

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.033

超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响的数值模拟分析

丁毅, 邢艳如

(中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133)

摘要: 为了研究超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响,以西安地铁2号线周边某基坑为工程实例,通过运用数值分析软件,结合场地的水文地质和工程地质条件,建立数值模型,进行施工过程的动态模拟,同时进行现场监测,经对比数值模拟结果及监测数据,表明运用 PLAXIS 软件能有效的模拟基坑开挖过程中的土体变形。同时工程采用的分段、分块开挖,中心岛顺做,周边预留土台反压、使用旋喷锚索的支护方案,对复杂条件下基坑开挖对邻近地铁结构的变形影响能起到有效的控制作用,可对类似工程的设计优化提供有益的参考及借鉴。

关键词: 超长超大基坑;中心岛法;旋喷锚索;数值分析

中图分类号: TU441+.6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)02—0170—06

Numerical Simulation and Analysis of Subway Structure Safety Influenced by Excavation of Super Long and Large Foundation

DING Yi, XING Yanru

(China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China)

Abstract: In order to analyze the influences of super-long and large excavation on the adjacent subway structure, this paper took the foundation pit surrounding the Xi'an metro line 2 as an engineering example, a numerical model was developed to carry out the dynamic simulation and safety evaluation of the subway structure during the construction process. The simulation results and monitoring data show that PLAXIS software can effectively simulate the excavation of soil in the process of deformation, the piecewise excavation method which divide the whole project into small pieces and adopt the support scheme of center island method which use surrounding soil table to resistance pressure at the same time, plus use of rotary spray anchor cable, have an effective effects on the deformation of metro structure control caused by the excavation of foundation pit.

Keywords: super long large foundation pit; center island method; rotary spray anchor cable; numerical analysis

当前,地面交通压力持续增加,全国城市轨道交通建设正在如火如荼开展中,以西安为例,地铁1、2、3号线已经通车运营。而随着地铁线路分布的越来越广,带动周边房地产开发热潮^[1],大型基坑在既有地铁周边开挖的现象逐渐增多。基坑开挖卸载会影响周边土体的应力变化,进而引起地铁结构发生水平变形和不均匀沉降,对乘客的安全和地铁正常运营产生严重威胁^[2]。为了保护城市轨道交通的结构,降低外部作业对其造成不利影响,规范要求地铁沉

降量、水平位移量 $< 20\text{ mm}$;纵向变形曲线的曲率半径控制值 $R > 15\ 000\text{ m}$;相对变曲控制值 $< 1/2500$ ^[3]。

目前针对基坑开挖对邻近地铁结构的影响,国内外学者已经做了很多的研究,得到大量实测数据,给出一定的变形规律^[4-5],并对邻近地铁的基坑设计重点分析^[6]。但在黄土地区,超长、超大基坑开挖对周边地铁结构的影响研究较少,在此条件下,如何确定支护及开挖方案、保证地铁的安全,具有较高的研究价值。

收稿日期: 2016-12-07

修稿日期: 2017-01-10

作者简介: 丁毅(1984—),男,甘肃兰州人,硕士,工程师,主要从事岩土工程设计工作。E-mail: creep0506@163.com

通讯作者: 邢艳如(1987—),女,河南濮阳人,硕士,工程师,主要从事岩土工程设计工作。E-mail: 348062218@qq.com

本文以西安地铁 2 号线周边一超长、超大基坑为背景,充分考虑土体开挖的时空效应,制定了基坑分段、分块开挖、中心岛顺作、周边预留土堆反压的支护方案。同时运用数值分析软件,结合实际场地的水文地质和工程地质条件,建立数值模型,进行施工过程的动态模拟,并对地铁结构的安全进行评价,以期对西安地区类似的基坑工程设计和施工起到一定的指导和借鉴意义。

1 工程概况

1.1 项目简介

本项目基坑南北长约 640 m,东西最大宽度 240 m,占地面积 88 200 m²,规划建筑面积近 100 × 10⁴ m²,是集购物、餐饮、娱乐、办公、公寓和住宅等多种业态为一体的综合开发项目。项目自北向南划分为基坑 A、基坑 B,基坑 C 三个子基坑,大部深约 20 m。基坑 A 毗邻地铁矿山法隧道与盾构区间,与矿山法隧道最小净距约为 21.4 m,基坑 C 靠近地铁车站、附属结构及盾构隧道。与车站主体最小净距约 14.6 m,与附属结构最小净距约 1.7 m,与盾构隧道最小净距约 9.2 m。基坑 B 处于基坑 A 与基坑 C 之间,如图 1 所示。

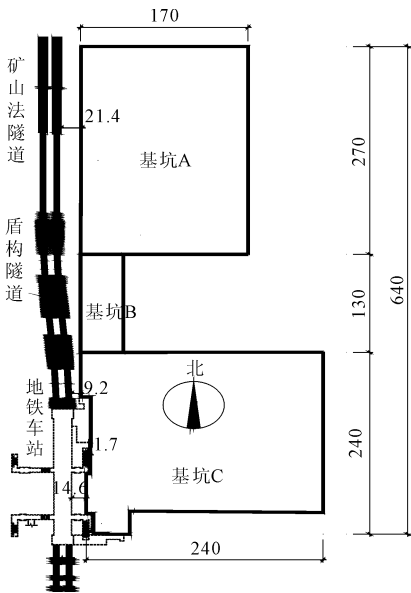


图 1 基坑与地铁结构平面关系图

1.2 工程地质概况

本工程所处于典型的西安黄土地层,地貌单元属黄土梁洼。自上而下分别为少量全新统人工填土(Q_4^{al})、上更新统风积新黄土(Q_3^{sol})、残积(Q_3^{cl})古土壤,再下为(Q_2^{sol})粉质黏土、粉质黏土(Q_2^{al}),地下水位埋深约 11 m。

1.3 支护方案总体思路

如此大规模基坑开挖卸载会导致基底隆起和侧向变形,从而引起已运营的地铁结构也发生变形。目前国内已有部分建(构)筑物施工造成邻近地铁结构安全影响的案例^[7]。本基坑长度过大,实践证明,利用基坑开挖的时空效应,将长大基坑分块、分层开挖可以控制支护结构变形^[8];而采用中心岛支护,预留土堆的开挖方案已经被多个工程利用控制支护结构的内力及变形,并取得较为理想的效果^[9]。

本项目基坑 A 离着地铁隧道较远,拟采用桩 + 多道锚索支护;基坑 B 宽度较窄,可考虑采用排桩 + 多道内支撑支护;基坑 C 采用中心岛支护,先施工东侧地下室结构,然后顺作开挖西侧土体,采用排桩 + 多道内支撑支护。如何合理有效的制定开挖分块的大小、预留土堆的范围以及锚索支护的参数是本方案支护设计的关键所在。支护方案总体思路见图 2。

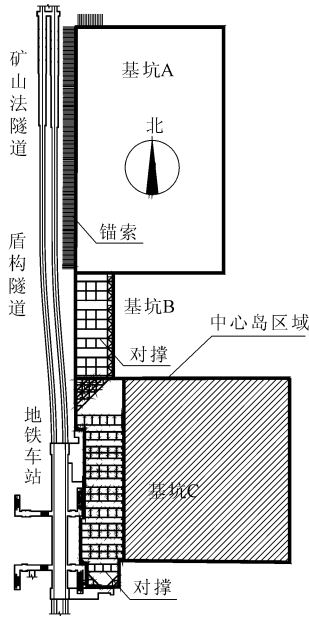


图 2 支护总体思路图

2 数值计算模型

2.1 计算软件及土体模型

利用岩土有限元软件进行数值模拟是比较常见的分析手段^[10]。首先来确定本工程的关键支护参数,再得到基坑开挖后的地铁结构变形情况。三维模型计算采用 FLAC^{3D},土体采用了广义摩尔-库仑模型。有限差分法软件中的摩尔-库仑本构模型屈服破坏面包含拉伸破坏和压剪破坏两部分,当压缩破坏时,满足非关联的流动法则;当拉伸

破坏时,满足相关联的流动法则^[11]。

二维细部模型采用 PLAXIS 2D 中经典的硬化土体本构模型。硬化塑性模型的屈服面在主应力空间中不是固定的,而是由于塑性应变的发生而膨胀。该模型可同时考虑剪切硬化和压缩硬化,这两种类型的硬化都包括在当前的模型之中。硬化土体模型很好的模拟了在主偏量加载下,土体的刚度下降,同时产生了不可逆的塑性应变^[12]。

2.2 数值模型与参数确定

数值计算模型大小按如下原则选取:既有地铁结构以西,取基坑开挖边界以外 2 倍开挖深度;由于

基坑范围较大,只对有可能对地铁结构造成影响区域外扩 2 倍基坑深度范围进行建模;沿深度方向,取基坑底 2 倍开挖深度。地铁结构采用线弹性模型,取相应标号混凝土,密度为 25 g/cm³。采用锚杆单元及 Embedded 桩单元分别模拟锚索的自由段及锚固段,锚杆单元根据钢绞线面积得出实际的 EA ; Embedded 桩单元桩径取钻孔孔径,摩阻力按照地勘报告输入,锚固段弹性模量 E 取值 1.8×10^4 N/mm²。对本项目先施工结构及内支撑结构采用弹性板、梁单元模拟,采用界面单元来模拟本项目支护桩与土体的摩擦作用。

表 1 土体材料参数(硬化土体模型)

土体名称	天然重度 γ /(kN·m ⁻³)	饱和重度 γ_m /(kN·m ⁻³)	水平渗透系数 k_x /(m·d ⁻¹)	竖向渗透系数 k_y /(m·d ⁻¹)	割线刚度 /(kN·m ⁻²)	切线刚度 /(kN·m ⁻²)	卸载/重新加载刚度 /(kN·m ⁻²)	刚度应力水平相关 幂指数 m	卸载/重新加载泊松比 ν_{ur}	(有效)黏聚力 c_{ref} /(kN·m ⁻²)	(有效)内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
填土	17.2	18.8	15	15	9000	9000	2.0×10^4	0.5	0.2	7	15
新黄土	16.5	18.9	6	6	24000	24000	7.5×10^4	0.5	0.2	30	15
古土壤	19.5	20.2	6	6	26000	26000	10.3×10^4	0.5	0.2	35	20
粉质黏土	19.9	20.1	10	10	37000	37000	13.2×10^4	0.5	0.2	38	24
粉质黏土	20.3	20.4	10	10	38000	38000	16.1×10^4	0.5	0.2	40	26

3 支护结构关键参数研究

3.1 超长基坑分段开挖研究

在我国沿海软土地区,在工程实践及科学研究中发现土的工程性质与时间和空间存在密切的关系。通过有目的的将一个长大基坑分为多段、多层开挖(见图 3),及时支护,能够有效地控制周边地层的变形^[13]。

在黄土地层,类似的研究很少,本项目基坑长达 640 m,利用三维数值软件来模拟分块长度分别为 60 m、45 m、30 m、20 m 的情况下,邻近地铁结构的最大水平位移变化情况。竖向开挖每层厚度均为 2 m。

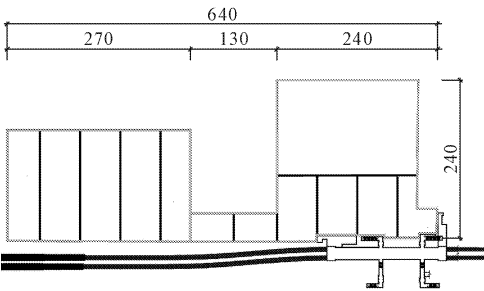


图 3 基坑分块开挖示意

利用三维有限元软件 FLAC^{3D}来动态模拟分段开挖的施工过程,每一段基坑及时施作支护结构(见图 4)。

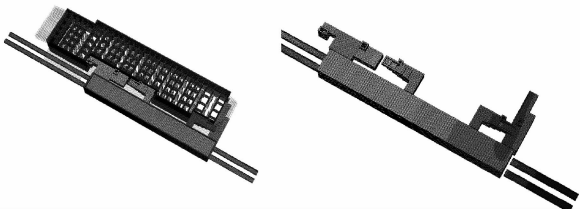


图 4 三维模型及位移云图结果

不同分段长度下,地铁结构的最大水平位移如图 5 所示。

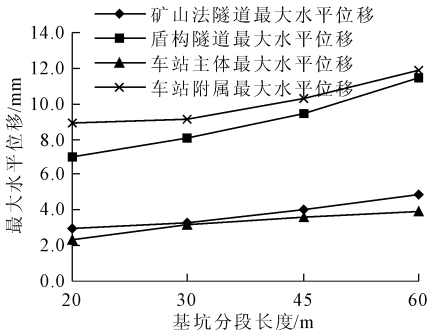


图 5 基坑分段地铁变形结果

由于地铁车站主体的自身抗侧向刚度很大,不同分段长度下,其水平变形变化很小。矿山法隧道刚度较大,且离基坑较远,其变形变化也不大。基坑靠近这两处可采用较大的分段长度。

盾构隧道与出入口处结构的最大水平位移与基

坑开挖分段关系较大。随着分段变长,地铁结构变形发生较大增加。

由以上结果可知,在西安黄土地层,地铁车站主体及矿山法隧道周边基坑分段开挖长度可以取 45 m~60 m;而靠近地铁出入口及盾构隧道处的基坑分段长度不宜超过 30 m。

3.2 中心岛预留土台研究

本工程最南侧基坑 C 与地铁车站附属结构最小净距约 1.7 m,与盾构隧道最小净距约 9.2 m,拟在靠近地铁结构一侧预留反压土体,中心岛地下室施工完成后,反压土体区域自上而下开挖,采用混凝土支撑与钢支撑混合的支撑体系。国内已有很多类似工程,对周边建筑构筑物保护效果较好,也形成了一定的成果^[14]。但是关于黄土地区中心岛预留土台宽度的研究较少。

利用二维有限元软件 PLAXIS 2D,研究预留土台底部宽度分别为 27 m、38 m、48 m,即约为基坑深度 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍时,地铁结构最大水平位移的变化情况。

首先得出不同宽度预留土台,地铁出入口的变形情况,见图 6~图 11。

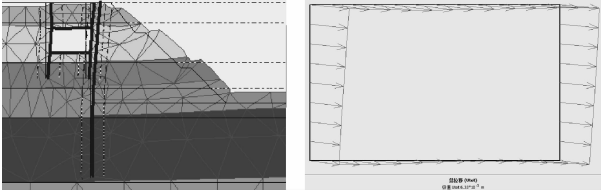


图 6 预留土台宽 27 m 地铁出入口变形

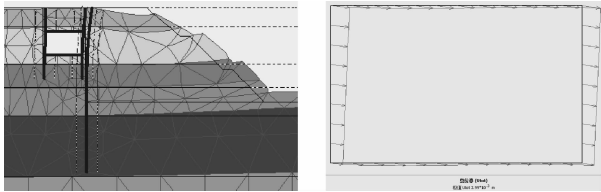


图 7 预留土台宽 38 m 地铁出入口变形

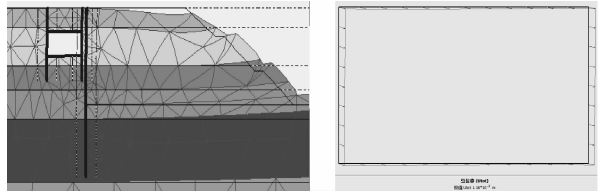


图 8 预留土台宽 48 m 地铁出入口变形

当预留土台的宽度从 27 m、38 m 变至 48 m 时,地铁出入口的最大变形从 6.33 mm、2.99 mm 最终减少至 1.16 mm。

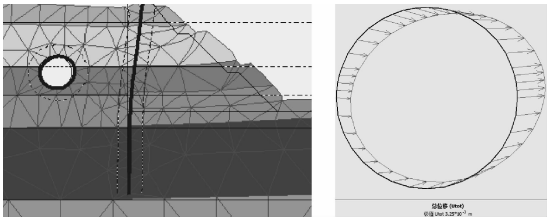


图 9 预留土台宽 27 m 盾构隧道变形

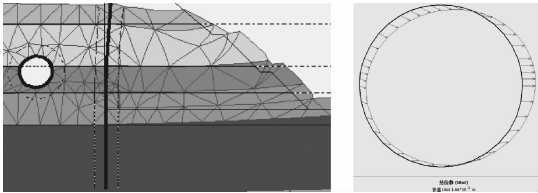


图 10 预留土台宽 38 m 盾构隧道变形

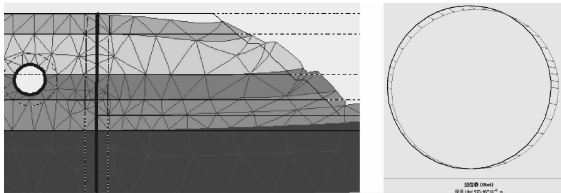


图 11 预留土台宽 48 m 盾构隧道变形

由图 9~图 11 可知,靠近盾构隧道一侧,当预留土台的宽度从 27 m(1.5 倍)、38 m(2.0 倍)变至 48 m(2.5 倍)时,地铁出入口的最大变形从 3.25 mm、1.66 mm 最终减少至 0.97 mm,结果如表 2 所示。

表 2 不同土台宽度下地铁结构变形汇总

预留土台 宽度/m	出入口 变形/mm	盾构隧道 变形/mm
27	6.33	3.25
38	2.99	1.16
48	1.16	0.97

土台宽度较大,对控制邻近地铁的变形有利,但是影响整个项目工期筹划。由结算结果可知,黄土地层当邻近地铁结构在基坑外 1 倍地铁宽度(直径)范围内时,土台底部预留宽度取 1.5 倍基坑深度为宜;当邻近地铁结构在基坑外 1 倍地铁宽度(直径)范围外时,土台底部预留宽度取 1 倍基坑深度即可。

3.3 基坑 A 锚索参数研究

本工程最北侧基坑 A,与地铁矿山法隧道最小净距约 21.4 m,若采用普通锚索,为了控制基坑变形,锚固段与地铁结构距离过近,将危及其安全。而类似工程经验可知,高压旋喷锚索相比普通锚索提高了抗拔力及抗变形性能^[15-16]。

相同几何参数下,分别计算采用孔径 300 mm 的

自进式旋喷锚索及孔径 150 mm 普通锚索的支护体系,得出基坑开挖到底后的水平位移云图,见图 12。

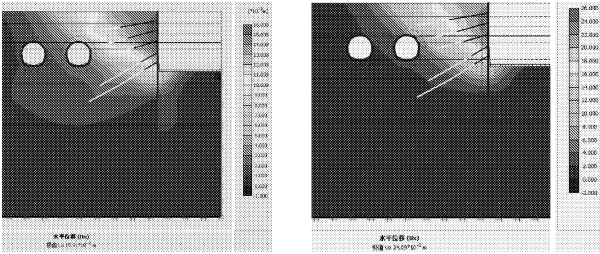


图 12 旋喷锚索、普通锚索水平变形对比

由上述计算结果可知,采用普通锚索,基坑最大位水平移约 24.09 mm,而采用高压旋喷锚索后,基坑最大水平位移为 15.91 mm,进而控制地铁矿山法隧道最大位移为 4.58 mm。

4 数值计算结果

4.1 基坑开挖到底水平位移云图

将基坑开挖到底后,各不利位置的水平变形云图整理见图 13、图 14。

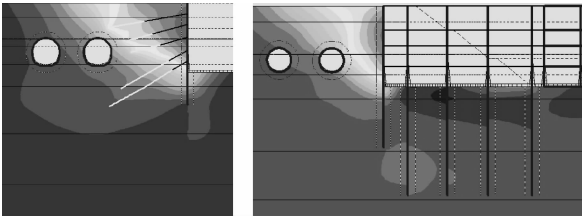


图 13 矿山法隧道、盾构隧道处水平位移云图

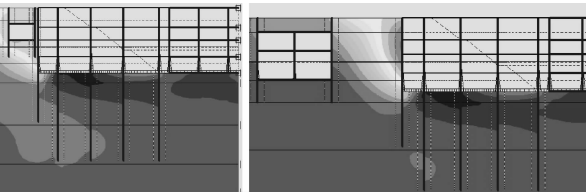


图 14 地铁出入口、车站主体处水平位移云图

4.2 邻近地铁结构变形

将地铁结构的变形进行提取见图 15、图 16。

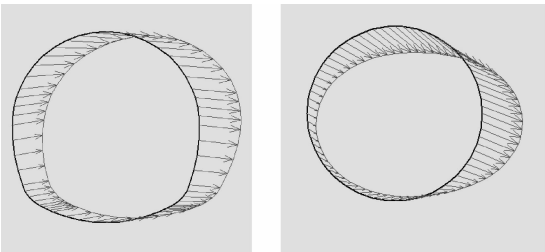


图 15 矿山法隧道、盾构隧道最大变形

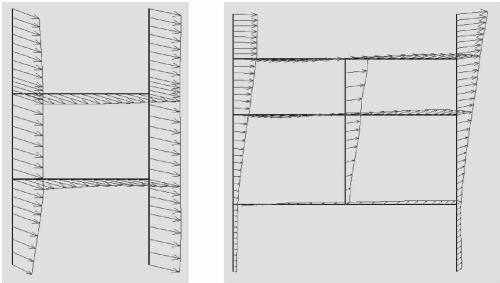


图 16 地铁出入口、车站主体最大变形

4.3 结果分析

通过数值分析可得到以下结论:

- (1) 基坑 A 采用旋喷锚索支护体系,基坑开挖到底后,支护桩最大水平位移约 15.91 mm,最大水平位移大致发生在桩顶处。
- (2) 基坑 C 采用中心岛 + 内支撑体系,基坑开挖到底后,支护桩最大水平位移约 11.4 mm ~ 13.4 mm,最大水平位移大约发生在桩顶下 1/3 基坑深度处。
- (3) 地铁车站主体最大位移约 3.48 mm,矿山法隧道最大位移约 4.58 mm,盾构隧道最大位移约 7.60 mm,地铁出入口最大位移约 9.51 mm。地铁变形以水平变形为主,竖向位移很小。
- (4) 地铁结构的最大变形均满足相关规范的要求。

5 数值模拟结果与实测结果对比

本基坑部分区段已开挖到底,为了验证数值模拟的准确性,利用施工过程中的监测数据,和邻近的计算断面结果进行对比分析。

监测数据显示,基坑 A 段,支护结构最大水平位移 18.47 mm,矿山法隧道最大水平位移 2.46 mm;基坑 C 段,支护结构最大水平位移 12.28 mm,地铁出入口最大水平位移 5.46 mm。地铁结构的变形满足相关规范的要求,对其正常运营未造成影响。

对比第 4 节分析结果,监测数据与数值模拟结果趋势基本一致,支护结构最大水平位移差别不大,地铁结构最大水平位移监测结果较数值模拟结果小,但在合理的范围中。证明数值计算采用的土体本构模型适合本项目地层,土体参数基本准确,支护及土方开挖方案合理可行,可为西安黄土地区类似工程提供参考及借鉴。

6 结 论

- (1) 监测数据与数值模拟结果趋势基本一致,

数值计算采用的 PLAXIS 硬化土体本构模型适合本项目地层,土体参数基本准确,可为西安黄土地区类似工程提供参考。

(2) 将一个长大基坑分为多段、多层开挖,及时支护,能够有效地控制周边地层的变形。由计算结果可知,黄土地区地铁车站主体及矿山法隧道周边基坑分段开挖长度可以取 45 m ~ 60 m;而靠近地铁出入口及盾构隧道处的基坑分段长度不宜超过 30 m。

(3) 在黄土地层,当邻近地铁结构在基坑外 1 倍地铁宽度(直径)范围内时,土台底部预留宽度取 1.5 倍基坑深度为宜;当邻近地铁结构在基坑外 1 倍地铁宽度(直径)范围外时,土台底部预留宽度取 1 倍基坑深度即可。

(4) 计算及监测数据显示,自进式锚索相比普通锚索提高了抗拔力及抗变形性能。

(5) 地铁结构的最大变形满足相关规范要求,地铁结构的正常运营未受到影响,证明本工程采用的支护及土方开挖方案合理可行,可对类似工程的设计优化提供参考及借鉴。

参考文献:

- [1] 张沈生,周 华,刘春雪.沈阳市地铁二号线与周边房地产相互作用分析[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2015,17(6):589-595.
- [2] 唐鹏军.邻近地铁出入口深基坑支护方案的研究及优化[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):186-191.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T202-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:24.
- [4] 贾夫子,王立峰,逮武全,等.基坑开挖对近邻地铁车站

和隧道的影响[J].岩土力学,2016,37(S2):673-678.

- [5] 戚长军,刘争宏,余武术,等.基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):142-146.
- [6] 刘 动.地铁保护区内深基坑支护设计研究[J].土工基础,2015,29(3):48-52.
- [7] 邵 华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [8] 黄 沛,陈 华,张 倩.大型基坑分区开挖对邻近地铁的影响[J].工程勘察,2015,43(8):15-20.
- [9] 邸国恩,王卫东.“中心岛顺作、周边环板逆作”的设计方法在单体 50000 m² 深基坑工程中的实践[J].岩土工程学报,2006,28(S1):1633-1637.
- [10] 丁 乐.基坑开挖对邻近地铁车站安全影响的三维有限元分析——以西朗交通枢纽站为例[J].隧道建设,2015,35(4):328-334.
- [11] 乐家根,曹 平,蒲成志,等.广义摩尔库仑模型及其在 FLAC^{3D}中的实现[J].铁道科学与工程学报,2012,9(3):112-116.
- [12] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(8):2283-2290.
- [13] 杨丽春,庞宇斌,李慎刚.超长基坑开挖的空间效应[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(2):541-545.
- [14] 顾问天,陈敏华.中心岛法实用设计计算方法研究[J].岩土力学,2013,34(4):996-1000.
- [15] 黄志全,张瑞棋,王安明.基于 FLAC^{3D}的桩锚支护结构变形分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):68-72.
- [16] 孙 克,李美梅.关于高压旋喷锚索与普通锚索的对比试验研究[J].煤炭工程,2016,48(9):84-86.

(上接第 80 页)

- [11] 张军辉.不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J].岩土力学,2011,32(4):1216-1222.
- [12] Kamash W E, Han J. Displacements of column-supported embankments over soft clay after widening considering soil consolidation and column layout: Numerical analysis[J]. Soils and Foundations, 2014,54(6):1054-1069.
- [13] 刘卢海,沙成满.类风积沙路基高速公路加宽工程的数值分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):36-40.
- [14] 刘观仕,孔令伟,丁 锋,等.高速公路扩建工程软基拓宽的沉降监测与分析[J].岩土力学,2007,28(2):

331-335.

- [15] 杜 浩,陈小琪,凌建明,等.拓宽路堤下 PHC 桩复合地基变形特性监测分析[J].土木工程学报,2009,42(9):139-144.
- [16] 谭儒蛟,张建根,徐鹏逍.带帽 PTC 桩在高速拓宽软土路基处理中的试验监测分析[J].工程勘察,2015(1):26-31.
- [17] 邓永峰.水泥土搅拌桩桩土相互作用理论与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [18] 袁胜强,朱银乐.沪宁高速公路(上海段)拓宽工程设计的几个关键问题[J].上海公路,2009(1):5-10.