

DOI: 10.7672/sgjs2026010036

# 双线盾构穿越密集建筑群数值模拟与实测分析\*

杨 剑<sup>1</sup>, 付一明<sup>2</sup>, 雷鸣宇<sup>1</sup>, 丁文其<sup>2</sup>

(1. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 因轨道交通规划发展需要, 地铁隧道穿越民房建筑群的案例日益增加。通过 ZSoil 建立了盾构穿越全过程有限元模型, 计算了地表沉降槽的变化曲线并与现场数据进行了对比, 验证了有限元模型的有效性, 分析了区域建筑以及地层的整体变形, 探究了双线盾构穿越对地表沉降的影响范围。结果表明: 双线穿越后, 地表沉降呈非对称分布; 距穿越中心 30m 范围内为强影响区, 30~45m 范围为弱影响区, 45m 以上为无影响区。对于不同程度的影响区应采用不同的加固措施; 房屋建筑物受先穿越隧道的影响较大, 受后穿越隧道的影响较小; 房屋建筑受邻近盾构穿越影响大于较远盾构; 民房底板为刚体时民房破坏面的法线随着隧道的穿越逐渐指向盾构掘进位置的中点; 沉降导致的软弱底板扭转对老旧民房产生了较大影响; 老旧民房底板曲面变形后最大局部倾斜角度随盾构掘进逐渐增大。

[关键词] 地铁; 盾构; 建筑群; 倾斜度; 沉降; 有限元分析

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0036-07

## Field Analysis and Numerical Simulation of Double-line Shield Traversing Dense Residential Building Complex

YANG Jian<sup>1</sup>, FU Yiming<sup>2</sup>, LEI Mingyu<sup>1</sup>, DING Wenqi<sup>2</sup>

(1. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Due to the needs of rail transit planning and development, the cases of subway tunnels crossing residential building complexes are increasing. The finite element model of the whole process of shield crossing was established by ZSoil. The variation curve of the surface settlement trough was calculated and compared with the field data. The validity of the finite element model was verified. The overall deformation of the regional building and the stratum was analyzed, and the influence range of the double-line shield crossing on the surface settlement was explored. The results indicate that after the double-line crossing, the surface subsidence is asymmetrically distributed. The strong-influence area is within 30 meters from the crossing center, the weak-influence area is within 30 to 45 meters, and the non-influence area is above 45 meters. Different reinforcement measures should be adopted for different degrees of affected areas. Houses and buildings are greatly affected by the initial crossing tunnel and less affected by the subsequent crossing tunnel. The influence of adjacent shield crossing on building construction is greater than that of far shield. When the bottom plate of the house is a rigid body, the normal line of the damage surface of the house gradually points to the midpoint of the shield tunneling position with the passage of the tunnel. The torsion of the weak floor caused by the settlement of the old houses has a great impact on the old houses. The maximum local inclination angle of the old house floor after surface deformation gradually increases with shield tunneling.

**Keywords:** subways; shields; building complexes; inclination; settlement; finite element analysis

\* 国家自然科学基金(52090083); 中铁南方投资集团有限公司技术开发项目

[作者简介] 杨 剑, 工程师, E-mail: 408962739@qq.com

[收稿日期] 2025-06-20

## 0 引言

盾构隧道下穿各种建筑物所导致的沉降、变形、倾斜等问题难以避免, 严重时甚至会产生较大

的工程风险。学者们通过构建三维模型对盾构下穿各种结构进行了精细化模拟,对计算结果进行了细致分析。

杨继全<sup>[1]</sup>依托轨道交通资阳线工程,建立了城轨车站段近接既有建筑物三维模型,探明了既有建筑物群国铁站房和地下停车场变形情况。葛照国<sup>[2]</sup>以上海机场联络轨道工程为背景,研究了大直径盾构隧道施工近接高架桩基群的影响分区并提出有效的综合控制措施。吴发展<sup>[3]</sup>依托地铁隧道盾构区间工程,运用袖阀管注浆加固立交桥地基,提高了盾构隧道下穿立交桥时的安全性。黄兴行<sup>[4]</sup>依托哈尔滨地铁叠落隧道工程,基于现场监测与数值模拟,开展叠落隧道开挖桩水平响应规律研究。韩悦<sup>[5]</sup>以北京地铁下穿清河及侧穿北苑东路清河桥为例,采用数值分析并与实际施工后监测数据相互验证,介绍盾构隧道下穿河道及侧穿桥桩方案。

周洁<sup>[6]</sup>通过分析盾构穿越房屋施工技术及盾构姿态对沉降的影响,结合 ABAQUS 软件建立模型对其进行研究,得出既有建筑物的存在将增大地层损失的结论。张昊然<sup>[7]</sup>依托西安市某地下综合管廊隧道,研究了土压平衡顶管隧道施工在近接建筑物地下室以及市政管线环境下存在的风险。屈浩等<sup>[8]</sup>以呼和浩特地铁 1 号线盾构隧道侧穿玛拉沁饭店为工程背景,在数值模拟中使用节理砌体本构模型进行有限元计算,得出盾构隧道侧穿砌体建筑物后,砌体建筑物的开裂区域是从下往上发展的结论。梁景一等<sup>[9]</sup>依托南昌轨道交通 4 号线,对渣土进行改良试验,采用最优的泡沫配合比,保证了建筑物群的安全。

然而,在建立模型的基础上分析实测数据对规律的探寻更具指导意义。高建成<sup>[10]</sup>通过进行实测数据分析以及施工方案对比得出结论:在线路规划确定的情况下,必须对建筑物进行加固施工,并且在盾构机通过时严格控制掘进参数,并做好应急预案。王家祥<sup>[11]</sup>以昆明地铁 1 号线为背景,建立了三维有限元模型,得到施工过程中及时进行二次跟踪注浆对沉降控制极为重要的结论。刺宝成等<sup>[12]</sup>以哈尔滨 3 号线安通街出入段线区间穿越棚户区项目为工程背景,利用监测数据分析采用沙袋进行反压实现了沉降控制。陈健等<sup>[13]</sup>以武汉地铁 8 号线越江盾构隧道工程为依托,分析了不同施工控制参数下建筑物的剩余变形能力。吴木生<sup>[14]</sup>阐述了地铁隧道工程盾构施工沉降监测项目的具体要求。

然而上述学者并未对双线隧道穿越密集民房

区进行三维精细模拟,且并未讨论民房底板是否因沉降产生扭转,也未提出应对扭转的施工方案。因此本文将依托深圳轨道交通 11 号线二期某区间节点,建立盾构穿越巴登村密集民房区的全过程三维精细有限元模型,分析区域建筑以及地层的整体变形,探究盾构穿越民房建筑物时的沉降和倾斜角度的规律,分析民房底板为刚体时破坏面的变化趋势以及软弱底面曲面变形后最大局部倾斜角度的变化规律。最终通过实测数据检测分析,得出了民房底板为刚体时破坏面的变化趋势以及应对老旧民房软弱底板发生扭转的施工方案。

## 1 工程概况

深圳轨道交通 11 号线二期某区间采用土压平衡盾构施工,盾构外径 6.48m,混凝土管片外径 6.20m,注浆层厚 0.14m,混凝土管片壁厚 0.35m,标准环宽 1.50m,采用错缝拼装。

在该区间盾构下穿巴登村民房,该处民房多为 9 层以下建筑,巴登村房屋为浅桩基础,桩长 10~11m。由于此处建筑物布局复杂、建筑物之间距离小,微小扰动带来的建筑物倾斜都会产生较大危害,盾构穿越风险高。盾构穿越巴登村地表沉降监测节点布置及盾构掘进位置与民房的关系如图 1 所示。监测点布置原则为:①隧道下穿建筑物地段应在隧道开挖前布设地表沉降观测点,地表沉降测点和隧道内测点应布置在同一断面里程;②地表沉降测点横向间距宜为 2~5m,在隧道中线附近测点应适当加密。

盾构隧道在此区间埋深约 23m,盾构隧道顶部沿掘进方向依次从正下方穿越 8 栋巴登村民房,周围区域民房数量可达数十栋。11 号线盾构隧道左右线中心距离约 12.0m,盾构穿越场地共分为 6 个地层,为典型的上软下硬地层,其中隧道主要穿越中风化花岗岩层,隧道穿越地层情况如图 2 所示。

## 2 三维有限元模型

### 2.1 模型概况

本文基于软土有限元软件 ZSoil 建立盾构穿越民房全过程的有限元模型,整个模型尺寸为 252m×224m×85m。模型中土体参数和隧道结构参数按照地勘报告中的参数进行取值。顶部建筑采用刚体模型实体单元,按照估算的密度计算等效重度。顶部建筑间距最小为 3m,建筑楼房多为 9 层以下,少数边缘建筑达 11 层。盾构掘进考虑掌子面压力、管片、等代层,整体模型如图 3 所示。在三维有限元模型中,土体、注浆层、衬砌均采用三维实体单元按照实际尺寸进行建模。模型除上



图 1 地表沉降监测点设置及盾构掘进位置与民房的关系

Fig. 1 Setting of surface settlement monitoring points and the relationship between shield tunneling location and residential houses

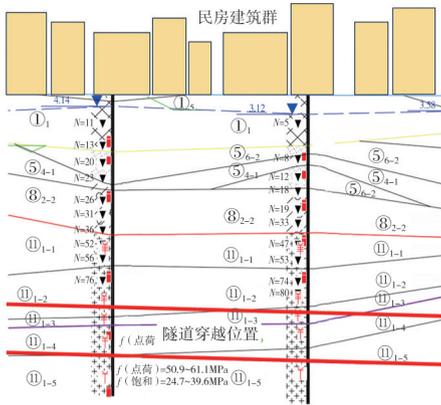


图 2 隧道穿越地层情况

Fig. 2 Condition of the strata which the tunnel passes

表面为自由边界以外,左右、前后、底部均约束法向位移。结合盾构实际施工参数设置情况,掌子面支护力在静止土压力的基础上提高 20kPa,注浆压力在开挖断面顶部静止土压力的基础上提高 10kPa,沿重力方向上施加。

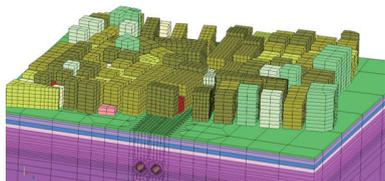


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model

2.2 参数取值

在 ZSoil 三维数值模型中,土体均采用莫尔-库伦模型,力学参数按地勘报告选取,如表 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

地层	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\nu$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
① <sub>1</sub> 素填土	10	0.30	12	8	17.1
⑤ <sub>4-1</sub> 粗砂	15	0.31	20	13	18.3
⑧ <sub>2-2</sub> 砾质黏性土	20	0.29	27	22	18.9
⑪ <sub>1-1</sub> 全风化花岗岩	50	0.27	26	24	19.1
⑪ <sub>1-2</sub> 强风化花岗岩	100	0.26	18	27	19.5
⑪ <sub>1-4</sub> 中等风化花岗岩	18 400	0.24	1 500	40	25.5

2.3 盾构穿越过程模拟

该模型顶推长度为 224m,每次开挖 1 环,盾构掘进施工模拟流程如下:①杀死对应分析步对应环的土,激活对应盾壳,同时激活掌子面前的开挖支护力;②顶推 6 环后,盾构尾部脱出,注销当前步 6 步前的盾壳,即盾构长度为 6×1.5m,激活注浆层和管片;③注浆压力伴随注浆层同时激活;④再次顶推 2 步后,注浆压力消散。盾构掘进过程模拟如图 4 所示。

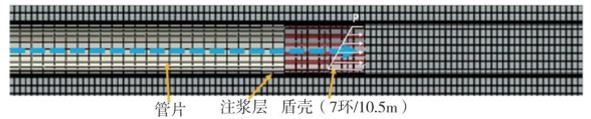


图 4 盾构掘进过程模拟

Fig. 4 Simulation of shield tunneling process

3 盾构穿越结果分析

对 ZSoil 三维数值模型进行计算,得到的模型整体变形云图如图 5 所示,在整个土体区域,隧道正上方附近的土体位移较大,其余地区土体位移不明显。

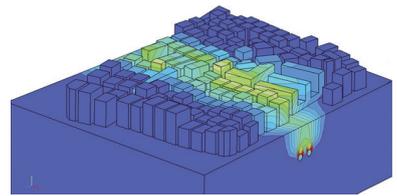


图 5 整体变形云图

Fig. 5 Cloud map of overall deformation

地表建筑中,新建隧道正上方的房屋建筑位移最大,为 6mm,两侧区域的民房位移依次减小,左右边界附近的房屋建筑位移不明显,地表建筑沉降量值在沿隧道轴线方向上未表现出明显差异,左右边界的房屋沉降为 0.8mm,民房沉降如图 6 所示。

地表处建筑物 2 个测点 JGC25-10, JGC25-11 的沉降发展历程如图 7 所示,在单线盾构穿越前,两测点沉降保持稳定,单线盾构穿越过程中,盾构引起

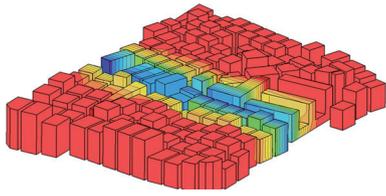


图6 民房沉降

Fig. 6 Settlement of private house

的沉降显著增大,并表现出差异沉降,在盾尾脱出,测点沉降继续发展,在盾尾脱出一定距离后趋于稳定。在第2条隧道开挖后,测点沉降在穿越过程中继续增大,最终分别达到6.1mm和3.5mm。根据GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》,该处民房的最大倾斜小于规范规定值。

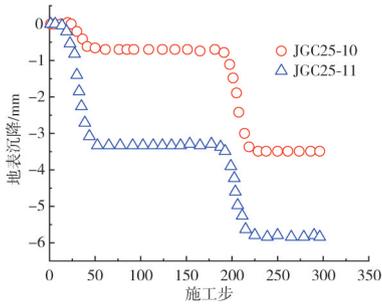


图7 建筑物典型测点沉降随施工步变化曲线

Fig. 7 Variation curve of settlement with construction step at typical building measurement points

模型中部截面地表处的沉降随盾构施工步发展如图8所示,在盾构到达前,地表沉降没有表现出发展趋势,在第60~230施工步内单线盾构开挖,地表沉降快速发展,最大沉降发展到3.5mm,由于地表刚体建筑在盾构隧道轴线两侧并非对称分布,在230~340施工步内第2条盾构开挖,地表沉降进一步增大,最大沉降发展到5.5mm,继续呈现非对称分布。沉降量为0的位置可认为无双线隧道穿越的影响。沉降槽沉降量的变化速率随与穿越中心距离的增大而先增大后减小。

通过地表处沉降槽变化的分析,将隧道施工对近距离工程影响程度大小进行分区,分区一般可划分为强影响区、弱影响区和无影响区。侯东祥<sup>[15]</sup>对既有隧道对地表沉降的影响开展了分区研究,结果表明,距穿越中心30m范围内为强影响区,30~45m范围内为弱影响区,45m以上为无影响区。

基于既有学者的地表影响范围分区研究<sup>[16-17]</sup>,本文对不同区域采取了不同的加固方案。对于强影响区,施工过程中在盾构机到达之前,需对该区域地层进行地面预注浆加固,提高地层的强度和稳定性。对于弱影响区,在盾构穿越过程中,当地表

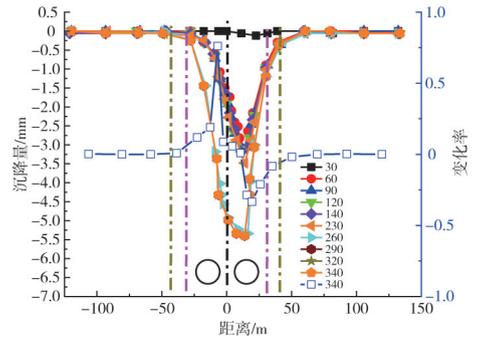


图8 地面沉降槽随施工步的发展

Fig. 8 Development of ground settlement tanks with construction steps

沉降变化较大时,应及时对该区域进行二次注浆,进一步加固地层。

#### 4 盾构穿越效果分析

基于本文的分区加固方案,对加固后的房屋沉降进行监测,选取监测点 JGC25-59, JGC44-02, JGC44-01, JGC45-02, JGC45-01, JGC35-05, JGC28-28 计算在双线盾构穿越时地表沉降槽的变化曲线,如图9所示。

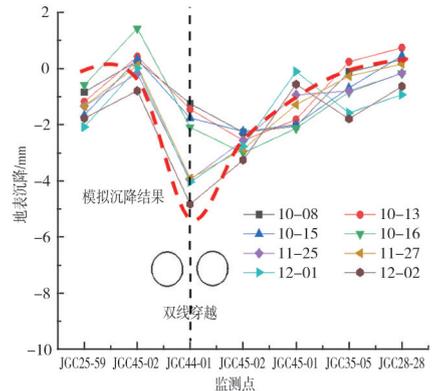


图9 施工槽变形实测数据与模拟对比

Fig. 9 Comparison of construction trench deformation measured data with simulation

施工监测数据中地表沉降随双线盾构的穿越也表现为非对称分布,与模拟结果相同,且在双线盾构中 JGC44-01 沉降最大,在12月2日达到5mm。沉降槽数据与模拟数据相近,证明了数值模型的有效性。

施工过程中对巴登村节点民房的地表沉降进行了较大范围的测量,测点布置如图1所示。本文将对代表性建筑的倾斜程度进行分析,选择64,84,69号建筑作为分析对象。

对于64号建筑,本文收集节点 JGC45-03 和 JGC45-04 的地表沉降,计算得到64号建筑的倾斜程度,绘制倾斜程度与时间关系曲线如图10所示。

在 2023 年 11 月 20 日前(右线穿越期),64 号建筑的倾斜度均小于  $5 \times 10^{-5}$ 。此时为右线穿越时期,对 64 号建筑影响不大,所以倾斜度极小。在 2023 年 11 月 20 日后,隧道左线开始穿越,64 号建筑的倾斜度开始增加,在 2023 年 12 月 4 日时,倾斜度达到了最大,为  $2 \times 10^{-4}$ 。模拟的地表沉降也与现场实测数据的发展趋势吻合,再次证明了数值模型的有效性。

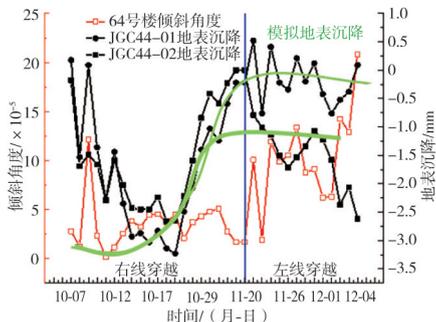


图 10 64 号建筑测点沉降、倾斜度随时间变化曲线  
 Fig. 10 Settlement and inclination curves over time at building 64 measurement points

对于 84 号建筑,本文收集节点 JGC44-01 和 JGC44-02 的地表沉降,计算得到 84 号建筑的倾斜程度,绘制倾斜程度与时间关系曲线如图 11 所示。在 2023 年 10 月 17 日前(右线穿越),84 号建筑的倾斜度从峰值的  $2.7 \times 10^{-4}$  降到倾斜度小于  $5 \times 10^{-5}$ 。说明隧道穿越右线对 84 号房屋的影响较大,在右线穿越后,采用注浆的方式控制了建筑物的倾斜角度,控制效果较好。在 2023 年 10 月 17 日后,84 号建筑的倾斜度均小于  $5 \times 10^{-5}$ ,说明左线穿越对 84 号建筑的影响较小。

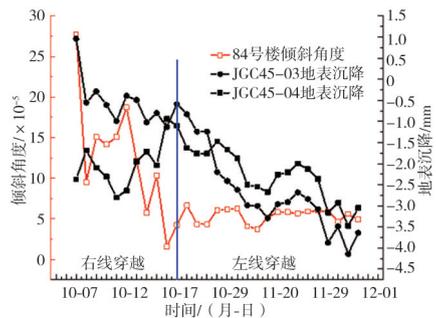


图 11 84 号楼测点沉降、倾斜度随时间变化曲线  
 Fig. 11 Settlement and inclination curves over time at building 84 measurement points

对于 69 号建筑,本文收集节点 JGC45-22 和 JGC45-21 的地表沉降,计算得到 69 号建筑的倾斜程度,绘制 69 号建筑倾斜程度与时间的关系曲线如图 12 所示。69 号建筑的倾斜度一直小于  $1 \times 10^{-4}$ ,说明隧道左线穿越和隧道右线穿越对 69 号建筑的

影响都较小。

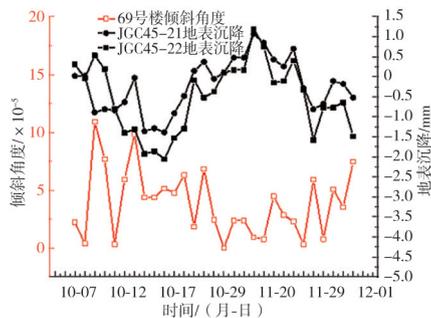


图 12 69 号建筑测点沉降、倾斜度随时间变化曲线  
 Fig. 12 Settlement and inclination curves over time at building 69 measurement points

在隧道掘进过程中,附近民房受掘进影响在 4 个角点产生沉降,导致民房底板发生变形,从而使民房出现破坏面,产生裂缝。如图 13 所示,假设民房底板为刚体时,民房底板将生成红色虚线所表示的破坏面。

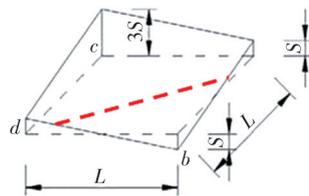


图 13 破坏面示意  
 Fig. 13 Damage surface

本文将以 64 号建筑的 4 个节点 JGC45-01, JGC45-02, JGC45-03, JGC45-04 为例,通过 Matlab 计算界面交线的方法,计算右线隧道掘进过程对房屋底板破坏面发展的影响,计算结果如图 14 所示。随着右线隧道的穿越,破坏面的法线逐渐指向盾构掘进位置的中点。

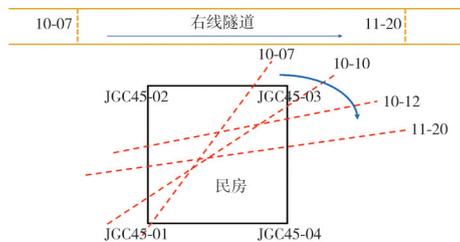


图 14 64 号建筑破坏面变化  
 Fig. 14 Changes in the damaged surface of building 64

然而对于老旧民房,其底板不应考虑为刚体,其在 4 个角点产生变形后会发生扭转,底板扭转对民房建筑的危害更加严重。本文基于 Matlab 对 64 号建筑底板边缘沉降数据进行拟合,获得软弱底板的变形曲面,并计算变形曲面的局部最大倾斜度如

图 15 所示。曲面的局部最大倾斜是逐渐增大的,因此在施工过程中更应注意房屋底板产生的扭转,应在设计、施工过程中考虑对房屋底板扭转的控制,以保证老旧民房的安全性。

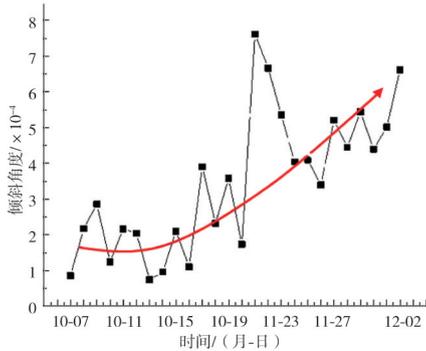


图 15 64 号建筑底板曲面局部最大倾斜度

Fig. 15 Maximum inclination of the curved floor slab of building 64

在本项目施工过程中采用了以下施工方案对民房扭转进行了控制:①采用加强型管片,管片增设注浆孔,盾构拱顶位于中风化岩层时,适当增加注浆量;②盾构在近距离下穿过程中,采用径向孔注入化学浆辅助措施自中盾注入土体,稳定掘进仓压,并及时填充盾体外侧空腔;③盾构下穿期间,对民房建筑结构进行自动化监测+人工复测;④施工场地内设置膨润土膨化池,并在台车膨润土罐储备足够膨润土,穿越期间不仅可进行渣土改良,如出现险情也可及时填仓,确保施工安全;⑤在地面设置拌浆区域,铺设 2 条注浆管路至左右线洞门口,设置三通,沿隧道布设至台车,台车上布置二次注浆机,再铺设管路至中盾位置,随时能启动二次注浆、径向孔注浆及螺旋机、土仓聚合物填充,保证在掘进过程对超出土位置和台车后二次注浆加固。

## 5 结语

依托深圳 11 号线二期某盾构区间穿越巴登村民房,建立了 ZSoil 三维数值模型,分析了密集民房区域建筑以及地层的整体变形云图,计算了地表沉降槽的变化曲线并与现场数据进行了对比,验证了有限元模型的有效性,探究了盾构穿越时民房建筑物的沉降规律,分析了测点沉降、地表沉降随施工步变化曲线,分析了代表性建筑物倾斜角度随左、右线隧道穿越的变化曲线,探讨了底板为刚体时民房破坏面随右线穿越的变化趋势,提出了预防老旧民房底板扭转的施工方案,得到以下结论。

1) 距穿越中心 30m 范围内为强影响区,30~45m 范围内为弱影响区,45m 以上为无影响区。对于强影响区,施工过程中在盾构机到达之前,需对

该区域地层进行地面预注浆加固,提高地层的强度和稳定性。对于弱影响区,在盾构穿越过程中,当地表沉降变化较大时,应及时对该区域进行二次注浆,进一步加固地层。

2) 房屋建筑物受先穿越隧道的影响较大,受后穿越的隧道影响较小,故 64 号建筑受左线影响较大,受右线影响较小;81 号建筑受右线影响较大,受左线影响较小。

3) 假设民房底板为刚体时,民房破坏面的法线随着右线隧道的穿越逐渐指向盾构掘进位置的中点。但对于老旧民房,房屋整体性差,曲面的局部最大倾斜随盾构掘进逐渐增大,应采取适当的施工方法,防止民房底板产生过度扭转。

## 参考文献:

- [1] 杨继全. 城轨车站段开挖对邻近高铁站建筑物的安全影响研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(3): 183-187.  
YANG J Q. Study on the safety impact of excavation of city railway station sections on the buildings of neighbouring high speed railway stations [J]. Railway construction technology, 2024(3): 183-187.
- [2] 葛照国. 大直径盾构隧道近接高架桩基群施工影响分区方法与分区控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 276-289.  
GE Z G. Research on construction impact zoning method and zoning control technology of large diameter shield tunnel near connecting elevated pile foundation group [J]. Modern tunneling technology, 2024, 61(3): 276-289.
- [3] 吴发展. 城市地铁侧穿立交桥桩基地面预加固技术[J]. 内蒙古科技与经济, 2023(11): 99-102.  
WU F Z. Pre-reinforcement technology of pile foundation ground of urban subway side crossing overpass [J]. Inner Mongolia science technology & economy, 2023(11): 99-102.
- [4] 黄兴行. 叠落盾构隧道开挖影响下邻近桥桩响应特征规律分析[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
HUANG X X. Characteristic law analysis of adjacent bridge pile response under the influence of stacked shield tunnel excavation [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [5] 韩悦. 盾构隧道下穿河道及侧穿桥桩方案设计[J]. 价值工程, 2023, 42(31): 108-110.  
HAN Y. Design of schemes for shield tunnel passing under river and side passing bridge piles [J]. Value engineering, 2023, 42(31): 108-110.
- [6] 周洁. 既有建筑对隧道开挖地表沉降的影响[J]. 交通世界, 2022(36): 111-113.  
ZHOU J. Influence of existing buildings on surface settlement of tunnel excavation [J]. TranspoWorld, 2022(36): 111-113.
- [7] 张昊然. 顶管隧道近接房屋及管线施工沉降与控制技术研究[J]. 北京: 北方工业大学, 2023.  
ZHANG H R. Research on settlement and control technology for construction of roof tube tunnel close to houses and pipelines [J]. Beijing: North China University of Technology, 2023.

- [ 8 ] 屈浩,张波,张振义,等. 盾构隧道侧穿引发砌体建筑物变形损伤实例研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(3):119-130.  
QU H, ZHANG B, ZHANG Z Y, et al. A case study on deformation damage of masonry buildings triggered by side penetration of a shield tunnel[J]. Modern tunneling technology, 2024,61(3):119-130.
- [ 9 ] 梁景一,王建. 盾构近距离穿越房屋群施工技术研究[J]. 江苏科技信息,2023,40(2):56-59.  
LIANG J Y, WANG J. Research on construction technology of shield structure crossing housing complex in close proximity[J]. Jiangsu science and technology information,2023,40(2):56-59.
- [ 10 ] 高建成. 盾构近距离穿越高层桩基础居民楼的影响分析及施工技术措施[J]. 建材与装饰,2016(12):270-271.  
GAO J C. Influence analysis and construction technical measures of shield passing through high-rise pile foundation residential building at close range[J]. Construction materials & decoration, 2016(12):270-271.
- [ 11 ] 王家祥. 昆明地铁1号线盾构隧道穿越密集居民区施工控制技术研究[J]. 中外公路,2018,38(1):225-229.  
WANG J X. Research on construction control technology of shield tunnel through dense residential area of Kunming Metro Line 1 [J]. Journal of China & foreign highway, 2018, 38(1): 225-229.
- [ 12 ] 刺宝成,王继峰,孟祥丰,等. 地铁盾构施工中上覆土层及棚户区沉降控制研究[J]. 交通世界,2020(28):19-20,22.  
LA B C, WANG J F, MENG X F, et al. Study on settlement control of overlying soil and shanty towns in subway shield construction[J]. TranspoWorld,2020(28):19-20,22.
- [ 13 ] 陈健,苏秀婷,黄习习,等. 大直径泥水盾构穿越敏感环境变形控制材料研发及控制参数研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(4):256-264.  
CHEN J, SU X T, HUANG X X, et al. Research and development of deformation control materials and control parameters for large diameter mud-water shield traversing sensitive environments[J]. Modern tunneling technology, 2022, 59(4):256-264.
- [ 14 ] 吴木生. 地铁隧道盾构施工中沉降监测研究[J]. 中国高新技术,2023(22):71-73.  
WU M S. Research on settlement monitoring during shield tunneling of subway tunnels[J]. China high-tech, 2023(22): 71-73.
- [ 15 ] 侯东祥. 盾构掘进对浅基础建筑物的扰动及影响分区研究——以上海典型软土区为例[D]. 南宁:广西大学,2023.  
HOU D X. Study on disturbance and impact zoning of shield excavation on shallow foundation buildings [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [ 16 ] 杨剑,赵志坚,彭启辉,等. 上软下硬地层袖阀管注浆对盾构下穿民房扰动控制分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(1):100-106.  
YANG J, ZHAO Z J, PENG Q H, et al. Analysis on disturbance control effect of sleeve-valve-pipe grouting on shield tunneling crossing civil buildings in upper-soft and lower-hard strata[J]. Construction technology, 2024,53(1):100-106.
- [ 17 ] 刘波,李焱,韩彦辉. 城市地下空间盾构隧道穿越工程研究综述[J]. 施工技术(中英文),2024,53(17):35-46.  
LIU B, LI T, HAN Y H. Review of research on shield tunnel crossing engineering in urban underground spaces [J]. Construction technology, 2024,53(17):35-46.