

# 复杂地质条件下盾构侧穿老旧建筑物加固技术研究

刘柄呈<sup>1</sup> 杨双锁<sup>1</sup> 李彦斌<sup>1</sup> 闫潇<sup>1</sup> 姜山<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学矿业工程学院, 030024, 太原; 2. 中铁三局集团有限公司, 030001, 太原//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 城市中的老旧建筑承受进一步变形和不均匀沉降的能力较差,在盾构侧穿施工时存在安全隐患,特别是地质条件不佳的情况下施工风险极大,因此必须采用一定的加固措施保证建筑物的安全。以太原地铁2号线牛站西巷区间盾构侧穿公交公司家属楼工程为例,对盾构近距离侧穿建筑物引起的沉降及锚杆桩的加固作用进行了数值模拟研究。结果表明:双线盾构隧道施工时,建筑物沉降和变形主要是邻近隧道开挖造成的;在施工条件受限的情况下,斜打锚杆桩能够明显降低双线盾构隧道施工中邻近隧道施工对建筑物的扰动;锚杆桩布设应靠近隧道,保持与地面较大夹角,这样才能充分发挥锚杆桩的加固作用。

**关键词** 地铁;盾构隧道;侧穿建筑物;复杂地质;锚杆桩

**中图分类号** TU714;U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.09.032

## Reinforcing Technique for Shield Machine Passing Alongside Old Buildings in Complex Geological Conditions

LIU Bingcheng, YANG Shuangshuo, LI Yanbin, YAN Xiao, JIANG Shan

**Abstract** Old buildings in the city are poor in resisting further deformation and uneven settlement, and there would be potential safety hazards when the shield machine passes alongside them, causing especially high construction risk in adverse geological conditions, so reinforcing measures must be taken to ensure the safety of buildings. Taking the engineering of shield machine passing alongside bus company family building at Niuzhan West Lane interval of Taiyuan Metro Line 2, the settlement caused by the excavation passing alongside the old building at close range and the reinforcing effect of anchor piles are studied with numerical simulation. The results show that settlement and deformation of the building are mainly caused by the excavation of adjacent tunnel when the double-line shield tunnel is constructed; the oblique anchor piles can significantly reduce the disturbance to old buildings caused by excavation of adjacent tunnel in the double-line shield tunnel construction; in order to achieve good reinforcing effect, anchor piles should be set close to the tunnel and keep a large angle from the ground.

**Key words** metro; shield tunnel; passing alongside buildings; complex geological condition; anchor pile

**First-author's address** College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, 030024, Taiyuan, China

采用盾构法在城市中修建地铁,不可避免地要侧穿老旧建筑物。老旧建筑物基础薄弱,自身结构刚度小,抵抗地基不均匀沉降的能力差,是盾构施工中的重大风险源。

文献[1]指出,在软弱地层中开挖双线盾构隧道,先开挖受房屋荷载作用显著的一侧有利于控制不均匀沉降<sup>[1]</sup>;文献[2]认为,房屋上部结构对房屋的不均匀沉降有一定的抑制作用;文献[3]对邻近建筑物盾构施工造成的横向地表沉降曲线进行了预测分析;文献[1]认为,隔离桩桩间距对建筑物沉降影响的重要程度大于桩长和桩径;文献[5]认为,浅基础的沉降形式与隧道的偏心比有关。为抵抗建筑物基础的不均匀沉降,需要对建筑物采取加固措施。传统隔离桩在隧道离建筑物距离近的情况下无法施工,且大直径隔离桩施工本身就会造成一定的沉降<sup>[6]</sup>,尤其在含砂量大的地层中,过大的桩间距不易形成土拱效应<sup>[7]</sup>。由于施工条件不佳,单纯地面预注浆加固也不能满足安全要求。针对以上情况,提出了在侧穿范围内打设复合锚杆桩的预加固技术。

## 1 地表沉降机理分析及加固技术

### 1.1 沉降机理分析

隧道开挖过程中,从隧道开挖处到地表会形成一个沉降槽。地表沉降是判断建筑物沉降的一个重要因素。对于双线盾构隧道引发的地表沉降,其沉降形式和大小受隧道断面和相对位置影响较大<sup>[8]</sup>,可使用叠加原理得到地表沉降变化曲线<sup>[9-10]</sup>,其计算方法为:

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

式中:

$S_{\max}$ ——隧道轴线上最大地面沉降量;

$i$ ——地面沉降槽宽度系数;

$V_{\text{loss}}$ ——单位长度土体损失量,  $V_{\text{loss}} = \pi R^2 \eta$ , 其中,  $R$  为隧道开挖半径,  $\eta$  为土体损失率。

$$S(x, z) = \frac{S_{\max, f}}{(1 - z/h)^n} \exp\left[\frac{-(x - 0.5L)^2}{2i_f^2(1 - z/h)^{2n}}\right] + \frac{S_{\max, l}}{(1 - z/h)^n} \exp\left[\frac{-(x + 0.5L)^2}{2i_l^2(1 - z/h)^{2n}}\right] \quad (2)$$

式中:

$S(x, z)$ ——坐标  $x, z$  位置处的地面沉降量;

$x$ ——距隧道轴线横向水平距离;

$z$ ——离地面的竖向距离, 以向下为正;

$n$ ——与隧道半径和土质条件有关的影响系数;

$L$ ——两隧道中心间距;

$h$ ——隧道轴线至地面距离;

$S_{\max, f}, S_{\max, l}$ ——分别为先行隧道及后行隧道的轴线上最大地面沉降量;

$i_f, i_l$ ——分别为先行隧道及后行隧道的地面沉降槽宽度系数。

当隧道侧穿范围内存在建筑物时, 地层沉降受其荷载影响会发生改变。当建筑物与隧道水平距离  $d$  处于  $0 \leq d < D$  ( $D$  为隧道直径) 范围时, 隧道开挖对建筑物的影响较大<sup>[11]</sup>, 如图 1 所示。当隧道上方含杂填土较厚时, 隧道上方土体成拱效应弱<sup>[12]</sup>; 同时, 地下水位较高、含砂量大时, 土的自稳能力差<sup>[13]</sup>, 也会使沉降进一步增大。

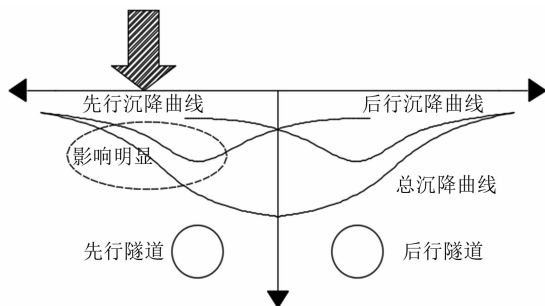


图 1 地表沉降机理示意图

## 1.2 加固技术及其机理分析

加固时使用  $\phi 150 \text{ mm} @ 300 \text{ mm}$  双排复合锚杆桩。锚杆桩施工工艺流程为: 施工准备→放线定位→钻机对准桩孔→成孔→清孔、护孔→锚杆安装→

孔内一次注浆→孔内二次注浆。

地表沉降槽的形成与地层内部滑移区密切相关。地层滑移线是地表和隧道开挖部分相连的最小沉降等值线。将锚杆桩打入受施工扰动明显的滑移区以外的区域, 可以保证锚杆桩的稳定, 并使其承受一部分上部土体和建筑传来的荷载, 降低因隧道开挖而造成的地表及建筑物沉降, 实现良好的加固作用。锚杆桩支护作用机理如图 2 所示。

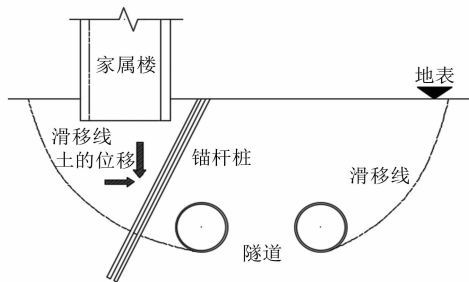


图 2 锚杆桩支护作用机理

管片在盾尾拼装后, 为了减小由于刀盘超挖与管片之间存在的间隙造成的地层沉降, 应及时在盾尾进行同步注浆和二次注浆, 并严格控制注浆材料和注浆压力等参数。注浆后管片与地层间形成的浆液和土的混合物可以视作均质弹性体, 即等代层, 如图 3 所示。

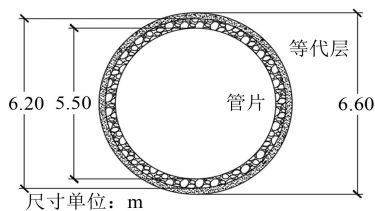


图 3 等代层示意图

## 2 计算模型

### 2.1 工程条件

太原地铁 2 号线双塔西街站一大南门站区间, 从双塔西街站北端引出后, 沿牛站西巷路自南向北敷设, 并侧穿公交公司家属楼。结构外墙与隧道结构最小净距约 0.6 m, 处于隧道强烈影响区。家属楼沿隧道方向长度较长, 与隧道推进方向呈现微小角度, 因此在施工中不仅受扰动的时间长, 而且建筑不均匀沉降现象更为显著。建筑和隧道相对位置如图 4 所示。

家属楼基础形式为墙下条形基础。由于建筑物建成已近 40 年, 墙体砖局部风化、砂浆粉化、个别墙体出现斜裂缝, 因此, 盾构侧穿时, 家属楼抵抗施

工扰动的能力较差。

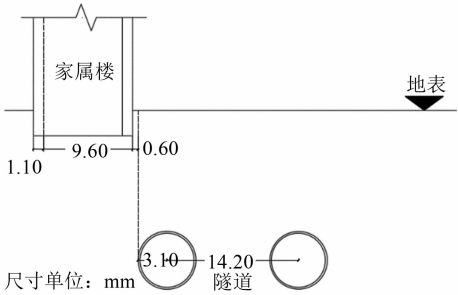


图 4 隧道与建筑物相对位置

侧穿区间范围内杂填土厚,地下水位线较高,土体含水量较大,拱顶夹杂砂性土。由于土层的自身结构特征,在盾构掘进时极易发生危险。

2.2 数值计算模型建立

为减少边界条件对计算结果的影响,模型长宽高取 80 m×60 m×30 m。模型底面和四周固定,上表面为自由面,X 轴与隧道轴线方向正交,Y 轴与隧道轴线方向平行,Z 轴为竖直方向。地下水位深度为 3.5 m。隧道开挖直径为 6.2 m。管片采用 C55 混凝土,厚度为 0.35 m,宽度为 1.20 m。模型中用等代层弹性模量为 1.2 MPa,泊松比为 0.2,注浆压力 0.3 MPa。基础为条形基础,采用 C25 混凝土,不考虑上部结构对土体位移的约束作用。锚杆桩采用 C35 混凝土,内设 q235 钢筋。计算时以开挖两环(2.4 m)并施加壳单元支护和同步注浆为一次施工步骤。根据计算结果在条形基础上施加 455 kN/m 的荷载。数值计算模型如图 5 所示。为研究不同角度的锚杆桩对土体的加固作用,设置了三种锚杆桩进行研究,与地面夹角分别为 30°、45°、60°,如图 6 所示。

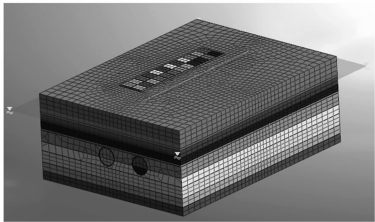


图 5 太原地铁 2 号线盾构隧道侧穿建筑物数值计算模型

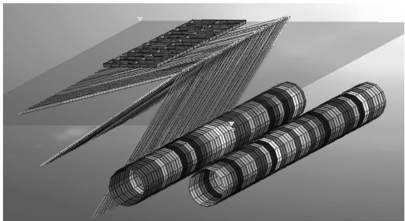


图 6 土体加固用锚杆桩模型示意图

为减少隧道开挖对建筑物沉降的影响,采用左线通过后再开挖右线的施工方案<sup>[1,13]</sup>。根据工程实际地质条件设定模型土层厚度及物理力学性质,如表 1 所示。

表 1 太原地铁 2 号线盾构隧道侧穿建筑物位置  
土层物理力学参数

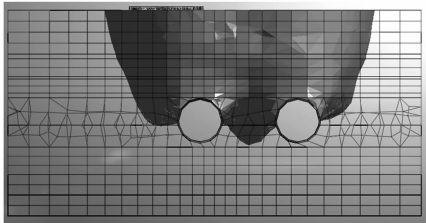
土层	厚度/m	重度/ (g/cm <sup>3</sup> )	内摩 擦角/(°)	粘聚 力/kPa	弹性模 量/MPa	泊松 比
杂填土	6.40	19.2	6.2	14.5	10.0	0.36
粉细砂	0.68	20.2	26.0	2.0	22.0	0.26
粘质粉土 1	2.60	19.8	20.5	12.0	10.0	0.32
粉质黏土	0.35	19.8	17.0	30.5	13.0	0.32
中砂	2.05	21.1	28.0	2.0	25.0	0.23
粘质粉土 2	0.68	19.8	21.0	21.5	16.4	0.3
粉质黏土	4.00	19.8	17.0	30.5	13.0	0.32
粉细砂	3.20	20.2	26.0	2.0	22.0	0.26
中砂	4.00	21.1	28.0	2.0	25.0	0.23
粗砂	3.00	22.0	32.5	2.0	29.0	0.20
圆砾	3.05	21.3	33.5	2.0	27.6	0.20

3 数值模拟结果分析

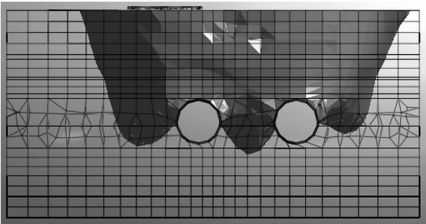
3.1 加固效果分析

建筑物建成后发生的变形包括结构自重作用下的固结沉降、附近管隧掘进引起的变形等。建筑自重沉降以均匀沉降为主,且主要发生在建筑建成初期,所以主要考虑盾构开挖引起的变形。

图 7 为无支护时双线贯通后模型内部的滑移区域。由图 7 可见,左线滑移区要大于右线滑移区。根据上述分析,应保证锚杆桩有足够的长度使其延伸到稳定土层之内。



a) 滑移大于 7 m 区域



b) 滑移大于 5 m 区域

图 7 无支护时双线贯通后模型内部的滑移区域

在不设锚杆桩时,对开挖造成的建筑物沉降进行计算。模型监测节点如图 8 所示。

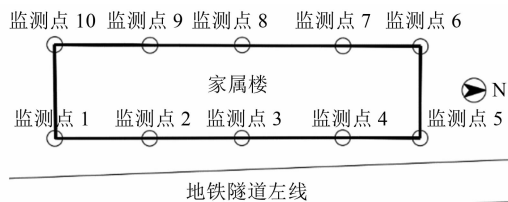


图8 数值计算模型监测点布设示意图

不采取加固措施时,双线贯通后建筑物沉降如图9~10所示。由图9可见,建筑物长边发生了不均匀沉降,沉降最大的点在邻近隧道一边、靠近盾构后到达的一侧,沉降值为40.85 mm;沉降最小的点在远离隧道一边、盾构先到达一侧的建筑物拐角,沉降值为13.01 mm。说明隧道开挖过程中建筑物产生了剪切扭转变形,这对结构的稳定是极为不利的。由图10可见,建筑物短边发生了沉降,先开挖一侧的沉降要小于后开挖一侧的沉降,建筑物倾向隧道一侧。总体来说建筑物沿对角线倾斜。

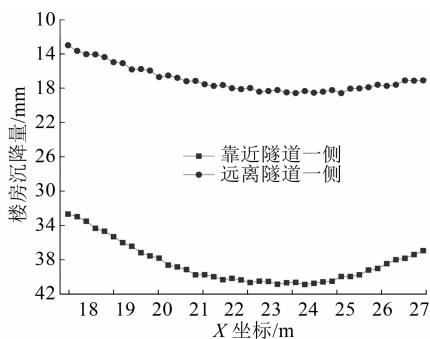


图9 不采取加固措施时双线贯通后建筑物长边沉降

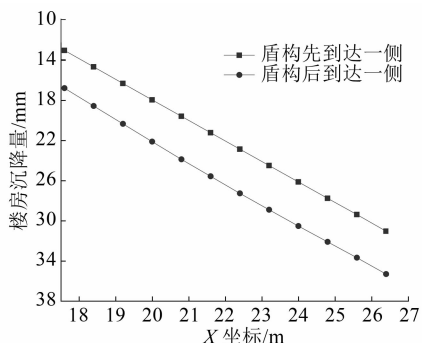


图10 不采取加固措施时双线贯通后建筑物短边沉降

不同开挖步骤下各监测点的建筑物沉降监测数据如图11所示。由图11可见:左线贯通后,建筑物靠近隧道一侧的沉降占到了总沉降的80%左右;右线贯通后,建筑物靠近隧道一侧的沉降受到明显的影响,而远离隧道一侧沉降受右线影响不明显,建筑物的倾斜加剧。左线开挖对建筑物沉降的影

响要远大于右线,因此要重点考虑对左线的支护。双线贯通后,各监测点的建筑物沉降量均达到最大值,但建筑物局部倾斜率最大时刻发生在左线开挖到648 m处和双线隧道贯通后,此时建筑物产生的剪切扭转变形对结构稳定性更为不利。因此,除双线贯通后建筑物的最大沉降量和局部倾斜之外,应重点控制左线开挖过程中建筑物的倾斜。根据图10计算的建筑的局部倾斜率最大值为236‰。

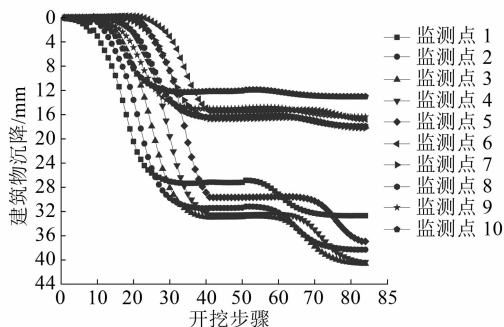


图11 不同开挖步骤下各监测点的建筑物沉降监测数据

根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》<sup>[14]</sup>和 DBJ 04/T 258—2016《建筑地基基础勘察设计规范》<sup>[15]</sup>的相关规定,建筑地基变形允许值为30 mm,建筑结构基础的局部倾斜允许值为20‰。以上计算得到的建筑物变形已超过规范规定的变形允许值。

将与地面夹角为60°的双排复合锚杆桩单元激活,计算在锚杆桩支撑下建筑物的沉降量,结果如图12所示。由图12可见:双线贯通后,建筑物沉降得到了有效的抑制;建筑物的沉降规律没有发生改变,仍沿对角线方向倾斜;建筑物最大沉降为15.56 mm,最大隆起为4.43 mm。推断这是由于锚杆桩拦阻土体下沉,斜打锚杆桩起到了有效的加固作用。建筑物基础有一定刚度,靠近隧道一侧沉降会使远离隧道一侧隆起。

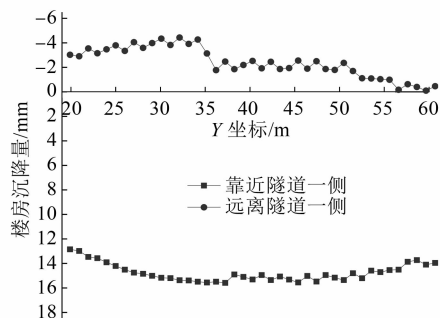


图12 与地面夹角为60°的双排复合锚杆桩单元激活后建筑物长边沉降

与地面夹角为 60° 的双排复合锚杆桩单元激活时各监测点沉降如图 13 所示。由图 13 可见:锚杆桩的加固作用主要体现在降低左线开挖的影响,因而右线贯通对沉降影响占比增加;锚杆桩对右线开挖造成沉降的控制作用较小;建筑物局部倾斜率最大值为 2.01‰,锚杆桩有效地降低了建筑物的局部倾斜率。

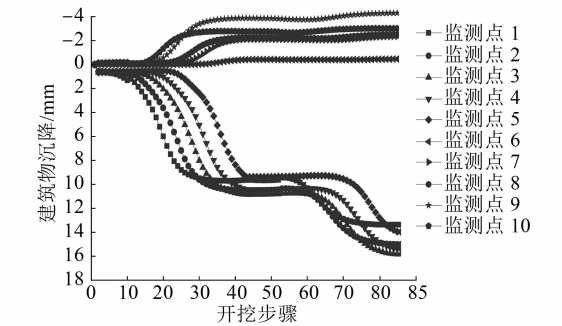


图 13 与地面夹角为 60° 的双排复合锚杆桩单元激活后监测点沉降值

3.2 锚杆桩受力分析

锚杆桩的变形仿真模拟计算结果如图 14 所示。由图 14 可见:锚杆桩上段下沉的过程中轻微变形,证明上段锚杆桩有限制土体位移的作用,但加固作用有限;锚杆桩中段变形明显,建筑沉降最大处对应下方的锚杆桩变形并非最大,变形最大处发生在锚杆桩中段靠近隧道的部分,证明这一部分起到了很好的加固作用;锚杆桩下段位移小且有隆起趋势,证明锚杆桩下段对锚杆桩起固定作用。这与传统隔离桩的加固原理有明显不同。

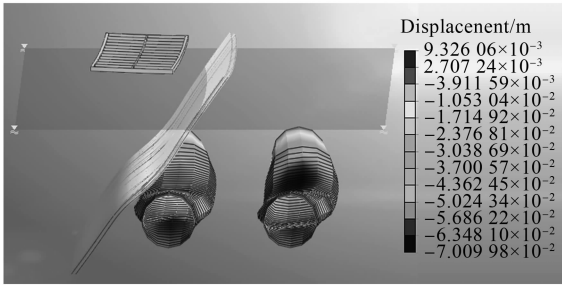


图 14 锚杆桩变形仿真模拟计算结果(放大)

与地面夹角为 45° 和 30° 的双排复合锚杆桩单元分别激活时各监测点沉降如图 15 所示。由图 15 可见:随锚杆桩与地面夹角的减小,锚杆桩加固作用逐渐减小;夹角为 45° 的情况下,建筑物靠近隧道一侧沉降与无支护时相比有所降低,远离隧道的一侧出现了轻微的隆起,锚杆桩有一定加固效果但作

用明显降低;夹角为 30° 的情况下,锚杆桩失去减小建筑物沉降的作用。

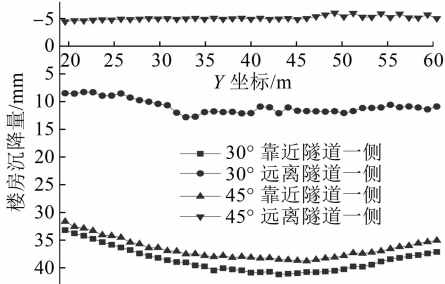


图 15 锚杆桩与地面夹角分别为 45° 和 30° 时的建筑物沉降

隧道开挖时,土体位移可以分解为竖直和水平两个方向。锚杆桩应与地面角度尽可能大,使其不直接承受上部土体的竖直荷载,而是以限制土体水平位移为主,充分发挥土体颗粒间摩擦力和粘聚力产生的自稳作用;同时较大的夹角可以使锚杆桩下段更好地延伸到滑移不明显的土层内,起到更好的稳固作用。

4 实际应用及结果分析

在太原地铁 2 号线侧穿家属楼区间范围内,对本文前述加固方案进行了实际应用。为在避开隧道的同时又能充分发挥锚杆桩的加固作用,实际施工中锚杆桩与地面夹角取 60°。锚杆桩采用 3 根  $\phi 25$  mm 钢筋,采用钢筋接驳器连接,按间距 1 m 安装钢筋定位支架,以使钢筋笼保持直立并束在桩孔中心,定位支架与钢筋采用焊接固定。家属楼实测点布置如图 16 所示。图 17 和图 18 分别为楼房东侧(靠近隧道一侧)和西侧(远离隧道一侧)沉降的实际监测数据。

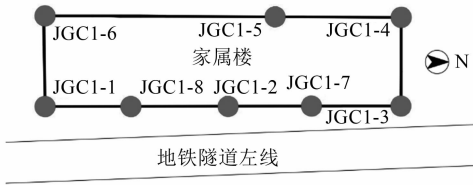


图 16 太原地铁 2 号线侧穿家属楼实测点布置示意图

由图 17 可见:盾构机抵达之前 JGC3-01、JGC3-02、JGC3-03、JGC3-07、JGC3-08 监测点轻微沉降,但变化不大;随着盾构机由南向北推进,盾构机到达后,沿推进方向布置的监测点的沉降值开始依次增加;左线盾构机通过后,沉降有一段相对稳定期;右线开挖后,沉降继续增大,最终左右线分别引起的沉降相差不大,这是由于锚杆桩起到了减小沉降的

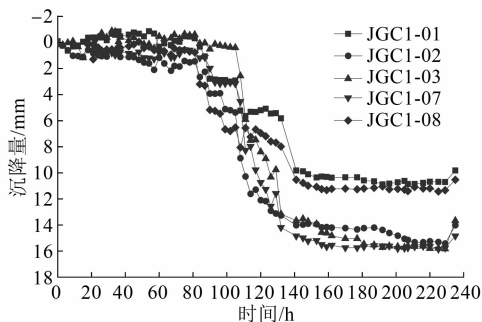


图 17 太原地铁 2 号线侧穿家属楼楼房东侧沉降实测值

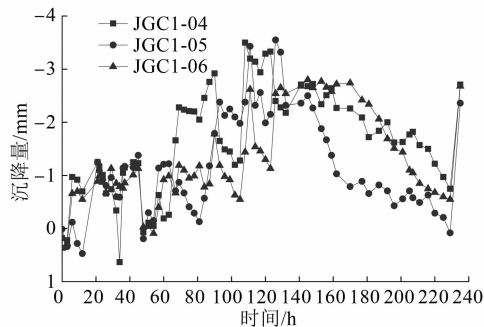


图 18 太原地铁 2 号线侧穿家属楼楼房西侧沉降实测值

作用。盾构机双线通过后,从最终稳定沉降量可以看出,JGC3-01 监测点的沉降量最小,JGC3-03 和 JGC3-07 监测点的沉降量最大,建筑物整体向东北方向倾斜。与实测结果相比,JGC3-03 监测点处的沉降数值计算结果稍小。从模型中隧道和地层变形来看,这是由于建筑物 Y 方向尺寸大,模型受边界条件的影响造成的;但两者变形趋势一致,计算结果可靠。

由图 18 可见:远离隧道一侧的监测点 JGC3-04、JGC3-05 和 JGC3-06 的隆起值在盾构机抵达之前和侧穿前期有所增加,在侧穿后期和离开后略有减小,但仍为隆起状态且前后差值始终没有超过 4 mm。可以认为,楼房西侧受盾构施工的影响较小。在盾构通过后,JGC3-04、JGC3-05 和 JGC3-06 监测点的最终沉降量相差不大,证明计算结果可靠。

## 5 结论

1) 双线隧道开挖时,建筑物的最大沉降发生在双线贯通后,但建筑物局部倾斜率的最大值也可能发生在其邻近隧道的开挖过程中。

2) 双线盾构隧道侧穿建筑物时,建筑物的沉降主要是由其邻近隧道的开挖造成的,应重点对邻

近隧道开挖造成的土层扰动进行控制。

3) 与传统隔离桩不同,锚杆桩受力变形部分主要发生在中部靠近隧道的部分,因此其加固作用主要体现在降低与建筑物相邻隧道盾构施工造成的沉降,对相隔隧道盾构施工造成的扰动加固作用较小。

4) 在施工场地受限的情况下,锚杆桩对建筑物能起到良好的加固作用。锚杆桩应在靠近隧道且尽量与地面夹角大的位置打设,才能充分发挥其加固作用。

## 参考文献

- [1] 鲁茜茜,赛蕴奇,王先明,等. 软弱地层盾构隧道侧穿房屋基础沉降特性分析[J]. 铁道标准设计,2019(12): 118.
- [2] 刘雪骄. 软土地层盾构穿越不同基础形式建筑物沉降分析[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [3] 丁智. 盾构隧道掘进对邻近建筑物影响及变形预测研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [4] 赵景阳,杨双锁,徐婧,等. 盾构隧道近距离通过高层建筑物时隔离桩参数优化设计[J]. 太原理工大学学报,2017(1): 62.
- [5] 车风,宫全美. 盾构隧道下穿引起浅基础变形的有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2015(6): 74.
- [6] 吴昌将,张子新,丁文其,等. 盾构侧穿邻近古建筑的施工影响分析及保护措施加固效果的研究[J]. 岩土工程学报,2012(1): 158.
- [7] 彭帅,汪华斌,周博,等. 基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟[J]. 地质通报,2013(12): 1993.
- [8] 糜瑞杰,杨双锁,鲍飞翔,等. 双线盾构隧道断面及相对空间位置对地表沉降的影响[J]. 太原理工大学学报,2018(3): 428.
- [9] WEI G. Prediction of soil settlement caused by double-line parallel shield tunnel construction[J]. Disaster Advances, 2013, 6(6): 23-27.
- [10] 陈春来,赵城丽,魏纲,等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学,2014(8): 2212.
- [11] 漆泰岳. 地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J]. 岩土工程学报,2012(7): 1283.
- [12] 邓崑,潘建平,曾雅钰琼. 砂黏复合地层盾构隧道施工地表横向沉降分析[J]. 科学技术与工程. 2019(18): 271.
- [13] 王呼佳,邹育,刘川昆,等. 淤泥质土及粉细砂地层盾构施工地表沉降监测分析[J]. 城市轨道交通研究,2019(5): 66.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [15] 山西省住房和城乡建设厅. 建筑地基基础勘察设计规范:DBJ 04/T 258—2016[S]. 北京:中国建材工业出版社,2016.

(收稿日期:2019-10-28)