

UDC

山东省工程建设标准



DB 37/T 5145-2019

P

备案号 J 11004-2019

复合土钉墙基坑支护技术标准

Technical standard for composite soil nailing wall in
retaining and protection of excavation

2019 - 08 - 15 发布

2019 - 12 - 01 实施

山东省住房和城乡建设厅
山东省市场监督管理局

联合发布

山东省工程建设标准

复合土钉墙基坑支护技术标准

Technical standard for composite soil nailing wall in
retaining and protection of excavation

DB 37/T 5145-2019

批准部门：山东省住房和城乡建设厅

山东省市场监督管理局

施行日期：2019年12月01日

中国建筑工业出版社

2019 北京

前 言

本标准是根据山东省工程建设标准制修订计划（鲁建标字[2014] 36 号）的要求，由中建八局第一建设有限公司和济南大学会同多家单位共同编制完成。

在编制过程中编制组调查总结了近年来复合土钉墙基坑支护的实践经验，吸收了国内外相关科技成果，开展了多项专题研究。本标准征求意见稿通过各种方式在全国范围内广泛征求了意见，并经多次编制工作会议讨论、反复修改后，形成送审稿，最后经审查定稿。

本标准共有 7 章及 2 个附录，内容包括总则、术语和符号、基本规定、设计、施工、质量检验、监测等。

本标准修订的主要技术内容是：

1. 扩大适用范围；
2. 将第 4 章调整为设计，增加对复合土钉墙设计的有关规定；
3. 将第 6 章调整为质量检验；
4. 增加对可回收复合土钉墙支护的有关规定。

本标准由山东省住房和城乡建设厅负责管理，济南大学负责具体技术内容的解释。为了提高本标准的质量，请各单位在执行过程中，注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给济南大学《复合土钉墙基坑支护技术规范》DB 37/T 5145—2019 管理组（地址：山东省济南市南辛庄西路 336 号，邮编 250022），以供今后修订时参考。

主编单位：中建八局第一建设有限公司
济南大学

参编单位：济南市工程质量与安全生产监督站

山东正元建设有限公司
 山东建筑大学
 山东省地矿工程勘察院
 山东建勘集团有限公司
 济南鼎汇土木工程技术有限公司
 济南城隧建设工程有限公司
 大成科创基础建设股份有限公司
 济南四建集团有限公司
 深圳市工勘岩土集团有限公司
 中铁第四勘察设计院集团有限公司
 山东鑫国基础工程有限公司

主要起草人员：	刘 燕	刘俊岩	范 涛	董文祥	付文光
	郑全明	孙剑平	张 健	付宪章	曾纯品
	邢庆毅	林绪锦	魏焕卫	于 科	赵庆亮
	黄 薛	李春林	张爱军	高锡刚	于克猛
	张亮亮	葛振刚	任 锋	马桂宁	宫 珂
主要审查人员：	宋义仲	李连祥	盛根来	樊祜传	马连仲
	罗永现	孙 杰	李克金	郭庆华	

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	6
4 设计	8
4.1 一般规定	8
4.2 土钉长度及截面的确定	10
4.3 基坑稳定性验算	14
4.4 设计及构造要求	20
5 施工	24
5.1 一般规定	24
5.2 复合土钉墙施工	25
5.3 降排水施工	29
5.4 基坑开挖	30
6 质量检验	32
7 监测	34
附录 A 土钉抗拔基本试验	35
附录 B 土钉抗拔验收试验	37
本标准用词说明	39
引用标准名录	40
附：条文说明	41

1 总 则

1.0.1 为使复合土钉墙基坑支护工程符合安全可靠、技术先进、经济合理及保护环境的原则，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于山东省内复合土钉墙基坑支护工程的设计、施工、检验和监测。

1.0.3 复合土钉墙基坑支护工程应综合考虑工程与水文地质条件、场地及周边环境限制、基坑开挖深度及施工条件等因素的影响，并结合工程经验，合理设计、精心施工、严格检验和监测。

1.0.4 复合土钉墙基坑支护工程除应符合本标准外，尚应符合国家现行标准和山东省工程建设标准的有关规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 土钉 soil nail

基坑侧壁土体中采用成孔置入钢筋或直接置入钢花管，并沿杆体全长注浆形成的细长构件。

2.1.2 土钉墙 soil nailing wall

由土钉群、被加固的原位土体、钢筋网混凝土面层等构成的基坑支护形式。

2.1.3 预应力锚杆 pre-stressed anchor

由锚头、杆体自由段和杆体锚固段组成的、能将张拉力传递到稳定岩土体中的一种受拉构件。

2.1.4 截水帷幕 curtain for cutting off water

沿基坑侧壁连续分布，由水泥土桩相互咬合搭接形成，起隔水、超前支护和提高基坑稳定性作用的壁状结构。

2.1.5 微型桩 mini-sized pile

沿基坑侧壁断续分布，用于控制基坑变形、提高基坑稳定性的各种小断面竖向构件。

2.1.6 复合土钉墙 composite soil nailing wall

土钉墙与预应力锚杆、截水帷幕、微型桩中的一类或几类结合而成的基坑支护形式。

2.1.7 截水帷幕复合土钉墙 composite soil nailing wall with curtain for cutting off water

由截水帷幕与土钉墙结合而成的基坑支护形式。

2.1.8 预应力锚杆复合土钉墙 composite soil nailing wall with pre-stressed anchor

由预应力锚杆与土钉墙结合而成的基坑支护形式。

2.1.9 微型桩复合土钉墙 composite soil nailing wall with mini-sized pile

由微型桩与土钉墙结合而成的基坑支护形式。

2.2 符 号

2.2.1 土的物理力学指标

c ——土的黏聚力；

d_s ——坑底土颗粒的相对密度；

e ——坑底土的孔隙比；

γ_1 、 γ_2 ——分别为地面、坑底至微型桩或截水帷幕底部各土层加权平均重度；

φ ——土的内摩擦角。

2.2.2 几何参数

A ——构件的截面面积；

D_j ——第 j 根土钉直径；

H ——基坑开挖深度；

h_j ——第 j 根土钉与基坑底面的距离；

h_c ——承压水层顶面至基坑底面的距离；

L_i ——第 i 个土条在滑弧面上的弧长；

l_j ——第 j 根土钉长度；

S_{xj} ——第 j 根土钉与相邻土钉的平均水平间距；

S_{zj} ——第 j 根土钉与相邻土钉的平均竖向间距；

t ——微型桩或截水帷幕在基坑底面以下的深度；

α_j ——第 j 根土钉与水平面之间的夹角；

α_{mj} ——第 j 根预应力锚杆与水平面之间的夹角；

β ——土钉墙坡面与水平面的夹角；

θ_i ——第 i 个土条在滑弧面中点处的法线与垂直面的夹角；

θ_j ——第 j 根土钉或预应力锚杆与滑弧面相交处滑弧切线与水平面的夹角。

2.2.3 作用、作用效应及承载力

E_a ——朗肯主动土压力；
 $f_{y,j}$ ——第 j 根土钉杆体材料抗拉强度设计值；
 h_w ——基坑内外的水头差；
 i ——渗流水力梯度；
 i_c ——基坑底面土体的临界水力梯度；
 k_a ——主动土压力系数；
 $N_{u,j}$ ——第 j 根土钉在稳定区（即滑移面外）所提供的摩阻力；
 p ——土钉长度中点所处深度位置的土体侧压力；
 p_m ——由土体自重引起的侧压力；
 p_q ——土钉长度中点所处深度位置由地面及土体中附加荷载引起的侧压力；
 P_{uj} ——第 j 根预应力锚杆在稳定区（即滑移面外）的极限抗拔力；
 P_w ——承压水水头压力；
 $q_{sk,i}$ ——第 i 层土体与土钉的极限粘结强度标准值；
 q ——地面及土体中附加荷载；
 $T_{k,j}$ ——第 j 根土钉轴向荷载标准值；
 $T_{y,j}$ ——第 j 根土钉验收抗拔力；
 T_m ——土钉极限抗拔力；
 W_i ——第 i 个土条重量，包括作用在该土条上的各种附加荷载；
 ζ ——坡面倾斜时荷载折减系数；
 τ_q ——假定滑移面处相应龄期截水帷幕抗剪强度标准值；
 τ_y ——假定滑移面处微型桩的抗剪强度标准值。

2.2.4 计算系数及其他

K_s ——整体稳定性安全系数；
 K_{s0} 、 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} 、 K_{s4} ——整体稳定性分项抗力系数，分别为土、土钉、预应力锚杆、截水帷幕及微型桩产生的抗滑力矩与土体下滑力矩比；

K_l ——抗隆起稳定性安全系数；

K_{w1} ——抗渗流稳定性安全系数；

K_{w2} ——抗承压水稳定性安全系数；

N_q 、 N_c ——坑底抗隆起验算时的地基承载力系数；

ψ ——土钉的工作系数；

η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 ——土钉、预应力锚杆、截水帷幕及微型桩组合作用时的折减系数。

3 基本规定

3.0.1 复合土钉墙基坑支护安全等级的划分应符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的有关规定。

3.0.2 复合土钉墙基坑支护方案应根据工程地质、水文地质、周边环境、场地条件、基坑深度等因素，通过工程类比和技术经济比较确定。复合土钉墙基坑支护可采用下列形式：

1 截水帷幕复合土钉墙支护。

2 预应力锚杆复合土钉墙支护。

3 微型桩复合土钉墙支护。

4 截水帷幕、预应力锚杆、微型桩中的两种及两种以上与土钉墙的复合形式。

3.0.3 复合土钉墙适用于黏性土、粉土、砂土、碎石土以及残积土、全风化岩及强风化岩，夹有局部厚度的填土、淤泥质土地层也可采用。当基坑计算范围内存在厚度大于 5m 的流塑状土（当为淤泥和泥炭时，厚度大于 2m）不宜采用复合土钉墙支护；当坑底存在软弱地层时应经地基加固或采取其他有效加强措施后方可采用复合土钉墙支护。

3.0.4 地下水位高于基坑底时应采取降排水措施。当有承压水作用时应进行抗突涌验算，必要时应采取降水减压措施。当降水会对基坑周边建筑、地下管线、道路等造成危害或对环境造成长期不利影响时，应采用截水帷幕控制地下水。

3.0.5 软土地层中基坑直立开挖深度不宜大于 6m，其他地层中基坑直立开挖深度不宜大于 10m，可放坡时基坑开挖深度不宜大于 15m。

3.0.6 复合土钉墙基坑支护结构的构件强度、基坑稳定性、锚杆的抗拔力等应按承载能力极限状态进行验算；支护结构的位移

计算、基坑周边环境的变形应按正常使用极限状态进行验算。

3.0.7 复合土钉墙用于对变形控制有严格要求的基坑支护时，应根据工程经验采用工程类比法，并结合数值法进行变形分析预测。

3.0.8 勘察单位应查明地下水类型、地下水位、含水层埋深和厚度、承压水头、地下水与外界河流的水力联系等情况。必要时进行现场试验，确定土层渗透系数和影响半径。

3.0.9 施工单位应按照审核通过的基坑工程设计方案，根据工程地质与水文地质条件、施工工艺、作业条件和基坑周边环境限制条件，编制专项施工方案。

3.0.10 基坑工程应实施监测。设计单位应对监测项目、监测点布置、监测频率、监测报警值提出要求。监测单位应编制监测方案，并依据监测方案实施监测。设计单位和施工单位应及时掌握监测情况，并实施动态设计和信息化施工。

3.0.11 复合土钉墙基坑支护工程的使用期不得超过设计规定。否则应重新对基坑进行安全评估。

4 设 计

4.1 一 般 规 定

4.1.1 复合土钉墙基坑支护设计应包括下列主要内容：

- 1 支护体系选型及布置。
- 2 支护构件设计。
- 3 基坑稳定性分析验算。
- 4 地下水及地表水控制。
- 5 土方开挖要求。
- 6 变形控制标准及周边环境保护要求。
- 7 施工检验要求。
- 8 现场监测要求。
- 9 安全风险及应急措施要求。

4.1.2 支护设计单元应按照各区段开挖深度、地质条件、周边环境条件等因素进行划分，同一支护设计单元应选取最不利条件进行计算。

4.1.3 设计荷载应包括土压力、水压力以及邻近建筑、车辆运行、材料、机具堆场等附加荷载。地面上的附加荷载应按实际作用最大值计取，实际值小于20kPa时，宜按20kPa的均布荷载计取。

4.1.4 设计计算时对邻近基坑侧壁的承台、地梁、集水坑、电梯井等坑中坑，应根据坑中坑的开挖深度确定基坑设计深度。

4.1.5 对缺乏类似工程经验的地区及安全等级为一级的基坑，土钉及预应力锚杆应先进行基本试验，并根据试验结果对初步设计参数及施工工艺进行调整。

4.1.6 预应力锚杆应进行锚杆抗拔承载力验算和锚杆筋体抗拉承载力验算，验算方法应按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120的有关规定执行。

4.1.7 可回收压力型锚杆除应进行锚固段抗拔承载力验算和筋

体抗拉承载力验算外，尚应进行锚固注浆体横截面受压承载力验算，验算方法及要求宜按照现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 的有关规定执行。

4.1.8 设计和验算采用的岩土物理力学指标应根据地质勘察报告、基坑降水、土体固结等情况，按照相关参数试验方法并结合现场试验、当地经验做出分析判断后合理取值。

4.1.9 土钉与土体界面粘结强度 q_{sk} 宜按照附录 A 的方法通过抗拔基本试验确定；无试验资料或无类似经验时，可按表 4.1.9 初步取值。

表 4.1.9 土钉与土体之间粘结强度标准值 q_{sk} (kPa)

土的名称	土的状态	土钉
素填土		15 ~ 30
淤泥质土		10 ~ 20
黏性土	流塑	15 ~ 25
	软塑	20 ~ 35
	可塑	30 ~ 50
	硬塑	45 ~ 70
	坚硬	55 ~ 80
粉土	稍密	20 ~ 40
	中密	35 ~ 70
	密实	55 ~ 90
砂土	松散	25 ~ 50
	稍密	45 ~ 90
	中密	60 ~ 120
	密实	75 ~ 150
风化岩	全风化软质岩	80 ~ 100
	全风化硬质岩	120 ~ 140
	强风化软质岩	140 ~ 200
	强风化硬质岩	160 ~ 240

- 注：1. 钻孔注浆土钉采用压力注浆或二次注浆时，表中数值可适当提高。
 2. 钢管注浆土钉在保证注浆质量及倒刺排距 0.25m ~ 1.0m 时，外径 48mm 的钢管，土钉外径可按 60mm ~ 100mm 计算。倒刺较密时可取较大值。
 3. 对于粉土，密实度相同，湿度越高，取值越低。
 4. 对于砂土，密实度相同，粉细砂宜取较低值，中砂宜取中值，粗砾砂宜取较高值。
 5. 土钉位于水位以下时宜取较低值。

4.1.10 土钉和锚杆的设置不应应对既有建筑、地下管线造成损害，也不应对邻近的后续工程产生不利影响。

4.1.11 季节性冻土地区应根据冻胀及冻融对复合土钉墙的不利影响采取相应的防护措施。

4.1.12 基坑需要降水时，应分析降水对周边环境产生的影响。

4.1.13 基坑内设置车道时，应验算车道边坡的稳定性，并采取必要的加固措施。

4.1.14 复合土钉墙除应满足基坑稳定性和承载力的要求外，尚应满足基坑变形的控制要求。当基坑周边环境对变形控制无特殊要求时，可依据地层条件、基坑安全等级按照表 4.1.14 确定复合土钉墙变形控制指标。

表 4.1.14 复合土钉墙变形控制指标
(基坑最大侧向位移累计值)

地层条件	基坑安全等级		
	一级	二级	三级
软土为主	—	$0.8\% H$	$1.0\% H$
黏性土、砂性土为主	$0.3\% H$	$0.5\% H$	$0.7\% H$
全风化硬岩为主	$0.2\% H$	$0.3\% H$	$0.4\% H$
全风化、强风化软岩为主	$0.4\% H$	$0.6\% H$	$0.8\% H$

注： H ——基坑开挖深度。

当基坑周边环境对变形控制有特殊要求时，复合土钉墙变形控制指标应同时满足周边环境对基坑变形的控制要求。

4.2 土钉长度及截面的确定

4.2.1 土钉长度及间距可按表 4.2.1 列出的经验值作初步选择，也可按本标准第 4.2.2 条～4.2.5 条的规定通过计算初步确定，再根据基坑整体稳定性验算结果最终确定。

表 4.2.1 土钉长度与间距经验值

土的名称	土的状态	水平间距(m)	竖向间距(m)	土钉长度与基坑深度比
素填土		1.0 ~ 1.2	1.0 ~ 1.2	1.2 ~ 2.0
淤泥质土		0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.2	1.5 ~ 3.0
黏性土	软塑	1.0 ~ 1.2	1.0 ~ 1.2	1.5 ~ 2.5
	可塑	1.2 ~ 1.5	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5
	硬塑	1.4 ~ 1.8	1.4 ~ 1.8	0.8 ~ 1.2
	坚硬	1.8 ~ 2.0	1.8 ~ 2.0	0.5 ~ 1.0
粉土	稍密、中密	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.4	1.2 ~ 2.0
	密实	1.2 ~ 1.8	1.2 ~ 1.5	0.6 ~ 1.2
砂土	稍密、中密	1.2 ~ 1.6	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 2.0
	密实	1.4 ~ 1.8	1.4 ~ 1.8	0.6 ~ 1.0
风化岩	硬岩	1.5 ~ 2.0	1.5 ~ 2.0	0.5 ~ 1.0
	软岩	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0

4.2.2 单根土钉长度 l_j (图 4.2.2) 可按下列公式初步确定:

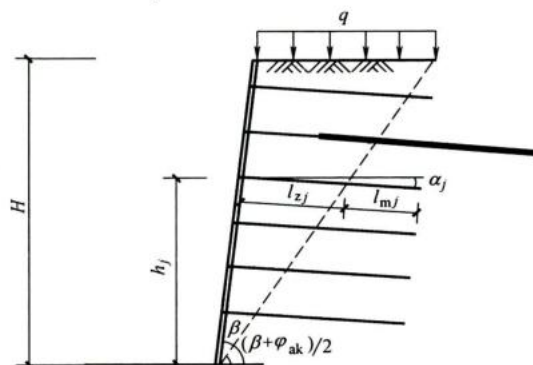


图 4.2.2 土钉长度计算

$$l_j = l_{zj} + l_{mj} \quad (4.2.2-1)$$

$$l_{zj} = \frac{h_j \sin \frac{\beta - \varphi_{ak}}{2}}{\sin \beta \sin \left(\alpha_j + \frac{\beta + \varphi_{ak}}{2} \right)} \quad (4.2.2-2)$$

$$l_{mj} = \sum l_{mi,j} \quad (4.2.2-3)$$

$$\pi d_j \sum q_{sk,i} l_{mi,j} \geq 1.4 T_{k,j} \quad (4.2.2-4)$$

式中 l_j ——第 j 根土钉长度；

l_{zj} ——第 j 根土钉在假定破裂面内长度；

l_{mj} ——第 j 根土钉在假定破裂面外长度；

h_j ——第 j 根土钉与基坑底面的距离；

β ——土钉墙坡面与水平面的夹角；

φ_{ak} ——基坑底面以上各层土的内摩擦角标准值，可按不同土层厚度取加权平均值；

α_j ——第 j 根土钉与水平面之间的夹角；

$\alpha_{m,j}$ ——第 j 根预应力锚杆与水平面之间的夹角；

$l_{mi,j}$ ——第 j 根土钉在假定破裂面外第 i 层土体中的长度；

$q_{sk,i}$ ——第 i 层土体与土钉的粘结强度标准值；

d_j ——第 j 根土钉直径；

$T_{k,j}$ ——计算土钉长度时第 j 根土钉的轴向荷载标准值；可按本标准第 4.2.3 条确定；

H ——基坑开挖深度；

q ——地表均布附加荷载。

4.2.3 计算单根土钉长度时，土钉轴向荷载标准值 T_{jk} （图 4.2.2、图 4.2.3）可按下列公式计算：

$$T_{jk} = \frac{1}{\cos \alpha_j} \zeta p S_{xj} S_{zj} \quad (4.2.3-1)$$

$$p = p_m + p_q \quad (4.2.3-2)$$

式中 S_{xj} ——第 j 根土钉与相邻土钉的平均水平间距；

S_{zj} ——第 j 根土钉与相邻土钉的平均竖向间距；

ζ ——坡面倾斜时荷载折减系数，可按本标准第 4.2.5 条确定；

p ——土钉长度中点所处深度位置的土体侧压力；

p_m ——土钉长度中点所处深度位置由土体自重引起的侧压力，可按图 4.2.3 (b) 求出；

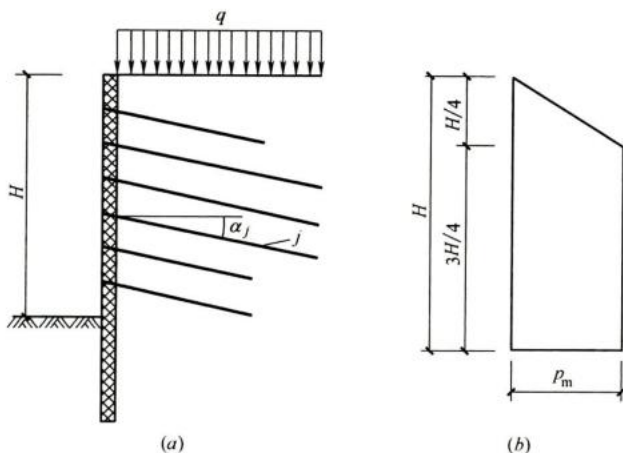


图 4.2.3 土钉轴向荷载标准值计算

(a) 复合土钉墙；(b) 土体自重引起的侧压力分布

p_q ——土钉长度中点所处深度位置由地面及土体中附加荷载引起的侧压力，计算方法按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的有关规定执行。

4.2.4 土体自重引起的侧压力峰值 $p_{m,max}$ 可按下列公式计算，且不宜小于 $0.2\gamma_{ml}H$ 。

$$p_{m,max} = \frac{8E_a}{7H} \quad (4.2.4-1)$$

$$E_a = \frac{k_a}{2} \gamma_{ml} H^2 \quad (4.2.4-2)$$

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{ak}}{2} \right) \quad (4.2.4-3)$$

式中 $p_{m,max}$ ——土体自重引起的侧压力峰值；

H ——基坑开挖深度；

E_a ——朗肯主动土压力，可按公式 (4.2.4-2) 计算；

γ_{ml} ——基坑底面以上各土层加权平均重度，有地下水作用时应考虑地下水位变化造成的重度变化；

k_a ——主动土压力系数，可按公式 (4.2.4-3) 计算。

4.2.5 坡面倾斜时的荷载折减系数 ζ 可按下列公式计算：

$$\zeta = \tan \frac{\beta - \varphi_{ak}}{2} \left(\frac{1}{\tan \frac{\beta + \varphi_{ak}}{2}} - \frac{1}{\tan \beta} \right) / \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{ak}}{2} \right) \quad (4.2.5)$$

式中 ζ ——坡面倾斜时荷载折减系数。

4.2.6 土钉杆体截面面积 A_j 可按下列公式计算：

$$A_j \geq 1.15 T_{y,j} / f_{y,j} \quad (4.2.6-1)$$

$$T_{y,j} = \psi \pi d_j \sum q_{sk,i} l_{i,j} \quad (4.2.6-2)$$

式中 A_j ——第 j 根土钉杆体（钢筋、钢管）截面面积；

$f_{y,j}$ ——第 j 根土钉杆体材料抗拉强度设计值；

$T_{y,j}$ ——第 j 根土钉验收抗拔力；

$l_{i,j}$ ——第 j 根土钉在第 i 层土体中的长度；

ψ ——土钉的工作系数，取 0.8 ~ 1.0。

4.3 基坑稳定性验算

4.3.1 复合土钉墙应进行基坑整体稳定性验算；可回收复合土钉墙应按照基坑开挖及使用期、回收期两个阶段分别进行基坑整体稳定性验算，整体稳定性验算可考虑截水帷幕、微型桩、预应力锚杆等构件的作用。

4.3.2 基坑整体稳定性分析（图 4.3.2）可采用简化圆弧滑移面条分法，按下列公式进行验算。最危险滑裂面通过试算搜索求得。验算时应考虑开挖过程中各工况，验算公式宜采用分项系数极限状态表达法：

$$K_{s0} + \eta_1 K_{s1} + \eta_2 K_{s2} + \eta_3 K_{s3} + \eta_4 K_{s4} \geq K_s \quad (4.3.2-1)$$

$$K_{s0} = \frac{\sum c_i L_i + \sum W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (4.3.2-2)$$

$$K_{s1} = \frac{\sum N_{uj} \cos(\theta_j + \alpha_j) + \sum N_{uj} \sin(\theta_j + \alpha_j) \tan \varphi_j}{s_{xj} \sum W_i \sin \theta_i} \quad (4.3.2-3)$$

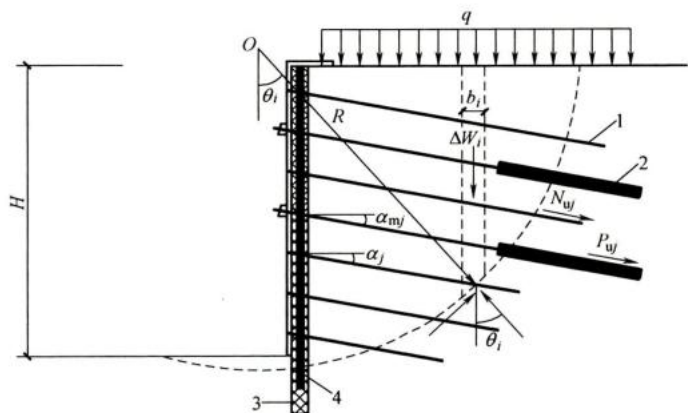


图 4.3.2 复合土钉墙稳定性分析计算

1—土钉；2—预应力锚杆；3—截水帷幕；4—微型桩

$$K_{s2} = \frac{\sum P_{wj} \cos(\theta_j + \alpha_{mj}) + \sum P_{wj} \sin(\theta_j + \alpha_{mj}) \tan \varphi_j}{s_{2xj} \sum W_i \sin \theta_i} \quad (4.3.2-4)$$

$$K_{s3} = \frac{\tau_q A_3}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (4.3.2-5)$$

$$K_{s4} = \frac{\tau_y A_4}{s_{4xj} \sum W_i \sin \theta_i} \quad (4.3.2-6)$$

式中

K_s ——整体稳定性安全系数，对应于基坑安全等级一、二、三级分别取 1.4、1.3、1.2；开挖过程中最不利工况下可乘 0.9 的系数；

K_{s0} 、 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} 、 K_{s4} ——整体稳定性分项抗力系数，分别为土、土钉、预应力锚杆、截水帷幕及微型桩产生的抗滑力矩与土体下滑力矩比；

c_i 、 i ——第 i 个土条在滑弧面上的黏聚力及内摩擦角；

L_i ——第 i 个土条在滑弧面上的弧长；

W_i ——第 i 个土条重量，包括作用在该土条上的各种附加荷载；

θ_i ——第 i 个土条在滑弧面中点处的法线与垂直面的夹角；

η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 ——土钉、预应力锚杆、截水帷幕及微型桩组合作用折减系数，可按本标准第 4.3.3 条取值；

s_{2xj} 、 s_{4xj} ——第 j 根预应力锚杆或微型桩的平均水平间距；

N_{uj} ——第 j 根土钉在稳定区（即滑移面外）所提供的摩阻力，可按本标准第 4.3.4 条取值；

$p_{u,j}$ ——第 j 根预应力锚杆在稳定区（即滑移面外）的极限抗拔力；按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的有关规定计算；

α_j ——第 j 根土钉的倾角；

α_{mj} ——第 j 根预应力锚杆的倾角；

θ_j ——第 j 根土钉或预应力锚杆与滑弧面相交处，滑弧切线与水平面的夹角；

j ——第 j 根土钉或预应力锚杆与滑弧面交点处土的内摩擦角；

τ_q ——假定滑移面处相应龄期截水帷幕抗剪强度标准值，根据试验结果确定；

τ_y ——假定滑移面处微型桩的抗剪强度标准值，可取桩体材料的抗剪强度标准值；

A_3 、 A_4 ——单位计算长度内截水帷幕、单根微型桩的截面积。

4.3.3 组合作用折减系数的取值应符合下列要求：

1 η_1 宜取 1.0;

2 $p_{u,j} \leq 300\text{kN}$ 时, η_2 宜取 0.5 ~ 0.7, 随着锚杆抗力的增加而减小;

3 截水帷幕与土钉墙复合作用时, η_3 宜取 0.3 ~ 0.5, 水泥土抗剪强度取值较高、水泥土墙厚度较大时, η_3 宜取较小值。

4 微型桩与土钉墙复合作用时, η_4 宜取 0.1 ~ 0.3, 微型桩桩体材料抗剪强度取值较高、截面积较大时, η_4 宜取较小值。基坑支护计算范围内主要土层均为硬塑状黏性土等较硬土层时, η_4 取值可提高 0.1。

5 预应力锚杆、截水帷幕、微型桩三类构件共同复合作用时, 组合作用折减系数不应同时取上限。

4.3.4 第 j 根土钉在稳定区的摩阻力 $N_{u,j}$ 应符合下式的规定:

$$N_{u,j} = \pi d_j \sum q_{sk,i} l_{mi,j} \quad (4.3.4)$$

4.3.5 整体稳定性安全系数 K_s 在满足第 4.3.2 条的同时, 分项抗力系数 K_{s0} 、 K_{s1} 、 K_{s2} 的组合应符合下式的规定:

$$K_{s0} + K_{s1} + 0.5K_{s2} \geq 1.0 \quad (4.3.5)$$

4.3.6 复合土钉墙底部存在软弱黏性土时, 应按地基承载力模式进行坑底抗隆起稳定性验算。

4.3.7 坑底抗隆起稳定性 (图 4.3.7) 可按下列公式进行验算:

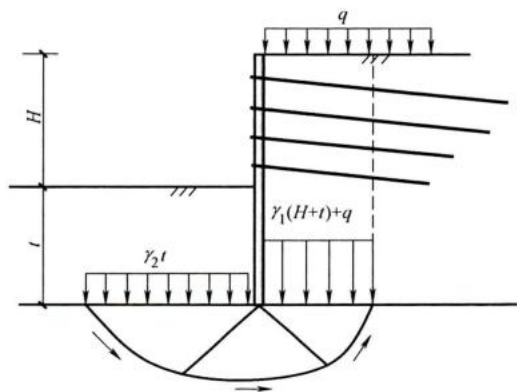


图 4.3.7 坑底抗隆起稳定性验算

$$\frac{\gamma_2 t N_q + c N_c}{\gamma_1 (H + t) + q} \geq K_1 \quad (4.3.7-1)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (4.3.7-2)$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi \quad (4.3.7-3)$$

式中 γ_1 、 γ_2 ——分别为地面、坑底至微型桩或截水帷幕底部各土层加权平均重度；

t ——微型桩或截水帷幕在基坑底面以下的长度；

N_q 、 N_c ——地基承载力系数；

q ——地面及土体中附加荷载；

c 、 φ ——支护结构底部土体黏聚力及内摩擦角；

K_1 ——坑底抗隆起稳定安全系数，对应于基坑安全等级二、三级时分别取 1.4、1.2。

4.3.8 有截水帷幕的复合土钉墙，基坑开挖面以下有砂土或粉土等透水性较强土层且截水帷幕没有穿透该层土时，应进行抗渗流稳定性验算。

4.3.9 抗渗流稳定性（图 4.3.9）可按下列公式进行验算：

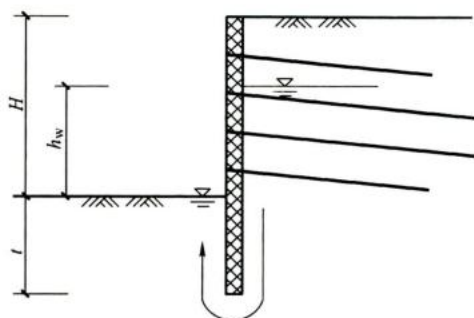


图 4.3.9 抗渗流稳定性验算

$$i_c / i \geq K_{wl} \quad (4.3.9-1)$$

$$i_c = (d_s - 1) / (e + 1) \quad (4.3.9-2)$$

$$i = h_w / (h_w + 2t) \quad (4.3.9-3)$$

式中 i_c ——基坑底面土体的临界水力梯度；

- i ——渗流水力梯度；
 d_s ——坑底土颗粒的相对密度；
 e ——坑底土的孔隙比；
 h_w ——基坑内外的水头差；
 t ——截水帷幕在基坑底面以下的长度；
 K_{w1} ——抗渗流稳定安全系数，对应基坑安全等级一、二、三级时宜分别取 1.50、1.35、1.20。

4.3.10 基坑底面以下存在承压水时（图 4.3.10），可按下式进行抗突涌稳定性计算。当抗突涌稳定性验算不满足时，宜采取降低承压水等措施。

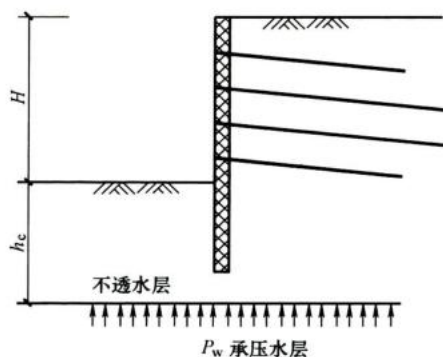


图 4.3.10 抗突涌稳定性验算

$$\gamma_{m2} h_c / P_w \geq K_{w2} \quad (4.3.10)$$

式中 γ_{m2} ——不透水土层平均饱和重度；
 h_c ——承压水层顶面至基坑底面的距离；
 P_w ——承压水水头压力；
 K_{w2} ——抗突涌稳定性安全系数，宜取 1.1。

4.3.11 回收期内，可回收复合土钉墙应按照“分层回填、分层回收；先回填、后回收”的工序，验算各工况条件下的基坑整体稳定性。回收期基坑整体稳定性分析时，应考虑基坑开挖及使用期内已发生的变形影响，采用工程类比与数值模拟相结合的方法

进行分析、验算。

4.4 设计及构造要求

4.4.1 土钉墙的设计及构造应符合下列要求：

- 1 土钉墙坑壁宜适当放坡，坡度系数宜取 0.2 ~ 0.4。
- 2 竖向布置时土钉宜采用中部长、上下短或上长下短布置形式。
- 3 平面布置时应减少阳角，阳角处土钉在相邻两个侧面宜上下错开或角度错开布置。
- 4 面层应沿坡顶向外延伸形成不少于 0.5m 的护肩，在不设置截水帷幕或微型桩时，面层宜在坡脚处向坑内延伸 0.3m ~ 0.5m 形成护脚。
- 5 土钉排数不宜少于 2 排。

4.4.2 土钉的设计及构造应符合下列要求：

- 1 应优先选用成孔注浆土钉。填土、软弱土及砂土等孔壁不易稳定的土层中可选用打入式钢花管注浆土钉。
- 2 土钉与水平面夹角宜为 5° ~ 20° 。
- 3 成孔注浆土钉的孔径宜为 70mm ~ 130mm；杆体宜选用 HRB400 钢筋，钢筋直径宜为 16mm ~ 25mm；全长每隔 1m ~ 2m 应设置定位支架。
- 4 钢管土钉杆体宜采用外径不小于 48mm、壁厚不小于 3mm 的热轧钢管制作。钢管上应沿杆长每隔 0.25m ~ 1.0m 设置倒刺和出浆孔，孔径宜为 5mm ~ 8mm，管口 2m 范围内不宜设出浆孔。杆体底端头宜制成锥形，杆体接长宜采用帮条焊接，接头承载力不应低于杆体材料承载力。
- 5 注浆材料宜选用早强水泥或水泥浆中掺入早强剂，注浆体强度不宜低于 20MPa。

4.4.3 面层的设计及构造应符合下列要求：

- 1 采用钢筋网喷射混凝土面层时，面层混凝土强度等级不应低于 C20，终凝时间不宜超过 4 小时，厚度宜为 80mm ~

120mm。面层中应配置钢筋网。钢筋网可采用 HPB300 钢筋，直径宜为 6mm ~ 10mm，间距宜为 150mm ~ 250mm，搭接长度不宜小于 30 倍钢筋直径。

2 采用新型材料制作的预制面层板应满足面层抗剪和抗弯的要求，预制面层板之间、预制面层板与土钉应连接牢固。

4.4.4 连接件的构造（图 4.4.4）应符合下列要求：

1 土钉之间应设置通长水平加强筋，加强筋宜采用 2 根直径不小于 12mm 的 HRB400 钢筋。

2 喷射混凝土面层与土钉应连接牢固。可在土钉杆端两侧焊接钉头筋，并与面层内连接相邻土钉的加强筋焊接。

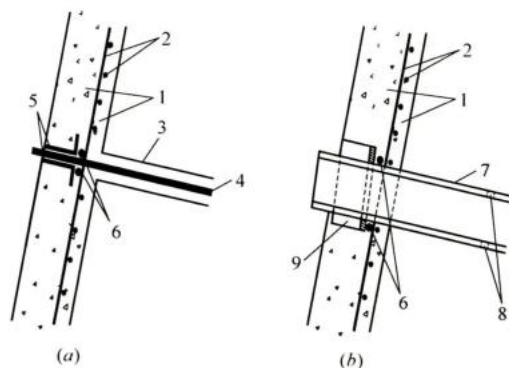


图 4.4.4 土钉与面层连接构造示意

(a) 钻孔注浆钉；(b) 打入式钢管注浆钉

1—喷射混凝土；2—钢筋网；3—钻孔；4—土钉杆体；5—钉头筋；

6—加强筋；7—钢管；8—出浆孔；9—角钢或钢筋

4.4.5 预应力锚杆的设计及构造应符合下列要求：

1 锚杆杆体材料可采用钢绞线、HRB400 或 HRB500 钢筋、精轧螺纹钢及无缝钢管等材料。

2 竖向布置上预应力锚杆宜布设在基坑的中上部；锚杆间距不宜小于 1.5m。

3 钻孔直径宜为 110mm ~ 150mm，与水平面夹角宜为

10°~25°。可回收压力型锚杆的钻孔直径尚应满足承载体尺寸的要求。

4 锚杆自由段长度宜为4m~6m，并应设置隔离套管；钻孔注浆预应力锚杆沿长度方向每隔1m~2m设一组定位支架。

5 锚杆杆体外露长度应满足锚杆张拉锁定的需要；锚具型号及尺寸、垫板截面刚度应能满足预应力值稳定的要求。

6 锚孔注浆宜采用二次高压注浆工艺，注浆体强度不宜低于20MPa。

7 锚杆最大张拉荷载宜为锚杆拉力设计值的1.1倍，且不应大于杆体抗拉强度标准值的80%。锚杆锁定值应根据锚固地层及支护结构变形控制要求确定，锁定值宜取锚杆拉力设计值的60%~85%并应与锚杆预加轴向拉力值一致。

4.4.6 腰梁的设计及构造应符合下列要求：

1 腰梁应通长、连续设置。

2 腰梁宜采用混凝土结构和型钢结构。腰梁应具有足够的强度和刚度。混凝土腰梁的截面和配筋应通过设计计算确定，宽度不宜小于400mm，高度不宜小于250mm，混凝土强度等级不宜低于C25。

3 腰梁应与面层可靠、紧密连接，腰梁与面层之间不得留有空隙。

4.4.7 截水帷幕的设计及构造应符合下列要求：

1 水泥土桩宜选用早强水泥或在水泥浆中掺入早强剂；单位水泥用量水泥土搅拌桩不宜小于原状土重量的13%，高压喷射注浆不宜小于20%；水泥土龄期28天的无侧限抗压强度应不小于0.6MPa。

2 截水帷幕应满足自防渗要求，渗透系数应小于0.01m/d。坑底以下插入深度应符合抗渗流稳定性要求且不应小于1.5m~2m。截水帷幕宜穿过透水层进入弱透水层1m~2m。

3 相邻两根桩的地面搭接宽度不宜小于150mm，且应保证相邻两根桩在桩底面处能够相互咬合。对桩间距、垂直度、桩径

及桩位偏差等应提出控制要求。

4.4.8 微型桩的设计及构造应符合下列要求：

1 微型桩宜采用钢管、型钢、小直径混凝土桩等，直径或等效直径宜取 100mm ~ 300mm。

2 钢管、型钢、小直径混凝土桩等微型桩间距宜为 0.5m ~ 2.0m，嵌固深度不宜小于 2m。桩顶上宜设置通长冠梁。

3 微型桩填充胶结物抗压强度不宜低于 20MPa。

4.4.9 防排水构造应符合下列要求：

1 基坑应设置由排水沟、集水井等组成的排水系统。

2 未设置截水帷幕的土钉墙应在坡面上设置泄水管，泄水管间距宜为 1.5m ~ 2.5m，坡面渗水处应适当加密。

3 泄水管可采用直径 40mm ~ 100mm、壁厚 5mm ~ 10mm 的塑料管制作，插入土体内长度不宜小于 300mm，管身应设置透水孔，孔径宜为 10mm ~ 20mm，开孔率宜为 10% ~ 20%，宜外裹 1 层 ~ 2 层土工布并扎牢。

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.1 复合土钉墙施工前除应做好人员、技术、材料、设备、场地准备外，尚应做好以下准备工作：

1 对照设计图纸认真复核并妥善处理地下、地上管线、设施和障碍物等。

2 明确用地红线、建筑物定位轴线，确定基坑开挖边线、位移观测控制点、监测点等，并妥善保护。

3 掌握基坑工程设计对施工和监测的各项技术要求及有关规范要求，编制专项施工方案，分析关键质量控制点和安全风险源，并提出相应的防治措施。

4 做好场区地面硬化和临时排水系统规划，临时排水不得破坏基坑边坡和相邻建筑的地基。检查场区内既有给水、排水管道，发现渗漏和积水应及时处理。雨季作业应加强对施工现场排水系统的检查和维护，保证排水通畅。

5 编制应急预案，做好抢险准备工作。

5.1.2 基坑周围临时设施的搭设以及建筑材料、构件、机具、设备的布置、车辆运行路线应符合施工现场平面布置图的要求，基坑周边地面荷载严禁超过设计规定。

5.1.3 土方开挖应与土钉、锚杆及降水施工密切结合，开挖顺序、方法应与设计工况相一致；复合土钉墙施工必须符合“超前支护，分层分段，逐层施作，限时封闭，严禁超挖”的要求。

5.1.4 施工过程中发现地质条件、工程条件、场地条件与勘察、设计不符，周边环境出现异常等情况时，应及时会同设计单位处理；出现危险征兆，应立即启动应急预案。

5.2 复合土钉墙施工

5.2.1 复合土钉墙施工宜按以下步骤进行：

- 1 施作截水帷幕和微型桩；
- 2 截水帷幕、微型桩强度满足后，开挖工作面，修整坡面；
- 3 施作土钉、预应力锚杆并养护；
- 4 铺设、固定钢筋网；
- 5 喷射混凝土面层并养护；
- 6 施作腰梁，张拉和锁定预应力锚杆；
- 7 进入下一层施工，重复以上步骤 2~6 直至完成。

5.2.2 截水帷幕的施工应符合下列要求：

1 施工前，应进行成桩试验，工艺性试桩数量不应少于 3 根。应通过成桩试验确定注浆流量、注浆压力、下沉和提升速度等技术参数。水泥浆液的水灰比宜按照试桩结果确定。

2 水泥土桩应采取搭接法施工，相邻桩搭接宽度应符合设计要求。

3 桩位偏差应小于 30mm，桩机导向架垂直度偏差不应大于 0.5%。

4 水泥土搅拌桩施工要求：

- 1) 宜采用喷浆法施工，桩径偏差不应大于设计桩径 4%。
- 2) 施工时应按照试桩确定的搅拌次数和提升速度提升搅拌头；输浆速度宜用流量泵控制，并应与提升速度相协调，应确保喷浆量在桩身长度范围内分布均匀。高塑性黏性土、含砂量较大及暗浜土层中，应增加喷浆搅拌次数。
- 3) 施工中如因故停浆，恢复供浆后，应从停浆点返回 0.5m 重新输浆搅拌。
- 4) 相邻水泥土搅拌桩施工间隔时间不应超过 24h；当超过 24h 时，应采取补强措施。
- 5) 若桩身插筋，宜在搅拌桩完成后 8h 内进行。

5 高压喷射注浆施工要求:

- 1) 宜采用高压旋喷, 高压旋喷可采用单管法、二重管法和三重管法, 设计桩径大于 800mm 时宜用三重管法。
- 2) 高压喷射注浆的喷射压力、提升速度、旋转速度、注浆流量等工艺参数应按照土层性状、水泥土固结体的设计有效半径等选择。
- 3) 喷浆管分段提升时的搭接长度不应小于 100mm。
- 4) 在高压喷射注浆过程中出现压力陡增或陡降、冒浆量过大或不冒浆等情况时, 应查明原因并及时采取措施。
- 5) 应采取隔孔分序作业方式, 相邻孔作业间隔时间不宜小于 24h。

5.2.3 微型桩施工应符合下列要求:

1 插入前应检查微型桩平整度和接头焊缝质量; 桩的接头承载力不应小于母材承载力。

2 对于可回收钢管或型钢, 插入前应先对钢管或型钢除锈, 并在其表面涂刷减摩材料。

3 成孔类微型桩孔内应充填密实, 灌注过程中应防止钢管或钢筋笼上浮。

4 桩位偏差不应大于 50mm, 垂直度偏差不应大于 1.0%。

5.2.4 土钉施工应符合下列要求:

1 注浆用水泥浆的水灰比宜为 0.45 ~ 0.55, 注浆应饱满, 注浆量应满足设计要求。

2 土钉施工中应做好施工记录。

3 钻孔注浆法施工要求:

- 1) 成孔机具的选择要适应施工现场的岩土特点和环境条件, 保证钻进和成孔过程中不引起塌孔; 在易塌孔土层中, 宜采用套管跟进成孔。
- 2) 土钉应设置对中架, 对中架间距 1000mm ~ 2000mm, 支架的构造不应妨碍注浆。
- 3) 钻孔后应进行清孔, 清孔后方应及时置入土钉并进行

注浆和孔口封闭。

- 4) 注浆宜采用压力注浆。压力注浆时应设置止浆塞，注满后保持压力 1 min ~ 2min。

4 击入法施工要求：

- 1) 击入法施工宜选用气动冲击机械，在易液化土层中宜采用静力压入法或自钻式土钉施工工艺。
- 2) 钢管注浆土钉应采用压力注浆，注浆压力不宜小于 0.6MPa，并应在管口设置止浆塞，注满后保持压力 1min ~ 2min。若不出现返浆时，在排除窜入地下管道或冒出地表等情况外，可采用间歇注浆的措施。

5.2.5 预应力锚杆的施工应符合下列要求：

1 锚杆成孔设备的选择应考虑岩土层性状、地下水条件及锚杆承载力的设计要求，成孔应保证孔壁的稳定性。当无可靠工程经验时，可按下列要求选择成孔方法：

- 1) 不易塌孔的地层，宜采用长螺旋干作业钻进和清水钻进工艺，不宜采用冲洗液钻进工艺。
- 2) 地下水位以上的含有石块的较坚硬土层及风化岩地层，宜采用气动潜孔锤钻进或气动冲击回转钻进工艺。
- 3) 松散的可塑黏性土地层，宜采用回转挤密钻进工艺。
- 4) 易塌孔的砂土、卵石、粉土、软黏土等地层及地下水丰富的地层，宜采用跟管钻进工艺或采用自钻式锚杆。

2 杆体应按设计要求安放套管、对中架、注浆管和排气管等构件，腰梁应平整，垫板承压面应与锚杆轴线垂直。

3 锚固段注浆宜采用二次高压注浆法。第一次宜采用水泥砂浆低压注浆或重力注浆，灰砂比宜为 1:0.5 ~ 1:1、水灰比不宜大于 0.6；第二次宜采用水泥浆高压注浆，水灰比宜为 0.45 ~ 0.55，注浆时间应在第一次灌注的水泥砂浆初凝后即刻进行，注浆压力宜为 2.5MPa ~ 5.0MPa。注浆管应与锚杆杆体一起插入孔底，管底距离孔底宜为 100mm ~ 200mm。

4 锚杆张拉与锁定应符合下列要求：

- 1) 锚固段注浆体及混凝土腰梁强度应达到设计强度的 75% 且大于 15MPa 后, 再进行锚杆张拉。
- 2) 锚杆宜采用间隔张拉。正式张拉前, 应取 10% ~ 20% 的设计张拉荷载预张拉 1 ~ 2 次。
- 3) 锚杆锁定时, 宜先张拉至锚杆承载力设计值的 1.1 倍, 卸荷后按设计锁定值进行锁定。
- 4) 变形控制严格的一级基坑, 锚杆锁定后 48h 内, 锚杆拉力值低于设计锁定值的 80% 时, 应进行预应力补偿。

5.2.6 混凝土面层施工应符合下列规定:

1 钢筋网应随土钉分层施工、逐层设置, 钢筋保护层厚度不宜小于 20mm。

2 钢筋的搭接长度不应小于 30 倍钢筋直径; 焊接连接可采用单面焊, 焊缝长度不应小于 10 倍钢筋直径。

3 面层喷射混凝土配合比宜通过试验确定。

4 湿法喷射时, 水泥与砂石的质量比宜为 1:3.5 ~ 1:4, 水灰比宜为 0.42 ~ 0.50, 砂率宜为 0.5 ~ 0.6, 粗骨料的粒径不宜大于 15mm。

5 干法喷射时, 水泥与砂石的质量比宜为 1:4 ~ 1:4.5, 水灰比宜为 0.4 ~ 0.45, 砂率宜为 0.4 ~ 0.5, 粗骨料的粒径不宜大于 25mm。

湿法喷射的混合料坍落度宜为 80mm ~ 120mm。干混合料宜随拌随用, 存放时间不应超过 2h, 掺入速凝剂后不应超过 20min。

6 喷射混凝土作业应与挖土协调, 分段进行, 同一段内喷射顺序应自下而上。

7 当面层厚度超过 100mm 时, 混凝土应分层喷射, 第一层厚度不宜小于 40mm, 前一层混凝土终凝后方可喷射后一层混凝土。

8 喷射混凝土施工缝结合面应清除浮浆层和松散石屑。

9 喷射混凝土施工 24h 后，应喷水养护，养护时间不应少于 7d；气温低于 +5℃ 时，不得喷水养护。

10 喷射混凝土冬期施工的临界强度，普通硅酸盐水泥配制的混凝土不得小于设计强度的 30%；矿渣水泥配制的混凝土不得小于设计强度的 40%。

5.2.7 可回收复合土钉墙回收期施工宜按以下流程进行：

- 1** 巡视检查，分析基坑监测数据，确定回收方案。
- 2** 基坑分层分段回填至可回收土钉、锚杆下部 500mm 处。
- 3** 安装土钉、锚杆回收设备。
- 4** 可回收土钉、锚杆解锁，回收土钉、锚杆。
- 5** 清除微型桩上的腰梁限位件、电焊疤等。
- 6** 进入上一层施工，重复步骤 2) ~ 5) 直至完成土钉、锚杆回收。
- 7** 基坑回填至可回收微型桩顶部。
- 8** 安装微型桩回收设备。
- 9** 回收微型桩。
- 10** 注浆填充微型桩拔出后留下的空隙。

5.2.8 可回收复合土钉墙回收应符合下列要求：

- 1** 土钉、锚杆回收时，应分层分段进行，回收前应将基坑回填至土钉端部以下 500mm，必要时应采取临时支撑等措施。
- 2** 钢管或型钢拔除应在基坑回填完成后进行，拔除宜采用专用液压起拔机。
- 3** 土钉、锚杆或钢管、型钢拔除后，应及时注浆填充拔除后留下的空隙。

5.3 降排水施工

5.3.1 降水井深度、水泵安放位置应与设计要求一致。设有截水帷幕的基坑工程，应待截水帷幕施工完成后方可坑内降水。

5.3.2 基坑降水应遵循“按需降水”的原则；水位应降至设计要求深度。

5.3.3 当设计采用降水方法提高坑底土体承载力时，应提前降水，提前时间应符合设计要求。

5.3.4 降水井停止使用后应及时进行封堵。

5.3.5 基坑内外的排水系统应满足下列要求：

1 宜在基坑场地外侧设置排水沟、集水井等地表水排水系统，有截水帷幕时，排水系统应设置在截水帷幕外侧；排水系统距离基坑或截水帷幕外侧不宜小于 0.5m；排水沟、集水井应具有防渗措施。

2 对基坑周边汇水面积较大或位于山地时，尚应考虑地表水的截排措施。

3 基坑内宜随开挖过程逐层设置临时排水系统。开挖至坑底后，宜在坑内设置排水沟、盲沟和集水坑，排水沟、盲沟和集水坑与基坑边距离不宜小于 0.5m。

4 基坑内、外的排水系统设计应能满足排水流量要求，保证排水畅通。

5.4 基坑开挖

5.4.1 截水帷幕及微型桩应达到养护龄期和设计规定强度后，再进行基坑开挖。

5.4.2 基坑土方开挖分层厚度应与设计要求相一致，分段长度软土中不宜大于 15m，其他一般性土不宜大于 30m。基坑面积较大时，土方开挖宜分块分区、对称进行。

5.4.3 上一层土钉注浆完成后的养护时间应满足设计要求，当设计未提出具体要求时，应至少养护 48h 后，再进行下层土方开挖。预应力锚杆应在张拉锁定后，再进行下层土方开挖。

5.4.4 土方开挖后应在 24h 内完成土钉及喷射混凝土施工。对自稳能力差的土体宜采用二次喷射，初喷应随挖随喷。

5.4.5 基坑侧壁应采用小型机具或铲锹进行切削清坡，挖土机械不得碰撞支护结构、坑壁土体及降排水设施。基坑侧壁的坡率应符合设计规定。

5.4.6 开挖后发现土层特征与提供地质报告不符或有重大地质隐患时，应立即停止施工并通知有关各方。

5.4.7 基坑开挖至坑底后应尽快浇筑基础垫层，地下结构完成后，应及时回填土方。

6 质量检验

6.0.1 复合土钉墙基坑支护施工前应对钢筋、水泥、钢管、砂石等原材料及机械设备工作性能、计量设备等进行检验。

6.0.2 截水帷幕质量检验应符合下列规定：

1 施工过程中应检查桩机垂直度、提升和下沉速度、注浆压力和速度、注浆量、桩长、桩顶标高、桩的搭接长度等。

2 水泥土桩应检验桩直径、搭接长度。检查数量为总桩数的2%，且不小于5根。

3 水泥土桩应检验桩体强度和墙身完整性。检查数量不宜少于总桩数的1%，且不应少于3根。

4 检验点宜布置在以下部位：

1) 施工过程中出现异常情况的桩；

2) 地层情况复杂，可能对截水帷幕质量产生影响的桩；

3) 其他有代表性的桩。

6.0.3 微型桩质量检验应符合下列规定：

1 施工过程中应检查桩机垂直度、桩截面尺寸、桩长、桩距等。

2 微型桩应检验桩身完整性，检验数量为总数的10%，且不少于3根。

6.0.4 土钉墙质量检验应符合下列规定：

1 施工过程中应检查土钉位置，成孔直径、深度及角度，土钉长度，注浆配比、压力及注浆量，墙面厚度及强度，土钉与面板的连接情况、钢筋网的保护层厚度等。

2 土钉应通过抗拔试验检验抗拔承载力。检验数量不宜少于土钉总数的1%，且不应少于3根。

3 喷射混凝土面层应采用钻孔法检验面层厚度。钻孔数宜

每 500m² 墙面积一组，每组不应少于 3 点。

6.0.5 预应力锚杆质量检验应符合下列规定：

1 施工过程中应检查预应力锚杆位置，钻孔直径、长度及倾角，自由段与锚固段长度，浆液配合比、注浆压力及注浆量，锚座几何尺寸，锚杆张拉值和锁定值等。

2 锚杆应采用抗拔验收试验检验抗拔承载力。检验数量不宜少于锚杆总数的 5%，且不应少于 3 根。

6.0.6 降排水工程质量检验应符合下列规定：

1 降水系统施工应检查井点（管）的位置、数量、深度、滤料的填灌情况及排水沟（管）的坡度、抽水状况等。

2 降水系统安装完毕后应进行试抽，检查管路连接质量、泵组的工作状态、井点的出水状况等。

6.0.7 土方开挖质量检验应符合下列规定：

1 土方开挖过程中应检查开挖的分层厚度、分段长度、边坡坡度和平整度。

2 土方开挖完成后，应对基坑坑底标高、基坑平面尺寸、边坡坡度、表面平整度、基底土性进行检验。

6.0.8 复合土钉墙基坑支护的施工质量检验标准应按照现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 的相关规定执行。

7 监 测

7.0.1 复合土钉墙基坑工程监测应符合现行国家标准《建筑基坑工程监测技术规范》GB 50497 的有关规定。

7.0.2 现场监测应采用仪器监测与巡视检查相结合的方法，基坑施工及使用期内应有专人进行巡视检查。

7.0.3 当出现下列情况之一时，必须立即进行危险报警：

- 1 监测项目的内力及变形监测累计值达到报警值。
- 2 复合土钉墙或周边土体的位移值突然明显增大或基坑出现流土、管涌、隆起、陷落或较严重的渗漏等。
- 3 土钉、锚杆体系出现断裂、松弛或拔出的迹象。
- 4 周边地面出现突发裂缝并持续扩展。
- 5 周边建筑的结构部位出现危害结构的变形裂缝。
- 6 周边管线变形突然明显增长或出现裂缝、泄漏等。
- 7 根据当地工程经验判断，出现其他必须进行危险报警的情况。

7.0.4 监测技术成果应包括当日报表、阶段性报告和总结报告。技术成果提供的内容应真实、准确、完整。当日报表应有施工工况描述。技术成果应按时报送。

附录 A 土钉抗拔基本试验

A.0.1 基本试验用土钉均应采用非工作钉。

A.0.2 每一典型土层中基本试验土钉数量不应少于 3 根。

A.0.3 基本试验土钉宜设置 0.5m ~ 1.0m 的自由段，其他条件（施工工艺、设计及施工参数等）应与工作土钉相同。

A.0.4 可按本标准式（4.2.6-2）预估土钉极限抗拔力 T_m 。

A.0.5 选取土钉杆体材料时，应保证杆体抗拉设计值不小于 $1.25T_m$ 。

A.0.6 试验应在注浆体无侧限抗压强度达到 10MPa 后进行。

A.0.7 加载装置、计量仪表等应在有效率定期内；千斤顶的额定负载宜为最大试验荷载的 1.2 倍 ~ 2.0 倍，计量仪表的量程应与之匹配；压力表精度不应低于 0.4 级，位移计精度不应低于 0.01mm；试验装置应保证土钉与千斤顶同轴；反力装置（承压板或支座梁）应有足够的强度和刚度；位移计应远离千斤顶的反力点、避免受到影响。

A.0.8 荷载应逐级增加，加荷等级与观测时间应符合表 A.0.8 规定。每级加荷结束后、下级加荷前及中间时刻宜各测读钉头位移 1 次。

表 A.0.8 土钉抗拔基本试验加荷等级与观测时间

加荷等级	$0.1T_m$	$0.3T_m$	$0.6T_m$	$0.8T_m$	$0.9T_m$	$1.0T_m$	...	破坏
观测时间/min	2	5	5	5	10	10	10	—

A.0.9 每级加荷观测时间内如钉头位移增量小于 1.0mm，可施加下一级荷载，否则应延长观测时间 15min；如增量仍大于 1.0mm，应再次延长观测时间 45min，并应分别在 15、30、45、60min 时测读钉头位移。

A. 0. 10 试验荷载超过 T_m 后, 宜按每级增量 $0. 1T_m$ 继续加荷试验, 直至破坏。

A. 0. 11 试验完成后, 应按每级荷载及对应的钉头位移整理制表, 绘制荷载—位移 ($Q-S$) 曲线。

A. 0. 12 出现下述情况之一时可判定土钉破坏并终止试验:

1 后一级荷载产生的位移量超过前一级 (第一、二级除外) 荷载产生的位移量的 3 倍。

2 钉头位移不稳定 (延长观测时间 45min 内位移增量大于 2. 0mm)。

3 土钉杆体断裂。

4 土钉被拔出。

A. 0. 13 单钉极限抗拔力应取破坏荷载的前一级荷载。

A. 0. 14 每组试验值极差不大于 30% 时, 应取最小值作为极限抗拔力标准值; 极差大于 30% 时, 应增加试验数量, 并按 95% 保证概率计算极限抗拔力标准值。

A. 0. 15 根据土钉极限抗拔力标准值反算土钉与土体粘结强度标准值 q_{sk} 。

附录 B 土钉抗拔验收试验

B.0.1 验收试验土钉数量应为土钉总数的 1%，且应不少于 3 根。

B.0.2 试验应在注浆体无侧限抗压强度达到 10MPa 后进行。

B.0.3 加载装置、计量仪表等应在有效率定期内；千斤顶的额定负载宜为最大试验荷载的 1.2 倍~2.0 倍，计量仪表的量程应与之匹配；压力表精度不应低于 0.4 级，位移计精度不应低于 0.01mm；试验装置应保证土钉与千斤顶同轴；反力装置（承压板或支座梁）应有足够的强度和刚度；位移计应远离千斤顶的反力点、避免受到影响。

B.0.4 试验土钉应与面层完全脱开，处于独立受力状态。

B.0.5 荷载应逐级增加，加荷等级与观测时间宜符合表 B.0.5 规定。每级加荷结束后、下级加荷前及中间时刻宜各测读钉头位移 1 次。

表 B.0.5 土钉抗拔验收试验加荷等级与观测时间

加荷等级	0.1 T_y	0.5 T_y	0.8 T_y	1.0 T_y	1.1 T_y	0.1 T_y
观测时间(min)	2	5	10	10	10	2

B.0.6 每级加荷观测时间内如钉头位移增量小于 1.0mm，可施加下一级荷载，否则应延长观测时间 15min；如增量仍大于 1.0mm，应再次延长观测时间 45min，并分别在 15、30、45、60min 时测读钉头位移。

B.0.7 试验完成后，应按每级荷载对应的钉头位移整理制表，绘制荷载—位移（ $Q-S$ ）曲线。

B.0.8 出现下述情况之一时可判定土钉破坏：

- 1 后一级荷载产生的位移量超过前一级（第一级除外）荷

载产生的位移量的 3 倍。

2 钉头位移不稳定（延长观测时间 45min 内位移增量大于 2.0mm）。

3 杆体断裂。

4 土钉被拔出。

B.0.9 土钉破坏或加载至 $1.1T_y$ 时位移稳定，应终止试验。

B.0.10 单钉抗拔力应取破坏荷载的前一级荷载，如没有破坏则应取最大试验荷载。

B.0.11 验收合格标准：检验批土钉平均抗拔力不应小于 T_y ，且单钉抗拔力不应小于 $0.8T_y$ 。不能同时符合这两个条件则应判定为验收不合格。

B.0.12 验收不合格时，可抽取不合格数量 2 倍的样本扩大检验。将扩大抽检结果计入总样本后如仍不合格，则应判断该检验批产品不合格，并应对不合格部位采取相应的补救措施。

本标准用词说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 标准中指定应按其他标准执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 2 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》 GB 50086
- 3 《岩土工程勘察规范》 GB 50021
- 4 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》 GB 50202
- 5 《建筑基坑工程监测技术规范》 GB 50497
- 6 《建筑地基处理技术规范》 JGJ 79
- 7 《建筑桩基技术规范》 JGJ 94
- 8 《建筑基坑支护技术规程》 JGJ 120

山东省工程建设标准

复合土钉墙基坑支护技术标准

DB 37/T 5145—2019

条文说明

编制说明

《复合土钉墙基坑支护技术标准》DB 37/T 5145—2019 经山东省住房和城乡建设厅、山东省市场监督管理局 2019 年 8 月 15 日以鲁建标字〔2019〕20 号公告批准、发布。

本标准是在《复合土钉墙基坑支护施工及验收规范》DBJ14-047—2007 的基础上修订完成的。修订过程中，编制组进行了广泛和深入的调查研究，总结了我国复合土钉墙基坑支护的设计、施工、检验、监测的实践经验，同时参考了国外先进的技术法规、技术标准。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《复合土钉墙基坑支护技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1 总则	44
2 术语和符号	45
3 基本规定	46
4 设计	52
4.1 一般规定	52
4.2 土钉长度及截面的确定	54
4.3 基坑稳定性验算	55
4.4 设计及构造要求	59
5 施工	62
5.1 一般规定	62
5.2 复合土钉墙施工	63
5.3 降排水施工	64
5.4 基坑开挖	64
6 质量检验	65
7 监测	66
附录 A 土钉抗拔基本试验	67
附录 B 土钉抗拔验收试验	68

1 总 则

1.0.4 本条规定除遵守本标准外，复合土钉墙基坑支护尚应符合国家现行有关标准的规定。与本标准有关的国家现行规范、规程主要有：

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086
- 3 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 4 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
- 5 《建筑基坑工程监测技术规范》GB 50497
- 6 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 7 《建筑桩基技术规范》JGJ 94
- 8 《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120
- 9 其他未列出的相关标准。

2 术语和符号

2.1.4 用作截水帷幕的水泥土桩主要有水泥土搅拌桩和高压喷射水泥土桩。

2.1.5 微型桩包括直径 100mm ~ 300mm 的灌注桩（骨架可为钢筋笼、型钢、钢管等，胶结物可为混凝土、水泥砂浆、水泥净浆等）和各种材料及形式的预制构件，如小直径预制桩、木桩、型钢等。本标准计取了微型桩对基坑整体稳定性的贡献。

2.1.6 复合土钉墙中强调以土钉为主要受力构件，整体稳定性主要由土和钉的共同作用提供，同时考虑预应力锚杆、截水帷幕、微型桩对整体稳定性的贡献。

3 基本规定

3.0.1 作为基坑工程的专项技术标准之一，复合土钉墙基坑支护安全等级宜与现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 相一致。《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 中规定，应综合考虑基坑周边环境状况、地质条件的复杂程度、基坑深度等因素，根据可能产生的破坏后果的严重程度，按表 1 采用基坑支护的安全等级。对基坑的不同侧壁，可采用不同的安全等级。

表 1 基坑支护安全等级

安全等级	破坏后果
一级	支护结构失效、土体失稳或基坑过大变形对基坑周边环境及主体结构施工的影响很严重
二级	支护结构失效、土体失稳或基坑过大变形对基坑周边环境及主体结构施工的影响严重
三级	支护结构失效、土体失稳或基坑过大变形对基坑周边环境及主体结构施工的影响不严重

3.0.2 复合土钉墙基坑支护的形式主要有下列七种形式(图 1)：

- 1 截水帷幕复合土钉墙 [图 1 (a)]。
- 2 预应力锚杆复合土钉墙 [图 1 (b)]。
- 3 微型桩复合土钉墙 [图 1 (c)]。
- 4 截水帷幕——预应力锚杆复合土钉墙 [图 1 (d)]。
- 5 截水帷幕——微型桩复合土钉墙 [图 1 (e)]。
- 6 微型桩——预应力锚杆复合土钉墙 [图 1 (f)]。
- 7 截水帷幕——微型桩——预应力锚杆复合土钉墙 [图 1 (g)]。

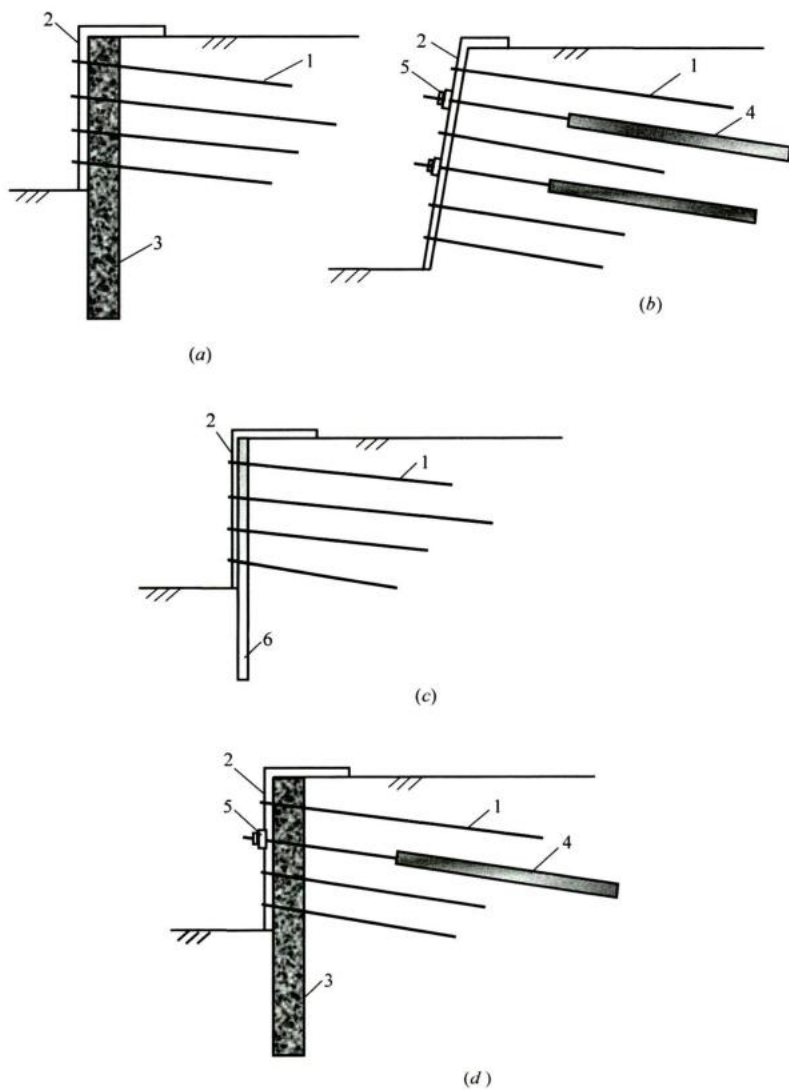


图1 复合土钉墙基坑支护形式(一)

(a) 截水帷幕复合土钉墙; (b) 预应力锚杆复合土钉墙;
(c) 微型桩复合土钉墙; (d) 截水帷幕—预应力锚杆复合土钉墙

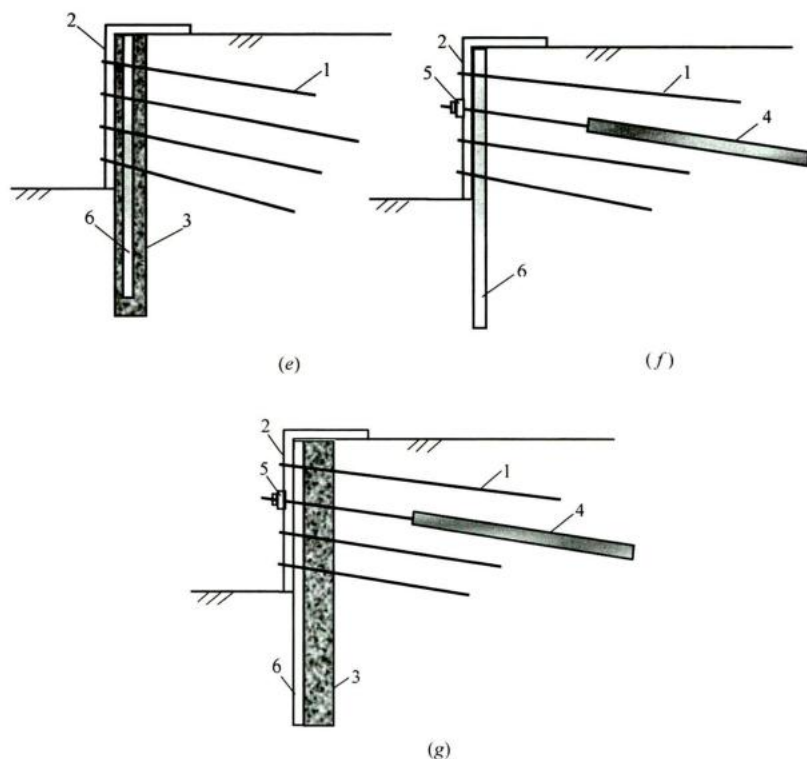


图1 复合土钉墙基坑支护形式(二)

(e) 截水帷幕—微型桩复合土钉墙; (f) 微型桩—预应力锚杆复合土钉墙;

(g) 止水帷幕—微型桩—预应力锚杆复合土钉墙

1—土钉; 2—喷射混凝土面层; 3—截水帷幕;

4—预应力锚杆; 5—腰梁; 6—微型桩

复合土钉墙支护方案的选型应综合考虑土质、地下水、周边环境以及现场作业条件,通过工程类比和技术经济比较后确定。有地下水影响时,宜采用有截水帷幕参与工作的复合土钉墙形式;周边环境对基坑变形有较高控制要求或基坑开挖深度较深时,宜采用有预应力锚杆参与工作的复合土钉墙形式;基坑侧壁

土体自立性较差时，宜采用有微型桩参与工作的复合土钉墙形式；当受多种因素影响时，应根据具体情况采取多种组合构件共同参与工作的复合土钉墙形式。

3.0.3 复合土钉墙较一般土钉墙具有更广泛的适用性。截水帷幕在隔水的同时，对土体也起到了加固的作用，增加了坑壁的自稳能力，因此较一般土钉墙，复合土钉墙适用于地下水位浅、土体强度低、自立性差的地层中，在我国诸多软土地区较浅基坑（一般坑深不超过 5m ~ 7m）中有广泛的工程实践，积累了丰富的经验。但在软土地层中采用复合土钉墙应满足一定的限制条件，许多工程实践表明，当基坑计算范围内存在厚度大于 5m 的流塑状土（当为淤泥和泥炭时厚度大于 2m）或坑底存在泥炭时不宜采用复合土钉墙支护；当坑底为淤泥和淤泥质土时应慎用复合土钉墙支护，如果采用，须对坑底软弱土层进行加固或采取设置强度较大的微型桩等其他加强措施。

在饱和粉土、砂土地层中，尤其要防止出现流砂，没有有效的降水、截水措施则不得采用复合土钉墙支护；而基坑开挖深度范围内如有承压水作用则应采取降水减压措施后再使用。

3.0.5 当场地条件允许，复合土钉墙支护宜有一定的坡率，放坡开挖较直立开挖的复合土钉墙更有利于保证基坑稳定性，尤其是采用预应力锚杆后，对控制基坑变形更加有利，开挖深度也可以进一步增大。

经工程统计，诸多基坑深度在 13m 以内，将直立开挖的复合土钉墙基坑深度限定在 13m 更有利于工程应用。

3.0.7 复合土钉墙基坑支护的变形与地质条件、周边环境条件、施工工况以及基坑开挖深度、土钉长度、土钉注浆量、基坑单边长度、超前支护刚度等多方面因素有关，由于地质勘察所获得的数据还很难准确代表岩土层的全面情况，对岩土层和复合土钉墙本身所作的计算模型、计算假定等也不能完全准确代表实际状况，而施工过程中复合土钉墙受力又经常发生动态变化，因此目前对复合土钉墙基坑支护的变形进行计算是十分困难的。

复合土钉墙基坑支护的变形可用有限元等数值分析方法做出估算，但成果的可靠性难以评估。目前较成熟的复合土钉墙变形计算研究成果主要是根据监测资料反演取得的。一些重要的、大型基坑工程建立了数值分析模型，将已观测到的成果作为数据输入，据此预测下一步变化，如此反复，得出的预测值与实测较为接近。但是，由于建模的复杂性及早期预测的准确度较低等因素，这类方法目前没能普遍应用。近些年，不少学者致力于建立相对简单的经验公式对变形进行预测，取得了一定的成果，但成果都是针对某地层、某地区取得的。

图2是上海市工程建设标准《基坑工程技术规范》DG/TJ08-61—2010提出的上海地区估算复合土钉墙位移的经验公式。图中单排超前支护指单排水泥土搅拌桩（宽0.7m），双排超前支护指双排水泥土搅拌桩（宽1.2m）。

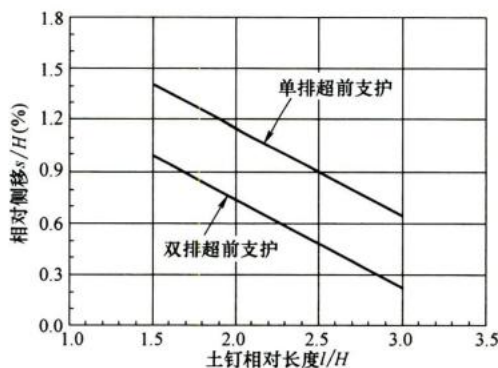


图2 土钉支护位移估算

3.0.10 复合土钉墙基坑工程监测是一个系统，系统内的各项目监测有着必然的、内在的联系。某一单项的监测结果往往不能揭示和反映基坑工程的整体情况，必须形成一个有效的、完整的、与设计施工工况相适应的监测系统并跟踪监测，才能通过监测项目之间的内在联系做出准确地分析、判断，因此监测项目的确定要做到重点量测、项目配套。

基坑工程设计方应根据地层特性和周边环境保护要求，对复合土钉墙进行必要的计算与分析后，结合当地的工程经验确定合适的监测报警值。

3.0.11 从基坑开挖至地下工程完成、基坑回填为止，基坑支护工程经历基坑施工期、使用期两个阶段。为控制基坑位移，基坑施工期内应连续施工。本标准基坑工程安全性设计指标基于基坑属于临时性工程，因此基坑工程的使用期不应超过1年。当使用期超过1年或设计规定后，应对基坑安全进行评估，依据基坑工程现状重新评价基坑稳定性、构件的承载能力，并应重新确定环境保护所对应的变形控制指标，以确保基坑及周边环境的安全与正常使用。基坑施工期、使用期内如遇停工，停工时间也应计入使用期内。

4 设 计

4.1 一 般 规 定

4.1.3 附加荷载包括基坑周边施工材料和机械设备荷载、邻近既有建筑荷载、周边道路车辆荷载等。对基坑周边土方运输车等重型车辆荷载、土方堆置荷载等应作必要的复核或荷载限制。

4.1.4 因为坑中坑设计和处理不当而造成的基坑事故屡有发生。坑中坑对复合土钉墙支护的局部稳定存在不利影响，进而可能引发基坑整体性破坏。

4.1.8 岩土物理力学指标的选取直接影响设计和验算结果，诸多基坑工程事故的发生与设计及验算时选取的岩土物理力学指标不合理有关。岩土物理力学指标的选取不能机械地依据地质勘察报告，有时勘察阶段与基坑施工阶段会有诸多不同，还应考虑周边环境变化、基坑降水、土体固结的情况、相关参数试验方法并结合现场试验、当地经验做出分析判断后合理取值。一般情况下，侧压力计算时，宜采用直剪固结快剪指标或三轴固结不排水剪切指标。稳定性验算时，饱和软土宜采用三轴不固结不排水剪切、直剪快剪指标或十字板剪切试验指标，粉土、砂性土、碎石土宜采用原位测试取得的有效应力指标，其他土层宜采用三轴固结不排水剪切或直剪固结快剪指标。

4.1.9 表 4.1.9 数据是根据大量抗拔试验结果反算出来的，试验时，土钉长度为 6m ~ 12m；钻孔注浆土钉采用一次重力式注浆工艺，成孔直径 70mm ~ 120mm。钢管注浆土钉均设置倒刺，倒刺排距 0.25m ~ 1.0m，数量（2 ~ 4）个/m，注浆压力 0.6MPa ~ 1.0MPa。反算时，假定钢管注浆土钉直径 80mm；钻孔注浆土钉如无明确要求则假定直径 100mm。

备注中的压力注浆指注浆压力大于 0.6MPa，二次注浆系指

第二次采用高压注浆。

表 4.1.9 土钉与土体粘结强度标准值 q_{sk} 是以一定工艺为基础的统计值，也参考了相关规范和工程经验，给出的 q_{sk} 值是一个较宽泛的范围值。由于各地区地层特性差异和施工工艺区域性特点明显， q_{sk} 取值原则是有地区经验情况下，应优先根据地区经验选取。

4.1.10 土钉及锚杆施工易造成水土流失，可能对周边环境产生不利影响，土钉及锚杆设置时应予以充分考虑；此外，基坑回填后土钉及锚杆残留在土体中，也可能会影响邻近地块的后续工程，必要时可采用可回收式锚杆及土钉。

4.1.11 冻融对季节性冻土影响非常明显，季节性冻土区采用复合土钉基坑支护时，应考虑冻胀后土钉受力增大、基坑位移增加以及融化后土体强度降低等不利影响。有研究表明，在冻胀力作用下土钉所受拉力会比初始拉力大 3~5 倍，土钉拉力分布形式也将发生改变；同时喷射混凝土面层后的土压力增大，基坑位移增加并且解冻后不可恢复。考虑地下水的影响，尤其是在有渗水的情况下，复合土钉墙不宜设置短土钉；考虑冻融深度的影响，该范围内的土体强度和模量以及土钉与土体的界面粘结强度也应适度折减；设计和施工还应确保土钉钉头连接牢固，同时应加强基坑监测。

4.1.14 复合土钉墙基坑变形既受荷载作用下土体自身变形的影响，同时还受到周边环境变形控制的约束。受荷作用下土体自身变形的大小主要与荷载、土性、开挖深度等因素有关。复合土钉墙基坑在满足自身稳定的同时，还应考虑变形对周边环境的影响，满足周边环境对变形的控制要求。

变形控制指标是基坑正常变形的一个范围值，反映的是基坑仍处于正常状态之中，是基坑变形设计的允许控制指标，超出该指标意味着基坑可能进入安全储备低、变形异常甚至基坑进入危险工作状态。

确定非常准确的基坑变形控制指标是十分困难的。从我国复

合土钉墙工程实践和现有的研究水平出发,编制组在对 202 个复合土钉墙基坑工程监测数据的分析基础上,结合工程经验和地方工程建设标准等,提出了依据地质条件、基坑支护安全等级以及基坑深度的分类变形控制指标建议值。

对 202 个复合土钉墙基坑工程监测统计情况分析,结果表明,复合土钉墙侧向位移范围一般在 $0.1\% H \sim 1.5\% H$ (H 为基坑开挖深度) 之间,软土中多数在 $0.3\% H \sim 1.5\% H$ 之间,一般土层中多数在 $0.1\% H \sim 0.7\% H$ 之间。

4.2 土钉长度及截面的确定

4.2.1 表 4.2.1 提供的土钉长度及间距主要依据工程经验,用于初步选择复合土钉墙中土钉的设计参数。设计时须进行稳定性分析验算,根据验算结果再对土钉初选设计参数进行修改和调整。

表 4.2.1 给出的土钉长度与基坑深度比是一个范围值,基坑较浅时可取较大值,有预应力锚杆或截水帷幕时可取较小值。

4.2.3 图 4.2.3 (b) 是根据工程实测数据并考虑安全条件后简化的结果,通过假定土体侧压力总值等于朗肯主动土压力计算后得出。

假定土钉轴向荷载标准值的主要目的是为了估算土钉的长度与分布密度。

4.2.4 规定 $p_{m, \max}$ 不宜小于 $0.2\gamma_{ml} H$ 的主要目的是避免局部土钉长度偏短。

4.2.5 ζ 是在一定假设条件下得到的半理论半经验系数,该假设条件是土压力水平向分布且作用在面层上。实际上,复合土钉墙的主动土压力并不作用在面层上, ζ_p 也不是作用在倾斜面上的主动土压力。

4.2.6 检验土钉施工质量的最好办法是对土钉进行全长现场抗拔试验,故应对抗拔力进行设计计算以便于工程检测。土钉验收抗拔力并非该土钉应承受的荷载,只是设计检验值,与计算单根

土钉长度时假定的土钉轴向荷载标准值没有对应关系。

考虑到土体的变异性、施工水平的波动性及对成品土钉的保护，式（4.2.6-2）中引入了工作系数，其主要目的是防止过高评估土钉验收抗拔力在整体稳定中的作用。

4.3 基坑稳定性验算

4.3.1 一些文献中，把滑移面全部或部分穿过被土钉加固的土体时的破坏模式称为“内部稳定破坏”，完全不穿过时称为“外部整体稳定破坏”或“深部稳定破坏”。按本标准推荐的整体稳定性验算模型及公式，程序自动搜索最危险滑移面时，是不分“内外”的，搜索到的最危险滑移面，是土体、土钉及各复合构件提供的安全度之和为最小值的滑移面，如果此时土钉及各构件的贡献值为零，即为“外部整体稳定”模式。但经验与理论分析表明，土钉贡献值为零的情况不会出现，因为最危险滑移面至少要穿过最下一排或最长一排土钉，如图3曲线1所示。曲线2为“外部整体稳定”最危险滑移面，与曲线1相比，因位置后移导致滑弧长度增加，土体抗剪强度提供的安全度增加。土钉在滑弧外的长度 l_m 很小时，摩阻力 N_u 很小， N_u 对安全度的贡献，小于曲线1后移至曲线2时土体抗剪强度提供的安全度增量，故曲线2的安全度大于曲线1，曲线2并非最危险滑移面。故本标准不采用“外部整体稳定”及“内部整体稳定”等概念。

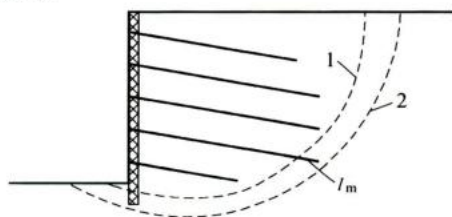


图3 整体稳定性分析比较

整体稳定验算可计取止水帷幕、预应力锚杆及微型桩的作

用，这是对大量工程实践统计的结果。如果不计取这些构件的作用，设计将过于保守，不仅与事实不符，且有些情况下（如在软弱土层中）设计计算很难达到一定的安全度，人为地限制了复合土钉墙技术的应用。当然，也不能过高估算这些复合构件的作用，如果这些复合构件（如微型桩或锚杆）起到了主导性作用，就已经不适用本标准推荐的整体稳定性验算公式了。验算公式中，通过设置组合作用折减系数，限制了这些复合构件的作用程度。

4.3.2 本公式以在国内广泛使用、直观、易于理解的瑞典条分法作为理论基础，采用极限平衡法作为分析方法，认为截水帷幕、预应力锚杆及微型桩能够与土钉共同工作，计算时考虑这些复合构件的作用。

为便于研究，公式作了如下假定及简化：

- 1 破坏模式为圆弧滑动破坏；
- 2 土钉为最主要受力构件；
- 3 土钉、预应力锚杆只考虑抗拉作用，截水帷幕及微型桩只考虑抗剪作用，忽略这些构件的其他作用；
- 4 破坏时土钉与土体能够发挥全部作用，复合构件不能与土钉同时达到极限平衡状态，即不能发挥最大作用，也不能同时发挥较大作用，必须要按一定规则进行强度折减，构件强度越高、类型越多、组合状态越不利，则折减越大；
- 5 预应力锚杆拉力的法向分力与切向分力可同时达到极限值，但只是计取假定滑动面之后的锚固段提供的抗滑力矩；
- 6 滑动面穿过截水帷幕或微型桩时，平行于桩的正截面；
- 7 不考虑地震作用；
- 8 安全系数定义为滑动面的抗滑力矩与滑动力矩之比。

破裂面的形状不能事先确定，取决于坡面的几何形状、土体的性状、土钉参数及地面附加荷载等许多因素，采用圆弧形主要因为它与一些试验结果及大多数工程实践比较接近，且分析计算

相对容易一些。在某些特殊情况下，圆弧滑动并非最佳，需要与其他破坏模式对比。例如：（1）在深厚的软土地层，采用圆弧形可能会高估计软土的被动土压力，如图 4（a）所示，土钉墙可能会沿着 2 曲线破坏而并非圆弧 1，因土质软弱，坑底的滑移面不会扩展到很远的地方。（2）基坑上半部分为软弱土层、下半部分为坚硬土层，且层面向基坑内顺层倾斜时，可能产生顺层滑动，破裂面为双折线、或上曲下直的双线，如图 4（b）所示。（3）土体中存在较薄弱的土层或薄夹层时，可能会产生沿薄弱面的滑动破坏，如图 4（c）所示。

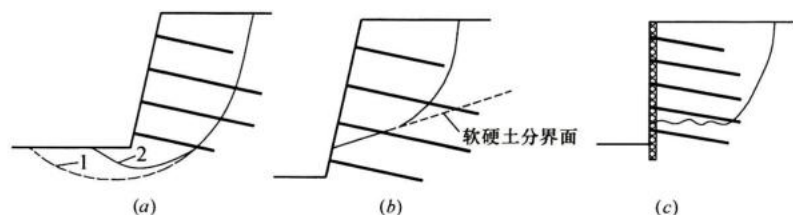


图 4 特殊地质条件下的破坏模式

无试验资料或类似经验时，截水帷幕如采用深层搅拌法形成，可按表 2 取值（喷浆法，单轴，2 喷~4 喷、4 搅工艺），工艺不同时可参考该表取值。高压喷射注浆法形成的水泥土截水帷幕抗剪强度可参考表 2、按水泥土设计抗压强度标准值的 15%~20% 取值，但最大不应超过 800kPa。

表 2 深层搅拌法水泥土抗剪强度标准值 τ_s

抗压强度/MPa	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
抗剪强度/kPa	100~250	150~300	200~400	400

4.3.3 式 (4.3.2-1) 是个半经验半理论公式，其中的组合作用折减系数根据实际工程反算而来。反算时，在国内外已实施的约 500 个复合土钉墙案例中，挑选了 202 个有代表性的进行了详细计算。思路为：通过对一些特殊案例（已塌方或变形很大的工

程) 的定性分析及定量计算, 估算出折减系数的大致范围, 然后通过大量的案例 (正常使用的工程), 验证该范围的合理性。

组合作用折减系数 η 是经验值, 根据大量失稳、濒临失稳及正常使用工程的监测数据反算而来。反算时做了如下假设:

1 基坑坍塌时支护体系达到了承载能力极限状态, 略低于临界稳定, 整体稳定安全系数 K_s 为 0.98 ~ 0.99。

2 基坑水平位移很大时, 支护体系为正常使用极限状态, 接近临界稳定, K_s 为 1.01 ~ 1.03。

3 正常使用时, 土钉墙的位移量与整体稳定安全系数 K_s 之间大致存在着表 3 所示的经验关系:

表 3 土钉墙位移与整体稳定安全系数 K_s 关系

位移量级	很小	较小	一般	较大	很大
位移比/%	<0.2	0.2 ~ 0.4	0.35 ~ 0.7	0.6 ~ 1.0	>1.0
位移/mm	10 ~ 20	15 ~ 40	25 ~ 70	40 ~ 100	>100
K_s	>1.40	1.30 ~ 1.45	1.15 ~ 1.35	1.05 ~ 1.20	1.01 ~ 1.05

4 微型桩与土钉墙结合后整体性不如截水帷幕与土钉墙结合后整体性效果好。

5 预应力锚杆的组合作用折减系数取 0.5 时, 作用效果与将其视为土钉相当。而预应力锚杆的作用效果应好于将之完全视为土钉。

提高截水帷幕及微型桩材料的抗剪强度、增大截面面积等会使复合构件自身抗剪能力得到较大提高, 但复合土钉墙整体稳定性依靠的是土、土钉与复合构件的协同作用, 复合构件自身抗剪能力的提高与复合土钉墙整体稳定性的提高并不同比增长。

4.3.5 复合土钉墙的整体稳定性首先应由土与土钉的共同作用提供基本保证, 设置复合构件的主要目的是隔水或减小变形、控制位移, 同时对整体稳定性亦有贡献。本条规定保证了土钉是最主要受力构件, 弱化了复合构件的抗力作用, 从而保证了工程安全性及整体稳定性验算公式的适用性。

大量基坑监测数据统计结果表明,如满足以下条件,基坑位移不大:

- 1 截水帷幕单独或与微型桩组合作用时, $K_{s0} + K_{s1} \geq 0.86$;
- 2 微型桩单独作用时, $K_{s0} + K_{s1} \geq 0.97$;
- 3 预应力锚杆单独作用时, $K_{s0} + K_{s1} \geq 0.96$;
- 4 截水帷幕及微型桩分别与预应力锚杆组合或三者一起组合作用时, $K_{s0} + K_{s1} + 0.5K_{s2} \geq 1.0$ 。

本条统一为式 (4.3.5), 是偏于安全的。

4.3.6 常用的基坑抗隆起稳定性分析模式主要有地基承载力模式及圆弧滑动模式。复合土钉墙的刚度及构件强度均较弱, 很难形成转动中心, 不宜采用圆弧滑动模式。

4.3.7 采用式 (4.3.7-1) 验算坑底抗隆起稳定性时, 注意以下问题:

- 1 式 (4.3.7-1) 忽略了土钉及锚杆的抗剪作用。
- 2 坡面倾斜时可考虑倾斜区土体自重减轻的有利因素。
- 3 以下情况可计取 t : 微型桩为直径大于 200mm 的钻孔混凝土桩、不小于 16 号的工字钢、预制桩或预应力管桩, 间距不超过 4 倍桩径; 插入不小于 12 号工字钢的水泥土墙; 厚度不小于 1m 的水泥土墙等。
- 4 以下情况不宜计取 t : 厚度小于 0.5m 的水泥土墙; 超前支护桩为竹桩、直径不大于 48mm 的钢管及直径不大于 50mm 的木桩等。
- 5 坡脚附近有软弱土层的一级基坑, 采用复合土钉墙支护很难满足抗隆起稳定性要求, 故没有给出安全等级为一级的基坑抗隆起稳定安全系数指标。

4.4 设计及构造要求

4.4.1 从利于基坑稳定和控制变形考虑, 土钉在竖向布置上不应采用上短下长布置形式。上下等长这种布置形式性价比不好, 一般只在基坑较浅、坡角较大、土质较好及土钉较短时采用。上

长下短这种布置形式有利于减小坑顶水平位移，但有时因上排土钉受到周边环境（如地下管线或障碍物）限制可能难以实施。中部长上下短这种布置形式性价比较好，宜优先选用。在这种布置形式中，第一排土钉对减少土钉墙位移有较大帮助，所以也不宜太短。

4.4.2 成孔注浆钉施工质量容易保证，与土层摩阻力较高，应优先选用。

4.4.3 ~ 4.4.4 面层及连接件受力较小，一般按构造设计即可满足安全要求。

4.4.5 预应力锚杆间距小于 1.5m 时，为减小群锚效应，相邻锚杆可采用不同倾角、不同长度的布置方式。基坑阳角处两侧的预应力锚杆可斜向设置，使锚杆锚固段远离阳角、位于阳角滑移面之外。

本条还规定，预应力锚杆的自由段长度宜为 4m ~ 6m。控制预应力锚杆自由段长度的目的是：（1）土钉对土体变形比预应力锚杆敏感，即较小的位移即可使土钉承受较大的荷载，为使土钉与预应力锚杆在相同位移下受力协调，应控制预应力锚杆变形不能太大；（2）复合土钉墙中的预应力锚杆自由段长度 4m ~ 6m 能够满足张拉伸长产生预应力的要求。

复合土钉墙基坑位移往往会引起预应力锚杆应力值增大。锚杆锁定时，应为基坑开挖变形后锚杆预应力的增长留有余地，故锁定值宜取锚杆轴向承载力设计值的 60% ~ 90%。

4.4.6 钢筋混凝土腰梁具有刚度大、与桩的结合紧密、锚杆预应力损失小等优点，因此宜优先选用。当采用钢腰梁时，一定要保证钢腰梁的刚度满足锚杆设计锁定值要求，截面应通过设计计算确定，并应充分考虑缺陷的影响。

腰梁可按以锚杆为支点的多跨连续梁设计计算。

预应力锚杆与面层及腰梁连接构造可参考图 5。

4.4.8 微型桩宜采用小直径混凝土桩、型钢及钢管等，特殊情况下也可采用木桩、竹桩、管桩等。采用木桩、竹桩时桩间距宜

适当减小。

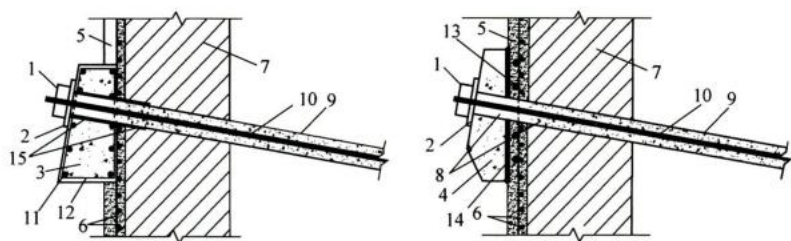


图5 预应力锚杆与面层及腰梁连接构造示意

- 1—锚具；2—钢垫板；3—腰梁；4—承压板；5—喷射混凝土；6—钢筋网；
7—土体、截水帷幕或微型桩；8—预留孔；9—钻孔；10—杆体；11—腰梁主筋；
12—腰梁箍筋；13—加强筋；14—水泥砂浆；15—预留孔套管

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.1 位移观测控制点包括基准点和工作基点，基坑工程施工前应布设好位移观测控制点和监测点，并予以妥善保护。

水患是复合土钉墙基坑支护的“大敌”。雨水和施工用水下渗、旧管道渗漏等会使土体下滑力增大，抗剪强度降低，从而引发基坑坍塌事故，因此应做好场区的排水系统规划和地面硬化，地面排水坡度不宜小于0.3%，并宜设置排水沟。

5.1.2 地面超载是复合土钉墙基坑支护的又一“大敌”。土方、材料、构件、机具的超载堆放，大型运输车辆随意改变行车路线等都易导致基坑坍塌事故的发生，因此，本条强调应按照施工现场平面布置图进行材料、构件、机具、设备的布置，而施工现场平面布置图应基坑工程设计工况相一致。

5.1.3 本条提出了复合土钉墙施工的20字方针，即“超前支护，分层分段，逐层施作，限时封闭，严禁超挖”，20字方针是复合土钉墙长期施工经验的总结。

为了控制地下水和限制基坑侧壁位移，保证基坑稳定，截水帷幕、微型桩应提前施工完成，达到规定强度后方可开挖基坑，即所谓“超前支护”。

基坑开挖所产生的地层位移受时空效应的影响，开挖暴露的面积越大，位移也越大，为控制位移，施工应按照设计工况分段、分层开挖，分层厚度应与土钉竖向间距一致。下层土的开挖应等到上层土钉注浆体强度达到设计强度的70%后方可进行。

每层开挖后应及时施作该层土钉并喷护面层，封闭临空面，减少基坑无土钉的暴露时间，即所谓“逐层施作，限时封闭”，一般情况下，应在1d内完成土钉安设和喷射混凝土面层；在淤

泥质地层和松散地层中开挖基坑时，应在 12h 内完成土钉安设和喷射混凝土面层。

超挖是基坑工程的又一“大敌”。工程中因超挖而造成的基坑坍塌事故屡有发生，即使未造成基坑坍塌事故，基坑开挖期位移过大，也会使基坑使用期的安全度下降。因此，分层开挖时应严格控制每层开挖深度，协调好挖土与土钉施工的进度，严禁多层一起开挖或一挖到底。

5.2 复合土钉墙施工

5.2.1 本条规定的流程为截水帷幕-微型桩-预应力锚杆复合土钉墙形式的施工流程，其他组合形式的复合土钉墙施工流程应根据组合构件在此基础上取舍。

复合土钉墙先施工截水帷幕还是先施工微型桩，应根据不同施工工艺确定，如果微型桩是非挤土桩，可以先施工截水帷幕，后施工微型桩；如果微型桩是挤土桩，则宜先施工微型桩，再施工截水帷幕。

5.2.2 水泥土桩止水帷幕的水泥掺量应符合设计要求，水泥浆液的水灰比宜按照试桩结果确定。一般双轴水泥土搅拌桩水灰比宜取 0.5~0.6，三轴水泥土搅拌桩水灰比宜取 1.0~1.5；高压喷射注浆水灰比宜取 0.9~1.1。

水泥土搅拌桩施工时，双轴搅拌机钻头搅拌下沉速度不宜大于 1.0m/min，喷浆搅拌时钻头的提升速度不宜大于 0.5m/min；三轴搅拌机钻头的提升速度宜为 1m/min~2m/min，搅拌下沉速度宜为 0.5m/min~1m/min。

高压喷射注浆分高压旋喷、高压摆喷和高压定喷三种形式，因高压旋喷帷幕厚度大，止水和稳定性效果好，是目前复合土钉墙中采用的主要形式。高压喷射注浆可根据工程实际情况采用单管法、二重管法、三重管法。单管法及二重管法的高压液流压力一般大于 20MPa，压力范围多为 20MPa~30MPa。高压三重管比单管和二重管喷射直径大，高压水射流的压力可达 40MPa 左右，

常用的压力范围为 30MPa ~ 40MPa；低压水泥浆的注浆压力宜大于 1MPa，气流压力不宜小于 0.7MPa，提升速度宜为 50mm/min ~ 200mm/min，旋转速度宜为 10r/min ~ 20r/min。对于较硬的黏性土层、密实的砂土和碎石土层及较深处土层宜取较小的提升速度、较大的喷射压力。

高压喷射注浆过程中，如出现异常情况，应及时查明原因并采取措施。当孔口返浆量大于注浆量的 20% 时，宜采取提高喷射压力、加快提升速度等措施。当因浆液渗漏而出现孔口不返浆时，宜在漏浆部位停止提升注浆管并进行补浆，注浆液中宜掺入速凝剂，同时采取从孔口填入中粗砂等措施，直至孔口返浆。

5.2.5 采用二次注浆的方法可以明显地提高锚杆锚固力，但要掌握好二次高压注浆的时机。二次注浆的时间宜根据注浆工艺试验确定。

5.3 降排水施工

5.3.2 基坑降水会引起周边地表和建筑沉降，此外过量降水也不符合节约水资源的规定，因此基坑降水应遵循“按需降水”的原则。

5.3.5 为了保证排水通畅，防止雨水、施工用水等地表水漫坡流动或倒流回渗基坑，硬化后的场区地面排水坡度一般不宜小于 0.3%，并宜设置排水沟。基坑内应设置排水沟、集水坑，及时排放积聚在基坑内的渗水和雨水。

5.4 基坑开挖

5.4.4 对自稳能力差的土体，如含水量高的黏性土、淤泥质土及松散砂土等开挖后应立即进行支护，初喷混凝土应随挖随喷。

5.4.7 基坑开挖至坑底后应及时浇筑基础垫层，在软土地区及时浇筑垫层尤其显得重要。根据软土地区淤泥和淤泥质土的特点，基坑垫层浇筑时间宜控制在 2h 以内，最迟不应超过 4h。

6 质量检验

6.0.1 ~ 6.0.8 复合土钉墙基坑支护的施工质量检查内容、质量检验标准应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004、《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 的有关规定。

7 监 测

7.0.2 巡视检查主要以目测为主，配以简单的工器具，巡视检查方法速度快、周期短，可以及时弥补仪器监测的不足。基坑工程施工期间的各种变化具有时效性和突发性，加强巡视检查是预防基坑工程事故简便、经济而又有效的方法。通过巡视检查和仪器监测，可以定性定量相结合，更加全面地分析基坑的工作状态，做出正确的判断。

7.0.3 复合土钉墙基坑工程工作状态一般分为正常、异常和危险三种情况。异常是指监测对象受力或变形呈现出不符合一般规律的状态。危险是指监测对象的受力或变形呈现出低于结构安全储备、可能发生破坏的状态。

附录 A 土钉抗拔基本试验

1 基本试验是对试验土钉所采取的现场抗拔试验。目的是通过检测土钉极限抗拔力，从而确定土钉与岩土层之间的粘结强度，同时确定施工工艺、部分设计及施工参数，为设计提供依据。

2 较薄土层中可不进行基本试验。

附录 B 土钉抗拔验收试验

验收试验是对实际工作土钉所采用的现场抗拔试验，目的是通过检测土钉实际抗拔力能否达到验收抗拔力，从而判断土钉长度、注浆质量等施工质量，为工程验收提供依据。