动静联合排水固结技术及应用进展

王德咏[1,2]，陈平山[1]，牛　飞[1]，梁小丛[1,2]，程海迅[1,2]
（1. 中交四航工程研究院有限公司，广东 广州 510230；
2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室，广东 广州 510230）

摘要：动静联合排水固结技术是快速加固深厚软土地基及控制工后沉降的有效方法。系统梳理了该技术理论与工艺的最新进展，剖析了“静力排水系统”与“动力加载”协同作用的内在机制，探讨了联合技术的主流工艺和适配性，分析了技术协同的关键控制参数。结果表明，真空预压为动力加固软土创造条件，动力冲击激发超静孔隙水压力并创造新的排水微通道，能显著加速固结，同时形成一定厚度的硬壳层；动静联合排水固结的关键在于参数的匹配，包括排水条件、上部覆盖层特性、动力加载时机、动力加固方式、工艺参数及时间间隔等；实践案例表明联合技术可将传统真空预压承载力提高 1.5 倍，工期及成本减少 30%~50%以上。对“真空预压同步强夯/振夯”这一前沿方向的技术难点与发展方向进行的探讨，也可为该技术的进一步优化与创新提供参考。

关键词：动静联合；排水固结；真空预压；强夯；硬壳层；孔压消散
中图分类号：U652.2；TU472　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0032-10

Progress in combined dynamic and static drainage consolidation technology and its application

WANG Deyong[1,2], CHEN Pingshan[1], NIU Fei[1], LIANG Xiaocong[1,2], CHENG Haixun[1,2]
(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The dynamic-static combined drainage consolidation technology is an effective method for rapid reinforcement of deep soft soil foundations and control of post-construction settlement. This paper systematically reviews the latest progress in theories and processes of the technology, reveals the internal synergistic mechanism of static drainage system and dynamic loading, discusses the mainstream processes and applicability of the combined technology, and analyzes the key control parameters for technical synergy. Results show that vacuum preloading provides favorable conditions for dynamic reinforcement of soft soil. Dynamic impact induces excess pore water pressure and forms new drainage micro channels, which can greatly accelerate consolidation and generate a crust layer with a certain thickness. The key to dynamic-static combined drainage consolidation lies in parameter matching, including drainage conditions, properties of overlying strata, dynamic loading time, dynamic reinforcement modes, process parameters and time intervals. Engineering cases prove that compared with conventional vacuum preloading, this combined technology can raise bearing capacity by 1.5 times, and cut construction period and cost by 30%－50% or more. Finally, this paper explores the technical challenges and development prospects of the cutting-edge technique of synchronous vacuum preloading combined with dynamic compaction/vibro-compaction, which can provide a reference for the further optimization and innovation of this technology.

Keywords: combined dynamic and static; drainage consolidation; vacuum preloading; dynamic compaction; hard crust layer; pore pressure dissipation

收稿日期：2025-12-03　　**录用日期：**2026-01-05

作者简介：王德咏(1982—)，男，博士，正高级工程师，从事岩土工程地基处理和边坡工程等方面的科研技术工作。

水运工程

随着我国沿海地区经济的飞速发展，土地资源日趋紧张，通过疏浚吹填形成陆域已成为获取土地资源、拓展发展空间的主要手段，如粤港澳大湾区、长三角地区、渤海湾地区。大量新近吹填淤泥地基具有含水量极高、强度极低、渗透性极差、厚度大等特点，属于典型的超软土地基[1]。此类地基无法直接满足港口、机场、物流仓储等工程的承载力与变形要求，必须进行快速、经济、有效的加固处理。

传统的排水固结法(如堆载预压、真空预压)对于超软土处理存在固结速度慢、工期长、浅层加固效果不佳等问题[2]。而单纯的动力固结法(如强夯)在处理饱和软黏土时，容易产生“橡皮土”现象，冲击能难以有效向下传递，加固深度有限[3]。为克服单一工法的缺陷，自 20 世纪 90 年代以来，工程界与学术界探索将静力排水与动力冲击相结合，形成了动静联合排水固结技术的基本思想[4]。该技术的基本原理是：首先通过设置砂垫层、塑料排水板等建立排水系统，利用真空负压、真空井点或堆载正压创造渗流固结条件；在此基础上，施加可控的冲击荷载或振动荷载，利用动力作用在土体中产生超静孔隙水压力，破坏土体原有结构，形成新的排水微通道，并驱动孔隙水加速向预设排水边界排出，从而实现土体的快速压密与强度增长[5]。

经过近 30 a 的发展，动静联合排水固结技术已从早期的“降水联合强夯[6-7]”演化为包含“真空预压联合强夯[8]”“高真空击密[9]”“复合排水固结技术[10]”等多种形式的成熟技术体系，并在沿海地区重大工程中成功应用[11-12]。

本文系统回顾该技术的发展历程，见图 1，从理论体系、室内试验、工艺技术、应用实践等多个维度总结研究进展，并对未来技术融合方向进行探讨，以期为相关工程实践与科学研究提供借鉴。

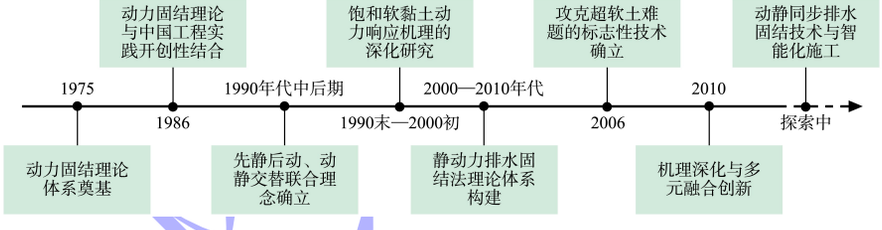

图 1　动静联合排水固结技术进展与应用

Fig. 1　Development and application of dynamic-static combined drainage consolidation technology

1　理论与试验研究

排水固结法是软土地基处理最常用的方法，动静联合技术的核心科学问题之一是冲击荷载作用下饱和软黏土的瞬态响应，冲击过程中超软土中孔隙水压力的演化规律，以及动力荷载冲击后土体结构破坏与再固结的微观机理和宏观本构模型。

在冲击荷载下饱和软黏土的瞬态响应研究领域，国内外已形成系列成果。法国工程师 Menard[13] 在 1975 年提出的动力固结理论奠定了理解“加载-液化-排水-固结”全过程的经典框架。我国著名学者钱家欢等[14]系统引入并发展了该理论，推动了其在中国的应用与深化。白冰等[15]、刘汉龙等[16]、郑颖人等[17]通过试验揭示了冲击瞬间孔压激增、结构液化及应变软化的动态过程，并建立了相应的孔压增长与消散模型。李彰明[18]结合工程实践，提出了考虑排水条件的冲击响应分析方法。近年来，雷华阳等[19]、刘勇健等[20]借助微观测试手段，进一步阐释了瞬态荷载导致的颗粒重组与孔隙演变机理。

在孔压增长与消散模型方面，白冰[21]通过系列试验，提出了冲击荷载下饱和软黏土的残余变形计算模式及孔压增长的经验公式，指出孔压增长与冲击能量、土性参数相关，其消散符合修正的固结理论。孟庆山[22]进一步研究了冲击荷载下淤泥质软土的孔压增长模式，将其分为瞬时增长、波动增长和累积增长 3 个阶段，并建立了考虑冲击次数和能量的经验模型。

在固结机理与数值模拟方面，陆新等[23]指出，强夯加固软黏土是动力挤密、动力固结、动力置换综合作用的结果。孟庆山等[24]采用流固耦合理论分析了强夯过程，揭示了动力排水固结是孔隙水压力激增、消散与土骨架再压缩的动态过程。

针对静动排水固结机理，研究者们设计了多种试验装置。李丽慧等[25]研制了可模拟排水板和冲击荷载的模型箱，研究了吹填黏性土的加固效果。王军等[26]发明了真空预压-堆载-强夯联合固结仪，可用于模拟真空预压、堆载预压和强夯联合加固软土地基的实验。

研究冲击能传递与有效加固深度问题，冲击能在土体中的传递规律是关键。李彰明等[27]通过不同竖向排水体下的模型试验，发现排水体的存在改变了冲击能的传递路径和衰减规律。钱晓敏等[28]研究了上覆土层厚度对冲击能向下传递的影响，确定了合理厚度范围。李彰明等[29]在高能冲击试验中观察到了显著的“水柱效应”，即冲击瞬间排水板中出现水柱喷发现象，这直观证明了动力对孔隙水排出的剧烈驱动作用。

从微观尺度揭示动力固结中土体微观结构演变，已成为土体改良研究的热点。文献[20]通过扫描电镜等手段，研究了冲击荷载前后软黏土微观结构的变化，发现冲击后土颗粒间连接方式改变，大孔隙减少，结构变得致密。文献[19]研究了振动荷载下软土加速蠕变的微观机制，从颗粒排列和孔隙变化角度解释了强度增长过程。这些研究证实，动力冲击不仅加速排水，更直接改变了土的微观结构，从而改善其工程性质[30]。

2 动静联合排水固结技术工艺

2.1 主流工艺分类

降水联合强夯法应用最早、最广泛的工艺之一。首先通过轻型井点或管井进行高真空深层降水，快速降低地下水位，提高土体有效应力并部分疏干土体；随后进行低能量、多遍次的强夯，逐步压密土体。在真空降水后的强夯中，水位以上土体以动力密实为主，水位以下则以动力固结为主；夯后紧随的真空排水，则主要完成排水固结。该工艺适用于渗透性稍好的粉土、粉质黏土及吹填砂。邓安华等[31]采用“降水+堆载+强夯”法成功加固汕头市东海岸吹填海相泥沙形成的软土地基。

针对渗透性极差的吹填淤泥，真空预压联合强夯工艺更具优势。先铺设水平排水垫层并打设排水板，然后实施真空预压。在真空荷载下土体发生初步固结，强度有所提高后，再在膜上施加强夯冲击。真空预压提供了持续的排水动力和侧向约束，强夯则进一步压密浅层土体并消除真空预压可能留下的“硬壳”下软弱层。董志良等[32]在此领域进行了大量实践与创新。

高真空击密法由徐士龙等[33]提出，其特点是采用高效率的“高真空”排水技术，快速形成负压硬壳层，然后采用“少击多遍、逐级加能”的强夯工艺。其特点在于真空排水与强夯的多遍循环，强夯的能量逐遍加大，与堆载预压的分级加载相似，加大的能量要与土的强度增长大致匹配，避免过大的夯击能把土夯成橡皮土。高真空排水与动力击密紧密衔接和循环，适用于处理滩涂、沼泽地等浅层超软土。

刘勇健等[34]针对堆载、真空等静力固结和强夯动力固结处理淤泥质软基提出系统化工艺。其核心是：在铺设完整排水系统(砂垫层+塑料排水板)后，先进行静力堆载(或真空)预压，待地基具有一定强度后，再进行动态冲击(强夯)。该法特别强调冲击能大小、遍数、间隔与排水体系、土体强度的匹配关系，通过试验确定最佳冲击能，以实现功效-成本比最优。为应对更复杂情况，衍生出多种复合工艺。如真空预压联合电渗再加强夯[35]，利用电渗法处理深部难排水的土体。

此外，高有斌等[36]提出了电渗法、井点降水、强夯法相结合共同进行地基处理的技术方案；黄彬[37]、贺立等[38]成功将堆载联合强夯技术应用于堆场或路基下卧软基的加固，这也说明了一定的

上覆垫层对动力加固软基的重要性。

2.2　关键控制参数

基于理论与试验研究，一系列成熟的动静联合排水固结施工工艺被开发并应用于工程实践，其核心可归纳为“排水系统设计”与“动力加载方案”两大环节的有机组合。一般关键控制参数需结合具体工程与水文地质、地基要求等试验确定。

排水系统设计包括排水板间距、深度、砂垫层厚度和材料等。加密排水板有利于加速动力产生的超静孔压消散，其间距应根据地基处理要求和成本综合考虑。在动静荷载联合作用下，软土地基中需设置竖向排水体与水平排水砂垫层，形成高效排水网络，以加速超孔隙水压力的消散与土体固结。强夯的软土层上必须有一定厚度的覆盖土层，一般不少于 3～4 m。大面积填土能够为软土提供有效的侧向围压，形成外部约束。通过强夯施工产生的冲击荷载，借助填土垫层作为传导介质，转换为以压缩波和剪切波为主的弹性波动。这种波动能量进一步激发软土中的动孔隙水压力，促使孔隙水加速排出，从而显著提升软土的排水固结速率与效果[39]。

动力加载方案包括夯击能级、夯点间距、夯击遍数、间隔时间。原则是“由轻到重、少击多遍、逐级加能”，并需通过试验监测孔压消散情况来确定两遍之间的间隔时间。

关于真空预压与强夯的衔接时机，通常以地基土体十字板剪切强度达到一定值(如 20～25 kPa)或孔隙水压力消散大部分(如 70%～80%)作为开始强夯的临界条件。

在标准规范方面，上海市地方标准 DG/T J08-40—2010《地基处理技术规范》及行业标准 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》均将降水强夯法写入其中，提出了首先通过降水措施有效降低土体含水量，然后实施“少击多遍、能量由低至高逐级递增”的强夯击密的加固策略；GB/T 51064—2015《吹填土地基处理规范》规定，强夯置换法和降水强夯法适合处理由粗颗粒土、砂混淤泥、砂、碎石混黏性土等组成的吹填土地基，以及表层覆盖有较厚碎石土、砂土、素填土、杂填土或粉性土的吹填土地基。

3　工程应用分析

3.1　真空预压联合强夯加固软基案例

珠海某旅游度假区地块软基主要为深厚淤泥及淤泥质土层，平均厚度 8 m，具有高含水率、大孔隙比、高压缩性和低承载力的典型特性，需进行快速有效处理以满足工期要求。

该工程采用“真空预压联合强夯”复合工艺。先进行约 40 d 真空预压，使地基固结度达 75%，随后实施强夯加密，采用两遍点夯(能量 2 000～2 500 kN·m，夯点间距 5 m，一点 3 击)及一遍普夯(夯能量为 2 500 kN·m，一点 3 击，搭接 1/3)，夯点错开布置，以进一步消除工后沉降。

为准确掌握强夯期间的地基沉降规律，工程采用沉降标连续观测与网格标高测量相结合的方法，对夯击及间歇期的场地高程变化进行了系统监测。试验区强夯期间场地沉降随时间的变化曲线见图 2。监测结果显示，在每一遍点夯施工期间，受夯击动应力作用，地基土体迅速压密，表层沉降量为 0.05～0.10 m。试验区先后实施了 3 遍点夯，前两遍夯击能为 2 000 kN·m，第 3 遍提高至 2 500 kN·m，随着能量增大，土体压密效应更显著。

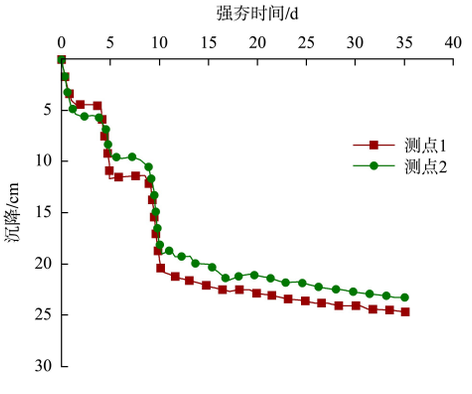

图 2　强夯期间场地沉降-时间关系曲线

Fig. 2　Settlement-time curve of site during dynamic compaction

经 40 d 真空预压处理后，地基残余沉降量为 4.1~38.5 cm。后续强夯施工进一步消除了 23~25 cm 的沉降，使工后沉降量稳定控制在 15 cm 以内，满足工程使用要求。

为同步分析强夯过程中土体内部响应，通过钻孔埋设孔隙水压力计，监测了超静孔隙水压力的激发与消散过程，相应变化曲线见图 3。此外，强夯前后十字板剪切试验结果对比见图 4，可直观反映土体抗剪强度随深度变化的提升情况，进一步验证了该复合处理方法的加固效果。

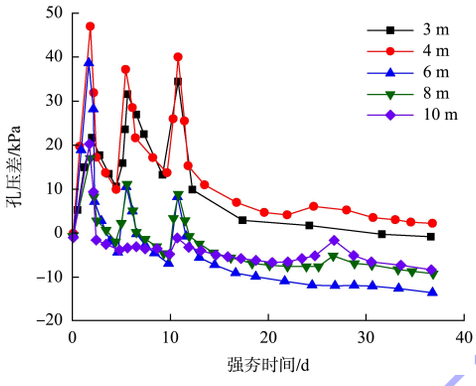

图 3　强夯期间孔隙水压力变化曲线

Fig. 3　Variation curve of excess pore water pressure during dynamic compaction

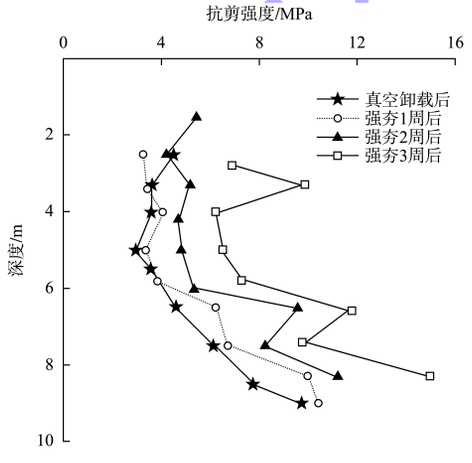

图 4　强夯前后十字板强度-深度曲线

Fig. 4　Vane shear strength-depth curves before and after dynamic compaction

该工艺通过将传统真空预压（约 90 d）缩短至 40 d 并衔接强夯，总工期缩短 50%以上，在保证加固质量的同时，显著降低了设备运行、维护及管理成本，实现了工期与造价的综合优化，为类似软土快速加固提供了高效经济的技术路径。

需要说明的是，真空联合强夯技术对地质条件的适应性有要求，在渗透性极低、缺乏夹砂层的深厚纯淤泥层中，即使动力制造裂缝，排水路径的建立和维持也可能较困难，影响加固速度和深度。技术效果与土层分布、渗透性差异密切相关。

3.2　降水联合强夯加固软基案例

工程位于广州港南沙港区龙穴岛，面积 2.25 万 m^2。场地地下水位埋深 0.5 m，地表以下 15 m 范围内主要分布两层流塑性软土（淤泥及淤泥质黏土），总厚度约 11 m，含水率高、压缩性强，是加固的主要对象。

工程试验区采用深井降水联合强夯法加固。先铺设砂垫层、插设塑料排水板，并设置泥浆搅拌墙阻隔外围地下水；随后采用 20.5 m（穿透软弱黏土层 0.5 m）深井进行降水预压，25 d 后水位下降至 5.3 m，稳定水位后在降水预压约 5 t 应力的基础上进行强夯；夯点按照 5.0 m 间距正方形布置，夯锤直径 2.0 m，根据“低能、少击、多遍”的原则分 4 遍进行点夯（能量分别为 1 000、1 500、2 000、2 000 kN·m）及 1 遍满夯（每点 1 击，能量 500~800 kN·m，间距为 0.7 倍夯锤直径），每遍夯击间隔根据孔隙水压力消散 75%以上进行控制，总工期 105 d。

降水预压至强夯各阶段（1~4 遍点夯）地下水位降深随时间的变化规律见图 5。在初始的 25 d 抽水期内，水位稳定下降 5.3 m，随后进入强夯施工阶段。由于外围泥浆搅拌墙有效阻隔了区外地下水补给，配合 20.5 m 深井管高效排水，水位在 45 d 时达到最大降深 6.1 m，之后基本稳定在 5.0~6.0 m 之间。强夯施工期间，每遍点夯均引起地下水位骤然上升，最大瞬时升幅达 1.2 m，随后在抽水作用下逐渐回落，呈现“骤升—缓降”的循环变化特征。这表明夯击能量会短暂扰动地下水位，但整体水位在有效排水系统控制下保持稳定。该结果进一步印证了深井降水结合防渗墙工艺在动力加固中的优势。

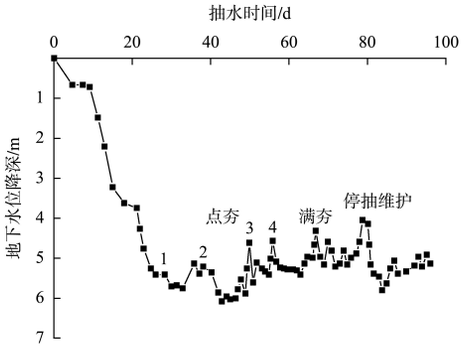

图 5　地下水位降深随时间变化规律

Fig. 5　Variation law of groundwater drawdown with time

试验区浅部与深部软土中孔隙水压力随时间的变化过程见图 6。根据监测数据，加固过程可分为两个特征阶段：在前 25 d 的单一降水预压阶段，孔隙水压力仅随持续抽水而平稳下降，未出现由动力冲击引起的峰值及后续消散现象。进入强夯施工阶段后，浅层软土孔隙水压力呈现典型的激发与消散循环。各遍点夯及满夯产生的超孔隙水压力平均消散时间约为 6. 8 d，表明塑料排水板有效提升了软黏土的渗透性。在第 2~4 遍点夯期间，由于孔隙水压力消散时间充分且降水作用持续，其消散量大于增量，反映出该阶段土体固结效果显著。从空间分布看，强夯对孔隙水压力的影响呈现明显深度差异：在 6 m 深度范围内影响最为显著，最大增量达 28 kPa，且不同夯击遍数所产生的峰值压力分布不均；4 m 深度处的影响相对减弱。而在 8 m 及以下深度，孔隙水压力未出现明显峰值，表明强夯能量对该深度土层的影响已显著衰减。由此可知，若在该场地采用传统强夯工艺，其有效加固深度约为 6 m。

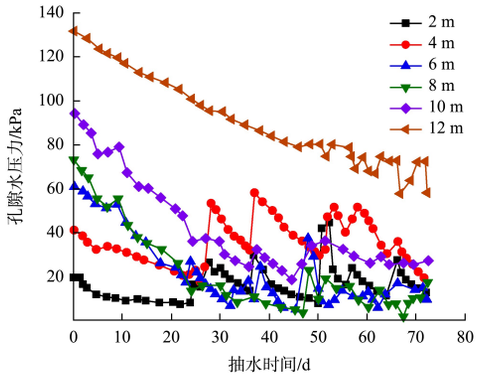

图 6　不同深度下孔隙水压力的变化规律

Fig. 6　Variation of pore water pressure at different depths

经加固处理后，浅层土体由流塑转为可塑状态，含水量从 51%降至 42%。经过该技术加固后检测，十字板抗剪强度由不足 10 kPa 增至 27 kPa 以上，见图 7；静载试验承载力特征值≥130 kPa，见图 8，满足设计要求。监测表明，孔隙水压力平均 6. 8 d 可消散 75%，水位在夯击扰动后能迅速恢复稳定。

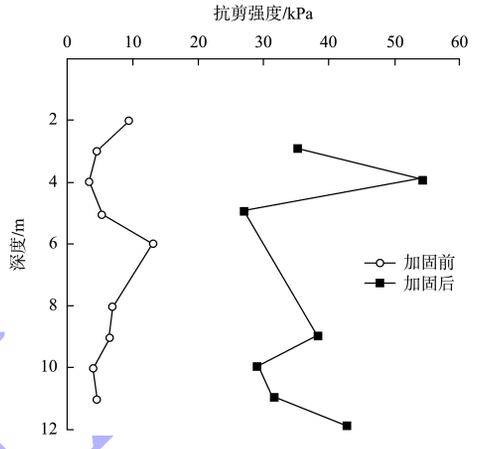

图 7　加固前后强度-深度曲线

Fig. 7　Strength-depth curves before and after reinforcement

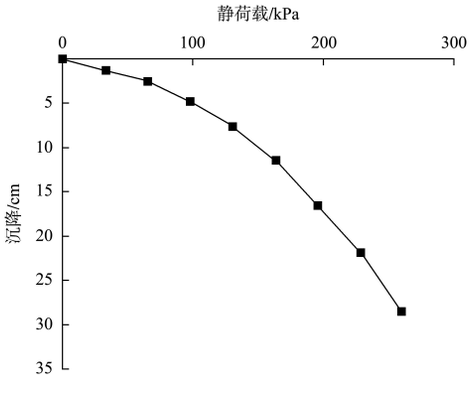

图 8　典型荷载-沉降量曲线

Fig. 8　Typical load-settlement curve

该工艺结合了降水预压与动力固结，充分发挥各自优势，工艺相对简单、维护方便，相较于传统排水固结法，具有工期较短、造价较低的优点，在类似深厚软土加固中具备良好的经济与社会效益。

上述两个案例表明，先排水固结、后动力加密的动静联合排水固结法可显著提升土体强度与承载力，有效控制工后沉降。该方法兼具工期短、成本低的优势，为类似工程提供了高效可靠的技术路径。

4　技术挑战和发展方向

尽管“先真空、后强夯”的分步工艺已应用成熟，但从理论层面来看，真空预压同步强夯/振夯是效率更高、耦合性更强的施工模式，见图 9。

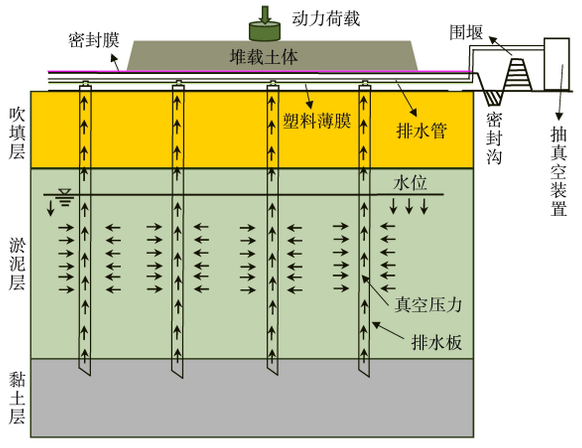

图 9　动静加载联合排水板排水固结示意图

Fig. 9　Schematic of the combined dynamic and static loading and PVD drainage technique

真空预压同步强夯/振夯能够有效实现动静耦合，该技术并非“排水”与“夯击”的简单叠加，而是形成了“动力加密创造排水通道，快速排水增强动力固结效果”的良性循环。夯击能量主动制造微裂缝网络，大幅提高深层土体渗透性，使真空排水效率呈几何级数提升；理论上说，真空负压提供的渗流场与动力冲击激发的剧烈超静孔压场实时叠加，可最大化排水驱动力；动力对土体的实时扰动可能防止排水板淤堵，进一步提升加固深度及效果，同时缩短工期。

然而，该技术也存在较大的挑战：1)技术涉及复杂的动力-渗流-变形多场耦合过程，目前尚无被广泛接受的、能够精确指导设计的成熟理论体系和计算模型；2)强夯冲击极易破坏真空膜和密封墙的完整性，导致真空度骤降甚至失效，因此需要对真空预压密封保护、上覆土层的厚度与特性、动力加载技术参数进行试验研究。

根据现有研究基础，未来可探索发展方向为：1)振夯替代强夯：采用能量较低、连续性强的振动碾压或振夯代替强夯，对密封系统破坏小，更易于与真空预压同步进行。文献[33]提出的“谐振真空预压加载系统”，将振动加载与真空荷载在频率上进行协同，为同步技术提供了新思路。2)研发高韧性、抗冲击的密封膜材料；设计可移动或局部保护的真空系统，使夯点与真空设备避让成为可能。3)研发智能真空监测系统，实时监测真空度与地基响应并反馈，动态调整抽真空与动力加载的参数，实现自适应控制。

5　结论

1）动静联合排水固结技术的加固效果与工期控制取决于“动静协同”水平，包括动力排水固结的加固时机和工艺参数。典型案例表明，合理匹配排水系统、冲击能级与土体强度增长是关键。真空预压联合强夯可将传统工期与成本缩短 30% 以上，承载力提高 50%，工后沉降控制在 15 cm 以内，土体由流塑转为可塑，承载力显著提升，体现了该技术在“快速、经济、有效”方面的综合优势。

2）动静联合排水固结技术在我国长三角、珠三角等沿海软土地区应用广泛，但其工程效果存在显著差异，成败高度依赖于精细化的地质适配与工艺控制。该技术的有效应用需满足多项严格条件，包括软土层的物理力学特性(如深度、含水率、有机质含量及是否存在排水夹层)、上部覆土垫层厚度与性质、排水系统效能，以及静力预压与动力加载的协同方式（如时序、能量）。

3）尽管动静联合排水固结技术在广州南沙、东莞、珠海、深圳、厦门及上海等地已有诸多工程实践，但静动荷载的协同作用机制、工艺参数的优化理论仍不完善，制约了该技术的可靠性与普适性。因此，亟待通过系统调研与深入研究，揭示其多场耦合作用机理，进而发展智能化施工控制方法，以推动该技术从经验应用向精准设计和可控实施的跨越。

参考文献：

[1] 鲍树峰, 董志良, 莫海鸿, 等. 高黏粒含量新吹填淤泥加固新技术室内研发[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 61-67.
BAO S F, DONG Z L, MO H H, et al. Laboratory tests on new reinforcement technology of newly hydraulic reclamation mud with high clay content [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(1): 61-67.

[2] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
GAO Z Y. Theory and practice of vacuum preloading method[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[3] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
ZHENG Y R, LU X, LI X Z, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2000, 22(1): 18-22.

[4] 丘建金, 张旷成. 动力排水固结法在软基加固工程中的应用[J]. 工程勘察, 1995, 23(6): 7-10, 68.
QIU J J, ZHANG K C. Application of dynamic drainage consolidation method in soft foundation reinforcement engineering[J]. Geotechnical investigation & surveying, 1995, 23(6): 7-10, 68.

[5] 李彰明. 地基处理理论与工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
LI Z M. Theory and engineering technology of ground improvement[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.

[6] 周健, 曹宇, 贾敏才, 等. 强夯-降水联合加固饱和软粘土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 376-380.
ZHOU J, CAO Y, JIA M C, et al. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering[J]. Rock and soil mechanics, 2003, 24(3): 376-380.

[7] 刘嘉, 罗彦, 张功新, 等. 井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2222-2227.
LIU J, LUO Y, ZHANG G X, et al. Experimental research on saturated mucky foundation treatment with well-point dewatering combined with dynamic compaction method [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(11): 2222-2227.

[8] 董志良, 张功新, 林军华, 等. 真空预压联合强夯快速加固疏浚土施工工法: GJYJGF084—2008[Z]. 2009.
DONG Z L, ZHANG G X, LIN J H, et al. Construction method for rapid improvement of dredged soil by vacuum preloading combined with dynamic compaction: GJYJGF084-2008[Z]. 2009.

[9] 楼晓明, 徐士龙. 高真空击密法的发展与展望[C]// 2018 全国岩土工程师论坛论文集, 2018: 247-253.
LOU X M, XU S L. Development and prospects of high-vacuum dynamic compaction method [C]//Proceedings of the 2018 National Geotechnical Engineering Forum, 2018: 247-253.

[10] 陈进, 吴名江, 周跃龙, 等. 复合排水固结技术处理新近吹填厚淤泥场地试验研究[C]//中交集团 2016 年技术交流论文集, 2016: 1000-1003.
CHEN J, WU M J, ZHOU Y L, et al. Experimental study on composite drainage consolidation technology for newly hydraulic-filled thick muck ground [C]// Proceedings of 2016 Technical Exchange Conference of China Communications Construction Group, 2016: 1000-1003.

[11] 武亚军, 吴名江, 吴价城, 等. 福建软土真空联合堆载预压强夯法处理及效果分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(S1): 23-28.
WU Y J, WU M J, WU J C, et al. Analysis of vacuum-preloading-dynamic compaction method and treatment effect for soft soil of Fujian zone[J]. Journal of engineering geology, 2008, 16(S1): 23-28.

[12] 刘勇健, 李彰明, 张丽娟. 动力排水固结法在大面积深厚淤泥软基加固处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4000-4007.
LIU Y J, LI Z M, ZHANG L J. Application of dynamic drainage consolidation method to reinforcement and treatment of deep and thick silt foundation of large area[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(S2): 4000-4007.

[13] MÉNARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation [J]. Géotechnique, 1975, 25(1): 3-18.

[14] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1-17.
QIAN J H, QIAN X D, ZHAO W B, et al. Theory and

水运工程

practice of dynamic conslidation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1986, 8(6): 1-17.

[15] 白冰, 刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长与消散规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 33-38.
BAI B, LIU Z D. Growth and dissipation of pore water pressure in saturated soft clay under impact loading[J]. Rock and soil mechanics, 1998, 19(2): 33-38.

[16] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体竖向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1493-1497.
LIU H L, GAO Y B, CAO J J, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009, 31(10): 1493-1497.

[17] 郑颖人, 李学志, 冯遗兴, 等. 软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 571-580.
ZHENG Y R, LI X Z, FENG Y X, et al. Study on the dcm mechanisms and engineering techniques of soft clay foundation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 1998, 17(5): 571-580.

[18] 李彰明. 软土地基静动力排水固结法理论与工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
LI Z M. Static-dynamic drainage consolidation theory and engineering technology for soft ground [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.

[19] 雷华阳, 卢海滨, 王学超, 等. 振动荷载作用下软土加速蠕变的微观机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 309-316, 324.
LEI H Y, LU H B, WANG X C, et al. Research on microscopic mechanism of accelerated creep of soft clay under vibration loads [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(2): 309-316, 324.

[20] 刘勇健, 符纳, 陈创鑫, 等. 三轴冲击荷载作用前后软黏土的微观结构变化研究[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(2): 23-27.
LIU Y J, FU N, CHEN C X, et al. Study on microstructure changes of soft clay before and after triaxial impact load [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(2): 23-27.

[21] 白冰. 土的动力特性及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
BAI B. Dynamic characteristics and application of soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[22] 孟庆山. 淤泥质粘土在冲击荷载下固结机理研究及应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
MENG Q S. Research on mechanism of silty soft clay under impact loading and its application [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003.

[23] 陆新, 郑颖人, 周良忠. 软粘土地基强夯加固机理、计算与推广应用[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(1): 50-52.
LU X, ZHENG Y R, ZHOU L Z. Application and calculation & mechanism of the improving soft soil with DCM[J]. Building science research of Sichuan, 2002, 28(1): 50-52.

[24] 孟庆山, 雷学文. 饱和软粘土强夯的流、固耦合分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2000, 23(4): 364-366.
MENG Q S, LEI X W. Two-phase media coupled analysis of dynamic consolidation reinforcing saturated soft clay [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (natural science edition), 2000, 23(4): 364-366.

[25] 李丽慧, 王珊珊, 魏欣, 等. 动力排水固结模型试验装置的研制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 574-579.
LI L H, WANG S S, WEI X, et al. Development of experimental apprapus for large dynamical consolidation test with drain [J]. Journal of engineering geology, 2009, 17(4): 574-579.

[26] 王军, 蔡袁强, 谷川, 等. 真空预压-堆载-强夯联合固结仪: CN 103823039A[P]. 2014-05-28.
WANG J, CAI Y Q, GU C, et al. Consolidation apparatus integrating vacuum preloading, surcharge preloading, and dynamic compaction: CN103823039A [P]. 2014-05-28.

[27] 李彰明, 赖建坤, 李正东, 等. 不同竖向排水体下淤泥地基冲击能传递规律模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 27-35.
LI Z M, LAI J K, LI Z D, et al. Experimental study of energy transferring law of muck soil with different drainage systems under high energy impact[J]. Journal of engineering geology, 2017, 25(1): 27-35.

水运工程

[28] 钱晓敏, 李彰明, 曾文秀. 冲击荷载下淤泥地基上覆土层合理厚度试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 841-846.
QIAN X M, LI Z M, ZENG W X. In-situ tests and analyses of reasonable covering thickness for muck foundation under impact load [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(3): 841-846.

[29] 李彰明, 温子奇, 潘继平, 等. 高能冲击作用下淤泥水柱效应试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 153-160.
LI Z M, WEN Z Q, PAN J P, et al. Experimental study on water column effect of muck soil under high energy impact[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13(1): 153-160.

[30] 杨爱武, 陈子荷, 王韬. 冲击荷载作用下结构性软黏土力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 44-50.
YANG A W, CHEN Z H, WANG T. A study of the mechanical characteristics of structured soft clay under impact loading [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2017, 44(6): 44-50.

[31] 邓安华, 孙振涛, 张磊. 静动力排水固结法处理吹填海相泥沙软基试验研究[J]. 水运工程, 2024(4): 162-167, 195.
DENG A H, SUN Z T, ZHANG L. Treatment of hydraulic fill marine soft soil ground using static and dynamic drainage consolidation method [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 162-167, 195.

[32] 董志良, 陈平山. 排水固结渗流理论及工程技术创新实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
DONG Z L, CHEN P S. Drainage consolidation seepage theory and engineering technology innovation practice[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[33] 徐士龙, 楼晓明, 刘敦敏, 等. 高真空击密法加固堆场地基的试验研究[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 736-739.
XU S L, LOU X M, LIU D M, et al. Experimental study on yard foundation reinforcement by high-vacuum dynamic compaction method[C]//Proceedings of the 9th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of China Civil Engineering Society. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 736-739.

[34] 刘勇健, 李彰明, 林军华. 静动力排水固结法处理淤泥质软基的加固效果分析[J]. 广东工业大学学报, 2010, 27(1): 75-81.
LIU Y J, LI Z M, LIN J H. Reinforcement effect analysis of static-dynamic drainage consolidation method to treat silt foundation[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2010, 27(1): 75-81.

[35] 刘飞禹, 陶宇, 王军, 等. 分级真空预压联合电渗和强夯法试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 168-179.
LIU F Y, TAO Y, WANG J, et al. Experiment on hierarchical vacuum preloading combined with electro-osmosis and dynamic compaction [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(9): 168-179.

[36] 高有斌, 王博, 刘汉龙, 等. 电渗降水法与强夯联合处理软基试验[J]. 水运工程, 2011(10): 135-140.
GAO Y B, WANG B, LIU H L, et al. Experiment of electro-osmotic method combined with dynamic consolidation[J]. Port & waterway engineering, 2011(10): 135-140.

[37] 黄彬. 堆载预压联合强夯法在散货堆场地基处理中的应用[J]. 水运工程, 2016(11): 179-183.
HUANG B. Application of preloading and dynamic compaction on foundation treatment of bulk yard [J]. Port & waterway engineering, 2016(11): 179-183.

[38] 贺立, 廖小明. 强夯垫层法在海港软土路基处理中的应用[J]. 水运工程, 2023(4): 185-190.
HE L, LIAO X M. Application of dynamic compaction cushion method in soft soil subgrade treatment of harbor[J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 185-190.

[39] 丘建金, 张旷成, 刘强, 等. 软土路基动力排水固结法实践与理论分析[J]. 土工基础, 2004, 18(4): 1-3, 29.
QIU J J, ZHANG K C, LIU Q, et al. Theoretical analysis and practice of dynamic consolidation by drainage treatment on soft clay foundation [J]. Soil engineering and foundation, 2004, 18(4): 1-3, 29.

（本文编辑　王传瑜）

水运工程