

整体分析法在基坑变形与力学特性研究中的应用*

李恭晨

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京,100083)

摘要: 为了研究整体分析法在基坑变形与受力中的应用,本文选取北京市某一采用复合土钉墙的基坑作为研究对象,运用FLAC 3D有限差分软件对该工程进行数值模拟,并结合现场实测数据进行分析,得到了该基坑侧壁侧向位移、土钉(锚索)轴力以及水泥土搅拌桩弯矩,并用现场实测数据验证了数值模型的可靠性.通过改变数值模型中水泥土搅拌桩这一影响因素,分析该基坑的侧壁变形、土钉(锚索)轴力的变化以及两者协同变化对基坑稳定性的影响.结果表明:基坑侧壁水平位移呈“弓”字形,两凸点位于基坑深度的1/3与2/3处、水平位移在1/3深度处最大;基坑水平位移随开挖深度的增加而增加,增长最大幅度是在第一步开挖时;土钉(锚索)轴力沿长度呈两头轴力小,距离临空面1/3长度处轴力最大,土钉从第1排到第5排轴力依次减小;水泥土搅拌桩不仅有挡水作用,还对基坑土体变形增长有一定的抑制作用;支护体系某一因素发生改变时,其不仅仅影响的是土体的变形,还有支护体系受力变化,两者共同作用来维持基坑的稳定性,所以分析时应将基坑土体与支护体系作为一个整体来考虑基坑的受力与变形.

关键词: 复合土钉墙;整体分析法;变形特性;数值模拟;力学特性

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.03.21.0001

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)03-0377-08

引文格式: 李恭晨.整体分析法在基坑变形与力学特性研究中的应用[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2021,38(3):377-384.

英文引文格式: LI G C. Application of holistic analysis method in the study of deformation and mechanical properties of foundation Pit[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(3): 377-384.

Application of Holistic Analysis Method in the Study of Deformation and Mechanical Properties of Foundation Pit

LI Gongchen

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: (Purpose)In order to study the overall analysis on the application of deformation and stress, this article selects a with composite soil nailing wall of foundation pit in Beijing as the research object,(Method)using the finite difference software Flac 3d numerical simulation for the project, obtained the lateral displacement of the foundation pit wall, soil nail (anchor) axial force and cement-soil mixing pile bending moment, and verify the reliability of the numerical model to the actual measured data.By changing the influence factor of soil-cement mixing pile in the numerical model, this paper analyzes the lateral wall deformation, the change of axial force of soil nails (anchor cables) and the contribution of the two changes to the stability of the foundation pit.(Result)The results show that the horizontal displacement of the side wall of the foundation pit is shaped like a "bow", the two convex points are located at 1/3 and 2/3 of the depth of the foundation pit, and the horizontal displacement is the largest at 1/3 of the depth.The horizontal displacement of foundation pit increases with the increase of excavation depth.The axial force of soil nails (anchor cables) is small at both ends along the length, and the axial force is the largest at 1/3 of the length away from the air surface. The axial force of soil nails decreases successively from row 1 to row 5.Soil-cement mixing not only holds back water, but also inhibits the deformation of foundation pit.When a certain factor of the support system changes, it will not only affect the soil deformation, but also the stress change of the support system, both of which change together to maintain the stability of the foundation pit. Therefore,

* 收稿日期: 2020-03-21

基金项目: 大学生科技创新基金项目(201510405022).

作者简介: 李恭晨(1994),男,硕士生,从事水文地质、工程地质的研究, E-mail: ligongch@163.com.

the soil and the support system of the foundation pit should be taken as a whole to analyze the stress and deformation of the foundation pit.

Key words: composite soil nail wall; global analysis; deformation characteristics; numerical simulation; mechanical property

0 引言

复合土钉墙是近十多年来在土钉墙基础上发展起来的新型支护结构,其根据具体工程条件将土钉墙与深层搅拌桩、旋喷桩、各种微型桩、钢管土钉及预应力锚杆等结合起来,形成的复合基坑支护结构.因其施工简单快速、经济效益好等优势被工程师们广泛应用于各类基坑项目中^[1-3].单仁亮^[4]、杨育文^[5]、李彦初^[6]等采用数值模拟的方式对复合土钉墙的作用机理进行了研究,表明复合土钉墙相对于纯土钉墙有着更好的支护效果.魏焕卫^[7]、王辉^[8]、张志平^[9]等结合数值模拟以及现场监测得到了复合土钉墙的受力特征以及土体的应力状态特征.张尚根^[10]、魏焕卫^[11]通过理论分析结合数值模拟的方法得到了复合土钉墙变形特性以及相应的变形计算方法.俞缙^[12]等通过有限元手段分析特殊土的复合土钉墙工程案例,得到了特殊土下的复合土钉墙特性.张宗领^[13]等通过数值模拟手段分析了地面超载对采用复合土钉墙支护方式的基坑的影响.张志平等^[9]对基坑的监测数据以及数值模拟结果进行分析,总结出影响复合土钉墙支护效果的因素,得出了各个影响因素对控制基坑变形的贡献程度.目前对复合土钉墙数值模拟的分析研究有很多,但对水泥土搅拌桩加预应力锚索的复合土钉墙变形特性研究较少,大部分研究均仅将水泥土搅拌桩用作止水帷幕,未考虑其加固土体和挡土作用.事实上复合土钉墙中锚索、土钉、搅拌桩其中一个改变时,其他因素会相互调节以满足基坑变形及稳定性,但目前研究分析时仅考虑锚索、土钉、搅拌桩单个因素对基坑的影响,没有在单个因素改变时,将支护结构作为一个整体对基坑的变形及稳定性进行分析.

本文以北京某基坑实例作为工程背景,结合Flac 3d有限差分数值模拟和现场监测数据,分析水泥土搅拌桩加预应力锚索的复合土钉墙变形特性,并且研究锚索、土钉、搅拌桩等其中一个因素变化时,支护体系的变化以及从整体的角度分析支护体系对基坑的支护效果.

1 工程概况

拟建场区位于温榆河故道及其边缘地区,大部分为空地,整体自然地形基本平坦.拟建科研楼建筑面积为41 495 m².科研楼基础板底标高平均高度-9.89 m,基坑平均开挖深度为8.39 m.

1.1 工程及水文地质条件

基坑开挖影响深度范围内土体自上而下具体参数见表1.

表 1 各土层主要物理性质参数

Tab 1 Main physical property parameters of each soil layer

层名称	密度 ρ (g/cm ³)	压缩模量E(MPa)	粘聚力c(kPa)	内摩擦角 ϕ	泊松比 μ
素填土	2.05	10.2	10	8.0	0.25
细砂-中砂	1.85	15.0	0	12.0	0.3
粘质粉土-砂质粉土	1.99	9.8	13	20	0.3
重粉质粘土-粉质粘土	1.93	4.1	23.5	10.7	0.3
粘质粉土-砂质粉土	1.99	9.8	46.5	13.5	0.3
粘土-重粉质粘土	1.89	5.2	59	12.5	0.3
粉质粘土-粘质粉土	2.01	8.3	25	13.5	0.3

表 2 地下水类型及其埋深

Tab 2 Types of groundwater and its buried depth

地下水类型	地下水埋深(m)
潜水	1.40~3.80
层间水	10.20~12.20
层间水(具承压性)	18.70~20.20
承压水	28.30~31.60

地面以下深度45.00 m范围内实测到4层地下水，拟建场地各层地下水水质对混凝土结构及钢筋混凝土结构中的钢筋均具有微腐蚀性，具体地下水情况见表2.

1.2 基坑支护设计及施工方案

4#科研楼基坑侧壁安全等级为二级. 基坑支护方式为搅拌桩复合土钉墙加预应力锚杆支护，4#科研楼基坑支护平面图见图1.

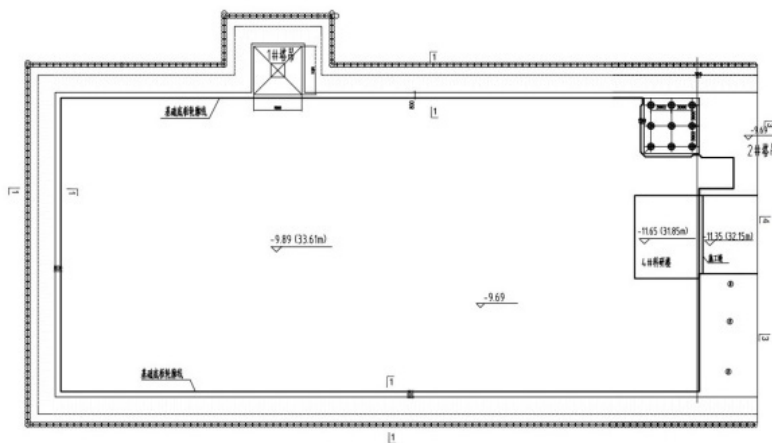


图 1 4#科研楼基坑支护平面图

Fig 1 Foundation pit support plan of no. 4 research building

开挖深度8.39 m，采用1：0.3放坡，坡度73°，竖向设置5道（第二道为预应力锚杆，其余为土钉），土钉孔径100 mm，置入Φ18钢筋，间距1 400 mm/1 500 mm（竖向）×1 500 mm（横向），梅花形布置，长度自上而下分别为8.80 m、16.00 m、8.80 m、7.80 m、6.80 m. 预应力锚索的自由段为5 m，锁定拉力为120 kN. 锚喷面板的厚度为8 cm，喷射的是C20混凝土，内衬φ8@200×200 mm钢筋网. 采用Φ700水泥土搅拌桩止水帷幕止水，桩顶在坡顶以下4.0 m，桩底进入基坑底3.0 m，详细数据见表3和图2. 本剖面水泥土搅拌有效桩长7.39 m. 为确保坑内干燥及土方开挖顺利进行，对坑内水采用了疏干井进行疏干.

表 3 边坡土钉设计

Tab 3 Design of soil nails for slope

层次	距地面深度(m)	孔径(mm)	倾角(度)	长度(m)	配筋
1	1.3	100	10	8.8	1Φ18
2	2.8	150	10	16.0	7φ5
3	4.3	100	10	8.8	1Φ18
4	5.7	100	10	7.8	1Φ18
5	7.1	100	10	6.8	1Φ18

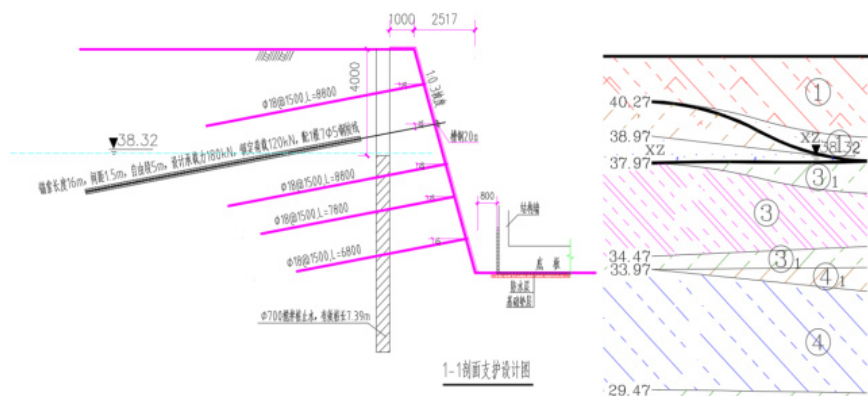


图 2 4#科研楼支护剖面图

Fig 2 Support profile of no. 4 research building

2 数值模拟与分析

2.1 Flac 3d模型建立

本文采用FLAC 3d建立三维有限差分数值模型。模型中间部位绝大多数单元一直在进行重复计算^[14]，为了提高计算效率、降低工作量，基坑按照实际工程的土钉间距宽度进行建模，且根据文献^[13,15]所述基坑开挖影响范围在2~3倍开挖深度以内，本文模型深度和长度均采用4倍开挖深度来建模，因此建立的模型尺寸为56 m×3 m×38 m，模型见图3。模型上表面为自由面，距离坡顶外1~6米范围内施加均布荷载20 kPa，侧立面约束法向位移，底面为固定约束效应。模型参数采用地质勘察资料所提供的数据，本构模型采用Mohr-Coulomb模型。面层采用shell单元，止水帷幕采用pile单元，土钉、锚索均采用cable单元，具体参数见表4。

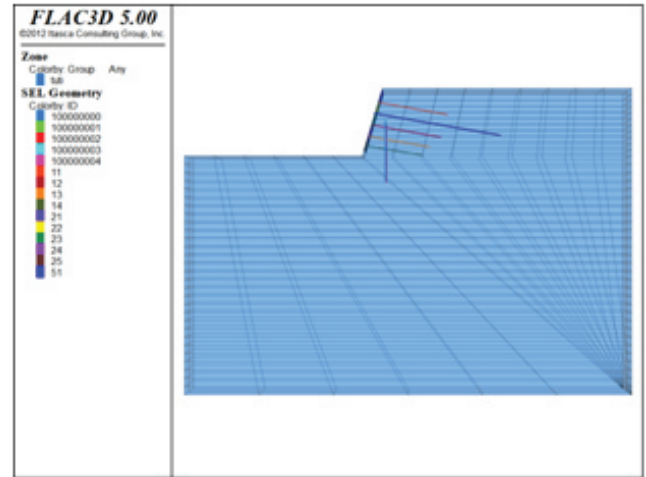


图3 计算模型

Fig 3 Calculation model

表4 土钉和预应力锚索物理力学参数

Tab 4 Physico-mechanical properties of soil nail and anchor cable

序号	类型	密度 $\rho/(g/cm^3)$	弹性模量 E/GPa	横截面积 A/mm ²	浆体黏聚力 $c_g/(N/m)$	浆体摩擦角 $\varphi_g/(^\circ)$	浆体剪切刚度 kg/(N/m ²)	浆体周长 P _g /mm	压缩强度 F _c /kN	拉伸强度 F _t /kN
1	Φ20	7.8	200	314.20	2×10^5	30	1.75×10^7	408.2	105.26	139.82
2	自由段	7.8	195	181.37	1×10^0	1	1	471.0	337.35	337.35
3	锚固段	7.8	195	181.37	2×10^5	30	1.75×10^7	471.0	337.35	337.35

2.2 基坑施工过程中工况的设置

按照施工顺序，施工至土钉或锚索以下0.5 m处时停止开挖。模拟基坑施工步骤见表5。

表5 基坑施工分析步骤

Tab 5 Analysis step of foundation pit construction

工况	内容
1	初始地应力平衡
2	止水帷幕施工及坑边堆载
3	开挖到地下1.8 m
4	安装第一道土钉与面层
5	开挖到地下3.3 m
6	安装第二道锚索、腰梁及面层
7	开挖到地下4.8 m
8	安装第三道土钉与面层
9	开挖到地下6.2 m
10	安装第四道土钉及面层
11	开挖到地下8.4 m
12	安装第五道土钉及面层
13	计算至不平衡力小于 10×10^{-5}

2.3 基坑侧壁的变形特性

基坑侧壁水平位移能较好地反映基坑的变形情况，因此绘制5个典型工况（工况3、5、7、9、11）下基坑侧壁水平位移随深度的变化曲线，如图4所示。在架设第一道土钉前，土体应力平衡被打破，外部土体有移动的趋势，但由于开挖深度较小（1.8 m），基坑侧壁位移不大。随着开挖深度的加大，基坑侧壁水平位移增加。在工况5完成后，基坑侧壁最大水平位移处并不在上端部，上端部位移为17.76 mm，基坑深度2.9 m处墙体水平位移最大，为35.13 mm，此时的最大水平位移占基坑侧壁最终阶段最大水平位移的81.9%，基坑侧壁整体呈“挺胸”形，即

基坑侧壁中上部深度侧移大，上部与下部深度侧移小。这是因为在第一道土钉和开挖面土体的作用下，基坑侧壁上端和开挖面处墙体的水平变形受到了限制，两者的增加速率相对于两者之间的水平位移增加速率小很多。在架设第二道预应力锚索后，随着开挖深度的增加，基坑侧壁位移几乎不变，最大水平位移相对于上一次开挖减少了0.32 mm，这是因为预应力锚索很好的限制了基坑侧向位移的增加。在工况9和工况11下，深度4 m以上的基坑侧壁水平位移增加幅度小，侧壁最大水平位移增幅分别仅为2.30 mm、5.75 mm，分别占基坑侧壁最终阶段最大水平位移的5.37%和13.41%，但随着开挖深度的增加，4 m深度以下的基坑侧壁水平位移逐渐增加，成凸起状，随着工况的进行，下凸点位置从深度5.2 m下移至7.0 m，凸点处水平位移从6.96 mm增长至17.2 mm。最终，侧移曲线呈具有双凸点的“弓”字形，凸点分别位于基坑深度的1/3和2/3处。原因是预应力锚索的施加有效地限制了基坑侧壁水平位移的增加，但随深度的增加，开挖深度超过了锚索有效影响范围，4 m深度以下基坑侧壁位移开始增长，但在搅拌桩和土钉的支护作用下，4 m深度以下基坑侧壁位移增长幅度相对于4 m以上基坑侧壁范围内的水平位移增长幅度要小。

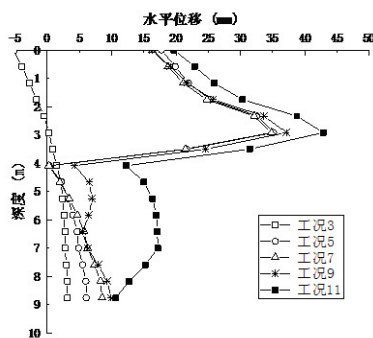


图 4 基坑侧壁水平位移随深度的变化曲线

Fig 4 Horizontal displacement curve of side wall of foundation pit with depth

2.4 土钉(锚杆)轴力分析

从图5可以看出沿土钉或锚索长度方向轴力并不像文献^[6]所述的呈中间大两头小，而是成两头轴力小，距离临空面1/3长度处轴力最大。沿土钉和锚杆长度方向，锚杆轴力降低幅度很大，由此可见水泥土搅拌桩的设置对于土钉和锚杆的受力起到了很大的分担作用。第2排锚索轴力最大，为91 000 N，土钉从第1排到第5排轴力依次减小，第5排土钉几乎没有受力。

2.5 水泥土搅拌桩弯矩分析

图6为水泥土搅拌桩弯矩图，搅拌桩弯矩分三部分：基坑深度3.0 m~6.4 m范围内弯矩小于0，其中最小值为-16 877 N·M，位于深度5 m处；基坑深度6.4 m~9.6 m范围内弯矩大于0，其中最大值为2 2783 N·M，位于深度8.2 m处；基坑深度9.4 m~10.86 m范围内弯矩小于0，其中最小值为8 938 N·M，位于深度10.28 m处，说明复合土钉墙中水泥土搅拌桩起到了一定的支护作用。

2.6 实测与模拟结果对比

选取复合土钉墙坡顶水平位移计算结果与现场实测结果进行对比分析。如图7所示，工况6~工况11之间顶点水平位移有所差别，但曲线变化趋势相同，分析原因可能是实际工程工况与模拟工况有一定的差别，模拟是整体上挖至土钉（锚索）以下1 m后再施工土钉（锚索），实际施工情况是某部分开挖至土钉（锚索）以下1 m后再施工土钉（锚索）。从总体上看两种曲线在趋向上基本相同，侧向位移值基本接近。由此证明FLAC

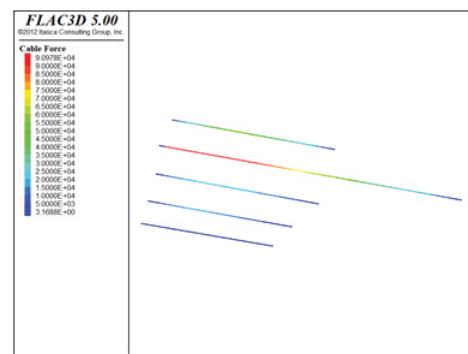


图 5 土钉(锚索)轴力云图

Fig 5 Axial force cloud diagram of soil nail (anchor cable)

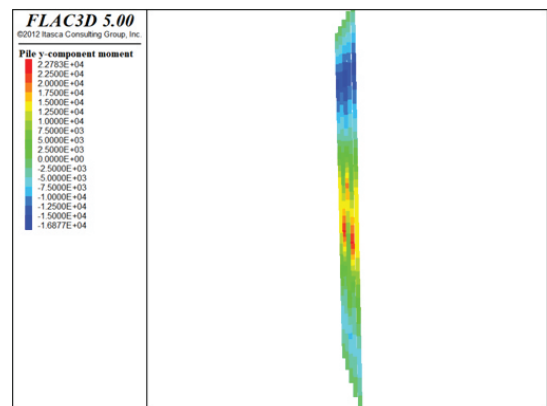


图 6 水泥土搅拌桩弯矩云图

Fig 6 Bending moment cloud diagram of soil-cement mixing pile

3D有限差分软件计算基坑变形具有较好的可靠性,本构模型和模型参数的取值较为合理.开挖到坑底时,模拟最大水平位移为20.50 mm,为0.024%的基坑深度,略大于实测最大水平位移(19.14 mm),满足最大位移控制值要求,说明结合水泥土搅拌桩和预应力锚索的复合土钉墙支护条件下,基坑变形得到了较好的控制.

该基坑随着开挖深度的增加,坡顶侧向位移曲折变化.由图7可知,从工况3至工况5,水平位移增加速率较缓,原因是第一道土钉的施加阻止了基坑土体的进一步侧向变形.从工况5至工况7,水平位移增加速率急剧增加,原因是第二次开挖深度较大,第一道土钉支护影响范围有限,且再次开挖部分未及时进行支护,导致土体变形加剧.从工况7至工况9,基坑侧壁水平位移产生负增长,是因为第二道锚索的预应力作用,加固土体,使得土体反向移动.从工况9至工况13,随着开挖深度的增加,土压力增大,坡顶水平位移开始增加,但在施工的土钉和有效长度的水泥土搅拌桩的作用下,水平位移增加幅度有所控制,最后趋于稳定.

3 从整体角度分析有无搅拌桩的基坑变形与受力

大多数文献的基坑变形与受力的数值模拟均采用单因素分析法,分析的结果均为某个因素变化导致土体位移变化,但事实上当支护结构系统的某个因素变化时支护结构和土体是整体协调变化来维持基坑的稳定性的.尽管在实际工程中没有考虑“水泥土搅拌桩”的挡土效应,但实际上是有一定增强基坑稳定性的效果.因此本文基于整体角度来分析搅拌桩这一因素变化时,支护系统各部分与基坑土体整体协调变化是怎样维持支护结构和土体的整体稳定性.

本文在原数值模型与参数的基础上,在不使用水泥土搅拌桩的条件下来进行数值模拟计算.图8为有无水泥土搅拌桩的基坑侧壁水平位移曲线对比图.由图8可知,水泥土搅拌桩不仅有挡水功能,对基坑土体变形增长有一定的抑制作用.在深度0 m~4 m以内,两者侧向位移相差不大,最大位移处仅增长2.05 mm,增长了4.79%,而深度4 m~8.39 m处,无水泥土搅拌桩的基坑侧壁侧向位移明显大于有水泥土搅拌桩的基坑

侧壁侧向位移,最大位移处侧壁水平位移相差6.86 mm,增长了39.88%.图9(a)为原数值模拟土钉(锚索)的轴力云图,图9(b)为无水泥土搅拌桩的数值模拟的土钉(锚索)轴力云图,表6为各层土钉(锚索)轴力最大值.由图表对比可知,因无水泥土搅拌桩,第一道土钉最大轴力增长了788.6 N,增长率为1.54%,第二道锚索轴力增长9 560.2 N,增长了10.51%,第三道土钉轴力增长8 135.2 N,增长了38.60%,第四道土钉最大轴力增长了9 990.7 N,增长率为64.24%,第五道土钉最大轴力增长了1 162.31 N,增长率为383.67%.土钉(锚索)轴力增长率从上至下依次增大,且从第2道锚索施加开始,轴力增加明显.分析可知两个模型深度4 m以下的土钉(锚索)轴力和基坑侧壁水平位移相差较大,原因在于本文原模型水泥土搅拌桩有效长度7.39 m,桩顶位于深度4 m处,其有效抑制了基坑深度4 m以下的侧壁位移,无水泥土搅拌桩后,基坑稳定性由土体和土钉(锚索)来维持,表现形

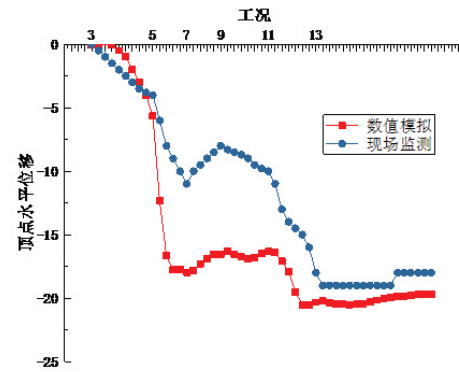


图7 坡顶水平位移随工况变化的数值模拟与现场监测对比曲线

Fig 7 Comparison curve between numerical simulation and field monitoring of horizontal displacement of the top of the slope under different working conditions

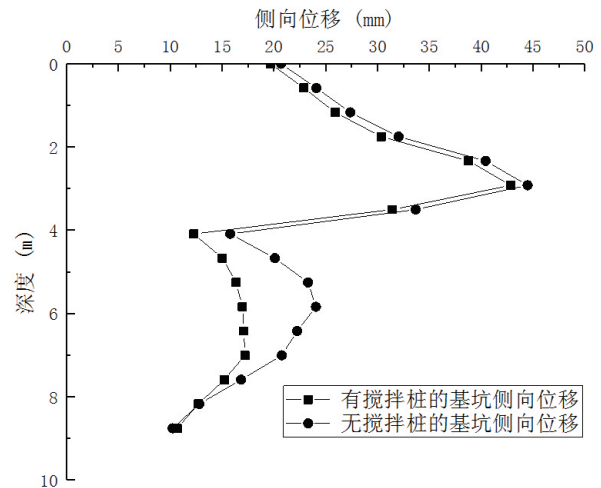


图8 有无水泥土搅拌桩基坑侧壁水平位移对比曲线

Fig 8 Horizontal displacement comparison curve of side wall of foundation pit with or without cement soil mixing pile

式为基坑侧壁水平位移的增长和土钉（锚索）轴力的增加。因此，支护结构某一部分变化时，影响的不仅仅是土体的变形，还有支护体系受力变化，两者共同来维持基坑的稳定性，所以分析时应将基坑土体与支护体系作为一个整体来分析基坑的受力与变形。

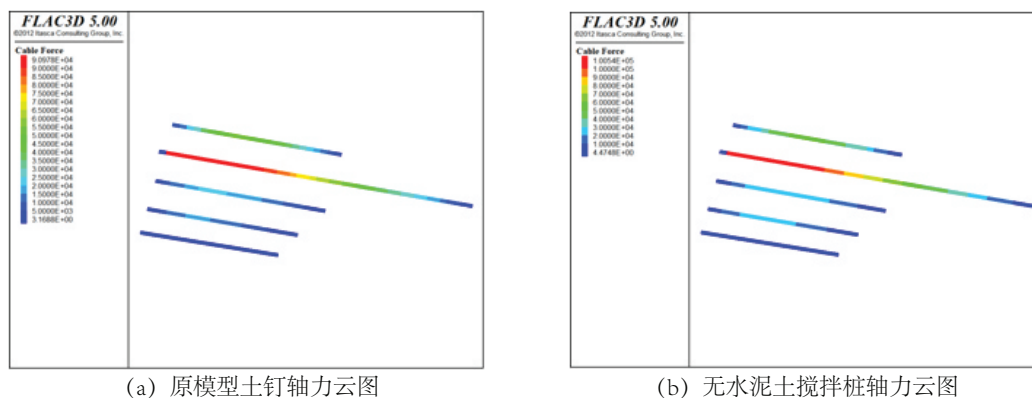


图 9 土钉（锚索）轴力云图

Fig 9 Axial force cloud diagram of soil nail (anchor cable)

表 6 各道土钉（锚索）轴力最大值

Tab 6 Maximum axial force of each soil nail (anchor cable)

土钉（锚索）道数	原数值模型轴力 (N)	无水泥土搅拌桩数值模型轴力 (N)
1	54 250.2	52 038.8
2	90 977.8	100 538.0
3	21 064.4	29 199.6
4	15 550.8	25 541.5
5	302.9	1 465.3

4 结论

运用有限差分软件Flac 3d建立模型，得到各开挖步的基坑侧壁水平位移、土钉（锚索）轴力以及水泥土搅拌桩弯矩，将有限差分计算结果与现场实测数据进行对比，得到如下结论：

(1) 本文中采用水泥土搅拌桩+预应力锚索的复合土钉墙的基坑侧壁水平位移与常规复合土钉墙的基坑侧壁水平位移曲线不同，其成“弓”字形，其双凸点分别位于基坑深度的1/3和2/3处，最大水平位移位于基坑深度1/3处。

(2) 基坑水平位移随开挖深度的增加而增加，增长最大幅度是在第一步开挖时，该阶段侧壁最大水平位移占最终阶段侧壁水平位移的81.9%。

(3) 土钉（锚索）轴力沿长度呈两头轴力小，距离临空面1/3长度处轴力最大，土钉从第1排到第5排轴力依次减小。

(4) 在该复合土钉墙中，水泥土搅拌桩根据弯矩的正负分为三段，水泥土搅拌不仅有挡水作用，还对基坑土体变形增长有一定的抑制作用。

(5) 在复合土钉墙中，支护体系某一因素发生改变时，其不仅仅影响的是土体的变形，还有支护体系受力变化，两者共同变化来维持基坑的稳定性，所以分析时应将基坑土体与支护体系作为一个整体来分析基坑的受力与变形。

参考文献：

[1] STOCKER M F, RIEDINGER G. The bearing behavior of nailed retaining structure[C]. New York: The American Society of Civil Engineers (ASCE), Geotechnical Special Publication 25, 1990: 612-628.

[2] PRADHAN B, THAM L G, YUE Z Q. Soil-nail pullout interaction in loose fill materials[J]. International Journal of Geo-mechanics, ASCE, 2006, 6(4): 238-247.

[3] JOSHI B. Behavior of calculated nail head strength in soil-nailed structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(9): 819-828.

- [4] 单仁亮, 郑赟, 魏龙飞. 粉质黏土深基坑土钉墙支护作用机理模型试验研[J]. 岩土工程学报, 2016(7): 1175-1180.
SHAN R L, ZHENG J, WEI L F. Model experimental study on supporting mechanism of soil nailing wall in silty clay deep foundation pit[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016(7): 1175-1180. (in Chinese)
- [5] 杨育文, 肖建华. 土体自稳坡角和土钉墙稳定机理分析[J]. 长江科学院院报, 2012(11): 87-90.
YANG Y W, XIAO J H. Analysis of self-stabilizing slope angle of soil and stability mechanism of soil nailing wall[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2012(11): 87-90. (in Chinese)
- [6] 李彦初, 陈轮. 深基坑复合土钉支护的三维有限元数值分析[J]. 工程勘察, 2012(2): 11-15.
LI Y C, CHEN L. Three-dimensional finite element numerical analysis of composite soil nailing in deep foundation pit[J]. Engineering Investigation, 2012(2): 11-15. (in Chinese)
- [7] 魏焕卫, 韩学民. 变形协调情况下土钉墙内力和位移的计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(z1): 2758-2763.
WEI H W, HAN X M. Calculation method of internal force and displacement of soil nailing wall under deformation coordination [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(Z1): 2758-2763. (in Chinese)
- [8] 王辉, 程建华. 复合土钉墙的受力分析与变形计算[J]. 煤炭工程, 2014, 46(7): 46-48. (in Chinese)
WANG H, CHENG J H. Stress analysis and deformation calculation of composite soil nailing wall[J]. Coal Engineering, 2014, 46(7): 46-48. (in Chinese)
- [9] 张志平, 程学军. 某超深基坑组合支护体系上部土钉墙内力监测及分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(10): 105-106.
ZHANG Z P, CHENG X J. Monitoring and analysis of the internal force of the soil nailing wall in the upper part of the composite support system of an ultra-deep foundation pit[J]. Building Structure, 2011, 41(10): 105-106. (in Chinese)
- [10] 张尚根. 复合土钉墙变形分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 243-246.
ZHANG S G. Deformation analysis of composite soil nailing wall[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 243-246. (in Chinese)
- [11] 魏焕卫, 宋丰波, 杨敏, 等. 复合土钉墙变形的简化计算方法[J]. 工程力学, 2011(1): 156-161.
WEI H W, SONG F B, YANG M, et al. A simplified method for calculating the deformation of composite soil nailing wall[J]. Engineering Mechanics, 2011(1): 156-161. (in Chinese)
- [12] 俞缙, 王艳芳, 宋博学. 复合土钉支护的软土基坑开挖有限元模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 212-217.
YU Y, WANG Y F, SONG B X. Finite element simulation analysis of soft soil foundation pit excavation supported by composite soil nailing[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 212-217. (in Chinese)
- [13] 张宗领, 付超. 地面超载对土钉墙工作性能影响的有限元分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 28(1): 151-153.
ZHANG Z L, FU C. Finite element analysis of the influence of ground overloading on the working performance of soil nailing wall[J]. Journal of Xinyang normal University (Natural Science Edition), 2015, 28(1): 151-153. (in Chinese)
- [14] ORAZALIN Z Y, WHITTLE A J, OLSEN M B. Three-dimensional analyses of excavation support system for the Stata Center basement on the MIT campus[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(7): 05015001.
- [15] 张宗领, 王士革. 深基坑土钉支护整体三维有限元分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2013, 26(4): 625-627.
ZHANG Z L, WANG S G. Three-dimensional finite element analysis of soil nailing in deep foundation pit[J]. Journal of Xinyang normal University (Natural Science Edition), 2013, 26(4): 625-627. (in Chinese)
- [16] 王曙光, 滕延京, 段启伟, 等. 土钉墙变形及土钉内力特征研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 36-40.
WANG S G, TENG Y J, DUAN Q W, et al. Study on deformation and internal force characteristics of soil nailing wall[J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 48(S2): 36-40. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科