

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0106-06

# 地铁隧道上部基坑施工监测与数值模拟研究

马博涵, 范 瑛

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 在已有地铁隧道顶部进行深基坑工程施工, 支护结构及基坑的稳定会受到较大的影响。以武汉市光谷大道南延线的地铁隧道上某深基坑工程为例, 对基坑的支护结构水平位移、钢支撑轴力等进行现场监测, 结果表明: 采用灌注桩组成的基坑支护结构相比分级放坡开挖更有利于基坑的稳定; 随着基坑开挖的进行, 钢支撑的轴力会先增大后减小, 当开挖接近底部时支撑轴力趋于稳定; 灌注桩支护结构的深层水平位移随着基坑开挖逐渐增大, 总体呈两头小中间大的“弓”形。在此基础上采用 midas/gts 有限元对基坑开挖进行了数值模拟, 对比分析模拟值与监测值变化规律, 验证了数值模拟方法的可行性, 为基坑支护方案设计、施工方法的选择和监测点布设提供依据。

[关键词] 基坑; 开挖; 监测; 数值模拟

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

随着地铁在中国城市经济建设的发展, 出现了很多地铁与建筑结构物进行交叉的状况。基坑工程作为所有这些建设的基础, 它的安全往往影响着整个项目安全进行, 为保证交叉的基坑工程的安全建设, 必须对基坑施工进行监测<sup>[1]</sup>。基坑监测的项目<sup>[2-7]</sup>主要有: 水平(竖向)位移监测、深层水平位移监测、倾斜监测、裂缝监测、结构内力监测、地下水位监测等几个方面。

本文通过对基坑开挖过程中支护结构(边坡)水平位移、钢支撑轴力和支护结构深层水平位移监测数据的分析, 得出了支护结构的变形趋势, 结合实测数据, 用数值模拟值与监测值的对比分析, 确保工程建设的安全。

## 1 工程概况

本工程位于光谷腹地, 为光谷大道南延线快速化改造工程。本文只选取金融港四路~高新四路段高架桥地梁基坑工程为研究对象, 按设计要求桥梁桩基地梁采取承台+地梁+承台+地梁+承台(6根桩基+承台+地梁)结构形式, 地梁开挖长度为 31.9~33.5 m, 开挖最大深度 6.8 m, 底部开挖宽度 8.1~11 m, 顶部开挖宽度 18~20.9 m, 单个基坑最大土方开挖量约为 2900 m<sup>3</sup>, 基坑长边沿东西方向。按照设计方案, 地铁二号线区间隧道与基坑南北两

侧边线垂直穿过, 区间隧道结构覆土厚度为 9~11.5 m, 而基坑开挖深度最大为 6.8 m, 隧道结构距离基坑底高度为 3~5 m。地梁结构图、地梁与地铁区间位置关系分别如图 1、2 所示。

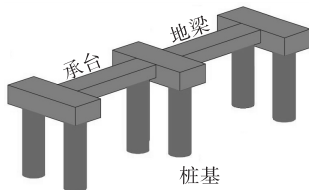


图 1 地梁结构示意图

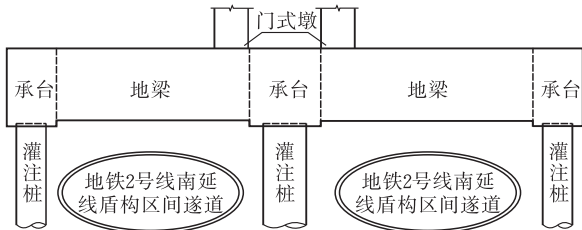


图 2 地梁与地铁区间位置关系图

## 2 基坑监测及数据分析

### 2.1 基坑支护方案

受地铁隧道与基坑南北两侧边线垂直穿过制约, 南北两侧无法采用打桩支护措施, 需采用放坡支护方式。根据现场实际条件, 桥梁上部结构跨度

[收稿日期] 2018-09-25

[第一作者] 马博涵(1991-), 男, 湖北荆州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为工程力学

40 m 左右,具备放坡开挖条件。根据湖北省地方标准《基坑工程技术规程》(DB42/T 159—2012)6.14.4 条规定,结合本工程实际地质情况,对于采用放坡开挖的,坡度按 1 : 0.75 实施。开挖深度按最大 6.8 m 考虑,共分 2 级放坡,放坡高度均为为 3.4 m,一、二级放坡中间部位设 1.5 m 宽平台。结合基坑所处地质资料,基坑东西侧采用 12 m 长 $\varnothing 800@1000$  钻孔灌注桩+800 $\times$ 800 冠梁支护+钢管斜撑的支护开挖体系。基坑南北、东西两侧支护结构如图 3 所示。

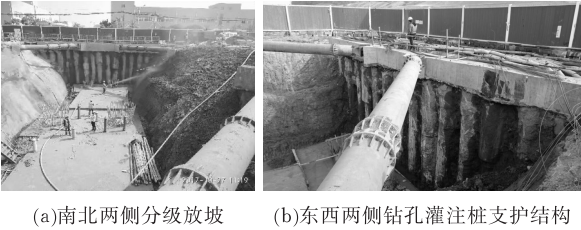


图 3  基坑南北、东西两侧支护工况图

2.2  基坑监测及数据分析

基坑在支护和开挖的过程中,必定会对周围土体产生扰动,而这种扰动最终会通过监测数据的变化反应出来。综合设计要求和本基坑工程的实际情况,选取支护结构(边坡)水平位移、钢支撑轴力和支护结构深层水平位移作为基坑监测对象。本次监测时间为 2017.10.7~2017.11.25,总持续时间为 50 d。

1)支护结构(边坡)水平位移  本文的围护墙(边坡)水平位移的监测利用徕卡 TC402 型全站仪采用极坐标法进行监测<sup>[8]</sup>,根据公式  $\Delta S = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{0.5}$ ,每次观测后得到的观测点坐标与初始观测点坐标值相比较,所得坐标矢量差即为该次观测点的累计位移量,用每次观测后得到的观测点坐标与前一次相同观测点的坐标矢量差即为本时间段的位移量。本次水平位移监测对象为 GN01 号~GN10 号共 10 个基坑,10 个基坑共计 120 个点位,限于本文篇幅,取具有代表性的基坑 GN03 的监测数据予以分析。支护结构水平位移监测、水平位移点位布置分别如图 4、图 5 所示。



图 4  围护墙(边坡)水平位移监测

GN03 号基坑围护墙(边坡)各监测点位水平位移累计变化如图 6 所示。其中向基坑内的位移量取负值,向基坑外侧的位移量取正值。

根据图 6 可以看出随着基坑开挖的进行,基坑

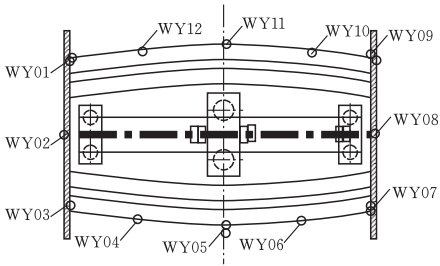
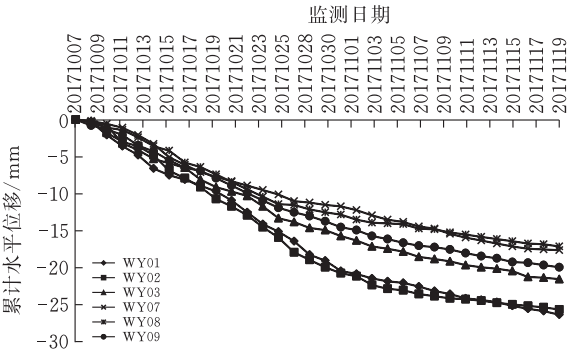
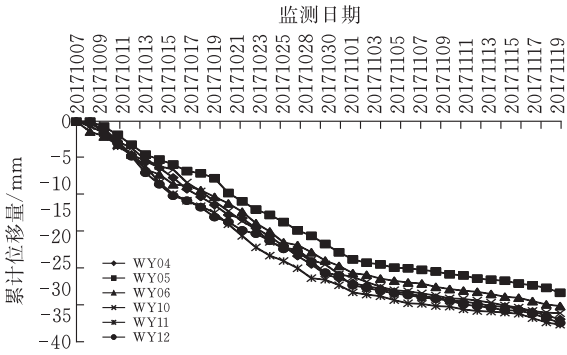


图 5  水平位移监测点布置图



(a)东西侧围护墙上各监测点位



(b)南北侧基坑边坡各监测点位

图 6  GN03 围护墙各监测点位水平位移累计变化

围护墙及边坡的累计水平位移量逐渐增加,蒋宿平<sup>[8]</sup>认为随着基坑开挖的不断进行,不但基坑尺寸和土压力不断变化,而且二者相互影响相互作用;开挖施工改变了基坑的深度,深度的变化又引起位移的大小及其分布的变化,水平位移的变化最终引起土压力的变化。GN03 东西侧累计最大水平位移量-28 mm(WY01 监测点),平均累计水平位移量-22.97 mm;南北侧累计最大水平位移量-37 mm(WY11 监测点),平均累计水平位移量-34.9 mm。随着基坑工程的进行,东西侧和南北侧累计位移量均逐渐增加,但东西侧的位移状态改变较南北侧平缓,分析原因为东西侧采用的是灌注桩围护结合,它比分级放坡开挖支护结构强度高、刚度大,更有利于维持基坑四周土体的稳定。

2)支撑轴力  基坑工程施工的过程中,四周土体会给支护结构一个挤压力,支护结构通过围檩将这个力传递给支撑结构,这个力就反应为支撑轴力。蒋洪胜<sup>[9]</sup>通过对基坑测点的支撑轴力监测数据及其

对应工况对照分析发现:在基坑开挖过程中随工况的变化,各道支撑轴力值大都呈现出有规律的增加或减小。

现场基坑工程轴力计测读仪测读如图 7 所示。



图 7 光谷大道南延线基坑工程轴力计测读

本次轴力监测 GN01~GN10 基坑共计安装 40 个,监测时间为从钢支撑安装开始到基坑回填前钢支撑拆除(2017.10.18~2017.11.8)。本论文分析时取具有代表性的基坑 GN03 的同一轴力计监测点位(GN03-ZL01)的监测数据。其测的值见表 1。

表 1 GN03-ZL01 监测点位轴力频率值及相应轴力值

监测日期	频率	轴力/kN	监测日期	频率	轴力/kN
2017.10.18	1844.3	26.1	2017.10.27	1822.0	182.6
2017.10.19	1814.3	237.8	2017.10.28	1823.2	173.9
2017.10.20	1846.3	12.0	2017.10.29	1829.4	130.6
2017.10.21	1831.1	118.6	2017.10.30	1819.4	200.3
2017.10.22	1822.7	177.8	2017.10.31	1823.5	171.8
2017.10.23	1803.4	311.0	2017.11.02	1826.3	152.3
2017.10.24	1803.4	311.0	2017.11.04	1822.2	180.9
2017.10.25	1803.3	311.7	2017.11.06	1829.7	128.5
2017.10.26	1803.4	311.0	2017.11.08	1828.2	139.0

由表 1 可知:从基坑表面开挖至最底层(2017.10.18~2017.10.26),随着基坑开挖的进行,支撑轴力值逐渐增,最大值为 311.7 kN(2017.10.25 测),层台施工阶段至钢支撑拆除(2017.10.27~2017.11.08)阶段支撑轴力值逐渐减小,最小值为 128.5 kN(2017.11.06 测)。

3)深层水平位移 桩身位移<sup>[6]</sup>完整地反映围护桩桩身的变形,也是维护结构安全状况的重要指标。本工程监测时间为 2017.10.7~2017.11.25,总持续时间为 50 d。GN03 号基坑监测期各主要时间节点测斜数据如图 8 所示。

由图 8 可以看出随着开挖的进行,东西侧灌注桩的深层水平位移逐渐增大,位移最大区域集中于灌注桩的中上部,总体呈现两头小中间大的“弓”形变形模式。其中最大深层水平位移为 11.1 mm(深度 1.5 m 处,2017.11.05 测),对比设计方案中深层水平位移预警值 30 mm,可知在基坑开挖过程中南北侧灌注桩支护结构处于安全可控状态,最大深层水平位移值为预警值的 37%,说明此支护设计方案

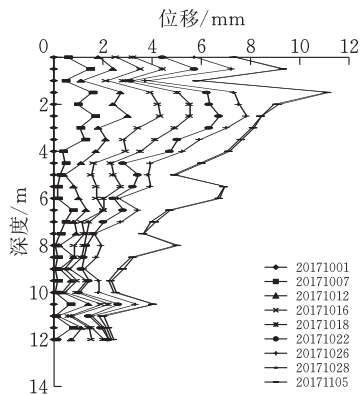


图 8 GN03 监测期各时间点测斜数据图

偏保守,在以后的支护设计中可以做适当优化。

### 3 基坑开挖的数值模拟分析

#### 3.1 数值分析模型

本文所选基坑工程长 32.5 m、宽 24 m,开挖深度 6.8 m,基坑正下方有已建地铁 2 号线隧道,本文数值模拟所取计算范围为 75 m×65 m×60 m( $X\times Y\times Z$ )。对依据尺寸建好的几何体进行网格划分,模型采用 midas/ gts 默认四面体网格划分,支护方案一共生成 50 530 个三维网格单元,28 436 个节点,支护方案二共生成 51 421 个三维网格单元,28 623 个节点,划分后的三维模型如图 9 所示。模型顶面为自由面,无约束;模型底面每个方向均约束;模型四个侧面均只约束法向,其余方向自由无约束。

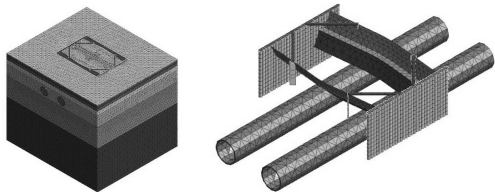


图 9 三维数值模型

#### 3.2 地层参数

根据勘察工程地质报告,光谷南延基坑模型地质参数见表 2。

表 2 地质参数表

名称	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	凝聚力粘 聚力/kPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	压缩模 量/MPa
杂填土	19.5	5	15	4
黏土	17.4	11	5	5.11
粉质粘土	19.47	25	14.9	10.8
黏土夹碎石	19.2	35	15	8.5
强风化泥 质粉砂岩	23	52.7	17.6	46
中风化泥 质粉砂岩	23.3	60	18.5	不可

#### 3.3 计算结果

计算结果中包含基坑模型中所有实体对象的变



形、应力、应变、轴力等结果。对于不同结果的处理可以根据不同需要以不同的方式获取计算结果。在 Midas Gts 中计算结果的表现形式也有很多种,如变形云图、线上图、等值线、输出为表格等。基坑模拟过程中不同阶段的基坑和基坑支护结构的变形云图如图 10~15 所示。

1)第一层土开挖变形云图

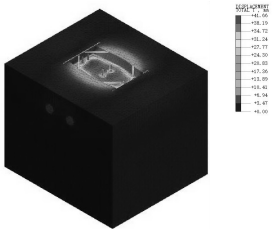


图 10  第一层图开挖结束整体变形云图

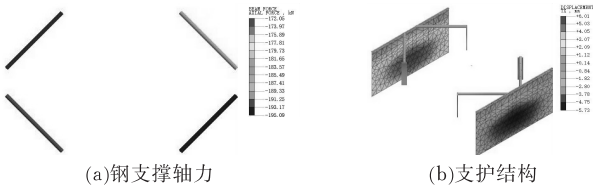


图 11  第一层土开挖结束钢支撑轴力和  
支护结构 X 方向变形云图

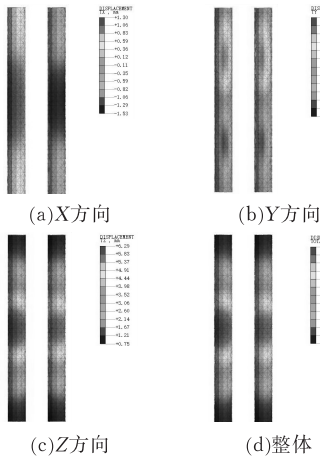


图 12  第一层土开挖结束后管片变形云图

从图 10 可以看出基坑第一层土开挖结束发生变形的最大处为基坑底部(基坑底面中部),主要表现为隆起,并且离基坑壁越远其值越大,最大值 41.66 mm;此阶段基坑东西两侧的变形很小,南北两侧发生较小变形,但是范围较大,这说明此基坑开挖阶段对于东西侧钢板桩支护结构影响较小,而对于南北侧分级放坡支护结构影响较大,在开挖过程中应重点注意监测南北侧土体位移情况。

由图 11a 可知第一层土开挖结束四个钢支撑的轴力值处于 172.05~195.09 kN 之间,其中最大值是最小值的 1.13 倍。从图 11b 可以看出支护结构的变形表现为两头小中间大的“弓”型,就整个支护结构平面来看,最大变形区域位于整个平面的中部,

呈椭圆形分布,且位于椭圆形中心的变形最大(6.01 mm),变形随着椭圆形半径的增大而逐渐变小。

从图 12 可以看出,第一层土开挖结束后隧道管片 X 方向最大变形为-1.53 mm,Y 方向最大变形为 0.67 mm,Z 方向最大变形 6.29 mm,这说明基坑第一层土开挖阶段对隧道水平方向的影响小于竖直方向的影响。

2)第二层土开挖变形云图

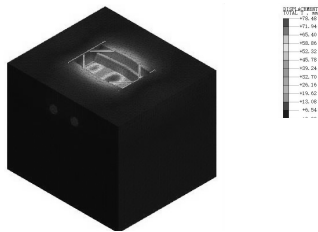


图 13  第二层土开挖结束基坑整体变形云图

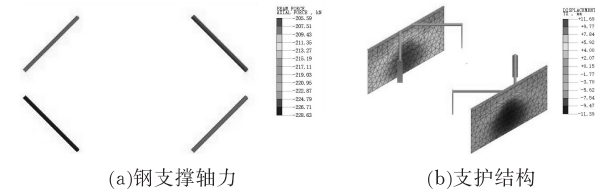


图 14  第二层土开挖结束钢支撑轴力和  
支护结构 X 方向变形云图

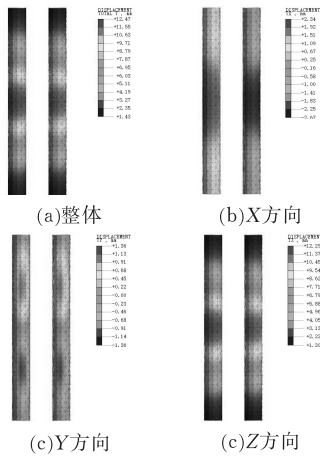


图 15  第二层土开挖结束管片变形云图

从图 13 可以看出基坑第二层土开挖结束发生变形的最大处为基坑底部(基坑底面中部),最大值为 78.48 mm,整个基坑底面被中间的两根灌注桩分为两个面积相等的平面,变形最大值均发生在平面的中部。对比图 10 和图 13 可知,随着开挖的进行,坑底土体隆起逐渐累积,最大值由 41.66 mm 增加到 78.48 mm,增加了 36.82 mm,是第一层土开挖结束最大值的 88.38%。

由图 14a 知,第二层土开挖结束后钢支撑轴力值范围为 205.59~228.63 kN,平均轴力为

217.11 kN,比图 11a 第一层土开挖结束后钢支撑的平均轴力值 183.57 kN 高 33.54 mm,高出部分占第一层土开挖结束后轴力平均值的 18.27%。由图 14b 知,随着开挖的进行,支护结构深层水平位移逐渐增大,其中最大值为 11.69 mm,位于支护结构的中部,第二层土开挖结束灌注桩的深层水平位移呈两头小中间大的“弓”形。

对比图 12 与图 15 可知,随着基坑第二层土开挖的进行,隧道管片 X、Y 和 Z 方向的变形量均有增大,且最终增大值为第一层土开挖结束相应方向变形值的一倍。

3.4 实测值与模拟值的对比分析

根据数值模拟<sup>[11]</sup>的结果优化设计并采用信息化施工手段,对基坑工程本体与周围环境在不同工况下薄弱点实施动态监测,汇总各项监测数据进行分析 and 预测验证支护方案的安全可靠性,这样才能更好地指导各项施工措施及保护措施的实施。支护结构(边坡)水平位移、深层水平位移的监测最大值与模拟计算最大值对比如图 16 所示。

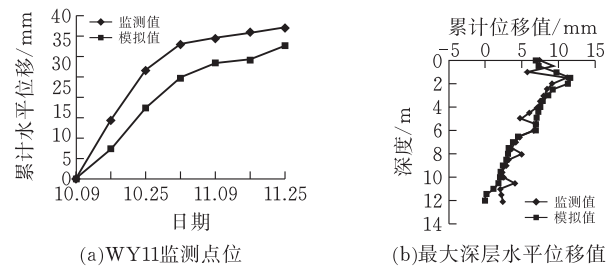


图 16 监测数据与模拟计算值对比图

综合变形云图以及监测数据可以发现如下结果。

1)由图 16a 可以看出,模拟计算值与监测值中基坑支护结构最大变形分别为 32.7 mm(南北侧边坡中部)、37 mm(WY11 监测点),满足设计规定不超过 80 mm 的要求,均说明基坑处于安全状态。从模拟变形云图可以看出从基坑初始开挖直至设计标高,基坑底部的变形逐渐增大,主要表现为隆起,这与实际工程的监测数据表现是一致的。对比基坑的几种支护结构,采用灌注桩的基坑东西两侧支护桩周围的土体变形小于采用分级放坡开挖支护的基坑南北两侧的变形,这说明灌注桩支护相对于分级放坡支护对土体的位移有更好的限制作用。

2)模拟计算值显示:钢支撑的轴力随着第二层土开挖结束会有一定的增加,增加值是第一层土开挖结束轴力值的 18%~21%,开挖结束最大轴力计算值为 228.63 kN。实际监测值较为离散,可以用模拟值补充关键点的轴力指标。

3)由图 16b 可知,模拟计算值显示东西侧的支

护结构的变形都是随着开挖的进行逐渐增大,最大变形计算值为 11.69 mm,最大监测值为 11.1 mm。对比监测数据,就竖直方向来看,支护结构的变形两头小中间大,符合围护结构四种破坏变形模式之一的“弓”形变形模式;横向看,支护结构的中部变形计算值最大,建议在实际的基坑监测中将深层水平位移的测管设置于此。

4)本文通过现场监测与数值模型相结合,分析地铁隧道的变形趋势以及指导实际的施工。数值模拟计算值中地铁隧道的 X、Y 和 Z 方向的最大变形分别为 -2.67 mm、1.36 mm 和 12.29 mm,竖向位移(Z 方向)与水平位移(X、Y 方向)对地铁隧道管片结构影响满足安全控制指标要求<sup>[12]</sup>,但竖向位移不满足区间隧道已完成铺轨工况下的隧道上浮不大于 5 mm 的控制指标要求,因此,按照目前的基坑开挖方案,建议基坑工程应在地铁隧道铺轨之前完工。

4 结论

本文对光谷大道南延线的地铁隧道上部基坑的施工进行了支护结构(边坡)、钢支撑轴力和支护结构深层水平位移进行了监测,采用 midas/gts 有限元分析软件对基坑开挖进行了数值模拟,通过对比分析监测数据以及数值模拟值,得出以下结论:

1)本次支护系统中灌注桩支护结构相比分级放坡支护结构更有利于维护基坑开挖期间的稳定,两者累计水平位移最大值分别为 -35.8 mm 和 -41.9 mm;随着基坑开挖的进行,钢支撑的轴力值会先增大后减小,当基坑开挖到最底部时轴力达到最大值;灌注桩支护结构的深层水平位移随着基坑开挖的进行逐渐增大,总体呈两头小中间大的“弓”形。

2)采用 midas/gts 有限元分析软件对基坑开挖进行了数值模拟,通过对比分析模拟值与监测值变化规律,证明了数值模拟分析能够对基坑开挖过程的变形趋势进行预测,这能够为基坑支护方案的设计、施工方法的选择和监测点的布设提供依据。

3)数值模拟计算值中地铁隧道的 X、Y 和 Z 方向的最大变形分别为 -2.67 mm、1.36 mm 和 12.29 mm,竖向位移(Z 方向)与水平位移(X、Y 方向)对地铁隧道管片结构影响满足安全控制指标要求,但竖向位移不满足区间隧道已完成铺轨工况下的隧道上浮不大于 5 mm 的控制指标要求,因此,按照目前的基坑开挖方案,建议基坑工程应在地铁隧道铺轨之前完工。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 刘俊岩. 建筑基坑工程监测技术规范(GB50497—2016)研究与编制[J]. 施工技术, 2016, 38(5):1-4.

[2] NI Hangen, LIU Yakun. Threshold condition for chocking in open channels and excavation of tailrace [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 17(2):164-170.

[3] 黄传盛. 地铁深基坑开挖变形预测方法及工程应用研究[D].长沙:中南大学, 2011.

[4] 张瑾. 基于实测数据的深基坑施工安全评估研究[D].上海:同济大学, 2008.

[5] 刘杰, 姚海林, 任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010(s2):456-461.

[6] 高立新. 地铁车站深基坑变形规律监测及 FLAC 模拟研究[D]. 西安:西安科技大学, 2009.

[7] 李清鹏. 基坑开挖对下部轨道交通区间隧道变形影响及控制研究[J]. 铁道勘测与设计, 2016(2):70-74.

[8] 蒋宿平. 基坑监测技术的研究与应用[D].长沙:中南大学, 2010.

[9] 蒋洪胜, 刘国彬. 软土深基坑支撑轴力的时空效应变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6):108-110.

[10] 潘顺琪. 基坑开挖变形预测和数值分析[D].兰州:兰州交通大学, 2018.

[11] 帅红岩, 陈少平, 曾执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014(4):1082-1090.

[12] 李清鹏. 基坑开挖对下部轨道交通区间隧道变形影响及控制研究[J]. 铁道勘测与设计, 2016(2):70-74.

# Monitoring and Numerical Simulation of Foundation Pit in Subway Tunnels

MA Bohan, FAN Ying

(School of Civil Engin., Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

**Abstract:** The construction of deep foundation pits on the top of the existing subway tunnel will greatly affect the stability of the supporting structure and foundation pit. Take a deep foundation pit project on the subway tunnel on the south extension line of Guanggu Avenue in Wuhan as an example, the horizontal displacement of the supporting structure of the foundation pit and the axial force of the steel support are monitored on site. The results show that the foundation pit consists of cast-in-place piles. Compared with the graded grading excavation, the supporting structure is more conducive to the stability of the foundation pit; as the foundation pit excavation progresses, the axial force of the steel support will increase first and then decrease. When the excavation approaches the bottom, the supporting axial force tends to in the stable; the deep horizontal displacement of the cast-in-situ support structure gradually increases with the excavation of the foundation pit, and the overall shape is a "bow" with a small middle and a large middle. Based on this, the midas/gts finite element method is used to simulate the excavation of the foundation pit. The variation of the simulated value and the monitored value is compared and analyzed. The feasibility of the numerical simulation method is verified, which could provide implications for the design of the foundation pit support scheme, the selection of the construction methods and the monitoring points.

**Keywords:** foundation pit; excavation; monitoring; numerical simulation

[责任编辑: 裴 琴]