

# 相邻隧道施工对上海地铁二号线的影响分析

李 喆, 张子新

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 上海明珠线东方路车站附近的区间隧道是相邻于地铁二号线的区间隧道建设的, 二者中心线间的最小距离为 12.3 m。由于距离很近, 新隧道的施工对原有的地铁二号线隧道的影响不可避免。讨论了在新隧道施工过程中地铁二号线隧道的位移变化规律; 研究了新建的盾构隧道的推进对原有隧道的影响特征, 并且, 给出了在已有隧道附近建设新隧道的规划和施工建议; 同时, 用数值模拟手段对隧道变形进行了预测, 并将预测结果与实测结果进行了比较。

**关键词:** 隧道工程; 地铁; 盾构隧道; 变形; 监测; 相邻隧道; 数值模拟

**中图分类号:** U 455.46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 1 - 5125 - 05

## RESPONSE OF SHANGHAI RUNNING-METRO LINE 2 TO THE CONSTRUCTION OF ADJACENT TUNNELS

LI Zhe, ZHANG Zi-xin

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Shield-driven tunnels of the Pearl Line 2 were constructed adjacent to the Metro Line 2 tunnels near Dongfang Road Station in Shanghai. A minimum distance of 12.3 m between the centerlines separates the new and existing tunnels from each other. In view of the scale and distance of construction, significant influence on Metro Line 2 tunnels is expected. The paper presents the monitoring of the tunnel deformations during the process of construction. Automatic monitoring system of electric level bar was installed in the Metro Line 2 tunnel to monitor their displacements and to ensure the safety of running Metro Line 2. It describes the characteristics of influence from the thrust of a succeeding tunnel to a preceding tunnel and gives some advices about the planning and construction of the tunnel adjacent to the existing tunnels. FEM analysis is applied to provide comparison with the measured data.

**Key words:** tunneling engineering; metro; shield driven tunnel; deformation; monitoring; adjacent tunnel; numerical simulation

## 1 引 言

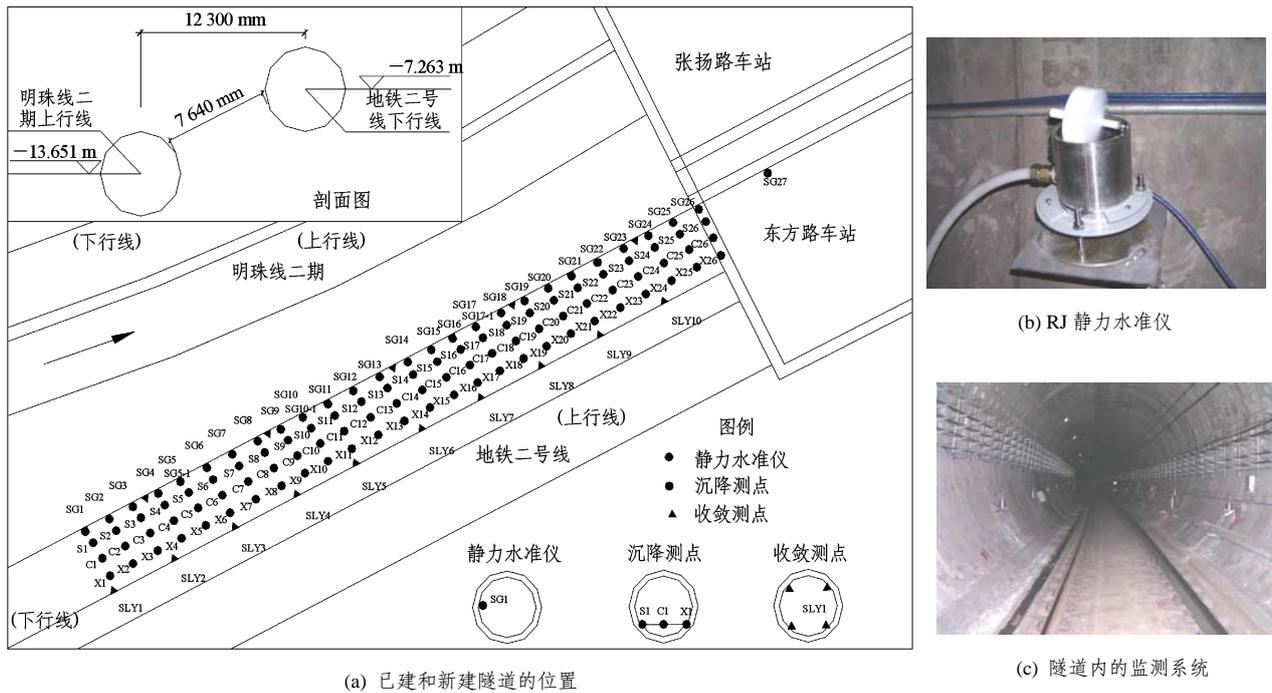
上海的基础设施建设在过去的 20 a 中飞速发展, 20 世纪 90 年代开始建设的地铁系统就是一个

很好的例证。为了改善城市交通状况, 需要建设更多的地铁线路, 明珠线二期就是其中之一。相邻的 2 条隧道的平面图和剖面图如图 1(a)所示。考虑到 2 条隧道在东方路和张扬路车站附近的距离非常近, 预计会产生明显的相邻影响<sup>[1]</sup>, 故在地铁二号线下

**收稿日期:** 2004 - 10 - 20; **修回日期:** 2004 - 11 - 15

**基金项目:** 上海市重点学科资助项目(2004 - 3)

**作者简介:** 李 喆(1980 -), 男, 硕士, 2005 年毕业于同济大学结构工程专业, 主要从事隧道与地下建筑工程方面的研究工作。E-mail: lizhe2004@hotmail.com.



(a) 已建和新建隧道的位置

(b) RJ 静力水准仪

(c) 隧道内的监测系统

图 1 相邻地铁隧道监测布置及监测断面

Fig.1 Monitoring layout and section of the adjacent subway tunnel

行线的隧道衬砌上安装了电子水准仪自动监测系统来监测隧道的沉降变形，同时，对隧道沉降和收敛进行了人工测量，以校核自动监测的结果，确保隧道的安全。

近年来，国内外关于盾构隧道进行了大量研究。国外方面，文[2~5]研究了相邻隧道的影响及其控制措施。而国内关于盾构隧道的研究主要集中在盾构法隧道管片接头、盾构隧道穿越复杂土层及对周围土体的扰动和关键施工技术等方面<sup>[6~8]</sup>，对于相邻隧道的影响的深入研究成果较少。本文针对盾构隧道中日益增多的相邻影响问题，运用有限元软件对新隧道的推进及其影响进行了数值模拟，计算结果与实测结果比较一致。

## 2 工程背景

### 2.1 地铁二号线

地铁二号线隧道衬砌的钢筋混凝土管片厚 350 mm，宽 1.0 m，内径 5.5 m，外径 6.2 m，管片之间用直螺栓连接。隧道埋深 5.3 m，于 1999 年 9 月建成通车。

### 2.2 明珠线二期

明珠线二期浦东大道至张扬路区间段长 2 519 m，上行线长 1 264 m，下行线长 1 255 m，其隧道衬砌

结构与地铁二号线相同。隧道的埋深比临近的地铁二号线隧道深 6.5 m。

### 2.3 地质条件

本文所研究的 2 条隧道穿越的土层地质条件如下：第 1 层为填土，厚 0.9~1.55~3.00 m(表示最小厚度~平均厚度~最大厚度)，这一层的底面标高为 3.29~2.18~0.76 m(表示最小厚度标高~平均厚度标高~最大厚度标高)；第 2 层为高压缩性粉质软粘土，厚 0.9~1.95~3.30 m，这一层的底面标高为 0.83~0.44~0.20 m；第 3 层为高压缩性冲积性粉质粘土，厚 2.10~5.82~9.10 m，这一层的底面标高为 -3.50~-5.35~-5.95 m；第 4 层为饱和高压缩性冲积粘土，厚 7.50~8.70~11.20 m，这一层的底面标高为 -12.71~-14.05~-15.23 m；第 5 层为中高压缩性粘土，厚 4.10~6.30~8.10 m，这一层的底面标高为 -19.67~-20.31~-20.85 m；第 6 层为中等压缩性粉质粘土，厚 3.60~4.25~5.10 m，这一层的底面标高为 -23.97~-24.50~-24.94 m；第 7 层为中低压缩性饱和砂质粉土，这一层没有被钻透。

## 3 现场监测系统

如前所述，已建和新建隧道的中心线间的最小间距为 12.3 m，因此，在新建隧道的盾构推进至影

响区域之前,在地铁二号线的隧道内安装了变形和沉降监测系统,以确保运营中的地铁二号线隧道的安全。整个监测系统包括静力水准仪、沉降人工测点和收敛人工测点。在地铁二号线下行线 150 m 被影响区范围内,每 6 m 设有 1 个沉降自动监测测点,每个自动监测测点的断面上设有 3 个人工测量沉降测点。整个影响区范围内设有 10 个收敛监测断面,每个断面有 4 个测点组成。整个监测系统的布置如图 1(a), (c)所示。

### 3.1 隧道沉降自动监测系统

在地铁二号线下行线内安装了一套自动监测系统,用来监测隧道的沉降,这套系统的基准点设在距离影响范围足够远处,不会被盾构的推进所影响的 SG27。为了在地铁运营期间也能够采集隧道沉降数据,整个系统的数据由一台计算机远程读取。用来监测隧道沉降的 RJ 静力水准仪的精度为  $\pm 0.1 \sim \pm 0.3$  mm, 总共设有 26 个自动测点 SG01~SG26, 3 个转换点: SG5-1, SG10-1, SG17-1, 1 个基准点 SG27, 总的测点数为 30 个。沉降自动监测系统的布置如图 1(a)所示,安装在隧道中的静力水准仪如图 1(b), (c)所示。

RJ 静力水准仪的读数会受到温度变化的影响。当周围温度偏高时静力水准仪的读数会偏低,反之亦然。一般情况下,这种影响在  $\pm 0.1 \sim \pm 0.3$  mm, 不会对数据的有效性产生影响。列车的运行会对静力水准仪的读数产生明显的影响,当列车通过时,静力水准仪的读数的波动会达到 1.0 mm 左右,所以,这种影响在处理数据时很容易被发现,可将受影响的数据剔除。

### 3.2 人工沉降监测测点

共在 26 个断面上设置了隧道沉降的人工监测测点,总测点数为 78 个: X1~X26, C1~C26, S1~S26。测点的布置如图 1(a), (c)所示。

### 3.3 隧道收敛监测系统

在 150 m 的被影响范围内,共 10 个断面内设置了收敛监测测点: SLY1~SLY10。每个断面设有 4 个监测点: A, B, C, D。收敛测点的布置如图 1(a), (c)所示。

## 4 隧道竖向位移

自动监测系统测得的地铁二号线下行线的沉降如图 2 所示。从图 2 中可以看到,当新建隧道的盾构通过时,已建隧道的衬砌发生了显著的沉降或隆

起。监测到的隧道衬砌的垂直位移在  $-2.4 \sim +3.0$  mm, 其中,“-”表示沉降,“+”表示隆起。在整个推进过程中,地下水位相对稳定,所以说,隧道衬砌的竖向位移不是由地下水位的变化引起的。隧道衬砌位移部分是由于新隧道盾构的推进开挖扰动了运营中的隧道下卧层土体引起的。盾构位置附近对应的已建隧道的管片都有明显的竖向位移。同时可以看到,盾构的推进速度对运营中的隧道的竖向位移有显著的影响。盾构在 2004 年 3 月 3 日到 2004 年 4 月 23 日期间,以相对稳定的速度推进,但是在进洞前推进的速度较慢,并且,停工几天,来准备进张扬路车站的工作井。从监测数据中可以看到,地铁二号线下行线隧道的相应管片产生了较大的沉降,测点 SG25, SG26 的沉降在 2.4 mm 左右。从中还可以得出,当盾构推进过慢或停顿一段时间时,在其上方的相邻隧道及周围土体会产生明显的沉降。根据其他工程中的经验,当盾构推进速度过快时,在其上方的相邻隧道及周围土体也会产生明显的竖向位移<sup>[2]</sup>。

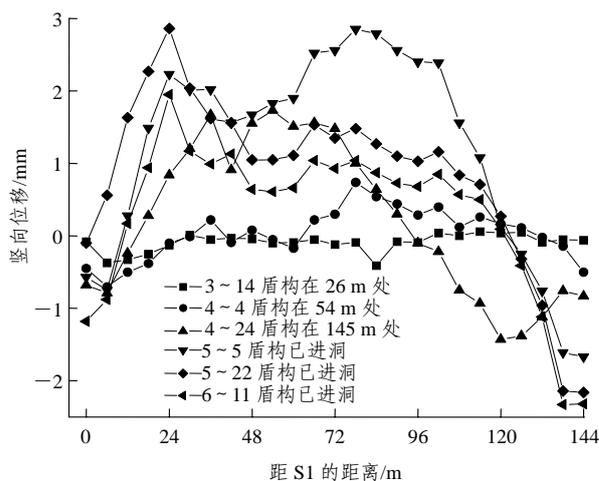


图2 地铁二号线下行线的竖向位移

Fig.2 Vertical displacement of No.2 downward subway

盾构在接近张扬路车站工作井时,为了准确进洞,推进曲线从纵剖面上看是向上倾斜的,而 SG25 和 SG26 两个测点显著沉降的部分原因也是由于这种盾构的偏向上方的推进造成的。由于新建隧道的埋深比运营中的地铁二号线隧道大,所以,偏向上方的推进意味着两者之间的土层厚度减小,相应地,盾构的推进对已建隧道的影响增大。另一个对于已建隧道的竖向位移影响较大的因素是新建隧道的二次注浆。在本工程中,注浆压力为 3 MPa 左右。从图 2 中可以看到,盾构已经经过的已建隧道的衬砌

有明显的隆起，隆起量最大达 3 mm，这是由于二次注浆引起的。所以，控制注浆压力在合理的范围内是保证运营中的隧道的安全的一个关键环节。

可以认为，隧道的最大竖向位移并不是影响隧道安全的唯一重要的因素，而隧道位移曲线的弯曲状态是最重要的影响因素之一。由于软土中的隧道受力变形特性与弹性地基梁相似，盾构的推进可能对隧道造成的损坏与已建隧道的线型和它周围土体的移动方向有关。纵断面凸向新建隧道(凹形纵断面)的已建隧道，由于土体向新建隧道移动时隧道被拉长，节点的螺栓容易被拉开，所以更容易被损坏。反之，纵断面凹向新建隧道(凸形纵断面)的已建隧道，由于土体向新建隧道移动时被压缩，节点的螺栓连接被压紧，也就是产生拱效应，所以，它相对于凹形纵断面的隧道不容易被损坏。

## 5 数值模拟

### 5.1 计算模型

本文用三维有限元模型来模拟新建隧道的盾构推进对已建隧道的影响。由于现场施工过程及地质情况都非常的复杂，完全精确的模拟这一过程是不现实的<sup>[3]</sup>。因此，在数值模拟的过程中作了一些相应的简化假定，即使用一些作用在隧道内表面上的均布力来模拟盾构推进、通过、以及二次注浆对周围土体的影响。模型中，将土体表面划分成三节点的等参单元，将土体划分成四节点的四面体单元<sup>[4]</sup>。土体用弹塑性模型进行模拟，整个过程中不考虑土体排水固结。在模拟过程中，假定新隧道推进的各种参数是沿中心线呈轴对称的。整个土体模型长 150 m，宽 50 m。隧道起拱线距模型边界 15.7 m，约为 2.5D(其中，D 为隧道直径)。位置较低隧道的底部距下部土体边界为 33.2 m，大于 5D。计算模型及其网格划分如图 3 所示。

### 5.2 数值模拟的计算步骤

现就整个隧道的单位长度的计算来说明盾构推进过程的数值模拟的计算步骤：

- (1) 加初始应力场(地压应力)；
- (2) 杀死盾构推进所要开挖的土体单元，代之以作用在开挖面上的力；

(3) 逐步减小这些作用在开挖面上的力到初始状态的 60%，用以模拟盾构到达时引起的隧道周围的土体的应力释放；

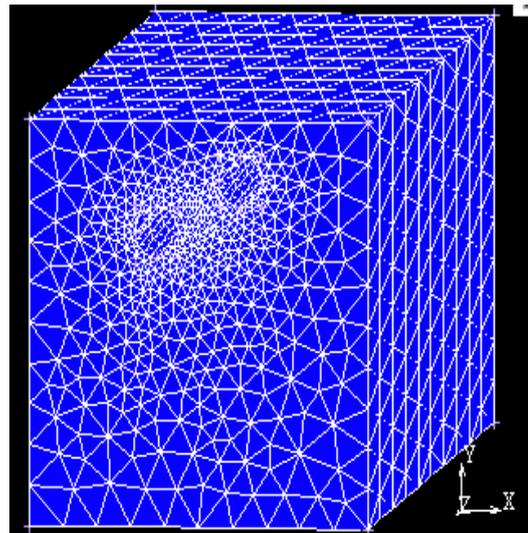


图 3 有限元计算模型

Fig.3 FEM simulation model

- (4) 建立壳体单元以模拟隧道衬砌；

(5) 将作用在开挖面上的力逐步减小到零，用以模拟盾构的脱离以及所带来的进一步的周围土体的应力释放；

(6) 采用作用在开挖面上的不同均布力来模拟同步注浆及二次注浆对周围土体的影响。

### 5.3 现场实测数据和数值模拟的结果对比分析

图 4 是用静力水准仪测得的地铁二号线隧道衬砌的竖向位移与数值模拟的计算结果的对比。

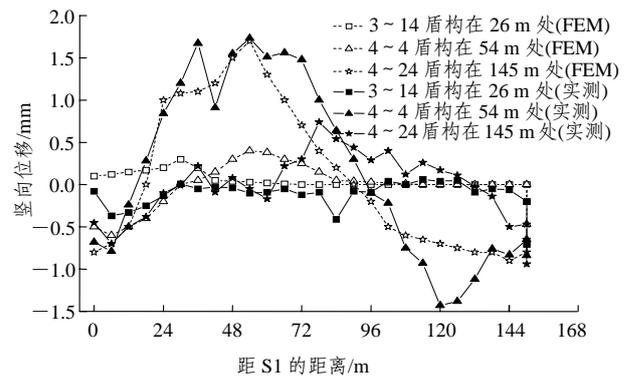


图 4 数值模拟结果与实测数据的对比

Fig.4 Comparison between the measured and computed results

从图 4 中可以看到，在最后 60 m，数值模拟的结果与现场实测数据符合得较好，在中间 30 m，有一定的偏差，但不是很大，在开始的 60 m，两者有明显的不同。有很多原因可能造成这种开始阶段较大的偏差，其中有两个最主要的原因，一个是在数

值模拟的过程中作了一定的简化,难以完全精确的模拟施工过程的复杂性;另外一个原因是计算参数的选取难以完全真实反映材料的真实性能,继而无法准确的模拟复杂的地质情况。但是,从上述分析中可以看到,数值模拟可以作为预测新隧道的施工对原有隧道影响的一种方法。随着计算理论和计算机技术的发展,这种方法的准确性将会得到不断的提高,在实际工程中的应用也会越来越广泛。

## 6 结 语

通过对以上的现场实测数据和数值模拟结果的分析可以得到如下结论:

(1) 在临近地铁二号线下行线东方路站附近的区间隧道的明珠线二期区间隧道的施工过程中,地铁二号线下行线隧道的竖向位移得到了有效控制;隧道的最大竖向位移为 3 mm 左右,在允许范围以内。

(2) 新建隧道的二次注浆是影响已建隧道竖向位移的一个重要因素,在已建的软土隧道附近用盾构法修建新隧道时,必须控制二次注浆压力在一定的范围之内,以确保已建隧道的安全运营。

(3) 新建软土盾构隧道的盾构推进速度也是影响附近已建隧道的竖向位移的一个重要因素,速度过快或过慢都会引起已建隧道的过大的位移。

(4) 新建软土盾构隧道盾构机的推进方向对附近的运营中的隧道也有明显的影响。

(5) 数值模拟是预测新建软土盾构隧道施工对附近已建隧道影响的有效工具,随着技术的进步将会得到越来越广泛的应用。

**致谢** 地铁运营公司的王如路总工、监护部的张伯平主任和于斌工程师在本文的写作中提供了大量的资料和宝贵的建议,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] Sharma J S, Hefnyb A M, Zhaob J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16: 93 - 98.
- [2] Richards J A. Inspection maintenance and repair of tunnels: international lessons and practice[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, 13(4): 369 - 375.
- [3] Chang C T, Suna C W, Duannb S W, et al. Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 151 - 158.
- [4] Asano T, Ishihara M, Kiyota Y, et al. An observational excavation control method for adjacent mountain tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 291 - 301.
- [5] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani 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.
- [6] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(9): 1 574 - 1 577.(Jiang Hongsheng, Hou Xueyuan. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9): 1 574 - 1 577.(in Chinese))
- [7] 张庆贺, 王慎堂, 严长征, 等. 盾构隧道穿越水底浅覆施工技术对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 857 - 861.(Zhang Qinghe, Wang Shentang, Yan Changzheng, et al. Tunneling methods through river(lake, sea)bed under shallow covering by shield[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 857 - 861. (in Chinese))
- [8] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1 514 - 1 520.(Jiang Hongsheng, Hou Xueyuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1 514 - 1 520.(in Chinese))