DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.05.30

盾构穿越多条既有隧道施工环境扰动分析

代仲海1,2, 胡再强1

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所,陕西西安 710048;2. 深圳地质建设工程公司,广东 深圳 518023)

摘 要:新建盾构穿越多条既有隧道施工是近年不断出现的新型地下空间布置形式。穿越邻近既有隧道过程除了 会使地表发生隆沉,还会对已有隧道产生扰动变形影响。建立了针对新建盾构垂直上、下穿现有隧道穿越施工形 式的三维弹塑性有限元动力学模型,并进行了全过程仿真分析。并根据一些结果,提出了预测多线盾构隧道施工 地表沉降的 Peck 修正公式。研究表明:当各隧道间的净距处于扰动影响范围内时,盾构掘进对地层产生二次扰 动,将对既有隧道产生较大影响。盾构上穿现有隧道时,地面将发生较大变形,且均呈隆起趋势;而下穿现有隧道 时,地面将发生较小的变形,现有隧道均呈下沉趋势。研究成果可为工程实际施工建设提供理论支持。 关键词:盾构隧道;垂直穿越多条隧道;有限元法;修正 Peck 公式;施工扰动

中图分类号:U455.43; P642.26 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)05-0186-05

Analysis of environmental disturbance in shield tunneling across several existing tunnels

DAI Zhonghai^{1,2}, HU Zaiqiang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Shenzhen Geology Construction Engineering Company, Shenzhen 518023, China)

Abstract: The construction of new shield crossing several existing tunnels is a new type of underground space layout in recent years. The process of crossing the existing tunnel, which make the ground surface sink, but also affect the deformation of the existing tunnel. For two kinds of typical construction methods of up – crossing and under – crossing, the 3D elastoplastic FEM was applied to analysis the dynamic construction process. A modified Peck equation was proposed to predict ground settlement according to some results. The results showed that when interval among all tunnels are in the influenced range, a secondary disturbance is caused by shield advance and greater influence will be made on the existing tunnels. During the construction of up – crossing, ground settlement turns to be larger, the existing tunnels have a tendency of upward moving. Whereas the under – crossing makes a smaller settlement with a tendency of subsidence. This research provides some theoretical basis and prophase guidance for practical engineering construction.

Key words: shield tunneling; perpendicularly crossing several existing tunnels; finite element method; modified Peck equation; construction disturbance

1 研究背景

随着我国城市经济的飞跃发展,城市地下空间 受到越来越广泛的关注和开发,城市轨道交通、地下 快速公路、越江隧道的建设迅速发展^[1],因此新建 盾构穿越多条邻近运营隧道的情况不断发生,对于 盾构施工水平提出了更高的要求,稍有不慎将引起 运营隧道的开裂破坏,严重时甚至导致隧道坍塌等 环境灾害。因此,针对盾构近距离穿越多线既有隧 道的复杂情况,预测并控制施工期间扰动变形,使其 对环境的影响减小到最低限度,就显得越来越重要。 目前,已有众多学者对盾构施工诱发的环境扰

收稿日期:2018-07-02; 修回日期:2018-09-10

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2017JM5059)

作者简介:代仲海(1984-),男,湖北潜江人,博士研究生,高级工程师,主要从事地基与基础工程、地下洞室稳定性分析等 方面的研究工作。

通讯作者:胡再强(1964-),男,陕西周至人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

动问题进行了丰富研究^[3-9],但对于近距离穿越施 工的扰动分区以及对地层应力和超孔压变化等施工 扰动机理还缺乏充分和深入的研究,特别是在多条 盾构法施工隧道相互影响作用等方面的研究极为匮 乏。本文分别对盾构垂直上穿与垂直下穿两种典型 穿越方式,构建了三维弹塑性有限元模型,计算分析 了盾构掘进引起的地表沉降以及对既有隧道的扰动 变形影响,对多线盾构隧道的合理设计及指导施工 采取相应的防护措施具有重大现实意义。

2 土体扰动影响因素

盾构法隧道是一个非常复杂的系统工程,盾构 的挖掘将不可避免地扰动周围的土体并引起地层的 隆起沉降。由于土体损失、超孔隙水压变化以及管 片承压变形等因素的影响,原有的土体平衡状态遭 到破坏,初始地应力将重新分布,产生地表不均匀沉 降、临近的既有隧道发生较大纵向变形等现象。

盾构隧道施工过程中,诸多因素会导致土体的 变形。在文献[10]中,深入研究了盾构前推力、盾 构与土体摩擦力和土体损失这3种主要因素,并分 别给出相对应的计算公式。当然,土质条件、盾构推 进速度、注浆压力、注浆速度、注浆量、超挖施工以及 既有隧道列车荷载等因素同样不可忽略^[11]。因此 在使用三维弹塑性有限元法模拟盾构掘进开挖的过 程中,为了尽可能地减小数值模拟与实际施工的误 差,必须综合考虑上述诸多因素的相互影响。

3 典型软弱地层盾构施工有限元模拟

3.1 掘进过程模拟

本文采用有限元数值模拟中生死单元以及改变 材料参数的技术手段,进而实现对与盾构掘进以及 同步注浆的有效模拟。采用设置等代层的思路可以 将不易量化的注浆过程进行必要简化,达到准确模 拟施工过程的目的,等代层示意图如图1所示。



3.2 三维有限元模型

本文构建的数值计算模型如图 2 和 3 所示,其 中, *X* 方向为 50 m, *Y* 方向为 24 环管片宽度 24 × 1. 2 m(环宽) = 28.8 m, *Z* 方向为 60 m,新建隧道与既 有隧道管片均是通用环楔形管片,其混凝土强度为 C60 级,混凝土抗渗等级为 S12。隧道的内部直径 为 5.5 m,外部直径为 6.2 m,厚度为 350 mm,管片 的环宽为 1.2 m,等代层厚度为 10 cm。假设现有隧 道之间净间距为 5 m,覆土厚度为 22 m,两条新建隧 道的净间距为 5 m,其与两条既有隧道的净距为 4 m。模型共有 35 196 个实体单元。



图 2 盾构上穿有限元模型 图 3 盾构下穿有限元模型

3.3 材料参数

本次建模过程中,采用邓肯 - 帕克弹塑性模型 模拟土体介质,为了模拟出盾构管片螺栓连接时产 生的刚度折减,将管片纵向刚度乘以 0.9 的折减系 数^[12]。此外,模型中通过采用设置时间步长来模拟 盾构施工中的时间效应以及土体固结作用的影响。 材料参数详见表 1 和 2。

		-44			~	
名称	μ	E/	γ' /	c/	arphi/	<i>K</i> /
		MPa	$(kN \cdot m^{-3})$	kPa	(°)	$(m \cdot s^{-1})$
土	0.26	10.47	7.8	14.0	14.5	2.6×10^{-9}
衬砌	0.20	30200				

表1 土和衬砌物理参数

表2 等	₩代.	层参	疹数
------	-----	----	----

等代层	E/MPa	$K/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$
Step1	0.2	1.1×10^{-8}
Step2	2.0	0.6×10^{-8}
Step3	18.0	0.2×10^{-8}

注:表1和2中,μ为泊松比,E为弹性模量,γ′为浮容重,c为黏 聚力,φ为摩擦角,K为渗透系数。

3.4 盾构穿越分区

为了更加清晰地描述盾构穿越开挖全过程,结 合参考文献[13]以及前期对此类参数下单线隧道 盾构开挖土体扰动范围研究可知:对既有隧道中心 间距小于2D(D为隧道外部直径,下同),新建隧道 距离既有隧道最小净距小于1.8D的近接工况,穿 越既有隧道区段可划分为如图4所示的5个区域, 即Ⅰ区——穿越接近区域,Ⅱ(1)区——穿越区域 1,Ⅱ(2)区——穿越区域2,Ⅲ区——穿越既有隧道 过渡区域,Ⅳ区——穿越远离区域。





图 5 为 1*和 2*线上穿过程中各区上方横向地 表沉降图。由图 5 可见,在 1*线上穿 I 区时,其相 应地表沉降最小,其值约为 8 mm,穿越 II (1) 区、II (2) 区时由于既有隧道上方土压力较小,地表沉降 相应也比穿越 I 区时大,1*线穿越Ⅳ区后,其地表沉 降最大,其值为 13.5 mm,2*线穿越过程中,地表沉 降与 1*线穿越过程相似,但由于各隧道之间的相互 影响作用,其地表沉降均大于 1*线穿越过程中的地 表沉降,其穿越完成后地表沉降最大为 27.5 mm 左 右。同时可以发现,2*线穿越完成后,地表最大沉降 并不是发生在 2*线正上方,也不呈对称分布,与施 工结果趋势相吻合。由此可见,各隧道之间的相互 影响较为复杂。

图 6 为 1[#]和 2[#]线在下穿过程中各区上方横向 地表沉降图,在图 6 所示的下穿过程中的地表横向 沉降规律类似于上穿过程,但总沉降量小于上穿时 引起的地表沉降,最大沉降量为 14.8 mm。同时,沉 降槽的宽度大于上穿过程的地表沉降槽宽度。 在模拟盾构上、下垂直穿越过程中,均以2.4 m (2环管片宽度)作为一个推进长度,首先进行1[#]线路的开挖,再进行2[#]线路的开挖。

4 数值模拟结果分析

本文主要对盾构掘进时地表的沉降以及对既有 隧道扰动变形进行深入分析,以期总结出类似工况 条件下普遍性的施工扰动规律。

4.1 地表沉降分析

在盾构掘进模拟过程中,始终以改变穿越分区时的开挖面正上方横向地表沉降为分析对象。研究 了新建盾构隧道在不同阶段和不同区域间穿越从而 引起的横向地表沉降规律。1[#]和 2[#]线上、下穿中各 区上方横向地表沉降如图 5 和 6 所示。



图 6 1[#]和 2[#]线下穿过程中各区上方横向地表沉降

4.2 Peck 公式验证与修正

Peck(1969)^[14]通过分析地面沉降工程相关监测数据及室内试验,提出了横向地面沉降估算公式:

$$S(x) = \frac{1}{i \sqrt{2\pi}} V_{loss} e^{\frac{-x^2}{2i^2}}$$
(1)

式中: S(x) 为地面沉降量,m; V_{loss} 为盾构隧道每单 位长度的地层损失量,m³/m; i 为地表沉降槽宽度 系数,m; x 为距隧道轴线的水平距离,m。

假设η为土体损失百分率,则有:

$$V_{loss} = \eta \pi R^2 \tag{2}$$

式中: *R* 为隧道的外半径,m; 根据文献[15] 中相应 的土体损失率取值及相关分布,参考上海地区相关 工程施工的平均标准值,本文中 η 取值为 0.89%^[15]。故地层损失量为:

 $V_{loss} = 0.89\% \times \pi \times 3.1^2 = 0.2687 \text{ m}^3/\text{m}$ 沉降槽宽度系数在垂直上穿情况下为:

$$i_1 = i_2 = \frac{Z}{\sqrt{2\pi}\tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}$$

$$= \frac{14.9}{\sqrt{2\pi}\tan(45^\circ - \frac{14.5}{2})} = 7.68 \text{ m}$$

式中: Z 为隧道中心与地表的间距,m; φ 为土体的 内摩擦角,(°)。故将上述结果代人公式(1),并且简 单假设各不同开挖过程所产生的影响为它们分别开 挖所产生影响的叠加,则:

$$S(x) = 2 \times \frac{1}{7.68 \times \sqrt{2\pi}} \times 0.2687 e^{\frac{-x^2}{118^2}} = 0.028 e^{\frac{-x^2}{118^2}}$$

因此,盾构上穿过程引起地表的横向沉降值可 由 Peck 经验公式计算求得其最大值为 28.0 mm。 盾构下穿时仍可采用同样的方法求得地表横向沉降 的最大值为 11.8 mm。

对比分析发现,Peck 公式计算值在下穿施工时 比模拟值小3 mm,这是因为多条盾构法隧道开挖诱 发的实际地表面变形并不是简单累加各条单独线路 开挖时引起的变形,此外,Peck 公式也没有计人各条 线路间盾构开挖的相互影响。由此可见,施工后最大 沉降并不在2[#]线正上方,而是稍偏于1[#]线处,正是盾



图 7 1[#]和 2[#]线上穿过程中 3[#]隧道纵向变形





由图 7 和 8 可见,在上穿过程中,既有隧道均呈 上浮趋势,且在 2[#]线穿越的过程中,在原来的基础 上地表沉降是继续增大的,具有明显的累积效应,这 构掘进对土体二次扰动的结果。在多线盾构施工过 程中,为考虑隧道间的相互影响引起沉降槽的偏移, 可以引入一个与施工参数密切相关的带方向经验修 正系数,对Peck公式做简单修正,形式如下:

$$S(x) = \frac{1}{i \sqrt{2\pi}} V_{loss} e^{\frac{-(x-\bar{x}i)^2}{2i^2}}$$
(3)

式中: ki 为沉降槽的偏移量,即与最大沉降量相对 应的地表到隧道中心轴线的水平距离,不难发现 k 总是指向先期受扰动隧道的一侧。k 的取值与诸多 因素有关,离散性也较大。但由于现阶段多线盾构 隧道工程实例较少,国外也仅有日本^[16]和新加 坡^[17]出现过,关于此类施工中地表沉降实测资料更 是极度匮乏。故在不同的施工地区,对于该修正系 数的不同取值研究任重道远。

4.3 既有隧道变形分析

在新建1^{*}、2^{*}线路掘进过程中,以既有3^{*}、4^{*}线路为研究对象,考虑其沿着纵向轴线的扰动变形。 既有隧道的纵向变形分别如图7~10 所示。



图 10 1[#]和 2[#]线下穿过程中 4[#]隧道纵向变形

是由于在2[#]线开挖的过程中,各条线路之间产生了 较大影响,对地层有二次扰动所致。同时,在新建隧 道的穿越过程中,随着既有隧道与新建隧道之间距 离的缩小,既有隧道的上浮逐步增加,最大的上浮出 现在各条线路穿越 IV 区时,且既有隧道的最大上浮 值出现在新建隧道的正上方,这和地表沉降所呈现 出的规律并不一致。在整个穿越过程中,最大上浮 值均出现在新建线路穿越既有线路完成时,既有 3[#] 线的最大上浮值约6.9 mm,既有 4[#]线的最大上浮值 约为7.0 mm。

由图9和10可知,当盾构下穿施工时,两条已 有隧道呈现明显的下沉趋势,此外,随着盾构距已有 隧道距离的减小,既有隧道的下沉逐步增加,最大的 下沉出现在各条线路穿越W区时,且既有隧道的最 大下沉出现在新建隧道的正上方,这同样与地表沉 降呈现出的规律不一致。与盾构上穿过程相比,下 穿过程对既有隧道扰动相对较大,既有隧道的最大 下沉量可以达到25.0 mm 左右。

5 结 论

本文对盾构隧道穿越多条既有隧道开挖过程进 行有限元模拟,并与 Peck 经验公式对比验证,分析 了盾构近距离穿越多条既有隧道复杂工况下施工对 地表沉降以及结构本体变形规律,提出了预测地表 最大沉降值出现位置的 Peck 修正公式,得出的主要 结论如下:

(1)由于地表变形受盾构上穿扰动影响较大, 而对已有隧道来说,受上穿扰动影响较小;盾构下穿 对地表变形扰动较小,而对已有隧道的扰动相对较 大,因此应根据实际需求选择合适的穿越方式。

(2)运用 Peck 经验公式估算盾构施工引起的 地表沉降量是可靠的,但对于最大沉降量的位置,更 多的还需要依靠施工经验进行判断。

(3)在近距离穿越施工时,盾构的土仓压力、注 浆速度以及注浆压力等设定值要在一定程度上低于 其他区域,以最大限度地减小对穿越区的施工扰动。

(4) 若盾构掘进中遇到超近距离、超浅覆土穿 越等极端恶劣工况, 尤其应控制施工扰动的影响, 可 结合注浆加固、冻土法^[18]等成熟施工技术, 以确保 工程的顺利进行。

参考文献:

- [1]王建光,武福美,邱德隆. 我国地下空间施工技术和发展 展望[J]. 建筑技术, 2018,49(6):578-580.
- [2]刘建航,侯学渊.软土市政工程施工技术手册—对建筑物影 响预测和防止[M].上海:上海市政工程管理局,1990.

[3]KLAR A, KLEIN B. Energy - based volume loss prediction

for tunnel face advancement in clays [J]. Géotechnique, 2014,64(10):776-786.

- [4]潘宇平,倪静,李林,等. 基于 LIB SVM 的盾构隧道地表沉降预测方法研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):231-235.
- [5] FAN Zuowen, ZHANG Zixin. Model test of excavation face stability of EPB shield in sandy cobble ground and agjacent building effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(12):2506-2512.
- [6] 程磊标, 陈有亮, 王苏然. 超大直径盾构施工地表沉降分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 226-229+235.
- [7] CHAPMAN D N, AHN S K, HUNT D V. Investigating ground movements caused by the construction of multiple. [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007,44(6):631-643.
- [8] ADDENBROOKE T I, POTTS D M. Twin tunnel interaction: Surface and subsurface effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2001,1(2):249-271.
- [9] HEFNY A M, CHUA H C, ZHAO J. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004,19(4 -5):471.
- [10]魏 纲,张世民,齐静静,等.盾构隧道施工引起的地面变 形计算方法研究[J].岩石力学和工程学报,2006,25 (S1):3317-3323.
- [11] JIANG M, YIN Z Y. Analysis of stress redistribution in soil and earth pressure on tunnel lining using the discrete method[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012,32:251-259.
- [12]日本土木学会.隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [13] ERCELEBI S G, COPUR H, OCAK I. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB – TBM[J]. Environmental Earth Sciences, 2011,62(2): 357 – 365.
- [14] PECK R B. Deep Excavations and tunneling in soft ground
 [C] // Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Report, 1969:225 - 229.
- [15]魏纲.盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研 究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1354-1361.
- [16]李清川,李术才,王汉鹏,等.上覆流沙层隧道开挖面稳 定性分析与数值试验研究[J].岩土力学,2018,39 (7):2681-2690.
- [17]张晓清,张孟喜,李 林,等.多线叠交盾构隧道近距离 穿越施工扰动机制研究[J].岩土力学,2017,38(4): 1133-1140.
- [18] 胡欣雨,刘安洋.复合地层泥水盾构开挖面失稳破坏宏微观 机理[J].上海交通大学学报,2015,49(7):1067-1074.