

文章编号: 1005-0523(2020)05-0047-06

## 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究

万先逵<sup>1</sup>, 袁聪聪<sup>2</sup>, 黄展军<sup>1</sup>, 褚东升<sup>3</sup>, 曹成威<sup>2</sup>, 石钰锋<sup>1,2</sup>

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330038; 2. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 依托珠三角地区某深厚软土地层基坑工程案例, 在采用排桩入岩方式基础上进行优化, 探究排桩不入岩+裙边加固支护方式对基坑变形的影响。选取基坑中部具有代表性的一段, 利用 MIDAS/GTS NX 有限元软件建立三维计算模型, 对比排桩水平位移、坑底隆起、周边地表沉降、工程造价与施工难度, 得出结论: 排桩不入岩+适当深度的裙边加固能有效减少排桩水平位移、坑底隆起、周边地表沉降; 加固深度超过一定范围后, 对减小基坑变形效果不明显; 优化方案工程造价和施工难度与原方案相仿, 可为类似工程设计提供参考。

**关键词:** 基坑; 深厚软土; 裙边加固; 数值模拟

**中图分类号:** TU470

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 万先逵, 袁聪聪, 黄展军, 等. 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 47-52.

**Citation format:** WAN X K, YUAN C C, HUANG Z J, et al. Study on optimization of foundation pit support scheme in deep soft soil [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 47-52.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.007

随着我国城市交通建设的迅速发展, 基坑在交通网络构建中发挥的作用越来越大。在深厚软土地层中进行基坑开挖时, 支护结构的强度要求和变形要求较高, 设计要求高、施工难度大、造价高且易发生工程事故, 其中以珠三角的深厚软土地层最具代表性<sup>[1-3]</sup>。许多学者对软土基坑变形规律进行了研究, 以期为基坑支护设计提供更好的理论支持和方法, 降低工程造价, 减少基坑事故。方焘等<sup>[4]</sup>应用 MIDAS/GTS 有限元软件分析得出基坑外侧有限土体宽度对基坑变形的影响范围为 1.5 倍基坑开挖深度。秦爱芳等<sup>[5]</sup>研究了受卸荷影响的被动区土体加固深度的范围, 得出上海地区加固深度建议值。张磊<sup>[6]</sup>借助 ABAQUS 软件分析了桩体入土深度对基坑变形的影响。郑俊杰等<sup>[7]</sup>研究表明基坑被动区加固使得地表沉降及地连墙变形减少超过 35%。蒋建平<sup>[8]</sup>使用数值模拟方法, 分析了被动区土体加固范围对整个深基坑的影响, 结果表明随着加固范围的扩大, 整个基坑的变形减小且但存在临界值。王立<sup>[9]</sup>以广东某深基坑案例为背景, 发现在软土地区对被动土体进行加固, 可以大大减少支护结构变形和受力。刘念武等<sup>[10-11]</sup>分析现场监测资料发现地表沉降与监测点基坑围护结构距离的关系呈三折线形状。

依托珠三角地区某深厚软土地层基坑工程项目, 通过数值模拟方法, 在原 46 m 长的围护桩基础上, 采用优化方案, 缩短围护桩长的同时对坑底被动区土体进行裙边加固, 分析在加固宽度不变条件下逐步增大加固深度时, 对支护桩身的水平位移、坑底隆起、地表沉降的影响, 最后对这几种方案进行工程造价及施工难度对比分析, 以为该工程和今后类似工程的设计提供参考。

### 1 工程概况

该明挖隧道基坑全长 410 m, 宽度 32~40 m, 场地整平后最大开挖深度约为 8.5 m, 基坑支护局部平面图如图 1 所示。场地地基属典型珠三角深厚软土地层, 软土厚度可达 40 余米, 夹淤泥质粉细砂, 基岩为中、强

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 国家地区科学基金项目(51768020); 江西省自然科学基金项目(20192BAB206043)

作者简介: 万先逵(1969—), 男, 高级工程师, 研究方向为地铁管理。E-mail: 794248239@qq.com。

通信作者: 石钰锋(1985—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: S074811156@126.com。

风化砂质泥岩。该基坑原支护方案采用排桩入岩方式,支护排桩为灌注桩,桩径 1.0 m,桩间距 1.3 m,桩长 46 m,中间设置一道格构柱,连系梁为钢筋混凝土结构,共设置两道横撑,截取原基坑支护典型横断面如图 2 所示。

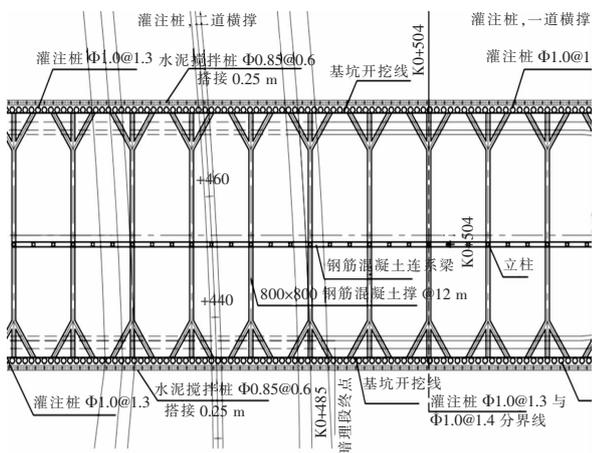


图 1 基坑支护局部平面图

Fig.1 Partial plan view of foundation pit support

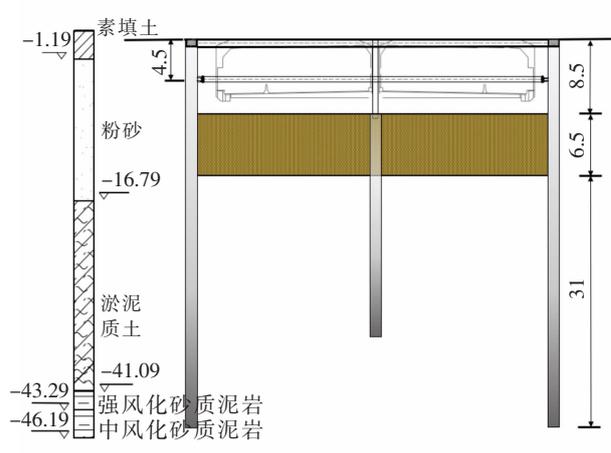


图 2 原方案基坑支护横断面图(单位:m)

Fig.2 Cross-sectional view of the original scheme of foundation pit support (Unit: m)

由于原方案围护桩长度过长,施工过程中存在塌孔等工程问题,且不经济。优化方案提出把排桩桩长缩短为 38.5 m 不入岩,两侧采用三轴搅拌桩加固被动区土体,加固区域宽 3.85 m,改变加固深度来寻求合理方案,以期在保证施工质量的前提条件下,减小基坑的变形和两侧地表沉降问题。

## 2 数值分析

### 2.1 模型建立

选用有限元计算软件 MIDAS/GTS NX 建立三维模型,该软件能够提供完全的三维动态模拟功能,配置多种本构及用户自定义本构模型,因而在岩土工程中应用较广。

根据基坑的实际尺寸,选用适当尺寸进行建模,图 3 为计算模型示意图,基坑开挖深度为 8.5 m,开挖宽度为 40 m,考虑两侧有居民建筑,模型宽度取 200 m,支护排桩底部土体向下取 30 m,模型纵向长度取 120 m,确定模型尺寸为 120 m×200 m×76 m(长×宽×高),基坑共分 3 层开挖,土体四周约束法向位移,底面固定,顶面自由。排桩根据刚度等效原则等效为地连墙,地连墙等效厚度为 0.768 m。土体采用实体单元模拟,本构采用修正莫尔-库伦模型(HS 模型)。

修正莫尔-库伦模型由莫尔-库伦模型扩展而来,其将非线性弹性和塑性模型联合起来,常用于砂土和淤泥。修正莫尔-库伦模型的屈服面为解耦双硬化模型,剪切破坏和压缩破坏互不影响。已经有许多学者<sup>[12-13]</sup>使用修正莫尔-库伦模型(HS 模型)进行了深厚软土基坑开挖模拟计算,结果与实测结果较吻合。

### 2.2 地层及支护参数

基坑土层参数参考相关地勘资料及室内土工试验,得到表 1 所示的计算参数

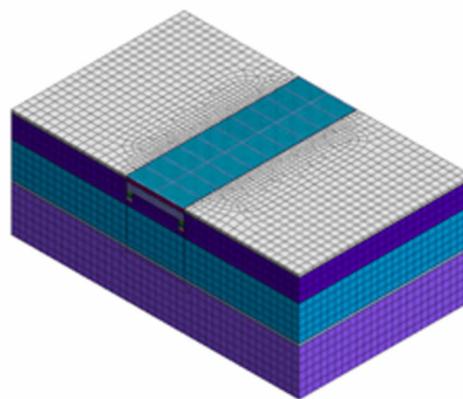


图 3 有限元计算模型

Fig.3 Finite element calculation model

表 1 土层计算参数  
Tab.1 Soil layer calculation parameters

地层	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E_{\text{ref}}^{50}/\text{MPa}$	$E_{\text{ref}}^{0.01}/\text{MPa}$	$E_{\text{ref}}^{10}/\text{MPa}$	$\nu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
素填土	18.5	3.94	3.15	11.81	0.3	20	14.1
粉砂	18	8.64	7.2	25.92	0.27	30	14
坑底加固区	24	320			0.2		
淤泥质土	16.8	2.73	2.28	8.2	0.42	5.8	3.9
强风化砂质泥岩	21	162	135	486	0.23	112	34.3
中风化砂质泥岩	25.3	4 890	4 078.8	14 683.7	0.18	4 620	44.9

在数值计算中,冠梁、钢筋混凝土支撑、腰梁、钢支撑及支护排桩均采用梁单元模拟,支护计算参数如表 2 所示。

表 2 支护结构计算参数  
Tab.2 Sample parameters list

支护结构	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$A/\text{m}^2$
支护排桩	24.8	30	0.2	0.785
格构柱	78.5	210	0.3	0.067
冠梁	24.8	30	0.2	0.960
钢筋混凝土横撑	24.8	30	0.2	0.640
腰梁	24.8	30	0.3	0.012
钢支撑	78.5	210	0.3	0.030

2.3 模拟施工步骤

基坑的开挖通过 MIDAS 中的钝化(R)来实现,支护通过 MIDAS 中的激活(A)来实现。开挖流程通过 MIDAS 中施工阶段助手设置,具体步骤如下:

1) 地应力平衡计算。地层在自重作用下会产生位移应力变化,得到地层初始固结状态,据此计算结果来判断模型是否正常。

2) 围护结构施工模拟。模拟支护排桩、格构柱及立柱桩施工,此阶段位移进行清零,不计入下阶段的基坑开挖。

3) 模拟基坑开挖。基坑共分 3 层开挖,第 1 层开挖至 1 m,施作桩顶冠梁及第 1 道混凝土横撑;第 2 层开挖至 5 m,施作腰梁及第 2 道钢支撑;第 3 层开挖至坑底,方案中如含有裙边加固,在此阶段施作。

2.4 模拟方案

依据原设计方案,结合现场条件进行优化比选,拟定 6 种支护方案,方案 1 为原方案,其余为优化方案,具体工况如表 3 所示。

表 3 支护方案表  
Tab.3 Support plan

方案号	支护桩长/m	裙边加固深度/m
1	46(入岩)	0(不加固)
2	38.5(不入岩)	0(不加固)
3	38.5(不入岩)	1
4	38.5(不入岩)	2
5	38.5(不入岩)	4
6	38.5(不入岩)	6

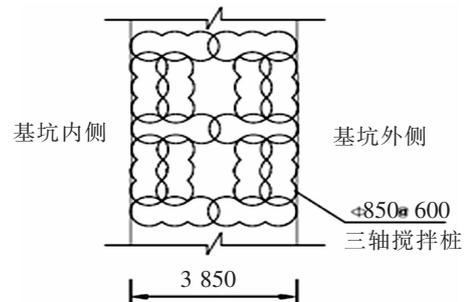


图 4 裙边加固布置方式

Fig.4 Skirt reinforcement arrangement

裙边加固方式为三轴搅拌桩加固,桩径 850 mm,桩间距 600 mm,咬合长度 250 mm,故加固宽度为 3

850 mm(600×5+850)。方案1为原方案,支护桩长为46 m(入岩),无裙边加固,其余方案采用桩长38.5 m(不入岩),加固深度依次为0,1,2,4,6 m,加固深度0 m时为坑底土体没有被加固的情形。裙边加固布置方式如图4所示,搅拌桩水泥掺量为22%。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 方案模拟结果对比分析

取基坑模型中部的支护排桩绘制最终工况下的桩身水平位移图(图5所示),从图5可以看出:① 桩身向坑内发生水平位移,在深度方向上大致呈抛物线型;② 当采用方案2排桩不入岩且不加固方式时,桩身水平位移峰值最大可达64.47 mm,原方案1入岩排桩的最大峰值为24.44 mm;③ 当采取不入岩且施作裙边加固深度为1,2,4,6 m时,最大水平位移降为35.44,23.05,22.55,22.43 mm。

结果表明,相比单独使用长排桩入岩方式,采用缩短桩长不入岩+适当增加裙边加固深度,可以有效控制桩身水平位移,位移减小最大可达8.22%;同时裙边加固深度具有范围,当加固深度超过2 m时,桩身最大水平位移值减小并不明显。

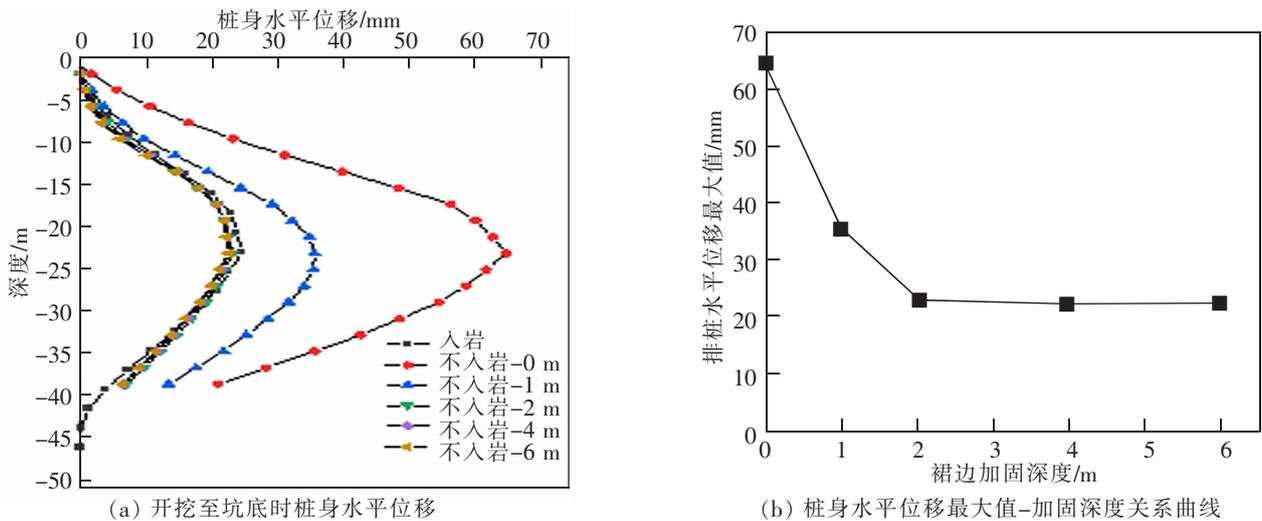


图5 支护排桩桩身水平位移

Fig.5 Horizontal displacement of perfusion pile

在软土地层进行基坑开挖时,坑底隆起也是用于判断基坑是否稳定的一项重要因素。取基坑底部一半绘制坑底隆起曲线图(图6所示),可以看出:① 隆起曲线随着距离坑壁距离增加,大致呈现先增大后缓慢减小趋势,最大隆起值在距坑壁15 m处;② 当采用方案2排桩不入岩且不加固方式时,最大隆起值为180.71 mm,原方案1入岩不加固的最大隆起为72.46 mm;③ 当采取不入岩且施作裙边加固深度为1,2,4,6 m时,最大隆起值分别为115.81,65.23,63.61,63.06 mm。

结果表明,采用加固深度0,1 m时,最大隆起值大于原排桩入岩方式,但是采用加固深度为2,4,6 m时,坑底隆起值得到有效控制,坑底隆起值较原方案1分别减小了7.23,8.85,9.40 mm,最大减小12.98%,即在不入岩条件下采取适当的加固深度可以减小坑底隆起值;当加固深度超过2 m时,坑底隆起值减小不明显。

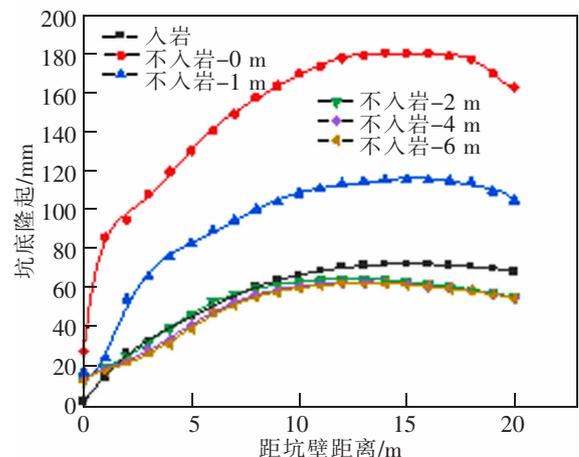


图6 坑底隆起曲线图

Fig.6 Pit bottom uplift curve

由于基坑周边存在 2~3 层的民用建筑,需考虑各方案对地表沉降的影响,取基坑外侧 80 m 范围内沉降数据,图 7 为沉降曲线图,可以看出:  
 ① 随着离坑边距离增加,曲线大致为抛物线型,在距离坑边 20~30 m 范围内沉降值达到最大;② 原方案 1 入岩地表沉降最大值为 20.49 mm;③ 不入岩+不加固方案地表沉降最大,最大值达到 41.74 mm,加固深度为 1,2,4,6 m 时地表沉降最大值为 27.96,15.62,9.18,9.22 mm。

结果表明,当加固深度不足 2 m 时,相比排桩入岩方式地表沉降更大;当加固深度大于 2 m 时,地表沉降可以大幅减小,但继续增大加固深度,地表沉降控制效果相差不大。

**3.2 工程造价及施工难度对比分析**

采取优化方案时,在确保结构安全的条件下,也要考虑方案的经济性和施工难易程度。通过这两个影响因素来分析优化方案的可行性,表 4 为隧道基坑 K0+412~K0+504 段主要支护结构的工程造价分析数据。

表 4 方案造价对比表  
 Tab.4 Scheme cost comparison

工况	φ1 000 灌注桩(C30)/m <sup>3</sup>	φ850 三轴搅拌桩/m	估算造价/万元
排桩入岩+不加固	5 130.22	-	717.20
排桩不入岩+不加固	4 293.77	564.97	631.86
排桩不入岩+加固深 1 m	4 293.77	1 192.59	666.95
排桩不入岩+加固深 2 m	4 293.77	2 385.19	733.64
排桩不入岩+加固深 4 m	4 293.77	4 770.37	867.00
排桩不入岩+加固深 6 m	4 293.77	7 155.56	1 000.37
单价/元	1 198	559.15	

考虑工程造价。从表 4 可知:① 当采用长支护桩入岩方案时,总造价达到 712.2 万元;② 当不入岩且加固深度 0,1 m,造价相比原方案降低 11.90%,7.00%;③ 当不入岩且加固深度 2,4,6 m 时,造价相比原方案增加 2.29%,20.89%,39.48%,方案 4 造价虽高出原方案 1 造价 2.29%,但高出数值并不大。

考虑施工难度。由于被动区地层主要为粉砂层,采用三轴搅拌桩进行裙边加固时,旋挖钻孔施工简便,难度较小。又因基坑外侧需要施作三轴搅拌桩止水帷幕,与裙边加固施工方法类似,可为裙边加固施工提供经验;因此裙边加固不会增加施工难度,两者方案施工难度相仿。

综上所述,结合数值分析结果和工程造价施工难易程度,当采用方案 4 排桩不入岩+2 m 深裙边加固时,相比原方案 1 采取排桩入岩方式,在控制排桩水平位移和坑底隆起以及地表沉降都能达到良好的效果,而继续增大加固深度则控制基坑变形效果相差不大,且在工程造价上不经济。在原方案基坑隆起达 72 mm 逼近基坑安全预警值时,采取偏安全的优化方案是更好的选择。所以,选择施工方案时,建议采用方案 4(不入岩+2 m 深裙边加固)。

**4 结论**

依托珠三角地区某明挖隧道基坑工程实例,通过数值模拟建立不同优化方案的三维模型,根据模型的计算结果对比得到如下结论:

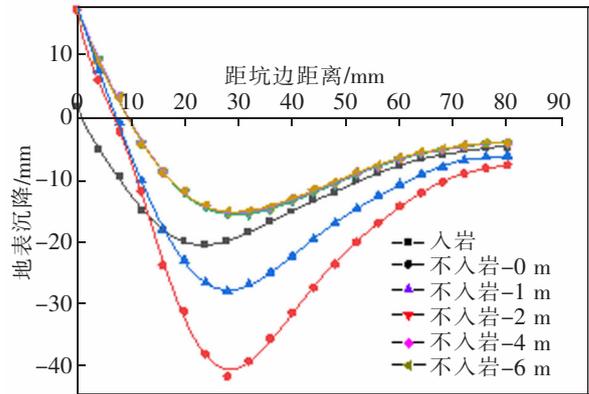


图 7 地表沉降曲线  
 Fig.7 Surface subsidence curve

1) 在原先排桩入岩方案基础上进行优化方案研究,发现排桩不入岩+适当深度的裙边加固能有效减少排桩水平位移、坑底隆起、基坑周边地表沉降。

2) 在此案例中,排桩不入岩且不加固会导致变形控制能力大幅降低,不能满足工程安全要求。

3) 固定加固宽度而增大加固深度,随着加固深度超过一定范围后(本文为2 m),对减小基坑变形效果不明显。

4) 采取优化方案4(不入岩+2 m深裙边加固)时,虽造价比原方案1高出2.29%,但能够有效控制基坑变形,且不增加施工难度,可为类似工程的设计提供一些参考。

#### 参考文献:

- [1] 张玉成,杨光华,胡海英,等. 珠三角深厚软土地区浅基坑支护若干问题探讨[J]. 岩土工程学报,2014,36(S1):1-11.
- [2] 杨志银,付文光,吴旭君,等. 深圳地区基坑工程发展历程及现状概述[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2730-2745.
- [3] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2276-2284.
- [4] 方焘,刘春,郭俊,等. 土体宽度非对称基坑变形特性分析[J]. 华东交通大学学报,2019,36(6):99-105.
- [5] 秦爱芳,胡中雄,彭世娟. 上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区土体加固深度研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(6):935-940.
- [6] 张磊. 某深基坑工程施工监测及有限元模拟分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] 郑俊杰,章荣军,丁烈云,等. 基坑被动区加固的位移控制效果及参数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):1042-1051.
- [8] 蒋建平. 被动区土体加固范围对整个深基坑的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(4):96-105.
- [9] 王立. 软土深基坑支护设计采用被动区加固案例[J]. 内江科技,2012,33(7):144.
- [10] 刘念武,龚晓南,楼春晖. 软土地区基坑开挖对周边设施的变形特性影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(7):1141-1147.
- [11] 刘念武,龚晓南,楼春晖. 软土地基中地下连续墙用作基坑围护的变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2707-2712.
- [12] 林煌超,谢建斌,张水兵,等. HS模型在高原湖相沉积土层深基坑的应用[J]. 低温建筑技术,2018,40(1):122-126.
- [13] 杨毅秋,严驰,袁中立. HS模型在基坑开挖模拟中的应用[J]. 石油工程建设,2004(6):19-22.

## Study on Optimization of Foundation Pit Support Scheme in Deep Soft Soil

Wan Xiankui<sup>1</sup>, Yuan Congcong<sup>2</sup>, Huang Zhanjun<sup>1</sup>, Chu Dongsheng<sup>3</sup>, Cao Chengwei<sup>1</sup>, Shi Yufeng<sup>1,2</sup>

(1. Nanchang Rail Transit Group Co. Ltd., Nanchang 330038, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. CCCC Fourth Navigation Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Based on the case of a deep soft soil foundation pit project in the Pearl River Delta region, this paper optimizes the method of row piles into the rock, and explores the effect of the row piles into the rock + skirt reinforced support method on the foundation pit deformation. A representative section in the middle of the foundation pit was selected, and a three-dimensional calculation model was established by using MIDAS / GTS NX finite element software to compare the horizontal displacement of row piles, uplift of the pit bottom, surrounding surface settlement, engineering cost and construction difficulty. Piling without rock and proper skirt reinforcement can effectively reduce horizontal displacement of piles, uplift of pit bottom, and surrounding ground settlement. After the depth of reinforcement exceeds a certain range, the effect on reducing deformation of foundation pit is not obvious; The cost and construction difficulty of the optimization scheme project are similar to the original plan, which can provide reference for similar engineering design.

**Key words:** foundation pit; deep soft soil; skirt border reinforcement; numerical simulation