

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.027

引用格式: 晏莉, 赵宇佳, 濮羲. 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.

Citation: YAN Li, ZHAO Yujia, PU Yi. Study on the influence of construction of new shield tunnel with close orthogonal upper span of existing tunnel[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 128-134.

新建盾构隧道近距离正交上跨既有隧道的 施工影响研究*

晏莉, 赵宇佳, 濮羲

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 依托郑州地铁某新建盾构双线隧道近距离正交上跨既有隧道工程, 采用数值模拟方法对盾构开挖全过程进行模拟, 分析新建隧道施工对既有隧道结构变形和地表沉降的影响。结果表明, 盾构隧道上跨既有隧道施工的主要影响区为盾构开挖面距既有隧道中轴线 6 m 至盾构驶离隧道中轴线 12 m 区段; 新建盾构隧道施工导致的地表竖向最大沉降发生在盾构开挖面正上方, 距开挖面正上方的横向距离越远, 沉降越小; 盾构隧道上跨既有隧道施工会导致既有隧道管片产生隆起变形, 隆起最大值出现在新建隧道正下方, 既有隧道拱顶轴线最终呈 M 双峰形状; 同一横断面上既有隧道管片呈椭圆状变形, 管片拱腰两侧向中间收紧, 拱顶和拱腰均向上隆起。

关键词: 隧道; 盾构上跨施工; 施工影响区; 数值模拟

中图分类号: U457.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0128-07

随着中国城市化的快速发展, 地下交通网络愈发完善, 不可避免地带来地铁隧道在空间上相互叠交穿越的现象。不同于近接单线隧道的一次扰动影响, 多线叠交隧道的相互影响不是简单的叠加关系, 这对盾构施工提出了更高的要求。

针对多线叠交隧道的相互影响问题, 孙钧等建立四线叠交隧道三维数值模型, 对盾构推进过程中既有隧道周围土体的变形和地表沉降进行了分析^[1]。针对盾构施工方法的模拟, 肖潇等提出单元生死技术和重复设定单元属性等方法实现盾构开挖土体卸载、盾构推进、管片拼接及注浆硬化等施工全过程模拟, 实现盾构施工模拟精细化^[2]; 王明年等在此基础上进一步提出盾构隧道掘进全过程模拟方法, 并研究了叠交隧道重叠段的影响分区^[3]。

多线叠交隧道施工影响因素有很多, 如土层、空间叠交形式、隧道间距、盾构施工参数等。在土层影响方面, 中国各地区地质条件差异较大, 较多学者针对各种不利地质条件进行了研究, 如张孟喜等针对全风化岩层致密性、渗透系数小等难点, 结合实际工程, 分析了双线盾构施工对既有双线隧道的影响^[4];

王俊等通过试验研究了平衡土压盾构机施工对上软下硬地层的扰动影响^[5]; 刘启明等针对富水砂卵石地层中盾构下穿既有地铁线工程, 提出袖阀管竖向注浆、袖阀管竖向注浆+斜向注浆、袖阀管竖向注浆+斜向注浆+四周帷幕注浆 3 种既有隧道加固方案, 并通过数值模拟分析了其有效性和实用性^[6]。在空间叠交形式影响方面, 不同多线叠交隧道对空间穿越形式的选择各不相同, 张晓清、卢岱岳、刘亮等研究多线叠交隧道空间上垂直上穿、垂直下穿、上下夹穿等穿越形式, 分析了盾构施工对地层和既有隧道的扰动影响^[7-9]。在间距影响方面, 王辉等对下穿施工的间距及交叉角度进行多样性建模, 提出了两者优化组合的方法^[10]。在盾构施工参数影响方面, 土仓压力和注浆压力作为盾构施工中的主要参数, 是研究盾构施工不可缺少的影响因素。Dias D. 等认为盾构施工模拟过程中加入土仓压力和注浆压力能明显提高计算准确度^[11]; 侯永茂等通过现场监测和数值模拟分析, 得到了同步注浆参数设定对地表沉降起关键性作用的结论^[12]; 刘树佳、刘五一等分析土仓压力、注浆压力对既有隧道管片变形的影

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408067); 湖南省教育厅优秀青年项目(18B136)

响,提出了多线叠交隧道施工影响系数的概念^[13-14];杨成永、杨荟斯等认为盾构隧道近距离下穿施工中应在合理范围内选定较大的土仓压力,同时尽量缩短注浆浆液凝固时间,增大注浆量,以减小既有隧道沉降^[15-16];肖果对盾构下穿既有隧道施工中既有隧道结构位移变形进行研究,分析了不同盾构推力、隧道间距及新建盾构埋深对既有隧道的扰动规律^[17]。随着城市地铁的不断发展,盾构穿越既有隧道工程越来越多,由于不同工程所处地质环境、设计参数和施工条件等不同,新建盾构隧道施工对既有隧道的影响也不尽相同。本文结合郑州地铁盾构隧道近距离正交垂直上跨既有隧道工程,对盾构开挖全过程进行模拟,分析盾构正交垂直上跨既有隧道施工中盾构掘进参数对地层位移和既有隧道结构变形的影响,为类似多线叠交隧道工程施工提供参考。

1 工程概况

郑州地铁某新建盾构双线隧道上跨运营隧道区间工程,既有隧道埋深约 18.00 m,中心线间距约 12.00 m,采用盾构法施工,管片外径 6.00 m、内径 5.40 m、厚度 0.30 m,于 2016 年运营通车;新建盾构隧道两线间距约 16.00 m,埋深约 10.00 m,管片外径 6.00 m、内径 5.40 m,与既有隧道的最小垂直净距仅 1.65 m。盾构掘进位置见图 1。该穿越段属于山前冲洪积缓倾平原,地层以第四纪松散沉积物为主,下伏基岩埋置较深,穿越段位于粉砂、细砂及砂质粉土层。

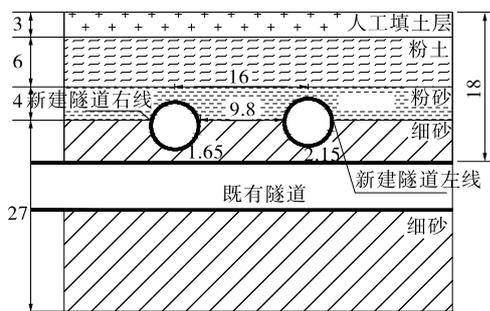


图 1 盾构双线隧道上跨运营隧道的位置关系剖面图(单位:m)

2 盾构隧道上跨既有隧道施工精细化模拟

2.1 计算模型

结合工程实际情况,建立图 2 所示三维数值模型,模型尺寸为 81.0 m×81.0 m×40.0 m(X×Y×

Z)。边界位移限制如下:顶部模拟地表为自由面,底部边界(Z=-27.0 m)固定 3 个方向的约束,X 轴方向两边界(X=-40.5 m,40.5 m)固定 X 方向约束,Y 轴方向两边界(Y=0.0,81.0 m)固定 Y 方向约束。模型各地层材料均采用摩尔-库伦本构关系,按实际地层从地表往下依次为人工填土层、黏质粉土、粉砂、细砂,各地层物理力学参数见表 1。

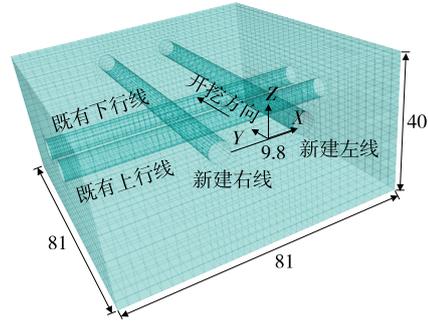


图 2 盾构隧道上跨既有隧道三维模型(单位:m)

表 1 各地层物理力学参数

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
填土层	3	18.5	8	5	10
黏质粉土	6	18.2	16	22	25
粉砂	6	19.5	3	28	45
细砂	30	18.5	0	32	60

既有隧道管片全长 81.0 m,采用壳单元结构,厚度为 0.3 m,不考虑管片间螺栓连接作用,弹性模量衰减至 75%,取 21 GPa,泊松比为 0.25。新建盾构隧道横截面见图 3,盾构隧道管片同样采用壳单元结构,不考虑管片间螺栓连接作用,衰减后的弹性模量为 23 GPa,泊松比为 0.25。为模拟盾壳及注浆材料的硬化过程,在管片外径处添加等代层,等代层模拟为实体单元,厚度为 0.2 m,采用弹性本构关系,等代层的长度分段与管片每环长度一致,为 1.5 m 一环(见图 3)。

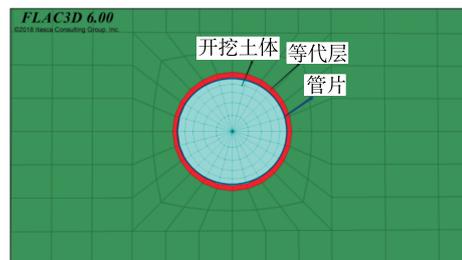


图 3 新建盾构隧道开挖面横截面示意图

2.2 隧道施工过程模拟

建立模型后,先生成初始应力场,模拟既有隧道上下行施工,采用一次性开挖完成,并施加衬砌。然后将模型的位移场清零,模拟新建盾构隧道施工,先施工右线隧道,右线隧道完成后再施工左线隧道。盾构隧道掘进分为开挖、管片拼接、盾尾注浆、浆液硬化 4 个阶段,将盾构的整体开挖过程看作非连续过程,采用逐步推进的方法进行模拟,通过激活和卸载相关过程开挖步的单元材料属性,实现每一步掘进一个开挖进尺深度(3 m,即两环管片长度),同时完成后续管片拼接与注浆过程(见图 4)。

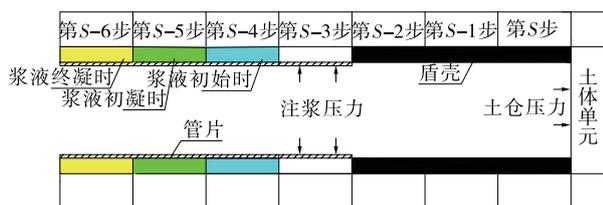


图 4 盾构掘进全过程模拟

(1) 开挖阶段。将盾构机进入土体的前三环(第 S 步至第 S-2 步)掘进长度视为盾构机壳体长度(此时盾构机全部进入土体),并将对应环数内的土体赋予空模型。将前三环的等代层单元设置为刚度很大的弹性模型,模拟盾构机壳体对周围土体的支撑作用,并在开挖面施加 0.15 MPa 土仓压力来平衡盾构机开挖前方的土压力。

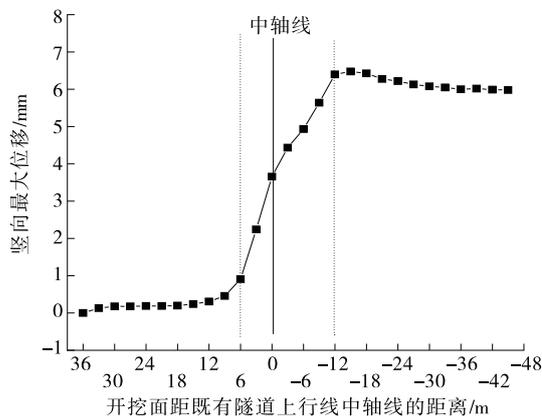
(2) 管片拼接阶段。在盾尾脱开后一环(第 S-3 步)处施加一环宽度的管片壳单元,同时将该位置等代层单元赋予弹性模型,材料参数设置为土体参数。

(3) 同步注浆阶段。在第 S-3 步开挖时施加 0.12 MPa 环向注浆压力,模拟注浆过程。

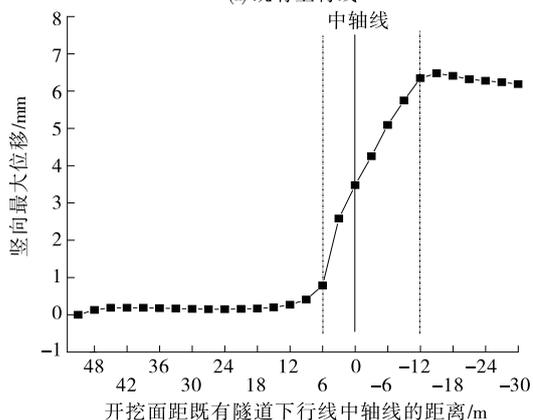
(4) 浆液硬化过程。将第 S-4、S-5、S-6 步等代层参数分别设置为浆液初始时、浆液初凝时和浆液终凝时,模拟浆液随时间的硬化过程。注浆材料初始弹性模量取 0.58 MPa,初凝时弹性模量取 6.80 MPa,终凝时弹性模量取 23.00 MPa。

3 盾构施工对既有隧道周边影响区的确定

为更准确地分析新建隧道盾构施工对既有隧道结构变形的影响,先确认盾构垂直正交上跨既有隧道的影响范围,取新建盾构隧道右线单独穿越整个地层,得到新建盾构隧道上跨既有隧道拱顶正交位置的最大竖向位移(见图 5)。



(a) 既有上行线



(b) 既有下行线

图 5 盾构开挖引起的既有隧道拱顶轴线竖向最大位移曲线

由图 5 可知:在新建盾构隧道施工过程中,既有隧道拱顶轴线的竖向最大位移发生显著变化。盾构开始掘进至距离既有隧道中轴线 6 m 区段,既有隧道拱顶轴线竖向最大位移几乎无变化,且数值很小,说明该区段盾构施工对既有隧道的影响很小;盾构掘进至距离既有隧道中轴线 6~12 m 时,既有隧道拱顶轴线竖向最大位移急剧增大,表明在该区段新建盾构隧道施工对既有隧道的影响很大;盾构驶离既有隧道中轴线超过 12 m 时,既有隧道拱顶轴线的竖向最大位移基本趋于稳定,说明盾构施工对既有隧道的影响很小。综上,新建盾构隧道垂直正交上跨既有隧道施工仅在盾构开挖面距既有隧道中轴线 6 m 至盾构驶离既有隧道中轴线 12 m 区段(见图 6 中 R10—R19 开挖进尺区间)对既有隧道产生较大影响。

4 盾构隧道上跨施工对地表沉降和既有隧道的影响分析

设置地表沉降监测点(见图 7)监测新建盾构隧

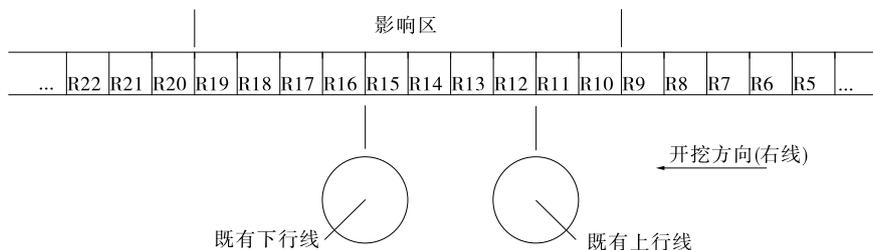
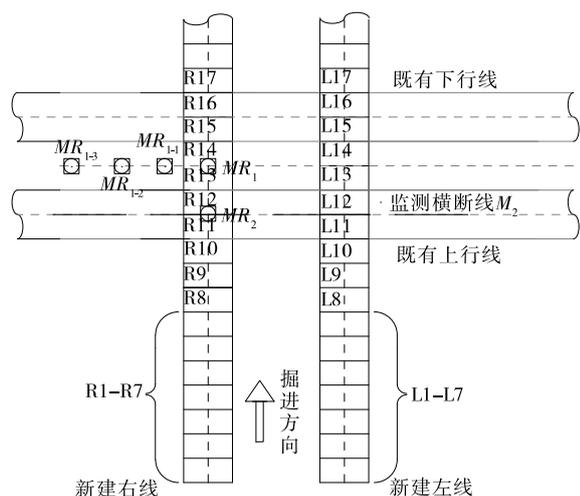


图 6 盾构开挖对既有隧道影响区位置示意图

道正交上跨既有隧道施工时地表沉降,对盾构隧道上跨施工对地表沉降的影响进行分析。



M_2 为地表沉降横向监测断面线,位于既有隧道上行线中轴线正上方; MR_2 位于新建盾构隧道正下方的既有拱顶; MR_1 为既有隧道双线中轴线与新建隧道右线中轴线的交点; MR_{1-1} 、 MR_{1-2} 、 MR_{1-3} 分别为距离 MR_1 3 m、5 m、10 m 处的地表沉降测点

图 7 新建隧道与既有隧道平面位置关系及地表沉降测点布置

4.1 地表沉降影响分析

通过数值模拟,得到图 8 所示 MR_1 、 MR_{1-1} 、 MR_{1-2} 、 MR_{1-3} 测点竖向位移随盾构开挖阶段的变化曲线。从图 8 可以看出: MR_{1-3} 测点的位移随着新建隧道的推进无明显变化,说明隧道施工对该区域的

影响不大;其他各测点的竖向位移随着盾构施工的推进呈现不一样的变化规律。在盾构到达前,各测点的累积竖向位移随开挖步的变化轨迹是同步的,各测点均呈现小幅度的隆起变形,越靠近新建隧道的测点其隆起变形越大。这是由于土仓压力对前方土体产生挤压作用,开挖面形成被动土压力,地表出现一定程度隆起变形。盾构穿越影响区时,由于盾构机施工,隧道周边土体朝着空隙坍塌,地表出现明显沉降,且沉降速率明显提升,其中开挖面正上方的沉降量和沉降速率最大,随着与轴线间距的增加,地表沉降量和沉降速率逐渐减小。盾构驶离影响区后,地表沉降速率显著下降,沉降曲线趋于平缓。

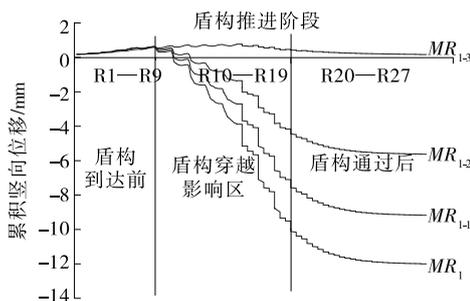


图 8 各监测点竖向位移与盾构推进阶段的关系曲线

图 9 为盾构掘进过程中 M_2 监测断面的地表竖向位移曲线。从图 9 可以看出:盾构开挖过程中,地表竖向位移呈漏斗状,且随着开挖步的增大,地表沉

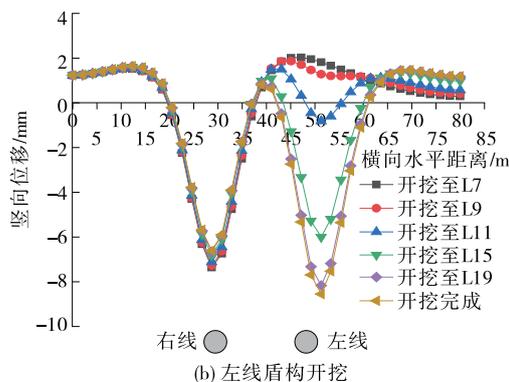
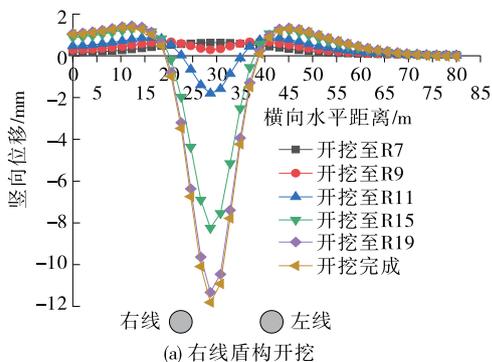


图 9 盾构掘进过程中 M_2 监测断面的地表竖向位移曲线

降增大。左线盾构开挖至 L7 时,地表沉降曲线呈现不对称的特点,这是由于右线开挖完成会对两侧土体造成挤压,导致左线盾构上方靠近右线的土体产生较大隆起,且左线盾构二次开挖导致的地表沉降比右线盾构开挖沉降小。右线盾构穿越影响区 R9—R19 的过程中,地表最大沉降从 0.37 mm 负增长至 -11.32 mm,增长量为 11.69 mm,占右线盾构施工总沉降 12.47 mm 的 93.74%。左线盾构穿越影响区 L9—R19 的过程中,地表最大沉降从 1.24 mm 负增长至 -8.16 mm,增长量为 9.40 mm,占左线盾构施工总沉降 10.39 mm 的 90.47%。此外,左线盾构开挖过程中右线上方地表沉降曲线基本一致,最大沉降量为 -7.35 mm,相较于右线开挖最大沉降 -11.80 mm,减小 -4.45 mm。

4.2 既有隧道变形影响分析

4.2.1 拱顶轴线竖向位移

图 10 为双线盾构施工推进至不同位置时既有

隧道拱顶轴线竖向位移曲线。从图 10 可以看出:右线隧道开挖至 R10 时,既有隧道上行线拱顶最大隆起量约 0.94 mm,既有隧道下行线因距离较远隆起变形不明显;右线盾构开挖至 R18 时,既有隧道上行线拱顶隆起变形达 5.56 mm,下行线因盾构上跨推进隆起变形增加至 3.60 mm;右线盾构开挖完成后,既有隧道上下行线的隆起变形趋于一致,最大隆起量约 5.15 mm。右线隧道穿越后左线盾构施工至 L10 时,既有隧道上行线拱顶隆起变形曲线发生明显变化,左线盾构施工的推进导致既有隧道上行线在新建左线隧道下方位置发生隆起,最大隆起量达 3.13 mm;左线盾构开挖至 L18 时,既有隧道上行线位于新建左线下方位置的拱顶竖向最大隆起量达到 6.31 mm,既有隧道下行线拱顶最大隆起量为 4.46 mm;左线盾构穿越完成后,既有隧道上下行拱顶变形曲线趋于一致,曲线呈 M 双峰形状,最大隆起量为 6.10 mm。

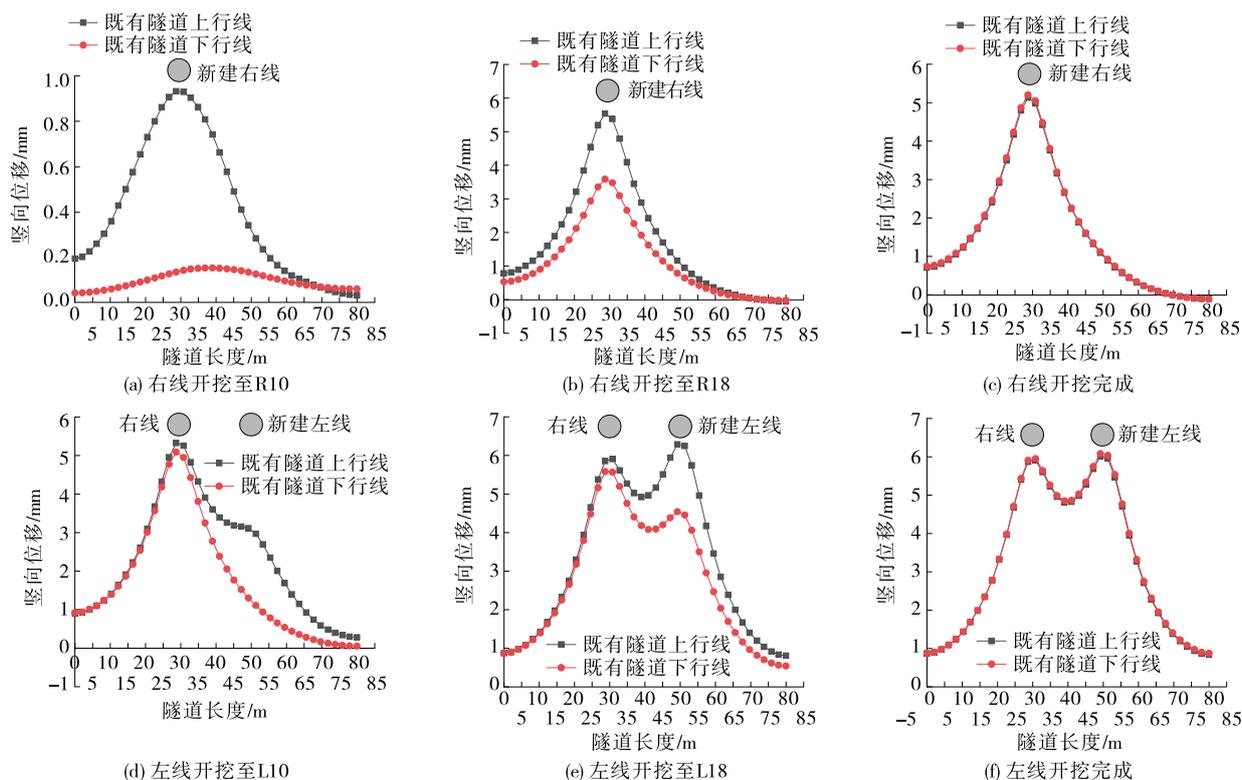


图 10 双线盾构施工推进至不同位置时既有隧道拱顶轴线竖向位移曲线

4.2.2 隧道管片变形

根据盾构开挖对既有隧道管片变形的数值模拟结果,右线盾构穿越 MR_2 断面时既有隧道上行线管片变形见图 11。从图 11 可以看出:右线盾构开挖导致既有隧道上行线管片呈椭圆形变形,管片拱腰

两侧向中间收紧,管片左侧拱腰变形比右侧拱腰大;拱顶和拱腰均向上隆起,拱顶变形大于拱底。相较于右线盾构隧道施工,左线盾构施工对既有隧道上行线管片变形的影响较小,管片两侧拱腰呈外扩变形,拱顶和拱底均发生向上隆起变形,其中拱顶隆起

比拱底大,右侧拱腰外扩变形大于左侧拱腰。

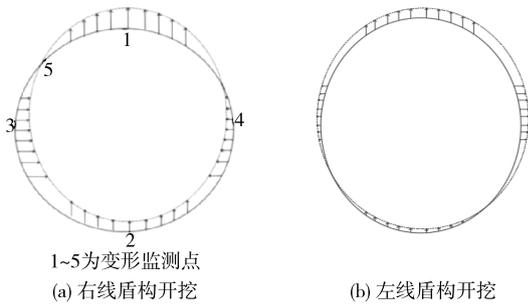


图 11 盾构穿越完成时既有隧道管片变形

为进一步分析盾构开挖对既有隧道管片变形的

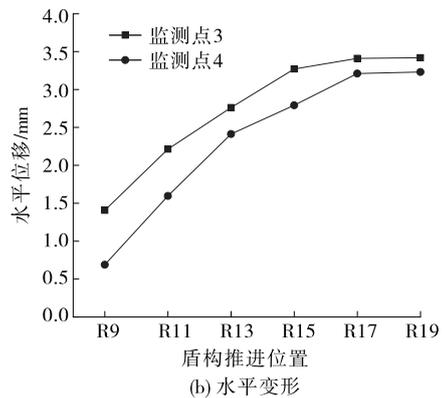
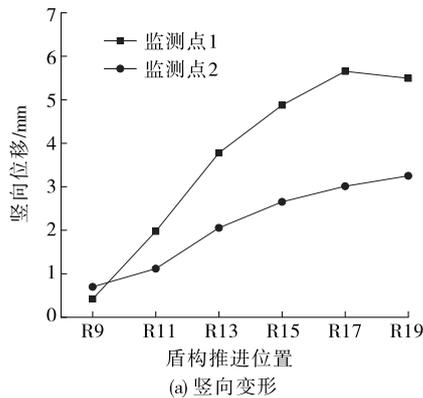


图 12 管片测点变形与盾构推进位置的关系

图 13 为右线盾构上跨既有隧道上行线时 MR_2 断面处管片测点 5 的水平位移监测值与数值模拟计算值的对比。由图 13 可知:实测值与计算结果的变化趋势一致,计算值比实测值小,但两者相差不大,验证了计算模型的准确性。

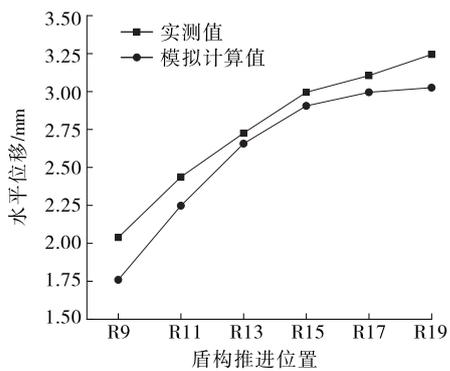


图 13 既有隧道上行线管片水平位移实测值与模拟值对比

5 结论

本文通过数值模拟分析新建双线盾构隧道正交上跨施工对地表沉降和既有隧道的影响,结论如下:

(1) 新建盾构隧道正交上跨既有隧道施工的主

影响,提取新建盾构穿越既有隧道上行线 MR_2 断面时管片各关键测点[见图 11(a)]的位移,结果见图 12。由图 12 可知:测点 1、2 均向上隆起,在影响区内随着盾构施工的推进隆起变形增大,且测点 1 的拱顶隆起变形是测点 2 拱底变形的 1.75 倍,拱顶最大隆起值为 5.67 mm,拱底最大隆起值为 3.24 mm;随着盾构的驶近,既有隧道管片两侧变形增大,管片两侧向中间挤压,测点 3 左侧拱腰的水平位移是测点 4 右侧拱腰水平位移的 1.06 倍,左侧最大水平位移为 3.43 mm,右侧最大水平位移为 3.24 mm。盾构施工对既有隧道管片拱顶竖向变形的影响更大。

要影响区为盾构开挖面距既有隧道中轴线 6 m 至盾构驶离既有隧道中轴线 12 m 区段。

(2) 盾构到达前地表产生隆起变形,盾构通过时地表产生明显沉降,盾构通过后继续产生沉降但沉降速率逐渐放缓;右线和左线盾构穿越影响区造成地表沉降的影响分别占盾构开挖地表总沉降的 93.74%、90.47%。地表竖向最大沉降发生在盾构开挖面正上方,距开挖面正上方的横向距离越远,沉降越小。

(3) 新建盾构隧道上跨施工导致既有隧道管片产生隆起变形,隆起最大值出现在新建隧道的正下方。盾构施工完成后,既有隧道拱顶轴线呈 M 双峰形状。

(4) 新建右线盾构开挖导致既有隧道上行线管片呈椭圆形变形,管片拱腰两侧向中间收紧,拱顶和拱底均向上隆起,拱顶竖向变形大于拱底变形。左线盾构开挖对既有隧道管片变形的影响较小。

参考文献:

[1] 孙钧,刘洪洲.交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数

- 值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 379-385.
- [2] 肖潇, 张孟喜, 吴惠明, 等. 多线叠交盾构施工引起土体变形数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 884-889.
- [3] 王明年, 张晓军, 苟明中, 等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 273-279.
- [4] 张孟喜, 张靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100-108.
- [5] 王俊, 何川, 胡瑞青, 等. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 953-963.
- [6] 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.
- [7] 张晓清, 张孟喜, 李林, 等. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133-1140.
- [8] 卢岱岳, 王士民, 何川, 等. 新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 108-116.
- [9] 刘亮, 高书通, 许芃. 地铁正交、平行上穿盾构隧道近接施工数值分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊 2): 791-795.
- [10] 王辉, 赵文娟. 叠交隧道设计参数对既有隧道稳定性影响的动态模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 116-122+152.
- [11] DIAS D, KASTNER R. Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields: analysis of monitoring and numerical modeling results[J]. Engineering Geology, 2013, 152(1): 17-25.
- [12] 侯永茂, 郑宜枫, 杨国祥, 等. 超大直径土压平衡盾构施工对环境影响的现场监测研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 235-242.
- [13] 刘树佳, 张孟喜, 吴惠明, 等. 新建盾构隧道上穿对既有隧道的变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 399-405.
- [14] 刘五一, 张健, 周中. 土仓压力对隧道近接既有隧道盾构施工影响分析[J]. 公路与汽运, 2018(4): 145-149+171.
- [15] 杨成永, 马文辉, 彭华, 等. 地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 91-98.
- [16] 杨荟斯, 刘涛, 缪红彬, 等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(3): 263-271.
- [17] 肖果. 盾构下穿既有隧道扰动效应分析[J]. 公路与汽运, 2020(5): 134-139+144.

收稿日期: 2023-02-11

(上接第 121 页)

- [2] 中国冶金建设协会. 大体积混凝土施工规范: GB 50496—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [3] 陈雨, 文玉梅, 李平, 等. 压电埋入式混凝土应力及温度传感器[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(增刊 1): 203-206+224.
- [4] CHEN Y, WEN Y M, LI P. Loss mechanisms in piezoelectric transducers and its response to stress [C]// Proceedings of International Conference on Information Acquisition, 2004. Hefei, China. IEEE, 2004.
- [5] CHEN Y, WEN Y M, LI P. Equivalent parameters of embedded PZT elements for concrete structure monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2006, 5(4): 343-354.
- [6] CHEN Y, WEN Y M, LI P. Characterization of PZT ceramic transducer embedded in concrete[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 128(1): 116-124.
- [7] 王新刚, 张伟, 樊士广, 等. 基于 MIDAS 的大体积混凝土冷却水管布置方案研究[J]. 港工技术, 2010, 47(6): 42-45.
- [8] 中交一公局集团有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [9] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司. 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程: JTS/T 202-1—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [10] LIU Y, ZHANG M, YIN X F, et al. Interface debonding detection of precast segmental concrete beams (PSCBs) using piezoceramic transducer-based active sensing approach[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 8725021.
- [11] XU K, REN C C, DENG Q S, et al. Real-time monitoring of bond slip between GFRP bar and concrete structure using piezoceramic transducer-enabled active sensing[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2653.

收稿日期: 2023-03-18