

顶管顶进对邻近盾构隧道的影影响规律

黄建华^{1,2}, 黄夏莲¹, 袁晓玉³

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

3. 安阳学院 建筑工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 以滨海区顶管穿越邻近地铁盾构隧道为研究背景进行建模, 将结果与实测数据对比, 验证模型的有效性。分析不同工况下, 顶管顶进过程盾构隧道力学性能变化特征及影响因素和敏感度。结果表明: 顶管垂直上穿施工会引起下方盾构隧道整体上浮, 最大变形在顶管轴线正下方; 顶管并行隧道时, 对邻近盾构隧道变形影响较大, 尤其在平行顶进立面夹角 -45° 位置时, 隧道变形最大, 是不利工况; 顶管与隧道间距越小, 盾构隧道横截面变形越大, 邻近顶管的隧道轴力和弯矩变化量也越大; 顶管直径越大, 顶进时邻近隧道横截面变形也越大, 轴力和弯矩变化量也越大, 顶管直径与距离的关联度均大于0.5, 顶管直径的敏感度大于二者间距。

关键词: 顶管; 盾构隧道; 力学性能; 数值模拟; 敏感度

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0212-08

Influence of pipe jacking on adjacent shield tunnels

HUANG Jianhua^{1,2}, HUANG Xialian¹, YUAN Xiaoyu³

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities in Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. School of Architecture and Engineering, Anyang University, Anyang 455000, China)

Abstract: A modeling was conducted with the background of pipe jacking through adjacent subway shield tunnels in the coastal area. The results were compared with measured data to verify the effectiveness of the model. The variation characteristics, influencing factors and sensitivity of mechanical properties of shield tunnel during pipe jacking process under different working conditions were analyzed. Results show that the vertical upward pipe jacking construction will cause the shield tunnel below to float as a whole, and the maximum deformation is directly below the pipe jacking axis. When the pipe jacking is parallel to the tunnel, it has a great influence on the deformation of the adjacent shield tunnel. Particularly, when the angle between the parallel jacking facade is -45° , the tunnel deformation is the largest, which is an unfavorable working condition. The smaller the distance between the pipe jacking and the tunnel, the greater the cross-sectional deformation of the shield tunnel, and the greater the change of the axial force and bending moment of the tunnel adjacent to the pipe jacking. The larger the diameter of the jacking pipe, the greater the cross-sectional deformation of the adjacent tunnel during jacking, the greater the change of axial force and bending moment. When the correlation between the diameter of the pipe jacking and the distance is greater than 0.5, the sensitivity of the pipe jacking diameter is greater than the distance between the two.

Keywords: jacking pipe; shield tunneling; mechanical properties; numerical simulation; sensitivity

收稿日期: 2024-07-14

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下结构工程、特殊土力学等。

伴随城市地下空间逐渐被开发,地铁区间隧道、地下人行通道、地下管线等地下工程不断修建,隧道之间的间距变得越来越小,随之而来也出现了一些新的隧道施工问题^[1-4]。隧道与隧道之间可能出现并行的情况,新建隧道平行或交叉顶进邻近隧道^[5-7]。国内外针对顶管施工对邻近管线的影响研究主要采用经验公式、理论解析、数值模拟、模型试验等方法。韩国良^[8]以石家庄顶管工程为背景,基于 peck 公式通过函数拟合的方法,计算获得了土体损失率和沉降槽宽度系数的取值范围。焦义等^[9]依据 Mindlin 位移解得到地表变形计算公式,计算发现正面附加推力对土体变形影响占比较大。Zang 等^[10]模拟了新建隧道垂直穿越既有隧道的开挖过程,探讨了地表沉降、既有隧道位移和弯矩的变化规律。马险峰等^[11]通过室内试验研究了顶管顶进时不同土体损失率对周围建筑物基础和地下管线的影响规律。

综上,针对顶管正交或斜交穿越邻近盾构隧道的研究较多,而对于顶管平行顶进工况以及邻近隧道力学性能变化的研究较少。本文通过数值模拟和现场实测,研究了不同工况下顶管顶进过程盾构隧道力学性能变化特征,并进一步分析其影响因素和敏感性。

1 场地概况

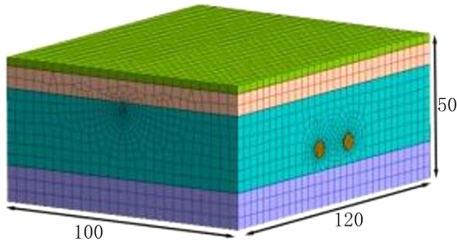
滨海区顶管穿越邻近地铁盾构隧道工程,顶管为 DN1400 钢筋混凝土管,埋深约 14.6 m,隧道覆土厚度为 26.7~27.3 m,顶管顶推至第 31 节,位于左线区间正上方,距隧道顶净距约 12.3 m,顶管顶推至第 41 节,位于右线区间正上方,距隧道顶距约 12.0 m。

顶管管节采用 DN1400 的Ⅲ级钢筋混凝土管,每节长 2 m,重量 2 769 kg,承插式结构。地铁隧道由钢筋混凝土管片构成,强度等级为 C50,抗渗等级不小于 P10,衬砌圆环管片内径 5.5 m,管片厚度 0.35 m,管片宽度 1.2 m,管片分 6 块,采用螺栓连接的错缝拼装形式。拟建为冲积平原地貌,根据地质勘探报告及相关工程资料,场地土层至上而下分为杂填土、粗中砂(稍密)、粗中砂(中密)、卵石 4 层,顶管及盾构隧道主要穿越粗中砂(中密)层。

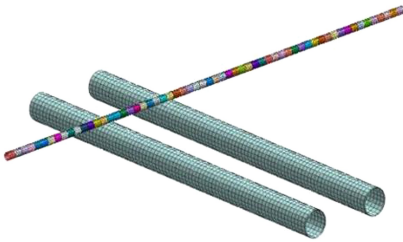
2 顶管上穿邻近盾构隧道模型建立

2.1 边界条件与网格划分

采用有限元软件建立模型,如图 1 所示,考虑模型的边界效应并结合实际工况,确定模型的尺寸为 y 方向(与顶管平行)120 m, x 方向(与既有盾构隧道平行)100 m, z 方向(竖直方向)50 m。取顶面为自由边界,其余 5 个面则施加法向约束,即底面施加竖向约束,水平向自由,四周侧面施加水平向约束,竖直向自由。为确保计算的精确度,临近顶管以及盾构隧道的土层网格划分得相对稠密,距离顶管以及盾构隧道较远的土体网格划分得较为稀疏,共划分 47 683 个单元,生成 93 669 个节点。



(a) 土体网格划分



(b) 顶管及盾构隧道网格划分

图 1 网格划分(单位:m)

Fig.1 Mesh partition(unit:m)

2.2 本构模型及参数选取

土体采用实体单元模拟,根据实际工程现场勘测数据,得到土体力学参数见表 1。土体选用修正摩尔-库伦本构模型,该模型的剪切和压缩屈服面相互独立,在剪切和压缩方向采用双硬化模型能应用于各种性质的土体。摩尔-库伦模型破坏面形状为六边形,不稳定,而修正摩尔-库伦模型做了圆角处理,使分析过程更加稳定,提高了模型的收敛性和计算的准确性。

表 1 土层力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of soil layer

地层	地层 厚度/m	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)	$E_{50}/$ MPa
杂填土	2.9	18.0	6	12	4
粗中砂 (稍密)	7.8	18.5	4	22	10
粗中砂 (中密)	26.5	18.8	4	25	12
卵石	12.8	21.0	5	35	40

顶管机及隧道管节采用板单元模拟,顶管机外壳为钢材,顶管管节为Ⅲ级钢筋混凝土预制管,邻近盾构隧道由 6 块钢筋混凝土管片构成,强度等级为 C50,结构物理力学参数见表 2。地铁隧道内环向螺栓会使管片的总体刚度减小,因此考虑混凝土材料弹性模量进行适当折减,采用惯用修正法计算管片整体刚度的折减系数为 0.8,即 $E=34.5\times0.8=27.6\text{ GPa}$ 。

表 2 支护结构力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of support structure

名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa
地铁隧道	26	27 600
污水管	26	30 000
顶管机	76	210 000

2.3 模拟结果与实测对比分析

以顶管轴线为中心,在顶管轴线左右各 50 m 范围内的邻近盾构隧道的拱顶和拱底设置沉降监测点。比较地铁隧道左右线拱顶和拱底的实际测量数据与数值分析结果,以确认顶管开挖的准确性。顶管开挖完成后地铁隧道左右线拱顶和拱底的最终竖向位移如图 2 所示,地铁隧道拱顶和拱底的最大变形值都位于顶管轴线正下方,随着与顶管轴线的距离增大,管片变形逐渐减小并趋于 0。对比数值分析结果与现场监测数据发现,数值模拟结果的曲线形状和趋势与现场实测基本一致,但现场实测结果较数值计算结果偏大。产生这种现象主要是因为施工现场环境较为复杂,地

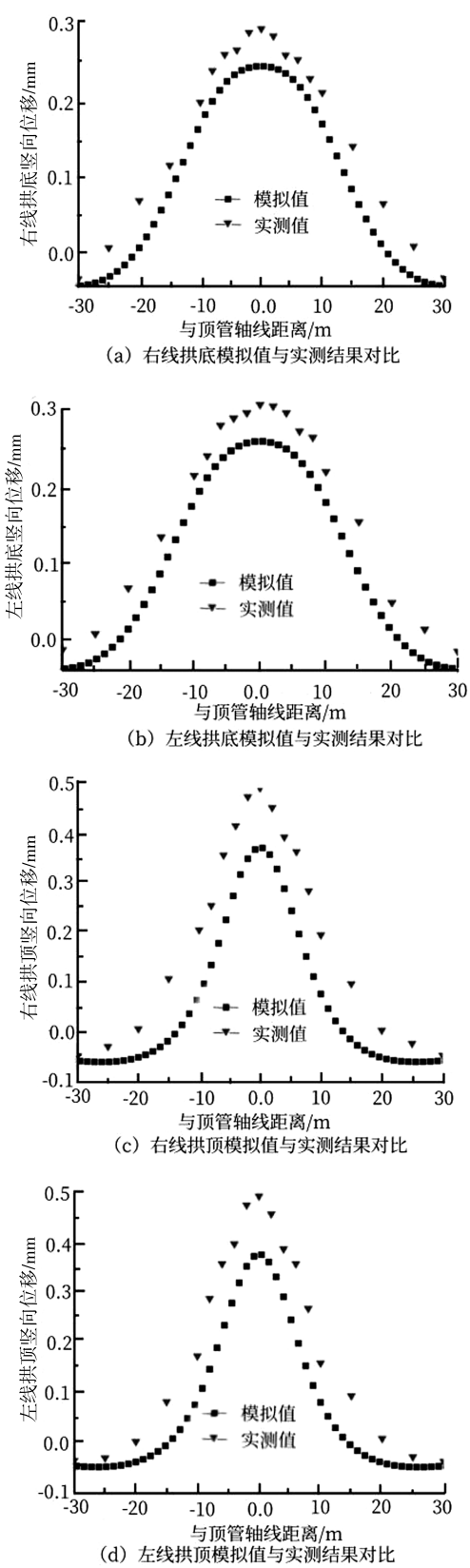


图 2 模拟值与实测结果对比

Fig.2 Comparison between simulated values and measured results

铁列车运营过程中的动荷载对邻近隧道的变形产生影响;顶管施工过程中顶进速度、顶推力大小以及纠偏都会导致邻近隧道产生变形。而数值模拟并未全部考虑这些因素。顶管实际顶进施工过程中应严格控制施工速度和顶进方向,合理控制顶推力和注浆压力大小,使其达到平衡,减小施工扰动。

3 影响地铁隧道力学性能变化因素

顶管顶进邻近盾构隧道的过程中,顶管与邻近盾构隧道并行位置、顶管直径以及与邻近盾构隧道之间的距离等因素都会对邻近盾构隧道的力学性能产生影响。为方便探讨,在保持其它条件恒定的前提下,单独考察某个特定因素对管道力学性能的影响情况。

3.1 顶管并行位置

以右线地铁隧道为中心,分析顶管平行顶进立面夹角 90° 、 45° 、 0° 、 -90° 、 -45° 位置时,顶管顶进对邻近地铁隧道的影

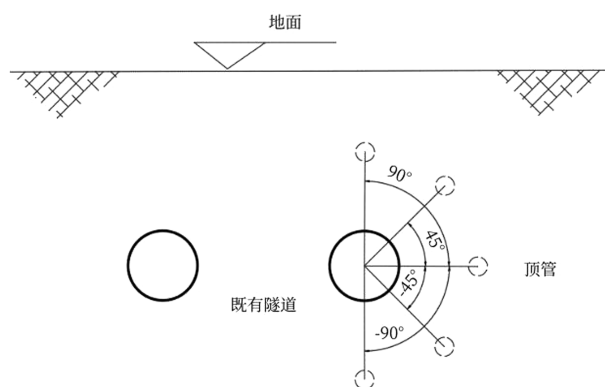


图3 顶管不同并行位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of different parallel positions of jacking pipe

90° 和 -90° 分别为顶管从邻近隧道右线正上方和正下方平行顶进,邻近隧道右线变形都呈竖鸭蛋状,正上方平行顶进使右线隧道整体向上隆起,正下方平行顶进使右线隧道整体向下沉降,并且正下方平行顶进比正上方平行顶进引起的变形要大。相对左线隧道,当平行顶进角度为 90° 和 -90° 时,顶管是从左线隧道斜上方 29° 和斜下方 -29° 平行顶进,左线隧道变形都呈斜椭圆形,而斜上方顶进引起左线隧道左侧拱腰变形较大,斜下方顶进引起左线右侧拱腰变形较大。

当顶管从右线隧道斜上方 45° 和斜下方 -45°

平行顶进时,右线隧道在竖直方向上均产生了位移,横截面变形为椭圆状,并且由于偏压作用存在一定程度的旋转。 45° 平行顶进右线隧道横截面发生顺时针偏转, -45° 平行顶进右线隧道横截面发生逆时针偏转。对于左线隧道而言,当平行顶进角度为 45° 和 -45° 时,顶管从左线隧道斜上方 19° 和斜下方 -19° 平行顶进,2 种工况下左线隧道横截面变形形状大致相同。

当并行角度为 0° 时,顶管从邻近隧道右方并行顶进,受侧压作用的影响左右线隧道两侧拱腰都向远离新建顶管方向移动,右线拱顶、拱底产生一定沉降。由于左线隧道相比于右线隧道距顶管较远,顶管施工对左线隧道影响较小,所以左线隧道变形普遍比右线隧道小。

综上所述,顶管不同并行位置施工引起邻近地铁隧道横截面偏离原有位置的方向也有所不同。顶管并行位置对邻近盾构隧道变形影响较大,并行位置不同,邻近盾构隧道横截面变形也不同。平行顶进立面夹角 -45° 时,邻近隧道变形最大,是最不利工况。所以在相同净距的情况下,相比于正下方平行顶进,施工应优先选择正上方平行顶进,同时应尽量避免斜向平行顶进施工。

3.2 顶管直径及距离大小

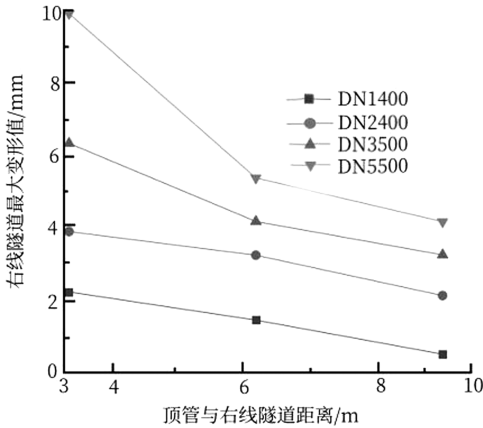
邻近盾构隧道不仅受开挖卸荷影响,还会受到偏压作用的影响,横截面变形会出现偏转。为进一步研究顶管 45° 平行顶进施工、顶管直径及距离大小对邻近盾构隧道的影

3.2.1 邻近盾构隧道横截面变形

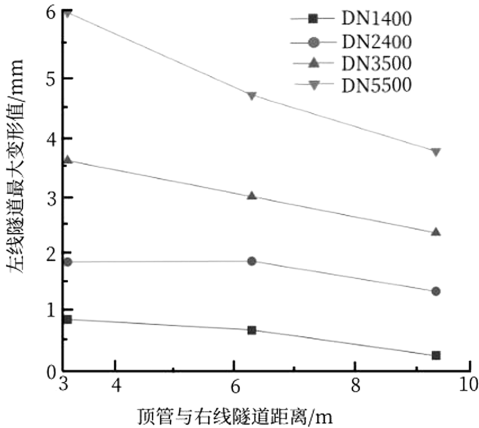
从图 4(a) 可看出,随着顶管与右线隧道之间距离的增大,右线隧道最大变形值逐渐减小。当顶管直径为 $5\,500\text{ mm}$ 时,顶管与邻近隧道之间距离由 3.1 m 增大至 6.2 m ,右线隧道最大变形值减小了 4.656 mm ,该过程对右线隧道最大变形值影响最大。右线隧道最大变形值随着顶管直径的增大而增大。3 种不同距离下,顶管直径由 $1\,400\text{ mm}$ 增大至 $2\,400\text{ mm}$ 时,3 条直线斜率相差不大,邻近盾构隧道右线最大变形值的增大速度较为一

致。顶管与邻近右线隧道之间距离为 3.1 m 时,顶管直径变化对右线隧道变形影响最大。

由图 4(b)可知,左线隧道最大变形值随顶管与右线隧道之间距离的增大而减小。顶管 DN5500 顶进施工,顶管与右线隧道距离由 3.1 m 增大至 6.2 m 过程中,左线隧道最大变形值变化幅度最大。左线隧道最大变形值随着顶管直径的增大而增大。顶管与右线隧道之间距离为 9.3 m 和 6.2 m 时,随着顶管直径的增大,直线斜率逐渐减小,但减小幅度都不大,两种距离下左线隧道最大变形值随顶管直径变化趋势大致相同。当顶管距右线隧道 3.1 m 时,随着顶管直径的增大,直线斜率先增大后减小,左线隧道最大变形值变化幅度先增大后减小。当顶管与右线隧道距离为 3.1 m 时,左线隧道最大变形值随顶管直径变化最大。



(a)不同直径及距离右线隧道最大变形



(b)不同直径及距离左线隧道最大变形

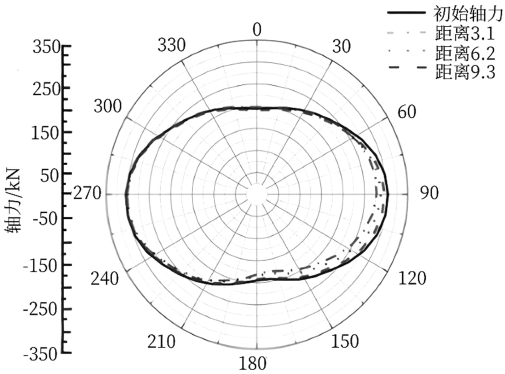
图 4 不同直径及距离隧道最大变形

Fig.4 Maximum deformation of tunnels with different diameters and distances

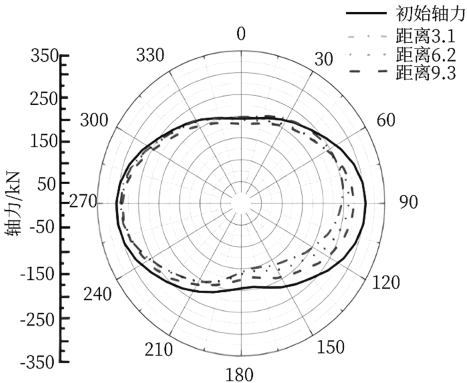
3.2.2 右线隧道内力变化

如图 5 所示,采用极坐标图绘制出不同间距下右线隧道管片轴力发展规律示意图。当顶管断面为 DN1400 时,60°~ 210°范围内右线隧道轴力明显减小,并且随着顶管与右线隧道之间距离的减小,轴力也越来越小。右线隧道 240°~ 360°之间轴力与顶管开挖前相比相差不大,随着顶管与右线隧道间距的增大,240°~ 360°之间轴力也没有明显变化。当顶管截面为 DN2400、顶管施工完毕后,右线隧道轴力普遍减小,但右线隧道右侧轴力减小的较多,由于右线隧道左侧距离新建顶管较远,所以左侧隧道的轴力相比于右侧减小较少。右线隧道轴力出现向逆时针方向略微偏转的现象,随着顶管与右线隧道距离的减小,偏转角度也逐渐增大。

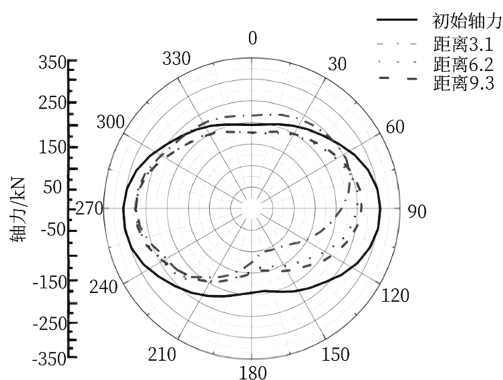
当顶管与右线隧道距离为 9.3 m,顶管断面为 DN1400 时,右线隧道左腰轴力相比开挖前变化不大,右腰处轴力微微减小,但随着顶管由 DN1400 增大至 DN2400 时,右线隧道轴力发生了明显的减小,顶管断面越大右线隧道轴力减小的



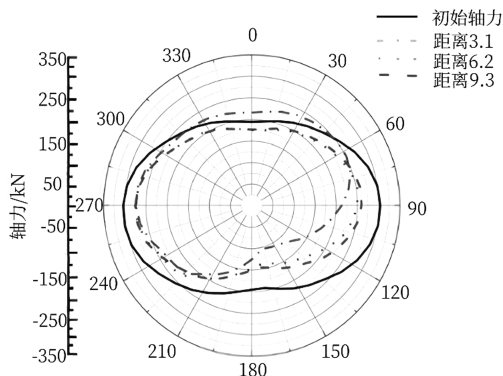
(a)顶管DN1400施工右线隧道轴力图



(b)顶管DN2400施工右线隧道轴力图



(c)顶管DN3500施工右线隧道轴力图



(c)顶管DN3500施工右线隧道轴力图

图 5 不同直径顶管施工右线隧道轴力图

Fig.5 Axial force diagram of right-line tunnel during construction of pipe jacking with different diameters

越多。当距离为 6.2 m,顶管断面为 DN1400 时,右线隧道左腰轴力微微减小,右腰处轴力减小较为明显,当顶管断面为 DN2400 时,右线隧道轴力明显减小,并且轴力出现逆时针方向偏转,随着顶管的断面增大,右线隧道轴力减小的越来越多,轴力偏转的角度也越来越大。当顶管与右线隧道之间距离为 3.1 m 时,右线隧道右腰轴力明显减小,顶管断面为 DN1400 时,右线隧道轴力已经出现偏转,随着顶管直径的逐渐增大,偏转角度变化也较大,当顶管断面 DN2400 增大为 DN3500 时,顶管偏转角度迅速增大。顶管直径增大至 DN5500,此时右线隧道轴力偏转角度最大,偏转角度趋近于 45°,相比顶管开挖前轴力发生了明显的偏转。

当顶管断面为 DN3500 时,右线顶管轴力明显减小,并且出现明显的逆时针偏转。顶管与右线隧道之间距离由 6.2 m 增大至 9.3 m 时,右线隧道轴力相比距离为 6.2 m 略微增大,偏转角度相

差不大。当顶管与右线隧道之间距离为 3.1 m 时,相对于距离为 6.2 m 时,右线隧道偏转角度明显增大。当顶管断面为 DN5500 时,顶管与右线盾构隧道之间距离由 9.3 m 变化至 6.2 m 时,右线隧道轴力减小,偏转角度增大,但变化幅度较小。当顶管与右线隧道之间距离由 6.2 m 减小至 3.1 m 时,右线隧道轴力偏转角度明显增大,变化幅度较大。

图 6 为不同距离下新建顶管施工完毕后邻近右线隧道弯矩变化示意图,从图中可看出,顶管施工导致邻近隧道弯矩增大,并且弯矩会出现逆时针偏转,顶管与右线隧道间距离越近,右线隧道弯矩相比开挖前增大的越多,偏转角度越大。顶管与右线隧道之间距离为 9.3 m 时,拱顶拱底弯矩略微增大,两拱腰弯矩增大较多,变化比较明显。顶管与右线隧道之间距离为 6.2 m 时,右线隧道弯矩相比于距离为 9.3 m 时有所增大,并且出现了逆时针偏转,当右线隧道与顶管之间距离为 3.1 m 时,右线隧道弯矩达到最大,偏转角度也逐渐增大。当顶管断面为 DN5500 时,顶管与右线隧道之间距离由 6.2 m 减小至 3.1 m 过程中,右线隧道弯矩变化量较大,并且偏转角度也更加明显。当顶管断面为 DN1400 时,顶管相对邻近隧道断面较小,顶管顶进施工的扰动范围也较小,对右线隧道弯矩的影响不大,右线隧道弯矩相比于顶管开挖前微微增大。随着顶管断面的不断增大,顶管施工的扰动会变大,顶管施工对邻近隧道的影响也较大,右线隧道弯矩逐渐增大并且出现了一定角度偏转,当顶管断面增大至 DN5500 时,右线隧道弯矩达到最大,偏转角度也最大。

3.3 顶管直径和距离敏感性分析

为综合分析顶管直径和距离的敏感性,通过模拟顶管 45°平行顶进施工顶管不同直径和距离对邻近盾构隧道最大变形值的影响,模拟结果见表 3,采用灰色关联度法分析模拟结果,评定出顶管直径和距离对邻近地铁盾构隧道最大变形值影响的权重。对变量进行预处理,去量纲,缩小范围便于计算。采用均值法,计算各因子的平均数;用各因子中的每个元素除以其平均数,预处理后的结果见表 4。

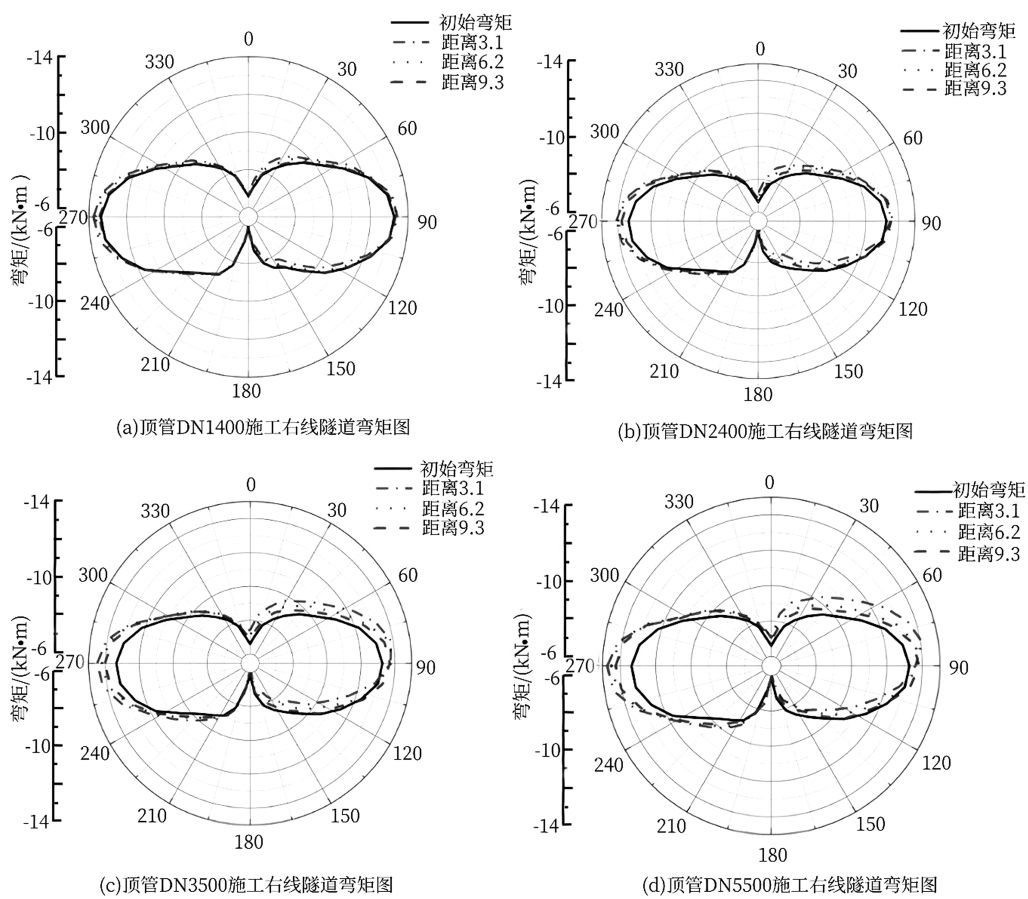


图 6 不同直径顶管施工右线隧道弯矩图

Fig.6 Bending moment diagram of right-line tunnel during construction of pipe jacking with different diameters

表 3 顶管不同直径和距离下邻近盾构隧道最大变形

Tab.3 Maximum deformation of adjacent shield tunnels with jacking pipes with different diameters and distances

编号	距离/m	顶管 直径/mm	右线隧道 最大变形/mm	左线隧道 最大变形/mm
1	3.1	1 400	2.218	0.872
2	3.1	2 400	3.929	1.844
3	3.1	3 500	6.429	3.559
4	3.1	5 500	10.102	6.064
5	6.2	1 400	1.422	0.696
6	6.2	2 400	3.258	1.858
7	6.2	3 500	4.214	2.950
8	6.2	5 500	5.446	4.669
9	9.3	1 400	0.456	0.260
10	9.3	2 400	2.116	1.348
11	9.3	3 500	3.267	2.338
12	9.3	5 500	4.207	3.717

表 4 预处理结果

Tab.4 Pretreatment results

编号	距离/m	顶管 直径/mm	右线隧道 最大变形/mm	左线隧道 最大变形/mm
1	0.5	0.437 50	0.565 53	0.346 78
2	0.5	0.750 00	1.001 79	0.733 32
3	0.5	1.093 75	1.639 22	1.415 34
4	0.5	1.718 75	2.575 73	2.411 53
5	1.0	0.437 50	0.362 57	0.276 79
6	1.0	0.750 00	0.830 70	0.738 90
7	1.0	1.093 75	1.074 45	1.173 16
8	1.0	1.718 75	1.388 58	1.856 77
9	1.5	0.437 50	0.116 27	0.103 40
10	1.5	0.750 00	0.539 52	0.536 07
11	1.5	1.093 75	0.832 99	0.929 78
12	1.5	1.718 75	1.072 67	1.478 18

计算绝对差序列:

$$\Delta_i(k)=|x_0(k)-x_i(k)|$$

(1)

其中, x_0 为母序列; $k=(1,2,\cdots,n)$ 为水平数; $i=(1,2,\cdots,m)$ 为因素序列数。计算两极最小差和最大差。

$$A=\max_i\max_k\Delta_i(k),a=\min_i\min_k\Delta_i(k)$$

(2)

确定关联系数:

$$\gamma_{0i}(k)=\frac{a+\rho A}{\Delta_i(k)+\rho A}$$

(3)

其中, ρ 为分辨系数,取 0.5。

计算关联度:

$$\gamma_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\gamma_{0i}(k)$$

(4)

将左右线隧道最大变形值分别作为分析参考列,即 $x_0,i=1$ 表示影响因素距离, $i=2$ 表示影响因素为顶管直径,分别计算距离、顶管直径与左线隧道变形最大值和右线隧道最大变形值的关联度,计算结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 右线隧道变形值关联系数及关联度表

Tab.5 Correlation coefficient and correlation degree of deformation value of right-line tunnel

编号	$\gamma_{01}(k)$	$\gamma_{02}(k)$
1	0.958 10	0.906 74
2	0.686 63	0.819 73
3	0.485 59	0.667 68
4	0.339 53	0.557 92
5	0.631 03	0.950 01
6	0.875 74	0.945 11
7	0.950 42	1.000 00
8	0.741 12	0.772 76
9	0.436 56	0.777 84
10	0.529 02	0.846 85
11	0.620 08	0.814 07
12	0.721 52	0.627 79
关联度	0.664 61	0.807 21

由计算结果可知,顶管直径和距离的关联度均大于 0.5,说明顶管 45°平行顶进施工,顶管直径和顶管与右线隧道的距离都是影响邻近地铁盾构隧道变

形的重要因素。依据所求关联度的大小可发现,顶管直径的敏感性均大于距离,因此在顶管工程设计施工时,为减小顶管施工产生的扰动,若顶管直径和距离无法同时满足时,应首先控制顶管直径大小。

表 6 左线隧道变形值关联系数及关联度表

Tab.6 Correlation coefficient and correlation degree of deformation value of left tunnel

编号	$\gamma_{01}(k)$	$\gamma_{02}(k)$
1	0.871 85	0.923 92
2	0.813 12	0.994 28
3	0.516 74	0.756 93
4	0.337 21	0.586 50
5	0.575 87	0.866 00
6	0.794 56	1.000 00
7	0.856 46	0.934 02
8	0.533 44	0.883 97
9	0.411 02	0.749 59
10	0.503 66	0.826 61
11	0.633 61	0.863 48
12	0.989 04	0.808 20
关联度	0.653 05	0.849 46

4 结论

- 1) 顶管垂直上穿施工,邻近地铁盾构隧道整体上浮,隧道竖向变形呈中间大两边小,拱顶和拱底的最大隆起值均出现在顶管轴线正下方,距离顶管轴线越远管片变形越小。
- 2) 当并行角度为 90°时,右线隧道变形最小为 1.18 mm,当并行角度为-45°时,右线隧道变形最大为 4.90 mm,是最不利工况,建议优先采用 90°并行施工。
- 3) 顶管 45°并行施工时,随着顶管与右线隧道之间距离的增大,右线隧道轴力弯矩变化量以及偏转角度逐渐减小,邻近盾构隧道横截面变形不断减小。当顶管直径逐渐增大时,右线隧道轴力弯矩变化量以及偏转角度越来越大,邻近盾构隧道横截面变形逐渐增大。当顶管与右线隧道之
- (下转第 291 页)

student psychology optimization enabled deep residual network and hybrid correlative feature selection for distributed denial-of-service attack detection in cloud using spark architecture[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing,2022,36(7):1647–1669.

[16] GSRE S,GANESHAN R,JINGLE I D J,et al. FACVO–DNFN:Deep learning–based feature fusion and distributed denial of Service attack detection in cloud computing[J]. Knowledge–Based system,2023,261.

[17] 王汉字. 基于改进麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),2022,36(6):59–63.

(责任编辑:方素华)

(上接第 219 页)

间距离为 3.1 m 时,顶管直径对右线隧道内力影响较大。

4)从顶管直径和距离与邻近盾构隧道最大变形值的关联度分析可发现,顶管直径与盾构隧道距离的关联度

均大于 0.5,且顶管直径的敏感度大于距离,实际顶管工程中应首先考虑顶管直径大小对临近既有盾构隧道的影响。

参考文献:

[1] 黄建华,鲍锋,王蕴晨,等. 并行差异断面顶管施工对地表变形的影响[J]. 地质科技通报,2021,40(6):185–192.

[2] 安关峰,王谭,司海峰,等. 施工顺序及不同管材对双层顶管隧道施工引起地表沉降的影响研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(4):119–126.

[3] 刘刚,孙逸文,冯成军. 大直径顶管施工对既有地铁区间隧道的影响分析[J]. 特种结构,2020,37(6):60–65.

[4] REN D J,XU Y S,SHEN J S,et al. Prediction of ground deformation during pipe-jacking considering multiple factors[J]. Applied Sciences,2018,8(7):1051.

[5] 袁晓玉. 滨海区顶管施工对既有盾构隧道影响研究[D]. 福州:福建工程学院,2023.

[6] LIN X T,CHEN R P,WU H N,et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2019,89:78–90.

[7] JIAO N,SUN S,LIU J Y,et al. Analysis of existing railway deformation caused by double shield tunnel construction in soil – rock composite stratum[J]. Energy Reports,2023,9:159–165.

[8] 韩国良. 顶管施工引起的地面变形问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

[9] 焦义,梁禹,冯金勇,等. 多因素影响下顶管施工引起土体变形计算研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(1):192–199.

[10] ZANG Y W,GAN P L,YAN J J,et al. Effects of construction sequences and volume loss on perpendicularly crossing tunnels[J]. Advances in Civil Engineering,2019,2019(1):1–12.

[11] 马险峰,陈飞,吴冰,等. 顶管电缆隧道施工对邻近建筑物和地下管线的扰动影响[J]. 科学技术与工程,2021,21(21):9074–9080.

(责任编辑:陈雯)