

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.025

引用格式:黄戡,傅铁军,王科伟,等.盾构隧道施工对上覆平行管线的影响分析[J].公路与汽运,2025,41(2):118-123.

Citation: HUANG Kan, FU Tiejun, WANG Kewei, et al. Analysis of influence of shield tunnel construction on overlying parallel pipelines[J]. Highways &amp; Automotive Applications, 2025, 41(2): 118-123.

## 盾构隧道施工对上覆平行管线的影响分析\*

黄戡<sup>1</sup>, 傅铁军<sup>1</sup>, 王科伟<sup>2</sup>, 刘汝宁<sup>1</sup>, 周京<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**为研究双线盾构隧道施工对地表和上覆平行管线的影响,以长沙地铁一号线北延一期工程宿龙桥站(原湘绣城站)—开福区政府站区间盾构下穿2条大型供水管线为研究对象,利用MIDAS/GTS NX软件对施工过程进行精细建模,研究双线盾构先后掘进时地表沉降与管线变形,分析掌子面推力与盾尾注浆压力对管线的影响。结果表明,双线盾构施工先后通过地表沉降监测断面后,地表最大沉降值分别为2.66 mm、5.22 mm,地表沉降槽均呈V形分布,右线盾构开挖完成后最大沉降位置向双线隧道中心轴线偏移;左、右2条管线的沉降变形分别由左、右线盾构施工所主导;在一定范围内增加掌子面推力和盾尾注浆压力,对控制管线沉降变形具有明显效果。

**关键词:**隧道;盾构施工;地下管线;掌子面推力;盾尾注浆压力

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0118-06

由于城市地下空间有限,各种生活和交通管线分布复杂,盾构隧道施工时须考虑对周围纵横交错管线的影响。盾构施工过程中的卸荷效应会不可避免地扰动周围地层,使其发生不均匀位移,进而对邻近地下管线的安全造成影响,严重时可能导致管线变形过大,甚至发生开裂和破坏。因此,研究盾构施工时地下管线力学响应规律并准确预估盾构开挖对邻近地下管线的影响具有重要意义。为此,诸多学者对盾构施工下穿既有管线问题进行了研究,研究方法包括理论分析法<sup>[1-4]</sup>、模型试验法<sup>[5-7]</sup>、数值分析法<sup>[8-11]</sup>。张桓等基于两阶段法,采用Loganathan等提出的解析方法及Pasternak弹性地基梁模型,推导了管线竖向位移和内力的解析解,推导并求解了考虑侧向土体作用的管线平衡微分方程,得到了管线变形的解析解<sup>[1]</sup>。冯国辉等考虑管线侧向土体对管线变形的约束作用,将管线简化成Euler-Bernoulli梁搁置在Kerr地基模型上,利用差分法得到了盾构隧道引起上覆管线竖向位移的半解析解<sup>[2]</sup>。刘晓强等通过能量变分法建立盾构下穿引起的管线位移控制方程,分析了管线材质、埋深、地层损失率对管线位移的影响<sup>[3]</sup>。王海涛等通过室内相

似模型试验,分析了采用钻爆法施工地铁隧道对地下管线的影响<sup>[5]</sup>。胡愈等采用相似模型试验和有限元数值模拟相结合的方法,研究了盾构隧道施工引发上覆雨污管线沉降的规律<sup>[6]</sup>。马少坤等通过离心模拟试验与有限元模拟对比分析,对双线盾构施工过程中不同埋深、不同开挖顺序对邻近地下管线的影响进行了研究<sup>[7]</sup>。柳程柱等运用FLAC<sup>3D</sup>有限元软件对盾构隧道上方管线进行模拟,分析了管隧平行时管线沉降规律,但未考虑盾构施工过程中施工参数变化对上覆平行管线的影响<sup>[8]</sup>。沈俊等以郑州某区间叠线盾构施工下穿并行燃气管线为研究背景,用数值模拟还原现场施工与控制,结合现场测量数据分析了盾构施工中燃气管线的变形和受力<sup>[9]</sup>。陆小烽等基于Mindlin解与盾构法隧道统一土体移动模型三维解,分析了盾构隧道施工中土体竖向位移;基于Pasternak地基模型,结合有限差分法,推导了盾构隧道开挖引起的上覆管线竖向位移计算公式<sup>[11]</sup>。目前关于双线盾构隧道施工对上覆平行管线的影响研究较少。本文以长沙地铁一号线北延一期工程宿龙桥站(原湘绣城站)—开福区政府站区间盾构下穿2条大型供水管线为研究对象,采用MIDAS/GTS NX软件建立施工过

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3800905);国家自然科学基金资助项目(52078060);长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2018IC19)

程模型,结合现场监测数据与数值模拟结果进行对比分析,研究双线盾构隧道施工引起既有 2 条平行供水管线变形的规律,并通过分析不同掌子面推力、盾尾注浆压力对上覆平行管线的影响,获得适宜的掘进参数,为类似工程施工提供借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

长沙地铁一号线北延一期工程宿龙桥站(原湘绣城站)—开福区政府站区间隧道,右线长度为 1 565.843 m,左线长度为 1 568.768 m。为单线单洞结构,最大纵坡 25%,最小转弯半径 600 m,最大轨面埋深 32 m。采用盾构法施工,双线盾构隧道中心间距为 14 m,盾构隧道埋深为 13.2~28.4 m。该区间隧道在 YDK9+573.000—906.000 和 ZDK9+661.236—906.000 段下穿 2 条沿芙蓉北路南北走向铺设并平行于隧道轴线的 DN1200 大型供水管线,管线材质为铸铁管。为方便表述,将左线盾构隧道上方管线命名为左管线,右线盾构隧道上方管线命名为右管线。

### 1.2 地质条件

该区间双线盾构隧道主要下穿上软下硬复合地层段,其中上部为圆砾地层,下部为中风化板岩地层。上部圆砾地层自稳性差,掘进过程中刀盘切削土体对上部土体扰动大,极易造成失稳引起地表沉降及破坏既有管线。地层条件及管线与隧道位置关系见图 1。

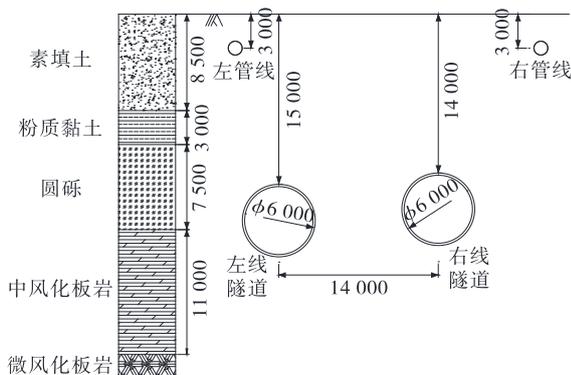


图 1 地层条件及隧道与管线的位置关系示意图(单位:mm)

## 2 数值模拟与监测方案

### 2.1 有限元模型建立

采用 MIDAS/GTS NX 软件对开挖段 YDK9+

597.500—637.500(共 40 环)和 ZDK9+597.500—637.500(共 40 环)进行建模分析,模型长、宽、高分别为 70 m、60 m、52 m。为简化计算,土体按水平分层考虑。土体、盾构管片和注浆层均采用 3D 实体单元模拟,其中土层采用修正的 Mohr-Coulomb 本构模型,盾构管片和注浆层采用弹性本构模型。盾构机盾壳采用 2D 板单元弹性本构模型模拟。各主要土层物理力学参数、主要岩层物理力学参数、盾构隧道结构材料及管线参数见表 1~3,有限元数值分析模型见图 2~5。

表 1 主要土层的物理力学参数

土层名称	天然密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	泊松比
素填土	1.98	15	4.5	10	0.30
粉质黏土	1.92	25	4.5	14	0.38

表 2 主要岩层的物理力学参数

地层名称	天然密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	泊松比
圆砾	2.2	2	35	30	0.28
中风化板岩	2.6	150	15 000	30	0.25
微风化板岩	2.7	300	22 000	40	0.22

表 3 盾构隧道结构材料及管线参数

材料	厚度/ m	重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
注浆层	0.2	23	200	0.25
管片	0.3	25	34 500	0.20
盾壳	0.1	78	212 000	0.20
左管线	0.2	25	25 000	0.17
右管线	0.2	25	25 000	0.17

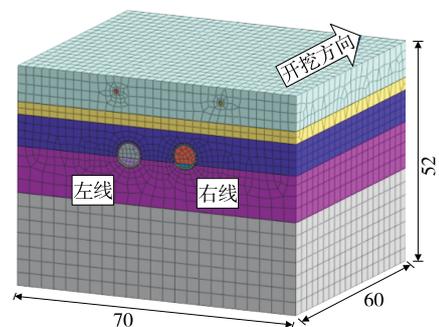


图 2 盾构隧道整体有限元模型(单位:m)



图3 管线与隧道的相对位置

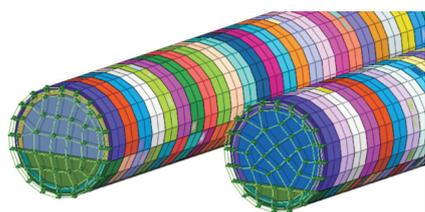


图4 掌子面推力示意图

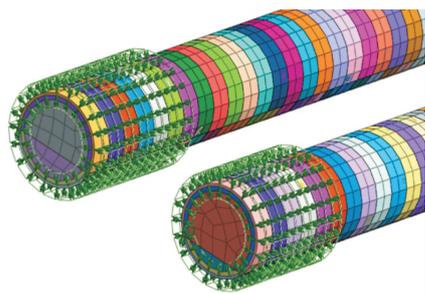


图5 盾尾注浆压力示意图

采用模型进行盾构掘进全过程动态模拟,共设置 83 个施工步,每个施工步为 1.5 m。开挖通过“生死单元”的方式实现。模拟步骤如下:1) 激活所有土体,进行初始地应力平衡。2) 钝化管线位置土体,激活管线材质,并将位移清零。3) 钝化第一环土体,激活第一环盾壳、管片、掌子面推力。4) 钝化第二环土体及第一环盾壳,激活第一环注浆压力、第二环盾壳、管片、掌子面推力。5) 钝化第三环土体、第二环盾壳、第一环注浆压力,激活第二环注浆压力、第三环盾壳、管片、掌子面推力。6) 以此类推,直到隧道掘进完成。

依据现场实际施工参数,选取掌子面推力为 120 kPa、同步注浆压力为 200 kPa。

## 2.2 监测方案

管线采用直埋顶法进行监测,每根管线分别沿掘进方向每 10 m 设 1 个监测点,各布置 3 个监测点。地表横向监测断面沿 D51 断面布置,设置 11 个

测点,测点间距为 2~3 m。地表及管线沉降测点布置见图 6。

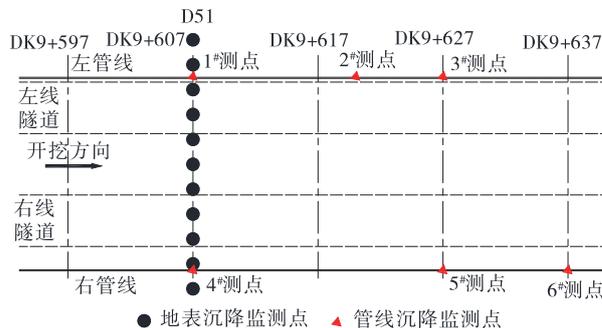


图6 地表及管线沉降测点布置示意图

## 3 有限元与监测结果对比

### 3.1 地表沉降变形规律分析

盾尾通过 8.5~9.0 d 后,盾构引起的地表瞬时沉降基本完成<sup>[12]</sup>。因此,取盾尾通过监测断面 9 d 后地表实测结果与有限元模拟值进行对比。图 7 为左线隧道通过监测断面 9 d 后地表沉降实测值与数值模拟值对比。从图 7 可以看出:左线盾构隧道掘进通过监测断面 9 d 后,监测断面地表沉降呈 V 形分布,数值模拟最大沉降值为 2.66 mm,出现在距双线隧道中心 -5 m 处,并非处于左线隧道轴线上。这是因为左管线的刚度远大于土体,使地表沉降总体向右偏移。数值模拟值与现场实测值具有良好的一致性。

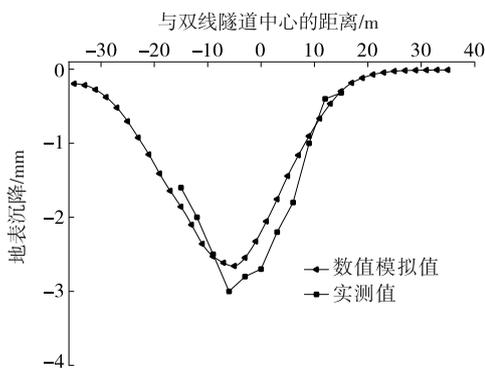


图7 左线隧道通过监测断面 9 d 后地表沉降实测值与数值模拟值对比

图 8 为右线隧道通过监测断面 9 d 后地表沉降实测值与数值模拟值对比。由图 8 可知:右线盾构隧道掘进通过监测断面 9 d 后,地表最大沉降模拟值为 5.22 mm,相比与左线贯通时最大沉降值增大 96.2%,沉降整体变化趋势与现场实测结果基本一致,地表最大沉降位置也不在隧道中心轴线上,而是

偏向既有隧道即左线。这是因为左线隧道掘进对周围地层已造成一定扰动,靠近左线隧道处土体更易受到右线隧道施工的扰动。

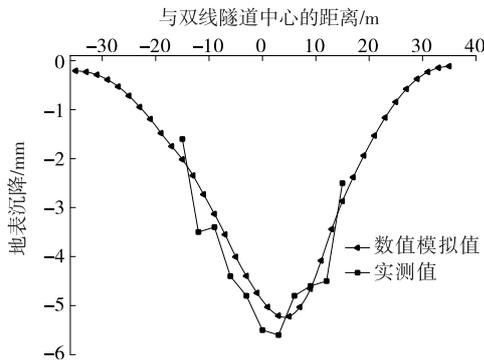


图 8 右线隧道通过监测断面 9 d 后地表沉降实测值与数值模拟值对比

现场实测结果总体大于数值解,这是因为实际施工过程中地层沉降还受盾壳摩阻力、刀盘与前方土体摩擦力等因素的影响,而模拟过程很难直接考虑这些因素的影响。

### 3.2 管线沉降变形规律分析

图 9 为左管线沉降随隧道施工的变化。受模型长度的限制,仅考虑纵向 60 m 范围盾构施工对管线沉降的影响。从图 9 可以看出:左线隧道开始掘进时,1<sup>#</sup>测点处沉降迅速发展,而远离左线隧道轴线的其他测点处产生少量隆起。根据 3<sup>#</sup>测点处沉降曲线,掘进面离监测点约 1 倍洞径时管线开始产生沉降变形,离监测点 3.5 倍洞径时管线沉降值达到最大,模拟值与实测值的变化趋势一致。由于左管线离右线隧道轴线距离较远,右线隧道开挖对左管线的扰动较小,左管线由此产生的位移仅为右管线最终沉降的 9%左右。

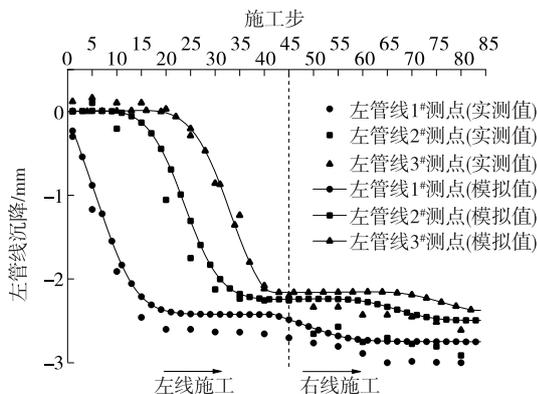


图 9 左管线沉降随隧道施工的变化

图 10 为右管线沉降随隧道施工的变化。从

图 10 可以看出:左线隧道掘进完成后,右管线已产生由左线隧道施工扰动引起的少量沉降,占右管线总沉降的 7.6%。右线隧道开始掘进后,右管线沉降在之前沉降的基础上迅速发展,掘进面通过右管线测点 14 环后沉降最大值基本稳定。总体来看,盾构隧道掘进下穿平行管线过程中,管线上任一点处的变形趋势基本相同,且随着盾构面的推进先后发生沉降。

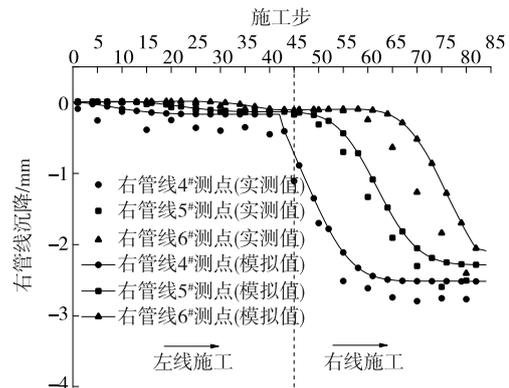


图 10 右管线沉降随隧道施工的变化

综上,地表和管线沉降模拟值与实测值的变化趋势整体上一致,采用上述有限元模型能较好地预测地表沉降及管线变形。

## 4 施工参数影响分析

以管线顶部沉降分析不同掌子面推力和盾尾注浆压力对管线的影响。该区间 2 条管线总沉降值均不超过 3 mm,且左线盾构施工引起的右管线沉降、右线盾构施工引起的左管线沉降均不超过其总沉降的 10%,进行施工参数影响分析时,只考虑左线盾构施工对左管线、右线盾构施工对右管线的影响。

### 4.1 掌子面推力的影响

掌子面推力为盾构隧道掘进的主要动力(本模型表现为施加在圆形掌子面上的均布压力),其大小直接关系到开挖面甚至周围既有结构的稳定。盾构掘进时应严格控制掌子面推力,过大的掌子面推力会导致前方地层隆起;过小的推力会增大地层损失,导致地层发生沉降变形。因此,研究不同掌子面推力对管线的影响非常重要。

根据该工程地层参数及区间地层天然重度与静止侧压力系数,掌子面水土压力为 111~130 kPa。以掌子面推力 120 kPa 为标准,20 kPa 为一个梯度,选取掌子面推力 100 kPa、120 kPa、140 kPa、160 kPa 进行模拟,计算掌子面处超压和欠压情况。

左线隧道盾构开挖至隧道中心位置时,左线盾构不同掌子面推力下左管线的沉降见图 11。由图 11 可知:不同掌子面推力下左管线沉降变化趋势相近。随着左线掌子面推力的增大,对左管线沉降的控制效果增大,掌子面推力由 120 kPa 增加至 160 kPa 时,最大沉降减少约 0.5 mm。掌子面推力为 140~160 kPa 时,掌子面前方 1.5D~5.0D(D 为管线直径)处左管线出现小幅度隆起,这是由掌子面推力大于该深度处水土压力所致。掌子面推力为 160 kPa 时,掌子面前后方左管线沉降最小,掌子面后方最大沉降值为 2.2 mm。结合现场施工经验和上述沉降规律,该区间左线隧道掌子面推力设置为 100~120 kPa 较合理。

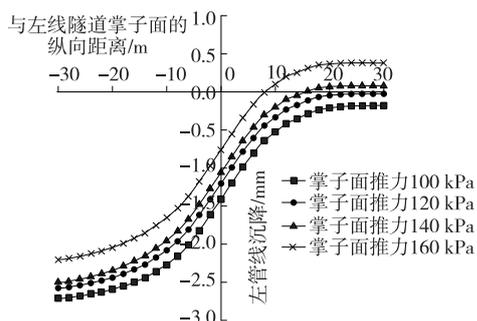


图 11 左线隧道盾构不同掌子面推力下左管线的沉降

右线隧道盾构开挖至隧道中心位置时,右线盾构不同掌子面推力下右管线的沉降见图 12。由图 12 可知:右线盾构掌子面推力分别为 100 kPa、120 kPa、140 kPa、160 kPa 时,右管线最大沉降依次降低,最大沉降减小约 0.12 mm,但变化幅度依次减小,抑制效果有限。结合现场施工经验与上述沉降规律,该区间右线隧道掌子面推力设置为 120~160 kPa 较适宜。

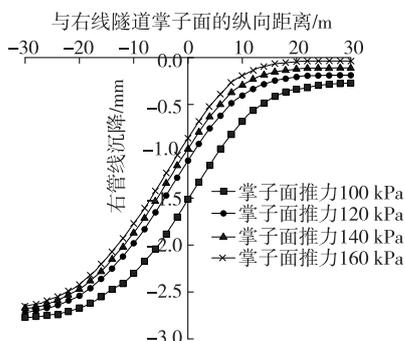


图 12 右线盾构不同掌子面推力下右管线的沉降

右线隧道的整体沉降略大于左线隧道,这是由于左管线离左线隧道较近,左管线所在土层被挖空,左线隧道掌子面处所承受的土压力略小。综上,该

区间左线隧道施工时应将掌子面推力控制在 100~120 kPa,右线隧道施工时掌子面处推力可适当增大至 160 kPa 左右,以控制管线沉降。

#### 4.2 盾尾注浆压力的影响

盾构掘进过程中,盾尾脱离管片后产生的空隙会造成土层应力重分布和不均匀沉降。盾尾同步注浆能有效防止地层变形<sup>[13-15]</sup>。根据实际施工参数,分别选取盾尾注浆压力 200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa 进行模拟。不同注浆压力下双线隧道贯通时左管线与右管线的沉降分别见图 13、图 14。

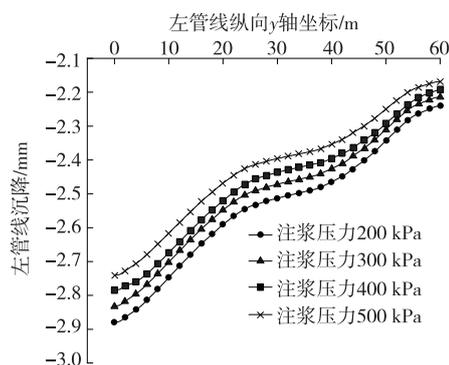


图 13 不同盾尾注浆压力下左管线的沉降

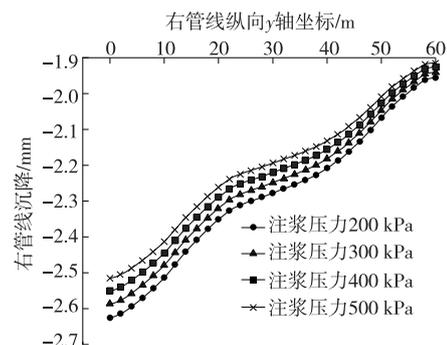


图 14 不同盾尾注浆压力下右管线的沉降

由图 13、图 14 可知:不同盾尾注浆压力下左管线沉降明显大于右管线,这是因为左管线离 2 条隧道轴线比右管线近,受施工扰动更大。注浆压力为 200~500 kPa 时,2 条管线的沉降均减小,分别减小约 0.14 mm、0.12 mm,但变化幅度依次减小。注浆压力增大至 500 kPa 时,对管线的沉降控制并不明显。表明盾尾注浆压力对控制管线沉降具有明显效果,但一味增加注浆压力,效果并不明显。该区间隧道的注浆压力控制在 300~400 kPa 即可满足 2 条管线沉降要求。

## 5 结论

以长沙地铁一号线北延一期工程宿龙桥站(原

湘绣城站)一开福区政府站区间为依托,采用 MIDAS/GTS NX 有限元软件对双线盾构施工下穿 2 条平行供水管线进行精细建模分析,得出以下结论:

(1) 双线盾构先后通过地表沉降监测断面后,地表最大沉降分别为 2.66 mm、5.22 mm。右线盾构通过监测断面后,地表沉降槽依旧呈 V 形分布。最大沉降位置向双线隧道中心轴线偏移。

(2) 双线隧道先后施工,左管线总沉降的 91.0% 由左线盾构施工造成,右管线总沉降的 92.4% 由右线盾构施工造成,左线盾构施工对右管线、右线盾构施工对左管线的影响均较小。

(3) 在一定范围内,管线沉降随着掌子面推力与注浆压力的增加而减小。该区间最佳掌子面推力左线隧道为 100~120 kPa、右线隧道为 120~160 kPa,注浆压力控制在 300~400 kPa 即可满足 2 条管线沉降要求。

#### 参考文献:

- [1] 张桓,张子新.盾构隧道开挖引起既有管线的竖向变形[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1172-1178.
- [2] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等.侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(8):1453-1463.
- [3] 刘晓强,梁发云,张浩,等.隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J].岩土力学,2014,35(增刊 2):217-222.
- [4] 魏纲,崔程虹,许讯,等.基于能量法的双圆盾构施工引起管线沉降计算[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):1106-1111.

- [5] 王海涛,金慧,贾金青,等.地铁隧道钻爆法施工对邻近埋地管道影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增刊 1):3332-3339.
- [6] 胡愈,姚爱军,张剑涛.地铁施工引发雨污管线灾变的试验研究与数值仿真[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(6):90-96.
- [7] 马少坤,邵羽,刘莹,等.不同埋深盾构双隧道及开挖顺序对临近管线的影响研究[J].岩土力学,2017,38(9):2487-2495.
- [8] 柳程柱,苏永华.盾构施工引起的管线变形规律及安全风险评估[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2882-2891.
- [9] 沈俊,晏莉,傅金阳,等.叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊 1):449-456.
- [10] 晏莉,赵宇佳,濮义.新建盾构隧道近距离正交上跨既有隧道的施工影响研究[J].公路与汽运,2024,40(3):128-134.
- [11] 陆小烽,黄戡,傅铁军,等.盾构施工对上覆管线竖向位移的影响分析[J].交通科学与工程,2025,41(1):41-50.
- [12] 梁荣柱,潘金龙,林存刚,等.软土地区盾构施工沉降界限[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(7):1148-1154+1201.
- [13] 刘启明,柳卓,刘学武,等.富水砂卵石地层隧道盾构下穿地铁线注浆方案优化[J].公路与汽运,2021(2):143-146.
- [14] 刘竹根.盾尾注浆硬化过程对地层和隧道结构力学响应的研究[D].北京:北京工业大学,2023.
- [15] 黄大维,石海斌,罗仲睿,等.盾尾同步注浆模拟试验研究[J].华东交通大学学报,2023,40(3):1-9.

收稿日期:2023-11-09

\*\*\*\*\*

(上接第 91 页)

- [11] 黄绍结,李莘哲,陈耀章.连续钢梁桥顶推过程临时墩受力研究及改善措施[J].公路与汽运,2016(4):198-200+201.
- [12] 张军,刘国坤.基于线性规划理论的顶推 PC 箱梁下部结构临时墩拉索力优化研究[J].公路工程,2021,

46(3):232-238.

- [13] 陈耀章.连续钢梁桥顶推施工程序设计及受力优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.

收稿日期:2023-09-16