

DOI: 10.7672/sgjs2025070012

土压平衡盾构施工诱发的地层及 邻近建筑变形特征分析*

万传真

(中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750)

[摘要] 土压平衡盾构是软土地层中地铁隧道施工最常用的施工工艺, 相关研究已经取得了丰富成果, 但目前依旧难以完全规避对地层的扰动, 其主要原因为缺乏有效的监测数据。为了分析土压平衡盾构施工引起的地表、地层内部以及邻近建筑的变形规律, 基于济南地铁 4 号线, 针对地表沉降、地层内部的竖向及水平变形均进行了现场监测分析, 同时监测记录了沿线建筑物的沉降变形。结果表明: 济南地铁 4 号线施工过程中隧道上方地表最大沉降范围介于 5~120mm, 其中多数介于 20~60mm。大多数地表沉降监测数据可用高斯函数拟合。隧道在黏土层中施工时沉降槽宽度参数 i 介于 0.4Z~0.6Z, 在砂层中施工时则小于 0.4Z。在土仓压力较大的区段中, 隧道中心以下深度处的土体向远离隧道方向变形。但对于隧道中心以上的土体, 均呈现出朝向隧道的变形。

[关键词] 地铁; 隧道; 盾构; 土压平衡; 沉降; 变形; 监测

[中图分类号] U231.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0012-07

Characteristics Analysis of Ground and Adjacent Building Deformation Induced by Earth Pressure Balance Shield Construction

WAN Chuanzhen

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: Earth pressure balance is the most commonly used construction process for underground tunneling in soft ground, and related research has achieved rich results, but it is still difficult to completely avoid the disturbance of the ground, mainly due to the lack of effective monitoring data. In order to analyse the deformation patterns of the ground surface, the inner strata and the adjacent buildings caused by the earth pressure balance shield construction, on-site monitoring and analysis were carried out based on Line 4 of Jinan Metro for the settlement of the ground surface, the vertical and horizontal deformation of the inner strata, and at the same time, monitoring and recording the settlement and deformation of the buildings along the line. The results show that during the construction of Jinan Metro Line 4, the maximum ground settlement above the tunnel ranges from 5 to 120mm, with most of them ranging from 20 to 60mm, and most of the surface settlement monitoring data can be fitted with Gaussian functions. The settlement channel width parameter i ranged from 0.4Z to 0.6Z for the tunnel construction in the clay layer, and was less than 0.4Z for the tunnel construction in the sand layer. In the section with high soil compartment forces, the soil below the centre of the tunnel was deformed in the direction away from the tunnel. However, for the soils above the centre of the tunnel, all show deformation towards the tunnel.

Keywords: subways; tunnels; shields; earth pressure balance (EPB); settlement; deformation; monitoring

* 中国铁建股份有限公司 2022 年度科技研究开发计划(2022-C1);

中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目(C2022-051)

[作者简介] 万传真, 工程师, 硕士, E-mail: proteus33@163.com

[收稿日期] 2024-12-23

0 引言

随着城市化进程的快速推进, 我国大中型城市人口也快速增长, 随之而来的是极大的城市出行压力。为了缓解地面交通压力, 越来越多的大型城市

开始广泛兴建地铁项目。其中土压平衡盾构常用于软土地层中的隧道开挖,但暗挖施工难免会造成地层变形并引发邻近建筑物沉降。

目前有关盾构施工引起的地层变形已经取得了丰富的研究成果,这些研究成果大多采用 Peck 拟合监测数据,同时采用数值模拟分析地层内部的变形。例如窦振涛等^[1]针对上软下硬地层中的盾构施工作用进行了分析,并采用 Peck 公式拟合了徐州地铁 3 号线施工期间的监测数据。汪壮壮等^[2]则采用数值模拟方法分析了地铁双线隧道施工时,双洞掘进之间的相互作用,并对双洞间距与沉降槽形状之间的关系进行了分析。杨令航^[3]则针对曲线段的盾构施工引发的地表沉降规律进行了现场监测,并基于此对 Peck 公式进行了修正。除此之外还有大量研究针对盾构施工引起的邻近桩基以及建筑变形进行了研究,从不同角度分析了盾构施工引起的地层内部变形以及桩的水平位移^[4-7]。这些研究充分说明了软土地层中的盾构施工对于邻近建筑存在一定程度的影响。然而对于地层内部的变形大多基于数值模拟,依旧缺乏试验数据以及现场监测数据。侯永茂等^[8]针对上海地铁某区间的土压平衡盾构施工进行了现场监测,并对土仓压力以及盾尾注浆压力等关键参数的作用进行了分析。鞠鑫^[9]则针对厦门地铁某区间的双线并行隧道施工进行了现场监测分析,同样研究了土仓压力等参数的作用规律。此外还有部分研究也针对不同地层类型下的盾构施工进行了监测分析,从沉降槽的形状特征以及沉降量的变化规律等各个方面进行了研究^[10-12]。这些研究成果进一步分析了盾构施工对地表沉降的影响规律,同时也强调了现场监测数据在盾构施工影响分析中的重要价值。但这些研究大多仅仅基于地表沉降进行了监测,对于地层内部的监测极少。

本研究针对软土地层中土压平衡盾构施工引起的地层变形以及邻近建筑沉降开展了大量现场监测分析。尤其对于盾构施工引起的地层内部竖

向以及水平变形,设置传感器进行监测。研究结果对于类似研究的数值模拟分析以及理论分析均具有较好的参考价值。

1 工程概况

1.1 项目概况

济南地铁 4 号线自小高庄站始发至彭家庄站结束,自西向东主要沿经十路走行,全长 40.2km。其中一期工程 7 工区总里程长 4.82km。本文选择洪山路—浆水泉段区间为研究区间。该区间长 479.391m,左右线间距为 13.0~15.2m,区间线路埋深为 13.66~20.24m。区间隧道采用盾构法施工,衬砌圆环内径 5 800mm,外径 6 400mm,衬砌混凝土强度等级 C50,厚度 300mm,环宽 1 500mm。隧道施工时所引起的地层损失和隧道周围地层受到扰动或剪切破坏后的再固结会造成地面沉降,形成沉降槽,对于邻近建筑物具有一定威胁性。

1.2 工程地质及水文情况

洪山路—浆水泉段区间研究区范围内地势平坦,地面标高 4.000~6.000m。根据地质资料,沿线发育第四纪地层,厚度达 20m 以上。在勘探深度范围内自上而下划分为①~④₂等 7 个工程地质单元层。研究区内隧道涉及的地层以黏土、砂土为主,隧道采用土压平衡盾构施工工艺。土压平衡式盾构掘进时,工作面压力为试推进 100m 后确定,工作面压力波动范围小于 0.01MPa。

1.3 沿线建筑分布

经十路为连接济南市东西向的主干道,车流量大、车速快,既有道路多次翻修,填土层较厚。且下部管线涉及给水、排水、电力、通信、信号、国防光缆等,种类众多。洪山路—浆水泉段区间下穿浆水泉路,为市政主干道,车流量大。区间沿线部分建筑物如表 1 所示,所调查的建筑物均采用桩基础,部分采用地下室+桩基础。

2 盾构施工诱发的地表位移

2.1 地表沉降

针对依托工程在隧道走向上每隔 50m 设置

表 1 沿线建筑物调查

Table 1 Questionnaire of buildings along the route				
建筑物名称	结构类型	层数	基础埋深/m	建造年份
精工伟业汽修厂	框架结构	地上 5 层	6.0	2002 年
济南环山汽车维修有限公司	框架结构	地上 5 层,局部 2 层	7.5	2000 年
济南环山汽车维修有限公司北侧居民楼	砖混结构	地上 7 层	13.0	2000 年
济南环山汽车维修有限公司南侧居民楼	砖混结构	地上 7 层,局部 3 层	10.0	2000 年
413 啤酒烧烤	砖混结构	地上 3 层	6.0	2000 年
卓越时代广场 1 号商务办公楼	框架结构	地上 16 层,地下 3 层	22.8	2010 年

了 1 个地表沉降监测点。监测结果显示,全线盾构施工过程中测得的沉降范围在 5~120mm,大多数测点测得的沉降值在 20~60mm(见图 1)。沉降值较大的范围出现在始发站附近的 13km 前后和中部 20km 处的层状地层区域,这两个区域的隧道均是在富水砂质地层中掘进。

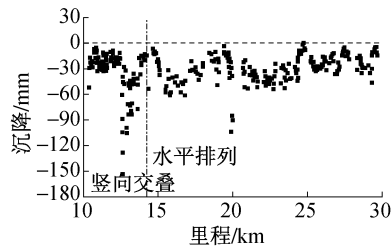


图 1 地铁沿线的最大地表沉降

Fig. 1 Maximum surface settlement along the metro line

部分研究针对富水砂质地层中土压平衡盾构 (EPB) 施工时地表沉降的影响因素。认为盾构施工过程中需要严格控制的关键因素是土仓压力^[8]。土仓压力在维持开挖面稳定性以及控制地表沉降中均起到了重要作用。因此针对基于施工过程中盾构机中控系统监测的施工参数数据,绘制了依托项目中观测到的地表沉降值与土仓压力之间的关系如图 2 所示。监测数据表明,土仓压力与地表沉降宏观上存在负相关性。其中在土仓压力较低时会出现较大的沉降,而在土仓压力非常高的情况下,地面甚至出现隆起。此外,图 2 还表明,当土仓压力较低(<100kPa)时往往地表沉降相对较大,但地层属性也存在显著影响。其中当隧道完全处于砂质地层中时,地表沉降与土仓压力之间关联性较强,但当隧道完全处于硬黏土中时,这种关联性相对减弱。

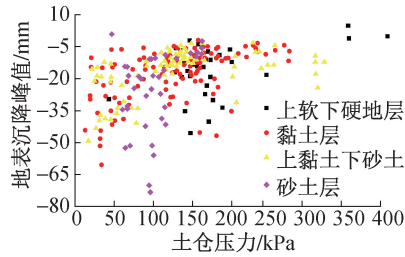


图 2 最大地表沉降与土仓之间的关系

Fig. 2 Relationship between maximum surface settlement and soil bin

除了隧道轴线上方的地表沉降,在依托工程中选择了 500m 作为研究区间,并每隔 10m 设置了 1 个监测断面用于监测地表沉降的横向分布。共计得到 50 组断面沉降数据,其中完整有效的沉降数据

共 39 组。得到的这部分沉降数据中有 19 组监测数据表明沉降槽可以较好地用高斯曲线拟合,如图 3、4 所示。根据拟合得到的沉降槽反算得到的隧道地层损失大多在 0.5%~2.5%。在部分土质较软的区段,反算得到的地层损失可达到 3.5%。而研究区间采用的盾构刀盘直径为 6.4m,管片直径为 6.2m,因此初始地层损失为 6%。可以发现理论值大于实测值的反算结果,这是由于盾尾同步注浆对盾尾间隙的填充效果,因此补充了一定的土体损失量。但是同样也反映了软土地层中依旧出现了较大的地层损失,并诱发了显著的沉降变形。

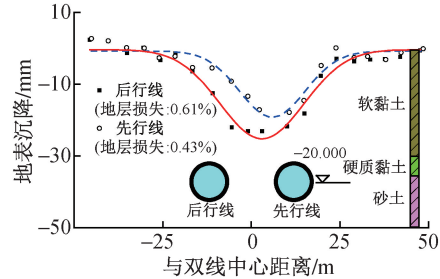


图 3 并排双隧道的地表沉降槽

Fig. 3 Surface settlement troughs in parallel twin-bore tunnels

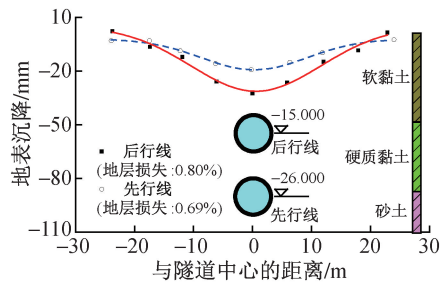


图 4 交叠隧道的地表沉降槽

Fig. 4 Surface settlement troughs in the overlapping tunnels

综合对比测得的沉降槽数据中那些形状并不严格遵循高斯函数的断面之后发现,这些监测断面处的隧道多位于建筑物附近或下穿立交桥桩基。即位于施工场地内的既有桩基影响了地层变形,导致沉降槽形状并不对称。例如如图 5 所示的断面,隧道从立交桥桩基之间通过,而桩基起到了隔离屏障的效果,导致隧道靠近桩基一侧的地面沉降值较大但沉降分布范围较小。

地铁隧道往往以双线的形式建设,因此地铁隧道盾构施工时,地表沉降峰值通常发生在先行线轴线上。而对于间距较小的双线隧道,一旦在该区段进行了第 2 条隧道的开挖,则沉降槽宽度会扩大并向后行隧道方向偏移,但依旧呈现高斯分布。研

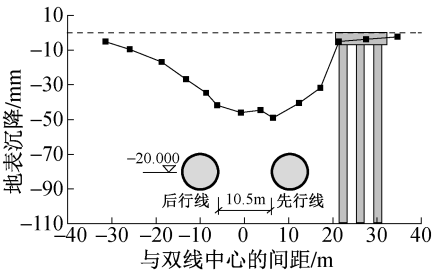


图 5 桩基对沉降槽的影响

Fig. 5 Effect of pile foundation on sinkhole

究区间观察到的这种变形行为与文献[13]研究得到的情况一致。在这种情况下,双线隧道的沉降槽可以用平移后的修正高斯函数来描述:

$$\delta = \delta_{\max} \exp \left[-\frac{(x - a)^2}{2i^2} \right] \tag{1}$$

式中: δ 为与高斯曲线峰值点相距 x 处的地表沉降; $\delta_{\max}$ 为测得的最大沉降(往往位于 $x = 0$ 处); x 为距高斯曲线峰值点处的水平距离; i 为从高斯曲线峰值点到拐点的距离; a 为高斯曲线峰值点到先行线中心水平距离。

对从济南地铁 4 号线测得的所有监测断面沉降数据进行分析发现,共在 24 个监测断面中观察到偏移参数 a 的范围 $0.03d \sim 0.58d$ (d 为双线隧道中心间距),其中 a/d 的平均值为 0.16。此外,在该项目中双线隧道分别施工观察到的沉降槽宽度为 6~12m,而对于双线隧道前后错开一定距离同时施工的沉降范围则为 10~17m。

因此针对沉降槽宽度数据按照 Peck (1969 年) 的预测方法进行了分析^[13]。对于单洞隧道进行施工的情况下, i/R 与 Z/D 的关系如图 6 所示。其中 R 为隧道半径, Z 为隧道埋深, D 为隧道直径。沉降槽宽度参数 i 是通过将监测到的地表沉降数据与高斯函数拟合得到的。数据表明,大部分数据点位于地下水位以下的砂土层区域,而非“黏土”区域。这表明在使用土压平衡盾构技术进行济南地铁 4 号线隧道开挖时,实测沉降槽的宽度往往比 Peck 公式的建议值要宽。

沉降槽宽度参数 i 与隧道埋深 Z 之间的关系如图 7 所示。其中大部分数据点显示硬质黏土层及软黏土层中的隧道 i 值在 $0.5Z \sim 0.6Z$,而砂土层中的隧道 i 值小于 $0.4Z$,这与文献[14]的结论基本一致。

2.2 地表以下土层变形

为了分析隧道开挖引起的上覆地层内部的变形情况,在隧道轴线上方的部分断面安装了钻孔伸缩位移计和倾斜计来监测地层内部的土体位移。

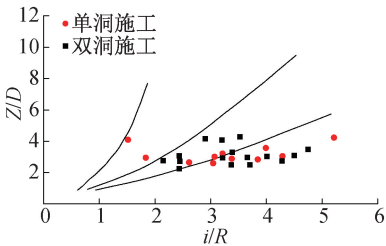


图 6 根据 Peck 公式绘制的 Z/D 与 i/R 的关系

Fig. 6 Z/D plotted against i/R according to Peck's equation

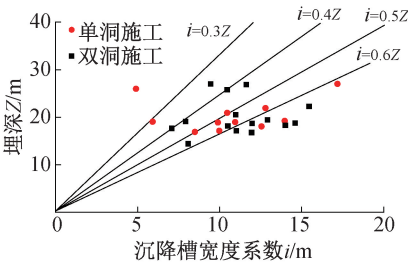


图 7 沉降槽宽度参数与埋深之间的关系

Fig. 7 Relationship between sinkhole width parameter and burial depth

监测传感器的布置如图 8 所示,位移计间距为 2m,隧道一侧的位移计与隧道中心间距 3~6m。

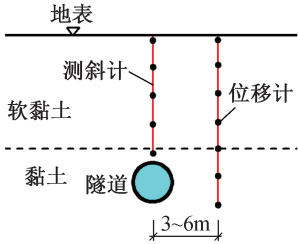


图 8 地层变形监测设备设置

Fig. 8 Monitoring equipment setup

1) 地层竖向变形

对于隧道轴线上方的地层,测得的地层竖向变形如图 9 所示,其中正值为隆起,负值为沉降。监测结果表明,隧道开挖后上覆地层的竖向变形随着深度靠近隧道顶部而逐渐增大。而对于隧道一侧的土体,监测数据表明竖向位移较大的区域集中在软黏土层,尤其是接近下方硬质黏土层交界处附近的位置(见图 10)。而在某些区段,隧道埋深处以下甚至监测到微量隆起变形。

借助埋置的监测传感器对盾构隧道开挖的长期地层变形行为进行了研究。监测了刀盘到达监测断面前后一定时长范围内的地层变形数据,如图 11 所示,图中刀盘到达监测断面的时间为第 12 天。地层竖向变形监测数据显示,在盾构刀盘通过后,

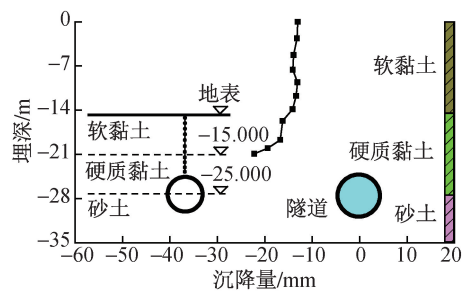


图 9 隧道中线上方的地层沉降

Fig. 9 Ground settlement above the tunnel

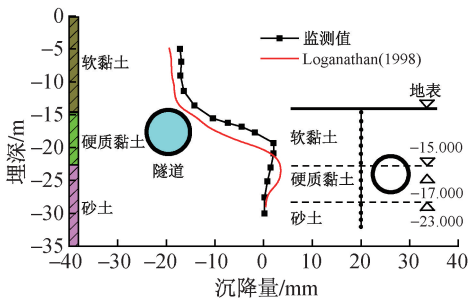


图 10 隧道一侧的地层沉降

Fig. 10 Ground settlement on one side of the tunnel

地层中部分测点沉降量呈现逐渐增加的现象。这是由于盾构隧道开挖引起的黏土层再固结效应。在某些情况下,黏土层中的沉降值在 3~4 个月内的增量几乎达到短期沉降的 30%(见图 11)。而在隧道顶部附近的土层中,长期沉降增加不显著,部分甚至出现恢复,这是由于距离隧道更近的区域更容易受到盾尾注浆的影响^[15]。

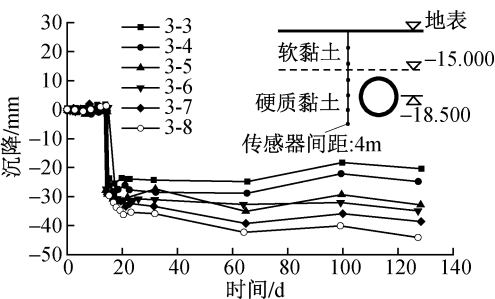


图 11 地层沉降时间曲线

Fig. 11 Subsurface settlement over time

2) 地层水平位移

在 12 个不同断面位置针对隧道一侧的地层横向位移进行了监测。监测传感器设置在隧道管片 0.20~2.6m 的范围内。大多数监测结果表明,地层的水平向变形均呈现出相似的模式,可以分为两个不同的深度区域,即隧道轴线埋深以上和以下(见图 12)。在隧道埋深以上,地层朝向隧道一侧产生横向变形,这主要是由于地层变形此时是以地层损

失引起的变形量为主导。位移峰值集中在软黏土层的下部区域,该区域内的水平位移随着刀盘通过直到盾尾到达呈现持续增大。

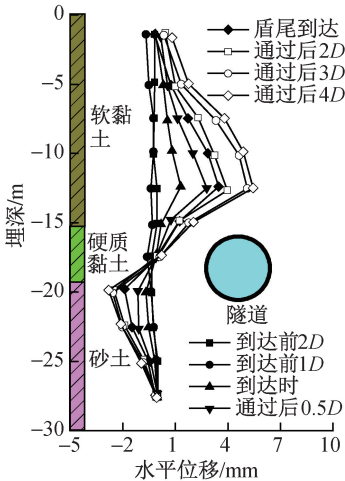


图 12 土仓压力较大时隧道一侧土体横向位移

Fig. 12 Lateral soil displacement on one side of the tunnel at high soil bin pressure

而在隧道埋深以下的区域,地层水平位移则呈现出两种不同模式。通常情况下如图 13 所示,可以观察到隧道附近地层出现朝向隧道一侧的位移。然而,在少数土仓压力较大的区段,此深度区域的地层在盾构通过时发生了朝向远离隧道一侧的位移,如图 12 所示。这主要是在隧道埋深以下的位置,地层损失产生的变形分量较小,因此地层的最终变形更易受到较大的土仓压力影响。但在盾构尾部通过后,这种变形不再增加。而这证明了土压平衡盾构施工时土仓压力在部分软土地层中的影响规律。

部分研究成果针对软土地层中盾构施工引起的地层变形进行了研究。这些研究成果基于不同研究方法,包括经验方法^[15]和数值方法^[4-5]。在经验方法方面,Loganathan 等^[15]的方法通常能够合理地描述单隧道和双隧道情况下的地层变形模式,且与实测数据基本一致。通过反算得出的间隙参数 g 在 20~60mm 范围内,Verruijt 等^[16]提出的方法也能够提供合理的预测。这些研究成果中针对地层内部的水平变形预测结果与本研究得到的监测数据呈现出的规律基本一致(见图 13)。

然而,在土仓压力较高的施工区段,这两种经验方法却未能对地层变形进行合理的预测。由于土仓压力较高的区段产生的土层水平位移大多呈现出远离隧道的变化,因此经验方法的预测情况与实际观测值存在较大偏差。

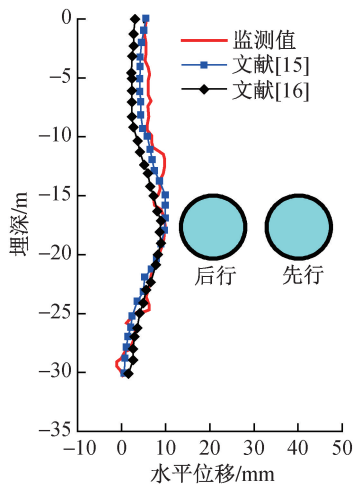


图 13 横向位移与预测值的比较

Fig. 13 Comparison of lateral displacements with predicted values

3 建筑响应

济南地铁 4 号线全线有 339 座建筑物和结构位于隧道施工的影响区域内。施工前对部分紧邻建筑的设计资料进行了调查,在盾构通过期间及之后,对这些建筑进行了长期观测。

目前大多数高层建筑均以桩作为基础结构,而根据建筑的大小及建造时期的不同,这些建筑使用的桩长度及尺寸均有所区别。其中沿线建筑物桩底的埋深可以分为如图 14 所示的 4 种类型:类型 1 为老旧建筑,桩长不超过 6m;类型 2 为 2~3 层的建筑物及商铺,桩长在 6~14m;类型 3 为 4~10 层的建筑物,桩长在 15~22m;类型 4 为超过 10 层的现代建筑或其他桩长超过 22m 的结构。

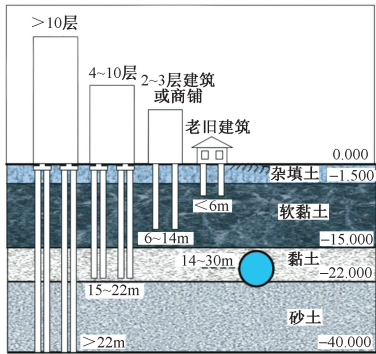


图 14 济南地铁 4 号线沿线建筑分类

Fig. 14 Classification of buildings along Jinan Metro Line 4

测得的所有监测数据中沉降值与桩隧间距以及建筑层数之间的关系如图 15,16 所示。这些数据表明建筑物的结构变形响应与桩隧间距及建筑高度之间存在一定关系。

监测数据表明,桩长较大的建筑物受隧道开挖

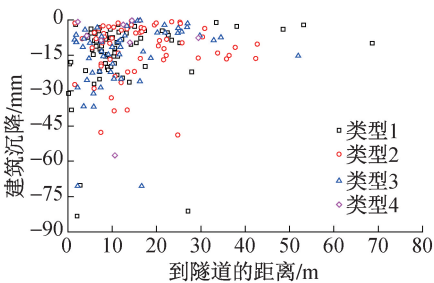


图 15 建筑沉降与建筑物与隧道距离的关系

Fig. 15 Relationship between building settlement and distance between building and tunnel

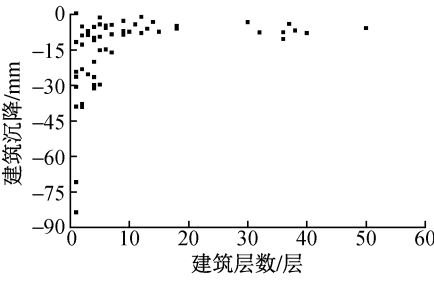


图 16 建筑沉降与建筑物楼层数的关系

Fig. 16 Relationship between building settlement and number of floors in a building

的影响较小(类型 4 的建筑物沉降<10mm)。而对于桩长较小的建筑物(类型 2 和 3),则沉降值偏大(最多可达 30mm)。而对于采用短桩的老旧建筑物(类型 1),部分建筑沉降值甚至超限。图 15 显示,部分位于隧道中心线 30m 内的建筑物记录到显著的建筑沉降(>20mm)。而 30m 范围内 4 种类型建筑的沉降差异证明了建筑基础深度对减少因隧道开挖引起的潜在结构影响的重要性。

基于监测数据计算了被测建筑的沉降差并以此推算了建筑物的倾斜量(沉降差/两个测点之间的距离)。最终发现被测建筑的倾斜值均小于 1:1 000(0.001),并未超过安全限值。根据相关研究,砖石类建筑的最大倾斜小于 1:500(0.002)且沉降小于 10mm,则可以忽略其损坏的风险。而济南地铁 4 号线施工过程中也并未出现由于盾构施工导致现有建筑物损坏的案例。部分安全范围内的损伤大多集中在 1~3 层的老旧建筑,这些建筑均采用短桩(可能桩尖位于软黏土层内)。此外,尽管部分建筑桩基与隧道间距较小,但所有高层建筑均未因隧道开挖而受损。

4 结语

监测结果表明济南地铁 4 号线施工过程中隧道上方地表最大沉降范围介于 5~120mm,其中多数介于 20~60mm。大多数地表沉降监测数据可用高斯

函数拟合。隧道在黏土层中施工时沉降槽宽度参数 i 介于 $0.4Z \sim 0.6Z$, 在砂层中施工时则小于 $0.4Z$ 。

在土仓压力较大的区段中,隧道中心以下深度处的土体向远离隧道的方向变形。但对于隧道中心以上的土体,均呈现出朝向隧道的变形。一般来说,观察到的地层沉降及水平位移均可以通过 Verruijt 模型以及 Loganathan 模型进行预测。但在高土仓压力区段,当地层发生远离隧道的横向位移时,这些模型的预测效果降低。

建筑物的沉降与建筑物的高度(基础桩的深度)以及桩隧间距均呈现相关性。但对于层高较小的建筑物,即使存在沉降差但建筑倾斜依旧小于安全限值。

参考文献:

[1] 窦振涛,陈拓,宋倩倩,等. 复合地层盾构施工地层参数对地表沉降的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (S1): 404-414.

DOU Z T, CHEN T, SONG Q Q, et al. Analysis of the influence of ground parameters on ground settlement during shield construction in composite strata [J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61 (S1): 404-414.

[2] 汪壮壮,汪学清,杨晶晶,等. 双线盾构施工地面沉降槽形状判别数值研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (10): 51-58.

WANG Z Z, WANG X Q, YANG J J, et al. Numerical study on shape discrimination of land subsidence groove during double-line shield construction [J]. Urban mass transit, 2024, 27 (10): 51-58.

[3] 杨令航. 基于小半径曲线隧道盾构施工的 Peck 公式修正及其工程应用[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (4): 40-43, 50.

YANG L H. Peck formula modification of and engineering application in small radius curve shield tunneling construction [J]. Urban mass transit, 2024, 27 (4): 40-43, 50.

[4] YAN B, WANG R, WANG Y. Deformation of adjacent buildings and ground settlement induced by shield construction of three-line small-spacing tunnels[J]. Alexandria engineering journal, 2023, 79: 237-251.

[5] WANG R, YAN B, WANG Y, et al. Prediction of adjacent single pile deformation induced by tunnel excavation based on the Pasternak model [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2024, 152: 105932.

[6] YAN B, WANG R, DING B S, et al. Numerical simulation analysis of tunnel backfill grout based on DEM-FDM coupling and particle inlet[J]. Underground space, 2024, 14: 285-299.

[7] WANG R, ZHANG B, WANG Y. Analysis of settlement induced by shield construction of the metro passing under existing buildings based on the finite difference method[J]. Geofluids, 2022 (1): 1206867.

[8] 侯永茂,郑宜枫,杨国祥,等. 超大直径土压平衡盾构施工对环境影响的现场监测研究[J]. 岩土力学, 2013, 34 (1): 235-242.

HOU Y M, ZHENG Y F, YANG G X, et al. Measurement and analysis of ground settlement due to EPB shield construction[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34 (1): 235-242.

[9] 鞠鑫. 双线地铁盾构施工引起的地表沉降分析及施工控制[J]. 铁道标准设计, 2019, 63 (8): 120-125, 139.

JU X. Analysis of ground settlement induced by twin-tube subway tunnel excavation and it' s construction control [J]. Railway standard design, 2019, 63 (8): 120-125, 139.

[10] 徐平,黄振磊. 富水砂卵石层盾构施工影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2024, 32 (5): 1787-1797.

XU P, HUANG Z L. Influencing factors and sensitivity analysis for shield construction in water-rich sandy cobble stratum[J]. Journal of engineering geology, 2024, 32 (5): 1787-1797.

[11] 崔光耀,麻建飞,宁茂权,等. 软弱地层超大矩形顶管盾构隧道近接施工加固方案优选研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (2): 178-184.

CUI G Y, MA J F, NING M Q, et al. A study on optimization of reinforcement scheme for adjacent construction of super-large rectangular pipe jacking shield tunnel in soft ground[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60 (2): 178-184.

[12] 李攸宜. 土岩复合地层中盾构隧道施工对地表沉降的影响因素[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56 (S1): 319-324.

LI Y Y. Research on the influencing factors of the double line shield tunnel construction on the surface settlement in the soil rock composite stratum [J]. Engineering journal of Wuhan University, 2023, 56 (S1): 319-324.

[13] NEW B M, BOWERS K H. Ground movement model validation at the Heathrow Express trial tunnel [M]. Boston: Springer US, 1994.

[14] O' REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kingdom—Their magnitude and prediction [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1983, 20 (1): A18.

[15] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998, 124 (9): 846-856.

[16] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane [J]. Géotechnique, 1996, 46 (4): 753-756.