

DOI: 10.11779/CJGE2021S2051

# 软弱地层中内撑式基坑开挖引起下卧地铁隧道变形的影响区研究

范雪辉<sup>1</sup>, 刘波<sup>2\*</sup>, 王园园<sup>1</sup>, 张嘉宝<sup>1</sup>, 范智博<sup>1</sup>, 章定文<sup>3</sup>

(1. 中交第三公路工程局有限公司, 北京 101300; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189; 3. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 基于多案例统计结果, 采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法分析内撑式基坑开挖对下卧地铁隧道变形特性的影响规律, 进而通过变形等值线分析, 结合 20, 10, 5 mm 三级隧道变形控制标准, 划分出不同变形控制标准对应的影响区范围, 并根据影响区范围特征, 通过定义影响区确定参数, 实现对影响区范围的简化描述。结果表明, 下卧隧道变形影响区可划分为主要影响区、次要影响区、一般影响区以及微弱影响区; 影响区范围可简化为直角梯形形状, 隧道变形等值线可简化为直线, 通过定义直线上的两点坐标值: 影响区深度系数  $N_1$ 、影响区深度系数  $N_2$ , 可快速确定出影响区范围。

**关键词:** 软弱地层; 基坑; 下卧隧道; 影响区

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0217-04

作者简介: 范雪辉(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事建筑工程施工技术管理工作。E-mail: 1003379092@qq.com。

## Influenced zones for deformation of underlying metro tunnels induced by braced deep excavation in soft strata

FAN Xue-hui<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>, WANG Yuan-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Jia-bao<sup>1</sup>, FAN Zhi-bo<sup>1</sup>, ZHANG Ding-wen<sup>3</sup>

(1. CCCO Third Highway Engineering CO., Ltd., Beijing 101300, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Based on the statistics of collected case histories, the finite element method considering small strain behaviors of soils is adopted to study the influences of excavation on deformation behaviors of underlying metro tunnels in soft silty clay. Then, through the analysis of deformation isoline of the tunnels, combined with the three-level tunnel deformation control standards of 20, 10 and 5 mm, the influenced zones for deformation of underlying tunnels are divided. According to the features of the influenced zones, by defining their determination parameters, a simplified description of the scope of the influenced zones is realized. The results indicate that the influenced zones of tunnel deformation can be divided into “primary”, “secondary”, “general” and “weak” influenced zones by adopting the three-level tunnel deformation control standards. The scope of the influenced zones of underlying tunnels can be simplified as a right trapezoid, the isoline of tunnel deformation can be simplified as a straight line, and by defining the two coordinates on the straight line: depth coefficient  $N_1$  and depth coefficient  $N_2$ , the scope of the influenced zones can be quickly determined.

**Key words:** soft stratum; excavation; underlying tunnel; influenced zone

## 0 引言

当前, 随着城市轨道交通和地下空间开发的迅速发展, 在既有地铁隧道上方进行基坑开挖的现象日益增多。开挖卸荷不可避免会引起坑底及以下一定深度范围内的土体回弹, 进而导致埋置其中的隧道产生变形。因此, 在基坑开挖前合理预测开挖的影响范围以及隧道可能产生的变形至关重要。张治国等<sup>[1-2]</sup>、Liang 等<sup>[3]</sup>、周泽林等<sup>[4]</sup>首先根据 Mindlin 解计算基坑开挖卸荷引起的土中附加应力, 再将隧道简化为

Winkler 弹性地基上的无限长梁, 推导出了隧道受基坑开挖影响纵向受力变形解析解。Doležalová<sup>[5]</sup>、黄宏伟等<sup>[6]</sup>、郑刚等<sup>[7]</sup>分别采用有限元法计算分析了基坑开挖引起的下卧隧道受力变形, 评价了相关控制措施的控制效果。NG 等<sup>[8]</sup>、Huang 等<sup>[9]</sup>分别开展了砂性地层

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805500); 中国博士后科学基金项目(2021M690624); 江苏省博士后科研资助计划项目(2021K146B)

收稿日期: 2021-08-16

\*通信作者(E-mail: boliu@seu.edu.cn)

和软黏土地层中基坑开挖对下卧隧道影响的离心模型试验。魏纲<sup>[10]</sup>、郭鹏飞等<sup>[11]</sup>分别基于基坑开挖对下卧隧道影响的多案例统计分析,提出了下卧隧道竖向隆起位移经验预测公式。为了实现开挖影响范围及隧道变形的简化预测,郑刚等<sup>[12]</sup>以天津某紧邻隧道的深基坑工程为例,采用有限元法对开挖引起的隧道变形规律进行了参数分析,结合不同规范隧道变形控制标准,划分出了既有隧道变形影响区,继而根据隧道所处的实际影响区预测隧道可能产生的变形。

本文借鉴郑刚等<sup>[12]</sup>的研究思路,补充考虑隧道位于坑底以下的工况,基于多案例统计结果,采用有限元数值方法计算分析内撑式基坑开挖对下卧地铁隧道变形特性的影响规律,进而通过变形等值线分析,结合 20, 10, 5 mm 三级隧道变形控制标准,划分出不同变形控制标准对应的影响区范围,并根据影响区范围特征,通过定义影响区确定参数,实现对影响区范围的简化描述,进而根据隧道所处的实际影响区预测其可能产生的变形。

## 1 基坑开挖对下卧隧道影响案例统计

笔者<sup>[13]</sup>通过文献调研对国内 33 个基坑开挖对下卧地铁隧道影响的工程案例进行了归纳统计。统计的内容包括案例所处的典型地层条件、基坑和隧道规模尺寸、相对位置关系、隧道变形以及控制措施等。

统计发现,案例所处的典型地层包括 3 类:软黏土地层,粉土、粉砂性地层以及砂卵石、风化岩地层。这 3 类地层中的案例占比分别为 60.6%, 18.2%, 21.2%。可见,实际工程中关注度最高的是软弱土地层中基坑开挖对下卧隧道影响。

统计发现,基坑开挖深度  $H_c$  分布范围在 3~27 m, 其中 6~9 m 范围所占比例最大,  $H_c \leq 9$  m, 12, 15, 18 m 的基坑分别约占总数的 51.5%, 81.8%, 90.9%, 93.9%。可见,实际工程中开挖深度  $H_c \leq 18$  m 基本涵盖了绝大多数基坑。基坑围护结构形式主要有 SMW 工法桩、钻孔灌注桩、地下连续墙等,坑内支撑结构形式主要有钢管支撑和钢筋混凝土支撑两种,其中对于土层性质较差的软黏土地层中的基坑,均采用坑内支撑。

统计发现,案例中下卧隧道结构形式均为城市地铁盾构圆形隧道,直径为 6 m 或 6.2 m 两种规格。

## 2 有限元数值模拟

### 2.1 模型建立

基于以上案例统计结果,本文主要研究软弱土地层中内撑式基坑开挖对下卧地铁盾构隧道的影响。

图 1 为计算模型尺寸示意图。基坑开挖深度  $H_c$

取 18 m, 开挖半宽度  $B$  取 30 m, 地下连续墙壁厚 0.8 m 且嵌入深度  $H_i = H_c$ , 首道水平支撑距地表 1 m, 其余间距 4.5 m。隧道为典型的地铁盾构隧道,外径取 6.0 m, 隧道中心距地下连续墙水平距离为  $L_t$ , 距坑底竖向距离为  $H_t$ 。考虑模型对称性,取 1/2 基坑尺寸进行建模,模型坑外水平宽度取值 120 m, 坑底以下深度取 3 倍基坑开挖深度(54 m)。

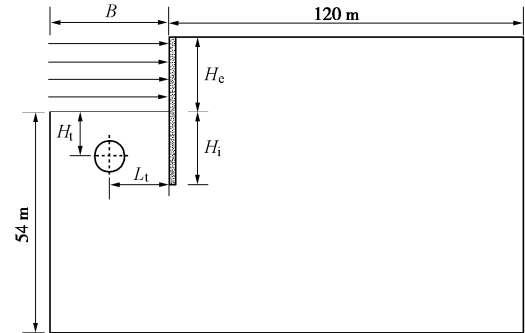


图 1 基坑开挖对下卧隧道影响的计算模型尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model sizes for influences of deep excavation on underlying tunnel

### 2.2 模型参数选取

本文选择粉质黏土层作为计算土层,且为了消除土层成层性的影响,土层假定为单一均质土层。模型中土体采用考虑小应变刚度特性的硬化模型(HSS模型)进行模拟。除基本物理参数外,HSS模型包含 13 参数,分别为:有效黏聚力( $c'$ )、有效内摩擦角( $\varphi'$ )、剪胀角( $\psi$ )、三轴固结排水试验参考割线模量( $E_{50}^{ref}$ )、标准固结试验参考切线模量( $E_{ocd}^{ref}$ )、与模量应力水平相关的幂指数( $m$ )、三轴固结排水卸载再加载试验的卸载再加载模量( $E_{ur}^{ref}$ )、卸载再加载泊松比( $\nu_{ur}$ )、参考应力( $p^{ref}$ )、破坏比( $R_f$ )、正常固结条件下静止侧压力系数( $K_0$ )、小应变刚度试验的参考初始剪切模量( $G_0^{ref}$ )、割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70%时所对应的剪应变( $\gamma_{0.7}$ ),详见表 1。

地下连续墙、基坑内水平支撑和隧道管片为钢筋混凝土材料,采用线弹性本构模型。单位重度取  $\gamma = 24.5$  kN/m<sup>3</sup>、弹性模量取  $E = 30$  GPa、泊松比取  $\nu = 0.2$ ,隧道刚度有效率取  $\eta = 0.75$  来反映管片接头的存在对隧道整体刚度的弱化作用,即等效圆环刚度为  $\eta EI$ 。

### 2.3 模拟工况

模型中设置不同的隧道位置:水平方向上,隧道中心间隔均设置为 3 m,隧道中心与围护结构最大间距为基坑半宽度 30 m;竖直方向上,在坑底以下 1 倍开挖深度范围内( $H_t \leq H_c$ ),隧道中心间隔设置为 3 m,1 倍开挖深度范围外( $H_t > H_c$ ),隧道中心间隔设置为 6 m,隧道中心最大埋深为 48 m ( $2.67H_c$ )。由于隧道边缘外 3 m(即隧道中心外 6 m)范围内一般不允许

进行施工, 因此  $L_1$  取值从 6 m 开始,  $H_1$  取值从 6 m 开始,  $H_1$  与  $L_1$  组合后共 90 个计算工况。

表 1 粉质黏土 HSS 模型参数<sup>[12]</sup>

Table 1 Parameters of HSS model for silty clay<sup>[12]</sup>

编号	参数	取值	编号	参数	取值
1	$\gamma$	19.8 kN/m <sup>3</sup>	9	$m$	0.8
2	$e$	0.6	10	$\nu_{ur}$	0.2
3	$c'$	14.0 kPa	11	$p^{ref}$	100 kPa
4	$\phi'$	25.7°	12	$R_f$	0.9
5	$\psi$	0	13	$K_0$	0.57
6	$E_{50}^{ref}$	7.2 MPa	14	$G_0^{ref}$	99.3 MPa
7	$E_{oed}^{ref}$	5.1 MPa	15	$\gamma_{0.7}$	$0.20 \times 10^{-3}$
8	$E_{ur}^{ref}$	36.8 MPa			

### 3 隧道变形影响区划分

#### 3.1 下卧隧道变形特性

图 2 为基坑开挖至坑底时坑底以下 90 个不同位置处隧道拱顶竖向位移。可见, 当隧道中心距坑底竖向距离在 1 倍基坑开挖深度范围内 ( $H_1/H_c \leq 1$ ) 时, 隧道中心距离地下连续墙越近, 拱顶竖向位移越大, 最大位移发生在地下连续墙附近 ( $L_1/B=0.2$ ); 而当隧道中心距坑底竖向距离大于 1 倍基坑开挖深度 ( $H_1/H_c > 1$ ) 时, 隧道中心距地下连续墙水平距离越远, 隧道拱顶竖向位移越大, 最大位移发生在基坑中央 ( $L_1/B=1$ )。

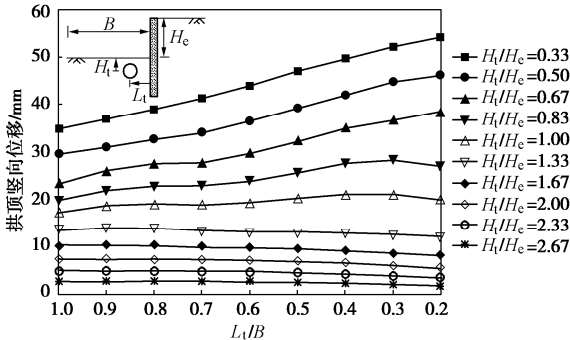


图 2 坑底以下不同位置处隧道拱顶竖向位移

Fig. 2 Vertical displacements of crown of tunnels below base slab

#### 3.2 不同隧道变形标准对应的影响区

将图 2 所示的隧道拱顶竖向位移绘制成等值线, 如图 3 所示。由于隧道边缘外 3 m (隧道中心外 6 m) 范围内一般不允许进行工程施工, 因此等值线图横坐标  $L_1/B$  的起始点为 0.2, 纵坐标  $H_1/H_c$  的起始点为 0.33。

与郑刚等<sup>[12]</sup>一致, 本文选定隧道最大位移 20, 10, 5 mm 作为隧道 3 级变形控制标准。然后, 结合这 3 级变形控制标准, 在图 3 中确定出其对应的等值线范围, 即隧道变形影响区。

#### 3.3 隧道变形影响区简化描述

为了实现影响区的简化描述, 根据影响区特征

将影响区范围简化为直角梯形形状, 将隧道变形等值线简化为直线如图 4 所示。考虑到前述的坑底以下不同深度处隧道隆起特性的差异, 坑底以下 1 倍基坑开挖深度范围内 ( $H_1/H_c \leq 1$ ) 和 1 倍开挖深度范围外 ( $H_1/H_c > 1$ ) 分别采用不同的直线形式。根据不同隧道变形控制标准, 将变形影响区划分为: 主要影响区 (I)、次要影响区 (II)、一般影响区 (III) 以及微弱影响区 (IV)。

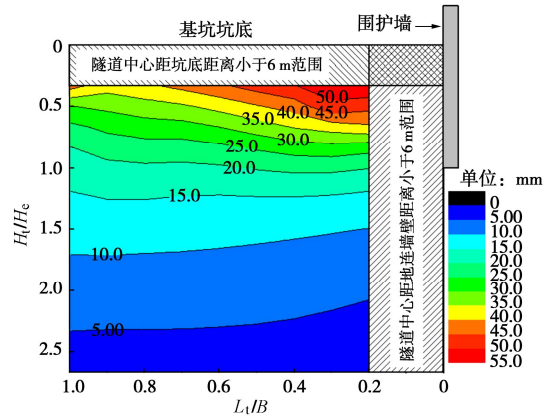


图 3 下卧隧道拱顶竖向位移等值线图

Fig. 3 Isolines of vertical displacement of crown of underlying tunnel

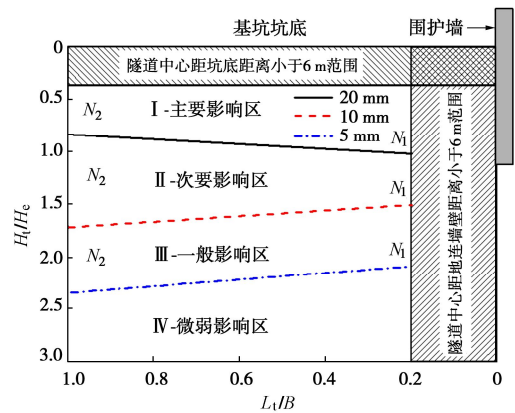


图 4 简化的 3 级隧道变形控制标准对应的影响区

Fig. 4 Simplified influenced zones corresponding to three-level control standards of tunnel deformation

为了方便地确定隧道变形影响区范围, 引入 2 个坐标值: 影响区深度系数  $N_1$ 、影响区深度系数  $N_2$ 。在坑底以下 1 倍开挖深度范围内,  $N_1 > N_2$ ; 在坑底以下 1 倍开挖深度范围外,  $N_1 < N_2$ 。通过这 2 个坐标, 即可快速确定出下卧隧道变形影响区范围。3 级隧道变形控制等级对应的  $N_1, N_2$  值见表 2。

表 2 下卧隧道变形影响区范围确定参数

Table 2 Determination parameters of influenced zones for deformation of underlying tunnel

控制值 20 mm		控制值 10 mm		控制值 5 mm	
$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
1.00	0.8	1.50	1.70	2.10	2.35

## 4 结 论

(1) 采用隧道最大变形 20, 10, 5 mm 三级变形控制标准可将下卧隧道变形影响区划分为: 主要影响区、次要影响区、一般影响区以及微弱影响区。

(2) 根据影响区特征, 影响区可简化为直角梯形形状, 隧道变形等值线可简化为直线, 其中坑底以下 1 倍基坑开挖深度范围内 ( $H_i/H_e \leq 1$ ) 和 1 倍开挖深度范围外 ( $H_i/H_e > 1$ ) 分别采用不同的直线形式。

(3) 通过定义隧道变形等值线上的两点坐标值: 影响区深度系数  $N_1$ 、影响区深度系数  $N_2$ , 即可快速确定出影响区范围。

### 参考文献:

- [1] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (in Chinese))
- [2] ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 244 - 253.
- [3] LIANG R Z, XIA T D, HUANG M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **81**: 167 - 187.
- [4] 周泽林, 陈寿根, 陈 亮, 等. 基坑施工对下卧地铁隧道上抬变形影响的简化理论分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **37**(12): 2224 - 2234. (ZHOU Ze-lin, CHEN Shou-gen, CHEN Liang, et al. Analysis of uplift deflection of subway tunnel due to adjacent pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **37**(12): 2224 - 2234. (in Chinese))
- [5] DOLEŽALOVÁ M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(6): 469 - 493.
- [6] 黄宏伟, 黄 栩, SCHWEIGER F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(3): 182 - 189. (HUAUG Hong-wei, HUAUG Xu, SCHWEIGER F H. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(3): 182 - 189. (in Chinese))
- [7] 郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu. Numerical analysis of effect of excavation on underlying existing metro tunnel and deformation control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (in China))
- [8] NG C W W, SHI J W, HONG Y. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(8): 874 - 888.
- [9] HUANG X, HUANG H W, ZHANG D M. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2014, **167**(1): 3 - 18.
- [10] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (in Chinese))
- [11] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(S2): 613 - 621. (GUO Peng-fei, YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua, et al. Measurement data analyses of heave deformation of shield tunnels due to overlying pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 613 - 621. (in Chinese))
- [12] 郑 刚, 杜一鸣, 刁 钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 599 - 612. (ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 599 - 612. (in Chinese))
- [13] 刘 波. 软弱地层中基坑开挖卸荷引起临近既有地铁盾构隧道变形及控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 147 - 148. (LIU Bo. Deformation and Its Control of Existing Shield Tunnel Induced by Unloading of Adjacent Foundation Pit Excavation in Weak Stratum[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 147 - 148. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)