

DOI: 10.11779/CJGE2022S2028

浅覆土大断面矩形顶管施工管节内力演化规律研究

朱卫杰¹, 甄亮¹, 徐文蕴^{2,3}, 李晓军^{2,3}

(1. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对施工期地下工程的监测技术整体已经较为成熟, 但对顶管工程管节内力演化规律的相关研究还较少。以往的研究成果认为: ①管道不直接承受土压力作用, 注浆压力起控制作用; ②纵向钢筋受力与管节内力有关, 在不同部位表现的受力性质不同; ③环向钢筋受力由多种因素控制, 其水平一般不高。上述结论主要是基于理论分析得出的, 实测数据较少, 且结构的受力水平受到埋深等因素的影响, 内力的演化规律应视具体工程条件而定。本研究根据陆翔路—祁连山路顶管工程的现场监测数据, 对上述结论进行了对比和修正, 提出了浅覆土条件下矩形顶管施工期的内力演化规律。

关键词: 浅覆土矩形顶管; 管节; 接触压力; 内力; 现场监测

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S2-0130-04

作者简介: 朱卫杰(1975—), 男, 江苏海门人, 硕士, 教授级高工, 主要从事隧道工程的施工、设计及科研工作。E-mail: zhuweijie03@163.com。

Evolution laws of internal forces in rectangular pipe jacking tunnels with large section and shallow soil

ZHU Wei-jie¹, ZHEN Liang¹, XU Wen-yun^{2,3}, LI Xiao-jun^{2,3}

(1. Technical Center, Shanghai Road and Bridge (Group) Co., LTD., Shanghai 200433, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The monitoring technology for underground engineering during construction period is relatively mature, but there are few researches on the evolution laws of internal forces in pipe jacking tunnels. The results of the previous researches show that: (1) The tunnel is not directly affected by the earth pressure, and the grouting pressure plays a controlling role. (2) The longitudinal reinforcement stress is related to the internal forces of the pipe, and it shows different mechanical properties at different locations. (3) The circular reinforcement stress is affected by many factors, but the stress level is generally not high. These conclusions are mainly based on the theoretical analysis but lack of the measured data. Moreover, the stress level of a structure is affected by a range of factors such as buried depth, and the evolution laws of the internal forces should depend on the specific in-situ conditions. On the basis of the monitoring data from the pipe jacking tunnel of Luxiang Road-Qilianshan Road, the above conclusions are compared and modified, and the evolution laws of the internal forces in rectangular pipe jacking tunnel under shallow soil during construction period are put forward.

Key words: rectangular pipe jacking tunnel with shallow soil; pipe; contact pressure; put forward internal force; field monitoring

0 引言

近年来, 随着中国城市化进程不断推进, 一系列问题也日益突显, 其中就包括交通拥堵问题。将地下交通隧道作为城市道路系统的延伸和补充, 有利于城市可持续发展, 引导城市交通系统向立体化扩展^[1], 但地下交通隧道在施工期容易引起周边建筑、地层的扰动变形, 必须实施严格的监测。

针对施工期隧道结构的内力及变形监测, 已有较多的相关研究。在监测内容方面, 张雪婵^[2]对杭州地铁1号线湘湖站北2基坑坍塌事故进行分析后发现, 实际监测方案比规范中少了周围地下关系位移、土体侧向变形和立柱沉降3项内容, 这导致了相关单位对

基金项目: 上海市青年科技启明星计划资助项目(19QB1401800)

收稿日期: 2022-12-01

现场情况了解不足, 对事故应对不及时; Brownjohn^[3]对 2004 年新加坡某隧道坍塌事故的报告进行研究后发现, 现场的离线监测仪器在两个月前已经记录到隧道有过大变形, 但并未及时处理, 这大大推动了后来无线自动监测技术的发展。

针对监测数据的处理, 早期工程中主要利用参数监测与反分析方法结合^[4], 依据跟踪实测数据, 判别周围地层的稳定性; 随着无线监测技术的发展, 施工监测往往能获得大量的数据, 对此, 国内许多学者的监测试验结果均表明, 监测数据多随时间呈离散变化, 采用时间序列分析法能有效提高对监测数据变化趋势的预测精度^[5]。

由此可见, 施工期监测技术不论体系还是方法都已经较为成熟。然而, 上述成果多数针对的是盾构法或明挖法施工的隧道。不同于盾构隧道, 顶管隧道管片是移动的, 这导致其在整个施工过程中的内力演化可能十分复杂。目前, 对于这种演化规律的相关研究还较少, 王承德^[6]从理论计算上得出了顶管不直接承受土压力作用的结论, 但监测数据资料较少, 不足以反映此规律; 魏纲等^[7]通过现场试验, 积累了一定的实测数据, 但监测对象长度仅为 22 m, 规模较小。陆翔路-祁连山路贯通工程 II 标段的顶管隧道一次顶进距离达 445 m, 本研究通过对该工程进行跟踪监测, 使用高频率的自动采集工具获得了大量实测数据。基于这些监测成果, 本文对浅覆土工况下施工期顶管隧道内力演化规律进行了分析研究, 并与以往的研究结论进行对比和验证, 得出了一些结论, 能为顶管隧道的设计计算提供依据。

1 工程概况

陆翔路-祁连山路贯通工程 II 标段的地地道程埋深约 4.5 m, 包含两条相互平行的断面尺寸 9.9 m×8.15 m、一次顶进距离 445 m 的矩形顶管隧道, 因此兼具了大断面、浅覆土和超长距离的特点。顶管隧道依次下穿顾村公园、河浜段、S20 外环高速, 并且靠近上海地铁 7 号线和在建 15 号线, 其平面位置如图 1 所示。

场区所处的位置在正常沉积土层和古河道沉积的交替处, 地层分布比较复杂, 自上而下可分为 9 个大层, 表层一般为杂填土, 平均厚度在 2 m 左右。拟建线路沿线有 3 处明浜, 浜底有 0.7~1.6 m 的含有机质淤泥, 另有少数几处暗浜等不良地质条件, 土质极差。

拟建场地地下水类型主要包括潜水和承压水, 潜水主要赋存于浅部黏性土层和浅部粉性土层中, 水位埋深在 0.3~1.5 m, 承压水包括分布在第 5 层的微承

压水和中下部的承压水, 对工程建设影响较大。



图 1 顶管工程位置示意图

Fig. 1 Location of pipe jacking tunnel

2 监测方案

本项目的监测内容为管节的接触压力和内力, 是通过土压力计和钢筋计来获取监测数据的。本次监测使用的振弦式柔性土压力计测量范围为 0~1.0 MPa, 分辨率 $\leq 0.06\%FS$ 。管节内力监测使用的是振弦式钢筋计, 最大测量压应力为 100 MPa, 最大拉应力为 200 MPa。

考虑监测数据量的要求以及现场工期协调问题, 本项目选取了西线第 16, 50, 130 环管节用于埋设所需传感器。其中, 土压力计均布置在 4 个侧面的中心位置; 钢筋计的安装需要能反映多个位置的受力变化情况, 同时又不致使传感器过多而影响浇筑, 因此选择在第 16 环和第 50 环安装钢筋计各 8 支, 并使其分布相对对称, 兼顾管节的内侧和外侧, 实际的安装位置示意如图 2 所示。

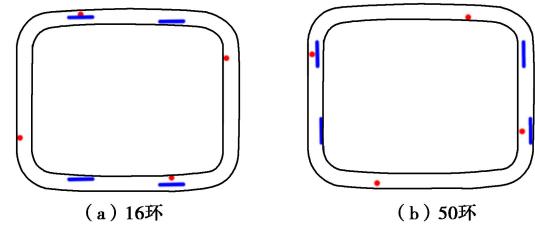


图 2 第 16 环、50 环钢筋计安装位置示意图

Fig. 2 Installation positions of reinforcement stress gauges on 16th and 50th pipe rings

待上述特殊管节下放至工作井后, 将各传感器的线缆接入采集箱内, 施工前期设置的采集间隔为 5 min, 后期调整为 10 min。

3 监测结果分析

本次监测从第 16 环管节下放开始, 持续整个施工期, 在顶管工程贯通后, 第 50 环和 130 环还继续监测了一段时间。尽管有部分传感器未能存活, 本研究仍收集到了大量监测数据。实测的结果大致可以反映出

一些规律,但也有部分数据存在问题,如第 16 环右侧的土压力计始终保持在一个固定值,或是某些钢筋计的测量值在某些时刻显著偏离正常范围甚至超出量程。本研究在后期分析时去掉了这部分数据,最终形成的监测结果按土压力和管节内力两个方面展开。

3.1 土压力监测结果分析

以往的理论分析认为^[6-7],顶管环向受到的接触压力主要由注浆压力和土压力两个因素决定,但主要承受的是注浆压力,而非土压力。现行的顶力计算规范中,使用的也是与土压力无关的公式。注浆能减小侧壁所受压力的水平,且对顶部和底部两侧的影响最为明显。管道底部的土体反力与顶部相同,大多数情况下这两个位置的受力都比较接近,且底部大一些。此次检测的结果大致符合这一规律,但也略有出入。

尽管从整体上看,监测数据是不断变化的,但在连续的一段时间内,其数据往往是较为稳定的。因此,本研究选择将测点各传感器监测数据按整体监测天数为区分,尽量选取各天相同监测时段内较稳定的监测值作为当天的代表值,绘制出趋势图,如图 3 所示,图中各编号对应的实际测点位置见表 1。

表 1 编号与实际土压力测点位置对照表

Table 1 Serial number and locations of measuring points for actual earth pressure

编号	位置
#1	第 16 环底部
#2	第 16 环顶部
#3	第 16 环左侧
#4	第 50 环右侧
#5	第 50 环左侧
#6	第 50 环顶部
#7	第 130 环左侧

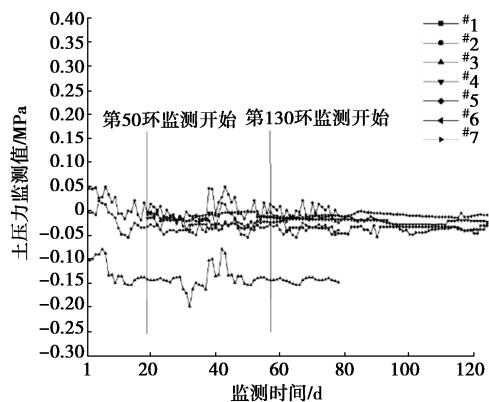


图 3 土压力监测数据变化趋势图

Fig. 3 Variation trend of monitoring data of earth pressure

由图 3 可见,在整个施工过程中,土压力值的水平都较低且波动明显,在后期施工结束但#4~#7 测点监测仍在继续的阶段,其监测结果才较为稳定,压应力保持在小于 0.05 MPa 的状态。由于此次监测仅第 16 环底部土压力计存活,故顶部与底部的对照略有缺

失,根据第 16 环的监测结果来看(即#1、#2),顶部土压力稍大于底部土压力的受力水平,但二者的值十分接近,这与理论结果不符。

与顶部和底部相比,左右两侧的受力水平(即#3、#4、#5、#7)则要高一些,而这其中又以第 16 环最为明显,此处最大土压力为 0.197 MPa,对比之下,此管节顶部最大土压力仅为 0.022 MPa。以往的测试结果显示^[7],管节所受压力大小受覆土压力和注浆压力影响,其中,注浆压力又起到控制作用。通过注浆形成泥浆套,能够减小管壁与周围土体的接触压力,这种影响对顶部和底部尤为明显,而对左右两侧影响不大,本次监测结果也符合这一规律。

3.2 管节内力监测结果分析

顶管施工时,顶力的来源是位于始发井的液压千斤顶装置,顶力通过管节不断向前传递,一般认为,管节纵向钢筋受力包括顶力、开挖面阻力以及周围土体的摩阻力等,管节环向钢筋则主要受到自重、水土压力和注浆压力。由于顶管管道本身是弯曲的,在弯曲处管道接头容易产生应力集中现象,使钢筋受到拉应力的作用;在直线顶进段,或是更换受顶管节时,管节内部既存在受拉部分,也存在受压部分,且大体上呈对称分布^[7],本次监测结果也能反映这一规律。钢筋内力监测数据的处理方式与土压力数据相同,并将纵向和环向数据分开呈现,如图 4 所示,各编号对应的实际测点位置见表 2。

表 2 编号与实际钢筋计测点位置对照表

Table 2 Serial number and locations of measuring points for actual reinforcement stress

编号	位置及安装方向
#1	第 16 环底部内侧、纵向
#2	第 16 环顶部外侧、纵向
#3	第 16 环右侧内部、纵向
#4	第 50 环顶部内侧、纵向
#5	第 50 环底部外侧、纵向
#6	第 50 环右侧内部、纵向
#7	第 16 环底部内侧、环向
#8	第 16 环底部外侧、环向
#9	第 16 环顶部外侧、环向
#10	第 16 环顶部内侧、环向
#11	第 50 环左侧内部、环向
#12	第 50 环左侧外部、环向
#13	第 50 环右侧内部、环向
#14	第 50 环右侧外部、环向

由图 4 可见,受实际工况不断变化的影响,管节各部位的受力状态也在不断改变,总体受力水平保持在一定范围内。监测结果显示,纵向钢筋计所受最大拉应力为 11.136 MPa,最大压应力为 3.984 MPa;而环向钢筋计受到的最大拉应力为 13.850 MPa,最大拉应力为 5.390 MPa。相对而言,纵向各传感器的受力

水平更为接近, 环向受力则更为复杂多变。

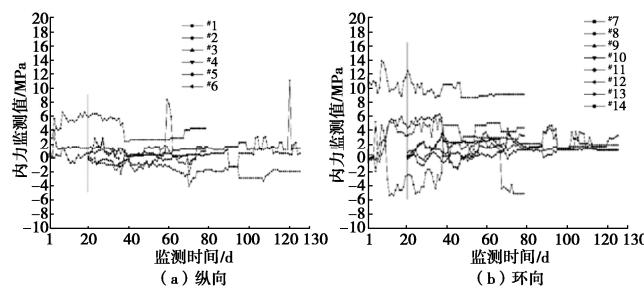


图 4 钢筋计监测数据变化趋势图

Fig. 4 Variation trend of monitoring data of reinforcement stress

进一步整理数据还发现, 靠管节内侧的纵向钢筋计 (#3、#4、#6) 容易表现出受压的性质, 靠外侧的钢筋计 (#2、#5) 则表现为受拉性质, 这与以往的测试结果^[7]相近, 这表明, 内侧钢筋受力主要受管节顶部内力影响, 外侧钢筋受力则取决于左右两侧的内力。唯一不符合此规律的是#1 测点, 由于该测点位于管节底部, 靠近机头堆载, 与其他测点受力情况略有不同, 故可认为该因素对钢筋的受力具有一定的影响。

对于环向钢筋的受力方面, 各传感器在施工期间均表现出了受拉和受压两种状态, 四个侧面受力性质分布比较均匀, 但其数值变化情况则比较复杂, 缺乏规律性。由此表明, 环向钢筋受力水平受到地层性质、注浆参数、线路弯直等因素的影响, 在实际施工过程中, 这些因素都是随工程推进而不断变化的, 多种因素叠加作用下导致了环向钢筋受力不断波动的现象。

4 结 论

通过对陆翔路顶管工程监测数据的处理分析, 本研究总结的施工期顶管内力演化基本规律如下:

(1) 管节环向接触压力受注浆压力和土压力影响, 但管节本身不直接承受土压力, 而是注浆压力起控制作用。通过注浆能够有效减小管节受到的接触压力, 这种作用对顶部和底部最为明显, 而对左右两侧影响不大。顶部和底部的受力水平与实际工况有关, 并无直接的大小关系。

(2) 实际工程中, 纵筋受力性质受管节内力、内部堆载等因素的影响, 变化规律比较复杂。一般情况下认为, 管节内侧的纵向钢筋主要受顶部内力的影响, 容易表现出受压的性质, 外侧的纵筋主要受两侧内力的影响而更多地表现出受拉的性质。

(3) 环向钢筋在施工期可以表现出受拉、受压两种性质, 且在管节上的分布区域较为均匀。环向钢筋

的受力水平受到地层性质、注浆参数、线路弯直等多种因素的影响, 这些因素的叠加作用会导致受力不断波动的现象, 规律性较差。

参考文献:

- 1] 陈良杰. 明挖隧道施工与运营安全分析及监测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (CHEN Liang-jie. Study on Safety Analysis and Monitoring System of Open Cut Tunnel in Construction and Operation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese))
- 2] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (ZHANG Xue-chan. Behavior of Narrow-Deep Excavation in Soft Clay Ground[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- 3] BROWNJOHN J M W. Structural health monitoring of civil infrastructure[J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 589 – 622.
- 4] 欧孝夺, 吴红营, 黄颂扬, 等. 超大断面箱形明挖隧道施工监测与力学特性分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 133 – 140. (OU Xiao-duo, WU Hong-ying, HUANG Song-ying, et al. Construction monitoring and mechanical property analysis for open-excavated box tunnel with super large cross-section[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 133 – 140. (in Chinese))
- 5] 雷江松, 王利明, 周建军, 等. 基于时间序列双护盾? TBM? 隧道管片结构内力监测分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 62 – 66. (LEI Jiang-song, WANG Li-ming, ZHOU Jian-jun, et al. Internal force monitoring and analysis of TBM tunnel segment structure based on time series[J]. Modern Urban Transit, 2019(7): 62 – 66. (in Chinese))
- 6] 王承德. 顶进管道受力分析[J]. 特种结构, 2006, 23(4): 87 – 89. (WANG Cheng-de. The mechanics analysis of Pipe jacking[J]. Special Structures, 2006, 23(4): 87 – 89. (in Chinese))
- 7] 魏纲, 徐日庆, 余剑英, 等. 顶管施工中管道受力性能的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1273 – 1277. (WEI Gang, XU Ri-qing, YU Jian-ying, et al. Site-based experimental study on pipe behavior during pipe jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1273 – 1277. (in Chinese))