

# 强夯法加固地基的机理及施工要点

韩腾飞 洪原 孟祥省 李成泽

中建八局第二建设有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5102

**[摘要]** 强夯法是岩土工程里实用性较强的地基处理方式,该方法利用高能冲击作用,用来改善土体结构,也能够适用于碎石土、砂土、素填土等多种场地土质。本文依托土体动力学相关特点,分别从动力压实、动力固结、振动密实几个方面,探析土体加固的内在原理;同时结合工程常用施工数据,梳理施工准备、参数管控、夯击作业以及后期处理等工序,明确夯锤规格、夯击能量等重要控制指标,文中也总结了质量管控措施与土质优化方法,以此理清施工技术思路,可为同类地基加固工程提供基础参考。

**[关键词]** 强夯法; 地基加固; 土体机理; 施工参数; 质量管控

中图分类号: TU472 文献标识码: A

## Mechanism and Key Construction Points of Dynamic Compaction for Foundation Reinforcement

Tengfei Han Yuan Hong Xiangsheng Meng Chengze Li

The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division

**[Abstract]** Dynamic compaction is a widely used and highly practical ground improvement method in geotechnical engineering. It improves soil structure through high-energy impact and is applicable to various soil types such as gravel soil, sandy soil, and plain fill. Based on soil dynamics, this paper analyzes the internal mechanisms of soil reinforcement from the perspectives of dynamic compaction, dynamic consolidation, and vibratory densification. In combination with commonly used engineering data, it summarizes key construction processes including preparation, parameter control, compaction operations, and post-treatment. Key control indicators such as tamper specifications and compaction energy are clarified. Quality control measures and soil improvement methods are also summarized, providing a technical reference for similar foundation reinforcement projects.

**[Key words]** Dynamic Compaction; Foundation Reinforcement; Soil Mechanism; Construction Parameters; Quality Control.

### 引言

在岩土工程的施工建设当中,软弱回填土、松散砂土这类不良地基较为常见;这类土体普遍孔隙偏大,压缩性能较高,自身承载能力也比较差,很难满足建筑物基础的受力以及变形要求。强夯法具备施工简便,加固深度大,造价低廉等诸多优点,常常被用于大面积、高填方场地的地基处理工作;其中常规能级强夯的加固深度为4至10米,超高能级施工深度能够超过15米。因此,本文结合土体动力变化规律,剖析加固机理,细化施工要点,设定量化管控标准,以此完善强夯施工的应用体系。

### 1 强夯法基本概述

强夯法,是一种物理加固手段,人们一般借助起重设备吊起重型夯锤,让夯锤做自由落体运动,依靠下落产生的冲击能量,并且配合冲击波在土层内部的传递效果,以此扰动深层土体,从

而达到改良土体结构的目的。这项技术最早出现于二十世纪六十年代,经过长时间的优化与更新,目前已经形成划分标准明确、施工流程规范的技术体系;行业通常按照夯击能量进行等级划分,小于4000kN·m为低能级,4000至8000kN·m属于中能级,而超出8000kN·m则判定为超高能级。工程当中常用夯锤重量为10至40t,锤底直径保持在2.0至3.5m,能够适配不同土质以及加固深度的施工条件。对比换填法、预压法等处理手段,强夯法不需要外加固结材料,主要依靠土体自身颗粒重组完成压实,能够缩短30%至50%的施工工期,工程经济性相对更好;该技术适用范围较广,除高饱和度淤泥质黏土以外,还可作用于砂土、碎石土、黄土等土质,处理过后的土体压缩模量能够提高1.5至3.0倍,常常应用在场地平整、道路基础以及工业场地等施工场景<sup>[1]</sup>。

### 2 强夯法加固地基核心机理

## 2.1 动力压实机理

动力压实,一般多用于透气性较好、孔隙偏大的非饱和松散土层,也是干砂、素填土以及碎石土最主要的加固方式。夯锤在下落的一瞬间,能够产生较大的瞬时冲击压力;这种竖向应力可以快速穿透地表土层,进而压缩土体内部各类孔隙。当瞬时动应力处于200至500kPa区间时,原本松散的土颗粒结构会被破坏,颗粒之间会出现竖向下沉、横向挤压的现象,大孔隙不断塌陷闭合,细小孔隙也会被进一步压缩。根据工程实测数据来看,单次夯击过后,0至2m表层素填土的孔隙率能够下降8%至15%;在多次夯击的作用下,冲击能量会不断叠加,密实效果也会由表层向深层扩散。该加固方式几乎不会造成土体水分流动,仅仅依靠颗粒重新排列完成压实,所以施工温度对其影响偏小,土体在常温条件下就可以保持较为稳定的加固效果。

## 2.2 动力固结机理

动力固结更加适用于饱和黏性土、粉质黏土这类细粒饱和土质,和常规的静态固结方式有所不同,该机理依靠动态冲击荷载,以此改变土体自身的透水性能。强夯产生的冲击力,能够破坏黏土原本的絮状结构;土体内部会生成瞬时超孔隙水压力,它的峰值通常为土体有效自重应力的1.2至1.8倍,进而打通封闭的滞流水体。在夯击的间隔阶段,孔隙水压力会慢慢消散,自由水分可以顺着土体缝隙向外渗透,土颗粒也会在应力作用下相互贴合压实。施工一般会将间歇时长控制在24至72h,方便水体充分排出;经过反复夯击处理,土体透水能力会不断减弱,土层抗剪强度有所提高,能够有效改善软土承载力差、后期沉降偏大的工程问题<sup>[2]</sup>。

## 2.3 振动密实机理

夯锤撞击地面以后,会产生压缩波、剪切波以及瑞利波,这三类波形能够在地层内部叠加传播,从而形成整体性的振动场。其中,压缩波的穿透能力相对更强,一般用来改良深层土体;剪切波和瑞利波则主要作用于地表土层,振动的影响范围大概是夯锤落距的1.2至1.5倍。对于松散砂土而言,振动能够减小土颗粒之间的摩擦阻力,让杂乱分布的砂粒重新排列,形成更为紧凑的土体结构,还可以降低砂土发生液化的概率。相关检测数据显示,处理后的砂土密实度,能够从40%以下提升至75%以上;由于振动能量会随土层深度增加不断损耗,深层加固效果相对偏弱,因此工程通常会搭配多级夯击工艺,以此均匀优化土体密实程度。

## 2.4 动力置换机理

动力置换机理,一般适用于压缩性偏高的软弱土层;施工人员会利用高强度夯击扰动土体,再向夯坑内填入碎石、砾石这类粗颗粒骨料,依靠夯击作用力把骨料压入软土层当中,以此形成骨料桩和原土结合的复合地基。施工通常采用分层压实的方式,单层填料厚度为0.5至1.2m,成型后的骨料桩直径可达1.5至2.5m。坚硬的骨料不易压缩,能够承受大部分上部荷载,骨料缝隙还可以构成排水通道;在受力状态下,桩体与土体共同承载,土体侧向形变也会受到限制。这种加固方式弥补了普通夯击难

以处理高饱和度软土的不足,也进一步扩大了强夯法的适用土质范围。

## 3 强夯法施工核心技术要点

### 3.1 施工前期准备要点

施工前期的准备工作,是保障强夯施工平稳开展、把控地基加固质量的重要前提;该环节主要包含场地勘测、地表处理、设备挑选这三部分内容。工作人员在勘测阶段,一般会结合原位检测与室内试验,用来测定土层排布、土体含水率、压缩模量等基础指标;勘测点位间距设置为20至35m,探测深度要比设计加固深度多出3至5m,以此摸清地下水、软弱夹层的分布情况,尽量规避施工盲区。在场地处理阶段,施工人员需要铲除地表杂草、腐殖土以及建筑垃圾,清理厚度不得小于0.3m;对于低洼地面,可使用碎石素土分层回填找平,表层铺设0.5至1.0m的碎石垫层,既能减轻夯击震动对表层土的破坏,也方便机械设备通行。若地下水位小于2m,还应布设间距15至25m的排水盲沟。施工设备要根据夯击能级进行挑选,低能级工程多用10至20t铸铁夯锤,中高能级则选用25至40t钢制夯锤;锤底预留150至200mm透气孔,起重设备承重需为夯锤自重的1.5倍以上,落距误差控制在±20cm以内<sup>[3]</sup>。

### 3.2 施工参数精准管控

在强夯施工的过程当中,施工参数能够直接影响地基处理的最终效果;其中较为关键的控制指标,包含夯击能量、夯点间距、夯击次数以及夯击遍数,工作人员需要结合土质情况和加固深度,对各项参数进行合理设定。施工能级一般按照加固深度进行选取,加固深度在5至8m时,通常采用3000至6000kN·m的夯击能级,深度达到8至12m时,则选用7000至10000kN·m的较高能级。工程常用的夯点布置方式,分为梅花形与正方形;梅花形排布均匀性更好,适合大面积平整场地,正方形排布操作简单,一般用于条形基础施工。夯点间距通常取夯锤直径的2.5至3.5倍,范围保持在5至9m。施工一般搭配主夯、副夯以及满夯工序,普通场地设置两遍主夯、一遍副夯和一遍满夯,软弱土层可额外增加补强夯。单点夯击以沉降稳定为判定依据,低能级施工沉降量控制在20至40mm,高能级为30至50mm;另外,砂土、碎石土的间隔时间为3至8h,黏性土则需要静置24至72h,方便孔隙水压力充分消散。

### 3.3 标准化夯击施工工艺

工作人员在开展夯击作业时,应当遵循分区施工、循序渐进的施工原则,以此优化施工顺序,减轻土体受到的不均匀扰动。对于面积较大的施工场地,施工人员可以划分独立施工区块,单块区域面积设置在2000至5000m<sup>2</sup>,尽量不要进行大范围连续夯击,能够有效防止土体出现应力集中的问题。施工流程一般按照先边缘、后中心,先深层、后表层的顺序推进;工作人员先夯击场地边缘位置,以此形成约束结构,限制土体向外侧偏移,之后再逐步夯击场地中心区域。主夯施工结束后,可在规定间隔时间内开展副夯作业,用来填补夯击盲区,副夯能量一般为主夯的60%至70%;后续进行的满夯作业采用低能级施工,夯印搭接宽度

不能小于四分之一锤径,用来消除表层松散土质。施工期间,工作人员需要实时观察夯坑状态,一旦出现土体隆起超150mm、坑体过深等异常情况,就要暂停施工,回填碎石找平后再继续作业;同时工作人员还要做好施工数据记录,登记夯击次数、沉降数据等信息,保证施工流程有据可查<sup>[4]</sup>。

### 3.4 施工质量检测与管控

质量管控贯穿施工全流程,分为施工过程监测、施工完成检测两个阶段,依托量化检测指标把控加固质量。施工过程中,重点监测夯锤落距、夯击次数、夯坑沉降量、土体隆起高度,每日随机抽检5%以上夯点,核查施工参数执行情况,落距偏差超出标准时及时调整起重设备。施工完成后,需静置养护7至15d再开展检测作业,砂土养护周期不少于7d,黏性土养护周期不少于12d,保障土体内部应力完全消散。检测方式选用原位测试结合室内试验,检测点位均匀分布,每1000m<sup>2</sup>布设不少于3个检测点,检测指标包含土体密实度、压缩模量、地基承载力、加固深度。行业规范要求,加固完成后填土密实度需 $\geq 93\%$ ,原状土压缩模量提升至8MPa以上,地基承载力特征值增幅不低于40%。针对检测不合格区域,划定补强施工范围,采用加密夯点、提高夯击能级的方式二次加固,直至指标达到设计标准。同时做好施工场地防护,夯击作业时在场地周边布设振动监测点,监测间距30m,临近构筑物区域振动速度需控制在2cm/s以内,规避振动次生危害。

### 3.5 常见施工问题及优化措施

强夯在施工开展的过程中,往往会出现土体隆起、坑内积水、加固不均以及表层松散等常见病害,施工人员应当结合现场土质条件,去制定对应的处理优化办法。黏性土质场地比较容易发生土体隆起,当单点土体隆起高度超过200mm时,工作人员可以减少单遍夯击次数,拉长夯击间隔时间,用来加快孔隙水排出,同时缩小夯点间距,以此均衡土层内部应力。地下水位较高的区域,很容易产生夯坑积水;施工前期可以布置排水盲沟和集水井,持续抽排积水,夯击结束以后,再回填透水砂石,用来阻断水分的渗透通道。夯点布置不合理、落距存在偏差,一般会造

成加固不均匀,施工人员可利用全站仪标定点位,将误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内,不规则场地可灵活调整排布方式,消除加固盲区。对于普遍存在的表层疏松问题,满夯阶段可以降低夯击能级,放缓施工速度并增加夯击次数,完工后铺设0.3m素土进行压实封闭。另外,气温低于5℃时土体容易冻结,需要缩短单次施工时长;雨季可设置2%至3%的地表坡度,避免雨水淤积软化土层,以此维持施工的整体稳定性<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

本文通过拆解强夯法四类加固机理,明确不同土体的改良作用逻辑,结合量化施工参数,系统梳理前期筹备、参数管控、夯击作业、质量检测及问题优化等施工要点。各类机理协同作用,实现土体颗粒重组、孔隙压缩、强度提升,适配多类不良地基改良。精准的施工参数管控、标准化作业流程是保障加固质量的核心,合理把控夯击能级、间距、间歇时间,可有效规避施工缺陷。未来可结合土层动态监测技术,优化能级适配方案,进一步提升加固均匀性。以期本次技术分析能够完善强夯施工应用逻辑,为同类地基处理工程提供可靠技术参考。

### [参考文献]

- [1]宋志磊.回填土地基强夯法加固施工要点探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(1):050-053.
- [2]杨德庆.建筑工程地基处理强夯法加固施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(4):017-020.
- [3]王海涛.强夯置换法在软土地基公路路基加固施工中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(2):142-145.
- [4]于越.强夯法施工技术在软土地基公路路基施工中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(2):087-090.
- [5]于玮玮.强夯法加固软土地基施工技术应用要点[J].交通世界,2025(22):113-115.