

DOI: 10.11779/CJGE2014S2015

深基坑桩锚支撑组合支护结构变形影响因素的 三维数值分析

邵 权, 徐学连, 徐 松, 徐 俊, 田 明

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 桩锚支撑组合支护结构是一种复杂的基坑组合支护形式, 其影响因素众多, 目前设计理论尚不成熟。结合工程实例, 通过数值模拟和现场监测, 分析桩锚支撑组合支护结构的受力和变形规律, 并对其变形的影响因素进行了分析。得出结论如下: 围护桩参数、内支撑刚度以及锚索参数都对该组合支护结构的变形有影响。适当减小围护桩直径以及增大围护桩嵌固深度, 都可以减小该组合体系的水平向位移; 增大内支撑刚度, 内支撑自身承受的力增大, 锚索轴力减小; 增大锚索间距以及减小锚索的倾斜角都会使体系中内支撑的内力增大。

关键词: 深基坑; 桩锚支撑组合支护结构; 数值模拟

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0087-05

作者简介: 邵 权(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事桩基检测和基坑支护方面的研究。E-mail: qshao2011@gmail.com。

Three-dimensional numerical analysis of factors affecting deformation of pile-anchor-support composite retaining structures for deep foundation pits

SHAO Quan, XU Xue-lian, XU Song, XU Jun, TIAN Ming

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The pile-anchor-support composite retaining structure is a complex combination support system for foundation pits. It has many influencing factors, and the current design theory is not mature. Based on an engineering example, through numerical simulation and site monitoring, the force and deformation of the pile-anchor-support supporting structure as well as the influencing factors of deformation are analyzed. The conclusions are drawn as follows: parameters of the retaining piles and anchors, and stiffness of the supports can affect the deformation of the composite retaining structures. To reduce the diameter or increase the embedded depth of retaining piles appropriately can reduce the horizontal displacement of the composite retaining structures. Besides, by increasing the stiffness of the support, the force that supports bears will increase, and the axial force of anchors will decrease. Finally, to increase the anchor spacing or reduce the inclination angle of anchors can increase the internal force of the system.

Key words: deep foundation pit; pile-anchor-support composite retaining structure; numerical simulation

0 引言

随着社会经济的飞速发展, 地铁工程、高层建筑物、市政工程以及地下空间的开发规模日渐增大, 深基坑工程的数量也在急剧的增加。同时, 建筑深基坑工程的开挖深度和施工难度也在不断的增加。深基坑组合支护体系的受力和变形分析是目前深基坑建设中非常重要的研究课题之一, 而针对桩锚支撑组合支护结构的相关研究已有一些, 但对于其变形影响因素的研究较为稀少并且不够深入, 因此展开其变形的现场监测和数值模拟研究具有非常重要的工程应用价值^[1-4]。本文以佛山市某基坑工程作为工程背景, 运用岩土数值模拟软件 Midas/gts, 对该深基坑开挖的全过程进行

了数值模拟研究, 分析了该深基坑桩锚支撑组合支护结构的内力和变形规律, 并在此基础上对影响桩锚支撑组合支护结构变形的因素进行了深入的分析。

从工程实际中来看, 桩支撑支护结构形式对于在确保基坑稳定以及控制周边变形方面有着显著的作用, 其缺点有: 使挖土工程的施工难度增大并且效率降低; 对于基坑深层的变形控制存在一些薄弱的环节以及不利因素; 在支撑施作的过程中基坑暴露的范围大, 很难分段的实施控制变形; 拆除支撑的时候还会造成额外的附加变形; 地下室结构的施工工序很多, 施工速

度慢；工程造价较高。桩锚支护克服了桩撑支护以上的缺点，其缺点在于：对于基坑顶部周边的变形控制能力是相对较弱；对于场地中含有软弱地层以及布置有诸如管道、基础或构筑物的地层使用受限。桩锚撑组合支护结构，这种新型的组合支护结构实际上是将上述两种实用的支护技术有机的结合起来，强强联合，取长补短，从而可以达到安全可靠、方便快速的施工以及能够合理的控制工程造价的综合效果。

从深基坑工程的实际需要出发，本文通过实际工程的现场监测和数值模拟研究结果，总结一定的该组合支护体系的变形和内力规律，以期对以后的工程实际有一定借鉴意义和参考价值。

1 工程概况

佛山市该基坑场地占地面积为 18880 m^2 ，主要建筑包括五栋高层住宅楼及低层商铺，住宅楼高约21~26层，商铺高3层，设有3层地下室，主体采用框架剪力墙，基础采用冲孔桩基础。周长约534.45 m，基坑开挖约10 m。

据钻孔揭示，场地内分布的地层有填土层、冲积土层、残积土层，下伏基岩为燕山晚期花岗岩。

综合考虑地质资料、开挖深度、周边环境、经济合理等因素，基坑支护采用“放坡+钻孔桩+搅拌桩+锚索”、“钻孔桩+旋喷桩+内支撑”和“放坡+钻孔桩+搅拌桩+内支撑”支护的组合支护施工。

基坑四周均采用钻孔桩兼双排搅拌桩围护体系，内侧钻孔护坡桩的直径均为1 m，间距1.3 m，嵌固深度约为20~26 m，双排搅拌桩直径为0.55 m，排距及桩间距均为0.4 m，嵌固深度约为11.5~16 m。在-2.8 m标高处设置第一道内支撑，与冠梁形成平面闭合的框架结构，与护坡桩形成支撑体系，减少上部基坑的变形，并保证周边道路、管线和建筑安全。在-6.0 m处设置有第二道内支撑。在内支撑关键交叉点设有立柱。基坑内支撑部分以下采用预应力锚索，分3层，为土方开挖及地下室施工创造方便。预应力锚索采用4~5根 $7 \times 5-\phi 15.2$ 低松弛高强钢绞线制作，其材料标准强度为1860 MPa，锚索水平间距1.3 m，倾斜角为35°。

2 三维模型的建立

2.1 计算模型的建立

设定基坑开挖区域尺寸，最长跨度为163 m，最宽为112 m，形状似刀。建立的三维模型如图1所示。所建立的计算模型中，土体均采用莫尔-库伦塑性本构模型；内支撑、冠梁、腰梁等混凝土材料的结构均

采用梁单元；预应力锚索采用锚建模助手建立，采用植入式桁架单元；围护桩按照等刚度原理折算成地下连续墙，采用板单元。结构单元如图2所示。

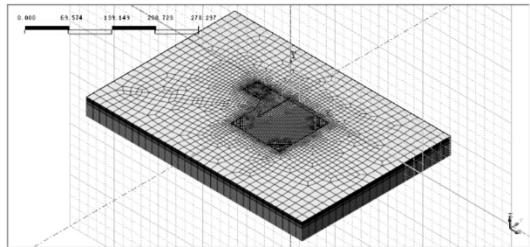


图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

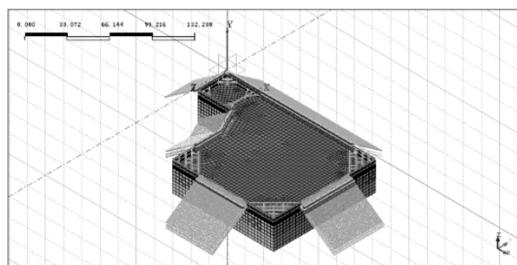


图2 结构单元

Fig. 2 Structural element

取模型的地表为自由边界，根据规范，平面范围内的模型尺寸取3倍左右的基坑跨度，限制其水平位移；而竖直范围的模型尺寸，可以依据网格划分的密度，以及实际地质情况予以取值，本文取最深支护结构向下12 m左右，底部限制其水平位移和竖向位移。综合这两个方面，确定了地基的计算边界。

2.2 施工工况的模拟

在初始地应力生成以后，对所有位移进行清零，然后进行施工阶段的划分，本次模拟的施工工况主要可以分为以下几步：①开挖至-2.8 m，考虑应力释放（分3步，系数设置为0.4, 0.3, 0.3），通过相应的激活和钝化网格组，进行冠梁、第一道支撑、地下连续墙、立柱及第一排锚索的施工；②开挖至-6.0 m，进行腰梁、第二道支撑及第二排锚索的施工；③开挖至-8.2 m，进行锚索腰梁及第三排锚索的施工；④开挖至坑底，即-10.9 m，施工完毕。

2.3 与现场监测结果的对比分析

由图3可以看出，围护桩的水平位移主要发生在桩身上部靠近桩顶的位置，最大的位移约为11 mm左右；由图4可以得到，围护桩的最大位移大约在12.4 mm左右，主要发生在基坑的北、东、南侧的围护桩顶端。模拟的结果与现场监测所得的结果十分接近，最大位移值比实测结果小的原因可能是将中间有间距的围护桩等效为了一体的底线连续墙，该结构的整体

刚度效果比实际略有增大。

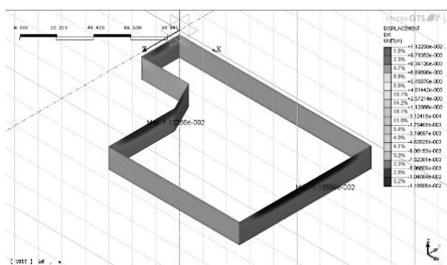


图 3 地连墙 x 方向最终位移

Fig. 3 Final displacement of diaphragm wall in x direction

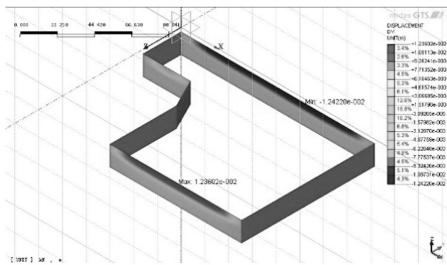


图 4 地连墙 y 方向最终位移

Fig. 4 Final displacement of diaphragm wall in y direction

从图 5 可以看出, 内支撑最大内力为压力, 大约在 345 kN 左右, 各支撑的内力均布相同, 其最大值跟监测所得到的数据大概保持在同一水平。

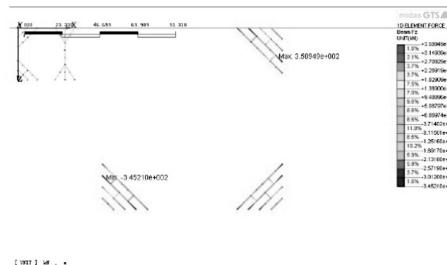


图 5 内支撑最终轴力

Fig. 5 Final axial force of internal support

由图 6 可以看出, 开挖完成后, 锚索的最终轴力最大为 55.49 kN 左右, 累计变化值是要比监测数据略大的。分析其原因可能是所有的锚索的预应力, 并不是都与现实相同, 而是为了模型计算方便统一取了 300 kN, 而且所采用的植入式桁架单元对结果也存在一定的影响。

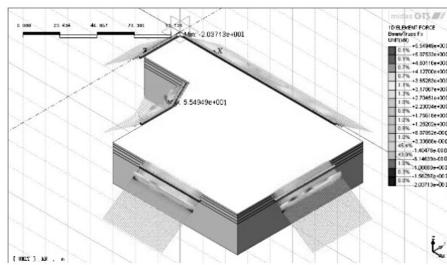


图 6 锚索最终轴力

Fig. 6 Final axial force of anchor

由以上的结论可以看出, 采用数值分析对该基坑进行模拟, 按施工工况开挖完成后得到的结果与现场监测所得结果相近, 证明使用 Midas/gts 来对基坑组合支护结构变形影响因素进行分析是可行的。

3 变形影响因素分析

3.1 围护桩参数的影响

桩直径的影响, 即模型中地下连续墙板单元厚度的影响, 以 0.8 m 时为例 (源模型为 1 m), 如下图 7 和图 8 所示。围护桩的水平方向位移相对于源模型来说是减小的, 其 x 方向的水平位移由源模型的 11 mm 减小到最大 7.4 mm, y 方向的水平位移由源模型的 12.4 mm 减小到最大 8.2 mm。围护桩桩径的变化对内支撑内力的变化和锚索轴力的变化则几乎没有影响。总的来说, 可以看出围护桩对于整个体系变形的影响很小(几乎不影响内支撑和锚索轴力的变化), 分析其原因可能是由于对于围护桩模型的处理采用了等效的地下连续墙, 同时对于双排桩也采用了地下连续墙的等下模型, 这两个连续墙的叠加对于内力的传递可能起到了一定的影响作用。

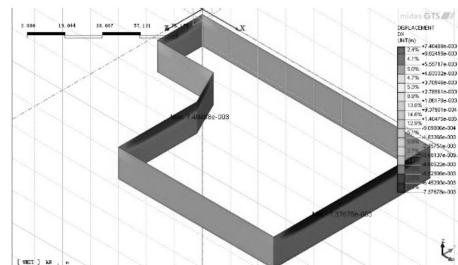


图 7 桩径为 0.8 m 时围护桩 x 方向位移

Fig. 7 Displacement in x direction under diameter of retaining pile of 0.8 m

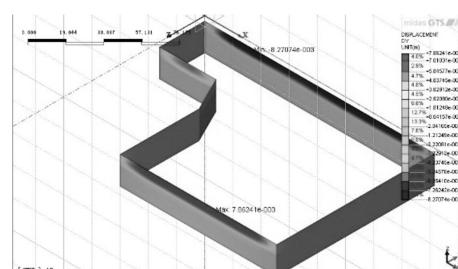


图 8 桩径为 0.8 m 时围护桩 y 方向位移

Fig. 8 Displacement in y direction under diameter of retaining pile of 0.8 m

桩嵌固深度的影响, 以增加 3 m 嵌固深度为例, 得到结果如下图 9, 10 所示, 图 9 表明, 增加 3 m 嵌固深度后, 围护桩 x 方向的水平位移由源模型的 11 mm 左右降到最大 7.26 mm。图 10 表明, 围护桩 y 方向的水平位移由源模型的 12.4 mm 降到了最大 8.0 mm。总结来看, 对比源模型, 嵌固深度增加 3 m 时,

围护桩的水平位移是减小的。

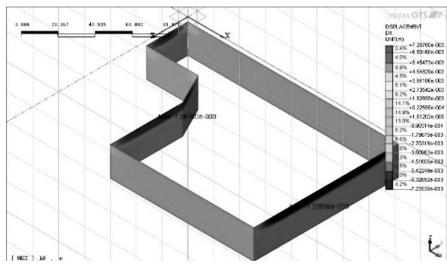


图 9 嵌固深度+3 m 时围护桩 x 方向位移

Fig. 9 Displacement in x direction under embedded depth of retaining pile increased by 3 m

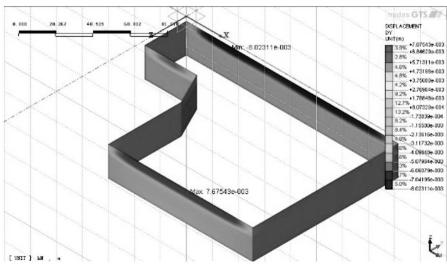


图 10 嵌固深度+3 m 时围护桩 y 方向位移

Fig. 10 Displacement in x direction under embedded depth of retaining pile increased by 3 m

3.2 内支撑刚度的影响

内支撑作为组合支护的一员，其自身的参数也对组合支护体系的变形起到了不可忽视的影响。本文以增大内支撑刚度为例，得到如下的计算结果云图，如图 11，12。图 11 表明，内支撑刚度增大后，其自身的内力最大为 357.3 kN，相对比源模型的 345 kN，其增大了 12.3 kN。图 12 则表明，内支撑刚度增大后，锚索的轴力也相应发生了变化，其由源模型的最大 55.49 kN 减小到现在的 54.6 kN，减小的幅度比较小。总结来看，增大内支撑的刚度，内支撑自身的轴力增大，锚索的轴力相对减小。分析其原因可能是，随着内支撑刚度的增大，内支撑系统所能承受的力更大，组合支护体系的协调变形，在内支撑体系上分担了更多的力，所以内支撑自身的轴力增大，而锚索的轴力发生了减小。

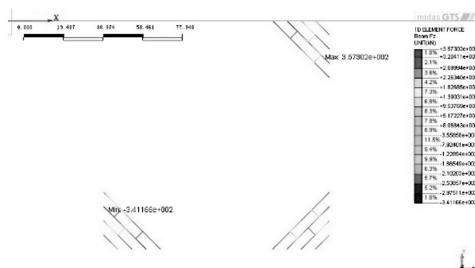


图 11 内支撑刚度增大自身最终内力

Fig. 11 Final internal force of internal support after increase of stiffness

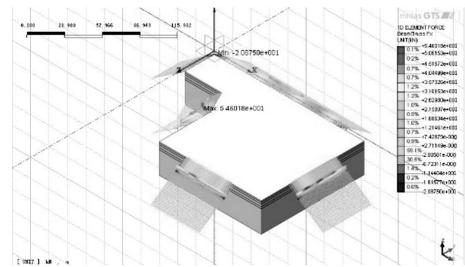


图 12 内支撑刚度增大锚索最终轴力

Fig. 12 Final axial force of internal support after increase of stiffness

3.3 锚索参数的影响

锚索间距的影响，考虑到缩小锚索间距会造成单兀数的进一步增加，给计算带来负荷，虽然增大锚索间距可能会造成支护力的不足，但适当的增大间距使基坑模型保证在稳定计算范围内还是可行的。以将锚索间距增大到 2.6 m 为例，计算得到如图 13，14 的结果云图。图 13，锚索间距从 1.3 m 增大到 2.6 m 后，相应的锚索轴力由源模型的最大 55.49 kN 增大到 55.52 kN，变化幅度很小。从图 14，内支撑的内力最大值由源模型的 252 kN 增大到现在的 262 kN，相比源模型增大了 10 kN。总结来看，增加锚索的间距，其自身的轴力增大的幅度极小，内支撑的内力则增大。分析其原因可能是锚索的间距增大，锚索的数量则相对的减少，其他条件不变的情况下，锚索自身的轴力增大幅度略小，总的锚固力减小，大部分的力由内支撑系统承受，所以内支撑的内力增大。

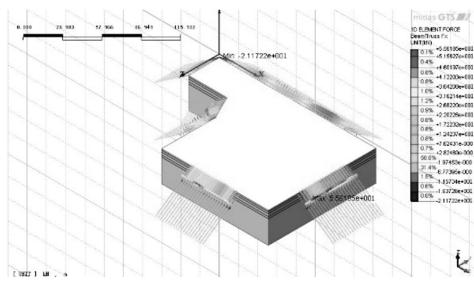


图 13 锚索间距 2.6 m 时锚索最终轴力

Fig. 13 Final axial force of anchor under spacing of 2.6 m

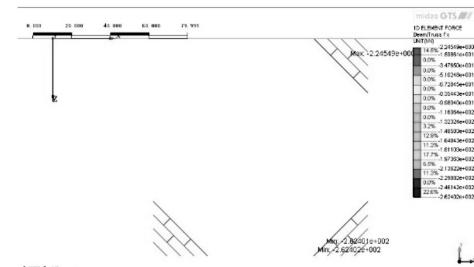


图 14 锚索间距 2.6 m 时内支撑最终内力

Fig. 14 Final internal force of internal support under spacing of 2.6 m

锚索倾斜角的影响, 源模型中的锚索倾斜角度为 35° , 由于锚索长度过长, 考虑到加大锚索倾斜角度有可能会超过原先的竖向地基边界, 所以在这里通过适当减小锚索倾斜角的方法来分析研究锚索倾斜角的改变对组合支护体系变形的影响。以锚索倾斜角为 30° 时为例, 如图 15、16。图 15 中, 锚索的轴力为最大为 47.9 kN , 与源模型的 55.49 kN 相对比是减小的。而图 16 中, 内支撑的内力则由源模型的 345 kN 增大到现在的 360 kN , 相比源模型, 倾斜角为 30° 时, 内支撑的最大内力增大了 15 kN 。总结来看, 在一定的范围内, 减小锚索的倾斜角, 锚索自身的轴力减小, 而内支撑的轴力增大。分析其原因可能是由于锚索倾斜角的减小, 减小了锚索的锚固力, 从而在水平方向的分拉力减小, 同时使得内支撑的轴力增大。

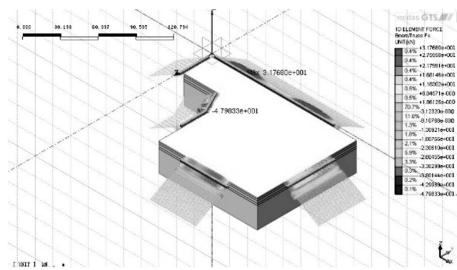


图 15 锚索倾斜角 30° 时锚索最终轴力

Fig. 15 Final axial force of anchor under slope angle of 30°

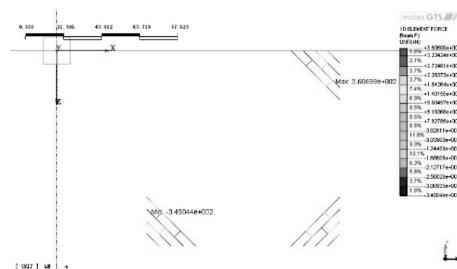


图 16 锚索倾斜角 30° 时内支撑最终内力

Fig. 16 Final internal force of internal support under anchor slope angle of 30°

4 结论与建议

深基坑桩锚撑组合支护结构是个复杂的空间结构

体系, 它的影响因素众多。其采用“围护内撑外拉”的方式保持基坑开挖条件下土体应力场处于静力平衡或动态平衡状态。通过三维数值模拟, 可以很好的反映组合支护结构的受力和变形, 应结合现场监测实施相应的控制和调整。由监测结果和计算结果可知, 桩锚撑组合支护结构达到了良好的支护效果。

然而本文由于模型的原因, 有些未予考虑的因素, 诸如围护桩桩间距以及采用 Goodman 接触单元时所选取的法向和切向刚度的因素等, 这些因素在进一步研究时应当予以考虑。

参考文献:

- [1] 杜秀忠, 杨光华, 孙昌利, 等. 双排桩支护在某水利基坑中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 490 - 494. (DU Xiu-zhong, YANG Guang-hua, SUN Chang-li, et al. Application of double row pile in a water conservancy pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 490 - 494. (in Chinese))
- [2] 王召磊, 杨志银, 张俊, 等. 桩撑锚组合支护结构的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 230 - 232. (WANG Zhao-lei, YANG Yin-zhi, ZHANG Jun, et al. Three-dimensional numerical analysis of pile-support-anchor bracing structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 230 - 232. (in Chinese))
- [3] 冯申铎, 姜晓光, 杨志银, 等.“桩(墙)-撑-锚”联合支护技术的工程应用与变形协调探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 456 - 460. (FENG Shen-duo, JIANG Xiao-guang, YANG Yin-zhi, et al. The engineering application and deformation coordination discussion of pile-support-anchor bracing structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 456 - 460. (in Chinese))
- [4] 邱洪志,甄西刚,乐金朝. 桩锚-撑联合支护结构在深基坑中的应用[J]. 河南城建学院学报, 2011, 20(5): 5 - 9. (QIU Hong-zhi, ZHEN Xi-gang, LE Jin-zhao. Application of pile-support-anchor bracing structure in deep foundation pit[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2011, 20(5): 5 - 9. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)