排 水 固 结

地 基 处 理

Ground Treatment

教师 *Instructor*

Dr. Wenxi Han **韩文喜**

联系方式

Phone: 13880536952

E-mail: hwx@cdut.edu.cn

本课程必备条件 ***Prerequisites:***

《土力学》

《地基与基础》

《岩土工程施工》

第五章 排水固结

5.1 概述

Dr. Han WX

排水固结法又称预压法。排水固结法加固地基是通过对地基施加预压荷载，使软黏土地基土体中的孔隙水排出，土体产生排水固结，土体孔隙体积减小、抗剪强度提高，达到减少地基工后沉降和提高地基承载力的目的。

土体固结速率与土体渗透系数、土体排水固结的最大排水距离有关，与最大排水距离成二次方关系。排水固结法加固地基时，为了缩短加载时间，一般通过在地基中设置排水通道以有效缩短排水距离，达到加速地基固结的目的。

排水固结法竖向通常由排水系统和加压系统两部分组成。

排水系统一般由水平向排水垫层和竖向排水通道组成。水平向排水垫层一般为砂垫层，也有由砂垫层加土工合成材料垫层复合形成。竖向排水通道常采用在地基中设置普通砂井、袋装砂井、塑料排水带等形成。若地基土体渗透系数较大，或在地基中有较多的水平砂层，也可不设人工竖向排水通道，只在地基表面铺设水平排水垫层。

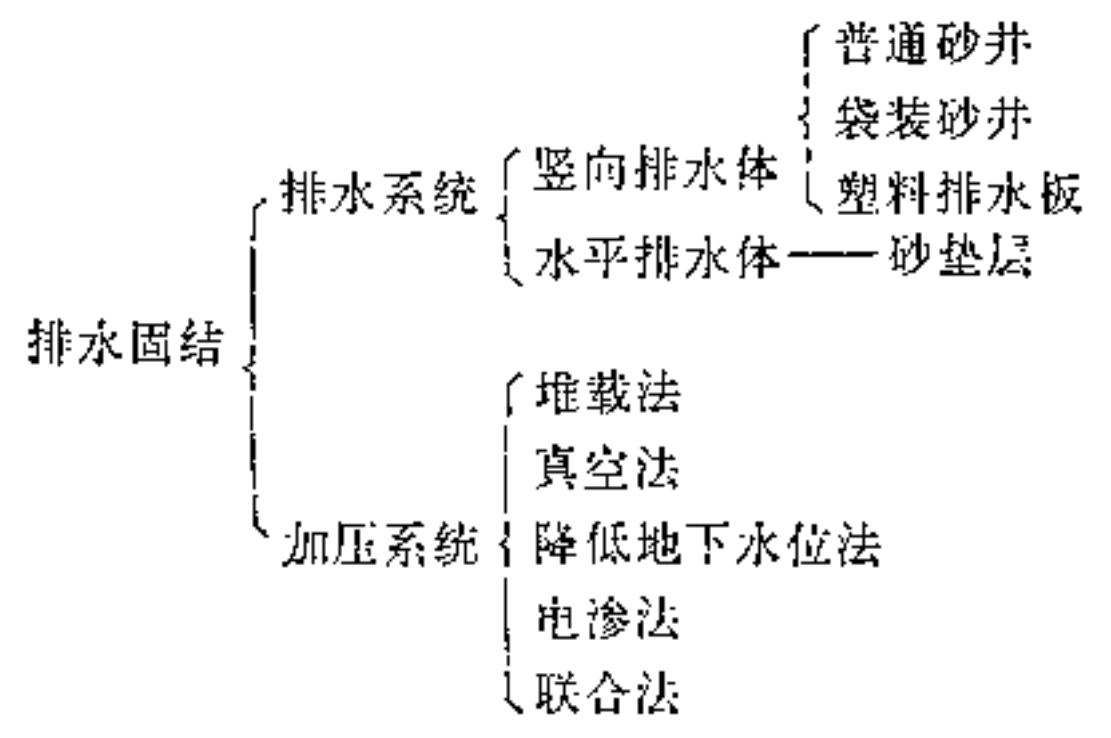
加压系统通常采用下述方法：堆载法、真空预压法、真空预压联合堆载法、降低地下水位法和电渗法等。

第五章 排水固结

5.1 概述

Dr. Han WX

排水固结法是由排水系统和加压系统联合构成



排水系统：主要是改善原地基地排水条件，增加排水途径，缩短排水路径；

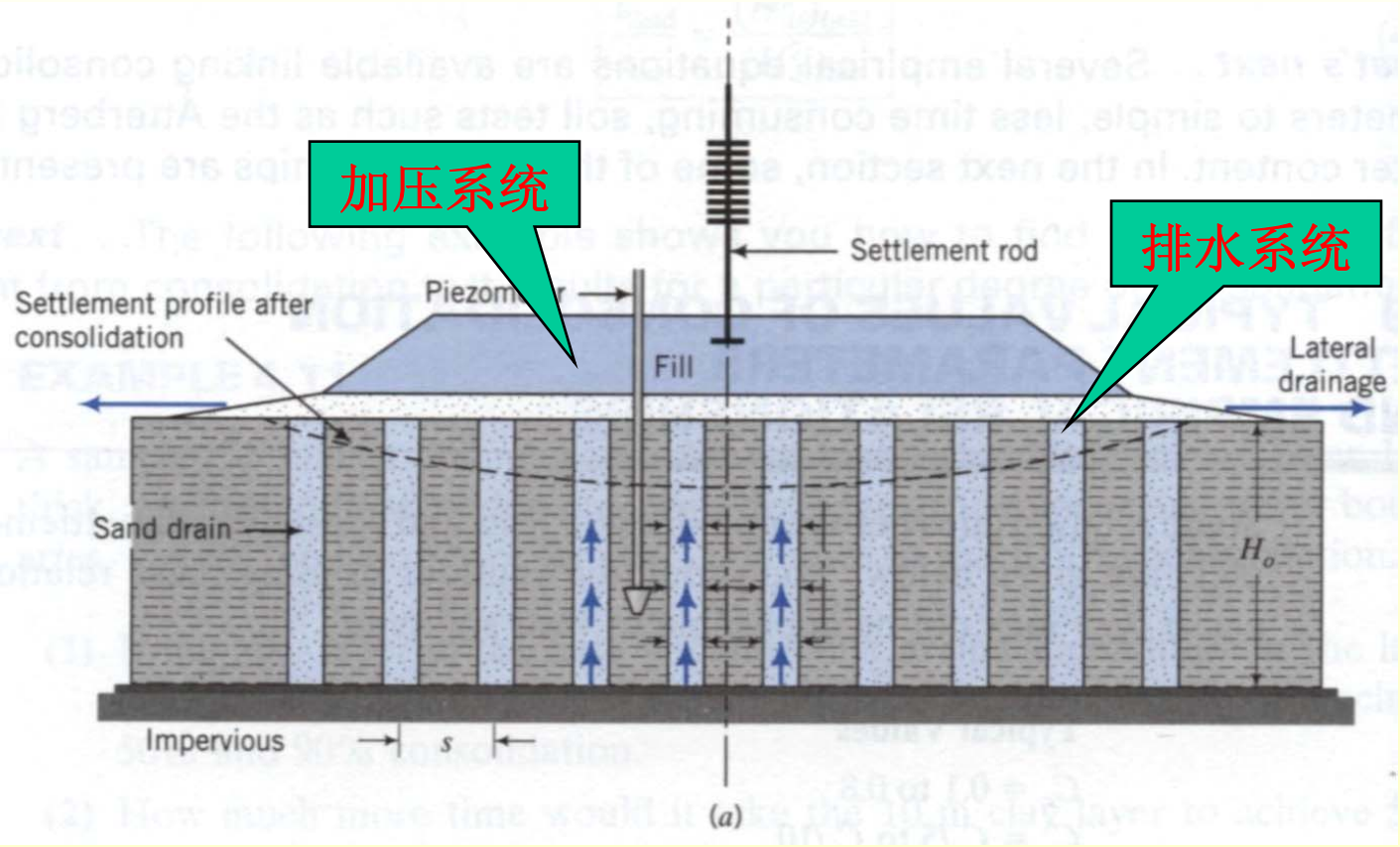
加压系统：起固结作用的荷载，使地基土的固结压力增加而产生固结。

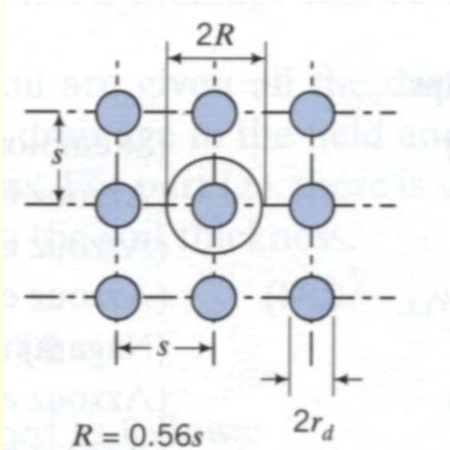
第五章 排水固结

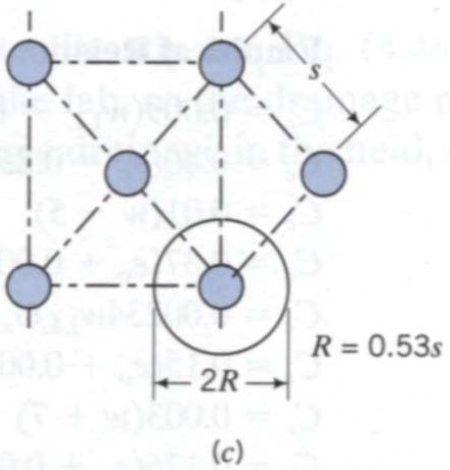
5.1 概述

Dr. Han WX

排水固结法适用于处理淤泥质土、淤泥、泥炭土和冲填土等饱和黏性土地基。







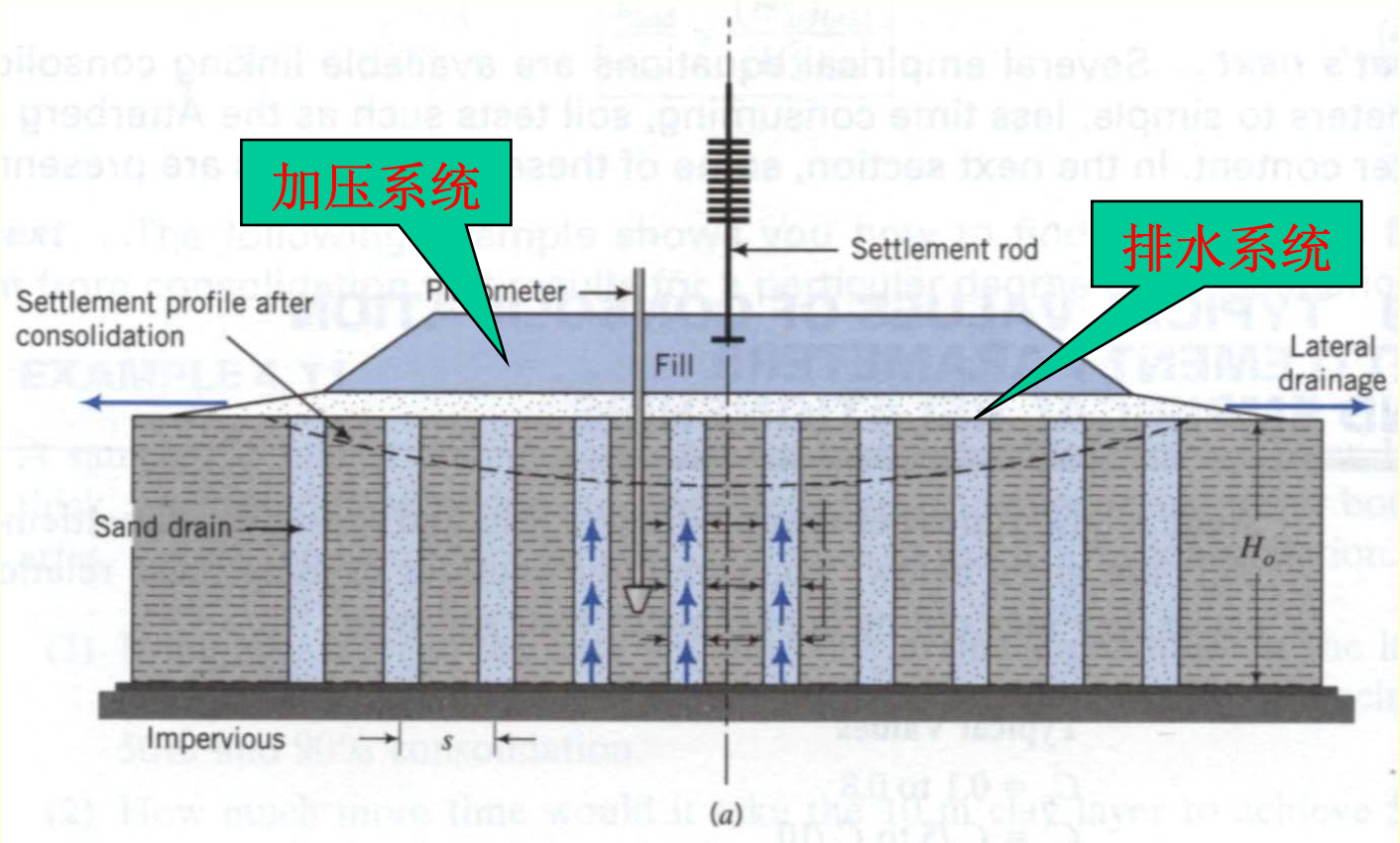
第五章 排水固结

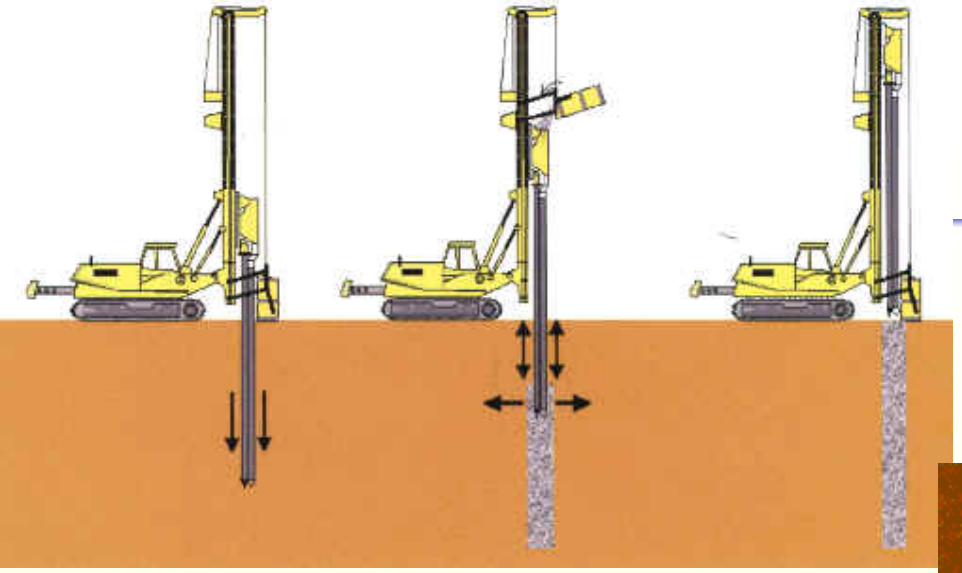
5.1 概述

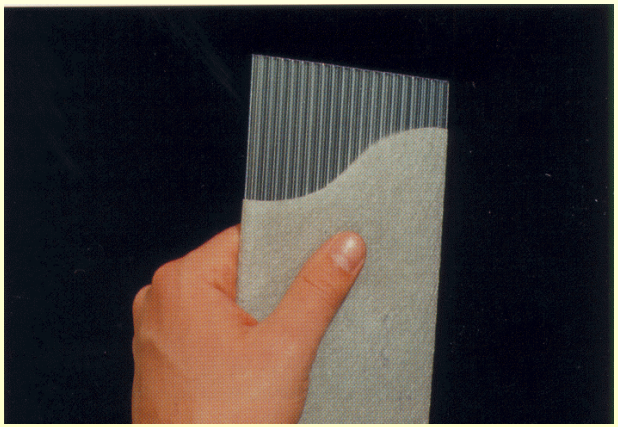
Dr. Han WX

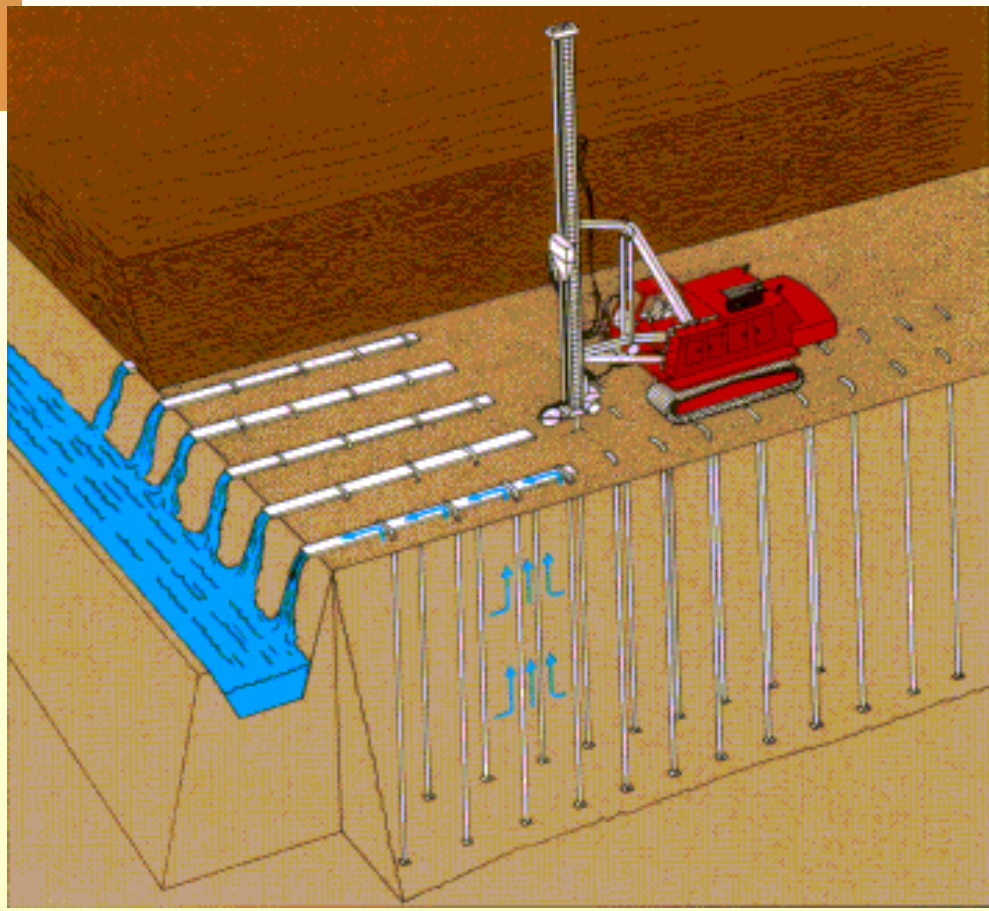
普通砂井、袋装砂井和塑料排水带各有优缺点，应根据工程条件通过技术经济比较后合理选用。

堆载法是指在被加固地基上采用堆载达到施加预压目的排水固结加固方法









第五章 排水固结

5.1 概述

Dr. Han WX

真空预压法是在砂垫层上铺设不透水膜，在砂垫层中埋设排水管，通过抽水、抽气，在砂垫层和竖向排水通道中形成负压区，和地基土体间形成水头差

在单纯采用真空预压法不能达到地基处理设计要求时，可采用真空预压与堆载预压联合法加固地基。

电渗法是在地基中设置正负极，在地基中形成电场，在电场作用下地基土体中的水流向阴极，并被排出地基，达到排水固结加固地基的目的。

第五章 排水固结

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

5.2.1 加固原理

采用排水固结法加固地基的原理是利用饱和黏性土地基在荷载作用下产生排水固结，土体孔隙比减小，压缩性减小，抗剪强度提高。因此，采用排水固结法加固地基可有效减少地基工后沉降和提高地基承载力。

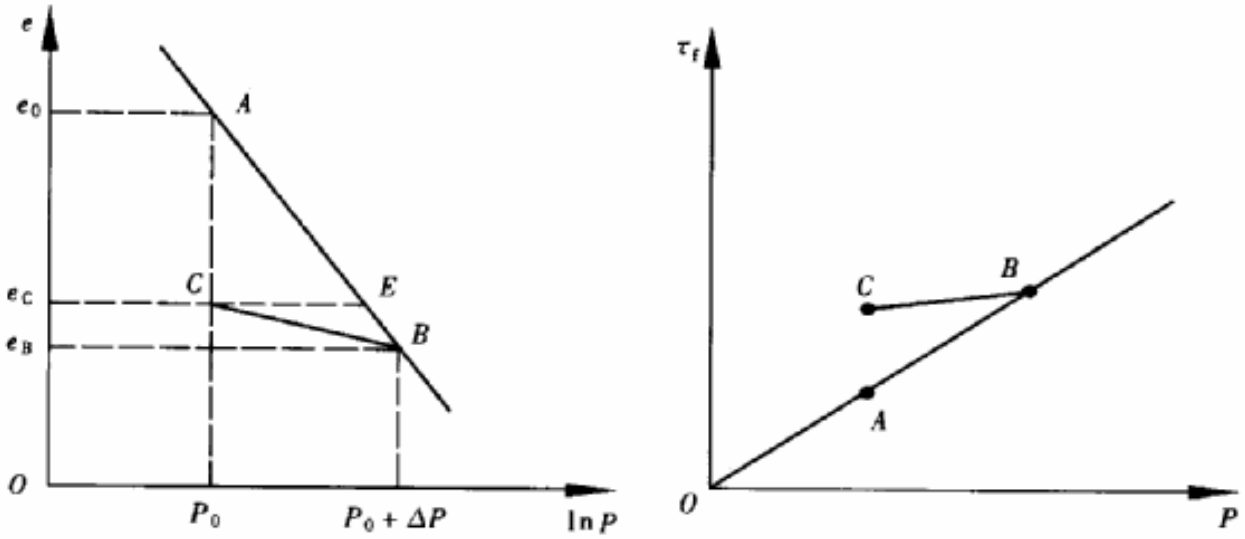


图 5-2-1 排水固结法加固地基原理

(a) e-lnp'曲线；(b) p-τ_f曲线

第五章 排水固结

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

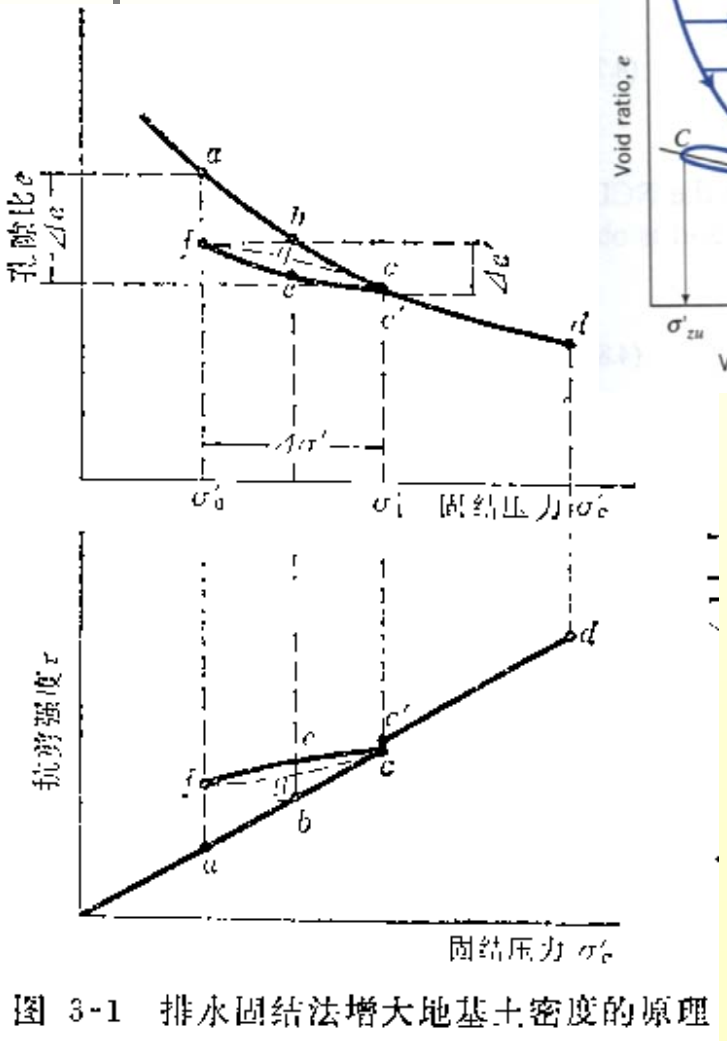
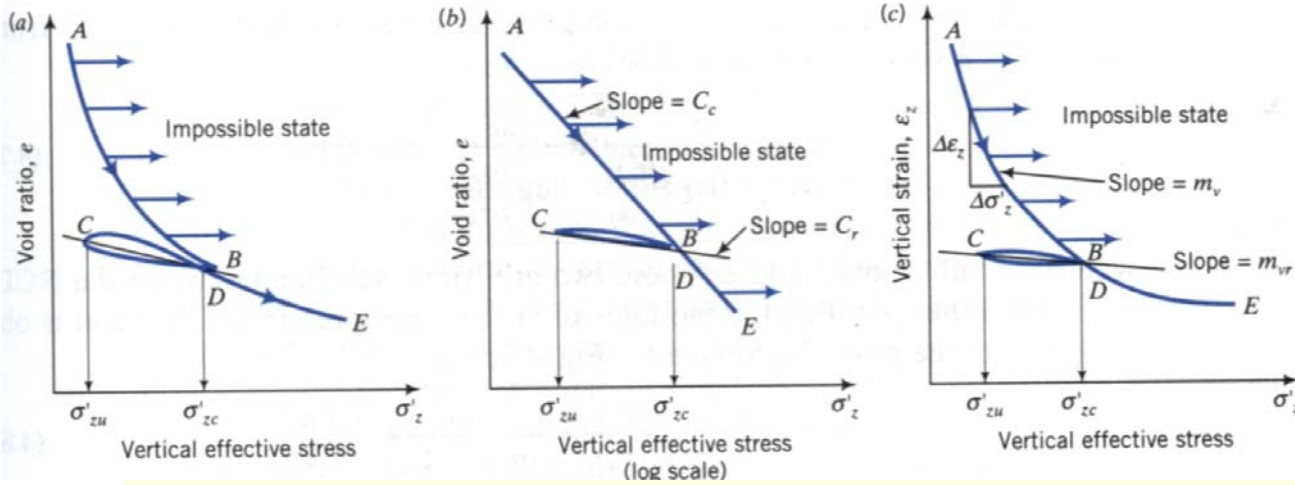


图 3-1 排水固结法增大地基土密度的原理



排水固结法原理：

在荷载的作用下，土层的固结过程就是空隙水压力消散和有效应力增加的过程。

$$\sigma' = \sigma - u$$

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

5.2.2 地基固结度计算

采用排水固结法加固地基的原理是利用饱和黏性土地基在荷载作用下产生排水固结，土体孔隙比减小，压缩性减小，抗剪强度提高。因此，采用排水固结法加固地基可有效减少地基工后沉降和提高地基承载力。

图 5-2-2 所示为一维固结情况。对一维固结可采用 Terzaghi 固结理论计算。

Terzaghi 一维固结方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (5\text{-}2\text{-}1)$$

式中 u——土体中超孔隙水压力；

C_v——固结系数。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k_z}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad C_v = \frac{k_z}{m_v \gamma_w} \qquad \frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

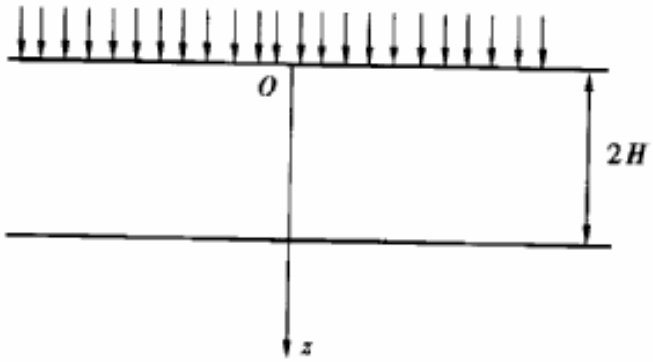


图 5-2-2 一维固结 Terzaghi 固结理论

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

5.2.2 地基固结度计算

根据 Terzaghi 一维固结理论，对最大排水距离为 H 的土层，当平均固结度不小于 30%时，地基平均固结度$\overline{U}_z$ 可采用下式计算：

固结度 $$U_z = 1 - \frac{\Delta u_z}{\Delta u_0} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M}\left(\frac{\sin Mz}{H_{dr}}\right)\exp(-M^2 T_v)$$

平均固结度 $$\overline{U} = 1 - \frac{\frac{1}{2H_{dr}}\int_0^{2H_{dr}} \Delta u_z dz}{\Delta u_0}$$

$$= 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2}\exp\left(-M^2 T_v\right) = \frac{\rho_{pc,t}}{\rho_{pc}}$$

平均固结度 $$\overline{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \qquad (5\text{-}2\text{-}2)$$

式中 T_v——固结时间因子，$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$；

t——固结时间。

第五章 排水固结

5.2 加固原理和计算理论

5.2.2 地基固结度计算

砂井固结度

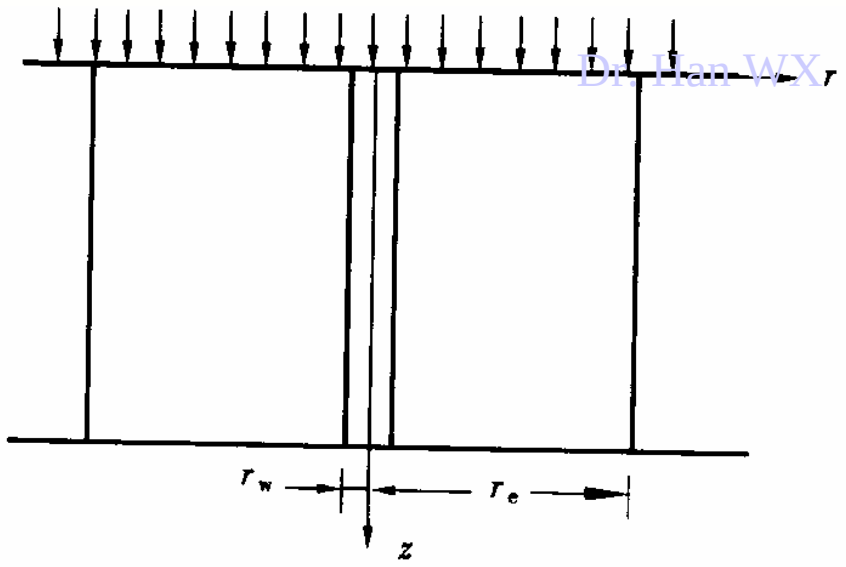


图 5-2-3 砂井地基固结理论

在地基中设置竖向排水通道——砂井，如图 5-2-3 中所示。在荷载作用下，地基土体既产生水平径向排水固结，又产生竖向排水固结。砂井地基排水固结属三维问题，可采用 Redulic-Terzaghi 固结理论计算。Redulic-Terzaghi 固结理论轴对称条件下固结方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \tag{5-2-3}$$

式中 C_v，C_h——分别为竖向和水平向固结系数。

5.2 加固原理和计算理论

式（5-2-3）可分解成如式（5-2-1）所示的竖向固结方程和式（5-2-4）所示的径向固结方程分别求解。径向固结方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \tag{5-2-4}$$

根据 Barron 在等应变假设条件下所得到的解，地基径向平均固结度 $\overline{U}_r$ 计算式为：

$$\overline{U}_r = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F(n)}} \tag{5-2-5}$$

式中 T_h——径向排水固结时间因子，其表达式为：

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e^2} \tag{5-2-6}$$

$F(n)$——参数，其表达式为：

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1}\ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \tag{5-2-7}$$

式中 n——井径比，$n = \frac{r_e}{r_w}$；

d_e，r_e——砂井影响范围的直径和半径；

r_w——砂井半径。

5.2 加固原理和计算理论

砂井地基径向平均固结度记为 $\overline{U}_r$，竖向平均固结度记为 $\overline{U}_z$，则砂井地基总的平均固结度 $\overline{U}_{rz}$可按下式计算：

$$\overline{U}_{rz} = 1 - (1 - \overline{U}_z)(1 - \overline{U}_r) \qquad (5\text{-}2\text{-}8)$$

若软黏土层较厚，砂井未能打穿软土层，如图 5-2-4 所示。图 5-2-4 中，砂井深度为 L，压缩层范围内软黏土层未设置砂井区厚度为 H，在荷载作用下地基平均固结度可采用下述方法计算。砂井区平均固结度 $\overline{U}_{rz}$采用式（5-2-8）计算。未设砂井区平均固结度 $\overline{U}_z$ 采用一维固结理论计算，计算时将砂井底面视为排水面。整个软黏土层平均固结度 $\overline{U}$ 可采用下式计算：

$$\overline{U} = \lambda\overline{U}_{rz} + (1 - \lambda)\overline{U}_z \qquad (5\text{-}2\text{-}9)$$

式中 $\overline{U}_{rz}$——砂井区平均固结度；

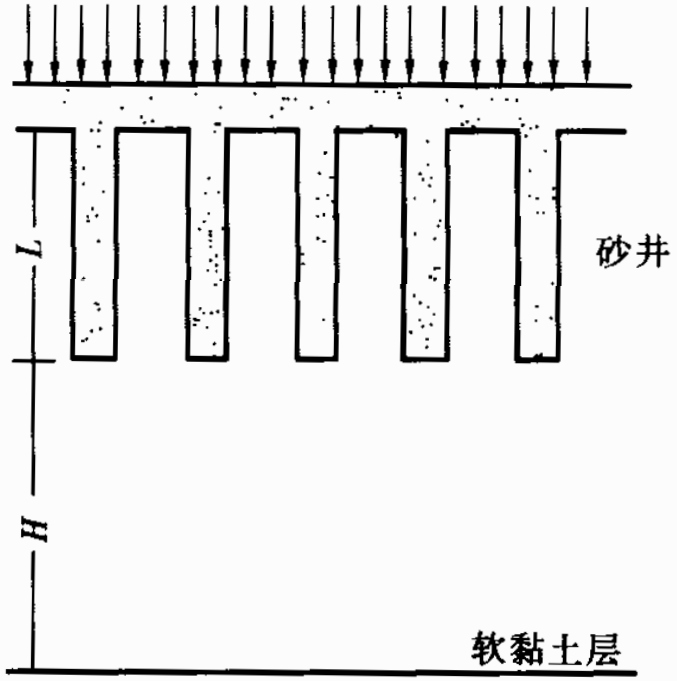


图 5-2-4 砂井未打穿软黏土土层情况

$\overline{U}_z$——未设置砂井区平均固结度；

λ——砂井深度与软土层总厚度之比值，其表达式为：

$$\lambda = \frac{L}{L+H} \tag{5-2-10}$$

式中 L——砂井深度；

H——未设置砂井区厚度。

曾国熙（1975）建议地基平均固结度采用下述普遍表达式表示：

$$\overline{U} = 1 - \alpha e^{-\beta t} \tag{5-2-11}$$

式中 α，β——参数，不同条件下平均固结度计算公式及参数 α、β 值见表5-2-1。

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

不同条件的固结度计算公式 表 5-2-1

序号	条件	平均固结度计算公式	α	β	备注
1	竖向排水固结（$\overline{U}_z > 30\%$）	$\overline{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v}{4H^2} t}$	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	Terzaghi 解
2	内径向排水固结	$\overline{U}_r = 1 - e^{-\frac{8C_h}{F(n)d_e^2} t}$	1	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}$	Barron 解
3	竖向和内径向排水固结（砂井地基平均固结度）	$\overline{U}_{rz} = 1 - (1 - \overline{U}_r)(1 - \overline{U}_z)$ $= 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\left(\frac{8C_h}{F(n)d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}\right) t}$	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

续表

序号	条件	平均固结度计算公式	α	β	备注
4	砂井未贯穿受压土层平均固结度	$\overline{U}=\lambda\overline{U}_{rz}+(1-\lambda)\overline{U}_z \approx 1-\frac{8\lambda}{\pi^2}e^{-\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}t}$	$\frac{8}{\pi^2}\lambda$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}$	$\lambda=\frac{L}{L+H}$ L——砂井长度 H——砂井以下压缩土层厚度
5	外径向排水固结（$\overline{U}_r>60\%$）	$\overline{U}=1-0.692e^{-\frac{5.78C_h}{R^2}t}$	0.692	$\frac{5.78C_h}{R^2}$	R——土桩体半径
6	普遍表达式	$\overline{U}=1-\alpha e^{-\beta t}$			

5.2 加固原理和计算理论

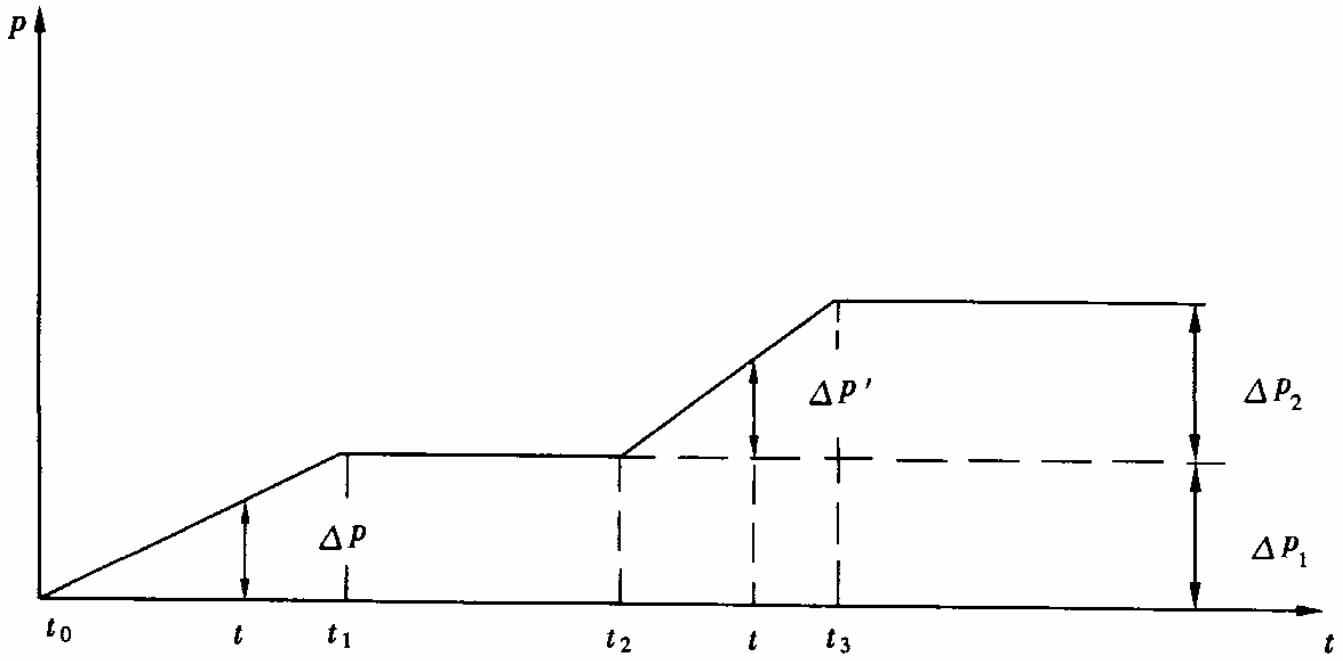
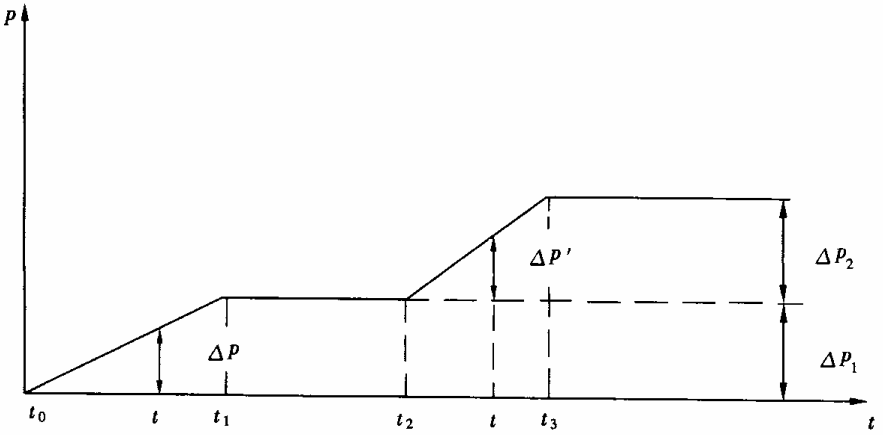


图 5-2-5 分级加载条件下地基平均固结度计算

地基平均固结度表达式，式（5-2-2）、式（5-2-8）、式（5-2-9）以及式（5-2-11）都是在瞬时加载条件下得到的解答。在实际工程中，预压荷载往往是分级逐渐施加的。现以图 5-2-5 为例说明地基固结度计算方法。图中表示荷载分级施加，第一级荷载为 Δp_1，从 t_0 时刻开始加载，加载时间为 t_1，第二级荷载为 Δp_2，从 t_2 时刻开始施加，加载时间为 $(t_3 - t_2)$。



曾国熙（1975）建议在这种情况下采用下述计算式计算地基固结度：

当 $0 < t < t_1$ 时，对 Δp 而言固结度：

$$\overline{U}_t = \frac{1}{t}\left[t - \frac{\alpha}{\beta}(1 - e^{-\beta t}) \right] \tag{5-2-12}$$

对 Δp_1 而言的固结度：

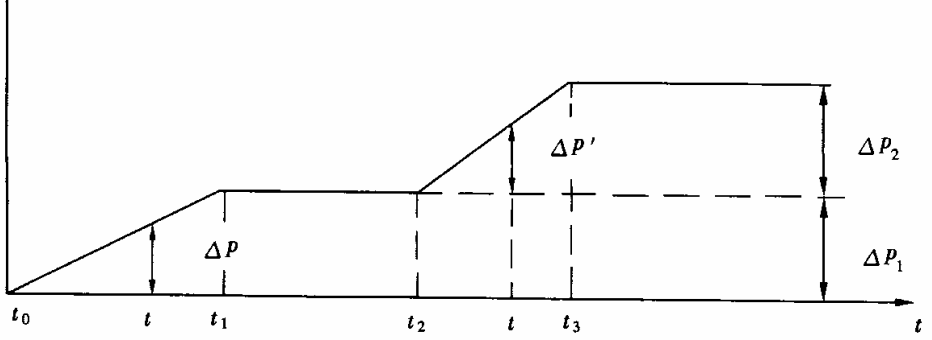
$$\overline{U}_t = \frac{1}{t_1}\left[t - \frac{\alpha}{\beta}(1 - e^{-\beta t}) \right] \tag{5-2-13}$$

对 $\Sigma\Delta p_1$ 而言的固结度：

$$\overline{U}_t = \frac{\Delta p_1}{t_1 \Sigma \Delta p}\left[t - \frac{\alpha}{\beta}(1 - e^{-\beta t}) \right] \tag{5-2-14}$$

当 $t_1 < t < t_2$ 时，对 Δp_1 而言的固结度：

$$\overline{U}_t = 1 + \frac{\alpha}{\beta t_1}\left[e^{-\beta t} - e^{-\beta(t - t_1)} \right] \tag{5-2-15}$$



对 $\Sigma\Delta p$ 而言的固结度：

$$\overline{U}_t = \frac{\Delta p_1}{\Sigma\Delta p}\left\{1 + \frac{\alpha}{\beta t_1}\left[e^{-\beta t} - e^{-\beta(t-t_1)}\right]\right\} \tag{5-2-16}$$

当 $t_2 < t < t_3$ 时，对 $\Sigma\Delta p$ 而言的固结度：

$$\overline{U}_t = \frac{\Delta p_1}{t_1\Sigma\Delta p}\left\{t_1 + \frac{\alpha}{\beta}\left[e^{-\beta t} - e^{-\beta(t-t_1)}\right]\right\}$$

$$+ \frac{\Delta p_2}{(t_3 - t_2)\Sigma\Delta p}\left\{(t - t_2) + \frac{\alpha}{\beta}\left[1 - e^{-\beta(t-t_2)}\right]\right\} \tag{5-2-17}$$

当 $t > t_3$ 时，对 $\Sigma\Delta p$ 而言的固结度：

$$\overline{U}_t = \frac{\Delta p_1}{t_1\Sigma\Delta p}\left\{t_1 + \frac{\alpha}{\beta}\left[e^{-\beta t} - e^{-\beta(t-t_1)}\right]\right\}$$

$$+ \frac{\Delta p_2}{(t_3 - t_2)\Sigma\Delta p}\left\{(t_3 - t_2) + \frac{\alpha}{\beta}\left[e^{-\beta(t-t_2)} - e^{-\beta(t-t_3)}\right]\right\}$$

(5-2-18)

5.2 加固原理和计算理论

多级等速加荷下修正后对 $\Sigma\Delta p$ 而言的固结度可归纳为下式表示：

$$\overline{U}_t = \sum_1^n \frac{q_n}{\Sigma\Delta p}\left[(t_n - t_{n-1}) - \frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t}(e^{\beta t_n} - e^{\beta t_{n-1}})\right] \qquad (5\text{-}2\text{-}19)$$

式中 q_n——第 n 级荷载的加荷速率，如图 5-2-5 中，$q_1 = \dfrac{\Delta p_1}{t_1}$；

$\Sigma\Delta p$——各级荷载的累加值；

t_{n-1}，t_n——分别为第 n 级荷载起始和终止时间，当计算第 n 级荷载加荷过程中时间 t 的固结度时，t_n 改用 t；

α，β——参数，见表 5-2-1 中所示。

5.2.3 考虑井阻作用固结度计算

在地基中设置竖向排水系统，无论是普通砂井，还是袋装砂井、塑料排水带，其本身透水性虽然大，但对渗流总有一定的阻力，并且在设置竖向排水系统过程中对地基土的扰动会降低砂井周围土体的渗透性。前者称为井阻，后者称为涂抹作用。Barron 解式（5-2-5）是没有考虑井阻和涂抹作用得到的。近年来横断面积较小的袋装砂井和塑料排水带在工程中应用日益广泛，使考虑井阻和涂抹作用的非理想井固结理论得到重视。Hansbo（1981）提出了考虑井阻和涂抹作用的饱和软黏土地基在深度 z 处径向排水平均固结度表达式：

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F}} \tag{5-2-20}$$

式中 T_h——径向排水固结因子，$T_h = \dfrac{C_h t}{d_e^2}$；

F——综合参数，其表达式为：

$$F = F_n + F_s + F_r \tag{5-2-21}$$

式中下标 n、s、r 分别表示井径比、涂抹作用、井阻作用的影响。F_n 计算式同

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

式中下标 n、s、r 分别表示井径比、涂抹作用、井阻作用的影响。F_n 计算式同式（5-2-7），当井径比 $n \geqslant 20$ 时，计算式可简化为：

$$F_n = \ln n - \frac{3}{4} \tag{5-2-22}$$

反映涂抹作用影响的参数 F_s 表达式为：

$$F_S = \left(\frac{K_h}{K_s} - 1 \right) \ln S \tag{5-2-23}$$

式中 K_h，K_s——分别表示原状土和扰动土的水平向渗透系数；

S——扰动区半径 r_s 与砂井半径 r_w 之比，$S = \frac{r_s}{r_w}$。

反映井阻作用影响的参数 F_r 表达式为：

$$F_r = \pi z \left(2H - z \right) \frac{K_h}{q_w} \tag{5-2-24}$$

式中 H——砂井贯穿土层最大排水距离；

z——竖向坐标；

q_w——竖向排水体（砂井）通水量，其表达式为：

$$q_w = K_w A_w = K_w \frac{\pi d_w^2}{4} \tag{5-2-25}$$

式中 K_w——竖向排水体渗透系数。

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

Hansbo 公式计算的是某一深度的平均固结度，因而可很方便地用来计算该深度土体因固结而增长的强度。

谢康和（1987）提出了考虑井阻作用和涂抹作用的砂井地基平均固结度计算式：

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F}} \tag{5-2-26}$$

式中 F——综合参数，其表达式为：

$$F = F_n + F_s + F_r \tag{5-2-27}$$

式（5-2-27）中 F_n 和 F_s 计算式分别同式（5-2-22）和式（5-2-23），F_r 计算式如下：

$$F_r = \pi G = \pi \frac{K_h}{K_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2 = \frac{\pi^2 H^2}{4}\frac{K_h}{q_w} \tag{5-2-28}$$

式中 G——井阻因子；

H，d_w——分别为竖向排水体贯穿土层最大排水距离和排水体直径；

5.2 加固原理和计算理论

5.2.4 土体固结抗剪强度增长计算

在荷载作用下地基土体产生排水固结。在固结过程中，土体中超孔隙水压力消散，有效应力增大，地基土体抗剪强度提高。同时还应看到，在荷载作用下，地基土体会产生蠕变。土体在发生蠕变时，可能导致土体抗剪强度衰减。因此，在荷载作用下，地基中土体某时刻的抗剪强度 τ_f 可以表示为：

$$\tau_f = \tau_{fo} + \Delta\tau_{fc} - \Delta\tau_{ft} \tag{5-2-29}$$

式中 τ_{fo}——地基中某点初始抗剪强度；

$\Delta\tau_{fc}$——由于排水固结而增长的抗剪强度增量；

$\Delta\tau_{ft}$——由于土体蠕变引起的抗剪强度减小的数量。

考虑到由于蠕变引起的抗剪强度减小的数量 $\Delta\tau_{ft}$ 尚难计算，曾国熙（1975）建议将式（5-2-29）改写为：

$$\tau_f = \eta\ (\tau_{fo} + \Delta\tau_{fc}) \tag{5-2-30}$$

式中 η——考虑土体蠕变及其他因素对土体抗剪强度的折减系数，并建议在软黏土地基工程设计中取 $\eta = 0.75 \sim 0.90$。

5.2 加固原理和计算理论

Dr. Han WX

对正常固结黏土，采用有效应力指标表示的抗剪强度表达式为：

$$\tau_f = \sigma' \tan\varphi' \qquad (5\text{-}2\text{-}31)$$

式中 φ'——土体有效内摩擦角；

σ'——剪切面上法向有效应力。

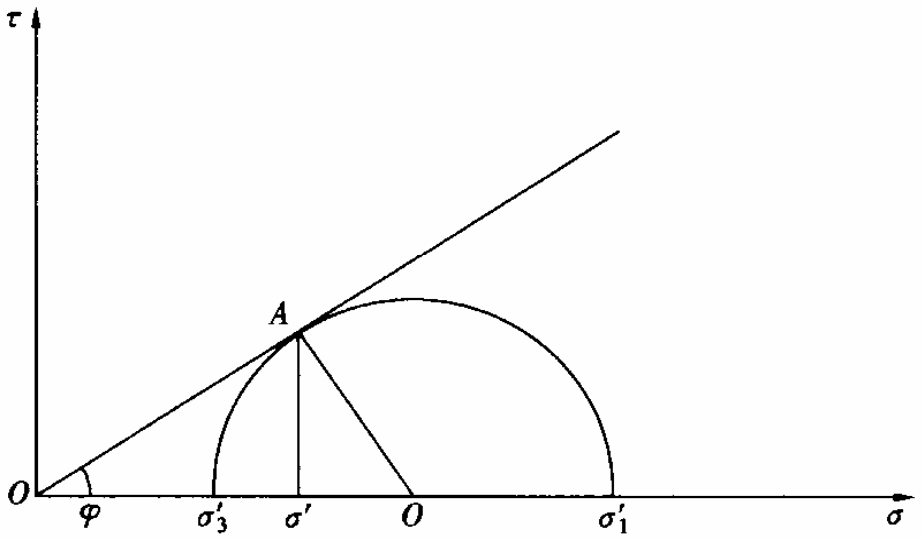


图 5-2-6

由图 5-2-6 可以看到，剪切面上法向应力 σ' 可用最大有效主应力 σ'_1 表示，其关系式为：

5.2 加固原理和计算理论

$$\sigma' = \frac{\cos^2\varphi'}{1+\sin\varphi'}\sigma'_1 \tag{5-2-32}$$

由式（5-2-31）可以得到：由土体固结产生的有效应力增量 $\Delta\sigma'_1$ 引起土体抗剪强度增量表达式为：

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma' \mathrm{tg}\varphi' \tag{5-2-33}$$

结合式（5-3-33）和式（5-3-32），可得：

$$\Delta\tau_{fc} = \frac{\cos^2\varphi'}{1+\sin\varphi'}\sigma'_1 = K\Delta\sigma'_1 \tag{5-2-34}$$

设在预压荷载作用下，地基中某点总主应力增量为 $\Delta\sigma_1$。当该点土体固结度为 U 时，土体中相应的有效主应力增量 $\Delta\sigma'_1$ 为：

$$\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u = U\Delta\sigma_1 \tag{5-2-35}$$

式中 Δu——土体中超孔隙水压力增量。

5.2 加固原理和计算理论

结合式（5-3-30）、式（5-3-34）和式（5-3-35），可得：

$$\tau_f = \eta\left[\tau_{f0} + K\left(\Delta\sigma_1 - \Delta u\right)\right] = \eta\left[\tau_{f0} + KU\Delta\sigma_1\right] \qquad (5\text{-}2\text{-}36)$$

式中 K——土体有效内摩擦角的函数，$K = \dfrac{\sin\varphi'\cos\varphi'}{1+\sin\varphi'}$；

U——地基中某点固结度，为简便计，常用平均固结度代替；

$\Delta\sigma_1$——荷载引起的地基中某点最大主应力增量，可按弹性理论计算；

Δu——荷载引起的地基中某点超孔隙水压力增量。

5.2.5 算例

已知：一淤泥质黏土地基，土体固结系数为 $c_h = c_v = 1.8 \times 10^{-3} cm^2/s$，土层厚 20m。采用堆载法加固，袋装砂井直径采用 $d_w = 70mm$，等边三角形布置，间距 $l = 1.4m$，深度 $H = 20m$，砂井底部为不透水层，砂井已打穿需加固土层。预压荷载总压力 $p = 100kPa$，分两级等速加载，预压过程如图 5-2-7 所示。

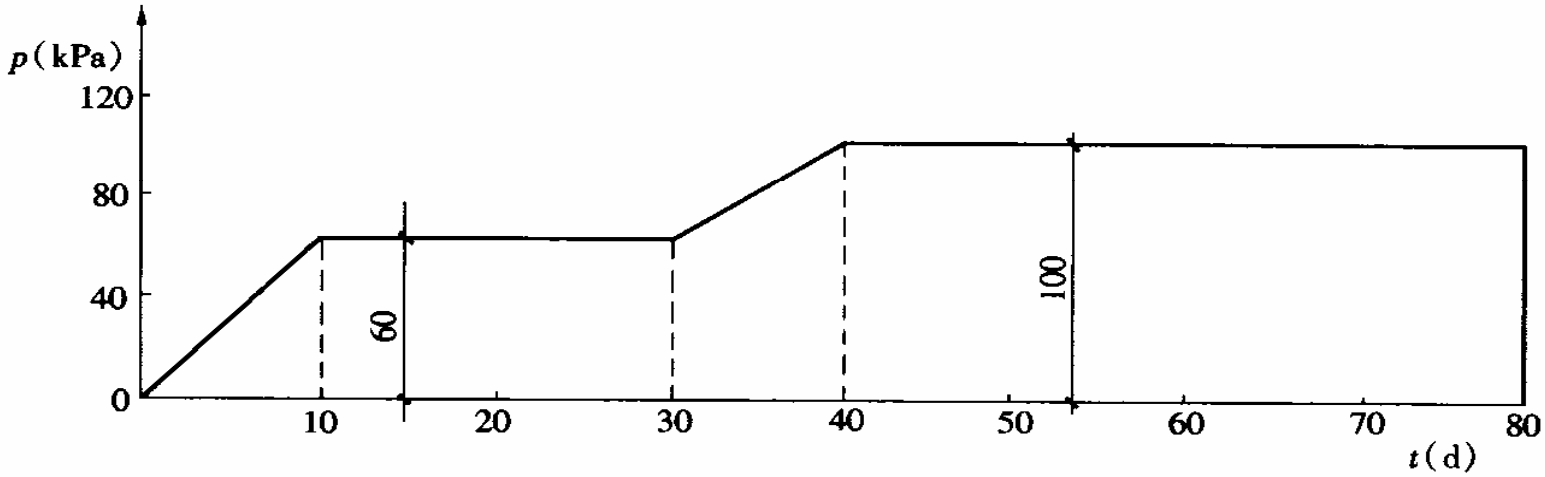


图 5-2-7 预压过程

求：加载开始后 120d 加固地基土层的平均固结度（不考虑砂井的井阻和涂抹影响）。

5.2 加固原理和计算理论

解：

土层平均固结度包括两部分：径向排水平均固结度和向上竖向排水平均固结度。加固地基土层平均固结度采用式（5-2-19）计算，式中参数 α 和 β 由表 5-2-1 知：

$$\alpha = \frac{8}{\pi^2} = 0.81$$

$$\beta = \frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$$

根据砂井的有效排水圆柱体直径 $d_e = 1.05l = 1.05 \times 1.4 = 1.47\text{m}$

径井比 $n = d_e / d_w = 1.47/0.07 = 21$，则

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1}\ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} = 2.3$$

$$\beta = \frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2} = 2.908 \times 10^{-7} 1/\text{s} = 0.0251\ (1/\text{d})$$

5.2 加固原理和计算理论

第一级荷载加荷速率

$$\dot{q}_1 = 60/10 = 6\text{kPa}/d$$

第二级荷载加荷速率

$$\dot{q}_2 = 40/10 = 4\text{kPa}/d$$

加固地基土层平均固结度采用式（5-2-19）计算：

$$\overline{U}_t = \Sigma \frac{\dot{q}_1}{\Sigma \Delta p}\left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t}(e^{-\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})\right]$$

$$= \frac{\dot{q}_1}{\Sigma \Delta p}\left[(t_1 - t_0) - \frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t}(e^{\beta T_1} - e^{\beta T_0})\right]$$

$$= + \frac{\dot{q}_2}{\Sigma \Delta p}\left[(t_3 - t_2) - \frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t}(e^{\beta T_3} - e^{\beta T_2})\right]$$

$$= \frac{6}{100}\left[(10 - 0) - \frac{0.81}{0.0251}e^{-0.0251\times 120}(e^{0.0251\times 10} - e^{0})\right]$$

$$= + \frac{4}{100}\left[(40 - 30) - \frac{0.81}{0.0251}e^{-0.0251\times 120}(e^{0.0251\times 40} - e^{0.0251\times 30})\right]$$

$$= 0.93$$

加固地基土层平均固结度为 0.93。

5.3 堆载预压法

堆载预压法设计计算步骤如下：

1. 竖向排水体材料选择

(1)竖向排水体材料选择

竖向排水体可采用普通砂井、袋装砂井和塑料排水带。可根据材料资源、施工条件和经济分析比较确定。若需要设置竖向排水体长度超过20m，建议采用普通砂井。

袋装砂井通常在现场制备，袋子材料通常采用聚丙烯编织布，直径多用70mm左右，砂料宜用风干砂，含泥量应小于3%。

塑料排水带在工厂生产，品种型号很多。滤膜芯带复合结构塑料排水带由两种材料组合而成，中间为带有各种形式通水孔道的芯板，如口琴型、城墙型、圆　孔型、双面型、双面交错凹凸乳头型等，外面包裹一层无纺土工织物滤层。

塑料排水带主要质量指标是复合体的力学性能、纵向通水量、滤膜的渗透性　和隔土性。塑料排水带的力学性能包括抗拉强度和延伸率、弯曲性能。土工合成　材料学会制定的排水带产品质量标准如表5-3—1所示。

塑料排水带产品质量标准

表 5-3-1

项目 \ 打入深度（m）			10	15	20	25	备　注
材质	芯带		聚酯，聚乙烯，聚丙烯，聚氯乙烯				
	滤膜		涤纶（热粘或胶粘非织布）				
断面尺寸	宽度（mm）		> 95				
	厚度（mm）		> 4				
拉伸强度	整带 kN/10cm（相应延伸率 10% ~ 15%）		> 1.0	> 1.0	> 1.2	> 1.2	采用侧压力为 350kPa 的试验结果，水力梯度 $i = 0.5$ 换算为 $i = 1$ 的通水量
通水能力（q_w）	cm^3/s		当设计要求无井阻时由土工织物流量计算式确定				
滤膜的拉伸强度	相应延伸率 10% 的拉伸强度（N/cm）	湿	10	10	20	20	
		干	15	15	25	25	
滤膜渗透反滤特性	渗透系数 K_G（cm/s）		$> 10^{-4}$ 和 $K_G > 100k_s$				K_G——滤膜的渗透系数； k_s——土的渗透系数
	等效孔 O_{95}（mm）		< 0.08				
抗压屈服强度（kPa）	带长 < 15m		250				
	带长 > 15m		350				

5.3 堆载预压法

Dr. Han WX

堆载预压法设计计算步骤如下：

1．竖向排水体材料选择

(2)竖向排水体设置深度设计

根据对工后沉降的要求和地基承载力的要求确定软黏土地基处理深度，然后由处理深度确定竖向排水体的设置深度。

若软土层较薄，竖向排水体应贯穿软土层。

若软土层中有砂层，而且砂层中设有承压水，应尽量打至砂层。如砂层中有承压水，则不应打至砂层，应留有一定厚度的软土层，防止承压水与竖向排水体连通。

5.3 堆载预压法

堆载预压法设计计算步骤如下：

1．竖向排水体材料选择

(3)竖向排水体平面设计

工程应用中，普通砂井直径一般为300—500mm，多采用400mm，井径比常采用n＝6-8。则当加固土层很厚时，砂井直径也有大于1000mm的。

袋装砂井直径一般为70-100mm，多采用70mm，井径比常采用n＝15-30。

塑料排水带常用当量直径表示。当塑料排水带宽度为b，厚度为δ时，其当量直径D_p计算式为：

$$D_p = \frac{2(b+\delta)}{\pi}$$

塑料排水带井比一般采用 n=15-30。

第五章 排水固结

5.3 堆载预压法

Dr. Han WX

图5－3－1表示砂井平面布置及影响范围。图5-3—1(a)表示等边三角形布置，图5-3-1(b)表示正方形布置，图中等面积圆表示一个砂井的影响范围。记竖向排水体砂井的影响圆直径为d_e，它与排水体中心间距l关系如下：

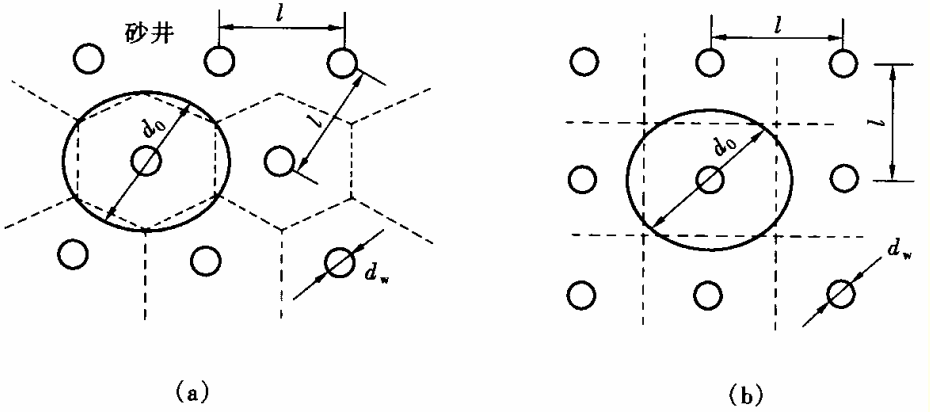


图 5-3-1 竖向排水体平面布置及影响范围

$$d_e = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}}l = 1.05l$$ 等边三角形排列

$$d_e = \sqrt{\frac{4}{\pi}}l = 1.13l$$ 正方形排列

井径比n的取值主要取决于土体的固结特性和预压加固期限的要求。井径比取值小，表示最大排水距离短，地基固结速度快，但地基处理成本提高。

5.3 堆载预压法

1. 竖向排水体材料选择

(4)水平排水砂垫层设计

地表排水砂垫层是预压法处理地基排水系统的一部分。

地表排水砂垫层采用中粗砂铺设，含泥量应小于5%，砂垫层的厚度一般应大于400mm。水平排水系统也可采用土工合成材料与砂垫形成的混合垫层。水平排水系统应能保证在预压加固过程中由地基中排出的水能引出预压区。

5.3 堆载预压法

2. 堆载预压计划设计

根据初步确定的排水系统和对地基处理的要求，包括提高地基承载力、减小工后沉降以及容许的堆载预压工期等要求，初步拟定一个堆载预压计划。

例如初步拟定的堆载预压计划如图5-3-2所示。

在图5-3-2中，预压荷载分两次等速加载。第一次预压荷载为p_1，加荷期限为t_1，然后保持恒载p_1预压至时间t_2；第二次增加预压荷载为(p_2-p_1)，加荷从t_2时刻开始，加荷期限为(t_3-t_2)，再保持恒载预压，堆载预压结束时间为t_4。对这一初步拟定的堆载预压计划，需要做下述几项验算：

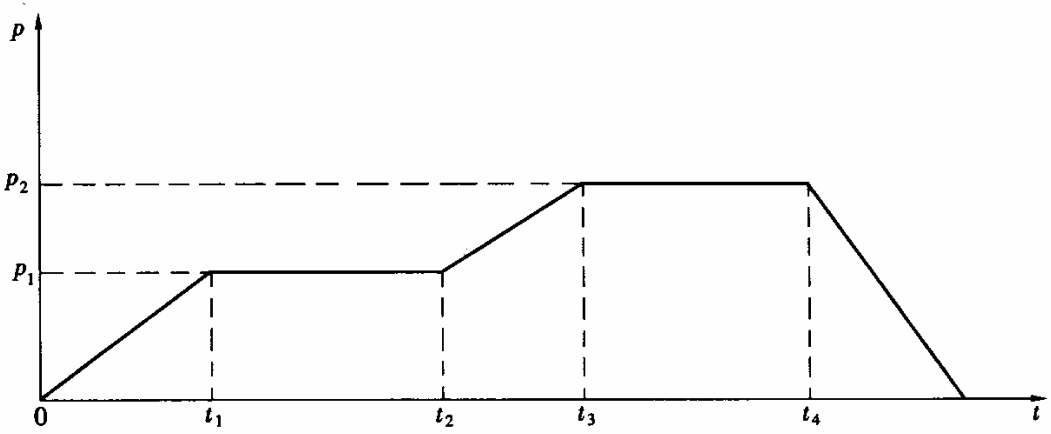


图 5-3-2 堆载预压计划

5.3 堆载预压法

2. 堆载预压计划设计

对这一初步拟定的堆载预压计划，需要做下述几项验算：

(1)堆载预压过程中地基稳定性验算

主要验算加载阶段地基的稳定性。

加载阶段地基稳定，则恒载预压阶段地基肯定是稳定的。通常通过稳定分析验证加载计划，主要验证一级加载量和加载速率是否合理。

稳定分析一般可采用圆弧滑动法分析。

在稳定分析前，应计算此时刻地基的承载能力。第一级加载时，加载量大小主要取决于天然地基承载力；第二级加载时，加载量大小取决于在前一级堆载作用下地基承载力的提高，主要与第一次加载量和此时地基达到的固结度有关。根据地基固结情况以及蠕变对强度的影响计算第二级荷载施加时t_2时刻地基土体抗剪强度，然后进行稳定性计算.

5.3 堆载预压法

Dr. Han WX

2．堆载预压计划设计

对这一初步拟定的堆载预压计划，需要做下述几项验算：

(1)堆载预压过程中地基稳定性验算

若在加载阶段中地基的稳定性不能满足，可修改预压计划或排水系统设计通过减小一次加载量或减慢加荷速率；或通过减小井径比，以提高地基的固结速率，进一步提高土体的强度，以达到满足地基的稳定要求。

若在加载过程中地基稳定分析的安全度偏大，可修改预压计划增加一次加载量或加快加荷速率，或修改排水系统设计如增加井径比，以节约投资等。

5.3 堆载预压法

2．堆载预压计划设计

对这一初步拟定的堆载预压计划，需要做下述几项验算：

(2)堆载预压结束时刻(t_4)地基承载力和工后沉降是否满足设计要求

通过计算预压荷载作用下地基固结度、地基土体抗剪强度的提高，可进一步得到经堆载预压处理后的地基承载力，判断通过堆载预压处理后的地基是否已满足提高地基承载力的要求。

通过计算在预压阶段地基的固结沉降和固结度，可进一步计算工作荷载作用下的沉降。例如：工作荷载为p_A，预压荷载为p_B，而且$p_B \leqslant p_A$，天然地基在预压荷载p_B作用下平均固结度达到U。卸载后建造建筑物，工作荷载为p_A，试求建筑物沉降。为便于说明，只考虑固结沉降。若天然地基在荷载p_A作用下固结沉降为Sc，在荷载p_B作用下固结沉降为S_{CB}，经堆载预压处理后地基上建筑物工后沉降S可表示为：

$$S=S_E+S_C-US_{CB}$$

5.3 堆载预压法

2．堆载预压计划设计

对这一初步拟定的堆载预压计划，需要做下述几项验算：

(2)堆载预压结束时刻(t_4)地基承载力和工后沉降是否满足设计要求

若工后沉降不能满足要求，由式(5-3—3)可知，可通过延长堆载时间，或减小井径比以增加平均固结度万，或增大预压荷载，均可达到减少工后沉降的目的。

通过对初步拟定的堆载预压计划的验算，不断调整堆载预压计划，必要时还要调整排水系统的设计。通过不断调整，反复验算，确定排水系统和堆载预压计划设计。

一般情况下，第一级预压荷载大小根据天然地基承载力确定。待地基相对于第一级预压荷载平均固结度达到80％左右开始施加第二级预压荷载。第二级预压荷载大小根据此时地基实际承载力确定，可以通过稳定分析验算。依次类推，拟定堆载预压计划。

5.3 堆载预压法

3．现场监测设计

堆载预压法现场监测项目一般包括地面沉降，地表水平位移观测和地基土体中孔隙水压力观测，如有条件也可进行地基中深层沉降和水平位移观测。

地面沉降观测点可沿堆载面积纵横轴线布置，以测量荷载作用范围内地面沉降、荷载作用范围外地面沉降或隆起。利用沉降观测资料可以估算地基平均固结度，也可推算在荷载作用下地基最终沉降量。在加荷过程中，如果地基沉降速率突然增大，说明地基中可能产生较大的塑性变形区。若塑性区持续发展，可能发生地基整体破坏。一般情况下，沉降速率应控制在10-20mm/d。

地面水平位移观测点一般布置在堆载的坡脚，并根据荷载情况，在堆载作用面外再布置2—3排观测点。通过水平位移观测限制加荷速率，监视地基的稳定性。当堆载接近地基极限荷载时，坡脚及外侧观测点水平位移会迅速增大。每天水平位移值一般应控制不超过4mm。

5.3 堆载预压法

3．现场监测设计

地基中孔隙水压力测点一般布置在堆载中心线和边线附近堆载面以下地基不同深度处。通过地基中孔隙水压力观测资料可以反算土的固结系数，推算地基固结度，计算地基土体强度增长，控制加荷速率。

深层沉降测点一般布置在堆载轴线下地基的不同土层中，一个深层沉降测点只能测一点的竖向位移。若采用分层沉降标，则可连续得到一竖直线上各点竖向位移情况。通过深层沉降观测可以了解各层土的固结情况，以利于更好地控制加荷速率。

深层侧向位移测点一般布置在堆载坡脚或坡脚附近。通过测斜仪测量预先埋设于地基中的测斜管在不同深度的水平位移得到地基土体的水平位移沿深度后变化情况。通过深层侧向位移观测可更有效地控制加荷速率，保证地基稳定。

5.3 堆载预压法

4. 堆载预压法设计计算小结

从以上介绍可以看到，无论是排水系统设计还是堆载预压计划设计，影响因素都很多，而且排水系统和堆载预压计划两者也是相互影响、相互制约的。更为重要的是堆载预压计划还要通过现场监测情况来调整，以保证堆载预压过程中地基的稳定和达到加固要求。堆载预压法设计过程是一个反复调整、不断优化的过程。堆载预压法应采用动态设计，根据现场监测结果，不断调整堆载预压计划。

设计者不能只满足于技术上可行的方案，还要追求经济上的合理性，进行多方案比较、以达到优化设计。

5.3 堆载预压法

5．3．2 施工

堆载预压法施工包括排水系统施工和堆载预压施工。

排水系统包括砂垫层和竖向排水体两部分。

在铺摊砂垫层时应注意与竖向排水体的连接。以保证排水固结过程中，排水流畅。若软土地基表面很软，直接进行竖向排水系统的施工有困难，可辅以土工聚合物。

竖向排水体通常有普通砂井、袋装砂井和塑料排水带三类。施工方法各不相同。

普通砂井成孔方法有两种：沉管法和水冲法。袋装砂井和塑料排水带施工采用专用施工设备。施工设备品种较多，如塑料排水带插带机等。

堆载预压应严格按照堆载预压计划进行加载，并根据现场测试资料不断调整堆载预压计划，确保堆载预压过程中地基稳定性。堆载预压用料应尽可能就近取材，如卸载后材料还能二次应用最好。如大面积堆载预压，应尽可能分区、分批预压，以节省费用。如有条件，也可利用建(构)筑物自重进行堆载预压，节省预压费用。

5.3 堆载预压法

5．3．3 质量检验

排水固结法施工过程中主要通过沉降观测、地基中超孔隙水压力监测来检验其处理效果，也可在加载不同阶段进行不同深度的十字板抗剪强度试验和取土进行室内试验，检验地基处理效果，并且通过上述检验手段验算预压过程中地基稳定性。

预压完成后，可通过沉降观测成果、超孔隙水压力监测成果以及对预压后地基进行十字板抗剪强度试验及室内土工试验检验处理效果。

第五章 排水固结

5.4 真空预压法

Dr. Han WX

真空预压法与堆载预压法不同的是加压系统，两者排水系统基本上是相同的。真空预压法是通过在砂垫层和竖向排水体中形成负压区，在土体内部与排水。

真空预压法示意图如图5-4-1所示。

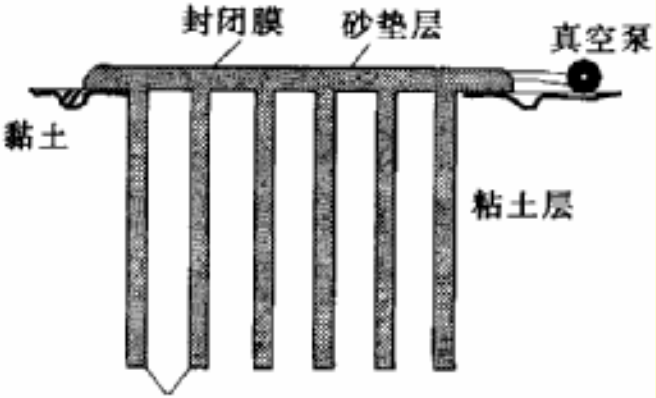


图 5-4-1 真空预压法示意图

工艺过程为：

- 首先设置竖向排水通道，表面铺设砂垫层；
- 再在砂垫层中埋设排水管道，并与抽真空装置(如射水泵)连接，形成抽气、抽水系统；
- 在砂垫层上铺设不透气封闭膜，在加固区四周将薄膜埋人土中一定深度以满足不漏水不漏气的密封要求；
- 最后通过抽气、抽水在砂垫层和竖向排水体中形成负压区；
- 持续不断抽气、抽水，孔隙水排出土体，土体发生固结。

5.4 真空预压法

Dr. Han WX

真空预压法加固原理：

真空预压法加固地基原理是土体在压力差(p_a—p_v)作用下固结，p_a为大气压力，p_v为砂垫层中气压。

真空预压下地基土体固结计算可采用Rendulic—Terzaghi加固结理论或Biot固结理论计算。地基土体除了在压差作用下固结外，抽气、抽水形成地下水位下降也促进地基土体固结。

5.4 真空预压法

Dr. Han WX

真空预压法设计和施工包括下述几方面：

(1) 排水系统设计与施工

通常采用塑料排水带、普通砂井、袋装砂井作为竖向排水体，设计计算和施工同堆载预压法。

(2)抽气、抽水系统和密封膜设计和施工在土体内部与排水。

抽气、抽水系统由水平向分布滤管、真空管路和真空泵组成。

(3)真空预压计划设计

真空预压法加固地基过程中，地基土体中有效应力不断增加，地基不存在失稳问题

(4)现场测试设计

现场测试设计同堆载预压法。

若单纯采用真空预压法不能满足地基加固设计要求，可采用真空预压和堆载预压相结合的处理方法，通常称为真空与堆载联合预压法。

第五章 排水固结

5.5 降低水位法

Dr. Han WX

降低地下水位可以改变地基中的应力场，使地基土在自重应力作用下产生排水固结。降低地下水位法加固地基的原理如图5-5—1所示。

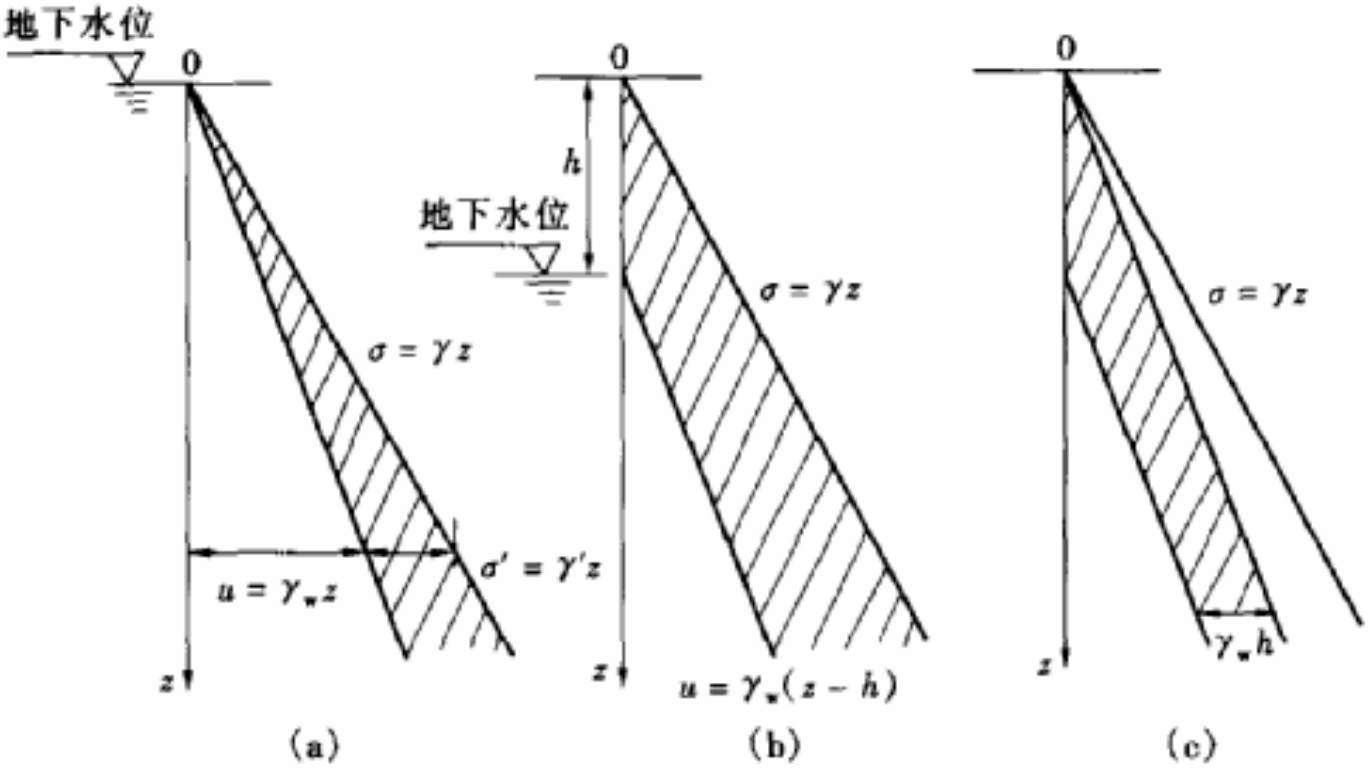


图 5-5-1 降低地下水位固结法示意图

5.5 降低水位法

$$\sigma = \gamma z \tag{5-5-1}$$

地基中静水压力为：

$$u = \gamma_w z \tag{5-5-2}$$

地基土体中有效应力为：

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma - \gamma_w) z = \gamma' z \tag{5-5-3}$$

若地基中地下水位下降至深度 h，如图 5-5-1（b）中所示，则地基土中总应力保持不变，而静水压力和有效应力表达式为：

$$\left.\begin{array}{ll} u = 0 & (z < h) \\ u = \gamma_w (z - h) & (z \geqslant h) \end{array}\right\} \tag{5-5-4}$$

$$\left.\begin{array}{ll} \sigma' = \gamma z & (z < h) \\ \sigma' = \gamma' z + \gamma_w z & (z \geqslant h) \end{array}\right\} \tag{5-5-5}$$

图 5-5-1（c）中阴影部分表示地下水位下降，地基土体固结完成后，地基土体中有效应力增加部分。对于渗透系数很小的软黏土地基，从图 5-5-1（a）表示的状态过渡到图 5-5-1（b）表示的状态需要较长的时间。对于渗透系数较大的土层，采用降低地下水位可达到较好的排水固结效果。

思 考 题 与 习 题

1. 按排水系统分类，排水固结法可分为几类？按预压加载方法分类，排水固结法又可分为几类？试分析各类排水固结法的优缺点。

2. 简述砂井地基堆载预压法设计步骤及注意点。

3. 简述真空预压法加固地基原理，分析其与堆载预压法的异同。

4. 某饱和软黏土地基，软土层厚 30m，土体不排水抗剪强度 $C_u = 12kPa$，固结系数 $C_v = 6 \times 10^4 cm^2/s$，要求采用堆载预压处理后，地基承载力达到 120kPa，工期不超过 8 个月。试完成堆载预压设计。

5. 某地基可压缩性土层 20.0m 厚，土层下为岩层。原地下水位 ±0.000 与地面平。土层土的重度为 γ，压缩模量为 E_s。当地下水位下降 −6.0m，求因地下水位下降造成的地面固结沉降量。