

第 27 章 其他形式的支护技术

27.1 桩锚与土钉、复合土钉联合支护技术

27.1.1 概述

1. 桩锚与土钉、复合土钉联合支护的概念、作用机理与适用范围

桩锚支护技术与土钉、复合土钉支护均为独立的支护技术。工程实践中，为实现技术、经济与环境安全间的目标控制，常需要通过两种或多种支护技术方法的联合应用。

桩锚与其他支护技术的常用联合形式有（如图 27-1）：

- （1）浅部（上部）土钉深部（下部）桩锚支护；
- （2）浅部（上部）复合土钉深部（下部）桩锚支护；
- （3）桩锚与土钉复合支护；

本节讨论内容不包括基坑支护土体为土岩结合，采用上部桩锚、底部土钉支护的情况（图 27-1（d））。

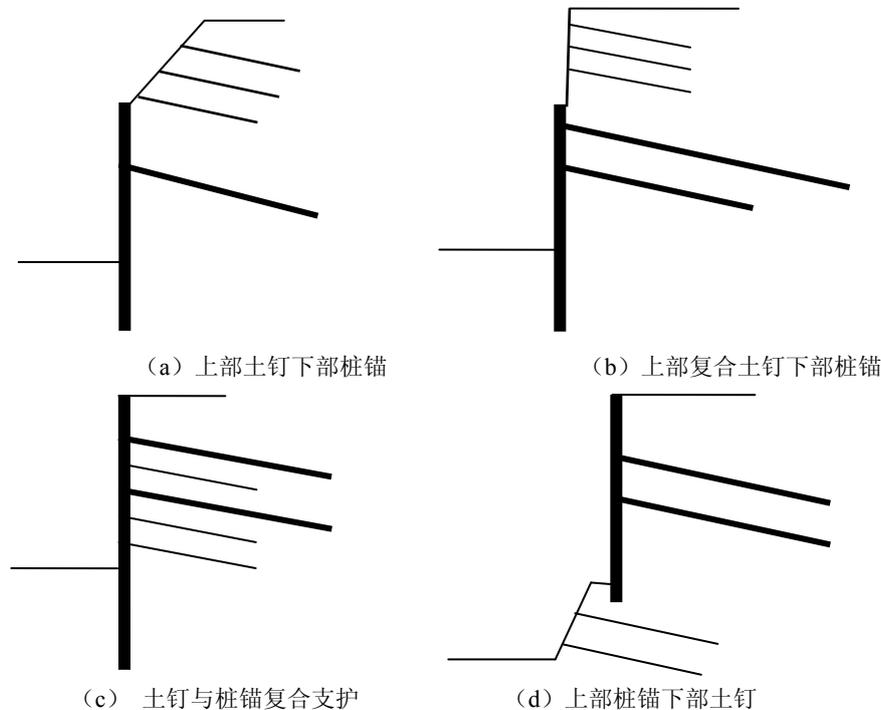


图 27-1 联合支护形式

桩锚支护体系通过施加预应力，使支护结构依靠自身的结构刚度和强度承受土压力，限制坑外土体的变形，从而保持基坑安全稳定，属于主动支护结构；土钉支护通过提高土体的强度，使支护材料与土体形成共同作用体，从而达到支护的目的。土钉抗力的发挥要依赖土体的侧移，伴随基坑侧壁的侧移，土钉逐步发挥相应的抗力，从这个意义上说，土钉属于被动支护结构构件。

图 27-1（c）中，桩锚复合土钉支护结构往往是以一种支护结构为主，另一种支护形式作为辅助手段形式存在的，一般可分为两大类：土钉加桩锚的联合支护结构和桩锚加土钉的联合支护结构。

土钉加桩锚的联合支护结构是以土钉为主要支护结构，以桩锚支护为辅，桩锚的作用

一般是对某些特殊部位进行强度控制，以满足工程的特定要求；桩锚加土钉的联合支护结构是以桩锚结构为控制体系，土钉支护体系为辅助结构，土钉对桩间土体起加强作用，以增强支护土体的整体性，减少作用于桩锚结构上的土压力，满足设计支护要求。

桩锚与土钉、复合土钉联合支护适用于采用土钉、锚杆支护适用的各种土层。

2. 破坏机理及设计方法

(1) 破坏机理

桩锚联合土钉支护结构的破坏基本是以桩锚支护结构的破坏为标志，即若桩锚支护结构失效，则桩锚复合土钉支护结构将发生破坏。

桩锚复合土钉设计中考虑了土钉的加强作用，计算土压力可进行一定的折减，支护桩的嵌固深度会较小。当土钉置于锚杆与桩底之间时，由于土钉的加固和锚固作用，支护桩上的弯矩分布相对较均匀，复合支护的作用比较明显，桩身断裂的现象基本不会发生。

由于桩锚支护结构的存在，容易产生于纯土钉支护结构中的内部稳定性破坏问题基本不会发生^[1]。

(2) 设计方法

1) 土钉或复合土钉支护深度确定

根据现场平面尺寸、地下水位、浅层土体岩性、埋深、承载力、土钉施工的可操作性、变形控制要求等，确定土钉支护深度，当要求对上部支护变形控制要求严格时，应采用复合土钉。

2) 桩体嵌入深度的确定

依据一般经验，选择基坑底下一定深度、具较好承载力的土层作为桩端持力层，初步确定桩的插入深度。

3) 依经验初步选择桩径、桩间距、锚杆位置

4) 土钉或复合土钉的设计计算

5) 桩锚支护体系内力计算与变形计算

当变形计算不满足要求时，应调整桩插入深度、锚杆预加力、桩径等参数重新计算，直到满足变形要求为止。其中，上部土钉的变形应根据地方工程经验选取并可控。

6) 各种形式的稳定性验算

桩锚联合土钉与复合土钉的稳定性验算与一般情况相同，桩锚复合土钉稳定性验算要点如下。

如图 27-2 所示稳定性验算，可将土钉与桩锚复合支护结构看做由土钉加固的一个整体，假定其为具有水平支撑力的“重力式挡墙”，进行整体稳定性分析；应根据施工期间不同开挖深度及基坑底面以下可能滑动面采用圆弧滑动简单条分法进行整体稳定性验算；将土钉与桩锚支护结构看做一个整体，假定其为具有水平支撑力的“重力式挡墙”，进行外部稳定性分析。

其中：抗滑移验算，取墙背摩擦角 $\delta = 0$ 。抗滑移安全系数 K_s 应满足：

$$K_s = \frac{\mu G + T_1}{E_a} \geq 1.3 \quad (27-1)$$

式中 G ——联合支护结构挡土墙自重； μ ——土对挡土墙基底的摩擦系数；

抗倾覆验算，有

$$K_t = \frac{0.5GB + T_1 h_{T1}}{E_a h_a} \geq 1.5 \quad (27-2)$$

式中 B ——挡土墙的计算宽度； h_{T1} ——锚杆预应力距倾覆点的垂直距离；

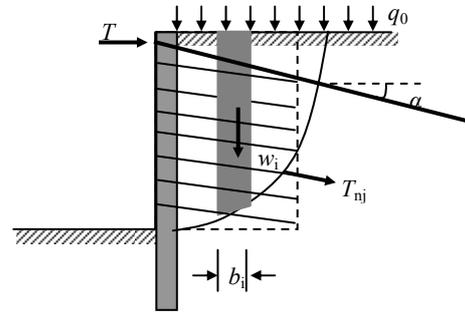


图 27-2 内部稳定性验算计算示意图

h_a ——主动土压力距离倾覆点的垂直距离。

注意，当上部土钉或复合土钉支护高度大于下部桩锚支护、或桩锚复合支护高度时，上部土钉或复合土钉仍可看作作用在桩锚顶面的均布荷载，但应考虑由上部土钉或复合土钉支护体“基底”水平作用力，对桩锚支护体倾覆与滑移稳定性的作用效应。

27.1.2 上部土钉（复合土钉）下部桩锚支护

1. 桩锚与土钉的竖向联合形式

实际工程中依据环境条件，桩锚与土钉竖向联合支护主要包括以下 2 种基本形式：

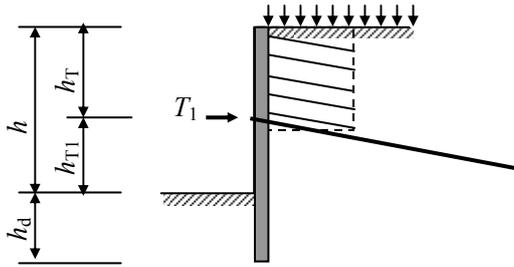


图 27-3 桩锚与土钉联合支护结构形式之一

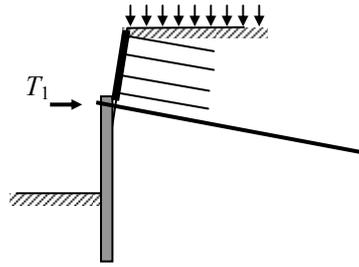


图 27-4 桩锚与土钉联合支护结构形式之二

2. 上部土钉（复合土钉）下部桩锚支护结构的土压力计算模型的比较

图 27-6 为联合支护结构常用设计模型，为了计算方便有时也可采用将桩锚以上土钉或复合土钉体折算成竖向荷载作用在桩锚支护结构顶面（如图 27-5）的模型。该模型忽略了土钉支护结构底面的水平荷载作用，可能使计算结果产生一定的差异。

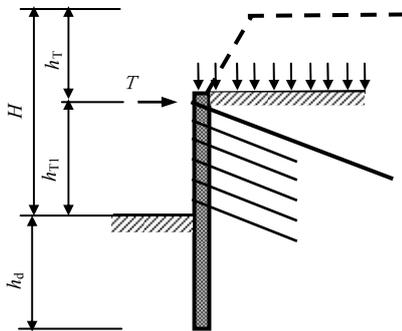


图 27-5 联合支护结构等效作用计算简图

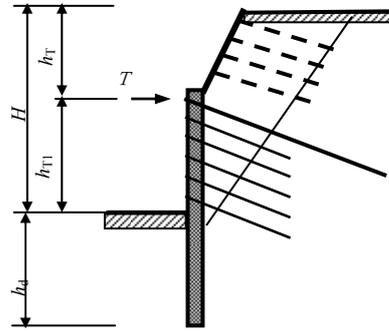


图 27-6 联合支护结构计算简图

以下是两种模型计算方法的计算结果和安全度差异的比较算例。

(1) 某工程地质条件见表 27-1。

某工程地质条件

表 27-1

层号	土类名称	层厚 (m)	重度 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (度)	与锚固体摩擦阻力 (kPa)
1	杂填土	1.94	19.0	10.00	10.00	25.0
2	粉土	4.89	19.8	19.00	33.00	40.0
3	粘性土	1.00	19.8	23.00	15.00	55.0
4	粉土	4.15	19.9	18.00	23.50	65.0
5	粉土	5.13	19.5	22.00	23.50	65.0

6	粉土	2.22	20.0	18.00	22.20	65.0
7	细砂	11.25	20.5	1.00	37.10	80.0
8	粘性土	5.09	16.6	25.00	20.00	65.0

(2) 计算方法的选取

1) 不考虑上部土钉对整体稳定性影响, 采用规范排桩计算方法

① 内力及位移计算

计算结果见图 27-7, 图 27-8。

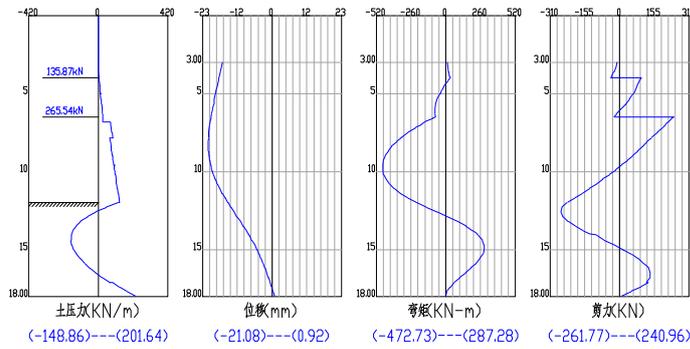


图 27-7 工况计算结果

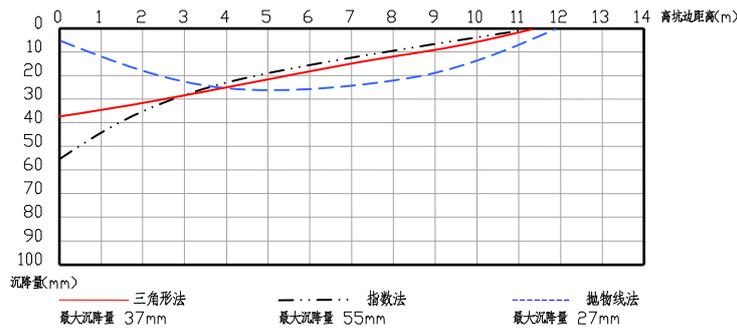


图 27-8 地表沉降计算结果

② 截面计算结果见表 27-2, 锚杆计算结果见表 27-3, 其他计算结果见表 27-6。

截面计算结果

表 27-2

选筋类型	级别	钢筋	实配[计算]面积(mm ²)
纵筋	HRB335	18Φ20	5655[5495]
箍筋	HPB235	Φ10@150	1047[941]
加强箍筋	HRB335	Φ14@2000	154

锚杆计算结果

表 27-3

支锚道号	支锚类型	钢绞线配筋	自由段长度实用值(m)	锚固段长度实用值(m)	实配[计算]面积(mm ²)	锚杆刚度(MN/m)
1	锚索	2Φ11.1	7.0	10.0	148.4[144.1]	3.76
2	锚索	3Φ12.7	6.0	15.0	296.1[281.7]	8.29

2) 上部土钉墙简化为均布荷载, 按规范排桩支护进行计算。

① 内力与位移计算

计算结果见图 27-9, 27-10。

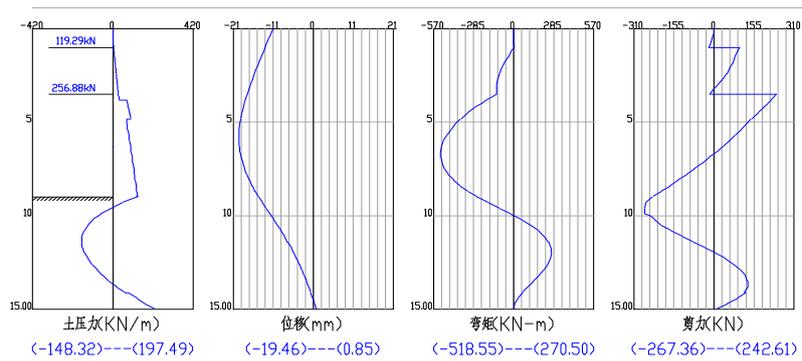


图 27-9 工况计算结果

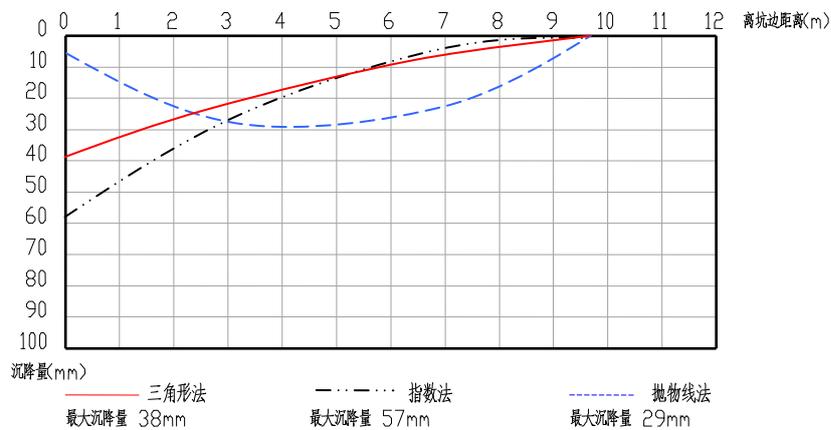


图 27-10 地表沉降计算结果

② 截面计算结果见表 27-4，锚杆计算结果见表 27-5，其他计算结果见表 27-6。

截面计算结果

表 27-4

选筋类型	级别	钢筋	实配[计算]面积(mm ²)
纵筋	HRB335	20Φ20	6283[6098]
箍筋	HPB235	Φ10@150	1047[941]
加强箍筋	HRB335	Φ14@2000	154

锚杆计算结果

表 27-5

支锚道号	支锚类型	钢绞线配筋	自由段长度实用值(m)	锚固段长度实用值(m)	实配[计算]面积(mm ²)	锚杆刚度(MN/m)
1	锚索	1Φ15.2	7.0	9.0	140.0[126.5]	3.56
2	锚索	2Φ15.2	6.0	14.5	280.0[272.5]	7.89

③ 计算结果比较

二种方法计算结果列表比较（见表 27-6）。

计算结果比较

表 27-6

序号	桩身弯矩(KNm)	桩体截面主筋配筋面积(mm ²)	整体稳定系数	抗倾覆系数	地表沉降(mm)	锚杆配筋(mm ²)	
						1	2

1 规程排桩 计算方法	472.73	5495	1.624	1.705	27	144.1	271.7
2 均布荷载 计算方法	518.55	6098	1.604	1.614	29	126.5	272.5

依据计算结果，上部土钉墙简化为均布荷载计算方法的整体稳定系数及抗倾覆安全系数相对较小，桩体弯矩配筋较大，第一排锚杆配筋较小，最大水平位移略小、最大地面沉降略大。可见忽略水平力的作用对联合支护计算结果的影响。

3. 工程实例

(1) 工程概况及周边的环境条件

郑州国贸中心总建筑面积约 50 万 m²，地下室建筑面积 60532.46m²。工程位于郑州市农业路以南、丰产路以北、花园路以西，南邻丰产路，北邻农业路，东邻花园路，西邻省计生委和核工业勘察院生活区。场地外东南角为中国人寿保险公司 5~7 层家属楼及 18 层办公大楼，西北角为 4~5 层住宅楼，基坑周边共有 18 栋建筑、三个城市主干道包围，环境条件十分复杂。

(2) 基坑工程的地质、水文特点

工程场地土层以粉土、粉质粘土和细砂为主，属不均匀地基。降水影响范围内的粉土、粉质粘土的综合渗透系数为 0.5m/d，粉细砂层的渗透系数为 6.0m/d。坑深范围内粉质粘土及粉土属郑州地区典型软土，灵敏度较高。

地下水位约为自然地面下 1.80~3.60m，地下水位年变化幅度为 2.0~3.0m，按降水至坑底以下 1.0m 计算，本基坑工程深 10.0~12.4m，实际降水深度为 10m 左右。降水深度范围内土质为粉质粘土与粉土交互层，降水十分困难。

(3) 工程设计参数

根据本工程基坑场地工程地质条件，基坑支护设计所需参数按表 27-7 取值：

基坑边坡设计所用各层土的设计参数

表 27-7

土层序号	岩性	天然重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 C_{UU} (kPa)	内摩擦角 φ_{UU} (°)
②	粉土	19.8	19	22
③	粉质粘土	19.8	23	17.9
④	粉土	19.9	18	22.3
⑤	粉质粘土与粉土层	19.5	22	23.5
⑥	粉土	20	18	22.2
⑦	细砂	20.5	30	37.1

(4) 基坑支护结构与降水方案设计选型

1) 基坑支护结构方案选择

本基坑支护方案主要采用上部土钉下部桩锚支护方案，部分采用了复合桩墙锚支护方案（将在以后的章节中介绍），设计基坑深度 12m，上部土钉支护深度 3m，下部桩锚支护 9m，支护桩长 15m，两排锚杆，具体布置形式如 27-14 所示。

2) 基坑降水方案选择

降水采用管井降水，井深 25m，间距 18~25m。

(5) 基坑工程设计计算

本基坑工程的计算包括：基坑的土压力计算、上部土钉计算、下部桩锚计算、深层搅拌水泥土桩墙抗渗计算、坑底抗隆起的验算、渗流稳定性验算等。

- 1) 上部土钉计算（限于篇幅略）
 - 2) 下部桩锚计算
 - ① 桩锚内力与变形计算
- 结果见表27-8及表27-9

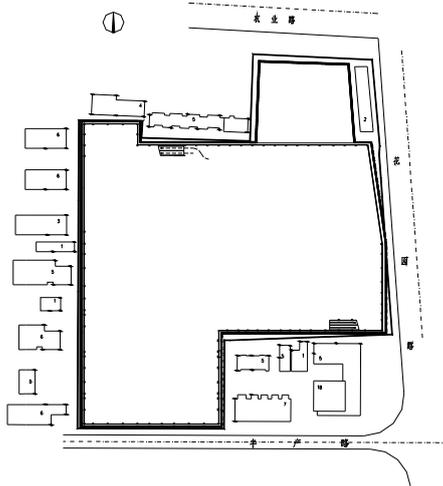


图 27-11 基坑总平面图

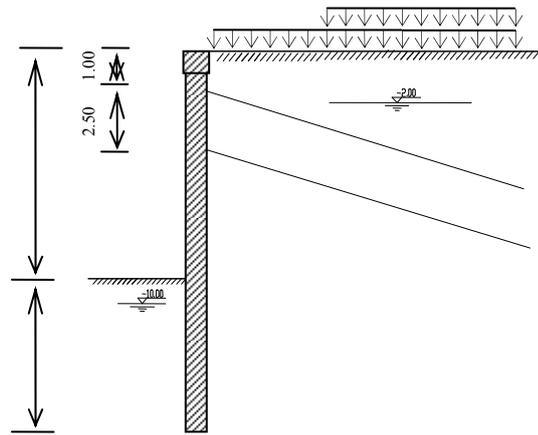


图 27-12 锚杆计算简图

锚杆计算内力值

表 27-8

支锚道号	锚杆最大内力 (弹性法) (kN)	锚杆最大内力 (经典法) (kN)	锚杆内力设计值 (kN)	锚杆内力实用值 (kN)
1	210.93	64.83	290.03	290.03
2	386.93	313.65	532.03	532.03

锚杆计算结果

表 27-9

支锚道号	支锚类型	钢筋或 钢绞线配筋	自由段长度 实用值(m)	锚固段长度 实用值(m)	实配[计算] 面积(mm ²)	锚杆刚度 (MN/m)
1	锚索	2Φ15.2	7.0	14.5	280.0[246.1]	6.83
2	锚索	4Φ15.2	6.0	23.5	560.0[451.5]	13.82

② 结构计算

a 内力

分别采用弹性法、经典法计算结果见表27-10

b 水平位移、地表沉降

最大水平位移19.58mm、地表最大沉降29mm。

截面内力计算

表 27-10

段号	内力类型	弹性法计算值	经典法计算值	内力设计值	内力实用值
1	基坑内侧最大弯矩(kN.m)	591.99	456.25	691.88	691.88
	基坑外侧最大弯矩(kN.m)	264.56	579.33	309.20	309.20
	最大剪力(kN)	328.16	295.49	451.22	451.22

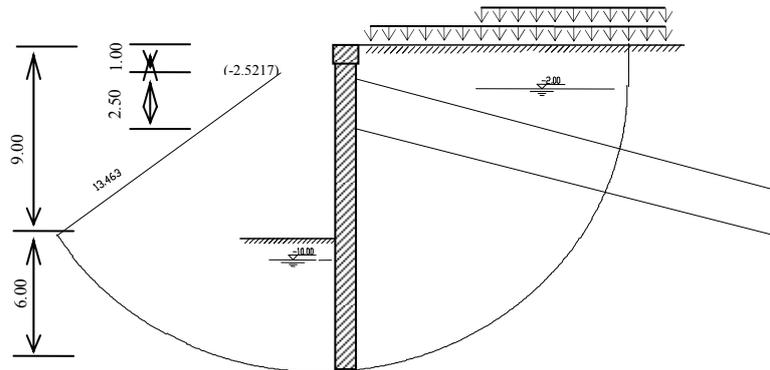
截面配筋计算

表 27-11

段号	选筋类型	级别	钢筋实配值	实配[计算]面积 (mm ² 或mm ² /m)
1	纵筋	HRB335	21Φ22	7983[7890]
	箍筋	HPB235	Φ12@150	1508[1163]
加强箍筋		HRB335	Φ14@2000	154

③ 整体稳定验算

图 27-13 整体稳定性验算简图



计算方法：瑞典条分法；条分法中的土条宽度0.50m，圆弧半径 $R = 13.463(\text{m})$ ，圆心坐标 $X = -2.521(\text{m})$ ，圆心坐标 $Y = 7.047(\text{m})$ 。由于上部土体简化为荷载，可能使计算结果偏于应力状态；总应力法。

整体稳定安全系数 $K_s = 1.489$

④ 抗倾覆稳定性验算

$$K_s = \frac{M_p}{M_a} \quad (27-3)$$

M_p ——被动土压力及支点力对桩底的弯矩，对于内支撑支点力由内支撑抗压力决定；
对于锚杆或锚索，支点力为锚杆或锚索的锚固力和抗拉力的较小值。

M_a ——主动土压力对桩底的弯矩；

最小安全 $K_s = 1.913 > 1.300$

⑤ 抗隆起验算

采用 Prandtl (普朗德) ($K_s \geq 1.1 \sim 1.2$) 方法 (参见第5章)

$$K_s = 11.130 > 1.1$$

采用Terzaghi (太沙基) ($K_s \geq 1.15 \sim 1.25$) 方法 (参见第5章)

$$K_s = 13.863 > 1.15$$

隆起量的计算 (如果为负值, 按0处理):

$$\delta = -\frac{875}{3} - \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i + q \right) + 125 \left(\frac{D}{H} \right)^{-0.5} + 6.37 \gamma c^{-0.04} (\tan \phi)^{-0.54} \quad (27-4)$$

式中 δ ——基坑底面向上位移 (mm);

n ——从基坑顶面到基坑底面处的土层层数;

γ_i ——第*i*层土的重度 (kN/m^3); 地下水位以下取土的饱和重度 (kN/m^3);

h_i ——第*i*层土的厚度 (m);

q ——基坑顶面的地面超载 (kPa);

D ——桩 (墙) 的嵌入长度 (m);

H ——基坑的开挖深度 (m);

c ——桩 (墙) 底面处土层的粘聚力 (kPa);

ϕ ——桩 (墙) 底面处土层的内摩擦角 (度);

γ ——桩 (墙) 顶面到底处各土层的加权平均重度 (kN/m^3)。

计算结果: $\delta = 1 \text{ mm}$

⑥ 抗管涌验算

$$1.5 \gamma_0 h' \gamma_w \leq (h' + 2D) \gamma' \quad (27-5)$$

$$K = 2.768 \geq 1.5$$

⑦ 承压水验算 (参见第五章)

$$K_y = \frac{P_{cz}}{P_{wy}} \quad (27-6)$$

式中 P_{cz} ——基坑开挖面以下至承压水层顶板间覆盖土的自重压力 (kN/m^2);

P_{wy} ——承压水层的水头压力 (kN/m^2);

K_y ——抗承压水头的稳定性安全系数, 取1.05。

$$K_y = 39.00/30.00 = 1.29$$

(6) 主要实测结果

1) 基坑工程于2006年8月开始至2007年8月结束, 从基坑开挖到回填土施工进行了全过程监测, 经实际监测, 各监测点水平位移最大值22.4mm, 详见图27-20。

2) 周围建筑物沉降最大值为19.55mm, 道路未发现裂缝, 满足变形控制要求。

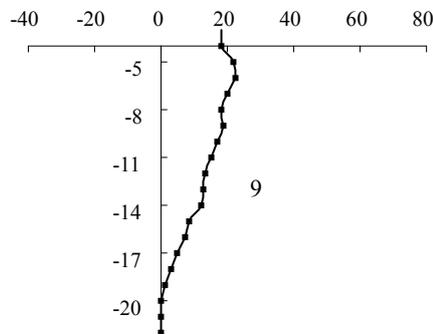


图 27-14 基坑支护水平位移实测结果

27.1.3 桩锚与土钉复合支护

1. 主要支护形式

在桩锚与土钉混合支护结构中，土钉部分使得土体得到加固和补强，相应的侧壁土压力减小，桩体嵌固深度较小，锚杆预应力水平降低；桩体较大的强度和刚度，使土钉支护结构内部稳定性和整体稳定性更易于满足要求，另由于桩锚支护结构施工早，强度的预先形成，可显著降低基坑变形提高土钉的施工速度，缩短工期。

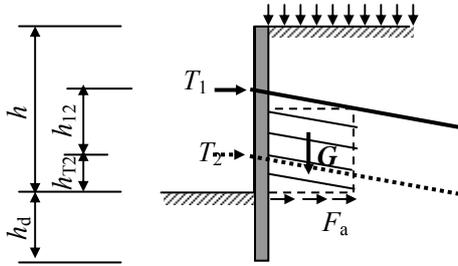


图 27-15 桩锚与土钉联合支护结构形式之三

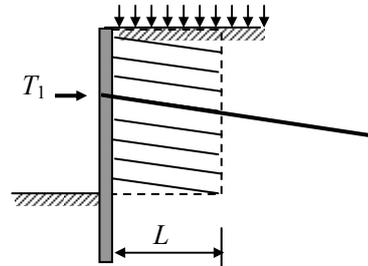


图 27-16 桩锚与土钉联合支护结构形式之四

2. 计算模式

(1) 桩锚+主动区土体加固

如图 27-17，以桩锚为主要支护，辅以土钉支护。

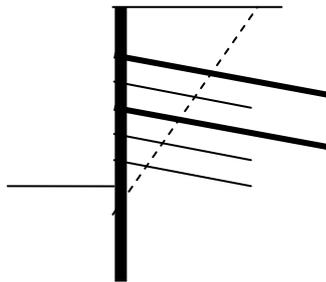


图 27-17 “桩锚+主动区土体加固”计算模式

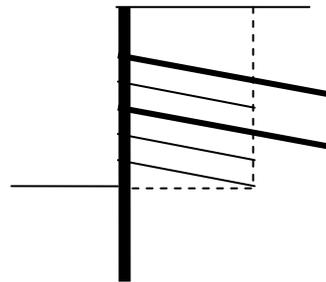


图 27-18 “复合土钉+锚杆”计算模式

(2) 复合土钉+锚杆

如图 27-18，以复合土钉为主要支护，辅以锚杆支护。

3. 桩锚与土钉复合支护的传力机制^[2]

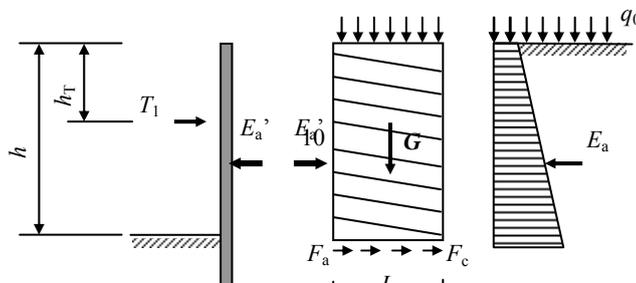


图 27-19 桩锚与土钉复合支护结构的隔离体图

假定土钉支护部分在土压力作用下，土钉长度范围内不会首先出现内部稳定性破坏。则联合支护结构中的土钉支护部分可视为土压力传至桩锚结构中间单元，土钉部分隔离体的受力如图 27-20 所示。

由 $\sum x = 0$ 可得：

$$E_a' = E_a - \psi F_a - F_c \quad (27-7)$$

式中 E_a 、 E_a' ——土压力等效集中力和作用于桩锚支护结构上的土压力合力；

F_a ——土钉支护结构底部的水平摩擦力合力；

ψ ——土钉底部水平摩擦力发挥系数；

F_c ——坑底土体粘聚力提供的水平抗剪力。

若出现内部稳定性破坏，则对由土钉承担的土压力考虑按比例进行折减，如图 27-26 所示。此时由土钉水平摩阻力极限值为：

$$F_a' = \frac{l_1}{l_2} F_a \quad (27-8)$$

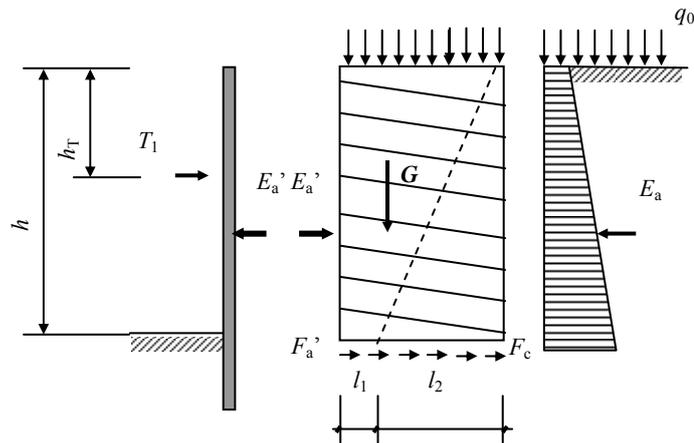


图 27-20 复合支护结构的内部稳定性破坏

与直线破裂面相交的土钉所提供的水平方向锚固力合力为：

$$R_a' = \sum_i R_i' \cos \theta_i \quad (27-9)$$

式中 R_i' ——与直线破裂面相交的第 i 个土钉所提供的极限抗拉力；

θ_i ——与直线破裂面相交的第 i 个土钉与水平面的夹角。

此时作用于桩锚支护结构上的土压力合力则表达为：

$$E_a' = E_a - (\psi F_a' + R_a' - F_c') \quad (27-10)$$

4. 基于协同工作的联合支护结构的设计计算

桩锚与土钉复合支护结构中锚杆和土钉作用力的发挥是依赖于基坑侧壁变形的，因此，研究桩锚与土钉联合支护结构中桩锚与土钉的受力变形状态就必须考虑二者的协调变形和承载力的逐渐发挥，按协同工作原理进行设计计算^[3]。

图 27-21 所示为深基坑工程中常用的一种联合支护形式：上部放坡区部分的土钉，主要保证上部土体的稳定性；下部与桩锚支护结构配合使用的土钉对基坑稳定发挥相当一部分作用，它们与桩锚结构共同工作、协调变形，共同抵抗基坑侧壁的土压力。将上部放坡区土钉加固部分的土体视为超载，对选定的联合支护结构作适当简化，如图 27-21 中实线部分所示。

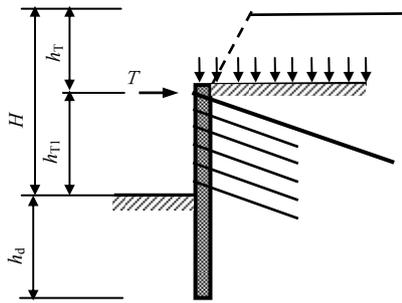


图 27-21 联合支护结构等效作用简图

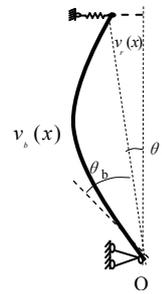


图 27-22 桩锚支护结构位移分解示意图

只讨论基坑开挖到底部时的情况。计算模型采用锚杆位置为弹性支点，支护桩土压力零点位置为另一支点的弹性简支结构，土钉作用简化为弹性力。桩锚支护结构在土压力作用下，侧移曲线 $v(x)$ 由两部分组成：刚体位移 $v_r(x)$ 和弯曲位移 $v_b(x)$ ，即 $v(x) = v_r(x) + v_b(x)$ ，如图 27-22 所示。

桩锚支护结构承担土压力时的弯矩与侧移的微分关系为：

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (27-11)$$

积分得到支护桩的弯曲变形曲线方程为：

$$v_b(x) = -\frac{1}{EI} \left[\int \left(\int M(x) dx \right) dx + Cx + D \right] \quad (27-12)$$

将各位置土钉集中力对支护桩变形的影响进行叠加，即可得到支护体系总变形。根据支护结构变形与受力的关系，计算锚杆和土钉的受力，通过对锚杆和土钉的承载能力进行对比分析，计算出土压力分担系数 ψ ，再根据计算出的 ψ 对相似工程进行设计。

5. 工程实例^[4]

(1) 工程概况

郑州某工程地下 3 层、地上部分为 33 层的双子塔楼和 3 层商业用房。基坑工程南北长为 145m，东西宽为 45m，深度为自然地坪以下 12.9m，如图 27-23 所示。

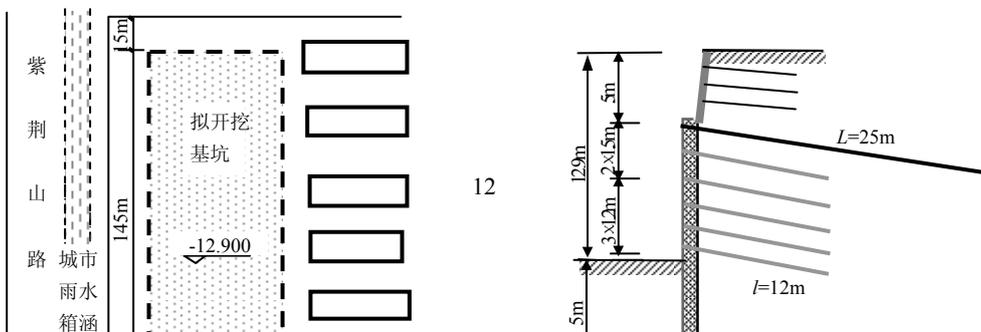


图 27-23 基坑平面示意图

图 27-24 支护结构剖面示意图

建筑周围环境包括：基坑东侧为居民家属院，沿基坑共有 5 栋 6 层住宅楼，均为 70~80 年代建筑，建筑外墙距基坑围护结构最近点 5m；西侧距基坑 13m 为郑州市主干道紫荆山路，城市雨水箱涵和污水管道等地理系统复杂，埋深均在 2~5m 范围内；北侧为城市次干道，距离基坑边沿 15m，南侧为城市加油站，距离基坑 18m。地下水位稳定在自然地面以下 5.5~6.5m。

实际工程中采用单支点桩锚与土钉联合支护结构，如图 27-24 所示。排桩直径为 0.8m，间距为 1.5m，桩长 12.4m，纵筋配置为 10Φ20，箍筋为 Φ8@200；预应力锚杆位于自然地面下 5.5m 处，同排间距为： $s=1.5m$ ，预应力锚杆承载力设计值为 250kN，张拉值 $T_{c1}=165kN$ ，采用 53×3.5 无缝钢管施加预应力，总长度为 $L=25m$ ；土钉支护结构采用同排间距为 1.5m，竖向排距为 1.2~1.5m，土钉采用 48×3.0 无缝钢管，长度为 12m，自自然地面下 7m 开始共设置 5 排土钉。

(2) 两种不同计算方式计算结果的比较

1) 工程地质条件（见表 27-12）

工程地质条件

表 27-12

序号	土层类型	土层厚度 (m)	容重 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (度)	钉土摩阻力 (kPa)
1	填土	1.5	17.5	10.0	15.0	50.0
2	粉土	3.9	18.7	22.0	25.0	80.0
3	粉土	4.1	18.0	22.0	25.0	80.0
4	粉土	5.3	18.5	22.0	25.0	100.0
5	粉砂	6.4	18.8	5.0	35.0	100.0
6	粉砂	15	19.0	5.0	35.0	100.0

2) 计算方法的选取

① 将锚杆以下的土钉视为非预应力锚杆，按规范排桩支护方法进行计算

a 内力与位移计算

计算结果最大弯矩 367.83KNm，最大位移计算结果为 12mm。

b 锚杆验算

锚杆验算结果

表 27-13

支锚道号	支锚类型	锚杆刚度 (MN/m)	自由段长度 实用值 (m)	锚固段长度 实用值 (m)	实配[计算] 面积 (mm ²)	钢筋配筋
------	------	-------------	---------------	---------------	------------------------------	------

1	锚杆	17.77	7.0	18.0	804[164]	1Φ32
2	锚杆	23.15	6.0	6.0	804[301]	1Φ32
3	锚杆	23.15	6.0	6.0	804[439]	1Φ32
4	锚杆	23.15	6.0	6.0	804[559]	1Φ32
5	锚杆	23.15	6.0	6.0	804[745]	1Φ32

c 整体稳定性验算

整体稳定安全系数 $K_s = 1.467$

d 抗倾覆验算

抗倾覆安全系数 $K_s = 1.962 > 1.300$

② 考虑排桩超前支护按复合土钉墙计算方法进行验算

a 计算模型 (如图 27-33 所示)

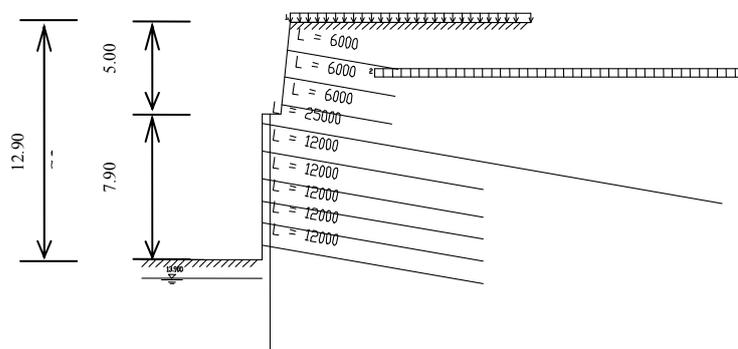


图 27-25 计算简图

b 局部抗拉验算

局部抗拉验算结果

表 27-14

开挖深度 (m)	破裂角 (度)	土钉号	土钉长度 (m)	受拉荷载标准值 T_{jk} (kN)	抗拔承载力设计值 T_{uj} (kN)	抗拉承载力设计值 T_{uj} (kN)	抗拔安全系数	抗拉安全系数
12.9	56.9	1	6.000	5.2	18.7	60.3	2.633	8.500
		2	6.000	2.9	39.8	60.3	9.877	14.961
		3	6.000	17.5	61.0	60.3	2.528	2.502
		4	12.000	0.3	224.8	241.3	544.387	584.348
		5	12.000	66.4	266.7	241.3	2.921	2.642
		6	12.000	114.2	333.7	241.3	2.124	1.536
		7	12.000	132.7	370.5	241.3	2.030	1.322
		8	12.000	152.4	397.5	241.3	1.897	1.151
		9	12.000	151.2	424.6	241.3	2.042	1.160

c 内部稳定验算

内部稳定验算结果

表 27-15

工况号	安全系数	圆心坐标 x (m)	圆心坐标 y (m)	半径 (m)
9	1.377	-17.200	19.750	26.114
10	1.468	-18.096	20.153	27.085

d 外部稳定计算结果

抗滑安全系数：5.512 > 1.300

抗倾覆安全系数：15.784 > 1.600

3) 两种方法计算结果比较

安全系数计算结果比较

表 27-16

序号	计算模式	内部稳定	外部稳定	整体稳定	抗滑移	抗倾覆
1	简化为桩锚			1.467		1.962
2	简化为复合土钉墙	>1.3	>5.512		5.512	15.784

比较结果表明，将桩锚复合支护以锚杆以下的土钉做为非预应力锚杆按规范排桩支护方法进行计算结果偏于安全。计算中未考虑非预应力锚杆间距较小造成的“群锚效应”。

① 基坑施工监测结果

基坑施工过程中采用测斜仪、高精度水准仪、经纬仪、深层沉降仪等精密仪器对施工全过程进行监控，以验证设计方法的合理性和施工方案的可行性。

自基坑开挖施工至地下3层地下室出地面，共历时9个月，测得基坑施工过程中，附近地面最大沉降量为24.6mm，基坑最大水平侧移量为21mm，桩顶压梁水平侧移量为19mm，开挖至设计标高时坑底最大反弹位移量为7mm，符合规范对基坑变形控制的设计要求。

② 基于变形协调条件的反分析计算

采用前述变形协调的设计计算方法，锚杆位置为坐标零点，沿坑深向下为正，位移以向坑内侧为正，计算单元宽度取为1m，简化计算模型如图27-26所示。计算桩锚和土钉各自发挥的承载力以及土压力的分担比例。计算结果如下：

根据理论分析，并通过编制相应的程序计算，最后得到结果示于图27-27和表27-17。

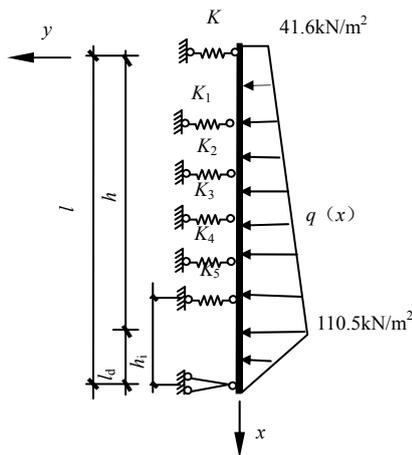


图 27-26 计算模型示意图

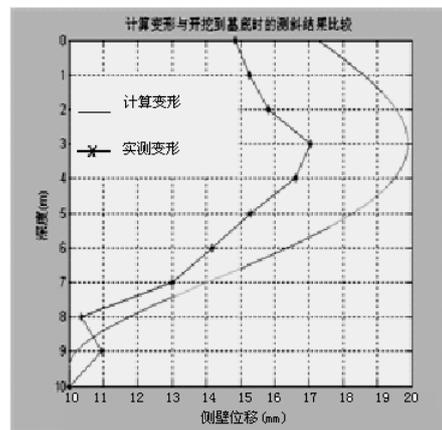


图 27-27 计算变形与实测变形

计算结果对比

表 27-17

	轴力 (kN)		弯矩 (kN·m)	
	理论计算	实测计算	理论计算	实测计算
锚杆	242.48	156.65	2304	992.1

土钉	146.3	85.36	809.2	324.3
总值	388.8	161.5	3106.5	1316.4
分配系数	0.376	0.353	0.258	0.246

由图 27-27 可以发现，依据桩锚与土钉变形协调工作原理计算所得的坑壁侧移与测斜实得曲线相比，在数值上偏大，这主要是未考虑桩墙侧阻所致，但二者相差不大，且变化规律基本一致，据此计算所得到的锚杆轴力和土钉轴力的发挥度对同类工程具有一定的参考价值。

27.2 复合桩墙支护技术

27.2.1 复合桩墙支护技术概况

库仑和朗肯土压力计算理论认为，作用在支护结构上的土压力产生的条件是土和水的重力，外有孔隙水压力、渗流力。因此减轻水土重度，或改变其传力路线是减小支护结构土压力的途径。此外，考虑墙后侧阻的楔形体滑块模型接近库仑理论。复合桩墙支护技术正是基于上述考虑而形成的。

复合桩墙是由水泥土桩墙止水帷幕（可加筋）与墙后 n 排竖向小桩、混凝土压顶板组成的基本支护结构，具有止水和支护双重技术效果。技术含义概括为：“加筋水泥土桩墙+注浆小桩加筋土+压顶混凝土板”。

复合桩墙支护技术适用于粉土、粉质粘土、粉砂土层，支护深度（软土地区）小于 10m 的基坑工程。当与锚杆形成复合支护时，支护深度可超过 10m。

1. 复合桩墙支护结构基本形式

(1) “减重”作用形式

小桩通过摩阻力将墙后土体重量部分传递至稳定土体，起到所谓“减重”作用。该形式的支护深度一般小于 6~8m。

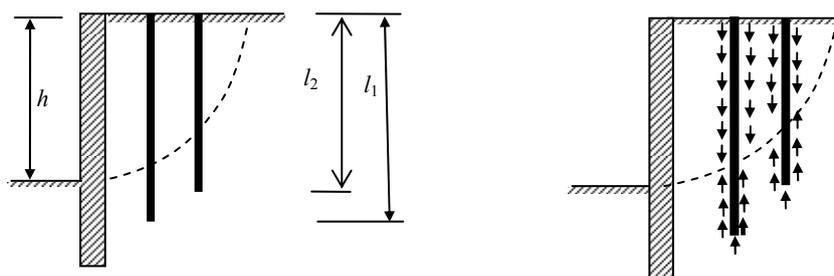


图 27-28 复合桩墙“减重”作用形式

(2) 整体作用形式

前墙与小桩间粘结效果强，可形成共同工作截面。该形式的支护深度一般小于 8~10m。

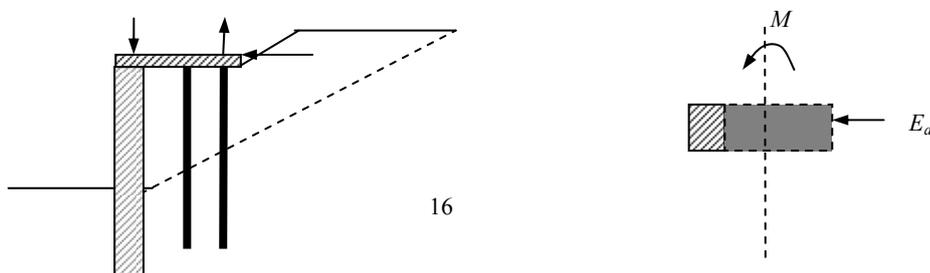


图 27-29 复合桩墙整体作用形式

当基坑支护深度较大，或需要对基坑变形及周围环境变形进行严格限制时，可对桩墙顶部采用预应力斜锚、桩墙中部采用预应力锚杆等方法。

2. 理论计算模型

(1) 考虑墙后侧阻和小桩的减重作用，采用“桩”“墙”分算模式。

该模式同时考虑小桩的竖向减重作用、前墙水泥土桩墙后的抗剪作用，大大降低了作用在前墙上的土压力。

(2) 将复合桩墙作为一个整体，按连续支挡结构设计。

(3) 当按整体断面进行连续墙设计时，小桩与桩间土的黏结强度须满足整体工作效果。

27.2.2 复合桩墙支护的设计

1. 考虑小桩减重作用和水泥土桩墙墙后侧阻的支护结构设计

(1) 设计方法

1) 考虑小桩承载力及桩后侧阻的土压力计算

小桩在滑裂面下的抗压承载力，影响土压力。

2) 前墙内力计算与承载力设计

内力计算时宜考虑小桩在前墙顶，通过压顶板传递的水平作用力，并考虑小桩在滑裂面下的抗拔承载力。

3) 抗倾覆验算

同样需考虑小桩在滑裂面下的抗拔承载力。

4) 水平滑移验算、整体稳定验算、抗隆起验算、抗渗流验算

按现行规范中有关规定进行，对前墙宽大于 800mm 时，一般基坑可不作墙体抗渗验算。

5) 桩体强度及抗裂验算

顶部混凝土板可部分传递弯矩给前墙，与土压力引起的弯矩、降水产生水泥土桩墙两侧阻力不同形成的附加弯矩，多种因素的共同作用可能导致桩身水泥土开裂。应进行水泥土抗拉强度验算。

(2) 工程实例

1) 工程概况

上海绿地集团开发的郑州世纪峰会位于郑州市郑东新区 CBD 外环与第十大街的交叉口东南角，主楼高 120m，基坑深 10.0m，局部埋深 11.0m，土层参数见表 27-18，地下水位在自然地面以下 3m。

基坑工程支护设计结构为复合桩墙，桩墙前墙厚度 950mm，小桩直径 $d=150\text{mm}$ ，间距 $s_1=0.8\text{m}$ ， $s_2=1.2\text{m}$ ，混凝土连续板与前墙连接采用插筋方式。采用深井降水。

基坑开挖范围内各层土的参数

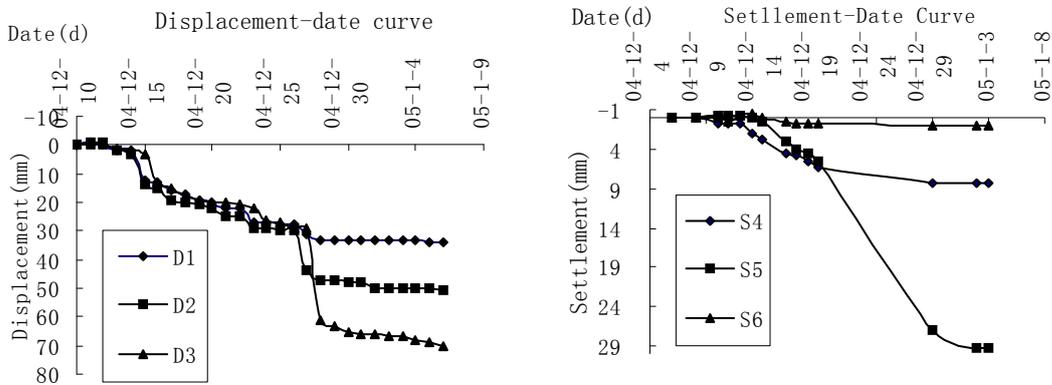
表 27-18

土层序号	2	3	4	5	s_1	6	7
------	---	---	---	---	-------	---	---

岩性	粉土	粉土	粉粘	粉土	粉粘	粉土	粘土
层厚 (m)	0.93	1.70	2.75	3.68	2.15	2.73	1.45
天然重度 γ (kN/m ³)	17.9	18.7	19.3	19.4	19.8	19.2	18.2
粘聚力 c (kPa)	15.0	15.2	14.4	13.4	14.0	15.6	14.6
内摩擦角 φ (°)	12.0	18.0	7.0	13.6	6.0	22.0	5.5
渗透系数 k (m/d)	-	0.2	0.003	0.5	0.007	0.03	0.0001

2) 监测结果

基坑开挖、降水在小桩施工完成 30 天后进行, 挖土历时 23 天, 基坑变形及地面沉降结果如下图 27-40、图 27-41 所示。与预测值相比, 除发生地表浸水事故的北侧外, 基坑水平位移最大值为 38mm, 地面沉降最大值为 10mm, 均小于预测值。



图

27-30 基坑水平位移变形

图 27-31 地面沉降监测典型曲线



图 27-32 上海绿地郑州世纪峰会基坑工程采用复合桩墙支护

施工期间, 因管理问题造成降水管路发生跑水事故, 形成北侧未作硬化处理地面大面积积水 8 小时, 北侧桩墙变形达 50mm, 墙体发生超过 3mm 的裂缝, 采用墙后卸载、设置墙顶土钉、被动区反压等措施, 稳定支护结构变形。整个基坑工程在下一步的施工中未发生危险, 满足了基础工程的施工要求。

2. 整体式复合桩墙支护的设计

(1) 设计方法

1) 土压力的计算

主动土压力采用库仑土压力理论进行计算，如图 27-33，根据滑块体的静力平衡条件，可求得：

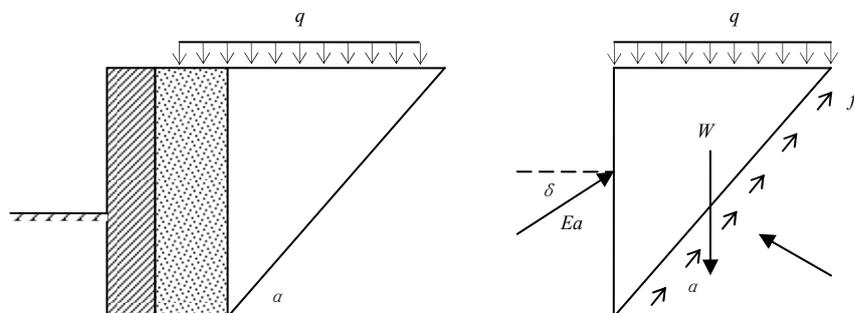


图 27-33 复合桩墙墙后主动土压力的计算图示

$$E_a = \frac{[W + qh \cot \alpha] \sin(\alpha - \varphi) - \frac{ch \cos \varphi}{\sin \alpha}}{\cos(\alpha - \delta - \varphi)} \quad (27-13)$$

其中：

$$W = \frac{1}{2} \gamma h^2 \cot \alpha \quad (27-14)$$

式中 W ——主动区滑块体的重量；

γ ——基坑开挖面以上土体的重度，非匀质土时，为其平均重度；

h ——基坑的开挖深度；

φ ——墙后土体的内摩擦角，非匀质土时，取各土层内摩擦角的层厚加权平均值；

c ——墙后土体的粘聚力，非匀质土时，取各土层粘聚力的层厚加权平均值；

δ ——墙后土与复合桩墙墙的外摩擦角；

可以编制计算程序，改变 α 的大小求得不同的 E_a 值，取最大值作为主动土压力合力值。分布力 e_a 可按线性分布假设推导出，即：

$$e_a = 2E_a / h \quad (27-15)$$

被动土压力采用朗肯土压力。

2) 截面强度验算

为保证整体工作性能，应进行截面强度验算。

① 抗弯

考虑到实际工程中，支护桩墙侧移较小，材料处于线弹性阶段，前墙和土体、小桩和土体间基本无相对错动，可将桩墙截面按不同材料的组合截面，采用材料力学公式按等效化原则进行计算。

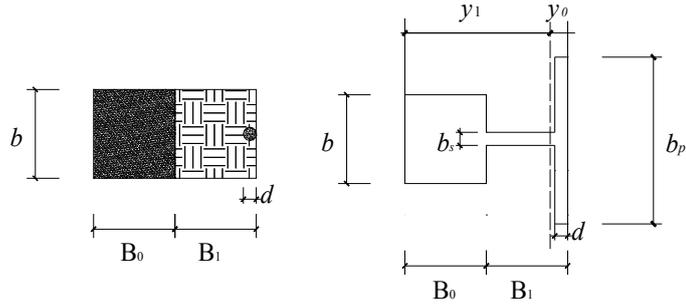


图 27-34 复合桩墙截面与等效截面示意

计算截面如图 27-44 所示，计算相当截面形心轴位置以及惯性矩 I_R 。

前墙在弯矩作用下产生的最大压应力：

$$\sigma_{cs} = \frac{My_1}{I_R} \quad (27-16)$$

小桩在弯矩作用下产生的拉应力：

$$\sigma_p = \frac{My_0}{I_R} \times \frac{E_p}{E_{cs}} \quad (27-17)$$

则桩身强度应满足：

$$1.25\gamma_0\bar{\gamma}z + \frac{My_1}{I_R} \leq f_{cs} \quad (27-18)$$

式中 $\bar{\gamma}$ ——复合桩墙的重度，可取为 20kN/m^3 ； z ——验算截面的深度；

小桩的锚固长度应满足：

$$\frac{My_0}{I_R} \times \frac{E_p}{E_{cs}} A_p \leq \pi dq_{sik} l_d \quad (27-19)$$

式中 l ——小桩的总长度； l_a ——验算截面以下小桩的剩余锚固长度。

② 抗剪强度

小桩的抗剪能力较弱，在复合桩墙抗剪强度验算中不予考虑，其承受的最大剪力应满足：

$$1.3\gamma_0 Q_{\max} \leq \tau_{cs} A_{cs} + \tau_s A_s \quad (27-20)$$

式中 τ_{cs} ——水泥土的抗剪强度设计值； A_{cs} ——水泥土前墙的正截面面积；

τ_s ——桩间土的抗剪强度； A_s ——桩间土截面面积；

3) 墙下地基土承载力验算

墙下地基土承载力不足时，前墙的沉降过大，将产生不利于安全的倾覆弯矩。应进行基底承载力验算。

$$\gamma_m(h+t) + \frac{E_a \sin \delta}{A} - \frac{E_p \sin \delta_p}{A} + \frac{2[E_a(h+t) - E_p t]}{B_0} \leq f_a + \eta_d \gamma_m(t-0.5) \quad (27-21)$$

式中 γ_m ——水泥土前墙底面以上土的加权平均重度，地下水位以下取浮重度；

t ——水泥土前墙埋深；

f_a ——地基承载力特征值；

η_d ——水泥土前墙埋深的地基承载力修正系数；

4) 抗滑移稳定性验算、抗倾覆稳定性验算、整体稳定性验算、抗隆起稳定性验算、抗渗流验算

可依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-99)等有关规范进行。

(2) 工程实例

1) 工程概况

某基坑工程南侧、西侧分别距道路红线 5.6m 和 6.0m；北侧一层地下车库同 10 号楼相临；12 号楼东侧距已有 7 层住宅 5.0m；二层地下车库南侧距该建筑物 6.9m。

基坑主要开挖深度为 7.3m~8.2m，实测稳定地下水位在地表下 5.4m 左右。

2) 围护结构设计

① 工程地质条件及设计参数（见表 27-19）

② 围护结构设计方案

与已有 7 层住宅临近的 12 号楼东侧和地下车库南侧支护方案采用“喷射搅拌水泥土桩墙+无砂混凝土小桩+预应力锚杆”联合支护方案；喷射搅拌水泥土桩墙厚 950mm，内插 H 型钢，桩底标高-15.300，有效桩长 13m；在水泥土墙外 0.8m 处设置无砂混凝土小桩一排，桩径 150mm，水平间距 1.2m，总长度 11.0m；在距水泥土桩内侧 1.2m 处施工一道预应力锚杆，倾角 70 度，水平间距 1.6m，单锚承载力设计值 600kN，锚筋采用 7 束 7 ϕ 4 的钢绞线，锚杆总长 24m。

基坑设计所用各层土的设计参数

表 27-19

土层编号	1	2	3	3 夹	6	7	8-1	8	9	10	11
土层类别	杂填土	粉土	粉质粘土	粉土	粉质粘土	粉土	粉土夹粉砂	粉砂	粉土	粉土夹粉砂	粉土
c (kPa)	—	16	19	16	16	18	10	3	17	13	18
φ (度)	—	20	15	20	15	16	20	25	21	23	20
天然重度 (kN/m ³)	—	19.06	18.97	19.37	18.99	19.44	19.24	19.20	19.36	19.13	19.26
极限侧阻力标准值 (kPa)	—	—	42	45	44	54	45	60	55	65	60
极限端阻力标准值 (kPa)	—	—	—	—	—	500	400	700	550	700	600
平均层厚 (m)	1.31	1.62	3.61	1.8	2.0	2.04	2.67	2.67	1.49	1.35	1.90

其它部分主要采用喷射搅拌水泥土桩墙+单排土钉+无砂混凝土小桩的联合支护方案，两排喷射搅拌水泥土桩墙厚 950mm，桩底标高-15.300，有效桩长 13m；在水泥土墙外 0.8m 处设置无砂混凝土小桩一排，桩径 150mm，水平间距 1.2m，长度 11.0m；从小桩顶位置施作一排土钉，水平间距 1.2m，长度 9.0m，土钉与小桩中钢管可靠焊接。

基坑支护结构剖面如图 27-35，平面布置如图 27-36 所示。

③ 围护设计计算

计算内容包括：基坑的土压力计算、联合支护结构整体稳定性计算、各构件承载力验算、坑底抗隆起验算、联合支护结构地基承载力验算等，计算结果满足规范要求（计算过程略）。

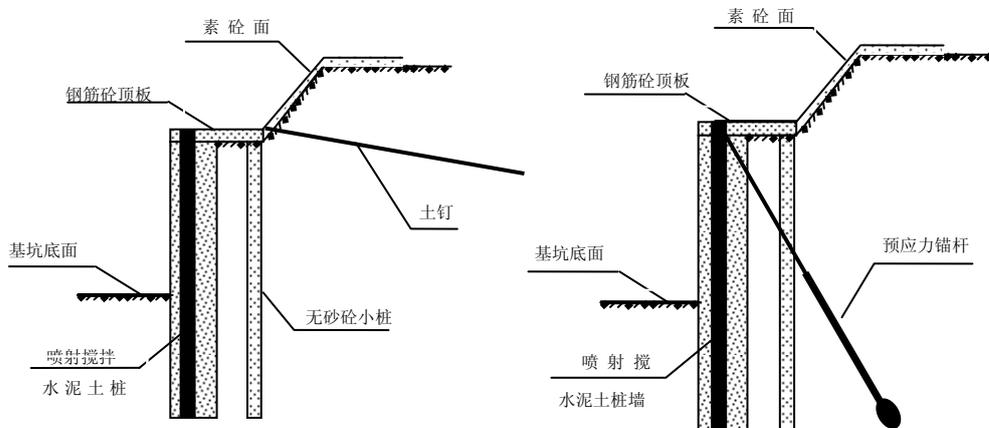


图 27-35 基坑剖面图

3) 变形监测

在基坑的周边布置了 14 个沉降观测点和 9 个测斜观测点，对基坑从降水到开挖再到地下室完工进行了全程变形监测，具体点位平面布置如图 27-37。实测结果如图 38~图 42。

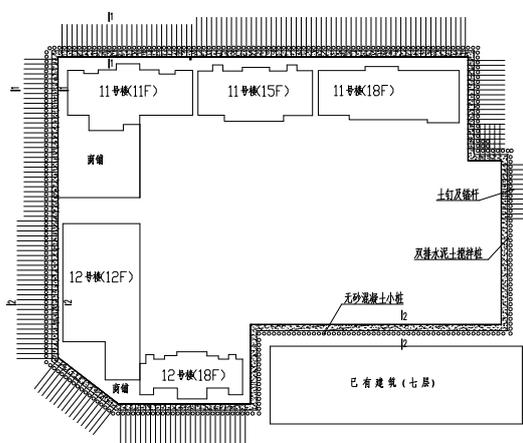


图 27-36 基坑支护平面布置图

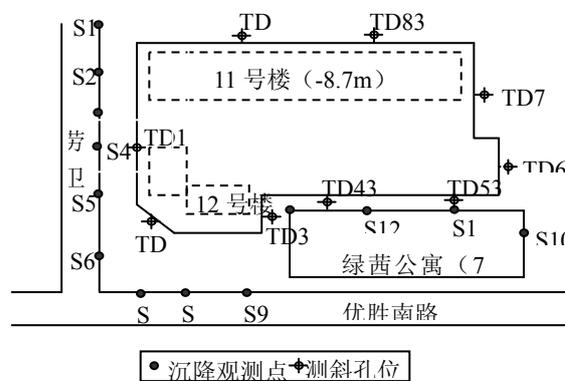


图 27-37 监测点位平面布置图

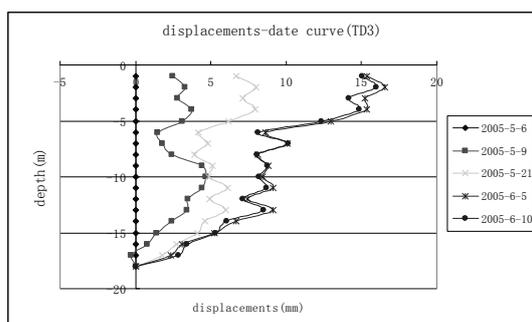


图 27-38 基坑南侧 TD3 侧移实测结果

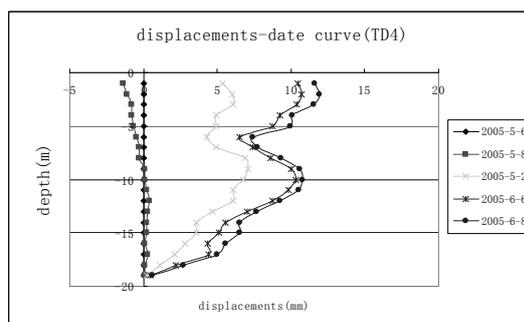


图 27-39 基坑南侧 TD4 侧移实测结果

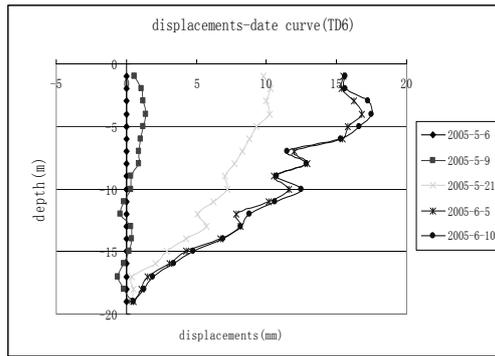


图 27-40 建筑物西侧 TD6 侧移实测结果

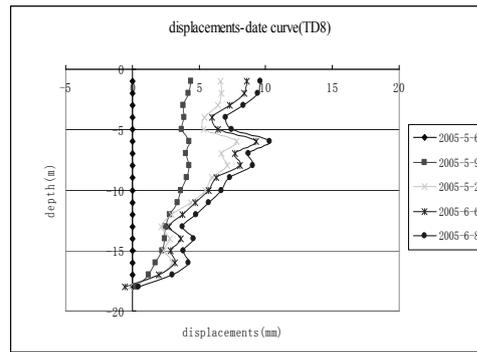


图 27-41 基坑支护北侧 TD8 侧移实测结果

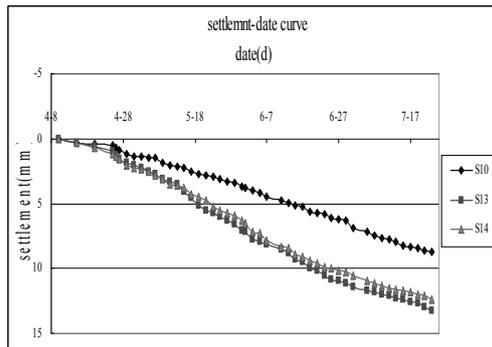


图 27-42 基坑支护南侧建筑物沉降实测结果



图 27-43 郑州天下城复合桩墙基坑工程

结果表明，施工前期，随开挖深度的增加，沉降逐渐增加，墙后建筑物最大沉降发生在 S13 号点，在垫层施工完之后，该点沉降仅有 8mm，后来由于底板施工速度减慢，沉降经过长期累计达 13mm。可以看出，整个施工过程中，未发生沉降突变情况；路面点沉降也比较均匀。

27.2.3 复合桩墙锚支护结构

1. 支护结构简介

由混凝土排桩与加筋水泥土桩墙通过桩顶混凝土板联系组成的复合桩墙，与连续板上部设置的斜锚、中部水平锚结合形成的支护结构。斜锚可按一定角度在桩顶设置，形成超前支护并在端部扩大，以适应红线限制条件下的支护设计，有利于控制支护结构变形，水平锚用于解决水平承载力不足和桩墙抗弯强度不足，并保证截面工作的整体性。该技术具有变形控制能力强、施工速度快的技术特点。

复合桩墙锚支护技术适用于软土地区支护深度较大、对变形要求严格、锚杆水平施工空间不足或锚杆施工对浅层土扰动较大、施工速度要求相对较快的基坑工程。

2. 工程实例

- (1) 工程概况及周边的环境条件（参见 27.1.2.4 内容）
- (2) 工程设计参数（见表 27-20）
- (3) 基坑支护方案选择

本基坑紧邻建筑物部分的支护方案采用上部土钉下部复合桩墙锚支护方案，下部桩墙采用钻孔灌注桩与喷射搅拌水泥土桩墙（水泥土强度 3.5MPa 内插 H 钢）复合方案，混凝土桩径 1m，设计间距 1.5m，桩顶斜锚 25m，水平锚 15m。典型剖面如图 27-44 示。桩顶

混凝土连续板厚 500mm，双层配筋与桩墙型钢及混凝土桩主筋可靠连接。

基坑设计所用各层土设计参数

表 27-20

土层序号	岩性	层厚 (m)	天然重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 c_{UU} (kPa)	内摩擦角 φ_{UU} (°)
①	杂填土	1.94	19.8	-	-
②	粉土	4.89	19.8	19	22
③	粉质粘土	1.00	19.8	23	17.9
④	粉土	4.15	19.9	18	22.3
⑤	粉质粘土	5.13	19.5	22	23.5
⑥	粉土	19.23	20	18	22.2
⑦	细砂	11.25	20.5	1	37.1

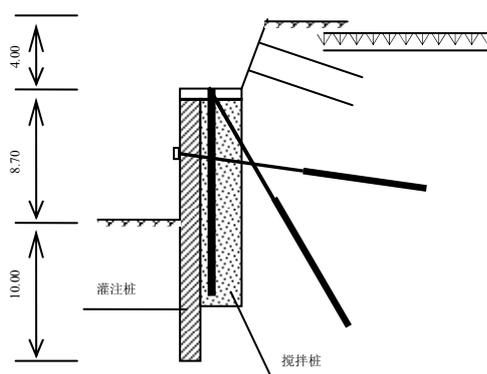


图 27-44 复合桩墙锚支护典型剖面

(4) 设计计算

内容包括：基坑的土压力计算、上部土钉计算、下部复合桩墙锚、整体稳定性验算、坑底抗隆起的验算、渗流稳定性验算等。

本工程计算中考虑深层喷射搅拌水泥土桩墙的支持作用，将上部加固过的土体看作下部斜锚的上部荷载，桩墙内力计算按组合截面进行。

其中内力、变形及锚杆计算结果如下表27-21，27-22所示。

内力值计算表

表 27-21

段号	内力类型	弹性法计算值	经典法计算值	内力设计值	内力实用值
代表段	基坑内侧最大弯矩 (kN.m)	1015.40	784.72	1269.25	1269.25
	基坑外侧最大弯矩 (kN.m)	778.03	896.87	972.54	972.54
	最大剪力 (kN)	516.46	394.52	548.74	548.74

采用组合截面进行承载力设计，经计算配筋满足规范要求。

锚杆配筋表

表 27-22

支锚道号	支锚类型	水平间距 (m)	入射角 (°)	锚杆配筋	锚杆刚度 (MN/m)	总长 (m)	锚固段长度实用值 (m)	预加力 (kN)	实配[计算]面积 (mm ²)
1	锚杆	1.500	50.00	7束15.2	7.05	28	9.5	200.00	980.0[438.7]
2	锚杆	1.500	15.00	2E32	149.95	15	0.0	100.00	1608[1325]

(5) 基坑变形监测结果

实测结果表明：在开挖过程中，复合桩墙锚的变形主要表现为整体和平移。但当基坑开挖超过一定深度时，由于顶部斜锚的张拉作用，在桩身弯矩最大截面位置附近变形增大，桩体产生弯曲变形。当对支护结构中设置水平锚杆并进行部分张拉后，弯曲变形很快得到控制并出现较大反弹，基坑水平变形在以后长期监测过程中都处于稳定状态，基坑最大水平变形为4号测斜点 10.8mm、5号测斜点 22.4mm。

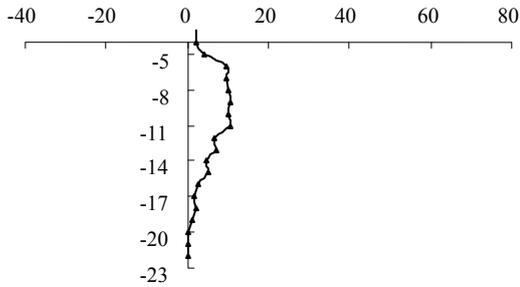


图 27-45 基坑水平位移监测结果



图 27-46 郑州国贸中心基坑工程复合桩墙锚支护实景

复合桩墙顶部设置的斜向锚杆起到超前锚固的作用，约束支护结构整体平移和转动变形。但当基坑开挖超过一定深度后，在灌注桩桩身会产生较大弯矩，可能发生复合桩墙墙身产生不协调弯曲变形，导致复合桩墙的整体工作性能遭到破坏，如不限制复合桩墙弯曲变形的发展，将使前墙产生开裂，继续开挖，则有可能危及基坑支护结构安全。为保证复合桩墙的整体工作性能和控制桩体开裂，较好的方法是在支护结构中增加水平短锚杆并进行张拉。从工程实测结果看，该法取得了比较好的效果，锚杆张拉后弯曲变形很快得到控制并出现较大反弹，有效保证了基坑支护体系的正常工作，效果良好。

27.2.5 复合桩墙支护相关技术

1. 深层喷射搅拌法施工技术

(1) 技术简介

深层喷射搅拌成桩法是在深层搅拌法和高压喷射注浆技术基础上开发研制成的一种新型地基加固处理技术。它将机械搅拌和喷射搅拌有效地进行组合，在桩的中心部位采用机械搅拌，外围采用高压喷射注浆处理，从而形成均匀细密的水泥土桩。该技术有效克服了单纯使用深层搅拌法和高压喷射注浆法产生的缺陷，整合了深层搅拌法和高压喷射注浆法的技术特长。与高压旋喷桩相比，喷射搅拌桩所需切割能量小、能耗小；钻杆钻进和提升快，施工速度可提高 30% 以上，水泥排放量减小，可节约水泥用量的 1/3；与深层搅拌法相比，提高了水泥与土的拌和均匀度和水泥土强度；可插入型钢等加筋材料具有支护和止水双重功能，其止水效果较好。建设部发布的《建设事业“十一五”推广应用和限制禁止技术》公告，在第一批推广应用技术部分，将“深层喷射搅拌法施工技术”列入“节地与地下空间开发利用技术领域地下工程施工技术”。

(2) 深层喷射搅拌法施工工艺

如图 27-47、图 27-48 所示，其特征在于：在成桩的中心部位主要采用机械搅拌，在外围桩体则以高压喷射流切割搅拌。

施工方法主要有 JC-1 方法和 JC-2 方法。

JC-1 方法的主要特点是水泥土的机械搅拌区和喷射搅拌区完全重合，桩径由切削翼控制，所需的浆液喷射压力较小，一般为 3MPa~10MPa。而水泥土桩的水泥土混合效果也

较好，水泥掺入比为 25%左右时，桩身强度可达 5MPa，桩径一般在 500mm 左右。

JC-2 方法的主要特点是成桩直径由喷射压力和提升速度来控制，可以根据设计需要改变水泥土桩的桩径，水泥土桩的桩身强度和单桩承载力的调控也比较灵活。并且钻杆在砂土中的钻进和提升速度也比传统的高压喷射法加快近 30%，水泥排放量减少近 50%。在粉砂中，水泥土桩桩径可控制在 500mm~800mm 范围内。当掺入比为 25%左右时，桩身强度可达 5MPa~20MPa^[5]。

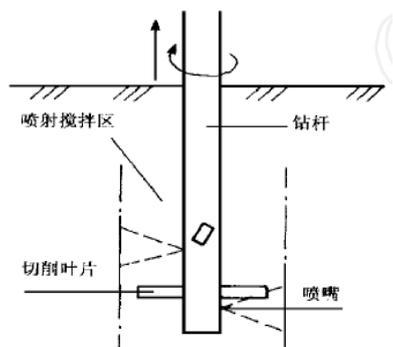


图 27-47 JC-1 方法示意图

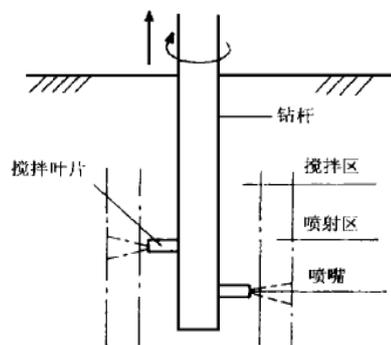


图 27-48 JC-2 方法示意图

JC-1 法和 JC-2 法于 1998 年在郑州某工地进行了现场试验，其中 JC-1 方法试桩 6 根；JC-2 方法试桩 3 根。地基土为粉土、粉砂。桩长 7.5 m、水泥土掺入比为 30%、置换率为 25%、龄期 28 天，水泥土桩的各项力学指标如表 27-23 所示。

试验结果（平均值）

表 27-23

方法	桩身强度 $f_{cu,k}$	单桩承载力特征值 R_k^d (kN)	复合地基承载力特征值 $f_{sp,k}$ (kPa)
JC-1	5.2	440	460
JC-2	6.5	510	550

(3) 设计施工要点

1) 水泥掺入量

掺入量宜为被加固土重的 20%~35%。外掺剂可根据实际工程需要选用具有早强、缓凝、减水、节省水泥等性能的材料，但应避免环境污染。

2) 抗渗计算

应满足各规范^{[6][7]}对防渗水泥土桩墙的抗渗计算要求，各规范要求如下：

① 《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-) 第 8.4.1 条“截水帷幕的厚度应满足基坑的防渗要求，截水帷幕的渗透系数宜小于 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ”。

② 《建筑基坑工程技术规范》(YB9258-97) 第 13.3.3 条“采用地下连续墙或隔水帷幕隔离地下水，宜将其插入含水层底板下 2~3m，隔水帷幕渗透系数宜小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ”。

3) 施工参数

搅拌直径：300mm~450mm

提升（钻进）速度：250mm~1000mm/min

喷嘴和搅拌叶片：喷嘴是将高压泵输送来的液体压能最大限度地转换成射流动能的装置，它安装在钻头侧面，其轴线与钻杆轴线成 90° ，设计成收敛圆锥形，其流速系数 $\varphi=0.960$ ，流量系数 $\mu=0.947$ ，喷嘴收缩角 $\theta=13^\circ$ 。

搅拌叶片由厚 $t=25\text{mm}$ 的钢板加工制成，叶片面与水平面成一定夹角。

2. 无砂混凝土小桩加固地基技术

(1) 技术简介

无砂混凝土小桩技术,是在压力灌浆和小桩技术基础上研究开发的一种地基处理技术。该技术通过桩孔中的注浆管及碎石桩体向桩周土体进行低压灌浆,待水泥浆液初凝后,再进行高压注浆,使孔内水泥浆进一步密实,并使桩周土体受到压密灌浆处理,形成混凝土小桩加筋体(加筋材料可为注浆钢管)。

(2) 施工工艺

1) 流程示意如图 27-49。

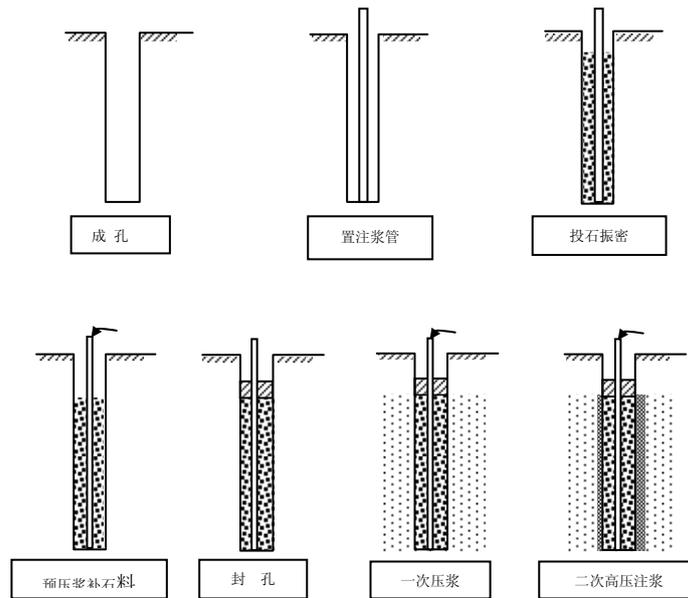
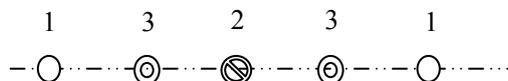


图 27-49 投石压浆无砂混凝土小桩施工工艺流程图

2) 施工顺序

对挡土及基坑工程,通常有单排桩、双排桩或三排桩形式。单排桩时,施工顺序如下图所示;双排桩时,宜先施工下游排桩孔;如三排桩,则先施工下游排桩,再上游排桩,最后施工中排桩。



1—第一次序桩位; 2—第二次序桩位; 3—第三次序桩位

图 27-50 同排桩施工顺序示意图

(3) 设计与施工要点

1) 小桩间距

当不考虑桩土粘结效应时,小桩间距 $S \geq 8d$,完全考虑时 $S \leq 6d$,考虑时桩间距介于两者之间。

2) 材料与技术参数

① 碎石粒径要求

为保证填石振捣质量,适用粒径为 5~15mm 级配碎石。

② 超细水泥

当原状土的渗透系数较低时，采用普通粒径的水泥浆液就难以灌入桩周土体，可采用平均粒径为 $4\mu\text{m}$ ，最大粒径为 $10\mu\text{m}$ 的 SK 型超细水泥。由于水泥细度高，比表面积大，要配制流动性较好的浆液所需水量就较大，其保水性又很强，易造成压入浆液的多余水份不易排出，而使结石强度降低，工程中可采用小水灰比加高效减水剂方法，改善水泥浆的流动性。

③ 灌浆压力

工程注浆分渗入灌注和二次补浆两个阶段。通常由现场试验来确定灌浆压力。即通过逐步提高压力，绘制注浆量与注浆压力关系曲线，实际注浆时，可以试验所得容许压力的 80% 作为注浆压力。也可根据经验，对砂土取 $0.2\sim 0.5\text{MPa}$ ；对粘性土，取 $0.2\sim 0.3\text{MPa}$ ；对粉土，取 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ ；补浆压力一般为 $1.5\sim 2\text{MPa}$ 。

④ 灌浆量

灌浆量为碎石桩中碎石的孔隙体积和桩周加固土层灌入孔隙体积之和，灌浆量可按下列式计算：

$$V = V_s n_s + V_n m n (1 + L) \quad (27-24)$$

式中 V_s ——碎石桩体总体积 (m^3)； n_s ——碎石桩的孔隙率；

V_n ——桩周加固土层的总体积 (m^3)；

n ——桩周土体孔隙率； L ——浆液损耗系数，取 $5\%\sim 15\%$ ；

m ——桩周土体的浆液充填系数，应通过试验确定，无试验资料时可按表 27-24 经验取用。

软土，粘性土，细砂	中砂，粗砂	黄土
$0.2\sim 0.4$	$0.4\sim 0.6$	$0.2\sim 0.8$

27.3 挡土止水二合一支护新技术——钻孔后注浆连续墙

钻孔后注浆连续墙技术是通过长螺旋钻机成孔，利用注浆泵向孔内注入水泥石浆，再在孔内插入 H 型钢或其他受力材料，形成一种具有挡土、止水两种功能的支护结构。钻孔后注浆连续墙受力机理与 SMW 工法相仿，均依靠水泥石浆内插入芯材受力，而水泥石浆不参与受力计算，计算模型和方法与 SMW 工法相同。

钻孔后注浆连续墙的成墙结果类似于 SMW 工法，但在成墙工艺和水泥石浆搅拌及成型工艺上有所区别，即利用长螺旋钻机钻掘至设计深度后，边提钻边注入在孔外已配制好的水泥石浆，在水泥石浆初凝之前，插入 H 型钢或其他受力材料，重复搭接施工，便形成一道有一定强度和刚度的、连续完整的地下连续墙体。图 27-51 和 22-52 为钻孔后注浆连续墙的开挖效果。



图 27-51 钻孔后注浆连续墙工程实景图



27-52 钻孔后注浆连续墙侧壁开挖实景

27.3.1 适用范围

钻孔后注浆连续墙适应于多种土层，能在基坑侧壁和基坑底是回填土、粘土、粉土、粉砂及粉土粉砂互层、淤泥（含流塑状态淤泥）、砂层、卵石（粒径小于 6cm）等地层中施工作业。对于存在地下障碍物的区域应先经过排障处理。

钻孔后注浆连续墙适宜的基坑深度与土层和施工机械有关，目前在已经采用钻孔后注浆连续墙工法施工的基坑支护工程中，基坑开挖深度一般为 5~15m，基坑侧壁和基坑底土质最差的土为承载力为 40kPa 流塑状态的淤泥，根据成孔直径和受力芯材断面的调整，或采用扶壁以及内支撑或锚杆的配合，可完成 20m 左右深的深基坑工程。

钻孔后注浆连续墙工法重叠搭接施工可根据地质情况自行调配，参见图 27-53。

钻孔后注浆连续墙的优势

- (1) 施工设备的施工占地小，动力头在前，距既有建筑物 60cm 即可施工。
- (2) 钻机设备成孔速度快，每台设备平均每天可施工 800 延米长，效率是传统排桩的 3~4 倍。
- (3) 与传统的水泥土搅拌相比，对水泥土的成型质量做到可视、可控。水泥土中掺入早强等添加剂，连续墙全部施工完后，即可对先施工的支护段进行开挖。
- (4) 导墙、围檩、部分支撑梁及 H 型钢均为装配式钢结构，安全度高，安装速度快，无需养护，有利于加快施工进度。
- (5) 挡土、止水二合一，工序少，工效高，工期短、成本低，该工法的成本比传统排桩支护低 5%~10%。
- (6) 挡土止水二合一，节约支护占地。

27.3.2 施工工艺

钻孔后注浆连续墙工艺由导墙安制、成孔、搅拌水泥土浆、注浆、芯材制作及吊放、换撑、拔受力芯材等工序组成，各个工序紧密相连，互相配合。钻孔后注浆连续墙施工工艺的平面图和剖面图分别见图 27-53、27-54。

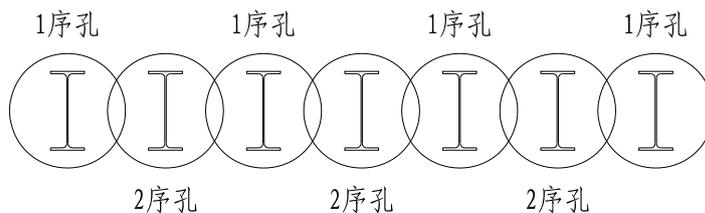


图 27-53 钻孔后注浆连续墙施工工艺平面图

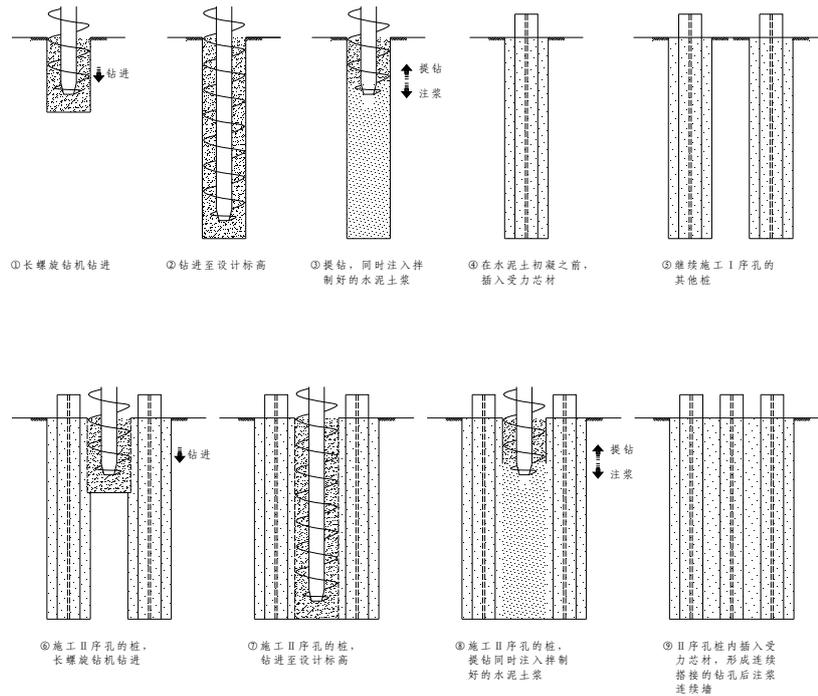


图 27-54 钻孔后注浆连续墙施工工艺剖面图

27.3.3 钻孔后注浆连续墙施工要点

1. 导墙的制作及安装

(1) 导墙采用装配式工字钢或 H 型钢，工字钢或 H 型钢内边应在一条直线上，间隔 3m 用钢筋加固固定，导墙外侧用粘土填实。

(2) 导墙转角连接处要焊接牢固，导墙安装和使用过程中应及时校正定位尺寸，要求平面位置偏差不大于 15mm，倾斜度偏差不大于 1%。

(3) 导墙上的泥土应及时清除，保证定位标志清晰。

2. 钻孔

(1) 钻机就位时严禁碾压或碰撞导墙，并保证垂直度满足要求。图 27-55 为长螺旋钻机成孔。

(2) 定位时，应复测桩位点，防止因堆积土体的挤压或附近钻孔的扰动，造成桩位移位。

(3) 为了保证施工的质量和施工安全，钻机作业行走区域内的地基承载力必须满足钻机作业的要求，必要时铺设钢板或路基箱。

(4) 钻孔采取分段循环跳钻施工法，根据土质情况确定跳钻间距。钻进时，下钻速度应保证泥土能及时排除。起钻时，禁止反钻，并尽量带出泥土。

3. 水泥土浆的制备

(1) 水泥土浆制备质量的好坏直接影响到钻孔后注浆连续墙的质量和安。制备好的水泥土浆存放入储存池。

(2) 水泥土浆制备前要经实验室试配。

(3) 水泥土浆由水泥土浆搅拌机搅拌，水泥土浆的搅拌时间不小于 3min。水泥土浆比重用比重计或电子天平测定。浆液应搅拌均匀，随搅随用。

4. 注浆

(1) 注浆提钻时，提钻速度和注浆速度应保持一致，且应保持压力，防止空孔现象，避免缩颈和塌孔。

(2) 水泥土浆的停注标高应超灌 0.8m，灌入量大于理论值（充盈系数不小于 1.1）。

(3) 注浆成桩后 2h 应检查孔口水泥土浆沉淀情况，并及时补浆以防桩顶出现空孔现象。

(4) 对于间隔时间较短，需要进行 II 序孔施工的情况，可采用掺入适量早强剂的方法。

5. 芯材安设

(1) 芯材采用竹筋笼时，竹筋笼直径不小于 150mm，居中放置，四片弧面向里梆轧成型。

(2) 芯材采用 H 型钢时，插入时居中放置，使腹板垂直于支护结构轴线的方向，并保证各 H 型钢在一条直线上，然后固定在导墙上。图 27-66 为钻孔后注浆连续墙内插入 H 型钢。

(3) 作为受力主材的芯材必须验收合格后方可进行安装，芯材必须对准桩中心并垂直插入，芯材不能插偏和插反，吊装时控制好芯材顶标高，防止过高或过低。

(4) 受力芯材采用型钢等可回收材料时，应刷减摩隔离剂，减小回收过程中的阻力。

6. 拔出芯材

(1) 芯材采用型钢等可回收芯材时，在地下室施工完毕并回填至±0.00 后需拔出芯材。

(2) 拔芯材采用高频振动锤或静力拔桩器进行，吊车型号应根据振动锤重量、型钢重量、长度、场地情况、周边环境等综合确定。

(3) 芯材拔出后如出现带出土的情况需及时用水泥土浆或砂浆回填空孔。



图 22-55 长螺旋钻机成孔



图 22-56 钻孔后注浆连续墙内插入 H 型钢

当基坑开挖深度较深、土质较软或对基坑变形控制较严时，除采用传统的增加钻孔直径和 H 型钢断面外，可在钻孔后注浆连续墙背后设置扶壁桩，从而达到加强竖向支护结构的刚度、减少或取消内支撑结构的目的，其布置形式如图 27-57 所示。

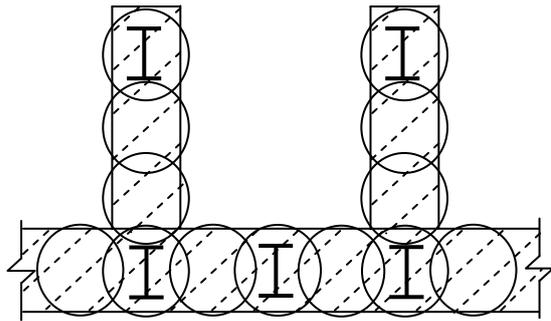


图 22-57 扶壁式钻孔后注浆连续墙连系梁布置形式



图 22-58 扶壁式钻孔后注浆连续墙工程实景

此时需在扶壁式钻孔后注浆连续墙顶部设置连系梁,可采用钢筋混凝土结构或钢结构,如图 27-67 所示。

与双排桩不同,扶壁式钻孔后注浆连续墙在一个计算单元内前排与后排桩的数量不是一一对应的,H 型钢的长短也不一样,通过对组合刚度的折减进行计算。图 27-58 为扶壁式钻孔后注浆连续墙工程实景。

27.3.4 质量控制标准与措施

1. 钻孔后注浆连续墙质量控制标准见表 27-25。
2. 钻孔后注浆连续墙质量控制
钻孔后注浆连续墙质量控制措施见表 27-26。

钻孔后注浆连续墙允许偏差

表 27-25

项次	项 目		允许偏差		检验方法
			单位	数值	
主控项目	1	桩顶标高	mm	+100 -50	水准仪
	2	桩位偏差	mm	<20	钢尺量
	3	垂直度	%	≤1	经纬仪
	4	混凝土强度	符合设计要求		试件强度
	5	桩 径	mm	≥ <i>D</i>	钢尺量
一般项目	2	芯材长度	mm	±10	钢尺量、 <i>D</i> 为桩径
	3	孔 深	mm	≥ <i>H</i>	测绳量
	4	芯材垂直于轴线方向偏差	mm	≤20	经纬仪、钢尺量
	5	芯材平行于轴线方向偏差	mm	≤20	水准仪
	6	芯材插入平面位置	mm	10	钢尺量

钻孔后注浆连续墙常见问题控制措施

表 27-26

序号	常见问题	控 制 措 施
1	桩中心偏位	桩中心标志要醒目,并要有专人指挥钻机定位。夜间施工要有明亮的照明。破坏的桩位应及时补测、及时定位。
2	桩径偏小	定期专人检查钻头直径,及时维修和更换不合格钻头。
3	桩身倾斜	施工前做好清障工作,钻机定位后,应吊线检查主塔的垂直度,四个支腿应撑在密实的地基上,保持稳定。施工过程中要随时抽检。

4	桩身夹杂异物	成桩施工后，应停置 24 小时再清理孔口周围泥土。
5	有效桩长不够	专人观察桩身注浆情况，注浆后 2 小时要有专人检查水泥土沉淀情况，及时补浆至设计液面标高。
6	水泥土强度不够	定期专人检查是否按配合比进行配料，定期专人检测泥浆比重和水泥土比重，经常搅拌水泥土以防沉淀。

27.3.5 工程实例

钻孔后注浆连续墙工法先后在铁四院科研大楼、长江委地下车库、武汉香港新世界中心、万科润园、江滩花园、新华明珠、武汉建筑设计院等 20 多项基坑支护工程中得到应用，取得了良好的经济效益与社会效益。下面列举 3 个具有代表性的工程。

1. 铁四院生产科研综合楼

(1) 工程概况

铁四院生产科研综合楼位于武昌区杨园街和平大道旁，占地 9959.6m²。地上 23 层，地下 2 层，基坑周长约 386m，基坑面积约 8458m²。工程场地略呈三角形，位于铁四院办公大楼的东南边。场地南侧紧邻和平大道；西侧紧靠既有的铁四院办公大楼，该办公大楼为 50 年代建的砖混结构房屋（毛石基础），在上述老建筑上加 4~6 层，加层部分采用钻孔灌注桩，共计 8~10 层。北侧紧靠既有的居民住宅，8 层砖混结构，钢筋混凝土条形基础。

(2) 地质条件

场地属长江冲积 I 级阶地，距长江较近，与基坑支护有关的土层构成与特征如表 27-27。

基坑所在场区的地质物理力学性质指标

表 27-27

层号名称	厚度范围 (m)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 (°)
①人工填筑素填土	0.5~3.4	8	16
①1粉土夹粉质粘土	0.6~6.7	13	12
①2淤泥质粘土	3~11	12	8
①3粉土	0~4.8	13	12
②1粉砂	0-4.8	0	27
②2细砂	16.5	0	32
②3中砂	17.9	0	36

(3) 基坑的特点及难点

1) 为满足铁四院地下停车位的需要，使地下室面积最大化，基坑只能沿红线施工。

2) 地下室为两层，基坑开挖深度为 9.95~11.5m，开挖深度较深。

3) 本基坑工程平面较为不规则，略呈三角形。

4) 本工程场地周边环境非常紧张，三边为既有建筑物、一边为城市主干道，不能放坡卸载，基坑支护结构的施工应考虑对围墙、办公楼、居民楼及地下管网的影响。尤其是在基坑临和平大道一侧有一条新修的电缆沟和基坑西北角有一条改道后的排水管及原有电缆沟需保护。

5) 本工程所处场地地下水丰富，且距离长江很近，坑侧壁有粉土、粉砂，易流浆，坑底以下为砂性土层，能解决好此土层的渗水和管涌问题是本工程的成败关键所在。

6) 场地内承压水层顶板埋深较浅，基坑底均处在粉砂层，需重点考虑地下水的处理。

(4) 基坑支护的选择

1) 由于本工程所处地层多为砂性土层,地下水丰富,深层搅拌桩的止水效果不理想,极易出现基坑侧壁渗漏水的情况;场地南侧和北侧地下室轴线距离红线 1m,若采用排桩支护体系,则排桩和深层搅拌桩必将出红线施工,造成红线外地下空间的污染。

2) 选择采用钻孔后注浆连续墙,在基坑四周每边可为业主节约支护用地 1.2m 宽,地下室可紧邻红线布置,使得地下室面积实现最大化。

(5) 实施效果

基坑开挖后,基坑侧壁连续致密,无渗漏点。临近的建构筑物经过监测数据分析,最大差异沉降量为 8.5mm,均在设计控制范围以内,整个基坑施工过程实现了“零”险情的目标。

监测结果表明,钻孔后注浆连续墙支护结构在深厚粉砂层、紧临长江和复杂周边环境条件的工程中得到了成功应用,图 27-69 为铁四院生产科研大楼基坑开挖实景。

2. 新华明珠基坑工程

(1) 工程概况

新华明珠工程位于汉口新华路和台北 1 路相交处,地上三栋 25-38 层楼,地下一层半。基坑平面为极不规则异形形状,基坑深 6.8~7.5m,基坑周长为 440m,基坑周边环境复杂(三边均为既有建筑物、一边为新华路)和淤泥深厚(16~18m 深的流塑状的淤泥)且承载力为 40~50kPa。

(2) 支护结构的选择

1) 经和排桩方案进行反复对比,尤其是分析了旁边两栋高层建筑的深基坑工程出现事故的原因后,采用了钻孔后注浆连续墙工法。

2) 针对本工程对基坑变形要求严的特点,采用了扶壁式钻孔后浆连续墙;实际工程表明扶壁式钻孔后注浆连续墙是减小基坑变形的有效方式,使基坑竖向支护结构的刚度大为提高。



图 27-59 铁四院生产科研大楼钻孔后注浆连续墙

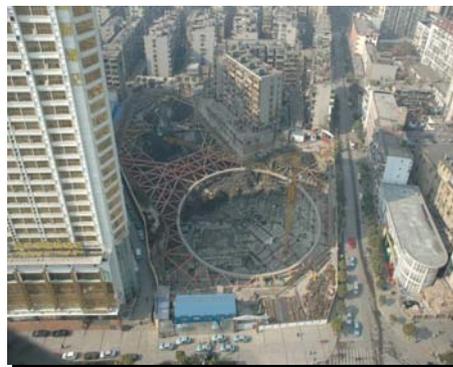


图 27-60 复杂环境条件下钻孔后注浆连续墙

3) 基坑南边 3m 处有一立体升降式车库,也是本基坑保护的重点对象之一,施工的实际情况表明,该处基坑变形仅为 21mm,效果良好。

(3) 实施效果

本深基坑工程在基坑边有危房和 16~18m 深厚淤泥,周边相邻两个深基坑(排桩+锚杆)均出现基坑事故的复杂条件下,采用钻孔后注浆连续墙+组合结构环形内支撑方案,平安地完成了深基坑支护的任务,图 27-60 为新华明珠基坑工程开挖实景。

4. 武汉香港新世界中心深基坑工程^[8]

(1) 工程概况

新世界发展(武汉)有限公司投资兴建的武汉新世界中心位于武汉市汉口利济北路与

解放大道交汇处，西靠大江祥和公寓，占地约 37234m²，基坑周长约 720.0m。

(2) 地质条件

场区杂填土层和砂、卵石层为强透水层，第④层为过渡含水层。表层杂填土与④层之间的粘性土层及下伏基岩（泥质页岩）为弱透水层和不透水层。根据地下水埋藏条件，场区地下水分为两种类型：上层滞水和孔隙承压水。基坑地层参数取值如表 27-28：

(3) 基坑的特点及难点：

- 1) 工程地处武汉市最繁华的闹市区，人流、车流量大，环保及文明施工要求高。
- 2) 工程地处航空路三层立交桥旁，基坑施工期间，保证立交桥的安全至关重要，武胜路立交桥曾因周边深基坑的渐土和渐水而发生不均匀沉降。
- 3) 本工程所处场地内土质情况较差，尤其是基坑侧壁的粉土、粉砂及其互层，对基坑支护不利。工程地下水水位较高，坑底的隔水层厚度较小，坑底的抗突涌风险较大。

基坑所在场区的地质物理力学性质指标

表 27-28

地层编号和名称	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)
①杂填土	18.7	8	18
②1 粘土	18.5	23	10
②2 粉质粘土	18.7	16	15
③1 粉质粘土	17.6	11	9
③2 粉质粘土	17.8	15	11
④粉土粉砂互层	17.6	11	20
⑤1 粉细砂	19	0	33

4) 基坑场地条件极为狭窄，基坑顶部难以放坡卸载。在狭窄的场地情况下，场地又分为三个标高：自然地面、-3.50m 和-11.00m，施工难度大。

5) 施工场地需要占用航空路边已装修的花岗岩路面，如何对其进行保护是一难点。(6) 工期异常紧，传统排桩支护方法需 180 天时间，业主要求 100 天完工。

7) 基坑周边荷载大（堆土荷载达 3m 高，并有 50t 坦克吊行走），如何控制基坑变形和保证坑边的数种管网的安全。

(4) 基坑支护的方案比较与选择

本工程基坑开挖深度较大（11m 深），周边地下管网较多且已施工的地下构筑物与基坑距离很近，基坑开挖深度范围内有较厚的软~流塑状的粉质粘土等软弱土层和粉土粉砂互层，本基坑支护工程，由于开挖深度较大，且有较厚的软土层，需采取有效的支护体系。根据本工程的特点，可供选择的方案有两种。

1) 排桩+止水帷幕+支撑支护方案

经论证排桩+止水帷幕方案无法实施。



图 27-61 核心闹市区钻孔后注浆连续墙基坑工程实景

图 27-62 新华明珠基坑工程开挖全景

2) 钻孔后注浆连续墙+支撑方案

钻孔后注浆连续墙因其挡土、止水二合一，工期短，造价低，安全性高，内插入 H 型钢进行挡土支护，可以成功解决本基坑的上述 9 个难点，内支撑采用两层钢支撑，第一层内支撑支撑在±0.00 结构上，第二层内支撑撑在已施工完的地下室底板上。

(5) 钻孔后注浆连续墙支护设计

钻孔后注浆连续墙钻孔直径为 650mm，钻孔后注浆连续墙内插 H 型钢，在基坑支护结构外侧沿轴线方向每 4.0m 布置一根 Φ650 钻孔后注浆扶壁桩。设置两道钢支撑，采用双拼和 4 拼 200×450mmH 型钢围檩。支撑构件为 Φ630 钢管，壁厚为 10mm 和 12mm。

(6) 周边环境和基坑的保护和监测

1) 基坑边有大量的地下管网，且均没有文字资料，而履带吊需在这些管网上（含煤气管网）上行走，为确保管网的安全，采用先进的探测方法将基坑边的管网全部进行了探测，做到有针对性地进行防护。

2) 由于基坑所处的特殊地段和众多管网距坑边很近，而且基坑边有 50t 的履带吊行走，此外，因本工程地处闹市区，白天不能出土，为加快出土进度，白天将土方先从基坑内挖上来堆在基坑边，高度达 3m，相当于基坑深度加深 3m，对本支护方案提出了严峻的挑战。因此，基坑设计中对变形从严控制，要求不大于 30mm，实际变形仅为 17mm，坑边有如此大的堆载，基坑的变形却比设计和计算要小得多，分析其原因在于本工程采用的是全钢结构的支护方式，即竖向支护结构、冠梁和内支撑全部为钢结构，均能立即受力，基坑处于悬臂或无支撑状态的时间很短，随挖随撑，减少了每个工况的变形以及各工况变形的叠加效应。

(7) 实施效果

1) 在武汉市最繁华的闹市区地段采用钻孔后注浆连续墙支护方案，实现了“零险情”的目标，图 27-71 为新世界中心基坑开挖实景。

2) 武汉市长江、汉江贯穿其中，地下水丰富导致武汉市的深基坑出问题主要原因之一就是基坑侧壁渗水渐土和基坑底突涌，从而引起周边沉降，钻孔后注浆连续正是针对上述问题而产生的具有针对性的基坑侧壁止水的解决方案；同时因止水帷幕和支护受力结构同深度，延长了地下水的渗透路径，并减少了对地下水的抽排，从而减少了对周边环境的影响。

3) 本工程为基坑扩建工程，需破除既有 Φ1000 排桩，难度大费用高；如在今后的类似工程中，在拟扩建一端或整个基坑中采用钻孔后注浆连续墙，因 H 型钢可拔出，从而减少了需破除排桩的难度和费用。

4) 实际抽水量比理论计算要小得多，分析其原因就在于钻孔后注浆连续墙延长了地下

水的补给线路，从这一方面讲，此工法减少了对地下水的抽排，不仅保护了地下水资源，也减少了因降水而引起的周边建构筑物的沉降。

4. 长江水利委员会基坑工程^[9]

(1) 工程概况

长江水利委员会地下车库位于武汉市汉口解放大道长江水利委员会大院内，该楼地上为三层，设两层地下室，车库顶面无建筑部分覆土厚度为 0.6m，基础为筏板基础。

(2) 地质条件

根据地质报告提供的数据，该工程所在场区的地质物理力学性质指标如表 27-29：

(3) 基坑特点

1) 本工程所处场地内地层土质情况较差，尤其是基坑侧面粉土互层，易渐土渐水，易引起周边环境发生险情，对基坑支护不利，需着重处理。

2) 基坑旁有五层加一层共计 6 层的办公楼改为资料楼，超载应充分考虑。

3) 距长江边较近，坑侧壁有较厚的粉土、粉砂交互土层，坑底的隔水层厚度较小，因此需重点考虑基坑侧壁的止水和坑底的抗突涌风险。

(4) 支护结构形式选择

本基坑支护工程，由于开挖深度较大，且有较厚的软土层，故不能采用放坡开挖，需采取有效的支护体系。根据本工程的特点，进行如下支护方案比选：

基坑所在场区的地质物理力学性质指标

表 27-29

地层编号	名称	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 (度)
(1)	杂填土	18.2	8	18
(2-1)	粉土	18.7	7	20
(2-2)	淤泥质粉质粘土	17.7	10	6
(2-3)	粉质粘土	18.7	10	7
(2-4)	粘土	18.5	20	9
(2-5)	粘土	18.6	21.7	11.2
(3-1)	粉质粘土	17.8	15.1	23.1
(3-2)	粉土	19.6	5.3	35.8
(3-3)	粉土	18.4	13	30.4
(4-1)	粉砂	18.6	10.5	33.8

1) 排桩支护方案

排桩+止水帷幕虽然有一定的安全性，但挡土、止水两种工艺分别施工，工期较长，造价相对较高，施工中产生的泥浆对环境有污染，尤其是大量工程实践证明，粉喷桩在基坑侧壁有粉砂粉土及其互层的情况下难以有效起到止水作用，有不少因此而产生基坑险情的报道

2) 钻孔后注浆连续墙方案

钻孔后注浆连续墙作为止水帷幕和受力体，墙内插入 H 型钢芯材进行挡土支护，挡土、止水二合一、工期短、造价低、安全性高。

(5) 实施情况

基坑在 2006 年汛期开挖，整个基坑侧壁无渗漏水情况，证明了钻孔后注浆连续墙具有连续致密的止水效果。图 27-73 为长江水利委员会地下车库工程开挖全景，图 27-74 为长江水利委员会地下车库基坑工程位于长江边侧壁钻孔后注浆连续墙开挖效果。



图 27-63 钻孔后注浆连续墙基坑工程开挖全景



图 27-64 钻孔后注浆连续墙开挖侧壁效果

参考文献

- [1] 张飞, 刘忠臣, 陈国刚. 预应力土层锚杆与土钉墙联合支护的力学工作机理研究[J]. 岩土力学, 2002, 23 (3): 292-296
- [2] 郭院成, 王立明, 郑秀丽. 土钉与桩锚联合支护结构的设计计算模式[J]. 河南科学, 2003, 21 (3): 287-291
- [3] 郭院成, 秦会来, 王立明. 桩锚与土钉联合支护结构中的土压力分配模式[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25 (3): 52-55
- [4] 郭院成, 周同和, 宋建学. 桩锚与土钉联合支护结构的工程实例[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24 (2): 26-28
- [5] 周同和等. 深层喷射搅拌法的试验研究与应用[A]. 南京: 第七届土力学与岩土工程学术讨论会论文集, 万国出版社, 1999
- [6] 建筑基坑支护技术规程 (JGJ120-99) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [7] 建筑基坑工程技术规范 (YB9258-97) [S]. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- [8] 王平, 覃莉莉. 武汉新世界中心深基坑扩建工程的设计和施工[R]. 武汉: 基坑工程应用技术, 2008
- [9] 王平. 钻孔后注浆连续墙在长江水利委员会会议中心工程中的应用[R]. 武汉: 基坑工程应用技术, 2008

本章专有名词与术语

1 混合支护

指基坑工程同一条边的不同支护段, 采用几种不同的支护结构剖面形成的支护体系。

2 联合支护

指同一支护剖面中, 上下采用二种或二种以上不同支护技术形成的联合支护结构。

3 复合支护

一般为重力式与嵌入式组合形成的支护结构。包括由超前支护桩与土钉复合形成的复合土钉, 锚杆与土钉组合形成的复合土钉, 通过加筋材料或灌浆形成的加筋土支护结构, 双排桩支护结构等。

4 复合桩墙

排桩与加筋水泥土连续墙、或加筋水泥土连续墙与小桩组合, 形成具有止水与支护双重作用的复合

支护结构。

5 钻孔后注浆连续墙支护

采用成孔、泵送水泥土浆液工法形成的水泥土桩连续墙，插入 H 型钢后，形成型钢水泥土墙之后技术。