

引文格式: 苏 栋, 张小妹, 张国涛, 等. 基坑开挖导致邻近既有隧道变形的主动控制研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(4): 130-138.
SU Dong, ZHANG Xiaomei, ZHANG Guotao, et al. Research on active control of deformation of existing tunnel caused by foundation pit excavation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 130-138.

DOI: 10.19815/j.jace.2022.08053

基坑开挖导致邻近既有隧道变形的主动控制研究

苏 栋^{1,2}, 张小妹³, 张国涛^{1,2}, 雷国平⁴, 陈湘生^{1,2}

(1. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 3. 深圳市前海建设投资控股集团有限公司, 广东 深圳 518066; 4. 佛山大学 土木与交通学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 采用有限元分析方法对新型支撑轴力主动控制系统进行了研究, 提出了一种支撑轴力设计方法; 在对支撑不施加主动轴力的情况下, 研究了花岗岩残积土地层中基坑开挖对既有隧道的影响, 根据基坑侧边不同位置隧道在基坑开挖作用下的位移划分了基坑开挖影响区; 基于提出的轴力设计方法, 研究了基坑开挖过程中支撑轴力主动控制对既有隧道位移的影响规律; 获得了隧道位移控制到预警值 10 mm 以下的临界控制比, 分析了其在不同隧道位置时的分布规律。结果表明: 该地层中的影响区范围相对已有研究的影响区更小; 隧道位移与地连墙位移的控制比近似呈正比关系; 基坑腰部 0.6 倍挖深位置附近隧道的水平位移需进行最严格的控制, 靠近基坑且深度较深的区域通过水平位移控制得到的临界控制比更小, 应以隧道水平位移控制为主, 而远离基坑且深度较浅的区域应以隧道竖向位移控制为主; 花岗岩残积土中的基坑开挖影响区以及对临界控制比的量化研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 基坑; 隧道位移; 支撑轴力; 主动控制系统

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)04-0130-09

Research on active control of deformation of existing tunnel caused by foundation pit excavation

SU Dong^{1,2}, ZHANG Xiaomei³, ZHANG Guotao^{1,2}, LEI Guoping⁴, CHEN Xiangsheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructure of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. Shenzhen Qianhai Construction Investment Holding Group Co., Ltd., Shenzhen 518066, Guangdong, China; 4. College of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528225, Guangdong, China)

Abstract: Finite element analysis method was used to study a new type of active control system for the axial forces of the supports, and a design method was proposed. The influence of excavation of a foundation pit in granite residual soil layers on existing tunnels was studied without applying active axial force to the supports. The excavation impact zone of the foundation

收稿日期: 2023-08-15

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 深圳市自然科学基金项目(JCYJ20210324094607020); 国家自然科学基金项目(51938008);

广东省重点领域研发计划项目(2019B111105001)

作者简介: 苏 栋(1978-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: sudong@szu.edu.cn.

通信作者: 雷国平(1989-), 男, 工学博士, 讲师, E-mail: guoping.lei@fosu.edu.cn.

pit was divided based on the displacement of tunnels at different positions on the side of the foundation pit under the action of excavation. Based on the proposed axial force design method, a study was conducted on the influence of active control of axial forces of the supports on the displacement of existing tunnels during excavation of the foundation pit. The critical control ratio of tunnel displacement control below the warning value of 10 mm was obtained, and its distribution pattern at different tunnel positions was analyzed. The results show that the scope of the impact zone in this stratum is relatively small compared to the existing research results. The tunnel displacement is approximately proportional to the control ratio of the diaphragm wall displacement. The horizontal displacement of the tunnel near the excavation depth of 0.6 times depth of the foundation pit needs to be strictly controlled. The critical control ratio obtained through horizontal displacement control is smaller in areas close to the foundation pit and deeper, and tunnel horizontal displacement control should be the main approach. The area far from the foundation pit and shallow in depth should be mainly controlled by vertical displacement of the tunnel. The quantitative research results on the excavation impact zone of foundation pits in residual granite soil and the critical control ratio can provide reference for similar projects.

Key words: foundation pit; tunnel displacement; supporting axial force; active control system

Author resumes: SU Dong(1978-), male, PhD, professor, E-mail: sudong@szu.edu.cn; LEI Guo-ping(1989-), male, PhD, assistant professor, E-mail: guoping.lei@fosu.edu.cn.

0 引言

随着一个城市轨道交通网络的铺开,越来越多新建建筑物毗邻地铁线路,由于地铁安保区的存在,对临近既有地铁隧道的基坑施工要求十分严格。深圳地铁安保区的范围为地铁线路两侧 50 m,在这个区域内,任何基坑工程都要满足地铁变形控制要求。临近既有地铁线路的基坑工程在变形控制时不仅要满足基坑施工的要求,还要保证地铁隧道的正常运行和结构安全。由于传统钢支撑在变形控制方面存在支撑轴力易损失、受温差影响大的问题,难以满足严格的控制要求,钢支撑轴力伺服系统的开发解决了这一难题。该系统通过将支撑头与钢支撑连接,以液压来调节支撑轴力,由总成箱读取数据,并实时接入到平台当中进行调节。该系统作为一种新型基坑变形控制措施的优势在于当钢支撑因为施工扰动、土体变形或降温产生轴力损失时,可以被系统实时检测到并通过油缸进行补偿。

针对轴力伺服系统的研究,贾坚等^[1]结合上海“大上海会德丰广场”紧邻运营地铁区间隧道的北区基坑工程实例,通过定量计算分析和设计,实施动态设计和信息化施工来分级控制变形,结果表明,应用轴力主动控制系统可将北坑开挖所产生的围护结构变形及地铁隧道变形控制在设定目标内。孙九春等^[2]根据大量工程实践,提出了轴力伺服控制系统

对基坑围护结构变形主动控制的基本原理,并阐述了基于多目标动态控制法的主动控制过程。刘毅等^[3]结合深圳某邻近建筑物的深基坑中现场开挖与轴力主动控制系统的应用情况,在现场监测数据的基础上通过有限元方法研究了轴力主动控制钢支撑的布置优化,分析表明,开挖过程中地连墙变形的发展不可逆,越早进行主动控制效果越好。孙九春等^[4]研究了软土地区地下两层车站和三层车站基坑轴力伺服系统设置方式对围护侧向变形控制效果的影响,对伺服系统进行分区布置研究,结果表明钢支撑全部采用伺服系统对围护结构的变形控制效果最好,一半支撑采用伺服系统的效果次之,支撑间隔使用伺服系统时效果稍差,效果最差的情况为仅有一道支撑使用伺服系统。曹虹等^[5]提出基于深基坑围护刚度的轴力确定方法,解决了上海软土地区钢支撑轴力伺服系统内力设计的难题,并引入了“双控法”的概念来确定支撑轴力,在保证控制围护结构侧向变形的同时兼具经济性。何君佐等^[6]从支撑轴力相干性出发,提出了水平向轴力相干性公式,并对比了多点同步加载与单根加载两种工况,结果表明,虽然多点同步加载对加载区外轴力影响更大但影响区域基本不变,且多点同步加载对于围护结构侧移的控制要更好。龚俊杰^[7]通过 2 个项目的监测数据对钢支撑轴力主动控制系统的 2 种加载方式进行对比,结果表明,采用分阶段进行轴力加载的施工方式

控制效果更好,能够体现出轴力实时控制加压泄压的优点。

现有研究以数值模拟结合工程实际为主要手段,分析支撑轴力伺服系统对基坑变形的控制效果,例如支撑内力大小、布设方式等对于不同土性条件基坑变形的控制,已取得了一定的成果,但对应用轴力伺服系统控制由基坑开挖导致的既有隧道位移的研究较少。本文以既有隧道的位移为控制目标,对新型支撑轴力主动控制系统进行研究,提出了一种支撑轴力设计方法。以深圳地区花岗岩残积土地层中邻近既有地铁的基坑开挖为工程背景建立有限元模型,对基坑开挖过程进行模拟并分析其对既有隧道的影响,根据基坑侧边不同位置隧道在基坑开挖作用下的位移划分了基坑开挖影响区。在此基础上,对隧道位移超过预警值的工况进行了主动轴力设计研究,对地连墙临界位移控制比进行了量化研究并总结了其规律。

1 工程概况及数值模型

1.1 工程概况

深圳市某深基坑工程平均开挖深度约 40 m,基坑长 120 m,宽 70 m,采用地下连续墙加 8 道内支撑的形式进行基坑支护,基坑与既有隧道位置关系如图 1 所示。基坑北侧紧靠地铁 11 号和 9 号线,基坑支护墙体距地铁 11 号线隧道管片的净距最小仅 3 m,为了保护地铁运行安全,该项目在混凝土支撑上采用轴力伺服系统(图 2)。通过现场自动化设备实时监测支撑体系与围护结构的相对变形,进而为控制系统提供测控依据。该项目所在区域主要地层为花岗岩残积土,基岩为微风化花岗岩。

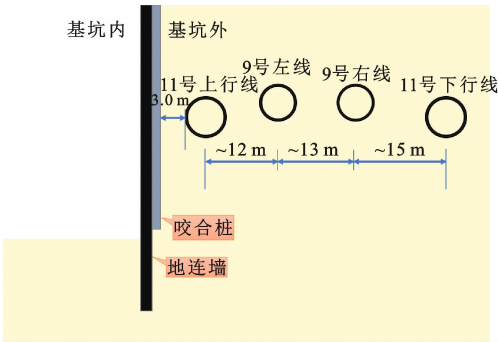


图 1 基坑与既有隧道位置关系示意图
Fig. 1 Schematic diagram of position relationship between foundation pit and existing tunnel

1.2 轴力伺服系统

支撑轴力伺服系统由补偿节、无线分布式数控



图 2 混凝土水平支撑上的轴力伺服系统
Fig. 2 Axial force servo system on concrete horizontal support

泵站、主机及软件系统组成,其中补偿节是最重要的部分。补偿节主要由支撑头、油缸、超声波测距仪组成(图 3),通过超声波测距仪和支撑头的轴力传感器读取支撑的位移和内力,油缸以改变千斤顶行程的方式来调节支撑轴力。

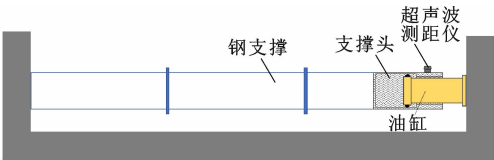


图 3 轴力伺服系统的补偿节
Fig. 3 Compensation section of axial force servo system

1.3 有限元模型和参数

本文着重研究基坑沿深度方向进行开挖对相邻隧道的影响,此类问题常简化为二维平面应变问题进行分析^[8-11]。对该类问题的三维数值模拟^[12]显示,纵向上在基坑开挖区域内的隧道区段会发生较大的偏向基坑的位移,而在开挖区域以外的隧道区段受基坑影响较小。采用二维模型则主要反映了隧道受影响最大截面处(隧道轴和矩形基坑边界平行的情况下,一般为基坑中部对应的截面)的受力与变形过程。另外,在二维模型中,支撑轴力相当于三维情况中支撑轴力除以纵向间距,因此本文模拟的是一定纵向范围内围护墙的整体变形情况,而不考虑其在纵向上因支撑间距带来的差异。

采用 PLAXIS2D 建立侧方含有单线既有隧道的基坑开挖二维有限元模型,如图 4 所示。基坑深度 40 m,宽度 70 m,为消除模型边界的影响,取模型长度为 5 倍基坑宽度(350 m),模型高取 100 m。边界条件为:底部固定,顶部自由,两侧边界设置法向约束。二维模型中采用 8 道轴力主动控制钢支撑

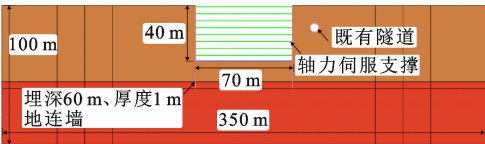


图 4 邻近既有隧道的基坑开挖有限元模型

Fig. 4 Finite element model of foundation pit excavation adjacent to existing tunnel

对水平支撑体系进行简化,支撑竖向间距与水平间距均为 5 m。钢支撑参数为:直径 609 mm,壁厚 16 mm,重度 $78.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量 206 GPa。模型中基坑围护结构采用 1 m 厚钢筋混凝土地连墙,混凝土强度等级为 C50,地连墙埋深 60 m,穿过厚度为 55 m 的花岗岩残积土并嵌入基岩(微风化花岗岩)5 m。

花岗岩残积土在深圳地区广泛分布,是一种物

理力学特性较为特殊的土体,具有结构性、遇水易崩解等特点,考虑到基坑工程的土体大多处于小应变范围,本研究采用小应变硬化本构模型(HSS 模型)来描述其应力-应变关系。HSS 模型是在硬化土模型(HS 模型)的基础上增加了 2 个参数来描述土体的小应变刚度行为,分别为初始小应变模量 G_0 以及割线模量 G_s 减小到 70% G_0 时的应变水平 $\gamma_{0.7}$ 。朱旻等^[13]通过基于旁压试验的有限元参数反演获得了深圳花岗岩残积土的 HS 模型参数,张国涛^[14]在室内三轴试验获得花岗岩残积土强度参数的基础上,采用和文献^[13]相同的方法反演获得了深圳花岗岩残积土的 HSS 模型参数(表 1)。

微风化花岗岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型,重度取 $26\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量取 6 GPa,泊松比取 0.3,黏聚力取 700 kPa,内摩擦角取 39° 。

表 1 花岗岩残积土 HSS 模型参数

Table 1 HSS model parameters for granite residual soil

c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	K_0	ν_{ur}	m	R_f	$E_{sd}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{scd}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$
10.7	32	5	0.47	0.2	0.83	0.92	56	29	168	80	1×10^{-4}	100

注: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; ψ 为剪胀角; K_0 为正常固结条件下的侧压力系数; ν_{ur} 为卸载再加载泊松比; m 为弹性模量应力水平相关幂指数; R_f 为破坏比; E_{sd}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验的参考割线模量; E_{scd}^{ref} 为固结试验的参考切线模量; E_{ur}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验的卸载再加载模量; G_0^{ref} 为参考应力下的小应变初始剪切模量; p^{ref} 为参考应力。

地铁隧道直径为 6.0 m,管片混凝土强度等级为 C50,重度取 $25\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比为 0.15,隧道横向刚度有效率 η 取为 0.7,用以反映管片间接头存在对既有隧道变形产生的影响^[10];衬砌结构等效厚度为 0.3 m,隧道与土体的相互作用通过 PLAXIS 软件自带的界面单元加以考虑,界面强度折减系数取软件默认的 0.65^[11]。

数值模拟的基坑开挖顺序为:①设置地下连续墙;②开挖至-1 m;③设置第 1 道支撑;④开挖至-6 m;⑤设置第 2 道支撑;⑥开挖至-11 m;⑦设置第 3 道支撑;⑧开挖至-16 m;⑨设置第 4 道支撑;⑩开挖至-21 m;⑪设置第 5 道支撑;⑫开挖至-26 m;⑬设置第 6 道支撑;⑭开挖至-31 m;⑮设置第 7 道支撑;⑯开挖至-36 m;⑰设置第 8 道支撑;⑱开挖至-40 m。

1.4 支撑轴力设计方法

轴力伺服系统的轴力控制工作模式需要预先设计支撑在各个开挖步骤的轴力,在实际开挖时将轴力严格控制在设计值,使围护结构的位移在控制范围内。在进行主动控制轴力设计时,支撑轴力越大,围护结构的位移越小,理论上可将围护结构位移控制为 0,即“零位移法”,但这在工程实际中基本难以

实现,且严格按照零位移来进行设计需要极大的支撑轴力。对此,曹虹等^[5]提出了“双控法”进行支撑轴力设计,在控制围护结构变形的同时使支撑轴力也不超过相应的限值。鉴于运营地铁隧道的位移控制条件十分严格(通常远小于基坑围护结构的位移限值),本文采用邻近地铁隧道的位移作为指标来设计轴力值。至于支撑结构,考虑到存在在钢筋混凝土水平支撑体系中安装轴力伺服控制系统的可能性(图 2),虽然本文在建模时采用钢支撑,但其结果同样适用于钢筋混凝土支撑体系的情况,因此本文不对水平支撑设定轴力限值。

本研究以邻近隧道在基坑开挖作用下的变形为控制对象,为达到主动伺服控制的目的,对各分析工况采用以下 3 个模拟步骤(图 5)。

模拟一:对支撑不施加主动轴力,即对支撑不施加预应力,支撑通过被动变形产生轴力,得到该工况下的地连墙位移 $y_{N=0}$ 以及隧道位移 $u_{N=0}$,其中下标“ $N=0$ ”表示无主动轴力。若 $u_{N=0}$ 小于预警值,则可直接判断该工况下隧道受影响较小,分析结束。若 $u_{N=0}$ 大于预警值,则需要进行下一步研究。

模拟二:根据模拟一中 $u_{N=0}$ 的大小来设定控制比 A_{CR} 。控制比 A_{CR} 定义为进行一定程度轴力主动

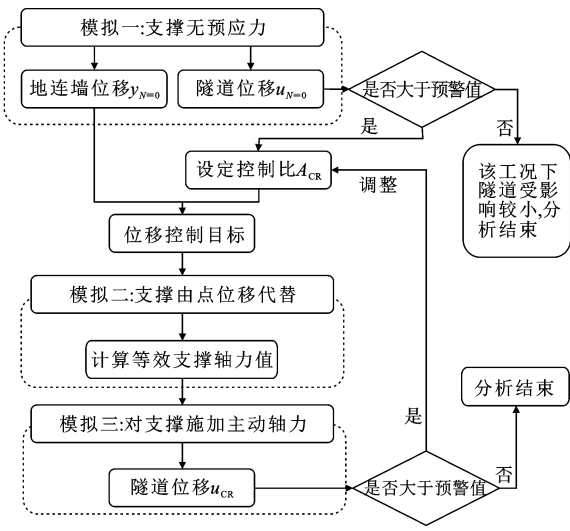


图 5 基于有限元模拟的支撑轴力设计方法流程图
Fig. 5 Flowchart of design method for support axial force based on finite element simulation

控制时的地连墙各支撑处水平位移与无主动控制时地连墙各支撑处水平位移之比,后者即为 $y_{N=0}$ 在支撑处的值, A_{CR} 越小代表位移控制越强。因此针对支撑所在位置地连墙的位移控制目标,建模时采用点位移代替支撑,并按照相同的施工步骤进行计算,通过地连墙的内力可计算得到与点位移控制相应的等效支撑轴力值。

模拟三:将模拟二中得到的等效支撑轴力值以主动轴力的方式输入到建有实体支撑的基坑模型中,得到该控制比下的隧道位移 u_{CR} 。若 u_{CR} 仍不满足要求,则需调整 A_{CR} 值重新进行计算直至满足要求。

2 基坑开挖对既有隧道的位移影响区

既有隧道埋置在一定深度的土体中,当周边地下空间进行基坑开挖时会对隧道周围土体产生影响。不同的围护结构下,基坑开挖引起周围土体产生不同形式的变形,对相邻隧道的影响也不尽相同。郑刚等^[10]针对基坑地连墙悬臂型、复合型、内凸型和踢脚型变形模式,将基坑外不同位置的隧道依据变形分为沉降区、变形过渡区及隆起区。根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJT 202—2013),靠近轨道交通的结构进行外部作业时,引起轨道交通结构的位移预警值为 10 mm,控制值为 20 mm。根据《深圳市城市轨道交通安全保护区施工管理办法》:城市轨道交通车站结构设施、隧道结构绝对沉降量及水平位移量小于等于 20 mm(包括各种加载和卸载的最终位移量);在地铁区间隧道上方

实施大面积的加卸载工程中,隧道的相对变曲小于等于 1/2 500。因此,在开挖超深超大基坑时,应对一定范围内既有隧道的变形进行控制,否则会带来结构安全风险。

为研究基坑开挖导致隧道发生位移的影响范围,以既有隧道的归一化埋深 h/h_e (其中 h 为隧道埋深, h_e 为基坑最终开挖深度) 及其与基坑的归一化水平距离 l/h_e (l 为隧道与基坑的水平距离) 为变量进行不同工况的计算分析,其中 h/h_e 的变化范围为 $[0.2, 1.2]$, l/h_e 的变化范围为 $[0.2, 1.0]$, 在 l/h_e 和 h/h_e 的变化范围内均每隔 0.1 设定一个计算工况,如图 6 所示。为方便后续对计算工况进行描述,采用 LiHj 的格式进行编号,其中 i 和 j 分别表示 $l/h_e=i/10$ 以及 $h/h_e=j/10$, 因此图 6 中隧道所示的工况编号为 L2H2。

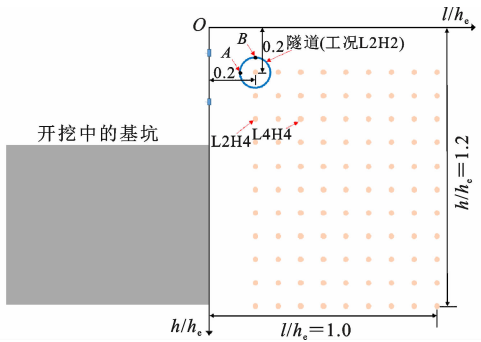
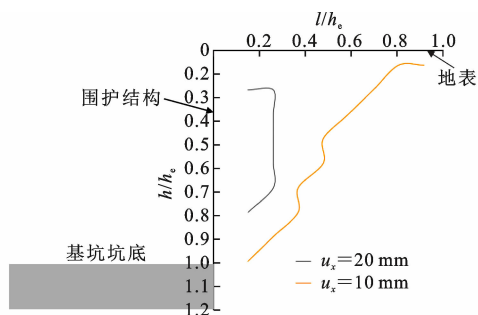
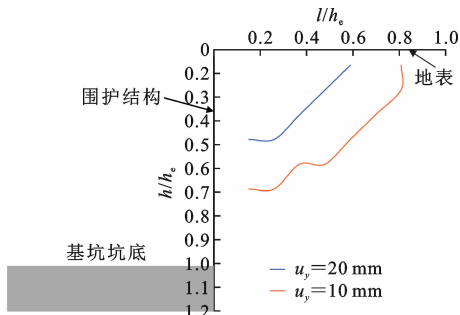


图 6 邻近基坑开挖的既有隧道不同位置工况
Fig. 6 Different position cases of existing tunnels adjacent to foundation pit excavation

本节主要研究基坑开挖的影响范围,作为后续是否需要支撑轴力主动控制的依据,即只包含图 5 中的“模拟一”部分。

通过数值模拟发现隧道管片结构以整体刚性位移为主,管片结构自身的变形相对较小,为方便分析,本文选取隧道腰部靠近基坑节点(图 6 中点 A)的水平位移代表隧道的水平位移 u_x ,选取隧道顶点(图 6 中点 B)的竖向位移代表隧道结构的竖向位移 u_y 。根据不同工况(图 6)获得的隧道位移,得到 u_x 和 u_y 随 l/h_e 和 h/h_e 分布的等值线图,如图 7、8 所示。整体上隧道位移均随其埋深及与基坑水平间距的增大而减小, u_x 和 u_y 等于 10 mm 的等值线大致呈 45°向基坑方向倾斜, u_x 的较大值主要集中在基坑腰部深度附近。

图 7 和图 8 的等值线图存在一定差异,意味着不同位置的隧道在基坑开挖影响下的位移方向是不同的。参考郑刚等^[10]将坑外受基坑开挖扰动的隧

图7 隧道水平位移 u_x 等值线图Fig. 7 Contour figure of tunnel horizontal displacement u_x 图8 隧道竖向位移 u_y 等值线图Fig. 8 Contour figure of tunnel vertical displacement u_y

道按照位移大小进行分区的思路,将 $u_x \geq 20$ mm 或 $u_y \geq 20$ mm 的区域作为主要影响区(I),将I区以外且 $u_x \geq 10$ mm 或 $u_y \geq 10$ mm 的区域作为次要影响区(II),剩余的区域则为一般影响区(III)。将以上分区之间的边界简化成折线形,得到基坑开挖导致侧边隧道发生位移的影响分区,如图9所示。图9中也显示了文献[10]的分区结果,对比发现花岗岩残积土中基坑开挖导致隧道位移的影响区要明显小于文献[10]的结果,且影响区形状也有不同。文献[10]的土层为天津市区典型粉质黏土层,其变形模量相对较小,基坑开挖导致的隧道位移更大,因此各个影响区的范围也更大。另外,花岗岩残积土地层中的I、II区范围随深度增加逐渐变小,与文献[10]不同,可能是两个工况的基坑开挖深度不同、围护结构位移水平不同导致。

3 基于既有隧道位移控制的基坑开挖支撑轴力主动控制规律

基于第2节结果,对超过预警值的工况(影响区等级为II和I)进行图5中所示的第2步和第3步的数值分析,研究支撑轴力的主动控制规律。考虑到在不同的控制比 A_{CR} 下,既有隧道的位移会得到不同程度的控制,定义临界控制比 A_{CCR} 为使隧道位移刚好低于预警值的控制比,本文以5%为梯度进

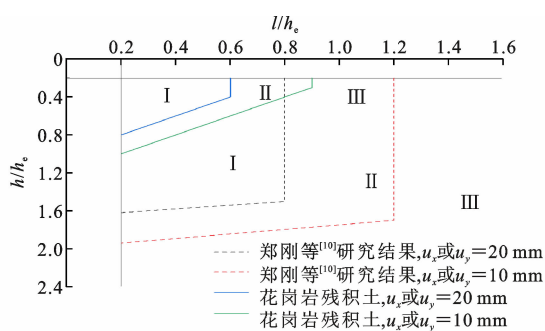


图9 基坑开挖对侧边隧道位移的影响区

Fig. 9 Impact zone of foundation pit excavation on displacement of nearby tunnel

行计算分析来获得 A_{CCR} 。

3.1 基于隧道水平位移的支撑轴力主动控制规律

以L2H4工况($l/h_e = 0.2$, $h/h_e = 0.4$,见图6,处于影响区I区)为例分析支撑轴力主动控制规律,如图10所示。可以看到,当采用轴力主动控制时,隧道水平位移 u_x 得到了不同程度的改善。 u_x 与控制比 A_{CR} 呈正比关系;当 A_{CR} 由90%过渡到10%时, u_x 由22.3 mm减小到3.7 mm。从 u_x - A_{CR} 曲线可以判断该工况下的临界控制比 A_{CCR} 约为30%。

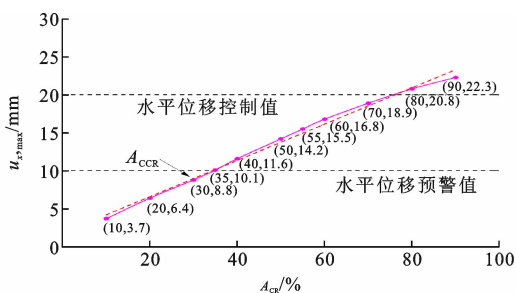


图10 L2H4 工况主动控制结果

Fig. 10 Active control results of case L2H4

L2H4 工况不同控制比情况下的支撑轴力见表2。可以看出,30%的控制比下,开挖最后阶段支撑轴力最大值发生在支撑8处,为6 428 kN。随着控制比的减小,支撑轴力不断增大。当控制比为10%时,支撑8的轴力最大,其值为8 083 kN。

基于既有隧道水平位移 u_x 的临界控制比 A_{CCR} 分布如图11所示。 u_x 最大的工况(L2H6)对应的 A_{CCR} 最小,为25%,因此基坑腰部0.6倍挖深位置附近隧道的水平位移需进行最严格的控制。 A_{CCR} 与隧道的相对位置密切相关。在水平方向, A_{CCR} 随隧道与基坑水平相对距离 l/h_e 的增加而增加。在深度方向,当 $l/h_e < 0.4$ 时, A_{CCR} 随 h/h_e 的增加先逐渐降低,当 h/h_e 达到约0.6时再随 h/h_e 逐渐增加;当 $l/h_e > 0.4$ 时, A_{CCR} 随 h/h_e 呈逐渐增加的趋势。

表 2 L2H4 工况不同控制比情况下的支撑轴力

Table 2 Support axial forces under different control ratio of case L2H4

控制比/%	支撑轴力/kN							
	支撑 1	支撑 2	支撑 3	支撑 4	支撑 5	支撑 6	支撑 7	支撑 8
10	199	1 316	2 323	3 235	4 035	5 012	5 482	8 083
20	242	1 419	2 376	3 151	3 886	4 671	4 704	7 324
30	272	1 498	2 430	3 145	3 769	4 458	4 292	6 428
35	284	1 533	2 461	3 147	3 750	4 360	4 135	5 905
40	296	1 570	2 506	3 136	3 712	4 286	3 970	5 487
50	310	1 626	2 591	3 165	3 691	4 147	3 679	4 455
55	314	1 654	2 641	3 201	3 711	4 083	3 536	3 965
60	317	1 674	2 691	3 227	3 716	4 016	3 413	3 405
70	321	1 735	2 816	3 298	3 771	3 921	3 175	2 379
80	327	1 795	2 914	3 407	3 827	3 831	2 976	1 272
90	349	1 794	2 949	3 484	3 874	3 716	2 811	232

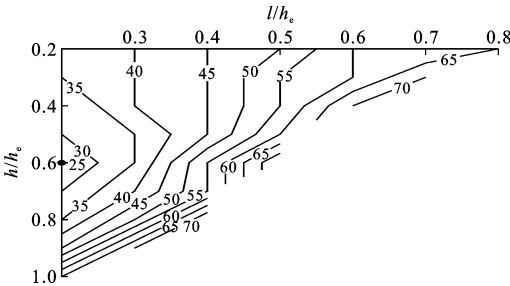


图 11 基于隧道水平位移的临界控制比分布

Fig. 11 Critical control ratio distribution based on tunnel horizontal displacement

3.2 基于隧道竖向位移的支撑轴力主动控制规律

图 12 显示了 L4H4 工况 ($l/h_e = 0.4, h/h_e = 0.4$, 见图 6, 处于影响区 I 区) 下采用支撑轴力进行主动控制时的隧道竖向位移 u_y 随控制比 A_{CR} 的变化。与基于隧道水平位移的情况类似, u_y 与 A_{CR} 呈正比关系, 当 A_{CR} 由 90% 变化到 10% 时, u_y 由 20.5 mm 减小到 1.8 mm。从 u_y - A_{CR} 曲线可以判断该工况下的临界控制比 A_{CCR} 约为 45%。

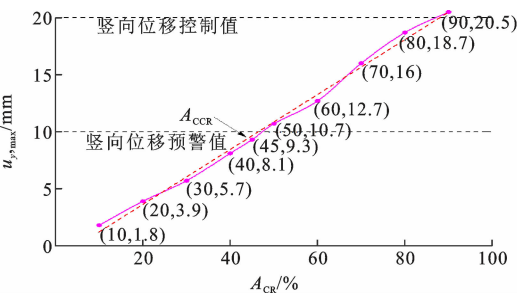


图 12 L4H4 工况主动控制结果

Fig. 12 Active control results of case L4H4

L4H4 工况在不同控制比 A_{CR} 情况下的支撑轴力见表 3。45% 的控制比下, 开挖最后阶段支撑轴

力最大值发生在支撑 8 处, 为 4 919 kN。随着控制比的减小, 支撑轴力不断增大。当控制比为 10% 时, 支撑 8 的轴力最大, 其值为 7 974 kN。

基于既有隧道竖向位移 u_y 的临界控制比 A_{CCR} 的分布如图 13 所示。整体上随着隧道相对埋深 h/h_e 和隧道与基坑水平相对距离 l/h_e 的减小, A_{CCR} 逐渐减小, 计算工况中 A_{CCR} 最小为 35%。当 h/h_e 在 0.3~0.5 的区间内, A_{CCR} 随 l/h_e 的增大呈先降低后升高的趋势, 但降低幅度不大。图 14 对比了 $A_{CCR}(u_x)$ (以 u_x 为控制目标获得的 A_{CCR} 值) 和 $A_{CCR}(u_y)$ 的相对大小在 $[l/h_e, h/h_e]$ 坐标系上的分布, 整体上靠近基坑且深度较深的区域通过水平位移控制得到的 A_{CCR} 更小, 应以隧道水平位移控制为主, 而远离基坑且深度较浅的区域应以隧道竖向位移控制为主。

4 结 语

(1) 对于基坑开挖中轴力伺服系统的轴力设计方法, 以既有隧道的位移为控制目标, 提出以地连墙位移进行百分比折减的控制比 A_{CR} 为指标进行轴力设计, 实现对基坑影响的控制。

(2) 在花岗岩残积土地层中研究了深度为 40 m 的典型深基坑开挖对侧向既有隧道的影响, 并根据不同位置隧道的位移大小划分了影响区域。与已有研究相比, 花岗岩残积土地层中的影响区更小。

(3) 对侧方隧道位移超过预警值 (10 mm) 的工况进行了轴力主动控制研究, 通过数值模拟得到不同工况下隧道位移降到预警值以下时的临界控制比; 基坑腰部 0.6 倍挖深位置附近隧道的水平位移需进行最严格的控制, 靠近基坑且深度较深的区域

表 3 L4H4 工况不同控制比情况下的支撑轴力

Table 3 Support axial forces under different control ratio of case L4H4

控制比/%	支撑轴力/kN							
	支撑 1	支撑 2	支撑 3	支撑 4	支撑 5	支撑 6	支撑 7	支撑 8
10	207	1 334	2 303	3 222	4 058	5 062	5 512	7 974
20	253	1 434	2 338	3 156	3 901	4 717	4 726	7 176
30	301	1 553	2 442	3 184	3 742	4 328	3 965	5 429
40	301	1 553	2 442	3 184	3 742	4328	3 965	5 429
45	299	1 603	2 523	3 187	3 738	4 243	3 783	4 919
50	310	1 609	2 547	3 217	3 751	4 170	3 682	4 356
60	320	1 662	2 635	3 284	3 772	4 032	3 419	3 316
70	320	1 698	2 744	3 383	3 806	3 918	3 167	2 434
80	326	1 791	2 885	3 454	3 807	3 832	2 918	1 525
90	351	1 770	2 918	3 479	3 864	3 807	2 826	369

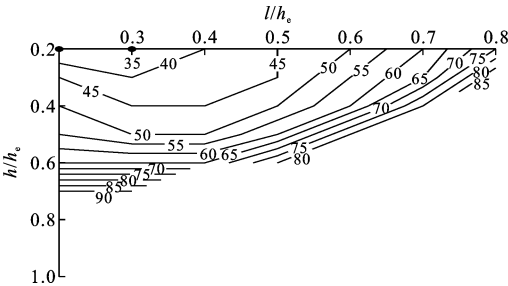


图 13 基于隧道竖向位移的临界控制比分布

Fig. 13 Critical control ratio distribution based on tunnel vertical displacement

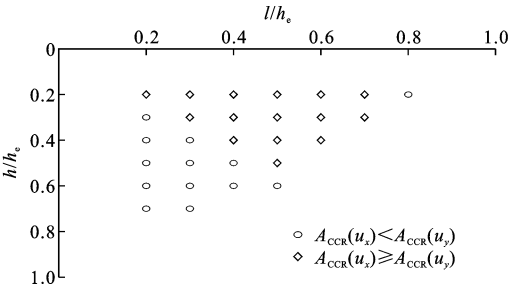


图 14 以 u_x 和 u_y 为控制指标得到的 A_{CCR} 值大小对比

Fig. 14 Comparison of A_{CCR} value obtained by taking u_x and u_y as control indicators

通过水平位移控制得到的临界控制比更小,应以隧道水平位移控制为主,而远离基坑且深度较浅的区域应以隧道竖向位移控制为主。

参考文献:

References:

[1] 贾 坚,谢小林,罗发扬,等. 控制深基坑变形的支撑轴力伺服系统[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(10): 1589-1594.

JIA Jian, XIE Xiaolin, LUO Fayang, et al. Support axial force servo system for controlling deformation of deep

foundation pit[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(10): 1589-1594.

[2] 孙九春,白廷辉,廖少明. 软土地铁深基坑围护结构侧向变形的主动控制技术[J]. 建筑施工, 2020, 42(12): 2255-2260.

SUN Jiuchun, BAI Tinghui, LIAO Shaoming. Active control technology for lateral deformation of subway deep foundation pit support structure in soft soil[J]. Building Construction, 2020, 42(12): 2255-2260.

[3] 刘 毅,张 勇,贺祖浩,等. 伺服钢支撑在邻近建筑物车站深基坑中的应用[J]. 施工技术, 2018, 47(23): 72-75.

LIU Yi, ZHANG Yong, HE Zuhao, et al. Application research of servo steel bracing in deep foundation excavation near buildings and stations [J]. Construction Technology, 2018, 47(23): 72-75.

[4] 孙九春,白廷辉. 地铁基坑钢支撑轴力伺服系统设置方式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增 1): 195-204.

SUN Jiuchun, BAI Tinghui. Study on the setting method of steel supporting axial force servo system for subway foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 195-204.

[5] 曹 虹,孙九春. 软土基坑钢支撑伺服系统轴力的确定方法研究[J]. 建筑施工, 2019, 41(5): 754-758.

CAO Hong, SUN Jiuchun. Study on determination method of axial force of steel support servo system in soft soil foundation pit [J]. Building Construction, 2019, 41(5): 754-758.

[6] 何君佐,廖少明,孙九春,等. 软土深基坑钢支撑多点同步加载的轴力相干性研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 99-107.

HE Junzuo, LIAO Shaoming, SUN Jiuchun, et al. Study on axial force interference of soft soil deep excavation

under multi-point synchronous loading[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(7):99-107.

[7] 龚俊杰. 自动伺服钢支撑的轴力加载方式研究[J]. 建筑施工,2016,38(10):1463-1464.

GONG Junjie. Study on loading method of axial force for automatic servo steel support [J]. Building Construction,2016,38(10):1463-1464.

[8] 王卫东,吴江斌,翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学,2004,25(增 2):251-255.

WANG Weidong, WU Jiangbin, WENG Qiping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(S2):251-255.

[9] 郑 刚,王 琦,邓 旭,等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1181-1194.

ZHENG Gang,WANG Qi,DENG Xu,et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1181-1194.

[10] 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 Yiming,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.

[11] 陈仁朋,叶跃鸿,王诚杰,等. 大型地下通道开挖对下卧地铁隧道上浮影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(7):1269-1277.

CHEN Renpeng,YE Yuehong,WANG Chengjie,et al. Influence of open-cut tunneling on uplift behavior of underlying metro tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2017,51(7):1269-1277.

[12] HUANG X,SCHWEIGER H F,HUANG H W. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels[J]. International Journal of Geomechanics,2013,13(2):170-180.

[13] 朱 旻,陈湘生,张国涛,等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用[J]. 岩土力学,2022,43(4):1061-1072.

ZHU Min,CHEN Xiangsheng,ZHANG Guotao,et al. Parameter back-analysis of hardening soil model for granite residual soil and its engineering applications [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(4):1061-1072.

[14] 张国涛. 深圳地区花岗岩残积土地层基坑及近接隧道变形支撑轴力主动控制研究[D]. 深圳:深圳大学,2022.

ZHANG Guotao. Study on active control of deformation supporting axial force of foundation pit and adjacent tunnel in granite residual soil layer in Shenzhen area[D]. Shenzhen:Shenzhen University,2022.