MPa,管片的弹性模量设为 35 GPa,网格划分为线性减缩积分的八节点六面体(C3D8R)单元。设置掘进荷载为 0.2 MPa,土层模型的左右边界位移为 0,前后边界位移为 0,建立 3 个卸荷单元模拟盾构连续掘进 3 个盾体长度的区间段。通过模拟运算,得到盾构掘进三维数值模拟云图,见图 7。

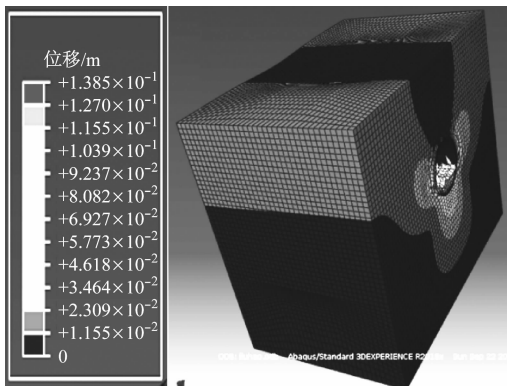


图 7 2 号线某盾构区间隧道三维数值模拟云图

Fig. 7 3D numerical simulation cloud diagram of tunnel in a certain section of Line 2

通过模拟结果发现,盾构机掘进土层时,地表沉降较为明显;盾构掘进时中心土挖走后,两侧土体在重力作用下充填挖掘出土的空隙;随着卸荷单

元消失,注浆层与管片衬砌的设置控制了盾构机上侧土体的沉降,下侧土层呈略微的隆起。选取模型上方中心横向 20 m 的地表沉降模拟结果,绘制地表沉降模拟曲线,见图 7。选取盾构掘进区域上方中心横向 20 m 的地表沉降实测结果,绘制在图 8 中。由图 8 可见,地表沉降大致呈正态分布,最大地表沉降量接近但未超过 2 cm。通过 Origin 软件将地表沉降实测值进行正态高斯分布拟合,得到地表沉降拟合曲线,见图 8。综合分析地表沉降实测拟合曲线与地表沉降模拟曲线,发现地表沉降模拟值与实际值相符,地表沉降均在 2 cm 以内;两条曲线形态相近,验证了地表沉降曲线接近于正态分布,为推算地表沉降经验公式做了准备。

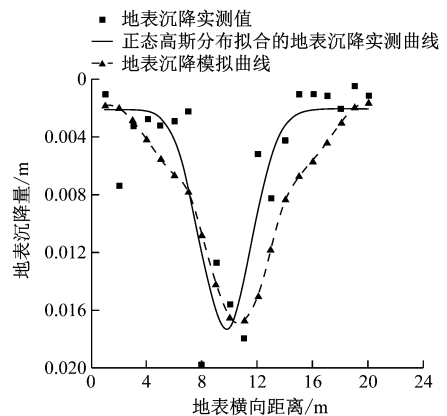


图 8 地表横向沉降曲线图

Fig. 8 Surface transverse subsidence curve diagram

4 地表沉降经验公式的推导及验证

通过地表沉降实测值及其拟合曲线,结合式(1)推算出富水粉细砂层中的地表横向沉降经验公式:

$$S = -0.015e^{-0.14(x-9.73)} - 0.002 \quad (8)$$

式中:

x ——地表横向沉降测点距某一端点的距离, m;

S ——地表沉降量, m。

根据式(8)计算得到最大地表沉降量为 1.7 cm,且在 2 cm 以内。结合式(6),以开挖 1 环的出土量来计算, k_1 取 4.3, k_2 取 1.8, D 取 6.43 m,1 环掘进长度取 1.5 m, H 取 14 m, c 按粉细砂取 2 kPa, ϕ 按粉细砂取 25° , γ 取 19 kN/m^3 , K_0 取 0.43,实测 L 为 1.02 m。通过计算得到开挖面 P_0 为 1 210.62 kPa, P_a 为 1 097.65 kPa。2 号线某盾构区间掘进 1

环的实测出土量,如图1所示。根据实测值,盾构掘进稳定时开挖每环的出土量取 45 m^3 。

推算得出盾构掘进富水粉细砂层时的每环出土量与盾构刀盘开口率的经验公式为:

$$Q_{\max} = 174.38 \xi^2 \quad (9)$$

通过式(9)可以发现,盾构通过富水粉细砂层时掘进每环的出土量与刀盘开口率的平方成正比。当实际工程要求出土量保持为 45 m^3 时,可推算刀盘开口率约为 51%,此时地表沉降值也在 2 cm 以内,符合工程实际。

选取2号线某盾构区间右线隧道的地表沉降实测值,验证式(8)的适用性。将式(8)所得的地表沉降曲线与地表沉降实测值绘制在图9中。由图9可见,地表沉降实测值基本位于地表沉降曲线上,可见该经验公式适用于富水粉细砂层。

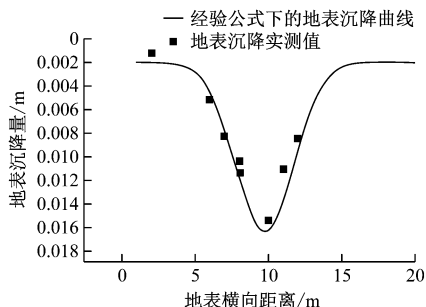


图9 经验公式下的地表沉降曲线图

Fig. 9 Surface settlement curve based on empirical formula

为验证式(9),选取盾构掘进2号线某盾构区间右线隧道的每环出土量,见图10。由图10可见,出土量仍保持在 45 m^3 左右。地表沉降值根据图9仍可控制在 2 cm 以内,满足要求。

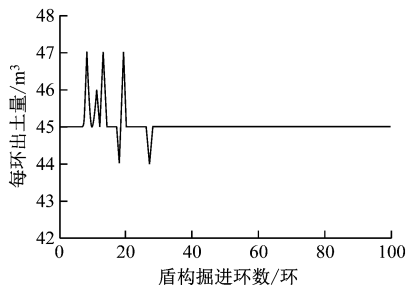


图10 2号线某区间右线盾构掘进环数与每环出土量关系图

Fig. 10 Relation diagram of shield tunneling ring number and unearthed quantity of per ring on the right line of a Line 2 section

因此,建议盾构施工时刀盘开口率采用 51%,这样可以保证较好的出土率,增加掘进速度,减少盾构掘进对地层的扰动,防止发生土壤液化。

5 结语

1) 通过研究刀盘开口率,发现刀盘主刀梁上的受力呈正态分布时为最佳,此时操作人员可使用较小的机械推力控制盾构机掘进。

2) 分析了刀盘开口率与盾构掘进每环出土量的关系,建议采用 51% 开口率的刀盘。这不仅可以保证主刀梁受力较为集中,也可以保证较大的出土率,增加了盾构的掘进速度,优化了施工进度,防止了土壤液化问题发生,对控制盾构掘进富水粉细砂地层的地表沉降有实际意义。

3) 结合理论公式与工程实测数据,推算出富水粉细砂地层地表横向沉降的经验公式。针对土压平衡式盾构机施工,根据盾构出土量与刀盘开口率的二次方成正比,推算出盾构掘进富水粉细砂地层的出土量与刀盘开口率的经验公式。通过实测数据验证了经验公式能满足要求,对盾构施工此类地层有借鉴意义。

参考文献

- [1] 李建斌. 浅谈盾构刀盘的设计与应用[J]. 建筑机械化, 2006(3): 31.
LI Jianbin. Design and application of shield cutter head[J]. Construction Mechanization, 2006(3): 31.
- [2] 金大龙, 袁大军, 李兴高. 盾构刀盘开口率对掘进参数影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2017(2): 156.
JIN Dalong, YUAN Dajun, LI Xinggao. Model test influence of shield cutterhead aperture ratio on driving parameters[J]. Modern Tunneling Technology, 2017(2): 156.
- [3] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土舱压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012(1): 89.
WANG Hongxin. Influence of aperture ratio of cutterhead of EPB shield on earth pressure in the chamber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012(1): 89.
- [4] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009(7): 113.
WANG Hongxin. Effect of cutterhead compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(7): 113.
- [5] 杨志勇, 程学武, 江玉生. 泥水平衡盾构刀盘扭矩计算及其影响因素分析[J]. 铁道工程学报, 2016(5): 59.
YANG Zhiyong, CHENG Xuewu, JIANG Yusheng. Analysis of cutterhead torque calculation and its influence factors for slurry balance shield[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(5): 59.
- [6] 杨举明. 粉细砂液化特性及碎石桩复合地基加固处理研究

- [D]. 成都:西南交通大学,2008.
- YANG Juning. Study on liquefaction characteristics of style-fine sand and liquefiable ground treated by gravel pile composite foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2008.
- [7] 王锋. 第三系富水粉细砂地层大断面隧道综合施工技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- WANG Feng. Study on comprehensive construction technology of large section tunnel in third water rich fine sand formation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2017.
- [8] 张学文. 桃树坪隧道穿越富水粉细砂地层双导洞超前法施工技术[J]. 隧道建设,2016(5):577.
- ZHANG Xuewen. Advanced double-drift construction technologies for Taoshuping Tunnel crossing water-rich fine silty sand strata[J]. Tunnel Construction,2016(5):577.
- [9] 夏金春. 黄河冲淤积地质条件下的盾构机刀盘开口率选择研究[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集. 昆明:中国土木工程学会隧道及地下工程分会,2012:5.
- XIA Jinchun. Study on opening ratio selection of shield machine cutter head under the geological condition of Yellow River alluviation [C]//China Civil Engineering Society, Tunnel and Underground Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Proceedings of the 15 th Annual Conference of China Society of Civil Engineering and the 17 th Annual Conference of the Tunnel and Underground Engineering Branch. Kunming: China Civil Engineering Society, Tunnel and Underground Engineering Branch of China Civil Engineering Society,2012:5.
- [10] CLOUGH G W, SCHMIDT B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay[J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1981, 20:567.
- [11] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A, et al. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 315.
- [12] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J]. 土木工程学报,2010(3):88.
- WANG Hongxin. Type selection of the head aperture ratio of EPB shield cutterheads and adaptability to stratum characteristics[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(3):88.

(收稿日期:2019-11-12)

中国中车与同济大学联合研制的国内最大功率氢燃料电池混合动力机车完成牵引等系列性能试验

近日,中国中车与同济大学联合研制的国内最大功率氢燃料电池混合动力机车完成牵引等系列性能试验,其中氢燃料电池系统功率为 400 kW,目前在轨道交通领域功率最大。自 2021 年 6 月该机车在中车戚墅堰公司组装下线后,双方团队经过 3 个月的试验线调试,先后完成了氢燃料电池系统 400 kW 静态测试和整车混合动力牵引试验等 20 多项系列性能测试。这标志着校企双方 4 年多时间的产学研合作取得了重大原创成果。同济中车创新研究中心负责人表示,这是中国中车和同济大学携手推动轨道交通产业绿色化、低碳化发展的重要成果,为世界铁路装备的可持续发展提供了创新示范,将助力我国“碳达峰”“碳中和”目标早日实现。中国中车与同济大学于 2016 年底成立了共建共管的同济中车创新研究中心。同济大学团队由新能源汽车工程中心、汽车学院、电子与信息工程学院、铁道与城市轨道交通研究院的教授和研究生等构成;中国中车团队由来自中车研究院、中车大连所、中车大连电牵公司和中车戚墅堰公司等的技术骨干构成。中心进行整体组织、协调和项目管理。该项目以同济大学 20 多年氢燃料电池电动汽车领域国家“863 计划”重大专项的科研成果和百年轨道车辆领域技术优势为基础,按照铁路运用场景特点,遵循相关铁路标准,以学科交叉融合的优势开展团队攻关。目标是面向氢燃料电池动力系统的关键技术,开发满足商业化应用的具备长寿命和高度一致性的燃料电池电堆、控制器、DC/DC 变换器和换热系统等关键零部件,研制出轨道交通应用的大功率氢燃料电池系统。其中百千瓦等级的氢燃料电池电堆、组合集成的氢燃料电池系统、两级架构的大功率 DC/DC 变换器、大功率热管理系统等,经历了方案设计、专家评审、施工设计、研发制造、第三方测试、地面调试、装车验证等环节的过程化管理。所研制的氢燃料电池系统最高效率达 55%,功率密度大于等于 3 500 W/L,为国内最早且具有自主知识产权的 400 kW 氢燃料电池系统,相关技术指标达到世界先进水平。氢能被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源。氢燃料电池作为氢能利用的主要载体,具有能量转换率高、环境污染小、噪声低等优点,在汽车、轨道交通、船舶、航空航天等交通领域具有广泛的应用前景。这次研制的氢燃料电池机车,是世界上首台兆瓦级新能源(氢燃料电池和锂电池混合)供电、永磁同步电机牵引的 C0-C0 型调车机车。该型机车设计时速 100 km,起动牵引力 520 kN,平直道最大牵引载重超过 8 000 t;并装用 12 瓶组、35 MPa 大容量高压储氢罐,满载氢气可连续运行 24 h,全过程零排放,完全能够取代 80% 既有内燃调车机车,可用于在役内燃机车的升级换代。

(摘自 2021 年 9 月 17 日同济大学新闻网,同济中车创新研究中心 康劲松报道)