

曲线平行双隧道施工引起的地表沉降规律分析

张 雁¹, 冯 浩², 璩继立¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 曲线双隧道开挖不同于直线型隧道, 近年来曲线线型多应用于地铁隧道。为研究地铁常见的曲线平行双隧道施工引起的地表沉降规律, 基于吉隆坡 MRT 一期北段工程的施工实测数据, 对 4 个位于不同曲线半径处的观测面沉降数据进行了分析。分析结果表明: 单线曲线隧道引起的地表沉降槽有不对称现象, 最大沉降值位置在隧道轴线下方; 当覆土厚度等于隧道轴线距离时, 曲线平行双隧道引起的地表沉降槽为对称的高斯分布, 最大沉降位置在双线隧道中线位置处; 随着曲线半径减小, 地表沉降量将增大, 当半径减小到 300 m 时沉降显著增加, 减小千斤顶速度对减小沉降量影响不明显, 应保持合理的土仓压力并适度提高注浆量。

关键词: 曲线平行双隧道; 盾构参数; 地表沉降

中图分类号: U 45 **文献标志码:** A

Case Study on the Surface Settlement Induced by Shielding Curved Twin Tunnels

ZHANG Yan¹, FENG Hao², QU Jili¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The surface settlement induced by curved twin tunnels is different from that induced by straight twin tunnels. In recent years, the curved alignment has usually been applied to metro tunnels. Based on the in-situ data from the first phase project of MRT in Kuala Lumpur, the surface settlement induced by the excavation of curved twin tunnels was analyzed. Four observation cross sections located in the portions with different radius of curved alignment were chosen to study the surface settlement profile of curved alignment. The results show that the surface settlement profile caused by a curved single tunnel sometimes tends to be asymmetrical and the surface settlement on the internal of alignment subsides is more than that on the external, which may caused by the uneven jacking thrust. The maximum settlement occurs under the tunnel axis. When the distance between two tunnels is equal to the cover depth, the surface settlement profile caused by curved twin tunnels with different radius is always a V-shaped symmetric Gauss curve like that caused by straight twin tunnels. The maximum settlement occurs on the middle line of twin tunnels. As the radius of curved alignment decreases, the maximum surface settlement increases. Especially, when the radius decreases to be 300 m, the maximum settlement increases significantly, which could be effectively alleviated by a reasonable earth pressure

and a moderate increase of grouting volume rather than by slowing down the speed of jacks.

Keywords: curved twin tunnels; parameter of shield machine; surface settlement

隧道开挖时, 开挖面附近土体受到扰动, 围岩应力发生变化, 使得围岩松动并向开挖面移动, 引起地表沉降。盾构地铁区间隧道大多采用双孔平行形式, 上下行隧道平行近距离先后开挖。在近距离情况下, 两次开挖使周围土体扰动相互影响, 可能造成比单隧道开挖更大的地表沉降。受城市规划、地表已有建筑等限制, 曲线盾构隧道越来越多出现在城市地铁隧道中。为保护地表建筑和设施, 预测和控制地表变形一直是工程界关注的重点。曲线盾构隧道由于施工时需要不断地超挖纠偏, 引起的地表沉降不同于直线盾构隧道情况。因此, 合理预测曲线盾构隧道引起的地表沉降显得尤为重要。

1969年, Peck^[1]提出正态分布曲线模型, 用以估算单线隧道引起的地表沉降规律。大量的工程案例表明 Peck 公式预测结果比较符合实测数据。对于近距离平行隧道施工, 由于先、后行隧道前后施工的相互扰动影响, 使得对地表沉降的预测更为复杂。目前一般认为双线隧道地表沉降槽与平行隧道的水平间距、埋深有关^[2-12]。魏纲等^[2]认为当双线隧道间距大于 0.79 隧道轴线覆土厚度时, 横向地表沉降槽呈 W 形状; 当双线隧道间距小于 0.66 倍隧道轴线覆土厚度时, 两条隧道为近距离隧道, 地表沉降槽符合正态分布。蒙晓莲^[9]通过 ANSYS 软件模拟了不同曲线半径时单线隧道施工引起的地表沉降,

发现开挖面的横向地表沉降槽关于隧道轴线明显不对称, 曲线半径越小, 地表最大沉降值越大。

目前, 关于平行双隧道引起的地表沉降研究多为针对直线段隧道施工的情况, 鲜有对曲线段施工工况下的研究。本文基于马来西亚 MRT 一期工程的实测数据, 对不同曲线半径处的地表沉降槽进行研究, 分析其地表沉降的特征。本文的研究成果可作为有益经验指导类似的工程建设。

1 工程概况

如图 1 所示, 吉隆坡 MRT 项目一期北段工程为三马丹北港经吉隆坡中心站至市场中心站区间隧道, 工程总长 2 716 m。南北双线平行隧道采用土压平衡盾构施工, 北线施工盾构为 TBM1, 南线施工盾构为 TBM2。双线隧道中心轴距为 13 m, 平均覆土厚度约为 13 m。隧道管片内径为 5.8 m, 管片厚度为 275 mm, 管片长度为 1.4 m, 采用 5+2+1 的单层钢纤维混凝土管片错缝拼装。转弯段采用楔形衬砌环与直线衬砌环的组合方式, 即左转弯、右转弯楔形衬砌环和直线衬砌环。盾构机壳体长度为 9.89 m, 5.39 m 处设铰接装置。刀盘直径 6 670 mm, 盾构外径 6 630 mm、内径 6 490 mm。盾构机平均掘进速度为每天 8 环, 北线较南线先行 30 d 始发。



图 1 总平面图
Fig.1 Site plan plot

根据地质钻孔资料(见 图 2), 该施工段隧道主要处于风化的肯尼山残积土层之中。被风化的肯尼山构造复杂, 地层多样化, 软硬相间, 大段地

层包含着土石夹层或者岩土相间的地层。隧道掘进范围存在高度风化的石英岩、千枚岩、泥岩等岩体, 岩石等级基本为 4 级, 岩层节理裂隙发

育，岩体强度大部分在 30 MPa 以内。风化的肯尼山残积土大致分为 A, B, C 这 3 类，土体力学性质见表 1。表 1 中： N 为标准贯入度值； γ 为土体容重； E 为土体弹性模量； c' 为土体有效黏聚力； φ' 为土体有效内摩擦角。本文研究的断面 CH1+448，

CH1+518 和 CH2+400，隧道主要穿越砂质粉土和砾质粉土，为 A 类土体；断面 CH1+960，隧道主要穿越稍微断裂的石英岩，为 C 类土体。地下水位位于地面以下 1~3 m，地层渗透系数为 $1.0\times10^{-6}\sim5.0\times10^{-5}$ m/s。

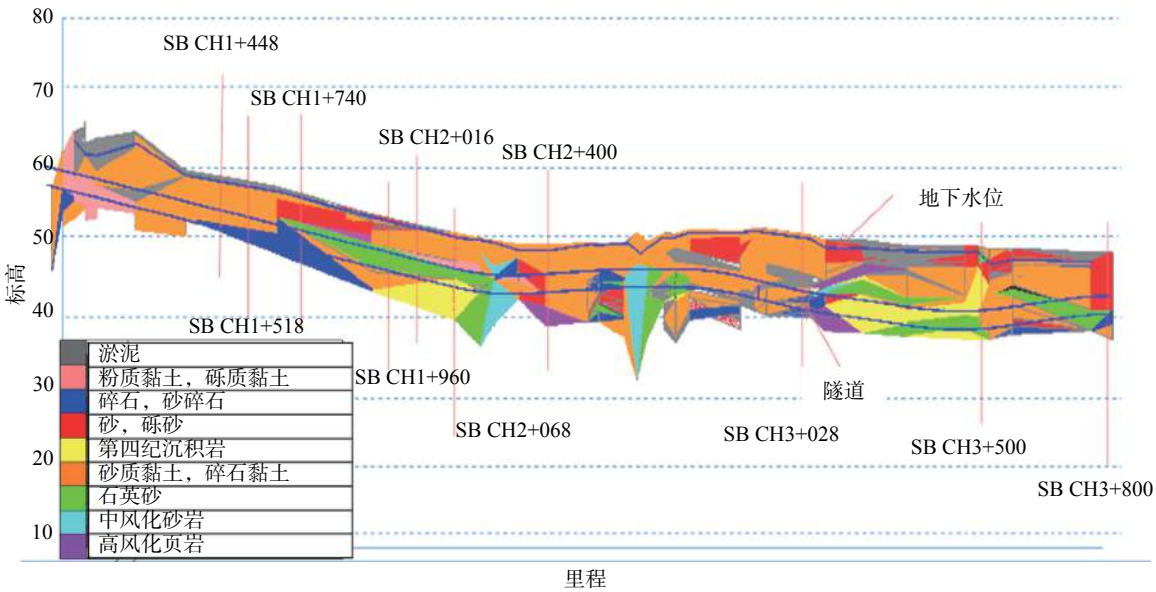


图 2 地质剖面图
Fig.2 Geological profile

表 1 土体物理力学参数
Tab.1 Physic-mechanical parameters of soils

类型	N	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
A	<30	18.5	<60	5	28
B	30~100	19.0	60~200	10	30
C	>100	20.0	>200	10	32

2 观测面选取

隧道区间施工段含有多个曲线段，为监测隧道施工引起的地表沉降，沿隧道纵向布置了多个沉降观测面，沿沉降观测面布置了若干沉降观测点。为研究双线隧道施工引起的地表沉降与曲线半径的关系，本文选取 4 个位于不同半径曲线段的观测面作为研究对象。曲线段观测面里程及相应的曲线半径分别为 CH1+448($R=500$ m)、CH1+518($R=400$ m)、CH1+960($R=700$ m)和 CH2+400($R=300$ m)。如图 3 所示，以观测面 CH1+518 为例建立坐标系， x 轴表示与南线隧道轴线的距离，则北线隧道轴线坐标为 $x=-13$ m， z 轴表示观测面的地表沉降量，地表隆

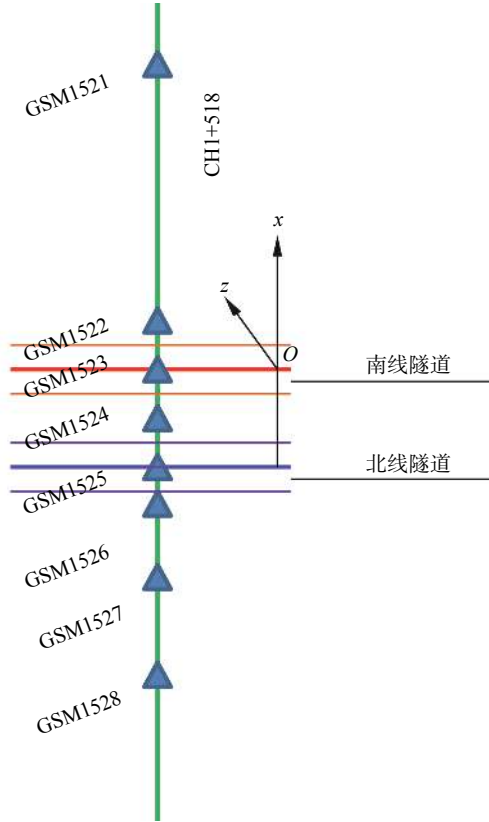


图 3 沉降观测面坐标轴示意图
Fig. 3 Coordinates for the observation cross section sketch map

起为正，沉降为负。垂直于双线隧道的绿色直线表示布置的观测面 CH1+518，GSM1521~1528 为布置在观测面上的地表沉降观测点。

3 盾构施工参数

盾构机的施工参数密切影响地表沉降，其中千斤顶速度、土仓压力和注浆量是主要影响地表沉降的因素。本文选取北线隧道盾构机 TBM1 和南线隧道盾构机 TBM2，分别对通过各观测面时的施工参数进行了统计分析。其中，盾构机 TBM1 通过断面 CH1+448 的盾构施工参数数据缺失，另有少数环号部分盾构施工数据缺失，由于整体数

据充分，这并不影响分析效果。

3.1 千斤顶速度

盾构机 TBM1 和 TBM2 通过各观测面时，千斤顶顶推速度如图 4 所示。由图 4 可知，盾构机 TBM2 通过观测面 CH1+448($R=500\text{ m}$)时，千斤顶平均速度为 35 mm/min 。盾构机 TBM1 通过观测面 CH1+518($R=400\text{ m}$)时，千斤顶平均速度为 35 mm/min ；盾构机 TBM2 通过时速度较慢，从 16 mm/min 逐渐加速，平均速度为 25 mm/min 。盾构机 TBM1 和 TBM2 通过观测面 CH1+1 960($R=700\text{ m}$)和 CH2+400($R=300\text{ m}$)时，千斤顶速度比较稳定，平均速度分别为 37 mm/min 和 33 mm/min ， 40 mm/min 和 31 mm/min 。

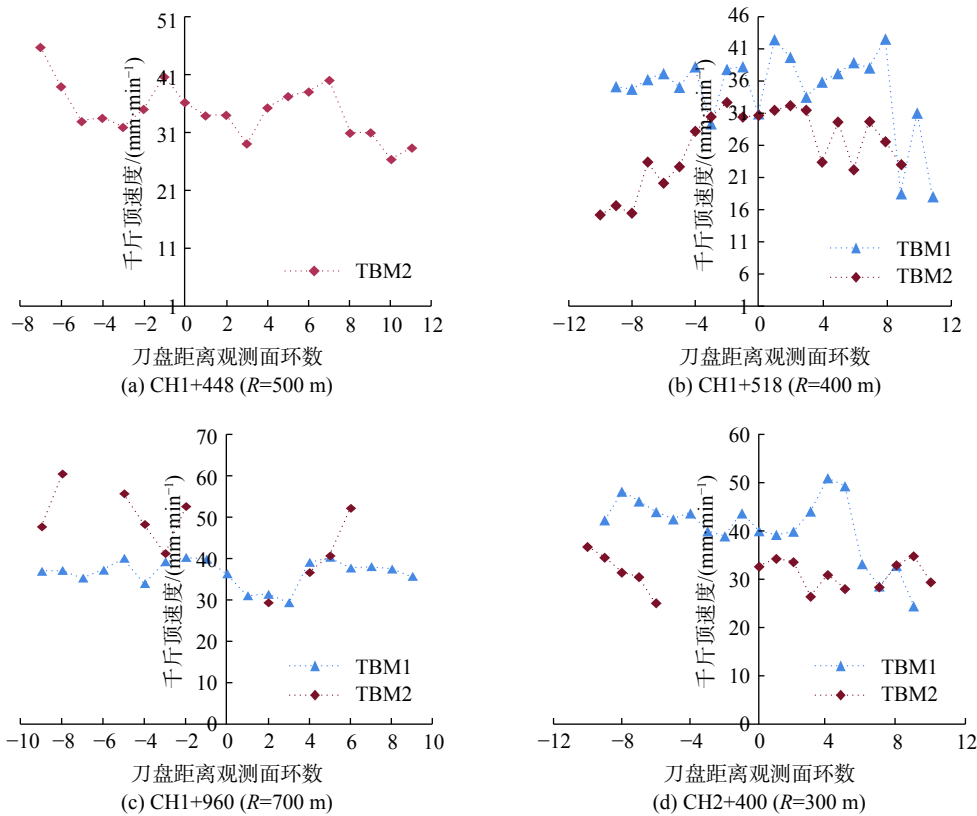


图 4 盾构机通过各观测面的千斤顶速度

Fig.4 Variation of the advancing speed of jacks at monitoring sections

3.2 土仓压力值

盾构机 TBM1 和 TBM2 通过各观测面时，土仓压力如图 5 所示。由图 5 可知，盾构机 TBM2 通过 CH1+448($R=500\text{ m}$)时，土仓压力平均值为 108 kPa 。盾构机 TBM1 通过 CH1+518($R=400\text{ m}$)时，土仓压力由 100 kPa 提高到 160 kPa ，平均为 109 kPa ；而盾构机 TBM2 通过该观测面时，土仓压力值比较稳定，基本维持在 100 kPa ，比盾构机

TBM1 低了 60 kPa 。盾构机 TBM1 和 TBM2 通过观测面 CH1+1 960($R=700\text{ m}$)和 CH2+400($R=300\text{ m}$)时，平均土仓压力分别为 $155, 165, 178, 205\text{ kPa}$ 。

3.3 注浆量

同步注浆采用双液浆，由 4 个注浆孔注入。盾构机 TBM1 和 TBM2 通过各观测面时，注浆量如图 6 所示。由图 6 可知，盾构机 TBM2 通过断面 CH1+448($R=500\text{ m}$)时，注浆量平均值为 4.7 m^3 。

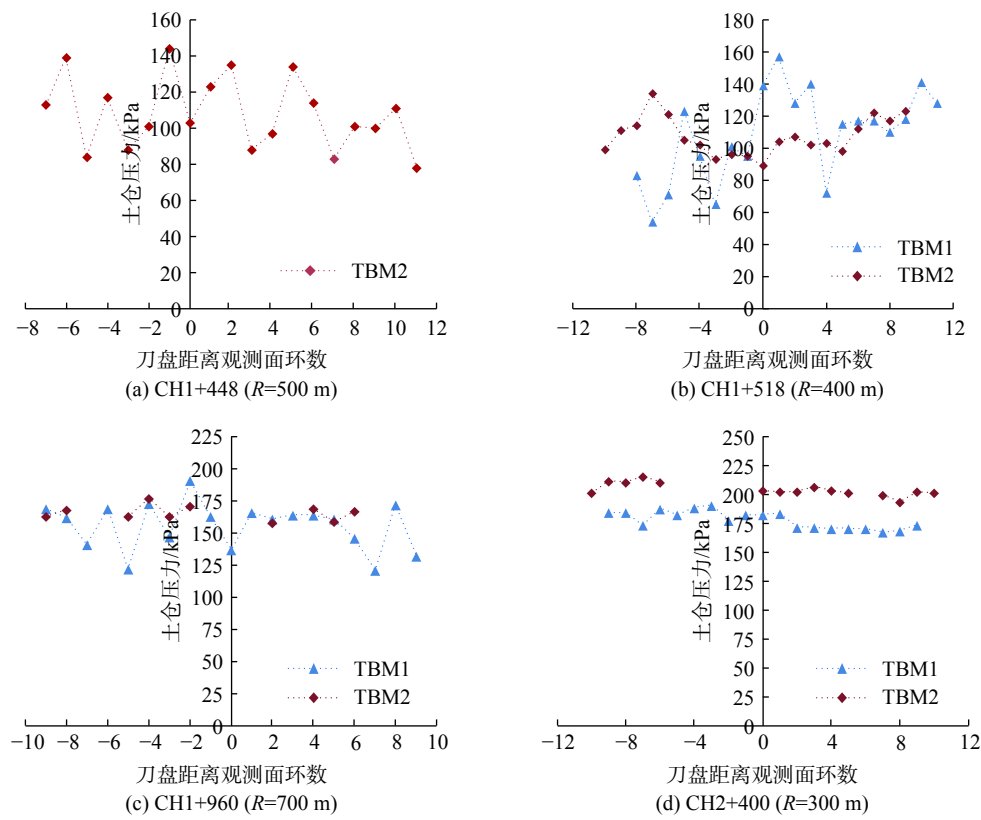


图 5 盾构机通过各观测面的土仓压力

Fig.5 Variation of the earth pressure at monitoring sections

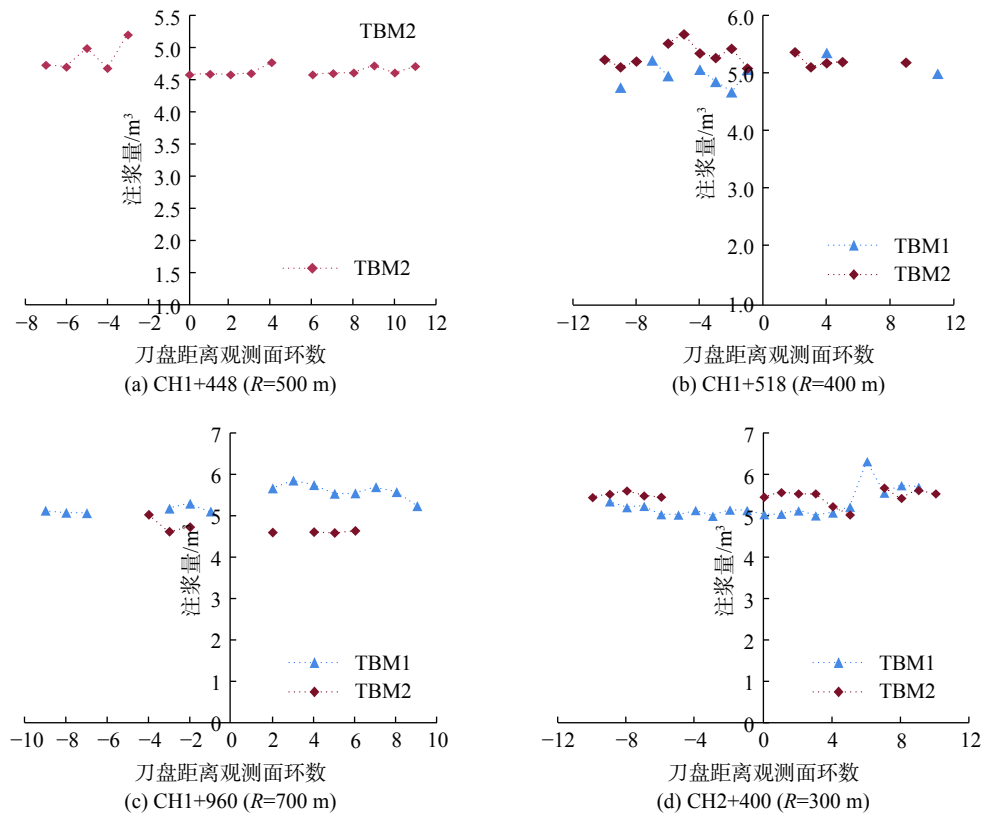


图 6 盾构机通过各观测面的注浆量

Fig.6 Variation of the grouting volume at monitoring sections

盾构机 TBM1 和 TBM2 分别通过断面 CH1+518 ($R=400\text{ m}$) 时, 注浆量平均为 5.0 m^3 和 5.3 m^3 。盾构机 TBM1 和 TBM2 通过观测面 CH1+1 960 ($R=700\text{ m}$) 和 CH2+400 ($R=300\text{ m}$) 时, 平均注浆量分别为 5.4 m^3 和 4.6 m^3 , 5.4 m^3 和 4.7 m^3 , 5.3 m^3 和 5.5 m^3 。

4 地表沉降

4.1 先行线盾构引起的地表沉降规律

北线盾构机 TBM1 通过观测面 5 d 后地表沉降趋于稳定, 通过观测面 20 d 后的地表沉降已经稳定, 如图 7 所示。由图 7 可知, 曲线盾构施工引起地表沉降槽与高斯拟合曲线有差异, 图 7(a), (b) 有不对称现象, 图 7(c), (d) 基本与高斯曲线吻合。盾构直线推进时, 千斤顶力均匀分布, 沉降槽为对称的高斯分布。当盾构曲线推进时, 曲线外侧的顶力大于内侧顶力, 外侧顶力的侧向分量使得曲线外侧土体有隆起趋势, 曲线内侧的土体比曲线外侧的土体沉降大。盾构通过后, 曲线

外侧隆起的土体逐渐下沉, 但是曲线内侧土体沉降仍然大于曲线外侧土体, 造成地表沉降槽不对称。曲线两侧的顶力差越大, 地表沉降槽不对称现象越明显。如图 7(a) 所示, 位于北线隧道内侧 3.5 m 处 ($x=-9.5\text{ m}$) 沉降值为 -3.4 mm , 大于位于曲线外侧 3.5 m 处 ($x=-16.5\text{ m}$) 的沉降值 -2.04 mm 。

位于不同曲线半径处的观测面, 实测最大沉降位置都位于北线隧道中线处, 即 $x=-13\text{ m}$ 处。根据高斯拟合曲线, 各观测面最大沉降位置也位于北线隧道中线附近, 往曲线内侧略有偏移。

盾构机 TBM1 通过观测面 CH1+960 ($R=700\text{ m}$) 时, 最大地表沉降量为 -6.43 mm ; 通过观测面 CH1+518 ($R=400\text{ m}$) 时, 最大地表沉降量为 -10.83 mm ; 通过观测面 CH2+400 ($R=300\text{ m}$) 时, 最大地表沉降量增加到 -13.91 mm 。可见, 地表沉降最大值有随曲线半径减小而增大的趋势。相比直线段隧道, 曲线隧道的曲线半径越小, 超挖量越大, 盾尾间隙越大, 在其他施工条件相同时引起的地表沉降量越大。

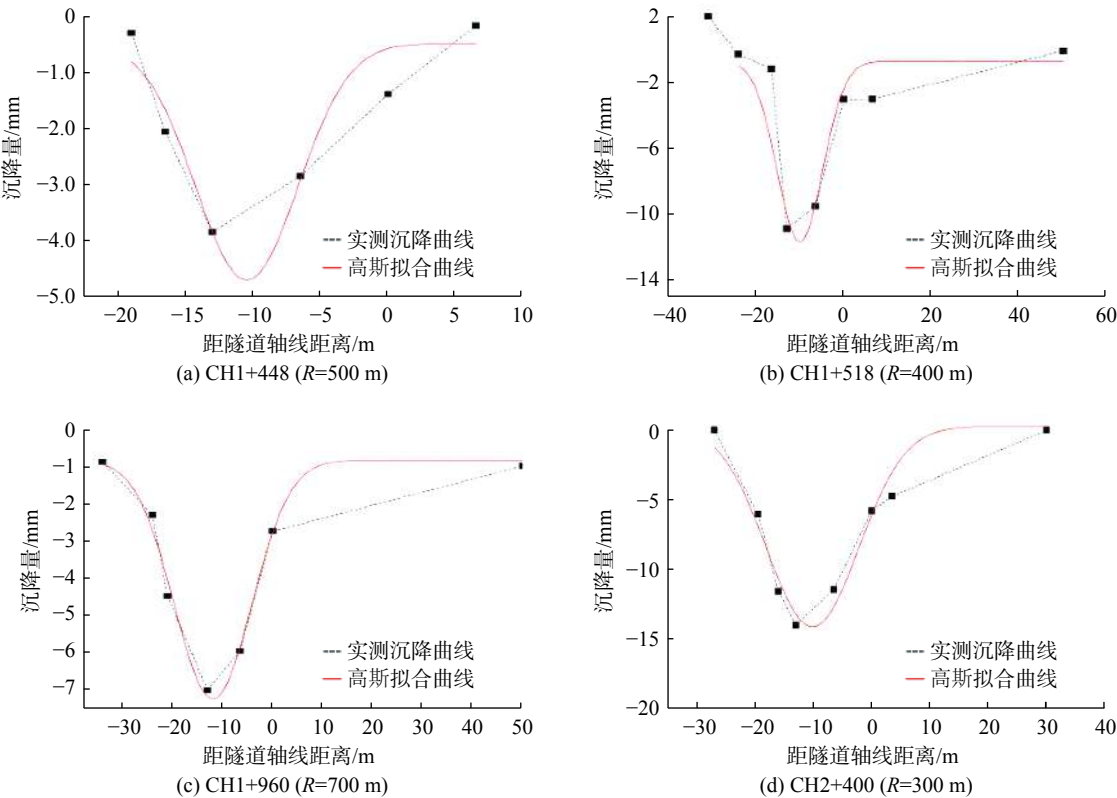


图 7 TBM1 通过后观测面地表沉降槽

Fig.7 Surface settlement profiles after TBM1 passing through

TBM1 通过观测面 CH1+960 ($R=700\text{ m}$) 后注浆量约为 5.6 m^3 , 最大地表沉降为 -6.43 mm ; 通过观

测面 CH2+400 ($R=300\text{ m}$) 后注浆量偏少, 约为 5.0 m^3 , 最大地表沉降为 -13.91 mm 。盾构在小半

径曲线掘进时会产生超挖，此时应适度增加注浆量以减少地表沉降。

4.2 后行盾构引起的地表沉降规律

南线盾构机 TBM2 通过观测面时引起地表再次发生沉降，约 20 d 后地面变形基本稳定，如图 8 所示。由图 8 可知，对于覆土厚度 H 为 13 m、轴线距离 L 为 13 m 的曲线双隧道，在南线盾构机 TBM2 通过后，不同半径曲线处的观测面地表沉降槽，与直线双隧道引起的地表沉降类似，均为对称的高斯分布，呈“V”形。由 4.1 可知，当先行线通过观测面后引起的最大沉降在该隧道轴线上方，而曲线内侧的后行隧道施工将主要引起先行线内侧地表继续发生沉降。两条隧道轴线中间区域土体在前、后行隧道施工主要影响范围交叠处受到的扰动最大。近距离平行双隧道的施工条件比较类似，使得先、后两次扰动产生的地表最大

沉降基本位于两隧道轴线的中线位置。

除观测面 CH1+518($R=400$ m)最大沉降值位于南线隧道轴线上方外，即 $x=0$ m 处，其他观测面的最大沉降值都位于南、北双线的中线位置，即 $x=-6.5$ m 处。由于盾构机 TBM2 通过断面 CH1+518 时土仓压力为 89 kPa，比 TBM1 通过时的 157 kPa 小 68 kPa。土仓压力设置过小导致盾构到达观测面前，南线轴线上方土体沉降突然增大 7 mm，盾构通过时土体继续急剧沉降到 -23.28 mm。可见，若在正常施工情况下，观测面 CH1+518($R=500$ m)的最大地表沉降值也应为双线中线位置。实际上，土仓压力设置也不应过大，当盾构机 TBM1 到达观测面 CH2+400($R=300$ m)时，土仓压力为 183 kPa，引起南线轴线上方土体隆起 1.74 mm；当盾构机 TBM2 再次到达时，土仓压力为 205 kPa，引起南线轴线上方土体先隆起 1.3 mm，通过后再发生 6 mm 沉降。

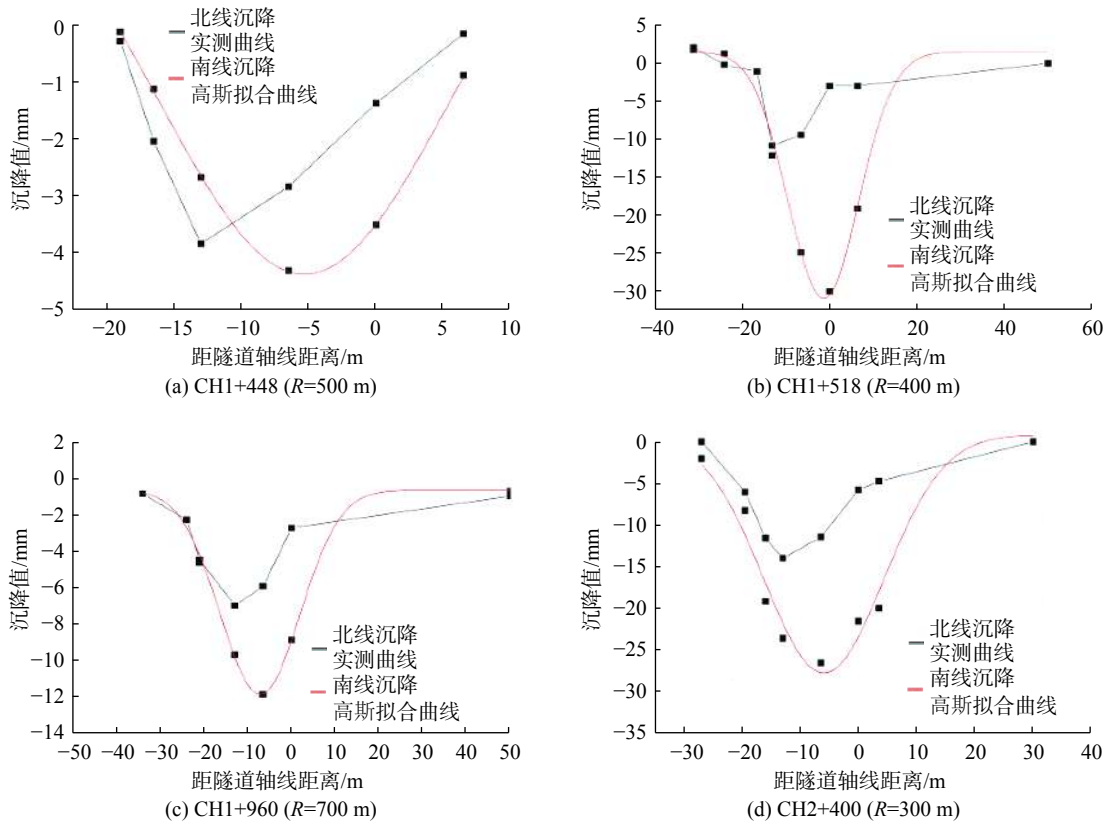


图 8 TBM2 通过后的观测面地表沉降槽

Fig.8 Surface settlement profiles after TBM2 passing through

对比图 8(b)和图 7(d)可知，当盾构机 TBM2 通过观测面 CH1+518($R=500$ m)时，千斤顶速度约为 30 mm/min，引起的地表最大沉降为 -29.92 mm；而当盾构机 TBM1 通过观测面 CH2+400($R=300$ m)

时，千斤顶速度约为 40 mm/min，引起的地表最大沉降为 -13.91 mm。可见，对于本工程中的小半径曲线隧道，降低千斤顶速度对减小地表沉降影响不大。图 8(c)观测面 CH1+960($R=700$ m)最大沉

降值为 -11.83 mm , 图 8(b)观测面 CH1+518($R=400\text{ m}$)处, 最大沉降值为 -30.84 mm ; 图 8(d)观测面 CH2+400($R=300\text{ m}$)处, 最大沉降值为 -27.5 mm 。由此可知, 随着曲线半径减小, 曲线双隧道引起的最大沉降值随之增大。

5 结 论

为研究曲线双隧道施工引起的地表沉降规律, 本文通过分析马来西亚 MRT 一期北段工程的实测数据, 得出如下结论:

a. 对于先行曲线盾构隧道, 盾构通过后的地表沉降槽有不对称现象, 位于曲线内侧的土体沉降大于曲线外侧土体, 这可能是施工时盾构曲线内外侧顶力差引起的。最大沉降值发生在先行线隧道轴线上方。当曲线半径减小时, 由于盾尾间隙增大, 地表最大沉降量随之增大, 小半径曲线隧道施工时应适度提高注浆量。

b. 对于平行双曲线盾构隧道, 当覆土深度等于隧道间距时, 后行线盾构通过后各曲线半径处的地表沉降槽都呈对称的高斯分布。最大沉降值的位置在双线隧道中线上方, 这可能是由于近距离平行先、后行隧道施工条件比较类似造成的。

c. 本工程地质条件下, 千斤顶速度在 $30\sim 40\text{ mm/min}$ 变化时, 对地表最大沉降量影响不大, 而控制土仓压力在合理范围内, 并适度提高注浆量能有效减小地表沉降。

致谢: 感谢中铁上海工程局集团有限公司提供数据资料。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft

ground[C]//In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969:225-290.

[2] 魏纲, 王霄. 基于统一解的近距离双线平行盾构地面沉降计算[J]. 现代盾构技术, 2017, 54(2): 87-95.

[3] 韩昌瑞, 贺光宗, 王贵宾. 双线并行隧道施工影响地表沉降的因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(s2): 484-487.

[4] 魏纲, 庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2562-2568.

[5] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2212-2218.

[6] OCAK I. A new approach for estimating the transverse surface settlement curve for twin tunnels in shallow and soft soils[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(7): 2357-2367.

[7] OCAK I. Interaction of longitudinal surface settlements for twin tunnels in shallow and soft soils: the case of Istanbul Metro[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(5): 1673-1683.

[8] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2012, 13(11): 858-869.

[9] 蒙晓莲. 大坡度小半径线路情况对盾构法施工开挖面稳定性及管片受力影响的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[10] 张恒, 陈寿根, 邓希肥. 盾构掘进参数对地表沉降影响分析[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(5): 48-53.

[11] 曹伍富, 李文聪, 马雪梅, 等. 盾构曲线段施工地表沉降监测与变形规律[J]. 都市轨道交通, 2014, 27(4): 85-89.

[12] 周诗俊, 王金安. 曲线隧道盾构引起地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 909-913.

(编辑: 丁红艺)