

裘友强, 张留俊, 刘洋, 等. “双碳”背景下公路软土地基处理技术研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 113-131. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.010

QIU Youqiang, ZHANG LiuJun, LIU Yang, et al. Research progress on soft soil foundation treatment techniques of highway under the background of dual-carbon strategy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 113-131. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.010

“双碳”背景下公路软土地基处理技术研究进展

裘友强^{1,2,3}, 张留俊¹, 刘洋³, 刘军勇^{1,2}, 尹利华^{1,2}

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 极端环境绿色长寿道路工程国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:【目的】随着我国基础设施建设的大规模开展, 近年来公路软土地基处理规模和深度大幅提高, 公路软土地基处理新理论、新技术、新材料、新工艺不断涌现并在工程实践中得到推广应用。为了避免盲目选取公路软土地基处理技术, 使成熟可靠、经济高效的技术成果得到更加广泛的推广应用, 有必要及时更新和归纳总结现阶段公路软土地基处理技术相关研究进展。【方法】在梳理我国公路软土地基处理技术发展历程的基础上, 从排水固结法、复合地基法、置换法和固化剂稳定法四个方面分类阐述了近年公路软土地基处理发展起来多种极富特色且具有代表性的新技术, 总结了公路软土地基处理技术若干理论成果和标准化建设情况, 并提出了现阶段公路软土地基处理技术存在的不足和今后发展趋势。【结果】研究表明, 基于我国国情和社会经济建设的需要, 我国公路软土地基处理技术经历了从初步探索→蓬勃发展→多元化创新发展→绿色低碳发展四个阶段的发展; 尽管我国公路软土地基处理技术整体水平较之前有了较大的提高, 但随着我国软土地基处理规模和深度大幅提高, 仍面临越来越多的挑战, 例如施工机械水平限制发展, 技术建造与监测不够智能化, 服役韧性有待提高, 安全性、环保性和经济性不够。【结论】结合国家对建造智能化及环保节能的要求, 未来我国公路软土地基处理技术将持续向多方向联合技术、智能建造及智慧运维技术、绿色低碳高值化利用技术、规范化与标准化技术体系等方向发展。研究成果将为现阶段我国公路软土地基处理技术指明方向和提供参考。

关键词: 公路; 软土地基处理; 新技术; 发展历程; 标准化建设; 发展趋势; 影响因素; 变形

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0113-19



收稿日期: 2023-09-13; 修回日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-01-22; 网络出版日期: 2024-05-31

基金项目: 陕西省科协青年人才托举计划资助项目(CLGC202206); 国家重点研发计划课题(2021YFB2600103, 2016YFC0802203)

作者简介: 裘友强(1991—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事公路特殊地基处理、路基加固及智能运维研究。E-mail: 1450312182@qq.com

通信作者: 张留俊(1962—), 男, 正高级工程师, 陕西省公路交通防灾减灾重点实验室执行主任, 博士, 主要从事公路特殊路基与地基处理研究。E-mail: ZLJ52208@163.com

刘洋(1979—), 男, 教授, 北京科技大学土木与资源工程学院副院长, 博士, 主要从事岩土工程科研和教学工作。E-mail: yangliu@ustb.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Research progress on soft soil foundation treatment techniques of highway under the background of dual-carbon strategy

QIU Youqiang^{1,2,3}, ZHANG Liujun¹, LIU Yang³, LIU Junyong^{1,2}, YIN Lihua^{1,2}

(1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] With the large-scale development of China's infrastructure construction, the scale and depth of highway soft soil foundation treatment have been greatly improved in recent years, and new theories, new technologies, new materials and new processes of highway soft soil foundation treatment have emerged constantly and been popularized and applied in engineering practice. In order to avoid blind selection of highway soft soil foundation treatment technologies, and make mature, reliable, cost-effective technical achievements more widely promoted and applied, it is necessary to timely update and summarize the current research progress of highway soft soil foundation treatment technology. [Methods] On the basis of combing the development period of highway soft soil foundation treatment technology in China, a variety of characteristic and representative new technologies developed in highway soft soil foundation treatment in recent years are classified from four aspects: drainage consolidation method, composite foundation method, replacement method and curing agent stabilization method, and some theoretical achievements and standardization of highway soft soil foundation treatment technology are summarized. At the same time, the shortcomings and future development trend of highway soft soil foundation treatment technology are put forward. [Results] The research shows that based on China's national conditions and the needs of social and economic construction, the development period of highway soft soil foundation treatment technology is reasonably divided into four stages (initial exploration stage → vigorous development stage → diversified innovation development stage → green and low-carbon development stage). Although the overall level of China's highway soft soil foundation treatment technology has been greatly improved, but with the scale and depth of China's soft soil foundation treatment has been greatly improved, it is still facing more and more challenges, such as the limited development of construction machinery, the technical construction and monitoring is not intelligent enough, the service toughness needs to be improved, the safety, environmental protection and economy are not enough. [Conclusion] combined with the national requirements for intelligent construction and environmental protection and energy saving, China's highway soft soil foundation treatment technology will continue to develop in the direction of multi-method combined technology, intelligent construction, intelligent operation and maintenance technology, high value utilization technology of green and low-carbon, standardized technology system in the future. The research result will point out the direction and provide reference for the treatment technology of highway soft soil foundation in China at present.

Keywords: highway; soft soil foundation treatment; new technology; development period; standardization construction; development trend; influencing factors; deformation

0 引言

软土在我国是分布面积最广的一类特殊土, 内陆沿海、高山平原、江河湖泊均有其分布, 而且其他特殊土如黄土、盐渍土、冻土、膨胀土等分布区域也经常伴随有软土存在, 虽然软土的成因、结构和形态不同, 但都具有含水率大、压缩性高、强度低和透水性差等特点^[1]。软土地基若不经处理或处理不当, 势必会引起工程质量的降低甚至破坏, 将直接影响工程的稳定性和安全性。据不完全统计, 我国 80% 以上大规模的公路、铁路、港口和机场等重大基础设施分布在内陆沿海、江河湖泊等软土地区。尤其是进入 21 世纪以来, 随着我国外向型经济的发展以及基础

设施建设的大规模开展, 陆地用地供给日益紧缺, 很多沿海城市在海域浅滩地区开展了大规模的围海造地及大型港口建设, 沿海滩涂建设的疏港公路则成为与之配套的海陆运输连接枢纽。然而, 沿海滩涂地带公路建设已经涉及工程性质极差的流泥、浮泥等超软土, 传统的软土处理方法已难以适应这类超软土地基。此外, 部分传统软土地基处理技术还需要投入大量的人力、物力和财力, 消耗大量资源和能源, 容易导致环境污染问题, 不符合国家倡导的绿色低碳建设要求。因此, 伴随着国家发展战略和工程建设规模的快速增长, 对公路软土地基处理技术也提出了更高的要求。

在此背景下, 相关科研人员和技术人员针对众多

工程建设中经常遇到的软土地基处理问题开展科技攻关,新理论、新技术、新材料和新工艺不断涌现并在工程实践中得到推广应用,与此同时一些相关的标准规范也相继发布实施,使公路软土地基处理技术整体水平有了较大的提高,一定程度上指导了软土地区公路工程建设,推动行业技术进步。鉴于我国公路软土地基处理技术发展很快,新技术层次不穷但参差不齐,部分成熟可靠的新技术尚未纳入现行标准体系中,且部分新技术的经济高效性还有待工程和时间验证,使得相关技术人员在选取公路软土地基处理技术时存在一定的盲目性。因此,及时梳理和总结公路软土地基处理技术研究进展很有必要。郑刚等^[2]、刘汉龙等^[3]、刘松玉等^[4]分别于2012年、2016年和2020年回顾和介绍了地基处理最新的研究进展,其中包括公路软土地基处理技术,但针对性并不是太强。为了使日新月异的技术成果得到更加广泛的推广应用,本文系统简要的回顾了我国公路软土地基处理技术发展历程,分类阐述了公路软土地基处理新技术、新理论及标准化建设,并指出了公路软土地基处理技术的发展趋势,旨在为现阶段我国公路软土地基处理提供一定的参考和借鉴。

1 公路软土地基处理技术发展历程

回顾我国公路软土地基处理技术的发展历程,大致可分为以下四个阶段。

1.1 第一阶段(1990年前)

1990年前,我国公路建设以低等级公路为主,技术储备较少,遇到的软土地基处理问题不突出,对软土地基处理技术要求不高,公路软土地基处理技术处于初步探索阶段。在此期间,主要采用排水固结法解决公路软土地基加固问题,即通过布置竖向排水体(塑料排水板、袋装砂井、挤密砂桩等)并采取预压、超载预压等方式,改善地基的排水条件,以加速软土的固结和强度增长^[5-8]。但传统塑料排水板受材质和工艺的影响,芯板和滤膜分离,存在质量参差不齐、淤堵排水有限、易老化断带或施工回带等问题,无法有效解决地基排水固结过程中的淤堵问题^[9-10];而预压、超载预压等方式存在施工工期过长、地基强度增长有限等问题。

1.2 第二阶段(1990—2000年)

1990—2000年期间,我国公路建设尤其是高等级公路建设进入了快速发展时期,这一时期的公路建设主要集中在东南部沿海地区,遇到的软土地基处理排水加固问题日益凸显,对公路软土地基处理技术也

提出了更高的要求,公路软土地基处理技术处于蓬勃发展阶段。与此同时,结合实体工程,相关学者和技术人员开展了一系列有针对性的公路软土地基处理技术研究,研发并成功应用了水泥搅拌桩(包括粉喷桩和浆喷桩)、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)、真空预压、强夯置换等多种方法^[11-14],公路软土地基处理技术呈现“百花齐放、百家争鸣”的局面,为这一期间我国公路软土地基处理提供了强有力的技术支持。但传统水泥搅拌桩受工艺影响,存在桩身强度离散性较大、施工长度受限(不宜超过10m)、质量不易控制等缺点;CFG桩需要成孔工序,存在施工工期较长、工程造价较高、深厚淤泥地段易塌孔较多等缺点;真空预压法受制于工艺和设备条件,存在真空压力偏低、排水板易淤堵、固结效率低下等缺点,无法直接应用于吹填淤泥和高路堤处理^[15-17]。

1.3 第三阶段(2000—2013年)

21世纪初,随着国家西部大开发战略的实施,我国公路建设重心逐渐转向西部环境敏感地区,在大规模建设资金投入和优惠政策支持下,西部地区工程建设规模取得了长足的进步与提升,一定程度上促进了区域交通和经济辐射能力。但受恶劣的气候条件及极端复杂的环境条件等因素的影响,西部地区其他特殊土如黄土、盐渍土、冻土、膨胀土等分布区域也经常伴随有软土存在,包括湿软黄土、盐渍化软土、内陆河湖相软土等,为公路软土地基处理技术带来了巨大的挑战,公路软土地基处理技术处于多元化创新发展阶段。在此期间,我国公路软土地基处理技术发展的一个典型趋势就是在既有较为成熟的地基加固技术基础上,形成了多种极富特色的新型复合地基加固技术,新型优质高效桩型不断涌现,比如现浇混凝土大直径管桩、现浇X形混凝土桩、浆固碎石桩、双向水泥土搅拌桩等^[18-21],弥补了传统方法的不足,攻克了复杂施工环境和软土地基工后沉降控制难题。

1.4 第四阶段(2013年至今)

2013年以来,随着我国“一带一路”和互联互通战略的实施,非洲、东南亚等海外交通基础设施建设正处于快速增长阶段,而这些地区多面临海、水网密集,同样不可避免地面临在海域浅滩地区修建公路的情况,建设场地条件由单一化逐渐转向多元化和特殊化,尤其是海域浅滩地区公路建设中涉及工程性质极差的流泥、浮泥等超软土,使得公路软土地基稳定与沉降问题尤为突出,传统的软土处理方法已难以适应这类超软土地基,制约了海域浅滩地区公路建设的发展。针对超软土工程性质极差、水域施工复杂的特

殊条件,我国陆续发展了增压式真空预压法、絮凝真空预压法、多元复合地基法等新技术^[22-25],统筹规范了公路与水工专业技术问题,弥补了技术上的空白,使工程质量更有保证。

此外,近年来,在国家“碳达峰、碳中和”大背景下,我国从国家发展战略、理念、重大行动方案(纲要、规划)等方面制定了一系列政策和法规,对我国各行各业未来的可持续发展产生了深远的影响和挑战,同时也带来了新的发展机遇。2020年,交通运输部发布了《绿色公路建设技术指南》,对环境敏感区提出了环境保护的原则性要求,并大力推进绿色公路建设先进技术推广、技术创新及建设实践,有力地推动绿色公路技术创新。基于“双碳”背景,我国公路行业分别从绿色地基加固材料(泡沫轻质土换填材料、微生物注浆材料、高聚物注浆材料、钢渣改良土、赤泥改良土、电石渣改良土等)、绿色地基工艺(吹填复式负压工艺、浆固散体材料桩工艺、夯扩挤密料桩工艺等)及绿色地基装备(搅拌桩施工自动监测设备、真空射流泵系统等)方面进一步完善软土地基处理技术^[26],有效提高了自然资源的利用率,达到了保护环境与资源的目的。

2 公路软土地基处理技术新进展

2.1 公路软土地基处理新技术

我国软土属于分布面积最广的特殊土,全国范围内众多工程建设中经常遇到软土地基处理问题,因此软土地基处理技术发展很快,新技术、新材料、新工艺不断涌现。现今软土地基处理方法多种多样,但各种方法都有其自身特殊的适用条件。笔者曾主持和参与编写多部涉及软基处理的国家标准和行业标准,并参与了沿海和内陆省份众多公路工程项目软土地基处理勘察、设计及施工技术服务等工作,能够较准确把握公路软土地基处理新技术的发展动态和应用情况。基于此,同时结合近年公路软土地基处理的技术资料和科研成果,按照类别将公路软土地基处理代表性新技术总结如下。

2.1.1 排水固结法

排水固结法是通过改善地基排水条件,同时采取加压、抽气、抽水等措施,加速软土固结沉降,从而有效提高软土地基承载力的一类常用方法。根据加压方式的不同,排水固结法可分为堆载预压法、超载预压法、真空预压法、降水预压法等多种方法。近年来随着深厚软土地基处理和大量吹填地基处理的需要,排水固结技术取得了突破性进展,尤其是在真空

预压技术方面涌现出以下多种新型技术,如增压式真空预压技术、絮凝真空预压技术、劈裂真空预压技术、真空降水强夯技术、电渗联合真空预压技术,并在多个实体工程中得到成功应用。

2.1.1.1 增压式真空预压技术

增压式真空预压技术是通过增设了密闭排水系统及增压系统,综合应用封闭式、增压式、分级式等真空预压技术,对吹填流泥地基进行预压固结的一种新型软基处理方法,工艺形式简单且高效^[27]。与传统真空预压方法相比,增压式真空预压技术采用整体式塑料排水板代替传统分体式塑料排水板,能够防止排水固结过程中的淤堵,增强排水能力;采用PVC钢丝软管取代水平滤管作为水平排水系统,采用密闭式连接取代绑扎方式,能够缩短真空压力传递路径;采用竖向增压板、增压管路和空气压缩机形成增压系统,能够有效提高固结压力,加速排水固结。蔡袁强等^[28-32]对增压式真空预压技术进行了一系列试验和理论研究,并对吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术进行了分析,使增压式真空预压技术在天津、连云港、温州等实体工程中逐步完善并形成了团体标准^[33]。

2.1.1.2 絮凝真空预压技术

絮凝真空预压技术是首先通过掺入絮凝剂对吹填流泥进行絮凝化处理,然后进行真空预压的一种新型软基处理方法^[23]。与传统真空预压方法相比,絮凝真空预压方法中掺入絮凝主要是为了解决预压过程中排水板淤堵和排水条件受限问题,但地基处理仍以真空预压为主。赵森等^[34]通过不同絮凝剂掺量下真空预压室内模型试验,发现采用该法处理吹填土,其加固效果能够得到大幅度提升,并明确了温州地区吹填土的最佳絮凝剂掺量为1.5%。张雷等^[35]设计了不同电渗介入时间情况下的絮凝-真空-电渗联合加固试验,发现当固结度为80%时介入电渗,能够有效地控制排水速率减小的趋势,使孔压消散更加均匀。

2.1.1.3 劈裂真空预压技术

劈裂真空预压技术是首先通过注入高压气体使土体内部产生劈裂裂隙,快速形成固结排水通道,然后进行真空预压的一种新型软基处理方法,加固深度能达到30m以上^[36]。刘松玉等^[37]、章定文等^[38]、韩文君等^[39-40]对该法开展了一系列试验和理论研究,分析了相关影响因素,完善了设计方法和加固效果,并经多项实体工程应用形成了地方标准^[41]。祝建成等^[42]通过实际施工应用与监测,详细阐述了该法的

施工工艺和质量控制措施,为其推广应用提供了施工技术方面的参考。

2.1.1.4 真空降水强夯技术

真空降水强夯技术是基于饱和软土的动力特性和动力固结机理,将真空井点降水技术和强夯技术结合起来的一种新型复合式动力排水固结法^[43]。该法通过两种加固技术相联合,可以充分发挥强夯和真空降水的技术优势,使其共同发挥作用;利用真空降水来加速强夯产生的超静孔压消散和孔隙水排出,从而可以迅速提高软土的固结度,有效避免强夯过程中出现的“橡皮土”现象,使得加固作用合理有效。曾华健等^[44]依托湖州市某软土地基,开展了真空降水联合不同强夯工艺加固处理应用研究,阐述了相关设计、施工工艺和加固效果,为类似工程提供施工参考。NI等^[45]依托某大面积软基工程开展现场试验研究,发现真空降水强夯技术能够加速超孔隙水压力消散,从而达到提高软基加固效果的目的。

2.1.1.5 电渗联合真空预压技术

电渗联合真空预压技术是将电渗固结技术和真空预压技术有机结合的一种新型软基处理方法,即首先进行真空预压处理,当土体排水固结至一定程度时,再通过对电渗排水板或金属电极通电,利用电动效应促进真空预压的排水固结,以达到更好的软基处理效果^[46]。将电渗固结技术和真空预压技术联合使用,一方面可以有效发挥电渗法将阳极区水分向阴极汇集的作用,另一方面能利用真空预压排出靠近塑料排水板区域土体中水分的作用,从而一定程度上可以改善塑料排水板淤堵问题。王军等^[47]通过自主研发的室内模型试验,发现真空预压与电渗法联合能够相互促进,比真空预压单独加固软黏土地基处理效果更好。孙召花等^[48]对比分析了电渗联合真空预压技术的多种组合方式,发现真空预压和电渗交替时间为100 min时的加固效果最好。

2.1.2 复合地基法

针对传统地基处理工期长、桩基础造价高等问题,结合大面积和大厚度软土地基处理的需要,高效、经济、快速的复合地基技术已经成为我国软土地基处理的主要手段,新的刚性桩、柔性桩、组合桩型不断涌现,尤其是龚晓南等历经20余年创建了复合地基理论体系,建立了复合地基设计方法和技术标准,形成了复合地基工程应用体系,极大地推动了复合地基新技术在软土地基中的发展,满足了工程建设的多样性需求。

2.1.2.1 刚性桩复合地基

刚性桩复合地基是复合地基中应用最广泛的一种形式,其加固机理主要是桩-土协同作用,破坏形式以桩体弯曲破坏为主。近年来,刚性桩的类型、设计理论和施工工艺等方面取得了较大进展,主要包括现浇混凝土大直径管桩、现浇X形混凝土桩、浆固碎石桩和塑料套管混凝土桩等。

(1)现浇混凝土大直径管桩(简称PCC桩)充分吸收了振动沉管桩和预应力管桩的优点,其桩侧面积和桩端面积均大于实心桩,使得其承载力和摩阻力更大,与同等承载力传统圆形桩相比,PCC桩能够节省混凝土用量,并实现造价低、承载力高、沉降量小的目标,是一种适用于软土地区的新型绿色地基处理技术^[49-50]。刘汉龙等^[49-53]对PCC桩开展了大量系统的理论和试验研究,完善了设计方法,规范了施工工艺,并形成了行业技术标准^[54]。

(2)现浇X形混凝土桩(简称XCC桩)在传统圆形沉管灌注桩的基础上,基于等截面异形周边扩大原理,通过改变截面形状达到增加桩侧表面积和桩侧摩阻力的目的,同时可以节省混凝土用量,同样是一种适用于软土地区的新型绿色地基处理技术^[55]。与传统圆形灌注桩相比,在等周长条件下,XCC桩可节省混凝土用量50%以上,节省施工耗能30%以上。在此基础上,文献^[56-58]依托实体工程,开展了XCC桩质量检测现场试验研究,进一步完善了XCC桩技术的质量检测。

(3)浆固碎石桩是在碎石桩的基础上,通过注浆方式改善桩体的加固效果,同时在注浆过程中可改善桩周土的力学性质,从而提高复合地基的承载力并有效减少沉降变形,属于刚性桩范畴。与其他桩型相比,浆固碎石桩施工所占用的场地较小,施工机械高度低,对周围建筑物影响很小,且桩身的强度也很高^[59]。目前,浆固碎石桩技术已在宁波绕城高速公路、杭州至千岛湖高速公路等软基处理工程中得到成功应用。基于现场工程应用,文献^[60-61]开展了浆固碎石桩现场试验和理论研究,验证了注浆对桩周土性质的改善作用,明确了成桩注浆影响范围,分析了浆固碎石桩复合地基的主要工作性状,同时建立了浆固碎石桩复合地基沉降的计算公式,进一步发展和完善了浆固碎石桩理论设计与施工工艺。

(4)塑料套管混凝土桩(简称TC桩)是在传统沉管灌注桩的基础上加以改进而形成的一种新型刚性桩^[62],主要由预制桩尖、塑料套管、套管内混凝土和桩帽四部分组成。作为一种小直径刚性桩,与其他

大直径桩相比,TC桩布桩方式为“细而密”,其桩间土沉降更加均匀。此外,TC桩“先套管成模,后集中现浇混凝土”的施工特点,使其还具有施工速度快、单桩承载力高、成桩质量可靠、工程造价合理、质量检测方便等一系列优势。截止目前,TC桩相关技术已成功应用于浙江省申嘉湖杭高速公路、杭金衢高速公路等软基处理工程,并纳入浙江省地方标准^[63]。文献^[64—68]通过室内外试验、数值模拟和理论分析等方法,对TC桩单桩承载特性、挤土效应、承载力时间效应及沉降计算方法等方面开展了系统研究,验证了TC桩承载力具有明显的时效性,能够有效改善路堤的整体稳定性。

2.1.2.2 柔性桩复合地基

柔性桩复合地基是复合地基的另一种主要形式,其加固机理主要是置换作用,破坏形式以刺入破坏为主,有时会出现桩身破坏。近年来,柔性桩的类型、设计理论和施工工艺等方面同样也取得了较大进展,主要体现在双向水泥土搅拌桩、加筋碎石桩和布袋加筋注浆桩等。

(1)双向水泥土搅拌桩。水泥土搅拌法是软土地基处理中较常用的一种方法,是利用专门机械设备,将地基土与水泥浆或水泥粉在原位进行混合搅拌,制成具有一定强度的柱状桩体,以提高地基承载力、减小沉降和增加稳定性^[69-70]。为了进一步提高成桩质量和加大地基处理深度,东南大学在原有浆喷桩的基础上研制出了双向水泥搅拌桩^[71]。双向水泥搅拌桩最大的创新在于将内、外两组搅拌叶片安装在同心钻杆上同时正反向旋转,显著提高了水泥搅拌桩搅拌的均匀性。近年来,东南大学在双向搅拌桩的基础上,通过调整搅拌叶片的伸缩,形成截面积变化的搅拌桩,称为变截面双向搅拌桩^[72]。与常规双向搅拌桩相比,变截面双向搅拌桩由于其变截面结构与地基中应力传递规律相一致,使加固体的受力更为合理,地基处理效果更佳。

(2)加筋碎石桩是在传统碎石桩的基础上,在桩顶一定深度范围内或通长采用土工合成材料(土工织物或土工格栅)作为筋材包裹桩体而形成的一种新型柔性桩^[73]。相较于传统碎石桩侧向约束力不足的问题,加筋碎石桩由于土工合成材料筋材的包裹作用,能够有效限制碎石桩的侧向变形,增加桩体侧向约束,从而避免桩体发生鼓胀破坏,同时提高复合地基承载力,是一种安全经济可靠的新型软基处理方法。近年来,国内外学者陆续对比分析了不同设计参数(套筒长度、筋箍长度及刚度等)及不同工作环境(冻

融、循环荷载等)对加筋碎石桩复合地基力学变形的影响,并探讨了不同加筋方式下同一复合地基中碎石桩变形规律,均验证了筋材的加入有利于显著提升加筋碎石桩复合地基承载力^[74-78]。

(3)布袋加筋注浆桩是通过低压力注浆的方式灌入在预先埋设于软土中的土工布袋内,并与加筋注浆管共同形成一种较为规则的新型柔性桩^[79]。由于在布袋内的浆液压力大于布袋周围的被动土压力,布袋能有效约束浆液并减小对桩周土体的扰动影响,成桩质量可靠、施工设备较小,同时能够显著提高复合地基承载力,因此布袋加筋注浆桩非常适合用于场地狭窄受限的软基处理工程。相关学者结合工程案例,通过模型试验、现场监测及质量检测等方法,对布袋加筋注浆桩的加固机理、承载力计算、施工工艺等方面开展了研究^[79-80],研究结果表明布袋注浆桩具有较好的沉降控制效果和较小的变形扰动影响,是一种对地基土扰动小、加固效果好的软基处理方法。

2.1.2.3 多元复合地基

除以上常见的刚性桩和柔性桩外,为了避免单一桩型的不利因素,近年来复合地基技术呈现由单一桩型向多元桩型结合使用的趋势,即组合式多元复合地基应运而生,以发挥各种单一桩型的优势,比如长短桩、刚柔性组合桩和劲性复合桩等。

(1)长短桩复合地基包括间隔布置的长桩和短桩,其中对于附加应力较大、压缩量较大的浅层软基,采用短桩(水泥土搅拌桩等半刚性桩)进行加固,以获得较大的置换率和减少一定的压缩变形,并增加长桩桩体摩阻力;对于附加应力较小、土质较好的深层软基,应采用长桩(素混凝土桩、预制预应力管桩等刚性桩)进行加固,其目的是将上部荷载通过桩身传递至深层地基,以减少压缩层变形和提高地基承载力,同时对短桩起到保护作用^[81]。目前,长短桩复合地基分类方式有多种,工作机理也略有差异,若按照基础刚度不同,可分为刚性基础下和柔性基础下的长短桩复合地基;按照长桩和短桩刚度不同,可分为刚性长短桩复合地基和刚柔性组合的长短桩复合地基;按照地基是否排水,又可分为排水型长短桩复合地基和不排水型长短桩复合地基。

针对上述不同类型的长短桩复合地基,近年来不少学者通过理论分析、数值模拟、模型试验和现场试验等方法,对其加固机理、承载特性及沉降计算等方面开展了一系列研究,并取得一些有益成果。例如:杨涛等^[82-83]基于成层地基一维固结理论,分别推导出瞬时加荷条件下多元不排水长短桩复合地基、悬浮

刚-柔性长短桩复合地基的固结方程,同时建立并验证了相应固结解析解的合理性和有效性;杨以国等^[84]借助模型试验,开展了循环荷载下长短桩桩网复合地基变形特性研究,发现土工格栅的加入有利于提高循环荷载下长短桩桩网复合地基的整体性能。但总体而言,这些长短桩复合地基的研究主要还停留在试验和理论分析上,尚需要在工程实践中得到进一步验证。

(2) 劲性复合桩(简称 SC 桩)是一种通过高压旋喷、深层搅拌或钻孔注浆等工艺形成水泥土搅拌桩并在初凝前插入高强度混凝土桩的新型多元桩型^[85],同时集合了刚性桩承载力高和柔性桩桩侧摩阻力大的优点,在软土地基工程中应用得越发广泛。近年来,不少学者已通过室内外试验、数值模拟和理论分析等方法,对 SC 桩的挤土效应、承载力作用机理、水平及竖向承载特性等方面进行了大量研究,并被证实为软基处理中加固效果好、经济效益高、施工方便的新型桩型。例如:VOOTPIRUEX 等^[86]对比分析了 SC 桩竖向承载力的影响因素,发现芯桩长度与总桩长的比值对 SC 桩竖向承载力的影响最为显著;JAMSAWANG 等^[87]提出 SC 桩的水平极限承载力约为同参数水泥土搅拌桩水平极限承载力的 10 倍;王安辉等^[88]建立了软黏土中 SC 桩水平承载特性 $p-y$ 曲线计算方法,并通过实测结果验证了所建立的 $p-y$ 曲线法的准确性与可靠性。此外,基于相关研究成果,编制形成了国家行业标准《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T 327—2014)^[89],对 SC 桩的设计与施工具有重大的指导价值。

2.1.3 置换法

置换法也称为换填法,是一类简单且便捷的常用软基处理方法,其原理是以优质岩土材料置换软弱土,以达到提高地基承载力、保证路基稳定性及减小沉降的目的。根据置换材料或工艺的不同,置换法主要包括换土垫层法、强夯置换法、爆炸挤淤法、现浇泡沫轻质土法等。近年来随着临海滩涂地带疏港公路建设的大规模开展,以泡沫轻质土法和爆炸挤淤法为代表的置换法应用越发广泛,新的设计理论和施工工艺不断得到发展与完善。

2.1.3.1 现浇泡沫轻质土

泡沫轻质土又称为泡沫混凝土、泡沫轻质混凝土或气泡混合轻质土等,是以水泥浆为基材与预制泡沫充分拌合后得到的多孔轻质材料,同时可以消纳胶凝类固体废弃物(例如粉煤灰),促进资源的循环利用,具有良好的环保节能效果。泡沫轻质土作为一种新型

的公路路基填料,由于其自身具有轻质性、高流动性、施工便捷性等特点,使得泡沫轻质土在公路工程中能取得较好的工程效果,为解决公路软土地基加固问题提供了一种全新的技术手段^[90]。本质上,现浇泡沫轻质土路基是软土地基处理的一种路基结构措施,通过减轻路基结构的重量减小地基的沉降量,提高地基和路基的整体稳定性,达到与对地基进行加固处理类似的工程效果(见图 1)。

为了提高传统泡沫轻质土的性能,国外学者通过掺加不同掺和料或外加剂的方式对泡沫轻质土进行一系列改性研究。例如: PASUPATHY 等^[91]研究了掺入碎砖废粉对泡沫轻质土抗压强度和微观结构的影响,并进行碳排放计算以评估开发的环境友好型地质聚合物泡沫轻质土对环境的影响,计算表明与常规泡沫轻质土相比,研发的掺入碎砖废粉的地质聚合物泡沫轻质土可以显著减少高达 60% 的碳排放; ZHANG 等^[92]通过制备 39 种泡沫轻质土材料,考察了粉煤灰、矿渣、硅灰用量对泡沫轻质土流动性、抗压强度、吸水性和抗冻融循环性的影响,对比发现硅灰对泡沫轻质土性能的影响更大。此外,国内外研究人员还在泡沫轻质土浆体中加入了泡沫塑料颗粒、碳纳米管、各类型纤维等掺和料对其进行改性^[93-95]。

2.1.3.2 爆炸挤淤法

爆炸挤淤法亦称爆炸排淤填石法,是利用炸药爆炸能量将片石、块石等填料沉入淤泥中,并将淤泥或淤泥质软土挤出,从而实现淤泥和石料的置换,其本质上是一种地基处理置换法^[96-97]。考虑时间、成本以及现场的施工可操作性问题,由于爆破挤淤法施工工序简单、成本低及工期短等优点,因此特别适用于海域滩涂淤泥地基处理,处理深度一般为 4~15 m,其处理深度受施工过程中隆起的淤泥包厚度的影响较大。鉴于海浪冲刷能够有效地削减淤泥包的厚度,因此,当公路路线越靠近海边(即海浪冲刷作用小)时,爆炸挤淤法的处理深度会逐渐减小;当路线越伸入海域(即海浪冲刷作用大)时,爆炸挤淤法的处理深度会逐渐增大(见图 2)。

公路工程中应用爆炸挤淤技术有其特定的使用条件,通常是用于临海滩涂地带的路基修筑。因为临海山体地形呈鸡爪状,路线通过时必然出现挖方和填方,将挖方就地消纳用作填方,符合“低碳循环”的原则。爆炸挤淤技术为最大限度地利用挖方创造了条件,因为通过爆炸挤淤可以加大填方的落底深度:在一般的自重挤淤条件下落底深度仅为 3 m 左右;爆炸挤淤条件下落底深度可以达到 25 m 左右。目前



图1 现浇泡沫轻质土路基填筑

Fig. 1 Cast-in-place foamed lightweight soil subgrade filling



图2 爆破挤淤抛填石替换淤泥

Fig. 2 Silt removal by blasting and rock dumping to replace silt

临海滩涂地带主要是水产养殖区，一旦修建公路均被征用并做必要的围挡，因此爆炸挤淤施工不会对环境和生态产生大的影响。该方法在诸多滨海区域或者类似淤泥地区应用，如汕头港广澳港区东防波堤、连云港西大堤、国省干线 S201(联七线)公路霞浦东冲至火车站段工程等，并取得了较好的社会效益。

2.1.4 固化剂稳定法

固化剂稳定法是指在软弱土中加入一定比例的固化剂，通过一系列物理化学作用使土体硬结成具有一定强度和整体性的加固土，从而达到提高土体强度和地基承载力的目的。根据固化剂类型的不同，固化剂稳定法也多种多样。公路软基加固普遍采用水泥或石灰作为固化剂，但水泥和石灰均存在能耗高、排放大等不利于环境保护的问题，经济性极差，且在运输及

材料生产过程中均产生了巨大的碳排放。为了践行国家“双碳”战略，贯彻绿色发展理念，国内外学者一直在探索工业固废弃和工程渣土等资源的合理利用，并寻求研发新型无污染或少污染、低能耗、易回收的节能环保型固化剂，以最大程度上减少对环境的污染，同时降低工程造价与碳排放，目前已取得不少进展。

2.1.4.1 钢渣/电石渣/赤泥等改良土

钢渣/电石渣/赤泥等是工业生产过程中的固体废弃物，在激发剂作用下具有胶凝特性，可取代水泥或石灰用作软土路基加固材料，极大节约资源和能源，具有较好的稳定固化效果和绿色环保性^[98-100]。目前，各类工业废渣改良土在公路软土路基工程中的应用范围逐步扩大，极具应用推广前景和社会经济效益。

2.1.4.2 微生物注浆技术

微生物注浆技术是近年来兴起的一种新的地基处理方法, 主要是通过微生物诱导产生碳酸钙沉积(MICP)胶结岩土材料, 再现自然界缓慢长期的造岩过程, 实现这一过程的快速和工程化^[101-102]。MICP形成的碳酸钙不仅可填充在土体孔隙之间, 而且是优质的胶结材料, 将土颗粒黏结起来, 从而达到提高土体强度、减小土体孔隙的加固效果。该材料对环境的影响小, 具有环境友好性。邵光辉等^[103]通过室内试验, 验证了MICP固化吹填粉土的有效性和优越性。赵志峰等^[104]依托江苏省某吹填工程, 分析了间隔时间、胶结液浓度、环境温度对MICP加固海相粉土效果的影响。

2.1.4.3 高聚物注浆技术

高聚物注浆技术是一种非开挖快速修复技术, 在路面塌陷修复、隧道渗漏治理、软土地基加固、机场道面修复等方面都有着广泛的应用, 且应用效果较好^[105-106]。对于软土地基加固而言, 该技术充分利用了高聚物注浆材料强度和韧性高、抗水渗透性好、固化时间短、膨胀力大等优点, 通过施工作业注入软土地基中, 借助高聚物注浆材料固化过程中产生的膨胀力, 对注浆点位周围土体起到挤密加固作用, 从而达到提高软土强度、减小软基工后沉降的目的。毫无疑问, 高聚物注浆技术的核心是高聚物注浆材料及相应的注浆技术。近年来在高聚物注浆材料性能方面得到进一步发展, LI等^[107]通过数字成像和声发射技术, 定量分析了高聚物注浆材料的全场压缩损伤演化过程; 李晓龙等^[108]通过数值计算与实测, 研究了不同浆液密度和围压下高聚物浆液膨胀机理。

2.1.4.4 就地固化技术

就地固化技术是近年来应用较为广泛的一种浅层软土地基处理技术, 其原理是通过强力搅拌头等就地固化设备将固化剂和软土原位进行搅拌, 使土体固化形成强度更高的混合土体, 从而实现浅层软土就地利用的目的^[109]。作为一种新的地基处理形式, 就地固化技术能够在软体地基表面快速形成一定厚度的硬壳层或板块, 不仅能够提高软土地基承载力, 提供施工作业平台, 施工速度快, 还可与桩基等深层处理方法联合使用。目前, 已开展了就地固化技术中的固化剂和固化设备等多方面的研究, 并取得了一定的研究成果。XIA等^[110]将研究了高吸水性聚合物(SPA)作为减水剂对淤泥软土的固化效果, 发现添加SAP不仅可以有效降低淤泥含水率, 还可以显著提高高含水率淤泥固化土的强度。陈永辉等^[111]依托现场试验, 发

现ALLU强力搅拌头系统与吹填土的适配性较好, 能够满足强度和承载力等设计要求。

2.2 公路软土地基处理技术新理论和标准化建设

2.2.1 刚性桩复合地基沉降计算和稳定分析

对于刚性桩复合地基而言, 其桩土模量差异较大, 桩土变形不协调, 若采用现有复合模量法进行沉降计算, 其沉降计算值严重偏小, 导致实际沉降值超过计算沉降值。刘吉福等^[112-113]在分析桩土沉降关系和桩土作用的基础上, 提出采用附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降, 即首先根据桩土作用计算桩土附加应力, 然后再采用分层总和法计算复合地基沉降。在此基础上, 通过工程实例验证, 同时与现行方法计算的沉降进行对比研究, 发现附加应力法由于综合考虑了单桩竖向承载力、桩帽转移荷载能力、桩土相互作用等因素的影响, 其沉降计算值与实测值更接近, 弥补了现有复合地基沉降计算方法的缺陷。

另外, 近几年沿海地区多个刚性桩复合地基路堤滑塌事故表明, 刚性桩承载力不足或桩帽太小会导致桩间土附加应力过大、桩间土位移和沉降较大, 产生绕流滑动或绕流滑动趋势, 导致刚性桩受弯断裂或倾倒^[114]。针对此问题, 刘吉福等^[115-117]提出一种考虑桩间土绕流的刚性桩复合地基稳定分析方法——修正重度法, 工程实例证明修正重度法分析结果与工程实际更符合。

2.2.2 多元复合地基固结分析理论

针对多元复合地基固结问题, 卢萌盟等^[118-119]以高置换率散体材料桩-不排水桩的多元复合地基为研究对象, 通过引入散体材料桩内径、竖向渗流, 对散体材料桩和土体均采用固结方程进行求解, 同时推导出其固结控制方程及解析解答, 并对解答的合理性进行了验证。杨涛等^[82-83]分别以多元不排水长短桩复合地基、变荷载下劲性搅拌桩复合地基为研究对象, 推导出相应的桩间土的固结方程, 建立了相应的固结解析解, 并通过与有限元解的比较验证了解析解的正确性。上述研究成果, 进一步完善和发展了多元复合地基固结分析理论, 为多元复合地基的工程设计和应用提供了关键的理论支撑。

2.2.3 软土地基沉降系数经验计算方法

地基总沉降是衡量公路软土地基排水加固处治效果的重要指标之一, 当采用沉降系数法计算地基总沉降时, 根据笔者多年工程试验经验, 结合国内外相关科研成果和技术资料, 总结提出了关于沉降系数计算的经验公式

$$m_s = 0.123\gamma^{0.7}(\theta H^{0.2} + VH) + Y \quad (1)$$

式中, H 为路堤中心高度 (m); γ 为路堤填料的重度 (kN/m^3); θ 为地基处理类型系数, 采用塑料排水板处理时取 0.95~1.10, 采用水泥搅拌桩等复合地基处理时取 0.85, 预压时取 0.90; V 为加载速率修正系数, 当加载速率为 20~70 mm/d 时取 0.025, 当采用分期加载、速率小于 20 mm/d 时取 0.005, 当采用快速加载、速率大于 70 mm/d 时取 0.05; Y 为地质因素修正系数, 当同时满足软土层不排水抗剪强度小于 25kPa、软土层的厚度大于 5 m、硬壳层厚度小于 2.5 m 三个条件时, $Y=0$, 其他情况下可取 $Y=-0.1$ 。

式(1)最大的特点在于, 能够有效避免沉降系数在 1.1~1.7 取值的盲目性, 使计算结果更合理、准确, 公式(1)已列入《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31-02—2013)修订内容中^[120]。

2.2.4 加固土强度龄期优化

关于加固土强度龄期的选取, 不同规范之间存在一定的差异, 《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》(TB 10113—96)和《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)均采用 90 d 龄期的强度作为加固土的标准强度^[121-122], 而之前《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—96)却采用 28 d 龄期的强度^[123]。合理的处理方法是加固土强度的龄期与实际工程进度结合考虑, 当路堤填筑至设计高度时, 加固土的强度才能充分发挥, 但加固土成桩 28 d 之前其承受的荷载非常小, 可忽略不计; 此外, 从目前施工情况来看, 加固土成桩 90 d 之内, 路堤高度可填至 3 m 左右, 稳定计算仍是偏安全的。因此, 加固土的标准强度选取 28 d 龄期是不太适宜的, 而采用 90 d 龄期的强度作为标准强度更符合公路工程的实际。

值得注意的是, 选取 90 d 龄期的强度作为加固

土的标准强度, 存在一个弊端, 即养护龄期过长, 会给现场检测和室内试验带来一定的困难。为了在较短时间内计算加固土 90 d 的标准强度, 目前采用两种方法解决: 方法一是根据强度经验公式进行计算, 即参照 7 d 或 28 d 的强度试验结果推算出 90 d 的标准强度, 相关经验公式如表 1 所列; 方法二是利用高温快速养生的方法, 使试件在较短的时间内快速达到标准养生 90 d 的强度, 根据前期研究发现^[124], 高温快速养生 30 h 的强度相当于标准养生 28 d 的强度, 高温快速养生 96 h 的强度相当于标准养生 90 d 的强度(见表 1)。

2.2.5 软土地基处理标准化建设

针对上述公路软土地基新技术和新理论, 相关成果已形成或纳入相关标准规范中, 包括《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T 213—2010)、《复合地基技术规程》(GB/T 50783—2012)、《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31-02—2013)、《公路软土地基路堤设计规范》(DB 33/T 904—2013)、《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T 327—2014)、《吹填土地基处理技术规范》(GB/T 51064—2015)、《现浇 X 形桩复合地基技术规程》(JGJ/T 402—2017)、《公路吹填流泥地基处理技术规程》(T/CECS G: D21-01—2019)、《气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程》(DB 32/T 3643—2019)、《变截面双向搅拌桩技术规程》(T/CECS 822—2021)、《公路路堤软基处理技术标准》(DB44/T 2418—2023)等^[33, 125-131], 比较集中反映了我国近年来在公路软土地基处理方面所取得的技术进展和工程实践经验。

3 公路软土地基处理技术发展趋势

毫无疑问, 经过近四十年系统的理论试验研究和工程实践, 我国公路软土地基处理技术已进入绿色低

表 1 不同地区水泥搅拌土强度与龄期关系式对比

Table 1 Comparison table of the relationship between strength and age of cement mixed soils in different regions

规范	取样地区	强度经验公式	假设 28 d 强度为 1.0 MPa, 按经验公式计算	
			7 d 强度/MPa	90 d 强度/MPa
中交一院	天津、福建、连云港和南通地区	$q_{u28} = 2.37q_{u7} - 0.19$ ($r=0.87, n=12$) $q_{u90} = 1.14q_{u28} + 0.85$ ($r=0.79, n=15$)	0.50	1.99
粉体喷搅法加固软弱土层技术规范(TB 10113—96)	—	$q_{u28} = 1.49q_{u7}$; $q_{u90} = 1.97q_{u7}$; $q_{u90} = 1.33q_{u28}$	0.67	1.33
天津港湾工程研究所	天津地区	淤泥: $q_{u7} = 0.364q_{u90}$; $q_{u28} = 0.652q_{u90}$ 淤泥质黏土: $q_{u7} = 0.262q_{u90}$; $q_{u28} = 0.485q_{u90}$	0.56 0.54	1.54 2.06
地基处理 ^[125]	上海地区	$q_{u7} = 0.56q_{u28}$ ($r=0.98, S=0.059, n=15$) $q_{u90} = 1.63q_{u28}$ ($r=0.98, S=0.143, n=9$)	0.56	1.63

注: q_{u7} 、 q_{u28} 、 q_{u90} 分别表示 7 d、28 d、90 d 无侧限抗压强度; r 、 S 、 n 分别表示相关系数、标准差、统计组数。

碳发展阶段。从公路软土地基处理技术研究现状和需求来看, 相关技术人员结合我国国情和区域特点, 在软基沉降控制与加固方面做出了许多有益探索, 因地制宜提出了许多新技术、新材料、新工艺, 但不可否认目前我国公路软基处理技术还存在不少技术瓶颈, 仍不能很好满足极端复杂环境下重大基础设施建设需求, 例如施工机械水平限制发展, 技术建造与监测不够智能化, 材料与结构韧性有待提高, 设计理论滞后于工程实践, 绿色低碳化和经济性不够合理。此外, 部分新技术还未经过足够的工程实践检验, 尚在不断的发展和完善中, 其加固机理、设计方法、施工工艺、质量检测还有待进一步的深入探究。因此, 系统总结现阶段公路软土地基处理技术的发展趋势, 对明确我国公路软土地基处理技术今后努力方向至关重要。概况来讲, 我国公路软土地基处理技术的发展趋势主要体现在以下几个方面。

3.1 持续向多方法联合技术方向发展

为了快速满足公路软土地基处理对地基承载力和排水固结及沉降等要求, 经过多年试验和工程实践, 在现有成熟的软基处理技术的基础上, 将两种或两种以上的处理技术综合使用, 研发出了一系列的多方法联合技术, 比如电渗联合真空预压技术、真空降水强夯技术、刚柔性组合桩复合地基技术等。实践证明: 多方法联合技术的发展, 使各个单一软基加固技术优势得以充分发挥, 扬长避短, 达到提高地基承载力和稳定性、减小地基沉降、快速施工等目的, 有效扩大了工程应用范围, 极大提升了公路软土地基处理技术水平。随着软土地基处理深度逐渐加大, 沉降控制标准越来越高, 传统单一加固技术已难以适应工程性质极差的流泥、浮泥等超软土地基, 多方法联合技术将成为公路软土地基处理技术发展的重要方向。

关于软基多方向联合技术的发展, 可从两方面进行探究和完善: 一是既有的一些多方法联合技术还未经过足够的工程实践检验, 需要对其加固机理、施工工艺、质量检测、沉降和承载性状等进行深入研究, 力求形成技术指南; 二是更深层次挖掘多种技术联合的优势, 持续大胆创新研发更多经济高效的多方法联合技术。

3.2 向智能建造及智慧运维技术方向发展

我国正由交通基础设施“建造大国”向“建造强国”跃升, 对建造智能化程度提出了更高要求, 传统的“人管模式”难以实现对软土地基施工及运维过程的精准控制和有效反馈。综合运用数字孪生、物联网、云计算、人工智能等新兴技术, 是我

国目前实现公路软土地基智能建造及智慧运维, 提高工程建造全寿命周期质量与效率的重要途径。与此同时, 智能压实机、智能搅拌桩等一批新型设备, 结合大数据、物联网、无线网络传输等信息手段, 可进一步提高软土地基智能施工能力, 有效实现现场智能化检测与监测。因此, 依托人工智能等新兴技术与传统工程建造深度融合形成的智能建造及智慧运维技术, 也是今后公路软土地基处理发展的重要方向。

关于公路软土地基智能建造及智慧运维技术, 可从三个方面做出努力: 一是继续应用人工智能、物联网、遥感卫星等新一代信息技术, 研发出一批新型智能设备, 为软土地基勘察、施工、检测及监测提高高效精准的技术设备; 二是持续构建并完善“天、空、地”一体化监测预警与智能管控平台, 建立公路软土地基监测评估方法及阈值指标, 形成多领域融合的一体化监测与自动化诊断技术体系, 实现对公路软土地基处理过程与服役能力一体化、自动化、数字化实时监控、诊断与智能管控; 三是以智能感知为手段, 改进现有勘察、施工及检测手段, 研究多通道数据的自动传输、智能解译技术, 实现软土地基特征参数等地质信息的快速获取。

3.3 向绿色低碳高值化利用技术方向发展

沿海软弱土方主要采取化学改良利用或弃方, 弃方造成了巨大的资源浪费后又需要外购合格土方填筑路基, 化学改良需要用到数以万计的石灰及水泥, 经济性极差, 且在运输及材料生产过程中均产生了巨大的碳排放。为积极响应“碳中和”“碳达峰”国家战略, 增强可持续发展能力, 在公路软土地基处理中, 应重视泡沫轻质土、赤泥、钢渣、电石渣、建筑垃圾等材料利用, 尽量避免或减少对环境的污染, 向绿色低碳高值化利用技术方向稳步发展。

关于软土地基绿色低碳高值化利用技术的发展, 可从三个方面做出努力: 一是持续研发或改进新型绿色材料与再生产品, 提高新型绿色材料的掺配比例, 在保证低碳与经济的前提下, 大幅提高绿色低碳技术在公路软土地基领域的应用; 二是重塑利用方案和处置方法, 重点突破长期服役性能评估与质量控制措施、路地协同利用、绿色低碳利用等关键技术问题; 三是推动 BIM、GIS、VR 等新技术运用, 广泛应用绿色低碳新材料、新工艺和新设备, 建立科学可行的碳排放计算、监测标准体系, 为公路软土地基处理绿色低碳转型提供技术和数据支撑, 为减排路径优化和实施措施制定提供决策依据和参考。

3.4 向规范化与标准化技术体系方向发展

为了更好地指导设计、施工及质量监测,公路领域相关技术人员在总结技术成果与工程实践经验的基础上,近十年以来相继制修订并发布实施了多部软土地基处理方面的标准规范。与此同时,随着我国公路交通建设事业的不断发展,公路软土地基处理工程量越来越大,相关技术人员积累了较丰富的软土地基处理经验,新理论、新技术、新材料、新工艺不断涌现并在工程实践中得到广泛的推广应用,极大拓宽了原有软土地基处理的技术范畴,但旧的标准已不再适用于当前的公路软土地基处理工程。鉴于公路软土地基处理技术成果在现行国家标准、规范和规程中还未完全形成统一,不能为相关设计人员、施工人员、检测人员等开展相应工作提供完全信服的科学依据,尚应向规范化、标准化技术体系方向努力,加大工程实践和试验理论验证力度,积极推广成熟可靠的技术,进一步完善相关规范的标准体系。

4 结论

(1)根据国家发展战略和经济技术特点,将我国公路软土地基处理技术发展历程合理划分为四个阶段(初步探索阶段→蓬勃发展阶段→多元化创新发展阶段→绿色低碳发展阶段),并指出每个阶段公路软土地基处理存在的技术现状及特点。

(2)基于技术成熟可靠、经济高效及具有代表性为原则,从排水固结法、复合地基法、置换法和固化剂稳定法等方面出发,分类阐述了近几年我国公路软土地基处理发展起来多种极富特色的新技术,包括增压式真空预压技术、电渗联合真空预压技术、塑料套管混凝土桩、多元复合地基、泡沫轻质土法等,并提出了相关研究进展。

(3)结合现行公路软土地基相关标准规范制修订内容,从刚性桩复合地基沉降计算和稳定分析、多元复合地基固结理论、软土地基沉降系数经验计算方法、加固土强度龄期优化等方面展现了公路软土地基处理技术相关理论成果和标准化建设情况。

(4)随着我国软土地基处理规模和深度大幅提高,结合国家对建造智能化及环保节能的要求,我国公路软土地基处理技术将持续向多方向联合技术、智能建造及智慧运维技术、绿色低碳高值化利用技术、规范化与标准化技术体系等方向发展。

参考文献 (References):

[1] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业

出版社, 2014.

GONG Xiaonan. Advances of Ground Improvement Technologies [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.

ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.

[3] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.

LIU Hanlong, ZHAO Minghua. Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115.

[4] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.

LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.

[5] 许莹. 塑料排水板在软土地基中的应用探讨[J]. 公路, 1995(9): 32-37, 62.

XU Ying. Discussion on the application of plastic drainage board in soft soil foundation [J]. Highway, 1995(9): 32-37, 62.

[6] 贾其军, 王晓谋, 袁怀宇. 袋装砂井处理河滩相软土固结沉降研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 36-40.

JIA Qijun, WANG Xiaomou, YUAN Huaiyu. Consolidation settlement study of alluvial flat soft clay with disposal of packed sand [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 36-40.

[7] 郭庆海, 周顺华, 王炳龙, 等. 塑料排水板超载预压处理高速公路软基的试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 340-344.

GUO Qihai, ZHOU Shunhua, WANG Binglong, et al. Soft ground treated with plastic drainage belt combined with surcharge preloading on expressway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(3): 340-344.

[8] 鲁绪文, 娄炎, 何宁, 等. 超载预压技术加固高速公路软基的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3277-3282.

LU Xuwen, LOU Yan, HE Ning, et al. Experimental study on reinforced soft ground of expressway by surcharge preloading method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3277-3282.

[9] 王婧, 李涛. 塑料排水板芯板及滤膜物理力学性能研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增1): 125-129.

WANG Jing, LI Tao. Physical and mechanical properties of core and filter membrane for plastic vertical drains [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 125-129.

- [10] 张达德, 王淳讷, 方力. 塑料排水板加固软土地基失效案例分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2034-2039.
CHANG Dade, WANG Chunhuan, FANG Li. An unfunctional case of vertical drains-reinforced soft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2034-2039.
- [11] 王正寿, 王会英. 水泥粉喷桩法在天津港区加固软土地基中的应用[J]. 铁道工程学报, 1997, 14(3): 78-84.
WANG Zhengshou, WANG Huiying. Application of spraying cement flour upon piles in solidifying ooze foundation of Tianjin port area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1997, 14(3): 78-84.
- [12] 徐超, 董天林, 叶观宝. 水泥土搅拌桩法在连云港海相软土地基中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 495-498.
XU Chao, DONG Tianlin, YE Guanbao. Application of cement deep mixing method in Lianyungang marine soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 495-498.
- [13] LIU Hanlong, ALY H. Mahfouz, Chen Yonghui. Ground treatment of sea embankment by vacuum preloading with PVDs[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2004, 20(1): 96-101.
- [14] 刘光华, 袁鸿鹄, 叶思源, 等. 温榆河公园堆山岩土工程问题分析研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(11): 114-118.
LIU Guanghua, YUAN Honghu, YE Siyuan, et al. Analysis and research on rock-soil engineering problems related to piled mountain in Wenyuhe Park [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(11): 114-118.
- [15] ZHOU Y, CHAI J C. Equivalent ‘smear’ effect due to non-uniform consolidation surrounding a PVD[J]. Géotechnique, 2017, 67(5): 410-419.
- [16] WANG P, HAN Y, ZHOU Y, et al. Apparent clogging effect in vacuum-induced consolidation of dredged soil with prefabricated vertical drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 524-531.
- [17] 鲍树峰, 娄炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1350-1359.
BAO Shufeng, LOU Yan, DONG Zhiliang, et al. Causes and counter measures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1350-1359.
- [18] THACH P N, LIU H L, KONG G Q. Evaluation of PCC pile method in mitigating embankment vibrations from highspeed train[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, 139(12): 2225-2228.
- [19] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明. 加固软土路基的现浇 X 形混凝土桩力学特性[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 11-17.
ZHANG Minxia, LIU Hanlong, DING Xuanming. Mechanical property for cast-in-situ X-shaped concrete pile of reinforced soft roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 11-17.
- [20] 刘汉龙, 陈永辉. 浆固碎石桩技术及其应用[J]. 岩土工程界, 2006, 9(7): 27-30.
LIU Hanlong, CHEN Yonghui. Grout-solidified CFG technology and its application [J]. Geotechnical Engineering Field, 2006, 9(7): 27-30.
- [21] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564.
LIU Songyu, XI Peisheng, CHU Haiyan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564.
- [22] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 201-225.
CAI Yuanqiang. Consolidation mechanism of vacuum preloading for dredged slurry and anti-clogging method for drains [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 201-225.
- [23] LIN W A, ZHAN X, ZHAN T L, et al. Effect of FeCl₃-conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan landfill, China[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014(42): 181-190.
- [24] 王凯, 冯传煌, 杜文山, 等. 重载铁路软土区交叉式组合桩复合地基沉降特性研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(4): 66-71.
WANG Kai, FENG Chuanhuang, DU Wenshan, et al. Research on settlement characteristics of cross-pile composite foundation in soft soil area of heavy-haul railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(4): 66-71.
- [25] 卢萌盟, 白垚, 杨康. 考虑排水板淤堵时空变化的多元复合地基固结性状研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1564-1573.
LU Mengmeng, BAI Yao, YANG Kang. Consolidation behaviors of multi-reinforcement composite ground considering time and depth-dependent clogging effects of prefabricated vertical drains [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1564-1573.
- [26] 刘汉龙. 绿色地基处理技术探讨[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 121-128.
LIU Hanlong. Study on green ground improvement technique [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 121-128.
- [27] 金亚伟, 金亚军, 蒋君南, 等. 增压式真空预压固结处理软土地基/尾矿渣/湖泊淤泥的方法: 中国, 200810156787.5 [P]. 2009-04-29.
JIN Yawei, JIN Yajun, JIANG Junnan, et al. The Treatment Method for Soft Soil Foundation/Tailing Slag/Lake Silt by Air-Booster Vacuum Preloading: China, 200810156787.5 [P]. 2009-04-29.
- [28] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1257-1268.
WANG Jun, CAI Yuanqiang, FU Hongtao, et al. Indoor and field experiment on vacuum preloading with new anti-clogging measures

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1257-1268.
- [29] 蔡袁强, 周岳富, 王鹏, 等. 考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3705-3713.
CAI Yuanqiang, ZHOU Yuefu, WANG Peng, et al. Calculation on the settlement of dredged slurry treated by vacuum preloading method with consideration of clogging effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3705-3713.
- [30] KE S W, WANG P, HU X Q, et al. Effect of the pressurized duration on improving dredged slurry with air booster vacuum preloading[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2019, 38(8): 970-979.
- [31] LEI H Y, HU Y, ZHENG G, et al. Improved air-booster vacuum preloading method for newly dredged fills: Laboratory model study [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2020, 38(4): 439-510.
- [32] LEI H Y, LIU X, WANG P, et al. Experimental investigation of influence of air-boost pressure and duration on air-boost vacuum preloading consolidation[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(6): 04021088.
- [33] 中国工程建设标准化协会. 公路吹填流泥地基处理技术规程: T/CECS G: D21-01—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard of China Association for Engineering Construction Standardization: T/CECS G: D21-01—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [34] 赵森, 曾芳金, 王军, 等. 絮凝-真空预压加固吹填淤泥试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1291-1296.
ZHAO Sen, ZENG Fangjin, WANG Jun, et al. Experimental study of flocculation combined with vacuum preloading to reinforce silt foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1291-1296.
- [35] 张雷, 吕延栋, 王炳辉, 等. 絮凝-真空-电渗联合加固滩涂软土的模式试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2383-2390.
ZHANG Lei, LYU Yandong, WANG Binghui, et al. Laboratory study of consolidation of marine soft soil using flocculation-vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2383-2390.
- [36] 刘松玉, 洪振舜, 章定文. 气压劈裂真空法预压法加固软土地基操作方法: 中国, 200510038644.0[P]. 2007-10-03.
LIU Songyu, HONG Zhenshun, ZHANG Dingwen. A combined pneumatic fracturing and vacuum preloading method for soft ground improvement: China, 200510038644.0[P]. 2007-10-03.
- [37] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 劈裂真空法加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 591-599.
LIU Songyu, HAN Wenjun, ZHANG Dingwen, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 591-599.
- [38] 章定文, 韩文君, 刘松玉, 等. 劈裂真空法加固软土地基的效果分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1467-1472, 1478.
ZHANG Dingwen, HAN Wenjun, LIU Songyu, et al. Effect analysis of a soft ground reinforced by a combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1467-1472, 1478.
- [39] 韩文君, 刘松玉, 章定文. 劈裂真空法加固软土室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(10): 108-118.
HAN Wenjun, LIU Songyu, ZHANG Dingwen. Model test study on reinforcement effect of combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(10): 108-118.
- [40] LIU S Y, ZHANG D W, DU G, et al. A new combined vacuum preloading with pneumatic fracturing method for soft ground improvement[J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 454-461.
- [41] 江苏省交通运输厅. 气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程: DB 32/T 3643—2019[S]. 南京: 江苏省质量技术监督局, 2019.
Jiangsu Provincial Communications Department. Technical code for combined vacuum preloading with pneumatic fracturing technique to improve soft soils: DB 32/T 3643—2019[S]. Nanjing: Quality and Technology Supervision of Jiangsu Province, 2019.
- [42] 祝建成, 徐浩, 段立超. 软弱地层气压劈裂真空预压加固施工技术[J]. 路基工程, 2023(3): 171-173.
ZHU Jiancheng, XU Hao, DUAN Lichao. Construction technology of pneumatic fracturing vacuum preloading reinforcement in weak strata [J]. Subgrade Engineering, 2023(3): 171-173.
- [43] 谭再坤, 潘秉忠, 杨耀明, 等. 超压真空降水联合强夯地基处理方法: 中国, 201110094989.3[P]. 2011-04-15.
TAN Zaikun, PAN Bingzhong, YANG Yaoming, et al. Treatment method of overpressure vacuum dewatering combined with dynamic compaction: China, 201110094989.3[P]. 2011-04-15.
- [44] 曾华健, 李军, 梅军, 等. 真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 64-70.
ZENG Huajian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment storage[J]. Subgrade Engineering, 2021, 3(1): 64-70.
- [45] NI F L, WEN X, ZHANG X B, et al. Experimental study on vacuum dynamic consolidation treatment of soft soil foundation [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2017.
- [46] 房营光, 徐敏, 朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34

- (11): 70-75.
- FANG Yingguang, XU Min, ZHU Zhongwei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 2006, 34(11): 70-75.
- [47] 王军, 王逸杰, 刘飞禹, 等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 37-45.
- WANG Jun, WANG Yijie, LIU Feiyu, et al. Test of reinforcement by intermittent vacuum preloadingelectroosmosis in dredger soft clay [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 37-45.
- [48] 孙召花, 余湘娟, 高明军, 等. 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 250-258.
- SUN Zhaohua, YU Xiangjuan, GAO Mingjun, et al. Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 250-258.
- [49] 刘汉龙, 费康, 马晓辉, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164-168.
- LIU Hanlong, FEI Kang, MA Xiaohui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with Vibrated and steel tube mould technology and its application (I): Development and design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 164-168.
- [50] 刘汉龙, 郝小员, 费康, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372-375.
- LIU Hanlong, HAO Xiaoyuan, FEI Kang, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with Vibrated and steel tube mould technology and its application(II): Application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372-375.
- [51] LIU H, KONG G, DING X, et al. Performances of large-diameter cast-in-place concrete pipe piles and pile groups under lateral loads [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(2): 191-202.
- [52] ZHOU M, LIU H, CHEN Y, et al. First application of cast-in-place concrete large-diameter pipe (PCC) pile-reinforced railway foundation: A field study [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(4): 708-716.
- [53] 郑长杰, 刘汉龙, 丁选明, 等. 饱和黏性土地基中现浇大直径管桩水平振动响应解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1447-1454.
- ZHENG Changjie, LIU Hanlong, DING Xuanming, et al. Analytical solution of horizontal vibration of cast-in-place large-diameter pipe piles in saturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1447-1454.
- [54] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程: JGJ/T 213—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for composite foundation of cast-in-place concrete large-diameter pipe pile: JGJ/T 213—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [55] LV Y R, LIU H L, DING X M, et al. Field tests on bearing characterisites of X-section pile compostite foundation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(2): 1943-5509.
- [56] 丁选明, 范玉明, 刘汉龙, 等. 现浇 X 形桩低应变动力检测足尺模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增2): 4290-4296.
- DING Xuanming, FAN Yuming, LIU Hanlong, et al. Full-scale model tests of low strain dynamic testing of X-section cast-in-place pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4290-4296.
- [57] ZHOU H, LIU H L, WANG L H, et al. Finite element limit analysis of ultimate lateral pressure of XCC pile in undrained clay [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 95: 240-246.
- [58] ZHOU H, LIU H L, YUAN J R, et al. Numerical simulation of XCC pile penetration in undrained clay[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 18-41.
- [59] 刘汉龙, 陈永辉, 宋法宝. 一种桩土互动浆固散体材料桩复合地基施工工法: 中国, 200510038903. X[P]. 2005-04-18.
- LIU Hanlong, CHEN Yonghui, SONG Fabao. A construction method of pile-soil interactive slurry solid material pile composite foundation: China, 200510038903. X[P]. 2005-04-18.
- [60] 左威龙, 刘汉龙, 陈永辉. 浆固碎石桩成桩注浆影响范围现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3329-3332.
- ZUO Weilong, LIU Hanlong, CHEN Yonghui. Field testing analysis of grouting impact range of grouting gravel pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3329-3332.
- [61] 温世清, 刘汉龙, 闫春雷, 等. 浆固碎石桩复合地基沉降分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(1): 92-96.
- WEN Shiqing, LIU Hanlong, YAN Chunlei, et al. Settlement analysis of composite foundation reinforced by grouted gavel pile[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 13(1): 92-96.
- [62] 方鹏飞, 董宏波. TC 桩技术及其工程应用分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增2): 116-119.
- FANG Pengfei, DONG Hongbo. Construction technology of TC piles and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 116-119.
- [63] 浙江省交通运输厅. 公路软土地基路堤设计规范: DB 33/T 904—2013[S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2013.
- Zhejiang Provincial Communications Department. Code for design of

- highway embankment on soft ground: DB 33/T 904—2013 [S]. Hangzhou: Quality and Technology Supervision of Zhejiang Province, 2013.
- [64] 陈永辉, 齐昌广, 王新泉, 等. 塑料套管混凝土桩单桩承载特性研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 51-59.
CHEN Yonghui, QI Changguang, WANG Xinquan, et al. Research on bearing performance of plastic tube cast-in-place single pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 51-59.
- [65] CHEN Y H, QI C G, XU H Y, et al. Field test research on embankment supported by plastic tube cast-in-place concrete piles [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(4): 1359-1368.
- [66] 齐昌广, 陈永辉, 王新泉, 等. 塑料套管混凝土桩的承载力随时间效应研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1635-1643.
QI Changguang, CHEN Yonghui, WANG Xinquan, et al. Time effect of bearing capacity of plastic tube cast-in-place concrete piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1635-1643.
- [67] QI C G, CHEN Y H, ISKANDER M. Field load tests on plastic tube cast-in-place concrete piles [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2016, 169(G11): 9-21.
- [68] 齐昌广, 左殿军, 刘干斌, 等. 塑料套管混凝土桩挤土效应的非侵入可视化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2333-2340.
QI Changguang, ZUO Dianjun, LIU Ganbin, et al. Non-intrusively visualization on squeezing effect of plastic tube cast-in-place concrete piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2333-2340.
- [69] 章定文, 范礼彬, 刘松玉, 等. 水泥土搅拌桩复合地基固结机理室内模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(12): 1-9.
ZHANG Dingwen, FAN Libin, LIU Songyu, et al. Laboratory model tests on consolidation mechanism of soft clay improved by deep mixing cement columns [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 1-9.
- [70] ZHAO L Y, CHEN Y K, CHEN W X, et al. The performance of T-shaped deep mixed soil cement column-supported embankments on soft ground [J]. Construction and Building Materials, 2023(369): 130578.
- [71] 刘松玉, 易耀林, 朱志锋. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2272-2280.
LIU Songyu, YI Yaolin, ZHU Zhiduo. Comparison tests on field bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2272-2280.
- [72] 易耀林, 刘松玉, 赵玮, 等. 变径双向水泥土搅拌桩施工技术 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增2): 387-390.
YI Yaolin, LIU Songyu, ZHAO Wei, et al. Installation of variable diameter soil-cement double mixed column [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 387-390.
- [73] RAITHEL M, KIRCHNER A, SCHADE C, et al. Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns—state of the art [C]//SCHAEFER V R, BRUCE D A, BYLE M J. Proceedings of GeoFrontiers. Reston: American Society of Civil Engineers, 2005: 1-11.
- [74] 赵明华, 顾美湘, 张玲, 等. 竖向土工加筋体对碎石桩承载变形影响的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1587-1593.
ZHAO Minghua, GU Meixiang, ZHANG Ling, et al. Model tests on influence of vertical geosynthetic-encasement on performance of stone columns [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1587-1593.
- [75] 夏博洋, 郑刚, 周海祚, 等. 筋箍长度及刚度对加筋碎石桩复合地基承载力影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增2): 209-212.
XIA Boyang, ZHENG Gang, ZHOU Haizuo, et al. Influences of length and strength of geosynthetics on bearing capacity of composite foundation with stone columns [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 209-212.
- [76] 陈建峰, 李良勇, 徐超, 等. 套筒长度对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1662-1669.
CHEN Jianfeng, LI Liangyong, XU Chao, et al. Influence of encasement length on deformation and stability of embankments on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1662-1669.
- [77] 陈建峰, 顾子昂, 王兴涛, 等. 冻融条件下加筋碎石桩复合地基路堤性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1393-1400.
CHEN Jianfeng, GU Ziang, WANG Xintao, et al. Behaviour of embankment on composite foundation with geosynthetic-encased stone columns under freeze-thaw condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1393-1400.
- [78] THAKUR A, RAWAT S, GUPTA A K. Experimental and Numerical Investigation of Load Carrying Capacity of Vertically and Horizontally Reinforced Floating Stone Column Group [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(4): 3003-3018.
- [79] 李仰波. 布袋加筋注浆桩在软基加固处理中的应用研究 [J]. 铁道工程学报, 2014, 31(12): 33-36.
LI Yangbo. Application research on the bag reinforced grouting pile on reinforcement of soft ground [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(12): 33-36.
- [80] 程红梅. 布袋注浆桩地基加固扰动影响试验研究 [J]. 铁道工程

- 学报, 2023, 40(4): 12-17, 83.
- CHENG Hongmei. Experimental research on the foundation reinforcement disturbance influence of the bag grouting pile [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(4): 12-17, 83.
- [81] 陆华, 高全臣, 周波, 等. 长短组合桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 56-63.
- LU Hua, GAO Quanchen, ZHOU Bo, et al. Experimental research on bearing capacity of long-and-short pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 56-63.
- [82] 杨涛, 李超, 阮一舟. 多元不排水长短桩复合地基固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2195-2202.
- YANG Tao, LI Chao, RUAN Yizhou. Analytical solution for consolidation of a composite ground with impervious multi-long-short piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2195-2202.
- [83] 杨涛, 吉映竹, 杨欢. 悬浮刚-柔性长短桩复合地基固结解析解[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 176-183.
- YANG Tao, JI Yingzhu, YANG Huan. Analytical solution for consolidation of composite ground with floating rigid-flexible and long-short piles [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 176-183.
- [84] 杨以国, 刘开富, 谢新宇. 循环荷载下长短桩网复合地基变形试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1027-1035.
- YANG Yiguo, LIU Kaifu, XIE Xinyu. Experimental research on deformation of pile-net composite foundation with long-short piles under cyclic load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(6): 1027-1035.
- [85] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 998-1001.
- QIAN Yujun, XU Zhiwei, DENG Yaguang, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 998-1001.
- [86] VOOTIPRUEX P, SUKSAWAT T, BERGADO D T, et al. Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(3): 318-329.
- [87] JAMSAWANG P, BERGADO D T, VOOTIPRUEX P. Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles [J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2010, 164(1): 33-49.
- [88] 王安辉, 章定文, 刘松玉, 等. 水平荷载下劲性复合管桩的承载特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 853-861.
- WANG Anhui, ZHANG Dingwen, LIU Songyu, et al. Bearing capacity behavior of strength composite pipe pile subjected to lateral loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 853-861.
- [89] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 劲性复合桩技术规程: JGJ/T 327—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for strength composite piles: JGJ/T 327—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [90] 裘友强. 软土地基上泡沫轻质土路基工程特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- QIU Youqiang. Study on engineering properties of foamed lightweight soil subgrade in the soft soil foundation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [91] PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Formulating eco-friendly geopolymer foam concrete by alkali-activation of ground brick waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2021 (325): 129180.
- [92] ZHANG S L, QI X Q, GUO S Y, et al. A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio [J]. Construction and Building Materials, 2022(339): 127683.
- [93] CHEN B, LIU N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties [J]. Construction and building materials, 2013, 44: 691-698.
- [94] LUO J, HOU D, LI Q, et al. Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation [J]. Construction and Building Materials, 2017(131): 512-516.
- [95] BING C, ZHEN W, NING L. Experimental research on properties of high-strength foamed concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 24(1): 113-118.
- [96] 张留俊. 软土地基处理的爆炸挤淤法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2000, 28(增1): 44-51.
- ZHANG Liujun. The method of explosive stone-fill in treating with soft clay ground [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2000, 28(S1): 44-51.
- [97] 赵简英, 王健, 吴京平. 控制加载爆炸挤淤置换法在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 332-335.
- ZHAO Jianying, WANG Jian, WU Jingping. An application of blast method to squeeze mud and replacement with controlled loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 332-335.
- [98] 邓永锋, 赵余, 刘倩雯, 等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 11-20.
- DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na_2SiO_4 and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 11-20.
- [99] JIANG N J, DU Y J, LIU S Y, et al. Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical and microstructural properties

- of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(3): 373-383.
- [100] 王伟志, 严赧强, 徐永福, 等. 高速铁路水泥改良钻渣路用性能研究[J]. *铁道勘察*, 2023, 49(1): 96-101.
WANG Weizhi, YAN Keqiang, XU Yongfu, et al. Study of the performance of cement modified drilling slag on high-speed railway subgrade[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2023, 49(1): 96-101.
- [101] IVANOV V, CHU J, STABNIKOV V, et al. Strengthening of soft marine clay using bioencapsulation [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2015, 33(4): 325-329.
- [102] DEJONG J, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(4): 287-301.
- [103] 邵光辉, 陈海涛, 侯敏, 等. 微生物注浆固化粉土矿化反应的沿程变化特性[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(1): 206-212.
SHAO Guanghui, CHEN Haitao, HOU Min, et al. Variation characteristics of mineralizing reaction along seepage path in bio-grouting-reinforced silt [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(1): 206-212.
- [104] 赵志峰, 邵光辉. 微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 231-238.
ZHAO Zhifeng, SHAO Guanghui. Experimental study on marine silt reinforcement by microbial induced calcium precipitation [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 231-238.
- [105] 王复明, 范永丰, 郭成超. 非水反应类高聚物注浆渗漏水处治工程实践[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(10): 1-11.
WANG Fuming, FAN Yongfeng, GUO Chengchao. Practice of non-water-reacting polymer grouting treatment to seepage [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(10): 1-11.
- [106] 张超, 潘旺, 方宏远, 等. 高聚物注浆材料压缩疲劳损伤演化与寿命预测[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(10): 64-74.
ZHANG Chao, PAN Wang, FANG Hongyuan, et al. Compression Fatigue damage evolution and life prediction of polymer grouting materials[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(10): 64-74.
- [107] LI X X, WAN J C, ZHENG D, et al. Compressive mechanical properties of self-expanding grouting materials with different densities [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 332: 127308.
- [108] 李晓龙, 陈灿, 贾赫扬, 等. 考虑化学反应的聚氨酯高聚物浆液膨胀机理试验与数值模拟研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(11): 4163-4173.
LI Xiaolong, CHEN Can, JIA Heyang, et al. Expansion mechanism of polymer considering chemical reactions: Experiment and numerical simulation [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(11): 4163-4173.
- [109] 王子挺. 公路路基下穿高铁合建桥梁影响分析及处置措施[J]. *铁道勘察*, 2023, 49(6): 76-81.
- WANG Ziting. The impact analysis of highway subgrade passing through the highway-railway bridge and treatment measures [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2023, 49(6): 76-81.
- [110] XIA Bian, DING Guoquan, WANG Zhifeng, et al. Compression and strength behavior of cement-lime-polymer-solidified dredged material at high water content [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(6): 840-846.
- [111] 陈永辉, 王颖, 程潇, 等. 就地固化技术处理围海工程吹填土的试验研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(增1): 64-69.
CHEN Yonghui, WANG Ying, CHENG Xiao, et al. Experimental study of new technologies using in situ stabilization treating dredger fill of coastal reclamation project [J]. *水利学报*, 2015, 46(S1): 64-69.
- [112] 刘吉福, 郑刚, 龚晓南. 附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 1995-2002.
LIU Jifu, ZHENG Gang, GONG Xiaonan. Superimposed stress method to calculate settlement of embankment with rigid-pile composite foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 1995-2002.
- [113] 姜启珍, 刘吉福. 《广东省公路路堤软基处理技术标准》主要增改内容释义[J]. *广东公路交通*, 2019, 45(3): 41-46.
JIANG Qizhen, LIU Jifu. Main revision of Technical Code for Soft Soil Improvement of Highway Embankment in Guangdong Province [J]. *Guangdong Highway Communications*, 2019, 45(3): 41-46.
- [114] 顾行文, 黄炜旺, 谭祥韶, 等. 基底倾斜的管桩复合地基路堤破坏模式研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(S1): 204-208.
GU Xingwen, HUANG Weiwang, TAN Xiangshao, et al. Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by pipe piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S1): 204-208.
- [115] 刘吉福, 郑刚. 单桩承载力对刚性桩复合地基路堤稳定性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(11): 1992-1999.
LIU Jifu, ZHENG Gang. Influences of bearing capacity of piles on stability of embankment with rigid pile composite foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(11): 1992-1999.
- [116] 刘吉福, 郑刚, 龚晓南, 等. 柔性荷载刚性桩复合地基修正密度法稳定分析改进[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增2): 33-36.
LIU Jifu, ZHENG Gang, GONG Xiaonan, et al. Improvement of revised density method for stability analysis of rigid-pile composite foundation under flexible loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S2): 33-36.
- [117] 刘吉福, 郭舒洋, 肖昌建, 等. 修正密度法分析混凝土桩复合地基路基绕流滑动稳定性[J]. *广东公路交通*, 2016(5): 12-20.

- LIU Jifu, GUO Shuyang, XIAO Changjian, et al. Revised density method for stability analysis of flow slide of embankment with concrete-pile composite foundation [J]. Guangdong Highway Communications, 2016(5): 12-20.
- [118] 卢萌盟, 敖祖瑞, 李东旭, 等. 高置换率散体材料桩-不透水桩多元组合桩复合地基固结分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1253-1260.
- LIU Jifu, ZHENG Gang, GONG Xiaonan, et al. Improvement of revised density method for stability analysis of rigid-pile composite foundation under flexible loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 33-36.
- [119] 卢萌盟. 复合地基固结解析理论研究方法与进展[J]. 地基处理, 2020, 2(6): 451-460.
- LU Mengmeng. Research methodologies and advances in analytical theory for consolidation of composite ground[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(6): 451-460.
- [120] 中华人民共和国交通运输部. 公路软土地基路堤设计与施工技术细则: JTG/T D31-02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2013.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground; JTG/T D31 - 02—2013 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2013.
- [121] 中华人民共和国铁道部. 粉体喷搅法加固软弱土层技术规范: TB 10113—96[S]. 北京: 建设司标准科情所, 1996.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. Technical Code on Dry Jet Mixing Method to Stabilize Soft Foundation; JTJ 017—96 [S]. Beijing: Standard Science and Information Institute of the Construction Department, 1996.
- [122] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings; JGJ 79—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [123] 中华人民共和国交通运输部. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范: JTJ 017—96[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground; JTJ 017—96[S]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [124] 张留俊, 李刚, 蔡宁, 等. 综合加固土的试验研究[J]. 路基工程, 2004(6): 26-28.
- ZHANG Liujun, LI Gang, CAI Ning, et al. Experimental study on comprehensive reinforced soil [J]. Subgrade Engineering, 2004 (6): 26-28.
- [125] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- YE Shulin, YE Guanbao. Foundation treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [126] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Composite Foundation; GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [127] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 吹填土地基处理技术规范: GB/T 51064—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Blowing Filling; GB/T 51064—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [128] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Substructure; JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [129] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 现浇X形桩复合地基技术规程: JGJ/T 402—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Cast-in-place X-section Pile Composite Foundation; JGJ/T 402—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [130] 中国工程建设标准化协会. 变截面双向搅拌桩技术规程: T/CECS 822—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Double Deep Mixing Column with Variable Diameter; T/CECS 822—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [131] 广东省交通运输厅. 公路路堤软基处理技术标准: DB 44/T 2418—2023[S]. 广州: 广东省市场监督管理局, 2023.
- Department of Communications of Guangdong Province. Technical Code for Improvement of Ground with Soft Clay of Highway Embankment; DB 44/T 2418—2023 [S]. Guangzhou: Market Supervision Administration of Guangdong Province, 2023.

(责任编辑 王海锋)