

有限空间内盾构施工对土体位移场的影响研究

郭健^{1,2}, 刘国彬¹, 黄沛³, 徐磊², 黄忠凯¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海建工一建集团有限公司, 上海 200120; 3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要 目的 研究软土地区有限空间区域内盾构施工对临近土体位移场的影响。方法 针对上海地区某新建隧道长距离平行下穿既有地下结构工程, 分别建立隧道处于三面围合有限空间及半无限空间条件下的高精度三维数值模型, 并将所得计算结果与实测数据进行对比验证。结果 新建隧道于有限空间内施工时不能引起整个有限空间内的土体变形, 仅隧道四周的土体会受到较为显著的扰动影响; 隧道处于半无限空间开挖引起的土体位移场影响范围约为有限空间条件下开挖引起的土体位移场范围的3~5倍。相较于半无限空间中隧道施工的计算结果, 新建隧道于有限空间内施工时大约可减小60%的最大地表沉降值和50%地表沉降范围, 但两种条件下地表沉降分布形式基本保持相同。结论 三面围合有限空间对由盾构施工引起的土体位移场有极强的约束作用, 在实际施工中可针对该屏蔽效应实施有限空间内的土体加固等措施。

关键词 盾构隧道; 有限空间; 土体变形; 数值模拟; 实测数据

中图分类号 TU433 文献标志码 A

Numerical Analysis about Influence from Shield Tunnel on Soil Displacement Field under Enveloped Condition in Soft Soil

GUO Jian^{1,2}, LIU Guobin¹, HUANG Pei³, XU Lei², HUANG Zhongkai¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Shanghai Construction No. 1 Group Co. Ltd., Shanghai, China, 200120; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, China, 710061)

Abstract: This study focused on the influence from the construction of the shield tunnel on the soil displacement field under enveloped situation in soft clay. Based on the project of the construction of shield tunnel in limited space in Shanghai, the integrated numerical models of the construction of

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807242); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102281203); 上海市科委科研项目(18DZ1201304, 21DZ1204403)

作者简介: 郭健(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事基坑及隧道工程等方面研究。

shield tunnel under enveloped condition and the construction of shield tunnel in half-infinite space were established, respectively. The field data and computed results were compared to evaluate the accuracy of the numerical models. The results indicated that only the soil near the tunnel in limited space was disturbed significantly. The range of soil displacement field induced by shield tunnel in half-infinite space was 3 ~ 5 times larger than that in limited space. The maximum ground surface settlement and the range of ground settlement induced by the construction of tunnel in limited space were 60% and 50%, respectively, smaller than those induced by construction of tunnel in half-infinite space. However, the ground settlement pattern between the aforementioned results were almost the same. This study indicated that the enveloped area formed by the underground structure and the existing diaphragm wall has significant restraint on the range of soil displacement field. Moreover, the soil reinforcement in enveloped area can be adopted during the construction period.

Key words: shield tunnel; limited space; soil displacement; numerical simulation; field data

随着现阶段城市化进程的不断加快,我国各大城市纷纷加快了地铁建设的步伐。相应地,各大城市浅层地下空间资源也愈发紧张^[1]。随着浅层城市地下空间资源被不断开发,新建隧道紧邻既有地下结构施工也愈发常见,施工风险也随之提高。对此,国内外诸多学者针对隧道开挖引起的土体沉降模式、土体位移场分布等方面进行了大量研究。吴昌盛等^[2-3]探究了盾构掘进引起的地表沉降分布形式,并指出隧道几何形状对其影响最大。沈建文^[4]针对盾构隧道临近桥桩施工时的地表沉降分布进行数值计算,并指出既有结构的对土体沉降分布具有较大的影响。C. Y. Gue 等^[5]通过离心模型试验探讨了新建隧道与既有隧道在不同净距条件下既有隧道的变形和内力分布规律,并提出相应施工控制措施。金大龙等^[6]则针对小净距隧道群下穿既有运营隧道进行了离心模型试验,指出既有隧道会对新建隧道的施工产生一定的影响。M. A. Soomro 等^[7-8]通过现场实测数据与数值模拟计算深入探究了隧道开挖与临近桩体的位移及应力传递规律。P. T. Simic-Silvaet 等^[9]针对盾构开挖时与临近群桩基础的相互影响进行数值计算研究,结果表明既有群桩基础对隧道开挖引起的土体位移场具有较大影响。

以上学者通过分析实验及现场实测等结果后均指出,当新建隧道周边存在既有结构

时,隧道开挖引起的土体沉降分布等会受到不同程度的影响^[10-11]。然而,上述研究大多针对隧道处于半无限空间中开挖或者新建隧道与既有地下结构仅为短距离穿越的情况,当隧道与既有地下结构处于长距离平行穿越状态且隧道处于有限空间内施工时,既有研究成果的适用性亟待进一步探讨。基于此,笔者以上海地区某盾构隧道下穿既有地下通道为工程背景,通过对比隧道在有限空间内开挖及在半无限环境中开挖两种条件下的数值计算结果,揭示了由既有地下通道及两侧地连墙构成的三面围合有限空间内隧道开挖引起的土体位移场范围、有限空间内土体沉降及地表沉降等因素的分布规律,并将计算结果与实测数据进行对比分析,以验证所得结果的合理性。

1 工程概况

该新建隧道与既有地下通道处于上下叠置的空间状态,叠置段总长度达到 5.4 km。既有地下通道底板与两侧地连墙形成了三面围合有限空间,而新建隧道则于该有限空间内进行施工。隧道与东西通道的典型横断面示意图如图 1 所示。该工程所在区域为典型的滨海平原地貌类型,基岩上方主要为第四纪松散沉积物。上海地区的第四纪松散沉积物自上而下主要可分为砂质粉土,淤泥质黏土、粉质黏土、黏质粉土、黏土及砂土。由于

新建隧道主要穿越上海的③号、④号软黏土层,并且该软黏土层具有强度低、含水率高、灵敏度高特性,因此工程的潜在风险性较大。

2 模型建立

2.1 土体及结构模型参数

郭健等^[12-13]通过三维数值模拟计算并与实测结果进行对比后指出,修正剑桥模型能够有效地反映滨海黏土的特性。谢雄耀等^[14]则通过研究指出,摩尔库伦模型用于模拟砂土等地层的效果较好。据此,本数值模型中上部软黏土采用修正剑桥模型进行模拟,下部砂土层采用摩尔库伦模型模拟。根据实际地勘报告及室内土工试验可得到上覆软黏土土体计算参数如表1所示,砂土土体的各项计算参数如表2所示。

由现场地勘报告可知,该区域地下水潜水水位为 $-2.7 \sim -5.2$ m。承压水水头埋深为地表以下32 m左右。

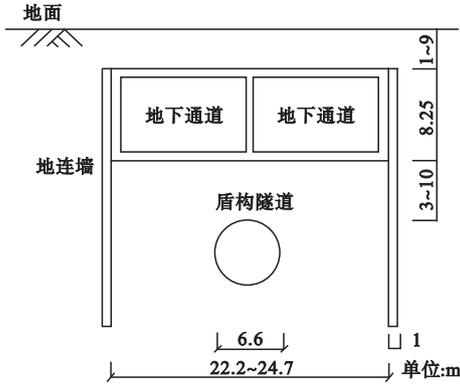


图1 工程典型横断面示意图

Fig. 1 Transverse section of the project

表1 黏土土体计算参数

Table 1 Parameters for soft soil in numerical mode

层号	土层名称	层厚/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C/kPa	$\varphi/(\text{°})$	e	ν	λ	κ
1	粉土	3.2	17.9	7.2	17.9	0.819	0.28	0.114	0.016
2	砂质粉土	5.9	18.3	12.6	16.5	1.113	0.31	0.179	0.021
3	淤泥质黏土	7.6	18.6	16.3	19.4	1.142	0.37	0.171	0.019
4	粉质黏土	8.8	18.9	17.5	26.1	0.843	0.31	0.162	0.007
5	黏土	3.4	18.2	19.8	20.6	0.916	0.29	0.086	0.005

注: γ 为土体重力密度; C 为土体黏聚力; φ 为内摩擦角; e 为土体孔隙比; ν 为泊松比; λ 为压缩指数; κ 为回弹指数。

表2 砂土土体计算参数

Table 2 Parameters for sandy soil in numerical model

层号	层厚/m	E/MPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C/kPa	$\varphi/(\text{°})$
6	8.6	200	19.7	1.6	25
7	9.8	210	19.7	2.1	23
8	22.7	200	22.3	3.2	27

注: γ 为土体重力密度; E 为土体弹性模量; φ 为内摩擦角; C 为土体黏聚力。

由于数值计算模型中边界效应对计算结果可能具有较大的影响^[15],许多学者基于大量三维数值计算结果和现场实测数据指出,隧道对四周土体的影响范围大约为 $5d \sim$

$7d$ ^[16],其中 d 为隧道直径。据此本数值模型沿隧道掘进方向(y 方向)的整体长度为120 m,垂直于隧道掘进方向(x 方向)的总长为100 m,并将中点设为坐标零点。计算模型沿深度方向(z 方向)的长度为70 m。数值模型示意图如图2所示。模型左右两侧约束 x 方向的位移,模型前后两侧约束 y 方向的位移,模型底面施加固定约束,顶部则为自由表面。为了更好地探究三面围合有限空间内盾构施工对土体位移场的影响,笔者同时建立相同条件下隧道处于半无限空间中开挖的数值计算模型,并将两种条件下的计算结果进行对比分析。

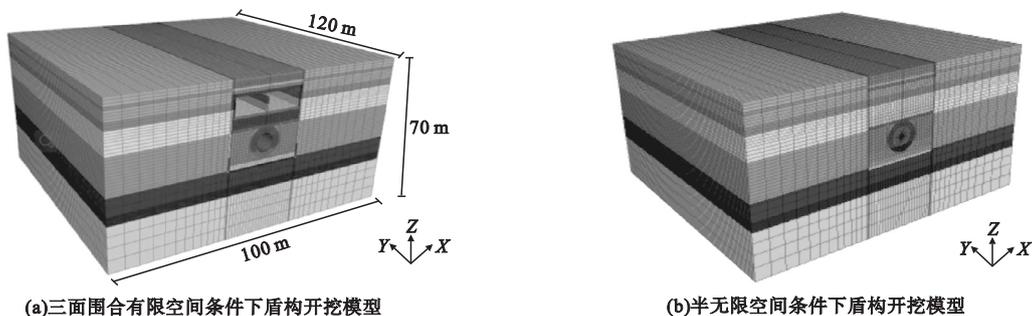


图2 数值模型示意图

Fig. 2 View of numerical model

禹海涛等^[17]通过相似模型实验指出,隧道管片接头与管片段存在一定的刚度差异。为了更好地考虑盾构隧道接头处的刚度削弱效应,笔者将盾构隧道接头处的混凝土弹性模量进行相应折减。管片中间段的弹性模量为 34.5 GPa,管片两端接头处的弹性模量为 24.15 GPa。该混凝土弹性模量折减段分布于管片接缝两端向外各 0.5 m 范围内。地下通道宽度为 24 m,纵向长度为 120 m,地连墙脚埋深为 -27 m,盾构隧道外径为 6.6 m,管片厚度为 0.3 m,管片环宽为 2 m。盾构隧道与既有地下结构均采用实体单元进行模拟。为方便计算,盾构机头附加推力设置为 30 kPa。其余各项计算参数见表 3。

表3 既有地下结构模型计算参数

Table 3 Parameters for underground structure

结构名称	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	厚度/m	泊松比
地下通道顶板	3.15	1.0	0.21
地下通道中板	3.15	1.2	0.21
地下通道底板	3.15	0.8	0.21
地下通道中隔墙	3.15	1.2	0.21
地连墙	3.00	1.0	0.21

2.2 数值计算模型的建立

采用 Flac3D 软件进行数值模拟计算,在计算过程中忽略承压水的影响,仅考虑地下水的作用。基于施工现场数据,隧道单次的开挖进尺为 2 m。由于在实际施工过程中采用了盾尾注浆等措施以填补盾尾间隙,并控制既有结构变形,为了使数值模型接近此真实状态,笔者在盾构机壳与临近土体间设

置“过渡层”以模拟盾尾注浆过程^[2]。“过渡层”的整体厚度为 60 mm,通过改变过渡层距盾壳不同位置处的加固土体弹性模量等参数以模拟注浆浆液的扩散及硬化作用。“过渡层”中不同位置处的加固土计算参数见表 4。

表4 不同位置处加固土计算参数

Table 4 Parameters for soil reinforcement in numerical model

编号	距盾壳距离/ mm	$E/$ 10 ⁵ kPa	$\gamma/$ (kN·m ⁻³)	ν
1	0~10	6.0	26.5	0.2
2	10~25	3.0	24.5	0.2
3	25~40	1.0	22.5	0.2
4	40~60	0.7	20.5	0.2

3 计算结果与实测结果对比

图 3 为盾构施工过程中距离盾构机头后方 5 m、15 m 和 30 m 三个监测断面的横向地表沉降数值计算结果与现场实测结果对比图。由图可知,实测数据和数值计算结果均反映出地表沉降始终以中间大、两边小的高斯分布形态为主要沉降形式,且地表沉降值随着盾构掘进而不断增大。监测面 1、监测面 2 和监测面 3 的最大地表沉降实测值分别为 0.92 mm、1.54 mm 和 2.41 mm,而三个断面的最大地表沉降计算结果分别为 1.11 mm、1.68 mm 和 2.59 mm,数值计算结果与实测值误差在 17% 以内。这也表明本研究的数值模型在一定程度上合理模拟了工程的实际情况。需要指出的是,地表沉降的

实测范围均小于数值模拟的结果,这是因为在实际工程中,在整体施工前对地表土进行了一定程度的注浆加固,而在本数值模型中忽略了该土体加固的作用。这也表明土体的注浆加固等措施有利于控制土体变形。

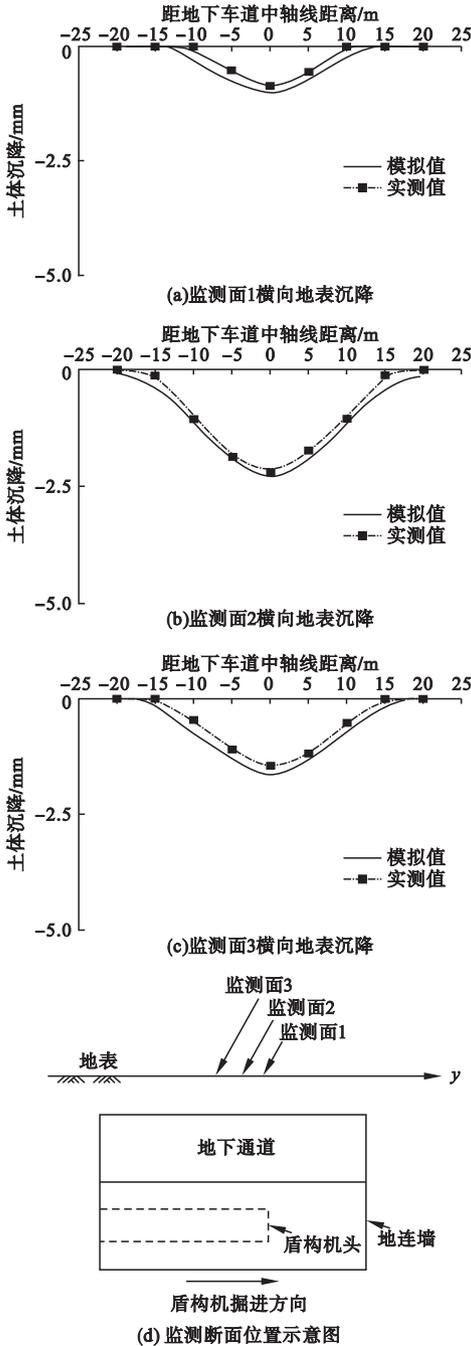


图 3 数值模拟与现场实测的横向地表沉降分布
Fig. 3 Lateral ground settlement for numerical simulation and field monitoring

4 计算结果分析

4.1 土体变形范围分析

图 4 为盾构隧道于三面围合有限空间及半无限空间中开挖完成后 $y = 60\text{ m}$ 处土体变形云图。

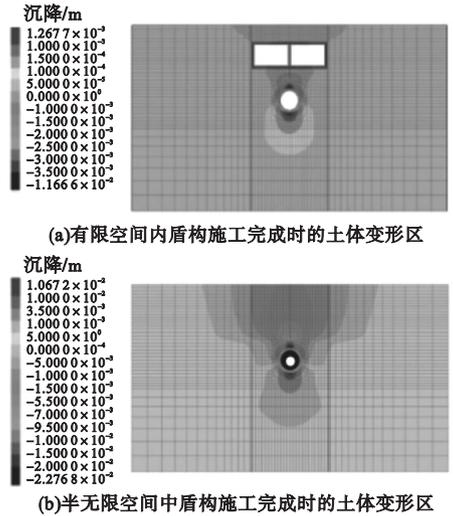


图 4 盾构开挖完成时的土体变形云图

Fig. 4 Contour plot of soil displacement field at the completion of the tunnel construction

由图可知,当隧道处于三面围合有限空间内施工时,仅隧道四周的土体受到较大的扰动影响。换言之,三面围合有限空间内隧道施工并不能引起整个有限空间内的土体变形。当隧道处于三面围合有限空间内施工时,隧道开挖引起的绝大部分土体变形均被限制于该有限空间中,地连墙外侧的土体基本不受盾构施工的影响。笔者认为当土体单元产生变形时,则该区域内的土体受到施工影响。据此可得,当隧道处于半无限空间内开挖时,隧道引起的土体位移影响范围较大,其整体范围约为 $36\pi r^2$,其中 r 为隧道半径;当隧道处于三面围合有限空间内开挖时,隧道施工引起的土体位移影响范围则受到了较为明显的抑制,其整体范围约为 $7\pi r^2$ 。为了进一步研究盾构开挖引起的土体变形影响范围,选取盾构机头后方不同截面位置处的土体变形计算结果,并将两种条件下的土体变

形影响范围列于表5中。由表5可知,新建隧道处于半无限空间开挖引起的土体位移场影响范围约为有限空间条件下结果的3~5倍。

表5 不同截面位置处土体变形影响范围

Table 5 The range of soil displacement field at different section

距机头 距离/m	半无限空间条件 下土体变形范围	有限空间条件下 土体变形范围
0	13.2 πr^2	4.2 πr^2
10	14.5 πr^2	4.5 πr^2
20	18.8 πr^2	5.4 πr^2
30	28.7 πr^2	7.1 πr^2
40	36.1 πr^2	7.1 πr^2
50	36.2 πr^2	7.1 πr^2

4.2 横向地表沉降分析

为了更好地探究盾构施工过程中横向地表沉降的变化规律,选取 $y = 60\text{ m}$ 位置处为监测断面。隧道位于三面围合有限空间及半无限空间条件下开挖引起该监测断面处的横向地表沉降计算结果如图5所示。由图可知,随着隧道开挖的进行,最大地表沉降值逐渐增大,横向地表沉降范围也相应增大。然而,无论当隧道处于有限空间或半无限空间开挖时,其引起的地表沉降分布形式相差不大。两种工况条件下的横向地表沉降均呈现出中间大、两边小的高斯分布形式,这与文

献[2-4]的统计规律一致。综合图3和图6的结果分析,既有地下结构所形成的有限空间的存在并不能改变地表沉降的分布形式,只是减小了地表沉降的最大幅值和沉降范围。

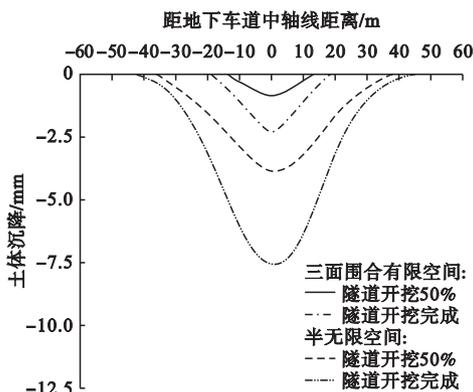


图5 横向地表沉降

Fig. 5 Lateral ground settlement

表6为有、无既有地下结构状态下隧道开挖50%和隧道开挖完成时监测断面的地表最大沉降值及地表沉降槽长度。由表6可知,当隧道处于三面围合有限空间内开挖时,地表沉降幅值和地表沉降槽长度均明显小于隧道处于半无限空间中开挖引起的结果。总体来说,相较于隧道处于半无限空间中施工的结果,新建隧道于有限空间内施工时大约可减小60%的最大地表沉降值和50%的地表沉降范围。

表6 监测断面最大地表沉降值及土体沉降槽长度

Table 6 The maximum and the range of surface settlement

类别	隧道开挖50%时最 大地表沉降/mm	隧道开挖50%时 地表沉降槽长度/m	隧道开挖完成时 最大地表沉降/mm	隧道开挖完成时 地表沉降槽长度/m
三面围合有限空间	1.31	32	2.61	47
半无限空间	3.51	67	7.54	91

4.3 纵向地表沉降分析

图6为有、无既有地下结构条件下盾构开挖引起的纵向地表沉降分布。由图可知,无论隧道处于三面围合有限空间内或是半无限空间中施工时,地表纵向沉降均呈现出相

似的三维分布规律,即地表沉降值随着距盾构机头后方距离的增大而逐渐增加。然而,当隧道处于三面围合有限空间内施工时,纵向地表沉降分布曲线明显小于隧道于半无限空间中开挖所得的结果。

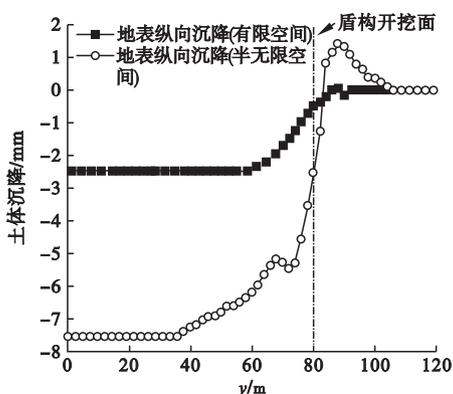


图6 纵向地表沉降

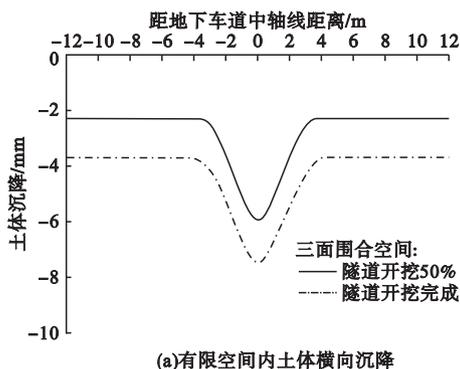
Fig. 6 Longitudinal ground settlement

由图6可知,当隧道处于半无限空间中施工时,盾构机头前方的地表土体会出现一定的隆起现象,这是由于盾壳与黏土的摩擦力过大以及机头附加推力过大等因素所引起的负土体损失导致的。然而,当隧道处于有限空间内施工时,盾构机前方的地表土则未出现隆起的现象,这是由于当盾构机于有限空间中掘进时,既有地下结构的存在会阻碍盾构施工过程中对地表土体的直接影响,即此时地表土体主要受到既有地下结构变形的影

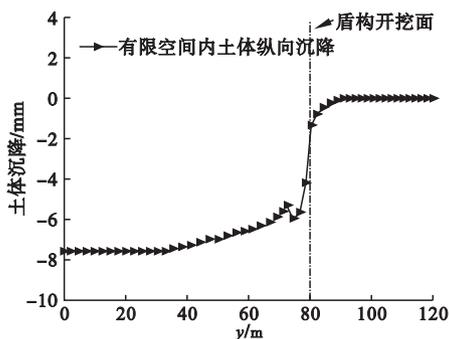
响。综合图4、图5和图6分析可知,三面围合有限空间对盾构施工引起的土体变形具有极强的屏蔽效应。

4.4 有限空间内土体沉降

图7为三面围合有限空间内横向及纵向土体沉降分布示意图。由图可知,三面围合有限空间内既有地下通道底板下方出现了土体沉降槽,并且该沉降槽范围及最大沉降值随着盾构施工的进行而逐步增大。有限空间内的土体沉降槽主要位于隧道中心线上方。有限空间内的纵向土体沉降也呈现出一定的三维分布形式,具体来说,有限空间内的纵向土体沉降随着距盾构机头后方距离的增大而逐渐增加。由于既有地下通道的存在,有限空间内盾构机前方的土体始终与地下通道处于密贴状态,并未出现土体隆起的现象。由于有限空间内既有地下结构底板下方出现了土体沉降槽,此时既有地下结构底板处于较为不利的受力状态,因此可在盾构施工前对该沉降槽范围内的土体提前进行注浆加固以控制土体沉降。



(a)有限空间内土体横向沉降



(b)有限空间内土体纵向沉降

图7 有限空间内土体沉降

Fig. 7 Soil settlement in limited space

5 结论

(1)新建隧道于三面围合有限空间内施工时并不能引起整个有限空间内的土体变形,仅隧道四周的土体会受到较为显著的扰动影响。当隧道处于三面围合有限空间内施工时,地连墙外侧的土体基本不受盾构施工

的影响。

(2)三面围合有限空间对由盾构施工引起的土体位移场有极强的屏蔽效应。集中表现在,隧道处于半无限空间开挖引起的土体位移场影响范围约为有限空间条件下土体位移场范围的3~5倍。相较于半无限空间中隧道施工的计算结果,新建隧道于有限空间

内施工时大约可减小 60% 的最大地表沉降值和 50% 地表沉降范围。

(3) 既有地下结构所形成的有限空间的存在并不能改变地表沉降的分布形式,只是减小了地表沉降的最大幅值和沉降范围。三面围合有限空间内盾构施工会导致有限空间内出现土体沉降槽,并且该沉降槽出现在隧道中心线上方。在实际施工中可预先对该土体沉降槽范围内的土体进行注浆等加固措施。

参考文献

- [1] MENG F Y, CHEN R P, XIE S W, et al. Excavation-induced arching effect below base level and responses of long-collinear underlying existing tunnel [J]. *Tunneling and underground space technology*, 2022, 124(5): 104451.
- [2] 吴昌胜. 大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. (WU Changsheng. Study on the ground deformation induced by large diameter shield tunnelling construction [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)
- [3] WANG F, MIAO L C, YANG X M, et al. The volume of settlement trough change with depth caused by tunneling in sands [J]. *KSCE journal of civil engineering*, 2016, 20(7): 2719 - 2724.
- [4] 沈建文, 刘力. 盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊2): 709 - 714. (SHEN Jianwen, LIU Li. Numerical analysis and field monitoring for studying effects of shield tunnelling on nearby piles [J]. *Rock and soil mechanics*, 2015, 36(S2): 709 - 714.)
- [5] GUE C Y, WILLOCK M J, ALHADDAD M M, et al. Tunnelling close beneath an existing tunnel in clay perpendicular under crossing [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(9): 795 - 807.
- [6] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8): 1507 - 1514. (JIN Dalong, YUAN Dajun, WEI Jiixin, et al. Centrifugal model test of group tunneling with small spacing beneath existing tunnels [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2018, 40(8): 1507 - 1514.)
- [7] SOOMRO M A, HONG Y, NG C W W, et al. Load transfer mechanism in pile group due to single tunnel advancement in stiff clay [J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2015, 45: 63 - 72.
- [8] SOOMRO M A, NG C W W, LIU K, et al. Pile responses to side-by-side twin tunnelling in stiff clay: Effects of different tunnel depths relative to pile [J]. *Computers and geotechnics*, 2017, 84: 101 - 116.
- [9] SIMIC-SILVA P T, MARTINEZ-BACAS B, GALINDO-AIRES R, et al. 3D simulation for tunnelling effects on existing piles [J]. *Computers and geotechnics*, 2020, 124: 103625.
- [10] 许原骑, 单冶钢, 甘鹏路, 等. 地铁并行隧道掘进对近接群桩基础的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(增刊1): 2935 - 2944. (XU Yuanqi, SHAN Zhigang, GAN Penglu, et al. Influence of side-by-side twin tunneling on an existing pile group [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2021, 40(S1): 2935 - 2944.)
- [11] 施有志, 林联泉, 徐建宁, 等. 增湿条件下膨胀土隧道近距离下穿既有地铁车站施工力学分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(1): 200 - 210. (SHI Youzhi, LIN Lianquan, XU Jianning, et al. Analysis of construction mechanics of expansive soil tunnel passing through existing subway station in short distance under humidification condition [J]. *Journal of railway science and engineering*, 2021, 18(1): 200 - 210.)
- [12] 郭健, 刘国彬, 苏维捷, 等. 群坑效应下已建地下结构对紧邻基坑开挖变形的影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2019, 35(2): 222 - 230. (GUO Jian, LIU Guobin, SU Weijie, et al. Numerical analysis about influence from the subsurface structure on adjacent deep excavation in foundation pit group [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2019, 35(2): 222 - 230.)
- [13] SHI Jiangwei, ZHANG Xian, CHEN Li, et al. Numerical investigation of pipeline responses to tunneling-induced ground settlements in clay [J]. *Soil mechanics & foundation engineering*, 2017, 54(5): 303 - 309.
- [14] 谢雄耀, 张永来, 周彪, 等. 盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(10): 1781 - 1789. (XIE Xiongyao, ZHANG Yonglai, ZHOU Biao, et al. Micro-settling control technology for shield tunnels crossing old buildings [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2019, 41(10): 1781 - 1789.)
- [15] LIU J Q, SUN Y K, LI C J, et al. Field monitoring and numerical analysis of tunnel water inrush and the environmental changes [J]. *Tunneling and underground space technology*, 2022, 122(4): 104360.
- [16] GU X, CHEN F Y, ZHANG W G, et al. Numerical investigation of pile responses induced by adjacent tunnel excavation in spatially variable clays [J]. *Underground space*, 2021, 11(1): 1 - 17.
- [17] 禹海涛, 萧文浩, 袁勇, 等. 沉管隧道接头与管节本体刚度比试验[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(12): 134 - 141. (YU Haitao, XIAO Wenhao, YUAN Yong, et al. Experiment on stiffness ratio of immersed tunnel element [J]. *China journal of highway and transport*, 2016, 29(12): 134 - 141.) (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)