

土钉和桩锚组合式支护体系受力和变形的数值模拟

刘利平, 刘晶晶, 张 鹏, 石明禄, 闫先锋

(河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘 要:针对深基坑的土钉和桩锚组合式支护体系,通过数值计算分析基坑开挖过程对支护体系结构的位移、应力及稳定安全系数等的影响,分析基坑开挖过程引起的地层变形规律。对 2 种基坑支护方案进行计算,其一为采用 2 道土钉加上 1 道锚杆的土钉与桩锚组合式结构,其二为采用 4 道土钉加上 3 道锚杆的土钉与桩锚组合式结构。根据计算结果,对不同支护方案下基坑的支护效果进行了对比研究,进而分析支护方案的可行性,最后将现场实际采用的支护方案与实测结果进行了比较。

关键词:基坑支护;土钉;桩锚;支护体系;数值模拟

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)08-0053-05

Numerical Simulation of Stress and Deformation on Combined Retaining System of Soil Nails and Pile-anchors/LIU Li-ping, LIU Jing-jing, ZHANG Peng, SHI Ming-lu, YAN Xian-feng (Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China)

Abstract: To the combined support system of soil nailing and pile-anchor for deep excavation, by the numerical calculation with FLAC3D software, the analysis is made on the influence of excavating process to displacement, stress and stability safety factor of support system structures, as well as the laws of ground deformation caused by excavation. 2 retaining schemes are considered; one is the retaining structure composted by 2 layer soil nails and 1 pile-anchor, the other one is the retaining structure composted by 4 layer soil nails and 3 pile-anchors. Based on the calculation results, comparative study is carried out on the support effects of different schemes to analyze the feasibility of the support scheme. The paper presents the comparison of support effects between the adopted scheme in the engineering and field measured results.

Key words: foundation pit support; soil nail; pile-anchor; support system; numerical simulation

0 引言

深基坑支护结构的形式逐渐趋于多样化,也出现了许多组合式的支护结构形态,其受力和变形性状也趋于复杂化^[1]。因此,通过多种手段进行其受力和变形以及安全性评估有现实意义。为此,马海龙等^[2]采用有限单元法对作为横向增强体的水泥土桩锚长度和直径等进行分析,表明当桩锚直径达到 400 mm 时,可很好控制墙顶水平位移并减小墙后土体的沉降。张钦喜等^[3]对一个桩锚土钉支护体系的实际受力状态和理论计算结果进行了比较,讨论了产生差异性的原因。而张丽丽等^[4]采用 FLAC3D 分析软件对支护体系中土钉的内力及变化规律进行研究,表明对桩锚支护结构的位移能起到很好的控制作用,而桩内钢筋的应力远小于设计强度值。董诚等^[5]针对土钉和预应力锚杆复合式支护技术,利用 PLAXIS 程序进行有限元分析,表明锚杆的位置越靠近坡顶,则锚杆发挥的作用越大,此外

土钉和预应力锚杆的复合支护方式与土钉支护相比,位移有所减小,而锚杆的数量和预应力值也对加固效果有较大影响。

欧阳劲^[6]的研究表明,深部水平位移随开挖深度表现为浅部开挖时变形曲线近似呈直线形,而深部开挖时变形曲线近似呈抛物线形,同时呈现明显的时效性和空间效应。李俊才等^[7]介绍了已有锚拉桩支护结构的计算模式,并对相应工程的监测结果进行了比较,表明在软土基坑中设置锚拉桩能有效地控制支护结构与土体的变形。孟庆山等^[8]利用土工离心机对钢轨桩、锚杆联合重力式挡土墙支护土质边坡的效果进行模型对比试验,表明钢轨桩下延作用以及锚杆锚固作用可以很好提高挡土墙的抗倾覆能力和边坡浅层抗滑塌能力。丁敏等^[9]提出了基于矩阵位移法的桩锚结构分析原理,其中将支护桩视为直立的连续梁,将主动侧土体转换为土压力,被动土体则用土体弹簧替代,而将锚杆简化为

收稿日期:2013-12-08;修回日期:2014-05-29

基金项目:河北省建设科技研究计划(50978022)

作者简介:刘利平(1972-),男(汉族),内蒙古人,河北建设勘察研究院有限公司地下工程公司经理、高级工程师,岩土工程专业,硕士,从事岩土工程设计与施工工作,河北省石家庄市建华南大街 58 号,hbjk2010@126.com。

弹簧支承。李涛等^[10]考虑支护的土拱效应建立相应的土压力计算模型,就典型深基坑砂卵石地层中桩锚支护结构的受力进行了分析,模型计算所得桩侧土压力与实测结果比较相符,可适用于砂卵石地层桩锚式支护结构土压力的估算。

深基坑开挖中的土钉-桩锚支护结构体系是一种新型组合式支护体系。本文针对一个典型基坑工程,采用数值方法分析基坑开挖过程中支护结构的位移、应力及边坡安全系数等影响,并对不同支护措施时基坑的支护效果以及实测结果进行对比。

1 数值计算模型

1.1 模拟工况

所进行数值模拟的典型基坑的围护结构形式见图 1。该基坑工程开挖时首先进行地下水控制,施工时水头降至基底以下 0.5 m。基坑外侧建筑物较远,考虑到施工等因素,地面超载取 10 kPa。选定下面 2 种情形进行模拟。

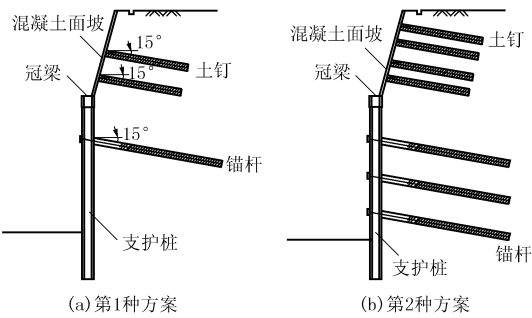


图 1 基坑支护中土钉和锚杆布置方式

方案一:采用 2 道土钉加上 1 道锚杆的组合式结构支护(此方案作为该基坑设计的比较方案)。基坑上部 7 m 采用放坡加土钉加喷射混凝土面板支护,基坑坡角为 75°,共设 2 道土钉,位置分别在 -3.5、-5.5 m;下部 9.75 m 采用排桩加锚杆支护,桩顶设置冠梁,有效桩长 14.3 m,桩径 1 m,桩顶标高为 -8.1 m,冠梁高 0.8 m,桩体进入冠梁长度≤0.1 m;设置 1 道锚杆,位于 -10.5 m,水平倾角为 15°,直径为 200 mm。

方案二:采用 4 道土钉加上 3 道锚杆的土钉与桩锚组合式结构支护(基坑工程的实施方案)。基坑开挖深度 16.75 m。基坑上部 7 m 采用放坡加土钉加喷射混凝土面板支护,基坑坡角为 75°,共设 4 道土钉,位置分别在 -2、-3.5、-5、-6.5 m,水平倾角为 15°;下部 9.75 m 采用排桩加锚杆支护,同时桩顶设置冠梁,有效桩长 14.3 m,桩径 1 m,桩顶标高为 -8.1 m,冠梁高 0.8 m,桩体进入冠梁长度

≤0.1 m;设置 3 道锚杆,分别位于 -8.8、-11.8、-14.6 m,水平倾角为 15°,成孔直径均为 200 mm。

1.2 土体的本构模型和参数

采用摩尔-库伦弹塑性模型来描述土体的本构特征,屈服准则采用摩尔-库伦准则,该模型需要的参数少且容易获得。根据现场工程地质资料,土性参数取值见表 1。

表 1 土性参数

层号	土层名称	层底标高 /m	层厚 /m	重度 / (kN·m ⁻³)	φ / (°)	c / kPa	泊松比 μ	压缩模量 E _{s0.1~0.2} / MPa
①	杂填土	-2.5	2.5	17.0	15.0	15	0.40	15
②	粉土	-6.0	3.5	19.6	18.9	25	0.33	14.03
③	粉质粘土	-9.4	2.4	19.2	13.3	30.4	0.35	7.88
④	粉土	-11.0	1.6	18.9	15.0	25	0.33	7.71
⑤	粉质粘土	-13.1	2.1	20.0	15.4	29.7	0.35	6.32
⑥	粉土	-15.6	2.5	20.1	19.9	28.2	0.33	9.42
⑦	粉质粘土	-18.2	2.6	20.0	19.2	31	0.35	6.52
⑧	粉质粘土	-24.5	6.3	20.3	19.2	38	0.35	7.43
⑨	中粗砂	-29.7	5.2	20.0	40.0	0	0.30	25
⑩	粉质粘土	-38.1	8.4	20.8	20.4	46.4	0.35	10.65
⑪	卵石	-43.2	5.1	20.0	45.0	0	0.30	35
⑫	粉质粘土	-50.0	6.8	19.3	30.0	46.4	0.35	14.64

1.3 模型建立

为便于网格划分并减少计算工作量,取基坑侧壁局部区域建模来进行分析。根据基坑工程施工开挖的影响范围,纵向取 6 m,横向取 60 m,竖向取 50 m。模型采用 2784 个细密单元,3750 个节点,顶部是自由边界,左右边界为水平方向约束,下边界为垂直方向约束。对于土钉和锚杆采用一维轴力杆弹性单元,对于护坡桩和冠梁采用各向同性弹性单元。模型中土钉每排 3 个,锚杆每排 5 个,锚杆锚固段施加预应力 10 kN,护坡桩桩距取为 1.2 m。

2 数值计算结果

2.1 基坑稳定性

计算表明,当开挖至基坑上部 7 m 处时,设置土钉和不设置土钉计算所得安全系数分别为 2.90 和 2.87,因此在开挖早期土钉的作用不大,这是因为此时在土钉所加固的区域还没有出现塑性区,土钉的作用并没有充分发挥,而土钉自身施工中的荷载反而使基坑安全系数有稍微下降的趋势。但是,随着基坑开挖深度的增加,土钉的存在对减小后期塑性区发展和增大支护结构的安全系数作用逐渐增强。

分析了不同桩径(即 800 和 1000 mm)对基坑边坡稳定性的影响,得到桩径 1000 mm 比桩径 800 mm 的支护边坡安全系数提高仅为 2.7% (分别为 1.54

和 1.50),因此单纯通过增大桩径来提高支护结构的安全系数效果并不好,即工程中桩直径的选择应有一个合适的值。

此外,预应力锚杆对提高基坑稳定性的作用是显著的,可以使安全系数提高 57.1% (分别为 1.54 和 0.98)。实际上,由于锚杆预应力的存在,使得当加设锚杆后,那么增强基坑边壁稳定性的作用就开始得到发挥,而对于土钉则只有当土体产生较大的

塑性流动后其作用才得到发挥,例如当在 -10.5 m 处加一道锚杆后,其稳定系数可增大到 1.54。

2.2 深基坑位移

基坑的开挖和支护会对基坑土体产生不同程度的扰动,进而引起位移场的变化。图 2 给出第二种方案下,不同开挖深度和地表处的沉降及水平位移之间的关系。

由图 2(a)可见,地表沉降随开挖深度的增加而

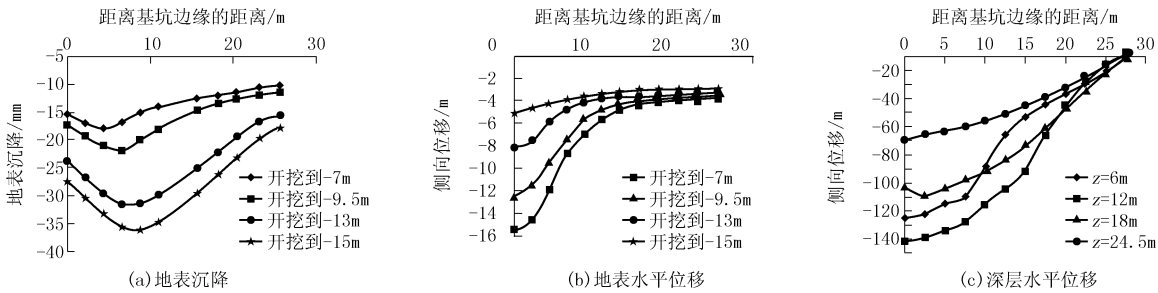


图 2 位移和沉降计算结果

不断增大,地表沉降最大值并非发生在基坑边缘,而是位于距基坑边缘一定的水平距离处。而且,随基坑开挖的进行,基坑最大地表沉降有明显向基坑外侧移动的趋势,这是因为土体和支护结构的相互作用使得土体在基坑边缘处的沉降有所约束,而随基坑开挖深度增加,基坑支护作用对土体的约束更加明显,最大位移沉降点距基坑边缘的距离也相应增加。

由图 2(b)可见,地表水平位移也随基坑开挖深度增加而不断增大。然而,地表最大水平位移发生在基坑边缘处,即基坑开挖对基坑边缘的土体影响较大。例如,距离基坑边 15 m 外,地表的水平位移已仅有 -5 mm,土体变形已很小。

图 2(c) 给出基坑开挖完成时,不同深度及距基坑边不同距离处的水平位移,表明随基坑开挖深度增加,深层水平位移随距离基坑边距离增加呈明显减小的趋势。这里,基坑边最大水平位移发生在深度 -12 处, -18 及 -6 m 处减小,即基坑边水平位移呈现中间大两头小的分布特征。

2.3 土钉轴力

选取第 1~4 排中部土钉,对第二种方案下的支护结构内力进行分析(图 3)可见,土钉单元受力随基坑开挖不断增大。基坑开挖第 4 步施加土钉时,土钉出现一个阶段的受压,这与基坑开挖深度已经比较大,土体应力释放逐渐增大有关。但是,随基坑进一步开挖,已开挖的边坡土体重心下移,土钉受力就会转为受拉,并逐渐增大。

2.4 锚杆轴力

把锚杆沿长度方向分成 8 段来计算其受力分布(见表 2),这里锚杆轴力取该段锚杆受力平均值。第 1 排锚杆对应第 5~7 开挖步序,第 2 排锚杆对应第 7~8 开挖步序,第 3 排锚杆对应第 7 开挖步序。可以看出,锚杆受力随开挖深度增加是不断增大的。锚杆在自由段受力较大,但变化不大,而在锚固段变化较大,随锚杆长度增大受力逐渐减小,在锚固端最小。此外,3 排锚杆在初始施加的开挖阶段的锚杆作用力是不同的,第 1 排初始锚杆作用力最小,第 3 排初始锚杆作用力最大,这与桩体本身弯矩和位移不断增大有关。

表 2 锚杆轴力 /10 kN

锚杆排号	开挖步序	1 段	2 段	3 段	4 段	5 段	6 段	7 段	8 段
1	5	8.634	8.633	8.632	2.635	2.536	1.982	1.357	1.389
1	6	8.881	8.81	8.81	5.222	5.191	4.565	3.641	3.888
1	7	14.8	14.8	14.8	11.2	9.391	8.492	6.586	7.85
2	7	10.84	10.84	10.84	4.955	4.082	3.291	2.236	2.713
2	8	14.72	14.72	14.72	7.956	8.858	7.632	5.021	6.487
3	7	21.2	21.2	21.2	7.83	7.86	5.671	4.987	4.747

2.5 支护桩和冠梁弯矩

当基坑开挖至 -15 m 时,支护桩和冠梁所受弯矩如表 3。由表 3 可以看出,不论桩径 800 或 1000 mm,在 y 方向的弯矩都明显大于其它两个方向弯矩。例如,Ø800 mm 的桩,y 方向的弯矩和 x、z 方向弯矩比值分别为 6300 和 33.7,即桩的 z、x 方向所受弯矩相对于 y 方向所受弯矩几乎可以忽略。对于

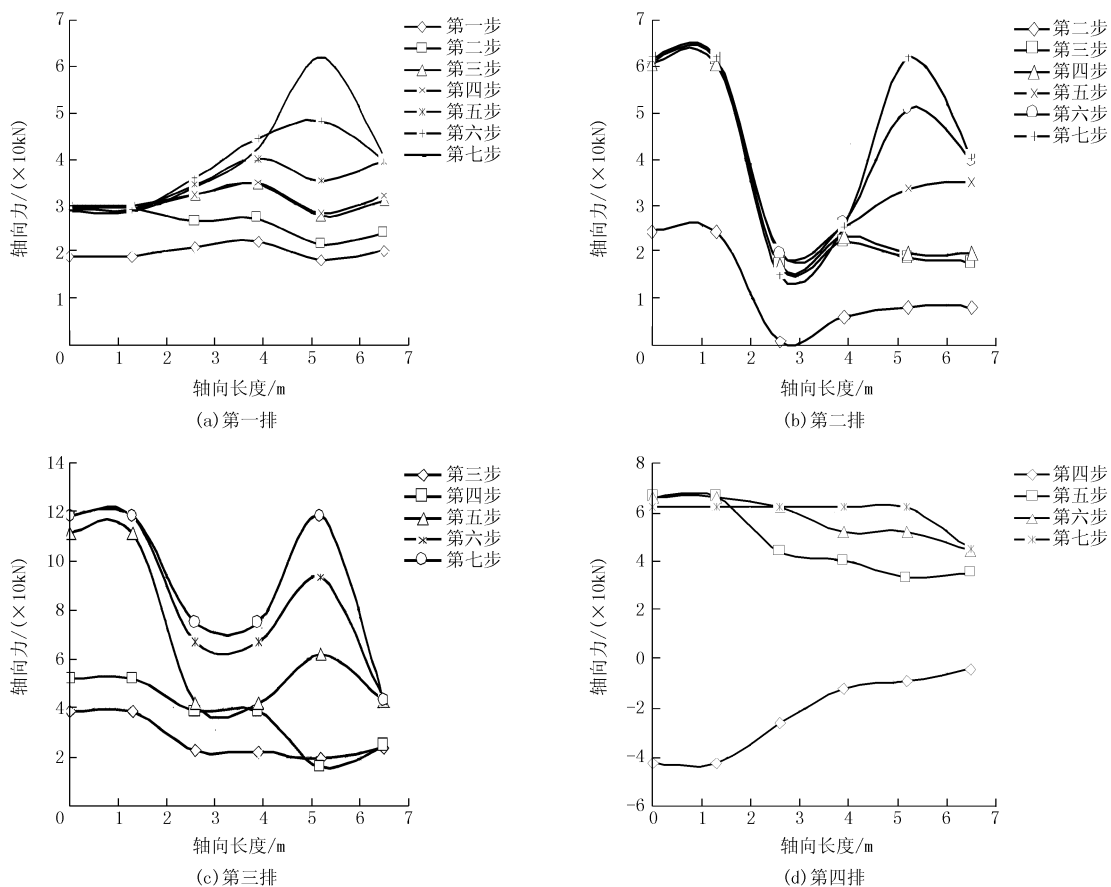


图 3 土钉各段轴力变化曲线

表 3 桩和冠梁弯矩 /($\text{N} \cdot \text{m}$)

桩径/mm	锚杆长度/m	桩 x 方向	桩 y 方向	桩 z 方向	冠梁 x 方向	冠梁 y 方向	冠梁 z 方向
800	15	5.468×10^1	3.441×10^5	1.02×10^4	1.476×10^5	1.619×10^4	5.422×10^4
1000	16	5.645×10^1	3.733×10^5	1.328×10^4	2.019×10^5	1.501×10^4	7.47×10^4

Ø1000 mm 的桩,也有类似的结果。此外,冠梁所受弯矩在垂直于基坑边壁方向上也比其它两个方向上要大。

3 计算结果的进一步分析

3.1 两种方案的比较

在基坑开挖结束时,第一种和第二种方案最大沉降分别为 5.94 cm 和 5.85 cm,最大水平位移分别为 15.1 cm 和 14.1 cm。由桩的弯矩来看,第一种方案最大弯矩为 404.4 $\text{kN} \cdot \text{m}$,第二种方案最大弯矩为 373.3 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。这说明,第二种方案在水平位移、沉降、稳定性等方面比第一种方案有一定改善,其安全性得到改善,但效果并不显著。考虑到计算的不确定性以及足够的安全性,在实际工程中采取了第二种方案,但相应也会明显地提高基坑开挖的工程造价,值得注意。

3.2 数值模拟与现场实测比较

将第二种方案下的数值模拟结果与现场监测数据做些对比,来考察土体及支护结构在开挖过程中的变形和受力状态。表 4 给出地表最大沉降和深层土体最大水平位移的比较结果。很明显,地层变形实测结果要小于数值模拟结果。其原因是,地表沉降最大值并非发生在靠近基坑边缘处,但现场实测的数据是由布置在靠近基坑边缘的测点得到的,即沉降计算点与实际沉降观测最大值发生位置有一定差异。

表 4 现场测试结果与数值计算结果的对比

取值方法	地表最大沉降/mm	深层土体最大水平位移/mm	最大弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	土压力/kPa
实测值	-26.79	-47	554.6	71.65 ~ 129.15
计算值	-58.5	-141	373.3	110 ~ 137

由表 4 可以看出,桩的实测弯矩值要大于计算值,而桩侧土压力实测值则比计算值要小。这是由于土压力的减小和桩弯矩增大有相反的变化趋势。

4 结论

(1)随基坑开挖深度增加,地表沉降最大值发生在距基坑边缘一定水平距离处,而且水平位移随基坑开挖也不断增大。此外,同一深度处的水平位移最大值发生在基坑边缘。

(2)随基坑开挖深度增加,土钉的作用对减小基坑开挖后期塑性区发展和增大基坑支护结构的安全性逐渐增强。

(3)随基坑开挖深度增加,锚杆和冠梁可以明显提高支护结构安全系数,但锚杆设置位置对基坑的安全性有一定影响。

(4)土钉和锚杆的轴力随开挖深度不断增大,而锚杆自由段受力最大,锚固段逐渐减小,锚固端部受力最小。而支护桩受到的弯矩在垂直于基坑边壁的方向较大,其它两个方向上的弯矩较小,可以忽略。此外,冠梁所受弯矩在垂直于基坑边壁方向上也比其它两个方向上要大。

参考文献:

- [1] 蔡海波,吴顺川,周喻.既有基坑延深开挖稳定性评价与支护方案确定[J].岩土力学,2011,32(11):3306-3311.
- [2] 马海龙,唐志军,石敦敦.桩锚直径等对水泥土桩锚墙支护影响[J].岩土力学,2012,33(12):3709-3714.
- [3] 张钦喜,陈鹏,尹文彪.国贸中心三期基坑支护工程监测研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2319-2326.
- [4] 张丽丽,张钦喜,马庆迅.桩锚-土钉组合支护中土钉受力规律[J].北京工业大学学报,2011,37(9):1338-1442.
- [5] 董诚,郑颖人,陈新颖,等.深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J].岩土力学,2009,30(12):3793-3802.
- [6] 欧阳劲.某基坑桩锚支护结构监测分析[J].铁道科学与工程学报,2013,10(1):87-91.
- [7] 李俊才,岳颖锋,茅奇辉.软土基坑支护中的锚拉桩结构设计[J].岩土力学,2008,29(9):2551-2559.
- [8] 孟庆山,孔令伟,陈能远,等.桩锚挡墙联合支护残积土边坡离心模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(1):3379-3396.
- [9] 丁敏,张永兴.基于矩阵位移法的桩锚结构分析方法[J].工程力学,2012,29(8):116-122.
- [10] 李涛,周妍,宋常军,等.考虑土拱效应的土压力理论在桩锚支护受力分析中的应用[J].四川建筑科学研究,2013,39(2):174-176.

汇聚松科科钻现场共商深部钻探对策

本刊讯 2014年8月8日,在中国地质调查局组织下,来自国土资源部、中国地质调查局、中国地质科学院、中国石油天然气集团公司、大庆油田、中国地质大学、吉林大学等单位的有关专家学者及国际地学研究代表200余人齐聚油城大庆,现场考察了中国地质科学院勘探技术研究所负责组织实施的松辽盆地国际大陆科学钻探工程(CCSO-SK)实施进展情况。国土资源部党组成员、中国地质调查局局长、党组书记钟自然出席活动并作重要讲话。中国地质调查局党组成员、中国地质科学院党组书记、副院长王小烈主持活动。



钟自然在讲话中指出,科学钻探工程是我国重大地球科学项目之一,得到了党中央、国务院的高度重视。由中国地质调查局、国际大陆科学钻探计划(ICDP)联合资助的松辽盆地科学钻探工程是全球第一口钻穿白垩纪陆相地层的大陆科学钻探井,设计井深为6400 m,为ICDP迄今为止资助项目之最,也是目前我国第一深的科学钻

探工程,开启了我国入地计划的新篇章。该工程计划通过攻克高温钻井、固井、测井和超长井段连续取心等关键技术

术,以全面提升我国钻探技术水平,为万米超深井科学钻探提供技术储备,促进我国深部勘查技术体系跨越式发展;通过工程实践,可以造就一支高水平的科学超深井钻探设备、工艺研发和工程管理队伍。

活动期间,中国地质科学院勘探技术研究所邀请了来自钻探技术领域的科研院所、大专院校、钻探装备生产、钻探施工等单位的60余位专家代表,在现场学术报告厅共同围绕深部钻探中遇到的实际问题召开现场讨论会。4位钻探技术专家作了专题报告。中国大陆科学钻探工程科钻一井和汶川科学钻探工程总工程师张伟教授作了“世界主要科学钻探项目的技术特色、施工经验和教训”专题报告,中国地质科学院勘探技术研究所所长、松辽盆地资源与环境深部钻探工程总指挥张金昌教授介绍了“13000 m科学超深井钻探技术方案预研”的最新成果,松辽盆地资源与环境深部钻探工程副总指挥兼总工程师朱永宜教授介绍了“松辽盆地科学钻探工程实施及进展”,中国地质大学(武汉)的乌效鸣教授介绍了“深部钻探泥浆关键参数研究与应用”。这些专题报告全面地介绍了深部科学钻探工程的实施情况,从技术上进行了系统的梳理和总结,对超深井施工在设备、工艺和器具方面的研究和发展提出了具体的要求和建设。与会专家展开了热烈而广泛的讨论,一致认为科学深井工程的组织实施是对当今钻探技术水平的一次全面检验和促进,其取得的成功经验对深部地质钻探技术也有极强的借鉴意义,将全面提升我国钻探技术水平。

(谢文卫 供稿)