

文章编号:1673-2049(2018)03-0104-14

深基坑支护新技术现状及展望

孙超, 郭浩天

(吉林建筑大学 测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要:对深基坑支护中的复合土钉墙、新型地下连续墙、排桩支护(桩-锚式、桩-撑式、双排桩、“桩墙合一”)、逆作法、紧邻建筑物“零占位”基坑支护方法、人工冻结法、联合支护(土钉墙+桩锚、土钉墙+桩撑、土钉墙+地下连续墙等)进行了归纳总结;重点分析了新型地下连续墙,包括“两墙合一”地下连续墙、渠式切割深层搅拌水泥土地下连续墙(TRD)工法、双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙(CSM)工法、加筋水泥土地下连续墙(SMW)工法、钢管桩连续墙(WSP)工法、挖掘土再利用地下连续墙(CRM)工法、超薄型防水地下连续墙(TRUST)工法、预制地下连续墙、预应力钢管混凝土桁架围护桩墙;总结了现有深基坑支护新技术、新工艺、新方法的特点、适用范围、应用情况等,提出了在使用新技术、新工艺时应注意的问题,并对新型深基坑支护技术今后的发展趋势、研究方向进行分析和展望。研究结论可为深基坑支护技术的发展及工程设计施工提供指导和参考。

关键词:深基坑;复合土钉墙支护;新型地下连续墙;排桩支护;逆作法;综述

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A

Present Situation and Prospect of New Technology for Deep Foundation Pit Support

SUN Chao, GUO Hao-tian

(School of Geometrics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, Jilin, China)

Abstract: The composite soil nailing wall, new underground continuous wall and row pile supporting (pile anchor, pile support, double row piles, “pile wall one”), reverse building method, “zero space” foundation pit supporting method adjacent to the buildings, freezing method, combined support (soil nailing wall + pile anchor, soil nailing wall + pile support, soil nailing wall + underground continuous wall, etc.) in deep foundation pit support were summarized and analyzed. The new underground continuous wall, including “two walls in one” underground continuous wall, trench cutting re-mixing deep (TRD) method, cutter soil mixing (CSM) method, soil mixing wall (SMW) method, wall made of steel piles (WSP) method, continuous wall using recycled mud (CRM) method, TRUST method, prefabricated underground diaphragm wall, and prestress steel tube concrete supporting structure supporting pile wall, were emphatically analyzed. The characteristics, application scopes and applications of new technologies, new processes and new methods for existing deep foundation pit supporting were summarized. The problems that should be paid attention to when using new technology and new technology were proposed, and the future development trend and research direction of new deep

收稿日期:2017-10-16

基金项目:住房和城乡建设部研究开发项目(2012-k3-16)

作者简介:孙超(1978-),男,黑龙江东宁人,副教授,工学博士,E-mail:sunchaobox@163.com。

通信作者:郭浩天(1991-),男,安徽肥东人,工学硕士,E-mail:guohaotian@163.com。

foundation pit supporting technology were analyzed and prospected. The conclusion can provide guidance and reference for the development of deep foundation pit supporting technology and engineering design and construction.

Key words: deep foundation pit; composite soil nailing wall support; new underground continuous wall; row pile support; reserve method; summary

0 引言

随着中国经济的增长、科技的进步、城市化进程的加速,对地下空间资源的开发利用及改造已成为社会发展的重要战略之一。地下空间开发的规模越来越大,对深基坑支护技术的要求也越来越高,基坑不断向“深大近”方向发展已成为必然趋势。为了保证复杂环境下基坑施工、主体地下结构和基坑周边环境的安全,践行绿色环保施工、建设生态文明社会的发展理念,对基坑侧壁、周边土体、周围环境的支挡、加固及保护措施的要求就越来越高,为此,深基坑开挖与支护引起了各方面的广泛重视,新的技术、方法、工艺也随之不断涌现。深基坑支护新技术一般是在原有支护技术上产生的,为弥补原有支护技术存在的缺点与不足,对原有技术进行优化,扩展支护的应用范围,使其适应不同的施工环境,确保基坑施工、主体地下建筑物结构物及周边环境的安全,使其达到安全、适用、经济、绿色环保的目的。

1 深基坑支护新技术发展现状

深基坑支护技术在岩土工程领域是一个实践性很强而又富有变化的课题,近些年来随着建设规模的扩大和地下空间资源的改造、利用,深基坑支护技术在原有的基础上有了很大的发展和突破,并在工程实践中得以广泛应用。目前常用的支护方式主要分为5类,即墙-撑式、桩-撑式、桩-锚式、复合土钉支护、联合支护。根据不同的工程地质条件、水文地质条件及场地环境条件等,目前在深基坑支护工程中使用的新技术主要有复合土钉墙、新型地下连续墙、排桩支护(桩锚、桩撑、双排桩、“桩墙合一”)、逆作法、紧邻建筑物“零占位”基坑支护方法、人工冻结法、联合支护(土钉墙+桩锚、土钉墙+桩撑、土钉墙+地下连续墙等)。新型地下连续墙主要包括“两墙合一”地下连续墙、渠式切割深层搅拌水泥土地下连续墙(TRD)工法、双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙(CSM)工法、加筋水泥土地下连续墙(SMW)工法、钢管桩连续墙(WSP)工法、挖掘土再利用地下连续墙(CRM)工法、超薄型防水地下连续墙

(TRUST)工法、预制地下连续墙、预应力钢管混凝土桁架围护桩墙。

1.1 复合土钉墙支护技术

复合土钉墙支护技术是在土钉墙基础上发展起来的一种先进、易于施工、经济合理、综合性能突出的深基坑支护新技术。该技术是将土钉墙与一种或几种单项支护技术或止水技术有机组合成的复合支护体系,突破了土钉墙不能应用的领域,同时继承了土钉墙的许多优点,主要由土钉、预应力锚杆、微型桩、止水帷幕、挂网喷射混凝土面层、原位土体等要素构成,适用于黏土、粉质黏土、粉土、砂土、碎石土、全风化及强风化岩,地层中局部夹有淤泥质土也可采用。在软土地层中基坑开挖深度不宜大于6 m,其他地层中直立开挖深度不宜大于13 m,可放坡时开挖深度不宜大于18 m^[1]。复合土钉墙支护能力强,可作超前支护,同时兼备支护、止水等效果,具有安全、经济、方便等优越性,得到了设计单位和施工单位的青睐^[2]。

复合土钉墙形式多样,每种组合类型都有各自的优缺点和适用范围,可根据土层特性、基坑深度、周边条件的限制以及工程需要进行灵活的有机结合。在实际工程中主要有7种组合类型,如图1所示,前3种复合土钉支护形式较为常用,其中预应力锚杆复合土钉支护是近年来应用最广,也是相当有发展潜力的复合支护形式,能大大提高基坑的稳定性^[3-4]。当基坑开挖深度越大,变形控制要求越高,工程地质条件和场地环境条件越复杂时,复合土钉墙组合形式就越复杂。随着工艺技术的不断提高和工程实践的需求,复合支护形式也在不断改进优化。为节约工期、减少工程造价,改进了预应力锚杆复合土钉墙的腰梁,采用同一排中预应力锚杆和土钉间隔布置的复合土钉墙技术^[5]。为了提高支护结构的稳定性,改变支护结构的破坏模式,产生了疏排桩-土钉墙组合支护结构^[6]。为了发展新型的节能环保型基坑支护技术,产生了毛竹复合土钉墙^[7]等,大量的工程应用表明^[8-12],在软土、富水、特殊土地区以及地质条件较复杂的地方,该技术也是可行的。复合土钉墙具有传统土钉墙无法比拟的优点,可用于

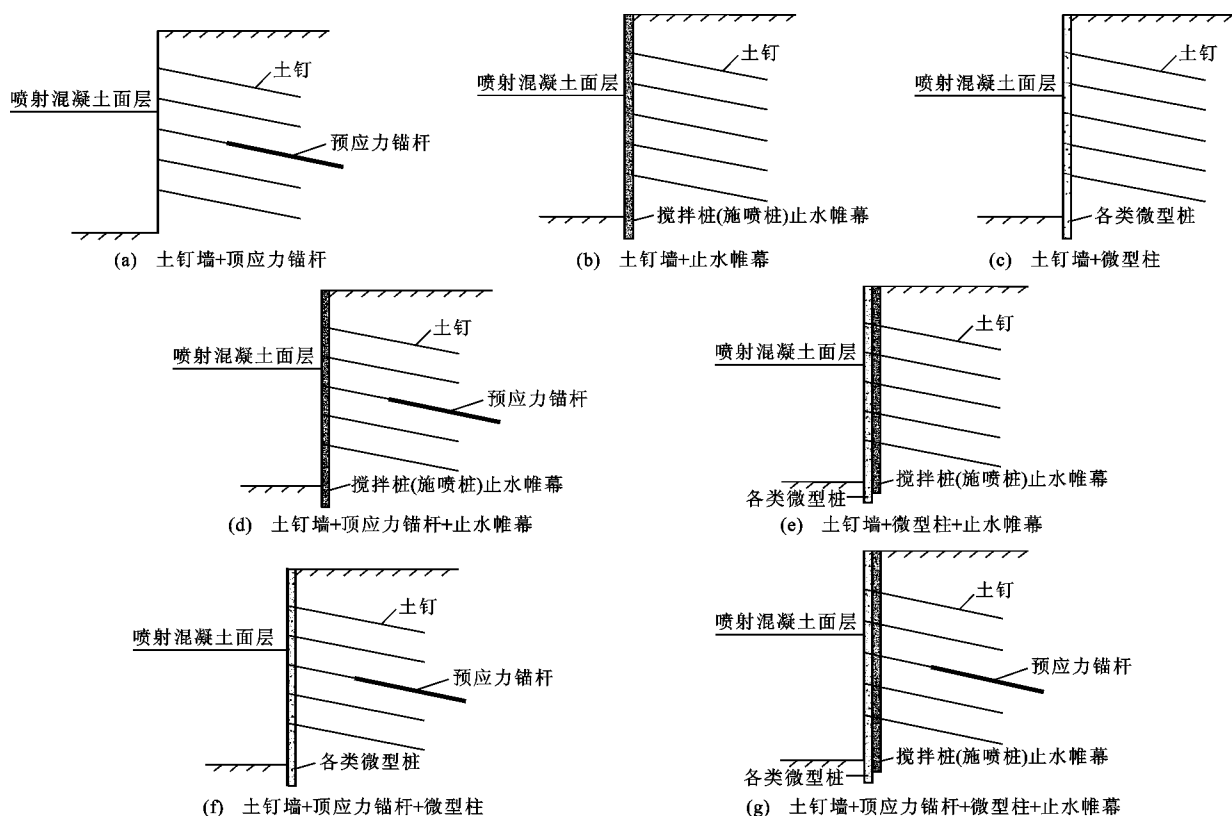


图1 复合土钉墙组合类型

Fig. 1 Composite Soil Nailing Wall Types

安全等级为一级的基坑,已成为深度不超过 18 m 的基坑中使用率最高的支护结构^[13]。需要注意的是在开挖坑中坑、旧城改造地下工程、基坑开挖过程中地下水渗流作用等作业条件下对复合土钉墙的安全性有较大的影响,设计时应应对地质条件、环境条件做充分考虑。

1.2 新型地下连续墙

深基坑墙-撑式支护结构中,地下连续墙以其墙体刚度大、整体性能高、防渗效果好、施工速度快、噪声小等优点,被越来越多地用于超深基坑工程中。为了满足工程建设的需求和时代的步伐,GFRP 筋^[14]、TRD 工法、TRUST 工法、CRM 工法、CMW 工法^[15]等新材料、新工艺、新技术越来越多地用在地下连续墙结构中。

1.2.1 “两墙合一”地下连续墙

“两墙合一”地下连续墙是一种将围护结构与主体结构合二为一的深大基坑围护技术,是一种集围护、防渗、承重和地下室结构外墙于一体的围护结构形式,具有十分显著的技术和经济效益,近些年来广泛应用于高层建筑地下室、地下车库、地铁、船坞等地下结构的围护结构和地下室外墙设计施工中的一种新技术。

“两墙合一”地下连续墙作为超深基坑的一种支护方法,得到越来越多的应用^[16-18],并已成为深基坑工程技术的发展方向之一。随着新型材料的产生和工艺技术的进步,地下连续墙性能在原来的基础上有了很大的提高,其优点如下:①将两墙合二为一,能够在一定程度上降低工程量及节约资源,具有很好的经济性;②通过对地下连续墙设置支腿,成功地解决了整幅地下连续墙不能进入中风化基岩层的问题,提高了竖向承载能力并解决了主体结构之间的沉降差异问题;③通过将围护结构和主体结构合二为一的方法,可以很好地发挥连续墙本身的抗拔和竖向承载力^[19];④墙体刚度、整体性能、抗渗隔水性能以及结构耐久性都相对较好,应用范围广,大量工程实例表明,在城市密集建筑群区域及沿海软土地区较为适用;⑤刚度大,变形小,噪声低,占地少,工期短,效益高;⑥施工时振动小,能贴近已建建筑物及地下管线施工,对相邻建筑物和地下设施沉降及变位影响小,墙体可以根据环境组合成为任意多边形和圆弧形,并可用于逆作法施工^[20]。

1.2.2 TRD 工法

TRD 工法是一种由主机带动插入地基中的链锯式切割箱横向移动、切割及灌注水泥浆,在槽内进

行搅拌、混合、固结原位岩土体,形成等厚水泥土地下连续墙的工艺,其施工示意图如图2所示。TRD工法水泥土墙既可用于基坑外侧的防渗止水帷幕,也可在墙内插入型钢形成等厚度的型钢水泥土连续挡墙^[21]。

TRD工法于2009年从日本引进,目前已经在中国多个省市得到成功应用,实践证明^[22-25],其在渗透性强的土层或者隔水帷幕超深、深部地层为密实砂层、软岩地层中形成的墙体隔水性能可靠,围护效果较好,有如下优点:①与其他方法相比,该工法所

使用的机械设备高度大大降低,稳定性高,使得施工安全性提高;②在水平方向和垂直方向具有较高的施工精度,可控性好,其最大成墙深度可达60 m,垂直度偏差不大于1/250,形成墙体均质性好,离散性小;③适应地层范围比较广,适用于黏性土、砂土,对硬质地层(硬土、砂卵石、软岩等)也具有良好的挖掘能力;④造价低,污染小,抗渗性能好,止水性能优异,优于传统SMW工法^[26-27];⑤可根据需要通过角度调节施工斜墙;⑥对周边环境影响很小,环保性能优良,节省材料。

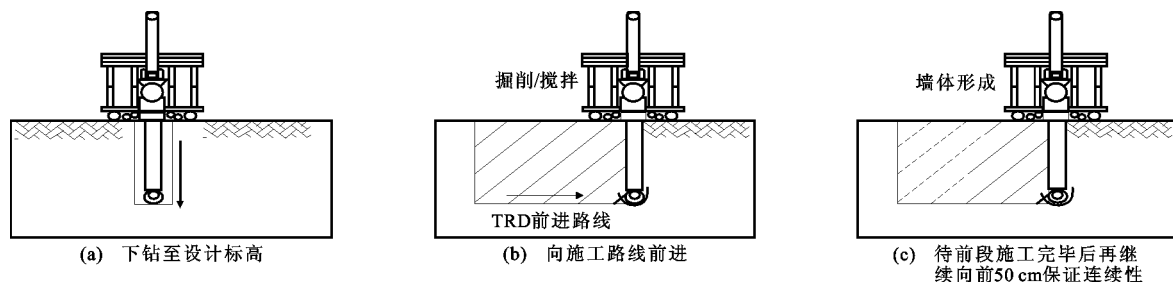


图2 TRD施工示意图

Fig. 2 Schematic Diagrams of TRD Construction

需要注意的是,TRD工法在复杂地层中的施工能力和施工效率会相对较低,需要对切削刀具、工序及施工参数等方面进行优化组合,在不同的地层中选用合适的刀头,在深埋密实卵石夹层中施工成墙前用桩基提前引孔等,防止在进入中等风化基岩时切割速度慢,刀排磨损大,遇到卵石夹层时卡链,甚至埋入地下,以确保成墙工效和质量。

1.2.3 CSM工法

CSM工法是通过配置在钻具底端的2组铣轮水平轴向旋转下沉掘削原位土体至设计深度后,提升喷浆(注入固化剂)强制性旋转搅拌已松化的土体形成矩形水泥土槽段,并通过对已施工槽段的接力铣削作业将一幅幅水泥土槽段连接构筑成等厚度水泥土连续墙,其不但可以作为防渗墙,而且可以在其内插入型钢,形成集挡土和止水于一体的墙体。

在复杂地层中已经成功应用了该工法^[28-30],其具有如下特点:①占用施工场地小,可在复杂场地环境条件下施工,施工速度快,效率高;②设备成墙尺寸、深度、注浆量、垂直度等参数控制精度高,垂直度控制精度能达到1/300;③防渗效果好,渗透系数能达到 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;④切削能力强,可切削35 MPa以下地层,最大切削强度达140 MPa^[31];⑤成墙质量高,7 d强度可达3 MPa,墙体强度能达到1~5 MPa,成墙厚度550~1 200 mm,可以插入大型号型钢;⑥低噪声和振动,对周边环境

影响较小,环保效果好;⑦适用于软黏土、密实砂土、粒径20 cm内的卵石和单轴抗压强度20 MPa内的硬岩等各种地层,对地层的适应性更高;⑧设备采用触摸屏控制系统,自动化程度高,各功能部位设置大量传感器,信息化系统控制,施工过程中动态控制施工质量;⑨360°旋转履带式主机底盘,便于转角施工,在紧邻已有建构筑物可实现零间隙施工;⑩CSM作为围护结构,在基坑内部结构施工完成后,型钢可回收重复使用。

通过实例^[31]表明CSM工法墙内插型钢计算原理可依托工艺比较成熟的SMW工法,需要注意的是对于周边环境条件要求较高,围护墙身砂性土、粉土等透水性较高的土层中或对搅拌墙抗裂、抗渗及防腐蚀有较高要求时,宜增加型钢插入密度。当基坑周边环境条件复杂、保护要求高时,型钢不宜回收。

1.2.4 SMW工法

SMW工法是基于深层搅拌桩工法和地下连续墙工法发展起来的一种新型深基坑围护技术。该法是利用特制的搅拌机械,以水泥浆作为固化剂,在土层中与软土强行拌合,将软土与固化剂拌合形成致密的水泥土地下连续墙,并按一定形式在墙体内插入受力型钢,从而形成的一种劲性复合围护结构。

SMW工法基坑围护具有卓越的止水性、经济性、施工工期短等优点^[32],因此在软土等松软地层

的深基坑中应用效果较好。需要注意的是,该工法中型钢可以回收重复利用,型钢起拔回收技术直接关系到施工成本的一半左右^[33],但随着基坑的开挖,挡墙变形使型钢产生弯曲,导致型钢的拔出存在困难,或拔出后较难重复使用,其次型钢起拔时顶拔力过高造成压顶梁断裂、压碎甚至水泥土墙顶碎裂等次生问题。另外成墙的均匀性、搅拌桩搭接厚度、墙身以及插入型材时的垂直度等也是值得关注的问题。

经过许多年的应用,该工法已经逐渐趋于成熟^[34-36],为了满足工程要求,在 SMW 工法的基础上产生了许多新的工艺技术,并得到成功应用,如智能 SMW 工法桩^[37],在基坑工程安全监测中能动态感知桩身受力和变形状态,并且能够实时获取详细信息。SMW 工法桩+单轴旋喷搅拌斜桩锚杆联合支护技术^[38]在膨胀黏土深基坑支护中有着很好的可行性和优越性。SMW 工法+预应力锚杆技术^[39]大大降低了成本,在满足基坑支护的同时解决了基坑边坡止水的问题。SMW 工法+斜向加筋水泥土桩技术^[40]用于软弱地层、周围环境受限制条件下的基坑工程支护,解决了周边环境受限制条件下侧向抗力不足的问题。SMW 工法+扩孔锚杆联合支护技术^[41]在含砂量高的地基中适用性很强,特别适用于施工工期紧张的深基坑工程。

1.2.5 WSP 工法

WSP 工法^[42]是利用大直径钢管桩承担水土压力的新型深基坑围护技术,其施工工艺是将相邻钢管桩套接用以阻挡桩间土,在接缝部位设置止水空腔,通过在止水空腔内安装弹性袋并充水来密封邻桩接缝,实现“以水堵漏”的目的,形成连续墙体进行基坑围护。此围护结构通过“以水堵漏”方式解决了钢管桩接缝止水问题,通过“土塞补偿”方式实现了钢管桩连续墙微扰动全回收。围护的形式有“半放坡”、“钢墙斜桩”、“钢墙斜锚”、“钢墙排桩”、“钢墙内支撑”等,相比于地下连续墙、SMW 工法、钻孔灌注桩等支护结构具有施工速度快、强度高、造价省、环保等优点。

上海顺寓国际社区基坑围护工程采用钢管桩连续墙施工工艺-WSP 工法,具有对周围环境影响小、材料可回收利用、施工速度快且效率高、围护强度高等优点,可有效解决现有围护结构不可回收利用、污染大、造价高、施工工期长等问题。尤其是该技术采用的“以水止水”、“土塞补偿”等新型理念,为深基坑围护技术的发展提供了一个全新的方向。

1.2.6 CRM 工法

CRM 工法^[43]是利用挖掘机械挖掘沟槽,以挖掘出的大部分土砂为主要材料,在施工现场制成水泥与土的混合浆体,使用导管在水下浇筑地下连续墙体的施工方法。CRM 工法源于日本,但在中国没有普及和使用,该方法的主要特点是施工精度高,墙体均匀性好,止水抗渗效果强,可以满足场地狭窄、临近施工等需求,适用于市区地下工程施工、各种土层条件(以砂砾、粗砂为主及含有大量有机质的地基土层)以及大深度施工。

1.2.7 TRUST 工法

TRUST 工法^[43]是一种超薄型地下防水连续墙的施工方法。利用这种工法,在 200 mm 超薄型墙壁厚度的情况下,连续墙的开挖深度可达 150 m,同时施工精度非常高,施工时低振动、低噪声,对环境的影响较小,对于一般土砂层到中等硬度岩石(岩石标准试样的单向极限抗压强度 $q_u = 5 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-2}$)都较适用,经济性能好,对中国地连墙施工有很强的借鉴意义,也为深基坑支护技术的发展提供了一个较好的研究方向。

1.2.8 预制地下连续墙

地下连续墙技术众多的优点使得其在中国得到了广泛的应用,但常规的地下连续墙依然存在着许多问题,如在一些特殊的地质条件下,施工难度大、施工方法不当或施工地质条件特殊,可能出现相邻墙段错缝、渗水、废弃的泥浆对环境造成污染等。相对而言,预制装配式地下连墙则具有常规地下连续墙所没有的很多优势,如预制时可采用不同的构造措施来改善和加强地下连续墙受力的均匀性,从而使墙体质量能够得到保证,连续墙整体性好,抗渗效果强,施工速度快且符合未来绿色施工的发展方向。

目前,中国已有大型地下连续墙的运输、吊装工艺^[44],如有必要可以在施工现场进行预制,为了提高连续墙体的整体性能,可对地下连续墙施加预应力,胡坚尉^[45]通过模拟分析得出,在同样的支撑条件下,后张法预应力地下连续墙在控制围护墙体自身变形及保护周边环境方面,效果明显好于常规地下连续墙及先张法预应力地下连续墙,而且墙身厚度可以更薄,支撑数量可以更少,可有效减少混凝土用量,缩减施工工期,从而节约工程造价。

1.2.9 预应力钢管混凝土桁架围护桩墙

预应力钢管混凝土桁架围护桩墙^[46]是一种新型基坑支护工艺,用钢管、混凝土、钢绞线三者构成桁架的弦杆,用角钢、钢板、细钢管三者中的一个构

成桁架的腹杆,后将桁架插入之前施工完成的水泥土沟槽中,从而形成预应力钢管混凝土桁架围护桩墙。在施工过程中无泥浆外排,与SMW工法、混凝土地下连续墙等围护结构相比具有施工速度快、工程成本低、防渗效果好及绿色环保等优势。

1.3 排桩支护

排桩支护结构形式主要有桩锚式、桩撑式及悬臂式等,其中桩锚式、桩撑式因其安全经济、施工便利、适用性强等优势,被广泛地应用于深基坑支护工程中,成为深基坑常用的支护形式之一。根据不同的开挖深度、地层条件、施工环境等,用到的支护桩体有钻孔灌注桩、旋喷搅拌加劲桩、钢桩、钢板桩、水泥搅拌桩、预应力高强混凝土矩形支护桩^[47]、PHC管桩,其中预制预应力桩因其施工速度快、绿色环保等优越性有望成为支护桩中的一种常用桩体。

桩撑式支护结构中,支撑体系将由钢筋混凝土支撑、钢管支撑技术逐渐被预应力型钢组合支撑技术、装配式预应力鱼腹梁支撑技术(IPS)等新型内支撑技术所取代。与传统的支撑结构相比,预应力型钢组合支撑技术具有方便施工(每道支撑均由数根型钢组合而成,所有节点均采用高强螺栓连接^[48],无现场焊接,土方开挖及外运空间较大)、刚度大、冗余性高、适用性强(基坑形状大小不受限制)、安全合理(支撑结构施加预应力,同时可根据现场情况进行调整)及绿色经济(无污染,大部分构件都可回收重复使用)的优点,但对施工作业水平要求较高。装配式预应力鱼腹梁支撑技术使得内支撑体系的稳定性和整体刚度有了极大的提高,大幅限制围护结构位移,降低基坑工程的环境影响,适用于深大异性基坑^[49],近年来在中国基坑工程中被推广应用并取得一系列显著成效^[50]。

桩锚式支护结构中,经过大量的科学研究和工程实践,已研制出了多种新型锚杆(索)^[51],为了解决锚杆超出规划红线、污染地下环境等问题,产生了多种可回收锚索(压力分散型的U形回收式锚索、直列无级调压式回收锚索、JL可回收锚索等)技术。为了防止锚杆失效,提高锚杆与土体间的黏结摩阻力,产生了扩体型锚杆(索)和二次高压灌浆锚杆(索)等。在复杂地质回填条件下,为了避开部分不可迁移地下构筑物,产生了锚杆(索)变角度预应力锚固技术^[52]。

由于实际工程的需求,深基坑排桩支护新技术也在不断地发展和应用,为了充分合理地利用建筑红线内的面积,减少相应主体地下结构投入等,产生

了将围护排桩作为正常使用阶段主体地下结构的一部分的“桩墙合一”技术^[53]。为了使支护结构具有更大的侧向刚度,减小基坑的侧向变形及锚索越界问题,产生了双排桩支护技术,并在工程中应用越来越多^[54]。

1.4 逆作法技术

逆作法施工技术是在修建建筑物地下结构时自上而下施工的一种技术,与传统的深基坑支护方法相比,其能够很好地利用地下主体结构,具有节约社会资源、保护环境、施工进度快等优点,克服了常规临时支护存在的诸多不足之处,具有显著的经济和社会效益。逆作法分为:上下同步施工的“全逆做法”、仅施工下部结构的“半逆作法”^[55]、部分逆作法和分层逆作法。大多数逆作法工程外围护结构采用地下连续墙“二墙合一”、“桩墙合一”的形式,既降低了工程量,节约了资源,又增加了地下空间的利用率。

“半逆作法”由于挖土效率不高,地下室结构施工不便,对于大型深基坑工期较长,故实际应用不多^[56],而“半顺作半逆作”、“坑边逆作”等也存在一些缺陷,为此产生了一些新型逆作施工工艺和技术^[57-58],通过工艺技术的创新提高了竖向支撑立柱的垂直精度、施工速度,解决了地下连续墙与内衬墙之间渗漏水、单桩承载力不足^[59]等问题。

1.5 人工冻结法技术

人工冻结法是借助人工制冷手段暂时加固含水地层和隔断地下水,起到承受荷载和密封防水作用的一种特殊施工方法。此法除对含水率非常小或地下水流速相当大的地层不适用外,几乎不受地层条件的限制,在复杂和特殊地层环境中具有很大的优越性。人工冰结法因具有适应性强、绿色环保、保护地下水资源等优势,越来越多地被应用在深基坑支护工程中,基坑越深、开挖体积越大,冻结法施工越具优越性^[60]。

人工冻结工艺技术也在不断地优化中,例如冻结方法除传统的氨-盐水外,产生了液氮、干冰冻结法。在淤泥质土体中,为解决冻结温度低、冻结扩展速度慢、形成冻结壁的低强度等问题,在排桩冻结法的基础上出现了三圈冻结法^[61]等。值得关注的是,人工冻结形成的冻土墙是一个具有一定长、宽、深的三维空间结构,应注意冻胀融沉对围护结构及周边环境的影响、土体含盐量对冻土墙强度的影响等。冻结法在深基坑支护工程中除了起到止水围护作用外还能用于抢险堵漏等,特有的优越性使其具有相当广泛的应用前景。

1.6 紧邻建筑物“零占位”基坑支护技术

“零占位”基坑支护技术^[62]是在紧邻既有建筑物基坑一侧地面处,采用工程机械按特定顺序钻斜孔,斜孔钻至紧邻建筑物基础下方土层中的设计深度时,再将水泥浆液高压旋喷射入切割孔周土体,通过一系列有序的旋转、喷射、提升使水泥浆液和切割下的土体搅拌形成圆柱状水泥土体,经固化后得到排列有序的圆柱状水泥土组合体,在紧邻建筑物基础下方形成基坑支护结构体的一种新型基坑支护方

法,与一般支护结构对比如图 3 所示。此方法结构简单,施做方便,支护可靠,受力合理,其最大优点是支护结构本身不占据基坑的空间位置,同时集基坑支护、挡土、止水、承载和保护紧邻建筑物为一体,使城市密集地区紧邻建筑物的新建基坑侧土地面积达到 100% 的充分利用,且在整个基坑施工期间不影响紧邻建筑物的正常使用。

1.7 深基坑支护新技术综合对比

深基坑支护新技术综合对比见表 1。

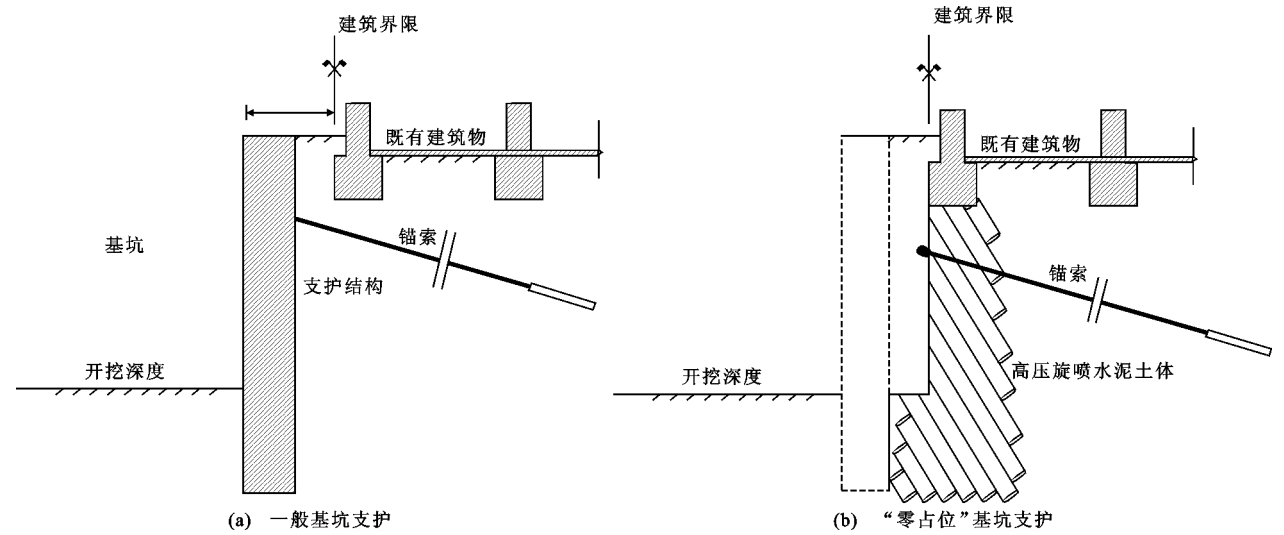


图 3 一般支护与“零占位”基坑支护示意图

Fig.3 Schematic Diagrams of General Support and “Zero Space” Foundation Pit Support

表 1 深基坑支护新技术综合对比

Tab.1 Comprehensive Comparison of New Supporting Technique for Deep Foundation Pit

| 工法名称 | | 适用范围 | 优点 | 缺点 |
|-----------|-------------|---|---|---|
| 复合土钉墙支护技术 | | 适用于黏土、粉质黏土、粉土、砂土、碎石土、全风化及强风化岩,局部夹有淤泥质土地层。软土地层中基坑开挖深度不宜大于 6 m,其他地层中直立开挖深度不宜大于 13 m,可放坡时开挖深度不宜大于 18 m | 造价低,工期短,施工不需单独占用场地,对于施工场地狭小、放坡困难、有相邻建筑、大型护坡施工设备不能进场时,该技术显示出独特的优越性与机动灵活性 | 对基坑外地层状况的要求高,不允许有地下管线、地下室、建筑基础等妨碍土钉或锚杆施工的因素 |
| 新型地下连续墙 | “两墙合一”地下连续墙 | 城市密集建筑群区域及沿海软土地区较为适用 | 刚度大,变形小,噪声低,占地少,工期短,施工时振动小,能贴近已建建筑物及地下管线施工,对相邻建筑物和地下设施沉降及变位影响小,墙体可以根据环境组合成为任意多边形和圆弧形并可用于逆作法施工 | 施工技术要求高,制浆及处理系统占地较大,管理不善容易对环境造成污染 |
| | TRD 工法 | 适用于黏性土、砂土,对硬质地层(硬土、砂卵石、软岩等)也具有较好的挖掘能力 | 适应地层范围比较广,在渗透性强的土层或者隔水帷幕超深、深部地层为密实砂层、软岩地层中形成的墙体隔水性可靠,围护效果较好 | 硬质地层作业时切割速度慢,刀排磨损大,遇到卵砾石夹层时容易卡链,甚至埋入地下 |
| | CSM 工法 | 适用于软黏土、密实砂土、粒径 20 cm 内的卵砾石和单轴抗压强度 20 MPa 内的硬岩等各种地层 | 施工速度快,效率高,占用施工场地小,可在复杂场地环境条件下施工,型钢可回收重复使用 | 对于周边环境条件要求较高时,需增加型钢插入密度,且型钢不宜回收 |

| 续表 1 | | | | |
|---------------------------------|----------------|---|--|---|
| 工法名称 | | 适用范围 | 优点 | 缺点 |
| 新 型 地 下 连 续 墙 | SMW 工法 | 在软土等松软地层深基坑中应用效果较好 | 构造简单,止水性好,施工工期短,造价低,施工时基本无噪声,对周围环境影响小 | 成墙的均匀性、搅拌桩搭接厚度、墙身及插入型材时的垂直度等是值得关注的问题 |
| | WSP 工法 | 适用于淤泥质土、砂土、硬黏土、砾石,试验证明可以插入圆砾 12 m 深度,可在复杂周边环境下载使用 | 相比于地下连续墙、SMW 工法、钻孔灌注桩等支护结构具有施工速度快、强度高、造价低、环保等优点 | 以大直径钢管桩为承载结构 |
| | CRM 工法 | 适用于市区地下工程施工、各种土层条件(以砂砾、粗砂为主及含有大量有机质的地基土层)以及大深度施工 | 施工精度高,墙体均匀性好,止水抗渗效果强,可以满足场地狭窄、临近建筑物施工 | 工程造价相对较高 |
| | TRUST 工法 | 一般土砂层到中等硬度的岩石($q_u=5\text{ kN}\cdot\text{cm}^{-2}$)都较适用 | 成墙质量高,止水效果好,低噪声,低振动,施工环境好 | 经济性能大约是 SMW 工法的 1 倍~2 倍,施工工艺复杂,工期相对较长 |
| | 预制地下连续墙 | 基本不受地层限制 | 墙体质量能够得到保证,连续墙整体性好,抗渗效果强,施工速度快且符合未来绿色施工的发展方向 | 在一些特殊的地质条件下施工难度大,施工方法不当或施工地质条件特殊,可能出现相邻墙段错缝、渗水等 |
| | 预应力钢管混凝土桁架围护桩墙 | 该工法与土层特点和性质没有关联,适应性强,适合能够施工水泥土搅拌桩的各种地质条件和基坑围护工程 | 防水性能高,受弯承载力强,强度储备高,延性性能好,施工速度快,与混凝土灌注桩相比工程造价较低,绿色环保 | 制作、施工工艺相对复杂,材料不可回收再利用 |
| 排 桩 支 护 | 桩锚式 | 基本不受基坑深度的限制,但不宜用于有机质土、液限大于 50% 的黏土及相对密度小于 0.3 的砂土 | 可用于不同深度的基坑,支护体系不占用基坑范围内空间,方便施工,支护适用性强 | 锚杆需伸入邻地,有障碍时不能设置,也不宜锚入毗邻建筑物地基内;锚杆的锚固段不应设在灵敏度高的淤泥层内,在软土中也要慎用;在含承压水的粉土、粉细砂层中应采用跟管钻进施工锚杆或一次性锚杆 |
| | 桩撑式 | 可用于不同深度的基坑和不同土质条件,变形控制要求严格时宜选用 | 安全储备较高,可靠度高,变形小,对周边环境影响较小 | 支护体系需占用基坑范围内空间,其布置应考虑后续施工的方便,工程量相对较大,费用略高 |
| | 悬臂式 | 悬臂高度不宜超过 6 m,对深度大于 6 m 的基坑可结合冠梁顶以上放坡卸载使用,坑底以下软土层厚度很大时不宜采用 | 支护桩体种类多,施工速度快 | 抗弯能力较弱,支护刚度相对较小,开挖后变形较大 |
| 逆作法技术 | | 城市交通环境复杂、建筑密集地区 | 可以大大节约工程造价,缩短施工工期,有非常好的经济效益和社会效益 | 挖土效率不高,地下室结构施工不便,对于大型深基坑工期较长 |
| 人工冻结技术 | | 除对含水率非常小或地下水流速相当大的地层不适用外,几乎不受地层条件的限制 | 适应性强,绿色环保,保护地下水资源 | 需要特别注意冻胀融沉对围护结构及周边环境的影响、土体含盐量对冻土墙强度的影响 |
| 紧邻建筑物“零占位”基坑支护技术 | | 城市密集地区、紧邻建筑物区域 | 结构简单,施做方便,支护可靠,受力合理,其最大优点是支护结构本身不占据基坑的空间位置,同时集基坑支护、挡土、止水、承载和保护紧邻建筑物为一体 | 在场地开阔、周围无建筑物区域,其社会效益不高 |

2 深基坑新技术发展趋势

深基坑支护技术是基坑工程中一个很有发展潜力的课题,不断增加的工程数量,差别迥异的地质条件,复杂多变的工程环境为基坑的发展提供了一个广阔的舞台。在今后的发展中,深基坑支护技术发

展趋势主要表现在以下 8 个方面。

2.1 信息监测监控与信息化施工技术

深基坑工程施工是一个动态的过程,其空间大小和形状的变化、周围环境条件的渐变、工程地质条件与水文地质条件的递变、开挖深度及施工过程中的扰动等众多不确定性因素都会对围护体系的工作性状产生较大的不良影响,对施工作业环境及周边环境造成威胁,因此在施工过程中要遵循“边观察、边施工”的原则,实施动态监测,动态施工,动态设计。其中,监测工作是信息化施工的前提,是在施工过程中进行科学决策的重要依据,也是确保施工安全与经济安全的重要保证,所以制定完整的监测方案,实时同步监测数据,根据监测数据分析调整施工参数,实施信息化施工,才能做到安全生产,智能 SMW 工法桩技术^[37]等的产生预示着未来在深基坑工程领域信息化监测施工新设备、新技术的发展将成为必然趋势。

2.2 复合土钉墙

复合土钉支护技术可根据土层特性、基坑深度、周边条件的限制以及工程需要进行灵活的有机结合,适用范围较广,方便设计施工,可大大缩短建设工期,降低工程造价。随着材料和技术的不断更新,及其在冻土、湿陷性黄土、膨胀土、盐渍土等特殊土地区的应用研究,复合土钉墙在中国建筑工程领域具有良好的发展前景,必将在工程中得到广泛应用。

2.3 新型地下连续墙

新型地下连续墙在国内外大量的深基础工程中都得到了应用,此种技术无论是作为地下结构的主体(或主体的一部分)还是作为防水、挡土结构,都是一种使用价值非常高的施工技术。随着工程实践的积累、技术的不断进步、新型材料的不断产生,新型地下连续墙的设计方法、施工工艺、防渗漏措施以及整体性能等方面都有了进一步的发展和完善。“两墙合一”地下连续墙、TRD 工法、CSM 工法等新技术将是深大基坑支护技术的主要发展趋势,预制装配式地下连续墙、预应力地下连续墙符合现代社会倡导绿色施工需求,在深基坑支护领域将是一个新的研究方向。

2.4 排桩支护

排桩支护目前广泛地应用于深基坑支护工程中,一系列新型支撑体系、新型锚杆(索)技术的持续发展和完善,使得排桩支护结构在深基坑支护工程中保持着旺盛的生命力。

2.5 逆作法

逆作法施工是进行可持续发展城市地下空间,开发和建设节约型社会的有效经济手段,是解决深基坑支护难题的一种较好的施工方法^[63],其施工已日趋成熟。目前在实际工程实践过程中支撑桩与柱、支撑柱与梁板、梁板与地墙间的节点处理、竖向立柱的稳定性、围护结构的设计施工等问题已经得到不断发展和完善。随着材料设备及工艺技术的不断更新进步,相继产生了新型逆作施工工艺方法,成功解决了传统逆作法存在的缺陷和不足。逆作法由于自身的优越性将在城市交通环境复杂及建设密集区的深、超深基坑支护工程中得到广泛运用。

2.6 冻结法

冻结法可在各种复杂工程条件下应用,不受基坑形状和尺寸的限制,能够很好地保护城市地下水资源,且施工设备和工艺方法也日趋成熟,符合绿色环保可持续发展的建设理念,其除了可以用作深基坑的止水围护结构外,还可以用于事故抢险,在深基坑支护工程中占有越来越重要的地位。需要注意的是,冻结使深基坑的受力过程变得较为复杂,冻胀融沉对围护结构和周边环境可能产生不利影响,在使用此法时应该加强信息化监测监控、信息化设计与信息化施工,以确保围护结构的安全性、稳定性。

2.7 联合支护

深基坑支护工程中,为实现技术、经济与环境安全等控制目标,沿基坑深度方向运用一种支护结构已经难以满足复杂工程要求,支护结构从单一结构向多种结构联合支护方向发展已成为必然趋势。联合支护技术可以发挥各种支护技术的优点,适用性好^[64],其中土钉墙+桩锚是常用的联合支护方式,除此之外还有土钉墙+桩撑、土钉墙+地下连续墙等。在确定选择联合支护的类型时,应充分利用各种支护方法的特点,根据工程地质条件及场地环境条件等因素因地制宜地选用支护类型,合理地优化设计方案,从而达到较好的经济技术效果。

2.8 紧邻建筑物“零占位”基坑支护技术

在城市建筑密集地区,基坑工程常常紧邻周边既有建筑物,现有的支护结构需要占用基坑一侧部分空间,使得城市密集区“寸土寸金”的土地面积不能达到 100% 的充分利用,造成空间使用上的损失和浪费。紧邻建筑物“零占位”基坑支护技术则集承载、基础延伸、基坑支护、挡土、止水、提高基坑空间利用率、有效控制紧邻基坑建筑物位移和沉降为一体,有效确保基坑和紧邻建筑物的安全稳定,其在城

市密集地区紧邻建筑物的深基坑支护中使用将成为一种趋势。

3 结 语

(1)深基坑工程中由于受复杂的工程地质条件、水文地质条件及施工环境等各种因素的影响,往往运用多种支护技术而不是单一的某种支护技术。在深基坑支护技术中挡土止水以桩、墙为主,支撑稳定以锚、撑为主,为解决外锚土质较差及锚杆占用红线外地下空间等问题,发展了内支撑支护结构,为解决内支撑带来的材料浪费及给地下结构施工带来的不便,发展了双排桩、“桩墙合一”、“零占位”等技术,为了避免施工对社会环境的影响和提高社会效益出现了逆作法工序等。同时,通过支护技术的复合、支撑方法的组合以及锚撑结合,解决了单一支护方法和支护技术难以解决的安全、经济、环保等深基坑支护问题。

(2)随着人们对地下空间资源需求的不断增加,这些深基坑支护新技术无论在工程实践中,还是在理论研究上都会有很大的进展,使得基坑工程更加安全、适用、经济、环保,从而满足工程建设和社会发展的需求。在未来如何根据工程建设的实际需求,对围护结构进行优化,发展新型基坑围护体系和围护新技术,将是深基坑工程领域的主要发展趋势。

参考文献:

References:

- [1] GB 50739—2011,复合土钉墙基坑支护技术规范[S]. GB 50739—2011, Technical Code for Composite Soil Nailing Wall in Retaining and Protection of Excavation[S].
- [2] 刘日成,张 芹,王育奎,等.复合土钉墙支护效果数值模拟[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):182-189.
LIU Ri-cheng, ZHANG Qin, WANG Yu-kui, et al. Numerical Simulation of Composite Soil Nailed Wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 182-189.
- [3] 赵 杰,邓林艳,刘道勇.地下水基坑预应力锚杆复合土钉支护的稳定性[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(7):826-831.
ZHAO Jie, DENG Lin-yan, LIU Dao-yong. Stability Analysis of Compound Soil Nail Wall of Pre-stressed Bolt in Foundation Pit Considering Groundwater[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(7): 826-831.
- [4] 彭文祥,谢雨军,徐松山,等.预应力锚杆复合土钉墙工作性状试验研究[J].中南大学学报:自然科学版, 2015, 46(4): 1468-1474.
PENG Wen-xiang, XIE Yu-jun, XU Song-shan, et al. Test Study on Working Properties of Prestress Anchor Composite Soil Nails Wall Work[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(4): 1468-1474.
- [5] 冯艳辉,王武刚,杨 媛.预应力锚杆复合土钉墙在云南某基坑工程应用中的改进[J].建筑结构,2013,43(24):72-75.
FENG Yan-hui, WANG Wu-gang, YANG Yuan. Improvement of Prestressed Anchor and Composite Soil Nailing Wall in an Foundation Pit Engineering in Yunnan Province [J]. Building Structure, 2013, 43(24): 72-75.
- [6] 古海东,杨 敏.土钉墙在疏排桩支护基坑中的加固效果试验研究[J].土木工程学报,2015,48(1):129-138,148.
GU Hai-dong, YANG Min. Experimental Study on Reinforcement Effect of Soil-nailed Wall in Pit Excavation Supported with Scattered Row Piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 129-138, 148.
- [7] 戴自航,欧 煜.毛竹复合土钉墙工作性状的数值分析研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):729-737.
DAI Zi-hang, OU Yu. Numerical Analysis on Working Performance of Composite Moso Bamboo Soil Nailing Wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 729-737.
- [8] 蔡楠生,刘小平,李亮辉.复合土钉墙在软土深基坑工程中的应用[J].土工基础,2007,21(3):1-3.
CAI Nan-sheng, LIU Xiao-ping, LI Liang-hui. Application of Composite Soil Nailing Walls in Deep Excavation at Soft Soil Site[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(3): 1-3.
- [9] 李 冬,岳大昌,唐延贵,等.微型桩复合土钉墙在膨胀土基坑中的应用研究[J].地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1645-1652.
LI Dong, YUE Da-chang, TANG Yan-gui, et al. Application Research of Micro Piles Composite Soil Nailing Wall in Expansive Soil Foundation Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1645-1652.
- [10] 张树龙,董希祥,李连祥.复合土钉墙现场测试及数值模拟分析研究[J].土工基础,2014,27(6):79-82.
ZHANG Shu-long, DONG Xi-xiang, LI Lian-xiang. Field Testing and Numerical Analysis of a Composite

- Soil Nailing Wall[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 27(6): 79-82.
- [11] 杨育文. 复合土钉墙实例分析和变形评估[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 734-741.
YANG Yu-wen. Case Studies of Composite Soil-nailing Walls and Movement Estimate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 734-741.
- [12] 沈振元. 复合土钉墙在基坑中的应用[J]. 建筑科学, 2012, 28(增1): 165-167, 175.
SHEN Zhen-yuan. Application of Composite Soil Nailing Wall in Foundation Pit[J]. Building Science, 2012, 28(S1): 165-167, 175.
- [13] 付文光, 杨志银, 刘俊岩, 等. 复合土钉墙的若干理论问题、兼论《复合土钉墙基坑支护技术规范》[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2291-2304.
FU Wen-guang, YANG Zhi-yin, LIU Jun-yan, et al. Some Theoretical Questions of Composite Soil Nailing Wall and Discussion on Technical Code for Composite Soil Nailing Wall in Retaining and Protection of Excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2291-2304.
- [14] 赵升峰, 黄广龙, 章新, 等. 玻璃纤维(GFRP)筋替代钢筋在基坑支护桩中的应用[J]. 安徽建筑大学学报, 2016, 24(4): 55-59.
ZHAO Sheng-feng, HUANG Guang-long, ZHANG Xin, et al. Application of GFRP Bars in Supporting Structure of Excavation by Replacing Steel Bars[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2016, 24(4): 55-59.
- [15] 孙兴春, 陈小兵, 丁朋芳. CMW工法桩加水平内支撑在深基坑支护工程中的应用[J]. 施工技术, 2014, 43(增1): 44-46.
SUN Xing-chun, CHEN Xiao-bing, DING Peng-fang. Application of CMW Pile with Inner Horizontal Support in a Deep Foundation Excavation[J]. Construction Technology, 2014, 43(S1): 44-46.
- [16] 傅根洲, 谈丽华. 苏州现代传媒广场地下室结构设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(20): 72-77.
FU Gen-zhou, TAN Li-hua. Structural Design on the Basement of Modern Media Plaza in Suzhou[J]. Building Structure, 2016, 46(20): 72-77.
- [17] 陈松, 邢沛霖, 叶家万. 超深基坑地下连续墙作为主体结构的设计方法研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(9): 48-51.
CHEN Song, XING Pei-lin, YE Jia-wan. Analysis on Design Method of Super-deep Foundation Pit Diaphragm Wall as the Main Structure[J]. Building Structure, 2012, 42(9): 48-51.
- [18] 孙峰, 徐杨青, 张婧雯. “两墙合一”地下连续墙竖向承载力设计计算研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 154-158.
SUN Feng, XU Yang-qing, ZHANG Jing-wen. Design and Calculation of Vertical Bearing Capacity of Diaphragm Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 154-158.
- [19] 陈其志, 徐良英, 徐长节, 等. “两墙合一”技术在深基坑围护优化设计中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 189-194.
CHEN Qi-zhi, XU Liang-ying, XU Chang-jie, et al. Optimal Design in Deep Excavation Engineering Adopting Dual-purpose Diaphragm Walls Retaining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 189-194.
- [20] 翁其平, 王卫东, 周建龙. 超深圆形基坑逆作法“两墙合一”地下连续墙设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5): 188-194.
WENG Qi-ping, WANG Wei-dong, ZHOU Jian-long. Design of Diaphragm Wall of an Ultra-deep Cylindrical Excavation Constructed by Top-down Method[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(5): 188-194.
- [21] 杨学林. 浙江沿海软土地基深基坑支护新技术应用和发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 33-39.
YANG Xue-lin. Application and Development of New Technology for Support of Deep Excavations in Coastal Areas of Zhejiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 33-39.
- [22] 黄炳德. TRD工法等厚度型钢水泥土搅拌墙在上海深基坑工程中的应用[J]. 土工基础, 2014, 28(3): 62-66.
HUANG Bing-de. Deep Excavation Support Using TRD Method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(3): 62-66.
- [23] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 56 m深TRD工法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3247-3252.
WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, CHEN Yong-cai. Experimental Investigation of Construction of a 56 m Deep Constant Thickness Cement-soil Wall Using Trench Cutting Re-mixing Deep Wall (TRD) Method in Deep Aquifers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3247-3252.
- [24] 张弥, 朱洁民, 刘福天. 深基坑工程止水帷幕TRD工法施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(21): 58-62.
ZHANG Mi, ZHU Jie-min, LIU Fu-tian. TRD Construction Method in Waterproof Curtain of Deep

- Foundation Excavation[J]. Construction Technology, 2014, 43(21): 58-62.
- [25] 谢兆良,李星,叶锡东. TRD工法在紧邻地铁深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 163-166.
- XIE Zhao-liang, LI Xing, YE Xi-dong. Application of TRD Method in Deep Foundation Pit Project Adjacent to Metro Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 163-166.
- [26] 陈晨,赵文,庞宇斌. TRD工法水泥土墙现场取芯的三轴渗透试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(1): 116-120.
- CHEN Chen, ZHAO Wen, PANG Yu-bin. Triaxial Permeability Test for Site Coring of Cement-soil Wall by TRD Method[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(1): 116-120.
- [27] 管锦春. 深基坑止水帷幕TRD工法与SMW工法应用分析[J]. 施工技术, 2016, 45(15): 90-92.
- GUAN Jin-chun. Application Analysis of TRD and SMW Methods for Deep Foundation Excavation Waterproof Curtain[J]. Construction Technology, 2016, 45(15): 90-92.
- [28] 祝紫燕,李涵宁,胡日清. CSM工法在武汉地区深基坑工程中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(增1): 157-161.
- ZHU Zi-yan, LI Han-ning, HU Ri-qing. Application of CSM in Deep Foundation Excavation Engineering in Wuhan[J]. Construction Technology, 2017, 46(S1): 157-161.
- [29] 高凤栋,廖春华,胡正亮,等. CSM工法在天津软土地区超深基坑的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(5): 77-80.
- GAO Feng-dong, LIAO Chun-hua, HU Zheng-liang, et al. Application of CSM Method in Super Deep Foundation Pit Support Engineering in Soft Soil Area of Tianjin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(5): 77-80.
- [30] 霍镜,朱进,胡正亮,等. 双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙(CSM工法)应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 666-670.
- HUO Jing, ZHU Jin, HU Zheng-liang, et al. Application of Deep Mixing Cement Soil Mixing Wall (CSM)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 666-670.
- [31] 吴海艳,林森斌. CSM工法在深基坑支护工程中的应用[J]. 路基工程, 2013(2): 168-173.
- WU Hai-yan, LIN Sen-bin. Application of CSM Method in Deep Foundation Pit Support Engineering[J]. Subgrade Engineering, 2013(2): 168-173.
- [32] 楼春晖,夏唐代,刘念武. 软土地区基坑中SMW围护桩变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 1208-1211.
- LOU Chun-hui, XIA Tang-dai, LIU Nian-wu. Deformation Characteristics of SMW Piles in Excavation on Soft Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1208-1211.
- [33] 施庆熙,张健儿,吕艳斌. SMW工法在某工程基坑支护中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(13): 28-31, 35.
- SHI Qing-xi, ZHANG Jian-er, LU Yan-bin. Application of SMW Method in Supporting Foundation Excavations[J]. Construction Technology, 2012, 41(13): 28-31, 35.
- [34] 王志文,陈志波,杨建学. SMW工法深基坑工程位移沉降分析[J]. 土工基础, 2017, 31(5): 563-567, 587.
- WANG Zhi-wen, CHEN Zhi-bo, YANG Jian-xue. Deflection Analysis of Deep Excavation with SMW Supporting System[J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(5): 563-567, 587.
- [35] 路明鉴. 地铁深基坑中SMW工法影响因素敏感性分析[J]. 施工技术, 2017, 46(15): 112-116.
- LU Ming-jian. Sensitivity Analysis of Influencing Factors of SMW Construction Method in Deep Foundation Excavation of Subway[J]. Construction Technology, 2017, 46(15): 112-116.
- [36] 杨建华. SMW工法在复杂条件下基坑支护中的应用研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2017, 42(7): 132-137.
- YANG Jian-hua. On Application of SMW Method in Foundation Pit Supporting Structure Under Complex Condition[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2017, 42(7): 132-137.
- [37] 余佳骏,陈静,彭智,等. 智能SMW工法桩在基坑工程中的应用[J]. 低温建筑技术, 2016(12): 117-119.
- YU Jia-jun, CHEN Jing, PENG Zhi, et al. Application of Intelligent SMW Method Pile in Foundation Pit Engineering[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016(12): 117-119.
- [38] 王梦想,周盛全,宗琦. 膨胀黏土加劲桩支护安全性分析[J]. 施工技术, 2017, 46(1): 39-42.
- WANG Meng-xiang, ZHOU Sheng-quan, ZONG Qi. Safety Analysis of the Stiffening Pile Supporting in Expansive Soil[J]. Construction Technology, 2017, 46(1): 39-42.
- [39] 李哲琳,倪晓荣. 北京地区深基坑支护SMW工法的

- 创新应用[J]. 施工技术, 2013, 42(1): 47-49.
- LI Zhe-lin, NI Xiao-rong. Innovative Application of SMW Method for Deep Foundation Excavation Supports in Beijing[J]. Construction Technology, 2013, 42(1): 47-49.
- [40] 马 郢, 徐光黎. SMW+水泥土桩锚结构在基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 934-938, 964.
- MA Yun, XU Guang-li. Application of SMW and Pile Anchor Retaining Structure in a Soft Soil Excavation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 934-938, 964.
- [41] 黄伟达, 张 明, 蓝永基, 等. SMW 工法及扩孔锚杆在深大基坑中的工程实践[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增 1): 261-264.
- HUANG Wei-da, ZHANG Ming, LAN Yong-ji, et al. Practice of SMW Method and Reamer Anchors in Deep and Large Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 261-264.
- [42] 张继红. 一种自钻进钢管桩连续墙施工方法及其所用的钢管桩连续墙: 中国, CN 201510133502. 6[P]. 2015-06-24.
- ZHANG Ji-hong. Self Drilling Steel Pipe Pile Continuous Wall Construction Method and Steel Pipe Pile Continuous Wall: China, CN 201510133502. 6[P]. 2015-06-24.
- [43] 彭芳乐, 孙德新, 袁大军, 等. 日本地下连续墙技术的最新进展[J]. 施工技术, 2003, 32(8): 51-53.
- PENG Fang-le, SUN De-xin, YUAN Da-jun, et al. The Latest Development of Diaphragm Walls Technology in Japan[J]. Construction Technology, 2003, 32(8): 51-53.
- [44] 周蓉峰. 地下停车库的预制地下连续墙施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 32(3): 225-226.
- ZHOU Rong-feng. Construction Technology for Prefabricated Diaphragm Wall of Underground Parking Lot[J]. Building Construction, 2010, 32(3): 225-226.
- [45] 胡坚尉. 预制预应力地连墙围护受力及变形分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增 1): 275-280, 290.
- HU Jian-wei. Analysis on the Stress and Deformation of Precast and Prestressed Diaphragm Wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 275-280, 290.
- [46] 王立明, 李 伟. 预应力钢管混凝土桁架围护桩及工程试验[J]. 建筑科学, 2016, 32(S2): 333-336.
- WANG Li-ming, LI Wei. The Truss Retaining Pile of Prestress Concrete-filled Steel Tubes with the Practicing Test[J]. Building Science, 2016, 32(S2): 333-336.
- [47] 杨 波, 黄广龙, 赵升峰, 等. 预应力高强混凝土矩形支护桩在基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 371-376.
- YANG Bo, HUANG Guang-long, ZHAO Sheng-feng, et al. Application of Rectangular Prestressed High Strength Concrete Supporting Piles in Excavation Engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 371-376.
- [48] 李 瑛, 陈 东, 刘兴旺, 等. 预应力型钢组合支撑应用于软土基坑支护[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 1): 51-55.
- LI Ying, CHEN Dong, LIU Xing-wang, et al. Application of Prestressed Assemble Steel Support System in Retaining Structures for Foundation Pits in Soft Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 51-55.
- [49] 周冠南. 预应力鱼腹梁支撑体系在异形基坑中的应用与研究[J]. 施工技术, 2014, 43(17): 7-10.
- ZHOU Guan-nan. Application and Research of Innovative Prestressed Support System in Special-shaped Foundation Excavation[J]. Construction Technology, 2014, 43(17): 7-10.
- [50] 郭 亮, 胡卸文, 钱德良, 等. 基于位移控制的装配式预应力鱼腹梁深基坑应用研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 1016-1021.
- GUO Liang, HU Xie-wen, QIAN De-liang, et al. Innovative Pre-stressed and Prefabricated Support for Retaining Structure of Deep Foundation Pit with Displacement Control[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 1016-1021.
- [51] 李晓军, 李世民, 徐 宝. 岩土锚杆、锚索的新发展及展望[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 37-43.
- LI Xiao-jun, LI Shi-min, XU Bao. New Development and Prospect of Geotechnical Bolts and Cable-bolts[J]. Construction Technology, 2015, 44(7): 37-43.
- [52] 曾 涛, 赵广宇, 李 明, 等. 复杂地质条件下回填区桩锚支护体系综合施工技术[J]. 施工技术, 2016, 45(23): 138-141, 163.
- ZENG Tao, ZHAO Guang-yu, LI Ming, et al. Comprehensive Construction Technology of Pile-anchor Supporting System in Complex Geological Backfill Area[J]. Construction Technology, 2016, 45(23): 138-141, 163.
- [53] 胡 耘, 王卫东, 沈 健. “桩墙合一”结构体系的受力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增 2): 197-201.

- HU Yun, WANG Wei-dong, SHEN Jian. Field Monitoring and Analysis of Stresses for Dual-purpose Pile Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 197-201.
- [54] 杨光华, 黄忠铭, 姜燕, 等. 深基坑支护双排桩计算模型的改进[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 1-15.
- YANG Guang-hua, HUANG Zhong-ming, JIANG Yan, et al. Improvement of Calculation Model of Double-row Piles for Supporting Deep Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 1-15.
- [55] 应惠清. 深基坑支护结构和施工新技术[J]. 施工技术, 2013, 42(13): 1-5.
- YING Hui-qing. New Support Structure and Construction Technology of Excavation Engineering[J]. Construction Technology, 2013, 42(13): 1-5.
- [56] 王斌, 张领帅. 复杂环境基坑半逆作法支护结构的探讨[J]. 土工基础, 2016, 30(5): 533-537.
- WANG Bin, ZHANG Ling-shuai. Application of the Semi Reverse Construction Method in Complex Supporting Structures[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(5): 533-537.
- [57] 苏伟, 张明, 叶磊, 等. 新型逆作法施工关键技术的研究与应用[J]. 施工技术, 2015, 44(1): 52-56.
- SU Wei, ZHANG Ming, YE Lei, et al. Research and Application of New Top-down Method Construction Technology[J]. Construction Technology, 2015, 44(1): 52-56.
- [58] 李鹏, 郑七振, 龙莉波, 等. 逆作法一柱一桩新型调垂系统及应用[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 186-189.
- LI Peng, ZHENG Qi-zhen, LONG Li-bo, et al. New Verticality Adjustment System and Its Applications in "One Column and One Pile" of Top-down Construction Method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(6): 186-189.
- [59] 李峰, 徐壮涛, 郑振鹏. 旋挖扩底灌注桩在软土地基工程应用中的经济性分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(8): 61-64.
- LI Feng, XU Zhuang-tao, ZHENG Zhen-peng. Cost Analysis of the Engineering Application of Screw-drilled Under-reamed Cast-in-situ Piles in Soft Ground[J]. Building Structure, 2016, 46(8): 61-64.
- [60] 顾孟寒. 冻结法在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2000(2): 80-83.
- GU Meng-han. Application of Freezing Method in Deep Foundation Pit Engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2000(2): 80-83.
- [61] 张向东, 张学磊, 王长江, 等. 三圈冻结法在淤泥质土深基坑工程的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(5): 798-800, 806.
- ZHANG Xiang-dong, ZHANG Xue-lei, WANG Chang-jiang, et al. Application of Tir-circle Freezing Method in Deep Foundation-pit Engineering with Silty Soil[J]. World Sci-Tech R&D, 2012, 34(5): 798-800, 806.
- [62] 马建林, 赵兴权, 杨彦鑫, 等. 一种密集地区紧邻建筑物零占位的基坑支护方法: 中国, CN 104264686A[P]. 2015-01-07.
- MA Jian-lin, ZHAO Xing-quan, YANG Yan-xin, et al. Method for Supporting Foundation Pit of Dense Area Close to Building: China, CN 104264686A[P]. 2015-01-07.
- [63] 应宏伟, 王奎华, 谢康和, 等. 杭州解百商业城半逆作法深基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 79-83.
- YING Hong-wei, WANG Kui-hua, XIE Kang-he, et al. Design and Monitoring of Deep Excavation with Semi-top-down Method in Hangzhou Jiebai Commercial Building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 79-83.
- [64] 许厚材. 复杂条件下某深基坑工程联合支护技术[J]. 施工技术, 2013, 42(7): 45-48.
- XU Hou-cai. Combined Supporting Technology for a Deep Foundation Excavation Under Complicated Conditions[J]. Construction Technology, 2013, 42(7): 45-48.