

Effect of Filling and Grouting Reinforcement on Deep Foundation Pit Support Structure and Adjacent Tunnels

Anxing Li, Yangqiu Li, Yanzeng Wang, Gengchen Tang

CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing
Email: ansin@foxmail.com

Received: May 6th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

This paper takes the deep foundation pit reconstruction project adjacent to the operating track line as an example, and introduces the foundation pit supporting scheme combining the rib column, the supporting pile and the short anchor rod and the long anchor cable. The height of the original foundation pit slope is deepened from 23.4 m to 40 m. With the excavation of the foundation pit, soil pressure is continuously increased, the original stress balance state of the tunnel is changed, and the stress mode of the bias is more obvious. Through the method of numerical analysis, the whole process from the reconstruction of the foundation pit to the new construction of the tower was simulated, and the deformation value and stress value of the tunnel under various construction conditions were obtained. Compared with the new construction project, the analysis of the construction conditions of the original underground structure demolition is added. In addition, the wind load and seismic load of the super high-rise tower are large, and they are also analyzed and calculated separately as a working condition. The results of numerical analysis are helpful to guide the design and construction of foundation pits, and predict the risk sources and time of occurrence of tunnel structure safety.

Keywords

Foundation Pit Slope, Metro Station, Interval Tunnel, Support Scheme, Working Condition Analysis

改建工程深基坑对地铁车站及区间隧道的影响分析

李安兴, 李杨秋, 王燕增, 唐耿琛

中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆
Email: ansin@foxmail.com

文章引用: 李安兴, 李杨秋, 王燕增, 唐耿琛. 改建工程深基坑对地铁车站及区间隧道的影响分析[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 821-829. DOI: 10.12677/hjce.2019.83095

摘要

本文以邻近运营轨道线路的深基坑改建工程为例，详细介绍了肋柱、支护桩与短锚杆、长锚索相结合的基坑支挡方案。原有基坑边坡高度由23.4 m加深至40 m，随着基坑的开挖，土压力不断增大，隧道原有的应力平衡状态被改变，偏压的受力模式更加明显，通过数值分析的手段模拟了从基坑改建到塔楼新建的全过程，得出各施工工况下隧道的变形值和应力值，相比于新建项目，增加了原有地下结构拆除的施工工况分析。另外超高层塔楼的风荷载和地震荷载数值较大，也单独作为一种工况进行了分析计算。数值分析的结果有利于指导基坑设计和施工，对影响隧道结构安全的风险源及发生时间进行预判。

关键词

基坑边坡，地铁车站，区间隧道，支护方案，工况分析

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

本世纪以来，基坑的规模越来越大，面积在 10,000 m² 以上的基坑越来越多；基坑的开挖深度达到 30 m~50 m；基坑场地紧凑，有些地方紧贴建筑红线，或临近已建隧道等重要地下构筑物，从而使一些基坑工程呈现出“大、深、紧”的特点。深基坑开挖卸载会引起周围地层移动及初始应力状态发生改变，进而导致紧邻隧道的位移场和应力场发生变化，这种改变将破坏隧道侧墙原有的对称受力模式，形成偏压隧道。而隧道是对变形控制极为严格的地下结构物，特别是已运营多年的旧地铁线路对于变形控制更为严格。

J. S. Sharma 等[1]报道了新加坡基坑开挖影响相邻隧道的案例，并应用数值方法与实测结果进行比较，得出数值分析能有效预测隧道变形趋势的结论；张治国[2]考虑基坑开挖引起坑底和四周坑壁土体同时卸荷产生的影响，提出了基坑开挖对临近隧道纵向变形影响的两阶段分析方法。高广运等通过数值方法对上海某邻近地铁隧道的基坑工程进行了施工动态模拟，提出并采用了坑外二次加固的施工新工艺的地铁隧道保护方法[3]。肖丽霞等运用 ANSYS 有限元软件建立了数值模型，进行了基坑施工过程的数值模拟，获取了隧道的变形分布与变化规律[4]。李杨秋、李安兴等运用 Midas-Gts 有限元软件建立了三维数值模型，以基坑位移及应力变化的影响作为研究重点，探讨了岩质基坑及邻近隧道结构在开挖过程中变形特点，分析了基坑工程对隧道位移、内力、安全性的影响规律[5] [6] [7]。

2. 工程概况

2.1. 基坑工程及隧道工程概况

重庆塔项目位于重庆解放碑中央商务区，主楼 96/-8F，建筑总高度约 430 m，基础形式为筏板基础、桩基础。场地有原万豪酒店二期曾经经过设计与部分施工的烂尾楼，原有地下车库为 6 层，基坑高度为 23.6 m，如图 1。重庆塔项目须拆除原有烂尾楼后将原有基坑由 6 层加深至 8 层。基坑东南侧有运营的轨道交

通二号线, 该侧基坑长约 110 m, 深度约 40 m, 边坡倾向 $304^{\circ}\sim 320^{\circ}$, 边坡主要岩性为砂岩及砂质泥岩, 属于深、大基坑工程。基坑竣工照片如图 2。项目总平面图如图 3。



Figure 1. Unfinished building foundation pit
图 1. 原万豪酒店二期烂尾楼基坑



Figure 2. Reconstruction of the foundation pit
图 2. 重庆塔项目改建基坑

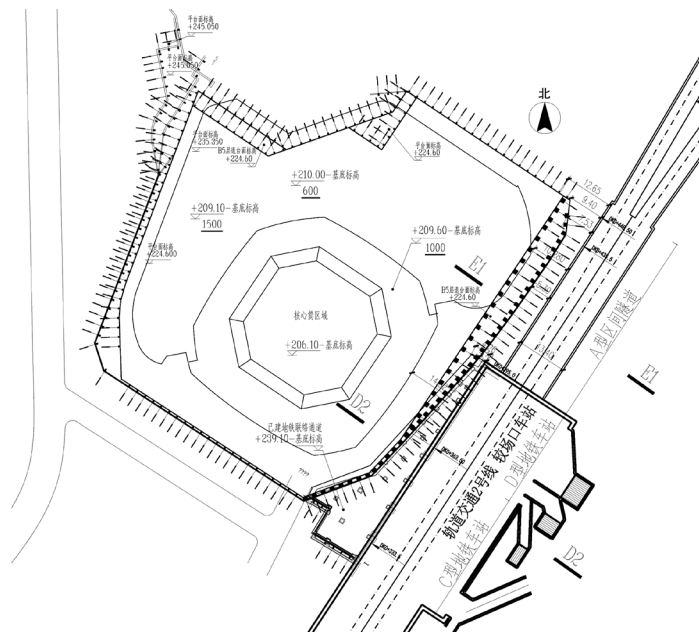


Figure 3. Project general plan
图 3. 项目总平面图

重庆轨道交通二号线是我国第一条建成通车的单轨铁路。轨道走向与东南侧基坑平行，受基坑影响的区段为较场口车站及较场口-临江门区间隧道。车站为双层侧式站台明挖车站，车站为两层两跨(三跨)钢筋混凝土框架结构，断面宽度 * 高度为 22~28 m * 14.35 m。车站埋深约 2.5 m，采用复合式衬砌。区间隧道以单洞双线的结构形式过渡到双洞单线，为深埋暗挖隧道，基坑影响范围内有两种断面：A 型断面宽度*高度为 12.48 m * 10.14 m。B 型断面宽度 * 高度 5.65 m * 7.08 m，均采用复合式衬砌。

2.2. 项目与轨道位置关系

较场口车站距基坑边线水平距离最近约 2.1 m，最远约 19.4 m，车站底板标高高于基坑坑底标高，距原有基坑坑底竖向距离约 5.3 m，距新建基坑坑底约 21.8 m，基坑与车站剖面位置关系见图 4。

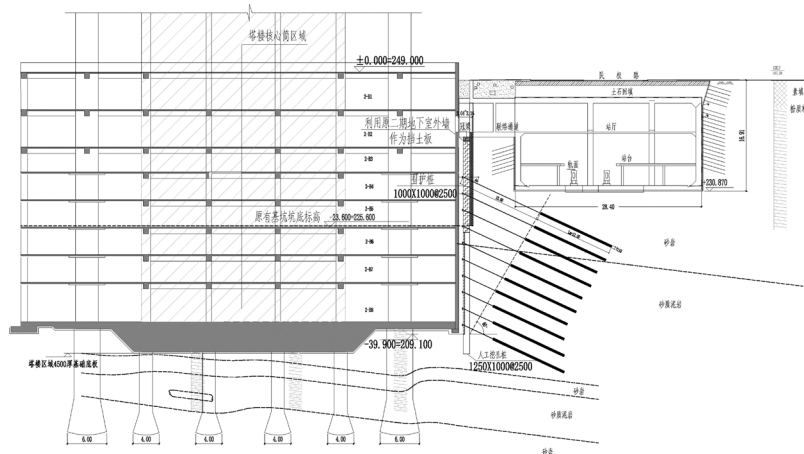


Figure 4. Relationship between the position of the foundation pit and the station
图 4. 基坑与较场口车站剖面位置关系图

区间隧道距基坑边线水平距离最近约 5.4 m，最远约 13.4 m，隧道底距原有基坑坑底竖向距离约 2.8 m~5.3 m，距新建基坑坑底约 19.3 m~21.8 m。基坑与区间隧道剖面位置关系见图 5。

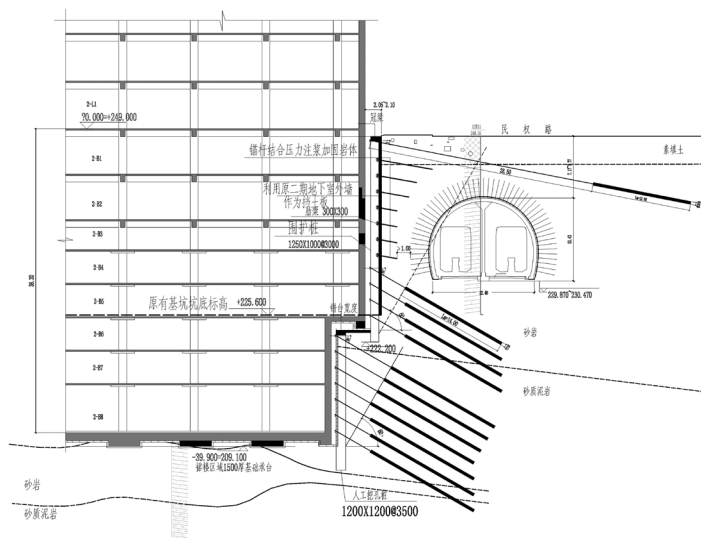


Figure 5. Relationship between the position of the foundation pit and the section tunnel
图 5. 基坑与区间隧道剖面位置关系图

3. 基坑支护设计方案

东南侧基坑边坡的保护对象为轨道交通二号线，包含了车站和区间隧道，保护对象的重要性高。根据赤平投影分析，东南侧基坑边坡稳定性主要受裂隙 J1 ($320^\circ \angle 75^\circ$) 控制，边坡破裂角为 75° ，基坑边坡若直立开挖，经平面滑动法计算出边坡稳定性系数为 1.03，处于欠稳定状态。

本项目基坑工程为改建工程，场地范围内存在原有六层地下室框架结构，需将原有地下结构拆除后再加深开挖 16.6 m，并新建八层地下室。基坑边坡总高度 40 m，分为上、下两部分，上部分为原六层地下室深度范围内的基坑边坡，高度 23.4 m，下部为新开挖基坑边坡，高度 16.5 m。

支挡设计方案采用支护桩结合预应力锚索的结构控制基坑变形。在基坑支护方案中充分考虑及利用原有地下室外墙结构，施工时，在结构板位置局部穿孔以完成原有基坑深度范围内的锚索和支护桩的施工，以原地下室外墙为挡土板，支护桩紧贴地下室外墙，待锚索张拉完成且验收合格后，方可进行原有地下室结构构件的拆除。在原有基坑与轨道结构距离较近处，无法设置锚索部分，则采用短锚杆结合压力注浆对岩体进行加固。原有基坑底标高为 225.6 m，该处结合建筑方案设置分阶平台，退台宽度约为 1.0 m~7.0 m，将原有烂尾楼拆除完毕后，再进行下部基坑支护桩的施工，为减少施工扰动影响，采用人工方式开挖桩孔，待人工挖孔桩浇筑完成后再进行基坑的开挖，开挖严格遵循“开挖一阶，支护一阶”的顺序施工锚索，张拉完毕后，方可进行下一阶的开挖工作。

岩质基坑设计方案一般选择锚(杆)索挡墙，当基坑邻近重要构筑物时，采用支护桩和预应力锚索联合作用的支挡结构能有效控制基坑边坡及隧道的变形，是首选支护方案。但因基坑侧壁与隧道结构距离太近，无足够的岩墙厚度保证锚索有效锚固长度，部分区域设计采用短锚杆与支护桩相结合的方案。该方案施工全程采用“逆作法”，即先支挡后开挖，能保证轨道交通设施的安全、稳定，并且通过调节锚索的预应力值能最大限度减小基坑变形对轨道结构的影响。因此在项目安全评审中，上述方案得到了专家组的认可，并同意予以实施。

4. 数值模拟分析

4.1. 三维有限元模型

采用有限元软件 MIDAS-GTS 建立三维模型，计算区域内的岩土体、外倾结构面、桩基础采用实体单元来模拟，车站、区间隧道、风井、出入口、连接通道及挡土板均采用板单元进行模拟，桩采用梁单元进行模拟，锚索采用植入式桁架进行模拟，出于安全考虑，数值模拟中未考虑区间隧道初期支护，仅考虑二次衬砌。模型施加荷载有：锚索预应力、行车荷载、建筑物基础荷载、高层建筑作用于基坑侧壁的风荷载及地震荷载。三维有限元模型见图 6。按表 1 施工工况设置荷载步。

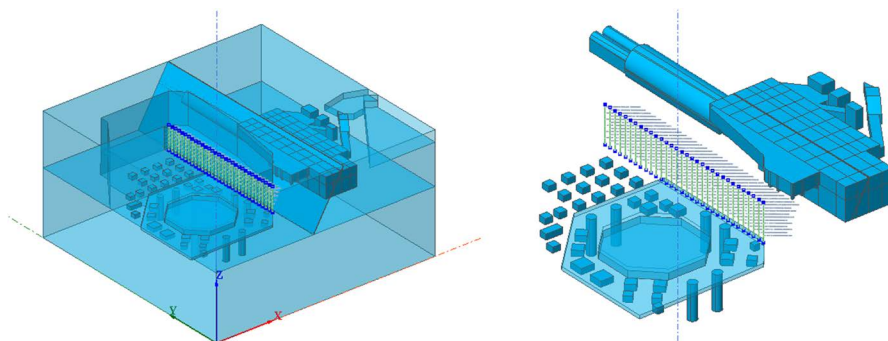


Figure 6. 3D finite element model
图 6. 三维有限元模型

Table 1. List of construction conditions
表 1. 施工工况一览表

荷载步	施工工况
第 1 步	原状地应力场、位移场
第 2 步	原有结构(烂尾楼)拆除
第 3 步	下部基坑开挖
第 4 步	基础开挖
第 5 步	项目修建完成
第 6 步	施加水平荷载

4.2. 计算参数

数值计算中岩土体本构关系选用摩尔库伦，岩土体物理力学参数见表 2。

Table 2. Physical and mechanical parameters of rock mass and structure
表 2. 岩土体及结构物理力学参数

岩土名称	重度 (kN/m ³)	岩石抗压强度标准值(MPa)		天然内摩擦角 Φ (°)	天然粘聚力 C (kPa)	抗拉强度标准值 (kPa)	变形模量 (MPa)	弹性模量 (MPa)	泊松比
		天然	饱和						
土层	20.0	/	/	25 (综合)	/	/	/	80	0.38
中风化砂岩	25.2	33.9	24.6	31	924	326	2793	3351	0.13
中风化砂质泥岩	25.9	10.4	6.3	23.6	325	84	953	1192	0.37
衬砌及基础混凝土 C30	25	/	/	/	/	/	/	24800	0.1

4.3. 位移分析

有限元计算共分为 6 个荷载步，如图 7 为基坑开挖工况下车站、区间隧道竖向位移，根据每荷载步计算结果将车站及区间隧道的竖向位移统计于表 3。数值分析表明，下部基坑开挖后紧邻基坑侧车站出现回弹，最大回弹量为 1.44 mm，沿远离基坑方向由回弹渐变为沉降，最大沉降量为 0.5 mm。项目修建完成后车站紧邻基坑侧发生沉降，最大沉降值为 2.00 mm。施加水平荷载后，车站整体沉降量小幅减少。相对于车站结构，各工况下区间隧道发生的竖向位移值较小。区间隧道拱腰及拱底最大沉降量为 1.35 mm，拱顶最大回弹量为 0.85 mm。各荷载步对比分析，项目修建即塔楼加载工况下，对车站的竖向位移影响最大。但车站结构、区间隧道衬砌的回弹及沉降量均未超过城市轨道交通结构安全控制指标。

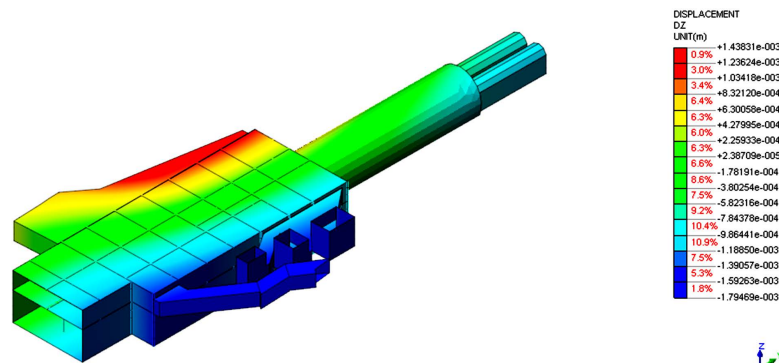


Figure 7. Vertical displacement cloud diagram of station and section tunnel in foundation pit excavation condition
图 7. 基坑开挖工况车站、区间隧道竖向位移云图

Table 3. Maximum vertical displacement of station structure and interval tunnel
表 3. 车站结构、区间隧道最大竖向位移

荷载步	车站结构		区间隧道	
	最大沉降值(mm)	最大回弹值(mm)	最大沉降值(mm)	最大回弹值(mm)
原有结构拆除	0.41	0.64	0.16	0.37
下部基坑开挖	1.39	1.44	1.08	0.83
基础开挖	1.68	0.82	1.35	0.37
项目修建	2.00	0.16	0.99	0.74
水平荷载作用	1.89	0.18	0.72	0.85

根据图 8 及表 4 分析：在现有结构拆除、下部基坑开挖、基础开挖及项目修建四个荷载步下，车站结构、区间隧道水平位移方向为基坑边坡临空方向，位移数值逐渐增大，在项目修建完成后车站水平位移达到 1.54 mm，区间隧道水平位移达到 1.35 mm。施加水平荷载后，水平位移方向发生反向，即指向基坑边坡临空反方向，车站主体结构最大水平位移为 3.79 mm，区间隧道衬砌最大水平位移为 2.97 mm。各荷载步对比分析，水平荷载作用工况对车站、区间隧道的水平变形影响大。但车站主体结构、区间隧道衬砌的水平位移均未超过城市轨道交通结构安全控制指标。

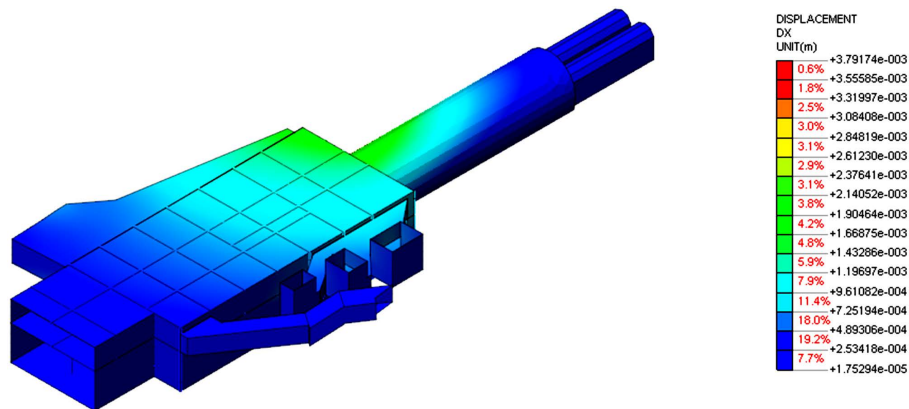


Figure 8. Horizontal displacement cloud diagram of station and interval tunnel under horizontal load condition
图 8. 施加水平荷载工况车站、区间隧道水平位移云图

Table 4. Maximum horizontal (DX) displacement of station structure and section tunnel lining
表 4. 车站结构、区间隧道衬砌最大水平(DX)位移

荷载步	车站位移	区间隧道位移
原有结构拆除(mm)	0.19	0.07
下部基坑开挖(mm)	-0.22	-0.66
基础开挖(mm)	-1.2	-1.08
项目修建(mm)	-1.54	-1.35
水平荷载作用(mm)	3.79	2.97

注：表中，负值表示基坑边坡临空方向，正值即为相反方向。

4.4. 应力分析

表 5 统计了车站主体结构、区间隧道衬砌第一主应力、第三主应力最大值。从原状到施加水平荷载整个过程, 车站及区间隧道应力变化小。车站结构最大拉应力为 2633 kPa, 比现状车站结构拉应力增大了 413 kPa, 最大压应力为 6853 kPa。区间隧道最大拉应力为 1427 kPa, 比现状拉应力增大了 218 kPa, 最大压应力为 5820 kPa。且两者最大拉应力、压应力均未超过结构的抗拉、抗压强度。

Table 5. Maximum stress value under each load step of station structure and interval tunnel
表 5. 车站结构、区间隧道各荷载步下最大应力值

荷载步	车站结构		区间隧道	
	第一主应力(kPa)	第三主应力(kPa)	第一主应力(kPa)	第三主应力(kPa)
原状	2220	-6744	1209	-5683
原有结构拆除	2170	-6853	1263	-5820
下部基坑开挖	2269	-6808	1427	-5818
基础开挖	2297	-6400	1408	-5549
项目修建	2431	-5235	1272	-5440
施加水平荷载	2633	-6766	938	-5469

注: 表中负值表示压应力, 正值表示拉应力。

4.5. 小结

通过对基坑与隧道的三维数值分析, 得出如下结论:

1) 各荷载步对比分析, 项目修建对车站主体结构的竖向位移影响最大。在项目修建后, 竖向位移达到最大值为 2.0 mm, 区间隧道衬砌的竖向位移小于车站主体结构竖向位移。水平荷载作用工况对车站、区间隧道的影响大, 该工况下车站结构的水平位移达到最大值 3.79 mm, 区间隧道的水平位移达到最大值 2.97 mm。

2) 通过对车站结构、区间隧道衬砌的大小主应力分析, 从原始状态到施加水平荷载整个过程, 车站结构、区间隧道衬砌应力变化幅度小。最大拉应力、压应力均未超过车站结构、区间隧道衬砌的抗拉、抗压强度。

3) 综合《城市轨道交通结构安全保护技术规范》、《建筑基坑工程监测技术规范》对轨道及基坑的变形要求, 结合数值分析计算结果, 建议以 20 mm 为基坑顶部水平变形预警值, 以 10 mm 作为基坑顶部竖向变形预警值, 以 8mm 作为车站结构及区间隧道变形预警值。

5. 结论与建议

1) 本文以重庆塔项目为研究背景, 详细叙述了改建基坑工程的支挡结构方案, 采用肋柱、支护桩与短锚杆、长锚索相结合的支护方案及全程逆作法的施工工序, 能很好地控制基坑侧壁及轨道结构的变形。

2) 采用数值分析手段模拟了从基坑改建到塔楼新建的全过程, 得出了各种工况下车站结构和区间隧道的变形值和应力值。与轨道交通附近实施的新建项目相比较, 改建基坑与隧道在空间与时间上的关系更为复杂, 工况分析的荷载步更多, 风险控制的难度更大。

3) 通过设置重要施工荷载步, 分析了在改建基坑中如何考虑施工工序对邻近隧道的影响, 提出了应对措施, 防范了风险, 对以后的类似工程有一定的指导作用。

4) 结合规范要求和数值分析计算结果, 合理提出了基坑、车站与区间隧道的变形预警值, 有利于在施工工程中密切监测变形, 保证轨道线路的安全运营。

5) 本项目基坑于 2017 年竣工, 目前正在施工超高层塔楼, 进展顺利。根据收集的监测数据, 基坑边坡变形值小于 10 mm, 车站结构变形值小于 3 mm, 区间隧道变形值小于 2 mm, 监测数据验证了数值分析结果的合理性。目前, 项目修建未对轨道运营产生不利影响。

基金项目

2017 年重庆市勘察设计行业创新研究与能力建设项目。

参考文献

- [1] Sharma, J.S., Hefny, A.M., Zhao, J. and Chan, C.W. (2001) Effect of Large Excavation on Deformation of Adjacent MRT Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**, 93-98.
[https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00033-5)
- [2] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [3] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453-458.
- [4] 肖丽霞, 张利民, 王志荣. 地铁车站基坑施工对既有盾构隧道的变形影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 326-330.
- [5] 李杨秋. 复杂地质条件下超深岩质基坑开挖对公路、地铁隧道影响分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(5): 132-138.
- [6] 李安兴, 唐秋元, 李杨秋. 双侧深基坑开挖对紧邻已有建(构)筑物变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 2): 300-305.
- [7] 张宗兴, 王成. 重庆某建筑深基坑施工对邻近既有隧道结构影响研究[M]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org