

# 邻近边坡地铁车站基坑顺逆结合施工稳定性分析

刘毅<sup>1</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 袁青<sup>1</sup>, 陈佳玮<sup>3, 4</sup>, 李元海<sup>3, 4</sup>, 唐晓杰<sup>3, 4</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430040; 2 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511458;  
3. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 随着城市地铁线路穿越山地环境及交通干线的日益增多, 车站基坑邻近边坡以及横跨交通干道作为两种典型的特殊施工环境变得愈发难以避免, 而采用顺逆结合施工技术可有效缓解基坑工程与现有交通的矛盾. 现有研究对于偏压环境下地铁车站基坑顺逆结合施工过程的系统分析相对欠缺, 为分析偏压环境及顺逆结合施工方式对于基坑稳定性的影响, 本文依托深圳轨道交通 2 号线莲塘口岸站工程, 基于现场监测数据及数值模拟方法对偏压环境下顺逆结合施工过程中地层及围护结构的稳定性情况进行了研究. 结果显示, 施工过程中基坑土体及围护结构均处于稳定状态, 施工完成后地表沉降主要影响区分布在  $0 \sim 1.25H$  之间, 次要影响区在  $1.25 \sim 2.0H$  之间, 沉降最大值出现在  $0.25H$  区域附近 ( $H$  为基坑开挖深度), 相对于无偏压环境扩大了 25% 的沉降影响范围. 边坡偏压的存在主要影响邻近边坡处围护桩变形, 偏压侧拉锚作用可显著减小围护桩的水平变形, 相对于无锚索情况可有效缩减 10 倍的围护桩水平变形.

**关键词:** 邻近边坡; 顺逆结合; 车站基坑; 施工稳定性; 监测; 数值模拟

中图分类号: U 231

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0873-09

## Analysis on the stability of bias metro station pit excavated through the combination method of bottom-up and top-down technology

LIU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, YUAN Qing<sup>1</sup>, CHEN Jiawei<sup>3, 4</sup>, LI Yuanhai<sup>3, 4</sup>, TANG Xiaojie<sup>3, 4</sup>

(1. Technology Center, CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China;

2. China Communications Construction Company (Guangzhou) Ltd., Guangzhou 511458, China;

3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

4. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China.)

**Abstract:** With the increasing number of subway lines crossing the mountain and transport arteries, it becomes more difficult to avoid the situation of the station adjacent to side slope and the cross-city traffic artery. Through the combination method of bottom-up and top-down technology, contradiction between the foundation pit project and the existing traffic can be well relieved. There is a lack of systematic analysis on the construction process of the subway station foundation pit under the bias environment. Based on the project of Liantangkouan metro station of No. 2 rail line in Shenzhen, deformation characteristics of stratum and supporting structures were analyzed through practical monitor data and numerical simulation method, to obtain the effect of bias pressure of high slope and the construction method. As the results shown, the foundation pit soil mass and the surrounding structure are in a stable state during the construction. Also, the main impact area of surface subsidence is distributed between  $0 \sim 1.25H$ , when the secondary impact area is between  $1.25 \sim 2.0H$  (" $H$ " refers to the depth of excavated pit). The maximum settlement is distributed around  $0.25H$ . The influence range of settlement is increased by 25% compared with the unbiased environment. Moreover, the existence of slope bias mainly affects the deformation of retaining piles near slope. The anchor tension plays an important role that the maximum horizontal deformation of the support piles can be reduced by approximately 10 times.

**Key words:** adjacent to the slope; combination of bottom-up and top-down technology; metro station pit; construction stability; monitor; numerical simulation

地铁车站的施工往往受既有管线、地面交通状况、邻近建筑物以及地形地貌的限制<sup>[1]</sup>. 邻近边

坡基坑作为一种偏压施工情况, 随着城市地铁线路的增多以及更多的城市加入到地铁修建的行列

收稿日期: 2019-01-21 修改稿日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174197)

第一作者: 刘毅(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通领域的施工技术研究工作. E-mail: 157038331@qq.com.

变得愈发地难以避免<sup>[2]</sup>。

偏压环境下的基坑变形及应力分布作为一个复杂的三维空间问题<sup>[3]</sup>,当偏压荷载达到一定值时,基坑围护结构可能发生向非偏压侧的整体偏移<sup>[4]</sup>,严重影响基坑的稳定性。近年来众学者在围护结构变形、地表沉降以及开挖方案优化等方面已开展了相应的研究。LIU J. 等针对工程实例,基于现场监测数据分析了基坑围护结构的变形特征,指出偏压环境下的基坑变形控制是保障施工安全的关键要素<sup>[5]</sup>。石钰锋等基于监测数据分析了紧邻铁路偏压基坑围护结构的应力分布特征<sup>[6]</sup>。徐烨等以南京地铁3号线明发广场站偏载深基坑工程为背景,采用有限元模拟分析了偏载深基坑的围护结构内力及变形分布关系<sup>[7]</sup>。刘波等针对偏压非等深基坑进行了数值模拟分析,表明地表沉降分布具有明显的空间效应<sup>[8]</sup>。王海龙等采用有限元软件 ABAQUS 对临江下立交匝道偏压基坑进行了模拟分析并提出了优化开挖方案<sup>[9]</sup>。以上研究主要涉及明挖顺作基坑,而传统的明挖顺作法因基坑暴露时间长、施工风险高、对周边交通环境影响大,较大地限制了其在中心城区的适用性。当地铁车站横跨交通主干道时,不得不采用顺逆相结合的施工方式。目前关于偏压环境下顺逆结合施工基坑的稳定性研究较少。

针对现有研究不足,本文依托深圳市轨道交通2号线莲塘口岸地铁站工程项目,首先基于现场监测数据对偏压环境下顺逆结合施工过程中地层及围护结构的稳定性情况进行了分析。为进一步研究边坡偏压及顺逆结合施工方式对于基坑稳定性的影响,基于有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup> 采用不同模拟方案对施工的全过程进行了数值模拟,分析项目主要涉及地表沉降特性、地层剪应力分布以及基坑围护桩的变形特征。

## 1 工程概况

### 1.1 站位布置

莲塘口岸站设于罗沙路与延芳路交汇处。车站西南角为猫窝山,地形为东低西高,坡底高程 18.6 m,坡顶高程 44.1 m,高差较大,坡度陡,对基坑产生偏压作用,站位布置如图 1 所示。

### 1.2 工程地质条件

车站地形起伏较大,场地标高为 20.23 ~ 56.12 m。沿线范围内地表分布有第四系全新统人工填堆填层(Q4 ml)及全新统冲洪积层(Q4 al+pl)、中间主要为上更新统冲洪积层(Q3 al+pl)、残积层

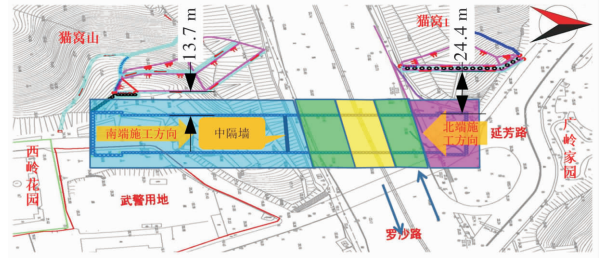


图1 莲塘口岸地铁站站位布置图

Fig. 1 Location of the Liantangkouan metro station

(Qel),下伏主要由石炭系测水组上段石英砂岩(C1c2)、碎裂岩组成。揭露地层岩性从上至下主要为人工填土、粉质粘土、强风化石英砂岩、中风化石英砂岩、微风化石英砂岩,平均厚度分别为 3.3 m、5.1 m、14.2 m、17.3 m、18.1 m。

### 1.3 莲塘口岸站顺逆结合施工工艺

莲塘口岸站横跨罗沙路段,车站施工过程中为保证道路不中断,采用顺逆结合的施工工艺。横向平面内,过罗沙路段采用盖挖逆作法施工,车站其他区域开挖采用明挖顺作法。南侧明挖顺作区域施工完成后进行中部盖挖区施工,随后施工北侧明挖区。顺逆结合施工布置如图 2 所示。

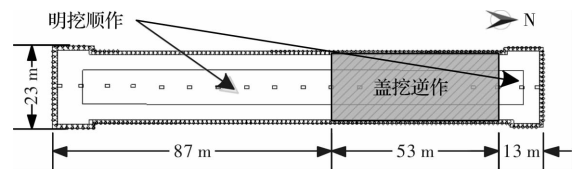


图2 地铁车站基坑平面布置

Fig. 2 Layout of the metro station

在进行交通疏解后,施工莲塘口岸站围护结构及旋喷桩止水、临时中立柱,随后进行明挖顺作段土体开挖,围护结构如图 3 所示。明挖顺作段纵向范围内第一、三、五道支撑采用钢筋混凝土支撑,第一道支撑与冠梁直接连接。第三、五道设置混凝土腰梁,支撑水平间距 9 m,均设八字撑。第一、三道支撑断面尺寸为 800 mm × 1 000 mm,第五道支撑及腰梁尺寸为 1 000 mm × 1 200 mm;第二、四、六道支撑采用钢支撑  $\varphi 800$  ( $t=20$  mm),水平间距为 3 m 并与钢腰梁连接,钢腰梁采用 2 根 I50c 工字钢通过连接钢板焊接而成。盖挖区顶板厚度 1 000 mm,中板厚度为 800 mm,底板厚度 1 300 mm,均使用 C35 混凝土浇筑。车站基坑开挖采用自基坑南端单向开挖的顺序,支护一层开挖一层。莲塘口岸站基坑北侧偏压处采用拉锚桩进行支护,锚杆参数为  $\varphi 22$  全长粘结性锚杆,打设角度  $20^\circ$ ,间距 1.5 m,偏压侧桩底打设锚杆长度为 6 m,其余位置长度为 3 m。

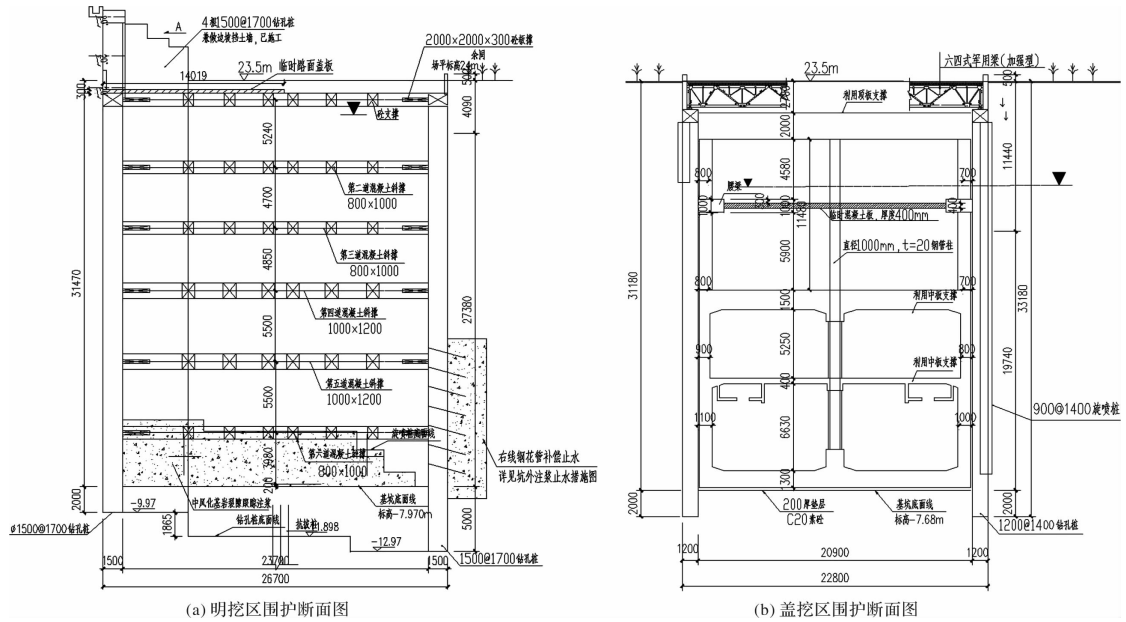


图 3 莲塘口岸站基坑围护结构示意图(单位: mm)

Fig. 3 Supporting structure of Liantangkouan metro station/mm

2 基于现场监测的基坑稳定性分析

为了确保施工期间周边建筑物、管线的安全, 莲塘口岸站施工过程中对工程区域地表、周边建筑物及工程本身进行监控量测。监测布置根据现有设计图纸及《城市轨道交通工程监测技术规范》GB50911-2013<sup>[10]</sup>进行。监测项目主要包括围护体系的变形、地表垂直位移、支撑结构的轴力变化。

2.1 地表沉降分析

取基坑南侧偏压处、无偏压处以及顺逆结合交界处测点的地表沉降数据进行分析, 分别绘制明挖(南、

北)及盖挖区开挖至标高时的监测结果, 如图 4 所示。开挖南侧明挖区土体时, 地表最大累计沉降值为 5 mm, 地表隆起值为 3 mm。中部盖挖区的施工对于基坑偏压处的土体造成了一定的沉降增量, 数值在 1 mm 左右, 但整体的地表位移主要变现为沉降值的减小及地表隆起值的增大, 这主要是由于盖挖逆作封闭的结构控制了扰动土层应力场的扩散, 且逆作区基坑结构造成土体自重应力增大, 使得土层应力场向初始应力场转变。此外, 北侧明挖区小范围的基坑开挖对于土体的沉降影响较小。监测过程中, 地表沉降值及隆起均小于警戒值 20 mm, 处于稳定状态。

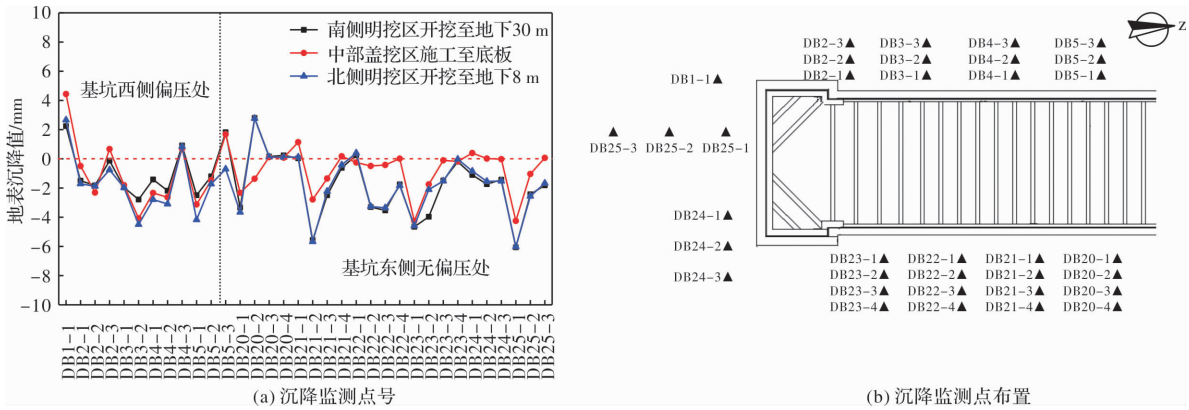


图 4 莲塘口岸站地表沉降监测数据

Fig. 4 Monitor data for ground surface settlement of Liantangkouan metro station

2.2 水平支撑分析

为防止基坑开挖过程中桩体变形过大, 通常采用钢支撑及砼支撑组合的形式对围护桩变形进行约束。支撑轴力的大小与桩体的水平变形具有

相互制约、相互作用的关系。莲塘口岸站南北侧明挖区施工过程中的支撑轴力监测数据如图 5 所示。支撑轴力的增大主要受南侧明挖区开挖的影响, 而中部盖挖逆作区的施工使得支撑轴力产生了

小幅的增大。北侧明挖区开挖范围较小,对于南侧支撑轴力的影响较小。从数据上看,各支撑轴力均小于设计值的80%,处于稳定状态。其中,砼支撑最大支撑力分别为6 000 kN及12 500 kN,分别为警戒值的73.2%、86.3%。钢支撑最大支撑力为2 800 kN,占警戒值的50.5%。可见在类型的工程条件下,上文所述的钢支撑的参数设计偏于保守,支撑体系的轴力设计方案仍存在一定的优化空间。

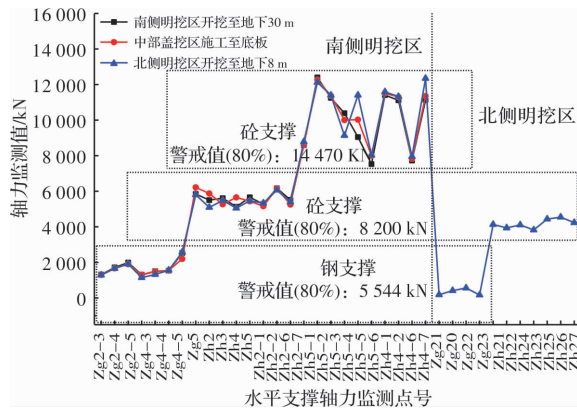


图5 莲塘口岸站水平支撑轴力监测数据

Fig. 5 Monitor data for horizontal support axial force of Liantangkouan metro station

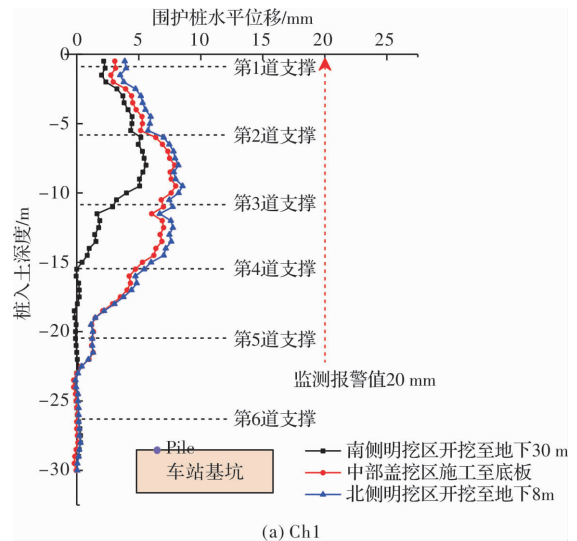
### 2.3 围护桩及基坑边墙土体变形

基坑外侧围护桩水平变形及基坑内墙位移曲线如图6所示。实测值位置选取为基坑邻近边坡处以及罗沙路盖挖区附近,此三处位置围护桩及土体的变形对于边坡稳定性控制以及交通干道安全的保障具有重要影响。其中:图6(a)~(c)为图示位置围护桩变形曲线,图6(d)~(f)为对应位置墙体变形曲线。

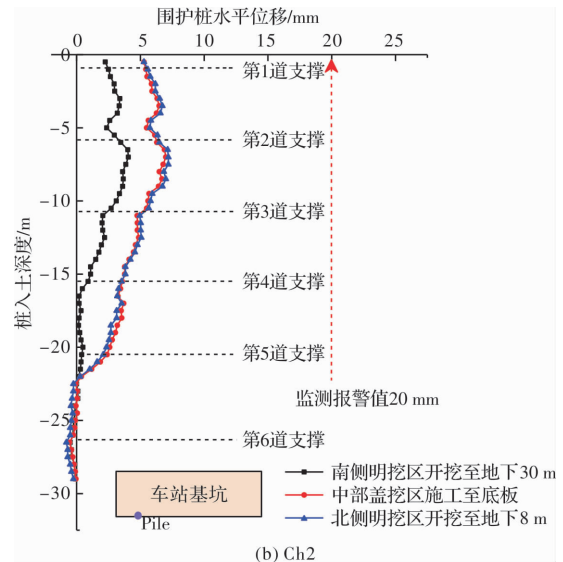
对比图6(a)~(c)可以发现,在明挖顺作区及盖挖逆作区施工过程中,围护桩水平变形低于报警值20 mm,处于稳定状态。南侧明挖区开挖至地下30 m时,邻近边坡处偏压侧围护桩最大水平变形为6 mm,无偏压处为5 mm。而盖挖逆作区产生了最大为4 mm的水平变形。当中部盖挖区施工完成时,三处位置均产生了水平变形增量。其中,邻近边坡的偏压围护桩CH1及盖挖逆作区CH3在围护桩中部产生了最大约5 mm的水平变形增量。北侧明挖区由于开挖范围较小,开挖长度方面约为0.1倍基坑总长,对于围护桩的变形影响较小,在三处位置均产生约1 mm的水平变形增量。变形模式方面,明挖偏压处及盖挖逆作区围护桩基本相同,呈现一种类“弓形变形”,最大水平变形出现在桩体中部。而无偏压处围护桩则呈现一种“前倾型”变形,最大水平变形出现在桩顶处。此外,水平支撑对于围护桩的水平变形具有

明显的“抑制”,支撑位置附近的围护桩变形明显产生了一定的变形值缩减。

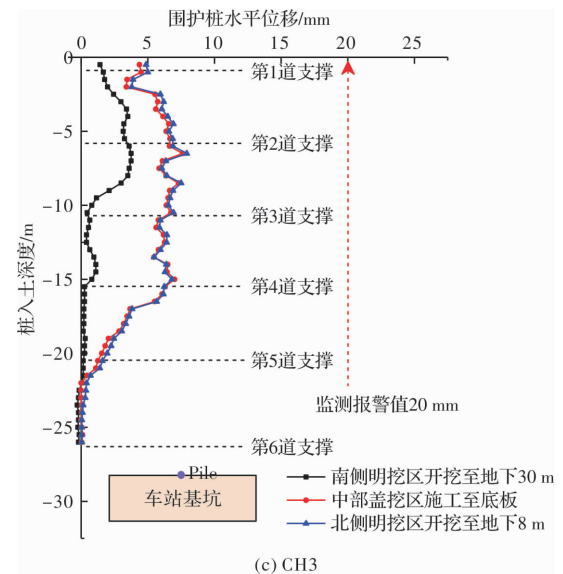
进一步对比图6(d)~(f)可以发现,围护桩对应位置的土体变形略大于桩体变形,这种增量变形的现象在盖挖逆作区更为明显,在桩体中部相



(a) CH1



(b) CH2



(c) CH3



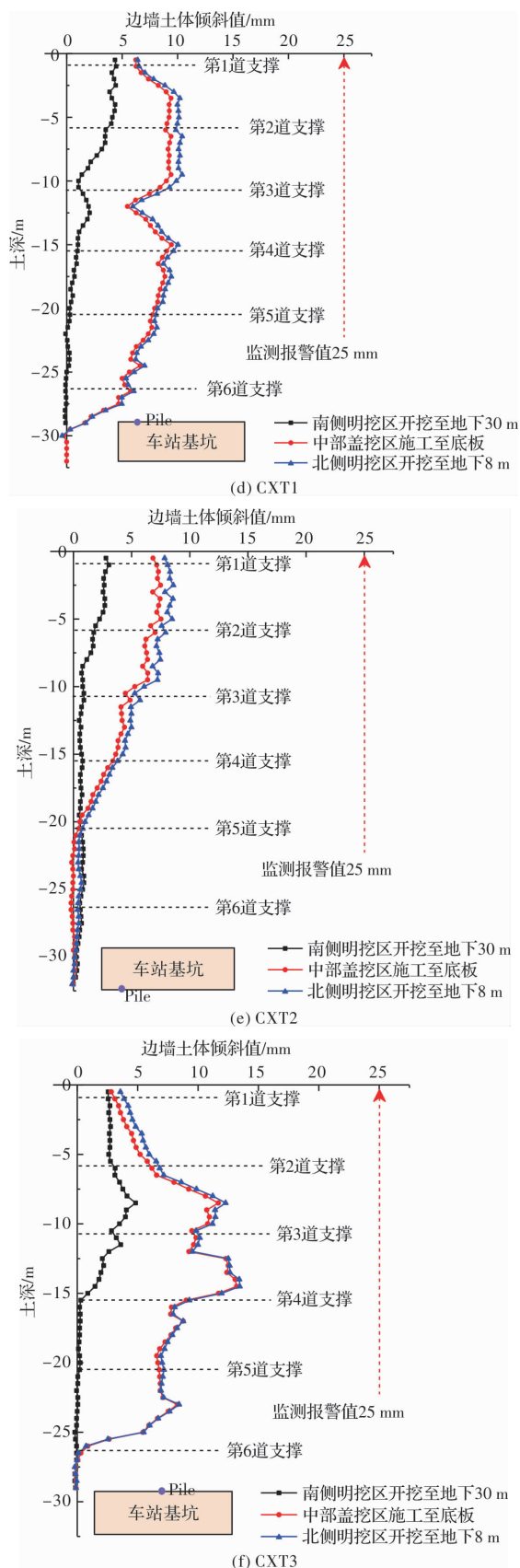


图6 基坑围护桩及边墙土体水平变形监测数据

Fig. 6 Monitor data for horizontal deformation of retaining pile and side wall soil mass

对于桩变形最大产生了6 mm的增量,可见进行顺逆结合施工过程中,对于盖挖逆作区边墙土体需进

行重点防护关注,类似于围护桩变形特性,邻近边坡的偏压侧土体CXT1以及盖挖逆作区CXT3变形较大,但均小于水平变形警戒值,处于稳定状态。

### 3 有限差分数值计算

基于现场监测的分析,莲塘口岸站顺逆结合施工过程中基坑及围护结构处于稳定状态,为进一步分析偏压环境下采用顺逆结合施工的影响,基于FLAC<sup>3D</sup>程序<sup>[11-12]</sup>对偏压效应及施工方式进行了模拟分析。

#### 3.1 计算模型及材料参数

莲塘口岸站基坑开挖深度约30 m,根据以往工程经验及有限元计算结果,基坑开挖影响宽度约为深度的3~4倍,影响深度约为开挖深度的2~4倍,在此范围基础上扩大计算区对模拟结果没有显著的影响<sup>[13]</sup>。数值分析模型长、宽分别定为300 m、150 m。有边坡部分,高程按实际相对高程取值,无边坡部分,沿高程方向取土体范围为70 m。由于深基坑开挖前已进行降水,故计算模型中没有考虑地下水的作用。为分析偏压及施工方式对于基坑稳定性的影响,分别建立有、无边坡模型,采用顺逆结合及传统明挖顺作施工方法分别进行模拟,计算模型如图7所示。

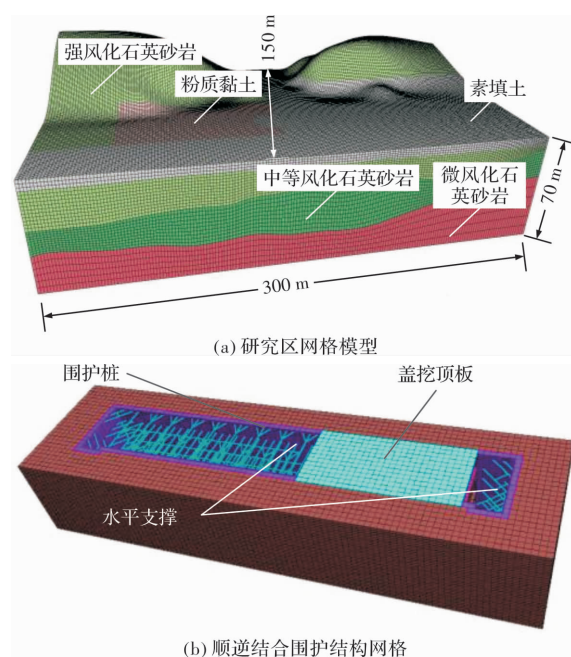


图7 莲塘口岸站基坑数值计算模型

Fig. 7 Simulation model of Liantangkouan metro station

计算区内土体采用摩尔—库伦模型,土层参数(见表1)。边坡支护采用预应力锚索加钻孔桩组合的形式,边坡施工时先进行土方开挖和支护,再进行钻孔桩施工。基坑顺挖标准段水平支撑按

实际设计值进行赋参. 数值模拟过程中支护结构采用 FLAC<sup>3D</sup> 结构单元 pile、beam、cable 进行模拟, 分别对应基坑围护桩、水平支撑以及锚杆, 其参数如表 2 所示.

表 1 岩土体模型物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	$\gamma$ /kN · m <sup>-3</sup>	$E$ /MPa	$\mu$	$c$ /kPa	$\varphi$ /°
素填土	18.5	4	0.18	10	20
粉质黏土	19.6	12	0.30	30	18
强风化石 英砂岩	21.9	32.3	0.27	35	45
中风化石 英砂岩	25.5	548	0.24	450	55
微风化石 英砂岩	26.5	4 385	0.23	3 800	68

注:  $\gamma$  为重度;  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为泊松比;  $c$  为内聚力;  $\varphi$  为内摩擦角

表 2 支护结构参数

Tab. 2 Parameters of support structural elements

支护结构 名称	结构单 元类型	$\gamma$ /kN · m <sup>-3</sup>	$E$ /MPa	$\mu$ /
钻孔桩	Pile	24.0	28 000	0.2
锚杆	Cable	78.0	200 000	0.2
混凝土支撑	Beam	25.0	32 000	0.2
钢支撑	Beam	78.0	200 000	0.3

注:  $\gamma$  为重度;  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为泊松比

### 3.2 监测—模拟数据对比

选取偏压模型基坑南侧明挖段第 1~6 层开挖过程中, 基坑拐角处地层沉降模拟数据进行对比分析. 如图 8 所示, 随开挖进行, 地表位移呈波动性变化, 整体表现为小幅减小的趋势. 现场监测值与模拟数据的变化趋势基本一致, 且数据处于同一数量级内, 最大误差小于 0.5 mm, 可见模型参数取值合理, 模拟数据可基本反映实际地表的位移特性.

桩顶变形与周围土体的变形有着密切联系, 基坑开挖过程中, 桩顶的位移监测对于基坑稳定性分析具有重要意义. 选取南侧明挖段基坑开挖过程中偏压一侧围护桩数据进行对比分析, 对比曲线如图 9 所示. 从对比结果上看, 各层开挖后监测数据与模拟数据的波动趋势基本一致, 最大误差小于 1 mm, 数值模拟的桩变形数据基本能反映实际工程中的围护桩变形情况.

### 3.3 数值模拟结果分析

#### 3.3.1 沉降影响区分析

Hsieh 等<sup>[14]</sup> 根据大量基坑的实测资料, 得出基

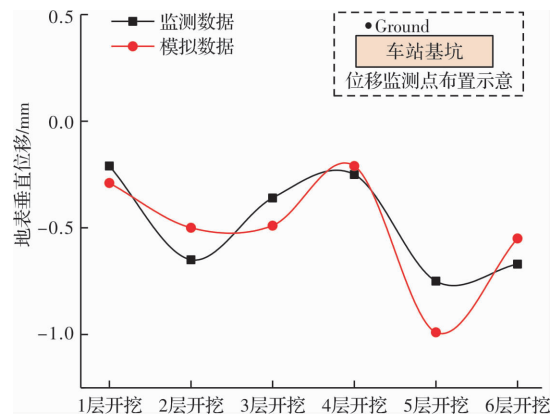


图 8 地表位移数值模拟与监测对比分析

Fig. 8 Comparison of the ground displacement during excavation

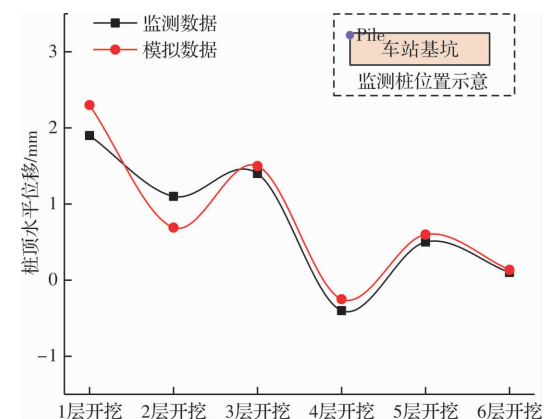


图 9 围护桩顶水平变形数值模拟与监测对比分析

Fig. 9 Comparison of the pile-top horizontal deformation

坑支护墙后地表沉降曲线通常为凹槽式分布, 最大沉降点距离支护墙边界具有一定距离, 这主要与开挖卸载后土层的应力分布有关. 通常地表沉降分布区域分为主要影响区和次要影响区两部分<sup>[15]</sup>,  $d/H$  是基坑开挖后地表沉降的影响距离与基坑开挖深度的比值. 图 10 所示为三种工况下地表沉降影响区的划分示意, 其中测线 2 及测线 3 处于交通主干道附件, 地表沉降对于地面交通环境的安全具有重要影响. 偏压环境下顺逆结合施工开挖完成时, 基坑周围地表沉降主要影响区分布于  $0 \sim 1.25H$  范围内, 次要影响区分布于  $1.25 \sim 2.0H$  范围内 ( $H$  为开挖深度). 各测线处最大地表沉降位置略有不同, 基坑短边处(测线 #1)出现在  $0.30H$ , 基坑长边偏压处(测线 #2)出现在  $0.20H$ , 而长边无偏压处(测线 #3)则出现在  $0.25H$ . 当采用全范围明挖顺作方法施工时, 沉降影响范围基本不变, 影响边界位于  $2.0H$  处, 但测线范围内的最大沉降值较顺逆结合施工有所增长, 这主要是由于全明挖施工更大范围的开挖卸载所导致的. 无偏压模型模拟数据显示, 基坑开挖的沉降影响范围较偏压环境有所减小, 影响边界位于

1.6H处,测线2及测线3的沉降分布曲线特征相似,在0.25H处出现最大沉降点.可见,偏压环境将扩大25%的沉降影响范围,而顺逆结合的施工方式可减小一定的地表沉降值,但对沉降范围的影响较小.以上这些数据也为信息化施工监测中合理布置地表沉降点提供了依据.

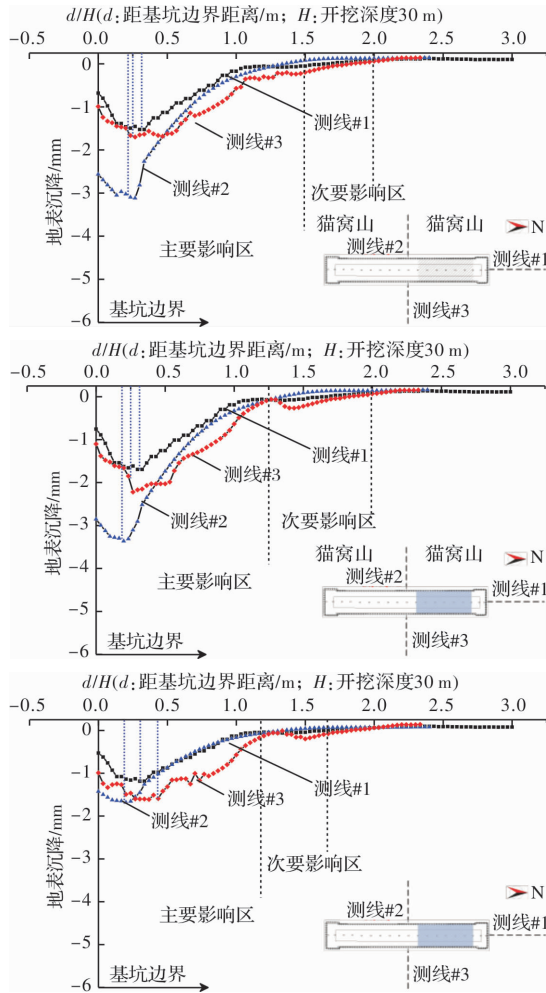


图10 基坑周围地表沉降影响区划分

Fig. 10 Area division of ground surface settlement

为进一步获得偏压基坑顺逆结合施工过程中施工区周围地层易于产生破坏的风险区域,选取最大剪应力指标进行分析.图11为莲塘口岸站基坑南北明挖区及中部盖挖逆作区开挖完成时截面范围的最大剪应力云图,截面位置如图中所示.基坑开挖的3个主要阶段土体范围内最大剪应力值约1MPa.受偏压作用影响,开挖完成时,近坡处的最大剪应力值明显大于无偏压处,此种现象在南、北侧明挖区尤为显著.此外,坑壁沿高程下部区域尤其是基坑坑底较上部产生了更大的剪应力集中,在施工监测及防护过程中需重点关注.

### 3.3.2 围护桩变形分析

围护桩位移与基坑变形有着密切联系,为分

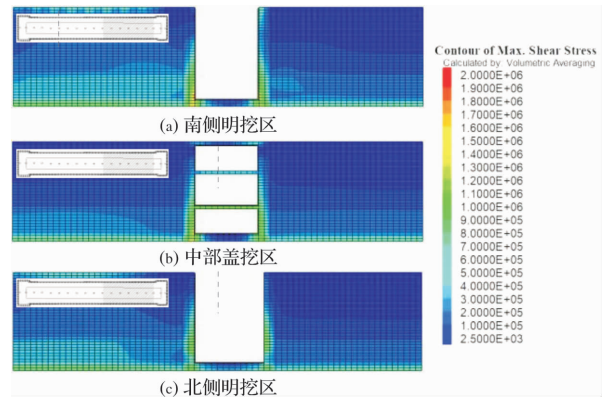


图11 基坑开挖区周围地层最大剪应力分布图(单位:Pa)

Fig. 11 Contour map of the max shear stress (unit: Pa)

析偏压环境及顺逆结合施工方法对于围护结构的变形影响,绘制三种施工条件下围护桩的变形曲线.选取边坡处偏压侧及无偏压侧围护桩以及盖挖逆作区围护桩变形数据进行分析, PileA、PileB及PileC的位置如图12位置示意.边坡偏压的存在对于邻近边坡处围护桩具有较大的影响,近坡处最大产生了1.2mm的水平变形增量,远坡处产生0.8mm的增量.但对于盖挖逆作区围护桩的水平变形影响较小,约产生了0.5mm的水平变形增量.这主要在于盖挖逆作封闭的结构可有效控制扰动土层应力场的扩散.在变形模式方面,偏压的存在使得原有的桩变形情况变得更加显著,具体表现为前倾变形值增大以及“弓形变形”桩中部变形值加大,原因在于邻近边坡造成偏压侧土体自重应力增大,非对称的应力分布情况使得桩体在不同深度位置产生不同程度的水平变形增量.进一步观察施工方式对于围护桩的变形影响:采用基坑全范围明挖顺作方式在基坑不同位置产生了围护桩水平变形增量.偏压处围护桩变形影响最为明显,相对于顺逆结合施工方式, PileA桩顶产生了1mm的变形增量.基坑全范围明挖顺作造成土体开挖卸载效应增大,在围护结构参数条件不变的情况下进而产生了围护桩水平变形的增加.由此可见,围护参数的设置与开挖方式的选择具有紧密联系.

基坑西侧猫窝山坡脚处采用拉锚桩支护,为分析拉锚作用对于围护桩的变形影响,分别模拟有、无拉锚两种计算工况下的围护桩变形特征.如图13所示,受偏压影响,无拉锚围护桩桩顶产生了较大的偏压倾斜现象,变形模式呈现为“前倾型”,相比于拉锚桩支护,最大水平变形从2mm增至21mm(约10倍),已接近围护结构变形警戒值.可见,拉锚作用对于偏压环境下围护桩结构



的桩顶变形控制具有重要影响。

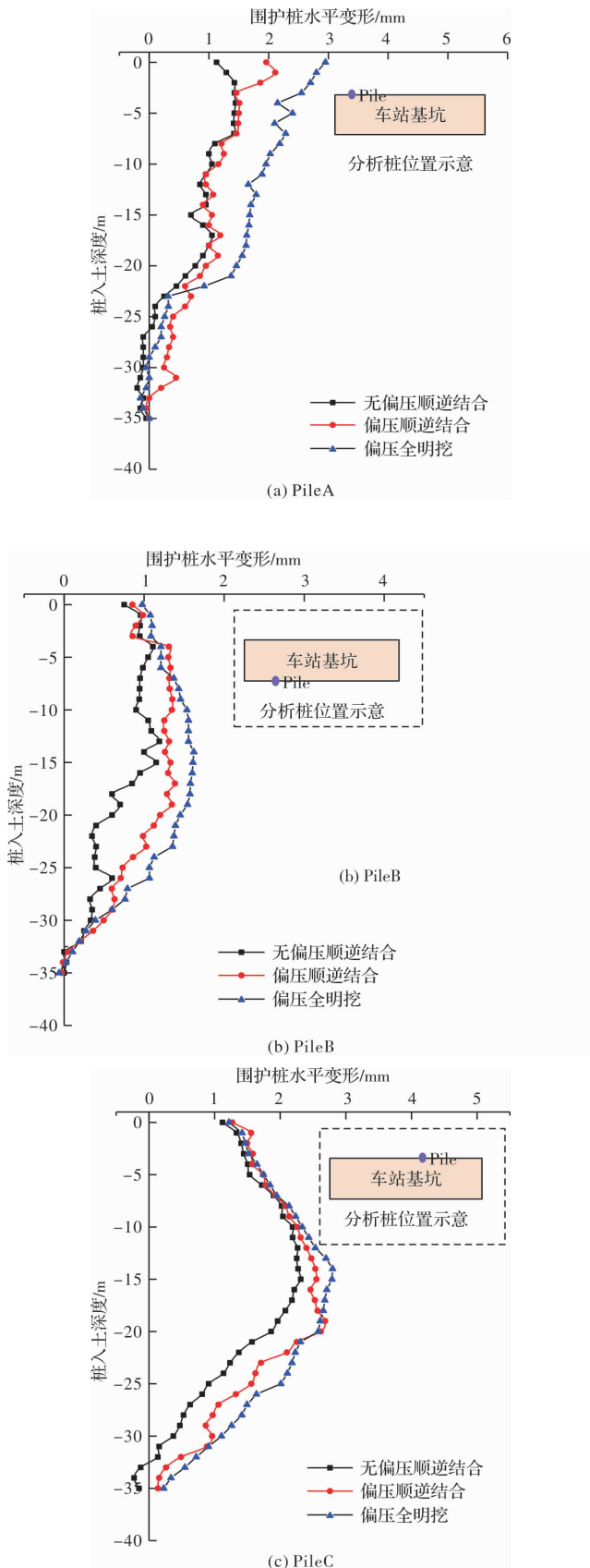


图 12 基坑围护桩水平变形分析

Fig. 12 Analysis on the horizontal deformation of piles

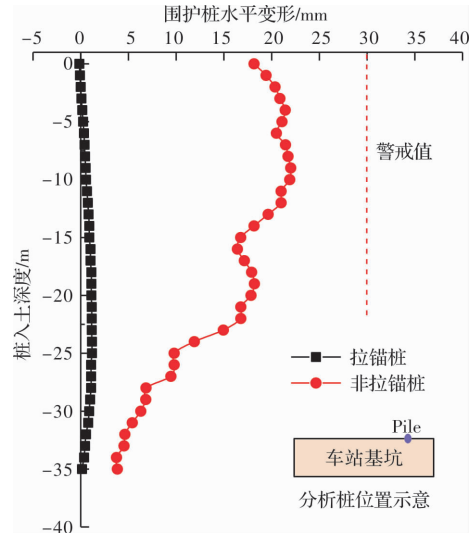


图 13 基坑偏压侧围护桩拉锚作用分析

Fig. 13 Analysis on the anchor tension on supporting piles

## 4 结论

(1) 地铁车站横跨城市交通干道时, 采用顺逆结合施工方案可缓解基坑工程施工进度与现有交通之间的矛盾。顺逆结合施工方法在莲塘口岸地铁车站修建中得到了成功应用。基于监测数据, 施工过程中基坑土体及围护结构均处于稳定状态。

(2) 数值分析结果表明, 莲塘口岸站顺逆结合施工完成后的地表沉降主要与次要影响区分别在  $0 \sim 1.25H$  和  $1.25 \sim 2.0H$  之间, 最大沉降出现在  $0.25H$  区域附近, 相对于无偏压环境扩大了 25% 的沉降影响范围。顺逆结合的施工方式可减小一定的地表沉降值, 但对沉降范围的影响较小。开挖过程中坑壁沿高程下部区域尤其是基坑坑底较上部产生了更大的剪应力集中, 在施工监测及防护过程中需重点关注。

(3) 边坡偏压的存在对于邻近边坡处围护桩具有较大的影响, 但对于盖挖逆作区围护桩的水平变形影响较小。顺逆结合施工方式由于单次开挖范围较小, 卸载效应相对于全范围明挖顺作的施工方式较弱, 所产生的围护桩水平变形值较小。

(4) 莲塘口岸站偏压侧围护桩拉锚作用对于基坑稳定性的控制作用较为显著, 相对于无锚索情况最大可有效缩减 10 倍的围护桩水平变形。

## 参考文献 References

- [1] 王志红. 北京地铁平乐园站盖挖逆筑深基坑设计[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (S1): 699-704.



- WANG Zhihong. Design of deep excavation of pingleyuan station of beijing metro using covering top-down method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (S1): 699-704.
- [2] 刘继强,田志强,林志斌,等.高边坡对邻近基坑稳定性的影响研究[J].隧道建设,2011,31(3): 294-300.
- LIU Jiqiang, TIAN Zhiqiang, LIN Zhibin, et al. Numerical analysis on stability of foundation pit at foot of high slope[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(3): 294-300.
- [3] 李大鹏,唐德高,闫凤国,等.深基坑空间效应机理及考虑其影响的土应力研究[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(9): 1632-1639, 1720.
- LI Dapeng, TANG Degao, YAN Fengguo, et al. Mechanics of deep excavation's spatial effect and soil pressure calculation method considering its influence [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(9): 1632-1639, 1720.
- [4] 刘波,章定文,席培胜.偏压基坑工程设计、施工与受力变形特性研究进展[J].中国矿业大学学报,2018,47(4): 791-804.
- LIU Bo, ZHANG Dingwen, XI Peisheng. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 791-804.
- [5] LIU Jie, HENG Hengcao, XIAO Fengjiang. Deformation monitoring and numerical analysis at the top of slope of a foundation pit[J]. Applied Mechanics and Materials. 2013, 353: 640-43.
- [6] 石钰锋,阳军生,白伟,等.紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4): 826-833.
- SHI Yufeng, YANG Junsheng, BAI Wei, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 826-833.
- [7] 徐烨,冯仁麟,吴跃华.地铁站偏载深基坑围护结构设计分析[J].城市轨道交通研究,2012,15(9): 43-48.
- XU Ye, FENG Renlin, WU Yuehua. Design and analysis of the support structure for metro station unsymmetrical loading pit [J]. Urban Mass Transit, 2012 (9): 43-48.
- [8] 刘波,席培胜,章定文.偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析[J].东南大学学报,2016,46(4): 853-859.
- LIU Bo, XI Peisheng, ZHANG Dingwen. Numerical analysis of excavation effect of unsymmetrical loaded foundation pit with different excavation depths [J]. Journal of Southeast University, 2016, 46 (4): 853-859.
- [9] 王海龙,方焘,余小强,等.临江下立交匝道偏压基坑开挖方案优化[J].铁道科学与工程学报,2016,13(6): 1061-1067.
- WANG Hailong, FANG Tao, YU Xiaoqiang, et al. The excavation scheme optimization of beside river interchange ramp unsymmetrical loaded foundation pit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1061-1067.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [11] 朱安龙,张胤,戴妙林,等.基于FLAC3D数值模拟的让压锚索边坡加固机理研究[J].岩土工程学报,2017,39(4): 713-719.
- ZHU Anlong, ZHANG Yi, DAI Miaolin, et al. Reinforcement mechanism of slopes with yielding anchor cables based on numerical simulation of FLAC3D[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (4): 713-719.
- [12] 谢和平,周宏伟,王金安,等.FLAC在煤矿开采沉降预测中的应用及对比分析[J].岩石力学与工程学报,1999(4): 29-33.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, WANG Jinan, et al. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 1999(4): 29-33.
- [13] 聂森.深基坑开挖过程数值模拟及支护对策[D].贵州:贵州大学地质工程,2009.
- NIE Miao. Numerical simulation and support countermeasures of deep foundation pit excavation [D]. Guizhou: Geological engineering of Guizhou university, 2009.
- [14] HSIEH Piogo, OU Changyu. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [15] 郑杰明,谢玖琪,杨平,等.深基坑开挖支护结构水平变形对地表沉降影响的数值模拟[J].现代隧道技术,2013,50(2): 102-108.
- ZHENG Jieming, XIE Jiuqi, YANG Ping, et al. Numerical Simulation of the Effects of Horizontal Deformation of the Supporting Structure on Surface Settlement in Deep Foundation Pits[J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50(2): 102-108.

(编辑 吴海西 桂智刚)