

强夯法和强夯置换法

主要内容

1 加固机理

2 设计计算

3 施工措施

4 质量检验

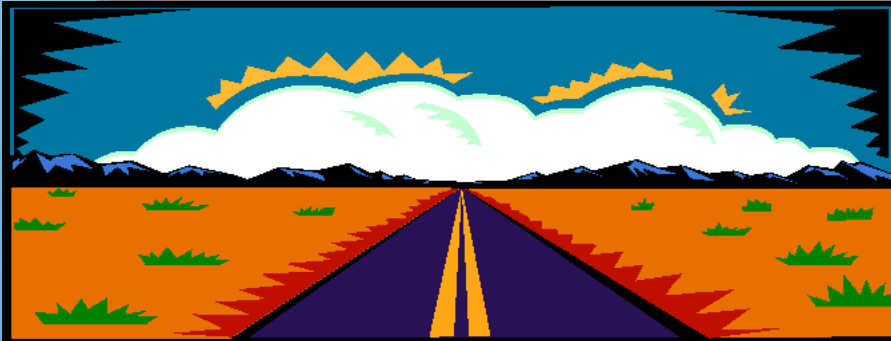
5 工程实例

6 发展趋势



概述

强夯是法国Menard技术企业于1969年首创的一种地基加固措施，我国于1978年首次由交通部一航局科研所及其协作单位在天津新港三号公路进行了强夯法试验研究。它经过一般8~30t的重锤（最重可达200t）和8~20m的落距（最高可达40m），对地基土施加很大的冲击能，提升地基土的强度、降低土的压缩性、改善砂土的抗液化条件等。



概述

强夯法合用土层

碎石土

砂土

低饱和度的粉土与粘性土

湿陷性黄土

杂、素填土

等等

对于高饱和度的可采用强夯置换法

《建筑地基处理技术规范》 (JGJ79-2023) 要求



强夯法合用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基。强夯置换法合用于高饱和度的粉土与软~塑流塑的粘性土等地基上对变形控制要求不严的工程。强夯置换法在设计前必须经过现场试验拟定其合用性和处理效果。

概述

强夯法、
强夯置换法
的优点

加固效果好

施工简朴

使用经济

强夯法加
袋装砂井

软粘土地基的综合治理

概述

自引进到80年代初，约8年。本阶段工程应用强夯能级比较小，一般仅为 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，处理深度5m左右，以处理浅层人工填土为主。

80年代初到90年代初。本阶段兴建国家要点工程山西化肥厂，为了消除黄土地基的湿陷性，国家化工部组织开发了 $6250\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯，使有效处理深度提升到了10m左右。

90年代初到2023年，本阶段以兴建国家要点工程三门峡火力发电厂为契机，成功开发了 $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯，使强夯消除黄土湿陷性的深度到达15m。

2023年底至今，强夯工程最高应用能级已经到达 $10000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。为了更进一步扩大强夯的应用范围，在强夯技术的基础上，还形成了强夯置换和柱锤冲扩等新技术。

国内
发展阶段

三个研究方向

以处理饱和软土为目的的低能级强夯技术；

以处理高填土和深厚湿陷性黄土，以及消除湿陷为目的的高能级强夯技术；

强夯与其他地基处理技术优势互补，发展成为组合式地基处理技术。



发展趋势

质量检验

工程实例

施工措施

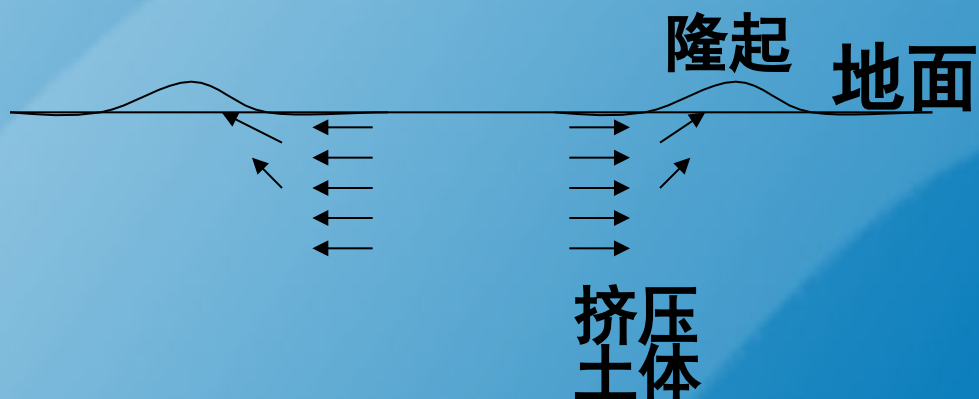
设计计算

加固机理



1 加固机理

夯锤



夯击能

冲击力

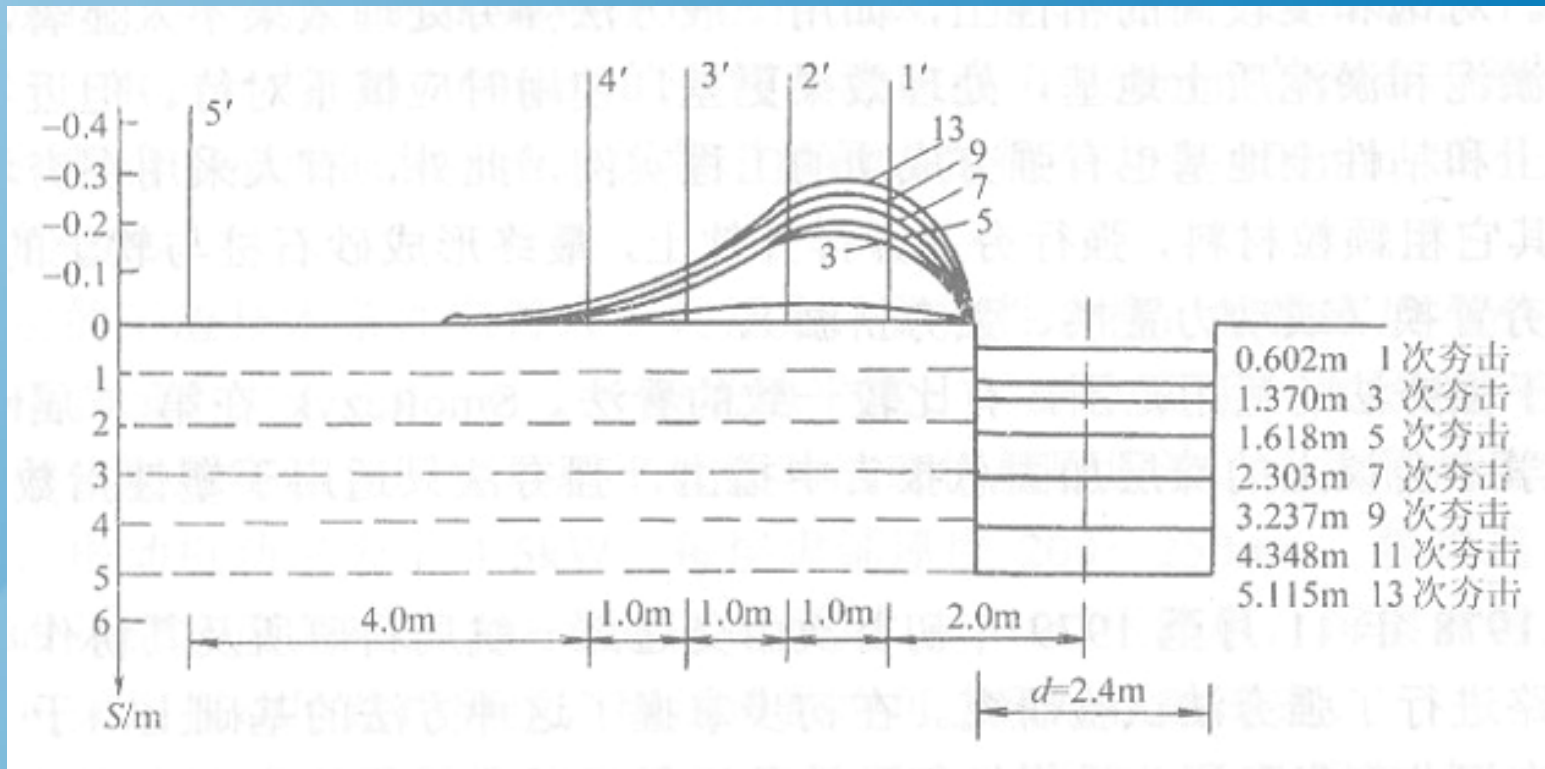
冲击波

冲切上部土体

构造破坏形成夯坑

挤压周围土体

1 加固机理



某工程测得的单点夯夯坑夯沉量及
周围地表隆起情况

1 加固机理

对非饱和土地基

压密过程基本上同试验室中的击实试验相同，挤密振密效果明显。

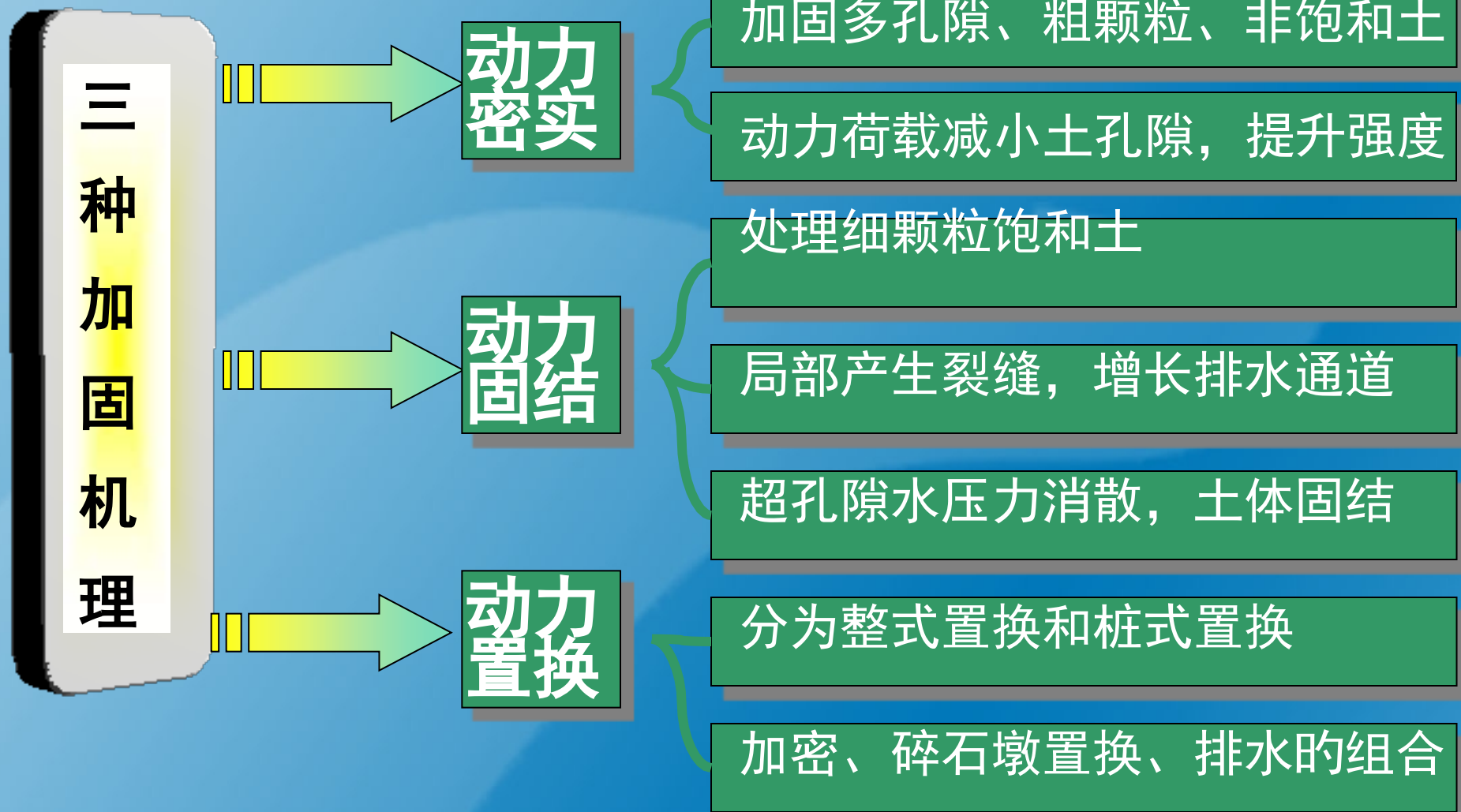
对饱和无粘性土地基

土体可能会产生液化，其压密过程同爆破和振动密实的过程相同。

对饱和粘性土地基

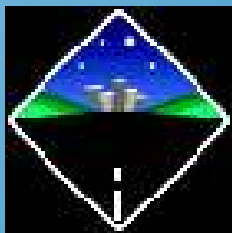
产生超孔压，而且逐渐消散，地基土固结，孔隙比减小，强度提升。

1 加固机理



1 加固机理

动力密实



实际工程表白，在冲击非饱和土在中档夯击能量 $1000\sim 2023\text{kN}\cdot\text{m}$ 的作用下，主要是产生冲切变形，在加固深度范围内气相体积大大降低，最大可降低60%。

1 加固机理



动力
固
结

The diagram shows a vertical green bar with the text '动力固结' (Dynamic Consolidation) written vertically. A yellow arrow points from the right side of the bar to a text box on the right. At the bottom of the bar, there are several stylized leaves in green and orange.

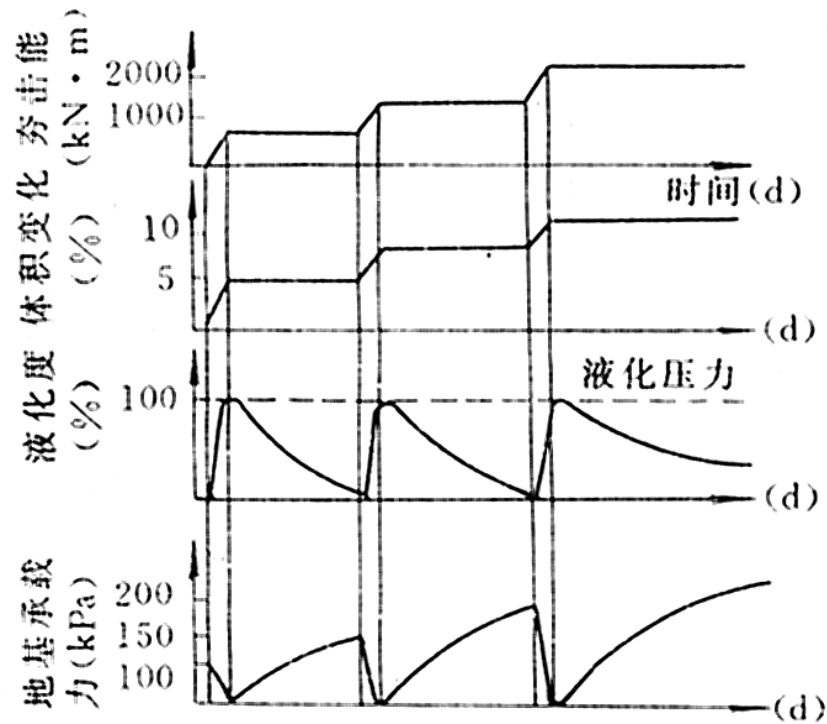
巨大的冲击能量在土中产生很大的应力波，破坏了土体原有的构造，使土体局部发生液化并产生许多裂隙，增长了排水通道，使孔隙水顺利逸出，待超孔隙水压力消散后，土体固结。因为软土的触变性，强度得到提升。

1 加固机理

Menard首次对老式的固结理论提出了不同的看法，以为饱和土是可压缩的新机理。

1. 饱和土的压缩性：进行强夯时，气体体积压缩，孔压增大，随即气体有所膨胀，孔隙水排出的同步，孔压就降低。
2. 产生液化：土体中气体体积百分比为零时，就变成不可压缩的。
3. 应于孔隙水压力上升到覆盖压力相等的能量级，土体即产生液化。
继
4. 续施加能量，除了使土起重塑的破坏作用外，能量纯属是挥霍。
3. 渗透性变化：超孔压不小于颗粒间的侧向压力时，致使土颗粒间出现
裂
4. 隙，形成排水通道。此时，土的渗透系数骤增，孔隙水得以顺利排出。孔压消散到不小于颗粒间的侧向压力时，裂隙即自行闭合。
4. 触变恢复：土体的强度逐渐减低，当出现液化或接近液化时，强度达到最低值。此时土体产生裂隙，而吸附水部分变成自由水，伴随孔压的消散，土的抗剪强度和变形模量都有大幅度的增长。

1 加固机理

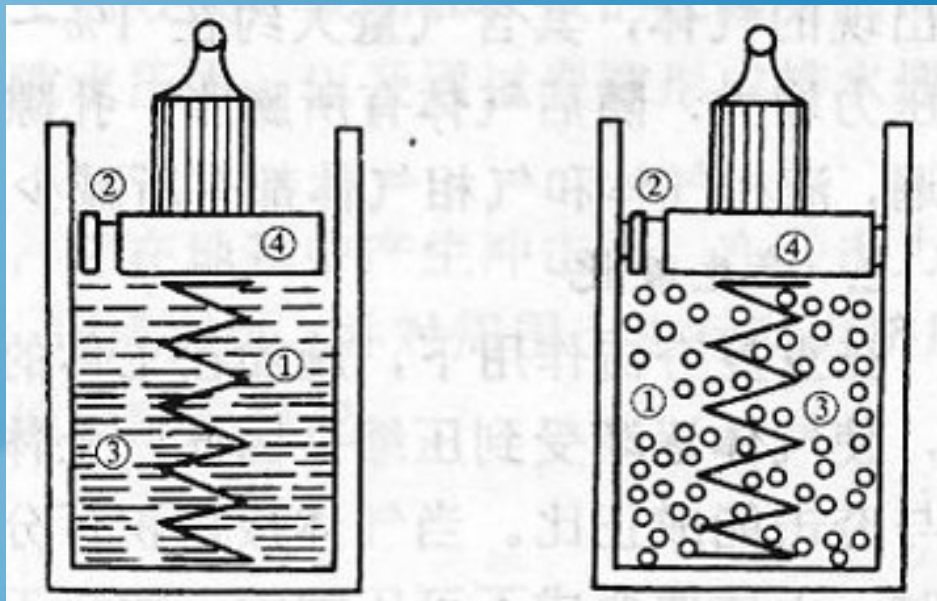


从图中可以看出，随着夯击能的增加，土体的液化度降低，体积变化增大，地基承载力提高。这说明，通过夯击加固，可以有效地提高土体的承载能力，并减少土体的液化程度。

夯击三遍的情况

1 加固机理

弹簧活塞模型



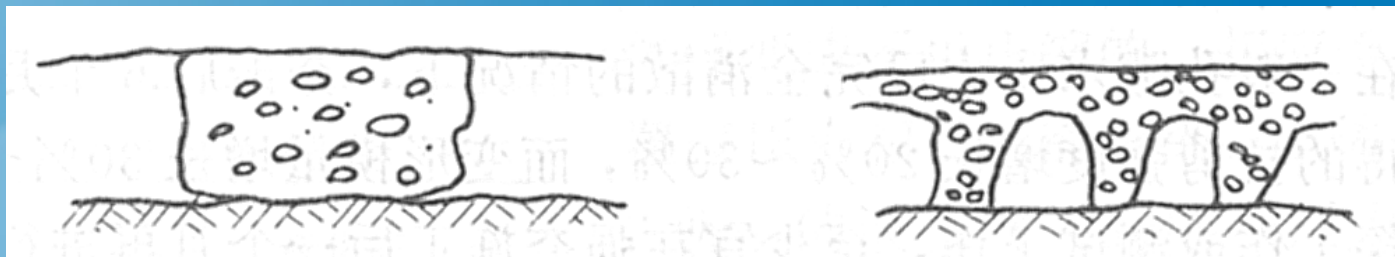
静力固结理论与动力固结理论模型比较

a) 静力固结理论模型

b) 动力固结理论模型

1 加固机理

动力置换



整式置换：将碎石整体挤入淤泥中，作用机理类似于换土垫层。

桩式置换：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。





发展趋势

质量检验

工程实例

施工措施

设计计算

加固机理



2 设计计算

有效加固深度

有效加固深度?

经强夯加固后，该土层强度和变形等指标能满足设计要求的土层范围。

$$H \approx \alpha \sqrt{M \cdot h}$$

系数，根据地基土性质决定

落距
(m)

2 设计计算

有效加固深度

影响H的原因除了锤重和落距外，还有地基土的性质、不同土层的厚度和埋藏顺序、地下水位以及其他强夯的设计参数。

应根据现场试夯或本地经验拟定有效加固深度

假如没有则根据《建筑地基处理技术规范》的提议取值

强夯
置换
墩的
深度

土质
条件
决定

对淤泥、泥炭等粘性软弱土层，置换墩应穿透软土层，着底在很好土层上

对深厚饱和粉土、粉砂，墩身可不穿透该层

2 设计计算

夯锤和落距

夯锤

落距

$$\text{单击夯击能} = M * h$$

$$\text{总夯击能} = N * M * h$$

$$\text{单位夯击能} = N * M * h / A$$

对饱和粘性土所需的能量不能一次施加，不然土体会产生侧向挤出，强度反而有所降低，且难于恢复。根据需
要可分几遍施加，每遍间隔一段时间。
应根据地基土类别、结构类型、荷载大小和重要程度、夯理深度等综合确定，并经过试验拟定。

2 设计计算

夯锤和落距

选择合适的夯锤和落距

选择夯锤

圆形和方形
气孔式和封闭式

锤重

底面积按土
的性质拟定

拟定落距

根据单点
夯击能量

较适合的夯击能 介于

夯击能最低值

2 设计计算

最佳夯击能

最佳夯击能?

在这么多的夯击能作用下，地基中出现的孔隙水压力到达土的自重压力。

粘性土中的拟定

根据孔隙水压力的叠加值

砂性土中的拟定

绘制孔隙水压力增量与夯击数(夯击能)的关系曲线

2 设计计算

夯击点的布置

夯击点的布置

根据基底平面形状

等边三角形

等腰三角形

正方形

应考虑施工时吊机的行走通道

强夯置换墩位布置

等边三角形

正方形

或条形基础

根据基础形式布置

处理范围应不小于建筑物基础范围，详细的放大范围，可根据建筑物类型和主要性等原因决定。对一般建筑物，每边超出基础外缘宽度宜为设计深度的 $1/2 \sim 2/3$ ，并不宜不不小于3m。

2 设计计算

夯击点的布置

夯击点的间距

拟定原则：一般根据地基土的性质和要求处理的深度而定，以确保使夯击能量传递到深处和保护邻近夯坑周围所产生的辐射向裂隙。

1. 强夯第一遍夯击点间距可取夯锤直径的2.5~3.5倍，第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间。后来各遍夯击点间距可合适减小。
2. 对处理深度较深或单击夯击能较大的工程，第一遍夯击点间距宜合适增大。
3. 强夯置换墩间距应根据荷载大小和原土的承载力选定，当满堂布置时可取夯锤直径的2~3倍。对独立基础或条形基础可取夯锤直径的1.5~2.0倍。墩的计算直径可取夯锤直径的1.1~1.2倍。

夯击击数

国内拟定夯击击数的措施有所不同：有的以孔隙水压力到达液化压力为准则；有的以最终一击的夯沉量达某一数值为限值；也有有的以上、下二击所产生的沉降差不大于某一数值为原则。总之，各夯击点的夯击数，应使土体竖向压缩最大，而侧向位移最小为原则，一般为4~10击。

2 设计计算

夯击击数和遍数

强夯夯点的
夯击击数

按现场试夯得到的夯击击数和夯沉量关系曲线拟定

还要满足

夯击击数

1. 最终两击平均夯沉量不宜不小于下列数值：单击夯击能量不小于 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时为 50mm ；夯击能为 $4000\sim 6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时为 100mm ；夯击能不小于 $6000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时为 200mm ；
2. 夯坑周围地面不应发生过大的隆起；
3. 不因夯坑过深而发生起锤困难。

2 设计计算

夯击击数和遍数

强夯置换点的夯击击数

按现场试夯得到的夯击击数和夯沉量关系曲线拟定

还要满足

夯击击数

1. 墩底穿透软弱土层，且到达设计墩长；
2. 合计夯沉量为设计墩长的1.5~2.0倍；
3. 最终两击的平均夯沉量不小于强夯的要求值。

夯击遍数

夯击遍数应根据地基土的性质拟定，可采用点夯2~3遍，对于渗透性较差的细颗粒土，必要时夯击遍数可合适增长。最终再以低能量满夯2遍，满夯还可采用轻锤或低落距锤屡次夯击，锤印搭接。

强夯前要求拟加固的场地必需具有一层稍硬的表层，使其能支承起重设备；并便于对所施工的“夯击能”得到扩散；同步也可加大地下水位与地表面的距离。对场地地下水位在-2m深度下列的砂砾石土层，可直接施行强夯，无需铺设垫层；对地下水位较高的饱和粘性土与易液化流动的饱和砂土，需要铺设砂、砂砾或碎石垫层才干进行强夯，不然土体会发生流动。

垫层厚度随场地的土质条件、夯锤重量及其形状等条件而定。当场地土质条件好，夯锤小或形状构造合理，起吊时吸力小者，也可降低垫层厚度。垫层厚度一般为0.5~2.0m，确保地下水位低于坑底面下列2m。铺设的垫层不能具有粘土。

2 设计计算

间歇时间

取决于加固土层中孔隙水压力消散所需要的时间

砂性土

消散快

间歇时间很短

连续夯

粘性土

消散慢

孔压叠加

间歇时间长

设置袋装砂井

加速消散

缩短间歇时间

2 设计计算

现场测试设计

地面 及 深层 变形

目的:

1. 了解地表隆起的影响范围及垫层的密实度变化;
2. 研究夯击能与夯沉量的关系,用以拟定单点最佳夯击能量;
3. 拟定场地平均沉降和搭夯的沉降量,用以研究强夯的加固效果。

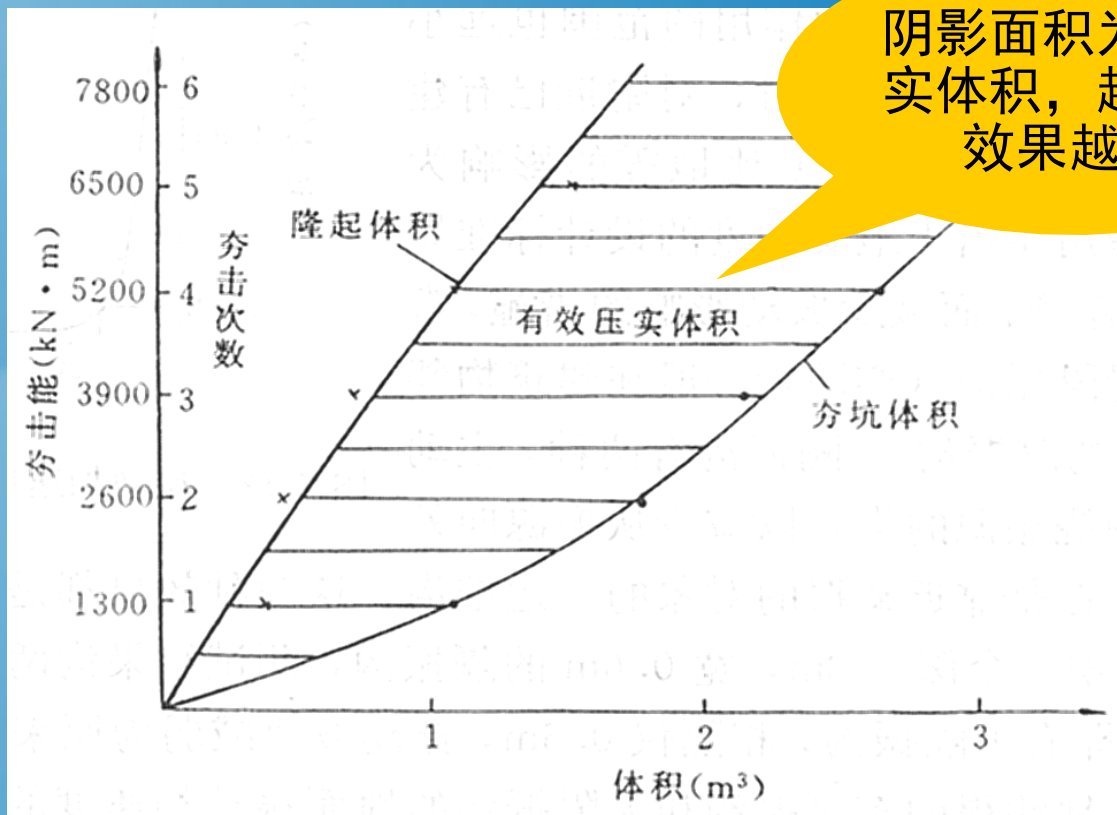
手段:

地面沉降观察、深层沉降观察和水平位移观察。

2 设计计算

现场测试设计

地面
及
深层
变形



夯击次数 (或夯击能) 与夯坑体积和隆起体积关系曲线

孔隙水压力

一般可在试验现场沿夯击点等距离的不同深度以及等深度的不同距离埋设**双管封闭式孔隙水压力仪**或**钢弦式孔隙水压力仪**，在夯击作用下，进行对孔隙水压力沿深度和水平距离的增长和消散的分布规律研究。从而拟定**两个夯击点间的夯距、夯击的影响范围、间歇时间以及饱和夯击能等参数**。

2 设计计算

现场测试设计

侧向 挤 压力

将土压力盒事先埋入土中后，在强夯加固前，各土压力盒沿深度分布的土压力的规律，应与静止土压力相近似。在夯击作用下，可测试每夯击一次的压力增量沿深度的分布规律。

振动 加 速度

经过测试地面振动加速度能够了解强夯振动的影响范围。一般将地表的**最大振动加速度为 0.98m/s^2** 处作为设计时振动影响安全距离。但因为强夯振动的周期比地震短得多，强夯产生振动作用的范围也远不大于地震的作用范围，所以强夯施工时，对附近已经有建筑物和正在施工的建筑物的影响肯定要比地震的影响为小。为了降低强夯振动的影响，常在夯区周围设置隔振沟



发展趋势

质量检验

工程实例

施工措施

设计计算

加固机理



3 施工措施

施工机械

西欧国家

大吨位的履带式起重机

稳定性好，行走以便

日本

轮胎式起重机

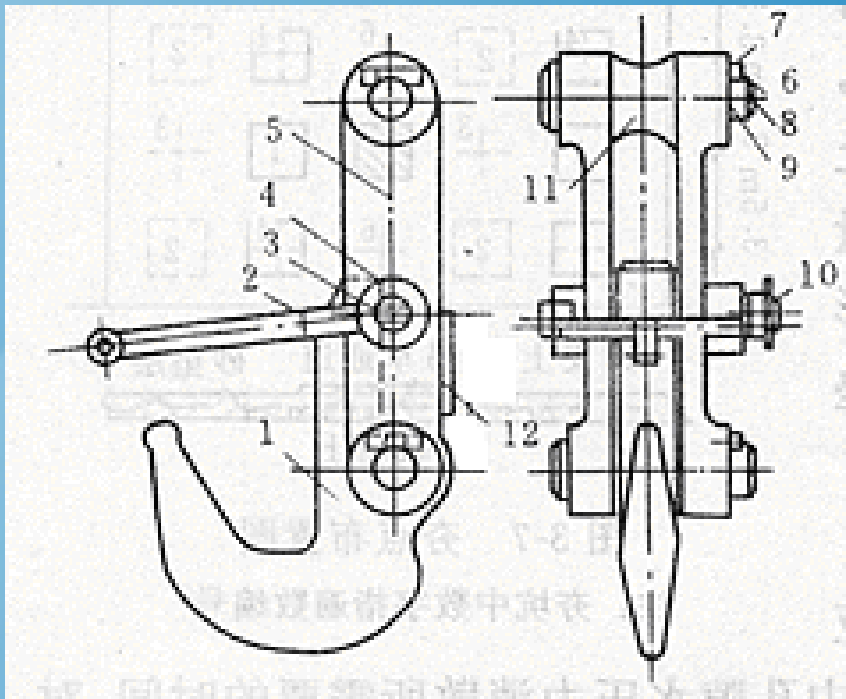
国外还制造了三足架和轮胎式强夯机，用于起吊40t夯锤，落距可达40m

国外所用履带吊都是大吨位的吊机，一般在100t以上

3 施工措施

施工机械

我国只具有小吨位起重机的施工条件，只能使用滑轮组起吊夯锤，利用自动脱钩装置



强夯脱钩装置图

- 1-吊钩 2-锁卡焊合件
3、6-螺栓 4-开口销
5-架板 7-垫圈 8-止
动板 9-销轴 10-螺母
11-鼓形轮 12-护板

强夯法施工的环节：

- 1) 清理并平整施工场地；
- 2) 铺设垫层，使在地表形成硬层，用以支承起重设备，确保机械通行和施工。同步可加大地下水和表层面的距离，预防夯击的效率降低；
- 3) 标出第一遍夯击点的位置，并测量场地高程；
- 4) 起重机就位，使夯锤对准夯点位置；
- 5) 测量夯前锤顶标高；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/908002116042006131>