9 地 基 承 载 力

P291

9.1 概述

9.2 地基的失稳形式与过程

9.3 极限承载力计算

9.4 容许承载力的确定方法

请安装 SoilMechPPT 09Ding SWF播放器

9.1 概述

建筑物地基设计的基本要求：

稳定要求：荷载小于承载力（抗力）

地基承载力 —— 与土的强度有关

极限平衡条件：土体的剪切应力达到其抗剪强度时

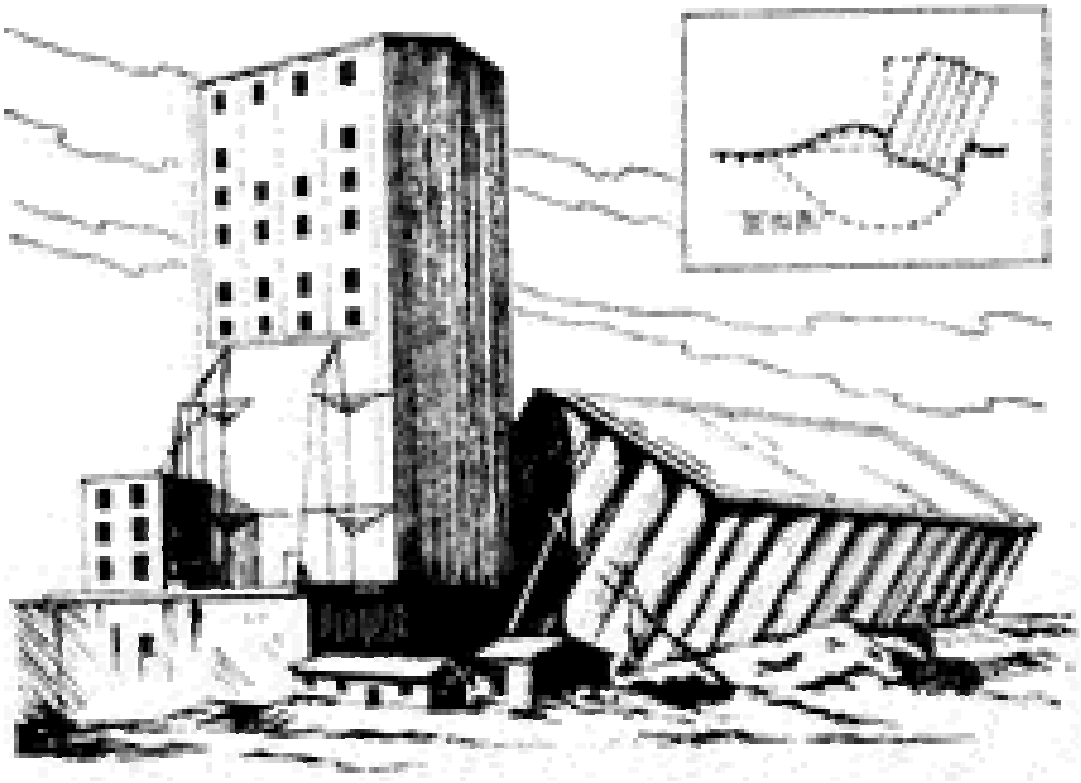
变形要求：变形小于设计允许值 S≤[S]

沉降计算（分层总和法） —— 与土的压缩性有关

9.1 概述

加拿大特朗斯康谷仓

概况：长59.4m，宽23.5m，高31.0m，共65个圆筒仓。
钢混筏板基础，厚61cm，埋深3.66m。
1911年动工，1913年完工，自重20000T。



事故：
1913年9月装谷物，10月17日装了31822T谷物时，

- 1小时竖向沉降达30.5cm
- 24小时倾斜26°53′
- 西端下沉7.32m
  东端上抬1.52m
- 上部钢混筒仓完好无损

地基失稳案例

1940年在粘土地基上的水泥仓地基破坏

倾覆

9.1 概述

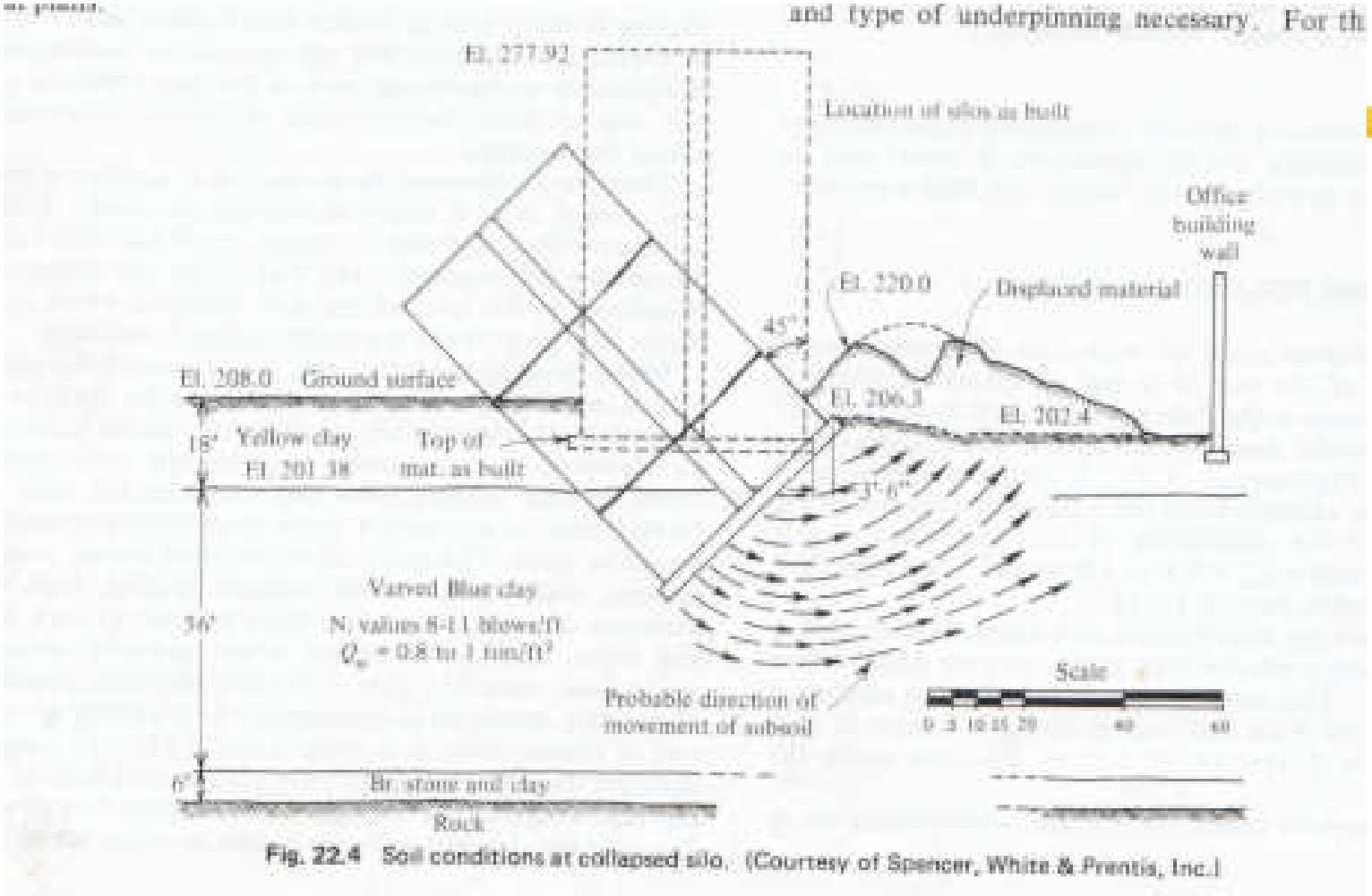


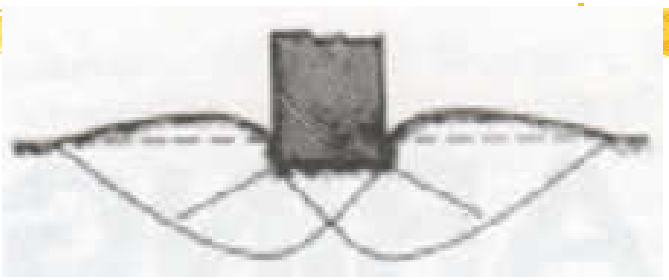
Fig. 22.4 Soil conditions at collapsed silo. (Courtesy of Spencer, White & Prentis, Inc.)

水泥仓地基的整体破坏

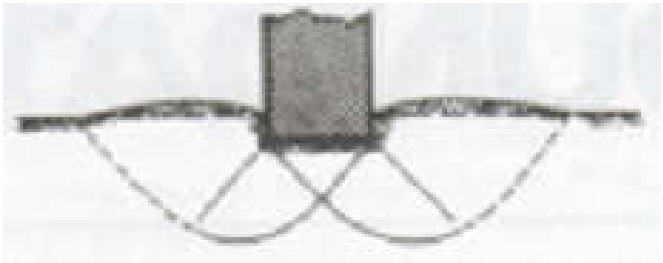
9.2.2 竖向荷载下地基的破坏形式

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。



2 局部剪切破坏



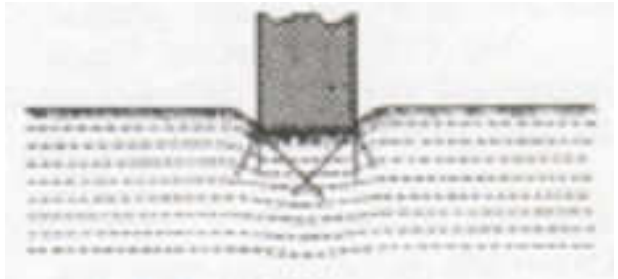
变形发展速率

有无隆起

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。

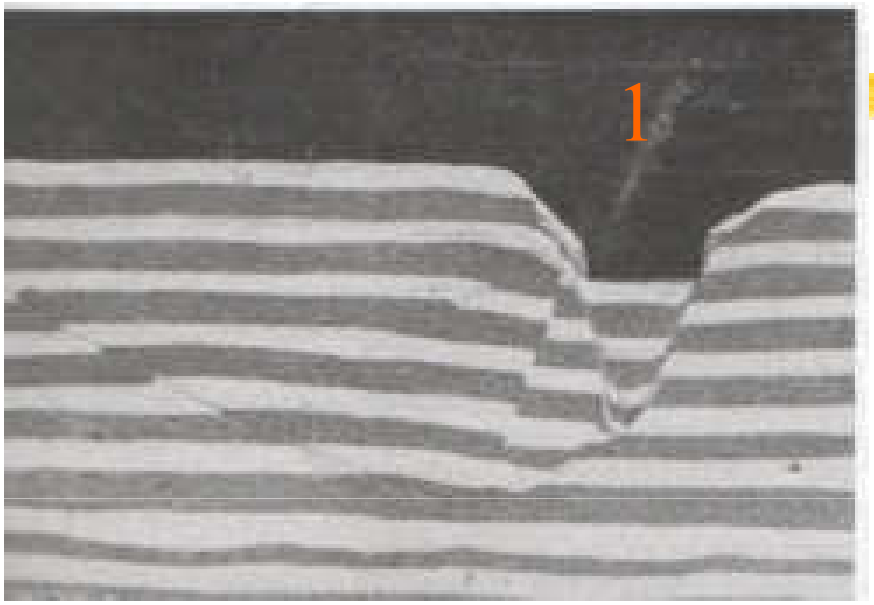
P192

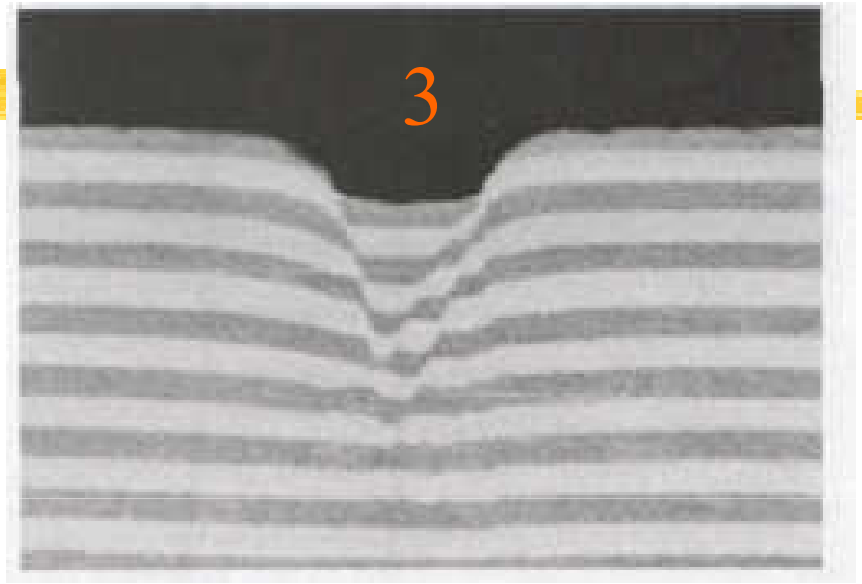
3 冲剪破坏

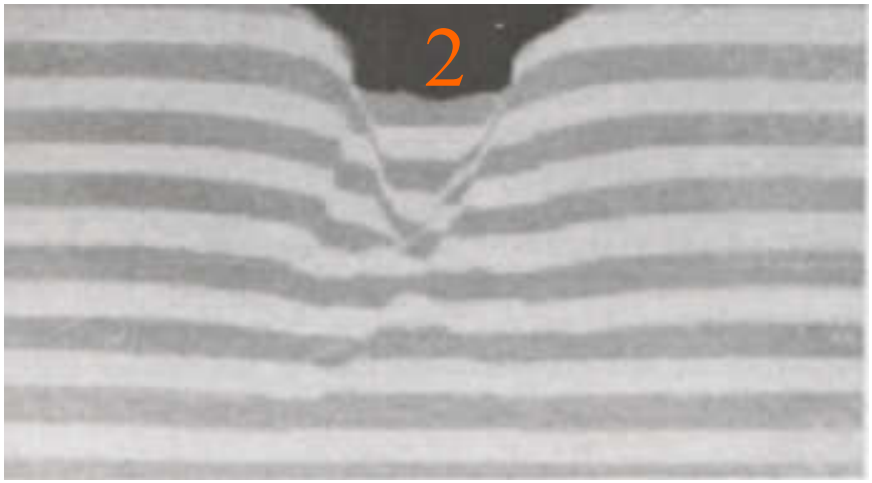


松软地基，埋深较大；荷载板几乎是垂直下切，两侧无土体隆起。

9.2.2 竖向荷载下地基的破坏形式







1 整体剪切破坏

2 局部剪切破坏

3 冲剪破坏

P192

相应出现的土体

9.2.2 竖向荷载下地基的破坏形式

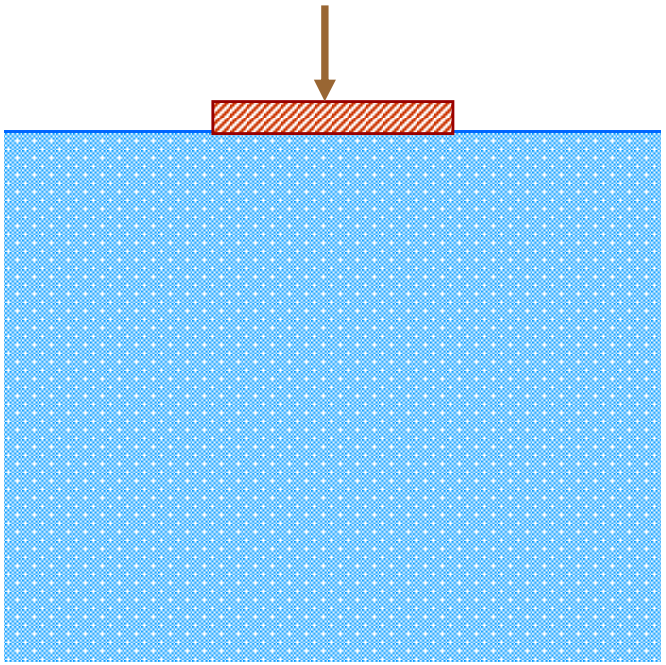
软粘土上的密砂
地基的冲剪破坏

P192

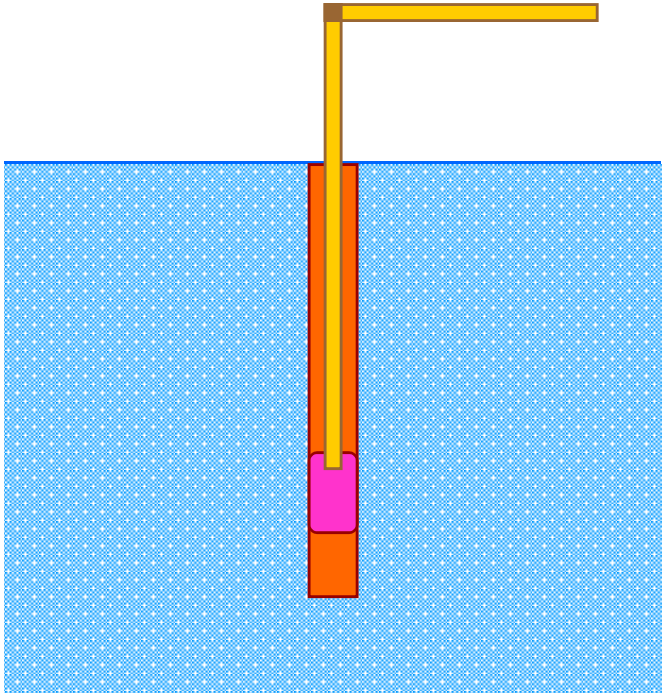
9.2 地基的失稳形式与过程

现场试验确定地基承载力

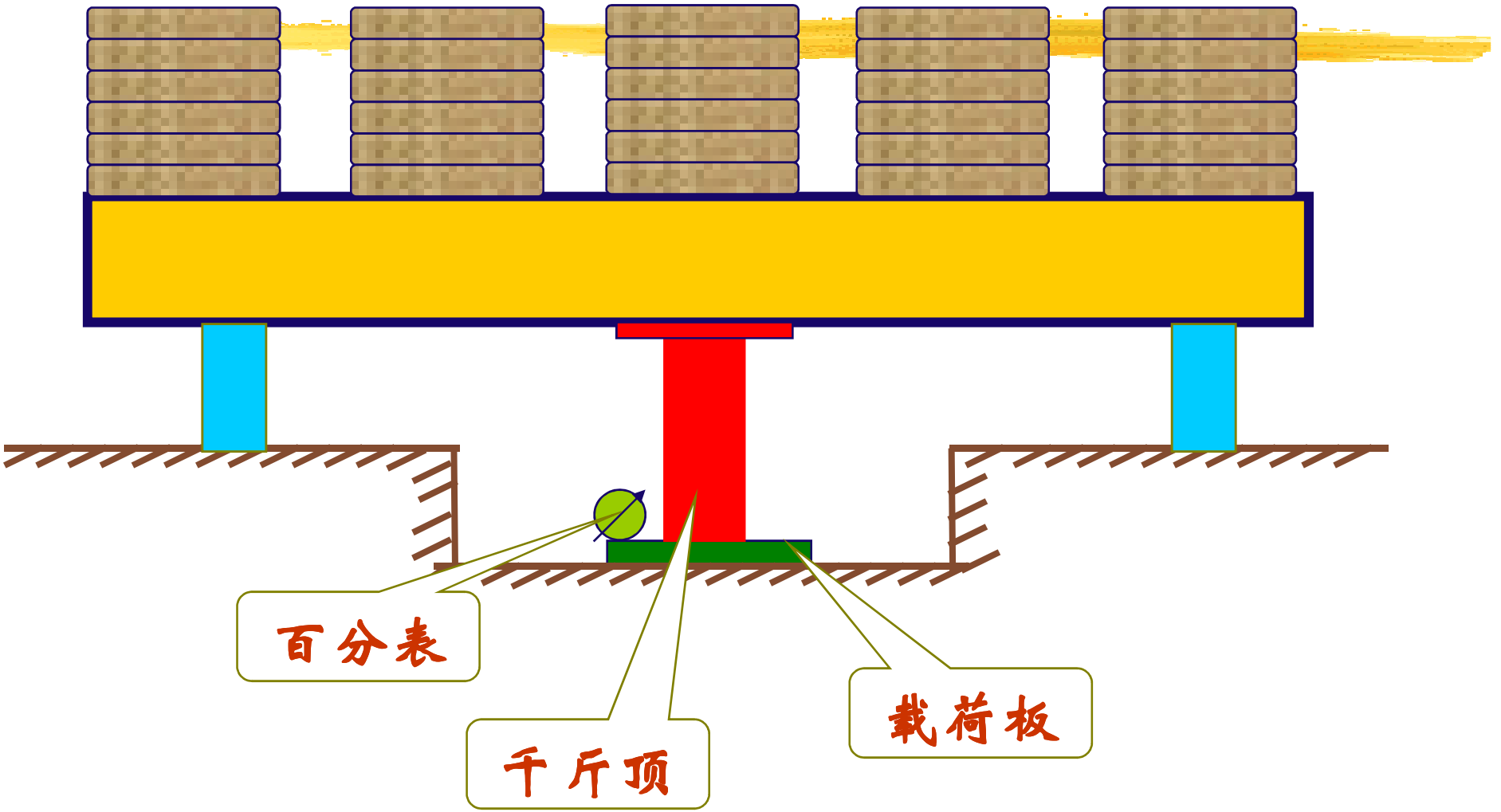
载荷试验



旁压试验

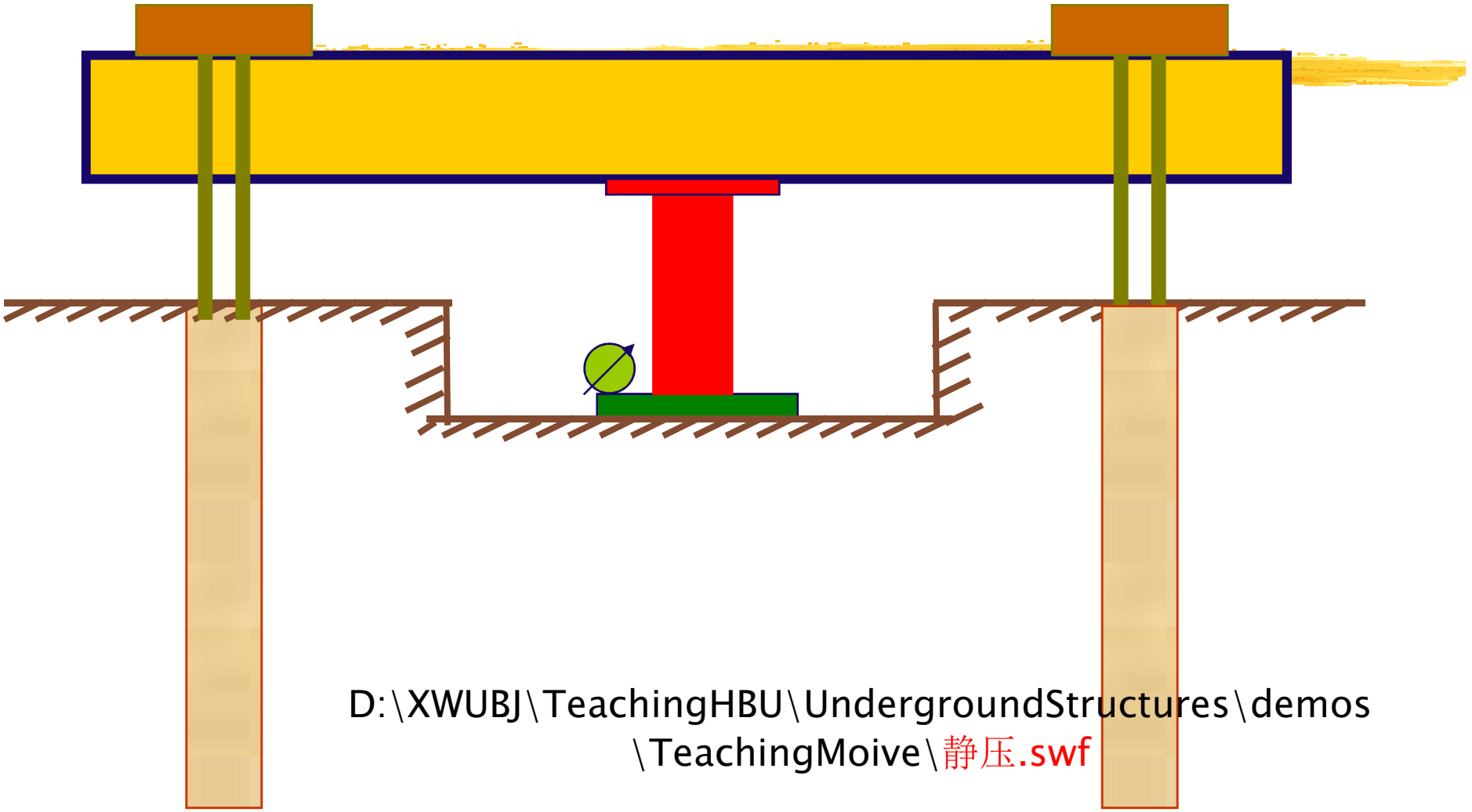


9.2 地基的失稳形式与过程



压载法

9.2 地基的失稳形式与过程



D:\XWUBJ\TeachingHBU\UndergroundStructures\demos\TeachingMoive\静压.swf

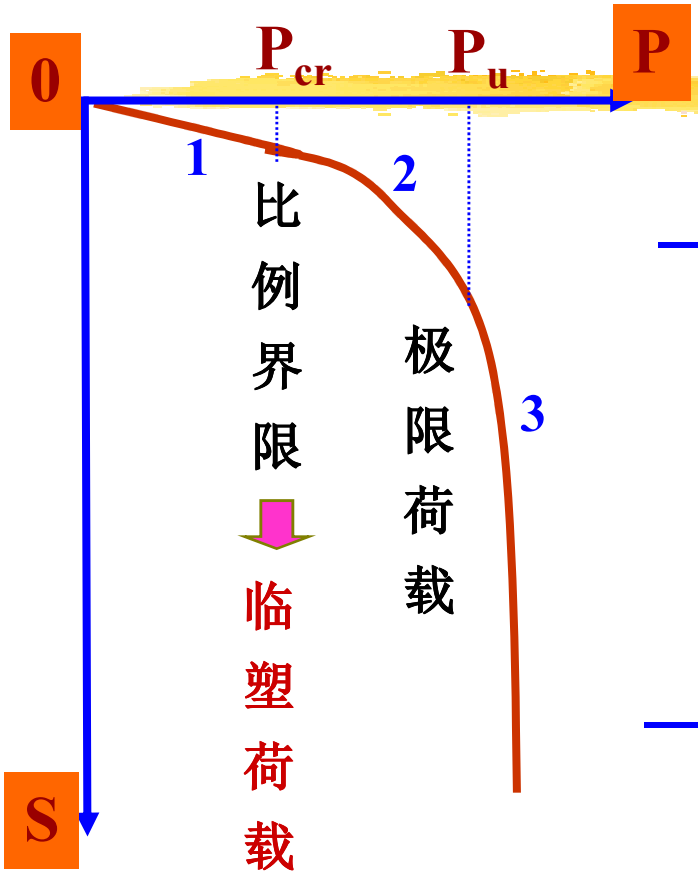
锚桩法

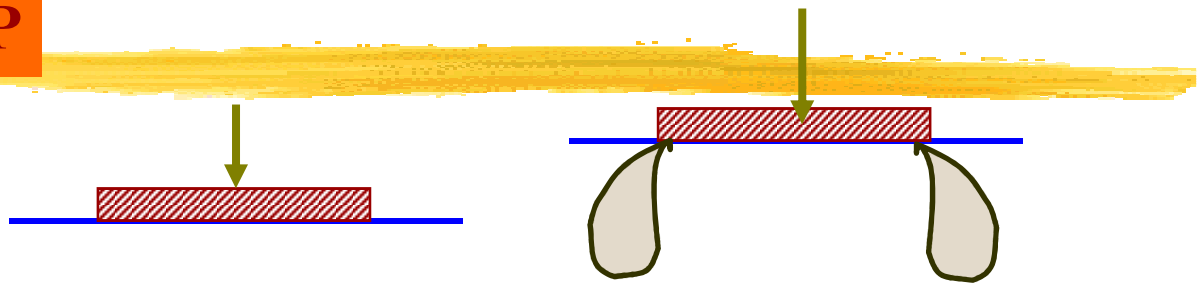
锚桩反力装置.swf

9.2 地基的失稳形式与过程

9.2.1 临塑荷载与极限荷载

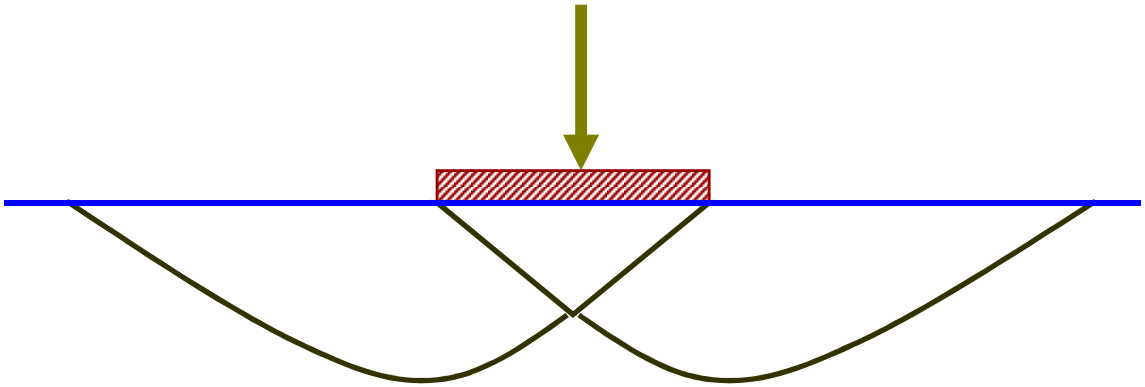
理想塑性





阶段1：弹性段

阶段2：局部塑性区



阶段3：完全破坏段

P~S曲线

P194

9.2.2 竖向荷载下地基的破坏形式

说明：

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

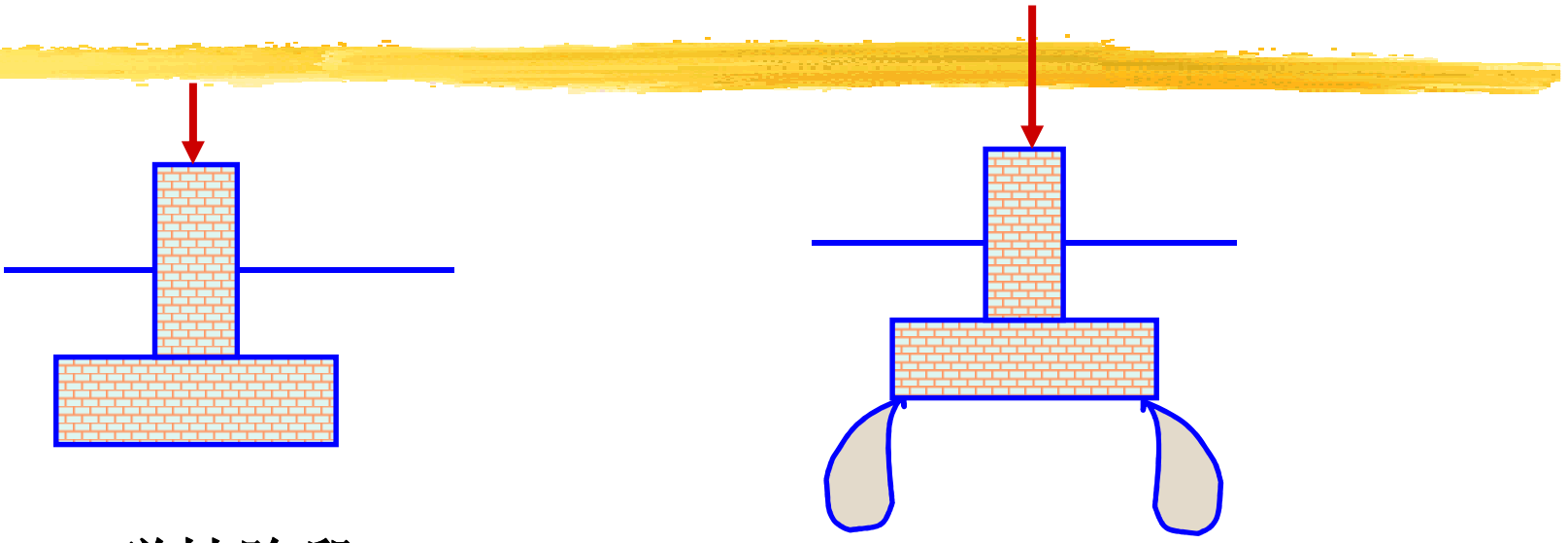
2 沉降 s 急骤增大，荷载~沉降（p~s）曲线出现陡降段

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≥0.06

P194 DEL

9.2 地基的失稳形式与过程



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

P194 考点

P292

9.4 承载力特征值的确定方法

承载力
- 极限承载力
- 承载力特征值（设计值）容许承载力：

通常所说的承载力特征值指容许承载力

9.4.1 承载力特征值的概念

临塑荷载 P_{cr}

P308

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
- 汉森公式
- 斯凯普顿公式

问题：如何确定承载力特征值？

P196 9.2.2 后面解答

9.4.2 塑性区发展范围的一般计算方法

P308

先介绍临塑荷载 P_{cr} 的理论公式，首先需要确定塑性区发展范围

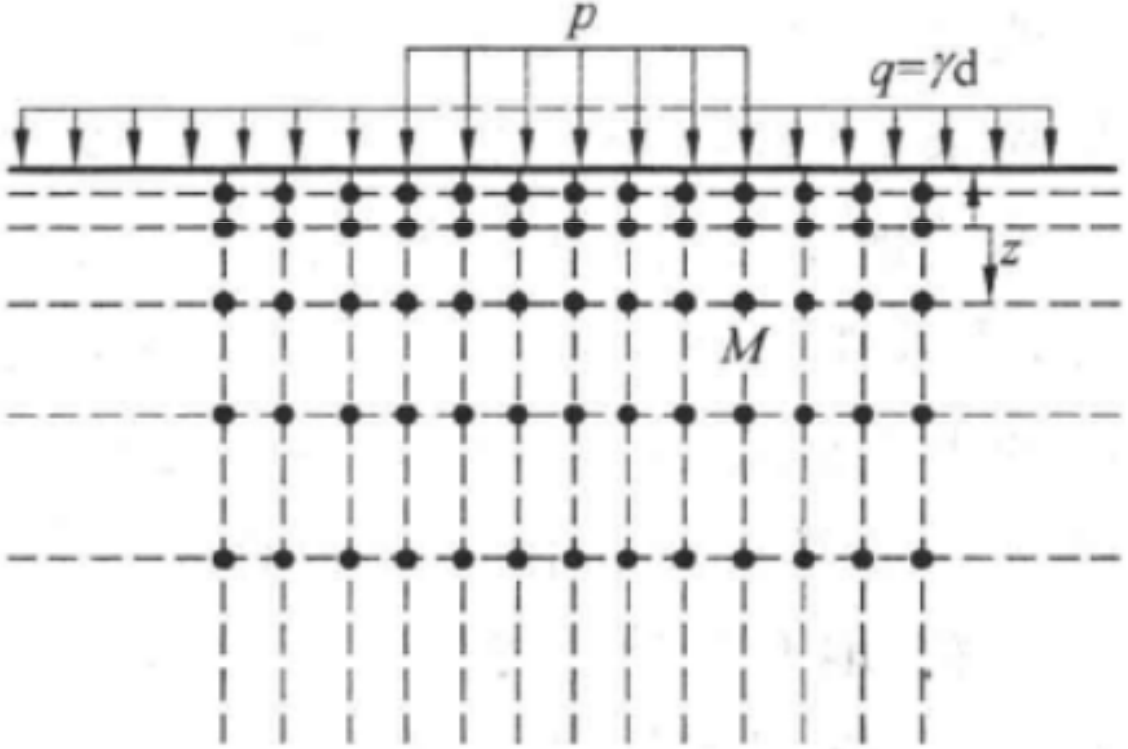


图8-16 计算地基内极限平衡区的网点

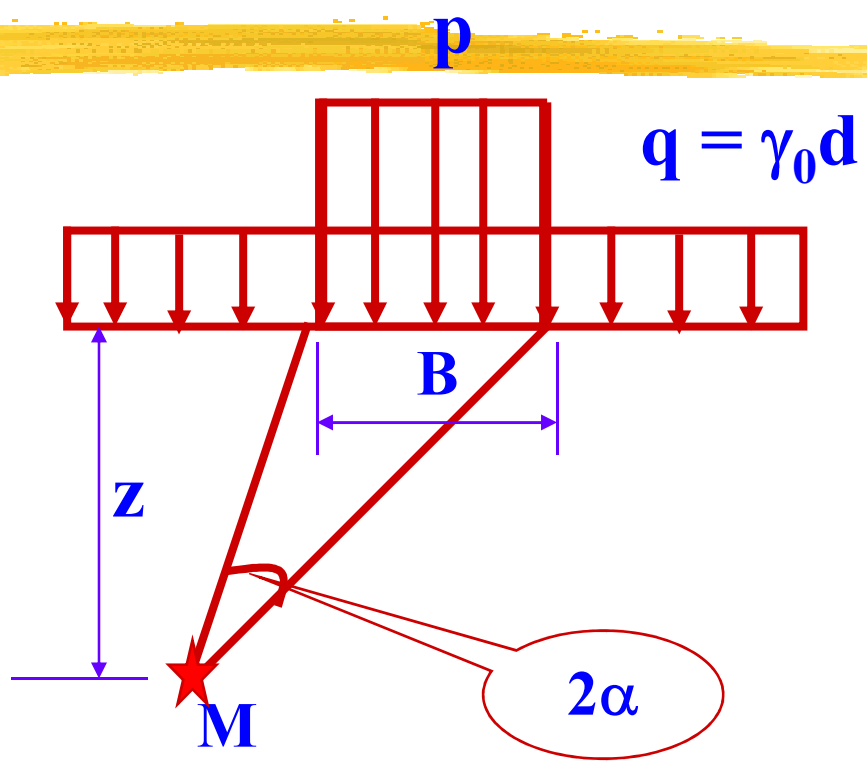
P195

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

- 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$k_0=1.0$

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

8-36

式9-2 & 9-3

P195

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

- 极限平衡条件：

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

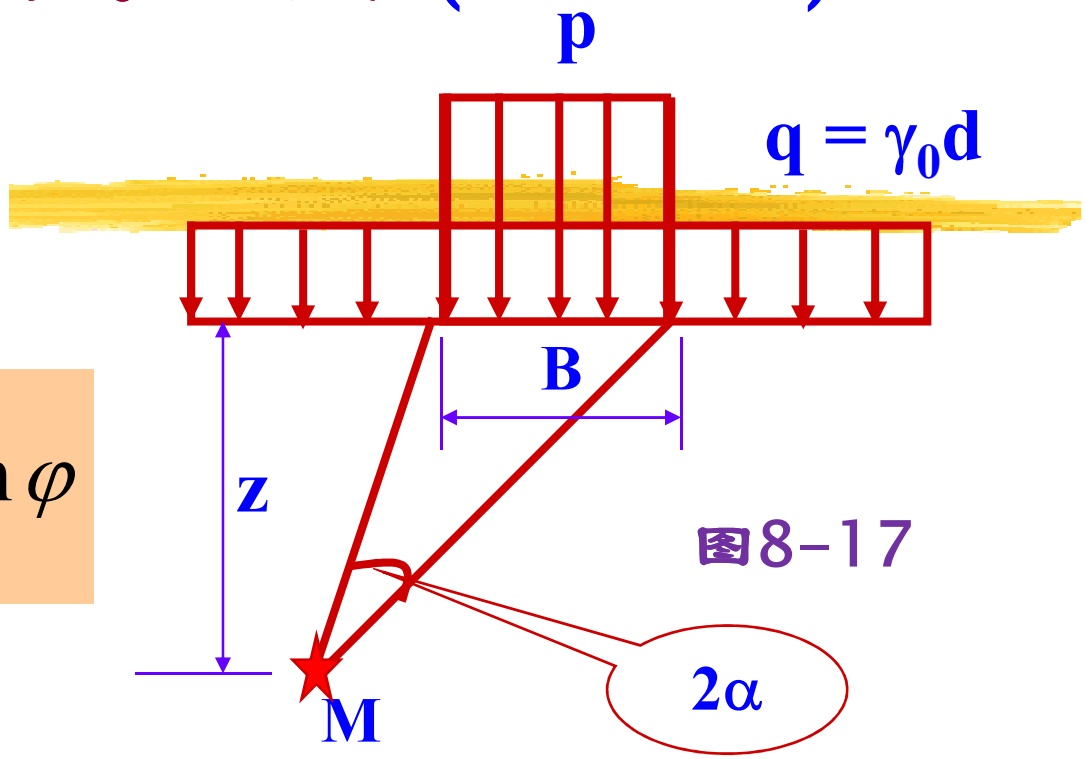


图8-17

将σ_1，σ_3的解代入极限平衡条件，得到极限平衡区轨迹线的方程式：

式9-5

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

8-37

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

由z与α的单值关系可求出Z的极值（求导）

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

8-39

式9-6

- $Z_{max}=0$

$$p_{cr}=\gamma_0 dN_q+cN_c$$

临塑荷载

8-40

式9-7

其中

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

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

地基土中将要出现塑性区还未出现塑性区的时刻，此时对应的基底压力即为临塑荷载

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

- Z_{max}= B/4 或 B/3：

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

8-41 式9-8

临界荷载

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

8-42 式9-9

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

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

P196

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

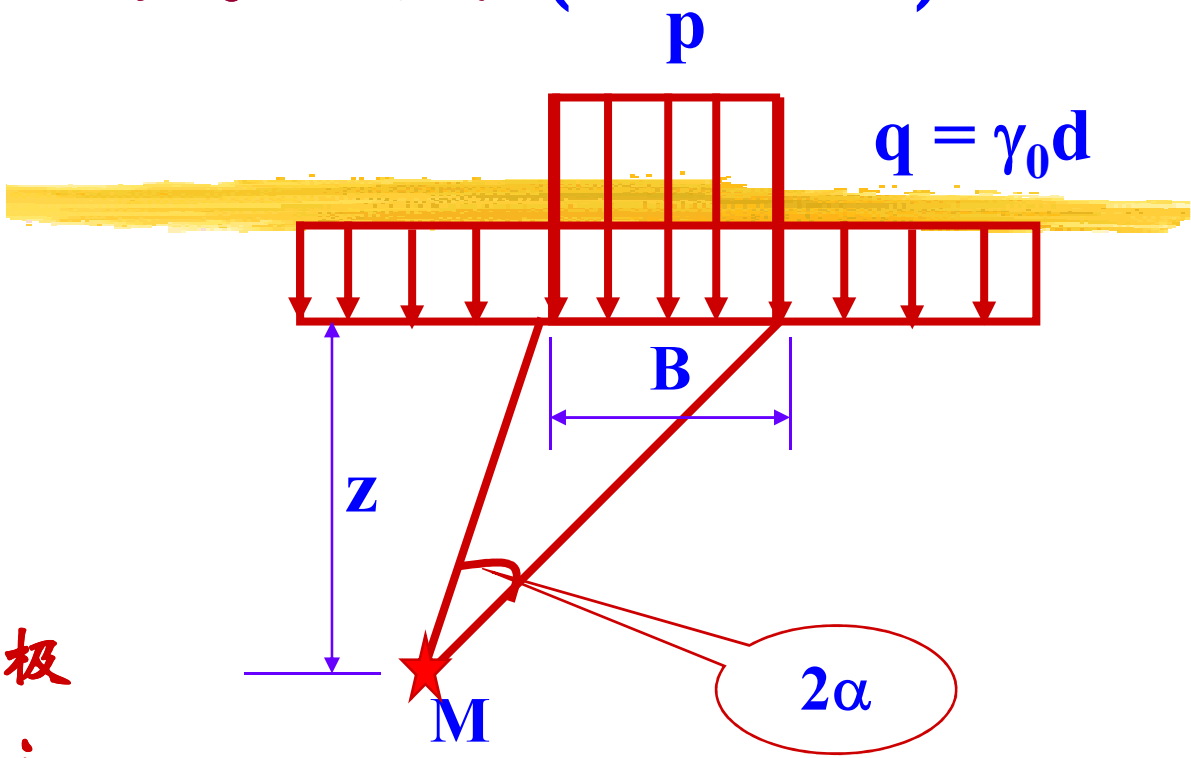
各种临界荷载的承载力系数

$$p=\frac{1}{2}\gamma BN_{\gamma}+qN_{q}+cN_{c} \qquad 8\text{-}43$$

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

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

- 特例：$\varphi=0$ 时



极限平衡条件：

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

将σ_1，σ_3的解代入极限平衡条件，得到：

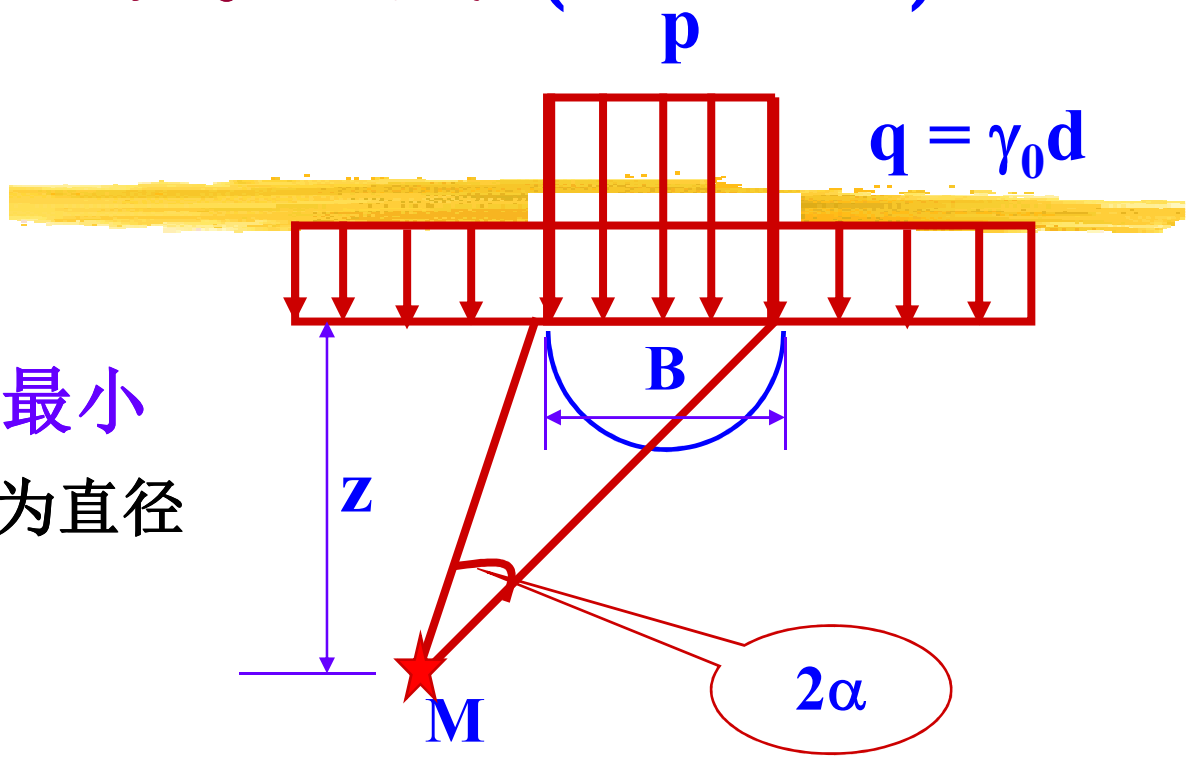
$$\frac{p-\gamma_0 d}{\pi}\cdot 2\sin 2\alpha=2c$$

即 $p<\gamma_0 d+\dfrac{\pi c}{\sin 2\alpha}$ 时地基不会出现塑性区

略过

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算（条形基础）

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



2α=π /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

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

φ=0 时特例

- 临界荷载

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

DEL略过

9.4.2 临塑荷载与临界荷载计算 (条形基础)

• 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的

P196-197

9.2 临塑荷载与临界荷载

• 讨论(续)

临界荷载：$$p=\frac{1}{2}\gamma BN_\gamma+qN_q+cN_c$$

外因

内因

B、d 增大

γ、c、φ 增大

$p_{1/4}$、$p_{1/3}$增大

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

临塑荷载：

$$p_{cr}=\gamma_0 dN_q+cN_c$$

B的变化对p_{cr}没有影响

9.3 极限承载力的理论计算

——极限承载力也可称作极限荷载

Pu

主要内容：

9.3.1 普朗德尔-瑞斯纳公式

9.3.2 太沙基公式

9.3.3 梅耶霍夫（Meyerhof）公式

9.3.4 汉森公式

9.3.4′ 斯凯普顿（Skempton）公式

9.3.5 极限承载力的影响因素

9.3.1 普朗德尔-瑞斯纳公式

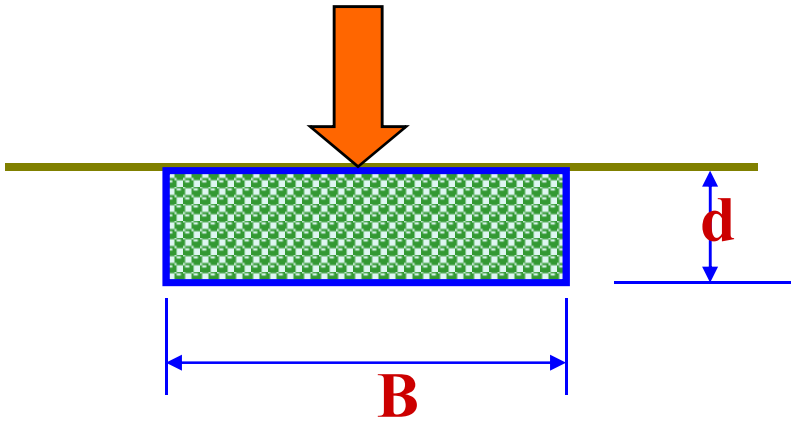
概述：普朗德尔(Prandtl, 1920)利用塑性力学针对无埋深条形基础得到极限承载力的理论解，雷斯诺(Reissner, 1924)将其推广到有埋深的情况。

假定：

1 基底以下土 $\gamma=0$

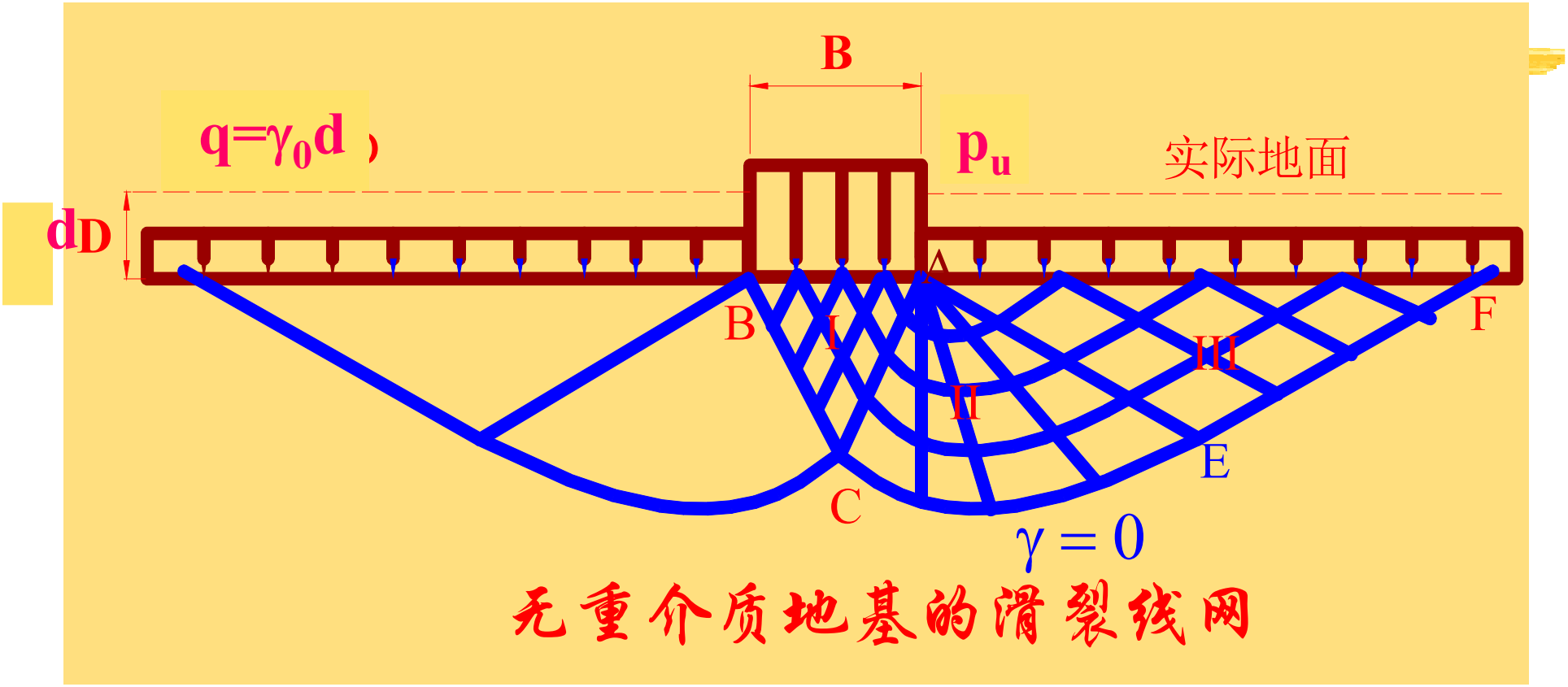
2 基底完全光滑

3 埋深d<B（底宽）



P197

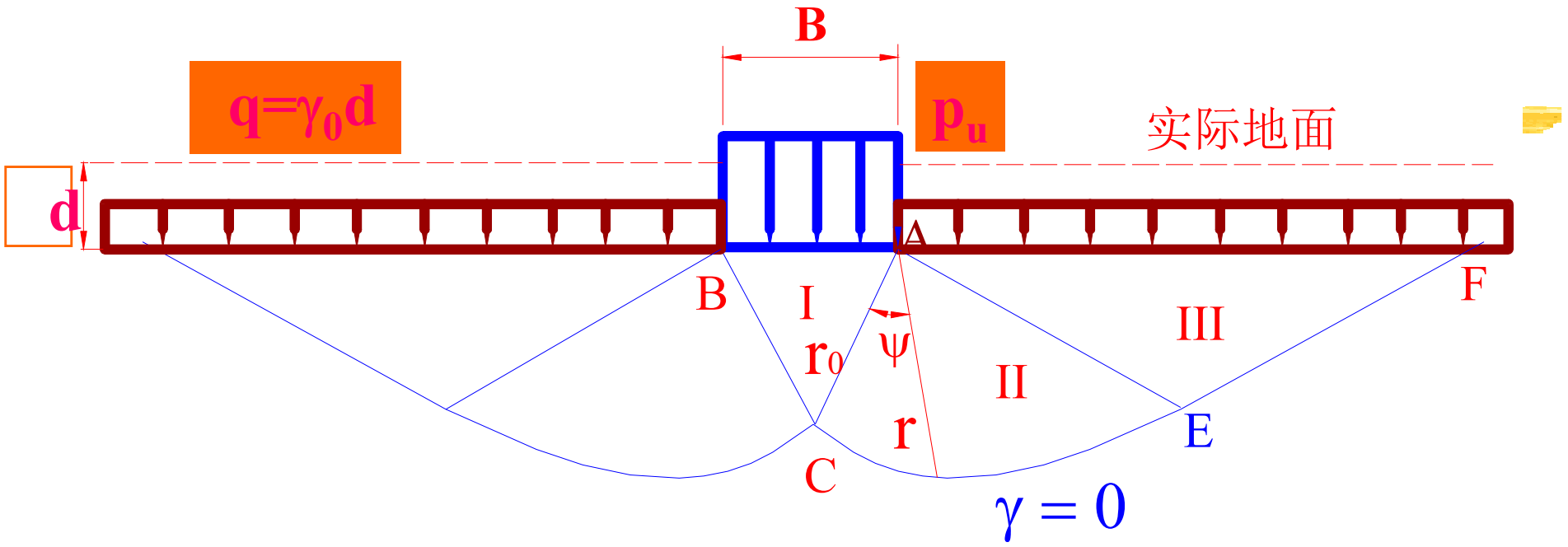
9.3 极限承载力计算



无重介质地基的滑裂线网

利用塑性力学的滑移线场理论

9.3 极限承载力计算



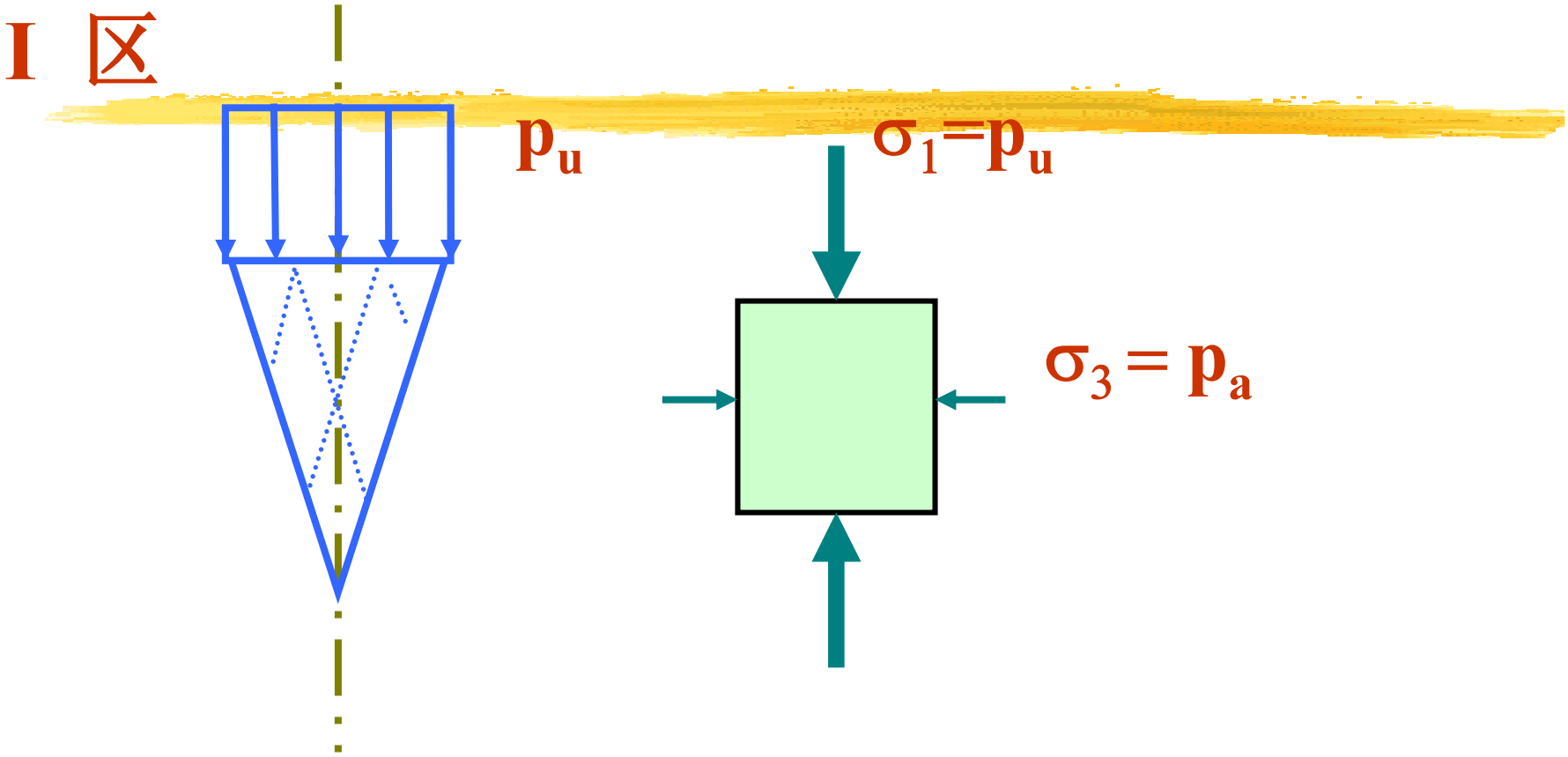
1 朗肯主动区：p_u为大主应力，AC与水平向夹角45°+ φ/2

2 过渡区：$r=r_0e^{\psi\ tg\varphi}$

3 朗肯被动区：水平方向为大主应力，EF与水平向夹角45°- φ/2

P198 图9-5

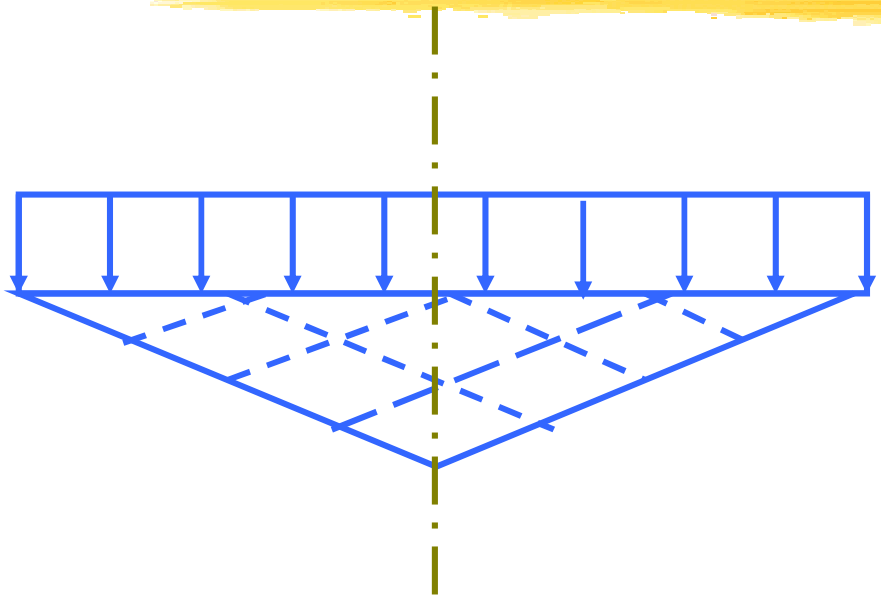
9.3 极限承载力计算

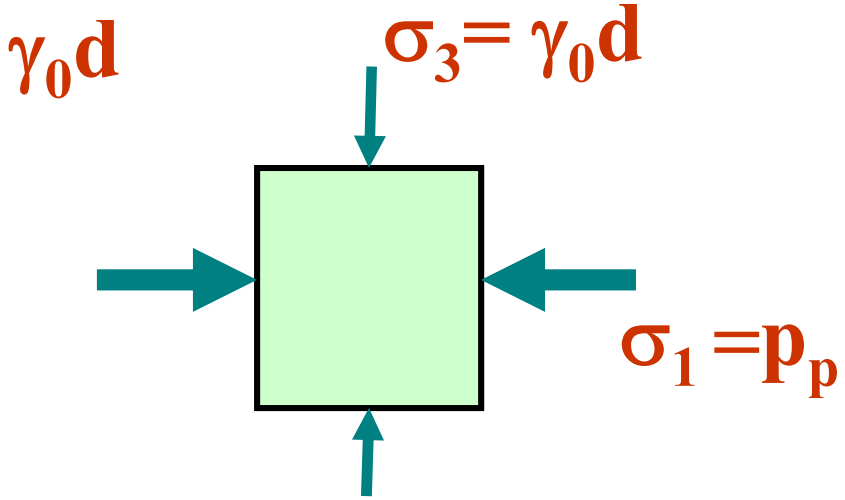


$$p_a = p_u K_a - 2c\sqrt{K_a} \qquad K_a = tg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

9.3 极限承载力计算

III 区

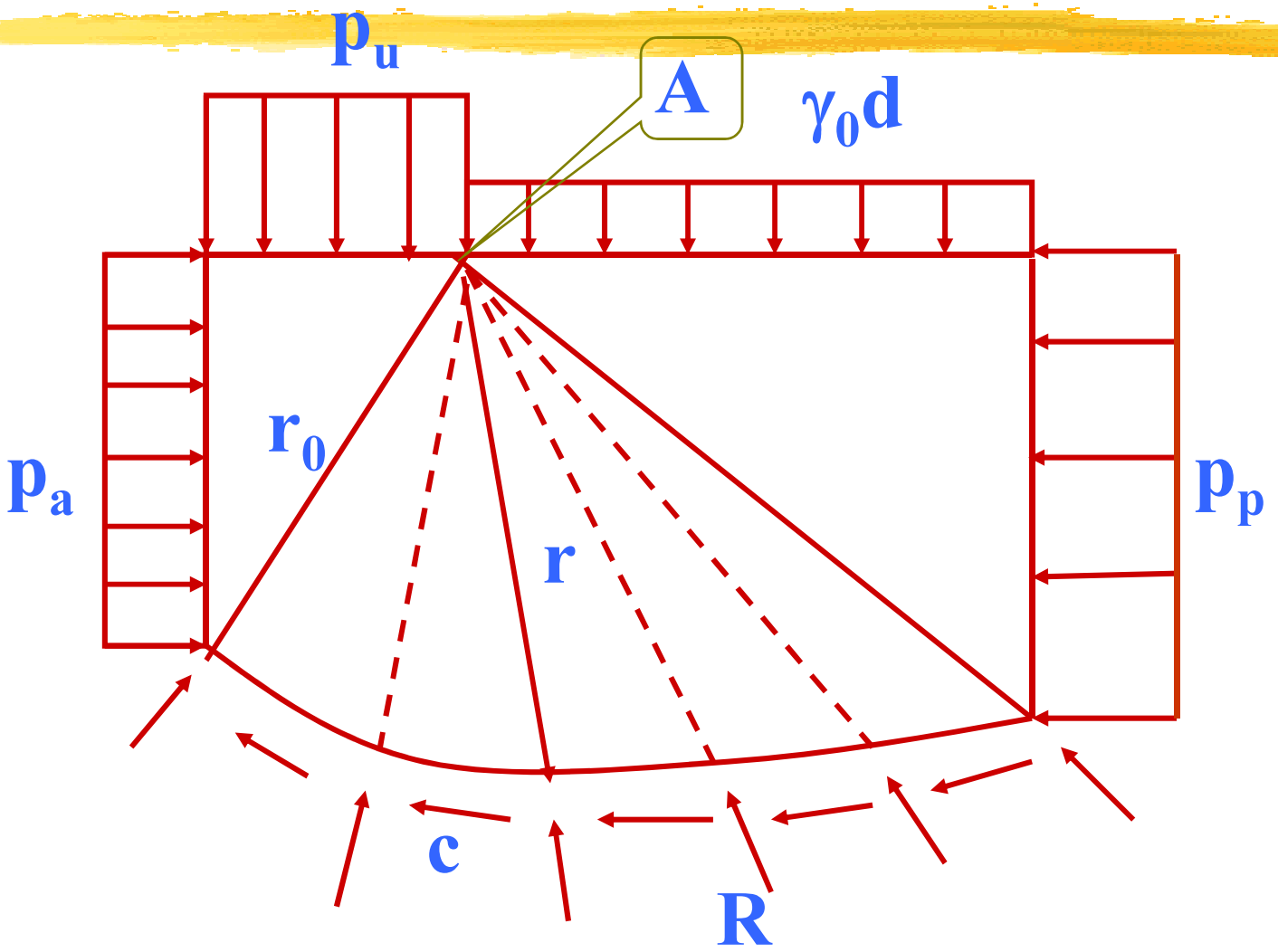




$$p_p = \gamma_0 d K_p + 2c\sqrt{K_p} \qquad K_p = tg^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$$

9.3 极限承载力计算

隔离体分析



P295 图8-6 采用力平衡法

9.3 极限承载力计算

普朗德尔-瑞斯纳（Prandtl-Reissner）

极限承载力：

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

P295 8-2 / 8-10

式9-10

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

8-3

式9-11

$$N_c = (N_q - 1)ctg\varphi$$

8-4

式9-12

特例：φ=0时 $p_u = \gamma_0 d + (\pi+2)c$

P198 讨论见p298 3点

9.3.2 太沙基 (Terzaghi) 公式

基本条件：

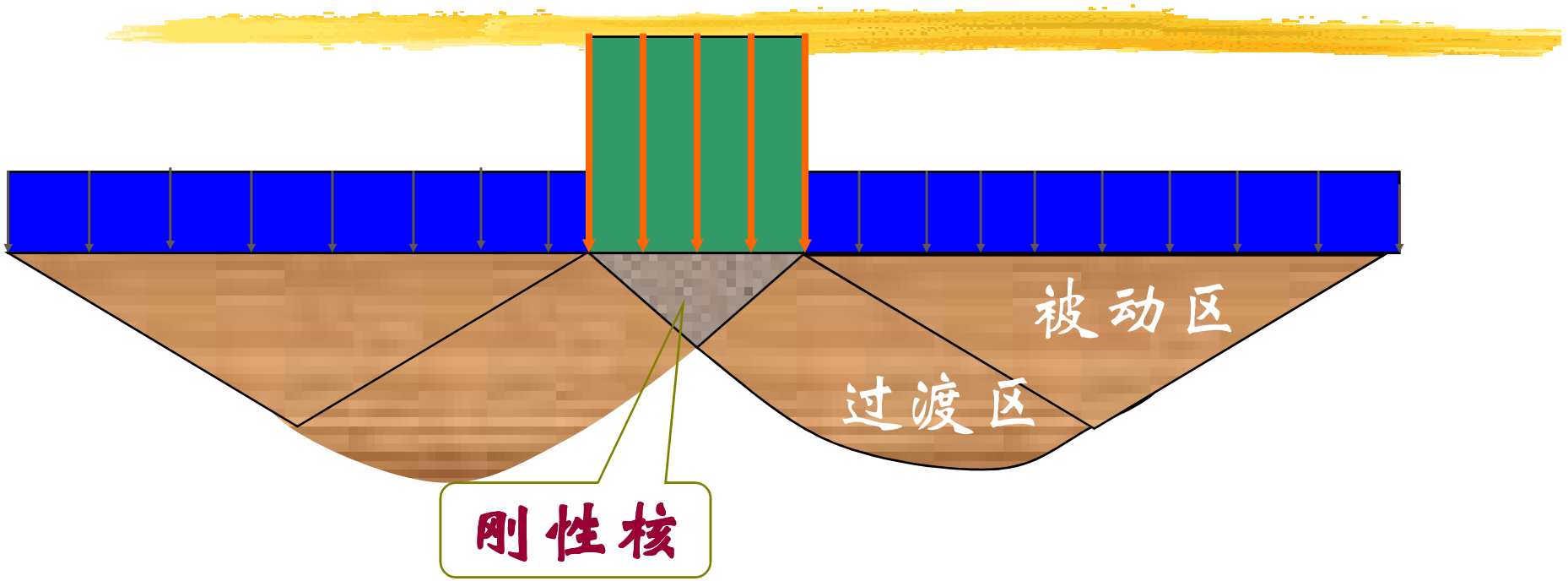
1 考虑基底以下土的自重

2 基底完全粗糙

3 忽略基底以上土体本身的阻力，
简化为上覆均布荷载 $q=\gamma_0 d$

P198

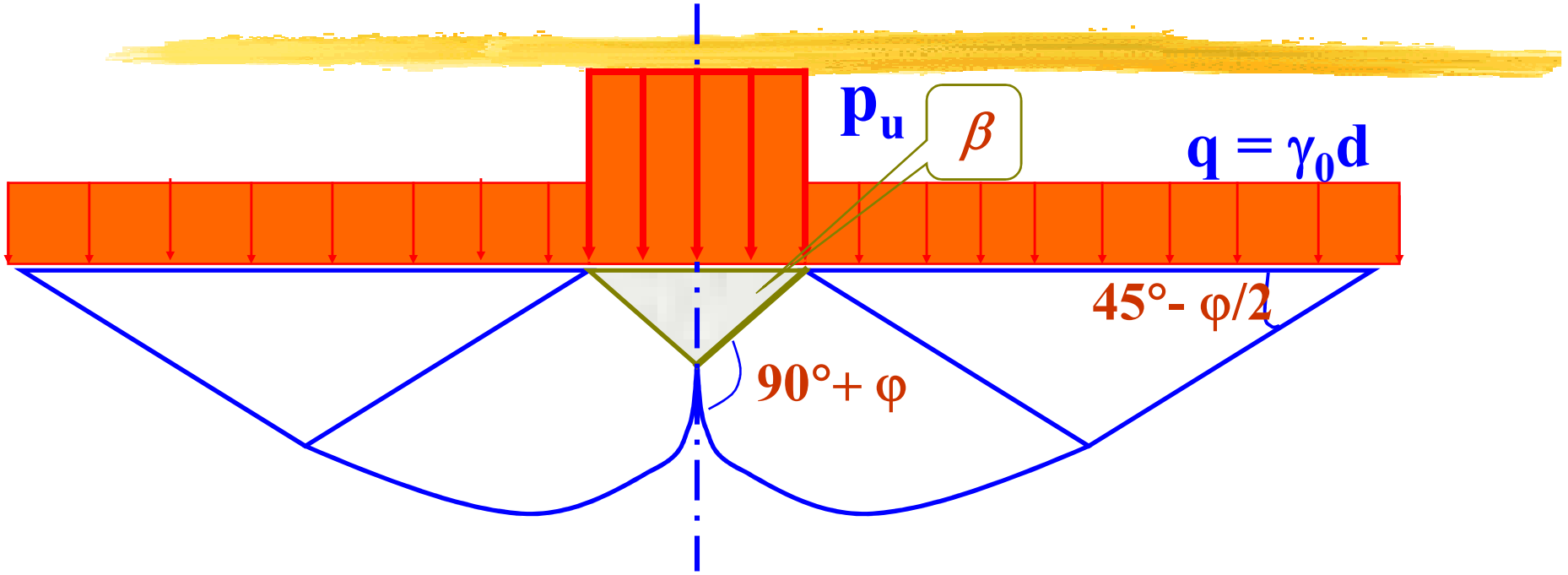
9.3 极限承载力计算



太沙基（Terzaghi）极限承载力示意

P199

9.3 极限承载力计算



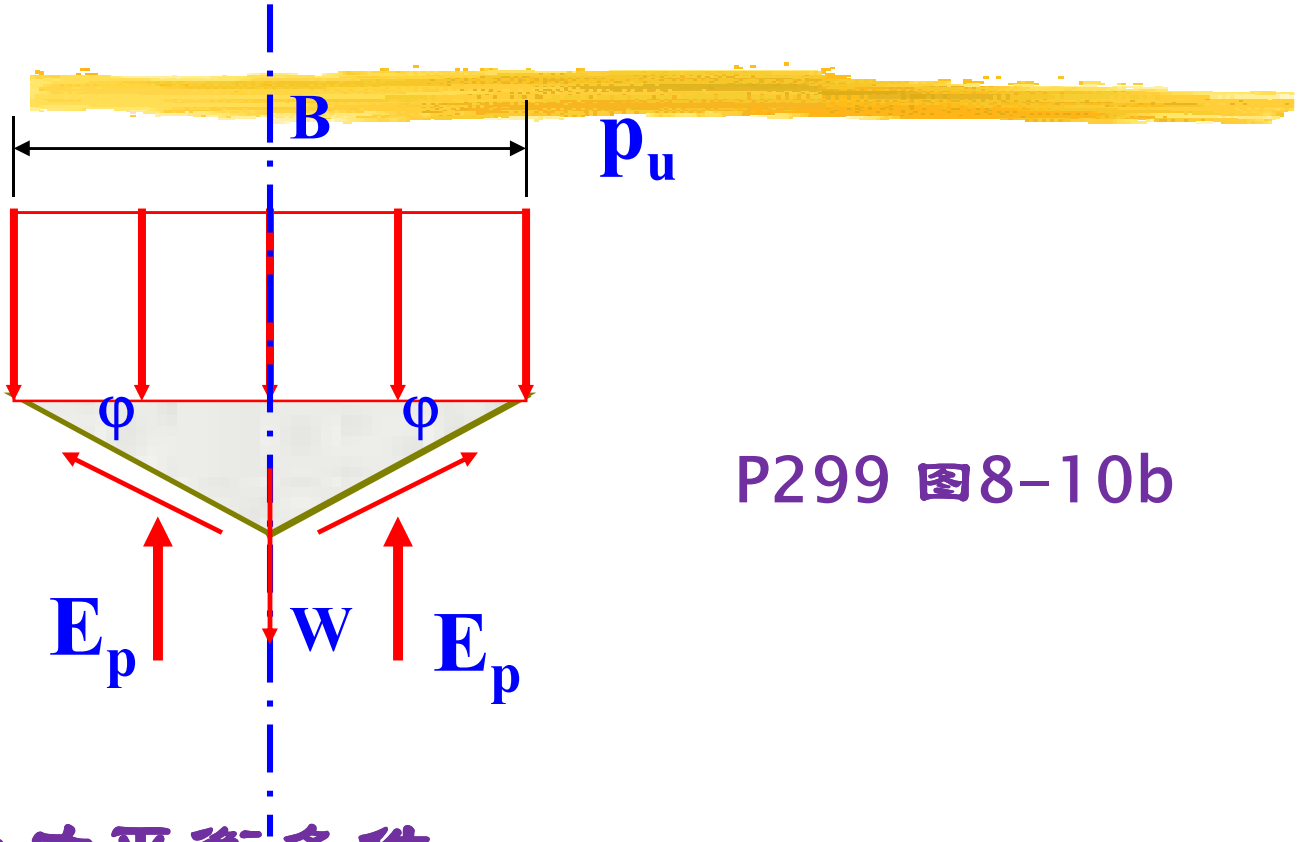
基底完全粗糙：$\beta = \varphi$

P199

9.3 极限承载力计算

刚性核分析：

基底完全粗糙时



P299 图8-10b

由刚性核的静力平衡条件

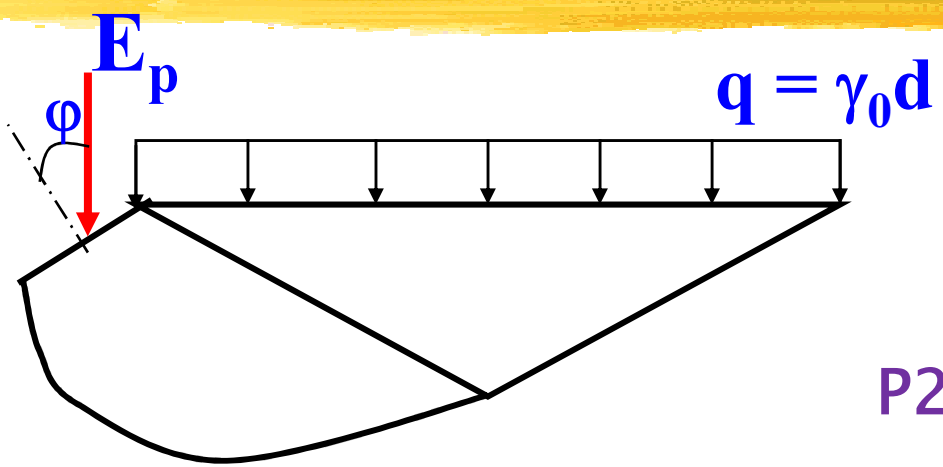
$$p_u B = 2E_p + cBtg\varphi - \frac{\gamma B^2}{4}tg\varphi$$

P299 8-12

DEL

9.3 极限承载力计算

被动土压力E_p：



P299 图8-10c

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

P300 8-13

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

DEL

9.3 极限承载力计算

Terzaghi极限承载力公式：

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

8-18

式9-13

N_γ、N_q、N_c——承载力系数，只取决于φ

也是其他方法的统一表达式，不同在于承载力系数的数值上

P199

已知φ，可以查得N_γ、N_q、N_c——承载力系数

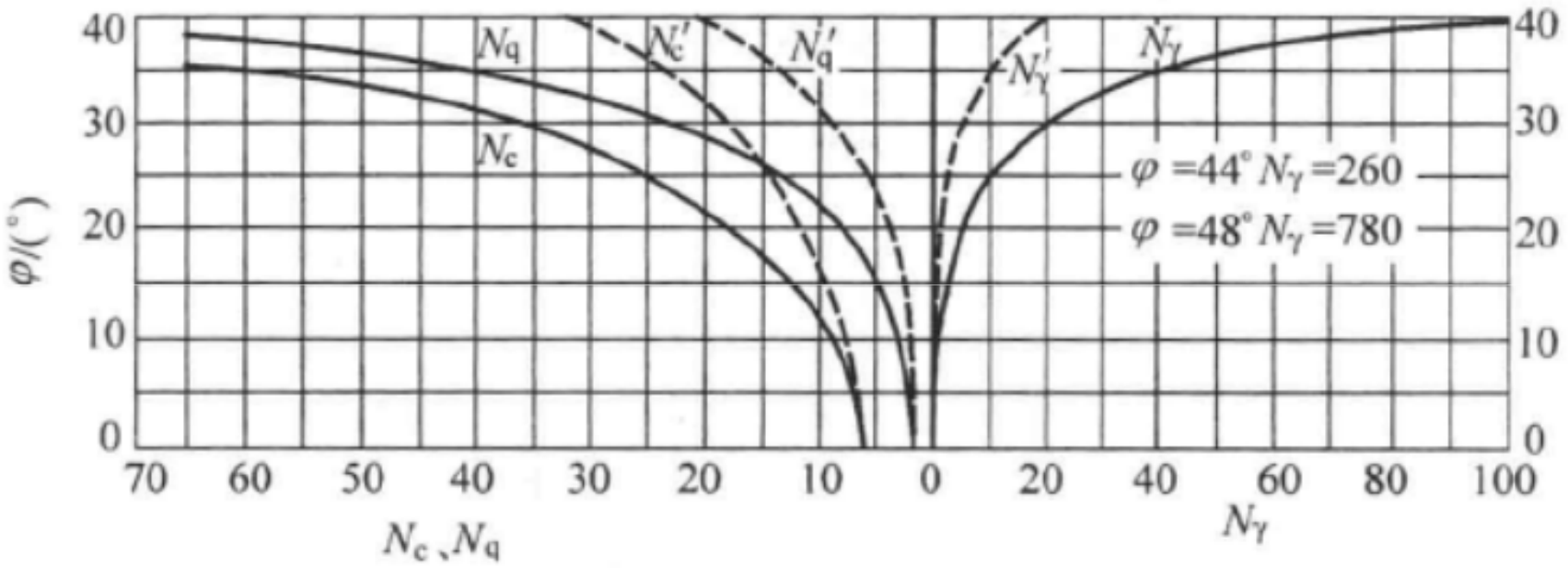


图 8-11　太沙基地基承载力系数

图9-7

P199

9.3 极限承载力计算

说明：可近似推广到圆形、方形基础，及局部剪切破坏情况

圆形基础：

圆形基础的直径

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

式9-15

方形基础：

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

式9-14

局部剪切：局部剪切时地基变形量较大，承载力降低，太沙基公式仍适用，但强度参数折减

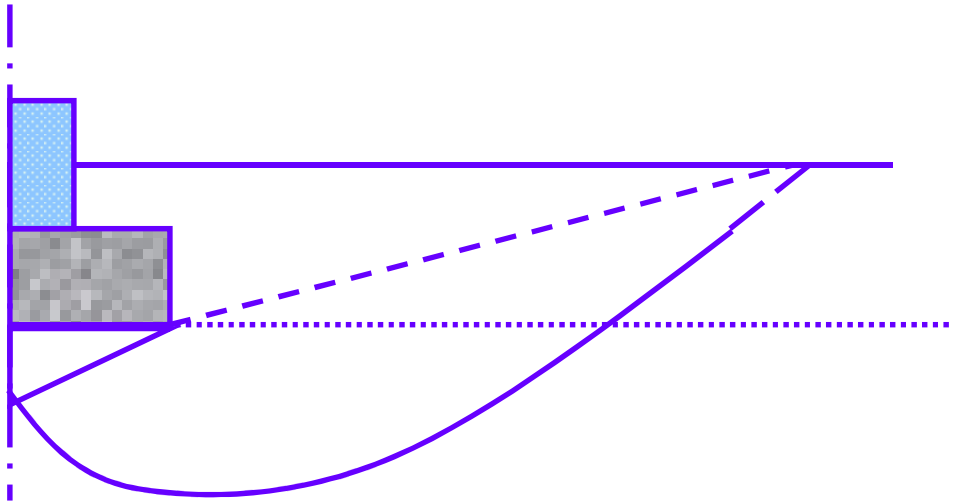
$$tg\bar{\varphi} = \frac{2}{3}tg\varphi \qquad \bar{c} = \frac{2}{3}c$$

P301 8-18a

9.3.3 梅耶霍夫（Meyerhof）公式

考虑基底以上土体抗剪强度时

- 基底粗糙
  - 对数螺旋线滑裂面
  - 考虑基底以上的土的抗剪强度



DEL

9.3.4 汉森（Hansen）公式

在原有极限承载力公式上修正：

- 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

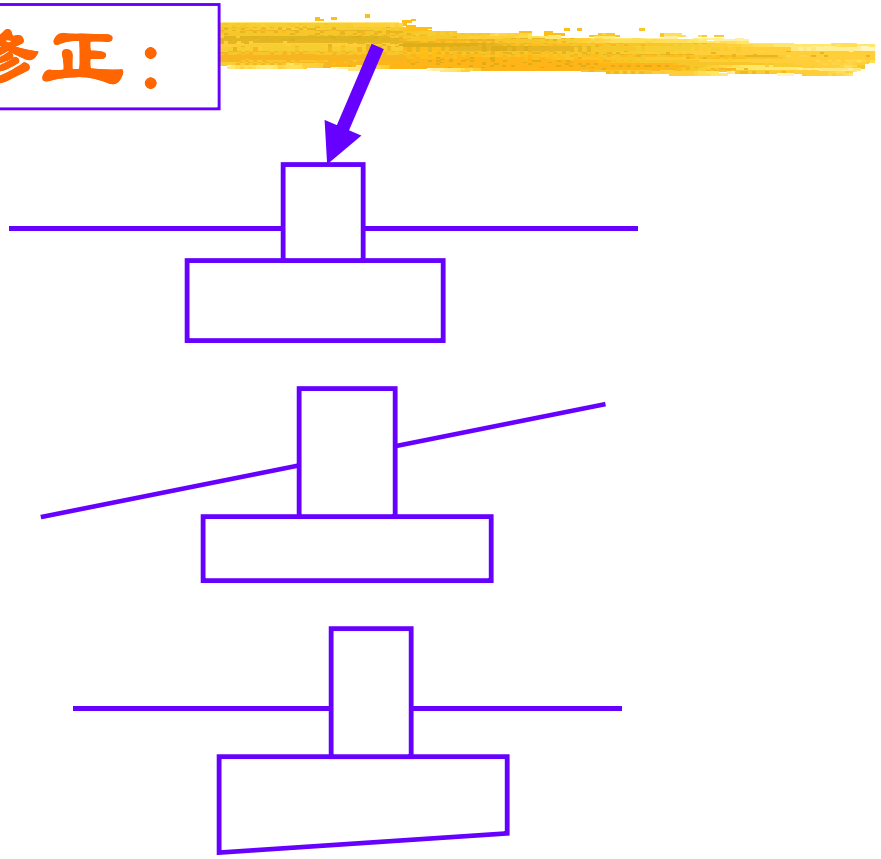


表8-1 P304

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

P200

9.3.4’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：

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

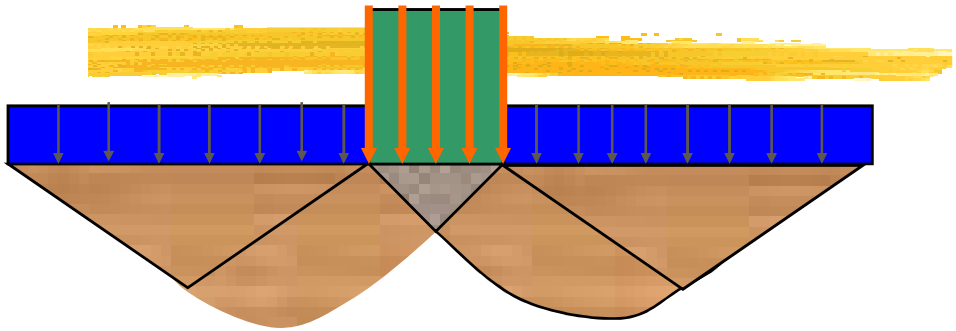
斯凯普顿公式

DEL

P305

9.3.5 地基承载力机理及公式的一般形式

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

DEL

9.3.6 极限承载力的影响因素

一般公式：

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

外因

内因

B、d 增大

γ、c、φ 增大

P_u增大

DEL

9.3 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

DEL

9.4 用原位测试成果确定地基承载力

9.4.1 主要原位测试试验

9.4.2 浅层平板载荷试验

（1）试验装置

（2）试验要点

（3）试验成果的整理与确定地基承载力的特征值 fak

先看书然后看动画
D:\XWUBJ\TeachingHBU\UndergroundStructures\demos\TeachingMoive\荷载板试验.swf

P201-202 一起看书

9.5 承载力特征值的确定方法

• 9.5.1 通过现场载荷试验确定 0

p312

① 有明显直线段：

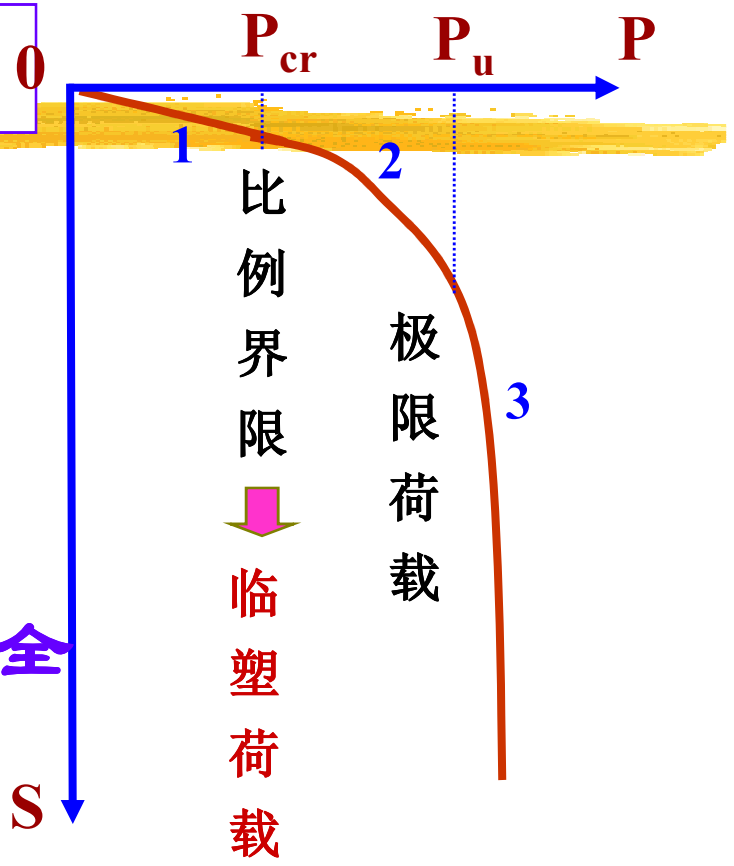
$$f_{ak} = P_{cr}$$

② 加载到破坏且 $P_u/2 < P_{cr}$：

$$f_{ak} = P_u/2$$ 取小值更安全

③ 不能满足上述要求时：

取某一沉降量对应的荷载，但其值不能大于最大加载量的一半



P~S曲线

9.5 承载力特征值的确定方法

现场P-S曲线确定承载力特征值$f_{ak}=P_u/2$

进行具体工程设计时，要作深度和宽度修正：

P312 8-51

$$f_a=f_{ak}+\eta_b\gamma(b-3)+\eta_d\gamma_m(d-0.5)$$ 式9-17

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）

η_b、η_d：宽度和深度修正系数

γ：基底下土的重度，地下水位以下取浮重度

γ_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)

P203

9.5 承载力特征值的确定方法

• 9.5.2 通过极限承载力公式计算

P310

在中国取$P_{1/4}$

① 要求较高： $f = P_{cr}$

② 一般情况下： $f = P_{1/4}$ 或 $P_{1/3}$

或者：

③ 用极限荷载计算：

$$f = P_u / K$$

K---安全系数

$K=$
- 太沙基： $K \geq 3.0$
- 斯凯普顿： $K=1.1\sim1.5$
- 汉森公式： $K \geq 2.0$

P204

9.5 承载力特征值的确定方法

GB50007-2011)

我国规范中取：

以临界荷载$P_{1/4}$为理论基础

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

式9-18

P311 8-44

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φ_k有关

表8-2

表9-7

φ_k：基底下一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：基底下一倍短边宽深度内土的粘聚力标准值

1 《建筑地基基础设计规范》（GBJ7-89）
2 《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2011）

P204

9.5 承载力特征值的确定方法

• 9.5.3 通过经验确定

GBJ7-89 规范：

推荐查表方法 不再使用

GB50007-2011 规范：

从其他原位测试、经验值等方法确定

注意：

经验方法得到的承载力特征值也要进行深度和宽度修正

本章小结

9.1 概述

9.2 临塑荷载和临界荷载

9.3 极限承载力计算

9.4 容许承载力的确定方法

Wu's publications related to the bearing capacity

Wu X.Z. *Implementing statistical fitting and reliability analysis for geotechnical engineering problems in R*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2017, 11(2):173-188. 土工多元统计分析和概率计算的 R 实施

Wu X.Z. *Trivariate analysis of soil ranking-correlated characteristics and its application to probabilistic stability assessments in geotechnical engineering problems*. Soils and Foundations. 2013, 53(4):540-556. [SCIE:0.41]. 土体多变量参数的相关性及其在岩土工程中概率稳定评估中的应用.

Wu X.Z. *Modelling dependence structures of soil shear strength data with bivariate copulas and applications to geotechnical reliability analysis*. Soils and Foundations. 2015, 55(5):1243-1258. 采用关联函数模拟土体抗剪强度参数的互相关性及其应用.

Wu X.Z. *Assessing the correlated performance functions of an engineering system via probabilistic analysis*. Structural Safety. 2015, 52(PA): 10-19. [SCI:2.39]工程体系的功能函数相关性的概率分析.

吴兴征, 王瑞凯, 辛军霞, 冯震. 特定场地下土工构筑物荷载变形曲线的概率密度分布. 工程质量. 2017, 35(9):41-46. [link] [pdf]

辛军霞, **吴兴征***, 高伟, 任国家, 马骏翔, 范磊. 基于Copula函数的CFG桩复合地基载荷-变形曲线的概率分析. 岩土力学. 2016. 37(S1):424-434. [EI] [pdf] 该文获得首届全国建筑业优秀论文评选二等奖

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com

本章所学习内容：

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
- 汉森公式

承载力

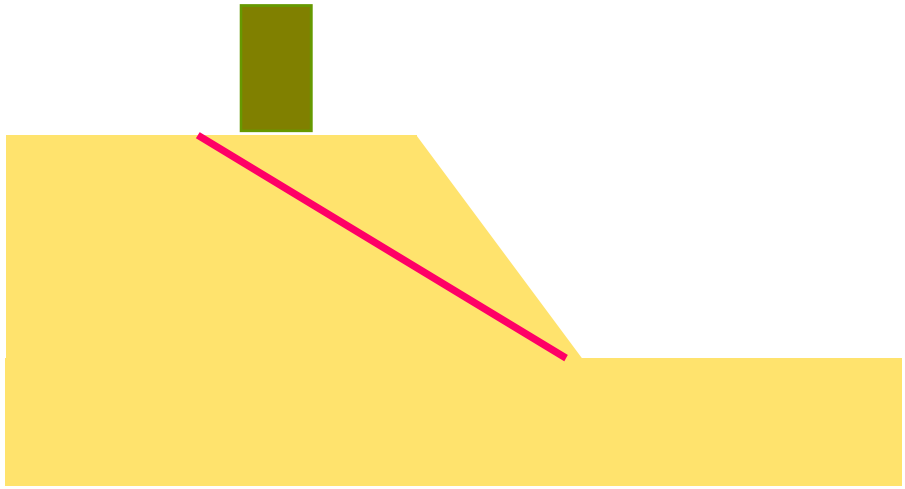
- 极限承载力
- 容许承载力：承载力特征值（设计值）

- 1 通过公式计算
- 2 通过载荷试验确定
- 3 通过经验确定

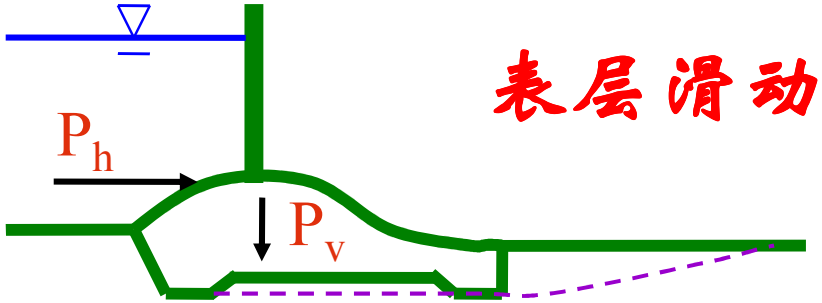
需要经过深度和宽度修正

原则：掌握公式理论基础，结合实际问题认真分析，恰当应用

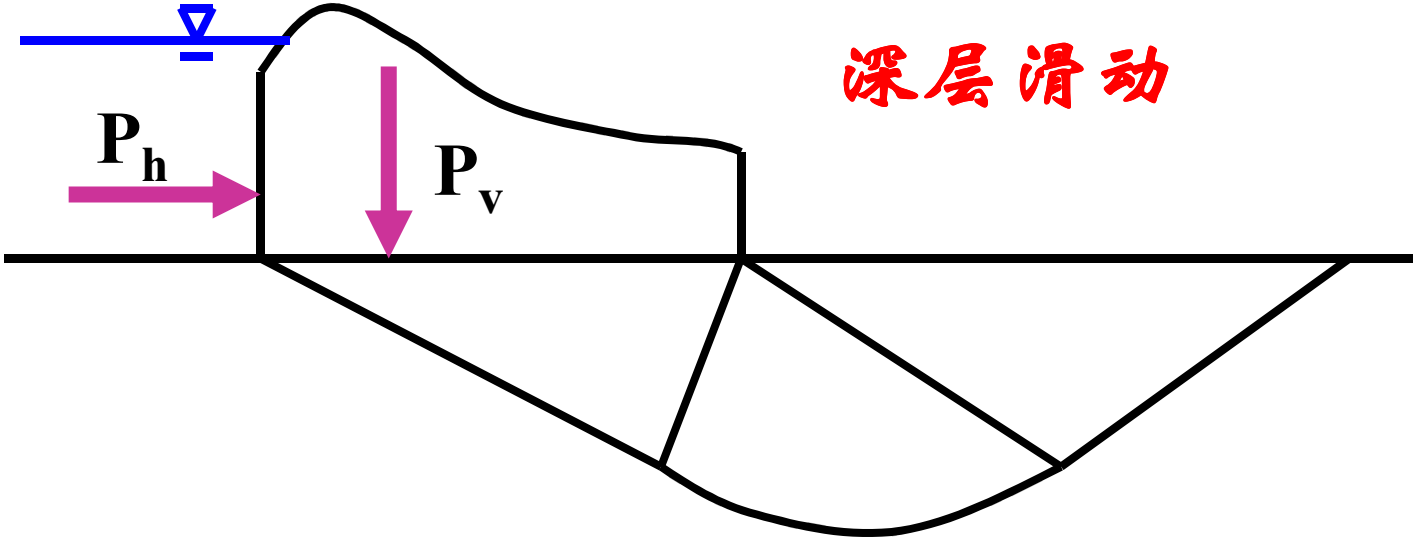
建筑在斜坡上时，稳定验算



水平荷载比较大时



表层滑动



深层滑动

9.1 概述

承载力的概念：

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

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。ultimate limit state design

容许承载力 ≈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。 serviceability limit state design