

# 考虑双线掘进和建筑结构耦合作用时地铁盾构下穿建筑物施工的地面沉降规律<sup>\*</sup>

王鹏飞<sup>1</sup> 邹利<sup>2</sup> 乙珂豪<sup>3</sup> 孙萌萌<sup>3</sup> 吴静红<sup>3</sup>

(1. 昆山市建设工程质量检测中心, 215300, 苏州; 2. 昆山市住房和城乡建设局, 215300, 苏州;  
3. 苏州科技大学土木工程学院, 215011, 苏州)

**摘要** [目的]城市软土地层中双线隧道下穿建筑结构引起的地面变形较为复杂,有必要研究双线隧道和上部建筑物的耦合作用对地面变形的影响。[方法]依托苏州轨道交通11号线工程的监测数据,利用 PLAXIS 3D 软件,采用小应变本构模型建立三维隧道数值模型,研究双线隧道盾构施工时的地面沉降规律,进而讨论双线隧道及建筑物参数的影响作用。在此基础上运用全局敏感性分析法对多个影响参数进行敏感性评估。[结果及结论]下穿建筑的双线隧道地面沉降曲线呈现近似对称的 U 形分布,最大沉降位置向先行隧道偏移。与先行隧道相比,后建隧道施工对地面沉降的影响较小。建筑结构所在地面呈现下凹式挠曲变形。建筑物自重、长宽比同地面沉降呈正相关,隧道埋深、间距、施工步距、建筑物刚度同地面沉降呈负相关。

**关键词** 城市轨道交通; 双线隧道; 引力搜索算法; 敏感性分析; 地面沉降

**中图分类号** TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.027

## Land Subsidence Law of Subway Shield Tunnel Construction Under-Crossing Buildings Considering the Coupling Effect of Double-Line Tunneling and Building Structure

WANG Pengfei<sup>1</sup>, ZOU Li<sup>2</sup>, YI Kehao<sup>3</sup>, SUN Mengmeng<sup>3</sup>, WU Jinghong<sup>3</sup>

(1. Kunshan Construction Engineering Quality Inspection Center, 215300, Suzhou, China; 2. Kunshan Housing and Urban Rural Development Bureau, 215300, Suzhou, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 215011, Suzhou, China)

**Abstract** [Objective] Ground deformation caused by double-line tunnels under-crossing building structures in urban soft soil stratum is relatively complex. It is necessary to study the influence of the coupling effect of double-line tunnel and the

upper buildings on ground deformation. [Method] Relying on the monitoring data of Suzhou Rail Transit Line 11 project, a 3D tunnel numerical model using the small-strain intrinsic model with PLAXIS 3D software is established, and the land subsidence pattern during the double-line tunnel shield construction is studied. Then, the influence of the double-line tunnel and building parameters is discussed. On this basis, the global sensitivity analysis method is used to evaluate the sensitivity of multiple influencing parameters. [Result & Conclusion] Land subsidence curves of the double-line tunnels under-crossing buildings show an approximately symmetrical U-shaped distribution, with the maximum settlement position leaning towards the advancing tunnel. Compared with the advancing tunnel, the construction of the following tunnels has less impact on land subsidence. The ground where the building structure is located presents a concave flexural deformation. The building's dead-weight and aspect ratio are positively correlated with land subsidence, while the tunnel depth, spacing, construction step, and building stiffness are negatively correlated with land subsidence.

**Key words** urban rail transit; double-line tunnel; GSA (gravity searching analysis); sensitivity analysis; land subsidence

软土地层中地铁盾构施工不仅会造成周围地层的扰动,还会危及邻近建筑物,使其产生不均匀沉降<sup>[1]</sup>。为保证双线隧道盾构施工下穿建筑物过程中地面变形的稳定,应更多地考虑隧道与上部建筑结构的耦合作用<sup>[2]</sup>,对相关参数进行评估,进而合理设计。本文考虑双线掘进和建筑结构的耦合作用<sup>[3]</sup>,建立三维有限元模型,分析隧道和建筑物的主要影响参数,通过 GSA(全局敏感性分析)进行

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41907232,42202306);江苏省自然科学基金项目(BK20200993);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22\_1590)

参数敏感性分析,进而总结了双线隧道下穿建筑时引起的地面沉降变形规律,以期为软土地区邻近建筑物双线隧道施工及设计提供参考。

## 1 双线隧道下穿建筑物的监测

### 1.1 工程概况

苏州轨道交通 11 号线连接苏州市和上海市。本文选取玉山广场站—昆山城市广场站区间(以下简称“玉昆区间”)为研究对象,该段施工时间为 2019 年 6 月—2022 年 10 月,全长约 3 km。隧道采用盾构法施工,玉昆区间隧道间距为 11.6~14.3 m,埋深为 13.3 m~18.0 m,隧道截面为圆形,直径为 6.60 m,盾构片厚度为 350 mm。左线掘进 200 环后,右侧开始盾构掘进施工。长城宾馆全长 50.0 m,最大宽度为 26.0 m,高度为 25.5 m,无地下室,6 层框架结构,采用桩基础,桩长 12.5 m。长城宾馆在隧道正上方,桩底与右线隧道垂直距离仅为 4.0 m。

### 1.2 工程地质条件

苏州地区广泛分布第四纪松散沉积物,玉昆区间施工范围内软土层厚度为 3.0~16.8 m,初见水位埋深为 1.0~2.0 m,地层分布见图 1。盾构穿越地层主要有杂填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉土夹粉砂、粉质黏土夹粉砂、粉质黏土夹粉土、粉砂。

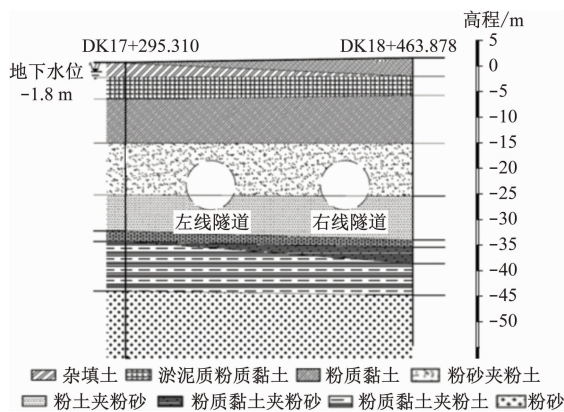
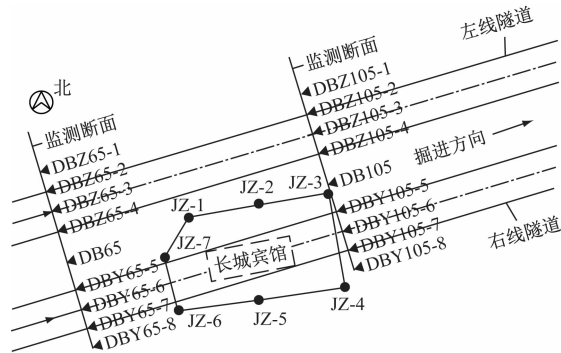


图 1 玉昆区间隧道剖面地质示意图

Fig. 1 Geological tunnel section diagram of Yu-Kun interval

### 1.3 地面监测点布置

为了掌握盾构施工过程中建筑物沉降及周边地面沉降的变化规律,本研究地面沉降监测点布置如图 2 所示。结合图 2 可知:整个区间每隔 30 环布置 1 个监测断面;每个监测断面上,2 条隧道轴线中间布置 1 个地面沉降监测点,左右两侧各布置 4 个地面沉降监测点,即每个监测断面上共有 9 个监测点。开挖面距监测断面 30 环时开始进行监测。



注: DBZ65-1 等代表左线隧道地面沉降监测点;DBY65-5 等代表右线隧道地面沉降监测点;JZ-1 等代表长城宾馆建筑角点的地面沉降监测点;DB65、DB105 为左右线隧道中间的地面沉降监测点。余类同。

图 2 长城宾馆周边地面沉降监测点布置

Fig. 2 Layout of land subsidence monitoring points around the Great Wall Hotel

### 1.4 监测结果

本文选择数据最完整的 3 个监测点(JZ-3、JZ-4、DB105)进行分析。盾构掘进全过程中,3 个监测点的沉降变化如图 3 所示。由图 3 可以发现:盾构施工引起的建筑沉降与地面沉降规律相似,呈现出先沉降、后略微隆起、最后沉降的趋势,且建筑物沉降略小于地面沉降。结合 JZ-4 点的变化规律可知,建筑物受施工影响,向北倾斜。

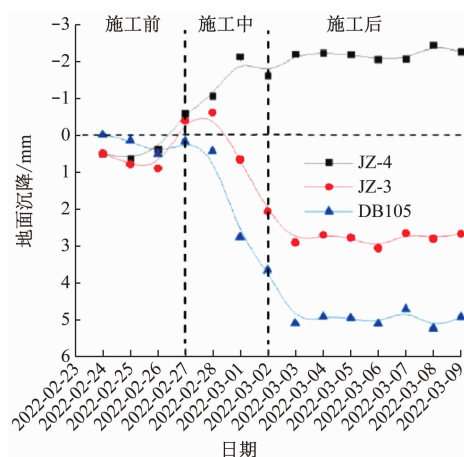


图 3 监测点沉降时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of settlement at the monitoring points

在盾构到达前,建筑整体处于沉降状态,盾构向前推进下穿建筑物,由于建筑物东北角距隧道最近距离仅有 2.60 m,与隧道距离最近监测点 JZ-3 地面沉降较大,达到 4.58 mm,监测点 JZ-4 表现为隆起,隆起量达到 1.80 mm。在采取注浆加固措施后,

建筑的整体沉降得到控制,此时建筑向北最大倾斜度为 0.22‰,向西最大倾斜度为 0.05‰,建筑最大差异沉降量为 4.53 mm。当盾构远离建筑后,建筑物整体表现为向北侧倾斜,最大倾斜度为 0.3‰。建筑物的最大转角变形量为  $2.3 \times 10^{-3}$  rad/m,最大差异沉降量为 4.80 mm。

按双线隧道间距  $L$  取值及上部有无建筑,取 4 个监测点(DB65、DB75、DB105、DB205,其中 DB75 及 DB205 为距长城宾馆较远处的监测点)作为典型监测点。双线隧道典型监测点处的地面沉降曲线如图 4 所示。

由图 4 可见:对于监测点 DB75,  $L = 12.50$  m,上部无建筑,双线施工完成后实测最大地面沉降为 12.50 mm,发生在双线隧道轴心偏左约 2 m 处,沉降槽曲线均呈 V 形;对于下穿长城宾馆处的监测点 DB65,沉降拟合曲线近似呈 U 形,最大地面沉降为 11.80 mm;对于监测点 DB205,  $L = 14.00$  m,上部无建筑,双线施工完成后沉降槽分布呈 W 形,与文献[4]的室内模型试验结果一致。值得注意的是,与上部无建筑物的情况相比,下穿建筑物施工情况下双线隧道的地面沉降最大处向先行施工隧道方向的偏移量更大,且沉降量最大值较小。

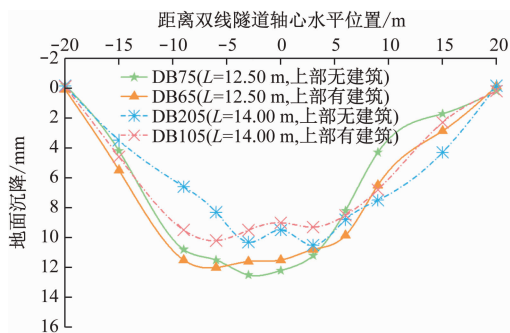


图4 双线隧道典型地面沉降曲线

Fig.4 Typical land subsidence curves of double-line tunnels

## 2 影响地面变形因素分析

采用 PLAXIS 3D 软件构建数值模型,如图 5 所示。整体模型长度为 300.00 m,厚度为 50.00 m,宽度为 100.00 m。隧道外径为 6.60 m,  $L = 12.50$  m,埋深为 20.00 m,衬砌厚度为 0.35 m,与桩基最近距离取 2.68 m。模拟时,隧道为直线水平推进,忽略坡度与转弯。盾构机长度为 12.00 m。注浆压力为 400 kPa,掌子面压力为 250 kPa,千斤顶压力为 1 300 kPa。盾构掘进步长为 2.50 m。

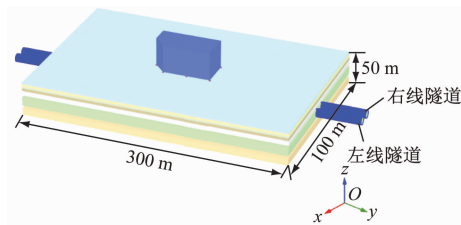


图5 双线隧道下穿建筑物数值模型

Fig.5 Numerical model of double-line tunnels undercrossing buildings

### 2.1 模型假设与模拟工况

考虑模型运算量,有必要在满足工程计算精度的前提下,对模型进行合理简化。对此做如下假定:复杂土层不均匀分布简化为多层均质水平分布土体;水平向顶进路线设为直线方向,忽略对计算影响不大的小曲率;模拟计算不考虑地下水的影响。模拟采用控制变量法来确定参数。

本文以 DB65 所在断面的实际参数为基准来确定模拟工况的参数取值。在实际项目中,该断面处上部有建筑,隧道埋深为 20.00 m,隧道间距为 12.00 m,隧道左右线施工步距为 100 m,建筑实际自重荷载  $G = 10$  kN/m<sup>2</sup>,建筑实际刚度  $E = 50$  MN·m<sup>2</sup>,长宽比为 2:1。

根据实际情况设定模拟工况见表 1。

表1 模拟工况

Tab.1 Simulated working conditions

工况	模拟工况说明
①	隧道埋深 $Z$ 分别设为 15.00 m、20.00 m、25.00 m、30.00 m;其他参数按实际情况取值
②	隧道间距 $L$ 分别设为 10.00 m、12.50 m、15.00 m、17.50 m;其他参数按实际情况取值
③	隧道左右线施工步距 $P$ 分别设为 50 m、100 m、200 m、300 m;其他参数按实际情况取值
④	建筑自重荷载分别设为 $G/2$ 、 $G$ 、 $2G$ 、 $3G$ ;其他参数按实际情况取值
⑤	建筑刚度分别设为 $E/2$ 、 $E$ 、 $2E$ 、 $3E$ ;其他参数按实际情况取值
⑥	建筑长宽比 $K$ 分别设为 1、2、3、4;其他参数按实际情况取值

### 2.2 影响因素分析

#### 2.2.1 隧道埋深变量分析

按模拟工况①,计算隧道埋深对地面沉降的影响,并同 DB65-1 无建筑时的计算结果及 DB65 实测结果进行比较,如图 6 所示。

在隧道埋深为 15.00 m 时,地面沉降槽呈现窄而深,随着隧道埋深的增加,地面沉降最大值逐渐

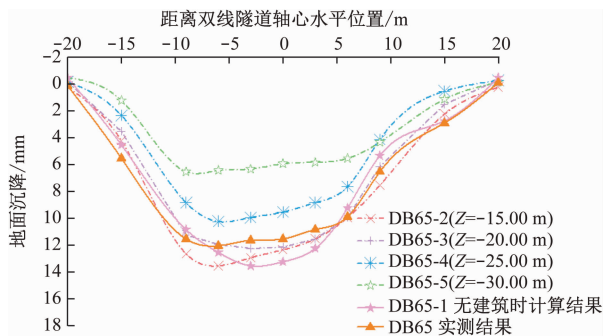


图6 模拟工况①下的地面沉降拟合曲线

Fig.6 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ①

减小,沉降槽呈现宽而浅。对于浅层隧道,建筑物对地面沉降产生较大影响,是因为更大的隧道深度诱发了更宽的影响区,随着深度增加,土的上覆压力逐渐增大,而上部建筑物荷载产生的附加应力相对减弱,所以地面沉降逐渐减小。

### 2.2.2 隧道间距变量分析

按模拟工况②,计算隧道间距对地面沉降的影响,并同 DB65-1 无建筑时计算结果及 DB65 实测结果进行比较,如图 7 所示。

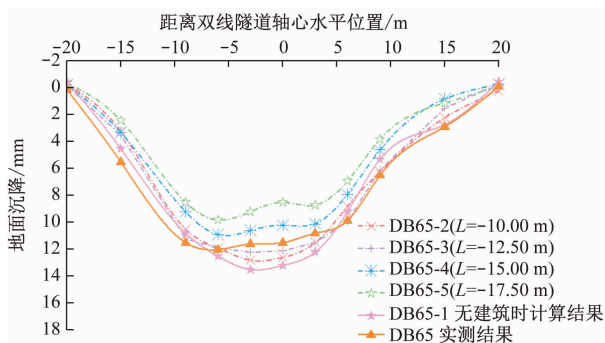


图7 模拟工况②下的地面沉降拟合曲线

Fig.7 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ②

由图 7 可见,双线盾构隧道施工穿越建筑物时其沉降槽形状随隧道间距的变化而变化。当隧道间距较小时,沉降槽形状与单线盾构隧道施工情况相似;当隧道间距增加时,沉降槽底部区域会逐渐变宽,逐渐呈现 U 形;当隧道间距继续增大时,双线隧道相互作用逐渐减小,沉降槽底部呈 W 形;当隧道间距足够大时,2 条隧道的施工不会相互影响,双线隧道的施工影响可以单独计算叠加。建筑物的存在会抑制地面沉降槽的最大沉降值,并使沉降槽向两侧发展。

### 2.2.3 隧道施工步距变量分析

按模拟工况③,计算隧道左右线施工步距对地

面沉降的影响,并同 DB65-1 无建筑时计算结果及 DB65 实测结果进行比较,如图 8 所示。

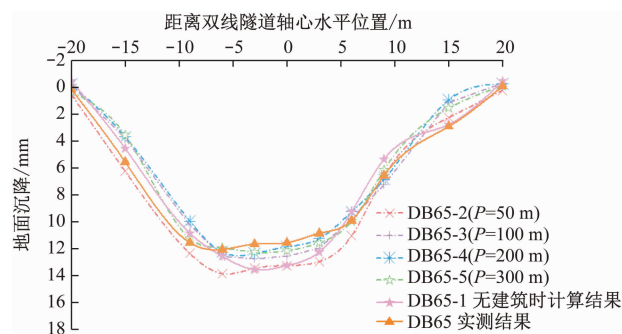


图8 模拟工况③下的地面沉降拟合曲线

Fig.8 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ③

由图 8 可见,后行隧道的开挖会使得沉降监测点变形稳定时间增长;后行隧道开挖后,地面沉降量增长缓慢,监测点地面沉降开始趋于稳定。由模拟结果可知:左右线施工步距在 100 m 以内时,双线隧道施工对地面沉降影响较大;左右线施工步距为 100 ~ 300 m 时,双线隧道施工对地面沉降的影响非常小。

### 2.2.4 建筑自重荷载变量分析

建筑自重是影响地层移动与变形特征的因素之一。受建筑自重荷载影响,建筑物下方一定范围内的土层将产生压缩变形。因此,若隧道上方有建筑物,则在隧道施工时土体附加应力会变大,进而形成更宽更浅的沉降槽,且沉降范围和影响程度随上部建筑自重荷载的增加而增大。

按模拟 DB65-1 工况④,计算建筑自重荷载对地面沉降的影响,并同 DB65-1 无建筑时计算结果及 DB65 实测结果进行比较,如图 9 所示。

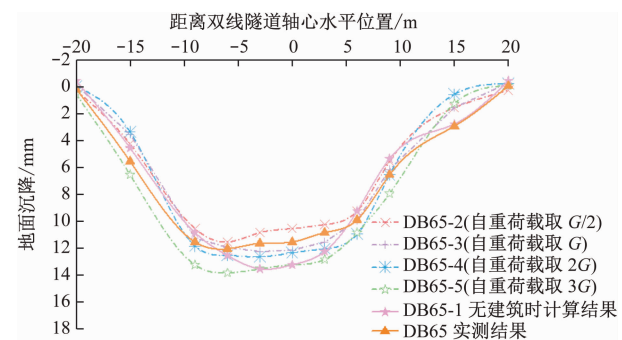


图9 模拟工况④下的地面沉降拟合曲线

Fig.9 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ④

由图9可见,建筑自重荷载从2G增至3G时的最大地面沉降增量远小于建筑自重荷载从G增至2G时的最大地面沉降增量。这是由于随着隧道体积损失的增加,建筑结构对地层的荷载逐渐从中心转移至建筑四周,从而增加周边地层的沉降。总的来说,相对于其他因素,建筑物自重荷载对地面沉降的影响是相对较小的。

### 2.2.5 建筑刚度变量分析

按模拟工况⑤,计算建筑刚度对地面沉降的影响,并同DB65-1无建筑时计算结果及DB65实测结果进行比较,如图10所示。

由图10可以看出:当刚度较小时,沉降槽曲线深而窄;随着建筑刚度的增加,沉降槽中间部分的曲率急剧下降;建筑刚度越小,地面沉降峰值越大。这是由于较大的建筑刚度抑制了地面变形,使地面沉降最大值变小。此时为弥补盾构施工造成的地层损失,沉降槽会向隧道轴线上方地面两侧扩张。

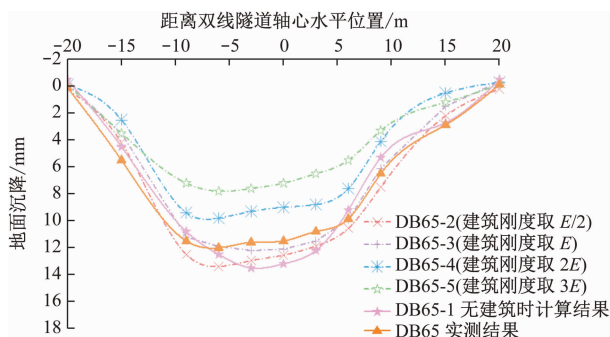


图10 模拟工况⑤下的地面沉降拟合曲线

Fig. 10 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ⑤

### 2.2.6 变量分析

按模拟计算工况⑥,计算建筑长宽比对地面沉降的影响,并同无建筑时计算结果及实测结果进行比较,如图11所示。

由图11可以看出:地面沉降随着建筑物的长宽比减少而逐渐减少。建筑物长宽比越大,其抵抗变形能力越低,更容易出现不均匀沉降,进而导致建筑发生挠曲。当长宽比为4时沉降拟合曲线接近上部无建筑的V形曲线;当长宽比由3降至2,最大地面沉降降低了30%。

## 3 GSA 敏感性分析

建筑物和隧道的相关参数对地面沉降的变化起着重要作用,双线隧道下穿建筑物施工的耦合作

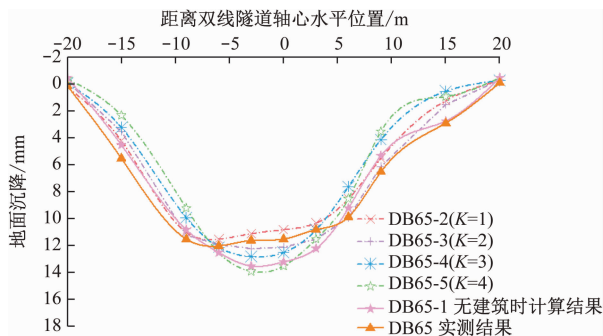


图11 模拟工况⑥下的地面沉降拟合曲线

Fig. 11 Land subsidence fitting curves under simulated working condition ⑥

用不能仅用一个因素来解释<sup>[5]</sup>。建筑物和隧道的不同参数对地面沉降的影响应尽可能量化,由此本文对隧道埋深、间距、施工步距,建筑自重、刚度及长宽比进行敏感性评估,以分析参数不确定性对地面沉降的作用<sup>[6]</sup>。

### 3.1 敏感性分析方法

敏感性分析可分为LSA(本地敏感性分析)和GSA<sup>[7]</sup>。LSA是对参数空间的某一点进行评估。如果参数之间的关系是非线性的,或者输入参数之间的相关性很强,LSA方法就不合适<sup>[8]</sup>。GSA结果的可靠性不受模型性质的影响,评估的不确定性不局限于一个特定参数的变化,而受其他参数的变化影响。因此,本研究选用GSA法对表1中的参数进行评价。

基于2个独立的 $n \times k$ 型矩阵A和B,建立1个新的 $n \times k$ 型矩阵 $C_j$ ,其中 $C_j$ 的第j列取自A的第j列,其他列都取自矩阵B。则 $C_j$ 第j列向量的一阶敏感指标 $S_j$ 和总效应指标 $S_{Tj}$ 分别为:

$$S_j = \frac{y_A^T y_{Cj} - n(\bar{y}_A)^2}{y_A^T y_A - n(\bar{y}_A)^2} \quad (1)$$

$$S_{Tj} = \frac{(y_B - y_{Cj})^T - (y_B - y_{Cj})}{2y_B^T y_B - 2n(\bar{y}_B)^2} \quad (2)$$

式中:

$y_A$ 、 $y_B$ 和 $y_{Cj}$ ——包含矩阵A、B和 $C_j$ 模型评价的向量;

$\bar{y}_A$ 和 $\bar{y}_B$ —— $y_A$ 和 $y_B$ 分量的估计平均值。

各个影响因素指标相加为1,单个因素分配的指标数越大代表其影响越大。

### 3.2 敏感性分析结果

GSA可以找出模型参数之间可能存在的非线性关联,能显示整个参数空间中建筑物与隧道参数

对地面沉降的相对敏感性<sup>[9]</sup>。GSA 法参数敏感性分析结果如图 12 所示。由图 12 可见,各参数按地面沉降对隧道和建筑物敏感度由高到低排序为:隧道埋深、建筑物刚度、隧道间距、建筑长宽比、建筑自重、隧道施工步距。其中,隧道埋深和建筑刚度在双线隧道施工中能较为直接地影响周围土体体积损失和应力重新分布,而隧道施工步距对地面沉降的影响几乎可以忽略不计。

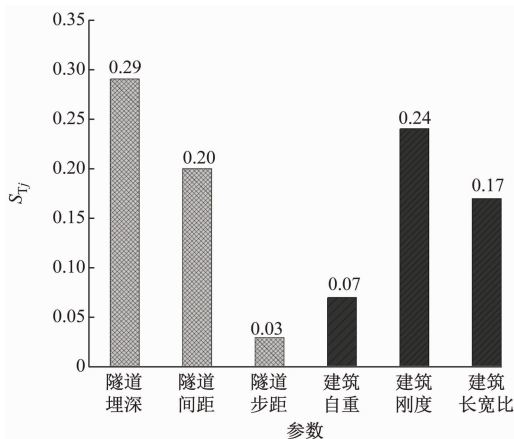


图 12 GSA 法参数敏感性分析结果图

Fig. 12 GSA method parameter sensitivity analysis result chart

## 4 结语

本文考虑双线隧道和上部建筑耦合作用,依托苏州轨道交通 11 号线工程监测数据,研究双线隧道盾构施工时地面沉降规律,进而讨论双线隧道及建筑物参数的影响作用,并利用 GSA 法进行了参数敏感性评估,得出以下结论:

1) 双线隧道施工完成后,地面横向沉降曲线呈非对称分布,后行隧道上方的地面沉降小于先行隧道上方的地面沉降,最大地面沉降位置向先行隧道位移,上部建筑结构的存在会明显增加向先行隧道的偏移量。

2) 地面建筑物的存在会导致双线隧道沉降曲线不呈正态分布的漏斗 V 形或 W 形,受附加应力的影响,最大地面沉降值减小,但沉降槽会变宽,最终呈现近似对称分布的 U 形曲线。

3) 建筑物刚度、隧道埋深、间距及施工步距增大均会限制地面沉降峰值的发展,与地面沉降呈负相关;建筑物自重及长宽比增大会引起地面沉降峰值增加,与地面沉降呈正相关。其中,地面沉降对隧道埋深和建筑物刚度这两个影响因素的变化较

为敏感。

## 参考文献

- [1] 张青,王洪超,赵耀,等.新建隧道近距离小角度斜下穿既有隧道稳定性分析:以青岛地铁 8 号线隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊 2):199.  
ZHANG Qing, WANG Hongchao, ZHAO Yao, et al. Stability analysis of new tunnel obliquely crossing underneath adjacent existing tunnel with small angle: a case study of a tunnel of Qingdao Metro Line 8[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 199.
- [2] ALIELAHI H, FEIZI D. Numerical study on dynamic effects of soil-tunnel-structure interaction[J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, 19(11): 1339.
- [3] ZANG Y, GAN P, YAN J J, et al. Effects of construction sequences and volume loss on perpendicularly crossing tunnels[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 1.
- [4] 魏纲,魏新江.双线盾构施工对邻近框架建筑物影响的研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):339.  
WEI Gang, WEI Xinjiang. Effect analysis of frame building crossed by double-line parallel shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 339.
- [5] 刘志涛,张京京,王立川,等.盾构下穿砖混民房建筑群施工控制技术研究:以合肥轨道交通 1 号线三期工程为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(增刊 1):427.  
LIU Zhitao, ZHANG Jingjing, WANG Lichuan, et al. Construction control technology of shield tunneling underneath brick-and-concrete residential buildings: a case study of phase III project of Hefei Rail Transit Line 1[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 427.
- [6] HUANG Z, FU H, ZHANG J, et al. Structural damage evaluation method for metro shield tunnel[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(1): 04018097.
- [7] MIRO S, HARTMANN D, SCHANZ T. Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 56: 80.
- [8] CHAPMAN D N, ROGERS C, HUNT D. Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 378.
- [9] ZHAO C, LAVASAN A A, HÖLTER R, et al. Mechanized tunneling induced building settlements and design of optimal monitoring strategies based on sensitivity field[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 97: 246.

· 收稿日期:2023-02-18 修回日期:2023-03-16 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-02-18 Revised:2023-03-16 Published:2025-04-10  
· 第一作者:王鹏飞,高级工程师, wangpengfei675@126.com  
通信作者:乙珂豪,工程师, 522029733@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license