2. 刚性基础与扩展基础

内容提要

- ✓概　述
- ✓**2.1** 基础结构构造要求
- ✓**2.2** 基础埋置深度的选择
- ✓**2.3** 地基承载力的确定方法
- ✓**2.4** 浅基础的设计计算（地基承载力与变形验算）
- ✓减轻建筑物不均匀沉降危害的建筑、结构及施工措施。

基本要求

（1）了解刚性基础与钢筋混凝土扩展基础的受力特点、适用条件和控制设计的方法，掌握刚性角概念。

（2）熟悉基础埋深的影响因素与选择原则，掌握地基承载力的常用确定方法。

（3）熟悉地基变形特征量与验算要求，并能应用已学土力学等方法进行地基变形计算与验算。

（4）掌握按地基承载力确定基础底面尺寸的计算方法（包括中心及偏心受荷的两种情况）、以及地基软弱下卧层承载力的验算方法。

（5）掌握基础强度验算的要点及地基与基础稳定性分析方法。

（6）掌握减轻建筑物不均匀沉降危害的建筑、结构及施工措施。

2.1 概　述

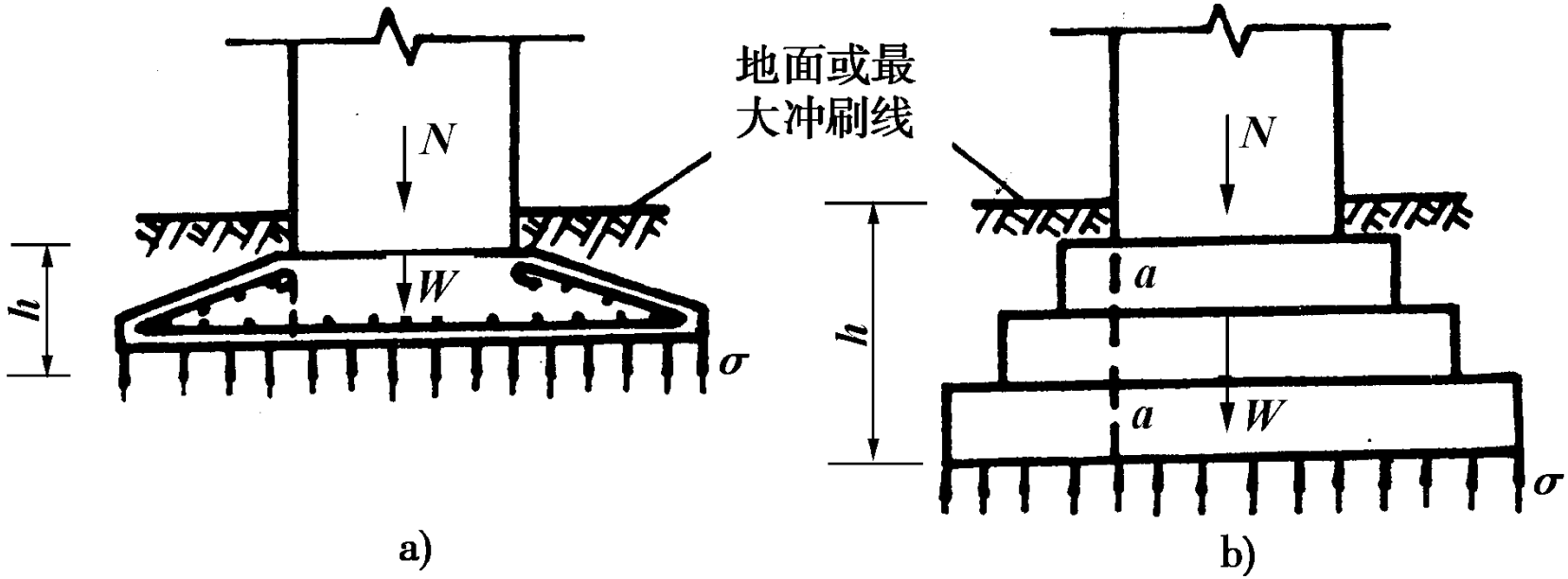
■无筋扩展基础（或刚性基础）

✓由素混凝土、砖、毛石、灰土和三合土等抗压性能好、而抗弯抗剪性能差的材料砌筑而成，通常由台阶的容许宽高比或刚性角控制设计。

■钢筋混凝土扩展基础（或柔性基础）

✓当不便于采用刚性基础或采用刚性基础不经济时采用钢筋混凝土材料做成的基础，如柱下钢筋混凝土独立基础和墙下钢筋混凝土条形基础）。

刚性基础和柔性基础的概念理解



柔性基础　　刚性基础

刚性基础的概念理解

✓基础在外力（包括基础自重）作用下，基底的地基反力为σ，此时基础的悬出部分a-a断面左端，相当于承受着强度为σ的均布荷载的悬臂梁，在荷载作用下，a-a断面将产生弯曲拉应力和剪应力。当基础圬工具有足够的截面使材料的容许应力大于由地基反力产生的弯曲拉应力和剪应力时，a-a断面不会出现裂缝，这时，基础内不需配置受力钢筋，这种基础称为刚性基础。

✓优点：稳定性好、施工简便、能承受较大的荷载，所以只要地基强度能满足要求，它是桥梁、涵洞和房屋等建筑物常用的基础类型。

✓缺点：自重大，并且当持力层为软弱土时，由于扩大基础面积有一定限制，需要对地基进行处理或加固后才能采用，否则会因所受的荷载压力超过地基强度而影响建筑物的正常使用。

✓形式：刚性扩大基础，单独柱下刚性基础、条形基础等 。

柔性基础的概念理解

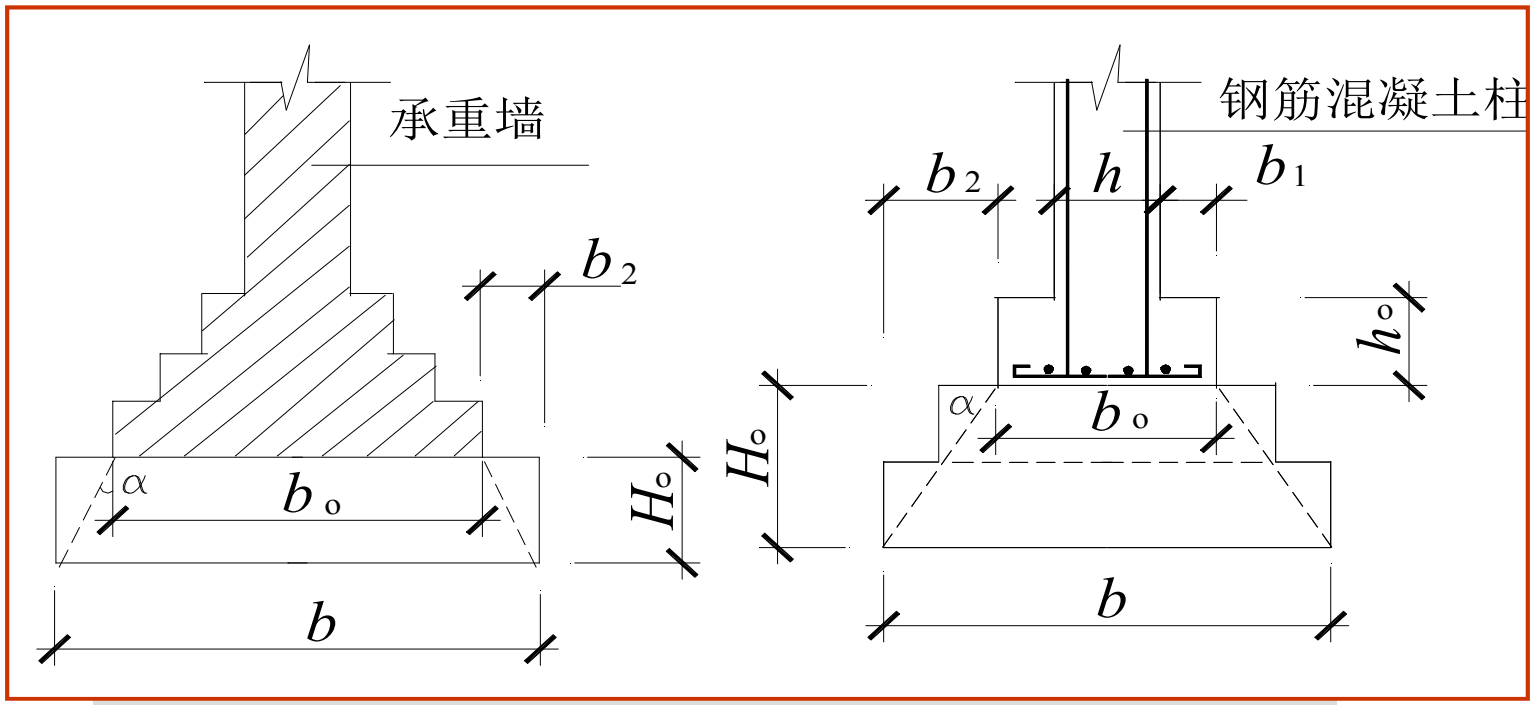
✓基础在基底反力作用下，在a-a断面产生弯曲拉应力和剪应力若超过了基础圬工的强度极限值，为了防止基础在a-a断面开裂甚至断裂，可将刚性基础尺寸重新设计，并在基础中配置足够数量的钢筋，这种基础称为柔性基础

✓优点：其整体性能较好，抗弯刚度较大。如筏板和箱形基础，在外力作用下只产生均匀沉降或整体倾斜，这样对上部结构产生的附加应力比较小，基本上消除了由于地基沉降不均匀引起的建筑物损坏。所以在土质较差的地基上修建高层建筑物时，采用这种基础形式是适宜的。

✓缺点：柔性基础，特别是箱形基础，钢筋和水泥的用量较大，施工技术的要求也较高，所以采用这种基础形式应与其它基础方案（如采用桩基础等）比较后再确定。

✓形式：柱下扩展基础、条形和十字形基础筏板及箱形基础。

2.1.1 刚性基础构造要求



刚性基础构造示意图

d—柱中纵向钢筋直径

2.1.1 刚性基础构造要求

- **砖基础**
- **毛石基础**
- **素混凝土基础**

✓ 上述基础材料都要符合强度等级要求

- **灰土基础**

✓ 石灰和土（粘性土）按其体积比3：7或2：8构成

- **三合土基础**

✓ 由石灰：砂：碎砖（或碎石）按1：2：4～1：3：6配成

刚性角(宽高比)：

$$\frac{b_i}{H_i} \le \tan\alpha$$

b_i— 任一台阶宽度(m);

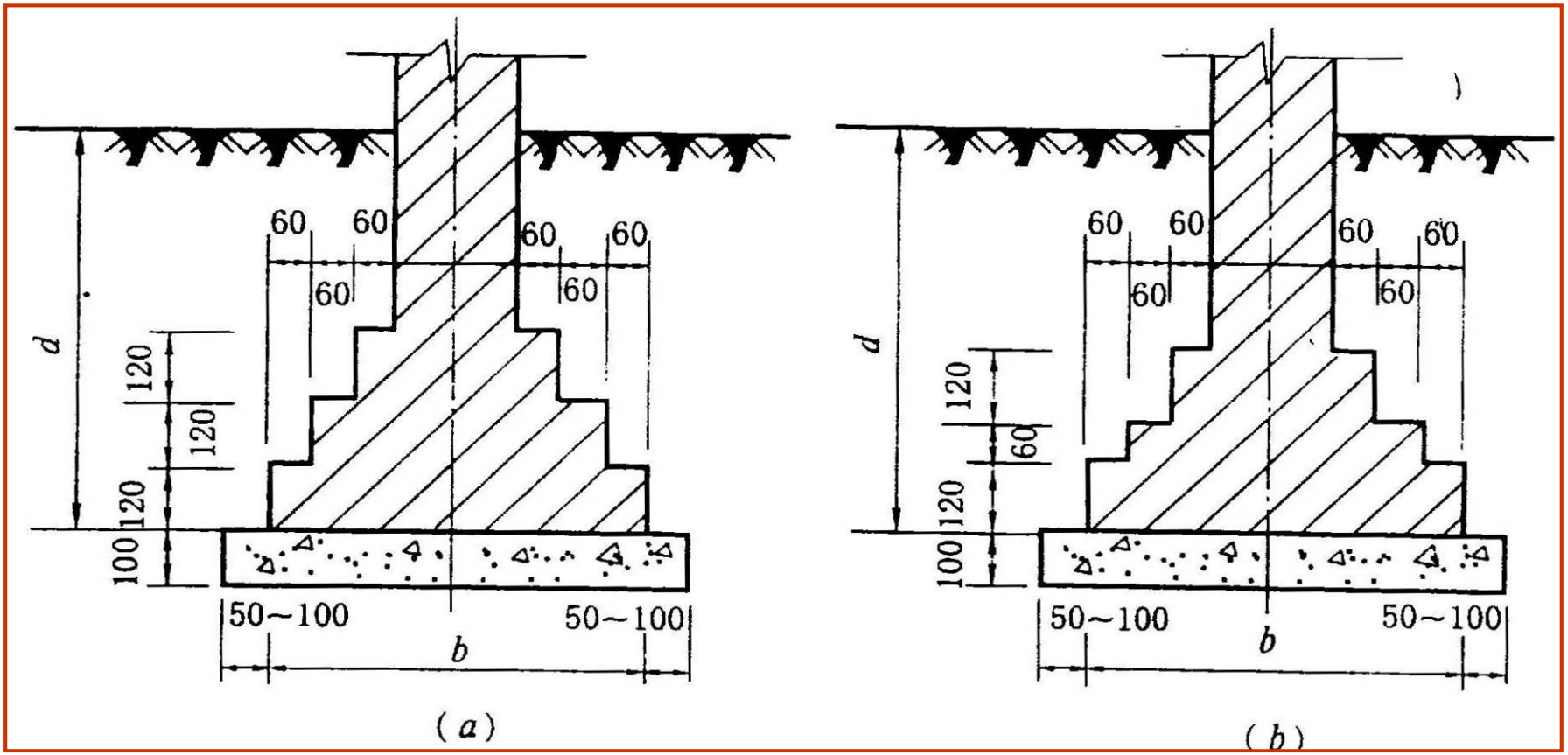
H_i— 相应台阶高度(m);

tanα— 台阶宽高比的允许值，参照下述规范表格经验值选用

刚性基础台阶宽高比允许值 P30 表2-1

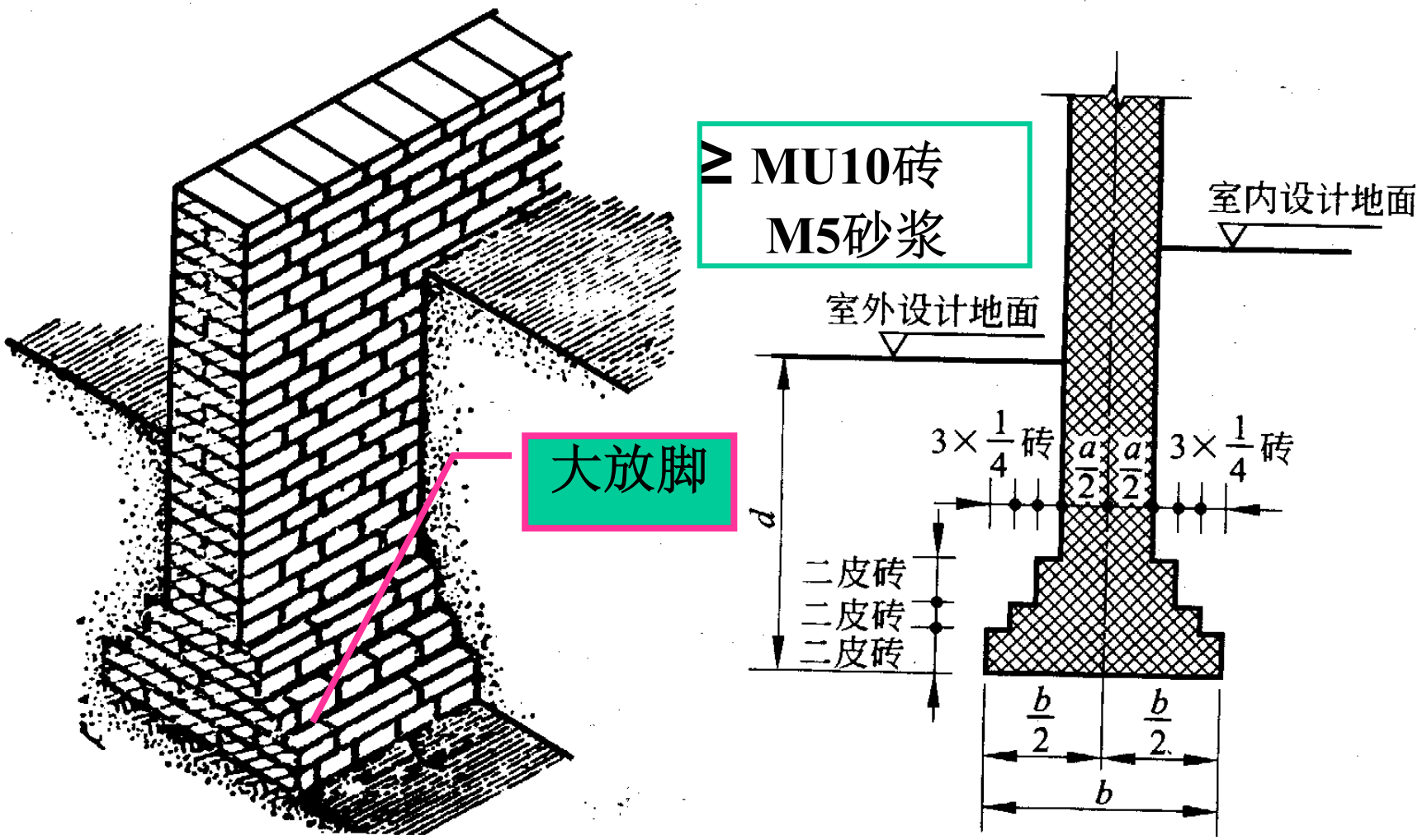
基础材料	质量要求	台阶宽高比允许值		
		$p_k \leq 100$	$100 < p_k \leq 200$	$200 < p_k \leq 300$
混凝土基础	C15混凝土	1：1.00	1：1.00	1：1.25
毛石混凝土基础	C15混凝土	1：1.00	1：1.25	1：1.50
砖基础	砖不低于MU10,M15砂浆	1：1.50	1：1.50	1：1.50
毛石基础	M15砂浆	1：1.25	1：1.50	—
灰土基础	体积比为3：7或2：8的灰土，其最小干密度：粉土1.55 t/m^3；粉质粘土：1.50 t/m^3；粘土：1.45 t/m^3	1：1.25	1：1.50	—
三合土基础	体积比为1：2：4～1：3：6（石灰：砂：骨料），每层约需铺220mm，夯至150mm	1：1.50	1：1.20	—

2.1.1 刚性基础构造要求



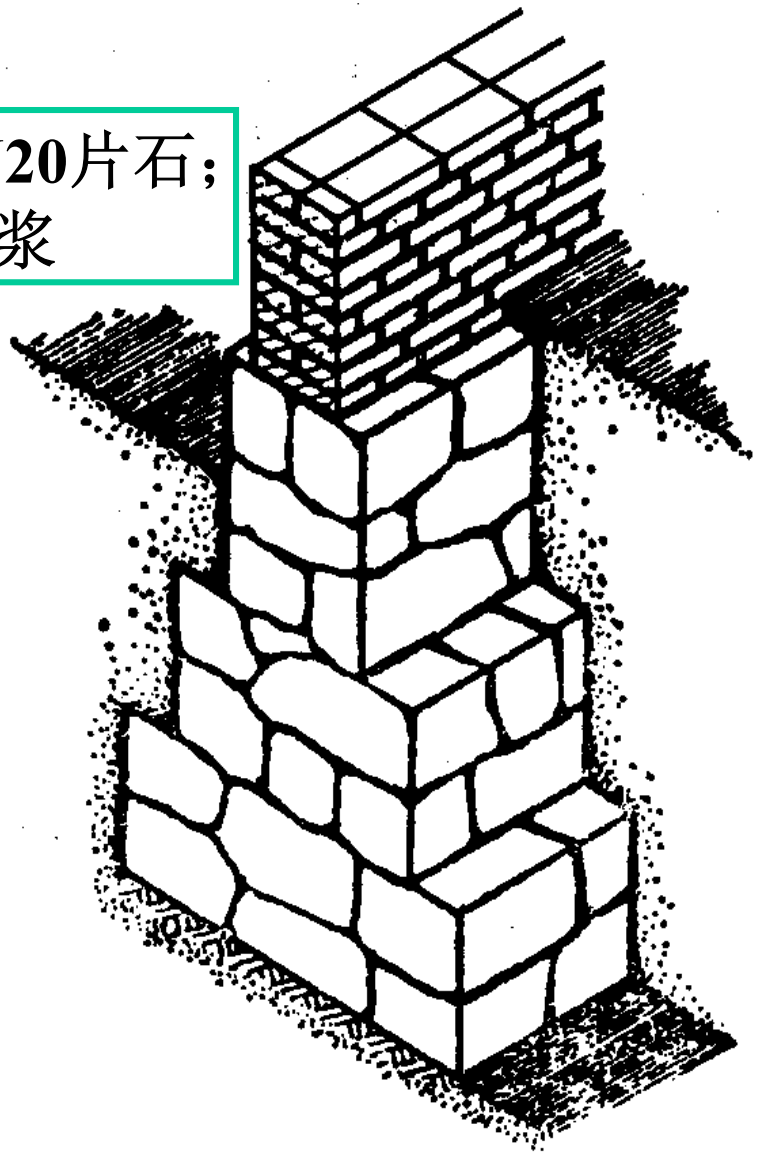
砖基础剖面图

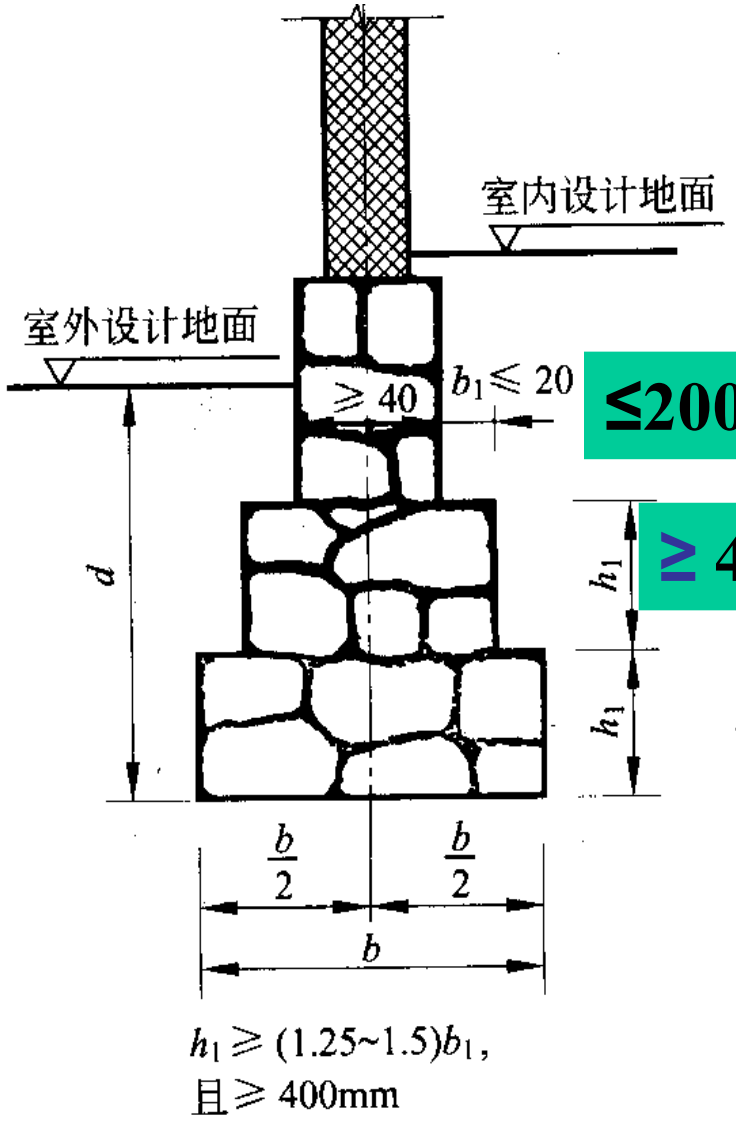
（a）“两皮一收”砌法；（b）“二一间隔收”砌法



砖基础： 低层建筑—墙下基础。砌筑方便，强度低、抗冻性差。砌法：二一间隔收或两皮一收（1/4砖）。

≥ MU20片石；
M5砂浆

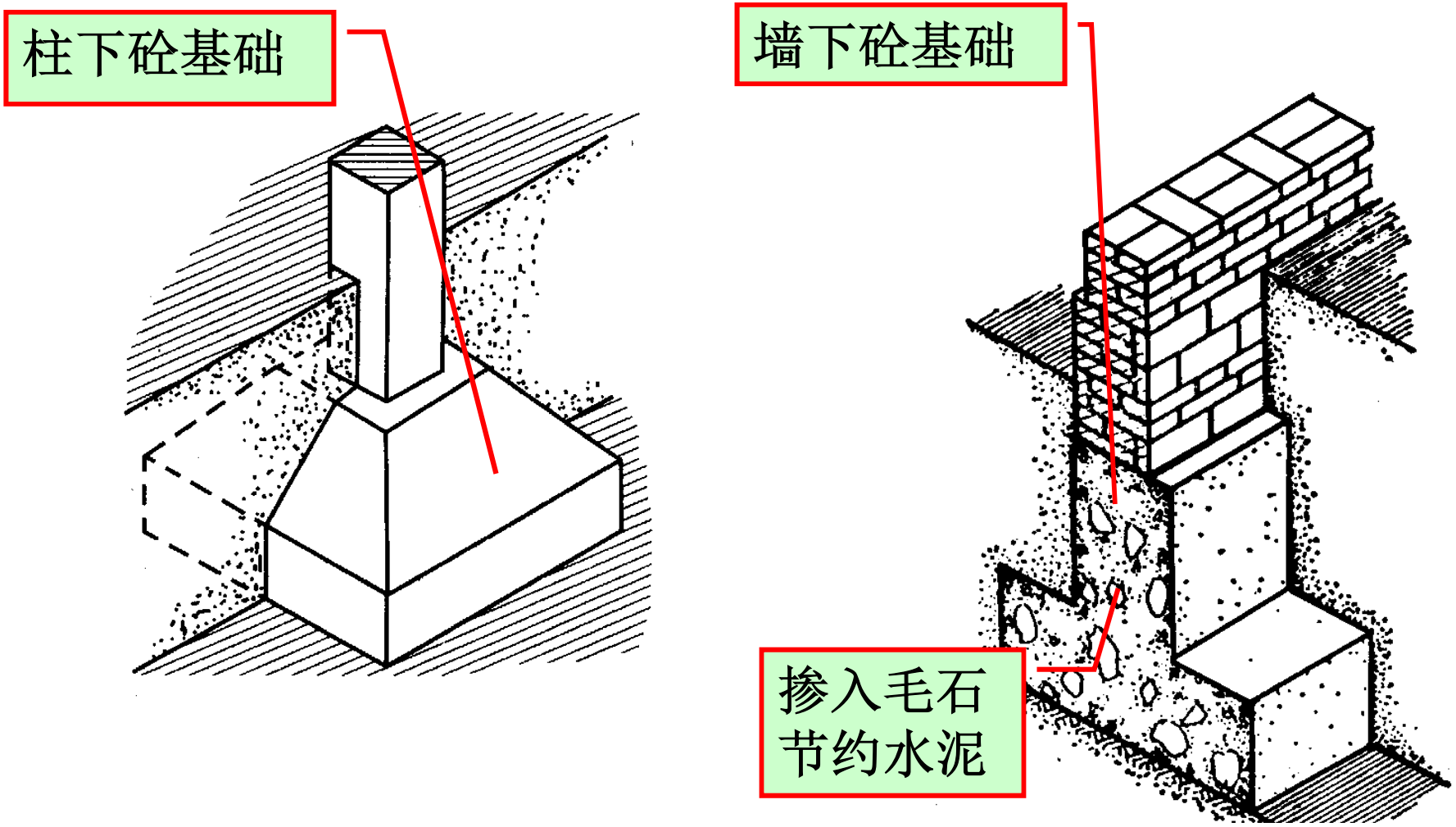




≤200

≥ 400

片石基础：砌筑较方便，抗冻性好。砌法：错缝搭接。



砼与片石砼基础： 强度、耐久性和抗冻性均较好，适于荷载大及地下水位以下结构。掺入片石要求：占体积**20~30%**，尺寸**≤300mm** 。

2.1.1 刚性基础构造要求

■刚性基础的特点

✓稳定性好，施工简便

✓用于≤6层的民用建筑、荷载较小的桥梁基础及涵洞等；

■刚性基础的局限性

✓当基础承受荷载较大时，用料多、自重大，埋深也加大

2.1.2 钢筋混凝土扩展基础

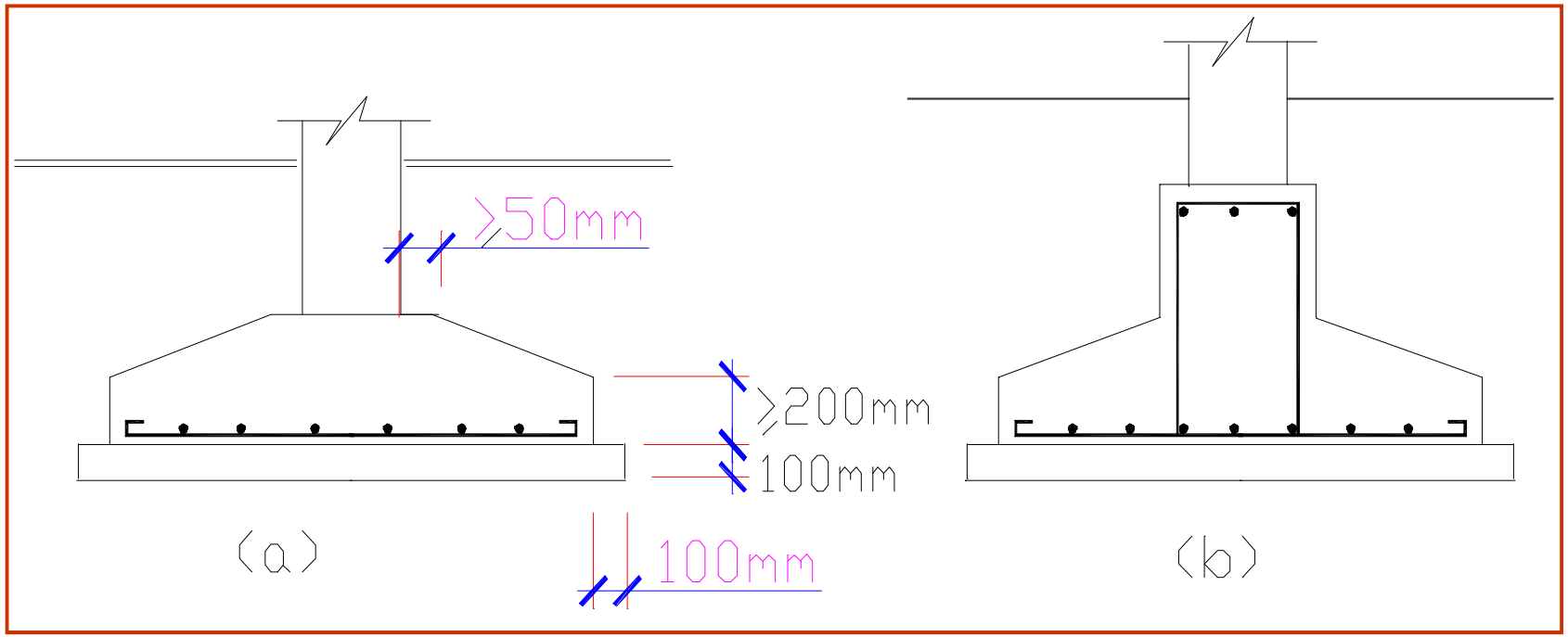
- **墙下钢筋混凝土条形基础**

✓ 砌体承重墙体及挡土墙、涵洞下常采用的基础形式

- **柱下钢筋混凝土独立基础**

✓ 建筑物中的柱、桥梁中的墩常用基础形式

2.1.2 钢筋混凝土扩展基础构造要求



墙下钢筋混凝土扩展基础

（a）无肋；（b）有肋

2.1.2 钢筋混凝土扩展基础构造要求

✓ 锥形基础边缘高不宜<200mm，坡度$i \leq 1:3$；小于250mm时可做成等厚板。阶梯形基础每阶高宜为300～500mm。

✓ 垫层厚度一般为100mm。

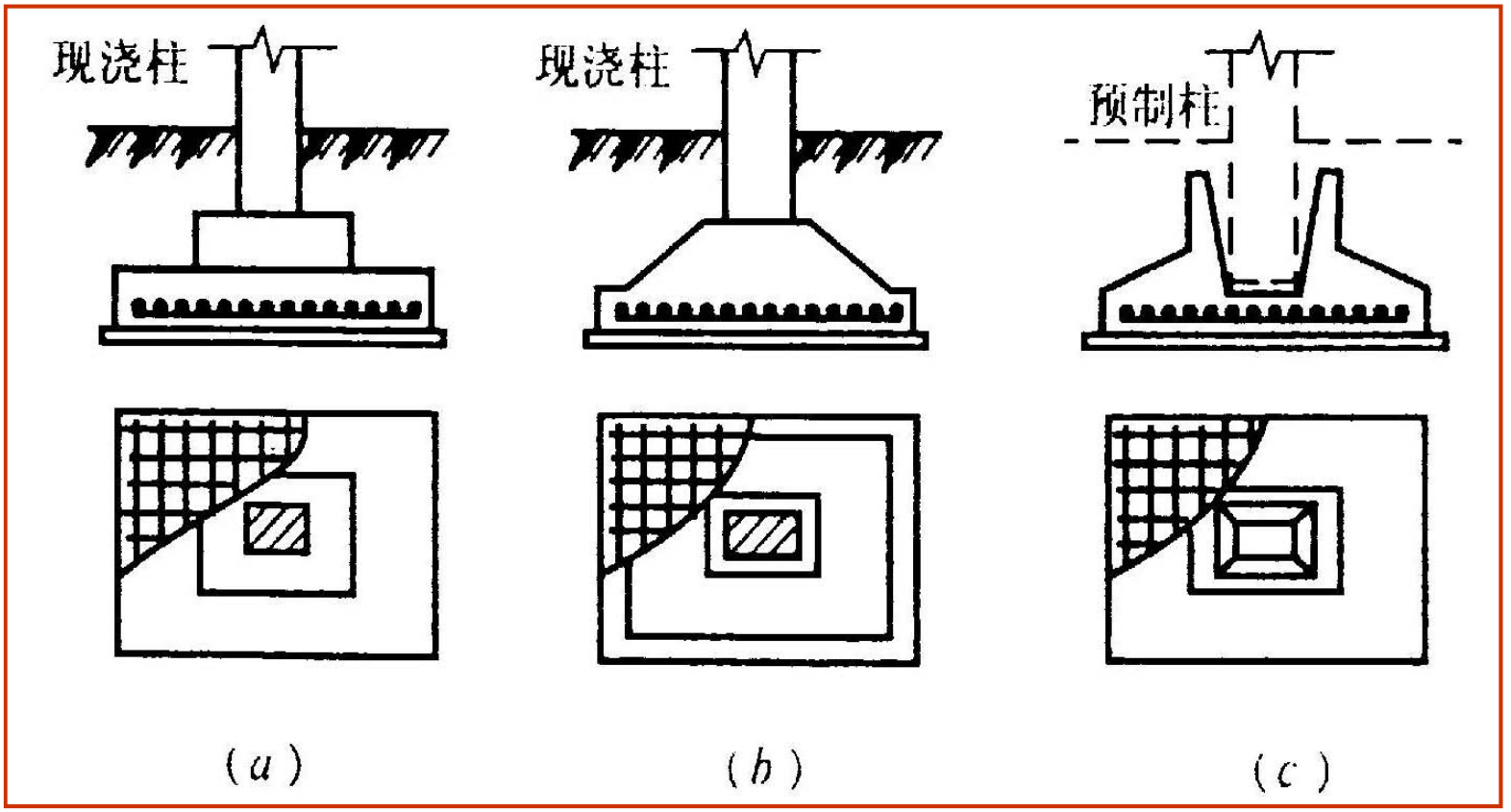
✓ 底板受力钢筋最小直径不宜<10mm,间距不宜>200mm和<100mm。有垫层时混凝土的净保护层厚不宜<40mm，无垫层时不宜<70mm。纵向分布筋直径≮8mm，间距≯300mm。

✓ 混凝土强度等级不宜低于C20。

✓ 根据经验,初选时基础的高度一般大于或等于$b/8$。

✓ 当地基软弱或承受差异荷载时，为增强基础的整体性和抗弯能力，可采用带肋基础。肋部纵向筋和箍筋按经验确定。

2.1.2 钢筋混凝土扩展基础构造要求

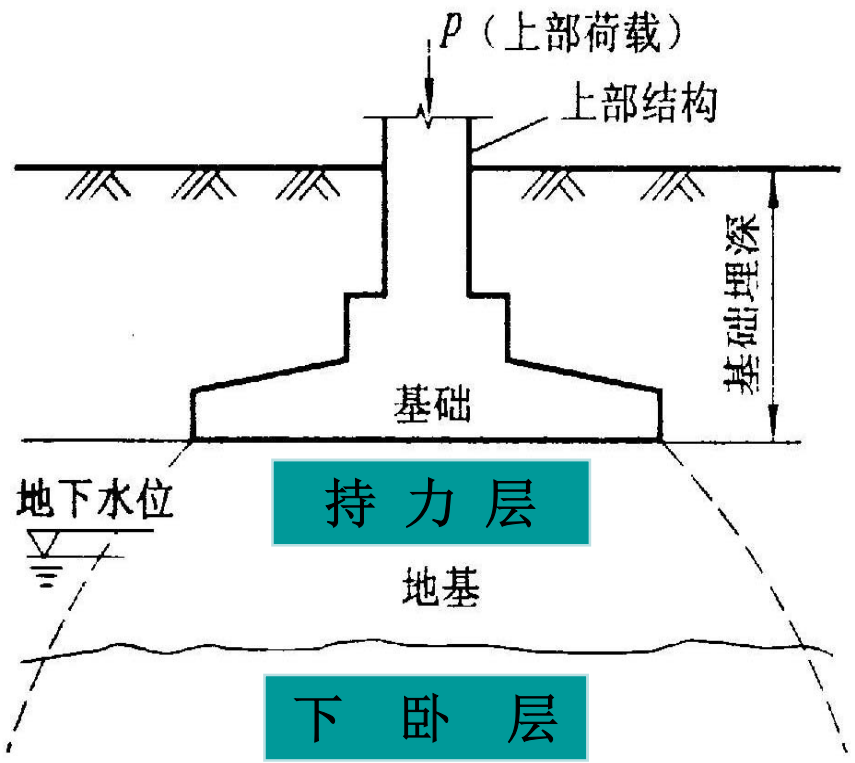


柱下钢筋混凝土单独基础
（a）台阶型；（b）锥台型；（c）杯口型

2.2 基础埋置深度的选择

- **持力层**
  - ✓ 直接支撑基础的土层
- **下卧层**
  - ✓ 持力层以下的各土层
- 覆盖层、软弱下卧层、刚性下卧层

- **选择基础埋置深度**
  - ✓ 也就是选择合适的地基持力层



基础埋置深度示意

2.2 基础埋置深度的选择

■基础埋深的概念:

基础埋置深度是指基础底面至室外设计地面的距离。

■确定基础埋深的意义 ：

选择了基础埋置深度就选择了地基持力层，反之亦然。

■确定基础埋深的原则：

✓在满足地基稳定和变形要求的前提下，基础尽量浅埋

✓当上层土强度大于下层土时，宜采用上层为持力层。

✓高层建筑应有足够的埋深来保持其稳定性。

✓除岩石地基外，基础埋深不宜小于0.5m。

2.2 基础埋置深度的选择

■基础埋深基本要求：

✓d大于50cm：表土扰动，植物，冻融，冲蚀

✓基础顶面距离表土大于10cm：保护作用

✓桥基要求在冲刷深度以下

■基础埋深d的取值

✓一般至室外标高算起；

✓在填方整平地区，可至填土地面标高算起。但填土在上部结构施工完成以后，应从天然地面标高算起；

✓对于地下室，如采用箱形或筏形基础时，至室外标高算起；当采用独立基础或条形基础时，应从室内地面标高算起。

注：天然地面-设计地面-室外标高-室内标高

2.2 基础埋置深度的选择

■**基础埋深应考虑因素：**

✓建筑结构条件与场地环境条件

✓工程地质条件

✓水文地质条件

✓地基冻融条件

2.2 基础埋置深度的选择
——建筑结构条件与场地环境条件

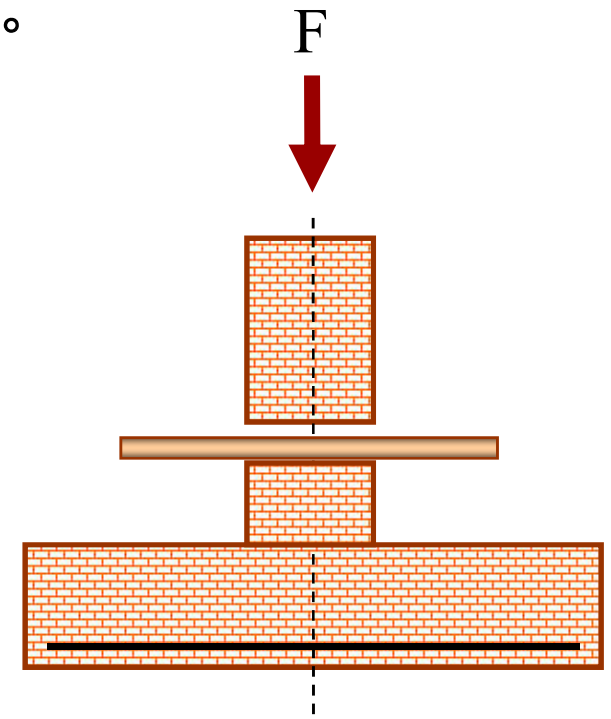
- ✓ 建筑结构条件
- ✓ 荷载大小
- ✓ 荷载性质
- ✓ 场地环境

■考虑建筑物地下空间的使用功能要求

✓有地下室或半地下室的建筑，其埋深必须结合地下部分设计标高选定。

✓地下管道应在基底以上，便于维修。

✓电梯缓冲坑：自地面向下至少1.4m



■考虑建筑物的高度和荷载大小的影响

✓高层建筑基础：承载力、变形

✓筏形基础和箱形基础：1/15

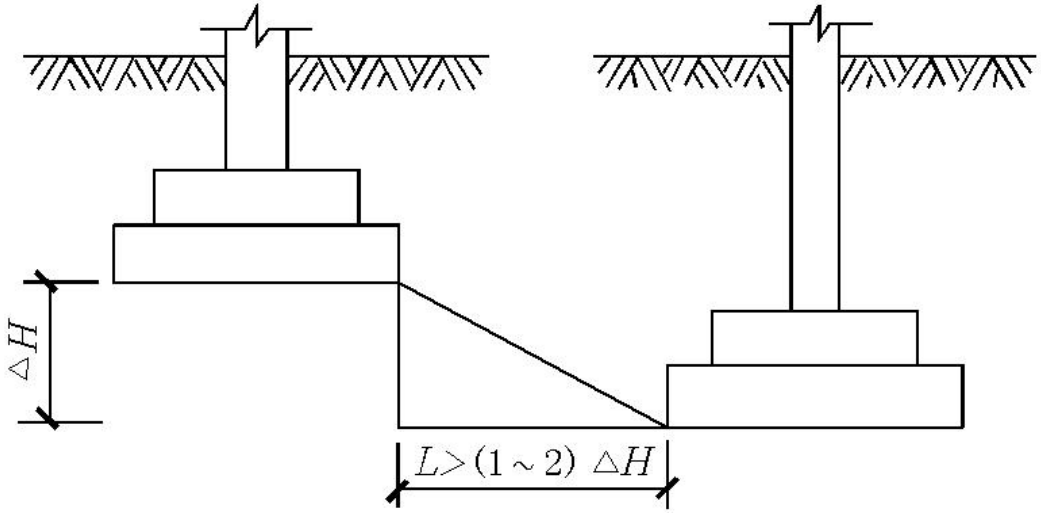
✓桩箱或桩筏基础：1/18～1/20，　（不计桩长）

注：以上规定不包括岩石地基，岩石地基上的高层主要考虑抗滑要求

✓输电塔基础：要求较大的埋深，提供足够的抗拔阻力

■考虑相邻建筑物的影响

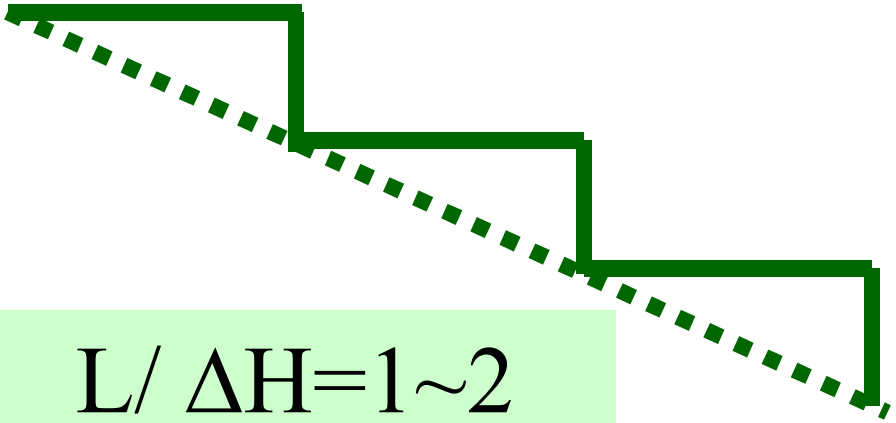
✓新建筑物基础埋深不宜大于原有建筑物基础。
✓当埋深大于原有建筑物基础时，两基础间应保持一定净距，否则要求支护并且严格限制支护的水平位移，分段施工，设置临时加固支撑、打板桩、地下连续墙等施工措施，或加固原有建筑物地基。



相邻基础埋深

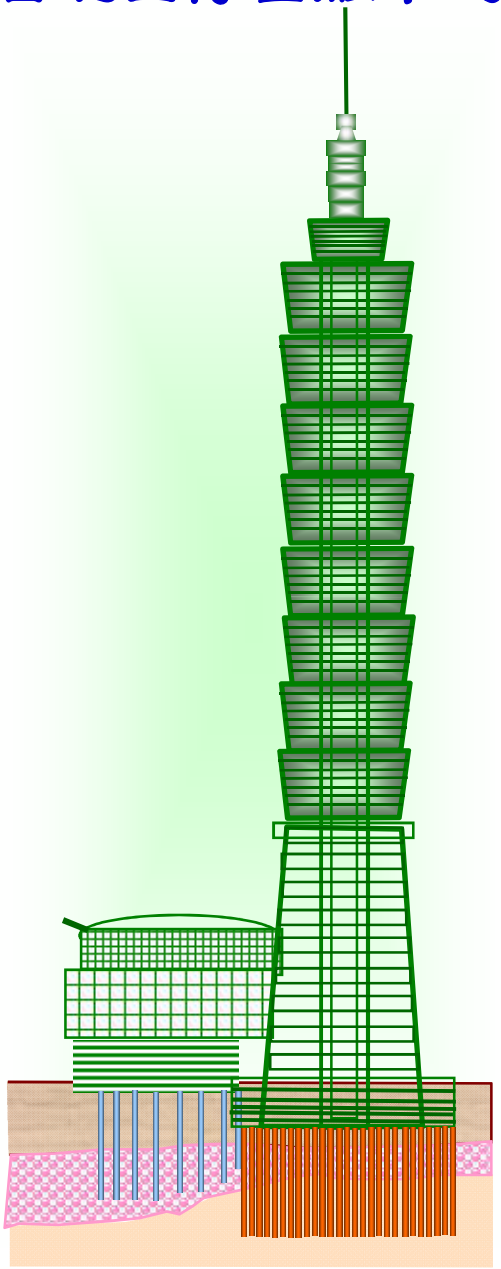
■基础埋深不同时

- ✓主楼与裙房：高度不同，分期施工设置后浇带
- ✓台阶式相连：
- 重要设备的基础需加大埋深
- 地下室与非地下室交界处的基础
- 山坡上的房屋



$$L/\Delta H=1\sim2$$

台北国际金融中心



2.2 基础埋置深度的选择
——场地环境条件

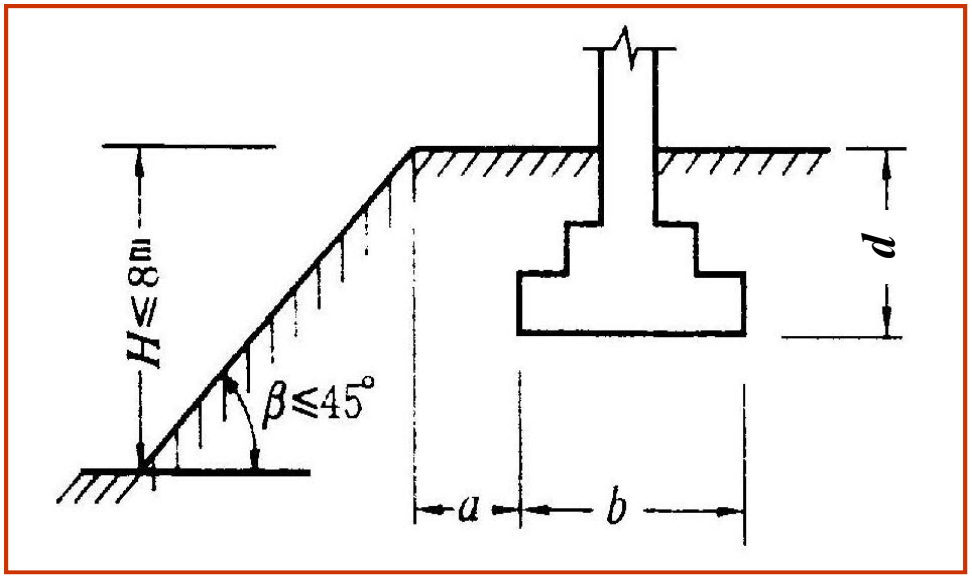
- 图示，若$b \leq 3m$ 则a满足下式但不小于**2.5m**
- 条形基础

$$a \geq 3.5b - d / \tan \beta$$

- 矩形基础

$$a \geq 2.5b - d / \tan \beta$$

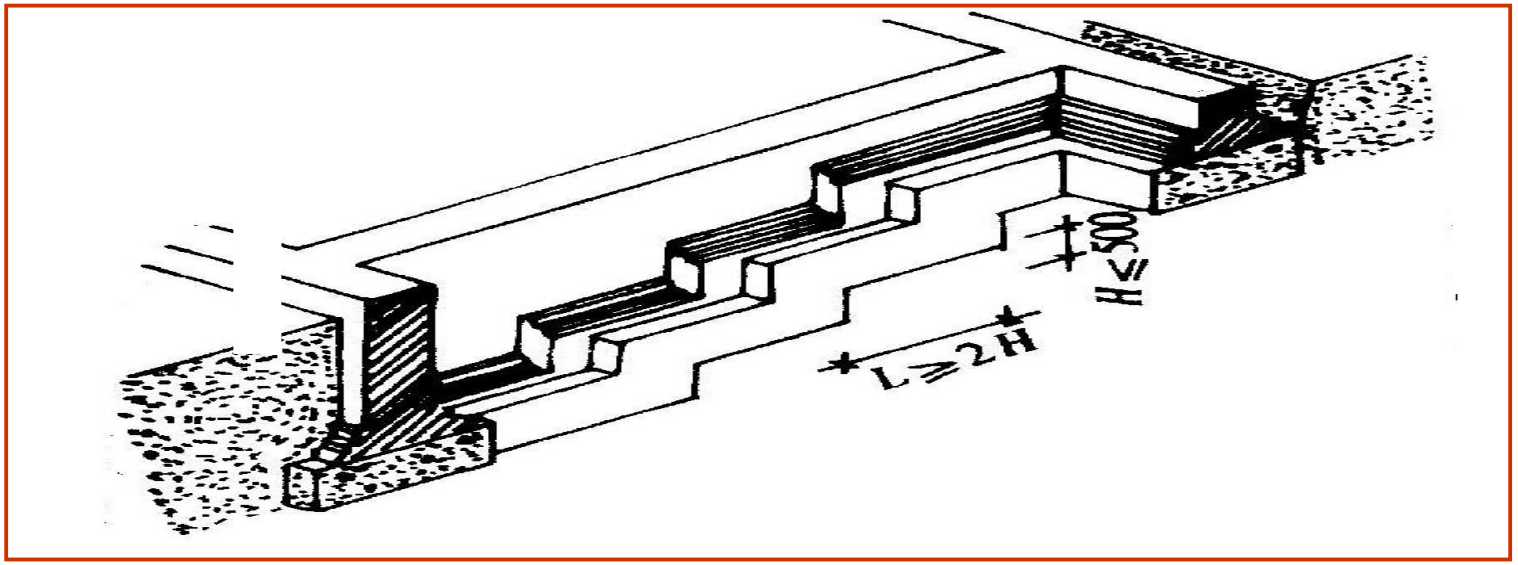
- 不满足要求时，应进行地基稳定性验算



土坡坡顶处基础的埋深

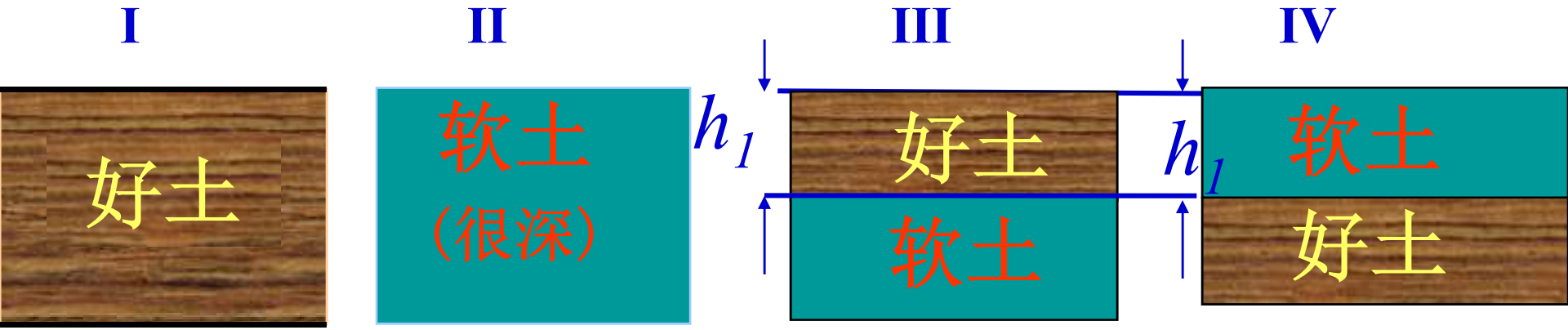
2.2 基础埋置深度的选择
——工程地质条件

- 地基由多层土组成，上好下软，基础应尽量浅埋
- 地基上软下好，应具体分析，进行方案比较
- 地基分布不均匀在水平方向倾斜较大时，基础埋深如图处理



台 阶 形 过 渡 处 理

举例：根据荷载的大小和性质给基础选择可靠的持力层



在满足地基基本要求条件下，按最小埋深和其他条件定

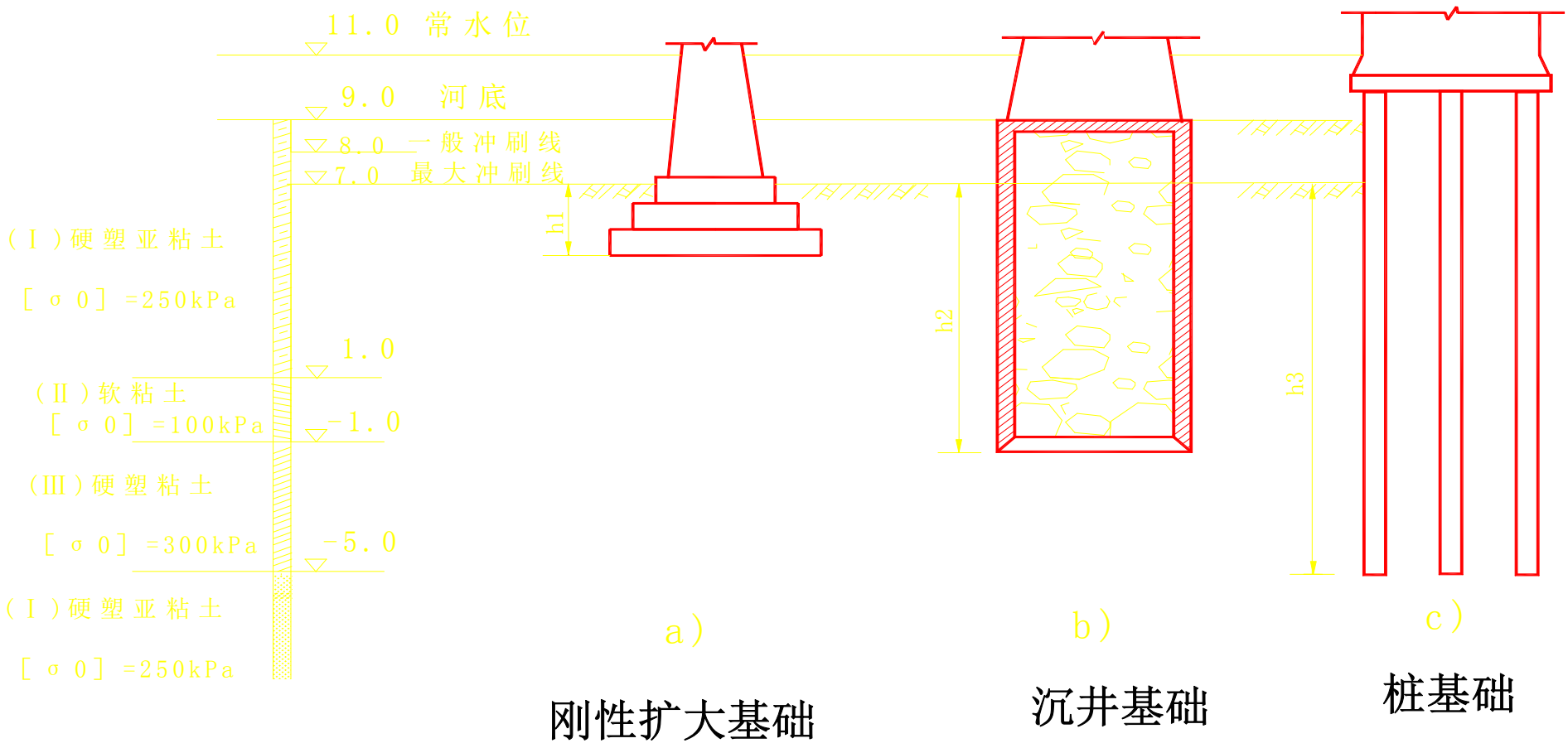
只有低层房屋可用，否则考虑选择人工地基或深基础等方案，比较选择

在其他条件满足时，基础应尽管浅埋，以加大基底至软弱层的距离，例如在我国沿海地区，地表普遍有约2~3m的“硬壳层”（日晒等原因），对一般中小型建筑物而言，是良好持力层应充分利用，最好采用钢筋混凝土基础如“宽基浅埋”方案或“不埋式基础”。若h_1太小就为II

h_1< 2m 基底在好土

h1=2m-4m则比较：浅埋，但因承力低，基底面积大；深埋，基底面小，但埋深大。高楼好土，低楼软土

h1>4 m 桩基或处理



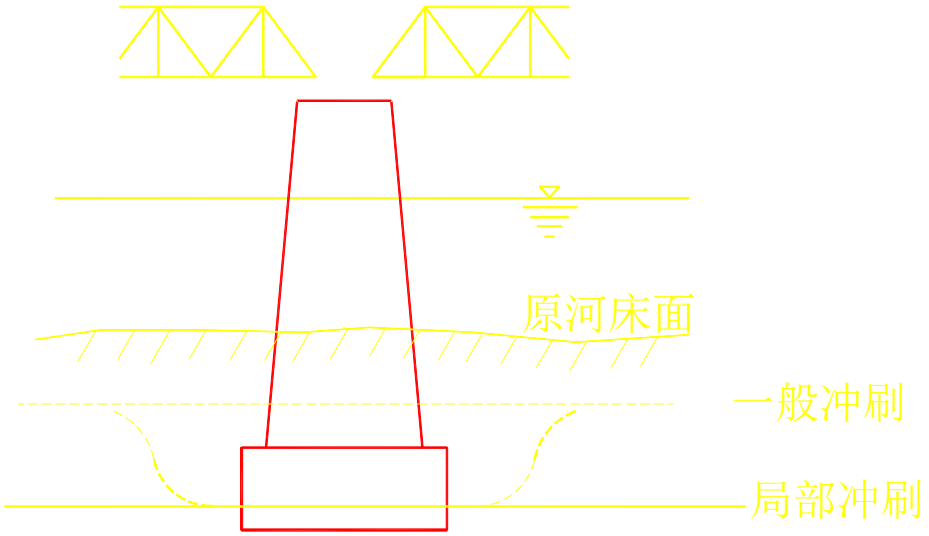
桥墩基础埋深的不同方案

2.2 基础埋置深度的选择
——水文地质条件

- 遇水时，基底应尽量放在地下水位以上
- 基底低于潜水面时，要考虑基坑排水、支护和地下水水质问题：涌土、流砂现象 和浮托力等
- 若遇承压水时，为防止基底因挖土减压而隆起开裂，必须控制基坑开挖深度，使基底隔水层的覆盖压力（自重力）大于水的承压力（静水压力），见后面图
- 若地下水位升降变化较大时，基础不宜置于地下水变化幅度范围，应放在最低水位以下（若不能放在最高地下水位以上时），以避免地下水位变化对基础沉降的不利影响。
- 桥墩基础应埋置在最大冲刷线下一定深度

补充——河流的冲刷深度基本概念

- ✓ 洪水冲刷后，整个河床面要下降，这叫一般冲刷
- ✓ 被冲下去的深度叫一般冲刷深度
- ✓ 同时由于桥墩的阻水作用，使洪水在桥墩四周冲出一个深坑，这叫局部冲刷



河流的冲刷作用

小桥涵的基础底面应设置在设计洪水冲刷线以下不小于1m。对于大、中桥基础的基底在设计洪水冲刷总深度以下的最小埋置深度，建议根据桥梁大小、技术的复杂性和重要性，参照下表采用。

冲刷总深度(m) / 最小埋置深度(m) / 桥梁类型	0	<3	≥3	≥8	≥15	≥20
一 般 桥 梁	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
技术复杂修复困难的特大桥及其它重要大桥	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

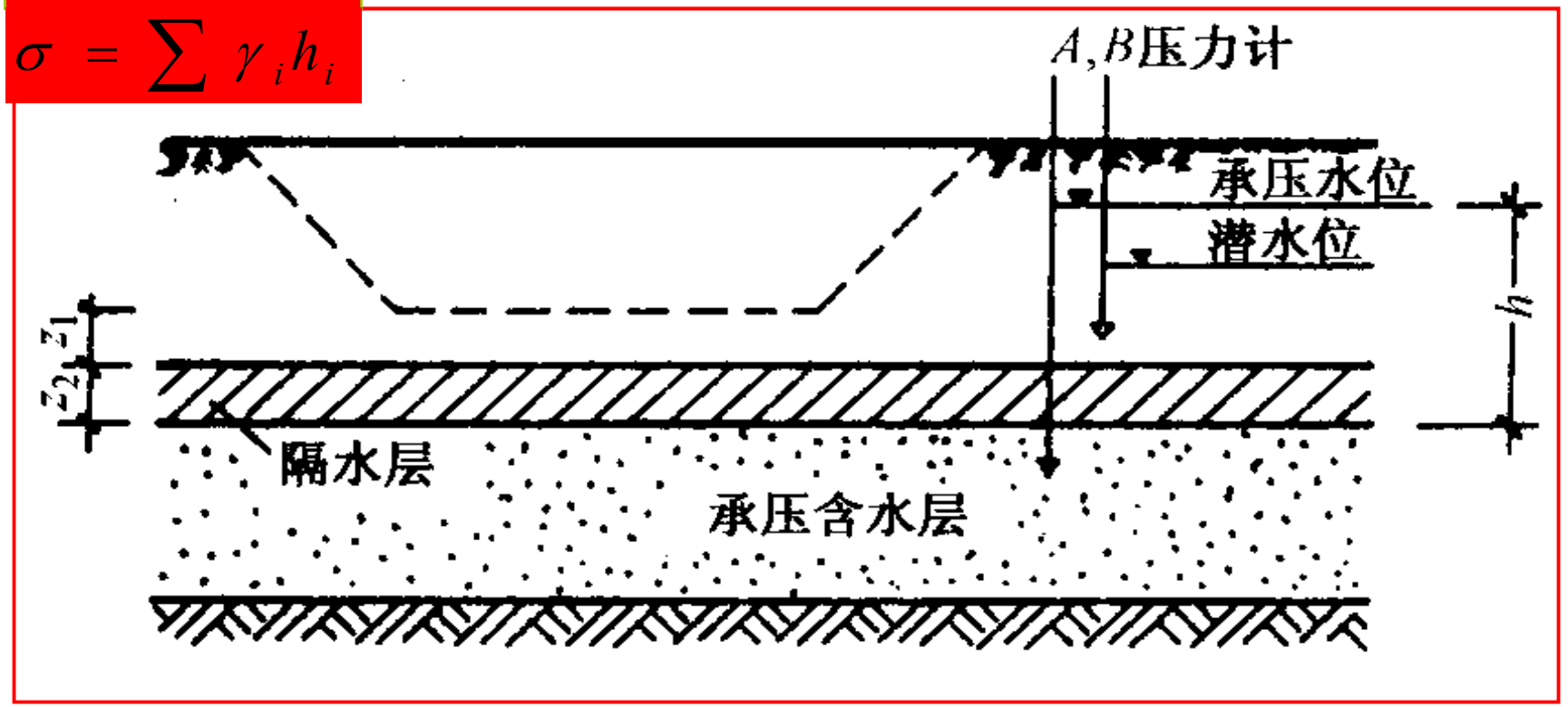
2.2 基础埋置深度的选择

——水文地质条件

$u/\sigma < 0.7$

$u = \gamma_\omega h$

$\sigma = \sum \gamma_i h_i$



基坑下埋藏有承压含水层的情况

2.2 基础埋置深度的选择
——地基冻融条件

在寒冷地区（我国主要在黄河以北地区），冬季时地面以下一定厚度的土层会处于摄氏零度以下，土中含有水分则冻结形成冻土。

■冻土分类

✓季节性冻土：是冬季冻结、天暖解冻，每年冻融交替一次的土层，在我国北方地区分布广泛。

✓多年性冻土：指连续保持冻结状态三年以上的土层，其性质较复杂，属特殊土地基，另见文献。

2.2 基础埋置深度的选择
——地基冻融条件

冻胀——土冻结后发现体积膨胀的现象，称为冻胀。

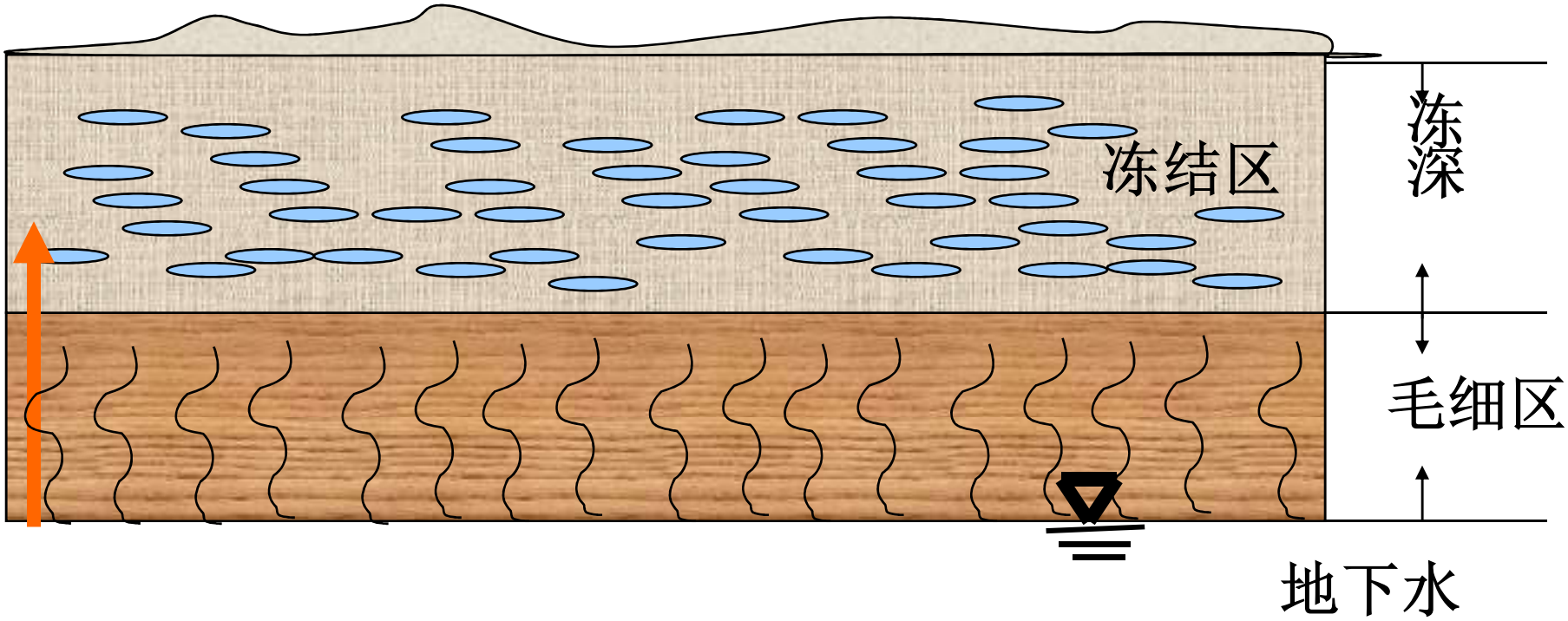
冻胀的原因：并不是所有的土冻结后均会发生冻胀现象，季节性冻土由细粒土（粉砂、粉土和粘性土）组成，土中含水量多且地下水位又高时，不但在冻结深度范围内的土中水被冻结形成冰晶体，且未冻区的自由水和弱结合水会不断向冻结区迁移、聚集，使冰晶体逐渐扩大，引起膨胀。结冰时水的膨胀可达10%左右，且膨胀力很大，达2MPa量级，若膨胀力大于基底压力，基础会被抬起。

融陷——冻土融化后引起建筑物的沉陷的现象，称为融陷。

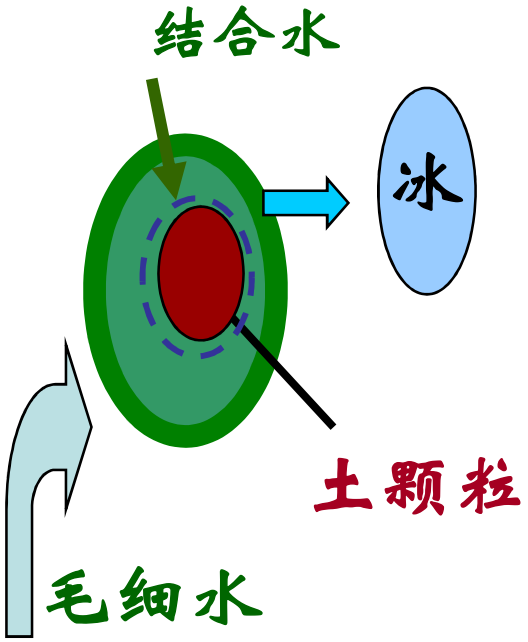
冻胀：冻胀力，地面隆起
融陷：强度降低，建筑物下陷 → 不均匀沉降 → 建筑物开裂损坏

2.2 基础埋置深度的选择
——地基冻融条件

- **冻胀机理：** 主要是由于土层在冻结期周围未冻区土中的水分向冻结区迁移、集聚使冰晶体不断扩大所致。



水变成冰---体胀，
自由水冻结温度0^{oc}，
结合水冻结温度
0.5^{oc}至-30^{oc}。



自由水+外层(弱)结合水冻结，形成冰针，冰透镜

⇩

结合水膜变薄，离子浓度加大，吸力增加

⇩

吸引毛细水

⇩

吸引地下水

2.2 基础埋置深度的选择
——地基冻融条件

■影响冻胀的因素（土类、地下水位及气温）

粗粒土：无冻胀

细粒土（粉砂、粉土和粘性土）：有冻胀

坚硬粘性土：冻胀微弱 ；粉土：冻胀最严重

■冻胀性划分：

《建筑地基规范》根据冻土层的平均冻胀率的大小，将地基土划分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀五类。

注：冻胀区的基础，应保证有足够的埋深，使基底达到或基本达到冻胀影响深度以下，从而避免冻害。

2.2 基础埋置深度的选择
——地基冻融条件

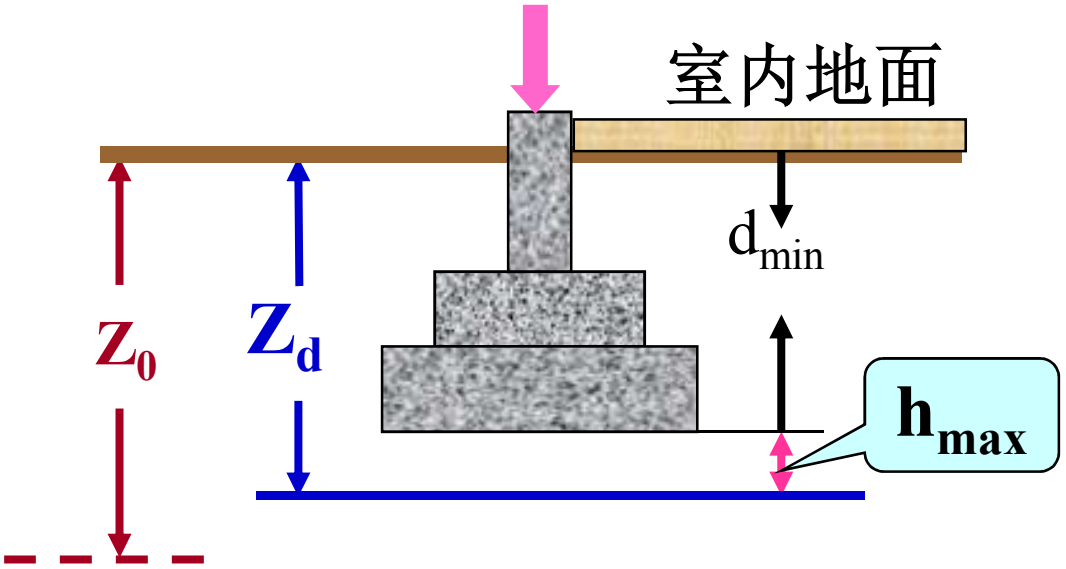
- **冻融条件考虑（P36）**

✓ 先按《地基规范》进行地基土冻胀性的划分，后再进行最小埋深d_{min}的计算

$$d_{min} = z_d - h_{max}$$

式中 h_{max}— 基底下允许残留冻土层的最大厚度

z_d — 设计冻深， z_0 标准冻深（见规范）

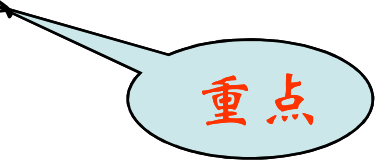


《公桥基规》规定，当上部结构为超静定结构时，基底应埋置在最深冻结线以下不小于**0.25m**；对静定结构的基础，一般也按此要求，但在冻结较深地区，为了减少基础埋深，有些类别的冻土经计算后也可将基底置于最大冻结线以上。同前。

2.3 地基承载力

■三个问题

- ✓ 地基承载力的基本概念及基本验算
- ✓ 影响地基承载力大小的因素
- ✓ 确定地基承载力的方法



地基承载力的概念

地基承载力是指地基单位面积承受荷载的能力。通常区分为两种承载力：

极限承载力——指地基即将丧失稳定性时的承载力；

容许承载力——指地基稳定有足够的安全度且变形在容许范围内的承载力。

极限承载力仅从地基稳定的角度研究地基土体所承受的最大荷载，但地基既使未失稳，若变形过大，引起上部结构破坏或不能正常使用也是不允许的。所以进行地基基础设计过去一直采用地基容许承载力，即现在所称的地基承载力特征值。

因此地基承载力是一个反映地基土在荷载作用下工作性能的综合指标，它不仅与地基土的性质有关，而且还与基础宽度，埋深以及上部结构的使用要求等因素有关，所以如何确定这一指标是地基基础设计的最关键性内容，它的大小直接关系到基础方案的选择，基础尺寸的大小，造价的经济性以及建筑物的安全稳定等。

2.3 地基承载力

建筑物因地基问题引起破坏的两种主要原因：

- ✓ 基础过大的沉降或沉降差
- ✓ 地基产生滑动破坏

地基承载力设计原则

- 总安全系数设计原则

$p = \frac{p_u}{k}$，k为安全系数

- 容许承载力设计原则，同时满足强度（$p<f_a$）和变形（$s>[s]$）条件
- 概率极限状态设计原则

f_a（特征值）

建筑地基基础设计规范GB50007-2002---定义

2.1.3 地基承载力特征值 characteristic value of subgrade bearing capacity

指由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值，其最大值为比例界限值。

2.3 地基承载力—基本验算

- **《建筑地基基础设计规范》要求：**

$$p_k \le f_a \qquad 2\text{-}5$$

$$p_{k\max} \le 1.2 f_a \qquad 2\text{-}6$$

p_k—相应于荷载效应标准组合时基底平均压力

$p_{k\max}$—相应于荷载效应标准组合时基底边缘最大压力

f_a—修正后的地基承载力特征值

- **《公路桥涵地基与基础设计规范》要求：**

$p_{\max}$—基底最大压应力，r_R—地基承载力容许值抗力系数

$[f_a]$—修正后的地基承载力容许值

$$p \le [f_a] \qquad 2\text{-}7$$

$$p_{\max} \le r_R [f_a] \qquad 2\text{-}8$$

2.3 地基承载力

影响因素：

- 地基土的成因与堆积年代
- 地基土的物理力学性质
- 地下水
- 上部结构情况

冲（洪）积土
坡积土

$\gamma \rightarrow \gamma'$

2.3 地基承载力

确定地基承载力的常用方法：

P_{cr}、 $P_{1/4}$、 P_u

- 1 按土的抗剪强度指标以理论公式计算
- 2 按现场载荷试验p-s曲线或其它原位试验确定
- 3 按有关规范提供的承载力或经验公式确定 —— 最常用

补充：在土质基本相同的条件下，参照邻近建筑物地基容许承载力；

原则：不过分严格，也不随意简化

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定

- 公式

$$f_a = \frac{A'}{K \cdot A} \cdot p_u = \psi_u \cdot p_u$$

- 来由 ∵

$$k = \frac{p_u}{f_a} \longrightarrow K = \frac{p_u \cdot A'}{f_a \cdot A}$$

p_u—地基极限承载力，按太沙基、魏锡克或汉森等理论公式计算

A'—与土接触的有效基底面积

A —基底面积

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定

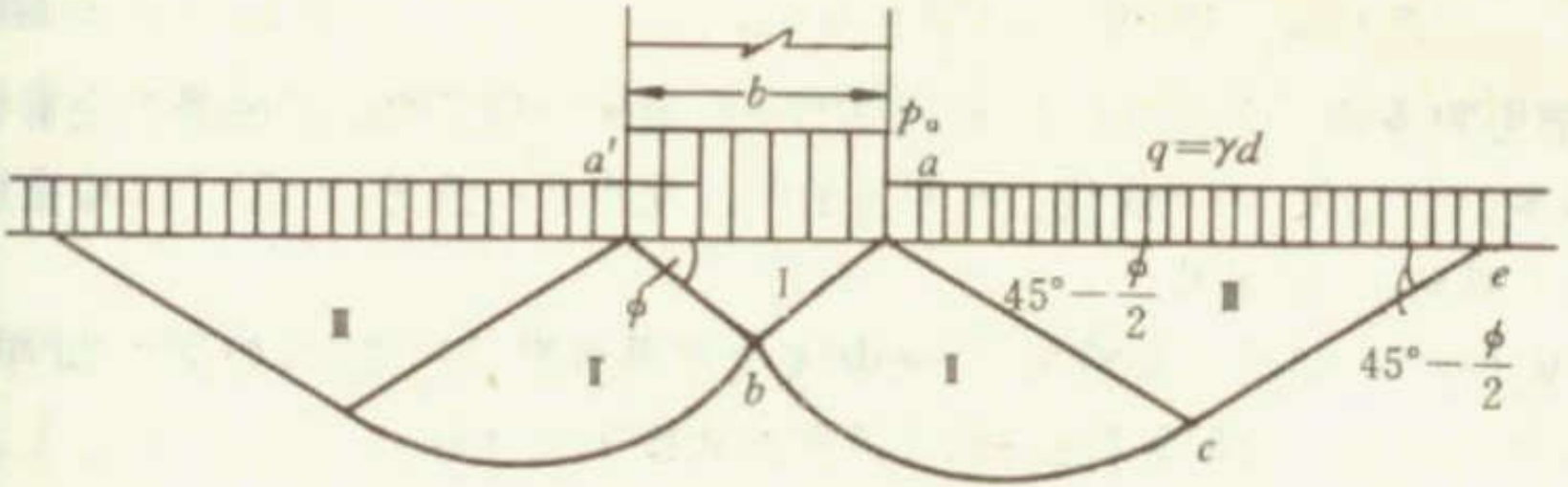
太沙基假定：

①条基、均布荷载

②滑动面形状

根据Ⅰ区土楔上诸力竖向平衡条件得：

$$p_u = \frac{1}{2}\gamma b N_\gamma + cN_c + qN_q$$



太沙基公式地基滑动面

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定

魏锡克公式：

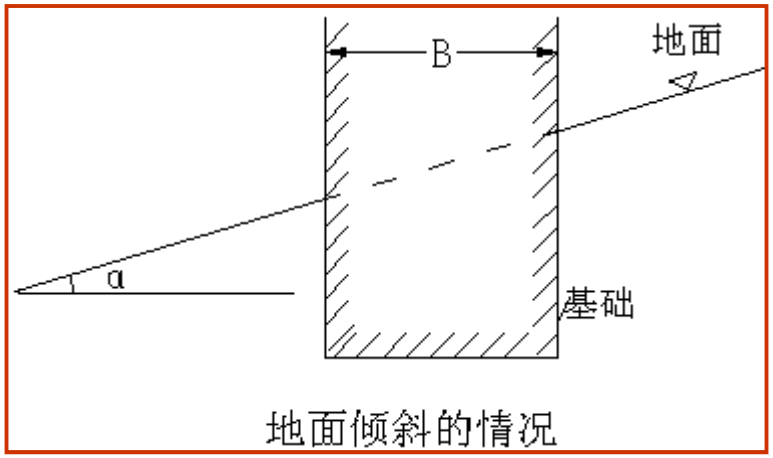
$$p_u = \frac{1}{2}\gamma b N_\gamma + \gamma_0 d N_q + c N_c$$

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^0 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

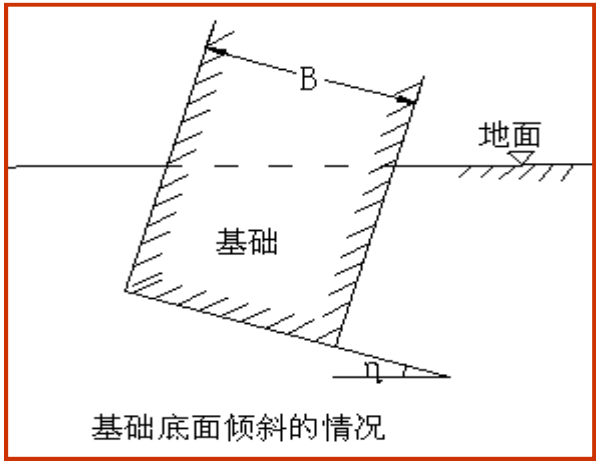
$$N_c = \cot\varphi\left(N_q - 1\right)$$

$$N_r = 2\left(N_q + 1\right)tg\varphi$$

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定



地面倾斜的情况



基础底面倾斜的情况

汉森公式：

$$p_u = \frac{1}{2}\gamma b N_\gamma s_r d_r i_r g_\gamma b_\gamma + q N_q s_q d_q i_q g_q b_q + c N_c s_c d_c i_c g_c b_c$$

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

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

$$N_\gamma = 1.8 N_c \tan^2\varphi$$

s_基础形状系数　i_荷载倾斜系数　d_基础深度系数
g_地面倾斜系数　b_基底倾斜系数　N_承载力系数

适用范围广

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定

地基极限承载力公式：

- 太沙基公式——适用于基础底面粗糙的条形基础，并推广到了方形与圆形基础
- 斯凯普顿公式——适用于软土地基、浅基础（矩形）情况
- 汉森公式——适用于倾斜荷载，以及不同的基础形状和埋深都可考虑

2.3.1 按土的抗剪强度指标确定

临塑荷载

$$p_{cr}=\frac{\pi(\gamma_0 d+c\cdot\cot\varphi)}{\cot\varphi+\varphi-\pi/2}+\gamma_0 d=N_c c+N_q\gamma_0 d$$

讨论：抗剪强度指标越大，临塑荷载越大；
埋深越大，临塑荷载越大；
临塑荷载与基础宽度无关。

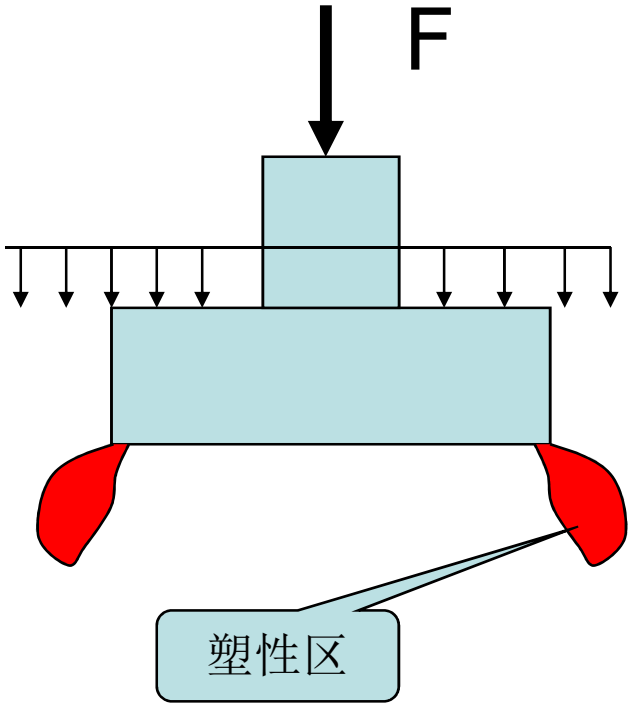
界限荷载：

$$p_{1/4(1/3)}=N_c c+N_q\gamma_0 d+N_b\gamma b$$

讨论：抗剪强度指标越大，界限荷载越大；
埋深越大，界限荷载越大；
界限荷载随基础宽度增大而变大。

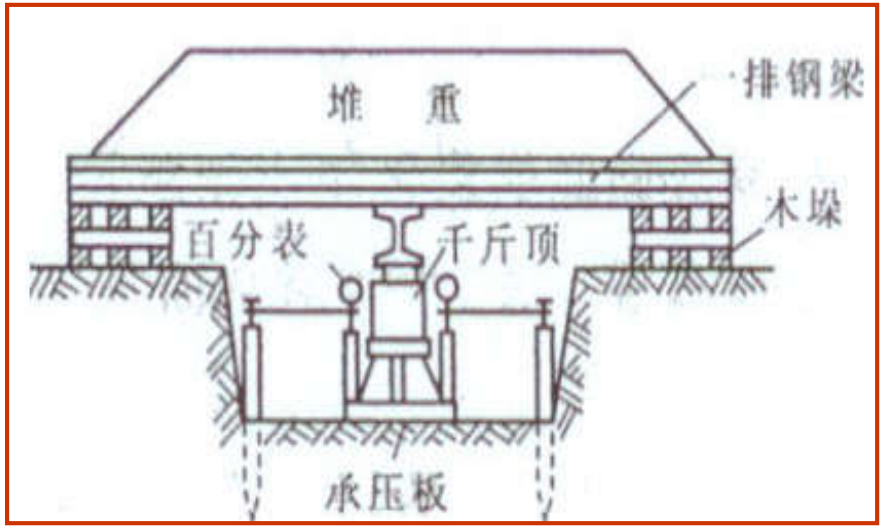
注意：

p_{cr}，$p_{1/4}$都可以作为地基承载力来进行设计，对于矩形和圆形基础，其结果偏于安全。已有塑性区，推导不严格。



2.3.2 按地基载荷试验确定

- ✓规范规定甲级必须进行
- ✓该法优点：成果可靠
- ✓该法缺点：费时、耗资、试验只能反映浅层地基的承载力。



载荷试验示意图（堆载）

2.3.2 按地基载荷试验确定

2.3.2 按地基载荷试验确定

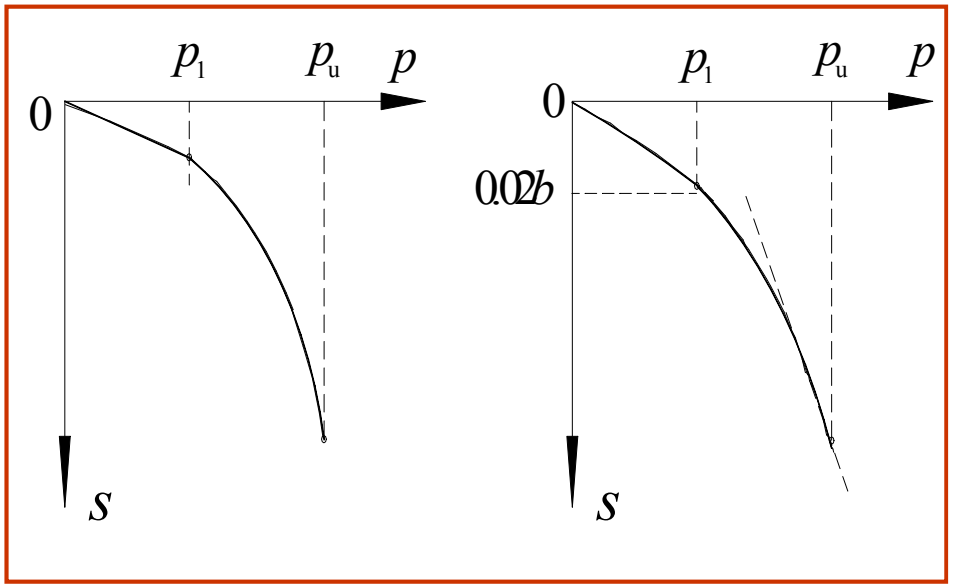


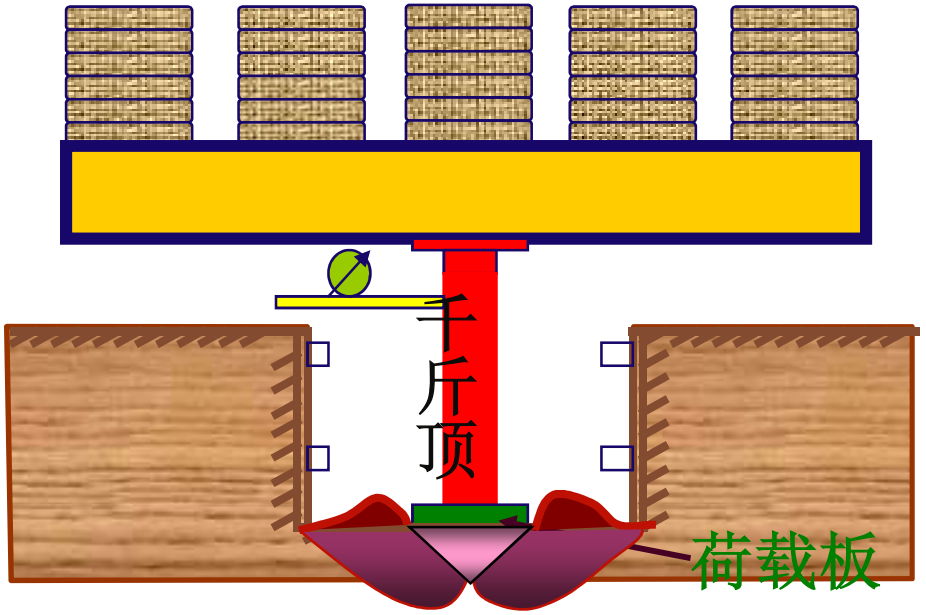
图2.12 按载荷试验确定地基承载力

(a)低压缩性土；（b）高压缩性土

- ***p-s*线有明显比例界限时(密砂、硬土)$f_{ak}=p_1$**
- **极限荷载能确定，且$p_u<2.0p_1$时，取$f_{ak}=0.5p_u$**
- **当不能按上述两点确定(中、高压缩性土的缓变型曲线)，取*s*/*b*=0.01～0.015时对应荷载作为f_{ak}**

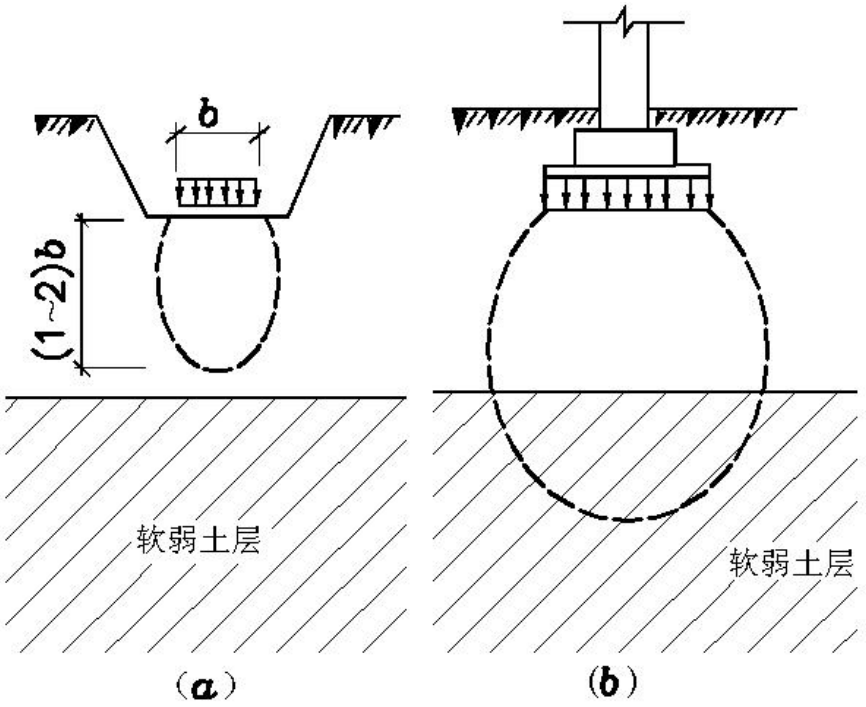
同一土层参加统计的试验点不应少于三点，符合要求后(极差不能超过30%)，取该平均值作为地基承载力特征值f_{ak}

规范要求:对地基基础设计等级为甲级的建筑物采用**载荷试验**、并根据理论公式计算及其他原位试验等方法综合确定。



载荷试验法

载荷板的测试范围：在现场通过0.25～0.50m²的载荷板对扰动较少的地基土体直接施荷，所测得的成果一般能反映相当于1～2倍荷载板宽度的深度以内土体的平均性质。

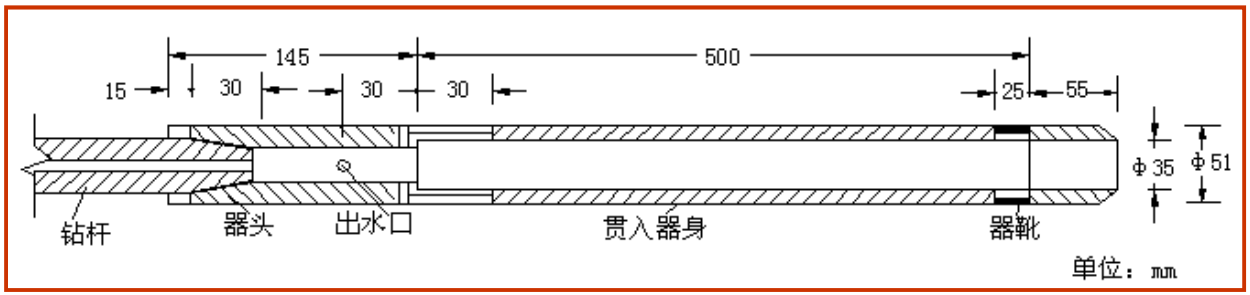


载荷板与实际基础对地基的影响深度比较

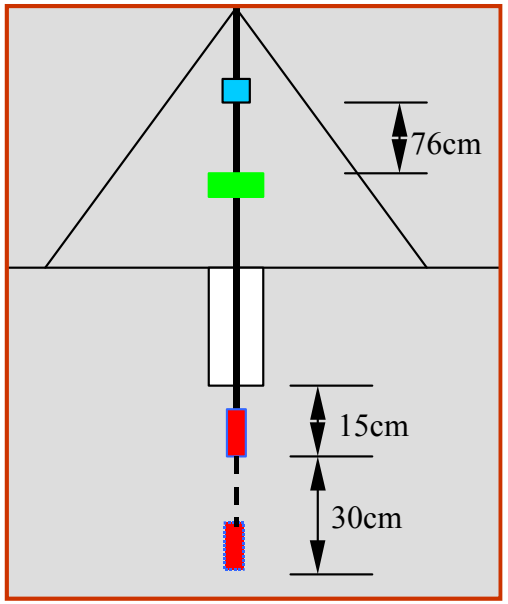
(a) 载荷试验　　(b) 实际基础

其他原位测试方法——标准贯入试验

方法：(1)钻孔，贯入器放入孔底；(2)63.5kg重锤以76cm高度自由下落将贯入器击入土中15cm;(3)记录继续打入30cm的锤击数N'



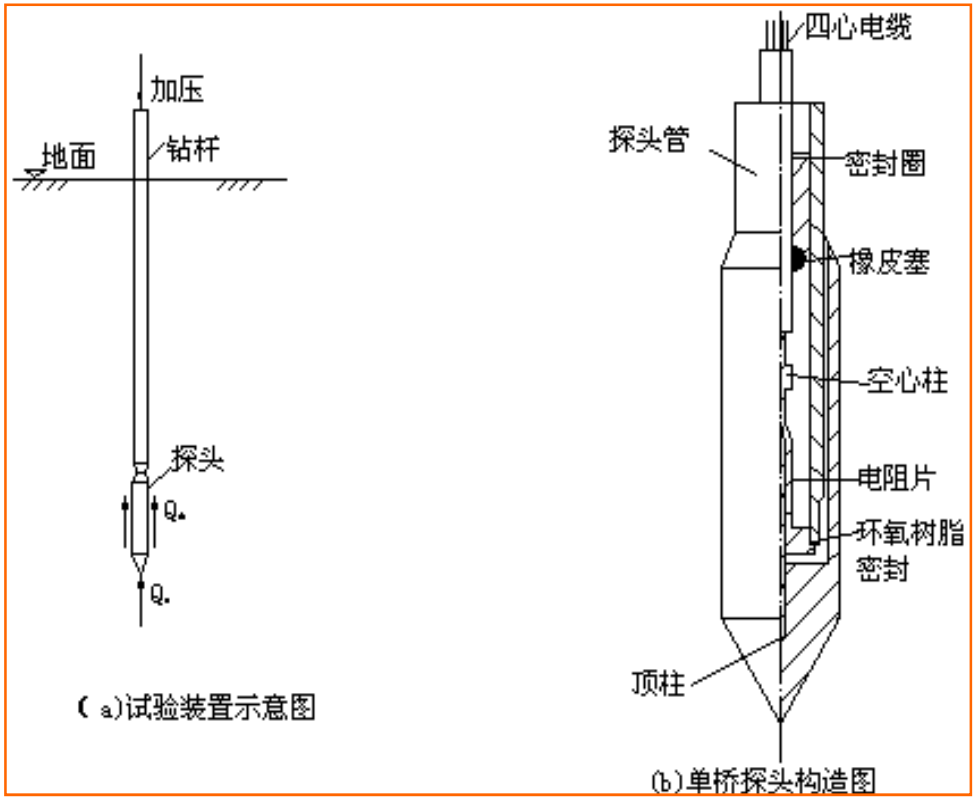
标准贯入器构造图



标贯试验得标贯击数N' → $N = \alpha N'$ → 修正后得标准贯入击数N查表得：承载力标准值

其他原位测试

——按静力触探试验确定地基承载力



静力触探示意图

比贯入阻力：

$$p_s = \frac{Q}{A} = \frac{Q_c + Q_f}{A}$$

根据比贯入阻力查经验表格或由经验公式计算

确定承载力特征值

2.3.3 按地基规范承载力公式确定

- **GB50007(建规)**推荐的公式($P_{1/4}$)
- 条件：荷载偏心距$e<0.033b$(b为偏心方向基础边长)
- $$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c C_k$$

f_a —由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值；

M_b、M_d、M_c—承载力系数，由φ_k查规范表；

b —基础底面宽度；注意b的取值

φ_k、c_k—基底下一倍短边宽深度范围内土的内摩擦角及粘聚力标准值；

γ —基础底面以下土的重度，水下取浮重度；

γ_m—基础埋深范围内各层土的加权平均重度。

表 5.2.5　　承载力系数 M_b、M_d、M_c

土的内摩擦角标准值 φ_k（°）	M_b	M_d	M_c
0	0	1.00	3.14
2	0.03	1.12	3.32
4	0.06	1.25	3.51
6	0.10	1.39	3.71
8	0.14	1.55	3.93
10	0.18	1.73	4.17
12	0.23	1.94	4.42
14	0.29	2.17	4.69
16	0.36	2.43	5.00
18	0.43	2.72	5.31
20	0.51	3.06	5.66
22	0.61	3.44	6.04
24	0.80	3.87	6.45
26	1.10	4.37	6.90
28	1.40	4.93	7.40
30	1.90	5.59	7.95
32	2.60	6.35	8.55
34	3.40	7.21	9.22
36	4.20	8.25	9.97
38	5.00	9.44	10.80
40	5.80	10.84	11.73

注：φ_k—基底下一倍短边宽深度内土的内摩擦角标准值。

2.3.3 按地基规范承载力公式确定

■ 承载力的修正（建规）：

✓修正的原因：由于载荷试验的压板尺寸有限（b<3m），且无旁侧荷载,考虑实际基础宽度及埋深对承载力的影响,当基础宽度大于3m或埋深大于0.5m时，需要修正。

✓ 宽度与深度修正条件：$b>3\text{m}$, $d>0.5\text{m}$;

✓ 修正后的地基承载力特征值f_a为：

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

式中 f_a——修正后的地基承载力特征值（kPa）；

f_{ak}——地基承载力特征值（kPa）；

η_b、η_d——分别为基础宽度和埋深的地基承载力修正系数，按基底下土的类别查表取值；

γ——基底持力层土的重度，地下水位以下取浮重度γ'（kN/m^3）；

γ_m——基础底面以上埋深范围内土的加权平均重度，地下水位以下取浮重度（kN/m^3）；

b——基础底面宽度（m）；当$b<3m$时按3m取值，$b>6m$时按6m取值；

d——基础埋置深度（m）；当$d<0.5m$时按0.5m取值，一般自室外地面标高算起。在填方整平地区，可自填土地面标高算起，但填土在上部结构施工后完成时，应从天然地面标高算起。对于地下室，如采用箱形基础或筏板时，基础埋置深度自室外地面标高算起；当采用独立基础或条形基础时，应从室内地面标高算起。

地基承载力修正系数——与哪些因素有关？

土 的 类 别		$/_b$	η_d
淤泥和淤泥质土		0	1.0
人工填土 e或I_L大于等于 0.85的粘性土		0	1.0
红粘土	含水比 α_w>0.8 含水比α_w≤0.8	0 0.15	1.2 1.4
大面积 压实填土	压实系数大于0.95、粘粒含量ρ_c≥10%的粉土 最大干密度大于2.1t/m^{3}的级配砂石	0 0	1.5 2.0
粉土	粘粒含量ρ_c≥10%的粉土 粘粒含量ρ_c<10%的粉土	0.3 0.5	1.5 2.0
e及I_L均小于0.85的粘性土 粉砂、细砂（不包括很湿与饱和的稍密状态） 中砂、粗砂、砾砂和碎石土		0.3 2.0 3.0	1.6 3.0 4.4

2.3.3 按地基规范承载力公式确定

■ 承载力的修正（桥规）：

✓ 当b>2m, h>3m，且h/b≤4，则容许承载力为：

$$[f_a]=[f_{a0}]+k_1r_1(b-2)+k_2r_2(h-3)$$

$[f_{a0}]$—当基础宽度b≤2m，埋深h≤3m时的容许承载力，查规范表确定（见下述步骤）

k_1、k_2—分别为基础宽度和埋深的地基承载力修正系数，查规范表

2.3.3 按地基规范承载力公式确定

■ 承载力的修正（桥规）：

b —基础底面最小边宽，小于2取2，大于10取10

γ_1 —基础底面以下土的重度，水下取浮重度；

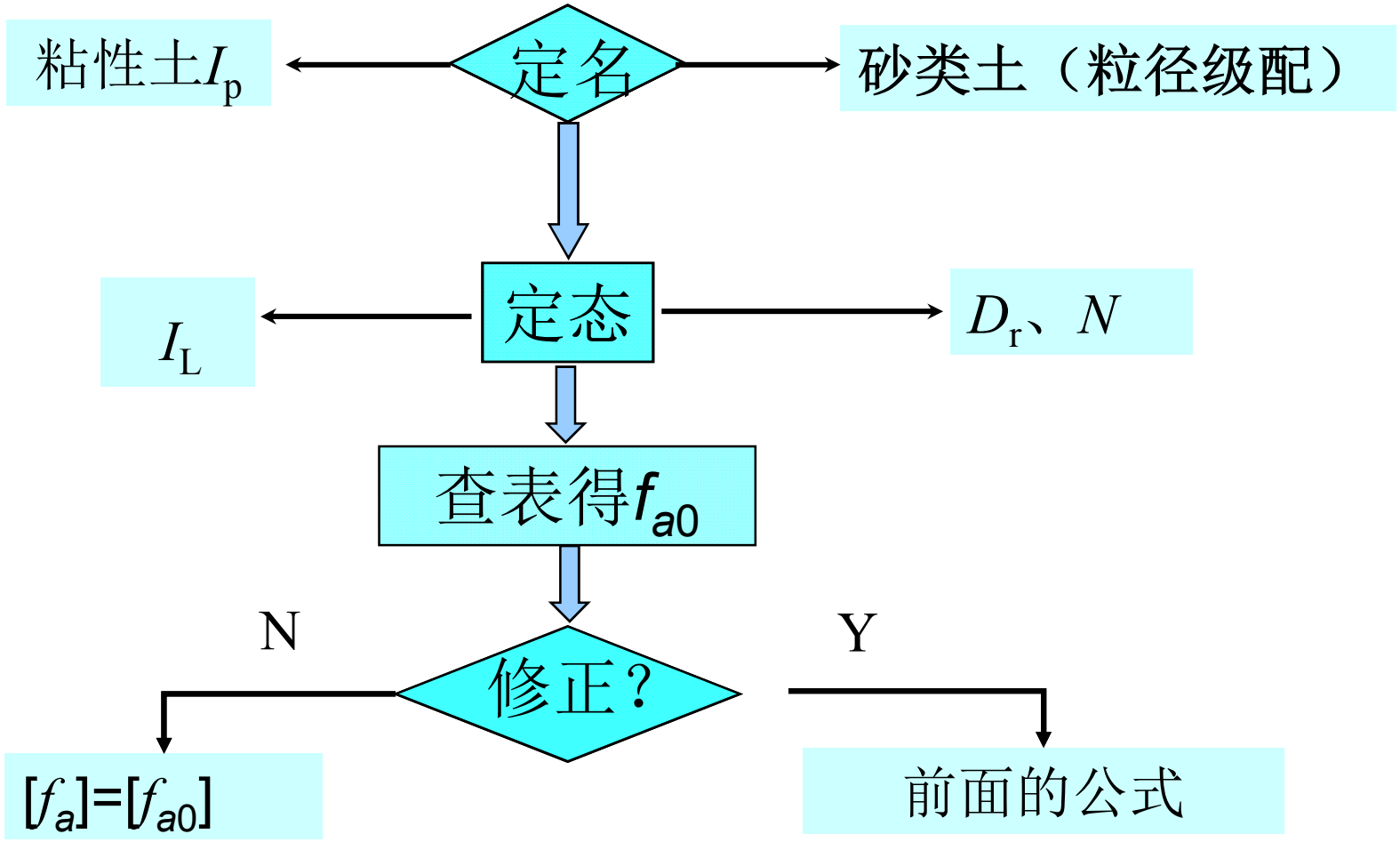
γ_2 —基础埋深范围内各层土的加权平均重度，为水面以下不透水层取饱和重度。

h —基底埋置深度；自天然地面算起，有水流冲刷时由一般冲刷线算起，小于3取3，当h/b>4，取h=4b

软土地基容许承载力值计算公式

见书上P39公式2-11~~2-13确定

✓ **《桥规》**查表确定[f_{a0}]的步骤：



补充说明：$[f_a]=[f_{a0}]+k_1r_1(b-2)+k_2r_2(h-3)$

✓第二项是基础在验算剖面底面宽大于2m时地基容许承载力的修正提高值。但是若地基土为粘土（包括黄土）时，受压后其后期沉降量较大，基础愈宽，沉降也愈大，这对建筑物正常使用是不利的，加上在制定容许承载力$[f_{a0}]$值时，已适当考虑了基础宽度的影响，故对粘性土和粉土的地基容许承载力不再考虑宽度修正，这样可以保证基础不致产生过大的沉降。对于砂土和碎石土地基，沉降在施工期间已大部分完成，所以受压后的后期沉降比较小，在基础宽度加大后，地基承载力有显著提高，故必须予以修正。由于基础过宽会增加沉降的不利因素，所以基础宽度超过10m者，仍按10m予以修正提高。

✓第三项是基础埋深超过3m时地基容许承载力的提高值。这主要考虑到随着基础埋深的增加，基础底面以上土的自重也随着增大，这对阻止基底下地基土在荷载作用下的挤出是有利的。根据国内外试验资料的分析，当$h/b\leqslant4$时，地基承载力随深度成直线比例增长，当$4<h/b<10$时，地基承载力虽然随着埋深的增加有所增长，但比较缓慢；当$h/b>10$时，地基承载力几乎为一常数，因此为了安全起见，只有当$h/b\leqslant4$时地基容许承载力才予以提高。

公路桥涵地基与基础设计规范（JTG+D63-2007）

表 3.3.4　地基土承载力宽度、深度修正系数 k_1、k_2

土类 / 系数	黏性土				粉土	砂土								碎石土			
	老黏性土	一般黏性土		新近沉积黏性土	—	粉砂		细砂		中砂		砾砂、粗砂		碎石、圆砾、角砾		卵石	
		$I_L \geqslant 0.5$	$I_L < 0.5$		—	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实
k_1	0	0	0	0	0	1.0	1.2	1.5	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0
k_2	2.5	1.5	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	4.0	5.5	5.0	6.0	5.0	6.0	6.0	10.0

注：1.对于稍密和松散状态的砂、碎石土，k_1、k_2 值可采用表列中密值的 50%。

2.强风化和全风化的岩石，可参照所风化成的相应土类取值；其他状态下的岩石不修正。

2.3.3 按地基规范承载力公式确定

各种地基规范承载力公式区别：

- 《建筑地基规范》与《公路桥涵地基规范》的区别：前者无表，但容许制定地方性经验表格或规范；后者仍然保留全国统一的承载力表格
- 《港口工程地基规范》采用极限承载力除以抗力分项系数的方法

$$f_d = \frac{1}{\gamma_R} F_k$$

F_k—地基极限承载力的竖向分力标准值,规范中针对不同土质、基础形状等给出了F_K的具体计算公式

γ_R—抗力分项系数

2.4 刚性基础与扩展基础的设计计算

- ✓ 2.4.1 地基承载力验算（包括持力层和软弱下卧层_确定基础底面尺寸）
- ✓ 2.4.2 软弱下卧层
- ✓ 基底合力偏心距验算 –p_{min}>0
- ✓ 2.4.3 地基与基础稳定性验算
- ✓ 2.4.4 基础结构设计 –确定高度配钢筋
- ✓ 2.4.5 基础变形验算（沉降量、沉降差、倾斜、局部倾斜）-计算S

2.4.1 地基承载力验算

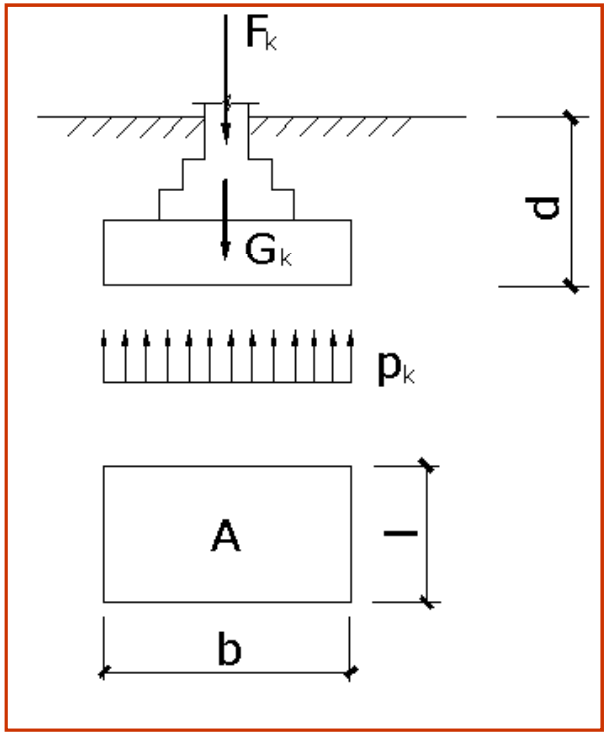
—按地基承载力计算基底尺寸A

■ 中心受荷基础

要求：$p_k < f_a$

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} = \frac{F_k + \gamma_0 A d}{A} \le f_a \qquad 2\text{-}18$$

$$A \ge \frac{F_k}{f_a - \gamma_G d} \qquad 2\text{-}19$$



中心荷载作用下的基础

2.4.1 地基承载力验算

✓ **方形基础**

$$a \geq \sqrt{A} \geq \sqrt{\frac{F_k}{f_K - \gamma_G d}}$$

✓ **矩形基础**

$$b \times l = A \geq \frac{F_k}{f_K - \gamma_G d} \qquad 2\text{-}20$$

（需先选定b或l，一般取l/b =1.0～2.0 ）

✓ **条形基础**

沿长度方向取1 m计算，则：

$$b \times 1 = A \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_0 d}$$

2.4.1 地基承载力验算

■双向偏心受荷基础

要求：

$$p_k < f_a$$

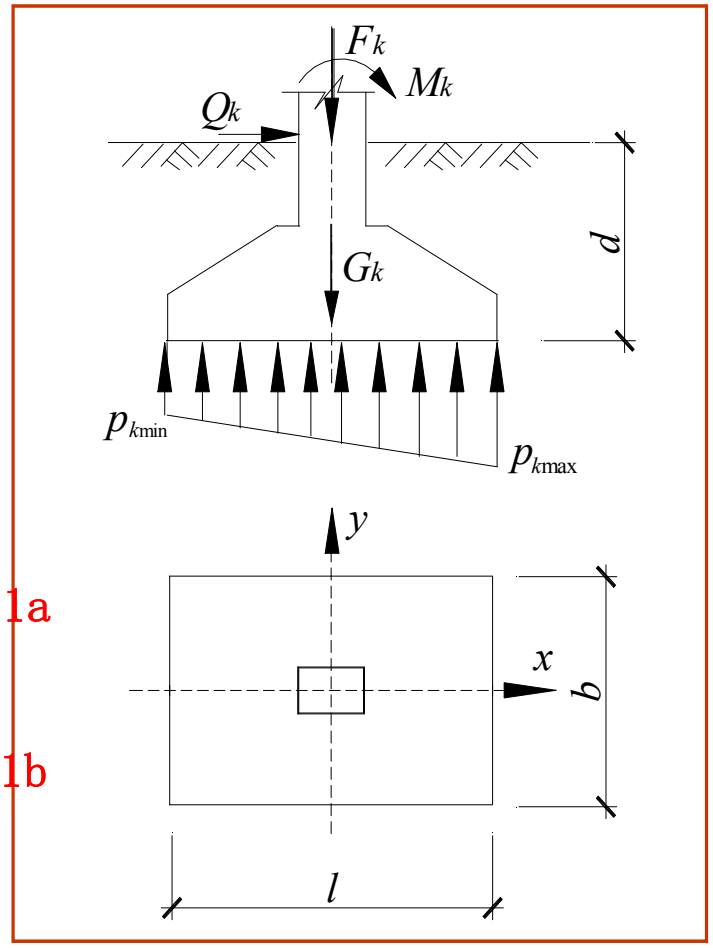
$$p_{a\max} < 1.2 f_a$$

$$e < \frac{l}{6} \quad (\text{或} p_{k\min} > 0)$$

$$p_{\substack{k\max \\ k\min}} = \frac{F_k + G_k}{A} \pm \frac{M_{xk}}{W_x} \pm \frac{M_{yk}}{W_y} \qquad 2\text{-}21a$$

或

$$p_{\substack{k\max \\ k\min}} = \frac{F_k + G_k}{A}\left(1 \pm \frac{6e_y}{b} \pm \frac{6e_x}{l}\right) \qquad 2\text{-}21b$$



W_x、W_y—基底对x和y轴的截面抵抗矩，m^3

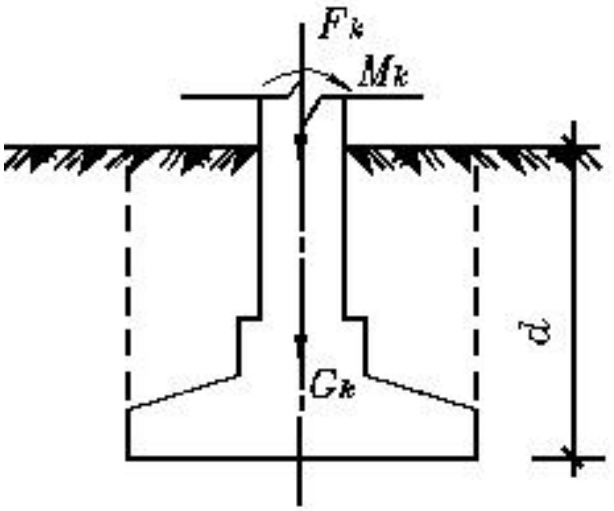
e_x、e_y—荷载对x轴和y轴的偏心距，m

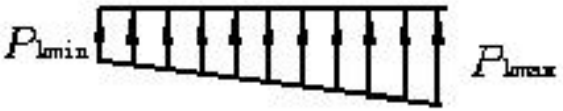
图2.16 偏心荷载作用下的基础

■单向偏心荷载作用下的基础

要求 $p_k \le f_a$

$p_{\max} \le 1.2 f_a$

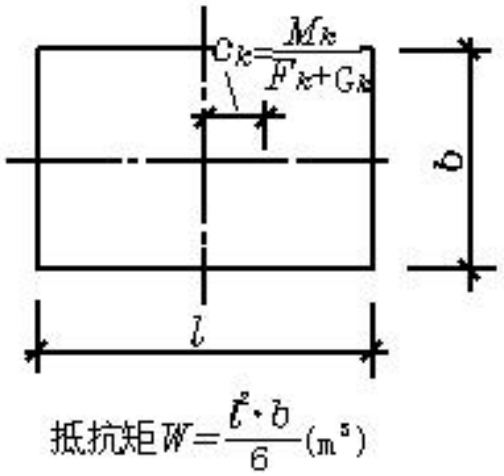




偏心荷载作用下的 $p_{k\max}$、 $p_{k\min}$ 计算公式：

$$\begin{matrix} p_{k\max} \\ p_{k\min} \end{matrix} = \frac{F_k + G_k}{A} \pm \frac{M_k}{W} = \frac{F_k + G_k}{l \cdot b}\left(1 \pm \frac{6e_k}{l}\right)$$

$$e < \frac{l}{6} \quad (\text{或} p_{k\min} > 0)$$



2-22b

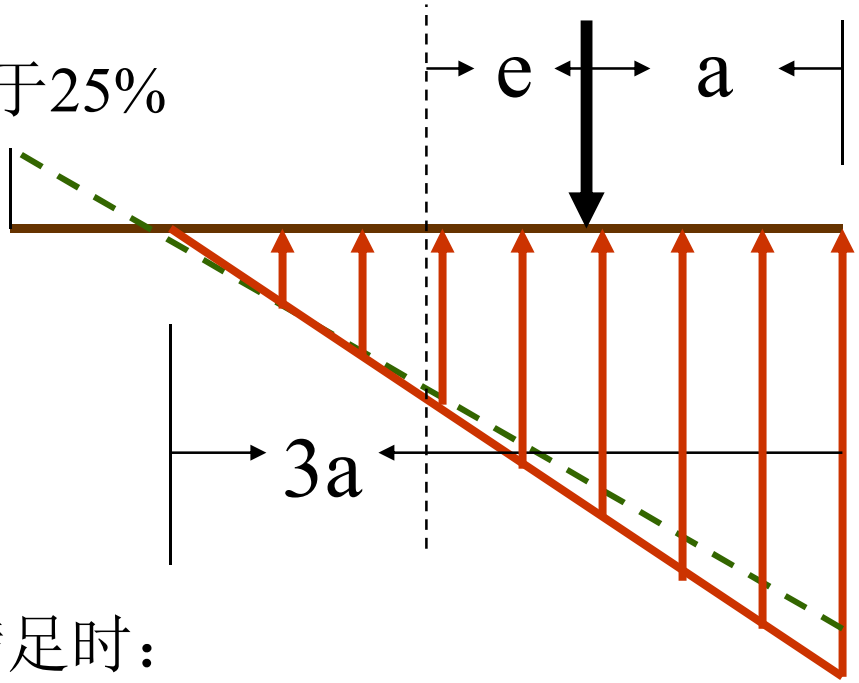
当 $p_{k\min}<0$，

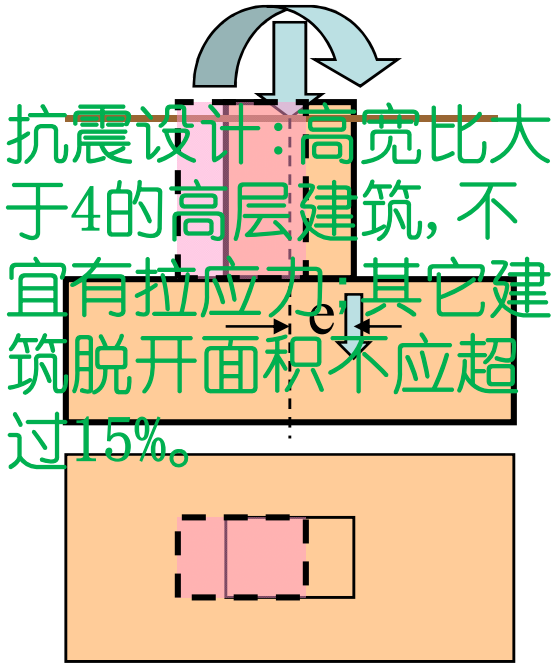
由于基底与土之间不能传递拉应力，基底压力重新分布如图。

$$p_{k\max}=\frac{2(F_k+G_k)}{3ba}$$

2-23 P43

要求3a ≥ 0.75l，即脱开面积小于25%





抗震设计：高宽比大于4的高层建筑，不宜有拉应力，其它建筑脱开面积不应超过15%。

不对称布置

不满足时：

1）增加A

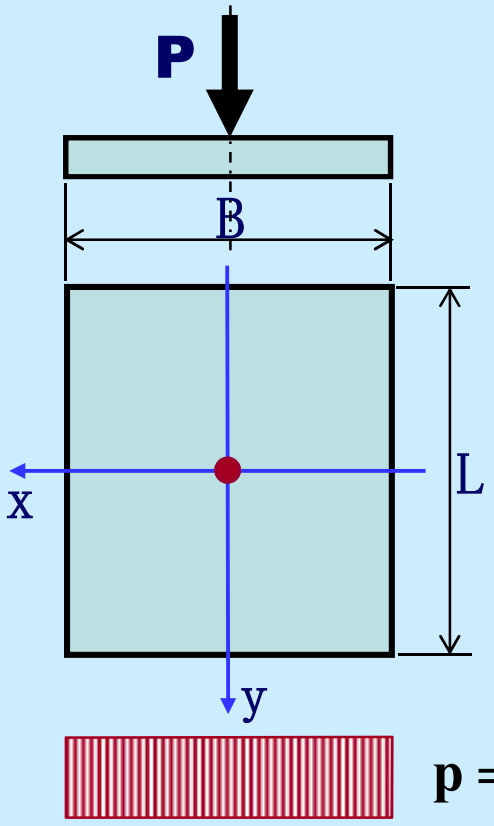
2）增加l，减少b，A不变

3）基础不对称布置

注意：基底压力p_{kmax}、p_{kmin}相差过大则容易引起基础倾斜

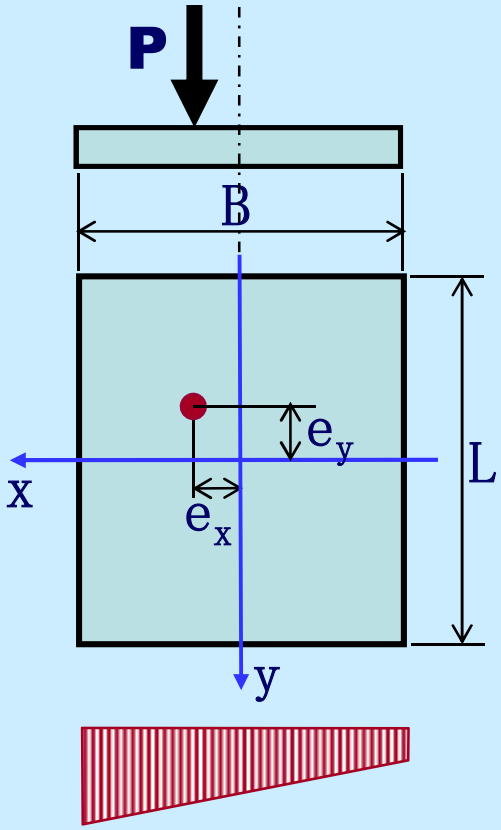
高、中压缩性地基土上的基础　　e_k不宜大于$l/6$

低压缩性地基土上的基础（短暂作用）　　e_k不宜大于$l/4$



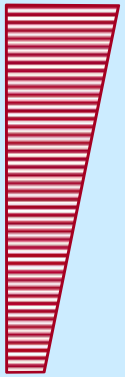
$p = P/A$

矩形面积中心荷载



矩形面积偏心荷载

$$p(x,y) = \frac{P}{A} + \frac{M_x y}{I_x} + \frac{M_y x}{I_y}$$



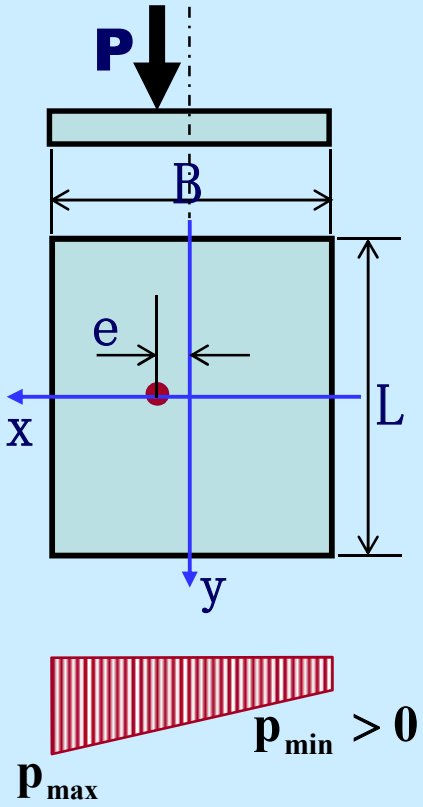
$$M_x = P \cdot e_y;$$

$$M_y = P \cdot e_x$$

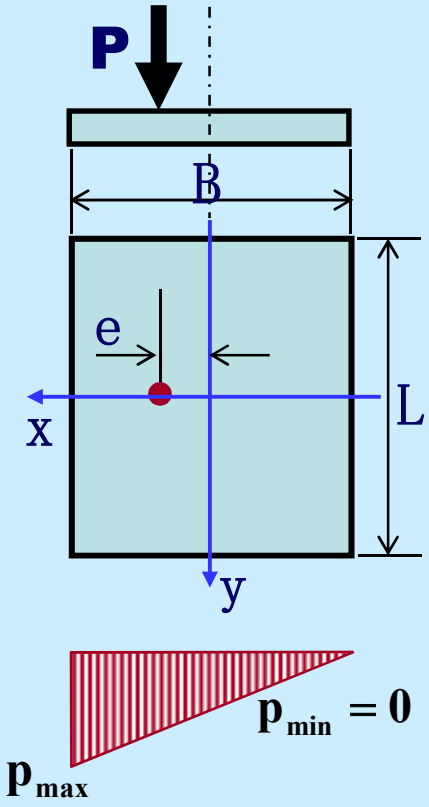
单项偏心，偏心距e

$$p_{\substack{max \\ min}} = \frac{P}{A}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right)$$

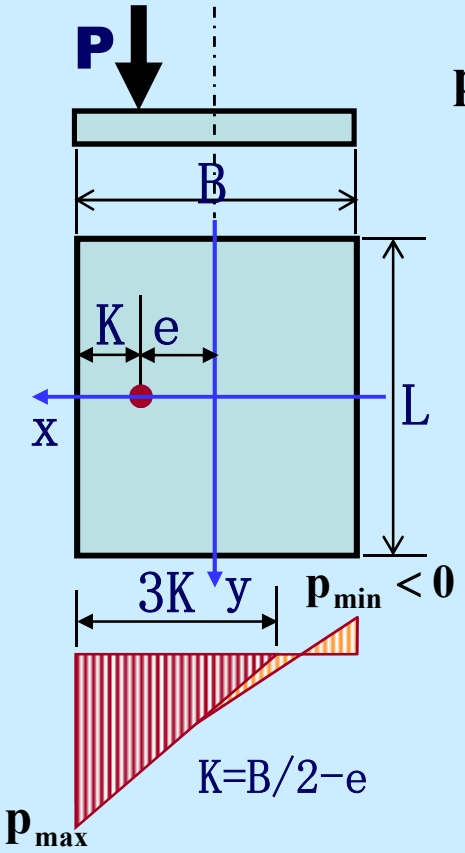
土力学回顾---矩形基础上的集中荷载



e<B/6：梯形



e=B/6：三角形



e>B/6：出现拉应力区

$$p_{\substack{max\\min}} = \frac{P}{A}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right)$$

出现拉力时，应进行压力调整，原则：基底压力合力与总荷载相等

$$p_{max} = \frac{2P}{3KL}$$

土力学回顾---矩形面积单向偏心荷载

2.4.1 地基承载力验算

P43

■ 偏心荷载下逐次渐近试算法求A

✓ 思路： 先试算，后验算

✓ 步骤：

- 先按中心荷载作用下的公式预估$A_{中}$
- 取$A_{偏}$ =（1.1～1.4） $A_{中}$
- 据$A_{偏}$初选边长l和b
- 验算偏心距e和基底边缘最大压力；
- 调整l 和b

2.4.2 软弱下卧层的验算

验算思路：传递到软弱下卧层顶面处的附加应力与自重应力之和不超过软弱下卧层的承载力，即：

$$p_z + p_{cz} \le f_{az}$$

p_z—软弱下卧层顶面处的附加应力值

p_{cz}—软弱下卧层顶面处土的自重应力值

f_a—软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值

2.4.2 软弱下卧层的验算

P_z计算—压力扩散角法

根据扩散前作用于基底平面处附加压力合力与扩散后作用于下卧层顶面处附加压力合力相等的条件，***Es1/Es2*** ≥3

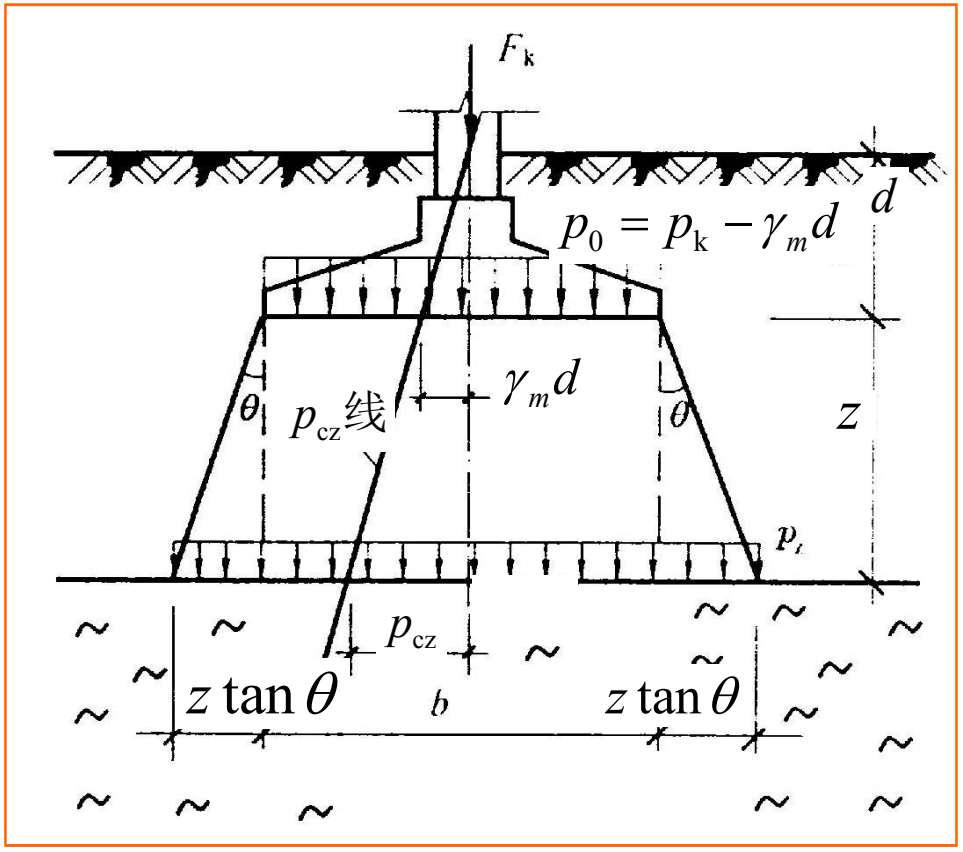
矩形基础：

$$p_z = \frac{lb(p_k - \gamma_m d)}{(l + 2z\tan\theta)(b + 2z\tan\theta)}$$

条形基础：

$$p_z = \frac{b(p_k - \gamma_m d)}{b + 2z\tan\theta}$$

θ—地基压力扩散角，查规范表确定



软弱下卧层顶面附加应力计算

地基压力扩散角θ

E_{s1}/E_{s2}	z/b	
	0.25	0.50
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

■软弱下卧层强度不足应采取的措施

- ✓ 增大基础底面积；
- ✓ 减小基础埋深；
- ✓ 对软弱下卧层进行地基处理，用人工方法提高其承载力；
- ✓ 变换地基持力层，或采用深基础避开软弱下卧层

2.4.3 基础和地基的稳定性验算

对经常承受水平荷载的建（构）筑物，如水工建筑物；挡土结构以及高层建筑和高耸建筑，地基的稳定问题可能成为地基的主要问题。在水平和竖向荷载共同作用下，地基失去稳定而破坏的形式有三种：

- ✓ 沿基底产生表层滑动；
- ✓ 偏心荷载过大而使基础倾覆；
- ✓ 深层整体滑动破坏。

设计荷载取值：计算挡土墙土压力、地基和斜坡的稳定及滑坡推力时，荷载效应应按承载力极限状态下荷载效应的基本组合，但其分项系数均为1.0。

2.4.3 基础和地基的稳定性验算

■地基抗水平滑动的稳定性验算

当水平荷载较大而竖向荷载相对较小的情况下，一般需验算地基抗水平滑动稳定性，目前地基的稳定验算仍采用单一安全系数的方法，当表层滑动时，定义基础底面的抗滑动摩擦阻力与作用于基底的水平力之比为安全系数，即

$$K = \frac{(F+G)\cdot f}{H} \qquad (2\text{-}25)$$

式中 ：

K—表层滑动安全系数，根据建筑物安全等级，取1.2～1.4；

$F+G$—作用于基底的竖向力的总和；

H —作用于基底的水平力的总和；

f —基底与地基土的摩擦系数。

2.4.3 基础和地基的稳定性验算

■基础倾覆稳定性验算

基础倾覆或倾斜除了地基的强度和变形原因外，往往发生在承受较大的单向水平推力而其合力作用点又离基础底面的距离较高的结构物上，如挡土墙或高桥台受侧向土压力作用，大跨径拱桥在施工中墩、台受到不平衡的推力，以及在多孔拱桥中一孔被毁等，此时在单向恒载推力作用下，均可能引起墩、台连同基础的倾覆和倾斜。

✓ 满足公式

$$p_k < f_a$$

$$p_{a\max} < 1.2 f_a$$

✓满足$K = y / e_0 > 1.5$:

y是基底截面重心至压力最大边的距离

e_0为外力合力偏心距

2.4.3 基础和地基的稳定性验算

■深层整体滑动破坏：

✓ 经常承受水平荷载的高层建筑及高耸结构，在水平和竖向荷载共同作用下，基础和深层土层一起发生整体滑动时，采用圆弧滑动面法进行验算。

$$K = M_R / M_S \geq 1.2$$

式中：K —— 地基安全系数；

M_r —— 地基破坏滑动面上各力对滑动圆心产生的抗滑力矩；

M_s —— 地基破坏滑动面上各力对滑动圆心产生的滑动力矩。

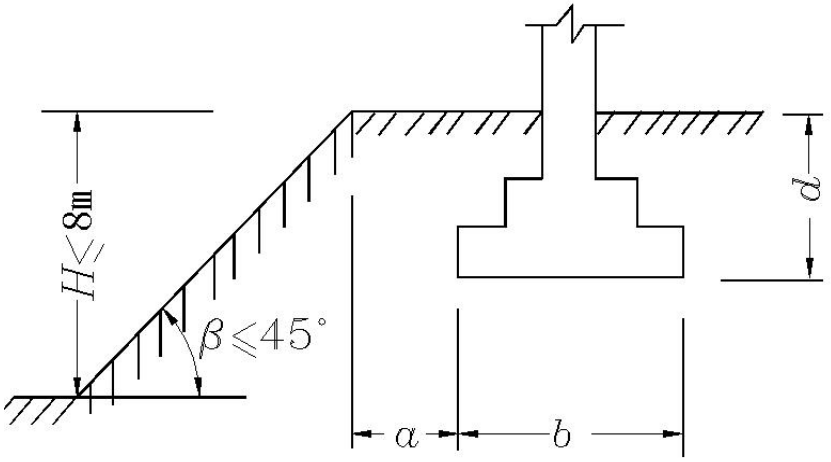
2.4.3 基础和地基的稳定性验算

- ✓ 位于稳定土坡的顶上的建筑物，当垂直于坡顶边缘线的基础底面边长**b ≤ 3m**时,其基础底面外缘线至坡顶的水平距离 **a** 应不少于**2.5m**，且符合下式，则土坡坡面附近由基础所引起的附加压力不影响土坡的稳定性。不满足上述要求时，可按前面圆弧滑动面法进行土坡稳定验算

图示：

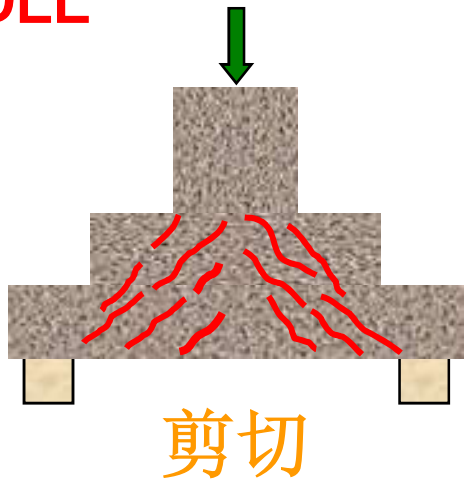
条形基础 $a \geq 3.5b - d / \tan \beta$

矩形基础 $a \geq 2.5b - d / \tan \beta$



■无筋扩展基础抗剪验算 DEL

剪切破坏形式



当混凝土基础的基础底面的平均压力值p_k超过300kPa时，还应按下式验算墙（柱）边缘或变阶处的受剪承载力：

$$V_s \leq 0.366 f_t A$$

f_t ——混凝土的轴心抗拉强度设计值；

A ——沿墙（柱）边缘或变阶处混凝土基础单位长度断面面积。

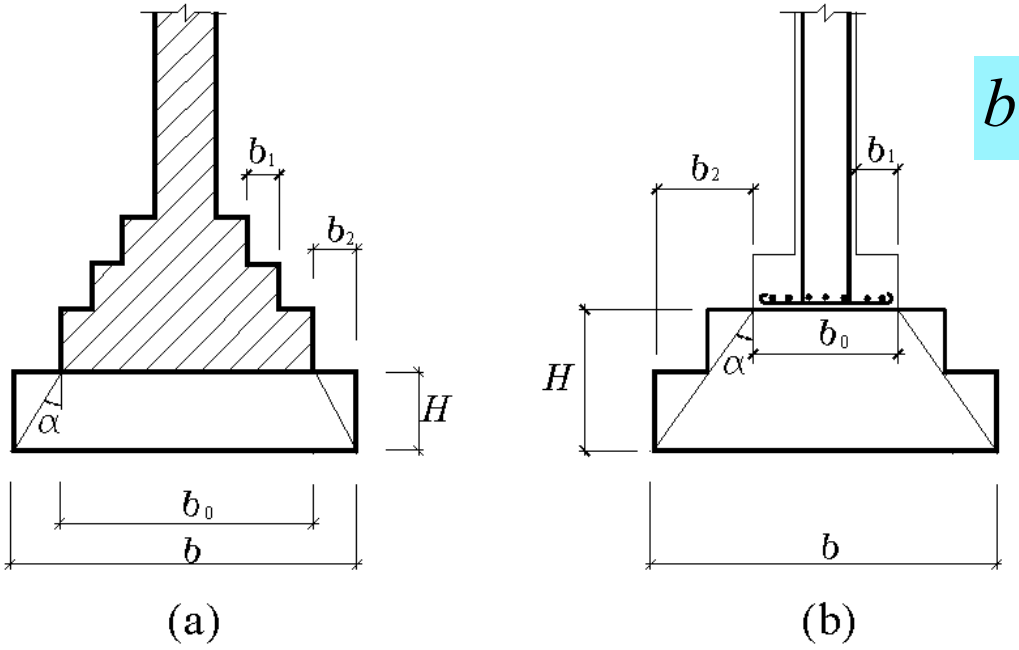
总结-无筋扩展基础（刚性基础）的设计步骤

- ✓选择基础的材料、类型，进行基础平面布置;
- ✓确定地基持力层和基础的埋置深度;
- ✓确定地基承载力：根据基础的埋置深度，进行地基承载力特征值的深度修正;
- ✓按持力层承载力确定基底尺寸b：$A \geq \dfrac{F}{f - \gamma_G \cdot d}$
- ✓按台阶宽高比(刚性角)允许值初选基础高度H;根据构造及建筑模数确定每一级台阶的宽度bi高度hi：

混凝土基础的高度不宜小于20cm，一般为30cm。对于石灰三合土基础和灰土基础，基础高度应为15cm的倍数。砖基础的高度应符合砖的模数，标准砖的规格为240×115×53。在布置基础剖面时，为保证传力路线流畅，节省材料，施工方便，每一级台阶（宽度bi和高度hi ）需符合宽高比()要求,见下图：

注：在地下水位以下或地基土潮湿时应采用水泥砂浆砌筑。

总结-无筋扩展基础（刚性基础）的设计步骤



$$b \le b_0 + 2H\mathrm{tg}\alpha$$

$$\mathrm{tg}\alpha = \left[\frac{b_2}{H}\right]$$

$\mathrm{tg}\alpha$ 基础台阶宽高比的允许值；

α 称为刚性角；

b_2 基础的外伸长度。

- ✓ 当刚性基础由不同材料叠合而成时，应对叠合部分作抗压验算.
- ✓ 当混凝土基础的基础底面的平均压力值p_k超过300kPa时，还应按下式验算墙（柱）边缘或变阶处的受剪承载力.

$$V_s \le 0.366 f_t A$$

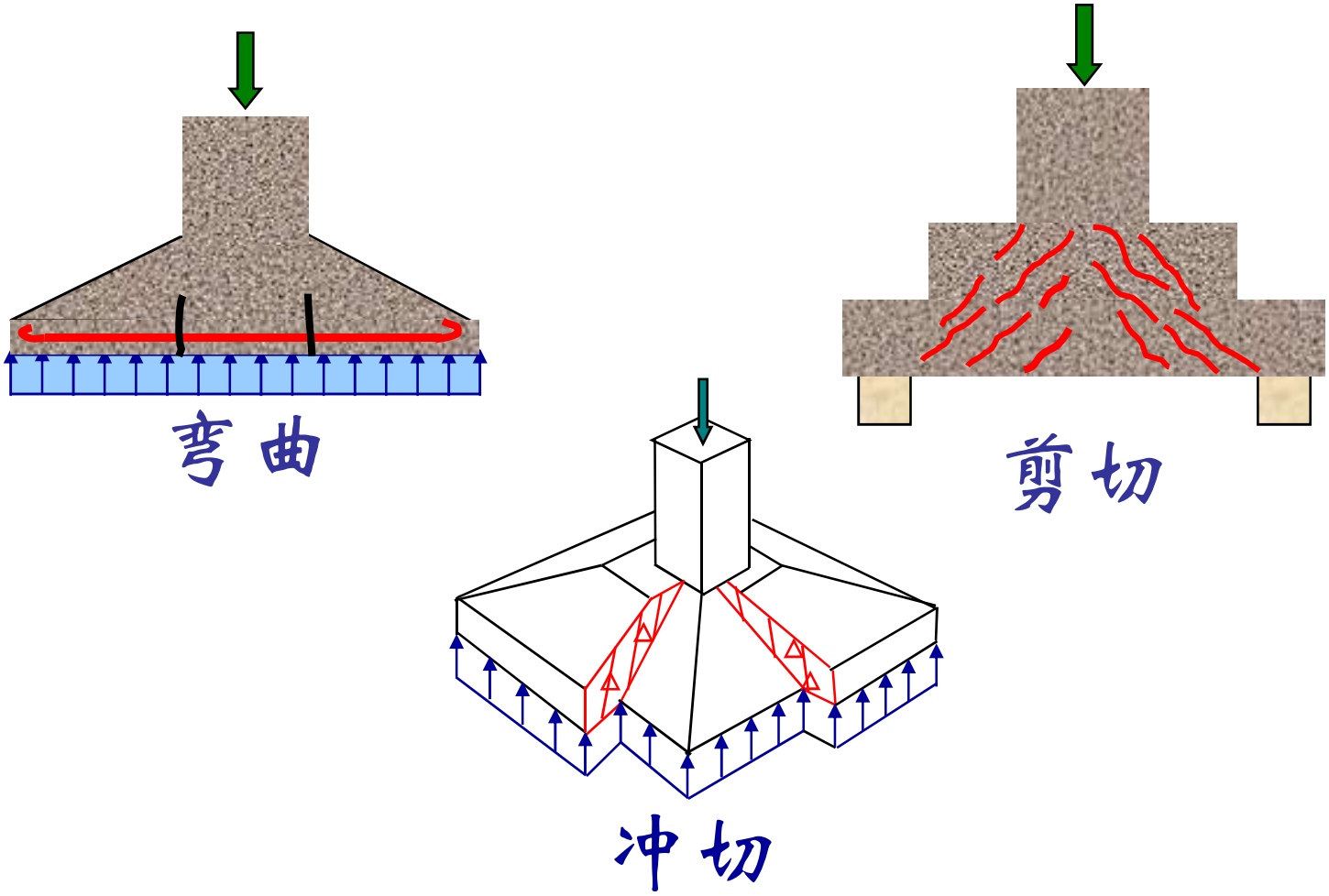
2.4.4 钢筋混凝土扩展基础结构设计

- 类型：柱下独立基础和墙下条形基础
- 受力模型：倒置的悬臂梁。 弯曲，剪切，冲切问题。
- 设计荷载取值：

✓确定基础配筋和验算材料强度，上部结构传来的荷载效应组合应按承载能力极限状态荷载效应的基本组合；相应的基底反力为净反力（不包括基础自重和基础台阶上回填土重所引起的反力）。

✓验算基础裂缝宽度，应按正常使用极限状态荷载效应标准组合。

2.4.4 钢筋混凝土扩展基础结构设计



基础受力后破坏形式

2.4.4 钢筋混凝土扩展基础结构设计

■ 墙下钢筋混凝土条形基础

✓ 轴心荷载下基础结构设计

(1) 地基净反力p_j

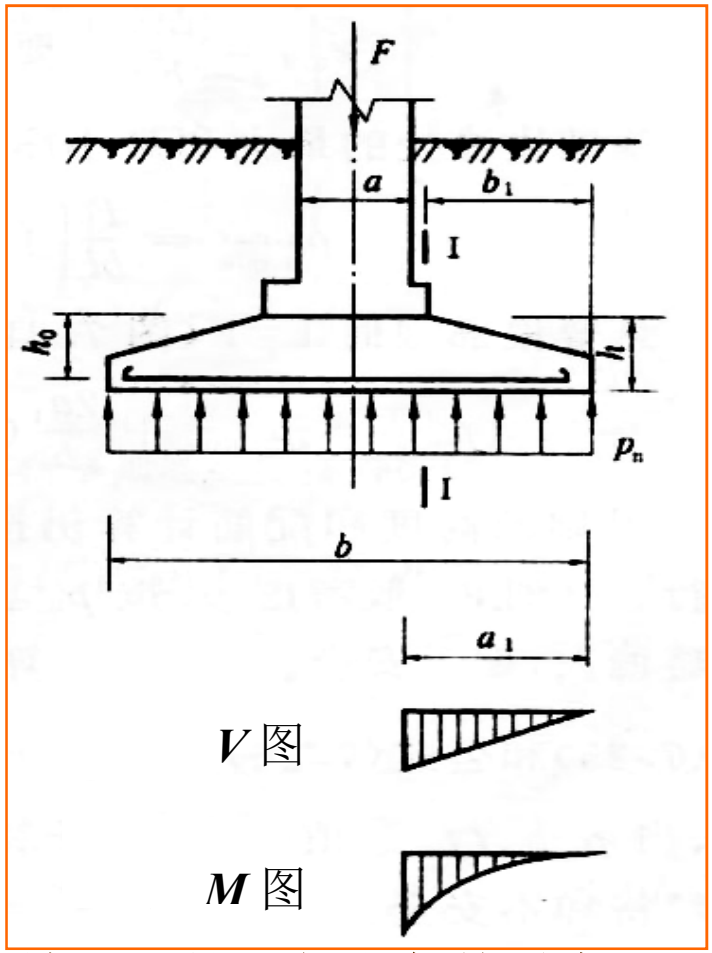
仅由基顶荷载设计值所产生的地基反力，沿墙长取**1m**计算

$$p_j = \frac{F}{b \cdot l} = \frac{F}{b}$$

p_j作用下，图中Ⅰ－Ⅰ截面弯矩与剪力：

$$V = p_j \cdot a_1$$

$$M = \frac{1}{2} p_j \cdot a_1^2$$



墙下钢筋混凝土条基受力

a_1–验算截面Ⅰ－Ⅰ至基础边缘的距离（m），砖为b_1+0.06，砼为b_1

2.4.4 钢筋混凝土扩展基础结构设计

(2) 基础底板高度

由于基础内不配箍筋和弯筋，故基础底板高度由砼的抗剪切条件确定：

$$V = 0.7\beta_h f_t h_0$$

或

$$h_0 \geq \frac{V}{0.7\beta_h f_t} \quad 2\text{-}31$$

f_t—砼轴心抗拉强度设计

β_h—截面高度影响系数,当h不大于800mm时，β_{hp}取1.0；当h大于等于2000mm时，β_{hp}取0.9，其间按线性内插法取用；

(3) 基础底板配筋

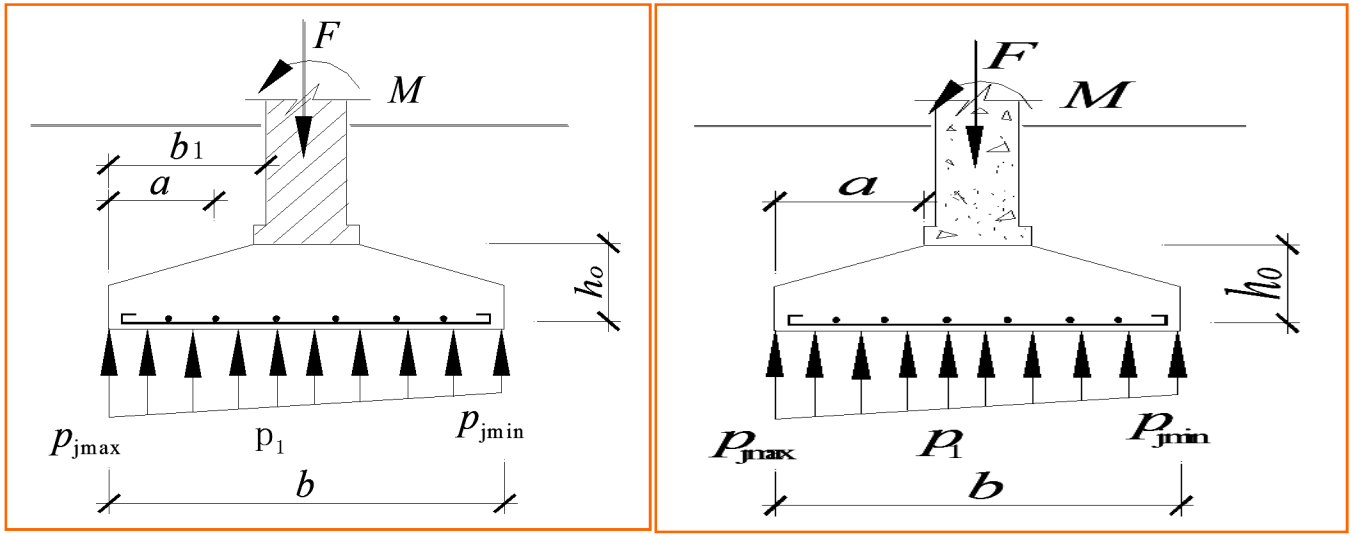
每米墙长的受力钢筋截面面积：

$$A_s = \frac{M}{0.9h_0 f_y}$$

f_y—钢筋抗拉强度设计值；

h_0—基础有效高度,$0.9h_0$为截面内力臂的近似值。

✓ 偏心荷载下基础结构设计



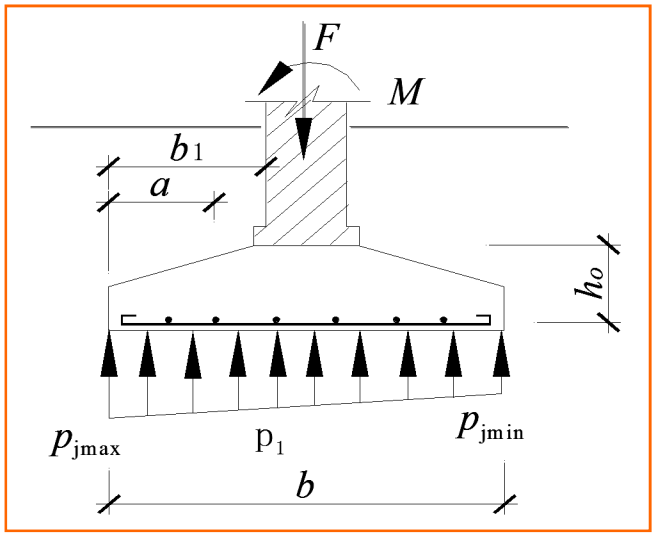
墙下钢筋混凝土条形基础的验算截面

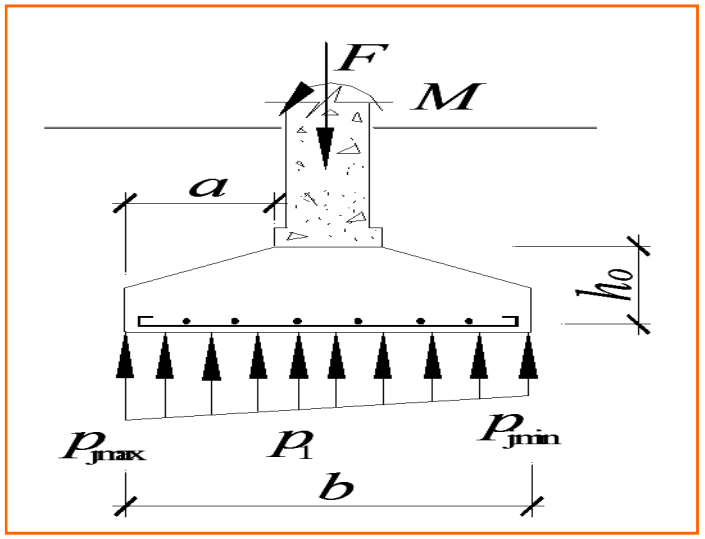
- 计算基底净反力的偏心距 $e=\frac{M}{F}$，**e≤b/6**
- 计算基础边缘处的最大和最小净反力

$$p_{\substack{j\max\\ j\min}}=\frac{F}{bl}\left(1\pm\frac{6e}{b}\right)$$

- 悬臂根部截面处的净反力p_I为

$$p_{\mathrm{I}}=p_{j\max}-\frac{a}{b}\left(p_{j\max}-p_{j,\min}\right)$$





墙下钢筋混凝土条形基础的验算截面

- 验算截面处的剪力：

$$V_{\mathrm{I}}=\frac{a}{2b}[(2b-a)p_{j\max}+ap_{j\min}] \qquad 2\text{-}28$$

- 由验算截面处的弯矩M决定

$$M_{\mathrm{I}}=\frac{a^2}{2}p_{\mathrm{I}}+\frac{a^2}{3}(p_{j\max}-p_{j\min}) \qquad 2\text{-}30$$

a—验算截面Ⅰ-Ⅰ距基础边缘距离

p_{I}—计算截面的地基净反力

■ 基础高度验算

确定剪力后，基础有效高度h_0由混凝土抗剪条件确定。

$$V = 0.7\beta_h f_t h_0$$

或 $$h_0 \geq \frac{V}{0.7\beta_h f_t}$$

■ 基础底板配筋

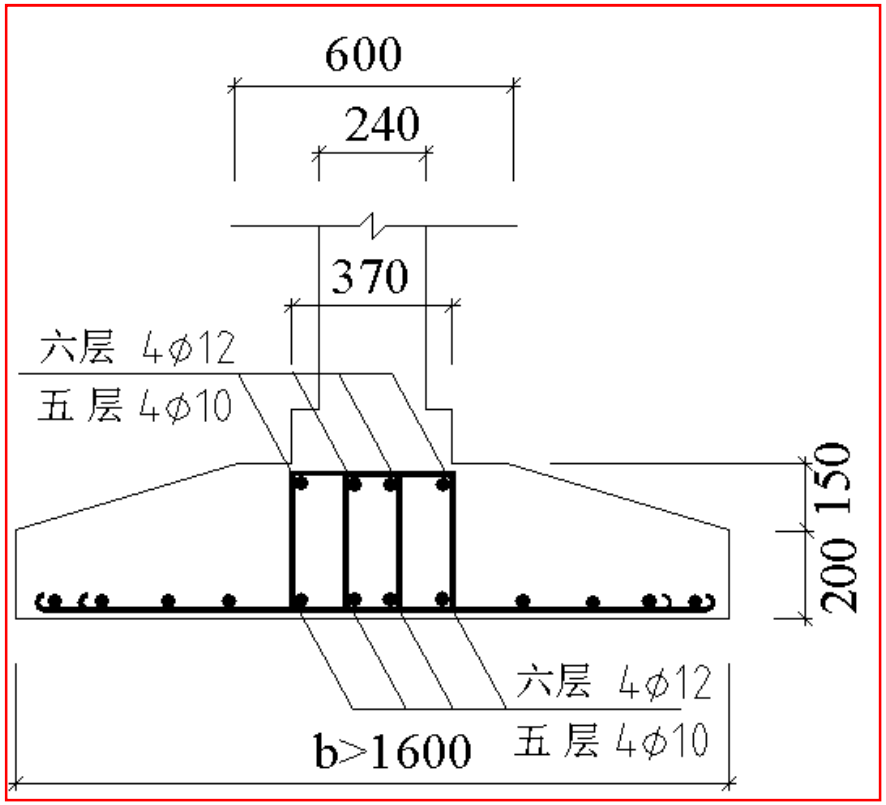
确定弯矩后，可计算基础底板的配筋面积。

$$A_s = \frac{M}{0.9h_0 f_y}$$

因为地震力和风荷载是双向作用的，基础一般都设计成对称截面 .

构造要求

墙下条形基础采用梯形截面时，一般每级高度宜300-500mm，锥形截面其边缘高度不宜小于200mm，坡度i≤1:3（节约材料）。基础高度小于250mm时，也可做成等厚度矩形板。基础混凝土的强度等级不应低于C20。基底下宜设C10素混凝土垫层，厚度一般为100mm。底板受力钢筋的最小直径不宜小于10mm，间距不宜大于200mm和小于100mm。当有垫层时，底板混凝土的保护层净厚度不宜小于40mm，无垫层时不宜小于70mm。底板纵向分布钢筋，直径不小于8mm，间距250～300mm。其他构造见规范。



当地基软弱时，为了减小不均匀沉降的影响，基础截面可采用带肋梁的板，肋梁的纵向钢筋和箍筋按经验或计算确定，如图：

2.4.4 钢筋混凝土扩展基础结构设计

■ 柱下钢筋混凝土独立基础

基础底板厚度—由抗冲切验算定 P47

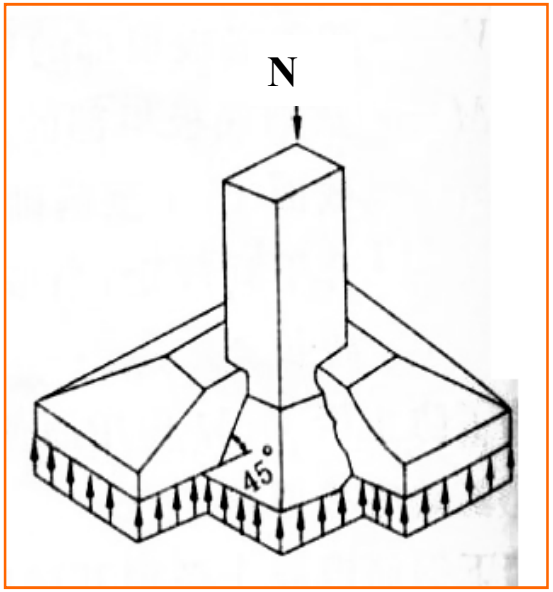
✓ 中心荷载作用：

在柱中心荷载N作用下，如果基础（或阶梯高度）不足，则沿柱四周（或阶梯高度变化处）产生冲切破坏，形成45度斜裂面的角锥体。因此由冲切破坏锥体以外(A_l)的地基反力所产生的冲切力(F_l)应小于冲切面处混凝土的抗冲切能力。对于矩形基础，柱短边一侧冲切破坏比柱长边一侧危险，所以，一般只需根据短边冲切破坏条件确定底板厚度，即验算柱与基础交接处以及基础变节处的受冲切承载力：

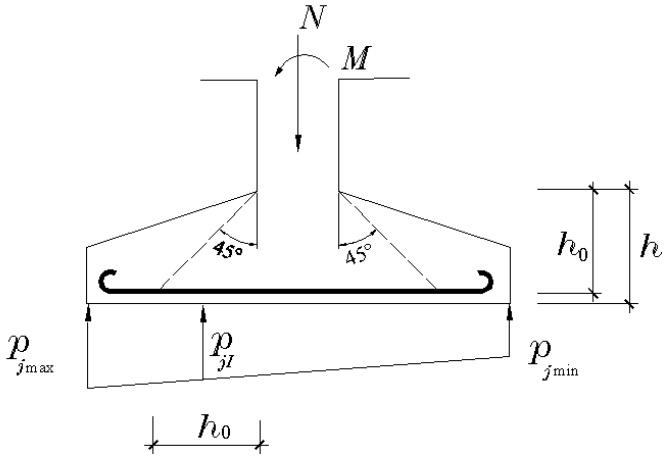
$$F_l \leqslant 0.7\,\beta_{hp}\,f_t\,a_m\,h_0 \qquad (8.2.7\text{-}1)$$

$$a_m = (a_t + a_b)/2 \qquad (8.2.7\text{-}2)$$

$$F_l = p_j\,A_l \qquad (8.2.7\text{-}3)$$



冲切破坏示意图



β_{hp}——受冲切承载力截面高度影响系数，当 h 不大于800mm时，β_{hp} 取 1.0；当 h 大于等于 2000mm 时，β_{hp} 取 0.9，其间按线性内插法取用；

f_t——混凝土轴心抗拉强度设计值；

h_0——基础冲切破坏锥体的有效高度；

a_m——冲切破坏锥体最不利一侧计算长度；

a_t——冲切破坏锥体最不利一侧斜截面的上边长，当计算柱与基础交接处的受冲切承载力时，取柱宽；当计算基础变阶处的受冲切承载力时，取上阶宽；

a_b——冲切破坏锥体最不利一侧斜截面在基础底面积范围内的下边长，当冲切破坏锥体的底面落在基础底面以内（图 8.2.7-1 *a*、*b*），计算柱与基础交接处的受冲切承载力时，取柱宽加两倍基础有效高度；当计算基础变阶处的受冲切承载力时，取上阶宽加两倍该处的基础有效高度。当冲切破坏锥体的底面在 l 方向落在基础底面以外，$a+2h_0 \geqslant l$ 时（图 8.2.7-1 *c*），$a_b=l$；

p_j——扣除基础自重及其上土重后相应于荷载效应基本组合时的地基土单位面积净反力，对偏心受压基础可取基础边缘处最大地基土单位面积净反力；

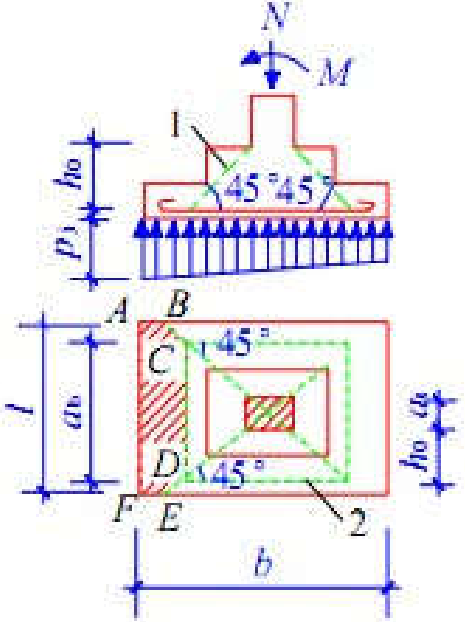
A_l——冲切验算时取用的部分基底面积（图 8.2.7-1 *a*、*b* 中的阴影面积 ABCDEF，或图 8.2.7-1 *c* 中的阴影面积 ABCD）；

F_l——相应于荷载效应基本组合时作用在 A_l 上的地基土净反力设计值。

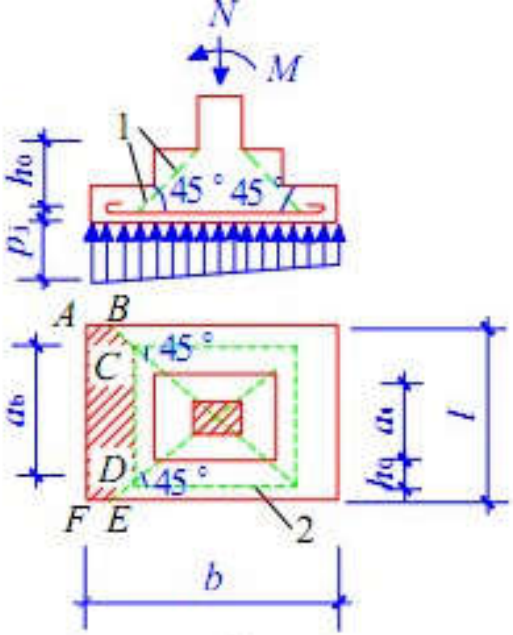
$$F_l \leqslant 0.7\beta_{hp} f_t a_m h_0$$

$$a_m = (a_t + a_b)/2$$

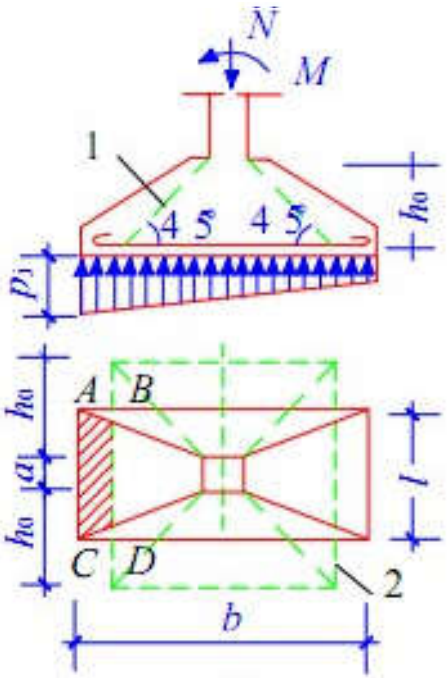
$$F_l = p_j A_l$$



(*a*)



(*b*)



(*c*)

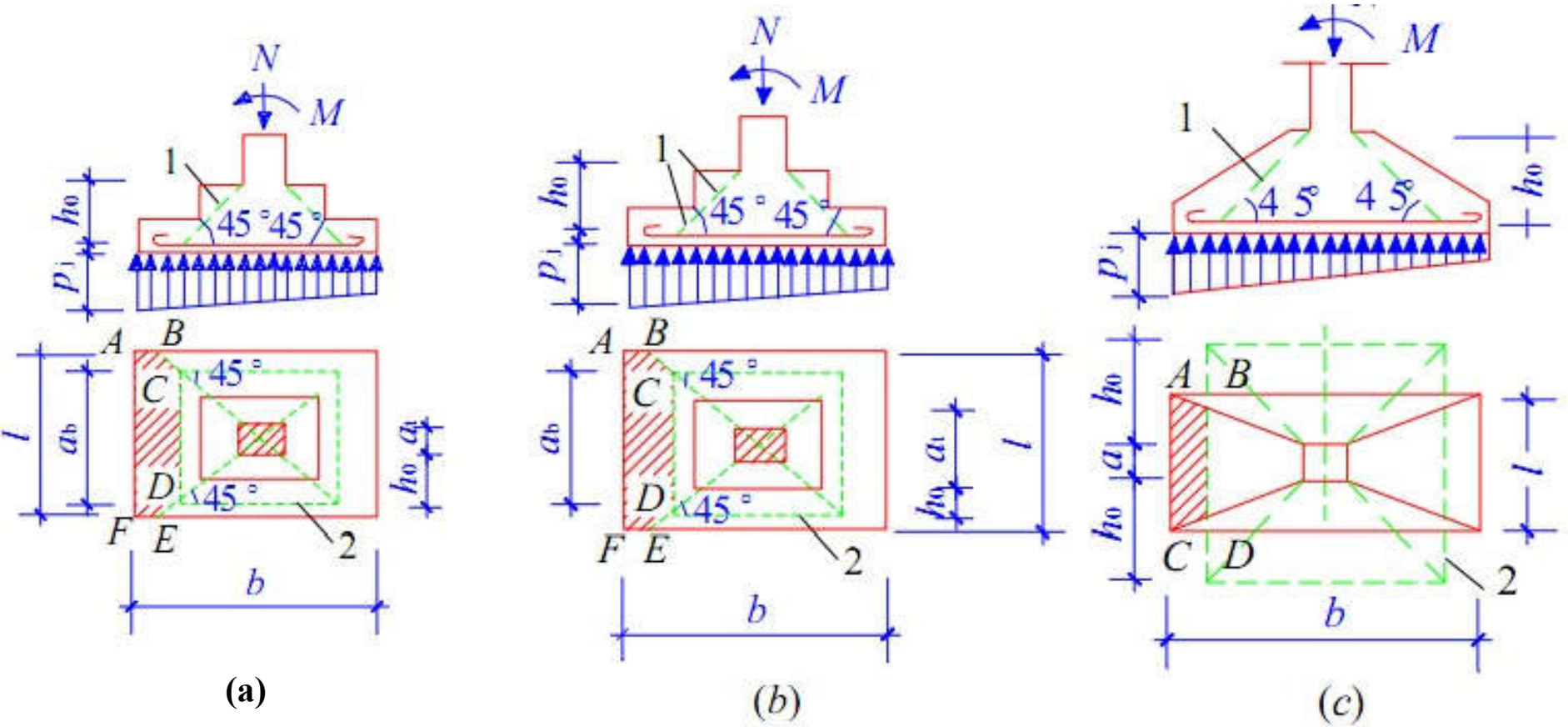


图 8.2.7-1　计算阶形基础的受冲切承载力截面位置

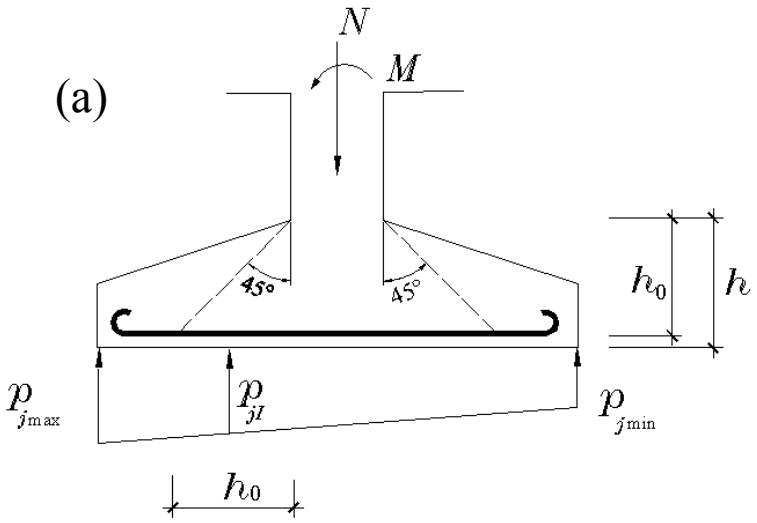
（a）柱与基础交接处；（b）基础变阶处

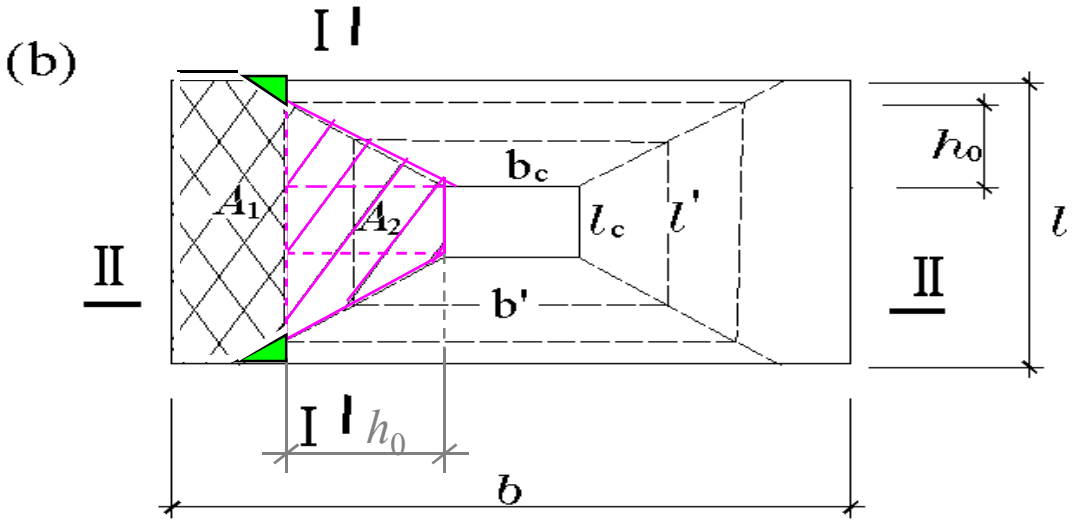
1—冲切破坏锥体最不利一侧的斜截面；2—冲切破坏锥体的底面线

A_l计算方法如下

A_l为考虑冲切荷载时取用的多边形面积(m^2)；

设基础底面短边长度为l(m)；柱截面的宽度和高度为l_c和b_c(m)；
当计算变阶处抗冲切时，l_c、b_c分别取相应台阶的宽度和长度。



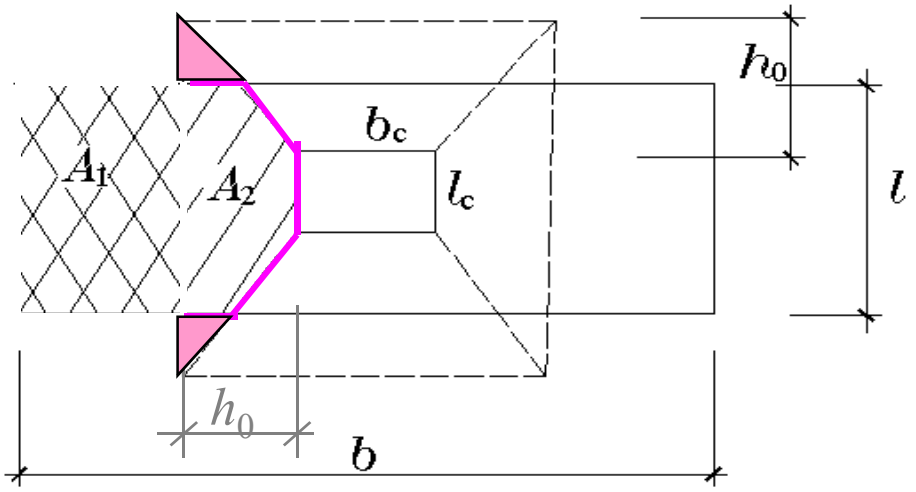


当　　$l \geq l_c + 2h_0$

(如图b)

$$A_1 = \left(\frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0\right) l - \left(\frac{l}{2} - \frac{l_c}{2} - h_0\right)^2$$

(c)



当 $l < l_c + 2h_0$

$$A_1 = \left(\frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0\right) l$$

(图c)

式中h_0为基础的有效高度(m)。当不满足抗冲切能力验算要求时，可适当增加基础高度h后重新验算，直至满足要求为止。

✓ 偏心荷载作用时，将上式 $F_l = p_j A_l$ 中的P_j换成P_{jmax}则可。

■ 柱下钢筋混凝土独立基础

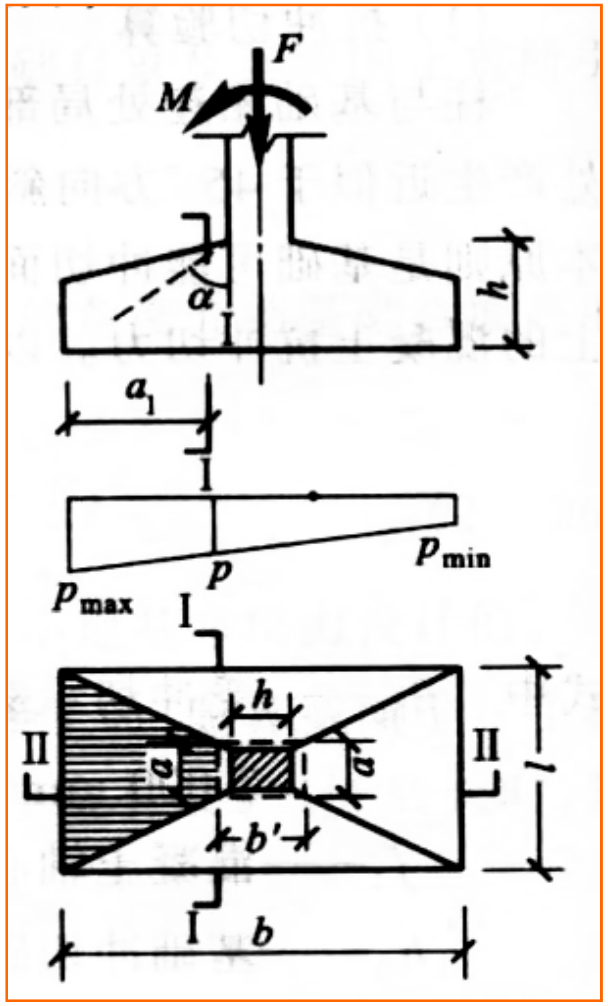
基础底板配筋—由抗弯验算定 P48

✓轴心或偏心荷载作用下，对矩形基础，当满足：

- 台阶宽高比$\alpha \leq 2.5$
- 偏心距$e \leq l/6$

$$M_{\mathrm{I}} = \frac{1}{12} a_1^2 \left[(2l + a') \left(p_{\max} + p - \frac{2G}{A} \right) + (p_{\max} - p)\, l \right] \qquad 2\text{-}34$$

$$M_{\mathrm{II}} = \frac{1}{48} (l - a')^2 (2b + b') \left(p_{\max} + p_{\min} - \frac{2G}{A} \right) \qquad 2\text{-}35$$



矩形基础底板计算

按4块板计算弯矩

式中 M_{I}、M_{II}——任意截面Ⅰ-Ⅰ、Ⅱ-Ⅱ处相应于荷载效应基本组合时的弯矩设计值；

a_1——任意截面Ⅰ-Ⅰ至基底边缘最大反力处的距离；

l、b——基础底面的边长；

p_{max}、p_{min}——相应于荷载效应基本组合时的基础底面边缘最大和最小地基反力设计值；

p——相应于荷载效应基本组合时在任意截面Ⅰ—Ⅰ处基础底面地基反力设计值；

G——考虑荷载分项系数的基础自重及其上的土自重；当组合值由永久荷载控制时，$G=1.35G_k$，G_k为基础及其上土的标准自重。

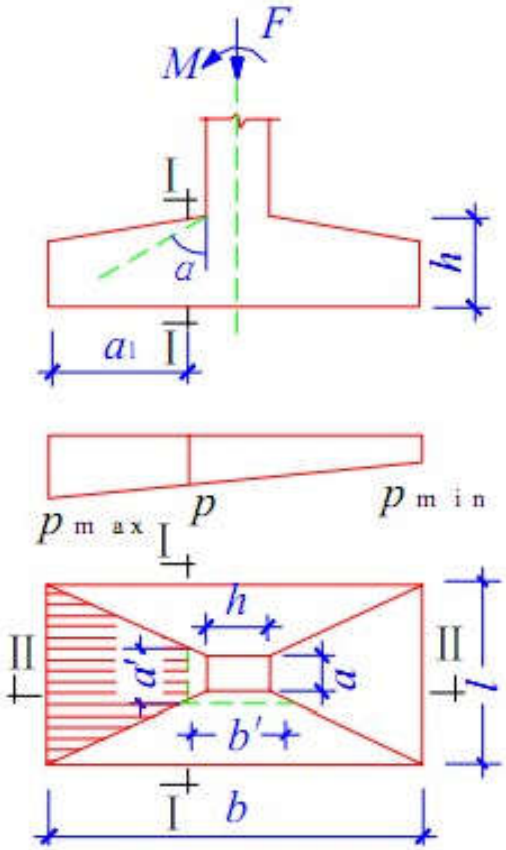


图 8.2.7-2 矩形基础底板的计算示意

✓ 求出M后，由此可计算底板长、短边方向受力钢筋面积$A_{s\,\mathrm{I}}$和$A_{s\,\mathrm{II}}$。

$$\begin{cases} A_{s\mathrm{I}} = \dfrac{M_{\mathrm{I}}}{0.9 f_y h_0} \\ A_{s\mathrm{II}} = \dfrac{M_{\mathrm{II}}}{0.9 f_y (h_0 - d)} \end{cases}$$

■柱下独立基础的设计构造要求

柱下钢筋混凝土独立基础，除应满足墙下钢筋混凝土条形基础的一般要求外，尚应满足如下一些主要的构造要求：

矩形独立基础底面的长边与短边的比值l/b，一般取1～1.5。阶梯形基础每阶高度一般为300～500mm。

基础阶数可根据基础总高度H设置，当H≤500mm时，宜分为一级；当500mm<H≤900mm时，宜分为二级；当H>900mm时，宜分为三级。

锥形基础的边缘高度，一般不宜小于200mm，也不宜大于500mm；锥形坡度角一般取25°，最大不超过35°。锥形基础的顶部每边宜沿柱边放出50mm。

■柱下独立基础的设计构造要求

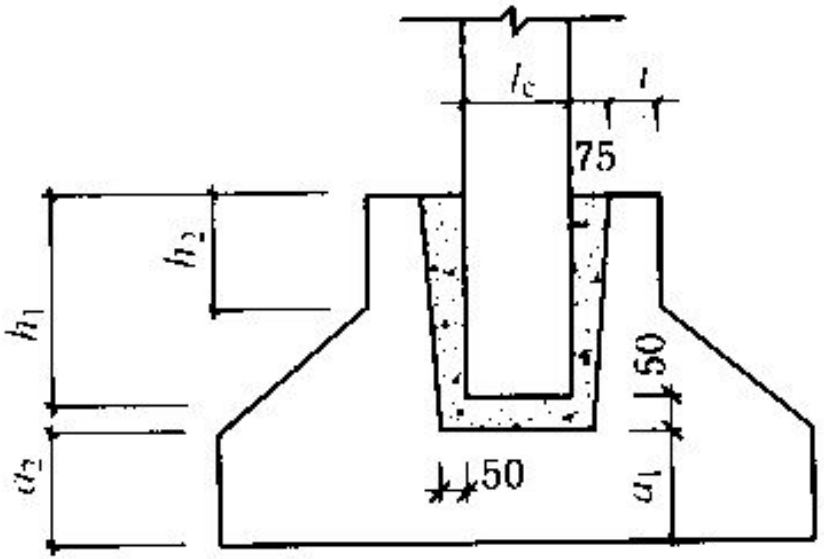
柱下钢筋混凝土单独基础的受力钢筋应双向配置。当基础宽度大于或等于2.5m时，基础底板受力钢筋可缩短为0.9(l-50)mm交错布置，l为基础底面边长。

对于现浇柱基础，如基础与柱不同时浇注，则柱内的纵向钢筋可通过插筋锚入基础中，插筋的的根数和直径应与柱内纵向钢筋相同。插入基础的钢筋，上下至少应有二道箍筋固定。插筋与柱纵向受力钢筋搭接长度1d可规范采用。

预制钢混柱与杯口基础的连接，应符合规范相关要求：

(1)柱的插入深度按规范选用，同时还应满足锚固长度要求和吊装时柱的稳定性。

(2)基础的杯底厚度和杯壁厚度按规范选用。



2.4.5 地基变形验算

P49

■ 1 基本概念：

✓ 目的：保证建筑物安全、正常使用和外观。

✓ 要求：$s < [s]$ (甲、乙和部分丙级地基基础)

s—地基变形特征值，是对各种建筑物产生危害的不利沉降形式。包括：沉降量、沉降差、倾斜、局部倾斜四种类型。按土力学中的方法计算。

[*s*]—相应的允许地基变形特征值，根据建筑物的结构特征、使用条件和地基土的类别查规范确定

荷载取值： 传至基础上的荷载应按正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合（不应计入风荷载和地震作用）。

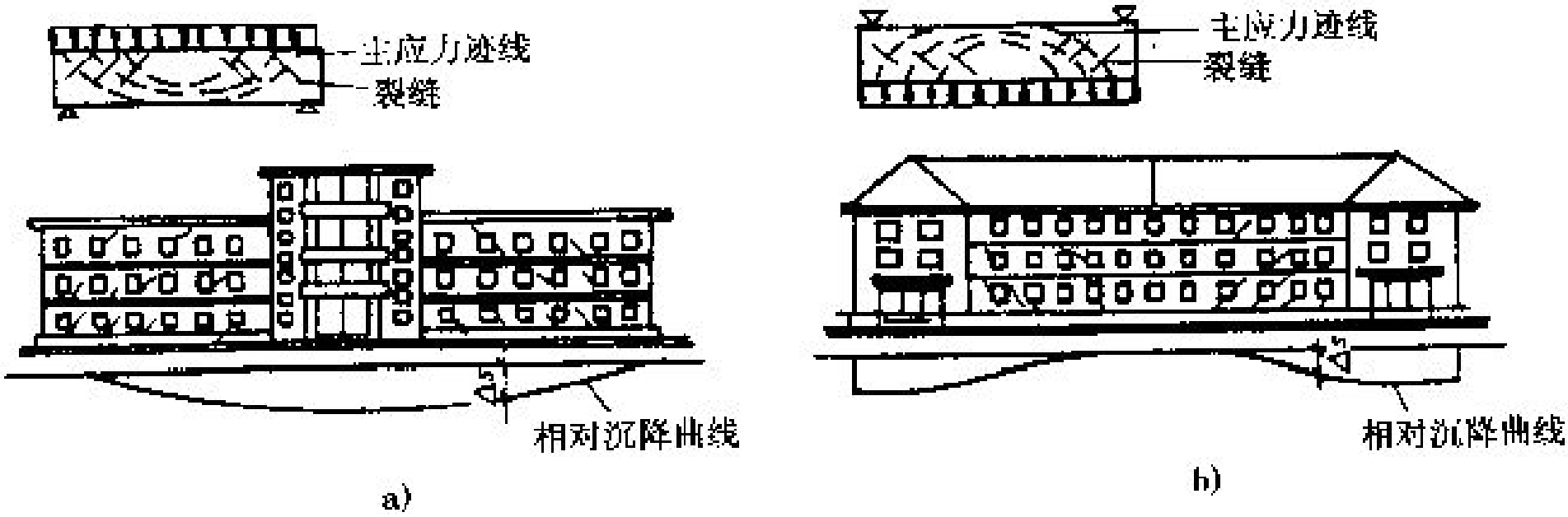
■ 2 变形验算内容：

对砖石承重结构，房屋的损坏主要是由于墙体挠曲引起的局部弯曲，故由局部倾斜控制。

混合结构房屋对地基的不均匀沉降很敏感，墙体极易产生呈45°左右的斜裂缝，如图。如果中部沉降大，墙体发生正向弯曲，裂缝与主拉应力垂直，裂缝呈正八字形开展；反之，两端沉降大，墙体反向弯曲。则裂缝呈倒八字形。裂缝首先在墙体刚度削弱的窗角发生，而窗洞就是裂缝的组成部分。

对于框架结构和单层排架结构主要由于相邻柱基的沉降差使构件受剪扭曲破坏，所以应由沉降差来控制，并要求沉降量不宜过大。

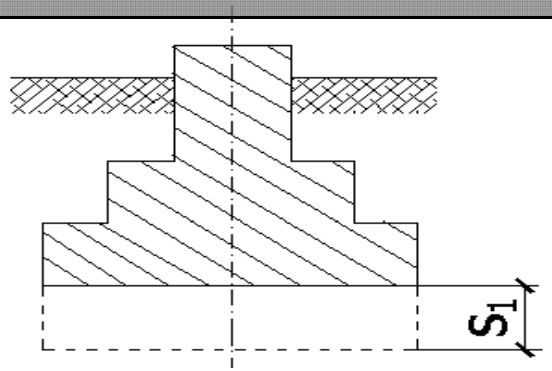
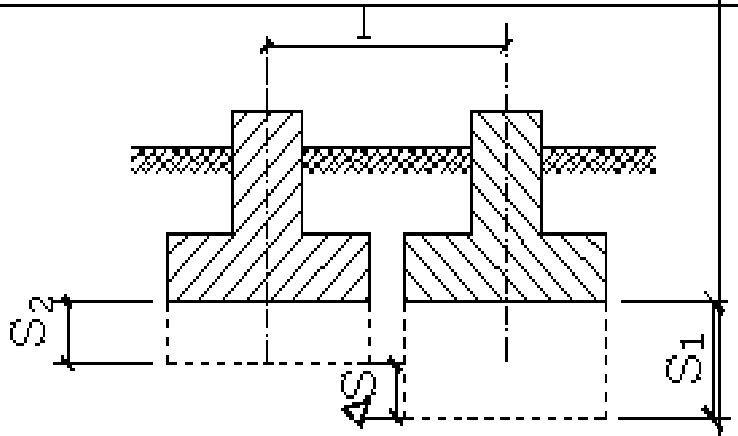
对于高耸结构物，高层建筑，应控制基础的倾斜，其允许倾斜值主要取决于人类感觉的敏感程度，倾斜值达到明显可见大致为1/250，结构破坏则大致在倾斜值达到1/150时开始。



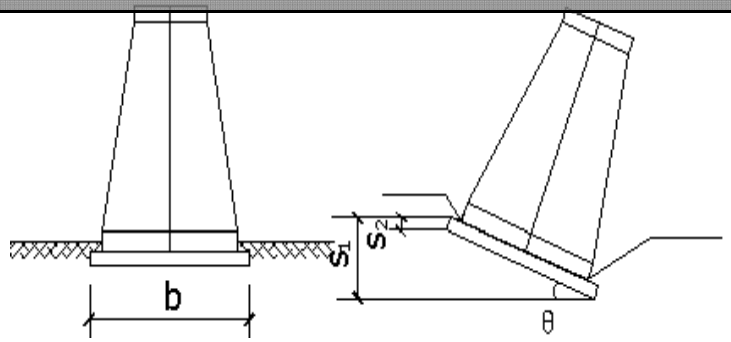
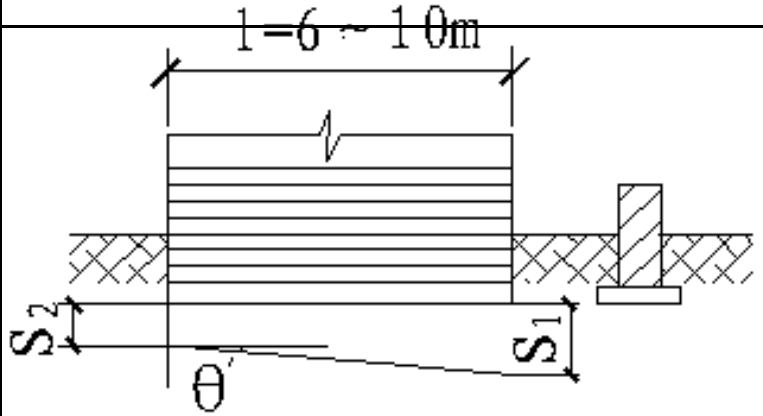
a）墙体正向弯曲；　b）墙体反向弯曲

2.4.5 地基变形验算

■ 2 变形验算内容：

地基变形指标	图　　例	计算方法	结构特点
沉降量		s_1基础中点沉降值	单层排架结构柱基
沉降差		两相邻独立基础沉降量之差 $\Delta s = s_1 - s_2$	框架结构

2.4.5 地基变形验算

地基变形指标	图　　例	计算方法	结构特点
倾斜		$\tan\theta=\frac{s_1-s_2}{b}$	高耸结构以及长高比很小的高层建筑
局部倾斜		$\tan\theta'=\frac{s_1-s_2}{l}$	砌体承重结构

建筑物的地基变形允许值

变形特征	地基土类别	
	中、低压缩性土	高压缩性土
砌体承重结构基础的局部倾斜结构	0.002	0.003
工业与民用建筑相邻柱基的沉降差 1.框架结构 2.砌体墙填充的边排柱 3.当基础不均匀沉降时不产生附加应力的结构	0.002 L 0.0007 L 0.005 L	0.003 L 0.001 L 0.005 L
单排排架结构（柱距为6m）柱基沉降量（mm）	(120)	200
桥式吊车轨面的倾斜（按不调整轨道考虑） 纵向 横向	0.004 0.003	
多层和高层建筑的整体倾斜 $H_g \leqslant 24$ $24<H_g \leqslant 60$ $60<H_g \leqslant 100$ $H_g>100$	0.004 0.003 0.0025 0.002	
提体型简单的高层建筑基础的平均沉降量(mm)	200	
高耸结构基础的倾斜 $H_g \leqslant 20$ $20<H_g \leqslant 50$ $50<H_g \leqslant 100$ $100<H_g \leqslant 150$ $150<H_g \leqslant 200$ $200<H_g \leqslant 250$	0.008 0.006 0.005 0.004 0.003 0.002	
高耸结构基础的沉降量（mm） $H_g \leqslant 100$ $100<H_g \leqslant 200$ $200<H_g \leqslant 250$	400 300 200	

注：1 本数值为建筑物地基实际最终变形允许值；

2 有括号者仅适用于中压缩性土；

3 l 为相邻柱基的中心距离（mm）；H_g 为自室外地面起算的建筑物高度（m）；

4 倾斜指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值；

5 局部倾斜指砌体承重结构沿纵向 6～10m 内基础两点的沉降差与其距离的比值。

■3 变形验算的规定

✓根据建筑物的情况，按上表进行相应的验算。

✓由于沉降计算方法误差较大，理论计算结果常和实际产生的沉降有出入。对于重要的、新型的、体型复杂的房屋和结构物。或对不均匀沉降有严格控制的房屋和结构物，还应进行系统的沉降观测，一方面它能观测沉降发展的趋势并预估最终沉降量，以便及时研究加固及处理措施，同时也可以验证地基基础设计计算的正确性，以完善设计规范。

沉降观测点的布置，应根据建筑物体型、结构、工程地质条件等综合考虑，一般设在建筑物四周的角点、转角处、中点；沉降缝和新老建筑物连结处的两侧，或地基条件有明显变化区段内，测点的间隔距离为8-12m。

沉降观测应从施工时就开始，民用建筑每增高一层观测一次。工业建筑在不同荷载阶段分别观测，完工后逐渐拉开观测间隔时间直至沉降稳定为止，稳定标准为半年不超过2mm。当有特殊要求时，应根据要求观测。

✓在必要的情况下，需要分别预估建筑物在施工期间和使用期间的地基变形值，以便预留建筑物有关部分之间的净空、考虑连接方法和施工顺序。

一般浅基础的建筑物在施工期间完成的沉降量：

1）对于砂土最终沉降量已基本完成；

2）对于低压缩粘性土完成最终沉降量的50%-80%；

3）对于中压缩粘性土已完成20%-50%；

4）对于高压缩粘性土已完成5%-20%。

5）在软土地基上，埋深5m左右的高层建筑箱型基础在结构竣工时已完成其最终沉降量的60%-70%。

2.4.5 地基变形验算

■中、小建筑物变形破坏的一般规律

- ✓ 砌体承重结构：主要是墙体开裂：斜裂缝、八字形裂缝、倒八字形裂缝
- ✓ 框架等超静定结构：沉降差引起构件附加内力，梁、板等产生裂缝、柱倾斜

均匀沉降 ➡ 影响建筑物的功能和正常使用

不均匀沉降 ➡ 建筑物开裂、倾斜、甚至破坏

2.4.5 地基变形验算

■ 产生不均匀沉降的原因

✓ 地基条件，土层极软或不均匀；
✓ 上部结构荷载不均匀；
✓ 相邻建筑物影响；
✓ 其它原因：如堆载、开挖深基坑等

■ 解决不均匀沉降的途径

✓ 增强上部结构对不均匀沉降的适应能力

✓ 减少沉降

2.4.5 地基变形验算

■ 减轻不均匀沉降损害的具体措施

- ✓ 采用柱下条形、筏形和箱形等结构刚度较大、整体性较好的基础
- ✓ 选择承载力大而变形小的地基（坚硬土层或岩层）作持力层，采用桩基或其他深基础
- ✓ 选用恰当而有效的地基处理方法，对软弱地基进行处理（采用人工地基）
- ✓ 从地基、基础和上部结构共同工作的观点为出发，在建筑、结构和施工方面采取本节下述的某些措施，以增强上部结构对不均匀沉降的适应能力。

2.4.5 地基变形验算

■ 减轻不均匀沉降损害的建筑措施

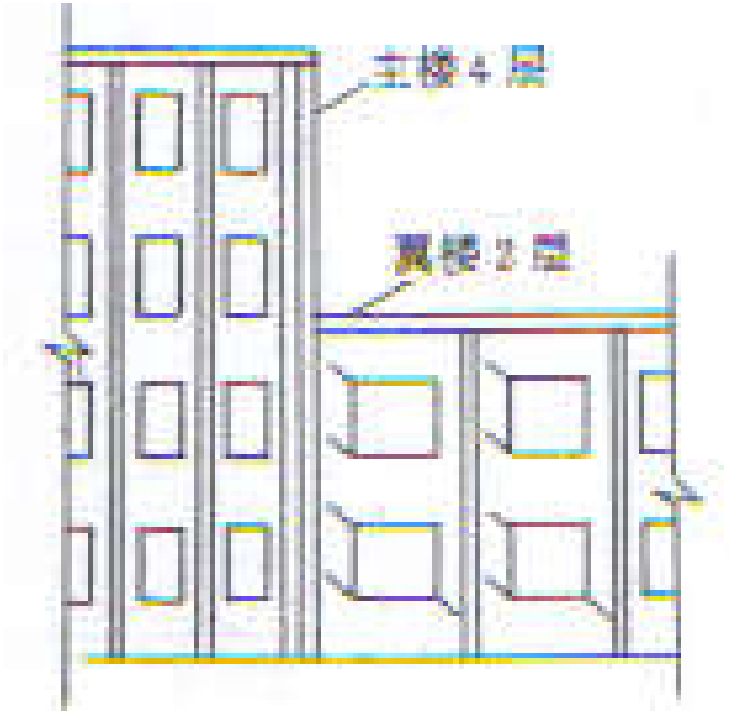
- ✓ 建筑体型力求简单
- ✓ 控制建筑物长高比及合理布置纵横墙
- ✓ 设置沉降缝
- ✓ 控制相邻建筑物基础的间距
- ✓ 调整建筑物的局部标高

■ 减轻不均匀沉降损害的建筑措施

●建筑物的体型应力求简单

平面：一字形

立面：高差最好不超过二层

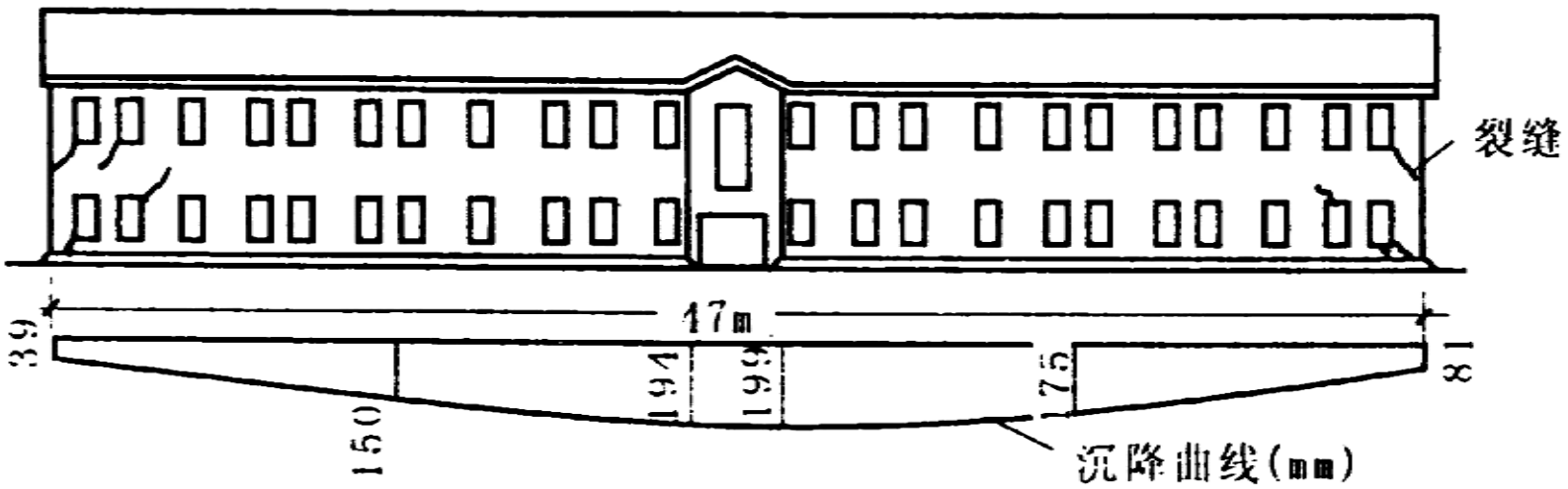


建筑物立面高差过大

2.4.5 地基变形验算

■ 减轻不均匀沉降损害的建筑措施

●控制建筑物的长高比：建筑物长高比是指它的长度L与其高度（屋顶檐口至基底的距离）Hf之比2.5-3.0

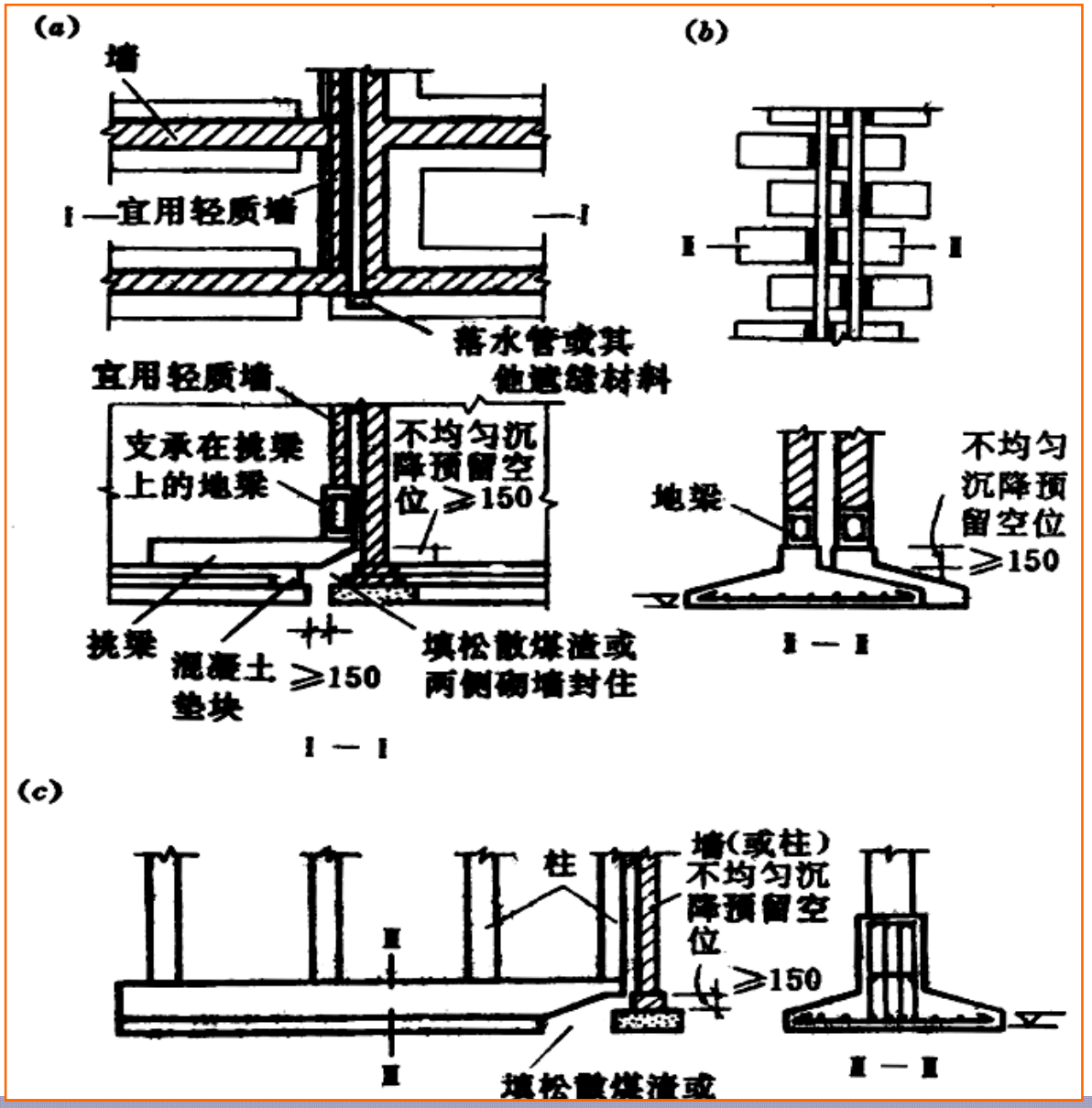


建筑物开裂实例—

——纵墙的长高比达 7.6 的过长建筑物

建筑物开裂实例图

●设置沉降缝



✓沉降缝——从上部结构檐口到基础底面将建筑物分割成两个或多个独立单元

✓沉降缝要求：分割出的独立单元（或沉降单元），应满足体形简单、长高比小、结构类型不变和所在处的地基比较均匀等条件的要求。

✓沉降缝作用：调整不均匀沉降。

(*a*)(*b*)适于混合结构房屋

(*c*)适于框架结构房屋

✓沉降缝设置的位置：

（1）复杂建筑平面的转折部位；

（2）建筑高度或荷载变化差异处；

（3）长高比过大的建筑适当部位；

（4）建筑结构或基础类型不同处；

（5）地基土的压缩性有显著变化部位；

（6）分期建造房屋的交接处；

（7）拟建伸缩缝或防震缝处（沉降缝可兼作伸缩缝或防震缝）。

✓沉降缝宽度：沉降缝应有一定的宽度，以利于相邻单元沉降而不受影响，保持缝的两侧单元内侧时而不互相挤压，其缝的宽度是：二~三层房屋为50~80mm，四~五层房屋为80~120mm，五层以上房屋应不小于120mm。

✓注意事项：沉降缝内一般不要填塞任何材料，寒冷地区也只能填塞防寒松软的材料，以保持沉降缝不失去应有的作用。

●恰当安排相邻建筑物基础间的净距

相邻基础 —附加应力叠加→ 不均匀沉降

✓同期建造的两相邻建筑物，低（或轻）者受高（或重）者的影响；

✓不同期建造的两相邻建筑物，原有建筑物受邻近新建高（或重）的建筑物的影响。

决定相邻建筑物基础间净距的指标：

受影响建筑（被影响者）　——刚度（长高比）

影响建筑（产生影响者）　——预估平均沉降量
（地基压缩性、建筑规模）

●调整建筑物各部分的标高

原理：根据可能产生的不均匀沉降，将预估沉降量大的部分标高提高，待其沉降后达到预定的标高，与沉降小的部分协调一致。

✓室内地坪和地下设施的标高，应根据预估沉降量予以提高；

✓建筑物各部分（或设备之间）有联系时，可将沉降较大者标高提高；

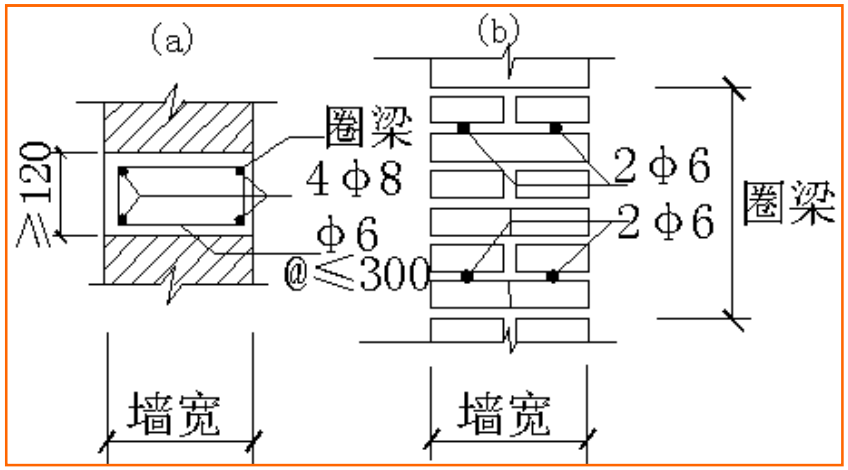
✓建筑物与设备之间，应留有足够的净空；

✓当有管道穿过建筑物时，应预留足够尺寸的孔洞，或采用柔性的管道接头。

2.4.5 地基变形验算

■ 减轻不均匀沉降损害的结构措施

- ✓ 减轻建筑物自重
- ✓ 设置圈梁
- ✓ 减小或调整基底附加压力
- ✓ 上部结构采用非敏感性结构形式



圈梁截面示意图
（a）钢筋混凝土圈梁；
（b）钢筋砖带圈梁

- 减轻建筑物自重

  ✓减轻墙重量：采用多孔砖，轻质墙等。

  ✓选用轻型结构：采用预应力钢筋混凝土结构、轻钢结构及各种轻型空间结构。

  ✓减少基础和回填土重量：如采用空心基础、壳体基础、以及加空地板代替厚填土等。

- 设置圈梁、基础梁（地圈梁）

  ✓增强建筑物的抗弯刚度

  ✓平面内形成闭合的网状系统。

  ✓钢筋混凝土圈梁、钢筋砖圈梁（或钢筋砖带）

- 减小或调整基底附加压力
  - ✓减小基底附加压力：

    减轻建筑物自重

    设置地下室（或半地下室、架空层）

  - ✓改变基底尺寸：

    选择和调整基础底面尺寸➡调整基底压力➡减少沉降差

- 采用非敏感性结构

  排架、三铰拱等铰接结构

2.4.5 地基变形验算

- **减轻不均匀沉降损害的施工措施**

✓ 合理安排施工次序

✓ 注意施工方法

✓ 保持地基土的原状结构

- 合理安排施工程序

  先重后轻（先建重的部分）

  先高后低（先建高的部分）

  先主体后附属(先建主体的部分)

- 基础周围不宜堆载、防止施工的不利影响

  打桩，强夯，井点降水、深基坑开挖

- 保护基底的地基土

  土的结构性，保持地基土的原状结构；

  开挖基槽时，保留约200mm；

  防水。

总结

非常好

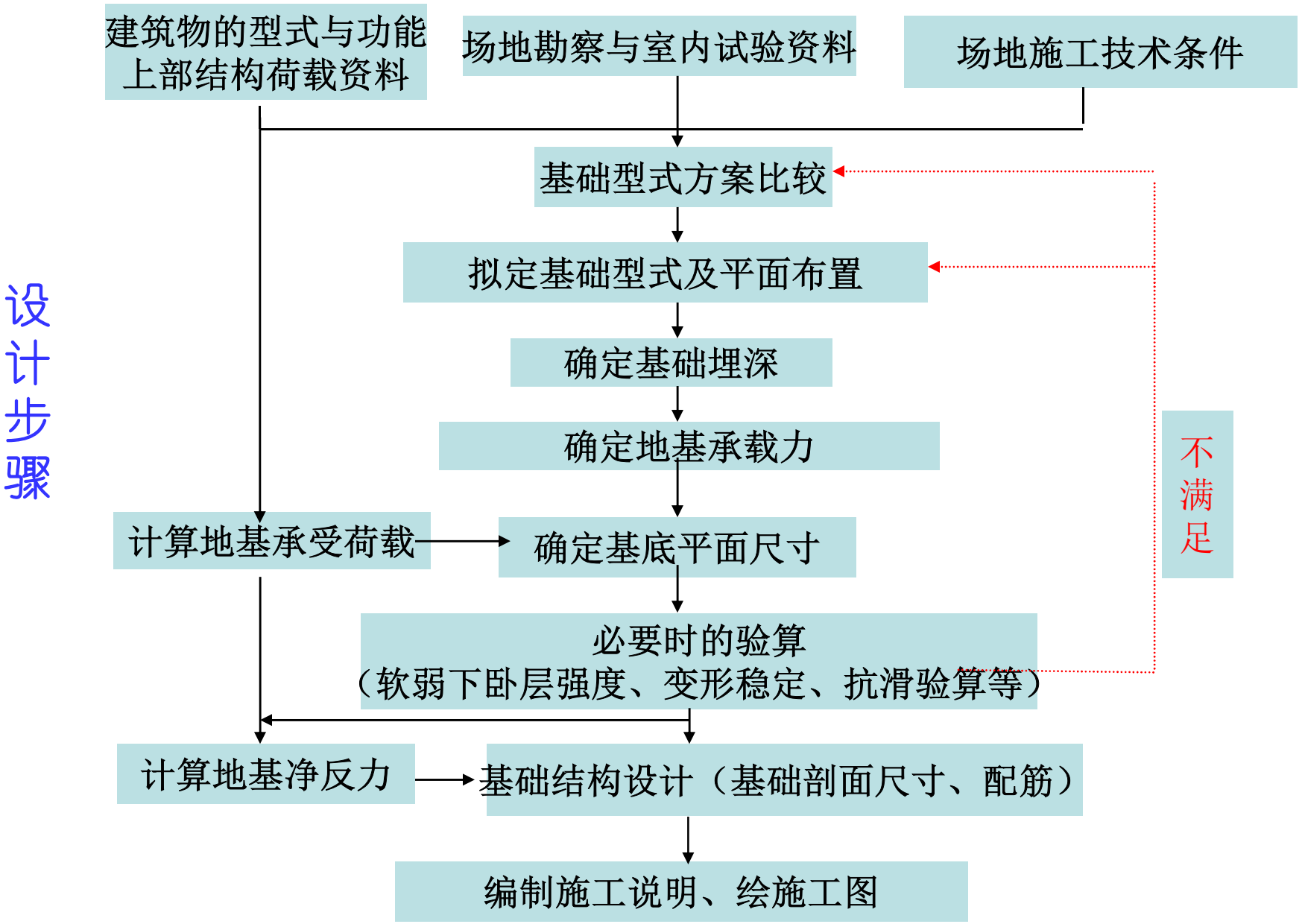
地基基础设计的基本内容与步骤

基本内容

- 地基基础设计
  - 地基计算
    - 防止地基强度破坏：承载力极限状态
    - 控制地基的变形：正常使用极限状态
    - 地基的稳定性验算：斜坡，高耸结构
  - 基础设计
    - 基础结构的强度
    - 刚度
    - 耐久性

其中地基计算的要求

地基计算内容	建筑物类型
地基承载力计算	所有建筑物（甲、乙、丙级）
地基变形计算	设计等级为甲、乙及部分丙级建筑物
地基稳定性计算	经常受水平荷载的高层建筑物；高耸结构、挡土墙；建造在斜坡上或边坡附近的建筑物或构筑物；基坑工程
抗浮验算	当地下水埋藏较浅，建筑物地下室或地下构筑物存在上浮问题


设计步骤
建筑物的型式与功能
上部结构荷载资料
场地勘察与室内试验资料
场地施工技术条件
基础型式方案比较
拟定基础型式及平面布置
确定基础埋深
确定地基承载力
计算地基承受荷载
确定基底平面尺寸
必要时的验算
（软弱下卧层强度、变形稳定、抗滑验算等）
不满足
计算地基净反力
基础结构设计（基础剖面尺寸、配筋）
编制施工说明、绘施工图