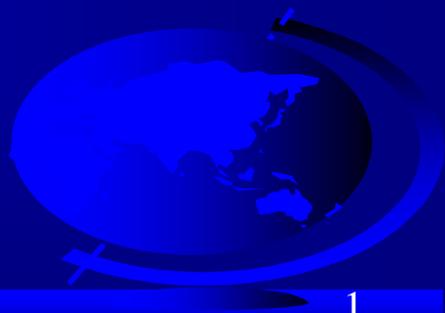


# 第8章 地基承载力

主讲：刘勇健



# 本章目录

§ 8.1 概述

§ 8.2 地基破坏模式及其变形过程

§ 8.3 临塑荷载和界限荷载

§ 8.4 极限承载力计算

§ 8.5 地基承载力的确定方法



# 学习要求

- (1) 掌握地基的变形及其破坏模式
- (2) 掌握地基的临塑荷载与界限荷载的计算
- (3) 掌握地基的极限承载力的计算方法
- (4) 地基极限承载力与容许承载力之间的关系

## § 8.1 概述

**建筑物地基设计的基本要求：**

**承载力要求：荷载小于承载力（抗力）**

**地基承载力**

与土的强度有关

**变形要求：变形小于设计允许值  $S \leq [S]$**

**沉降计算（分层总和法）**

与土的压缩性有关

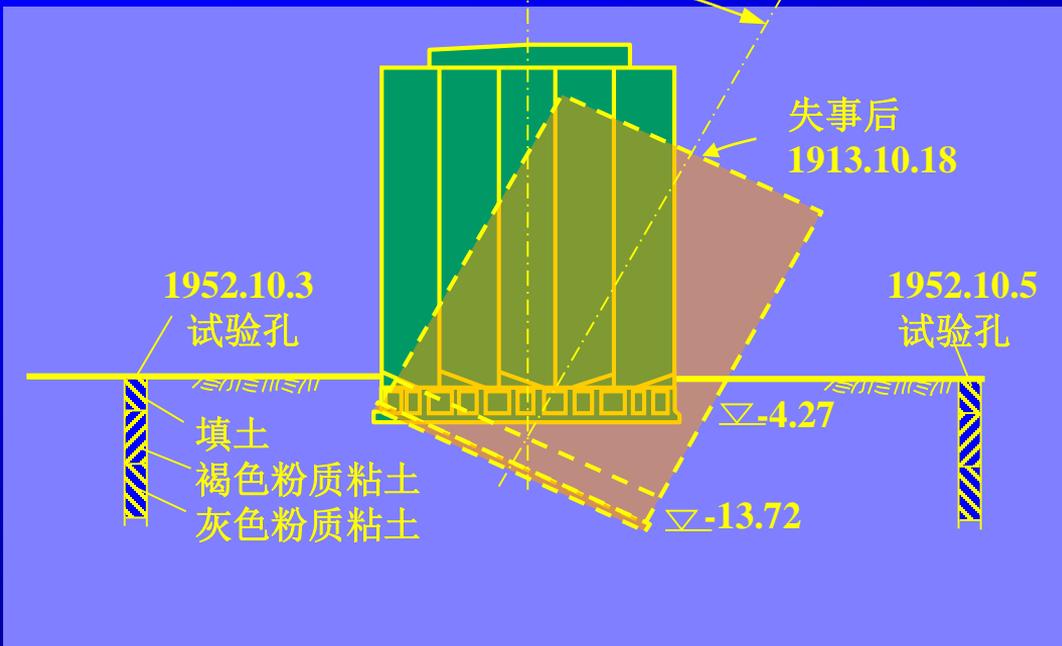
**概况：** 共65个圆筒仓。1913年完工，自重2万T。



## 加拿大特朗斯康谷仓

**事故：** 9月开始装谷物，至10月17日共装入3万多T谷物时发生破坏：

- 1小时竖向沉降30.5cm
- 24小时倾斜 $26^{\circ} 53'$
- 西端下沉7.32m
- 东端上抬1.52m
- 上部钢混筒仓完好无损



原因：  
地基承载力按邻近结构物的试验结果计算。  
由于地基实际承载力远小于谷仓破坏时的基底压力。

谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动！

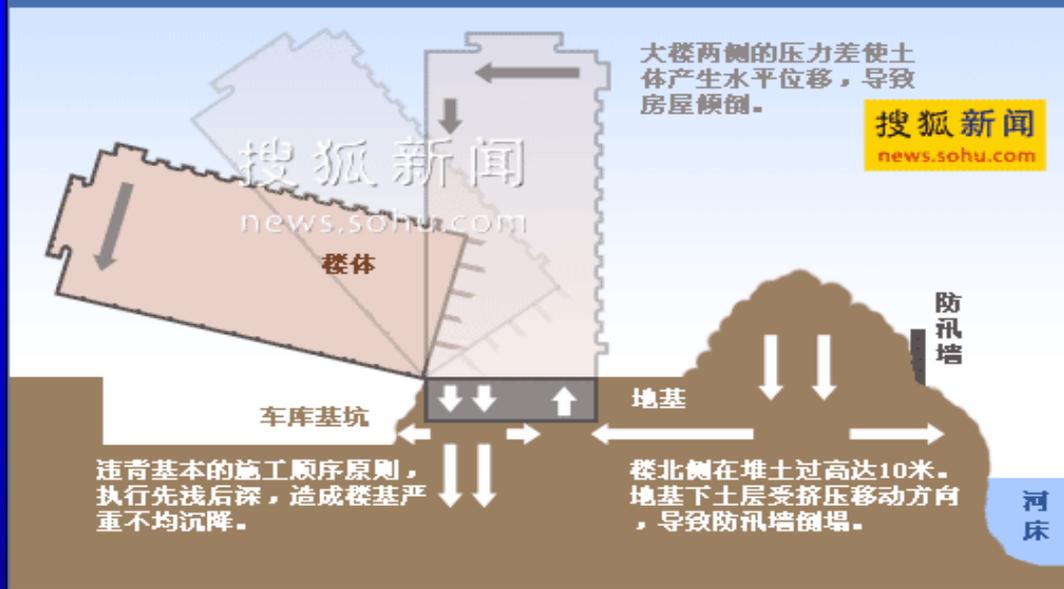
加拿大特朗斯康谷仓



**事件：** 2009年6月27日清晨，上海莲花南路西侧“莲花河畔景苑”小区一栋在建13层住宅楼整体倒塌，造成1名工人死亡，无人受伤（幸运：尚未交付使用）

上海“楼脆脆”

## 上海莲花南路楼盘倒塌示意



# 上海“楼脆脆”

## 专家认定的原因：

紧贴7号楼北侧，在短期内堆土过高，最高处达10米左右；与此同时，紧邻大楼南侧的地下车库基坑开挖4.6米，大楼两侧的“**压力差**”使土体产生水平位移，水平力超过了桩基的抗侧能力，导致房屋倾倒塌

## 8.1 概述

### **承载力的概念：Bearing capacity**

地基承受荷载的能力。数值上用地基单位面积上所能承受的荷载来表示。

### **极限承载力 Ultimate bearing capacity**

地基承受荷载的极限能力。数值上等于地基所能承受的最大荷载。

### **容许承载力 $\approx$ 承载力设计值(特征值)**

保留足够安全储备，且满足一定变形要求的承载力。也即能够保证建筑物正常使用所要求的地基承载力。



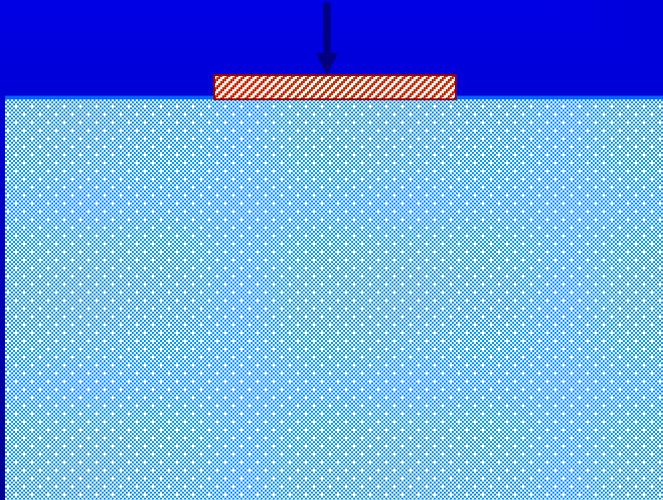
## § 8.2 地基破坏模式及其变形过程



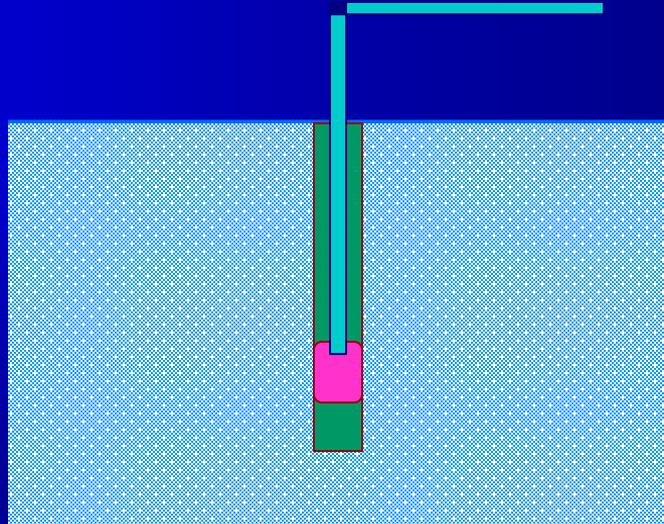
# 一、载荷试验

## 现场试验确定地基承载力

载荷试验



旁压试验





2003 / 8 / 6





## 静载荷试验：

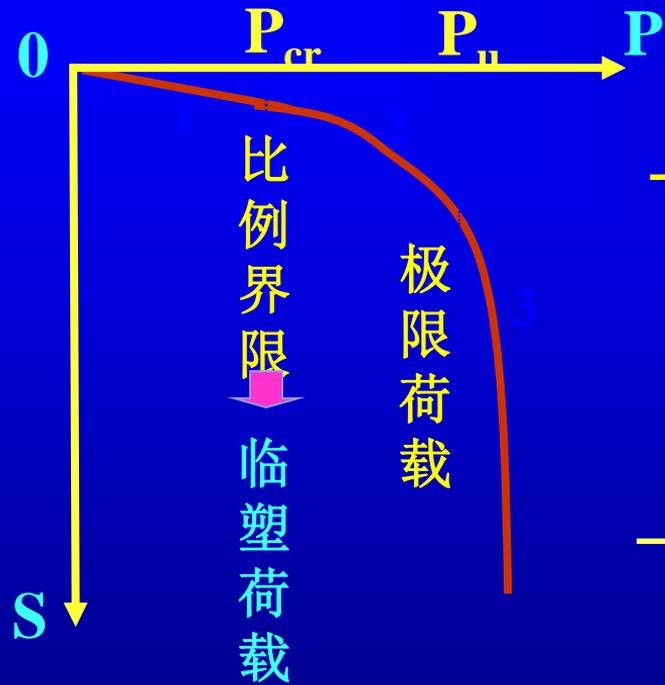
- 1 分级加载，分级不少于8级，每级沉降稳定后再进行下一级加载；
- 2  $P_u$ 取值：满足终止加载标准（破坏标准）的某级荷载的上一级荷载作为极限荷载

## 终止加载标准：《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2011）

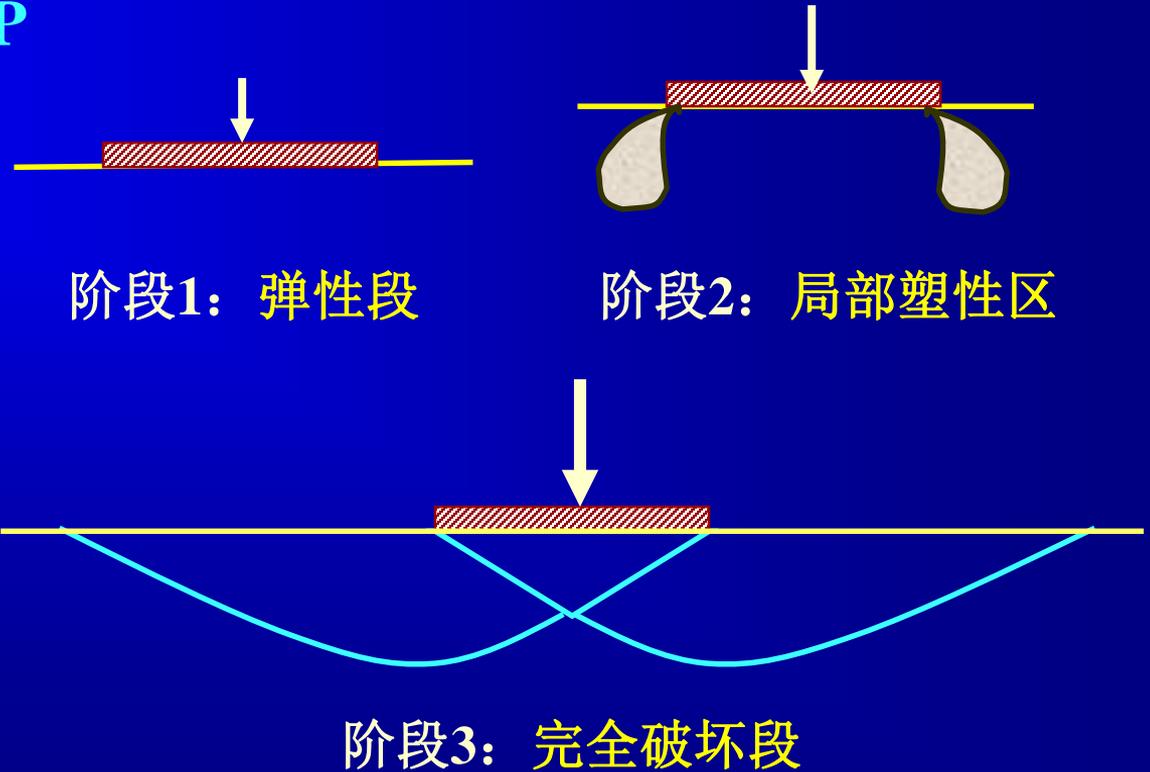
当出现下列情况之一时，可终止加载：

- 1 承压板周围的土明显侧向挤出
- 2 沉降  $s$  急骤增大，荷载~沉降（ $p\sim s$ ）曲线出现陡降段
- 3 在某一荷载下，24小时内沉降速率不能达到稳定
- 4 沉降量与承压板宽度或直径之比 $s/b \geq 0.06$

## 二、地基的破坏模式及变形过程



**P~S曲线**



# 地基破坏形式

## 1 竖直荷载下地基破坏的形式

1) 整体剪切破坏

2) 局部剪切破坏

3) 冲切破坏（刺入剪切破坏）

## 2 竖直和水平荷载下地基破坏形式

1) 表面滑动 水平力大

2) 深层滑动 竖直荷载大

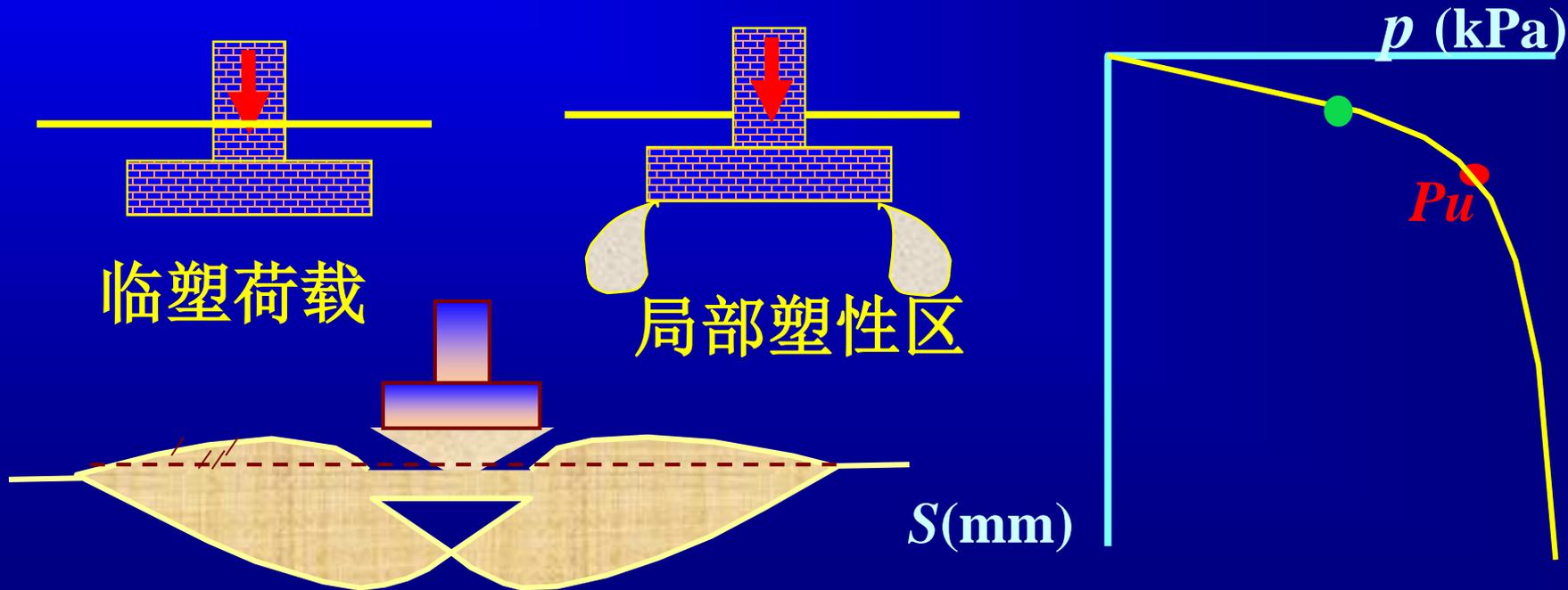


# 1). 整体剪切破坏

土质坚实密实砂土，坚硬粘土

基础埋深浅

曲线开始近直线，随后沉降陡增，两侧土体隆起。

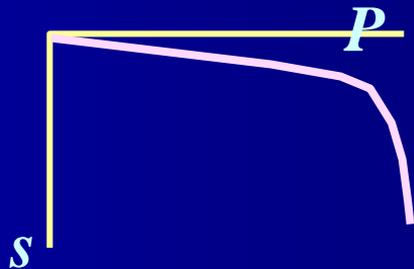


## 1). 整体破坏

土质坚实, 基础埋深浅  
曲线开始近直线, 随后  
沉降陡增, 两侧土体隆起。

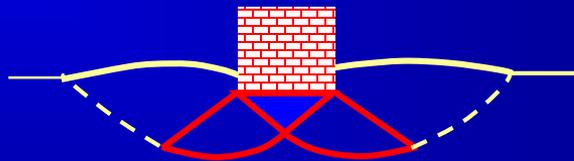


整体破坏

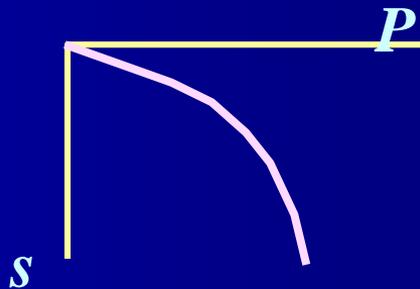


## 2). 局部剪切

松软地基, 埋深较大;  
曲线开始就是非线性,  
没有明显的骤降段。

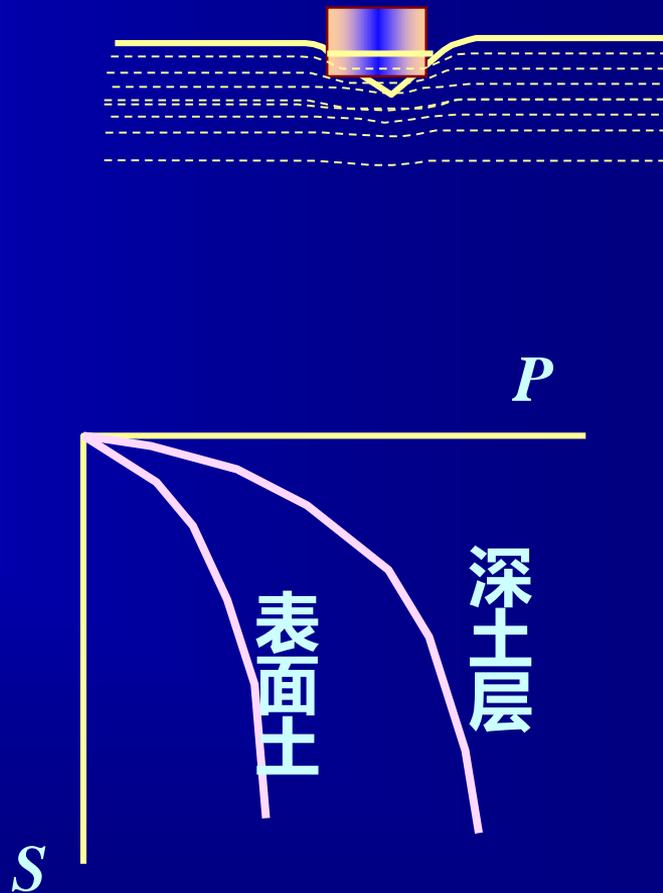


局部剪切



### 3) 冲切破坏（刺入破坏）

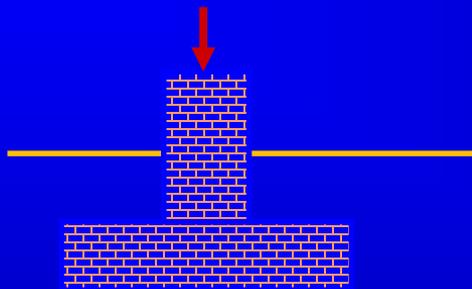
松软地基，埋深较大  
基础几乎垂直下切，  
两侧无土体隆起。



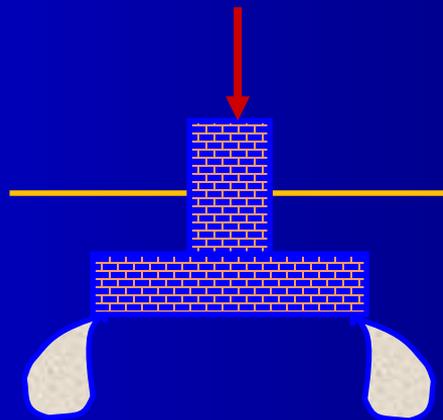
## § 8.3 临塑荷载和临界荷载



## 8.2 临塑荷载与临界荷载



1 弹性阶段



2 局部塑性区

### 临塑荷载：

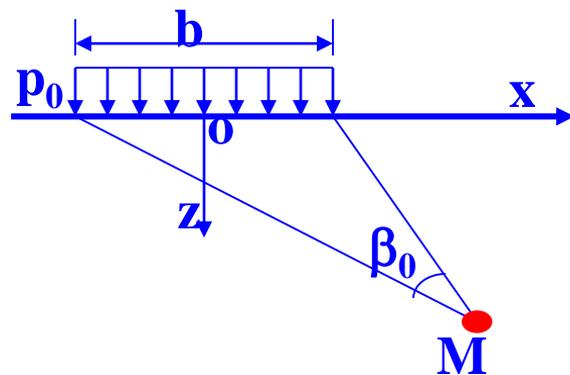
地基处于弹性阶段与局部塑性阶段界限状态时对应的荷载。此时地基中任一点都未达到塑性状态，但即将达到

## 教材P106 图3.29

P107, 公式 (3-39)

均布的条形荷载 $p_0$ 沿 $x$ 轴分布, 由线荷载的弹性理论可得 $M$ 点的大小主应力表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{aligned} = \frac{p_0}{\pi} (\beta_0 \pm \sin \beta_0)$$



**M点的总应力=自重应力+附加应力**

# 1、临塑荷载 (条形基础)

- M点土的自重应力

$$\sigma_{s1} = \gamma_0 d + \gamma z$$

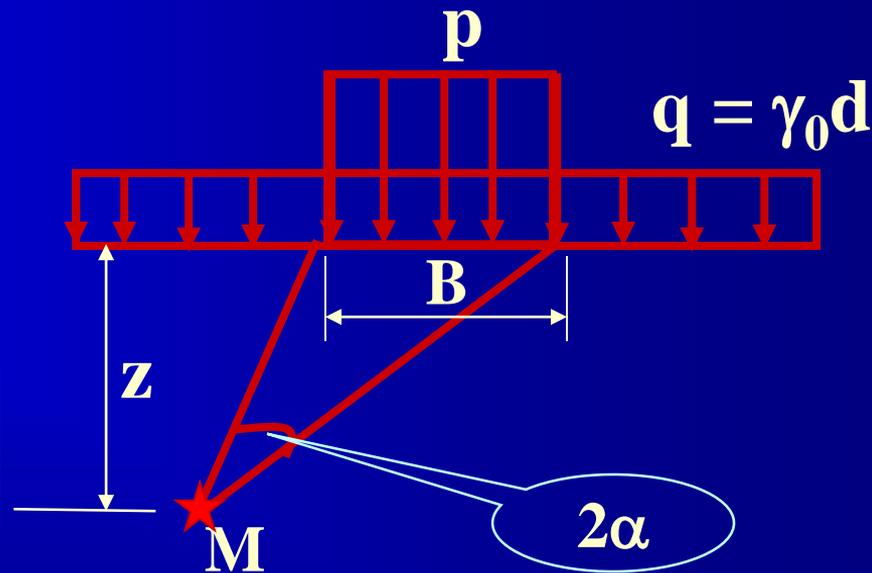
$$\sigma_{s3} = k_0 (\gamma_0 d + \gamma z)$$

- 附加应力

$$\sigma_{1,3} = \frac{p - \gamma_0 d}{\pi} (2\alpha \pm \sin 2\alpha)$$

- 合力= 设  $k_0 = 1.0$

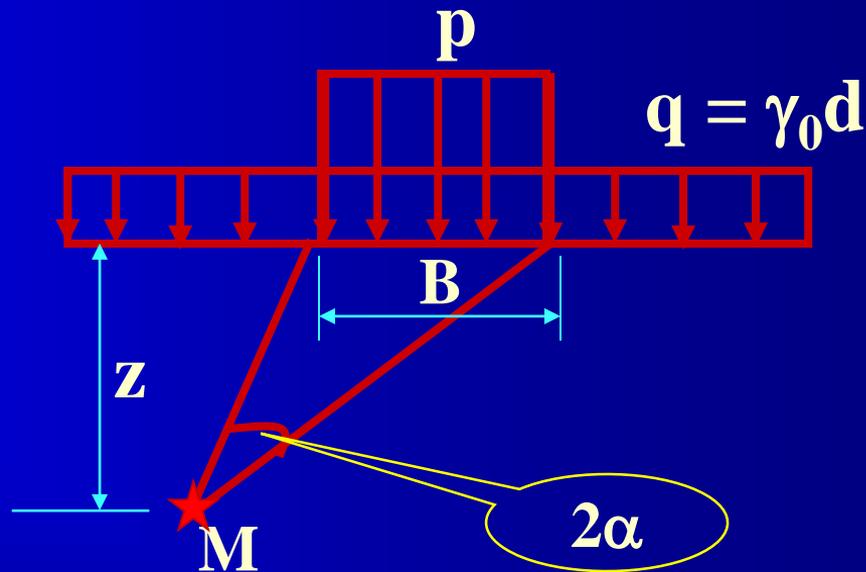
$$\sigma_{1,3} = \frac{p - \gamma_0 d}{\pi} (2\alpha \pm \sin 2\alpha) + \gamma_0 d + \gamma z$$



# 临塑荷载

- 极限平衡条件:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi$$



将 $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ 的解代入极限平衡条件, 得到:

$$z = \frac{p - \gamma_0 d}{\gamma \pi} \left( \frac{\sin 2\alpha}{\sin \varphi} - 2\alpha \right) - \frac{c}{\gamma} \operatorname{ctg} \varphi - d \frac{\gamma_0}{\gamma}$$

由 $z$ 与 $\alpha$ 的单值关系可求出 $z$ 的极值

$$z_{\max} = \frac{p - \gamma_0 d}{\gamma \pi} \left( \operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{c}{\gamma} \operatorname{ctg} \varphi - d \frac{\gamma_0}{\gamma}$$

•  $Z_{\max}=0$

$$p_{cr} = \gamma_0 d N_q + c N_c$$

临塑荷载

其中

$$N_q = 1 + \frac{\pi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$$

$$N_c = \frac{\pi \operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$$

## 2、界限荷载

- $Z_{\max} = B/4$  或  $B/3$ :

$$p_{1/4} = \gamma B N_{1/4} + \gamma_0 d N_q + c N_c$$

$$p_{1/3} = \gamma B N_{1/3} + \gamma_0 d N_q + c N_c$$

临界荷载

其中

$$N_{1/4} = \frac{\pi}{4 \left( \operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right)}$$

$$N_{1/3} = \frac{\pi}{3 \left( \operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right)}$$

# 临塑荷载和界限荷载的承载力系数

$$p = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} + q N_q + c N_c$$

	$N_{\gamma}$	$N_q$	$N_c$
$p_{cr}$	0	$1 + \pi / (c \cot \varphi - \pi / 2 + \varphi)$	$(N_q - 1) \cot \varphi$
$p_{1/4}$	$(N_q - 1) / 2$		
$p_{1/3}$	$2(N_q - 1) / 3$		

# 临塑荷载和临界荷载

• 特例： $\varphi=0$  时

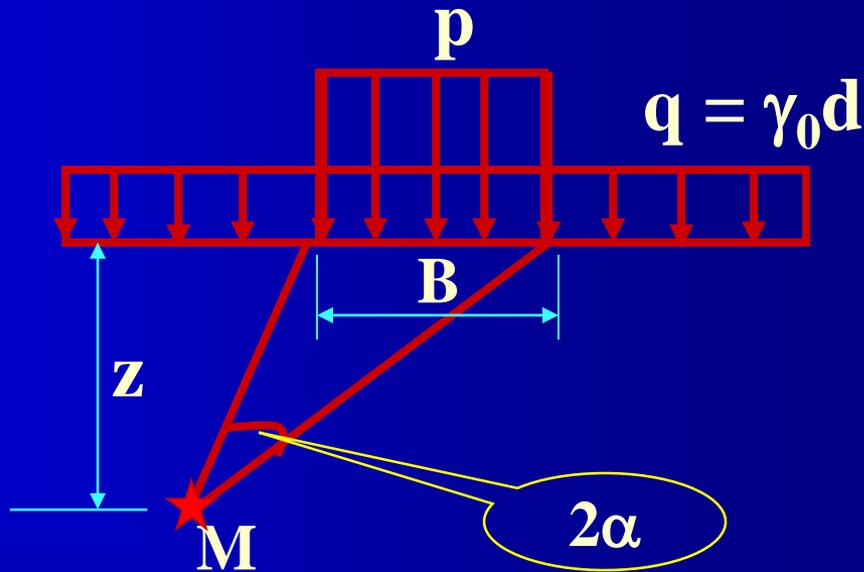
极限平衡条件：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c$$

将 $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ 的解代入极限平衡条件，得到：

$$\frac{p - \gamma_0 d}{\pi} \cdot 2 \sin 2\alpha = 2c$$

即  $p < \gamma_0 d + \frac{\pi c}{\sin 2\alpha}$



时地基不会出现塑性区

## 4.2 临塑荷载与临界荷载

$$p < \gamma_0 d + \frac{\pi c}{\sin 2\alpha}$$

$2\alpha = \pi/2$  时右端为最小

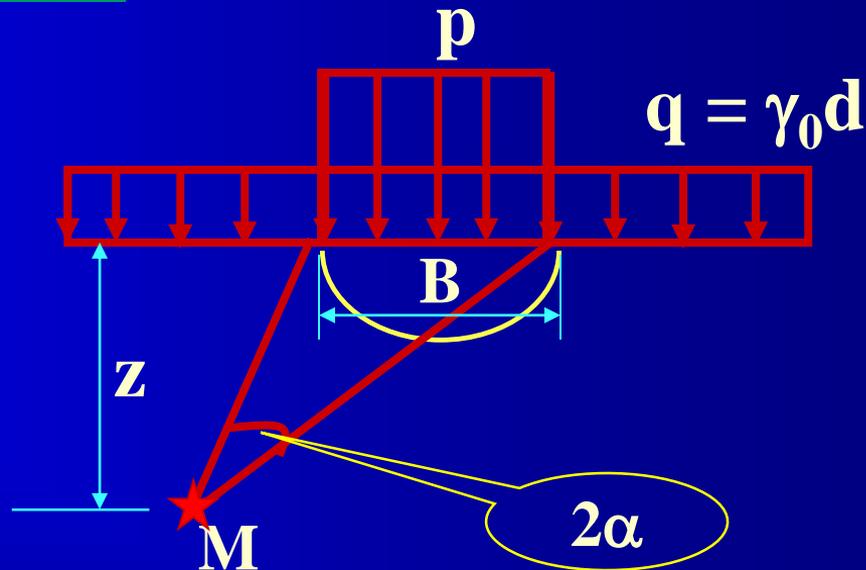
此时其轨迹为以基底为直径的一个圆弧

- 临塑荷载

$$p_{cr} = \gamma_0 d + \pi c$$

- 界限荷载

$$p_{1/4} = p_{1/3} = p_{cr} = \gamma_0 d + \pi c$$



## • 讨论

- 1 公式推导中假定 $k_0 = 1.0$ 与实际不符，但使问题得以简化
- 2 计算临界荷载 $p_{1/4}$ ， $p_{1/3}$ 时土中已出现塑性区，此时仍按弹性理论计算土中应力，在理论上是矛盾的
- 3 公式来源于条形基础，但用于矩形基础时是偏于安全

## • 讨论

界限荷载:

$$p = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} + q N_q + c N_c$$

特例:  $\varphi=0$ 时 **B** 的变化对  $p_{1/4}$ 、 $p_{1/3}$  没有影响

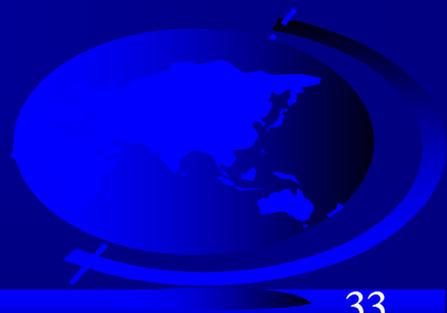
**B、d 增大**  
 **$\gamma$ 、 $c$ 、 $\varphi$  增大** }  $\rightarrow$   $p_{1/4}$ 、 $p_{1/3}$  增大

临塑荷载:

$$p_{cr} = \gamma_0 d N_q + c N_c$$

**B** 的变化对  $p_{cr}$  没有影响

## § 8.4 极限承载力计算



## 8.4 极限承载力计算

主要内容：

1 普朗德尔-瑞斯纳公式

2 太沙基公式

3 斯开普顿公式

4 汉森公式

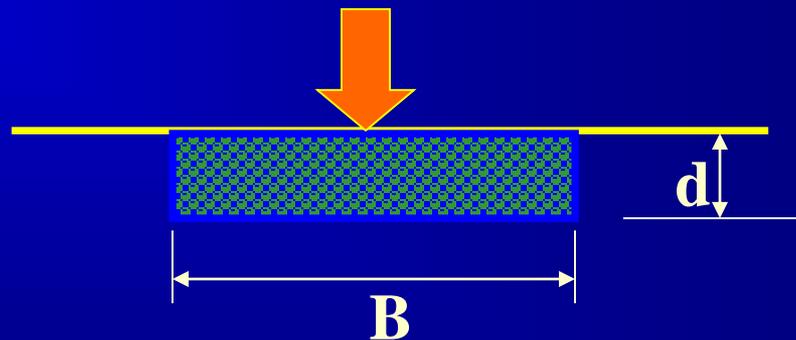
5 极限承载力的影响因素

# 一、普朗德尔-瑞斯纳公式

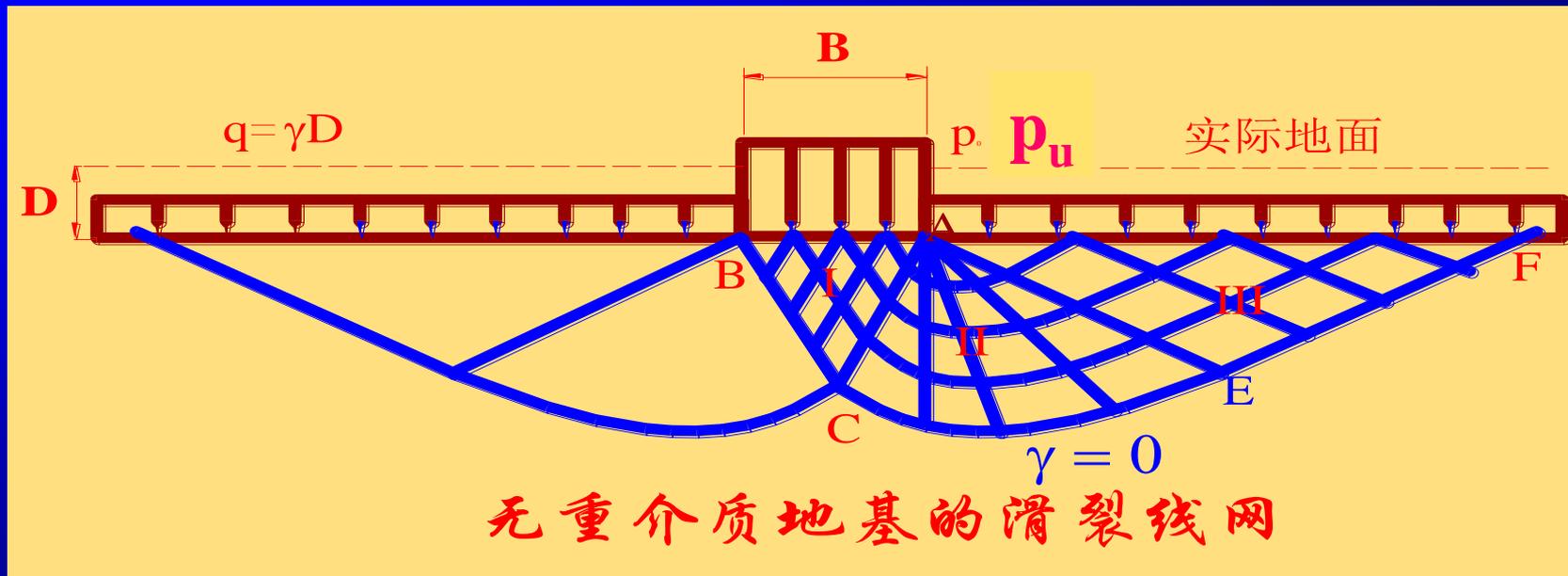
**概述：**普朗德尔(Prandtl, 1920)利用塑性力学针对无埋深条形基础得到极限承载力的理论解，雷斯纳(Reissner, 1924)将其推广到有埋深的情况。

**假定：**

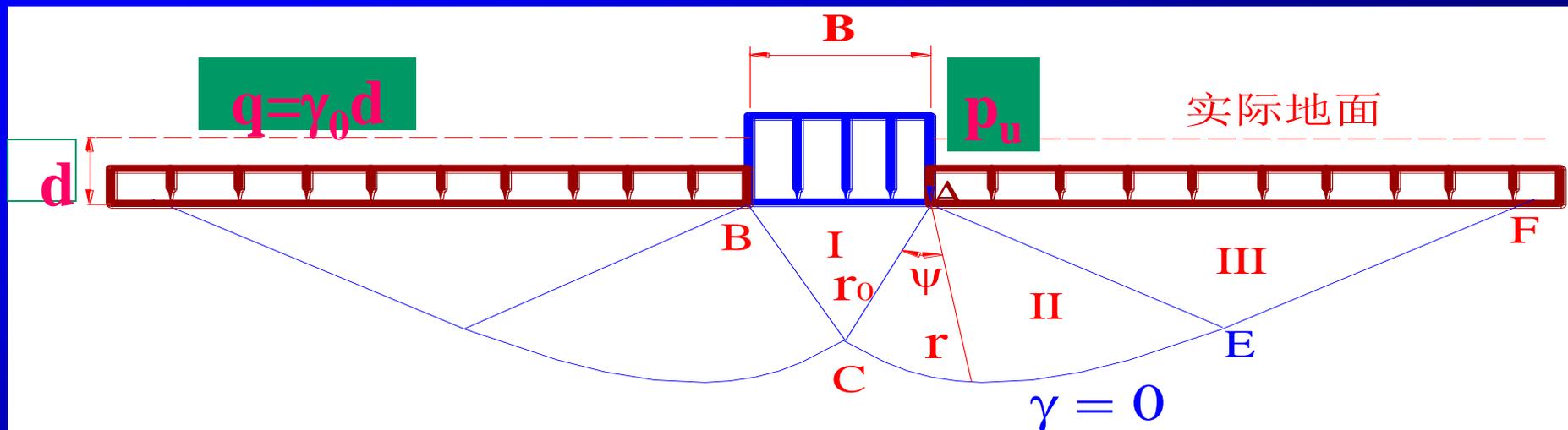
- 1 基底以下土  $\gamma=0$
- 2 基底完全光滑
- 3 埋深  $d < B$  (底宽)



## 8.4 极限承载力计算



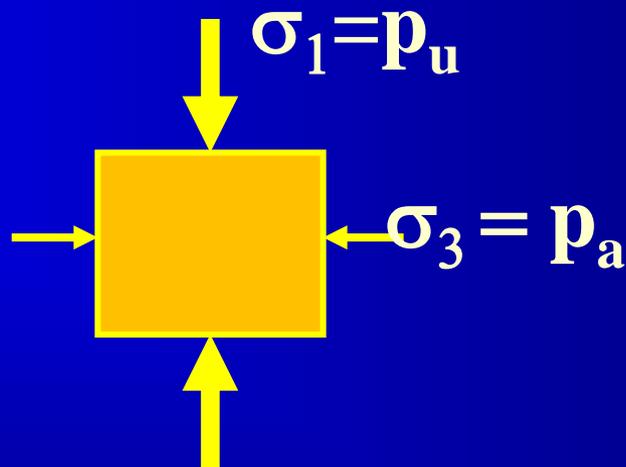
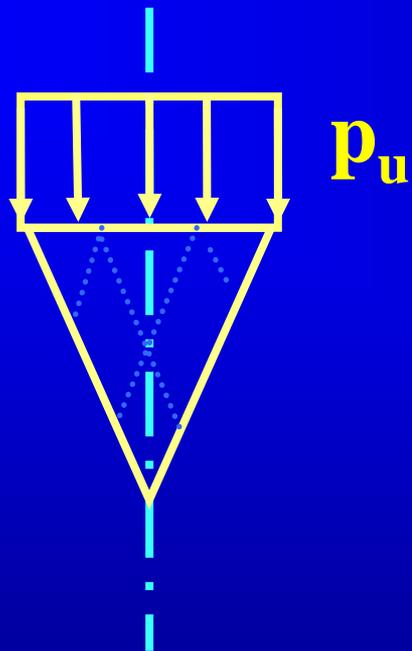
利用塑性力学的滑移线场理论



- 1 朗肯主动区:  $P_u$ 为大主应力, AC与水平向夹角 $45^\circ + \varphi/2$
- 2 过渡区:  $r = r_0 e^{\psi \tan \varphi}$
- 3 朗肯被动区: 水平方向为大主应力, EF与水平向夹角 $45^\circ - \varphi/2$

## 8.4 极限承载力计算

I 区

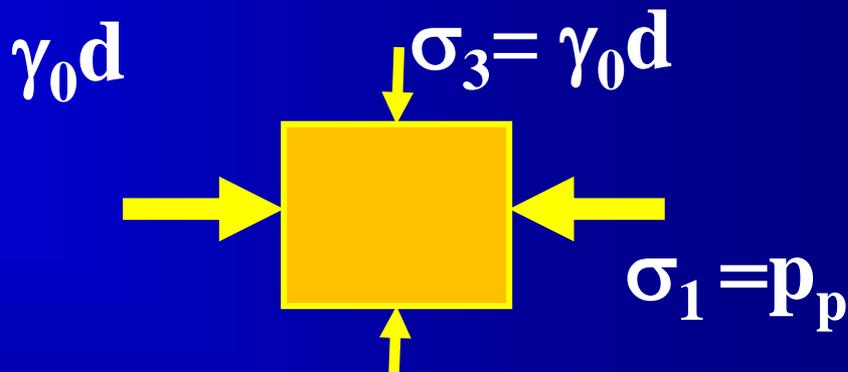
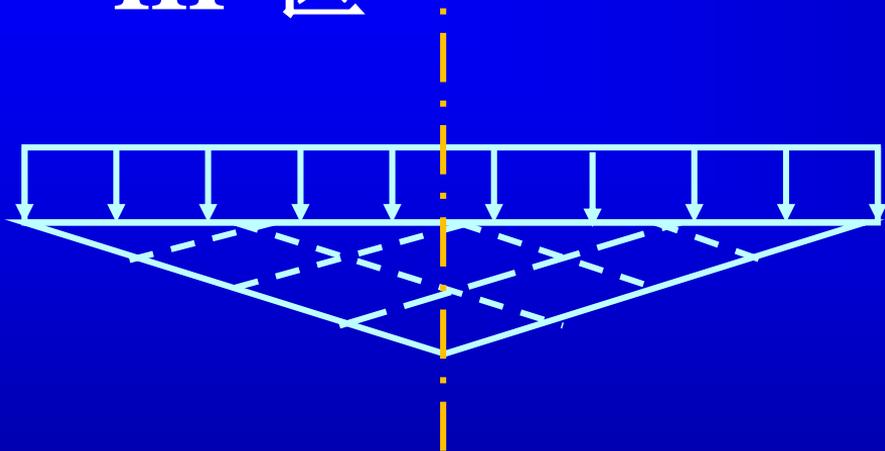


$$p_a = p_u K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

## 8.4 极限承载力计算

III 区

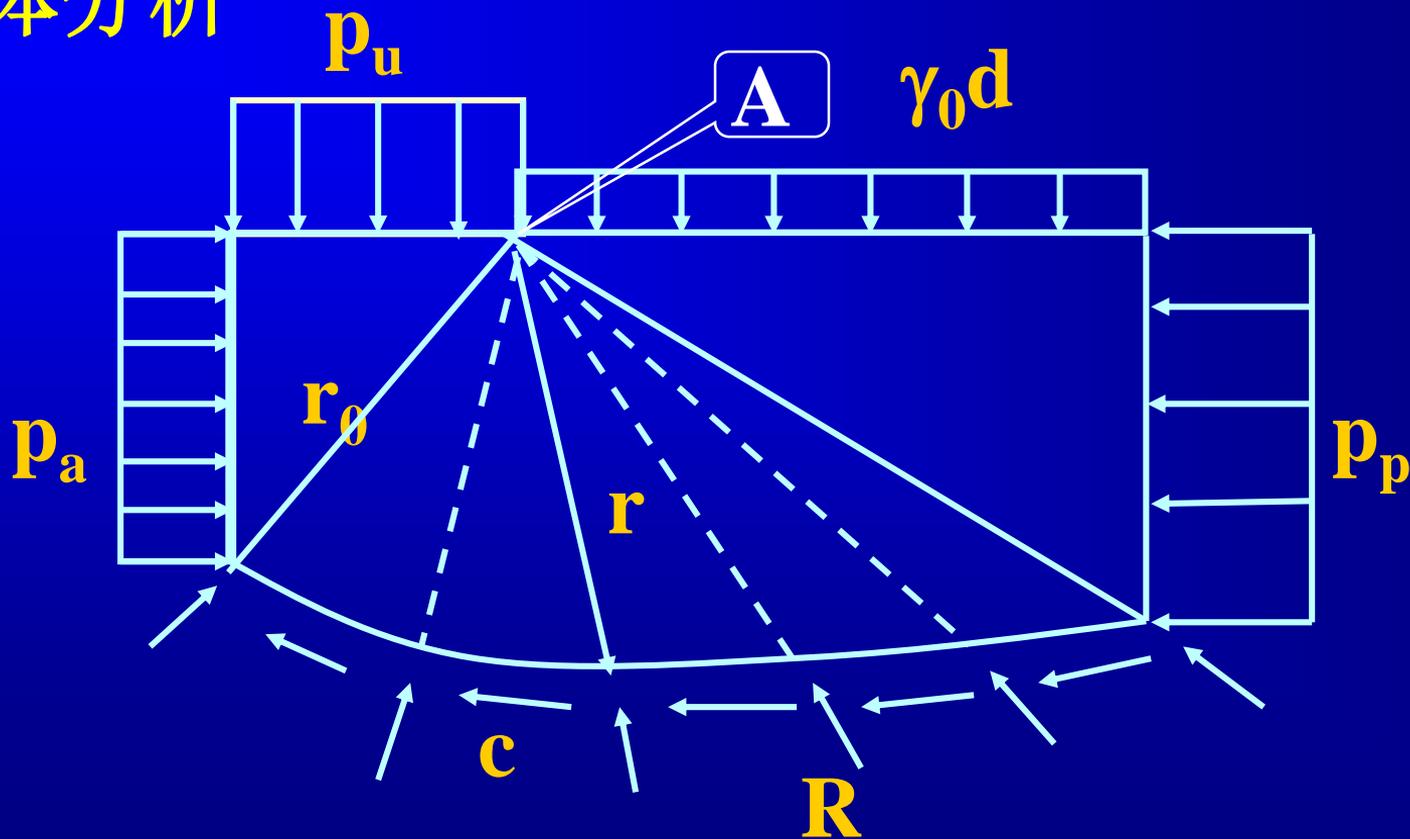


$$p_p = \gamma_0 d K_p + 2c \sqrt{K_p}$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

# 8.4 极限承载力计算

## 隔离体分析



## 8.4 极限承载力计算

### 1、普朗德尔-瑞斯纳极限承载力：

$$p_u = \gamma_0 d \cdot N_q + c \cdot N_c$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) c \tan \varphi$$

特例： $\varphi=0$ 时  $p_u = \gamma_0 d + (\pi+2)c$

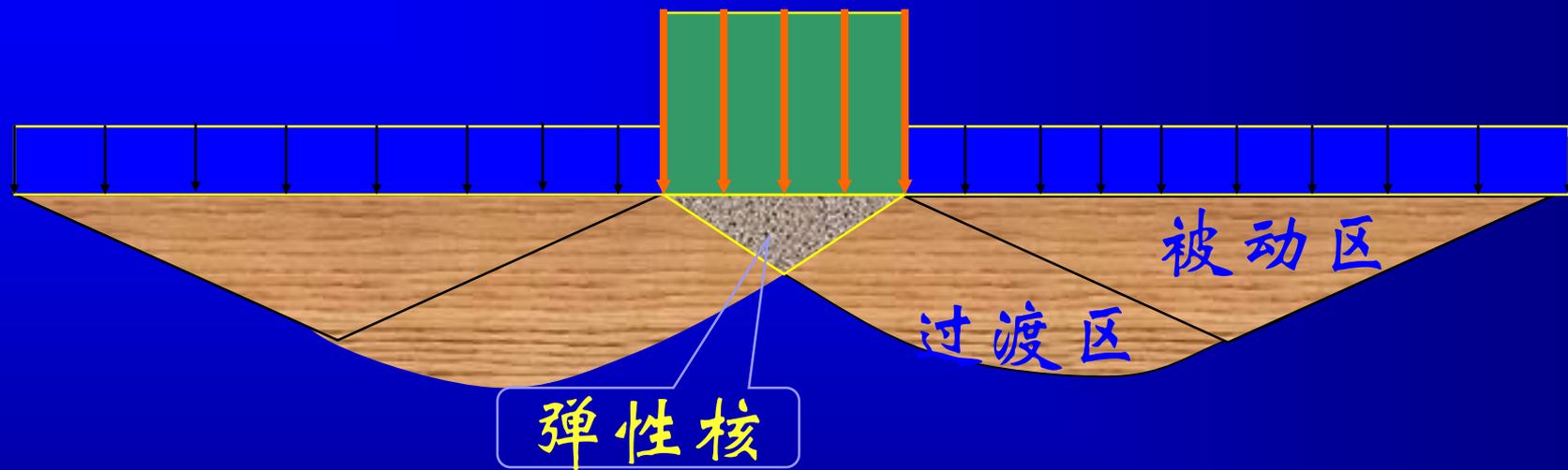
## 8.4 极限承载力计算

### 2、太沙基 (Terzaghi) 公式

基本条件：

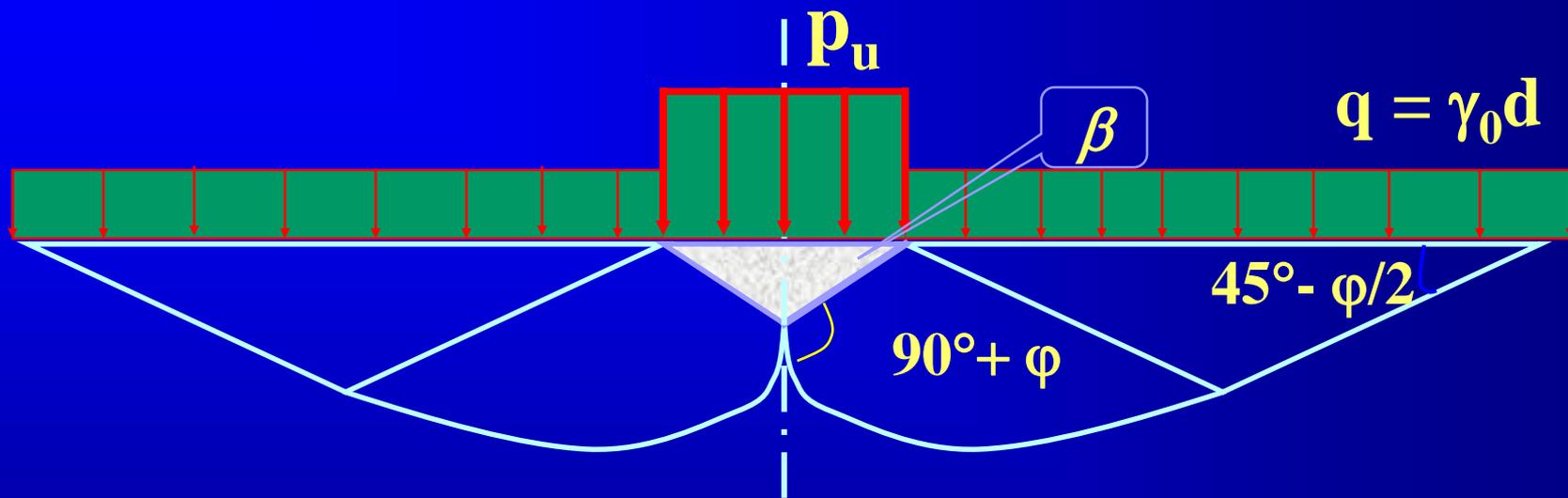
- 1 考虑土体的重力
- 2 基底完全粗糙
- 3 忽略基底以上土体本身的阻力，  
基底以上两侧简化为均布荷载  $q = \gamma_0 d$

## 8.4 极限承载力计算



太沙基 (Terzaghi) 极限承载力示意

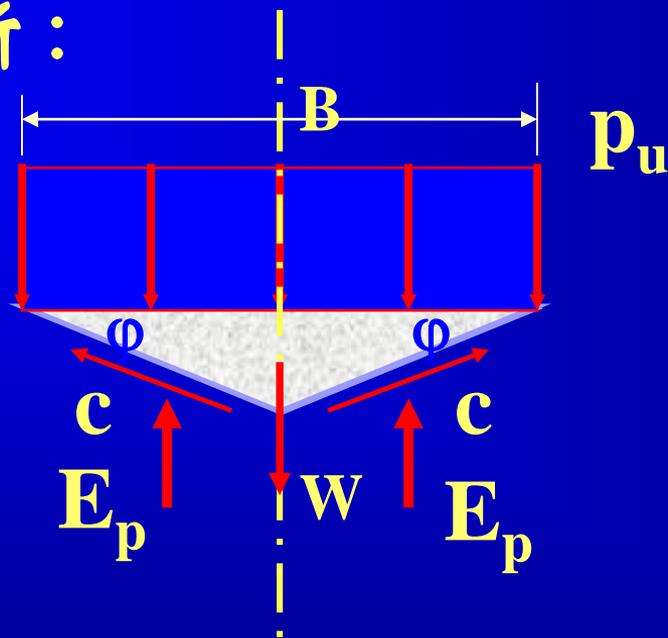
## 8.4 极限承载力计算



基底完全粗糙:  $\beta = \phi$

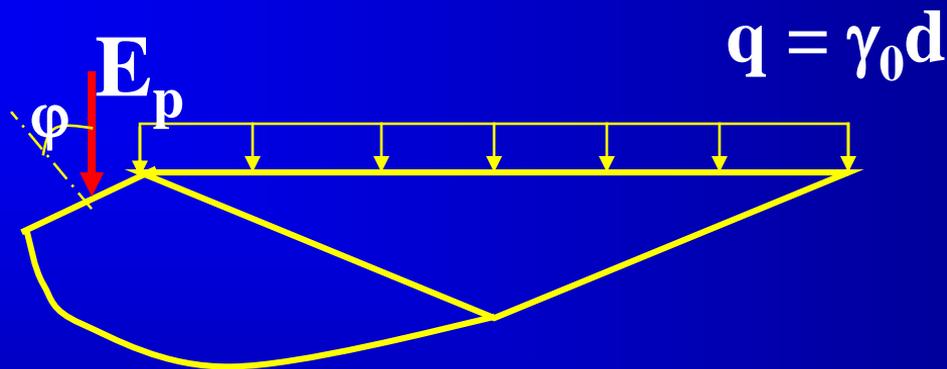
## 8.4 极限承载力计算

弹性核受力分析：



$$p_u B = 2E_p + cB \operatorname{tg} \phi - \frac{\gamma B^2}{4} \operatorname{tg} \phi$$

# 被动土压力 $E_p$ :



$$E_p = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3}$$

$E_{p1}$  : 土体自重产生的抗力

$E_{p2}$  : 滑裂面上粘聚力产生的抗力

$E_{p3}$  : 侧荷载  $q = \gamma_0 d$  产生的抗力

## 8.4 极限承载力计算

Terzaghi极限承载力公式：

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B \cdot N_\gamma + q \cdot N_q + c \cdot N_c$$

$N_\gamma$ 、 $N_q$ 、 $N_c$ ——承载力系数，只取决于 $\varphi$

## 8.4 极限承载力计算

圆形基础的直径

**圆形基础：**

$$p_u = 0.3\gamma D \cdot N_\gamma + q \cdot N_q + 1.2c \cdot N_c$$

**方形基础：**

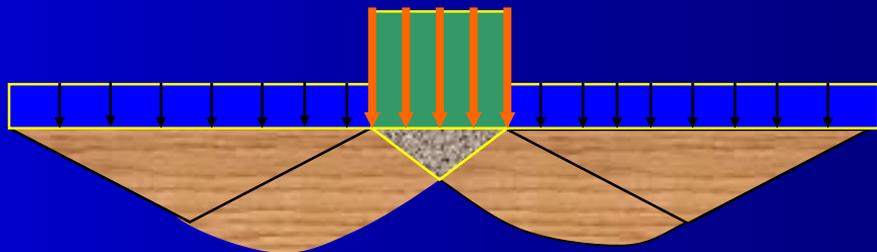
$$p_u = 0.4\gamma B \cdot N_\gamma + q \cdot N_q + 1.2c \cdot N_c$$

**局部剪切：**

$$\operatorname{tg} \bar{\varphi} = \frac{2}{3} \operatorname{tg} \varphi \quad \bar{c} = \frac{2}{3} c$$

## 8.4 极限承载力计算

极限承载力 $p_u$ 的组成:



$$\frac{1}{2} \gamma B \cdot N_\gamma$$

滑动土体自重产生的抗力

$$c \cdot N_c$$

滑裂面上的粘聚力产生的抗力

$$q \cdot N_q$$

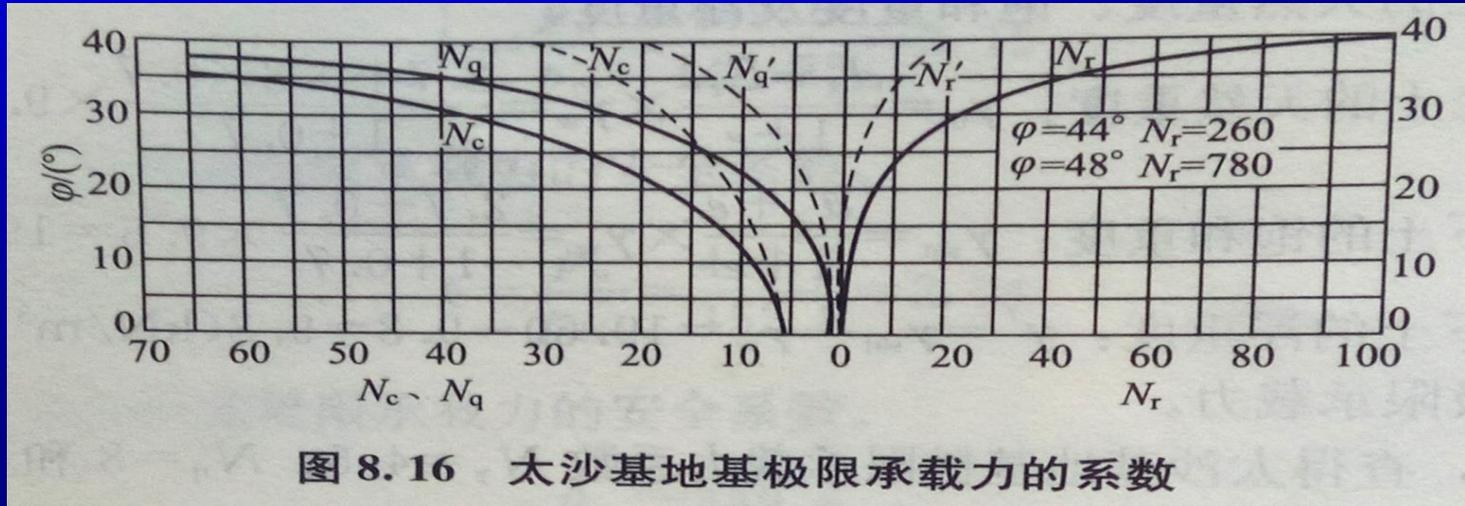
侧荷载  $\gamma_0 d$  产生的抗力

# 太沙基地基极限承载力公式

方形基础：式8-53

圆形基础：式8-52

矩形基础：在方形和条形基础之间进行内插。对局部剪切破坏：经验公式（8-51）



## 8.4 极限承载力计算

### 3、斯凯普顿 (Skempton) 公式

对于饱和软粘土地基  $\varphi = 0$ ：

条形基础下：

$$p_u = (\pi + 2)c + \gamma_0 d$$

普朗德尔-瑞斯纳公式的特例

矩形基础下：

$$p_u = 5c\left(1 + \frac{b}{5l}\right)\left(1 + \frac{d}{5b}\right) + \gamma_0 d$$

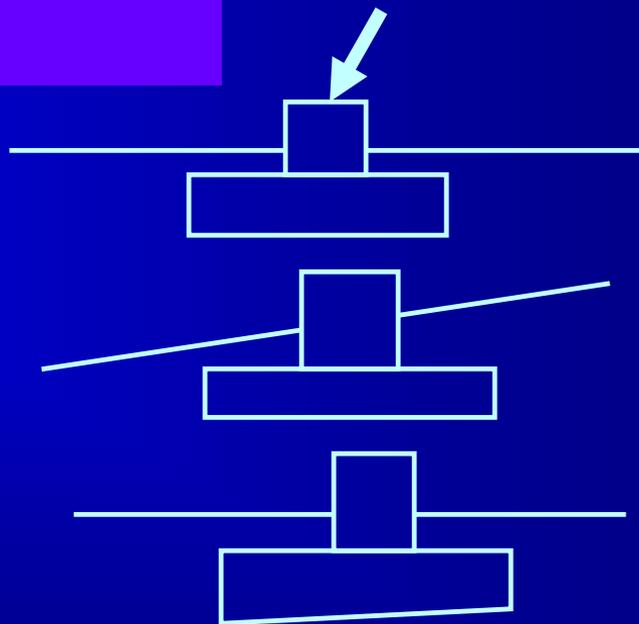
斯凯普顿公式

## 8.4 极限承载力计算

### 4、汉森 (Hansen) 公式

#### 增加修正系数

- 基础形状修正
- 深度修正
- 荷载倾斜修正
- 地面倾斜修正
- 基底倾斜修正



$$p_u = \frac{1}{2} \gamma B \cdot N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma + q \cdot N_q s_q d_q i_q g_q b_q + c \cdot N_c s_c d_c i_c g_c b_c$$

## 8.4 极限承载力计算

### 5、极限承载力的影响因素

一般公式:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B \cdot N_\gamma + q \cdot N_q + c \cdot N_c$$



## 8.4 极限承载力计算

饱和软粘土地基  $\varphi = 0$ :

条形基础下:

$$P_u = (\pi + 2)c + \gamma_0 d$$

特例:  $B$ 的变化对 $P_u$ 没有影响

## 4 地基承载力的确定方法

承载力 { 极限承载力  
容许承载力：承载力特征值 (设计值)

# 地基临塑荷载、界限荷载、极限承载力

临塑荷载  $P_{cr}$

临界荷载  $P_{1/4}$ 、 $P_{1/3}$

极限荷载  $P_u$   
(极限承载力)

普朗德尔-瑞斯纳公式  
太沙基公式  
斯凯普顿公式  
汉森公式

**问题：** 如何确定容许承载力？

## 承载力 $f$ 的确定办法：

### • 1 通过公式计算

国内：  
取  $P_{1/4}$

① 要求较高： $f = P_{cr}$

② 一般情况下： $f = P_{1/4}$  或  $P_{1/3}$

③ 用极限荷载计算：

$$f = P_u / K$$

$K$ ---安全系数

$K = \left\{ \begin{array}{l} \text{太沙基：} K \geq 3.0 \\ \text{斯凯普顿：} K = 1.1 \sim 1.5 \\ \text{汉森公式：} K \geq 2.0 \end{array} \right.$

# 不同极限承载力公式的比较

P.299~300

表8-5, 表8-6



## 现行国家规范中取：

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k$$

以临界荷载 $P_{1/4}$   
为理论基础

$f_a$ ：承载力特征值（设计值）

$M_b$ 、 $M_d$ 、 $M_c$ ：承载力系数，与内摩擦角 $\varphi_k$ 有关

$\varphi_k$ ：基底下—倍短边宽深度内土的内摩擦角标准值

$b$ ：基底宽度，大于6m按6m取值，对于砂土小于3m按3m取值

$c_k$ ：基底下—倍短边宽深度内土的粘聚力标准值

《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2011）

## • 2 通过载荷试验确定

① 有明显直线段:

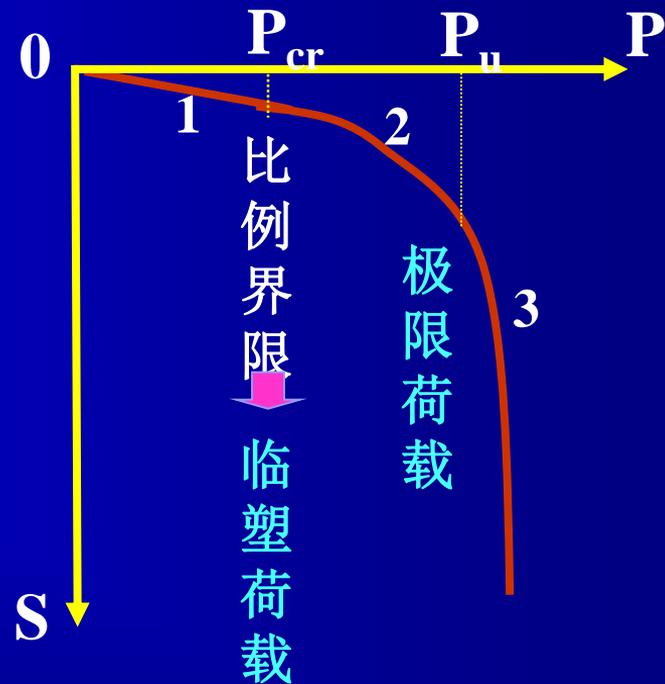
$$f_{ak} = P_{cr}$$

② 加载到破坏且  $P_u/2 < P_{cr}$  :

$$f_{ak} = P_u/2$$

③ 不能满足上述要求时:

取某一沉降量( $s/b=0.02$ )对应的荷载,  
但其值不大于最大加载量的一半



P~S 曲线

## 进行深度和宽度修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5)$$

$f_a$ ：深宽修正后的承载力特征值（设计值）

$f_{ak}$ ：承载力特征值（标准值）

$\eta_b$ 、 $\eta_d$ ：宽度和深度修正系数

$\gamma$ ：基底下土的重度，地下水位以下取浮重度

$\gamma_m$ ：基底以上土的加权平均重度，地下水位以下取浮重度

$b$ ：基底宽度(m)，大于6m按6m取值，小于3m按3m取值

$d$ ：基础埋深(m)

## 本章知识要点：

临塑荷载  $P_{cr}$

界限荷载  $P_{1/4}$ 、 $P_{1/3}$

极限荷载  $P_u$   
(极限承载力)

普朗德尔-瑞斯纳公式

太沙基公式

斯开普顿公式

汉森公式

## 承载力

极限承载力

承载力特征值 (设计值)

• 1 通过公式计算

• 2 通过载荷试验确定

• 3 通过经验确定

需要经过深度  
和宽度修正

# 本章目录

§ 8.1 概述

§ 8.2 地基破坏模式及其变形过程

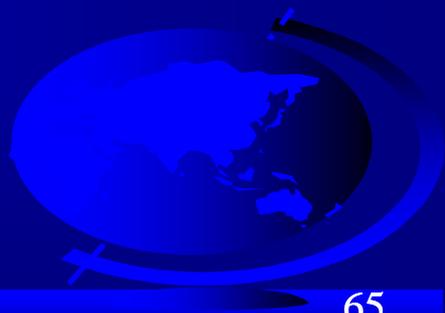
§ 8.3 临塑荷载和临界荷载

§ 8.4 极限承载力计算

§ 8.5 地基承载力的确定方法



本章结束



# 课后作业 (P.301~302)

简答题： 1

计算题： 1 要求：

- ①分别用太沙基公式和魏锡克公式计算极限承载力；
- ②计算地基的 $p_{cr}$ ，  $p_{1/4}$  和 $p_{1/3}$ 。