

第二章 地基处理技术

第一节 概 述

凡是基础直接建造在未经改造的天然土层上时,这种地基称为天然地基。若天然地基不能满足地基强度要求,则事先要经过人工处理后再建造基础,这种地基称为人工地基。对地基进行人工改造加固,称为地基处理。

各种各样的结构物对地基的要求是不同的,而各个地区天然地层的情况差别又非常大,即使在同一地区、同一工点,地质情况也可能有很大差别。所有这些就决定了地基处理问题的复杂性和多变性。是采用天然地基,还是采用人工地基?采用人工地基时采用什么地基处理方案?这是建造结构物时首先需要解决的问题。处理是否恰当,不仅影响到建筑物的安全和使用,而且对建设速度、工程造价都有很大影响,甚至成为工程建设中的关键。

随着我国经济建设的迅速发展,基本建设规模越来越大。在交通、土建、水利等工程建设中会遇到各种各样的地基土,因土的种类不同,其承载能力、压缩性以及透水性等力学性能亦有很大的差别。随着当前结构物的荷载日益增大,对地基变形要求越来越严。原来一般可被评价为良好的地基,也可能在某些特定条件下,非进行人工处理不可,以满足工程建设的需要。因而涉及到多种地基处理技术。

第二节 挤密桩施工法

挤密桩施工是向地基中掺入一定的填充材料,使原孔隙比较大的松散砂土和人工填土层在填充材料的挤压作用下孔隙比减小,地基强度增加,掺入的填充材料在地基中能起到较好的骨架作用,挤密桩施工通常可将承载力较小的软弱地基改变成为承载力较大的新的复合地基。

一、土桩及灰桩施工技术

土桩、灰桩、灰土桩和二灰桩挤密法是处理地下水位以上的湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基加固方法,是由桩间挤密土和填夯的桩柱共同组成的复合地基。它是利用沉管、冲击、爆破等方法将钢管打入土中侧向挤密成孔,然后在孔中分别填入素土或石灰或石灰土或石灰与粉煤灰混合物(简称二灰),夯实而成的桩,桩与桩间土共同组成复合地基承受上部荷载。

土桩是将土料填入桩孔内夯实而制成的桩,由于桩孔内填入的土料与桩间土相同,土料夯实和桩间土质量一致时,两者的物质力学指标相近。因此,土桩挤密地基可视为厚度较大的素土垫层。

灰桩是将生石灰填入桩孔内夯实而制成的桩,石灰桩除了成孔时挤密桩周围土外,主要作用还在于生石灰在桩孔中吸收土层的孔隙水变成熟石灰时产生体积膨胀。进一步挤密桩周土,提高地基承载力,消除湿陷性,从而使地基得到加固。

灰土桩是在土桩挤密法基础上发展起来的。灰土桩是用石灰和土按 2:8 或 3:7 的体积比例拌和,并在桩孔内夯实加密后形成的桩。这种材料在化学性能上具有气硬性和水硬性,

并随灰土龄期增长,土体固化作用提高,使灰土逐渐增加强度,达到挤密地基,提高地基承载力的效果。

二灰桩采用的是石灰和粉煤灰,通过石灰的碱性激发作用,促进粉煤灰之间产生一系列复杂的硅铝酸钙和水硬性胶凝物质,从而提高了二灰的强度。

石灰桩及石灰粉煤灰桩具有加固效果显著、材料易得,施工简便等特点。适于处理含水量较高(30%~130%)的粘性土地基、淤泥、含有有机质的土、不太严重的黄土地基的湿陷性事故或作为严重湿陷事故的辅助处理措施。一般加固后地基强度可提高1~3倍,是一种简易处理软弱地基的有效方法。

(一) 加固机理

湿陷性黄土属于非饱和的欠压密土,孔隙比较大干密度偏小,是其产生湿陷性的根本原因。研究与工程实践证明,当土的干密度及其压实系数达到某一标准时,即可消除其湿陷性。土桩和灰土桩挤密法正是利用这一原则,通过挤土成孔,使桩间土横向加密,并与夯填密实的桩体组成无湿陷性的承载力较高的人工复合地基。

1. 挤密作用

单桩挤密时,在孔壁附近土的密度(ρ_d)接近或超过其最大干密度 ρ_{dmax} ,挤密系数 $\lambda \approx 1.0$ 。依次向外,土的干密度和压实系数逐渐减小,直至接近土的原始干密度 ρ_{d0} 。对应于 $\rho_d = \rho_{d0}$ 的界限区内可称为“挤密影响区”,其半径常为(1.5~2.0)d(d为桩孔直径)。单个桩孔的“有效挤密区”半径一般为(1.0~1.5)d。相邻两桩或三桩成孔挤密后,在交界处将产生叠加作用,使桩间土干密度进一步增大,且桩间土的密实度变得均匀,桩距愈近,叠加效果愈显著。

土的天然密度和含水量对挤密效果有显著影响。当含水量过低时,由于土呈坚硬状态,塑性小,有效挤密区相应缩小。当含水量过高时,由于挤压引起超孔隙水压力,使土体只能向外围移动而促成挤密效果不佳,且孔壁附近的土受扰动而使强度降低,拔出桩管时桩孔容易出现缩径、回淤等情况。当含水量接近最优含水量时,土呈塑性状态,挤密效果最佳。因此,施工挤密时需要对土的含水量进行最优值选择。土的天然干密度愈大,则有效挤密范围愈大;反之,则有效挤密区较小,挤密效果较差。

2. 物化作用

石灰桩除了成孔时挤密桩周围土外,主要作用还在于生石灰在桩孔中吸收桩土层的孔隙水变成熟石灰时产生体积膨胀。石灰在吸取桩周土体中水分进行化学反应的过程中,产生吸水、膨胀、发热、脱水、挤密、离子交换、胶凝等一系列作用,从而使土体的含水量降低,孔隙比减少,承载力提高,与桩周土层一起组合成复合地基。石灰桩体本身也具有一定强度,其单轴抗压强度可达300KPa。

灰土桩是用石灰和土按一定体积比例(2:8或3:7)拌合,并在桩孔内夯实加密后形成的桩,这种材料在化学性能上具有气硬性和水硬性,由于石灰内带正电荷钙离子与带负电荷粘土颗粒相互吸附,形成胶体凝聚,并随灰土龄期增长,土体固化作用提高,使灰土逐渐增加强度。在力学性能上,它可达到挤密地基的效果,提高地基承载力,消除湿陷性,使沉降均匀和沉降量减少。

在石灰桩中掺入粉煤灰(一般占石灰桩重的15%~30%),与石灰混合后,生石灰吸水膨胀、放热及离子交换作用促成化学反应,生成具有强度和水硬性的水化硅酸钙、水化铝酸钙和水化铁酸钙。同时随埋在土中的龄期增长其强度也增长,除提高强度和密实性外,还可克服石灰桩桩心的软化和解决石灰桩在地下水位以下的硬化问题。在二灰桩中采用的粉煤灰,且多数采用湿灰。粉煤灰中含有较多焙烧后的氧化物。粉煤灰中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 玻璃

体与一定量的石灰和水拌合后,由于石灰的吸水膨胀和放热反应,通过石灰的碱性激发作用,促进粉煤灰之间离子相互吸附交换,在水热合成作用下,产生一系列复杂的硅铝酸钙和水硬性胶凝物质,使其相互填充于粉煤灰空隙间,胶结成密实坚硬、类似水泥水化物的块体,从而提高了二灰的强度。同时由于二灰中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的作用,有利于石灰粉煤灰的水稳性。

3. 桩体作用

在灰土桩挤密地基中,灰土桩的变形模量远大于桩间土的变形模量(灰土的变形模量为 $E_0=40\sim 200\text{MPa}$,相当于夯实素土的 2~10 倍)。灰土桩的桩体作用既不同散体材料(无胶凝强度)的素土桩,又不同于刚性混凝土桩的情况,而灰土桩介于两者之间。虽桩顶相对沉降量灰土桩与混凝土桩接近,但灰土桩约至 $6d$ (d 为桩径)深度处,桩体已不再产生沉降,说明其荷载已快速向桩侧土体传递,桩体本身应力已很低,其传递荷载的深度是有限的,此即柔性桩工作的主要特征。载荷试验结果表明:只占压板面积约 20% 的灰土桩承担了总荷载的一半左右,而占压板面积 80% 的桩间土仅承担其余一半。由于总荷载的一半由灰土桩承担,从而降低了基础底面下一定深度内土中的应力,消除了持力层内产生大量压缩变形和湿陷变形的不利因素。

此外,由于灰土桩对桩间土能起侧向约束作用,限制土的侧向移动,桩间土只产生竖向压密,使压力与沉降始终呈线性关系。

(四) 施工工艺

土桩、灰土桩或二灰桩施工工艺可分为管内成桩法与管外成桩法两种方式。一般宜采用管内成桩。即机械或人工成孔后填料,夯实、封顶,自上而下成孔,自下而上填夯成桩。

1. 管内成桩法施工程序

管内成桩施工程序如图 2-2 所示,主要包括:施工准备、成孔挤密、填料配置、桩孔填夯和质量检验等项。其主要工序为成孔挤密和桩孔填夯两项。

2. 管内成桩成孔方法:

土桩和灰土桩或二灰桩的成孔施工方法可分为沉管成孔、爆扩成孔和冲击成孔等。施工时,应根据地基土的物理力学性质、桩孔深度、机械设备条件和施工经验等因素来选定。

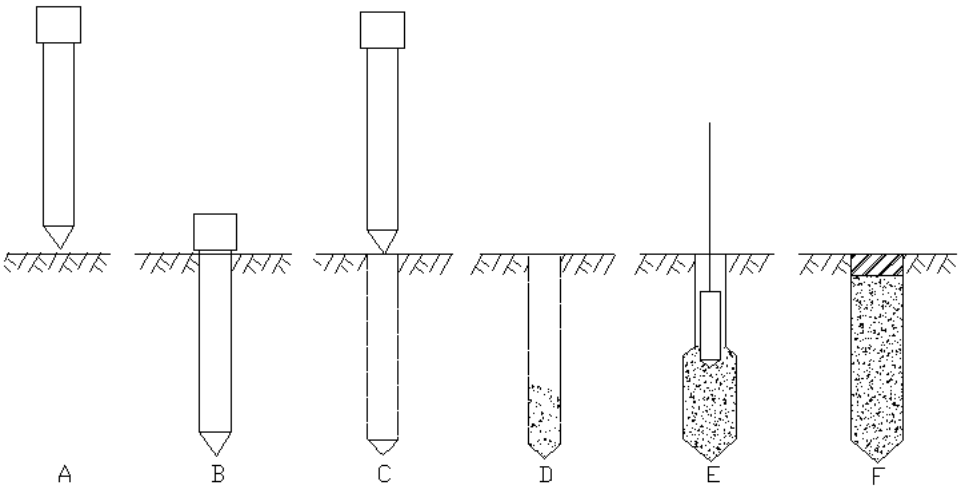


图 2-2 管内成桩法施工程序图

A—桩管就位, B—成孔挤密, C—桩孔形成, D—填料待冲, E—夯填挤密, F—成桩封顶

(1) 沉管法成孔

使用振动或锤击打桩机，将带有特制桩尖的钢制桩管（图 2-3）打入土层中至设计深度，然后慢慢拔出桩管即成桩孔。其孔壁光滑规整，挤密效果和施工技术都比较容易控制和掌握。因此，沉管法是最常用的成孔方法。但是，沉管法成孔的最大深度受到沉管机桩架高度的限制，一般不超过 8m。选用的打桩机技术性能应与桩管直径、长度、重量以及地基土特性等相适应。锤重不宜小于桩管重量的 2 倍。

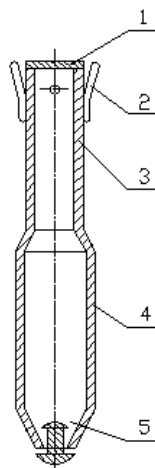


图 2-3 沉管法成孔桩管构造

1—封头板， 2—提环， 3— $\phi 275\text{mm}$ 钢管， 4— $\phi 300\text{mm}$ 钢管， 5—底阀

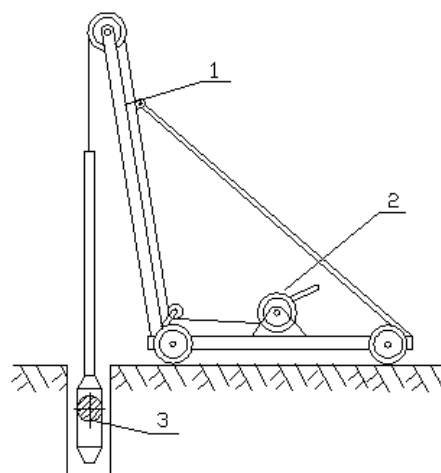


图 2-4 冲击法成孔夯实机

1—机架， 2—夯锤， 3—卷扬机

(2) 冲击法成孔

冲击法成孔是使用定型或简易冲击机，将锤头提升一定高度后自由落下，反复冲击使土层成孔，如图 2-4 所示。成孔深度不受机架高度的限制，可达 20m 以上，孔径 500~600mm。本法特别适用于处理自重湿陷性厚度较大的土层。

(3) 爆扩法成孔

爆扩法成孔是采用简易工具先形成一个小孔，在小孔内装填炸药，然后引爆炸药，爆扩成直径为 200~450mm 的桩孔。该法不需打桩机械，工艺简便，但孔径不易控制。适用于缺少施工机械的新建工程场地。

① 药眼法(见图 2-5)

将直径 $\phi 15 \sim \phi 30 \text{ mm}$ 的钢钎打入土中，拔出钢钎后在土中就形成小孔眼（药眼），在药眼内直接装填炸药和电雷管，引爆后即成桩孔。该法适用于含水量超过 22% 的土层。

② 药管法(见图 2-6)

用洛阳铲或扁头钢铲在土中挖成直径 $\phi 60 \sim \phi 80\text{mm}$ 和深度与桩孔设计值相同的孔洞，然后往孔洞内放入直径 $\phi 15 \sim \phi 30 \text{ mm}$ 的炸药管和 1~2 个电雷管，引爆后即成桩孔。此法适用于含水量较大的土层。

3. 桩孔回填夯实

回填夯实施工前，应进行回填试验，以确定每次合理的填料数量和夯击数。根据回填夯实质量标准确定检测方法和应达到的指标。桩孔填料夯实机目前有两种：一种是偏心轮夹杆式夯实机，此机可用拖拉机或翻斗车改装。因此移动轻便，夯击速度快，但必须严格控制每次填料量，较难保证夯实质量。另一种是采用电动卷扬机提升式夯实机(图 2-4)。锤重可达 450kg，落距为 1~3m。夯击能量大，一次可填入较多的填料，夯实效果较好，但需人工操作。

回填桩孔用的夯锤，宜采用倒置抛物线型锥体或梨形锤，锤重不宜小于 100 kg。夯锤最大直径应比桩孔直径小 100~160mm，使夯锤自由落下时将填料夯实。填料时每一锹料夯击 1~2 次，每分钟夯击 25~30 次。一般长为 6m 的桩孔可在 15~20 分钟内夯击完成。

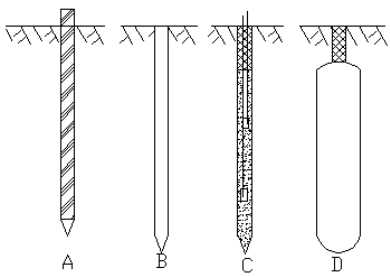


图 2—5 药眼爆扩法施工程序

A—钢钎打药眼，B—药眼形成，
C—装填炸药，D—引爆成孔

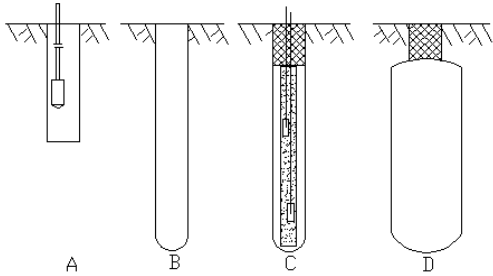


图 2—6 药管爆扩法施工程序

A—洛阳铲打药管眼，B—药管眼形成，
C—装填炸药管，D—引爆成孔

4. 桩孔封顶

因生石灰吸水膨胀，对各个方向都将产生很大的膨胀力，为减少向上膨胀力的损失，约束石灰桩的上举力，到夯填至距桩顶 0.5~1.0m 时，用 3: 7 灰土或 C_{7.5} 素混凝土捣实封顶，其顶部标高值为基础的底部标高值。

5. 管外成桩施工方法

管外成桩法是先将石灰料铺放在待加固的地面，地基土吸水膨胀固结后，再用打桩机将钢管打下，成一段孔，拔出管填一段料后再成一段孔，桩孔达到设计深度后拔出钢管，钢管外已形成较硬的石灰桩壁，桩间土已基本固结，管外桩身由上而下逐段形成，然后再在管内填料夯实，形成管内的桩身。施工工艺流程如图 2—7 所示。管外成桩法成孔质量较难保证。仅在大面积淤泥等软弱地面采用。

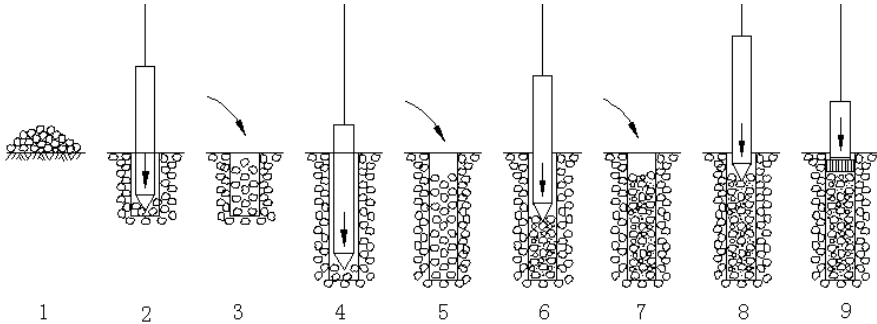


图 2—7 管外成桩法施工流程图

1—堆放桩料，2—成上段孔，3—堆填桩料，4—成下段孔，5—填料，
6—夯实，成下段桩身，7—填料，8—夯实，成上段桩身，9—粘土封顶

6. 施工要求

(1) 成孔施工时，地基土宜接近最优含水量，当含水量低于 12% 时，宜加水增湿至最优含水量。

(2) 桩孔中心点的偏差不应超过桩距设计值的 5%。

(3) 桩孔垂直度偏差不应大于 1.5%。

(4) 对沉管法，其直径和深度应与设计值相同；对冲击法或爆扩法，桩孔直径与设计值的误差不得超过 ±70mm，桩孔深度不应小于设计深度的 0.5m。

(5) 向孔内填料前，孔底必须夯实。然后用素土或灰土在最优含水量状态下分层回填夯实。回填土料一般采用过筛(筛孔不大于 20mm)的粉质粘土，并不得含有有机质；粉煤灰采用含水量为 30%~50%湿粉煤灰；石灰用块灰消解(闷透)3~4 天后并过筛，其粗粒粒径不大于 5mm 的熟石灰。灰土或二灰应拌合均匀至颜色一致后及时回填夯实。

(6) 成孔和回填夯实的施工顺序宜间隔进行，对大型工程可采取分段施工。基础底面以上应预留 0.7~1.0m 厚的土层，待施工结束后，将表层挤松的土挖除或分层夯压密实。

二、干冲碎石桩法

干冲碎石桩成桩的基本原理是在一直立管道内，用机械方法往土层中低频冲击碎石。把碎石导入到预定深度，使土层被挤密，碎石随管道上提而被连续冲捣成桩。这样按一定排列方式造成一根根桩体与被挤密的土层构成了新的复合地基(图 2—8)。

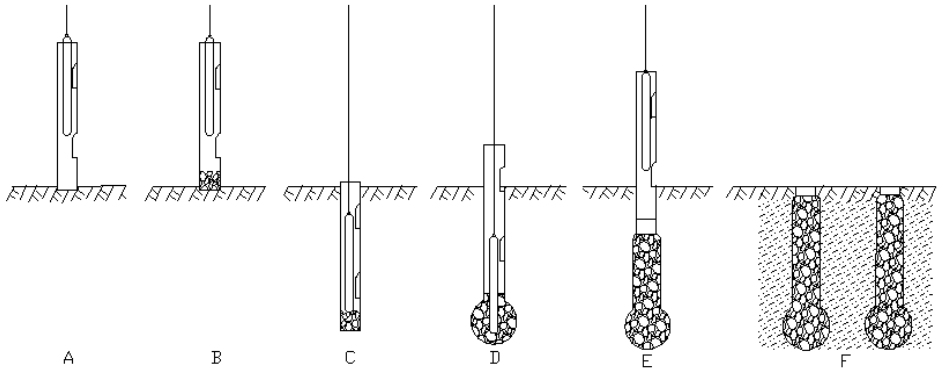


图 2—8 干冲碎石桩成桩原理

A—竖起成孔管 B—投石待冲 C—成孔管到底 D—打桩底 E—打桩身 F—复合地基形成

(一) 碎石桩加固原理

碎石桩加固地基的实质是把松散的天然地基变成由碎石桩和挤密后的桩间土组成的共同工作的复合地基，其承载力比天然地基可大幅度提高，建筑物沉降量可大幅度减小。碎石桩有以下几方面的加固作用：

1. 挤密效应

在成孔和挤密碎石的过程中，土体在水平挤压力的作用下，产生径向位移，其密度提高，孔隙比减小，承载力比加固前提高 60% 以上。因此，挤密桩间土是复合地基承载力提高的主要因素。

挤密效果与含水量密切相关。在整个桩长范围内，当某一段的含水量最接近其最优含水量（或塑限）时，其挤密效果显著增加；反之，挤密效果降低。当含水量 < 10% 或 > 24% 时，挤密效果最差。

2. 置换作用

由于桩间土对桩体有很好的约束作用，所以碎石桩体的强度高、模量大，在刚性基础作用下，地基中的应力按模量大小进行分配。因此，桩上应力集中是复合地基承载力提高的第二因素。

侧向约束力对碎石桩形状的影响至关重要，随着桩周土侧向约束力的增加，桩的模量越大，桩传递竖向荷载的能力增加，变形减小。桩间土对桩的约束力越大，地基加固效果也

越显著。

桩的挤密和桩的置换作用是相辅相成、互为依托的，而桩的置换作用的大小主要取决于桩侧土对桩体的约束力。

3. 垫层和加筋作用

碎石桩的垫层作用主要是指在较厚的软弱土层中，碎石桩没有打穿该软弱土层，这样，整个碎石桩复合地基等于对没有加固的下卧层起到垫层的作用。经垫层的扩散作用将建筑物传到地基上的附加应力减小，作用于下卧层的附加应力趋于均匀，从而使下卧层的附加应力在允许范围之内。这样就提高了地基的整体抵抗力，减少了沉降。

碎石桩的加筋作用主要是指在厚度不大的软弱土层中，碎石桩可穿过整个软弱土层达到其下的硬层上面，此时，柱体在外荷载的作用下就会产生一定的应力集中现象，从而使桩间土承担的压力相应减小。其结果与天然地基相比，复合地基的承载力会提高，压缩量会减小，稳定性会得到加强，还可用来改善土体的抗剪强度，加固后的复合桩土层可以改善土体的稳定性，这种加固作用即通常所说的加筋作用。

4. 排水作用

在碎石桩的制桩过程中由于振动、挤压和扰动等因素，桩间土会出现较大的附加孔隙水压力，从而导致原地基土强度降低。一旦制桩结束，所形成的碎石桩则是地基土的一个良好排水通道，孔隙水压力会向桩体转移消散，加速了桩间土的固结，使沉降稳定加快。

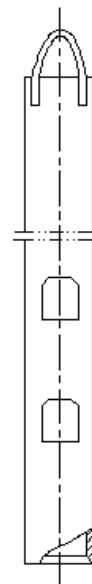


图 2-9 成孔管

(二) 干冲碎石桩施工设备机具

1. 设备

干冲碎石桩施工的主要设备是钻架和能同时提动冲锤和成孔管的两个卷扬机(以及相应的动力机)。并适应频繁移位的要求，钻架和卷扬机都应安装固定在同一平台上。提动冲锤的卷扬机的提升能力应不小于 20kN，所用钢丝绳直径一般为 $\phi 18 \sim \phi 32\text{mm}$ 。提动成孔管的卷扬机的提升能力应不小于 15kN，所用钢丝绳的直径一般小于 $\phi 15\text{mm}$ ；钻架的高度为 8~10m 即可，负荷能力不小于 150kN。

2. 成孔管

成孔管用壁厚为 10~14mm 的钢管制成。为适应起拔的需要，可以在管口的两侧对称各固定一滑轮，作为提升时之游动滑轮用；亦可焊接提环作提升之用。成孔管的下部一侧沿轴向等距开设投石口若干个，最后一个投石口距管底 1.5m 左右(图 2—9)。

3. 冲锤

冲锤是用圆钢或充铅厚壁钢管制成，其上端焊有吊环，底端为钝锥形。

(三) 施工工艺

1. 布桩和施工顺序

为使制成的桩不受到邻近桩位施打时的侧向挤压，桩点一般呈等边三角形或等腰三角形交错分布。

施工顺序应根据土层性质和场地工作条件来确定，一般可参阅《地基与基础工程施工及验收规范》(GBJ202-83)“振冲地基”推荐方法。

(1) 排孔法：由一端开始，逐步造孔到另一端，打完一排再打相邻一排。如有建筑物的场地，首排应从靠近建筑物一侧开始。

(2) 跳打法：同一排孔，隔孔跳打。

(3) 围幕法：对大面积的砂土地基，可先打造外围 2~3 圈(排)桩，再由外向内隔圈跳打，在软粘土地基，应由里向外施工，这样可使软土逐渐向外挤。

2. 制桩

制桩可分为下成孔管和填石成桩两大步骤：

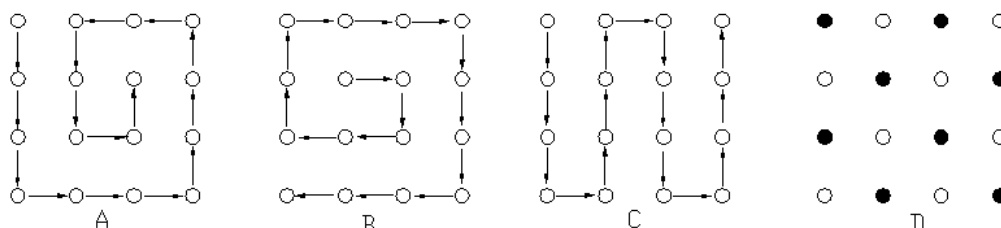


图 2-10 碎石桩的施工顺序

A—由外向里方式，B 由里向外方式，C—由一边推向另一边方式，D—间隔跳打方式

(1) 下成孔管

① 以桩位点为中心，挖一直径略大于成孔管直径的浅坑，（软土也可直接冲击造坑），拉起成孔管(内套冲锤)，直立于桩位上，并力求扶正。

② 提起冲锤，使锤下端高出成孔管投石口，通过投石口投入碎石。成孔管内投石高度约 0.5~1.5m。

③ 冲击碎石，把成孔管带到预定深度(即离设计桩深 0.5~1.0m 处)。开始应控制冲锤行程，轻冲缓下，待成孔管稳固直立时，再逐渐加大冲击行程，以碎石和管壁的摩擦力带动成孔管下行，直到预计深度(仍指离设计桩深 0.5~1m 处的深度)。成孔管下行过程中，碎石柱可能被冲透，此时应补投碎石再冲。

(2) 成桩

① 将成孔管上提 1m 左右，使管底脱离碎石柱。

② 试打：即轻冲击管底碎石 1~2 次，如成孔管不随之下沉，可判定碎石已脱离成孔管底，这时便可提起冲锤投石。

③ 打桩底：打桩底时一般需投 0.3~0.5m³ 碎石。每次投石约为 0.04m³，冲击 2~3 次，边投石边提动，即：提管——投石——冲击的循环。

④ 打桩身：打制桩身仍然是提管——投石——冲击的循环，但此时不同的是每次都要把成孔管均匀上提 0.3~0.5m，在保持桩径大体一致的情况下，逐渐增高桩身，直到打满为止。如图 2—8 所示。

三、振动水冲法

振动水冲法简称振冲法。振冲法可分振冲置换法和振冲挤密法两类。

振冲置换法利用振动和水冲成孔，制造一群以石块、砂砾等散粒材料组成的桩体。这些桩与原地基土一起构成所谓复合地基，使承载力提高，沉降减少。在成孔过程中有大量的地基土成泥浆排出，适用于处理不排水抗剪强度不小于 200 kPa 的粘性土、粉土、饱和黄土和人工填土等地基。

振冲挤密法利用振动和水冲使地基振密实，在振动密实过程中形成的空洞，用砂砾、粗粒土回填再振密实，适用于处理砂土和粉土等地基。

振冲加固可提高地基承载力，减少沉降和不均匀沉降，且能达到地基抗地震液化能力的效果。国内已将振冲应用在饱和松散粉细砂、中砂、粗砂、砾砂、杂填土、粘性土和软土中，都取得了令人满意的效果。就工程而言，振冲法可用于中小型工业与民用建筑物、码头、护岸、土石坝、路基、材料堆置场等。

（一）振冲法加固地基的机理

振冲加固法是以起重机吊起振冲器，启动潜水电机带动偏心块，使振冲器产生高频振动，同时开动水泵通过喷嘴喷射高压水流。在振动和高压水流的联合作用下，振冲器沉到土中的预定深度，然后从地面向孔中逐段添加填料(碎石或其他硬质粗粒料)，每段填料均在振动作用下被振挤密实，达到所要求的密实度后提升振冲器，再进行第二段填料振冲。重复上述操作，直至地面，如图 2—11 所示。从而在地基中形成一根大直径的密实桩体。

振冲法加固地基对不同的地基土性质其作用机理也不同。

1. 松散砂性土

松散砂土是单粒结构，而疏松的单粒结构，颗粒间孔隙大，颗粒位置不稳定，在动力和静力作用下特别是在振动力作用下很容易位移，产生较大的沉降。

松散砂土在振冲器的振动力和冲水饱和下，一方面传播振动加速度，在振冲器周围一定范围内的砂土产生了振动液化。液化后的砂土颗粒在重力以及填料的挤压力作用下重新排列，使孔隙减小。另一方面振冲器的水平振动力和侧向挤压力通过填料层使砂土的结构逐渐破坏，孔隙水压力迅速增大。由于结构破坏，土粒有可能向低势能位置转移，这样，土体由松变密。密实后的砂土地基承载力和变形模量得到了提高。由于砂土预先经历了人工振动液化、重排密实，而且制成的碎石桩构成良好的排水通道，降低了今后发生地震时该场地的超孔隙水压力，从而使二次液化现象大为减轻，砂土颗粒再次重排密实的沉降量大为减小。因此，振冲法可提高砂土地基抗震能力。

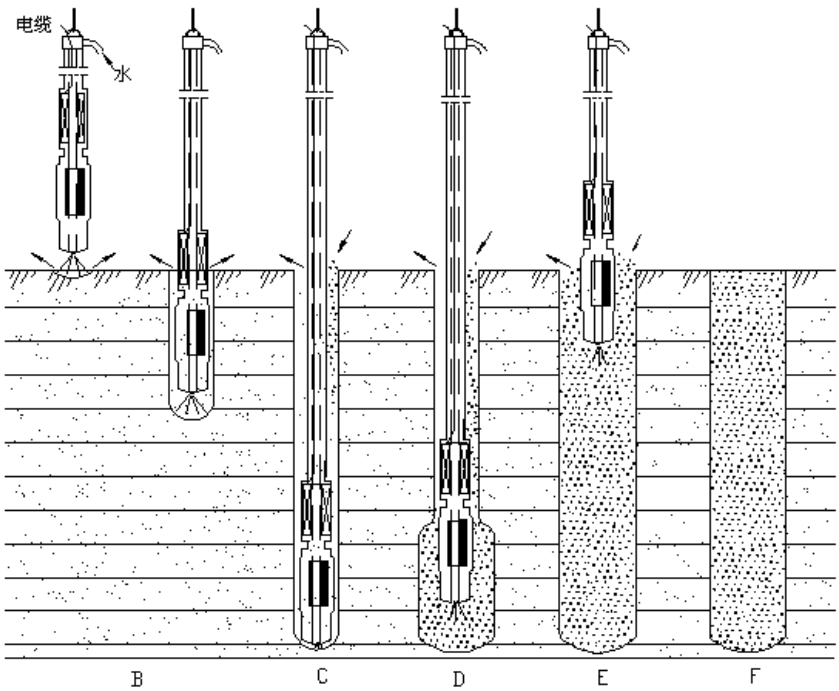


图 2-11 振冲施工过程

A-振冲就位, B-振冲成孔, C-开始填料, D-振制桩底, E-振制桩身, F-单桩完成

砂土的振动液化在特定的条件下与加速度的大小有关,同时还取决于土层的上覆压力、土的压密特性、砂的渗透性、边界排水条件以及振动的持续时间或次数。因此,最有效的压实是在砂层的自振频率接近输入振动频率时产生共振。当振冲器的振动频率与砂土的自振频率 1020~1200 次/min 相接近时,振冲挤密效果较好。

2. 粘性土

对于粘性土地基加固,振冲碎石桩的作用不是使地基挤密,而是置换。粘性土(特别是饱和软土),由于软粘土渗透性很低,振动力或挤压力不能使土中的孔隙水迅速排除而减小孔隙比。振冲施工时,通过振动器借助其自重、水平振动力和高压水将粘性土变成泥浆水排出孔外,形成略大于振冲器直径的孔,再向孔中灌入碎石料,并在振冲器的侧向力作用下,将碎石挤入周围土中,形成具有密实度高和直径大的碎石桩体,它与原粘性土构成复合地基。复合地基承受荷载后,由于原地基和碎石桩柱材料变形模量不同,使地基土中应力重新分布,大部分荷载将由碎石桩承担,桩体应力和桩间粘性土应力之比值称为桩土应力比,一般为 2~4。因此,在没有提高软粘土承载力的情况下,而整个地基承载能力得到提高。

碎石桩(或砂桩)是由散粒体组成,承受荷载后产生径向变形,并引起周围的粘性土产生被动抗力。如果粘性土的强度过低,不能使碎石桩得到所需的径向支持力,桩体就会产生鼓胀破坏,使加固效果不佳。因此,天然地基抗剪强度的大小是形成复合地基的关键。

(二) 振冲碎石桩施工工艺

1. 振冲施工设备

振冲法的主要施工机具是振冲器。振冲器必须具有振动挤实的最优振动力、振幅和振动频率;并具有射水成孔,充水护壁并使土体和填料处于饱和状态的供水性能。目前使用的定型产品其构造示意图见图 2-12。

振冲器的上部为立式潜水电机,下部为振动机体。电机轴转动时,通过弹性联轴器带动振动机体中的中空轴。中空轴上装有用键连接的偏心块,从而产生水平向振动力。外径为 25mm 的水管从电机上部穿过电机中空轴和振动机体中空轴至端部进行射水和供水,振冲器的锥头由硅锰合金钢制成,以增强耐磨性。

振动机体外壳为优质无缝钢管,轴承箱内装有两组径向轴承和一个推力轴承。对于内部和外部的各接合面采取了密封措施。轴内穿过的射水管采取上端固定,下端放松,中部设一弹性支承点并在管外绕有石棉盘根等材料,以改善射水管在振动状态下的受力状况。在振冲器端部机体外设有翼板,以抵抗振冲时的反扭力矩。在振冲器与上部悬挂导管之间装有万向接头,以衰减振动能量的向上传递。

振冲施工的配套机械设备有:

悬吊、起重和升降系统:一般采用履带吊、汽车吊、自行井架式专用吊机。起重能力和提升高度均应满足施工要

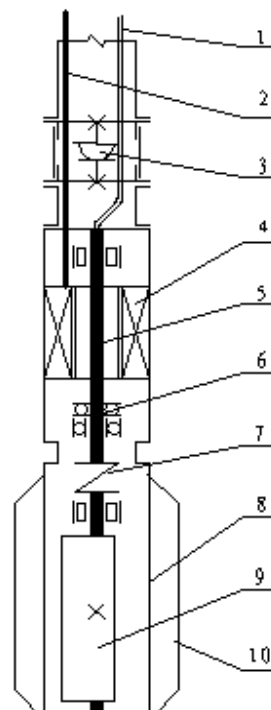


图 2-12 振冲器
构造示意图

1-水管, 2-电缆, 3-万向节, 4-潜水电机, 5-中空轴, 6-轴承, 7-联轴器, 8-壳体, 9-偏心体, 10-翼板, 11-射水嘴

求，并需符合起重规定的安全值，一般起重能力为 100~150KN。

泵送系统：要求有足够的压力水通过胶皮管引入振冲器的中心水管，最后从振冲器的孔端喷出 400~600KPa 的水压力，水量为 20~30m³/h。用一般钻进泥浆泵和配水管路即可。也可用压力达到 700KPa 的其它类型供水泵。

振冲法施工配套设备如图 2—13 所示。

2. 填料选择及加料方式

(1) 填料选择

填料的作用一方面是填充在振冲器上提后在砂层中可能留下的孔洞，另一方面是利用填料作为传力介质，在振冲器的水平振动下通过连续加填料，将砂层进一步挤压加密。

对中粗砂，振冲器上提后由于孔壁极易坍塌能自行填满下方的孔洞，从而可以不加填料，就地振密；但对粉细砂，必须加填料后才能获得较好的振密效果。

填料可用粗砂、砾石、碎石、矿渣等材料，粒径为 0.5~5cm。理论上讲填料粒径越粗，挤密效果越好。使用 30kw 振冲器时，填料的粒径宜在 5cm 以内，因为如若填料的多数颗粒径大于 5cm，容易在孔内发生卡料现象，影响施工进度。使用 75 kw 大功率振冲器时，最大粒径可放宽到 10cm。

(2) 加料方式

在地基内成孔后，接着要往孔内加填料。过去有三种加料方式。第一种是把振冲器提出孔口，往孔内倒入约 1m 堆高的填料，然后下降振冲器使填料振实。每次加料都这样做。第二种是振冲器不提出孔口，只是向上提升约 1m 左右，然后向孔口倒料，再下降振冲器使填料振实。第三种是边把振冲器缓慢向上提升，边在孔口连续加料。就粘性土地基来说，多数采用第一种加料方式，因为后两种方式，桩体质量不易保证。对较软的土层，宜采用“先护壁，后制桩”的办法施工。即成孔时，不要一下达到设计深度，而是先达到软层上部 1~2m 范围内，将振冲器提出孔口加一批填料，下降振冲器使这批填料挤入孔壁，把这段孔壁加强以防塌孔。然后使振冲器下降至下一段软土中，用同样方法加料护壁。如此重复进行，直达设计深度。孔壁护好，就可按常规步骤制桩了。

选用何种加料方式，主要视地基土的性质而定。在软松土地基中，由于孔道常会被坍塌下来的软粘土所堵塞，所以常需进行清孔除泥，故不宜使用连续加料的方法。砂性土地基的孔道，塌孔现象不像软弱粘土地基那样严重，所以为了提高工效，可以使用连续加料的施工方法。

3. 施工顺序

施工顺序一般可采用“由里向外”或由一边向另一边”的顺序进行。因为这种方式有利于挤走部分软土。如果“由外向里”制桩，中心区的桩很难做好。对抗剪强度很低的软粘土地基，为减少制桩时对原土的搅动，宜用间隔跳打的方式施工。当加固区附近有其他建筑物时，为减少对建筑物的影响，必须先从邻近建筑物一边的桩开始施工，然后逐步向外推移。必要时可用振力较小的振冲器（如 ZCQ13）制邻近建筑物一边的桩。施工顺序可参见图 2—10。

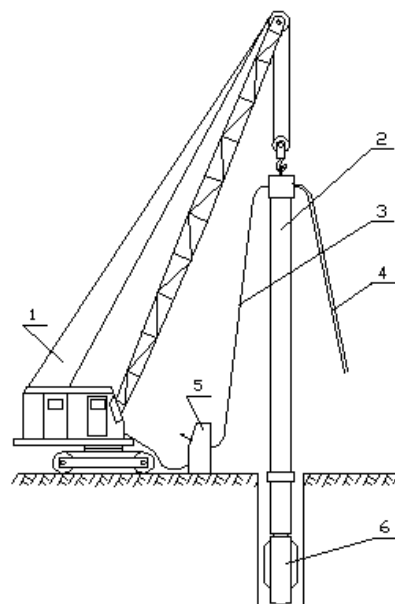


图 2—13 振冲法施工配套设备

1—起重机，2—连接管，3—电缆，
4—水管，5—操作台，6—振冲器

4. 施工方法

振冲法具体施工可根据“振冲置换”和“振冲挤密”的不同要求，其施工操作要求亦有所不同。

(1) 振冲置换法施工

在粘性土层中制桩，孔中的泥浆水太稠时碎石料在孔内下降的速度将减慢，且影响施工速度，所以要在成孔后留有一定时间清孔，将回水把稠泥浆带出地面，降低泥浆的比重。若土层中央有硬层时，应适当进行扩孔，把振冲器多次往复上下几次，使得此孔径能扩大，以便于加碎石料。每次往孔内倒入的填料数量，约为堆积在孔内 1m 高，然后用振冲器振密，再继续加料。密实电流应超过原空振时电流 35~45A。

(2) 振冲挤密法施工

振冲挤密法一般在中粗砂地基中使用时可不另外加料，而利用振冲器的振动力，使原地基的松散砂振挤密实。在粉细砂、粘质粉土中制桩，最好是边振边填料，以防振冲器提出地面孔壁坍塌。施工操作时，其关键是水量大小和“留振时间”的长短。“留振时间”是指振冲器在地基中某一深度处停留振动的的时间。水量的大小是要保证地基中的砂土充分饱和。砂土只有在饱和状态下并受到了振动便会产生液化，足够的留振时间是让地基中的砂“完全液化”和保证有足够大的“液化区”。砂土经过液化在高频振动下，颗粒便会重新排列，这时的孔隙比将比原来的孔隙比小，密实度相应增加，这样就可达到加固的目的。

整个加固区施工完后，桩体顶部向下 1m 左右这一土层，由于上覆压力小，桩的密实度难以保证，应予以挖除另作垫层，也可另用振动或碾压等密实方法处理。

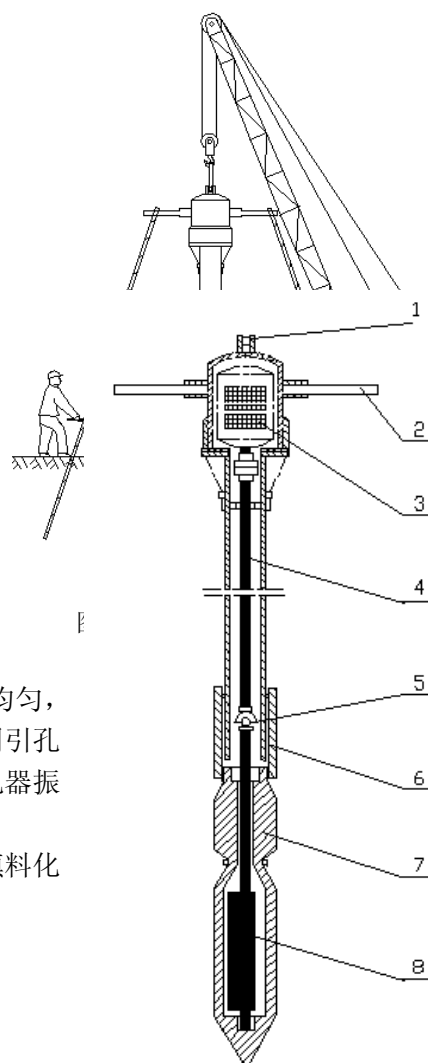
四、干振碎石桩简介

干振碎石桩技术是对振冲碎石桩的直接改进，即以无射水干振的“振孔器”取代振动加水冲的“振冲器”造孔和制桩，利用“振孔器”的水平振动力和自重成孔。挤密碎石而成干振碎石桩。从而避免泥水污染环境及非饱和土遭水浸的缺点。图 2-14 为干振法的施工现场情况。干振法的“振孔器”构造如图 2-15 所示。

干振碎石桩加固地基的工艺是首先用振孔器振动挤土成孔，使原孔位的土体全部挤到周围土体中去，成孔后提起振孔器，在孔中倒入约 1m 高的碎石，再放入振孔器振密碎石，直到达到密实电流，并且留振适当时间，再提起振孔器。如此反复进行上提——投石——振密程序，即可制成 1 根干振碎石桩。

振动成孔是干振碎石桩施工的关键环节，能成孔才能成桩。对于杂填土和高压缩性的非饱和和粘性土，成孔电流一般控制在 80~110A，成孔速度控制在 0.5~1.0m/min。震动器下放的速度要均匀，不宜过快过猛、忽快忽慢。成孔困难时，可以采用引孔的方法，即采用其他设备先钻孔，然后再采用振孔器扩孔。

干振法施工对填料要求不是很严格，只要求填料化



学成分稳定。这是因为干振法加固地基挤密效应是承载力提高的主要因素，桩体的置换作用是第二位的。填料可以是碎石、卵石、建筑垃圾、钢渣等。填料粒径一般不宜超过 10cm，采用分段填料。每次填料量不宜超过 1m，每次填料后采用振孔器进行挤扩至密实电流（约 80A），并留振 10~15 秒。

干振法加固地基，在振冲基础上免去了冲水问题，减小了环境污染，施工设备及成孔成桩工艺简单，在我国北方地区取得了良好的效果。

五、水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 施工技术

水泥粉煤灰碎石桩 (Cement Fly-ash Gravel Pile)，简称 CFG 桩。它是在碎石桩的基础上掺入适量石屑、粉煤灰和少量水泥，加水拌合后制成的一种具有一定强度的桩体。其骨料仍为碎石，用掺入石屑来改善颗粒级配，掺入粉煤灰来改善混合料的和易性，并利用其活性减少水泥用量；掺入少量水泥使其具有一定粘结强度。它不同于碎石桩。碎石桩是由松散的碎石组成，在荷载作用下将产生鼓胀变形，增加桩长，承载力提高不显著。CFG 桩是一种低强度混凝土桩，可将荷载传递到深层地基中去，大大提高复合地基承载力。加之 CFG 施工工艺简单，具有较好的技术性能和经济效果，得到广泛应用。

图 2-15 振孔器结构示意图

1—滑轮，2—反扭矩，3—电动机，4—传动轴，5—万向节，6—减震器，7—配重体，8—偏心体

（一）加固机理

CFG 桩加固软弱地基主要有三种作用，即桩体作用、挤密作用和褥垫层作用。

1. 桩体作用

CFG 桩的桩身为具有一定胶结强度的混合料制成。在垂直荷载作用下桩身不会出现压胀变形，在荷载作用下桩的压缩性比其周围软土小得多，由基础传给复合地基的应力随地基的变形逐渐集中到桩体上，桩承受的荷载通过桩周的摩阻力和桩端阻力传到深层地基中，起到“桩体作用”，CFG 桩的桩体作用显著，其复合地基承载力提高幅度较大。

2. 挤密作用

CFG 桩采用振动沉管法施工，对土体产生振动和挤压，使土得到挤密，经挤密后的地基土的含水量、孔隙比、压缩系数均有所减小，重度、压缩模量均有所增加，使挤密加固后桩土的力学性能大为改善，从而使复合地基的承载力显著提高。

3. 褥垫层作用

由级配砂石、粗砂、碎石等散体材料组成的褥垫，在复合地基中有如下几种作用：

（1）保证桩、土共同承担荷载。褥垫层的设置为 CFG 桩复合地基在受荷后提供了桩上、下刺入的条件，即使桩端落在好土层上，至少可以提供上刺入条件，以保证桩间土始终参与承载（图 2-16）。

（2）减少基础底面应力集中。在基础底面处桩顶应力 σ_p 与桩间土应力 σ_s 之比随褥垫层厚度的变化如图 2-17 所示。当褥垫层厚度大于 10cm 时，桩对基础产生的应力集中已显著降低。褥垫厚度可以调整桩土荷载分担比，当荷载一定时，褥垫越厚，土承担的荷载越多。

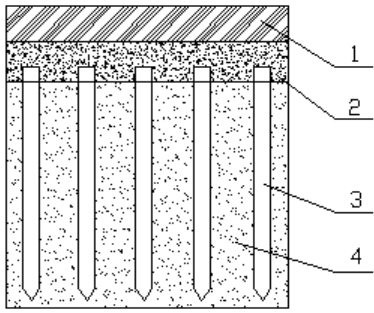


图 2—16 CFG 桩复合地基示意图

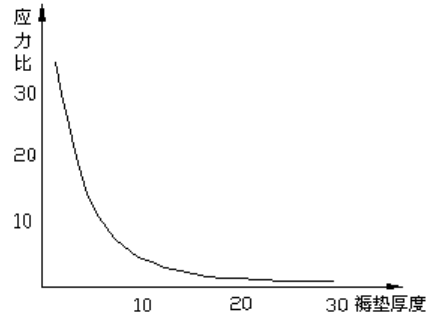


图 2—17 σ_p/σ_s 与褥垫层厚度关系曲线

(二) 施工

工艺

CFG 桩施工工艺流程见图 2—18。

1. 机具设备

CFG 桩成桩机具一般采用振动式沉管或锤击式沉管机设备，配以 DZJ90 型变矩式振动锤（图 2—19 为振动沉管设备）。也可根据现场土质情况和设计要求的桩长、桩径选用其他类型的振动锤。所用桩管的外径一般为 325mm 和 377mm 两种。

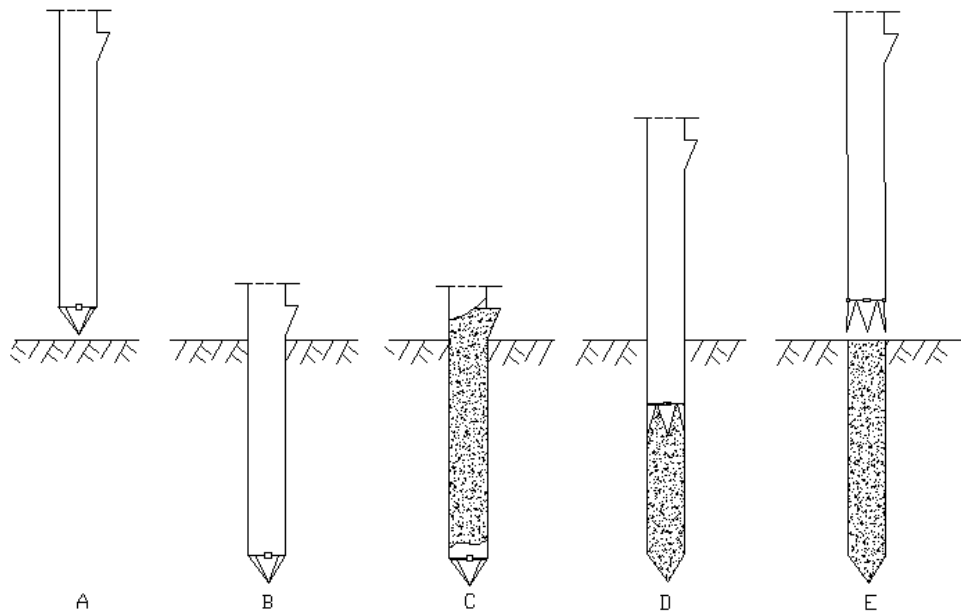


图 2—18 CFG 桩施工工艺流程图

A-振（打）入桩管,B-桩管到深,C-填入拌合料,D-边振（留振）边上提桩管,E-单桩完成

2. 施工程序

(1) 桩机就位

桩机就位须水平、稳固、调整沉管与地面垂直，确保垂直度偏差不大于 1%。若采用预制钢筋混凝土桩尖，需埋入地表以下 300mm 左右。

(2) 沉管

启动电动机，开始沉管直至设计深度。沉管过程中须作好记录。对土层变化处应特别说明。

(3) 停振投料

沉管至设计标高后须尽快投料，投料量直到管内料面与钢管投料口平齐。如上料量不多，须在拔管过程中进行孔中投料，以保证成桩桩顶标高满足设计要求。

(4) 留振拔管

当混合料加至钢管投料口平齐后，开动振动电机，使沉管原地留振动 10 秒左右，然后边振动边拔管。每上拔 1m，停拔，原位振动 5~10s。如此反复，直至全部拔出桩管。

拔管速度应均匀，一般控制在 1.2~1.5m 左右，如遇淤泥或淤泥质土，拔管速率要适当放慢。

(5) 复振

如需扩大桩径，增强挤密程度，在拔出沉管后，在原桩孔位上第二次振动沉管，将未凝固的混合料向四周挤压，达到要求深度后，二次灌注混合料，再次振动拔管成桩。

(6) 保护桩长

保护桩长是指成桩时预先设定加长的一段桩长，基础施工时将其剔掉。保护桩长越长，桩的施工质量越容易控制，但浪费的材料也越多。保护桩长一般可取 0.5~1.0m，上部用土或粒状材料封顶直到地面。

(7) 桩头处理

CFG 桩施工完毕待桩体达到一定强度(一般为 7 天左右)，方可进行基槽开挖。在基槽开挖中，如果设计桩顶标高距地面深度小于 1.5m，宜采用人工开挖，如果基槽开挖较深，开挖面积大，采用人工开挖不经济，可考虑采用机械和人工联合开挖。桩头凿平，并适当高出桩间土 1~2cm。

(8) 褥垫铺设

褥垫材料多为粗砂、中砂或级配砂石，限制最大粒径不超过 3cm。
虚铺后多采用静力压实，当桩间土含水量不大时亦可采用夯实。桩间土含水量较高，特别是高灵敏度土，要注意施工扰动对桩间土的影响，以避免产生橡皮土。

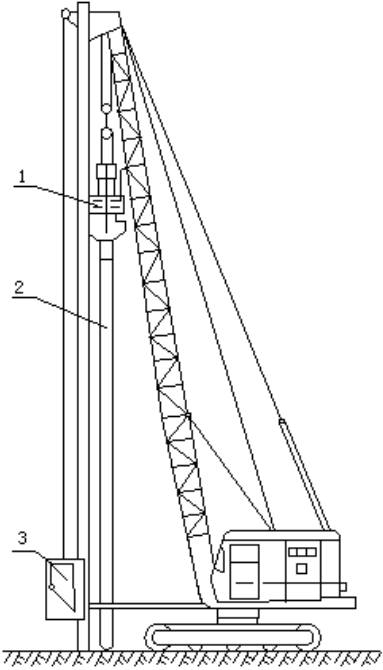


图 2-19 振动沉管施工设备
1—振压器，2—桩管，3—料斗

第三节 注浆施工法

地层注浆法通常是以钻机钻成一注浆孔，利用注浆泵将具有填充、胶结、固化性能的浆液，通过注浆孔注入到岩土层中的孔隙、裂隙或空洞中，经一定时间后，浆液凝结硬化，减少岩土层的渗透性，增加其强度和稳定性，从而达到岩土加固、防渗的目的。

注浆法处理地基经济、安全、可靠，已成为岩土工程改造地基基础的重要手段。广泛应用于各种复杂地层的岩土工程。

注浆施工工艺方法可分为静压注浆法、高压旋喷注浆法和深层搅拌注浆法。

一、静压注浆法

静压注浆法也称压力灌浆法。其实质是借助于压力（主要是液压、气压）或电化学原理，通过注浆管把能凝结固化的浆液注入地层中。浆液以填充、渗透或挤密等方式，赶走土颗粒间或岩石裂隙中的水分和空气后占据其位置。经一定时间后，浆液凝结充塞孔隙或裂缝，将原来松散的颗粒胶结成一个结构强度大、防渗性能好的一个整体。

（二）注浆浆液材料

注浆工程中所用的浆液是由主剂（原材料）、溶剂（水或其它溶剂）及各种外加剂混合而成。通常所说的注浆材料，是指浆液中所用的主剂。

注浆材料常分为粒状浆材、化学浆材和混合浆材三个大类，其后再按材料的主要特点细分为不稳定粒状浆材、稳定粒状浆材、无机化学浆材和有机化学浆材等四类。

粒状浆材主要包括纯水泥浆、水泥砂浆、粘土水泥浆及粘土固化浆液四种。这些浆材容易取得，成本低廉，故在各类工程中应用最为广泛。为了改善粒状浆材的性质，以适应各种自然条件和不同注浆目的需要，还常在浆液中掺入各种外加剂。

粒状浆材中绝大多数以水泥作为基本浆材。水泥基浆液是以水泥浆为主的浆液，在地下水无侵蚀性条件下，一般采用普通硅酸盐水泥。这种水泥具有固结强度高、耐久性好、无毒性、货源广和价格低等优点。近年开发的超细水泥与普通水泥相比，它有较好的渗透性能，能渗入细砂层和宽度大于 0.05mm 的岩石细裂隙中。目前超细水泥已广泛应用于加固坝体基础及各种地下工程的防渗、堵漏等注浆工程中，并取得了较好的效果。

为了调节水泥浆的性能，有时需加入部分水泥外加剂。常用水泥浆外加剂见表 2—4。

2. 化学浆材

化学浆液的品种很多，包括环氧树脂类、甲基丙烯酸酯类、聚氨酯类、丙烯酰胺类、木质素类和硅酸盐类等。

化学浆液近年来得到广泛的应用，是因为它具有一些特点：

（1）化学浆液的粘度低，流动性好，可灌性好，在其凝结之前粘度保持不变。一般认为，凡是水能进入的细微裂隙，多数化学浆液都能灌入。

（2）化学浆液的胶凝时间可以准确地控制。有时根据工程需要调节配比，可使其瞬间胶凝，这对处理大的集中渗流较为有效。

（3）化学浆液凝结后的渗透系数很小，可达 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ 。多数浆液与岩土的结合强度都比较高，且稳定性和耐久性都较好。

（4）某些化学浆材有一定的毒性，对人有害，对环境有不同程度的污染。

化学浆液虽有上述特点，但由于浆液成本较高，化学浆液一般只用于水泥类浆液难以奏效的工程条件下。

3. 混合浆材

混合浆材主要是指粒状浆材与化学浆材的混合。常用的混合浆材是水玻璃溶液与水泥浆的混合物，称水玻璃水泥浆液。它具有凝结时间可在几秒钟到几十分钟内调节控制，凝固后的结石率高，结石抗压强度较大等特点。是一种用途广泛、使用效果良好的灌浆材料。

（六）注浆设备

注浆设备是指配制和压送浆液的机具。它包括注浆泵、搅拌机、流量计、输浆管、止

浆塞和混合器等。

1. 注浆泵

对注浆泵的要求是：有足够的排量，泵压应大于最大注浆压力的 1.2 倍；在注浆过程中，供浆均衡稳定。注浆泵可参考表 2—13 技术特征选择。

目前我国专用注浆泵有 YSB—250 / 120 型液力调速注浆泵和 2MJ—3 / 40 型隔膜计量注浆泵。

2MJ—3 / 40 型泵是专为双液注浆工艺设计制造的。它有两个缸，可以同时输送一种浆液，或分别输送两种浆液。

另外用泥浆泵代替亦可，如可用 2DN—25 / 80、9MTP 泥浆泵，TBW 系、BW 系泥浆泵和 300 型电动水泥泵等。

2. 浆液搅拌机

搅拌机是把固体注浆材料加水或其它溶液搅拌成均匀浆液的设备。目前国内尚无专门用于注浆的专用的搅拌设备，大都是各施工单位自行设计制造。一般有卧式和立式两种，转速为 40~80r / min。

3. 注浆工具

(1) 混合器

采用两种或两种以上的浆液同时注入的注浆，需用混合器。即两种浆液在混合器内要混合均匀。按混合器设置位置，可分为孔口混合器和孔内混合器两种。需根据注浆工艺流程和浆液凝固时间来选择使用。

(2) 止浆塞

止浆塞是实现分段注浆的工具。它在孔内的安设位置，应是稳定岩层，且无纵向裂隙、孔形规则的孔段。常用橡胶止浆塞。在注浆孔中，橡胶塞靠机械压力产生横向膨胀，与孔壁挤紧，使注浆孔中的注浆段和非注浆段隔开，以保证分段注浆的正常进行。

橡胶塞有直线型和弧形。直线形胶塞受压后与孔壁接触面积大，承压能力高，止浆效果好。止浆塞的结构、构造与止水装置用的相同。

(3) 流量计

注浆工程中常用流量计有两种类型。一种为 LW 型涡轮流量计，其测量范围为 0~540L / min，最大工作压力为 6.4MPa。适用于水玻璃浆液和其他粘度较小的化学浆液。另一种为 LD 型电磁流量计，其最大流量为 66L / min，最大工作压力为 1.6MPa。通常安装在注浆泵的输浆口上。

(七) 注浆施工工艺

1. 注浆材料混合方式

(1) 一种溶液一个系统方式

将所有材料放进同一容器中，预先混合，再进行单泵单管线注浆。这适用于凝胶时间较长的情况。

(2) 两种溶液一个系统方式

两种溶液分别用泵输送，在孔口（注浆管的头部）设置一混合器使两种溶液混合。孔内为一根注浆管线。这种在孔口进行混合的灌注方式与一种溶液一个系统方式比较，可以减少浆液混合后的输送时间，适用于凝结时间较短的情况。

(3) 两种溶液两个系统方式

两种溶液分别用泵输入两套注浆管线（并列管、双层管）在两套注浆管线出口端（孔内）流出的瞬间，在孔内混合器内两种溶液混合。这种方法适用于两种浆液混合后瞬间凝结的情况。

况。

孔内混合器是两根输浆管的汇合端。混合器内设置有喷枪，甲乙两种浆液有的在喷枪内混合，有的在喷枪外混合。图 2-28 为喷枪在各种注浆方法中的状态。

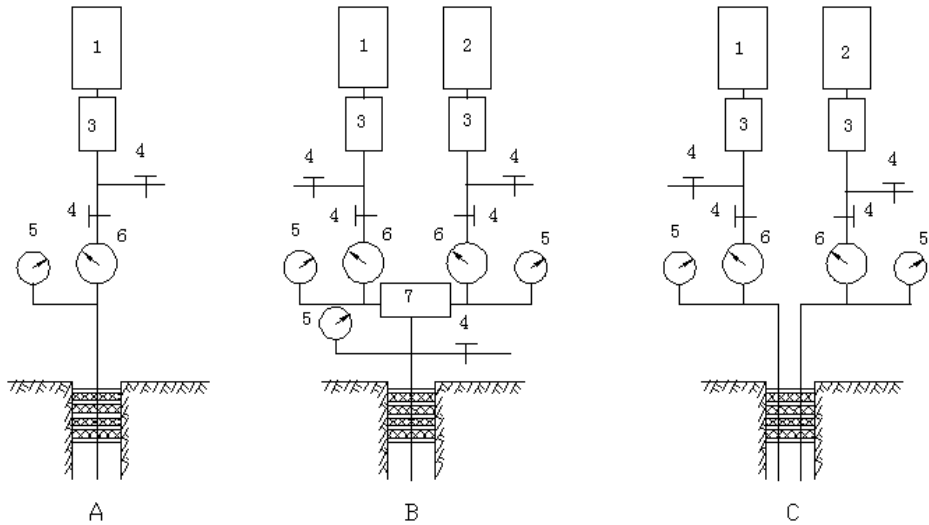


图 2-27 灌浆工艺类型

A—单液灌浆系统 B—双液灌浆孔口混合系统 C—双液灌浆孔内混合系统
1—甲液浆池，2—乙液浆池，3—注浆泵，4—阀门，5—压力表，6—流量计，7—混合器

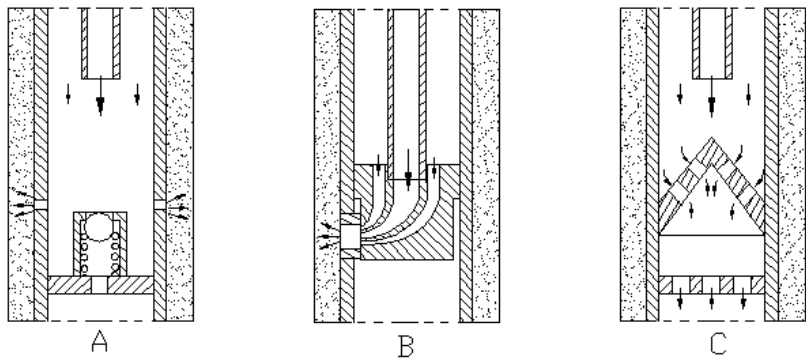


图 2-28 双液注浆孔内混合器示意图

A—DDS 注浆法，B—LAG 注浆论，C—MT 注浆法

2. 注浆施工方法

(1) 钻杆注浆法

① 打管入土注浆法

打管入土灌浆共有五道工序：打管入土(或压入)，冲洗管，试水，注浆，拔管。

a. 打管入土

采用钻机或其它具有冲击或压入功能的机械设备。将注浆花管打入地层中。注浆花管用内径为 19~38mm，壁厚不小于 5mm 的钢管制成。管尖是一个具有 25°~30°的圆锥体，上部带有丝扣与花管联接；花管距底端 0.4~1.0m。分四排交错排列的孔眼。孔眼间隔约 50mm，

1m 长度内应有 60~80 个孔眼，孔眼直径为 1~3mm；

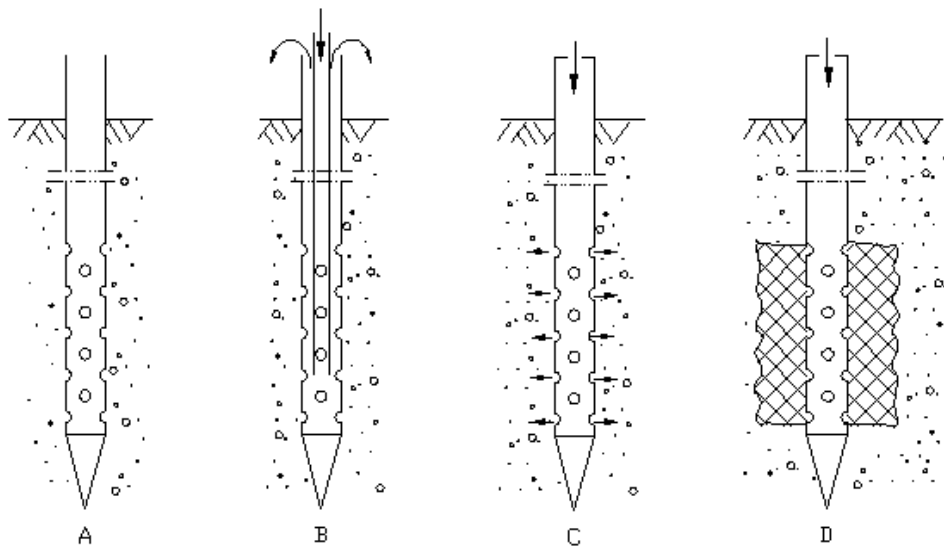


图 2—29 打管入土注浆法施工程序

A—打管入土，B—冲洗管，C—试水，D—压力注浆

b. 冲洗管

在注浆管打入(或压入)过程中，可能从花管孔眼进入泥土。为将注浆管内泥土清除干净，可用直径小于注浆管的冲洗管插入注浆管内，然后开泵液力冲洗，使泥土随冲洗水流从管口返出，直至返出水流变清为止。

c. 试水

系指将水压入注浆管内，以了解加固土体的渗透系数，以便调整注浆浆液的浓度，同时也可检查泵及管路系统的工作状态。

d. 压力注浆

试水结束后，即可正式灌注浆液，从上往下逐段进行。灌注浆液的压力不能超过上面土层的压力(上部有建筑重量或混凝土压板除外)。

e. 拔管

在注浆工序结束后，若停留时间过长，浆液凝固后注浆管难以起拔。注浆管拔出后应立即进行清洗，以保证管子畅通。

打管入土注浆法方法简单，但遇卵石、块石时，打管就十分困难，故只适于较浅的砂砾层。注浆时也易沿注浆管壁冒浆。

② 钻孔钻杆注浆法

钻杆注浆施工法是把注浆用的钻杆(单管)，由钻孔钻到所规定的深度后，把注浆材料通过钻杆注入地层中的一种方法，如图 2—30 所示。与其他注浆法比较，钻杆注浆法的优点是容易操作，施工费用较低。其缺点是浆液沿钻杆和钻孔的间隙容易往地表喷浆。

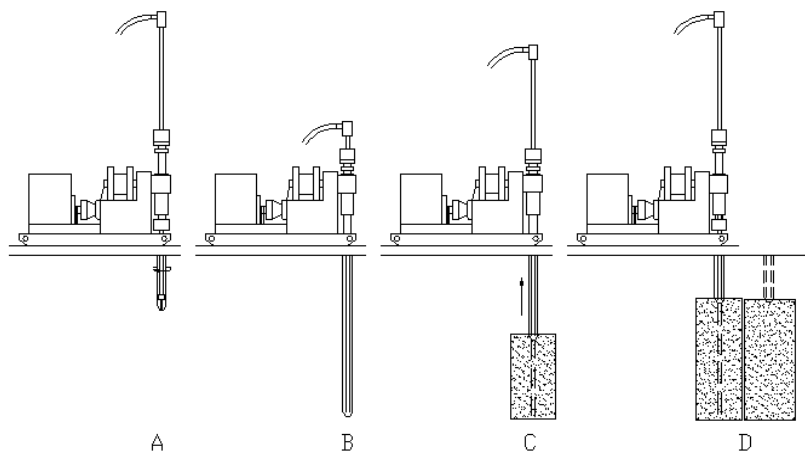


图 2-30 钻杆注浆施工方法

A—钻注浆孔，B—钻至设计深度，C—开始注浆，D—注浆结束

(2) 套管注浆法

① 套管护壁注浆法

采用边钻孔边压入套管直至设计深度。进行洗孔后，下放注浆管，然后拔一段套管灌注一段，直至孔顶段。如图 2-31 所示。

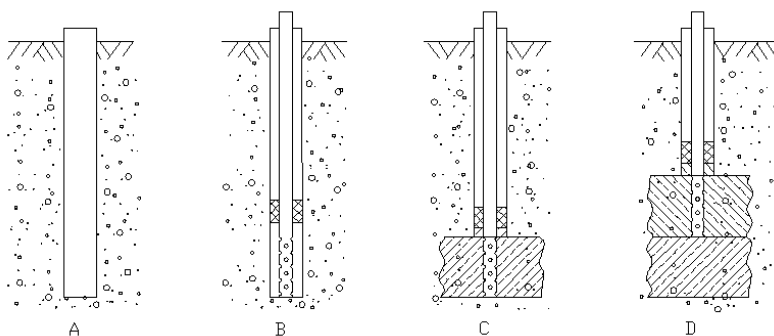


图 2-31 套管护壁注浆法

A—边钻孔边跟入套管，B—下放注浆管，C—拔一段套管灌注一段，D—逐段向上注浆

此法在施工中压入套管和上拔套管都比较困难。应据孔深、孔径准备相应的压管、拔管机具。

① 单过滤管注浆法

单过滤管(花管)注浆法如图 2-32 所示。把过滤管先设置在钻好的地层中，并在过滤管内填以砂，管与地层间所产生的间隙(从地表到注浆位置)用填充物(粘性土或注浆材料等)封闭，不使浆液溢出地表。一般从上往下依次进行注浆。每注完一段，用水将管内的砂冲洗出后，反复上述操作。这样逐段往下注浆的方法比钻杆注浆方法的可靠性高。

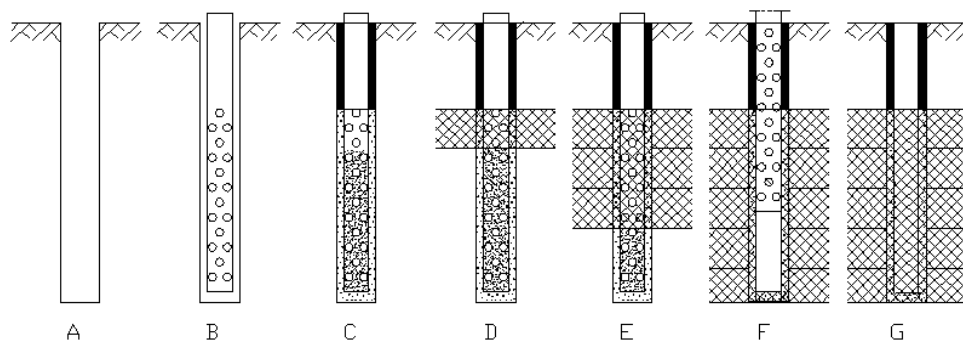


图 2—32 单过滤管注浆法施工顺序

A—钻孔，B—插入过滤管；C—管内外填砂及封闭孔口；D—第一阶段注浆；E—洗出管内砂，第二、三阶段注浆，直到注浆完毕；F 拔出过滤管；G 回填或注浆

单过滤管注浆的优点是：在较大的平面内可得到同样的浆液渗透深度。注浆施工顺序是自上而下地进行，注浆效果可靠；化学浆液从多孔扩散，且水平喷射渗透均匀。注浆管设置和注浆工作分开，注浆容易管理；化学浆液喷出的开口面积比钻杆注浆的大，所以一般只采用较小的注浆压力，而且注浆压力很少出现急剧性变化。其缺点是：注浆管加工及注浆管的设置麻烦，造价高；注浆结束后，回收注浆管困难，且有时可能成为施工障碍。

(3) 边钻孔边注浆法

边钻孔边注浆法是在钻孔时仅下入口口管，钻进中用泥浆护壁，自上而下钻一段灌注一段，直到设计钻灌深度。此法施工速度较慢，因未下套管，栓塞封闭的严密程度差。

(4) 预埋花管法(或叫袖阀管法)

此法是在钻孔内预先下入特制的带有孔眼的注浆花管(袖阀管)，然后在花管与孔壁间填入填料浆液。在注浆管内用双塞分段进行注浆。

其施工程序是：钻孔(或下入套管护壁)——清洗钻孔——下花管——填入填料——(起拔套管边填入填料边起拔套管)——待凝(填料凝结)——在花管内下入双塞——压力开环注浆(如图 2—33 所示)。如果钻孔时不下套管护壁而用泥浆护壁，则可先填入填料浆液，然后下插花管。

① 钻孔

此法主要用在砂砾石层或松散地层，因此钻进时，一种是采用跟管钻进，其钻进方法可选用回转钻进、反循环钻进、气动或液动冲击回转钻进、冲击钻进。另一种是仅下一段孔口管，用泥浆护壁钻进(宜采用稀泥浆)，其钻进方法与上相同。钻进结束后，即进行清孔，换浆。尽可能将孔内残留物和沉淀物捞干净，并换以相对稀一点的泥浆护壁(未下套管)以保持孔壁稳定。

② 下插花管(袖阀管)

花管结构常用 $\phi 73 \sim \phi 108\text{mm}$ 钢管，也可用强度高的塑料管制作。要求其内壁光滑，管底端封闭牢固。管身间隔 $300 \sim 500\text{mm}$ 钻一组(4 个)直径为 10mm 的射浆孔，在射浆孔外用弹性好的厚约 $1.5 \sim 2\text{mm}$ 、宽为 $100 \sim 120\text{mm}$ 的橡皮箍套上，形成单向阀。见图 2—34(A)。

花管应下在钻孔中心才能使填料厚度均匀，为此可在花管上间隔装设导向装置。下插花管时应使其平稳自由下降，不宜强力下压或拧动。下管时应详细准确记录花管各节长度及各排射浆孔的深度等内容。

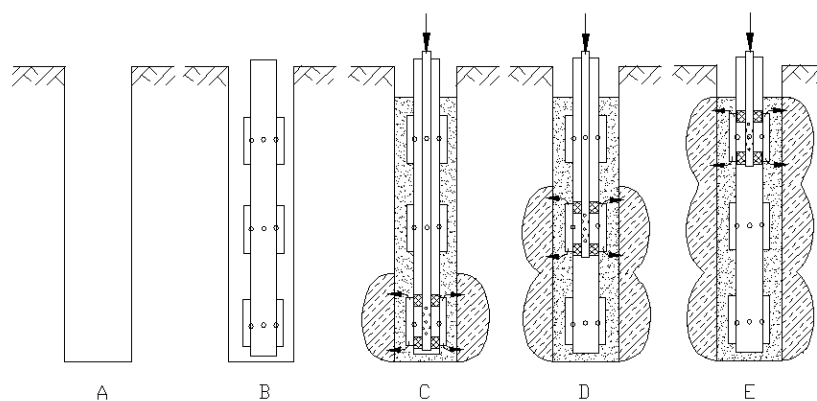


图 2—33 预埋花管（袖阀管）法施工程序

③ 灌注填料(或叫套壳料)

在孔壁与花管之间的环状间隙里灌注填料，待其凝结后形成环状的“夹圈”，以防止灌浆时浆液沿孔壁、管壁向上流串，并防止各灌浆孔段互相串浆。

填料的强度要适宜，高强度套壳料对防止浆液串冒是有利的。但却不利于开环，低强度套壳料虽有利于开环，却容易使浆液向上串冒。套壳料强度必须兼备开环和防止串浆的双重需要。因此要求填料在水下能凝固，收缩性小，早期强度高，后期强度增长缓慢，在高压下产生脆性破坏，填料浆液的粘度要低，析水率要低，稳定性要好。国内外大都采用以粘土为主、水泥为辅的低强度配方。为增加填料脆性，可采用粉粒含量较高的粉质粘土或掺入一些细砂。为使填料在 7 天龄期后的强度达到 0.1~0.2MPa，在正式施工前应多次进行室内外的试验，以达到所要求的性能指标。

填料灌注方法根据钻进时孔内有无套管而定。

套管护壁的钻孔：在套管与花管之间从下向上泵入填料浆液，边泵入边起拔套管。连续泵入直至孔口返出的填料与泵入的填料一样(其比重差不大于 0.02)即可结束泵入。

泥浆护壁的钻孔：钻进至设计深度后，即进行清孔并达到要求，然后从孔底泵入填料，将孔内稀泥浆替换，最后下入花管。

④ 开环

在灌注完填料后，一般待凝 7 天，即可进行开环。开环是通过压浆泵施加压力将花管射浆孔所对应的填料体压裂，为浆液进入地层形成通道。

工序过程为：在花管内下入双塞注浆枪，将注浆枪中出浆部位对准花管上的欲开环注浆的环排孔位。并压紧止浆栓塞。再用稀浆或清水逐渐升压(逐级升压)或快速升压开环。由于填料厚度是不均匀的，逐级升压的慢速开环，有可能在填料薄弱的地方使填料破坏不均匀，或形成局部破坏；而快速开环可改善这种情况。压力突然降低，吸浆量(吸水量)突然增大，即表示开环成功。有时会出现不开环的情况，造成不开环的原因很多，可能是局部填料过厚，配方强度过高，或上下两段灌浆时在开环段内外形成附加层等。此时，可采用高压开环。例如可采用 5.5MPa 的压力。预埋花管孔内布设详见图 2—34(B)。

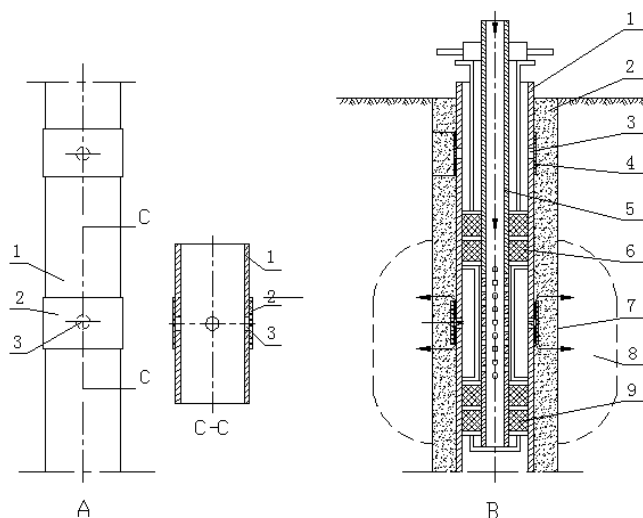


图 2—34 花管结构及孔内安装示意图

A—注浆花管结构：1—花管，2—射浆孔，3—橡皮箍

B—孔内安装： 1—花管，2—填料，3—射浆孔，4—橡皮箍，
5—注浆管， 6—上止浆塞，7—孔壁，8—注浆浆体，9—下止浆塞

二、高

压喷射

注浆法

高压喷射注浆法是在高压水射流切割技术基础上而发展起来的。它以水泥为主要原料，加固土体的质量高，可靠性好。具有增加地基强度，提高地基承载力，止水防渗减少遮挡建筑物土压力，防止砂土液化和降低土的含水量等多种功能。高压喷射注浆法的出现解决了静压灌浆法对于不均匀的地基土，浆液流动的方向和范围难以控制以及渗透系数较小的粉砂、细砂或粘性土、淤泥等地基加固中水泥浆不能与地基土均匀混合的问题。

高压喷射注浆一般是利用轻便钻机钻一直径为 75~250mm 的孔作为下入注浆管的导孔，将带有喷嘴的注浆管插入导孔的预定位置后，以高压设备使浆液或水成为 $\geq 20\text{MPa}$ 的高压流从喷嘴中喷射出来，冲击孔壁土体。当喷射流的动压超过土体结构强度时，土粒便从土体剥落下来。同时钻杆以一定速度旋转和渐渐向上提升，将浆液与土粒强制搅拌混合，一部分细小的土粒随着浆液冒出地面，其余土粒在喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下，与浆液搅拌混合。并按一定的浆土比例和质量大小有规律的重新排列。浆液凝固后，在土中形成一个固结体。施工工序如图 2—35 所示。旋喷的工序为钻孔，插入旋喷注浆管至钻孔底设计标高后旋喷注浆，当压力流量达到规定值后，随即旋转和提升，进行自下而上的旋喷作业。

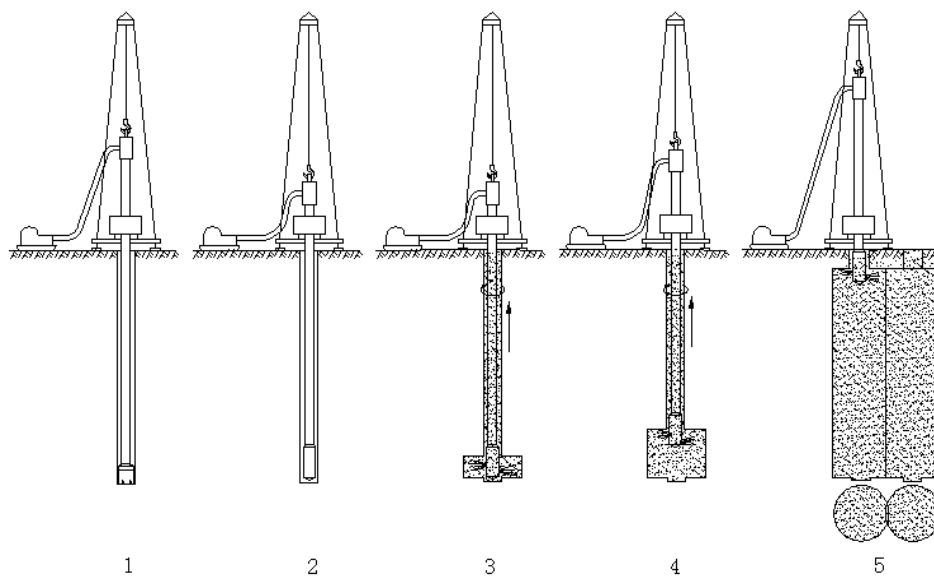


图 2—35 高压旋喷施工程序

1—钻旋喷孔, 2—下入旋喷管, 3—开始旋喷浆液, 4—边喷浆边旋转边上提制桩, 5—成桩

固结体的形状与喷射流移动方向有关。一般分为旋转喷射(简称旋喷)、定向喷射(简称定喷)和摆动喷射(简称摆喷)三种形式, 如图 2—36 所示。

旋喷法施工时, 喷嘴一面喷射一面旋转并提升, 固结体呈圆柱状。主要用于加固地基, 提高地基的抗剪强度, 改善土的变形性质; 也可组成闭合的帷幕, 用于截阻地下水流和治理流砂。旋喷法施工后, 在地基中形成的圆柱体, 称为旋喷桩。

定喷法施工时, 喷嘴一面喷射一面提升, 喷射的方向固定不变, 固结体形状如板状或壁状。

摆喷法施工时, 喷嘴一面喷射一面提升, 喷射的方向呈较小角度来回摆动, 固结体形如较厚墙状。

定喷及摆喷两种方法通常用于基坑防渗、改善地基土的水流性质和稳定边坡等工程。

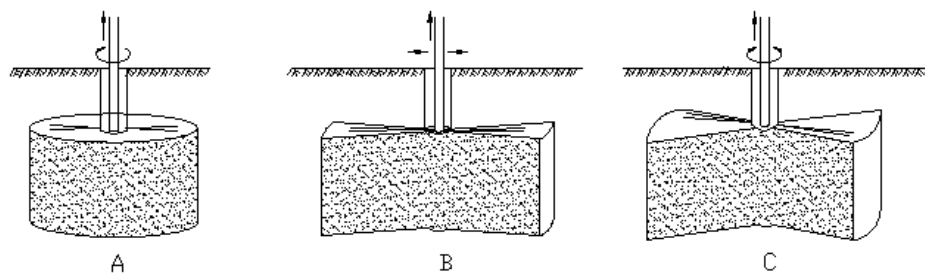


图 2—36 高压喷射注浆的三种形式

A—旋喷, B—定喷, C—摆喷

(一) 高压喷射注

浆法的加固机理

高压喷射注浆是通过高压发生装置, 使液流获得巨大能量后, 经过注浆管道从一定形状

和孔径的喷嘴中以很高的速度喷射出来,形成一股能量高度集中的液流,直接冲击破坏土体,并使浆液与土搅拌混合,在土中凝固成为一个具有特殊结构的固结体,从而使地基得到加固。

1. 高压喷射流对土体的破坏作用

高压喷射流破坏土体的效能,是随着土的物理力学性质的不同,在数量方面有较大的差异。喷射流破坏土的机理比较复杂,目前在理论上尚未充分查明,但可以透过旋喷的现象,分析出破坏土的主要作用。

高压喷射流冲击土体时,由于能量高度集中地冲击一个很小的区域,因而在这个区域内及其周围的土和土结构的组织之间,受到很大的压应力作用,当这些外力超过土颗粒结构的破坏临界数值,土体便受到破坏。

高压喷射法对土体的切割主要是高速的喷射流,而喷射流的破坏力 F 可由射流运动方程得到:

$$F = \rho \cdot A \cdot V^2$$

式中: F —喷射流破坏力 (N);
 ρ —喷射流介质密度 (N/m^3);
 A —喷射流截面积 (m^2) 喷嘴出口;
 V —喷射流速度 (m/s)。

当介质和喷嘴一定时,破坏力与喷射流速度的平方成正比。因此,喷射压力愈高,流速愈大,破坏力愈大,切割、搅拌土体的范围也愈大。可见,增大泵压提高流速是增大旋喷桩桩径的合理方法。

单射流虽然具有巨大的能量,但由于喷射力在土中急剧衰减,因此破坏土的有效射程较短,致使旋喷固结体的直径较小。当在喷嘴出口的高压水喷流的周围加上圆筒状空气射流进行水、气同轴喷射时,空气流使水或浆的高压喷射流从破坏的土体上将土粒迅速吹散,使高压喷射流的喷射破坏条件得到改善,阻力大大减少,能量消耗降低,因而增大了高压喷射流的破坏能力,形成的旋喷固结体的直径较大。

2. 高压旋喷成桩机理

高压喷射流在地基中把土体切削破坏。其加固范围就是喷射距离加上渗透部分或压缩部分的长度为半径的圆柱体。一部分细小的土粒被喷射的浆液所置换,随着液流被带到地面上(俗称冒浆),其余的土粒与浆液搅拌混合。在喷射动压,离心力和重力的共同作用下,在横截面上土粒质量大小有规律地排列起来,小颗粒在中间部位居多,大颗粒多在外侧或边缘部分,形成了以浆液为主体、搅拌混合和压缩渗透等部分,经过一定时间便凝固成强度较高渗透系数小的固结体。随着土质的不同,横断面的结构多少有些不同,如图 2—37 所示。由于旋喷体不是等颗粒的单体结构,固结质量也不均匀,通常是中心部分强度低,边缘部分强度高。

定喷时,高压喷射注浆的喷嘴不旋转,只作水平的固定方向喷射,并逐渐向上提升,便在土中冲成一条沟槽,并把浆液灌进槽中,最后形成一个板状固结体。固结体在砂性土中有一部分渗透层,而粘性土却无这一部分渗透层,如图 2—37 所示。

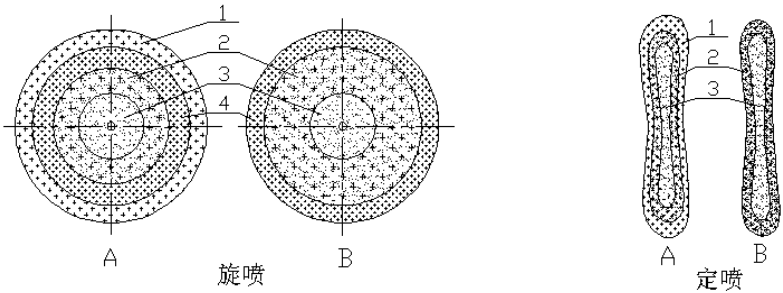


图 2—37 旋喷固结体截面结构示意图

A—砂性土, B—粘性土

1—渗透层, 2—搅拌混合层, 3—浆液主体, 4—压缩层

对于大砾石和腐植土的旋喷固结机理有别于砂类土和粘性土。在大砾石中，喷射流因砾石体大量重，不能被切割移动和重新排列，喷射流只能通过其间隙，充满砾石周围的空隙。由于喷嘴的旋转，浆液向四周挤压，其机理接近于渗透理论的机理。

对于腐植土层，旋喷固结体的形状及它的住质，受植物纤维的粗细长短，含水量及土颗粒多少的影响很大。对纤维细短的腐植土旋喷时，完全与在粘性土中的旋喷机理相同。而对纤维粗长而数量多的腐植土旋喷时，纤维质富于弹性，切割是困难的，但由于孔隙多，喷射流仍能穿过纤维体，但纤维质多而密的部位，浆液少，固结体的均匀性较差。

3. 水泥与土的固结机理

旋喷固结体是一种特殊的水泥土网络结构。水泥土的水化反应比纯水泥浆的反应复杂得多。由于水泥土是一种空间不均匀材料，在高压旋喷搅拌过程中，水泥和土被混合在一起，首先是土体被粉碎成各种粒径颗粒，在颗粒间被水泥浆所填满。水泥水化后，在土颗粒的周围形成了各种水化物结晶，结晶体不断地生长、伸延、特别是钙矾石的针状结晶很快地生长交织在一起形成空间的网络结构，土体被分割包围在这些水泥的骨架中间。随着结晶的长大与土颗粒相搭接，土体逐渐被挤密，自由水也逐渐减少、消失，形成了一种特殊的水泥土骨架结构。这就增加了水泥的强度。

(二) 高压喷射注浆法的工艺类型

高压喷射注浆法的基本工艺类型有单管法、二重管法、三重管法和多重管法四种。

1. 单管法

单管旋喷注浆法是利用钻机把安装在注浆管(单管)底部侧面的特殊喷嘴(图 2—38 (B) 所示)，置入土层预定深度后，用高压泥浆泵等装置，以 20MPa 左右的压力，把浆液从喷嘴中喷射出去冲击破坏土体，同时借助注浆管的旋转和提升运动，使浆液与从土体上崩落下来的土搅拌混合，经过一定时间凝固，便在土中形成圆柱状的固结体，如图 2—38 (C) 所示。这种方法日本称之为 CCP 工法。

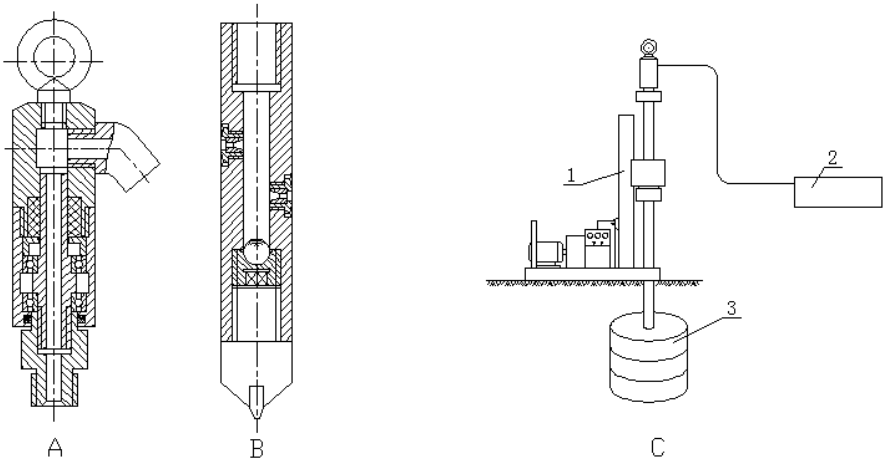


图 2—38 单管旋喷注浆示意图

A—导流器，B—旋喷头，C—注浆工艺： 1—钻机，2—高压注浆泵，3—旋喷固结体

2. 二重管法

该法使用双通道的二重注浆管。当二重注浆管下到土层的预定深度后，通过在管底部侧面的一个同轴双重喷嘴(图 2—39 (A))，同时喷射出高压浆液和空气两种介质的喷射流冲击破坏土体。即以高压泥浆泵等高压发生装置喷射出 20MPa 左右压力的浆液，从内喷嘴中

高速喷出，并用 0.7MPa 左右压力把压缩空气从外喷嘴中喷出，在高压浆液和它外圈环绕气流的作用下，破坏土体的能量显著增大，喷嘴一面喷射一面旋转和提升，最后在土中形成圆柱状固结体。固结体的直径明显增加，如图 2—39 (B) 所示。这种方法日本称之为 JSJ 工法。

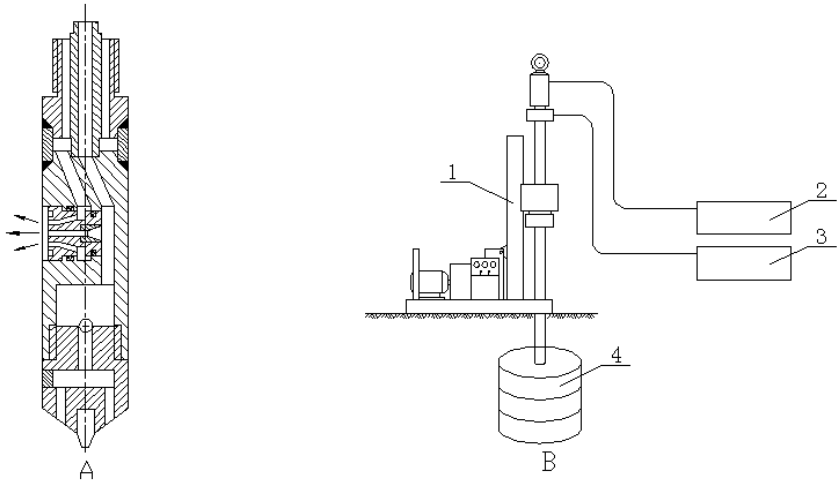


图 2—39 二重管旋喷注浆示意图

A—旋喷头，B—旋喷注浆工艺： 1—钻机，2—高压注浆泵，3—空压机，4—旋喷固结体

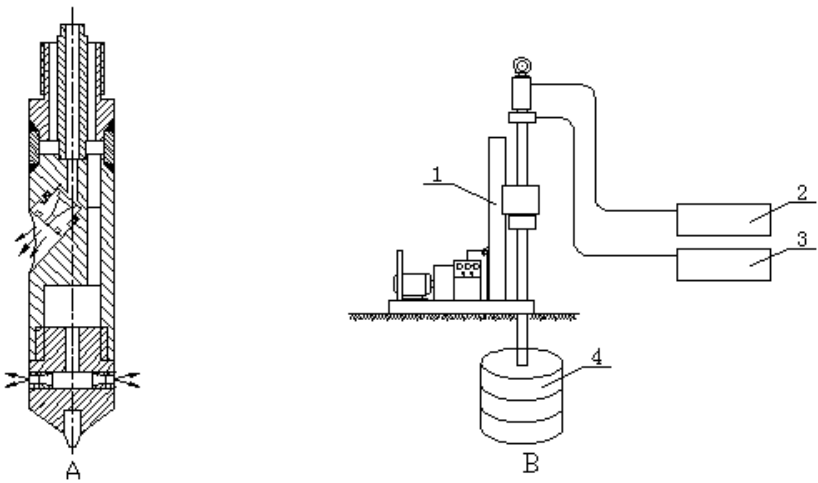


图 2—40 改进型二重管旋喷注浆示意图

A—旋喷头，B—旋喷注浆工艺

1—钻机，2—高压清水或泥浆泵，3—低压注浆泵，4—旋喷固结体

3. 改进型二重管法

近来生产部门对二重旋喷头进行改进，将原来的浆、气两种介质改为高压清水和中压浆液。在改进后的喷头上都设置一个与旋喷管轴线呈 120° 的斜喷嘴，在喷头下部设置一个与旋喷管轴线呈 90° 的水平喷头（见图 2—40(A)）。这两个喷头从不同方向喷射高压清水，将更有利于切割、分离土体，以增大旋喷桩成桩直径。在喷头的下端设置 4~6 个 $\phi 4\sim 6\text{mm}$

的浆液喷嘴，使浆液与切割、分离下来的碎土搅拌混合，形成旋喷固结体。改进型示意图见图 2—40 (B)。

4. 三重管法

该法使用分别输送水、气、浆三种介质的三重注浆管。在以高压泵等高压发生装置产生 20MPa 左右的高压水喷射流的周围，环绕一股 0.7MPa 左右的圆筒状气流，进行高压水喷射流和气流同轴喷射冲切土体，形成较大的孔径，再由泥浆泵注入压力为 2~5MPa 的浆液填充，喷嘴作旋转和提升运动，最后便在土中凝固为直径较大的圆柱状固结体。如图 2—41 所示。这种方法日本称之为 CJP 工法。

5. 多重管法

这种方法首先钻一个导孔，然后置入多重管，用逐渐向下运动的旋转超高压水力射流（压力约 40MPa），切削破坏四周的土体，经高压水冲击下来的土和石成为泥浆后，立即用真空泵从多重管中抽出。如此反复地冲和抽，便在地层中形成一个较大的空穴。装在喷嘴附近的超声波传感器及时测出空穴的直径和形状，最后根据工程要求选用浆液、砂浆、砾石等材料进行填充。最终在地层中形成一个大直径的柱状固结体。在砂性土中最大直径可达 4m，如图 2—42 所示。这种方法日本称之为 SSS-MAN 工法。

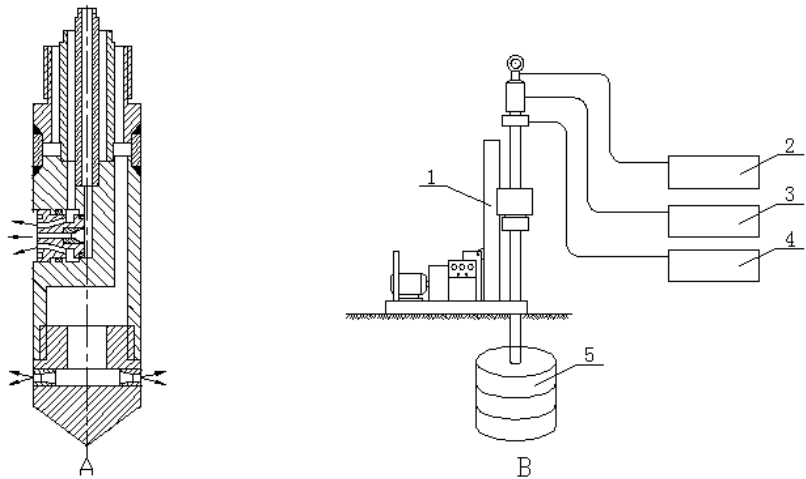


图 2—41 三重管旋喷注浆示意图

A—旋喷头，B—旋喷注浆工艺

1—钻机，2—高压清水或泥浆泵，3—空压机，4—低压注浆泵，5—旋喷固结体

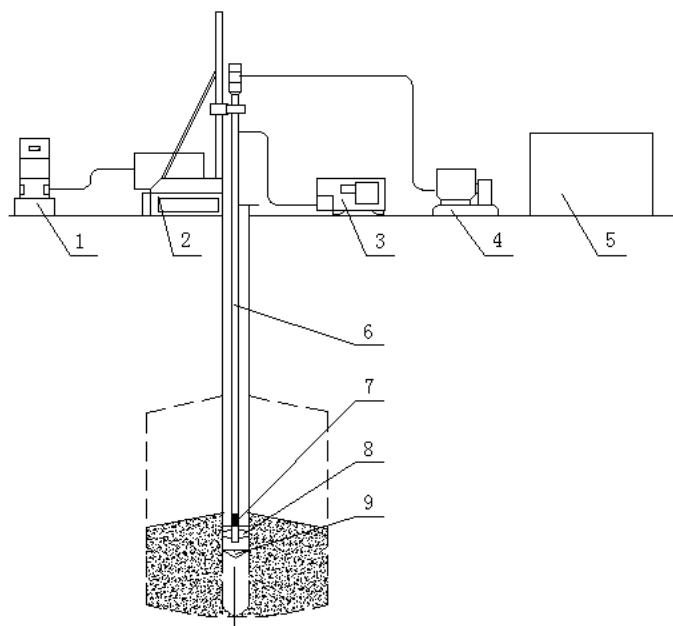


图 2—42 多重管旋喷注浆示意图

1—显示、计测、控制部分，2—钻机，3—高压泵，4—真空泵，
5—泥水箱，6—多重钻杆，7—超声波传感器，8—高压喷嘴，9—钻头

第三节 深层搅拌

深层搅拌法用于加固软土地基的一种方法。它是利用水泥、石灰等材料作为固化剂的主剂，通过特制的深层搅拌机械，在地基深处就地将软土和固化剂（浆液或粉体）强制搅拌，利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理化学反应，使软土硬结，成为具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体。这些桩体与天然地基（桩间土）形成复合地基，共同承受建筑物的荷载。

深层搅拌法加固地基工艺方法可分为水泥浆搅拌法和粉体喷射搅拌法。两种搅拌方法的施工程序基本相同，如图 2—44 所示。

一、水泥浆搅拌法

（一）水泥浆加固机理

水泥是一种水硬性胶凝材料，当水泥浆或水泥粉与饱和软土搅拌混合时，水泥颗粒表面的矿物立即与水发生水解和水化反应，生成一系列水化物。这些水化物迅速溶于水，使水泥颗粒表面继续暴露，继续与水反应，直至溶液达到饱和，生成物不能再溶解，成为凝胶微粒悬浮于溶液中，这些凝胶微粒的一部分与其周围具有一定活性的粘土颗粒发生反应，另一部分逐渐自身凝结硬化而形成水泥石骨架。

土中的二氧化硅遇水即形成硅酸胶体微粒。经化学反应，较小的土颗粒逐渐形成较大的土团粒，土团粒进一步互相结合，并且封闭了团粒之间的孔隙，从而形成较坚固的水泥土的

大团粒结构，使土的强度提高。

随着水泥水化反应的深入，当溶液中析出的钙离子的数量超过离子交换所需数量时，部分或其多余部分便与粘土矿物中的一部分或大部分胶态 SiO_2 或胶态 Al_2O_3 进行反应，生成不溶于水的、稳定的硅或铝酸钙结晶化合物，即微晶凝胶，它在水中逐渐硬化，且强度增长。由于其结构较致密，水不易侵入，因此，水泥土具有一定的水稳定性。

上述水泥加固地基土原理可看出，水泥在土体中的硬化机理与混凝土硬化机理不同，由于水泥掺量很小(仅占被加固土体重量的 7%~15%)，水泥的水解和水化反应完全是在具有一定活性介质(土)的围绕下进行，所以水泥加固的强度增长过程比混凝土缓慢得多，而且土团颗粒的大小对加固后地基总体强度也有较大影响。

浆体深层搅拌施工中不可避免地会留下一些未被粉碎的大小土团。在拌入水泥浆后会出现水泥浆包裹土团的现象，固结后的水泥土中存在土团之间水泥较多，而在土团内部则没有水泥或仅有少量渗透到土团内的水泥水解产物。由此可见，搅拌越充分，土块被分散得越小，水泥分布到土中越均匀，地基的总体强度也越高。

(二) 水泥浆搅拌法施工工艺

1. 搅拌机械

深层搅拌机常以两种形式分类：一种是以搅拌轴数量可分为单轴型和双轴型。另一种是以动力驱动形式可分为动力头式和转盘式两大类。转盘式搅拌机配置有步履式底盘，主机安装在底盘上，搅拌轴由旋转接头、方钻杆、搅拌头等组成。由于搅拌轴重量有限，尚需配置链轮、链条加压装置。动力头式搅拌机由动力头喷粉(浆)装置、搅拌轴、搅拌头等组成。由于重心较高，尚需配置具有足够重量的底盘。国内目前使用的搅拌机有中心管喷浆方式和叶片喷浆方式。叶片喷浆方式是使水泥浆从叶片上若干个小孔喷出，使水泥浆与土体混合较均匀，对大直径叶片和连续搅拌是适合的。中心管输浆方式中的水泥浆是从两根搅拌轴间的另一中心管输出。当叶片直径在 1m 以内时，并不影响搅拌均匀度，而且它可适用于多种固化剂，除纯水泥浆外，还可用于水泥砂浆，甚至掺入工业废料等的粗粒固化剂。

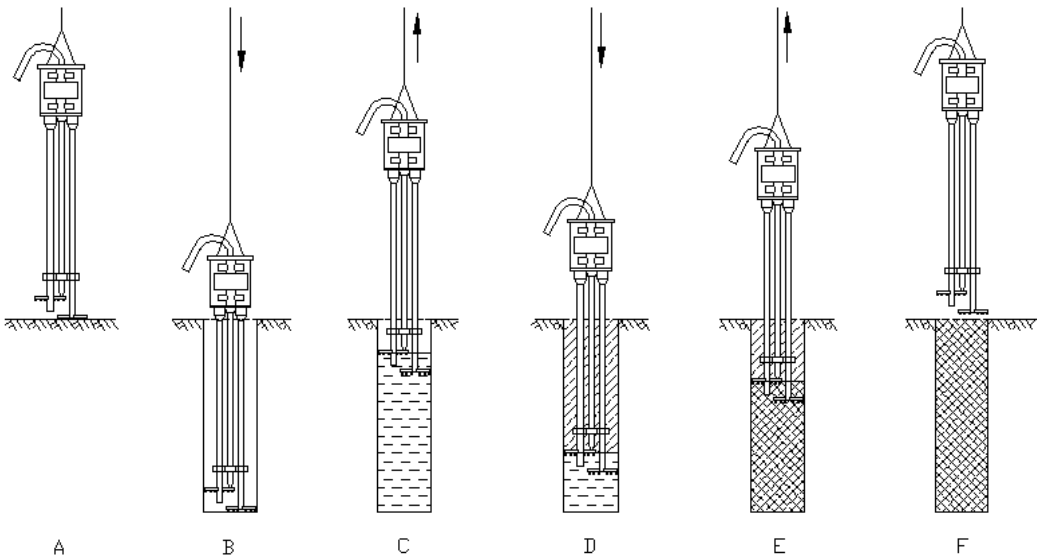


图 2-44 深层搅拌工艺流程

A—搅拌机就位，B—搅拌下沉，C—喷加固料搅拌上升，
D—重复搅拌下沉，E—重复搅拌上升，F—结束

最具代表性的深层搅拌机有 SJB—1 型和 GZB—600 型深层搅拌机。SJB—1 型深层搅拌机是双搅拌轴中心管输浆的水泥搅拌专用机械，如图 2—45 所示。搅拌机采用两台 30kW 潜水电机经二级行星齿轮减速驱动搅拌轴从而使拌合叶片旋转。固化剂注入被加固土中是通过灰浆泵从中心管下端管口压开单向球阀实现的。GZB—600 型深层搅拌机为单搅拌轴、叶片喷浆方式的搅拌机，如图 2—46 所示。它由电机、搅拌轴、输浆管、搅拌头等部件组成。

SJD—1 型和 GZB—600 型深层搅拌机的配套机械主要有灰浆拌合机、集料斗、灰浆泵和电气控制柜。

2. 水泥浆搅拌施工工艺

双轴和单轴搅拌机的施工工序大致相同，见图 2—44。

(1) 定位

搅拌机到达指定桩位，搅拌机定位对中，桩位偏差不超过 5cm。搅拌轴垂直度误差应不超出 1%。

(2) 第一次搅拌下沉

待搅拌机的冷却水循环正常后，启动搅拌机电机，放松起重机钢丝绳，使搅拌机沿导向架搅拌切土下沉，下沉的速度可由电机的电流监测表控制。对 SJB 型机，下沉时不喷浆，速度可以快一些，如可达 2m / min。遇到砂层时可适当压些清水，以利钻进。对单轴搅拌头，常在下沉时就开始喷浆，喷浆速度应和整个行程的下沉速度相配合，使整个加固体搅拌均匀。

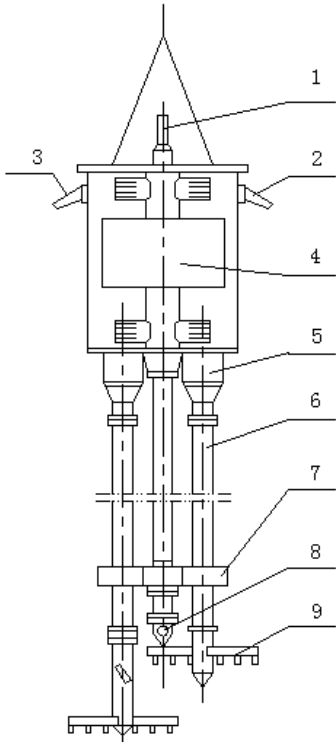


图 2—45 SJB—1 型深层搅拌机

1—输浆管，2—出水口，3—进水口，4—电动机，5—减速器，6—搅拌轴，7—横向系板，8—喷浆口，9—搅拌头

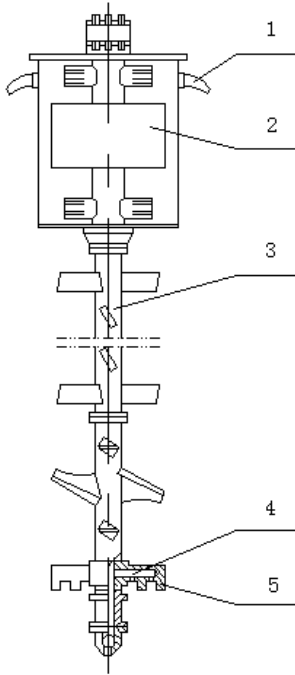


图 2—46 GZB—600 型深层搅拌机

1—进浆口，2—电动机，3—搅拌轴，4—喷浆口，5—搅拌头

(3) 上提喷浆搅拌

搅拌机下沉到达设计深度后，开启灰浆泵将水泥浆压入地基中，边喷浆边旋转边提升，上提前应在原地搅拌数分钟，待浆液流至搅拌头并在底部充分搅拌后再上提，对 SJB 型机上提速度以 $0.5\text{m} / \text{min}$ 为宜。对单轴搅拌头，提升速度应和旋转速度相配合，一般也不超出 $0.5\text{m} / \text{min}$ 。

(4) 二次搅拌

搅拌机提升至设计加固深度的顶面标高时，集料斗中的水泥浆应正好排空。为使软土和水泥浆搅拌均匀，通常均采用二次搅拌工艺，即再次将搅拌机边旋转边沉入土中，至设计加固深度后再将搅拌机提升出地面。

(5) 清洗、移位：向集料斗内注清水，开启灰浆泵，清洗全部管路中残存的水泥浆，直至冲洗干净。搅拌结束，将搅拌机移至下一个桩位，进行下一根桩的施工。

由于搅拌桩顶部与上部结构的基础或承台接触部分受力较大，因此通常还可对桩顶 $1.0 \sim 1.5\text{m}$ 范围内再增加一次输浆，以提高其强度。

二、粉体喷射搅拌法

粉体喷射搅拌法使用的固化剂除石灰、水泥之外，还有石膏及矿渣等。在目前实际工程中使用的主要是石灰和水泥，与软土搅拌后通过固结反应等形成稳定的石灰土、水泥土。水泥土的固结反应机理在前已叙及，以下简述石灰土的固结反应。

(一) 粉体喷射搅拌法加固地基的机理

在软弱地基中拌入生石灰后，生石灰便与土中的水分发生化学反应，形成熟石灰。在这一化学反应中，使得土的物理力学性质发生了变化，主要表现在以下几方面。

1. 脱水挤密 1kg 生石灰的消解反应要吸收 0.32kg 的水，同时，由于反应中放出大量热量提高了地基土的温度，使土产生一定的汽化脱水。从而使土中含水量下降，孔隙比减小，土颗粒靠拢挤密。

2. 膨胀挤密 生石灰在吸收土中的水后便发生吸水膨胀，其体积可增到原来的 $1 \sim 3.5$ 倍。使桩间土受到强大的挤压力，使土的孔隙比进一步减小，强度增高。

3. 胶凝作用 由于生石灰吸水生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中一部分与土中二氧化硅和氧化铝产生化学反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等水化产物。水化物在水中和空气中逐渐硬化，与土颗粒粘结在一起，形成网状结构，结晶体在土颗粒间相互穿插，使土颗粒联系得更加牢固，促使加固处理土的强度增高并长期保持稳定。

利用石灰固化处理地基的作用，分为形成熟石灰快速反应的前半过程与形成熟石灰以后缓慢的后半过程。

(二) 粉体喷射搅拌施工工艺

1. 施工机具和设备

粉体喷射搅拌机械与水泥浆体喷射搅拌基本相同，不同的是减少了制浆机和输浆泵，增加了粉体发生器和空压机。

(1) 粉体发送器

粉体发送器是一种定时定量发送粉体材料的设备，也是粉喷技术施工的关键设备。其工作原理如图 2-47 所示。由空压机输送来的压缩空气首先进入“气水分离器”，以减少压缩

空气内的水份。“干风”通过流量计调节风量的大小和压力后到达粉体发送器喉管，与叶轮泵定量输出的粉状加固料混合，成为“气固二相混合体”通过钻杆、钻头，输入地基深部。

粉体的定量输出是靠调节叶轮泵的转速来实现的。施工前必须按照场地的地质条件，进行工艺性试验以调节钻机转速、钻机提升速度以及粉喷机叶轮泵转速、管道压力等操作参数，满足设计要求的加固料喷出量。

(2) 空气压缩机

空气压缩机用来提供压缩空气。以便形成气粉混合物。

(3) 搅拌钻头

钻头直径为 $\phi 500 \sim \phi 700\text{mm}$ ，钻头应保证在反向旋转提升时对加固土体有压密作用。

2. 施工工艺流程

粉体喷射搅拌法施工顺序如图 2-48 所示。

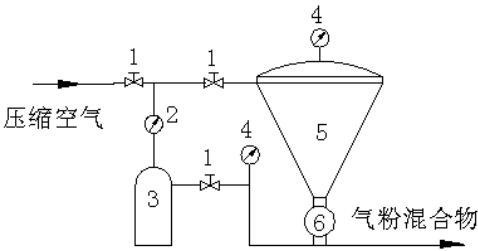


图 2-47 粉体发送器的工作原理

1—节流阀，2—流量计，3—气水分离器，4—压力表，5—灰罐，6—发送器转鼓

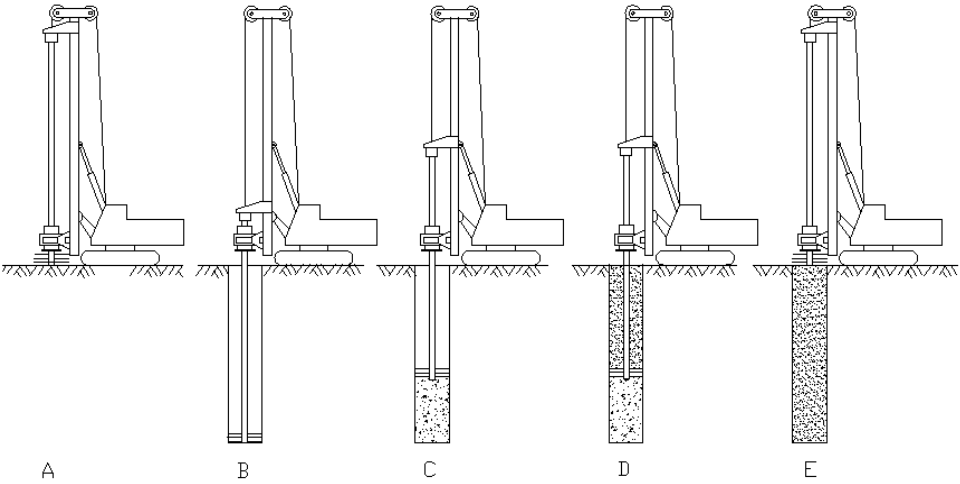


图 2-48 粉体喷射搅拌法施工顺序

A—设备就位，B—切土下沉，C—喷粉搅拌，D—重复搅拌，E—结束

(1) 定位

将搅拌机对准加固物的中心位置，使搅拌轴保持垂直。

(2) 预搅下沉

启动搅拌桩机，钻头正向旋转，实施钻进作业。为了不致堵塞钻头上的喷粉口，钻进过程中不喷粉，只喷射压缩空气，即确保顺利钻进，又减小负载扭矩。随着钻进，使被加固的土体在原位受到搅动。预搅下沉到设计深度时停止下沉，并应在原位转动 $1 \sim 2\text{min}$ 。

(3) 提升喷粉搅拌

反向旋转提升钻头，同时打开粉体发送器前面的控制阀，按需要量向被搅动的疏松土体中喷射固化剂，边提升边喷射边搅拌，尽量达到均匀搅拌，使软土与固化剂充分混合。

(4) 搅拌桩形成

当钻头提升至高出桩顶 $0.4 \sim 0.5\text{m}$ 时，发送器停止向孔内喷射粉体，原地搅拌 $1 \sim 2\text{min}$ 。桩柱形成。实践证明喷射过程中在提升钻头的最后阶段应注意控制，使钻头距地表 50cm 左右时停止喷粉，则粉体不会溢出地面向空中喷发与飞扬。

(5) 重复搅拌

为了确保固化剂与主体充分混合，或当感到喷射质量欠佳时，需对已形成的搅拌桩复搅一次。即再次搅拌下沉到设计深度，反向旋转边提升边搅拌（不喷射粉体），直到钻头提升地面。

(6) 结束

钻机移位，按上述步骤进行下一根桩的施工。

三、深层搅拌特点与应用范围

深层搅拌法加固软土技术方法，其独特的优点如下：

1. 深层搅拌法由于将固化剂和原地基软土搅拌混合，因而最大限度地利用了原土；
2. 搅拌时不会使地基侧面挤出，所以对周围原有建筑物的影响很小；
3. 土体加固后重度基本不变，对软弱下卧层不致产生附加沉降；
4. 施工时无振动、无噪音，无污染，可在市区内和密集建筑群中进行施工；
5. 施工设备机具轻便，操作工艺简单，施工速度快，工程造价低。
6. 深层搅拌法加固软土地基的深度可达 18m，最大桩体直径可达 1.5m。

深层搅拌法可用于提高软土地基的承载能力，减少沉降量，提高边坡的稳定性；适用于进行大面积地基加固，防止码头岸壁的滑动；深基坑开挖时防坍塌和防坑底隆起以及减少软土中地下构筑物的沉降。也可作为地下防渗墙以阻止地下渗透水流；对桩侧或扳桩背后的软土加固以增加侧向承载能力。