

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.110



被动加固区参数变异性对软土深基坑 变形行为的影响

郑俊杰, 乔雅晴, 章荣军

(华中科技大学 岩土与地下工程研究所, 武汉 430074)

摘要:被动区加固是控制软土深基坑变形的有效措施之一,但加固区土体力学参数往往表现出极强的空间变异性,势必会给软土深基坑整体变形行为带来一定的不确定性。鉴于此,通过 FLAC^{3D} 软件建立了基坑开挖三维动态模型,基于 K-L 法生成了水泥土参数随机场,并进行了确定性与不确定性数值分析。重点比较了两种分析方法中地连墙最大水平位移与地表最大沉降的结果差距,统计了不确定性分析中变形指标的分布趋势,探讨了水泥土参数变异性强弱对不同厚度被动加固区加固效果的影响。结果表明:考虑水泥土材料参数空间变异性时,被动区加固存在临界加固厚度;被动加固区参数变异性的强弱对软土深基坑整体变形行为的影响有限,在评估软土深基坑的变形程度时,不必对加固区参数的空间变异性作特殊考虑。

关键词:深基坑;被动区加固;空间变异性;随机场;变形

中图分类号:TU753 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0001-08

Effect of spatial variability of engineering properties on holistic performance of passive zone improvement for deep excavation in soft soil

Zheng Junjie, Qiao Yaqing, Zhang Rongjun

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: Passive zone improvement is one of the most effective measures to control the deformation of deep excavation in soft soil. However, the soil mechanical parameters of improvement zone often show strong spatial variability, leading to the uncertainty of overall deformation behavior of deep excavation. Therefore, a three-dimensional model simulating the process of excavation is built by FLAC^{3D} software, random field models for cement-soil parameters are established based on K-L transformation, then deterministic and probabilistic analyses are conducted. The maximum horizontal displacement of diagram wall and the maximum ground surface settlement in both deterministic and probabilistic analyses are compared. Distribution patterns for the two deformation indicators are fitted, and the influence of coefficient of variation in cement-soil properties on the effect for different passive zone improvement thicknesses is also investigated. The results indicate that: a critical improvement thickness exists while

收稿日期:2019-05-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0800200);国家自然科学基金(51678267)

作者简介:郑俊杰(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程与隧道研究,E-mail:zhengjj@hust.edu.cn.

Received:2019-05-19

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0800200); National Natural Science Foundation of China (No. 51678267)

Author brief: Zheng Junjie (1967-), professor, doctoral supervisor, main research interests: geotechnical engineering and tunnel engineering, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

considering the spatial variability of cement-soil; the spatial variability of cement-soil has limited influence on the overall deformation behavior of deep excavation and needs no special consideration in holistic performance evaluation.

Keywords: deep excavation; passive zone improvement; spatial variability; random field; deformation

随着中国城市化进程不断加快,城市轨道交通系统的发展方兴未艾,地铁作为一种快速、大运量的公共交通方式,是城市轨道交通的一股重要力量。随着地铁建设线路增长,覆盖面扩大,地铁车站的施工环境也愈发复杂:一方面,地铁线路交错纵横,多线汇集,部分地铁站点为承担多线换乘功能,不断增大地铁基坑开挖深度^[1];另一方面,地铁交通网作为一种安全迅捷、承载量高的地下交通网络,主要用以连接城市的住宅、商业、文教与工业等区域,因此,地铁站多建于建筑物密集区域,其周边环境复杂,邻近设施密布,对深基坑工程的环境效应控制要求更为严格^[2]。对于中国沿海及中部地区广泛分布的深厚黏性土地层而言,当车站基坑开挖深度较深、开挖面积较大时,若支护结构变形与地层沉降控制不当,将严重影响周边既有设施。因此,在软土深基坑设计中,变形控制正逐步成为主流设计理念和首要考虑因素^[3-4]。

深基坑工程多采用水泥土加固被动区的方式进行变形控制,主要是通过高压旋喷桩、深层搅拌法等施工手段对深基坑基底及基底以下部分区域进行加固,从而提高土体承载力,增大土体模量,增强土体抗变形能力,进而控制基坑支护结构变形与地表沉降,常见的被动区加固方式有裙边加固与抽条加固。众多学者都对被动区加固的位移控制效果进行了分析,例如,侯新宇等^[5]分析了深层搅拌桩对超大深基坑的加固效果,结果表明,深搅加固可降低27%的墙体侧向位移,并有效控制坑底隆起;马海龙^[6]探讨了加固深度与宽度对基坑支护结构受力与变形的影响,给出了合理相对加固深度与宽度值;郑俊杰等^[4]针对裙边加固和抽条加固进行分析,得到了有效加固宽度和深度范围,并给出了工程设计建议。

但水泥土作为一种人工材料,其力学参数除受到原位土影响外,还与施工方法密切相关,尤其在深层施工条件下,水泥土搅拌均匀性降低且存在垂直度施工误差,力学参数具有很强的空间变异性。Honjo^[7]对日本广岛、横滨等港口水泥土深层搅拌桩的强度变异性进行了统计,结果显示水泥土强度

变异系数最高可达0.592;Navin^[8]对前人的研究成果进行了统计整理,得出深层搅拌水泥土的强度变异系数分布在0.342~0.790之间;由此可见,深层搅拌法施工下的水泥土具有较强的不均匀性,空间变异特征表现得十分明显。基于此,刘勇等^[9]同时考虑深层搅拌桩的强度空间变异性与桩身位置不确定性,对水泥土加固层整体加固效果进行研究,并得出其强度设计值应取为钻芯取样强度平均值与 t (折减系数)倍标准差的差值;Tsutomu等^[10]基于随机有限元法,研究了水泥土强度空间变异性对水泥土单桩竖向承载力的影响,并强调当随机场自相关长度与单桩半径长度相似时,桩的整体平均承载力会降至最低值。根据上述研究结果可知,水泥土力学参数的空间变异性对水泥土构件单桩强度或整体宏观性能的影响皆非常突出。但值得注意的是,前述研究都是以单一的水泥土构件作为研究对象,对于涉及被动区加固的软土深基坑整体“系统工程”而言,变形控制环节包括土方开挖、围护结构、内撑体系及被动区加固等多种措施,被动区加固只是诸多变形控制环节中的一环,水泥土力学参数空间变异性对水泥土构件宏观性能影响显著,并不一定意味着对基坑整体变形的影响同样显著。因此,被动加固区参数强空间变异性对软土深基坑整体变形行为的影响到底如何仍不得而知,在设计中应该如何考虑被动加固区参数强空间变异性也尚无定论。

鉴于此,本文通过数值模拟方法与随机场理论^[11-13],重点研究被动加固区参数强空间变异性对软土深基坑整体变形行为的影响程度及规律。具体内容包括:1)建立无加固区与被动区加固厚度(h)分别为1、2、3、5 m的深基坑开挖三维动态模型,并生成相应条件下的水泥土强度参数随机场;2)基于基准水泥土强度变异系数(COV)条件,对深基坑开挖模型进行确定性分析与不确定性分析,并对比两种分析下不同加固厚度基坑的整体变形规律;3)研究不同水泥土强度变异系数条件下各加固厚度深基坑的变形程度,分析加固区参数变异性强弱对不同加

固厚度深基坑整体变形行为的影响。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

深基坑动态开挖模型以武汉某实际深基坑工程为依托,基坑开挖典型断面图及所在地层条件如图 1 所示。

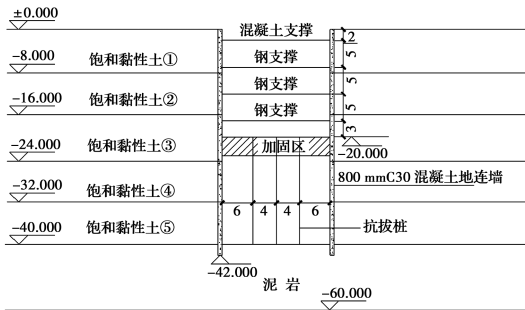


图 1 基坑典型断面图(单位:m)

Fig. 1 Typical section of the deep excavation (unit:m)

基坑开挖宽度和深度皆为 20 m,共分 5 次开挖,开挖深度依次为 2、5、5、5、3 m,并沿竖向依次架设 4 组水平支撑,纵向共设 7 组水平支撑,间距为 3 m。除第 1 组支撑采用截面为 600 mm×600 mm 的 C30 混凝土支撑外,其余皆采用钢支撑,钢支撑外径为 609 mm,壁厚为 16 mm,采用 Q235 钢;地下连续墙厚 800 mm,埋深 42 m,底部入岩,采用 C30 混凝土浇筑;根据以往工程及文献资料总结,基坑开挖水平影响范围约为开挖深度的 3~4 倍,深度影响范围约为开挖深度的 2~4 倍^[14],基于此,基坑模型两侧水平影响范围取为开挖深度的 6 倍,即 120 m,横向计算域总长 261.6 m;深度影响范围取为开挖深度的 3 倍,即 60 m,竖向计算域总长 60 m;模型纵向取为 21 m;加固厚度分别取为 1、2、3、5 m,加固厚度与强度参数以外的参数设置保持一致,以便进行工况对比;基坑底部设 7 组平行抗拔桩,分别位于基坑中部、内侧距基坑边界 6 m 处,相邻抗拔桩纵向间距为 3 m,与基坑水平支撑保持一致。模型整体计算域为 261.6 m×60 m×21 m。

1.2 参数设定

模型共分为 6 个土层,地面以下 40 m 为 5 层强度不同的饱和黏性土,地下 40~60 m 为基岩层。其中,饱和黏性土层、加固区与基岩均采用 Mohr-Coulomb 模型,地连墙采用弹性模型,水平支撑与抗拔桩采用结构单元模拟,确定性分析中各层土体参

数及支护结构参数见表 1。不确定性分析中部分土体参数为非定值,由随机场理论表征,具体见后文。

表 1 土体及支护结构力学参数

Table 1 Mechanical parameters of struts and soils

土体及 支护结构	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	E/MPa	μ	C_u/kPa	$\varphi_u/(^\circ)$
土层①	18		20	0.45	20	2
土层②	18		40	0.45	40	2
土层③	18		60	0.45	60	2
土层④	18		80	0.45	80	2
土层⑤	18		100	0.45	100	2
泥岩		24	1.5×10^3	0.23	112.6	26
加固区	18		1.2×10^3	0.30	1.5×10^3	5
混凝土支撑			2.0×10^4	0.20		
地连墙			2.0×10^4	0.20		
钢支撑			78.5	1.3×10^5	0.25	

注:土层①~⑤对应饱和黏性土①~⑤; γ 表示土体重度; ρ 表示密度; E 表示模量; μ 表示泊松比; C_u 表示土体不排水强度; φ_u 表示土体内摩擦角。

1.3 网格划分

模型网格划分及整体网格疏密情况见图 2。为准确分析开挖过程中深基坑及周边环境的整体变形行为,对基坑开挖面及左右两侧 40 m 进行网格加密;为提高随机场模拟精度,对加固区网格进行再加密,整体模型共计 100 m 网格加密区。其余网格由密至疏,通过接触面相连。纵向网格均匀划分。

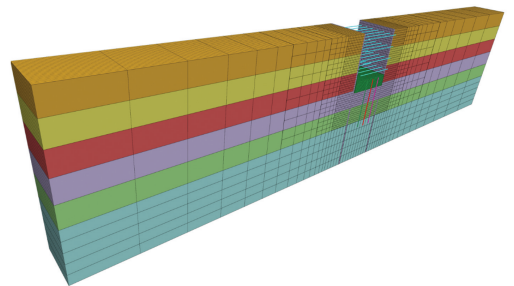


图 2 模型网格划分

Fig. 2 Model meshing

2 水泥土参数变异性随机场表征

水泥土作为一种人工材料,其空间变异性主要有两个来源:一是原位土材料参数固有的空间变异性影响;二是水泥土施工工艺中的不确定性,如深层搅拌桩的不均匀搅拌、桩身位置的不确定性等,因此,水泥土参数的变异性具有与天然土体参数变异

性不同的统计特征。鉴于此,在广泛查阅文献及工程资料的基础上,考虑水泥土不排水强度的4个变异系数COV取值:0.2、0.4、0.6、0.8,并取0.4作为基准变异系数,假定不排水强度变异性服从对数正态分布,均值为1.5 MPa。

相较于水泥土不排水强度的强变异性,水泥土摩擦角与重度的变异性较小,故忽略其重度与摩擦角的变异性,重点关注水泥土强度参数的变异性,并将其他土体参数视为定值。根据以往文献总结,水泥土的模量与抗拉强度等强度参数可视为与不排水强度相关,因此,在随机场生成阶段仅考虑不排水强度的参数影响,再通过相关关系得到模量与抗拉强度的随机场模型。每一个水泥土强度参数变异系数COV对应的工况实现次数皆为1000次,每个加固厚度 h 对应4个COV,加固厚度 h 分别取为1、2、3、5 m。

3 结果分析与讨论

3.1 确定性分析

对无被动区加固与被动区加固厚度 h 分别为1、2、3、5 m的基坑开挖变形响应分别进行确定性分析,因基坑模型在几何上为轴对称模型,故分析仅取基坑左侧两种典型变形响应:地连墙水平位移 δ 与地表沉降 s 进行统计。开挖结束后, δ 随地连墙埋深 z 的变化结果如图3所示, s 随沉降点距基坑边界距离 d 的变化结果如图4所示。地连墙最大水平位移 δ_{\max} 与地表最大沉降 s_{\max} 见表2。

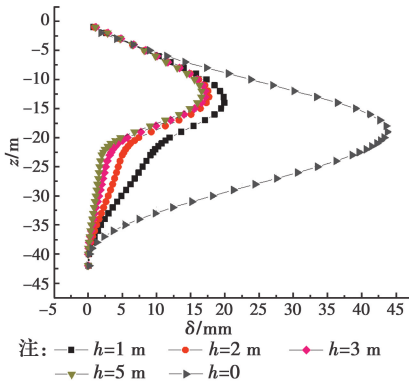


图3 确定性分析中地连墙水平位移

Fig. 3 Horizontal displacement of diaphragm wall in deterministic analysis

表2 确定性分析统计结果

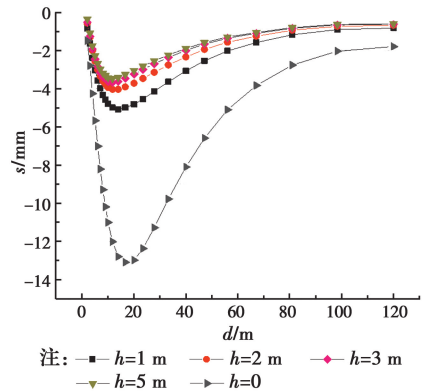


图4 确定性分析中地表沉降

Fig. 4 Ground surface settlement in deterministic analysis

Table 2 Deterministic analysis statistics

h/m	δ_{\max}/mm	s_{\max}/mm
0	43.75	13.09
1	19.93	5.07
2	17.66	4.03
3	17.10	3.68
5	16.60	3.55

从确定性分析的图表统计结果可以看出:1)被动区加固有效地控制了基坑的变形与沉降;无被动区加固的基坑, δ_{\max} 达到了4 cm以上, s_{\max} 为1.3 cm,进行被动区加固后, δ_{\max} 皆在2 cm以下, s_{\max} 控制在6 mm以内,相较于侯新宇等^[5]分析中27%的降幅,被动区加固对本工况下的基坑开挖模拟变形控制效果更为显著,降幅达到50%以上。这一方面是因为在本工况模拟下,基坑周边土体强度较弱,开挖过程中变形较大,另一方面,基坑开挖深度较之参考文献^[5]所述工况更深,地连墙支护结构厚度更薄,刚度更弱,因此,地连墙的加固效果表现更为明显;2) h 的改变对各变形响应最大值的位置并无明显影响,对加固区的位移控制效果也仅表现出一定程度的影响。随着 h 增大,基坑开挖各项变形响应虽在整体上呈现出减小的趋势,但当 h 达到3 m后,继续增大 h 对各变形的控制并未有明显的提升。

基坑两种典型变形响应对加固厚度 h 的敏感性也略有不同。地连墙水平位移 δ 在 h 较小时表现得较为敏感, h 由1 m增至2 m时, δ_{\max} 降低2 mm以上,且开挖面以下的水平位移相较于最值更为敏感,当 h 增至2 m以上后,则逐渐趋于稳定;地表沉降 s 对 h 的改变敏感性很低, h 由1 m增至5 m, s_{\max} 仅降

低 1.5 mm。相较之下, δ 对 h 的变化更敏感,但从整体而言,两种典型变形响应都对 h 的变化不敏感。其可能原因是:在软土深基坑的整体支护系统中,共设有 7 根混凝土支撑、21 根钢支撑,并埋设了 21 根抗拔桩,其支护结构体系整体刚度较大,加固区强度的改变在整个支护系统中的影响有限。

3.2 基准变异系数条件下的不确定性分析

依据 Liu 等^[15]、Chen 等^[16]的统计结果,工程中水泥土强度参数变异系数 COV 多分布在 0.4 附近,故不确定性分析的基准 COV 取为 0.4。对基准 COV 工况下的计算数据进行统计,并分别进行正态分布与对数正态分布拟合,结果显示:两种分布形式对基坑开挖典型变形响应最大值的统计结果拟合度均较高,且拟合曲线分布形态十分接近,相较之下,对数正态分布的拟合效果误差更小,效果稍优。图 5 和图 6 为基准 COV 条件下 $h=3$ m 时典型变形指标的对数正态分布拟合图。

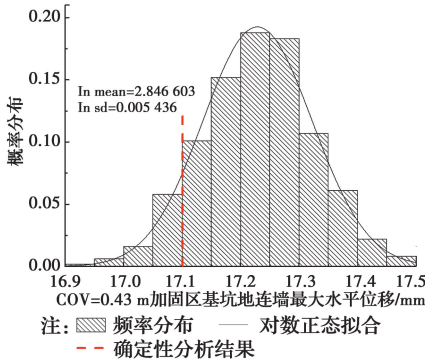


图 5 地连墙最大水平位移直方图 (COV=0.4, $h=3$ m)

Fig. 5 Histogram of the maximum horizontal displacement of diaphragm wall (COV=0.4, $h=3$ m)

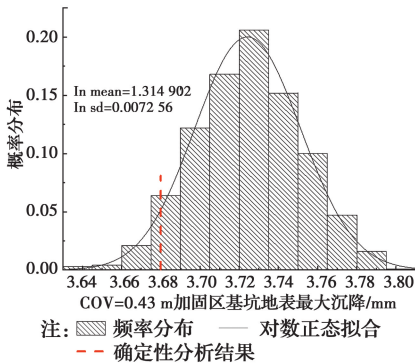


图 6 地表最大沉降直方图 (COV=0.4, $h=3$ m)

Fig. 6 Histogram of the maximum ground surface settlement (COV=0.4, $h=3$ m)

由于变形响应最值统计结果可视为符合对数正

态分布,根据 3σ 原则,统计出了基准 COV 条件下不同加固厚度深基坑开挖两种变形响应最大值的均值 m 、变异系数 COV_a 与 3σ 区间,结果见表 3。由表中对基坑开挖变形指标的统计结果可以看出,当考虑水泥土强度空间变异性时, δ_{max} 与 s_{max} 仍随着 h 的增大而减小,且减小规律与确定性分析结果类似:当 h 低于 3 m 时, h 的增大对变形控制效果的提升较为明显,当 h 高于 3 m 后,继续增大 h ,各变形指标并无显著降低。但对于 h 相同的基坑,不确定性分析的均值 m 略大于确定性分析结果,因此,忽略水泥土变异性会在数值上低估基坑的变形。

表 3 COV=0.4 时数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results with COV=0.4

h/m	δ_{max}			s_{max}		
	m/mm	$COV_a/\%$	3σ 区间/ mm	m/mm	$COV_a/\%$	3σ 区间/ mm
1	20.07	0.38	19.84~20.30	5.18	0.46	5.11~5.25
2	17.72	0.49	17.46~17.98	4.12	0.52	4.06~4.18
3	17.23	0.54	16.95~17.51	3.72	0.73	3.64~3.80
5	16.79	1.61	15.98~17.60	3.62	2.17	3.38~3.86

综上所述,当 h 较小时, h 的增大对基坑开挖变形指标的控制有利,不考虑水泥土力学参数空间变异性的确定性分析相较于不确定性分析,虽然会低估基坑的变形,高估水泥土加固区的控制作用,但整体而言,水泥土力学参数变异性引起的基坑变形指标不确定性很小,被动加固区参数空间变异性对软土深基坑整体变形行为的影响基本可以忽略不计。过大的 h 并未显著提高加固区的变形控制效果,受到水泥土强度变异性的影响却更强,因而存在着更大的不确定性,且资源成本高,经济效益低,在无特殊要求的基坑设计中,不建议采用。

3.3 水泥土强度变异系数的影响分析

水泥土强度变异系数影响分析的 COV 取 0.2、0.4、0.6、0.8,包含了已有文献的统计范围^[17-20]。表 3 与表 4 分别统计了不确定性分析中这两种变形响应最大值的均值 m 、变异系数 COV_a 与 3σ 区间。

表4 不同 h 与 COV 下的概率分析统计结果Table 4 Probability analysis statistics with different h and different COV

h/m	COV	δ_{\max}			s_{\max}		
		m/mm	$COV_a/\%$	3σ 区间/ mm	m/mm	$COV_a/\%$	3σ 区间/ mm
1	0.2	19.98	0.21	19.85~20.11	5.13	0.12	5.11~5.15
	0.4	20.07	0.38	19.84~20.30	5.18	0.46	5.11~5.25
	0.6	20.38	0.89	19.83~20.92	5.26	1.06	5.09~5.43
	0.8	20.46	1.03	19.83~21.09	5.29	1.26	5.09~5.49
2	0.2	17.69	0.28	17.54~17.84	4.08	0.18	4.06~4.10
	0.4	17.72	0.49	17.46~17.98	4.12	0.52	4.06~4.18
	0.6	17.77	0.91	17.28~18.26	4.19	1.14	4.05~4.33
	0.8	17.85	1.07	17.28~18.42	4.24	1.40	4.06~4.42
3	0.2	17.14	0.32	16.98~17.30	3.69	0.43	3.64~3.74
	0.4	17.23	0.54	16.95~17.51	3.72	0.73	3.64~3.80
	0.6	17.41	0.97	16.90~17.92	3.73	1.31	3.58~3.88
	0.8	17.53	1.24	16.88~18.18	3.95	1.69	3.75~4.15
5	0.2	16.68	0.87	16.24~17.12	3.58	1.17	3.45~3.71
	0.4	16.79	1.61	15.98~17.60	3.62	2.17	3.38~3.86
	0.6	17.07	2.46	15.81~18.33	3.67	3.12	3.33~4.01
	0.8	17.13	2.68	15.75~18.51	3.74	3.59	3.34~4.14

横向分析表中数据,整体而言,当 h 相同时,随着 COV 的增大,加固区对基坑的加固效果呈现出减弱的趋势,各项变形指标的均值 m 逐渐增大,变形指标的变异性也逐渐增强, 3σ 区间长度增长,与确定性分析结果的差值增大。

当 COV=0.2 时,水泥土强度变异性小,变形指标变异性低, m 与确定性分析结果最为接近;随着 COV 的增大,各变形指标的 COV_a 也逐渐增大,当 COV 增大 4 倍,至 0.8 时, COV_a 增大近 3 倍,表明水泥土强度空间变异性越强,对加固区位移控制效果的影响越大,变形分析的不确定性越强,与确定性分析结果的差值越大;除此之外, COV_a 随 COV 非均匀线性增大,在同一加固厚度条件下,当 COV 由 0.4 增至 0.6 时, COV_a 的增长速率最快。

纵向分析表中数据,当 COV 相同时,随着 h 的增大,尽管 m 逐渐减小, COV_a 却逐渐增大, 3σ 区间长度逐渐增大,且 h 越大, COV_a 增长速率越大。

当 h 较低时, COV_a 仅随 h 略有增长,但当 $h=5$ m 时, COV_a 相较于 $h=3$ m 时的 COV_a 成倍增长,

3σ 区间长度也快速增大,这表明 h 越大,水泥土用量越多,水泥土强度参数的空间变异性对被动区加固效果的影响越明显,分析结果的不确定性越强。但在部分 COV 条件下, $h=2$ m 时,深基坑变形指标的 3σ 区间长度却小于 $h=1$ m 时的 3σ 区间,这是因为当 h 较低时,增大 h ,水泥土加固区对基坑整体变形行为的控制效果提升较为明显, m 降低幅度相对较大,但进一步提高 h ,对基坑变形控制的有利影响基本可以忽略不计,空间变异性带来的分析结果不确定性却愈发明显。

然而,从整体分析结果来看,即使是在 $h=5$ m、COV=0.8 的最敏感条件下,变形指标的最大变异系数 COV_{\max} 也仅为 3.59%,远低于水泥土强度变异系数 COV,变形指标的最大 3σ 区间长度也不足 3 mm;在大多数工况下,变形指标 3σ 区间长度不足 1 mm,与确定性分析结果的差异小于 0.5 mm。因此,加固区力学参数变异性的对软土深基坑开挖变形指标的影响十分有限,在分析软土深基坑的整体变形行为时,可以不予考虑。

综上所述,水泥土强度参数的空间变异性对不同厚度加固区的加固效果虽有影响,但其影响基本可以忽略不计,在评估软土深基坑的变形程度时,不必对被动加固区参数的空间变异性作特殊考虑。

4 结论

结合基坑开挖三维动态模型与被动加固区随机场模型,对不同水泥土强度变异系数、不同加固厚度下的深基坑变形指标进行确定性与不确定性分析,所得结论如下:

1) 被动区加固对软土地区深基坑开挖的整体变形控制效果显著,是十分有效的位移控制措施,但被动区加固存在一个临界加固厚度,超过临界厚度后,继续增大加固厚度对变形控制效果提升不明显。

2) 随着水泥土强度参数变异系数的增大,软土深基坑变形指标的变异性增强,分析结果的不确定性增大。但整体而言,由被动加固区力学参数变异性引起的基坑变形指标不确定性很小,远低于加固区力学参数自身的不确定性。

3) 尽管既有文献已证实水泥土力学参数的空间变异性对于水泥土加固层自身工作性状的影响十分

显著,但对于涉及被动区加固的软土深基坑“系统工程”而言,在工程常见厚度范围内,被动加固区参数变异性的对软土深基坑整体变形行为的影响有限,在评估软土深基坑的变形程度时,不必对被动加固区参数变异性作特殊考虑。

参考文献:

- [1] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
LIU N W, CHEN Y T, GONG X N, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576. (in Chinese)
- [2] 王曙光. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup1): 474-477.
WANG S G. Deformation control of excavation engineering with complicated surroundings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup1): 474-477. (in Chinese)
- [3] 康志军, 谭勇, 邓刚, 等. 被动区土体加固对深基坑变形影响的研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 119-123.
KANG Z J, TAN Y, DENG G, et al. Impact of soil reinforcement in passive zone on the deformation behaviors of deep excavation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 119-123. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHENG J J, ZHANG R J, DING L Y, et al. Displacement control effects and parameter analysis of passive zone improvement of foundation pits [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1042-1051. (in Chinese)
- [5] 侯新宇, 刘松玉, 童立元. 被动区深搅桩加固对地铁深基坑变形的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 180-184.
HOU X N, LIU S Y, TONG L Y. Effect of deep mixing pile reinforce on deformation of deep foundation pit in metro station in passive zone [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 180-184. (in Chinese)
- [6] 马海龙. 基坑被动区加固对支护影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 573-578.
MA H L. Influence of excavation passive zone reinforcement on bracings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup2): 573-578. (in Chinese)
- [7] HONJO Y. A probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method [J]. Soils and Foundations, 1982, 22 (1): 23-38.
- [8] NAVIN M P. Stability of embankments founded on soft soil improved with deep mixing method [D]. The Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [9] 刘勇, 李福豪, 陈健, 等. 深层搅拌水泥土基底加固层的三维随机有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (8): 1542-1548.
LIU Y, LEE F H, CHEN E J, et al. Three-dimensional random finite element analysis of cement-admixed soil slab for stabilization of foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1542-1548. (in Chinese)
- [10] TSUTOMU N, JUNICHI K. Effects of spatial correlation on the compression behavior of a cement-treated column [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (8): 1346-1359.
- [11] VANMARCKE E. Random fields: Analysis and synthesis [M]. Cambridge: MIT Press, 1983.
- [12] 蒋水华. 水电工程边坡可靠度非侵入式随机分析方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
JIANG S H. A non-intrusive stochastic method for slope reliability in hydroelectricity engineering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [13] LI D Q, ZHENG D, CAO Z J, et al. Response surface methods for slope reliability analysis: Review and comparison [J]. Engineering Geology, 2016, 203: 3-14.
- [14] 王威, 王磊, 马东辉, 等. 不同保护措施下地下管线受邻近基坑开挖影响的三维有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(7): 939-946.
WANG W, WANG L, MA D H, et al. 3D FEM

- analysis of buried pipeline affected by excavation of adjacent foundation pits under different protection measures [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2009, 35(7): 939-946. (in Chinese)
- [15] LIU Y, CHEN E J, QUEK S T, et al. Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab [J]. Géotechnique, 2015, 65(10): 851-865.
- [16] CHEN J, LEE F H, NG C C. Statistical analysis for strength variation of deep mixing columns in singapore [C]//Geo-Frontiers Congress 2011, March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA, 2011.
- [17] SRIVASTAVA A, BABU G L S. Variability and reliability in estimating design strength of in-situ ground stabilized with deep mixing technique [C]// Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control, Wollongong, Australia: 2012: 1271-1276.
- [18] HOSOMI H, NISHIOKA S, TAKEI S, et al. Method of deep mixing at Tianjin Port [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 1996: 491-494.
- [19] MIZUTANI T, KANAI S, FUJII M. Assessment of the quality of soil-cement columns of square and rectangular shaped formed by a deep mixing method [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 1996: 637-642.
- [20] WU S H, OU C Y, CHING J, et al. Reliability-based design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (5): 594-603.

(编辑 王秀玲)