

软土地层深基坑施工对临近区间隧道影响数值分析

罗小松

中铁第一勘察设计院集团有限公司

摘要: 根据软土地层中某临近区间隧道的深基坑工程实例, 采用Midas-GTS三维有限元软件模拟分析基坑施工中对周边地层、区间隧道的变形影响。结果表明: 基坑开挖施工后周边地层将产生向基坑内部的变形, 基坑底部产生因卸载隆起变形, 支护结构最大水平变形为14.423mm; 地下一层基坑开挖引起区间隧道水平变形为2.177mm, 竖向变形为0.678mm, 地下二层坑中坑基坑开挖对区间隧道影响较小, 区间隧道变形值满足国家规范限制要求, 说明基坑支护结构选型合理、可行。

关键词: 深基坑; 区间隧道; 数值模拟; 变形

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.08.035

当前我国城市轨道交通发展十分迅速, 在运营轨道交通线路周边建设住宅、商业广场等工程已成为城市规划的新方向, 新建工程在轨道交通安全保护区内施工已成为常态。由于地下工程的复杂性、轨道交通安全保护的苛刻性, 给临近轨道交通的深基坑工程设计、施工带来巨大挑战。不同地质条件下基坑支护结构如何选型, 方可最大限度降低对临近轨道交通的影响已成为基坑工程的研究热点。本文根据软土地层中某临近既有区间隧道的深基坑工程实例, 采用Midas-GTS三维有限元软件模拟分析基坑施工全过程对区间隧道的变形影响, 分析基坑支护结构选型的合理性, 并为后期基坑开挖施工提供指导。

一、工程概况

(一) 既有地铁区间隧道概况

既有地铁区间隧道采用盾构法施工, 隧道结构外直径6.2m, 管片结构厚度0.35m, 区间隧道拱顶覆土厚度约10m。隧道穿越地层为粉砂夹粉土、粉砂、粉细砂层, 隧道拱顶为粉质黏土夹粉土层, 隧道底部为中细砂、粉质黏土, 地质条件一般。

(二) 拟建工程概况

拟建基坑为坑中坑形式, 设两层地下室, 临近区间隧道侧基坑开挖深度为3.84m~4.84m, 为降低该侧基坑开挖对区间隧道的影响, 基坑支护结构采用Φ800mm@1200mm钻孔灌注桩, 桩长12.5m, 桩底进入隧道中心线以下; 二层地下室开挖深度为7.54m~8.04m, 围护结构采用PRCΦ600mm@1000mm预制管桩, 桩长11m, 桩底标高同钻孔灌注桩; 基坑止水帷幕均采用Φ500mm@350mm水泥搅拌桩。拟建基坑地下一层基坑支护结构与区间隧道最小净距为10.75m, 地下二层支护结构与区间隧道最小净距为27.7m。拟建基坑与既有区间隧道平、剖面位置关系详见图1、图2。

拟建场地上覆(Q₄地层)地貌属长江I级阶地~长江冲洪积平原, 下覆(Q₂地层)地貌为三级阶地。主要由人工填土、淤泥质黏土、粉砂夹粉土、粉砂、粉细砂、粉质黏土及黏土夹碎石组成, 下伏基岩为三叠系下

统大冶组砂岩、灰岩, 地层分布详见表1。

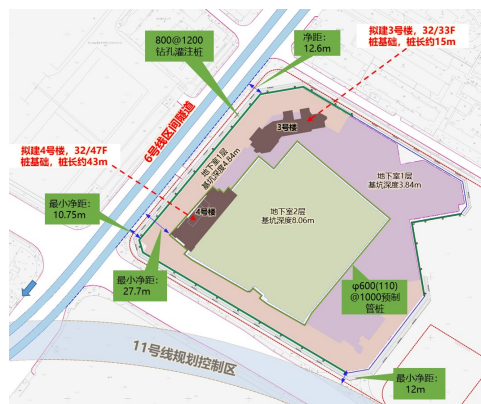


图1 拟建基坑与既有区间隧道平面位置关系图

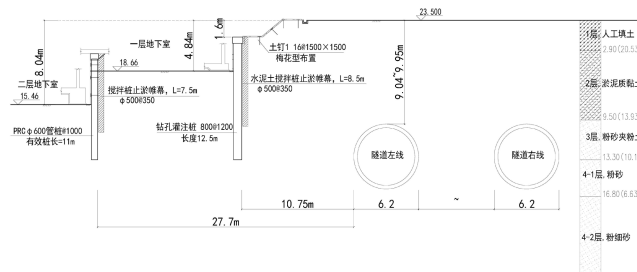


图2 拟建基坑与既有区间隧道剖面位置关系图

二、数值模拟方案

(一) 模型设计

根据区间隧道与拟建基坑位置关系, 建立三维有限元计算模型; 为减少边界效应对计算的影响(基坑开挖的影响范围取3倍基坑深度), 综合考虑基坑形状、施工特性及计算效率, 尽可能真实地模拟基坑开挖对区间隧道的影响, 模型横向(x方向)范围取170m, 沿隧道纵向(y方向)取300m, 深度方向(z方向)范围取60m; 模型初始边界条件为地表为自由, 模型底部边界约束x、y、z方向的自由度, 模型侧边边界只约束其水平方向位移, 数值分析模型详图3。

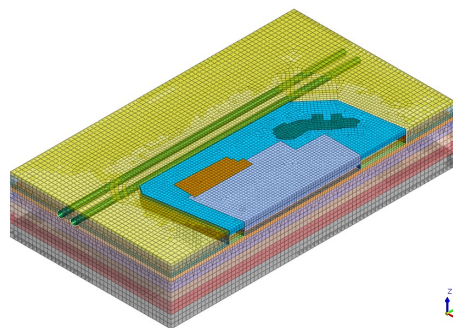


图3 数值分析模型

(二) 模型参数取值

为便于三维模型建立，基坑围护结构采用板单元模拟，将圆形围护桩按照抗弯刚度等效原则换算为板单元；经计算，地下一层围护结构 $\Phi 800\text{mm} @ 1200\text{mm}$ 钻孔灌注桩等效板厚度为0.586m；地下二层围护结构PRC $\Phi 600\text{mm} @ 1000\text{mm}$ 管桩等效板厚度为0.424m。混凝土冠梁近似为梁单元受力，模型计算采用1D梁单元；盾构隧道管片采用2D板单元模型；板单元、梁单元均采用弹性本构模型，各构件具体参数详表1。为保证模型计算的收敛，假定围护结构与地层在小变形情况下两者相等，模型中地层、围护桩、冠梁通过共节点方式实现变形协同，以实现不同结构之间在6个自由度上力传递。

表1 结构材料参数

类别	材料名称	重度 / kN/m^3	弹性模量 kPa	泊松比
区间隧道	C50 钢筋混凝土	25	34500000	0.2
围护桩	C30 钢筋混凝土	25	30000000	0.2
冠梁	C35 钢筋混凝土	25	31500000	0.3

土层采用3D实体单元模拟，采用修正摩尔-库伦模型，修正摩尔-库伦模型是在摩尔-库伦模型的基础上加以改进，其计算更接近于塑性理论，可较为准确的反应基坑开挖后土体的塑性变形；修正摩尔-库伦模型共有12个参数，其中3个刚度参数勘察报告难以体现，且对模型计算结果影响较大，根据已有工程经验结合相关理论研究，根据勘察报告提供的土体压缩模量 E_s 进行换算，割线刚度取 $1.2E_s$ 、切线刚度取 $3E_s$ 、卸载弹性模量取 $7 \sim 11E_s$ ；选取代表性土层建立模型，土层物理学参数表详见表2。

(三) 模拟工况

根据基坑开挖施工步骤，计算模拟施工工序如下：

工况1：初始应力分析，初始阶段轨道交通结构及基坑工程尚未施工，位移归零。

工况2：轨道交通区间隧道施工完成，位移归零。

工况3：施工拟建基坑地下一层基坑围护桩、冠梁、止水帷幕。

工况4：地下一层基坑开挖完成。

工况5：施工拟建基坑地下二层基坑围护桩、冠

梁、止水帷幕。

工况6：地下二层基坑开挖完成。

工况7：基坑回筑。

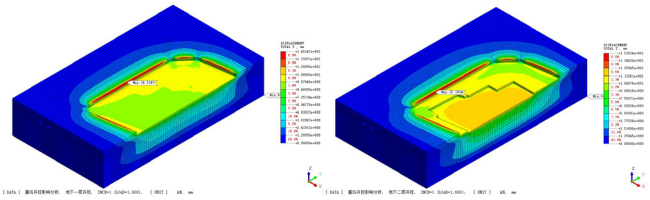
三、基坑施工对区间隧道的影响

(一) 基坑开挖对区间隧道的影响

根据实际施工步骤模拟计算了各施工工况下基坑及区间隧道变形规律，地层、区间隧道两层基坑开挖工况下位移变形结果详见表3，地层、区间隧道位移变形云图详见图4、图5。

表3 基坑开挖后周边环境变形计算结果 /mm

项目	工序	x 方向位移	y 方向位移	z 方向位移	总位移
地层	地下一层开挖	14.423	13.744	10.486	14.515
	地下二层开挖	14.994	14.391	12.492	15.101
区间隧道	地下一层开挖	2.177	0.521	0.678	2.578
	地下二层开挖	2.586	0.709	0.620	2.634



a) 地下一层基坑开挖完成后周边总位移图
b) 地下二层基坑开挖完成后周边总位移图

图4 基坑开挖对周边土体位移影响云图

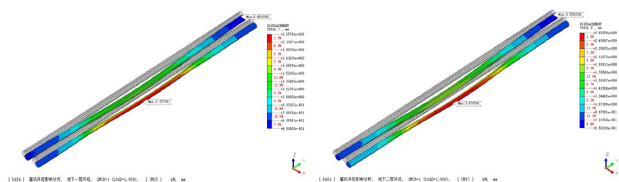
由计算结果可知，地下一层基坑开挖完成后，基坑外侧土体产生向基坑内侧x方向的位移，基坑外土体最大水平位移为14.423mm，位移方向指向基坑内，基坑外侧土体总位移值为14.515mm；基坑底部土层产生了卸载引起的隆起变形，最大隆起值为10.486mm，最大变形位于地下一层基坑中央。

地下二层基坑开挖完成后，基坑外土体最大水平位移为14.994mm，位移方向指向坑内，相比地下一层基坑开挖，位移变形增加0.571mm；基坑外侧土体总位移值为14.515mm，相比地下一层基坑开挖，位移变形增加0.586mm；坑底土最大隆起位置处于地下二层中间部

表2 土层物理参数表

土层名称	厚度 m	容重 kN/m^3	粘聚力 kN/m^2	摩擦角 $^\circ$	压缩模量 kN/m^2	割线刚度 kN/m^2	切线刚度 kN/m^2	卸载弹性模量 kN/m^2
人工填土	2.9	18.5	10	15	1.5	1.8	4.5	16.5
淤泥质黏土	6.6	16.3	15	7	3.0	3.6	9.0	33.0
粉砂夹粉土	3.8	18.5	10	22	8.5	10.2	25.5	93.5
粉砂	3	18.5	0	34	23.0	27.6	69.0	253.0
粉细砂	17.5	18.7	0	35	27.0	32.4	81.0	297.0
4-2a 粉质黏土	1.3	19.2	30	15	7.5	9.0	22.5	82.5
(5) 粉质黏土	12.3	19.7	42	17	16.0	19.2	48.0	176.0
黏土夹碎石	11.8	20	75.6	17.4	17.5	21.0	52.5	192.5

位,最大值为12.492mm,同比增加2.006mm。综合分析来看,地下一层基坑开挖对周边地层变形影响最大,地下二层开挖后,周边地层变形累计增值加较小。



a) 地下一层基坑开挖完成后区间隧道管片总变形图
b) 地下二层基坑开挖完成后区间隧道管片总变形图

图5 基坑开挖后区间隧道变形云图

由表2、图5区间隧道变形可知,地下一层基坑开挖完成后,盾构区间隧道发生了整体偏向基坑侧的变形,变形主要为水平x方向,最大值为2.177mm;由于基坑开挖对地层卸荷效应,隧道竖向变形表现为上浮,最大竖向位移为0.678mm。地下二层基坑开挖完成后,盾构区间偏向基坑一侧的水平位移增大至2.586mm,竖向上浮位移最大值为0.620mm。基坑开挖对区间隧道产生的变形满足国家规范5mm限制要求,影响可控。

综合分析基坑开挖对区间隧道的影响,地下二层开

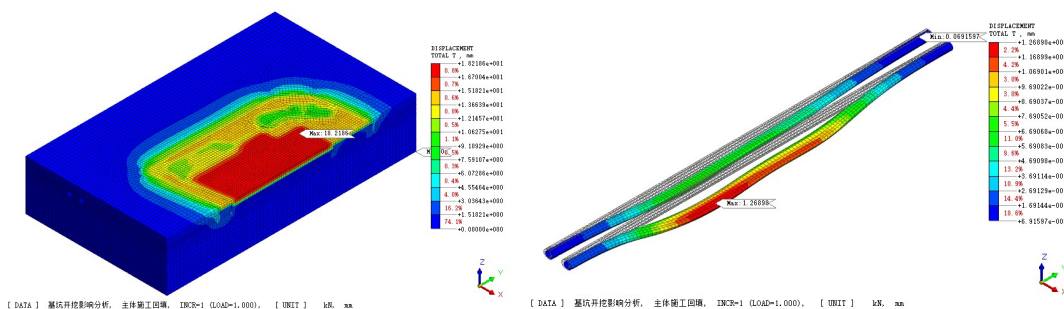
挖后区间隧道x方向位移增加0.409mm、z方向位移减小0.058mm、总位移增加0.056mm,说明地下一层基坑开挖对区间隧道变形影响最大,地下二层基坑开挖对隧道变形影响较小。地下一层基坑施工中应严格把控施工工序,每一工况基坑开挖时应确保基坑支护形成完整受力体系后再进行开挖,严格按照软土基坑的时空效应进行土方开挖作业。

(二) 基坑回筑对区间隧道的影响

表4 基坑回筑后周边环境变形计算结果/mm

项目	X 位移	Y 位移	Z 位移	总位移
地层	11.234	10.982	-18.105	18.219
区间隧道	1.125	0.188	-0.615	1.269

由表4、图6基坑回筑后基坑、区间隧道变形结果可知,基坑回筑完成后,基坑周边土体最大水平位移为11.234mm,较基坑开挖工况减小3.76mm;坑内土体z方向变形表现为沉降,最大沉降变形为-18.105mm。盾构区间偏向基坑一侧的x方向水平位移最大为1.125mm,较基坑开挖工况减小1.052mm;区间隧道z方向位移表现为沉降,最大沉降值为0.615mm,相比基坑开挖工况沉降变形值为1.293mm。基坑回筑对区间隧道产生的变形满



a) 基坑回筑完成后周边总位移图

b) 基坑回筑完成后地铁隧道管片总变形图

图6 基坑回筑后地层、区间隧道变形云图

足国家规范要求,影响可控。

四、结论

(1) 根据有限元计算结果可知,软土地层中深基坑开挖后周边地层将产生向基坑内部的变形,因土体卸载效应,基坑底部产生因卸载隆起变形,支护结构最大水平变形为14.423mm,坑底隆起竖向变形为12.492mm,整体风险可控。

(2) 地下一层基坑开挖引起区间隧道产生向基坑侧的水平变形,最大水平变形为2.177mm;土方开挖产生地层应力卸载效应,引起区间隧道上浮,最大竖向位移为0.678mm。坑中坑的地下二层基坑开挖对区间隧道变形影响较小,隧道水平位移仅增加0.409mm,对竖向位移基本无影响。

(3) 基坑回筑后周边支护结构、区间隧道变形产生一定的收敛,区间隧道的竖向变形为1.293mm,影响明显,基坑回筑施工时应密切关注隧道变形。

(4) 基坑开挖、回筑会对区间隧道变形产生一定

的影响,隧道结构变形值满足国家规范限制要求,整体风险可控;计算结果显示基坑支护体系稳定性良好,说明基坑支护结构选型合理、可行,适合作为软土地层中临近区间隧道基坑的支护结构。

参考文献

[1] 郭坤, 赖荫楠. 基坑开挖对既有地铁隧道的安全评估分析[J]. 土工基础, 2023, 37 (05): 773-777.
 [2] 谢晓冬, 李梓焜, 陈锐浩等. 基坑开挖对邻近建筑及既有地铁的影响分析[J]. 路基工程, 2020 (02): 175-179.
 [3] 成文灿. 深基坑施工对邻近地铁隧道变形的影响研究[D]. 华中科技大学, 2022.
 [4] 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 (S2): 251-255.
 [5] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31 (05): 86-94.