

DOI: 10.11779/CJGE201406007

近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究

李磊¹, 张孟喜¹, 吴惠明², 王永佳²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200062)

摘要: 针对上海地铁新建 11 号线先下后上近距离穿越既有 4 号线, 形成三层隧道四线叠交的特殊工况, 采用有限元数值模拟和现场监测相结合的方法, 考虑既有隧道周围土压力的分布规律, 研究了盾构下穿施工时土仓压力和注浆压力以及上穿施工时压重范围和压重量对既有隧道变形的影响。研究结果表明: 下穿施工结束时, 既有隧道的沉降量不随土仓压力比的改变而改变, 但随注浆压力比的减小而增大; 上穿施工应采取压重措施预防既有隧道的上浮和局部隆起变形, 宜遵循新建隧道同步压重为主, 既有隧道压重为辅的原则。

关键词: 多线叠交隧道; 盾构施工; 土仓压力; 注浆压力; 既有隧道变形; 现场监测

中图分类号: TU432; U455

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1036-08

作者简介: 李磊(1986-), 男, 湖北荆门人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下结构的研究。E-mail: smilelilei@126.com。

Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels

LI Lei¹, ZHANG Meng-xi¹, WU Hui-ming², WANG Yong-jia²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: Considering the complicated project of four-line overlapped tunnels in Shanghai metro construction, in which Metro Line 11 below-shield and above-shield crosses the existing Metro Line 4 successively, numerical modelling and in-situ monitoring are employed to study the influence of shield tunnelling on the deformation of the existing tunnels. According to the distribution law of earth pressure around the existing tunnels, the shield operation parameters are set to change with the advance of the EPB shield machine. Particular attention is paid to the effect of the chamber earth pressure and grouting pressure on the deformation of the existing tunnels during the below-shield tunnelling as well as the loading scope and its value during the above-shield tunnelling. The results show that the settlement of the existing tunnels stays at the same level as the chamber earth pressure ratio increases, while it increases with the decrease of the grouting pressure ratio. Construction measures, which follow the principle of synchronous loading in the new tunnel mainly and loading in the existing tunnel secondarily, should be taken to control the heave and partial uplift of the existing tunnels during the above-shield tunnelling.

Key words: multi-line overlapped tunnel; shield tunnelling; chamber earth pressure; grouting pressure; existing tunnel deformation; in-situ monitoring

0 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展, 地铁网络的形成将不可避免地带来地铁隧道在空间上相互叠交穿越的问题。北京站至北京西站地下直径线下穿既有地铁 2 号线及 4 号线宣武门车站, 形成了三线叠交隧道的工况^[1]。Yamaguchi 等^[2]对日本京都市四线近距离平行盾构隧道的设计和施工也展开过研究, 而上海地区近期出现的新建 11 号线先下后上近距离斜穿既有 4 号线形成四线叠交的特殊工况, 在国内尚属首例^[3]。

土仓压力和注浆压力是盾构推进过程中影响周围土体变形的施工参数^[4-5]。盾构近距离下穿既有隧

道时, 廖少明等^[6]基于既有隧道的受荷机理, 提出了盾构工作面土压力宜先逐步减小再逐步恢复正常的分步台阶控制方案, 结果表明既有隧道的变形控制效果良好。孙永玉等^[7]也发现, 考虑既有隧道对其所处位置土体的替换及其对土压力的承担分散作用, 土仓压力和注浆压力的大小应根据既有隧道下方土压力的分布规律进行设定。丁文其等^[8]指出, 压力舱土压力设定值比开挖面水土压力略大时, 开挖面前方地层在挤

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172238)

收稿日期: 2013-09-23

压作用下将产生隆起变形趋势, 有利于地层的最终沉降控制。但土仓压力和注浆压力都不能过大或过小, 否则会对既有隧道和地表造成不利影响^[9-11]。盾构近距离上穿既有隧道时, 刘汉龙等^[12]利用数值模拟分析了地层加固深度、盾构施工步以及斜交角等因素对下卧既有隧道回弹变形的影响。黄德中等^[13]采用离心模型试验研究了盾构上穿对既有隧道和周围地层的影响, 得出了盾构上穿开挖卸载及地层损失会引起下方既有隧道上浮的结论。

相对于单独上穿或下穿既有隧道的工程实例, 盾构上下穿越既有隧道所造成的多次扰动, 必将导致既有隧道及其周围土体的变形充满复杂性和不确定性。尽管廖少明等^[14]研究得知先下穿后上穿既有隧道的施工顺序有利于既有隧道的变形控制, 但对于既有隧道的位移随盾构推进的变化规律, 盾构施工参数和压重措施对既有隧道变形的影响等问题, 还有待于进一步研究分析。本文针对上海地铁新建 11 号线上下近距离穿越既有 4 号线, 形成三层隧道四线叠交的特殊工况, 采用有限元数值模拟和现场监测相结合的方法, 研究了盾构下穿施工时土仓压力和注浆压力以及上穿施工时压重范围和压重量对既有隧道变形的影响, 以期近距离多线叠交盾构隧道的施工提供建议。

1 工程概况

上海地铁新建 11 号线北段二期徐家汇站至上海体育馆站区间隧道工程, 盾构在经过零陵路时斜向 75° 先后从既有 4 号线下、上方穿越, 如图 1 所示。11 号上、下行线与既有 4 号线隧道净距分别为 1.82、1.69 m, 4 号线内、外圈中心间距为 16.8 m。4 号线和 11 号线隧道外径均为 6.2 m, 内径为 5.5 m。衬砌管片采用钢筋混凝土预制而成, 混凝土强度等级 C55, 每环管片宽度为 1.2 m, 厚度为 0.35 m。区间隧道采用 2 台土压平衡式盾构机同向推进, 盾构直径为 6.34 m。

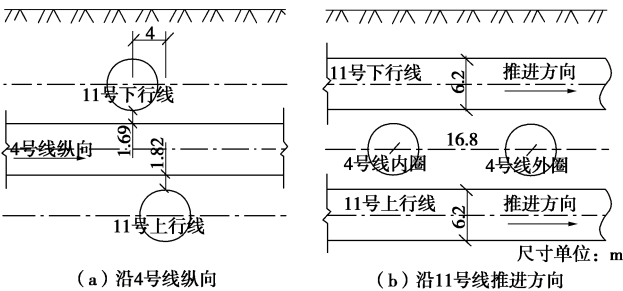


图 1 多线叠交示意图

Fig. 1 Position of multi-line overlapped tunnels

为减小 11 号上、下行线盾构施工的相互影响, 上行线下穿 4 号线约一个月后, 下行线盾构开始上穿 4

号线。上行线隧道施工区域位于⑤₁黏土层和⑤₃粉质黏土层, 下行线隧道施工区域位于③淤泥质粉质黏土层和④淤泥质黏土层, 土体物理力学参数见表 1。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils						
土层	层厚 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
①填土	2.0	18.3	15.0	16.0	15.82	0.33
②粉质黏土	1.3	18.5	26.0	17.0	15.68	0.32
③淤泥质粉质黏土	3.3	17.4	10.0	16.5	8.89	0.32
④淤泥质黏土	8.4	16.7	11.0	12.5	7.32	0.33
⑤ ₁ 黏土	1.0	17.8	14.0	14.5	11.76	0.26
⑤ _{1a} 砂质粉土	4.5	18.2	5.0	33.0	28.74	0.24
⑤ ₁ 黏土	4.3	17.8	14.0	14.5	11.76	0.26
⑤ ₃ 粉质黏土	15.0	18.1	16.0	22.5	16.31	0.29

2 三维有限元计算模型

2.1 盾构施工过程模拟

简化 11 号线与既有 4 号线隧道为垂直叠交状态, 建立有限元计算模型尺寸为 84 m×84 m×60 m, 即沿 4 号线纵向和 11 号线推进方向均取 84 m, 沿深度方向取 60 m。土体、衬砌和等代层均采用 8 节点实体单元进行模拟, 土体屈服准则为 Drucker-Prager 准则。考虑管片拼装对衬砌结构刚度的影响, 将衬砌管片刚度折减 15%, 弹性模量取 30.2 GPa, 泊松比为 0.2。有限元计算模型如图 2 所示。

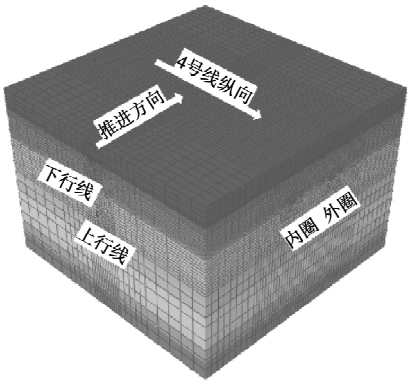


图 2 三维有限元网格划分示意图

Fig. 2 Mesh of 3D FEM model

既有隧道的存在改变了其周围土压力的分布规律, 11 号上、下行线开挖面不同位置土体的竖向应力分布曲线如图 3 所示。考虑既有 4 号线对周围土体横向影响的范围, 结合盾构施工情况, 确定 11 号线盾构推进步如图 4 所示。沿 11 号线推进方向第 5~23 步为多线叠交段, 对应上行线 990~1027 环、下行线 988~1025 环, 叠交段推进长度为 2.4 m/步; 第 1~4 步和第 24~27 步为非叠交段, 推进长度为 4.8 m/步。

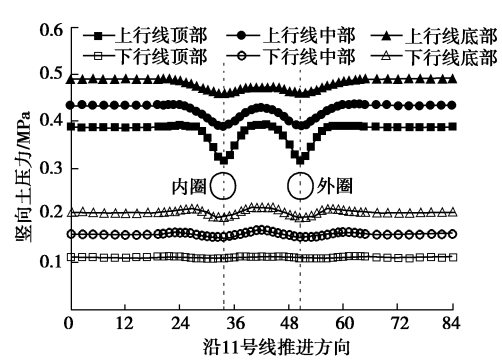


图 3 新建 11 号线开挖面不同位置土压力的分布曲线

Fig. 3 Distribution of vertical earth pressure at different positions of excavation face of new tunnels

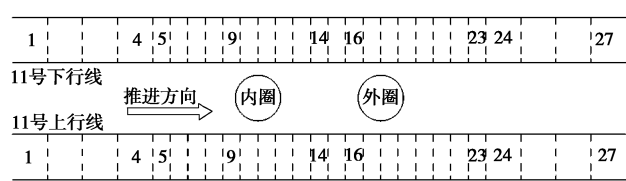


图 4 11 号线盾构推进步划分示意图

Fig. 4 Excavation step of new tunnels

利用刚度迁移法^[15]和等代层^[16]模拟盾构施工过程,等代层厚度取 0.1 m。根据浆液抗压强度现场测试结果,选取 2 个典型抗压强度时间点,即浆液的弹性模量由 0.58 MPa 变为 1.2 MPa,以模拟浆液的硬化过程。如图 5 所示,每个盾构推进步进行的模拟包括:

①第 n 步隧道区域土体移除,添加等代层单元,等代层材料参数为盾壳,开挖面施加土仓压力;

②考虑盾构机的长度,第 $n-1$ 步和第 $n-2$ 步等代层材料参数保持为盾壳;

③第 $n-3$ 步移除等代层,沿隧道洞室土体单元面径向施加均布注浆压力;

④第 $n-4$ 步添加衬砌单元和等代层单元,等代层材料参数变为弹性模量 0.58 MPa 的浆液;

⑤第 $n-5$ 步浆液硬化,等代层弹性模量增大到 1.2 MPa。

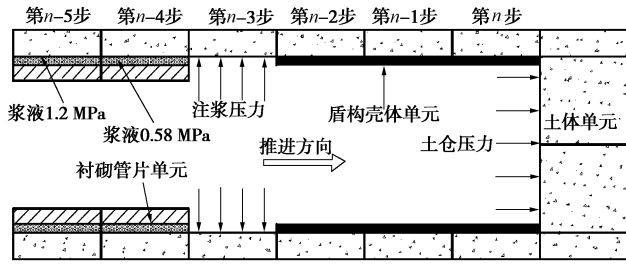


图 5 盾构推进过程的模拟

Fig. 5 Simulation of shield advance

2.2 下穿施工土仓压力和注浆压力的设定

土压平衡盾构土仓压力与开挖面理论土水压力平衡时,开挖面维持稳定。但理论土水压力为梯形荷载,为简化计算,本文取盾构平衡土仓压力等于开挖面中

心水平静止土压力。引入土仓压力比 λ_1 ^[17],土仓压力 P_1 的大小表示为

$$P_1 = \lambda_1 P_0 = \lambda_1 K_0 \sigma_v, \quad (1)$$

式中, P_0 为盾构平衡土仓压力, K_0 为静止土压力系数, σ_v 为开挖面中心土体的竖向应力。

盾构注浆压力设定太小,易导致地表变形较大,过大则造成浆液侵入周围土层且导致混凝土管片开裂。引入注浆压力比 λ_2 ,注浆压力 P_2 的大小表示为

$$P_2 = \lambda_2 \sigma_v. \quad (2)$$

根据下穿盾构推进记录,土仓压力的设定范围为 0.18~0.27 MPa。盾构注浆压力与隧道埋深处土层应力相当时,盾构施工引起的地层损失和地表沉降都较小,注浆压力一般取 0.2~0.4 MPa^[11,18]。为研究盾构下穿施工时,土仓压力和注浆压力对既有隧道变形的影响,本文对 5 种下穿施工工况进行了计算,见表 2。

表 2 下穿施工的计算工况

Table 2 Calculated cases of below-shield tunnelling					
工况	1	2	3	4	5
土仓压力比 λ_1	1.0	1.3	1.6	1.6	1.6
注浆压力比 λ_2	1.0	1.0	1.0	0.8	0.6

2.3 上穿施工压重范围和压重量

11 号线上穿盾构推进时,在下行线和既有 4 号线内采取了一系列的压重措施以抑制既有隧道的上浮趋势。下行线隧道随盾构前行进行同步压重,压铁堆载量约为 5 t/环。在 4 号线隧道道床上沿下行线与 4 号线隧道中心线交点左右 15 m 范围内,采用并排放置 10 根列车用钢轨的方式进行压重,压重量约为 600 kg/m。

为研究盾构下穿结束后上穿施工过程中,压重范围和压重量对既有隧道变形的影响,本文考虑 5 种上穿施工计算工况,见表 3。工况 1~3 比较压重范围的影响,工况 3~5 比较 11 号下行线同步压重量大小的影响。下穿施工土仓压力比取 1.6,注浆压力比取 1.0。下穿施工结束后再进行上穿施工,上穿施工土仓压力比和注浆压力比均取为 1.0。

表 3 上穿施工的计算工况

Table 3 Calculated cases of above-shield tunnelling					
工况	1	2	3	4	5
压重范围	下行线	无	同步	同步	同步
压重量	4 号线/m	无	无	15	15
	下行线/(t·环 ⁻¹)	无	5	5	7
	4 号线/(kg·m ⁻¹)	无	无	600	600

3 下穿施工计算结果分析

3.1 既有隧道的竖向位移

下穿施工工况 3 对应的既有 4 号线纵向变形曲线如图 6 所示。可以看出下穿施工导致上方既有隧道发

生不均匀变形,最大位移位于上行线隧道中心线上方。

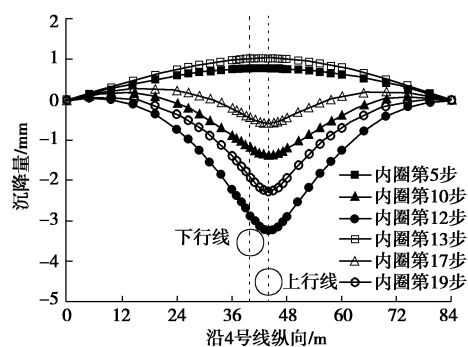


图 6 下穿施工时既有隧道的纵向变形曲线

Fig. 6 Curves of longitudinal deformation of existing tunnels

图 7 为下穿施工既有隧道的最大位移值随盾构推进步数的变化情况。开挖面前方土体受土仓压力的挤压作用而产生隆起趋势,进而导致上方既有隧道产生隆起变形。盾构推进第 1~5 步时,4 号线内圈逐渐隆起,推进到第 5 步时隆起量达到最大值 0.78 mm。4 号线外圈在第 14 步之前也表现为隆起趋势,推进到第 13 步时隆起量最大且为 1.03 mm。这表明,下穿施工盾构开挖面到达距既有隧道中心线约 1.7 倍盾构外径时,既有隧道的隆起量为最大。随后,土仓压力的影响逐步消失,既有隧道由隆起变形发展为沉降变形。

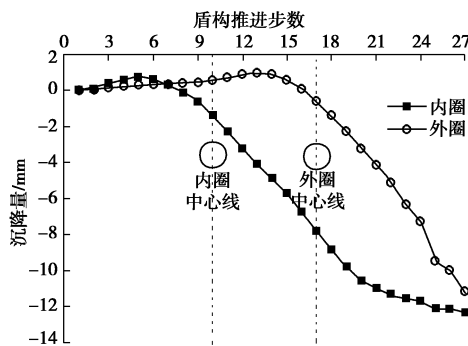


图 7 既有隧道沉降量随盾构推进步数的变化

Fig. 7 Settlement-excitation step curves of existing tunnels

3.2 土仓压力对既有隧道变形的影响

工况 1~3 不同土仓压力比时,既有隧道的沉降量随盾构推进的变化如图 8 所示。由图 8 可知,土仓压力对内、外圈竖向位移的影响分别集中在第 4~12 步、第 10~19 步,此范围内既有隧道的竖向位移随土仓压力比的增大而增大。

由工况 1 与 3 既有隧道沉降量差值随盾构推进的变化曲线可知,盾构推进到第 4~7 步、第 10~14 步时,内、外圈沉降量差值均呈现逐步增大趋势,即距既有隧道中心线 1.1~3.0 倍盾构外径范围内,土仓压力的变化会对既有隧道的竖向位移产生较大影响,应作为土仓压力控制的重点区域。

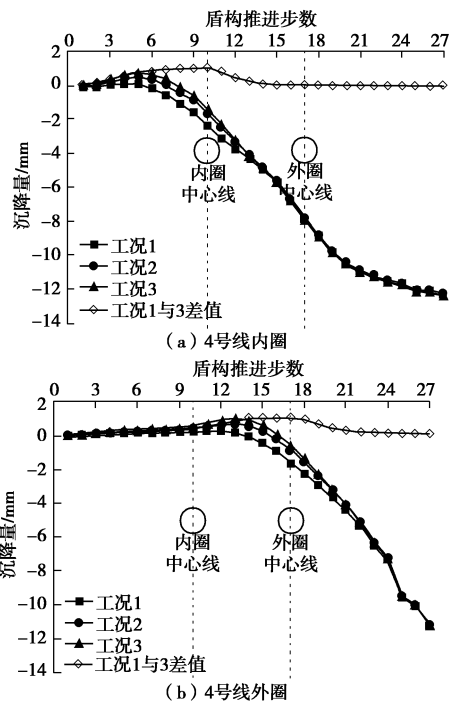


图 8 既有隧道沉降量随盾构推进步数的变化

Fig. 8 Settlement-excitation step curves of existing tunnels

3.3 注浆压力对既有隧道变形的影响

工况 3~5 不同注浆压力比时,既有隧道的沉降量随盾构推进的变化如图 9 所示。由工况 3 与工况 5 沉降量差值随盾构推进的变化曲线可知,下穿盾构推进到接近既有隧道中心线 0.8 倍盾构外径,远离其 1.9 倍盾构外径范围内(内圈对应第 9~15 步、外圈对应第 16~22 步),既有隧道沉降量随注浆压力比的减小而显著增大,此范围应作为注浆压力控制的重点区域。随后,内、外圈沉降量差值分别稳定在 4.27, 4.78 mm。

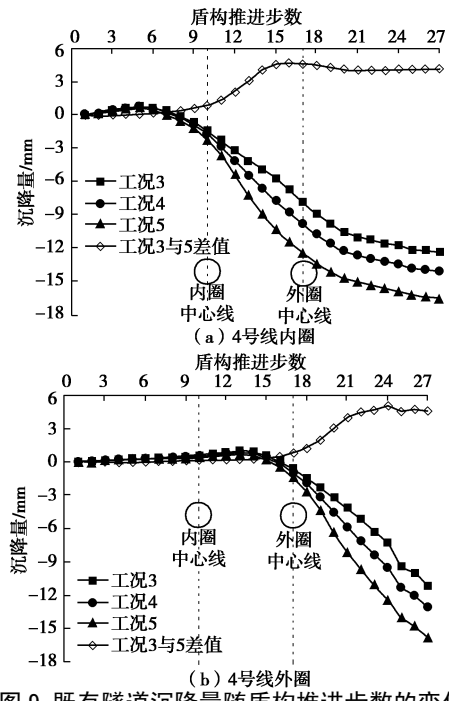


图 9 既有隧道沉降量随盾构推进步数的变化

Fig. 9 Settlement-excitation step curves of existing tunnels

表4为不同工况下11号上行线开挖结束时既有隧道的沉降量,结果表明:

(1) 工况1~3中既有隧道内、外圈沉降量不随土仓压力比的改变而改变,计算结果均值为12.30, 11.20 mm。

(2) 工况3~5中既有隧道的沉降量随着注浆压力比的减小而增大,注浆压力比减小40%到0.6时,既有隧道内、外圈的沉降量分别增加34%, 41%达到16.52, 15.81 mm。

表4 下穿施工结束时既有隧道的沉降量

Table 4 Settlement values of existing tunnels at completion of below-shield tunneling (mm)					
工况	1	2	3	4	5
内圈沉降量	12.32	12.24	12.33	14.04	16.52
外圈沉降量	11.27	11.16	11.18	13.11	15.81

4 上穿施工计算结果分析

4.1 既有隧道的竖向位移

上穿施工工况3既有隧道的纵向变形曲线如图10所示。上穿施工的开挖卸载和地层损失导致既有隧道不断上浮,既有隧道纵向变形曲线的最大位移仍位于上行线隧道中心线上方。由于11号上、下行线隧道中心线不重合,位于上行线隧道中心线左侧的既有隧道较右侧对称位置处上浮量更大,且上穿结束时左侧既有隧道的部分区间段呈向上隆起趋势。

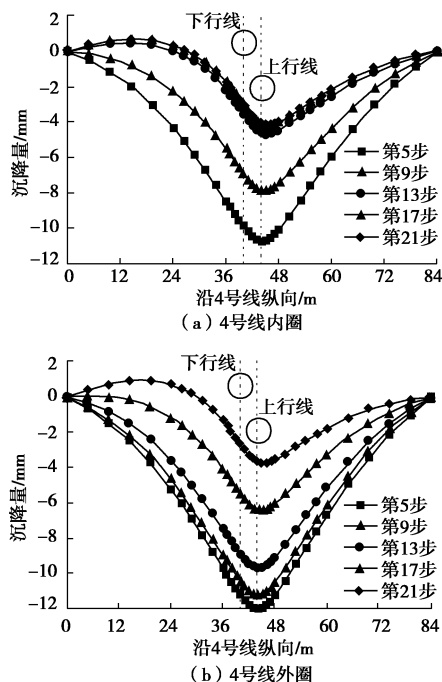


图10 上穿施工时既有隧道的纵向变形曲线

Fig. 10 Curves of longitudinal deformation of existing tunnels

图11为上穿施工既有隧道的最大位移值随盾构推进步数的变化情况。既有隧道的上浮量随盾构向前

推进而不断增大,最后趋于稳定。盾构推进第5~14步时,4号线内圈上浮6.42 mm,占总上浮量的78%;盾构推进第12~21步时,4号线外圈上浮6.57 mm,占总上浮量的72%。故上穿盾构推进到接近既有隧道中心线2.3倍盾构外径,远离其1.5倍盾构外径范围内,应严格控制既有隧道的上浮趋势。

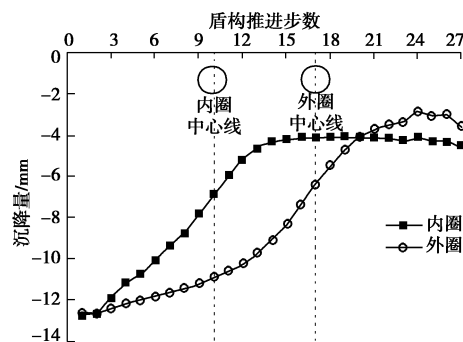


图11 既有隧道沉降量随盾构推进步数的变化

Fig. 11 Settlement-excitation step curves of existing tunnels

4.2 压重范围和压重量对既有隧道变形的影响

图12为上穿施工不同计算工况下,既有隧道沉降量随盾构推进的变化曲线。相比于工况1不采取任何压重措施,工况2下行线同步压重对既有隧道上浮趋势的抑制效果比较明显,两者既有隧道沉降量的差值随盾构推进步数的增大而增大。工况3相比于工况2增加了4号线压重,既有隧道沉降量计算结果与工况2的差值始终保持在0.25 mm左右。工况3~5下行线不同压重量下,既有隧道沉降量的差值随盾构推进步数的增大而增大。

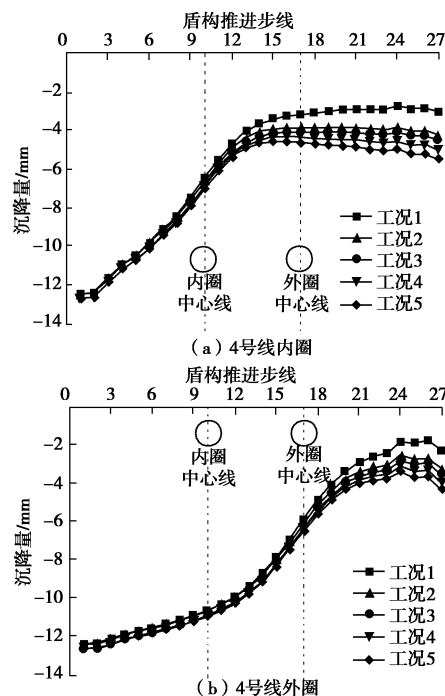


图12 既有隧道沉降量随盾构推进步数的变化

Fig. 12 Settlement-excitation step curves of existing tunnels

表 5 为不同工况下 11 号下行线开挖结束时既有隧道的上浮量, 结果表明:

(1) 受现场施工条件的限制, 既有 4 号线内压重量仅为 11 号下行线的 1/7, 压重范围集中在 11 号下行线与 4 号线隧道中心线交点左右。从压重效果和既有隧道行车安全的角度考虑, 盾构施工应以新建下行线隧道同步压重为主, 既有隧道内压重为辅。

(2) 下行线同步压重量由 5 t/环增大到 9 t/环时, 内、外圈的上浮量分别减少 0.98, 0.82 mm。既有隧道的上浮量随同步压重量的增大而减小, 但减小的幅度并不明显。

表 5 上穿施工结束时既有隧道的上浮量

Table 5 Uplift values of existing tunnels at completion of above-shield tunnelling

(mm)

工况	1	2	3	4	5
内圈上浮量	9.49	8.27	8.26	7.77	7.28
外圈上浮量	10.15	9.12	9.11	8.70	8.29

5 现场监测结果分析与对比

以既有 4 号线内、外圈纵向轴线在 11 号线平面上投影线的中点为中心, 分别在 4 号线内、外圈轨道中间沿纵向用 40 支 2.4 m 的电水平尺首尾相连构成长为 96 m 的监测线。内、外圈监测点沿 4 号线纵向编号分别为 NU40~0、WU40~0, 内圈测点 NU18~22 和外圈测点 WU18~22 位于叠交段穿越区内, 如图 13 所示。

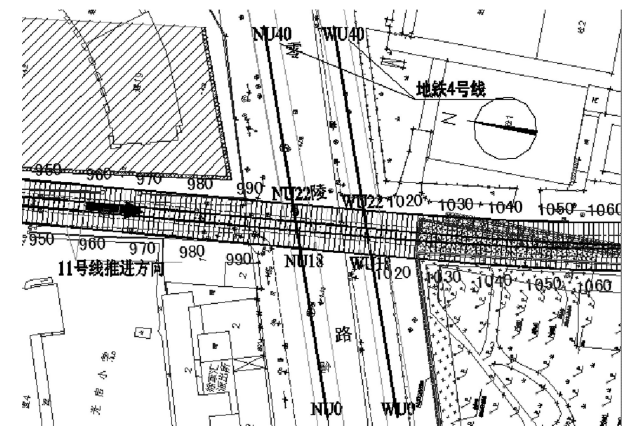


图 13 既有 4 号线监测点布置图

Fig. 13 Arrangement plan of monitoring points

5.1 下穿施工既有隧道变形趋势对比

图 14 为穿越区内测点的竖向位移和开挖面土压力设定值随下穿盾构推进环数的变化曲线。

由图 14 可见, 4 号线内、外圈的竖向位移分别在 996~1003 环、1008~1016 环开挖时随盾构向前推进

而不断增大, 内、外圈隆起量最值分别在 1003~1006 环、1016~1019 环取得, 较开挖面土压力最值滞后 6~10 环。由此说明, 盾构推进到 990~997 环、1001~1009 环, 即距既有隧道中心线 2.6~1.1 倍盾构外径范围内, 既有隧道的竖向位移随开挖面土压力的增大而明显增大, 内、外圈隆起量最值分别为 2.87, 3.39 mm。

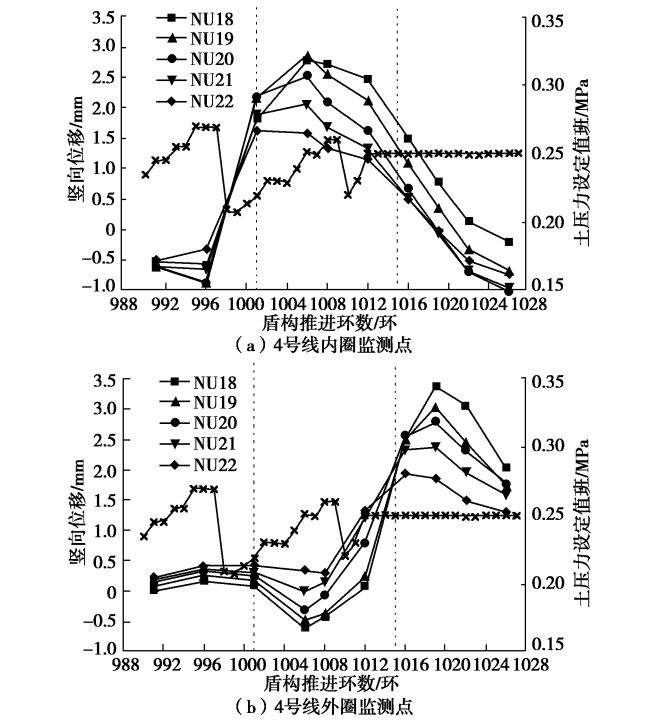


图 14 监测点竖向位移和土压力设定值随盾构推进环数的变化
Fig. 14 Vertical displacement-excavation step curves of points and setting value-excavation step curves of earth pressure

图 15 为下穿施工过程中既有隧道的纵向变形监测曲线。可以看出既有隧道的变形集中在上行线隧道中心线左右 2.5 倍盾构外径范围内, 且斜交使得既有隧道的变形呈现不对称性。而由图 6 可见, 既有隧道竖向位移曲线变化缓慢, 变形范围较大, 内、外圈隆起量最大值分别为 0.78, 1.03 mm, 计算结果与监测数据存在一定差别。究其原因, 一方面是因为实际施工在接近既有隧道中心线时, 盾构开挖面土压力设定值逐步增大, 而数值模拟按照既有隧道下方土压力分布规律设置的土仓压力却维持在同一水平; 另一方面, 建模过程中四线垂直叠交和层状土体的简化导致计算结果与监测数据存在差异。

5.2 上穿施工既有隧道变形趋势对比

图 16 为上穿施工过程中既有隧道的纵向变形监测曲线。可以看出既有隧道的上浮主要发生在下行线隧道中心线左右 2.5 倍盾构外径范围内, 且盾构由 989 环推进到 1004 环穿越 4 号线内圈, 由 1004 环推进到 1021 环穿越 4 号线外圈时, 对应内、外圈隧道均发生

较大的上浮变形。由此可见, 上穿盾构在接近既有隧道中心线 2.1 倍盾构外径, 远离其 1.3 倍盾构外径范围内穿越既有隧道时, 既有隧道的上浮变形率较大。

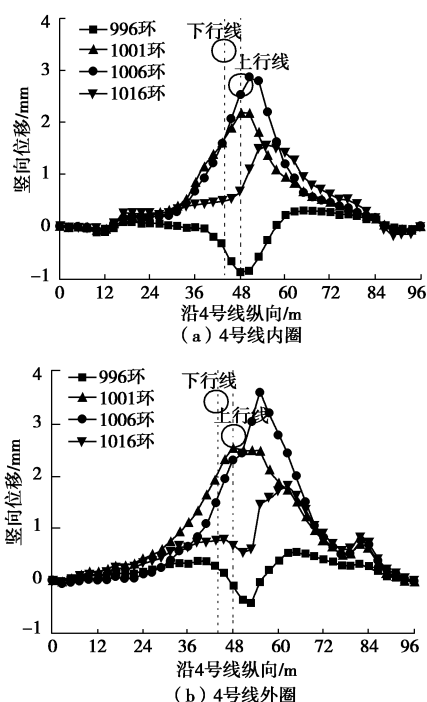


图 15 下穿施工时既有隧道的纵向变形监测曲线

Fig. 15 Curves of longitudinal deformation of existing tunnels

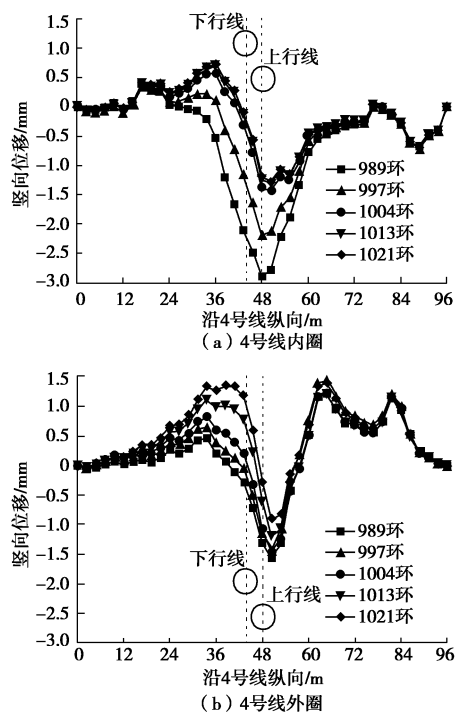


图 16 上穿施工时既有隧道的纵向变形监测曲线

Fig. 16 Curves of longitudinal deformation of existing tunnels

对比图 10 可见, 监测数据与数值计算结果在变化趋势上保持一致。由此表明盾构上穿既有隧道阶段应严格控制既有隧道的上浮, 且应重点关注既有隧道的

局部隆起变形。

6 结 论

针对上海地铁新建 11 号线与既有 4 号线形成四线叠交的特殊工况, 通过有限元数值模拟和现场监测结果分析, 研究了近距离多线叠交盾构施工对既有隧道的变形影响规律, 得到以下 6 点结论。

(1) 下穿盾构推进到距既有隧道中心线 2.6~1.1 倍盾构外径范围内, 土仓压力的增大会造成既有隧道发生明显的隆起变形。

(2) 下穿施工结束时既有隧道的沉降量不随土仓压力比的改变而改变, 但随注浆压力比的减小而增大。

(3) 考虑压重效果和既有隧道的行车安全, 上穿施工应以新建隧道同步压重为主, 既有隧道压重为辅。既有隧道的上浮量随同步压重量的增大而减小, 但减小的幅度并不明显。

(4) 先后下上盾构施工过程中, 既有隧道的变形集中在新建隧道中心线左右 2.5 倍盾构外径范围内。

(5) 上穿盾构在接近既有隧道中心线 2.1 倍盾构外径, 远离其 1.3 倍盾构外径范围内穿越既有隧道时, 既有隧道的上浮变形率较大, 且易发生局部隆起变形。

(6) 对于多线叠交盾构隧道工程, 下穿盾构接近既有隧道时, 适当增大开挖面土压力使既有隧道略微隆起, 有利于盾构穿越后通过同步注浆控制既有隧道的沉降变形; 上穿施工时, 应采取压重措施预防既有隧道的上浮和局部隆起变形。

参考文献:

- [1] 贾颖绚, 刘维宁, 孙晓静, 等. 三维交叠隧道列车运营对环境的振动影响[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 104 - 109. (JIA Ying-xuan, LIU Wei-ning, SUN Xiao-jing, et al. Vibration effect on surroundings induced by passing trains in spatial overlapping tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 104 - 109. (in Chinese))
- [2] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANL Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289 - 304.
- [3] 肖 潇, 张孟喜, 吴惠明, 等. 多线叠交盾构施工引起土体变形数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 884 - 889. (XIAO Xiao, ZHANG Meng-xi, WU Hui-ming, et al. Numerical simulation analysis on ground settlements caused by multi-line shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 884 - 889.

- (in Chinese))
- [4] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, **21**(2): 160 - 171.
- [5] LECA E, NEW B. Settlements induced by tunneling in soft ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, **22**(2): 119 - 149.
- [6] 廖少明, 杨俊龙, 奚程磊, 等. 盾构近距离穿越施工的工作面土压力研究[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(11): 1727 - 1730. (LIAO Shao-ming, YANG Jun-long, XI Cheng-lei, et al. Approach to earth balance pressure of shield tunneling across ultra-near metro tunnel in operation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(11): 1727 - 1730. (in Chinese))
- [7] 孙玉永, 周顺华, 向科, 等. 近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J]. *中国铁道科学*, 2010, **31**(1): 54 - 58. (SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, XIANG Ke, et al. Study on the construction parameters of shield tunneling in short-distance undercrossing the existing tunnel[J]. *China Railway Science*, 2010, **31**(1): 54 - 58. (in Chinese))
- [8] 付昱凯, 陆小龙, 丁文其, 等. 盾构隧道施工动态扰动特点及控制分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, **6**(4): 810 - 814. (FU Yu-kai, LU Xiao-long, DING Wen-qi, et al. Analysis on the characteristics of dynamic disturbance due to shield tunneling and the construction control[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, **6**(4): 810 - 814. (in Chinese))
- [9] BYUN G, KIM D, LEE S. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, **21**(3/4): 361 - 366.
- [10] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, **24**(4): 454 - 465.
- [11] 王非, 缪林昌, 黎春林. 考虑施工过程的盾构隧道沉降数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(增刊 1): 2907 - 2914. (WANG Fei, MIAO Lin-chang, LI Chun-lin. Numerical analysis of shield tunnel settlement considering construction process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S1): 2907 - 2914. (in Chinese))
- [12] LIU H L, LI P, LIU J Y. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, **26**(2): 276 - 283.
- [13] 黄德中, 马险峰, 王俊淞, 等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(3): 520 - 527. (HUANG De-zhong, MA Xian-feng, WANG Jun-song, et al. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(3): 520 - 527. (in Chinese))
- [14] 廖少明, 杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(5): 812 - 818. (LIAO Shao-ming, YANG Yu-heng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper- and lower-shield in succession[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(5): 812 - 818. (in Chinese))
- [15] 于宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (YU Ning, ZHU He-hua. Analysis of earth deformation caused by shield tunnel construction and 3D-FEM simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (in Chinese))
- [16] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(3): 388 - 392. (ZHANG Yun, YING Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(3): 388 - 392. (in Chinese))
- [17] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(11): 2005 - 2009. (HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua, et al. Study on limit supporting pressure and stabilization of excavation face for shallow shield tunnels in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(11): 2005 - 2009. (in Chinese))
- [18] 苟长飞, 叶飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(3): 590 - 598. (GOU Chang-fei, YE Fei, ZHANG Jin-long, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(3): 590 - 598. (in Chinese))