DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.07.017 2013,30(07):86-90,100

基坑被动区阶梯式加固尺寸对桩位移影响分析

屈若枫[1],马 郧[1,2],徐光黎[1],胡小庆[1]
(1.中国地质大学 工程学院,武汉 430074;2.中南勘察设计院(湖北)有限责任公司,武汉 430074)

摘要:为研究深基坑被动区阶梯式加固尺寸对桩位移的影响,在提出被动区阶梯式加固概念的基础上,以某大楼基坑工程为背景,以现场试验数据为基础,针对加固形状及阶梯式加固尺寸等对桩位移的影响因素,建立数值模型并进行模拟。结果表明:数值模拟可以较好地分析桩支护体系的实际变形规律;被动区加固对支护桩位移影响是非常显著的;阶梯型加固尺寸存在最优参数比,即当各阶加固宽度与深度相当时,加固效果最理想;被动区阶梯式加固相比其他加固形式有明显的优势,具有较强的适用性。

关 键 词:基坑;软土地基;阶梯式;被动区;位移影响;数值模拟
中图分类号:O319.56 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)07-0086-05

1 研究背景

随着武汉城市建设的快速推进,由高层建筑和地下建筑工程带来的深基坑开挖与支护技术得到了前所未有的发展。武汉地区长江Ⅰ—Ⅲ阶地的基坑工程开挖地层主要是淤泥质土、淤泥或软黏性土,其主要特征表现为软—流塑状态,土质软弱;若基坑支护设计不当,易造成过大的支护体系体侧向变形、周围地表沉陷等诸多问题,给该区域深基工程的设计、施工均造成较大困难。如何去避免这些问题的产生,尤其是如何去控制支护结构位移变化,保证基坑稳定性,其对基坑工程的设计提出了很高的要求。

大量的工程实践及理论分析证明:基坑被动区加固技术能够很好地改善基坑坑底土体的物理力学性质,起到减小支护结构的内力、水平位移及地面沉降的作用,能够提高被动区土体的侧向抗力,减小基坑卸载的变形。

基坑被动区土体加固技术具备多样性、广泛性、重要性、紧迫性等多种典型特征。因此,自21世纪以来,加固技术引起了很多专家及学者的高度关注,并已经展开了一些研究。2003年2月在美国新奥尔良召开的由美国土木工程学会(ASCE)和国际深基础协会(DFI)联合主办的第三届注浆与地基加固国际会议上,从来自20多个国家的127篇论文中可见,加固技术正发挥着越来越重要的作用[1-2];国内寿旋等人[3-4]分析了基坑被动区土体的深度(高度)及强度对围护结构变形的影响;秦爱芳[5]以卸荷试验为基础,就基坑工程中被动区土体的合理加固深度进行了研究。就目前基坑坑内加固研究成果来看,现行的很多加固方案,不论是对加固区域形状、加固宽度和深度等影响因素方面,还是对主要参数取值问题,其坑内加固评价体系还不够完善。

因此,本文以武汉地区某大楼建筑工程为实例,采用数值模拟分析,率先在该区域内提出阶梯式基坑被动区加固的方案,考虑了加固形状及阶梯式加固尺寸参数对桩位移控制的影响,并与实际监测数据进行了相关对比研究;通过系统地分析被动区加固参数对桩位移的影响,进一步优化被动区加固参数,为武汉地区今后类似工程的深基坑被动区加固设计和施工提供经验与指导。

2 工程概况

2.1 工程布局

该工程为武汉某大楼建筑工程,总建筑面积37 128 m^2,其中地上建筑面积32 000 m^2,地下建筑面积约4 120 m^2。地上20层,地下2层,采用钻孔灌注桩基础。兴建的地下室基坑总体形状呈长方形,东西向长约85 m,南北向宽约65 m。基坑总周长约300 m,基坑面积约5 150 m^2。支护桩采用钻孔灌注桩工艺,桩身砼强度均为C30;主筋均采用

收稿日期:2012-12-07;**修回日期**:2013-01-17
基金项目:武汉市城建科研项目(201223)
作者简介:屈若枫(1988-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事岩土体稳定性、地基处理及基坑工程等方面的研究工作,(电话)13667109390(电子信箱)quruofeng@hotmail.com。

HRB400。基坑平面布置图如图 1。

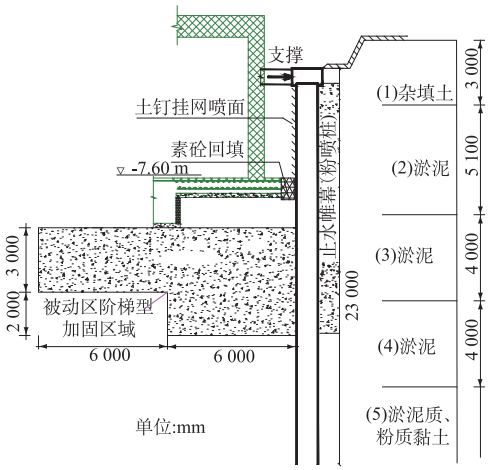


图 1　基坑典型剖面

Fig. 1　Vertical section of the foundation pit

2.2　工程地质条件

拟建场地地貌上属典型的长江Ⅰ—Ⅲ(高)阶地,依勘探点孔口标高计,拟建场地现地面标高变化在19.90～21.07 m之间,地势相对平坦。场区地层上部为黏性土,下部为砂性土,土的粒度由上而下逐渐由细变粗。下伏基岩为白垩－下第三系粉砂质泥岩。本场地分布有上层滞水及孔隙承压水 2 种类型地下水;上层滞水主要赋存于杂填土及淤泥层中;孔隙承压水主要赋存于粉土、粉砂夹粉质年土、粉细砂、细砂及卵石类土中。典型支护结构剖面、地质剖面以及主要尺寸如图 1 所示。

2.3　被动区阶梯式加固

2.3.1　被动区阶梯式加固的概念

被动区阶梯型加固指的是针对软弱地基,提高被动侧土体的强度和抵抗变形能力,为改善基坑所处地层的土体力学性能,提高被动区土体的侧向抗力,保证基坑开挖的安全稳定;进而在基坑被动区,根据具体的工程地质条件,在桩基的背荷侧对土体实行加固深度、加固宽度不统一的加固形式。

2.3.2　被动区阶梯式加固方案

该工程周边环境均非常严峻,基坑除西侧为空地外,其它三侧均有建筑物,多紧临基坑边线,且建筑物基础形式均较差,为静压方桩、锚杆静压桩,该桩型的抗剪、抗变形能力均较差,对基坑变形控制要求非常高。除了常规的支护方式,比如排桩、混凝土角撑、坑内被动区加固、土钉挂网喷面、喷锚网、紧临建筑物地基加固等多种联合支护手段,还要辅助坡顶减载、止水帷幕、中型井点降水等手段,确保支护体系的完善。

为有效提高被动区土体的力学性质,控制好桩身位移,因此本基坑工程在坑底部位采取了坑内加固处理措施,坑内加固厚度根据每段坑内淤泥厚度的不同而不同。目前国内比较流行的加固竖向形状主要包括坑底板式、多层式、满坑式、阶梯式等多重形式[6],但鉴于武汉地区具备典型的长江Ⅰ—Ⅲ阶地特性,其复杂的地质条件都对基坑支护,尤其是保证加固区与支护桩间的充分咬合提出了更高的要求,既要保证加固的作用最大化,又要保证经济的合理化。于是在这样的背景下,本文提出了对该工程在其被动区加固采取阶梯型加固。结合该工程地区特殊地质情况,该工程内土体加固采用粉喷桩加固,桩间距为 450 mm×425 mm,加固宽度均为 12 m,加固厚度按二级台阶(即为阶梯型加固)设计,每级台阶宽为 6 m。

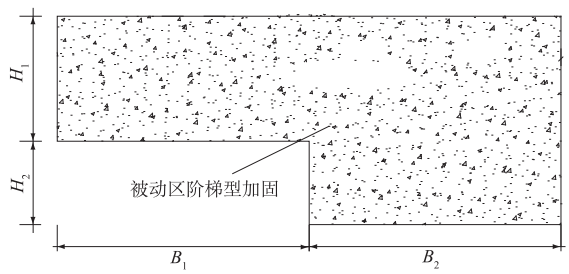


图 2　被动区加固区域剖面图

Fig. 2　Profile of strengthened soil in passive zone

阶梯型加固区域剖面图如图 2 所示,图中 H_1 = 3 m,H_2 = 2 m,B_1 = 6 m,B_2 = 6 m。

由于该场区上部各土层厚度、承台底标高及场地周边环境在场地内分布有一定的变化,为慎重起见,将基坑周边概化成 10 个最不利地质剖面分别进行数值计算,根据岩土工程详细勘察报告和《湖北省基坑工程技术规程》(DB42/159—2004)[7],结合相关工程实践经验,拟定基坑支护设计有关参数取值见表 1。

表 1　土层物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical properties of soil strata

土层名称	天然重度/(kN·m^{-3})	弹性模量 E/MPa	泊松比	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
(1)杂填土	18.0	75.0	0.45	6.0	14.0
(2)淤泥	17.2	70.0	0.46	10.5	4.5
(3,4)淤泥质粉质黏土夹粉土	17.8	22.5	0.43	12.0	6.5
(5)粉土、粉砂夹粉质黏土	18.5	39.5	0.42	8.0	17.0
粉细砂	22.0	50.5	0.38	0.0	30.0
加固土	18.0	300.0	0.33	60.0	5.0

3　数值模拟模型

FLAC 采用的是有限差分法计算,内部网格单

元为四边形。在模型材料的本构模型选择上,根据实际设计文件,将基坑顶部的横撑采用梁单元(Beam 单元),梁单元采用线弹性本构模型,弹性模量取 30 GPa、泊松比为0.20、重度 25 kN/m^3;土体及粉喷桩加固体采用以 Mohr-Coulomb 屈服条件为破坏准则的弹塑性模型,各地层参数均依据实测数据如表 1。

为了减少边界效应对几何模型的影响,在计算模型简化原则上:本基坑实际长71.5 m,宽 58 m,基坑几何形状基本为矩形,具对称性,因此从中间取剖面,建立平面对称模型。

基坑区域为研究区域,基坑区域网格取得较密,而离基坑较远的区域网格变大。模型左右边界固定水平位移边界条件,模型底部采用固定竖直位移边界条件。由于采用对称模型则在支撑梁单元与对称轴的交点处限制其 x,y 方向的位移及 xy 平面内的转动位移。

为方便计算,本文建模前作如下假设[8-9]:①不计基坑开挖的过程;②地表和各土层均呈水平层状且匀质;③不考虑降水因素的影响。建立模型如图 3,图 3 是数值模拟中的模型网络划分图。

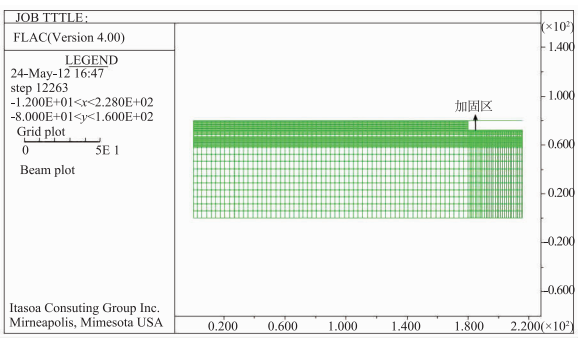


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical simulation model

4 数值模拟与实测结果比较分析

在建立基坑被动区的加固 FLAC 模型的基础上,本文讨论了加固区域的深度、宽度、形状等参数对支护结构位移的影响(被动区加固区域剖面图如图 2,令 $H = H_1 + H_2$,$B = B_1 + B_2$,以便后面讨论),在模型中,为了更好地反映支护桩位移的变化规律,选择桩埋深 h 为 0,3.9,7.8,10.8,11.8,14.3,18.2,21.7 m等 8 个节点为位移监测点,并将计算值与支护结构的实测位移进行了对比分析,验证数值模拟的合理性。

4.1 实测桩位移及其力学试验分析

为了更好地评价被动区加固土体对支护体系的影响,施工期间分别对基坑进行了坡顶位移及沉降、边坡的测斜、周边道路位移及沉降、周边建(构)筑物的沉降、支护桩位移及应力、支撑结构的变形及应力等的监测。

结合工程实例,在力学试验中,本文选取 CX1,CX2,CX3,CX4,CX5,CX6 等 6 处设立的测斜点,根据实际监测得的结果,做出了不同测点处支护体系水平位移分布规律图。图 4 为在阶梯型加固(加固区域尺寸为 3 m×6 m+5 m×6 m)的前提下,现场 6 处典型斜测点处支护体系水平位移同深度的关系曲线图,图 5 为不同测点处支护桩最大侧向位移。

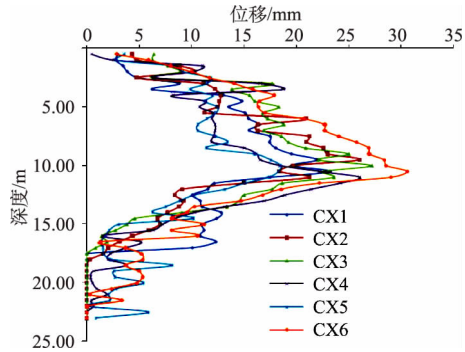


图 4 不同测点处支护桩侧向位移分布规律

Fig. 4 Distribution of lateral displacement at different measuring points of the supporting piles

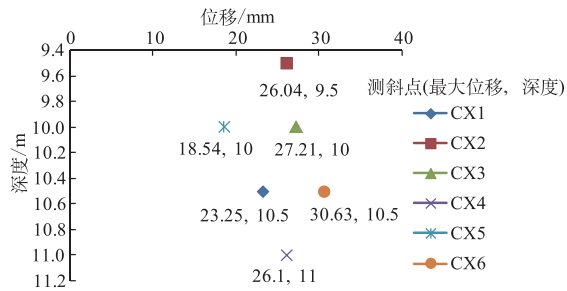


图 5 不同测点处支护桩最大侧向位移

Fig. 5 Maximum lateral displacement at different measuring points of the supporting piles

通过图 4、图 5,可看出支护桩的结构位移在深度 h 为 0 时,各测点位移均较小,可以认为没发生变化;随着 h 变大,水平位移渐渐变大,当增大到 10 ~ 11 m 时,即为0.4 ~ 0.6倍桩长时水平位移达到最大,最大的位移在18.54 ~ 30.63 mm区间内;当 h > 10 m 时,水平位移渐渐变小,位移改变不明显;当 h = 18 ~ 23 m 时,位移变化逐渐减小至 0,即在桩底端附近的位移变化为 0;很明显看出,各测点的位移变化规律基本一致。

从图 6 可以看出,在桩身应力计埋深为 0 m 时,即在桩顶部位时,桩后土压力累计变化为 0,也就是桩顶处桩后土压力基本无变化;在桩身应力计埋深在 10 m 左右时,即为0.4 ~ 0.6倍桩长时桩后土压力

累计变化最大;在桩身应力计埋深 $h>10$ m 时,桩后土压力累计变化趋势呈现缓慢减小,最后趋近 0 的状态。综上研究表明:不同测点处桩后土压力变化规律同支护体系水平位移分布规律的关系基本一致,从侧面反映了不同测点处支护体系水平位移监测的正确性。

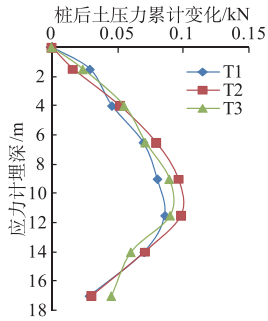


图 6　不同测点处桩后土压力变化规律

Fig. 6　Distribution of soil pressure of pile at different measuring points

4.2　阶梯式被动区加固尺寸影响分析

在研究阶梯式被动区加固尺寸对支护体系水平位移的影响分析时,本文保持 H,B(据武汉地区一般的加固深度和宽度,取值 $H=5$ m,$B=12$ m。)不变,拟定以下 6 种模型尺寸,详见表 2。

表 2　加固模型尺寸

Table 2　Reinforcement model size　　m

模型类型	A	B	C	D	E	F
加固尺寸	$H_1=0$ $H_2=0$	$H_1=3$ $H_2=2$ $B_1=6$ $B_2=6$	$H_1=3$ $H_2=1$ $B_1=6$ $B_2=6$	$H_2=0$ $B_1=0$ $H=5$	$H_1=2.5$ $H_2=2.5$ $B_1=6$ $B_2=6$	$H_1=2.5$ $H_2=2.5$ $B_1=4$ $B_2=8$

图 7 为阶梯式加固尺寸对支护体系水平位移的影响关系曲线。通过各种情况对桩位移的影响对比分析,明显看出:在桩顶附近,由于支撑的存在,各种情况下桩的水平位移均较小;而随着距桩顶距离的增大,支撑的影响逐渐减小,桩的水平位移逐渐增大,在 0 ~ 10 m 范围内,桩的水平位移变化很快;在 10 m 左右即0.4 ~ 0.6倍桩长时,各种情况下的水平位移达到最大。同时,将图 7 与图 4 不同测点处支护桩侧向位移分布规律对比,二者变化规律一致,说明计算结果具备正确性和可靠性。

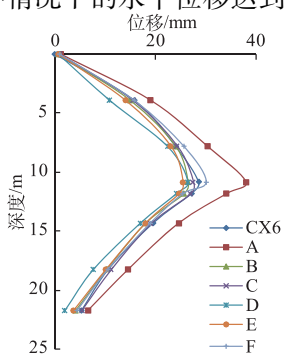


图 7　阶梯式加固尺寸对支护体系侧向位移的影响

Fig. 7　Influence of the size of stepped reinforcement on lateral displacement of supporting structure

图 8 为 A,B,C,D,E,F 6 类模型情况下加固尺寸对桩最大侧向位移的影响对比图,现场实际监测最大位移为30.63 mm;A 种情况下即未加固时,桩位移最大,为38.06 mm;E 种情况下即 $H_1=H_2=2.5$,$B_1=B_2=6$ 时,桩位移为 25.42 mm,仅比最小位移25.12 mm大0.30 mm,加固效果可等效。

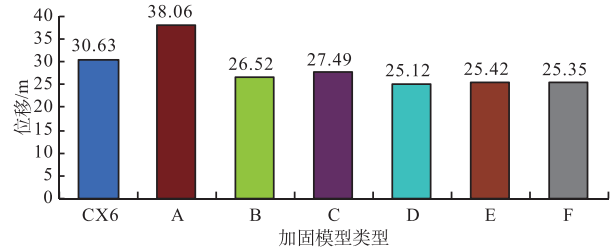


图 8　加固尺寸对桩最大侧向位移的影响

Fig. 8　Influence of the reinforcement size on the maximum lateral displacement of pile

4.3　被动区加固形状的影响分析

在研究被动区加固形状对支护体系水平位移的影响分析时,就加固形状分别选取长方型(长方形尺寸为 5 m × 12 m 即为 D 类模型)和阶梯型(阶梯型尺寸为 3 m × 6 m + 5 m × 6 m 即为 B 类模型)2 组方案进行对比分析,并且将以上二者再与实际测斜结果对比分析。

图 9 为在阶梯型和长方形加固时,支护体系水平位移的变化规律。通过对比分析,可看出支护桩的水平位移随着深度的不断变化,各测点位移基本没发生变化;二者曲线基本重合,说明在这 2 种情况下产生的加固效果相同。D 种情况时($H=5$ m),最大位移为 26.5 mm; B 种情况($H_1=3$ m,$H_2=2$ m),最大位移为26.52 mm,位移仅比 D 种情况高0.075%,其差值基本可以忽略不计。

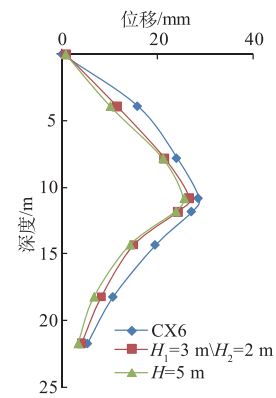


图 9　加固形状对支护体系侧向位移的影响

Fig. 9　Influence of the shape of reinforcement on the lateral displacement of supporting structure

因此,阶梯型加固能够更加充分的发挥加固的效果,使得工程经济更加合理,更加符合武汉地区特殊地质条件的工程需求。

综上所述,阶梯式被动区加固尺寸为 $H_1=H_2$ 以及$B_1=B_2$时最佳,在武汉区域与本基坑类似的工程中,这样的阶梯型加固尺寸使得加固土体作用更加充分发挥,经济上更加合理,具备一定的优势。

5　结　论

本文结合武汉地区某一典型基坑工程,采用数值模拟及现场监测二者对比分析研究,就土质软弱

地区基坑被动区加固参数对支护结构位移的影响参数进行了分析,讨论了加固区域的尺寸及形状对支护结构位移的影响,得出结论如下:

(1) 桩身应力变化规律、不同测点处桩后土压力变化规律、支护体系水平位移各自随深度变化的规律一致。

(2) 数值模拟计算值与实际监测值二者规律基本一致,表明数值模拟可以较好地给出支护体系的侧向变形规律。

(3) 阶梯式被动区加固尺寸为 $H_1 = H_2$ 以及 $B_1 = B_2$ 时,加固土体的作用能够更加充分的发挥,能够最大限度的减少支护体系的位移变化,作用显著。

(4) 相比长方形加固而言,阶梯型加固能够更加充分的发挥加固的效果,节约成本,降低施工难度,使得工程经济更加合理,更加符合武汉地区特殊地质条件的工程需求。

参考文献:

[1] SHIRLAW J N. Jet Grouting Soft Clays for Tunneling and Deep Excavations-Design and Construction Issues[C]// ASCE. Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Louisiana, February 10 – 12, 2003:257 – 268.

[2] LITTLEJOHN S. The Development of Practice in Permeation and Compensation Grouting: A Historical Review (1802 – 2002) [C]// ASCE. Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Louisiana, February 10 – 12, 2003: 100 – 116.

[3] 罗战友,刘 薇,夏建中. 基坑内土体加固对围护结构变形的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2006,(增 1): 1538 – 1540. (LUO Zhan-you, LIU Wei, XIA Jian-zhong. Effect of Improvement Soils on Lateral Deformation of Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, (Sup. 1): 1538 – 1540. (in Chinese))

[4] 寿 旋,徐肖华,孙苗苗,等. 软土地区深基坑被动土体加固高度改进研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(增):104 – 108. (SHOU Xuan, XU Xiao-hua, SUN Miao-miao, *et al.* Reinforcement Height of Passive Zone of Deep Foundation Pits in Soft Clay Regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (Sup.): 104 – 108. (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 Ai-fang, HU Zhong-xiong, PENG Shi-juan. 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] 贾 坚. 土体加固技术在基坑开挖工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(1):132 – 137. (JIA Jian. The Application of Ground Treatment in Foundation Excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2007, 3(1): 132 – 137. (in Chinese))

[7] DB42/159—2004, 湖北省基坑工程技术规程[S]. 武汉:湖北省建设厅, 2004. (DB42/159—2004, Technical Specification for Engineering of Foundation Excavation in Hubei Province[S]. Wuhan: Department of Housing and Urban Rural Development of Hubei Province, 2004. (in Chinese))

[8] 张 辉,熊巨华,曾英俊. 长条形基坑地下连续墙侧向位移数值模拟及其影响因素分析[J]. 结构工程师, 2010,26(1):80 – 86. (ZHANG Hui, XIONG Ju-hua, ZENG Ying-jun. Numerical Simulation and Influence Factor Analysis on Lateral Displacement of Diaphragm Wall in Long-Narrow Pit [J]. Structural Engineers, 2010, 26 (1):80 – 86. (in Chinese))

[9] 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 Jun-jie, ZHANG Rong-jun, DING Lie-yun, *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))

(编辑:姜小兰)

Effect of Stepped Reinforcement Size on Pile Displacement in the Passive Zone of Foundation Pit

QU Ruo-feng[1], MA Yun[1,2], XU Guang-li[1], HU Xiao-qing[1]

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Central Southern Geotechnical Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: To research the influence of stepped reinforcement size on pile displacement in the passive zone of deep

(下转第 100 页)