



# 项目2 地基处理及加固



## 建筑结构对地基的要求

地基是与建筑基础相接的那部分土层，称为持力层，直接承受基础传来的荷载，并把受力分散到下部更深的土层中。地基土与建筑的安危有直接关系，因此地基要有足够的强度，要限制它的变形。

## 地基加固处理的目的

如果地基上部的土层较好，足以满足强度和变形的要求，可以采用天然地基上的浅基础。如果地基表层土质较差，承载力弱，受荷载后变形过大，就要用加固的方法使其达到强度和变形的要求。



本项目以江西某大学新教学楼地基为例，主要介绍换填垫层法的设计计算及验算，并在之后介绍换填垫层法的施工技术、质量标准与安全技术等内容。再以学校食堂及其附楼地基为例，主要介绍强夯法和深层搅拌法的实际计算及验算，并在之后介绍强夯法和深层搅拌法的施工技术、质量标准与安全技术等内容。

该大学新教学楼为6层框架结构，建筑面积8 350 m<sup>2</sup>，基础面积1 647.8 m<sup>2</sup>，教材2.1中将结合本工程局部进行介绍。该大学学校食堂为4层框架结构，其附楼为2层框架结构，建筑面积10 380 m<sup>2</sup>，教材2.2、2.3中将结合本工程局部进行介绍。



## 目录

### 2.1 换填垫层法

### 2.2 强夯法

### 2.3 深层搅拌法

### 2.4 其他地基处理方法

2.1

# 换填垫层法



## 2.1.1换填垫层法的概念与应用



换填垫层法 ( cushion ) 也称换填法 , 是将基础下一定深度范围内的软弱土层全部或部分挖除 , 然后分层回填砂、碎石、素土、灰土、粉煤灰、高炉干渣等强度较大 , 性能稳定且无侵蚀性的材料 , 并分层夯实 ( 或振实 ) 至要求的密实度(compactness)。换填法也包括低洼地域筑高 ( 平整场地 ) 或堆填筑高 ( 道路路基 ) 。



## 2.1.1换填垫层法的概念与应用



当软弱地基(soft clay ground)的承载力(bearing capacity)和变形(deformation)不能满足建筑物要求，且软弱土层的厚度又不很大时，换填垫层法是一种较为经济、简单的软土地基浅层处理方法。根据不同的回填材料，可分为砂垫层、碎石垫层、素土或灰土垫层、粉煤灰垫层及煤渣垫层等。换填垫层法可就地取材，施工方便、机械设备简单、工期短、造价低。

## 2.1.2换填垫层法的使用范围



换填垫层法的处理深度常控制在3~5 m。如换填垫层太薄,其作用不甚明显,因此换填垫层的厚度不宜小于0.5 m,也不宜大于3 m。换填法各种垫层的适用范围见表2.1。

表 2.1 各种垫层的适用范围

| 垫层种类       | 适用范围   |
|------------|--|
| 砂垫层(碎石、沙砾) | 中、小型建设工程的滨、塘、沟等局部处理;软弱土和水下黄土处理(不适用于湿陷性黄土);也可有条件用于膨胀土地基 |
| 素土垫层       | 中小型工程,大面积回填,湿陷性黄土                                      |
| 灰土垫层       | 中小型工程,膨胀土,尤其湿陷性黄土                                      |
| 粉煤灰垫层      | 厂房、机场、港区路线和堆场等大、中小型大面积填筑                               |
| 干渣垫层       | 中小型建筑工程,地坪、堆场等大面积地基处理和场地平整;铁路、道路路基处理                   |

## 2.1.3换填垫层法的加固机理



换填垫层处理软土地基，其加固机理和作用主要体现在以下几个方面。

- ①提高浅层地基承载力。
- ②减少地基的变形量。
- ③加速软土层的排水固结。
- ④防止土的冻胀。
- ⑤消除地基土的湿陷性、胀缩性或冻胀性。

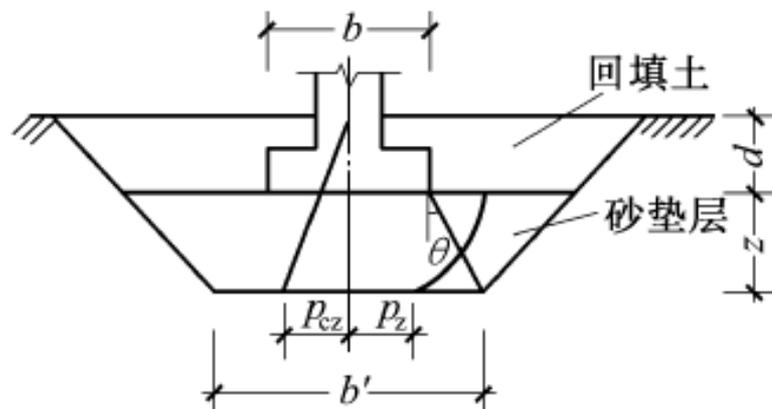
## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### 1.垫层的厚度确定

如图2.1所示，垫层厚度 $z$ 应根据需置换软弱土层的深度或下卧土层的承载力确定，并符合下式要求：

式中 $p_z$ ——  
( kPa ) ；  
 $p_{cz}$ ——  
 $f_{az}$ ——



加压力值

$\bar{p}$  ( kPa ) 。

图 2.1 垫层内应力分布

## 2.1.4换填垫层法的设计计算



垫层底面处的附加压力设计值 $p_z$ 可按压力扩散角 $\theta$ 进行简化计算：

①条形基础： $p_z = b(pk - p_c) / (b + 2z \tan \theta)$

②矩形基础：

$$p_z = bl(pk - p_c) / (bl + 2z \tan \theta)$$

式中 $b$ ——矩形基础或条形基础底面的宽度（m）；

$l$ ——矩形基础底面的长度（m）；

$p_k$ ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值（kPa）；

$p_c$ ——基础底面处土的自重压力值（kPa）；

$z$ ——基础底面下垫层厚度（m）；

$\theta$ ——垫层的压力扩散角（°），宜通过试验确定，当无试验资料时，可按表2.2选用。

## 2.1.4换填垫层法的设计计算



表 2.2 土和矿石材料压力扩散角  $\theta(^{\circ})$

| 换填材料<br>$z/b$ | 中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、石屑、卵石、碎石、矿渣 | 粉质黏土类、粉煤灰 | 灰土 |
|---------------|----------------------------|-----------|----|
| 0.25          | 20                         | 6         | 28 |
| $\geq 0.50$   | 30                         | 23        |    |

注:1. 当  $z/b < 0.25$  时,除灰土取  $\theta = 28^{\circ}$  外,其余材料均取  $\theta = 0^{\circ}$ ,必要时,宜由试验确定。

2. 当  $0.25 < z/b < 0.5$  时, $\theta$  值可内插求得。

3. 土工合成材料加筋垫层其压力扩散角宜由现场荷载试验确定。

## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### 2.垫层的宽度确定

垫层底面的宽度应以满足基础底面应力扩散和防止垫层向两侧挤出为原则，可根据当地经验由下式确定：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta$$

式中 $b'$ ——垫层底面宽度（m）；

$\theta$ ——压力扩散角（°），可按表2.2选取，当 $z / b < 0.25$ 时，仍按 $z / b = 0.25$ 取值。

## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### 3. 垫层承载力的确定

垫层承载力宜通过现场荷载试验确定。当无试验资料时，可按表2.3选用，并应进行下卧层承载力验算。

表 2.3 各种垫层的承载力

| 施工方法           | 换填材料类别                 | 压实系数 $\lambda_c$ | 承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa |
|----------------|------------------------|------------------|----------------------|
| 碾压、振密或<br>重锤夯实 | 碎石卵石                   | 0.94~0.97        | 200~300              |
|                | 砂夹石,其中碎石卵石占全重的 30%~50% |                  | 200~250              |
|                | 土夹石,其中碎石卵石占全重的 30%~50% |                  | 150~200              |
|                | 中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾         |                  | 150~200              |
|                | 粉质黏土                   |                  | 130~180              |
|                | 灰土                     | 0.95             | 200~250              |
|                | 粉煤灰                    | 0.90~0.95        | 120~150              |

注:①压实系数  $\lambda_c$  为土控制干密度  $\rho_d$  与最大干密度  $\rho_{dmax}$  的比值,土的最大干密度宜采用击实试验确定,碎石或卵石的最大干密度可取  $(2.0\sim 2.2)\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

②采用轻型击实试验时,压实系数  $\lambda_c$  宜取高值;采用重型击实试验时,压实系数  $\lambda_c$  宜取低值。重锤夯实土的承载力标准值取低值,灰土取高值。

③矿渣垫层的压实指标为最后两遍压实的压陷差小于 2 mm。



## 2.1.4换填垫层法的设计计算



含有冻土或膨胀土。当含有



## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### (4) 粉煤灰

粉煤灰可用于道路、堆场以及小型建筑垫层上宜覆土0.3~0.5 m。粉煤灰垫层应确定其性能及适用条件。作为建筑物垫层应满足标准的要求。粉煤灰垫层中的金属含量填筑粉煤灰时应考虑对地下水和土



## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### (5) 矿渣

垫层矿渣是指高炉重矿渣，可分为分级矿渣、混合矿渣及原状矿渣。矿渣垫层主要用于堆场、道路和地坪，也可用于小型建（构）筑物地基。

矿渣的松散重度不小于 $11 \text{ kN/m}^3$ 。设计、施工前必须对选用的矿渣进行试验，符合规定后方可使用。作为建筑物垫层时，不宜用于易受酸、碱影响的基础或地下管沟。应考虑对地下水和土壤的环境影响。



## 2.1.4换填垫层法的设计计算



### (6) 其他工业废渣

在有可靠试验结果或成功工程经验时，对质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和放射性危害的工业废渣等亦可用于填筑换填垫层。工业废渣的粒径、级配和施工工艺等应通过试验确定。

### (7) 土工合成材料

由分层铺设的土工合成材料与地基土构成加筋垫层。土工合成材料的品种、性能及填料的土类应根据工程特性和地基土条件，按照《土工合成材料应用技术规范》(GB 50290—1998)的要求，通过设计并进行现场试验后确定。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



### 1. 机械碾压法

机械碾压法是采用各种压实机械来压实地基土的密实方法。此法常用于基坑底面积宽大、开挖土方量较大的工程。

机械碾压法的施工设备有平碾、振动碾、羊足碾、振动压实机、蛙式夯、插入式振动器和平板振动器等。一般粉质黏土、灰土宜采用平碾、振动碾或羊足碾；中小型工程也可采用蛙式夯、柴油夯；砂石等宜用振动碾；粉煤灰宜采用平碾、振动碾、平板振动器、蛙式夯；矿渣宜采用平板振动器或平碾，也可采用振动碾。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



工程实践中，对垫层碾压质量的检验，要求获得填土最大干密度。其关键在于施工时控制每层的铺设厚度和最优含水量，其最大干密度和最优含水量宜采用击实试验确定。所有施工参数(如施工机械、铺填厚度、碾压遍数与填筑含水量等)都必须由工地试验确定，对现场试验应以压实系数 $\lambda_c$ 与施工含水量进行控制。不具备试验条件的场合，可按表2.4选用垫层的每层铺填厚度及压实遍数。

表 2.4 垫层的每层铺填厚度及压实遍数

| 施工设备                 | 每层铺填厚度/mm   | 压实遍数 |
|----------------------|-------------|------|
| 平碾                   | 200~300     | 6~8  |
| 羊足碾 516              | 200~350     | 8~16 |
| 蛙式夯 200 kg           | 200~250     | 3~4  |
| 振动碾 815              | 600~1 300   | 6~8  |
| 振动压力机 2 t, 振动力 98 kN | 1 200~1 500 | 1~0  |
| 插入式振动器               | 200~500     | —    |
| 平板振动器                | 150~250     | —    |

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



### 2. 重锤夯实法

重锤夯实法是用起重机将夯锤提升到某一高度，然后自由落锤，不断重

复夯击以加固地基。重锤夯实法适用于处理地下水位距地表0.5m以上、

稍湿的黏性土、砂土、湿陷性

主要设备为起重机械、夯锤、

当直接用钢丝绳悬吊夯锤时，

采用脱钩夯锤时，起重能力应



## 2.1.5换填垫层法的施工技术



夯锤宜采用圆台形，如图2.2所示。锤重宜大于2 t，锤底面单位静压力宜为15 ~ 20 kPa，夯锤落距宜大于4 m。垫层施工中，应进行现场试验，确定符合夯击密实度要求的最少夯击遍数、最后下沉量(最后两击的平均下沉量)、总下沉量及有效夯实深度等。黏性土、粉土及湿陷性黄土最后下沉量不超过10 ~ 20 mm，砂土不超过5 ~ 10 mm时应停止夯击。施工时夯击遍数应比试夯时确定的最少夯击遍数增加1或2遍。实践经验表明，夯实的有效影响深度约为锤底直径的1倍。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术

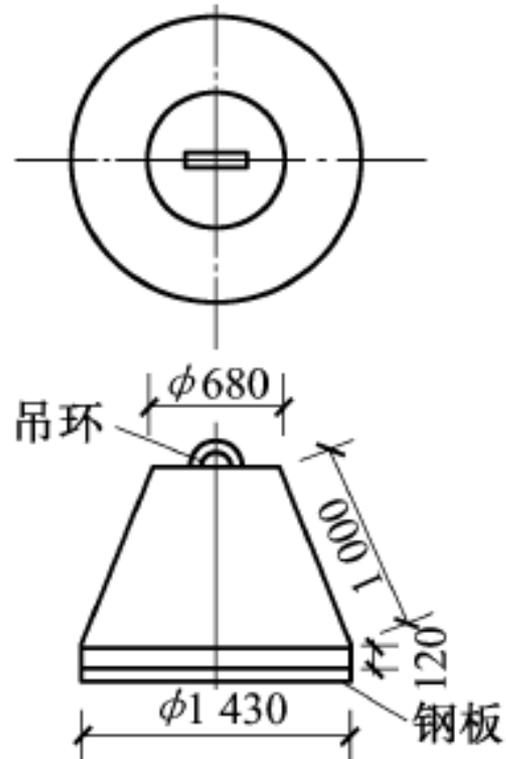


图 2.2 夯锤

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



重锤夯实法施工要点如下。

- ①重锤夯实施工前应在现场试夯，试夯面积不小于 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ ，试夯层数不少于2层。
- ②夯击前应检查坑(槽)中土的含水量，并将土的含水量进行处理。
- ③在条基或大面积基坑内夯击时，第一遍宜一夯挨一夯进行，第二遍应在第一遍的间隙点夯击，如此反复，最后两遍应一夯套半夯；在独立柱基基坑内，宜采用先外后里或先周围后中间的顺序进行夯打；当基坑底面标高不同时，应先深后浅逐层夯实。
- ④注意边坡稳定及夯击对邻近建筑物的影响，必要时应采取有效措施。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



### 3 . 平板振动法

平板振动法是使用振动压实机来处理无黏性土或黏粒含量少、透水性较好的松散杂填土地基的一种方法。



## 2.1.5换填垫层法的施工技术



如图2.3所示，振动压实机的工作原理是由电动机带动两个偏心块以相同速度反向转动，由此产生较大的垂直振动力。这种振动机的频率为1 160~1 180 r/min，振幅为3.5 mm，激振力可达50~100 kN。该振动压实机可通过操纵使之前后移动或转弯。

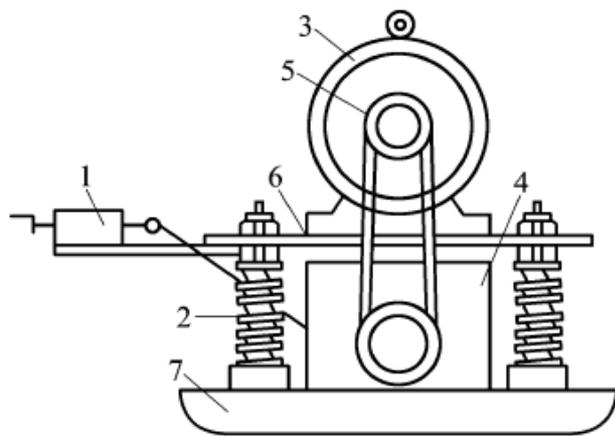


图 2.3 振动压实机示意

1—操纵机构；2—弹簧减振器；3—电动机；4—振动器；  
5—振动机槽轮；6—减振架；7—振动夯板

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



振动压实的效果与填土成分、振动时间等因素有关，但振动时间超过某一值后，振动引起的下沉基本稳定，再继续振动压实作用已不明显。为此，需要施工前进行试振，得出稳定下沉量和时间的关系。一般，对建筑垃圾，振动时间在1 min以上；对含炉灰等细粒填土，为3~5 min，有效振实深度为1.2~1.5 m。施工时若地下水位太高，将影响振实效果。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



### 4. 砂石垫层施工

砂石垫层的施工要点如下。

- ①砂石垫层施工宜采用振动碾和振动压实机等机具，其压实效果、分层铺填厚度、压实遍数、最优含水量等，应根据具体施工方法及施工机具等通过现场试验确定。当无试验资料时，可参考表2.4选取。
- ②对于砂石料可按经验控制适宜的施工含水量，用平板式振动器时可取15%~20%，用平碾或蛙式夯时可取8%~12%，用插入式振动器时，宜为饱和的碎石、卵石。
- ③垫层底部存在古井、古墓、洞穴、旧基础、暗塘等软硬不均的部位时，应先予清理，再用砂石或好土逐层回填夯实，经检查合格后，再铺填垫层。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



④严禁扰动垫层下卧的淤泥和淤泥质土层，防止践踏、受冻、浸泡或暴晒过久。如淤泥和淤泥质土层厚度过小，可先在软弱土层面上堆填块石、片石等，然后将其压入以置换或挤出软弱土。

⑤砂石垫层的底面宜铺设在同一标高上。若深度不同，基底应挖成阶梯或斜坡搭接，并按先浅后深的顺序施工，搭接处应夯压密实。垫层竣工后，应及时施工基础，回填基坑。

⑥地下水高于基坑底面时，宜采取排降水措施，并注意边坡稳定，以防坍土混入垫层中。

## 2.1.5换填垫层法的施工技术



### 5. 土垫层施工

土垫层的施工要点如下。

- ①素土及灰土料垫层的施工，其施工含水量应控制在 $w_{op} \pm 2\%$ 的范围内。 $w_{op}$ 可通过室内击实试验确定，或根据当地经验取用。
- ②土垫层施工时，不得在柱基、墙角及承重窗间墙下接缝，上下两层的缝距不得小于0.5 m，接缝处应夯压密实，灰土、二灰土应拌和均匀并应当日铺填压实，灰土压实后3天内不得受水浸泡，冬季应防冻。
- ③其他要求参见砂垫层的施工要点。

## 2.1.6工程实例



本工程某局部砂石地基，基础底面积和埋深如图2.4所示。 $b \times l = 4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ，埋深 $d = 3 \text{ m}$ ，作用基础顶面竖向荷载 $F = 10\,000 \text{ kN}$ ，土层 $0 \sim 8 \text{ m}$ 皆为细砂，重度为 $17 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，地基承载力不能满足设计要求。现采用换填垫层法进行地基处理，填料为碎石，重度为 $19.5 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，换填垫层厚度为 $2 \text{ m}$ ，分层压实，使土的内摩擦角达到 $30^\circ$ 。下卧层承载力是否满足要求？

## 2.1.6工程实例



解(1)垫层底面处的附加压力值

$$p_k = F + GA$$

$$= 10\,000 \text{ kN} + 4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 20 \text{ kN/m}^3$$

$$= 560 \text{ kPa}$$

(2)下卧层承载力验算

①由碎石垫层 $\varphi_k = 36^\circ$ ，查《建筑地基基础设计规范》表5.2.5，得承载力系数：

$M_b = 4.2$ ， $M_d = 8.25$ ，则有

$$f_a = M_b \gamma_b + M_d \gamma_m d$$

$$= 4.2 \times 19.5 \text{ kN/m}^3 \times 4 \text{ m} + 8.25 \times 17 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m}$$

$$\approx 748.4 \text{ kPa} > 560 \text{ kPa}$$

## 2.1.6 工程实例



②下卧层承载力验算：查表压力扩散角 $\theta=30^\circ$ ，有：

$$\begin{aligned} p_{cz} &= 19.5 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} + 17 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m} \\ &= 90 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_z &= bl(pk - pc)(b + 2z \tan \theta) + (l + 2z \tan \theta) \\ &= 4 \times 5 \times (560 - 51)(4 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ) + (5 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ) \\ &= 220.8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

由于 $\eta_b = 2$

$$\gamma_m = (17 \times 3 + 19.5 \times 2) / 5 \text{ kN/m}^3 = 18 \text{ kN/m}^3,$$

$\eta_d = 3$ ，则有：

$$\begin{aligned} f_{az} &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 190.7 \text{ kPa} + 2 \times 17 \times (4 - 3) \text{ kPa} + 3 \times 18 \times (5 - 0.5) \text{ kPa} = 467.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

## 2.1.6 工程实例



$$p_z + p_{cz} = 220.8 \text{ kPa} + 90 \text{ kPa}$$

$$= 310.8 \text{ kPa} < f_{az}$$

$$= 467.7 \text{ kPa}$$

故下卧层承载力满足要求。

2. 2



# 强夯法

## 2.2.1强夯法的适用范围



强夯法 ( dynamic compaction ) 适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土和黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基。对于软土地基，一般来说处理效果不显著。

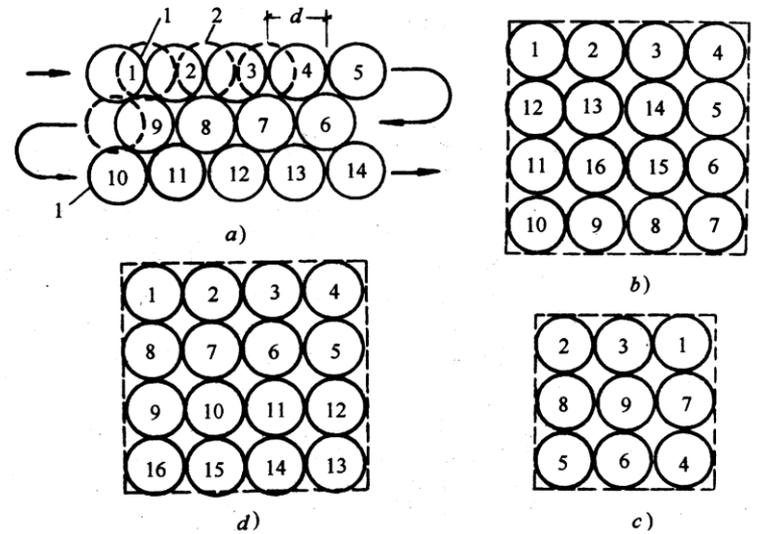
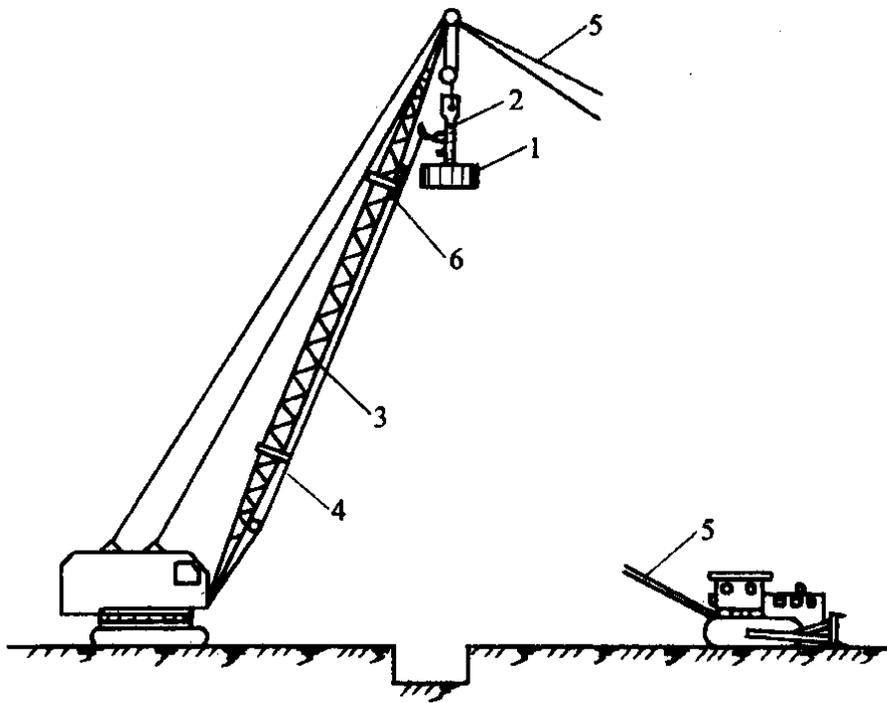
强夯法所用设备  
土地基加固效果的好  
超孔隙水压力容易消  
强夯法加固地基  
而且速度快、效果好



## 2.2.2强夯法的加固机理



强夯法是利用强大的夯击能给地基一冲击力，并在地基中产生冲击波，在冲击力作用下，夯锤对上部土体进行冲切，土体结构破坏，形成夯坑，并对周围土进行动力挤压，从而达到地基处理的目的。目前，强夯法加固地基有三种不同的加固机理：动力密实、动力固结和动力置换。对具体种类地基土的加固机理取决于地基土的类别和强夯施工工艺。



## 夯打顺序

1-夯拉 2-重叠夯 d-重锤直径

## 履带式起重机强夯加推土机锚碇

1-夯锤 2-自动脱钩装置 3-起重臂  
4-拉绳 5-锚绳 6-废轮胎



重锤夯实法施工现场

强  
夯  
压  
实



## 2.2.3强夯法的设计计算



### 1. 有效加固深度

有效加固深度既是选择地基处理方法的重要依据，又是反映处理效果的重要参数。可采用经修正后的梅那（Menard）公式来估算强夯法加固地基的有效加固深度 $H$ 。

式中 $H$ ——有效加固深度（m）；

$M$ ——夯锤重（kN）；

$h$ ——落距（m）；

$\alpha$ ——修正系数，一般取 $\alpha = 0.34 \sim 0.8$ ， $\alpha$ 值与地基土性质有关，软土可取0.5，黄土可取0.34~0.8。

## 2.2.3强夯法的设计计算



鉴于有效加固深度目前尚无适合的计算公式，《地基处理规范》规定有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定。在缺少经验或试验资料时，可按表2.5预估。

表 2.5 强夯的有效加固深度

(单位:m)

| 单击夯击能/(kN·m) | 碎石土、砂土等粗颗粒土 | 粉土、黏性土、湿陷性黄土等细颗粒土 |
|--------------|-------------|-------------------|
| 1 000        | 4.0~5.0     | 3.0~4.0           |
| 2 000        | 5.0~6.0     | 4.0~5.0           |
| 3 000        | 6.0~7.0     | 5.0~6.0           |
| 4 000        | 7.0~8.0     | 6.0~7.0           |
| 5 000        | 8.0~8.5     | 7.0~7.5           |
| 6 000        | 8.5~9.0     | 7.5~8.0           |
| 8 000        | 9.0~9.5     | 8.0~9.0           |
| 10 000       | 10.0~11.0   | 9.5~10.5          |
| 12 000       | 11.5~12.5   | 11.0~12.0         |
| 14 000       | 12.5~13.5   | 12.0~13.0         |
| 15 000       | 13.5~14.0   | 13.0~13.5         |
| 16 000       | 14.0~14.4   | 13.5~14.0         |
| 18 000       | 14.5~15.5   | —                 |

注:强夯的有效加固深度应从最初起夯面算起。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### 2. 夯锤和落距

在强夯法设计中，应首先根据需加固的深度初步确定单击夯击能，然后再根据机具条件因地制宜地确定锤重和落距。

#### (1) 单击夯击能

单击夯击能为夯锤重 $M$ 与落距 $h$ 的乘积。一般来说，夯击时如果锤重和落距都大，则单击能量大，夯击击数少，夯击遍数也相应减少，加固效果和技术经济性都较好。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### (2) 单位夯击能

单位夯击能为整个加固场地的总夯击能量（即锤重 $\times$ 落距 $\times$ 总夯击数）除以加固面积。强夯的单位夯击能应根据地基土类别、结构类型、荷载大小和要求处理的深度等综合考虑，并可通过试验确定。在一般情况下，对粗颗粒土可取 $1\ 000\sim 3\ 000\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}^2$ ，对细颗粒土可取 $1\ 500\sim 4\ 000\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}^2$ 。

对于饱和黏性土，所需的能量不能一次施加，否则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，两遍之间可间歇一段时间。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### (3) 夯锤选择

国内夯锤一般重为10~25 t。夯锤材质最好用铸钢，也可用钢板为外壳内灌混凝土的锤。夯锤平面一般为圆形或方形，夯锤的底可为平底、锥底或球形底等。一般锥底锤、球底锤的加固效果好，适用于加固较深层土体，平底锤则适用于浅层及表层地基加固。夯锤中设置若干个上下贯通的气孔，孔径可取250~300 mm，它可减小起吊夯锤时的吸力（夯锤的吸力可达三倍锤重），又可减少夯锤着地前的瞬时气垫上托力。

夯锤的底面积对加固效果的影响很大。当锤底面积过小时，静压力就大，夯锤对地基土的作用以冲切为主；锤底面积过大时，静压力太小，达不到加固效果。为此，夯锤底面积宜按土的性质确定，锤底静压力可取25~40 kPa。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### (4) 落距选择

夯锤确定后，根据要求的单点夯击能量，就能确定夯锤的落距。国内通常采用的落距是8~25 m。对相同的夯击能量，常选用大落距的施工方案，这是因为增大落距可增加深层夯实效果，减少消耗在地表土层塑性变形的能量

## 2.2.3强夯法的设计计算



### 3 . 夯击点布置及间距

#### (1) 夯击点布置

夯击点布置是否合理与夯实效果有直接关系。夯击点布置可根据基底平面形状，采用等边三角形、等腰三角形或正方形布置。

强夯处理范围应大于建筑物基础范围，具体的放大范围可根据建筑物类型和重要性等因素考虑决定。对一般建筑物，每边超出基础外缘的宽度宜为设计处理深度的 $1/2 \sim 2/3$ ，并不宜小于3 m。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### (2) 夯击点间距

夯击点间距一般根据地基土的性质和要求处理的深度而定。对于细颗粒土，为便于超静孔隙水压力的消散，夯点间距不宜过小。当要求处理深度较大时，第一遍的夯击间距不宜过小，以免夯击时在浅层形成密实层而影响夯击能向深层传递，并且在夯击时上部土体易向侧向已夯成的夯坑中挤出而造成坑壁坍塌、夯锤歪斜或倾倒，影响效果。

一般来说，第一遍夯击点间距通常为5~15 m（或取夯锤直径的2.5~3.5倍），以保证使夯击能量传递到土层深处，并保护夯坑周围所产生的辐射裂隙为基本原则。第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间，以后各遍夯击点间距可适当减小。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### 4 . 夯击击数和遍数

#### ( 1 ) 夯击击数的确定

每遍每夯点的夯击击数应按现场试夯得到的夯击击数和夯沉量关系曲线确定，且应同时满足下列条件。

①最后两击的夯沉量不宜大于下列数值：当单击夯击能小于4 000 kN·m时为50 mm；当单击夯击能为4 000~6 000 kN·m时为100 mm；当单击夯击能大于6 000 kN·m时为200 mm。

②夯坑周围地面不应发生过大隆起。

③不因夯坑过深而发生起锤困难。

夯击击数应以使土体竖向压缩量最大、侧向位移最小为原则，一般为3~10击比较合适。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### (2) 夯击遍数的确定

夯击遍数应根据地基土的性质和平均夯击能确定。一般为1~8遍，对于粗颗粒土夯击遍数可少些，而对于细颗粒黏土特别是淤泥质土则夯击遍数要求多些。国内大多数工程夯2~3遍，并进行低能量“搭夯”，即“锤印”彼此搭接。对于渗透性弱的细颗粒土地基，必要时夯击遍数可适当增加。

由于表层土是基础的主要持力层，如处理不好，将会增加建筑物的沉降和不均匀沉降。因此，必须重视满夯的夯实效果，除了采用两遍满夯外，还可采用轻锤或低落距锤多次夯击，以及锤印搭接等措施。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### 5 . 间歇时间

两边夯击之间应有一定的时间间隔，间隔时间取决于土中超静孔隙水压力的消散时间。有条件时最好能在试夯前埋设孔隙水压力传感器，通过试夯确定超静孔隙水压力的消散时间，从而决定两遍夯击之间的间隔时间。当缺少实测资料时，可根据地基土渗透性确定。对于渗透性较差的黏性土地基，间隔时间不应少于3~4周；对于渗透性较大的砂性土，孔隙水压力的峰值出现在夯完后的瞬间，消散时间只有2~4 min，即可连续夯击。

## 2.2.3强夯法的设计计算



### 6. 垫层铺设

强夯前要求拟加固的场地必须具有一层稍硬的表层，使其能支撑起重设备，亦便于所施工的“夯击能”得到扩散。对场地地下水位在-2 m深度以下的沙砾石土层，可直接施行强夯，无须铺设垫层；对地下水位较高的饱和黏性土与易液化流动的饱和砂土，均需要铺设砂、沙砾或碎石垫层才能进行强夯。垫层厚度一般为0.5~2.0 m。

## 2.2.4强夯法的施工技术



### 1. 施工机械

强夯施工机械宜采用带有自动脱钩装置的履带式起重机或其他专用设备。采用履带式起重机时，可在臂杆端部设置辅助门架，或采取其他安全措施，防止落锤时机架倾覆。如果夯击工艺采用单缆锤击法，则100 t的吊机最大只能起吊20 t的夯锤。若起重机起吊能力不足，可通过设置滑轮组来提高卷扬机的起吊能力，并利用自动脱钩装置使锤形成自由落体运动。

## 2.2.4强夯法的施工技术



自动脱钩装置工作原理如图2.5所示。

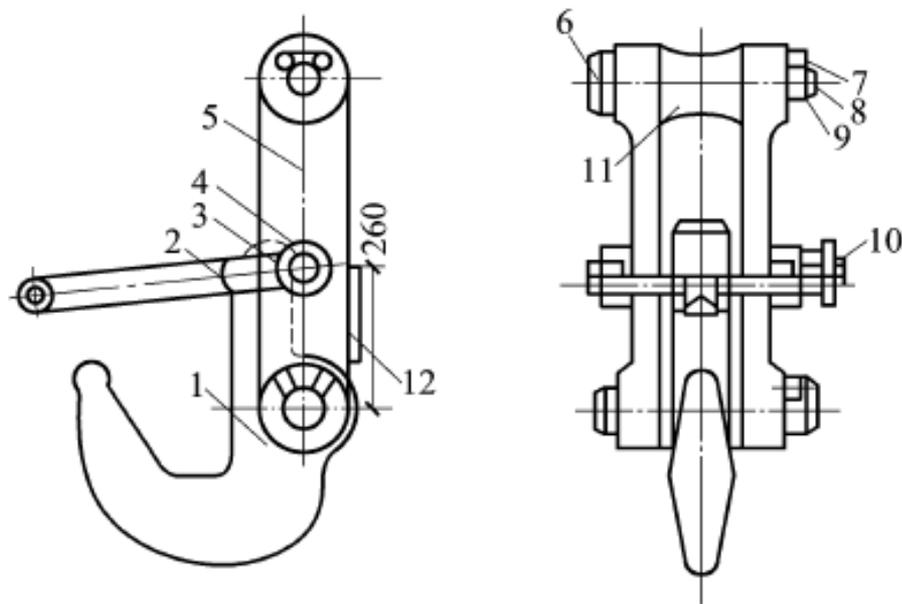


图 2.5 强夯自动脱钩装置工作原理

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

## 2.2.4强夯法的施工技术



### 2. 施工步骤

- ①清理并平整施工场地，放线、埋设水准点和各夯点标桩。
- ②铺设垫层，在地表形成硬层，用以支撑起重设备，确保机械通行和施工，同时可加大地下水和表层面的距离，防止夯击的效率降低。
- ③标出第一遍夯点位置，并测量场地高度。
- ④起重机就位，使夯锤对准夯点。
- ⑤测量夯前锤顶高程。
- ⑥将夯锤起吊到预定高度，待夯锤自由下落后，放下吊钩，测量锤顶高程。
- ⑦重复步骤⑥按设计规定次数及控制标准，完成一个夯点的夯击。
- ⑧重复步骤④~⑦完成第一遍全部夯点的夯击。

## 2.2.4强夯法的施工技术



⑨用推土机将夯坑填平，并测量场地高程。

⑩按上述步骤逐次完成全部夯击遍数，最后用低能量锤，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

## 2.2.5 质量标准与安全技术



### 1. 质量标准

强夯地基质量检验标准应符合表2.6的规定。

表 2.6 强夯地基质量检验标准

| 项目类型 | 序号 | 检查项目           | 允许偏差或允许值 |      | 检查方法  |
|------|----|----------------|----------|------|-------|
|      |    |                | 单位       | 数值   |       |
| 主控项目 | 1  | 地基强度           | 设计要求     |      | 按规定方法 |
|      | 2  | 地基承载力          | 设计要求     |      | 按规定方法 |
| 一般项目 | 1  | 夯锤落距           | mm       | ±300 | 钢索设标志 |
|      | 2  | 锤重             | kg       | ±100 | 称重    |
|      | 3  | 夯击遍数及顺序        | 设计要求     |      | 计数法   |
|      | 4  | 夯点间距           | mm       | ±500 | 用钢尺量  |
|      | 5  | 夯击范围(超出基础范围距离) | 设计要求     |      | 用钢尺量  |
|      | 6  | 前后两遍间歇时间       | 设计要求     |      | —     |

## 2.2.5质量标准与安全技术



### 2 . 安全技术

- ①施工前应通过试验确定强夯施工技术参数。
- ②夯击前应先平整场地,做好排水沟,并应先对夯点放线定位,标出第一遍夯点位置。
- ③起重机就位时,夯锤应对准夯点位置。
- ④发现因坑地倾斜而造成夯锤歪斜时,应及时将坑地整平。
- ⑤强夯施工前应检查夯锤重和落距,以确保单击夯击能符合要求。
- ⑥每遍夯击前,应复核夯点放线,夯完后检查夯坑位置,发现偏差和漏夯应及时纠正。
- ⑦应按设计要求检查每个夯点的夯击次数和夯沉量。

## 2.2.5 质量标准与安全技术



⑧强夯施工所产生的振动对邻近设施有影响时，应采取防震及隔振措施。

⑨强夯施工产生的振动较大，对场区边坡不利时，应挖1 m×1.5 m的减振沟。

⑩强夯施工时如表土过干（尤其满夯时），应采取加水措施，增加含水量。

夯锤上应设通气孔，如遇堵塞，应立即开通。

为防止飞石伤人，现场工作人员应戴安全帽。在夯击时，所有人员应退出安全线以外。

## 2.2.5 质量标准与安全技术



### 3. 检验方法

强夯处理后的地基竣工验收时，承载力检验采用原位测试和室内土工试验。强夯置换后的地基竣工验收时，承载力检验除应采用单墩荷载试验外，尚应采用动力触探等有效手段，查明置换墩底情况及承载力与密度随深度的变化，对饱和粉土地基允许采用单墩复合地基荷载试验代替单墩荷载试验。

室内试验主要通过夯击前后土的物理力学性质指标的变化来判断其加固效果。其项目包括抗剪强度指标（ $c$ ， $\varphi$ 值）、压缩模量（或压缩系数）、孔隙比、重度、含水量等。

## 2.2.5 质量标准与安全技术



原位测试方法及适用条件如下。

- ① 十字板剪切试验：适用于饱和软黏土。
- ② 轻型动力触探试验：适用贯入深度小于4 m的黏性土及素填土（黏性土与粉土组成）。
- ③ 重型动力触探试验：适用于砂土和碎石土。
- ④ 超重型动力触探试验：适用于粒径较大或密实的碎石土。
- ⑤ 标准贯入试验：适用于黏性土、粉土和砂土。
- ⑥ 静力触探试验：适用于黏性土、粉土和砂土。
- ⑦ 荷载试验：适用于砂土、碎石土、粉土、黏性土和人工填土。

## 2.2.5质量标准与安全技术



⑧旁压试验：分预钻式旁压试验和自钻式旁压试验。预钻式旁压试验适用于坚硬、硬塑和可塑黏性土、粉土、密实和中密砂土、碎石土；自钻式旁压试验适用于黏性土、粉土、砂土及饱和软黏土。

⑨波速试验：适用于各类土。

## 2.2.6工程实例



某工程地基承载力不能满足设计要求，现采用强夯法进行地基处理，已知夯锤的重量为250 kN，夯锤的落距为25 m，求强夯处理的有效加固深度，并进行单点夯击击数与夯击遍数的确定。

解：取修正系数  $\alpha$ ，则有效加固深度H为

$$H \approx \alpha M h^{1/2} = 0.5 \times 250 \times 25^{1/2} = 12.5 \text{ m}$$

单点夯击击数应按现场试夯得到的夯击击数和夯沉量关系曲线确定，且应同时满足下列条件。

- ①最后两击的平均夯沉量不大于50 mm，当单击夯击能量较大时，夯沉量不大于100 mm。
- ②夯坑周围地面不应发生过大的隆起。

## 2.2.6工程实例



③不因夯坑过深而发生起锤困难。

因为砂性土，夯击遍数取两遍，每夯击点的夯击数6击。最后再以较低能量（如前几遍能量的 $1/4\sim 1/5$ ，击数为2~3击）满夯一遍，以加固前几遍之间的松土和被振松的表层土。



2. 3

# 深层搅拌法

## 2.3.1 深层搅拌法的适用范围



深层搅拌法 ( deep mixing method ) 加固软土技术是利用水泥、石灰等材料作为固化剂的主剂，通过特制的深层搅拌机械，在地基深处直接将软土和固化剂强制拌和，使软土硬结而形成强度较高的补强桩体,使补强桩体和桩间天然地基共同组成承载力较高、压缩性较低的复合地基。

目前，常用的深层搅拌桩桩径多数为500 mm，加固深度从数米到数十米不等。可用于增加软土地基承载力，减少沉降量和提高边坡的稳定性。常用于建(构)筑物地基、大面积的码头、公路和坝基加固及地下防渗墙等工程。处理后的复合地基承载力可达200 kPa，甚至更高。

## 2.3.2 深层搅拌法的加固机理



深层搅拌加固法就是利用深层搅拌机械，在软土地基内边钻进边喷射浆液和外加剂，并且利用搅拌轴的旋转充分拌和，使固化剂和土体之间发生一系列的物理和化学反应，改变原状土的结构，使之硬结成具有整体性和水稳性及一定强度的水泥石，从而使土体的强度增加，达到加固目的。

# 攪拌桩加固



## 2.3.3 深层搅拌法的设计计算



### 1. 单桩竖向承载力(vertical allowable load capacity)的计算

深层搅拌桩的单桩竖向承载力可通过下式进行计算，取其中的较小值。

$$Nd_1 = K f_{cu,k} A_p$$

$$Nd_2 = q_{svp} L + \alpha A_p f_k$$

式中  $Nd_1$  ,  $Nd_2$ ——搅拌桩单桩竖向承载力 ( kN ) ；

$f_{cu,k}$ ——与搅拌桩身加固土配比相同的室内加固土试块 ( 边长为 70.7 mm 的立方体 , 也可采用边长为 50 mm 的立方体 ) 的无侧限抗压强度平均值 ( kPa ) ；

$K$ ——强度折减系数 , 可取 0.35 ~ 0.50 ；

## 2.3.3 深层搅拌法的设计计算



$A_p$ ——搅拌桩的截面积 (  $m^2$  ) ;

$q_s$ ——桩周围土的平均摩擦力, 对淤泥可取  $5 \sim 8 \text{ kPa}$ , 对淤泥质土可取  $8 \sim 12 \text{ kPa}$ , 对黏性土可取  $12 \sim 15 \text{ kPa}$  ;

$v_p$ ——搅拌桩加固周长 (  $m$  ) ;

$L$ ——搅拌桩长度 (  $m$  ) ;

$f_k$ ——桩端天然地基土的承载力标准值, 可按国家标准《建筑地基基础设计规范》(  $GB 50007—2012$  ) 的有关规定确定( $kPa$ ) ;

$\alpha$ ——桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取  $0.4 \sim 0.6$ 。

## 2.3.3 深层搅拌法的设计计算



### 2 . 复合地基承载力(bearing capacity of composite foundation)的计算

搅拌桩复合地基承载力标准值应通过现场复合地基荷载试验确定，也可按下式计算：

$$f_{sp,k} = mN_d/A_p + \beta(1 - m)f_{s,k}$$

式中 $f_{sp,k}$ ——复合地基的承载力标准值(kPa)；

$m$ ——面积置换率(%)；

$A_p$ ——搅拌桩的截面积( $m^2$ )；

$f_{s,k}$ ——处理后桩间天然地基土承载力标准值(kPa),可按地区经验确定；

$\beta$ ——桩间土承载力发挥系数，可按地区经验确定；

$N_d$ ——单桩竖向承载力标准值，应通过现场单桩荷载试验确定。

## 2.3.3 深层搅拌法的设计计算



### 3 . 面积置换率(replacement ratio)的计算

进行加固设计时，可根据地基承载力要求按下式计算面积置换率：

$$m=(f_{sp,k} - \beta f_{s,k}) / (N_d/A_p - \beta f_{s,k})$$

式中各符号的意义同前。

### 4 . 搅拌桩数的计算

深层搅拌桩平面布置可根据上部建筑对变形的要求，采用柱状、壁状、格栅状、块状等处理形式。可只在基础范围内布桩。柱状处理可采用正方形或等边三角形布桩形式，其桩数可按下式计算：

$$n=mA/A_p$$

式中 $n$ ——桩数（根）；

$A$ ——基础底面积（ $m^2$ ）。

## 2.3.3 深层搅拌法的设计计算



当搅拌桩处理范围以下存在软弱下卧层时，可按国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2012）的有关规定进行下卧层强度验算；搅拌桩复合地基的变形包括复合土层的压缩变形和桩端以下未处理土层的压缩变形。其中复合土层的压缩变形值可根据上部荷载、桩长、桩身强度等按经验取10~30 mm。桩端以下未处理土层的压缩变形值可按国家标准《建筑地基基础设计规范》的有关规定确定；深层搅拌壁状搅拌桩处理用于地下挡土结构时，可按重力式挡土墙设计。为了加强其整体性，相邻桩搭接宽度宜大于100 mm

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



昵图网 nipic.com/伊松20

用双层（或多层）十字杆形或叶片  
SJB—2型、GZB—600型、  
其配套机械主要有灰浆搅拌机 佳



昵图网 www.nipic.com 87, 伊松20

NO:20120506081012796329

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



### 2 . 施工工艺

#### ( 1 ) 定位

起重机 ( 或搭架 ) 悬吊搅拌机到达指定桩位并对中。

#### ( 2 ) 预搅下沉

待搅拌机冷却水循环后 , 启动搅拌机沿导向架搅拌切土下沉。

#### ( 3 ) 制备水泥浆

按设计确定的配合比制备水泥浆 , 待压浆前将水泥浆倒入集料中。

#### ( 4 ) 提升喷浆搅拌

搅拌头下沉到达设计深度后 , 开启灰浆泵将水泥浆液泵入压浆管路中 , 边提搅拌头边回转搅拌制桩。

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



### (5) 重复上、下搅拌

搅拌机提升至设计加固深度的顶面标高时，集料斗中的水泥浆应正好排空。为使软土和水泥浆搅拌均匀，可再次将搅拌机边旋转边沉入土中，至设计加固深度后再将搅拌机提升出地面。

### (6) 清洗

向集料斗中注入适量清水，开启灰浆泵，清洗全部注浆管路直至基本干净。

### (7) 移位

重复上述(1)~(6)步骤，再进行下一根桩的施工。

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



### 3 . 施工注意事项

- ( 1 ) 深层搅拌机应基本保持垂直，要注意平整度和导向架垂直度
  - ( 2 ) 深层搅拌叶下沉到一定深度后，即开始按设计配合比拌制水泥浆
  - ( 3 ) 水泥浆不能离析
- 水泥浆要严格按照设计的配合比配置，水泥要过筛，为防止水泥浆离析，可在灰浆机中不断搅动，待压浆前才将水泥浆倒入料斗中。

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



(4) 要根据加固强度和均匀性预搅，软土应完全预搅切碎，以利于水泥浆均匀搅拌

① 压浆阶段不允许发生断浆现象，输浆管不能发生堵塞。

② 严格按设计确定数据，控制喷浆、搅拌和提升速度。

③ 控制重复搅拌时的下沉和提升速度，以保证加固范围每一深度内，得到充分搅拌。

④ 在成桩过程中，凡是由于电压过低或其他原因造成停机，使成桩工艺中断的，为防止断桩，在搅拌机重新启动后，将深层搅拌叶下沉半米后再继续成桩。

⑤ 相邻两桩施工间隔时间不得超过12 h（桩状）。

## 2.3.4 深层搅拌法的施工技术



- ⑥ 确保壁状加固体的连续性，按设计要求桩体要搭接一定长度时，原则上每一施工段要连续施工，相邻桩体施工间隔时间不得超过25 h（壁状）。
- ⑦ 考虑到搅拌桩与上部结构的基础或承台接触部分受力较大，因此通常还可以对桩顶板-1.5 m范围内再增加一次输浆，以提高其强度。
- ⑧ 在搅拌桩施工中，根据摩擦型搅拌受力特点，可采用变参数的施工工艺，即用不同的提升速度和注浆速度来满足水泥浆的掺入比要求或在软土中掺入不同水泥浆量。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



### 1. 质量标准

#### (1) 保证项目

深层搅拌桩使用的水泥品种、标号、水泥浆的水灰比、水泥加固土的掺入比和外加剂的品种掺量，必须符合设计要求。

检验方法为检查出厂证明、合格证试验报告及施工记录。

#### (2) 基本项目

① 深层搅拌桩的深度、断面尺寸、搭接情况整体稳定和墙体、桩身强度必须符合设计要求。

检验方法如下。

a. 一般成桩后两周内用钻机取样检验，开挖检查断面尺寸，观察桩身搭接情况及搅拌均匀程度，桩身不能有渗水现象。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



b. 搅拌桩质量检验，使用轻便触探法检验桩身质量，根据触探击数判断各段水泥浆强度。

② 现场荷载试验。用此法进行工程加固效果检验，因为搅拌桩的质量与成桩工艺、施工技术密切相关，用现场荷载试验所得到的承载力完全符合实际情况。

③ 定期进行沉降观测，对正式采用深层搅拌加固地基的工程，定期进行沉降观测、侧向位移观测，是直观检查加固效果的理想方法。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



### (3) 允许偏差

深层搅拌桩的质量允许偏差和检验方法应符合表2.7的要求。检查数量是按墙（柱）体数量抽查5%。

表 2.7 深层搅拌桩质量检验标准

| 项目       | 允许偏差/mm    | 检查方法             |
|----------|------------|------------------|
| 桩体桩顶位移   | 10(20)     | 用尺量检查            |
| 桩(墙)体垂直度 | $0.5H/100$ | 用测量仪器吊线和尺量检查为桩长度 |

注： $H$ 为桩长。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



### 2 . 安全技术

#### ( 1 ) 深层搅拌机冷却循环水

深层搅拌机冷却循环水在整个施工过程中不能中断，应经常检查进水和回水温度，回水温度不应过高。

#### ( 2 ) 负载大及工作电流超额定电流时处理方法

深层搅拌机的入土切削和提升搅拌，荷载太大及电机工作电流超过额定值时，应减慢提升速度或补给清水，一旦发生卡钻或停钻现象，应切断电源，将搅拌机强制提起之后，才能重新启动电机。

#### ( 3 ) 深层搅拌机电网电压低于380 V时应暂停施工，以保护电机。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



### (4) 灰浆泵及输浆管路

- ① 泵送水泥浆前管路应保持湿润，以利输浆。
- ② 水泥浆内不得有硬结块，每日完工后，需彻底清洗一次，喷浆搅拌施工过程中，若发生故障停机超过半小时宜拆卸管路，排除灰浆，认真清洗。
- ③ 灰浆泵应定期拆开清洗，注意保持齿轮减速器内润滑油清洁。

(5) 深层搅拌机械及起重设备在地面土质松软环境下施工时，场地要铺填石块、碎石，平整压实，根据土层情况，铺垫枕木、钢板或特制路轨箱。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



### 3. 检验方法

深层搅拌法工程竣工后的质量检验可采用以下方法。

- ①标准贯入试验或轻便触探等动力试验。用这种方法可通过贯入阻抗，估算土的物理力学指标，检验不同龄期的桩体强度变化和均匀性，所需设备简单，操作方便。
- ②静力触探试验。静力触探可连续检查桩体长度内的强度变化。
- ③取芯检验。用钻孔方法连续取水泥土搅拌桩桩芯，检验桩体强度和搅拌的均匀性。
- ④截取桩段做抗压强度试验。在桩体上部不同深度现场挖取50 cm桩段，上、下截面用水泥砂浆整平，装入压力架后用千斤顶加压，即可测得桩身抗压强度及桩身变形模量。

## 2.3.5 质量标准与安全技术



⑤静荷载试验。适用于承受垂直荷载的水泥土搅拌桩。

⑥开挖检验。可根据工程设计要求，选取一定数量的桩体进行开挖，检查加固桩体的外观质量、搭接质量和整体性等。

## 2.3.6工程实例



本工程场地属于回填区。由于场地的地基承载力不能满足设计要求，经研究决定采用深层搅拌加固法进行加固处理。该建筑拟采用独立桩基础，基础底面积为 $15.2 \text{ m}^2$ ，要求加固后的地基承载力不小于 $160 \text{ kPa}$ 。

### (1)场地的工程地质条件

场地的地基土主要由4层土组成。

①砂层：黄褐色～灰白色，含少量砾石，稍湿～饱和，呈松散状态，层厚 $0.3 \sim 4.5 \text{ m}$ ，该层承载力标准值 $f_k=110 \text{ kPa}$ 。

②淤泥质粉质黏土：杂色，饱和，局部混砂，呈较塑～流塑状态，属高压缩性土，层厚 $0.2 \sim 2.1 \text{ m}$ 。该层承载力标准值 $f_k=60 \text{ kPa}$ 。

## 2.3.6工程实例



③粗砂：灰黑色～黄褐色，饱和，中密状态，级配较好，层厚0.6～1.5 m。该层承载力标准值 $f_k=200$  kPa。

④粉质黏土：黄褐色，夹沙砾及铁锰质结核，可塑状态，中压缩性，该层最大揭露厚度19 m。该层承载力标准值 $f_k=200$  kPa。

### (2)水泥掺入比的选择

为了选择合适的施工参数，分别钻取第一层砂、第二层淤泥质粉质黏土和第四层粉质黏土，按水泥掺入比12%和15%进行室内配比试验，其中水灰比为0.5，掺入2%的石膏为外加剂。最后经计算比较，决定采用水泥掺入比 $\alpha_w = 15\%$ ，淤泥质土水泥试块的90 d龄期无侧限抗压强度 $q_0$ 取2 000 kPa，桩侧平均摩擦力取 $q_s=8.5$  kPa。则单桩承载力 $N_d$ 分别按公式(2.6)和公式(2.7)计算，并取其中较小值。

## 2.3.6工程实例



桩身混凝土强度： $N_{d1} = 137.2 \text{ kN}$

土对桩的支撑力： $N_{d2} = 137.35 \text{ kN}$

根据以上计算，取单桩承载力设计值 $N_d = 135 \text{ kN}$ 。

(3)面积置换率的计算

由于要求加固后的复合地基承载力不小于 $160 \text{ kPa}$ (按 $160 \text{ kPa}$ 设计)，

按公式(2.9)计算，可得

$$m = (f_{sp,k} - \beta f_{s,k}) / (N_d / A_p - \beta f_{s,k}) \\ = 19.7\%$$

(4)每个独立柱下桩数的计算

每个独立柱下桩数根据式(2.10)进行计算，得

$n = 15.5$ (根)，施工时取整数 $n = 16$ 根。

2.4

## 其他地基处理方法



## 2.4其他地基处理方法



地基处理方法通常有以下几种不同分类：根据处理时间，可分为临时处理和永久处理；根据处理深度，可分为浅层处理和深层处理；根据被处理土的特性，可分为砂性土处理和黏性土处理、饱和土处理和非饱和土处理；根据地基处理的作用机理，可分为置换法、排水固结法、加筋法、胶结法和热学法。

## 2.4其他地基处理方法



### (1) 置换法

置换法是指利用物理力学性质较好的岩土材料置换天然地基中部分或全部软弱土体，以形成双层地基或复合地基，可提高持力层的承载力，减少沉降量，消除或部分消除土的湿陷性和胀缩性，防止土的冻胀作用和改善土的抗液化性。

常用于基坑面积宽大和开挖土方量较大的回填土方工程。适用于处理浅层软弱地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基、季节性冻土地基、素填土和杂填土地基。

## 2.4其他地基处理方法



### (2) 排水固结法

排水固结法的基本原理是软土地基在附加荷载的作用下完成排水固结，使孔隙比减小，抗剪强度提高，以实现提高地基承载力、减少沉降的目的。

适用于处理厚度较大的饱和软土和冲填土地基，但对于厚度较大的泥炭层要慎重对待。

### (3) 加筋法

在人工填土的路堤或挡墙内铺设土工合成材料、钢带、钢条、尼龙绳或玻璃纤维等作为拉筋，使这种人工复合土体可承受抗拉、抗压、抗剪和抗弯作用，用以提高地基承载力、减少沉降和增加地基稳定性。加筋土适用于人工填土的路堤和挡墙结构。

## 2.4其他地基处理方法



### (4) 胶结法

胶结法是指向土体内灌入或拌入水泥、水泥砂浆以及石灰等化学固化物，在地基中形成加固体或增强体，用以提高地基承载力、减少沉降、增加稳定性、防止渗漏。

适用于处理岩基、砂土、粉土、淤泥质黏土、粉质黏土、黏土和一般人工填土，也可使用于托换加固工程中。

### (5) 热学法

热学法是通过渗入压缩的热空气和燃烧物，并依靠热传导，而将细颗粒土加热到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，则土的强度就会增加，压缩性随之降低，从而达到理想的截水性能和较高的承载力。

适用于非饱和黏性土、粉土和湿陷性黄土。