

第 21 章 注浆技术

21.1 概述

21.1.1 注浆法介绍

注浆法是将一定材料配制成浆液，用压送设备将其灌入地层或缝隙内，使其扩散、胶凝或固化，以达到加固地层或防渗堵漏的目的。

注浆法可用于防渗堵漏、提高地基土的强度和变形模量、充填空隙、进行既有建筑地基基础加固和控制变形。

按浆液在土中的流动方式，可将注浆法分成以下三类：

(1) 渗透注浆

指浆液以渗透渗入方式，渗入土体孔隙的注浆方式。

显然，在渗透注浆中浆材必须与土体孔隙大小相适应。一般认为，对渗透系数小于 10^{-5} cm/s 数量级的地基上，即使选用真溶液也难以达到渗透形式。

20 世纪 80 年代初以来，我国用环氧树脂浆液注浆成功地处理了低渗透性含泥破碎岩体 ($k_{\text{平均}} = 10^{-6} \sim 10^{-8}$)，其机理用传统的压力渗透理论是无法解释的。我国学者将双重孔隙介质力学模型理论与化学注浆相结合，提出化学注浆的吸渗理论。该理论认为在注入浆液(驱动相)与被注介质的亲和力大于孔隙水(被驱动相)的亲和力时，具有浆液自动渗入被注入介质和被注入介质自动吸吮浆液的双向作用机制。根据吸渗理论的基本方程的计算结果，提出了间歇注浆方法，即在初注时采用较快速率灌注，使浆液迅速进入裂隙系统后尽快将夹泥系统投入吸渗，而随后间歇一段时间让夹泥充分地吸渗浆液，该方法克服了连续注浆浪费浆液的缺点，工程实践证明有良好的效果。化学注浆吸渗理论机理还需进一步的探讨。^[1]

(2) 压密注浆

指用很稠的浆液灌入事先在地基土内钻进的孔中并挤向土体，在注浆处形成浆泡，浆液的扩散靠对周围土体的压缩。浆体完全取代了注浆范围的土体，在注浆邻近区存在大的塑性变形区，离浆泡较远的区域土体发生弹性变形，因而土的密度明显增加。评价浆液稠度的指标通常是浆液的坍落度。

(3) 劈裂注浆

劈裂注浆是目前应用最广泛的一种注浆方法，是在钻孔内施加液体压力于土体，当液体压力超过劈裂压力时土体产生水力劈裂，也就是土体突然出现裂缝，吃浆量突然增加，劈裂注浆在注浆孔附近形成网状浆脉，通过浆脉挤压土体和浆脉的骨架作用加固土体。

虽然注浆法有以上分类，但在实际注浆中浆液往往是以多种形式灌入地基中，单一的流动方式是难以产生的，只是以某一种形式为主而已。例如在劈裂注浆施工时，浆液在压力未达到劈裂压力时首先以渗透形式充填土体中的空隙，然后局部堆积对土体形成压密，当压力达到劈裂压力时在土体中形成劈裂裂缝，在向裂缝注入时也伴随着渗透和压密，但其主要流动方式是劈裂形式。图 21-1 和图 21-2 表达了注浆浆液的流动方式。

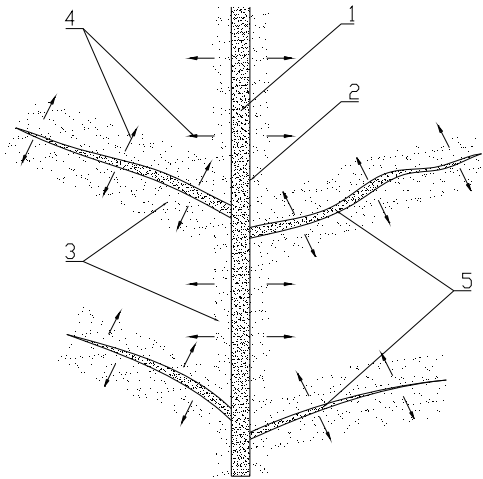


图 21-1 劈裂注浆

1—浆液；2—注浆孔；3—渗透渗入的浆液(通过劈裂面和注浆孔边缘)；
4—浆液挤压作用；5—劈裂面

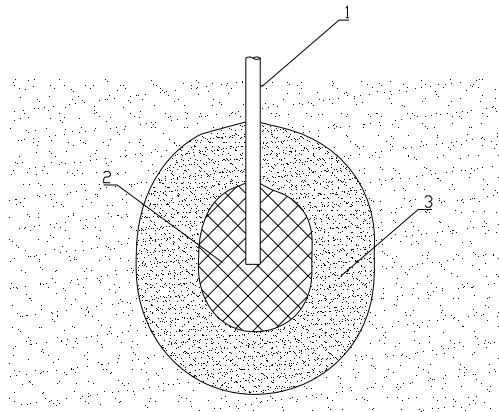


图 21-2 压密注浆

1—注浆管；2—球状浆泡；3—压密带

21.1.2 注浆法的主要用途

注浆法在基坑工程中的用途目前主要有地层加固、周围环境保护跟踪注浆、抢险堵漏等。

在之前的很长一段时间里，注浆法是基坑周边地层大面积加固的主要施工方法，但随着基坑工程的不断发展，基坑平面尺寸和深度不断加大，周围环境保护要求不断提高，注浆法在基坑周边地层大面积加固方面逐渐被加固强度更高、加固体性能更稳定的深层搅拌法、高压喷射注浆法替代。目前在基坑工程中，注浆法更多地发挥着其灵活机动的优点，而被广泛应用到局部地层加固、周围环境保护跟踪注浆、抢险堵漏等方面。

21.1.3 常用的注浆材料

注浆材料大体可分为无机系和有机系两大类，而在日常使用中一般又分为水泥浆材和化学浆材两大类。表 21-1 列出了一些常用的注浆材料^[1]。

选定适宜的注浆材料和配比，不仅对注浆效果至关重要，同时还直接决定了采用注浆法的经济性，所以必须综合考虑各种因素加以选择。

必须注意的是有些化学浆液或其固结体的浸出液具有毒性和腐蚀性，用其注浆将会产生环境和地下水污染，在这方面已有沉痛的教训，早已引起各国的重视。在选择注浆材料时应对其毒性和腐蚀性进行仔细评估，同时不得违反国家和地方相关的法律、法规和各项规定。

毒性的衡量指标通常用半数致死剂量 LD_{50} 、半数致死浓度 LC_{50} 表示。 LD_{50} (或 LC_{50})是指在给定时间内使一组试验动物的 50%发生死亡的毒物剂量，其值越小，毒性越大，毒性

分级见表 21-2。^[1]

表 21-1 注浆材料分类

系别	类别	浆液名称
无机系	单液水泥浆	普通水泥浆液；改性灌浆水泥浆液；超细水泥浆液；膏状水泥浆液；……
	水泥-水玻璃类	水泥-水玻璃双液浆
	黏土类	黏土-膨润土浆液
	水玻璃类	水玻璃-氯化钙浆液；水玻璃-铝酸钠浆液；酸性水玻璃浆液；……
	水泥黏土类	
有机系	丙烯酰胺类	纸浆废液-重铬酸钠(铬木素)浆液；纸浆废液-过硫酸铵浆液；…… 脲醛树脂-硫酸浆液；尿素-甲醛-三氯化铁浆液；…… 水溶性聚氨酯浆液；油溶性聚氨酯浆液
	木质素类	
	脲醛树脂类	
	聚氨酯类	
	环氧树脂类	
	糠醛树脂类	
	甲基丙烯酸甲酯	
	丙烯酸盐类	
	其他	

表 21-2 毒性分级表

毒性分级	LD ₅₀ (mg/kg)	LC ₅₀ (×10 ⁻⁶)	涂于皮肤时 LD ₅₀ (mg/kg)	体重为 70kg 的人 可能致死剂量(g)
剧毒	≤1	<10	≤5	0.06
高毒	1~50	10~100	5~42	4
中毒	50~500	100~1000	44~340	30
低毒	500~5000	1000~10000	350~2810	250
基本无毒	5000~15000	10 ⁴ ~10 ⁵	2810~22590	1200
无毒	>15000	>10 ⁵	>22600	>1200

21.2 常用注浆法施工工艺

21.2.1 袖阀管注浆法

袖阀管注浆法为法国 Soletanche 公司首创，故又称为 Soletanche 法。在国内 20 世纪 80 年代末开始广泛用于砂砾层渗透注浆、软土层劈裂注浆和深层土体劈裂注浆。

袖阀管注浆法通过孔内封闭泥浆、单向密封阀管、注浆芯管上的上下双向密封装置减小了不同注浆段之间的相互干扰，降低了注浆时冒浆、串浆的可能性。袖阀管注浆法特殊的注浆孔结构使注浆施工时可根据需要灌注任一注浆段，还可进行同一注浆段的重复施工。图 21-3 是袖阀管注浆法的施工流程图，图 21-4 是袖阀管注浆法的工作原理图。

袖阀管注浆法采用的单向密封阀管除特殊情况下采用钢管外，一般采用的是钙塑聚丙烯制造的塑料单向阀管，其内壁光滑，接头有螺扣，端部有斜口，在阀管首尾相接时保证接头部位光滑，使注浆芯管在管内上下移动方便无阻，其外壁有加强筋以提高抗折能力。塑料阀管分有孔、无孔两种，在加固范围内设置的是有孔塑料单向阀管，在其有孔部位外部，紧套着根据测定爆破压力为 4.5MPa 的橡胶套覆盖住注浆孔，这样就可保证浆液的单方向运动。

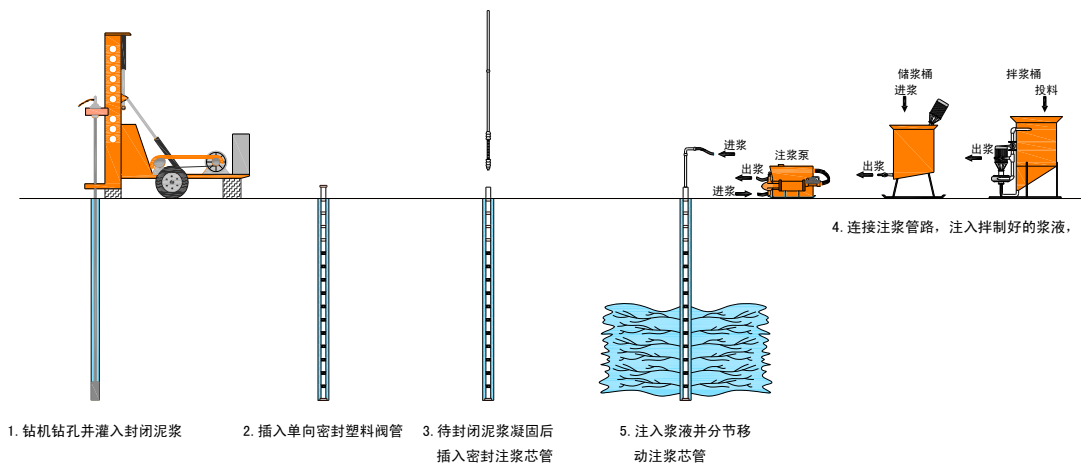


图 21-3 袖阀管注浆法施工流程图

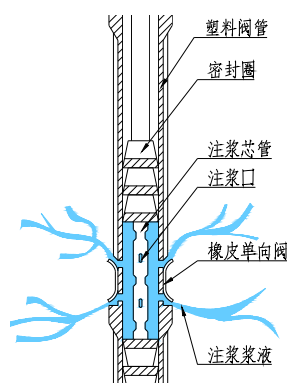


图 21-4 袖阀管注浆法的工作原理图

单向密封阀管作为袖阀管注浆法中的一个重要部件，其作用是：

- (1)保证浆液按规定的要求分清层次，形成劈裂；
- (2)保证浆液只从阀管中喷出，而防止逆流入阀管中，为二次甚至多次注浆创造条件；
- (3)在注浆加固的同时，单向阀管也对土体起到一定稳定作用。

袖阀管注浆法采用的双向密封注浆芯管一般有以下两种：

(1)PRC 型自行密封式双向密封芯管

PRC 型自行密封式双向密封芯管是依靠配置在注浆芯管出浆段两侧的聚氨酯密封环与阀管内壁形成密封，主要用于以水泥、粉煤灰、膨润土为主的浆液，该种浆液较稠，呈悬浊液状，所以在注浆过程中稍有压力，其聚氨酯密封环就有效地起到密封作用。

(2)RBH 型膨胀密封式双向密封芯管

RBH 型膨胀密封式双向密封芯管是由膨胀胶管、固定接头、注浆芯管和注水管组成，在水压作用下，膨胀胶管与塑料阀管管壁紧密接触，起到良好的密封作用，主要用于化学浆液。化学浆液粘度低，呈溶液状，如果采用 PRC 型注浆芯管，其密封环与塑料阀管内壁间隙较大，注浆时浆液会有较多渗漏，无法维持压力，效果不甚理想。

以上二种型号注浆芯管的操作情况如下：

(1)PRC 型双向密封芯管

- ①将 PRC 注浆芯管插入塑料阀管至预定深度；
- ②用注浆软管将 PRC 注浆芯管与注浆泵连接；
- ③按设计要求，注浆一段，拔出一段。

(2)RBH 型双向密封芯管

- ①将 RBH 注浆芯管插入塑料阀管至预定深度；
- ②用注浆软管连接芯管和注浆泵(浆泵)；

③用软管连接注水接头与注浆泵(水泵);

④开动注浆泵(水泵), 维持压力在 0.6MPa;

⑤按设计要求, 注浆一段, 然后释放水压, 拔出一段, 再注水至压力为 0.6MPa, 继续注浆。

在施工时, 塑料单向阀管每一节均应作检查, 要求管口平整无收缩, 内壁光滑。事先将每 6 节塑料阀管对接成 2m 长度作备用。准备插入孔内时应复查一遍, 必须旋紧每一节螺纹。注浆芯管的聚氨酯密封圈使用前要进行检查, 应无残缺和大量气泡现象, 上部密封圈裙边向下, 下部密封圈裙边向上, 且都应抹上黄油。所有注浆管接头螺纹均应保持有充足的油脂, 这样既可保证丝牙寿命, 又可避免浆液凝固在丝牙上, 造成拆装困难。

袖阀管注浆法中使用的封闭泥浆的基本功能为封闭单向密封阀管与钻孔壁之间的空间, 在橡皮套和双向密封芯管的配合下, 迫使浆液只在一个注浆段范围进入土体。根据施工经验, 封闭泥浆的七天立方体抗压强度宜为 0.3~0.5MPa, 浆液粘度为 80"~90"。

21.2.2 直接注浆法

所谓直接注浆法是指采用振入或钻孔放入的方式直接将注浆管置入土体中进行注浆的方法。根据采用注浆管形式的不同, 直接注浆法可分为注浆管注浆法、花管注浆法、钻杆注浆法、止浆塞注浆法等。

注浆管注浆法指直接通过注浆管下部的管口进行注浆的方法; 花管注浆法是通过在侧壁设置多层注浆孔的注浆管(花管)进行注浆的方法; 钻杆注浆法是指直接通过钻孔用的钻杆进行注浆的方法。这 3 种注浆方法的施工步骤基本一致:

(1)下管

注浆管注浆法和花管注浆法一般采用振入的方式将注浆管置入土体预定深度, 在深度较大的情况下也可采用预钻一定深度后振入的方法。钻杆注浆法则直接依靠钻孔方法将注浆管(钻杆)置入土体。

(2)注浆

将制浆设备、注浆泵和下放的注浆管进行连接, 按照要求进行制浆, 通过注浆泵将浆液注入土体中。在完成一个注浆段施工后根据要求向上或继续向下移动注浆管, 进行下一个注浆段的施工。

注浆管注浆法、花管注浆法和钻杆注浆法与袖阀管注浆法相比较, 其共同的缺点在于注浆时容易延管壁冒浆、注浆分层效果较差, 这些缺点在采用流动性较好、初凝时间较长的浆液时尤为突出; 其优点在于设备和工艺简单、灵活机动性好、施工速度快, 更适应需要快速反应的情况。

止浆塞注浆法一般用于岩石裂隙注浆, 其注浆管上带有止浆塞, 可将注浆段上部封闭, 其主要施工步骤如下:^[2]

(1)注浆孔成孔

一般采用旋转钻机进行钻孔。要求岩层内的注浆孔全部取芯钻进, 以便查明岩层裂隙的发育及其分布情况, 取芯率在坚硬的岩层中应达到 80~90%, 在破碎岩层中应为 70%。钻孔清洗液以清水为主, 如岩石破碎, 塌孔严重, 也可采用稀泥浆作循环液。

注浆孔在开口处一般安设 6~10m 长的孔口管, 以防止可能出现的塌孔, 同时在钻孔时起到导向作用, 注浆时用以安设孔口封闭装置、防止跑浆。

注浆孔钻进结束后安装并下放注浆管、止浆塞以及混合器等孔内设施。

(2)压水试验

压水试验是利用注浆泵向注浆区段压注清水, 其主要目的是:

①检查止浆管头特别是止浆塞的止浆效果。

②把未冲洗净、残留在孔底, 或粘滞在孔壁的岩粉、杂物推挤到注浆范围以外, 以提高

浆液结石体与裂隙面的结合强度及抗渗能力。

③根据测定钻孔的吸水量，核实岩层的透水性，以确定注浆的压力、流量，并确定注浆浆液及其初始浓度。

(3)注浆

注浆根据沿地层深度分段施工的顺序可分为分段下行式、分段上行式和一次全深注浆方式。分段下行式是从地面开始，自上而下钻一段孔，注一段浆，每注一段后继续下延钻孔与注浆，如此交替进行直至设计的最终注浆深度，然后再由下而上进行复注；分段上行式是注浆孔一次钻到注浆终深，使用止浆塞进行自下而上的分段注浆；一次全深注浆方式是注浆孔一次钻到注浆终深，然后对全深进行一次注浆。

止浆塞注浆法采用的止浆塞是封隔注浆钻孔，实现分段注浆的关键装置，良好的止浆塞应保证在 10MPa 以上的注浆压力作用下正常工作。目前使用的止浆塞根据其结构和作用原理可分为机械式和水力膨胀式 2 种，其中机械式止浆塞较为简单可靠，得到较多使用，图 21-5 是几种常用的止浆塞结构。

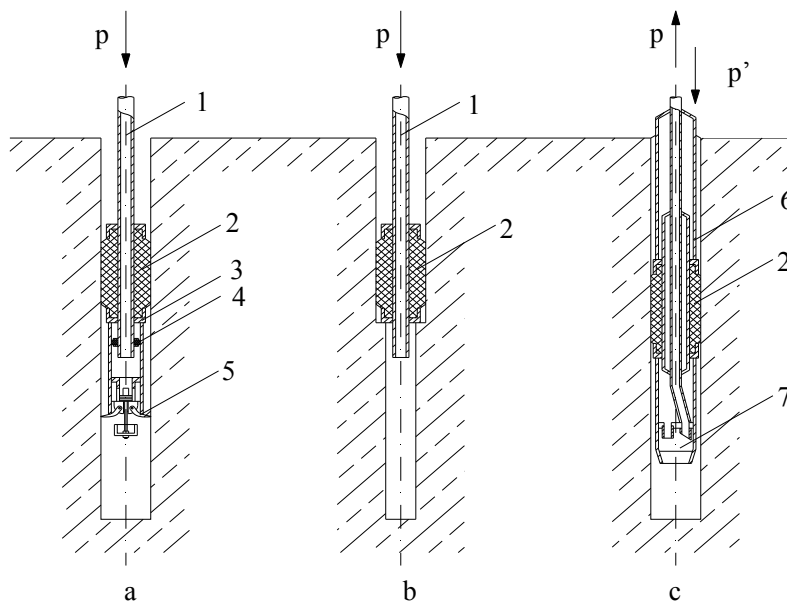


图 21-5 常用止浆塞结构

a—三爪式止浆塞；b—异径式止浆塞；c—双管式止浆塞

1—钻杆注浆管；2—止浆胶塞；3—下托盘；4—密封；5—三爪；6—外注浆管；7—混合室；p，p'—使止浆塞发挥作用而施加的力

21.2.3 埋管注浆法

埋管注浆法是指通过埋设或预埋于结构内的密封管进行注浆的方法，主要用于需穿透结构对其外部进行注浆处理的情况。埋管注浆法形式多样，用途广泛，本章仅对一般结构埋管注浆进行介绍，围护结构的脚趾注浆在另外的章节中有详细的介绍，这里就不再赘述。

一般结构埋管注浆的工艺流程如下：

(1)密封管埋设

①钻孔埋管

A.首先利用钻机在设计孔位上钻孔，钻孔直径宜为密封管外径的 1.5~1.8 倍。在钻穿结构前退出钻头，安装密封管套管，在结构与套管间隙中灌入“特速硬水泥”，以密实缝隙。

B.待密封管套管安装完毕后，改用小直径钻头，穿过套管继续钻进，直至钻穿结构。随后退出钻头并安装闷盖，待注浆时再开盖使用。

②预埋密封管

如果在结构施工前已经设计采用埋管注浆，可将密封管作为预埋件，直接浇筑在钢筋混凝土中。预埋时应注意下列事宜：

A.注意固定密封管，最好能与结构钢筋连接固定。

B.密封管套管端部应设有丙纶薄膜。

(2)注浆

根据不同施工要求，可以选择直接将注浆设备与密封管连接，用密封管作为注浆管进行近距离注浆的方式；或是将注浆芯管或花管通过密封管置入结构外土体中进行注浆的方式。

后一种注浆方式的一般施工流程如下：

①卸下密封管上的闷盖，在密封管上安装球阀和防喷装置。

②将注浆芯管或花管安装入防喷装置，并将防喷装置上的压盖拧紧，然后开启球阀，将注浆芯管或花管通过球阀、密封管置入土体，置入一般采用振动压入方式。

③将注浆设备与注浆芯管或花管连接进行注浆，注浆可采用定点注浆，也可通过移动注浆芯管或花管进行一定范围的注浆。

图 21-6 和图 21-7 是埋管注浆经常采用的密封管和防喷装置的示意图。

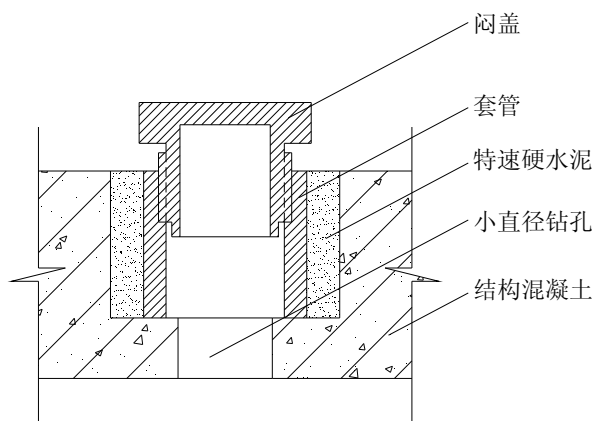


图 21-6 密封管

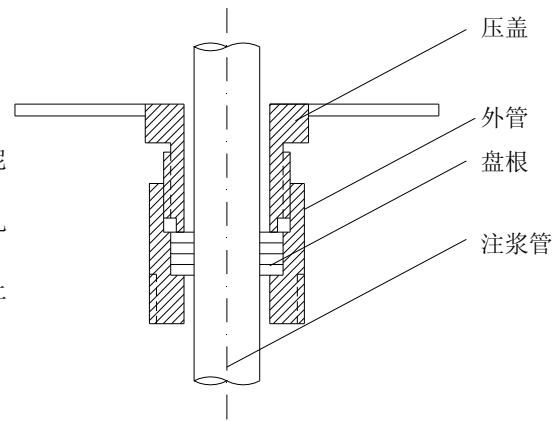


图 21-7 防喷装置

21.2.4 低坍落度砂浆压密注浆法(CCG 注浆工法)

压密注浆效果形成的重要条件就是采用低坍落度浆液，一般采用低坍落度的水泥砂浆。目前比较成功地采用低坍落度砂浆进行压密注浆的工艺是由上海隧道工程股份有限公司和上海申通集团有限公司联合开发的可控制压实注浆工法(简称 CCG 注浆工法)，该工法通过对设备、材料和工艺的研究，实现了采用坍落度小于 50mm 的水泥砂浆进行压密注浆，在上海地区饱和软黏土中得到了成功应用。

CCG 注浆工法主要是利用特殊的高压、低流量注浆设备，将高粘度、坍落度较小的砂浆，按设计要求压入加固区域的地基土中，砂浆在泵压下不与土体混合或向阻力小的土体方向以脉状渗透或劈入，而是在原位扩展形成浆泡挤压注浆点周围的土体，随着注浆管的提升，形成早期强度可控制的葫芦状或圆柱状的固结砂浆桩体，达到增强土体强度和密度、提高地基承载力、纠偏、基础托换等目的。CCG 注浆工法的施工工艺流程如图 21-8 和图 21-9 所示。

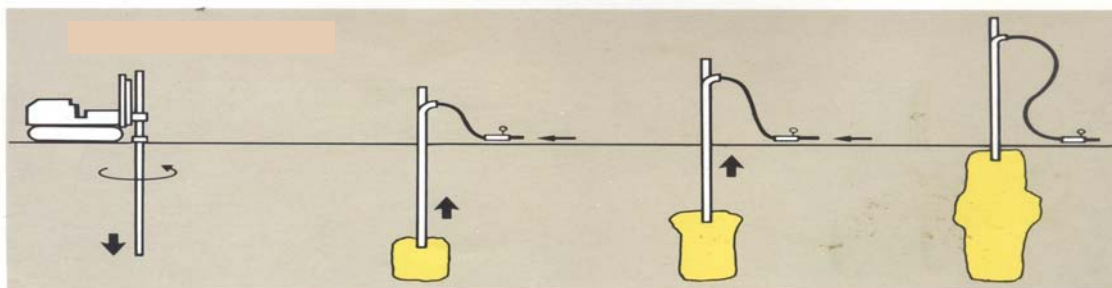


图 21-8 CCG 注浆工法施工顺序图

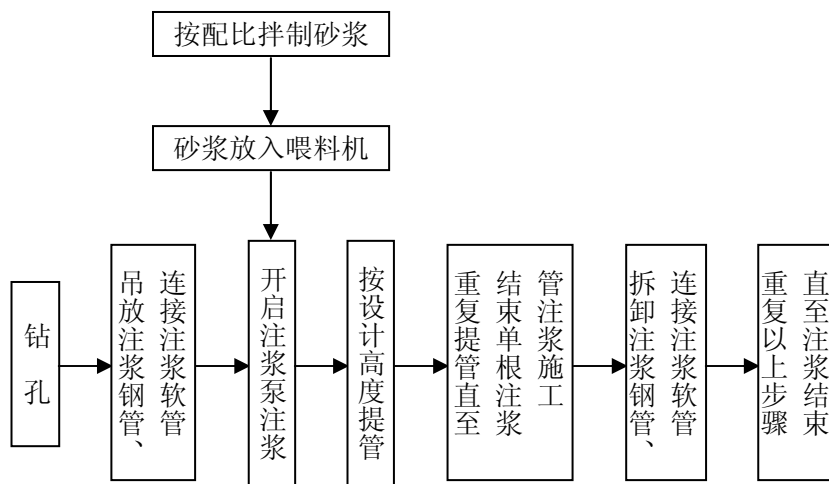


图 21-9 CCG 注浆工法工艺流程图

CCG 工法属于压密注浆工艺，是否有良好的排水通道对加固土体的效果有直接的影响，因此一般而言，CCG 工法在砂性土中的加固效果要优于在黏性土中的加固效果，在黏性土中进行施工时可考虑设置辅助排水措施，例如降水井点、砂井等。

CCG 注浆工法采用的低坍落度水泥砂浆一般由水泥、砂、粉煤灰、膨润土、水和外加剂等组成，根据实际工程需要，其无侧限抗压强度可在 3~15MPa 范围内选择。表 21-3 为 CCG 注浆工法参考浆液配比。

表 21-3 CCG 注浆工法浆液配比参考

材料 用途	水泥	细砂	粉煤灰	膨润土	外掺剂 SY-1	减水剂 ND-105	水
加固工程	1	1~4	0~7	0~4	4%	1.5%	5.6~7
纠偏工程	1	4	7	0~0.5	4%	1.5%	3.1~3.7

注：表中参数为重量比，加水量根据测得的砂浆坍落度确定，结石体抗压强度 2.5~5 MPa

21.2.5 柱状布袋注浆法

柱状布袋注浆法是以土工织物袋和注浆浆液形成似圆柱状硬化体来加固土体的软土地基注浆施工工艺，其功用如下：

(1)排水作用：布袋可以形成排水通道，当土体中存在超孔隙水压力时，土中的水会沿着织物排出土体，从而加速了土体的固结，更有利于相邻布袋注浆对土体的压密。此外，由于注浆布袋的渗水性，使浆液在一定压力下其中的部分水份通过布袋排出，降低了布袋内浆液的水灰比，从而能够加速浆液凝固，并得到高密度、高强度的硬化体。

(2)隔水作用：浆液在布袋内的压力大于布袋周围的被动土压力，布袋的隔离作用使浆液体得以通过膨胀布袋达到压密土体的目的，并形成较规则的注浆体。

(3)加筋作用：即使采用强度较低的浆液，由于布袋的抗拉强度高，也能起到加筋土体的作用，可以增加土体的稳定性。

柱状布袋注浆法加固土体的机理包括对土体的压密，因此其在砂性土中的加固效果更为显著。柱状布袋注浆工艺如图 21-10 和图 21-11 所示，其工序如下：

(1)将符合设计注浆深度的尼龙袋套在塑料阀管外，两端用铁丝扎紧，以保证注入袋内的浆液不从两端溢出。

(2)每隔 50cm 用扎绳将尼龙袋扎牢，然后连同塑料阀管一并放入已钻好的孔内。

(3)按照与袖阀管注浆法相同的工艺自下而上逐节压入搅拌好的浆液，注浆量应大于布袋套体积。随着浆液逐节压入，形成以塑料阀管为轴心的圆柱状或类似圆柱状的长桩。

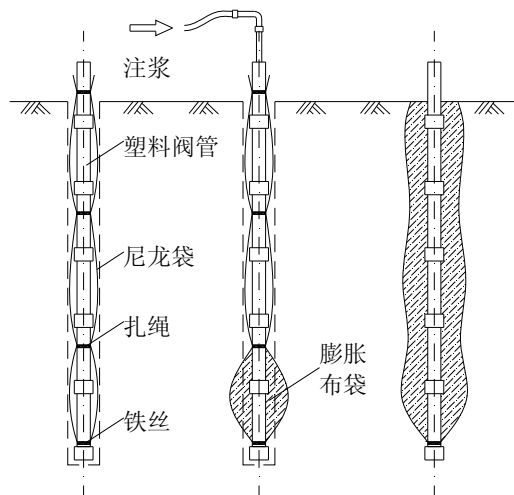


图 21-10 柱状布袋注浆

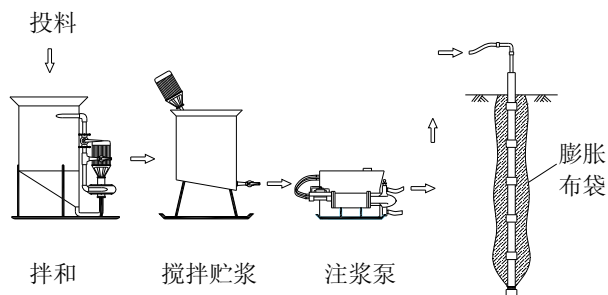


图 21-11 柱状布袋注浆工艺流程

21.3 注浆法设计和施工要点

就目前而言，注浆法的设计和施工还存在很强的经验性，另外注浆施工常常要面对比较复杂的工程条件，必须根据实际工程情况进行设计和施工。在一般情况下，注浆法的设计和施工可参考以下要点进行。

21.3.1 设计与施工前的准备工作

在注浆设计前要进行详细的工程调查，调查的范围为注浆处理的范围及其周边区域。工程调查的内容有：地质构造和地层分布情况；土的颗粒级配、含水量、孔隙率、渗透系数、土体强度、有机质含量等物理力学指标；地下水分布和特性；注浆处理范围及其周边区域的构筑物情况等。

对于重要工程和在无相应经验的地区进行注浆时，在注浆设计前宜进行现场注浆试验，以求得合适的设计参数，并检验施工方法和设备。

施工前的准备工作包括：设计单位应向施工单位提供注浆设计文件并负责技术交底；施工场地事先应予平整，除干钻法外，应沿钻孔位置开挖沟槽与集水坑，以保持场地的整洁干燥；机械器具、仪表、管路、注浆材料、水和电等的检查及必要的试验；对施工区域及其周边环境进行仔细排摸，落实相应的监测和保护措施等。

21.3.2 注浆目的和注浆范围

注浆的用途非常广泛，但要达到不同的目的，需要采用不同的注浆工艺、注浆材料和技术参数，因此在设计时首先要明确注浆处理要达到的目的，以此为基础，根据地质情况来选择合适的注浆范围、注浆浆液和施工工艺，设计合理的技术参数。在基坑工程中注浆目的一般有降低土层渗水性、增加土体强度和变形模量、充填土体空隙、补偿土体损失、堵漏抢险等。

注浆范围应根据工程不同要求必须充分满足注浆目的加以确定。注浆点的覆盖土厚度应大于 2m。

21.3.3 注浆浆液的选定和制备

注浆材料的选择及其配比的设计，必须考虑注浆的目的、地质情况、地基土的孔隙大小、地下水的状态等，在满足所需目的范围内选定最佳材料及配比。浆液的选定还必须兼顾经济性。对于重要工程，在选定浆液前必须进行室内浆液配比试验。

在进行渗透注浆时必须考虑被注介质的可注性，选择注浆材料要注意与被注介质可注性的匹配。

国内外广泛采用简化公式来评价粒状介质的可注性。[3]

$$N = \frac{D_{15}}{D_{85}} \geq 10 \sim 15 \quad (21-1)$$

式中：N——可注比值；

D_{15} ——地层土颗粒在粒度分析曲线上占 15% 的对应粒径；

D_{85} ——注浆材料在粒度分析曲线上占 85% 的对应粒径。

岩体裂隙可注性是裂隙宽度应大于注浆材料最粗颗粒直径的 3 倍以上。

劈裂注浆法的浆液材料可选用以水泥为主剂的悬浊液，也可选用水泥和水玻璃的双液型混合液。用作防渗堵漏的浆液可选用水玻璃、水玻璃与水泥的混合液或化学浆液。压密注浆可选用低坍落度的水泥砂浆。动水情况下的堵漏注浆宜采用双液注浆或其它初凝时间短的速凝配方。

在有地下动水流的情况下，不宜采用单液水泥浆等初凝时间长的浆液。

浆液使用的原材料及制成的浆体应符合下列要求：

(1)制成的浆体应能在设计要求的时间内凝固，其本身的强度、防渗性和耐久性能能满足设计要求。

(2)浆体在凝固后其体积不应有较大的收缩率，一般应小于 3% 体积量。

(3)所制成的浆体在 1 小时内不应发生析水现象。

为了改善浆液性能，根据工程需要可在浆液拌制时加入早强剂、减水剂、微膨胀剂、抗冻剂、缓凝剂等外加剂，掺加量可参考产品说明并应作相关试验确定。

浆体必须经过搅拌机充分搅拌均匀后，才能开始压注，并应在注浆过程中不停顿地缓慢搅拌，搅拌时间应小于浆液初凝时间。浆体在泵送前应经过筛网过滤。拌制好的浆液应进行随机抽检。

在冬季，当日平均温度低于 5℃ 或最低温度低于 -3℃ 的条件下注浆时，应在施工现场采取适当措施，以保证不使浆体冻结。在夏季炎热条件下注浆时，用水温度不得超过 35℃；并应避免将盛浆桶和注浆管路在注浆体静止状态暴露于阳光下，以免加速浆体凝固。

21.3.4 施工工艺的选择

施工工艺对注浆效果有很大的影响，每种施工工艺都有其优点和局限性，在进行注浆设计时，要综合考虑地基土特性、注浆目的、注浆范围和注浆浆液等因素，对施工工艺加以明确。施工工艺的选择带有一定的经验性，表 21-4 只是反映了部分地区的施工经验，仅供参考。

表 21-4 注浆工艺的适用情况

注浆工艺	浆液		注浆目的						
	一般浆液	快凝型浆液	砂砾层渗透注浆	土体加固	充填土体空隙	补偿土体损失	堵漏抢险	围护结构脚趾加固	岩石裂隙注浆
袖阀管注浆法	√	√	√	√	○	√	○	×	×
钻杆注浆法	△	○	△	△	○	○	○	×	×
注浆管注浆法	△	○	○	○	○	○	√	×	×
花管注浆法	○	√	○	○	√	√	√	×	×
CCG 工法	—	—	×	√	○	×	×	×	×
埋管注浆法	√	√	×	×	×	○	×	√	×
止浆塞注浆法	√	√	×	×	×	×	×	×	√

注：√—适用；○—可用；△—慎用；×—一般不用或不适用。

21.3.5 浆液扩散半径和孔位布置

浆液扩散半径与浆液的流动性和胶凝时间、注浆压力、注浆量、注浆时间等因素有关，其确定方法包括理论公式计算、经验判断和现场注浆试验。由于地层条件的复杂性，理论公式计算时采用的参数很难符合实际情况，所以在没有足够施工经验的条件下，推荐采用现场注浆试验方法确定浆液扩散半径。

在进行现场注浆试验时要选择不同特点的地基，最好采用多种注浆方法，以求得不同条件下的浆液扩散半径。

现场注浆试验常采用三角形布孔或矩形布孔的方式，见图 21-12 和图 21-13 所示。

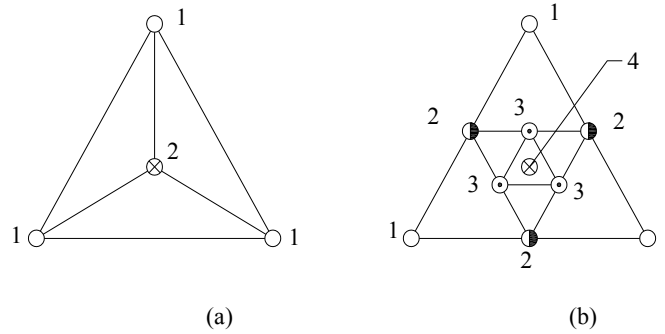


图 21-12 三角形布孔

(a) 1—注浆孔；2—检查孔

(b) 1—I 序孔；2—II 序孔；3—III 序孔；4—检查孔

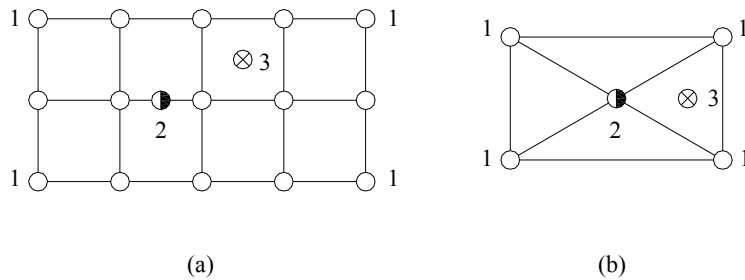


图 21-13 矩形布孔

(a) 1—注浆孔；2—试井；3—检查孔

(b) 1—I 序孔；2—II 序孔；3—检查孔

注浆试验结束后可通过以下方法评价浆液扩散半径：

- (1) 钻孔压水或注水，求出注浆体的渗透性；
- (2) 钻孔取样，检查空隙充浆情况；
- (3) 用大口径钻井或人工开挖竖井，肉眼观察地层充浆情况，并取样进行室内试验研究。

考虑到地基土的不均匀性，在确定设计浆液扩散半径时要注意选取符合设计要求的，在多数条件下可以达到的扩散距离。^[3]

确定了浆液扩散半径后，即可设计注浆孔布置。注浆孔的布置应能使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体。

在一般情况下，用作防渗的注浆应设置不少于 3 排的注浆孔，注浆孔间距可按 0.8~1.2m 范围设计；用作提高土体强度的劈裂注浆孔间距可按 1.0~2.0m 范围设计；压密注浆在选用坍落度较小的水泥砂浆时，注浆孔间距可按理论球状浆体直径的 2~5 倍设计。多排孔的布置以梅花形布孔为宜。

21.3.6 注浆压力和流量

渗透注浆的最大容许注浆压力推荐采用注浆试验曲线确定,即在注浆试验过程中,逐步提高注浆压力,求得压力和流量关系曲线(如图 21-14 所示),当压力升到某一数值(p_f)时,注浆流量突然增大,表明地层已产生劈裂,因而把这一压力值作为确定最大容许注浆压力的依据。

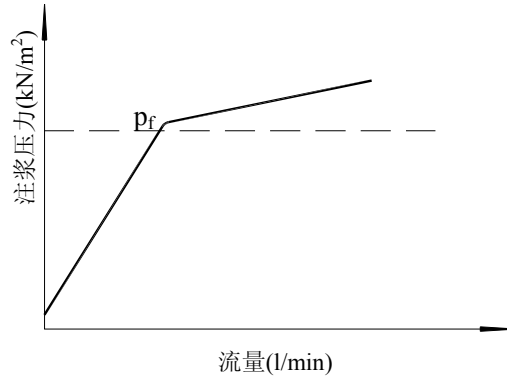


图 21-14 注浆压力和流量关系曲线

在缺乏试验资料或在进行注浆试验前需预定一个试验压力值时,也可根据以下砂砾地基注浆的经验公式确定。

$$[p_e] = c(0.75T + K\lambda h) \quad (21-2)$$

或

$$[p_e] = \beta\gamma T + cK\lambda h \quad (21-3)$$

式中: $[p_e]$ ——容许注浆压力, 10^5Pa ;

c ——与注浆期次有关的系数,第一期孔 $c=1$,第二期孔 $c=1.25$,第三期孔 $c=1.5$;

T ——地基覆盖层厚度, m ;

K ——与注浆方式有关的系数,自上而下注浆时 $K=0.8$,自下而上时 $K=0.6$;

λ ——与地层性质有关的系数,可在 $0.5\sim 1.5$ 之间选择。结构疏松、渗透性强的地层取低值,结构紧密、渗透性弱的地层取高值;

h ——注浆段至地面深度, m ;

β ——系数,在 $1\sim 3$ 之间选择;

γ ——地面以下,注浆段以上土层的重度;

岩石裂隙注浆最大容许注浆压力除根据注浆试验确定外,也可根据经验曲线或经验公式确定,式 21-4 为考虑地质条件、注浆方法和浆液浓度的经验公式。

$$[p_e] = p_w + \gamma H + m(H_1 - H) - (H_1\gamma_G - s\gamma_w) \quad (21-4)$$

式中: $[p_e]$ ——容许注浆压力, kPa ;

p_w ——地下水静水压力, kPa ;

γ ——地面以下,注浆段以上土层的重度, kN/m^3 ;

H ——止浆塞以上地层厚度, m ;

m ——容许注浆压力深度增量, 10^2kPa/m ;

H_1 ——注浆段总深度, m ;

γ_G ——浆液重度, kN/m^3 ;

s ——注浆段至地下静水位的距离, m ;

γ_w ——水的重度, kN/m^3 。

不同条件下的 m 值见表 21-5。表中第一类岩石指强烈风化并有多组大裂隙的松散岩石,

第二类岩石包括弱风化、中等裂隙性岩石，第三类指有细裂隙的较致密岩石。稀浆是指水灰比大于 1 的水泥浆液，稠浆是指水灰比小于 1 的水泥浆液。^[3]

表 21-5 不同条件下的 m 值

岩石类别	自下而上注浆		自上而下注浆	
	稀浆	稠浆	稀浆	稠浆
第一类	0.18	0.20	0.20	0.22
第二类	0.20	0.22	0.22	0.24
第三类	0.22	0.24	0.24	0.26

劈裂注浆压力的选用应根据土层的性质及其埋深确定。在砂土中的经验数值是 0.2~0.5MPa；在黏性土中的经验数值是 0.2~0.3MPa。如采用水泥-水玻璃双液快凝浆液，则注浆压力宜小于 1MPa。在保证可注入的前提下应尽量减少注浆压力，浆液流量也不宜过大，一般控制在 10~20 l/min 范围。

压密注浆压力主要取决于浆液材料的稠度。采用水泥砂浆时，坍落度可在 25~75mm 左右，注浆压力可选定在 1~7MPa 范围内，而且坍落度较小时，注浆压力可取上限值。流量一般为 10~40 l/min。

21.3.7 注浆量

渗透注浆的常用注浆量计算公式为式 21-5。^[1]

$$Q = \pi r^2 h n \alpha (1 + \beta) \quad (21-5)$$

式中：Q——注浆量；

r——渗透半径；

h——注浆厚度；

n——土体孔隙率；

α ——有效灌注系数；

$1 + \beta$ ——损失系数，可取 1.1~2.0。

不同条件下的有效灌注系数取值见表 21-6。

21-6 不同条件下的有效灌注系数

土质类型	浆液粘度(mPa·s)		
	1~2	2~4	>4
粗砂	1.0	1.0	0.9
细砂	1.0	0.9	0.7
砂质土	0.9	0.7	0.6

劈裂注浆只考虑孔隙率为主体的注浆率是不能确定注浆量的，劈裂注浆的注浆量一般表示如式 21-6。

$$Q = V \lambda \quad (21-6)$$

式中：Q——注浆量；

V——加固土体体积；

λ ——浆液充填率。

浆液充填率 λ 的取值可通过现场试验、施工经验和经验公式确定。根据上海、天津和江浙地区的经验，劈裂注浆加固土体的浆液充填率一般在 15%~20%。

低坍落度砂浆压密注浆的注浆量是根据每个注浆段注入的球状体的体积来计算的，目前的相关经验较少，宜通过注浆试验来确定，现有的 CCG 工法在上海和浙江的工程实例中是按照直径为 60cm 左右的球状体来设计和施工的。

必须指出的是上述仅为注浆量的估算方法，在实际施工中应根据注浆压力的变化、地面是否冒浆、地表抬升、周边构筑物位移等情况对注浆量进行即时的控制。

21.3.8 施工顺序

注浆顺序必须采用适合于地基土质条件、现场环境及注浆目的的方式。

一般情况下不宜采用自注浆地带某一端单向推进的压注方式，应按跳孔间隔注浆方式进行，以防止窜浆或压力过分集中，提高浆液强度与时俱增的约束性。对有地下动水流的特殊情况，应考虑浆液在动水流下的迁移效应，应自水头高的一端开始注浆。

压密注浆的施工顺序应根据周边排水条件通过注浆试验确定，主要的设计原则是有利于地下水的排出。

一般注浆施工应采用先外围后内部的注浆施工方式，注浆范围以外有边界约束条件时，也可采用自边界约束远侧开始顺次往近侧注浆的方法。

若在施工场地附近存在对变形控制有较严格要求的建筑物、管线等时，可采用由建筑物或管线的近端向远端推进的施工顺序，同时必须加强对建筑物、管线等的监测工作。

21.3.9 质量控制

注浆施工过程中必须进行严格的质量控制和质量检验，其主控项目包括原材料检验、注浆体强度、注浆施工顺序等，在有特殊要求时，还包括浆液初凝和终凝时间等；一般项目包括各种注浆材料称量误差、注浆孔位、注浆孔深、注浆压力、注浆流量等。

注浆施工情况必须如实和准确地记录，应有压力和流量记录，宜采用自动流量和压力记录仪。施工中要对资料及时整理分析，以便指导注浆工程的顺利进行，并为验收工作作好准备。

注浆工程竣工验收的检验，应根据设计提出的要求进行，检验时间一般在注浆结束 28 天后。对于设计明确提出承载力要求的工程，应采用载荷试验进行检验；有抗渗要求时可采用注水试验、抽水试验等原位测试方法测定其渗透性；加固工程可选用标准贯入或静力触探等方法对加固地层进行检测。^[4]

注浆施工和效果评定的经验性较强，在效果评定时要注重前后数据的对比，同时还要注意相似工程的类比，这样才能客观地综合评定注浆效果。由此可见，注浆工程的大量数据收集和分析是十分必要的。

21.3.10 周边环境影响控制

采用注浆法进行地基处理时，通常要经历先破坏、扰动地基，然后经过浆液凝固、土体固结等过程使地基土改良的过程，同时伴有施工时土体向周围膨胀，施工后由于注浆压力释放、浆液凝固收缩、土体固结等原因土体又有收缩的趋势。这些现象往往造成注浆法施工时对周边环境产生不利影响，是在进行注浆法设计和施工时必须考虑的因素。

控制周边环境对施工方面可采取的措施包括：

(1)在可注入的前提下尽量降低注浆压力和流量，降低孔隙水压力的突增量，有利于孔隙水压力的消散，同时有利于提高注浆效果。

(2)采用“多点少注”的方法，即加密布孔，减少每孔注浆量，避免应力过分集中。

(3)采用由建筑物或管线的近端向远端推进的施工顺序，将施工引起的附加地内压力向远侧引导。

(4)控制施工节奏，放慢施工速度，同样有利于降低孔隙水压力的突增量、有利于孔隙水压力的消散、避免应力过分集中。

控制周边环境影响最重要的是对注浆进行严格的信息化施工管理，即在施工期间对周边环境进行严密的观测和监测，并将相关信息及时传递至施工方面，施工方面及时对信息进行分析，并根据分析结果对施工工艺、技术参数、施工顺序、施工速度等进行调整。

21.4 注浆法在基坑工程中的应用

21.4.1 基坑地层注浆加固

基坑地层注浆加固是通过注浆的手段增加土体的强度、刚度和抗渗性，使其满足基坑工程的要求。

基坑地层注浆加固的目的如下所述：

- (1)减少挡土墙的水平位移。
- (2)使基坑挡土墙被动区产生较大抗力。
- (3)减小基坑挡土墙主动区土压力。
- (4)增加基坑底部抗隆起稳定性。
- (5)在长、大基坑中，防止因分段开挖造成的基坑内土体纵向失稳。
- (6)防止挡土墙接缝漏水。
- (7)增加挡土墙的垂直承载力。

基坑地层注浆加固包括基坑内底部土体加固、基坑外阴角加固、围护墙接缝防水、围护墙底部脚趾加固等，从平面布局上区分有满膛加固、抽条加固等形式。如前所述，基坑内底部土体加固和基坑外阴角加固等大面积的加固已逐渐被深层搅拌、高压喷射注浆等强度较高、稳定性较好的加固方法所替代，注浆法在这方面较多地应用在开挖深度小、变形要求低的基坑工程或是局部加固上；围护墙接缝防水施工现在也较多地采用高压喷射注浆的方法，因为注浆法毕竟存在一定的不确定性和不连续性，尤其在细颗粒土层中较为明显，目前更多地应用于开挖深度小、地质条件较好、周边环境要求较低的基坑工程；围护墙底部脚趾注浆目前应用较为广泛。

围护墙底部脚趾注浆采用埋管注浆法施工，浆液一般采用水泥浆液。其他注浆施工可采用袖阀管注浆法、注浆管注浆法、花管注浆法，其加固机理一般主要表现为劈裂注浆形式，浆液可根据需要选用水泥浆液或水泥-水玻璃双液浆；以增加土体强度、刚度为目的的注浆施工还可采用压密注浆工艺，如 CCG 工法等。

工程实例 1—上海延安东路越江隧道浦西引道段 106A—104 地基注浆加固

延安东路越江隧道是上海第二条穿越黄浦江底的公路隧道，全长 2261m，其主体部分是圆形隧道，直径为 11m，采用盾构法施工。在 1 号井以西的引道段采用地下连续墙围护进行开挖施工，当引道段接近河南路时，分成两条独立的车道，所以在 106A 段的跨度达 21.4m，在 106~105 段的开挖深度达 11m。基坑位于市中心区域，北侧约 10m 处有一幢 6 层高亚洲大楼，南侧有一幢综合贸易楼，西侧为交通要道河南路。为减少开挖时围护结构的位移，保护周围的建筑物，保证交通安全，采用注浆法对基坑内深层土体进行加固。

施工地区地层大致可划分为 3 层：

(1)杂填土：厚度 4.3~4.5m，主要由沥青、花岗岩抛石块石及碎石、砖瓦、废钢板、回填土等组成。

(2)淤泥质粉质黏土：厚度 7.5~8.5m，灰色饱和和流塑，局部含有少量薄层粉细砂和贝壳，含水量 32.8%，孔隙比 0.85。

(3)淤泥质黏土：灰色软塑，局部含少量薄层粉细砂、贝壳和植物根茎，含水量 50.7%，孔隙比 1.39。

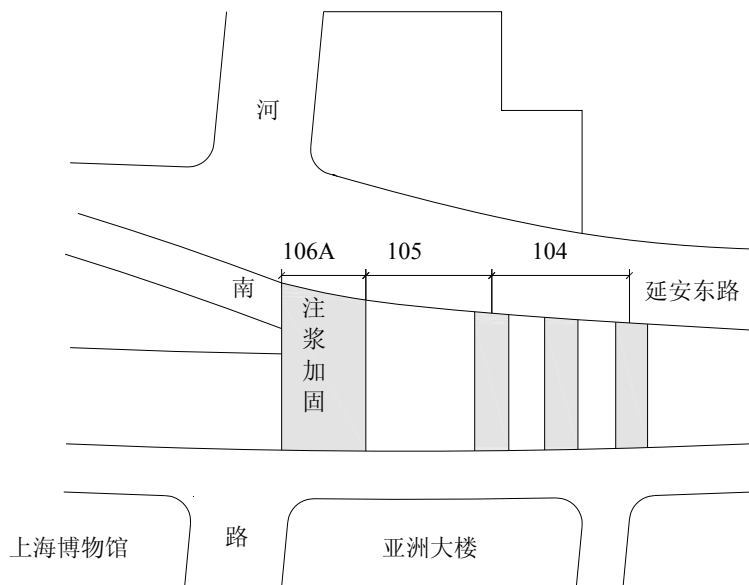


图 21-15 106A-104 注浆加固平面图

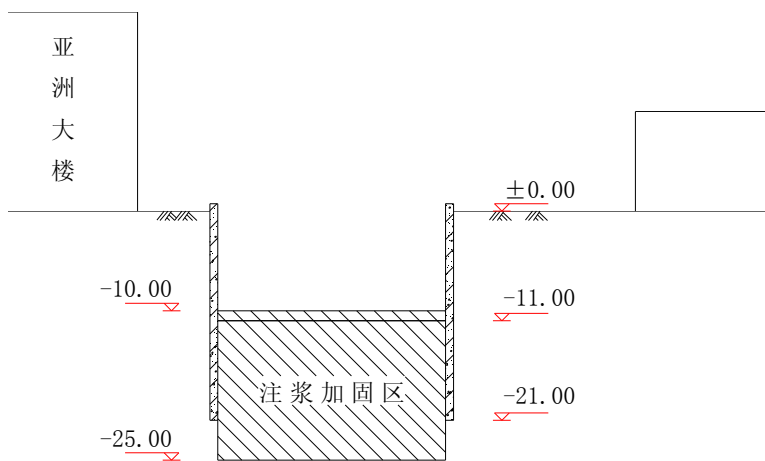


图 21-16 106A-104 注浆加固剖面图

注浆采用袖阀管注浆法，注浆孔孔距 1.5m，排距 1.5m，孔深 25m，注浆加固深度范围 -10~-25m，注浆加固面积 414m²，体积 7245m³，钻孔 212 只，注入水泥浆液近 2000m³。

注浆加固后，土体 N 值由未加固时的 0~1 提高到 3~5，用跨孔法测定声波的横波速度，注浆后有明显提高，横波速度(v_t)提高 20%~45%，动弹模量(E_d)提高 68%~138%，动剪切模量(G_d)提高 52%~138%，详见表 21-7。

表 21-7 注浆前后声波波速测定结果

深度 (m)	注浆前			注浆后			提高率(%)			备注
	v_t	G_d	E_d	v_t	G_d	E_d	v_t	G_d	E_d	
8	115	2428	6556	167	5720	13831	45	136	111	龄 期 7 天
10	125	2869	7746	182	6082	16427	46	112	112	
11	126	2914	7868	167	5120	13831	32	96	76	
12	126	2914	7868	163	4878	13176	29	67	67	
13	127	2914	7995	170	5306	14332	34	79	79	
16	125	2869	7746	193	6829	18472	54	138	138	
17.5	136	3369	9169	176	5120	15361	29	52	68	
平均	126	2861	7956	176	5766	15361	39	98	95	

注浆加固后约 2 个月,当开挖到注浆加固深度时,可见层厚 1~2cm 的薄片状浆液凝固体分布在土体中,土体空隙处和薄弱处都充满了浆液凝固体,地下连续墙与软土的接触部位有大量浆液凝固体,提高了地下连续墙与土体的摩擦力。基坑开挖地下连续墙最大位移量仅为 2.5cm,周围最大沉降量为 2.5cm。

工程实例 2—上海地铁 M8 线鞍山路车站基坑注浆加固

上海地铁 M8 线鞍山路车站基坑长约 149m,标准段宽 19.6m,挖深约 13.12m;两侧端头井宽约 23.8m,挖深约 14.27~14.97m。该车站基坑为二级环境保护基坑,采用明挖法施工,地下连续墙围护,基坑底部处于灰色淤泥质黏土和灰色黏土中。

为了提高基坑底部的土体强度和基床系数,增强坑底稳定和围护结构的刚度,减少基坑围护变形和坑外土体变形,端头井、标准段与部份连续墙外侧实施了 CCG 注浆工法加固。设计强度为静力触探试验 p_s 平均值 1.2MPa,设计注浆形成的柱状砂浆体直径为 $\phi 600\text{mm}$,间距为 1.3m,桩长为坑底下 3~3.4m,部份连续墙外侧砂浆体直径为 $\phi 600\text{mm}$,桩长 16.8m。在注浆施工同时,基坑内进行了井点降水。

在注浆区龄期超过 28 天后,依据规范要求,按照监理所确定的抽检位置,采用静力触探试验法,对注浆加固区进行了强度测试,共测试 8 个孔,加固后的土体强度较原状土有很大的提高,坑底灰色淤泥质黏土的静力触探试验 p_s 值由原来的 0.46MPa 提高到 0.8MPa~1.4MPa;坑底灰色黏土的静力触探试验 p_s 值由原来的 0.59MPa 提高到 1.0MPa~1.5MPa,抽检孔位的加固区土体 p_s 平均值达到 1.24MPa。基坑开挖时,可见一个个压密注浆后形成的砂浆结石体,基坑底板浇筑完成后,地下墙围护位移为 1.5cm,基坑周围的建筑、地下管线均安然无恙。

在这个基坑东端头井开挖中,由于需先挖除坑内 5m 深的地下防空洞,造成了南北两侧地下连续墙发生了较大的水平变形。后在两侧地下连续墙墙体旁,深 11m~13m 范围内,采用 CCG 注浆工法实施纠偏,取得了显著的纠偏效果。

21.4.2 周围环境保护跟踪注浆

随着工程的不断发展,基坑工程面对的环境条件越来越复杂,在环境保护方面的要求也不断提高,跟踪注浆作为控制基坑周围建筑物、管线等变形的有效辅助手段,得到了广泛应用。

跟踪注浆从其作用机理来说可分为主动区补偿地层损失注浆、被动区注浆和矫正变形注浆 3 大类。

主动区补偿地层损失注浆的作用机理是在基坑开挖过程中,通过注浆的手段及时补偿由于开挖引起的水土损失,减小周边建筑物、地下管线等的变形量。

被动区注浆的作用机理是利用注浆时引起水土压力增加,作用在围护墙上,短时间内增大被动区抵抗围护墙变形的能力,减弱围护墙变形增大的趋势,同时随着浆液凝固,可提高被动区土体强度而对围护墙的变形起限制作用。

矫正变形注浆的作用机理是基坑周围建筑物和管线由于开挖施工产生了变形,通过注浆的手段稳定其变形速率,在可能的情况下,利用注浆时土体膨胀、隆起的特性,对变形进行适当的矫正,减少变形量和不均匀变形量。

这 3 类跟踪注浆方法既可以分别使用,也可以结合使用,结合使用往往可以起到更好的效果。主动区补偿地层损失注浆区域和被保护建筑物、管线之间(包括矫正变形注浆区域)宜设置隔离桩,以避免相互之间的干扰,隔离桩可采用树根桩或钻孔灌注桩,顶部可采用钢筋混凝土圈梁连结。隔离桩同时还具有切断土体滑裂面、调和沉降曲线的作用,是基坑工程环境保护的有力措施。

跟踪注浆可采用袖阀管注浆法、注浆管注浆法、花管注浆法等方法施工,被动区注浆和

矫正变形注浆还可采用低坍落度浆液压密注浆的方法进行施工,例如采用低坍落度水泥砂浆的 CCG 工法。

被动区注浆和矫正变形注浆在采用袖阀管注浆法、注浆管注浆法、花管注浆法等方法施工时选用的浆液应具有快凝早强的特性,例如水泥-水玻璃双液浆。主动区补偿地层损失注浆可根据实际情况选用水泥浆液或水泥-水玻璃双液浆。

跟踪注浆的目的是控制基坑周围建筑物、管线等的变形,同时注浆还具有非常明显的副作用,特别是在主动区进行注浆时带有一定的风险,因此跟踪注浆必须在严格的信息化施工管理下进行。

需要指明的是,跟踪注浆只是基坑工程周围环境保护的辅助手段,其最主要的措施还是科学合理的支护体系设计和开挖施工管理。

工程实例 1—上海地铁二号线河南路车站东海商都保护跟踪注浆^[5]

河南路车站是上海地铁 2 号线建造难度较大的一座车站,具有高难度的环境保护要求。车站基坑标准段开挖深度约 16m,宽 22m,采用地下连续墙钢支撑支护体系。

东海商都与地下连续墙相距仅约 1m,对围护形成约为 80kN/m^2 的大面积超载。东海商都建于 20 世纪 30 年代,采用独立木桩基础,对地层位移非常敏感,其环境保护等级为特级。为保护东海商都,其邻近的基坑部分采用顺做 1 层逆做 2 层的施工方法,在围护结构和东海商都之间设置拱形的隔离桩,隔离桩采用树根桩方法施工,在开挖期间采取了跟踪注浆的辅助手段。

跟踪注浆包括主动区补偿地层损失注浆和被动区注浆,浆液均为水泥-水玻璃双液浆。主动区补偿地层损失注浆在隔离桩和地下连续墙之间的区域施工,采用了袖阀管注浆法,由于东海商都的木桩与围护墙距离很近,主动区注浆量较小;被动区注浆在靠近地下连续墙的开挖面以下区域施工,采用了注浆管注浆法。图 21-17 是东海商都与地铁车站基坑相对位置的平面示意图,图 21-18 是注浆孔的平面布置图。

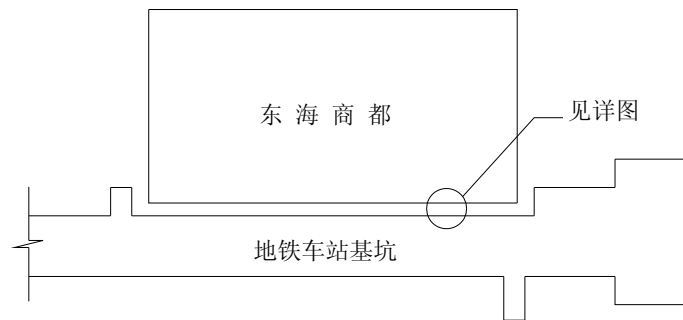


图 21-17 相对位置平面示意图

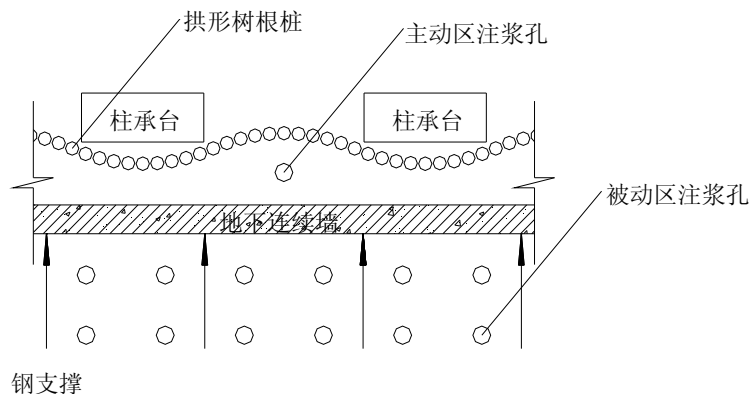


图 21-18 局部详图和注浆孔布置图

跟踪注浆时对地下连续墙变形、建筑物沉降等进行了严密的监测，并根据监测结果指导跟踪注浆的施工。通过监测数据发现，被动区注浆施工时，在每一次注浆及稍后时间内地下连续墙变形和建筑物沉降的增量都明显减少，甚至出现负值；整个开挖工程中，进行跟踪注浆的时间段与未进行跟踪注浆的前期相比，建筑物的沉降速率有明显的降低。这些情况都充分说明了跟踪注浆有效地抑止了变形的发展。

由于采取了一系列有效的保护措施，包括在严格信息化施工管理下的跟踪注浆，成功地在基坑开挖期间对东海商都进行了保护。

工程实例 2—大上海时代广场基坑工程 $\phi 900$ 上水管保护跟踪注浆^[6]

大上海时代广场工程位于上海繁华闹市区，东邻柳林路、柳林大厦，西靠淮海公园，南面是大量旧式民居，北面为淮海中路。基坑开挖面积约 11000m^2 ，开挖深度 17.05m ，局部最深处达 19m ，围护采用 1m 厚地下连续墙，支撑设 4 道，其中角撑均为钢筋混凝土支撑，中部直撑第 1 道为钢筋混凝土支撑，其余 3 道为钢支撑。该工程地质条件较差，土层分布复杂，为典型的上海地区软土地基。

该基坑四周存在大量分布复杂的地下管线，其中位于柳林路上的一根 $\phi 900$ 上水管是该基坑工程环境保护的重点对象。该管线管径大、年代久，一旦破坏影响极大且难以修理，而在附近基坑施工已使其发生过一定的沉降，采用雷达探测方法发现该管线所处的柳林路道路地基状况不佳。

在施工前期未能对该管线进行直接监测，仅对其相邻的电缆线布置了测点。当基坑开挖深度达 12m 时，测点的累计沉降值达到 $38.3\sim 51.3\text{mm}$ ，考虑到至基坑底部还有 5m ，为保证该管线安全，对其进行了跟踪注浆保护，注浆采用袖阀管注浆法施工，浆液为水泥-水玻璃双液浆。

为保证注浆效果，防止注浆对管线产生不利影响，在跟踪注浆施工前对该管线进行了直接测点布置，布置方法为以每节管段长(6m)为间距开挖路面使管线局部暴露，在管顶焊 1 根钢筋作为沉降测点，对应监测点位置在管线一侧以 2m 为间距布置注浆孔。

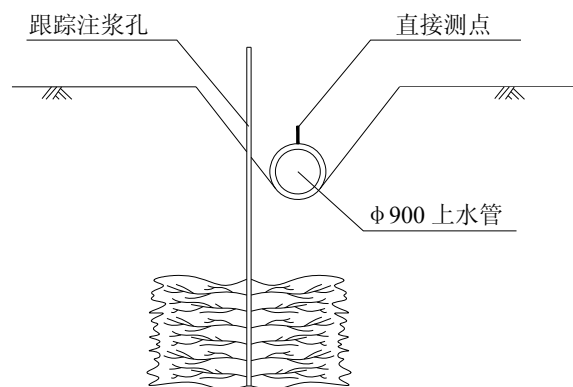


图 21-19 跟踪注浆剖面示意图

跟踪注浆在严格信息化施工管理下进行，根据每日监测点的沉降监测数据绘制管线的沉降曲线，并计算出每段的曲率半径，对曲率半径超出允许值的区段计算出欲使其恢复至允许值范围的注浆抬高量，在此基础上选择合适的注浆点，对管线进行抬升，施工时进行即时监测控制管线抬高量。

自实施跟踪注浆以后，管线沉降速率明显减缓，通过对管线曲率半径的控制，使管线能处于安全状态，在基坑开挖过程中成功地保护了管线。

21.4.3 注浆堵漏抢险

基坑工程的风险控制很大一部分在于水的治理，一旦基坑发生渗漏，就会伴随着大量的

水土流失,若不及时封堵,将会产生严重后果。注浆法作为一种设备简单、施工方便、见效快的堵漏施工工艺,较多地在堵漏抢险中得到应用并取得很好的效果。

注浆堵漏的基本作用机理为通过注浆设备将浆液注入至土层中的渗漏水通道,通过浆液的不凝固、堆积,将渗漏水通道堵塞,从而解决渗漏水问题。注浆堵漏的作用机理决定了该技术比较适用于解决范围较小的渗漏水问题。

注浆堵漏是在动水的条件下施工,必须根据工程实际情况,合理选择施工工艺和注浆浆液,才能取得良好的效果。

注浆堵漏对施工工艺的要求就是设备和工艺简单,施工速度快,以满足抢险工程快速反应的要求。施工工艺一般选择注浆管注浆法、花管注浆法,成孔施工在深度较小的情况下一般采用振入方式;深度较大时宜选择施工速度快的振动式凿岩钻机钻孔,然后将注浆管或花管放入孔内进行注浆。在情况不是很紧急,并且注浆深度范围较大时,也可在孔内插入单向密封塑料阀管,以方便注浆芯管上下移动。在易产生塌孔的地层施工时,注浆管或花管可能无法顺利置入孔中,也可选择钻杆注浆法直接进行注浆。

注浆堵漏对浆液的要求是快速凝结和早强,目前应用较多的是油性聚氨酯浆液和水泥-水玻璃双液浆。

油性聚氨酯浆液是采用多异氰酸酯和聚醚树脂等作为主要原材料,加入各种附加剂配制而成。由于浆液中含有未反应的多异氰基团,所以遇水后会发生反应(水解反应),放出CO₂气体(发泡反应)致使凝胶体体积迅速膨胀,同时还会发生连锁反应,产生交联形成泡沫凝固体,另外发泡过程会产生二次渗透,从而对地层有加固和防渗作用。油性聚氨酯浆液凝固时间为数十秒至数十分钟,在堵漏施工中一般控制在1分钟上下,固砂体强度一兆帕至十几兆帕,注后渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

油性聚氨酯浆液的优点是可注性好、固砂强度高、遇水反应凝胶时间快,浆液流失少、适应性强、止水作用见效快,特别适用于紧急情况下的堵漏处理。其缺点是决定凝胶时间的因素较多,包括主剂和外加剂的影响、环境温度的影响、地下水pH值及与地下水的接触状态等,故其凝胶时间不好控制;材料价格较贵;遇水反应的特性往往造成注浆管移动困难,在要求注浆深度范围较大的情况下使用有一定的局限性;另外油性聚氨酯浆液有毒、易燃,使用中应特别注意防毒、防火。

水泥-水玻璃双液浆亦称CS浆液,是以水泥浆和水玻璃为主剂,两者按一定比例以双液方式注入,必要时加入附加剂所组成的注浆材料。其快凝、早强的机理是水玻璃与水泥水化生成的氢氧化钙快速反应,生成具有一定强度的凝胶体—水化硅酸钙。水泥-水玻璃双液浆的特点是浆液凝胶时间可控制在几秒至几十分钟范围内,凝结后结石率可达100%,结石体抗压强度达5~20MPa,材料来源丰富,价格较低,对环境和地下水无污染。在实际施工中,综合考虑凝胶时间、抗压强度、施工等因素,水泥-水玻璃双液浆一般采用的配方为:水泥采用32.5级或42.5级普通硅酸盐水泥,水泥浆水灰比0.6~0.7,水玻璃采用浓度为25~35°Be'的中性水玻璃,模数以2.8~3.5为宜,水泥浆与水玻璃的体积比为1:0.5~1:1,初凝时间一般为15~60秒。

由于不同厂家、不同批次的材料在性能上有一定差异,现场环境条件也不一致,在注浆施工前应对浆液进行小样试验,以确定合理的浆液配比。

如前所述,基坑工程发生渗漏往往会产生严重后果,因此制定和落实有效的控制预案是非常必要的。在施工前应落实注浆堵漏的施工队伍、设备和材料,并预先分析可能发生渗漏水的位置、原因以及应对措施,以保证一旦发生渗漏水情况能得到及时处理。

在注浆堵漏施工前应对渗漏水情况、发生原因和渗漏水通道位置等进行信息收集和分折,并确定合理的处理方案、施工工艺和注浆浆液,以保证注浆堵漏施工有的放矢。注浆堵漏是在动水条件下施工,而浆液的凝固、堆积是需要一定时间的,若水流较大,就会造成浆

液来不及凝固、堆积就被水流冲走，因此在注浆前一般要用黏土、水泥包等对漏水处进行适当的封堵。出于同样的原因，注浆孔不宜紧靠漏水处，一般以距离 1~2m 为宜。

注浆堵漏施工时应应对渗漏水情况的变化、浆液是否沿渗漏水流出及流失量大小等情况进行仔细观察，并及时调整施工位置和浆液配比。

注浆施工时浆液是在一定压力下进入土体，而浆液的快凝早强也对压力的消散产生负面影响，而且施工一般在基坑主动区开展，因此注浆堵漏施工可能会对围护结构及周边环境产生不利影响，所以应对围护结构和周边环境进行严密的监测。

工程实例 1

某地铁车站基坑采用端头井与标准段分部开挖的方式施工，围护结构为地下连续墙，端头井与标准段之间采用封头墙隔离。端头井开挖深度约 16m，坑底以下土层为砂质粉土。

基坑开挖期间很正常，素混凝土垫层浇注完毕 1 天后发现在靠近封头地下连续墙“T”形幅处的垫层发生隆起，为释放压力，施工方将该处垫层凿穿，出现了大量涌水涌砂现象，该处基坑附近尚有不少民房等建筑物，一旦出现大量水土流失，后果不堪设想。

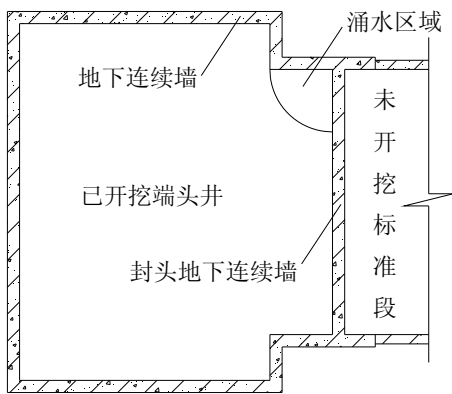


图 21-20 平面示意图

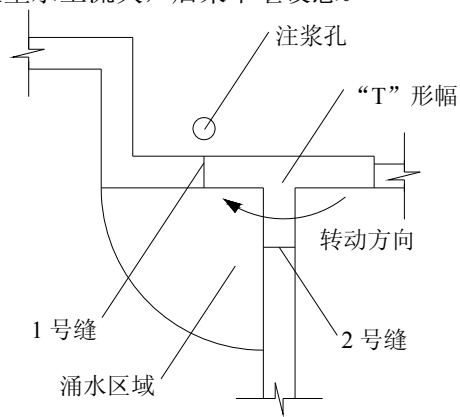


图 21-21 局部详图

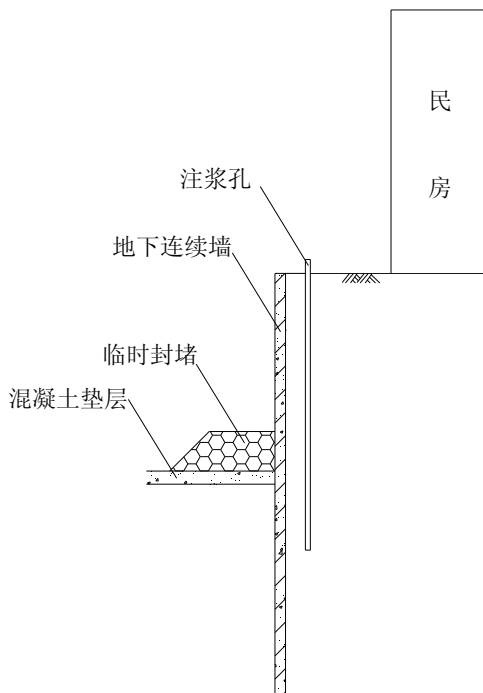


图 21-22 剖面示意图

施工方启动了紧急预案，现场成立抢险指挥部，调动人力物力，使用黏土、包装水泥等对涌水点进行封堵，降低了水土流失速度，同时安排专业注浆施工队伍进行注浆堵漏。

在施工准备期间，召开了堵漏方案讨论会，根据现场观察情况和施工方介绍的施工以及渗漏发生情况综合分析，认为本次渗漏原因为施工方为方便施工，除第一道支撑外，未按设计要求在“T”形幅处设置钢筋混凝土角撑，基坑开挖打破了“T”形幅处的平衡，造成其发生转动，2号缝在转动后张角向内，1号缝处则张角向外，漏水位置应在 1 号缝处，因坑底以上均为黏性土，故开挖期间未出现问题。考虑到未开挖土体对围护结构的约束性，1号缝的漏水缝隙不会很深，同时考虑到情况紧急，会议决定采用注浆管注浆法进行施工，浆液采用油溶性聚氨酯浆液，注浆深度为坑底以下 5m。

堵漏方案明确后，由专业注浆队伍立即展开施工，采用大功率气动钻机在基坑外侧距 1 号缝约 1.5m 处钻孔至开挖面以下 5m，在孔内放入注浆管，为确认注浆孔位的有效性，先注入

少量凝固时间较长的浆液，在发现浆液随水流进入基坑后，迅速配制凝结时间短的浆液进行注浆，用 1 个小时左右的时间消除了渗漏水现象。

工程实例 2

某地铁车站所处地层比较复杂，为黏性土、砂土互层，基坑底部为 5m 厚的黏性土层，以下为含微承压水的砂土层。由于底部黏性土层足以抵抗下部的承压水头，基坑开挖和底板制作均顺利完成，在钻孔安装接地装置时，将黏性土层钻穿，发生了大量涌水涌砂情况，在出现险情一侧基坑外部的几幢 6 层居民楼均不同程度地发生沉降。

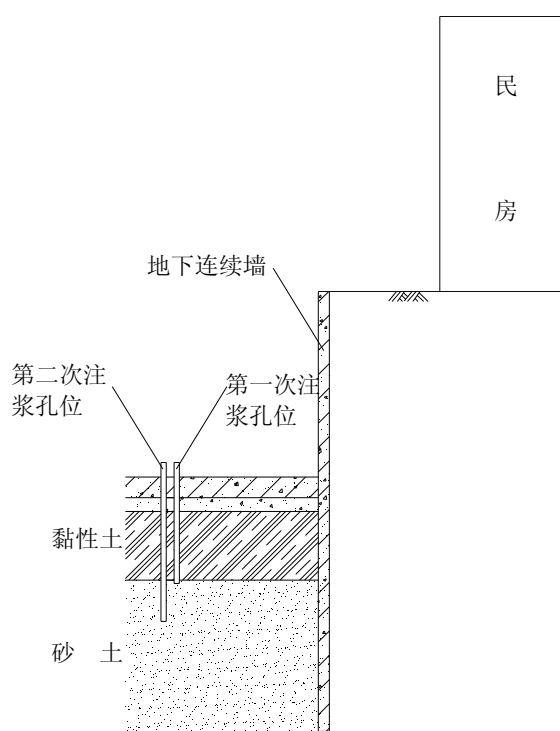


图 21-23 剖面示意图

险情出现后，施工方马上安排专业注浆队伍进场抢险，结合现场条件，采用注浆管注浆法在原钻孔处进行注浆堵漏，浆液采用水泥-水玻璃双液浆。在注浆施工时发现浆液被水流冲出，无法封堵漏水点。针对这种情况，有关专家会同注浆技术人员现场会诊，一致认为注浆深度太浅，浆液来不及凝固堆积就被冲出孔外；决定调整施工方案，加大注浆深度，注浆管进入砂土层 3m，同时对浆液配比进行调整，缩短初凝时间，提高早期强度。

注浆队伍按照调整的方案展开施工，在原孔位无法施工的情况下，在其附近采用振入的方式使注浆管进入砂土层 3m，按照调整好的配比进行水泥-水玻璃双液注浆，一开始尚有部分浆液被水流带出，随着浆液在砂土层里不断凝固堆积，水流和被带出的浆液逐渐减少，直至渗漏点被完全封堵。

参考文献

- [1] 邝健政，咎月稳，王杰，杜嘉鸿主编. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京：科学出版社，2001.
- [2] 翁家杰主编. 井巷特殊施工[M]. 北京：煤炭工业出版社，1991.
- [3] 龚晓南主编. 地基处理手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.
- [4] 程骁，张凤祥编著. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海：同济大学出版社，1998.
- [5] 徐全庆，李亚，徐昀. 跟踪注浆对基坑周围土体变形的控制[J]. 岩石力学与工程学报. 2001,20(2): 262~266.
- [6] 陈韵兴. 运用跟踪注浆技术控制大直径管线的沉降[J]. 建筑施工. 1998,20(1): 36~37.
- [7] 刘建航，侯学渊主编. 基坑工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1997.