第五章 地基处理
Ground improvement

§5.1 概述
§5.2 置换法
§5.3 加密法
§5.4 胶结法
§5.5 加筋法

§5.1 概述

为什么要进行地基处理？

浅基础承载力，沉降，渗透性，液化，冻胀不满足设计要求（这些要求直接取决于土体的三大特性）

(1) 采用深基础，桩基础

(2) 地基处理， 改善土性

P24 软弱土层
或软土地基
小于100 kPa

5.1.1 软弱土和软弱地基

地基处理对象

- 1 淤泥土与淤泥质土 muck, mucky soil
- 2 松砂 Loose sand
- 3 冲填土 Rinse fill
- 4 杂填土 填土,回填土 Fill, backfill
- 5 泥炭,泥炭质土 Peat
- 6 区域性特殊土 Regional soils

素土夯实

软土

$a > 0.5\ MPa^{-1}$

$Cu < 30\ kPa$

1 淤泥土与淤泥质土 muck, mucky soil

(1) 定义

淤泥土孔隙比 $e > 1.5$, $\omega > \omega_L$ ($I_L > 1.0$)

淤泥质土孔隙比 $e = 1.0 \sim 1.5$, $\omega > \omega_L$ ($I_L > 1.0$)

(2) 土性

*高含水量

*高压缩性 $a = 0.5 \sim 3.0 MPa^{-1}$

*高流变性：次固结量随时间增加

*低强度 $C_u < 30\ kPa$ vane shear test

*低渗透性 10-6～10-8cm/s, 固结过程长

2 松砂Loose sand

Dr < 1/3 or e > 0.85

易液化，振陷

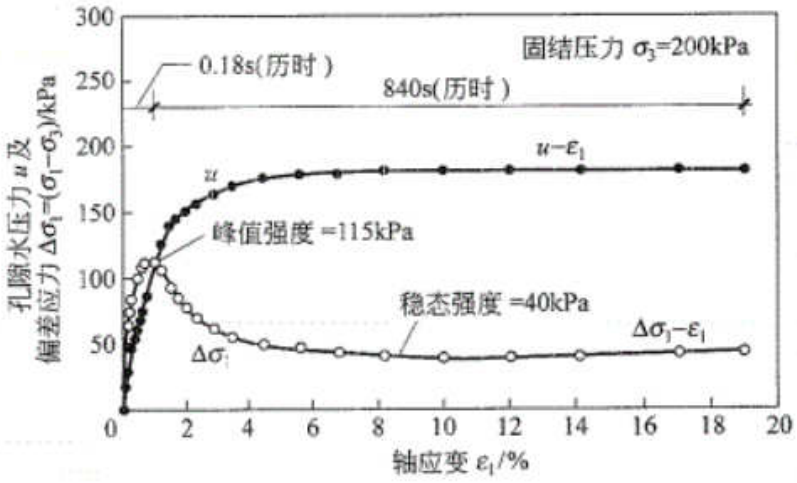


图 5-1 饱和松砂的不排水剪切特性

填土，回填土 Fill, backfill

⌘3 冲填土Hydraulic fill :细 欠固结

⌘4 杂填土Miscellaneous fill :建筑垃圾，卫生填埋，不均匀，不稳定

n 素填土Plain fill,

砾石，砂，粉土，粘性土

5 泥炭,泥炭质土 Peat

⌘ 定义:

泥炭 $e>1.5$, $\omega>\omega_L$ ($I_L>1.0$) 有机含量>60%

泥炭质土 $e=1.0\sim1.5$, $\omega>\omega_L$ ($I_L>1.0$) 有机含量10-60%

⌘ 土性

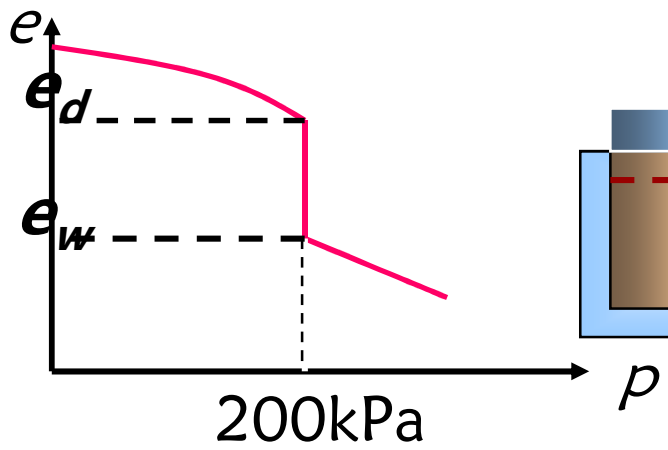
* 高含水量
* 高压缩性, 不均匀
* 高流变性
* 低强度 $C_u < 30$ kPa
* 渗透性 不均匀

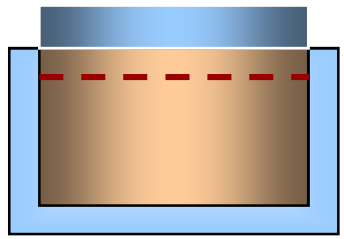
6 区域性土 Regional soil

⌘湿陷性黄土 Collapsible loess (silt)

广泛分布，大孔隙，高结构强度

室内压缩试验 200kPa, 荷载不变



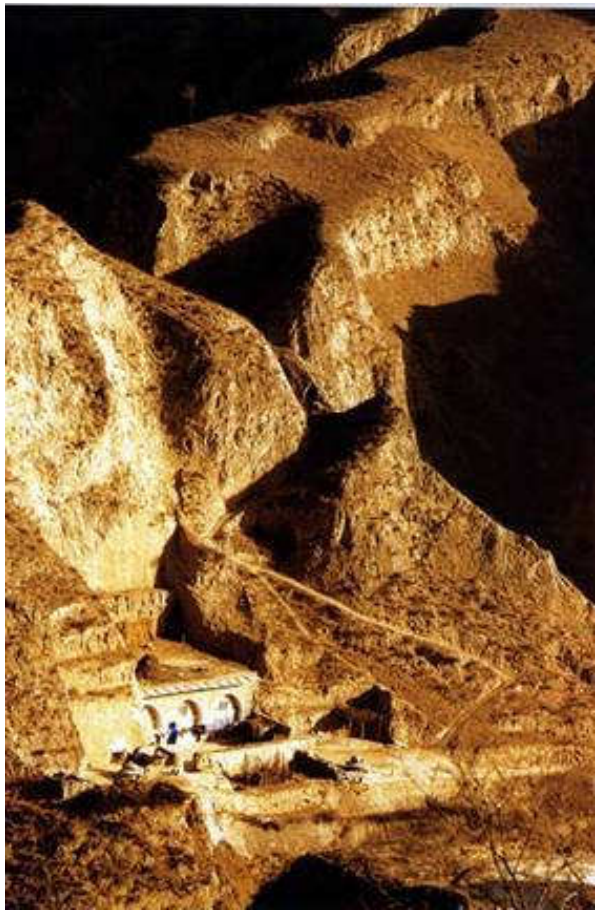


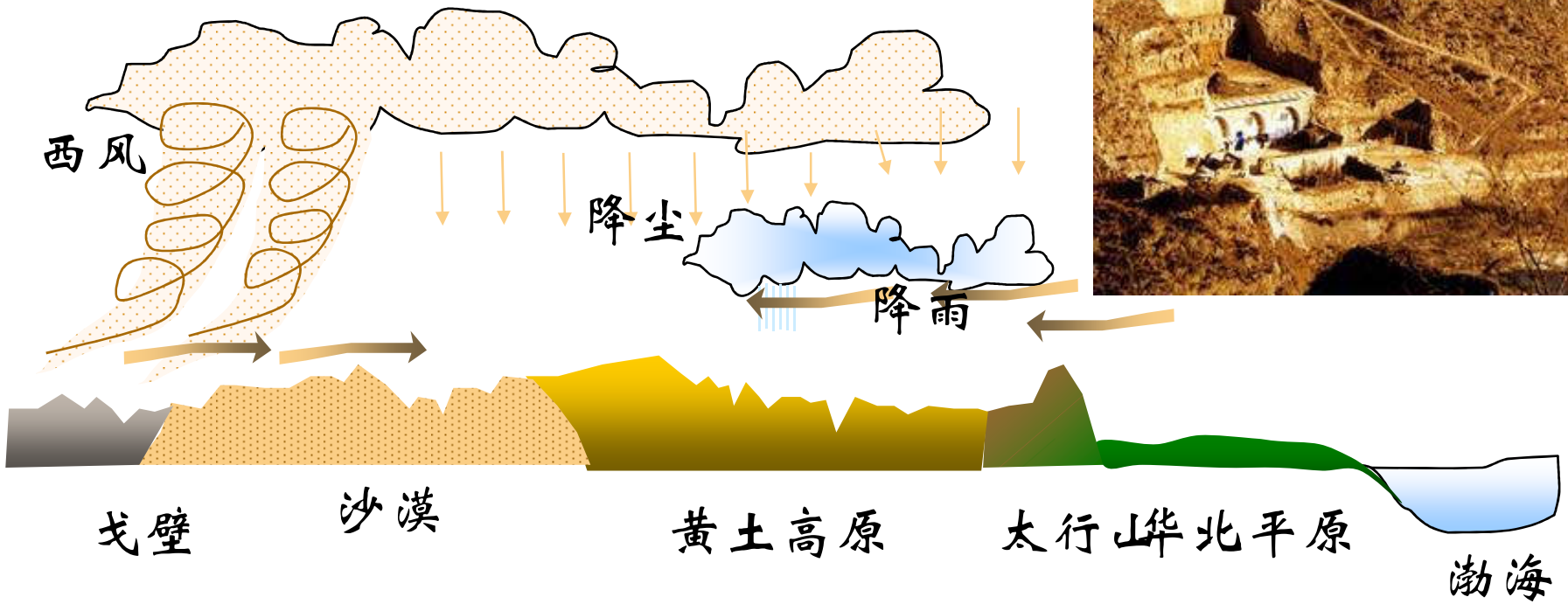
$\delta s=(h_d-h_w)/h_0\geq 0.015$

$\delta s=(e_d-e_w)/(1+e_0)$

荷载板试验 200kPa, 荷载不变　　注水沉降 $\delta/b=0.023$

6 区域性土 Regional soil





黄土高原上的湿陷性黄土

6 区域性土 Regional soil

⌘湿陷性黄土 Collapsible loess (silt): 广泛分布，大孔隙

天然状态高结构强度 遇水浸湿结构破坏

■ 膨胀土Expansive soil 蒙特石含量高

■ 冻土 Frozen soil, 冻胀性

冻胀

某援外工程未查明

膨胀土层导致建筑开裂

由上述这几类土所构成或占主要组成的地基，称为**软弱地基**。是否需要进行地基处理，不仅与地基的软弱程度有关，还与建筑物的性质有关。建筑物很重要，对地基的稳定和变形的要求很高，即便地基土的性质不很软弱，可能也要求对地基进行处理。相反，建筑物重要性低，对地基的要求不高，即便地基土比较软弱，也可能不必进行地基处理。所以地基处理是一个需要综合考虑土质和建筑物性质的复杂问题。

除上述软弱土外，另一类也经常要处理的土是渗透系数很大，粒径级配不连续（曲率系数 $C_c<1$ 及 $C_c>3$），组成很不均匀（不均匀系数 $C_u>10$）的粗粒土，当其作为水工建筑物地基时，往往渗流量过大，且易发生渗透破坏。

P227

5.1.2 地基处理的目的和要求

1 提高土的强度-地基承载力

2 增加土的刚度-减少地基沉降量

3 改善地基土的水力特性

(1)防渗：堤坝，闸基，池(湿陷，膨胀性土)

(2)排水：软基固结渗流，挡土墙排水

(3)渗透稳定性：长江大堤的管涌，流土，采用反滤

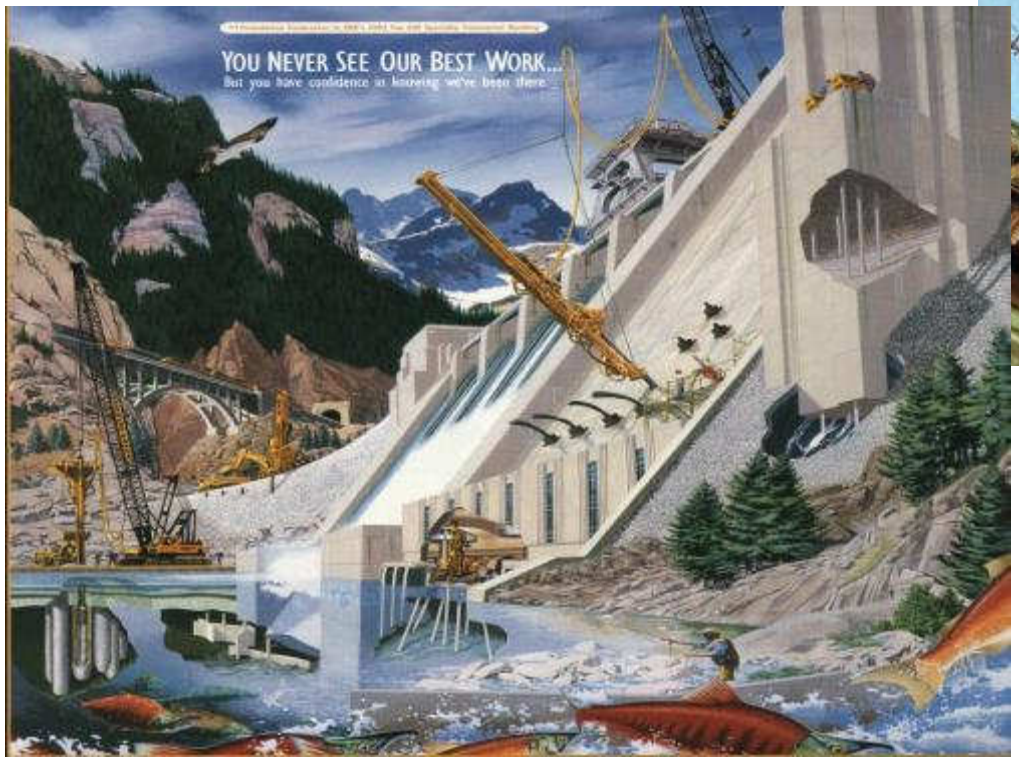
(4)抗冻性：实质是渗透性，减少毛细现象，加强排水

4 改善抗震性能

(1)液化：加密，围封；

P227 (2)震陷：干松砂和溶洞

5.1.3 地基处理的设计程序



5.1.4 地基处理方法分类

采用什么样的方法？

1 置换法 Soil replacement

2 加密法 Densification

3 胶结法 Cementation

4 加筋法 Soil reinforcement

选择原则：技术经济

机械压密

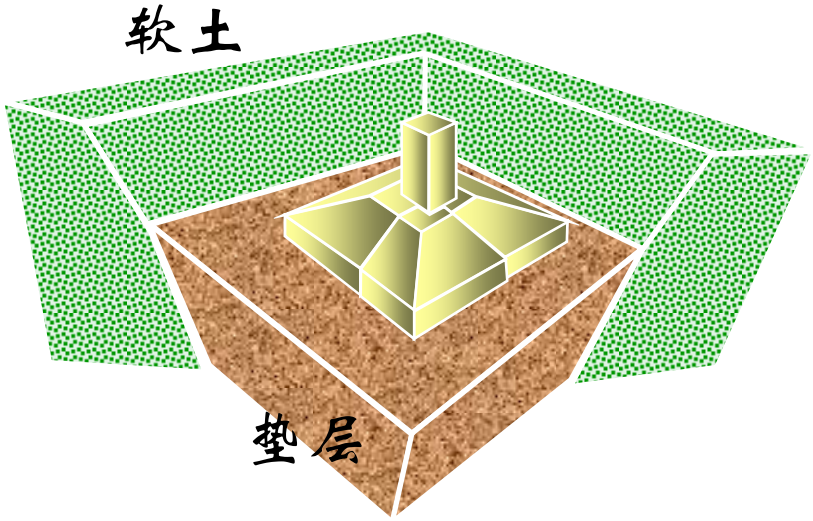
水泥搅拌桩

P229

的实质而言，大体上可以分成如下四类，即：**置换法，加密法，胶结法和加筋法。置换法**就是将地基内局部软土挖除或挤出，换填以好土，可以分成水平的层式置换和竖直的柱式置换。**加密法**就是用各种压、振、挤的方法提高地基土的密度。**胶结法**就是在软弱的地基土中灌入或掺入某些胶结材料，将碎散的土颗粒变成有一定黏结强度的颗粒集合体；还可用冰冻和烧结的方法使土变成坚硬的块体。**加筋法**就是在土中排放一定数量的土工合成材料甚至钢材，其作用类似于钢筋加于混凝土中，形成新的、强度高得多的材料——钢筋混凝土；有时也可以在土中掺以纤维丝，以改善土的性能。以上四类地基处理方法，因选用的加固材料和

P229

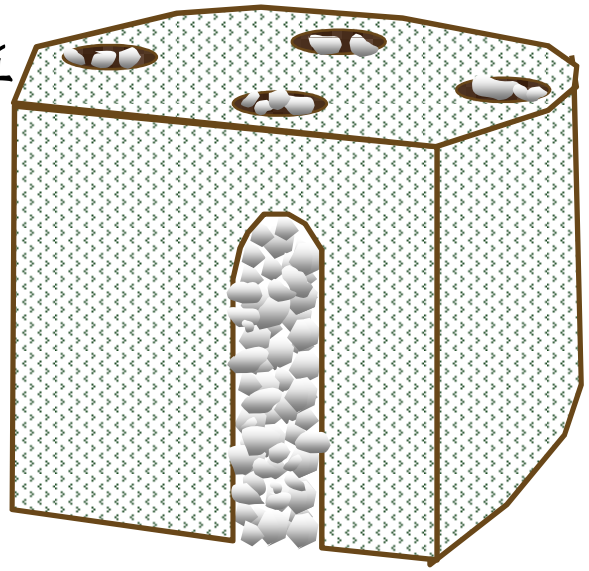
§5.2 置换法



5.2.1 换土垫层置换法

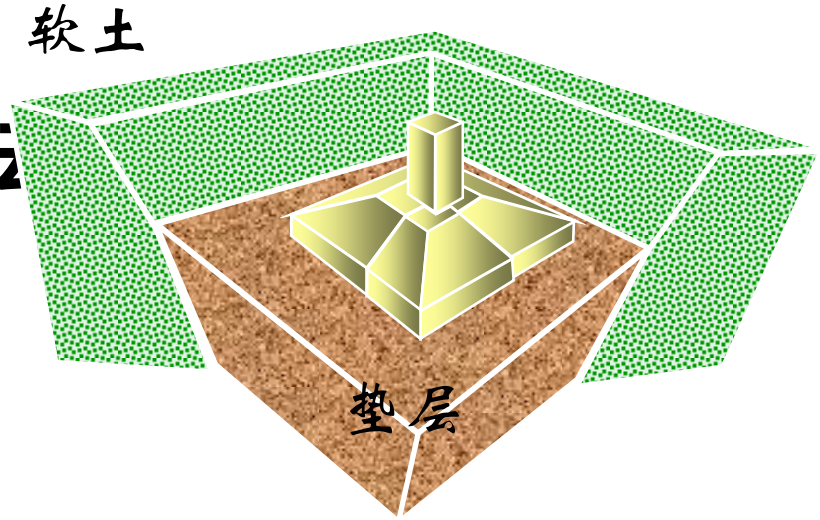
- 就地取材
- 人工持力层承载力
- 软弱下卧层承载力验算
- 垫层厚度限制

5.2.2 土质桩置换法 复合地基



P230

5.2.1 换土垫层法 垫层置换法



1 垫层的作用和垫层料的要求

块石： 抛石挤淤

砾，中粗砂：压实 防冻 防液化 加速固结

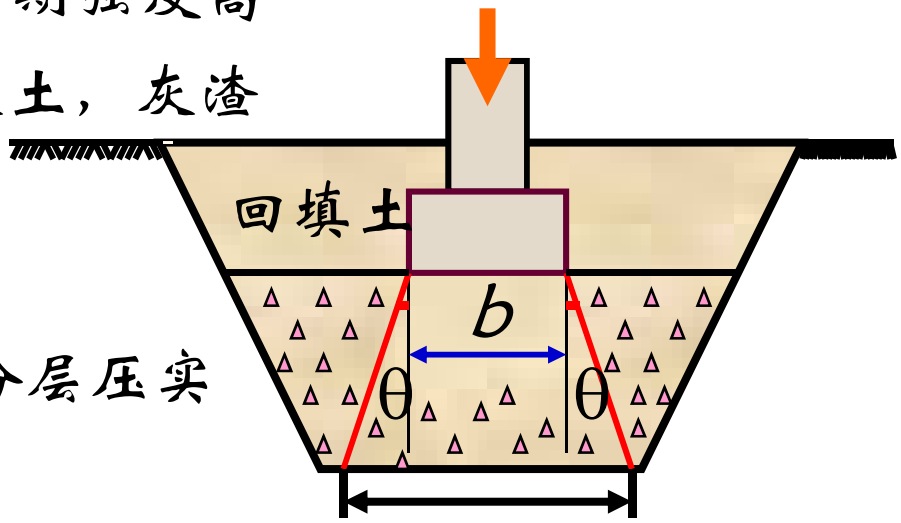
灰土(石灰+粉质粘土2:8,3:7)：后期强度高

三合土： 石灰、砂和碎石，灰土，灰渣及碎砖瓦

工业废渣： 粉煤灰，矿渣

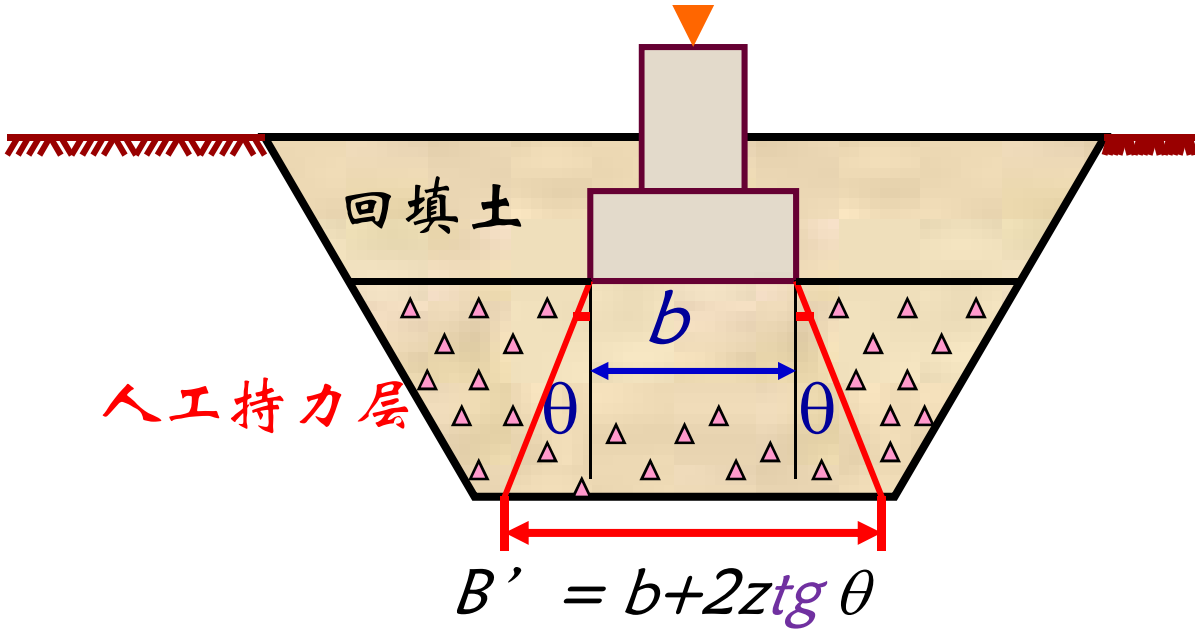
素土： I_p=10～17换除原土分层压实

加筋土： 土工合成材料



$B' = b+2z\,tg\,\theta$

P231



2 垫层法的适用性

软粘土和淤泥

湿陷性土

填土，一般粘性土(承载力低)

3 垫层尺寸确定

人工持力层，软弱下卧层控制

(1)垫层承载力 确定垫层宽度

(2)垫层厚度设计

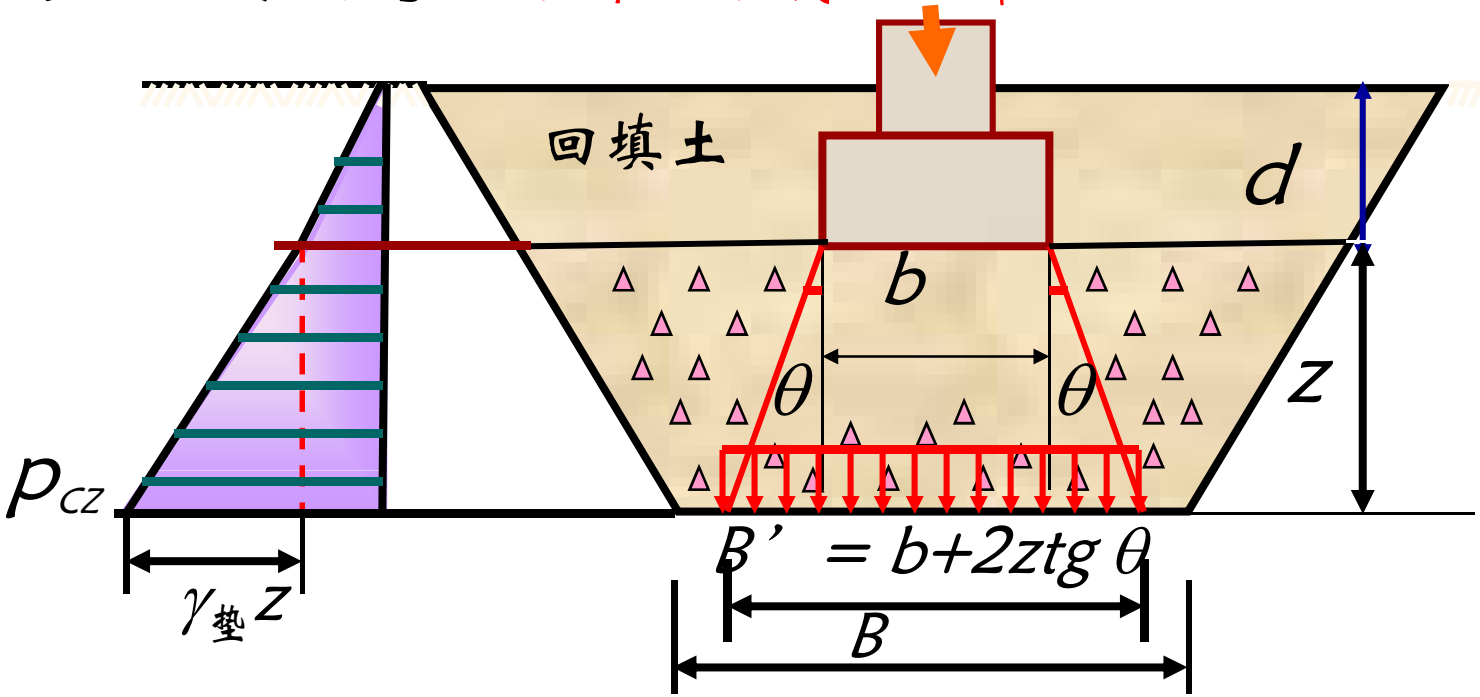
一般要求 ＞0.5 m 应力扩散和技术要求

＜3.0 m 工程量，经济性限制

$$p = \frac{F+G}{b}$$

3 垫层尺寸确定 – 下卧层承载力验算

基底压力



$$p_z = \frac{(p_k - p_{c0})b}{b + 2z\tan\theta} \quad (5\text{-}2)$$

基础底面附加

=下卧层顶面附加

条形基础

$$p_z = \frac{(p_k - p_{c0})ab}{(a + 2z\tan\theta)(b + 2z\tan\theta)} \quad (5\text{-}3)$$

矩形基础

$$p_z + p_{cz} \le f_{(z+d)}$$

P232 式5-1

$$B \ge b + 2z\,\mathrm{tg}\,\theta + 2 \times 30\ \mathrm{cm}$$

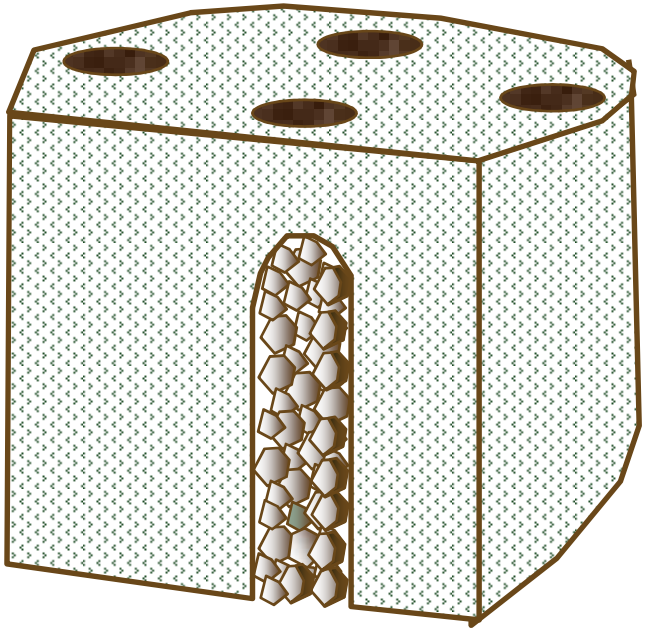
巩固P242 例题5-1 重要结合P56原理P65例题2-4

分层浮重为自重

栽树挖坑为附加

自附之和小承载

5.2.2 土桩置换法　复合地基



桩身材料

1）散体材料桩

砂、石、灰土、粘性土

2）胶结掺和料桩

水泥粉煤灰碎石桩

水泥土桩

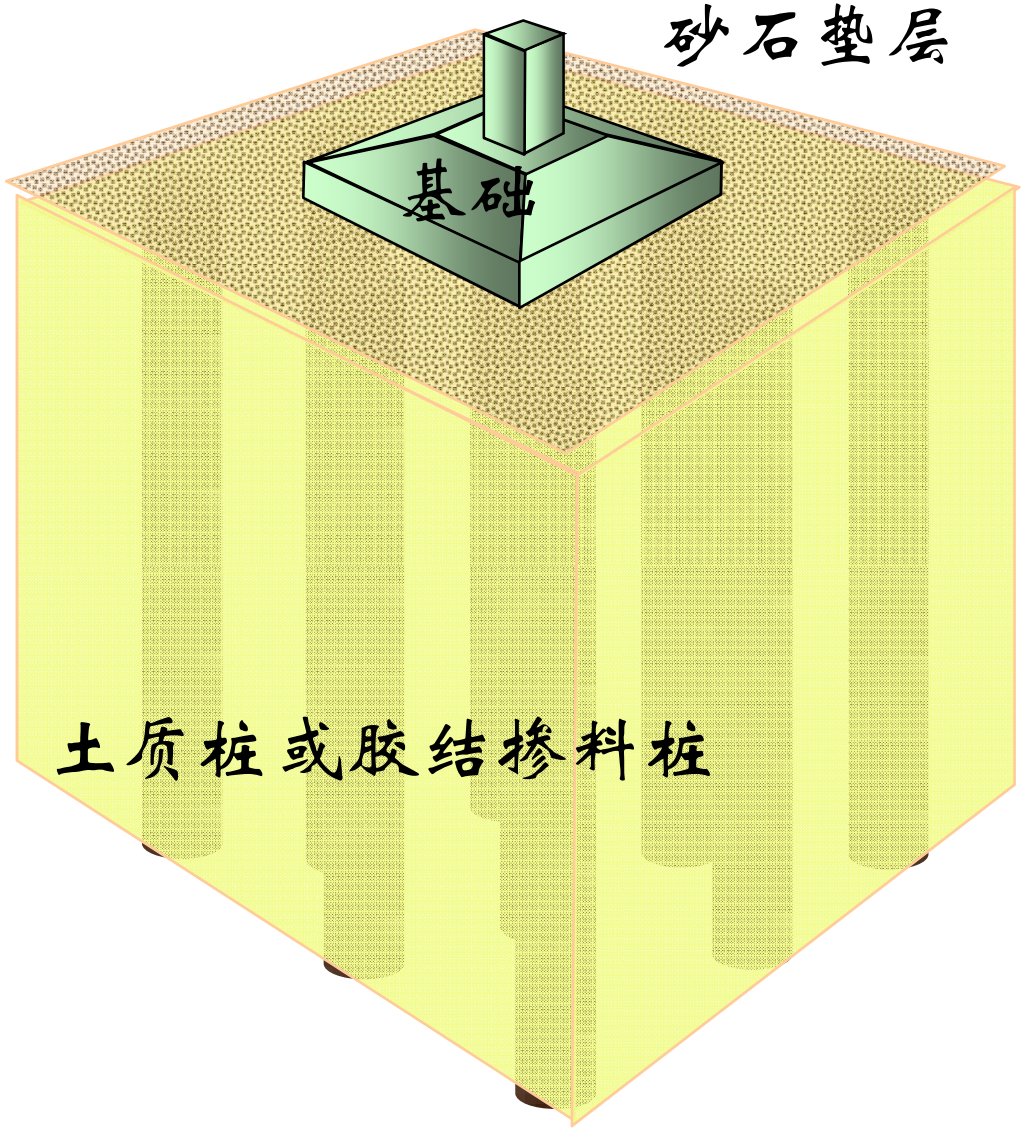
高压喷射注浆桩

水泥搅拌桩

土桩置换构成复合地基

P233

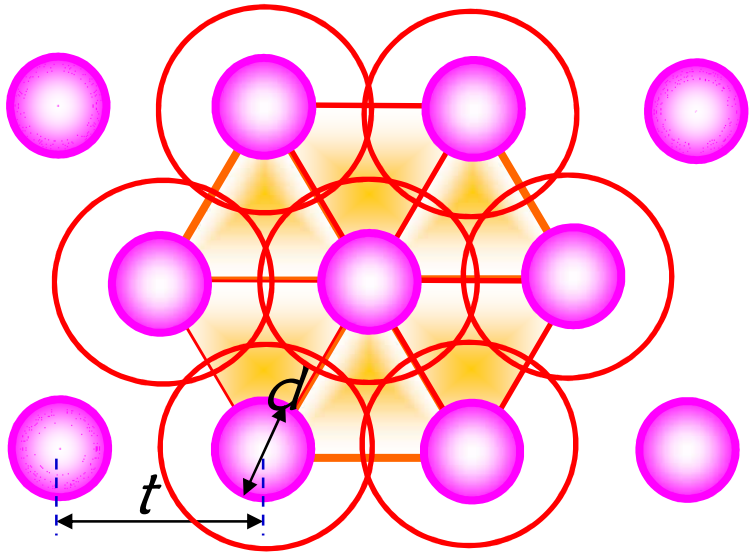
砂石垫层、基础

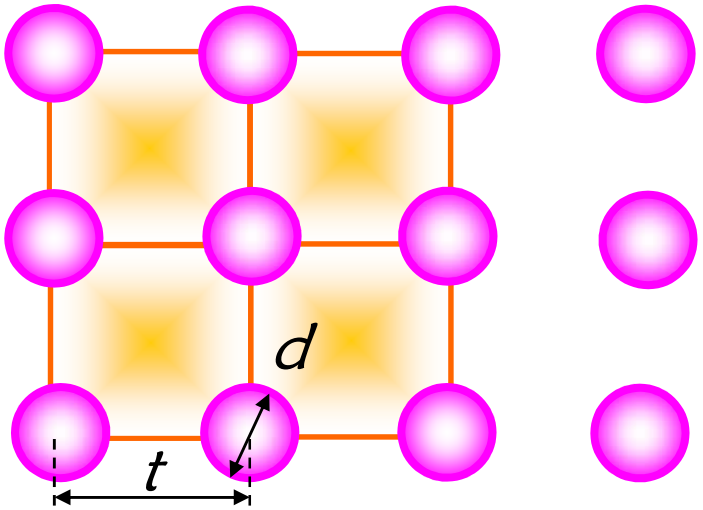


1 复合地基概念 Composite ground　　Pile-soil intermediate

在软土内造孔回填土石料或掺和料，形成刚度比四周软土大的土质桩，与桩周土一起共同承受建筑物荷载。这种地基称为复合地基

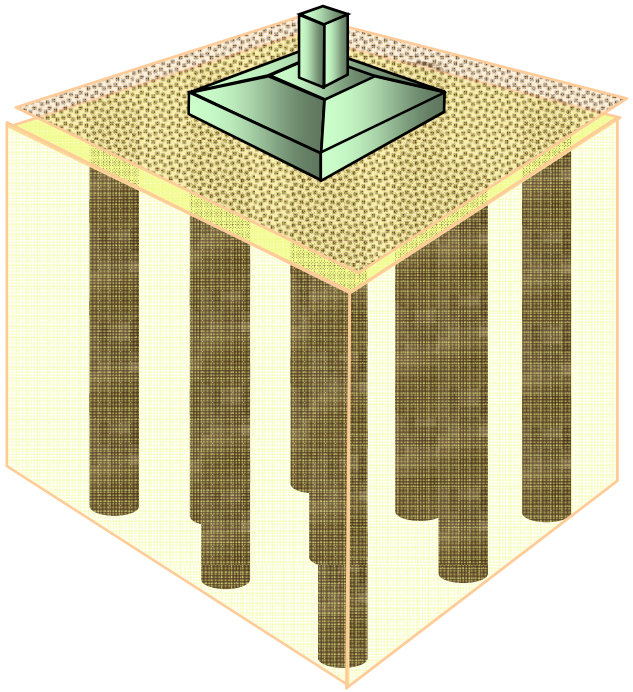
布置方式：梅花形　　正方形





P233 书上解释

复合地基与桩基础的异同点



复合地基

桩材料：碎散料或胶结掺料

与地基共同承担荷载

浅基础布置在复合地基上

桩基础

桩材料：混凝土或钢筋混凝土

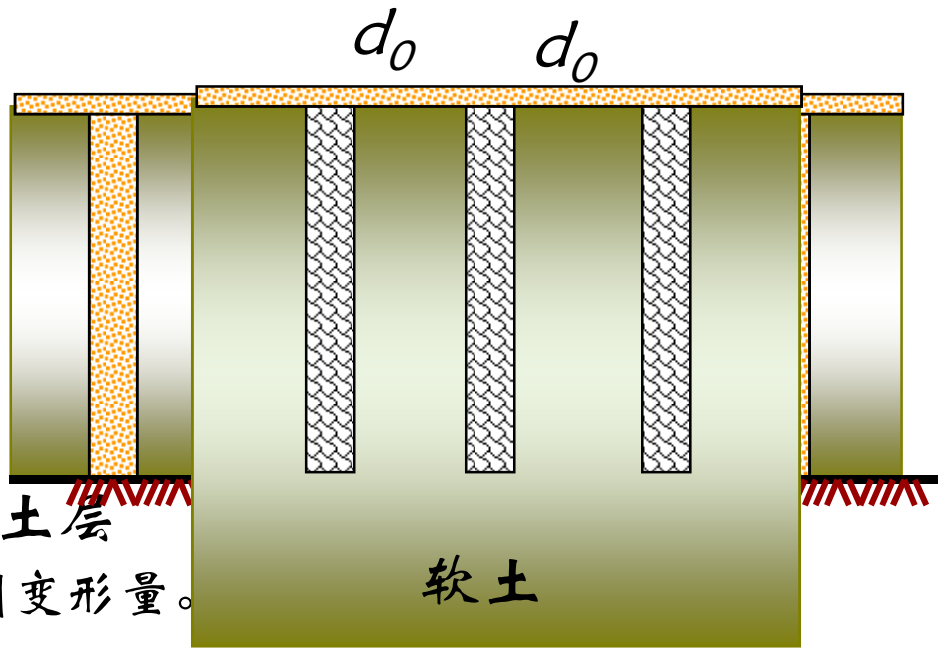
侧摩阻和端阻承担荷载

承台连接桩基础

桩端阻力传递荷载。但就整体而言，由于基础底面与桩头之间设置砂石垫层，基础荷载经垫层分配给桩和桩间土，而不像一般桩基础，直接由承台将荷载传给桩。桩受载而下沉，再将部分荷载传给桩间土，所以这类半刚性桩在分类上归属于地基处理的复合地基。

P234

2 散体材料复合地基设计



(1) 处理范围

适用： 软弱粘性土，粉土

砂土和人工填土

处理深度：穿越软土层达到良好土层

如果没有穿透软土，要求控制变形量。

(2) 碎石桩的平面布置

(等价成圆)有效直径d_e

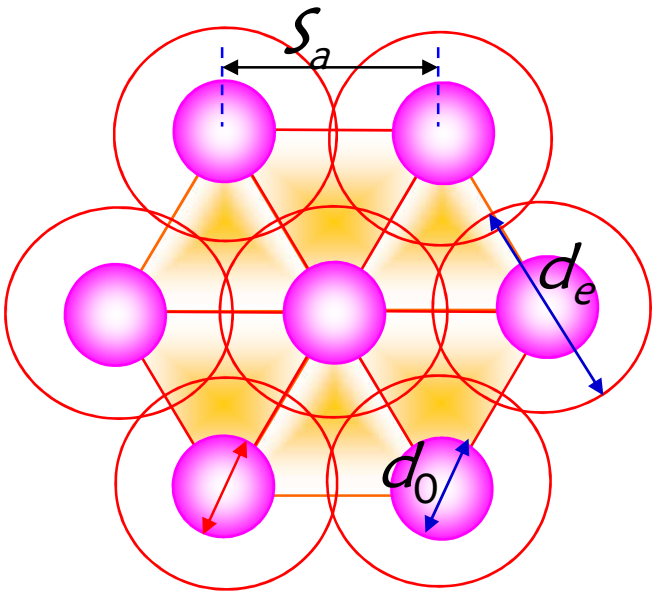
梅花形： $d_e = 1.05\ S_a$

正方形： $d_e = 1.13\ S_a$

面积置换率 $m = (d_0/\ d_e)^2$

S_a 桩中心距

Space between axial centers of piles



P234 考查

(2) 砂石桩的平面布置

通常在加固面积内，砂石桩按等边三角形或正方形布置，如图 5-6(a)和(b)所示，图中，s_a为砂石桩的中心距，d_0为砂石桩的直径，d_e为与每根桩所控制的面积相等的圆的直径。当按等边三角形布置时，$d_e=1.05s_a$；当按正方形布置时，$d_e=1.13s_a$。每根桩的面积与其所控制的面积之比 m 称为**面积置换率**：[1]

$$m=\frac{d_0^2}{d_e^2} \tag{5-5}$$

对于面积较小的独立基础和条形基础，桩一般采用对称于轴线的正方形、矩形布置，或者单排布置，这时的面积置换率 m 可以通过基础覆盖的桩的总截面积与基础面积之比直接计算。[2]

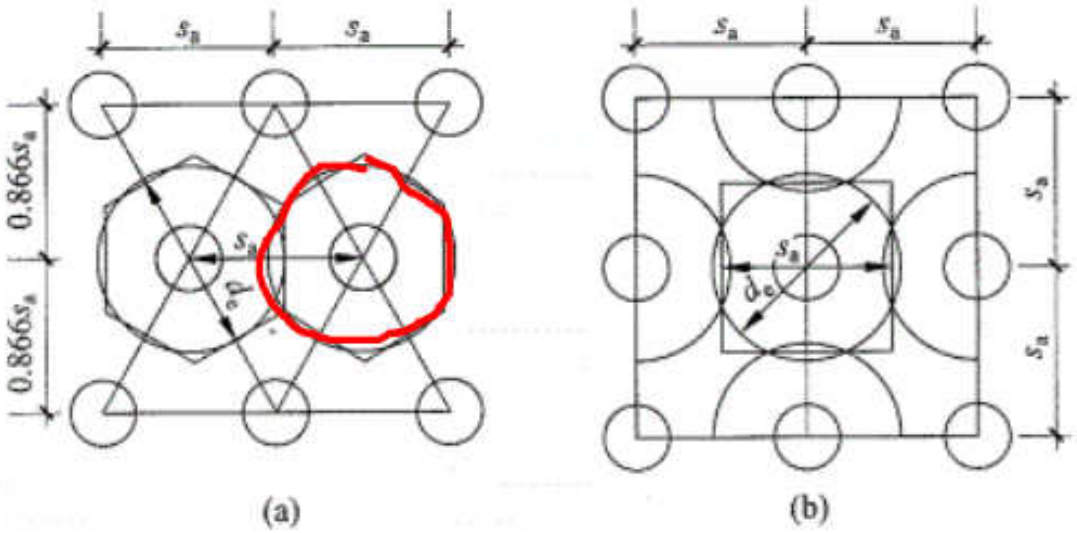


图 5-6 砂石桩的平面布置

（3）复合地基的承载力

1) 现场载荷试验

⌘ 取包含桩土的代表单元直接测定

⌘ 桩土分开的载荷试验

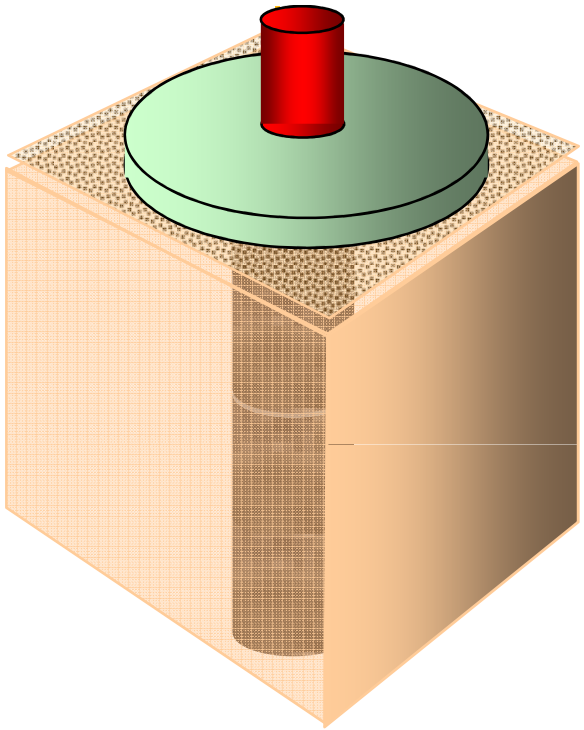
采用公式 $f_{spk}=mf_{pk}+(1-m)f_{sk}$

f_{spk} 复合地基承载力特征值 kPa

f_{pk} 桩体承载力特征值 pile

f_{sk} 桩间土承载力特征值 soil

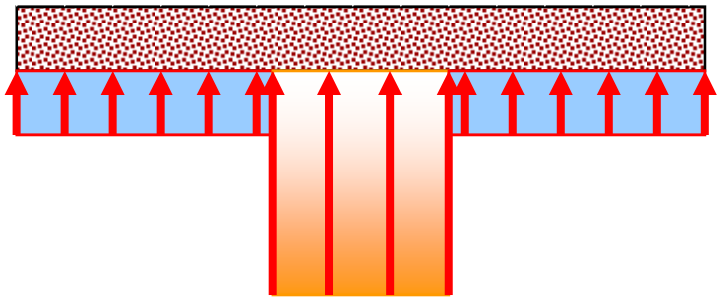
m 面积置换率 $=A_p/A$



包含桩土的载荷试验

P235 式5-6

包含桩土的地基



2) 无载荷试验资料(小型工程)

$f_{spk}=[1+m(n-1)]f_{sk}$

桩土应力比 $n=\sigma_p/\sigma_s$

与土性有关,随荷载变化

对于碎石桩$n=2\sim4$

m面积置换率 $=A_p/A$

复合地基承载力特征值

$$Af_{spk}=A_p\sigma_p+(A-A_p)\sigma_s$$

$$f_{spk}=m\sigma_p+(1-m)\sigma_s$$

$$=[1+m(n-1)]f_{sk}$$

P235 式5-7

（4）复合地基的变形验算

计算方法与多层地基相同

复合土层的压缩模量

$$E_{sp}=\alpha[1+m(n-1)]E_s$$

E_s 为砂石桩置换前的压缩模量，MPa

α 为成桩对周围土的挤密效应系数，砂石桩取1.0，石灰桩取1.1～1.3

P236-237

3 胶结掺料桩复合地基设计

按材料分类　　Cement fly-ash gravel

常用材料：　水泥粉煤灰砂石桩CFG，水泥土桩，高压喷射注浆桩

CFG桩　　适用于粘性土、粉土、砂土和自重固结完成的人工填土

水泥土桩　　适用于正常固结的淤泥、淤泥质土、粉土、黄土、素填土、粘性土和饱和松散砂土(静水位)

高压喷射注浆桩　　适用于土类与水泥土桩类似

P237 CFG 考查

（1）CFG桩和夯实水泥土桩复合地基

CFG桩由于水泥的加固作用，这种桩的材料强度较高，桩的刚度较大，具有刚性桩的传力特点，即基础传来的荷载主要通过桩传给桩端地基土，因此要选择承载力较大的土层作为桩端的持力层。

桩的布置范围可以限定于基础范围内，桩径常用300-800mm，桩距为3-5倍桩径。

桩顶与基础之间应设置（0.4-0.6）倍桩径厚度的砂石垫层。砂石垫层是胶结掺料桩复合地基的重要组成部分。起调整、分配基底荷载的作用。

P238 CFG 考查

在一般桩基中，承台直接支撑在桩上，荷载直接由桩传递，桩基受力下沉，通过桩侧摩擦和承台下土的抗力，部分荷载转由桩间土承担，形成桩土共同作用。

在复合地基中，基底荷载直接作用在砂石垫层上，受力后桩头刺入垫层中，桩的上部产生负摩擦作用，其结果使基底荷载在桩与桩间土中重新分布，形成桩土共同作用。

P238 CFG 考查

CFG桩复合地基的承载力初步设计时由下式估算

$$f_{spk} = \lambda m(R_a/A_p) + \beta(1-m) f_{sk} \qquad 5\text{-}13$$

λ 为单桩承载力发挥系数，与垫层厚度有关

β 为桩间土承载力发挥系数，取决于垫层的性质、桩的刚度、桩间土的承载能力

CFG桩单桩竖向承载力特征值R_a可由现场单桩试验测得的极限承载力除以安全系数2。当无条件时，由下式估算：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^{n} q_{si} h_i + \alpha q_p A_p \qquad 5\text{-}14$$

P238 CFG 考查

此外，除满足桩身材料的强度外，具体桩身立方体试块的28天抗压强度平均值fcu应满足

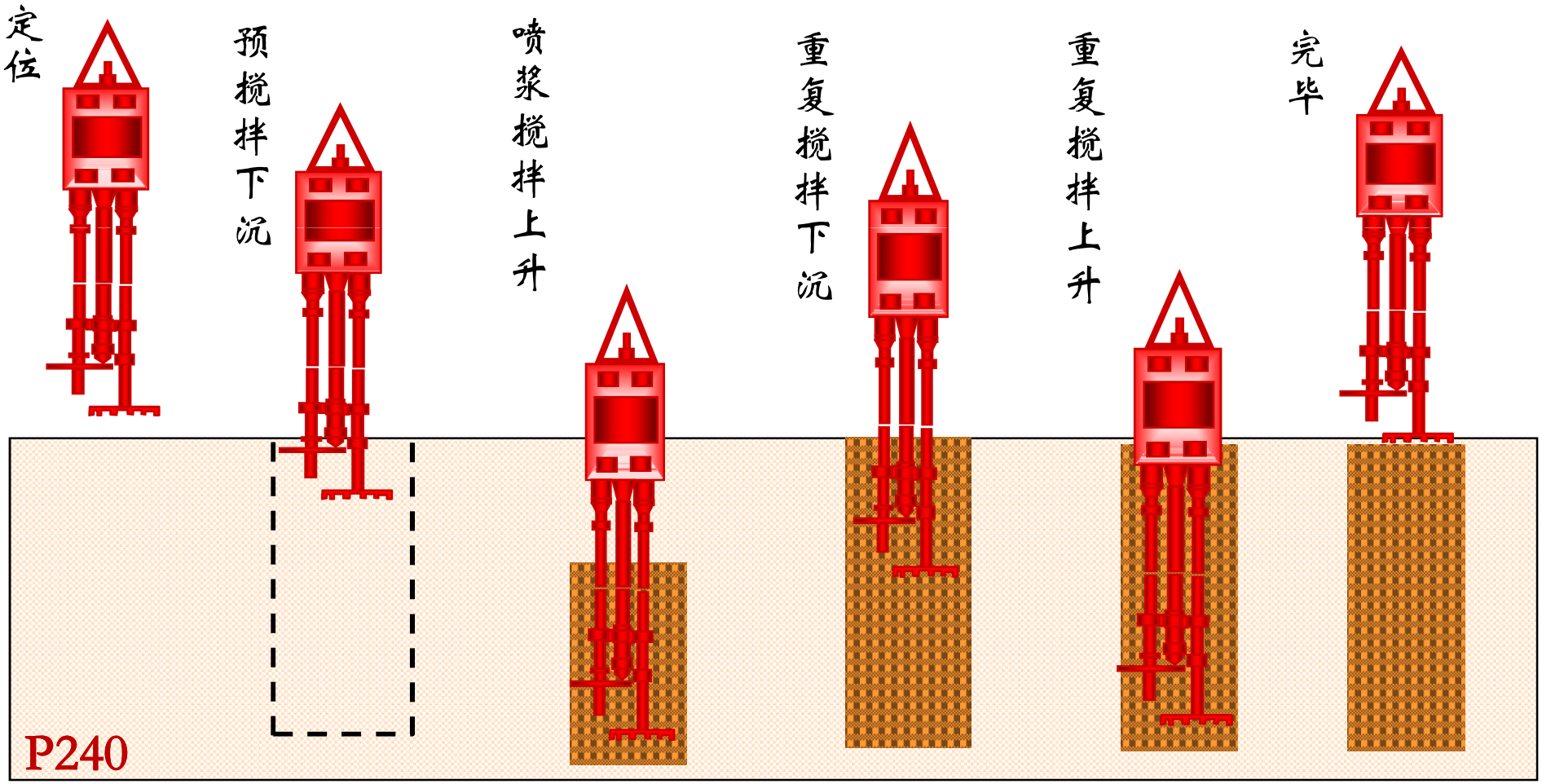
$$\eta f_{\mathrm{cu}} \geq R_{\mathrm{a}} / A_{\mathrm{p}} \qquad 5\text{-}15$$

η 值可取为1/3

经过CFG桩处理后的复合地基还应按上述复合地基变形计算方法进行变形计算

（2）水泥搅拌桩复合地基

深层搅拌法施工工艺流程



深层搅拌桩载荷试验前后

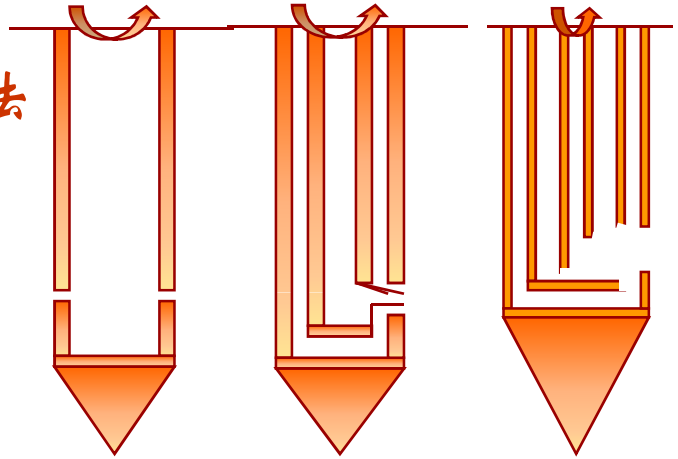
（3）高压喷射注浆法

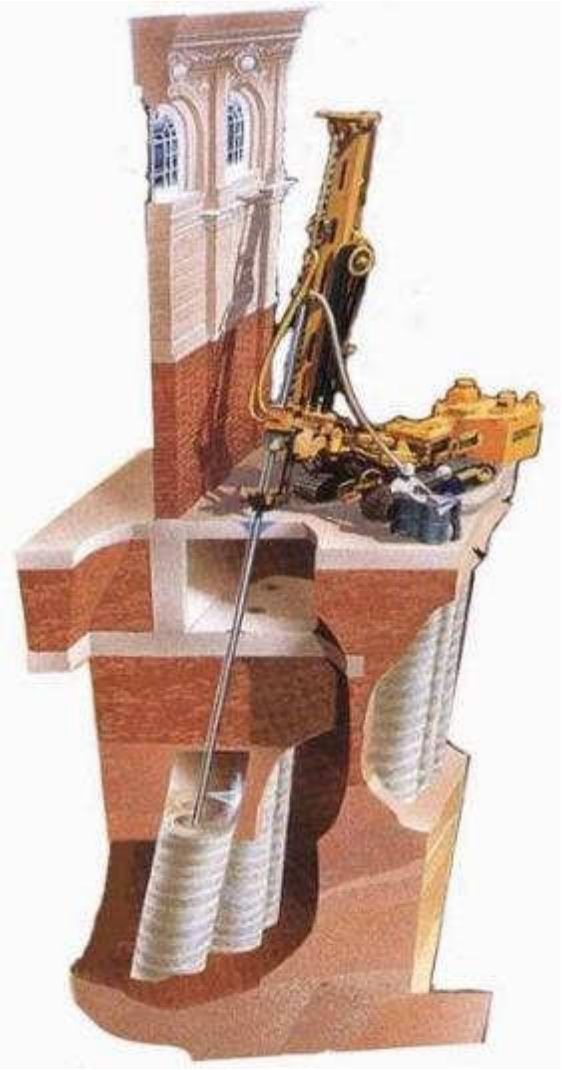
高压旋喷

单管:浆液

双管:内浆外气

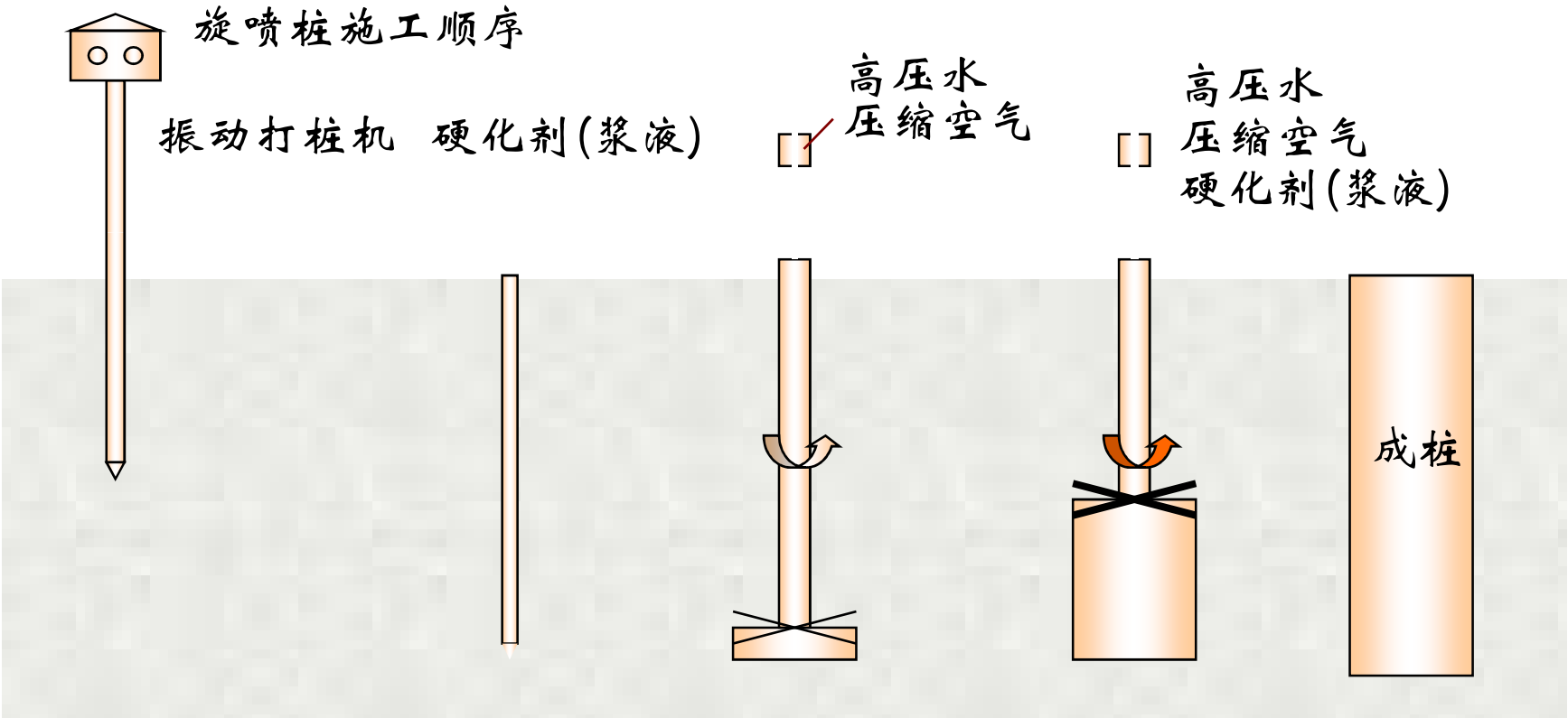
三管:气，水，浆





适用于:人工填土;黄土粉土，
一般粘性土;软粘土;砂石

高压喷射注浆法



置换法 Soil replacement

一 垫层置换法

软弱下卧层控制

垫层厚度确定_0.5-3.0 m

二 土桩置换法

复合地基承载力

$$f_{spk} = [1+m(n-1)]\, f_{sk}$$

变形计算

$$E_{sp} = \alpha[1+m(n-1)]E_s$$

P243 例题5-1 – 5-3 重要 公式5-5 5-6 5-13 5-14学会使用

Ref

周景星 李广信 张建红 虞石民 王洪瑾 基础工程 清华大学出版社 第3版

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com

http://www.xingzhengwu.com/CVInChinese/index.html