

# 盾构隧道掘进施工对邻近既有建筑的影响分析

郭长龙<sup>1</sup>, 王平让<sup>2</sup>, 汪德才<sup>3</sup>, 孙立军<sup>1</sup>

(1. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南 250014; 2. 郑州航空工业管理学院土木建筑学院, 河南 郑州 450046;  
3. 华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 盾构隧道掘进过程中, 会对周围土体产生扰动和变形。当变形达到一定程度时, 会危及邻近建筑物的正常使用。基于有限差分软件 FLAC 3D 建立三维数值计算模型, 模拟不同临近距离和不同建筑层高工况下盾构隧道掘进对邻近既有建筑物的影响, 选择既有建筑物沉降作为指标进行分析, 对不同工况下既有建筑物的沉降变化曲线进行数据拟合, 并与现场实际监测数据进行对比分析。研究结果表明: (1) 不同临近距离工况下, 随盾构掘进步数增大, 建筑物的沉降逐渐增大。随临近距离增大, 同一施工步下建筑物的沉降逐渐减小, 沉降速率逐渐减小。(2) 不同建筑层高工况下, 随盾构掘进步数增大, 建筑物的沉降逐渐增大。随建筑层高增大, 同一施工步下建筑物的沉降先逐渐增大后逐渐减小。(3) 盾构掘进过程中对邻近建筑物的主要影响区约为 1.6 倍隧道外径。研究成果可为类似盾构隧道掘进施工提供参考。

**关键词:** 盾构隧道; 邻近建筑; 影响分析; 数值模拟; 变形监测

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0162-04

## 0 引言

盾构隧道掘进施工过程中, 会对周围土体产生扰动, 引起土体变形, 甚至危及邻近既有建筑物的正常使用和结构安全。如何确定盾构隧道掘进施工对邻近既有建筑物的影响并确保其安全, 是当前研究和解决的热点问题。

在数值分析和模型试验研究方面, 魏纲等<sup>[1]</sup>采用有限元软件 MIDAS/NX 研究了盾构隧道施工对短桩基础框架结构建筑物受力和变形的影响。奎耀<sup>[2]</sup>通过室内模型试验与数值模拟研究了盾构施工对邻近既有建筑物桩基的影响。杨记芳<sup>[3]</sup>研究了软弱地层大直径盾构下穿不同桩长桩基时邻近建筑物的沉降及桩体变形。王红丽等<sup>[4]</sup>通过三维有限元方法研究了盾构隧道下穿高层建筑时对桩基变形和内力性能的影响。周金文<sup>[5]</sup>通过有限元方法分析了盾构隧道掘进施工对周围地层及邻近建筑物筏板基础的影响。

在实际工程案例研究方面, 刘少楠<sup>[6]</sup>利用有限元软件 ABAQUS 并结合现场实际监测, 研究了某地铁区间盾构隧道施工对邻近建筑物沉降的影响。蒋颖等<sup>[7]</sup>分析了武汉地铁某盾构隧道近距离下穿既有建

筑物时对建筑结构的影响。张杨等<sup>[8]</sup>分析了南昌地铁某区间盾构隧道施工对既有建筑物地基和主体结构变形的影响。杨绍阁等<sup>[9]</sup>分析了郑州地铁某区间盾构隧道掘进施工对邻近既有建筑物沉降的影响。穆岩松等<sup>[10]</sup>通过有限元方法研究了某地铁双线盾构侧穿既有建筑物时对地表沉降和建筑结构变形的影响。徐万春等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法研究了深圳地铁某区间盾构隧道下穿既有建筑物时对建筑结构内力和变形的影响。夏志强等<sup>[12]</sup>利用有限元软件 MIDAS 分析了杭州地铁某双线盾构施工对周围地层及建筑结构的影响。

目前盾构隧道掘进施工对邻近建筑物影响的研究主要集中在建筑物的基础上, 忽略了建筑物的上部结构, 计算结果不能完全反映实际情况。基于此, 本文采用有限差分软件 FLAC 3D 建立三维数值计算模型, 并结合现场实际监测数据, 研究不同临近距离和不同建筑层高工况下盾构掘进对邻近既有建筑物的影响, 为类似盾构隧道施工提供参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

郑州地铁某区间隧道先后侧穿某小区低层商铺、公交总公司大楼、熊耳河和昆丽河。左线设计里程为 ZK13+457.435 ~ ZK15+000.722, 左线长度为 1 558.458 m。右线设计里程为 YK13+457.435 ~

收稿日期: 2022-07-25

基金项目: 河南省科技攻关计划(社发领域)项目(192102310489; 202102310243)

作者简介: 郭长龙(1990—), 男, 专科, 助理工程师, 从事盾构隧道施工技术与安全管理工作。

YK15+000.722,右线长度为1 543.287 m。线路间距约13~19 m,线路纵断面为V字坡,线路最大纵坡2.4%。

### 1.2 水文地质条件

根据本区间地质钻探和勘察资料,本场地55 m以上地基土均属第四系(Q)沉积地层,在垂直方向上55 m范围内分布有第四系全新统人工堆积层杂填土(Q4-3ml)、第四系上更新统冲洪积物(Q3a1+p1)和第四系中更新统坡洪积物(Q2d1p1)。

根据本地区水文地质资料,本场地地下水类型主要为第四系松散层孔隙潜水,含水层岩性以黏质粉土、粉质黏土及细砂为主。勘察期间,地下水初见水位埋深为20.30~25.70 m,稳定水位埋深为19.80~25.30 m,变幅1.0~2.0 m。本场地近3~5 a地下水最高埋深为17.30~20.85 m,历史最高水位埋深为12.30~15.85 m。

### 1.3 隧道施工方法

本区间隧道结构为单线单洞形式,采用盾构法施工,联络通道采用浅埋暗挖法施工。采用两台盾构机由市儿童医院站盾构井向黄河南路站推进,主要施工顺序为:先对市儿童医院站盾构井西端土体进行加固,盾构机从车站西段盾构井始发,在盾构机到达黄河南路站之前,在黄河南路站北端接收井端头进行土体加固,以保证盾构顺利进洞接收。

## 2 三维数值模型建立

### 2.1 数值模型建立

采用有限差分软件FLAC 3D进行数值计算,建立的三维数值计算模型如图1所示。数值计算模型区域:长90 m,宽60 m,高45 m,埋深12 m。Z轴为正方向,为盾构掘进方向,X轴为水平方向,Y轴为竖直方向。模型共划分实体单元149 900个、节点623 381个。

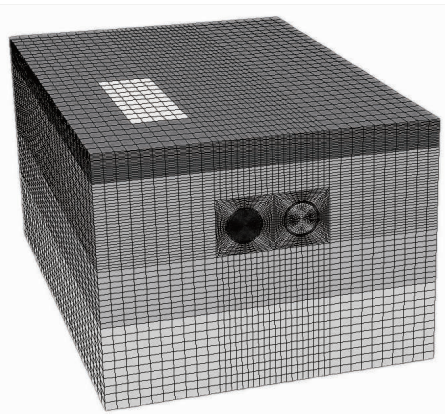


图1 三维数值计算模型

隧道位于黏质粉土地层中,上覆土层厚度12 m,邻近既有建筑物在模型上方用一个 $X \times Y \times Z = 10 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的基础来表示,掘进隧道距离邻近建筑物5 m。盾构管片衬砌外径6 m,内径5.4 m,管片厚0.3 m,幅宽1.5 m,注浆层厚度0.3 m,模型中计算单元沿盾构机掘进方向即Z轴正方向每两环管片(即3 m)划分一个。

根据相关规范且偏安全考虑,对于7层框架建筑物,数值计算采用70 kPa均布竖向荷载。数值模型中通过适当简化来考虑盾构机掘进中顶进力及地层损失引起的周围土体扰动影响。盾构隧道衬砌是一个整体结构,通过螺栓将单个管片连接在一起,模拟分析时采用空间8节点实体单元,并采用均值等效管片衬砌。此时管片衬砌须乘以相应的刚度折减系数。横向刚度折减系数取0.6~0.8。考虑到在纵向上管片主要承受盾构机顶进反力,因此纵向刚度不进行折减。折减后盾构隧道管片衬砌材料的计算参数见表1。

表1 管片衬砌材料计算参数

$E_x /$ GPa	$E_y /$ GPa	$E_z /$ GPa	$E_{xy} /$ GPa	$E_{yz} /$ GPa	$E_{xz} /$ GPa	$\mu_{xy}$	$\mu_{yz}$	$\mu_{xz}$
27.6	27.6	0.35	11.5	0.16	0.16	0.2	0.2	0.2

模型中采用空间8节点实体单元来模拟盾构机、扰动层和土层。盾构机为土压平衡式盾构机,重385 t,采用杀死单元的方法来模拟盾构机盾尾空隙,并在盾尾空隙处施加注浆压力,盾构机掘进施工时会对周围土体产生扰动,扰动层厚度取0.3 m,并采用提高扰动层刚度的方法来模拟盾构机盾尾注浆。

### 2.2 土层和材料参数

根据本区间地质钻探和勘察资料,数值计算模型共划分为4个土层,采用摩尔-库伦强度准则,采取提高相应计算参数对盾构机和注浆层进行模拟,具体计算参数见表2。

表2 土层和材料计算参数

名称	层厚 / m	黏聚力 / kPa	内摩擦 角 / (°)	重度 / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量 / MPa	泊松比
杂填土	2	17	30	17.2	4.1	0.35
砂质粉土	4	18	23	19.5	7.4	0.33
黏质粉土	19	20	20	20.3	8.9	0.30
粉质黏土	20	32	18	21.0	10.6	0.32
盾构机	—	—	—	—	210 000	0.12
注浆层	—	—	—	21.2	1 000	0.21

### 2.3 盾构机掘进模拟

数值模型中采用改变材料计算参数和单元“生”“死”的方法对盾构掘进施工进行动态模拟,盾构机、扰动层和管片衬砌单元全部采用预设单元。盾构机掘进施工模拟如图2所示。模拟盾构掘进时,将第0步设为掘进前状态(即参考状态),第1步掘进15 m;从第2步开始到第17步,每步掘进3 m;剩下的27 m在第18步完成掘进。这样可减小边界条件对掘进模拟的影响。当盾构掘进时,将之前的土层计算参数设置为盾构机计算参数,同时“杀死”盾尾空隙处单元,并施加0.2 MPa径向注浆压力,将0.25 MPa顶进压力施加在掘削面,顶进反力施加在盾构机后方的管片上。待盾构机盾尾脱出一段距离后,即可激活扰动层和衬砌单元。

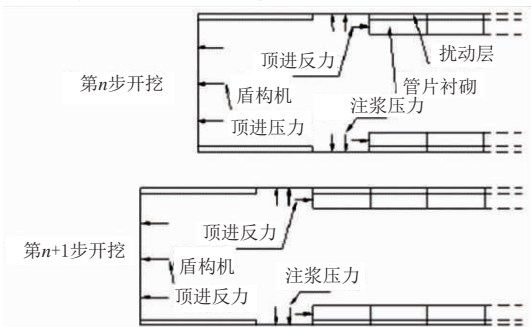


图2 盾构机掘进模拟示意图

## 3 数值计算结果分析

### 3.1 不同临近距离工况下计算结果分析

在7层建筑层高工况下,分别设定5 m、10 m、15 m三种不同临近距离,分析不同临近距离工况下盾构掘进施工对邻近既有建筑的影响,具体计算结果如图3所示。

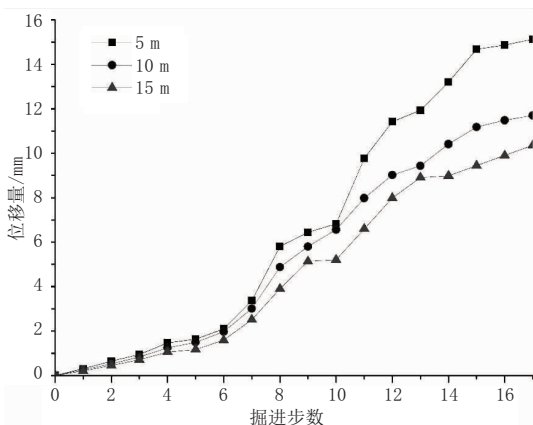


图3 不同临近距离工况下建筑物沉降变化曲线

由图3可以看出,随盾构机掘进步数增大,建筑物的沉降逐渐增大。不同临近距离工况下,同一施工步下建筑物的沉降不同,5 m时最大,10 m时次之,

15 m时最小。随临近距离不断增大,沉降速率逐渐减小。临近距离为5 m、10 m、15 m时,建筑物的最大沉降分别为15.1 mm、11.6 mm、10.4 mm,且沉降差逐渐减小。

对不同临近距离工况下建筑物的沉降变化曲线进行数据拟合,可以得出如下公式:

$$y=0.0415x^2-1.3066x+20.619 \quad (1)$$

式中: $x$ 为临近距离; $y$ 为建筑物的沉降; $R^2=1$ 。根据式(1),可计算出临近距离10 m时建筑物的最大沉降为11.6 mm。当临近距离超过10 m后,沉降先保持稳定,然后急剧减小。因此,可设定10 m左右为建筑物离盾构隧道的安全距离。超过此安全距离,盾构掘进对建筑物的影响很小。以沉降10 mm左右为分界线,即临近距离10 m左右及以内为盾构隧道的主要影响区,大于该临近距离为次要影响区。隧道外径为6 m,因此可设定约1.6倍隧道外径为盾构掘进过程中的主要影响区。这与相关规范规定的隧道影响分区基本一致。

### 3.2 不同建筑层高工况下计算结果分析

在5 m临近距离工况下,分别设定7层、13层、30层三种不同层高,分析不同建筑层高工况下盾构掘进施工对邻近既有建筑的影响,具体计算结果如图4所示。

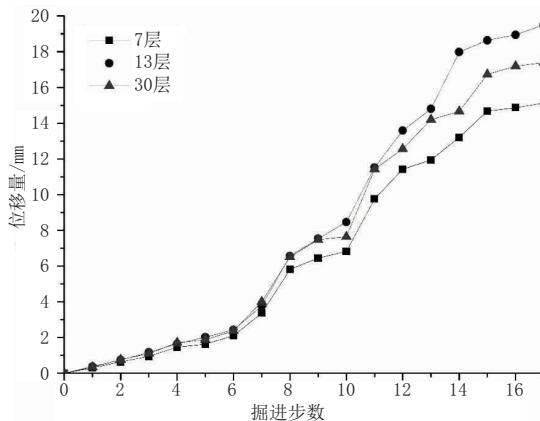


图4 不同建筑层高工况下建筑物沉降变化曲线

由图4可以看出,随盾构机掘进步数增大,建筑物的沉降逐渐增大。不同建筑层高工况下,同一施工步下建筑物的沉降不同,13层时最大,30层时次之,7层时最小,表明并非建筑物层高越高其沉降越大。主要原因在于,随着建筑物层高增加,地基固结较好,盾构掘进时,由于地基和基础条件较好,沉降反而减小。层高7层、13层、30层时建筑物的最大沉降分别为15.1 mm、19.5 mm、17.4 mm。可见,随建筑层高增加,同一施工步下建筑物的沉降先逐渐增大后



逐渐减小。

对不同建筑层高工况下建筑物的沉降变化曲线进行数据拟合,可以得出如下公式:

$$y = -0.0372x^2 + 1.4749x + 6.6218 \quad (2)$$

式中: $x$ 为建筑层高; $y$ 为建筑物的沉降; $R^2=1$ 。根据式(2),可计算出20层层高时建筑物的沉降最大,为21.2 mm。层高超过20层以后,随建筑层高增加,沉降反而减小。因此,可根据式(2)对建筑物的最终沉降进行估算。

### 4 现场变形监测

#### 4.1 监测方法

掘进隧道周边邻近建筑物为7层多层建筑,隧道埋深约12 m,隧道外径6 m。按照相关规范要求及现场情况布置监测点对建筑物变形进行现场监测。同时为便于与数值计算结果进行对比分析,在邻近建筑物距离掘进隧道5 m、10 m、15 m位置处分别布置监测点,并选择建筑物沉降作为盾构掘进施工对邻近建筑物影响的主要分析指标。具体监测仪器、精度及频率见表3。

表3 监测仪器、精度及频率

监测内容	监测仪器	监测精度	监测频率
建筑物沉降	电子水准仪	1 mm	掘进面前后≤20 m时,1次/d
			掘进面前后≤50 m时,1次/2 d
			掘进面前后>50 m时,1次/w
			监测数据趋于稳定后,1次/m

#### 4.2 监测结果分析

临近距离5 m、10 m、15 m工况下建筑物的沉降变化曲线分别如图5至图7所示。

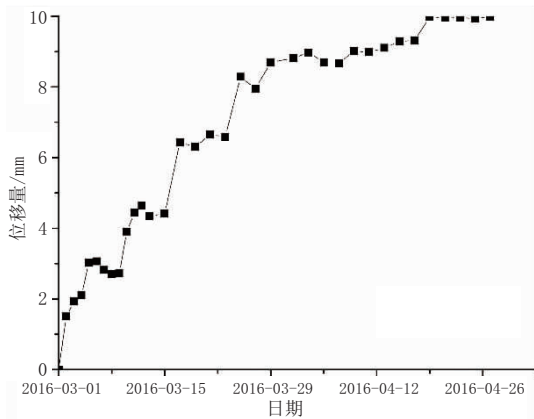


图5 临近距离5 m工况下建筑物沉降变化曲线

由图5~图7可以看出,不同临近距离工况下,同一施工步下建筑物的沉降不同。随临近距离增大,建筑物的沉降逐渐减小,5 m时最大,10 m时次之,15 m时最小。由此可见,盾构隧道掘进施工时,现场

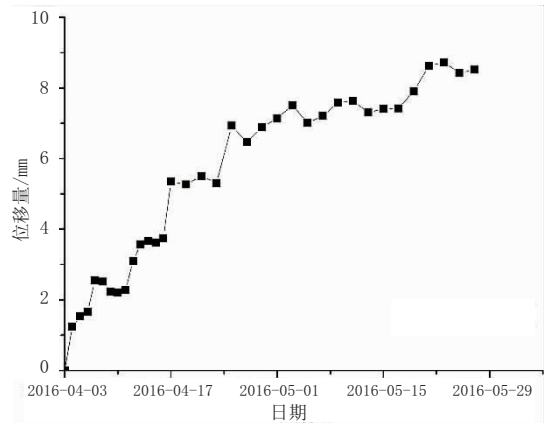


图6 临近距离10 m工况下建筑物沉降变化曲线

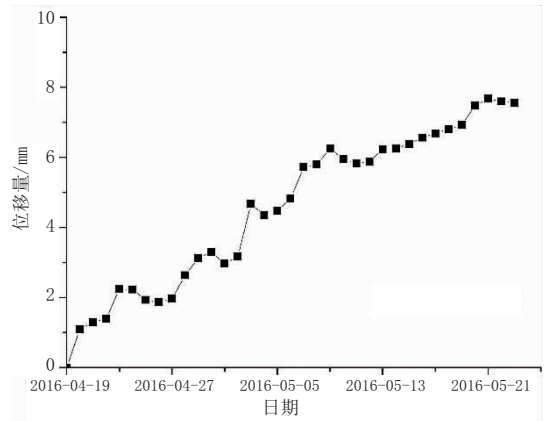


图7 临近距离15 m工况下建筑物沉降变化曲线

监测得出的邻近建筑物沉降变化规律与采用数值计算得出的结果是一致的。

现场实际监测数据表明,以建筑物沉降10 mm为分界线,临近距离10 m及以内为盾构隧道掘进的主要影响区,大于临近距离10 m为次要影响区,隧道外径为6 m,可设定约1.6倍隧道外径为盾构掘进过程中的主要影响区,这也与数值分析计算的隧道影响分区基本一致。

### 5 结语

基于有限差分软件FLAC 3D建立三维数值计算模型,研究了不同临近距离和不同建筑层高工况下盾构隧道掘进施工对邻近既有建筑物的影响,并与实际监测数据进行对比分析,得出如下结论:

(1)不同临近距离工况下,随盾构掘进步数增大,既有建筑物的沉降逐渐增大;随临近距离增大,同一施工步下建筑物的沉降逐渐减小,沉降速率逐渐减小。

(2)不同筑物层高工况下,随盾构掘进步数增大,既有建筑物的沉降逐渐增大;随建筑层高增加,同一施工步下建筑物的沉降先逐渐增大后逐渐减小。

(3)临近距离10 m左右及以内为盾构隧道掘进

(下转第172页)

其结构位移、应力均满足要求。

(2)与土石混合料回填方案对比后发现,采用泡沫轻质土对明挖小间距隧道特殊部位进行回填,其衬砌结构最大位移可分别减小约24%、29%、11%;最大应力可分别减小约41%、39%、27%,其中对衬砌结构顶板和墙角的竖向位移、应力作用效果最显著。

(3)采用土石混合料回填时,回填深度至8 m后结构顶板位移才超出容许值。从施工便利性、结构安全性和回填压实度考虑,采用泡沫轻质土对小间距隧道特殊部位进行回填更优。

(4)采用泡沫轻质土回填,结构侧墙位移呈对称分布,可以有效避免结构产生不对称变形和应力,造成结构拉剪破坏。

(5)从模拟结果和实测位移值对比发现,结构施工结束后,产生顶板向下、侧墙向洞周外位移,最终回填后,侧墙转向洞周内位移,由于土拱效应导致实测结果小于计算结果。

参考文献:

[1] 徐慧芬,曾琛超.海底隧道洞口长距离明挖段拱脚回填材料优化设计与施工[J].公路,2021,66(4):376-379.  
 [2] 李明,严松宏,李盛,等.采用泡沫轻质土对高填明洞二次回填的结构受力特性研究[J].铁道学报,2022,44(2):135-142.  
 [3] ZHUO Bin,ZHU Muyuan,FANG Yong,et al.Numerical and experi-

mental analyses for rubber-sand particle mixtures applied in high-filled cut-and-cover tunnels[J].Construction and Building Materials,2021,306:124874.  
 [4] 黎鸣.泡沫轻质土路堤扶壁式挡土墙受力及变形特性研究[D].西安:长安大学,2018.  
 [5] QIU Youqiang, LIU yang, ZHANG liujun,et al. Influence of lightweight foamed concrete as backfill material on stress and deformation of buttressed earth-retaining wall[J]. Geofluids, 2021, Article ID 7610933: 14.  
 [6] CHEN Yonggui,GUAN Leilei,ZHU Shenyi,et al. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling [J]. Construction and Building Materials,2020,273:121685.  
 [7] WANG Guangyuan, DENG Zhengdong, XU Haoli, et al. Application of foamed concrete backfill in improving antiexplosion performance of buried pipelines [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(4): 04021052.  
 [8] 马永政,温小栋,冯蕾,等.早期人防隧洞工程泡沫混凝土现浇回填施工应用研究[J].土工基础,2021,35(5):553-556.  
 [9] 孙思博.泡沫轻质土在高填涵洞中应用的实验与数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2017.  
 [10] 唐援彬.高填方明挖隧道土压力计算理论及加筋减载研究[D].兰州:兰州交通大学,2013.  
 [11] 兰庆男,彭鹏,李长俊,等.穿越软硬突变地层隧道纵向不均匀沉降分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):1044-1050.  
 [12] 张祖迪,王玉锁,姚庆晨,等.复杂明挖并行隧道群施工沉降控制技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(增刊1):319-325.

\*\*\*\*\*  
 (上接第165页)

的主要影响区,大于临近距离10 m左右为次要影响区,设定约1.6倍隧道外径为盾构掘进过程中的主要影响区。

参考文献:

[1] 魏纲,洪子涵,孙樵.类矩形盾构施工对邻近建筑影响的有限元模拟分析[J].市政技术,2019,37(2): 127-130.  
 [2] 奎耀.盾构开挖对既有建筑基础的影响研究[D].济南:山东建筑大学,2020.  
 [3] 杨记芳.大直径盾构隧道施工对高层建筑及桩基影响数值分析[J].太原理工大学学报,2017,48(5): 772-777.  
 [4] 王红丽,刘良旭.盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响探析[J].公路工程,2017,42(4): 347-354.  
 [5] 周金文.盾构下穿复合地基高层建筑相互安全影响[J].建筑安全,2021,36(4): 23-25.

[6] 刘少楠.郑州地铁5号线盾构施工对地表民用建筑沉降影响研究[D].郑州:河南工业大学,2016.  
 [7] 蒋颖,刘华,何振华.地铁盾构近距离下穿既有建筑结构影响分析[J].土工基础,2018,32(2): 151-153,177.  
 [8] 张杨,林本海,牛九格.地铁盾构隧道施工对既有老式建筑的影响分析[J].广东土木与建筑,2015,22(4): 56-59.  
 [9] 杨绍阁,张彪,赵玉靓,等.盾构掘进穿越民用建筑的沉降影响研究[J].市政技术,2017,35(2): 97-100,138.  
 [10] 穆岩松,戴亦军,邱琼,等.盾构隧道侧穿保护建筑的影响分析[J].施工技术,2018,47(S1): 547-551.  
 [11] 徐万春,罗浩,刘晓阳.盾构隧道下穿对砖混建筑的受力影响与控制方法研究[J].路基工程,2020(2): 180-184.  
 [12] 夏志强,董少博,董克胜,等.双线地铁隧道盾构施工对地层与建筑结构影响研究[J].现代城市轨道交通,2021(4): 49-55.