

小曲率半径转弯隧道盾构施工扰动实测分析

潘泓^{1,2}, 苏文渊^{1,3}, 翟国林⁴, 曹洪^{1,2}, 骆冠勇^{1,2}

(1. 华南理工大学, 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学, 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
3. 广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060; 4. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510330)

摘要: 受规划及已建结构物的制约, 小曲率半径转弯盾构隧道的应用越来越广, 小曲率半径转弯隧道盾构施工对紧邻土体扰动有待研究。以广州 220 kV 犀牛站电缆隧道工程为背景, 通过动态监测小曲率半径转弯盾构施工引起土体分层沉降、水平位移、孔隙水压力的变化, 分析小曲率半径转弯隧道盾构掘进对紧邻土体的扰动规律。分析结果表明小曲率半径隧道转弯段盾构掘进过程中, 隧道侧边土体沉降及水平位移与直线段隧道有显著不同, 且会增加对周边环境的扰动, 应引起足够重视。隧道转弯段外侧土体的沉降规律与直线段隧道不同, 在盾体挤压作用下竖向离隧道较近的土层不是沉降最大的, 甚至可能产生隆起。转弯段土体的深层水平位移由两部分位移的叠加而成: 一是盾体通过过程中, 由于盾体挤压作用而产生的向外远离隧道的位移; 二是由于盾体转弯造成不对称变形, 转弯外侧挤压向隧道外位移, 转弯内侧卸载向隧道内位移。

关键词: 隧道工程; 盾构掘进; 土体变形; 孔隙水压力; 小曲率半径

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)04 - 1024 - 08

Soil disturbance induced by shield advancing through a small radius path

PAN Hong^{1,2}, SU Wenyuan^{1,3}, ZHAI Guolin⁴, CAO Hong^{1,2}, LUO Guanyong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
3. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510060, China; 4. Guangzhou Metro Company, Guangzhou, Guangdong 510330, China)

Abstract: To avoid the disturbing to the existing underground structures, shield advancing along a path with a small radius of curvature is sometimes inevitable. In this paper, the site observation data, the vertical and horizontal deformation and the pore water pressure of soils around the tunnel, were presented and analyzed when a shield advancing through a path with the radius of curvature being 118 m. It was found that the soil deformation mode was very different from those observed in the case of straight path. The soil around the tunnel on the outside of the curve was squeezed and moved upward and the horizontal displacement of soil around the tunnel consists of two parts. One part was induced by the squeezing effect, which was similar to that induced by shield advancing through a straight path, and the other part was from the turning action. The second part is nonsymmetrical. The soil on the outside of the curve moved away from the tunnel and the soil on the inside moved towards the center of the

收稿日期: 2016 - 07 - 13; **修回日期:** 2016 - 12 - 01

基金项目: 广东省科技计划项目(粤科函规财字[2015]1303 号 x2tjB2160460); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室研究课题(2015ZC16); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(Z015013)

Supported by the Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China(Grant No. x2tjB2160460), State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology(Grant No. 2015ZC16) and Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences(Grant No. Z015013)

作者简介: 潘泓(1967 -), 男, 1996 年毕业于浙江大学岩土工程专业, 现任教授, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: hpan@scut.edu.cn。
通讯作者: 骆冠勇(1979 -), 男, 现任讲师。E-mail: luogy@scut.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0869

tunnel. The superimposition of the deformation increased the risk and should be paid more attention.

Key words: tunneling engineering; tunneling advancing; soil deformation; pore water pressure; small curvature radius

1 引 言

地下盾构隧道在线路的选择上, 由于受规划及建、构筑物的制约, 如: 高层建筑的地下桩基、现有或者已规划的地下交通轨道等, 使得的隧道线形越来越复杂, 隧道部分区段曲率半径很小。从城市地下隧道的长远发展来看, 小曲率半径曲线隧道数量必将越来越多。如何控制地层变形以保证隧道周边结构物及管线的安全, 是设计和施工中必须考虑的问题。

现今, 国内外对盾构掘进过程中周边土体的扰动研究主要以直线段为主。贾 勇等^[1-5]通过对直线段隧道盾构掘进过程中周边土体的分层沉降和深层水平位移进行监测, 分析了土层的变形规律。王占生等^[6]在 R. J. Mair 等^[7]工作的基础上提出了中小直径盾构施工引起的地表下土体的水平变位和沉降变位的预测评估方法, 并与监测数据做了对比分析, 证明了该方法的可行性。魏 纲等^[8-9]也进行了这方面的工作。徐永福等^[10]对直线段隧道盾构掘进过程中周边土体的孔隙水压力和土压力进行监测, 根据土体应力状态变化分析了土体的扰动程度。蒋洪胜和侯学渊^[11]通过对直线段隧道盾构掘进穿越地下污水管道过程中周边土体位移以及孔隙水压力进行监测, 分析了盾构穿越交叠隧道过程中对周边土体的扰动规律。

对小曲率半径转弯盾构隧道的研究, 徐 辉等^[12-13]从盾构机机械特性角度介绍如何实现和控制小曲率半径转弯。黄雪梅和钱 新^[14]介绍了 300 m 小曲率半径盾构下穿现有铁路时的施工措施。

小曲率半径转弯盾构隧道施工过程中势必对邻近的土体及管线等设施扰动较大, 这也是小曲率半径转弯盾构隧道设计、施工中极为关注的关键点, 但目前对于小曲率半径转弯盾构施工对土体扰动的研究较少, 且一般情况下所做的现场实测工作目的的主要为了监测分析评估对周边建筑物、管线等设施的影响, 因此测点一般更接近上述设施而非接近盾构隧道, 对紧邻盾构土体的现场实测研究很少, 缺少相关现场数据及分析研究。

此外, 盾构法小曲率半径转弯, 一般都指半径

为 350 m(小半径)的或者比 350 m 更小(超小半径)的转弯施工, 选取曲率半径尽可能小的转弯隧道进行研究, 更能体现小曲率半径转弯的特点, 可深入揭示对其土体扰动的特性。

本文选取一转弯半径仅为 118 m 的盾构隧道工程, 并且为揭示紧邻盾构土体的扰动情况, 监测测点紧邻隧道外侧埋设, 最近测点距盾构机外侧不足 30 cm, 实测所得隧道邻近土体分层沉降、深层水平位移、孔隙水压力的数据, 并将其与直线段隧道数据进行比较, 分析其规律和特征, 揭示盾构转弯引起土体变形机制, 为分析评价小曲率半径转弯隧道盾构施工对周围土体的扰动及邻近建筑物、地下设施的安全提供参考。

2 工程概况及监测方案

广州市 220 kV 犀牛站电缆隧道长约 3 975 m, 采用盾构法施工, 穿越沿线路面交通繁忙, 地下管线密布, 地表建筑群密集, 在部分区段邻近高架桥或过街天桥桩基区。选取其曲率半径最小的区段进行现场科研测试, 此区段的曲率半径为 118 m, 区段长度约 200 m, 此区段的隧道埋深为 7.9 m, 隧道结构外径为 4.1 m, 如图 1 所示。

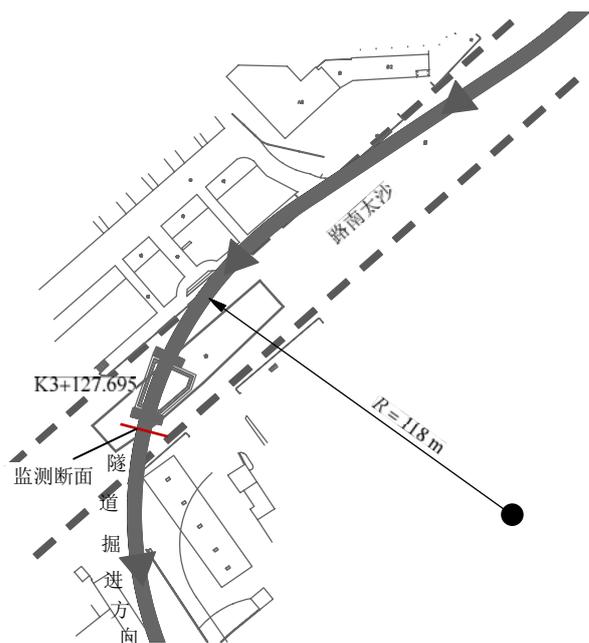


图 1 转弯段监测断面的位置

Fig.1 Location of the monitoring section

2.1 地质概况

监测断面所在地层纵断面如图 2 所示，其各土层物理力学指标见表 1。地下水位埋深 2.0 m。

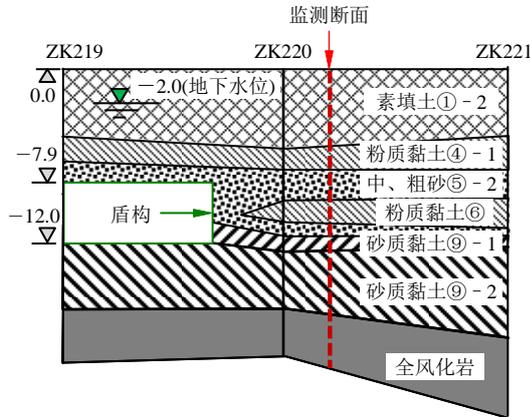


图 2 监测断面地层纵剖面(单位: m)

Fig.2 Longitudinal soil profile of the monitoring section (unit: m)

表 1 试验段土层物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers for the monitoring sections

层序	岩土层名称	层底深 度/m	天然重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	直接快剪	
					黏聚力 c/kPa	内摩擦 角φ/(°)
①-2	素填土	4.6	18.5	0.75	20.0	18.3
④-1	粉质黏土	7.0	17.7	1.02	18.4	14.7
⑤-2	中、粗砂	9.0	19.5	-	0.0	32.0
⑥	粉质黏土	11.0	19.1	0.72	16.7	15.8
⑨-1	砂质黏土	12.5	18.1	0.92	17.8	22.1
⑨-2	砂质黏土	18.5	18.1	0.87	18.1	23.6

2.2 监测方案

现场监测点布置如图 3 所示。测点符号 FC, CX, KY 分别代表土体分层沉降、土体水平位移、孔隙水压力测点。测点 FC3 和 CX2 所在断面称为

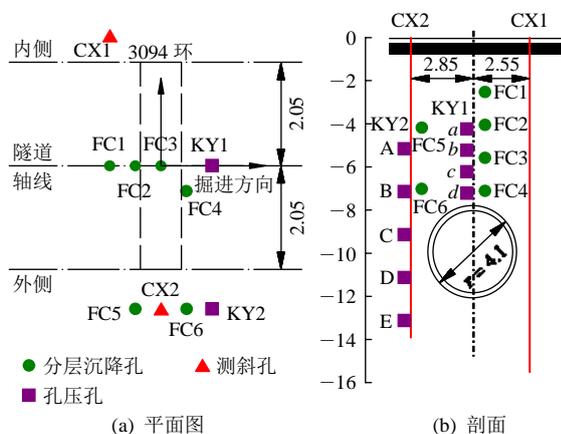


图 3 转弯段监测点布置图(单位: m)

Fig.3 Layouts of the monitoring instruments(unit: m)

监测断面，测试轴向范围从盾构刀盘距离监测断面 7 m 至刀盘通过监测断面 16 m。由于盾构施工转弯主要影响转弯外侧土体，且实测现场位于城市主干道上，开展科研的场地极为有限，因此主要测点布置在隧道轴线上及转弯外侧，转弯内侧仅能布设少量必要的测点。

为尽可能测得紧邻盾构机处的土体扰动的情况，测点设置时尽量靠近隧道，距离隧道最近的测点：水平位移 CX1 距盾构机外侧水平距离仅 0.38 m，分层沉降 FC4 及孔压 KY1 - d 距隧道顶垂直距离仅 0.28 m。隧道轴线上，分层沉降各测点间距离为 1.5 m，孔压各测点间的距离为 1.0 m，而隧道外侧，上述距离则分别为 3.0 和 2.0 m。

分层沉降测点主要布置在隧道轴线及隧道外侧，隧道外侧测点位置既要靠近盾构机外侧，又要避免盾构机小曲率半径转弯通过时外切、盾构机姿态变化等因素破坏测点(本监测距盾构机最近的孔压等测点在刀盘到达时即被破坏)，因此布设在距离盾构机外侧 0.68 m 处，即与隧道轴线水平间距 2.85 m 处；在隧道轴线上布点尽可能密集但又要避免各测点相互影响，竖向每 1.5 m 布设一个测点，而在隧道外侧的有限测试空间由于同时还要布设水平位移等测点，分层沉降测点无法布设较多，因此竖向每 3 m 布设一个测点。

土体的分层沉降一般采用分层沉降仪来测量，采用该方法监测盾构掘进过程中土体的分层沉降有较大误差^[1]。其受测试者对探头到达感应磁环的判别及反应速度等人为因素的影响较大，测量精度一般为 1 cm，精度较低，无法准确反映土体的沉降情况。考虑到此项目为科研测试，故土体分层沉降测试通过在指定深度土层中埋设沉降板，通过水准仪加测微器和钢钢尺测量，该方法的测量精度可达 1 mm。同时，测斜也采用精度较高的进口 RST 测斜仪，测量精度为 0.2 mm。由于盾构施工过程中隧道周边土体沉降一般达 10 mm 或以上量级，而盾构转弯施工引起的土体水平位移也至少为 mm 量级，所以采取上述测试设备及测试方法，可满足本科测试精度的需要。

2.3 盾构掘进参数

工程选用海瑞克 M1586 土压平衡式盾构机进行隧道掘进，盾体外径为 4 340 mm，机身长度为 10 m。管片拼装位置在刀盘后 8 m 处，新拼装的管片在 2 m 之后完全脱出盾尾。盾体采用双铰接形式，即前体和中体间为主动铰接，中体和尾盾间为被动

铰接，通过 2 个铰接来满足盾构小转弯能力的要求。监测区间盾构主要掘进参数如图 4 所示，横轴为刀盘至监测断面距离，负值表示未到达监测断面，正值表示已通过监测断面(以下同)。从图 4 中可以看出，盾构施工参数有一定波动，平均的推进速度、盾构推力、土仓压力和注浆压力分别为约为 3.0 m/h，5 MN，90 kPa 和 2 MPa。

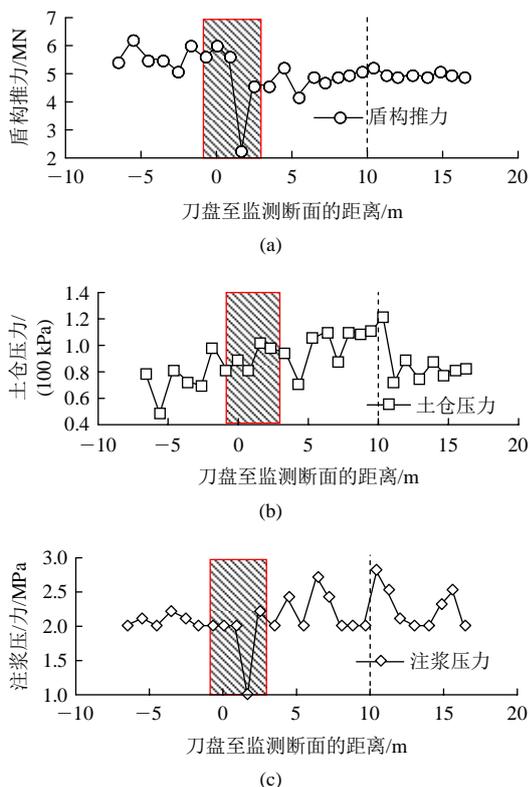


图 4 盾构掘进参数

Fig.4 Shield advancing parameters

3 小曲率半径隧道转弯段盾构掘进现场监测分析

根据盾构施工引起土体变形机制的不同，K. M. Lee 等^[15]将盾构施工周围土体的扰动分为 5 个阶段：

(1) 切口到达前。切口压力导致切口前方土体变形，当切口压力较大时，前方土体隆起；否则土体沉降。对于盾构掘进参数而言，此阶段对土体的扰动主要由土仓压力及盾构推力引起。(2) 盾构通过。由于盾壳与土体接触面积大，盾壳与土体摩擦力将引起地层剪切变形。(3) 盾尾闭合。由于盾尾建筑空隙的存在导致土体损失引起较大的地表沉降，而盾尾注浆则为填充盾尾空隙、控制地表沉降的措施。在此阶段对土体扰动的主要盾构掘进参数为注浆压力。(4) 浆液及扰动土体固结。其本质相当于土体

损失随时间增加导致地层沉降。(5) 扰动土体次固结。扰动土体，特别是灵敏土体，扰动固结导致长期沉降。因本文主要研究盾构通过阶段对土体的扰动影响，所以此处实测数据主要集中在前面的 3 个阶段。

3.1 土体分层沉降监测

土体分层沉降与盾构机刀盘至监测断面距离之间的关系如图 5 所示。纵轴为土体沉降量，正值表示土体隆起，负值表示土体沉降。

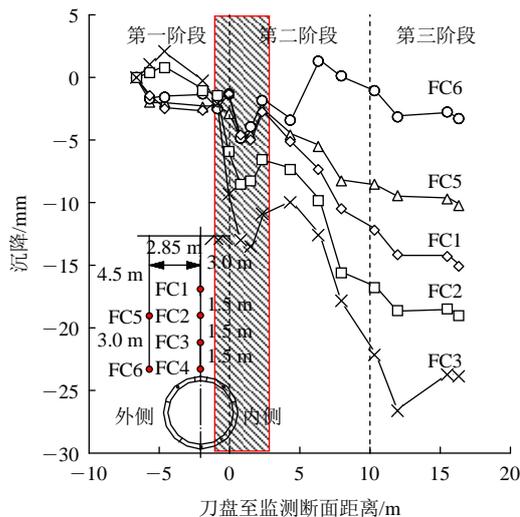


图 5 土体分层沉降

Fig.5 Soil vertical settlement at different depths

(1) 隧道轴线正上方土体

测点 FC1~FC3(FC4 失效)在第一阶段沉降量不大，在第二、第三阶段总体表现为持续的沉降，最终趋于稳定。在此期间，较深测点 FC3 沉降量最大，较浅测点 FC1 沉降量最小。由此可见，隧道正上方土体的沉降规律与直线段隧道类似，总体表现为土体被开挖应力释放引发的持续沉降，距隧道顶越近的土层受扰动最大，沉降也大。这与直线段隧道观测得出的土体沉降规律基本一致^[2]。

盾构掘进对周边土体产生扰动影响的主要施工参数包括土仓压力，盾构推力及注浆压力等。在切口到达监测断面前的第一阶段，由于盾构掘进参数基本保持平稳(见图 4)，土体的变形响应也相对平稳，总体量级也较小，在 ±2 mm 之内。在 x = -5 m 附近土仓压力和推进速度出现较明显波动，但由于距离监测断面相对较远，土层虽有响应但不大。

当刀盘处于距监测断面 -1~3 m 的范围内(见图 5 中阴影部分)，各测点均表现出不同程度的沉降。其中 FC3 的沉降最大，达 13 mm，FC2 次之，

为 8 mm，其他各点的沉降在 4~5 mm。此变形应由盾构推力减少引起切口压力降低所致。由图 4 可知，盾构推力先减少后增大，由 6.0 MN 减少至 2.1 MN，然后回升至 5.0 MN。土仓压力变化相对平稳，呈上升势，由 80 kPa 升至 100 kPa。盾构推力主要由盾体与土体的摩擦力和切口阻力所平衡。在盾构掘进的上述 4 m 长度范围内土层基本未变化，盾体与土体的摩擦力应该变化不大；又因为盾构推力的减少远大于土仓压力的增加，所以盾构推力减少导致整个切口压力(含土仓压力)减少，从而导致地层发生较大的沉降。后期推力恢复，各测点又回升隆起。在此范围内，盾尾注浆压力虽然变化也较大，但因为盾尾注浆管的位置距监测断面达 5~9 m，其影响有限。

随着盾构的推进，切口压力的影响逐渐式微，盾体通过时剪切扰动的影响逐渐显著，除 FC6 测点外，其他各测点主要表现为持续的沉降。FC6 有一明显的上抬隆起段，系由盾构转弯挤压外侧土体造成的，这种挤压外侧效应在后文介绍的水平位移监测中亦有揭示。

刀盘通过 10 m 后，管片脱出盾尾，地层沉降进一步增加(见图 5 中横坐标 10~12 m 范围内)，随后不仅马上得到盾尾注浆的控制，而且对照图 4 可以看出，盾尾稍过监测断面时注浆压力恰好为一个峰值(从之前的平均 2 MPa 提升到 2.8 MPa 左右)，因此距离盾尾最近的测点 FC3 停止沉降转为出现抬升，其他 4 个测点(包括隧道轴线正上方的 FC1，FC2 及隧道轴线侧上方的 FC5，FC6)也基本停止之前的

沉降趋势(见图 5 中横坐标 12.0~16.5 m 范围内)。说明，在盾尾注浆作用下地层沉降趋于稳定。

以上实测数据也表明，对于某一盾构通过的土体断面而言，从盾构机刀盘邻近接近开始，至刀盘通过较少距离(盾壳仅通过少部分)的阶段内，地层沉降主要受盾构推力和土仓压力这 2 个施工参数的影响；管片脱出盾尾后，盾尾注浆压力对于地层沉降的控制非常重要，适当提高盾尾注浆压力对于减少地层沉降的发展极为有效。

(2) 隧道外侧土体

总体上看隧道外侧测点 FC5~FC6 的沉降量小于隧道轴线正上方测点 FC1~FC3。隧道外侧较浅测点 FC5 的沉降趋势与隧道正上方测点类似。隧道外侧较深测点 FC6 在第二阶段受盾体转弯段施工的挤压作用影响，产生隆起，而且监测期间的最终沉降量也比较浅测点 FC5 小。由此可见，隧道转弯段外侧土体，受盾体挤压作用的影响，竖向离隧道较近的土层不仅不是沉降最大的，甚至可能产生隆起。

3.2 土体水平位移监测

图 6 为盾构推进过程中距离监测断面不同距离时垂直于盾构推进方向的土体水平位移图，图 6(a)表示外侧测斜管 CX2，与隧道轴线距离 2.85 m，图 6(b)表示内侧测斜管 CX1，与隧道轴线距离 2.55 m。横轴正值表示向隧道方向变形，负值表示背向隧道变形。

各阶段内外侧土体的变形特征如下所述。

(1) 外侧土体

从图 6(a)可以看出：

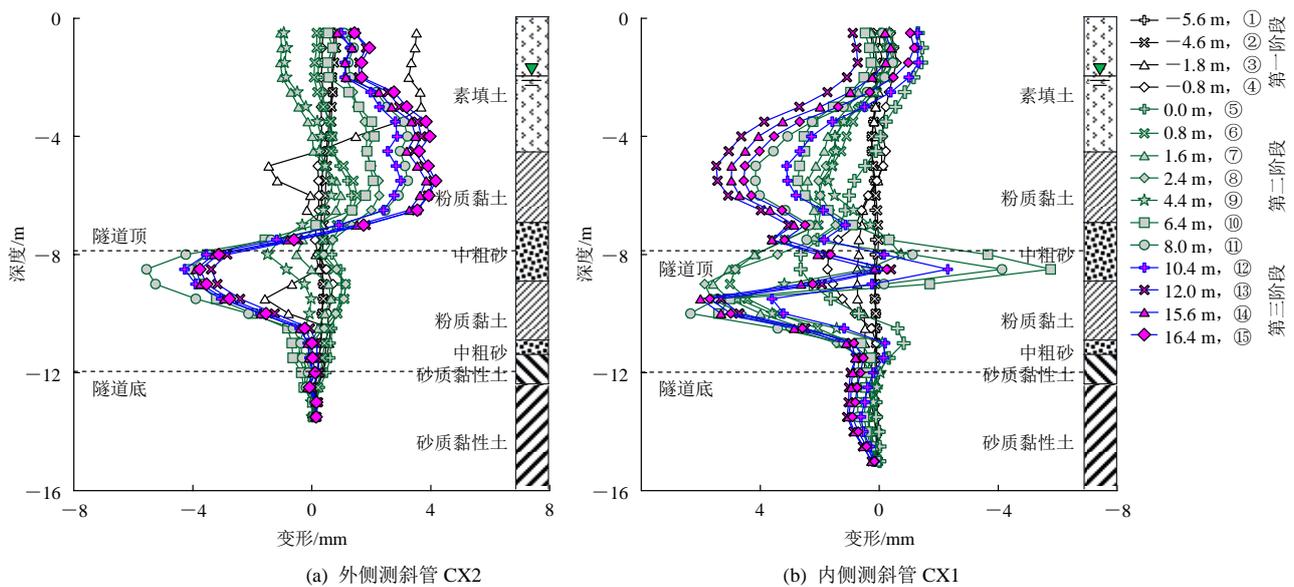


图 6 垂直于盾构推进方向的土体水平位移图

Fig.6 Soil horizontal displacement when shield advances through the monitoring section

① 土体的变形特征在隧道顶以上和隧道范围的土层明显不同。隧道以上的土层受隧道掘进过程中地层损失的影响, 水平位移主要表现为向隧道方向移动; 而隧道范围内的土体主要受隧道转弯过程挤压作用, 表现为向隧道外移动。此现象与其他直线盾构隧道施工所观察到的现象类似^[16]。

② 第一阶段, 隧道以上和隧道范围内的土体变形都很小, 大部分的变形都发生在后面 2 个阶段。第二阶段后半段(⑨, ⑩, ⑪曲线)的变形变化较大, 第三阶段相对平稳, 尤其是隧道范围内土体的变形。反映出转弯时盾体对土体的扰动剧烈, 而盾体脱出后, 对土体的扰动明显减少。

③ 隧道以上部分, 随着隧道掘进, 变形虽然有所反复, 但基本呈增加趋势。最大变形为 4.2 mm, 发生在第三阶段最后的⑮线, 高程位置在埋深 -5.5 m 处, 离隧道顶约半个洞径。

④ 隧道范围内的最大变形则发生在即将脱出盾尾的⑪曲线, 为 -5.6 mm, 高程位置在埋深 -8.5 m 处, 与隧道顶几乎同高, 仅比其高程低 0.6 m。第三阶段的变形有所减少, 且变的相对稳定, 最大的变形稳定在 -3.5 mm 左右。在均质土层隧道范围内土体的最大水平位移通常认为发生在隧道中部^[6, 8-9], 与此处的现象不符, 其原因可能是因为此处隧道范围内的土层非均质所致, 处于隧道中上部的砂层似乎更容易被扰动、强度变小。

⑤ 无论哪个阶段, 隧道下部 1 m 范围内的土体变形很小。主要因一般情况下盾构隧道周边土体最大的变形发生在盾肩处, 隧道下部土体的变形较小, 而且, 监测断面隧道下部的土体为砂质黏性土, 其刚度较大变形也会较小。

(2) 内侧土体

从图 6(b)看出, 与外侧土体类似之处为: 在隧道顶部以上和隧道范围内土体的变形表现明显不同; 隧道以上和隧道范围内的土体第一阶段的变形很小, 第二阶段的变形比较剧烈, 第三阶段的变形相对稳定; 隧道顶部以上的土体变形以向隧道内变形为主; 隧道下部 1 m 范围内的土体变形小; 隧道内上部土体总体有向隧道外变形的趋势等。

与外侧土体变形的不同之处在于隧道范围内中下部土体的变形: 与外侧侧向隧道外变形相反, 其总体表现为向隧道方向的变形, 最大的向内位移为 6.3 mm, 发生在即将脱出盾尾的⑪线, 高程位置在 -10 m 处, 即隧道中部。

注意到隧道范围内内侧上部位移与外侧位移趋

势基本相同(⑨曲线以后), 均往外变形。但中下部变形趋势内外侧相反, 导致隧道范围内土体的变形呈“之”字形变化。

另外, 内侧的变形总体比外侧略大, 原因可能在于内侧测斜管距离盾构机边约 0.38 m, 外侧测斜管距离盾构机边约 0.68 m, 内侧管的安装位置比外侧管更靠近隧道。综合内外侧的变形数据, 可以看出转弯段的土层的深层水平位移由两部分位移的叠加而成(见图 7): 一是盾体通过过程中, 由于盾体挤压作用而产生的向外的远离隧道的位移, 这部分的位移与直线段的位移模式基本相同; 二是由于盾体转弯造成不对称变形, 外侧挤压向隧道外, 内侧卸载向隧道内。而且从中可以, 由于掘进姿态和土层不均, 上述 2 种位移最大值的位置不一定相同。同时, 相对于直线段, 由于转弯段内侧额外增加了土体向隧道内的水平变形, 因此转弯段内侧土体沉降应较直线段更大; 但由于本项目位于交通流量很大的交通干道上, 受现场空间的严格限制, 在隧道转弯内侧仅能见缝插针布设测斜孔, 无法布设土体沉降等监测点, 对此可在以后的监测研究中加以验证。

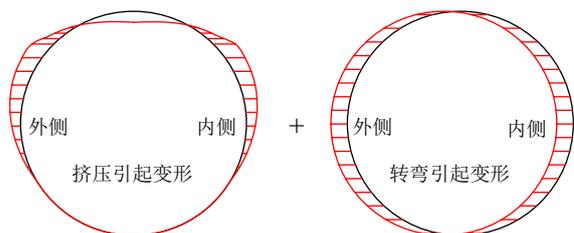


图 7 小曲率半径转弯段深层水平位移变形模式

Fig.7 Soil horizontal deformation patterns when shield advances through a small radius path

(3) 孔隙水压力监测

不同深度的测点超孔隙水压力随盾构机推进的变化情况, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 隧道正上方测点中, 点 c 变化幅值最大显著(由于点 d 在刀盘到达后被损毁, 因此点 c 实际为在刀盘到达后距盾构机最近的测点), 点 a 变化幅值最小。可知, 位于小曲率半径隧道转弯段正上方的土体, 距隧道顶越近的土体受盾构施工的扰动越大, 超孔隙水压力的变化也越显著。

在转弯段外侧, 隧道腰部以下的测点 D, E 两点的变化幅值较小, 位于挤压区的 B, C 两点的变化幅值较大。可知, 转弯段外侧挤压区土体的超孔隙水压力响应最明显, 挤压区以下区域土体超孔隙水压力变化不大。

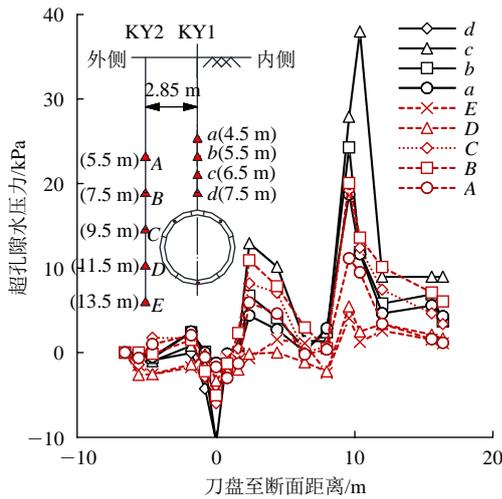


图8 超孔隙水压力

Fig.8 Excess pore water pressures

结合内外侧孔压监测结果可以看出，隧道正上方和转弯段外侧的土体超孔隙水压力对盾构施工的影响有4个明显阶段：① 刀盘临近前，产生较大的负超孔隙水压力。负孔压产生的原因是切口附近的土体向隧道内变形，引起地层沉降，越靠近隧道附近的深层土体沉降越大(见图5)，土体膨胀，而外围的水补给不及，从而产生负孔压。即刀盘切削土体对切口及附近土体产生卸荷作用，进而出现负孔压。② 自刀盘通过后开始至通过2.4 m期间，外侧土体受盾构机转弯段施工挤压作用的影响，孔隙水压力显著提高；③ 盾尾临近时，受注浆压力影响，孔隙水压力再次显著升高；④ 盾尾通过后，受盾尾空隙影响，孔隙水压力显著下降。

4 结论

通过对小曲率半径隧道转弯段盾构掘进过程进行现场监测分析，得出以下结论：

(1) 隧道正上方土体的沉降规律与直线段隧道类似；隧道转弯段外侧土体的沉降规律与直线段隧道不同，外侧土体，受盾体挤压作用的影响，竖向离隧道较近的土层不是沉降最大的，甚至可能产生隆起。

(2) 转弯段的土层的深层水平位移由两部分位移的叠加而成(见图5)：一是盾体通过过程中，由于盾体挤压作用而产生的向外的远离隧道的位移，这部分的位移与直线段的位移模式基本相同；二是由于盾体转弯造成不对称变形，转弯段外侧挤压向隧道以外变形，转弯段内侧卸载向隧道以内变形，这是转弯段所特有的特性。二部分位移叠加加大了对

周围土体的扰动。

(3) 隧道正上方和转弯段外侧的土体孔隙水压力对盾构施工的影响有4个明显阶段：① 刀盘临近前，产生较大的负超孔隙水压力；② 自刀盘通过后开始至通过2.4 m期间，外侧土体受盾构机转弯段施工挤压作用的影响，孔隙水压力显著提高；③ 盾尾临近时，受注浆压力影响，孔隙水压力再次显著升高；④ 盾尾通过后，受盾尾空隙影响，孔隙水压力显著下降。

(4) 小曲率半径转弯隧道盾构施工对转弯外侧土体挤压现象明显。这在土体分层沉降、水平位移以及孔隙水压力测试中均体现出来。

(5) 小曲率半径隧道转弯段盾构掘进过程中，隧道侧边土体沉降及水平位移与直线段隧道有显著不同，且会增加对周边环境的扰动，应予以重视。不过对于工程中较为关注的盾构小曲率半径转弯对邻近地下结构或设施的影响问题，从本测试研究来看，即使紧邻盾构机的土体，其水平位移也非常小，因此如果施工措施得当盾构小曲率半径转弯对邻近地下结构或设施的影响应可控制在可接受的范围内。

致谢 本科研项目得到广州轨道交通建设监理有限公司、中煤第三建设(集团)有限责任公司、广州供电局有限公司、广州市电力设计院等单位的大力支持，深表感谢。

参考文献(References):

[1] 贾勇. 盾构施工地层变形实测与三维数值模拟及参数分析[博士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2010.(JIA Yong. Ground deformation measurement and three-dimensional numerical simulation and parametric analysis by shield driven[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.(in Chinese))

[2] 姜忻良, 崔奕, 李园, 等. 天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1 612 - 1 616.(JIANG Xiliang, CUI Yi, LI Yuan, et al. Measurement and simulation of ground settlements of Tianjin subway shield tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1 612 - 1 616.(in Chinese))

[3] DIAS D, KASTNER R. Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields—Analysis of monitoring and numerical modeling results[J]. Engineering Geology, 2013, 152(2): 17 - 25.

[4] CHEN R P, ZHU J, LIU W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. Tunnelling and Underground

- Space Technology, 2011, 26(1): 163 - 171.
- [5] SUN Y, XU Y S, SHEN S L, et al. Field performance of underground structures during shield tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012; 28: 272 - 277.
- [6] 王占生, 王梦恕, 张 弥. 盾构隧道施工引起地表下土体变位的分析评估[J]. 岩土力学, 2009, 27(6): 1 699 - 1704.(WANG Zhansheng, WANG Mengshu, ZHANG Mi. Methods for estimating subsurface ground movements induced by shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 27(6): 1 699 - 1 704.(in Chinese))
- [7] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315 - 320.
- [8] 魏 纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 418 - 424.(WEI Gang. Prediction of ground deformation induced by shield tunneling construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 418 - 424.(in Chinese))
- [9] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 583 - 593.(LIANG Rongzhu, XIA Tangdai, LIN Cungang, et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 583 - 593.(in Chinese))
- [10] 徐永福, 陈建山, 傅德明. 盾构掘进对周围土体力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 174 - 1 179.(XU Yongfu, CHEN Jianshan, FU Deming. Effect of shield tunneling on mechanical properties of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 174 - 1 179.(in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 徐 辉. 铰接式盾构机的铰接与仿形刀应用[J]. 地下工程与隧道, 2003, (2): 41 - 44.(XU Hui. Application of articulation and copying tool in articulated shield[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2003, (2): 41 - 44.(in Chinese))
- [13] 陈大因, 郑学峰. 小曲率半径隧道盾构推进的轴线控制[J]. 城市道桥与防洪, 2009, (5): 132 - 133.(CHEN Danan, ZHENG Xuefeng. Axis control of shield driving in small curvature radius of tunnel[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2009, (5): 132 - 133.(in Chinese))
- [14] 黄雪梅, 钱 新. 小半径盾构隧道下穿多轨道铁路风险源的研究[J]. 地下工程与隧道, 2010, (3): 115 - 119.(HUANG Xuemei, QIAN Xin. Research of risk sources of shield tunneling in small radius for traversing below multitrack[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2010, (3): 115 - 119.(in Chinese))
- [15] LEE K M, JI H W, SHEN C K, et al. Ground response to the construction of Shanghai metro tunnel-line 2[J]. Soils and Foundation, 1999, 39(3): 113 - 134.
- [16] 唐晓武, 朱 季, 刘 维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 417 - 422.(TANG Xiaowu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 417 - 422.(in Chinese))