

引用格式:曹文昭,吴旭君,张兴杰,等.装配式基坑支护技术发展现状与展望[J].工业建筑,2025,55(4):168-179. CAO Wenzhao, WU Xujun, ZHANG Xingjie, et al. State-of-the-Art and Prospects of Prefabricated Excavation Support Technologies[J]. Industrial Construction, 2025, 55(4): 168-179 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gjzG24071906

## 装配式基坑支护技术发展现状与展望\*

曹文昭<sup>1</sup> 吴旭君<sup>2</sup> 张兴杰<sup>2</sup> 骆永生<sup>2</sup> 龚超<sup>1</sup>

(1. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司,广东深圳 518055;2. 中国京冶工程技术有限公司,北京 100088)

**摘要** 我国现有基坑工程主要基于临时性设计理念进行支护结构的设计与施工,装配式基坑支护结构具有可重复利用、施工效率高、绿色环保和节省造价等优点,近年来逐渐得到推广和应用。首先总结了常见的装配式水平支撑和装配式竖向支护结构研究应用现状,阐述了建筑信息模型(BIM)技术、建筑机器人、先进感知技术和伺服控制等智能建造技术在装配式基坑支护工程中的应用,梳理了近年来发布的装配式基坑支护技术相关标准规范;其次分析了发展装配式基坑支护技术目前主要存在的问题,提出了针对性建议;最后以前海中冶大厦基坑为例,介绍了钢管混凝土+T型钢组合支撑研发及应用过程,并对装配式基坑支护技术今后的推广应用进行了展望。

**关键词** 装配式;基坑支护;水平支撑;竖向支护结构;智能建造

### State-of-the-Art and Prospects of Prefabricated Excavation Support Technologies

CAO Wenzhao<sup>1</sup> WU Xujun<sup>2</sup> ZHANG Xingjie<sup>2</sup> LUO Yongsheng<sup>2</sup> GONG Chao<sup>1</sup>

(1. Central Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd., MCC Group, Shenzhen 518055, China;

2. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** The existing foundation excavation engineering in China is mainly based on the temporary design concept to carry out the design and construction of supporting structure. Prefabricated excavation support structures have been widely used in recent years due to their advantages of reusability, high construction efficiency, green environmental protection and cost saving. The paper first summarized the current studies and application status of common prefabricated horizontal bracing and vertical support structures, expounded on the application of intelligent construction technologies such as BIM, construction robots, advanced perception technologies, and servo control in prefabricated excavation support projects, and combed through the related standards and technical specifications for prefabricated excavation support technologies released in recent years. Secondly, the problems arising in the development of prefabricated excavation support technology were analyzed, followed by the targeted suggestions. Finally, taking the foundation excavation of the MCC Tower in Qianhai as an example, the development and application process of the composite support system composed of concrete-filled steel tubes and T-shaped steel members was introduced, and the future popularization and application of prefabricated foundation excavation support technologies were discussed.

**Keywords:** prefabricated; excavation support; horizontal bracing; vertical supporting structure; intelligent construction

\* 五矿科技创新发展基金项目(JHCX20220011);国家重点研发计划项目(2023YFB3711605)。

第一作者:曹文昭,博士,高级工程师,主要从事绿色装配式基坑支护技术研究。

电子信箱:cwz\_1990@qq.com

收稿日期:2024-07-19

统计分析表明<sup>[1]</sup>,2021年我国建筑全过程碳排放总量占全国能源相关碳排放的比重为47.1%,其中建材生产阶段的碳排放量占全国能源相关碳排放的24.4%。近年来,城市地下空间开发利用规模越来越大,地下设施建造和地下空间开发时常需要先修建复杂的围护体系,以保证施工安全。目前,工程建设中采用的基坑支护结构绝大部分为临时性支护结构,随着地下结构建设进程的发展,水平内支撑被拆除,而无法回收的竖向支护桩则被遗留在地下,耗费大量钢筋、混凝土等建材<sup>[2]</sup>。同时,传统基坑支护结构大量采用钢筋混凝土,从而存在大量现场湿作业、工期长、效率低、环境污染(噪声、粉尘)、资源浪费等问题<sup>[3]</sup>。

装配式基坑支护结构是以预制混凝土或钢结构等预制构件为主体,通过现场装配并辅以其他技术手段形成的基坑支护结构,具有施工快捷、工期短、绿色环保、可回收重复利用等优点,为地下空间开发提供了一种安全经济、功能协调、可持续发展的绿色支护体系<sup>[4]</sup>。而相比于传统的钢结构支护,其在刚度和适用性方面也有很大提升,因此具有广阔的应用前景。2020年,在第75届联合国大会上,习近平总书记提出“2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的伟大愿景,装配式基坑支护结构很好契合了国家“双碳”战略需求。“十四五”规划中,各地区就“发展以装配式建筑为代表的新型建筑工业化作为建筑产业转型升级的重要抓手”达成建筑行业转型升级的共识。实现基坑临时支护结构的可回收利用,对于落实“双碳”战略和高质量发展具有重要意义。

“十三五”期间,我国新增城市轨道交通运营里程约3000 km,建设地下综合管廊超过8000 km。“十四五”期间,广东省计划新增城市轨道交通超700 km,总投资约8800亿元;每年城市地下空间新增规模在500万m<sup>2</sup>以上,总投资预计超过千亿元。预计在未来相当长一段时间内,高层建筑、轨道交通、地下综合管廊和城市地下空间开发利用等建设过程中还会持续涌现出大量的基坑工程,即基坑工程在基础设施建设中仍将占据重要地位。本文总结了装配式基坑支护技术研究应用现状,结合作者团队在装配式基坑支护技术方面的研发及工程实践,对装配式基坑支护技术研究与发展方向进行展望。

## 1 装配式水平支撑研究应用现状

### 1.1 预应力鱼腹梁钢支撑

传统的装配式水平支撑(圆钢管和H型钢等)的水平间距一般比较密(一般不宜大于4 m),相对来说机械挖土不太方便<sup>[5]</sup>,预应力鱼腹梁钢支撑(Innovative Prestressed Support,简称IPS)主要由鱼腹梁、角撑、对撑、三角连接件等构件组合形成内支撑系统,其中鱼腹梁是由受力梁、支撑腹杆以及钢绞线组成的新型组合梁结构(图1)。通过千斤顶张拉钢绞线,可以对支撑腹杆和受力梁施加反力,从而减小结构内力,配合位移监测系统还可实现较为精准的变形控制。IPS结构具有良好的受力性能,安全性较高,适用于跨度大于100 m的基坑,能够有效减少支撑数量和截面积,释放作业空间。此外,通过与混凝土支撑灵活组合,可以充分发挥这两种支护结构的优势。

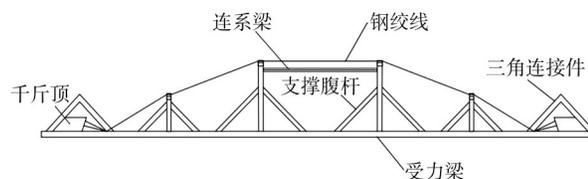


图1 预应力鱼腹梁示意

Fig. 1 Schematic diagram of the prestressed fish-bellied beam

很多学者针对IPS结构及工法进行了研究,如庄诗潮等<sup>[6]</sup>简化了预应力鱼腹梁钢支撑结构,并对其预应力施加前后的刚度进行推导;毕平均等<sup>[7]</sup>引入“等代抗弯刚度”的概念,探究了鱼腹梁刚度的影响因素并给出了鱼腹梁刚度的建议值;周臻等<sup>[8]</sup>采用迭代法对滑动索进行模拟,可以较好地模拟预应力损失补偿效果和拉索滑动现象,且操作简单。然而,关于IPS工法的研究仍滞后于工程实践,如:1)支撑强度和刚度的计算理论尚不完善;2)钢绞线在循环荷载下的疲劳松弛问题还未解决;3)预应力检测系统的灵活性和精度有待提高等。此外,IPS工法在施工过程中还存在拼接误差积累,超长支撑刚度难以满足要求,支护效果受温度变化和周边环境的影响较大等问题。构件运输、拼装及预应力施加对技术人员的专业素质要求也较高。

### 1.2 张弦梁钢支撑

张弦梁结构是一种由上弦抗弯受压构件、中部撑杆、下弦高强拉杆或高强拉索组成的刚柔混合结构,在大跨度公共建筑结构中应用广泛<sup>[9-10]</sup>(图2)。张弦梁结构借助自平衡的轴力系统降低构件最大

弯矩,通过施加预应力减小结构的内力和变形。相比于IPS,张弦梁钢支撑的优势主要体现在:1)采用高强钢拉杆代替钢绞线,有效降低预应力损失;2)采用现浇混凝土冠梁和腰梁,将钢弦杆插入混凝土梁,提高支撑结构整体刚度;3)平面布置和结构更为优化,节点构造简单,结构整体稳定性较高;4)通过位于张弦梁撑杆端部的千斤顶对紧贴基坑侧壁的受压构件施加作用,有效控制基坑变形。谢卫兵等<sup>[11]</sup>结合实际基坑案例,提出了张弦梁施工控制和节点改造方法,对张弦梁的施工具有借鉴意义。



图2 预应力张弦梁钢支撑应用

Fig. 2 Applications of prestressed beam string steel bracing systems

### 1.3 型钢组合支撑

型钢组合支撑指由型钢支撑梁、立柱和连接件等构件装配形成的支撑系统,型钢组合支撑可以与鱼腹梁或张弦梁配合使用。研究表明,型钢组合支撑在受力性能方面存在刚度和变形控制能力不足的问题<sup>[12-13]</sup>,此时可以通过施加预应力来达到增加支撑刚度,提高变形控制能力的目的。此外,采用补偿装配式H型钢支撑技术,在传力部件的连接点统一采用螺栓连接,配合伺服千斤顶,实现实时轴力补偿,能够有效保证型钢组合支撑的变形控制能力。

型钢组合支撑通常采用高强螺栓拼接,节点布置灵活多样。按照组合形式的不同,型钢组合支撑在水平面上可分为对撑、八字撑、角撑等,在竖直面包括双拼支撑、交叠式支撑、斜抛撑等组合形式<sup>[14]</sup>(图3)。在大型基坑中,需根据基坑大小、形状、围护墙受力情况、土方开挖和施工等因素进行针对性的型钢支撑布置。预应力型钢组合支撑可通过高强螺栓、连杆、连接件、牛腿以及浇筑混凝土等方法与钢板桩、钢围檩、立柱以及支护桩等结构灵活拼接。组合支护体系的钢材回收率可达到100%,绿色环保,基本无建筑垃圾的产生。

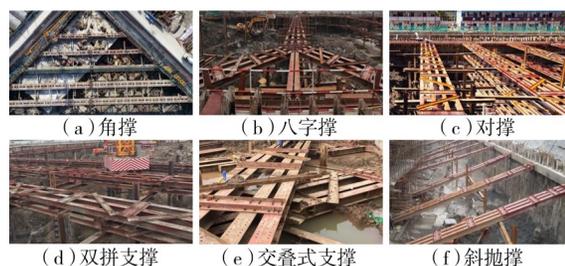


图3 不同形式的型钢组合支撑

Fig. 3 Steel composite bracing systems with different forms

### 1.4 钢管组合支撑

钢管组合支撑与型钢类似,只是支撑梁主要由钢管组成。传统钢管撑适用于面积不大的狭长基坑,尤其常见于地铁车站、地下综合管廊等基坑工程中。钢管组合支撑在我国的研究与应用已较为成熟,其局限性体现在:1)单根钢管撑承载力有限,因此需要布设得较为密集,导致影响施工开挖,且开挖与支护的协同性较差;2)与基坑侧壁的连接点安全度较差;3)受温度变化影响大等。

针对传统钢管撑存在的问题,一些学者开展了新型钢管组合支撑技术研究,衍生出一些新的工艺工法。钢管组合支撑采用高强螺栓连接,交叉处采用十字接头连接,支撑长度可达百米,能够满足更深、更大的基坑支护需求,比传统钢管撑适用范围更广。例如,由中冶建筑研究总院研发的钢管混凝土+T型钢组合结构<sup>[15]</sup>将钢材与混凝土巧妙结合,采用标准段模块化设计、加工与施工,截面可变且应力可控,通过与智能伺服支撑头连接,能够有效控制支护结构的水平变形(图4)。



图4 钢管混凝土+T型钢组合结构

Fig. 4 The composite structure composed of concrete-filled steel tubes and T-shaped steel members

### 1.5 可回收锚杆(索)技术

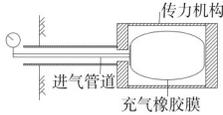
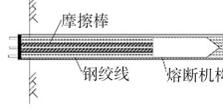
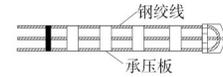
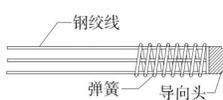
常见的可回收锚杆(索)按回收方式可分为机械式、化学式、力学式<sup>[16]</sup>。可回收锚杆(索)可有效解决注浆式锚杆(索)滞留土体所造成的材料浪费与地下空间资源浪费问题<sup>[17]</sup>。近年来,可回收锚杆

(索)技术在工作机理、设计计算、施工工艺、回收、试验、检验与验收等方面都取得了系统性的成果<sup>[18]</sup>。目前,可回收锚杆(索)种类繁多,如压力分散型可回收锚索、新型热熔可回收锚杆、充气锚杆、扩大头锚杆、定阔式可回收锚索以及在交叉梁中打入锚杆<sup>[19]</sup>。部分常见可回收锚杆(索)工作原理及优缺点见表1。

虽然可回收锚杆(索)技术已经在部分基坑工程中得到了成功应用,并取得了较好的经济社会

效益,但仍存在以下问题需要解决:1)锚杆数目多,锚杆回收难免增加施工工期,使锚杆回收缺乏经济效益动因;2)锚头或其他部件不能完全回收,或因产品缺陷及施工条件限制难以回收,部分构件残留土中可能造成污染;3)产品设计中,确保构件回收率与提高锚杆承载力之间存在矛盾,影响了可回收锚杆承载力的提升。此外,可回收锚杆(索)技术在计算理论、标准及二次回收利用等方面也有待进一步发展。

表1 部分常见可回收锚杆(索)  
Table 1 Some common recyclable anchor rods(cables)

产品名称	结构简图	工作与回收原理	优缺点
充气锚杆		通过对橡皮膜充气与放气,实现挤压土体和卸载回收	1)无滞留物,可实现完全回收且回收便捷; 2)橡皮膜是结构薄弱环节,需避免橡皮膜破裂进而获得更大承载力 <sup>[20]</sup>
热熔锚杆		通过电磁感应、电加热片、化学反应放热等方式熔断锚杆后回收	1)具有较高的抗拔承载力; 2)回收后部分杆体残留土体中,不易回收
压力分散型可回收锚索 <sup>[21]</sup>		承压板能够分散承担压力,回收时松动夹片后即可使用千斤顶将钢绞线抽出	1)结构简单,适应性强; 2)场地狭小时,钢绞线回收需经特殊处理
旋喷式可回收锚索		旋喷自进扩孔注浆,回收时下压旋转后,钢绞线直接拔出,可实现人工回收	1)钻进阻力小,地层适应性强,易于回收; 2)导头滞留土体中无法回收

## 2 装配式竖向支护结构研究应用现状

### 2.1 型钢水泥土搅拌桩(墙)

型钢水泥土搅拌桩(Soil Mixing Wall,简称SMW)工法是在混凝土搅拌桩内插入型钢形成的复合挡土防水结构,在我国软土地区深基坑工程中应用广泛,技术成熟。目前,SMW工法桩的研究成果以施工工艺创新为主,可参考的设计依据比较完备<sup>[22-23]</sup>。TRD(Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall Method)工法和CSM(Cutter Soil Mixing)工法(图5)作为新型水泥土搅拌墙技术,能够弥补SMW工法的不足,在一些施工难度大、成墙质量要求高的工程中得到应用。TRD工法又称等厚度水泥土搅拌墙技术,于2009年引入我国,能够灵活运用于基坑支护、隔水帷幕、隔离防渗墙、地下连续墙槽壁加固等工程中。该工法通过将切削刀具插入地层至设计深度进行横向切削,水平无缝推进成墙,具有更好的防水效果、更高的施工效率与经济效益。相比SMW工法,TRD工法的优势体现在3个方面:1)施工设备高度低,在施工空间受限情况下能够灵活推

进;2)施工深度大,适用地层广;3)成墙垂度高,且无施工缝。

CSM工法又称双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙,利用双轮旋转切削土体,注入泥浆及气体成墙,并插入H型钢,通常应用于止水帷幕、挡土墙或地层加固施工中,其挡土墙无侧限抗压强度可达到15 MPa,截水墙的渗透系数可控制在 $10^{-8}$  m/s。CSM工法的优势体现在:1)适用地层范围广,能够切削硬质地层和卵石地层;2)成墙垂度高,接缝处质量好;3)施工过程振动小,无噪声。研究表明,CSM工法在高塑性黏土、强度高的岩层以及有机质含量高的土体中施工的适用性较差,需要对土层进行预处理<sup>[24]</sup>。

### 2.2 组合钢板桩

组合钢板桩形式多样,通常由不同截面形式的构件单元通过锁口连接、焊接或其他形式连接并打入土体,形成具有挡土、截水或围护功能的支护结构<sup>[25]</sup>。常见的组合构件单元如钢管桩、钢板桩和H型钢,在承载力、刚度、沉桩排土量和穿透性能、止

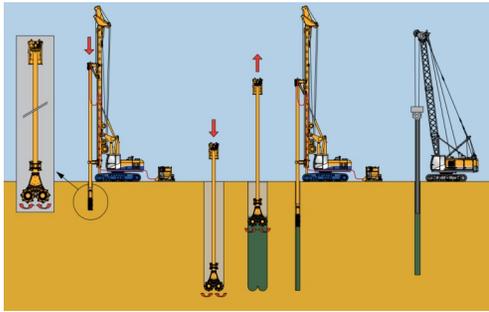
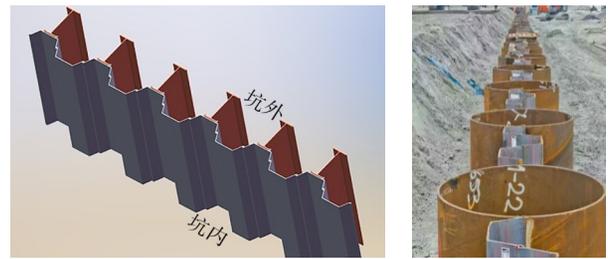


图5 CSM工法施工流程<sup>[24]</sup>

Fig. 5 The construction process of CSM method

水性能、施工难易程度等方面各有优势,在实际的工程应用中,通常采用组合钢板桩、钢板桩+钢管桩、钢板桩+H型钢等组合形式(图6),充分发挥不同截面形式构件的支撑性能<sup>[26]</sup>。常见的组合钢板



(a) 钢板桩+H型钢(外置)

(b) 钢板桩+钢管桩

图6 钢板桩组合形式

Fig. 6 Composite forms of steel sheet piles

桩单元截面及性能对比见表2。目前,针对钢板桩、钢管桩的研究主要集中在刚度控制<sup>[27]</sup>、锁口类型<sup>[28]</sup>和传力机理<sup>[27]</sup>等方面,施工方面则主要考虑截面类型与打桩的影响<sup>[29-30]</sup>。

表2 常见钢板桩组合及主要特点

Table 2 Common combinations of steel sheet piles and their main characteristics

类型	组合构件单元	主要特点
钢板桩组合	H形钢板桩+U形钢板桩	H形钢板桩作为承受水土压力的主要构件,而U形钢板桩作为辅桩,连接整体桩墙并承受部分水土压力
	H形钢板桩+Z形钢板桩	HZ/AZ组合钢板桩抗弯性能好,钢材用量省,但竖向承载力相对偏小
	2根Z形钢板桩+1根U形板	同时具备较好的抗弯性能和竖向承载力,但缺点在于锁口较多,钢材消耗量较大
	帽形钢板桩+H形钢板桩	采用焊接连接,整体刚度较大,且减少了锁口的数量,有效提升了施工效率,但存在沉桩阻力大的问题
钢板桩+H型钢	根据H型钢位置,分为内置型和外置型	内置型在施工时将钢板桩和H型钢分开打入土体,打桩阻力小,但由于连接不紧密,整体刚度小;外置型将H型钢与钢板桩焊接后再进行沉桩,具有较大的刚度,但沉桩阻力大
钢板桩+钢管桩	钢管桩+拉森钢板桩	钢管桩相较传统钢板桩能够更好地抵抗横向及竖向荷载,钢板桩作为辅桩受力兼具挡水功能,施工时需要大型打桩设备

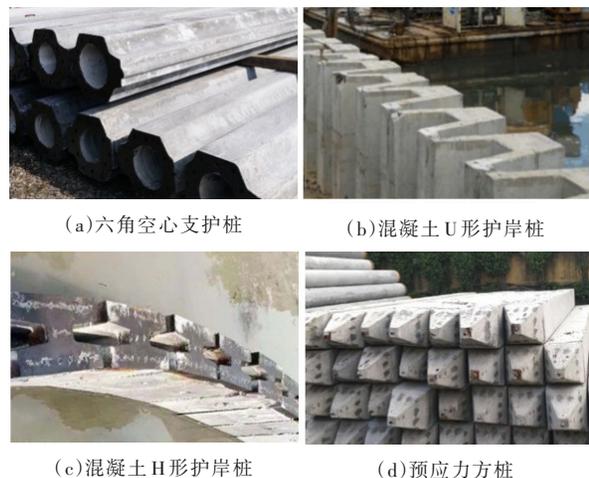
### 2.3 预制混凝土桩

近年来,预制混凝土桩发展迅速,产品多元化、企业规模化、生产流程智慧化成为趋势。常见的预制混凝土桩按截面形式,大致可分为管桩、方桩、异形桩等(图7)。此外,还可通过预应力施加及改变混凝土掺料与配比满足实际工程需要。常见预制混凝土桩分类及特点见表3。

相较于组合钢板桩,预制混凝土桩在抗腐蚀和强度性能方面存在明显优势,但也存在一些短板,需开展针对性研究:

1)部分预制混凝土构件生产过程中污染严重、产品质量参差不齐,需通过诸如混凝土泵送设备、免蒸养生产技术、离心成型工艺等<sup>[31]</sup>生产工艺的革新与推广,提升产品质量,减少碳排放。

2)与钢材相比,预制混凝土构件运输不便且回收率偏低,如何提高预制混凝土桩的运输及使用效率是亟待解决的难题。此外,还需充分利用新型混



(a) 六角空心支护桩

(b) 混凝土U形护岸桩

(c) 混凝土H形护岸桩

(d) 预应力方桩

图7 常见的预制混凝土桩

Fig. 7 Common precast concrete piles

凝土的耐腐蚀、高强度、低渗透性等特点,进一步推广应用预制混凝土桩尤其是新式异形桩、竹节桩等,同时研发更多针对个性化需求的产品。

表3 常见预制混凝土桩及主要特点

Table 3 Common precast concrete piles and their main characteristics

截面形式	常见应用	主要特点
管桩	预应力混凝土管桩	混凝土强度等级不低于C50
	预应力混凝土薄壁管桩 (PTC)	混凝土强度等级不低于C60,通过提高混凝土强度等级减小桩径和截面厚度
	预应力高强混凝土管桩 (PHC)	混凝土强度等级不低于C80,具有高承载力、低渗透性和较好的抗冲击能力
方桩	预应力空心方桩	相比同等截面管桩,方桩具有更高的的承载能力和造价优势,同时具有更大的焊接周长,便于施工
	预应力混凝土U形板桩	主要应用于海堤和护岸结构,比钢板桩具有更好的抗弯性能和耐腐蚀性能,是一种具有止水性能的预制混凝土桩
	预应力混凝土六角支护桩	具有刚度大、强度高、止水性能好且排布灵活的优势,是一种具有一定性价比和应用前景的新型桩

3)考虑预制混凝土桩的挤土效应,配合诸如根植桩法、旋挖植桩法、中掘工法等植桩工法,减小沉桩对周边环境特别是城市建成区周边建(构)筑物和管线的影响。

#### 2.4 预制地下连续墙

相比现浇地下连续墙,预制地下连续墙在成墙质量、造价、施工速度等方面更具优势。由于墙幅运输不便等问题,国内近几年关于预制地下连续墙(简称“地连墙”)的研究和应用才有所增加,研究热点围绕地连墙接头和接缝的防水性能、受力性能、墙体抗裂性和刚度等方面,也涉及配套支撑体系的设计以及施工插打配套设施的改进等。

1)预制地连墙墙幅生产方面,可以考虑在墙幅注模的几何形状、成墙材料、钢筋分布等方面进行改良。如对预应力筋进行局部曲线布置以提高墙体的抗裂性和抗变形能力<sup>[32]</sup>,应用新型混凝土满足不同工程需求及降低碳排放量,墙内预留空槽降低墙幅自重等。

2)施工工艺创新方面,预制地连墙施工能够融合各类现有成熟工艺,如盾构管片拼装工艺、袖阀防渗工艺<sup>[33]</sup>、TRD工法成槽工艺以及预成槽泥浆状态控制方法等<sup>[34]</sup>。

3)关于预制地连墙接头形式的研究已取得不少成果,常见的形式主要包括锁口管连接、工字钢板连接和预制混凝土接头连接,也有自卡式预制地下连续墙接头工艺<sup>[35]</sup>、近幅拼装连接<sup>[36]</sup>、接缝卡槽连接<sup>[37]</sup>、上下分节墙幅接头等新型接头形式(图8)。张勤翔等<sup>[38]</sup>对比了焊接钢板连接和钢筋混凝土扶壁柱连接两种接头形式,认为钢板接头模型的延性大且抗弯性能更好。此外,接头抗渗性能可以通过加设防水垫层、设置防水收口等<sup>[37-39]</sup>形式进行改善。

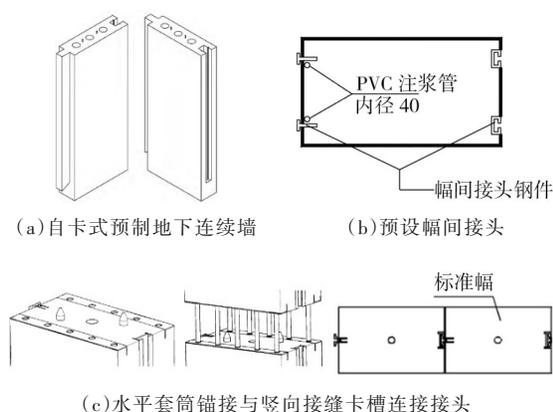
图8 几种新型装配式地连墙接头示意<sup>[35]</sup> mm

Fig. 8 Schematic diagrams of several new types of prefabricated basement wall joints

### 3 智能建造技术在装配式基坑支护工程中的应用

#### 3.1 建筑信息模型(BIM)技术

近年来,住房和城乡建设部等国家部委多次发布大力支持建筑信息化及BIM技术推广应用的政策及举措。例如,BIM+AR技术实现动态化施工展示和可视化交底;Cloud-BIM集成技术<sup>[40]</sup>实现从供应链到现场施工的科学管理;BIM-PKPM集成<sup>[41]</sup>应用于装配式预制构件设计与可视化等。在基坑工程领域,目前基于BIM技术能够实现施工准备阶段的方案比选、施工模拟和方案检查,以及施工阶段的工程量分析、变更分析、可视化交底、无人机航拍、生产任务分派、智慧工地等任务。

#### 3.2 建筑机器人

建筑机器人种类繁多,如焊接机器人、机械臂、搬运机器人、协作机器人等,目前已经可以在装配式构件的运输、施工和装配过程中替代人工<sup>[42]</sup>。例如:1)在预制品构件生产阶段,能够应用于复杂结构的钢筋网绑扎、混凝土构件精细抹平、非标准混

凝土构件批量生产等,进一步实现预制构件智能化生产;2)在储存运输阶段,能够用于预制构件自动化摆放存储,监测周围环境,基于大数据平台的运输线路规划,以及构件在施工现场的运输调度等,以降低存储运输阶段预制产品的损耗。然而,由于基坑工程施工环境复杂,实现装配过程的高度机械化仍有待新的技术突破。总体而言,当前建筑机器人以完成单一工作任务为主,难以协作完成复杂的设计及施工工序,其工程应用仍较为有限。但是,由于建筑机器人具有节能减耗、智能监测感知、提高生产效率等突出优势,其应用前景仍然十分广阔。基于BIM模型和更精细化、高协同性建筑机器人的装配化施工<sup>[43]</sup>将是装配式基坑支护技术的重点发展方向。

### 3.3 先进感知技术

基坑工程是一项复杂且存在一定不确定性的专项工程,需要对其施工过程进行动态监控以指导施工安全管理。特别是对于装配式基坑支护结构,其土体与结构相互作用、变形协同控制等方面仍不成熟,需要根据现场监测结果,及时调整施工工序或采取其他措施。而常规监测方法效率低下、精度低且数据不及时或不完整,不能全面反映项目的安全状态,无法实现装配式基坑工程施工安全管控的自动化、可视化和信息化要求。近年来,新型传感技术得到了蓬勃发展,岩土工程监测日趋自动化、智能化<sup>[44]</sup>。

分布式光纤传感技术<sup>[45]</sup>利用光纤的一维空间连续特性,能够在整个光纤长度上对沿光纤分布的参数进行连续测量。在基坑工程中,运用光纤可以测量支护结构受力变形情况,实现基坑变形的有效控制。刘立新等<sup>[46]</sup>提出一种应用于钢板桩围堰的光纤埋设工艺,并成功应用于实际工程;Ding等<sup>[47]</sup>在H型钢上安装光纤传感器,用于SMW工法中的变形实时监测。分布式光纤传感技术还具有环境适应性强、能够有效实现远程测量、可结合温度补偿系统消除环境误差等优点。

图像识别技术作为一种应用便捷、覆盖面广、智能化程度高、简明直观的检测方法,目前已广泛应用于各领域工程检测中。例如,针对钢支撑接头螺栓松动的图像识别,能够配合深度学习做到快速、自动化检测,相比传统人工检测、传感器检测和声波检测,图像识别方法能够避免结构能量损耗、检测效率低、成本高等问题,且检测准确度高。结

合无人机拍摄的图像,还可以实现对螺栓旋转程度的检测。不足之处在于无法做到对接头处机械性能(预应力施加情况)的反馈<sup>[48-49]</sup>。

此外,三维激光扫描技术目前也在工程监测中得到了较好的应用<sup>[50]</sup>,能够实现在无接触的条件下,对基坑工程实景进行格网扫描,获取观测面的形变信息。相比传统观测手段,三维激光扫描技术能够实现以“面观测”代替“点观测”,并配合BIM进行三维建模,实现更直观的监测效果。

### 3.4 伺服控制系统

伺服控制系统由油泵压力系统、控制及人机交互系统以及智能支撑头组成,在钢支撑体系中能够通过轴力监测和应力补偿,替代传统现浇混凝土支撑依靠增大截面积提高设计刚度满足变形控制的方法<sup>[51]</sup>,减少混凝土支撑养护期间的基坑变形,以及后期人工轴力补偿对支护结构的扰动。轴力伺服控制系统最初主要与钢管撑结合,应用于地铁车站基坑支护变形控制,后逐步在各类钢支撑中广泛应用<sup>[52]</sup>。近年来,关于轴力伺服控制系统的研究主要集中在以下方面:1)伺服系统布置形式对伺服控制效果的影响,研究表明,伺服系统变形控制效果与支撑头的布置数量及标高有关<sup>[53]</sup>,实际工程中可结合变形控制要求及造价进行方案比选;2)活络接头部分稳定性的保证与节点优化;3)通过轴力算法完善、轴力阈值设置推算<sup>[54]</sup>、考虑温度和环境变化对轴力补偿值的影响等方法,确保伺服系统的工作效率。

## 4 相关标准规范的建立

近年来,装配式基坑支护技术在我国部分地区得到了较好的试点应用,但也出现过一些险情和事故。及时总结工程应用中的成熟经验,避免设计与施工中出现的常见问题,使装配式基坑支护结构的设计、施工、验收和监测更加规范化,因此,标准规范的建立显得尤为重要。2016年,北京市率先发布了DB 11/T 1366—2016《可拆除锚杆技术规程》<sup>[55]</sup>,对可拆除锚杆的设计、施工、储存、监测、拆除等环节进行了规定;2017年,广西省发布了DB/T 45-043—2017《装配式基坑支护技术规范》<sup>[56]</sup>,内容涉及钢板桩、预制管桩、十字钢格构装配式支护结构三种支护形式,同年,中国土木工程学会发布了T/CCES 3—2017《预应力鱼腹式基坑钢支撑技术规程》<sup>[57]</sup>,对建筑基坑预应力鱼腹式钢支撑的设计、施

工、检验与监测进行了规定;2018年,浙江省发布了DB 33/T 1142—2017《基坑工程装配式型钢组合支撑应用技术规程》<sup>[58]</sup>,主要针对装配式型钢组合支撑的设计、施工、监测与验收进行了规定;2019年,安徽省发布了DB 34/T 3466—2019《装配式钢支撑基坑支护技术标准》<sup>[59]</sup>,主要涉及装配式型钢组合支撑、钢管桩组合支撑、预应力伺服系统等内容;2021年,陕西省发布了DBJ 61/T 191—2021《装配式预应力鱼腹梁组合钢支撑技术规程》<sup>[60]</sup>,同年,福建省发布了DBJ/T 13—389—2021《装配式张弦梁钢结构基坑支撑技术标准》<sup>[61]</sup>;2022年,中国工程建设标准化协会发布了T/CECS 999—2022《可回收锚杆应用技术规程》<sup>[62]</sup>和T/CECS 1208—2022《全回收基坑支护技术规程》<sup>[63]</sup>,可回收乃至全回收的绿色基坑支护体系发展理念进一步深入人心;2023年,福建省又发布了DBJ/T 13—437—2023《装配式钢结构基坑支护技术标准》<sup>[64]</sup>。由上可见,装配式基坑支护技术相关标准规范的发布近几年明显增多,主要为地方标准和团体标准,但同时也存在一定的同质化现象,其内容涉及装配式水平支撑的较多,而关于装配式竖向支护结构的内容偏少,且没有形成体系,这也是目前有待进一步研究的重要方向。开发新型装配式竖向支护构件及结构体系,实现不同地质条件下基坑工程竖向支护结构的装配化施工、信息化管控及回收利用,最终实现全装配式基坑支护,是岩土工程工作者重要的努力方向。

## 5 存在问题分析及建议

### 1) 发展基坑支护方案的环境效益评价体系。

目前在我国通常把经济性和安全性作为基坑支护方案选型的两大决定性因素,而对方案的环境效益缺乏深入细致的评价体系。国外关于建筑全寿命周期内的能源消耗及环境效益评价的产业发展较为成熟。研究表明,与建筑相关的能源消耗约占全球总能源消耗的60%,预制构件的使用能够减少52%的建筑垃圾,其中装配式钢结构的应用可节省高达81%的能源消耗和51%的材料消耗<sup>[65-66]</sup>。因此,通过发展基坑支护方案的环境效益评价体系,对不同支护方案在生产、运输、施工、回收及废弃材料处理全过程的能源与环境效益进行评价,并将其作为基坑支护方案选型的依据,对于推动装配式基坑支护技术的研究应用具有十分重要的意义。

### 2) 提升基坑支护预制构件标准化水平。

近年来,虽然装配式基坑支护结构在我国的研究应用发展迅速,但是支护构件缺乏统一预制标准,不利于实现规模化生产,从而极大增加了生产和使用成本<sup>[67]</sup>。同时,相比现浇支护结构,预制支护构件的运输、堆放、安装及拼接过程难度更大,技术要求更高。比如,大尺寸构件运输时需避免碰撞以降低性能损耗,运输和堆放过程中的构件磨损和破坏及预应力损失、施工人员专业熟练度不足等都会影响拼装速度和支护效果。因此,需进一步明确预制支护构件的标准,完善接口设计与连接技术,提高拼接、预应力施加与轴力控制的精度,保证支护结构传力性能和工程性能的有效发挥。

### 3) 加强装配式基坑支护结构使用过程监测。

对于装配式基坑支护结构,特别是水平钢支撑,施工及应用阶段的外界环境变化将对支撑内力产生较大影响,如日照与温度的改变、周边施工振动的影响、局部构件的松动脱落等。虽然装配式支护结构能够通过轴力伺服控制系统结合,实现支撑轴力的实时调节与基坑变形的安全管控,但也对伺服控制系统的安全性、可靠性以及基坑支护体系的变形监测提出了更高要求。因此,需要采用多维、多源自动化监测手段,对装配式基坑支护结构进行全天候实时在线监测,并基于3D GIS+BIM技术构建三维可视化平台,通过监测数据融合和预警机制构建,实现装配式基坑支护结构的信息化施工和智能化安全管控。

### 4) 提高基坑支护构件回收率和再利用率。

装配式基坑支护结构能否有效回收直接关系到其环境效益和经济效益能否得到发挥。一方面,由于施工场地和周边环境的限制,钢材难以回收或多次使用后会现损耗;另一方面,技术规范、施工方案不完善及技术人员熟练度不足,也会影响到钢材的回收率。比如钢板桩回收在狭窄空间中难以进行;SWM工法中桩减摩剂涂抹不充分、型钢焊接不牢固等也可能导致型钢拔出时产生断裂;钢板桩或型钢发生受力变形弯曲等也会导致拔出困难。

回收材料再次利用时其强度可能发生折减,钢材或混凝土预制构件回收后能否再次有效利用仍需深入研究。Sansom等<sup>[68]</sup>区分了建材回收率和再利用率之间的区别,2012年Eurofer对英国部分承包商的调查结果显示,钢材回收率从93%上升到96%时,再利用率反而有所下降。为提高构件回收后的再利用率,需要保证回收环节施工操作的规范性,

同时应完善回收构件的性能检测技术,保证构件回收后的可用性与安全性。

5)加大政策支持和引导力度。

“十三五”期间,大力发展绿色装配式建筑技术已上升为推动高质量发展的国家战略,但作为临时性结构,基坑支护结构并未被纳入装配式建筑体系规划中。同时,装配式基坑支护技术在我国的应用尚处于推广阶段,政府主管部门之间的协调性不足,在部分地区的使用要经过较长的论证审批流程,项目实施过程中建设、设计、施工和检测单位的配合也面临复杂的沟通与协调问题。在“双碳”目标背景下,结合住建部对于建筑垃圾减量化的控制要求,装配式基坑支护结构的推广应用或将迎来重要机遇。

此外,国内目前能够提供装配式基坑支护技术服务的企业水平参差不齐,其中熟练的技术工人成为大规模推广应用的关键。因此,还需探索新时期产业工人培养途径和方法,引导广大务工人员转变成成长久稳定的装配式产业工人,建立更为完善的装配式产业工人保障制度,吸引更多的工人或技术人员投身装配式建筑行业。

## 6 钢管混凝土+T型钢组合支撑研发及应用

### 6.1 项目背景

前海中冶大厦位于深圳市南山区桂湾片区,项目基坑西侧紧邻十一号路,管线众多,基坑东侧为地铁1号线鲤鱼门—新安区间出入段线隧道,与基坑支护桩外边线距离约为10.5~20.7 m,基坑底面比地铁隧道底面低约1.0 m。基坑周长约305.2 m,基坑面积约5837.4 m<sup>2</sup>,基坑深度为13.2~14.8 m,基坑支护结构安全等级为一级。基坑支护方案采用咬合桩+两道内支撑的支护形式。

综合政府主管部门及项目相关各方意见,在项目基坑西北角第二道角撑采用团队自主研发的“钢管混凝土+T型钢”组合内支撑结构,并应用了轴力伺服控制系统、光纤监测技术;基于3D GIS+BIM技术构建三维可视化平台,通过监测数据融合和预警机制构建,实现了基坑工程的信息化施工和智能安全管控。项目的创新性主要体现在多元感知自动化监测体系的建立以及主动变形控制的实现,通过数据后处理算法实现了基坑和监测数据的三维可视化。

### 6.2 钢管混凝土+T型钢组合内支撑

组合内支撑体系包括水平支撑、转换梁、斜撑支座、钢围檩以及伺服系统。其中转换梁、斜撑支座、钢围檩以及伺服系统均放置在钢牛腿上(图9)。水平支撑为钢管混凝土+T型钢组合结构,其中钢管直径为300 mm,壁厚8 mm,采用Q355B钢材,内灌C50混凝土;T型钢采用Q355B材质,T型钢、钢管和法兰盘之间均采用焊接。

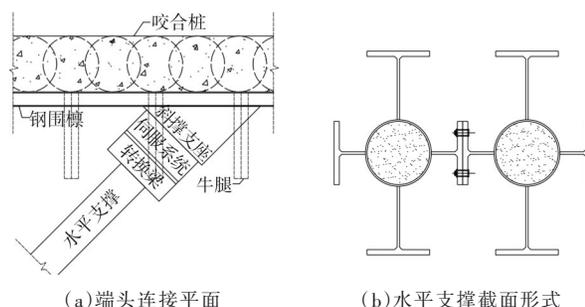


图9 钢管混凝土+T型钢组合内支撑

Fig. 9 The internal support system composed of concrete-filled steel tubes and T-shaped steel members

钢管混凝土+T型钢的组合形式[图10(a)]可以充分发挥混凝土和钢材的材料特性,具有以下优点:1)钢管中内灌C50混凝土,可以增加水平支撑的刚度和稳定性;2)T型钢与钢管截面尺寸灵活可变,方便拼装,能够根据工程需要自由调节;3)全部采用螺栓连接[图10(b)],现场组装节点可靠性高;4)能够灵活配合轴力伺服控制系统[图10(c)],实现主动变形控制。



图10 水平支撑体系施工实景

Fig. 10 Horizontal bracing system construction scene

### 6.3 自动化监测与伺服控制

基于新兴的弱光栅传感技术,在基坑西北角咬合桩内布设表面贴有光纤的测斜管,应用弱光栅测斜技术实时监测支护桩深层水平位移。光纤测斜管的安装流程为钻机钻孔→测斜管下放→测斜管

外注浆。测斜管长度取接近桩身长度,钻孔以不穿透支护桩底部为宜,最终得到支护桩在全长范围内的位移监测曲线。相比传统人工监测,有效降低了人工成本,且可实现数据的连续采集。

项目在水平支撑的端头安装轴力伺服控制装置,通过自动化轴力(变形)监测和调节,实现应对环境变化的主动变形控制。现场安装智能支撑头总成和无线伺服油泵,结合基坑支护结构变形的自动化监测,监测数据通过程控主机传送至远程管控台,管控平台的信息能够在远程监控大屏上显示,并将各分项信息与手机端、PC端相连接,便于管理人员及时发现问题并进行处理。该系统能够实现基坑支撑轴力和支护结构变形24 h实时监控,做到

低压自动伺服,高压自动报警,为基坑安全提供了全方位多重安全保障。

#### 6.4 三维可视化监测云平台研发及应用

基于BIM+GIS+无人机倾斜摄影技术,研发并应用了三维可视化监测云平台,综合施工过程中的动态信息,将原有抽象数据和二维信息进行可视化显示及三维呈现,实现对工程实景的可视化监测,且能够根据项目需要显示测点周边实景图,并分别以二维图像、曲线、表格、报表的形式导出监测数据。利用BIM建模,还可以对水平内支撑系统结构设计、施工全过程进行模拟,实现可视化技术交底(图11)。



(a) 三维可视化云平台

(b) 角撑BIM模型

图11 基坑工程三维可视化监测云平台

Fig. 11 3D visualization cloud platform for foundation excavation engineering monitoring

## 7 结语及展望

传统基坑支护结构现场施工需要进行大量的湿作业,导致工期长、效率低,环境污染(噪声、粉尘)和资源浪费严重。而装配式基坑支护结构可以标准化生产、装配化施工,施工质量和效率高,且可回收重复使用,有效缩短工期并降低成本。在国家大力发展绿色装配式建筑技术的背景下,装配式基坑支护技术在城市地下空间开发利用中具有广阔的应用前景。近年来,IPS工法、张弦梁、型钢组合支撑、钢管组合支撑、可回收锚杆(索)等装配式水平支撑结构的应用趋于广泛,型钢水泥土搅拌桩(墙)、组合钢板桩、钢板桩+钢管桩+型钢组合支护、预制混凝土管桩、装配式地下连续墙等装配式竖向支护结构也逐步引入国内,并在不同地区的各类基坑工程中成功应用。同时,依托物联网、大数据、云计算、人工智能等现代信息技术发展出的智能建造技术,也进一步推动了装配式基坑支护技术的发展。在今后的研究与应用中,应重点提升装配

式基坑支护结构的安全性、适用性,充分发挥其经济性、环保性。在强调产能结构性改革的国家发展战略部署之下,将装配式结构应用于深基坑工程支护中,具有显著的经济和社会效益。

#### 参 考 文 献

- [1] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑, 2024(2): 46-59.
- [2] 李连祥,赵仕磊,张菊连,等. 全回收基坑支护技术发展及思考展望[J/OL]. 工业建筑,2023[2023-11-07]. <https://doi.org/10.13204/j.gyjzG23022605>
- [3] 王卫东,丁文其,杨秀仁,等. 基坑工程与地下工程:高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 78-98.
- [4] 王锐松,郭成超,林沛元,等. 富水粉土基坑装配式可回收支护开挖响应分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 843-853.
- [5] 陈富强,李卓勋,李长江. 装配式结构在基坑工程中的应用研究现状及展望[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(11): 30-36.
- [6] 庄诗潮,张建霖,张灿辉,等. 装配式预应力鱼腹式钢支撑系

- 统的刚度研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 18-25.
- [7] 毕平均, 许绮炎. 鱼腹梁刚度的影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 165-171.
- [8] 周臻, 郭从明, 王立云, 等. 带滑动索预应力鱼腹梁的迭代分析方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 34-39.
- [9] 吴祖威, 楼文娟, 高子珺. 单向张弦梁结构的受力性能研究[J]. 钢结构, 2010, 25(7): 1-3, 18.
- [10] 刘建鹏. 装配式张弦梁钢支撑基坑支护主动控制原理分析[J]. 工程与建设, 2023, 37(6): 1727-1731.
- [11] 谢卫兵, 郭海轮, 郑钊泽. 装配式张弦梁钢支撑在某深基坑工程中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(1): 22-25.
- [12] 胡琦, 施坚, 黄天明, 等. 预应力型钢组合支撑受力性能分析及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 93-96.
- [13] 陈昆, 詹旺宇, 刘红波. 装配式钢支撑基坑支护结构体系基坑开挖与稳定性模拟分析[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(12): 71-76.
- [14] 胡琦, 施坚, 方华建, 等. 型钢组合支撑研究综述[J]. 建筑施工, 2019, 41(12): 2111-2113.
- [15] 龚超, 侯兆新, 梁伟桥, 等. 一种标准化、可扩展的装配式基坑内支撑体系: CN 202020162299.1[P]. 2020-11-06.
- [16] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [17] 龚晓南, 俞建霖. 可回收锚杆技术发展及展望[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 90-96.
- [18] 付文光, 邹俊峰, 黄凯. 可回收锚杆技术研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊1): 512-522, 528.
- [19] 欧孝寿, 全守岳, 彭远胜, 等. 新型装配式基坑支护结构与试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3433-3439.
- [20] 杨学祥, 焦园发, 杨语骅. 充气膨胀控制锚杆的研制与试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 149-156, 184.
- [21] 盛宏光, 张勇, 丁巧爱. 压力分散型回收式锚索的设计与施工[J]. 工程勘察, 2004(4): 47-50.
- [22] 凌同华, 谷淡平, 曹峰, 等. 软土地区型钢水泥土搅拌墙-土相互作用试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 409-418.
- [23] 谷淡平, 凌同华. 悬臂式型钢水泥土搅拌墙的水泥土承载力和墙顶位移分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1957-1965.
- [24] ARNOLD M, BECKHAUS K, WIEDENMANN U. Cut-off wall construction using cutter soil mixing: a case study[J]. Geotechnik, 2011, 34: 11-21.
- [25] 潘泓, 王加利, 曹洪, 等. 钢板桩围堰在不同施工工序下的变形及内力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2316-2324.
- [26] 杨靛. 组合钢板桩(HSW工法)支护结构设计及其工程应用[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [27] WANG J F, XIANG H W, YAN J G. Numerical simulation of steel sheet pile support structures in foundation pit excavation[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(4), 05019002.
- [28] MORIYASU S, CHIEW S P, YAN J G, et al. Comparison of flexural stiffness between hat-type and U-type steel sheet pile retaining walls in a field test in Singapore[J]. Geotechnical Engineering, 2020, 51(1), 00465828.
- [29] DOUBROVSKY M P, MESHCHERYAKOV G N. Physical modeling of sheet piles behavior to improve their numerical modeling and design[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(4): 691-702.
- [30] OSTHOFF D, GRABE J. Deformational behaviour of steel sheet piles during jacking[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 101: 1-10.
- [31] 蒋云海. 对现阶段我国预制混凝土桩行业发展的几点思考[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(6): 30-33, 40.
- [32] 宋帅奇, 黄博文, 潘乾通. 局部张拉预应力装配式地连墙受力及变形分析[J]. 混凝土, 2019(10): 125-129, 134.
- [33] 韩银华, 罗叠峰. 新型预制地下连续墙设计与施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(7): 71-75.
- [34] 郭帅杰, 宋绪国. 基于沉桩模拟试验的装配式地下连续墙沉桩阻力评估方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 269-274.
- [35] 许国光, 油新华, 耿冬青, 等. 自卡式预制地下连续墙接头工艺研究[J]. 施工技术, 2018, 47(3): 135-136.
- [36] 崔涛. 新型预制地下连续墙接头性能研究[J]. 施工技术, 2019, 48(12): 36-38.
- [37] 杨毅秋, 周慧超, 杨贵生, 等. 装配式地下连续墙设计施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 91-97.
- [38] 张勤翔, 许宏发, 陈明雄. 侧向静载下装配式复合墙模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 695-699.
- [39] 俞峰, 陈鑫, 洪哲明. 渠式切割装配式地下连续墙的防水施工措施: CN202010021980.9[P]. 2020-05-19.
- [40] 卢勇东, 杜思宏, 庄典, 等. 数字和智慧时代BIM与GIS集成的研究进展: 方法、应用、挑战[J]. 建筑科学, 2021, 37(4): 126-134.
- [41] 王正凯. 基于BIM的装配式建筑预制构件设计加工技术研发[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2018.
- [42] 肖阳功杰, 朱生媛, 李佳荣, 等. 智能机器人在装配式建筑中的应用分析[J]. 智能建筑, 2021(1): 65-67.
- [43] ZHU A Y, PAUWELS P, DE VRIES B. Smart component-oriented method of construction robot coordination for prefabricated housing[J]. Automation in Construction, 2021, 129, 103778.
- [44] 陈湘生, 洪成雨, 苏栋. 智能岩土工程初探[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2151-2159.
- [45] 朴春德, 施斌, 魏广庆, 等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976-981.
- [46] 刘立新, 任祥瑞, 雷志强, 等. 基于分布式光纤传感技术的钢板桩施工全过程演化规律[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 119-124.
- [47] DING Y, WANG P, YU S. A new method for deformation monitoring on H-pile in SMW based on BOTDA[J]. Measurement, 2015, 70: 156-168.
- [48] HUYNH T C. Vision-based autonomous bolt-looseness detection method for splice connections: design, lab-scale evaluation, and field application[J]. Automation in Construction, 2021, 124, 103591.

- [49] RAMANA L, CHOI W, CHA Y J. Fully automated vision-based loosened bolt detection using the Viola - Jones algorithm [J]. *Structure Health Monitor*, 2018, 18(2): 422-434.
- [50] 韩达光, 秦国成, 周银, 等. 基于BIM和三维激光扫描在基坑监测中的应用[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(6): 72-76.
- [51] CHEN B G, YAN T F, SONG D B, et al. Experimental investigations on a deep excavation support system with adjustable strut length [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115, 104046.
- [52] LI M G, DEMEIJER O, CHEN J J. Effectiveness of servo struts in controlling excavation - induced wall deflection and ground settlement[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(9): 2575-2590.
- [53] 孙九春, 白廷辉. 地铁基坑钢支撑轴力伺服系统设置方式研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(增刊1): 195-204.
- [54] 黄彪, 李明广, 侯永茂, 等. 轴力自补偿支撑对支护结构受力变形影响研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增刊2): 359-365.
- [55] 北京市住房和城乡建设委员会. 可拆除锚杆技术规程:DB 11/T 1366—2016[S]. 北京:北京市住房和城乡建设委员会, 2016.
- [56] 广西壮族自治区住房和城乡建设厅. 装配式基坑支护技术规范:DB/T 45-043—2017[S]. 南宁:广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 2017.
- [57] 中国土木工程学会. 预应力鱼腹式基坑钢支撑技术规程:TCCECS 3—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- [58] 浙江省住房和城乡建设厅. 基坑工程装配式型钢组合支撑应用技术规程:DB 33/T 1142—2017[S]. 杭州:浙江省住房和城乡建设厅, 2017.
- [59] 安徽省住房和城乡建设厅. 装配式钢支撑基坑支护技术标准:DB 34/T 3466—2019[S]. 合肥:安徽省住房和城乡建设厅, 2019.
- [60] 陕西省住房和城乡建设厅. 装配式预应力鱼腹梁组合钢支撑技术规程:DBJ 61/T 191—2021[S]. 西安:陕西省住房和城乡建设厅, 2021.
- [61] 福建省住房和城乡建设厅. 装配式张弦梁钢结构基坑支撑技术标准:DBJ/T 13-389—2021[S]. 福州:福建省住房和城乡建设厅, 2021.
- [62] 中国工程建设标准化协会. 可回收锚杆应用技术规程:T/CECS 999—2022[S]. 北京:中国计划出版社, 2022.
- [63] 中国工程建设标准化协会. 全回收基坑支护技术规程:T/CECS 1208—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
- [64] 福建省住房和城乡建设厅. 装配式钢结构基坑支护技术标准:DBJ/T 13-437—2023[S]. 福州:福建省住房和城乡建设厅, 2023.
- [65] JAILLON L, POON C S, CHIANG Y H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong [J]. *Waste Management*, 2009, 29 (1): 309-320.
- [66] AYE L, NGO T, CRAWFORD R H, et al. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 47: 159-168.
- [67] WEI H, YAN L, ZHANG S J. Research on existing problems of fabricated building in China[R]. Guangzhou: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [68] SANSOM M, AVERY N. Briefing: reuse and recycling rates of UK steel demolition arisings [J]. *Engineering Sustainability*, 2014, 167(3): 89-94.