



同济大学交通运输工程学院  
COLLEGE OF TRANSPORTATION ENGINEERING  
TONGJI UNIVERSITY

# 城市轨道交通 结构设计与施工

Structural Design and Construction in  
Urban Mass Transit

城市轨道交通与铁道工程系

周顺华、宫全美



- 本节主讲：宫全美

- 办 公 室：交通学院663

- 联系电话：69583652

- 电子邮箱：[gongqm@tongji.edu.cn](mailto:gongqm@tongji.edu.cn)

# 第五章

## 明挖法结构设计

### 第四节

#### 支护结构选型与设计





围护结构类型

支撑结构体系

支护结构的稳定性验算

支护结构的内力计算

基坑变形与计算





# 一、围护结构类型



## 基本概念与流程

- 首先需综合考虑开挖深度、工程水文地质条件、周边环境等因素合理选用支护结构形式。
- 如基坑的整体稳定性：场地条件允许，可以采用放坡开挖方案，但地铁明挖法施工时，大多受场地的限制，或基坑稳定性不能满足要求，或周边环境保护要求等级较高时，明挖法施工中都采用支护结构
- 支护结构是基坑工程中采用的围护墙、支撑（或土层锚杆）、围檩、防渗帷幕等结构体系的总称，主要包括围护结构和支撑结构体系。





- **支护结构的设计与计算**是在选型的基础上，确定围护结构的插入比、支撑的设置、结构配筋等。主要考虑三方面的内容：稳定性验算、支护结构强度设计和基坑变形计算。
- 插入比：围护结构入土深度与基坑开挖深度之比
  - 稳定性验算主要是指基坑周围土体与支护结构一起保持稳定的能力；
  - 支护结构强度设计主要是计算支护结构体系以及各构件的内力，使其满足强度设计的要求；
  - 基坑变形计算主要结合基坑的保护等级以及周边建筑物、管线的保护要求，控制基坑开挖对周边环境的影响。

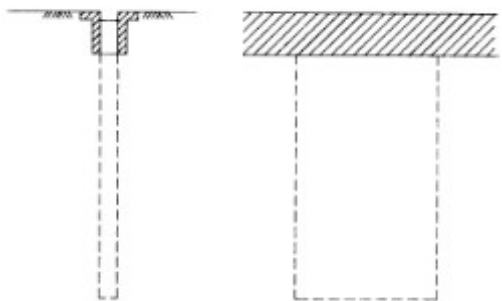
## 围护结构类型

### ➤ 地下连续墙

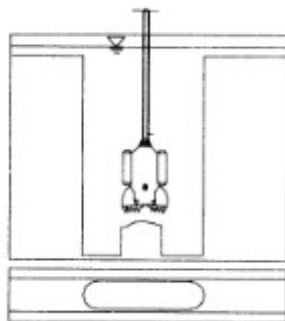


- 强度高、整体性好
- 具有挡土、防水抗渗及承重等多种功能
- 施工时振动小、噪音低、对邻近建筑物或构筑物影响小等；
- 但造价较高，且存在弃土和废泥浆处理、粉砂地层易引起槽壁坍塌及渗漏等问题
- 城市轨道交通中应用比较广泛

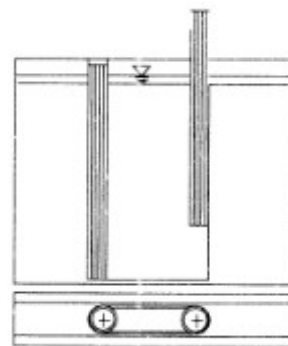
## 围护结构类型



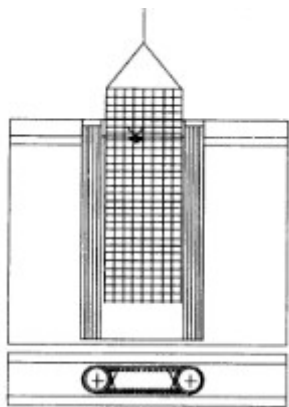
(a) 准备开挖的地下连续墙沟槽



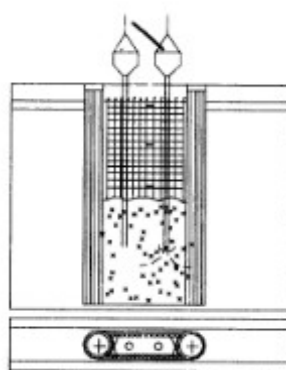
(b) 用液压成槽机进行沟槽开挖



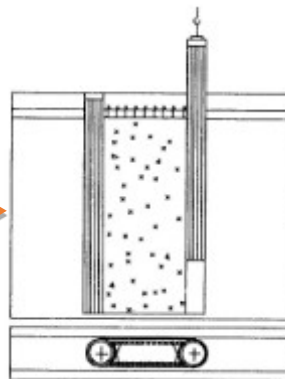
(c) 安放锁口管



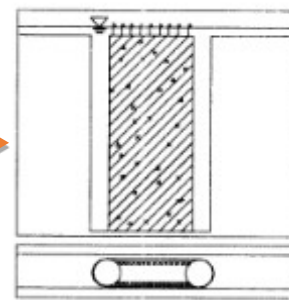
(d) 吊放钢筋笼



(e) 水下混凝土浇注



(f) 拔除锁口管



(g) 已完工的槽段



## 围护结构类型

### ➤ 锁口管接头施工程序

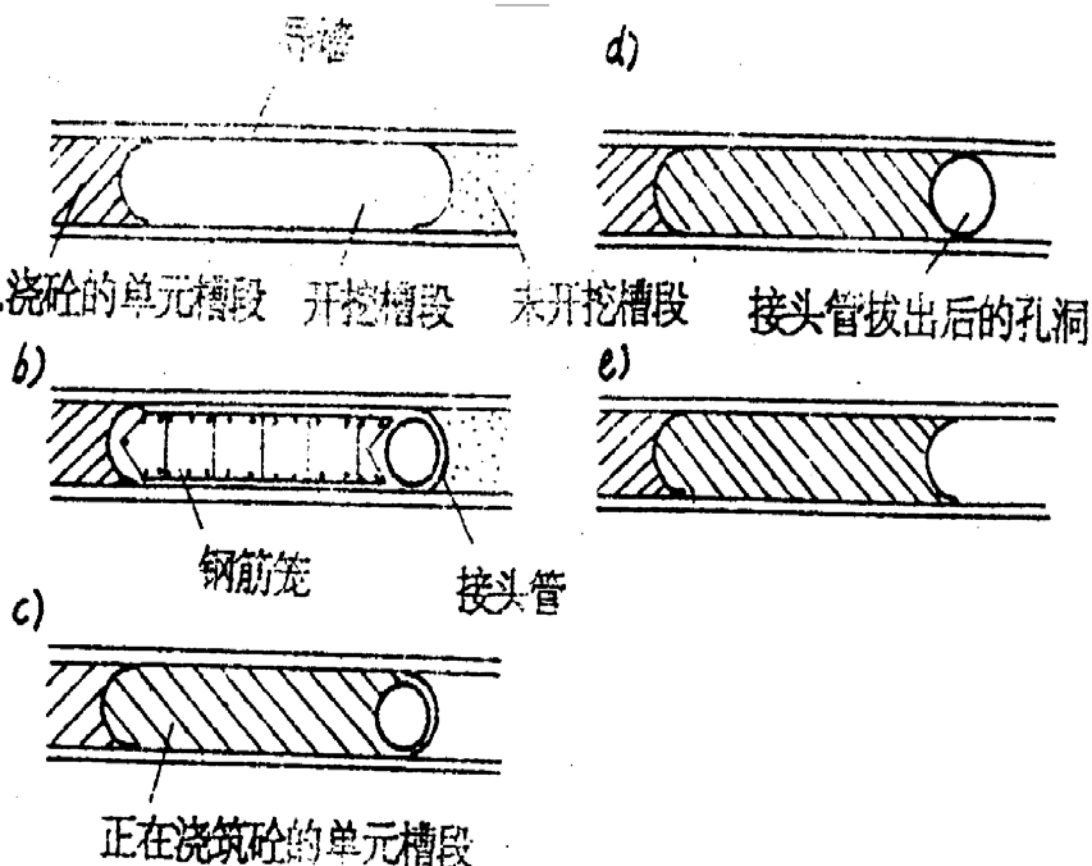
a) 开挖槽段；

b) 吊放接头管和钢筋笼；

c) 浇筑砼；

d) 拔出接头管；

e) 形成接头



## 围护结构类型



## 围护结构类型

### ➤ 成槽机





## 围护结构类型

➤ 刷壁



➤ 泥浆



Q：泥浆的作用？

## 围护结构类型

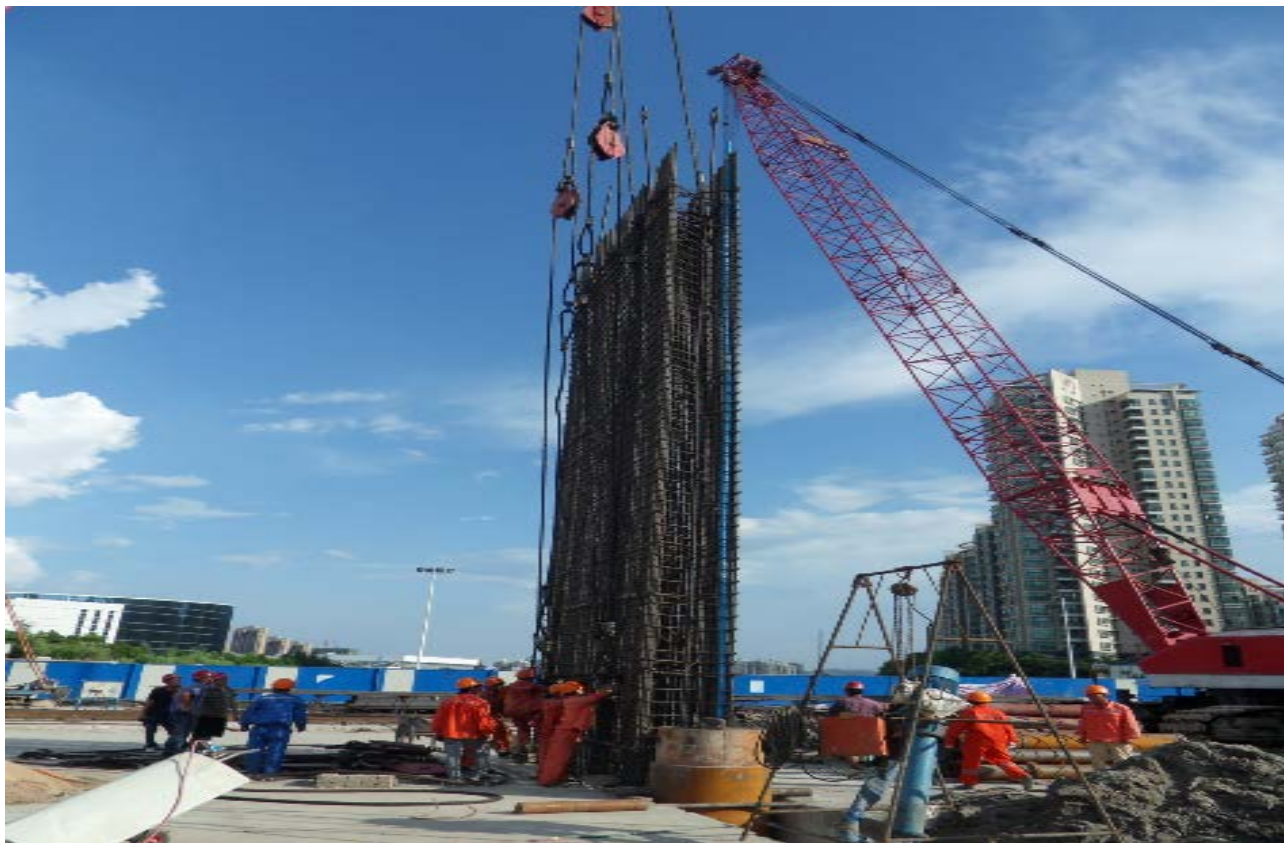
### ➤ 钢筋笼制作





## 围护结构类型

### ➤ 吊放钢筋笼入槽





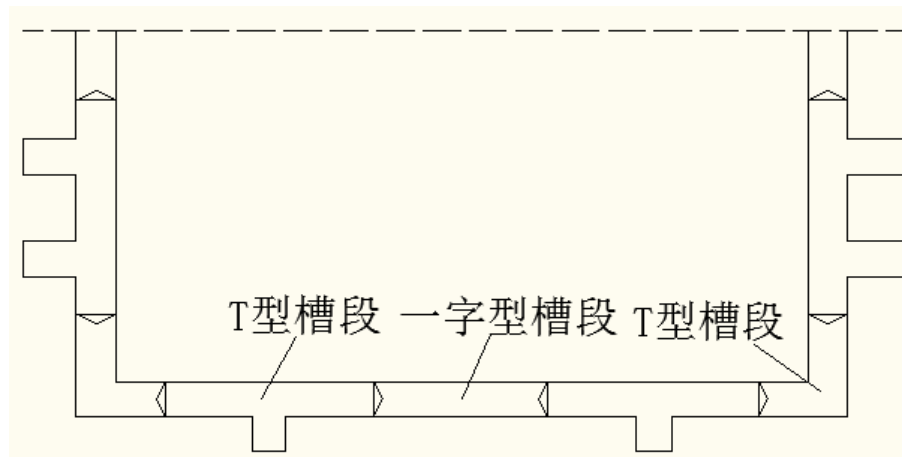
## 围护结构类型

### ➤ 锁口管



## 围护结构类型

### ➤ 槽段形式

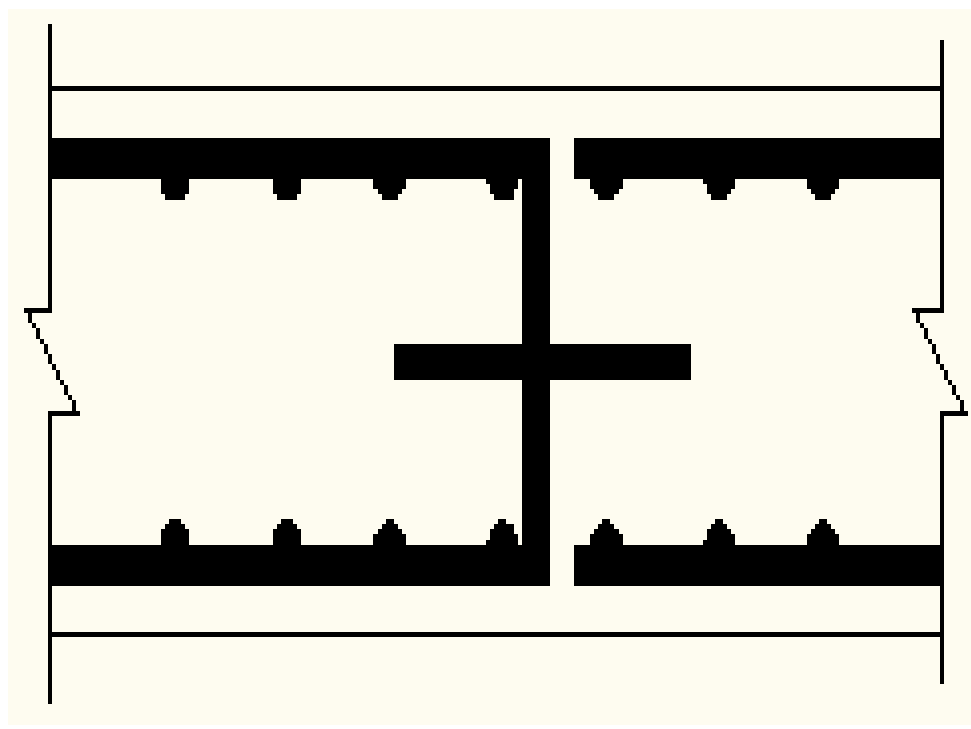


Π型、转角槽段（图中有错误）

### ➤ 一般尺寸

- 厚度为600mm、800mm、1000mm、1200mm。
- 幅宽6~8m

## 围护结构类型



隔板式接头



## 围护结构类型

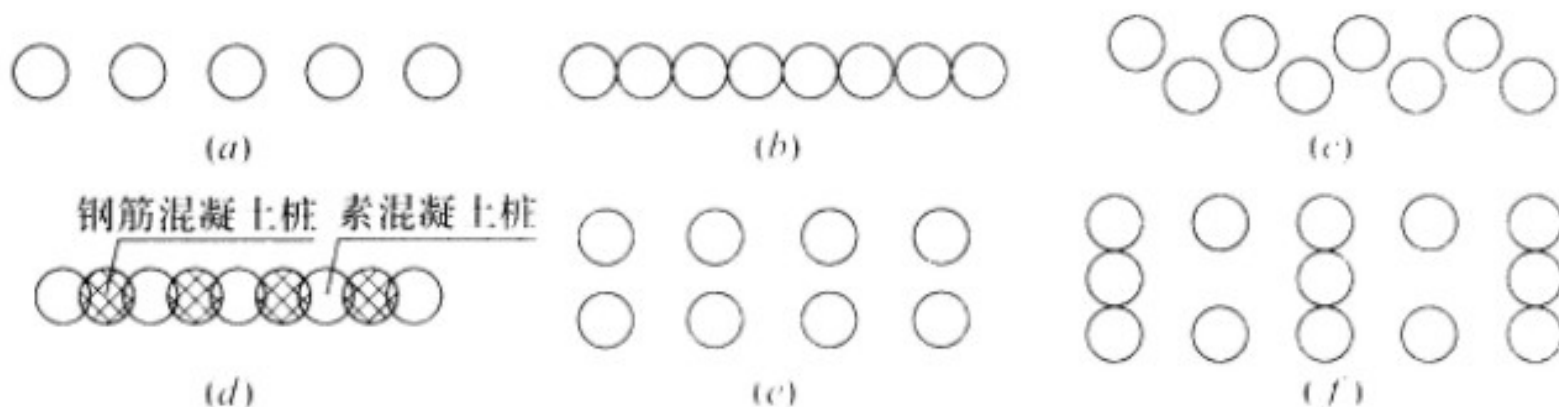
### ➤ 地连墙材料要求

- 混凝土设计强度等级不应低于C30，水下浇筑时混凝土强度等级按相关规范要求提高。
- 混凝土抗渗等级不宜小于S6级
- 受力钢筋应采用HRB400级和HRB335级钢筋，构造钢筋可采用HRB235级钢筋。

## 围护结构类型

### ➤ 排桩

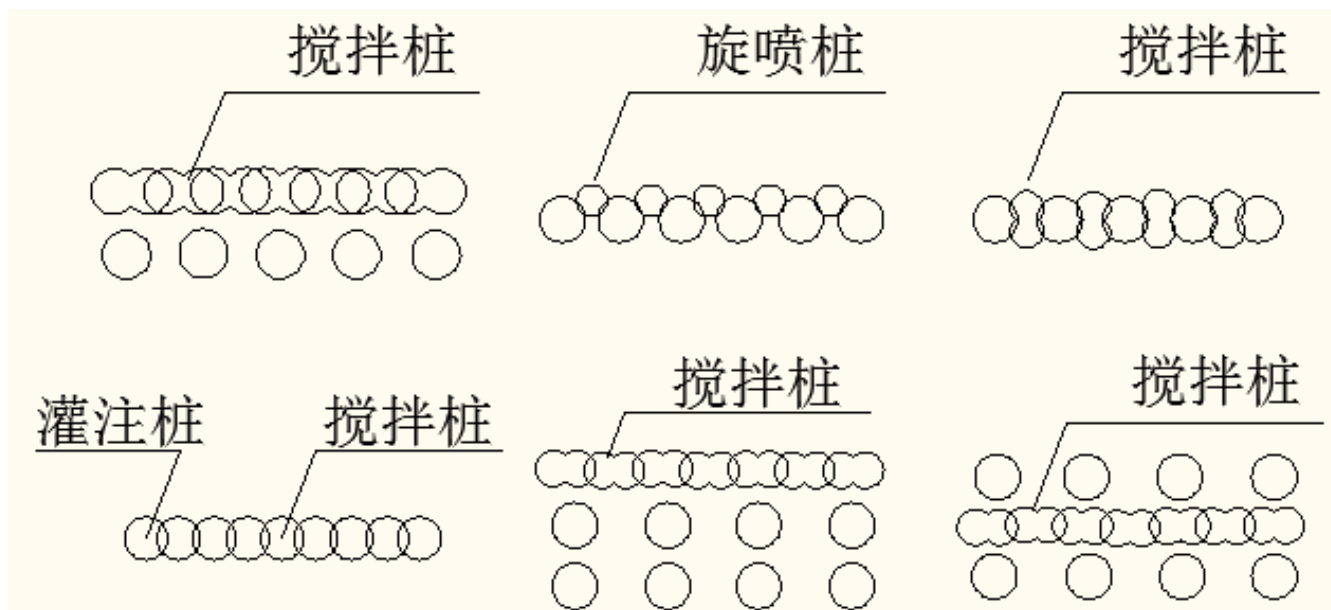
- 排桩围护体是利用常规的各种桩体，例如 钻孔灌注桩、挖孔桩、预制桩等，按一定间距或连续咬合排列形成的地下挡土结构。
- 排桩围护体施工工艺简单，成本低，平面布置灵活，但防渗和整体性差，一般适用于中等深度的基坑围护。



Q：哪个图示具有止水功能？

## 围护结构类型

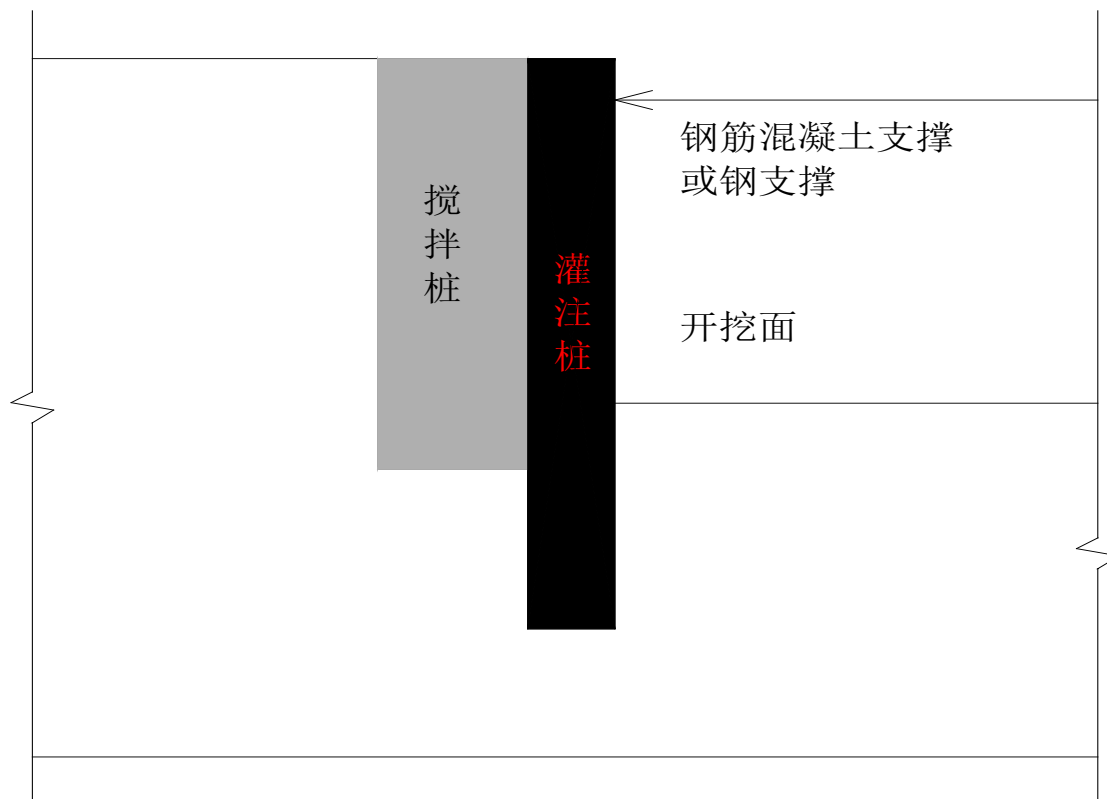
### ➤ 排桩围护体的止水措施



- 采用咬合桩排桩
- 增加隔水帷幕：注浆、水泥搅拌桩、旋喷桩等



## 围护结构类型



灌注桩与止水帷幕

## 围护结构类型

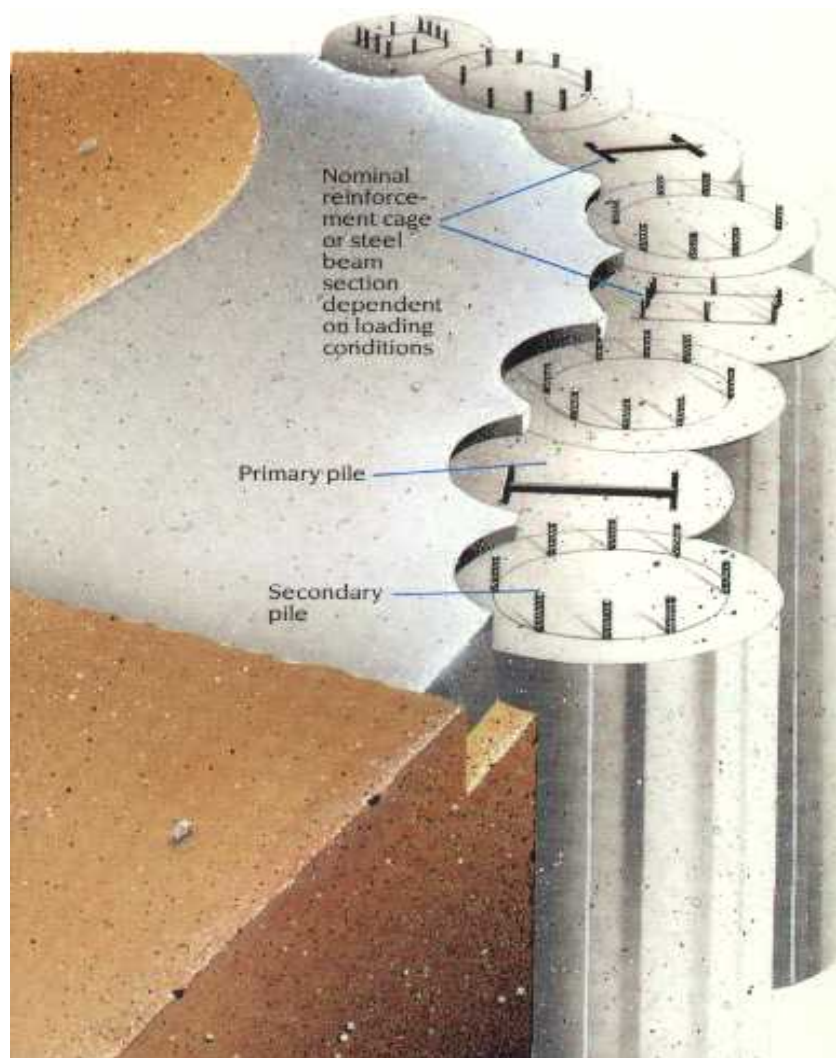




## 围护结构类型



## 围护结构类型





## 围护结构类型

- 型钢水泥土搅拌墙
  - 通常称为SMW工法（Soil Mixing Wall），是一种在连续套接的三轴水泥土搅拌桩内插入型钢形成的复合挡土隔水结构。



a型钢密插型



b型钢插二跳一型



c型钢插一跳一型

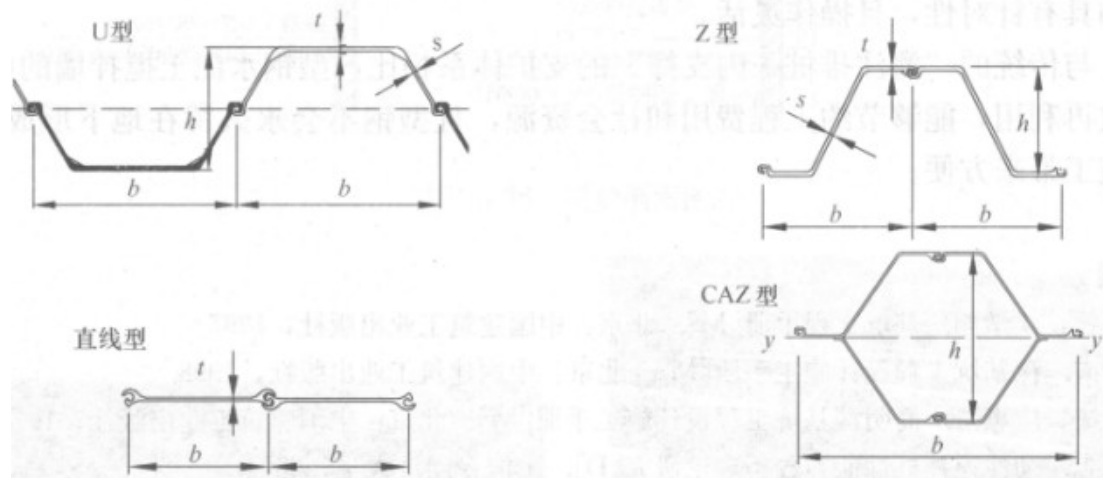
## 围护结构类型

- **优点：**施工完成后，可以将H型钢从水泥土搅拌桩中拔出，达到回收和再次利用的目的，因此该工法与常规的围护形式相比，不仅工期短、施工过程污染小、噪声小等，还可以节约社会资源，避免围护体在地下室施工完毕后永久遗留于地下，成为地下障碍物。
- **缺点：**与地下连续墙、灌注排桩相比，型钢水泥土搅拌墙的刚度较低，基坑开挖时常会产生相对较大的变形



## 围护结构类型

### ➤ 钢板桩围护体



- 钢板桩是一种带锁口或嵌口的热轧（或冷弯）型钢，钢板桩打入后靠锁口或嵌口相互连接咬合，形成连续的钢板桩围护体。
- 钢板桩具有**轻型**、**施工快捷**的特点；施工后可拔除，循环利用，经济性较好；在防水要求不高的工程中，可采用自身防水；防水要求高的工程应设置隔水帷幕。
- **刚度较小**，开挖时**变形较大**，适用于开挖深度 $\leq 7\text{m}$ 且邻近无重要建筑物或重要地下管线的砂土、粉土和粘土层的基坑。

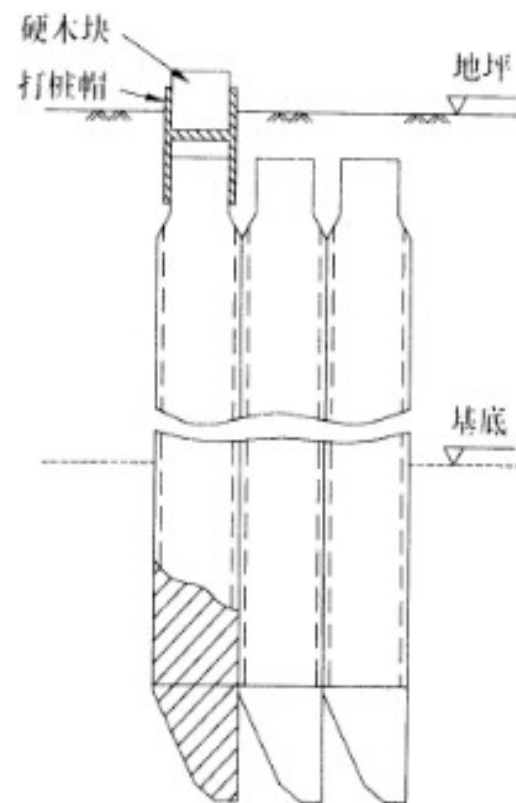
## 围护结构类型





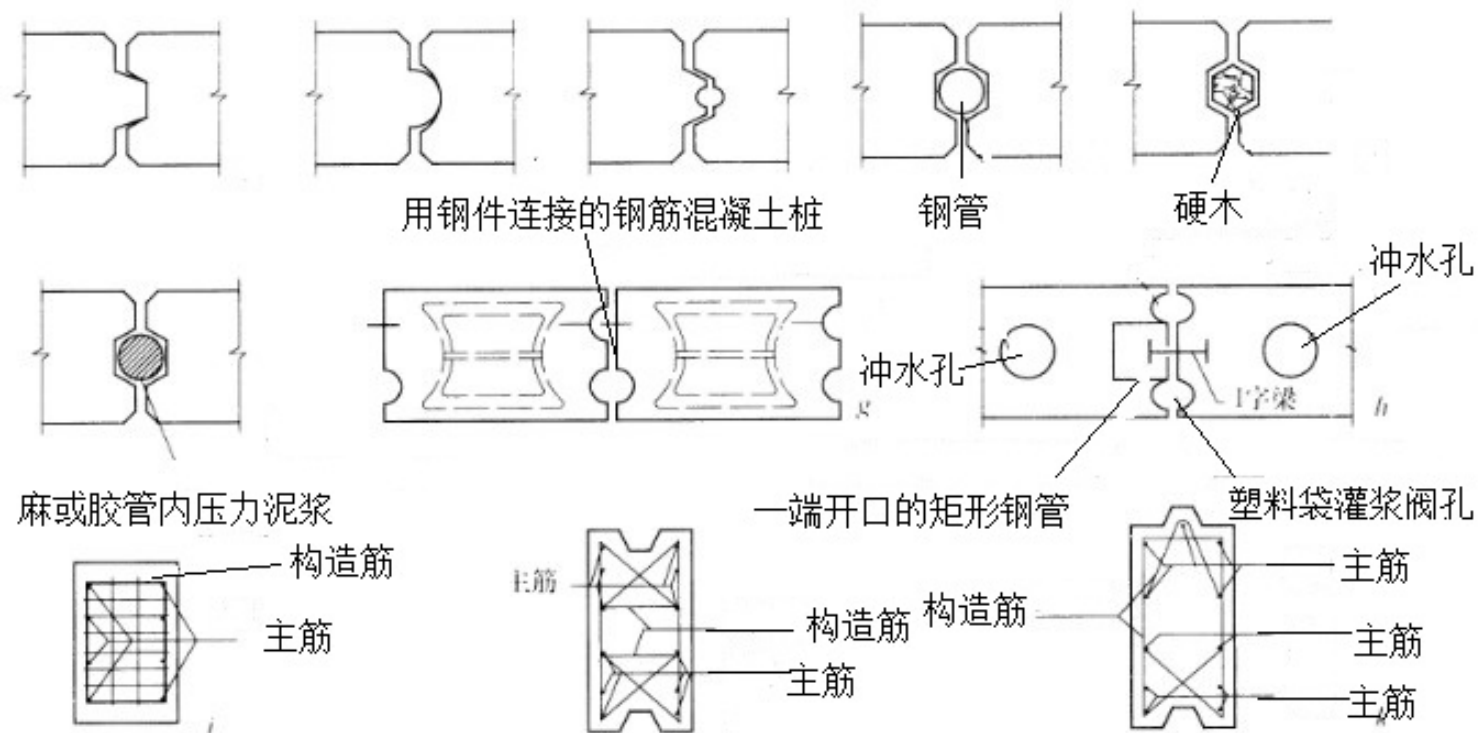
## 围护结构类型

- 钢筋混凝土板桩围护墙
- 钢筋混凝土板桩围护墙是由钢筋混凝土板桩构件连续成桩后形成的基坑围护结构，板桩截面有矩形、“T”形和“工”字形，也可采用圆管形或组合形。



钢筋混凝土板桩围护墙立面图

## 围护结构类型



- **施工简单**、现场作业**周期短**，曾在基坑中广泛应用，但由于钢筋混凝土板桩的施打一般采用锤击方法，**振动与噪音大**，同时沉桩过程中**挤土**也较为严重，在城市工程中受到一定限制。

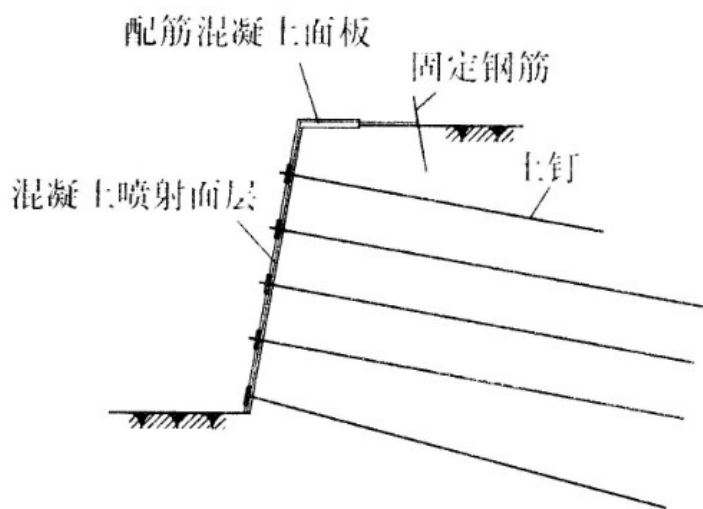
## 围护结构类型

- 水泥土重力式挡墙
- 水泥土重力式围护墙是以水泥系材料为固化剂，通过搅拌机械采用喷浆施工将固化剂和地基土强行搅拌，形成有一定厚度和嵌固深度的连续搭接的水泥土柱状加固体挡墙。
- 水泥土重力式围护墙占用空间较大，围护结构变形较大，由于采用水泥土搅拌桩或高压喷射注浆成墙，围护墙施工对邻近环境影响较大。
- 水泥土重力式围护墙一般在软土层中应用较多。适用于软土地层中开挖深度不超过7.0m、周边环境保护要求不高的基坑工程。周边环境有保护要求时，采用水泥土重力式挡墙围护的基坑不宜超过5.0m。

Q：如何稳定？

## 围护结构类型

### ➤ 土钉墙支护



土钉墙的基本形式

- **土钉**墙由分布于原位土体中的**土钉**、粘附于土体表面的**钢筋混凝土面层**、**土钉之间被加固的原位土体**及**必要的防排水系统**组成，是具有自稳能力的原位挡土墙。
- **优点**：**设备**及**工艺**简单，对基坑形状**适应性强**，**经济性**较好；坑内无支撑体系，可实现**敞开式**开挖；支护柔度大，有良好的延性；施工所需场地小，支护结构基本不占用场地内的空间等。但土钉长度较长，需占用坑外地下空间，而且土钉墙施工与土方开挖交叉进行，对现场施工组织要求较高。

Q：靠什么稳定？应注意的问题是什么？各构件之间的连接？



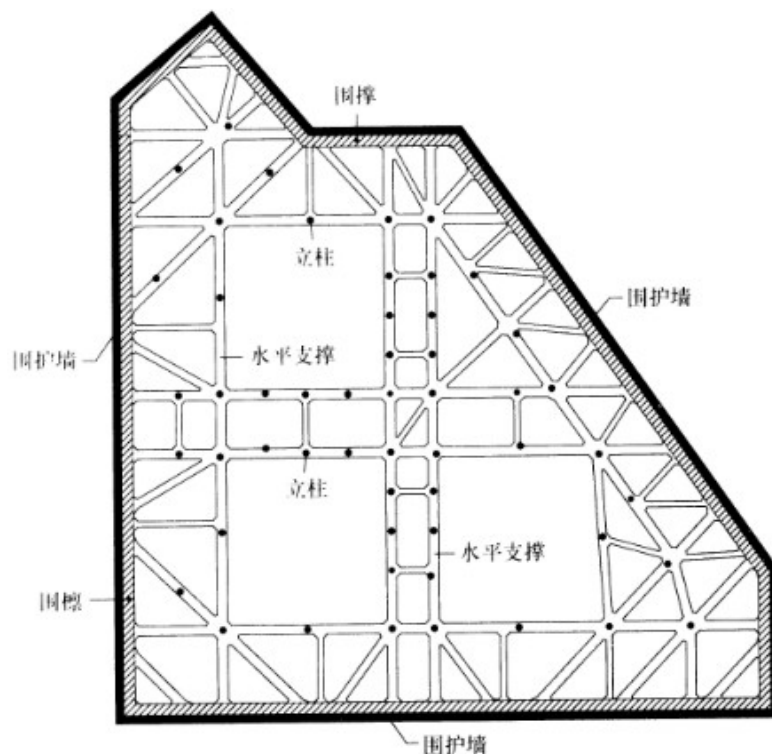


## 二、支撑结构体系



## 支撑结构体系

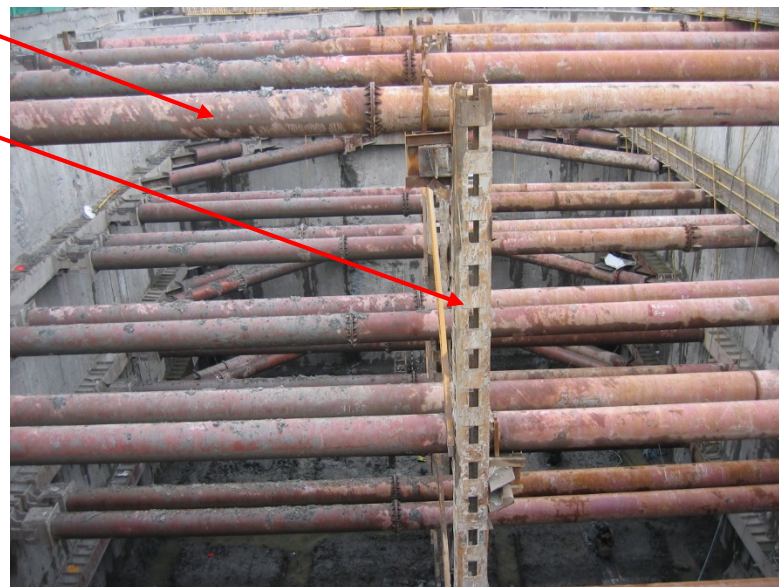
- 内支撑结构体系组成
  - 内支撑结构体系由水平支撑和竖向支承两部分组成。
  - 内支撑体系由**围檩**、**水平支撑**、**钢立柱**和**立柱桩**等基本构件组成。



内支撑系统示意图

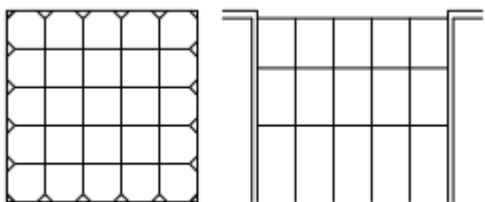
## 支撑结构体系

- **围檩**是协调支撑和围护墙结构间受力与变形的重要受力构件，起到加强围护墙的整体性、将力传递给支撑构件的作用；
- **水平支撑**是平衡围护墙外侧水平作用力的主要构件；
- **钢立柱**和**立柱桩**的作用是保证水平支撑的纵向稳定，加强支撑体系的空间刚度和承受水平支撑传来的竖向荷载。

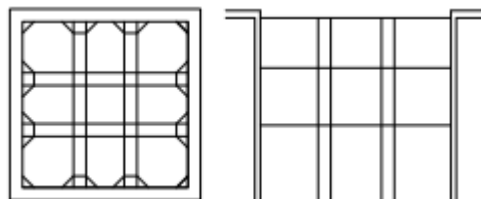


## 支撑结构体系

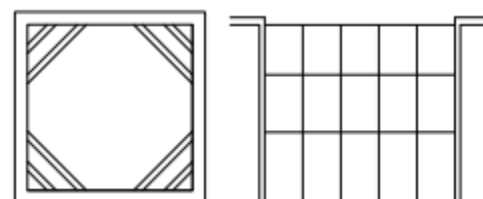
### ➤ 常用形式



同一水平面的直交式，非同水平面的直交式



井字型集中布置



角撑体系布置

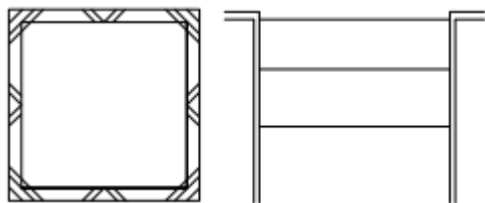
在软土地层，环境保护要求高的条件下，这是应用最多的布置形式；安全稳定，有利于控制墙体位移；支撑布置与开挖土方设备和工艺不协调时土方开挖和主体结构施工较为困难。

一般在采用钢筋混凝土支撑时，在环境保护要求高的条件下，将水平直交的支撑集中布置成井字型与角撑结合的支撑体系以方便土方开挖和主体工程施工；钢筋混凝土支撑使用时可与施工用在栈桥平台结合设计。

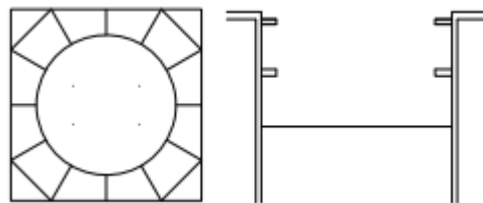
方便土方开挖和主体结构的施工；整体稳定性及变形控制效果不及水平直交式支撑及井字型集中式布置者。



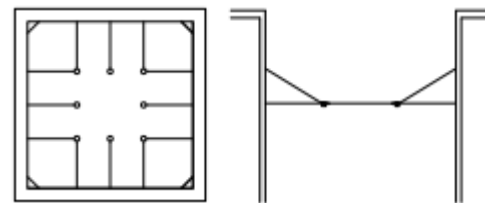
## 支撑结构体系



边桁架



圆形环梁布置



竖向斜撑

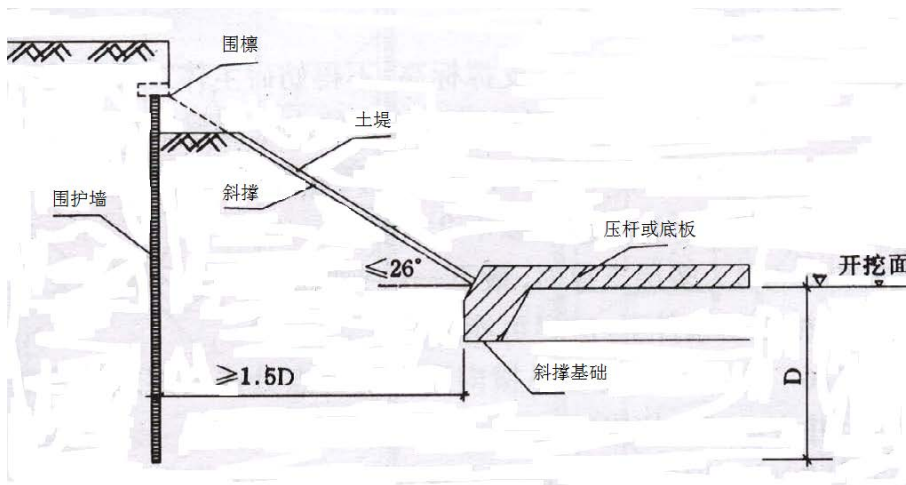
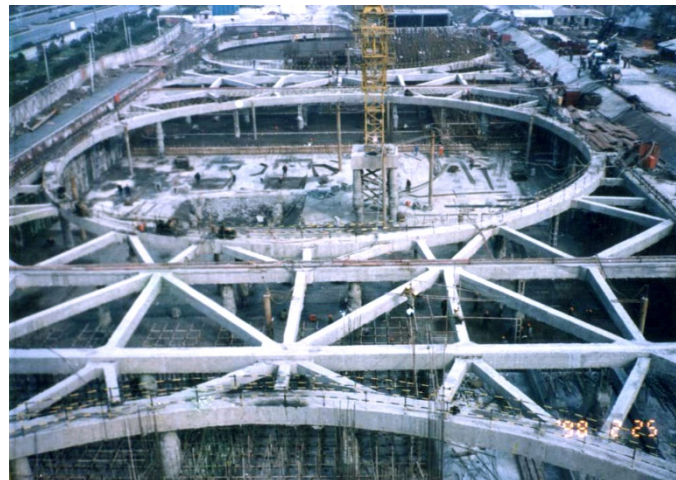
方便土方开挖和主体结构施工；整体稳定性及变形控制效果不及水平直交式支撑及井字型集中式布置者。

在采用钢筋混凝土支撑时，因地制宜采用环梁方案，可方便中间筒体，主楼施工，方便土方开挖；将支撑体系受力主构件化为圆形结构，受力条件较好，可节省钢筋混凝土量；在坑外周荷载不均匀，土性软硬差异较大，部分地层水平基床系数很小时，此布置形式要慎用。

节省立柱和支撑材料；有利于开挖面积较大，深度较小的基坑；在软弱地层中，不易控制基坑稳定和变形；斜撑与底板相交处结构施工较困难。

## 支撑结构体系

- 单层
- 多层平面支撑体系
- 竖向斜撑体系



## 支撑结构体系

### ➤ 水平支撑材料



钢筋混凝土支撑



钢支撑



## 支撑结构体系

### ➤ 钢支撑体系

- 在基坑内将钢构件用焊接或螺栓拼接起来的结构体系；目前常用的形式一般有钢管和型钢两种，钢管大多选用 $\Phi 609$ ，壁厚为10mm、12mm、14mm；型钢大多选用H型钢，常用的有H700 $\times$ 300、H500 $\times$ 300等。

### ➤ 混凝土支撑体系

- 具有刚度大、整体性好的特点，而且可采取灵活的平面布置形式适应基坑工程的各项要求；
- 相对钢支撑而言，钢筋混凝土支撑造价高、需要现场浇筑和养护，而且基坑工程结束后还需进行拆除，其经济性和施工工期不及相同条件下的钢支撑。

### ➤ 钢和混凝土组合支撑

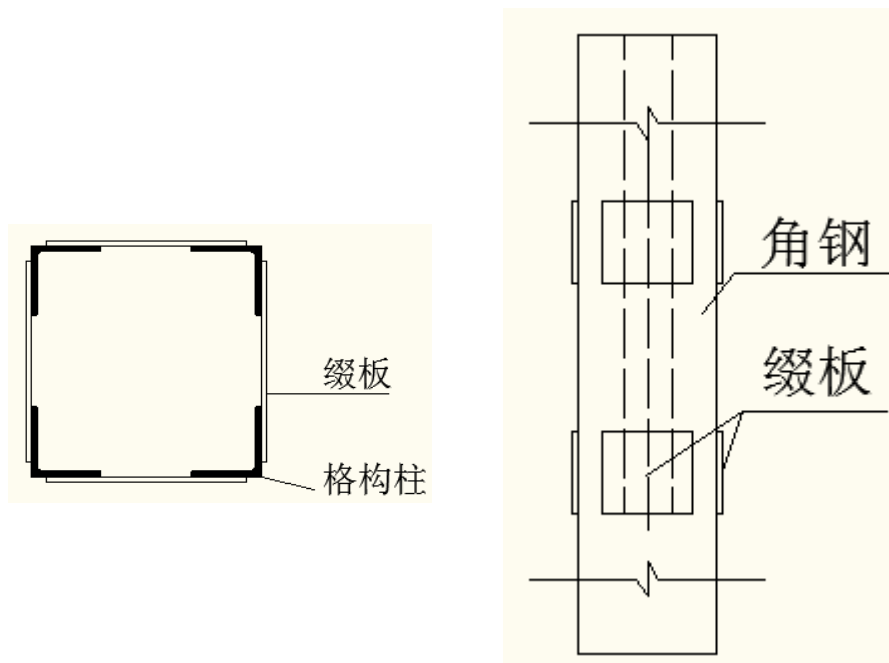
- 同层支撑平面内的组合，如在长条形基坑中，基坑中部设置短边方向的钢支撑对撑、基坑两边设置钢筋混凝土角撑；
- 分层组合，如第一道为钢筋混凝土支撑，第二及以下为钢支撑。



## 支撑结构体系

### ➤ 竖向支撑系统

- 基坑的竖向支承系统，通常采用**钢立柱**插入**立柱桩桩基**的形式
- 立柱一般可采用角钢格构式钢柱、H型钢柱或钢管柱；
- 立柱桩常采用钢筋混凝土的钻(挖)孔灌注桩，也可以采用钢管桩。



角钢拼接平面图和立面图



钢筋混凝土支撑

## 支撑结构体系



掉撑



## 支撑结构体系



围囹变形



## 支撑结构体系



塌方



## 支撑结构体系



超灌



# 三、支护结构的稳定性验算



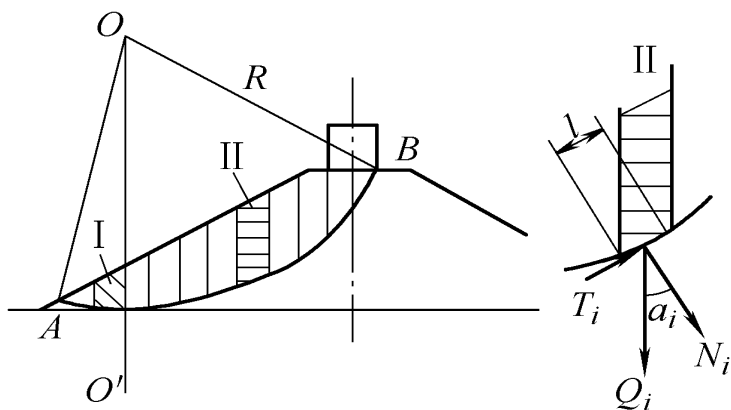
## 支撑结构的稳定性验算

- ① **整体稳定性验算**：防止因为围护墙插入深度不够，使基坑边坡沿着墙底地基中某一滑动面产生整体滑动。
  - ② 围护墙体**抗倾覆稳定验算**：防止开挖面以下地基水平抗力不足，使墙体产生绕前趾倾倒。
  - ③ 围护墙底面**抗滑移验算**：防止墙底底面与地基接触面上的抗剪强度不足，使墙底底面产生滑移。
  - ④ 基坑围护墙前**抗隆起验算**：防止围护墙底部地基强度不足，产生向基坑内涌土。
  - ⑤ **抗渗流验算**：在地下水较高的地区，在基坑内外水头差或者坑底以下可能存在的承压水头作用下，防止由于地下水竖向渗流使开挖面以下地基土的被动抗力和地基承载力失效。
- 最终确定的围护墙插入比应同时满足以上各项验算的要求，②、③项验算主要针对重力式挡墙。

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 整体稳定性

- 整体稳定性计算方法比较常用的是基于极限平衡理论的条分法、瑞典圆弧滑动法、简化Bishop法、Janbu法



瑞典条分法示意图

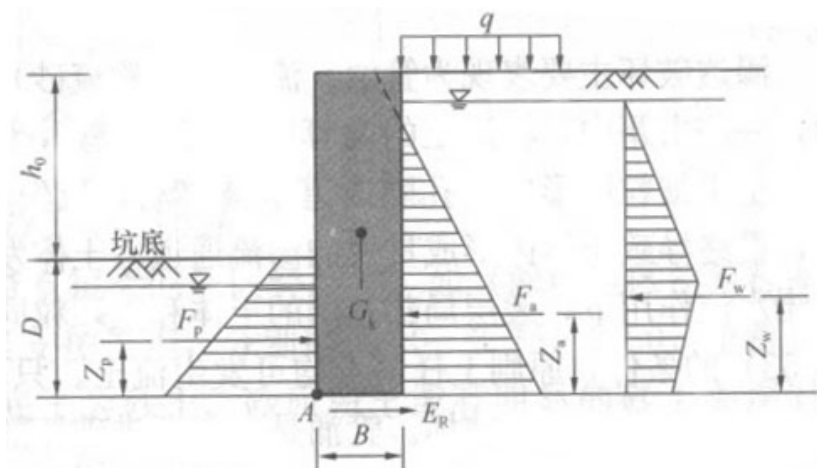
$$K = \frac{\sum_1^n N_i \tan \varphi_i + \sum_1^n c_i l_i}{\sum_1^n T_i}$$

- 考虑内支撑作用时，通常不会发生整体稳定破坏，因此对只设一道支撑的支护结构需验算整体滑动，而对设置多道内支撑时可不作验算



## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗倾覆稳定性——重力式挡墙



重力式围护结构抗倾覆计算简图

$$K_q = \frac{M_R}{M_s}$$

$$M_s = F_a Z_a + F_w Z_w$$

$$M_R = F_p Z_p + G_k B / 2$$

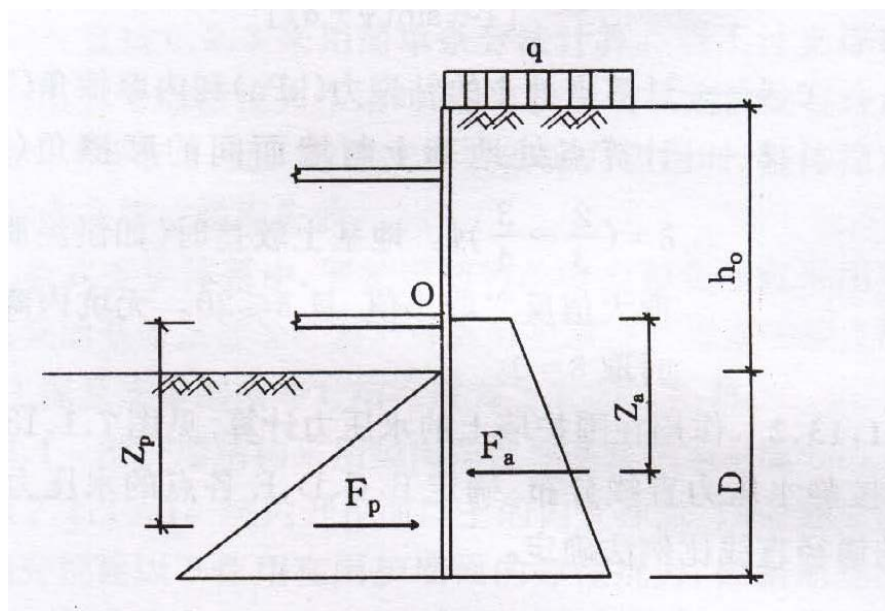
$M_s$  – 坑外侧压力( $F_a$ )、水压力 ( $F_w$ ) 以及墙后地面荷载所产生的侧压力对墙底前址的倾覆力矩 ( $kN \cdot m / m$ )

$M_R$  – 水泥土围护墙自重 ( $G_k$ ) 以及坑内墙前被动侧压力 ( $F_p$ ) 对墙底前址的稳定力矩 ( $kN \cdot m / m$ )

Q：是否绕A点倾覆？

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗倾覆稳定性——板式支护结构



板式支护结构抗倾覆稳定性计算简图

$$K_Q = M_{RC} / M_{OC}$$

$$M_{RC} = F_p Z_p \text{ —— 抗倾覆力矩}$$

$$M_{OC} = F_a Z_a \text{ —— 倾覆力矩}$$

认为**最下部支撑为转动点**，故：  
倾覆力矩取最下一道支撑以下围护墙外侧压力对最下一道支撑的转动力矩。

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗滑移稳定性——重力式挡墙

$$K_{HL} = \frac{\text{墙体抗滑力}}{\text{墙体滑动力}} = \frac{W \tan \phi_o + c_o B + F_p}{F_a}$$

式中  $W$  = 墙体自重,  $W = \gamma_o B H (kN)$

$B$  – 墙宽 ( $m$ )

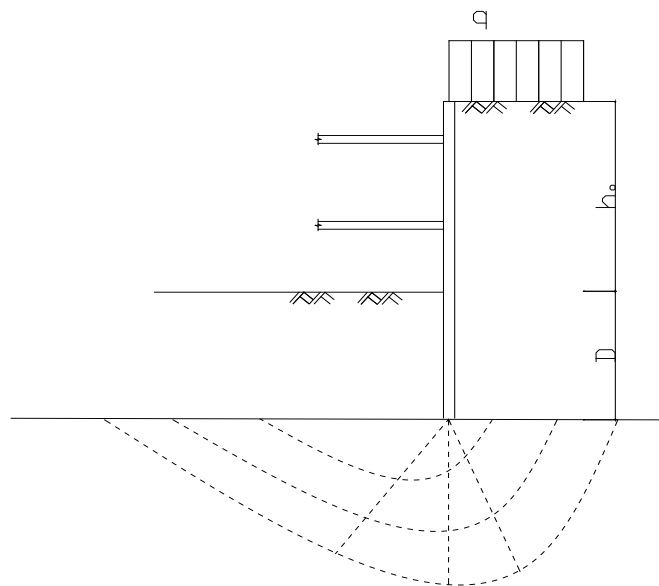
$\gamma_o$  – 墙体平均重度, 根据水泥渗量取  $(18 - 19) kN / m^3$ , 坑底深度下取浮重度

$\phi_o$ 、 $c_o$  – 墙底土层的内摩擦角 ( $^\circ$ ) 和粘聚力 ( $kPa$ )

$K_{HL}$  – 墙底抗滑安全系数, 应小于1.2。当基坑边上不大于20m时,  $K_{HL}$  应不小于1.0

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗隆起稳定性——地基承载力模式



地基承载力模式抗隆起分析

$$K_a = \frac{\gamma_2 D N_q + c N_c}{\gamma_1 (H + D) + q}$$

若基底光滑:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \varphi}$$

若基底粗糙:

$$N_q = \frac{1}{2} \left[ \frac{e^{\left( \frac{3}{4} \pi - \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi}}{\cos \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} \right]^2 \quad N_c = (N_q - 1) \frac{1}{\tan \varphi}$$

$\gamma_1$ ——坑外地表至围护墙底, 各层土天然重度的加权平均值 ( $\text{kN} / \text{m}^3$ );

$\gamma_2$ ——坑底以下至围护墙底, 各层土天然重度的加权平均值 ( $\text{kN} / \text{m}^3$ );



## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗隆起稳定性 —— 圆弧滑动的抗隆起分析模式

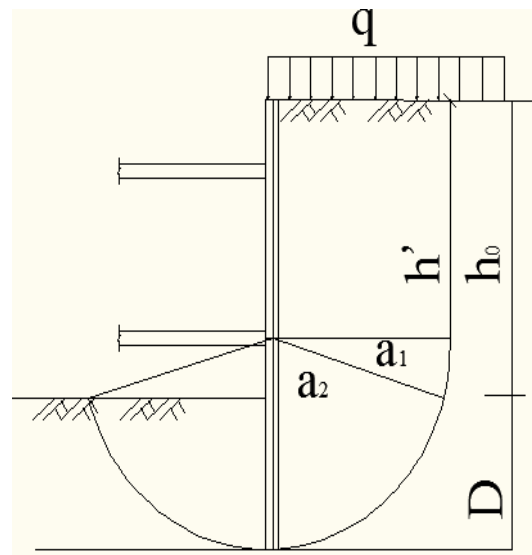
假定：土体沿围护墙体底面滑动，且滑动面为一圆弧，圆弧滑动的中心位于最下一道支撑处

$$K_L = \frac{M_{RL}}{M_{SL}} \rightarrow \begin{aligned} M_{RL} &= R_1 K_a \tan \phi + R_2 \tan \phi + R_3 c \\ M_{SL} &= \frac{1}{2} (r h_0' + q) D^2 \end{aligned}$$

$M_{SL}$  -- 隆起力矩 (kN·m/m)

$K_L$  -- 抗隆起安全系数

$M_{RL}$  -- 抗滑动力矩 (kN·m/m)



基坑底抗隆起计算简图

$$R_1 = D \left( \frac{r h_0'^2}{2} + q h_0' \right) + \frac{1}{2} D^2 q_f (a_2 - a_1 + \sin a_2 \cos a_2 - \sin a_1 \cos a_1) - \frac{1}{3} r D^3 (\cos^3 a_2 - \cos^3 a_1)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} D^2 q_f \left[ a_2 - a_1 - \frac{1}{2} (\sin 2a_2 - \sin 2a_1) \right] - \frac{1}{3} r D^3 [\sin^2 a_2 \cos a_2 - \sin^2 a_1 \cos a_1 + 2(\cos a_2 - \cos a_1)]$$

$$R_3 = h_0 D + (a_2 - a_1) D^2 \quad q_f = \gamma h_0' + q_0$$

## 支撑结构的稳定性验算

- 抗渗透稳定性
  - 抗渗流稳定性：针对基坑坑底土体在内外水头差作用下是否会发生流土现象；
  - 抗突涌稳定性：检算坑底是否会被承压水冲溃

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗渗流稳定性

$$K_s = \frac{i_c}{i}$$

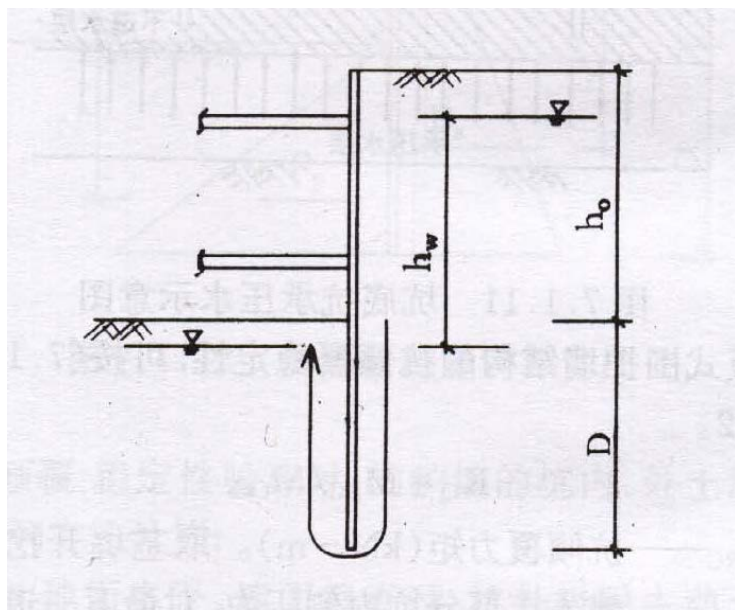
$$i = h_w / L$$

$$L = \sum L_h + m \sum L_v$$

$m$ : 渗径垂直段换算水平段的系数, 单排帷幕墙时  $m=1.5$ ; 多排帷幕墙时  $m=2$

$$i_c = (G_s - 1) / (1 + e)$$

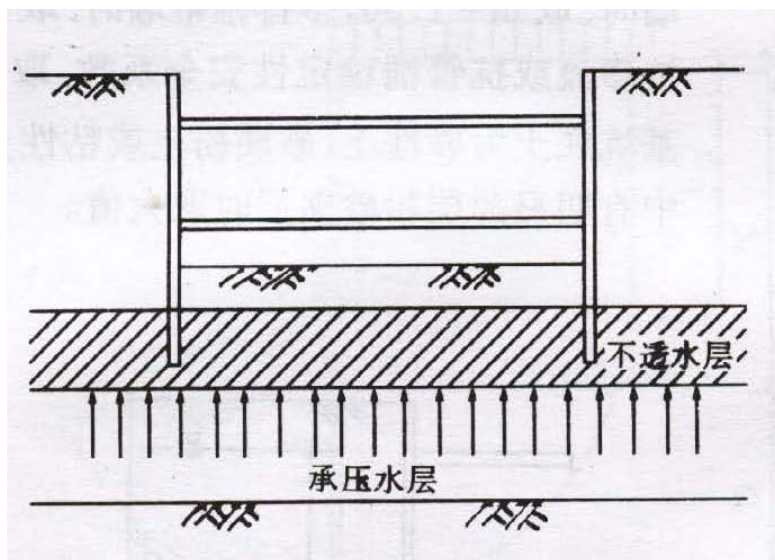
$K_s$  取1.5~2.0。基坑底土为砂性土、砂质粉土或粘性土与粉性土中有明显薄层粉砂夹层时取大值。



抗渗流稳定性计算图式

## 支撑结构的稳定性验算

### ➤ 抗突涌稳定性



抗突涌稳定性计算图式

$$K_y = p_{cz} / p_{wy}$$

$P_{cz}$ --基坑开挖面以下至承压水层顶板间覆盖土的自重应力(kN/m<sup>2</sup>)

$P_{wy}$ --承压水层的水头压力(kN/m<sup>2</sup>)

$K_y$ --抗承压水头的稳定性安全系数，取1.05



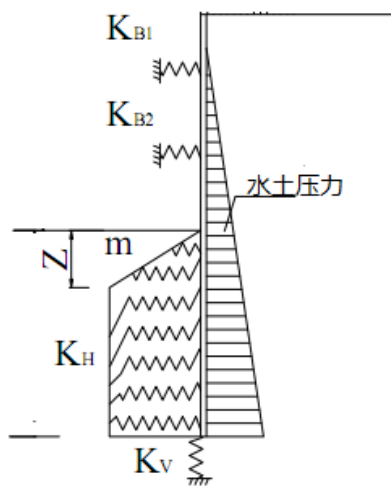


## 四、支护结构的内力计算



## 支护结构内力计算

- 挡土结构的内力计算
  - 弹性地基梁或杆系有限元法
  - 假定挡土结构为平面应变问题，取单位宽度的挡土墙作为竖向放置的弹性地基梁，支撑和锚杆简化为弹簧支座，基坑开挖面以下土体采用弹簧模拟，挡土结构外侧作用已知的水压力和土压力，



弹性地基梁法计算简图

$$K_B = \frac{2\alpha EA}{L \times S}$$

$K_B$ --内支撑的压缩弹簧系数(kN /m/m); ↵

$\alpha$ --与支撑松弛有关的折减系数，一般取 0.5~1.0;

混凝土支撑或钢支撑施加预应力时，取  $\alpha=1.0$ ;

$E$ --支撑结构材料的弹性模量(kN/m<sup>2</sup>); ↵

$A$ --支撑构件的截面积(m<sup>2</sup>); ↵

$L$ --支撑的计算长度(m); ↵

$S$ --支撑的水平间距(m)。 ↵

## 支护结构内力计算

$$K_H = k_H bh \quad K_V = k_V bh$$

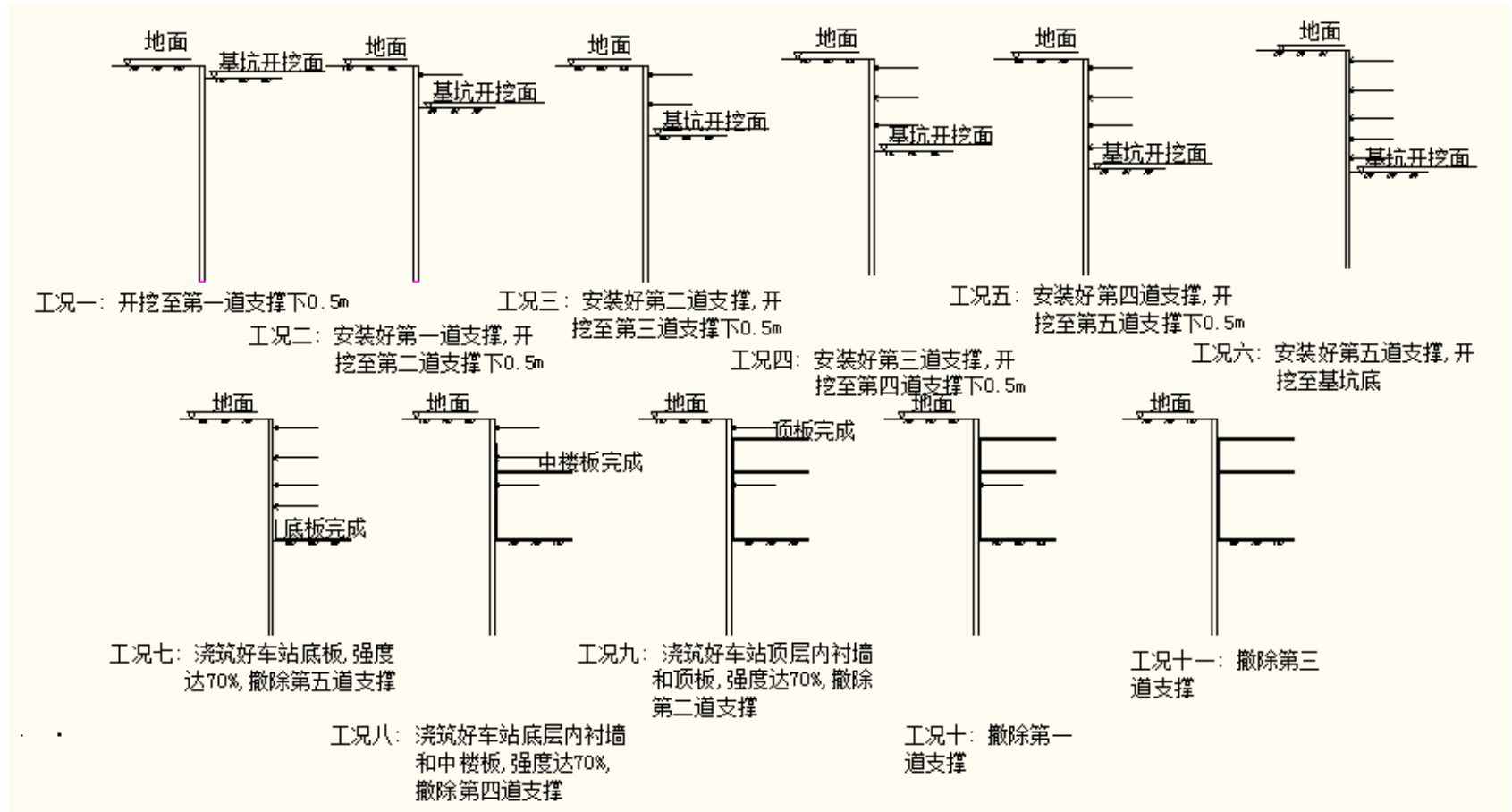
$k_H$ 、 $k_V$ ——分别为地基土的水平向和垂直向基床系数 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )，开挖面以下一定深度内的水平向基床系数取为三角形分布，三角形分布区内的水平向基床系数  $k_H = mz$ ； $m$  为水平向基床系数沿深度增大的比例系数； $z$  为影响深度，一般取开挖面以下 3~5m，坑底地基土软弱或受扰动较大时取大值，反之取小值；  
 $b$ 、 $h$ ——分别为弹簧的水平向和垂直向计算间距。

### ➤ 计算时注意：

- 考虑到土体的分层、水平支撑的存在等实际情况，需沿着竖向将弹性地基梁划分为若干单元；
- 应根据基坑开挖、支撑施加顺序等进行支护结构的变形和内力计算

支护结构内力计算

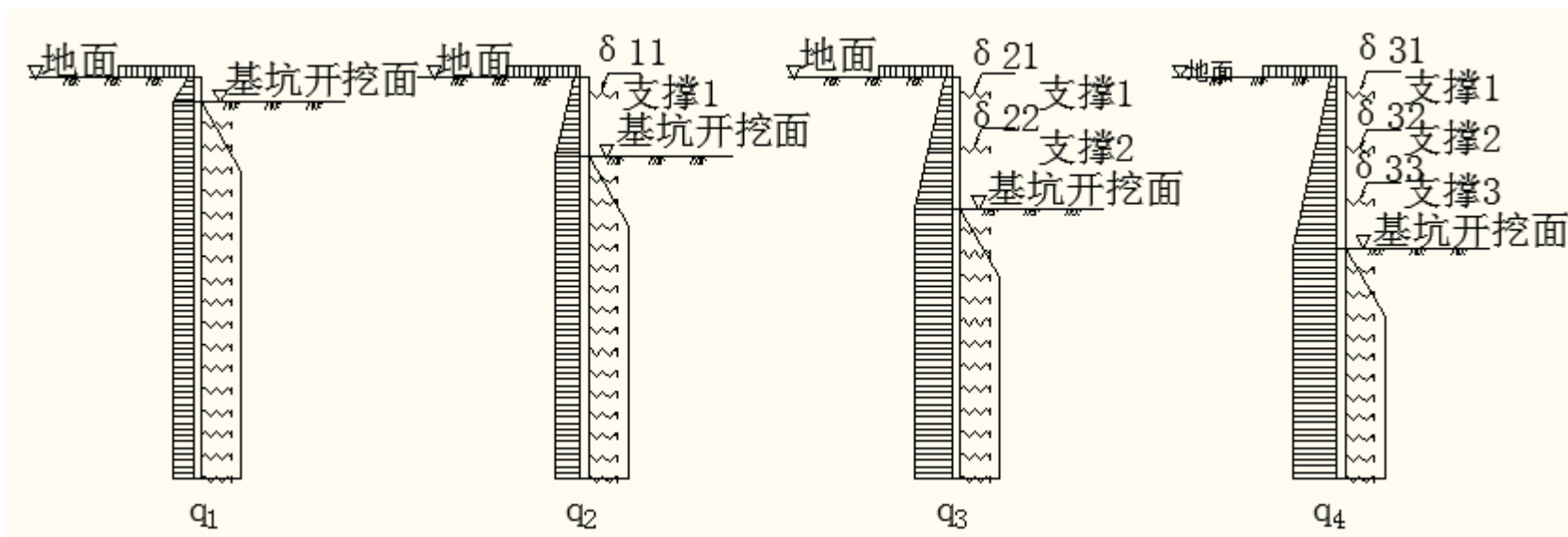
➤ 某明挖法车站围护结构计算工况简图





## 支护结构内力计算

- 为考虑施工过程中墙体受力和变形的继承性，一般采用**荷载总量法**或**增量法**计算
- 总量法计算图示
  - **总量法**，是指对每一个施工工况，相应的主动侧压力**全部**作用于围护结构上，在支撑处加入设置支撑前该点已产生的围护结构水平位移，求得的内力和位移，即为该工况的实际内力和位移值。



(a)--第一步开挖

(b)--第二步开挖

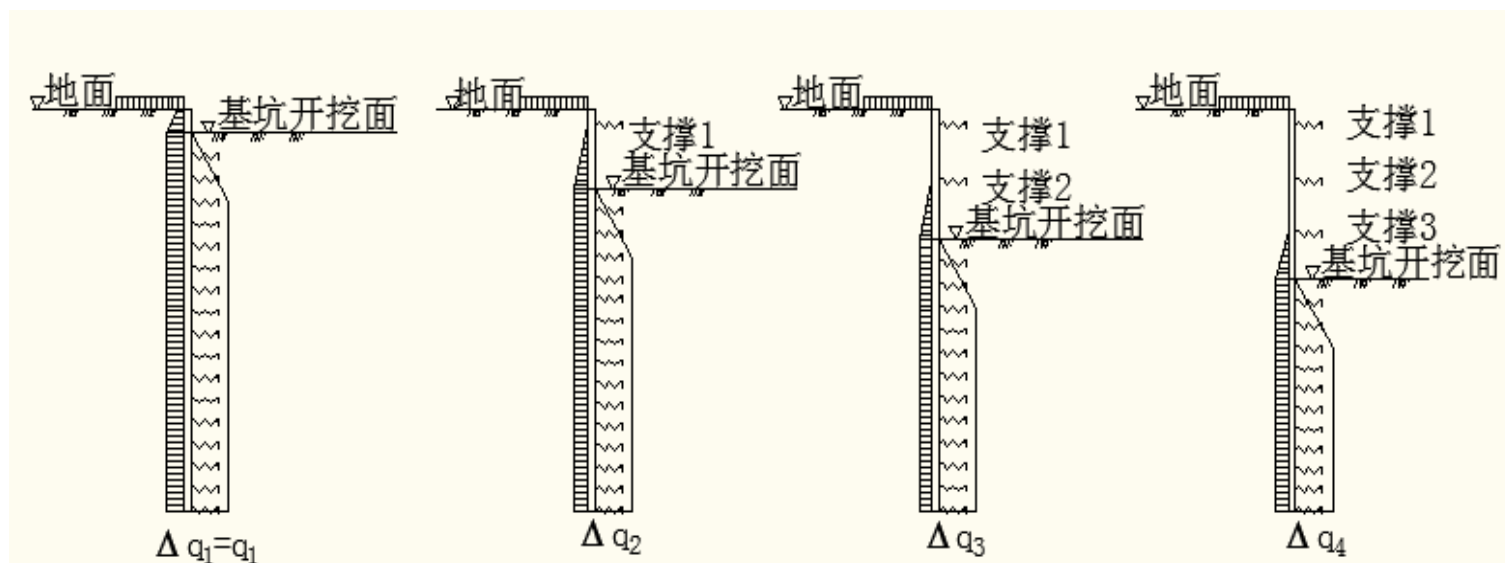
(c)--第三步开挖

(d)--第四步开挖

## 支护结构内力计算

### ➤ 增量法计算图示

- **增量法**，是将整个施工过程分成若干工况，将前后两个工况的荷载改变值，称为荷载增量。由荷载增量引起的位移和内力，称为位移增量和内力增量，累计从开始到当前施工阶段各工况的位移增量和内力增量，则可得到当前工况的实际位移和实际内力。



(a)--第一步开挖

(b)--第二步开挖

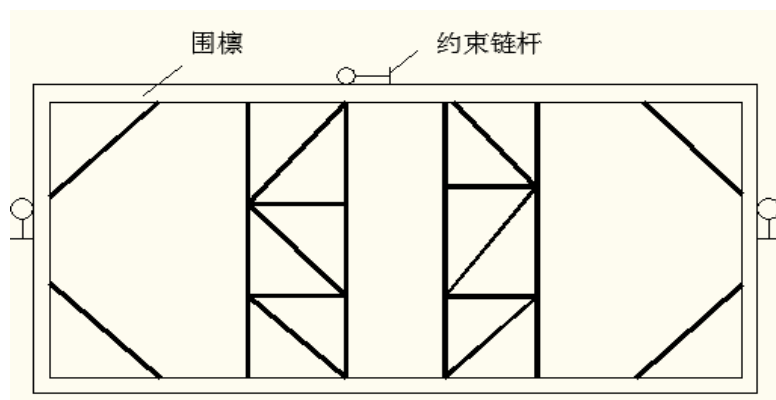
(c)--第三步开挖

(d)--第四步开挖

## 支护结构内力计算

### ➤ 水平支撑体系内力计算

- 对于交叉交叉对撑的钢筋混凝土支撑或钢支撑，内支撑主要受轴力作用，其轴力即为弹性地基梁计算得到的内支撑点处的弹性支座反力。
- 对于较复杂杆系结构的水平支撑系统，可将弹性地基梁计算得到的内支撑点处的弹性支座反力作用于由水平支撑构件和围檩组成的水平支撑系统上，采用空间杆系模型即可计算得到水平支撑体系的变形和构件内力。



水平支撑系统内力计算示意图

- 计算时需添加适当的约束，一般可考虑在结构上施加不交于一点的三个约束链杆。

## 支护结构内力计算

### ➤ 钢立柱内力计算

- 钢立柱可能破坏形式有强度破坏、整体失稳和局部失稳破坏等。
- 基坑施工阶段，应根据每一施工工况对立柱进行承载力和稳定性验算。
- 一般截面形式的钢立柱可按照轴心受压构件进行设计计算；
- 在两道支撑之间的立柱计算跨度可取为上一道支撑杆件中心至下一道支撑杆件中心的距离，最底层一跨立柱计算跨度可取为上一道支撑杆件中心至立柱桩顶标高。
- 立柱桩的设计计算方法与主体结构工程桩相同，可按照国家标准或工程所在地区的地方标准进行。
- 立柱桩以桩与土的摩阻力和桩的端阻力来承受上部荷载，在基坑施工阶段承受钢立柱传递下来的支撑结构自重荷载与施工超载。





## 五、基坑变形与计算

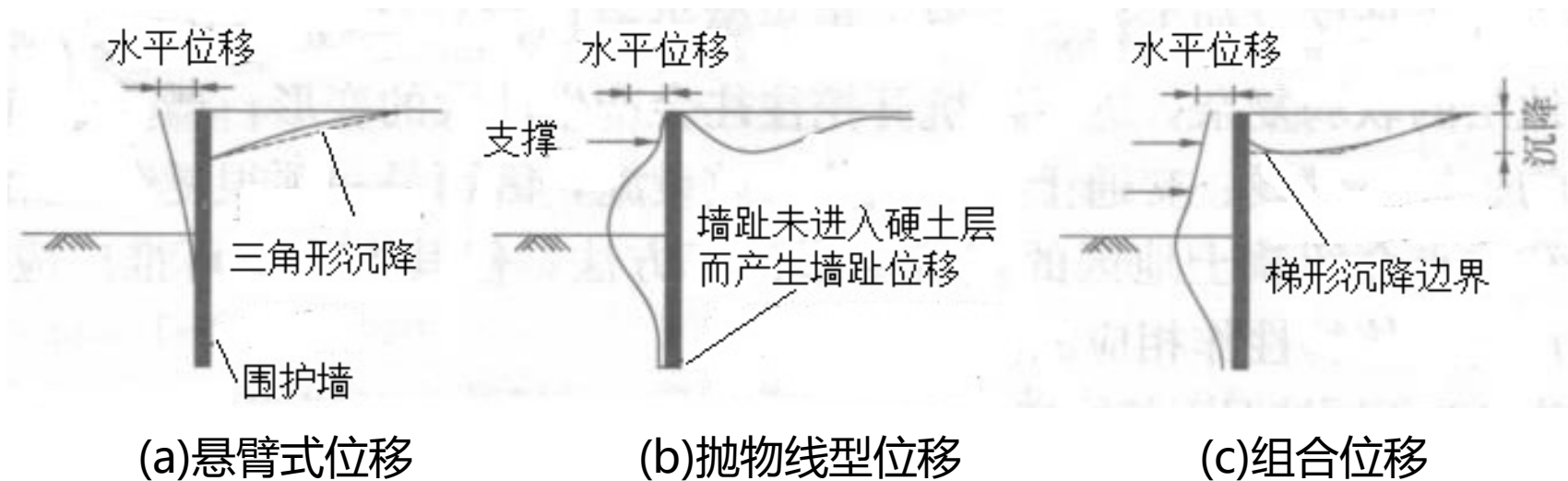


## 基坑变形计算

- 基坑变形一般指围护墙体变形、坑底隆起变形以及地表沉降等；估算方法可分为理论、经验算法和数值计算方法。

- 围护墙体水平变形

- 围护结构变形形态



## 基坑变形计算

### ➤ 围护墙体水平变形

- 当基坑开挖较浅，还未设支撑时，表现为墙顶位移最大，向基坑方向水平位移，成悬臂式位移分布；
- 随着开挖深度的增加，刚性墙体继续表现为向基坑内的三角形水平位移或平行刚体位移，而一般柔性墙如果设支撑，则表现为墙顶位移不变或逐渐向基坑外位移，墙体腹部向基坑内突出，即抛物线型位移；
- 理论上有多道内支撑体系的基坑，墙体变形为第三类，其围护体的最大变形位置一般都位于开挖面附近。
- 对于墙址进入硬化或风化岩层的围护结构，围护结构底部基本没有位移；
- 而对于墙址位于软土中的围护结构，当插入深度较小时，墙址出现较大变形，呈现出“踢脚”状态，从而影响整个围护结构的变形及稳定。

## 基坑变形计算

### ➤ 围护墙体竖向变形

- 由于基坑开挖土体**自重应力**的释放，致使墙体有所上升，而支撑、楼板的重量施加又会使墙体下沉，特别是当围护墙底下因**清孔不净有沉渣**时，围护墙在开挖过程中会出现较大的下沉。
- 围护结构上升或下沉导致的围护结构本身、与立柱之间的差异下沉会产生较大的危害，如冠梁拉裂、楼板或梁系出现裂缝等，设计和施工时应引起足够的重视。

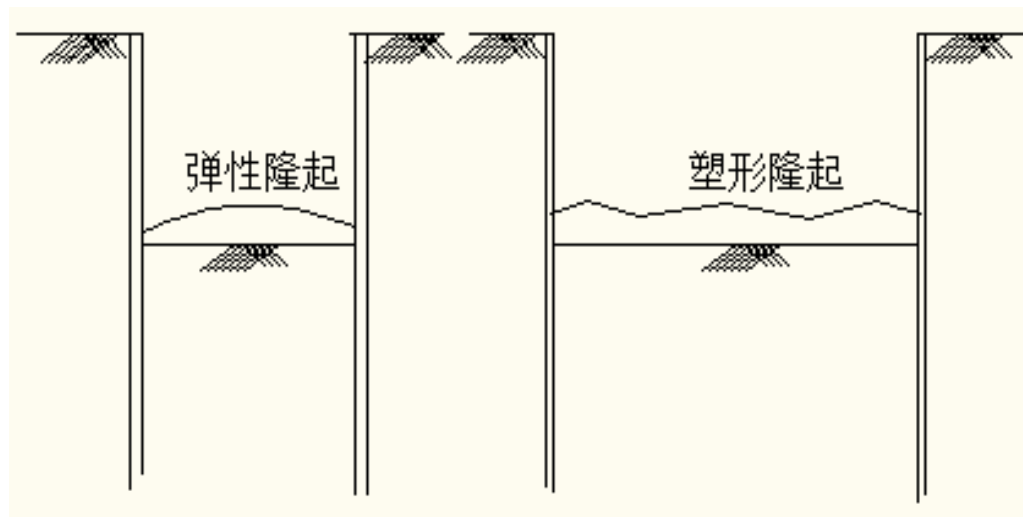


## 基坑变形计算

### ➤ 坑底隆起变形

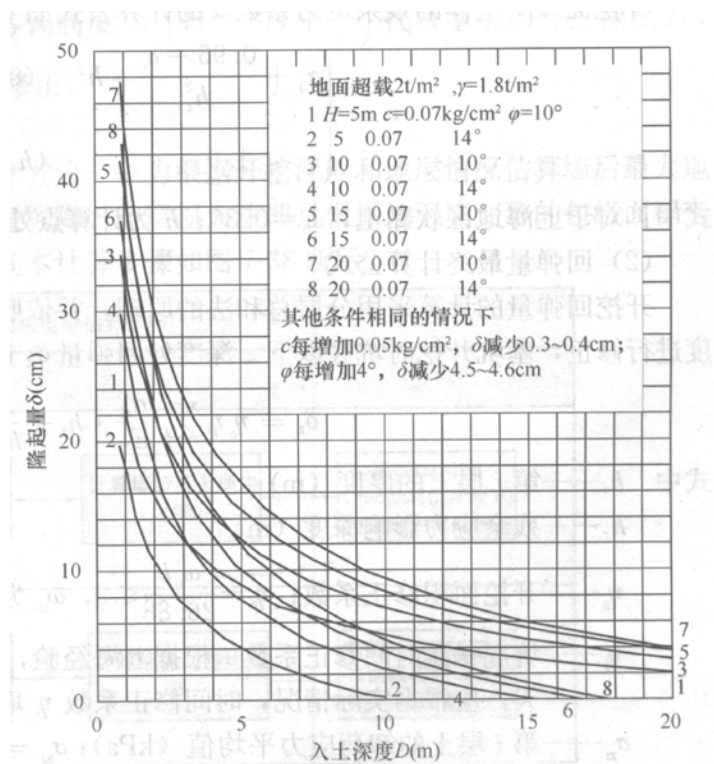
- 由于开挖卸载引起的；
- 变形过大会影响到底板的施作质量及立柱变形等；
- 一般而言，可分为中间大两边小或两边大中间小两种型态

- 中间大两边小的隆起型态一般出现在开挖**深度不大**、坑底为弹性隆起的状态；
- 当开挖达到**一定深度**且**基坑较宽**时，出现**塑性隆起**，隆起量也逐渐由中部最大转变为两边大中间小的形式，但对于**较窄**的基坑或**长条形**基坑，仍是中间大两边小的分布。



## 基坑变形计算

### ➤ 坑底隆起量计算



$$\delta = -29.17 - 0.167\gamma H' + 12.5 \left( \frac{D}{H} \right)^{-0.5} + 5.3\gamma c^{-0.04} (tg \phi)^{-0.54}$$

$$\delta - \text{基底隆起量}(cm) \quad H' = H + \frac{p}{\gamma}$$

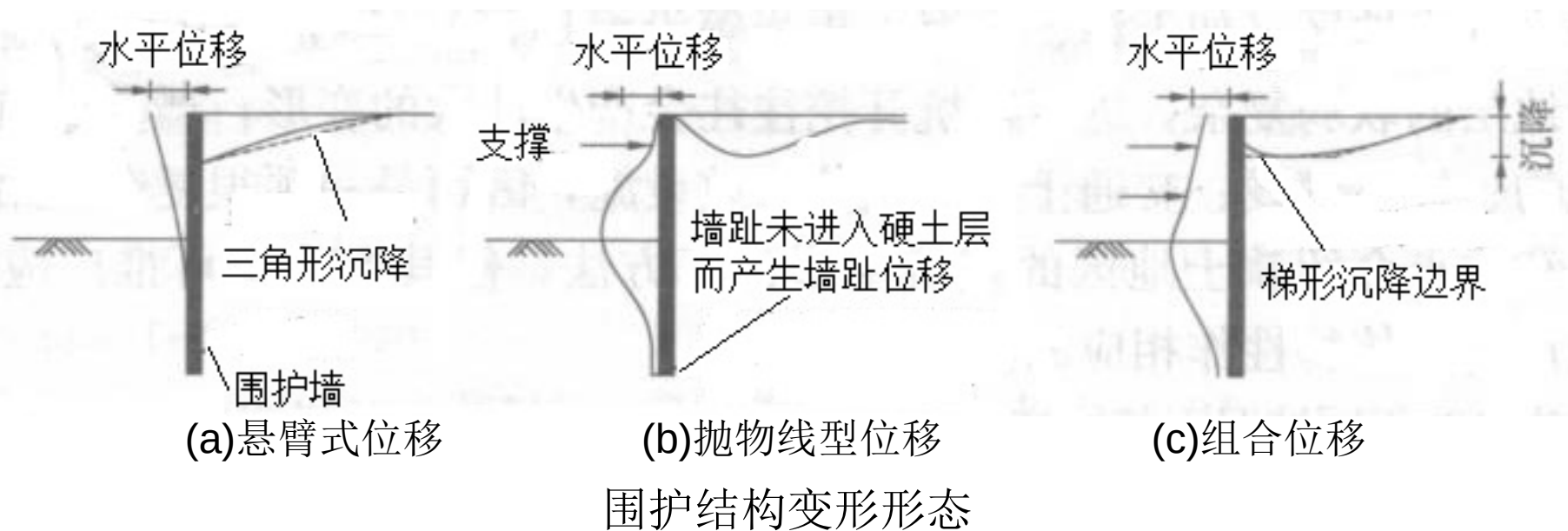
$p$  - 地面超载

$c$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$  - 土的粘聚力( $kg / m^2$ )、内摩擦角(度)、重度( $t / m^3$ )

$D$  - 墙体入土深度(m)

## 基坑变形计算

### ➤ 地表变形



- 地表范围的大小取决于地层的性质、开挖深度、墙体入土深度、下卧软弱土层深度、开挖支撑施工方法等。

## 基坑变形计算

### ➤ 地层损失法：

- 根据围护结构变形的包络面积来推算墙后的地表变形。
- 认为地表沉降面积与墙体的侧移面积相等
- 墙后变形为三角形：

$$\delta_{V_{\max}} = \frac{2S_w}{x_0}$$

$$S_w = \sum_{i=1}^n \delta_i \Delta H$$

$$x_0 = H_g \tan(45^\circ - \varphi/2)$$

$S_w$ --计算挠曲线与初始轴线之间的面积

$\delta_i$ --i段的挠曲线与初始轴线之位移差

$\Delta H$ --i段的长度

$H_g$ --围护墙的高度

$\varphi$ --墙体穿越土层的平均内摩擦角





---

# 思考题

---







---

# QUESTION AND DISCUSSION

---



「 谢 谢 ! 」

