

复合地层盾构施工对上覆管线变形影响研究

胥正总, 张拥军, 张伟国, 冯志昊, 张啸雨

(青岛理工大学, 山东 青岛 266520)

摘要: 为了探究上软下硬复合地层盾构施工对上覆管线的影响, 依托青岛市15号线南四区间为背景, 通过有限元软件, 建立数值模型。采用单因素分析法, 研究了管线直径、软硬岩复合比和水位埋深对管线变形的影响规律, 并通过正交实验对管线直径、软硬岩复合比及水位埋深进行敏感性分析, 研究各因素对管线变形的影响程度。结果表明: 随着管线直径增大、软硬岩复合比的减小以及水位埋深增加, 管线的竖向位移呈现减小的趋势; 并通过多因素敏感性分析确定各因素影响程度排序为: 软硬岩复合比 > 水位埋深 > 管线直径。

关键词: 盾构开挖; 管线变形; 流固耦合; 复合地层; 敏感性分析

中图分类号: U452

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0358-05

Study on Influence of Shield Tunneling in Composite Strata on Deformation of Overlying Pipelines

XU Zhengzong, ZHANG Yongjun, ZHANG Weiguo, FENG Zhihao, ZHANG Xiaoyu

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: To explore the influence of shield tunneling in upper-soft and lower-hard composite strata on overlying pipelines, a numerical model is established by using finite element software based on the South Fourth Section of Qingdao Metro Line 15. Single-factor analysis is adopted to study the effects of pipeline diameter, composite ratio of soft and hard rocks, and burial depth of the groundwater level on pipeline deformation. Additionally, orthogonal experiments are conducted for sensitivity analysis of pipeline diameter, soft-hard rock composite ratio and groundwater level burial depth, and the degree of influence of each factor on pipeline deformation is studied. The results indicate that as the pipeline diameter increases, the composite ratio of soft and hard rocks decreases, and the burial depth of the groundwater level increases, the vertical displacement of the pipeline tends to decrease. Through the multi-factor sensitivity analysis, the order of influence of these factors is determined, that is the composite ratio of soft and hard rocks > burial depth of the groundwater level > pipeline diameter.

Keywords: shield tunneling; pipeline deformation; fluid-solid coupling; composite strata; sensitivity analysis

0 引言

随着城市化进程的加快, 地下工程建设日益增多, 施工过程中常常需要下穿既有市政管线, 如供水、排水、燃气管道等。这些管线分布复杂, 一旦受到不利影响, 极易引发供水中断、燃气泄漏或通信瘫痪等问题, 危及城市基础设施安全。隧道掘进引起的地层应力重分布和土体变形, 可能导致管线产生

沉降、位移及附加内力, 若控制不当将带来严重风险。因此, 开展隧道下穿管线相互作用机理及变形规律研究, 不仅具有重要的理论意义, 也对城市地下工程施工安全和风险防控具有实际应用价值。

针对盾构下穿对邻近管线变形的影响, 国内外学者也开展了大量研究, 积累了丰富的理论成果与工程经验。温竹茵^[1]针对矩形盾构近距离下穿大直径管道, 从隧道的设计和施工等方面进行了分析论述, 提出了针对性的措施。吴文娟等^[2]针对盾构下穿多条电力管沟交叉, 提出掘进参数优化、注浆等保护措施, 采用工字钢顶托等就地保护方案。苏永华等^[3]考虑不同非连续管线接头间距、接头刚度和管隧间距的影响, 探讨隧道开挖对非连续管线沉降、弯矩及管土接触应力的影响。康晶^[4]采用有限元软件MIDAS GTS模拟地铁盾构掘进对大直径输水管线的

收稿日期: 2025-12-28

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2025]一般071)

作者简介: 胥正总(1999—), 男, 硕士, 从事岩土方向研究工作。

通信作者: 张拥军(1974—), 男, 博士, 教授, 从事岩土方向研究工作。电子信箱: zyjun@qut.edu.cn

影响,通过现场监测结果对计算结果进行验证。庄新玉^[5]建立盾构下穿既有管线数值模型,研究隧道直径、管线直径、管隧净距以及管线埋深四个因素对管线变形的影响,并得到了隧道施工对管线沉降影响的多因素耦合公式。孙姝婷等^[6]采用FLAC3D有限差分程序研究了开挖循环进尺、初期支护的强度与厚度、注浆加固指标对管线沉降的影响。Yang等^[7]以盾构区间复杂管线为研究对象,研究盾构施工过程中铸铁管线的变形特征。罗文俊等^[8]参考Rayleigh-Ritz法给出位移函数,写出地基梁系统各部分的功能表达式,建立关于管线变形的总势能方程。王晓军^[9]从能量角度出发,并基于Pasternak地基模型建立管线在外力作用下的势能方程,获得盾构下穿引起上覆既有管线受力变形解析解。林存刚等^[10]基于无拉力Winkler地基及管线地基承载力理论,推导了考虑界面脱空和土体屈服影响的管土非线性相互作用计算方法。冯国辉等^[11]将管线简化成无限长梁放置在Pasternak地基上,引入无限远端侧向土体位移对既有管线的影响,采用力学平衡法获得管线竖向受力变形控制方程。Shi等^[12]基于自主研发管线模型试验系统,对小范围无渗漏盾构施工引起的地表沉降和管线变形进行了研究。Liu等^[13]考虑土-管道不连续接触效应,利用物理试验标定的FDM-DEM耦合模拟阐明了失稳机制。傅金阳等^[14]基于半无限空间Mindlin解及统一土体移动模型,将既有管线简化为Euler-Bernoulli梁,建立3参数Kerr地基模型下的管线纵向受力平衡微分方程并计算。史江伟等^[15]开展物理模型试验,研究了隧道埋深比(C/D)和管线开挖面水平净距(H/D)对地下管线变形特性影响。

目前,国内外学者的研究主要集中隧道开挖管土相互作用理论以及单一软土或者岩质地层下单因素分析,对于上软下硬地层盾构施工对管线变形的影响因素以及各因素的敏感性分析还需要进一步的研究。本文以15号线南四区间为背景,研究了青岛地区高水位条件下,盾构在上软下硬地层施工时,管线材质、直径、软硬岩复合比及水位埋深四个因素对管线竖向位移的影响规律,并通过正交试验研究了管线直径、软硬岩复合比、水位埋深对管线竖向位移的敏感性分析,为国内外类似工程提供参考。

1 工程概况

青岛地铁15号线南四区间,地处棘洪滩街道辖区。左线长3 748 m,右线长3 746 m,区间隧道埋深

8.7 ~ 22 m,水平线间距13 ~ 14.2 m。

本文选取区间段K38+991 ~ K39+381,左线隧道经过锦宏东路,并下穿及侧穿给水、雨水、污水、燃气及通讯多种管线,管线一般埋深1.5 ~ 4.2 m。

本区段自上而下地层为:素填土、强风化安山岩、中风化安山岩、微风化安山岩。隧道穿越强、中、微风化安山岩地层。初勘期间水位埋深0.9 ~ 7.00 m,水位标高-1.38 ~ 11.26 m,区间场地地下水位综合年变幅为1 ~ 2 m。

2 数值模拟分析

2.1 有限元计算模型

通过有限元软件建立隧道正交管线三维模型,模型相对位置见图1。模型尺寸设置为90 m×60 m×45 m,管隧相对位置为正交,其中双线隧道直径7 m,隧道埋深为13.2 m,隧道轴线水平间距14 m。注浆层厚度0.15 m,管片内径6 m,管片厚度为0.35 m且1.5 m一环。管线为混凝土材质,管线埋深3.5 m,管线直径1.4 m,管线厚度0.15 m。地层从上到下分别为4.5 m素填土,11.5 m强风化安山岩,8.7 m中风化安山岩,20.3 m微风化安山岩,且强风化安山岩与中风化安山岩分界面位于隧道轴线上方0.7 m处。地下水位埋深设置为1 m,通过初始水压力平衡得到地层内的孔隙水压力分布。法向位移约束模型四周与底部,设置前后左右和底部五个边界为不透水边界,上部边界设置为透水边界。模型掌子面支护力设置为1.4 bar,注浆压力为1 bar。地层及隧道参数见表1、表2。

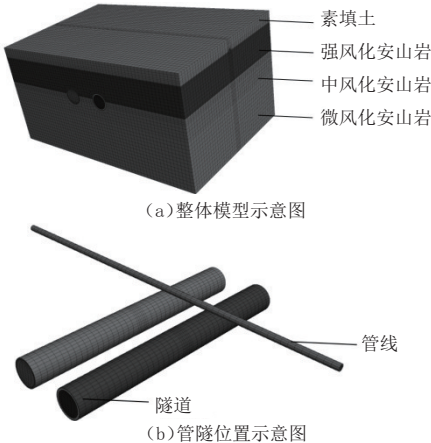


图1 三维数值模型图

2.2 施工模拟

模型设置左线开挖贯通后,右线再贯通。一次循环开挖1.5 m。模拟过程如下:先钝化1.5 m土体,

表1 地层材料参数

地层参数	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
素填土	1.75	10	0.2	15	15	15
强风化安山岩	2.3	200	0.25	90	45	1.5
中风化安山岩	2.45	5 000	0.22	150	55	0.01
微风化安山岩	2.51	22 000	0.2	450	60	0.001

表2 盾壳、管片、注浆层及管线材料参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
盾壳	7.85	210 000	0.30
管片	2.60	34 000	0.21
注浆第一阶段	2.20	1	0.34
注浆层 注浆第二阶段	2.20	6.8	0.32
注浆第三阶段	2.20	56	0.3
混凝土管线	2.50	25 000	0.20

相应位置激活盾壳,同时开挖面施加掌子面支护力。之后钝化盾壳,激活管片与注浆层,同时注浆层与管片及周围岩土体接触面上施加等值的注浆压力,并且注浆材料分三阶段变化,通过调整注浆层的力学参数,模拟注浆材料从初始流塑状态向固结硬化状态的演化,重复40次直至左线开挖完成,再进行右线开挖。

3 模拟结果分析

3.1 模型准确性验证

提取标准工况下管线相应实际监测点位置处的模拟值,将监测值与模拟值绘制成图。

由图2所示由于模型未考虑地层不均匀分布的影响,导致模拟值与监测值有所差别,但监测值与模拟值整体趋势相同,均为V形曲线,大体为对称的“钟形”分布。越靠近隧道中心,沉降变化越剧烈;远离隧道时,沉降逐渐减小,基本符合Peck曲线变化规律,验证模型建立的准确性。

3.2 管线竖向位移变化规律

为了研究不同开挖阶段管线位移变化规律,对左线开挖20环、左线贯通、右线开挖20环、右线贯通四个阶段,分别在模型管线顶部节点 $x=-40\text{ m}$ 到 $x=40\text{ m}$ 位置每隔2 m提取总共41个监测点绘制成管线竖向位移曲线见图3。一环1.5 m,20环为管线正下

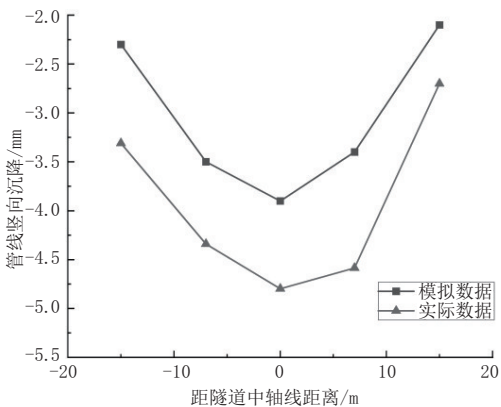


图2 现场监测与数值模拟对比图

方对应环数。

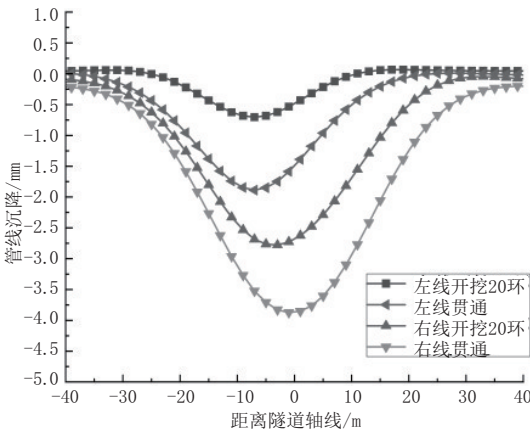


图3 不同开挖阶段管线竖向位移曲线图

由图3得,盾构开挖20环时,即盾构机头到达管线正下方,管线竖向变形峰值0.7 mm,此时管线竖向变形曲线中心位于左线隧道中心;左线隧道贯通后,管线竖向变形峰值1.9 mm;右线隧道开挖20环时,管线变形峰值来2.8 mm;右线隧道贯通后,管线变形峰值来到了3.9 mm。当右线隧道开挖至20环处,管线竖向变形曲线中心有着向右移动的趋势,随着右线隧道贯通,曲线中心位于双线隧道中轴线附近。在整个开挖过程中,曲线中心由左线隧道轴线向双线隧道轴线过渡,且整体呈现V形曲线。

4 不同影响因素分析

为进一步探究盾构隧道开挖对临近管线竖向位移的影响,引入单因素分析方法,分别研究管线直径、软硬岩复合比、水位埋深3个因素对管线的变形规律。

本节所有工况均在模型管线顶部节点 $x=-40\text{ m}$ 到 $x=40\text{ m}$ 位置每隔2 m提取总共41个监测点绘制成管线竖向位移曲线。

4.1 管线直径的影响分析

工程中,混凝土排水管管径范围常见尺寸不大

于 3 m。为研究盾构隧道施工管线直径对管线竖向位移的影响规律,保持其他条件不变,在标准工况 1.4 m 的基础上,以 0.5 m 为幅度。分别取 0.9、1.4、1.9、2.4、2.9 m 五种管线直径工况进行模拟分析。

由图 4 得,0.9 m 直径工况下,管线竖向位移峰值最大,为 6.2 mm;直径 2.9 m 工况下,管线竖向位移峰值最小,为 5.4 mm。随着管线直径的增大,管线整体抗弯刚度增大,在与土体相互作用中,抵抗土体变形的能力增强,故呈随着管线直径的增加,管线竖向位移呈现减小的趋势。

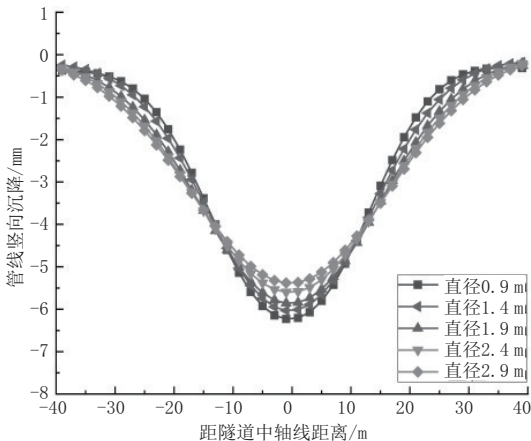


图 4 不同管线直径竖向位移曲线

4.2 软硬岩复合比的影响分析

为研究盾构隧道施工穿越地层软硬岩复合比对管线竖向位移影响规律,保持其他条件不变,分别取软硬岩复合比 0%、25%、50%、75%、100% 五种工况进行模拟分析。这五种工况依次为,软硬岩分界面位于隧道中轴线上方 3.5 m 处(隧道整体位于硬岩)、软硬岩分界面位于隧道中轴线上方 1.75 m 处、软硬岩分界面位于隧道中轴线处、软硬岩分界面位于隧道中轴线下方 1.75 m 处、软硬岩分界面位于隧道中轴线下方 3.5 m 处(隧道整体位于软岩)。

由图 5 得,软硬岩复合比 0% 工况下,管线竖向位移峰值最小,为 2.0 mm;软硬岩复合比 100% 工况下,管线竖向位移峰值最大,为 8.0 mm。随着软硬岩复合比增加,隧道从整体位于硬岩向整体位于软岩变化。硬岩强度高、自稳性好,能有效形成承载拱抑制变形;而软岩强度低、自稳性差,隧道穿越的软岩比例越高,开挖引起的围岩塑性变形和松动范围就越大,从而导致地层竖向变形显著加剧。故软硬岩复合比增加,管线竖向位移呈现增大的趋势,且趋势加剧。

4.3 水位埋深的影响分析

为研究盾构隧道施工地下水位对管线竖向位移,保持其他条件不变,根据项目区间勘期间水位埋

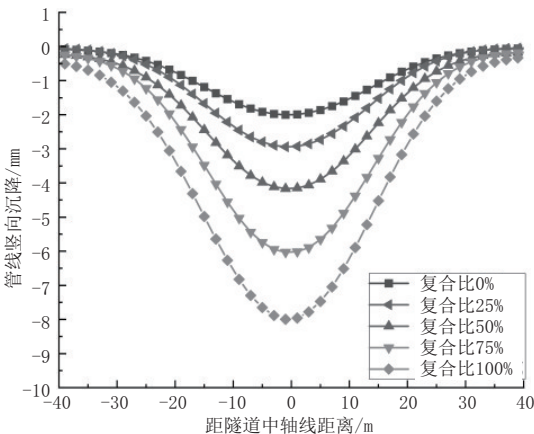


图 5 不同地层弹性模量比管线竖向位移曲线

深以及地下水位综合年变幅,分别取地下水位埋深 1、3、5、7、9 m 五种工况进行模拟分析。

由图 6 得,水位埋深 1 m 工况下,管线竖向位移峰值最大,为 6.0 mm;水位埋深 9 m 工况下,管线竖向位移峰值最小,为 4.7 mm。隧道开挖后,前上方地下水会向隧道的开挖掌子面补给,水位埋深越大,盾构开挖引起的渗流速度越小,渗流影响的范围越小,对地层变形影响程度越小,进而导致管线竖向位移减小。随着水位埋深的增加,管线竖向位移呈现减小的趋势,且趋势逐渐变缓。

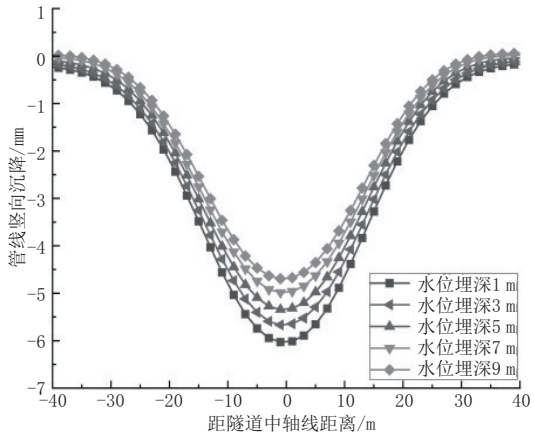


图 6 水位埋深管线竖向位移曲线

5 影响因素敏感性分析

为研究在上软下硬地层盾构隧道开挖各影响因素对已有管线的敏感性,找出最显著因素。采用正交实验设计结合数值模型模拟的方法,选取管线直径、软硬岩复合比、水位埋深这 3 个影响因素进行正交实验设计,根据上一节各因素分析工况,确定各水平划分,见表 3。根据表中因素和水平的划分,采用 L9(34) 正交表,设计 9 组试验,见表 4。

通过对实验方案分别建模计算,以管线位移峰值作为敏感性分析指标,正交试验结果见表 4。

表3 正交实验因素和水平

参数	水平1	水平2	水平3
管线直径/m	0.9	1.9	2.0
软硬岩复合比/%	0	50	100
水位埋深/m	1	5	9

表4 正交实验方案结果

试验	因素			管线位移 峰值/mm
	管线直径/m	上下地层软硬岩 复合比B	水位埋深/m	
1	0.9	0	1	2.4
2	0.9	50	5	4.4
3	0.9	100	9	6.5
4	1.9	0	5	1.8
5	1.9	50	9	3.6
6	1.9	100	1	8.0
7	2.9	0	9	1.5
8	2.9	50	1	4.2
9	2.9	100	5	6.2

极差分析法通过计算极差*R*来判定各因素的显著性,具体方式为比较各因素在不同水平下试验指标的均值差异,*R*值越大,说明该因素的影响作用越突出。极差计算公式如下:

$$R_j = \max k_i - \min k_i \tag{1}$$

式中:*k_i*为第*i*水平对应指标之和*k_i*的平均值,即 $k_i = \frac{K_i}{r}$,其中:*r*为任一列同一水平出现的次数。

将管线直径、软硬岩复合比和水位埋深作为影响因素,通过极差分析来探究三个因素对模拟结果影响的显著性水平,计算结果见表5。

表5 正交试验方案的极差分析

指标	直径 A	上下地层软硬岩复合比 B	水位埋深 C	
管线沉降 峰值	K1	13.3	5.7	14.6
	K2	13.4	12.2	12.4
	K3	11.9	20.7	11.6
	k1	4.4	1.90	4.87
	k2	4.47	4.07	4.13
	k3	3.97	6.90	3.87
	R1	0.5	5.0	1.0

由表5可见,因素A、因素B、因素C的管线变形峰值极差分别为0.5、5.0、1.0。各因素对管线变形的影响从大到小排序为:因素B、因素C、因素A。青岛地区上软下硬地层隧道下穿管线对管线的影响程度为软硬岩复合比>水位埋深>管线直径。

6 结 语

(1)管线竖向沉降曲线呈现V形。在右线隧道

(后行线)开挖时,管线竖向沉降曲线中心向右线隧道偏移,最终位于双线隧道中轴线附近。

(2)随着管线直径的增加,管线竖向位移呈现减小的趋势,且趋势逐渐变缓。随着软硬岩复合比增大,管线竖向变形呈现增大的趋势,且趋势逐渐加剧。而随着水位埋深的增加,管线竖向位移呈现减小的趋势,且趋势逐渐变缓。

(3)管线直径、软硬岩复合比、水位埋深三个影响因素对管线竖向位移敏感性排序依次为:软硬岩复合比、水位埋深、管线直径,软硬岩复合比对管线竖向位移的影响最为显著。

参考文献:

[1] 温竹茵.大型矩形盾构近距离穿越管线影响研究[J].城市道桥与防洪,2018(4):202-207.

[2] 吴文娟,王振飞.公路隧道近距离下穿电力管线施工技术研究[J].城市道桥与防洪,2021(5):220-225.

[3] 苏永华,李明.黄土盾构下穿不同地下非连续管线的模型试验[J].湖南大学学报(自然科学版),2024(3):59-68.

[4] 康品.盾构近距离下穿输水管道控制措施研究[J].城市道桥与防洪,2023(3):161-163;170.

[5] 庄新玉/盾构下穿施工既有管线沉降分析及预测[J].力学季刊,2024(1):239-247.

[6] 孙姝婷,袁维,彭澍.城市暗挖隧道平行穿越既有市政管线施工方法研究[J].甘肃科学学报,2024(5):31-37;55.

[7] Yang H, Wu W, Wu X. et al. Analysis of Disturbance and Safety Risk Assessment of Shallow-Buried Pressure Pipelines Utilizing the Shield Tunneling Method[J]. Buildings, 2025, 15(13): 2253.

[8] 罗文俊,刘天宇,郝结平,等.基于能量法的隧道穿越引起既有管线变形研究[J].防灾减灾工程学报,2024(1):128-136.

[9] 王晓军.盾构下穿引起上覆管线变形的解析计算方法[J].科学技术与工程,2023(26):11398-11404.

[10] 林存刚,王忠杰,郭成超,等.基于双层Winkler地基的盾构穿越管线挠曲与脱空分析[J].岩石力学与工程学报,2024(5):1270-1281.

[11] 冯国辉,肖明清,倪建中,等.盾构下穿引起上覆管线变形的简化计算方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2024(5):68-75.

[12] Shi X, Zheng L, Rong C, et al. Study on the Rules of Ground Settlement and Pipeline Deformation Considering the Combined Effects of Pipeline Damage Leakage and Shield Tunneling Construction [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 49: 101367.

[13] Liu Y, Lei H, Huang H, et al. Finite-discrete element numerical modeling on shield tunnel face stability undercrossing existing pipeline considering discontinuous contact[J].Scientific Reports, 2025, 15(1): 34616.

[14] 傅金阳,孙前辉,杨州,等.地铁隧道并行下穿影响下既有管线纵向变形响应研究[J].中国铁道科学,2025(3):182-194.

[15] 史江伟,王金朴.盾构开挖面失稳下既有管线三维变形特性研究[J].地下空间与工程学报,2025(3):1057-1065.