# **地基基础和地下空间工程技术**

### 1 灌注桩后注浆技术

****1.1 技术内容****

灌注桩后注浆是指在灌注桩成桩后一定时间，通过预设在桩身内的注浆导管及与之相连的桩端、桩侧处的注浆阀以压力注入水泥浆的一种施工工艺。注浆目的一是通过桩底和桩侧后注浆加固桩底沉渣（虚土）和桩身泥皮，二是对桩底及桩侧一定范围的土体通过渗入（粗颗粒土）、劈裂（细粒土）和压密（非饱和松散土）注浆起到加固作用，从而增大桩侧阻力和桩端阻力，提高单桩承载力，减少桩基沉降。

在优化注浆工艺参数的前提下，可使单桩竖向承载力提高40%以上，通常情况下粗粒土增幅高于细粒土、桩侧桩底复式注浆高于桩底注浆；桩基沉降减小30%左右；预埋于桩身的后注浆钢导管可以与桩身完整性超声检测管合二为一。

****1.2 技术指标****

根据地层性状、桩长、承载力增幅和桩的使用功能（抗压、抗拔）等因素，灌注桩后注浆可采用桩底注浆、桩侧注浆、桩侧桩底复式注浆等形式。主要技术指标为：
（1）浆液水灰比：0.45～0.9；
（2）注浆压力：0.5～16MPa。
实际工程中，以上参数应根据土的类别、饱和度及桩的尺寸、承载力增幅等因素适当调整，并通过现场试注浆和试桩试验最终确定。 设计和施工可依据[《建筑桩基技术规范》JGJ94](https://coyis.com/guifantuji/guifan/201412053487.html%22%20%5Ct%20%22https%3A//coyis.com/technical-reserves/sgjs/_blank)的规定 进行。

****1.3 适用范围****

灌注桩后注浆技术适用于除沉管灌注桩外的各类泥浆护壁和干作业的钻、挖、冲孔灌注桩。当桩端及桩侧有较厚的粗粒土时，后注浆提高单桩承载力的效果更为明显。

****1.4 工程案例****

目前该技术应用于北京、上海、天津、福州、汕头、武汉、宜春、杭州、济南、廊坊、龙海、西宁、西安、德州等地数百项高层、超高层建筑桩基工程中，经济效益显著。典型工程如北京首都国际机场T3航站楼、上海中心大厦等。

### 2 长螺旋钻孔压灌桩技术

****2.1 技术内容****

长螺旋钻孔压灌桩技术是采用长螺旋钻机钻孔至设计标高，利用混凝土泵将超流态细石混凝土从钻头底压出，边压灌混凝土边提升钻头直至成桩，混凝土灌注至设计标高后，再借助钢筋笼自重或利用专门振动装置将钢筋笼一次插入混凝土桩体至设计标高，形成钢筋混凝土灌注桩。后插入钢筋笼的工序应在压灌混凝土工序后连续进行。与普通水下灌注桩施工工艺相比，长螺旋钻孔压灌桩施工，不需要泥浆护壁，无泥皮，无沉渣，无泥浆污染，施工速度快，造价较低。
该工艺还可根据需要在钢筋笼上绑设桩端后注浆管进行桩端后注浆，以提高桩的承载力。

****2.2 技术指标****

（1）混凝土中可掺加粉煤灰或外加剂，混凝土中粉煤灰掺量宜为 70～90kg/ m3；
（2）混凝土的粗骨料可采用卵石或碎石，最大粒径不宜大于 20mm；
（3）混凝土塌落度宜为 180～220mm。
设计和施工可依据《建筑桩基技术规范》JGJ94的规定进行。

****2.3 适用范围****

适用于地下水位较高，易塌孔，且长螺旋钻孔机可以钻进的地层。

****2.4 工程案例****

在北京、天津、唐山等地多项工程中应用，经济效益显著，具有良好的推广应用前景。

### 3 水泥土复合桩技术

****3.1 技术内容****

水泥土复合桩是适用于软土地基的一种新型复合桩，由PHC管桩、钢管桩等在水泥土初凝前压入水泥土桩中复合而成的桩基础，也可将其用作复合地基。水泥土复合桩由芯桩和水泥土组成，芯桩与桩周土之间为水泥土。水泥搅拌桩的施工及芯桩的压入改善了桩周和桩端土体的物理力学性质及应力场分布，有效地改善了桩的荷载传递途径；桩顶荷载由芯桩传递到水泥土桩再传递到侧壁和桩端的水泥土体，有效地提高了桩的侧阻力和端阻力，从而有效地提高了复合桩的承载力，减小桩的沉降。目前常用的施工工艺有植桩法等。

****3.2 技术指标****

（1）水泥土桩直径宜为500～700mm；
（2）水泥掺量宜为12%～20%；
（3）管桩直径宜为300～600mm；
（4）桩间距宜取水泥土桩直径的3～5倍；
（5）桩端应选择承载力较高的土层。

****3.3 适用范围****

适用于软弱粘土地基。在沿江、沿海地区，广泛分布着含水率较高、强度低、压缩性较高、垂直渗透系数较低、层厚变化较大的软粘土，地表下浅层存在有承载力较高的土层。采用传统的单一的地基处理方式或常规钻孔灌注桩，往往很难取得理想的技术经济效果，水泥土复合桩是适用于这种地层的有效方法之一。

**3.4 工程案例**

在上海、天津、江阴、常州等地区的多项工程中应用。

### 4 混凝土桩复合地基技术

**4.1 技术内容**

混凝土桩复合地基是以水泥粉煤灰碎石桩复合地基为代表的高粘结强度桩复合地基，近年来混凝土灌注桩、预制桩作为复合地基增强体的工程越来越多，其工作性状与水泥粉煤灰碎石桩复合地基接近，可统称为混凝土桩复合地基。

混凝土桩复合地基通过在基底和桩顶之间设置一定厚度的褥垫层，以保证桩、土共同承担荷载，使桩、桩间土和褥垫层一起构成复合地基。桩端持力层应选择承载力相对较高的土层。混凝土桩复合地基具有承载力提高幅度大，地基变形小、适用范围广等特点。

**4.2 技术指标**

根据工程实际情况，混凝土桩可选用水泥粉煤灰碎石桩，常用的施工工艺包括长螺旋钻孔、管内泵压混合料成桩，振动沉管灌注成桩及钻孔灌注成桩三种施工工艺。主要技术指标为：

（1）桩径宜取 350～600mm；
（2）桩端持力层应选择承载力相对较高的地层；
（3）桩间距宜取 3～5倍桩径；
（4）桩身混凝土强度满足设计要求，一般情况下要求混凝土强度大于等于C15；
（5）褥垫层宜用中砂、粗砂、碎石或级配砂石等，不宜选用卵石，最大粒径不宜大于30mm，厚度 150～300mm，夯填度≤0.9。

实际工程中，以上参数根据场地岩土工程条件、基础类型、结构类型、地基承载力和变形要求等条件或现场试验确定。

对于市政、公路、高速公路、铁路等地基处理工程，当基础刚度较弱时，宜在桩顶增加桩帽或在桩顶采用碎石+土工格栅、碎石+钢板网等方式调整桩土荷载分担比例，以提高桩的承载能力。
设计和施工可依据《建筑地基处理技术规范》JGJ79的规定进行。

**4.3 适用范围**

适用于处理粘性土、粉土、砂土和已自重固结的素填土等地基。对淤泥质土应按当地经验或通过现场试验确定其适用性。就基础形式而言，既可用于条形基础、独立基础，又可用于箱形基础、筏形基础。采取适当技术措施后亦可应用于刚度较弱的基础以及柔性基础。

**4.4 工程案例**

在北京、天津、河北、山西、陕西、内蒙古、新疆以及山东、河南、安徽、广西等地区多层、高层建筑、工业厂房、铁路地基处理工程中广泛应用，经济效益显著，具有良好的应用前景。在铁路工程中已用于哈大铁路客运专线工程、京沪高铁工程等。

### 5 真空预压法组合加固软基技术

**5.1 技术内容**

（1）真空预压法是在需要加固的软粘土地基内设置砂井或塑料排水板，然后在地面铺设砂垫层，其上覆盖不透气的密封膜使软土与大气隔绝，然后通过埋设于砂垫层中的滤水管，用真空装置进行抽气，将膜内空气排出，因而在膜内外产生一个气压差，这部分气压差即变成作用于地基上的荷载。地基随着等向应力的增加而固结。

（2）真空堆载联合预压法是在真空预压的基础上，在膜下真空度达到设计要求并稳定后，进行分级堆载，并根据地基变形和孔隙水压力的变化控制堆载速率。堆载预压施工前，必须在密封膜上覆盖无纺土工布以及粘土（粉煤灰）等保护层进行保护，然后分层回填并碾压密实。与单纯的堆载预压相比，加载的速率相对较快。在堆载结束后，进入联合预压阶段，直到地基变形的速率满足设计要求，然后停止抽真空，结束真空联合堆载预压。

**5.2 技术指标**

（1）真空预压施工时首先在加固区表面用推土机或人工铺设砂垫层，层厚约0.5m；
（2）真空管路的连接点应密封，在真空管路中应设置止回阀和闸阀；滤水管应设在排水砂垫层中，其上覆盖厚度100~200mm的砂层；
（3）密封膜热合粘结时宜用双热合缝的平搭接，搭接宽度应大于15mm且应铺设二层以上。密封膜的焊接或粘接的粘缝强度不能低于膜本身抗拉强度的60%；
（4）真空预压的抽气设备宜采用射流真空泵，空抽时应达到95kPa以上的真空吸力，其数量应根据加固面积和土层性能等确定；
（5）抽真空期间真空管内真空度应大于90kPa，膜下真空度宜大于80kPa；
（6）堆载高度不应小于设计总荷载的折算高度；
（7）对主要以变形控制设计的建筑物地基，地基土经预压所完成的变形量和平均固结度应满足设计要求；对以地基承载力或抗滑稳定性控制设计的建筑物地基，地基土经预压后其强度应满足建筑物地基承载力或稳定性要求。

主要参考标准：《建筑地基基础工程施工规范》GB51004、《建筑地基处理技术规范》JGJ79。

**5.3 适用范围**

该软土地基加固方法适用于软弱粘土地基的加固。在我国广泛存在着海相、湖相及河相沉积的软弱粘土层，这种土的特点是含水量大、压缩性高、强度低、透水性差。该类地基在建筑物荷载作用下会产生相当大的变形或变形差。对于该类地基，尤其需大面积处理时，如在该类地基上建造码头、机场等，真空预压法以及真空堆载联合预压法是处理这类软弱粘土地基的较有效方法之一。

**5.4 工程案例**
本技术已用于日照港料场、黄骅港码头、深圳福田开发区、天津塘沽开发区、深圳宝安大道、上海迪士尼主题乐园项目、珠海发电厂、汕头港多用途泊位后方集装箱堆场、天津临港产业区等。

### 6 装配式支护结构施工技术

**6.1 技术内容**

装配式支护结构是以成型的预制构件为主体，通过各种技术手段在现场装配成为支护结构。与常规支护手段相比，该支护技术具有造价低、工期短、质量易于控制等特点，从而大大降低了能耗、减少了建筑垃圾，有较高的社会、经济效益与环保作用。

目前，市场上较为成熟的装配式支护结构有：预制桩、预制地下连续墙结构、预应力鱼腹梁支撑结构、工具式组合内支撑等。

预制桩作为基坑支护结构使用时，主要是采用常规的预制桩施工方法，如静压或者锤击法施工，还可以采用拆入水泥土搅拌桩，TRD搅拌墙或CSM双轮铣搅拌墙内形成连续的水泥土复合支护结构。预应力预制桩用于支护结构时，应注意防止预应力预制桩发生脆性破坏并确保接头的施工质量。

预制地下连续墙技术即按照常规的施工方法成槽后，在泥浆中先插入预制墙段、预制桩、型钢或钢管等预制构件，然后以自凝泥浆置换成槽用的护壁泥浆，或直接以自凝泥浆护壁成槽插入预制构件，以自凝泥浆的凝固体填塞墙后空隙和防止构件间接缝渗水，形成地下连续墙。采用预制的地下连续墙技术施工的地下墙面光洁、墙体质量好、强度高，并可避免在现场制作钢筋笼和浇混凝土及处理废浆。近年来，在常规预制地下连续墙技术的基础上，又出现一种新型预制连续墙，即不采用昂贵的自凝泥浆而仍用常规的泥浆护壁成槽，成槽后插入预制构件并在构件间采用现浇混凝土将其连成一个完整的墙体。该工艺是一种相对经济又兼具现浇地下墙和预制地下墙优点的新技术。

预应力鱼腹梁支撑技术，由鱼腹梁（高强度低松弛的钢绞线作为上弦构件，H 型钢作为受力梁，与长短不一的 H 型钢撑梁等组成）、对撑、角撑、立柱、横梁、拉杆、三角形节点、预压顶紧装置等标准部件组合并施加预应力，形成平面预应力支撑系统与立体结构体系，支撑体系的整体刚度高、稳定性强。本技术能够提供开阔的施工空间，使挖土、运土及地下结构施工便捷，不仅显著改善地下工程的施工作业条件，而且大幅减少支护结构的安装、拆除、土方开挖及主体结构施工的工期和造价。

工具式组合内支撑技术是在混凝土内支撑技术的基础上发展起来的一种内支撑结构体系, 主要利用组合式钢结构构件其截面灵活可变、加工方便、适用性广的特点，可在各种地质情况和复杂周边环境下使用。该技术具有施工速度快，支撑形式多样，计算理论成熟，可拆卸重复利用，节省投资等优点。

**6.2 技术指标**

预制地下连续墙：

（1）通常预制墙段厚度较成槽机抓斗厚度小20mm左右，常用的墙厚有580mm、780mm，一般适用于9m以内的基坑；
（2）应根据运输及起吊设备能力、施工现场道路和堆放场地条件，合理确定分幅和预制件长度，墙体分幅宽度应满足成槽稳定性要求；
（3）成槽顺序宜先施工L形槽段，再施工一字形槽段；
（4）相邻槽段应连续成槽，幅间接头宜采用现浇接头。

预应力鱼腹梁支撑：

（1）型钢立柱的垂直度控制在1/200以内；型钢立柱与支撑梁托座要用高强螺栓连接；
（2）施工围檩时，牛腿平整度误差要控制在2mm以内，且不能下垂，平直度用拉绳和长靠尺或钢尺检查，如有误差则进行校正，校正后采用焊接固定；
（3）整个基坑内的支撑梁要求必须保证水平，并且支撑梁必须能承受架设在其上方的支撑自重和来自上部结构的其他荷载；
（4）预应力鱼腹梁支撑的拆除是安装作业的逆顺序。

工具式组合内支撑：

（1）标准组合支撑构件跨度为 8m、9m、12m等；
（2）竖向构件高度为 3m、4m、5m等；
（3）受压杆件的长细比不应大于 150，受拉杆件的长细比不应大于200；
（4）进行构件内力监测的数量不少于构件总数量的15%；
（5）围檩构件为1.5m、3m、6m、9m、12m。

主要参考标准：《钢结构设计规范》GB50017、《建筑基坑支护技术规程》JGJ120。

**6.3 适用范围**

预制地下连续墙一般仅适用于9m以内的基坑，适用于地铁车站、周边环境较为复杂的基坑工程等；预应力鱼腹梁支撑适用于市政工程中地铁车站、地下管沟基坑工程以及各类建筑工程基坑，预应力鱼腹梁支撑适用于温差较小地区的基坑，当温差较大时应考虑温度应力的影响。工具式组合内支撑适用于周围建筑物密集，施工场地狭小，岩土工程条件复杂或软弱地基等类型的深大基坑。

**6.4 工程案例**
预制地下连续墙技术已成功应用于上海建工活动中心、明天广场、达安城单建式地下车库和瑞金医院单建式地下车库、华东医院停车库等工程。
预应力鱼腹梁支撑已成功应用于广州地铁网运营管理中心、江阴幸福里老年公寓和商业用房、南京绕城公路地道工程、宁波轨道交通1、2号线鼓楼站车站等工程。
工具式组合内支撑已成功应用于北京国贸中心、上海临港六院、上海天和锦园、广东工商行业务大楼、广东荔湾广场、广东金汇大厦、杭州杭政储住宅、宁波轨交1号线鼓楼站及北京地铁13号线等。

### 7 型钢水泥土复合搅拌桩支护结构技术

**7.1 技术内容**

型钢水泥土复合搅拌桩是指：通过特制的多轴深层搅拌机自上而下将施工场地原位土体切碎，同时从搅拌头处将水泥浆等固化剂注入土体并与土体搅拌均匀，通过连续的重叠搭接施工，形成水泥土地下连续墙；在水泥土初凝之前，将型钢（预制混凝土构件）插入墙中，形成型钢（预制混凝土构件）与水泥土的复合

墙体。型钢水泥土复合搅拌桩支护结构同时具有抵抗侧向土水压力和阻止地下水渗漏的功能。
近几年水泥土搅拌桩施工工艺在传统的工法基础上有了很大的发展，TRD工法、双轮铣深层搅拌工法（CSM工法）、五轴水泥土搅拌桩、六轴水泥土搅拌桩等施工工艺的出现使型钢水泥土复合搅拌桩支护结构的使用范围更加广泛，施工效率也大大增加。

其中TRD工法（Trench－Cutting& Re-mixing Deep Wall Method）是将满足设计深度的附有切割链条以及刀头的切割箱插入地下，在进行纵向切割横向推进成槽的同时，向地基内部注入水泥浆以达到与原状地基的充分混合搅拌在地下形成等厚度水泥土连续墙的一种施工工艺。该工法具有适应地层广、墙体连续无接头、墙体渗透系数低等优点。

双轮铣深层搅拌工法（CSM工法），是使用两组铣轮以水平轴向旋转搅拌方式、形成矩形槽段的改良土体的一种施工工艺。该工法的性能特点有：（1）具有高削掘性能，地层适应性强；（2）高搅拌性能；（3）高削掘精度；（4）可完成较大深度的施工；（5）设备高稳定性；（6）低噪声和振动；（7）可任意设定插入劲性材料的间距；（8）可靠施工过程数据和高效的施工管理系统；（9）双轮铣深层搅拌工法（CSM工法）机械均采用履带式主机，占地面积小，移动灵活。

**7.2 技术指标**

（1）型钢水泥土搅拌墙的计算与验算应包括内力和变形计算、整体稳定性验算、抗倾覆稳定性验算、坑底抗隆起稳定性验算、抗渗流稳定性验算和坑外土体变形估算；
（2）型钢水泥土搅拌墙中三轴水泥土搅拌桩的直径宜采用650mm、850mm、1000mm，内插H形钢或预制混凝土构件；
（3）水泥土复合搅拌桩28d无侧限抗压强度标准值不宜小于0.5MPa；
（4）搅拌桩的入土深度宜比型钢的插入深度深0.5～1.0m；
（5）搅拌桩体与内插型钢的垂直度偏差不应大于1/200；
（6）当搅拌桩达到设计强度，且龄期不小于28d后方可进行基坑开挖；
（7）TRD工法等厚度水泥土搅拌墙28d龄期无侧限抗压强度不应小于设计要求且不宜小于0.8MPa；水泥宜采用强度等级不低于P.O 42.5级的普通硅酸盐水泥，水泥土搅拌墙正式施工之前应通过现场试成墙试验以确定具体施工参数（材料用量和水灰比等）。
（8）双轮铣深层搅拌工法（CSM工法）成槽设备在施工过程中采用泥浆护壁来防止槽壁坍塌；膨润土泥浆的配合比通常为70~90kg/m3（取决于膨润土的质量），泥浆密度约为1.05kg/cm3，粘度要超过40s（马氏漏斗粘度）。
主要参照标准：《型钢水泥土搅拌墙技术规程》JGJ/T199、《建筑基坑支护技术规程》JGJ120等。

**7.3 适用范围**
该技术主要用于深基坑支护，可在粘性土、粉土、砂砾土使用，目前在国内主要在软土地区有成功应用。

**7.4 工程案例**
上海静安寺下沉式广场、国际会议中心、地铁陆家嘴车站、地铁2号线龙东路延伸段、上海梅山大厦、天津地铁二、三号线工程、天津站交通枢纽工程。TRD工法已在上海、天津、武汉、南昌等多个深大基坑工程中成功应用，超深可达60m；双轮铣深层搅拌工法（CSM工法）在天津医院、地铁2号线红旗路站联络线工程、世纪广场、华润紫阳里停车厂等工程中应用。

### 8 地下连续墙施工技术

**8.1 技术内容**

地下连续墙，就是在地面上先构筑导墙，采用专门的成槽设备，沿着支护或深开挖工程的周边，在特制泥浆护壁条件下，每次开挖一定长度的沟槽至指定深度，清槽后，向槽内吊放钢筋笼，然后用导管法浇注水下混凝土，混凝土自下而上充满槽内并把泥浆从槽内置换出来，筑成一个单元槽段，并依此逐段进行，这些相互邻接的槽段在地下筑成的一道连续的钢筋混凝土墙体。地下连续墙主要作承重、挡土或截水防渗结构之用。

地下连续墙具有如下优点：（1）施工低噪声、低震动，对环境的影响小；（2）连续墙刚度大、整体性好，基坑开挖过程中安全性高，支护结构变形较小；（3）墙身具有良好的抗渗能力，坑内降水时对坑外的影响较小；（4）可作为地下室结构的外墙，可配合逆作法施工，缩短工期、降低造价。
随着城市土地资源日趋紧张，高层和超高层建筑的日益崛起，基坑深度也突破初期的十几米朝更深的几十米发展，随之带来的是地下连续墙向着超深、超厚发展。目前建筑领域地下连续墙已经超越了110m，随着技术的进步和城市发展的需求地下连续墙将会向更深的深度发展。例如软土地区的超深地下连续墙施工，利用成槽机、铣槽机在粘土和砂土环境下各自的优点，以抓铣结合的方法进行成槽，并合理选用泥浆配比，控制槽壁变形，优势明显。

由于地下连续墙是由若干个单元槽段分别施工后再通过接头连成整体，各槽段之间的接头有多种形式，目前最常用的接头形式有圆弧形接头、橡胶带接头、工字型钢接头、十字钢板接头、套铣接头等。其中橡胶带接头是一种相对较新的地下连续墙接头工艺，通过横向连续转折曲线和纵向橡胶防水带延长了可能出现的地下水渗流路线，接头的止水效果较以前的各种接头工艺有大幅改观。目前超深的地下连续墙多采用套铣接头，利用铣槽机可直接切削硬岩的能力直接切削已成槽段的混凝土，在不采用锁口管、接头箱的情况下形成止水良好、致密的地下连续墙接头。套铣接头具有施工设备简单、接头水密性良好等优点。

**8.2 技术指标**

地下连续墙根据施工工艺，可分为导墙制作、泥浆制备、成槽施工、混凝土水下浇筑、接头施工等。主要技术指标为：
（1）新拌制泥浆指标：比重1.03~1.10，粘度22s~35s，胶体率大于98%，失水量小于30ml/30min，泥皮厚度小于1mm，pH值8~9；
（2）循环泥浆指标：比重1.05~1.25，粘度22s~40s，胶体率大于98%，失水量小于30ml/30min，泥皮厚度小于3mm，pH值8~11，含砂率小于7%；
（3）清基后泥浆指标：密度不大于1.20，粘度20s~30s，含砂率小于7%，pH值8~10；
（4）混凝土：坍落度200mm±20mm，抗压强度和抗渗压力符合设计要求；
实际工程中，以上参数应根据土的类别、地下连续墙的结构用途、成槽形式等因素适当调整，并通过现场试成槽试验最终确定。

**8.3 适用范围**

一般情况下地下连续墙适用于如下条件的基坑工程：
（1）深度较大的基坑工程，一般开挖深度大于10m才有较好的经济性；
（2）邻近存在保护要求较高的建（构）筑物，对基坑本身的变形和防水要求较高的工程；
（3）基坑内空间有限，地下室外墙与红线距离极近，采用其他围护形式无法满足留设施工操作空间要求的工程；
（4）围护结构亦作为主体结构的一部分，且对防水、抗渗有较严格要求的工程；
（5）采用逆作法施工，地上和地下同步施工时，一般采用地下连续墙作为围护墙。

**8.4 工程案例**

上海中心大厦、上海金茂大厦、上海环球金融中心、深圳国贸地铁车站等等。目前地下连续墙广泛应用于北京、上海、深圳、南京、兰州等地的江河湖泊防渗，港口、船坞和污水处理厂、高层建筑的地下室、地下停车场、地铁甚至于大桥建设中，市场前景广阔。

### 9 逆作法施工技术

**9.1 技术内容**

逆作法一般是先沿建筑物地下室外墙轴线施工地下连续墙，或沿基坑的周围施工其他临时围护墙，同时在建筑物内部的有关位置浇筑或打下中间支承桩和柱，作为施工期间于底板封底之前承受上部结构自重和施工荷载的支承；然后施工逆作层的梁板结构，作为地下连续墙或其他围护墙的水平支撑，随后逐层向下开挖土方和浇筑各层地下结构，直至底板封底；同时，由于逆作层的楼面结构先施工完成，为上部结构的施工创造了条件，因此可以同时向上逐层进行地上结构的施工；如此地面上、下同时进行施工，直至工程结束。

目前逆作法的新技术有：
（1）框架逆作法。利用地下各层钢筋混凝土肋形楼板中先期浇筑的交叉格形肋梁，对围护结构形成框格式水平支撑，待土方开挖完成后再二次浇筑肋形楼板。
（2）跃层逆作法。是在适当的地质环境条件下，根据设计计算结果，通过局部楼板加强以及适当的施工措施，在确保安全的前提下实现跃层超挖，即跳过地下一层或两层结构梁板的施工，实现土方施工的大空间化，提高施工效率。
（3）踏步式逆作法。该法是将周边若干跨楼板采用逆作法踏步式从上至下施工，余下的中心区域待地下室底板施工完成后逐层向上顺作，并与周边逆作结构衔接完成整个地下室结构。
（4）一柱一桩调垂技术。在逆作施工中，竖向支承桩柱的垂直精度要求是确保逆作工程质量、安全的核心要素，决定着逆作技术的深度和高度。目前，钢立柱的调垂方法主要有气囊法、校正架法、调垂盘法、液压调垂盘法、孔下调垂机构法、孔下液压调垂法、HDC高精度液压调垂系统等。

**9.2 技术指标**

（1）竖向支承结构宜采用一柱一桩的形式，立柱长细比不应大于25。立柱采用格构柱时，其边长不宜小于420mm，采用钢管混凝土柱时，钢管直径不宜小于500mm。立柱及立柱桩的平面位置允许偏差为10mm，立柱的垂直度允许偏差为1/300，立柱桩的垂直度允许偏差为1/200。
（2）主体结构底板施工前，立柱桩之间及立柱桩与地下连续墙之间的差异沉降不宜大于20mm，且不宜大于柱距的1/400。立柱桩采用钻孔灌注桩时，可采用后注浆措施，以减小立柱桩的沉降。
（3）水平支撑与主体结构水平构件相结合时，同层楼板面存在高差的部位，应验算该部位构件的受弯、受剪和受扭承载能力，在结构楼板的洞口及车道开口部位，当洞口两侧的梁板不能满足传力要求时，应采用设置临时支撑等措施。
逆作法施工技术应符合《建筑地基基础设计规范》GB50007、《建筑基坑支护技术规程》JGJ120、《地下建筑工程逆作法技术规程》JGJ165的相关规定。

**9.3 适用范围**

逆作法适用于如下基坑：
（1）大面积的地下工程；（2）大深度的地下工程，一般地下室层数大于或等于2层的项目更为合理；（3）基坑形状复杂的地下工程；（4）周边状况苛刻，对环境要求很高的地下工程；（5）上部结构工期要求紧迫和地下作业空间较小的地下工程。
目前逆作法已广泛用于高层建筑地下室、地铁车站、地下车库、市政、人防工程等领域。

1.9.4 工程案例

上海中心裙房工程、上海铁路南站南广场、南京青奥中心、浙江慈溪财富中心工程、天津富力中心、重庆巴南商业中心、北京地铁天安门东站、广州国际银行中心、南宁永凯大厦等。

### 10 超浅埋暗挖施工技术

**10.1 技术内容**
在下穿城市道路的地下通道施工时，地下通道的覆盖土厚度与通道跨度之比通常较小，属于超浅埋通道。为了保障城市道路、地下管线及周边建(构)筑物正常运用，需采用严格控制土体变形的超浅埋暗挖施工技术。一般采用长大管棚超前支护加固地下通道周围土体，将整个地下通道断面分为若干个小断面进行顺序错位短距开挖，及时强力支护并封闭成环，形成平顶直墙交替支护结构条件，进行地下通道或空间主体施工的支护技术方法。施工过程中应加强对施工影响范围内的城市道路、管线及建（构）筑物的变形监测，及时反馈信息，及时调整支护参数。该技术主要利用钢管刚度强度大，水平钻定位精准，型钢拱架连接加工方便、撑架及时和适用性广等特点，可以在不阻断交通、不损伤路面、不改移管线和不影响居民等城市复杂环境下使用，因此具有安全、可靠、快速、环保、节资等优点。

**10.2 技术指标**

（1）地下通道顶部覆盖土厚度H与其暗挖断面跨度A(矩形底边宽度)之比H/A≤0.4；
（2）管棚：钢管管径90～1000mm，管壁厚度8、12、14、16mm，长度为24～150m；浆液水灰比宜为0.8～1，当采用双液注浆时，水泥浆液与水玻璃的比例宜为1:1；
（3）注浆加固渗透系数应不大于1.0×10-6cm/s；
（4）型钢拱架间距500～750mm；
主要参照标准：《钢结构设计规范》GB50017。

**10.3 适用范围**

一般填土、粘土、粉土、砂土、卵石等第四纪地层中修建的地下通道或地下空间。

**10.4 工程案例**

北京首都机场2-3号航站楼联络通道、青岛胶州市民广场。

### 11 复杂盾构法施工技术

**11.1 技术内容**

盾构法是一种全机械化的隧道施工方法，通过盾构外壳和管片支承四周围岩防止发生坍塌。同时在开挖面前方用切削装置进行土体开挖，通过出土机械外运出洞，靠千斤顶在后部加压顶进，并拼装预制混凝土管片，形成隧道结构的一种机械化施工方法。由于盾构施工技术对环境影响很小而被广泛地采用，得到了迅速的发展。

复杂盾构法施工技术为复杂地层、复杂地面环境条件下的盾构法施工技术，或大断面圆形（洞径大于10m）、矩形或双圆等异形断面形式的盾构法施工技术。

选择盾构形式时，除考虑施工区段的围岩条件、地面情况、断面尺寸、隧道长度、隧道线路、工期等各种条件外，还应考虑开挖和衬砌等施工问题，必须选择安全且经济的盾构形式。盾构施工在遇到复杂地层、复杂环境或者盾构截面异形或者盾构截面大时，可以通过分析地层和环境等情况合理配置刀盘、采用合适的掘进模式和掘进技术参数、盾构姿态控制及纠偏技术、采用合适的注浆方式等各种技术要求来解决以上的复杂问题。盾构法施工是一个系统性很强的工程，其设计和施工技术方案的确定，要从各个方面综合权衡与比选，最终确定合理可行的实施方案。

盾构机主要是用来开挖土、砂、围岩的隧道机械，由切口环、支撑环及盾尾三部分组成。就断面形状可分为单圆形、复圆形及非圆形盾构。矩形盾构是横断面为矩形的盾构机，相比圆形盾构，其作业面小，主要用于距地面较近的工程作业。矩形盾构机的研制难度超过圆形盾构机。目前，我国使用的矩形盾构机主要有2个、4个或6个刀盘联合工作。

**11.2 技术指标**

（1）承受荷载：设计盾构时需要考虑的荷载，如土压力、水压力、自重、上覆荷载的影响、变向荷载、开挖面前方土压力及其他荷载。
（2）盾构外径：所谓盾构外径，是指盾壳的外径，不考虑超挖刀头、摩擦旋转式刀盘、固定翼、壁后注浆用配管等突出部分。
（3）盾构长度：盾构本体长度指壳板长度的最大值，而盾构机长度则指盾构的前端到尾端的长度。盾构总长系指盾构前端至后端长度的最大值。
（4）总推力：盾构的推进阻力组成包括盾构四周外表面和土之间的摩擦力或粘结阻力（F1）；推进时，口环刃口前端产生的贯入阻力（F2）；开挖面前方阻力(F3)；变向阻力（曲线施工、蛇形修正、变向用稳定翼、挡板阻力等）（F4）；盾尾内的管片和壳板之间的摩擦力（F5）；后方台车的牵引阻力（F6）。以上各种推进阻力的总和（∑F），须对各种影响因素仔细考虑，留出必要的余量。

**11.3 适用范围**

（1）适用于各种复杂的工程地质和水文地质条件，从淤泥质土层到中风化和微风化岩层。
（2）盾构法施工隧道应有足够的埋深，覆土深度不宜小于6m。隧道覆土太浅，盾构法施工难度较大；在水下修建隧道时，覆土太浅盾构施工安全风险较大。
（3）地面上必须有修建用于盾构进出洞和出土进料的工作井位置。
（4）隧道之间或隧道与其他建(构)筑物之间所夹土(岩)体加固处理的最小厚度为水平方向1.0m，竖直方向1.5m。
（5）从经济角度讲，盾构连续施工长度不宜小于300m。

**11.4 工程案例**

盾构法广泛应用于隧道和地下工程中。上海地铁、跨江隧道均采用盾构法施工；深圳地铁5号线的盾构工程穿越复杂地层；南京地铁四号线盾构区间穿越了上软下硬地层以及大量厂房民居，地质情况复杂多变、地下水丰富、施工难度大、安全风险高等特点；郑州中州大道采用6个刀盘联合工作的矩形盾构机，是我国自主研发的世界最大矩形盾构机。西安地铁4号线与武汉地铁11号线都采用了盾构法施工；北京的众多地铁线路也采用了盾构法施工，其中16号线首次采用外径6.4m地铁管片，使隧道空间明显增大。

### 12 非开挖埋管施工技术

**12.1 技术内容**

非开挖埋管施工技术应用较多的主要有顶管法、定向钻进穿越技术以及大断面矩形通道掘进技术。

（1）顶管法

顶管法是在松软土层或富水松软地层中敷设管道的一种施工方法。随着顶管技术的不断发展与成熟，已经涌现了一大批超大口径、超长距离的顶管工程。混凝土顶管管径最大达到4000mm，一次顶进最长距离也达到2080m。随着大量超长距离、超大口径顶管工程的出现，也产生了相应的顶管施工新技术。
1）为维持超长距离顶进时的土压平衡，采用恒定顶进速度及多级顶进条件下螺旋机智能出土调速施工技术；该新技术结合分析确定的土压合理波动范围参数，使顶管机智能的适应土压变化，避免大的振动。
2）针对超大口径、超长距离顶进过程中顶力过大问题开发研制了全自动压浆系统，智能分配注浆量，有效进行局部减阻。
3）超长距离、多曲线顶管自动测量及偏离预报技术是迄今为止最为适合超长距离、曲线顶管的测量系统，该测量系统利用多台测量机器人联机跟踪测量技术，结合历史数据，对工具管导引的方向及幅度作出预报，极大地提高了顶进效率和顶管管道的质量。
4）预应力钢筒混凝土管顶管（简称JPCCP）拼接技术，利用副轨、副顶、主顶全方位三维立体式进行管节接口姿态调整，能有效解决该种新型复合管材高精度接口的拼接难题。

（2）定向钻进穿越

根据入土点和出土点设计出穿越曲线，然后根据穿越曲线利用穿越钻机先钻出导向孔、再进行扩孔处理，回拖管线之后利用泥浆的护壁及润滑作用将已预制试压合格的管段进行回拖，完成管线的敷设施工。其新技术包括：
1）测量钻头位置的随钻测量系统，随钻测量系统的关键技术是在保证钻杆强度的前提下钻杆本体的密封以及钻杆内永久电缆连接处的密封。
2）具有孔底马达的全新旋转导向钻进系统，该系统有效解决了定子和轴承的寿命问题以及可以按照设定导向进行旋转钻进。

（3）大断面矩形地下通道掘进施工技术

利用矩形隧道掘进机在前方掘进，而后将分节预制好的混凝土结构件在土层中顶进、拼装形成地下通道结构的非开挖法施工技术。

矩形隧道掘进机在顶进过程中，通过调节后顶主油缸的推进速度或调节螺旋输送机的转速，以控制搅拌舱的压力，使之与掘进机所处地层的土压力保持平衡，保证掘进机的顺利顶进，并实现上覆土体的低扰动；在刀盘不断转动下，开挖面切削下来的泥土进入搅拌舱，被搅拌成软塑状态的扰动土；对不能软化的天然土，则通过加入水、粘土或其他物质使其塑化，搅拌成具有一定塑性和流动性的混合土，由螺旋输送机排出搅拌舱，再由专用输送设备排出；隧道掘进机掘进至规定行程，缩回主推油缸，将分节预制好的混凝土管节吊入并拼装，然后继续顶进，直至形成整个地下通道结构。
大断面矩形地下通道掘进施工技术施工机械化程度高，掘进速度快，矩形断面利用率高，非开挖施工地下通道结构对地面运营设施影响小，能满足多种截面尺寸的地下通道施工需求。

**12.2 技术指标**

（1）顶管法
1）根据工程实际分析螺旋机在不同压力及土质条件下的出土能力变化趋势，设计设定出适应工程的螺旋机智能调速功能，应对不同土层对出土机制的影响；
2）利用带球阀和有自动开闭的压浆装置，结合智能操控平台，使每个注浆孔都被纳入自动控制范围，远程操控、设定压浆参数，合理分配压浆量，在比较坚硬的卵石土层应设定多分配压浆量，比较松软、富水土层少压浆或可不压，起到有的放矢的功效；
3）预应力钢筒混凝土管顶管施工承压管道，采用特制的中继环系统，中继环承插口应按照预应力钢筒混凝土管承插口精度要求制作，保证与其他管节接口密封性能良好；
4）预应力钢筒混凝土顶管管节接口拼接施工，利用三维立体式拼接系统时，在承插口距离临近时，应控制顶进速度0.001m/s，宜慢不宜快。

（2）定向钻进穿越

1）采用无线传输仪器进行随钻测量，免除有线传输带来的距离限制，在井眼位置安装信号接收仪器，及时反馈轨道监测数据以及掌握钻向动态。
2）根据土层情况设定旋转钻头方向参数以及孔底马达的动力参数，结合远程操控平台智能化进行钻进穿越施工。
（3）大断面矩形地下通道掘进施工技术
地下通道最大宽度 6.9m；地下通道最大高度 4.3m。

**12.3 适用范围**

（1）顶管法
1）特别适用于在具有粘性土、粉性土和砂土的土层中施工，也适用于在具有卵石、碎石和风化残积土的土层中施工。
2）适用于城区水污染治理的截污管施工，适用于液化气与天然气输送管、油管的施工以及动力电缆、宽频网、光纤网等电缆工程的管道施工。
3）适用于城市市政地下工程中穿越公路、铁路、建筑物下的综合通道及地铁人行通道施工。
（2）定向钻进穿越
1）定向钻进穿越法适合的地层条件为砂土、粉土、粘性土、卵石等地况。
2）在不开挖地表面条件下，可广泛应用于供水、煤气、电力、电讯、天然气、石油等管线铺设施工。

（3）大断面矩形地下通道掘进施工技术

能适应 N值在 10以下的各类粘性土、砂性土、粉质土及流砂地层；具有较好的防水性能，最大覆土层深度为 15m；通过隧道掘进机的截面模数组合，可满足多种截面大小的地下通道施工需求。

**12.4 工程案例**

（1）顶管法
上海南市水厂过江顶管工程顶进直径为3000mm的钢管总长度1120m；上海市引水长桥支线顶管工程顶进长度1743m；嘉兴市污水处理排海工程顶进2050m超长距离钢筋混凝土顶管；汕头市第二过海顶管工程顶进2080m，钢顶管直径2m；无锡长江引水工程实现2200mm钢管双管同步顶进2500m；上海白龙港污水处理南干线DN4000钢混凝土顶管工程长距离顶进2039m；上海黄浦江闵奉支线C2标预应力钢筒混凝土顶管（JPCCP）工程成功顶进874m。

（2）定向钻进穿越

墨水河定向钻穿越工程，穿越长度为532m；珠海—中山天然气管道二期工程的磨刀门水道定向钻进穿越工程；郑州南变电站备用电源郑尧高速地下穿越工程；上海市轨道交通6 号线港城路车辆段33A标工程；上海浦东国际机场扩建工程南区给水泵站工程；上海虹桥综合交通枢纽市政道路及配套1标段等工程施工都采用了定向钻进穿越技术。

（3）大断面矩形地下通道掘进施工技术

上海轨道交通 6 号线浦电路车站、8 号线中山北路车站、4 号线南浦大桥车站等。

### 13 综合管廊施工技术

**13.1 技术内容**

综合管廊，也可称之“共同沟”，是指城市地下管道综合走廊，它是为实施统一规划、设计、施工和维护，建于城市地下用于敷设市政公用管线的市政公用设施。采取综合管廊可实现各种管线以集约化方式敷设，可以使城市的地下空间资源得以综合利用。
综合管廊的施工方法主要分为明挖施工和暗挖施工。
明挖施工法主要有：放坡开挖施工；水泥土搅拌桩围护结构；板桩墙围护结构以及SMW工法等。明挖管廊的施工可采用现浇施工法与预制拼装施工法。现浇施工法可以大面积作业，将整个工程分割为多个施工标段，加快施工进度。预制拼装施工法要求有较大规模的预制厂和大吨位的运输及起吊设备，施工技术要求高，对接缝处施工处理有严格要求。
暗挖施工法主要有盾构法、顶管法等。盾构法和顶管法都是采用专用机械构筑隧道的暗挖施工方法，在隧道的某段的一端建造竖井或基坑，以供机械安装就位。机械从竖井或基坑壁开孔处出发，沿设计轴线，向另一竖井或基坑的设计孔洞推进、构筑隧道，并有效地控制地面隆降。盾构法、顶管法施工具有自动化程度高，对环境影响小，施工安全，质量可靠，施工进度快等特点。

**13.2 技术指标**

（1）明挖法

1）基础工程
综合管廊工程基坑（槽）开挖前，应根据围护结构的类型、工程水文地质条件、施工工艺和地面荷载等因素制定施工方案。
基坑回填应在综合管廊结构及防水工程验收合格后进行。回填材料应符合设计要求及国家现行标准的有关规定。管廊两侧回填应对称、分层、均匀。管廊顶板上部1000mm范围内回填材料应采用人工分层夯实，大型碾压机不得直接在管廊顶板上部施工。综合管廊回填土压实度应符合设计要求。
综合管廊基础施工及质量验收应符合《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202的有关规定。

2）现浇结构
综合管廊模板施工前，应根据结构形式、施工工艺、设备和材料供应条件进行模板及支架设计。模板及支撑的强度、刚度及稳定性应满足受力要求。
混凝土的浇筑应在模板和支架检验合格后进行。入模时应防止离析；连续浇筑时，每层浇筑高度应满足振捣密实的要求；预留孔、预埋管、预埋件及止水带等周边混凝土浇筑时，应辅助人工插捣。
混凝土底板和顶板应连续浇筑不得留置施工缝，设计有变形缝时，应按变形缝分仓浇筑。
混凝土施工质量验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的有关规定。

3）预制拼装结构

预制拼装钢筋混凝土构件的模板，应采用精加工的钢模板。

构件堆放的场地应平整夯实，并应具有良好的排水措施。构件运输及吊装时，混凝土强度应符合设计要求。当设计无要求时，不应低于设计强度的75%。

预制构件安装前应对其外观、裂缝等情况应按设计要求及现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的有关规定进行结构性能检验。当构件上有裂缝且宽度超过0.2mm时，应进行鉴定。
预制构件和现浇构件之间、预制构件之间的连接应按设计要求进行施工。预制拼装综合管廊结构采用预应力筋连接接头或螺栓连接接头时，其拼缝接头的受弯承载力应满足设计要求。
螺栓的材质、规格、拧紧力矩应符合设计要求及《钢结构设计规范》GB 50017和《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205的有关规定。

（2）暗挖法

1）盾构法
盾构法的技术指标应符合《盾构法隧道施工与验收规范》GB 50446的有关规定。
2）顶管法

计算施工顶力时，应综合考虑管节材质、顶进工作井后背墙结构的允许最大荷载、顶进设备能力、施工技术措施等因素。施工最大顶力应大于顶进阻力，但不得超过管材或工作井后背墙的允许顶力。
一次顶进距离大于100m时，应采取中继间技术。
顶管法的技术指标应符合《给水排水管道工程施工及验收规范》GB50268的有关规定。

**13.3 适用范围**

综合管廊主要用于城市统一规划、设计、施工及维护的市政公用设施工程，建于城市地下，用于敷设市政公用管线。

**13.4 工程案例**

北京天安门广场综合管廊、上海浦东新区张杨路共同沟、广州大学城综合管廊、昆明广福路和彩云路综合管廊、中关村（西区）综合管廊、上海世博园区综合管廊、武汉光谷综合管廊、珠海横琴新区环岛综合管廊、上海安亭新镇综合管廊、上海松江新城综合管廊等。