

塑料板排水法加固软基 工程实例集

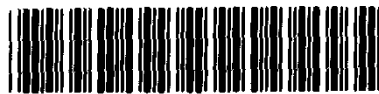
中国土木工程学会 港口工程学会
塑料排水学术委员会 编

人民交通出版社

Suliaoban Paishuifa Jiagu Ruanji Gongcheng Shiliji

塑料板排水法加固软基工程实例集

中国土木工程学会港口工程学会
塑料排水学术委员会 编



A0918519

人民交通出版社

内 容 提 要

本书收录了海堤、公路铁路、港口码头、机场、电厂灰堆场、大面积公共用地、民用建筑地基、特种工业地基 8 大类 27 个有代表性的工程实例。介绍了塑料板排水法在地基加固中的应用理论、设计方法和施工技术,对有代表性的地基加固方法进行了总结。

本书可供土木工程界科研、设计、施工人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

塑料板排水法加固软基工程实例集/刘家豪主编.-北京:人民交通出版社, 1999.10
ISBN 7-114-03506-3

I . 塑… II . 刘… III . 基础 (工程) -地基处理 IV . TU753.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 44166 号

塑料板排水法加固软基工程实例集

中国土木工程学会港口工程学会

塑料排水学术委员会 编

版式设计: 周 园 责任校对: 杨杰 责任印制: 孙树田

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.25 字数: 350 千

1999 年 10 月 第 1 版

1999 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷 总第 1 次印刷

印数: 0001 — 3500 册 定价: 26.00 元

ISBN 7-114-03506-3

TU • 00062

塑料板排水预压法加固软基设计与施工概论

杨高升 刘家豪

软土地基由于土颗粒细、孔隙比大、含水量大、孔隙中的水不易排出,所以在这类地基上修建工程主要问题是地基强度低,受荷后变形大,引起建筑物下陷量大,建筑物极易失稳。如果不对软基进行处理或所采取的措施不当,不仅加大工程量,花费过高的工程费用,拖长工程建设期限,甚至可能会造成工程失败。为了解决这个问题,人们在长期的建设实践中,积累了许多的经验,研究出许多的先进技术,塑料板排水法加固软基技术就是其中之一。

(一) 引言(前言)

排水预压固结法的机理是通过预压荷载,使被加固土体中的孔隙水排出,有效应力增加,土中孔隙体积减小,密实度加大,土体强度得到提高,地基承载力也得到提高。

排水预压加固地基方法的原理是在软基表面施加等于或大于设计使用荷载,经施工期的预压后,软基完成大部分(如 80%)或绝大部分(如 90%~95%)的沉降,预压完成后卸去预压荷载,地基有些回弹,交付使用后,地基承受使用荷载再次沉降,但沉降的量很小(仅为卸载时的回弹量加剩余沉降量,此量对建筑物的使用和安全没有影响)。达到减少地基工后沉降和提高地基承载力的目的。

自从 1925 年美国工程师摩然(D. J. Moran)提出砂井预压法并获取专利以来,经过 70 多年的工程应用,充分证明砂井排水预压法是一种行之有效的地基加固方法,并在全世界被广泛应用。同样,作为排水预压固结法竖向排水体的塑料排水板是继杰尔曼(Kjellman, 1934)纸质排水板之后,由维格(O. Weger, 1971)提出来的一种竖向排水新型材料,它由聚氯乙烯制成透水芯带,外套无纺滤布制成。这种型式的竖向排水体一经出现,就迅速被推广应用,也是一种行之有效的软土地基加固的新技术。

自 1980 年河海大学研制出我国第一块塑料排水板,1981 年天津港湾工程研究所研制成功我国第一台专用塑料排水板插板机,同年第一次在天津塘沽新港码头堆场软基加固工程中开始应用以来,塑料排水板由于具有性能好、质量可靠、施工方便、工效高、工程费用低、对土的扰动小、可用轻型机械在超软土上施工等优点,迅速在国内得到推广,大有代替砂井、袋装砂井的趋势。现在塑料板排水法在我国应用已十分广泛,已广泛应用于港口码头、电厂、钢厂等原料堆场,机场跑道、铁路路堤、高速公路、软基上的堤坝、造陆工程、油罐充水预压和冷库及水池等类工程的地基加固中,并且都取得了良好的效果。单从塑料排水板每年的用量(表 1)就可看出其发展情况。

1990 年以来塑料排水板用量表

单位:万 m 表 1

1990 年	1991 年	1992 年	1993 年	1994 年	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年
965	2 516	4 574	5 566	6 000	6 500	6 500	6 500	约 7 000

(二) 固结理论

根据 Terzaghi 一维固结理论,地基土固结所需时间 t 与最大排水距离 H 之间的关系如下式所示:

$$t = \frac{H^2 T_v}{C_v} \quad (1)$$

式中: T_v ——时间因子;

C_v ——固结系数。

由式(1)可知,地基土固结速率与土体固结系数有关,也与最大排水距离有关,而且是二次方关系。在地基中设置竖向排水系统可有效缩短最大排水距离 H ,大大缩短地基土固结所需时间。

塑料排水板与砂井、袋装砂井都是排水预压法竖向排水通道材料,作用相同,排水机理相同,其固结理论和设计方法也基本相同。因此,可将排水板换算成等效直径的砂井对塑料板排水预压法进行设计和研究。

1. 理想井固结理论

对于塑料排水板加固的地基,可采用太沙基(Terzaghi)固结方程:

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

式中: u ——孔隙水压力(超静孔隙水压力);

C_h ——水平向固结系数;

C_v ——竖向固结系数。

根据边界条件直接求解,在数学上是十分困难的。纽曼(A. B. Newman)和卡锐罗(N. Carri-lo)证明可用分离变量法求解:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_r}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_r ——水平向固结超静水压力;

u_z ——竖向固结超静水压力。

太沙基(Terzaghi)给出了瞬间加荷条件下,无垂直排水井地基竖向固结理论公式,条件为:

初始条件: $u|_{t=0} = u_0$

边界条件: $\begin{cases} u|_{z=0} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H} = 0 \end{cases}$

式中: u_0 ——初始孔隙水压力;

H ——压缩层厚度($z = H$ 时,下面为不透水层,即单面排水)。

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{2}{H} \int_0^H u_0 \sin \frac{Mz}{H} dz \right) \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v}$$

式中: $M = \frac{(2m-1)}{2} \pi$

T_v ——时间因素, $T_v = C_v t / H^2$

若 u_0 在整个压缩层内为均匀分布, 即为常量, 则:

$$u(z, t) = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v}$$

整个压缩层 t 时刻竖向平均孔隙水应力 $\bar{u}$, 竖向平均固结度 $\bar{U}_v$, 分别为:

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{H} \int_0^H u dz = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (4)$$

$$\bar{U}_v(t) = \frac{u_0 - \bar{u}(t)}{u_0} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (5)$$

对于工程应用, 取第一项即有足够的精度, 即: $\bar{U}_v(t) = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}}$

如图 1, 巴隆(Barron)最先给出了理想井在等垂直应变和自由垂直应变两种边界条件下的水平向固结方程的解。当井径比 $d_e/d_w > 5$, 时间因素 $T_h \geq 0.1$ 时, 两种解答几乎有相同的平均固结度, 此时:

$$u = \frac{u_0}{r_e^2 \cdot F(n)} \left[r_e^2 \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{(r^2 - r_w^2)}{2} \right] e^{\lambda} \quad (6)$$

式中: u ——超静孔隙水压力;

r_e ——等效土柱的半径($d_e/2$);

r_w ——排水井的半径($d_w/2$);

$$\lambda = -\frac{8T_h}{F(n)}; T_h = \frac{C_h t}{d_e^2}; n = d_e/d_w;$$

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

因此仅考虑径向流动时的平均固结度为:

$$\bar{U}_r(t) = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F(n)}} \quad (7)$$

2. 考虑涂抹与井阻影响的非理想井固结理论

1) 涂抹影响的考虑

理想井实际上是不存在的, 打设排水井不可避免地会改变板周土的性质, 其扰动的程度与打设机械、打设方式、土的特性(灵敏度、宏观结构)等因素有关。

若考虑涂抹的影响, 在巴隆(Barron, 1948)和汉斯保(Hansbo, 1979, 1981)的分析中, 都假定在板周有一涂抹扰动土环存在, 其直径为 d_s , 渗透系数为 K_s , 且 $K_s < K_h$ (不扰动土的渗透系数), 如图 2a)。在这新的边界条件下, 土体的平均固结度仍可用式(6)表示, 仅因子 $F_s(n)$ 稍加改变。

$$F_s(n) = \ln\left(\frac{n}{s}\right) \frac{n^2}{n^2 - 1} - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} + \left[\frac{K_h}{K_s}\right] \ln(s) \quad (8)$$

式中: $S = \frac{d_s}{d_w}$; d_s ——涂抹区的直径。

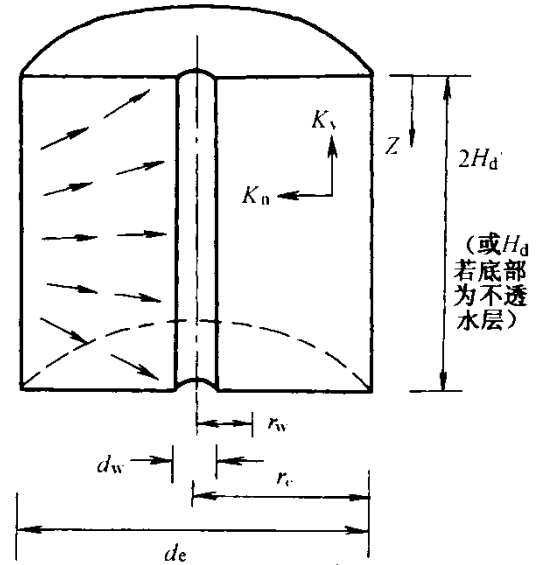


图 1 等效圆柱体剖面

因 $n = \frac{d_e}{d_w}$ 较大, 所以 $F_s(n) \approx \ln\left(\frac{n}{s}\right) - \frac{3}{4} + \frac{K_h}{K_s} \ln(s)$

可以看出涂抹扰动影响愈大, 即 d_s 愈大, K_s 愈小, 则 $F_s(n)$ 因子愈大, 达到同样固结度, 所需的时间也愈长。图 2b) 表示出了涂抹对固结的影响。

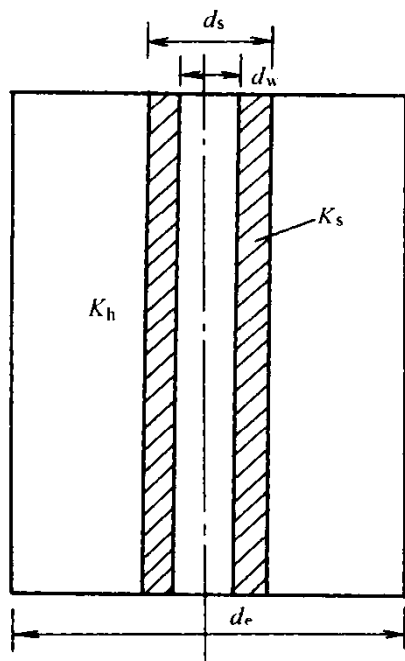


图 2a) 涂抹扰动土环示意

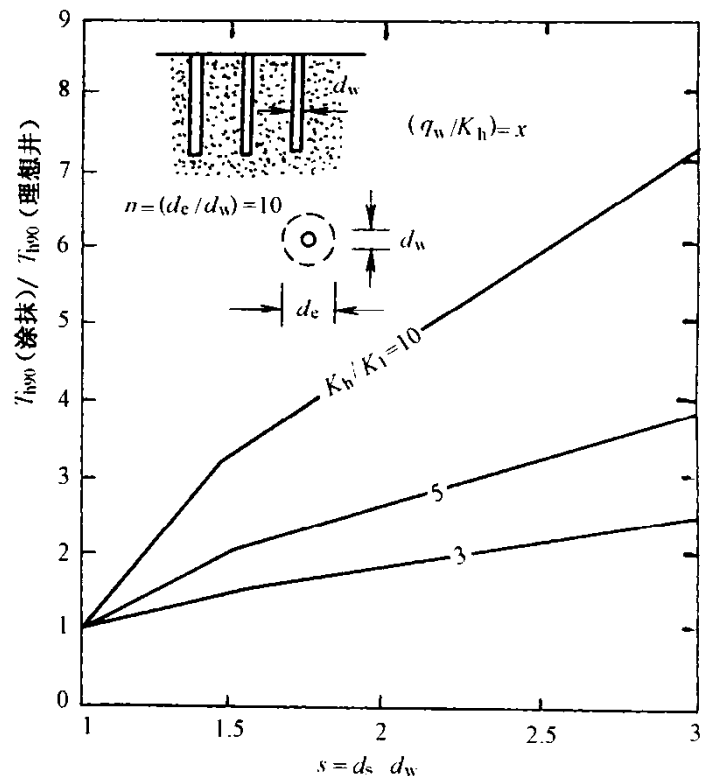


图 2b) 涂抹对固结速率的影响

2) 井阻影响的考虑

细长的排水板, 在固结期间其通水能力受到影响, 则整个固结过程将被推迟。Barron (1948) 最先提出了等应变条件的解, 对于同样边界条件 Hansbo (1981) 给出了类似的解。土体内某一深度处的固结度仍可用式(6)表示, 但计算因子需改为:

$$F = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{K_h}{K_n} \ln s - \frac{3}{4} + F_r \quad (9)$$

式中: $F_r = \pi z(2l - z) \cdot \frac{K_h}{q_w}$ ——计及井阻的因子;

l ——排水板特征长度;

$q_w = A_w \cdot K_w$ ——排水井纵向通水量;

z ——某点至排水面的距离。

浙江大学的谢康和博士则就井阻影响考虑了 $F_r = \pi G$ 的因子,

其中 $G = \left(\frac{K_h}{K_w}\right) \left(\frac{l}{d_w}\right)^2 = \frac{\pi}{4} l^2 \frac{K_h}{q_w}$ 与 Hansbo 的解, 略有不同。

3) 同时考虑涂抹及井阻影响

谢康和博士(1987)给出了理论解。地基中任一深度 z 处径向排水平均固结度为:

$$U_r = l - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-\beta_r t} \quad (10)$$

地基径向排水平均固结度 $\bar{U}_r$ (沿深度范围内 U_r 的平均值):

$$\bar{U}_r = l - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_r t} \quad (11)$$

式中: $\beta_r = \frac{8C_h}{(F+D)d_e}$; $D = \frac{8G(n^2-1)}{M^2 \cdot n^2}$;

$$F = \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{K_h}{K_s} \ln s - \frac{3}{4} \right] \frac{n^2}{n^2-1} + \frac{S^2}{n^2-1} \left(1 - \frac{K_h}{K_s} \right) \left(1 - \frac{S^2}{4n^2} \right) + \frac{K_h}{K_s} \cdot \frac{1}{n^2-1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right);$$

$$G = \left(\frac{K_h}{K_w} \right) \left(\frac{l}{d_w} \right)^2; M = \frac{2m+1}{2} \pi (m=1, 2, 3 \cdots)$$

其中: G ——井阻因子;

$n = \frac{d_e}{d_w}$ ——井径比;

$S = \frac{r_s}{r_w}$ ——涂抹交应比。

对于竖向和径向排水组合情况,在一次瞬时加荷时有卡锐罗(N. Carrilo)定理: $\frac{U}{U_0} = \frac{U_s}{U_0} \cdot \frac{U_r}{U_0}$
则有:

$$U_{rs} = 1 - (1 - U_r)(1 - U_s) \quad (12)$$

为了简化计算,取其级数的首项作为近似式:

$$U_r = 1 - e^{-\beta_r}, U_s = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}}$$

式中: $\beta_r = \frac{8C_h}{(F+\pi G)d_e^2}$ $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$

$$\text{则: } U_{rs} = 1 + e^{-\beta_r t} \left(\frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \right) = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\beta_{rs} t} \quad (13)$$

式中: $\beta_{rs} = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} + \frac{8C_h}{(F'+\pi G)d_e^2}$

$$F' = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{K_h}{K_s} \ln(S) - \frac{3}{4}$$

3. 分级加载下的固结理论

结合上述固结理论,应用高木俊界法可得分级加载下的地基平均固结度的计算公式:

$$\bar{U} = \sum_{n=1}^N \frac{R_n}{P_t} \left[(t_n - t_{n-1}) - \frac{8}{\pi^2 \beta} e^{-\beta t} (e^{\beta t_n} - e^{\beta t_{n-1}}) \right] \quad (14)$$

式中: $\beta = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} + \frac{8C_h}{(F+J+\pi G)d_e^2}$;

C_v 、 C_h ——分别为竖向、径向固结系数;

H ——竖向排水最长的渗透路径长度;

d_e ——排水板的有效影响直径;

t ——所求固结度的历时;

P_t —— t 时固结度的总荷载;

R_n ——第 n 级加荷的速率, $R_n = (P_n - P_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})$;

t_n 、 t_{n-1} ——第 n 级等速加荷终点和始点的历时(从零点计起),当 $t_{n-1} \leq t < t_n$ 时, t_n 改为 t ;

J ——涂抹因子, $J = \ln S \left(\frac{K_h}{K_s} - 1 \right)$;

G ——井阻因子, $G = \left(\frac{K_h}{K_w} \right) \left(\frac{l}{d_w} \right)^2$ 或 $G = \left(\frac{Q_h}{Q_w} \right) \frac{l}{4d_w}$;

F ——井径比因子, $F = \ln n' - \frac{3}{4}$;

n' ——井径比, $n' = \frac{d_e}{d_w}$, d_w 为塑料排水板折算直径;

S ——涂抹比, $S = \frac{d_s}{d_w}$, d_s 为排水井涂抹层的直径;

Q_w ——单位水力梯度作用下, 排水板的通水能力;

Q_h ——单位水力梯度作用下从地基土流入排水板内的流量;

l ——排水板的打入深度;

K_h 、 K_s 、 K_w ——分别为地基土、涂抹层土和排水板渗透系数。

4. 塑料板未打穿软土地基时的固结理论

若软粘土层较厚, 塑料排水板未能打穿软土层, 如图 3 所示。塑料排水板打设深度为 L , 压缩层范围内软粘土层未设置塑料排水板区厚度为 H , 在荷载作用下地基平均固结度可采用下述方法计算: 塑料排水板区平均固结度采用式(13)计算 $\bar{U}_{rz}$; 未设塑料排水板区平均固结度采用一维固结理论计算, 计算时将塑料排水板底面视为排水面。整个软粘土层平均固结度 $\bar{U}$ 可采用下式计算:

$$\bar{U} = \lambda \bar{U}_{rz} + (1 - \lambda) \bar{U}_z \quad (15)$$

式中: $\bar{U}_z$ ——塑料板区平均固结度;

$\bar{U}_{rz}$ ——未设置塑料板区平均固结度;

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \quad (16)$$

式中: $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$;

λ ——塑料板深度与软土层总厚度之比值, 其表达式为:

$$\lambda = \frac{L}{L + H} \quad (17)$$

式中: L ——塑料板深度;

H ——未设置塑料板区厚度。

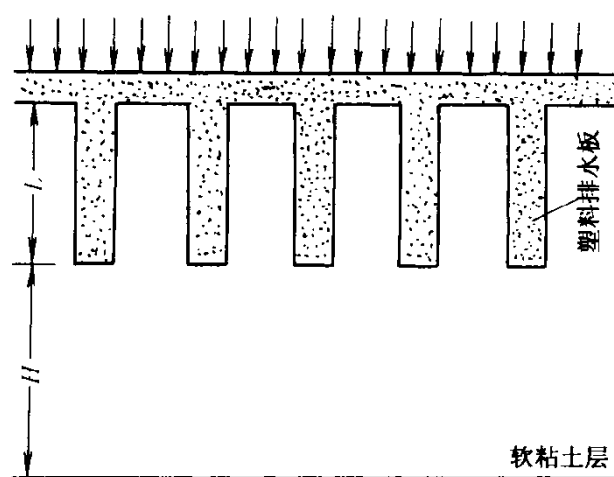


图3 塑料排水板未打穿软土土层情况

5. 塑料板排水地基抗剪强度的增长计算

在荷载作用下地基土体发生固结, 固结过程中, 超孔隙水压力消散, 有效应力增大, 地基土体强度提高。同时, 在荷载作用下, 地基土体产生蠕变, 还有可能导致强度衰减。因此, 在荷载作用下, 地基中某点某时刻的抗剪强度 τ_f 可以表示为:

$$\tau_f = \tau_{f0} + \Delta\tau_{fc} - \Delta\tau_{ft} \quad (18)$$

式中: τ_{f0} ——地基中某点初始抗剪强度;

$\Delta\tau_{fc}$ ——由于固结而增长的抗剪强度增量；

$\Delta\tau_{ft}$ ——由于蠕变引起的抗剪强度衰减量。

考虑到 $\Delta\tau_{ft}$ 尚难计算, 曾国熙(1975)建议将式(18)改写为:

$$\tau_f = \eta(\tau_0 + \Delta\tau_{fc}) \quad (19)$$

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, 并建议在工程设计中取 $\eta = 0.75 \sim 0.90$ 。

正常固结粘土的有效应力指标抗剪强度表达式为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (20)$$

式中: ϕ' ——土体有效内摩擦角；

σ' ——剪切面上法向有效应力。

由图 4 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:

$$\sigma' = \frac{\cos^2 \phi'}{1 + \sin \phi'} \sigma'_1 \quad (21)$$

由于土体固结, 有效应力增量 $\Delta\sigma'_1$ 引起土体抗剪强度增量表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{fc} &= \Delta\sigma' \operatorname{tg} \phi' \\ &= \frac{\sin \phi' \cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \Delta\sigma'_1 \\ &= K \Delta\sigma'_1 \end{aligned} \quad (22)$$

在荷载作用下, 地基中某点总主应力增量为 $\Delta\sigma'_1$ 。若该点固结度为 U , 则相应有效主应力增量 $\Delta\sigma'_1$ 为:

$$\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u = U \Delta\sigma_1 \quad (23)$$

式中: Δu ——超孔隙水压力增量。

结合式(18)、式(21)和式(22)可得:

$$\begin{aligned} \tau_f &= \eta[\tau_0 + K(\Delta\sigma_1 - \Delta u)] \\ &= \eta[\tau_0 + KU\Delta\sigma_1] \end{aligned} \quad (24)$$

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

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 ——荷载引起地基中某点超孔隙水压力增量。

6. 说明

井阻和涂抹作用对砂井地基(包括排水板)固结效果的影响是客观存在的。诚然, 采用非理想井固结理论指导工程实践是合理的, 有利于发展排水固结技术, 有利于分析实际问题, 然而按照规范采用理想井固结理论砂井地基设计也应该是可以的, 它具有参数少, 易于确定, 易于应用, 便于分析等优点。但是在实际工程中应用这一理论应该是有条件的, 即: 必须选用透水性良好的、通水量较大的排水板, 使井阻因子 $G < 0.1$, 以减少井阻对固结效果的影响; 尽量

降低施工对地基扰动的影响,以降低涂抹对固结效果的影响,或者根据工程经验,按理想井理论计算的结果考虑一个折减系数(如 0.85 ~ 0.95)。

(三)塑料板排水预压法的设计

在软基上修建工程出现的问题因工程的规模和性质、地基土层的厚度和土的物理力学性质等而异,要消除或解决这些对工程的安全和使用带来的危害所采取的措施,也因前述的因素及工程特点、施工条件、工程费用等而异,因而在进行工程软基加固设计时,要对上述各项因素进行充分的调查研究,在此基础上,拟定几种软基加固处理方案进行技术和经济的比较,综合予以评价,确定最优的软基加固实施方案。

软基加固设计的一般顺序如图 5 所示:



图 5 软土地基处理一般设计顺序

具体的设计内容因所采用的软土地基加固方法而有所不同,当进行塑料板排水预压法加固软基设计时,可按图 6 的设计顺序进行。

排水预压固结法包括排水和预压两个不可分离和缺省的部分。预压有利用堆积重物进行预压的堆载预压法和利用大气压力进行预压的真空预压法两类。

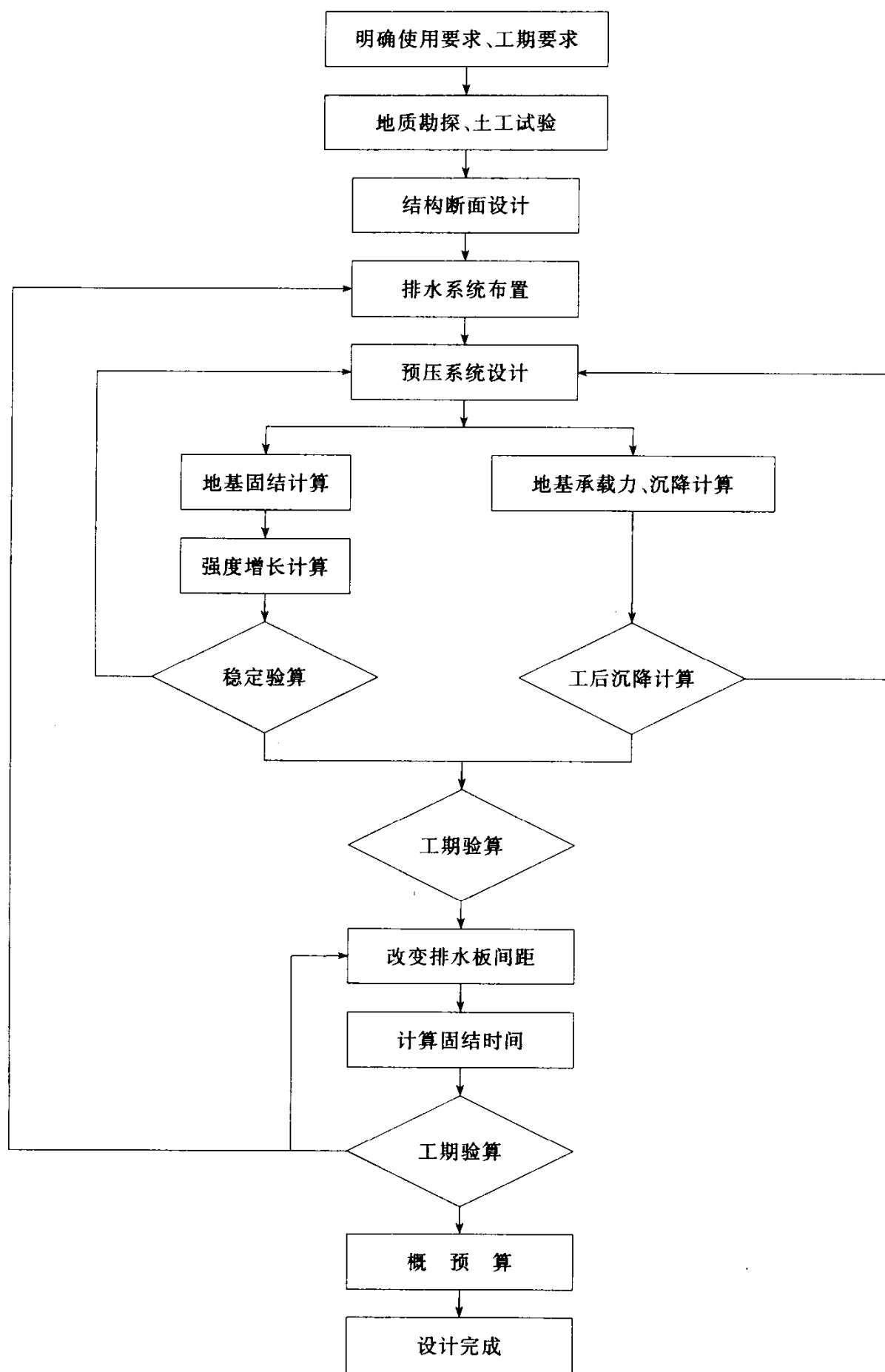


图 6 塑料板排水预压固结法设计顺序

1. 排水系统布置

排水系统包括作为竖向排水体的塑料排水板,水平排水的排水砂垫层以及设于其间的盲沟,排水垫层外的排水沟。

1) 排水砂垫层

应根据软土层的土质情况、软土层的厚度、结构物的布置等确定排水系统的布置。

a. 排水垫层的材料

一般为含泥量少的中粗砂,无纺土工布。在一些砂源缺乏的地方也有用粒径小于 10cm 的碎石渣作为排水垫层。有一些工程如淤泥地基上修筑海堤,为了防止堤身抛石和垫层的砂碎石材料陷入淤泥中,先在淤泥表面铺 1~2 层有纺(编织)土工布,起隔离、传力均匀和加劲(筋)作用。

b. 排水垫层的面积与厚度

排水砂垫层的铺垫面积应大于建筑物的外轮廓面积,其厚度随铺设的方法而定。当采用陆抛的方法铺设时,垫层的厚度一般为 50cm;当采用船抛的方法铺设时,垫层的厚度一般为 100cm 以上。

2) 塑料排水板

a. 材料

国内通常使用的是 SPB-1、SPB-1B、SPB-1C 型塑料排水板,其断面为 $100\text{mm} \times (4 \sim 6)\text{mm}$ 。在选择排水板时,应根据加固土层厚度及工程的性质,选择相应规格的塑料排水板。考虑到我国塑料排水板生产的实际情况,要严格对排水板的验收检验制度,以保证所用排水板的质量。塑料排水板应完全满足中华人民共和国行业标准《塑料排水板质量检验标准》(JTJ/T257),以及《塑料排水板施工规程》(JTJ/T256)的要求,其核心是纵向通水性和滤膜的强度。

b. 布置

塑料排水板按正三角形或正四方形布置,排水板的间距 d 一般为 $1.0 \sim 2.0\text{m}$,根据允许加固时间的长短、土质情况及工程费用确定。其影响圆柱的直径 d_e 为:

当三角形布置时 $d_e = 1.05d$

当正四方形布置时 $d_e = 1.13d$

c. 塑料排水板换算直径

竖向排水通道采用塑料排水板时,根据国内大量的室内及现场试验研究结果表明,国内通常使用的断面为 $100\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的塑料排水板,其排水预压加固结地基的效果与 7cm 直径袋装砂井排水预压加固的效果相同,因而可折合成 7cm 直径的砂井进行设计,亦可按下式计算塑料排水板的等效换算直径 d_w :

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$$

d. 排水板的插设深度

一般应达处理软土层的层底,若软土层较厚(如超过建筑物底宽的 2 倍时),排水通道的打设深度为 $1/2$ 建筑物底宽,但排水板必须穿过土体稳定计算的弧形滑动面至少 2m。

3) 盲沟及排水沟

为了让砂垫层中的水能尽快顺畅地排到加固区外,最好在砂垫层底下间隔着设置盲沟。盲沟可选用塑料盲沟,也可用传统的砂、碎石盲沟,盲沟的坡度为 $1/1000$,与设在加固区外的排水沟连通。

2. 预压荷载及分级

1) 堆载预压

a. 堆载材料选择

堆载预压所用的压载材料,对于海堤、路堤为堤身建筑材料;对于围海造陆工程和码头堆场场地等则用砂土、石料或矿渣等作为临时压载物,预压完后移走。

b. 预压荷载量的确定

根据使用要求的承载力及要求施工期完成(消除)的沉降、土的性质确定,一般应等于设计的荷载,同时,根据工程的性质对工后沉降量要求的严格程度考虑是否要超载预压。当为了缩短堆载预压时间,或为了进一步减少工后沉降量则采用加大预压荷载的措施,以使施工期完成的沉降量大于使用要求的沉降,以此作为提高预压效果保证率的一项措施,此措施即为超载预压的措施。

c. 预压荷载分级

软基土质较软,地基承载力较低,当采用堆载预压时,为了避免地基发生塑性变形而失稳,需要控制加载速度。分级加载进行预压要与地基土的强度增长速度相应,每级预压荷载不应超过前级荷载作用下地基强度增加后的允许承载力。对于正常压密土增长后的抗剪强度计算按式(24)计算

当有十字板强度指标时, τ_z 为深度 z 处的抗剪强度,可由下式计算:

$$\tau_z = \tau_0 + K_z \quad (25)$$

式中: τ_0 ——地基表面天然强度;

K ——十字板剪切试验强度增长斜率;

Z ——深度。

2) 真空预压

a. 真空预压荷载量确定

当采用真空预压时,荷载不需要分级,可一次加足预压荷载。根据工程实践经验,真空预压所能达到的真空压力(真空膜内外的压力差)最大可达 0.09MPa,一般为 0.08 ~ 0.085MPa。

b. 抽真空系统设计

真空预压要分区进行,每分区面积视加固面积大小而定,一般为 3 000 ~ 10 000m²,国内最大可达 30 000m²。

抽真空系统由以下几部分组成:铺于排水砂垫层中间的抽真空滤管、干管、管路出膜器、止回阀、射流式抽真空泵(包括离心式水泵)、密封薄膜、粘土密封沟,每一台(套)射流式抽真空泵系统可处理 1 000 ~ 1 500m²,每分区可设若干台(套)射流式抽真空泵系统。

抽真空滤管通常用 3in (7.6cm) 钢管或塑料管制成,管上开许多小孔,外绕细钢丝包无纺布滤膜,铺于排水砂垫层中间,并与 4in (10.2cm) 的干管相连,通过管路出膜器与密封膜外的抽真空管路连接到射流真空泵上。

密封膜通常用 2 ~ 3 层塑料薄膜制成,整体覆盖在砂垫层上,并埋没于加固区四周的密封沟内,回填粘土封死。若加固区内有与外界相通的透水层时,需沿密封沟布设密封墙,以防不能达到和维持必要的真空度,降低预压的效果。

进行真空预压时,要求密封膜下的真空度长期稳定在 80kPa 以上,真空泵上真空度稳定在 90 ~ 95kPa 水平上。

3. 固结计算

在真空预压设计阶段,固结计算主要解决:①通过预压所达到的固结度以估算施工期间所完成的沉降量及工程完成后的剩余沉降量(又称工后沉降量),推算地基强度的增长,验算地基的稳

定性;②根据工程的要求,预估达到某个固结度所需要的时间,以确定工程进度和施工工期等。

前面已将固结理论和固结计算方法作了介绍,此处仅根据设计顺序作简单的归纳。目前塑料排水板预压地基的固结计算有两类,根据研究,一类是不考虑施工扰动和涂抹作用的影响,按理想井进行设计计算,对于加固深度 $< 15\text{m}$ 的塑料板排水地基,可按此设计计算;另一类,要考虑施工扰动和涂抹作用的影响,按非理想井进行设计计算,对于加固深度 $> 15\text{m}$ 的塑料板排水地基,由于扰动和涂抹作用的影响较大,将会延迟地基的固结效果,必须按此情况进行固结计算。

1) 按理想井设计计算

a. 预压荷载为瞬间施加的情况

总平均固结度按式(12)计算,竖向平均固结度 $\bar{U}_v$ 按式(16)计算, U_h 按式(7)计算。

b. 预压荷载为分级施加的情况

按式(14)计算,式中 β 为计算参数,可从一般地基手册中查到。

2) 按非理想井设计计算

一般为分级施加预压荷载,可按式(14)计算,但式中 β 为包含涂抹因子 J 及井阻因子 G 在内的计算参数。

3) 对塑料板未打穿软土层的固结计算

当软土层较厚时,塑料排水板不能打穿软土层,这种情况的固结计算可按式(14)计算。

4) 查表法进行固结计算

在土质条件与排水系统布置已确定时,固结度仅与固结时间因数有关,也就是仅与固结时间有关,因而有人制成 U_v-T_v , U_h-T_h 曲线,可以快速方便地计算固结度,见图 7 ~ 图 8。

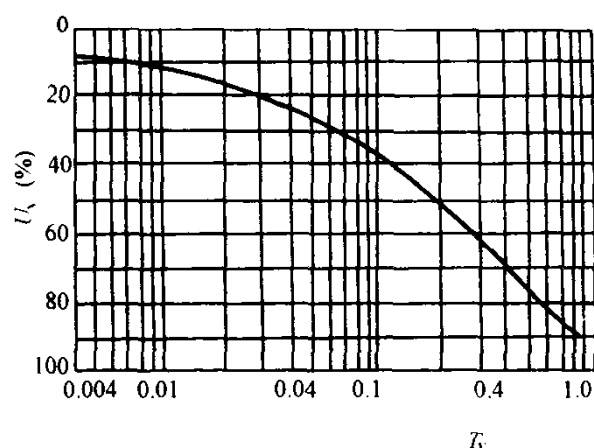


图 7 U_v-T_v 关系曲线

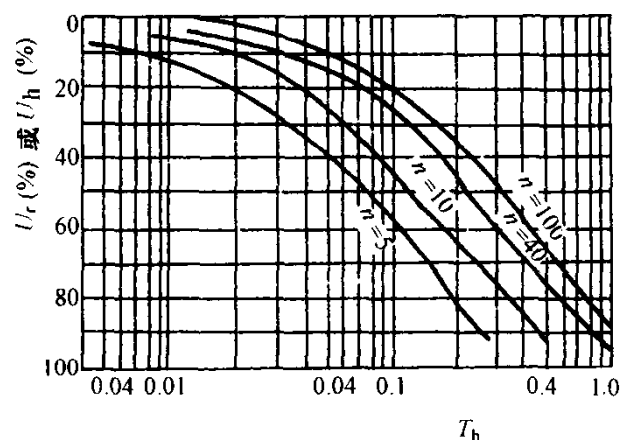


图 8 U_h-T_h 关系曲线

南京水利科学研究院林孔锚根据国内工程的实践和研究,对竖向排水地基三向固结计算提出一种查图计算的方法。以塑料板排水预压加固地基为例,工程上通常要求预压加固后的固结度为 80%,塑料排水板的等效换算直径为 7cm,以此为基本条件,计算出不同固结系数、不同排水板布置(不同的有效影响直径 d_e)时的固结时间 $t_{80\%}$,制成固结时间 $t_{80\%}$ 与有效影响直径 d_e 的关系图如图 7 a),以及计算出任意固结度与固结度为 80%时的固结时间的相关关系,制成固结度 U_h 与固结时间相关系数 B_1 的关系曲线如图 9b),由图 9a)查出任意 d_e 时的 $t_{80\%}$,再由图 9b) 查出任意固结度所对应的 B_1 ,即可得出达到任意固结度所需固结时间 $t = t_{80\%} \times B_1$ 。

如果要进行的是砂井地基的固结计算,也可应用这两个图,只要从图 10 上查出任意井径比 $n(n = d_e/d_w)$ 在不同间距时的固结时间相关系数 B_2 ,即可很方便的得出达到任意直径砂

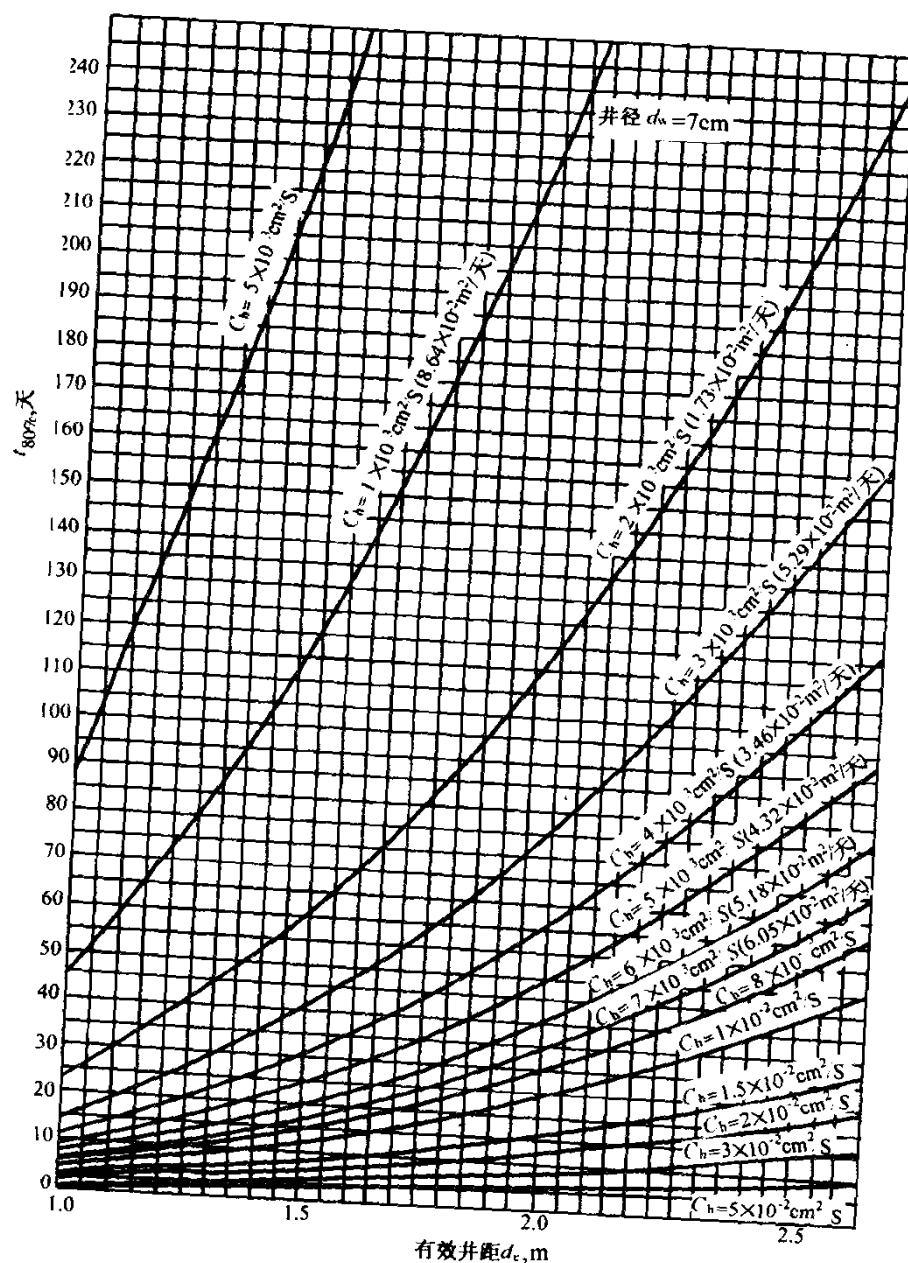


图 9a) $d_e - t_{80\%}$ 关系曲线

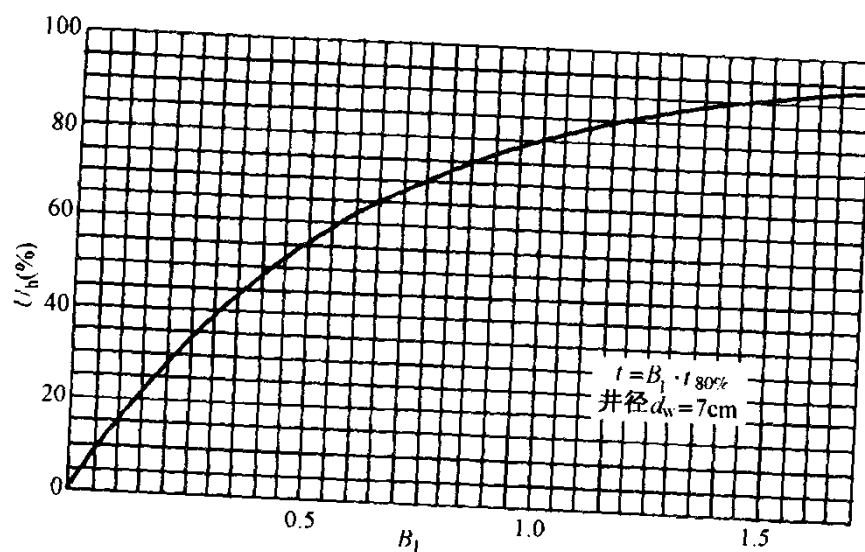


图 9b) $B_1 - U_h$ 关系曲线

井、任意间距在任意要求固结度时的固结时间 $t = t_{80\%} \times B_1 \times B_2$ 。

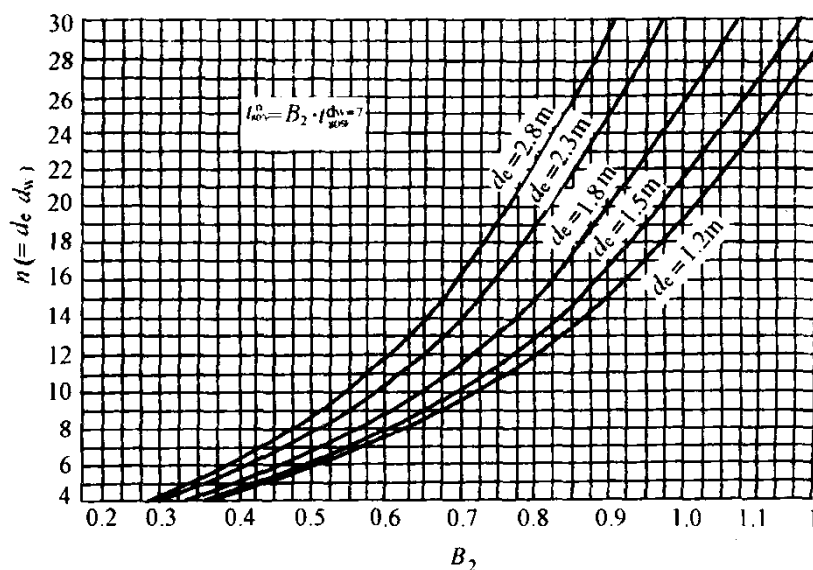


图 10 B_2-n-d_e 关系曲线

4. 沉降量及残余沉降量计算

1) 沉降量计算

排水预压固结法加固处理软土地基的作用就是使地基在等于设计荷载的预压作用下完成预计发生沉降的绝大部分。因而在设计阶段要计算设计荷载(建筑物自重和外加荷载)作用下可能发生的总沉降量,通过地基加固措施在施工期可能完成的沉降量,工程投产后还可能发生的残余沉降量。

从理论上说,软土地基的总沉降由瞬时沉降量 S_d 、固结沉降量 S_c 、次固结沉降量 S_s 三部分组成。

瞬时沉降是指由于地基土质强度很低,初始受到荷载作用后地基产生塑性变形,所加物料陷入软土中和将土向侧面挤出,由此所产生的沉降。这部分沉降量很难通过理论计算、也很难测量出来,主要根据经验估算,根据土质、施工方法、施工速度等因素考虑一个因侧向变形和物料陷入地基引起的附加沉降经验系数 m_s ,一般为 1.2 ~ 1.4,即瞬时沉降 S_d 约为固结沉降量 S_c 的 20% ~ 40%。

固结沉降是指由于预压荷载等附加荷载作用使土孔隙中的水排走,土颗粒被挤紧密所发生的沉降。固结沉降量 S_c 用分层总和法计算。

次固结沉降指土骨架在持续荷载作用下发生蠕变所产生的变形,一般不作计算。但是,对于可塑性大的土和有机质土次固结沉降要占总沉降量的相当比例,不得不考虑。

总沉降量(也称最终沉降量) S_∞ 可按下式计算:

$$S_\infty = S_d + S_c + S_s \quad (26)$$

2) 残余沉降量(工后沉降量)计算。

在计算出总沉降量后,可算出设计(使用)荷载作用下的沉降,也可算出建筑物的残余沉降 S (或称建筑物的工后沉降),其计算式为:

$$S = S_e + S_c + S_d - US_{cb} \quad (27)$$

式中: S_e ——预压卸载时的地基回弹量;

S_{cb} ——设计使用要求荷载作用下的沉降量。

如果计算出的 S 超过设计规定,就要返回重新考虑预压的荷载量、预压分级、预压的时间。