

双圆盾构隧道施工土体扰动特性及实测分析

孙统立^{1, 2}, 张庆贺^{1, 2}, 胡向东^{1, 2}, 朱继文³

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 上海市第二市政工程有限公司, 上海 200065)

摘要: 以上海轨道交通 6#线双圆盾构区间隧道工程为背景, 通过动态监测双圆盾构施工引起土体分层沉降、水平位移、孔隙水压变化、海鸥块背土挤土现象, 总结归纳双圆盾构掘进土体扰动的基本规律, 提出了双圆盾构施工土体扰动的区域性、时段性特征。

关键词: 隧道工程; 双圆盾构; 土体扰动; 孔隙水压力; 环境土工影响; 区域性时段性

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5950 - 06

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF SOIL DISTURBANCE CHARACTERISTICS INDUCED BY DOUBLE-O-TUBE SHIELD CONSTRUCTION

SUN Tong-li^{1, 2}, ZHANG Qing-he^{1, 2}, HU Xiang-dong^{1, 2}, ZHU Ji-wen³

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai No.2 Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Based on the construction of Shanghai metro line No.6, the horizontal displacement, layered settlement, variation of pore water pressure caused by the construction of double-o-tube(DOT) shield in soft clay region are monitored continuously. Furthermore, the soil disturbance above sea-gulled segment is analyzed. The essential rules of soil disturbance induced by DOT shield excavation are summarized quantitatively and the characteristics of regional and time-dependent of DOT shield are brought forward.

Key words: tunneling engineering; double-O-tube(DOT) shield; soil disturbance; pore water pressure; environmental influence of soil engineering; regional and time-dependent characteristics

1 引言

1990 年, 第一台水平双圆盾构(MF 型)应用于京叶线东京地下车站, 双圆区间隧道施工取得成功, 从而引发了日本隧道盾构掘进机的革命^[1]。第一台“水平三圆盾构”在大阪地铁 7#线新大阪副都中心车站的暗挖施工建设中的成功, 谱写了世界地铁建

设史的新篇章。上海地铁 6#及 8#线双圆盾构区间隧道的建设, 开创了我国“区间双圆隧道集约化盾构施工法”的新时代。双圆盾构隧道具有断面有效利用率高、对环境影响小、工程成本较低等众多优点, 在进行地下高速公路、地下商业街、地铁隧道和车站等工程施工中, 应用前景广阔。

所谓双圆盾构工法是指采用在同一平面上配置 2 个刀盘的双圆形加泥式土压平衡盾构机(double-

收稿日期: 2005 - 08 - 16; **修回日期:** 2005 - 10 - 28

作者简介: 孙统立(1978 -), 男, 2001 年毕业于河海大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事盾构隧道及地下工程设计、施工技术方面的研究工作。E-mail: tlsun@163.com。

O-tube, DOT)和在圆形断面连接相对位置上设置有“Y”形(海鸥块)接头管片来构筑双圆形隧道施工方法的总称^[2],如图1所示。双圆盾构工法在我国刚刚起步,人们对于双圆盾构施工引起的土体扰动、地层移动规律还缺乏足够的认识,需要进一步探索其规律性和积累实践经验。



图1 双圆盾构工法

Fig.1 DOT shield construction technology

2 双圆盾构掘进试验段现场监测分析

博兴路站—金桥路站—云山路站区间隧道工程是上海市轨道交通6#线一期工程的重要组成部分,隧道采用双圆盾构工法施工。本区间埋深中间深,两端浅,隧道底板高程-8.288~-12.492 m,顶板高程-2.288~-6.492 m。主要穿越土层为:③₂灰色粘质粉土夹粉质粘土层;③₃灰色淤泥质粉质粘土层;④灰色淤泥质粘土层。穿越土层物理力学指标见表1。

表1 云山路站—金桥路站区间隧道土层物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical indexes of soil strata

层序	土层名称	层底高程/m	含水量/%	孔隙比	直剪(峰值)		比贯入阻力/ P _s /MPa
					粘聚力 c/kPa	内摩擦角φ(°)	
③ ₂	灰色粘质粉土夹粉质粘土	-4.22	31.6	0.92	3	35.0	1.54
③ ₃	灰色淤泥质粉质粘土	-6.86	42.9	1.22	13	16.0	0.55
④	灰色淤泥质粘土	-14.74	50.9	1.45	14	11.0	0.50

选用由日本石川岛播磨重工业株式会社(IHI)制造的双圆形土压平衡盾构(φ 6.52 m×11.12 m)进行隧道掘进。其切削面呈眼镜型,两圆直径均为6 520 mm,中心距4 600 mm,切削面积58.37 m²。

选取试验段对双圆盾构施工过程中土体扰动特性进行了全过程监测。在纵向50 m范围内布置6个监测断面,依次为A-A, B-B, …, F-F断面。其中, A-A横剖面测点布置如图2所示。测点 FF1/CF1/

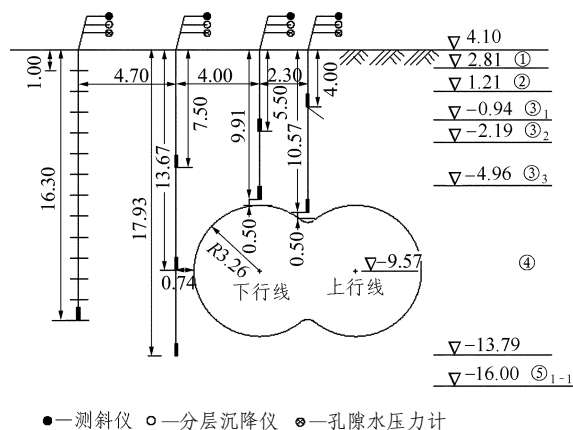


图2 测点横剖面布置图(A-A断面)(单位: m)

Fig.2 Transverse profile of monitoring point arrangement section(A-A)(unit: m)

KA1 中的第1, 2, 3个符号分别表示分层沉降/测斜/孔压、F-F/A-A断面、从中轴线向侧边依次编号。

2.1 土体分层沉降监测

盾构于2004年9月27日晚推进至工作井,于2004年10月7日晚出洞。试验段F-F断面隧道中心埋深约为13.31 m,上覆土层厚度约为10.05 m,盾构刀盘于10月18日6时到达F-F断面,于10月19日10时盾尾脱离该断面。该断面土舱压力P = 210 kPa,盾尾注浆量S = 6.8 m³/环,盾构掘进速度V = 30 mm/min。文中,对于沉降值“+”表示隆起,“-”表示沉降。

(1) 中轴线上部

FF1测孔位于隧道中轴线上部。由图3可见,盾构通过时,土体受到挤压,测管发生明显隆起,地面埋深0.519 m处隆起值为37.81 mm,测孔下端9.806 m处隆起值为42.81 mm;盾尾脱出后,测孔上端土体出现下沉,测孔下端由于盾尾注浆的影响,隆起值进一步增大至55.40 mm,至12月21日测孔上、下端土体沉降量分别为-22.40, 12.60 mm,固结沉降延续约3个月或更长。

(2) 下行线上部

FF2测孔位于隧道下行线上部偏右0.5 m处,由图4可见,盾尾刚脱出时土体隆起量达最大值,地面埋深0.542 m处隆起值为11.37 mm,测孔下端8.471 m处土体隆起值为17.37 mm;盾构通过后土体位移回弹,至12月21日测孔上、下端土体沉降量分别为-13.31, 7.69 mm。

(3) 下行线右侧

FF3测孔位于隧道下行线右侧0.74 m处。由图5可见,盾尾刚脱出时,地面埋深1.109 m处土

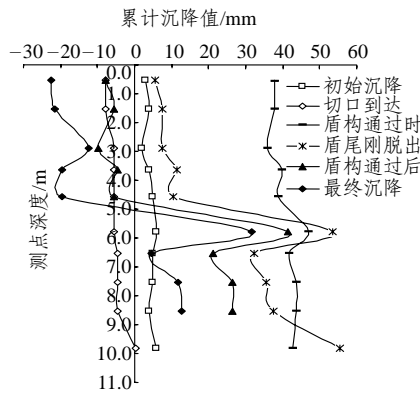


图3 FF1测孔分层沉降特征曲线

Fig.3 Characteristic curves of layered settlement for survey hole FF1

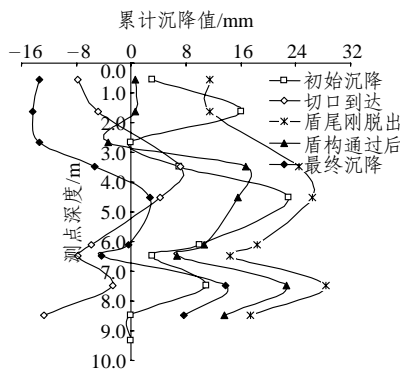


图4 FF2测孔分层沉降特征曲线

Fig.4 Characteristic curves of layered settlement for survey hole FF2

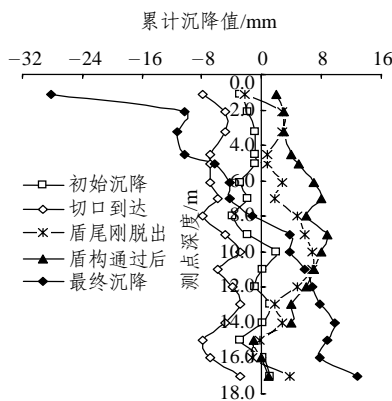


图5 FF3测孔分层沉降特征曲线

Fig.5 Characteristic curves of layered settlement for survey hole FF3

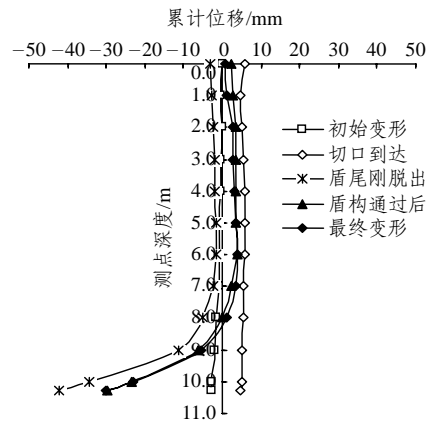
体沉降量为-2.2 mm，地面埋深 17.018 m 处土体稍有隆起 3.8 mm；盾构通过后，由于地层损失以及土体固结的影响，测孔上端土体出现较大沉降-28.23 mm。由于该断面盾尾注浆量过大(注浆率约为 1.6 L/min)，测孔下端土体最终隆起值为 12.77 mm。

2.2 土体水平位移监测

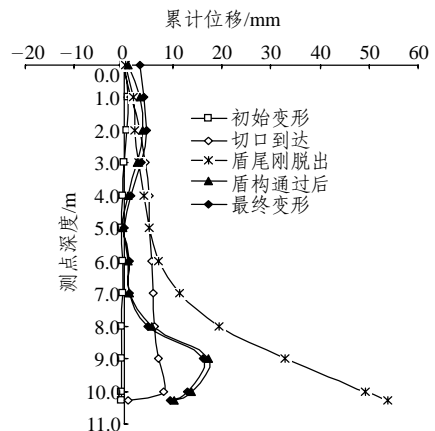
文中，水平位移正负号规定如下：在垂直于盾构推进方向，“+”表示沿着上行线向下行线方向的位移；沿着盾构推进方向，“+”表示沿着盾构推进方向位移，“-”则相反。

(1) 中轴线上部

CF1 测孔位于隧道中轴线上部。由图 6 可见：垂直于盾构推进方向，土体沿下行线向上行线方向位移，在盾尾脱出时达到最大值-42.01 mm。这是由于双圆盾构辐条式刀盘外旋，测孔安装时向上行线一侧偏斜造成的，在盾壳上部 2.0 m 范围内该挤土效应较明显；沿着盾构推进方向，由于盾壳与软粘土之间的粘附作用，测孔土体在盾尾脱出之前，沿着盾构推进方向发生较大位移，在盾壳上部 4.0 m 范围内该背土效应较为明显，最大位移达 53.87 mm；盾构通过后，测孔下端土体处于卸荷状态，位移回弹，在地面埋深 9.0 m 处测孔变形出现反弯点，测孔最下端位移稳定在 9.64 mm。



(a) CF1 测孔垂直于盾构推进方向土体位移



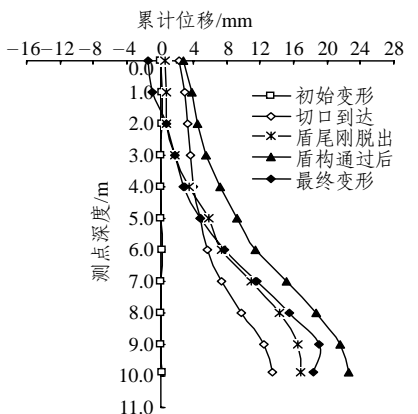
(b) CF1 测孔沿着盾构推进方向土体位移

图6 CF1测孔土体水平位移特征曲线

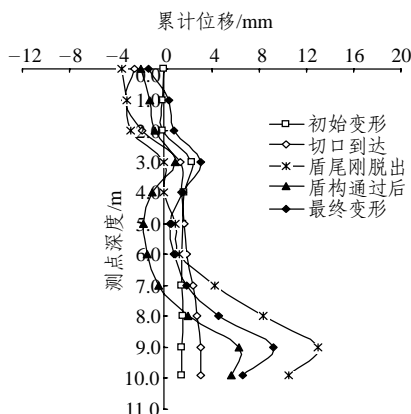
Fig.6 Horizontal displacement characteristic curves for survey hole CF1

(2) 下行线上部

CF2 测孔位于隧道下行线上部偏右 0.5 m 处, 由图 7 可见, 在垂直于盾构推进方向, 土体沿上行线向下行线方向的位移, 在盾尾脱出后达到最大值 16.82 mm; 沿着盾构推进方向, 土体表现出沿着盾构推进方向移动, 在地面埋深 9.0 m 处出现反弯点, 最大位移为 13.02 mm, 测孔最下端位移为 10.53 mm。



(a) CF2 测孔垂直于盾构推进方向土体位移



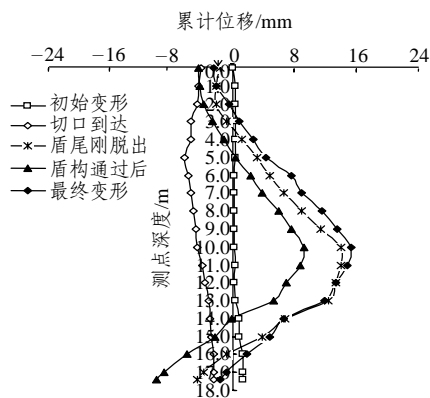
(b) CF2 测孔沿着盾构推进方向土体位移

图 7 CF2 测孔土体水平位移特征曲线

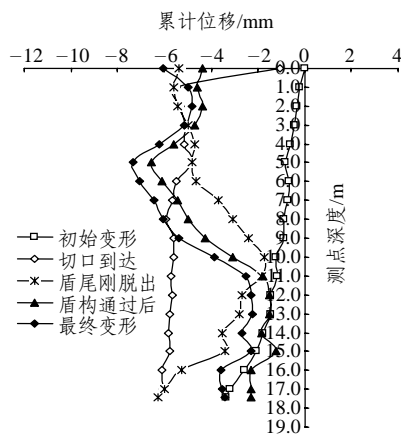
Fig.7 Horizontal displacement characteristic curves for survey hole CF2

(3) 下行线右侧

CF3 测孔位于隧道下行线右侧 0.74 m 处, 由图 8 可见, 在垂直于盾构推进方向, 土体沿着上行线向下行线方向移动, 盾尾脱出后位移量达到最大值 14.10 mm, 出现在拱顶位置, 盾壳挤土效应较为明显; 沿着盾构推进方向, 测孔上端土体表现出迎向盾构推进方向的负位移, 地面埋深 5.0 m 处, 位移量达到最大值 -7.36 mm, 测管变形曲线向后凸出, 这是由于隧道开挖土体应力释放造成的位移回弹。



(a) CF3 测孔垂直于盾构推进方向土体位移



(b) CF3 测孔沿着盾构推进方向土体位移

图 8 CF3 测孔土体水平位移特征曲线

Fig.8 Horizontal displacement characteristic curves for survey hole CF3

2.3 超孔隙水压力监测

图 9 为位于隧道中轴线上部的 KA1 测孔孔隙水压历时曲线。由各测点孔隙水压监测结果, 得出如下结论: (1) 随着盾构推进, 开挖面前方土体受到挤压, 孔隙水压力急剧升高, 盾尾脱出时达到最大值, 盾构通过该测点后孔隙水压力逐渐消散, 消散

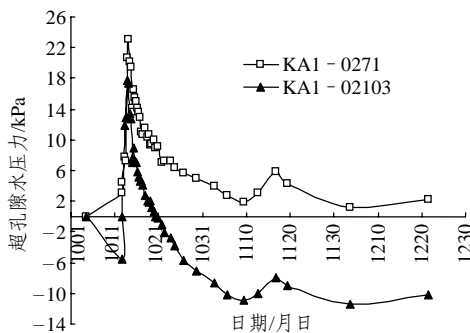


图 9 KA1 测点超孔隙水压力历时曲线

Fig.9 Time-history curves of excess pore water pressure for survey point KA1

速率逐渐减小；(2) 在盾尾脱出后的一段时间内，孔隙水压出现突跌现象，这可能是由于隧道周围土体向临空面内坍塌引起的，随后由于盾尾注浆的影响，孔隙水压力有所回升或维持在一定水平；(3) A-A 监测断面隧道中心埋深为 13.57 m，隧道中心处的设定土压力约为 210 kPa，盾构在加固区时采取接近零土压推进方式，刚出加固区土舱压力为 189 kPa，开挖面前上方土体处于侧向卸荷引起孔压下降，出现负超孔隙水压力；(4) 距离盾壳越近，孔隙水压力变化越显著。孔隙水压最大升高速率为 3.3 kPa/h，最大消散速率达 5.5 kPa/h。

3 双圆盾构施工土体扰动特性分析

3.1 土体扰动区域性特征

盾构施工引起的地层损失和隧道周围受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结，是地面沉降、土体扰动的根本原因^[3-6]。

根据理论分析和监测资料归纳，双圆盾构施工土体扰动区域特征如图 10, 11 所示。

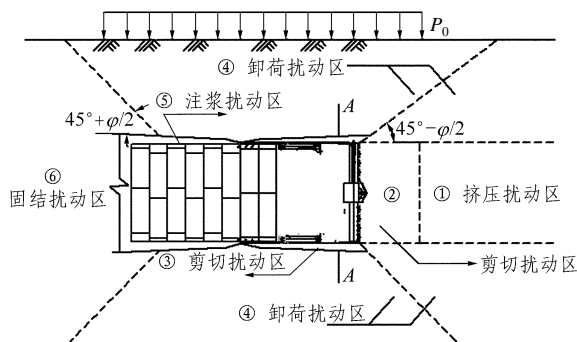


图 10 双圆盾构掘进土体扰动纵向分区图

Fig.10 Longitudinal sections of disturbance induced by DOT shield tunneling

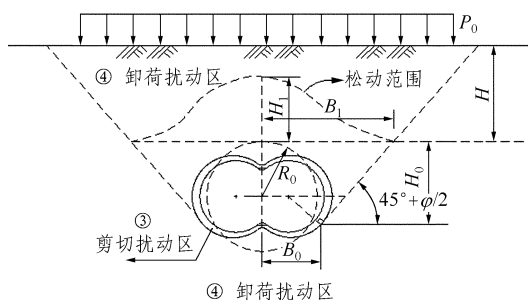


图 11 双圆盾构掘进土体扰动横向分区图

Fig.11 Cross sections of disturbance induced by DOT shield tunneling

盾构掘进时，当盾构千斤顶的推力 T 大于前进过程中的各种阻力(盾构外壳与周围土体的摩擦力、切口切入土层阻力、开挖面的主动土压力等)^[4]时，盾构前方①区土体受到挤压加载，引起土体前移和隆起，盾构机正常工作时为此状况。由于双圆盾构采用辐条式刀盘，对土体切削搅拌扰动极大，②区土体应力状态极其复杂，地层对于土舱压力的设定较单圆盾构的面板式刀盘更为敏感。盾构掘进过程中，盾壳摩擦剪切周围土体在盾壳周围形成剪切扰动区③。由于双圆盾构海鸥形凹槽的存在，盾壳上部常出现背土效应，深层土体先隆后沉现象较明显。隧道开挖后应力释放，土体经历卸荷阶段原始应力状态改变，在隧道周围形成卸荷扰动区④。盾尾脱出后，土体向盾尾间隙内塌落导致地表下沉。同步注浆可以有效地填充盾尾间隙，减少地面沉降。双圆盾构采用双液(2点式)注浆体系，注浆孔设置在盾构中心上下凹槽处，浆液填充盾尾间隙所经过的路径较长，形成注浆扰动区⑤。由于盾构掘进引起土体孔隙水压的变化，盾构通过后土体发生固结变形，形成固结扰动区⑥。当盾构进行姿态调整或者曲线推进时，地层移动的分区特征将局部发生变化。

可以采用 Terzaghi 公式估算双圆盾构施工土体的松动范围，计算简图如图 11 所示^[1]。按面积等效原则将双圆盾构等效为单圆盾构，可得

$$B_1 = R_0 \cot\left(\frac{\pi/4 + \varphi/2}{2}\right) \quad (1)$$

$$H_1 = \frac{B_1(1 - c/B_1\gamma)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi H / B_1}) + \frac{P_0}{\gamma} e^{-K_0 \tan \varphi H / B_1} \quad (2)$$

式中： B_1 为松动带宽度； H_1 为松动带高度； R_0 为双圆盾构等效开挖半径； c ， φ 分别为土体粘聚力和内摩擦角； K_0 为侧压力系数，通常取 1.0； P_0 为上覆荷重； γ 为容重； H 为覆土厚度。

该工况下双圆盾构土体松动圈范围约为 $B_1 = 9.14$ m， $H_1 = 8.52$ m(取 $c = 0$ ， $P_0 = 0$)。为安全起见，垂直土压力计算应采用全覆土土压力。

3.2 纵向沉降曲线时段特征

如图 12 所示，双圆盾构掘进土体扰动的时段特征大致分为以下几个时段^[1, 3]：(1) 盾构到达前。常表现为地表隆起或下沉，它是由盾构掘进引起开挖面土体的侧向应力状态变化造成的，主要表现为土

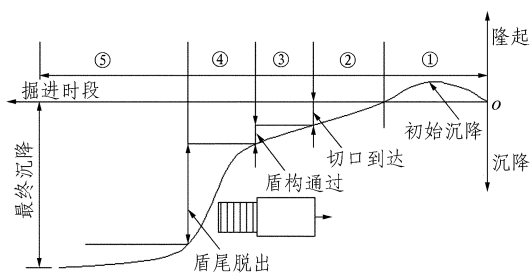


图12 盾构掘进与地层移动时段特征

Fig.12 Time-dependent characteristics of Ground disturbance by DOT shield tunneling

体受到挤压孔隙水压上升。(2) 切口到达。双圆盾构采用辐条式刀盘, 无法有效支撑正面土体。直径达 $\phi 55\text{ cm}$ 的辐条刀盘在地层中切削搅拌对土体扰动极大。(3) 盾构通过。它是由盾壳与土体之间的剪切、挤压作用引起的。特别在盾构纠偏或曲线掘进过程中, 土体扰动特征更为复杂。(4) 盾尾脱出。由于盾尾间隙和应力释放土体扰动特征常出现突变现象, 此时注浆可以有效地填充建筑空隙, 减小地面沉降。(5) 盾构通过后的长期沉降, 由于受到盾构掘进扰动的影响, 土体发生固结沉降, 固结沉降延续约3个月左右或更长。

根据地面沉降资料统计分析, 实测地层损失率为 $0.46\% \sim 1.35\%$, 负地层损失率为 $-0.26\% \sim 0.00\%$, 其中各时段地层损失占总地层损失的比值同单圆盾构相类似^[3]。

4 结 论

通过理论分析和试验段双圆盾构掘进现场监测, 得出如下基本认识:

(1) 分层沉降测孔上端沉降量大于下端沉降量, 并且基本呈线性规律变化, 盾壳上方测孔的沉降量远大于侧边测孔, 并且侧边测孔常表现为靠近盾壳土体出现隆起, 上端土体表现为沉降, 隆沉的反弯点约为拱顶位置。

(2) 隧道中轴线上部土体表现背土挤土现象, 下行线上方土体表现向侧边、沿盾构推进方向的移动, 盾尾脱出后下端土体处于卸荷状态应力回弹, 测管变形出现反弯点; 隧道下行线右侧, 土体表现出沿隧道中心向侧边、逆盾构推进方向位移。下行线外侧 5.44 m 测孔土体扰动程度较小。

(3) 随着盾构掘进, 孔隙水压力急剧升高, 盾尾脱出时达到最大值, 盾构通过后孔隙水压逐渐消散, 消散速率逐渐减小。由于盾构循环施工的特点, 孔隙水压在升高或消散过程中, 存在起伏升降的现象。

(4) 沿隧道纵向各测点沉降量相差较大, 因隧道是一横向宽度较小, 而纵向长度较大的结构, 隧道整体结构的纵向长期沉降问题应引起重视, 必要时应对沉降较大的部位补充底部控制注浆。

(5) 双圆盾构掘进土体扰动呈现区域性时段性的特征, 虽然扰动特征与单圆盾构存在类似之处, 但由于其体型变化、施工方法的不同, 不可避免地存在着机理的差异, 实践中需要进一步探索其规律性。

参考文献(References):

- [1] 日本土木学会. 隧道标准规范及解说[M]. 朱伟译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(Japan Society of Civil Engineers. Japanese Standard for Shield Tunneling[M]. Translated by Zhu Wei. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [2] 周文波, 顾春华. 双圆盾构施工技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(4): 22 - 32.(Zhou Wenbo, Gu Chunhua. Construction technique of DOT shield[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(4): 22 - 32.(in Chinese))
- [3] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield Tunnelling[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.(in Chinese))
- [4] 张庆贺, 朱忠隆, 杨俊龙, 等. 盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 699 - 703.(Zhang Qinghe, Zhu Zhonglong, Yang Junlong, et al. Theory analysis and testing study on soil disturbance caused by shield driving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 699 - 703.(in Chinese))
- [5] 魏纲, 徐日庆, 屠玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 476 - 482.(Wei Gang, Xu Riqing, Tu Wei. Testing study and analysis on soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 476 - 482.(in Chinese))
- [6] Nomoto T, Imamura S, Hagiwara T, et al. Shield tunnel construction in centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 289 - 300.