

护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙联合 支护体系研究应用

孙 剑¹, 范民浩², 李 鑫³

(1.北京爱地地质勘察基础工程公司,北京100144; 2.北京航天地基工程有限责任公司,北京100070;

3.中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京102600)

摘要:本文提出了一种新的联合支护体系——护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙支护体系,成功解决了基坑周边无放坡空间需垂直开挖、基坑深度大、要求位移小、支护费用高等技术难题,做到了施工便利,对控制边坡位移变形、增强边坡整体稳定性、保证在基坑开挖工程中不发生对周围环境的影响具有良好的作用。采用这种支护方式对北京一工程进行设计施工探讨,经工后监测效果良好,大大地提高了边坡的安全稳定性,从而验证了这一支护形式的可行性,其在深基坑支护中具有常规土钉墙和护坡桩无法相比的技术与经济优势,可供其他类似工程参考,具有较高的适用推广价值。

关键词:深基坑支护;护坡桩;微型钢管桩;复合土钉墙;联合支护体系;变形监测

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)10-0116-09

Combined supporting system of the slope protection pile and the compound soil nail wall with micro steel pipe piles

SUN Jian¹, FAN Minhao², LI Xin³

(1.Beijing Aidi Geological Exploration and Foundation Engineering Co., Beijing 100144, China;

2.Beijing Aerospace Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China;

3.China Railway No.5 Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: This article proposes a new combined supporting system—the slope protection pile and the compound soil nail wall with micro steel pipe piles, which successfully solved the technical difficulties such as necessity of vertical excavation around the foundation pit due to no grading space, great depth of the foundation pit, requirement for small displacement, and high support costs. In addition, the system provided convenient construction, and was beneficial to control of the displacement and deformation of the slope, and enhancement of the overall stability of the slope without impact on the surrounding environment during the excavation of the foundation pit. The design and construction with this support method was tested for a project in Beijing, and the monitoring results were good with great improvement in the safety and stability of the slope; thus, verifying the feasibility of the support form. It has technical and economic advantages that conventional soil nail walls and slope protection piles cannot compare to in deep foundation pit support. It can be used as a reference for other similar projects, and has high application and promotion value.

Key words: deep foundation pit support; slope protection pile; micro steel pipe pile; compound soil nail wall; combined support system; deformation monitoring

收稿日期:2020-12-25; 修回日期:2021-03-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.10.016

作者简介:孙剑,男,汉族,1985年生,主任工程师,工程师,国家注册岩土工程师,硕士,主要从事岩土工程勘察与设计工作,北京市石景山区晋元庄路23号,421127987@qq.com

引用格式:孙剑,范民浩,李鑫.护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙联合支护体系研究应用[J].钻探工程,2021,48(10):116-124.

SUN Jian, FAN Minhao, LI Xin. Combined supporting system of the slope protection pile and the compound soil nail wall with micro steel pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):116-124.

0 引言

近年来,随着我国经济和城市建设的快速发展,出现了大量复杂深基坑工程,促进了设计计算理论的提高和施工工艺的发展。对基坑工程进行正确的设计和施工,能带来巨大的经济和社会效益,对加快工程进度和保护周围环境发挥重要作用^[1-5]。

目前深基坑支护采用的方法为土钉墙(复合土钉墙)、护坡桩(桩锚、桩+内支撑)及地下连续墙三大类^[6]。土钉墙支护最大特点就是造价低、施工方便,但土体位移变形稍大,因此在边坡位移无特殊要求的地方及对周围环境影响不大的地方广泛应用^[7]。护坡桩支护最大优点是控制位移能力强,但投入大,成本高,施工复杂^[8]。随着实际工程经验的积累,人们发现采用2种或2种以上的支护结构相结合,不仅降低工程造价,而且更加合理,这样形成了一种复合型支护体系,它既可以独立采用,又可以联合运用,达到方案最优化、施工简便的目的^[9-13]。

本文以工程实例介绍一种新的联合支护方法:护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙支护体系。该方法施工便利,造价介于完全护坡桩支护与土钉墙支护之间,对控制边坡位移变形、增强整体稳定性、保证边坡开挖过程中不影响周围环境等具有很好的作

用,大大提高了边坡的安全稳定性。特别是在相对较好的地层中、无放坡空间或放坡坡度小、周边有建筑物的边坡支护,优于常规土钉墙和护坡桩单独支护的体系。

1 工程概况

某深基坑项目位于北京市丰台区花乡,南四环国际汽车博览中心东侧,东临四合庄西路,南邻汽车博览中心南路,西邻国际汽车博览中心东路,北邻1516-12-A综合性商业金融用地。地上12层,高度 ≥ 50 m,框架-剪力墙结构,地下3层,±0.00相当于绝对标高47.9 m,目前自然地面标高约48.0 m,基坑从自然地面算起深约14.5 m,基坑长约147 m,宽约47.6 m。本文研究的重点部位为基坑南侧与东侧,长度约160.0 m,详见图1。基坑东侧紧邻用地红线,用地红线距四合庄西路马路牙3.0 m,结构边线距用地红线2.06 m;基坑南侧距用地红线约8.4~13.0 m,在用地红线内设置钢筋加工区与堆放区、项目部办公区及模板堆放区,护坡紧邻加工场地和堆放场地,结构边线距项目部办公区围墙2.2 m。周边环境较复杂,对基坑变形及稳定性要求高,是该项目基坑支护的重点与难点。

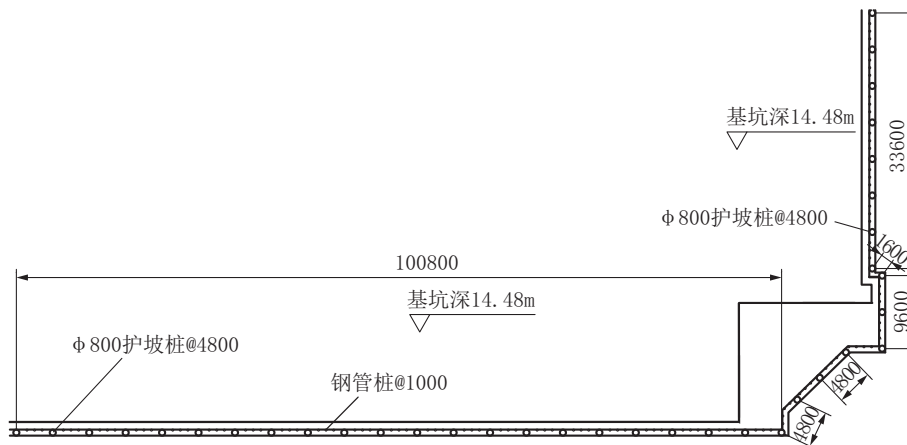


图1 基坑支护平面布置

Fig.1 Layout plan of the foundation pit support

本场地从自然地面至基础底部,自上而下地层分布为:①层素填土,②层粘质粉土,③层细中砂,④层圆砾,⑤层卵石,地层物理力学参数见表1。

2 基坑支护方案设计

根据现场南侧与东侧的周边环境,无放坡空间

且无扩展的可能,在这种情况下,根据《建筑基坑支护技术规范》(JGJ 120—2012)^[14]中支护结构选型、场地周边地下地上情况,结合多年的类似工程经验,在总结类似基坑工程成功的经验及教训的基础上,提出2种支护比选方案:

方案一:采用桩锚支护体系。这种支护体系属

表1 岩土物理力学参数指标
Table 1 Physical and mechanical parameters
of the rocks and soils

岩土名称	层厚/ m	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松 比	c / kPa	φ / ($^{\circ}$)	Q_{sk} / kPa
素填土	3	19.4	0.35	10	15	35~40
粘质粉土	1	19.8	0.3	20	20	65~70
细中砂	2	20.2	0.25	3	30	100
圆砾	2	20.5	0.2	3	40	150
卵石	27	21.0	0.2	3	40	150~180

于一种传统深基坑支护形式,在空间上能满足狭小场地内深基坑施工的需求。优点是设计施工简单,工艺成熟,结构刚度大,边坡位移小,技术可靠,安全系数高。但最大的缺点就是成本高,不经济。

方案二:一种安全可靠又比较经济实用的方案,鉴于《建筑基坑支护技术规范》(JGJ 120—2012)第3.3.2条规定微型钢管桩复合土钉墙支护基坑深度不宜超过12.0 m,本工程基坑深度为14.5 m,提出了“护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙”的支护体系。这

种支护体系是一种符合现场条件且具有安全稳定性好、节省投资的方案,由土钉(钢管式土钉)、预应力锚杆、微型钢管桩、护坡桩、喷射混凝土面层共同形成的一种新的支护体系。护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙支护就是在坡面中增设护坡桩。护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙支护体系仍然采用《建筑基坑支护技术规范》(JGJ 120—2012)5.1、5.2、5.3条中设计计算方法,而坡面中增设护坡桩在计算中不作考虑,作为安全储备的作用,其作用是提高护坡面的表面刚度,使整个边坡形成一个整体,它对控制坡面位移、地面沉降、防止土方开挖过程中局部出现坍塌以及控制每层开挖到支护前这段时期内的位移、抗倾覆方面都有重要的作用,对周围建筑物的保护提供可靠的保证。

2.1 桩锚支护

采用砖墙构造柱+桩锚支护体系,垂直开挖,上部3.0 m做砖墙构造柱,下部为桩锚结构,桩长14.50 m,桩间距1.6 m,桩径800 mm,冠梁尺寸800 mm \times 934 mm \times 500 mm,锚索水平间距分别是2.4、1.6 m,长度23.0、17.0 m,如图2所示。

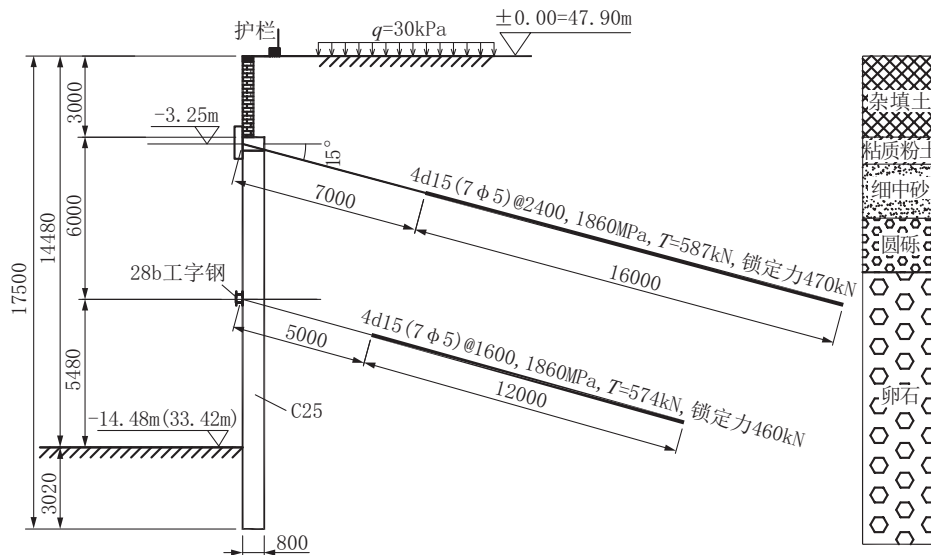


图2 桩锚支护结构断面

Fig.2 Section view of the pile-anchor supporting structure

2.2 护坡桩+钢管桩复合土钉墙支护

采用砖墙构造柱+护坡桩+钢管桩复合土钉墙支护体系,垂直开挖,上部3.0 m为砖墙结构,下部为护坡桩+钢管桩复合土钉墙支护结构,桩长14.50 m,桩间距1.6 m,桩径800 mm,冠梁尺寸800

mm \times 934 mm \times 500 mm,钢管桩桩长14.50 m,间距1.0 m,7道土钉,矩形状布设,横向间距1.0~3.2 m,纵向间距1.5 m,长4.0~9.0 m,4道锚杆,横向间距3.2~2.4 m,与土钉间隔布设,长18.0~10.0 m,如图3所示。

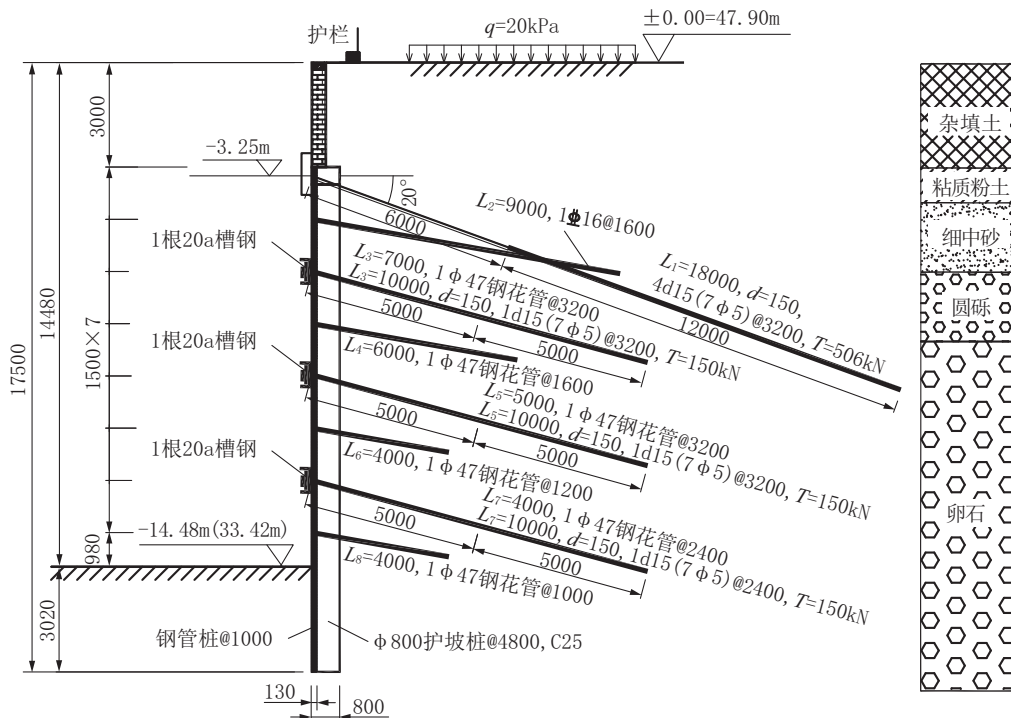


图3 灌注桩-微型钢管桩复合土钉墙支护结构断面

Fig.3 Sectional view of the support structure of cast-in-place piles+the composite soil nail wall with micro steel pipe piles

3 基坑支护方案比选

通过基坑支护设计软件对2种支护方案的整体稳定性进行对比分析,最后从施工费用及施工工期2方面对2种方案进行对比分析,确定选择经济合理的设计方案。

利用深基坑支护结构设计软件验算基坑开挖后的稳定性,结果表明方案一的整体稳定安全系数为1.512,方案二的整体稳定安全系数为1.482,均大于规范要求的二级基坑安全系数1.3,满足设计要求。从整体稳定性方面对比,方案一优于方案二。

3.2 工程造价比较

2种方案的工程造价见表2。经过对比,方案二工程造价比方案一节约40.122万元。

3.3 工期比较

方案二基坑支护计划施工工期35天,如果采用方案一桩锚支护体系计划施工工期47天,可节约工期12天。

3.1 整体稳定性验算

依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012),整体滑动稳定性验算可采用圆弧滑动条法,应满足以下规定:

$$\min \{K_{s,1}, K_{s,2}, \dots, K_{s,j}, \dots\} \geq K_s \quad (1)$$

$$K_{s,i} = \frac{\sum \{c_j l_j + [(q_j l_j + \Delta G_j) \cos \theta_j - u_j l_j] \tan \varphi_j\} + \sum R'_{k,k} [\cos(\theta_k + \alpha_k) + \psi_v]}{\sum (q_j b_j + \Delta G_j) \sin \theta_j} \quad (2)$$

3.4 方案选择

综上所述,新组合基坑支护体系在工期和经济上具有明显的优势,同等条件下与桩锚支护体系相比,可节约造价约25%左右(包含缩短工期的费用)。所以选用方案二支护方案。

4 数值模拟

4.1 模型建立

基坑的南侧与东侧在平面上大致呈L形,长约147m,宽约66m,基坑深约14.5m。本文利用Midas GTS有限元分析软件,取基坑东、南两侧长度的一半进行建模分析,建立的三维模型如图4(结构整

表2 工程总造价对比

Table 2 comparison of the total project cost

方案	序号	项目名称	单位	工程量	综合单价/元	合价/万元
方案一	1	护坡桩	m ³	743.0	1500	111.45
	2	冠梁	m ³	69.4	1250	8.675
	3	锚锁	m	3230	200	64.6
	4	喷射混凝土	m ²	1760	110	19.360
	5	28b工字钢	t	15.324	4200	6.436
	6	砖墙构造柱	m ³	177.6	700	12.432
	7	总价				222.953
方案二	1	护坡桩	m ³	262.2	1500	39.33
	2	冠梁	m ³	69.4	1250	8.675
	3	锚锁	m	900	200	18.0
	4	锚杆	m	1670	180	30.06
	5	土钉	m	3540	32	11.328
	6	钢管桩	m	1435.5	260	37.323
	7	喷射混凝土	m ²	1760	120	21.12
	8	20a槽钢	t	10.866	4200	4.564
	9	砖墙构造柱	m ³	177.6	700	12.432
	10	总价				182.831
方案二节省					40.122	

体绕Z轴旋转180°所得)所示。模型尺寸为150 m×70 m×35 m,其中计算总长度为150 m,基坑开挖部分长73.5 m,开挖面后长76.5 m;计算总宽度为70 m,基坑开挖部分宽33 m,开挖面后宽37 m;计算深度为35 m,是支护结构总深度的2倍。

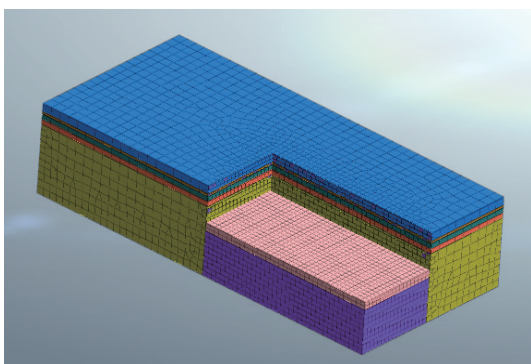


图4 基坑模型

Fig.4 Foundation pit model

为简化模型、方便操作,将支护桩等刚度转换为地下连续墙结构,建立的支护结构模型如图5所示。

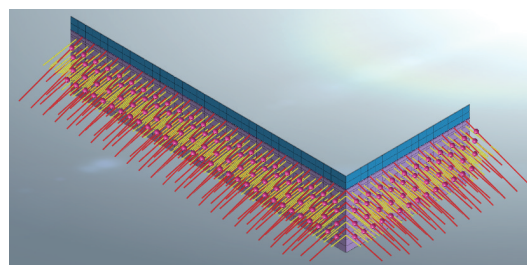


图5 支护结构模型

Fig.5 Supporting structure model

4.2 数值模拟结果分析

4.2.1 支护结构水平位移

从图6中可以看出,基坑开挖完毕,支护结构水平位移最大值为24.97 mm,小于安全报警值44 mm (3‰h),基坑一直处于安全状态。

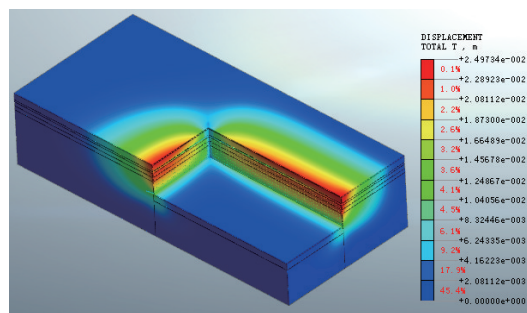


图6 支护结构水平位移云图

Fig.6 Cloud picture of the horizontal displacement of the support structure

4.2.2 支护结构深层水平位移

从图7中可以看出,支护结构深层水平位移在各工况下变化趋势基本一致,在上部砖墙部分,水平位移随深度的增大逐渐减小;而在下部组合结构部分,随着基坑深度的增大,水平位移先增大后减小,底端位移几乎为零,最大值出现在基坑中下部支护结构。支护结构整体最大水平位移为24.18 mm,小于安全报警值58 mm,支护结构处于安全稳定状态。

4.2.3 基坑周边道路沉降及坑底隆起

从图8中可以看出,随着基坑的不断开挖,周边道路将发生不均匀沉降,且沉降值逐渐增大,最大值达7.29 mm,小于安全控制值25 mm,不影响道路的正常使用寿命。

同时,在基坑开挖过程中,坑底将出现隆起现象,坑底隆起随开挖深度的增大而增大,最大值达

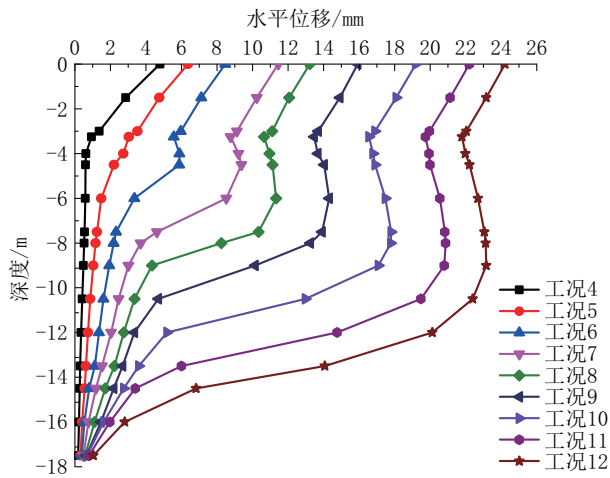


图7 支护结构深层水平位移曲线
Fig.7 Deep horizontal displacement curve of the support structure

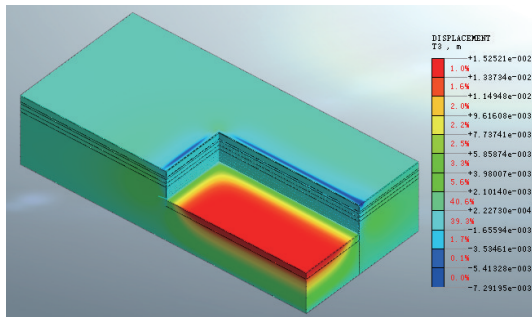


图8 周边道路沉降及坑底隆起云图
Fig.8 Cloud picture of the surrounding road settlement and pit bottom uplift

15.25 mm,出现在坑底中部的的位置,距离基坑侧壁越近,隆起量越小。

4.2.4 锚杆轴力

从图9中可以看出,施工竣工且基坑达到最终稳定状态后,第一道锚杆轴力达到383.8 kN,小于其安全控制值404 kN,其余几道锚杆的轴力同样也小于安全控制值,表明各道锚杆均能正常发挥作用,从而保证基坑的安全。

5 基坑监测

5.1 基坑监测内容

依据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)^[15]相关规定,对基坑支护结构顶部水平及竖向位移、基坑上沿地面沉降、基坑周边道路沉降、支护结构深层水平位移、锚杆轴力等进行实时监

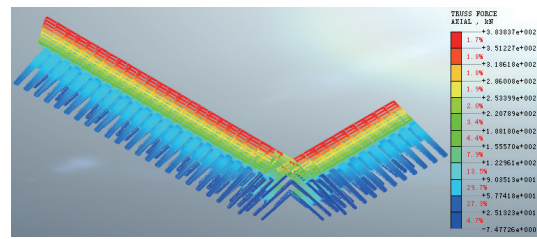


图9 锚杆轴力云图
Fig.9 Cloud picture of the bolt axial force

测^[16],以确保基坑安全。基坑监测点平面布置见图10。

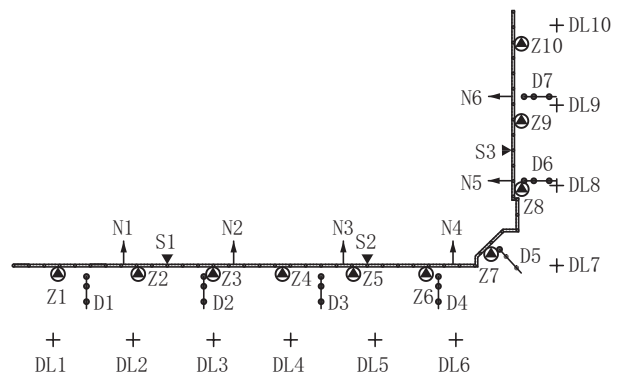


图10 基坑监测点平面布置
Fig.10 Layout plan of the foundation pit monitoring points

5.2 监测预警、报警值

依据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2019),并综合考虑现场实际情况,确定基坑监测预警、报警值见表3。

表3 监测预警及报警值

检测项目	安全预警值	安全报警值
支护结构顶部水平位移/mm	35	44
支护结构顶部竖向位移/mm	20	31
深层水平位移/mm	44	58
锚杆轴力/%	60	80
基坑顶部地面沉降/mm	30	35
周边道路沉降/mm	20	25

5.3 监测结果分析

5.3.1 支护结构顶部水平位移分析

从图11中可以看出,各监测点水平位移随时间的变化趋势大致相同,在土方开挖过程中,支护结构

顶部水平位移随开挖深度的增大逐渐增大,待土方开挖完毕、基坑正常使用过程中,位移变化趋于稳定,最大水平位移为21.80 mm,小于安全报警值44 mm,在可控范围之内。支护结构顶部水平位移量较小,且变形均匀、平稳,在监测过程中未出现突变现象,基坑整体稳定性较好,达到了预期支护效果。

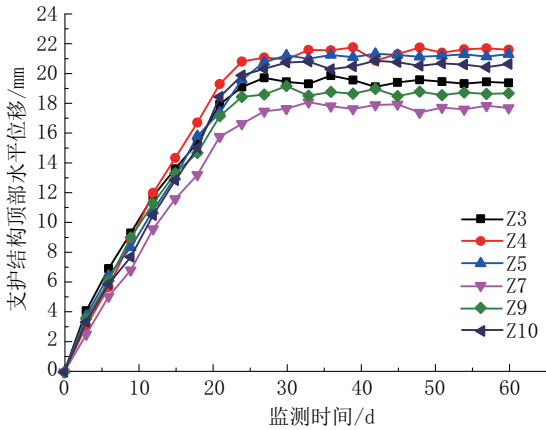


图 11 支护结构顶部水平位移曲线
Fig.11 Top horizontal displacement curve of the support structure

5.3.2 支护结构顶部竖向位移分析

从图 12 中可以看出,随着土体的开挖,应力释放,基坑底部产生隆起,带动支护结构向上移动,待基坑开挖完毕,支护结构顶部竖向位移趋于稳定,最大位移发生在 Z4 监测点,最大值为 7.10 mm,远远小于其安全控制值 31 mm。在基坑开挖过程中,位移变化均匀、平稳,未发现突变,基坑一直处于稳定状态。

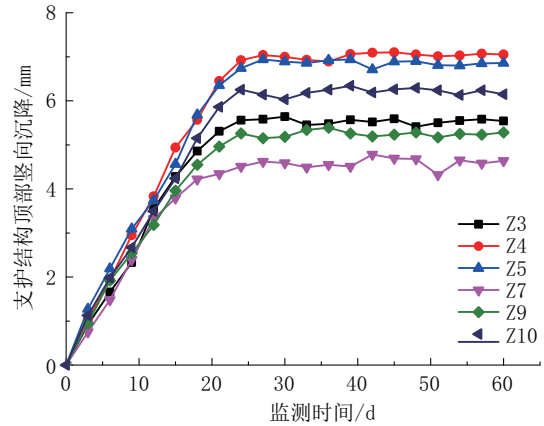


图 12 支护结构顶部竖向沉降曲线
Fig.12 Top vertical settlement curve of the support structure

5.3.3 深层水平位移分析

从图 13 中可以看出,基坑开挖完成后,沿基坑深度方向,支护结构深层水平位移先增大后减小,基坑开挖范围内位移大,坑底以下位移小,支护结构底端几乎为零。最大位移发生在基坑中下部,大约距坑底 $H/3$ (H 为基坑开挖深度) 的位置,最大值约 20.80 mm,远小于安全报警值 58 mm。

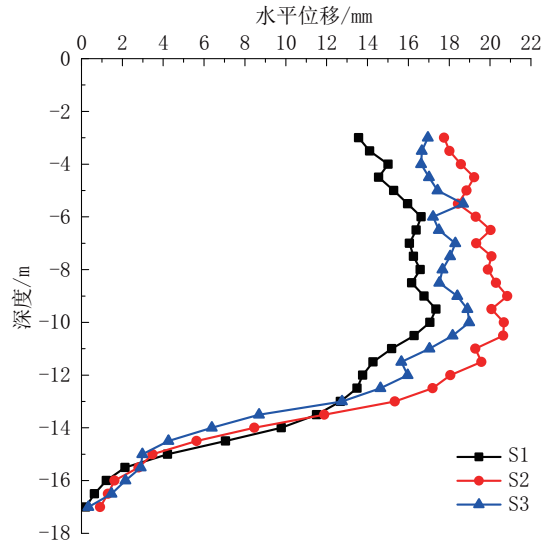


图 13 基坑开挖完成后深层水平位移曲线
Fig.13 Deep horizontal displacement curve after foundation pit excavation

5.3.4 锚杆轴力变化分析

基坑东、南两侧共布设 6 组锚杆轴力监测点,每组监测点对上下 4 道锚杆进行监测,共监测 24 根锚杆的轴力值。由于监测数量多,每组第一道锚杆轴力大、变化明显,故将其作为分析对象。锚杆孔径 150 mm,全长 18 m,其中自由段长 6 m,锚固段长

12 m,内插 4d15(7 ϕ 5)低松弛型预应力钢绞线,锚固力设计值 505 kN,预加拉力 405 kN,锚杆轴力变化如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,锚杆轴力随时间的变化呈 3 个阶段,即预应力快速下降阶段、预应力“抬头”阶段和预应力稳定变化阶段,预应力总损失率在 37%~52% 之间。锚杆张拉锁定后,预应力立即损失近 40%,此时测得的最大值为 265 kN。锚杆轴力变化受多方面因素影响,钢绞线张拉后回缩、钢绞线应力松弛、土体变形、混凝土徐变、锚杆施工偏差等,均会引起锚杆预应力的损失。随着基坑的不断开

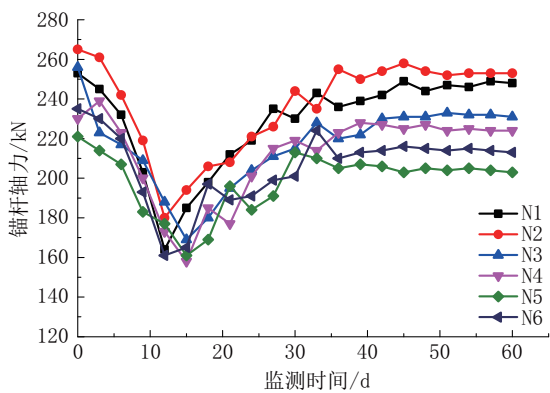


图14 锚杆轴力随基坑开挖时间变化曲线

Fig.14 Variation curve of the bolt axial force vs the excavation time of foundation pit

挖,支护结构与周围土体发生位移变形,锚杆轴力呈现先减小后增大的趋势,待基坑工程施工完成后,锚杆轴力最终趋于稳定,最终稳定值远远小于轴力设计值,满足设计要求。

5.3.5 周边道路沉降分析

从图15中可以看出,周边道路沉降随时间变化大致呈缓慢增长、显著增长和稳定变化3个阶段。第一阶段为排桩施工阶段,排桩施工会使周围土体受到一定程度的扰动,进而使基坑周边道路产生较小的沉降;第二阶段为基坑开挖阶段,随着基坑土方的开挖,基坑侧壁约束解除,周边土体应力释放,土体结构将产生较大的水平和竖向变形,从而引起周边道路竖向沉降;第三阶段为支护体系正常使用阶段,基坑工程施工完毕,支护结构与周围土体有效结合形成统一整体,支护结构的正常使用有效控制了周围土体的位移变形,从而限制了周边道路的竖向沉降。周边道路最大沉降为6.85 mm,远小于安全报警值25 mm,未影响道路的正常使

用。综上所述,在基坑开挖及使用过程中,支护结构顶部水平位移与竖向位移、深层水平位移、锚杆轴力、周边道路沉降均未达到安全报警值,基坑一直处于安全稳定状态。

对比分析支护结构位移与内力、基坑周边道路变形的有限元分析结果与实际监测数据,随基坑开挖的变化趋势基本吻合,模拟值与实测值虽有差异,但差值很小。

6 结论

本文以北京市某深基坑工程为例,介绍了新型

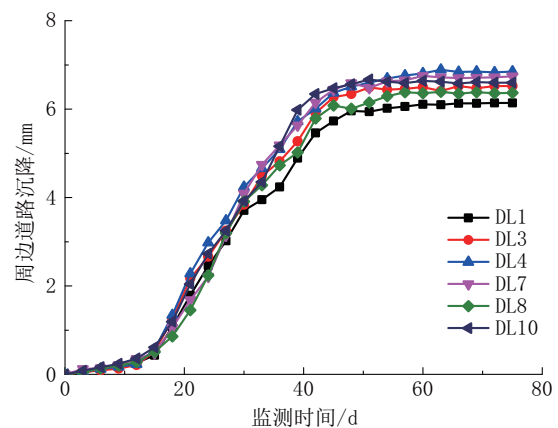


图15 周边道路沉降曲线

Fig.15 Settlement curve of the surrounding roads

组合深基坑支护体系——护坡桩+钢管桩复合土钉墙支护体系,通过与桩锚支护体系的对比分析,以及有限元模拟与现场原位监测的对比研究,得出以下结论:

(1)在同样保证基坑施工与使用安全的前提下,与桩锚支护体系相比,护坡桩+钢管桩复合土钉墙支护体系可节省工期数天,节约造价25%左右。

(2)对比分析有限元模拟结果与实际监测数据,支护结构内力与位移、周边道路沉降随基坑开挖的变化趋势基本一致,模拟值与实测值虽有差异,但差值很小,验证了该组合支护体系的合理性与可行性。

(3)该组合支护体系的成功运用,解决了周边环境复杂、要求位移小、基坑支护造价低等深基坑支护的技术难题,验证了这一支护形式的可行性,其在深基坑支护中具有常规土钉墙和护坡桩无法相比的技术与经济优势,对类似工程积累了可靠的施工数据,对处理该类似情况的深基坑积累了丰富的经验,在未来会有很大的发展空间,具有推广价值及良好的社会效益。

参考文献(References):

- [1] 赵曦.关于我国建筑工程深基坑支护施工技术要点分析[J].科技创新与应用,2014(36):268.
ZHAO Xi. Analysis on the key technical points of deep foundation pit supporting construction in China's construction projects [J]. Technology Innovation and Application, 2014(36):268.
- [2] 刘方,赵晔,麦吾兰·阿力木江,等.深基坑支护形式的优选探讨[J].工程技术研究,2017(9):43,56.
LIU Fang, ZHAO Ye, MAIWULAN·Alimujiang, et al. Dis-

- cussion on the optimization of deep foundation pit support form [J]. Metallurgical Collections, 2017(9):43,56.
- [3] 周瑜. 深基坑工程中多种支护形式的组合和施工初探[J]. 中国新技术新产品, 2015(2):107-108.
ZHOU Yu. Discussion on the combination and construction of various supporting forms in deep foundation pit engineering[J]. China New Technologies and New Products, 2015(2):107-108.
- [4] 胡刚, 胡福洪, 黄佛光. 非等长双排桩在武汉地区基坑工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2):78-82.
HU Gang, HU Fuhong, HUANG Foguang. Application of unequal length double-row piles in a foundation pit project in Wuhan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):78-82.
- [5] 刘文峰. 微型钢管桩在基坑支护中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10):67-71.
LIU Wenfeng. Application of the steel pipe micro-piles in foundation pit support[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):67-71.
- [6] 罗文林, 韩焯, 刘炜. 北京地区基坑支护技术现状研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1):1534-1537.
LUO Wenlin, HAN Xuan, LIU Wei. Studies on present status of retaining structures for deep excavation in Beijing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1):1534-1537.
- [7] 武威. 微型钢管桩复合土钉墙支护的模型研究与数值模拟[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
WU Wei. The model study and simulation of supporting system by composite coil nailing wall with mini-sized steel tube piles [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [8] 杨向前. 微型桩预应力锚杆复合土钉支护结构受力变形性状模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
YANG Xiangqian. Simulation study on stress deformation of mini pile prestressed anchor composite soil nailing excavations protection structure [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [9] 吴静. 深基坑超前钢管桩复合预应力锚杆支护数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
WU Jing. Numerical simulation research on prestressed anchor support with advanced steel pipe pile in deep foundation pit [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [10] 徐松山. 预应力锚杆复合土钉支护稳定性分析及数值模拟方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
XU Songshan. Stability analysis and numerical simulation methods research of prestressed anchor composite soil nailing support [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [11] 贾景松. 钢管桩在搅拌桩复合土钉墙支护体系中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
JIA Jingsong. Study on the application of steel pipe pile in mixing pile composite soil nailing wall support system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [12] 张红涛. 北京中关村科技园区丰台园东区基坑工程支护设计与施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(3):64-68, 74.
ZHANG Hongtao. Design and construction of foundation pit support in Fengtaiyuan east area of Zhongguancun Science and Technology Park, Beijing [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(3):64-68, 74.
- [13] 谢秋明, 张青平. 南昌商业中心深基坑工程组合支护技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(9):75-80, 96.
XIE Qiuming, ZHANG Qingping. Composite support for the deep foundation pit of a commercial center in Nanchang [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9):75-80, 96.
- [14] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
JGJ 120—2012, Technical specification for retaining and protecting of building foundation excavations[S].
- [15] GB 50497—2019, 建筑基坑工程监测技术标准[S].
GB 50497—2019, Technical standard for monitoring of building foundation excavation engineering[S].
- [16] 黄薛, 孔涛, 郭长恩. 济南东舍坊深基坑工程多种支护方式及变形对比分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6):77-82, 87.
HUANG Xue, KONG Tao, GUO Changen. Comparison of deformation with various support methods used at a deep foundation pit project in Jinan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6):77-82, 87.

(编辑 周红军)