

基坑被动区加固参数对支护结构位移影响分析

马 郢^{1, 2}, 屈若枫^{1*}, 周兴涛¹, 徐光黎¹, 龙雄华², 李受祉²

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为研究软土地基区域基坑被动区加固参数对支护结构位移影响, 以武汉地区某典型基坑工程为背景, 采用 FLAC 二维数值模拟的方法, 建立了有限差分基坑被动区的加固模型, 并将 CX6 现场实测值与计算值与进行对比, 验证计算模型的合理性; 实测桩身应力变化规律同支护体系水平位移分布规律一致, 反映了实测数据的正确性; 基于模型讨论了加固区域的深度、宽度、形状参数对支护结构位移的影响; 并将计算值与支护结构的实测位移进行了对比分析, 验证数值模拟的精确性、合理性。结合实测值和数值模拟分析的结果表明, 数值模拟可以较好地分析支护体系的实际变形规律; 在武汉软弱土层地区, 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; 被动区加固对支护结构变形的位移影响是非常显著的; 加固区域各阶深度、宽度都存在一个有效域, 当超出该域后, 加固效果不会出现显著提升; 当各阶加固宽度与深度相当时, 加固效果最好。

关键词: 软土地基; 基坑; 阶梯式; 被动区加固; 位移影响; 数值模拟

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2012)S0 - 0190 - 07

作者简介: 马 郢(1970 -), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、基坑工程设计工作。E-mail: mayun410@126.com。

Effects of reinforcement parameters in passive zone of excavations on lateral deformation of supporting structures

MA Yun^{1, 2}, QU Ruo-feng¹, ZHOU Xin-tao¹, XU Guang-li¹, LONG Xiong-hua², LI shou-zhi²

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

China)

Abstract: In order to study the influence of the parameters of strengthened soils in passive zone of excavations on the lateral displacement of supporting structures in soft soil ground, based on a typical excavation in Wuhan, a finite difference model is established by the FLAC two-dimensional numerical simulation method. Then, the calculated results of CX6 are compared with the field data to verify the rationality and accuracy of the numerical model. The distribution laws of stress on piles and lateral displacement of supporting structure at different measuring points are in consistency, which reflects the correctness of the measured data. The effects of the depth, width and shape in passive zone on the lateral deformation of the supporting structures are studied. The calculated results are compared with the field data to verify the rationality and accuracy of the numerical model. The better agreement of filed data and the numerical simulation analysis shows that the numerical simulation can be used to analyze the actual deformation laws of the supporting structure. The multi-stair improvement has obvious advantages in passive zone compared with other forms, and it shows great application value in Wuhan soft soil layer areas. The effects of strengthened soils in passive zone on the lateral deformation of the supporting structures are obvious. The effects of the depth and width in passive zone exist a valid range. When those parameters exceed a certain value, the increasing rate of the reinforcement effects will be very little. When the width and depth of the improvement are approximately equal, the optimum reinforcement effect can be obtained.

Key words: soft soil ground; excavation; multi-stair; passive zone reinforcement; lateral deformation; numerical simulation

0 引 言

随着武汉地区城市建设的高速发展, 建筑工程数量和规模日益增加, 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 级阶的基坑工程开挖

地层主要是淤泥质土、淤泥或软黏性土, 其主要特征

基金项目: 武汉市建设科研项目

收稿日期: 2012 - 08 - 24

*通讯作者

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侧向变形、周围地表沉降、坑底隆起、管涌以及流砂, 给该区域深基工程的设计、施工均形成较大困难。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是武汉地区现在基坑技术中一个很大的难关。

而基坑被动区加固技术, 是武汉地区基坑技术的一大特色; 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的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、地面沉降及坑底隆起的作用, 能够提高被动区土体的侧向抗力, 减小基坑卸载的变形, 引起了国内外学者的广泛关注, 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, 从会的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]; 在德国汉堡举行的第14届国际土力学与基础工程会议上, 挪威学者 K. Karsrud 所作的“深基坑设计与施工的若干问题”特邀报告中就将坑内地基加固议题作为第一个议题进行了探讨^[3]; 国内罗战友等人分析了坑内土体的加固深度及程度对围护结构变形的影响^[4-5]; 秦爱芳以卸荷试验为基础, 就基坑工程中被动区土体的合理加固深度进行了研究^[6]。就目前基坑坑内加固研究成果来看, 现行的很多加固方案, 不论是在加固区域形状、加固宽度和深度等影响因素还是在主要参数取值问题上, 坑内加固评价体系还不够完善。

本文以武汉某建筑工程为实例, 采用数值模拟分析及实际监测等手段, 率先在该区域内提出阶梯式基坑被动区加固的方案, 考虑了被动区加固深度、被动区加固宽度、被动区加固形状对支护结构位移控制的影响, 并与实际监测数据进行了相关对比研究; 通过系统的分析被动区加固参数对支护结构位移的影响, 进一步优化被动区加固参数, 对武汉地区基坑坑内加固的研究具备一定的参考和指导意义。

1 工程的概况

1.1 工程概况

该工程拟兴建一栋大楼, 总用地面积 14755 m², 总建筑面积 36648 m², 其中地上建筑面积 27550 m², 地下建筑面积约 4500 m²。地上 16 层, 地下 1 层, 采用钻孔灌注桩基础。兴建的地下室基坑总体构呈长方形, 东西向长约 72 m, 南北向宽约 58 m。基坑总周长约 260 m, 基坑面积约 5200 m²。

1.2 工程地质条件

拟建场地地貌上属典型的长江 I 级阶地, 地势相对平坦。场区地层除地表有 2.0~5.0 m 厚的填土层外, 其下为一套第四系长江冲洪积物, 具二元结构特征。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。典型支护结构剖面、地质剖面以及主要尺寸如图 1 所示。

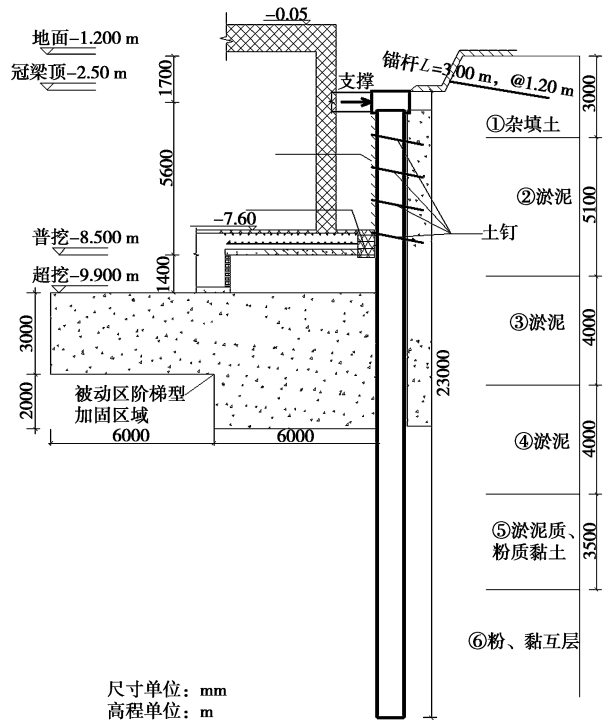


图 1 地质剖面图及设计尺寸

Fig. 1 Geological cross-section and design dimensions

1.3 基坑工程围护方案

根据本基坑工程的开挖深度、周边环境、地层性质以及工程经验, 本基坑围护总体方案是以排桩、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, 辅助坡顶减载、止水帷幕、中型井点降水等工程手段, 构成较为经济合理、技术可靠的围护方案。

1.4 被动区加固方案

为解决因坑内有深厚淤泥易造成支护结构不稳定的问题, 有效提高被动区土体的力学性质, 控制好桩身位移, 本基坑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、阶梯式等多种型式^[7], 但鉴于武汉地区复杂地质条件, 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; 因此, 对该工程本文就提出在其被动区加固采取阶梯型加固的形

式。结合该工程地区实际情况，加固采用粉喷桩加固，桩间距为 450×425 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，每级台阶均宽 6 m，加固区域如上图 2 所示。阶梯型加固区域 1-1 剖面图如下图 3 所示 ($H_1=3$ m, $H_2=2$ m, $B_1=6$ m, $B_2=6$ m)。

基坑加固区域粉喷桩加固厚度 5.0 m，宽度 6.0 m，与支护桩咬合 200 m。
粉喷桩间距 450×425 mm，共 13 排

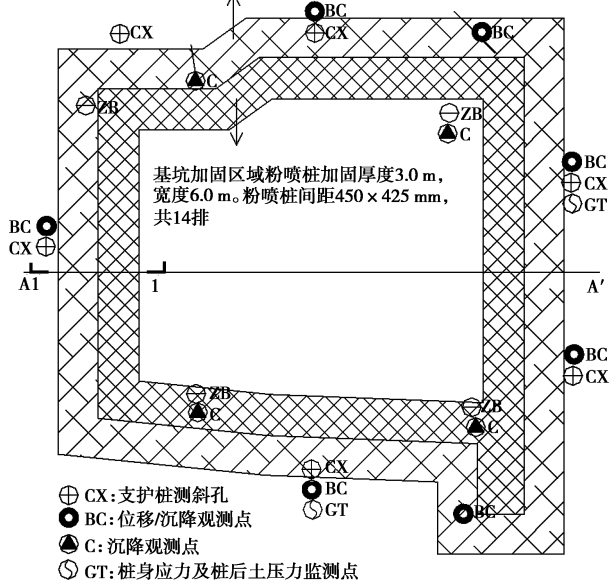


图 2 被动区加固方案及测点布置示意图

Fig. 2 Sketch of strengthened scheme in passive zone and arrangement of measuring points

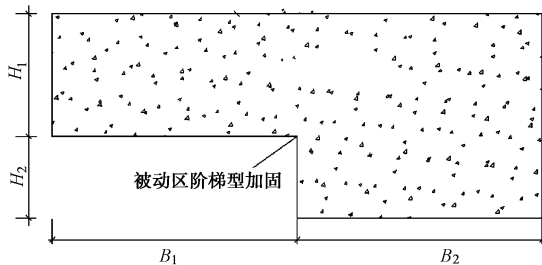


图 3 被动区加固区域 1-1 剖面图

Fig. 3 Profile 1-1 of strengthened soil in passive zone

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)^[8]，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。

2 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。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soil strata

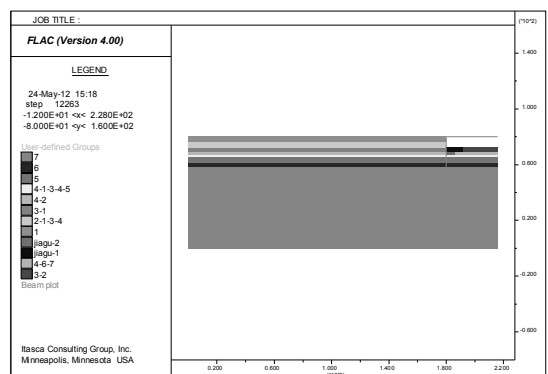
土层名称	天然重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E /MPa	泊松比	综合取值	
				黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
(1)杂填土	18.5	80	0.44	6	14
(2-1)淤泥	17.0	75	0.48	10.5	4.5
(2-2)淤泥质粉质黏土夹粉土	17.5	20	0.42	12	6.5
(3)粉土、粉砂夹粉质黏土	18.0	38.7	0.4	8	17
(4-1)粉细砂	21.0	51	0.36	0	30
加固土	18.0	300	0.32	60	5

为了减少边界效应对几何模型的影响，宽方向取为 216 m，高取 80 m。在计算模型简化原则上，由于本基坑实际长 71.5 m，宽 58 m，基坑几何形状的基本为矩形，很具对称性，从中间取 A-A' 剖面，建立平面对称模型，基坑一半的长即为 35.75 m (近似 36 m)。

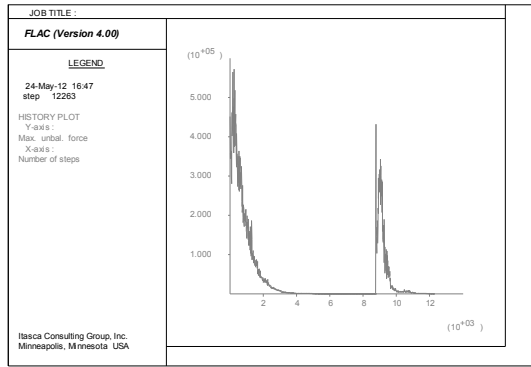
基坑区域为研究区域，基坑区域网格取得较密，而离基坑较远的区域网格变大。模型左右边界固定水平位移边界条件，模型底部采用固定竖直位移边界条件。由于采用对称模型则在支撑梁单元与对称轴的交点处限制其 x, y 方向的位移及 xy 平面内的转动位移。

为方便计算，本文建模前作如下假设^[9-10]：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不考虑冠梁的作用，支护桩桩顶按自由端约束条件考虑。④不考虑降水因素的影响。建立模型如图 4 所示。

图 4 中 (a)、(b) 分别是数值模拟中的模型图以及最大不平衡力随迭代次数的变化图，通过最大不平衡力随时步的变化图可以看出最大不平衡力趋于 0，则计算收敛，说明模型及边界条件建立的是正确的，满足计算的要求。



(a) 模型分层



(b) 最大不平衡力随迭代次数的变化

图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical model

3 数值模拟与实测结果比较分析

在建立基坑被动区的加固模型基础上, 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(被动区加固区域示意图如图 3, 令 $H=H_1+H_2$, $B=B_1+B_2$, 以便后面讨论), 在模型中, 为了更好的反映支护桩位移的变化规律, 选择 $H=0, 3.9, 7.8, 10.8, 11.8, 14.3, 18.2$ 和 21.7 m 八个节点, 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。

3.1 实测支护体系位移及力学分析

为了更好的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。由于本文研究重点并非地下水位、内支撑轴力等的情况, 对其不予考虑, 只研究与基坑支护体系结构位移变化及其影响因素。

结合工程实例, 选取 CX1、CX2、CX3、CX4、CX5、CX6 等 6 处测斜点, 根据实际测得的结果, 本文做出了不同测点处支护体系水平位移分布规律图, 图 5 为现场 6 个典型斜测点处支护体系水平位移同深度的关系(加固区域尺寸为 $3\text{ m} \times 6\text{ m} + 5\text{ m} \times 6\text{ m}$)。

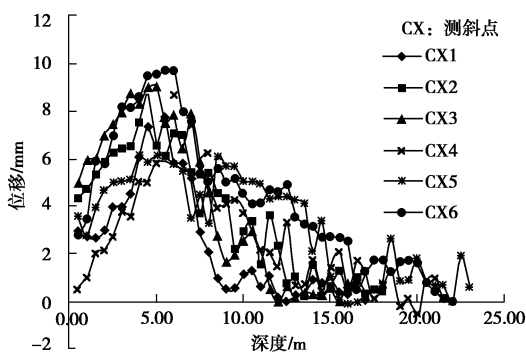


图 5 不同测点处支护体系水平位移分布规律

Fig. 5 Distribution laws of lateral displacement of supporting structures at different measuring points

通过对比分析, 可看出支护桩的结构位移在深度 H 为零时, 各测点位移均较小; 随后随着 h 变大, 水平位移渐渐变大, 当 $H=6\sim 8$ m 时, 水平位移达到最大, 最大的位移达到了 10 mm ; 当 $H>8$ m 时, 水平位移渐渐变小, 位移改变不明显。总的来说, 各测点的位移变化规律基本一致。

同时为了研究不同测点处桩身应力变化规律同支护体系水平位移分布规律的关系, 考虑到现场的实际情况, 本文就桩身应力变化规律选取了 GT1、GT2 共计两组的监测数据, 其变化规律分别如图 6。

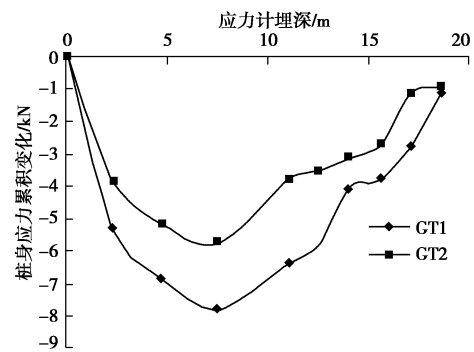


图 6 不同测点处桩身应力变化规律

Fig. 6 Distribution laws of stress on pile at different measuring points

从图 6 可以看出, 在桩身应力计埋深为 0 时, 即在桩顶部位时, 桩身应力累积变化为零, 也就是桩顶处应力基本无变化; 在桩身应力计埋深在 $H=6\sim 7$ m 时, 桩身应力累积变化最大, 在桩身应力计埋深在 $H=8\sim 13$ m 时, 桩身应力累积变化逐渐变小; 在桩身应力计埋深 $H>13$ m 时, 桩身应力累积变化趋势呈现迅速变小, 有趋近于 0 的趋势, 不同测点处桩身应力变化规律详见上图 6。

综图 5, 6 的研究表明: 桩身应力变化规律同支护体系水平位移分布规律的关系一致; 从侧面反映了不同测点处水平位移监测的正确性。

3.2 长方形被动区加固深度的影响分析

在研究被动区加固深度 H 对支护体系水平位移的影响时, 本文保持长方形被动区加固宽度 $B=12\text{ m}$ 不变, 对 H 分别选取 0, 1, 3, 5 和 7 m 六组方案进行对比分析, 拟求出比较适合的加固深度。

下图 7 为监测支护桩 CX6 位移随 H 变化的实测值与模拟值的变化规律图; 结果显示: 对于 CX6 各测点处的实测值(图中 CX6)和计算值(图中 $H_1=3\text{ m}/H_2=2\text{ m}$), 在桩身上部和下部基本是一致的, 但在桩身中间部位实测值偏大, 尤其是最大位移处位移增大近 1 倍, 但总体趋势是一致的, 其原因可能是由于数值分析是理想状态下的计算, 不可能考虑设备、人为

等因素影响，故所以导致计算值偏小于实测的 CX6 位移值但曲线的趋势始终一致。尽管如此，各测点计算值与实测值的平均相对误差仍不超过 30%，且从整体分布形态及位移发展趋势上来看，计算结果与实测值也较为吻合，从工程应用的角度来看，这种差异是完全可以接受的。

计算结果表明，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 0~6 m 范围内，桩的水平位移变化很快；在深度大于 6~8 m 时，基本达到最大值，根据现场实际情况，最大值所在深度有所变化；在深度大于 8 m 后，由于加固区土体起到了一定的限制作用，桩的位移逐渐减小。

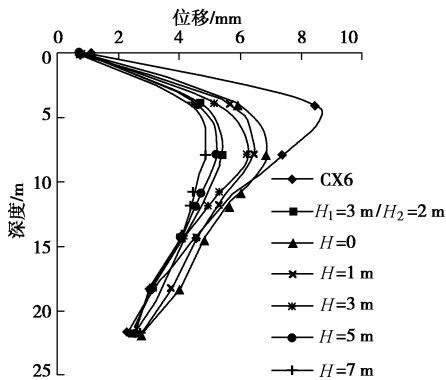


图 7 加固深度对支护体系水平位移的影响

Fig. 7 Influence of depth on lateral displacement of supporting structures

通过分析，当 $H=5\text{ m}$ 和 $H=7\text{ m}$ 时，二者曲线相比其他曲线而言，反映出来的位移变化很小。可以认为当 $H \geq 5\text{ m}$ 后，加固的深度增加对桩位移的控制作用已不显著。这说明当深度处于该范围之中时，能够充分发挥加固体的作用。但当加固深度超出最佳范围之后，加固土体作用无法充分发挥，使得经济上不合理。因此，在武汉区域与本基坑类似的工程中，加固土体的深度一般不宜超过 5 m，当 H 达到 5 m 仍无法满足工程需要时，应另采用其他的位移控制措施。

3.3 长方形被动区加固宽度的影响分析

在研究被动区加固宽度 B 对支护体系水平位移的影响分析时，本文保持长方形被动区加固深度 $H=5\text{ m}$ （第 3.2 节分析已经求解出最佳深度）不变，对 B 分别选取 0, 4, 8, 12 和 16 m 五组方案进行对比分析，求出比较适合的加固宽度。

图 8 为监测支护桩 CX6 位移随 B 变化的实测值与模拟值的变化规律图；同上节分析一样，各种情况下桩的水平位移均较小；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 0~6 m 范围内，桩的水平位移变化很快；在 $H=6\sim 10\text{ m}$ 时，基本达到最大值，根据现场实际情况，最大值所在深度有所变化；在 $H > 10\text{ m}$ 后，由于加固区土体起到了一定的限制作用，桩的位移逐渐减小。当 $B=12\text{ m}$ 和 $B=16\text{ m}$ 时，二者曲线相比其他曲线而言，反映出来的位移变化很小。可以认为当 $B \geq 16\text{ m}$ 后，加固的宽度增加对桩位移的控制作用已不显著。同 3.2 分析，在武汉区域与本基坑类似的工程中，加固土体的宽度一般取超过 12~16 m，当 B 达到 16 m 仍无法满足工程需要时，应另采用其他的位移控制措施。

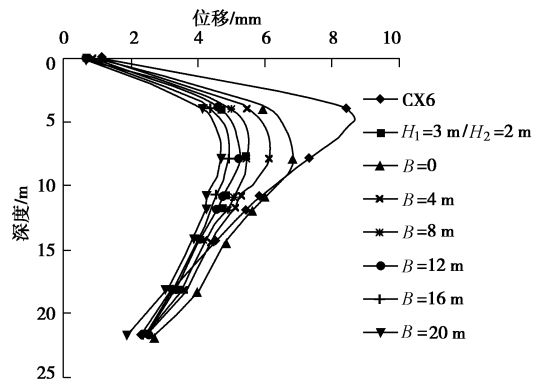


图 8 加固宽度对支护体系水平位移的影响

Fig. 8 Influence of width on lateral displacement of supporting structures

3.4 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，本文在构建模型时，保持两个阶梯尺寸不变时，就加固形状分别选取长方形（长方形尺寸为 $5 \times 12\text{ m}$ ）和阶梯型（阶梯型尺寸为 $3 \times 6 + 5 \times 6\text{ m}$ ）两组方案进行对比分析。

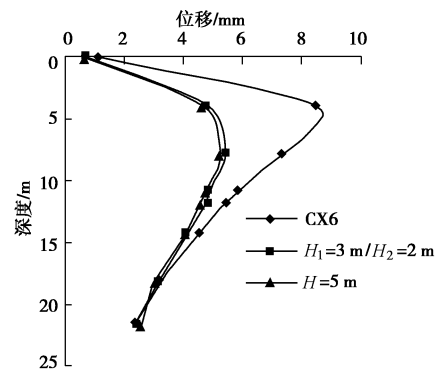


图 9 加固形状对支护体系水平位移的影响

Fig. 9 Influence of shape on lateral displacement of supporting structures

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, 说明在这两种情况下产生的加固效果一致的, 同时也说明阶梯型加固能够更加充分的发挥加固的效果, 经济上更加合理。

3.5 阶梯式被动区加固尺寸的影响分析

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 (依据前面求出的适宜深度和宽度, 分别为 $H=5\text{ m}$, $B=16\text{ m}$) 两个尺寸不变, 分别选取 A: $H_1=H_2=0$; B: $H_1=3$, $H_2=2$, $B_1=B_2=8$; C: $H_1=3$, $H_2=1$, $B_1=B_2=8$; D: $H_2=B_1=0$, $H=5$, $B=16$; E: $H_1=H_2=2.5$, $B_1=B_2=8$; F: $H_1=H_2=2.5$, $B_1=6$, $B_2=10$; 这 6 组值 (单位: m) 进行对比分析, 求出比较适合加固尺寸。

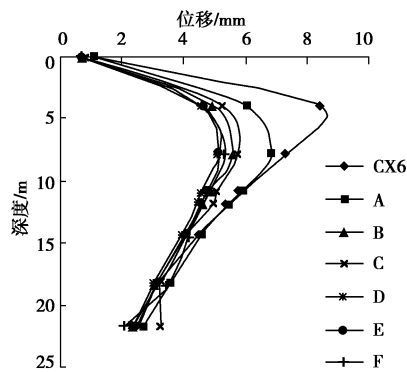


图 10 阶梯式加固尺寸对支护体系水平位移的影响

Fig. 10 Influence of size of multi-stair on lateral displacement of supporting structures

图 10 为阶梯式加固尺寸对支护体系水平位移的影响关系曲线; 同第 3.2 节分析一样, 各种情况下桩的水平位移均较小; 随着距离桩顶距离的增大, 支撑的影响逐渐减小, 桩的水平位移逐渐增大, 在 0~6 m 范围内, 桩的水平位移变化很快。

从图 10 可以清楚的看到, 未加固时 (A 种情况), 支护桩的水平位移明显大于其他加固情况时的位移变化。通过分析, 当 D 种情况时, 即加固型为长方形时, 在 H 、 B 保持一定的情况下, D 反映出来的位移变化比 E 略小; 当 E 种情况时, 即 $H_1=H_2=2.5$, $B_1=B_2=8$ 时, 其曲线相比其他任何曲线而言, 反映出来的位移变化是可以接受的, 相对也较小。因此, 从经济的角度考虑, 阶梯式被动区加固尺寸为 $H_1=H_2$ 以及 $B_1=B_2$ 时最佳。

4 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, 讨论了加固区域的深度、宽度、形状等参数对支护结构位移的影响, 得出结论如下:

(1) 通过数值模拟计算值与实际监测值的对比分析, 表明数值模拟可以较好地给出支护体系的侧向变形规律。

(2) 桩身应力变化规律、不同测点处桩后土压力变化规律、支护体系水平位移分布规律这 3 者的关系变化规律基本一致, 说明了测点处支护体系水平位移监测的正确性。

(3) 加固深度 H 存在最佳范围, 当 H 超出该范围之后, 加固效果提高不再明显。对于复杂的武汉工程地质条件及与该工程类似的其他工程而言, H 取值应该在 5 m 左右。

(4) 加固宽度 B 存在最佳范围, 当 B 超出该范围之后, 加固效果提高不再明显。对于复杂的武汉工程地质条件及与该工程类似的其他工程而言, B 取值应该在 16 m 左右。

(5) 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经济效果, 节约成本, 降低施工难度, 更加符合武汉地区特殊地质条件的工程需求。

(6) 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, 该形式能够最大限度的减少支护体系的位移变化, 作用显著。

参考文献:

- [1] SHIRLAW J Nick. Jet grouting soft clays for tunneling and deep excavations-design and construction issues[C]// Grouting and Ground Treatment Proceedings of the Third International Conference, GSP No.120. New Orleans, Louisiana: ASCE, 2003: 257 - 268.
- [2] STUART Littlejohn. The development of practice in permeation and compensation grouting a historical review (1802-2002)[C]//Grouting and Ground Treatment Proceedings of the Third International Conference, GSPNo.120. New Orleans, Louisiana: ASCE, 2003: 100 - 116.
- [3] KARLSRUD K. Some aspects of design and construction of deep supported excavations[C]//Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997.
- [4] 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, 28(增刊): 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,

- 28(S0): 1538 - 1840. (in Chinese))
- [5] 魏祥, 杜金龙, 杨敏. 被动区加固对基坑外桩基础的变形影响分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 37 - 40. (WEI Xiang, DU Jin-long, YANG Min. Influence of passive zone reinforcement on pile foundations adjacent to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S0): 37 - 40. (in Chinese))
- [6] 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 day[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 935 - 940. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] DB42/159—2004 基坑工程技术规程[S]. 2004. (DB42/159—2004 Technical specification for engineering of foundation excavation[S]. 2004. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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))

(本文责编 李运辉)