

DOI: 10.11779/CJGE201908013

类矩形盾构施工对地下管线影响的模型试验研究

魏纲¹, 王辰², 蔡诗淇¹, 许讯¹, 洪子涵¹, 崔程虹², 徐银峰¹

(1. 浙江大学城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 类矩形盾构隧道开挖使土体以不均匀沉降形式作用于地下管线, 导致管线产生纵向变形、破坏。针对类矩形盾构隧道施工, 采用室内缩尺寸模型试验, 综合考虑管隧相对位置、管线埋深及土体损失率 3 个影响因素, 研究类矩形盾构隧道在砂土地层中施工, 地下管线沉降、变形及地表沉降的规律变化。研究表明: 管隧垂直工况时, 管线竖向位移曲线呈高斯分布, 竖线位移反弯点出现在隧道轴线附近处, 管线弯矩呈“M”型分布, 最大竖向位移及弯矩位于隧道轴线正上方; 管隧斜交工况受影响比管隧垂直工况影响更大; 管线埋深越大, 管线受影响程度越深; 管线竖向位移随土体损失率减小相应降低, 隧道轴线正上方管线竖向位移与管线最大正弯矩及两个较大负弯矩减小幅度较大, 管线两端受影响程度较小; 地表沉降受土体损失影响较大, 沉降值比管线大。

关键词: 类矩形盾构; 缩尺寸模型试验; 土体损失; 沉降; 弯矩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)08 - 1489 - 07

作者简介: 魏纲(1977—), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 研究方向为地下隧道施工对周边环境的影响及风险评估与控制。E-mail: weig@zucc.edu.cn。

Model tests on influences of quasi-rectangular shield construction on underground pipelines

WEI Gang¹, WANG Chen², CAI Shi-qi¹, XU Xun¹, HONG Zi-han¹, CUI Cheng-hong², XU Yin-feng¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Excavation of quasi-rectangular shield tunnels causes uneven settlement of soils in pipelines, resulting in longitudinal deformation and failure of the pipelines. The indoor shrinkage model tests are conducted for the construction of quasi-rectangular shield tunnels. The influencing factors of the relative position of tunnels, buried depth of pipelines and soil loss rate are taken into account. The rules of subsidence, deformation of underground pipelines and surface settlement in dry sand are studied. The results reveal that the vertical displacement curve of the pipelines is Gaussian, the reverse bending point of the vertical displacement appears near the tunnel axis, the bending moment of the pipelines is “M” type distribution, and the maximum vertical displacement and bending moment are located directly above the tunnel axis. The impact of skew conditions of pipelines and tunnels is greater than that of their vertical conditions. The deeper the pipeline is, the larger the influence is. The vertical displacement of the pipelines decreases with the decrease of the soil loss rate. The vertical displacement of the pipelines directly above the tunnel axis and the maximum positive bending moment and two large negative bending moments of the pipelines decrease greatly, and the both sides of the pipelines are less affected. The surface settlement is directly affected by the soil loss, and the settlement value is larger than that of the underground pipelines.

Key words: quasi-rectangular shield; reduced-scale model test; soil loss; settlement; bending moment

0 引言

地下空间结构复杂, 地铁隧道经过大多为城市繁华地区, 类矩形盾构施工节约地下空间, 内部空间利用效率高; 安全埋置深度较浅。地下管线被誉为城市生命线, 分布错综复杂。盾构施工易造成地下管线破损, 影响城市居民正常生活。因此, 有必要对类矩形盾构施工对邻近地下管线的影响进行研究。

国内外学者就此进行了大量研究, 主要研究方法包括经验公式法^[1-3]、理论解析法^[4-6]、数值模拟法^[7-9]、离心模型试验法^[10-11]和缩尺寸模型试验法^[12-15]。在经验公式法中: Peck^[1]基于工程实测数据, 提出了地层损失的概念; 吴为义^[2]针对管隧垂直、平行两种工况,

基金项目: 浙江省科技厅公益技术研究项目(2016C33051)

收稿日期: 2018 - 08 - 17

提出了管线纵向分布规律；李兴高等^[3]在地层移动规律的基础上，提出了管线受地铁施工影响的安全评价方法。在理论解法中：马亚航^[4]将管线当作弹性体考虑，给出了管线变形微分方程；Klar 等^[5]采用边界积分法研究连续管线的隧道效应问题；魏纲等^[6]基于 Winkler 地基模型，推导了地面出入式管线弯矩、应变和应力公式。采用数值模拟法有：彭基敏等^[7]、吴波等^[8]利用 ANSYS 程序软件，对盾构施工对管线沉降的影响进行了分析；魏纲等^[9]采用三维有限元法，分析地下管线的受力变形；离心模型试验法有：邵羽^[10]、马少坤等^[11]通过离心模拟试验，研究不同埋深盾构双隧道开挖对既有管线的影响；采用室内缩尺寸模型试验法有：王正兴等^[12]、朱叶艇等^[13]通过室内缩尺寸模型试验，研究管隧垂直工况下管线变形规律；王海涛等^[14]、黄晓康等^[15]研究管隧不同交角工况下，地下管线沉降、变形规律。室内缩尺寸模型试验操作简单、不易受外界条件影响，能较真实反映管线竖向位移与受力变化。类矩形盾构与单洞双线大型圆隧道相比，大幅度的减少了占用地下空间；当开挖面积相同时，单圆盾构半径较大，对土体扰动更大，引起地下管线沉降比类矩形盾构大^[16]。目前未见有人采用模型试验法研究类矩形盾构施工对地下管线研究，因此很有必要采用模型试验法进行研究。

本文采用大型室内缩尺寸模型试验，设计了管隧不同位置、管线不同埋深、不同土体损失 3 种工况，在砂土条件下，研究类矩形盾构隧道开挖对地下管线的影响规律。研究结果可为类矩形盾构（以下简称盾构）在施工过程中，对邻近管线维护及加固提供依据。

1 室内模型试验

1.1 试验模型

本文依托于宁波地铁 3 号线一期出入线段工程，试验选取 50 m 隧道作为研究对象，类矩形盾构隧道实际外包尺寸为 11.5 m×6.94 m，管片厚度为 450 mm，隧道上覆土 9.75 m，模型试验几何相似比为 1：20，试验模型装置照片见图 1。



图 1 试验装置图

Fig. 1 Test device diagram

(1) 模型箱

试验模型箱采用钢板制成整体框架模型结构，框架四面采用角钢加固，顶部左右两侧设置滑槽，便于抽砂设备滑动，均匀撒砂。模型箱长 3.0 m，宽 2.5 m，高 2.1 m，根据几何相似比以及做工精度问题，类矩形盾构衬砌模型结构外包尺寸为 572 mm×370 mm，厚度 2.5 mm。一侧采用有机玻璃，便于观察填土高度变化；在试验过程中，更可以直接观察试验现象。靠近有机玻璃一侧，制作模拟盾构机脱出轨道，防止模拟盾构机全部脱出，直接落地造成意外影响。模拟盾构机采用液压机通过钢绞绳拉出，在轨道上滑动。

(2) 输送装置

输送装置主要包括了抽砂机和撒砂机，将砂土装入漏斗，通过抽砂机，注入至临时装砂箱，再由撒砂机均匀撒入至模型箱内，撒砂机电动机功率为 3 kW，转速 1440 r/min，抽砂管径为 12 cm，如图 2 所示。



图 2 输送装置图

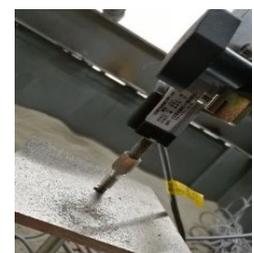
Fig. 2 Conveyor diagram

(3) 测量系统

试验中管线竖向位移通过使用电阻式 TST-50 型位移传感器和 DHDAS 动态信号采集分析系统软件测得。位移传感器通过磁性底座吸附在模型箱内的高于地表 15 cm 杆件上。由于管线埋藏在土体一定深度处，无法用位移计直接测量管线竖向位移。采用自制沉降杆，将管线与位移传感器通过沉降杆搭接，沉降杆具有一定刚度，可直接穿过土层与管线顶部通过强力胶进行黏结，位移传感器与沉降杆顶板契合，顶板中间有预留孔洞，可将位移传感器一端牢牢卡住，防止位移传感器左右滑动，影响数据的精确性。沉降杆竖杆使用 PVC 套管，防止沉降杆与土体直接接触，减小摩擦。测点安装完毕后将所有导线接入至应变测试系统，通过网线与电脑连接进行测量读取数据，见图 3。



(a) 沉降杆



(b) 位移传感器

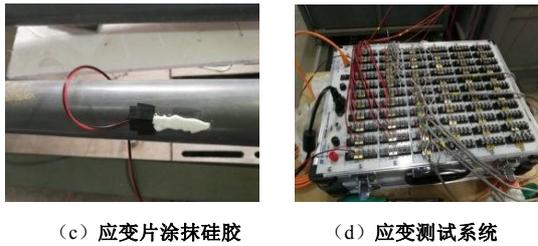


图 3 测量系统

Fig. 3 Measuring system

(4) 控制系统

控制系统主要由发动机、液压机、自制轨道以及钢绞绳组成, 其中轨道长度为 3.2 m, 高度为 1.1 m, 液压机最大拉力为 100 kN, 额定压力为 16 MPa。

1.2 试验材料

试验土体材料选用海砂, 采用室内烘干方法获得干砂, 具体物理指标见表 1, 管线参数如表 2 所示, 图 4 为海砂的颗粒级配曲线。考虑几何和物理相似比, 采用 PVC 管模拟铸铁管, 试验研究对象为连续管线。

表 1 试验砂物理力学指标

Table 1 Parameters of sand in tests

土类	密度 (g·cm ⁻³)	含水 率/%	内摩 擦角 (°)	黏聚 力 /kPa	孔隙 比	压缩 模量 /MPa
干砂	1.806	0.23	34.3	0	0.482	6.28

表 2 试验管线参数

Table 2 Parameters of test pipes

材质	弹性模量 /GPa	外径 /mm	壁厚/mm	刚度 $E_p I_p$ /(kN·m ²)
PVC	3.33	69	3	1.13×10^6

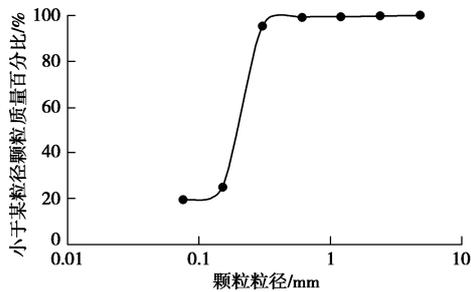


图 4 试验砂颗粒级配曲线图

Fig. 4 Grain-size distribution curve of sand in tests

1.3 试验工况

针对管隧相对位置、管线不同埋深及不同土体损失 3 种试验控制变量, 本文设计进行了 5 组试验来研究管线变化规律。具体试验工况见表 3。

选取试验 1 作为标准工况。管隧垂直工况测点布置如图 5 所示。管线上部位移测点从左往右, 编号从 #1~#9; 下部贴有应变片, 为应变测点, 从左往右编

号从 #10~#18, 测量管线应变。与隧道轴线垂直有 7 个地表测点, 测点间距为 300 mm, 编号从 #19~#25, 间距 400 mm, 与隧道轴线平行布置 5 个测点, 标号从 #26~#30, 间距为 450 mm。测点均为等间距分布(斜交工况未布置地表测点, 其他测点均与垂直工况相同)。测点布置完毕, 导线接好后, 接通电源, 盾构匀速脱出。

表 3 试验工况

Table 3 Test conditions

试验编号	管隧位置	管线埋深/cm	土体损失率/%
1	垂直	15	5
2	平行	15	5
3	斜交	15	5
4	垂直	20	5
5	斜交	15	4

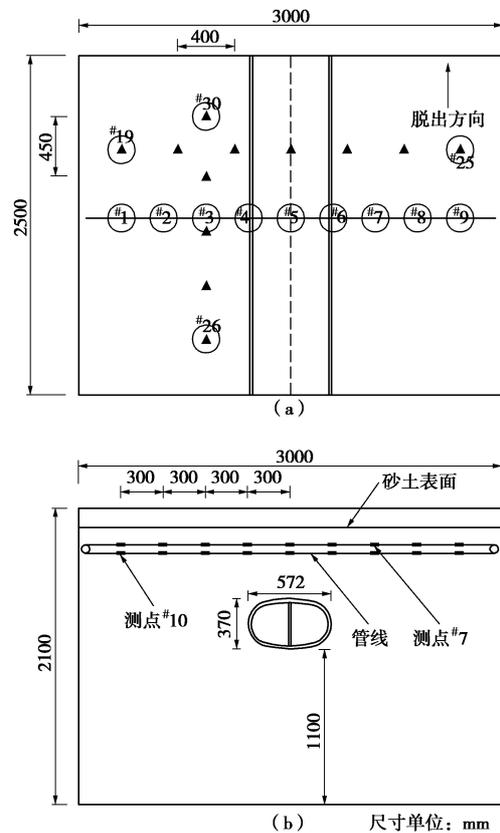


图 5 测点布置图

Fig. 5 Layout of measuring point

1.4 试验步骤

(1) 将干砂通过抽砂机输送至装砂箱内, 启动撒砂机并前后移动, 均匀地将干砂撒至模型箱内, 注土高度每达到 10 cm 夯实一次。当注土高度达到 1.1 m 时(依据于原型工况隧道上覆土 9.75 m 以及考虑到几何相似比和模型箱高度), 将模拟盾构机和管片推放入至模型箱内, 继续填土、夯实至达到埋藏管线深度, 安放管线。

(2)埋置管线之前需对管线上提前贴好的应变片进行检测,防止应变片损坏或者与导线焊接有误,导致最后读取数据存在偏差情况。将导线焊接在接线端子上,与应变片相接。贴好后的应变片表面及焊接导线部位,需涂抹703硅橡胶,防止土体对应变片破坏。

(3)在管线上布置测点,安装沉降杆及位移传感器(位移传感器与沉降杆需共线,并且与地面垂直),填土夯实至设计标高。将管线上的导线与位移传感器的导线一起接入到静态应变测试系统(导线需提前标号,防止测点位置错乱),应变仪与电脑通过网线连接。

(4)使用液压机通过钢绞绳,环扣模拟盾构机接通电源,通过发动机,将模拟盾构机匀速脱出,速度6 cm/s,同时电脑读取数据至盾构完全脱出,关闭电源。

2 试验结果分析

2.1 标准工况试验研究

由图6可以看出,盾尾到达测点前,管线竖向位移较小,最大沉降值为0.6 mm,(试验数据均为模型试验测得原始数据)盾尾到达测点和通过测点后,管线竖向位移从0.9 mm急剧增至2.1 mm。管线竖向位移变化幅度最大。管线产生最大竖向位移位于隧道轴线正上方,最大沉降值为3 mm,距离隧道轴线越远,管线竖向位移越小。管线竖向位移分布关于隧道轴线对称,呈“V”型分布。在盾构隧道外侧附近,存在位移曲线拐点,结合图7中隧道两侧上方管线弯矩为零,反证出管线竖向位移存在拐点。

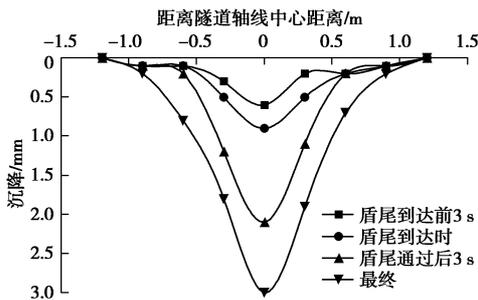


图6 各时间段管线沉降曲线

Fig. 6 Settlement curves of pipelines in each time period

标准工况下试验结果与文献[16]数值模拟结果规律一致,管线沉降呈高斯分布,管线两端影响最小。

从图7中可以看出,在盾构隧道开挖中,管线弯矩呈“M”型分布,在盾构施工过程中,管线弯矩会出现一个最大正弯矩,位于隧道轴线正上方,弯矩值为28.17 N·m,和两个较大负弯矩,距离隧道轴线60 cm处,分别为-18.18, -18.2 N·m。管线呈现出上拱下拉效应,原因在于管线两端被锚固,中间部位存在

土体损失,受土体压力,管线向下受拉。管线最外两侧弯矩几乎无变化,表明距离隧道轴线越远,管线弯矩越小,所受影响越小。

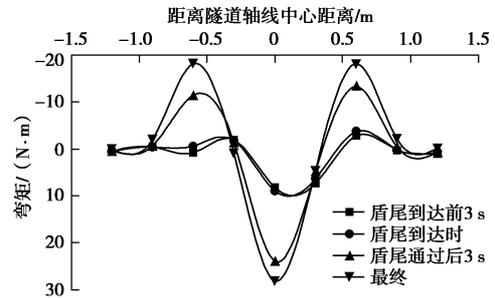


图7 各时间段管线弯矩曲线

Fig. 7 Curves of bending moment of pipelines in each time period

图8为管线测点竖向位移随时间变化分布图。从图中可以看出,在盾构隧道施工中,#1~#5测点,测点竖向位移依次增大,#4和#5测点竖向位移从21 s后增长速度较快,#5测点因距离隧道轴线最近,竖向位移增长最快,达到3 mm。原因在于从第21 s开始,盾尾到达测点,盾构机与衬砌结构外壁之间存在土体损失,管线竖向位移显著增大。

从图9中可以看出,盾尾到达测点前,地表沉降已经存在一定影响。同地下管线沉降规律,盾尾到达测点及通过测点后,地表沉降显著增大,由3.3 mm增至6.1 mm。盾构与衬砌结构之间的土体损失导致地表沉降增大。

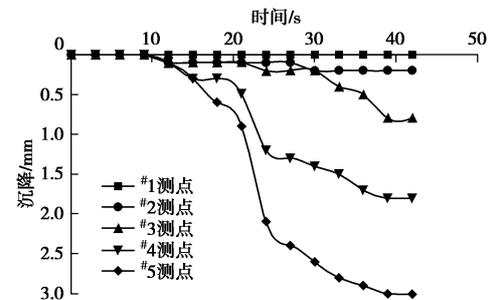


图8 管线测点沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves at measuring points of pipelines

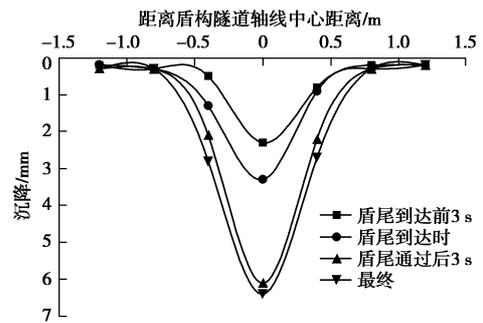


图9 各时间段地表沉降曲线

Fig. 9 Surface settlement curves in each time period

图 10 为横向地表沉降曲线,可以看出横向地表沉降随时间呈台阶状变化,稳定较快,沉降值缓慢增长至 0.7 mm,这是由于测点离隧道较远。

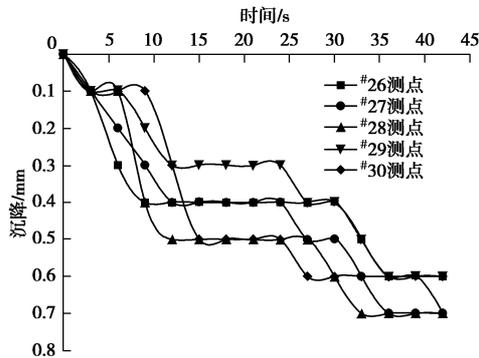


图 10 地表横向测点沉降曲线

Fig. 10 Settlement curves at surface lateral measurement points

2.2 管隧相对位置研究

选取试验编号 1 号、2 号、3 号 3 组试验即管隧垂直、平行、斜交 3 种不同位置。研究管线埋深 15 cm 时, 管线竖向位移分布规律及管线弯矩变化。管隧平行工况时, 管线距离隧道轴线 60 cm 布置, 管线上设置 7 个测点, 间距为 30 cm。管隧斜交工况设置斜交角度为 45°, 等间距布置 9 个测点, 间距为 30 cm。

图 11 为管隧垂直、平行工况, 距离中心测点(隧道轴线) 60 cm 处, 同一位置测点的沉降图。从图中可看出, 平行工况时测点竖向位移稳定保持在 0.3 mm。垂直工况管线竖向位移随时间持续增大至 0.7 mm。原因在于管隧平行时, 管线整体距离隧道轴线较远, 管土相互作用较弱, 管线竖向位移较小。管隧垂直时, 盾构施工阶段管线影响较大, 特别当盾构通过测点后, 由于存在土体损失, 管线竖向位移显著增大。

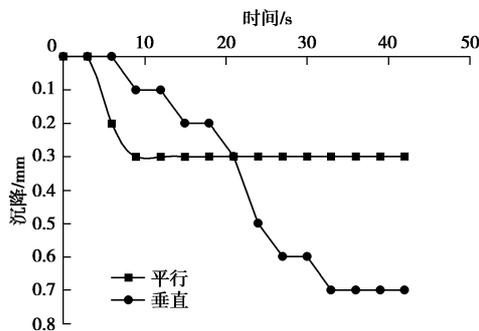


图 11 同一测点位置沉降曲线

Fig. 11 Settlement curves at same measuring point

从图 12 中可以看出, 管隧垂直与斜交工况下, 管线竖向位移分布均关于隧道轴线对称分布。但管隧斜交时, 各测点的竖向位移均比管隧垂直工况大, 原因在于斜交工况时, 相同测点位置距离隧道轴线比垂直

工况测点更近, 受盾构施工影响程度更高, 故竖向位移较大。越往两端, 测点竖向位移相差越小, 原因在于距离隧道轴线越远, 管线所受影响逐渐减小。

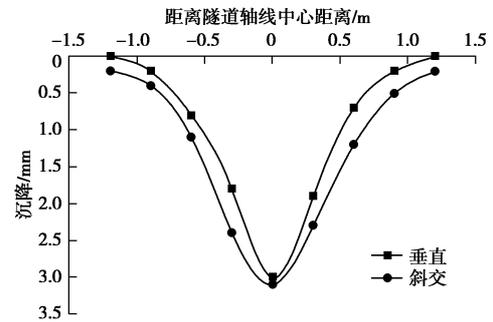


图 12 管隧不同位置沉降曲线

Fig. 12 Settlement curves of pipe tunnel at different positions

由图 13 可以看出, 对比管隧垂直、斜交工况, 分布规律基本一致, 呈“M”型分布。图中管隧斜交工况中距离隧道轴线第三个测点(#11 测点)达到最大负弯矩值, 而垂直工况#12 测点达到最大负弯矩值。原因为斜交管线#11 测点位置比其他测点(特别是#12 测点)与垂直管线#12 测点位置至隧道轴线中心距离相差最小, 故弯矩分布如图 13 所示。并且斜交管线最大负弯矩较垂直管线最大负弯矩小, 原因在于斜交工况时管线的管土作用小于垂直工况。

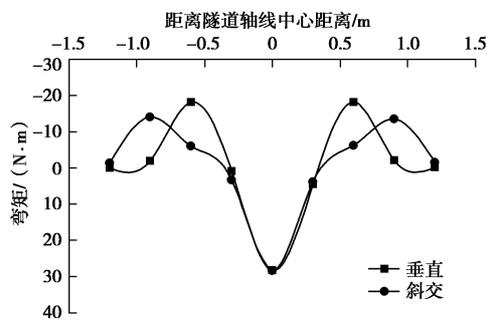


图 13 管隧不同位置弯矩曲线

Fig. 13 Curves of bending moment of pipe tunnel at different positions

2.3 管线不同埋深研究

本节选取试验 1 与试验 4 研究管隧垂直工况, 考虑管线不同埋深下, 管线沉降与弯矩的变化规律。

由图 14 可知, 管线埋深越大, 距离隧道越近, 盾构施工时管线竖向位移越大, 表明管线受盾构施工影响越大, 且管线沉降槽宽度随管线埋深增大而增大。

由图 15 可知, 管线埋深增大, 管线弯矩响应更显著, 施工时应更加注意管线保护。管线两端受影响很小, 不受管线埋深影响, 几乎可以忽略。由图 14, 15 可知, 管线变形与管线埋深之间影响呈正相关变化。

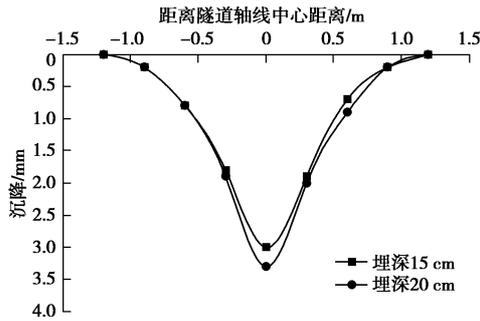


图 14 管线不同埋深沉降曲线

Fig. 14 Settlement curves of pipelines at different buried depths

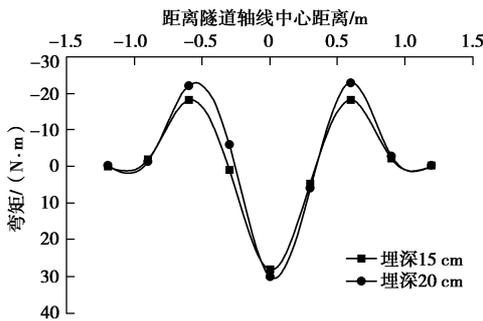


图 15 管线不同埋深弯矩分布

Fig. 15 Distribution of bending moment of pipeline at different buried depths

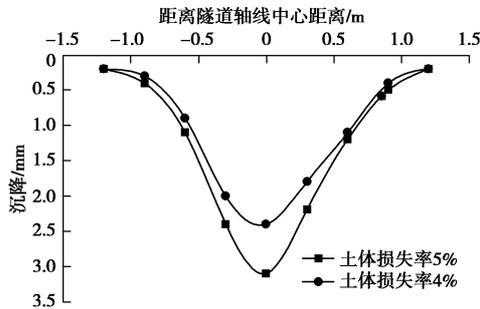


图 16 不同土体损失管线沉降曲线

Fig. 16 Settlement curves of pipelines under different soil losses

2.4 不同土体损失率研究

土体损失是由盾构机与衬砌外壁之间存在空隙造成的，通过在衬砌外壁黏贴一定厚度的纸张，改变盾构机与衬砌外壁之间空隙大小来改变土体损失率。本节选取试验 3 与试验 5，对比管隧斜交、不同土体损失率工况下，管线沉降与弯矩的变化规律。土体损失率取值考虑为类矩形盾构隧道开挖的极限情况。

由图 16 可看出，土体损失率减小，管线位移相应减小，并且管线最大竖向位移减小幅度较大。靠近管线两端，管线竖向位移越小，位移减小幅度也越小。土体损失对沉降影响很大，应注意仪器的精准度。

图 17 反映出土体损失率越小，管线弯矩所受影响减弱，最大正弯矩值从 28.33 N·m 减小至 9.57 N·m，

左右两个较大负弯矩分别由 -14.02，-13.48 N·m 降至 -6.75，-5 N·m，管线弯矩波峰波谷整体降低。表明土体损失率降低，管线受盾构施工影响程度减弱。

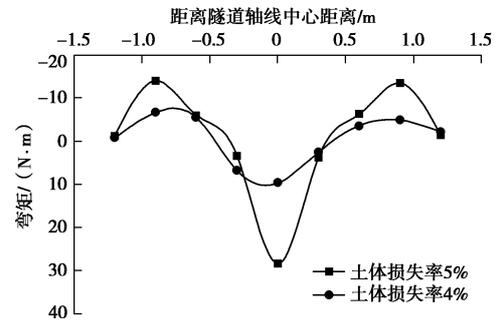


图 17 不同土体损失管线弯矩分布曲线

Fig. 17 Distribution curves of bending moment of pipelines under different soil losses

3 结 论

(1) 管隧垂直及斜交工况时，地下管线竖向位移呈高斯分布；弯矩变化呈“M”型分布，出现一个最大正弯矩与两个较大负弯矩；在整个施工阶段内，盾构通过测点时管线竖向位移与弯矩的变化率最大。表明在此阶段内，管线最有可能发生变形或者破坏。

(2) 相同测点，管隧斜交工况时测得的沉降及弯矩均较管隧垂直工况时测得数据大，表明相同影响因素条件下，管隧斜交工况所受影响更大；同一位置，垂直工况下管线受影响程度高于平行工况。

(3) 管线埋深增加，竖向位移相应增大，弯矩响应更显著，表明管线受损程度与埋深呈正相关；而管线两端的沉降与弯矩受埋深影响较小。

(4) 随着土体损失率减小，地下管线各测点竖向位移（除最外侧两个测点）降低，隧道轴线正上方竖向位移减小幅度最大；管线弯矩也相应减弱，管线上拱下拉效应急剧减弱。

本文模型试验中采用连续空心管，管内无压力，土体为单一砂土，在今后试验中仍需进一步去完善，同时还应注意仪器装备制作的精准性。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969: 225 - 290.

[2] 吴为义. 盾构隧道周围地下管线的性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (WU Wei-yi. Study on mechanical behaviors of buried pipelines induced by shield tunneling construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in

- Chinese))
- [3] 李兴高, 王 霆. 柔性管线安全评价的简便方法[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1861 - 1864, 1876. (LI Xing-gao, WANG Ting. Simple method for evaluating safety of flexible pipelines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1861 - 1864, 1876. (in Chinese))
- [4] 马亚航. 隧道开挖引起的地层变形及其对地下管线的影响分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011. (MA Ya-hang. Effect of tunneling on ground movements and underground pipelines[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese))
- [5] KLAR A, MARSHALL A M, SOGA K, et al. Tunneling effects on jointed pipelines[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(1): 131 - 139.
- [6] 魏 纲, 黄 文, 姜 鑫. 地面出入式盾构开挖对邻近地下管线的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, **14**(9): 1934 - 1941. (WEI Gang, HUANG Wen, JIANG Xin. Analysis of influence of ground penetrating shield tunnel excavation on adjacent underground pipeline[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(9): 1934 - 1941. (in Chinese))
- [7] 彭基敏, 张孟喜. 盾构法施工引起邻近地下管线位移分析[J]. 工业建筑, 2005, **35**(9): 50 - 53. (PENG Ji-min, ZHANG Meng-xi. Analysis of the displacements of underground pipelines caused by shield construction[J]. Industrial Construction, 2005, **35**(9): 50 - 53. (in Chinese))
- [8] 吴 波, 高 波. 地铁区间隧道施工对近邻管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(增刊 2): 2451 - 2456. (WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect of tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(S2): 2451 - 2456. (in Chinese))
- [9] 魏 纲, 魏新江, 裘新谷, 等. 过街隧道施工对地下管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2853 - 2859. (WEI Gang, WEI Xin-jiang, QIU Xin-gu, et al. 3D numerical simulation of effect of underground urban street-passage tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2853 - 2859. (in Chinese))
- [10] 邵 羽. 盾构双隧道施工对邻近埋地管线的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017. (SHAO Yu. Mechanism behavior of existing buried pipeline due to twin shield tunneling[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese))
- [11] 马少坤, 邵 羽, 刘 莹, 等. 不同埋深盾构双隧道及开挖顺序对邻近管线的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(9): 2487 - 2495. (MA Shao-kun, SHAO Yu, LIU Ying, et al. Effects of construction sequences of twin tunneling at different depths on the adjacent pipeline[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(9): 2487 - 2495. (in Chinese))
- [12] 王正兴, 缪林昌, 王冉冉, 等. 砂土中隧道施工对相邻垂直连续管线位移影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 143 - 149. (WANG Zheng-xing, MIAO Lin-chang, WANG Ran-ran, et al. Model test study of vertical buried continuous pipelines displacements affected by tunneling in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 143 - 149. (in Chinese))
- [13] 朱叶艇, 张 桓, 张子新, 等. 盾构隧道推进对邻近地下管线影响的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 151 - 160. (ZHU Ye-ting, ZHANG Huan, ZHANG Zi-xin, et al. Physical model test study of influence of advance of shield tunnel on adjacent underground pipelines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 151 - 160. (in Chinese))
- [14] 王海涛, 金 慧, 袁大军. 砂土地层隧道施工对埋地管道影响的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(增刊 2): 118 - 126. (WANG Hai-tao, JIN Hui, YUAN Da-jun. Model test study on influence of pipeline caused by tunnel construction in sand[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(S2): 118 - 126. (in Chinese))
- [15] 黄晓康, 卢坤林, 朱大勇. 盾构施工对不同位置地下管线变形的影响模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊 1): 123 - 130. (HUANG Xiao-kang, LU Kun-lin, ZHU Da-yong. Simulation test study of deformations of pipelines located at different geometric positions arising from shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S1): 123 - 130. (in Chinese))
- [16] 崔程虹. 不同断面类型盾构施工对邻近地下管线沉降影响的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018. (CUI Cheng-hong. Research on the influence of different sections shield tunnel construction on adjacent underground pipelines[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018. (in Chinese))