https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.326



# 既有建筑对极软岩地层中土压盾构的施工影响

王晓睿<sup>1</sup>,蔡 松<sup>1,2</sup>,杨 伟<sup>3</sup>,郑培信<sup>4</sup>

1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院,河南郑州 450045

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南郑州450003

3. 河南璟信工程监理有限公司,河南洛阳 471000

4. 河南省尧栾西高速公路建设有限公司,河南洛阳 471500

摘 要:基于土压盾构在极软岩地层中近距离下穿既有建筑的背景,采用ABAQUS有限元数值模拟与现场实测相结合的方法,从地表和建筑物竖向位移变化及其控制的角度出发研究既有建筑对盾构施工的影响.实测结果表明:地表和建筑物在盾构下穿过程中会呈现出先隆起后沉降的趋势,其中在盾尾脱出阶段地表和建筑物会产生较大速率的沉降.数值模拟结果表明:建筑物改变了地层原有的应力场,使地表最终沉降峰值向靠近建筑物方向偏移并增大,沉降槽宽度也在一定程度上增大.本研究对于土压盾构穿越地层敏感区域具有较强的理论指导意义.同时,在工程实践方面,也对土压盾构采用施工参数调节与补强注浆来进行沉降控制提出了具体的指导方案.

**关键词:** 土压盾构;极软岩地层;近距离下穿;有限元数值模拟;现场实测;工程地质. **中图分类号:** P642 **文章编号:** 1000-2383(2022)04-1483-09 **收稿日期:** 2020-09-30

# Influence of Existing Buildings on Construction of Earth Pressure Shield in Extremely Soft Rock Stratum

Wang Xiaorui<sup>1</sup>, Cai Song<sup>1,2</sup>, Yang Wei<sup>3</sup>, Zheng Peixin<sup>4</sup>

1. School of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China

3. Henan Jingxin Engineering Supervision Co., Ltd., Luoyang 471000, China

4. Henan Yaoluanxi Expressway Construction Co., Ltd., Luoyang 471500, China

**Abstract:** In this paper, based on the background of the earth pressure shield tunneling through the existing buildings in the extremely soft rock formation at a short distance, using the method of combining ABAQUS finite element numerical simulation and on-site monitoring, from the perspective of surface and building vertical displacement changes and their control, the impact of existing buildings on shield construction is studied. The actual measurement results show that the ground surface and buildings will show a trend of uplift first and then subsidence during the underpass of the shield. Among them, the surface and buildings will settle at a relatively large rate during the shield tail exit stage. Numerical simulation results show that the building changes the original stress field of the stratum, and the final settlement peak of the ground surface shifts and increases toward the direction of the building, and the width of the settlement trough is also increased in a smaller range. The research in this paper has a strong

基金项目:河南省科技攻关项目(No.182102210062);河南省交通运输厅横向项目资助(No.2020J5).

作者简介:王晓睿(1975-),男,教授,主要从事数值计算的研究及其岩石裂纹扩展方面的应用.ORCID:0000-0001-5686-4332. E-mail:wxrui203@163.com

引用格式:王晓睿,蔡松,杨伟,郑培信,2022.既有建筑对极软岩地层中土压盾构的施工影响.地球科学,47(4):1483-1491.

Citation: Wang Xiaorui, Cai Song, Yang Wei, Zheng Peixin, 2022. Influence of Existing Buildings on Construction of Earth Pressure Shield in Extremely Soft Rock Stratum. *Earth Science*, 47(04):1483–1491.

theoretical guiding significance for the earth pressure shield to penetrate the sensitive area of the formation. At the same time, in terms of engineering practice, a specific guidance plan for the use of construction parameter adjustment and reinforcement grouting for settlement control of the earth pressure shield is also proposed.

Key words: earth pressure shield; extremely soft rock stratum; close crossing; finite element numerical simulation; on-site monitoring; engineering geology.

# 0 引言

随着城市地铁建设数量及规模的不断扩大,盾 构法以其安全、高效、隐蔽的优势成为当前被广泛 运用的施工方法(杨哲峰,2015). 但随着现代化建 设的逐步深入,城市密集建筑群及地下建构筑物的 高标准保护对盾构施工扰动的控制提出了更为严 格的要求(邵颖,2016).目前关于盾构近距离穿越建 筑物的研究内容多集中于盾构施工对周边地表及 建筑物的影响(王晓睿等,2019;Lv et al.,2020),常 见的研究方法有经验法(刘招伟等,2003;Liao et al., 2009)、理论分析法(蒋洪胜和侯学渊, 2003)、 数值模拟法(王晓睿等, 2016; Wu et al., 2020; Zhang et al., 2020), 而直接研究建筑物对盾构施工 造成影响的案例则较为少见.由于实际施工时建筑 物与地层、盾构之间是一个相互影响的整体(潘茁, 2016),因此本研究对于盾构施工时的地表变形控 制和建筑物保护同样有重要意义.

本文以某市政工程盾构区间全断面极软岩地 层施工为背景,通过对典型实测断面数据和有限元 计算成果的比较分析,从地表和建筑物竖向位移变 化的角度出发,系统阐述了既有建筑对盾构施工过 程的影响,可为今后的类似工程提供借鉴.

## 1 工程概况

城市地铁某盾构区间穿越一座道路旁的商用 建筑,该建筑高约15m,长约30m,宽约11m,采用 砖混结构,条形基础.本工程首先施工并贯通先行 隧洞,而后再开始后行隧洞的施工,本研究对后行 隧洞的施工过程不予考虑.建筑物与先行隧洞的位 置关系如图1,图2所示.由于地下水埋藏较深,施工 过程中未进行降水,因而不考虑孔隙水压的变化对 岩土体变形的影响.

城市地下工程的建设是以地面以下一定深度 范围内的岩土体作为载体的,因而场地的工程地质 条件会对地下空间的规划与利用产生影响(谭飞 等,2021).本工程隧洞结构所处地层条件主要由强



图 1 隧洞与建筑物平面关系示意(单位:m) Fig.1 Schematic diagram of the plane relationship between the tunnel and the building (unit: m)



图2 隧洞与建筑物剖面关系示意(单位:m)

Fig.2 Schematic diagram of the cross-sectional relationship between the tunnel and the building (unit: m)

风化泥岩组成的极软岩地层.作为特殊条件下的一种复杂地质体,极软岩结构松散,具有易流变、受扰易变形、遇水易膨胀崩解等特性,其泥态成分在很大程度上决定了它的工程性质,因而在工程建设时的诸多因素联合作用下,极软岩往往会产生较大的弹塑性变形,进而对工程的安全性产生影响(朱俊勋,2014).

### 2 现场实测

#### 2.1 地表竖向位移实测

本文取靠近建筑物中间位置的某实测断面 P-P'为研究对象,观测方案平剖面示意如图3,4所示. 由于部分测点位于后行隧洞外侧,可能远离位移影 响区,现需要根据 Peck 定理估算沉降曲线宽度 B, 以进一步确定待观察的测点数.









Fig.4 Schematic diagram of the cross-section of the observation project(unit: m)

$$i = \frac{H+R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^{\circ} - \frac{\alpha}{2}\right)},\tag{1}$$

 $B = 5i, \qquad (2)$ 

式中:*i*为地下洞室横剖面中心点至沉降曲线拐点的 水平距离(m);*H*为地面至洞室拱顶的深度(m);*R* 为洞室半径(m); α为加权平均后的岩土体内摩 擦角().

通过查阅地勘报告,可以计算得到岩土层加权 平均后的内摩擦角α=19.21°,并将其结合其他参 数代入公式计算,得出高斯沉降曲线的宽度系数 *i*=8.53 m,从而可进一步估算出*B*=42.65 m.由于 现场实测断面的测点 P11与P3的距离为24 m,因此 P11 刚好位于估算的沉降曲线宽度范围以外,为了 获取相对完整的沉降槽,最终决定对P-P'断面上所 有测点的竖向位移历程进行观测分析.

通过对实测资料的整理分析(图5)发现:测点 在刀盘到达P-P'断面前10~20m产生少量隆起,考 虑为主要由于机身对围岩的拖拽挤压或土仓压力 较大所致;在靠近P-P'断面10m以内时,部分测点 开始沉降,考虑主要原因为土仓压力波动;在盾构 刀盘通过P-P'断面后的一段距离,主要受地层损失 影响,该阶段测点表现出持续沉降的现象,其中在 刀盘通过 P-P' 断面 9.5 m( 盾尾通过) 后, 由于注浆 液体尚处于凝固阶段,各测点表现出较大的沉降增 长速率:之后在盾构驶出建筑物的阶段(刀盘通过 断面约20~30m),由于在建筑物下方进行了洞内 补强注浆,沉降产生一部分回弹,部分测点甚至开 始出现隆起;最后,在经过由浆液凝固时的压力消 散及体积收缩而导致的沉降再次增大后,各点竖向 位移在刀盘驶出P-P'约40m后进入了趋于稳定的 阶段.同时,因场地地质条件良好,施工、设计参数 合理,地表最终竖向位移相对较小.

根据图5还可以得出:

(1)隧洞轴线正上方的测点 P3沉降量为 3.17 mm,左右两侧关于其对称的两点 P2、P4 的沉降量 分别为 3.11 mm 和 2.85 mm,与 P3 的沉降差值分别 为 1.89% 和 10.09%,显然此时的沉降曲线已不再 服从理论上的正态分布,此时沉降最大值向左偏移 且位于 P3 和 P2之间.

(2)P1与P3的距离为18.1m,P9距离P3的距 离为16m,而P1的沉降值却比P9略大,这说明在盾 构施工时,建筑物的重力增加了附近土体的受扰 程度.

(3)作为一种土体加固手段,注浆有着优良的 施工变形控制效果,在洞内进行补强注浆以后地表 沉降快速收敛,但同时也有部分测点呈现出隆起的 现象,因而在实际操作时需要严格控制注浆参数.

#### 2.2 建筑物竖向位移实测

为了突出建筑物竖向位移在盾构开挖过程中的变化规律,笔者在盾构位于穿越段的5个不同特征位置(图6)处分别进行了现场观测工作.5个特征位置处的盾构刀盘分别位于:切面a-a'前方10m、切面a-a'正下方、切面b-b'正下方、切面c-c'后方9.5m(盾尾驶出)、c-c'后方40m.

5个特征位置处的建筑物竖向位移实测值如图 7所示(横坐标沿指向隧洞的方向逐渐增大),通过



Fig.5 The monitoring process curve of the vertical displacement of the ground surface





分析:建筑物各测点的竖向位移和短边方向的斜率 随着盾构的逐步开挖均表现出先正后负的变化规 律,其中在盾构处于位置五时的*b-b*′切面,测得建筑 物短边斜率绝对值的最大值0.0002;由于建筑物在 长边方向的跨度相对较大,不均匀沉降对长边方向 的影响也相对更大,并且在盾构处于位置三时的 *e-e*′切面,测得建筑物长边的最大沉降差为 1.78 mm.各项测值均满足设计规定.

根据图7还可以得出:

(1)在盾构靠近及远离的过程中,建筑物呈现 出先升后降的变形规律.由于施工扰动区随隧洞开 挖面移动而发生变化,且随着远离开挖面盾构扰动 逐渐衰减,从而在建筑物的各点之间形成沉降差, 并且沉降差值还会随隧洞开挖进度的不同而不断 改变,这表明在隧洞开挖过程中,建筑物的危险点 和可能的破坏形式会受到时空影响而动态变化.

(2)当盾构位于建筑物前方时,建筑物可能产

生远离隧洞方向的倾覆破坏,而随着盾构逐渐穿越 并远离,建筑物则可能产生靠近隧洞方向的倾覆破 坏,这就要求应当根据盾构和建筑物的相对位置来 选用相应的抗倾覆措施.

(3)当盾构位于位置一、四、五时,建筑物基础 形态呈下凸状,此时易产生正八字形开裂;当盾构 位于位置二和三时,建筑物基础形态呈下凹状,此 时易产生反八字形开裂.这就要求应当根据盾构在 穿越段的具体位置来选用合适的防开裂措施.

# 3 数值模拟计算分析

#### 3.1 数值计算模型及材料参数

本文采用ABAQUS有限元软件建立了盾构穿 越浅基础建筑施工三维计算模型,用刚度迁移法对 整个施工过程作精细化仿真模拟.基本假定条件与 关键仿真技术如下:

(1)假设岩土层性质近似服从莫尔库伦本构关系,该运算法则能较好地表述岩土体特性,假定岩 土层面与水平面平行,并以每层实际厚度平均值作 为模拟厚度.

(2)考虑到建筑物基础刚度远大于周边土体,因而本模型将二者作为一个整体进行分析,即通过使用软件自带的分割功能在模型中圈定出建筑物基础的边界后,再分别赋予基础和岩土层以不同的材料属性来进行计算.

第4期



计算模型网格

Fig.8 Computational model grid

图 8

(3)采用等效均布压力来模拟建筑物结构传递 4 给基础表面的荷载,由于建筑物采用砖混结构,对 4

 $\overset{Z}{\searrow}_{X}^{Y}$ 

每层压力可取为18 kPa,因而最终将5层建筑对基础的总压力取为90 kPa.

表1 模型材料参数 Table 1 Material parameters of the model						
人工填土	1.75	0.02	0.18	5	10	0.50
粉质黏土	1.90	0.05	0.32	30	16	5.50
极软岩1	2.10	0.30	0.30	50	22	18.40
极软岩2	2.20	0.50	0.31	65	19	15.60
注浆层	1.90	$9 \times 10^{-4}$	0.40			0.10
盾壳	7.50	205.00	0.30			0.10
衬砌	2.10	28.00	0.30			0.35
条形基础	2.50	20.00	0.20			2.00



图 9 建筑物存在时的平衡应力场(a)和无建筑物存在时的平衡应力场(b)

Fig.9 The equilibrium stress field when the building exists (a) and the equilibrium stress field when there is no building (b)

(4)通过结合实际施工资料,将掌子面支护力 和注浆压力分别取为200 kPa和50 kPa,均为均布 荷载.

(5)由于盾构机身表面凹凸不平且刀盘与机身

之间存在半径差,所以在施工时往往会将盾壳外一部分土体带走而形成地层损失,模型将通过对盾壳外侧一定范围内的围岩模量进行折减来模拟这一地层损失.



图 10 建筑物存在时的地表竖向位移云图(a)和无建筑物存在时的地表竖向位移云图(b) Fig.10 Cloud map of surface vertical displacement when buildings exist (a) and when there is no building (b)

有限元模型如图8所示.该数值模型共包含计 算单元55504个,计算节点67400个,单元类型为 C3D8R减缩积分,进行沙漏控制后提交运算.模型 沿盾构区间纵向长度为120m,横向延伸70m(隧洞 轴线左侧考虑建筑物的影响,取40m),高度为 40m,共开挖40步,每步开挖距离为两环衬砌长度 (3m).

施工段范围内地层物理参数根据工程勘察报 告取值采用,具体参数如表1所示.

#### 3.2 数值计算结果分析

本文首先分析建筑物的存在对地层应力场及 地面位移场的影响,图9为建筑物存在与否时其位 置下方地层剖面的初始应力场平衡结果.

由图 9 可知,建筑物的存在改变了地层原有的 应力状态,并使地层在一定深度范围内形成明显的 附加应力值,因此可推知盾构掌子面处的静止土压 力也在一定程度上增大.

有无建筑物存在时盾构开挖地表最终竖向位 移云图如图 10 所示(图 10a 中高亮位置为建筑物), 通过对两种结果进行比较分析发现,建筑物的存在 改变了地表竖向位移的分布形式:在建筑物附近某 区域地表沉降表现出集中分布的现象且分布范围 有所增加;无建筑物存在时,沿隧洞开挖方向地表 沉降数值变化不大且沿横向均表现为中间大两边 小的分布规律;通过图 10a还可以发现,建筑物左侧 地表某一区域的沉降值比周边要小,甚至表现出微





displacement of P-P' section

小的隆起现象.以上分析还可说明建筑物对周边地 表竖向位移的影响不单单是在附加应力作用下使 得地表沉降加大,往往也会因其对周边土体的挤压 抬升而使得某一区域的地表沉降有所减小.

为了进一步分析建筑物的存在对地表竖向位移的影响,取沉降实测断面P-P',对比分析该断面地表竖向位移的模拟值与实测值.对比曲线如图11 所示:

在前文讨论的基础上,通过对比分析可进一步 得出:受建筑物的影响,隧洞开挖后地表沉降槽形 态由正态分布曲线转为偏态分布曲线,地表沉降最 大值开始由隧洞轴心正上方向建筑物一侧偏移,而



图 12 建筑物竖向位移动态变化对比分析曲线

Fig.12 Comparative analysis curves of the dynamic change of the vertical displacement of the building

相较于产生明显变化的沉降曲线形态,沉降槽宽度 仅得到了十分有限的增加,这说明建筑物对沉降槽 宽度的影响要比沉降槽形态的影响小得多.模拟曲 线与实测曲线形态较为相似,由于模型参数取值较 为保守,模拟值略大于实测值.

盾构分别位于穿越段五个特征位置处的建筑 物竖向位移数据如图12(横坐标沿盾构前进的方向 逐渐增大),将模拟值与实测值进行对比可知,两曲 线在盾构掘进至位置一和位置四时均存在较大的 相对误差,笔者通过结合施工资料对其进行分析, 发现当盾构开挖至位置一附近,掘进速度和螺旋输 送机出土速度均产生较大波动,因而导致了由土压 力偏大引起的实测值较大现象;当盾构开挖至位置 四,由于现场施工人员在建筑物底部进行了洞内补 强注浆,因而此时的对比曲线也呈现出较大的相对 误差.实测曲线与模拟曲线表现出的盾构开挖过程 中的数据变化趋势较为相似,这说明数值模拟较好 地表达了土压盾构在穿越段的施工过程.

### 4 结论

(1)建筑物在盾构施工过程中可能出现的破坏 形式为倾覆或开裂,并且其危险点与可能的破坏形 式均会受时空影响而不断变化,如盾构在穿越段的 不同位置处建筑物可能产生倾覆的方向以及基础 的变形形态均会有所改变.这要求应当采用施工参 数实时调节或盾尾补强注浆等不同的控制措施来 灵活应对建筑物在盾构穿越过程中受到的危害.

(2)建筑物使其周边地层成为盾构施工扰动敏 感区,施工时地表竖向位移的分布形式在该区域发 生变化且表现得更为复杂,因此为了保证地面变形 的控制效果,就要求视盾构与地层敏感区域的位置 关系变化实时调整控制参数.

(3)建筑物在一定程度上增大了其附近地表的 沉降值与沉降槽宽度,并使沉降最大值向建筑物一 侧偏移,在盾构通过穿越段时应当加强对地面变形 的控制力度并适当提高变形实测频率.

#### References

- Jiang, H.S., Hou, X.Y., 2003. Theoretical Study and Analysis of Site Observation on the Influence of Shield Excavation on Soft Clays around Tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(9): 1514-1520(in Chinese with English abstract).
- Liao, S.M., Liu, J.H., Wang, R.L., et al., 2009. Shield Tunneling and Environment Protection in Shanghai Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technolo*gy, 24(4): 454-465. https://doi. org/10.1016/j. tu-

st.2008.12.005

- Liu, Z. W., Wang, M. S., Dong, X. P., 2003. Analysis on Ground Surface Subsidence of Metro Tunnel Induced by Shield Construction. *Chinese Journal of Rock Mechanics* and Engineering, 22(8): 1297-1301(in Chinese with English abstract).
- Lv, J., Li, X. L., Fu, H. L., et al., 2020. Influence of Shield Tunnel Construction on Ground Surface Settlement under the Condition of Upper–Soft and Lower–Hard Composite Strata. *Journal of Vibroengineering*, 22(5): 1126–1144. https://doi.org/10.21595/jve.2020.20967
- Pan, Z., 2016. Study on Soil Disturbance and Its Classified Settlement Due to EPB TBM Excavation (Dissertation). China University of Mining & Technology, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Shao, Y., 2016. Land Subsidence and Deformation by Shield Tunnelling Construction of Line 4 in Suzhou Subway (Dissertation). China University of Mining & Technology, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Tan, F., Wang, J., Jiao, Y.Y., et al., 2021. Current Situation and Development of Urban Underground Space Suitability Evaluation. *Earth Science*, 46(5): 1896-1908 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Jiang, H. J., Zhu, K., et al., 2019. Research on Ground Settlement Laws of Urban Subway Tunnel Construction Process Based on Earth Pressure Shield. *Earth Science*, 44(12): 4293-4298(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.R., Zhou, F., Zhang, Z., et al., 2016. Dynamic Deformation of the Oversized Cross-Section Rectangular Pipe-Jacking Tunnel. *Earth Science*, 41(11): 1959– 1965(in Chinese with English abstract).
- Wu, H. N., Shen, S. L., Chen, R.P., etal., 2020. Three-Dimensional Numerical Modeling on Localised Leakage in Segmental Lining of Shield Tunnels. *Computers and Geotechnics*, 122: 103549. https://doi.org/10.1016/j. compgeo.2020.103549

- Yang, Z.F., 2015. Research on the Mechanics Mechanism and Control Technology of Shield Tunnel Approaching Construction on Suzhou Metro Tunnel(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.J., Li, S.H., Li, P.F., 2020. Numerical Analysis of Ground Displacement and Segmental Stress and Influence of Yaw Excavation Loadings for a Curved Shield Tunnel. *Computers and Geotechnics*, 118: 103325. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103325
- Zhu, J.X., 2014. Mechanical Properties of Soft Rock and Prevention of Engineering Hazards. *Environmental Protection and Circular Economy*, 34(1):36-38, 51(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蒋洪胜,侯学渊,2003. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理 论与实测分析. 岩石力学与工程学报,22(9):1514-1520.
- 刘招伟,王梦恕,董新平,2003. 地铁隧道盾构法施工引起 的地表沉降分析. 岩石力学与工程学报,22(8):1297-1301.
- 潘茁,2016. 盾构施工全过程引起的土体扰动与分层沉降特 性研究(博士学位论文).北京:中国矿业大学.
- 邵颍,2016. 苏州地铁4号线盾构施工引起地面沉降变形研 究(硕士学位论文).北京:中国矿业大学.
- 谭飞, 汪君, 焦玉勇, 等, 2021. 城市地下空间适宜性评价研 究国内外现状及趋势. 地球科学, 46(5): 1896-1908.
- 王晓睿,姜洪建,朱坤,等,2019.基于土压盾构的城市地铁 隧道构筑过程地表沉降规律.地球科学,44(12): 4293-4298.
- 王晓睿,周峰,张振,等,2016.超大断面矩形顶管隧道施工 动态变形规律.地球科学,41(11):1959-1965.
- 杨哲峰,2015.苏州地铁盾构近接施工力学机理与控制技术 研究(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 朱俊勋,2014.软岩的力学特性及工程危害防治.环境保护与 循环经济,34(1):36-38,51.