

# 南京地区基于地铁隧道保护要求的基坑变形控制指标

宋博文<sup>1,2</sup>, 秦会来<sup>3</sup>, 王 蓉<sup>4</sup>, 翟 雷<sup>3</sup>, 王 龙<sup>1,2</sup>, 吕玺琳<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100032; 4. 上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 为了保障南京软土地区深基坑开挖时邻近地铁隧道安全, 有必要提出基于地铁隧道保护要求的基坑施工变形控制指标。基于南京某深基坑工程, 开展三维有限元数值模拟, 研究了软土深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响规律。系统性探讨了地铁隧道与基坑相对位置变化条件下隧道变形响应特性, 进而提出地铁隧道最大水平位移计算公式。根据地铁隧道保护要求, 划分了基坑开挖对隧道的影响区, 从而提出基于地铁隧道保护要求的基坑围护水平变形控制标准。

**关键词:** 深基坑开挖; 地铁隧道; 数值模拟; 影响区划分; 控制标准

中图分类号: TU447

文献标志码: A

## Deformation Control Indicator for Deep Foundation Pit Based on Subway Tunnel Protection Requirements in Nanjing Area

SONG Bowen<sup>1,2</sup>, QIN Huilai<sup>3</sup>, WANG Rong<sup>4</sup>, ZHAI Lei<sup>3</sup>, WANG Long<sup>1,2</sup>, LÜ Xilin<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100032, China; 4. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety of adjacent subway tunnels during deep foundation pit excavation in Nanjing soft soil area, it is necessary to propose control indicators based on protection requirements of subway tunnels. Based on a deep foundation pit project in Nanjing,

the effect of deep foundation pit excavation on the deformation of adjacent subway tunnels was studied through 3D finite element numerical simulation. The deformation response characteristics of subway tunnels and foundation pits under the condition of relative position changes were systematically explored, and a formula for calculating the maximum horizontal displacement of subway tunnels was put forward. According to protection requirements of subway tunnels, the impact area of foundation pit excavation on subway tunnels was divided, and then a control standard for the horizontal deformation of foundation pit enclosure based on subway tunnel protection requirements was proposed.

**Keywords:** deep foundation pit excavation; subway tunnel; numerical simulation; division of impact areas; control standard

随着大量地铁隧道的建设运营, 城市后续建设不可避免地出现邻近隧道的深基坑开挖。软土地区深基坑开挖导致土体变形<sup>[1]</sup>, 进而对临近隧道造成附加变形, 导致隧道管片损坏乃至破坏<sup>[2]</sup>。因此, 为了达到城市地铁隧道的保护要求, 提出基于地铁隧道承受能力的基坑控制标准具有重要意义。

目前在隧道变形预测、评价及控制方面已取得了一些研究成果。文献[3-7]中采用Mindlin解计算基坑开挖导致的隧道周围土体附加应力, 再采用Winkler弹性地基梁法建立隧道位移和内力的表达式。文献[8-13]中结合工程案例采用数值模拟方法进行计算研究。文献[14-18]中开展了离心模型试验, 分别研究干砂和软黏土地层中基坑开挖对既有隧道受力变形特性的影响。文献[19-22]中给出了

收稿日期: 2023-08-31

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800200); 中建二局科技项目(2021ZX000001)

第一作者: 宋博文, 博士生, 主要研究方向为岩土体失稳破坏机理。E-mail: 2310082@tongji.edu.cn

通信作者: 吕玺琳, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土力学与工程。E-mail: xilinlu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

部分基坑开挖对邻近既有隧道影响的案例,并采用现场实测方法对这些案例进行研究。目前研究重点多集中在基坑开挖对既有隧道变形及受力性状影响方面,将基坑变形指标与隧道变形指标联系的相关研究则较少。

在地铁隧道变形控制方面,最早提出隧道变形控制要求的是《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》<sup>[23]</sup>,要求地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 $\leq 20$  mm(包括各种加载和卸载的最终位移量),该控制指标在我国沿海软土地区得到了广泛应用。《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)<sup>[24]</sup>提出了隧道水平位移和竖向位移10 mm的预警值和20 mm的控制值;《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)<sup>[25]</sup>提出了更加严格的控制标准,其中隧道结构沉降控制值为3~10 mm,隧道结构上浮控制值为5 mm,隧道结构水平位移控制值为3~5 mm。对于隧道的水平位移和竖向位移,现行规范通常采用5、10、20 mm 3级控制指标。

以南京某深基坑工程为背景,采用考虑土体小应变刚度特性的有限元分析方法,研究了基坑开挖引起的邻近隧道变形,探讨了地铁隧道位于不同位置时基坑开挖对隧道变形的影响,并建立了隧道水平位移和基坑围护变形的关系式,进而基于隧道变形要求提出了基坑围护的变形控制标准。

## 1 工程概况

依托工程为某基坑项目。基坑尺寸约为170 m $\times$ 109 m,面积约为17 325 m<sup>2</sup>,周长约为531 m。基坑位置如图1所示。一侧紧邻城市道路,距基坑75 m有南京地铁3号线,地铁隧道的内径为10.2 m,管片厚度为0.5 m。

场地土层上部为淤泥质软黏土和粉砂层,下部

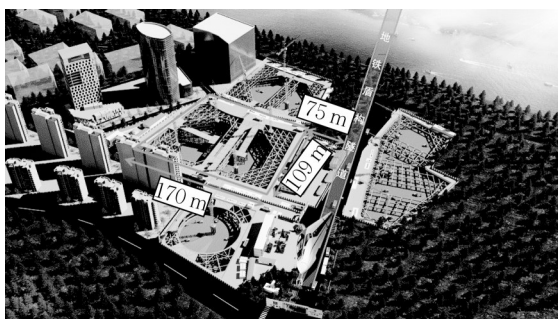


图1 基坑位置示意

Fig.1 Schematic diagram of foundation pit location

为较厚的砂、卵石层。土层从上到下依次为人工填土、淤泥质粉质黏土、粉细砂、中风化灰岩,地下水埋深1 m。基坑开挖深度为20.6 m,竖向共设置4道混凝土支撑,混凝土支撑尺寸为1.0 m $\times$ 1.0 m,围护采用1.2 m地下连续墙,墙深52 m。基坑剖面详见图2。基坑开挖共分为5步,每步开挖深度为2.0、5.5、5.0、4.0、4.1 m。

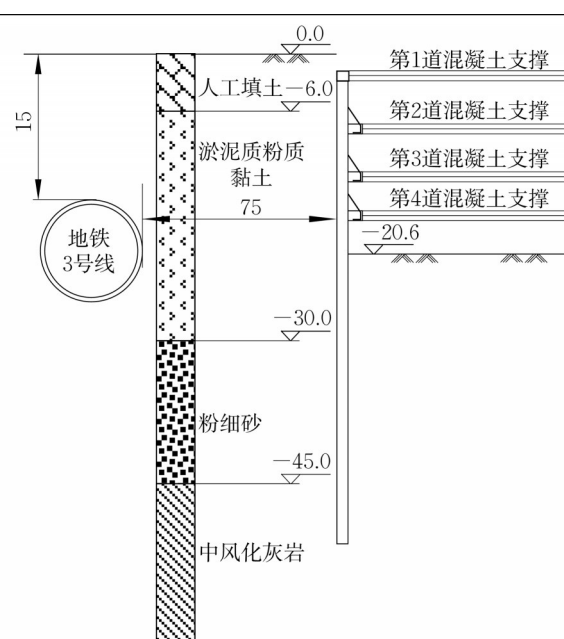


图2 基坑剖面(单位:m)

Fig.2 Cross section of foundation pit (unit: m)

## 2 基坑开挖对邻近隧道影响数值模拟

### 2.1 三维有限元模型的建立

针对基坑开挖过程开展三维有限元数值模拟,有限元模型及网格如图3所示。模型尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 深)为360 m $\times$ 230 m $\times$ 70 m,边界条件为底部固定约束,四周水平约束,顶部自由。梁、格构柱采用梁单元模拟,立柱桩采用嵌入桩单元模拟。板为6节点面单元,梁为3节点线单元,土体为10节点四面体单元,土与结构界面为12节点界面单元,水平支撑体系为3节点梁单元。将模型划分为96 366个单元和137 733个节点。

中风化灰岩采用基于摩尔-库仑准则的理想弹塑性本构模型,其余土体采用HSS本构模型描述,材料参数见表1。结合勘察报告和室内三轴试验确定的计算参数如表1所示。其中, $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $G_0$ 、 $\gamma_{0.7}$ 、 $m$ 、 $K_0$ 、 $R_f$ 分别为有效黏聚力、有效内摩擦角、参考切线模量、参考割线模量、参考卸载再加载模量、参考初始

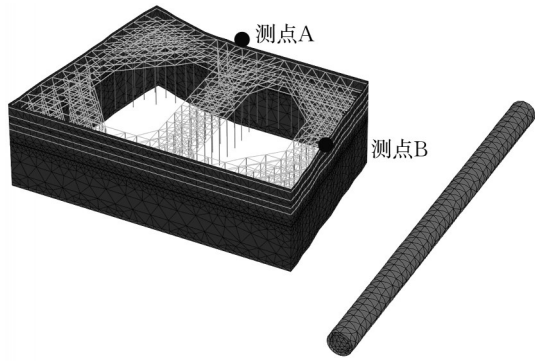


图3 深基坑开挖三维有限元模型及网格

Fig.3 Three-dimensional finite element model for deep foundation pit excavation and mesh

剪切模量、割线剪切模量衰减为 $0.7G_0$ 时对应的剪应变、应力指数、静止侧压力系数、破坏比。中风化灰岩

黏聚力取45 kPa,摩擦角取 $35^\circ$ ,弹性模量取1.5 GPa,泊松比取0.2。板单元杨氏模量取 $2 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,梁单元杨氏模量取 $2.5 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。

### 2.2 开挖施工过程

根据现场实际情况将土层分为5层开挖。在第1道混凝土支撑局部设置了栈桥板,以便施工过程中机械挖土,因栈桥板对基坑开挖过程中土体受力变形影响不大,可忽略。第一阶段模拟地应力平衡,再现土体自重作用下应力状态,并将变形置零;第二阶段模拟基坑施工前的既有隧道,激活隧道结构,并将变形置零;第三阶段模拟施工围护结构;第四阶段为分层开挖到坑底。为了模拟基坑降水,每次开挖均设置开挖面到围护墙底部范围的地下水位线性内插。具体施工工序见表2。

表1 土体模型材料参数

Tab.1 Material parameters of soil model

土层	$c'/\text{kPa}$	$\phi'/(^{\circ})$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	$m$	$K_0$	$R_f$
人工填土	12.0	10.0	6.00	6.00	30.0	30.00	$3.0 \times 10^{-4}$	0.65	0.54	0.90
淤泥质粉质黏土	18.3	30.2	3.80	3.53	24.5	47.44	$1.2 \times 10^{-4}$	0.61	0.50	0.90
粉细砂	1.6	35.4	8.93	6.90	42.8	90.45	$1.2 \times 10^{-4}$	0.56	0.42	0.64

表2 开挖施工过程描述

Tab.2 Description of excavation construction progress

工况	描述
1	进行地应力平衡
2	激活隧道结构
3	激活围护结构
4	开挖1, 基坑开挖2.0 m
5	开挖2, 设置第1道混凝土支撑, 开挖7.5 m
6	开挖3, 设置第2道混凝土支撑, 开挖12.5 m
7	开挖4, 设置第3道混凝土支撑, 开挖16.5 m
8	开挖5, 设置第4道混凝土支撑, 开挖20.6 m

### 2.3 模型验证

基坑开挖过程中东、北侧围护结构中部测点A和测点B(水平变形最大点)模拟和实测结果对比如图4所示。两者变化曲线基本一致,说明数值模拟能很好地体现基坑开挖过程中围护结构的变形。

### 2.4 隧道变形分析

数值模拟得到基坑开挖引起的隧道最大水平位移和最大竖向位移,横坐标参照隧道穿过基坑的长度进行了量纲一处理,如图5所示。水平位移以朝向基坑方向为正,竖向位移以竖向沉降为正。基坑开挖引起的隧道最大水平位移约为1.30 mm,最大竖向位移约为0.35 mm。变形最大值位于基坑中部,基坑范围内大致呈现正态分布。

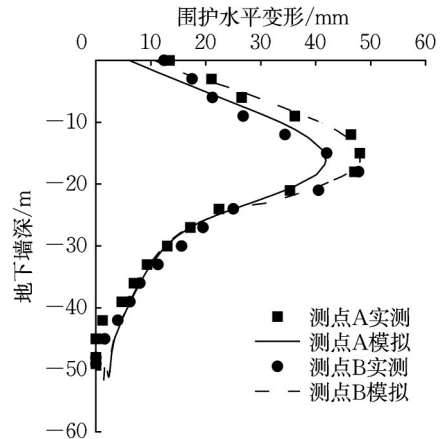


图4 地下连续墙水平变形分布

Fig.4 Lateral displacement distribution of retaining wall

## 3 基坑开挖对不同位置隧道影响分析

### 3.1 不同位置隧道变形响应数值模拟

进一步地分析隧道处于基坑不同相对位置时基坑开挖对隧道变形的影响。将隧道与基坑的水平距离设置为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0倍开挖深度,同时将隧道埋深设置为0.5、1.0、1.5、2.0倍开挖深度,共进行24种工况下的数值模拟,具体模拟过程与前述相同。

计算得到所有工况下基坑开挖导致的隧道变形



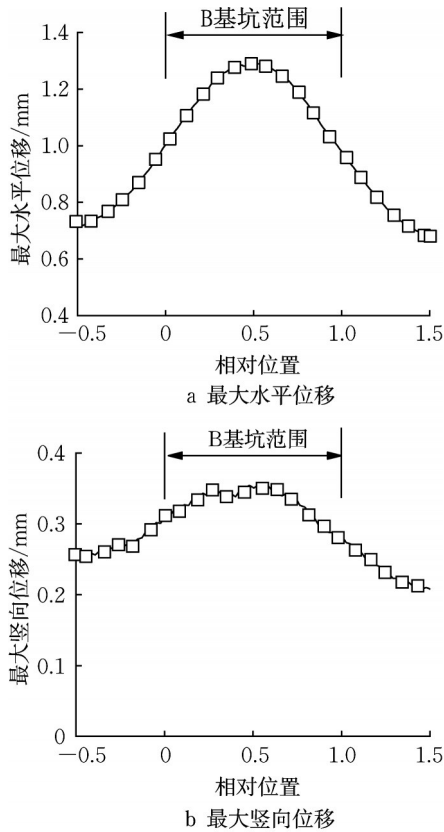


图5 基坑开挖导致的隧道变形

Fig.5 Tunnel deformation caused by adjacent foundation pit excavation

情况,并将不同位置处隧道最大变形特征绘制于图6中。可见,当基坑开挖结束后,受土体水平向卸荷作用,隧道表现为水平向拉伸、竖向压缩,导致隧道呈现椭圆形发展趋势。从不同位置处隧道变形可看出,主要影响范围为水平向1.5倍开挖深度和竖向2.0倍开挖深度,在该影响范围外基坑开挖对隧道变形影响较小。

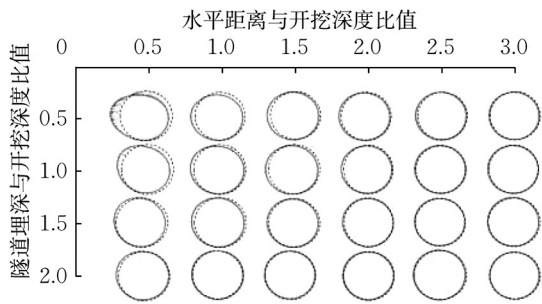


图6 不同位置隧道变形

Fig.6 Tunnel deformation at different positions

模拟得到的隧道顶部沉降、隧道底部沉降、隧道最大水平位移、隧道水平收敛值、隧道竖向收敛值随基坑水平距离的变化如图7~11所示。图中, $X$ 为隧

道与基坑水平距离, $h$ 为基坑开挖深度, $H$ 为隧道埋深, $S_{yt}$ 为隧道顶部沉降, $S_{yd}$ 为隧道底部沉降, $S_x$ 为隧道最大水平位移。以隧道水平位移朝向基坑方向为正,竖向位移以竖向沉降为正,水平收敛值拉伸为正,竖向收敛值压缩为正。

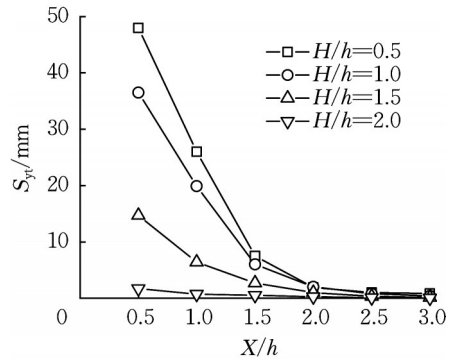


图7 隧道顶部沉降随基坑水平距离的变化

Fig.7 Variation of tunnel top settlement with the horizontal distance of the tunnel to excavation face

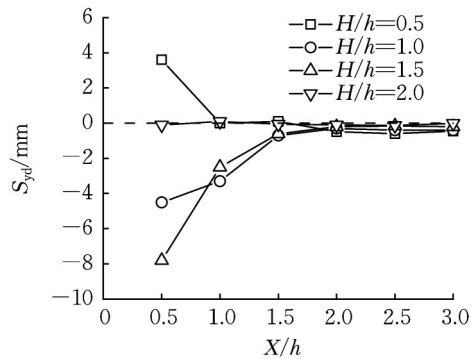


图8 隧道底部沉降随基坑水平距离的变化

Fig.8 Variation of tunnel bottom settlement with the horizontal distance of the tunnel to excavation face

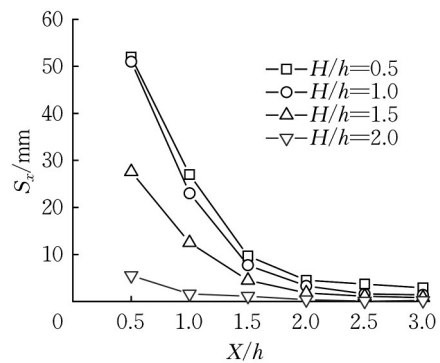


图9 隧道最大水平位移随基坑水平距离的变化

Fig.9 Variation of tunnel maximum horizontal displacement with the horizontal distance of the tunnel to excavation face

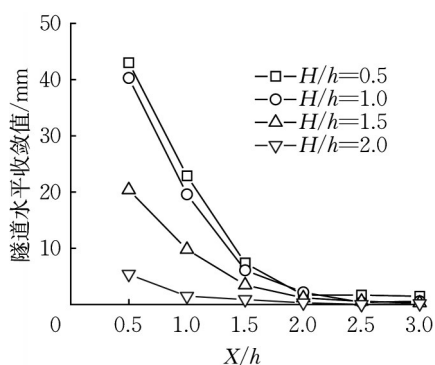


图 10 隧道水平收敛值随基坑水平距离的变化

Fig.10 Variation of the horizontal convergence value of the tunnel with the horizontal distance of the tunnel to excavation face

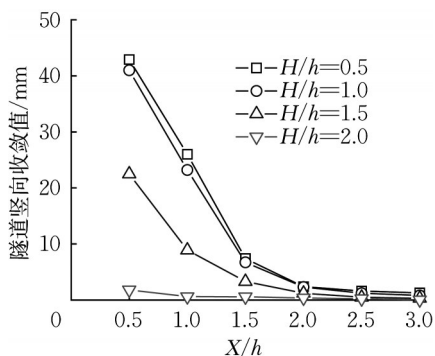


图 11 隧道竖向收敛值随基坑水平距离的变化

Fig.11 Variation of the vertical convergence value of the tunnel with the horizontal distance of the tunnel to excavation face

隧道顶部沉降随隧道埋深变化大致呈线性减小趋势,2.0倍水平距离之外隧道顶部沉降已经很小。隧道底部变形随隧道不同位置呈不同变形趋势,当隧道在约1.0倍水平距离内时变化明显,埋深较浅时(1.0倍开挖深度范围内)隧道底部表现为沉降,埋深较深时(大于1.0倍开挖深度)表现为隆起,并随着埋深增加隆起值逐渐变小。这是由于基坑较深时,开挖卸荷对隧道周围土体产生向上位移,使隧道隆起;当埋深较浅时,开挖卸荷会对隧道周围土体产生向下位移,进而使隧道产生沉降变形。隧道最大水平位移、水平收敛值、竖向收敛值变化趋势大致相同,随隧道与围护水平距离增加呈快速减小趋势,随隧道埋深增加呈缓慢减小趋势。从计算结果可看出,隧道水平收敛值和隧道竖向收敛值大致相当。

### 3.2 坑外地下水的影响

实际工程中隧道变形不仅受基坑开挖的单一因素影响,也可能受其他因素影响。采用数值模拟分析坑

外地下水位变化造成的隧道水平变形和隧道顶部沉降。坑外地下水位分别设置为-1、-3、-5、-7 m,分析结果如图12所示。可见,坑外地下水位变化对隧道竖向位移影响较大,且大致呈线性变化趋势,-7 m水位工况下隧道最大竖向位移比-1 m水位高约40%。坑外地下水位对隧道水平位移几乎无影响,这主要是因为坑外地下水位下降导致坑外土体竖向有效应力增加,附加变形主要体现在竖向,水平向几乎未产生受力梯度差,所以水平位移基本不变。

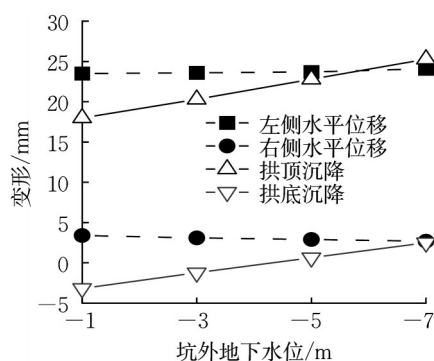


图 12 坑外地下水位对隧道变形的影响

Fig.12 Effect of ground water level on tunnel deformation

### 3.3 坑外超载的影响

共设置了压力0、10、20、30、40、50 kPa 6组坑外超载工况,计算结果如图13所示。随着坑外超载压力的增加,隧道结构呈进一步朝椭圆形发展趋势,即水平收敛值向外拉伸,竖向收敛值向内压缩。隧道水平变形左右变化量一致,可认为水平向隧道中心并未产生附加位移。隧道最大水平位移有一定增长,围护结构最大水平变形也变大。拱顶沉降变化幅度明显大于隧道水平位移的变化。超载压力为50 kPa时隧道拱顶沉降为无超载时的1.95倍,因此隧道竖向位移相比水平位移对坑外超载更敏感。

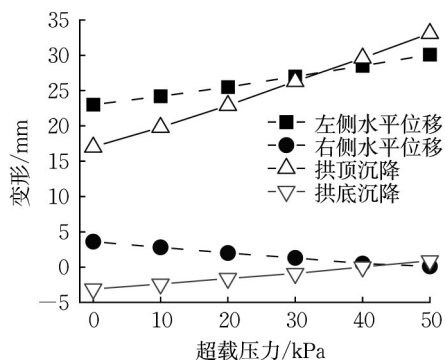


图 13 坑外超载对隧道变形的影响

Fig.13 Effect of overload on tunnel deformation

## 4 基于隧道保护要求的基坑控制指标

### 4.1 隧道最大水平变形规律

前述分析可知,隧道最大水平位移受坑外地下水位、坑外超载影响较小,相比之下受基坑开挖影响显著,因此可建立基坑开挖参数与隧道最大水平位移的关系。基坑开挖过程中围护结构水平变形和地表沉降是基坑开挖的重要控制指标,基坑开挖对周围环境的影响与这2个指标息息相关。研究发现,围护结构水平变形最大值与地表沉降最大值之间存在一定关系,就工程实用角度而言,围护结构监测比周围地表沉降监测点多,监测结果受环境影响小,相对较准确,故选取基坑围护结构水平变形为主要指标。

以围护结构最大水平位移 $\delta x$ 为主要指标,考虑基坑开挖深度 $h$ 、隧道埋深 $H$ 、隧道与基坑水平距离 $X$ ,建立隧道最大水平位移与围护结构水平变形的拟合公式,并根据隧道变形控制要求提出基于围护结构最大水平位移的控制标准。分析隧道最大水平位移与围护结构水平变形关系,将各指标归一化后进行拟合,所得结果如图14所示。

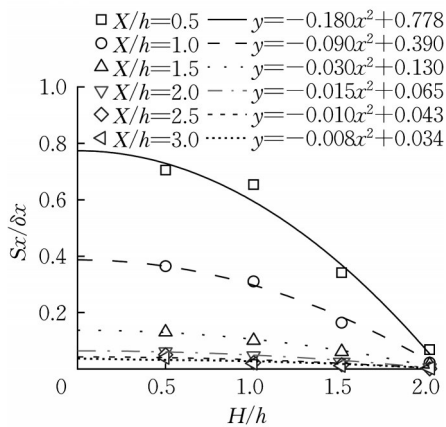


图14 隧道最大水平位移拟合公式

Fig.14 Fitting formula for maximum horizontal displacement of the tunnel

针对拟合公式特征,可将拟合公式统一为

$$\frac{S_x}{\delta x} = A \left[ \left( \frac{H}{h} \right)^2 - 4.3 \right] \quad (1)$$

式中, $A$ 为与 $X/h$ 相关的参数。

进一步对不同水平距离下的参数 $A$ 进行拟合,并考虑隧道水平变形朝基坑方向的变形特性,公式采用反比例函数,结果如图15所示。

综上可得 $S_x/\delta x$ 关于 $H/h$ 和 $X/h$ 的拟合公式为

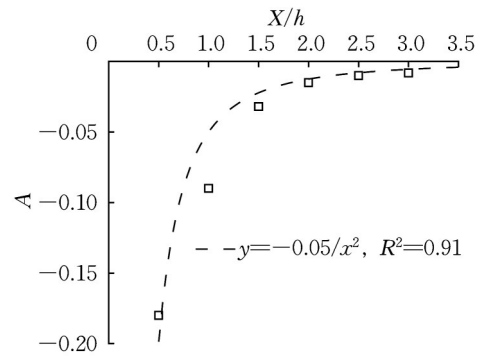


图15 参数A拟合公式

Fig.15 Fitting formula for parameter A

$$\frac{S_x}{\delta x} = \frac{-0.08h}{X} \left[ \left( \frac{H}{h} \right)^2 - 4.3 \right] \quad (2)$$

公式拟合与数值模拟结果对比如图16所示。可见,在隧道水平变形较大时两者吻合,在隧道水平变形较小时公式值略小。采用式(2)时,需注意适用范围为隧道埋深4.3倍开挖深度以内,工程实践中超过该范围时基坑开挖对隧道的影响可忽略。

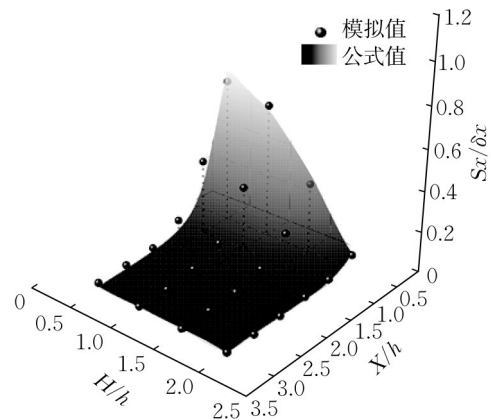


图16 数值模拟与公式计算结果对比

Fig.16 Comparison of results between numerical simulation and formula calculation

### 4.2 基于隧道水平变形要求的开挖影响区划分

根据《南京地区建筑基坑工程监测技术规程》(DGJ32/J 189—2015)<sup>[26]</sup>,支护结构安全等级为一级基坑的深层水平位移报警值为 $0.4\%h \sim 0.5\%h$ (围护为灌注桩或地下连续墙),二级基坑的深层水平位移报警值为 $0.6\%h \sim 0.7\%h$ (围护为灌注桩)、 $0.7\%h \sim 0.8\%h$ (围护为地下连续墙)。数值模拟结果表明,基坑开挖导致的隧道水平位移和竖向沉降大致相当。以基坑开挖对隧道水平变形影响公式为基础,考虑国家和各地区对隧道变形限值的规定,取隧道水平变形5、10、20 mm作为影响区划分标准,基

坑围护水平变形限值取  $0.5\%h$  作为支护结构安全等级一级的指标,  $0.8\%h$  作为支护结构安全等级二级的指标, 划分结果如图 17、18 所示。

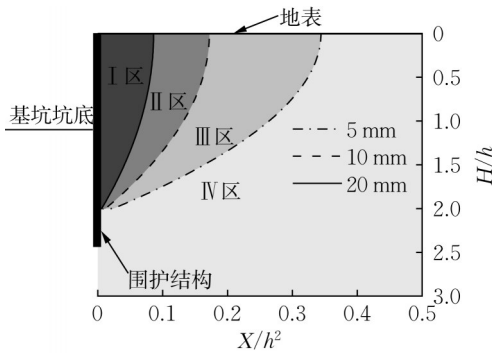


图 17 一级基坑影响区划分

Fig.17 Impact area of foundation pit at the first level

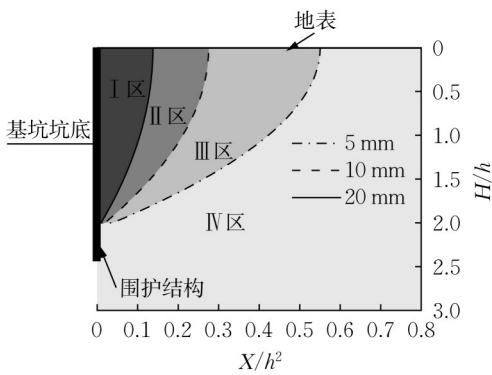


图 18 二级基坑影响区划分

Fig.18 Impact area of foundation pit at the second level

I 区为主要影响区, II 区为次要影响区, III 区为

一般影响区, IV 区为微弱影响区。当地铁隧道变形限值为 5 mm 时, 位于 I、II、III 区范围内的地铁隧道对基坑围护结构水平位移的要求比基坑规范更严格; 当地铁隧道变形限值为 10 mm 时, 位于 I、II 区范围内的地铁隧道对基坑围护结构水平位移的要求比基坑规范更严格; 当地铁隧道变形限值为 20 mm 时, 位于 I 区范围内的地铁隧道对基坑围护结构水平位移的要求比基坑规范要求更严格。工程快速应用顺序如下: 首先根据实际工程设计确定基坑开挖深度  $h$ 、基坑支护结构安全等级、隧道水平位移限值、隧道与基坑水平距离  $X$  以及隧道埋深  $H$ , 计算  $X/h^2$  和  $H/h$ , 然后查询相应的基坑影响区划分图, 如某工程为一级基坑,  $X/h^2$  为 0.2,  $H/h$  为 1.5, 隧道水平位移限值为 10 mm, 查图可知位于 II 区内, 则需对基坑围护提出更高的变形要求。通过公式计算可知, 围护水平变形限值为  $0.39\%h$  (规范限值为  $0.5\%h$ )。

### 4.3 工程对比验证

为了验证公式的合理性, 对南京地区的 4 个基坑工程实测数据进行对比, 结果如表 3 所示。可知, 总体上公式计算值与实测值符合较好, 前 3 个工程案例的计算误差均可以控制在 15% 以内。第 4 个案例存在一定偏差, 这主要是由于在基坑与地铁隧道之间距离基坑 8.4 m 处设计了一道隔离桩。隔离桩对隧道水平变形起到一定控制作用, 同时也对基坑本身的变形有影响, 而所提出的公式不能反映这两种因素的影响, 导致计算值与实测值存在一定偏差。基于南京地区软土地层提出的公式适用于未设置加固防护措施情况下基坑和隧道变形关系的计算, 当存在加固防护措施时, 还需对公式进行修正。

表 3 南京地区工程案例对比

Tab.3 Comparison of engineering cases in Nanjing area

编号	项目名称	$h/m$	$X/m$	$H/m$	$\delta x/mm$	$S_{x,测}/mm$	$S_{x,公式}/mm$	计算差值/mm	差值百分比/%
1	金融大厦基坑工程 <sup>[27]</sup>	15.0	15	18	29.6	6.8	6.6	-0.2	-2.9
2	南京河西某商业项目二期工程 <sup>[28]</sup>	14.5	56	13	36.8	3.0	2.7	-0.3	-10.0
3	金融城 <sup>[29]</sup>	19.3	26	12	15.0	3.0	3.4	0.4	13.3
4	银河城某基坑工程 <sup>[30]</sup>	11.0	20	12	13.0	2.2	1.7	-0.5	-22.7

## 5 结论

(1) 隧道最大水平位移、水平收敛值、竖向收敛值变化趋势大致相同, 数值随隧道与基坑水平距离增加呈快速减小的变化趋势, 随隧道埋深增加呈缓慢减小的变化趋势。

(2) 隧道水平位移受地下水位及地表超载的影

响较小, 而隧道竖向位移受两者影响较大。隧道水平变形主要受基坑开挖的影响。

(3) 给出了不同位置处隧道最大水平位移与围护结构水平位移的关系式, 并基于隧道保护要求及南京地区基坑开挖规范要求划分了基坑开挖对隧道影响的分布范围, 最后提出了基于隧道保护要求的基坑围护结构水平变形控制方法。



## 作者贡献声明:

宋博文:理论分析,论文撰写。  
秦会来:工程对比分析,研究资金获取。  
王 蓉:结果验证,论文修改。  
翟 雷:工程资料收集与分析。  
王 龙:数值计算,论文初稿撰写。  
吕玺琳:研究思路提出,论文指导及修改。

## 参考文献:

- [1] 王龙,朱长根,徐柯锋,等.上覆新填土软土深基坑开挖变形控制数值模拟[J].岩土工程学报,2021,43(S2):84.  
WANG Long, XU Changgen, XU Kefeng, *et al.* Numerical simulation of deformation control during excavation of deep foundation pit in soft soil with newly filled soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2):84.
- [2] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016(6):53.  
ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, *et al.* Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2016(6): 53.
- [3] 张治国,张孟喜,王卫东.基坑开挖对邻近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J].岩石力学,2011,32(7):2085.  
ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2085.
- [4] ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 244.
- [5] 魏纲,赵城丽.基坑开挖引起邻近地铁隧道的附加荷载计算方法[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3408.  
WEI Gang, ZHAO Chengli. Calculation method of additional load of adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3408.
- [6] ZHANG Junfeng, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, *et al.* Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 36: 24.
- [7] 姚宏波,李冰河,童磊,等.考虑空间效应的软土隧道上方卸荷变形分析[J].岩石力学,2020,41(7):2453.  
YAO Hongbo, LI Binghe, TONG Lei, *et al.* Analysis of metro tunnel deformation by upper excavation unloading considering spatial effect in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2453.
- [8] HU Z F, YUE Z Q, ZHOU J, *et al.* Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 933.
- [9] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, *et al.* Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (2): 93.
- [10] 李宇升,喻卫华.深基坑施工对紧邻地铁区间隧道结构影响分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):352.  
LI Yusheng, YU Weihua. Analysis on influence of deep pit excavation on neighboring metro tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 352.
- [11] 王卫东,沈健,翁其平,等.基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J].岩土工程学报,2006,28(S1):1340.  
WANG Weidong, SHEN Jian, WENG Qiping, *et al.* Analysis and countermeasures of influence of excavation on adjacent tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1340.
- [12] 邹伟彪,张冬梅,蔡雄威.基坑开挖对邻近地铁变形的实时监测与数值分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(S2):1728.  
ZOU Weibiao, ZHANG Dongmei, CAI Xiongwei. Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S2): 1728.
- [13] ZHENG Gang, WEI Shaowei. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(S2): 69.
- [14] NG C W W, SHI Jiangwei, HONG Yi. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 874.
- [15] NG C W W, SHI Jiangwei, MAŠÍN D, *et al.* Influence of sand density and retaining wall stiffness on three-dimensional responses of tunnel to basement excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1811.
- [16] HUANG Xu, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineer: Geotechnical Engineering, 2014, 167(1): 3.
- [17] 陈仁朋,AL-MADHAGI A,孟凡衍.基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):6.  
CHEN Renpeng, AL-MADHAGI A, MENG Fanyan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-off walls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (S2): 6.
- [18] 陈仁朋,刘书伦,孟凡衍,等.软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(6):1132.  
CHEN Renpeng, LIU Shulun, MENG Fanyan, *et al.* Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1132.
- [19] TAN Yong, LI Xiang, KANG Zhijun, *et al.* Zoned excavation



- of an oversized pit close to an existing metro line in stiff clay: case study [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(6): 04014158.
- [20] LIU Guobin, HUANG Pei, SHI Jiangwei, *et al.* Performance of a deep excavation and its effect on adjacent tunnels in Shanghai soft clay [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(6): 04016041.
- [21] 徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S1): 41.  
XU Zhonghua, ZONG Ludan, SHEN Jian, *et al.* Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 41.
- [22] 刘波. 软弱地层中基坑开挖卸荷引起邻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.  
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.
- [23] 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定 [S]. 上海: 上海市市政工程管理, 1994.  
Provisional prescription on protecting techniques of metro [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Administration, 1994.
- [24] 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Technical code for protection structure of urban rail transit: CJJ/T 202—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [25] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013 [S]. 北
- 京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [26] 南京地区建筑基坑工程监测技术规程: DGJ32/J 189—2015 [S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2015.  
Technical specification for monitoring of building excavation engineering in Nanjing area: DGJ32/J 189—2015 [S]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2015.
- [27] 邓松峰. 南京河西地区长江漫滩地貌基坑支护技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
DENG Songfeng. Study on foundation pit engineering technology of the Yangtze River floodplain in Hexi area of Nanjing [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [28] 王霆. 南京长江漫滩区基坑开挖与降水对既有地铁隧道影响的数值分析[J]. *都市快轨交通*, 2016, 29(3): 81.  
WANG Ting. Study on the effect of pit excavation and dewatering on metro tunnels in floodplain area of Nanjing Yangtze River [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2016, 29(3): 81.
- [29] 朱慧宇. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响的分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
ZHU Huiyu. Analysis of the influence of deep excavation on adjacent subway tunnel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [30] 胡俊涛. 有隔离桩时基坑开挖对侧方既有隧道的影响研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.  
HU Juntao. Influence of foundation pit excavation with isolation pile on lateral existing tunnel [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.

### (上接第 547 页)

- [21] ZHENG Y, FOX P, MCCARTNEY J. Numerical simulation of the deformation response of geosynthetic reinforced soil mini-piers [J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(3): 271.
- [22] 沈盼盼. 桥跨荷载下加筋土桥台变形特征数值模拟研究 [J]. *地基处理*, 2022, 4(4): 289.  
SHEN Panpan. Numerical simulation of deformation characteristics of reinforced soil abutment under bridge span load [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(4): 289.
- [23] ADAMS M T, NICKS J, STABILE T, *et al.* Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system, synthesis report [R]. McLean: Federal Highway Administration, 2012.
- [24] SAGHEBFAR M, ABU M F, ARDAH A, *et al.* Performance monitoring of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) in Louisiana [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45: 34.
- [25] TALEBI M. Analysis of the field behavior of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system during construction and operation [D]. Newark: University of Delaware, 2016.
- [26] 朱晨. 模块式加筋土桥台承载力模型试验研究及数值模拟 [D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2021.  
ZHU Cheng. Model test and numerical simulation of bearing capacity of modular reinforced soil abutment [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2021.
- [27] REN F F, XU H, JI Y, *et al.* Experimental study on the mechanical behavior of shored mechanically stabilized earth walls for widening existing reinforced embankments [J]. *Geotextiles Geomembranes*, 2022, 50: 737.
- [28] MIRMOAZEN S M, LAJEVARDI S H, MIRHOSSEINI S M, *et al.* Active lateral earth pressure of geosynthetic-reinforced retaining walls with inherently anisotropic frictional backfills subjected to strip footing loading [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104302.