

紧邻多孔交叠盾构隧道施工影响分析

李 朋¹, 徐海清², 李振伟³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉地铁集团有限公司, 武汉 430030; 3. 北京城建设计研究总院有限公司, 北京 100037)

摘 要: 紧邻多孔交叠隧道是随着地铁建设的不断深入发展而出现的一种复杂的隧道空间分布形式。依托武汉地铁 2 号线和 4 号线工程, 针对 4 孔紧邻交叠隧道, 采用三维有限元方法分析了隧道动态施工过程引起的地表变形规律以及后建隧道对已建隧道受力与变形的影响。计算结果表明: 隧道埋深对地表变形影响显著; 紧邻 4 孔交叠隧道施工引起的地表最终变形达到了 32 mm, 超出了规范的限值; 隧道埋深越大, 引起的地表变形越小, 但影响的范围越大; 紧邻 4 孔交叠隧道施工时的影响范围为: 前方约为 30 m、后方约 25 m、单侧约 30 m; 隧道的变形主要表现为上下压扁, 两拱腰外扩, 变成倒鸭蛋形; 隧道的变形主要发生在盾构机刀盘通过前后约 1D 的范围内, 随后很快趋于稳定; 隧道结构的沉降主要取决于隧道自身以及其上部的垂直隧道的施工, 邻近隧道的施工主要影响已建隧道的侧向变形; 后建隧道将少量增加已建隧道管片内的内力。研究成果可为武汉地铁建设以及国内今后类似工程的设计与施工提供参考和指导。

关 键 词: 紧邻多孔交叠隧道; 施工; 地表变形

中图分类号: TU 921

文献标识码: A

Analysis on construction influence of four adjacent and overlapped shield tunnels

LI Peng¹, XU Hai-qing², LI Zhen-wei³

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Metro Group Co. Ltd., Wuhan 430030, China;

3. Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Adjacent overlap multi tunnels are a complex spatial distribution form with the unceasing development of the metro construction. Relying on the project of Wuhan metro line 2 and line 4, for four adjacent and overlapped shield tunnels, 3D FEM is applied to analyzed the ground deformation law caused by dynamic construction of tunnel and the influence of latter tunnel excavation on former tunnel. The results show that the buried depth has a remarkable effect on the ground deformation; the final deformation caused by the construction is 32 mm, which beyonds the standard limits; the larger the buried depth is, the smaller the ground deformation is, but the larger the influence range is; for the ground deformation, the influence range to the ahead is 30 metres, to the back is 25 metres, and the influence range to the transverse for each side is 30 metres; for the tunnel deformation, the top and the bottom are compressed, the left and the right are outward-spread, so the tunnel changes into a inverted duck egg; the tunnel deformation occurs mainly near the cutter of the shield machine, whose range is around 1D, and it becomes steady quickly; the tunnel settlement mainly depends on the construction of the tunnel itself and the vertical tunnel, the construction of adjacent tunnel has major effect on the lateral displacement; the latter tunnel excavation has a great influence on the force of the former tunnel. The research results can provide some references and guidance for Wuhan metro and similar projects in the future.

Key words: Adjacent overlap multi-tunnels; construction; surface deformation

1 引 言

随着我国地铁建设的不断发展和完善, 地铁工程建设中不可避免地会出现 2 条隧道相互平行、重叠

情况。当 2 个隧道的距离越来越小, 重叠隧道近接施工的影响就会越明显。地下工程对开挖比较敏感, 易受扰动, 特别是对于多孔隧道, 后建隧道的施工将对已建隧道及地表产生连续、多次的扰动, 当相

邻隧道比较接近时,如果不采取专门对策,则相邻隧道的施工将会对紧邻隧道产生不利影响,因此,相邻隧道的近接施工问题的研究显得尤为重要。国内对该类工程进行了相关的研究,也取得了部分研究成果^[1-9]。但大多数是针对单孔或双孔隧道,也有少量的3孔隧道工程,但还未见4孔隧道施工的实例,在国外,也仅有日本^[10]和新加坡^[11]出现了4孔交叠隧道的工程,这方面的研究成果还相对较少,因此,极有必要开展紧邻多孔交叠隧道施工引起的力学行为开展研究。

正在施工的武汉地铁2号线1期工程和4号线1期工程的洪山广场站、中南路站为实现双向客流全部同站台换乘,车站相邻的区间隧道呈上下相互重叠、相互交错状态,属于近接施工问题,设计、施工难度较大。本文针对洪中区间盾构隧道的近距离掘进过程进行了三维有限元模拟,分析盾构掘进对地表沉降的影响以及后挖隧道对先挖隧道变形与受力的影响。

2 工程概况

武汉地铁2、4号线1期工程的区间隧道单向纵向长为700 m,区间隧道主要在粉质黏土中通过。隧道在靠近洪山广场端空间位置分布的横断面如图1所示,其中,2L、2R、4L、4R分别表示2号线左、右线,4号线左、右线。施工采用德国的海瑞克牌盾构机,管片外径为6 m,内径为5.4 m,可以看出,上、下行隧道中心埋深分别为13 m、20.5 m,上下行隧道最小净距为1.5 m,隧道水平净距为7 m。如图1所示。

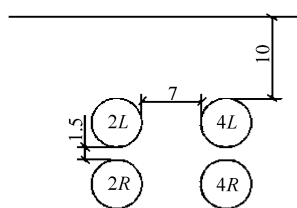


图1 隧道横断面图(单位: m)
Fig.1 Tunnel cross-section model(unit: m)

3 盾构掘进数值模拟

3.1 掘进过程模拟

对盾构机的动态施工过程模拟采用大型通用有限元程序 ANSYS 里单元的“生”和“死”和改变材料参数的方法来实现。盾壳单元、衬砌单元、扰动层单元都是预设单元,开挖过程为:①模拟盾构开挖。根据本工程土质情况在掌子面加上0.4 MPa的

推进力;②在盾构机的保护作用下开挖土体。把核心土体单元“杀死”,改盾构机所在位置的土体单元为“盾壳”单元,此时由于隧道开挖,对周围土体有一定的扰动,故将盾构机外围15 cm的土体单元参数改为扰动土参数^[7],同时施加0.2 MPa的土压平衡力;③安装管片。“激活”管片单元。④盾构机脱壳。模拟注浆过程,即“杀死”盾构机单元,“激活”注浆层单元。重复步骤①~④来模拟盾构机的不断向前推进,盾构机共推进20步,开挖总长度为60 m,盾构推进的顺序为:2R→4R→2L→4L。

3.2 隧道三维有限元模型的建立

三维有限元计算模型如图2所示,纵向长度为60 m,模型高40 m,横向宽度为80 m,管片衬砌的外径为6 m,内径为5.4 m,管片厚度为30 cm,管片宽度为1.5 m,盾构机每推进一次的长度为两环管片的宽度,即3 m。模型中上表面取自由表面,其他5个面建立法向约束。

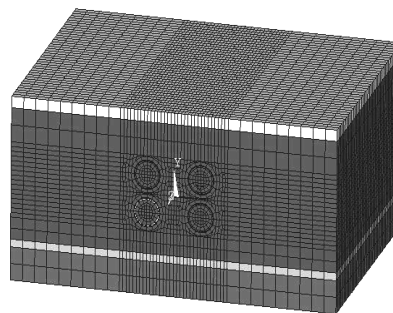


图2 盾构隧道的计算模型
Fig.2 Shield tunnel model

隧道的每环管片是由6个小块组成,采用错缝拼装,管片环之间是通过螺栓连接,具有横观各向同性性质,分析过程中管片采用空间8节点实体单元来模拟,由于管片是用均质材料来模拟,所以对管片的刚度进行折减,在横断面内,按已有理论折减系数通过取0.6~0.8^[12],在纵向,根据已选取的材料参数以及已有理论公式可以计算出此模型管片的纵向抗弯、抗拉、抗剪的刚度折减系数约为0.015^[13],折减对象为弹性模量,由于隧道纵向主要受盾构机的顶推力,所以纵向抗压刚度不折减。

土体、盾构机、扰动层也采用空间8节点实体单元模拟。

3.3 土层和材料参数

表1列出了本次计算所用的各材料参数,表2列出了本次模型中衬砌管片的材料参数。其中土体采用 Drucker-Prager 模型,其他材料均用线弹性模型。

表1 土层和材料参数

Table 1 Parameters of soils and construction material

名称	厚度 /m	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比
杂填土	2.5	14	12.0	19.5	12.0	0.40
粉质黏土	15.6	20	15.0	19.2	30.0	0.38
含碎石黏土	13	28	18.0	19.8	60.0	0.35
粉质黏土	2.7	19	13.2	19.5	21.0	0.40
基岩层	7.2	38	30.7	21.6	75.0	0.33
盾构机	0.15			78.5	210 000.0	0.12
注浆材料	0.15			16.5	1.3	0.40
扰动层	0.15			18.0	2.5	0.40

表2 衬砌管片材料参数

Table 2 Material parameters of segment lining

E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	重度
27.6	27.6	0.345	11.6	0.108	0.108	0.2	0.2	0.2	26

注：表 2 中， E 为弹性模量， G 为剪切模量，单位均为 GPa，重度的单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$

4 数值模拟结果分析

由于 2R 为最先开挖隧道，后挖隧道对 2R 均有影响，因此，主要分析 2R 隧道中心对应的地表位移以及 2R 拱顶、拱底、左拱腰、右拱腰的位移。观测断面取沿隧道纵向的中心横断面。（ $Z=30\text{ m}$ ）

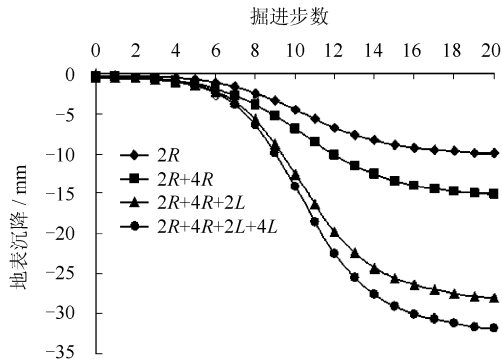


图 3 纵向沉降曲线

Fig.3 Curves of longitudinal settlement

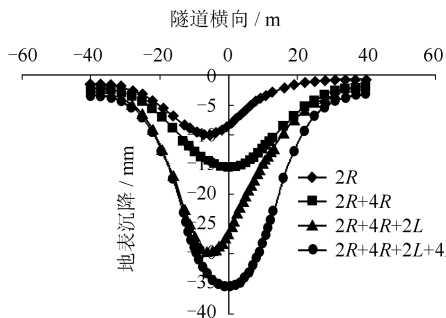


图 4 横向沉降槽曲线

Fig.4 Curves of transverse settlement

4.1 地表变形分析

图 3、4 中，2R+4R 表示叠加 2R、4R 单独开挖

时地表的沉降曲线，可以看出，开挖左线的地表沉降值比右线大，左线的埋深比右线小，说明隧道埋深对地表变形影响显著；隧道施工引起的最终变形达到了 32 mm，超出了规范限值；隧道埋深越大，引起的地表变形越小，但地表横向影响的范围越大；隧道施工时的影响范围为：前方约为 30 m（约 5D，D 为隧道外直径）、后方约 25 m（约 4D）、单侧约 30 m（约 5D）。同时，从图 4 可以看出，开挖 2R 时，横向沉降槽最大值为 90 mm，可以用 Peck 公式来验算模型的正确性与 Peck 公式的适用性，这里主要计算最大横向沉降值，由 Peck 公式

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}i} V_1 e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

式中： V_1 为地层损失量（ m^3/m ），根据施工方的经验取地层损失率为 1.5%，故地层损失量为

$$V_1 = 1.5\% \pi r^2 = 1.5\% \pi 9 = 0.42 \text{ m}^3/\text{m}$$

$$i = R \left(\frac{Z}{2R} \right)^{0.8} = 30 \left(\frac{17.5}{60} \right)^{0.8} = 11.2$$

式中： R 为单侧影响宽度，即曲线反弯点与隧道中心的间距，取 30 m； Z 为隧道顶部到地表的距离，对于右线取 17.5 m； X 为地表上任意一点到隧道中心对应地表点的距离，代入公式得：

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}11.2} 0.42 e^{\frac{-x^2}{2 \cdot 11.2^2}} = 0.0084 e^{\frac{-x^2}{250}}, \text{ 故横向沉降最大值为：} 0.0084 \text{ m，即 } 84 \text{ mm，可见地面横向沉降计算结果与 peck 公式吻合较好。}$$

4.2 隧道变形分析

这里给出各隧道开挖完成后，2R 拱顶、拱底、左拱腰、右拱腰的变形曲线。

从图 5~12 可以看出，2R 的拱顶主要变为向下变形，拱底主要表现为向上变形，隧道的最终变形主要表现为上下压扁，两拱腰外扩，变成倒鸭蛋形；隧道的变形主要发生在盾构机刀盘通过前后约 1D 的范围内，随后很快趋于稳定；隧道结构的沉降主要取决于隧道自身以及其上部的垂直隧道的施工。

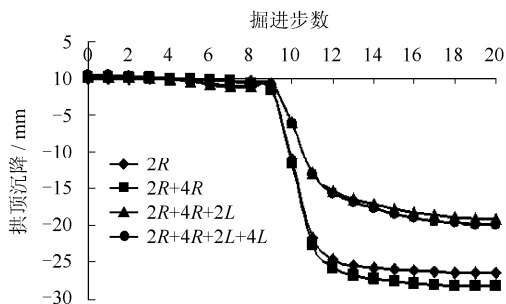


图 5 拱顶沉降曲线

Fig.5 Curves of vault settlement

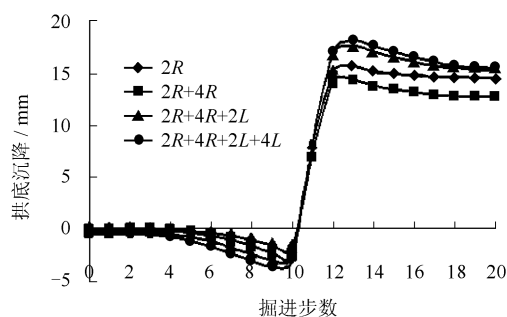


图6 拱底沉降曲线

Fig.6 Curves of soffit settlement

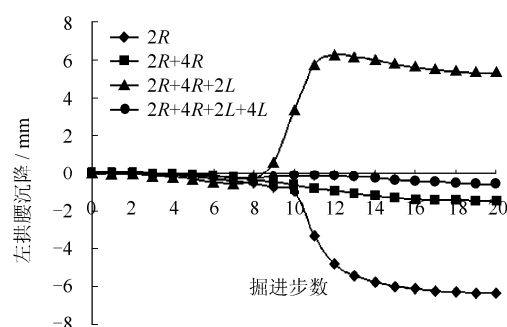


图7 左拱腰沉降曲线

Fig.7 Curves of left hance settlement

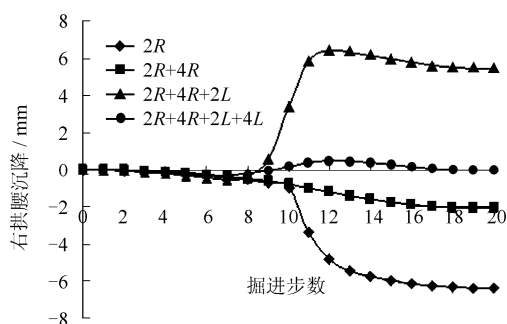


图8 右拱腰沉降曲线

Fig.8 Curves of right hance settlement

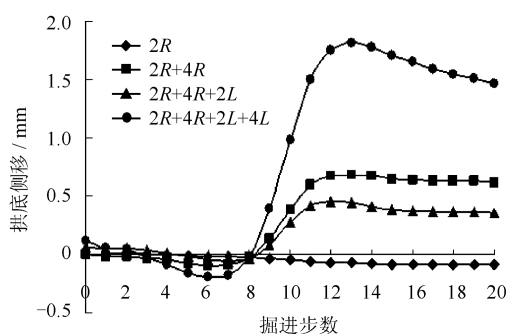


图9 拱顶侧移曲线

Fig.9 Curves of vault lateral displacement

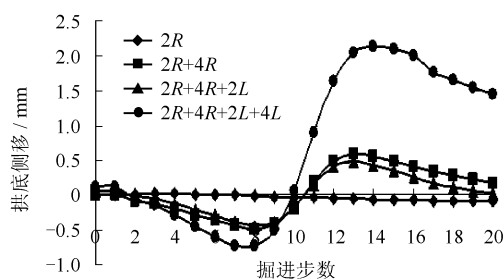


图10 拱底的侧移曲线

Fig.10 Curves of soffit lateral displacement

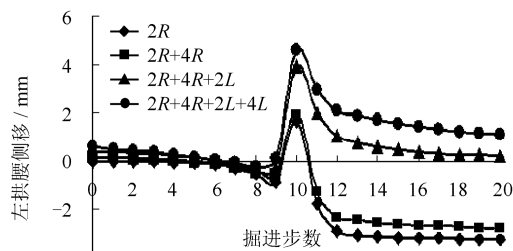


图11 左拱腰侧移曲线

Fig.11 Curves of left hance lateral displacement

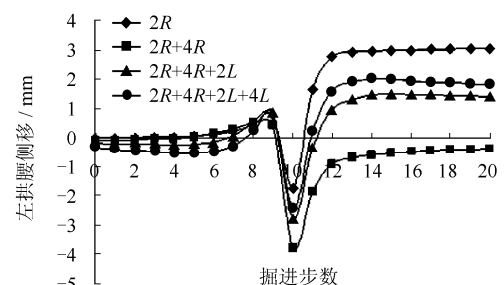


图12 右拱腰侧移曲线

Fig.12 Curves of right hance lateral displacement

力学的知识进行换算,本次计算只考虑叠加隧道开挖上部隧道对下部隧道内力的影响,只提取管片拱顶的应力,考虑到计算速度,管片在厚度和长度方向均划分为一个单元(即 $0.3\text{ m}\times 1.5\text{ m}$)。

本次共计算两种工况,工况1为仅开挖2R,计算并提取2R拱顶的应力 σ_1 ;工况2为在2R已开挖的基础上开挖2L,计算并提取拱顶应力值 σ_2 ,计算结果如表3。

表3 管片拱顶应力计算结果
Table 3 Compute results of vault stress

σ_1	σ_2	增幅
-5.88	-6.10	10.2%

从表3可以看出,后建上部隧道将少量增加已建下部隧道管片内的内力值。

5 结 论

本文对紧邻四孔交叠隧道的动态施工过程进

邻近隧道的施工主要影响已建隧道的侧向变形。

4.3 隧道受力分析

在ANSYS的计算中,对于实体单元只能提取单元的应力,要想得到单元的内力,还需通过材料

行有限元模拟并对计算结果进行分析, 分析了紧邻多孔交叠隧道动态施工对地表变形、已建隧道变形与受力的变化规律, 得出了如下结论:

- (1) 隧道埋深对地表变形影响显著;
- (2) 紧邻 4 孔交叠隧道施工引起的最终变形达到了 32 mm, 超出了规范的限值;
- (3) 隧道埋深越大, 引起的地表变形越小, 但影响的范围越大;
- (4) 紧邻 4 孔交叠隧道施工时的影响范围为: 前方约为 30 m (约 5D)、后方约 25 m (约 4D)、单侧约 30 m (约 5D);
- (5) 隧道的变形主要表现为上下压扁, 两拱腰外扩, 变成倒鸭蛋形;
- (6) 隧道的变形主要发生在盾构机刀盘通过前后约 1D 的范围内, 随后很快趋于稳定;
- (7) 隧道结构的沉降主要取决于隧道自身以及其上部的垂直隧道的施工, 邻近隧道的施工主要影响已建隧道的侧向变形;
- (8) 后建隧道将少量增加已建隧道管片拱顶的内力。

本文得到的相关结论可为武汉地铁 2、4 号线 1 期工程的设计与施工提供依据和指导, 同时还可为国内今后类似复杂工程的设计与施工提供参考。

参 考 文 献

- [1] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 近距离叠交隧道后构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 282—286.
ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. Numerical simulation of influence of new tunnel on short distance overlapped old tunnel during shield tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 282—286.
- [2] 陶连金, 唐四海, 金亮. 隧道上穿既有车站结构的变形预测及安个评估[J]. 地下空间与工程报, 2008, 4(3): 442—447.
TAO Lian-jin, TANG Si-hai, JIN Liang. Deformation prediction and risk evaluation of the existing subway station structure with above traversed tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(3): 442—447.
- [3] 方勇, 何川. 平行后构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 402—406.
FANG Yong, HE Chuan. Numerical analysis of effects of parallel shield tunneling on existent tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 402—406.
- [4] 胡群芳, 黄宏伟. 软土地层近距离上穿既有隧道变形的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 42—47.
HU Qun-fang, HUANG Hong-wei. Analysis and monitoring on shield tunneling under existing adjacent tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(1): 42—47.
- [5] 陈越峰, 张庆切. 近距离二线并行后构隧道施工实测分析[J]. 地下空间工程学报, 2008, 4(2): 335—340.
CHEN Yue-feng, ZHANG Qing-he. In-situ monitoring and analyzing on closely spaced parallel pipe shield tunnels[J]. **Underground Space and Engineering**, 2008, 4(2): 335—340.
- [6] 何川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁后构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 92—98.
HE Chuan, SU Zong-xian, ZENG Dong-yang. Influence of metro shield tunneling on existing tunnel directly above[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(3): 92—98.
- [7] 李围, 何川. 盾构隧道近接下穿地下大型结构施工影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1277.
LI Wei, HE Chuan. Study on construction influence of shield tunnels traversing adjacently under underground large-scale structure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(10): 1277.
- [8] 孙钧, 刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 379.
SUN Jun, LIU Hong-zhou. 3-D numerical simulation of ground surface settlement under overlapped shield tunneling[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2002, 30(4): 379.
- [9] 于宁, 朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 292.
YU Ning, ZHU He-hua. The simulation of shield tunnel construction and analysis of its influence upon surrounding environments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 292.
- [10] YAMAGUEHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield driven in close proximity in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1998, 13(3): 289—304.
- [11] WONG I H, POH T Y, CHUAH H L. Analysis of case histories from construction of the central express way in Singapore[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(5): 732—746.
- [12] 土木学会(日). 隧道标准规范(盾构篇)及解说[S]. 朱伟译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 68—72.
- [13] 何川. シールドトンネル縦断方向の地震挙動に関する研究[D]. 东京: 早稲田大学専理工学部, 1999.