

地基加固文集

长江流域规划办公室施工研究所
水利水电爆破咨询服务部

1987

1
45

前 言

我国古代很早就采用打夯和打碓的方法压实土层,但当时锤重只有几十公斤至几百公斤,落距一米(夯)至几米(碓),夯击能量0.1至0.2吨米,有效压实厚度约几十厘米。解放后五十年代至六十年代,曾用2至3吨夯板夯实土坝填料,能量10—20吨米,有效压实厚度1米以内。在水下用过5吨夯锤压实防波堤水下垫层,能量10—20吨米,有效压实厚度2—3米。六十年代末,法国工程师梅纳将夯锤加大至几十吨,落距几十米,夯击能量几百吨米,有效夯实厚度几米至十几米。故称“强力夯实法”简称“强夯法”也叫“动力固结法”。此法施工快,成本低;设备亦不复杂,适应性强,对粘土、壤土、砂、砂卵石、石碴、堆石、混合杂土、城市垃圾土等都可采用。我国从1978年开始采用强夯法,现在国内外强夯法已广泛用于工业与民用建筑、道路、铁路、港口码头、船坞、电站、油库、机场、市政工程等行业。七十年代以后,最大夯锤已达200吨,石碴加固深度达30米(瑞典乌德瓦拉船厂,夯锤重40吨,最大落距40米),软土已达40米(法国尼斯机场扩建工程,夯锤170吨,落距25米以内)。水下强夯已有若干实例,如(1)法国布雷斯特军港核潜艇船坞工程。(2)科威特阿·拉赫防波堤工程。(3)尼日利亚拉各斯干船坞。(4)突尼斯斯法克斯港。这对水利水电工程水下压实有重要参考价值。

近年来国内外已注意研究强夯的机理、计算和室内试验方法。为此做了一些现场观测试验及模拟试验研究、观测强夯作用下土的位移规律(垂直及水平向),振动加速度,动应力,孔隙水压力等,对强夯机理和模拟试验方法已初步了解,并建立数学模型进行计算,今后进一步发展将可用模拟试验逐步代替现场试验。

检测强夯效果的方法也在不断地完善,目前采用的方法有:

- (1)土的位移(夯坑沉降及隆起、地面平均沉降)
- (2)标准贯入试验
- (3)触探(静力或动力)
- (4)挖坑取样做土工试验
- (5)荷载板做静载试验
- (6)旁压仪(亦名横压仪)做旁压模量及极限压力(或比例模量)
- (7)孔隙水压力
- (8)振动加速度
- (9)动应力
- (10)落锤阻滞试验
- (11)弹性波测动弹模

这些手段可做夯前夯后相对比较,也有些可求出承载能力,变形模量绝对值,这些手段可互相验证补充,可以较好地判断压实效果,并有助于了解强夯的机理和某些规律。随着广

泛的实践，强夯机理研究也将加强，使工程实践、试验、理论有机地结合，使强夯技术发展日臻完善。

长办自1980年开始研究强夯，搜集了一些资料，学习国内外经验。在此基础上已做了三个工程试验及施工。包括葛洲坝开关站石碴地基，黄石大冶钢厂堆碴场复合地基和长办酒宝荡住宅区强夯压实，并使夯坑形成砂桩地基。对这三个工程进行一系列的观测，包括振动加速度，触探，旁压试验，挖坑取样做土工试验，荷载板静载试验，弹性波测动弹模等，取得了一些有用的资料，并结合其它工程资料和试验研究资料探讨强夯机理，检测方法，模拟试验等，使理论，实践，科研三结合。

为了使强夯技术在水利电力战线和全国更好地应用，特汇编了“地基加固文集”供长办及全国有关单位参考。文集共选代表性文章30篇，其中译文16篇。文集收集六个方面的文章，综合文章四篇，软土地基七篇，石碴地基二篇，其它地基三篇，（垃圾土、钢碴、漂石土），水下强夯二篇，强夯机理试验研究及强夯效果检测九篇，其它三篇。国内外强夯资料已付印较多，本文集只能根据需求和可能，这一方面选一些代表性的文章，有些文章已为大家所熟知，尽量不印或节录，一部分而着重补充一些国外最近几年的文章，或国内未登过的文章。

本文集尊重原文的观点，不做原则性修改，有不同意见可以按百家争鸣方针，在今后实践和研究中不断补充资料，继续讨论集思广益。因水平所限，译文，编印如有错误请指正。

司兆乐

一九八六年十月

目 录

前 言:

一.	强夯技术应用和研究概况	(1)
二.	强力夯实法工程实例	(18)
三.	强夯加固地基的实践与探讨	(46)
四.	强夯法在地基加固中的应用	(60)
五.	强夯法加固秦皇岛煤码头堆场细砂地基	(65)
六.	强夯法加固软土地基的现状及其动向	(72)
七.	强夯法加固长江下游河漫滩软基(扬子石化乙烯工程)	(80)
八.	强夯加固酒宝荡住宅区软土地基试验	(97)
九.	梅纳动力固结法加固尼斯机场地基	(106)
十.	强夯法在加固海岸工程地基中的应用	(111)
十一.	强夯法工程实例	(117)
十二.	强夯法加固粗粒土地基	(123)
十三.	乌德瓦拉造船厂堆石地基的强夯施工	(131)
十四.	黄石大冶钢厂强夯试验报告(钢渣及亚粘土)	(137)
十五.	动力固结效果的现场研究(垃圾土及软土)	(149)
十六.	动力夯实漂石土	(156)
十七.	拉格斯干船坞海床土的改良	(161)
十八.	水下强夯在码头工程中的应用	(166)
十九.	强夯法室内试验和理论计算	(171)
二十.	强夯机理的探讨	(187)
二十一.	重锤夯实的理论和实践	(195)
二十二.	落锤夯击引起土层动应力的变化	(201)
二十三.	动力固结后土的强度	(210)
二十四.	关于饱和粘性土动力固结机理的探讨	(215)
二十五.	强夯施工效果的弹性波检测	(218)
二十六.	强力夯实试验(振动)研究报告	(227)
二十七.	利用夯锤阻滯过程推求地基变形模量的探讨	(237)
二十八.	深层压实(振动压实、碎石桩,强夯、爆夯)	(242)
二十九.	砂井排水固结机理及其特性的分析研究	(254)
三十.	松散土爆破压实的预测和控制技术	(261)

强夯技术应用和研究概况

一、强夯法的基本原理

强夯冲击下的振动波，有压力波（P波），剪切波（S波），和瑞利波（R波），它们的频率不同压力波沿半径方向，正负交替，剪切波和瑞利波可剪切土壤颗粒，当颗粒间压力为负值时，剪切波较易错动土壤颗粒，使其重新排列成为较紧密的状态。（图1）

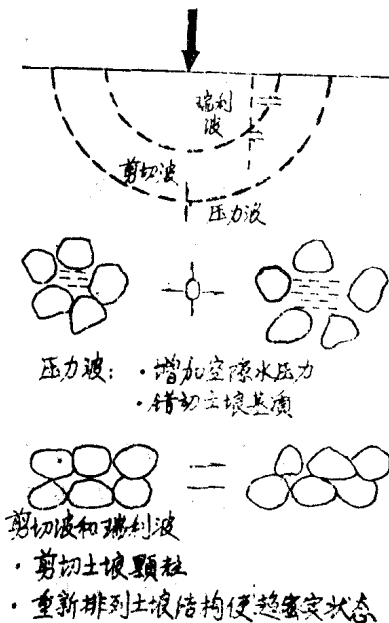


图1 动力固结时振动波的效应

对非粘性土，强夯过程中，夯锤下面表层土体先得到压实，沉陷量较大，而夯锤外土体沉陷逐步减少，夯锤内外高差较大而形成竖向剪切裂缝，随着夯击次数增加，锤下压实深度增加，夯坑沉陷量加大，周围剪切裂缝范围不断加大，裂缝深度不断增加，夯锤冲击能量逐步向深部传递，如此反复，使压实深度不断增加，第二序夯点夯击时可使第一序夯点之间压实，并使

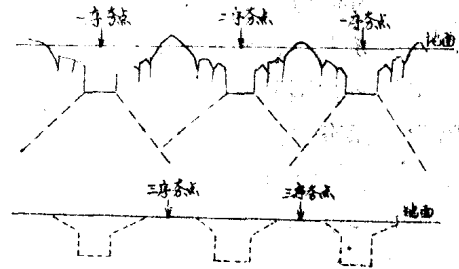


图2 夯击压实程序示意图

一序夯点裂缝闭合，第三序夯点夯击时，一二序夯点裂缝可消除，使整个地基压实，地面普遍下沉（图2）。

对接近饱和的粘性土，强夯机理除上述特点外，还有另外的特点，甘沅（1979年）认为压力波主要通过液相传播，并不断增加和减少孔隙水压力来振动土的骨架，直到骨架移动为止。而剪切波和瑞利波以较低的速度使颗粒重新排列达到更紧密的状态。即随着夯击次数增加，土孔隙内气体逐步排出，孔隙减少，密度加大，而孔隙水来不及排出，使孔隙水压力迅速增高，有效压力减少，抗剪强度降低，在多次冲击下，液化范围扩大，夯击将使土体向侧面滑移夯坑周围大量隆起，夯击能量将大量消耗在土体滑移上而压实土体作用减少（通常称为弹簧土），这时夯击效果迅速下降，必须间歇一段时间，使孔隙水压力消散，间歇时间长短取决于地基土的渗透系数大小，渗透系数越大间歇时间越短。一般地说，大面积粘性土孔隙水压力消散较慢，但夯坑周围剪切裂缝增加了排水通道使渗径减少，孔隙水压力消散加快，缩短了间歇时间，即使如此，有些粘性土间歇时间也在两周甚至更多，有间歇时间过长增

加施工困难，因此需要因地制宜采取措施，据已有经验大致有以下几种：

1. 打排水沙井。在强夯加固区打竖向排水砂井，间距约1.5~2米，孔径10厘米左右，孔内填砂（为便于施工用砂袋填孔）这样可缩短渗径，加快孔隙水压力的消散。

2. 机械混合法。S.D. Ramaswamy等用高能量冲击泥炭土上面的粉土（或垫层）使其与下面泥炭土发生机械混合，使强夯效果提高。梅纳也认为下面孔隙较大的土厚度小于6米上面砂性土厚度小于5米，夯击后产生上下混合是可能的，强度也会提高〔1〕。

3. 强夯挤淤。连云港在淤泥上面抛石强夯，块石插入淤泥中，淤泥一部分被挤走，一部分留在石缝中，石块形成骨架，增加抗剪强度。

4. 强夯加固与砂桩相结合。

黄石市一住宅在淤泥地基中用强夯形成3米深的片石桩，接近基岩，效果很好。

长办酒宝荡住宅区软土强夯，夯坑深达2—3米就在夯坑内填砂形成砂桩，继续夯击砂桩，使其继续加深至3米多，并使一部分淤泥隆起，一部分与砂混合，少部分挖除，这是利用强夯达到加固、砂桩、挤淤三种作用相结合，取得成功。

二、强夯法的设计和施工

强夯加固法的设计参数和施工工艺，应因地制宜。1980年4月法国梅纳公司总经理甘汴来我国进行技术交流时谈到，采用强夯加固技术一般是根据强夯前的试验观测，确定施工参数，但国内外已有的类似经验可作为参考，据国内部分工程的资料介绍如下：

1. 夯锤

夯锤重量我国一般采用10~20吨，国外最大达到200吨。

夯锤底面积与锤重土质和加固深度有关，对加固深度小于5米时，锤底面积为2~4.5平方米，大于5米时，底面积大于4.5平方米。

夯锤材料，国外基本上用钢锤，以铸钢为好，据资料介绍，从加固效果看，钢锤比砼锤好，因为砼锤夯击瞬间产生的变形约等于钢锤的10倍，能量损失大，特别是对砂砾石及石碴强夯效果差，软土用砼锤尚可。

我国10~20吨夯锤多半用圆底锥形砼锤，用钢板做外壳，底板厚12—20毫米，侧边8—10毫米，内加钢筋与钢板焊接，浇筑300号砼，锤底周边做成弧形，以减少阻力。锤底必须留有足够的排气孔，以使夯锤着地时坑底空气能迅速排出，同时还能减少起锤时坑底的负压吸力，排气孔直径不应小于6厘米，以免被土堵塞而失效。

锤形国外用方形的，但用吊车钢丝绳有扭动，两次夯锤着地时锤印不完全重合，会造成棱角落地能量损失，或夯坑倾斜，影响夯击效果，所以圆形锤较好。

水下强夯，夯锤应做成圆的，流线型的，并加足够的排水孔，以减少阻力。

2. 吊机

国内多用履带吊，脱钩（加自动脱钩器），起吊能力一般为锤重的2倍以上。吊高8—25米，每锤2~2.5分钟，葛洲坝右岸开关站用4立米索铲，可不脱钩，每锤0.5分钟或稍多一点，一般不脱钩的起重能力应为锤重的3—5倍，不脱钩的要解决吊绳卷筒的自动刹车，以避免钢丝绳松脱过多，不能正常操作。

如锤重过大或吊高过大，要特制强夯机，梅纳公司已造了一些专用三角架强夯机，其中为尼斯机场特制Giga吊机，锤重170吨，吊高25米，加固深度40米〔2〕。

3. 夯点布置及夯击程序

夯点间距：当处理深度在10米以内时，夯点间距约为3~5米，夯击程序一般分为三序（图3）

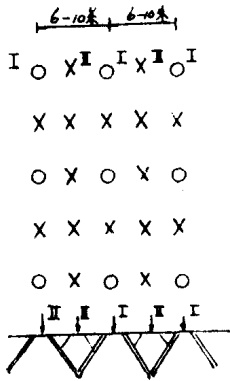


图3. 夯点布置示意图

一序点间距6—10米，夯击次数为几击至十几击。

二序点，在一序点中间布置，一、二序点完成后间距3—5米。

三序点，满夯起整平作用，落距可减少，如处理深度较大，间距亦相应加大，可能要四序，即三序加满夯。

处理深度大，夯锤重或吊高受限制，可增加夯击次数，增加有效压实深度，对松散土碴可超过20击。

夯击范围一般为 $(B+H) \times (L \times H)$ ，B为加固区宽度，L为长度，H为处理深度。

亦可在基础外加1—2排夯点。

条形脚采用点线布置，柱基可用点夯。

对粘性土为使孔隙水压力消散，需分几遍进行，每遍间歇为1—4周，如采取排水孔，间歇时间可缩短。

软土夯击时要求有0.5米~1米垫层（砂、石子、或钢碴），特别松软的要1.5米。

4. 有效加固深度

梅纳建议的有效加固深度 $D = \sqrt{WH}$

式中W为夯锤质量以吨计；

H为夯锤落高以米计；

D为有效加固深度以米计。

国内外一些经验认为有效加固深度小于此数，需乘以系数0.5~0.7，散粒土为0.7左右，粘性土为0.5左右。

上述数字是指一般情况，击数为几击到十几击，如受吊车限制，锤重落距不能加大，则可增加夯击次数至二十多次，则上述系数就可加大一些。

5. 强夯振动的影响

强夯振动对周围建筑物的影响与土的特性，夯击能量和建筑物的要求有关。如果在强夯施工区附近有对振动敏感的住房或建筑物应考虑振动的影响。所以强夯必须离开建筑物20—30米以外进行。为减轻振动影响可在建筑物附近挖3米左右深的防震沟。如梅纳公司曾在一个桩基的桥梁承台旁5米处夯击未发生问题。同时认为一般夯击振动速度小于5厘米/秒是安全的。从上海港十一区测得频率为3.85—12.3赫芝，认为10—15米内有较大影响。破坏程度只好参照地震和打桩资料分析参考，如地震波一个周期要30—40秒，打桩每秒为二击左右，一根桩历时为30—40分钟，而强夯每击振动时间只有1—3秒，故其破坏程度比地震小得多，而与打桩相比有明显的减少。

三、强夯加固效果的检测

据国内外已有实践资料，检查强夯效果的方法有以下几种：

1. 沉降观测

测地面总沉降与计算沉降比较；分析沉降与压缩层厚度比率；测夯坑体积，隆起体积分析有效压缩体积。

2. 标准贯入试验、触探(静力或动力)求夯前夯后对比值估计强夯效果,亦可参考其绝对值,估算承载能力。

3. 挖坑取样做土工试验,求夯前夯后土的物理力学指标,葛洲坝开关站穿坑深10米。

4. 现场荷载板静载试验

一般面积较小,检验深度较浅,对小面积基脚和条形基脚还是适应的,现在荷载板面积逐步加大,扬子石化公司乙烯工程用3米×3米荷载板,影响深度可达5—6米。

5. 旁压仪试验

利用旁压仪(或称横压仪)在占孔内分层做旁压试验求旁压模量及横向极限压力(或比例极限)做压实前后相对比较,国内外不少工程使用此法,本文集中几个工程采用此法的见表1利用旁压模量求解静弹模需要乘一个系数。法国梅纳研究中心1975年根据一些试验资料,建议系数如下〔3〕:

$$E = E_M \times K \quad E_M \text{ 为旁压模量, } K \text{ 值为下表 1}$$

土类	粘土	粉土	砂土	砂砾石
超固结	1	1.5	2	3
正常固结	1.5	2	3	4

葛洲坝围堰砂砾石试验K为2—3,葛洲坝开关站石碴地基采用2.5。

利用旁压极限压力PL求地基承载力R可用下式

$$R = qa + q_0 \quad q_0 = \frac{K(P_1 - P_0)}{F}$$

式中P₀——试验水平接触压力;

k——承载力系数(葛洲坝开关站石碴用0.8);

f——安全系数,一般用3,葛洲坝开关站山碴,考虑占孔可能有挤压采用5;

q_a——土的承载能力;

q₀——建筑物基础面标高以上的自重压力。

6. 孔隙水压力 测不同部位孔隙水压力消散过程,包括动态、静态。

7. 瑞典乌德瓦拉船厂〔4〕利用夯锤下落时的阻滞试验,检测已夯地区的变形模量,这一尝试值得重视。该工程压实石碴最大厚度30米,用40吨夯锤,落离40米,夯后用夯锤下落2.5米和4米,测地基接触压力与夯锤沉降的关系求动荷载作用下的静弹模,办法是在夯锤上,测出夯锤触地后加速度过程,用积分法求出落距速度,位移(沉降)及接触压力,在位移—接触压力曲线上的坡度可反映变形模量与静载试验相比,属同一数量级。通过进一步研究,可发展为一种检测弹模的较好方法。

8. 弹性波测动弹模

有些工程采用弹性波检测地基夯实后的动弹模,如黄石大冶钢厂,葛洲坝开关站,长办酒宝荡住宅区,北京塑料八厂工程,瑞典乌德瓦拉船厂〔5〕〔6〕〔7〕〔4〕〔8〕散粒体弹性波测得的动弹模约为静弹模的5—10倍,乌德瓦拉船厂石碴地基采用5倍,与荷载板静压试验很接近。

长办酒宝荡住宅区软土地基强夯后动弹试验与土工试验对比结果,动弹模约为静弹模的7—8倍与天津大学等单位新编“地基与基础”一书中推荐的7.5倍很接近。

几个工程强夯效果检测内容

表 2

检 测 项 目

工程名称	沉降及位移	标准贯入试验	触探	挖坑联墙做土工试验	荷载板静载试验	旁压试验	动土压力	振动加速度	落锤阻滯试验	弹性波测动弹模	孔隙水压力
石 砾											
葛洲坝大江开关站	✓			✓(深10米)	✓	✓		✓	✓	✓	
乌德瓦拉船厂	✓				✓	✓			✓	✓	
秦皇岛煤码头	✓	✓	✓			✓					✓
法国尼斯机场	✓					✓					
尾日利亚拉格新干船坞	✓		✓		✓	✓				✓	
长办酒宝荡住宅区	✓		✓		✓	✓					✓
杨子石化乙烯工程	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
垃圾土											
英国伦敦车站一医院	✓(沉降仪)										✓
英国雷迪奇公路东道	✓(沉降仪)										✓
哈佛群公路东道	✓(沉降仪)										✓
复合地基											
大冶钢厂钢渣压亚粘土	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓
日本大阪北部住宅区漂石土	✓	✓			✓	✓					

几个代表性工程强夯效果检测内容见表2。

四、强夯法的试验研究和计算

强夯法虽然在实际应用方面已很广泛,但理论计算和模拟试验的研究还不多,为了确定强夯的各种参数(如选择锤重、落距、夯点间距、有效深度、间歇时间等)常需做现场试验,观测夯击过程中的动力参数,土的物理力学性质和孔隙水压力变化,分析其压实效果。现场试验费用高、时间长。近几年来国内外开始注意通过现场试验得到的资料和土的动力原理来探索强夯的计算和模拟试验方法。

七十年代奥地利维也纳大学H·布兰特和W·撒德高斯基在公路立交桥强夯加固中观测了土内动应力,加速度的变化过程及其距夯点距离、深度、夯锤落距的关系〔9〕。

黄石大冶钢厂堆碴场强夯中观测了夯击时土内振动加速度与深度、夯击次数的关系和孔隙水压力的变化过程。还在夯锤上面放了加速度仪,测夯锤落地后受阻滞作用时的加速度过程。随着夯击次数的增加,锤下土体压实深度增加,落锤加速度也逐渐增加,第一击落锤阻滞加速度17g,第13击为108g,利用这些指标进一步研究有可能求出压实后的变形模量。

葛洲坝开关站石碴地基强夯观测了动应力,加速度变化过程及其深度,夯击次数的关系,可反映散粒料在夯击过程中夯击能逐步向下传递的规律,开始几击压实表层土并在夯坑周围出现竖向剪切的裂缝。随着夯击次数增加,压实深度和剪切裂缝深度交替增加,使夯击能逐渐往深部传递,有效压实深度逐步增加。这说明有效压实深度与夯击次数或夯击总能量有关。在一定条件下,靠增加夯击次数来增大压实深度可能是合理的。

夯锤下2.5米深(锤重16吨,落锤16米)最大加速度约75g,而在6.3深处(接近有效压实深度)加速度约为4g。锤下2.5米深处冲击压力16公斤/厘米²,乌德瓦拉船厂锤重40吨,落距2.5米和4米时,地表冲击压力均为30公斤/厘米²。扬子石化公司乙烯工程测了动应力、加速度和孔隙水压力。

以上数据对检验强夯效果和模拟试验以及计算有重要的参考价值,今后有更多的试验数据后可以总结出一些检验强夯效果和模拟试验的方法。

联邦德国鲁尔大学H·L·耶斯伯格和R·A·邦因在试验室做了落锤动应力试验〔10〕发现落锤击土的最大加速度 α_{max} 与 $\sqrt{2gh}$ (h为夯锤落距)成直线关系,即 α_{max} 与落距h的平方根成直线关系,而与 $\frac{M}{A}$ (M为锤重,A为锤底面积)有关,这就为模拟试验创造条件,可在室内利用小锤模拟现场重锤进行试验,预测压实后效果,选择强夯参数。

H·L耶斯伯和H·J葛代克〔11〕对近似饱和粘土做了室内夯击模拟试验,得出夯击过程中垂直和水平有效压力的变化过程,有助于了解强夯的机理和判断强夯效果。

文献〔12〕研究了与强夯压实效果相同的等效静力预压实应力,可用静力压实和剪切试验资料预测强夯的效果。

河海大学钱学德同志将已夯工程测得的资料,如动应力,位移和孔隙压力随着时间变化的波形和应力应变关系,动应力分布等建立数学模型,用计算方法确定强夯参数,并改进了动力固结仪,在仪器上方加了沙盘,使夯锤夯击时振动波形与现场强夯接近。

以上这些探索,已取得可喜的成果,今后应继续努力,可以预见在不久的将来,将会用计算和模拟试验确定强夯参数,预测强夯效果,检验强夯施工的效果,以节约现场的试验费用和时间。

五、强夯实例

表三列出国内外部分工程实例，现选其中有代表性实例（包括水下和水上）简述如下：

1. 法国布雷斯特军港核潜艇船坞工程

干船坞工程天然土表层为砂与淤泥质粉土，厚2—5米，下层为砂砾石层，下面为裂隙页岩。

干船坞采用三个浮运预制的预应力砼结构，水上组装，下沉海底。为了使结构物的沉降量减少到几厘米，并避免在透水性很强的土层中开挖基坑或在压缩性土层中设桩，事先对海底地基土进行了强夯。

夯锤是带有稳定翼的钢锤，锤重13吨，水下重（自重减去浮力）11吨，落距（在水中）10—13米，每个夯击点夯6击，夯击能随压缩性土层的厚度而变化，单位夯击能为240—720吨米/米²。改善深度10米。

强夯所产生的沉降量为27—75厘米，平均值为45厘米，使填土厚度压缩10%，相当于使容重增大8—12%，强夯加固后基础底面夯力可用到20—30吨/米²，而沉降仅有几厘米，造价低，效率高见图4。

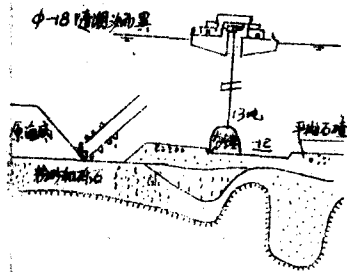


图 4

第一遍夯点按正方形网格布置，间距4米，夯点击数7—10击；第二遍夯点亦按正方形网格布置，间距2.5米，夯点击数3—7击。试验含水量减少5—7%，旁压极限压力增加了4倍，抗液化强度增加了1.4倍，变形模量增加了三倍，改善深度9米见图5。

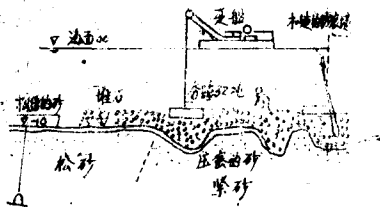


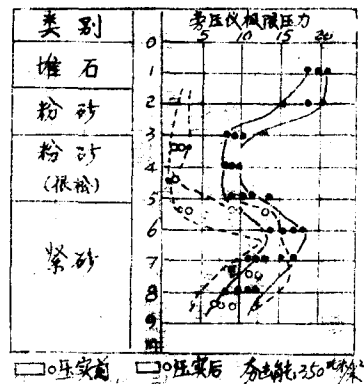
图 5

3. 突尼斯斯法克斯 (SFAX) 港的实施效果

水下强夯在码头工程中的应用，突尼斯斯法克斯新建港口位于老港的西南侧，占地面积约0.5平方公里。该区土层分布情况是：上层5.5米为淤泥质冲积层，下层2.5米为夹有贝壳和有机质的粉砂层，再下是2—3米厚的均匀粉砂层，最下是粘土层。

2. 科威特，阿·拉赫——防波堤工程，海底松砂的处理。科威特在濒临阿拉伯海港的伊麦雷修建一个海军基地的防波堤：

海底为松砂，厚3.6米，上面抛2.4米块石作为基床，堤身用预制连锁砼块构成。据分析不能直接筑于松砂之上，在很大的波浪作用下它会液化。因此抛了一层块石同松砂一起，在水深10—12米下采用了强夯加固，选用底面积2.4×2.4米方形空心锤，重32吨，落距10—12米，单位夯击能350吨米/



国外强夯工程实例

表 3

编 号	国 名	地 点	建 筑 物	地 基 概 况	强 夯 特 性 指 标		加 固 效 果	备 注			
					锤重 (吨)	落距 (米)					
1	法国	里维埃拉	7—8层 大楼建 筑群	填海造地。表层约 9米为岩碴其下厚 12米松的粉砂	10	12	9—10	8 △ PE S 50 小于1.2 12~17	加固特性指标 说明: S—夯完后最 终沉降量 (厘米) △—地基加载 绝对沉降 量(厘米) P—承载力, 加()为 允许值 (公斤/厘米 ²) PI.P—夯压 试验极限压力 (公斤/厘米 ²) PE—夯压试 验变形模量 (公斤/厘米 ²) E—变形模量 (公斤/厘米 ²)		
2	法国	布雷斯特军港 (水下)	船舶坞碇浮 运结构 的基床	挖除淤泥抛填粉 砂、砾石层,表 层抛石 (d=4—10厘米)	13	10—13	1—3	240—720	10	27—75	
3	美国	杰克逊 维尔	油压开 关站	沿有机质粉砂的 沼泽地上吹填厚 约3米砂其上抛 填厚约2米砂	18	25	3	335	约14 (10米以 上明显改 善)	69 1.1~3.3 10—110 3.3	
4	德国	潘本堡	船厂船台 及厂房	表层吹填厚5米 粉砂其下为冲积 层(粉土及粉砂 中含有囊状粘土 和泥炭)。	18	24	2—3	110—230	8 (5米以 上明显改 善)	10—24 170—230	
5	瑞典	乌德瓦拉	船厂船台 和重力式 岸壁的基础 共7万 平米	清除淤泥,水中 抛石碴(含有60 厘米以上的块 石)最厚30米, 以下为岩床。	40	40		总夯击能	40	205—250 2100 3.3	
6	瑞典	卡尔斯塔 维纳湖	港口码头 的货棧 (3× 20000平 米)	表面2—10米吹填 细砂和壤土,其下 为厚10—12米壤土 质和粘土砂质,再 下为冰碛土	14	25		14980吨米	(预计)	4—12	
7	科成特	伊麦雷 军港 (水下)	防波堤 碇块的 基床	海床为砂,其上 5米为松的粉砂, 抛3.4米块石作 基床。	32	9		240	15 (7米以 上明显改 善)	3—8 80~150 300~800	

续表 3

编 号	国 名	地 点	建 筑 物	地 基 概 况	强 夯 特 性 指 标		加 固 效 果	备 注						
					锤重 (吨)	落距 (米)			遍数	单位夯击能 (吨米/米 ²)	改善深度 (米)	特性指标	加固前	加固后
8	多米尼加		因处处地震区作液化处理	表层5米砂, 其下5—7米中细砂, 再下为粉土。	18—15	21	2—4		S	S	12.5—45			
9	日本	宝塚市	住宅大建筑群(20000平米)	填石碴造地, 厚15—25米, 有的为1米以上岩块和风化土混杂	12	20	5—15	33~264	PE	PE	54~110	110—270		
10	英国	格拉斯哥	楼房建筑群(20000平米)	老船厂陡斜坡滑边上堆弃碴, 含有砂、砖块、砾(有大至2—3米)还有木材。			4	200—400		△		约0.5	静载试验取设计荷载(30吨/米 ²)的2倍。	
11	奥地利	艾本	公路交叉(80000平米)	有机质粉土及泥炭层深6—14米, 土层含水量平均150~400%, 个别达1200%。			7	600						
12	突尼斯	斯法克斯(水下)	码头	上层5.5米淤泥质冲积层, 下层2.5米有贝壳和有机质的粉砂层, 再下2—3米均匀粉粘土, 最下层是粘土回填料, 有不同的粉砂土含砾石料以及粘质粉土。	40	10	4							
13	法国	里维埃拉	尼斯机场		170	25	2	3500	S PLP	40	56	85 88	(深部老土)	

国内强夯加固工程实例

续表 3

编号	工程地点	地基概况	强夯			特性		指标		承载力(吨/米 ²)	
			锤重(吨)	落距(米)	遍数	单位夯击能(吨米/米 ²)	改善深度(米)	加固前	加固后		
14	山西白羊墅车辆段房屋	二、三级阶地上填筑黄土质砂粘土 8—10 米	10	8		80	8—9		15		
15	河北秦皇岛煤码头堆场	上层为回填细砂厚 5 米下层为天然沉积细砂 13 米	5 10	16 13	6 5	69—114	约 8		动力触探击数提高 6 倍		
16	天津新港	淤泥质粘土和淤泥质亚粘土	10	13	3	130	6		5—6	17.5	
17	太原面粉二厂	粘土(约 3 米)其下为湿陷性黄土、粘性土	11.5	14	3	161	6			承载力提高	
18	北京西部寨口站房地基	碎石、块石弃碴高方填筑地基	10	12	2	120	6.7			承载力提高 1—3 倍	
19	太阳线古交车站	土夹石填土(大块弃石及黄土状轻亚粘土)	8	8		64	约 6—7			承载力提高 2—3 倍	
20	廊坊地区某工程	亚粘土、轻亚粘土	11	9		99	约 6				
21	黑泥洼编组站	膨润性粘土,硬塑,填土厚 20 米	10	10		100	5			地基强度提高明显	
22	武汉某厂船用机械试车吊车基础	地基填土厚 6—7.8 米,粘性土含碎石大者 10 厘米、亚粘土或淤泥	10	15	第一遍 第二遍 第三遍	225 225 80	约 8		12—15	20	

续表 3

编号	工程地点	地基概况	强夯			特性	指标	承载力(吨/米 ²)	
			锤重(吨)	落距(米)	遍数			单位夯击能(吨米/米 ²)	改善深度(米)
23	十堰二汽地区办公楼	回填弃碴, 卵石层、基岩等厚5—10米 亚粘土、	10	10	1	184.3	6.5		16
24	湖北黄石大冶钢厂厂房基础	矿渣、粘壤土	11	14	2	154	约7	7	承载力30-40(吨/米 ²)
25	江苏南京扬子石化公司乙烯工程	土质属中、高压缩性软土, 含水量高, 土质软弱。	15	16	3	240	10		18-26(吨/米 ²)
26	北京塑料八厂宿舍	上部以卵石为主, 填夹砂及粘土的卵石层, 厚约5—6米, 下部为河床卵石层	10	17	2	170	约7		30吨/米 ² 以上
27	济南汽车厂党家庄分厂	上层为人工填土, 含多量碎石, 厚约1.7—3.8米, 下为亚粘土, 4米以下为黄粘土	12	17	5	204	约8		18吨/米 ² 以上
28	山东石臼港码头	土层为四、灰色亚粘土、粗砂粒, 强风化岩。	16	一般2—3米最大5米	3	48	最大6-7		
29	葛洲坝大江开关站地基处理	两山间沟谷填石碴厚10—15米。	16	16	3	250	约8		旁压模量提高近2倍
30	长办酒宝荡住宅区软土地基加固处理	地基层中高压压缩性和软粘土分五层厚约11米	11	6	3-4	99	约8	8	承载力14吨/米 ²

实整平,水深在20米以下,夯锤重5—10吨,落距3—5米,垫层厚1—3米,块石直径5—15厘米,人工整平,经过处理都是成功的。

6. 大冶钢厂厂房地基处理观测试验

黄石大冶钢厂厂房地基处理,由长办进行了观测试验,进行了静力触探,旁压,孔隙水压力,土体位移,动应变,振动波等观测试验。

地基主要为矿渣、粘壤土,夯锤重11吨,底面积 3.8米^2 ,落距14米,夯点3米,夯击次数10击,夯两遍。采用带钢板外壳的砵锤高1.54米,下底直径为 $\phi 2.2$ 米,上面直径为 $\phi 1.3$ 米,为了在落地时能及时排出夯锤下的空气,在夯锤中设置7个 $\phi 159$ 毫米壁厚5毫米垂直排气管。

用强夯法压实回填矿渣2米,以下粘性土有3米左右土层是有效的,它不仅改变了颗粒组成,而且在冲击波的作用下,颗粒得到重新排列组合,使其密度大大提高,矿渣填料密度由夯前的1.94吨/立米³,增到2.1吨/立米³,密度为44%。旁压模量提高47倍。粘性土密度由1.53克/厘米³增至1.6克/厘米³,提高4.6%。而孔隙比由0.8降至14.6%。无侧限抗压强度由0.69公斤/厘米²增至0.72公斤/厘米²提高4.3%。有效加固深度为5米。

实践证明,用旁压仪检测夯实效果是一种有效的方法,旁压仪是国内外一种原位测试的好办法,仪器是从法国引进的GA型,采用手摇钻成孔,旁压器的直径(ϕ)为64毫米。沿着土层深度每隔一米作一次试验,而最大试验深度为8.9米。

对强夯加固效果和强夯振动对周围建筑物的影响做了以下检验:

(1) 试验在场地面积 $21 \times 18\text{米}^2$,夯点间距3米,夯锤11吨,落距14米,布置30个传感器,其中12个埋入地下5个放入孔内(占孔最大深度12米),测量垂直加速度沿孔深的变化,5个测量地表水平加速度,一个固定在夯锤上,其余几个分成两组,在地表设置流动测点,通过一次积分放大器,探测地表水平及垂直速度的变化规律。

试验结果表明:垂直加速度随孔深而减少,并随夯击次数而增大,第一击时2.5米深处约为10g,8米深处为5g,而在第十三击时离地表2.5米深处为48g,8米深处为2.7g,距夯点15米处的地表水平加速度为70gal。

在夯锤上安装了一个加速度计,测得夯锤落地阻滞加速度达17g(第一击)~108g(第十三击)。地基振动主频率为6.5和8.0赫芝,强夯时地基振动频率一般为5—10赫芝。

(2) 隔震沟的“防震效果”

为了研究隔震沟的效果,利用强夯时形成的一条宽3米,深约1.5米的土坑作为隔震沟,在沟的一侧夯击,在沟的两侧对称地布置测点,4个点,沟左2点,沟右2点,在每点设置传感器,同时观测水平加速度,水平和垂直速度效应。

通过试验隔震沟的衰减作用,可振动衰减50%。

(3) 强夯振动对建筑物的影响

为了研究强夯冲击振动对建筑物的影响,在松软地基上模拟一个建筑物,高3米,断面 $36 \times 36\text{厘米}^2$ 的砖柱。在地基和柱顶各安装两个传感器,同时监测水平和垂直的振动速度反应。夯点距模拟建筑物6米,经夯击,柱顶最大水平振动速度为40.3厘米/秒,最大垂直的速度为49.5厘米/秒;地基最大水平的振动速度为20厘米/秒,最大的垂直的振动速度为8.4厘米/秒。试验后经过仔细观察未发现任何破坏痕迹。

7. 葛洲坝大江右岸开关站地基强夯处理

葛洲坝大江右岸500KV开关站布置在两山间沟谷地带,由石渣、卵石、砂石混合料及含