

淤泥质土及粉细砂地层盾构施工地表沉降监测分析

王呼佳¹ 邹育¹ 刘川昆² 李策² 伍伟林¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 淤泥质土和粉细砂为地铁隧道施工的主要不良地质土层。分析盾构掘进在该土层造成的地表沉降规律, 这有利于采取合适的施工技术对策。以佛山地铁 2 号线花仙区间为实例, 对淤泥质土及粉细砂地层盾构施工地表沉降监测数据进行了分析。结果表明: 在淤泥质土层中, 地表沉降主要发生在管片脱出盾尾和后期的固结沉降阶段; 在粉细砂层中, 地表沉降主要发生在盾构掘进和管片脱出盾尾阶段, 且盾构施工对粉细砂层的影响大于对淤泥质土层的影响。

关键词 地铁隧道施工; 盾构; 地表沉降; 监测; 淤泥质土; 粉细砂

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.015

Monitoring and Analysis of Surface Settlement during Shield Tunneling in Mucky Soil and Fine Sand Layer

WANG Hujia, ZOU Yu, LIU Chuankun, LI Ce, WU Weilin

Abstract Fine sand and mucky soil layer are the major adverse geological layers for metro tunnel construction. In this paper, the rules of surface settlement in fine sand and mucky soil layers caused by shield advancement are analyzed to find appropriate technical measures for the construction. Taking the Flower Fairy Section on Foshan metro Line 2 as example, the monitoring data of surface settlement during shield tunneling in mucky soil and fine sand layer are analyzed. The result shows that the surface settlement mainly occurs at the shield tail and the later consolidation settlement stage in the mucky soil layer shielding. While in the fine sand layer, the surface settlement often occurs in shield tunneling and segment withdrawal stage, the influence of shield construction on the fine sand layer is larger than that on the muddy soil layer.

Key words metro tunnel construction; shield; surface settlement; monitoring; mucky soil; fine sand

First-author's address China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

地铁隧道施工多采用盾构法。淤泥质土及粉细砂层是盾构隧道施工常见的不良地层, 是引起地表沉降的关键因素。为此, 分析地层沉降原因, 总结地层沉降规律, 变得尤为重要和迫切。

文献[1]对浅埋三车道大跨度隧道施工引起的地表沉降变形特征进行现场监测, 探讨浅埋大跨度隧道的开挖方式, 分析采用三台阶七步平行线流水开挖引起的隧道地表沉降变形特征; 文献[2]通过对地表沉降和深部土体水平位移的实测和分析, 得出富水砂卵石地层盾构隧道施工引起地层变形的基本规律; 文献[3]通过理论预测计算得到的沉降值与西安地铁某区间隧道的地表沉降实测数据进行了对比分析; 文献[4]以成都砂卵石地层中地铁 1 号线的土压平衡式盾构掘进施工为研究背景, 采用室内试验及数值模拟的方法, 揭示了土压平衡式盾构穿越砂卵石地层的失稳机制和沉降规律, 并结合实际施工参数和实测地表沉降数据进行了对比分析; 文献[5]分析了城市浅埋隧道开挖引起地表沉降的主要影响因素, 并建立了基于遗传算法的神经网络浅埋隧道开挖地表沉降预测模型。

以上研究主要从理论分析及数值模拟对盾构掘进引起的地表沉降进行分析, 而对淤泥质土及粉细砂层地表沉降采用现场实测的分析方法甚少。为此, 本文依托佛山地铁 2 号线工程, 根据现场监测数据, 对盾构掘进在淤泥质土和粉细砂层中造成的地表横断面沉降和纵断面变形进行分析。

1 工程概况

1.1 工程概述

花卉世界站—仙涌站区间线路出花卉世界站后, 沿佛陈公路向东北方向前行, 先下穿文登河, 然后依次下穿 2 座文登河公路箱涵。区间隧道采用土压平衡式盾构, 左线隧道先施工, 右线隧道后施工。隧道内径 5.4 m, 管片厚度 300 mm, 平面最小曲线

半径为 600 m,左、右线间距 12.0 ~ 14.4 m。区间纵断面为 V 型坡,最大纵坡 24‰,竖曲线半径为 5 000 m,隧道拱顶埋深为 6.0 ~ 20.5 m。

拟建区间附近地表水主要为线路北侧的文登河,宽约 14.7 m,水深约 4.4 m,常年有水,水流缓慢,水量丰富。

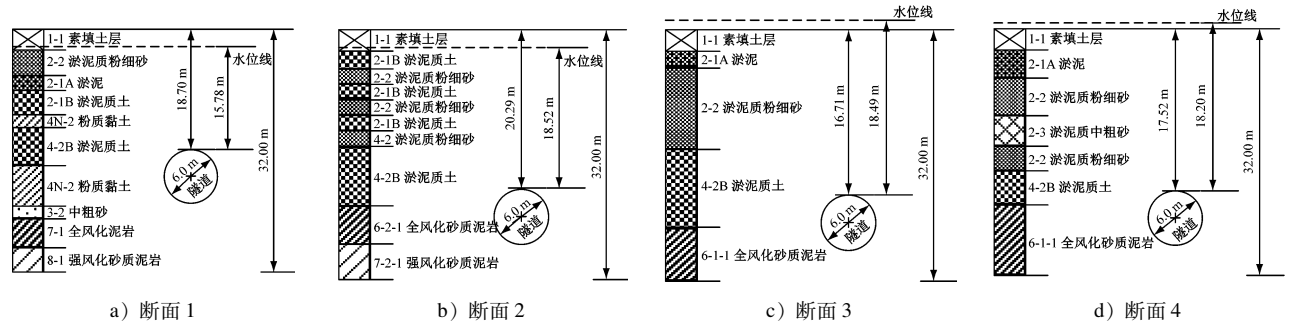


图 1 淤泥质土层典型断面地质条件

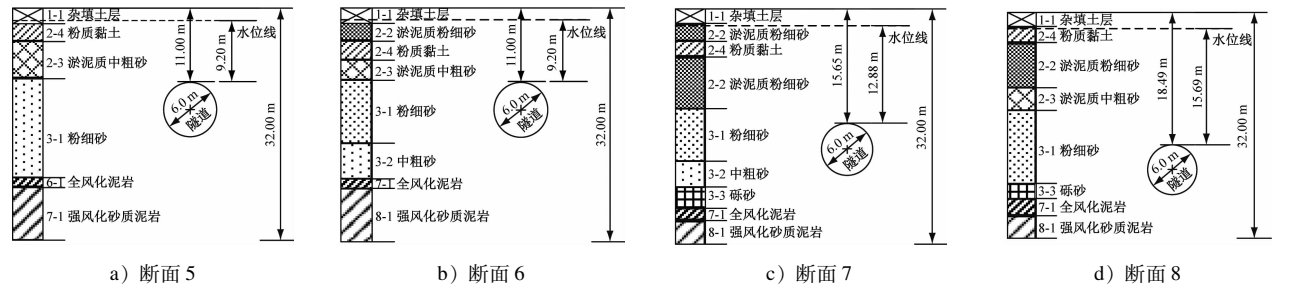


图 2 粉细砂地层典型断面地质条件

2 施工监测方案

监测点纵向沿隧道中轴线间隔布置,横向以左、右隧道中轴线为中心等间距布置。主要对淤泥

1.2 地质条件

区间断面地层从上至下依次为:素填土、粉质黏土、淤泥质土、淤泥质粉细砂、中粗砂、全风化砂质泥岩、强风化砂质泥岩。区间盾构主要穿越淤泥质土及粉细砂地层,其典型断面地质条件如图 1 ~ 2 所示。

质土和粉细砂层 8 个典型断面(见图 1 ~ 2)进行分析。各典型断面概况见表 1。淤泥质土和粉细砂层典型断面的线间距分别为 14.4 m 及 12.0 m,监测点的布置分别如图 3 和图 4 所示。

表 1 各典型断面概况

项目	淤泥质土层				粉细砂层			
	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	断面 6	断面 7	断面 8
断面里程	ZDK40 + 245.100	ZDK42 + 475.497	ZDK42 + 277.497	ZDK42 + 227.997	ZDK41 + 220.100	ZDK41 + 179.6	ZDK40 + 986.100	ZDK40 + 779.100
隧道覆土厚/m	18.70	20.29	17.52	16.71	11.10	11.49	15.65	18.49

3 淤泥质土层沉降监测分析

以断面 3 监测数据为代表,对淤泥质土层横断面沉降槽进行分析。

3.1 单线掘进横断面沉降槽分析

盾构刀盘位于监测断面 3 后方 3 环时,地表产生微隆起,最大变形量为 1.2 mm,如图 5 所示。当刀盘位于监测断面 3 前方 10 环时,盾构通过监测断

面,管片脱出盾构机,地表变形量迅速增加,地表最大沉降值为 5.2 mm;随着盾构继续推进,由于淤泥质土受前期盾构施工的扰动,后期固结沉降量大,持续时间长,地表沉降持续增大,最大沉降值达到 5.2 mm。在淤泥质土层中,单线隧道施工引起的地表横向沉降曲线近似为 V 型分布,最大沉降发生在线路中线。隧道掘进引起的横向地表沉降主要分布在隧道中线两侧 1.5 D 范围(D 为隧道直径),距

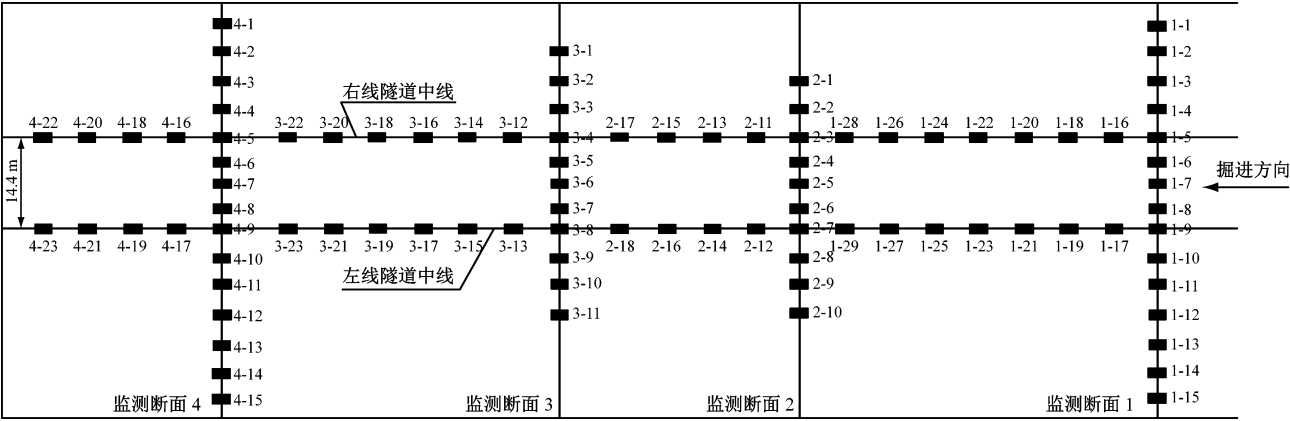


图3 淤泥质土层典型断面的监测点布置方案

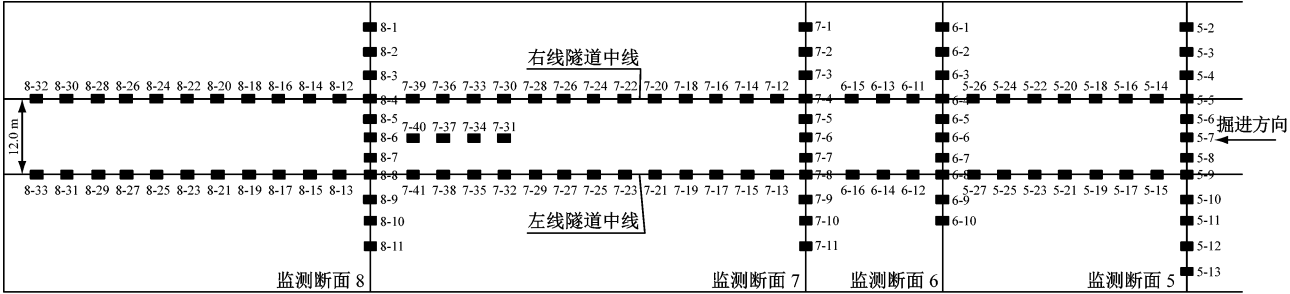


图4 粉细砂层典型断面的监测点布置方案

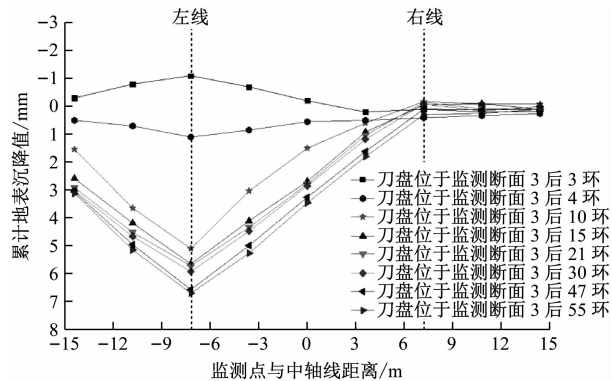


图5 淤泥质土层单线掘进横断面地表沉降实测曲线

提高了土体的强度和稳定性,使得后行隧道对先行隧道的影响小于先行隧道对后行隧道的影响。

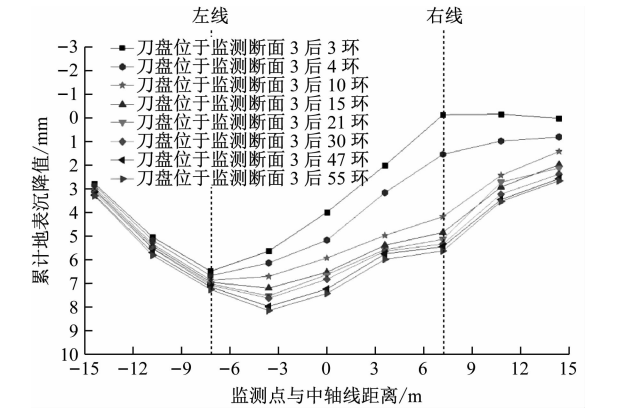


图6 淤泥质土层双线掘进横断面地表沉降实测曲线

中线 $2.0D$ 以外区域几乎不受影响。

3.2 双线掘进横断面沉降槽分析

单线盾构掘进时,地表横向沉降主要分布在距各自隧道中线 $1.5D$ 范围内,当隧道线间距为 $2.3D$ 时,左右线隧道主要影响区相交,理论上最终的沉降曲线仍为 V 字型,且沿中轴线对称分布;而实际地表累计沉降曲线对称轴偏向左线隧道(先行隧道),如图 6 所示。左线隧道(先行隧道)地表累计沉降大于右线隧道(后行隧道),最大沉降量分别为 5.6 mm 和 7.2 mm 。主要原因是成型隧道通过在管片壁后进行同步注浆和二次注浆,改善了隧道周围的土体,减少了土体的孔隙率和含水率,整体上

3.3 变形过程分析

地表沉降除与地层有关,盾构姿态、土仓压力、掘进速度、同步注浆和二次注浆等盾构施工参数也起着控制性作用。对于不同的断面,由于盾构参数的差异,地表沉降会有所不同,但沉降曲线趋势基本一致。根据刀盘与测点的位置可将地表沉降划分为先行沉降、开挖面沉降和隆起、盾尾沉降、盾尾空隙沉降、后续沉降等 5 个阶段^[6]。

盾构刀盘在淤泥质土层中,土仓内压力容易控

制,施工过程中一般控制土仓内压力稍大于掌子面土体压力,盾构前方土体受到一定挤压,使得开挖面前方地层有少量隆起,如图7所示。盾构机通过阶段,地层逐步退出土仓压力挤压影响范围,同时由于盾构姿态调整、管片拼装时的千斤顶回缩以及盾壳与地层间摩阻力引起的“背土”等原因,地层会发生较小的沉降。由于淤泥质土灵敏度高、含水量大,管片脱出盾构机盾尾后,受扰动地层固结、浆液凝固、孔隙水压力消散等引起位于该区域内的断面地层损失率总体呈线性增大,表现为地表沉降逐渐增加,所产生的地层沉降占施工导致的地层沉降的绝大部分。同时因盾构施工扰动的淤泥质土固结时间长,后续地表沉降会持续增大。

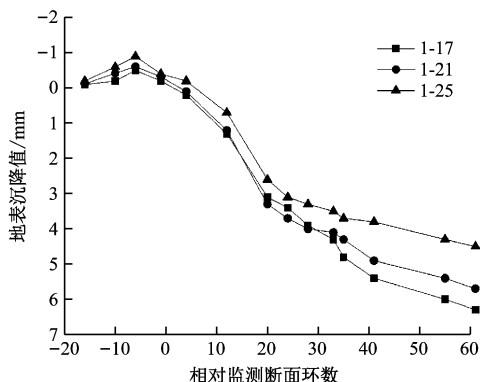


图7 淤泥质土层左线纵向地表沉降时程曲线

4 粉细砂地层沉降监测分析

以断面5监测数据为代表,对粉细砂层横断面沉降槽进行分析。

4.1 单线掘进横向沉降槽分析

盾构刀盘位于监测断面5后方11环到后方7环时,所有监测点几乎没有变化,表明盾构掘进还未对监测断面产生扰动;盾构刀盘位于监测断面5后方3~4环时,由于掘剖面土体因土仓压力不足而向盾构内移动时,盾构前方土体将发生向下和向后的移动,造成地表产生沉降,最大沉降为5.0 mm;当刀盘位于监测断面5前方3环时,左线隧道上方发生明显的地表沉降,最大沉降量达到10.5 mm;当盾构管片环脱离盾尾时,盾构壳体与管片之间存在空隙,而同步注浆施工和浆液硬化存在的滞后性,建筑空隙不能及时被填充,同时粉细砂自稳性差,从而引起地层突然产生较大的沉降,最大沉降量达到21.7 mm。随着浆液的硬化,盾构施工对监测断

面的影响越来越小,而粉细砂层后期沉降量又较小,最终地表沉降保持稳定。

在粉细砂地层,单线施工引起地表沉降曲线形态近似为V型分布曲线,最大沉降发生在线路中线。隧道掘进引起的横向地表沉降主要分布在隧道中线两侧1.0 D范围,距中线1.5 D以外区域几乎不受影响,如图8所示。

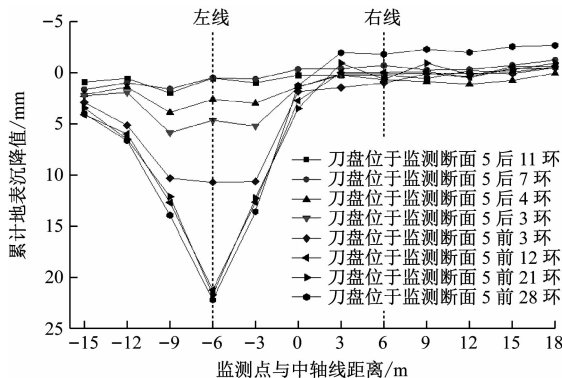


图8 粉细砂地层单线掘进横断面地表沉降实测曲线

4.2 双线掘进横向沉降槽分析

单线盾构掘进时,地表横向沉降主要分布在距各自隧道中线1.0 D范围内,当隧道线间距为2 D时,左、右线隧道主要影响区不相交,叠加的沉降曲线呈W型分布,双线最大地表沉降量较单线最大地表沉降量变化不大,如图9所示。左、右线地表最大沉降发生在各自中线偏内侧(左、右线隧道间为内侧),隧道间的地表沉降大于隧道外侧地表沉降,且左线隧道(先行隧道)地表沉降大于右线隧道(后行隧道)地表沉降,最大沉降累计量分别为25.3 mm和23.4 mm。

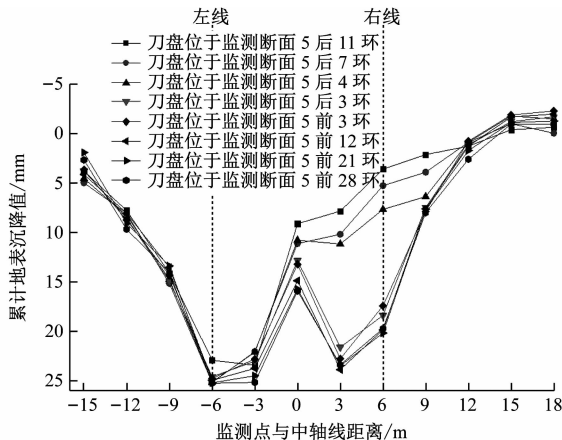


图9 粉细砂地层双线掘进横断面地表沉降实测曲线

4.3 变形过程分析

由于粉细砂没有黏聚力,土仓、螺机内渣土的

和易性差,流速不稳定,容易引起掌子面土压力波动剧烈,从而导致同一地层不同断面先行沉降,与开挖面沉降差异很大,如图 10 所示。粉细砂自稳性极差,无法形成坍塌拱,在刀盘与盾壳、盾壳与管片之间的空隙中土体失去支撑,容易发生较大变形,故在粉细砂地层中,地表沉降主要发生在盾构开挖和盾尾脱出盾构机阶段。

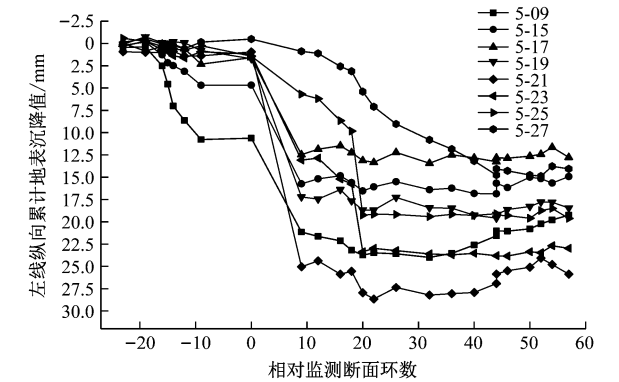


图 10 粉细砂地层左线纵向地表沉降时程曲线

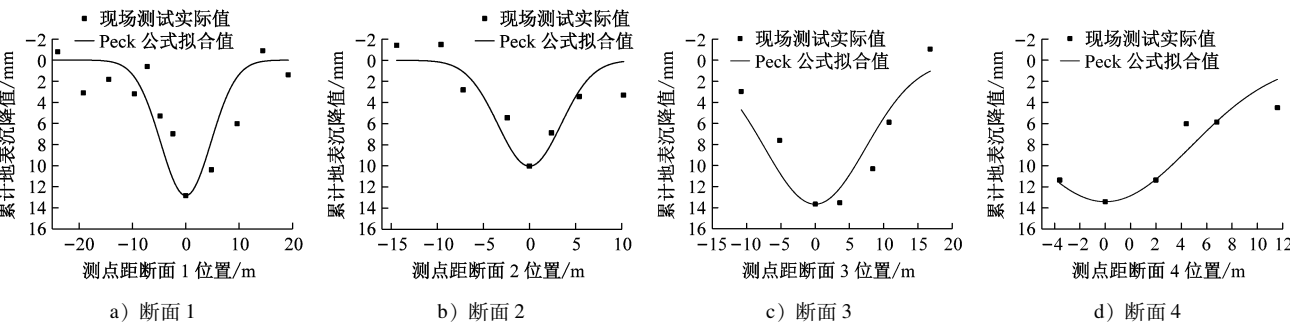


图 11 淤泥质土层各监测断面沉降槽对比

表 2 淤泥质土地层监测断面拟合结果				
断面	埋深/m	地表最大沉降量/mm	沉降槽宽度系数/m	拟合度
断面 4	17.52	13.65	7.40	优
断面 3	16.71	13.41	6.79	良
断面 1	18.70	12.84	4.72	良
断面 2	20.29	10.03	3.42	合格

5 不同断面地表沉降对比分析

5.1 淤泥质土层沉降槽对比

通过 Peck 公式对地表沉降进行拟合,如图 11 所示。除了断面 2 外,其他 3 个断面的拟合结果都比较好,表明 Peck 公式拟合淤泥质土层地表沉降与现场测试实际值偏差不大。由表 2 的统计数据可知,在淤泥质土层中,盾构埋深越深,最大地表沉降量越小,且沉降槽宽度越小。这是因为盾构埋深越浅,地表离盾构越近,地表土体受到的扰动就越大,因而造成的地层损失、沉降和随后的固结沉降也越大,沉降槽也越大。

5.2 粉细砂地层沉降槽对比

通过 Peck 公式对地表沉降进行拟合,如图 12 所示,除了断面 7 外,其他 3 个断面的拟合结果都比较好,表明 Peck 公式拟合粉细砂地层地表沉降与现场测试实际值偏差不大。由于粉细砂层无黏聚力,下层土体的坍塌会引起上层粉细砂的失稳,故盾构

表 3 粉细砂土层监测断面拟合结果				
断面	埋深/m	地表最大沉降量/mm	沉降槽宽度系数/m	拟合优劣度
断面 5	11.10	21.64	3.93	优
断面 6	11.49	15.53	5.47	优
断面 7	15.65	13.77	5.16	合格
断面 8	18.49	7.02	10.09	优

埋深越深,最大地表沉降量越小,而沉降槽宽度越大,如表 3 所示。

6 结论

(1) 在淤泥质土和粉细砂地层中,后行隧道对先行隧道的影响小于先行隧道对后行隧道,施工中可以对靠近重要建筑物的隧道先施工。

(2) 在同一埋深条件下,盾构施工对粉细砂地层的影响大于对淤泥质土层的影响。

(3) 对于淤泥质土层,盾构埋深越深,最大地表沉降量越小,沉降槽宽度越小;而对于粉细砂地层,盾构埋深越深,最大地表沉降量越小,而沉降槽宽度越大。

(4) 在淤泥质土层中,地表沉降主要发生在管

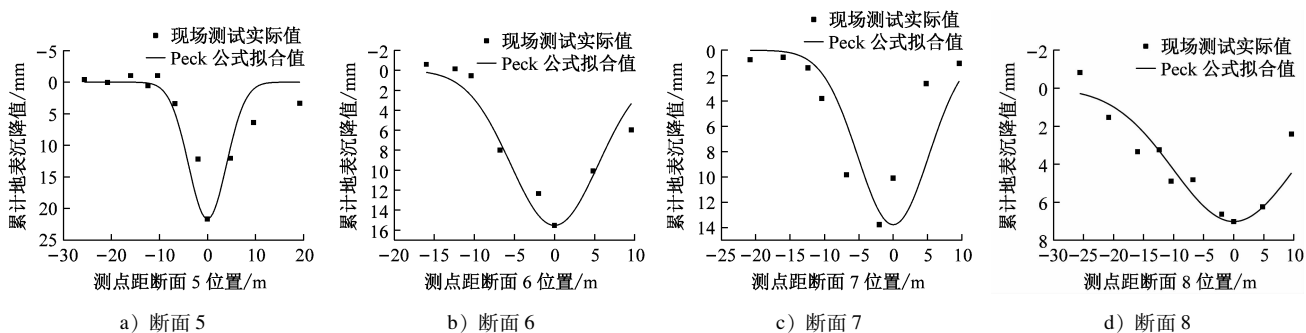


图12 粉细砂地层各监测断面沉降槽对比

片脱出盾尾和后期的固结沉降阶段;在粉细砂地层中,地表沉降主要发生在盾构掘进和管片脱出盾尾阶段。

(5) 当线间距大于2倍盾构主要影响范围,最终的沉降槽成W型;当线间距小于2倍盾构主要影响范围,最终的沉降槽成V型。

参考文献

- [1] 李新志,李术才,李树忱. 浅埋大跨度隧道施工过程地表沉降变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3348.

- [2] 王振飞,张成平,王剑晨. 富水砂卵石地层泥水盾构施工地层变形规律[J]. 铁道工程学报, 2013(9): 78.
- [3] 任建喜,王金华,张引合,等. 黄土层地铁盾构施工地表变形规律预测研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(11): 93.
- [4] 滕丽,张桓. 盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细观分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1141.
- [5] 任松,姜德义,杨春和. 基于遗传算法的浅埋隧道开挖地表沉降神经网络预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006(3): 46.
- [6] 阳军生,刘宝琛. 挤压式盾构施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 10.

(收稿日期:2018-11-11)

(上接第58页)

(2) 普通道床板结构在25~35 Hz有明显峰值;安装阻尼谐振器之后,道床板在该频率范围内的振动加速度显著降低。因此,道床板因共振产生的放大现象可以通过使用阻尼器消除。

(3) 在20~40 Hz频率范围内,相对于普通组合道床的道床板,安装轨道板阻尼谐振器组合道床的道床板在垂向和横向上振动均明显降低。特别是在25 Hz处,垂向振幅降低了15 dB左右,横向振幅降低了13 dB左右,表明谐振系统起到了谐振作用,显著降低了道床板低频范围的振动。

参考文献

- [1] LIU Y Z, YU D L, ZHAO H G, et al. Review of passive dynamic vibration absorber [J]. Chinese Journal of Mechanic Engineering, 2007, 43(3): 14.
- [2] BROCK J E. A note on the damped vibration absorber [J]. Journal of Applied Mechanics, 1946, 13(4): A-284.
- [3] DEN HARTOG J P. Mechanical vibration [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1947: 112-132.
- [4] WEI C F. Time-domain conversion and the application research of track irregularity power spectrum [D]. Chengdu: Southwest

Jiaotong University, 2011: 26-28.

- [5] ZHAI W M. Vehicle-track coupling dynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997: 175-178.
- [6] CHEN G. The analysis on random vibration of vehicle-track coupling system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000: 153.
- [7] 刘晶波,王振宇,杜修力,等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46.
- [8] LIU W F, LIU W N, YUAN Y. Study on isolation efficiency of floating slab track using a numerical prediction model of metro traffic induced vibrations [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 34(9): 81.
- [9] WANG A B, QU L H, FAN Y X, et al. The key technology research of high performance damping slab mat [R]. 2013: 1-25.
- [10] WANG A B, WANG Z Q, XU N. Dynamic testing analysis report of the high performance damping slab from Guangbo station to Xinlong road of Zhengzhou metro line two [R]. 2015.
- [11] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [12] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法: GB 10070—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.

(收稿日期:2017-06-20)