

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0721

盾构下穿高铁路基变形规律模型试验研究

刘 勇^{1,2}, 周怡晟¹, 索晓明³, 樊浩博^{1,2}, 曹毅泽¹, 杜志田³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘 要: 为了探究盾构下穿施工对高铁路基 U 型槽结构和地层的变形影响规律, 以拟建的石家庄市轨道交通 4 号线下穿京石高速铁路路基为工程背景, 基于几何相似比配制了地层和结构模型试验材料, 设计了试验监测系统, 采用 $\phi 1200$ mm 小型盾构机进行了盾构隧道顶距路基管桩底不同距离的 2 组室内模型试验。结果表明: 随着距离盾构隧道拱顶距离的增大, 地层沉降减小, 盾构施工对地层的影响范围约为 2 倍洞径, 显著影响区为 1 倍洞径; 随着埋深的增大, 盾构施工引起结构下方地层的沉降减小, 距盾构隧道顶距离分别为 0.5 倍洞径和 1 倍洞径时沉降最大差值为 10%; U 型槽结构与相邻地层间产生脱空, 盾尾脱出阶段发生的地层沉降占比大于 74%。建议管片拼装完成后采用保水性好且有一定早期强度的注浆填充材料, 以控制沉降变形, 同时进行地层深孔注浆, 及时充填松动地层孔隙, 增加地层密实度。

关 键 词: 盾构隧道; 下穿高铁路基; 地层变形; 模型试验

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 04-0941-11

Model test on the deformation law of shield tunnel underpassing high speed railway roadbed

LIU Yong^{1,2}, ZHOU Yi-sheng¹, SUO Xiao-ming³, FAN Hao-bo^{1,2}, CAO Yi-ze¹, DU Zhi-tian³

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the effect of shield underpass construction on the deformation of the U-shaped trough structure and stratum of the high speed railway roadbed. The proposed Shijiazhuang rail transit line No.4 underpassing the Beijing-Shijiazhuang high-speed railway roadbed is selected as the engineering background. The stratum and structural model test materials are formulated based on the geometric similarity ratio, and the test monitoring system is designed. A $\phi 1200$ mm small shield is employed to carry out 2 sets of laboratory model tests for different distances from the vault of the shield tunnel to the bottom of pile in the roadbed. The results show that: with the increase of the distance from the shield tunnel vault, the settlement of the strata decreases, the influence range of the shield construction on the strata is about 2 times of the diameter of the tunnel, and the significant influence range is one time of the diameter of the tunnel; with the increase of the burial depth, the settlement of the strata under the structure caused by the shield construction decreases, and the maximum difference of settlement is 10% at the distance of 0.5 and 1.0 times of the diameter of the tunnel respectively from the shield tunnel vault; a dehiscence occurs between the U-shaped trough and the adjacent strata, and the percentage of settlement of the strata occurring during the shield tail release phase is greater than 74%. It is recommended to use grout filling material with good water retention and certain early strength after the completion of segment assembly to control the settlement deformation. Meanwhile, deep hole grouting should be carried out to timely fill loose ground pores so as to increase the compactness.

Keywords: shield tunnel; underpassing high speed rail roadbed; stratigraphic deformation; model test

1 引 言

随着我国高铁运营里程持续增长以及城市轨

道交通领域的快速发展, 轨道交通工程穿越运营高铁的情况日渐增多。城市轨道交通区间工程以盾构法施工为主, 目前盾构隧道成功下穿高铁桥梁的工

收稿日期: 2022-05-16

录用日期: 2022-09-22

基金项目: 国铁集团重点课题 (No.N2020G009); 国家自然科学基金青年基金 (No.52108378); 青年人才托举工程 (No.2021QNR0001)。

This work was supported by the Key Project of China Railway (N2020G009), the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (52108378) and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2021QNR0001).

第一作者简介: 刘勇, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下工程施工稳定性方面的研究。E-mail: 1366050542@qq.com

通讯作者: 樊浩博, 男, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事富水隧道衬砌水压力及结构病害方面的研究。E-mail: fanhb@stdu.edu.cn

程较多,而穿越高铁路基的案例极少,给铁路主管部门及城市轨道交通建设管理部门从管理层面、技术层面及操作层面均提出严峻的挑战。如何预测盾构下穿对高铁路基的影响,保证高铁平稳运行成为设计、施工中的关键问题。

盾构掘进对地层影响规律的研究手段主要分为 3 类:理论分析、数值模拟和模型试验。模型试验相较理论分析与数值模拟,能够更加真实地反映地层变形规律。模型试验又分为模拟试验与相似试验。模拟试验由于没有严格的比例关系,用于寻找一般规律;相似试验严格遵从相似比例关系,能够对实际工程复现,可以很好地反映出地层的变形规律,从而反馈给实际工程。

同济大学朱合华^[1-6]团队为研究土压平衡盾构在砂土与软土地层中施工的适应性,以相似理论为依据,采用 $\phi 400$ mm 模型盾构机在 $2.4\text{ m}\times 2.4\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的试验土箱中开展了砂土与软土地层下的盾构掘进试验,得出土仓压力与排土效率、单位时间排土量与推进速度、排土效率与地表位移、推力和扭矩之间的内在联系,以及隧道埋深、刀盘开口率、推进速度对推力和扭矩的影响。范祚文等^[7]针对北京砂卵石地层开挖面稳定性的问题,基于相似理论,采用 $\phi 160$ mm 模型盾构机在 $1.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 1.3\text{ m}$ 模型试验箱中研究不同埋深条件下的砂卵石地层中,在邻近建筑物影响下的开挖面稳定性和地表沉降规律。西南交通大学何川团队^[8-10]采用 $\phi 520$ mm 土压平衡式盾构模型机,实现了完整意义上的掘进模拟,并先后使用该盾构机开展了盾构开挖对邻近桩基础,既有盾构隧道结构以及黄土地层扰动的研究,研究了盾构开挖引起的既有结构物的内力及变形的发展规律,从地层沉降,地层沉降时程曲线以及地层损失参数出发研究了盾构掘进对地层扰动的特点。王俊等^[11]采用 $\phi 800$ mm 盾构机开展室内掘进试验,发现砂卵石地层支护力随埋深线性增加。凌昊等^[12]通过离心模型试验研究新建隧道对既有隧道影响,发现新建隧道对既有隧道内力影响较大。以上多数模型试验并未实现全过程开挖,且研究地层多为均质土层,关于成层土层研究的模型试验几乎没有;模型试验多为小比尺模型试验,大比尺模型试验缺少研究;模型试验大多研究盾构施工对地层的影响,对于结构的影响研究较少。

本文以拟建的石家庄轨道交通 4 号线盾构区间下穿京石高铁路基工程为背景,采用直径 1.2 m 模型盾构机进行了两种不同埋深下穿全过程模型试

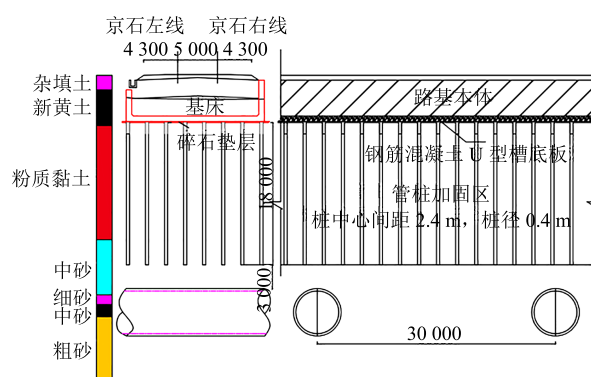
验,以分析盾构施工对高铁路基的竖向影响,为实际工程提供设计与施工依据。

2 工程概况

拟建石家庄市城市轨道交通 4 号线一期工程涉铁段(AK14+000~AK17+700),与京石高铁交角 120° 。京石高铁路基采用 0.7 m 厚 C30 钢筋混凝土 U 型槽,地基采用管桩加固,桩长为 18 m,桩径为 0.4 m,管桩正方形布置,桩间距为 2.4 m,桩顶铺设 0.15 m 厚碎石垫层。地铁与高铁位置关系如图 1 所示。



(a) 区间穿越铁路平面位置关系



(b) 4 号线与高铁路基纵剖面位置关系(单位: mm)

图 1 4 号线与高铁路基位置关系

Fig.1 Location of line 4 in relation to the high speed railway roadbed

3 试验设计

3.1 试验工况

为研究不同埋深条件下盾构施工对高铁路基的竖向影响,分别建立了隧道拱顶距管桩底部 0.6 m 与 1.2 m 两种试验模型,掘进过程中掌子面压力均采用静止土压力。由于盾构下穿区间无地下水,因此试验无需考虑地下水的影响。

3.2 试验平台搭建

为模拟城市中真实盾构机的掘进过程,尽量减小人为因素的干扰,研发了直径 1 200 mm 半自动模型盾构机,如图 2 所示。模型盾构机主要由出渣

系统、掘削系统、推进系统、控制系统、拼装系统以及液压系统组成，能够实现刀盘掘削、螺旋出土、盾构推进、管片拼装等盾构主要施工步骤。该模型盾构机开挖直径为 1 230 mm，盾壳厚度为 10 mm，机长 2 700 mm。刀盘采用液压马达驱动，刀盘扭矩为 35 kN·m，能够保证在黏土、砂土和卵石层等地层中掘进。



图 2 Φ1 200 mm 土压平衡盾构机
Fig.2 Φ1 200 mm earth pressure balance shield

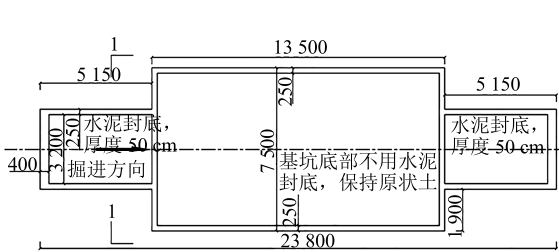
由于模型盾构机设计直径为 1.2 m，实际工程中采用直径 6 m 盾构机，因此确定模型盾构试验几何相似比为 1:5，土的重度比为 1。模型试验各物理

量相似比见表 1。

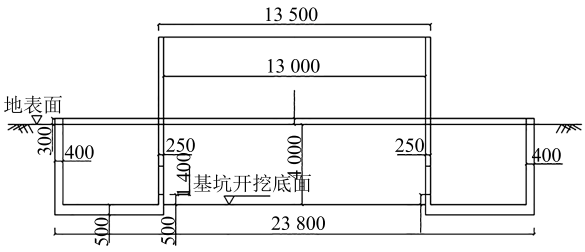
本试验设计采用 13 m×7 m×8 m（长×宽×高）模型试验箱，为方便试验操作，在地面开挖出一个 13 m×7 m×4 m（长×宽×高）的基坑，并在基坑四周浇筑 25 cm 厚挡土墙，基坑底部不用混凝土封底，保持原状土。基坑上方采用钢板拼接出模型试验箱的另一半（13 m×7 m×4 m），用于展开模型盾构试验。在离基坑底部 0.5 m 正面轴线处预留直径为 1.4 m 的孔洞，作为盾构始发洞口，如图 3 所示。

表 1 模型试验各物理量的相似比
Table 1 Similarity ratio of each physical quantity in the model test

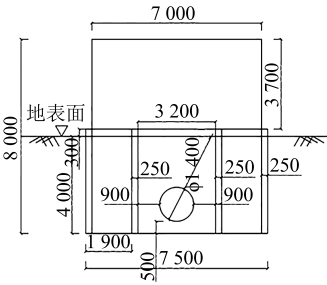
物理量	相似关系	相似比
长度 L	$C_L = 5$	5
重度 γ	$C_\gamma = 1$	1
厚度 H	$C_H = 5$	5
含水率 w	$C_w = 1$	1
压缩模量 E_s	$C_{E_s} = C_H C_r$	5
黏聚力 c	$C_c = C_H C_r$	5
摩擦角 ϕ	$C_\phi = 1$	1
盾构直径 D	$C_D = C_H$	5
土体损失率 ξ	$C_\xi = 1$	1
隧道及 U 型槽厚度 d	$C_d = 5$	5
隧道及 U 型槽刚度 EI	$C_{EI} = C_r C_H^5$	5 ⁵
竖向变形 δ	$C_\delta = C_H$	5



(a) 模型槽平面图 (单位: mm)



(b) 正视图 (单位: mm)



(c) 1-1 剖视图 (单位: mm)



(d) 盾构始发井



(e) 模型试验箱

图 3 试验用模型槽

Fig.3 Experimental model tanks

3.3 模型土样配制

根据地质报告可知，石家庄地铁 4 号线主要穿越新黄土、细砂、粉土和粉质黏土层，各土层的主

要性质见表 2。

对于细砂层与中粗砂层，其黏聚力基本为 0，自满足相似比；为使模型材料与原状地层具有相同

的重度, 采用控制砂土堆放的密实度实现。选取附近深基坑中的细砂与中粗砂作为相似材料, 在满足重度、含水率及压缩模量的条件下进行直剪试验, 细砂和中粗砂的内摩擦角与黏聚力分别为 33.8° 、 1.4 kPa 及 33.4° 、 5.86 kPa 。

表 2 地层物理性质
Table 2 Physical properties of strata

地层	重度 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	含水率 $\%$	压缩模量 $/\text{MPa}$	内摩擦角 $/(\circ)$	黏聚力 $/\text{kPa}$
黏土	19	15.0~21.4	9	16~24	12~25
细砂	19	15.0~21.4	10	25~28	0
中粗砂	19	15.0~21.4	18	30	0

黄土及粉质黏土模型材料采用模型槽开挖土、重晶石粉、滑石粉和水进行配制。在满足重度及含水率的条件下按不同配比(见表 3)配置模型材料, 并进行直剪试验及侧限压缩试验, 得到满足相似比的模型材料。

表 3 黏土试验配比(单位: g)
Table 3 Clay test ratios (unit: g)

编号	试验场地土	重晶石粉	滑石粉	水
配比 1	60	15	30	7
配比 2	65	15	25	7
配比 3	70	15	20	7
配比 4	75	15	15	7

不同配比下模型材料的内摩擦角、黏聚力以及压缩模量试验结果见表 4。

表 4 不同配比黏土物理性质
Table 4 Physical properties of clay with different ratios

编号	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa	压缩模量 E_s/MPa
配比 1	28	1.0	1.8
配比 2	28	1.8	2.0
配比 3	28	1.9	2.0
配比 4	27	4.1	2.1

由表 4 可以看出, 按照配比 4 配制的模型材料能够满足相似关系, 因此选用配比 4 作为黏土相似材料。

3.4 结构相似材料配制

3.4.1 U 型槽相似材料配制

U 型槽实际为钢筋混凝土结构, 采用 C30 混凝土和 $\phi 28 \text{ mm}$ 的 HRB400 钢筋浇筑而成。C30 混凝土的弹性模量为 31.5 GPa , 所需配制材料根据相似关系换算后弹性模量为 6.3 GPa , 强度为 6.9 MPa 。采用水泥砂浆为基本材料, 通过添加减水剂、聚丙烯纤维配制模型材料, 最终得到模型材料的弹性模

量为 6.2 GPa , 强度为 4.1 MPa , 能够满足试验要求。

3.4.2 混凝土管桩相似材料配制

地铁 4 号线下穿高速铁路基段采用直径为 40 cm 的管桩进行加固, 管桩长为 18 m , 中心间距为 2.4 m 。根据相似关系换算后管桩模型需直径为 8 cm , 长为 3.6 m , 中心间距为 0.48 m 。经过相似关系换算, 最终决定采用直径为 8 cm 、壁厚为 2 mm 的铝管模拟管桩。

3.5 模型管片

本次试验主要考虑盾构掘进对既有高速铁路基与周边地层的扰动规律, 对衬砌内力特征不进行研究。结合前人^[13-15]研究, 衬砌变形对地层位移影响较小, 考虑到衬砌制作与拼装的难度较大, 决定采用钢管片模拟钢筋混凝土管片, 管片间采用 M12 内六角高强度螺栓进行连接, 并在管片缝隙中采用胶水固定规格为 $7 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ (宽 $\times$ 高) 橡胶止水条用于密封防水。此外, 模型管片上预留注浆孔, 用于后期盾尾注浆, 模型管片如图 4 所示。



(a) 钢管片



(b) 组装成环

图 4 模型试验用盾构管片

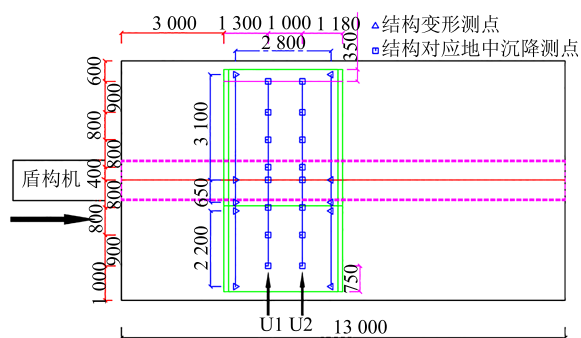
Fig.4 Shield segments for model tests

3.6 测点布置

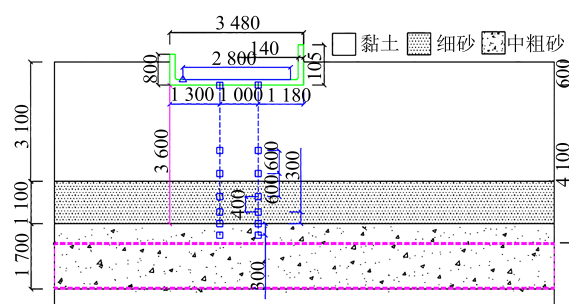
本次试验主要监测盾构施工引起的地层竖向位移以及结构竖向位移, 地层测点共设置 2 个横向监测断面, 沿掘进方向分别为 U1、U2, 测点布置示意图如图 5 所示。

沉降传感器采用 YHD-50 型与 YHD-100 型,

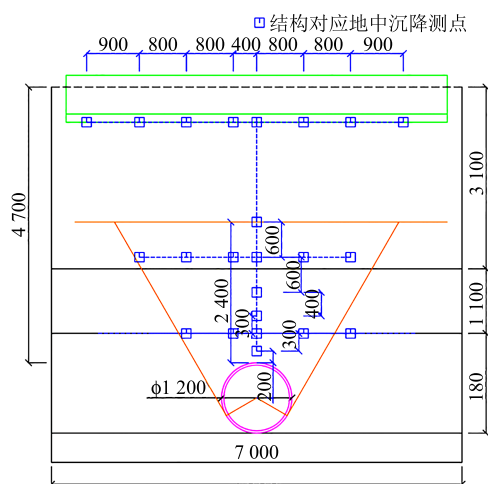
最小精度为 0.001 mm。YHD-50 型布置在地表测点及结构测点, YHD-100 布置在地中测点。位移计布置完成后, 将其电信号线连接至 TZT38326E 静态信号测试分析系统硬件上, 并用电脑软件显示信号。试验开始后每 5 min 记录一次数据变化, 并在结束后对数据进行人工整理。监测装置见图 6。



(a) 地表测点布置平面图 (单位: mm)



(b) 测点布置侧视图 (单位: mm)



(c) U 型槽范围测点布置纵断面图 (单位: mm)



(d) 位移计测点布设

图 5 测点布置示意图

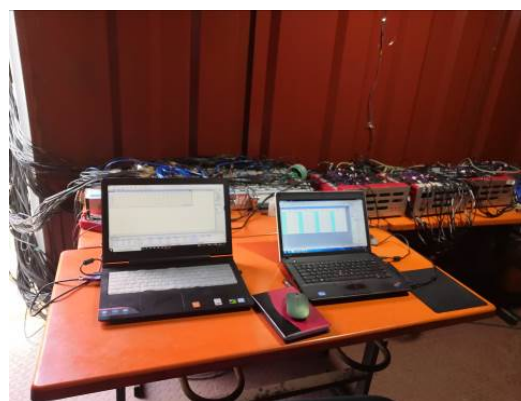
Fig.5 Schematic of measurement point layout



(a) YHD-10



(b) YHD-5



(c) 地面监测系统

图 6 监测装置

Fig.6 Monitoring device

4 试验流程

(1) 按比例配制模型土, 从模型槽底部分层填土并夯实, 分别填装中粗砂、细砂和黏土。首先中粗砂填至 170 cm 后开始预埋管桩, 其次从桩底开始填装 110 cm 细砂, 再次填装 250 cm 黏土后采用龙门吊将 U 型槽吊装至模型槽预定位置, 最后在 U 型槽两侧分别装填 60 cm 黏土。

(2) 按照上述测点布置示意图依次布置测点并进行编号, 并将测点与地面位移计连接。

(3) 将盾构机吊装至始发位置, 检查盾构机控制系统和注浆泵是否流畅, 调试地面监测系统与位移计之间是否灵敏。

(4) 开始盾构掘进并同时启动地面监测系统, 掌子面压力为静止土压力, 每掘进 210 mm 开始人工拼装管片, 管片拼装完成后采用配比为水泥:砂:水=200 kg:680 kg:536 kg 砂浆进行背后注浆。受设备制约无法进行盾尾同步注浆, 试验工况下地层沉降将略大于实际工况。每环管片建筑空隙约为 0.077 m^3 , 考虑到弥补地层损失时存在部分浆液泄露, 因此每环管片背后注浆量控制在 0.15 m^3 。

5 试验结果分析

本试验主要研究盾构隧道开挖对结构及其下方地层的影响, 因此主要对 U1 与 U2 断面测点进行分析, U1 与 U2 断面位置如图 5(a)所示。

5.1 横断面结果分析

2 种工况下 U 型槽底部地层、距拱顶 1.8 m 地层、距拱顶 0.5 m 地层、开挖轴线横断面最终沉降如图 7、8 所示。由图 7(a)~7(c)与图 8(a)~8(c)可知, 同一水平面下, 隧道开挖引起的地层沉降呈中间大两边小的 V 字型分布。由图 7(d)与图 8(d)可知, 随着埋深的增大, 隧道开挖轴线处的沉降与沉降增加速率越来越大; 隧道开挖对地层的影响约为隧道 2 倍洞径。不同工况下 U1 与 U2 断面各地层最大沉降如表 5、6 所示。

由表 5、6 可知, 随着拱顶距桩底距离的增加, 各监测断面最大沉降量发生了降低, U 型槽结构底部土层沉降降低幅度最大达到 10%, 距拱顶 1.8 m 处 U 型槽范围内土层沉降降低幅度最大为 25%, 距拱顶 0.5 m 处 U 型槽范围内土层沉降降低幅度最大为 2.4%, 距拱顶 0.2 m 处 U 型槽范围内土层沉降降

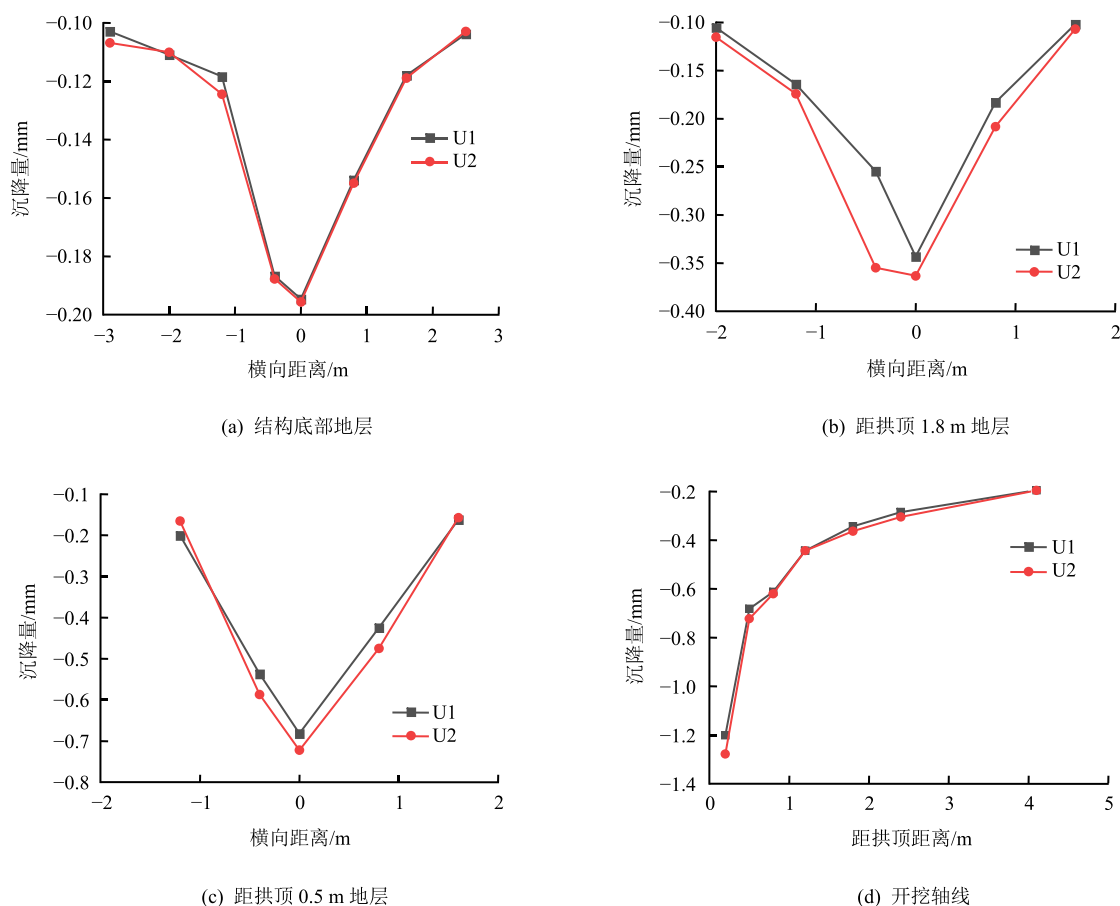


图 7 拱顶距桩底 0.6 m 工况最终沉降曲线

Fig.7 Final settlement cross-section distribution for working condition 0.6 m from arch top to pile bottom

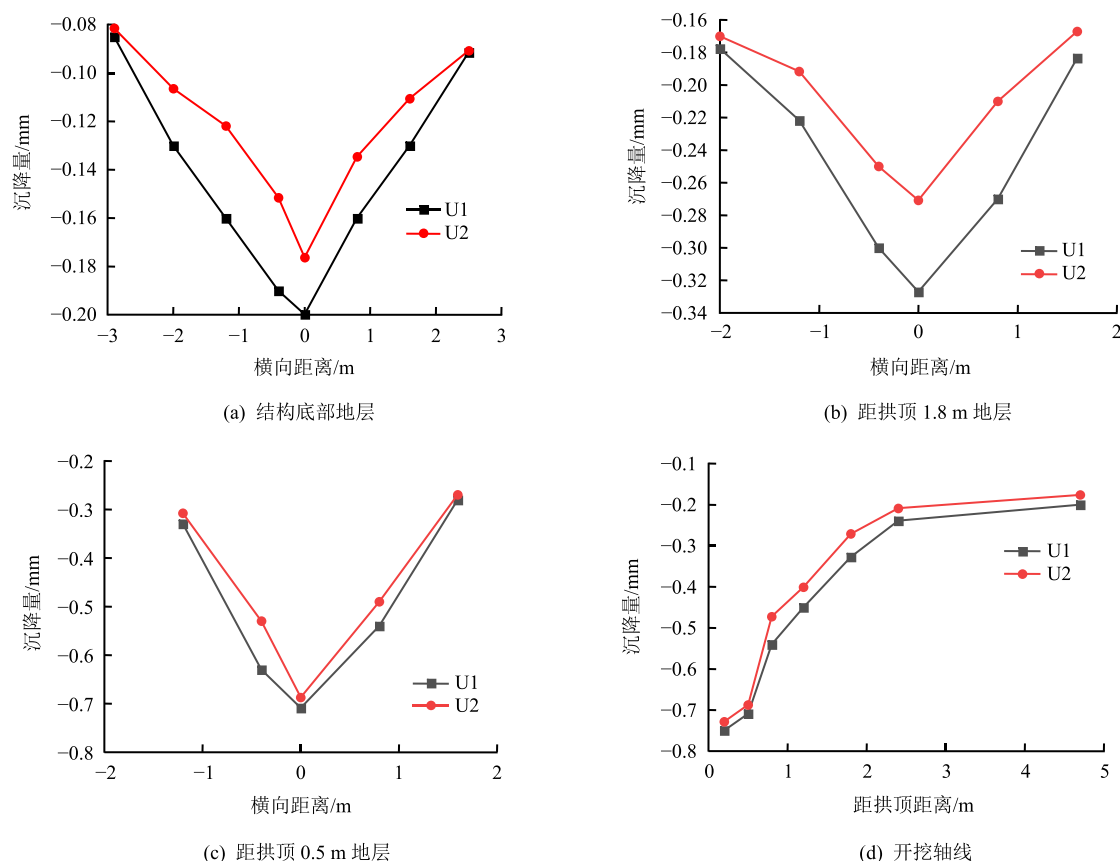


图8 拱顶距桩底 1.2 m 工况最终沉降曲线

Fig.8 Final settlement cross-section distribution for working condition 1.2 m from arch top to pile bottom

表5 不同工况 U1 最大沉降对比 (单位: mm)

Table 5 Comparison of maximum settlement at U1 for different operating conditions (unit: mm)

试验工况	结构底部	距拱顶 1.8 m	距拱顶 0.5 m	距拱顶 0.2 m
距桩底 0.6 m	0.195	0.343	0.682	1.201
距桩底 1.2 m	0.200	0.327	0.709	0.749

表6 不同工况 U2 最大沉降对比 (单位: mm)

Table 6 Comparison of maximum settlement at U2 for different operating conditions (unit: mm)

试验工况	结构底部	距拱顶 1.8 m	距拱顶 0.5 m	距拱顶 0.2 m
距桩底 0.6 m	0.196	0.363	0.722	1.278
距桩底 1.2 m	0.176	0.271	0.687	0.728

低幅度最大为 43%。可见随着埋深的增大, 盾构施工对上方土层及其结构的竖向影响逐渐减小。

5.2 纵断面结果分析

2 种工况下 U 型槽底部地层、距拱顶 1.8 m 地层、距拱顶 0.5 m 地层、开挖轴线纵断面各测点沉降随开挖距离的变化如图 9、10 所示 (x 代表测点距隧道开挖轴线距离, y 代表测点距隧道拱顶距离)。由图 9、10 可知, 当盾构机未到达或正通过监测断面时, 引起的沉降较为缓慢; 当盾尾脱出时,

沉降迅速增加; 背后注浆约在继续开挖 3 m 凝固并发挥作用, 沉降逐渐趋于稳定。不同工况下盾构机距监测断面不同位置时各地层轴线测点沉降如表 7、8 所示。

由表 7、8 可知, 桩底距拱顶 0.6 m 时, 距拱顶各地层 (4.1、1.8、0.5、0.2 m) 盾尾脱出引起的最大沉降量分别为 0.145、0.299、0.519、0.938 mm, 分别占总沉降量 (未到达+通过中+通过后) 的 74.3%、87.2%、76.1%、78.1%。桩底距拱顶 1.2 m 时, 距拱顶各地层 (4.7、1.8、0.5、0.2 m) 盾尾脱出引起的最大沉降量分别为 0.199、0.324、0.702、0.750 mm, 分别占总沉降量 (未到达+通过中+通过后) 的 99.5%、98.8%、100%、100%。

5.3 结构沉降分析

2 种工况下结构最终变形曲线如图 11、12 所示。由图 11、12 可知, 结构沉降较为均匀, 其沉降量最大约为 0.108 mm, 由于结构的刚度较大, 盾构隧道开挖并不会引起结构特别大的变形。将图 10 与图 7(a), 图 11 与图 8(a) 比较可知, U 型槽结构沉降与其底部土层沉降的差值最大为 0.1 mm, 结构与土层之间发生脱空, 这是由于结构的刚度远大于土层。

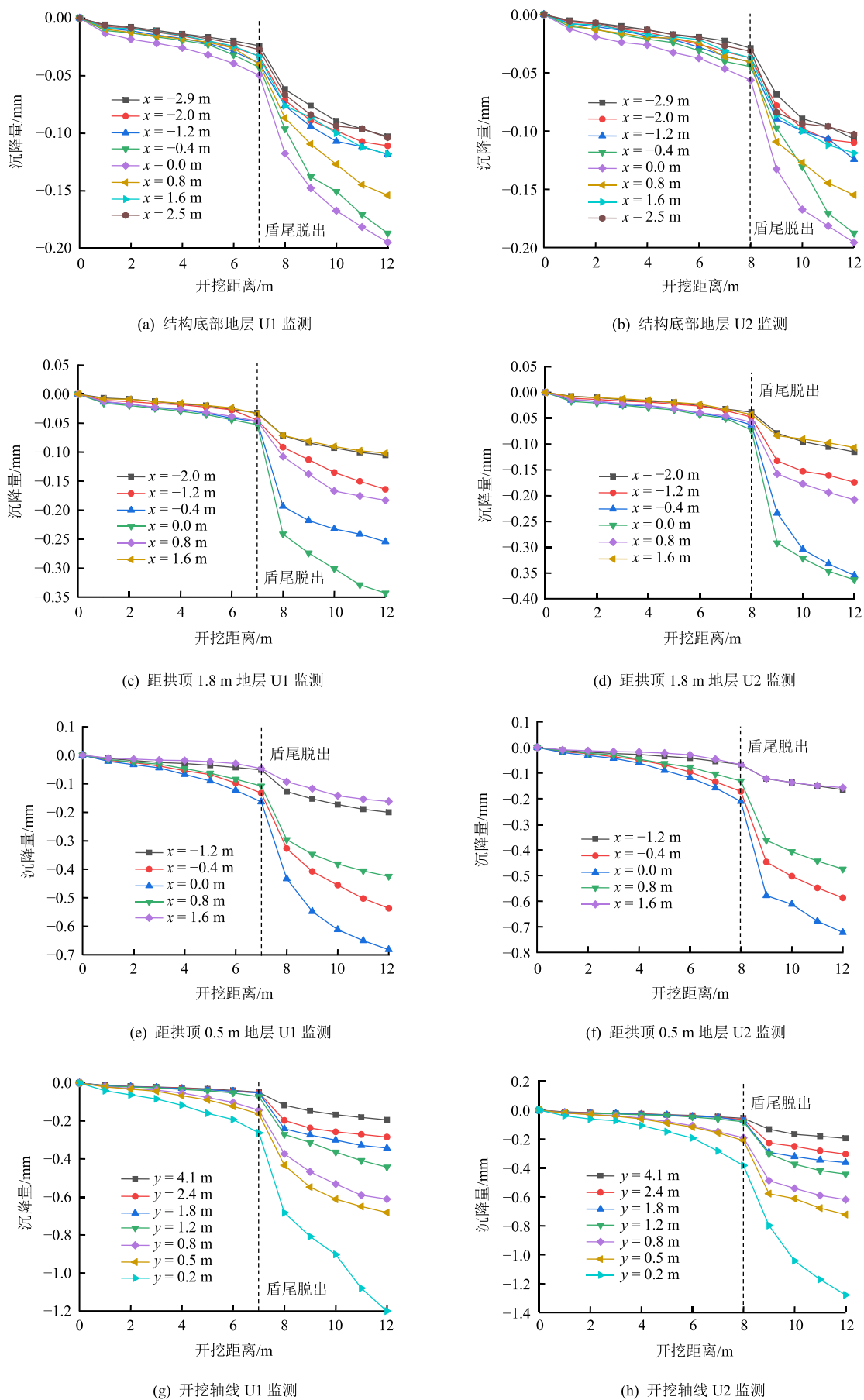


图9 拱顶距桩底 0.6 m 工况纵断面沉降监测结果

Fig.9 Settlement monitoring results for the longitudinal section under the condition of 0.6 m from the arch top to the pile bottom

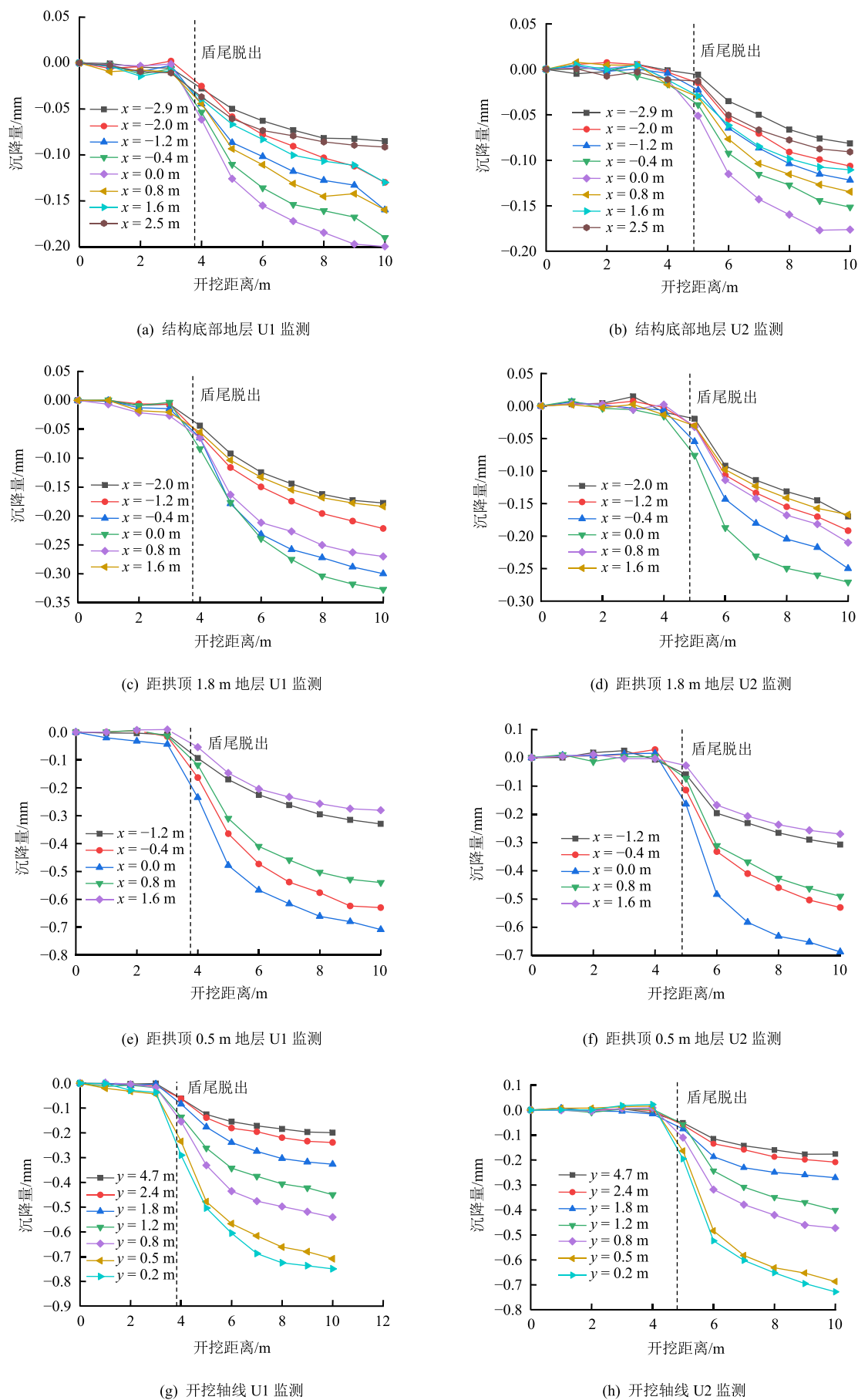


图 10 拱顶距桩底 1.2 m 工况纵断面沉降监测结果

Fig.10 Settlement monitoring results for the longitudinal section under the condition of 1.2 m from the arch top to the pile bottom

表 7 不同工况盾构机距 U1 不同位置引起各地层
轴线测点沉降对比 (单位: mm)

Table 7 Comparison of settlement at each stratigraphic
axis measurement point caused by the different positions of
the shield from U1 under different working
conditions (unit: mm)

试验工况	距拱顶/m	未到达	通过中	通过后
距桩底 0.6 m	4.1	0.026	0.024	0.145
	1.8	0.029	0.015	0.299
	0.5	0.067	0.096	0.519
	0.2	0.117	0.146	0.938
	4.7	0.002	-0.001	0.199
距桩底 1.2 m	1.8	-0.001	0.004	0.324
	0.5	0.020	0.024	0.666
	0.2	0.001	0.029	0.720

表 8 不同工况盾构机距 U2 不同位置引起各地层轴线测点
沉降对比 (单位: mm)

Table 8 Comparison of settlement at each stratigraphic
axis measurement point caused by the different positions of
the shield from U2 under different working
conditions (unit: mm)

试验工况	距拱顶/m	未到达	通过中	通过后
距桩底 0.6 m	4.1	0.032	0.023	0.141
	1.8	0.034	0.039	0.290
	0.5	0.090	0.121	0.511
	0.2	0.150	0.233	0.895
	4.7	-0.001	0.013	0.164
距桩底 1.2 m	1.8	0.004	0.012	0.255
	0.5	-0.008	-0.007	0.702
	0.2	-0.001	-0.021	0.750

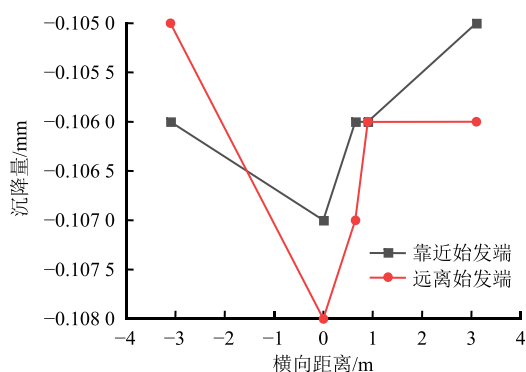


图 11 拱顶距桩底 0.6 m

Fig.11 Top of arch 0.6 m from base of pile

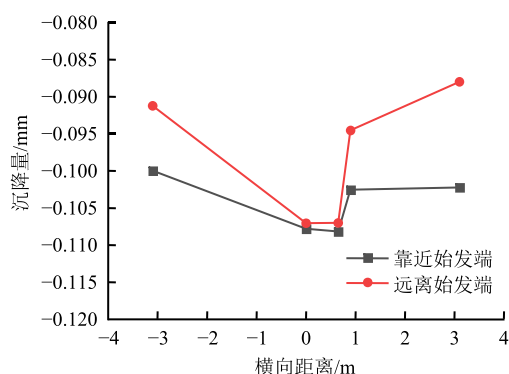


图 12 拱顶距桩底 1.2 m

Fig.12 Top of arch 1.2 m from base of pile

6 结论与建议

(1) 盾构隧道距离管桩底分别为 0.6 m 和 1.2 m 时, 以结构沉降代表轨道沉降, 根据几何相似关系换算, 结构底地层最大沉降能够满足 5 mm 沉降要求。

(2) 随着埋深的增大, 盾构施工引起结构下方土层的沉降减小, 距盾构隧道顶 1.2 m 工况较 0.6 m 工况 U 型槽底地层沉降降低约 10%。

(3) 盾尾脱出是引起沉降的主要因素, 沉降占比在 74% 以上, 脱出盾尾 3 m 后随注浆浆液的凝固地层沉降趋于稳定, 建议实际工程中采用保水性好且有一定早期强度的注浆填充材料, 以控制沉降变形。

(4) 由于结构刚度远大于地层刚度, 结构与其相邻地层间产生脱空。

(5) 隧道开挖对地层的影响范围约为 2 倍洞径, 建议管片拼装完成后进行地层深孔注浆, 及时充填松动地层孔隙, 增加地层密实度, 减少后期沉降。

参考文献

- [1] 朱合华, 徐前卫, 郑七振, 等. 软土地层土压平衡盾构施工参数的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 87-94.
ZHU He-hua, XU Qian-wei, ZHENG Qi-zhen, et al. Experimental study on the working parameters of EPB shield tunneling on soft ground[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(9): 87-94.
- [2] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849-1857.
XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on EPB shield tunnel construction in soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1849-1857.
- [3] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 均匀软质地层条件下土压平衡盾构施工的合理顶进推力分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 79-85.
XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Analysis of reasonable thrust force during tunnel excavation in homogeneous soft ground by use of earth pressure balance shield machine[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(1): 79-85.
- [4] 徐前卫, 朱合华, 丁文其, 等. 均质地层中土压平衡盾

- 构施工刀盘切削扭矩分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 47-54.
- XU Qian-wei, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Cutting torque during tunneling process of earth pressure balance shield machine in homogeneous ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 47-54.
- [5] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 25(8): 1587-1594.
- ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Model experimental study on stratum adaptability of tunnel excavation with EPB shield machine in sandy stratum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 25(8): 1587-1594.
- [6] 徐前卫, 朱合华, 廖少明. 砂土地层盾构法施工的模型试验设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 361-364, 368.
- XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming. Design on model test of tunnel excavation with EPB shield machine in sand stratum[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(3): 361-364, 368.
- [7] 范祚文, 张子新. 砂卵石地层土压力平衡盾构施工开挖面稳定及邻近建筑物影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2506-2512.
- FAN Zuo-wen, ZHANG Zi-xin. Model test of excavation face stability of EPB shield in sandy cobble ground and adjacent building effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2506-2512.
- [8] 何川, 汪洋, 方勇, 等. 土压平衡式盾构掘进过程的相似模型试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 162-169.
- HE Chuan, WANG Yang, FANG Yong, et al. Similarity model test of earth-pressure-balanced shield tunneling process[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(2): 162-169.
- [9] HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunneling in sandy cobble strata[J]. **Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering)**, 2012, 13(11): 858-869.
- [10] HE Chuan, JIANG Ying-chao, FANG Yong, et al. Impact of shield tunneling on adjacent pile foundation in sandy cobble strata[J]. **Advances in Structural Engineering**, 2013, 16(8): 1457-1467.
- [11] 王俊, 王闯, 何川, 等. 砂卵石地层土压盾构掘进掌子面稳定性室内试验与三维离散元仿真研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3038-3046, 3054.
- WANG Jun, WANG Chuang, HE Chuan, et al. Heading stability analysis of EPB shield tunnel in sandy cobble ground using laboratory test and 3D DEM simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 3038-3046, 3054.
- [12] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2849-2853.
- LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2849-2853.
- [13] 何川, 李讯, 江英超, 等. 黄土地层盾构隧道施工的掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1736-1743.
- HE Chuan, LI Xun, JIANG Ying-chao, et al. Laboratory test on shield tunneling in loess strata[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1736-1743.
- [14] 张治国, 杨轩, 宫剑飞, 等. 复变函数法分析盾构隧道开挖引起的土体位移和衬砌变形[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1626-1635.
- ZHANG Zhi-guo, YANG Xuan, GONG Jian-fei, et al. Complex variable analysis of soil displacement and liner deformation induced by shield excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(9): 1626-1635.
- [15] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755-760.
- ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(5): 755-760.