

强 夯 法 地 基 加 固

左名麒 编
朱树森

郑象铨 审



中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

强 夯 法 地 基 加 固

左名麒 编
朱树森

郑象铨 审

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

内 容 提 要

强夯法设备简单、原理直观、适用范围广泛，可用于各种填土、湿陷性黄土和液化地基。不仅适用于房建工程，也适合于桥涵、道路、机场、码头和大型设备基础工程。其施工速度快、效果好、造价低，是当前一种经济而简便的地基加固方法。

本书较系统地介绍了强夯法的原理、设计和施工有关知识，以及我国在强夯法加固地基中的实践经验和研究成果。可供土建设计、施工技术人员和科研、教学人员参考。

强夯法地基加固

左名麒 编
朱树森

郑象铎 审

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 王顺庆 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

北京顺义燕华营印刷厂印

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：5.5 字数：113千

1990年2月 第1版 第1次印刷

印数：1—2500册 定价：2.70元

ISBN7-113-00205-6/TU·62

前 言

随着国民经济的发展，不仅在地质条件良好的地方进行工程建设，而且在地质条件不好的地方也要进行工程建设。另外，随着科学技术的日新月异，结构物的荷载日益增大，工作条件复杂多变，变形要求也越来越严。因而原来一般视为良好的地基，也可能在某些特定条件下非经人工处理不可。这样，就要针对不同的地质条件，不同的工程结构物，选用最合适的基础型式或择取最恰当的地基处理方法，妥善地解决好地基与基础问题。因为任何建筑物的荷载最终将传递到地基上，所以地基强度和变形必须满足设计要求，否则就要进行地基处理。

地基处理的目的，是为了提高软弱地基的强度，保证地基的稳定，降低软弱地基的压缩性，减少基础的沉降和不均匀沉降。

地基处理方法很多，其中强夯法就是较理想的一种地基加固方法。该法所用设备简单，原理直观，适用范围广泛，可用于加固各种填土，湿陷性黄土和液化地基等。不仅适合于房建工程，也适合于桥涵、道路、港口码头和大型设备基础等工程；而且具有速度快，效果好，节省投资等优点，可称之为当前“一种经济而简便的地基加固方法”。

目前，国内这方面的书籍很少，为满足广大读者的需要，为了进一步发展这项新技术，使其在社会主义建设中发

目 录

第一章 概 论

- 第一节 强夯法及其特性…………… (1)
- 第二节 国内外强夯法的发展和使用情况…………… (3)

第二章 强夯法原理

- 第一节 动力固结理论…………… (5)
- 第二节 强夯法机理的研究和发展…………… (10)
- 第三节 强夯法室内试验与现场试验…………… (21)

第三章 强夯法加固地基设计

- 第一节 设计方法及步骤…………… (34)
- 第二节 加固目的及要求…………… (34)
- 第三节 主要施工参数的选择…………… (36)
- 第四节 加固后地基检验标准…………… (47)

第四章 地基强夯加固后的变形计算

- 第一节 施工中变形量的计算…………… (49)
- 第二节 强夯地基的沉降计算…………… (54)
 - 一、前期固结压力 P_c 的确定…………… (54)
 - 二、超压密土地基的沉降计算…………… (56)

第五章 强夯法施工

- 第一节 施工机具…………… (58)
- 第二节 施工工艺…………… (67)
- 第三节 对邻近建筑物震动影响问题…………… (71)

第四节 安全施工注意事项	(75)
--------------------	------

第六章 工程实例

第一节 强夯法处理高填土地基工程	(77)
------------------------	------

第二节 强夯法处理湿陷性黄土地基	(95)
------------------------	------

第三节 强夯法处理液化地基	(132)
---------------------	-------

第四节 强夯法处理软土地基	(139)
---------------------	-------

附 录	(168)
-----------	-------

参考文献	(170)
------------	-------

第一章 概 论

第一节 强夯法及其特性

一、强夯法

强夯法是法国梅那 (Menard) 技术公司1969年首创的一种地基加固方法, 亦称动力固结法。迄今已为国内外广泛采用。该法一般是以8~40t重锤(最重为200t)起吊到一定高度(一般为8~30m), 令锤自由落下, 对土体进行强力夯实, 以提高其强度、降低其压缩性的一种地基加固方法。它是在重锤夯实法的基础上发展起来的, 但又与重锤夯实法迥然不同的一项新技术。

该法所用设备简单, 原理直观, 适用范围广泛, 可用于加固各种填土、湿陷性黄土、碎石土、砂土、一般粘性土、软土以及工业、生活垃圾等地基, 特别是对非饱和土加固效果显著。对饱和土地基加固效果的好坏, 关键在于排水, 如饱和砂土地基, 渗透性好, 超孔隙水压力容易消散, 夯后就固结快。对于饱和的粘土或淤泥质土, 由于渗透性差, 土体内的水排除困难, 加固效果就比较差, 必须慎重对待。目前, 对这类地基用砂井排水与强夯结合使用, 加固效果就比较好。

强夯法可适合于房建、桥涵、道路、港口、码头、机场

和大型设备基础等工程。而且加固速度快，效果好，投资省，是当前最经济而简便的地基加固方法之一。

二、强夯法基本特性

用强夯法加固后地基的压缩性可降低200~1000%，而强度可提高200~500%（有的文献介绍，粘土可提高100~300%，粉质砂土可提高400%，砂和泥炭土可提高200~400%）。

用强夯法处理垃圾土，尚可使有害气体迅速排除，有利于环境保护。

强夯法与以往的机械夯实、爆炸夯实等比较还有以下特点：

（1）平均每一次的夯击能比普通夯击能大得多；

（2）以往的夯实方法，能量不大，仅使地表夯实紧密，但能量不能向深处传递，其结果仅限于表层加固，而强夯法能按照我们的预计效果进行控制施工，可根据地基的加固要求来确定夯击点间距及夯击方式，依次按需要加固的深度进行改良，使地基深层得到加固；

（3）在施工中，必要的夯击能量可以分几遍进行夯击；

（4）地基经过强夯加固后，能消除不均匀沉降现象，这是任何天然地基所不能达到的。

强夯法最适宜的施工条件：

（1）处理深度最好不超过15 m（特殊情况除外）；

（2）对于饱和软土，地表面应铺一层较厚的砾石、砂土等优质填料；

- (3) 地下水位离地表面下 2 ~ 3 m 为宜;
- (4) 夯击对象最好为粗颗粒土组成;
- (5) 施工现场离既有建筑物有足够的安全距离 (一般为大于 10 m), 否则不宜施工。

第二节 国内外强夯法的发展 和使用情况

强夯法首先是在法国用来处理填土、饱和砂土、冲积土以及大量的软土地基的一种方法。以后相继在英、美、日本、联邦德国、加拿大、荷兰等二十几个国家三百多项工程中获得了广泛应用, 现在全世界许多国家都普遍推广使用。我国是 1978 年 9 月引进这项技术, 1979 年初首先在塘沽进行强夯法加固粘土地基的试验研究。1979 年 6 月分别在河北省廊坊与山西省阳泉, 对轻亚粘土、粉细砂地基与黄土质砂粘土填土地基进行了处理。这是我国采用强夯法处理地基的最早的两项工程。随后, 很快就推广到北京、天津、上海、秦皇岛、太原、西安、兰州、长沙、南宁、福州、广州、南京、深圳等地。现在, 在建筑、铁路、交通、水利、冶金等部门广泛采用强夯法处理地基, 已达一百多项工程, 都取得了十分良好的技术经济效果, 为国家节省了基础工程费用达几千万元。

通过在多种工程中的实践证明, 夯实后的土体力学性能得到了很好的改善, 这也是采用强夯法加固地基的主要功效。尽管强夯法已得到普遍推广与应用, 但对其机理仍在研究之中。过去的分析方法只限于动力固结试验, 即在试验室

内用固结仪作动力载荷试验。目前，通过实践，对强夯机理有了进一步发展，其中，有运用经典土力学理论进行现场测试与室内模拟试验相结合，并运用电子计算机与计算数学等现代计算技术逐步建立多相介质的动力固结理论。还有用波动理论去研究强夯法机理等等。总之，各种研究方法和途径，目的是为了建立一套简便、可靠的确定强夯参数的设计计算方法。

第二章 强夯法原理

第一节 动力固结理论

在技术发展史上，往往是经验先于理论，强夯法的发展也是符合这种规律的，虽然在实践中已被证实是一种较好的方法，但目前还没有一套很成熟、很完善的设计计算理论和方法，施工参数的确定只是靠经验或典型试验方法来确定。

过去的固结理论认为，饱和粘性土在瞬时荷载作用下，由于渗透性低，孔隙水无法在瞬间排除，因而被看作是不可压缩体。

梅那 (L · Menard) 根据饱和粘性土经受强夯于瞬间产生数十厘米沉降的现象，提出了一个新的模型来解释动力固结机理，如图 2—1 所示。

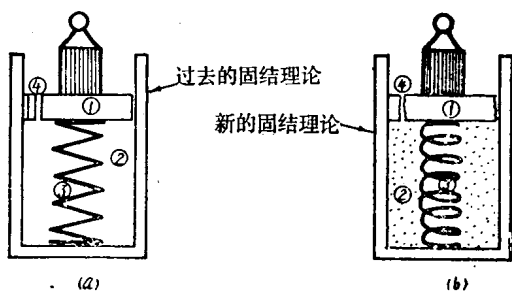


图 2—1 新、旧固结理论图

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1—无摩擦力的活塞； | 1—有摩擦力的活塞； |
| 2—不可压缩的液体； | 2—含有百分之几气泡的可压缩液体； |
| 3—弹簧常数为常数的弹簧； | 3—弹簧常数为变数的弹簧； |
| 4—固结时，液体排出所通过的小孔，其孔径是不变的。 | 4—固结时，液体排出所通过的小孔，其孔径是变化的。 |

动力固结理论考虑下述四点：

1. 饱和土的压缩性

由于土中有机物的分解，土中总存在一些微小气泡，土颗粒之间的孔隙水也有孔隙可压缩，其体积占整个体积的1~3%，最多可达4%。

施行强夯时，气体体积压缩，孔隙水压力增大（产生超孔隙水压力）。

随后气体有所膨胀，如图2—2中的(A)，孔隙水排出，孔隙水压力减少，固相体积始终不变。这样，每夯击一遍，液相体积

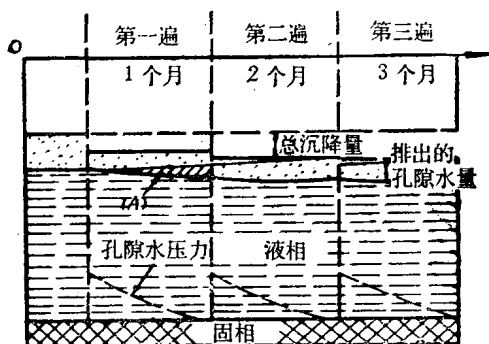


图2—2 施行强夯时气相、液相的变化情况

就有所减少，气相体积也有所减少，（有的资料介绍〔1〕，每夯一遍减少40%，夯五遍之后，气体的体积仅是原来气体体积的8%左右）。这是与以往的固结理论不同之处。

在冲击力作用下，含有空气的孔隙水不能立即消散而具有滞后现象。气相的体积也不可能立即膨胀，这可用图2—1模型中“活塞与筒体之间存在摩擦力”来加以说明。

土颗粒周围的吸着水，由于振动或温度上升而变作自由水。其结果使土颗粒之间的内聚力削弱，土的强度降低，这可用图2—1模型中“弹簧强度是可变的”来加以说明。

2. 土体液化

土体沉降与夯击能成正比，当夯击能达到一定程度时，

即当气体的体积百分比接近于零时，土质具有不可压缩性，此界限值称为饱和能，如图 2—3，饱和能的大小与土的种类有关，一般为 $500 \sim 2000 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3$ 。

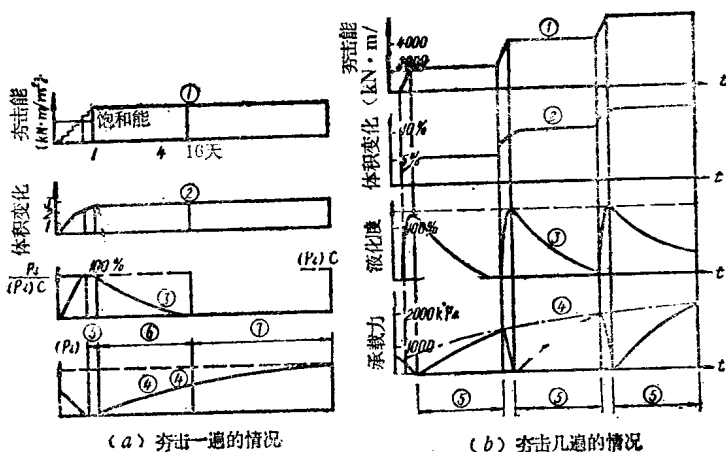


图 2—3 施行强夯时土体的变化情况

- 1—夯击能与时间的关系;
- 2—体积变化与时间的关系;
- 3—孔隙水压力与液化压力之比随时间的变化;
- 4—极限压力与时间的关系;
- 5—液化过程;
- 6—孔隙水压力消散过程;
- 7—触变的恢复过程。

夯击能达到饱和能时，土体产生液化，吸着水变成了自由水，土的强度下降到最小值。必须注意，一旦达到饱和能量的瞬间，就不能再多夯，否则对土体固结不利，因为夯击能过大，土体固结条件遭到破坏，孔隙水反而不易排出，土体强度降低后难以恢复。

3. 由于土体产生裂隙或趋于液化, 引起渗透性增大。

当夯击能增大到饱和能时, 孔隙水压力上升到与竖向应力相等 (即 $u = \sigma$, 而 $\tau_e = (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi = 0$), 夯击停止后,

孔隙水压力迅速消散。

如果仍使用夯击前土的渗透系数, 就无法解释孔隙水压力何以能如此迅速消散。所以梅那认为, 在很大的夯击能作用下, 土中出现很大的应力和冲击波, 致使地基内部出现裂隙形成树枝状排水网路, 如图 2—4 所示。

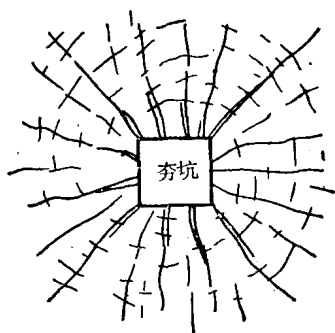


图 2—4

强夯时土体局部液化, 即这一瞬间的孔隙水压等于总压力所产生的超孔隙水压力, 使土颗粒之间出现裂隙, 形成排水通道, 土的渗透系数陡增。当孔隙水压力消散, 达到小于土颗粒之间的横向压力时, 裂隙闭合, 土中水的运动又恢复常态, 如图 2—5 中表现为二段不同斜率的直线, 这可用图 2—1 模型中孔径是变化的来加以说明, 图 2—6 表示渗透系数随孔隙水压力 u 与全应力 σ_v 之比的变化情况。

4. 触变的恢复

从试验中可知, 在夯实进行中土的抗剪强度明显地降低, 当土体液化或接近液化时, 抗剪强度为零或最小, 吸附水变成自由水。当孔隙水压力消散, 土的抗剪强度和变形模量大幅度地增长, 土体颗粒间的接触更加紧密, 新的吸附水层逐渐固定, 这是由于自由水重新被土颗粒所吸附变成了吸

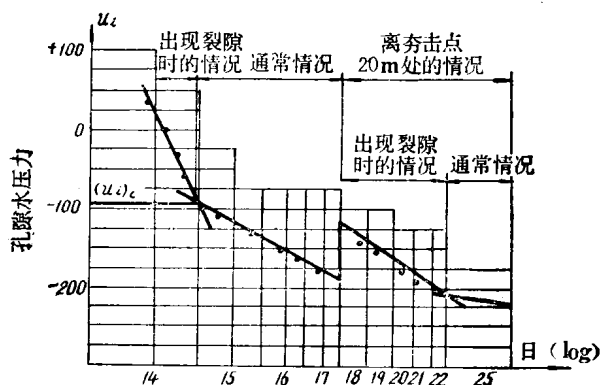


图 2—5 强夯后孔隙水压力的消散

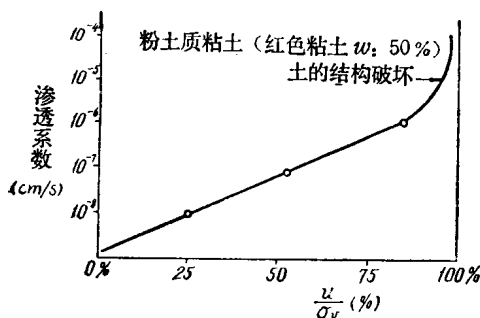


图 2—6 渗透系数随孔隙水压力与全应力之比的变化

着水的缘故。这就是具有触变性的土的特性，触变性与土质种类有很大关系，有的恢复得快，有的恢复得非常缓慢。所以强夯效果的检验工作宜在夯后 4～5 周进行。

应当指出，土在触变恢复过程中，对振动是十分敏感的，所以在这期间进行测试工作时一定要十分注意。

通过大量的试验实测资料，证实了梅那提出的新的动力固结理论是正确的，强夯对饱和粘性土地基加固是有一定效果的，如果夯击参数选择得合理，效果更为显著。

第二节 强夯法机理的研究和发展

法国梅那指出，由于强夯时巨大的冲击能量，使土体产生强烈的震动和应力，而导致土中孔隙压缩，土体局部液化，夯击点周围产生裂隙，形成良好的排水通道，孔隙水顺利逸出，土体迅速固结以达到减少沉降提高承载能力的目的。

目前，除了梅那理论对强夯机理作了解释外，还有用振动波理论的原理和固体微观力学的原理来分析强夯法机理的。

1. 震动波压密理论

强夯的特点是将机械能转换为势能，再变为动能作用于土体。在重锤作用于地面一瞬间，使土体产生强烈震动，类似于地震的震源（但与地震有许多不同之处），在地基土中产生震动波，从震源向四周传播。又因地基为一弹塑性材料，在巨大的冲击能作用下，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，而引起周围介质的振动。振动在介质内的传播过程形成波，根据其作用、性质和特点的不同波，可分为体波和面波两种。

强夯主要是体波起加固作用，体波又分纵波和横波，纵波是由震源向外传递的压缩波，质点的振动方向与波的前进方向是一致的，同时伴随着产生体积的变化，一般表现为周期短，振幅小。横波是由震源向外传递的剪切波，质点的振

动方向与波的前进方向相垂直，不产生体积的变化，如图 2—7 所示，一般表现为周期较长，振幅较大。横波只能在固体里传播，而纵波在固体、液体里都能传播。

纵波与横波的传播速度理论上可分别按下列公式计算〔3〕。

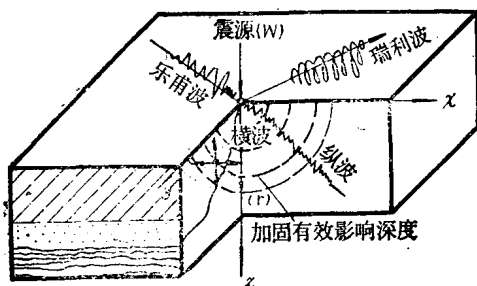


图 2—7 各种波的传播示意图

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2-1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-2)$$

式中 V_P ——纵波速度 ($\frac{m}{s}$)；

V_s ——横波速度 ($\frac{m}{s}$)；

E ——介质杨氏弹性模量 (kPa)；

G ——剪切模量 (kPa)；

ρ ——介质密度 (kN/m^3)；

μ ——介质泊松比 (见表 2—1)。

当 $\mu = 0.22$ (相当砂土)，则纵波速度按下式计算，即