

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.009

盾构开挖顶推力对下平行隧道影响的数值分析

矫永刚

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州 072750)

摘要: 以滨海软土地层中盾构隧道平行上穿既有隧道为背景, 通过数值仿真软件对开挖动态过程进行了精细化模拟, 研究盾构隧道施工顶推力对周边地层及其内部既有隧道受力变形的影响。结果表明, 在新建隧道上穿施工过程中, 开挖扰动对地层的影响范围主要集中在距开挖面 $-1.0\sim 1.5D$ 区域内(D 为盾构隧道外径), 扰动效果以新建隧道轴线为中心呈环状向外扩散, 盾构顶推力从 0.1 MPa 增至 0.4 MPa 时, 地表变形及 1.0D 范围内地层压力均增大 20% 以上; 新建隧道平行上穿既有隧道过程中, 既有隧道断面变形从横向鼓曲变为竖向拉伸, 且整体出现上浮现象, 顶推力达 0.3 MPa 后, 既有隧道拱底和拱顶隆起速度增加, 以拱底为基准, 顶推力自 0.1 MPa 增加至 0.4 MPa 时, 隧道上浮量增大 34.2%; 施工过程中除保证常规地表变形监测外, 对于近接平行上穿施工还需加强对既有隧道竖向变形的监控, 必要时采取结构加固措施和施工参数综合调整办法, 以降低开挖扰动对周边地层和结构物的影响。

关键词: 盾构隧道; 软土地层; 平行上穿; 顶推力; 数值模拟

中图分类号: U459.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)01-0046-07

Numeric analysis of the influence of shield excavation jacking force on the lower parallel tunnel

JIAO Yonggang

(The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 18 Bureau Group, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: Taking the shield tunnel in the coastal soft soil layer running parallel with the existing tunnel beneath it as the background, the numerical simulation software was used to finely simulate the dynamic excavation process, focusing on the influence of the jacking force of the shield tunnel on the surrounding stratum and the internal tunnel. Results show that during the construction process of the new tunnel, the influence of excavation disturbance on the stratum and internal structures is mainly concentrated in the area that is $-1.0\sim 1.5D$ from the excavation surface(D represents external diameter of the shield tunnel). The disturbance effect spreads outward in a ring shape around the axis of the new tunnel. When the shield excavation jacking force increases from 0.1 MPa to 0.4 MPa, the surface deformation and the formation pressure within the 1.0D range increase by more than 20%. During the process of new tunnel running parallel above the existing lower tunnel, the deformation of the tunnel sections changes from lateral drum to vertical tension, and the overall floating phenomenon occurs. After the jacking force reaches 0.3 MPa, the bulging speed of the tunnel arch bottom and the dome of the existing tunnel increases. Based on the arch bottom, when the jacking force increases from 0.1 MPa to 0.4 MPa, the floating amount of the tunnel increases by 34.2%. In the construction process, in addition to ensuring the regular deformation monitoring, it is necessary to strengthen the monitoring of the vertical deformation of existing tunnel so as to ensure the parallel construction above it. Structural reinforcement measures and comprehensive adjustment of construction parameters shall be taken when necessary to reduce the impact of excavation disturbances on surrounding strata and structures.

收稿日期: 2019-11-12

作者简介: 矫永刚(1979-), 男, 山东烟台人, 工程师, 硕士, 研究方向: 地铁盾构隧道施工。

Keywords: shield tunnel; soft soil layer; running parallel above; jacking force; numerical simulation

近年来,轨道交通在我国各大城市取得长足发展,盾构法修建隧道凭借先进的施工工艺和施工技术,在施工过程中机械自动化程度高、掘进速度快等优点受到人们的青睐,因此在城市地铁建设中得到了广泛的应用^[1-3]。

顶推力作为盾构掘进过程中重要的施工参数,密切影响着地表沉降以及围岩附加压力。当盾构机后方千斤顶推进时,盾构刀盘对开挖面的压力一般为盾构总推力的 15%~20%,当加压压力与开挖面前方的水土压力相等时,开挖面可维持平衡状态,而加压压力过小则无法维持开挖面平衡,开挖面前方土体可能会沿着刀盘方向发生塌陷,加压压力过大则刀盘会挤压未掘削土体,使之产生外扩位移。国内外学者通过理论解析、数值模拟和模型试验方法,对顶推力优化展开了大量研究。张厚美^[4]通过对现场掘进试验的统计分析,建立顶推力、刀盘转速等主要掘进参数对掘进速度的线性数学模型。徐前卫等^[5-9]通过模型试验及数值模拟手段,研究盾构推进过程中包括顶推力在内的各施工参数对地层和近接隧道的影响。管会生等^[10-11]运用力学原理和数学方法,建立并改进了盾构推进力计算理论模型。何祥凡等^[12-13]针对特殊施工情况下顶推力的影响及优化进行了研究,使其适用于专有工况。Hasanpour 等^[14]通过数值模拟对在冻土围岩环境中的双线隧道 TBM 的开挖周期中推进速率问题进行了分析,考虑了千斤顶顶推力的作用并确定掘进所需的顶推力。上述成果对盾构顶推力的数学描述和作用机理已经做了相关研究,但针对顶推力在盾构近接小角度穿越施工过程中的影响规律应进一步详细分析和归纳。

本文以软土地层中某盾构隧道上下平行近接穿越既有隧道为背景,通过有限差分软件对穿越过程进行了精细化数值模拟,重点关注盾构顶推力对地表沉降、围岩附加压力和既有隧道变形的影响,总结影响规律,以期为类似工程盾构参数的选取提供参考。

1 工程概况

1.1 工程概述

此线路区间有 2 条盾构隧道正线和 2 条盾构

隧道出入线并行延伸,由于出入线在区间中部侧向延伸至正线外侧,因此出现了正线与出入线的上下交叠穿越现象。出入线位于正线上方,埋深 6.6 m 左右,线路采用了先下后上的施工顺序,即两出入线均以接近平行的空间方位上穿正线右线,穿越净距为 7.3 m 左右,约一倍洞径,具体位置关系如图 1 所示。各线盾构隧道外径 6.2 m,内径 5.5 m,幅宽 1.2 m,管片采用 C55 钢筋混凝土预制而成。

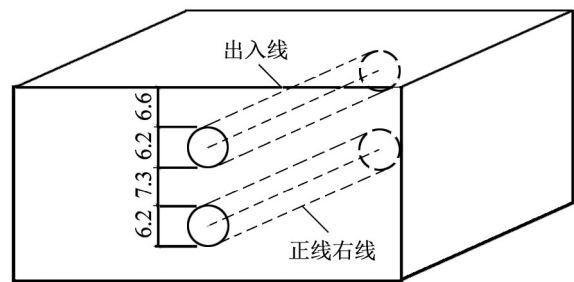


图 1 新建隧道与既有隧道详细位置关系图 (单位:m)

Fig.1 Detailed location relationship between new tunnel and existing tunnel (unit:m)

1.2 工程地质

此工程场地位于福建地区沿海地层,土层由上至下依次是杂填土、淤泥、粉质黏土和淤泥质土,除最上层杂填土外,以下三层是盾构施工的主要土层,各土层压缩性较高,属于典型的滨海软弱土层,参考工程地质勘察资料,具体参数如表 1 所示。

表 1 地层参数表

Tab.1 Stratum parameters

土层	平均层厚/ (H · m ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
淤泥	11.7	1.64	10.4	5.8	1.83
黏土	4.5	1.96	29.6	13.2	5.63
淤泥质土	15.05	1.74	18.0	11.6	3.23
加权平均	30.00	1.81	17.50	10.10	3.18

现场地下水按埋藏条件包括上层滞水和承压水,主要相对隔水层包括淤泥、黏土和淤泥质土夹薄层。勘察时测得钻孔中初见水位埋深为 0.5~3.6 m,混合稳定水位埋深为 0.8~3.7 m。勘察时

测得承压含水层(泥质)中砂、卵石层的稳定水位埋深为 2.2 m。

2 数值模型

2.1 有限元模型建立

采用数值分析软件^[15]建立有限元模型,模型沿盾构掘进方向长 60 m,横向长 60 m,地层厚度 30 m,如图 1 所示。建模过程中,对盾构隧道周边网格进行了局部加密,整个模型实体单元数共计 32 900 个。约束条件设置为,四侧面限制其法向位移,底部限制三方向位移,顶面为自由面。

盾构隧道衬砌采用结构单元 shell 来模拟,沿着盾构掘进方向每 1.2 m 划分一个单元网格,与盾构环宽相等。

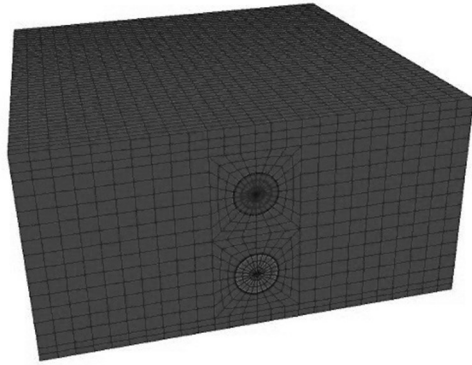


图 2 盾构隧道上下平行穿越有限元模型

Fig.2 Finite element model of parallel shield tunnels

2.2 本构关系及参数选取

考虑到盾构施工地层为软弱土层,高压缩性富水土体的变形特性不能通过 Mohr-Coulomb 本构模型得到较好的体现,而修正剑桥模型^[16]则能较好的反映土体的非线性弹性、硬化软化以及屈服等特性。该模型以塑性势函数与屈服函数相等的理论为基础,采用简单曲线配合方法得到。

一般情况下,正常固结粘土和饱和和重塑弱固结粘土存在一个边界状态面,该状态面的具体表述为:孔隙比 e 与外力 p 和 q 之间仅存一种关系,且不随应力路径变化而改变,无数条不同应力比 (p/q) 的正常压缩曲线组成边界状态面^[17]。

修正剑桥模型参数由摩擦常量 M 、正常固结曲线 λ 、回弹曲线 κ 、超固结比 OCR 组成,其值由下列公式 1~3 求出,土层修正剑桥参数见表 2。

$$M = 6\sin\varphi'/3 - \sin\varphi' \quad (1)$$

$$\lambda = C_c/\ln 10 \quad (2)$$

$$\kappa = C_s/\ln 10 \quad (3)$$

其中 φ' 为土体内摩擦角, C_c 、 C_s 由正常固结曲线和等压膨胀曲线得到。

表 2 土层修正剑桥参数

Tab.2 Cambridge parameters of soil layers

内摩擦常量	正常固结曲线	回弹曲线	超固结比
0.369	0.165	0.029 4	1.23

盾构隧道衬砌管片用线弹性本构模型模拟隧道的力学性能,具体数值见表 3。

表 3 盾构隧道管片参数

Tab.3 Shield tunnel segment parameters

外径/m	厚度/m	环宽/m	弹性模量/GPa	泊松比
6.2	0.35	1.2	34.5	0.3

2.3 模拟过程

计算过程中需模拟盾构隧道施工的关键步骤,体现开挖扰动对地层及其内部既有结构物的影响,具体过程如下:

- 1) 建立几何模型并约束边界法向位移。
- 2) 将确定的土层参数赋予相应实体单元,并进行初始地应力计算。
- 3) 在初始地应力场中分部开挖既有隧道。
- 4) 既有隧道开挖完成后,准备按设定进尺进行新建隧道开挖。
- 5) 对开挖面设置一定的顶推力。
- 6) 采用 model null 命令进行新建隧道开挖,采用 sel shell 命令进行衬砌支护。
- 7) 每环开挖后撤销所设置的顶推力,循环开挖,直至整条隧道完成。

3 结果分析

实际盾构施工中,总推力约为 8 000~16 000 kN,作用在开挖面的顶推力约为 0.1~0.2 MPa。在此基础上,数值模拟过程中分别对新建隧道开挖面施加 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 的顶推力,探寻对应地层和既有隧道的受力变形规律。

3.1 地表位移

为分析新建盾构隧道掘进过程对地表位移的

影响,在模型地表上设 5 个纵向监测点和 5 个横向监测点,如图 3 所示。*C* 测点布置在模型中心,沿前、后向每隔 5 m 各布置两个纵向测点,即 *A*、*B*、*D*、*E*,沿左、右向每隔 5 m 各布置两个横向测点,即 *J*、*K*、*M*、*N*,共 9 个测点。

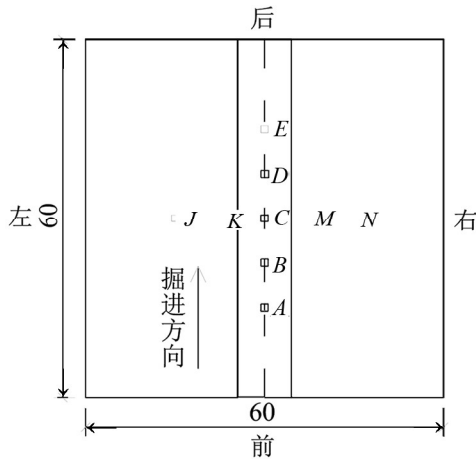


图 3 地表位移测点 (单位:m)

Fig.3 Surface displacement's measuring point (unit:m)

开挖面顶推力为 0.1 MPa 时的地表位移 *D* 与新建隧道开挖面位置 *S* 间关系如图 4 所示。

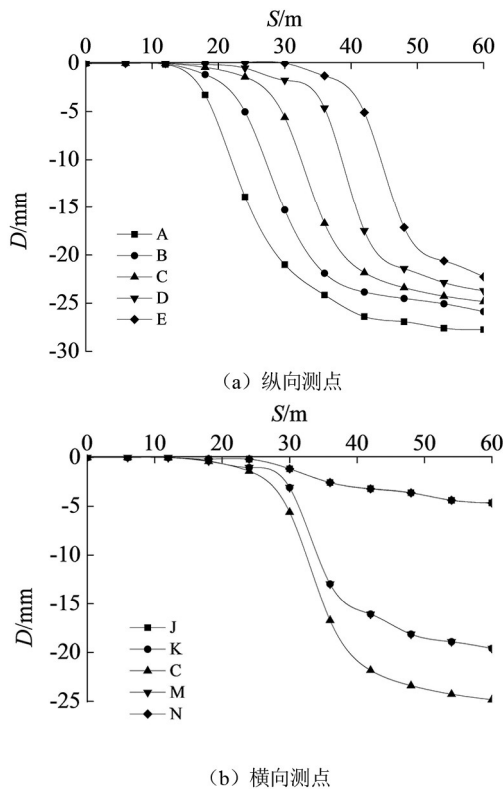


图 4 0.1 MPa 下地表沉降位移曲线

Fig.4 Surface settlement's displacement at 0.1 MPa

由图 4(a)可知,各纵向测点地表沉降值随新建隧道开挖不断增大。随着开挖面的前移,先开挖部分受盾构扰动持续时间长,对应地表沉降大于后开挖部分,其中 *A* 测点的沉降值最大为 27.7 mm, *C* 测点沉降值达到 24.8 mm, *E* 测点的沉降值最小达到 22.3 mm。

图 4(b)中, *J* 和 *N*、*K* 和 *M* 测点的位移时程曲线分别重合,即由于盾构开挖对土层的扰动由轴线向四周呈环状扩散,使地表横向测点位移分布具有对称性,且距离盾构隧道中心越近,地表位移受盾构掘进施工过程影响越大。其中 *K* 和 *M* 测点距盾构隧道中心 5 m,其地表沉降值为 19.1 mm,约为 *C* 测点的 77%, *J* 和 *N* 测点距盾构隧道中心 10 m,其地表沉降值为 4.7 mm,约为 *C* 测点沉降值的 25%。

由于地表位移各测点变化规律相似, *C* 点受盾构隧道开挖影响较为明显,不同顶推力下地表位移 *D* 与测点至开挖面距离 *L* 的关系曲线如图 5 所示。

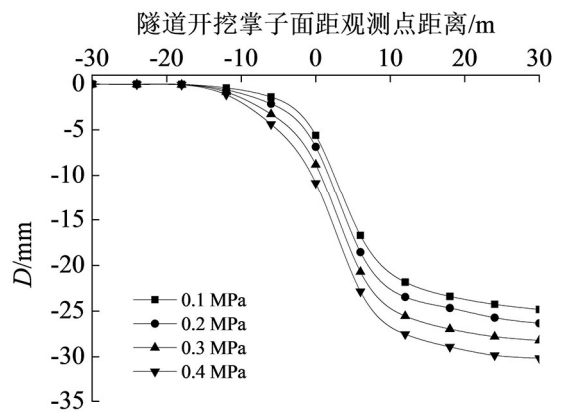


图 5 不同顶推力下测点 *C* 的地表位移曲线

Fig.5 Surface displacement of measuring point *C* with different jacking forces

由图 5 可知,在不同顶推力作用下,地表位移变化曲线规律相似。顶推力从 0.1 MPa 增加至 0.4 MPa 时,各工况测点的地表沉降分别为 24.8、26.3、28.2、30.2 mm,相邻工况间地表沉降差值近似,即随盾构开挖顶推力的增加,地表沉降量呈线性增大,其中,0.1 MPa 至 0.4 MPa 顶推力对应地表变形增大了 21.8%。这是由于计算过程以顶推为主,不考虑盾尾压浆,从而使较大的顶推力引起的地层扰动产生了明显的卸载现象。

3.2 地层附加压力

为分析新建隧道盾构掘进过程中对既有盾构隧道周围土层压力的影响,取既有隧道中间断面,在距隧道拱顶 1、2、4、5 m 的 4 个平面上各布置 3 个测点,中测点位于既有隧道中心处,并向隧道两侧 10 m 处各布置一个测点,即左、中、右测点,如图 6 所示。

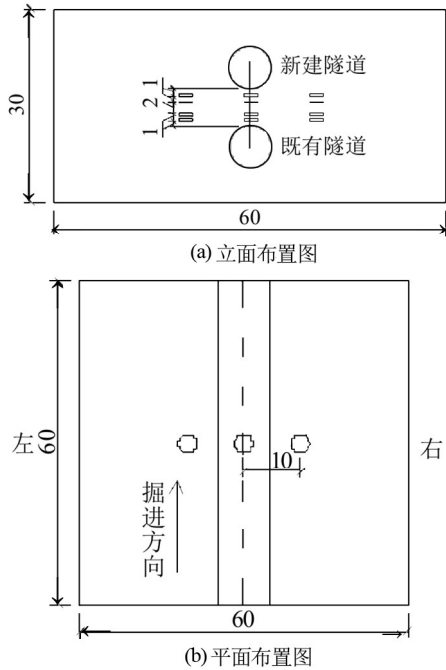


图 6 土压力测点布置图 (单位:m)

Fig.6 Layout of earth pressure's measuring points (unit:m)

当开挖面顶推力为 0.1 MPa 时,中立面测点及 $H=1\text{ m}$ 处各测点土压力变化 P 与测点至开挖面距离 L 的关系如图 7 所示。

图 7 表明,当开挖面距离观测点约 $-1.0\sim 1.5D$ 时(D 为盾构隧道外径),各测点的附加围岩竖向压力发生明显变化,当前方开挖面距离测点大于 $1.5D$ 时,附加围岩竖向压力曲线逐渐趋于稳定。在隧道中心立面,离新建盾构隧道越近的测点,其附加围岩竖向压力越大,即在竖向空间上,盾构掘进施工对土层的扰动影响由上往下递减。沿盾构隧道纵向轴线中心两侧,左、右断面测点的附加围岩竖向压力曲线相重合,说明盾构掘进对沿隧道轴线中心横向的两侧土层扰动作用呈对称分布。

同样以中立面 $H=1\text{ m}$ 测点为研究对象,在不

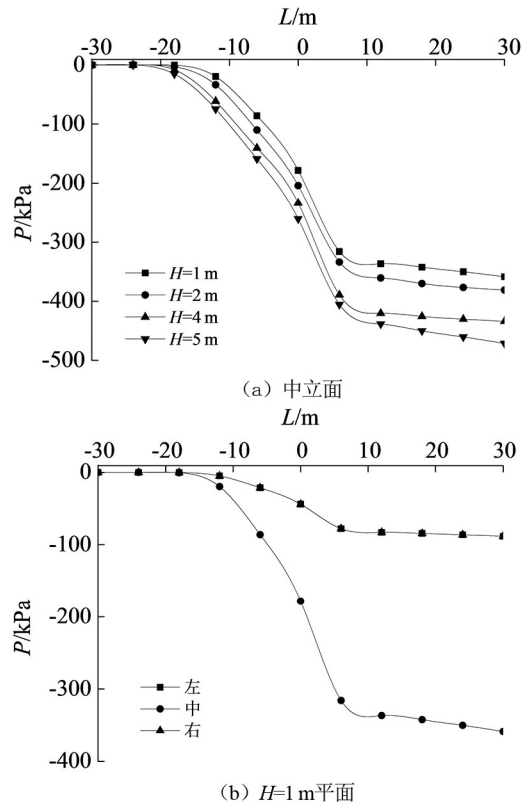


图 7 0.1 MPa 下土层竖向压力变化曲线

Fig.7 Change of vertical pressure of soil layer at 0.1 MPa

同开挖面顶推力作用下,新建盾构隧道上穿施工引起土层扰动规律如图 8 所示。

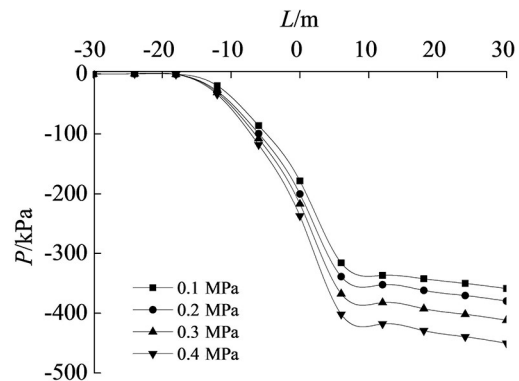


图 8 不同顶推力对应中间测点土压力变化曲线
Fig.8 Change of earth pressure at intermediate measuring point with different jacking forces

由图 8 可知,在不同顶推力作用下,土压力变化曲线规律相似,且顶推力越大,扰动影响越显著,对应地层压力变化越明显。0.1 MPa 顶推力作用下中测点竖向压力为 -358.7 kPa ,0.4 MPa 时

为-450.3 kPa,增幅达到 25.5%。

3.3 既有隧道变形

盾构开挖的扰动作用透过土层传递至既有隧道,必将对既有隧道产生一定影响。在既有隧道纵向上选取 5 个断面,即 A、B、C、D、E 断面,A 测点距初始开挖面 20 m,后续每隔 5 m 布置一个测点,测点位置平面图如图 9 所示。分别读取各断面拱腰径向位移、拱顶和拱底的竖向位移变化,拱腰外扩为正,拱顶、拱底隆起为正。

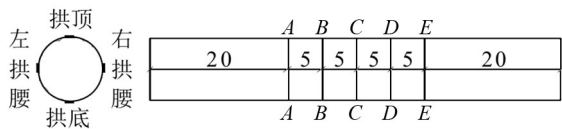


图 9 既有隧道衬砌变形测点布置图(单位:mm)

Fig.9 Layout of measuring points of the deformation of existing tunnel lining(unit :mm)

由计算结果可知,单一顶推力工况下,既有隧道各断面变形规律及量值差别不明显,仅由于受新建隧道开挖扰动影响时刻不同而出现了依次变化。因此,此处以 C 断面为例,得到既有隧道拱顶、拱底变形 D_v 随顶推力的变化规律如图 10 所示。

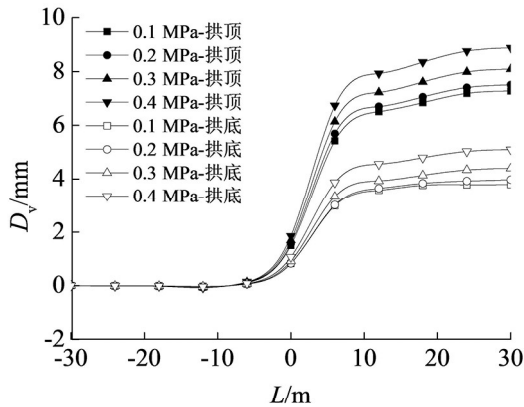


图 10 不同顶推力下既有隧道 C 断面竖向变位

Fig.10 Vertical displacement of the C section of the existing tunnel with different jacking forces

新建隧道上穿开挖过程中,当开挖面在观测点后约 1.0~1.5D 处时,既有隧道拱底、拱顶开始产生隆起,随着开挖面向前推移,各点拱底、拱顶竖向位移逐渐增加,当隧道开挖面在观测点前方约 2.0D 以后,拱底、拱顶的竖向位移逐渐趋于稳定。就变位量值而言,拱顶隆起量大于拱底隆

起量。新建隧道施工完成时,0.1 MPa 顶推力对应盾构掘进引起既有隧道拱底、拱顶隆起量与 0.2 MPa 对应值相差不大,但 0.4 MPa 顶推力对应拱底、拱顶隆起量较 0.1 MPa 时有大幅的提升,这是由于顶推力增加时,对地层的扰动影响范围也随之增大,当顶推力超过 0.3 MPa 时,扰动影响范围较为显著的区域已扩大至既有隧道所在空间,从而使其变形量随顶推力的增加呈现非线性变化规律。顶推力为 0.4 MPa 时,拱底、拱顶分别隆起 5.1、8.9 mm,0.1 MPa 为 3.8、7.3 mm,增幅为 34.2%、21.9%。因此,增加隧道开挖面的顶推力,盾构通过后卸载作用明显,将导致既有隧道拱底、拱顶的隆起量增大。

同样以 C 断面为例,既有隧道拱腰随新建隧道开挖产生的径向收敛变形 D_r 如图 11 所示。

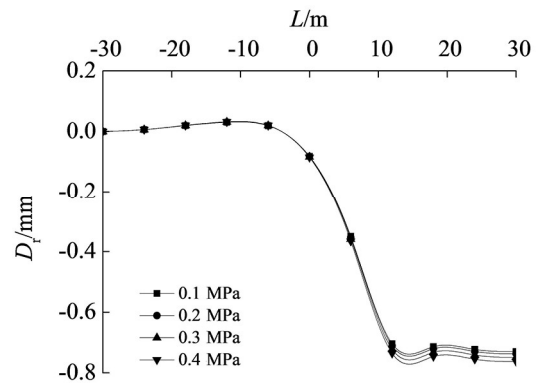


图 11 不同顶推力下既有隧道 C 断面径向收敛

Fig.11 Radial convergence of the C section of the existing tunnel with different jacking forces

图 11 表明,新建隧道上穿过程中,由于刀盘推动周边地层,挤压作用传递到既有隧道处,导致其拱腰径向位移出现略微侧鼓。当隧道开挖面到达测点处时,注浆作用及超挖现象致使地层卸载,既有隧道拱腰开始径向收敛,随着开挖面向前推移,各点拱腰径向位移逐渐增加。当隧道开挖面在观测点前方约 2.0D 以后,拱腰径向位移逐渐趋于稳定。新建隧道施工完成后,各项推力作用下盾构掘进引起既有隧道各测点的拱腰径向位移值均在 0.7~0.8 mm 范围内,增加隧道开挖面的顶推力,对既有隧道拱腰的径向位移并无显著影响。

结合既有盾构隧道竖向及径向变形可以发现,新建盾构隧道开挖面到达监测断面之前,即距离约 1.0D 时,既有隧道产生“小横鸭蛋”的变形

效应,随着隧道开挖面的不断推移前进,既有隧道断面横向逐渐收敛,竖向拉长,产生“竖鸭蛋”变形效应,当隧道开挖面在观测点前方约 1.5~2.0D 时,既有隧道各测点变位逐渐趋于稳定。

4 结论与建议

利用数值仿真方法实现了盾构隧道上穿既有隧道的动态施工过程,并对开挖引起的周边地层及既有隧道的受力变形规律进行了分析,得到如下结论:

1) 在盾构隧道上穿施工过程中,地表沉降、地层土压力和下部既有隧道受力变形主要发生在距离新建隧道开挖面前后-1.0~1.5D 范围内。距离新建隧道轴线越近的地层所受影响越大。

2) 在新建隧道开挖面到达前和通过后,既有隧道分别受土层挤压和卸载回弹作用,断面变形状态由横向鼓曲变为竖向拉伸,且竖向变形明显。

3) 由于开挖扰动后卸载作用随顶推力增加而变大,顶推力从 0.1 MPa 增至 0.4 MPa 时,地表变形及 1.0D 范围内地层压力均增大 20% 以上。顶推力超过 0.3 MPa 后,既有隧道处于开挖扰动影响主要区域,变形量呈非线性增加,且拱底和拱顶均出现隆起现象,整体呈现上浮移动,以拱底为基准,顶推力自 0.1 MPa 增加至 0.4 MPa 时,上浮量分别为 3.8 mm 和 5.1 mm,增幅为 34.2%。

4) 由计算结果可知,盾构隧道开挖必将通过地层扰动引起周边既有建筑物的变形变位。对于平行上穿既有隧道工况,施工过程中除重点监测开挖面前后 1.5D 范围内地表隆沉变形以外,对既有隧道结构自身的变形状态,尤其是竖向拉伸情况应进行重点监控,必要时加强隧道拱顶和拱底的管片强度,并结合盾构超挖量和盾尾注浆压力等施工参数,对顶推力进行综合调整,以降低开挖对周边环境的扰动影响。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.
- [2] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):112-113.
- [3] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 张厚美. 盾构隧道的理论与施工实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [6] 朱合华,徐前卫,廖少明,等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1587-1594.
- [7] 魏新江,周洋,魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地层位移影响的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):73-79.
- [8] 齐春,何川,封坤,等. 泥水平衡式盾构模拟试验系统的研制与应用[J]. 岩土工程学报,2016,38(11):1999-2008.
- [9] 张俊儒,叶伦,严丛文,等. 泥质粉砂岩地层中后行盾构隧道近接施工对大断面矿山法隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(5):122-132,156.
- [10] 管会生. 土压平衡盾构机关键参数与力学行为的计算模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [11] 耿哲,李树忱,赵世森,等. 泥水平衡盾构顶推力非线性动力学分析与应用研究[J]. 岩土力学,2018,39(S1):469-476.
- [12] 何祥凡,高峰,申兴柱,等. 盾构隧道穿上软下硬地层掌子面顶推力优化研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(6):1603-1610.
- [13] 杨成永,马文辉,彭华,等. 地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 铁道工程学报,2018,35(7):91-98.
- [14] HASANPOUR R, ROSTAMI J, ÜNVER B. 3D finite difference model for simulation of double shield TBM tunneling in squeezing grounds [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 109-126.
- [15] Itasca Consulting Group. User Manual of FLAC3D Version 5.0 [M]. Minneapolis: [s.n.], 2009.
- [16] 李顺群,张建伟,夏锦红. 原状土的剑桥模型和修正剑桥模型[J]. 岩土力学,2015,36(S2):215-220.
- [17] 姚甫昌,谢红建,何世秀. 对修正剑桥模型的认识及试验模拟[J]. 湖北工学院学报,2004,19(1):13-16.

(责任编辑:方素华)