

文章编号: 1007-2993(2024)06-0631-13

地基处理综述及地基处理智能化 ——第九届全国岩土工程实录交流会特邀报告

化建新¹ 王浩¹ 张丹¹ 梁涛²

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 航天规划设计集团有限公司, 北京 100162)

【摘要】 对“第九届全国岩土工程实录交流会”地基处理技术进行综述,介绍了地基处理的新技术、新方法和数智化的研发、应用情况,探讨了地基处理应加强研究的方向。地基处理面临着向绿色低碳、智能化转型的挑战,未来发展方向包括利用 BIM、大数据等信息技术构建智能化地基设计系统与智能化地基处理施工管控系统;同时加强软土地基处理、沉降控制及 MICP 技术的应用研究,促进理论与实践相结合,推动相关规范标准更新,以更好地服务于国家工程建设需求。

【关键词】 地基处理;智能化;复合地基;CFG 桩;微生物注浆加固(MICP)

【中图分类号】 TU472

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.001

Review of Ground Treatment Techniques and Their Intelligitize

Hua Jianxin¹ Wang Hao¹ Zhang Dan¹ Liang Tao²

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing, 100053; 2. China Aerospace Planning and Design Group Co., Ltd., Beijing, 100162)

【Abstract】 The ground treatment techniques for the 9th National Geotechnical Engineering Records Conference were reviewed, and new techniques, digitalization, and intelligence for ground treatment applications were introduced. Furthermore, some directions were provided which should be strengthened in future research. Ground treatment faces the challenge of transitioning towards green, low-carbon, and intelligent solutions. Future development directions include utilizing BIM and big data to construct intelligent foundation design systems and treatment construction management systems. Application research in soft ground foundation treatment, settlement control, and MICP technology should be emphasized. It is necessary to prompt the integration of theoretical knowledge with practical experience and update relevant standards and specifications to better meet the needs of national construction projects.

【Key words】 ground treatment; intelligence; composite foundation; CFG piles; microbial induced carbonate precipitation (MICP)

0 前言

我国地域辽阔,包含多种地貌,但国土 65% 的面积属于山地或丘陵^[1],分布大量特殊性土,在工程建设时,常遇到非常复杂的岩土工程问题,设计人员常采用地基处理的方法解决承载力、变形和地基稳定的问题。为了满足工程建设的需要,常采用挖山填沟、围海造地解决土地紧张问题。如延安新区为了解决城市发展与老城保护问题,在新区进行挖山、填沟、造地与土地综合治理工作^[2-3],截至 2018 年 8 月形成建设用地及生态综合治理用地 21.33 km²^[4];如兰州新区,规划总面积 1744 km²,在黄土地区采用削除低

丘,回填沟壑进行土地平整^[5]。民航机场的建设,遇到了大填、大挖、地基变形和挖方、填方边坡稳定的问题,九寨黄龙机场^[6]、绵阳机场^[7]、吕梁机场^[8]、康定机场^[9]、稻城机场^[10]、贵阳龙洞堡机场^[11]、昆明长水机场^[12]、承德机场^[13]、神农架机场^[14]等都采用强夯、碾压等方式进行回填土的处理,确保了后期机场的安全运营。

2020 年 9 月 22 日,在 75 届联合国大会一般性辩论上中国宣布了力争在 2030 年前 CO₂ 排放达峰,2060 年前努力争取实现碳中和。根据中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022 年)^[15],2020 年我国建筑行

作者简介:化建新,男,1964 年生,汉族,河南偃师人,硕士,正高级工程师,主要从事岩土工程勘察、设计、施工和检测工作。E-mail: zgbkhjx@126.com

业碳排放(全过程)总量为 50.8 亿 t CO₂(见图 1), 占全国碳排放总量的 50.9%, 2005 年到 2013 年碳排放量增速显著, 2013 年到 2020 年增速降低(见图 2)。

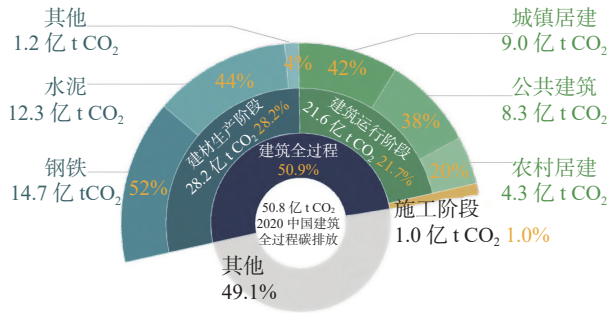


图 1 全国建筑碳排放总量及构成能耗与碳排放变化^[15]

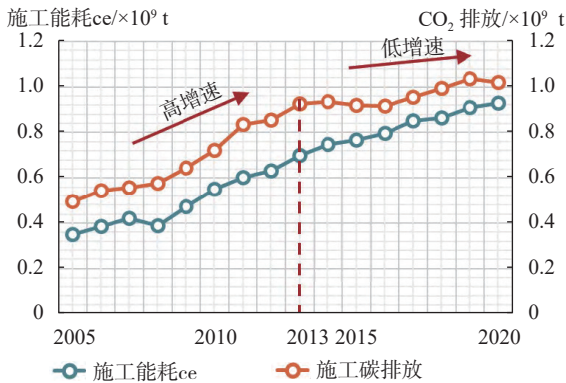


图 2 2005—2020 年施工能耗与碳排放变化^[15]

根据中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023 年)^[16], 图 3 给出了 2021 年全国建筑碳排放(全过程)总量为 50.1 亿 t CO₂, 占全国碳排放总量的 47.1%, 图 4 给出了建筑施工能耗与碳排放关系, 2013 年到 2021 年碳排放低速增长。

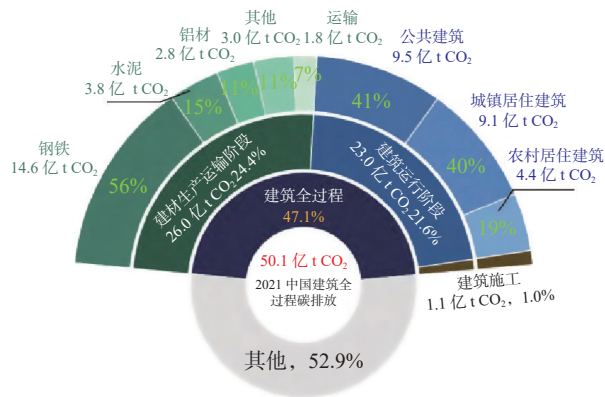


图 3 2021 年全国建筑碳排放总量及构成^[16]

从图 1—图 4 可知, 建筑全过程碳排放量占全国碳排放总量的比例较大, 2021 年施工过程碳排放为 1.06 亿 t CO₂, 与 2020 年同比增长了 4.4%。住建部“十四五”规划(2022 年 1 月)提出, 建筑业提倡绿色低碳、数字化、智能化、装配式, 在此大趋势下, 岩土

工程中地基处理将面临减少碳排放、设计和施工数字化、智能化的问题, 也要采用绿色低碳、数字化、智能化新技术减少碳排放, 为“双碳”战略做出应有的贡献。

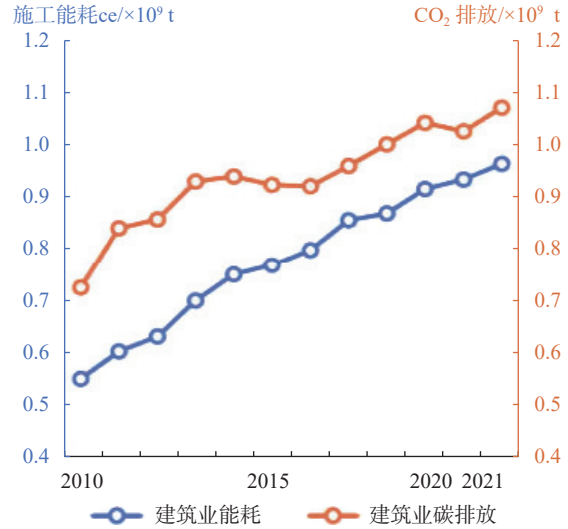


图 4 2010—2021 年施工能耗与碳排放变化^[16]

1 《岩土工程实录交流会实录集》地基处理文章特色

自 1988 年举办第一届全国岩土工程实录交流会, 到 2023 年已经举办了九届, 各届实录会中地基处理的论文数量见图 5 和有关文献^[17]。“第九届全国岩土工程实录会”共收录论文 313 篇^[18], 其中, 地基处理有关的实录论文 18 篇, 包括复合地基 6 篇(水泥石搅拌桩复合地基 1 篇、水泥粉煤灰碎石桩复合地基 2 篇、DJP 管桩复合地基 1 篇、旋喷桩复合地基 1 篇、柱锤冲扩桩复合地基 1 篇), 压实地基与夯实地基 11 篇, 多桩型复合地基 1 篇。

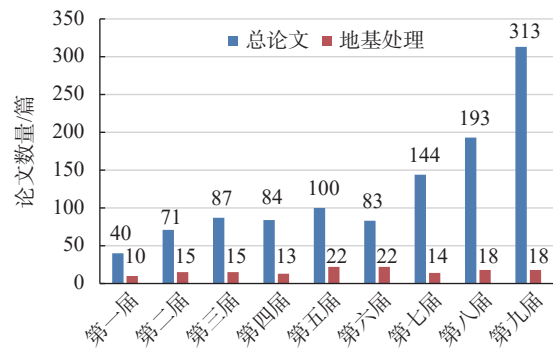


图 5 各届岩土工程实录会中地基处理论文数量分布图

篇幅所限, 本文选出 4 篇论文进行综述。曹瑞钠等^[19]介绍了沈阳某高填方场区的岩土工程施工勘察实录, 场区原始地形起伏较大, 最大标高为 92.45 m, 最小标高为 55.07 m, 最大高差 37.88 m, 场区原建

筑设计方案为根据原有场地条件场地整平至 74.3 m, 填方段挖除场地杂填土、耕土等软弱土层后利用场地挖方段的粉质黏土、坡积土、全风化岩等挖方土与石灰拌和(灰土质量比为 1:9)分层强夯地基处理至标高 74.3 m, 最后铺设 1.70 m 厚碎石至标高 76.0 m。2020 年下半年, 历经沈阳连续几场暴雨后, 汽车分拨中心陆续出现基础较大沉降及不均匀沉降现象, 场区回填区域地面发生较大的裂缝, 场地东侧挡土墙顶部地面发生较大的地面裂缝。勘察采用综合手段查明了强夯填土情况: (1) 东二区、东三区: 该区域大部分地面下 2.0~6.0 m 为软塑—流塑状态素填土(局部软弱土深度达 8~11 m); 由于局部场地地面受水影响沉降严重, 造成局部强夯硬壳层下形成空洞; 另由于分层强夯质量及回填材料成分的差异造成局部场地在浸水后自上而下出现“软层—硬层—软层—硬层”交互地层。(2) 南区填方区: 地面下 2.0~4.0 m 存在承载力低、压缩性高的素填土, 其余部位素填土地基承载力较高、压缩性较低。(3) 汽车跑道填方区: 局部区域存在 4.0~8.0 m 厚度的软弱素填土。室内湿陷性试验表明, 8 个勘探孔的 9 组填土试样具有湿陷性。勘察还发现风化花岗岩和残积土层有遇水软化现象。场地除了以上土层性质较差以外, 场地排水不良造成大量雨水下渗也是产生沉降大、地面开裂的原因。从勘察资料看场地排水不畅和强夯施工质量差是造成地面开裂的原因, 尤其是强夯地基土浸水软化、填土湿陷要引起重视。

文光菊等^[20]通过重庆国际博览中心地质健康检查岩土工程实录, 介绍了建成 10 年后的重庆国际博览中心产生病害情况。展馆室外地面裂缝发育, 局部地面沉降量接近米级; U 形北侧区桩板挡墙累计平面位移达 340 mm, 超过设计值 100 mm; 扶壁式挡墙累计平面位移和沉降较大, 相邻挡墙墙顶错位近 10 cm; 展馆室内地面裂缝密集; 滨江路路面沉降明显, 部分给排水管网渗漏。场地主要通过回填造地建设, 填方面积约 0.839 km², 占项目建筑区域的 50%。作者以填土、水、管网和结构为研究对象, 以“病害检查、诊断、开具处方”的方式找出填土病害诱因为不均匀的填土和渗透在土中的水。场地填土方量大, 分布面积广, 回填时间短; 块石大粒径含量高, 填料空间分布不均匀, 物理力学性质差异大; 管网渗漏、大气降雨和场地周边地下水补给, 造成场区地下水量大。水在填土中渗流会对填土中细小颗粒土体产生潜蚀作用, 软化砂岩、泥岩填料, 减弱岩土体颗粒间的接触和支撑。水对填土性质有直接影响, 易引起地面不均匀沉降、

塌陷等病害。桩板挡墙桩后为填土, 桩前抗力主要由填土提供, 扶壁式挡墙基础置于填土上。结构与填土、水紧密接触, 填土和水是结构变形的直接诱因。作者从场馆维护制度建设、给排水系统维护、地面维护、无损检测、长期监测等方面给出了适用于整个博览中心的治理措施; 针对 U 形北侧区变形超过设计值 3 倍的桩板挡墙, 给出了高压喷射注浆加固+效果检测的综合措施。经实施, 治理效果良好。

李建光等^[21]关于马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程岩土工程实录, 介绍了一带一路的马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程涉及珊瑚砂岩土工程勘察、岩土工程设计和工程监测情况。珊瑚砂是一种区别于常规石英砂的特殊土^[22-25], 主要分布在北纬 30°和南纬 30°之间的热带或亚热带气候的大陆架和海岸线一带。作者在查明场地珊瑚砂工程特性的基础上, 根据原有陆域区、新填海区吹填珊瑚砂的厚度, 将场地划分为 3 个区域(区域 A、区域 B 和区域 C), 设计了 5 组地基处理小区试验。小区试验针对振动碾压法和冲击碾压法两种地基处理方案, 采用了重型动力触探试验、平板载荷试验、地基反应模量试验、CBR 试验、密度试验、颗分试验、现场振动测试和分层沉降观测等多种手段, 对处理效果进行了对比分析, 通过对小区试验成果对比分析, 得到如下成果: (1) 振动碾压的地基处理效果好于冲击碾压; (2) 振动碾压的地基处理深度能够满足设计要求; (3) 振动碾压对珊瑚砂的破碎作用较小; (4) 振动碾压后地下水位以上珊瑚砂的地基反应模量和 CBR 指标满足设计要求; (5) 可采用现场干密度试验指标和重型圆锥动力触探指标作为地基处理后的验收检测指标。最终机场跑道地基处理采用振动碾压方法, 处理效果好, 具有较好的社会效益和经济效益。

莫振林等^[26]的文章关于某高层建筑物综合加固纠偏技术工程实录, 介绍了采用大直径刚性桩复合地基和其他手段进行建筑物加固纠偏情况。某小区由 9 栋高层住宅楼及附属设施组成, 加固前住宅楼主体结构均已封顶。2#建筑物高度 99.4 m, 无地下室, 基顶-7.0 m, 一层为架空层, 基础为厚度 2 m 筏板基础。地基持力层为换填级配砂石, $f_{sk} = 300$ kPa, $E_0 = 46.0$ MPa, 地基岩土层自上而下分别为: 卵石层(局部为强风化层)、强风化泥岩层(局部为全风化层)、强风化泥岩层、中等风化泥岩层。在 2#楼主体施工完成后, 为后期修建中庭地下室车库而进行沉降测量过程中, 发现该楼栋基础存在不均匀沉降, 其最大倾斜率达到 0.506%, 超过了规范规定的 0.25% 允许值, 且加固前

沉降尚未稳定。确定场地建筑物变形过大的原因为：(1)场地强风化泥岩存在可压缩层(全风化泥岩层)，积水软化增大其变形量；(2)基岩内以透镜体形式存在的石膏成分，经地下水溶蚀而形成不规则流塑状黏土层性状；(3)工程建设改变了原场地的水文地质环境，临近河水的频繁涨落改变场地局部地层性状。通过对比各种纠偏措施及工程现场实际情况后，确定了“基础加固(采用28根大直径人工挖孔桩，在桩顶设置不同厚度的柔性垫层)—挖土卸载—掏土射水—截止沉桩”综合法进行纠偏加固。根据沉降监测结果，房屋倾斜率满足规范要求，沉降基本稳定。

从实录论文中可以看出地基处理以下特点：(1)工程师依据不同的地层条件和设计要求选用合适的地基处理方法；(2)地基处理方法的选择除了考虑地域特色外，还考虑了经济与技术的统一，选取的方案具有安全可靠、经济合理、技术可行的特点；(3)对已经形成的填、挖方场地，因排水不畅或管道漏水等原因造成的场地病害，提出了场地健康检查的理念，提醒工程师要考虑对已经形成的填、挖方场地进行保护，否则可能产生病害，带来安全隐患；(4)对于以前没有遇到的特殊性地基土如珊瑚砂等，在勘察和地基处理中要加强有关问题的研究和现场试验、监测，确保建(构)筑物的安全。

2 地基处理新技术与智能化地基处理

随着城市建设、轨道交通建设和机场建设的推进，遇到的岩土工程问题越来越复杂，根据住建部绿色低碳、智能化要求，当前的地基处理技术将迎来严峻的挑战。这是地基处理技术发展的机遇，岩土工程师将与高校学者一起，发挥智慧，研发出更多绿色低碳、智能化的地基处理技术，形成新的地基处理工艺和技术手段。

图6为《岩土工程技术》2013年—2022年发表的地基处理论文统计。由图6中可知，《岩土工程技术》平均每年发表地基处理论文8篇，占发表论文总数的11%。总体占比偏低，地基处理论文投稿数量还有待提升。

2.1 换填与压实地基

换填、压实地基是常采用的地基处理方法。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[27]规定，地基压实度是施工过程中的控制性指标。姚仰平等^[28]提出山区高填方机场的智能建造与安全运营系统，利用北斗卫星+互联网+无人驾驶碾压机械，实现了对机场高填方压实质量实时监控和管理，实现了智能化建造(见图7)。并在北京大兴国际机场进行了试验研

究^[29]，结果表明无人驾驶车辆控制系统可以有效管控高填方施工。

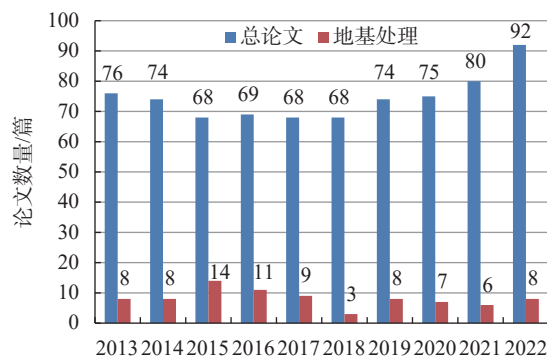


图6 《岩土工程技术》发表地基处理论文统计图



图7 高填方机场压实质量实时监控系统^[28]

陈镇金^[30]采用B/S技术构架+GPS实时定位+数据传输+云服务器等技术对振动压实碾压进行智能监控，提出了振动压实碾压遍数和碾压轨迹算法模型和分层压实填筑自动算法模型，研发了适用于路基施工振动压实的智能化检测系统。

滕飞等^[31]在马尔代夫国际机场改扩建工程中对珊瑚砂地基处理采用GNSS空间卫星群、GNSS地面差分基准站和振动压实机械智能控制组件进行协同工作，用以管理、控制珊瑚砂地基压实过程质量。

地基改良是地基处理常用的方法，对膨胀土地基改良除了掺入固化剂粉煤灰、石灰、水泥外，黄飞龙等^[32]通过试验研究提出对膨胀潜势为中等的膨胀土，掺入砂石的颗粒粒径越大，膨胀土的胀缩性改变得越好，砂石最优的掺量会变小。改良膨胀土细砂的最优掺量是40%，中砂的最优掺量是30%，碎石的最优掺量是25%。裴沛雯^[33]、许英姿等^[34]通过室内试验研究提出对膨胀潜势为中等的膨胀土，初始含水率为最优含水率，碎石掺石量在25%可以达到很好的改良效果。

《建筑地基处理技术规范》对换填材料进行了规定，换填材料常根据场地周边土料分布，选择范围大，选择换填材料应考虑材料遇水崩解特性，王芳等^[35]

在室内研究了不同风化程度泥岩填料力学性能,指出浸水能显著降低泥岩的承载能力,对强风化泥岩表现尤为显著。李建望^[36]指出,由于周边范围内土石条件全部为千枚岩和泥岩,某路堤部分基床底层及以下全部采用全一弱风化软岩岩块填料,该填料遇水易崩解,形成细颗粒,细颗粒容易被水渗流带走,形成架空,线路运营后产生沉降变形大,可能会给线路运营带来安全隐患,采用强夯补强路基可以达到消除隐患的目的。粉煤灰也是常用的填料,使用粉煤灰时应考虑其含有的重金属对生态的危害^[37],应选择对生态没有危害的粉煤灰作为填料或添加剂。

2.2 预压地基

预压地基是采用排水固结的方法,使软土地基排水,土体固结,提高承载力,减少未来加载后软土地基沉降量,它适应于处理淤泥质土、淤泥、吹填土等饱和黏性土地基,按处理工艺可分为堆载预压、真空预压、电渗法、动力固结及其组合处理方法,如堆载预压+真空预压、强夯+堆载预压、电渗法+真空预压^[38]、强夯+电渗法^[39]、真空预压+电渗降水+低能量强夯^[40]等。

刘松玉等^[41-42]通过将气压劈裂与真空预压法相结合(见图8),提出了劈裂真空法加固软土地基,使软土的加固达到30m深度,劈裂真空法可以提高真空荷载向深层软土的传递,加速软土固结,缩短工期。

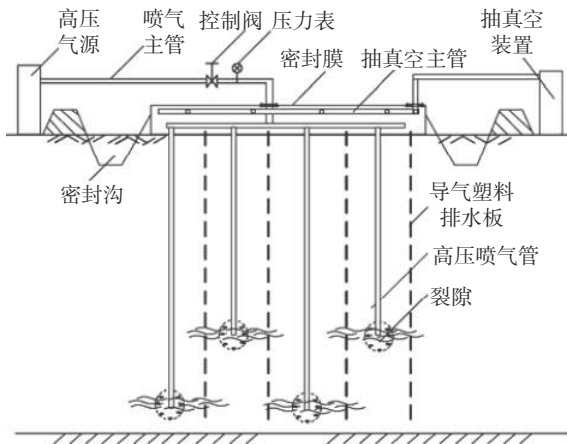


图8 气压劈裂加固软土示意图^[41]

杨子江等^[43-44]对真空预压技术进行改进,提出增压式真空预压法(见图9),在塑料排水板间设置增压管待常规真空预压固结度达40%后,采用间歇式增压施工,利用压缩气体扰动一定深度范围内的土体,打破抽真空时土体的相对平衡状态,使该范围内更多的孔隙水向周围排水板移动,再利用真空负压将该部

分水排出,从而加速软土地基固结,使真空预压的加固效果得到了明显改善。

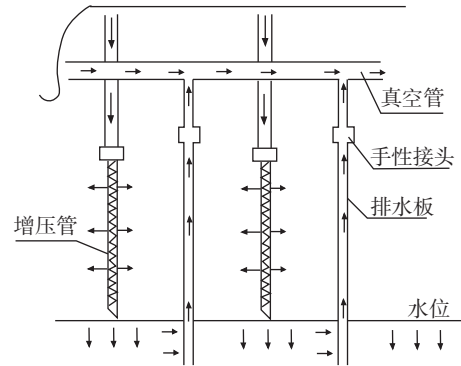


图9 增压式真空联合堆载排水过程^[39]

雷华阳等^[45]、刘景锦^[46]为解决吹填超软土加固中采用真空预压法所产生的淤堵问题,在室内试验和数值模拟分析基础上,提出了交替式真空预压法处理吹填超软土的地基加固技术(见图10)。研究表明,交替式真空预压法抑制淤堵形成及“土柱”现象非常有效,且土体加固效果更加均匀。

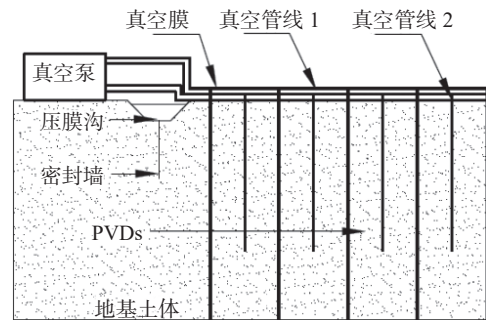


图10 交替式真空预压法处理吹填超软土的地基加固机理^[46]

吴慧明等^[47-48]提出了高压气溶胶解构排水固结技术,该技术是在已经设置塑料排水板的软土中增加一道注射高压气溶胶旋喷工序(见图11),分层水平旋喷注射高压气溶胶,高压气溶胶在施工过程中及施工后一定时间内,孔隙水压力急剧下降,土体排水速度加快,处理软土深度更深,从而缩短工期、减少工后沉降。

蔡袁强等^[49]、史 吏等^[50]提出了吹填淤泥真空预压防淤促排处理技术(滤膜孔径优化提升排水体性能、“一板两用”增压式真空预压增强真空渗流场、絮凝-真空预压改良土性),缓解了排水体的淤堵,提高了软土固结速率,加速了吹填淤泥软土处理,增强了加固处理效果。

低位真空预压法是天津市水力科学研究院研发的软土真空预压技术,真空预压层埋在吹填土的下部,加固下部软土地基时也可完成吹填土加固^[51-53]。

此技术利用吹填土地层本身具有的封闭功能,可在吹填土地层下软土内得到 80 kPa 以上的真空度。

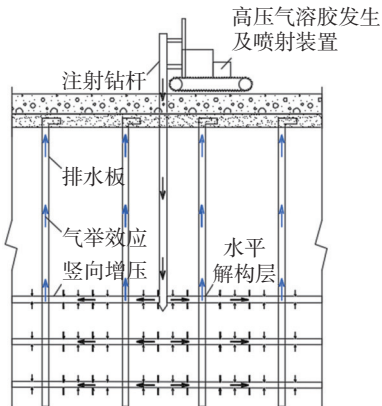


图 11 高压气溶胶解构排水法工作机理示意图^[48]

2.3 强夯地基

强夯是目前常用的地基处理方法,具有价格低、环保、节能、低碳、处理深度大、工效高等特点,不仅用于杂填土、素填土、湿陷性土和新近沉积土地基处理,还与其他方法(如降水、插排水板、真空预压等^[54-55])结合处理软土地基。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[27]、《钢制储罐地基处理技术规范》(GBT 50756—2012)^[56]规定了各夯击能量下不同地基加固的有效深度。据搜狐新闻(2017年9月20日)报道,大连新机场采用了 30000 kN·m 超高能级强夯。

对于高填方工程,如机场工程、围海造地工程、挖山填沟工程等,由于回填土厚度大,常采用高能级强夯。董炳寅等^[57]将夯击能在 10000~18000 kN·m 的称为高能级强夯,并给出了夯击能与不同土层的有效加固深度曲线(见图 12)。王铁宏等^[58]根据研究提出高能量强夯有效加深度。尽管规范和不同研究者给出了强夯有效加固深度,考虑到土性的不同,实际工程中应根据土层情况采用取土室内试验、动力触探试验、标准贯入试验、瑞利波的综合方法确定强夯的有效加固深度。

詹金林^[59]采用 GPS 测量,对强夯施工过程中夯锤的位置、落锤高度、夯击范围、收锤标准、夯击遍数等进行动态监测,实现了强夯施工过程的信息化管理。高志斌等^[60]在北京新机场飞行区工程中,研发了强夯施工自动控制技术,该技术可以实现强夯施工过程自动定位、记录夯沉量、夯击遍数、判定强夯施工质量,提高了施工效率。刘全等^[61]研发了基于多元感知的强夯智能监测系统和施工质量智能监测装备,实现了夯机和夯坑的定位、夯坑位置、夯沉量

和夯次智能监测,并在实际工程中进行了应用。朱飞虎^[62]在天津港 C 段智能化集装箱码头工程中自动记录夯击能、夯点位置、夯沉量、夯击次数等数据,并将数据存入信息化控制系统中,提高了强夯的动态管控水平和施工质量。

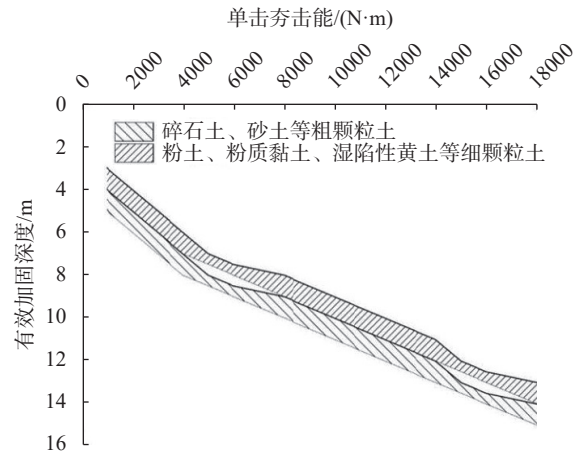


图 12 不同强夯能级与有效加固深度关系曲线^[57]

要重视强夯后场地的地面排水问题,尤其是场地排水不畅造成降雨下渗等因素使地基土浸水,浸水后地基土承载力和压缩模量降低,地基产生不均匀沉降,形成质量事故^[63-66],造成很大的经济损失。据人民网(2022年7月30日)报道,重庆某项目 10 栋洋楼,建于高填方强夯地基上,雨季建筑物加速沉降,花费 10 亿拆除重建。

2.4 复合地基

复合地基技术在国内各领域建设中得到广泛应用,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[27]和《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)^[67]对复合地基类型进行了规定,但实际工程中除了规范规定的复合地基外还有其他的复合地基,本文主要对近年来部分新的工法进行介绍。

2.4.1 振杆密实法

振杆密实法是由刘松玉团队研发的十字形气动振动翼及整套施工装备,可用于消除黄土的湿陷性^[68-70]、消除土体液化^[71-74]、提高填土地基的承载力^[75]。该方法无需额外添加其他填料,调整振动频率使系统与土体产生共振,密实土体,加固深度大、施工方便,对环境振动影响小。2019年,东南大学与江苏盛泰建设工程有限公司联合研发了智能化振杆密实法监控系统与施工设备^[76],实现了振杆密实工艺施工过程中的自动化监测、智能化管控。

2.4.2 无振动挤密法

黄土地区的隧道内常存在湿陷性黄土,目前的

黄土地基处理方法不适合在狭小空间内对黄土湿陷性处理,根据隧道内特殊施工地基处理要求,中铁西北科学研究院有限公司研发了无振动挤密处理技术,该技术采用竖向静压、横向静压、竖向倒拔的方法处理洞内黄土的湿陷性^[77-80],处理效果较好。

2.4.3 智能化双向搅拌桩技术

双向搅拌已经大量用于软土地基处理^[81-84],是国内搅拌桩的主流施工方法,能够智能化管控双向搅拌的施工质量,提高施工水平。近年来,许多双向搅拌智能化研究^[85-90]中提出了基于物联网技术,对搅拌桩施工过程进行监测和记录,实现了对搅拌桩施工过程的质量控制。东南大学与南京路鼎搅拌桩特种技术有限公司合作研发了双向变截面搅拌桩智能化管控系统^[91],基于施工过程中电流值、深度、钻头压力和已有的勘察报告资料等,对土层进行精准识别,实现变频喷浆,当地层与已有资料不符合时,进行智能管控,调节施工参数,确保水泥浆与土体充分搅拌,实现了双向搅拌桩智能化施工。采用物联网可实现多个施工现场的施工质量远程监控,根据施工参数可对完成的单桩即时进行施工质量评估,对不合格桩进行报警处理。在施工完成后系统可生成施工报表、施工平面图和施工质量评估报告。

2.4.4 大直径 CFG 桩技术

CFG 桩地基处理技术已在国内广泛应用,在铁路、公路、储油罐、民用建筑与工业建筑、市政工程等领域,取得了较好的经济效益和社会效益。CFG 桩地基处理常用的桩径为 400 mm,某些超高层建筑由于设计要求承载力高,变形控制严格,常采用大直径素混凝土桩(桩体直径 800~1500 mm)进行地基处理,康景文等^[92]介绍了在成都 ICON 云端项目,采用直径 1000~1300 mm,桩长 9.00~19.00 m 的素混凝土桩进行地基处理,处理后复合地基承载力最大达到 1500 kPa,满足设计要求。大直径素混凝土桩在其他工程^[93-99]也有应用,经载荷试验,复合地基承载力和变形满足设计要求。王志祥^[100]、王丽娟^[101]、彭涛等^[102]、聂源^[103]、刘洪波^[104]、胡熠等^[105]对大直径素混凝土桩受力特性、荷载传递机理、桩土应力比等进行了研究,发现部分工程,桩端为中等风化的岩石在达到设计荷载时,桩端承受的荷载比较小,说明桩的荷载大部分由摩阻力承担,桩端远没有发挥其承载力,大直径素混凝土桩具有一定的安全度。吴平等^[106]发现大约在桩径的 2 倍范围内均出现了负摩阻。

某些工程为了更好地发挥粗颗粒土的侧阻力和

端阻力,采用后压浆 CFG 桩^[107-108],采用长螺旋钻孔压灌混凝土,振动插入压浆管,在桩体强度达到一定值后进行后压浆,控制压浆量和压浆压力直到满足设计要求,经载荷试验检测,单桩承载力和单桩复合地基承载力均满足设计要求。连镇营等^[109]介绍,大连某工程原设计采用人工挖孔扩底桩,施工过程中由于地下水影响和土层软弱原因无法进行扩底成桩。经分析论证后采用后注浆大直径刚性桩复合地基,经载荷试验检测和建筑物的沉降观测,说明了采用后注浆大直径刚性桩复合地基是成功的。

杨丽^[110]介绍了某新建 350 km/h 高速铁路线路中采用变径倒锥台阶型长螺旋钻孔成孔 CFG 桩,认为该桩型比常规 CFG 桩具有成桩效率高、单桩承载力高的特点,可以在工程中应用。

余辉^[111]在长螺旋钻机和混凝土泵车上安装传感器实时采集 CFG 桩施工过程中的参数信息,并将每根桩的施工参数信息实时上传至服务器,实现了 CFG 桩成桩质量过程控制,项目管理人员可在系统上查看每根桩的施工参数信息。

2.4.5 劲性桩复合地基

劲性桩是由外围的水泥土桩和内插预制桩芯桩构成,最早由中国建筑科学研究院地基所刘金砺提出。该桩型具有承载力高、无泥浆排放污染环境特点,已进行了荷载传递机理、承载力和变形研究^[112-120],并成功应用于工程中,解决地基承载力和变形问题^[121-125]。为适应劲性复合桩施工质量管控,刘金波等^[112]在文中介绍了邓亚光研发出智能化、信息化劲性复合桩机及施工管理平台。该大功率智能搅拌装备具有勘察、物探功能,层层反压(每 15 mm 一层一层螺旋叶片自攻反压力 30 t+电机钻杆自重 15 t+钢丝绳链条加压 100 t)挤扩含敏感材料的水泥土桩使其致密快速固结;采用大吨位智能压桩机,超载预压芯桩,解决芯桩预沉降,也可检验复合桩承载力。信息管理平台能通过分析电动机电流、地勘报告的静力触探结果、土工试验结果及时掌控实际土质情况和成桩质量情况,根据地层情况通过控制主机及时调整供料机和桩机的施工参数,对施工数据(包括喷灰量、喷浆量、搅拌速度、搅拌均匀性、反压力、提升速度等)及时进行记录、统计,并通过云平台管理系统展示数据。

2.4.6 多桩型复合地基

由于我国地域辽阔,各地岩土层分布性质不同,尤其是特殊土分布广泛,造就了地基处理的多元化和本土化,各种地基处理方法都有其适用范围,多种地

基处理方法的组合可以更好地发挥各种地基处理方法的特点。组合型地基处理不存在固定的模式,应根据设计条件要求的地基承载力、变形情况,考虑场地地基土性质,地基处理对周边环境影响和当地施工水平,选择合理的地基处理工艺组合,按变形控制原则进行地基处理设计,选择适宜的桩端持力层,确保地基处理满足设计要求,并具有安全、绿色、低碳、经济的特点。

阎明礼等^[126]对多桩型复合地基设计方法进行了探讨,介绍了多桩型复合地基承载力和变形计算方法。梁胜增等^[127]将夯实水泥土桩与 CFG 桩组合,夯实水泥土桩提高桩间土承载力,CFG 桩控制地基变形,对存在液化土层地基内,可采用碎石、桩砂石桩处理液化地层,消除地基土液化,采用 CFG 桩提高地基土承载力,控制地基变形^[128-132]。针对深厚软土层或粉煤灰填土,可以采用水泥搅拌桩与 CFG 组合型桩进行地基处理^[133-135]。对于回填场地,采用强夯处理回填土,消除其湿陷性,处理后填土达到中密,在填土地基上建高层建筑时^[136-137],采用 CFG 桩提高承载力,控制地基土变形。对于回填土也常采用夯扩桩挤密填土,采用 CFG 桩提高承载力,控制地基土变形^[138],对回填土地基处理,要考虑水(地下水位上升、管道漏水、雨水下渗等)对处理后回填土的影响。对于浅部存在好的桩端持力层,常采用长短桩进行地基处理^[139-143],发挥短桩提高承载力,长桩控制变形的特点,使地基处理效果更加安全可靠。对地基土为湿陷性黄土,常采用强夯、灰土挤密桩或水泥土挤密桩消除黄土湿陷性,采用 CFG 桩提高承载力,控制地基变形^[144-146]。

2.4.7 复合地基的智能化设计

复合地基的智能化设计远远落后于工程实践,部分研究生在导师的指导下探讨了复合地基的智能化设计,但复合地基的智能化设计仍没有应用于实际工程中。

焦健^[147]研究了 CFG 桩复合地基承载力的影响因素,构建了 CFG 桩复合地基设计的神经网络模型。根据搜集到的工程资料,对神经网络进行训练,提取了 CFG 桩复合地基承载力和变形值与影响因素的函数关系。以神经网络模型为基础,在桩径为定值时,在满足承载力和变形条件下,用最小二乘法得到了桩长、置换率的函数关系曲线,利用模拟退火算法搜索出在满足承载力和变形条件下确定的合理桩长,用合理桩长确定的成本为最优方案。

邓兴波^[148]在了解 CFG 桩复合地基设计内容的

基础上,利用光滑样条非参数回归法、采用 MATLAB 优化工具箱优化算法、BP 神经网络、模糊层次分析法等理论,研发了 CFG 桩复合地基智能化设计系统。

陈新岩^[149]以水泥土搅拌桩复合地基、CFG 桩复合地基、多桩型复合地基(碎石桩+CFG 桩)为案例,学习了规范中 3 种类型复合地基设计内容,对优化设计的关键参数桩径、桩长、桩间距进行了分析,分别建立了 3 种复合地基处理时优化设计的数学模型,利用 GA 遗传算法,得到 3 种复合地基数学模型的最优解;应用灰色模糊综合评价法,建立了复合地基处理的综合评价模型,采用 MATLAB2016b 程序,编写了智能综合评价分析系统,通过 1 个工程实例,验证了该方法的适用性。

牛顺生^[150]考虑地基处理设计时变量为桩长和置换率,约束函数为复合地基的承载力、变形、软弱下卧层强度,建立了长、短桩地基处理的优化设计的数学模型。依据模拟退火算法和遗传进化算法提出了组合桩智能优化方法,并编制了优化设计程序。根据 2 个工程实例计算结果,可达到优化设计的目的。

2.5 微生物注浆(MICP)

近年来发展起来的微生物注浆加固(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 简称 MICP)技术是向土中灌注菌液和胶结液,利用微生物矿化作用在土颗粒间生成 CaCO_3 , CaCO_3 以包裹、吸附和胶结细小颗粒填充在土颗粒内,以改善土体的物理力学性质, MICP 的微生物矿化机理示意图如图 13。

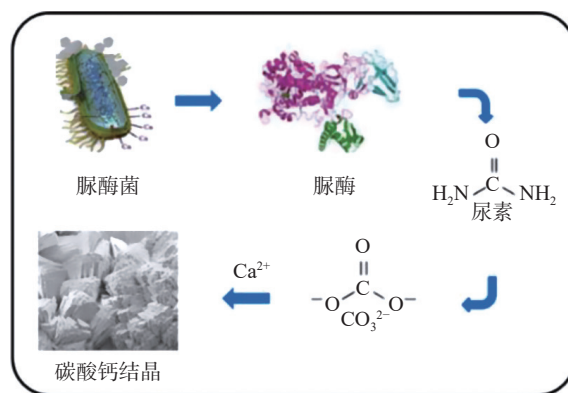


图 13 MICP 的微生物矿化机理示意图^[151]

目前 MICP 技术在实验室内进行了很多研究^[151-152],张宽等^[153]运用菌液和胶结液混合施用的方法,采用喷洒法将混合液喷洒到土体表面,对黏性土进行 MICP 处理,能够提高黏性土结构强度。Andres 等^[154]在砂土中采用饱和灌浆法灌入微生物浆液和非饱和入渗法渗入微生物浆液两种方式,采用无侧

限抗压强度试验和扫描电子显微镜研究两种手段研究所产生的结果,结果表明入渗法效果比灌浆法稍好。许朝阳等^[155]采用 MICP 技术对粉土进行了改性,采用扫描电镜(ESEM)和能量弥散 X 射线(EDX)能谱分析发现,碳酸钙以包裹、吸附和胶结细小颗粒型式填充在粉土颗粒的孔隙内,微生物加固可改善粉土的渗透性,提高抗压强度。赵志峰等^[156]研究了微生物加固海相粉土的情况,结果表明环境温度影响微生物的活性,对微生物加固效果影响显著。土样中氯化盐含量过高时会抑制微生物细菌活性,对 CaCO_3 的析出有很大影响,从而影响加固效果。方祥位等^[157-158]采用 MICP 技术对吹填的珊瑚砂加固进行了研究,发现固化效果较好,固化体强度较高,干密度增加,抗压强度增大,渗透性降低,生成的 CaCO_3 可完整包裹珊瑚砂颗粒。刘汉龙等^[159]在吹填的珊瑚砂地基现场进行了微生物加固试验研究,结果表明:采用回弹仪检测的加固体表面强度不小于 10 MPa,加固地基深度可达 70 cm。一些学者^[160-162]对 MICP 技术加固砂土的动力性质进行了研究,发现加固体抗液化能力有所提高。MICP 技术尽管绿色、环保,对土体加固有效果,但距离大面积的工程应用还有许多需要研究的问题。

3 展望

随着国家工程建设发展和“一带一路”工程项目的推进,岩土工程将面临更多更复杂的地基处理问题,目前地基处理的工程实践早于地基处理理论,希望未来研究机构与生产单位联手,加强地基处理理论、工艺、工法研究和工程经验的总结,建议在以下方面进一步加强研究:

(1)践行“双碳”战略,聚焦地基处理新技术、新工艺的绿色、低碳、环保开展研究。

(2)应用 BIM、大数据、云计算、ChatGPT、AI 大模型等技术,建立地区地基处理模型,形成智能化地基处理设计系统、智能化地基处理施工管控系统。

(3)加强多桩型地基处理理论、加固机理等方面的研究,加强沉降观测,加强地基基础变形控制技术研究,重视变形控制设计的地方经验积累。

(4)加强深厚软土地基处理技术和工后沉降研究,解决工程项目中遇到的深厚软土工后沉降问题。

(5)加强 MICP 技术应用研究,尽快应用于工程实际。

(6)对于近年来应用的地基处理新工艺、新方法,尽快总结经验,将其纳入技术规程,更好地为工程建设服务。

参 考 文 献

- [1] 化建新,张苏民,黄润秋,等.城市环境与地质问题研究现状与发展[J].工程地质学报,2006,14(6):739-742.
- [2] 顾宝和.岩土工程典型案例述评[M].北京:中国建筑工业出版社.2015.
- [3] 张 炜,张继文,于永堂.第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——黄土高填方关键技术问题与工程实践[J].岩土工程技术,2016,30(1):12-19,38.
- [4] 高建中.延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践[M].《延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践》编委会.北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [5] 李松微.兰州新区大厚度回填黄土区地基处理方法研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.
- [6] 刘 宏,李攀峰,张倬元,等.山区机场高填方地基变形与稳定性系统研究[J].地球科学进展,2004(S1):324-328.
- [7] 闵卫鲸.绵阳机场高填方强夯加固工程实践[J].路基工程,2006,124(1):34-36.
- [8] 朱才辉,李 宁,刘明振,等.吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):293-301.
- [9] 李公水,任 剑,刘 宏.康定机场冰碛土特性及地基处理[J].地质灾害与环境保护,2007(4):35-39.
- [10] 王庭博,宋德朝,顿志元.高原机场冰碛土地基强夯处理及试验检测[J].岩土工程技术,2012,26(3):152-154.
- [11] 甘厚义,焦景有,金幸初,等.贵阳龙洞堡机场大块石填筑地基的强夯处理技术[J].建筑科学,1995(1):17-26.
- [12] 马新岩,张合青,韩黎明.分层沉降应变率分析在昆明长水机场的应用[J].公路交通科技,2013,30(1):45-49,73.
- [13] 侯 森,任 庚,韩黎明,等.承德机场高填方地基工后沉降预测[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):279-284.
- [14] 任佳丽,龚 泉,姜志全,等.神农架机场高加筋土挡墙的设计与实践[J].长江科学院院报,2014,31(3):122-127.
- [15] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J].建筑,2023,(2):57-69.
- [16] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J].建筑,2024,(2):46-59.
- [17] 化建新,闫德刚,赵杰伟,等.第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——地基处理综述及新进展[J].岩土工程技术,2015,29(6):285-300.
- [18] 第九届全国岩土工程实录交流会:岩土工程实录集[C].北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [19] 曹瑞钠,张海东,刘 琦.沈阳某高填方场区岩土工程施工勘察实录[C]//《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.
- [20] 文光菊,何平,张顺斌,等.重庆国际博览中心地质健康检查岩土工程实录[C]//《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.
- [21] 李建光,王笃礼,刘少波.马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程岩土工程实录[C]//《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.
- [22] 中国科学院南沙综合科学考察队.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
- [23] 段志刚,刘成田,夏丽华.水域浅层地震反射波在珊瑚岛礁地层勘察中的应用[J].岩土工程技术,2016,30(3):113-117.
- [24] 邹桂高,王笃礼,王祎鹏.印度洋珊瑚岛礁地基动力特性测试分析[J].岩土工程技术,2019,33(4):240-244.
- [25] 余东华,黄俊文,贺迎喜.强夯联合振动碾压加固珊瑚礁回填料地基[J].中国水运(下半月),2015,15(2):283-285.
- [26] 莫振林,袁永强,彭小军,等.某高层建筑物综合加固纠偏技术工程实录[C]//《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.
- [27] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].
- [28] 姚仰平,丛易敏行,罗汀,等.山区高填方机场的智能建造与安全运营[J].科技导报,2018,36(17):106-110.
- [29] 姚仰平,阮杨志,张星,等.机场高填方的压实质量实时监控研究[C]//2018全国岩土工程师论坛文集.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [30] 陈镇金.路基施工振动压实智能化检测系统及应用研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [31] 滕飞,杨庆德,张凤林,等.珊瑚砂地基连续智能压实控制研究[J].施工技术,2019,48(4):44-47.
- [32] 黄飞龙,董柏林,许英姿.砂石粒径对改良膨胀土的影响研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1709-1713,1718.
- [33] 裴沛雯.碎石改良广西膨胀土膨胀性试验研究[D].南宁:广西大学,2017.
- [34] 许英姿,黄政棋,颜日葵,等.碎石改良膨胀土模型试验研究[J].科学技术与工程,2021,21(19):8145-8151.
- [35] 王芳,刘思源,刘凯,等.不同风化程度泥岩填料力学性能试验研究[J].安徽工程大学学报,2023,38(2):64-70.
- [36] 李建望.成型软岩填料路堤强夯补强现场试验研究[J].岩土工程技术,2011,25(5):244-248.
- [37] 张治国,谭雨柠,胡友彪,等.宁东能源化工基地粉煤灰重金属赋存特征及生态风险评价[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):144-152.
- [38] 王军,张乐,刘飞禹,等.真空预压-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014(S2):4181-4192.
- [39] 符洪涛,王军,蔡袁强,等.低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):612-620.
- [40] 刘凤松,刘耘东.真空-电渗降水-低能量强夯联合软弱地基加固技术在软土地基加固中的应用[J].中国港湾建设,2008,28(5):43-47.
- [41] 刘松玉,韩文君,章定义,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.
- [42] 刘松玉,刘宜昭.江苏地基处理技术创新与应用[J].江苏建筑,2021(3):11-15,29.
- [43] 杨子江,余江,刘辉,等.增压式真空预压施工工艺研究[J].铁道标准设计,2011,31(8):26-31.
- [44] 沈宇鹏,冯瑞玲,余江,等.增压式真空预压处理软基的加固机理[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):792-797.
- [45] 雷华阳,李宸元,刘景锦,等.交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(10):2112-2125.
- [46] 刘景锦.超软吹填土地基真空预压加固改进机理及沉降预测研究[D].天津:天津大学,2017.
- [47] 吴慧明,赵子荣,林小飞,等.主动排水固结法气举降水效应模型试验研究[J].岩土力学,2021,42(8):2151-2159.
- [48] 吴慧明,龚晓南,林小飞,等.高压气溶胶解构排水固结法处理软基现场试验研究[J].地基处理,2020,2(2):98-104.
- [49] 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.
- [50] 史吏,胡东东,蔡袁强,等.增压式真空预压吹填淤泥孔压实时响应及加固机制初探[J].岩土力学,2020,40(1):185-193.
- [51] 顾立军,赵维江,刘小川.低位真空预压专利技术在工程建设中的应用[J].水利规划与设计,2009(4):62-63,67.
- [52] 方子杰,应舒.低位真空预压法吹填土软基加固技术的应用[J].港工技术,2011,48(1):41-43.
- [53] 冯伟骞.低位真空预压加固技术应用研究[D].天津:天津大学,2012.
- [54] 米晓晨.轻型井点降水联合强夯法加固吹填土地基[J].中国港湾建设,2017,37(9):54-57.
- [55] 刘永林.真空预压联合强夯法处理软土地基的效果分析[J].施工技术,2016,45(S1):102-106.
- [56] GB/T 50756—2012 钢制储罐地基处理技术规范[S].
- [57] 董炳寅,水伟厚,秦劭杰.中国强夯40年之技术创新[J].地基处理,2022,4(1):1-16.
- [58] 王铁宏,水伟厚,王亚凌.对高能级强夯技术发展的全

- 面与辩证思考[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 86-89.
- [59] 詹金林. 基于 GPS 的强夯施工信息管理系统研究[J]. 施工技术, 2012, 41(368): 109-111.
- [60] 高志斌, 吕雪松, 刘少宁. 北京新机场强夯施工自动控制关键技术研究[J]. 施工技术, 2020, 49(23): 120-125.
- [61] 刘全, 张宏阳, 邬志, 等. 多元感知的强夯施工质量智能监测装备系统[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 135-146.
- [62] 朱飞虎. 简析信息化管控系统在地基强夯施工中的应用[J]. 港工技术, 2022, 59(S1): 98-101.
- [63] 刘金波, 张雪婵, 王也宜, 等. 山区高填方地基事故预防与处理[J]. 施工技术, 2017, 46(10): 117-121.
- [64] 孙威, 刘金波, 张寒, 等. 西南某炼油厂强夯法处理填土地基事故分析[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 23-28.
- [65] 陈娟娟, 李思佳. 某山区深厚填土强夯地基质量事故原因浅析[J]. 化工矿产地质, 2024, 46(2): 187-192.
- [66] 李冰, 张寒, 毛安琪, 等. 某强夯法处理填土地基事故分析[J]. 工程质量, 2023, 41(S1): 110-114.
- [67] GB/T 50783—2012 复合地基技术规范[S].
- [68] 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.
- [69] 刘松玉, 杜广印, 毛忠良, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1377-1383.
- [70] 曾彪, 章定文, 刘松玉, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土施工参数确定现场试验[J]. 岩土工程学报, 2021(Z2): 229-232.
- [71] 程远, 付宇鹏, 郜新军. 基于能量耗散原理的振杆密实可液化地基范围研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 55-62.
- [72] 程远. 振杆密实法加固可液化地基理论与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
- [73] 程远, 韩杰, 朱合华, 等. 振杆密实法加固粉土地基效果试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 63-70.
- [74] 杜广印, 刘松玉, 任蓓蓓, 等. 十字形振动翼共振法在处理可液化地基中的应用[C]//中国地质学会工程地质专委会, 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心), 山西省国土资源厅. 2014年全国工程地质学术大会论文集. 东南大学岩土工程研究所, 2014: 4.
- [75] 程远, 杨晔, 时刚. 振杆密实法处理杂填土地基试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 99-108.
- [76] 李亚霖, 杜广印, 毛峥嵘, 等. 智能化振杆密实法加固海陆交互相液化地基试验研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 690-698.
- [77] 贾黎. 湿陷性黄土地基的无振动挤密处理新技术研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9): 48-51.
- [78] 孙兵. 无振动挤密地基处理技术在湿陷性黄土隧道中的应用[J]. 铁道建筑, 2017(3): 70-72.
- [79] 齐甦, 吴江, 吴晓辉, 等. 高速铁路湿陷性黄土地基无振动挤密处理技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(2): 79-83.
- [80] 韩龙武, 米维军, 徐安花, 等. 隧道内湿陷性黄土地基加固处理现状与新技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 79-83.
- [81] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 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.
- [82] 祖超. 双向水泥搅拌桩法在市政道路软基加固中的应用实践[J]. 工程技术研究, 2023, 136(8): 55-57.
- [83] 时洪斌. 海相软土地区铁路深长双向搅拌桩复合地基加固效果分析[J]. 铁道建筑技术, 2021(3): 140-146.
- [84] 贾秉志, 朱进军, 邵勇. 双向搅拌桩喷桩在地下综合管廊地基处理中的应用[J]. 江苏建筑, 2019(2): 85-87.
- [85] 朱志铎, 万瑜, 刘松玉, 等. 双向水泥土搅拌桩智能化施工技术研发及实践[J]. 地基处理, 2022, 4(6): 451-458, 465.
- [86] 万瑜, 朱志铎, 高波, 等. 水泥土搅拌桩智能化施工控制研究[J]. 施工技术, 2019, 48(13): 43-47.
- [87] 赵明时. 水泥土双向搅拌桩智能化施工的研究与应用[J]. 港工技术, 2021, 58(2): 104-108.
- [88] 于连娜, 边超. 水泥土双向搅拌桩自动智能化施工研究与应用[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2006-2008.
- [89] 赵汉文, 吴国萌. 智慧管控下水泥土双向搅拌桩质量控制分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(19): 63-65.
- [90] 王怀才, 邹国春, 邹昕圻, 等. 智能化双向搅拌粉喷桩技术在公路软土地基处理中的应用与研究[J]. 科学技术创新, 2023(25): 172-175.
- [91] 龚晓南, 杨仲轩. 地基处理新技术、新进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [92] 康景文, 毛坚强, 郑立宁, 等. 基于工程实践的大直径素混凝土桩复合地基技术研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 188.
- [93] 张军新, 颜光辉, 符征营, 等. 半岛城邦三期含膏泥岩溶蚀孔洞地基综合处理工程实录[C]//第七届全国岩土工程实录交流会. 2015.
- [94] HUA J X, CHEN H, ZHANG D, et al. Study on Properties of CFG Pile Composite Foundation with Large Diameter[C]// Engineering Geology for a Habitable Earth: IAEG XIV Congress 2023 Proceedings, Chengdu, China. Springer, 2024.
- [95] 高尊华. 某工程大直径刚性桩复合地基设计及沉降计算方法探讨[J]. 地基与基础, 2020, 47(7): 153-155.
- [96] 李勇, 李吉辉. 浅谈大直径刚性桩复合地基处理技术应用[J]. 四川建筑, 2016, 36(6): 216-217, 219.
- [97] 孔文健. 浅析大直径素混凝土桩复合地基设计和施工以及监测的实施——以四川省成都市简阳三岔镇工程为例[J]. 科技创新导报, 2019, 16(28): 1-4.
- [98] 许万强. 岩溶地区大直径素混凝土桩复合地基处理工

- 程实例[J]. 福建建筑, 2016, 215(5): 60-63.
- [99] 陈耀光, 连锁营, 彭芝平, 等. 大直径桩复合地基的工程实践[J]. 建筑科学, 2006(5): 66-67.
- [100] 王志祥. 成都地区人工挖孔素混凝土桩复合地基受力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [101] 王丽娟. 成都地区大直径素混凝土桩复合地基受力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [102] 彭涛, 邓安. 成都膨胀土地区某大直径刚性桩复合地基现场原位测试[J]. 施工技术, 2018, 47(7): 97-101.
- [103] 聂源. 大直径素混凝土桩复合地基承载及变形特性研究[J]. 四川建筑, 2020, 40(5): 138-141.
- [104] 刘洪波. 大直径素混凝土桩复合地基设计计算理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [105] 胡熠, 杜超, 章学良, 等. 软岩素混凝土桩复合地基承载特性现场试验研究[C]//第七届全国岩土工程实录交流会: 岩土工程实录集. 2015.
- [106] 吴平, 董馨. 成都地区大直径素混凝土桩复合地基筏板受力特性研究[J]. 安徽建筑, 2015, 22(5): 86-89.
- [107] 李自伟, 任东志, 齐保卫, 等. 北京朔黄发展大厦后压浆 CFG 桩施工技术[J]. 施工技术, 2009, 38(9): 91-92.
- [108] 施帅健, 陆建飞. CFG 桩复合地基后压浆施工技术[J]. 科技资讯, 2014, 12(12): 33-34.
- [109] 连锁营, 彭芝平, 鲁克宇, 等. 后注浆刚性桩复合地基的工程实践[J]. 西北地震学报, 2011, 33(B8): 321-325.
- [110] 杨丽. 新型 CFG 变径倒锥台阶型长螺旋钻孔桩在高速铁路地基加固中的应用和造价分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(6): 49-52.
- [111] 余辉. 浅谈 CFG 桩基施工信息化技术[J]. 科技资讯, 2019, 17(26): 6-7.
- [112] 刘金波, 柳致富, 邓亚光, 等. 我国岩土工程施工技术的成就——复合桩[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(13): 69-75, 112.
- [113] 李立业, 刘松玉, 章定文, 等. 劲性复合桩承载力计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 43-47.
- [114] 朱锐, 周峰, 陈廷柱, 等. 劲性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3577-3586.
- [115] 包华, 洪俊青, 夏胞刚, 等. 劲性复合桩外界面侧阻强化效应试验研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(1): 107-113.
- [116] 李俊才, 张永刚, 邓亚光, 等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3068-3076.
- [117] 朱锐, 周峰, 盛强, 等. 水泥掺入量对劲性复合桩界面剪切特性的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 546-553, 562.
- [118] 文磊, 刘钟, 马晓华, 等. 粉土地基中劲性复合桩抗压承载特性与荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 511-524.
- [119] 邓亚光, 郑刚, 陈昌富, 等. 劲性复合桩技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(A4): 262-264.
- [120] 丁永君, 李进军, 刘峨, 等. 劲性搅拌桩的荷载传递规律[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6): 530-536.
- [121] 陈邱云. MC 劲性复合桩在水利工程软基处理中的应用与分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(7): 365-367.
- [122] 刘鹏程. 劲性复合桩复合地基沉降和稳定性计算与数值模拟分析[J]. 中国高新科技, 2019, 46(10): 89-92.
- [123] 洪波. 劲性搅拌桩在复合地基中应用效果的评价和研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [124] 李爱国. 劲性桩复合地基在大面积高堆载工程中的应用分析[J]. 安徽建筑, 2022, 29(3): 126-128.
- [125] 王亮, 洪迪思. 劲性桩复合地基在工程中的应用[J]. 土工基础, 2016, 30(1): 13-15.
- [126] 闫明礼, 王明山, 闫雪峰, 等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 352-355.
- [127] 梁胜增, 王泽云, 贾二红. CFG 桩-夯实水泥土桩组合型复合地基在工程中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 53-55.
- [128] 张瑞峰. CFG 桩与碎石桩组合桩复合地基在工程中的应用[J]. 电力学报, 2006, 21(4): 497-499.
- [129] 王贵和, 季荣生, 马孝春. 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基设计理论与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(5): 248-251.
- [130] 李继才, 丛建, 曹军, 等. 振冲碎石桩与 CFG 桩组合桩型复合地基试验研究[J]. 水运工程, 2017, (6): 174-180.
- [131] 张文秀. 刚-柔性桩复合地基在曹妃甸吹填土地地的应用[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(1): 17-21.
- [132] 王步云, 赵秀芹. 砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用(二)[J]. 岩土工程技术, 1997(2): 3-5.
- [133] 李龙起, 罗书学, 陈麟, 等. CMP 与 CFG 组合型桩复合地基荷载作用特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 82-86.
- [134] 殷辰鹏, 张怀静, 孙宏伟. 多桩型复合地基变形数值计算对比实例分析[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(2): 64-69, 87.
- [135] 何长明, 彭功勋. 深厚软土区路桥过渡段差异沉降控制[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(5): 294-298.
- [136] 刘海源, 任华, 李成芳. 基于复合地基的组合地基处理技术在高层建筑填方场地中的应用[J]. 重庆建筑, 2021, 20(S1): 28-30.
- [137] 陈建民. 高层建筑大范围超深回填地基处理技术[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(5): 237-242.
- [138] 赵杰伟, 王志智, 尚润祥. 北京某住宅楼复合地基处理实践[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1): 29-32.

- [139] 赵京文, 化建新. 北京纺机厂高层住宅地基处理方案对比分析 [J]. 岩土工程技术, 1999, 13(2): 12-16.
- [140] 孙燕林. 长短桩复合地基设计计算的探讨 [J]. 岩土工程技术, 2004, 18(5): 252-254.
- [141] 马 骥, 张东刚, 张 震, 等. 长短桩复合地基设计计算 [J]. 岩土工程技术, 2001, 15(2): 86-91.
- [142] 陈天林. 组合桩型复合地基的设计及应用 [J]. 岩土工程技术, 2011, 25(1): 49-52.
- [143] 张丽华, 刘海波. CFG 长短组合桩复合地基全过程沉降规律及预测研究 [J]. 煤炭工程, 2017, 49(2): 121-123, 127.
- [144] 高平军. 大厚度强湿陷性黄土区长短桩地基处理现场试验研究 [J]. 工程勘察, 2022, 50(8): 17-51.
- [145] 袁生昊. 某公寓湿陷性黄土地基处理比较分析 [J]. 安徽建筑, 2023, 30(3): 132-134.
- [146] 刘 挺, 刘东顺, 张平顺, 等. 强夯+CFG 桩复合地基在具有腐蚀性的湿陷性黄土地区的应用 [J]. 建筑结构, 2020, 50(23): 50, 114-117.
- [147] 焦 健. 基于 BP 神经网络的 CFG 桩复合地基智能设计 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2007.
- [148] 邓兴波. CFG 桩复合地基智能优化设计系统开发研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [149] 陈新岩. 复合地基智能综合优选系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [150] 牛顺生. 长短桩组合型复合地基智能优化设计方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [151] 吴创周, 楚 剑, 成 亮, 等. 微生物注浆地基处理技术研究进展 [J]. 地基处理, 2020, 2(3): 181-186.
- [152] 刘汉龙, 肖 鹏, 肖 杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2019, 41(1): 1-14.
- [153] 张 宽, 唐朝生, 刘 博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 306-316.
- [154] ANDRES Q, 张 帅, 程晓辉. 微生物入渗注浆法加固非饱和砂土的研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 28-30, 175.
- [155] 许朝阳, 张 莉, 周 健. 微生物改性对粉土某些特性的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 80-84.
- [156] 赵志峰, 孔繁浩. 土体环境对微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的影响研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 608-614, 692.
- [157] 方祥位, 李晶鑫, 李 捷, 等. 珊瑚砂微生物固化体三轴压缩试验及损伤本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 1-8.
- [158] 方祥位, 申春妮, 楚 剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2773-2779.
- [159] 刘汉龙, 马国梁, 肖 杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究 [J]. 地基处理, 2019, 1(1): 26-31.
- [160] 刘汉龙, 肖 鹏, 肖 杨, 等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38-45.
- [161] 程晓辉, 麻 强, 杨 钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1486-1495.
- [162] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3173-3178.

收稿日期: 2024-08-27