

大直径双线盾构隧道施工期地表沉降监测分析

周宇舒

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月5日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

本文针对大直径土压平衡盾构施工期地表沉降进行监测及分析。依托南沙至珠海城际某段的盾构地铁项目, 通过现场监测及研究分析, 对盾构施工期地表沉降展开研究, 得出结论: 1) 先发左线隧道通过监测横断面后, 横向沉降折线呈类似高斯曲线, 地表沉降的最大值点位于左线隧道轴线上方地表土体。2) 后发右线通过监测横断面后, 地表继续沉降, 横向沉降折线类似一个标准高斯曲线右侧叠加一个不完整的高斯曲线, 最大值点右移, 位于左线隧道轴线与双线隧道中轴线间的上方地表。3) 双线隧道通过区间后, 横向沉降近似为两个高斯拟合曲线叠加, 且沉降折线整体不对称, 最大值点位于双线隧道中轴线与右线隧道轴线间的上方地表。4) 纵向地表沉降监测中, 沉降折线总体呈现随距离增加斜率逐渐降低的趋势。5) 地表沉降的大小与隧道上覆土厚度呈负相关, 与土层刚度也呈负相关。

关键词

盾构隧道, 地表沉降, 现场监测

Analysis of Surface Settlement Monitoring during the Construction Period of a Large-Diameter Double-Line Shield Tunnel

Yushu Zhou

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Aug. 15th, 2025; accepted: Sep. 5th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

Abstract

This paper monitors and analyzes surface settlement during the construction period of large-diam-

eter earth pressure balance shield tunneling. Based on a shield tunnel metro project along a section of the Nansha-Zhuhai Intercity Railway, this study conducted on-site monitoring and research analysis to investigate ground settlement during shield construction. The conclusions drawn are as follows: 1) After monitoring the cross-section of the left-line tunnel, the lateral settlement curve resembles a Gaussian curve, with the maximum surface settlement point located above the left-line tunnel axis on the surface soil. 2) After the right-line tunnel was constructed, the ground surface continued to settle. The lateral settlement curve resembled a standard Gaussian curve with an incomplete Gaussian curve superimposed on its right side. The maximum value point shifted to the right and was located above the ground surface between the axis of the left-line tunnel and the central axis of the double-line tunnel. 3) After the double-track tunnel passes through the section, the lateral settlement is approximately the superposition of two Gaussian fitted curves, and the settlement curve is overall asymmetric, with the maximum value point located above the ground surface between the centerline of the double-track tunnel and the axis of the right-line tunnel. 4) In longitudinal ground surface settlement monitoring, the settlement curve generally shows a trend of decreasing slope with increasing distance. 5) The magnitude of ground subsidence is negatively correlated with the thickness of the overburden above the tunnel and also negatively correlated with the stiffness of the soil layer.

Keywords

Shield Tunnel, Ground Settlement, On-Site Monitoring

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市发展水平的持续升高,盾构法因其诸多优点,成为了城市地铁建设的首选方法。在盾构隧道的掘进过程中,地表沉降是一种普遍发生的现象,过大的地表沉降不仅威胁着地下管线的安全,更影响着地表建筑物的稳定性,其重要性不言而喻。而现场监测法和数值模拟法是分析盾构施工期地表沉降的主要方法。

现场监测法是通过实时监测设备,在盾构施工掘进过程中对于地表土体进行动态观测,从而总结地表变形的变化规律的方法。与其他方法相比,现场动态监测方法是最直接、最有效、最符合实际的获得地层变形规律的手段。Chen 等[1]对杭州地铁 1 号线实测数据进行分析,得到土体竖直位移、深层水平位移及超孔隙压力随盾构掘进的变化规律。魏新江等[2]进一步通过对杭州地铁 1 号线某盾构区间施工现场进行实时监测,建立了盾构施工参数和土体位移之间的相关关系,从而进一步讨论了盾构施工对土体位移发展规律的影响。梁浩等[3]结合上海轨道交通 11 号线南段盾构区间地表变形实时监测数据,并基于多种施工工况下施工参数的变化,分析了掘进施工区间地层变形变化规律。司金标等[4]根据现场关于地表变形以及土体分层变形的实测数据,讨论了类矩形盾构隧道施工引起的地层垂直方向变形的基本规律,同时基于变形机理提出了施工控制建议。晁峰等[5]收集盾构在板岩地层中掘进引起的变形实测数据,通过对盾构轴线的放线,探究了施工中横向土层的位移变化规律,分析了盾构掘进阶段对土体中土、水压力的影响;分析了盾构穿越板岩地层盾构推力、土仓压力等施工参数变化对地表变形量的影响变化规律。朱科峰等[6]通过对现场实测数据的分析,得到了隧道地下通道底板及顶板弯矩、与底板下方土压力、底板变形与空隙水压力的变化规律。

本研究依托项目所在区域为广州南沙区，此处软弱地层的分布范围大，地层情况复杂，相比较稳定地层，在掘进过程中的土体不均匀变形大，且隧道沿道路敷设，周边土体存在较多管线，对地表变形的要求高；同时，盾构采用了大直径(8800/80 mm)双螺旋土压平衡盾构机，掘进过程中，造成的土体损失率大，而土体损失率是影响地表变形的重要影响因素。故本研究由盾构施工控制及地表沉降的既有研究现状出发，从盾构施工地表沉降的现场监测结果及相关参数中，选取三段典型盾构区间进行对比验证分析，以便为大直径双线土压平衡盾构引起的地表沉降问题提供一些参考。

2. 工程概况

2.1. 项目概况

论文依托于南沙至珠海城际某段的盾构地铁项目，对大直径盾构施工条件下地表沉降特性开展研究，施工区段的区间线路平面如图 1 所示。工程内容包括一站一区间，区间采用盾构法掘进施工，区间隧道长约 2.745 km，盾构区间隧道拱顶埋深范围为：12.7 m~38.8 m；底板埋深范围为：21.2 m~47.2 m，区间线路坡型为 V 字坡，线路最大坡度为 23.3‰。



Figure 1. Plan view diagram of shield tunnel section
图 1. 盾构隧道区间平面示意图

经过综合比较选择，区间隧道采用铁建重工双螺旋土压平衡式盾构机，出厂编号为 DZ513，开挖直径为 8840 mm，面板箱型辐条式刀盘，盾构掘进速度为每天 8 环左右。盾构机的部分参数如下：最大额定扭矩 17,960 kN.m，脱困扭矩 19,760 kN.m，额定推力 40,000 kN。盾构掘进区间结构采用外径 8500 mm，内径 7800 mm，管片宽度 1600 mm，厚度 350 mm 的平板式单层预制钢筋混凝土管片衬砌，强度等级为 C50，防渗透能力为 P1。

2.2. 工程地质条件

盾构隧道穿越地层主要为淤泥、中粗砂、粉细砂、砾石层、粉质粘土层、砂质黏性土等，根据岩土勘察报告，勘察深度范围内，自上而下各层土层参数见表 1。

盾构隧道为双线隧道，其左右线路区间地质纵断面如图 2 所示，场地特殊性岩土主要有填土、软土、风化岩和残积土，盾构难度大。其中，海陆交互相软土具有含水量高，压缩性高，孔隙比大，抗剪强度低，灵敏度高的特点，且软土以欠固结土为主，施工期沉降较大，可能引起隧道下沉破坏，引起地表或上覆建构物的不均匀沉降或者变形。

Table 1. Shield tunnel section geological characteristics table
表 1. 盾构隧道区间地层特性表

土层分类	土层编号	土层名称	层厚
人工填土层	<1-1>	杂填土	0.5~6 m
海陆交互相层	<2-1>	淤泥	0.8~19.5 m
	<2-2>	淤泥质粉细砂层	0.5~5.4 m
	<3-1>	粉细砂层	0.5~13.1 m
冲积 - 洪积砂层	<3-2>	中粗砂层	0.6~13.6 m
	<3-3>	砾石层	0.6~14.3 m
	<4-1>	河湖相淤泥质土层	0.5~27.7 m
冲积 - 洪积土层	<4-2>	塑状粉质黏土层	0.5~10.7 m
	<5-1>	硬塑砂质黏性土	0.6~17.4 m
残积土层	<5-1>	硬塑砂质黏性土	0.6~17.4 m
岩石全风化带	<6-1>	全风化变质岩	1.0~3.5 m
岩石强风化带	<7-1>	强风化混合花岗岩	0.5~20.3 m

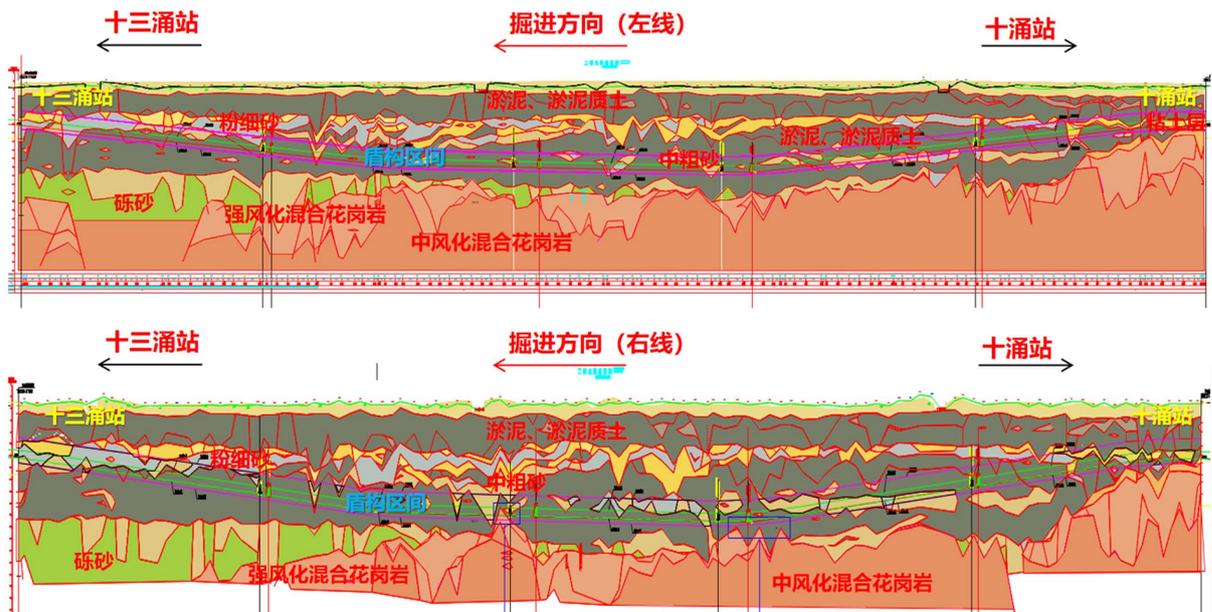


Figure 2. Schematic diagram of the longitudinal profile of the shield tunnel section
图 2. 盾构隧道区间线路纵断面示意图

3. 施工现场监测方案

3.1. 监测内容及测点命名

盾构隧道的监测内容主要有：地表沉降、建筑物沉降、桥墩沉降等。根据《城市轨道交通工程测量规范》[7]、《工程测量通用规范》[8]，设置本研究相关的监测内容，如表 2。

Table 2. Surface monitoring point statistics table
表 2. 地表监测点统计表

序号	测点类型	点位个数	监测点布设	监测仪器
1	建筑物沉降	152	L 型弯钩	电子水准仪
2	桥墩沉降	162	L 型棱镜或 L 型弯钩	徕卡全站仪或电子水准仪
3	地表沉降	1200	Φ20 钢筋	电子水准仪

地表沉降作为测量盾构掘进过程中引起位移的最直观指标，在整个施工过程中需要监测，最主要监测其竖向沉降。地表变形监测点沿每条隧道或分部开挖导洞的轴线上方地表布设，沿纵断面每 10 m 设置一个测点，沿隧道轴线每 50 m 设一横断面，根据实际情况在横断面的地表两侧各 30 m 内设定共 15~19 个测点。并在临近重要建构筑物结合其测点布置适当加密监测断面或测点。其中，纵向监测点以左、右线里程编号(ZD + 序号、YD + 序号)，横向监测点里程编号(D + 横断面序号 - 序号)。

3.2. 监测频率

监测频率的设置是决定监测结果优劣的重要因素。如果监测频率设置过高，会显著增加施工现场的工作负担；如果频率设置过低，则难以及时响应地表的沉降变化。故在盾构机距离监测断面较远时，监测频率较低；而当距离较近时，需要适当提高频率。目前，关于监测频率并没有统一的理论指导，通常依据经验来确定。一般情况下，监测频率可参考表 3 中的标准。

Table 3. Shield tunnel monitoring frequency table
表 3. 盾构隧道监测频率表

序号	监测部位	监测对象	开挖面到监测点或监测断面距离	监测频率
1	开挖前方	周围岩体上、周边环境	$5D < L \leq 8D$	1 次/(3~5 天)
			$3D < L \leq 5D$	1 次/2 天
			$L \leq 3D$	1 次/1 天
2	开挖后方	管片结构、周围岩土体和周边环境	$L \leq 3D$	(1~2 次)/1 天
			$3D < L \leq 8D$	1 次/(1~2 天)
			$L > 8D$	1 次/(3~7 天)

在表格中，D 为盾构隧道开挖直径(m)，L 为开挖面至监测点或监测断面的水平距离(m)，且当盾构机离开监测断面一定时间后，沉降将要达到稳定时，即监测数据显示最后 100 天内的沉降速率均小于 0.04 mm/d，降低监测频率 1 次/30 天。

3.3. 监测区间及现场监测点布置

考虑区间线路盾构长度较长，直接监测分析不能很好的反应施工期地表沉降的趋势及走向。并且盾构隧道埋深落差也较大，而区间线路坡型为 V 字坡，所以考虑在区间线路的上下坡段各选取一个区间，在隧道埋深最深处附近选取一个区间，对于这三个区间的地表沉降进行现场监测及数据分析：

1 区间为下坡监测区间，其范围为 D14 横断面前后各 40 m，位于从始发井开始第 55 环到第 105 环管片的位置，隧道上覆土厚度约为 17.8~19.3 m，纵断面沿左右线隧道轴线方向各布置 9 个纵向监测点，横断面布置 19 个横向监测点，其中 ZD14 布置在左线中心线上方，D14-9 布置在双线隧道中轴线上方，YD14 布置在右线中心线上方，具体现场监测点位平面布置图如图 3 所示。

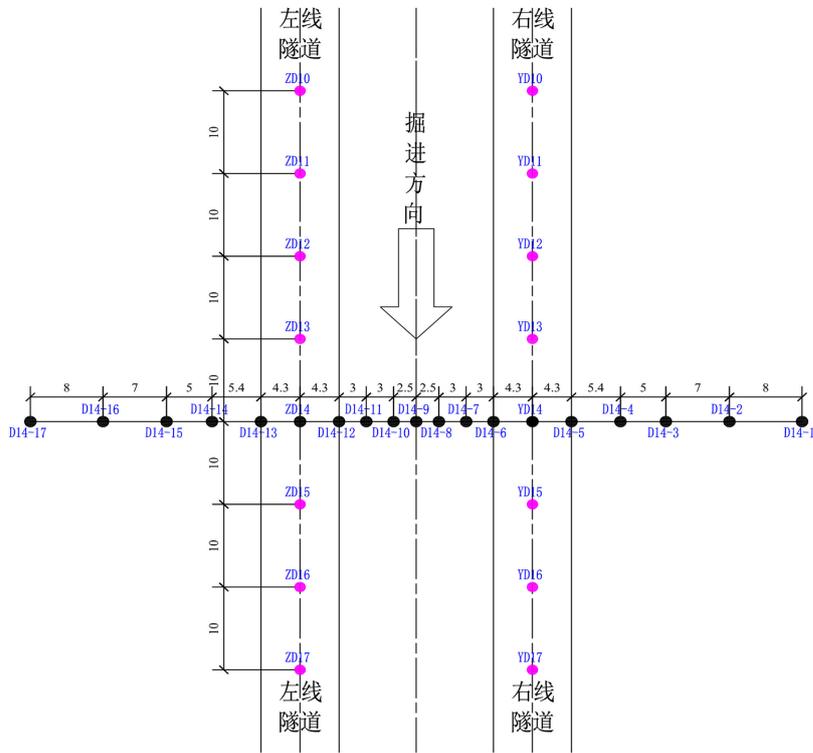


Figure 3. 1 Plan layout of on-site monitoring points in the section (unit: m)
图 3. 1 区间现场监测点位平面布置图(单位: m)

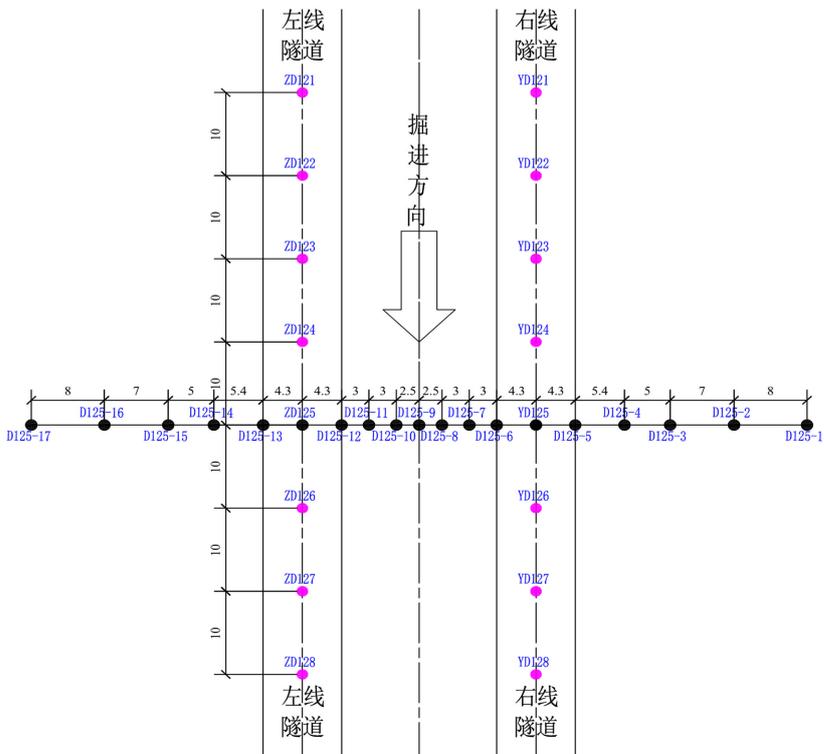


Figure 4. 2 Plan layout of on-site monitoring points in the section (unit: m)
图 4. 2 区间现场监测点位平面布置图(单位: m)

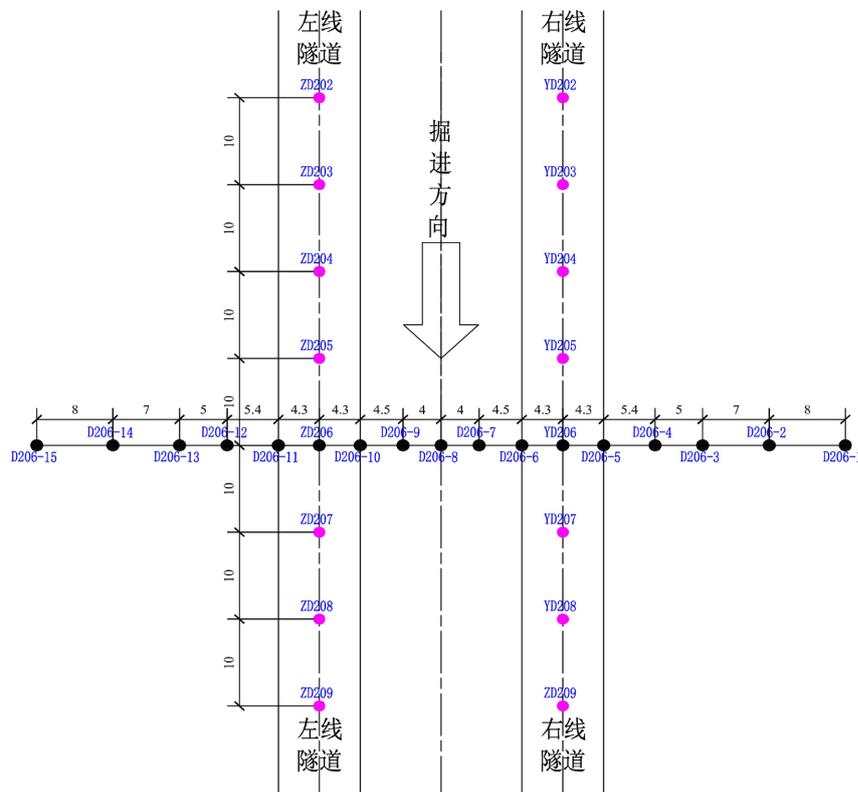


Figure 5.3 Plan layout of on-site monitoring points in the section (unit: m)
 图 5.3 区间现场监测点位平面布置图(单位: m)

2 区间为最深处监测区间,其范围为 D125 横断面前后各 40 m,位于从始发井开始第 750 环到第 800 环管片的位置,隧道上覆土厚度约为 34.1~35.2 m,纵断面沿左右线隧道轴线方向各布置 9 个纵向监测点,横断面布置 19 个横向监测点,其中 ZD125 布置在左线中心线上方,D125-9 布置在双线隧道中轴线上方,YD125 布置在右线中心线上方,具体现场监测点位平面布置图如图 4 所示。

3 区间为上坡监测区间,其范围为 D206 横断面前后各 40 m,位于从始发井开始第 1260 环到第 1310 环管片的位置,隧道上覆土厚度约为 28.6~30.3 m,纵断面沿左右线隧道轴线方向各布置 9 个纵向监测点,横断面布置 17 个横向监测点,其中 ZD206 布置在左线中心线上方,D206-8 布置在双线隧道中轴线上方,YD206 布置在右线中心线上方,具体现场监测点位平面布置图如图 5 所示。

4. 施工现场监测结果分析

4.1. 横向地表沉降分析

结合各区间断面的现场布置图,本章节对区间的双线隧道地表的横向地表进行沉降监测,并将每个区间的监测点沉降分为 3 个阶段,即左线通过阶段、右线通过阶段和双线通过阶段。其中,图 6、图 7 和图 8 表示 1、2 和 3 区间左线通过阶段的横向地表沉降,图 9、图 10 和图 11 表示 1、2 和 3 区间右线通过阶段的横向地表沉降,图 12、图 13 和图 14 表示 1、2 和 3 区间双线通过阶段的横向地表沉降。

在左、右线通过阶段,按照盾构机与监测断面的位置关系,分别统计通过断面 10 环前、通过断面时、通过断面 10 环后的横向地表沉降量,按照各监测点位的实时沉降数据绘制折线图。在双线通过阶段,此时盾构机已分别通过断面 30 环以上,且沉降趋于稳定,故按照各监测点位的最终沉降数据绘制折线图。

图 6、图 7 和图 8 分别为 1、2 和 3 区间左线通过阶段的横向地表沉降图，此时右线掘进还未进入区间，故其横向地表沉降折线与单线隧道相似，为类似高斯拟合的沉降槽。同时，各区间的最大地表沉降监测点为 ZD14、ZD125 和 ZD206，即 -12.8 m 处，这也与左线隧道轴线相符。各区间的最大地表沉降量分别为 -9.54 mm、-6.69 mm 和 -7.64 mm。

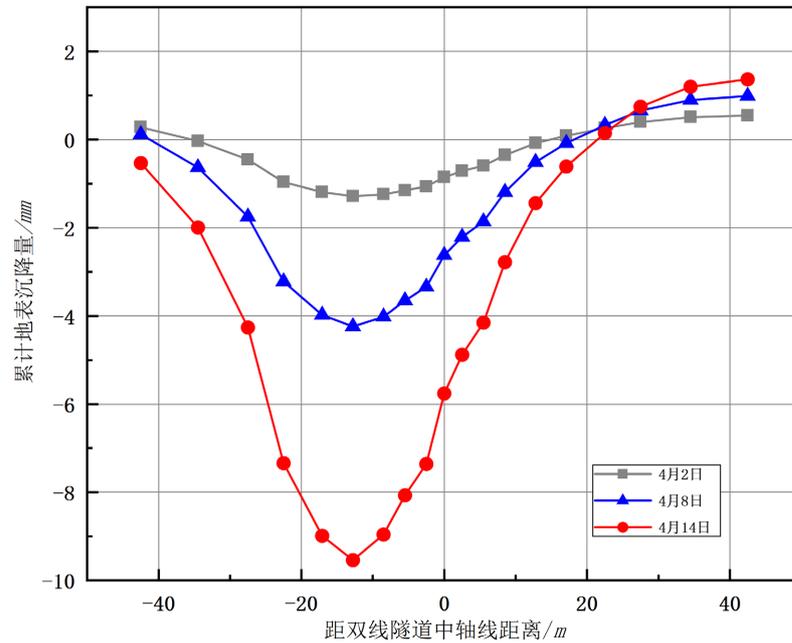


Figure 6. 1 Left-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
图 6. 1 区间左线盾构横向地表沉降图

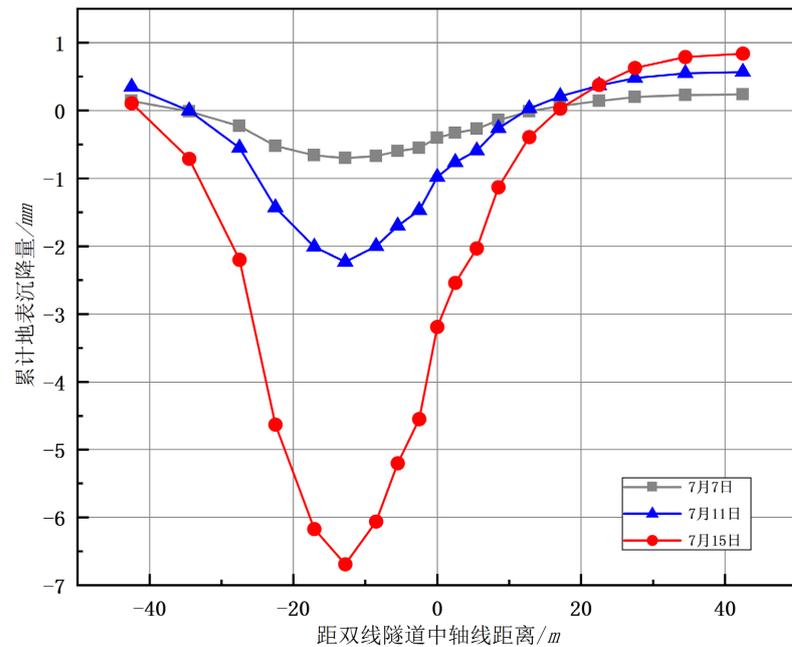


Figure 7. 2 Left-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
图 7. 2 区间左线盾构横向地表沉降图

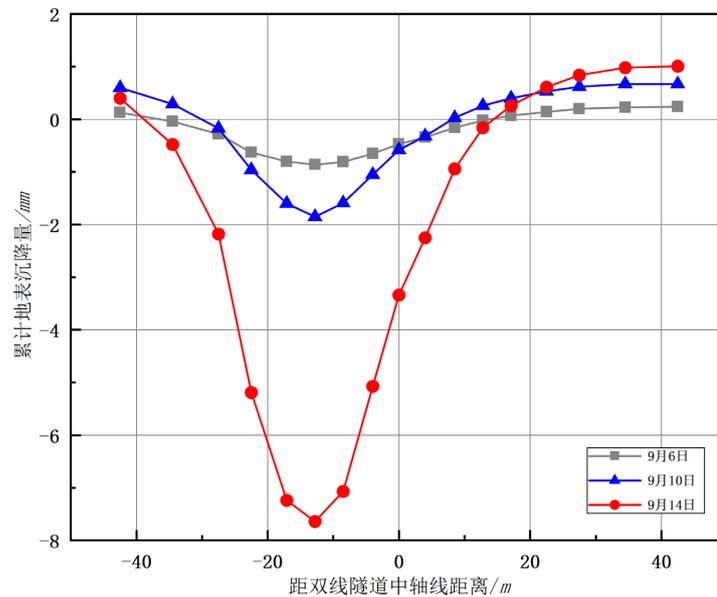


Figure 8.3 Left-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
图 8.3 区间左线盾构横向地表沉降图

图 9、图 10 和图 11 分别为 1、2 和 3 区间右线通过阶段的横向地表沉降图，此时左线盾构机掘进已经通过的断面 10 环以上，但仍在沉降，故后发掘进的右线地表沉降受先发掘进的左线地表沉降的影响，且整体沉降趋势进一步加深。此时，受右线隧道掘进影响，各区间的最大地表沉降监测点开始右移，并在通过断面 10 环后达到右线通过阶段的最大沉降量。三个区间的最大地表沉降监测点为 D-14-12、D-125-12 和 D-206-10，即 -8.5 m 处，各区间的最大地表沉降量分别为 -20.68 mm、-13.13 mm 和 -15.65 mm。

此阶段的横向地表沉降折线已经与标准高斯拟合曲线有明显差异，但是左线一侧的沉降量还是明显大于右线一侧，且仅有图 11 所示的 D-206 断面有较明显的第二个沉降槽叠加。

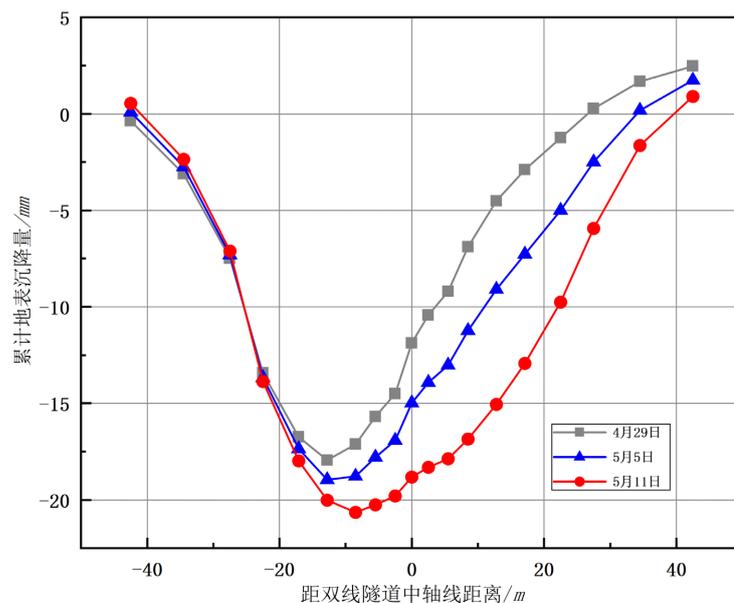


Figure 9.1 Right-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
图 9.1 区间右线盾构横向地表沉降图

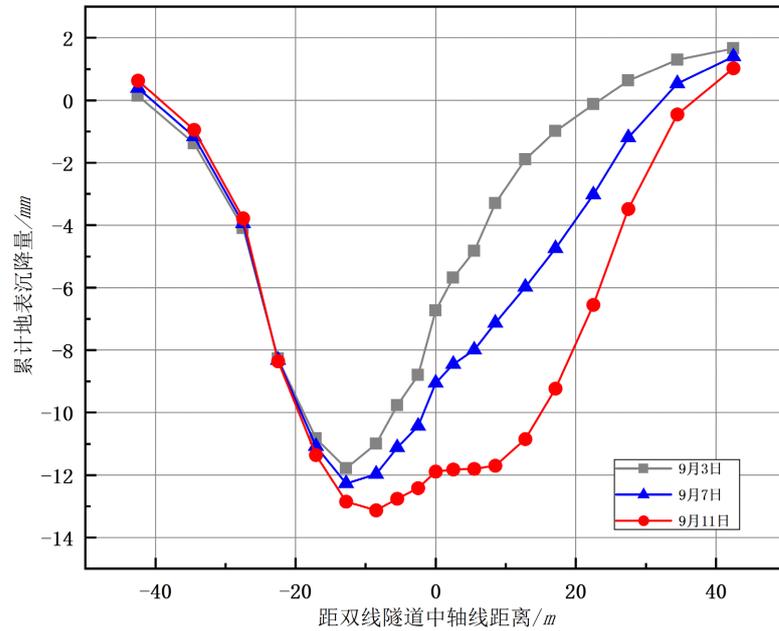


Figure 10. 2 Right-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
 图 10. 2 区间右线盾构横向地表沉降图

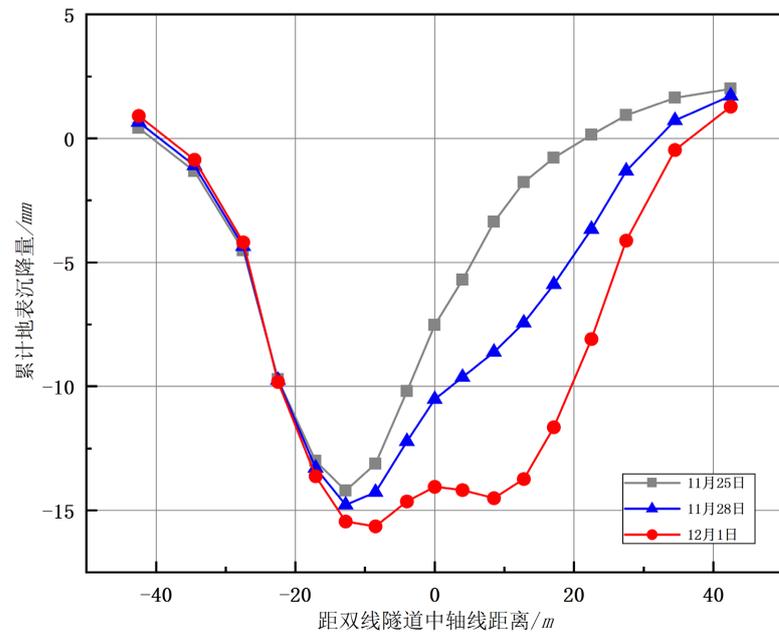


Figure 11. 3 Right-line shield tunnel horizontal ground surface settlement line diagram
 图 11. 3 区间右线盾构横向地表沉降图

图 12、图 13 和图 14 分别为 1、2 和 3 区间双线通过阶段的横向地表沉降图，此阶段双线盾构机都已通过研究断面的 30 环以上，且沉降趋于稳定。此时，横向地表沉降受先后掘进顺序影响，各区间的最大地表沉降监测点继续右移，并已达到双线通过阶段的最大沉降量。三个区间的最大地表沉降监测点为 D-14-6、D-125-6 和 D-206-6，即 8.5 m 处，各区间的最大地表沉降量分别为 -22.21 mm、-16.49 mm 和 -19.68 mm。

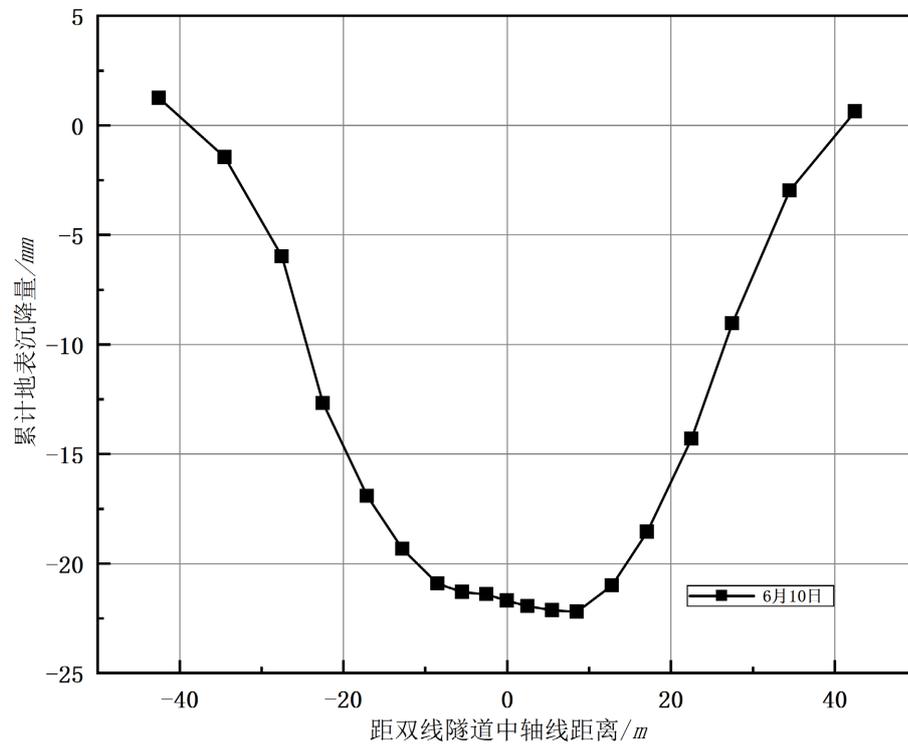


Figure 12. 1 Double-line shield tunnel through transverse ground surface settlement line diagram
 图 12. 1 区间双线盾构通过横向地表沉降图

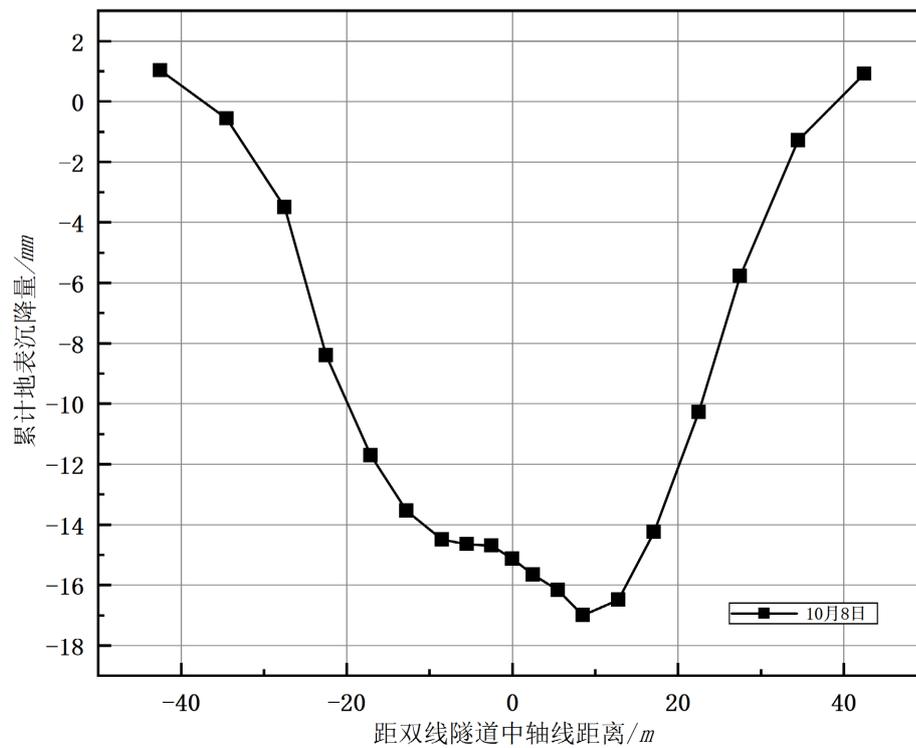


Figure 13. 2 Double-line shield tunnel through transverse ground surface settlement line diagram
 图 13. 2 区间双线盾构通过横向地表沉降图

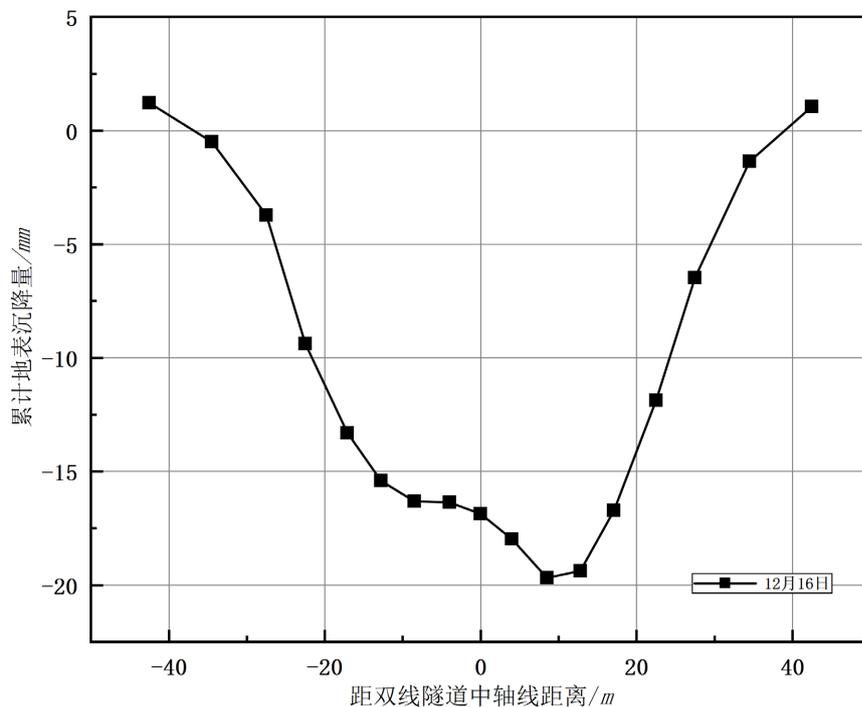


Figure 14.3 Double-line shield tunnel through transverse ground surface settlement line diagram
图 14.3 区间双线盾构通过横向地表沉降图

值得注意的是，此阶段的横向地表沉降曲线已可拟合为左右线引起的两个沉降槽叠加，且右线掘进引起的沉降量变化大于左线掘进引起的沉降量变化。经研究分析，推测为先发左线的掘进引起了土层扰动，使得土体的结构更加松散，故后发右线掘进时能在邻近引起更大的地表沉降。

4.2. 纵向地表沉降分析

在各区间纵断面的现场布置时，沿着双线隧道轴线上方地表，每隔 10 m 设置一个纵向监测点。即在长度为 80 m 的 3 个区间内，分别在双线隧道轴线方向的地表，各布置 9 个纵向监测点，每区间共布置 18 个纵向监测点。本章节对区间双线隧道地表的纵向分别进行沉降监测，并将每个区间的监测点沉降分为 2 个阶段，即左线掘进阶段、右线掘进阶段。其中，图 15、图 16 和图 17 表示 1、2 和 3 区间左线掘进阶段的纵向地表沉降过程的两个阶段，图 18、图 19 和图 20 表示 1、2 和 3 区间右线掘进阶段的纵向地表沉降。

在各纵断面地表沉降监测中，按照盾构机与监测断面的位置关系，以盾构机到达选取断面时为基准，定义此时为距离横断面 0 环时。然后在确定到达横断面 0 环时后，依次确定，到达横断面 20 环前，到达横断面 10 环前，通过横断面 10 环后，通过横断面 20 环后和通过横断面 30 环后，并依此绘制成图。

图 15、图 16 和图 17 分别为 1、2 和 3 区间左线掘进阶段的纵向地表沉降图，左线为先发线，此时右线掘进还未进入各区间的影响范围。随着盾构掘进，各监测点皆呈现沉降趋势，并通过横断面 10 环后与 20 环后的对比，得出结论沉降已逐渐趋于稳定。各区间的最大地表沉降监测点为 ZD10、ZD121 和 ZD202，即 -40 m 处，各区间的最大地表沉降量分别为 -4.96 mm、-6.76 mm 和 -7.94 mm。

图 15、图 16 和图 17 内的折线总体呈现随距离增加斜率逐渐降低的趋势，经过研究分析，推断盾构机在掘进中，收到前进方向反向的土层推力，使得盾构机后方的土体呈现一定隆起的趋势，且随盾构机的远离而减小，但因为土层的损失使得地表沉降的量更大，折线均呈现随距离增加斜率逐渐降低的趋势。

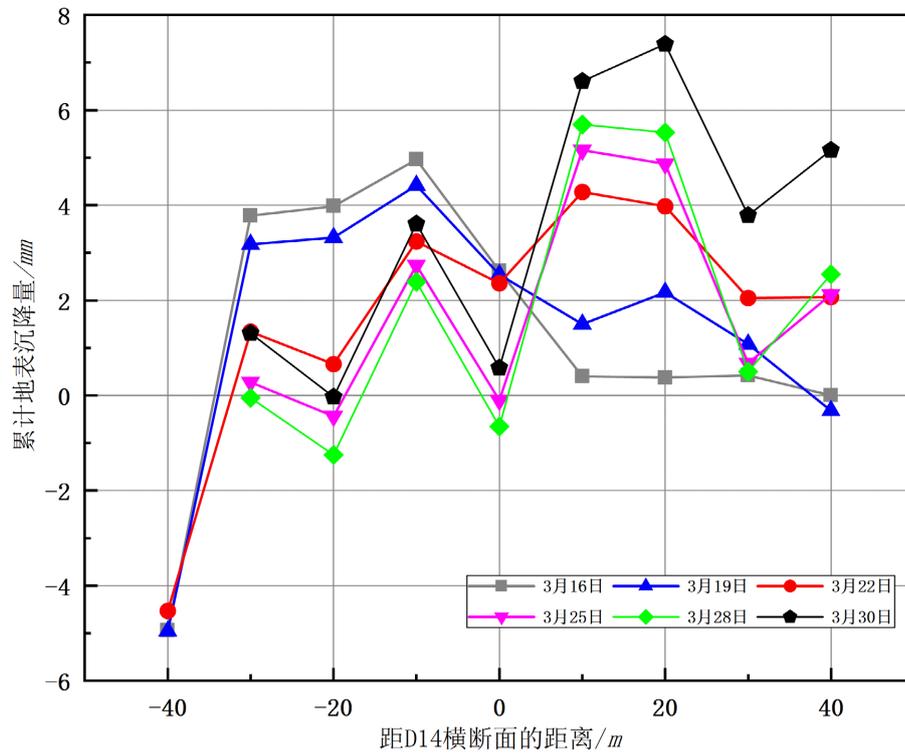


Figure 15. 1 Left-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 15. 1 区间左线盾构纵向地表沉降图

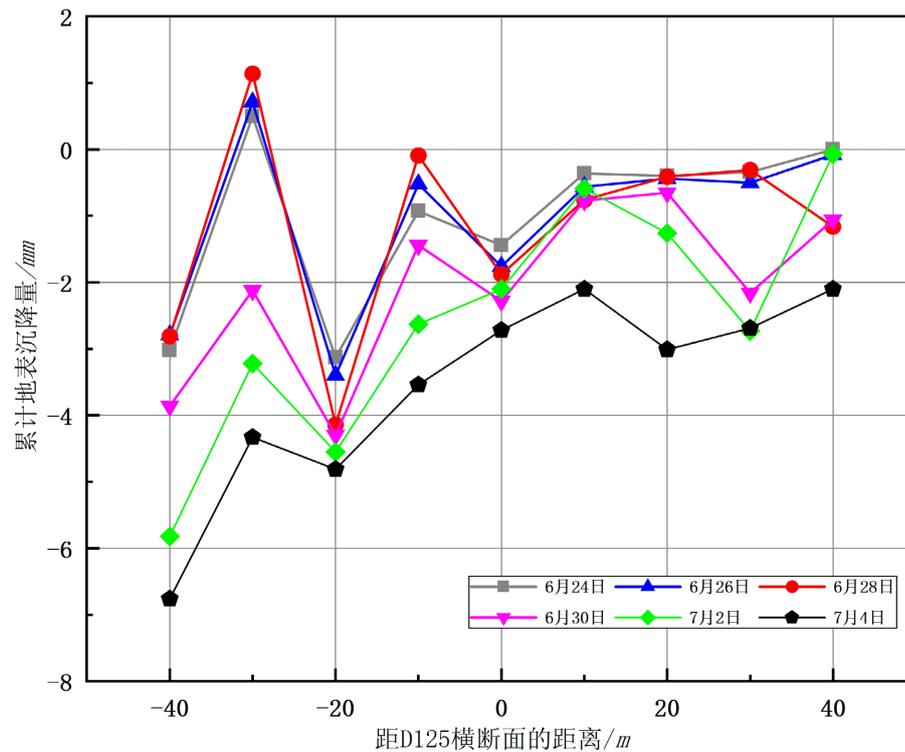


Figure 16. 2 Left-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 16. 2 区间左线盾构纵向地表沉降图

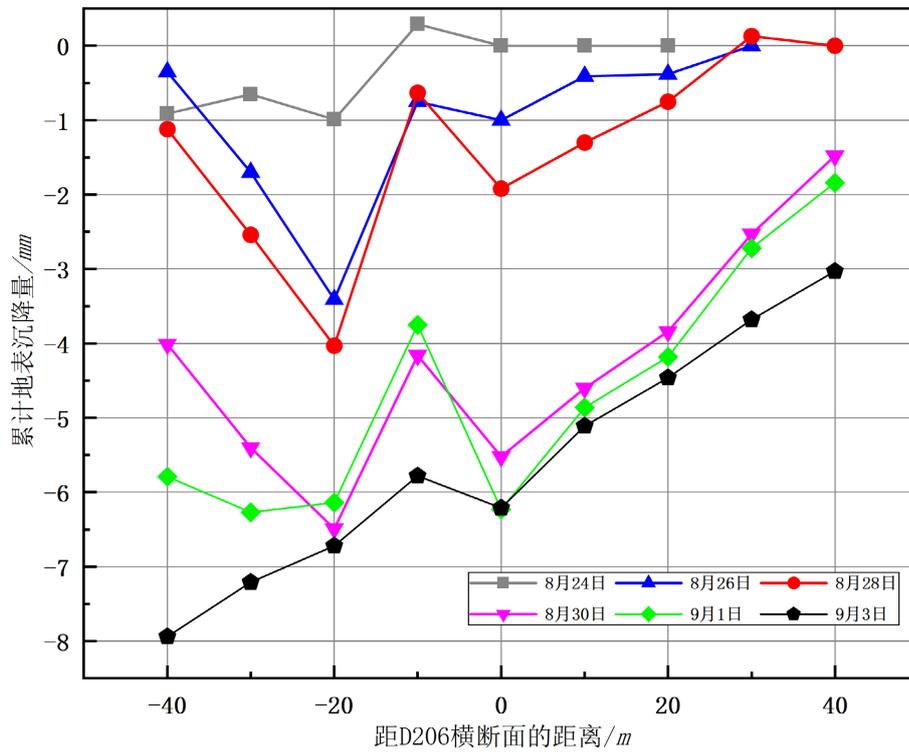


Figure 17. 3 Left-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 17. 3 区间左线盾构纵向地表沉降图

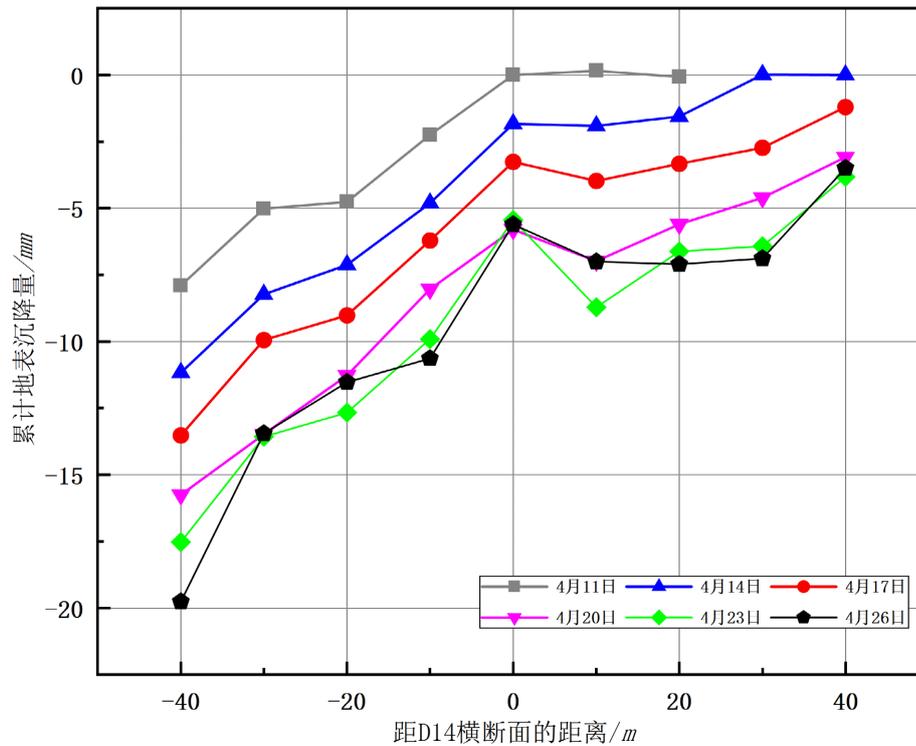


Figure 18. 1 Right-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 18. 1 区间右线盾构纵向地表沉降图

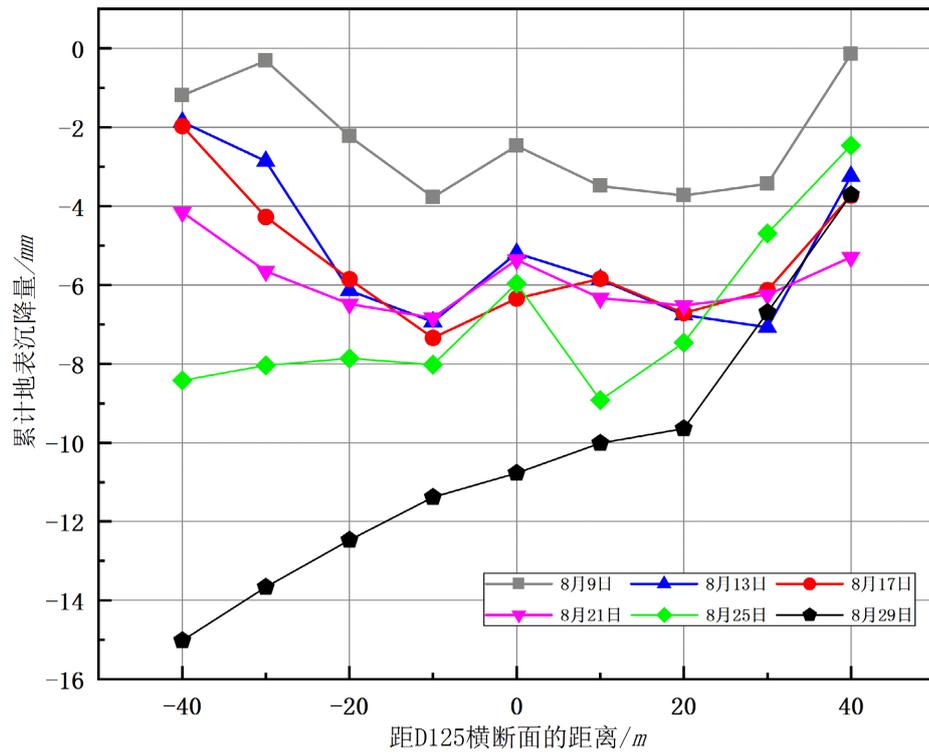


Figure 19. 2 Right-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 19. 2 区间右线盾构纵向地表沉降图

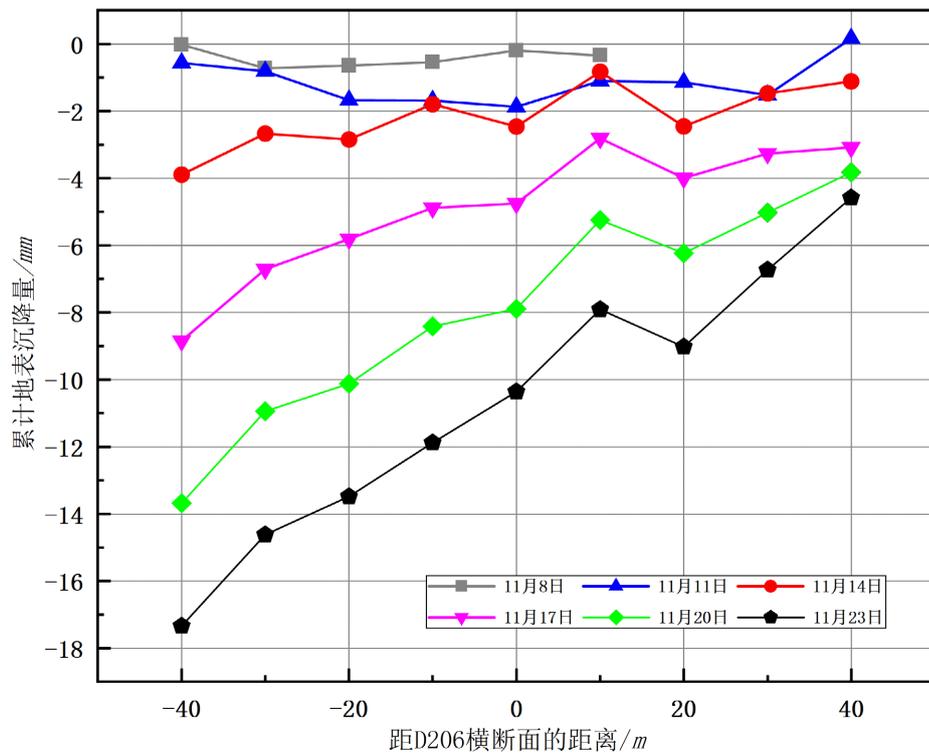


Figure 20. 3 Right-line shield tunnel longitudinal ground surface settlement line diagram
 图 20. 3 区间右线盾构纵向地表沉降图

图 18、图 19 和图 20 分别为 1、2 和 3 区间右线掘进阶段的纵向地表沉降图，右线为后发线，通过横向地表沉降分析，知此时右线隧道轴线上方土体受左线掘进影响而沉降，并且随着盾构掘进，右线地表的各监测点沉降量增加，并逐渐趋于稳定。各区间的最大地表沉降监测点为 YD10、YD121 和 YD202，即-40 m 处，各区间的最大地表沉降量分别为-19.76 mm、-15.02 mm 和-17.34 mm。

值得注意的是，-19.76 mm、-15.02 mm 和-17.34 mm 为 1、2 和 3 区间纵向现场监测阶段的最大沉降值，且 3 个区间的沉降量有较明显的差距。经过研究分析，推断盾构施工期地表沉降量与上覆土厚度及土层刚度相关，而各区间隧道上覆土厚度分别为 17.8~19.3 m、34.1~35.2 m 和 28.6~30.3 m，软弱土层的厚度也因埋深而增加，这说明地表沉降的大小与隧道上覆土厚度呈负相关，与土层刚度也呈负相关。

5. 结论

通过对双线大直径盾构隧道施工期沉降的现场监测及研究分析，得出以下结论：

1) 在横向地表沉降监测中，左线为先发线通过区间后，横向沉降折线呈类似高斯曲线，地表沉降的最大值点位于左线隧道轴线上方地表土体；右线为后发线通过区间后，地表继续沉降，横向沉降折线可以类比一个标准高斯曲线右侧叠加一个不完整的高斯曲线，地表沉降的最大值点开始右移，但仍然位于左线隧道轴线与双线隧道中轴线的上方地表之间。

2) 在横向地表沉降监测中，双线隧道通过区间后，横向沉降近似为以左线隧道轴线为对称轴和以右线隧道轴线为对称轴的两个高斯拟合曲线叠加，但此时的沉降折线整体不对称，地表沉降的最大值点继续右移，位于双线隧道中轴线与右线隧道轴线的上方地表之间。推断原因为先发左线的掘进引起了土层扰动，使得土体的结构更加松散，故后发右线掘进时能在邻近引起更大的地表沉降。

3) 在纵向地表沉降监测中，折线总体呈现随距离增加斜率逐渐降低的趋势，推断盾构机在掘进中，受到前进方向反向的土层推力，使得盾构机后方的土体呈现一定隆起的趋势，且随盾构机的远离而减小，但因为土层的损失使得地表沉降的量更大，故呈现此趋势。

4) 在横纵断面现场监测过程中，不同监测区间的沉降量有明显的差距，推断在盾构机相关参数类似的情况下，地表沉降的大小与隧道上覆土厚度呈负相关，与土层刚度也呈负相关。本研究得到的沉降参数，可以为未来珠三角地区类似工程的设计提供参考。讨论后发现隧道沉降的放大效应，可以为施工控制中预留变形量提供依据。

参考文献

- [1] Chen, R.P., Zhu, J., Liu, W. and Tang, X.W. (2011) Ground Movement Induced by Parallel EPB Tunnels in Silty Soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.09.004>
- [2] 魏新江, 周洋, 魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地层位移影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 73-79.
- [3] 梁浩, 程池浩, 廖少明, 等. 泥水盾构穿越吹填土变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 848-852.
- [4] 司金标, 朱瑶宏, 季昌, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1551-1559.
- [5] 晁峰, 王明年, 刘大刚, 等. 板岩地层盾构掘进对地层扰动的现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 138-144.
- [6] 朱科峰, 张宏远, 张晓菲. 盾构法隧道与地下通道长距离平行叠置施工实测数据分析[J]. 隧道与轨道交通, 2022(4): 14-16+65.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程测量规范 GB/T50308-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量通用规范 GB 55018-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.