

DOI: 10.11779/CJGE2019S1006

管廊隧道开挖对上覆在建深基坑影响的三维有限元分析

戴 轩¹, 徐管应², 霍海峰^{1*}, 程雪松³, 闫晓荣¹

(1. 中国民航大学机场学院, 天津 300300; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300392;
3. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 以沈阳某盾构法综合管廊隧道下穿在建盖挖顺做法基坑为工程实例, 在对工程实测数据进行分析基础上, 利用小应变硬化本构模型进行三维有限元数值模拟研究, 分析了盾构隧道下穿在建基坑引发的围护结构位移、水平支撑变形和基坑内既有结构变形。研究表明, 利用小应变硬化本构模型可对盾构隧道下穿在建基坑问题进行较好的模拟; 盾构隧道下穿基坑将引发围护结构顶部产生差异沉降; 基坑内已施工完成的结构和水平支撑将发生“两边沉降大, 中间沉降小”的上凸型变形; 合理设计的立柱可有效控制盾构下穿引发的水平支撑沉降。

关键词: 盾构隧道; 深基坑; 风险工程; 综合管廊; 三维有限元分析; 小应变硬化本构

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0021-04

作者简介: 戴 轩(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程灾害、机场岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: tianjindaixuan@126.com。

Three-dimensional finite element analysis of impact of utility tunnel construction on overlying deep excavations

DAI Xuan¹, XU Guan-ying², HUO Hai-feng¹, CHENG Xue-song³, YAN Xiao-rong¹

(1. College of Airport Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300392, China; 3. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A shield method utility tunnel is constructed underneath the foundation pit using the cover-excavation method in Shenyang. Based on the analysis and comparison of the measured data of this project, a three-dimensional finite element model is established using the HSS constitutive model. The deformation of the retaining structures, the strut settlement and the deformation of the finished structures in the pit caused by tunnelling are analyzed. The research shows that the characteristics of the tunnelling underneath the foundation pit can be described appropriately using the HSS model. The underneath tunnelling will induce differential settlement at the top of the retaining structures. The settlement of the finished structures and struts in the foundation pit increases gradually from the middle part to the two sides near the retaining structures. The reasonably designed columns can control the settlement of the struts effectively.

Key words: shield tunnel; deep excavation; risk engineering; utility tunnel; 3D FEM; HSS model

0 引言

城市地下空间开发是城市发展的必然趋势。以城市综合管廊建设为例, 其可以提升城市基础设施水平和城市综合排水能力, 对优化城市环境和提高城市生活质量起到至关重要的作用^[1]。在城市地下空间开发过程中, 必然会遇到不同开挖工程(如隧道工程、基坑工程)交叉作业和相互影响的情况。此外, 受到既有建(构)筑物(如建筑基础、桥梁基础、地铁隧道等)的制约, 近接施工和穿越工程逐渐增多, 这些均为地下工程的发展带来了极高的风险与挑战, 甚至引发工程事故。

盾构法在城市综合管廊建设工作中被广泛采用,

关于盾构法施工对于地层的影响, 已有很多国内外学者进行了相关研究^[2-3]。在此基础上, 盾构隧道施工对已建成的地下建(构)筑物的影响被大量研究^[4-5]。然而, 在盾构施工对在建的开挖工程的影响方面, 目前工程实例和相关研究均较少。随着地下空间愈发紧张, 以基坑开挖和隧道开挖为代表的城市开挖工程间的交叉作业越来越多, 隧道工程和基坑工程之间的相互影响问题越来越突出。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808548, 51508558); 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项资金资助项目(3122018C017)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者 (E-mail: hhf_1117@126.com)

对于隧道工程与基坑工程相互影响问题,现有研究大部分集中于基坑开挖对于邻近隧道的影响及保护^[6],对于盾构下穿在建的基坑工程尚缺乏相关工程经验与深入研究。

本文以实际工程为背景,介绍了沈阳某盾构法综合管廊隧道下穿明挖法公路隧道基坑的工程案例,并对实测数据进行了分析。采用小应变硬化本构模型对该工程进行了三维有限元数值模拟,在利用实测数据验证模拟可靠性的基础上,分析了盾构隧道下穿在建深基坑对于支护结构和基坑内既有结构的影响。随着地下空间的开发,隧道与基坑工程间的交叉作业将会越来越多,研究成果对于此类工程问题具有一定参考意义。

1 工程概况

沈阳某综合管廊工程采用盾构法施工,全长约12.8 km。管廊采用两个单圆的盾构工法,管片内径为5.4 m,外径为6.2 m,开挖直径为6.3 m。两管廊中心线距离约为12 m,覆土为6~22.5 m,底板埋深12~28.5 m。

管廊在两条主干道交口处需下穿在建公路隧道基坑,公路隧道基坑采用盖挖顺做法施工。基坑围护结构为钻孔灌注桩加内支撑的形式,管廊工程与隧道基坑的位置关系如图1所示,管廊隧道与基坑斜交,夹角约为67°,相交处管廊纵断坡度约为30%,管廊覆土约为20.5 m。

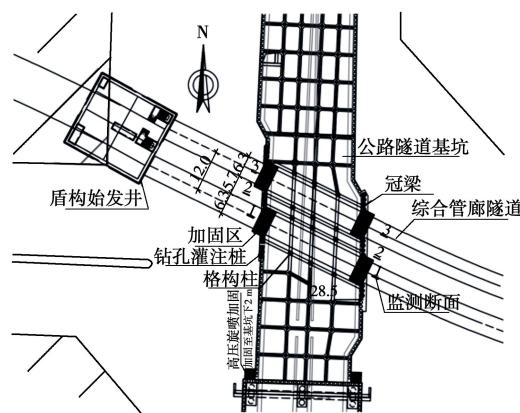


图1 管廊隧道下穿基坑平面图

Fig. 1 Plan view of utility tunnel underneath excavations

管廊隧道与公路隧道基坑纵剖面及地质剖面如图2所示。基坑中公路隧道在负二层,上部为合建的南北走向管廊。盾构施工时将穿越基坑底部以下地层且穿越围护桩,坑底距离盾构隧道顶约为3 m。盾构穿越基坑围护桩时需要对其进行切割。为满足穿越要求,竖向钢管柱(立柱)布置时已避开管廊隧道。

根据公路隧道基坑的工期安排,2016年6月基坑

施工及土方开挖完成,同年7月开始施工主体结构,10月负二层主体结构完成。盾构法管廊隧道计划工期为2016年10月盾构始发,11月盾构推进至公路隧道基坑时,基坑中仅完成了负二层主体结构,两个在建工程存在交叉作业,互为风险源。

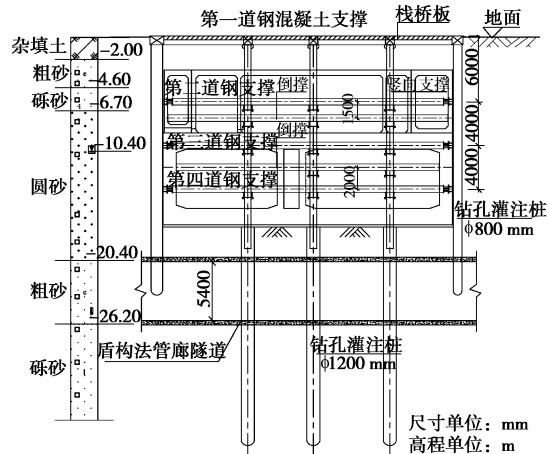


图2 管廊隧道下穿在建基坑剖面图

Fig. 2 Profile of utility tunnel underneath foundation pit under construction

2 盾构隧道下穿在建深基坑的三维有限元模型及验证

数值模拟采用Plaxis^{3D}进行分析。模型网格如图3所示,基坑最宽处为28.5 m,下穿隧道底部埋深27 m,模型尺寸为180 m×100 m×50 m以消除边界条件的影响,模型生成单元数约为200000个。基坑与下穿管廊隧道位置关系见图4。

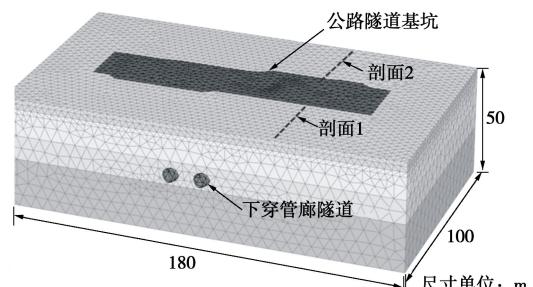


图3 数值分析模型网格图

Fig. 3 Mesh of model for numerical simulation

模型中围护结构、负二层公路隧道结构、盾构隧道管片、首层栈桥板采用六节点三角形Plate单元进行模拟;钢支撑、钢围檩、立柱采用Beam单元进行模拟;立柱桩采用Embedded-pile单元进行模拟,数值模型结构尺寸均与实际工程保持一致,数值模拟的土体参数如表1所示。

按照实际施工顺序,首先模拟基坑开挖(坑内已施工完毕负二层结构),再对盾构下穿进行模拟。为验证HS-Small模型的可靠性,选取两个典型剖面(见图3),

表 1 土体分层及物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c' ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	φ' ($^\circ$)	G_0^{ref} ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\gamma_{0.7}$ (10^{-3})	E_{50}^{ref} ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$E_{\text{ued}}^{\text{ref}}$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)
①杂填土	19.2	25.7	15.2	32232	0.2	3950	3950	11850
④ ₄ 粗砂	19.1	15.2	27.4	44798	0.2	5490	5490	16470
④ ₅ 砾砂	19.6	28.5	29.9	62750	0.2	7690	7690	23070
④ ₆ 圆砾	19.3	25.1	30.6	55243	0.2	6770	6770	20310
⑤ ₄ 粗砂	20.3	26.0	20.6	40963	0.2	5020	5020	15060
⑤ ₅ 砾砂	20.5	14.4	24.1	105508	0.2	12930	12930	38790

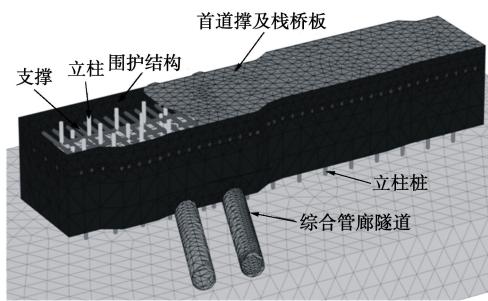


图 4 基坑与隧道位置关系

Fig. 4 Relative position between tunnel and excavations

将本文基坑开挖得到的地表沉降曲线与 Hsieh 等^[7]提出的经验曲线进行对比如图 5 所示 (d 为距基坑边距离, H_e 为基坑深度), 可以看出 HS-Small 模型的模拟结果与经验公式拟合的较好, 数值模拟得到的地表沉降槽范围略小于经验公式解。

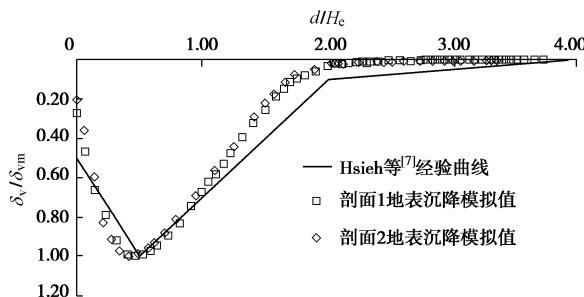


图 5 基坑外地表沉降模拟值与经验公式对比

Fig. 5 Comparison of ground surface settlement outside pit between numerical results and empirical solutions

盾构管廊工程下穿基坑时, 坑内公路隧道施工完成了负二层结构, 下穿过程中对公路隧道进行了 24 小时自动化监测, 监测断面见图 1 (共 3 个断面)。管廊盾构下穿后 1—1 断面变形的数值模拟和实测结果对比如图 6 所示。可以看出, 数值模拟和实测值得到的基坑内结构变形均以竖向沉降为主, 且均呈现出“两边大、中间小”的上凸型沉降变形模式 (具体原因见后文分析), 此时对基坑内结构底板和中板的上皮钢筋应予以加强。数值模拟和工程实测值得到的隧道结构变形的结果较为一致。

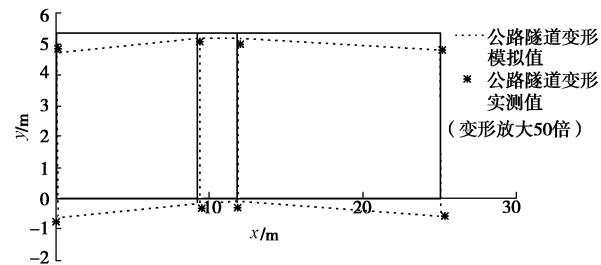


图 6 盾构下穿后基坑内隧道结构计算值和实测值对比

Fig. 6 Comparison of highway tunnel deformation between numerical simulations and measured data

3 数值模拟结果分析

管廊隧道施工穿越基坑围护结构, 需要切割部分灌注桩, 加之盾构施工本身的扰动, 将引起围护结构发生变形, 因此有必要对其进行分析。图 7 为盾构穿越引起的围护结构顶部 (冠梁处) 的沉降, 可以看出, 盾构施工围护结构顶部同样会形成“沉降槽”, 且沉降最大值在两管廊隧道中心处, 最大沉降值为 3.3 mm。

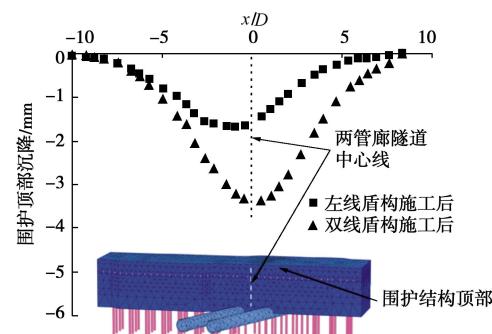


图 7 管廊隧道施工引起的围护结构顶部沉降

Fig. 7 Settlements of top of cast-in-place pile induced by construction of subjacent utility tunnel

图 8 为管廊隧道下穿引发的水平支撑竖向位移 (图中标记的管廊隧道边界为右线隧道)。由于管廊隧道穿越基坑时, 与基坑形成一定的角度 (夹角约 67°), 因此水平支撑沉降曲线并非完全对称。总体上看, 水平支撑竖向位移曲线呈现出“两边大、中间小”的趋势, 这主要是由于采用“盖挖顺作法”施工, 立柱桩

桩长较长(桩底位于坑底以下 20 m), 可以较好地控制水平支撑的竖向沉降, 而围护桩由于下部盾构施工时被切割了一部分, 竖向承载力被削弱, 故水平支撑两侧沉降较大。这种变形趋势与已施工完成的基坑内负二层结构的变形一致(见图 7)。

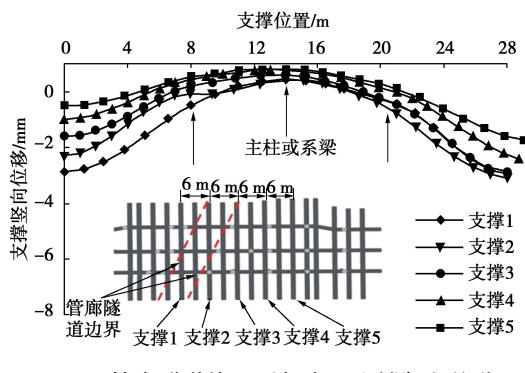


图 8 管廊隧道施工引起水平支撑竖向位移

Fig. 8 Vertical movements of horizontal support induced by construction of subjacent utility tunnel

4 结 论

本文以沈阳某盾构法综合管廊隧道下穿在建盖挖顺作法基坑为工程实例, 首先对工程实测数据进行了分析, 并利用实测数据对三维有限元数值分析结果进行验证; 在此基础上, 分析了盾构法管廊隧道下穿在建基坑引发的基坑和基坑内既有结构变形规律。主要结论如下:

(1) 管廊隧道下穿公路隧道基坑后, 基坑内已施工的负二层结构以沉降变形为主, 且在盾构下穿后出现“两边沉降大, 中间沉降小”的上凸型变形模式。

(2) 利用小应变硬化本构模型可对盾构隧道下穿在建基坑问题进行较好的模拟, 数值模拟与实测结果得到的公路隧道变形模式较为一致。盾构隧道横穿围护结构, 围护结构顶部会产生差异沉降, 因此对于盾构穿越处的围护结构顶部冠梁的竖向受力应进行校核。

(3) 基坑内设置的立柱对于水平支撑的竖向沉降具有较好的控制作用, 水平支撑在管廊隧道下穿后同样出现“两边沉降大, 中间沉降小”的变形模式。对于基坑内部的立柱及立柱桩进行合理设计可提高基坑的整体性, 从而提升其抗扰动能力。

本文仅对沈阳市某盾构隧道下穿盖挖顺做法基坑进行了初步分析, 实际上不同地层情况、不同基坑施

工方法、不同隧道下穿角度、不同基坑平面形状都会对此类问题带来影响; 此外尚应进行一系列模型试验以对其变形机理和控制方法进行更为深入的研究。

参 考 文 献:

- [1] 余常俊. 城市地下综合管廊浅析[J]. 公路, 2016, **10**: 153 – 157. (YU Chang-jun. Brief analysis of city underground utility gallery[J]. Highway, 2016, **10**: 153 – 157. (in Chinese))
- [2] CHAKERI H, OZCELIK Y, UNVER B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **36**: 14 – 23.
- [3] DIAS D, KASTNER R. Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields — Analysis of monitoring and numerical modeling results[J]. Engineering Geology, 2013, **152**(1): 17 – 25.
- [4] 陈江, 陈思明, 傅金阳, 等. 盾构侧穿邻近桥桩施工影响及加固措施研究[J]. 公路交通科技, 2016, **33**(7): 97 – 102. (CHEN Jiang, CHEN Si-ming, FU Jin-yang, et al. Study on effect of shield tunneling side-crossing adjacent piles and reinforcement Measures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, **33**(7): 97 – 102. (in Chinese))
- [5] 王国富, 孙捷城, 路林海, 等. 盾构隧道近距离下穿高架桥主动预支护研究[J]. 现代隧道技术, 2017, **54**(6): 195 – 202. (WANG Guo-fu, SUN Jie-cheng, LU Lin-hai, et al. Active pre-support technology for a shield tunnel approaching to a proposed viaduct pile[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, **54**(6): 195 – 202. (in Chinese))
- [6] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 599 – 612. (ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 599 – 612. (in Chinese))
- [7] HSIEH P, OU C. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004 – 1017.

(责编: 胡海霞)