

文章编号: 1007-2993(2024)05-0505-07

# “双碳”战略下基坑和边坡工程发展进展与展望

李建光<sup>1</sup> 刘荣毅<sup>2</sup> 刘情情<sup>1</sup> 颜立明<sup>2</sup>

(1. 中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098; 2. 中船勘察设计研究院有限公司, 上海 200063)

**【摘要】** 随着“碳达峰”“碳中和”战略的实施, 建筑工程领域中低碳化策略、可持续发展变得尤为重要。随着物联网、人工智能、BIM 技术、绿色材料的不断发展与应用, 基坑和边坡工程中也涌现出了数字化、智能化、低碳化等新的可持续发展方向。结合近年来我国基坑和边坡工程的典型案例, 归纳总结了绿色低碳支护及监测的新技术、新工艺、新装备以及基坑边坡碳排放计算方面的新进展, 并对“双碳”背景下基坑和边坡工程未来发展的新趋势做了展望。

**【关键词】** 基坑工程; 边坡工程; “双碳”战略; 数字化; 智能化; 低碳化

**【中图分类号】** P642; TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.001

## Development Progress and Prospects of Foundation Pit and Slope Engineering Under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Policy

Li Jianguang<sup>1</sup> Liu Rongyi<sup>2</sup> Liu Qingqing<sup>1</sup> Yan Liming<sup>2</sup>

(1. Avic Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100098, China; 2. China Shipbuilding Industry Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**【Abstract】** With the implementation of the carbon peaking and carbon neutrality policy, low-carbon strategies and sustainable development in the field of construction engineering have become particularly important. With the continuous development and application of the Internet of Things, artificial intelligence, BIM technology, and green materials, new sustainable development directions such as digitization, intelligence, and low-carbon have emerged in foundation pit and slope engineering. Typical cases of foundation pit and slope engineering in China in recent years were introduced, and new technologies, new processes, new equipment for green and low-carbon support and monitoring were summarized, as well as new progress in carbon emission calculation. Prospects for the new trends in the future development of foundation pit and slope engineering under the carbon peaking and carbon neutrality policy were proposed.

**【Key words】** foundation pit engineering; slope engineering; carbon peaking and carbon neutrality; digitization; intelligence; low-carbon

### 0 会议论文概述

“第九届全国岩土工程实录交流会”共收录基坑和边坡工程论文 87 篇, 比第八届多 22 篇。其中基坑工程 74 篇, 边坡工程 13 篇, 涉及的地区有北京、上海、天津、河北、辽宁、浙江、江苏、广东、云南、重庆、山东、贵州、湖南、海南、广西、陕西、四川、新疆、湖北、福建等省市, 还有一项工程位于委内瑞拉。

本次收录的 74 项基坑工程中, 涉及住宅、公建、轨道交通工程等建(构)筑物, 基坑开挖深度最深达 46.2 m。与上届相比, 收录的基坑工程案例涵盖范围更为广泛, 开挖深度普遍较深, 周边环境条件越发复

杂, 地质条件多变, 表征着近年基坑工程继续向着“深、大、难”的方向发展。如刘兴旺等报道的《杭州景芳园地下公共停车库 46.2 m 超深基坑工程实录》<sup>[1]</sup>, 其开挖深度达 46.2 m, 是本次实录集中开挖最深的基坑, 该项目周边环境条件复杂, 位于老旧小区内部, 水文地质条件复杂, 坑底处于赋存高水头承压水的圆砾层, 地表下 20 m 范围为透水性较好的粉砂土地层, 场地施工空间狭小, 施工难度大。王卫东等报道的《徐汇滨江西岸传媒港与上海梦中心项目(西岸“九宫格”)基坑工程实录》<sup>[2]</sup>, 是本次实录集中规模最大的基坑群设计, 也是当时上海地区规模最大和最复杂

作者简介: 李建光, 男, 1975 年生, 汉族, 河北昌黎人, 硕士, 研究员, 主要从事岩土工程勘察、设计与管理工作。E-mail: lijian-guang10@126.com

的基坑群之一;该基坑群总面积超 15.7 万  $\text{m}^2$ , 基坑普遍开挖深度 16~17 m, 周长约 2 km, 开挖土方量达 250 万  $\text{m}^3$ ; 该项目临近地铁运营线及黄浦江, 面临着严峻的环境保护与复杂水文地质问题。

大多数案例采用了复合支护结构的形式, 多使用了新工艺、新工法, 或对传统工法做了拓展使用, HC 工法桩、组合型钢内支撑、鱼腹式钢支撑等预制、装配式工程构件在基坑工程中也得到较多应用, 基坑安全监测受到更多重视, 也涌现出一批新的监测技术和设备。如张健儿等报道的《装配式预应力型钢组合支撑技术在深基坑支护中的应用》<sup>[3]</sup>, 采用了装配式预应力型钢组合支撑+混凝土边桁架作为水平支撑, 节约了施工工期, 实现了绿色施工、节能环保的目标。张真弼等报道的《鱼腹式钢支撑在基坑工程的应用》<sup>[4]</sup>, 基坑开挖深度 10 m, 支护体系采用灌注桩+一道预应力鱼腹式钢支撑+搅拌桩止水帷幕, 是湖北武汉地区应用的首个鱼腹式钢支撑基坑工程。这些工程案例表明基坑工程正朝着低碳节能、绿色可持续、数字化智能化方向快速发展。

本次收录的 13 项边坡工程中, 涉及边坡的勘察、设计、施工、监测等多专业角度。边坡高度 6~100 m。从本次实录和近年各地工程建设的情况看, 建筑边坡工程的系统性和复杂性与日俱增, 复杂、复合和超高建筑边坡工程数量大大增加。如张鹏等报道的《广东清远恒大银湖城二期永久边坡岩土工程勘察与边坡支护设计实录》<sup>[5]</sup>, 其案例依山削坡、填方而建, 最大挖方边坡高度约 100 m, 为土岩混合边坡, 最大填方高度约 35 m; 采用了三维激光扫描和无人机航拍新技术精准高效地获取了高陡地段的地形和结构数据, 为高陡边坡的调查提供了新的方法和思路; 对土岩组合高边坡采用了定性评价、极射赤平投影法、有限元强度折减法多种方法综合分析评价边坡稳定性, 并根据边坡岩土体特性及变形模式, 分别提出相应的系统治理设计方案; 同时案例采用了多种高效合理的边坡复绿措施, 实现了人工边坡与自然生态的有机统一。综上, 本次实录集案例中精细化勘察、动态化设计理念得到了充分体现, 边坡工程的生态化、数字化等新技术的运用也备受重视。

## 1 基坑和边坡工程最新进展

### 1.1 基坑工程

基坑工程作为土木工程的一个重要分支, 逐渐呈现出深度深、面积大、周边建筑群密集及施工场地狭窄等特点, 传统的现浇钢筋混凝土结构, 存在着消耗大、污染严重、文明施工条件恶劣等问题, 绿色低

碳化程度较低<sup>[6]</sup>。

在国家“双碳”战略指引下, 近年逐渐涌现出了一批绿色、低碳、环保的新技术和新工艺, 装备也更加精进, 数字化产品也越来越多。

#### 1.1.1 基坑支护技术

基坑支护工程中涌现出的新技术有永临结构一体化技术、可回收式锚杆支护技术、预应力装配式鱼腹梁支撑技术、自稳式基坑支护技术、组合型钢支撑技术、PC 工法桩支护技术等。

地下工程永临结构一体化技术<sup>[6-7]</sup>, 可以减少临时围护结构、水平支撑体系和竖向支承系统的设置, 具有保护环境、节约社会资源、缩短建设周期等优点, 在目前双碳背景下有着极其重要的意义。当前虽然在桩墙(两墙)一体化、梁撑一体化、梁柱一体化等多个一体化技术方面有了很多研究和工程实践, 但是仍然需要理论上的提升和系统的施工技术研究。

锚杆(索)支护技术作为一种重要的施工支护措施, 在深基坑工程中同样得到了广泛应用。以往支护工程结束后, 传统锚杆(索)被废弃在地层中, 不但造成材料浪费, 而且占据地下空间, 对后续地下空间的开发利用产生不良影响。针对传统锚杆(索)不能回收、污染地下环境的问题, 近年已陆续发展出多种可回收式锚杆(索)支护技术<sup>[8-9]</sup>, 根据可回收锚杆(索)脱阻装置的不同进行分类, 可总体分为机械可回收、力学可回收和化学可回收三大类型。可回收式锚杆(索)在基坑工程中不断推广应用, 更多学者及工程人员参与研究, 可回收式锚杆(索)的理论计算、计算模型、特殊条件下的性能及锚杆(索)的二次回收利用等方面均取得了较大进展, 进一步推动了可回收式锚固技术在基坑工程中的应用。

预应力装配式鱼腹梁支撑技术(IPS 工法)<sup>[10-11]</sup>是基于预应力原理, 针对传统混凝土内支撑和传统钢支撑的不足, 开发出的新型基坑支护内支撑结构体系, 由预应力鱼腹梁、角撑(对撑)、围檩、牛腿、连接件、预应力加载装置、竖向立柱、竖向围护墙体等组成。与传统混凝土内支撑、钢支撑相比, 安装、拆卸便捷, 提供了开阔的挖土和主体结构施工空间, 有效缩短施工工期, 提升施工能效。同时构件材料全部回收重复循环使用, 无噪声、无建筑剩余垃圾等, 可以弥补传统钢筋混凝土支撑的工作量大、粉尘污染严重、振动大、噪声大、材料不能重复使用等缺点, 符合国家节能减排的产业政策, 是绿色环保的施工技术。

为确保相邻建筑结构及市政管线不受干扰, 对基坑工程支护体系提出了更高的管理要求, 如支护体

系不得超出用地红线或超出用地红线使用后必须回收,限制了锚杆土钉等支护技术在基坑工程的使用,产生了大量非必要的水平内支撑支护工程。在此背景下,自稳式基坑支护技术<sup>[12-15]</sup>逐渐开始发展和应用,如斜直交替桩组合支护、X形和个字形倾斜桩组合支护、斜直组合双排桩支护、排桩+注浆前撑支护、排桩+预制斜向支撑桩支护等。自稳式基坑支护技术主要是可以实现软土地区深基坑无水平支撑直立开挖,对比传统水平内支撑支护技术,大幅减少基坑施工周期、节约工程造价,降低水泥、钢筋和砂石等建材消耗,减少砂石的自然资源开采及对生态环境的影响,节能、降耗和减碳效益显著,具有广阔的应用前景。

国家提出“双碳”战略,岩土工程领域也顺应国家的政策导向,推广可回收、可重复利用的钢结构支护和支撑体系代替传统的一次性、产生大量建筑垃圾的钢筋混凝土结构,如组合型钢支撑技术、PC工法桩支护技术等,在低碳环保方面取得了一定的成就,为未来发展方向提供基础。

#### 1.1.2 基坑施工工法

城市开发使越来越多的基坑工程呈现出“深、大、紧、近”的特点,而有些地层限制了常规工法施工的可行性,为了满足相应的深度、强度,已催生出很多工艺工法,比如在止水帷幕形成或坑底地基土加固方面,除了传统的单轴、双轴、三轴和五轴搅拌桩和高压旋喷桩施工工艺,TRD工法、CSM工法和RJP工法等也越来越多地应用于基坑工程中。

此外,为满足周边环境对施工扰动控制的更高要求,MJS工法<sup>[16]</sup>(全方位高压旋喷注浆)、IMS工法(微扰动搅拌桩)和DMP工法(数字化微扰动搅拌桩)等应运而生。MJS工法可实现孔内强制排浆和地内压力监测,能有效控制地表变形,减小对周边环境的影响,适用于周边环境复杂、保护要求高的地基加固工程及基坑工程隔水帷幕、隔离桩墙等。IMS工法<sup>[17]</sup>采用的日本GI系列设备,可以在操作室内实时监控钻杆垂直度、深度、注浆压力、注浆流量、转数等情况,保证了在大深度基坑工程中的高精度、高质量施工,加上独特的钻头设计和钻杆连接结构,施工效率高、扰动小,适用于施工场地空间小、周边环境复杂的地基加固或隔水帷幕等。DMP工法<sup>[18]</sup>(数字化微扰动搅拌桩)是一种气、浆结合的施工工法,解决了传统搅拌桩施工过程中桩身强度不均匀、信息化水平低、施工质量难以管控、置换土体较多、施工扰动大、成桩效率低等问题,可以有效减小深部搅拌时的

阻力,提高水泥土的搅拌均匀性及成桩质量,施工中渣土排放少环保优势明显,可广泛应用于隔水帷幕、地基加固、防渗隔渗处理等领域。相较于传统水泥土搅拌桩,这些工法能减小对周围土体的扰动,已在周边环境保护要求较高的工程项目中广泛应用。

#### 1.1.3 基坑施工装备

除了工艺工法不断创新外,新型施工装备也不断取得新突破,国产化、自主化程度显著提高,例如数字化微扰动四轴搅拌桩机械和竖井掘进机等。数字化微扰动四轴搅拌桩<sup>[18]</sup>是自动化程度高的搅拌桩设备,设备配置了数字化控制系统和地内压力监控系统,能够实现自动化成桩施工、记录施工过程参数、实时监测地内压力变化,通过调整浆气压力,保证地内压力控制在合理范围内,同时对成桩过程进行监控和预警。竖井掘进机设备直径7 m到24 m,在垂直掘进过程中同时完成管片支护,一次成型。主要应用于地下智能停车场、城市地铁竖井、深隧竖井以及有色金属矿山、煤矿、军工等垂直深隧的掘进施工,彻底改变传统竖井掘进方法,开辟了全新的垂直盾构施工工法,与传统施工工艺相比,施工工作面小、对周边环境影响小且地层适应性强,更加安全、高效,具有广阔的市场应用前景。

#### 1.1.4 基坑工程监测

基坑工程的复杂性增加了基坑开挖的建造风险,基坑工程监测尤为重要,基坑工程监测充当决策者的“眼睛”,承担着提前预报风险,时刻指引着基坑施工工作向着安全、稳定方向发展的重大责任。但是与重大责任不匹配的是当前的绝大多数基坑工程监测仍然是采取纯人工采集、纸质传输、采集数据种类单一的传统方式,很难满足当前复杂基坑的监测工作要求。相关从业者已经意识到传统监测方式的弊端,随着复杂深大基坑的不断实施,有力推动了基坑工程监测技术和管理的创新<sup>[19]</sup>。

例如上海地区将技术创新和管理创新相结合,尝试新的信息化施工,开发了基坑工程信息化管理平台<sup>[20]</sup>。依托管理平台,参建各方和管理部门能随时通过手机移动端APP和PC端查看相关监测数据。便于各方对基坑建设中的环节进行动态化数据监控,并通过特有的数据模型,建立危险源分级预警机制,擦亮危大工程管理的“眼睛”。

另外远程自动化监测技术也逐步应用到基坑工程施工过程中,传统的监测手段具有间断性、周期性,无法实时有效监控基坑工程的安全状态,而远程自动化监测技术可以减少人为干扰因素和人为差错,实现

监测数据的即时性、正确性和可靠性。

先进的综合远程自动化监测技术是未来基坑监测工作的必经之路,但是目前存在几点不足制约了基坑自动化监测的发展:(1)自动化监测多在工程建设投入较大的市政轨道交通深基坑工程中使用,但自动化监测成本高,这是制约自动化监测发展的最大障碍;(2)90%以上的基坑工程仍采取传统人工方法监测,少部分采取了自动化与人工相结合的方式实现监测初步自动化,没有充分整合各传感器数据集成问题,同时缺少成熟的监测系统平台;(3)市场上自动化监测系统硬件生产厂家繁多,性能参差不齐,部分硬件性能不够稳定,兼容性差,集成度低;(4)自动化监测设备易受施工的干扰和破坏。基坑工程复杂的现场施工环境给远程自动化在线监测设备的安装、保护及破坏后的及时恢复提出了很高的要求;(5)相关标准与规范缺位,不能引领和适应新技术的发展。

## 1.2 边坡工程

随着山地开发项目的大力发展,建筑边坡工程的系统性和复杂性与日俱增,复杂地形地质条件、复杂周边环境条件和超高建筑边坡工程数量大大增加,精细化勘察、动态化设计、自动化监测等越来越得到重视,生态化、数字化、智能化等新技术蓬勃发展。

### 1.2.1 边坡工程技术

传统的岩土工程勘察技术手段效率低,准确性差,不满足边坡工程设计、施工精细化管理的需求。利用数字化技术,如建立三维地质模型<sup>[21-22]</sup>、应用勘察外业智能采集系统<sup>[23]</sup>等可以有效提高岩土勘察工作的准确性和效率。

随着无人机的不断发展和广泛使用,无人机在勘察中发挥着重要的作用,无人机倾斜摄影技术能够从垂直、倾斜等多个角度采集具有空间信息的照片。在工程勘察中,可以通过无人机或者激光雷达扫描等手段获取工程现场的三维地质信息再基于 BIM 技术便可以建立三维实景模型,直观地反映被测工程的地质地貌,还可以添加不同的工程部件方便后续进行设计修改。该方法还可以生产出多类型的测绘成果,如数字正射影像、数字表面模型、数字高程模型等。踏勘具有省时省力、路线准确的特点;对于岩体结构性断裂,危岩体识别,边坡边界等地质信息的采集,能够做到精准高效定位与识别<sup>[24]</sup>。在“无人机+BIM”一体化设计技术方法中<sup>[25]</sup>,能够实现基于 BIM 技术进行场地工程的三维可视化设计与设计成果展示。同时还可以基于三维模型进行土方测量、施工模拟等,合理确定施工方案,节约了时间,精准测算并控制成

本,同时基于 BIM 平台的测量机器人自动放点等自动化的手段<sup>[26]</sup>在施工中的应用,也进一步提升了施工和勘察的效率。

BIM 技术的发展同样促进了边坡支护设计的全流程服务,BIM 数字设计<sup>[27-31]</sup>连通了可研、测量、勘察、设计、施工、运维全生命周期。在勘察阶段,建立三维实景模型;在设计阶段,三维可视化有效解决了支护方式的表达;在施工阶段,可以对施工信息及实时更新推演,为下一步施工提供指导和参考。

边坡支护除了满足传统意义上工程安全的需要,还需兼顾环境美化的需求,同时大量废弃矿山遗留的裸露边坡、以往工程建设中形成的工程创面也面临修复的需求,边坡生态修复技术<sup>[32-39]</sup>近几年蓬勃发展,涌现了许多新兴技术,如客土喷播技术、植被混凝土护坡技术、厚层基材工艺、液压喷播技术、SPF 无土喷播技术、生态毯等。同时高陡岩质边坡、石漠化地区边坡、高寒区边坡等特殊地质条件下的边坡修复技术仍在持续研究中。这些技术和新材料为实现边坡生态修复提供了有利支撑,值得重视并推广。

### 1.2.2 边坡施工工法

在边坡工程中,装配式构件被运用到施工中,装配式工程构件具有节省成本,制造方便等优点,在安装与运输方面,相比传统的现场浇注,节省了时间提高了效率,是未来边坡工程领域需要不断重视并加以发展创新的方向。装配式构建技术在边坡工程中运用包括:

(1)装配式生态锚杆挡墙支护技术<sup>[40]</sup>:该技术是一种结构轻盈、绿色美观、节能减排、工业产能高的装配式支护结构。

(2)绿色装配式可回收边坡支护技术<sup>[41]</sup>:该技术是一种利用塑料格栅、土工布和防水隔离层组成的绿色装配式可回收柔性护坡技术,既达到了防护的目的,又做到了可回收、生态绿色。

(3)装配式框架梁与生态绿化在高边坡中的应用<sup>[42]</sup>:在山区破碎岩石的高边坡防护施工中,采用装配式框架梁、生态绿化技术、各类植被种子和土壤按特殊比例拌和的技术进行高边坡防护绿化。这一技术使高边坡防护施工更标准化,绿化植被成活率高,土壤固化比例得到保障,从而取得了良好的经济效益与社会效益。

(4)装配式榫接柔性生态挡墙支护技术<sup>[43]</sup>:使用预制配件,在现场装配安装、榫卯连接,提高了施工质量,增强了抗震能力。

推动新材料与新的工艺方法在边坡工程中的运

用也是边坡工程低碳化发展的重要部分,新材料新工艺以提升效率、减少浪费为出发点,促进了边坡工程的可持续发展。新材料新工艺在边坡工程中的运用实例包括:

(1)止水支护一体化结构<sup>[44]</sup>:桩式墙/墙式桩,即将止水帷幕和支护桩合一体化设计,合二为一,既能降低成本,又能方便施工;

(2)玄武岩锚杆<sup>[44]</sup>:利用天然玄武岩材料做成筋材,代替钢绞线,制成玄武岩锚杆,大大降低了工程造价;

(3)流态填筑料技术<sup>[44]</sup>:就地取材,利用现场的渣土,通过掺入一定比例的固化剂、水等进行拌和,形成一种具有一定固化强度的流态填筑材料,实现了建筑渣土的资源化利用。

### 1.2.3 边坡工程监测

传统的边坡监测方法需要人工核对每一测量位置的信息并进行统计和记录,不仅耗费时间、效率不高,还存在监测范围有限、数据获取不实时等问题。数字化技术的蓬勃发展,5G、物联网技术、BIM技术、智慧平台、大数据算法等已应用于边坡灾害的预警与识别<sup>[45]</sup>,极大地提升了监测效率与准确度,节省了运营成本,同时可以实现地质灾害的精准预测分析。

## 2 碳排放计算初步探索

### 2.1 相关政策及标准

碳达峰、碳中和是国家重大战略发展目标。建筑行业积极响应国家政策,通过推广绿色低碳建材,大力发展装配式建筑,强化绿色节能设计等具体措施,推动建筑行业绿色低碳发展<sup>[46]</sup>。

目前,建筑整体的碳排放计算研究及规范已相对广泛,但针对基坑、边坡工程的专项政策少,仍处于研究阶段。《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)明确了建筑碳排放计算标准,确定了建筑碳排放的定义、计算边界、排放因子及计算方法,适用于新建、扩建和改建的民用建筑的建材生产及运输、建造及拆除、运行阶段的碳排放计算。该标准以独栋建筑或建筑群为计算对象,未单独考虑基坑工程、边坡工程等施工过程的碳排放计算方式。北京市地方标准《建筑基坑支护技术规范》(修订中)、北京市地方标准《内支撑基坑工程技术规范》(修订中)、中航勘察设计研究院有限公司编制的企业标准《岩土工程施工阶段碳排放核算标准》,规定了基坑、边坡工程的碳排放计算。

### 2.2 碳排放计算的方法

碳排放计算的基本方法有:物料平衡法、实测法

和碳排放因子法,最为普遍采用的是碳排放因子法。碳排放因子法可细分为两类,基于资源消耗量的碳排放因子法和基于定额工程量的定额碳排放因子算法:

#### (1)基于资源消耗量的碳排放因子法<sup>[47]</sup>

使用资源消耗量为活动水平数据计量施工阶段碳排放量。当有确切的施工阶段碳排放源的资源消耗量以及相应碳排放源的排放因子时,依据各碳排放源的资源消耗量计算,此方法主要用于核算已完成或正在实施的施工项目的碳排放计算。计算方法如下:

$$E_{\text{GHG}} = A_{\text{GHG}} + B_{\text{GHG}} + C_{\text{GHG}} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{GHG}}$  为建设工程施工阶段碳排放总量, kg;  $A_{\text{GHG}}$  为施工阶段直接排放范围内的碳排放总量, kg;  $B_{\text{GHG}}$  为施工阶段间接排放范围内外购电力碳排放总量, kg;  $C_{\text{GHG}}$  为施工阶段其他间接排放的碳排放总量, kg。

#### (2)基于定额工程量的定额碳排放因子算法<sup>[47]</sup>

参照《建设工程工程量清单计价规范》,将基坑、边坡施工过程按照流程划分为分部工程,再依据不同材料、不同部位或不同施工方法再次细分,最后根据施工工艺不同细分至定额子项,此方法适合用于设计阶段估算项目的碳排放情况。计算方法如下:

$$E_{\text{GHG, norm}} = \sum_j \sum_i n_{ij} \cdot EF_{\text{GHG, norm}, i} \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{GHG, norm}}$  为建设工程施工阶段定额碳排放量, kg;  $n_{ij}$  为建设工程中第  $j$  项单元活动中第  $i$  项定额的工程量,单位对应定额单位;  $EF_{\text{GHG, norm}, i}$  为第  $i$  项定额的定额碳排放因子,单位为 kg/定额计量单位。

### 2.3 碳排放计算的流程

以边坡工程为例,阐述基于碳排放因子法的边坡工程施工过程碳排放计算流程<sup>[47-48]</sup>:

(1)阶段划分:将边坡工程的生命周期划分为不同阶段,如规划设计、施工、维护和拆除。

(2)数据收集:也是确定边坡工程的清单数据,将边坡工程全过程细分为不同部分,根据工程计价依据预算消耗量标准计算每个部分的碳排放消耗量。  
①规划和设计:确定工程规模、土地利用、材料选择等;②施工:施工设备能源消耗、材料制造和运输、土方运输等;③维护:维护所需的能源消耗、设备使用、植被养护等;④拆除:拆除设备的能源消耗、材料处理等。

(3)碳排放计算:依据《建筑碳排放计算标准》确定不同单元的碳排放因子,对每个阶段,使用合适的碳排放系数将各项数据转化为碳排放量。系数反映

了不同活动和材料在产生碳排放方面的具体影响。

(4)考虑碳吸收:在边坡工程中,往往存在生态修复治理方案,因此需要考虑边坡完成之后,在植被生长阶段植物的碳吸收能力。基于不同植物的生长速率和碳吸收系数,计算植物的碳吸收量。

(5)计算净碳排放:对每个阶段,计算净碳排放量,即总碳排放减去植物碳吸收量。这揭示了每个阶段对环境的实际碳影响。将各阶段的净碳排放量综合,得出边坡工程的整体生命周期净碳排放。

#### 2.4 基于 BIM 构建建筑碳排放测算模型

基于 BIM 构建建筑碳排放测算模型,利用图纸、清单等项目信息建立建筑项目的 3D 可视化信息基础模型;实现建筑项目进度信息的动态模拟,将建筑施工进度信息融入基础模型,通过 3D 基础模型与施工进度计划相关联;导入碳排放因子数据库,关联相应的碳排放因子计算建筑项目的碳排放量数据,实现项目进度计划信息与碳排放量计算的同步更新;引入建筑项目的能耗模拟分析,通过建筑碳排放测算模型,进而实现建筑项目各阶段及全生命周期的碳排放量计算<sup>[49]</sup>。

### 3 展望

本次实录虽不足以全面反映当前我国基坑和边坡工程的总体技术水平,但仍然可以表明,我国土木工程建设中的基坑和边坡工程向“深、大、紧、近”方向急剧发展。同时由于国家“双碳”战略目标的提出,原有的工程建设理念已不能完全适应当前社会发展的需求,需要在传统测绘、勘察、设计、施工和监测技术的基础上,创新设计理念、提升绿色建造技术,全面落实国家“碳达峰”“碳中和”重大决策。最后对我国基坑和边坡工程领域的发展方向做以下展望:

(1)新的工程问题推动岩土工程设计创新:复杂周边环境、复杂水文及地质条件下大规模基坑群工程的设计方法研究,包括各基坑土体反复加卸荷的复杂应力路径研究,以及各基坑间相互作用和环境影响叠加效应研究是未来基坑工程的重点发展方向。

(2)新材料、新工艺和新工法的创新和应用:未来将更多地采用可再生和可持续材料,以减少碳排放和资源消耗。新的施工技术将注重降低能源消耗和环境污染,逐渐形成一批绿色施工技术,如施工机器人、数字协同平台等。同时将更加注重工程的环境友好性,生态恢复技术也将蓬勃发展,助力更加合理、科学地统筹工程建设和工程生态修复。

(3)数字化向智慧化迭代:建设基于 IoT+ CIM+AI 的全生命周期工程感知平台,实现数字化向

智慧化转变。在 IoT 物联网领域,传感器数据的精度及传输效率是未来研究的难点;在 CIM 平台方面,应用数字孪生技术,实现地上+地面+地下三维数据模型的融合,是未来发展的方向;大数据分析和人工智能将成为强大计算工具,可以分析历史工程数据、地质信息、气象数据等,为工程师提供更好的决策支持。

(4)碳排放政策逐步落地:在各个阶段的碳排放计算中,需要细化施工全过程的阶段划分,细化数据收集,考虑更多细节,例如施工设备的具体能源消耗、材料的生产地点和运输距离等,以提高计算的准确性。未来需进一步开发更高效、精确的碳计算工具和模型,整合现代技术如人工智能、大数据分析等,以提升碳排放计算的质量和效率。探讨如何在各类工程中引入碳汇策略,通过植被恢复、土壤改良等方式增加碳储存,降低工程的净碳排放。同时应尽快建立统一的基坑、边坡工程碳计算的标准和指南,促进碳排放管理口径的统一。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘兴旺,李 璜,董 星,等.杭州景芳园地下公共停车库 46.2 m 超深基坑工程实录[M]//《岩土工程实录集》编委会.第九届全国岩土工程实录交流会:岩土工程实录集.北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [2] 王卫东,沈 健,胡 耘,等.徐汇滨江西岸传媒港与上海梦中心项目(西岸“九宫格”)基坑工程实录[M]//《岩土工程实录集》编委会.第九届全国岩土工程实录交流会.北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [3] 张 鹏,彭卫平,邓钟尉.广东清远恒大银湖城二期永久边坡岩土工程勘察与边坡支护设计实录[M]//《岩土工程实录集》编委会.第九届全国岩土工程实录交流会:岩土工程实录集.北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [4] 张真弼,张杰青,汪 彪,等.鱼腹式钢支撑在基坑工程的应用[M]//《岩土工程实录集》编委会.第九届全国岩土工程实录交流会:岩土工程实录集.北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [5] 张健儿,朱其俊,杨世圣,等.等装配式预应力型钢组合支撑技术在深基坑支护中的应用[M]//《岩土工程实录集》编委会.第九届全国岩土工程实录交流会.北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [6] 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.
- [7] 董艳辉,油新华.双碳背景下地下工程永临结构一体化技术实践[J].工程地质学报,2022,30(1):265-269.
- [8] 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,2021,17:512-522,528.
- [9] 李红军,张开普.可回收式锚杆在基坑支护工程中的应

- 用[J]. 建筑结构, 2019, 49(10): 21, 110-114.
- [10] 王卫东, 徐中华. 基坑工程技术新进展与展望[J]. 施工技术, 2018, 47(6): 53-65.
- [11] 高文生, 王涛. 地基基础技术创新与发展[J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 66-75.
- [12] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 倾斜桩支护结构的工作性能和基坑稳定性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(1): 115-124.
- [13] 郑刚, 何晓佩, 周海祥, 等. 基坑斜-直交替支护桩工作机理分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41: 97-100.
- [14] 李明. 前撑式注浆钢管桩在软土地区基坑工程中的应用[J]. 建筑施工, 2023, 45(5): 849-855.
- [15] 许磊, 陈俊辉, 王颖, 等. 砂土地基钢格构斜向支撑桩基坑支护实例分析[J]. 地基处理, 2023, 5(3): 255-261.
- [16] 叶琪, 王国权, 杨兰强, 等. 宁波软土地区 MJS 工法桩施工对临近既有建筑物的影响分析[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11): 1379-1386.
- [17] 刘兴旺, 李瑛, 龚晓南, 等. 新型地基加固 IMS 工法施工对土体扰动的试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 54-58.
- [18] 李青, 杜策, 王理想, 等. 数字化微扰动搅拌桩技术与现场试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 113-118.
- [19] 李明亮, 孙阳阳. 基坑监测技术研究综述[J]. 科学论坛, 2022, 9: 106-108.
- [20] 王骁云. 上海基坑工程论证管理信息平台建设[J]. 上海建设科技, 2022(1): 64-66.
- [21] 邵建鸿, 郑万鹏, 张斌, 等. 基于点云数据的黄土公路边坡病害识别[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(3): 320-326.
- [22] 吴志轩, 杨军. 消费级无人机在大型岩土工程三维建模中的应用——以西南某山区机场高填方地基为例[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(6): 311-316.
- [23] 龚亚龙. 分析数字化技术在提高岩土勘察效率方面的应用[J]. 四川水泥, 2021(4): 196-198.
- [24] 钱开铸, 郑勋伟, 赵涛, 等. 无人机倾斜摄影技术在地质灾害防治中的应用——以北京房山某库房为例[C]//第十四届全国边坡工程技术大会论文集, 2022: 489-494.
- [25] 王博爽, 邓永煌. 无人机结合 BIM 的边坡工程三维设计方法研究[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(1): 89-92.
- [26] 方睿, 周志易, 高飞, 等. 基于 BIM 平台测量机器人在施工放样中的研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(2): 68-72.
- [27] 王恰时, 青舟, 杨喆. BIM 协同设计管理平台研发与应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 47-52.
- [28] 刘晓奇, 赵军甫. 加快 BIM 技术创新应用构建标准化、智能化设计体系[J]. 中国建设信息化, 2023(14): 34-37.
- [29] 张宇. 数字化设计在未来城市建设中的应用思考[J]. 建设科技, 2021(Z1): 70-74.
- [30] 蔡升华, 林阳, 黄建城. 依托数字设计云平台打造网络协同设计院[J]. 中国勘察设计, 2020(3): 47-52.
- [31] 李军心, 杨洵, 高洪, 等. BIM 技术在山地城市基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(5): 263-267.
- [32] 佚名. 高边坡生态修复的低碳建养实践[J]. 中国公路, 2023, (11): 22.
- [33] 白建宇. 高陡岩质边坡的生态修复技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(12): 104-106.
- [34] 杨雨荷, 廖克武, 麻坚, 等. 中国 30 年边坡绿化技术专利发展[J]. 生态学杂志, 2023, 42(8): 1993-2002.
- [35] 晏长根, 梁哲瑞, 贾卓龙, 等. 黄土边坡坡面防护技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4): 1-22.
- [36] 谢永利, 刘新荣, 晏长根, 等. 特殊岩土体工程边坡研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 93-105.
- [37] 韩猛, 封海洋, 李金典, 等. 我国露天煤矿边坡研究现状及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 276-280, 284.
- [38] ZHANG M, HU D, FAN J. Study on the application of vegetation protection and ecological restoration technology in stone slope[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510(4): 042024.
- [39] WANG M, LIU Q, PANG X. Evaluating ecological effects of roadside slope restoration techniques: A global meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281: 111867.
- [40] 唐川, 朱殿芳, 聂青, 等. 关于装配式生态锚杆挡墙边坡支护中施工技术要点及适用条件探讨[J]. 四川建筑, 2023, 43(2): 242-243.
- [41] 吉星宇. 绿色装配式可回收边坡支护施工技术应用[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(19): 33-36.
- [42] 金玲玲. 装配式框架梁与生态绿化在高边坡中的应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(21): 1-3.
- [43] 李兆龙. 装配式榫接柔性生态挡墙支护技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(12): 45-48, 73.
- [44] 油新华, 徐良平, 平洋, 等. 双碳背景下岩土工程绿色建造理念与技术实践[J]. 建筑技术, 2022, 53(6): 773-776.
- [45] 刘善军, 吴立新, 毛亚纯, 等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2265-2276.
- [46] “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[J]. 安装, 2022, (5): 1-6.
- [47] 黄斐超. 建设工程施工阶段碳排放核算体系研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [48] 郭飞, 孔恒, 孙凯悦, 等. 地铁深大基坑施工碳排放计算方法[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 197-206.
- [49] 王丽华, 赵庆双. 基于 BIM 技术的建筑碳排放测算研究[J]. 住宅与房地产, 2023(20): 88-90.