

综述 强夯技术在全国重大工程项目地基处理中的应用

王铁宏（中国建筑科学研究院）

一、概述

我国是一个多山区的国家，山区坡洪积地基与平原河冲积地基相比，其工程地质条件复杂。因此，山区工程建设中，地基处理问题就显得尤为重要。同时，我国“地少人多”的矛盾日渐突出，特别是在沿海地区人口稠密，人均耕地面积更少，而随着改革开放的不断深化，经济特区、开放城市和广大沿海地区建设规模的迅速扩大，建设用地越来越紧缺。和国际上其他国家一样，在解决用地的矛盾时大都采用大规模的围海、填海造地方法，这也成为沿海地区解决建设用地和农业用地之争的惟一出路。“围海造地”即将炸山或炸岛所得的碎、块石抛入海中填积而成，由此堆积起来的场地不仅非常疏松，而且夹杂淤泥极不均匀，不做处理，根本无法作为建设场地。在我国已有多个工程采用“开山填谷”、“炸山填海”、“炸岛填海”等方法，利用强夯法加固处理填筑厚度达 50 余米的高填方大块石填筑地基，使其地基承载力、变形及均匀性等都能满足工程建设的要求。

强夯法是一种经济高效的地基处理方法。强夯法加固地基的原理见图 0-1，即反复将 80~400kN 的锤（最重的达 2000kN）起吊到 8~25m 高处（最高的达 40m），而后自由落下，其动能可在土中转化成很大的冲击波和高应力，从而提高地基承载力，降低压缩性，消除湿陷性，改善其抵抗振（震）动液化的能力等。同时，强夯法可提高土层的均匀性，减少工后差异沉降。

强夯法是一种主动加固方法，它将土作为一种能满足技术要求的工程材料，在现场对土层本身作文章，充分利用和发挥土层本身的作用，符合岩土工程“要充分利用岩土体本身作用”的总

原则。该法自诞生以来，以其经济易行、效果显著、设备简单、施工便捷、节省材料、质量容易控制、适用范围广、施工周期短等突出优点，在全球各类工程的地基处理中得到了

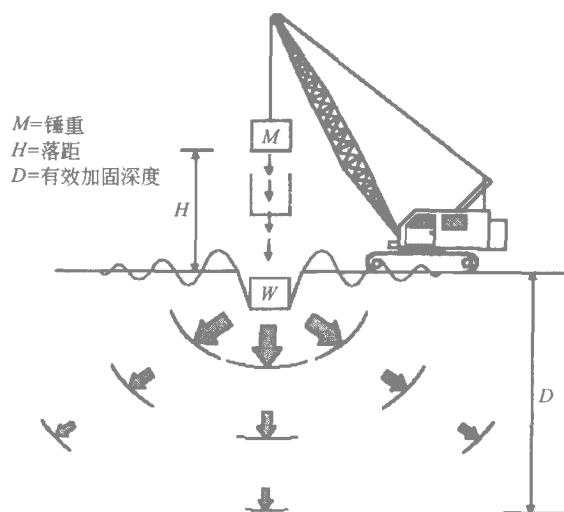


图 0-1 强夯原理示意图 (Lukas)

日益广泛的应用。

强夯法，当应用于粗粒土和低饱和度的细粒土时称动力压密法 (Dynamic Compaction)；当应用于高饱和度的细粒土，特别是在淤泥、淤泥质土和泥炭土等软黏土地基时称动力固结法 (Dynamic Consolidation)。强夯法文名称为 Consolidation Dynamique，英文统称为 Dynamic Compaction，也称 Deep Dynamic Compaction, Heavy Tamping, Pounding, Dynamic Precompression Treatment, Impact Densification 等，不同的名称也揭示了强夯法机理和作用的不同方面。如在强夯法施工初期，仅对浅层素填土、碎石填土、砂土进行加固，这时尚处于重锤夯实 (Heavy Tamping) 阶段。随着工程实践的增加，并且对某些条件下的细粒土软弱地基的处理也取得了一定的效果（这是两者相区别的标志），于是就发展成为动力固结法 (Dynamic Consolidation Method)。

强夯法的基本思想源于古老的夯击方法，用夯击法加固地基土或土工构筑物是我国在公元前 6 世纪就已经采用的施工方法。在人类生活的西安半坡遗址上，即发现原始公社母系氏族社会时期，建筑的柱基垫土经过夯实。进入文明社会几千年以来，中国就一直用夯实法，用夯（木夯、抬夯）、碓（石碓、铁碓）加固地基，并用其修建土工构筑物，如堤、坝、台、墙（小至建筑墙壁，大至城墙），秦阿房宫前殿遗址即为东西宽 1300m、南北长 500m、面积 60 万 m^2 的大夯土台基，最初的万里长城及以后的长城心墙也多用土夯实筑成。

随着工程建设和施工机械的发展，夯击法作为一种施工简单、适用性广的地基加固方法，在 20 世纪 30 年代已用于道路建设工程，时称重锤夯实法，锤重 2~3t，落距 2~3m，锤径 0.7~1.5m，加固深度 1~2.5m。50 年代在山西太原化工区建设工程处理湿陷性黄土地基中大量应用。进入 60 年代，该法将锤重发展到 5~7t，落距 5~9m，加固深度 2~4m 的重级重锤夯实法。这种方法适用于要求加固深度处于地下水位 0.8m 以上稍湿的黏性土、砂类土、湿陷性黄土、杂填土和分层填土地基。对含水量过高的土夯实效果差，易形成“橡皮土”，不宜使用。

但作为一种在原理、加固效果、适用范围和施工工艺都异于夯击法和重锤夯实法的现代地基处理技术，其形成和应用始于 L. Menard 1969 年对法国南部 Cannes 附近 Napoule 海滨一采石场废土石围海造成的场地上。该场地表层为新近填筑约 9m 厚的碎石填土，其下是 12m 厚疏松的砂质粉土，场地上要求建造 20 栋 8 层住宅。由于碎石土是新近填筑的，如果采用桩基，负摩阻力将占单桩承载力的 60%~70%，很不经济。经研究采用堆载预压法处理地基，堆载历时 3 个月，堆土高度 5m 只沉降了 200mm，承载力仅提高了 30% 最终改用强夯法处理，锤重 80kN，落距 10m，单击能 800kJ，总夯击能为 1200kJ/ m^2 ，只夯击一遍，整个场地平均夯沉量达 500mm，夯实土平均性能改善 200%。建造的 8 层居住建筑竣工后，其平均沉降仅为 13mm。此后该法推广应用于饱和粗粒土的加固，并定名为“重夯法” (Heavy Tamping)。1971 年，该法又应用于饱和的低渗透性黏性土，经 4 年时间里上百项工程应用，Menard 正式将该加固地基方法定名为“动力压密法” (Dynamic Compaction)，该法很快引起世界各国工程界的普遍关注和广泛应用。据不完全统计，到 1995 年止，全世界已有几十个国家的 5500 余项强夯工程付诸实施，处理地基面积达到 1 亿 3 千万 m^2 。

本书介绍的 36 项全国重大工程项目强夯地基处理实录就是“七五”到“十五”期间

的强夯技术发展结果。强夯处理技术广泛应用于碎石土、砂土，低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土、杂填土、素填土等地基。对于饱和度较高的黏土和淤泥质地基通过辅以置换等措施也可以取得一定的加固效果，如形成硬壳层，可作为工业项目的厂区、道路、一般建（构）筑物地基，但不宜用作高重设施基础。关于高饱和度粉土与黏性土等地基，采用夯坑内回填块石、碎石或其他粗颗粒材料进行强夯置换亦取得了一定效果。近年来多项全国重大工程项目采用强夯技术加固地基并取得显著效果，经检测评价满足设计要求，上部结构已建成或已投入使用。本书共分 5 篇，介绍的项目有：

第一篇 高能级强夯加固沿海非均匀回填地基

实录一 大亚湾华德石化有限公司增建原油库及配套设施项目 26 万 m^2 非均匀回填地基强夯及 10000kN·m 能级强夯试验研究

最大填土厚度为 11~14m，且填方区冲积平原地貌浅层的人工填土层、耕植土层、海陆交互相沉积层等软土层厚度达 5.0m 以上。强夯能级有 3000kN·m、6000kN·m、8000kN·m、10000kN·m。检测表明：3000kN·m 能级强夯的有效加固深度为 7.5m，6000kN·m 能级强夯的有效加固深度为 9.5m，8000kN·m 能级强夯的有效加固深度为 11m，10000kN·m 能级强夯的有效加固深度为 15m，比 8000kN·m 增长了 36.4%。

实录二 惠州威宏仓储油库 1.5 万 m^2 抛石填海夹杂淤泥质土地基高能级强夯处理

强夯处理抛石填海夹杂淤泥质土地基，处理面积 1.5 万 m^2 ，能量 8000kN·m，处理深度 12m。

实录三 珠海高栏港区油库 10 万 m^2 非均匀回填且下卧淤泥质土地基的 10000kN·m 能级强夯处理

场地为开山填海形成，由于填土固结时间短，结构疏松且存在大孔（空）隙，强度很低；中（细）砂层属可能液化土层；其下部还有厚度不等的淤泥和淤泥质土。3000kN·m 试夯区强夯后地基承载力特征值达到 $f_{ak}=240kPa$ ，压缩模量 $E_s=21.9MPa$ 。8000kN·m 试夯区承载力特征值为 263kPa，距设计要求相差 12.5%。10000kN·m 试夯区 4 个检测点位的承载力特征值均大于 300kPa，变形模量在 30MPa 以上，满足设计要求。

实录四 青岛北海船舶重工有限公司海西湾造船基地 9 万 m^2 高能级强夯处理抛石填海夹杂淤泥质土地基

原始地层及海域主要为淤泥及淤泥质土，表层为碎石填土。采用 8000kN·m 能级进行强夯加固处理，分四遍进行。强夯后碎石填土地基承载力 $f_{ak}=270\sim 320kPa$ ，变形模量 $E_0=24.5\sim 38.6MPa$ ，满足设计要求。

实录五 珠海恒基达鑫国际化工有限公司码头及仓储工程 22.7 万 m^2 块石地基 10000kN·m 能级强夯处理

场地为开山块石填海形成，对其仓储及油罐区地基场地三期，累计强夯处理场地约 12 万 m^2 ，主夯能级为 10000kN·m、8000kN·m、6000kN·m 等，其中采用 10000kN·m 高能级强夯的有 2.5 万 m^2 。地基承载力特征值 $f_{ak}=300kPa$ ；变形模量 $E_0=33.6MPa$ ，压缩模量 $E_s=40.5MPa$ 。

实录六 福建漳州港 1 号、2 号泊位集装箱堆场 23 万 m^2 块石回填地基强夯处理的试验研究

原始地貌为丘陵坡和海滩交接区域，后经人工采用开山土石回填形成。能级 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，强夯影响深度达到 14m ，有效加固深度 10m 。

实录七 福建漳州港物流中心地基处理工程 20万 m^2 块石回填地基高能级强夯地基处理

场地由填土层、海相沉积层、冲洪积层和残积层组成，强夯加固处理总面积为 167372m^2 。其中采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 进行处理的有 18590m^2 ， $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯 142704m^2 ， $2500\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯 6078m^2 。

实录八 中油温州重交沥青原油罐区 2.6万 m^2 开山块石地基强夯处理工程

场地地表土为厚度不等的人工填土，采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯。强夯的有效加固深度可以达到 10m ，地基土承载力值由 220kPa 提高到 $300\sim 400\text{kPa}$ 。

实录九 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯在惠州马鞭洲原油码头及配套工程 8万 m^2 大块抛石填海地基处理中的应用

强夯处理大深度抛石填海地基，处理面积 8万 m^2 ，能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}+8000\text{kN}\cdot\text{m}$ （双层强夯）处理深度 24m 。

实录十大连西太平洋石油化工有限公司 10万 m^3 原油贮罐山区非均匀块石回填地基高能级强夯处理

强夯处理山区非均匀块石回填地基，处理面积 1万 m^2 ，能量 $7200\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度 12m 。

实录十一 青岛重交沥青有限公司原料库 7.5万 m^2 填土地基强夯处理工程

场地由变质岩类、花岗岩类风化物回填而成，下卧淤泥质粉质黏土层。采用 $7000\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $5000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯进行处理，检测表明： $5000\text{kN}\cdot\text{m}$ 区域强夯有效加固深度达 7.5m ，影响深度基本达到该能量加固区基岩面； $7000\text{kN}\cdot\text{m}$ 区域强夯有效加固深度最大达 9.4m 。

实录十二 大连西太平洋石油化工有限公司新增原油库区 7万 m^2 非均匀回填地基强夯工程

工程由 4 座 10万 m^3 原油储罐和两座 5万 m^3 原油储罐及附属配套设施组成，场地为半开挖、半回填的不均匀地基，采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯处理。处理效果显著，地基承载力特征值 $f_k\geq 250\text{kPa}$ ，变形模量 $E_0\geq 20\text{MPa}$ 。

实录十三 青岛益佳阳鸿燃料油有限公司 8万 m^2 人工填土地基强夯处理工程

场区第四系主要有素填土、海相中细砂、含有机质粉质黏土、陆相粉质黏土、含黏性土角砾及碎石，采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $5000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯处理。检测表明地基承载力达到 450kPa ，变形模量 E_0 达到 32.75MPa 。

实录十四 大连港二十五万吨级矿石专用码头 55万 m^2 非均匀回填地基处理工程

场地主要地貌单元为丘陵坡地，地形起伏较大，最大填土厚度超过 30m 。采用强夯方案对填方区的人工填土分层进行加固处理，设计选用的能级分别为 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $5000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $1500\text{kN}\cdot\text{m}$ ，总处理面积约为 55万 m^2 。检测结果表明，强夯后，在检测深度范围内，承载力特征值 f_{ak} 大于 250kPa ，变形模量 E_0 大于 15MPa ，满足设计要求。

第二篇 强夯法加固山区非均匀回填地基

实录十五 茂名 30 万 t 乙烯工程 60 万 m^2 砾质黏性土回填地基的强夯处理

强夯加固砾质黏性土回填地基，处理面积 60 万 m^2 ，能量 $2500kN \cdot m$ ，处理深度 5.7m。

实录十六 贵阳龙洞堡国际机场 12 万 m^2 山区高填方回填地基强夯处理

强夯处理山区高填方回填地基，处理面积 12 万 m^2 ，每层处理深度 4.5m，能量 $3000kN \cdot m$ ，分 13 层强夯，处理最大深度 54m。

实录十七 强夯法处理燕化重油催化装置 3 万 m^2 高填方非均匀块石地基

强夯处理山区高填方非均匀块石。回填地基，处理面积 3 万 m^2 ，能量 $5000kN \cdot m + 5000kN \cdot m + 5000kN \cdot m$ （三层强夯 9 万 m^2 ），处理深度 21m。

实录十八 贵州瓮福磷肥重钙工程 15 万 m^2 山区非均匀回填地基高能级强夯处理

强夯处理山区非均匀块石回填地基，处理面积 15.3 万 m^2 ，能量 $8000kN \cdot m$ ，局部 $6000kN \cdot m$ 或 $3000kN \cdot m$ 最大处理深度 10m。

实录十九 岳阳石化总厂原料工程 11 万 m^2 山区非均匀回填地基高能级强夯处理

强夯处理山区非均匀块石回填地基，处理面积 11 万 m^2 ，能量 $8000kN \cdot m + 8000kN \cdot m$ ，处理深度 17m。

实录二十 中油黄岛燃料油中转油库工程 5 万 m^3 原油储罐非均匀地基高能级强夯处理

工程由 3 个 $5 \times 10^4 m^3$ 浮顶油罐和配套设施组成，占地面积约 100 亩。填土层为开山碎石土，比较适宜采用强夯法处理。考虑到油罐对地基沉降和变形的要求，设计确定对 3 个 $5 \times 10^4 m^3$ 原油储罐地基采用 $8000kN \cdot m$ 能级强夯进行加固处理。强夯后地基承载力特征值不小于 $300kPa$ ，变形模量不小于 $20MPa$ ，处理深度达到粉质黏土层。

实录二十一 兰州—成都—重庆输油管道工程重庆末站地基 9 万 m^2 非均匀回填地基多层强夯

场地填土最大厚度达 20m 以上，局部夹粉土、粉砂、淤泥质黏土薄层。采用 $5000kN \cdot m$ 和 $8000kN \cdot m$ 能级强夯，有效加固深度大于等于 10m，地基承载力 $f_{ak} \geq 250kPa$ ，变形模量 $E_0 \geq 18MPa$ 。

实录二十二 秦皇岛输油泵站罐区原油 10 万 m^3 贮罐非均匀性地基 $8000kN \cdot m$ 高能级强夯地基处理

强夯处理山区非均匀块石回填地基，处理面积 1 万 m^2 ，能量 $8000kN \cdot m$ ，处理深度 10m。

实录二十三 四川泸州某工程非均匀回填地基强夯处理试验研究

场地部分属于回填区，部分属于挖方区，强夯能级为 $6000kN \cdot m$ 。0~3m 地基承载力特征值 $f_{ak} = 120kPa$ ，3m 以下地基承载力标准值 f_k 大于 $180kPa$ 。

第三篇 强夯法加固砂土液化地基

实录二十四 北京乙烯工程 23 万 m^2 液化地基的强夯处理

强夯消除地基液化，提高地基承载力，处理面积 23 万 m^2 ，能量 $3000kN \cdot m$ ，处理

深度 8m。

实录二十五 中纺总公司廊坊生产基地 2.4 万 m^2 液化地基强夯处理

强夯消除地基轻微液化，提高地基承载力，处理面积 2.4 万 m^2 ，能量 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度 7m。

实录二十六 中原油田黄河水源净化厂 13.2 万 m^2 饱和粉土液化地基强夯处理

强夯消除饱和粉土液化，提高地基承载力，处理面积 13.2 万 m^2 ，能量 $2000\sim 2550\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度 9~11m。

实录二十七 广西防城港 9号、10号泊位陆域 8.5 万 m^2 吹填海砂地基高能级强夯处理工程

场地原为海滨地带，属海陆交互相沉积地貌，后经人工吹砂堆填后，场地较平坦，强夯能级 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 经强夯处理后，各地层的密实度和承载力在水平方向上较均匀，其承载力特征值大于等于 200kPa ，沉降量小于 2cm ，差异沉降小于 2cm ，均满足设计要求。

第四篇 强夯法加固湿陷性黄土地基

实录二十八 三门峡火力发电厂 20 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯处理

强夯消除黄土湿陷性，处理面积 19.3 万 m^2 ，能量 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $6500\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，最大处理深度达 11.5m。

实录二十九 国营七四四厂工程 5 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯处理

强夯消除黄土湿陷性，处理面积 4~5 万 m^2 ，能量 $2000\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度 4~5m。

实录三十 首阳山电厂二期扩建工程 4 万 m^2 灰场坝湿陷性和非均匀性地基处理

强夯处理灰场坝湿陷性和非均匀地基，处理面积 4 万 m^2 ，能量 $2500\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度 6~8m。

实录三十一 洛阳石化总厂化纤工程 4.6 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯处理

场地内湿陷性土层厚 13m 左右，湿陷等级为 I 级（轻微）~ II 级（中等）非自重湿陷。采用 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯处理 4.6 万 m^2 地基，效果显著，土的湿陷性已消除，不同区域承载力分别达到 200kPa 和 250kPa 。

实录三十二 万家寨引黄工程太原呼延净水厂 25 万 m^2 湿陷性黄土地基强夯工程

场地地基土为第四系山麓冲洪积物，主要由湿陷性黄土和碎石土组成。采用能级 $3000\sim 8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯进行加固处理。强夯有效加固深度均约为 11.0m，承载力特征值均大于 220kPa ，有效加固深度内湿陷土层的湿陷性全部消除。

第五篇 预处理加强夯工艺处理软弱地基

实录三十三 建设部 2000 年小康住宅示范区天津市宜白路住宅小区及川府新村工程排水砂井加强夯处理陆海相饱和黏土地基

排水砂井加强夯处理陆海相及古河道、渔池、新近沉积的淤泥及淤泥质土地基，处理面积 2.1 万 m^2 ，能量 $1500\sim 2000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，砂井 $\phi 350$ ，井深大于 7m，处理深度 6~8m。

实录三十四 青岛港 8 号码头堆场 6.3 万 m^2 杂填土夹淤泥质土回填地基经塑料排水板预处理后的高能级强夯

工程场地淤泥质土层较厚，覆盖层相对较薄，地质条件较为复杂，采用塑料排水板处理的 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯，处理面积 6.3 万 m^2 。实践证明预处理高能级强夯处理杂填土夹淤泥质回填地基的有效处理深度可以达到 15m 。

实录三十五 广东省惠州港一期通用码头（改造）配套项目 8 万 m^2 淤泥质土地基高能级强夯置换处理工程

场地中间为东西向狭长的滨海水域，南面为一海岛，填土在本场地该层最深处达 23.80m ，淤泥最厚处为 5.80m 。采用 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯置换，实际施工面积 41865m^2 。检测发现填石置换体深度分别达 $7.1\sim 8.2\text{m}$ ，置换效果很好。

实录三十六 强夯法在大庆石化总厂某 5 万 m^3 大型油罐地基处理中的应用

场地主要由回填土、粉土和粉砂组成，上部荷载较大，采用 $1500\text{kN}\cdot\text{m}$ 强夯处理，检测表明其加固效果良好，满足设计要求，也是强夯法在冻土地区得到成功应用的实例。

以上工程中，北京乙烯工程由于采用强夯技术消除了 23 万 m^2 地基液化，显著提高了地基承载力，比挤密碎石桩加固方案和直接采用灌注桩方案节省工程投资 3800 万元，缩短施工周期逾 3 个月；茂名 30 万 t 乙烯工程采用强夯技术有效地加固了近 60 万 m^2 ， $5\sim 7\text{m}$ 深的砾质黏性土回填地基，消除了部分回填地基的湿陷性，比直接采用灌注桩方案或挤密碎石桩方案节约数千万元投资，大大缩短了施工周期。

本书介绍的大部分工程项目采用了高能级强夯（ $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级以上），并特别介绍了在广东沿海某碎石土回填地基上成功实施的国内首次 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯系列试验（ $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ ），以及珠海某抛石夹杂淤泥质土地基上的 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯工程实践，在国内首次提出了 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 高能级强夯的施工参数、有效加固深度、检测方法等。

重大工程项目的特点之一就是厂区面积大，一经采用适宜的地基加固处理方案，其直接和间接经济效益将十分惊人，因此引起工程技术人员的极大兴趣，倾注了极大热情，同时取得了丰硕的科研成果。本书所介绍工程实录均经检测部门评价满足设计要求，且多数已建成投产使用。

二、强夯法适用范围及拓展

强夯法的适宜性很大程度上取决于土体对超孔隙水压力的消散能力，砂性土等粗粒土地基经强夯处理后，其承载能力可提高 $200\%\sim 500\%$ ，压缩性可降低 $1/5\sim 9/10$ 。所以最初强夯法只用于处理碎石土、砂类土、非饱和黏性土等，但随着经验的丰富以及施工方法的科学化、现代化，尤其是排水条件的改善，用强夯法所处理的土类不断增加，甚至对海底、水下的软弱土层也尝试通过特殊工艺进行强夯处理。强夯法的局限性是施工时较大的噪声和振动，因而不宜在人口密集的城市内使用。

强夯法可用于加固湿陷性黄土地基。在过去 10 年中，仅美国西部 5 个州就先后有 9 个工程使用强夯法处理湿陷性黄土地基。此外，在处理液化地基中，强夯同样被广泛使用，美国开发署使用强夯法处理了多个液化路堤工程。

20 世纪 80 年代中国采用强夯法处理填海地基获得成功，并在沿海地区推广应用，为我国广大沿海地区进行大规模“填海造地”工程提供了经济有效的地基处理方法和经验，

从根本上解决了建设与农业争地问题的矛盾，具有重大的经济效益和社会效益。

对于工业废渣来说，采用强夯法处理的效果也是理想的。我国冶金、化学和电力等工业部门排放大量废渣，堆积如山，不仅占用大量土地，而且造成环境污染。工程实践证明，将质地坚硬、性能稳定和无侵蚀性的工业废渣作为地基或填料，采用强夯法处理，能取得较好的效果，从而解决了长期存在的废渣占地和环境污染问题，同时还为废渣利用开辟了新的途径。

随着社会发展，人口激增，环境问题日益严重，而对每天产生的大量垃圾和固体废弃物的处理更是迫在眉睫，治理城市废物和垃圾已成为世界各大城市的重大环境问题。以我国为例，据不完全统计，我国的城市生活垃圾年产量以 9.6% 以上的速度递增，从 1988 年的 6 亿 t 猛增到 2000 年的 10 亿 t，如果加上历年的累计存储，总计存量已超过 70 亿 t。利用强夯法处理工业和生活垃圾，有极大的优越性，国外有很多工程都取得了成功，近几年，英国、法国、美国、西班牙、比利时等国家都在用强夯法处理垃圾填埋场和固体废弃物。

美国能源部 Savannab River 核电站，位于南卡罗纳州，由于核废料上覆土层的不均匀沉降，造成地面积水，存在污染地下水的危险。考虑了振冲、高压喷射注浆法、堆载预压等方法处理后，美国能源部决定在场地上加铺一层不透水的黏土，选用强夯密实核废料，有如下几点理由：（1）对掩埋核废料在地表进行密实，没有核废料的暴露，这是严格的安全要求；（2）对本场采用地强夯法是最经济的处理手段；（3）夯锤重量和落距可以调整，以保证有效加固深度和密实程度；（4）当下面有阻挡物时，使用附加能量使之或破碎，或移位，使废料中潜在的空洞坍塌。强夯施工中，规定每点夯击 20 次，为了避免碰到放射性物质，最大夯坑深度依据安全要求而定。圆形夯锤重 200kN，直径 2.5m，平底，落距 12.8m 施工过程中进行质量监测和安全监测。第一遍夯击时，每击平均深度增加 0.15m，而第二遍为 0.12m，最后一遍的平均夯坑深度为 1.7m。为了检测核废料整个深度上的处理效果，强夯前后进行了标贯试验，结果显示其密实效果非常明显。

综上所述，强夯技术具有以下特点：

（1）适用各类土层：可以用于加固各类砂性土、粉土、一般黏性土、黄土、人工填土，特别适宜加固一般处理方法难以加固的大块碎石类土以及建筑、生活垃圾或工业废料组成的杂填土，结合其他技术措施亦可用于加固软土地基。

（2）应用范围广泛：可应用于工业与民用建筑、重型构筑物、设备基础、机场跑道、堤坝、公路和铁路路基、贮仓、堆场、油罐、桥梁、飞机场跑道及港口码头、核电站、人工岛等。近年来强夯法在工程建设与环境保护协调方面已发展应用于垃圾填埋场、沙漠地基、核废料场等的处理。

（3）加固效果显著：地基经强夯处理后，可明显提高地基承载力、压缩模量，增加干密度，减少孔隙比，降低压缩系数，增加场地均匀性，消除湿陷性、膨胀性，防止振动液化。地基经强夯加固处理后，除含水量过高的软黏土外，一般均可在夯后投入使用。

（4）有效加固深度：本书介绍的工程实录中，单层 8000kN·m 高能级强夯处理深度达 12m，多层强夯处理，深度可达 24~54m，一般能量强夯处理深度在 6~8m。

（5）施工机具简单：强夯机具主要为履带式起重机。当起吊能力有限时可辅以龙门式起落架或其他设施，加上自动脱钩装置。当采用机械设备有困难时，还可因地制宜地采用打桩机、龙门吊、桅杆等简易设备。

(6) 节省材料：一般的强夯处理是将原状土施以能量，无需添加建筑材料，大大缩短了施工周期。当有特殊要求时，可辅以砂井、挤密碎石工艺配合强夯施工，其加固效果比单一工艺高出许多，材料亦比单一砂井、挤密碎石方案要少，费用较低。

(7) 节省工程造价：由于强夯工艺无需建筑材料，节省了建筑材料的购置、运输、制作、打入费用，除消耗少量油料外，没有其他消耗，因此工艺价格低廉。北京乙烯工程挤密碎石方案造价 200 元/m² 以上，强夯仅 25 元/m²；茂名 30 万 t 乙烯工程，回填地基原采用分层碾压，没有达到应有的加固效果，如采用挤密碎石桩加固费用为 250 元/m² 以上，强夯工艺仅需 30~50 元/m²，且加固效果更好、工期大大缩短（造价对比见表 0-1）。

各种地基处理方法的工期造价对比

表 0-1

加固方法	强夯法	砂井预压	挤密砂桩	钢筋混 凝土桩	堆载 预压	真空 预压	振冲	注浆	化学拌 合法
造价/m ²	1	4.4	2.4	16	4	2.8	2	6.4	12
工 期	1	8	2	3	10	4	3	3	8

(8) 施工快捷：只要工艺适合，强夯工艺无需建筑材料的制作、打入时间，其施工周期最短，特别是对粗颗粒非饱和土的强夯，周期更短，一般与挤密碎石桩、分层碾压、直接采用灌注桩方案相比更为快捷，因此间接经济效益更为显著，更令建设单位感兴趣。这从另一方面对设计人员提出了更高要求，地基处理方案中时间效益更为凸显，施工快捷是方案可行与否的重要要求。

总之，只要环境允许、土层条件适合，强夯法在某种程度上比其他机械的、化学的或力学的加固方法使用更为广泛和有效，是最具节能省地优势的技术措施。

三、强夯法的变革与技术发展

为充分利用强夯技术的优点，确保强夯在粗粒土和饱和细粒土中均取得较好的、实用性的加固效果，在工程实践中又逐渐发展了一些不同类型的复合式强夯技术，最基本的可归为两类：

一类是普通强夯，指采用普通强夯施工设备、工艺和设计方法，对土体进行有效加固，以提高地基承载力和减小沉降量。包括常规强夯（中低能级）、高能级强夯以及预处理强夯（对土体进行预处理，使之更加适合强夯，包括强夯拌合法、强夯置换法、置换后强夯和动力排水固结法）等；

另一类是特种强夯，指普通强夯施工工艺不能实施的，须结合其他处理工艺、设备和方法进行的复合式地基处理方法。包括爆炸强夯法、电渗强夯法、孔内深层强夯法、地基夯实动力打桩工法、旋转夯锤式强夯、锥（球）形锤强夯、液压高速夯实法、水下强夯法等。复合式强夯技术不但可以有机结合两种或多种方法的优点，摒弃各自的缺点，而且可以进一步拓展强夯法的适用范围。

1. 普通强夯

(1) 方法一：常规强夯

指单击夯击能在 6000kN·m 以下的中低能级强夯，其有效加固深度在 10m 以内。

(2) 方法二：高能级强夯

指单击夯击能在 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上的强夯，其有效加固深度在 10m 以上。

(3) 方法三：强夯拌和（混合）法（DCM）

强夯拌和（混合）法（Dynamic Compaction & Mixing）是在饱和软黏土上铺设 $0.5\sim 2.0\text{m}$ 或更厚些的垫层（可用矿渣、钢渣、碎石等粗粒料），利用高能量夯击作用，使上部垫层与下部软土发生机械混合，改变软土的组成，从而改善其工程性质。

(4) 方法四：强夯置换法（DR）和强夯置换混合法（DRM）

不同于强夯拌和（混合）中使垫层材料相对均匀混入土中或零星地存在于被处理土中，强夯置换则是在土中通过强夯形成相对独立、完整和连续的置换体，使置换体成为地基的一个增强体，从而构成垫层或复合地基。

强夯置换在名称和工艺上尚未完全统一，英文常称为 Dynamic Substitution 或 Dynamic Replacement。在国内一般称强夯置换（DR），当用于淤泥类土中时称作强夯挤淤，所形成的置换体被称作碎石柱、碎石桩、碎石墩等。在应用形式上大致可分成两种：一种是夯点间有一定间距时，置换体规则分布于被置换土中，置换后，置换体用作建筑桩基或形成置换体与桩间土的复合地基，这种方式称作单点置换或点夯筑桩（淤泥类土中称桩式挤淤）。另一种是在加固面积或加固宽度较小而置换点密集时，在一定范围内置换体连成一体，形成一层相对完整的置换材料组成的垫层，与被置换土层或下伏土层在局部形成层状地基，此称整式置换（整式挤淤）。在施工上的一般做法是：在平整后的场地上铺设一个施工垫层（以利于施工机械行走、水平向排水和减缓地面隆起等），形成夯坑后，用散体粒料（碎石，矿渣等）将夯坑填满，完成 1 次置换；以相同步骤作第 2、3、……次置换，直至置换体达到预定深度，由此 1 次性完成对 1 个点的置换。然后顺次或跳行对其他点置换直至完成所有夯点的置换，最后做满夯，从而完成整个场地的强夯置换。在有些工程中也采用类似强夯的方法，分遍完成对各夯点的置换。

强夯置换在国内发展迅速，应用的技术经济效果也极明显。该法在国内最早列入深圳等一些地区的地基处理技术规范，目前已经列入国家地基处理技术规范（JGJ 79—2002）。强夯置换在一些大型工程地基处理中应用，取得了显著的技术经济效益。例如深圳机场跑道、滑行道建设中，两侧的拦淤沉堤用抛石挤淤和强夯置换挤淤，堤身一次穿透含水量 85% 左右淤泥沉到 6m 以下的硬质粉质黏土中，解决了换填建设方案中关键技术问题。占地 29000m^2 的深圳机场停机坪扩建工程，采用强夯置换处理形成深 7m 、直径 1.4m 的碎石墩，复合地基承载力达 140kPa 以上。马鞍山钢铁公司 2500m^3 高炉原料堆场，面积近 50万 m^2 ，设计荷载 325kPa ，地基土表面 $1\sim 1.5\text{m}$ 之下有厚 $6\sim 19\text{m}$ 淤泥质饱和流塑状黏土，地基承载力标准值仅 90kPa ，采用插设塑料排水板后进行强夯置换，处理后形成 5m 的置换层， $3\text{m}\times 3\text{m}$ 载荷板检测结果表明，使用荷载作用下沉降仅 44.7mm ，夯后沉降量仅为夯前的 5% ， 5m 以上地基土的承载力达 300kPa 以上，其下各层承载力也达 $130\sim 190\text{kPa}$ 。宁波北仑港 20 万吨级矿石中转码头工程， 20.8万 m^2 的堆场采用强夯置换石碴代替原设计的塑料排水板堆载预压加固厚层淤泥质粉质黏土，处理后桩体直径 $1.2\sim 3.0\text{m}$ ，桩长约 8m ，复合地基承载力可达 220kPa 的设计要求，取得了良好的技术与经济效益。

置换深度取决于夯击能、土性（ c 、 φ 值）、土质条件、停夯标准等因素，其加固机理中包含了多种加固作用：强夯置换 = 置换 + 加密 + 大直径排水 + 混合。要比较接近实际的

考虑强夯置换问题，我们必须考虑其很多复杂的性质，如孔隙水的流动、由于强夯处理带来的原土的特性改变、高能量产生的大量的轴向及侧向变形等问题。Thilakasiri et al (2001) 用三维非线性大应变有限元程序 DYCOM 和 DYNA2D 进行了分析，该程序对置换用的砂子采用椭圆型帽子模型，对有机软土采用修正的剑桥模型，并将计算结果与足尺模型试验进行了对比。

强夯置换混合法 (Dynamic Replacement & Mixing, 简称 DRM) 多用于有机黏土和泥炭质土等，以消除或减少其在附加应力下产生的过大沉降量和次固结沉降。Kwang Wei Lo 和 Peng Lee Ooi 等在新加坡进行了一系列现场试验。如图 0-2 所示，对这两类土的处理可分为两个阶段进行：先是强夯置换 (DR) 图 0-2a 和图 0-2b)，在高压缩性土中进行低能量强夯，并在夯坑中填粗砂形成砂桩；接着进行强夯置换混合，在砂桩上施加高能量强夯(图 0-2c)，进一步置换并将置换体下移，使砂桩振散砂粒喷溅，形成刚度更大、徐变特性相对较小的双层组合土(图 0-2d)。为了对现场试验结果进行细化和放大，他们又进行了室内模型试验。在各种强夯能量下通过改变泥炭土和砂的混合比例进行试验，对处理后的试样又进行了固结试验，研究强夯置换混合法处理后地基的压缩性。试验强夯分五遍进行，前 4 遍为低能量强夯置换，单击能 $1500\text{kN}\cdot\text{m}$ 。第 5 遍为强夯置换混合，单击能为 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。检测结果表明强夯后泥炭土的承载力和变形模量均有大幅提高。

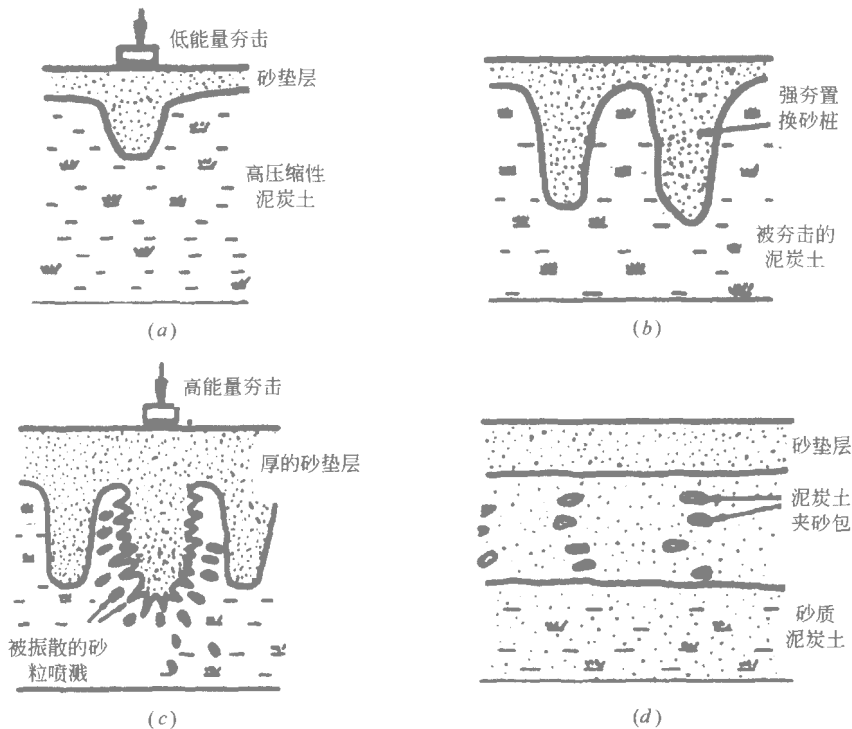


图 0-2 强夯置换与强夯置换混合法机理示意图

(a) 强夯置换体的形式；(b) 强夯置换处理后地基剖面图；

(c) 强夯置换混合法工艺过程；(d) 强夯置换混合法处理后的地基剖面

(5) 方法五：置换后强夯法 (RDC)

强夯置换是先强夯后置换，在适宜强夯的土质中先形成夯坑，然后在夯坑中填砂石，

有效加固深度在 4~7m。与之不同, 置换后强夯则是先置换后强夯, 先在软弱淤泥质土中形成较长的碎石桩、砂桩、双灰桩、灰土桩或渣桩等置换体或插设排水板, 再施加强夯, 处理深度深, 加固效果好, 应用范围广, 对不能直接强夯的土质亦可。在此法联合加固中置换体和强夯二者相互补充, 如置换体在对土体进行置换、挤密的同时, 又为强夯作用形成竖向排水通道, 而强夯反过来亦增强置换后土层的上部加固效果等, 彼此相辅相成, 取得了较为理想的效果。

置换体加强夯的加固方法, 一方面可借助强夯在浅部加固效果显著的特点, 加强置换体(挤密碎石桩等)在浅部的加固效果; 另一方面, 置换体又改善了强夯时的排水通道, 有利于饱和软土中强夯效果的提高。由于碎石桩加强夯比单纯的挤密碎石桩可稀疏些, 工艺可简化, 使地基处理的总费用与单纯挤密碎石桩方案相比基本持平或略低一些。

置换后强夯法不仅将碎石桩等置换体加固深层与强夯法加固浅层的优点在饱和软土地基处理中有机地结合起来, 而且又具有方法本身的特点, 其主要表现在以下六个方面: 1) 加速软土的排水固结作用; 2) 碎石桩密实程度的进一步提高, 大的强夯能量作用于桩体, 使碎石桩产生较大的竖直变形, 增大了碎石桩体的密实度; 3) 对土体含水量接近饱和的土避免形成橡皮土, 这类土若在强夯置换一次又一次的夯击和揉搓下很可能形成橡皮土; 4) 碎石桩的扩径作用, 一方面使置换率提高, 另一方面扩径可使桩间土挤密; 5) 挤淤置换作用; 6) 预振效应, 地基土受到一定的振动影响, 这对消除地震液化是极为有利的。

国内较为成功的工程实例有: 武钢四烧地基处理(淤泥厚 6~8m)采用夯扩渣桩+强夯; 廊坊长途汽车站工程(粉土夹淤泥层)、饶阳印染厂工程(饱和粉质黏土和黏土)、山西芮城非金属矿制品厂工程(湿陷性黄土)采用了碎石桩+强夯法; 解放军某部硅铁矿主厂房工程采用了双灰桩+强夯法(生石灰和粉煤灰, 体积比为 7:3); 建设部 2000 年小康住宅示范小区天津市宜白路住宅小区及川府新村工程(1.1~4.2m 的淤泥质土)采用了砂桩+强夯法等。

(6) 方法六: 动力排水固结法(DCP)

动力排水固结法(Dynamic Consolidation with Pre-compression)是动力固结法与堆载预压法联合加固的方法, 有些学者也称之为“动静结合排水固结法”, 适用于饱和软黏土、淤泥质砂土等, 该方法利用强夯冲击产生较高的孔隙水压力并在堆载预压静载的作用下消散, 使堆载预压的时间大大缩短, 加固效果提高。

与传统强夯法不同, 动力排水固结法强调软土的排水固结特性。软土具有含水量大、高孔隙比、低强度和易流动等特点, 所以其性质的改善取决于孔隙水压力能否迅速消散、孔隙水能否迅速排出, 以及软土不被过分扰动, 以保持软土本身的微结构不被破坏。因此, 动力排水固结法强调排水体的设置, 即采用该法时应首先按排水固结法在软土中设立竖向排水体(如塑料排水板、袋装砂井等)和水平排水体(如砂垫层、盲沟、集水井等), 并强调及时用水泵强制排水以保证加固区地下水位不上升。

增设竖向排水体的强夯思想源于固结理论, 其出发点是通过缩短路径改善排水条件, 以加速夯击产生的超静孔压的消散。例如天津新港软黏土采用袋装砂井+强夯处理后, 超静孔隙水压力一周内可消散 95%(不设砂井时, 4 周后只能消散 80%); 有效变形量由不设竖向排水通道时的 20%增至设置排水通道时的 45%。在上海崇明岛机场面积为 45 万 m² 软黏土地基处理中, 开发并采用了一种新的强夯工艺。该机场地基处理的主要对象为原地面下 1~5m 的淤泥质粉质黏土, 该土的含水量约 37%、孔隙比约 1.0、静力触探锥

尖阻力 $0.25\sim 0.75\text{MPa}$ 、承载力 $50\sim 80\text{kPa}$ ；通过插设塑料排水板和埋设软式透水管加强排水，采用先轻后重、少击多遍的夯击工艺，使该地基淤泥质土经强夯处理达到了理想的效果，夯后地基土的承载力达到 120kPa 以上，静力触探锥尖阻力达到 $1.14\sim 2.69\text{MPa}$ ，消除了软黏土的主固结沉降。

动力排水固结法与强夯法的另一不同之处在于对夯击能的使用方面。强夯法通常先用高能量加固深层土，再加固浅层土，最后用低能量满夯加固表层土。而该法则先加固浅层软土，待浅层排水固结强度有所提高后，再逐渐加大能量，以加固深层软土。

(7) 方法七：异形锤强夯

强夯振动会产生瑞利波（R波）、压缩波（P波）和剪切波（S波）。P波有助于增加土粒间的正应力，提高压缩量；S波有助于产生剪切位移，促使土粒重新排列；P波和S波的振幅越大，加固效果就越好，这是我们所期望的。Miller & Pursey 研究发现，平底的浅基础稳态振动时产生的R波、S波和P波占总能量的百分比分别为 67.3% 、 25.8% 和 6.9% 。传统的平底夯锤就像一个浅基础，因此可以认为强夯的能量在三种弹性波中的分配与稳态振动的浅基础相似（Smolczyk）。S波的能量比例非常小，这就暗示我们可以通过改变夯锤底面形状来增加S波的能量。T. W. Feng 在干砂（相对密实度 $30\%\sim 40\%$ ）和湿砂（相对密实度 60% ）试样上对平底、锥形底（Conical-base）和球形底（Spherical-base）夯锤的夯实效果进行了一系列比较试验研究。三种夯锤的尺寸如图 0-3 所示，试验发现锥形底和球形底夯锤的夯坑体积分别是平底夯锤夯坑体积的 $1.29\sim 1.95$ 倍和 $1.16\sim 1.32$ 倍，电子静力触探试验显示加固影响区也较大，加固效果比平底夯锤更有效。

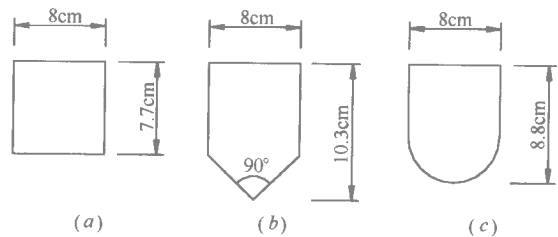


图 0-3 平底和锥形、球形底夯锤的侧视图
(a) 平底夯锤；(b) 锥形底夯锤；(c) 球形底夯锤

到目前为止，强夯夯锤大都为钢制或钢包混凝土的圆形平底锤。我国的一些施工公司在实践中发现将锤底制成稍带凸弧，增加了侧挤，使坑壁稳定，减小了起锤力和坑壁塌土。为了进一步增大侧挤、置换效果和加固深度，工程实践中强夯夯锤的一个发展方向就是圆柱体或底部形如子弹头的“异形锤”，锤重多为 10t 、 20t 和 30t 三种，直径在 $1.0\sim 1.5\text{m}$ 之间，高度依重量而不同，锤底静压力 $200\sim 400\text{kPa}$ 。 20t 异形锤高度 2.5m ， 30t 异形锤高度接近 3.0m ，由于高度太大，重心偏高，易于倾倒，造成人身安全事故。异形锤的冲孔深度很大，在冲孔中加入填料，其侧向挤密效果显著，加固深度也较大。此外，还有梯形锤（易于提锤）、倒梯形锤（加大侧挤能量）等。总之，各种形状夯锤均有其优缺点，工程中选用什么形状的夯锤，依所要加固的土层、土质等情况而定。

(8) 方法八：孔内深层强夯法（DDC法）

孔内深层强夯法是将强夯法和挤密法相结合在工艺上的创新，它是先成孔，再向孔内填料，然后以重锤在孔内进行夯击，使填料向孔周侧向挤压以达到加固地基的目的，又称 DDC 法（Down Hole Dynamic Compaction）。DDC 技术桩锤呈尖锥杆状或呈橄榄状，夯击时，对下层填料是深层动力夯、砸、压密，对上层新填料是动力夯、砸、劈裂和强制侧向挤压密实。

孔内深层强夯技术能大量消耗建筑及工业垃圾，利用各种无机固体废料进行地基加固处理，减少环境污染，变废为宝。该项技术先后在数十项地基处理工程中应用，消除了深厚黄土地基的湿陷性，大幅度提高了地基承载力，降低地基压缩性，地基处理效果显著。

从作用机理来讲，DDC 技术是通过机具成孔（钻孔或冲孔），在地基处理的深层部位进行填料，用高动能的特制重力夯锤进行冲、砸、挤压的高压强、强挤密的夯击作业，从而达到加固地基、消纳垃圾和渣土的目的。对于复杂地层或有饱和软土、淤泥层地基，为保持核体的完整性，防止因侧向土约束力太差，导致桩体变形，也可采用具有复合材料的桩体，可在软土层段填夯素混凝土料，其他土层再改填一般填料。

采用 DDC 技术加固的桩体，不仅使桩体十分密实，受到很大夯击能后缓缓释放，不断对桩周土施加侧向挤压力，而桩周土受到的侧向强力挤密应力，成桩后慢慢释放，对桩体产生很大的侧向约束的“抱紧”作用，使桩体具有刚、柔性桩的特点。不足之处是在对含水量较大的土处理时易发生“丢锤”现象，效果不甚理想。

(9) 方法九：电渗—强夯法 (EODC)

电渗—强夯综合法 Electric Osmosizing-Dynamic Consolidation，简称 EODC 是利用土的电动现象，将电渗降水固结技术和强夯密实加固方法相配合，以达到加固软弱地基的目的。电渗与强夯法配合使用，可明显改善土体组分、结构，大幅度增加承载力、降低其压缩性，达到优质、高效、经济的处理效果。

工程界静态疏干饱和软黏土中所含的水而使之固结的方法很多，如堆载预压法、降水预压法、真空预压法、砂井堆载预压法等，但上述各法仅能排出黏土中部分自由水，难以抽出黏土的结合水，因此只能缓慢长时间降水（一个疏干固结周期往往长达 1~3 年），难以适应工程需要。如向土层施加直流电场，利用电能及电泳、电渗破坏土中各种水与土粒的吸附结合，使自由水和弱结合水汇集阴极并被抽走，可实现快速降水。此法每个排水周期仅 7~10 天。同时阳极（钢、铝）被电蚀，进入土中的金属离子与 OH^{-1} 等阴离子结合成胶凝，亦能粘结土粒，所以，其加固土体的技术特点是以物理固结为主，伴以物理化学固化，改变与强化土体结构，从而改善土体物理力学性能，充分发挥其固有固有能力。影响电渗—强夯综合法施工质量的因素颇多，其中最为关键的是砂井的质量。它直接影响电渗排水的成败，影响强夯施工参数的确定及强夯的加固效果，所以要严格保证砂井的成井质量。

电渗强夯法处理地基无污染、噪声低、工期短，特别适用于加固要求承载力不大、下伏土层深且厚的大面积场地。在珠海一软弱地基加固处理中使用该综合法将高含水量、高压缩性、高孔隙比、低强度的软弱土层的承载力提高到近 5 倍，含水量降低了 15%，剪切强度提高了 31%，后期沉降量可控制在设计要求范围内（ $\leq 10\text{cm}$ ），该工程电渗—强夯法施工前后各物理力学指标的对比详见表 0-2。所以说若不考虑其用电量、不太经济的缺点，它是一种无污、低噪、快速的软土加固技术，在沿海、沿江、沿湖地域有广阔的推广使用前景。

电渗—强夯法处理前后地基土物理力学指标对比

表 0-2

阶 段	承载力特征值 f_{ak} (kPa)	含水量 w (%)	抗剪强度 CU (kPa)	孔隙比 e	压缩系数 α (MPa^{-1})	压缩模量 E_s (MPa)	黏聚力 c (kPa)
处理前	35	60.9	24.02	1.86	1.56	1.52	4.78
处理后	160	51.9	31.36	1.40	0.98	2.12	8.23
对 比	+357%	-15%	+31%	-25%	-37%	+39%	+72%

2. 特种强夯法

(1) 方法一：爆炸—强夯法 (EDC)

爆炸法 (Explosive Compaction Method, 简称 ECM) 加密饱和砂基和粉砂在世界上的各种工程中已经使用了 70 多年, 尽管施工设备简单、经济、加固深度大, 但设计方法的高度经验性限制了它使用的广泛性。爆炸加密饱和砂基的主要环节在于排出孔隙水, 这种方法只能限于饱和介质, 而在实际工程中, 如码头陆域堆填的砂体上部常常有 1~4m 的非饱和砂, 单纯用爆炸法对于上部这些松散的砂体就无法实现加密。故爆炸—强夯法 (Explosive & Dynamic compaction) 既可利用爆炸加密法的优点加固深层砂体, 又可利用强夯法的优点加固浅部砂层。

爆炸法处理地基在国际上有很多实例, 都取得了好的加固效果。国内也成功应用该工艺加密深达 14m 厚的饱和砂基。如某填海造地工程布置在清除淤泥后的人工回填砂基上。砂层厚度 7.0~16.0m, 平均厚度约 13.0m 左右。在爆炸加密的基础上采用强夯法再加密。试验研究证明: 1) 爆炸法对 6.0m 以下深砂层加密效果好, 而强夯法与此相反, 对 6.0m 以上砂层加密效果好。将两种方法结合起来使用, 能使厚层砂基上下都得到较好的密实。2) 采用先爆炸后强夯的施工程序是合理的, 加密效果好, 标贯点合格率高, 砂层密实均匀性好。深层爆炸不但能加密砂层, 且有提高砂层底部及其下卧黏土层物理力学性能的优点, 浅层强夯不仅有加密上部砂层的功能, 还有提高下部深层砂层密实度的作用, 能发挥爆炸益于深层、强夯益于浅层的优点。3) 该方法经济效益显著, 工程造价省。经测算和实际工程对比, 加密同样体积的砂层地基, 比振冲法造价减少约 2/3, 施工速度快一倍。从现场标贯资料看, 加密质量比振冲法好, 具有设备简单、速度快、质量好、成本低的优点, 值得在此类地基处理中推广。该工艺虽施工方便, 造价低廉, 但作为新工艺它还需在生产中得到进一步的改进, 优化爆炸、强夯参数, 施工成本还可以有较大幅度的降低。

(2) 方法二：地基夯实力打桩工法 (DCOM 法)

日本学者 T. Nakaoka 等针对强夯由于能量沿深度指数衰减可能导致浅部土层过量夯实和深部土层夯实不足的问题, 发展并应用了一种类似于沉管桩的工法称为“地基夯实力打桩工法” (Dynamic Pile Driving Method For Ground Compacting, 简称 DCOM 法), 在日本岐阜 (Gifu) 南部一 15m 厚填土工程中的试验研究和成功应用, 均表明该法能使较大深度土层达到相当均匀的改良。

DCOM 法不仅适用于粗粒材料的地基 (如碎石土、硬黏土、固体废弃物等), 还可用于软黏土地基。该工法施工时分两个阶段: 1) 打桩阶段: 用 7t 桩锤将内径 30cm, 外径 60cm 的钢管桩打入填土 10m; 2) 桩体形成阶段: 拔桩 2~5m, 桩尖打开, 填入碎石、砂等粗粒料, 然后用桩锤冲击压缩填料, 形成桩体。在这一过程中桩间土也得到振密与挤密, DCOM 法的加固效果与桩径、桩间距、桩长、填料类型、冲击次数等因素有关。

(3) 方法三：旋转夯锤式强夯 (RDCM 法)

M. Kanatani、Y. Yoshida 等研究出了一种综合利用夯锤的势能和转动动能的“旋转夯锤式强夯” (Dynamic Consolidation Method With Rotational Ram, 简称 RDCM), 并将该法与常规强夯法 (DCM, 夯锤自由下落) 通过模型试验进行了对比。

试验装置如图 0-4(a) 所示, Tonegawa 松砂的平均粒径 $d_{50} = 0.34\text{mm}$, 均一性系数

$U_c=1.95$ ，相对密度 $d_s=2.701$ ，初始相对密实度是 10%，含水量在 10% 左右，分 5 层置于 $150\text{cm}\times 150\text{cm}\times 110\text{cm}$ 的矩形容器中，砂层底部铺设 10cm 的碎石垫层。夯锤的起吊和旋转机理见图 0-4(b)，夯锤通过气动卡盘上的吊钩起吊，通过释放气动卡盘气缸中的压缩空气下落，通过气动机传动的齿轮对夯锤施加转动动能。

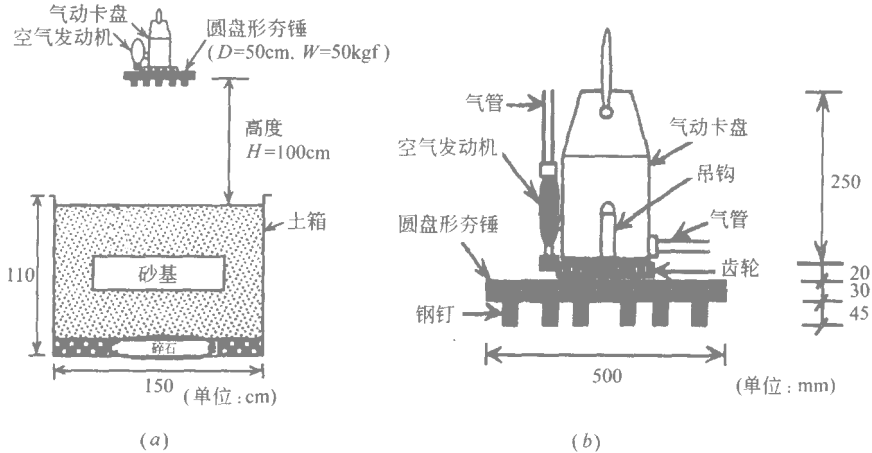


图 0-4 RDCM 试验装置图与旋转机理图

圆形夯锤底部钢钉的设置，可使夯锤接触地面时转动能量的损失减到最少。试验中夯锤的转动频率为 4Hz ，在这种情况下，夯锤的转动动能与夯锤自由落体的势能相差无几。加密的程度和深度通过试验前后的静力触探阻力来确定，此外还进行了夯沉量测试和各遍夯击下地面竖向位移测定等。

检测结果表明在所有测点上经 RDCM 处理后的静探阻力增值 Δq_c 均大于 DCM 处理后的 Δq_c ，在接近地表处经 RDCM 处理后的 Δq_c 远大于经 DCM 处理后的 Δq_c 。尤其是在夯锤下区域，接近地表处经 RDCM 处理后的 Δq_c 是试验前初始静探阻力的 2 倍，而经 DCM 处理后的 Δq_c 大约是试验前初始静探阻力的 1 倍。RDCM 处理后的加固深度也会比 DCM 的加固深度的大一些。试验发现，相同击数下 RDCM 的夯沉量大约是 DCM 夯沉量的 2 倍，RDCM 夯锤周边地面稍有隆起，这是因为转动的夯锤在触地一瞬间对地面造成局部的剪切膨胀所致。两种方法产生的地面沉降差异很小，然而比较它们在不同深度产生的竖向位移，可以看出 RDCM 在地面产生的竖向位移和形成的夯坑面积要比 DCM 的大。Y. Yoshida 和 M. Kanatani 等提出了旋转夯锤这一强夯的新概念，模型试验显示它可提高加固效果，但由于施工困难，大吨位的施工机具较难实现等原因，目前尚未用于工程实践。

(4) 方法四：强夯加 CFG 桩

CFG 桩是指用水泥、粉煤灰和碎石屑加水按一定比例配制而成的，具有一定粘结强度的半刚性半柔性桩体，即水泥粉煤灰碎石桩 (Cement Fly-ash Gravel Pile) 的简称。CFG 桩、桩间土和褥垫层一起构成 CFG 桩复合地基。其特点在于可以改变水泥、粉煤灰的比例而得到不同刚度的桩。CFG 桩复合地基适应范围较广，费用低、施工方便、承载力高及其广泛的适应性等优点，得到广泛的推广与应用。

强夯加 CFG 桩联合加固方案即先用小能量强夯进行大面积超宽处理，以消除欠固结

土, 加速地基土固结过程。然后在建筑物范围内进行 CFG 桩处理, 置换原土体, 挤密桩间土, 充分利用 CFG 桩桩身压缩量小、端承力高、控制沉降效果好的特点, 从而使 CFG 桩复合地基的承载力、沉降量及地基均匀性均满足设计要求。如某工程场地原为采砂坑, 后被用作养鱼塘, 回填时间不到半年, 自重固结尚未完成。结构设计要求复合地基承载力标准值为 180kPa , 采用强夯加 CFG 桩方案加固后的检测结果表明: 1) 该场地经强夯施工达到了场地土大面积消除欠固结的效果, 扰动砂层密实度明显加强, 提高了地基土的承载力和均匀性; 2) CFG 桩施工桩长从 $2.5\sim 6.0\text{m}$ 不等, 复合地基承载力、沉降量及沉降差均满足规范要求, 该建筑物已竣工使用 2 年多, 效果良好。

(5) 方法五: 液压高速夯实法 (RIC)

传统的强夯技术使用履带吊车施工, 夯击频率为 $2\sim 3\text{min/击}$, 若按每夯点 15 击、直线行进的挪锤移位计算, 每个夯点夯击一遍需要 $30\sim 50\text{min}$ 。BSP 液压高速夯实机即 BSP Rapid Impact Compactor (RIC) (图 0-5), 使用了强夯技术的原理, 并通过特殊设计, 以便进行特定深度地基的夯实处理。液压高速夯实机的设计源自 BSP 液压桩锤, 具有高移动性, 其 7t 或 9t 的锤体落高为 1.2m , 每分钟可夯击 40 次以上。根据锤重的不同, 每次对地夯击能量最高可达 $108\text{kN}\cdot\text{m}$ 。夯击能量通过直接放在地面的 BSP 专利的 1.5m 直径

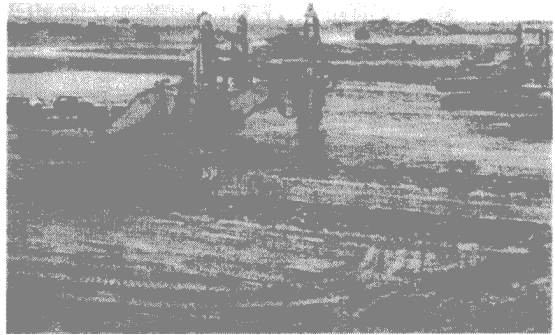


图 0-5 液压高速强夯机在哈萨克斯坦储罐项目进行施工

的钢锤脚传递给地基, 不仅可以减小能量传递的损失, 而且可以保证液压高速夯实机安全地靠近结构物和人员设备作业。尽管单次夯击的能量与传统的强夯设备相比较小, 但是液压高速夯实机的高速夯击频率弥补了这一点。

液压高速夯实机自出现以来, 在世界各地已被广泛用于油库、港口、机场、高速公路等的地基处理。在环卫领域可用于垃圾填埋场垃圾的埋填夯实, 以减少垃圾的二次污染。在中国和日本, 液压高速夯实机也被用来补充夯实高速公路的路堤和桥台台背填土, 以减少填土的沉降, 延长道路的使用寿命。

(6) 方法六: 水下强夯法 (Underwater DC)

随着近岸和离岸工程的日益增多, 利用强夯法加固海底和水下软弱地基也成为必然的研究课题。在水介质中传播 P 波, 相对而言, 在液相介质中能量损失较少, 是比较有利的。由于在水和土中振动所引起的频率、速度、能量是不同的, 因此强夯时具有不同的振动效应, 当二者的动力差大于土粒对水的吸附能力时, 自由水、毛细水将从颗粒间隙析出, 土密度提高, 强度逐渐增加。为了减少夯锤冲击能量在水中的损耗, 夯锤被设计成流线型, 夯锤中间设有上下贯通的孔洞, 落锤高度限制在一定范围内, 主要通过增加锤重来提高单击夯击能。科威特某军港拟建一条新防波堤, 防波堤底部地基土上部为厚 $4\sim 5\text{m}$ 的松散粉砂, 原先打算挖掉这层 5m 厚的松砂, 换填大块石。最后决定在海底上直接抛一