第四章 桩基础与深基础

Pile foundation and deep foundation

§4.1 概述

§4.2 桩的分类与应用

§4.3 竖向承压桩的荷载传递

§4.4 竖向承压桩单桩承载力的确定

§4.5 桩的抗拔承载力与桩的负摩阻力

§4.6 桩在水平荷载下的性状及承载力的确定

§4.7 桩基的沉降计算

§4.8 桩基础的设计

§4.9 桩基技术和理论的新发展

§4.10 墩基础 §4.11 沉井基础

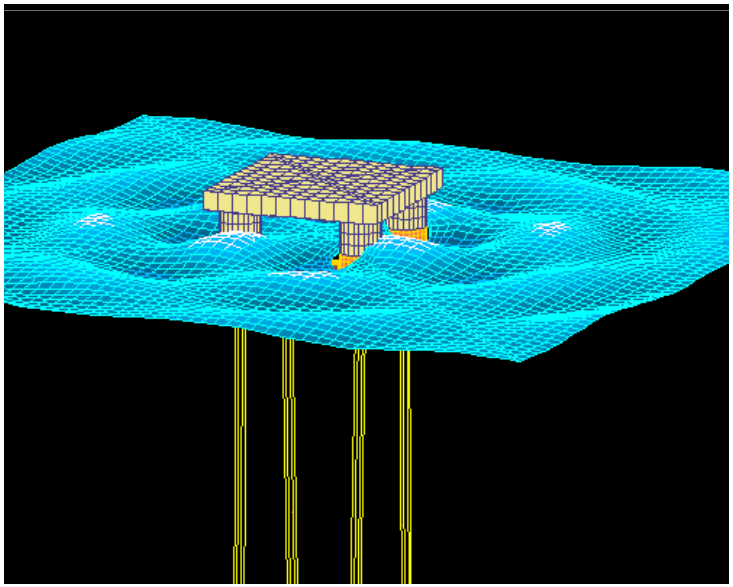
§4.5 桩的抗拔承载力与桩的负摩阻力

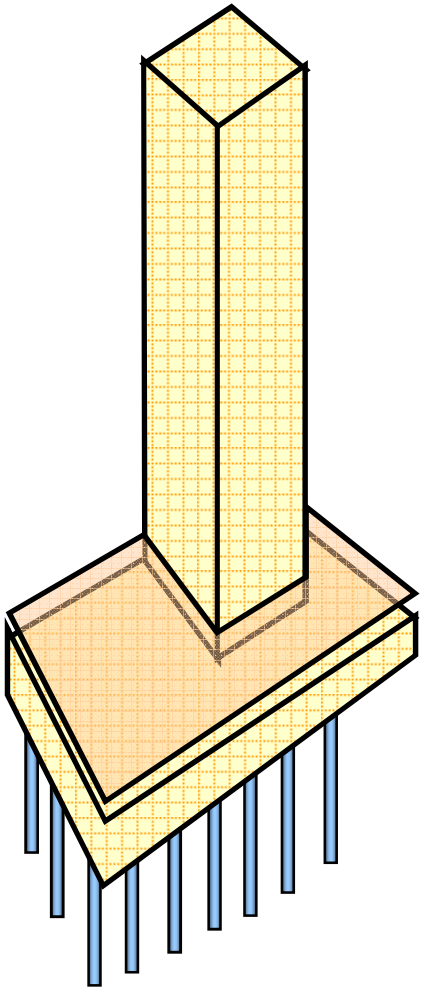
Pullout strength and negative shaft friction

一般的竖向受压桩都是桩在竖向荷载下相对于桩周土有向下的相对位移，桩周土则对桩身作用向上的摩阻力，但有时会发生相反的情况，这就是抗拔桩和发生负摩擦力的工作状态。

4.5.1 单桩的抗拔承载力

抗浮桩 抗拔桩

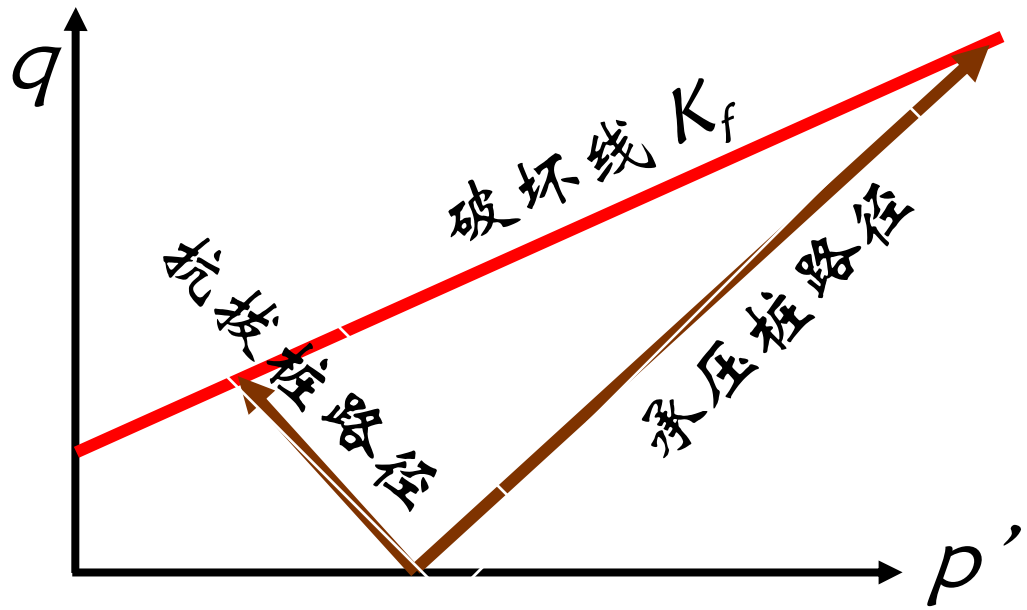


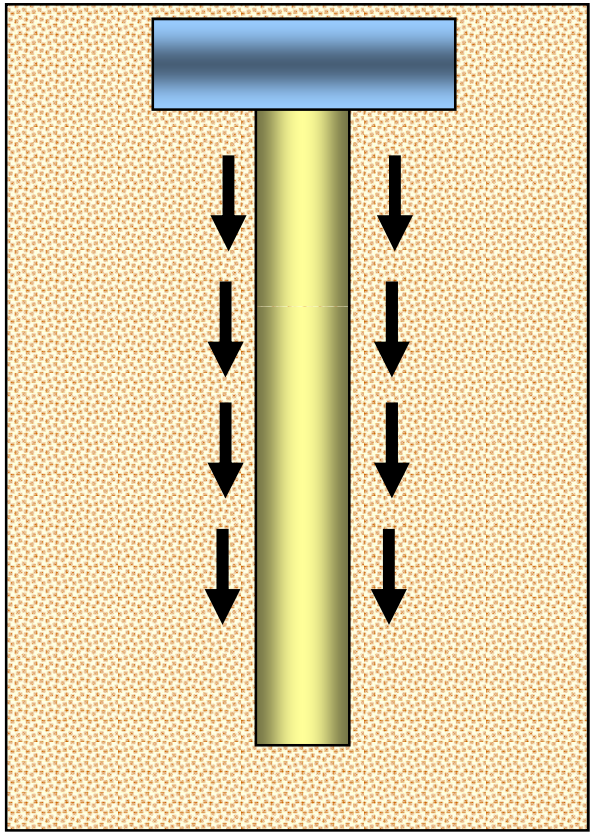


p=(sig1+sig3)/2; q=(sig1-sig3)/2

1） 抗拔承载机理特点

抗拔时，桩周土的应力状态、应力路径和土的变形与承压桩不同。一般抗拔的摩阻力小于抗压的摩阻力。

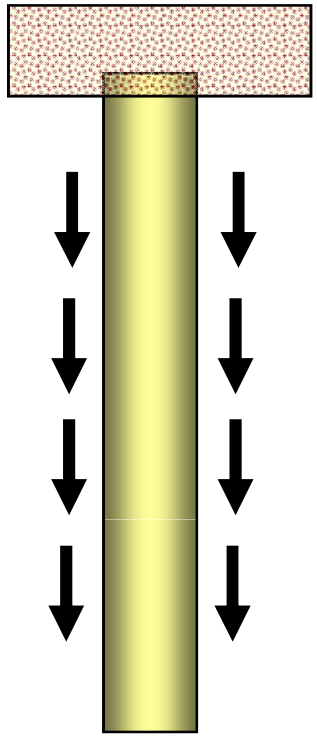




2） 单桩抗拔承载力特征值T_a

现场抗拔静载荷试验----针对重要建筑物

下列公式 ---- 针对非重要建筑物



$$T_a = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{pi} q_{sia} u_i l_i$$

第i层土抗拔折减系数λ_{pi}

砂土0.5-0.7，粉，粘土0.7-0.8

P177 式4-9

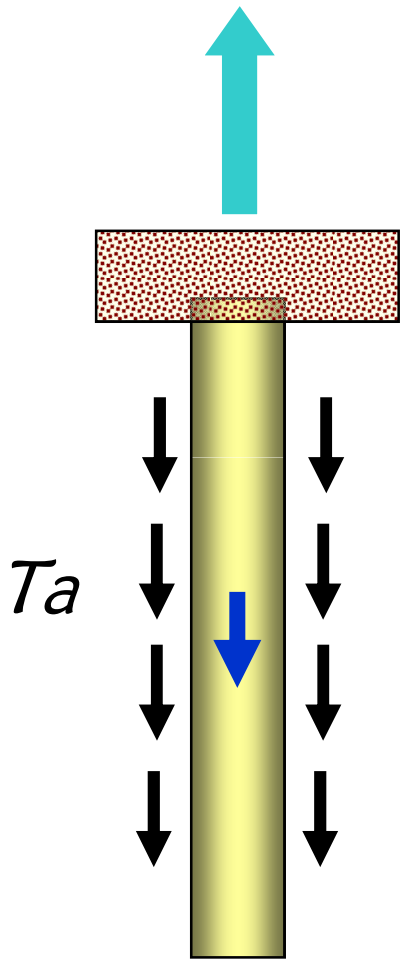
单桩的抗拔验算

$$N_k \le T_a + \gamma_G G_p \qquad T_a = Tuk/2$$

N_k 相应于作用标准组合，单桩上拔力

G_p 为桩的自重，水下为浮重

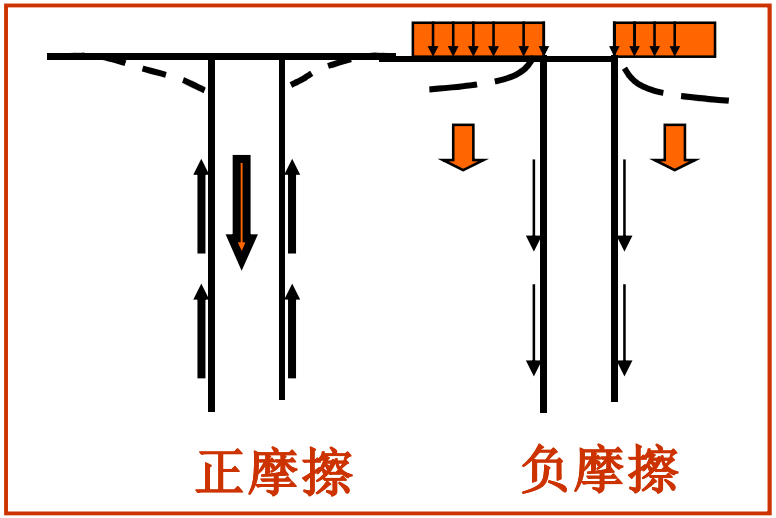
γ_G 永久荷载的分项系数



P177　式4-10

4.5.2 桩的负摩阻力

1 负摩阻力的概念和形成

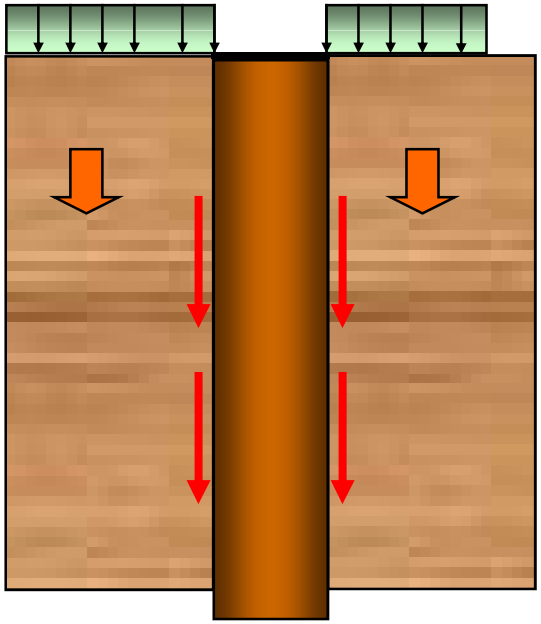


1) 负摩擦的产生原因

(1) 桩周附近地面大面积堆载
(2) 大面积降低地下水位
(3) 欠固结土，新填土
(4) 湿陷性黄土遇水湿陷
(5) 砂土液化、冻土融陷

2) 负摩擦力成为荷载

岩石中的端承桩可能全桩为负阻力



土相对桩向下

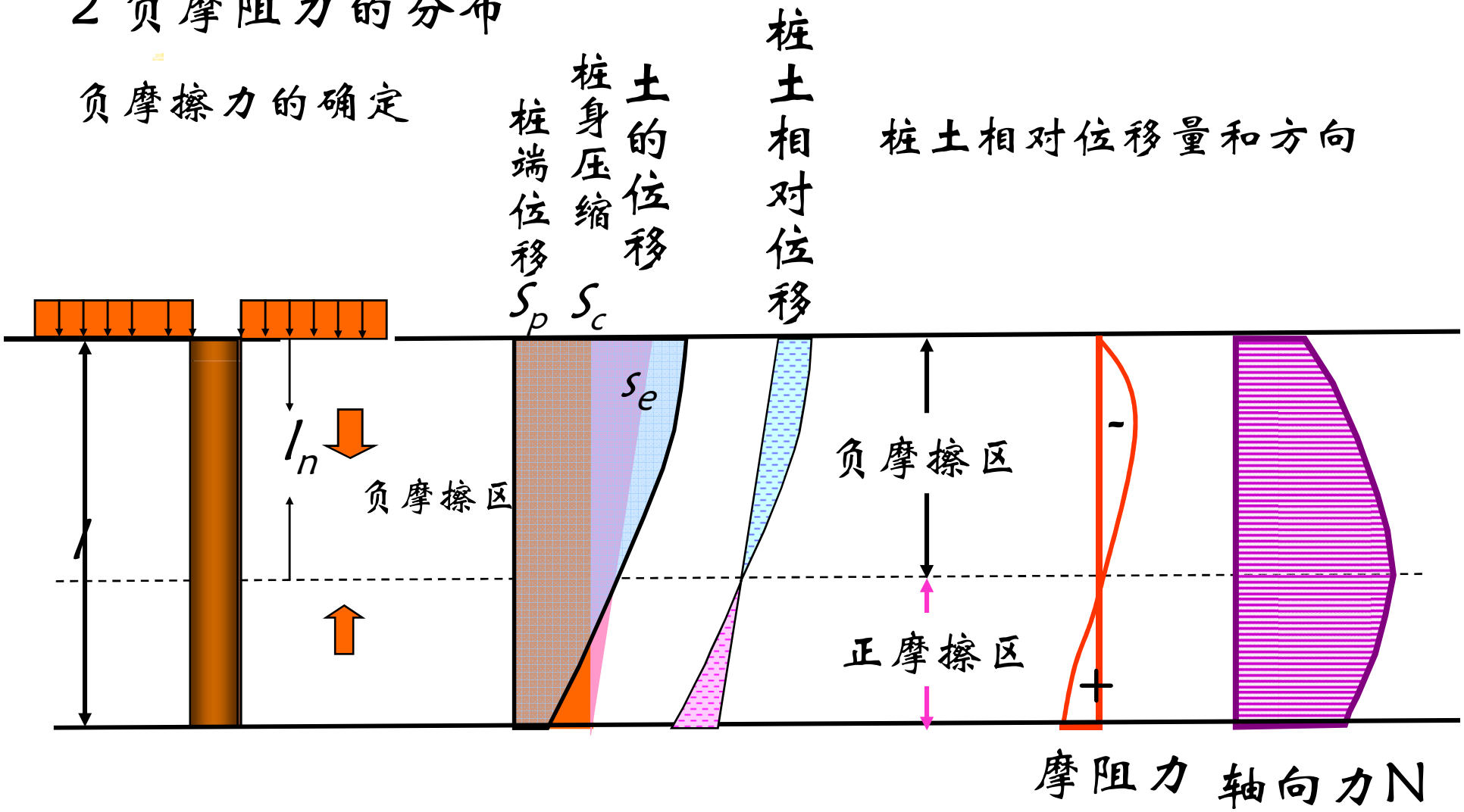
负摩阻

P178 重要

在中性点处，桩与桩周土位移相等，二者没有相对位移即摩擦力的作用

2 负摩阻力的分布

负摩擦力的确定



P179 图4-14 中性点的概念 考 落井下石

■ 中性点

✓ 定义：桩土相对位移为零处，桩侧摩阻力为零处。

- 在某深度处桩周土与桩截面沉降相等；
- 或两者无相对位移发生；
- 或其摩阻力为零。

✓ 特点：在中性点处桩身轴力达到最大值$N=Q+Q_n$。

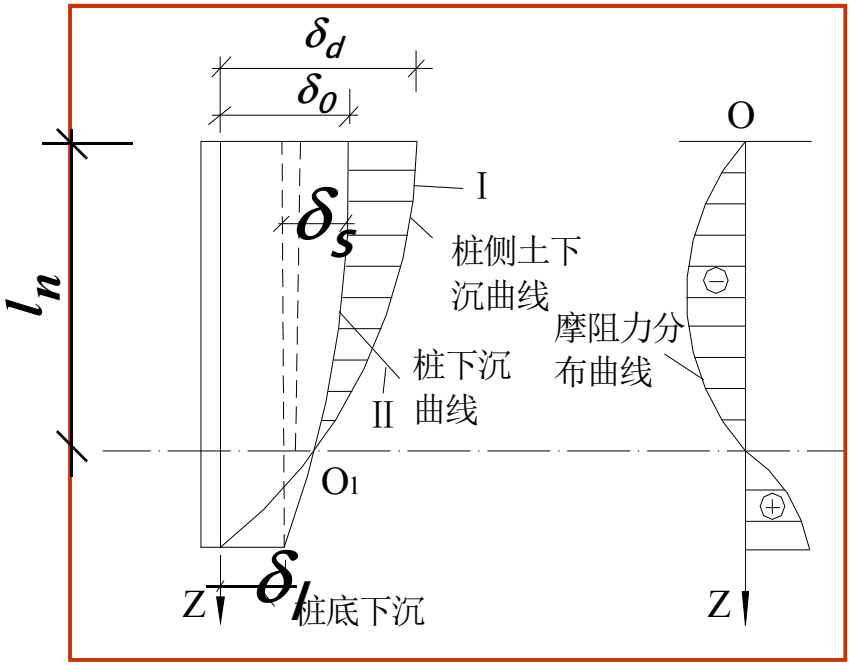
Q_n----下拉荷载：单桩桩侧总的负摩阻力，即中性点以上负摩阻力之和。

■ 中性点位置的确定

✓中性点的位置l_n取决于桩—土间的相对位移：

·当桩侧压缩变形大，桩的下土层坚硬，抗下沉量小，→下移；

·反之，中性点位置上移。



有负摩阻力时的荷载传递

✓ 中性点位置l_n还与时间因素、环境因素、地质条件等有关，精确计算有困难，目前采用经验估算法：（0.5～1.0l_0）

✓ l_0—桩周变形土层下限深度，即软弱压缩层厚度。

持力层土层	粘性土、粉土	中密以上砂	砾石、卵石	基岩
	0.5-0.6	0.7-0.8	0.9	1.0

P179 表4-6

3 负摩阻力的计算

Bjerrum提出的有效应力法较为接近实际

$$q_{si}^{n} = K\tan\varphi'\sigma' = \xi_n\sigma' \qquad (4\text{-}13)$$

- 减小负摩阻力的措施

  - ✓ 侧土预密实
  - ✓ 预制桩：涂层法；
  - ✓ 钢桩：塑料薄膜隔离层法；
  - ✓ 灌注桩：桩土之间灌注斑脱土浆法；

P179 -180

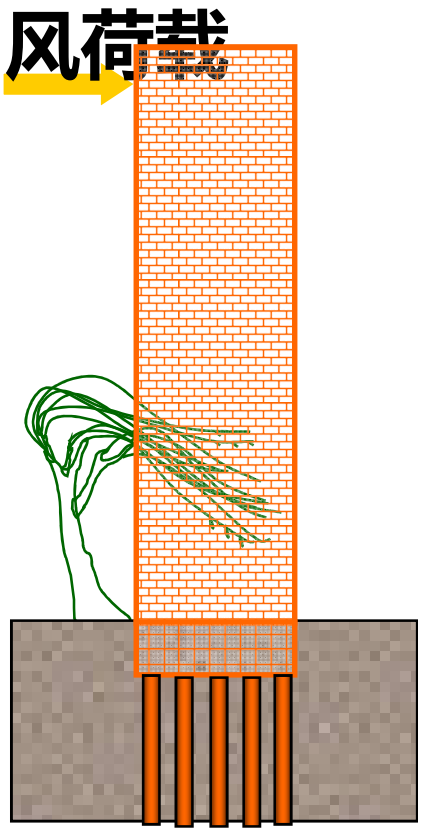
§4.6 桩在水平荷载下的性状及承载力的确定

塌橋運沙船佛山撞橋躉10多架車墮西江

一条史诗级的铁道线|北京-乌兰巴托

4.6.1 单桩水平承载力的影响因素

■作用机理：水平荷载(力和弯矩）作用下，桩身产生横向位移或挠曲变形，并挤压桩侧土体，同时桩侧土反作用于桩，产生侧向土抗力，桩土共同作用。为保证桩身材料和地基强度与稳定性，并考虑桩顶水平位移满足使用要求，进而分析和确定桩的横轴向承载力。



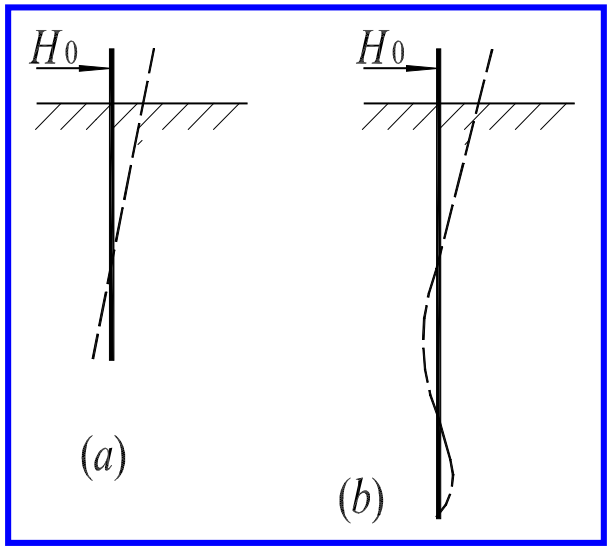
■影响因素：桩周的土质条件、桩的入土深度、桩的截面刚度、桩的材料强度、建筑物的性质等。

■另外一些影响单桩水平承载力的因素还有桩顶的嵌固条件和群桩中各桩的相互影响。

■破坏模式

✓刚性桩($al<4$)：桩身刚体转动破坏，承载力主要由桩的水平位移和倾斜控制

✓柔性桩($al\geqslant4$)：桩身发生挠曲变形，破坏时桩身某点弯矩超过截面抵抗矩或土体屈服失稳，承载力由桩身水平位移及最大弯矩值控制



a)刚性桩；b)弹性桩

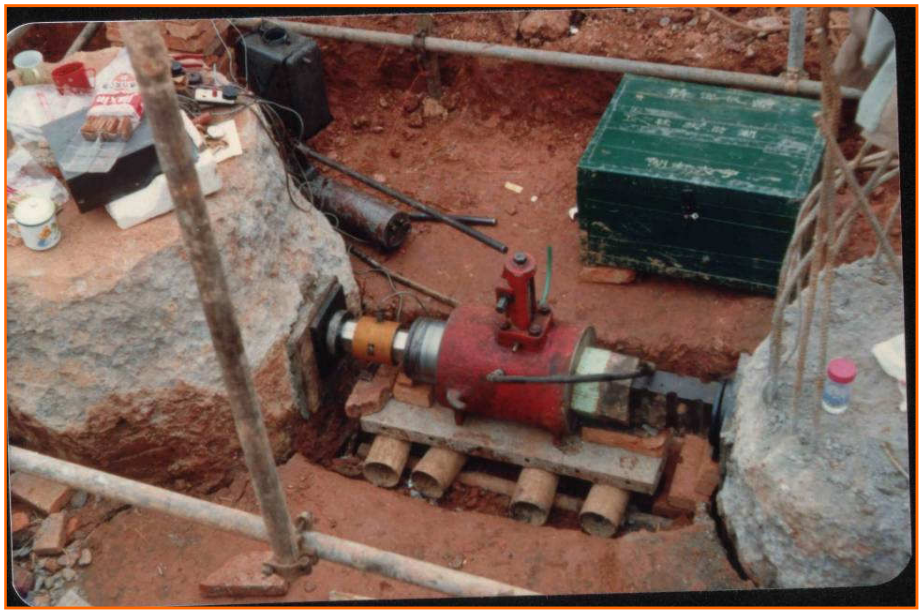
图4-15

✓DEL 一般外荷载合力R与竖直线夹角q≤5°时用竖直桩；当5°<q≤15°时用斜桩；当q>15°或受双向荷载时用叉桩，将竖直桩产生的弯矩，转化为受拉或受压。

4.6.2 单桩水平静载荷试验

✓试验装置：

- 加荷系统：千斤顶、试桩
- 位移观测：百分表



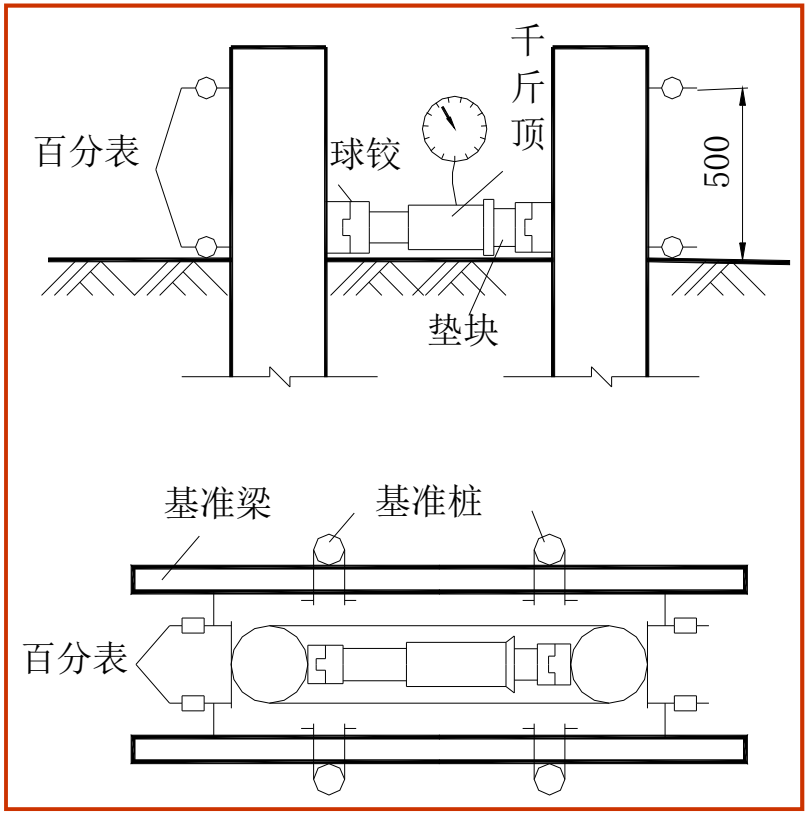


图4.20 单桩水平静载荷试验

P182

✓试验方法

- **每级荷载大小**

  约为预估水平极限承载力的（1/10-1/15）。

- **读数方法**

  每级加荷后恒载4min测读桩顶水平位移，然后卸载至零，停2min测读残余水平位移，如此循环5次，再施加下一级荷载。

- **终止加载条件**

  桩身折断

  桩顶水平位移超过30－40mm

  桩侧地表出现明显裂缝或隆起。

✓水平极限承载力的确定

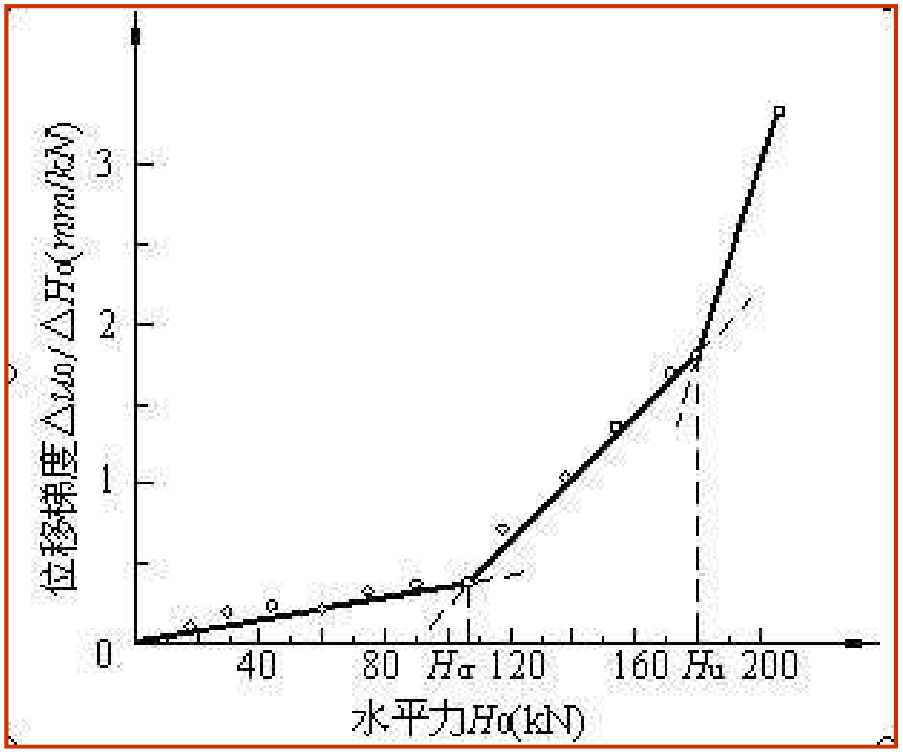


图4.18 单桩H_0—$\Delta x_0/\Delta H_0$曲线

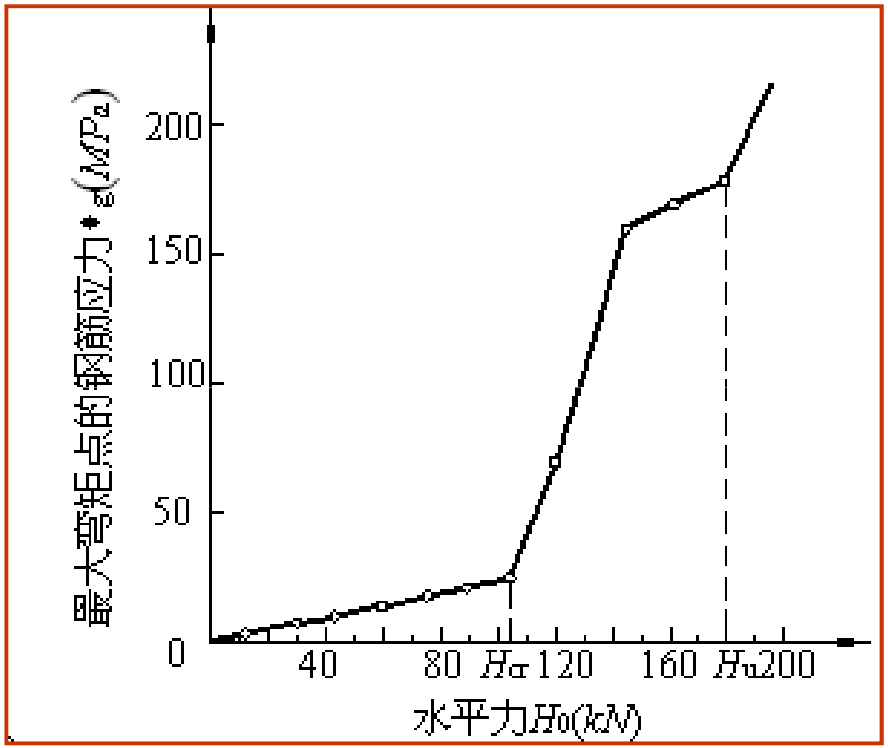


图4.22 单桩H_0—σ_g曲线

两特征点对应的荷载称为临界荷载H_{cr}和极限荷载

4.6.3 弹性长桩在水平荷载作用下的理论分析

■ 水平受荷桩的理论分析

多采用线弹性地基反力法，假设土的抗力P与桩的水平位移x成正比，常按文克勒假定$p = k_h x b_0$。关键在于确定土体抗力系数 沿深度的分布，即桩侧水平抗力系数 k_h 如何沿桩身分布，分为：(a)常数法；(b)k法；(c)m法（水平位移大用）；(d) c法 （水平位移小用）

$$k_h = mz^n$$

4-19

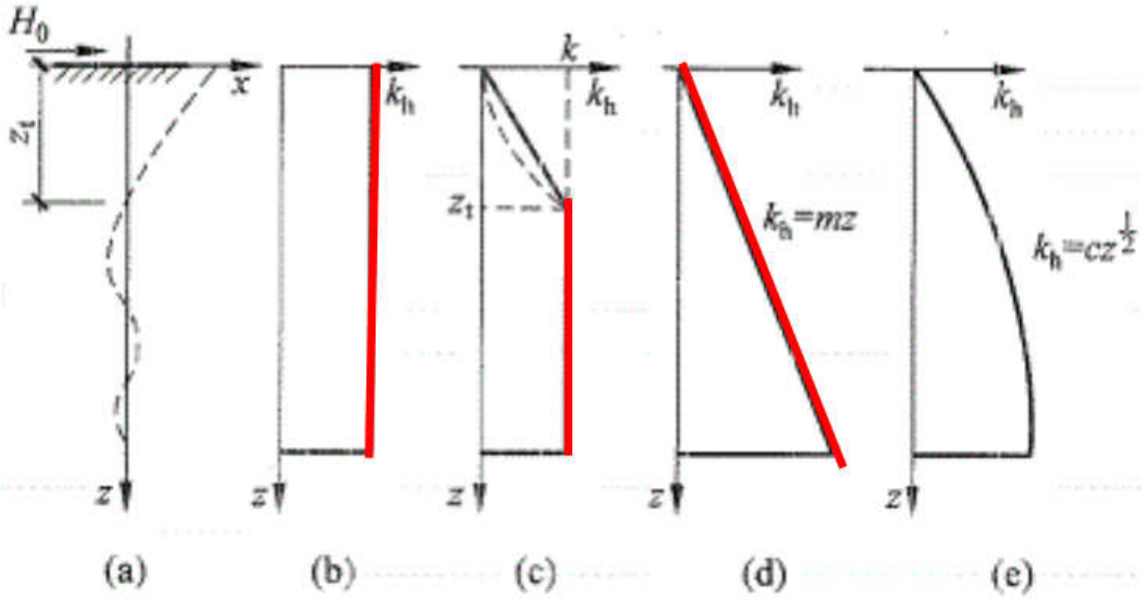


图 4-19 水平荷载下桩的变形及不同的水平抗力系数假定

✓1 单桩挠曲微分方程的建立

取一基桩微元体，由平衡条件可得挠曲微分方程：

采用幂函数积分求解：

$$EI\frac{\mathrm{d}^4x}{\mathrm{d}z^4}+N_0\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}z^2}=-p(z)$$

位移 $x_z=\dfrac{H_0}{\alpha^3EI}A_x+\dfrac{M_0}{\alpha^2EI}B_x$

转角 $\varphi_z=\dfrac{H_0}{\alpha^2EI}A_\varphi+\dfrac{M_0}{\alpha EI}B_\varphi$

弯矩 $M_z=\dfrac{H_0}{\alpha}A_M+M_0B_M$

剪力 $V_z=H_0A_Q+\alpha M_0B_Q$

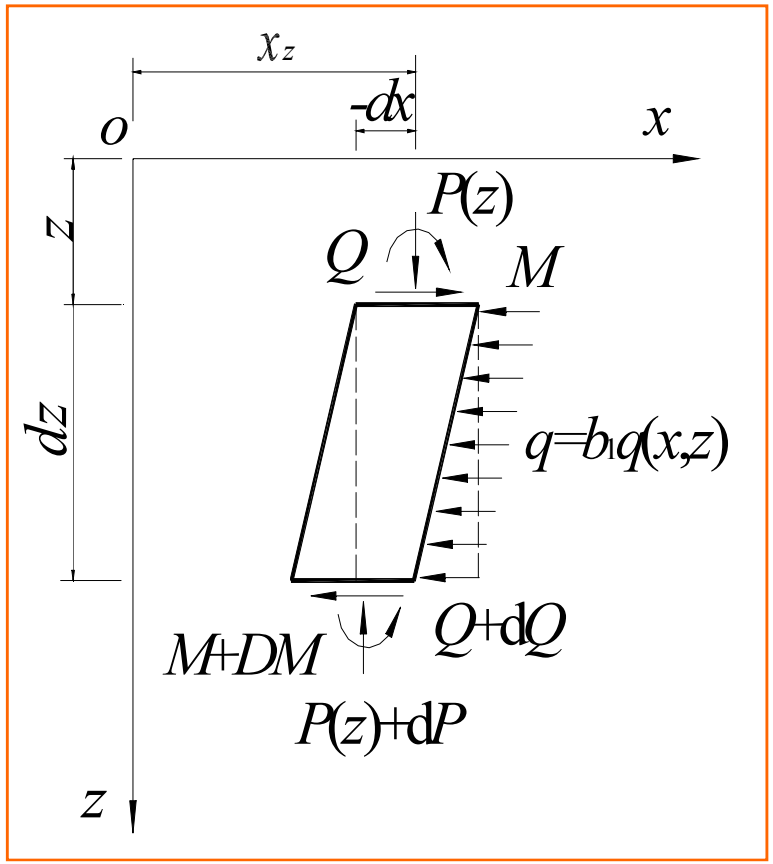


图4.24 微元体受力示意图

相关系数可查表确定。

P184

✓ a为桩的水平变形系数,单位是m^{-1}，l为桩实际长度，$a\,l$是换算长度

$$\alpha=\sqrt[5]{\frac{m\,b_0}{EI}}$$

P184

m—地基土横向抗力系数的比例系数(MN/m^4)，受桩材和刚度、土类及其性质、荷载作用方式、荷载水平、桩身水平位移等因素影响，宜通过水平静载试验确定,如无试验资料，m值可参照表4-10.对多层地基取当量m值计算，取层厚$h_m=2(d+1)$范围内的m加权平均作为整个深度的m值，比如3层土时：

$$m=\frac{m_1h_1^2+m_2(2h_1+h_2)h_2+m_3(2h_1+2h_2+h_3)h_3}{(h_1+h_2+h_3)^2}$$

b_0—桩身计算宽度（简化为平面受力）P183 表4-8.

EI—桩身抗弯刚度，对于钢筋砼桩，取$EI=0.85E_cI_0$(建工)或$0.80E_cI_0$(路桥)，其中E_c为砼的弹模，I_0为桩身截面惯性矩.

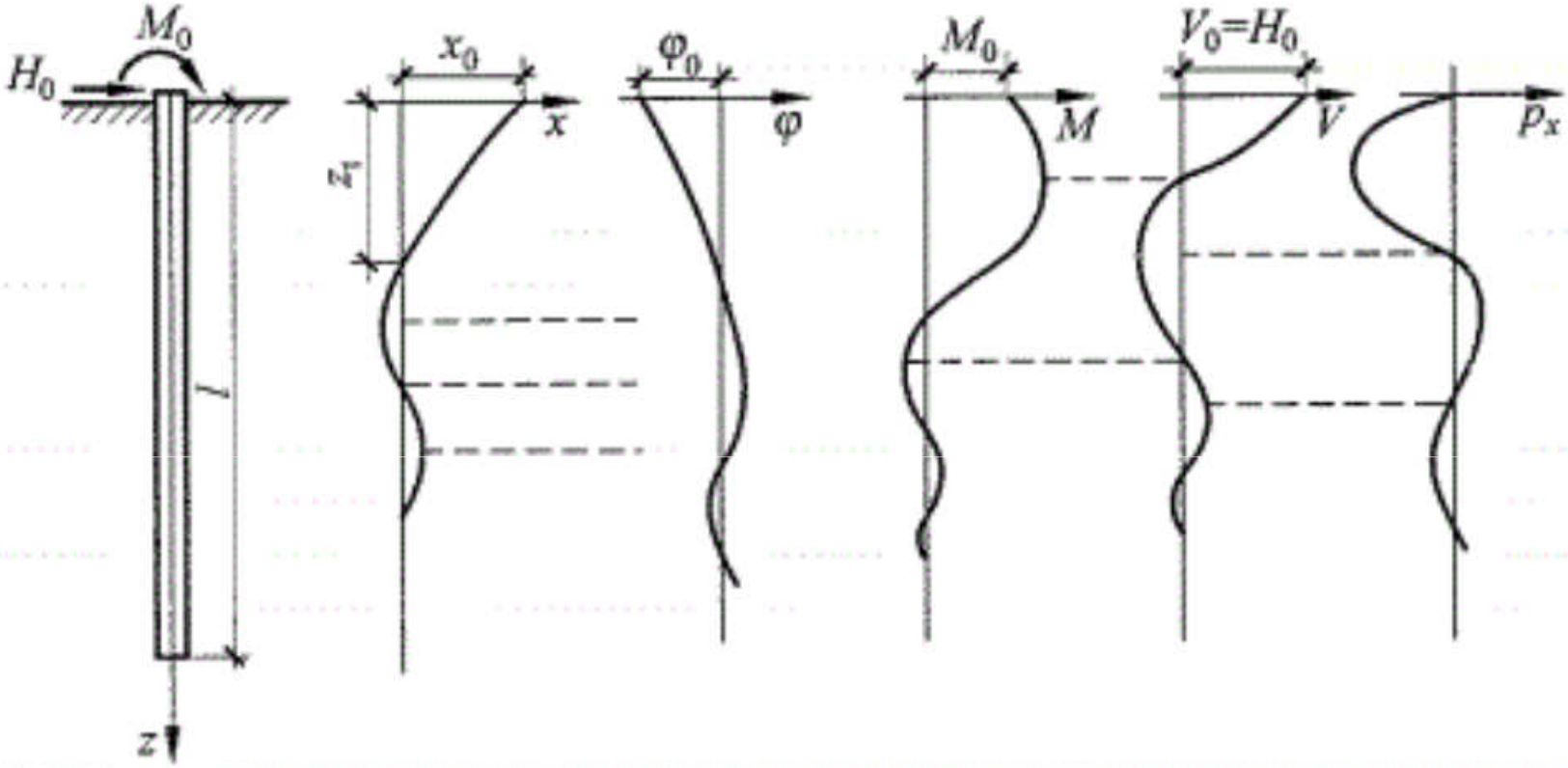


图 4-20　水平荷载下弹性长桩的内力与变形

✓ 2 桩顶的水平位移：是控制桩的水平承载力的主要因素

长桩（柔性桩）：由表4-11，查换算深度az=0时的Ax和Bx值代入下式求得的位移就是桩顶的水平位移：

$$x_z = \frac{H_0}{\alpha^3 EI} A_x + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} B_x$$

短桩（刚性桩）：根据桩的换算长度al和桩端支承条件，由表4-11，查得位移系数Ax和Bx，再代入上式求得的位移就是其桩顶的水平位移

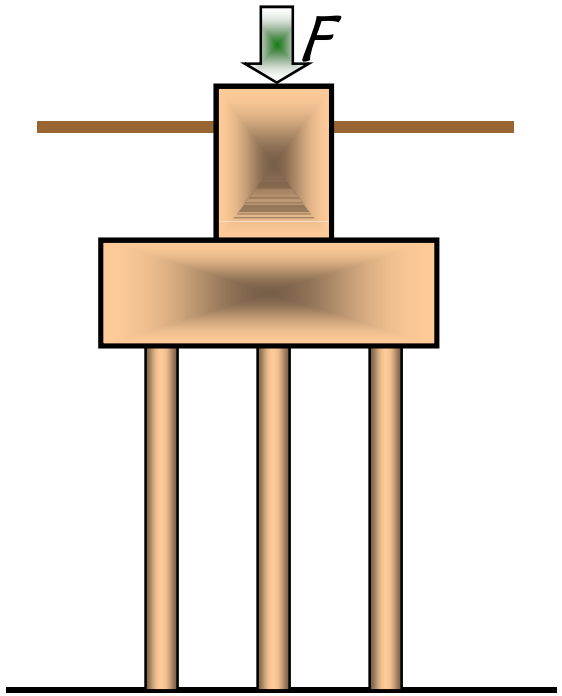
P186

✓ 3 桩身最大弯矩M_{max}及其位置z_0：

$C_I = aM_0/H_0 \longrightarrow$ 查表4-12得$\bar{h}(=az) \longrightarrow z_0 = \bar{h}/a$

$C_I = aM_0/H_0 \longrightarrow$ 查表4-12得$C_{II} \longrightarrow M_{max} = C_{II}M_0$

§4.7 桩基的沉降计算



多数桩基需要进行沉降验算

作用准永久组合

基本假设：单向压缩、均质各向同性和弹性假设的分层总和法

方法：

一 实体基础法－布氏解Boussinesq

二 明德林（Mindlin)方法

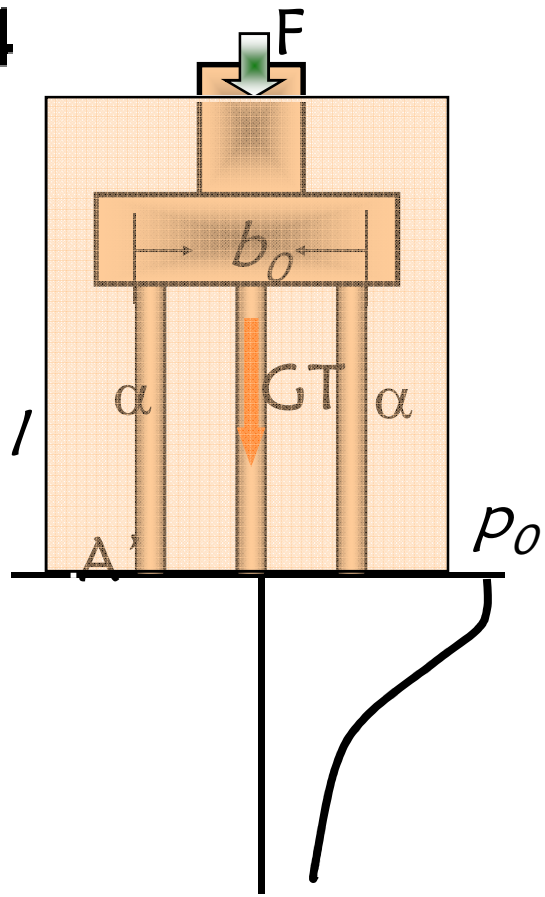
4.7.1 实体深基础法

1 荷载扩散法

$$A' = (b_0 + 2l\mathrm{tg}\alpha)(a_0 + 2l\mathrm{tg}\alpha);\ \alpha = \overline{\varphi}/4$$

$$p = \frac{F + GT}{A'}$$

$$p_0 = p - \gamma(d + l)$$



a_0、b_0 群桩外缘长短边的长度

l 桩的入土深度

$\overline{\varphi}$ 桩穿过土层内摩擦角平均值

G 扩散后面积上的重量(矩形)

P188

忽略桩身部分在入桩前后重量的变化

$$A' = (b_0 + 2l\mathrm{tg}\alpha)(a_0 + 2l\mathrm{tg}\alpha);\ \alpha = \overline{\varphi}/4$$

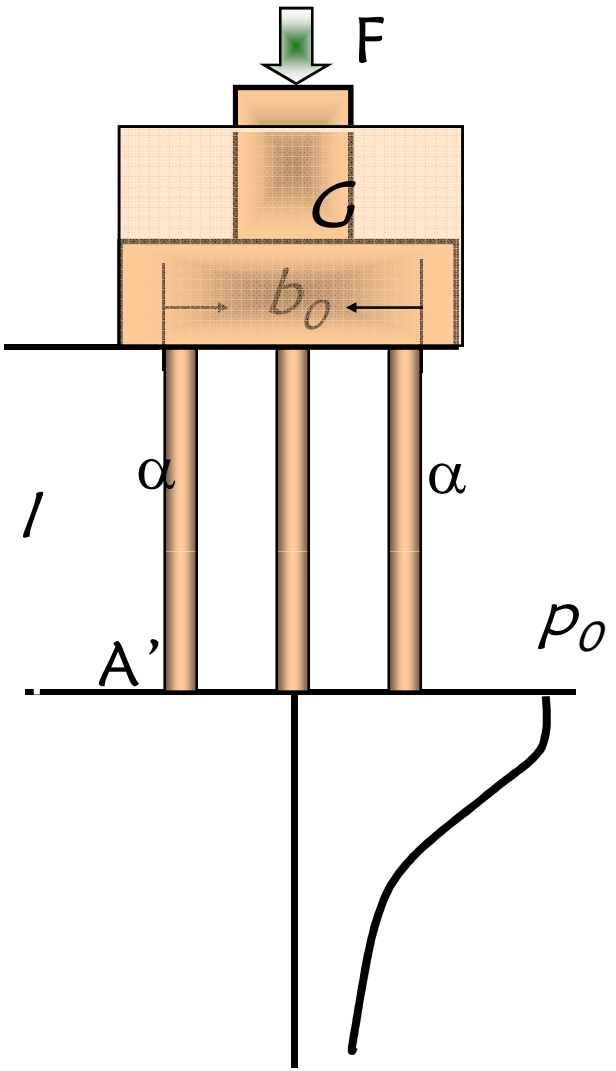
$$p0 = \frac{F + G - p_{c0} \times a \times b}{A'}$$

a、b 承台的长度和宽度

$\overline{\varphi}$ 桩穿过土层内摩擦角平均值

p_{c0} 承台底面处地基土自重应力

G_k 承台和承台以上土的重量(矩形)



按照扩散后的面积进行分层总和法计算沉降

$$s = \psi_p \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i \Delta h_i}{E_{si}}$$

s 桩基最终计算沉降量

n 计算分层数

E_{si} 压缩模量

p_i 第i层土的竖向附加应力平均值

ψ_p 沉降计算经验系数

2 扣除桩群侧壁摩阻法

$$p = \frac{F + G - 2(a_0 + b_0)\sum q_{sia} h_i}{a_0 \times b_0}$$

h_i 桩身穿越第i层土层厚度

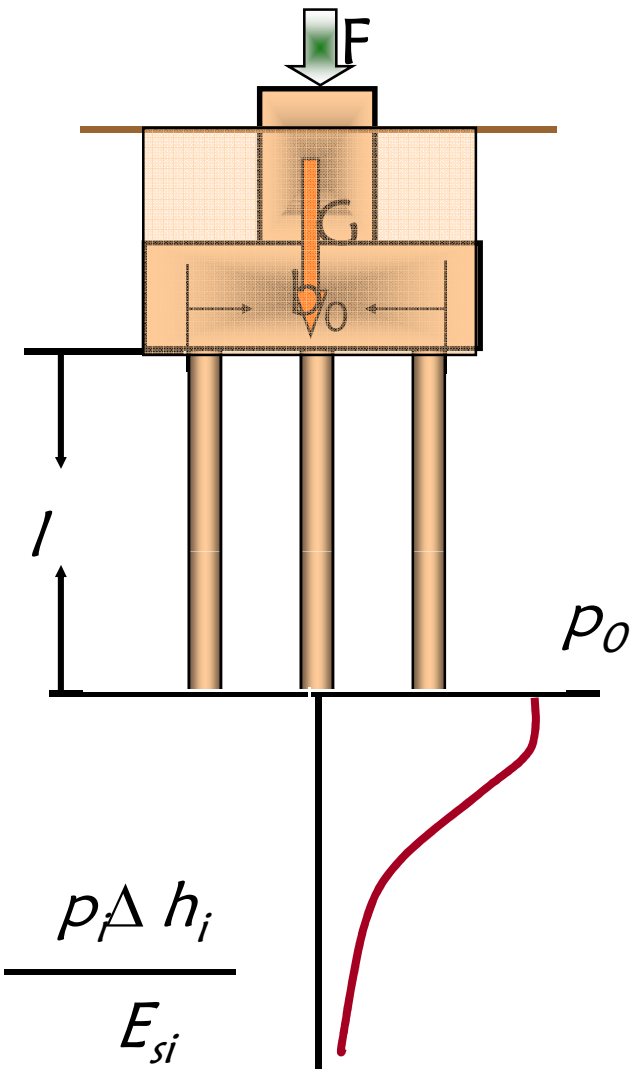
l 桩的入土深度

q_{sia} 第i层土侧阻力特征值

G 承台和承台以上土的重量

按照分层总和法计算沉降

$$s = \psi_p \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i \Delta h_i}{E_{si}}$$



4.7.2 明德林—盖得斯法

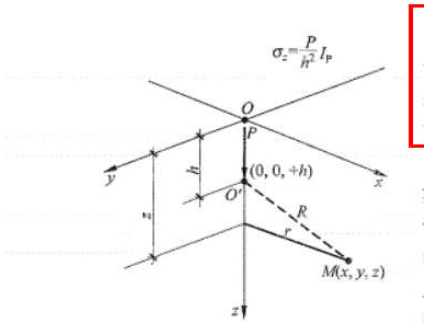
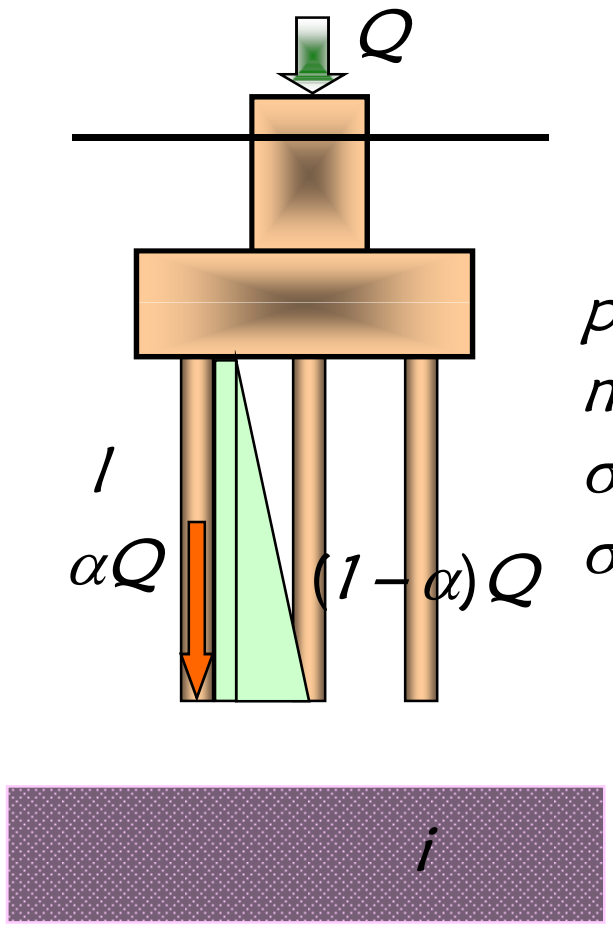


图 4-21 半无限弹性体内集中力引起的应力——明德林课题



$$p_i = \sum_{k=1}^{m} \left(\sigma_{zp,k} + \sigma_{zs,k}\right)$$

p_i 第 i 层土层中点处的附加应力

m 桩数

$\sigma_{zp,k}$ 第 k 根桩端荷载产生的附加应力

$\sigma_{zs,k}$ 第 k 根桩侧荷载产生的附加应力

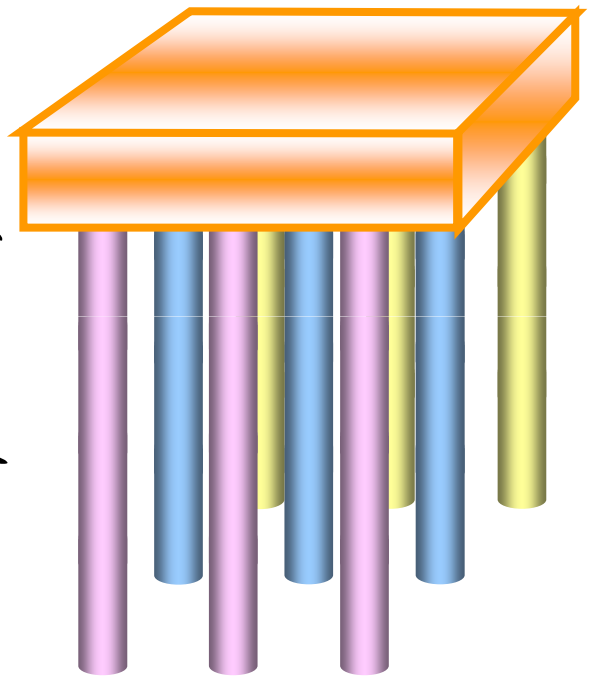
$$s = \psi_p \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i \Delta h_i}{E_{si}}$$

P190

§4.8 桩基础的设计

Pile group and group efficiency

4.8.1 群桩与群桩效应

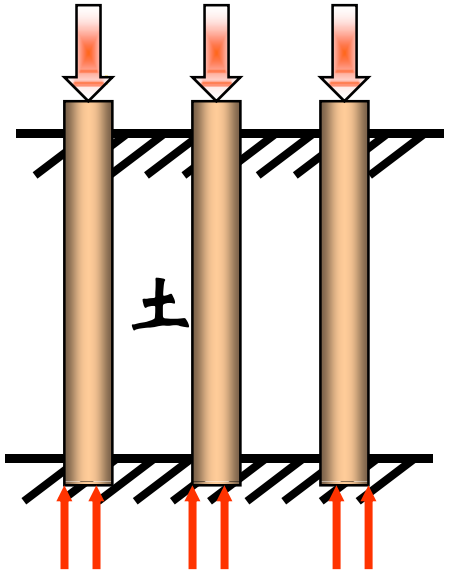


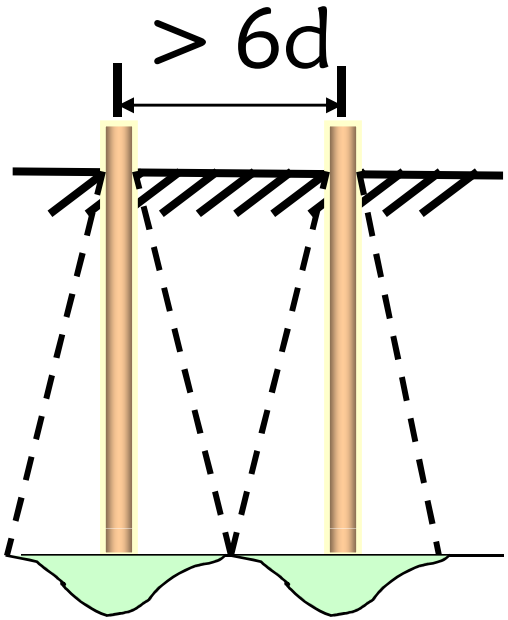
由三根及以上的桩组成的称为群桩基础，由承台连接

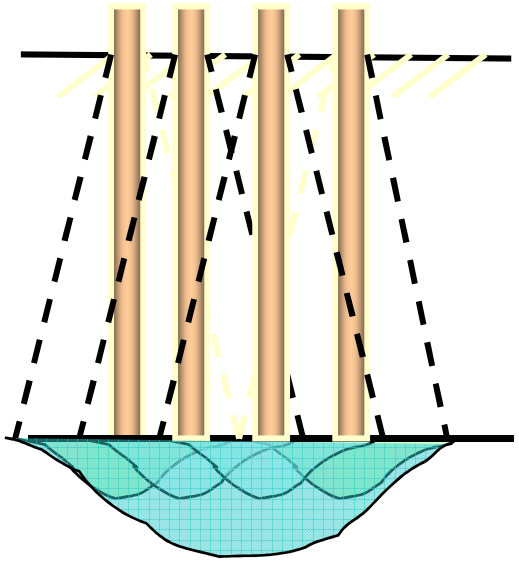
单桩承载力加起来是否等于群桩承载力？

P192 群桩效应 考

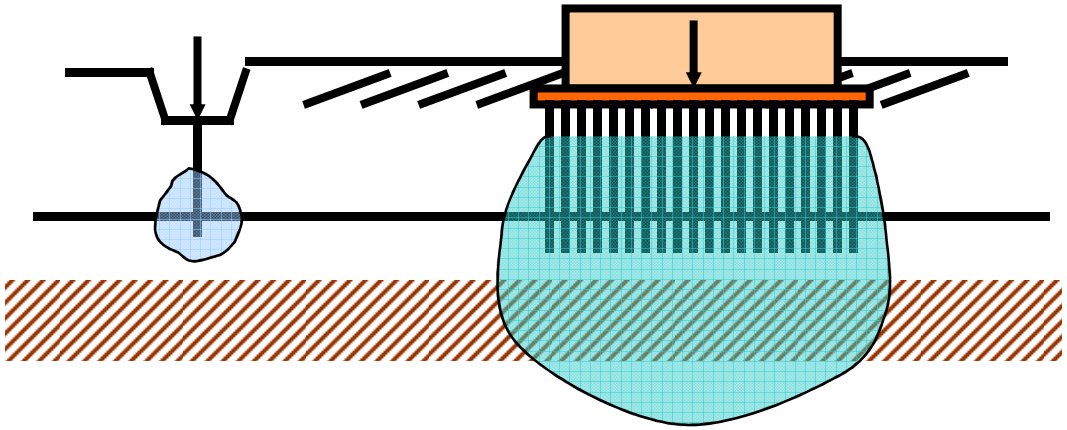
首先 分析桩与土间的相互作用问题







应力叠加



应力扩散深度

（1） 预制桩沉桩

砂土，非饱粘性土，有挤密作用，承载力增加

饱和粘土，土层扰动，承载力降低、负摩阻力

（2） 应力叠加

桩端应力增加，使桩端土承载力不足

总的沉降增加

（3） 桩之间互相调节

个别桩承载力低，其它桩帮助承担，总体互补

（4） 承台可部分承受荷载

其次 承台在群桩效应中也起重要的作用

承台可以承担荷载，最高达30%

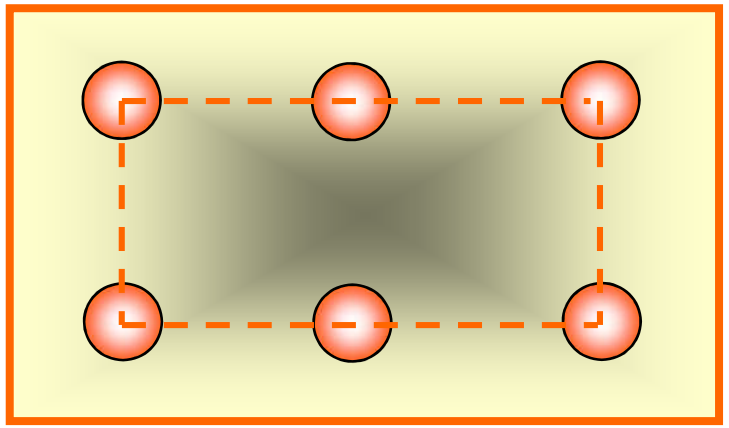
端承桩情况下不考虑承台承载力

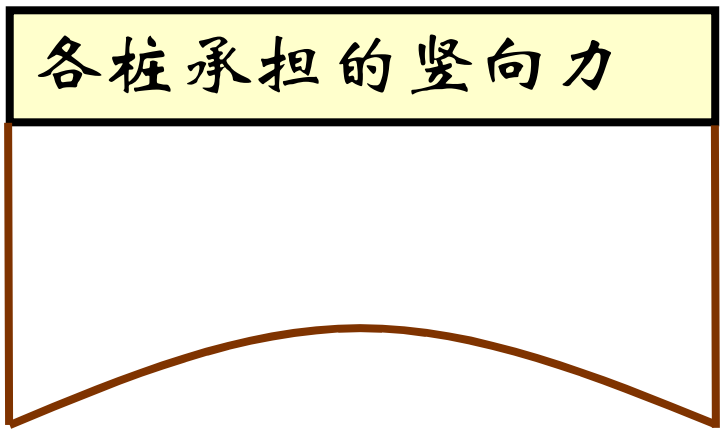
第三 承台对于各桩的摩阻力和端承力也有影响

刚性承台下各桩承担的荷载不同

动力荷载下(铁路桥梁)负摩擦力(地面下沉);

中心荷载作用下尽管各桩顶位移基本相等，但竖向力不等，角桩大于边桩，边桩大于中心桩，亦即是马鞍形分布





群桩效应与很多因素相关，用群桩效应系数估计

$$\eta = \frac{\text{群桩承载力}}{\text{群桩中各单桩承载力之和}}$$

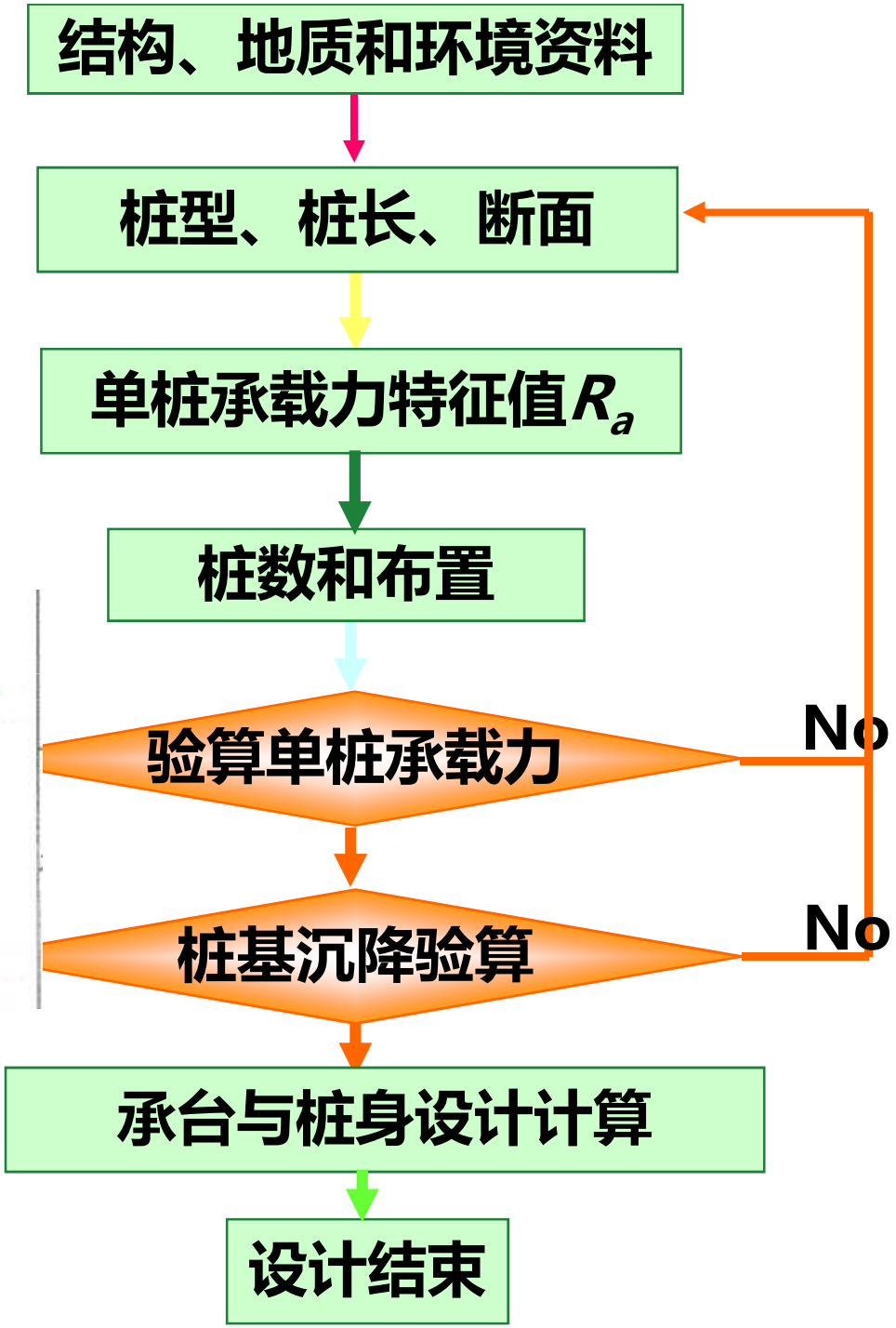
对于砂土、长桩和大间距条件下 $\eta \geq 1.0$,

工程设计中常取$\eta = 1.0$

4.8.2 桩基础的设计步骤

沉降验算见 4.7 节。值得注意的是，其承载力、沉降和承台及桩身强度验算采用的作用组合不同：当进行桩的承载力验算时，应采用正常使用极限状态下作用的标准组合；进行桩基的沉降验算时，应采用正常使用极限状态下作用的准永久组合；而在进行承台和桩身强度验算和配筋时，则采用承载能力极限状态下作用的基本组合。=1.35Nk

5. 承台和桩身的设计、计算



P193

4.8.3　群桩基础中的单桩承载力验算

中心竖直荷载

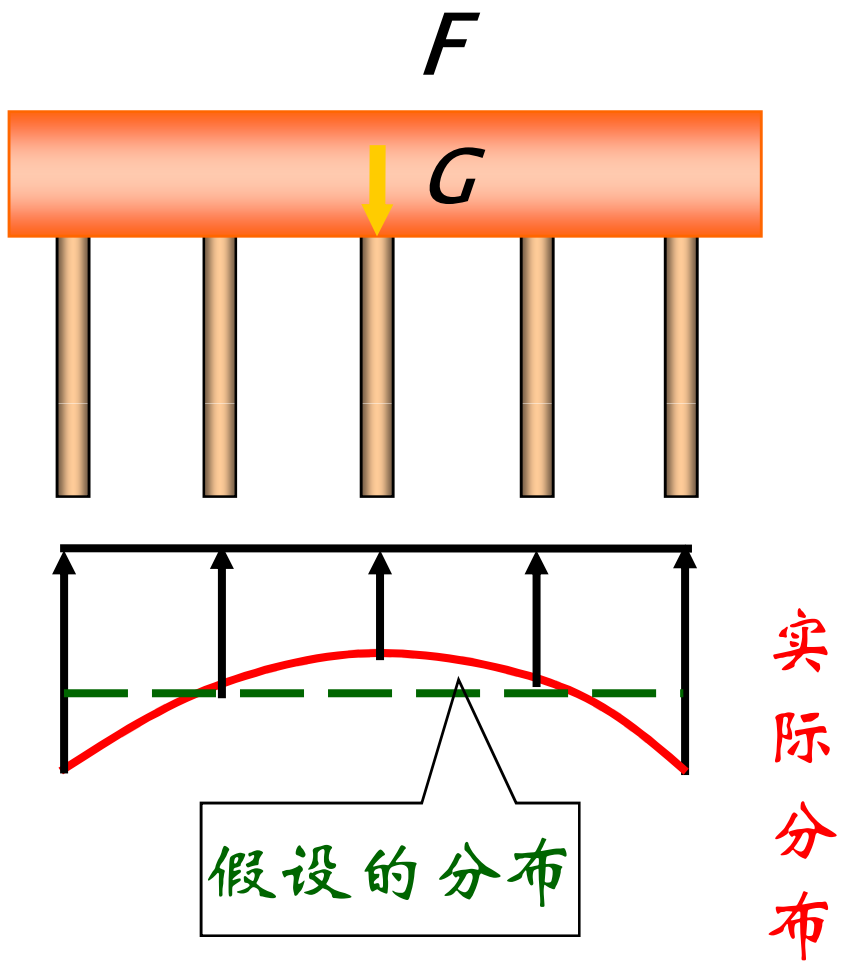
假设各桩荷载相同

$$Q_k = \frac{F_k + G_k}{n}$$

G_k 承台底面以上基础和土的自重

n 桩数

$$Q_k \le R_a$$



P195

偏心竖向荷载　荷载线性分布假设

P195 4-39 具体解释

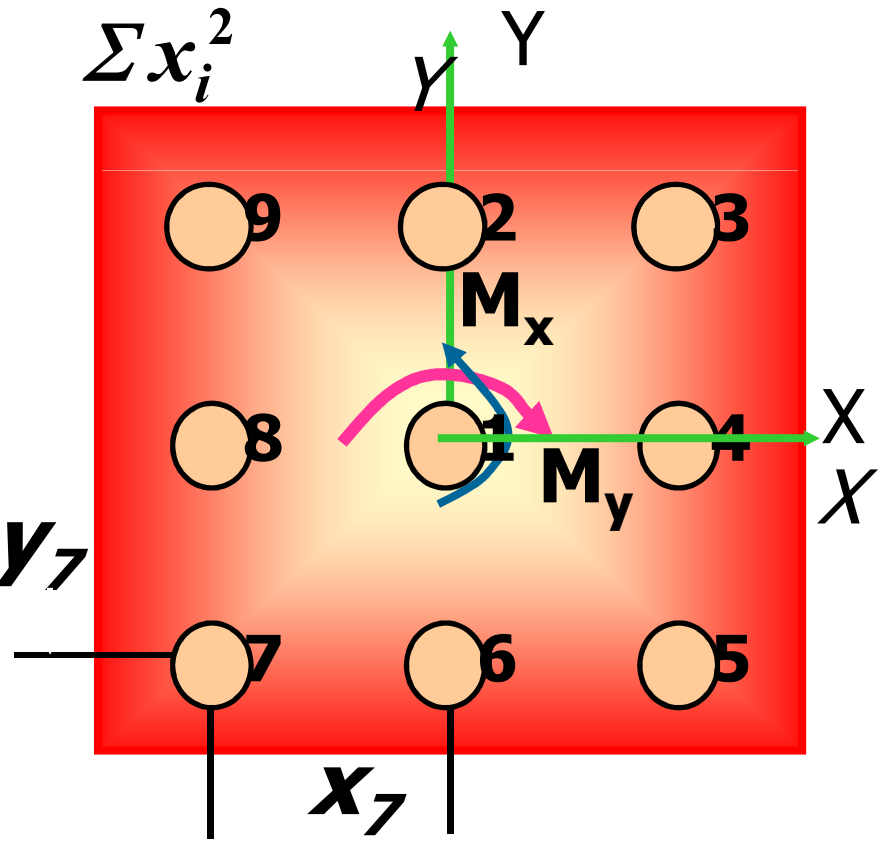
参见4-45或后两页幻灯

$$Q_{ik}=\frac{F+G}{n}\pm\frac{M_x y_i}{\Sigma y_i^2}\pm\frac{M_y x_i}{\Sigma x_i^2}$$

$$Q_{max}\le 1.2R_a$$

Q_{ik} 第i根桩底竖向力

M_{xk}，M_{yk} 作用于承台底通过桩群形心的x，y轴的力矩



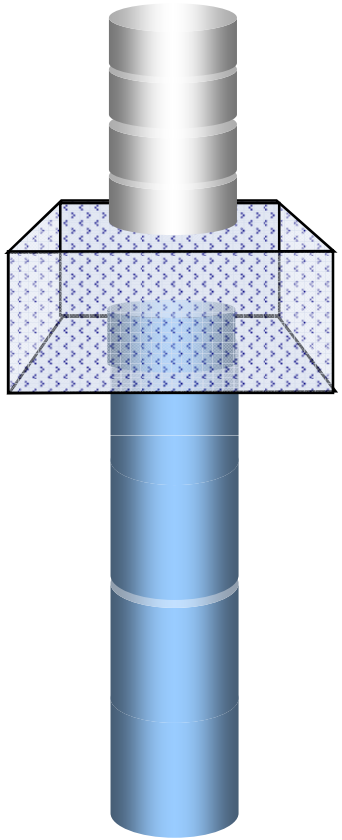
4.8.4 承台的设计计算

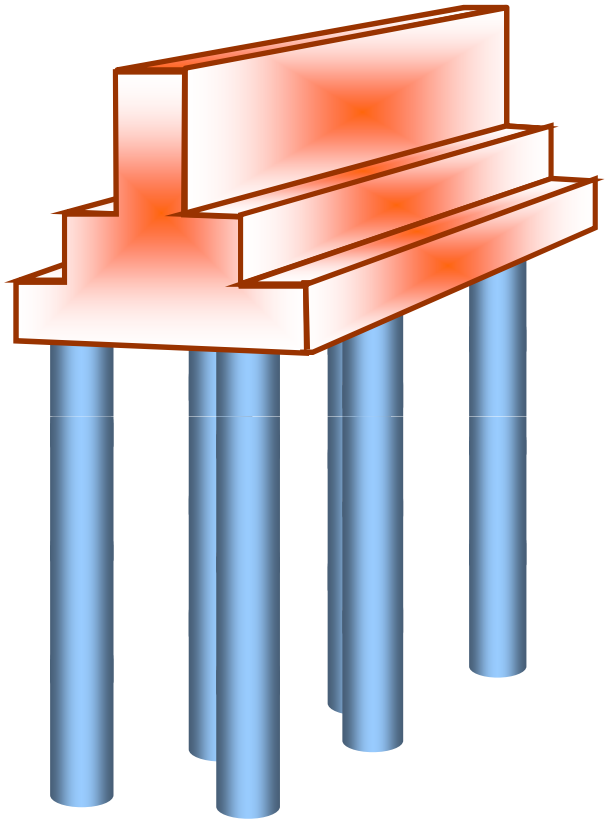
1 承台的构造基本要求

独立承台、条形承台梁，筏板承台和箱形承台

承台的埋置深度一般与浅基础相同，主要由建筑物结构设计和环境条件决定

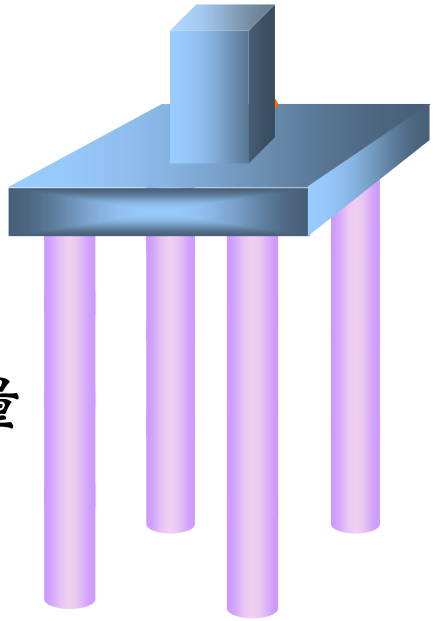
承台进行抗弯、抗冲切和抗剪计算

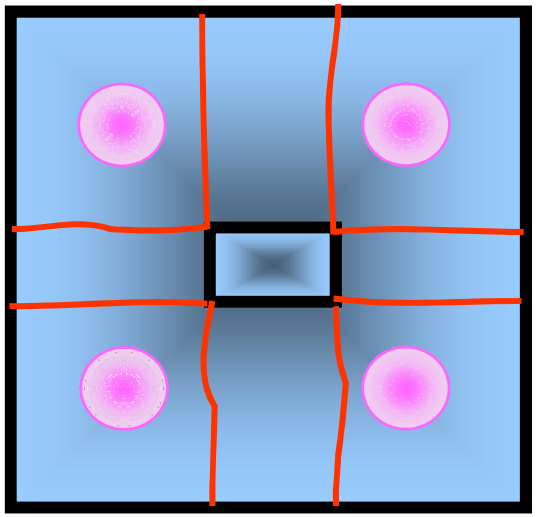




P196

2 承台抗弯计算



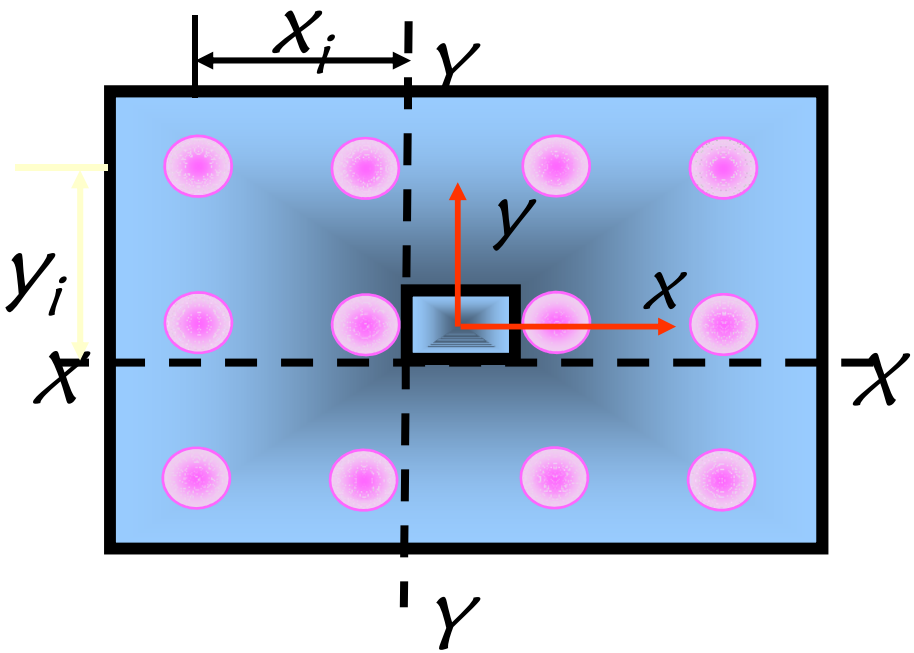


如果承台厚度较小，配筋量不足，可能发生弯曲破坏

多桩矩形承台 计算截面为柱边和承台截面变化处

$$M_x = \Sigma N_i y_i$$

$$M_y = \Sigma N_i x_i$$

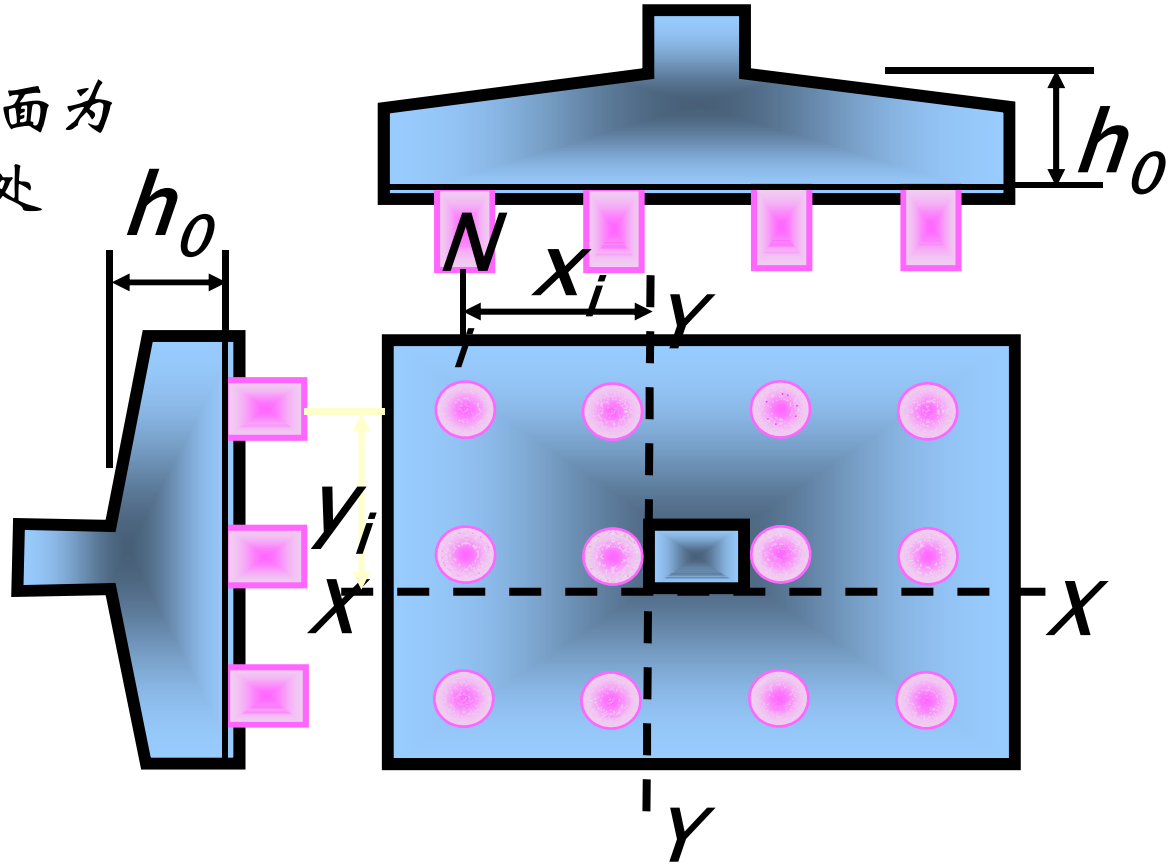


P198 图4-28

多桩矩形承台 计算截面为柱边和承台截面变化处

$$M_x = \Sigma N_i y_i$$

$$M_y = \Sigma N_i x_i$$

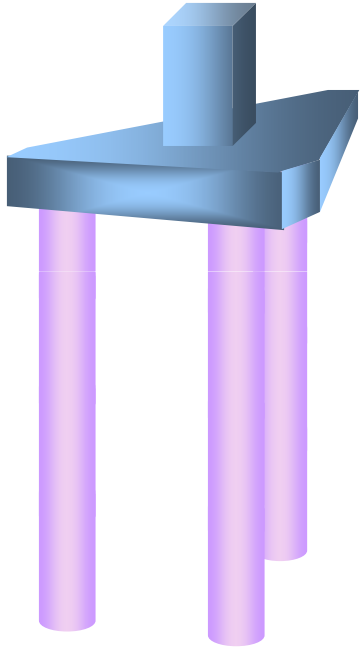


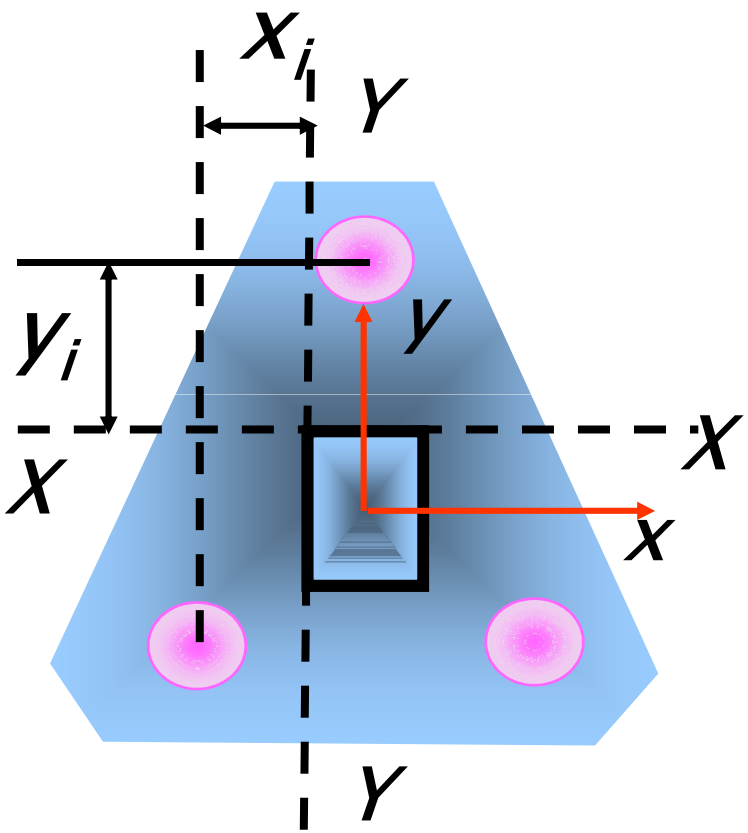
P198 图4-28

三桩三角形承台与矩形承台类似

$$M_x = \Sigma N_i y_i$$

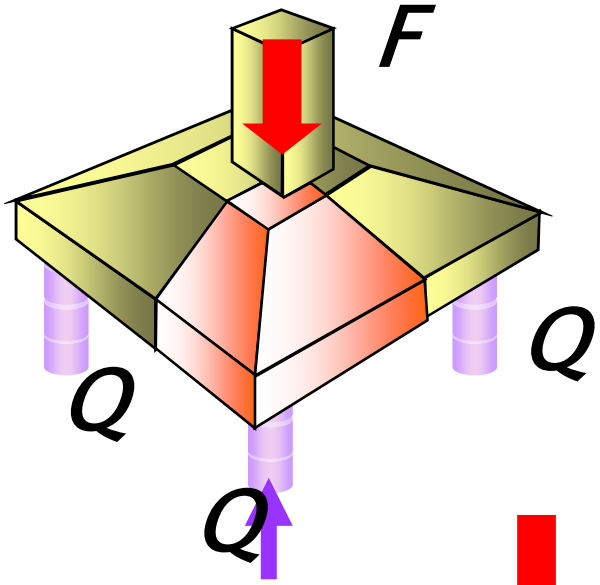
$$M_y = \Sigma N_i x_i$$





P197-198

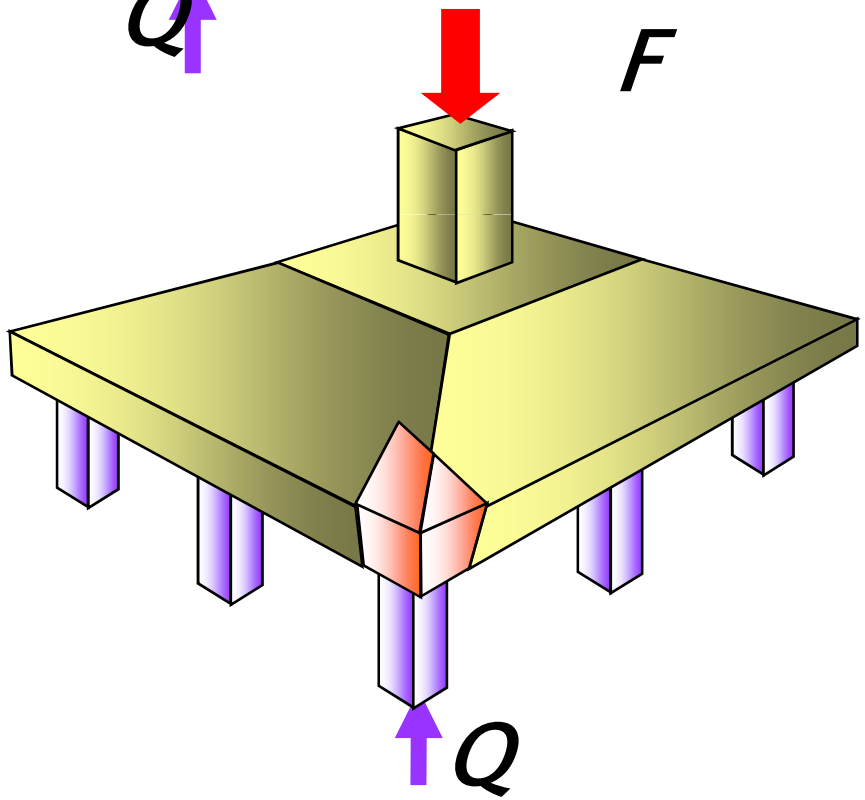
3 柱下桩基独立承台冲切计算



板式承台厚度主要由冲切计算决定。两种破坏形式：

柱对承台的冲切，由柱边沿或变阶处形成≥45°的冲切锥

角桩处形成一个倒冲切锥体（自学）



P198

$$F_l \le 2[\beta_{0x}(b_c+a_{0y}) + \beta_{0y}(a_c+a_{0x})]\,\beta_{hp} f_t h_0$$

$$F_l = F - \Sigma N_i$$

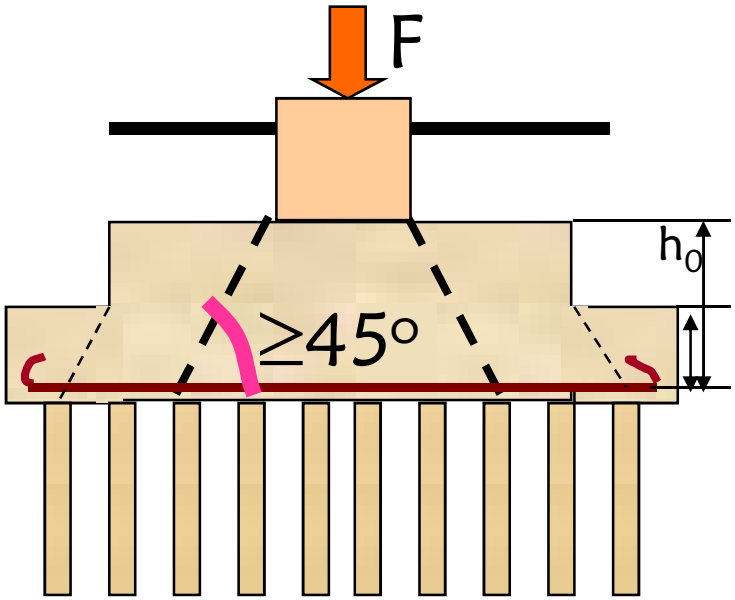
h_0 冲切锥体的有效高度

β_{0x}、β_{0y} 冲切系数，

f_t 混凝土抗拉强度

a_{0x}、a_{0y} 柱边或变阶处至相应桩边水平距离

β_{hp} 截面高度影响系数



4 柱下桩基独立承台的受剪计算
斜截面的剪切验算

$$V \le \beta_{hs} \beta f_t b h_0$$

$$\beta = \frac{1.75}{\lambda + 1.0}$$

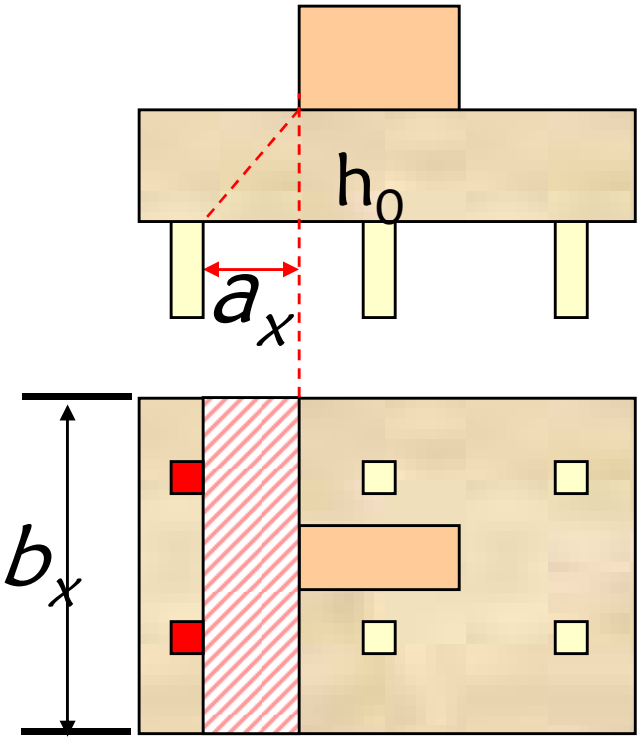
V 扣除承台及其上土自重后

斜截面上最大剪力设计值

β 剪切系数

β_{hs} 高度影响系数

λ 剪跨比



P201

5 桩基础结构设计

1）桩端持力层 要求桩端进入持力层一定深度

桩端下持力层留有一定厚度

2）承台设计

承台埋深要求

高承台:由建筑物决定,如

桥(过船),码头,冲刷深度

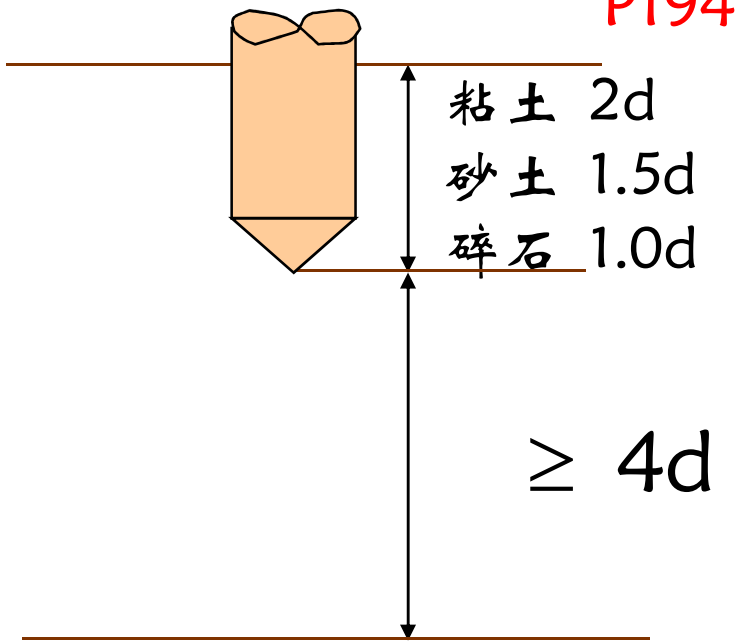
低承台,确定基础埋深 ≥60 cm

建筑物要求

地质水文

冻胀

P194



P202 例题4-1非常重要

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

pile shaft 桩轴
Base resistances