

软土层中类矩形盾构掘进施工引起地层 竖向变形实测与分析

司金标¹, 朱瑶宏², 季 昌¹, 周顺华¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101)

摘要: 类矩形盾构断面形状、机械配置与圆形盾构的差异必然引起地层变形规律有所不同, 以国内首例软土层中类矩形盾构地铁隧道工程为背景, 依据现场实测地表变形、土体分层沉降数据, 分析类矩形盾构隧道施工引起地层竖向变形的基本规律, 并结合变形机制对施工控制提出建议。结果表明: 类矩形盾构施工引起地表沉降最大值约 50 mm, 开挖面前方影响范围约 20 m; 地表竖向位移随时间发展呈现出缓慢沉降(隆起)、急剧隆起、快速沉降、平稳沉降 4 个阶段, 沉降主要发生在盾构通过后, 由软土地层受扰动后固结引起。地层竖向变形主要受土仓压力、盾尾注浆、盾构姿态等因素的影响, 其中, 盾构掘进姿态控制是盾构两侧土体竖向位移方向相反的主要原因, 盾构姿态对周围地层变形影响比单圆盾构更显著。

关键词: 隧道工程; 类矩形盾构; 软土地层; 现场监测; 地层变形

中图分类号: U 455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)06 - 1551 - 09

Measurement and analysis of vertical deformation of stratum induced by quasi-rectangular shield tunneling in soft ground

SI Jinbiao¹, ZHU Yaohong², JI Chang¹, ZHOU Shunhua¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China)

Abstract: The stratum deformation caused by the quasi-rectangular shield tunneling is different from the circular shield tunneling and the limited research has been carried out to study the issue. The first time application of the quasi-rectangular shield tunnel in soft ground in China was studied and the surface deformation and layered settlement were monitored and analyzed to investigate the major pattern of the vertical stratum deformation. The suggestions for the construction controlling were presented in terms of the deformation mechanism. The results show that the maximum surface settlement is about 50 mm and the range of excavation influence is about 20 m ahead of the excavation face. The vertical displacement of the ground surface experiences four stages over the tunneling period, the slowly down(upward) stage, the rapid upward stage, the rapid down stage and the gently down stage. The surface settlement occurs mainly after the pass of the shield tail, which is caused by the consolidation of the disturbed soft stratum. The main factors for the vertical stratum deformation include the chamber pressure, synchronous grouting and shield posture. The shield posture caused the soil on two sides of the shield machine to move in the opposite directions. In addition, the influence of the shield posture to soil

收稿日期: 2016 - 07 - 27; **修回日期:** 2016 - 10 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478353)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51478353)

作者简介: 司金标(1993 -), 男, 2015年毕业于同济大学交通工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事盾构隧道方面的研究工作。E-mail: tjitsi@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0963

deformation is more significant than in the case of single circle shield tunneling.

Key words: tunneling engineering; quasi-rectangular shield; soft ground; site monitoring; stratum deformation

1 引言

目前,我国正处于城市轨道交通快速发展时期。截至2015年底,中国内地共有25个城市拥有城市轨道交通运营线路,总长3 293 km^[1],在建及已批复建设的城市有42个。单圆盾构隧道以其施工速度快、结构受力形式合理、施工技术日益成熟等优点广泛应用于城市轨道交通建设。然而,一个城市的地下可开发空间总量有限,随着各类市政管线及隧道工程总量不断增加,可被利用的城市地下空间越来越少,盾构隧道不可避免的下穿狭窄道路、密集建筑群等空间范围小、环境保护等级高的地区,当前城市轨道交通建设面临施工中的安全性、环境保护两方面的问题^[2]。因此,在满足双线地铁运营限界要求的基础上,亟待寻找一种空间利用率高、横向跨度小、环境影响低新型隧道断面结构形式。上海地铁6[#]和8[#]线曾尝试使用双圆盾构,此种断面虽然刀盘掘进系统不会留下死角、且在理想状态下成型断面受力性能好,但施工中盾构对土体有明显的背土、挤土效应^[3]。2003年,日本在京都市营地铁东西线六地藏—石田区间完成长759 m的世界首条类矩形盾构双线隧道^[4],该隧道具有横向跨度小、下穿能力强、一次施工形成两条线路等优点。目前宁波市部分地区在地铁建设中因地下空间、地面建筑等限制难以实施单圆盾构,在此背景下尝试采用类矩形盾构。

类矩形盾构断面形状介于单圆与矩形之间,克服了矩形凸角、双圆海鸥块凹角背土的缺陷,横断面利用率高于大直径单圆,适用于双线单洞地铁隧道。作为一种新引进的工法,类矩形盾构断面形状、机械配置等方面与圆形盾构有明显不同,由此引起土仓压力、同步注浆、侧摩阻力等与圆形盾构存在差异,这些结构、机械与土相互作用的差异导致地层响应规律也会有所不同,而软土层中类矩形盾构掘进引起的地层变形特征尚缺乏认识。

目前,对于单圆、双圆盾构施工引起的地层变形,国内外学者在经验公式^[5-8]、理论解析^[9-12]、数值分析^[13-14]、模型试验^[15]、实测分析^[16-18]等方面有诸多研究成果,对于类矩形盾构引起的地层变形则鲜有研究,而软土层沉降会引起隧道不均匀沉降^[19]、结构病害^[20]等问题,以致影响隧道服役性能。因

此,本文在前人研究的基础上结合现场实测数据,系统分析类矩形盾构掘进施工引起地层竖向变形的规律。

2 工程背景

宁波市轨道交通4号线工程周边环境复杂,中心城区道路交通流量非常大,两侧建筑密集,环境保护要求高,为减小盾构施工对周边建筑物的影响,应尽量加大隧道至两侧建筑物的距离。通常的单圆盾构由于施工工艺的限制,难以减小横向空间占用,双线单洞的大直径单圆盾构由于覆土厚度限制难以实施,而双圆盾构海鸥块背土严重,在此背景下考虑采用类矩形盾构。由于国内尚无类矩形盾构施工先例,为探索并验证类矩形盾构机、管片设计、施工控制、测量监测等方面技术,在宁波4号线施工前选定宁波3号线姜山镇出入段线作为示范工程。

2.1 工程概况

宁波3号线试验段采用的类矩形盾构机如图1所示,盾构机长11.46 m,刀盘由2个反向旋转的辐条式大刀盘和一个偏心多轴驱动仿形刀盘组成,2个大刀盘的中心距小于大刀盘半径之和,相位差90°,偏心刀盘位于盾构机切削面的中央位置,弥补大刀盘未能切削的部分,刀盘开挖尺寸为11 830 mm×7 267 mm(宽×高),开挖面积为71.98 m²;盾尾配备8个注浆管,每2个一组,共分拱顶、拱腰上、拱腰下、拱底4组;盾构机采用左右2个螺旋输送机出土,2套机械臂拼装管片。如图2所示,每环管片由10块标准块管片和1块中间立柱管片构成,管片外包尺寸为11 500 mm×6 937 mm(宽×高),厚度450 mm,环宽1 200 mm。



图1 盾构机实物图

Fig.1 Quasi-rectangular shield machine

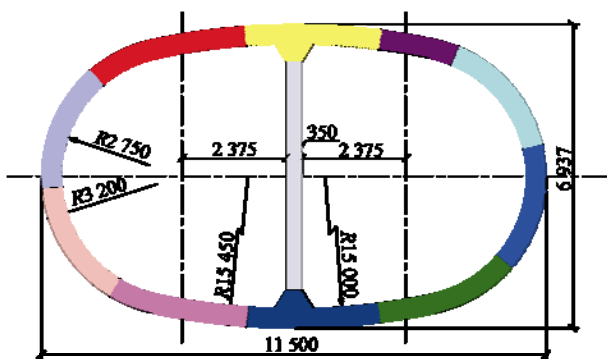


图 2 类矩形盾构管片图(单位: mm)

Fig.2 Segments for quasi-rectangular shield tunnel(unit: mm)

2.2 工程地质

盾构区间全长 390.3 m，区间隧道纵坡最大坡度 35%，最小平曲线半径 400 m。盾构从高塘桥站始发，现状地面主要为农田，主要穿越土层为淤泥质黏土层和淤泥层，该土层呈现软塑性状态，土体强度低、压缩性高、渗透性低、灵敏度高，地质纵断面图如图 3 所示，隧道上覆土厚度 5.3~9.8 m。各土层的物理力学参数如表 1 所示。

3 地层变形实测与分析

3.1 现场实测

为探究类矩形盾构施工对周围不同空间位置土体的扰动情况，需要测量土体分层沉降；地表变形作为评价环境影响的最直观指标，在整个施工过程中也需要监测。施工现场沿隧道走向布置有多组地表沉降监测断面和分层沉降监测断面，监测点布置范围约隧道中心线两侧各 25 m。

本文选取 2 个地表沉降监测断面 DM21，DM34 和 1 个分层沉降监测断面 DM25 作为研究对象，3 个断面分别位于从始发井开始第 21 环、第 25 环和第 34 环管片位置，由于该段纵坡坡度很小，3 个断面处隧道上覆土厚度均为 9.7 m，约 1.5 倍隧道高度。DM21，DM34 断面均布置 8 个监测点，DM25 断面布置 3 个分层沉降测孔，各监测点位平面布置如图 4 所示，其中 DM21 - 4，DM34 - 4 布置在左线中心线上方，DM21 - 5，DM25 - 2，DM34 - 5 布置在

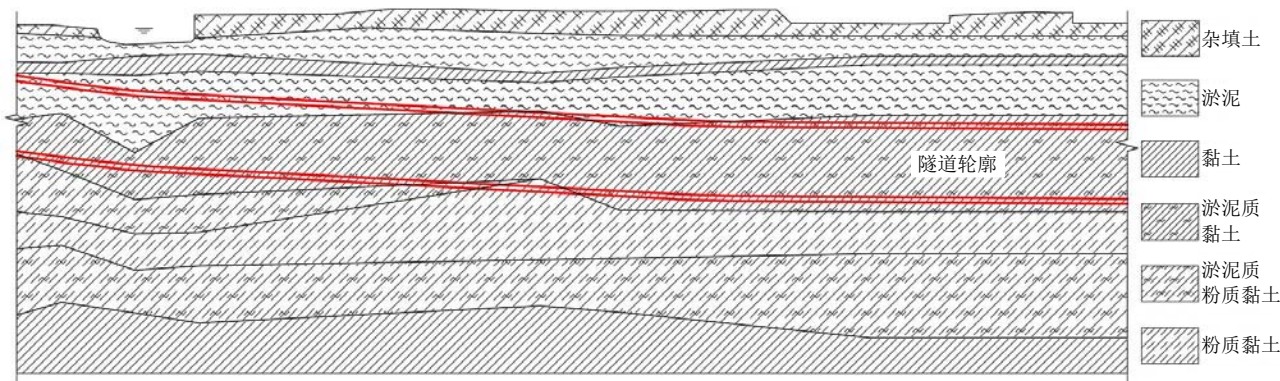


图 3 类矩形盾构区间地质纵断面图

Fig.3 Geological profile of the rectangular shield-driven section

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil strata

土层	层厚/m	重度/(kN · m ⁻³)	压缩模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	回弹模量/MPa	静止侧压力系数
① ₁ 杂填土	1.5	18.0	3.41	17.7	25.0	13.56	0.60
① ₃ 淤泥	1.7	16.4	1.65	19.7	9.3	10.2	0.72
② ₁ 黏土	0.8	18.3	3.15	16.1	14.5	12.5	0.63
② _{2a} 淤泥	4.4	16.5	1.63	13.6	8.5	9.2	0.72
② _{2b} 淤泥质黏土	8.4	17.2	2.02	15.3	10.5	11.6	0.67
③ ₂ 粉质黏土	3.7	18.3	3.03	21.4	12.0	17.7	0.47
④ ₁ 淤泥质粉质黏土	7.3	18.0	2.84	16.8	9.8	13.8	0.54
④ ₂ 黏土	5.7	17.4	2.87	14.0	18.3	14.2	0.55

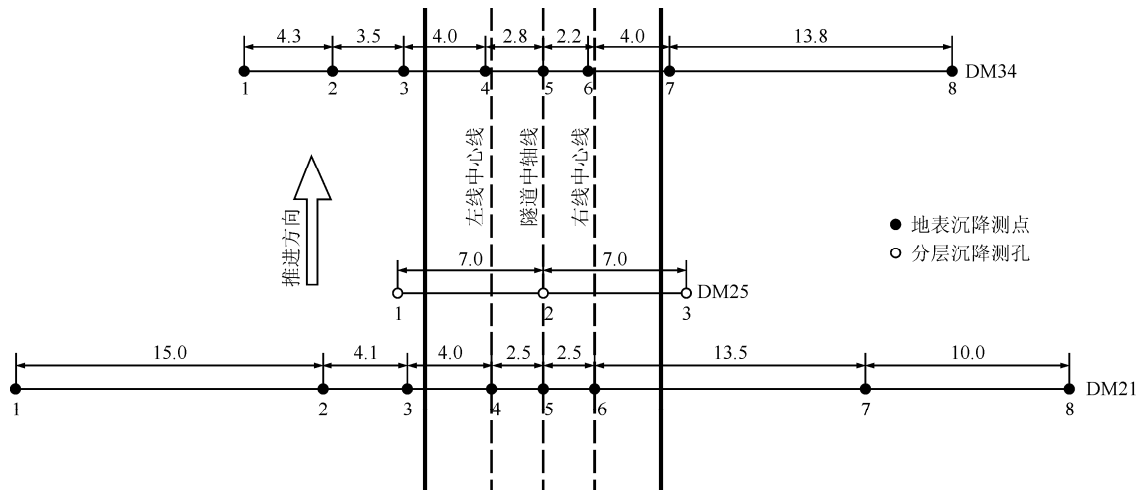


图4 监测点位布置平面图(单位: m)

Fig.4 Layouts of monitoring points(unit: m)

隧道中轴线上方, DM21 - 6, DM34 - 6 布置在右线中心线上方, DM25 - 1, DM25 - 3 分别布置在隧道左侧和右侧向外 1.25 m 处。

3.2 横断面变形分析

3.2.1 地表变形

根据盾构机与监测断面的空间位置关系, 把测点沉降划分为 6 个阶段: 到达前(见图 5(a))、到达时(见图 5(b))、通过时(见图 5(c))、脱出盾尾(见图 5(d))、通过后(见图 5(e))、最终(见图 5(f))。其中, 到达前指盾构机刀盘在监测断面前 5 m, 到达时指盾构机刀盘刚好在监测断面, 通过时指盾构机中部在监测断面, 脱出盾尾指盾尾刚好通过监测断面, 通过后指盾尾通过监测断面后 10 m, 最终指地表沉降趋于稳

定时, 前 5 个阶段如图 5 所示。由于实际施工中盾构推进约 3 环/d, 且地表沉降为非连续监测, 故以上沉降阶段划分略有误差, 但总体符合现场实际情况。文中, 对于沉降值“+”表示隆起, “-”表示沉降。

根据现场实测数据, DM21 断面各阶段累计地表变形如图 6(a)所示, 阴影区域为盾构机对应地表范围。盾构到达前, 盾构机横向跨度范围内地表整体已有约 20 mm 沉降; 盾构到达时及通过时, 地表有少量隆起; 从通过时到脱出盾尾地表发生较大沉降, 该阶段最大沉降量 16.9 mm, 最大沉降量位置在左线中心线对应地表; 从脱出盾尾到通过后, 受盾尾注浆影响地表隆起明显, 该阶段最大隆起量 19.2 mm, 最大隆起量位置在右线中心线对应地表; 盾构通过后, 最终地表发生了 49.7 mm 的沉降, 最大沉降量位置在左线中心线对应地表, 最终沉降量对应时间为脱出盾尾后 47 d。

DM34 断面各阶段累计地表变形如图 6(b)所示。从盾构到达前到盾尾刚脱出监测断面, 地表持续隆起, 脱出盾尾时的最大隆起量 22.7 mm, 最大隆起量位置在右线中心线对应地表; 脱出盾尾后, 由于土体向盾尾间隙内塌落、土体超孔压消散等原

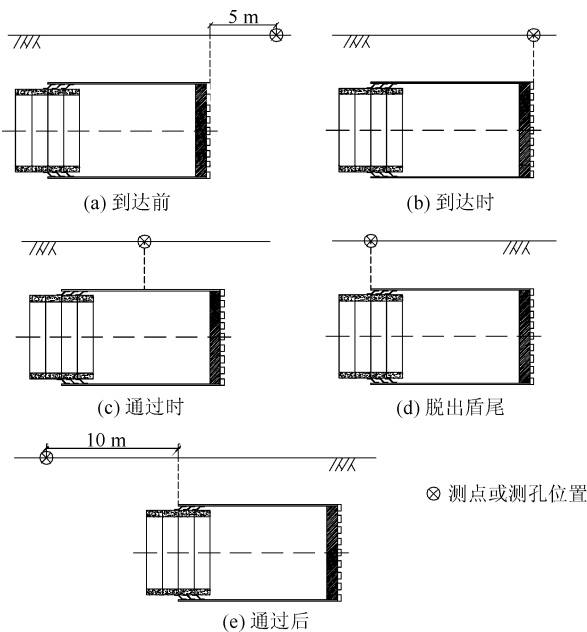
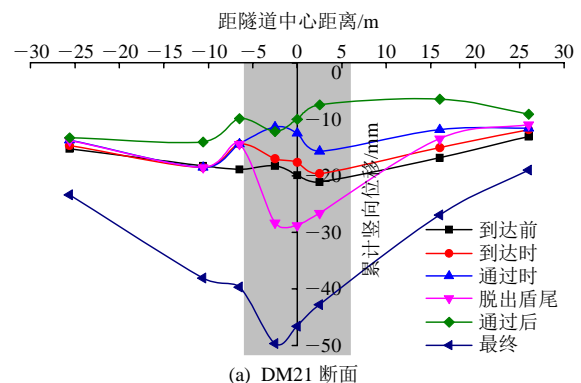


图5 施工阶段划分示意图

Fig.5 Division of construction stages



(a) DM21 断面

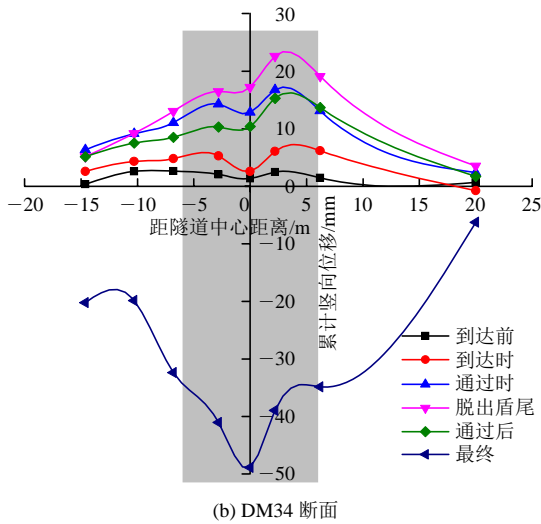


图 6 各阶段累计地表变形

Fig.6 Cumulative surface settlement at each stage

因，地表发生了很大幅度的沉降；最终地表沉降量 48.9 mm，最大沉降量位置在隧道中轴线对应地表，最终沉降量对应时间为脱出盾尾后 85 d。

两断面最大沉降量基本相同，但位置不同，这与盾构姿态控制及 2 个螺旋输送机工作状态差异等因素有关。DM21 断面 8 个注浆管平均注浆压力 0.97 MPa，总注浆量 8.0 m³，而 DM34 断面分别为 0.67 MPa，8.55 m³，注浆压力的差异能很好地解释脱出盾尾后 DM21 断面地表受注浆影响有明显隆起而该阶段 DM34 断面地表则无隆起的现象。DM34 断面地表竖向变形幅度较大，说明该断面土体扰动程度较大，且盾构通过后地表沉降趋于稳定需要的时间更长。

3.2.2 分层沉降

根据盾构机与分层沉降监测断面的空间位置关系，把测孔竖向变形划分为 5 个阶段：到达前(a)、到达时(b)、通过时(c)、脱出盾尾(d)、通过后(e)，5 个阶段的定义与地表变形中定义相同。由于实际施工中盾构推进约 3 环/d，且分层沉降为非连续监测，故以上变形阶段划分略有误差，但总体符合现场实际情况。

DM25 - 1 测孔位于左线隧道外 1.25 m，分层沉降如图 7(a)所示，两虚线间为盾构机穿越范围的左侧。盾构通过时，盾构机左上方土体有明显的隆起，埋深 2.603 m 处最大隆起值为 22.6 mm；盾构通过后，土体整体发生沉降，盾构机穿越范围左侧尤其明显，埋深 16.156 m 处最大沉降值为 27.9 mm。

图 7(b)为 DM25 - 2 测孔分层沉降，从盾构机到达通过时，上方土体有沉降趋势，埋深 0.567 m 处最大沉降值 8.9 mm；盾构机通过后，由于同步注浆等因素影响，测孔下端土体发生显著隆起，埋深 6.41 m 处最大隆起值 24.2 mm，而测孔上端靠近地面土体则继续沉降。

DM25 - 3 测孔位于右线隧道外 1.25 m，分层沉降如图 7(c)所示，两虚线间为盾构机穿越范围的右侧。盾构机到达前，盾构机穿越范围右侧土体已发生较大隆起，埋深 12.144 m 处最大隆起值为 10.0 mm；盾构通过时，盾构机右上方土体有明显的沉降；盾构通过后，测孔下端土体发生较大沉降，埋深 16.112 m 处最大沉降值为 10.0 mm。

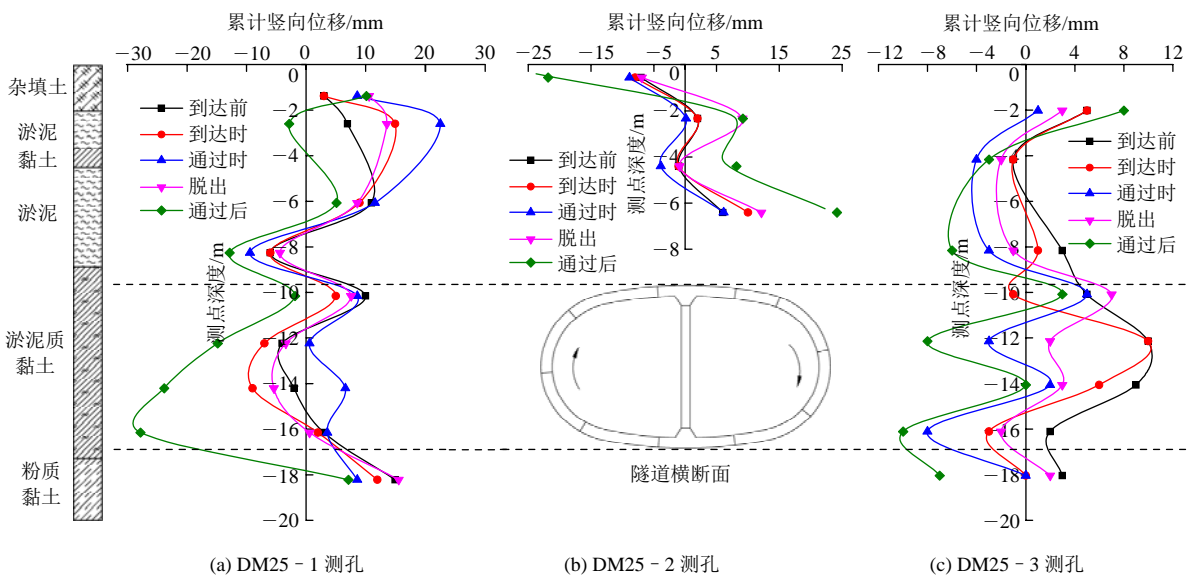


图 7 DM25 断面分层沉降曲线

Fig.7 Curves of layered settlement for section DM25

从分层沉降随测孔位置、深度的变化趋势可见，对于隧道两侧的测孔，盾构机穿越范围对应的土体扰动较大，靠近盾构机顶部一定范围内土体扰动较小；对于隧道正上方的测孔，越靠近盾构机土体扰动越大，因为靠近盾构机土体受盾构壳体摩擦及注浆影响更大。图8为不同测孔阶段位移对比，显示了盾构底面以上测孔部分阶段的测点平均位移，脱出盾尾前的施工阶段，隧道两侧的测孔土体竖向位移方向呈相反趋势，盾构通过的过程中尤其明显。

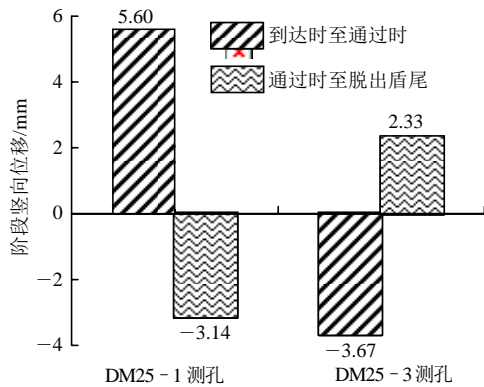


图8 不同测孔阶段位移对比

Fig.8 Comparison of deformation at different holes

从分层沉降随施工阶段发展可见，脱出盾尾前的施工阶段地层竖向变形量值及变化幅度均较小，而脱出盾尾后一段时间内地层竖向变形急剧发展，因此，控制地层竖向变形应主要控制脱出盾尾后的变形。脱出盾尾后一段时间内，受同步注浆影响，隧道两侧测孔土体发生明显的沉降，而隧道正上方土体则有明显隆起，这是由于施工中拱顶、拱腰上、拱腰下、拱底4组注浆管的注浆量之比约为2:1:1:1，拱顶注浆量过大，隧道上方土体受到挤压而隆起；隧道正上方土体隆起也可能与隧道上浮有关，S. Zhou 和 C. Ji^[21]通过宁波单圆盾构现场试验得出同步注浆参数对隧道管片上浮有显著影响，类矩形盾

构同步注浆对管片上浮的影响有待后续进一步研究。

3.3 纵断面地表变形分析

图9为隧道中轴线对应地表纵向变形曲线，横坐标原点为盾构机刀盘位置。从图中可见，盾构掘进对前方土体影响范围约20m，开挖面前方及盾构机上方地表均表现为隆起，这与掘进参数设置、盾壳与土体的摩擦等因素有关；靠近盾构始发井的位置，由于存在土体加固，地表变形有明显的减小，而开挖面后方30~40m范围由于注浆量过大出现了明显的地表隆起。

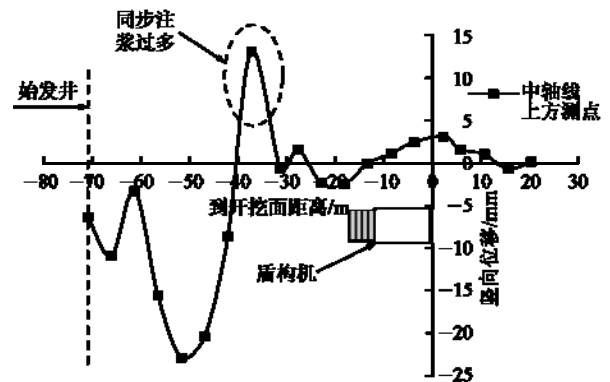


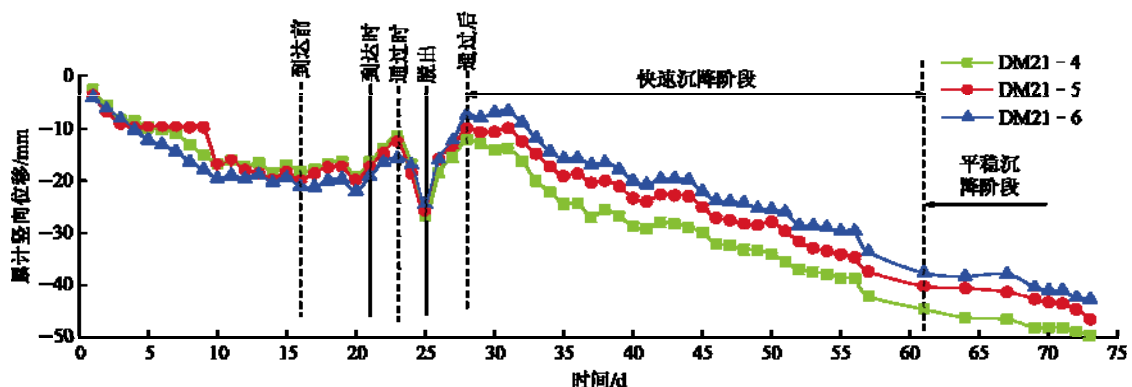
图9 纵断面地表变形曲线

Fig.9 Distribution of surface settlement along longitudinal axis of tunnel

由于盾构穿越地层呈软塑性状态，土体强度低、压缩性高、灵敏度高，故周围土层极易受土仓压力、出土量、同步注浆等施工参数的影响，纵断面地表变形表现出与施工参数设置密切相关的特点。

3.4 地表沉降随时间变化

图10(a)所示为DM21断面隧道上方3个测点的竖向位移历时曲线，3条曲线整体均呈现缓慢沉降、急剧隆起、快速沉降、平稳沉降4个阶段，图10(b)为DM34断面隧道上方3个测点的竖向位移历时曲线，3条曲线整体均呈现缓慢隆起、急剧隆起、快速沉降、平稳沉降4个阶段。可见，两断面竖向位移



(a) DM21 断面

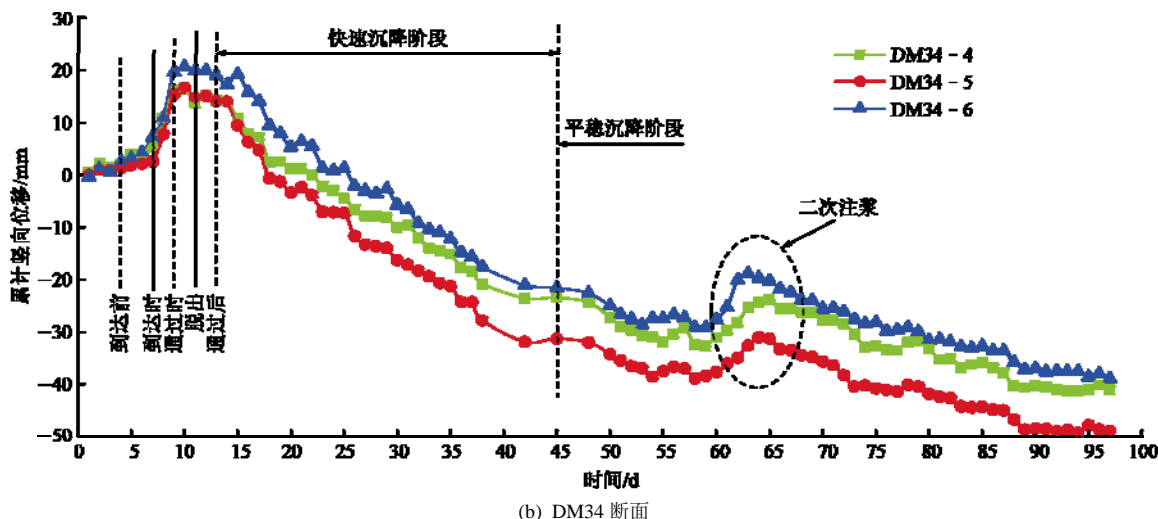


图 10 地表沉降历时曲线

Fig.10 Time curves of surface settlement

历时曲线整体趋势相似，但盾构到达前土体位移方向有所不同，DM21 断面表现为较大沉降，DM34 断面则略有隆起，这与盾构推进时的土仓压力及出土量有关；盾构通过后，DM21 断面最大沉降发生在左线中心线上方，而 DM34 断面最大沉降发生在隧道中轴线上上方；两断面快速沉降阶段均持续约 30 d，DM21 断面 3 个监测点平均沉降速率 0.97 mm/d，DM34 断面 3 个监测点平均沉降速率 1.33 mm/d，DM34 断面 3 个测点平均沉降速率约为 D21 断面的 1.4 倍；DM34 断面平稳沉降阶段中由于二次注浆引起少量隆起，二次注浆后约 25 d 沉降趋于稳定。对于两监测断面沉降历时曲线差异的原因，由于目前缺乏详细的施工参数，本文尚未做进一步分析。

从盾构通过后到最终，DM21 断面 3 个测点的平均沉降量为 36.5 mm，DM34 断面 3 个测点的平均沉降量为 58.8 mm。可见，盾构施工引起的地表沉降主要发生在盾构通过后，而盾构通过后地表沉降主要由软土地层受扰动后固结引起，因此，控制盾构施工过程中对周围软土地层的扰动是减小地表沉降的关键。

4 问题讨论

4.1 土体扰动特征

孙统立等^[18, 22]分析了单圆、双圆盾构引起周围土体扰动的区域性特征，本文在前人研究的基础上结合现场实测数据分析，归纳宁波市类矩形盾构掘进施工土体扰动区域性特征如图 11 所示。

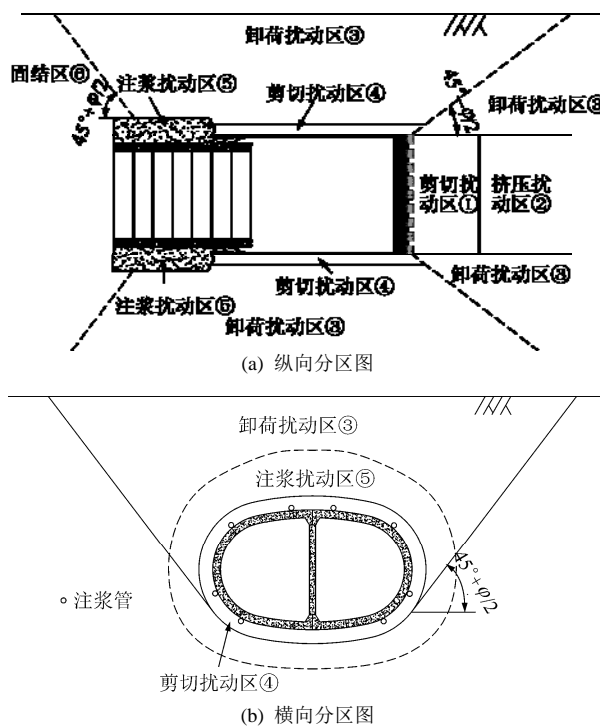


图 11 类矩形盾构掘进土体扰动分区

Fig.11 Disturbance induced by quasi-rectangular shield tunnel

类矩形盾构机采用辐条式大刀盘，刀盘前方土体扰动极大，且 2 个螺旋输送机出土的差异引起开挖面左右两侧压力分布不均，由此导致区域①应力状态复杂，土体变形受施工参数影响比单圆盾构更显著。盾构现场盈压掘进，开挖面前方土体受挤压前移和隆起，形成挤压扰动区②。隧道开挖导致土体应力释放，在隧道周围形成卸荷扰动区③。类矩形断面形状较单圆扁平，上下两侧与土体接触面积更大，盾壳四周与土体摩擦剪切形成剪切扰动区④；此外，与单圆盾构相比，区域④受盾构姿态影响更

大。管片脱出盾尾后，同步注浆形成注浆扰动区⑤，由于拱顶一组注浆管浆液分配量大，且隧道顶部平缓导致浆液流动性差，隧道上方土体受注浆挤压抬升明显，地表甚至出现隆起。脱出盾尾后一段时间，管片四周浆液凝固及周围土体受扰动再固结，形成固结区⑥，地表沉降主要发生在该区域。

4.2 与圆形盾构对比

为探究类矩形盾构与圆形盾构施工引起地层沉降规律的差异，选取上海轨道交通6#线某双圆盾构区间250环、280环处的监测数据作为对比。该区间隧道覆土厚度5~12m，主要穿越土层为③₂灰色黏质粉土夹粉质黏土层、③₃灰色淤泥质粉质黏土层、④灰色淤泥质黏土层；该工程采用的双圆盾构切剖面呈眼镜形，两圆直径均为6520mm，中心距4600mm^[18]。图12(a)为盾构机刀盘通过监测断面50m时，类矩形盾构与双圆盾构地表横向累计沉降

对比。可见，相同施工阶段，类矩形盾构施工引起的地表沉降槽比双圆盾构平缓，中轴线附近地表沉降明显小于双圆盾构，说明类矩形盾构能够克服双圆盾构背土的问题。

同时，对比类矩形盾构与宁波市相同地层中已施工完成的一条双洞单圆盾构地表最终横向累计沉降，该双洞单圆盾构隧道上覆土厚8.0m，线间距15.0m，外径6.2m。由图12(b)可见，类矩形盾构地表沉降槽宽度与双洞单圆盾构接近，地表最大沉降量小于双洞单圆盾构。

与单圆、双圆盾构相比，类矩形盾构引起的地表沉降总体较小，沉降槽形态较为平缓，这意味着相同跨度内的不均匀沉降更小，更有利于控制环境影响。

4.3 施工控制

在软土地层中掘进时，盾构机发生摇摆或横移会挤压一侧土体导致隆起，而另一侧土体由于盾构机的背离则相应产生沉降；不同于单圆盾构，当类矩形盾构机发生绕纵向轴线的旋转时，也会对一侧土体产生明显的挤压效应，导致该侧土体隆起，同时另一侧土体会产生沉降。因此，盾构掘进姿态控制是两侧测孔土体竖向位移方向相反的主要原因，类矩形盾构姿态对周围土体变形的影响比单圆盾构更显著。

土仓压力设置高于理论土压力时，会在开挖面产生附加压力，附加压力越大脱出盾尾前地表沉降越小，甚至可能出现隆起，但开挖面周围软土地层受挤压产生的超孔压也随之增大，超孔压消散会引起更大的后期沉降；同样，盾尾注浆量、注浆压力大虽然能较好控制脱出刚盾尾时地表沉降，但地层受扰动后固结也会引起更大的后期沉降。因此，土仓压力、同步注浆参数的确定，应以施工引起地表总沉降最小为依据。软土地层在盾构掘进后不会形成塌落拱，全覆土压力直接作用在盾壳上，减小盾-土接触面的摩擦系数能够减小盾构对土体的侧摩阻力，从而减小地层扰动，施工中在盾壳与土体接触面注入减摩泥浆是一种行之有效的方法。

5 结论

本文以国内首例软土地层类矩形盾构隧道工程为背景，依托试验段现场实测数据，分析了整个施工过程中地表横断面、纵断面竖向变形以及土体分层沉降，得出盾构掘进引起周围地层变形的空间特征，总结了地表沉降随时间发展的基本规律，并结合

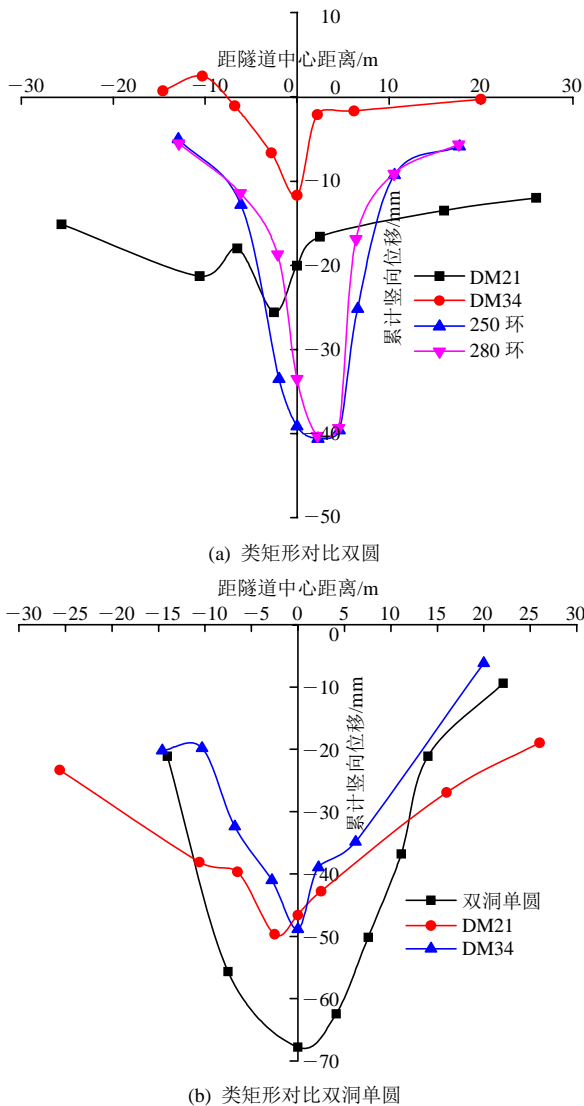


图 12 不同断面形式横断面地表沉降对比

Fig.12 Comparison of surface settlement for different type of tunnel sections

施工引发地层变形机制提出了控制地表变形的建议。

类矩形盾构与圆形盾构存在显著差异, 盾构姿态控制对地层变形影响更为复杂, 同步注浆引起周围土体位移模式、对隧道上浮的影响尚不明确, 掘进参数控制也有待进一步研究并在实践中探索。

参考文献(References):

- [1] 樊佳慧, 张琛, 卢恺, 等. 2015年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(1): 1-3.(FAN Jiahui, ZHANG Chen, LU Kai, et al. China's operational urban rail transit lines, 2015: statistics and analysis[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(1): 1-3.(in Chinese))
- [2] 周顺华. 城市轨道交通施工力学的新挑战[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 560-569.(ZHOU Shunhua. New challenges in construction mechanics of urban rail transit[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(6): 560-569.(in Chinese))
- [3] 孙统立, 李浩, 吕虎, 等. 双圆盾构施工扰动引起的地表位移特性分析[J]. 土木工程学报, 2009, (6): 108-114.(SUN Tongli, LI Hao, LU Hu, et al. Characteristics of the surface displacement induced by Double-O-Tube shield tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, (6): 108-114.(in Chinese))
- [4] NAKAMURA H, KUBOTA T, FURUKAWA M, et al. Unified construction of running track tunnel and crossover tunnel for subway by rectangular shape double track cross-section shield machine[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 253-262.
- [5] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[J]. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s.n.], 1969: 225-290.
- [6] ATTEWELL P B, FARMER I W. Ground settlement above shield driven tunnels in clay[J]. Tunnels and Tunnelling International, 1975, 7(1): 58-62.
- [7] 刘建航, 候学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991: 347-350.(LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield tunnelling[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991: 347-350.(in Chinese))
- [8] 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.
- [9] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1988, 38(3): 301-320.
- [10] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.
- [11] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 585-589.(SHI Chenghua, PENG Limin, LIU Baochen. Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 585-589.(in Chinese))
- [12] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3317-3323.(WEI Gang, ZHANG Shimin, QI Jingjing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3317-3323.(in Chinese))
- [13] KASPER T, MESCHKE G. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(4/5): 234-247.
- [14] 王非, 缪林昌, 黎春林. 考虑施工过程的盾构隧道沉降数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 31(增1): 2907-2914.(WANG Fei, MIAO Linchang, LI Chunlin. Numerical analysis of shield tunnel settlement considering construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 31(Supp.1): 2907-2914.(in Chinese))
- [15] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942-947.(MA Xianfeng, WANG Junsong, LI Xiaoyun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunneling in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 942-947.(in Chinese))
- [16] 李曙光, 方理刚, 赵丹. 盾构法地铁隧道施工引起的地表变形分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 87-92.(LI Shuguang, FANG Ligang, ZHAO Dan. Analysis on the ground deformation of subway tunnel induced by shield construction[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 87-92.(in Chinese))
- [17] 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 Yongmao, ZHENG Yifeng, YANG Guoxiang, et al. Measurement and analysis of ground settlement due to EPB shield construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 235-242.(in Chinese))
- [18] 孙统立, 张庆贺, 胡向东, 等. 双圆盾构隧道施工土体扰动特性及实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5950-5955.(SUN Tongli, ZHANG Qinghe, HU Xiangdong, et al. Measurement and analysis of soil disturbance characteristics induced by Double-O-Tube shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5950-5955.(in Chinese))
- [19] DI H, ZHOU S, XIAO J, et al. Investigation of the long-term settlement of a cut-and-cover metro tunnel in a soft deposit[J]. Engineering Geology, 2016, 204(8): 33-40.
- [20] ZHOU S, DI H, XIAO J, et al. Differential settlement and induced structural damage in a cut-and-cover subway tunnel in a soft deposit[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 04016028-1-04016028-8.
- [21] ZHOU S, JI C. Tunnel segment uplift model of earth pressure balance shield in soft soils during subway tunnel construction[J]. Biocontrol Science and Technology, 2014, 2(4): 221-238.
- [22] 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 of soil disturbance caused by shield-driven[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 699-703.(in Chinese))