

QIANG HANG SHIGONG JISHU YU GONGCHENG SHIJIAN

强夯施工技术与工程实践

安 明 编著
叶观宝 主审

中国建筑工业出版社

强夯施工技术与工程实践

安 明 编著

叶观宝 主审

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

强夯施工技术与工程实践/安明编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-112-22055-7

I. ①强… II. ①安… III. ①强夯-工程施工-研究
IV. ①TU751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 069282 号

本书以《强夯地基处理技术规程》CECS 279—2010 为编写背景, 在分析强夯加固机理的基础上, 对强夯的设计、施工、质量检测等内容进行系统论述, 并对未来强夯技术的研究和发展指明了方向。另外, 还结合工程实践对强夯施工技术进行了详细的说明。全书共分为 7 章, 分别为: 概述, 强夯加固机理, 设计, 施工, 质量检测, 强夯施工技术发展展望, 工程实例。

本书可供从事地基处理的岩土工程技术人员和科研人员参考阅读。

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

强夯施工技术与工程实践

安 明 编著

叶观宝 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10½ 字数: 209 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-22055-7

(31957)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

强夯加固地基技术于 20 世纪 60 年代由法国梅纳技术公司首创。20 世纪 70 年代末引入我国。1979 年, 山西省机械施工公司(山西机械化建设集团有限公司的前身)在科研设计部门的协助配合下, 首次在山西轩岗矿务局同家梁矿大型煤筒仓地基采用强夯法处理获得成功, 成为中国最早进行强夯法试验研究和工程实践的单位之一。

之后, 山西机械化建设集团有限公司先后在山西化肥厂、吉林长山热电厂、大连石油七厂、大连新港大窑湾港区、上海关港、浦东机场、福州长乐机场、武汉钢铁公司、重庆钢铁公司的技改扩建工程、九寨沟机场、贵州发耳电厂、昆明机场等数百项工程中, 进行强夯试验研究和工程处理。地基处理范围涉及填海地基、湿陷性黄土地基、软土地基、红黏土地基、岩溶地基、盐渍土地基、高填方地基、高水位地基。在强夯波动机理、动力固结原理、高水位地基强夯机理、强夯振动传播规律与隔振技术方面进行了深入的探讨和研究, 取得了一定的成果。先后获山西省科技进步二等奖 2 项, 三等奖 2 项, 发明专利 4 项, 实用新型专利 10 项。

在近 40 年的工程试验研究和工程实践中, 强夯法已成为我国地基处理中应用最广、经济有效、简便易行的施工技术。

作者对强夯施工技术在工程中的应用研究进行了回顾和总结, 并参阅了国内同行的一些文献资料, 编著了此书。

本书介绍了强夯机理、施工参数设计和施工应用方面的一些研究成果, 并给出工程实例, 以供相关技术人员参考。由于作者水平有限, 书中不妥及错误之处在所难免, 请读者批评指正。本书由上海同济大学叶观宝教授审阅, 并给出了许多宝贵意见, 在此致以衷心的感谢!

作 者

2017 年 11 月

目 录

前言	
第一章 概述	1
第二章 强夯加固机理	3
第一节 加固机理的分类	3
第二节 强夯加固地基的波动原理	4
第三节 非饱和土的加固原理	6
第四节 饱和土的加固原理	6
第五节 强夯置换法的动力固结原理	8
第六节 高水位地基强夯机理及施工技术研究	21
第七节 强夯振动传播规律及隔振原理的研究	39
第三章 设计	56
第一节 强夯的应用范围与地基土分类	56
第二节 强夯有效加固深度	57
第三节 强夯参数设计	62
第四节 改进型动力固结强夯法	69
第五节 强夯置换法	70
第六节 特殊土地基强夯处理	71
第四章 施工	76
第一节 施工设备	76
第二节 施工准备	84
第三节 施工要点	85
第五章 质量检测	89
第一节 强夯法地基处理质量检测和验收项目和标准	89
第二节 地基竣工验收及检测要求	89
第六章 强夯施工技术发展展望	91
第一节 强夯加固地基机理研究的方向	91
第二节 强夯施工技术与其他处理方法的综合应用	96

第七章 工程实例	101
第一节 超高能级强夯法处理低含水量湿陷性黄土地基的应用.....	101
第二节 超高能级强夯与强夯置换施工技术的联合应用.....	146
索引	156

第一章 概 述

强夯法加固地基自 1965 年法国梅纳 (L. Menard) 首创以来, 以其工艺适用范围广、设备简单、施工方便、节省材料、施工效率高、施工文明和施工费用低等优点, 迅速传播到世界各地。

我国从 1978 年开始, 先后在天津新港、河北廊坊、山西白羊墅、河北秦皇岛等地进行了试验研究和工程实践, 取得了显著的加固效果。随即, 强夯法在全国各地推广使用。强夯法引入我国四十多年来, 正值我国改革开放, 基础设施、经济建设高速发展, 再加上我国地域辽阔, 自然与工程地质条件差别巨大, 使得强夯施工技术获得了巨大的发展空间, 工程数量和使用规模都居世界第一, 取得了丰硕的成果。

强夯法在国际上称为动力压实法 (Dynamic Compaction Method) 或称动力固结法 (Dynamic Consolidation Method), 这种方法是反复将夯锤提到高处, 使其自由落下, 给地基以冲击和振动能量将地基土夯实, 从而提高地基的承载力, 降低其压缩性, 改善地基性能。

强夯法在我国的应用和发展中, 经历了以下几个阶段:

(1) 基于动力压实的原理, 被大量地应用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土、黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基, 不但很好地提高了地基土的强度、密实度, 降低了压缩性, 同时在消除砂土、粉土液化, 消除湿陷性黄土的湿陷性方面取得了非常突出的效果。20 世纪 80 年代初, 太原理工大学、化工部第二建设公司、山西省机械施工公司, 在山西化肥厂应用 $6250\text{kN} \cdot \text{m}$ 强夯能级处理湿陷性黄土, 消除湿陷性深度达到 12m , 这是我国推广强夯法初期取得的重要成果。

(2) 随着我国沿海一些港口城市的对外开放, 沿海地区建设规模迅速扩大, 建设用地稀缺与农争地的矛盾日益突出; 同时出于港口建设的需要, 围海造地也成为沿海城市建设的必然趋势, 开山填海是围海造地的主要途径。

但这种将开山获得的石块、碎石土抛入海中堆积而形成的场地, 不但非常稀松, 而且极不均匀, 如果不作处理, 根本不能成为建设场地。如用传统的常规处理方法, 不但造价高昂, 加固效果差, 仅效率低、工期长也为快速发展的建设形势难以接受。20 世纪 80 年代中期, 中国建筑科学研究院和石化北京设计院、山西机械施工公司等采用强夯处理填海地基建造重要的工业建筑获得成功, 并在沿

海地区推广,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,也是我国强夯施工技术发展史上的一个重要标志。

(3) 随着改革开放由沿海向中西部的发展,我国基本建设形势又遇到新的课题需要解决。一是沿海及内地广为分布的软土地基,处理效果差、工期长、造价高;二是我国冶金、化工、电力等工业排放的工业废渣大量堆积、占用土地、污染环境。

太原工业大学于1984年采用在夯坑中填砂的办法,处理新近堆积软土,通过 $1600\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯,边夯边填,夯实后形成4m的砂石墩,使承载力为 $60\sim 70\text{kPa}$ 的软土地基形成地基承载力为 200kPa 的复合地基,这是强夯置换的初步探索。1987年冶金部建筑研究总院和山西省机械施工公司等人在武汉钢铁公司龙角湖沼泽地试验强夯置换加固软土地基,将质地坚硬、性能稳定和无侵蚀性的冶金渣作为地基和填料,不但使大量沼泽地成为工业建筑用地,同时还搬掉了武钢建厂以来堆积的占地 10km^2 的渣山。我国已故著名土力学专家刘惠珊教授根据这一成果总结了强夯置换法,并将其纳入地基处理规范;同一时期,冶金部建筑研究总院和山西省机械施工公司用强夯法处理重庆钢铁公司冶金渣填地基,用作重型工业厂房地基取得成功。

1991年,深圳市建筑科学中心等将强夯置换碎石墩和强夯置换挤淤沉堤两种方法,分别用于建筑场地地基处理和飞机场跑道、滑行道的拦淤堤施工。

以上项目为解决工业废渣利用和软土地基处理提供了新的思路和途径。

在西部大开发的建设高潮中,我国强夯施工技术又遇到一次难得的发展空间与机会。我国西南地区山大沟深,工程地质条件恶劣,地质灾害频发,搬山填谷、填方造地是我国中西部丘陵、山区解决建设用地的唯一途径。这些填方地基,最大填方高度达百米以上,最大填方量往往在数百万至数千万立方米以上,昆明机场的最大填方量达到一亿立方米以上。这些填方地基的加固绝大多数采用了强夯法处理。传统的分层碾压法,由于对填方材料含水量、粒径、级配要求高,分层厚度小,很难满足大规模填方地基的工期和质量要求。中国建筑科学研究院、中国民航设计院、机场建设集团、西南电力设计院、山西机械化建设集团有限公司在贵州发耳电厂、四川福溪电厂、九寨黄龙机场等西部电厂及机场建设中,针对高填方地基强夯处理中的填方材料、回填工艺、压实功能、稳定性、振动影响、施工工艺等一系列课题进行技术攻关,取得了多项成果,摸索出我国中西部山区、丘陵地区高填方地基以强夯为主的综合整治加固处理方法。

第二章 强 夯 加 固 机 理

第一节 加固机理的分类

强夯法虽然在实践中已被证实是一种较好的地基处理方法，但到目前为止，还没有一套成熟和完善的理论和设计计算方法。目前，国内学术与工程界普遍将强夯加固机理分为三种类型：动力密实（Dynamic Compaction Method）、动力固结（Dynamic Consolidation Method）和动力置换（Dynamic Replacement），它取决于地基土的类别和强夯施工工艺。

一、动力密实

采用强夯加固多空隙、粗颗粒、非饱和土是基于动力密实的原理，即用冲击型动力荷载，使土体中的孔隙体积减小，土体变得密实，从而提高地基土的强度。非饱和土的夯实过程，就是土中的气相（空气）被挤出的过程，其夯实变形主要是由于土颗粒的相对位移引起的。

二、动力固结

用强夯法处理细颗粒饱和土时，则是借助于动力固结的理论，即巨大的冲击能量在土中产生很大的应力波，破坏了土体原有的结构，使土体局部发生液化并产生许多裂缝，增加了排水通道，使孔隙水顺利逸出，待超孔隙水压力消散后，土体固结。由于土的触变性，其强度也得到了提高。

三、动力置换

动力置换可分为整式置换和桩式置换。整式置换是采用强夯将碎石整体挤入淤泥中，其作用机理类似于换土垫层法。桩式置换是通过强夯将碎石填筑土体中，部分碎石桩（或墩）间隔地夯入软土中，形成桩式（或墩式）的碎石墩（或桩）。其作用机理类似于振冲法等形成的碎石桩，它主要是靠内摩擦角和墩间土的侧限来维持桩体的平衡，并与墩间土起复合地基的作用。

第二节 强夯加固地基的波动原理

一、波动理论概要

对连续弹性体而言,质点在连续介质内振动,其振动的能量可以传递给周围介质,引起周围介质的振动,振动在介质内的传播过程中形成波。波在介质内传播分为纵波和横波。波的传播形式是纵波还是横波由传播的介质所确定。当介质产生剪切应变,弹性恢复力存在时则介质可以传播横波(一般固体介质具有这种性质)。否则不能形成横波,如液体和气体介质除液体表面可以传播瑞利波外不能在内部传递横波。当介质产生拉压变形有弹性恢复力存在时,此种介质可以传播纵波。液体及气体受压缩时,有弹性恢复力作用,剪切时无弹性恢复力,因此在液体和气体中只能传播纵波,在固体中,纵波和横波可以同时存在。

从介质的谐振周期 $T = \sqrt{m/k}$ 分析,介质的谐振周期和质量刚度有关,对液体介质,其刚度 k 值远远大于土体介质,所以当重锤夯击时引起水相和土相介质的振动频率也不相同,因此不同的介质在夯击中引起不同的反应。

二、强夯加固地基时的振动波型

地基是半无限弹性体,强夯处理地基时,由高势能夯锤自由落下和地基土碰撞产生巨大的冲击波,这部分冲击能,一部分以声波的形式向外传播,一部分由夯锤和地基土摩擦而形成热传播,其余大部分冲击能以体波的形式由振源点向地基深层及周围传播,能量释放于可加固的地基中,使土体得到不同程度的压密和加固。强夯夯击时在弹性半空间地基中产生的波场示意图 2-1。冲击波对地基产生压缩和侧向挤压,产生纵波。纵波的质点振动方向和传播方向相同,所以也称为压缩波(P波)。冲击波对地基产生的剪切变形,在地基中产生横波,即剪切波(S波),横波的振动方向和传播方向垂直。

在柱坐标系中,纵波表现为竖直方向的纵向振动和水平方向的径向振动。

横波在柱坐标系中表现为与传播方向垂直的竖向振动(SV波)(对地基有松动作用)和水平切向振动(SH波)。在地基表面,SV波和径向振动波合成为瑞利波(R波),SH波和径向振动波合成为乐夫波(L波),对地基产生松动影响的主要是SV波。松动层以下,由于压缩波的作用,使土体得到加固。地基土为一弹性体,在强力夯击下,地基产生变形,其变形量包括塑性及弹性两部分,总变形量除与单击能量大小有关外,也随夯击数而异。

为了更好地理解强夯振动原理,将振动波分解到柱坐标系中进行表达,更为形象和易懂。图 2-2~图 2-4 为柱坐标系中波振动的示意图。

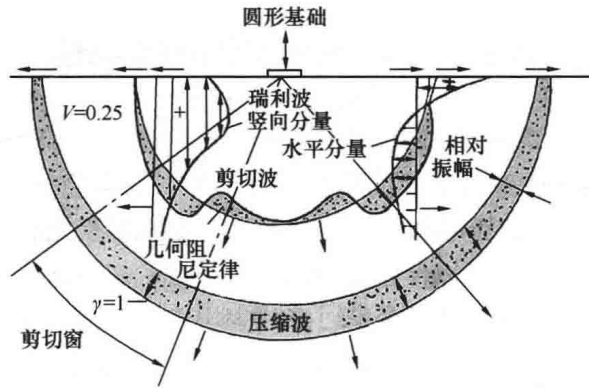


图 2-1 夯锤夯击在弹性半空间地基中产生的波场

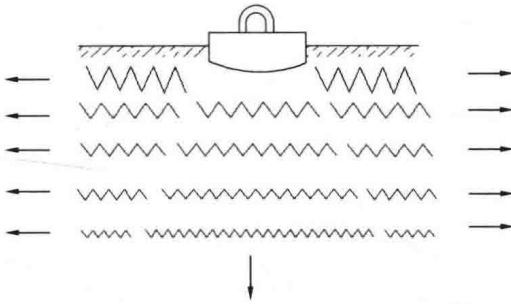


图 2-2 夯点下纵剖面竖向振动压缩波与剪切波示意图

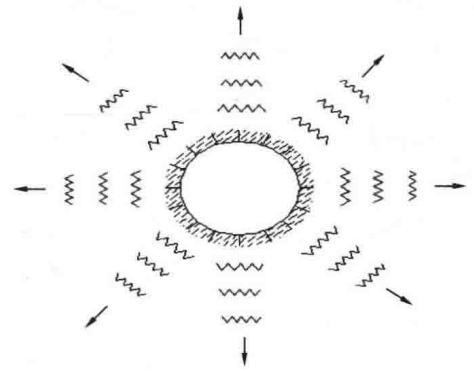


图 2-3 夯点下水平剖面径向振动压缩波示意图

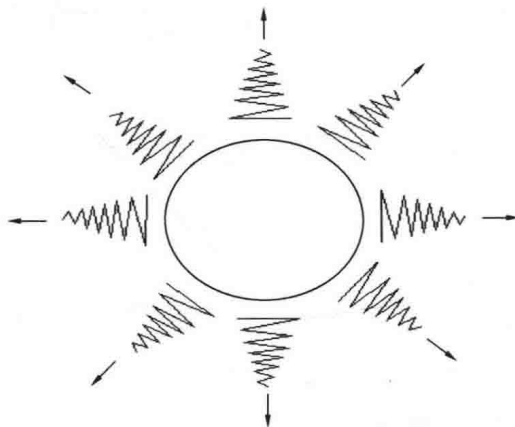


图 2-4 夯点下水平剖面水平切向振动剪切波示意图

第三节 非饱和土的加固原理

对非饱和地基土,初夯变形以塑性变形为主,能量大部分作用于浅层土,使浅层地基得到加固。随夯击次数的增加,夯击能通过较密实的浅层土传播至深层,使深层土得到加固。继续增加夯击次数,浅层土塑变充分发挥,其弹性变形出现。其弹性变形一方面可以传递能量向深层传播,加固深层土体,这是弹性变形有利的一面。另一方面,弹性变形可以使表层出现反弹,使能量损耗,减少夯击效果,这时的表现即为每击的夯沉量逐渐变小,夯击数与夯沉量曲线趋于平缓,其临界点即为最佳夯击能(数)。

在强夯过程中,每次夯击能量都以纵波和横波这两种波能在地基中传播,其能量的分配随地基的夯击加固在发生变化。在初夯时,土体产生压缩塑变,以纵波作用为主。塑变完成产生弹性压缩时,此时横波的作用相对增加,从而降低了夯击效果。这一点也为强夯振动测试随击数的增加、振动反应增强所证实。

在振动测试中,所测的为地基表面波。面波的能量增加意味着体波能量的减少。横波在地基表面极化为垂直方向振动的SV波和水平切向振动的SH波。

SV波和压缩波(水平径向振动波)在地基表面合成瑞利波;SH波和压缩波(水平径向振动波)在地基表面合成乐夫波。面波中的乐夫波影响忽略不计,所以面波多以瑞利波出现,当土体出现弹性变形,再增加夯击数其效果减小。此时可以停夯,确定饱和夯击能。如果在夯坑铺设砂石后继续夯击,可以减少反弹,增加夯击次数,增大加固深度。

所以非饱和土的加固机理,可以归结为压缩波的反复作用,对土体产生固结。一部分能量使土体产生塑变,转换为土的位能,通过土体的弹性变形传递另一部分能量向深层传播,加固深层地基,最终使能量转换为土的塑变位能,这是非饱和土也可多遍夯的原理。

第四节 饱和土的加固原理

关于强夯加固饱和土的机理,梅纳提出了以下几点:

- ① 由于存在微小气泡,孔隙水具有压缩性;
- ② 由于冲击力的反复作用,孔隙水压力上升,地基发生液化;
- ③ 由于裂隙以及土接近液化或处于液化状态,还由于细粒土的薄膜水一部分变为自由水,土的透水性增大;
- ④ 由于静置孔隙水压力降低,土的触变性得到恢复。动力固结法是加固饱和土(细粒土)的理论依据。

梅纳只是从饱和土的排水固结原理解释了强夯加固饱和土的可能性原理。(张永钧、史美筠两位学者在《地基处理手册》中,对此进行了详细的阐述,在此不再重复),没有对动力学原理做出满意的解释。

一、动力固结的动力学原理

山西省建筑科学研究院崔朝显研究员通过一系列试验现象,利用波动原理精辟解释了强夯加固饱和土的机理。

他指出:对于水位以下的饱和土而言,强夯的冲击波在水位以下取得了有利的传播条件。在液相介质中,只能传播纵波(压缩波)。相对而言,在液相介质中能量的损耗较少。由于在不同的介质中,振动引起的频率、速度、能量不同,有不同的振动效应。当两者的动力差大于土粒对水的吸附能力时,自由水、毛细水将从颗粒之间析出。在实践中我们看到由于连续轻击饱和土,水分产生析出现象,也就是由于水和土粒有不同的振动频率,存在动力差。

在火车行进或启动时,在同一振源作用下,杯中水很容易振动溢出,比固体介质振感突出,这样将水和固体介质混置在一起时,水将产生析出现象;同时,也对固体介质产生冲击作用,又如机械振动筛选机,不同粒径和质量的材料在振动筛上分布在不同的部位。饱和土中水的振动也有同样作用。由于水、土两相混合物在夯击的动力作用下,两者的物理参数不同,振动效应也不同,存在动力差,产生间隙水的聚结,形成动力水的聚结面,造成排水通道。在动力冲击作用下,自由水向低压区排泄,当动水压力超过上复土自重压力时,自由水将喷出地面,经过一段触变土结构恢复,密度增大,强度提高。

所以地基经夯击加固后,可能形成水位下降,土粒含水量减少,增加土的抗渗性能。在一些强夯工程也曾有类似现象产生,最典型的就是强夯加固可液化地基,是强夯加固饱和土最完美的诠释。

崔朝显研究员曾做过这样的试验:取一部分饱和砂土和饱和状轻亚黏土(粉土),用透水的纱布包扎,不论是砂土或轻亚黏土在自重作用下水分很难或不产生析出;而在振动作用下,对砂土试样,水分极易析出,停放一段时间,试样土密实、固结;而轻亚黏土则需经过较长时间或强烈的振动水分才能析出,停放一段时间,土样密实固结。

二、关于动力固结动力学原理的结论

崔朝显研究员通过这个试验,得出了以下两点结论:

- (1) 动力排水固结的效应远远大于静态固结效应。
- (2) 砂土、粉土两种试样需一段振击后,水分才开始析出。但对于饱和粉土则需经历较长时间。一旦出现析水,两者即使在轻微的振动下,水分也能绵绵不

断地流出。这种现象表明：由于土中孔隙水和土粒交错均匀排列，水分和土粒处于惯性相对静止状态。要使水分离析，首先要突破两者静止平衡，所以要输入一定的激发能量和适当的振动次数。激发能量的大小和土粒组成有关，当黏粒及粉粒较多时，由于水的吸附力较强，所以需要输入较高的能量和较多的振动击数。

崔朝显研究员认为：强夯法加固粉土地基的效果不及砂性土突出，其原因也在于此，针对这一观点，造成粉土地基强夯效果不及砂土的原因，还应补充以下几点：

(1) 对于粉质黏土等一类含黏粒更高的黏性土，在夯击振动后，水的析出需要更长的时间。这就说明：饱和粉质黏土的强夯不但需要更高的夯击能、更多的夯击遍数，还需要更多的遍与遍之间的固结时间。

(2) 当大面积强夯时，由于强夯点与点之间的干涉效应，使得排水通道不畅，增加了孔隙水消散的阻力。山西化肥厂一些场地。强夯地基使用数年后，发现地基中一些疏松部位在开挖后充满积水，很明显是由于地基排水通道不畅，使孔隙水向由于某些原因造成局部疏松的区域积聚。

在工程实践中，由于孔隙水消散时间过长（6个月， c 、 φ 值增长20%~30%），使强夯加固饱和黏性土的效果大打折扣，失去了其工程应用的价值。因此，张永钧、史美筠指出：对饱和度较高的粉土和粉质黏土地基，一般来说强夯效果不显著，应慎用。

我国工程技术人员，通过在饱和黏性土地表铺设硬质粗颗粒垫层，并在夯击过程中向坑中加硬质粗骨料，建立排水通道，使地基夯坑周围和坑底的孔隙水就近转移，总结提出了加快土层固结的改进型动力固结强夯法，并在此基础上，进一步总结发展出了强夯置换施工工艺，即动力排水固结法。

第五节 强夯置换法的动力固结原理

一、强夯置换法的动力排水固结原理

强夯置换起源于对于饱和软土的强夯加固。1984年，太原工业大学采用在夯坑中填砂石的办法处理新近堆积软土，场地原为稻田，土质为软塑—流塑的粉质黏土，承载力为60~70kPa，采用1600kN·m的强夯边夯边填，夯后形成4m的砂石墩，复合地基承载力达到200kPa。1987年，冶金建筑研究总院和山西省机械施工公司在武汉钢铁公司的龙角湖沼泽地试验强夯置换加固地基取得成功。

强夯置换，从形式上看是一种动力置换。但其实质上是真正的动力固结排水法。强夯置换所形成的硬质粗骨料置换墩，相当于预压地基的排水竖井。而置换墩形成过程中的不断夯击，其对夯间土的不断振击，促使软土地基不断析出水分，向置换墩汇集。因此，在强夯置换中，可以看到置换点的涌水、喷水现象。

从表 2-1 静力固结与动力固结的比较中，不难判断强夯置换法就是真正的动力固结排水法。

静力固结与动力固结的比较 表 2-1

固结形式	静力固结	动力固结
固结荷载	静荷载	动荷载
加载形式	天然地基堆载、地基堆载+排水通道、真空预压+排水通道	强夯夯击振动
排水通道	袋装砂井、塑料排水板、地基中透水层	强夯置换墩
特点	排水固结持续缓慢	排水固结间断性，较快
加载方式	真空预压，一次性加载，堆载预压，分级加载	隔点分遍夯击
施工方法	天然地基堆载法，地基堆载+袋装砂井、塑料排水板法，真空预压+袋装砂井、塑料排水板法，真空预压+地基堆载+袋装砂井、塑料排水板法，降水预压排水法，电渗排水预压法	强夯置换法； 强夯半置换法
适用范围	淤泥质土、淤泥、冲填土	淤泥、淤泥质土、冲填土、高饱和度的黏性土、素填土地基、软塑红黏土地基
固结效应	小	大

二、改进型的动力固结法（强夯半置换法）

强夯半置换法是在强夯置换法的启发下，形成的一种专门用于处理承载力在 80~120kPa 之间的饱和黏性土的施工工艺。这类土包括高饱和的一般黏性土、软塑状的红黏土等地基。

强夯半置换与强夯置换的区别在于由于这类饱和黏性土有一定的强夯置换墩的长度，不需全部穿透土层。根据土层厚度，达到置换处理土层的 1/2~2/3。强夯半置换墩的形成，可使夯间及墩底土层产生孔隙水，从墩体排出，从而使夯间及墩底部的土层的强度有一定的提高，满足下卧层的强度要求。

三、动力固结排水法工程实例（强夯置换）——武钢龙角湖沼泽地填渣强夯置换

本项目为 20 世纪 80 年代末，由武钢地基组、冶金部建筑研究总院、山西省机械施工公司合作共同研发的项目。

（一）场地概况

武钢龙角湖沼泽地是废弃的武钢工业港地，面积 57 万 m²，厂区自然地面标高 23.00m 左右，设计地面标高 28.0m。场地位于人工填土、运河淤泥、湖塘相沉积层和长江河漫滩阶地等地貌交汇处，与长江相通。周围有防洪堤。整个场地属于沼泽地段，浸水池中含沥青，水下有淤泥，遍地树木茂盛，水草丛生，最不良的地质现象是运河淤泥层和湖塘相沉积层。地基承载力只有 40~60kPa。大部

分面积被这层土覆盖。淤泥及淤泥质土厚度在 2~8m 之间。最厚处可达 11m。每逢汛期,长江水倒灌,整个场地一片汪洋。

武钢扩建工程中,场地均处于条件差、场地低洼的位置,面临的几个难题:

1. 大面积软土处理难,工业厂房设计要求高;
2. 设计地面较天然地面相差 5m 左右。如何填平这一大片洼地,需要将地面下 15m 左右的饱和黏性土、软土的沉降控制在可接受的水平内,需要回填的土方量达 700 多万 m^3 ,而武钢附近的数十千米范围内已无土可取;
3. 武钢渣场已堆放钢渣 700 多万 m^3 ,而每年仍有 100 多万 m^3 钢渣排放,渣场渣满为患,危及钢铁生产和城市环境。

在进行了挖淤换土,预制桩、振冲渣桩和堆载预压等多种方案比较后,均有费用高、工期长、施工难度大、质量难以保证等问题。

在地基处理的同时,如能解决渣的处理问题,开辟一条以渣代土,废渣利用的新途径,对解决填方土料、土源、节省渣场的投资有极大的经济价值。

(二) 处理方法

1. 填渣强夯挤淤即强夯置换法,适用于淤泥厚度小于 5m 的区域,且有较好下卧层的场地。强夯可使夯点下的淤泥向四周挤出。然后用矿渣填入夯坑内,代替被挤出的淤泥。当夯坑夯到一定深度或拔锤困难时,随即向夯坑内填渣,反复填夯,使每个夯点形成一根密实的渣柱,并穿透淤泥层,使渣柱底端支撑于下卧层较好的土层下。这样夯密实的渣柱强度很高,承载力一般都在 300kPa 以上,其次,在填渣挤淤过程中,必然将部分渣侧向挤入夯间的淤泥中,使之成为渣与淤泥的结合物。从而可改善夯间淤泥性质。同时,在填渣强夯的过程中,强夯产生的振动,使淤泥的水析出,极易产生很高的孔隙水压力,渣柱是良好的竖向排水通道,便于吸收夯间的淤泥水分的排出。

2. 钢渣碎石桩+钢渣垫层强夯法也是一种动力排水固结法,适用于淤泥厚度 $>5\text{m}$ 的区域。

(三) 处理目的

1. 重型 I 类厂房

- (1) 基底的承载力特征值 $f_{ak} \geq 300\text{kPa}$;
- (2) 钢渣夯实层的压缩模量 $E_s \geq 15.0\text{MPa}$;
- (3) 下卧层(钢渣夯实层以下)的压缩模量 $E_s \geq 7.0\text{MPa}$;
- (4) 基底以下 5m 处的附加应力 $p_z \geq 100\text{kPa}$;
- (5) 基底以下 10m 处的附加应力 $p_z \geq 50\text{kPa}$ 。

2. 中型 II 类厂房

- (1) 基底的承载力特征值 $f_{ak} \geq 200\text{kPa}$;
- (2) 钢渣夯实层的压缩模量 $E_s \geq 12.0\text{MPa}$;

- (3) 下卧层（钢渣夯实层以下）的压缩模量 $E_s \geq 6.0 \text{MPa}$;
- (4) 基底以下 5m 处的附加应力 $p_z \geq 70 \text{kPa}$;
- (5) 基底以下 10m 处的附加应力 $p_z \geq 35 \text{kPa}$ 。

(四) 处理方案

地基处理试验共分为三个区，其中，Ⅰ、Ⅲ区为强夯试验区，淤泥和淤泥质土厚度 2~5m，施工方法为先铺 1.5~2m 厚的钢渣，再进行 3000kN·m 和 5000kN·m 的强夯。强夯时采用了夯击加填渣的工艺，即先夯 3~5 击，当夯坑过深致使拔锤困难时，用钢渣将夯坑填平继续夯，夯至 20 击。Ⅱ区为钢渣碎石桩辅以强夯区，淤泥和淤泥质土厚度 5~7m。施工时，先填钢渣 1~1.5m 厚，再打 10m 长的夯扩桩，桩身材料选用经破碎分选的钢渣粒料，粒径 1~5cm。夯扩桩施工完毕后，进行低能级（1500kN·m）满夯，再填 3~4m 厚的钢渣，进行 3000kN·m 的强夯。由于Ⅱ试区施工工艺不是单纯意义上的强夯，不是本节讨论的重点，本节仅就Ⅰ、Ⅲ试区的试验结果进行研究分析。

1. 场地地层概况

① 运河相淤积层（ Q^{yu} ）

淤泥，呈软塑—流塑状态， $w = 53.2\%$ ， $I_L = 1.13$ ， $a = 1.26 \text{MPa}^{-1}$ ， $E_s = 2.2 \text{MPa}$ ， $e = 1.51$ ，厚度 0.7~2.6m。

② 湖塘相淤泥质土（ Q_L ），位于淤泥层下，多呈流塑状态， $w = 52.6\%$ ， $I_L = 1.07$ ， $a = 1.54 \text{MPa}^{-1}$ ， $E_s = 2.3 \text{MPa}$ ， $e = 1.46$ ，厚度 0.5~3m。

③ 第四纪全新统冲积层（ Q_4^{al} ）

粉质黏土及黏土层，平均 $w = 24.1\% \sim 28.2\%$ ， $e = 0.75 \sim 0.8$ ， $a = 0.26 \sim 0.31 \text{MPa}^{-1}$ ， $E_s = 7.06 \sim 8.41 \text{MPa}$ ，承载力 90 kPa 以上，层底标高低于 13.00m。

2. 强夯施工技术参数

Ⅰ、Ⅲ强夯试验区施工技术参数见表 2-2。

强夯施工技术参数

表 2-2

试验区	锤形	锤重 (kN)	底面积 (m^2)	能量 (kN·m)	夯点 间距 (m)	平均夯击能 (kN·m/ m^2)	挤淤置 换率	强夯 遍数
Ⅰ (甲)	球底	180	5	3500	4.5×4.5	7740	0.48	5
Ⅰ (乙)	球底				3.5×3.5	12260	0.8	
Ⅰ (丙)	平底	250	7	5000	3.5×3.5	17140	1.15	
Ⅰ (丁)	平底				4.5×4.5	10700	0.7	
(满夯)	平底	150	5	2000	夯印相切			
Ⅲ区	球底	180	5	2000	4.0×4.0 夯印相切	10800		4
	平底 (满夯)	150	5	1500				

注：挤淤置换率系指填渣强夯形成的渣桩柱面积与每柱所加固的面积之比，渣柱的断面积按锤底面积计算。