

盾构穿越保护建筑数值模拟预测与监控量测

葛世平^{1,2,3}, 谢东武^{1,2}, 丁文其^{1,2}, 杨洪杰⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103; 4. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201103)

摘要: 对既有建筑下盾构穿越施工引起的地表沉降规律进行多工况系统的 3 维数值模拟研究, 认为在地层及隧道相关参数不变的情况下, 既有建筑与隧道的相对位置、既有建筑的刚度、自重等对地表沉降规律具有明显的改变作用, 主要表现为对沉降量、沉降槽宽度及形式等的改变. 结合上海轨道交通 11 号线穿越历史保护建筑上海市徐家汇观象台工程, 建立全 3 维模型对既有建筑下盾构穿越施工全过程进行模拟, 预测地表沉降量. 通过对穿越过程沉降测点的监测, 对数值模拟预测的合理性进行了验证.

关键词: 盾构; 穿越; 保护建筑; 数值模拟; 监控量测

中图分类号: TU 94.2

文献标识码: A

Simulation and Monitoring of Shield Tunnel Undercrossing Historic Building

GE Shiping^{1,2,3}, XIE Dongwu^{1,2}, DING Wenqi^{1,2}, YANG Hongjie⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shentong Metro Construction Group Co. Ltd., Shanghai 201103, China; 4. Shanghai Shentong Metro Research & Consultancy Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: A series of 3D numerical simulation about the shield tunnel undercrossing existing building was accomplished. Results show that important parameters include relative position of tunnel and existing building, weight and stiffness and geometric form of existing building have dominating influence on the pattern of surface settlement trough, especially in changing the maximum settlement and modifying the width and form of settlement trough. Based on the Shanghai Metro Line 11 undercrossing the historic

building-Xujiahui Observatory, full three-dimensional model about shield tunnel undercrossing Xujiahui Observatory was established to simulate construction process. Settlements of surface were forecasted. Measuring points were arranged to monitor surface settlements during undercrossing to verify simulation results.

Key words: shield tunnel; undercrossing; historic building; simulating; monitoring

盾构施工对地表沉降的影响很早就引起了人们的关注, 但盾构施工对既有地表建筑的影响限于技术发展及认识水平, 相关研究较少. Sigl 等^[1]结合新加坡一盾构穿越寺庙工程, 对穿越过程中的相关建筑沉降进行监测. Dimmock 等^[2]在伦敦 Jubilee Line 延长线上的砖石建筑对隧道施工的持续反应进行了研究, 认为受到房屋建筑的限制, 水平应变基本可以忽略, 且与无地表建筑时的位移趋势毫无关系. Finno 等^[3]提出一种将建筑物的楼板和承重墙分别考虑的复合梁法对地表建筑物进行分析.

借助于数值模拟可以较全面地考虑相关影响因素, 较为准确地预计隧道施工引起的地表移动及建筑变形, 目前已成为穿越工程研究的主要方向. Mrroueh 等^[4-5]建立完全 3 维模型, 通过对比有无地面建筑开挖隧道土体力学行为, 分析采用扩大基础的结构对隧道施工引起的地面沉降的影响. 计算结果显示, 结构的存在对盾构隧道附近及结构基础附近的塑性区发展以及地面沉降曲线有明显的影响. Houlsby 等^[6]认为 2 维模型忽略了隧道推进的进程, 不能模拟建筑的实际情况, 建立 3 维模型对有无地面建筑情况下沉降趋势、结构损伤随隧道推进的发

收稿日期: 2010-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(50878149); 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-08-0403); 上海申通地铁集团项目(STTC-HT-001)

第一作者: 葛世平(1966—), 男, 教授级高工, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软土地下工程与环境保护.

E-mail: geshiping@shmetro.com

通讯作者: 谢东武(1980—), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为软土地下工程与环境保护. E-mail: xdw980829@163.com

展进行了研究,结果表明,地表建筑的存在,不仅从沉降量,而且从沉降模式上改变了地表的沉降趋势.廖少明等^[7]采用在单元上施加荷载模拟建筑物,对盾构侧穿危房进行了研究,对盾构施工不同土体损失下的建筑物沉降规律进行分析,认为盾构推进方向侧边建筑的存在增大了盾构施工引起的不均匀沉降.

目前在盾构穿越既有建筑物施工过程中地表和建筑物沉降的规律性认识方面还有较大的分歧,存在着建筑物增大地表沉降和减小地表沉降 2 种观点.本文拟通过建立一系列的 3 维数值模型对盾构穿越建筑物过程中的建筑物和地表测点的沉降规律进行研究,得到盾构穿越既有建筑物过程中地表及建筑物沉降的一般规律,进而对实际工程案例进行预测,并通过现场监测验证所提出结论的合理性.

1 盾构穿越既有建筑数值模拟分析

本文建立数值模型时,假定盾构施工过程及隧道周边土体、隧道埋深等参数不变,通过改变建筑物的相关参数,研究既有建筑对盾构施工引起的地表沉降趋势的改变.

采用专业岩土工程分析软件 Z-Soil^[8] 建模计算.土体本构采用摩尔-库仑模型.采用八结点四面体单元模拟土体、盾构壳体及建筑物墙体.盾构机头采用壳单元模拟.盾构与土体、盾构与管片、管片与土体间采用接触单元.由于篇幅有限,本文主要对浅基础 6 层以下的砌体建筑进行研究.

为了使模拟更有针对性,结合轨道交通 11 号线下穿越徐家汇观象台工程,建立 3 维数值模型.通过检测得到徐家汇观象台房屋底层至 3 层砌筑砖强度等级评定为 MU10;底层砌筑砂浆强度推定为 6.4 MPa,2 层砌筑砂浆强度推定为 4.6 MPa,3 层砌筑砂浆强度推定为 3.9 MPa.结合《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001),得到对应的每层砌体结构的弹性模量分别为:第 1 层砌体 2.57 GPa,第 2 层砌体 2.04 GPa,第 3 层砌体 1.96 GPa.盾构外径 6.34 m,衬砌外径为 6.20 m,管片结构采用 35 cm 厚度的 C55 混凝土,各环宽度为 1.2 m,管片结构弹性模量为 $E=34.5$ GPa.土层物理力学参数见表 1.

1.1 既有建筑与盾构推进轴线相对位置不同对地表变形趋势的影响

盾构隧道穿越既有建筑有 2 种情况:正穿和侧

穿.模型中建筑物短边 22 m,长边 60 m,无特殊说明情况下建筑物为 6 层砖砌体结构,高度 20 m.正穿情况下,建筑物长边轴线与两隧道间中线重合.侧穿共计算 5 种情形.其中,情形 1 为建筑物短边与两隧道间中线重合,情形 2,3,4,5 包括建筑物短边与两隧道间中线距离为 5,15,25,35 m.如图 1 所示,对比地表无建筑物、正穿和侧穿情况下,盾构隧道施工引起的沉降槽曲线,除了正穿时隧道轴线上方及两轴线间的地表沉降量有所减小外,侧穿情况下隧道轴线上方及两轴线间的地表沉降均有所增大.随着隧道轴线与建筑物的距离不断增大,建筑物基底曲线逐渐趋于平缓.

表 1 土层物理力学参数
Tab.1 Parameters of soil

层号	土层名称	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模 量/MPa	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
①	杂填土	18.0	2.0	6.0	7	10.0
②	褐黄色粉质黏土	18.7	4.5	13.3	27	17.0
③	淤泥质粉质黏土	17.3	2.5	7.6	10	16.5
④	淤泥质黏土	16.7	2.1	6.2	11	12.5
⑤ ₁	黏土	17.5	3.4	10.1	14	14.0
⑤ ₃	粉质黏土	17.9	4.7	14.0	16	22.5

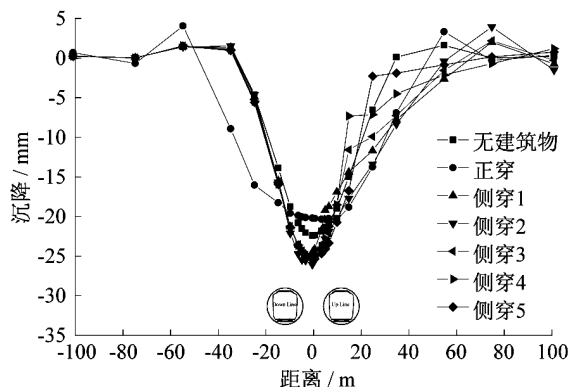


图 1 盾构施工正穿、侧穿沉降槽对比
Fig.1 Comparison of settlement trough of shield tunneling undercrossing and sidecrossing the building

1.2 建筑物刚度不同对地表变形趋势的影响

建筑物刚度越大,建筑物下的沉降槽越平缓,但建筑物下的基础与其周边基础的差异沉降将会增大.如图 2 所示,对比正穿情况下改变建筑物的刚度所形成的沉降槽曲线.随着建筑物刚度的不断增大,建筑物下沉降槽曲线逐渐趋于平缓,当刚度达到实际砌体结构刚度的 100 倍时,沉降槽已接近直线.

对比建筑物刚度与最大沉降值的关系可以看

出,当建筑物刚度较小时,建筑物的存在会增大盾构施工引起的最大沉降,相当于在地表直接施加荷载的情况.而随着建筑物刚度的增大,最大沉降逐渐减小,并小于无建筑物情况下的地表最大沉降.

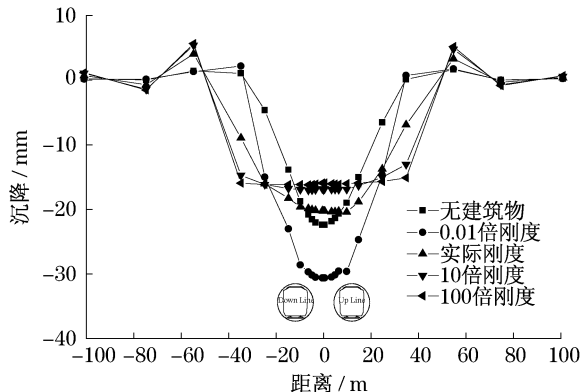


图 2 盾构穿越刚度不同建筑物的沉降槽对比

Fig.2 Comparison of settlement trough of shield tunneling undercrossing the building with different stiffness

1.3 建筑物自重不同对地表变形趋势的影响

改变建筑物的自重,则要增加建筑物的楼层,从而建筑物的刚度会增加.因此,建筑物自重的改变是个多因素共同作用的情况,不能单独考虑自重增加.

从图 3 可以看出,由于自重增加的同时建筑物的刚度也增加了,因此沉降槽在建筑物下部趋于平缓,同时最大沉降量也并没有明显增大.对应于实际情况,6 层砌体建筑所对应的最大沉降量并不一定会明显大于 3 层砌体建筑的沉降量,而会出现明显差别的应该为建筑物下土层与周边土层的差异沉降.

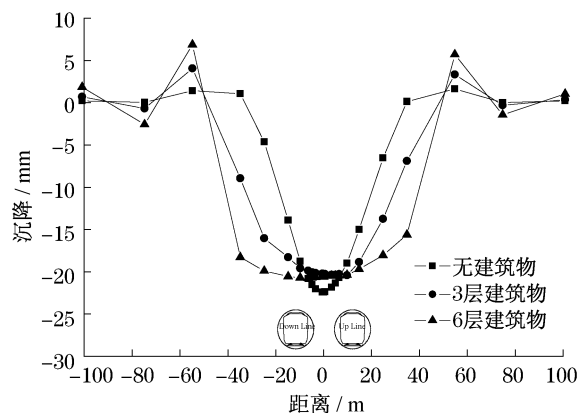


图 3 盾构穿越自重不同建筑物的沉降槽对比

Fig.3 Comparison of settlement trough of shield tunneling undercrossing the building with different weights

1.4 小结

盾构隧道正穿和侧穿既有地表建筑物情况下,

既有建筑与隧道轴线相对位置不同,沉降槽的形式和沉降量的变化情况有差别.正穿情况下,既有建筑物的存在会减小地表最大沉降量,但侧穿情况下基本会增大最大地表沉降量.

正穿情况下建筑物刚度的改变也会改变沉降槽的形式和最大沉降量.因此,在模拟时应考虑实际的建筑物刚度,将基础模拟为完全刚性和完全柔性都是不合适的.

从改变建筑物自重的模拟对比结果来看,对于高度在 6 层以内的砌体结构来讲,3 层砌体建筑与 6 层砌体建筑引起的沉降最大值差别不大,而建筑物下的沉降槽形式则有明显的区别.

2 盾构穿越既有保护建筑的模拟预测

2.1 工程概况

徐家汇观象台已有百余年历史,主体为砖木 3 层结构.由于该建筑建造年代久远,使用年限已远远超过常规建筑.因此对该建筑物的保护要求非常高.

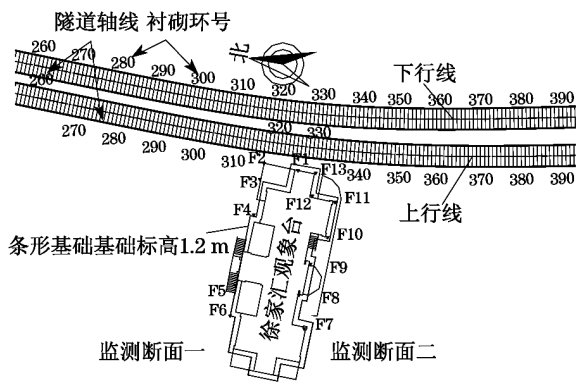
上海轨道交通 11 号线从徐家汇观象台北侧下方土体穿过.盾构外壁距离地表约 26.2 m,2 条盾构轴线相距约 9.7 m.隧道衬砌环外直径 6.2 m,内直径 5.5 m,管片环宽 1.2 m.盾构区间与徐家汇观象台的平面相对位置及立面图见图 4.土体参数见表 1.

施工过程中为有效控制盾构推进扰动造成的地面沉降,及时反馈修正施工参数,建立了监控系统对隧道轴线上方地表和徐家汇观象台沉降进行实时监测,测点布置如图 4a 所示.根据测点布设情况,可基本将观象台及其附近所布设的测点归结在 2 个横断面上,第 1 横断面包括测点 315,320,F2,F3,F4,F5,F6,第 2 横断面包括测点 330,335,F13,F12,F11,F10,F9,F8,F7.其中,F 表示建筑物墙体上的测点,其余测点为隧道对应环号上方地表测点.这样划分对后续的计算分析有帮助.

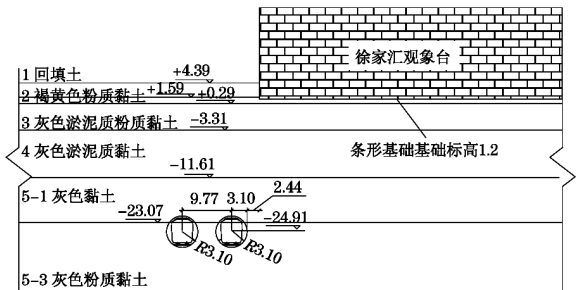
2.2 数值模拟预测

建立观象台和盾构隧道施工全 3 维数值模拟模型,模型网格划分如图 5 所示.模型宽 209.2 m,长 192 m,隧道轴线至地面 20.955 m,至底部边界 56.835 m.两隧道轴线间距 17.2 m.隧道开挖直径 6.34 m,盾壳厚度 0.07 m,管片厚度 0.35 m.

整理有无建筑物沉降槽对比如图 6 所示.建筑物的存在,增大地表最大沉降量,改变了沉降槽的形式.



a 平面位置示意图及侧点布置图



b 地质剖面图(单位:m)

图 4 轨道交通 11 号线与徐家汇观象台相对位置示意图
Fig.4 Relative position of Metro Line 11 and Xujiahui Observatory

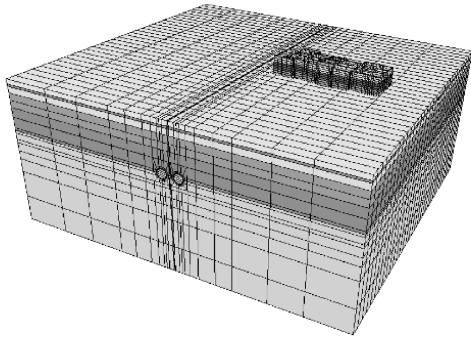


图 5 包括徐家汇观象台的有限元模型
Fig.5 FEM model with Xujiahui Observatory

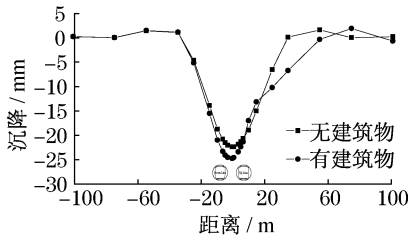


图 6 观象台测点沉降时程曲线预测
Fig.6 Settlement-time curve forecast of Observatory measured points

无观象台隧道轴线上方地表测点最大沉降值为 21.34 mm, 有观象台时测点最大沉降值为

22.38 mm, 沉降差 1.04 mm; 而靠近隧道侧的建筑物地表测点的沉降值较小, 为 14.58 mm, 与其附近隧道轴线上方测点沉降差为 7.8 mm.

3 建筑物沉降的监控量测

轨道交通 11 号线在 2010 年 2 月和 3 月份穿越徐家汇观象台. 对观象台对应 2 个横断面测点的沉降数据进行整理, 与预测值的对比如图 7 和 8 所示.

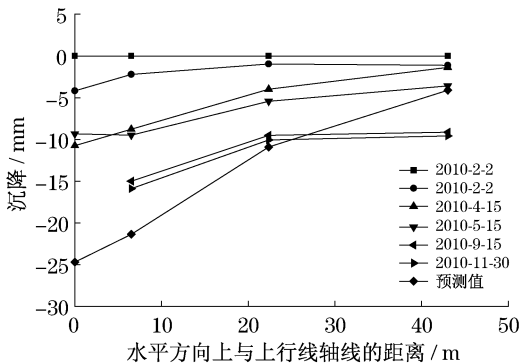


图 7 观象台监测点沉降槽(断面一)
Fig.7 Settlement trough of Observatory measured points(Section 1)

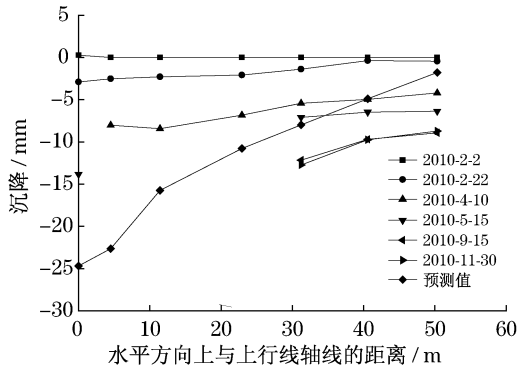


图 8 观象台监测点沉降槽(断面二)
Fig.8 Settlement trough of Observatory measured points(Section 2)

从监测数据曲线来看, 随着距离隧道轴线的距离逐渐增大, 沉降逐渐减小的规律较为明显. 由于观象台的存在, 使得测点测值过渡较为平顺, 沉降槽宽度增大, 虽然距离隧道轴线已近 50 m, 但两沉降槽端部测点沉降值仍达到近 10 mm. 与预测沉降槽相比, 实测沉降槽曲线局部出现大的差异沉降, 这可能由于建筑物自身历史悠久, 加上长期发展的既有变形, 在建筑物上产生裂缝(图 9), 导致沉降发展不连续, 而有限元模型并没有考虑这一点.



图 9 墙体及搭建房屋与主体结构接缝竖向开裂
Fig.9 Crack of wall and crack between annex
with the main structure

观象台位置的测点沉降最大值小于隧道轴线上
方地表测点沉降值,这与计算预测结果一致.

4 结论

通过建立 3 维数值模型对各种工况下盾构穿越
既有建筑的地表沉降规律进行对比分析,对 11 号线
下穿越徐家汇观象台进行预测,与监控量测结果进
行对比,主要结论如下:

(1) 既有建筑的存在改变了盾构施工引起的地
表沉降规律,建立 3 维全模型进行数值模拟预测是
一个较好的办法.

(2) 既有建筑与隧道轴线的相对位置、既有建筑
的自重、既有建筑的刚度等因素会改变盾构施工引起
的地表沉降的规律;特别是既有建筑物的刚度的影
响,已有的对建筑物刚度的假定,或者不考虑建筑物
刚度,或者假定为无限刚度的方法,都是值得商榷的.

(3) 结合 11 号线下穿越徐家汇观象台工程监测
数据对盾构穿越地表既有建筑情况下的建筑物沉降

进行预测,指导施工进行,并与监测结果进行了对比
分析.

由于工程案例有限,本文对盾构穿越既有建筑
物施工所作的工程验证仅针对个体工程进行,系统
的工程验证将是进一步研究工作的方向.

参考文献:

- [1] Sigl O, Atzl G. Design of bored tunnel Linings for singapore MRT north east line C706 [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14: 481.
- [2] Dimmock P S, Mair R J. Effect of building stiffness on tunneling-induced ground movement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 438.
- [3] Finno R J, Voss F T, Rossow E, et al. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (10): 1199.
- [4] Mroueh H, Shahrour I. A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 38.
- [5] Mroueh H, Shahrour I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 245.
- [6] Houlsby G T, Burd H J, Augarde C E. Analysis of tunnel-induced settlement damage to surface structures [C] // Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Amsterdam: [s. n.], 1999: 147-152.
- [7] Liao S M, Liu J H, Wang R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 454.
- [8] Truty A, Zimmermann T H, Urbanski A, et al. Z_Soil PC 2009 manual [M]. Lausanne: Elmeppress International, 2009.