

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.166

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



深基坑基底注浆加固效果数值模拟分析

夏梦然

(中铁工程设计咨询集团有限公司,北京 100055)

摘要:采用高压旋喷注浆工艺对软土地区的基坑底部土体进行加固是保证深基坑施工安全与工程稳定常采用的方法。基于某地铁站监测数据,利用 PLAXIS 2D 软件建立了其数值计算模型并进行模型校核,对加固和未加固两种工况进行了数值模拟,对比分析了地连墙的位移和弯矩、地表沉降等开挖响应。研究表明,对软土地区基坑进行基底注浆加固,能有效减小地连墙的侧向变形和地表沉降。并针对加固区厚度、地连墙嵌入深度及刚度、软土层厚度 4 个参数进行了分析与讨论,优化了加固区的合理厚度、地连墙的合理嵌入深度,研究了基坑变形受地连墙刚度和软土层厚度影响的敏感性。

关键词:高压旋喷注浆;软土地基;深基坑工程;有限元分析

中图分类号:TU472.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)01-0064-06

Numerical simulation analysis of jet grouting effect of deep excavation bottom

Xia Mengran

(China Railway Engineering Consulting Group Co. LTD, Beijing 100055, P. R. China)

Abstract: Jet grouting technology is widely employed as a reinforcement of excavation base in soft soil area. In this study, based on the monitoring data, numerical analysis of a railway station is carried out using PLAXIS 2D software. Firstly, comparison between the reinforced and unreinforced excavation cases is evaluated based on the analysis of deformation, bending moment of diaphragm wall and ground settlement. The results show that the lateral deformation of diaphragm wall and the ground settlement can be effectively reduced by basal grouting reinforcement in soft soil. Then four parameters, namely, the thickness of reinforcement zone, the penetration depth, the stiffness of diaphragm wall and the thickness of soft soil layer, are analyzed and discussed. The reasonable thickness of reinforcement zone and depth of diaphragm wall, and the sensitivity of deformation to the stiffness of diaphragm wall and the thickness of soft soil layer are also investigated.

Keywords: jet grouting; soft soil foundation; deep excavation; finite element analysis

在软土中进行基坑开挖会对周围土体及环境造成很大影响,导致基底的隆起变形、引起邻近既有建筑物的沉降等。在实际工程中,常采用加固坑底土体的方法改善坑底土体的物理力学性能,从而达到控制基坑变形的目的。

但如何评估注浆加固体的力学性能、加固效果

以及适用条件,一直是学者们研究的热点。郝峰^[1]结合基坑支护实例,介绍了高压旋喷桩在复合土钉墙系中的应用,并通过 PLAXIS 2D 软件进行了案例验证,指出了高压旋喷桩的贡献作用及规律;最后给出旋喷桩、土钉、混凝土面层相关力学参数在 PLAXIS 2D 软件中的建议取值。来弘鹏等^[2-3]结合

收稿日期:2019-08-29

作者简介:夏梦然(1989-),女,主要从事地下结构研究,E-mail: 834760830@qq.com。

Received: 2019-08-29

Author brief: Xia Mengran (1989-), main research interest: underground structure, E-mail: 834760830@qq.com.

广福隧道、西安市地铁隧道等工程实例,从数值模拟结果和现场实测数据两方面详细介绍了地表预注浆方法在公路隧道、铁路隧道中的加固机理以及加固效果。高峰等^[4]结合隧道围岩加固的研究现状,针对常规有限元方法模拟注浆加固存在一定误差的问题,利用有限元理论分析了该误差产生的原因,进而提出了在有限元中模拟加固效应的改进方法。秦爱芳等^[5-6]对土体注浆加固的形式、深度、宽度进行了研究,并结合室内模型实验,讨论了坑底土体加固的深度问题。朱志祥等^[7]结合基坑工程实例,从墙内侧土压力、地下连续墙变形和邻近铁路的沉降 3 方面分析了水泥土搅拌加固法在深基坑中的支护效果。Shirlaw 等^[8-10]结合工程实例和监测数据说明了喷射注浆板在基坑开挖过程中的加固效果以及注浆加固工艺的施工质量要点;Goh^[11]提出了考虑坑底注浆加固的基底抗隆起安全系数计算公式。但是,少有学者系统分析喷射注浆加固在基坑工程中的支护作用以及与基坑支护结构协同工作时的相互影响。

笔者结合工程案例,利用 PLAXIS 2D 软件进行了有限元建模分析,首先进行了案例验证,在此基础上对坑底加固的合理厚度进行了研究,并针对地下连续墙嵌入深度和刚度、软土层厚度 3 种参数进行了参数分析,探究其对坑底加固体加固效果的影响。

1 工程概况

某地铁站的土层分布及支挡结构设置如图 1 所示。土层分布依次为杂填土、砂土、软粘土和冲积层,其中,软粘土层较厚,地下水位于地表下 5 m。基坑的开挖宽度约为 16 m,开挖深度约为 17.5 m,由于基坑的长度约为 129 m,相当于宽度的 8 倍,故可作为平面应变问题处理。基底有 1.5 m 厚的喷射注浆加固体;支护结构由 0.8 m 厚的地下连续墙(深

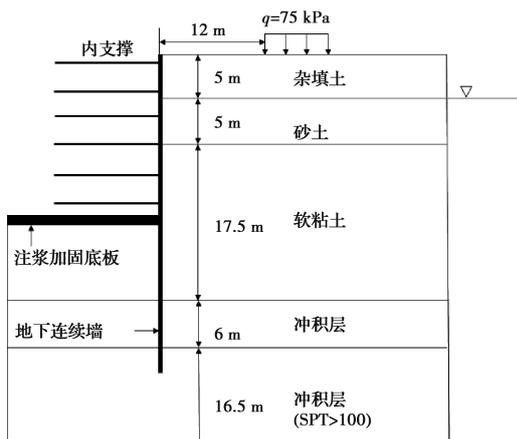


图 1 土层分布及支挡结构设置(半结构)

Fig.1 Profiles of soil and retaining systems (half of the structure)

度为 35 m)和 6 道钢管内支撑组成(竖向间距为 3 m)。距离基坑 12 m 处有 1 栋 3 层框架结构建筑物。基坑施工顺序为先施工地下连续墙和坑底土体注浆加固,后进行分步开挖,同时设置内支撑。

2 有限元模型建立与验证

2.1 数值计算模型

基坑采用对称开挖,故可取半结构进行建模分析。模型的左右边界限制单元结点的水平方向位移,底部边界限制单元结点的水平及竖向位移,模型的上部边界为自由边界。

考虑到基坑开挖过程中土体的小应变硬化特性,采用 PLAXIS 2D 中的土体小应变硬化模型(HSS 模型)模拟土体,该模型与土体硬化模型(HS 模型)相比,能够更好地反映基坑开挖中土体的硬化行为。土体的输入参数见表 1,其中,杂填土、砂土采用排水模式模拟,以摩擦角(粘聚力设为 0)作为强度参数;软粘土、冲积层采用不排水 B 模式模拟,以不排水抗剪强度作为强度参数。表 1 中土体重度、摩擦角、不排水抗剪强度为现场勘测数据;小应变硬化的范围为 0%~0.002%,其他参数均由 HSS 模型的计算公式得出,已有很多学者^[11-16]验证过此计算公式,不再赘述。

支护结构采用线弹性体模拟。考虑到地下连续墙在施工时质量不易控制,故对弹性模量取 0.7 的折减系数;由于按平面应变问题处理,内支撑的等效抗压刚度应考虑平面外间距,具体的处理方式是将单根内支撑的横截面积除以平面外间距的平均值(见表 2 注释)。支护结构具体参数见表 2。注浆加固土体采用摩尔-库伦模型模拟。根据学者们^[1-4,7,11]的建议,由于注浆体质量受施工质量影响很大,在量化其力学性能指标时,可取较保守的值。表 3 列出了一些学者在模拟注浆加固体时物理力学参数的取值,由表 3 可知,破碎围岩加固体的力学性质要远高于软弱土层中的加固体。依据表 3 中软弱土层加固体参数的取值以及 Shirlaw 等^[8]给出的现场测试数据;文中取弹性模量 $E=150$ MPa,不排水抗剪强度 $c_u=270$ kPa(即按照不排水 B 模式进行分析)。

针对邻近建筑,采用均布荷载简化模拟,每层建筑荷载简化为 25 kPa 的均布荷载,并以地表最大沉降近似代替建筑的沉降。

施工步设置为 10 步:1)初始 K_0 过程;2)激活均布荷载,模拟建筑施工;3)重置位移为 0,将地下连续墙激活以模拟地连墙的施工,将基坑底部土体

的材料参数改为注浆体材料参数(PLAXIS 软件支持在施工步中修改单元材料属性,直接修改即可);
4)开挖至地下 3 m 处,同时设置第 1 道支撑;5)依此类推,逐步开挖至地下 6、10、12.5、15、17.5 m,同时

设置剩余 5 道内支撑。

依据工程实际情况,采用先进行坑内降水,后进行开挖的方式模拟,即在每个施工步中将坑内水位设置为开挖面以下。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c_u/kPa	E_{50}/kPa	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	m	$G_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\gamma_{0.7}$	$\varphi/(^\circ)$
杂填土	19		5 250	33 000	33 000	99 000	0.8	130 000	0.000 2	30
砂土	19		7 500	23 000	23 000	69 000	0.8	67 000	0.000 2	35
软粘土	16	44	7 950	7 950	7 950	23 850	1	30 000	0.000 2	23
古冲积层	20	150	90 000	107 000	107 000	321 000	0.8	380 000	0.000 2	40
古冲积层 (SPT>100)	20	500	300 000	270 000	270 000	810 000	0.8	820 000	0.000 2	45

注: E_{50} 为标准排水三轴试验的割线刚度; E_{50}^{ref} 为标准排水三轴试验的参考割线刚度; $E_{\text{ed}}^{\text{ref}}$ 为初次固结加载的参考割线刚度; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载/重加载参考刚度; G_0^{ref} 为小应变下的参考剪切模量($\epsilon < 10^{-6}$)。

表 2 支护结构物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of support structure

支撑形式	埋深/ m	$E/$ ($10^8 \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$A/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	$I/$ ($\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-1}$)
钢支撑	1	2.07	0.019	
钢支撑	4	2.07	0.019	
钢支撑	7	2.07	0.019	
钢支撑	10	2.07	0.038	
钢支撑	13	2.07	0.038	
钢支撑	16	2.07	0.038	
地下连续墙	35	0.28	0.8	0.042 67

注:等效面积 A = 钢支撑的横截面积/平面外间距。

表 3 各工程中注浆加固体物理力学参数汇总

Table 3 Physical and mechanical parameters of soil reinforced by jet grouting in several projects

应用的场景	物理力学参数取值	参考文献
复合土钉墙	$E=200 \text{ MPa}, c=120 \text{ kPa}, \varphi=25^\circ$	[1]
公路隧道 破碎围岩加固	$E=15\ 000 \text{ MPa}, c=400 \text{ kPa}, \varphi=28^\circ$	[2]
地铁区间隧道 黄土地层注浆	$E=150 \text{ MPa}, c=66 \text{ kPa}, \varphi=27^\circ$	[3]
隧道围岩加固	$E=1\ 950 \text{ MPa}, c=120 \text{ kPa}, \varphi=25^\circ$	[4]
地铁车站软土 深基坑加固	$E=170 \text{ MPa}, c=348 \text{ kPa}, \varphi=25^\circ$	[7]
软土地区 深基坑加固	$E=150 \text{ MPa}, c_u=300\sim 500 \text{ kPa}$	[11]

注:表中 E 为弹性模量; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; c_u 为土体不排水抗剪强度。

建立的有限元模型见图 2。模型包含 799 个单元、6 740 个结点。

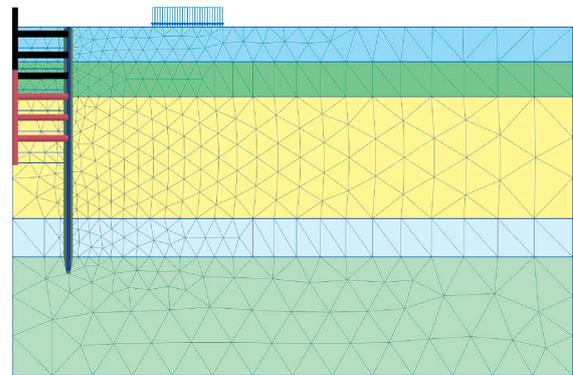


图 2 有限元模型示意图

Fig.2 Diagram of the finite element model

2.2 数值模型验证

建立有限元模型后,分析计算得到无注浆底板支护时挡墙的最大侧移为 84.23 mm,有注浆底板支护时挡墙的最大侧移为 52.69 mm,与现场检测结果 80 mm(无注浆底板支护区域)、55 mm(有注浆底板支护区域)相比,误差较小,说明土体和注浆体选用的参数基本合理。

3 坑底土体加固效果的参数分析

3.1 土体加固效果及加固厚度的影响分析

图 3 为加固与未加固两种情况的地连墙侧移曲线及弯矩图的对比。由图 3(a)可以看出,采用坑底土体加固后,地下连续墙的变形明显减小。且由于对基坑底部 1.5 m 深度内的土体进行了加固,地连

墙最大侧移出现的位置有所下降,说明在软土地区,对坑底土体采用注浆加固的方法比较有效。由图 2(b)可知,进行注浆加固后,地连墙的内力有所减小,最大正弯矩的出现位置大约位于 28 m 深度处,因此,此处为软土层与冲积层的接触面;而最大负弯矩出现在开挖面下方,大致位于软土层的中间层(20.714 m 处),与地连墙最大侧移出现的位置一致(同理,进行注浆加固后,最大负弯矩的出现位置在 22.5 m 处,与最大侧移位置一致)。

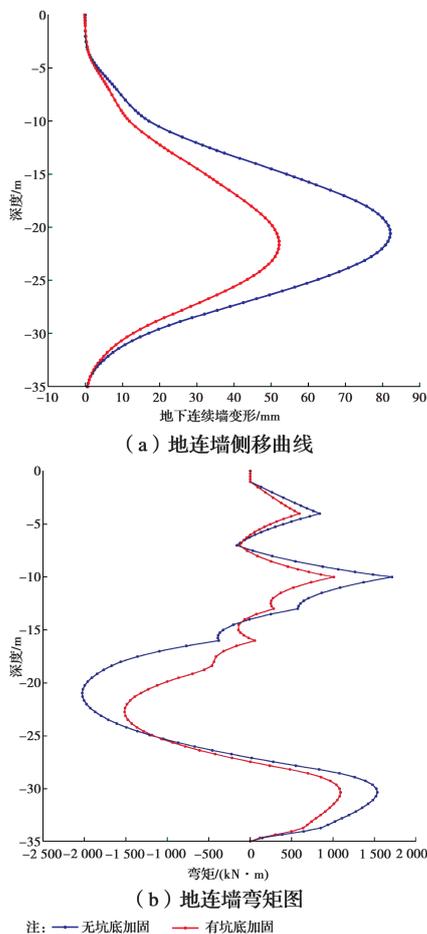


图 3 地连墙侧移曲线及弯矩图的对比

Fig.3 Deflection curve and bending moment of diaphragm wall

为研究加固区厚度对加固效果的影响,选取了 1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 m 共 8 种工况,从地下连续墙侧移、基底隆起、地表沉降 3 个方面评估加固效果,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,底板厚度在 1.5~3.0 m 范围内,均有良好的抑制变形效果,能够有效减小挡墙侧移、基底隆起和地表沉降。底板厚度在 2.0~2.5 m 左右即可以减少变形 50%左右,对变形控制较为严格时,可考虑采用 3.0 m 厚的注浆底板。当加固厚度大于 3 m 时,加固的效果逐渐降低,4 m 以上时,地下连续墙侧移及地表沉降趋于稳定,再扩大加固区

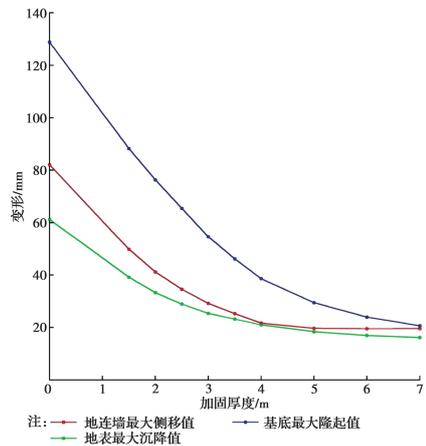


图 4 注浆加固厚度的影响

Fig.4 The influence of thickness of jet grouting

域已不能提高加固效果。因此,合理的加固范围应在 1.5~3.0 m 之间,相当于开挖深度的 10%~20%。

3.2 地下连续墙嵌入深度及刚度的影响分析

选取地下连续墙嵌入深度为 29、32、35(原工况)、38、41 m 共 5 种工况进行分析。除地下连续墙嵌入深度外,地下连续墙的刚度也会影响支护系统,通过改变地下连续墙厚度的方式,选取了 3 组工况,研究不同刚度的地下连续墙对支护系统的影响。计算分析结果如表 4、表 5 所示。

表 4 地连墙嵌入深度的影响

Table 4 The influence of diaphragm wall depth

地连墙嵌入深度/m	地连墙最大侧移值/mm	基底最大隆起值/mm	地表最大沉降值/mm
29	58.75	98.56	43.16
32	54.43	96.88	42.16
35	52.08	91.96	40.39
38	52.1	91.5	40.4
41	52.09	91.57	40.36

表 5 地连墙刚度的影响

Table 5 The influence of diaphragm wall stiffness

地连墙厚度/mm	地连墙最大侧移值/mm	基底最大隆起值/mm	地表最大沉降值/mm
600	71.69	119.4	52.52
800	52.08	91.96	40.39
1 000	39.75	74.14	32.06

由表 4 可以看出,挡墙深度为 35、38、41 m 时,挡墙的变形几乎一致,这是因为地连墙已经嵌入至持力层。反之,减小地连墙的嵌入深度,由于 30 m 时地连墙仍嵌入持力层(但 SPT<100),所以,最大侧移值略有增加,而没有迅速增加。因此,采用地下连续墙与坑底注浆加固的复合支护方案时,地下连

续墙嵌入持力层 2~3 m 即可。

与嵌入深度不同,地下连续墙的刚度对支护系统有较大的影响。由表 4 可以看出,地下连续墙的厚度减小时,基坑及地表的变形有所增加;厚度增大时,基坑及地表的变形均会减小。因此,在采用这种复合支护方案时,应保证地下连续墙具有一定的刚

度,以达到控制基坑变形的目的。

3.3 软土层厚度及软土力学性质的影响分析

工程所处的邻近区域,软粘土广泛分布在地表以下 18~35 m 深度处^[8],所以,选取了软土层厚度分别为 12.5、15、17.5、20、22.5 m 共 5 种情况,研究分析结果见图 5。

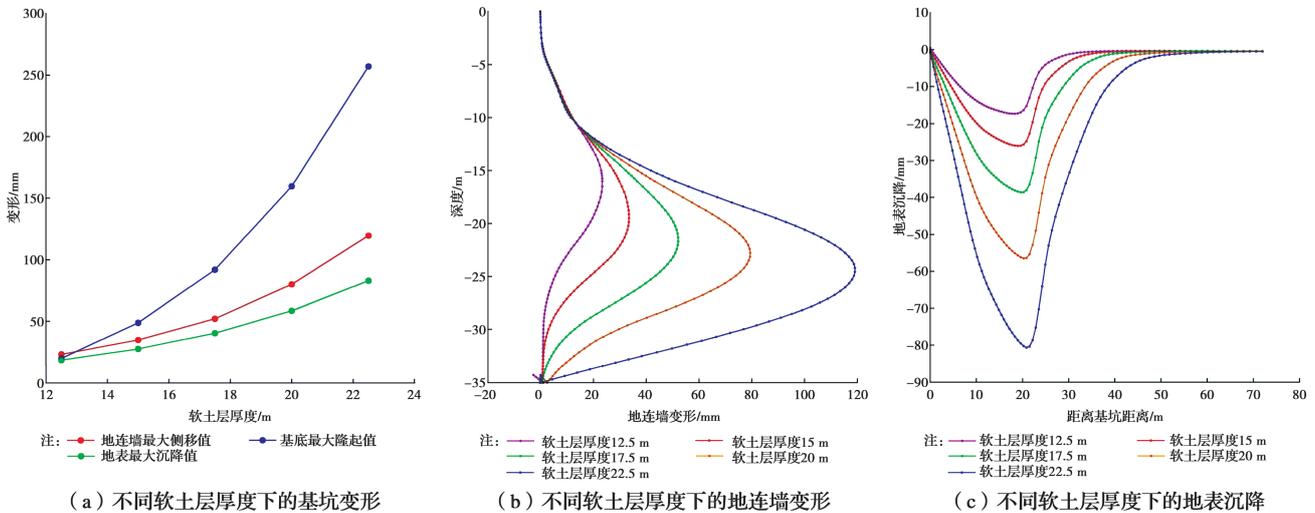


图 5 软土层厚度对支护系统加固效果的影响

Fig.5 The effect of diaphragm wall with different marine clay thickness

由图 5 可知,软土层厚度是影响基坑变形的重要因素之一,随着软土层厚度的增加,基坑的侧移变形、隆起变形、地表沉降均显著增加,尤其是隆起变形。且随着软土层厚度的增加,地连墙的侧移曲线变化更加剧烈,地连墙的最大位移出现位置也随之下降,这是由于地连墙没有嵌入下部坚硬土层中。软土层厚度减小后,基坑变形及建筑的附件沉降迅速下降。因此,在新加坡这类近海地区,若有软粘土层存在,则变形主要发生在软粘土中。对于下覆软粘土层的深基坑工程,应特别注意,需采用基底注浆加固与地下连续墙、内支撑相结合的支护系统,才能够有效控制基坑的变形,且软粘土层较厚时,应提高地下连续墙的嵌入深度(或刚度)以起到控制变形的作用。

4 结论

通过建立有限元分析模型,模拟基坑开挖及支护的全过程,系统分析了加固区厚度、地连墙嵌入深度、地连墙刚度、软土层厚度对支护系统的影响。主要得到以下结论:

1) 基底注浆加固的合理厚度应为基坑开挖深度的 10%~20% 左右,可以充分抑制基坑的变形,减小地连墙的变形、基底隆起变形和地表沉降。

2) 采用基底加固与地连墙相结合的复合式支护系统时,地连墙需嵌入坚硬土层中 2~3 m,不宜太深,并应保证地连墙具备一定的刚度。

3) 在软土地区进行基坑开挖时,应注意施工区域的软土层分布,基坑变形及地表沉降受软土层厚度影响显著。在软土层较厚的区域,应通过增加地连墙嵌入深度、增大地连墙刚度或者加大注浆加固区域等方式控制变形。

参考文献:

- [1] 郝峰. 高压旋喷桩复合土钉墙 Plaxis 有限元分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(9): 52-55.
HAO F. Plaxis finite elements analysis on supporting structure with high-pressure jet grouting pile and composite soil-nailing wall[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(9): 52-55. (in Chinese)
- [2] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2309-2315.
LAI H P, XIE Y L, YANG X H. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27

- (11): 2309-2315.(in Chinese)
- [3] 来弘鹏, 康佐, 谢永利, 等. 地铁区间隧道黄土地层注浆预加固技术研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 47-54.
LAI H P, KANG Z, XIE Y L, et al. Grouting pre-reinforcement technology for metro tunnel in loess strata[J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 47-54. (in Chinese)
- [4] 高峰, 谭绪凯. 隧道围岩注浆加固效应模拟方法研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(11): 82-86.
GAO F, TAN X K. Research on the numerical simulation method of grouting in tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(11): 82-86. (in Chinese)
- [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.
QIN A F, HU Z X, PENG S J. Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 935-940. (in Chinese)
- [6] 秦爱芳, 李永圃, 陈有亮. 上海地区基坑工程中的土体注浆加固研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 69-72, 82.
QIN A F, LI Y P, CHEN Y L. Study on stabilizing grout of excavation pits in Shanghai district[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 69-72, 82. (in Chinese)
- [7] 朱志祥, 刘少炜, 刘新荣, 等. 某地铁车站软土深基坑加固效果研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 716-720.
ZHU Z X, LIU S W, LIU X R, et al. Study on the reinforcing effect of a deep foundation pit in soft soil of a metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 716-720. (in Chinese)
- [8] SHIRLAW J N, WEN D Z, NADARAJAH P, et al. Construction issues related to jet grouted slabs at the base of excavations[C]//Proceedings of Tunnels and Underground Structures, an International Conference, 26-29 November, 2000, Singapore.
- [9] SHIRLAW J N, WEN D Z, NADARAJAH P, et al. Design issues related to jet grouted slabs at the base of excavations [C]//Proceedings of Tunnels and Underground Structures, an International Conference, 26-29 November 2000, Singapore.
- [10] SHIRLAW J N, WEN D Z, KHENG H Y, et al. Controlling heave during jet grouting on marine clay [C]//Proceedings of the RTS Conference, Singapore, 2003.
- [11] GOH A T C. Deterministic and reliability assessment of basal heave stability for braced excavations with jet grout base slab[J]. Engineering Geology, 2017, 218: 63-69.
- [12] ZHANG W G, GOH A T C, XUAN F. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 67-72.
- [13] BURLAND J B. Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: "Small is beautiful": the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 499-516.
- [14] KUNG GORDONT C, OU C Y, JUANG C H. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 304-319.
- [15] KUNG GORDONT C, HSIAO EVANC L, JUANG C H. Evaluation of a simplified small-strain soil model for analysis of excavation-induced movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(6): 726-736.
- [16] ZHANG W G, HOU Z J, GOH A T C, et al. Estimation of strut forces for braced excavation in granular soils from numerical analysis and case histories [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 286-295.

(编辑 胡玥)