

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240328002

盾构下穿施工既有隧道变形机理数值模拟研究*

路德春^{1,2}, 宋涛^{1,2}, 林庆涛^{1,2}, 孟旭^{1,2}, 杜修力^{1,2}

(1.北京工业大学岩土与地下工程研究所,北京 100124;
2.北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124)

摘要:盾构施工下穿既有运营隧道,易导致既有线路变形过大,给地铁列车运营安全带来安全隐患。考虑盾构机与土体相互作用、衬砌-注浆层-土体相互作用,以及同步注浆硬化过程和压力消散等关键因素,发展了盾构施工全过程数值模拟方法。结合实际工程建立盾构下穿既有隧道三维有限元数值模型,获得了盾构下穿过程中既有隧道结构变形、内力响应、围岩压力,及其周围地层应力的发展变化规律,揭示了既有隧道的变形机理。结果表明:既有隧道在纵向上发生挠曲和扭转变形,挠曲变形呈现为中部沉降两端隆起的“V”形变形,断面扭转变形呈中间大两端小的分布形式,且随盾构掘进先逆时针扭转后顺时针扭转;对于隧道横断面,在 $x=-0.8D\sim 0.8D$ 隧道断面呈现侧向压扁、竖向伸长的变形模式,在 $x=\pm 0.8D$ 之外隧道断面呈现侧向伸长、竖向压扁的变形模式, $x=-0.8D\sim 0.8D$ 隧道断面变形由盾构开挖引起的土体卸载引起, $x=\pm 0.8D$ 之外的隧道断面变形由中间区域隧道断面扭转和沉降变形的传递导致。

关键词:盾构;下穿施工;既有隧道;变形机理;数值模拟

中图分类号: U461;TP308 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0485-16

Numerical Simulation Study on Deformation Mechanism of Existing Tunnels Induced by Shield Under-crossing

LU Dechun^{1,2}, SONG Tao^{1,2}, LIN Qingtao^{1,2}, MENG Xu^{1,2}, DU Xiuli^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Shield tunneling under-crossing existing operational tunnels can easily cause excessive deformation of existing lines, posing safety risks to subway train operations. By considering the key factors such as shield-soil interaction, lining-grouting layer-soil interaction, as well as synchronous grout hardening process and pressure dissipation, we developed a numerical simulation method for the entire shield construction process. Based on an actual project, a 3D finite element numerical model of shield tunneling underneath existing tunnels was established. The evolutionary patterns of structural deformation, internal force response, surrounding rock pressure and adjacent stratum stresses during shield un-

* 收稿日期:2024-03-28;修回日期:2024-05-05

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFC3800901)、国家自然科学基金项目(52025084,52208396)资助

作者简介:路德春(1977—),男,教授,博士。主要从事岩土与城市地下工程领域研究。E-mail: dechun@bjut.edu.cn

通信作者:林庆涛(1987—),男,助理研究员,博士。主要从事城市地下工程施工力学和灾害治理技术研究。

E-mail: linqingtao@bjut.edu.cn

dercrossing were obtained, revealing the deformation mechanism of existing tunnels. The results showed that the existing tunnel underwent both flexural and torsional deformations longitudinally. The flexural deformation exhibited a V-shaped pattern with middle-section settlement and end-section uplift. Sectional torsional deformation showed greater magnitude in the middle sections than at the ends, initially twisting counterclockwise then clockwise during shield advancement. For tunnel cross-sections, within the range of $x = -0.8D$ to $0.8D$, sections demonstrated lateral flattening and vertical elongation deformation patterns. Beyond $x = \pm 0.8D$, sections exhibited lateral elongation and vertical flattening deformation patterns. Deformations within the range of $x = -0.8D$ to $0.8D$ resulted from soil unloading induced by shield excavation. Deformations beyond $x = \pm 0.8D$ were caused by transmission of torsional and settlement deformations from central sections.

Keywords: shield; under-crossing construction; existing tunnels; deformation mechanism; numerical simulation

0 引言

随着城市地下空间建设的蓬勃发展,新建城市隧道埋深不断增加,盾构开挖穿越临近既有隧道的工程日益增多^[1]。盾构下穿施工时,改变已经平衡的应力场并引起沉降,导致既有隧道产生附加的荷载,使其产生附加变形,对既有隧道正常运行产生不利影响,威胁其运营安全和结构安全^[2-3]。减小和控制既有隧道的力学响应,确保既有隧道的安全,是盾构下穿施工控制的关键目标^[4]。针对盾构近距离穿越影响下地层及既有隧道的应力及变形规律开展研究,揭示既有隧道的变形机理,对于盾构下穿施工时既有隧道安全控制十分必要。

盾构下穿施工时首先对周围的土体产生扰动,使其应力状态重新分布,进而使新建隧道和既有隧道之间的土体发生位移,土体的移动带动既有隧道共同变形,既有隧道的扰动特征是盾构-土体-既有隧道相互作用的结果^[5]。国内外学者考虑盾构施工参数、地层条件、既有隧道抗弯刚度、新建隧道和既有隧道相对空间位置等多种因素的影响,对盾构下穿施工对既有隧道影响进行了研究。马险峰等^[6]针对上海软弱地层开展离心模型试验,研究了注浆速率对既有隧道施工期和工后长期的变形规律的影响。徐前卫等^[7]针对软土和砂土地层进行盾构参数适用性设计方法研究。谢雄耀等^[8]研究了不同推进速度下既有隧道受力变形规律。C.W.W.Ng等^[9-11]基于大量离心实验,发现既有隧道的位移与应力的体积损失率和注浆率线性变化。围岩条件对既有隧道的受力变形有至关重要的影响。汪洋等^[12]的

研究表明提高围岩条件,既有隧道变形相应减小,韩冠楠^[13]针对砂卵石地层的研究也得到了相同的结论。A. M. Marshall^[14-15]基于离心试验研究了既有隧道刚度的影响,试验表明当既有隧道刚度较大时,其具有抵挡和控制地层变形的作用,有时甚至会在既有隧道下方产生土体脱空的现象;当既有隧道刚度较小时,其变形与相同位置土体的变形基本相近,与土体处于变形协调状态。新建隧道与既有隧道的空间位置被作为近接施工中几何近接度的判别标准。李从安等^[16]分析了不同净距下新建隧道正交下穿施工的影响,结果表明:1D净距影响比较明显,大于2D时影响较弱,1D时既有隧道的纵向应变是3.5D时的两倍。刘效成等^[17]研究相交角度对既有隧道变形规律影响。针对砂卵石地层,韩冠楠^[13]分析了新建隧道和既有隧道间夹层土中土拱的形成和发展规律,指出提高夹层土的厚度有利于土拱形成,可以显著降低下穿施工对既有隧道的扰动。姚海波^[18]对北京实际工程监测数据进行了分析,指出既有隧道主要呈现出整体沉降与纵向旋转,具有刚体变形特征,归纳为刚性变形;韩焯等^[19]分析了北京及伦敦地区案例,认为既有隧道变形与结构刚度有关,变形主要呈现柔性变形特征。X. Liu等^[20]和Q. Fang等^[21]把既有隧道的变形规律总结归纳为“两性三模式”。当既有隧道刚度远大于土体刚度时,既有隧道变形主要体现为整体式刚性变形;当既有隧道刚度接近或小于土体刚度时,既有隧道变形主要体现为柔性变形。在刚性和柔性两种变形形式中,又都可以分成挠曲、转动、错动这三种变形模式^[22-24]。通过盾构开挖模型试验,Q.T.Lin等^[25-26]发现随盾构的掘进,既有隧道的变形

模式逐渐演化,尤其是既有隧道的扭转变形与盾构刀盘的位置密切相关。总体而言,已有研究已合理揭示了盾构下穿施工引起的既有隧道的最终的变形特征,但对盾构下穿施工过程中既有隧道受力和变形演化发展的规律尚缺乏充分的认识。

考虑盾构机与土体相互作用、支护结构-土体相互作用,以及同步注浆过程模拟的关键因素,结合ABAQUS有限元平台,发展了盾构施工全过程数值模拟方法。以清华园隧道盾构下穿北京地铁10号线为工程背景,建立了三维有限元模型,并利用现场实测数据对其进行了标定。基于模拟结果,分析了盾构下穿施工过程中,既有马蹄形隧道结构纵向和环向的变形、内力响应及围岩压力变化发展演化规律,分析了既有马蹄形隧道的变形机理。

1 盾构施工全过程数值模拟方法

盾构法施工时,刀盘旋转切削土体,切削的土体通过螺旋出土机排除,同时盾构机向前掘进。刀盘和土压仓支护前方掌子面,盾壳对周围土体形成临时支护。随着盾构机的不断掘进,盾构机完全进入土体中,拼装好的管片从盾尾脱出,支护盾构机后方土体,同时盾尾进行同步注浆填充支护与土体之间的空隙。浆液以液体形式由一定压力注入,注入的浆液会随时间逐渐硬化,由液体变为固体与管片一起协同支护周围土体,浆液硬化的同时,注浆压力也逐渐减小至消失。整个盾构过程重复以上工作直至盾构出洞,隧道建设完成。实现盾构施工全过程数值模拟的关键在于实现盾构施工过程中土体、盾构机、管片以及注浆浆液之间相互作用的模拟,如图1所示。

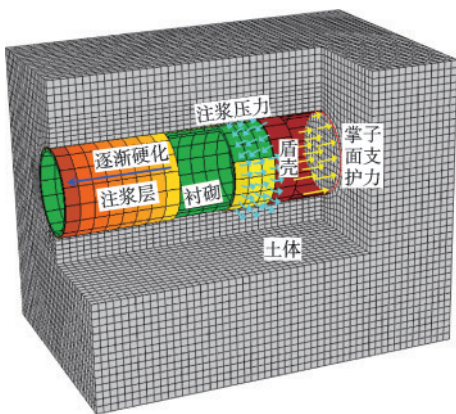


图1 盾构施工模拟示意图

Fig.1 Schematic of shield tunneling simulation

1.1 盾构机-地层相互作用模拟

盾构施工时,刀盘在切削土体的同时,支护掌子面维持其稳定;盾壳为隧道开挖断面提供临时支撑,维持周围地层稳定和变形,如图2所示。对土体开挖、掌子面支护,以及盾壳与开挖后土体的相互作用的模拟,是实现盾构开挖模拟的关键。

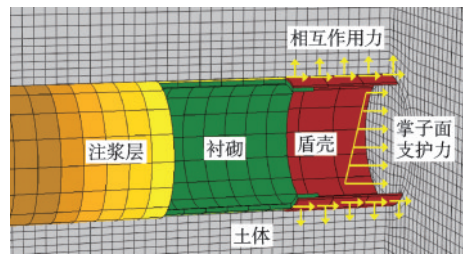


图2 盾构机与地层相互作用示意图

Fig.2 Interaction mechanism between shield machine and ground strata

在有限元模拟中,一般将盾构机简化为盾壳实现盾构机与土体间的相互作用的模拟。盾壳一般采用壳体或实体单元模拟^[27],盾构自重通过增设置壳体的密度实现,盾壳与土体间的相互作用的性质通过设置盾壳外表面和隧道开挖后土体的内表面之间的接触关系反映,硬接触可以合理地描述盾壳与土体间的法向和切向作用^[28]。刀盘对土体的切削过程的模拟在有限元中难以实现,通常在掌子面施加支护压力模拟刀盘与掌子面土体的相互作用。施加的掌子面支护力为按深度分布的梯形荷载,其数值按静止土压力计算,即:

$$P = k_0 \gamma z \quad (1)$$

式中, γ 是土的单位重度; z 是掌子面土体深度; k_0 是静止土压力系数。

1.2 衬砌-注浆层-土体相互作用模拟

盾构机向前开挖掘进,拼装好的管片从盾尾脱出支护盾壳后方土体,同时对盾尾间隙进行注浆填充。建立衬砌、注浆层和土体的模型及合理的接触关系是实现衬砌、注浆层与土体相互作用模拟的基础。在盾构施工扰动有限元模拟中,将衬砌简化为均质圆环,通过材料刚度弱化的方式反映管片拼装对其刚度的影响。注浆层位于衬砌和土体之间,在有限元模拟中难以实现真实注浆过程的模拟,将注浆层简化为均质圆环^[29],忽略其随机缺陷和分布不均匀的影响,将注浆层厚度大小设置为盾尾间

隙。注浆层同时与隧道开挖断面的内表面和衬砌的外表面接触,注浆层与衬砌和土体间的相互作用表现为法向的接触力和切向的摩擦力,如图3所示。在有限元中可以通过设置注浆层-土体、注浆层-衬砌之间的接触关系,以及在土体和衬砌与注浆层接触面上施加注浆压力实现,用绑定接触的描述注浆层-衬砌、注浆层-土体之间的接触关系。注浆压力分布形式采用考虑浆液重力分布^[29],其方向为衬砌和围岩接触面的法向,可表示为^[30]:

$$P_0 = P_{\text{bot}} - \gamma_{\text{浆液}} \cdot h \quad (2)$$

式中, P_0 为注浆压力; P_{bot} 为拱底的注浆压力,其值为该位置处静止土压力; $\gamma_{\text{浆液}}$ 为注浆材料重量; h 为浆液位置到拱底的竖向距离。注浆压力的分布规律如图3所示。

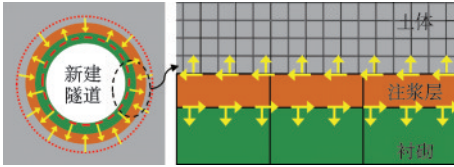


图3 衬砌-注浆层-土体相互作用示意图

Fig.3 Interaction mechanism of lining-grout-soil system

1.3 盾尾注浆硬化过程模拟

盾构掘进实时拼装完成的衬砌从盾尾脱出,同时进行同步注浆,浆液以液体形式注入管片与土体之间,并逐渐凝固,强度随时间逐渐增长至完全硬化,同时注浆压力逐渐消散。在有限元模拟中考虑浆液的硬化过程和注浆压力的消散过程可以更为合理的反映地层和衬砌的受力变形规律^[31]。浆液凝固时在力学性能上主要表现为弹性模量增加和泊松比降低,在数值模拟中采用M. Senis等^[32]提出的硬化模型描述注浆材料的硬化规律,如图4所示。

随着盾构的掘进该衬砌壁后的注浆材料硬化的同时,注浆压力也逐渐消散。在有限元数值模拟中为考虑注浆压力的消散作用采用T. C. Zhao等^[33]基于试验提出的注浆消散规律,即:

$$p_{\text{nor}} = \begin{cases} \frac{t}{T_1}, t \leq T_1 \\ \frac{t^\lambda - \lambda T_2^{\lambda-1}(t - T_2) - T_2^\lambda}{T_1^\lambda - T_2^\lambda + \lambda(T_2 - T_1)T_2^{\lambda-1}}, T_1 < t \leq T_2 \\ 0, t > T_2 \end{cases} \quad (3)$$

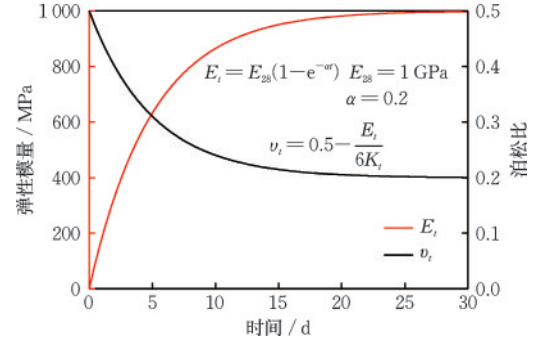


图4 注浆材料硬化力学参数变化规律

Fig.4 Evolution pattern of grout mechanical properties during hardening

式中, P_{nor} 为归一化注浆压力; t 为注浆时间; T_1 是注浆压力达到最大值的时间; T_2 是注浆压力消散为0的时间; λ 为拟合参数。

盾尾注浆时,注浆压力不仅影响注浆环,同时也会影响上一环。多环注浆压力消散规律,参考李培楠等^[34]同步注浆全过程压力变化研究,将注浆压力影响范围设置为三环盾构管片的距离,随盾构掘进,后方注浆压力逐渐衰减为前一环的80%,如图5所示。盾构施工有限元模拟中没有真实的时间,注浆材料硬化和注浆压力消散随时间的发展规律无法直接施加。由于实际工程中盾构掘进速度相对稳定,在有限元模拟中可以将时间进行离散化处理,每个计算分析步时间代表掘进一环所需要的时间,通过掘进环数增加模拟时间变化。

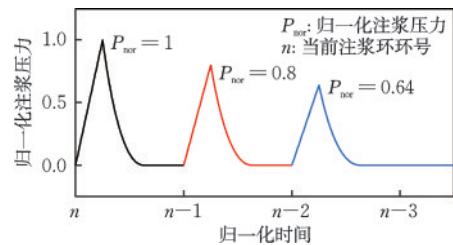


图5 多环浆液压力消散规律

Fig.5 Pressure dissipation pattern of multi-ring grouting

2 工程背景和数值模型建立

以清华园隧道下穿北京地铁10号线工程为背景,建立了盾构施工全过程数值模型,并基于现场实测数据对数值模型进行了标定。

2.1 工程背景

清华园隧道西起于学院南路,东止于双清路,

全长5 330 m。其中,盾构段区间长度3 750 m,采用 $\Phi 12.6$ m泥水平衡盾构施工,衬砌外径12.2 m,管片环宽2.0 m,厚0.55 m。如图6所示,盾构机在知春路近距离下穿北京地铁10号线隧道,两隧道间夹层土厚度为5.48 m;知春路附近北京地铁10号线隧道为马蹄形断面,高度 $h=6.7$ m,宽度 $d=6.5$ m,该位置处地层自上至下依次为人工填土、粉质黏土、中密卵石、粉质黏土、粉砂和密实卵石。为控制既有隧道沉降,工程中对新建隧道和既有隧道间土体进行了注浆加固,加固范围如图6所示。

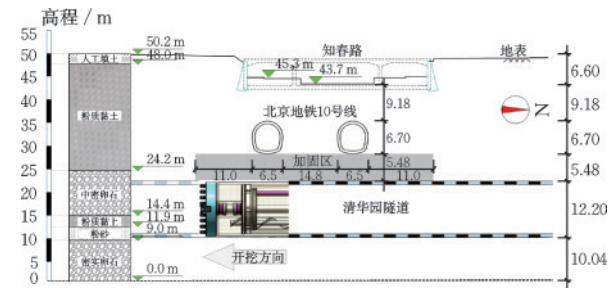


图6 清华园隧道下穿北京地铁10号线示意图

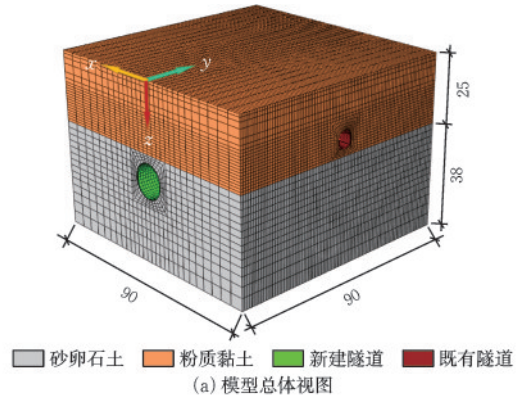
Fig.6 Schematic diagram of Tsinghuayuan Tunnel underpassing Beijing Metro Line 10

2.2 数值模型建立

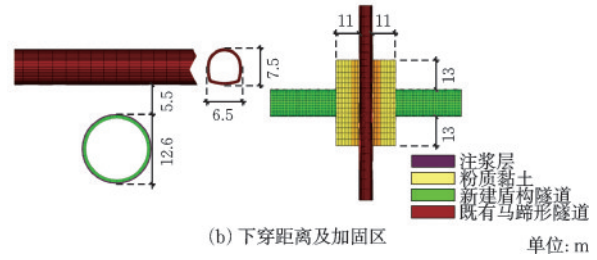
基于提出的盾构施工全过程数值模拟方法,结合实际工程信息,利用ABAQUS数值仿真平台建立了盾构施工有限元数值模型,如图7所示。数值模型尺寸为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}\times 63\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),新建隧道开挖方向为y轴方向。隧道开挖直径 $D=12.6$ m,拱顶埋深为27.9 m,盾壳长8 m,既有隧道为马蹄形断面,宽6.5 m、高6.7 m,拱顶埋深为16 m。隧道纵向(开挖方向)长度为90 m,横向宽度为90 m,隧道底部为22.5 m,模型宽度为隧道开挖直径的7.1倍,满足盾构隧道施工土体扰动范围的要求,可以忽略边界效应的影响^[35]。

考虑主要的研究内容对数值模型进行了简化。首先,将地层简化为粉质黏土和砂卵石土复合地层,上部25 m为黏性土地层,下部38 m为砂卵石地层;其次,将实际工程中的两条既有隧道简化为1条,并根据施工时地层加固区的确定原则,确定了数值模型中加固区的范围。

土体力学性质采用M-C模型描述,土体参数由工程地勘报告获得,见表1。新建隧道衬砌和既有隧道几何尺寸取实际工程值,注浆层厚度取为盾尾



(a) 模型总体视图



(b) 下穿距离及加固区

单位:m

图7 新建盾构隧道下穿既有马蹄隧道有限元模型

Fig.7 Finite element model of new shield tunnel under-crossing existing horseshoe tunnel

表1 模型材料参数

Table 1 Material parameters of numerical model

地层	厚度/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)
粉质黏土	25	1 900	30	0.28	15	24
砂卵石土	38	2 000	40	0.27	1	31
粉质黏土 加固区	2.6	2 000	800	0.3	60	33
砂卵石土 加固区	2.9	2 100	2 500	0.3	100	35
衬砌	0.55	2 400	24 000	0.25	—	—
注浆层 (硬化)	0.2	1 900	3 200	0.3	—	—
盾构机	0.5	7 850	220 000	0.2	—	—
既有马蹄 形隧道	0.5	2 500	20 000	0.25	—	—

间隙,其值为0.2 m。土体、衬砌、盾构、注浆层模型采用C3D8R单元,模型共包含144 520个单元。衬砌、注浆层、盾构均采用弹性模型描述其力学性能,衬砌的纵向和环向接缝对衬砌刚度的影响,衬砌弹性模量进行一定程度折减,折减系数取0.7,材料参数见表1。建立的模型中,盾构和土体之间采用切向摩擦接触,法向为硬接触,切向作用的库仑摩擦

系数取 $0.5^{[36]}$ 。掌子面压力大小为 $k_0\gamma z=0.43 \times 19 \text{ kN/m}^3 \times z$ 。其中 $k_0=0.43$ 。初始注浆压力为 $k_0\gamma H=326.8 \text{ kPa}$ ，注浆压力演化规律和注浆材料硬化规律如图4和图5所示。

2.3 模型验证

工程中对既有马蹄形隧道拱底的沉降进行了监测，测点位于距新建隧道轴线5 m位置，数值模型计算结果与实测数据对比如图8所示，可以看出两者具有较好的一致性，验证了有限元建模方法的合理性。由于本文主要研究盾构下穿施工扰动的的基本规律，因此将已验证模型中加固区恢复至原始地层重新计算，并以此为基础分析了地层和既有隧道的力学响应特征。

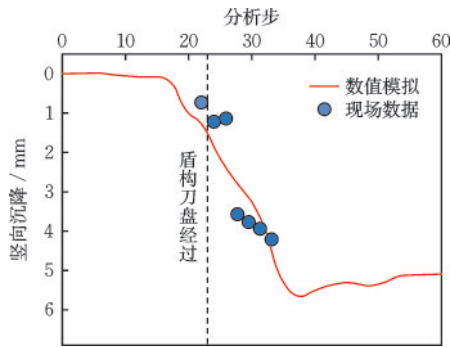


图8 既有隧道拱底沉降结果对比

Fig.8 Comparison of settlement results of arch bottom of existing tunnel

3 既有隧道变形规律

新建盾构隧道的掘进对地层产生了扰动，致使既有马蹄形隧道围岩压力发生变化，隧道结构发生变形，本节基于模拟结果分析了盾构掘进不同时刻时既有隧道的变形规律。

3.1 竖向位移分布规律

在盾构掘进过程中，盾构与既有隧道的相对位置是影响既有隧道变形的一个重要因素，为研究新建盾构隧道掘进过程中既有隧道响应，以盾构刀盘与既有隧道轴线的水平距离(P_{ch})为变量，分别提取了 $P_{ch}=-1.7d$ (刀盘到达既有隧道轴线前 $1.7d$ ，开挖17环)、 $P_{ch}=0d$ (刀盘到达既有隧道轴线，开挖23环)、 $P_{ch}=1.5d$ (盾尾到达既有隧道轴线，开挖27环)、 $P_{ch}=3.2d$ (盾尾通过既有隧道 $1.7d$ ，开挖33环)

和 $P_{ch}=6.9d$ (盾尾从模型驶出)时，既有马蹄形隧道竖向位移的纵向分布曲线，如图9所示。

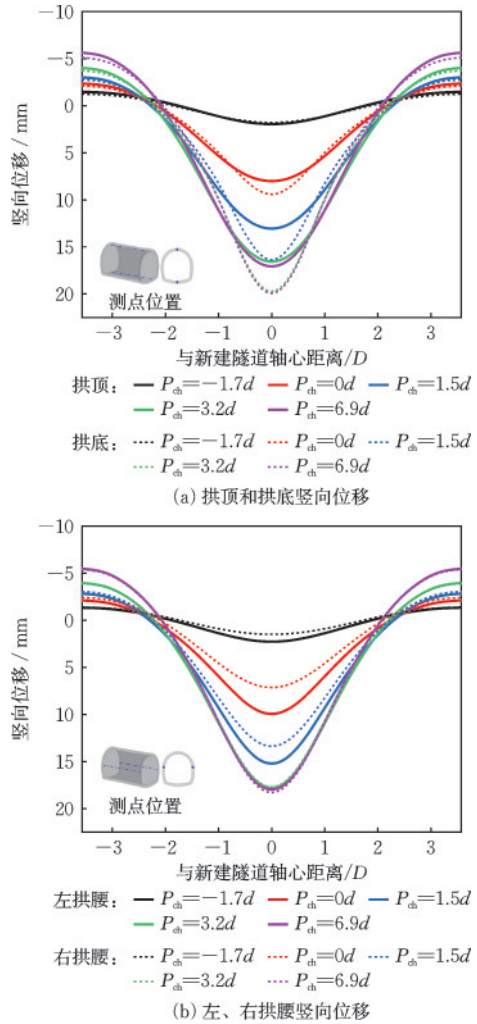


图9 既有隧道竖向位移发展规律

Fig.9 Evolution of vertical displacement in existing tunnel

盾构下穿过程中既有隧道整体呈现中部下移、两端上移的“V”形变形模式。随着盾构不断掘进既有隧道中部下移量和两端上移量逐渐增大，且中部发生沉降的范围先增大后减小，两端上移的范围反之。图9(a)为隧道拱顶、拱底竖向位移曲线。在盾构掘进过程中，新建隧道轴线两侧 $0.5D$ 范围内，既有隧道拱顶竖向沉降始终小于拱底，既有隧道两端拱顶竖向隆起始终大于拱底，且随盾构掘进沉降差逐渐增大。图9(b)为左、右拱腰(靠近盾构始发侧为左)竖向位移曲线。在既有隧道的中部， $P_{ch}=3.2d$ 时刻之前左拱腰竖向沉降大于右拱腰， $P_{ch}=3.2d$ 时刻既有隧道左拱腰竖向沉降与右拱腰基本相同， $P_{ch}=6.9d$ 时刻，既有隧道左拱腰竖向沉降小

于右拱腰;在既有隧道两端, $P_{ch}=3.2d$ 时刻之前左拱腰上移小于右拱腰, $P_{ch}=3.2d$ 时刻及之后左右拱腰上移基本相同。

3.2 横断面收敛变形

通过既有隧道不同位置处横断面的变形,包括: $x=0D$ 、 $x=0.5D$ 、 $x=1.0D$ 和 $x=2.0D$ 位置断面,分析了既有马蹄形隧道横断面变形随盾构掘进的演化规律,如图10所示,其中 $x=0D$ 断面位于新建隧道轴线正上方, $x=0.5D$ 断面位于新建隧道右侧边上方, $x=1.0D$ 和 $x=2.0D$ 位置断面与新建隧道轴线距离分别为 $1.0D$ 和 $2.0D$ 。为了更为清楚的呈现隧道横断面的变形特征,图10中将隧道断面的变形进行了放大显示。在 $x=0D$ 位置,隧道横断面变形发展总体上呈水平挤压竖向拉伸的变形形式,但在隧道掘进过程中,变形有所偏转。在 $P_{ch}=-1.7d$ 时刻, $x=0D$ 位置断面在左拱脚到右拱肩连线方向发生拉伸变形,在右拱脚到左拱肩连线方向发生挤压变形,但变形较小;在 $P_{ch}=0d$ 时刻,断面拉伸和挤压变形方向呈向逆时针回转,且变形程度明显增大;在 $P_{ch}=1.5d$ 时刻及之后,变形程度变化不大,但变形逐渐转正,变为拱顶到拱底连线方向拉伸,左右拱腰连线方向挤压的变形形态。 $x=0.5D$ 位置,断面变形在盾构掘进过程中的发展规律与 $x=0D$ 位置相同,但是变形程度小于 $x=0D$ 断面。在 $x=1.0D$ 位置,隧道横断面变形整体呈水平拉伸上下挤压的变形形式,变形程度 $x=0.5D$ 位置小,且左拱脚的相对下移、右拱脚相对上移。 $x=2.0D$ 位置,断面变形规律与 $x=1.0D$ 位置相同,但形变量较 $x=1.0D$ 位置略小。

通过图9和图10可以看出,既有隧道结构不同位置横断面的收敛变形规律有所差别。图11分别以拱顶和拱底竖向位移差、左右拱腰的水平位移差呈现了既有马蹄形隧道断面竖向及水平收敛沿其轴线的变化规律,正值表示拉伸变形,负值表示收缩变形。可以看出:在 $P_{ch}=-1.7d$ 时刻, $x=-0.8D\sim 0.8D$ 的隧道断面收敛变形表现为竖向收缩、水平扩张的变形规律, $x=-0.8D\sim 0.8D$ 以外位隧道断面则表现为水平收缩、竖向扩张,但此时隧道各位置断面的收敛变形较小。在 $P_{ch}=0d$ 时刻, $x=-0.8D\sim 0.8D$ 隧道断面收敛变形为竖向扩张、水平收缩的变形规律,在 $x=0.8D\sim 2.5D$ 及 $x=-0.8D\sim -2.5D$ 则相反,在 $x=\pm 2.5D$ 范围之外又

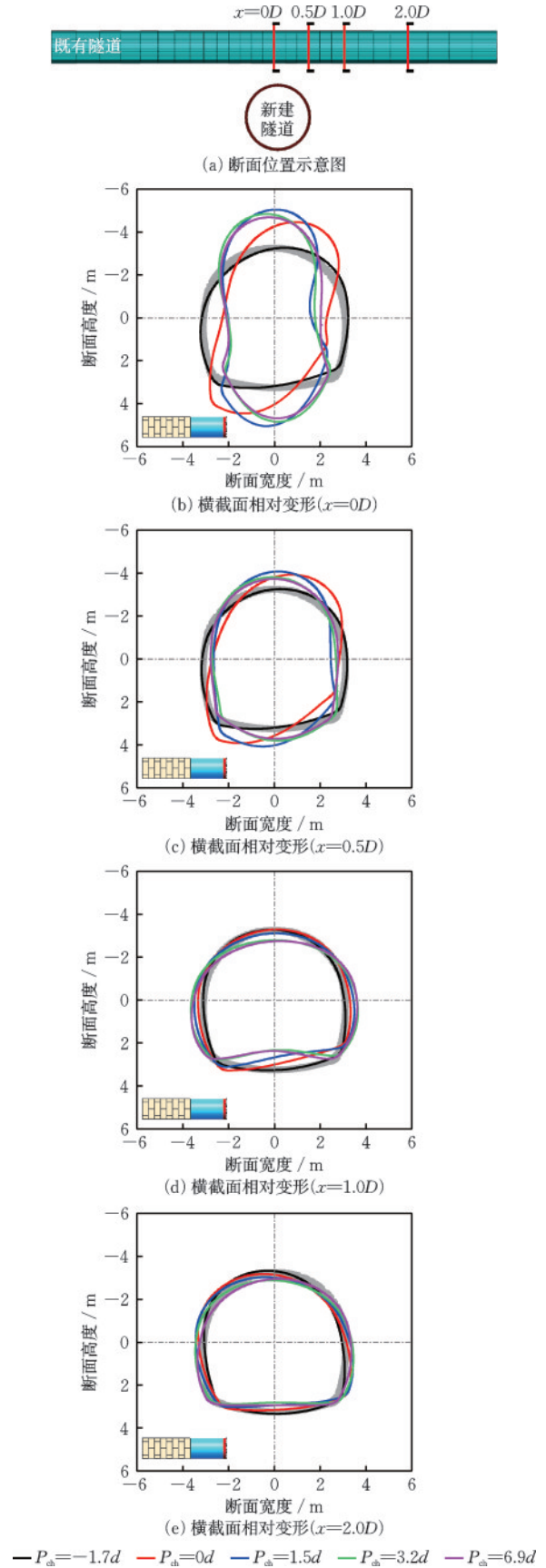


图10 既有隧道不同横断面相对变形规律($\times 1000$)

Fig.10 Relative deformation patterns at different cross-sections in existing tunnel ($\times 1000$)

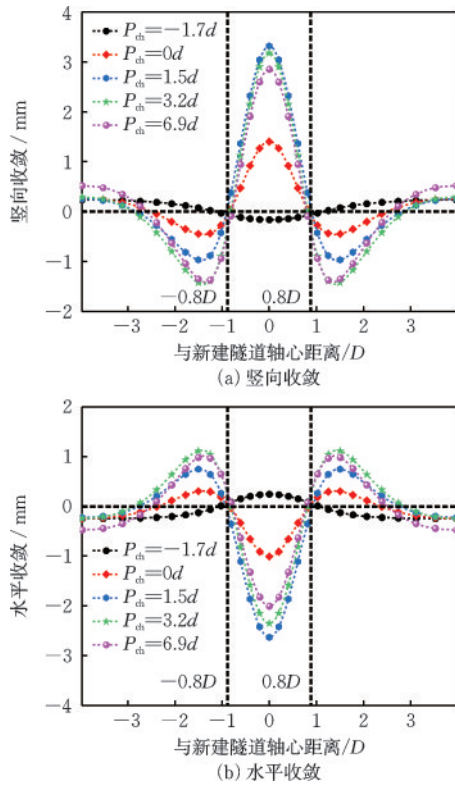


图11 既有隧道收敛变形发展规律

Fig.11 Evolution patterns of convergence deformation in existing tunnel

变为竖向扩张、水平收缩的变形规律。在之后的各时刻,既有隧道各个位置处的收敛变形规律与 $P_{ch}=0d$ 时刻相同,但收敛值及两端收敛值正负分界位置距新建隧道轴线距离都随盾构掘进呈先增大后减小的变化规律。值得注意的是,在 $x=-0.8D$ 和 $0.8D$ 附近,隧道断面竖向收敛和水平收敛都接近于0,且在隧道掘进过程中变化较小。

3.3 横断面扭转变形

盾构掘进时,既有隧道横断面发生收敛变形的同时也发生扭转变形。本文以左右拱腰的连线与水平线的夹角表示断面扭转,以顺时针(右拱腰低于左拱腰)方向为正,断面扭转角度计算公式为:

$$\theta_{\text{偏}} = \arctan\left(\frac{\Delta z_{\text{右}} - \Delta z_{\text{左}}}{d}\right) \quad (4)$$

式中, $\theta_{\text{偏}}$ 为断面扭转角度; $\Delta z_{\text{右}}$ 为右拱腰竖向沉降; $\Delta z_{\text{左}}$ 为左拱腰竖向沉降。

既有隧道横断面扭转变形发展规律如图12所示。在 $P_{ch}=-1.7d$ 时刻,盾构刀盘掘进至既有隧道轴线前 $1.7d$ 位置,隧道整体发生逆时针扭转,在纵向上呈中间大两端小的对称分布; $P_{ch}=0d$ 时刻,扭

转变形纵向分布规律与 $P_{ch}=-1.7d$ 相同,但是偏转角度增大,此时扭转程度达到最大;在 $P_{ch}=1.5d$ 时刻,扭转形纵向分布规律与 $P_{ch}=0d$ 时刻相同,但是扭转角度减小,断面向顺时针反向发生了回转;在 $P_{ch}=3.2d$ 时刻,断面扭转变形在纵向上的分布规律发生了改变,从新建隧道轴向正上方到两端呈先增大后减小的分布规律且扭转角度比上一时刻减小;最后,在 $P_{ch}=6.9d$ 时刻,断面扭转变形在纵向上又变为中间大两端小的分布规律,但是扭转角度已经整体变为顺时针方向。

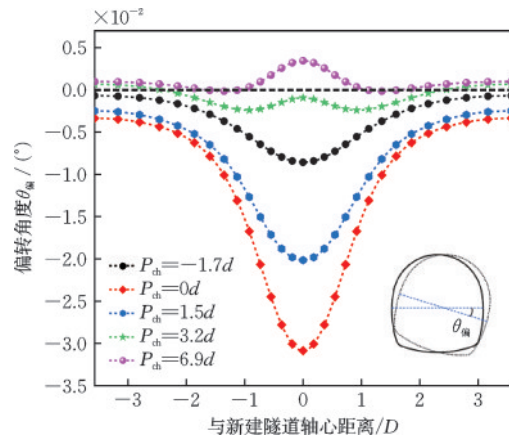


图12 既有隧道断面扭转角度沿隧道轴线变化规律

Fig.12 Variation pattern of torsion angle of existing tunnel cross-section along the tunnel axis

同时,分别提取了 $x=0D$ 、 $x=0.5D$ 、 $x=1.0D$ 和 $x=2.0D$ 位置断面扭转角度随盾构掘进过程的变化规律,如图13所示。可以看出在盾构掘进过程中,各断面扭转演化规律相似但大小不同, $x=0D$ 断面的偏转角度最大,随盾构的掘进隧道断面的扭转角度先增大、后减小,在盾构掘进第24环时 ($P_{ch}=0d$

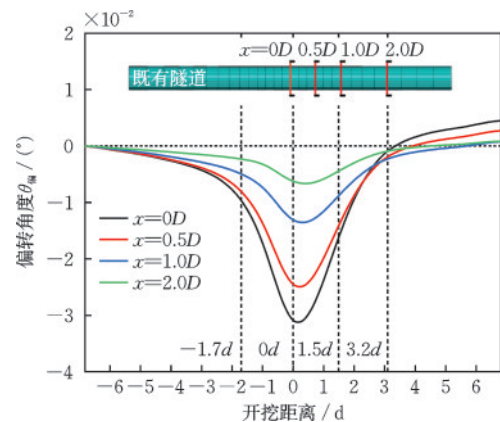


图13 既有隧道断面扭转角度随盾构掘进的变化规律

Fig.13 Variation pattern of torsion angle of existing tunnel cross-section with shield advancement

时刻是掘进第23环)断面偏转角度达到最大值,在此之后扭转开始减小,当掘进至34环附近位置($P_{ch}=3.2d$ 时刻是掘进第33环)时扭转角减小为负值。表明随盾构掘进隧道断面先向逆时针方向扭转,刀盘通过既有隧道轴线后开始向顺时针方向扭转,刀盘通过既有隧道轴线 $3.2d$ 位置之后至开挖结束,隧道断面处于顺时针偏转状态。

4 既有隧道内力变化规律

盾构隧道施工引起既有隧道变形的同时,其内力也发生相应的变化。本节对盾构掘进过程中既有隧道纵向和环向内力的变化规律进行了分析。

4.1 纵向内力变化

4.1.1 轴向弯矩

既有马蹄形隧道竖向和水平弯矩如图14所示。既有隧道竖向弯矩在轴向上的分布规律与正太分布曲线类似,弯矩最大值在新建隧道正上方,且随

着盾构的掘进弯矩值不断增大,同时 $-1.2D$ 和 $1.2D$ 附近位置处弯矩几乎不随盾构掘进发生变化,且始终接近于0。盾构掘进至各个位置时,在 $-1.2D\sim 1.2D$ 弯矩为负值,既有隧道拱顶受压、拱底受拉;在 $-1.2D\sim 1.2D$ 之外的位置,弯矩正值,既有隧道拱顶受拉、拱底受压;新建隧道正上方拱底位置受拉程度最大,为最危险位置。

既有隧道水平弯矩的发展规律如图14(b)所示,随盾构的掘进其分布由“M”形逐渐转变为“W”形。水平弯矩在 $-1.2D$ 和 $1.2D$ 附近位置也几乎不随盾构的掘进而变化,始终接近于0。在 $-1.2D\sim 1.2D$,随盾构的掘进水平弯矩呈先负后正变化;在 $-1.2D$ 和 $1.2D$ 之外位置,随盾构的掘进水平弯矩呈先正后负变化。在 $P_{ch}=0d$ 时刻,刀盘处于既有隧道轴线正下方,既有隧道向y轴负方向(盾构机所在一侧)移动,新建隧道轴线正上方水平弯矩达到最大负值。随着盾构通过,水平弯矩逐渐减小变为正值,既有隧道朝向y轴正方向移动。与竖向弯矩相比,最大值都出现在新建隧道轴线正上方,且水平方向弯矩的最大值只有竖向弯矩最大值的1/8。

4.1.2 轴向剪力

既有隧道竖向和水平剪力如图15所示。既有隧道竖向剪力呈反对称分布,隧道中间位置和两端位置处为0,最大值出现在 $-0.7D$ 和 $0.7D$ 附近位置,最容易产生上下错台开裂变形;随着盾构掘进,除隧道中间和两端位置,其余位置处剪力不断增大。

水平剪力发展规律如图15(b)所示,在盾构掘进至某一位置时,水平剪力沿隧道也呈反对称分布,刀盘掘进至 $P_{ch}=1.5d$ 及之前,分布规律于竖向剪力相似,最大值出现的位置位于 $-0.7D$ 和 $0.7D$ 附近;刀盘到达 $P_{ch}=3.2d$ 及之后,水平弯矩仍呈反对称分布,但变为左侧为正、右侧为负,但最大值在 $-0.5D$ 和 $0.5D$ 附近位置。总体而言,与竖向剪力相比,水平方向剪力量值较小,在刀盘经过时刻最大且只有竖向剪力最大值的1/8。

4.2 环向内力变化规律

针对既有隧道不同位置断面,即: $x=0D$, $x=0.5D$, $x=1.0D$ 和 $x=2.0D$ 位置断面,提取了盾构掘进过程中其弯矩和剪力的分布规律,如图16和图17所示。

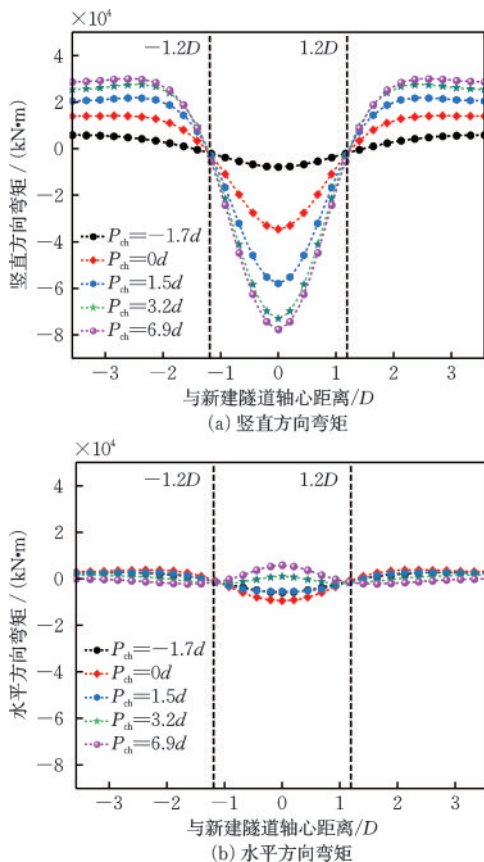


图14 既有隧道弯矩分布规律

Fig.14 Distribution patterns of bending moment in existing tunnel

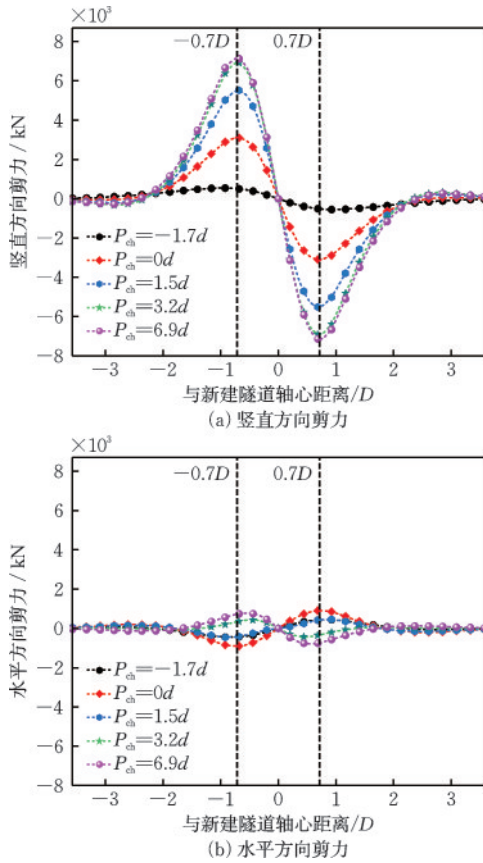


图 15 既有隧道剪力分布规律

Fig.15 Shear force distribution of existing tunnel

4.2.1 环向弯矩

图 16 为不同位置隧道横断面的附加弯矩分布规律。在 $x=0D$ 断面,随着盾构的掘进,附加弯矩整体呈拱顶和拱底逐渐增大(正值),左右拱腰逐渐减小(负值)的趋势。在盾构掘进的不同时刻,附加弯矩最大值出现在拱底附近,与隧道断面变形形态相对应。在拱顶和拱底处,隧道断面内边缘受压、外边缘受拉,拱腰和拱脚处则相反,拱底外边缘和拱脚内边缘容易产生开裂。在 $x=0.5D$ 断面,附加弯矩变化规律与 $x=0D$ 断面相似,但数值相对较小。

在 $x=1.0D$ 断面,拱顶和拱底附加弯矩为负值,左右拱脚附加弯矩为正值,分布模式与 $x=0D$ 和 $x=0.5D$ 断面相反,数值也更小。附加弯矩最大位置位于拱底处,且拱底和拱脚处附加弯矩大于拱顶和拱肩处。在拱底处断面内边缘受拉、外边缘受压,拱脚处断面内边缘受压、外边缘受拉,拱底内边缘和拱脚外边缘容易产生开裂。 $x=2.0D$ 断面附加弯矩变化规律与 $x=1.0D$ 断面相同,但数值更小。

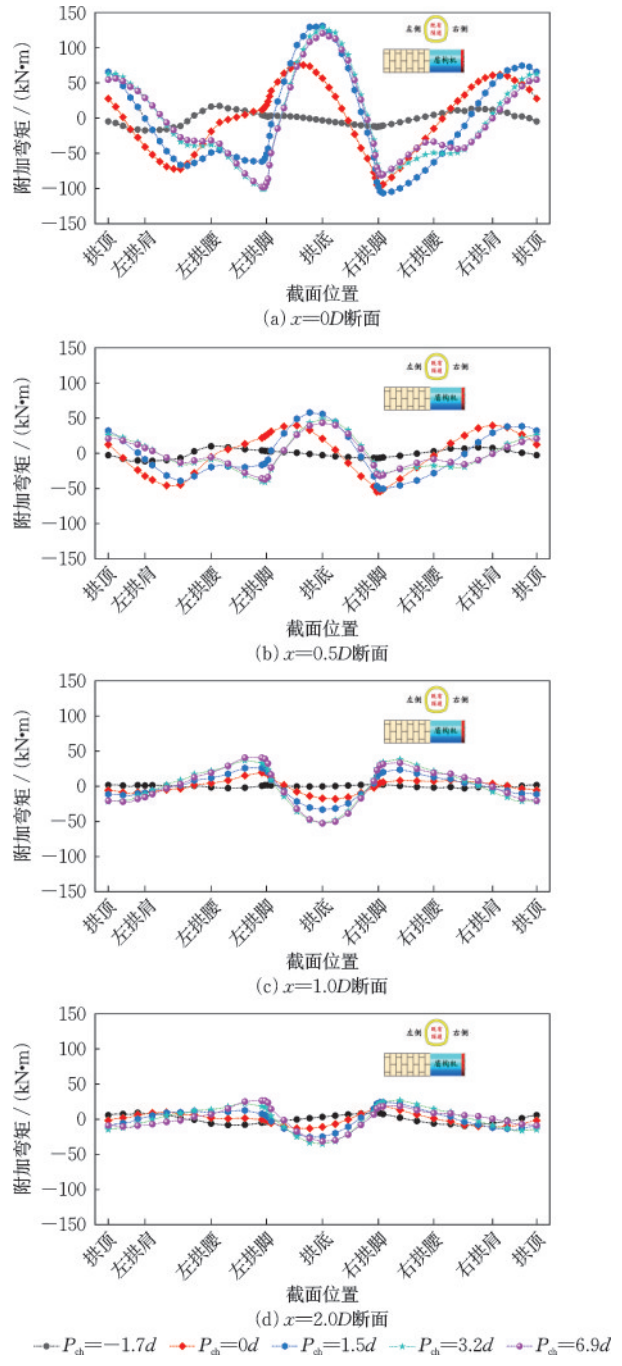


图 16 既有隧道横断面附加弯矩分布规律

Fig.16 Distribution patterns of additional bending moment on cross section in existing tunnel

4.2.2 环向剪力

图 17 为不同位置隧道断面附加剪力分布。在 $x=0D$ 断面,随盾构掘进拱脚处附加剪力逐渐增大,拱顶和拱腰处附加剪力先增大后减小。在盾构掘进不同时刻,附加剪力最大值出现在拱脚处,拱脚位置衬砌最容易出现开裂。 $x=0.5D$ 断面附加剪力的变化规律与 $x=0D$ 断面相同,但比附加剪力值比

5 盾构下穿施工既有隧道变形机理

分别提取了盾构隧道掘进过程中地层应力变化、既有隧道围岩压力变化和变形的规律,以此为基础分析了既有隧道的纵向和环向变形的机理。

5.1 既有隧道纵向变形机理

表2呈现了盾构掘进至不同位置时,既有隧道轴线所在断面地层竖向应力云图、既有隧道附加围岩压力和既有隧道竖向变形云图。

在 $P_{ch} = -1.7d$ 时刻,盾构刀盘虽未到达既有隧道,但已经对其产生了一定的扰动。在 $-0.7D \sim 0.7D$,既有隧道拱底处地层竖向应力略有减小;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,拱底处地层应力略有增大,既有隧道拱顶地层应力无明显变化。在 $-0.7D \sim 0.7D$,既有隧道拱顶围岩压力无明显变化,拱底围岩压力减小,既有隧道上下产生压力差使其发生竖向沉降;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,既有隧道拱顶压力无明显变化,但拱底压力增大,既有隧道发生隆起。既有隧道呈现中部沉降两端隆起的变形模式。

在 $P_{ch} = 0d$ 时刻,刀盘到达既有隧道轴线正下方,在 $-0.7D \sim 0.7D$,既有隧道拱底地层竖向应力明显减小,拱顶应力变化较小;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,拱底地层应力增大,拱顶地层应力变化不明显。在 $-0.7D \sim 0.7D$,既有隧道拱顶围岩压力变化不明显,拱底围岩压力明显减小,既有隧道上下产生压力差增大,竖向沉降增大;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,既有隧道拱顶围岩无明显变化,拱底围岩压力明显增大,但压力增大值只有 $0D$ 位置围岩压力减小值的 $1/3$,既有隧道发生隆起变形,变形小于沉降值。

在 $P_{ch} = 1.5d$ 时刻,随着盾构掘进,在 $-0.7D \sim 0.7D$,既有隧道拱底地层竖向应力和围岩压力进一步减小;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,拱底地层竖向应力和围岩压力进一步增大,而既有隧道拱顶地层竖向应力和围岩压力依然变化不明显,既有隧道中部竖向沉降和两端竖向隆起也进一步发展。在 $P_{ch} = 3.2d$ 时刻及之后,随着盾构不断远离既有隧道,对既有隧道围岩的扰动程度减小,地层竖向应力及既有隧道围岩压力变化规律与之前相同,但变化幅度较小,直至盾构机远离既有隧道,变形趋于稳定。

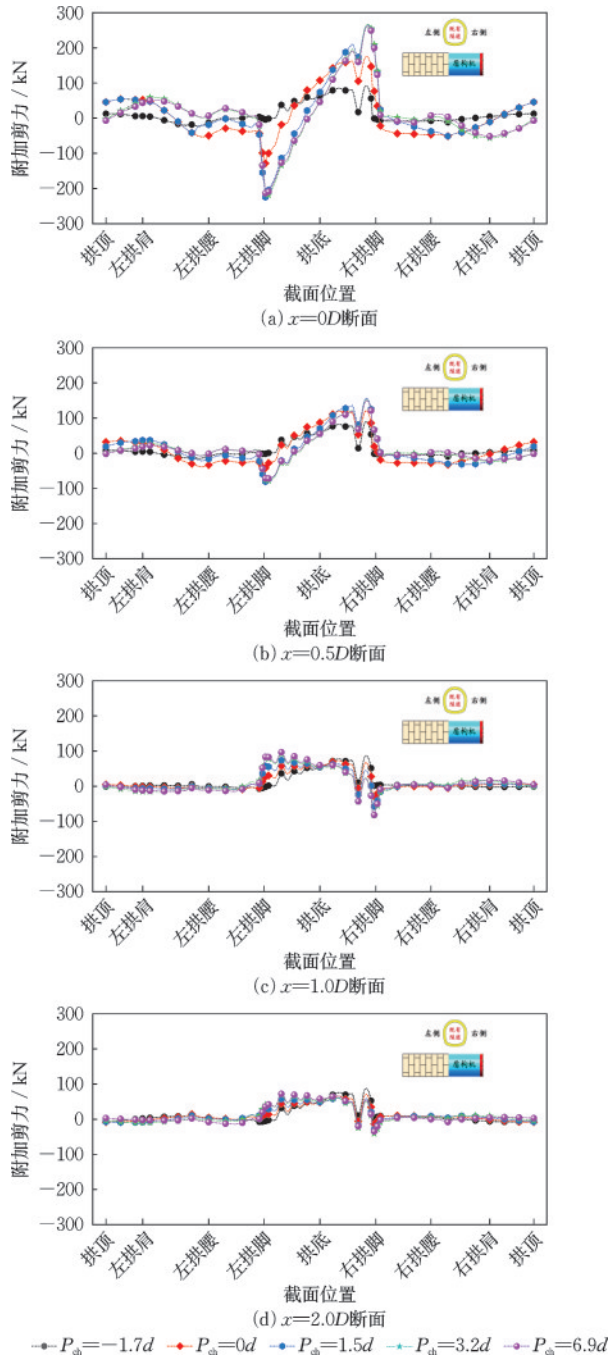


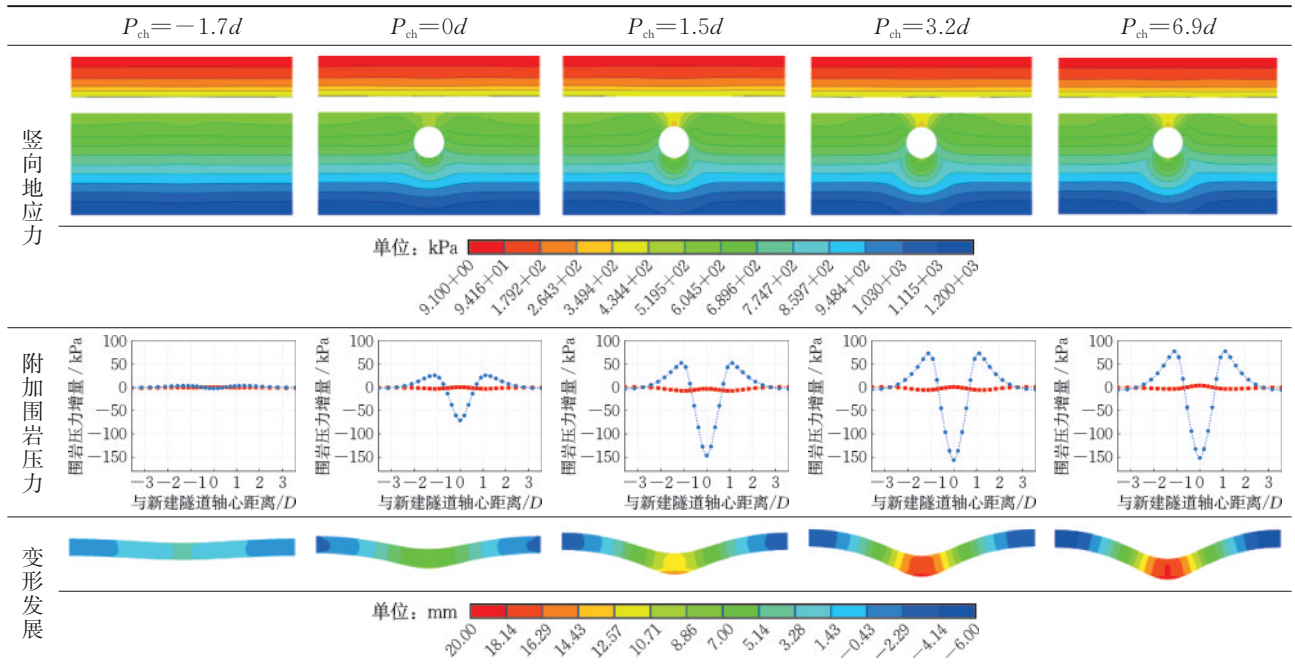
图17 既有隧道横断面附加剪力分布规律

Fig.17 Distribution patterns of additional shear force on cross section in existing tunnel

$x=0D$ 断面小。在 $x=1.0D$ 断面,随盾构掘进拱脚处附加剪力增大,拱顶、拱肩和拱腰位置附加剪力值变较小且基本不变,拱底处附加剪力值比拱顶、拱肩和拱腰处大,但基本不变。剪力最大值出现在拱脚处,拱脚位置最容易出现开裂。在 $x=2.0D$ 断面,附加剪力变化趋势与 $x=1.0D$ 断面类似,但附加剪力值较小。

表 2 既有隧道纵向剖面地应力、隧道围岩压力和变形发展规律

Table 2 Development patterns of in-situ stress, surrounding rock pressure, and deformation along the longitudinal profile of existing tunnel



5.2 马蹄形隧道环向变形机理

由图 10 可以看出既有隧道 $x=0D$ 与 $x=0.5D$ 断面的变形模式相同, $x=1.0D$ 和 $x=2.0D$ 断面变形模式相同, 因此分别以 $x=0D$ 和 $x=1.0D$ 断面为例分析了既有隧道环向变形的机理。

对于 $x=0D$ 断面, 表 3 呈现了盾构掘进至不同位置时, 地层竖向应力云图、既有隧道围岩压力和隧道断面变形图。

在 $P_{ch}=-1.7d$ 时刻, 刀盘未到达既有隧道轴线正下方, 土体扰动区域位于既有隧道左侧并且朝向盾构掘进方向向斜上方发展, 扰动区域土体应力减小, 左拱脚和左拱腰围岩压力减小, 开始向左下方位移, 隧道断面发生从右拱肩到左拱脚的拉伸变形并向逆时针方向扭转, 此时盾构对既有隧道周围土体扰动较小, 隧道断面的变形和扭转相对较小。

在盾构机向既有隧道正下方掘进的过程中, 盾构对地层的扰动范围向前发展, 对既有隧道周围土体的扰动程度增加, 夹层土竖向应力减小, 拱脚和拱底处围岩压力变化最为显著。在 $P_{ch}=0d$ 时刻, 刀盘到达既有隧道轴线正下方, 此时左拱脚和拱底处围岩受扰动, 土体应力和围岩压力进一步降低, 拱底和左拱脚的竖向沉降显著增大, 隧道断面从右拱肩到左拱脚的拉伸变形加剧, 同时呈现逆时针扭转。

刀盘经过既有隧道轴线正下方后, 盾构对土体的扰动逐渐延伸到既有隧道右方。 $P_{ch}=1.5d$ 时刻, 盾尾到达既有隧道轴线下, 既有隧道右方土体的应力减小, 右拱脚和右拱腰处围岩压力减小, 隧道断面所受围岩压力左右两侧逐渐趋于平衡, 隧道断面变形发展为接近竖直的拉伸变形, 并向顺时针方向扭转。 $P_{ch}=3.2d$ 时刻, 盾尾离开既有隧道 $1.5d$, 既有隧道右方土体的应力进一步降低, 右拱脚和右拱腰处围岩压力减小, 右拱脚处围岩压力略小于左拱脚处, 隧道断面拉伸变形向左拱脚和右拱脚方向偏转, 扭转变形变为顺时针方向。直至盾构机出洞, 既有隧道断面变形趋于稳定。

对于 $x=1.0D$ 断面, 表 4 呈现了盾构掘进至不同位置时, 地层竖向应力云图、既有隧道断面围岩压力和变形。 $x=1.0D$ 断面与 $x=0D$ 断面变形模式不同, 引起变形的机理不同。在 $x=0D$ 断面, 盾构开挖首先引起围岩卸载, 进而诱发既有隧道变形; 在 $x=1.0D$ 断面, 既有隧道的环向变形主要由 $x=0D$ 断面处既有隧道断面扭转变形向两侧传递引起。

在 $P_{ch}=1.5d$ 时刻及之前, $x=0D$ 及 $x=0.5D$ 断面发展生逆时针方向扭转并带动 $x=1.0D$ 断面发生逆时针扭转, 既有隧道 $x=1.0D$ 断面左侧挤压围岩, 隧道断面左下方土体竖向应力增大, 左拱腰和左拱

表3 $x=0D$ 断面地应力、隧道围岩压力和变形发展规律

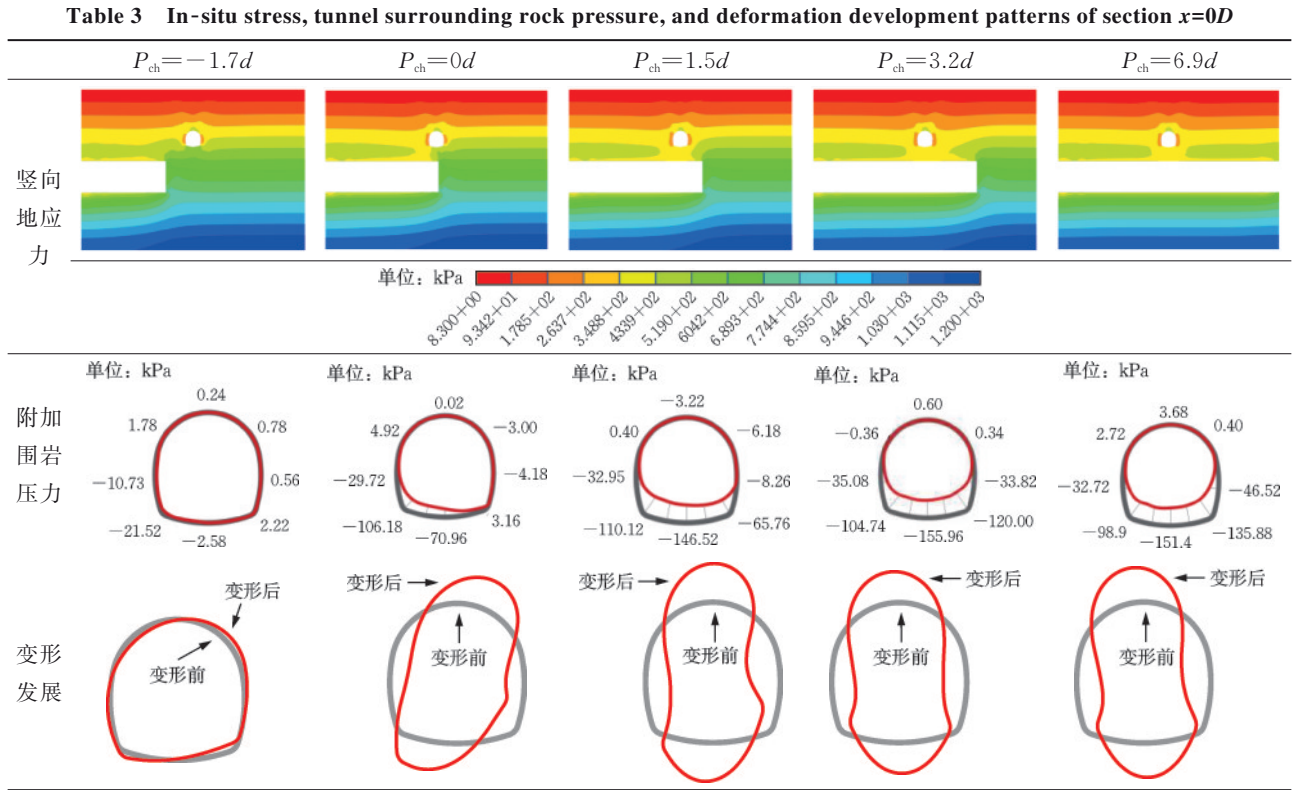
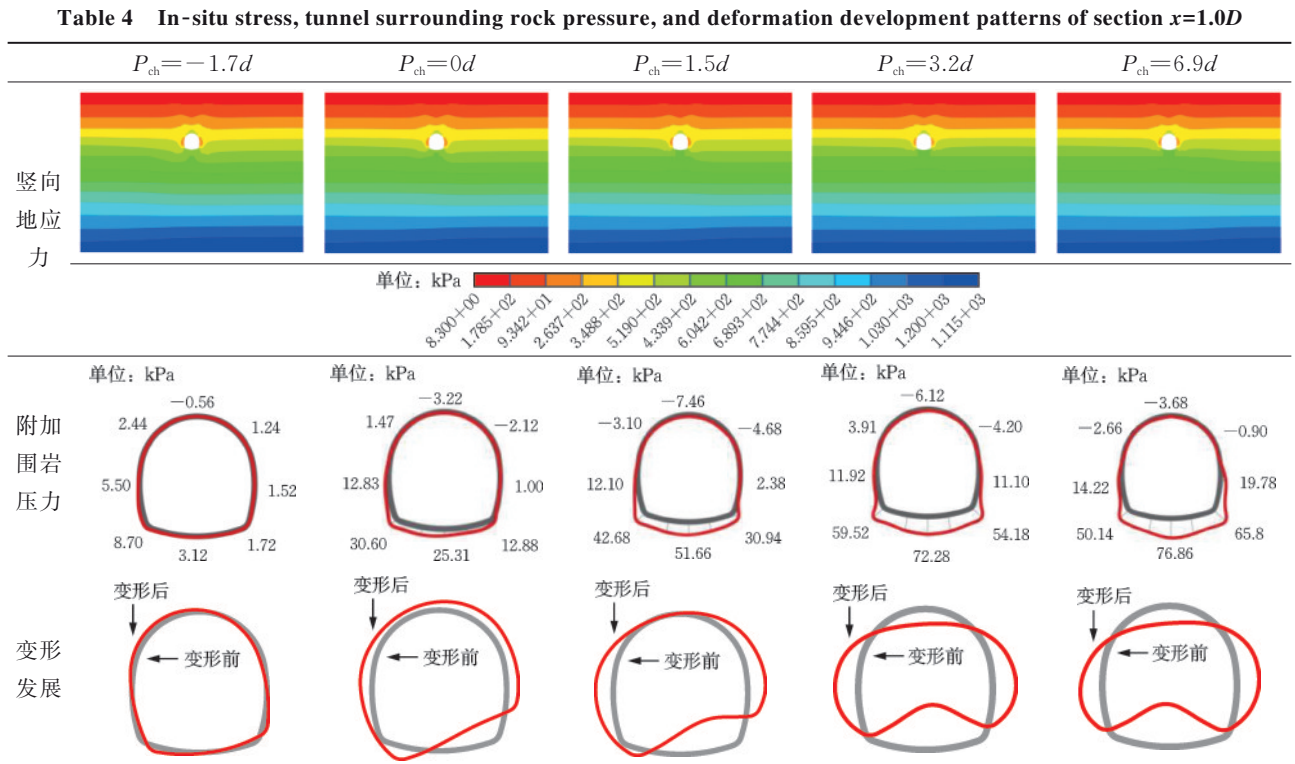


表4 $x=1.0D$ 断面地应力、隧道围岩压力和变形发展规律



脚处既有隧道围岩压力增大,同时由于既有隧道发生竖向沉降,拱顶与围岩有脱离趋势,拱底与土体相互挤压,拱顶土体竖向应力和围岩压力减小,拱

底土体竖向应力和围岩压力增大。在 $P_{ch}=3.2d$ 时刻及之后,隧道断面逆时针扭转减小并逐渐向顺时针方向扭转,竖向沉降也持续发展,拱底土体竖向

应力和围岩压力增大但拱顶土体竖向应力和围岩压力变化不大, $x=1.0D$ 断面拱底发生隆起变形,直至盾构出洞,断面变形趋于稳定。

6 结 论

考虑盾构机与土体相互作用、衬砌-注浆层-土体相互作用,以及注浆硬化和注浆压力消散等因素,发展了盾构施工全过程数值模拟方法。结合清华园隧道下穿北京地铁10号线工程,建立了盾构施工有限元数值仿真模型,并利用实测数据对数值模型进行了标定。基于建立的数值模型,分析了盾构下穿施工既有马蹄形隧道变形机理,得到如下结论:

(1)对于既有隧道整体,随着盾构的推进在 $-0.7D\sim 0.7D$,既有隧道拱顶压力无明显变化,拱底围压力逐渐减小,既有隧道上下产生压力差使其发生竖向沉降变形;在 $\pm 0.7D$ 之外的位置,既有隧道拱顶压力无明显变化,但拱底压力随盾构推进逐渐增大,既有隧道发生隆起。既有隧道呈现中部沉降两端隆起的“V”形变形模式。

(2)对于既有隧道横断面,在盾构掘进的过程中,既有隧道周围土体扰动从既有隧道左侧向右侧逐渐发展,左拱脚地层竖向应力和围岩压力先减小,拱底和右拱脚处后减小,致使盾构掘进不同时刻既有隧道 $0D$ 和 $0.5D$ 位置断面左右两侧竖向沉降产生差异,断面发生收敛和先逆时针后顺时针的扭转变形; $0D$ 和 $0.5D$ 断面等中部位置断面的变形传递带动 $1.0D$ 和 $2.0D$ 断面发生收敛和扭转变形,使其拱脚和拱底位置与土体发生挤压,围岩压力增大,拱底发生隆起变形。

参考文献:

- [1] Shen S L, Wu H N, Cui Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40: 309-323.
- [2] Liang R Z, Xia T D, Hong Y, et al. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 58: 159-176.
- [3] Ding Z, Zhang M B, Zhang X, et al. Theoretical analysis on the deformation of existing tunnel caused by under-crossing of large-diameter slurry shield considering construction factors[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 133: 104913.
- [4] Liu X, Fang Q, Zhan D L. Mechanical responses of existing tunnel due to new tunnelling below without clearance[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80: 44-52.
- [5] 严长征. 盾构隧道近距离共同作用机理及施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Yan C Z. Research on the mechanism and construction techniques of interaction for adjacent tunneling performed by shield [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [6] 马险峰, 陈斌, 田小芳, 等. 盾构隧道注浆对既有隧道影响的离心模拟研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3604-3610.
Ma X F, Chen B, Tian X F, et al. Centrifuge modeling study of effects of grouting into shield tunnel on existing tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3604-3610. (in Chinese)
- [7] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(增1): 2902-2909.
Xu Q W, Zhu H H, Liao S M, et al. Model experimental study on stratum adaptability of tunnel excavation with epb shield machine in sandy stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006 (Sup1): 2902-2909. (in Chinese)
- [8] 谢雄耀, 牛俊涛, 杨国伟, 等. 重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(10): 2061-2069.
Xie X Y, Niu J T, Yang G W, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels on existing tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 2061-2069. (in Chinese)
- [9] Ng C W W, Boonyarak T, Mašin D. Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(9): 935-946.
- [10] Ng C W W, Wang R, Boonyarak T. A comparative study of the different responses of circular and horse-shoe-shaped tunnels to an advancing tunnel underneath[J]. *Geotechnique Letters*, 2016, 6(2): 168-175.
- [11] Boonyarak T, Ng C W W. Three-dimensional influence zone of new tunnel excavation crossing underneath existing tunnel[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(42): 1513-1518.

- [12] 汪洋, 何川, 曾东洋, 等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报, 2010, 32(2): 79-85.
Wang Y, He C, Zeng D Y, et al. Model test and numerical simulation of influence of perpendicular under-cross shield tunnel construction on existing tunnel[J]. Journal of The China Railway Society, 2010, 32(2): 79-85. (in Chinese)
- [13] 韩冠楠. 砂卵石地层大断面平顶直墙隧道下穿运营地铁变形控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Han G N. Study on the deformation control of tunnels with flat top and vertical wall in large section of sand-pebble stratum under through operating subway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [14] Marshall A M. Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009.
- [15] Marshall A M, Klar A, Mair R J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1664-1672.
- [16] 李从安, 李波, 王志鹏, 等. 新建隧洞下穿既有隧道离心模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(4): 286-290.
Li C A, Li B, Wang Z P, et al. Centrifuge modeling on the effects of shield tunnel crossing below the existing tunnels[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(4): 286-290. (in Chinese)
- [17] 刘效成, 陈寿根, 张超, 等. 重叠盾构隧道施工中两隧道相对位置变化的影响模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(1): 107-109, 128.
Liu X C, Chen S G, Zhang C, et al. Research by model test on effects of relative position change of overlapping tunnels with shield method[J]. Railway Engineering, 2018, 58(1): 107-109, 128. (in Chinese)
- [18] 姚海波. 大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
Yao H B. Research on construction technology of large section tunnel crossing under the existing subway tunnel by means of shallow tunneling method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [19] 韩焯, 李宁. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2016, 28(1): 23-28.
Han X, Li N. An adaptability study of gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 28(1): 23-28. (in Chinese)
- [20] Liu X, Fang Q, Zhang D L, et al. Behaviour of existing tunnel due to new tunnel construction below [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 71-81.
- [21] Fang Q, Zhang D L, Li Q Q, et al. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45: 128-137.
- [22] Liu X, Fang Q, Zhang D L. Mechanical responses of existing tunnel due to new tunnelling below without clearance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 44-52.
- [23] Selman R. Subsurface settlements induced by tunnelling in London Clay [C] //Proceedings European Young Geotechnical Engineer's Conference. Delft, Netherlands: Netherlands Geotechnical Society, 1998: 1-8.
- [24] Cooper M L, Chapman D N, Rogers C D F, et al. Movements in the piccadilly line tunnels due to the heathrow express construction [J]. Géotechnique, 2002, 52(4): 243-257.
- [25] Lin Q T, Lu D C, Lei C M, et al. Model test study on the stability of cobble strata during shield under-crossing [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103807.
- [26] Lin Q T, Lu D C, Lei C M, et al. Mechanical response of existing tunnels for shield under-crossing in cobble strata based on the model test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 125: 104505.
- [27] Liu C, Cui J, Zhang Z X, et al. The role of TBM asymmetric tail-grouting on surface settlement in coarse-grained soils of urban area: Field tests and FEA modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103857.
- [28] Kavvadas M, Litsas D, Vazaios I, et al. Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 22-34.
- [29] Zhang M J, Li S H, Li P F. Numerical analysis of ground displacement and segmental stress and influence of yaw excavation loadings for a curved shield tunnel [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103325.
- [30] Zhang D M, Huang X. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction II [M]. Springer: [s.n.], 2018: 23-31.
- [31] Youn B Y, Breitenbücher R. Influencing parameters of the grout mix on the properties of annular gap grouts in

- mechanized tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 290-299.
- [32] Senis M, Varona P, Velasco P. Simulation of the excavation of a tunnel using an EPB machine[J]. Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Ge-Engineering-28-Hart, Detouray & Cundall. Paper: (09-06), 2008.
- [33] Zhao T C, Ding W Q, Qiao Y F, et al. A large-scale synchronous grouting test for a quasi-rectangular shield tunnel: Observation, analysis and interpretation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 103018.
- [34] 李培楠, 朱合华, 李晓军, 等. 大断面异形盾构同步注浆两阶段复合扩散机制及压力时空分布模式[J]. 土木工程学报, 2023, 56(3): 90-106.
- Li P N, Zhu H H, Li X J, et al. Two stage compound diffusion mechanism and pressure space-time distribution mode of synchronous grouting for large cross-section special-shaped shield [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(3): 90-106. (in Chinese)
- [35] Miao J B, Lu D C, Lin Q T, et al. Time-dependent surrounding soil pressure and mechanical response of tunnel lining induced by surrounding soil viscosity [J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(11): 2453-2468.
- (本文编辑:周小潭)