

何忠明,王盘盘,王利军,等.深基坑施工对临近地铁隧道变形影响及参数敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2022,42(4):63-72.  
HE Zhong-ming,WANG Pan-pan,WANG Li-jun,et al. Influence of deep foundation pit construction on adjacent subway tunnel deformation and parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(4):63-72.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.04.007

# 深基坑施工对临近地铁隧道变形影响及参数敏感性分析

何忠明<sup>1</sup>,王盘盘<sup>1</sup>,王利军<sup>2</sup>,邱俊筠<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114; 2. 广州地铁集团有限公司,广东 广州 510380; 3. 赣州城市投资控股集团有限责任公司,江西 赣州 341000)

**摘 要:**为研究深基坑开挖回填及支护结构参数对临近地铁隧道和地下连续墙变形的影响,依托广州地铁 11 号线基坑工程,在验证数值计算可靠性的基础上,利用有限差分软件 FLAC3D 对基坑降水开挖及回填过程中临近地铁隧道和地下连续墙的变形规律进行分析,并采用正交试验方法研究支撑刚度、地下连续墙嵌固深度和地下连续墙厚度对地下连续墙最大水平位移、地铁隧道最大水平位移和竖向位移指标的影响,分析确定各因素对上述稳定性指标的影响效果。研究表明:随着基坑降水施工的开展,地下连续墙的水平位移不断增加,最大水平位移位置也从顶部逐渐向下移,整体呈现近似中间大、两头小的抛物线形;随着基坑施工的开展,地铁隧道的水平位移曲线变得越来越凸出,其位移值较大的区域集中在基坑范围内,最终最大水平位移为 8.55 mm,位于地铁隧道近基坑侧中轴线中部;地铁隧道在基坑施工作用下,产生的最大沉降量达 3.76 mm,位于地铁隧道近基坑侧的中部;施工完成时地下连续墙的最大水平位移相对于开挖完成时增长了 50% 左右;采用极差法分析时,因素Ⅲ(支撑刚度)作用下各稳定性指标最大变形均值的极值均大于其他因素,支撑刚度参数对地下连续墙和地铁隧道变形的作用效果最为显著,方差分析结果同样表明支撑刚度对地铁隧道最大水平位移的影响最为显著。在同地区类似基坑的设计时应注重支撑结构的设计。

**关键词:**隧道工程;超大深基坑;隧道变形;敏感性分析;数值模拟;地下连续墙

中图分类号:U451.5

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2022)04-0063-10

## Influence of deep foundation pit construction on adjacent subway tunnel deformation and parameter sensitivity analysis

HE Zhong-ming<sup>1</sup>, WANG Pan-pan<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>2</sup>, QIU Jun-jun<sup>3</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Guangzhou Metro Group Co. Ltd, Guangzhou 510380, Guangdong, China; 3. Ganzhou Urban Investment Group Co. Ltd, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to study the influence of deep foundation pit excavation, backfill and support structure parameters on the deformation of the adjacent subway tunnel and underground

收稿日期:2022-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51978084);广州地铁集团有限公司科研项目(HT200856);

湖南省研究生科研创新项目(CX20210752)

作者简介:何忠明(1980-),男,湖南永兴人,教授,工学博士,博士后,E-mail:hezongming45@126.com。

diaphragm wall, based on the foundation pit project of Guangzhou Metro Line 11, and the finite difference software FLAC3D was used to analyze the deformation law of the adjacent subway tunnel and underground diaphragm wall during the excavation and backfilling of the foundation pit precipitation. The effects of support stiffness, burial depth, and thickness of diaphragm wall on the maximum horizontal displacement of a diaphragm wall, and maximum horizontal and vertical displacement index of a subway tunnel were studied by an orthogonal test method. The influence of various factors on the stability indexes was analyzed and determined. The results show that with the development of the pit construction, the horizontal displacement of the underground diaphragm wall gradually increases and the position of the maximum horizontal displacement gradually moves down from the top. The horizontal displacement curve of the underground diaphragm wall is a parabola, and the values in the middle of the parabola are relatively large and the values at the two ends are relatively small. With the development of pit construction, the horizontal displacement curve of the subway tunnel becomes more and more prominent. The horizontal displacement of the subway tunnel is larger in the range of the pit. The maximum horizontal displacement is 8.55 mm, which is located in the middle of the subway tunnel near the pit side. During the construction of the foundation pit, the maximum settlement of the subway tunnel is 3.76 mm, which is located in the middle of the subway tunnel near the side of the foundation pit. The maximum horizontal displacement of the underground diaphragm wall at the completion of construction is about 50% higher than the underground diaphragm wall at the completion of excavation. When using the extreme difference method, the extreme value of the mean value of the maximum deformation of each stability index under the action of factor III (support stiffness) is the largest, and the effect of the support stiffness parameter on the deformation of the diaphragm wall and the subway tunnel is the most significant. The results of the ANOVA also indicate that the influence of the support stiffness on the maximum horizontal displacement of underground diaphragm wall and the subway tunnel is the most significant. The design of similar pits in the same area should focus on the design of the support structure. 10 tabs, 11 figs, 25 refs.

**Key words:** tunnel engineering; deep foundation pit; tunnel deformation; sensitivity analysis; numerical simulation; underground diaphragm wall

## 0 引言

随着地下空间的进一步开发,在既有的地铁隧道周围进行基坑工程施工的情况也越来越多。而基坑工程的开挖会对临近地铁隧道的稳定性产生较大影响,甚至造成严重危害。在国内外已建和在建的地铁基坑工程中,出现过因地质条件复杂,支护措施不当引起已有运营地铁隧道变形过大,造成隧道漏水、漏泥等工程事故,严重影响地铁隧道的使用<sup>[1-3]</sup>。因此,有必要进行基坑开挖对临近既有地铁隧道影响的研究。

在研究基坑开挖对临近建筑影响方面,Finno 等研究了基坑开挖对临近浅基础建筑的影响,在对现场实测数据分析后发现,靠近基坑侧的部分建筑发生了凹陷,其余部分出现了隆起<sup>[4]</sup>。在此基础上,

Zhang 等对隧道基坑开挖过程对已有临近建筑的影响进行了研究,发现既有建筑物的地层沉降不仅受基坑开挖施工的影响,还受到基坑施工中土层脱水的影响,而基坑中细砂和中砂主要构造也对基坑脱水土体施工产生了显著影响<sup>[5]</sup>。刘念武等对深厚软黏土地区某地铁车站深基坑开挖对邻近建筑的影响进行了系统性监测和分析,发现基坑开挖可引起较大的土体沉降及沉降差,嵌岩桩基础建筑的变形最小,浅基础建筑的变形明显大于桩基础建筑<sup>[6]</sup>。在此基础上,韩健勇等将有限元软件计算结果与接近浅基础建筑物的某桩锚支护深基坑的现场监测数据进行对比分析后,优选出了较合适的本构模型,并研究了邻近建筑物位置和地基附加应力对基坑及邻近建筑物本身的影响<sup>[7]</sup>。张治国等对基坑-建筑物的

相互作用进行了三维有限元模拟,揭示了基坑开挖面与建筑物成不同角度的条件下,开挖时对建筑物的影响<sup>[8-10]</sup>。在此基础上,施有志等以厦门市某紧邻建筑物的深基坑工程为背景,利用有限元软件建立相应的模型进行模拟计算,研究土体小应变刚度行为、基坑与建筑物的相互作用条件下,开挖过程中引起临近建筑物变形特征,并以此来评价基坑开挖对临近建筑物的安全影响<sup>[11]</sup>。

近年来,学者们用不同方法进行了基坑开挖对临近地铁隧道影响的研究,取得了一定的成果。在理论分析方面,Liang等提出了一种计算基坑开挖对临近盾构隧道变形影响的理论方法,将盾构隧道视为修正后的 Pasternak 模型的连续 Euler-Bernoulli 梁,先通过 Mindlin 解来计算作用在下层隧道上的开挖引起的垂直卸载应力,而忽略现有的盾构隧道的存在,然后使用有限差分法分析了盾构隧道由于施加的垂直卸载应力而引起的响应,最后与三维有限元分析和 2 次公开提交的测量结果进行比较,验证了该方法的可行性<sup>[12]</sup>。在此基础上,Huang 等根据临近开挖引起的既有隧道围岩变形特征,建立了新的破坏机理,利用这种破坏机理,在上限定理的框架下,结合变分法推导了既有隧道围岩滑移面方程的上限解,并给出了不同参数下滑移面的形状和范围<sup>[13]</sup>。在现场实测方面,沈雯等通过对上海某近邻地铁车站及区间隧道的超深基坑工程现场实测数据进行研究,分析了基坑开挖对地铁车站及区间隧道水平位移、竖向沉降和墙体倾斜的影响规律<sup>[14]</sup>。魏纲等通过对紧邻大型基坑开挖的某地铁隧道变形进行监测,通过研究监测数据,分析了“坑中坑”施工控制措施以及在基坑外设置隔离桩的加固措施对地铁隧道变形的作用效果,并提出了相应的地铁隧道位移计算公式<sup>[15-17]</sup>。Zhang 等通过 Plaxis2D 有限元软件进行数值模拟,生成大量人工数据,并对开挖宽度、开挖深度、系统刚度、土壤性质、隧道相对开挖位置等因素对隧道位移的影响进行回归分析,并建立了乘法回归方程,提出了用于预测软土层中横向相邻深基坑开挖引起的既有隧道位移的简化模型<sup>[18]</sup>。在数值模拟方面,Ye 等以工程实例为背景研究了基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响,通过采用有限元分析软件 Plaxis3D 对整个开挖过程进行了数值模拟,并根据仿真结果对基坑的结构设计进行优化,以保证基坑的稳定性和既有地铁隧道结构的安全性,其研究表明,基坑开挖卸荷对地铁隧道的影响与地铁距基坑的距离,一次开

挖的土方量以及工程地质条件密切相关<sup>[19]</sup>。郑刚等则通过有限元软件进行了基坑施工对临近地铁隧道变形影响的研究,在此基础上,对几种常用隧道变形控制方法进行了对比和评价,并提出了基坑开挖时临近地铁隧道变形的控制建议<sup>[20-24]</sup>。在此基础上,Chen 等利用三维数值模拟软件,进行了临近大型基坑开挖对敏感软土地区现有地铁隧道影响的研究,得到了基坑开挖过程中左隧道的弯矩、变形变化,以及基坑、周围土体和紧邻既有双洞隧道三者之间相互作用的机理,并建议采用分段分块开挖、对土体进行加固以及增加防渗墙等措施,以降低基坑开挖对临近隧道的影响<sup>[25]</sup>。

综上所述,目前学者们通过理论分析、现场实测、数值模拟等方法,已进行了大量关于基坑开挖对临近地铁隧道及临近建筑影响方面的研究,但在基坑开挖时考虑基坑支护结构参数对临近隧道及地下连续墙变形影响方面仍鲜有研究。因此,本文依托广州地铁 11 号线琶洲站超大深基坑项目,通过 FLAC3D 软件对深基坑的开挖及回填过程进行了模拟,探讨了深基坑开挖及回填影响下,围护结构地下连续墙和临近地铁隧道整体的变形规律,采用正交试验方法研究了地下连续墙厚度、地下连续墙嵌入深度和支撑刚度在基坑开挖、回填过程中对基坑及临近地铁隧道变形的影响,分析了各因素对基坑及临近地铁隧道稳定性的影响程度,以为同地区类似基坑工程的合理设计提供一定的指导。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

拟建设的广州地铁 11 号线琶洲站与珠三角城际轨道广佛环线琶洲站基坑全长 302 m,标准段宽为 75.0 m,其北侧城际配线明挖区间基坑长 224 m,基坑开挖深度为 27.3~31.7 m,开挖面积及深度都较大,属于超大深基坑工程。主体结构采用地下连续墙+内支撑方式作为支护结构。琶洲站超大深基坑呈刀把形,采用明挖顺作法同时施工,分段、分层开挖,支护结构采用地下连续墙加竖向 4 道内支撑方案,四道支撑均采用钢筋混凝土支撑,支护结构平面简图如图 1 所示。南面紧邻地铁 8 号线,大致呈东西走向。临近的区间隧道为现浇钢筋混凝土箱形框架结构,是采用敞口明挖顺作法施工建成的,距基坑的最近距离约为 33 m,隧道一侧的风机房距基坑仅 27 m。基坑与地铁隧道位置关系及地铁隧

道结构如图 2 所示。

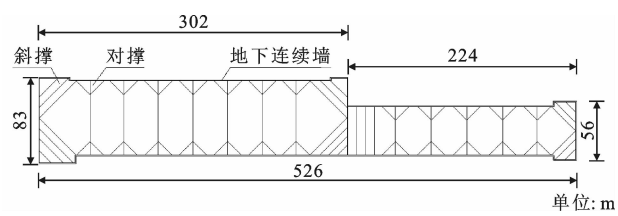


图 1 支护结构平面简图

Fig. 1 Plane diagram of supporting structure

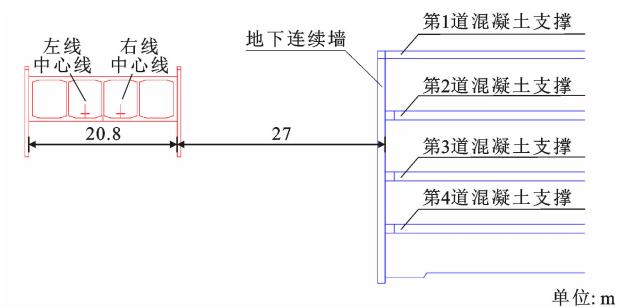


图 2 琶洲站与既有 8 号线区间隧道位置关系

Fig. 2 Location relationship between Pazhou Station and existing Line 8 section tunnel

1.2 工程地质

工程地处珠江干流与支流黄埔涌之间,为珠江开始进入河网地带,所处地形平坦,场地标高 7.75~9.46 m,地貌为海陆交互相冲积平原,场地范围内地层由上至下依次为素填土、淤泥质土、中砂、黏性土、残积粉土、全风化岩、强风化岩、中风化岩和弱风化岩,场地土层分布及物理力学性质如表 1 所示。根据地质勘查报告,该工程潜水年平均水位在 2.0~6.5 m,水位呈季节性变动,本基坑计算采用地下水位埋深为 4 m。采用逐层降水方式,进行施工降水研究,开挖前控制地下水位在开挖层底面以下 1.0 m。

表 1 岩土体的物理力学参数

层号	土类名称	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	固结快剪		变形模量/ $\text{MPa}$	泊松比	渗透系数 $k$ / ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
			黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦角/ $^{\circ}$			
1	素填土	19.9	10.0	10	3	0.33	
2	淤泥质土	16.7	8.5	5	4	0.40	0.01
3	中砂	19.0	0.0	29	20	0.22	15.00
4	黏性土	19.8	20.0	16	16	0.30	0.03
5	残积粉土	19.6	23.0	19	32	0.29	0.50
6	全风化岩	20.2	31.5	22	50	0.28	0.20
7	强风化岩	21.5	39.0	28	100	0.28	0.70
8	中风化岩	24.7	300.0	32	850	0.29	0.70
9	弱风化岩	25.5	500.0	40	3 000	0.28	0.10

2 深基坑变形数值模拟

2.1 数值计算模型

本文采用 FLAC3D 有限差分软件进行基坑施工全过程模拟计算,根据建模经验,结合基坑施工方案及基坑特性,模型 X 方向长度为 730 m,Y 方向长度为 240 m,Z 方向长度为 100 m,计算模型见图 3。

模型底面约束全位移,同时设置为不透水边界,4 个侧面约束法向位移,为定水头边界,上表面为自由边界。地铁隧道采用实体单元模拟,地下连续墙采用衬砌结构单元(liner)模拟,设置为不透水;内支撑采用梁结构单元(beam)模拟,第 1 层基坑支护与临近地铁隧道的结构模型见图 4。

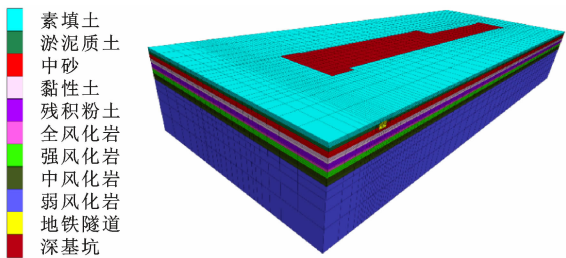


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation Model

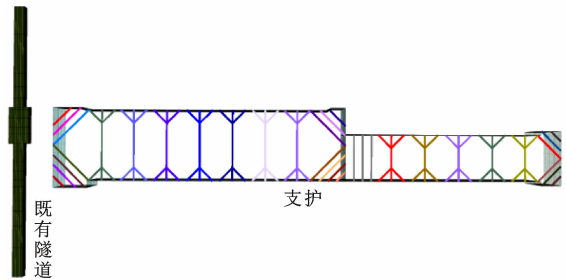


图 4 第 1 层基坑支护与临近地铁隧道结构模型

Fig. 4 Structural model of first floor foundation pit support and adjacent subway tunnel

本文采用 Mohr-Coulomb 本构模型对岩土体的应力-应变行为进行描述,地铁隧道采用线弹性本构模型进行模拟。基坑工程地质条件复杂多样,根据岩土工程勘察报告及广州地区各岩土层的力学计算参数经验值,适当简化土层地质分布,将土层分为 9 层,得到土层分布及参数,见表 1,其他结构计算参数如表 2 所示。

2.2 施工工况模拟

为接近基坑工程的实际情况,本文对超大深基坑施工全过程进行模拟。首先对工程模型施加重力荷载,平衡地应力;随后依次模拟地铁隧道施工和安装地下连续墙,分别计算达到平衡后进行清零;之后

表 2 相关结构的计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of related structures

名称	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	尺寸/mm
地下连续墙	25.0	31.5	0.167	厚度 1 000
钢筋混凝土支撑	25.0	31.5	0.167	宽 900,长 1 200
主体结构	25.0	31.5	0.167	
钢支撑	78.5	206.0	0.250	直径 800,厚度 20

模拟基坑降水开挖施工,土方开挖至相应的深度,然后及时施作内支撑;待开挖施工全部完成后,开始进行主体浇筑和拆除内支撑;主体浇筑完成后,回填基坑,恢复路面。具体施工工况见表 3。

表 3 施工工况

Tab. 3 Construction conditions

工况	施工步骤
1	开挖土体至-2 m,在-1.5 m 处架设第 1 道支撑
2	降水后开挖土体至-10.2 m,在-9.7 m 处架设第 2 道支撑
3	降水后开挖土体至-16.9 m,在-16.4 m 处架设第 3 道支撑
4	降水后开挖土体至-23.9 m,在-24.4 m 处架设第 4 道支撑
5	降水后开挖土体至基底,施作底板和钢换撑
6	拆除第 4 道支撑,施作负二层楼板
7	拆除第 3 道支撑,施作负一层楼板
8	拆除第 2 道支撑,施作顶板
9	拆除钢换撑、第 1 道支撑及中立柱,基坑回填,恢复路面

2.3 数值计算模型的验证

本研究将地下连续墙及基坑第 1 层施工完成后,邻近地铁隧道在监测点的变形与数值模拟计算结果进行对比,以验证计算模型的合理性。地铁隧道监测点的布置如图 5 所示。地下连续墙及基坑第 1 层施工完成后,监测点处地铁隧道的水平位移对比如图 6 所示。由图 6 可知,在地下连续墙及基坑第 1 层施工完成后,地铁隧道监测点水平位移的数值计算与实测结果大致吻合,说明本文数值模型对邻近地铁隧道变形模拟较准确,模型参数的选取比较合理。

3 计算结果分析

3.1 围护结构地下连续墙变形分析

图 7 为基坑降水施工过程中,地铁侧地下连续墙中心截面处的水平位移曲线。由图 7 可知:随着施工的开展,地下连续墙朝基坑内侧的变形逐渐增加,最大水平位移处的位置逐渐向坑底移动。工况 1 的开挖深度较小,因此地下连续墙的水平位移曲线影响深度较小且呈悬臂形;而在工况 2~9 中,墙体的变形随深度的增加先逐渐增大,增长至最大值后

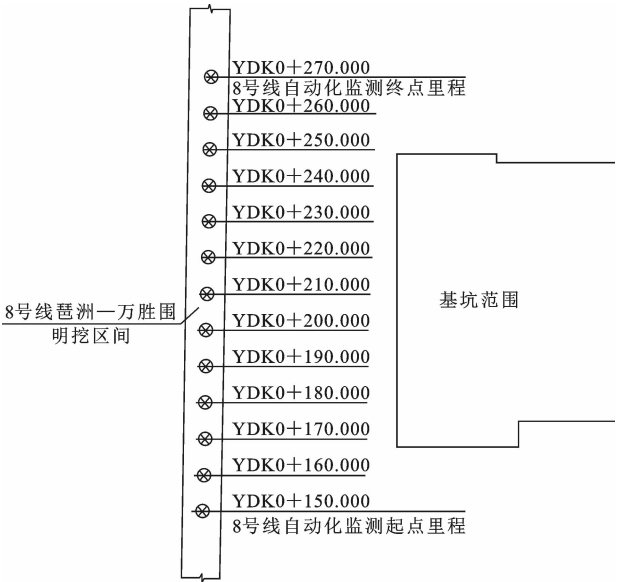


图 5 邻近既有地铁隧道监测点平面布置  
Fig. 5 Layout plan of monitoring points adjacent to existing subway tunnel

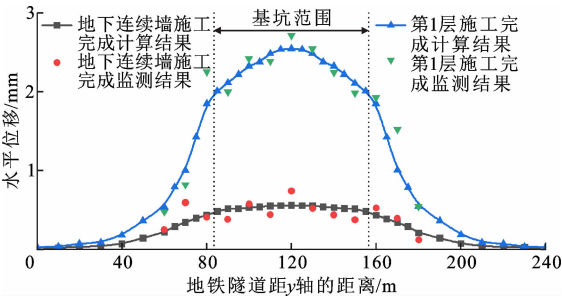


图 6 地铁隧道监测点水平位移对比曲线  
Fig. 6 Horizontal displacement comparison curves of subway tunnel monitoring points

再逐渐减小,呈现近似为中间大两头小的抛物线形。开挖至基坑底部时最大位移为 17.40 mm,位于地表下 15 m 处;然后随着主体浇注及内支撑拆除,地下连续墙侧移继续发展,至工况 9 后,回填基坑,最大位移达到 26.15 mm,位于地表下 16 m 处,相比开挖完成后增长了 50.29%,这是由于内支撑的拆除,使得围护结构的水平约束得到了一定释放,导致水平位移进一步发展。

3.2 临近地铁隧道变形

由于本模型地铁隧道的走向是沿着 y 轴,与临近的超大深基坑短边平行,为了更好分析超大深基坑施工对地铁隧道结构的变形规律,故沿着模型的 y 轴方向选取地铁隧道 3 条中轴线,即近基坑侧中轴线监测点 a、地铁隧道隔墙中轴线监测点 b 和远离基坑侧中轴线监测点 c,进行水平位移的监测;地铁列车运行时,对地铁轨面要求很高,故选取地铁隧



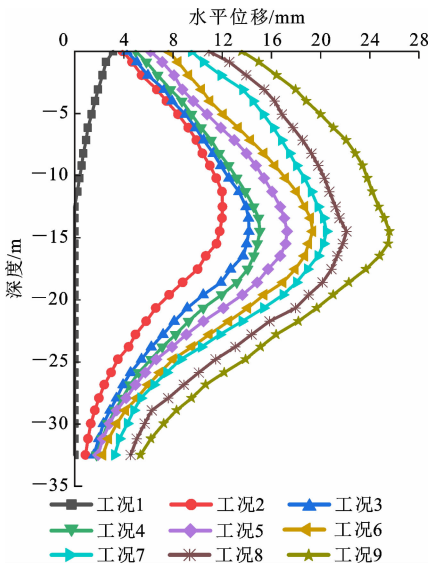


图 7 临近地铁隧道侧围护结构水平位移曲线  
Fig. 7 Horizontal displacement curves of retaining structure near subway tunnel

道底部的 3 条轴线监测点  $d$ 、 $e$  和  $f$ ，进行竖向位移的监测，其横截面监测布置点示意如图 8 所示。

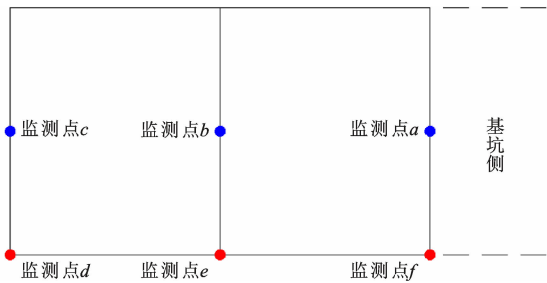


图 8 地铁隧道结构横断面监测布置点示意  
Fig. 8 Sketch of monitoring layout points of cross section of subway tunnel structure

图 9 为基坑施工过程中，各工况下地铁隧道中轴线监测点  $a$  水平位移曲线，可知基坑开挖回填过程中，随着施工的进展，地铁隧道的水平位移不断增加，其位移值较大的区域集中在基坑范围内，且随着远离基坑而迅速减少，逐渐降为零。前 5 次开挖工况影响下，产生的最大位移依次是 0.78、2.53、3.70、4.61、5.12 mm，均位于基坑中线位置，且其影响随开挖深度的增加愈发显著，水平位移曲线变得越来越凸出；基坑开挖完成后，基坑内主体浇筑过程中，4 次工况下产生的最大水平位移分别为 5.47、6.63、7.87、8.55 mm。由于内支撑逐步拆除，工况 7 和 8 的水平位移分别增加了 1.16、1.24 mm，而工况 6 和 9 增长幅度较小，可能是因为工况 6 施作了底板，一定程度上限制了坑

底隆起的发展，而工况 9 虽然拆除了第 1 道支撑以及格立柱，但此时对基坑影响不大。

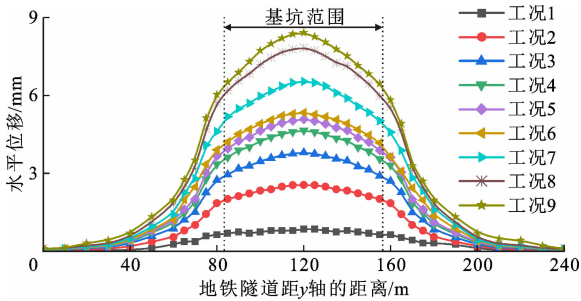


图 9 各工况下地铁隧道中轴线监测点  $a$  水平位移曲线  
Fig. 9 Horizontal displacement curves of subway tunnel axis monitoring point  $a$  under various working conditions

图 10 为基坑开挖及回填过程中，各工况下地铁隧道底部近基坑侧轴线监测点  $f$  竖向位移曲线（正值代表隆起值，负值代表下沉值）。由图 10 可知：由于工况 1 开挖深度较浅，地铁隧道竖向位移很小，最大竖向位移仅为  $-0.20$  mm；随着开挖深度增加，工况 2 中地铁隧道在基坑边缘附近出现了隆起，最大隆起量仅为 0.17 mm，对地铁隧道结构影响不大，最大竖向位移为  $-0.59$  mm，位于基坑中心偏右位置；开挖施工进行到工况 3，地铁隆起逐渐消失，最大竖向位移增大了近 3 倍，达到了  $-1.54$  mm，至开挖到基坑底部时，工况 5 的最大竖向位移达到了  $-2.31$  mm，均位于基坑中心附近。基坑内主体浇筑中，4 次工况产生的竖向位移分别是  $-2.43$ 、 $-2.97$ 、 $-3.57$  和  $-3.76$  mm。其中，与前一工况相比，工况 7 和 8 的竖向位移增幅均较大，分别增加了 22.2%、20.2%，施工时应注意内支撑拆除对地铁隧道的影响。

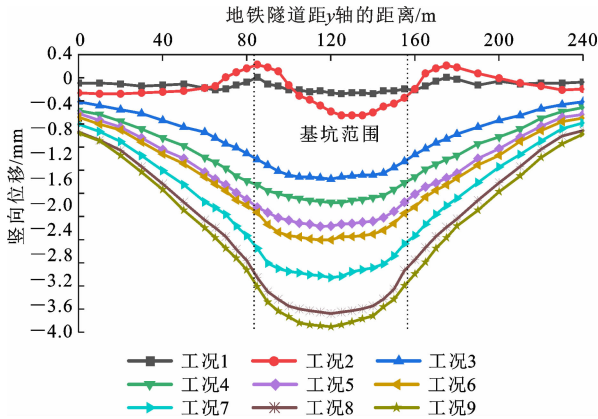


图 10 各工况下地铁隧道底部轴线监测点  $f$  竖向位移曲线  
Fig. 10 Horizontal displacement curves of subway tunnel bottom axis monitoring point  $f$  under various working conditions

4 支护结构的影响

基坑围护结构变形对临近基坑的地铁隧道结构变形影响很大。在超大深基坑施工过程中,开挖时土体卸载作用、降水以及开挖完成后从下往上拆除支撑,都会导致支护体系产生不同程度的变形。为此,本节通过正交试验研究了地下连续墙厚度、地下连续墙嵌入深度、支撑刚度对基坑及临近地铁隧道变形的影响。

4.1 正交试验设计

本文用基坑降水开挖完成时和施工完成后地下连续墙的最大水平位移,以及施工完成后地铁隧道的最大竖向和最大水平位移来衡量基坑的稳定性。在已有研究的基础上,结合项目设计方案,本文地下连续墙厚度除取标准算例中墙厚 1.0 m 外,还取 0.8、0.9 和 1.1 m,而地下连续墙嵌固深度除取标准算例中嵌固深度 2.5 m 外,还取 4、6 和 8 m。

支撑刚度对地下连续墙的变形和弯矩影响很大,保证支撑体系具有足够的刚度,可以有效控制地下连续墙的变形,防止基坑发生过大变形从而导致基坑不稳定,危及临近地铁隧道的安全。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)规定,当支撑腰梁或冠梁的挠度可以忽略时,水平支撑刚度系数  $k_R$  可按式计算

$$k_R = \frac{\alpha_R E A b_a}{\lambda l_0 s}$$

式中: $\lambda$  为支撑不动点调整系数; $\alpha_R$  为支撑松弛系数,对混凝土支撑和预加轴向压力的钢支撑取 1.0,对不预加支撑轴向压力的钢支撑取 0.8~1.0; $E$  为支撑材料的弹性模量(kPa); $A$  为支撑的横截面面积( $m^2$ ); $l_0$  为受压支撑构件的长度(m); $s$  为支撑水平间距(m); $b_a$  为挡土结构计算宽度(m)。

为此,本文通过调整支撑的截面(宽×长)来实现支撑刚度的变化,为分析支撑刚度的影响,分别计算支撑截面为 900 mm×1 000 mm、900 mm×1 200 mm、1 000 mm×1 200 mm 和 1 100 mm×1 200 mm(对撑由 2 根砟支撑+砟板撑组成,以支撑截面为 1 000 mm×1 200 mm 为例,如图 11 所示),则相对于横截面为 900 mm×1 200 mm 的支撑刚度比分别为 0.83、1.00、1.11、1.22。

因此,本文试验采用三因素四水平正交试验方案,共 16 组试验,每组的因素和水平设计如表 4 所示。

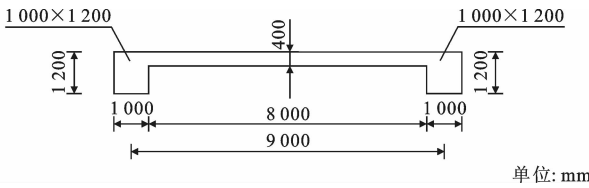


图 11 对撑截面示意

Fig. 11 Cross section sketch of brace

表 4 正交试验的因素与水平

Tab. 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	影响因素		
	地下连续墙厚度(因素 I)/m	地下连续墙嵌固深度(因素 II)/m	支撑刚度(因素 III)
1	0.8	2.5	900 mm×1 000 mm
2	0.9	4.0	900 mm×1 200 mm
3	1.0	6.0	1 000 mm×1 200 mm
4	1.1	8.0	1 100 mm×1 200 mm

注:支撑刚度由支撑截面面积(宽×长)控制。

4.2 正交试验结果及分析

采用 FLAC3D 有限差分软件对基坑降水开挖过程进行模拟,得到 16 组正交试验结果,如表 5 所示。

根据表 5 的正交试验结果,采用极差分析法对其进行分析,地下连续墙最大水平位移、地铁隧道的最大水平位移和竖向位移的极差分析结果,如表 6~表 9 所示。表中  $K_n$  是指特定因素在  $n$  水平上的试验值之和, $\bar{K}_n$  是指特定因素在  $n$  水平上的试验值的均值。由表 6~表 9 可知:随着基坑施工的开展,施工完成时地下连续墙的最大水平位移要大于开挖完成时,且增长率为 50%左右。对比表 6~表 9 中各因素水平作用下最大变形均值的极值大小可知,因素 III 的极值均大于因素 II 和因素 I。极值越大说明对地下连续墙和地铁隧道变形影响越大,即试验选取的各因素中对地下连续墙和地铁隧道变形的影响最大的是支撑刚度,地下连续墙厚度次之,地下连续墙嵌固深度对变形的影响最小。

根据施工完成后地铁隧道的最大水平位移进行方差分析计算,计算结果见表 10。经查表后得显著性水平  $p=0.1$  时,F 值为 3.29,可见,支撑刚度对地铁隧道最大水平位移的影响最为显著,地下连续墙厚度的影响比较显著,而嵌入深度无显著影响,这与极差分析结果相符。

5 结 语

(1)随着基坑开挖深度的增加,地下连续墙向

表 5 正交试验方案及结果

Tab. 5 Scheme and results of orthogonal test

试验 编号	因素			各衡量指标最大值/mm			
	因素Ⅰ/m	因素Ⅱ/m	因素Ⅲ	地下连续墙最大水平 位移(开挖完成)	地下连续墙最大水平 位移(施工完成)	地铁隧道最大 水平位移	地铁隧道最大 竖向位移
1	0.8	2.5	900 mm×1 000 mm	22.55	32.76	11.36	−4.30
2	0.8	4.0	900 mm×1 200 mm	19.80	30.16	9.95	−4.06
3	0.8	6.0	1 000 mm×1 200 mm	18.04	26.28	8.73	−3.71
4	0.8	8.0	1 100 mm×1 200 mm	16.98	25.80	8.37	−3.54
5	0.9	2.5	900 mm×1 200 mm	19.70	30.00	9.76	−3.99
6	0.9	4.0	1 000 mm×1 200 mm	17.93	26.20	8.59	−3.64
7	0.9	6.0	1 100 mm×1 200 mm	16.84	25.14	8.34	−3.51
8	0.9	8.0	900 mm×1 000 mm	19.94	30.04	10.12	−4.10
9	1.0	2.5	1 000 mm×1 200 mm	17.26	25.97	8.42	−3.57
10	1.0	4.0	1 100 mm×1 200 mm	16.71	24.55	8.22	−3.30
11	1.0	6.0	900 mm×1 000 mm	19.02	29.32	9.84	−3.74
12	1.0	8.0	900 mm×1 200 mm	18.12	27.25	9.09	−3.66
13	1.1	2.5	1 100 mm×1 200 mm	16.57	24.03	8.07	−2.26
14	1.1	4.0	900 mm×1 000 mm	18.64	28.47	9.59	−3.68
15	1.1	6.0	900 mm×1 200 mm	17.63	26.24	8.69	−3.61
16	1.1	8.0	1 000 mm×1 200 mm	16.90	24.95	8.29	−3.47

表 6 开挖完成时地下连续墙最大水平位移极差分析结果

Tab. 6 Analysis results of maximum horizontal displacement  
range of diaphragm wall after excavation

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$\bar{K}_4$	极值
Ⅰ	77.37	74.41	71.11	69.74	19.34	18.60	17.78	17.44	1.90
Ⅱ	76.08	73.08	71.53	71.94	19.02	18.27	17.88	17.99	1.14
Ⅲ	80.15	75.25	70.13	67.10	20.04	18.81	17.53	16.78	3.26

表 7 施工完成时地下连续墙最大水平位移极差分析结果

Tab. 7 Analysis results of maximum horizontal displacement  
range of diaphragm wall after construction

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$\bar{K}_4$	极值
Ⅰ	115.00	111.38	107.09	103.69	28.75	27.85	26.77	25.92	2.83
Ⅱ	112.76	109.38	106.98	108.04	28.19	27.35	26.75	27.01	1.44
Ⅲ	120.59	113.65	103.40	99.52	30.15	28.41	25.85	24.88	5.27

表 8 地铁隧道最大水平位移极差分析结果

Tab. 8 Analysis results of maximum horizontal displacement  
range of subway tunnel

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$\bar{K}_4$	极值
Ⅰ	38.41	36.81	35.57	34.64	9.60	9.20	8.89	8.66	0.94
Ⅱ	37.61	36.35	35.60	35.87	9.40	9.09	8.90	8.97	0.43
Ⅲ	41.91	37.49	34.03	33.00	10.27	9.33	8.50	8.25	2.02

基坑内的水平位移不断增加,最大水平位移位置也从顶部逐渐向下移,整体呈现近似中间大、两头小的抛物线形。

(2)随着超大深基坑施工的进行,地铁隧道的水平位移不断增加,水平位移曲线变得越来越凸出,其

表 9 地铁隧道最大竖向位移极差分析结果

Tab. 9 Analysis results of maximum vertical displacement  
range of subway tunnel

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	$\bar{K}_4$	极值
Ⅰ	−15.61	−15.24	−14.27	−13.02	−3.90	−3.81	−3.57	−3.26	0.64
Ⅱ	−14.12	−14.68	−14.57	−14.77	−3.53	−3.67	−3.64	−3.69	0.16
Ⅲ	−15.82	−15.32	−14.39	−12.61	−3.96	−3.83	−3.60	−3.15	0.81

表 10 地铁隧道最大水平位移方差分析结果

Tab. 10 Variance analysis results of maximum horizontal  
displacement of subway tunnel

因素	平方和	自由度	均方和	F 值	F 临界值	显著水平
地下连续墙厚度	1.997	3	0.666	8.818	3.29	*
嵌入深度	0.595	3	0.198	2.628	3.29	
支撑刚度	9.674	3	3.224	42.724	3.29	**
误差	0.453	6	0.075			

注: \*、\*\* 分别为  $p=0.01$  和  $0.05$  显著水平。

位移值较大的区域集中在基坑范围内,随着远离基坑而迅速减少,逐渐降为零,基坑开挖及回填完成后,最终最大水平位移为 8.55 mm,位于地铁隧道近基坑侧中轴线中部。

(3)当开挖深度不大时,地铁隧道的竖向沉降值不大,坑角处对应的地铁隧道底部产生了一定的弹性隆起,随着开挖的进行,下沉继续发展,隆起消失,至开挖及回填完成后,最大沉降量达 3.76 mm,位于地铁隧道近基坑侧的中部。

(4)施工完成时地下连续墙的最大水平位移相



对于开挖完成时增长了50%左右。

(5)在试验选取的各因素中,对地下连续墙和地铁隧道变形影响最大的是支撑刚度,地下连续墙厚度次之,地下连续墙嵌固深度的影响最小。

(6)本文考虑到计算效率等因素,对模型的周边环境及地下水作用情况进行了简化。因此,下一阶段将考虑建立更为复杂的数值模型,增加更多的作用因素进行深入系统研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 彭智勇,杨秀仁. 基坑分块开挖参数对邻近地铁盾构隧道的变形影响分析[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 206-210.  
PENG Zhi-yong, YANG Xiu-ren. The deformation influence about block excavation parameters of foundation pit adjacent to metro shield tunnels[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 206-210.
- [2] 王利军,邱俊筠,何忠明,等. 超大深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 77-85.  
WANG Li-jun, QIU Jun-jun, HE Zhong-ming, et al. Influence of excavation of super deep foundation pit on deformation of adjacent metro tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 77-85.
- [3] 陈辉. 超大深基坑开挖对临近地铁隧道影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 90-95.  
CHEN Hui. Analysis of the influence of excavation of super-large deep foundation pit on adjacent subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 90-95.
- [4] FINNO R J, BRYSON L S. Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2002, 16(1): 10-20.
- [5] ZHANG X M, YANG J S, ZHANG Y X, et al. Cause investigation of damages in existing building adjacent to foundation pit in construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 83: 117-124.
- [6] 刘念武,陈奕天,龚晓南,等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.  
LIU Nian-wu, CHEN Yi-tian, GONG Xiao-nan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
- [7] 韩健勇,赵文,李天亮,等. 深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 149-156.  
HAN Jian-yong, ZHAO Wen, LI Tian-liang, et al. Field measurement and numerical analysis of the influences between the deep excavation and adjacent buildings[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 149-156.
- [8] 张治国,贾延臣,王卫东. 邻近建筑与基坑边成任意角度受基坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增2): 617-628.  
ZHANG Zhi-guo, JIA Yan-chen, WANG Wei-dong. Influence analysis of foundation pit excavation on building in arbitrary angle with foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 617-628.
- [9] 张治国,张谢东,王卫东. 临近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(11): 93-97.  
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Xie-dong, WANG Wei-dong. Numerical modeling analysis on deformation effect of metro tunnels due to adjacent excavation of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(11): 93-97.
- [10] 张治国,杨轩,赵其华,等. 浅基础框架建筑受邻近基坑开挖影响简化分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 224-227.  
ZHANG Zhi-guo, YANG Xuan, ZHAO Qi-hua, et al. Simplified analysis of frame buildings with shallow foundation induced by excavation of adjacent foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 224-227.
- [11] 施有志,柴建峰,赵花丽,等. 地铁深基坑开挖对邻近建筑物影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 927-935.  
SHI You-zhi, CHAI Jian-feng, ZHAO Hua-li, et al. Study on the impact of metro deep foundation excavations on neighboring buildings[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 927-935.
- [12] LIANG R Z, WU W B, YU F J, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 94-105.
- [13] HUANG F, ZHANG M, WANG F, et al. The failure mechanism of surrounding rock around an existing shield tunnel induced by an adjacent excavation[J].

- Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103236.
- [14] 沈雯, 沈蓉, 孙廉威. 超深基坑分区开挖对侧方地铁影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增 1): 354-360.
- SHEN Wen, SHEN Rong, SUN Lian-wei. Field monitoring and analysis on the influence of deep excavation on adjacent metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 354-360.
- [15] 魏纲, 厉京, 宣海力, 等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 718-726.
- WEI Gang, LI Jing, XUAN Hai-li, et al. Monitoring data analysis on the influence of large deep foundation pit excavation on nearby metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 718-726.
- [16] 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.
- [17] 魏纲, 胡凌威, 朱佳定. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 46-49, 56.
- WEI Gang, HU Ling-wei, ZHU Jia-ding. Numerical analysis of effect of foundation pit excavation on underneath existed shield tunnel[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2014, 36(4): 46-49, 56.
- [18] ZHANG D M, XIE X C, LI Z L, et al. Simplified analysis method for predicting the influence of deep excavation on existing tunnels [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121: 103477.
- [19] YE S H, ZHAO Z F, WANG D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit[J]. Underground Space, 2021, 6(4): 421-431.
- [20] 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.
- [21] 郑刚, 潘军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1181-1190.
- ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xue-song, et al. Passive control and active grouting control of horizontal deformation of tunnels induced neighboring excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1181-1190.
- [22] 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.
- [23] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1109-1116, 1140.
- ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1109-1116, 1140.
- [24] ZHENG G, WEI S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(2): 69-75.
- [25] CHEN R P, MENG F Y, LI Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 224-235.