

Research on Safety Impact Analysis and Reinforcement Measures of Foundation Pit Excavation on Underlying Existing Metro Tunnel

Yinan Cui¹ Yong Li²

China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

Based on the pit unloading excavation of Zhengzhou metro Line 1, using FLAC^{3D} finite difference software, the whole process of construction schemes with different reinforcement measures is compared and analyzed. It is concluded that the comprehensive control measures of “foundation reinforcement + step excavation + surcharge back pressure” can effectively reduce the deformation of surrounding surface and soil body and the additional internal force and deformation generated by the running subway tunnel. Meanwhile, the main construction and emergency measures of soft deep foundation pit spanning existing subway tunnels close to each other are studied in order to provide reference for the design and construction of similar projects

Keywords

pit unloading; underlying metro tunnel; numerical analysis; deformation control

基坑开挖对下卧既有地铁隧道的安全影响分析及加固措施研究

崔轶男¹ 李勇²

中铁第六勘察设计院集团有限公司, 中国·天津 300000

摘要

以郑州地铁1号线某上跨基坑为背景, 采用FLAC^{3D}有限差分软件对采取不同加固措施的施工方案进行全过程对比分析, 得出采用“地基加固+分步开挖+堆载反压”综合控制措施能有效减少周边地表及土体产生的变形及已运行的地铁隧道产生的附加内力与变形的结论; 同时, 针对软土深基坑近距离上跨既有地铁隧道的主要施工和应急措施进行了研究, 以期为类似的工程项目的设计和施工提供参考。

关键词

基坑卸荷; 下卧隧道; 数值分析; 变形控制

1 引言

截至 2025 年底, 我国已有超过 54 个城市开通了地铁, 运营线路超 11389.7 公里。伴随着城市地下空间的进一步开发, 不可避免出现隧道相互交叠。近年来, 上跨既有地铁隧道基坑工程的规模越来越大、距离越来越近。

在既有地铁隧道上方近距离进行基坑开挖不可避免地会打破基坑周边原有土体的应力场平衡, 必然会引起坑底土体的回弹变形, 土体的变形也必将引起既有隧道的变形^[4-5]。当既有运营隧道变形超过一定限度, 轻则造成隧道管片接缝漏水、结构破损, 重则危及线路安全运行。为确保既有地铁隧道及相关设施的安全运行, 各城市对地铁隧道的水平及竖

向位移、变形曲率半径等都进行了严苛的规定^[6-8]。由于软土地区地下水位高、土体强度低, 在基坑开挖时要将下卧隧道变形控制在允许范围内难度很大。因此, 研究软土地层条件下, 如何降低上跨基坑施工对既有地铁隧道的影响, 并提出相应的加固及应急措施具有重要的工程实践意义。

目前, 国内已有学者对此课题的相关方面作了一些理论和工程实践研究, 并取得了较为丰富的成果。

本研究利用 FLAC3D 有限差分软件, 结合郑州地铁 1 号线某上跨基坑, 对采取不同加固措施的施工方案进行全过程对比分析, 得出采用“地基加固 + 分步开挖 + 堆载反压”综合控制措施能有效减少周边地表及土体产生的变形和已运行的地铁隧道产生的附加内力与变形的结论; 同时, 针对软土深基坑近距离上跨既有地铁隧道的主要施工和应急措施等进行了研究。

【作者简介】崔轶男 (1990—), 男, 工程师, 从事隧道与地下工程设计与技术研究。

2 工程概况

郑州某双向八车道市政隧道上跨穿越地铁1号线盾构区间，两者平面基本正交，隧道结构为单层双孔箱涵，设计宽度约为37.8m，底板底设计埋深约9.4m，隧道底板与地铁盾构之间竖向最小净距约为1.98m。盾构隧道外径6.0m，管片宽1.5m、厚300mm，错缝拼装。基坑与地铁1号线位置关系见图1、图2。

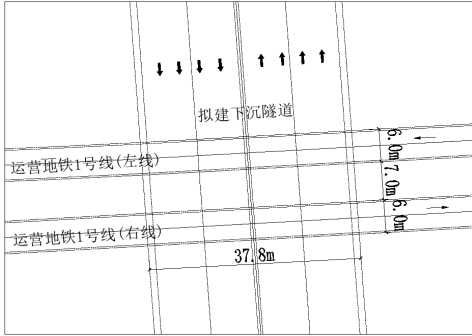


图1 基坑与地铁1号线平面位置关系图

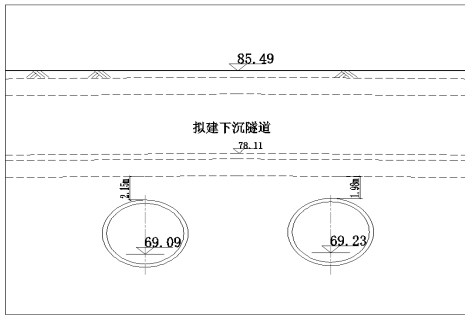


图2 基坑与地铁1号线竖向位置关系图

本项目地层从上至下及具体力学参数如表1所示。区域内存在两层地下水，上层为潜水，主要赋存于粉土层中，地下水水位高程为80.07~82.34m。下层为承压水，主要赋存于粉砂、细砂、中砂层中，承压水头12m。

表1 土体分层及物理力学参数

土体	密度 ρ (g/cm^3)	弹性模量 E (MPa)	土体侧压 系数 k_0	内聚力 C (MPa)	内摩擦 角 Φ ($^\circ$)
粉土	1.92	8.80	0.48	11.5	20.4
粉土	1.93	9.9	0.46	11.0	21.2
粉质粘土	1.84	4.2	0.60	17.0	12.5
粉土	1.98	9.1	0.44	11.3	21.5
粉砂	1.96	/	0.35	/	31.5
细砂	2.12	12.85	0.35	/	33.0
粉土	2.03	11.0	0.43	13.0	23.0
粉质粘土	2.04	6.8	0.42	23.6	15.6
粉质粘土	1.98	5.9	0.42	24.3	15.9
粉土	1.96	9.2	0.43	15.5	22.0

3 基坑施工全过程动态模拟研究

3.1 分析工况

为掌握基坑实施过程对既有地铁区间隧道的影响程度，明确所采取的工程技术措施是否能够满足隧道变形控制要求。采用数值计算分析方法，对不同施工方案进行对比分析。本次计算采用FLAC3D有限差分程序进行分析，分以下5种方案：

工况1—不进行地基加固措施，一次开挖；

工况2—进行地基加固，一次开挖；

工况3—不进行地基加固措施，基坑纵向分条逐次开挖（每条开挖5m，1:1放坡开挖）；

工况4—进行地基加固，基坑纵向分条逐次开挖（每条开挖5m，1:1放坡开挖）；

工况5—进行地基加固，基坑纵向分条逐次开挖并进行堆载反压（堆载150kPa）。

3.2 模型的建立

基坑开挖深度9.6m，宽50m，基底距隧道拱顶1.98m。整个模型计算范围为80m×70m×32m（长×宽×高），隧道管片和基坑土体均采用实体单元，土钉采用cable单元，混凝土喷层采用壳单元，采用null单元对相应网格单元进行开挖模拟。模型计算采用摩尔-库伦屈服准则。

计算模型上边界为自由面，其余边界约束其法向位移。在基坑开挖前，对土体位移场和塑性区清零。计算模型如图3所示：

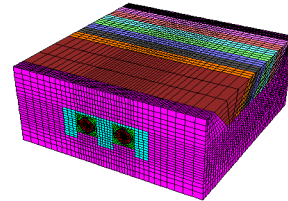


图3 模型及网格划分图

3.3 计算结果及分析

3.3.1 工况1 模拟结果及分析

基坑一次放坡全开挖情况下，基底与管片的变形云图如图4、图5所示，管片内力变化情况见表2。由图4、图5可以看出一次全开挖时基底的最大变形量为136.13mm，隧道结构的最大变形量为67.59mm，不满足控制要求。

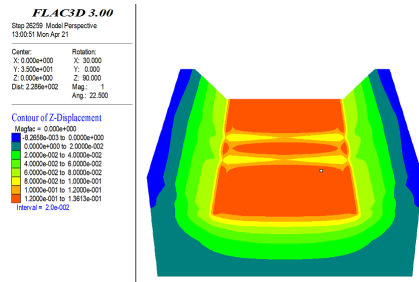


图4 工况1 基底变形云图

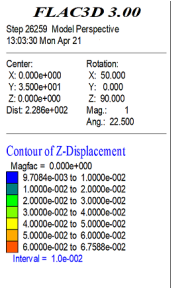


图 5 工况 1 管片变形云图

表 2 工况 1 管片开挖前后内力变化

项目	开挖前 (MPa)	开挖后 (MPa)	变化率 (%)
最小主应力	-3.22	-5.81	80.43
最大主应力	0.076	1.41	1750

3.3.2 工况 2 模拟结果及分析

土体加固后再对基坑进行一次放坡全开挖情况下，基底与管片的变形云图如图 6、图 7 所示，管片内力变化情况见表 3。由图 6、图 7 可以看出一次全开挖时隧道范围内基底变形较小，但两侧最大变形量为 139.83mm，隧道结构的最大变形量为 50.34mm，不满足控制要求。

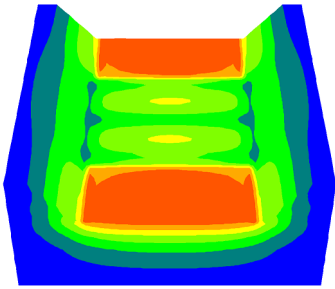
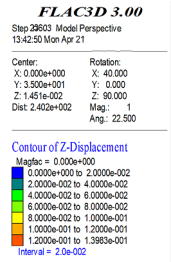


图 6 工况 2 基底变形云图

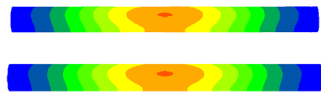
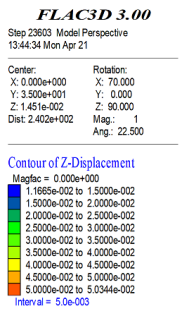


图 7 工况 2 管片变形云图

表 3 工况 2 管片开挖前后内力变化

项目	开挖前 (MPa)	开挖后 (MPa)	变化率 (%)
最小主应力	-3.22	-6.22	93.2
最大主应力	0.076	0.827	988.1

3.3.3 工况 3 模拟结果及分析

在不加固情况下对基坑进行分步放坡开挖，基底与管片的变形云图如图 8、图 9 所示，管片内力变化情况见表 4。由图 8、图 9 可以看出纵向分条逐次开挖时基底的变形量为 150.37mm，隧道结构的最大变形量为 69.96mm，不满足控制要求。

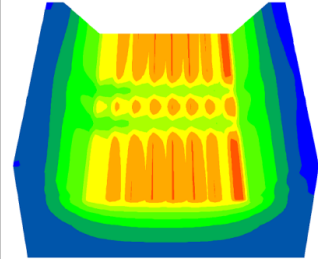
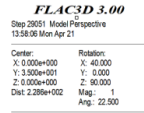


图 8 工况 3 基底变形云图

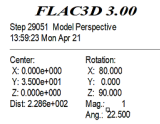


图 9 工况 3 管片变形云图

表 4 工况 3 管片开挖前后内力变化

项目	开挖前 (MPa)	开挖后 (MPa)	变化率 (%)
最小主应力	-3.22	-7.59	135.71
最大主应力	0.076	2.09	2644.7

3.3.4 工况 4 模拟结果及分析

土体加固情况下对基坑进行分步放坡全开挖，基底与管片的变形云图如图 10、图 11 所示，管片内力变化情况见表 5。由图 10、图 11 可以看出一次全开挖时基底的变形量为 122.25mm，隧道结构的最大变形量为 52.32mm，不满足控制要求。

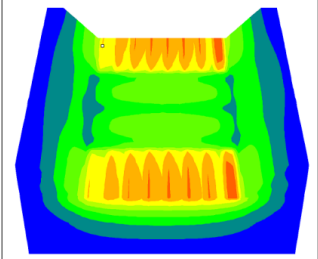
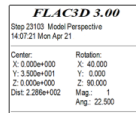


图 10 工况 4 基底变形云图

FLAC3D 3.00
Step 23103 Model Perspective
14:08:19 Mon Apr 21
Center: X: 0.000e+000 Y: 3.500e+001 Z: 0.000e+000
Rotation: X: 90.000 Y: 0.000 Z: 90.000
Dist: 2.286e+002 Mag: 1
Ang: 22.500

Contour of Z-Displacement
Mag: 0.000e+000
7.6327e-003 to 1.0000e-002
1.0000e-002 to 1.5000e-002
1.5000e-002 to 2.0000e-002
2.0000e-002 to 2.5000e-002
2.5000e-002 to 3.0000e-002
3.0000e-002 to 3.5000e-002
3.5000e-002 to 4.0000e-002
4.0000e-002 to 4.5000e-002
4.5000e-002 to 5.0000e-002
5.0000e-002 to 5.2322e-002
Interval = 5.0e-003



图 11 工况 4 管片变形云图

表 5 工况 4 管片开挖前后内力变化

项目	开挖前 (MPa)	开挖后 (MPa)	变化率 (%)
最小主应力	-3.22	-7.89	145.03
最大主应力	0.076	1.41	1750

3.3.5 工况 5 模拟结果及分析

进行地基加固，基坑纵向分条逐次开挖并进行堆载反压，基底与管片的变形云图如图 12、图 13 所示，管片内力变化情况见表 6。由图 12、图 13 可以基底最大变形量为 63.36mm，隧道结构的最大变形量为 14.81mm，均满足控制要求。

FLAC3D 3.00
Step 23209 Model Perspective
15:40:22 Mon Apr 21
Center: X: 0.000e+000 Y: 3.500e+001 Z: 1.207e-002
Rotation: X: 40.000 Y: 0.000 Z: 90.000
Dist: 2.470e+002 Mag: 1
Ang: 22.500

Contour of Z-Displacement
Mag: 0.000e+000
0.0000e+000 to 1.0000e-002
1.0000e-002 to 2.0000e-002
2.0000e-002 to 3.0000e-002
3.0000e-002 to 4.0000e-002
4.0000e-002 to 5.0000e-002
5.0000e-002 to 6.0000e-002
6.0000e-002 to 6.3363e-002
Interval = 1.0e-002

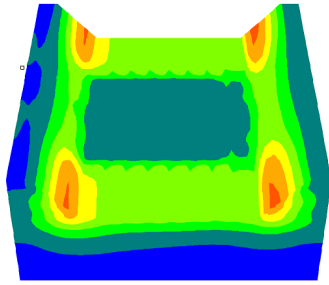


图 12 工况 5 基底变形云图

FLAC3D 3.00
Step 23209 Model Perspective
15:40:59 Mon Apr 21
Center: X: 0.000e+000 Y: 3.500e+001 Z: 1.207e-002
Rotation: X: 60.000 Y: 0.000 Z: 90.000
Dist: 2.470e+002 Mag: 1
Ang: 22.500

Contour of Z-Displacement
Mag: 0.000e+000
5.7888e-003 to 1.0000e-002
1.0000e-002 to 1.0500e-002
1.0500e-002 to 1.1000e-002
1.1000e-002 to 1.1500e-002
1.1500e-002 to 1.2000e-002
1.2000e-002 to 1.2500e-002
1.2500e-002 to 1.3000e-002
1.3000e-002 to 1.3500e-002
1.3500e-002 to 1.4000e-002
1.4000e-002 to 1.4500e-002
1.4500e-002 to 1.4855e-002
Interval = 5.0e-004

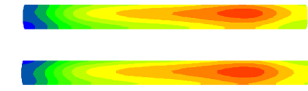


图 13 工况 5 管片变形云图

表 6 工况 5 管片开挖前后内力变化

项目	开挖前 (MPa)	开挖后 (MPa)	变化率 (%)
最小主应力	-3.22	-2.90	9.94
最大主应力	0.076	0.087	14.47

3.4 不同工况模拟结果对比分析

各种工况下基坑和隧道结构的变形情况如表 7 所示。

表 7 各种工况开挖基坑及隧道管片变化

工况	基底最大变形量 (mm)	隧道最大变形量 (mm)	最小主应力 (MPa)	最大主应力 (MPa)
工况 1	136.13	67.59	-5.81	1.41
工况 2	139.83	50.34	-6.22	0.827
工况 3	150.37	69.96	-7.59	2.09
工况 4	122.25	52.32	-7.89	1.41
工况 5	63.36	14.81	-2.90	0.087

对上述所得数据进行对比分析：

(1) 土体不做加固处理时，基坑一次全开挖基底和隧道管片的最大变形量分别为 136.13mm 和 67.59mm；分步开挖基底和隧道管片的最大变形量分别为 139.83mm 和 50.34mm；分步开挖情况下，隧道管片变形量减小了 17.25mm。土体做加固处理后，一步全开挖基底和隧道管片的最大变形量分别为 150.37mm 和 69.96mm；分步开挖基底和隧道管片的最大变形量分别为 122.25mm 和 52.32mm；分步开挖情况下，隧道管片变形量减小了 17.64mm。由此可见，分步开挖对隧道管片的变形控制有较好的效果。

(2) 一次全开挖基坑时，土体不做加固处理，隧道管片的最大主应力为 1.41MPa；土体做加固处理，隧道管片的最大主应力为 0.827MPa；分步开挖基坑时，土体不做加固处理，隧道管片的最大主应力为 2.09MPa；土体做加固处理，隧道管片的最大主应力为 1.41MPa。从隧道管片最大主应力来看，土体加固对减小隧道管片的拉应力、改善隧道管片受力状态有较好效果。

(3) 采用“地基加固 + 分步开挖 + 堆载反压”，基底最大变形量为 63.36mm，隧道管片最大变形量为 14.81mm；由隧道管片的最大主应力和最小主应力云图来看，基坑开挖完成后隧道管片所处应力状态与基坑开挖前其所处应力状态极为相似，对隧道管片的影响最小。因此可知，工况 5 开挖方式对基底和隧道管片的控制作用十分明显。

综上，对多种施工方案进行模拟分析后，本工程施工中可采用“地基加固 + 分步开挖 + 堆载反压 (150kpa)”综合控制措施，经计算隧道结构上浮变形约 14.81mm，满足运营地铁隧道最大变形量 20mm 的控制标准。

4 结语

基坑开挖对下卧既有地铁隧道的影响是一个非常复杂的土与结构共同作用的问题，上跨隧道的基坑工程变形控制要求高、难度大。本文阐述了基于软土地层上跨隧道深基坑工程实践总结形成的较为成熟的变形控制设计方法，主要包括坑内土体加固、分步开挖、坑外隔断、堆载反压以及承压水控制等。综合采取上述设计方法能够达到良好的变形控制效果，总体能满足地铁及隧道变形控制和结构安全的要求。

参考文献

- [1] 薛彦琪,张可能,胡晓军.深基坑开挖卸荷对下卧既有地铁隧道的影响分析[J].工程地质学报,2016,24(6):1230-1239.
- [2] 张俊平,张耀,唐正国.土体加固技术在跨地铁基坑施工中的应用[J].山西建筑,2005,01:61-62.
- [3] 李志高,曾远,刘浩,王毅斌.基坑开挖引起下方地铁隧道位移的控制措施[J].铁道建筑技术,2005,05:33-36.
- [4] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 郑网刚,焦莹.深基坑工程设计理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 城市轨道交通既有结构保护技术规范: DBJ/ T 15-120—2017[S].北京:中国城市出版社,2017.
- [7] 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,2014.
- [8] 城市轨道交通运营技术规范:GB/T38707—2020[S].北京:中国质检出版社,2019.