

# 富水砂层盾构叠落隧道下穿施工对既有建筑的扰动效应

杜有超<sup>1</sup>, 石立民<sup>1</sup>, 孔祥勋<sup>2,3,4</sup>, 姚昌瑞<sup>2</sup>, 马金骥<sup>2</sup>, 雷云生<sup>1</sup>, 李春潮<sup>1</sup>, 刘玉辉<sup>1</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090;  
3. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090; 4. 哈尔滨工业大学重庆研究院, 重庆 401135)

**摘要:** 盾构隧道叠落区间的施工形式复杂, 亟须探究周围既有建筑物受上下线隧道施工扰动的响应规律, 以降低潜在施工风险。通过有限元方法模拟了泥水盾构机在进行叠落盾构隧道掘进时, 对既有建筑基础的影响。首先开挖下行隧道, 随后进行上行隧道的开挖, 研究了这一顺序对基础稳定性的具体影响。模拟结果与现场监测数据进行对比, 验证了模型的可靠性。结果显示, 下行隧道开挖时, 基础底部持续沉降; 上行隧道开挖时, 基础沉降有所减缓, 并出现轻微隆起; 上行隧道完成后, 基础底部沉降呈线性分布。此外, 叠落隧道下穿既有建筑主要影响为基础上传来的竖向荷载增加, 使得衬砌受力和变形增大。研究结果将为叠落型隧道工程提供设计和参考价值。

**关键词:** 富水砂层; 盾构; 叠落穿越; 既有建筑; 地表沉降

**中图分类号:** U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)08-0064-09

随着城市化进程的加快, 城市交通建设的发展越来越得到重视。然而, 城市中心区域的建设密集程度高、交通道路密布, 对于交通建设带来的干扰和影响也越来越大。在这种情况下, 盾构隧道作为一种快速、高效的地下交通建设方式, 被广泛应用于城市交通建设中。然而, 盾构隧道下穿既有建筑物时, 由于地下隧道开挖施工所产生的振动与沉降会给既有建筑物带来一定的影响和损害。因此, 研究盾构隧道下穿施工对既有建筑的扰动效应具有重要的理论意义和实际应用价值。本文以某富水砂层盾构叠落隧道下穿既有建筑物为研究对象, 通过数值模拟及相关分析, 对盾构隧道下穿施工对既有建筑的扰动效应进行了深入研究, 为类似项目的设计、施工与监测提供了参考<sup>[1-4]</sup>。

近年来, 众多学者针对叠落隧道掘进过程开展了大量的研究。在盾构隧道掘进规律研究方面,

Kasper 和 Meschke<sup>[5]</sup>采用 Cam-Clay 塑性模型模拟黏性土, 建立随时间变化的具有时变刚度和渗透性弹性材料作为注浆浆液模拟注浆施工过程。Ngoc 等<sup>[6]</sup>模拟机械化开挖过程中的大部分过程, 研究机械化开挖过程中的灌浆压力和千斤顶力对隧道衬砌结构力的影响。Melis 等<sup>[7]</sup>则是通过有限元模拟手段重点探究施工顺序对地层变形的影响, 并通过现场数据验证规律有效性。梁伟和席培胜<sup>[8]</sup>结合理论分析与数值模拟, 分析地表沉降随着掘进面推进下变化规律, 预测盾构施工引起的地表沉降。在监测数据辅助验证下, 邱明明等<sup>[9]</sup>以南昌地铁为研究背景, 建立 Flac3D 有限元模拟, 模拟盾构隧道施工过程, 发现竖向位移于 Peck 公式拟合的同时, 沉降槽宽度为 6 倍隧道直径。赵东平等<sup>[10]</sup>利用土层力学参数的算数平均值和加权平均值反映复合地层上覆土的特征, 提出可考虑该复合地层特征的沉降

**收稿日期:** 2024-09-19

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2024D014); 重庆市城市管理科研项目(城管科字 2023 第 28 号); 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室开放基金课题(HITCE202408); 中国博士后科学基金项目(2024M754193); 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-040)

**作者简介:** 杜有超(1987—), 男, 天津人, 高级工程师, 研究方向为地铁隧道施工、盾构机掘进施工; 石立民(1985—), 男, 甘肃兰州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港口与航道工程、海洋工程; 孔祥勋(1994—), 男, 山西晋中人, 博士, 讲师, 研究方向为地铁隧道施工、盾构机掘进施工; 姚昌瑞(1994—), 男, 湖北恩施人, 博士, 研究方向为地铁隧道施工、盾构机掘进施工; 马金骥(1996—), 男, 河北衡水人, 硕士, 研究方向为桥梁工程、结构健康监测; 雷云生(1984—), 男, 天津人, 高级工程师, 研究方向为地基处理与基础工程; 李春潮(1983—), 男, 天津人, 高级工程师, 研究方向为港口工程、施工管理; 刘玉辉(1982—), 男, 天津人, 高级工程师, 研究方向为海洋工程、项目管理。

槽宽度的计算公式。Moeinossadat 和 Ahangari<sup>[11]</sup> 使用有限差分法(FDM)对德黑兰地铁 7 号线进行建模预测。通过包含 100 个 S-max 值的数据集,选择基因表达式编程(GEP)方法来表示数学方程,创建智能模型。

双线隧道在软土地层中进行盾构施工时,复杂的耦合作用使得地表沉降规律难以精确预测。基于此,Ngoc 等<sup>[12]</sup>、Ocak<sup>[13]</sup>通过有限元模拟软件研究盾构开挖叠落隧道时的地表沉降以及隧道间相互作用。何川等<sup>[14]</sup>、李兆平等<sup>[15]</sup>对上方隧道穿越下方既有隧道问题进行深入研究,并通过内部钢支撑支护形式控制陈曲管片变形,保证施工安全。在施工影响因素影响机理方面,Ma 等<sup>[16]</sup>探究施工顺序对叠落区间盾构隧道的影 响,考虑平行隧道、完全叠落隧道、斜向叠落隧道三种隧道相对位置关系对地层变化的影响效应。Mirhabibi 和 Soroush<sup>[17]</sup>、Chehade 和 Shahrour<sup>[18]</sup>、Mojtahedi 和 Nabizada<sup>[19]</sup>通过建二维有限元模型,探究了两隧道间距、地表荷载、地表建筑物位置等影响因素对地表沉降影响,整合评估了各影响因素对地表沉降影响。乙珂豪等<sup>[20]</sup>通过改进传统 Peck 公式和 Chapman 修正参数,结合双线隧道的施工特性与相对位置关系,提出新的地表沉降计算公式。该公式通过经验量化参数,能够准确反映双线隧道埋深及间距对地表沉降的影响。研究依托苏州市轨道交通 S1 号线工程,讨论不同土层中的适用性,并通过 PLAXIS 3D 有限元软件对盾构施工进行数值模拟,验证公式的可靠性。朱春柏等<sup>[21]</sup>为研究新建隧道对上覆既有隧道的受力变形影响,提出一种隧道与土体相互作用的解析方法。通过 Logathan 解计算盾构下穿引起的土体自由位移场,并将既有隧道视作放置在 Winkler 地基上的欧拉

梁,结合边界条件与 Taylor 级数展开,推导出隧道变形响应的解析解。该方法与上海实际工程及离心机试验数据的对比显示,计算结果与实测数据吻合,验证该方法的可靠性。

综上所述,富水砂层盾构隧道叠落区间施工对既有建筑物的扰动研究尚未形成系统理论体系,本文则从前人工作出发,基于实际地铁工程富水叠落区间段进行研究分析,更为系统地全面分析叠落隧道对既有建筑的影响。

## 1 工程概况

哈尔滨地铁三号线盾构隧道工程“河松街—河山街”区间,采用泥水盾构施工,此段区间从平行隧道逐渐过渡为完全叠落段隧道,并向东北方向延伸至河松街站,如图 1 所示。该区间的起止里程为 DK36+494.320~DK35+679.792。其中,左线(上区间)长 824.069 m(包括长链 9.541 m),右线(下区间)长 814.528 m。上区间和下区间在 DK36+292.111~DK36+085.048 为平行变叠落段,斜交长度为 207.063 m,竖向最小距离为 2.8 m。从 DK36+085.048 至区间终点为完全叠落段,叠落长度为 405.256 m,竖向距离为 2.1~8.9 m。

## 2 数值模型分析

### 2.1 模型建立

#### 2.1.1 土体模型

叠落区间的盾构隧道施工所涉及的土层参数如表 1 所示,数值模型土层分布与网格划分如图 2 所示。

在土的模型本构方面,考虑与弹性、非线性弹性或黏弹塑性模型相比,摩尔库伦弹塑性模型能够更准确地描述叠落区间土层在盾构隧道施工中所受的应力和应变。因此,选择摩尔库伦模型作为具体本构模型,其表示如式(1)所示。

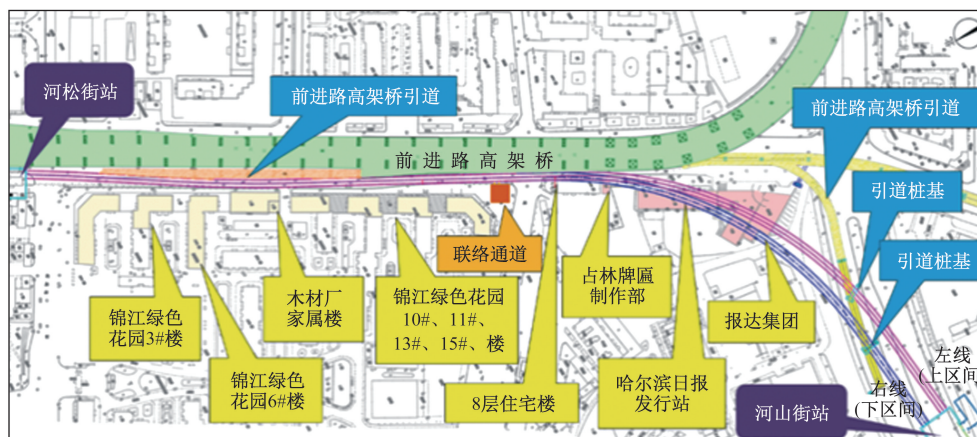


图 1 盾构隧道工程叠落区间平面

表 1 各土层材料力学参数

土层名称	杂填土	细砂	中砂	泥岩
密度	1 850	1 930	2 060	2 110
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3
黏聚力	10.0	0.2	0.3	120.0
摩擦角	6.0	28.1	31.8	35.0
弹性模量	16.750	33.975	35.825	100.000
孔隙比	0.50	0.64	0.49	0.50
渗透系数	0.010 835	6.894 720	13.219 200	0.000 259

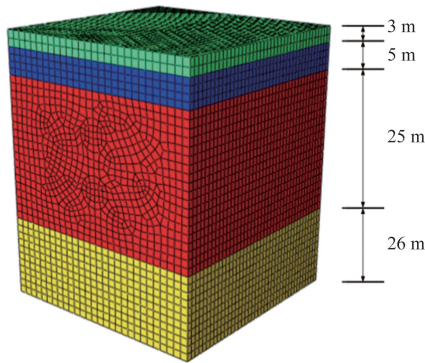


图 2 模型分布图及模型网格划分

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \quad (1)$$

式中： $\sigma_1$  为土体最大主应力； $\sigma_3$  为土体最小主应力； $\varphi$  为土体内摩擦角； $c$  为黏聚力。

### 2.1.2 盾构模型

盾构机的建模采用建立三维实体单元来实现的，只考虑盾构机盾壳部分，并将盾构机的总重量等效于盾构机盾壳中。盾构机的尺寸为外径 6.28 m，内径 6 m，盾头长度设为 6 m。注浆过程不是本文的主要对象，因此不进行模拟，而是直接采用注浆等代层实现，注浆等代层的厚度设为 140 mm，并与衬砌管片同时激活。此外，预设了三维实体单元和构件的装配，并通过生死单元法来实现掘进注浆。

衬砌管片同样采用三维实体单元进行模拟，忽略衬砌管片之间的连接方式和衬砌接缝的影响。通过建立整体实体单元，并运用生死单元法来实现衬砌的支护，衬砌的内径为 5 400 mm，外径为 6 000 mm，衬砌的厚度为 300 mm。每一环衬砌的长度设为 1 m。模型中各部件的基本尺寸如表 2 所示。整体的三维有限元模型如图 3 所示。

表 2 模型各部件基本尺寸

变量	隧道	盾构机	衬砌	等代层
外直径/mm	6 280	6 280	6 000	6 280
内直径/mm	—	6 000	5 400	6 000
厚度/mm	—	140	300	140

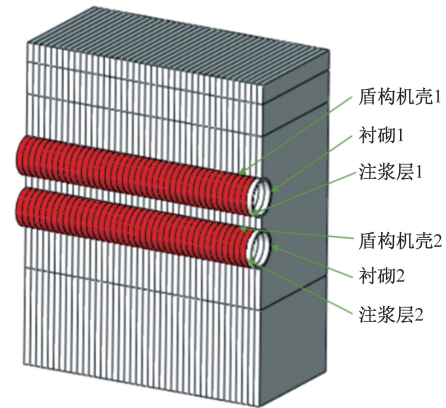


图 3 盾构下穿隧道三维有限元模型

### 2.1.3 边界条件与荷载设置

模型的边界通过位移约束来实现，横向边界采用约束法向位移的方式，而不约束切向位移和土体转角。底部边界约束三个自由度的位移，而不约束土体转角，顶部边界不施加任何约束。由于叠落区间盾构隧道施工速度较快，且模型尺寸较大，故假设模型边界为不排水边界。同时，假设隧道衬砌采取良好的防水措施，将其设置为不排水单元。通过设置孔压边界条件，实现水压力的分布。建立土体初始孔压解析场来定义土体的孔压。土体孔压的计算公式为

$$P_w = 10\,000(56 - Z) \quad (2)$$

式中： $P_w$  为土体孔压，Pa； $Z$  为土体深度，m。

此外，为防止地下水位以上的土体产生负压，将地下水位以上的孔压设置为 0，以保证分析结果的准确性。除了土体孔压的初始条件，模型计算还需要以既有的初始地应力条件为基础。为了定义初始地应力场，本模型采用 ODB 导入方法。首先建立一个初始模型，该模型仅包括土体而不包括其他构件，通过计算得到相应的地应力场。然后将计算结果作为正式计算模型中的初始地应力场，采用地应力分析步骤，得到所需的初始地应力场。

为了确保模型计算符合实际工况，设置两个加载条件。第一个加载条件是模拟盾构机掘进时的掌子面支护力，该力模拟盾构机对掌子面的支护作用。掌子面的荷载通过竖向梯形荷载来实现，顶部荷载设置为 250 kPa，底部荷载设置为 370 kPa，荷载梯度为 20 kPa/m。第二个加载条件是衬砌支护注浆荷载，模拟注浆过程中产生的注浆压力。随着盾构机的推进，衬砌支护和注浆压力也随之推进。注浆压力仅作用在盾构机后方的 6 环衬砌外部。

## 2.2 模型验证

### 2.2.1 叠落区间盾构隧道现场监测

#### 1) 管片衬砌底部隆起

隧道沉降测量时,观测点的标志可设置在衬砌环连接螺丝上,既不易破坏又便于观测,不大于50环布设一个监测断面,每个断面布设1个监测点,通过稳定的工作点来测定观测点的沉降。管片底部监测点如图4所示。

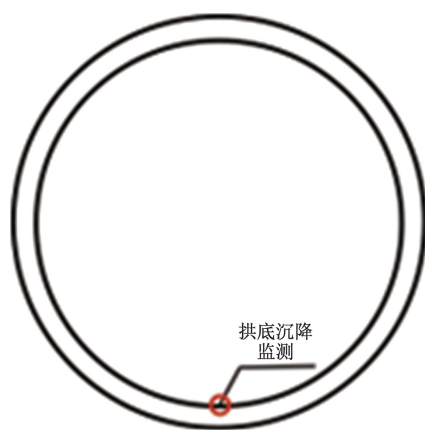


图4 管片沉降点的布设示意图

沉降量的计算公式为

$$\Delta H = H_n - H_0 \quad (3)$$

式中: $\Delta H$ 为监测点沉降量,mm; $H_0$ 为监测点初始高程,mm; $H_n$ 为实测高程,mm。

#### 2) 管片衬砌净空收敛监测

收敛监测采用激光测距仪观测,布设间距为不大于50环一个测点。测定衬砌初始竖向内径,通过定期测定隧道顶部与底部两监测点相对距离并与初值进行比对得到衬砌净空收敛变形。监测点安装后,对监测点与激光测距仪接触点的符合性进行检查,独立观测3次,3次观测较差应小于标称精度的2倍,观测结果取3次独立观测读数的平均值。

净空相对位移计算公式为

$$U_n = R_n - R_0 \quad (4)$$

式中: $U_n$ 为第 $n$ 次量测时净空相对位移值,mm; $R_n$ 为第 $n$ 次量测时的观测值,mm; $R_0$ 为初始观测值,mm。

### 2.2.2 模型数据验证

将400环为440环断面处拱底竖向位移以及竖向收敛模拟值与现场监测值进行对比,如图6所示,结果表明现场监测数据与数值模拟数据数值与趋势规律大体一致,模拟结果可靠。

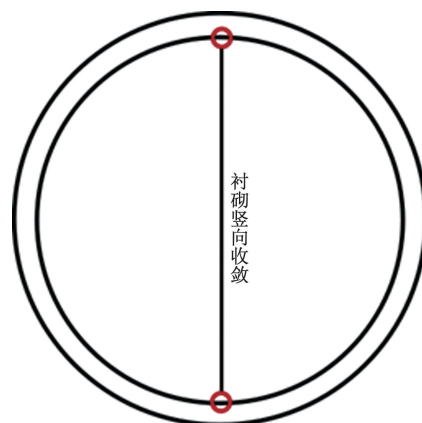
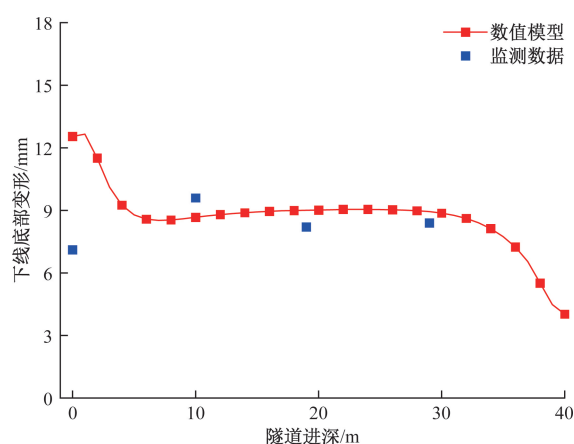
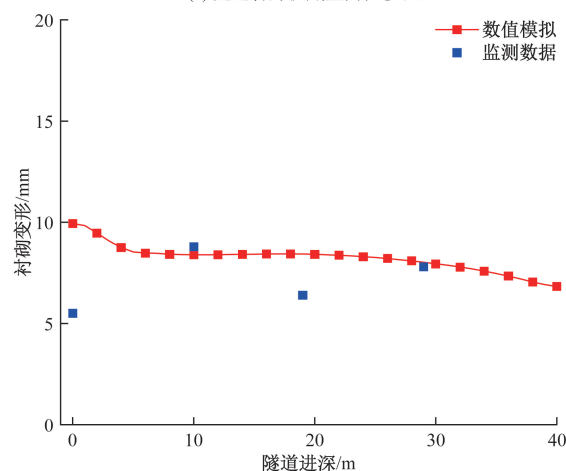


图5 管片收敛变形测点布设示意图



(a) 隧道管片拱底竖向位移验证



(b) 隧道管片竖向收敛验证

图6 数值模型与现场监测结果对比

## 3 叠落隧道下穿既有建筑安全性分析

随着城市化进程的不断推进,城市空间的开发利用变得越发紧缺。在这种情况下,地铁线路不可避免会穿过既有建筑的基础。然而,隧道的下穿会导致既有基础发生较大的位移,与此同时,建筑基础所传递的底部荷载也会进一步增加施工区间

地层的应力, 从而对隧道施工产生一系列不利影响。因此, 接下来针对这一问题展开, 旨在分析在这种复杂工况下的施工安全性, 并综合考虑相关影响因素。

### 3.1 叠落隧道中心下穿基础影响分析

选取上层建筑整体基础作为主要研究对象, 模拟叠落隧道下穿影响, 基础厚度定为 3 m, 顶部压强 65 kPa, 其他地层条件不发生改变, 探究叠落隧道下穿既有基础规律。建立得到的有限元模型如图 7 所示。

地应力平衡应力与应变计算结果如图 8 所示。土体位移数值达到模拟要求, 且土体应力随着土体深度增大, 满足数值模拟规律。

选择  $Y=20\text{ m}$  (深度方向) 处基础底部的沉降时程和最终沉降分布曲线如图 9 所示。

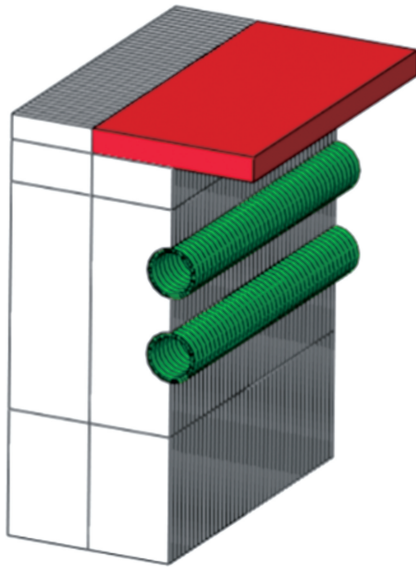


图 7 叠落隧道下穿已有建筑基础模型

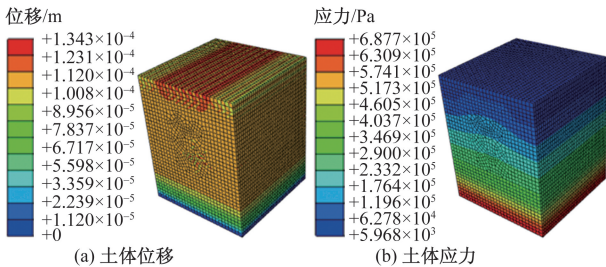
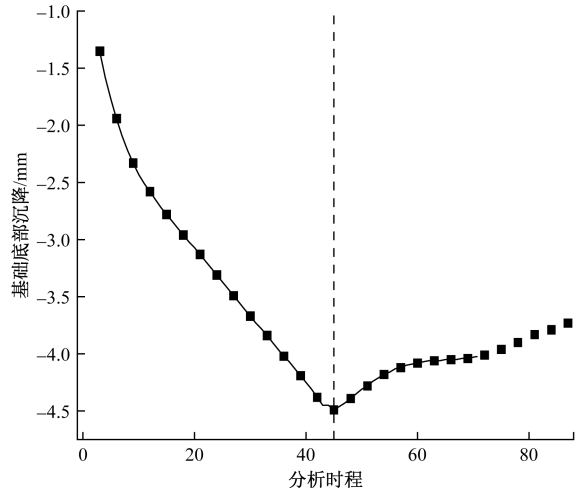
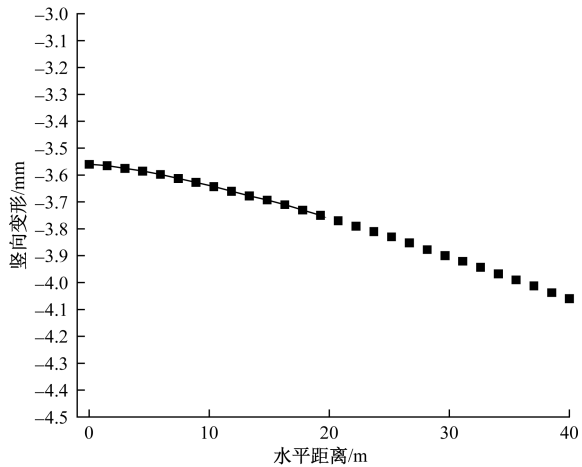


图 8 地应力平衡结果

由图 9(a) 可知, 在下行隧道的整个开挖过程中, 基础底部持续发生沉降。初始阶段, 基础的沉降速率较快, 随着盾构机的不断掘进, 衬砌底部的沉降呈线性增加, 最终在下行隧道开挖完成后达到



(a) 基础底部沉降时程



(b) 基础底部最终沉降分布

图 9 基础沉降曲线

最大值为 4.5 mm。当上行隧道开挖过程中, 基础的沉降减小, 出现一定程度的隆起。当盾构机靠近监测面时, 沉降减小速率逐渐下降; 而当远离监测面时, 沉降减小速率逐渐上升, 最终达到最小值 4.0 mm。上行隧道破除后, 由于上层土体较坚固, 土压力释放以及水压力的影响, 基础底部沉降出现一定程度的上浮现象。

由图 9(b) 可知, 上行隧道开挖完成后, 基础底部的沉降分布并不完全均匀。随着隧道深度的增加, 沉降呈线性分布, 但是随着深度增加, 沉降值逐渐减小, 差异不大, 差值约为 0.4 mm, 基本保持均匀。这是因为基础整体性较好, 在隧道不断掘进的过程中, 基础底部的沉降逐渐累积。因此, 在施工过程中, 需要注意对基础底部沉降进行监测, 并在必要时采取加固措施。

提取模型纵向中间断面 ( $Y=20\text{ m}$ ) 地层竖向位移变形云图如图 10 所示。

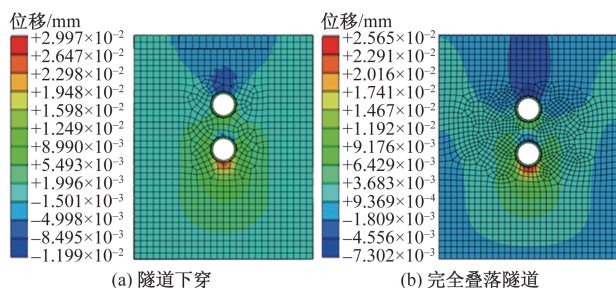


图 10 地层竖向变形

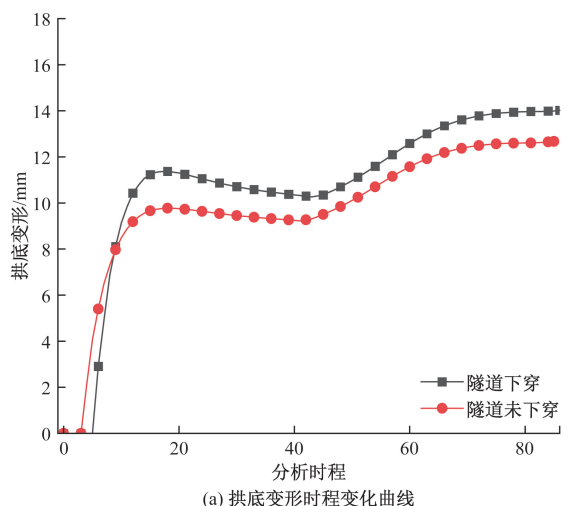
相较于无基础时施工,隧道下穿施工整体变形集中范围更大,涵盖整个基础底部,下行隧道底部呈现隆起,上行隧道顶部呈现下降,整体衬砌变形均呈现竖向收敛、横向拉伸趋势,其原因可能是基础传来的上部荷载导致衬砌竖向受力增大所致,地层变形范围整体增大。

总体而言,叠落隧道下穿既有建筑物的主要影响在于上部基础传递的竖向荷载导致衬砌承受的竖向荷载增加,进而导致衬砌的受力和变形增加。此外,相比于下行隧道,上行隧道所受到的影响较小。因此,在施工过程中,应将加固重点放在下行隧道上,并可以采取加固夹层的方法来提高整体性能,使上行隧道的衬砌承担更多的荷载。

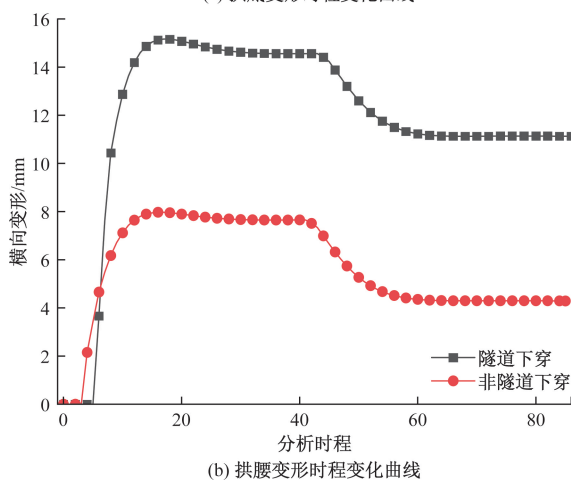
提取洞口处五种工况条件下下部衬砌拱底拱腰变形时程分析曲线如图 11 所示。

由图 11(a)下行隧道拱底时程曲线可知,隧道下穿工况与非隧道下穿工况相比,时程规律几乎相同,但存在一定区别。在下行隧道开挖过程中,拱底的变形先增长后未能一直保持稳定,而呈现出小幅度的下降。这是由于基础的整体性导致后续隧道开挖时衬砌所承担的荷载略微减小。此外,对于由上行隧道开挖引起的地应力释放,下行隧道拱底的变形数值大体相同,相互作用未发生明显变化。

由图 12(b)拱腰时程变化曲线可知,两种工况的时程变化规律相同,但明显可见隧道下穿工况下的横向变形远大于非隧道下穿工况,最终变形达到了 2.7 倍。与拱底变形相比,拱腰的变形更加明显。上部传递荷载的增大主要由下行隧道的衬砌承担,导致横向变形进一步增大,这两种变形主要集中在下行隧道的施工过程中。因此,在下行隧道的施工过程中需要采取加固措施。针对横向变形,可以采取竖向支护、超前注浆等形式来降低竖向受荷。而上行隧道的施工过程对下行隧道拱腰的变形影响,在两种工况下均达到了约 4 mm 左右,对下行隧道的影响作用相近。



(a) 拱底变形时程变化曲线



(b) 拱腰变形时程变化曲线

图 11 下行隧道拱底拱腰变形

综上所述,在隧道下穿工况条件下,变形主要发生在下行隧道开挖阶段,因此需要在这一阶段采取加固措施来进行控制。另外,在上行隧道的施工过程中,上行隧道对下行隧道的影响未发生明显变化。在叠落隧道下穿既有建筑物的情况下,下行隧道的变形过大,需要采取一定的加固措施来进行控制,以确保施工的安全性。

### 3.2 叠落隧道非中心下穿既有基础影响分析

选取上层建筑整体基础作为主要研究对象,模拟叠落隧道下穿影响,与之前基础下穿方案一样,基础尺寸、埋置深度等均相同,不同的是基础中轴线与隧道中轴线偏离 5 m,探究叠落隧道下穿既有基础规律。建立得到的有限元模型如图 12 所示。

选取  $Y=20$  m 处基础底部沉降时程、基础底部最终沉降分布曲线如图 13 所示。由图 13(a)可知,基础底部沉降曲线的趋势与位于隧道正中心下穿的基础曲线形状相似。然而,由于基础中心位置不在隧道正上方,基础底部的沉降略微减小。同时,

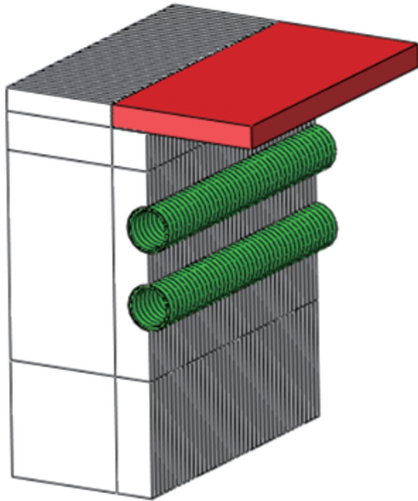


图 12 叠落隧道偏心下穿已有建筑基础模型

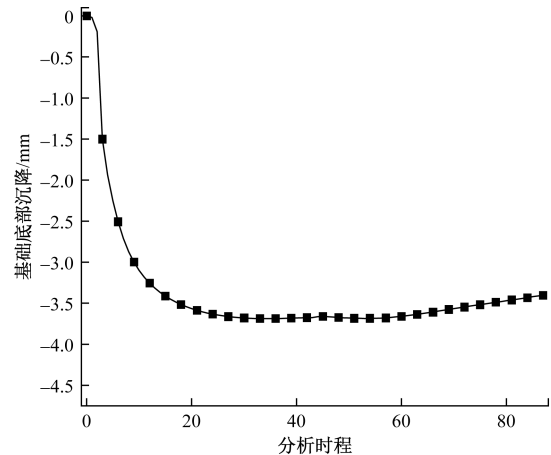
在上线隧道开挖完成后,基础底部的抬升变化范围较小,仅为 0.12 mm,与位于基础正中心下方的情况相比有较大差异。由图 13(b)可知,上线隧道开挖完成后,隧道进深方向上基础底部的沉降不均匀。与位于中心轴下穿的情况一样,沉降呈随着隧道进深的增加而增大的趋势。然而,基础底部的沉降值和沉降变化值都比位于中心下穿的既有隧道的情况要小。这可能是由于隧道偏心下穿后,左侧基础的沉降较大,基础向左侧发生偏移,导致中心位置的沉降和变形减小。

为进一步验证上述结论,提取既有基础横向方向上底部沉降绘制得到如图 14 所示曲线,发现临近隧道一侧基础沉降较大,而随着远离隧道,基础底部沉降逐渐减小,与之前总结得到的规律相互印证,由于隧道开挖导致基础产生不均匀沉降,且基础为刚性基础,隧道横向沉降呈现线性变化。

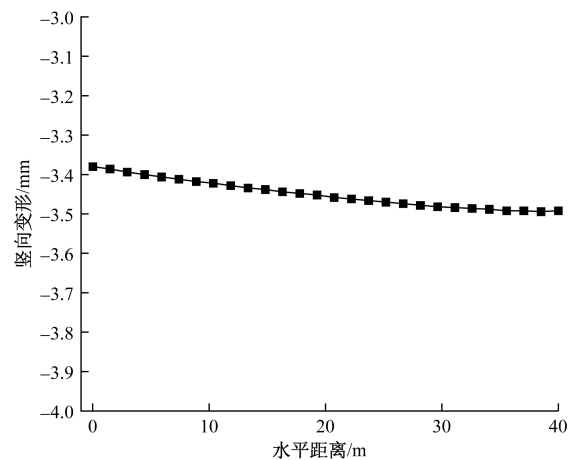
提取隧道下穿基础两种工况条件下下线隧道衬砌管片拱底拱腰变形时程分析曲线如图 15 所示。

由图 15(a)可知,隧道下穿既有基础中心工况与隧道偏心下穿既有基础工况的时程规律几乎相同。两种工况下,下行隧道开挖时盾构机的掘进导致衬砌拱底的变形快速增大,随着掘进面远离拱底,变形趋于稳定,直至上行隧道开挖时拱底的变形进一步增大。上行隧道对拱底变形的影响变化量相同,隧道之间的相互作用影响相差不大,但隧道偏心下穿既有基础工况下的拱底变形较小。

由图 15(b)可知,两种工况条件下,下行隧道拱腰的时程变化规律相同。同时,两种工况下,上行隧道开挖导致的拱腰变形减小值也相同,进一步证明两种工况下的两条隧道相互作用的影响相同。



(a) 基础底部沉降时程



(b) 基础底部最终沉降分布

图 13 基础沉降曲线

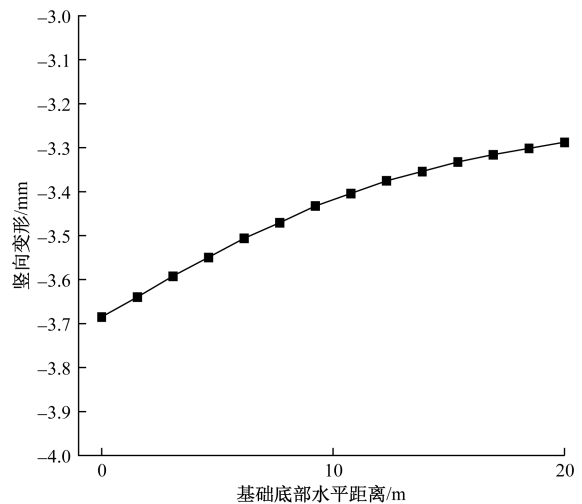


图 14 基础底部横向沉降曲线

最终,下行隧道的横向位移相差 2 mm,横向变形与竖向变形大致相同,均产生较大的变形。因此,在加固过程中应注意同时加固竖直方向和水平方向。

综上所述,隧道偏心下穿既有基础工况条件

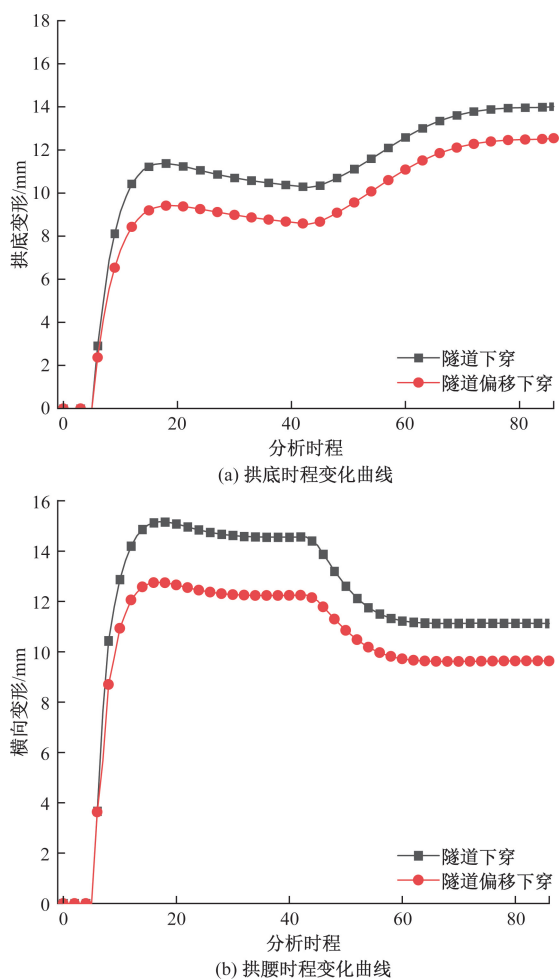


图 15 下行隧道拱底拱腰变形

下,下行隧道的开挖引起的变形在总体变形中占据了显著比重,由于破坏原有地应力平衡,导致地层变形较大,应在下线隧道开挖时就需要进行加固措施进行控制,且这两种情况变形均大于非下穿情况,应较基础工况进一步加固同时注意下穿建筑防护,定期监测实时采取措施。

#### 4 结论

(1)分析了叠落隧道下穿既有隧道的情况,由于地表荷载增大,隧道变形增大,同时既有基础进一步沉降,同时由于基础整体性原因,当隧道位于基础底部中心穿过时基础沉降较为均匀,但当偏移基础中心时会导致基础的不均匀变形。

(2)叠落隧道中心下穿基础时,在下行隧道的整个开挖过程中,基础底部持续发生沉降,而当上行隧道开挖过程中,比下行隧道开挖过程中的基础沉降小,且出现一定程度的隆起,最终基础沉降值达 4.0 mm 左右。此外,上行隧道开挖完成后,基础底部的沉降分布并不完全均匀。随着隧道深度的

增加,沉降呈线性分布,但是随着深度增加,沉降值逐渐减小,差异不大,差值约为 0.4 mm,基本保持均匀。

(3)相较于无基础时施工,隧道下穿施工整体变形集中范围更大,涵盖整个基础底部,下行隧道底部呈现隆起,上行隧道顶部呈现下降,整体衬砌变形均呈现竖向收敛、横向拉伸趋势。

#### 参考文献

- [1] 宋浩然,张顶立. 叠落盾构隧道施工影响下地层变形及结构受力分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 279-282.
- [2] 王凯,李兆平,姜厚停,等. 长距离叠落隧道施工对邻近桥梁的影响及控制措施研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 180-185.
- [3] 杨冬梅,田建华,张振营,等. 叠落盾构隧道施工对邻近桥桩影响控制措施效果分析[J]. 市政技术, 2020, 38(6): 121-125.
- [4] 邹小春,杨伟鸿,张习颖,等. 繁华城区强变异地层大直径叠落盾构工程关键技术[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(3): 57-61.
- [5] KASPER T, MESCHKE G. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(14): 1441-1460.
- [6] NGOC A D, DIAS D, ORESTE P, et al. Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(4): 673-694.
- [7] MELIS M, MEDINA L, RODRIGUEZ J M. Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1273-1287.
- [8] 梁伟,席培胜. 土仓压力对盾构下穿公路引起地表变形的影响分析[J]. 皖西学院学报, 2017, 33(2): 138-141.
- [9] 邱明明,杨果林,姜安龙,等. 地铁盾构施工地层变形预测及数值分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(4): 377-387.
- [10] 赵东平,沈振东,王风,等. 砂卵石泥岩复合地层盾构隧道施工导致的地表沉降槽宽度计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 32-41.
- [11] MOEINOSSADAT S R, AHANGARI K. Estimating maximum surface settlement due to EPBM tunneling by numerical-intelligent approach: a case study on Tehran subway line 7[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18: 92-102.
- [12] NGOC A D, DIAS D, ORESTE P. Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2014, 15(11): 896-913.
- [13] OCAK I. A new approach for estimating the transverse

- surface settlement curve for twin tunnels in shallow and soft soils[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(7): 2357-2367.
- [14] 何川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. *土木工程学报*, 2008(3): 91-98.
- [15] 李兆平, 汪挺, 郑昊, 等. 盾构隧道近距离小角度上穿已建暗挖隧道方案[J]. *都市轨道交通*, 2008, 21(6): 64-68.
- [16] MA S, LIU Y, LÜ X, et al. Settlement and load transfer mechanism of pipeline due to twin stacked tunneling with different construction sequences[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(10): 3810-3817.
- [17] MIRHABIBI A, SOROUSH A. Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 29: 40-51.
- [18] CHEHADE F H, SHAHROUR I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 210-214.
- [19] MOJTAHEDI A S, NABIZADEH A. A numerical approach to evaluating the asymmetric ground settlement response to twin-tunnel asynchronous excavation[J]. *Soils and Rocks*, 2022, 45(2): 1-10.
- [20] 乙珂豪, 师文豪, 吴静红, 等. 软土地层双线隧道地表沉降计算公式修正[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(4): 1627-1634.
- [21] 朱春柏, 刘志贺, 刘伟, 等. 新建隧道对上覆既有隧道受力变形解析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(30): 13150-13156.

## Disturbance Effect on Existing Buildings Caused by Tunneling of Shield Superimposed Tunnel in Water-rich Sand Layer

DU Youchao<sup>1</sup>, SHI Limin<sup>1</sup>, KONG Xiangxun<sup>2,3,4</sup>, YAO Changrui<sup>2</sup>, MA Jinji<sup>2</sup>,  
LEI Yunsheng<sup>1</sup>, LI Chunchao<sup>1</sup>, LIU Yuhui<sup>1</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Tianjin 300461, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Chongqing Research Institute, Harbin Institute of Technology, Chongqing 401135, China)

**Abstract:** The construction forms of overlapping sections of shield tunnels are complicated, so it is urgent to investigate the response rules of existing buildings to the disturbance of tunnel construction, so as to reduce the potential construction risks. In this paper, the finite element method was used to simulate the influence of mud-water shield machine on the existing building foundation when the superimposed shield tunnel was driven. First, the down tunnel was excavated, then the up tunnel was excavated, and the concrete influence of this sequence on the stability of the foundation was studied. The simulation results are compared with the field monitoring data to verify the reliability of the model. The results show that the foundation bottom continues to settle when the tunnel is excavated. When the tunnel is excavated, the settlement of the foundation slows down and a slight uplift occurs. After the completion of the ascending tunnel, the settlement at the bottom of the foundation presents a linear distribution. In addition, the vertical load increases on the basis of the main influence of the stacked tunnel under the existing buildings, which makes the lining stress and deformation increase. The research results will provide design and reference value for cascade tunnel engineering.

**Keywords:** water-rich sand layer; shield; overlapping crossing; existing buildings; ground subsidence