

第 24 章 基坑土体加固

24.1 概述

24.1.1 基坑土体加固的概念

基坑土体加固是指通过对软弱地基掺入一定量的固化剂或使土体固结,以提高地基土的力学性能。

从广义的角度出发,加固可包含对场地的地基土加固和支护结构加固,其中支护结构加固是结构范畴,非本文讨论的内容,可见有关专著。地基土加固是针对区域性的场地,地基土处理或加固的方法较多^{[1][2]},包括自密法、置换法、复合地基法、加筋法、灌浆法。自密法包括排水固结法、碾压法、动力夯实法,其中排水固结法又包括预压法和降水法。置换法包括粗粒或细粒垫层法。复合地基法包括碎石桩法、砂桩法、灰土桩法、水泥土桩法。其中水泥土桩法包括深层搅拌和旋喷桩等工法。每一种地基加固方法都有其适用范围和局限性,不存在任何条件下都是最合理的处理方法。

场地的地基土加固通常分为两种类型:结构物地基加固和施工期间地基加固。前者属于永久性加固,后者是施工期间的临时性加固。本文主要是针对基坑开挖工程中的临时性地基处理,我们称之为基坑土体加固。处理的对象指软弱地基土,包括由淤泥质土、人工填土、或其他高压缩性土层构成的软弱地基。主要是为提高土的强度和降低地基土的压缩性,确保施工期间基坑本身的安全和基坑周边环境安全而对基坑相应的土体进行加固。

基坑开挖时围护结构的受力及变形情况与其插入深度、土的力学性能、地下水状况、施工工况、开挖方式及周围环境等因素有关。随着坑内土的不断挖深,土的受力状况发生变化,作为挡土结构两侧的水、土压力处于动态变化中,挡土墙后的土体随墙体的变化向基坑方向移动,此外,在开挖时由于采用内降水,使坑外水位发生变化,也会使土体产生位移,影响周围构筑物的安全。为了掌握施工和使用过程中围护结构的受力及变化情况,使围护结构在基坑开挖和使用过程中,安全地起到挡土、挡水作用,保证在施工过程中工程和周围环境的安全,必须采取相应的工程措施,其中对基坑土体进行预加固是一种行之有效的技术措施。

24.1.2 软弱土体与基坑变形的关系

基坑围护墙前后有较大的水位差和土压力差,实际开挖工程中,墙体位移不允许大到极限平衡状态。大量工程实测资料表明,不同深度的侧向变形及侧压力系数的变化很大,一般情况下在开挖面附近及开挖坑底位置一定深度区域的墙体变形较大,相应位置的土体压缩也较大。对于软土地基^[3],由于软土侧向约束作用微弱,透水性差,高灵敏度的软土被挤压,破坏了原结构。在基坑工程中可考虑加固的软弱土体主要包括淤泥质土、素填土、冲填土、松散的砂及含承压水土层等。软土一般主要分布在河流入海处,地质成因极为复杂。上海、广州等沿海地区为三角洲沉积,温州,宁波为滨海相沉积。沿海一带的软土地区,多为淤泥质土,埋藏厚度不一,天然孔隙比大于 1.0 但小于 1.5,含水量大,抗剪强度低,压缩性高。

由于软土的渗透系数较小,固结速率慢,如果施工速率过快,可造成局部较大的塑性开展区,使基坑围护变形急剧增加或建筑物产生严重的不均匀下沉。在粘性土的深基坑施工中,周围土体均达到一定的应力水平,还有部分区域成为塑性区。由于粘性土的流变性,土体在相对稳定的状态下随暴露时间的延长而产生移动是不可避免的。因此,在基坑内支撑挖出槽位以后,如延搁支撑安装时间或混凝土支撑形成时间过长,会明显增加墙体变形和相应的地面沉降。在开挖到设计坑底标高后,如不及时浇筑好底板,使基坑长时间暴露,则因粘性土的流变性亦将增大墙体被动压力区的土体变形和墙外土体向坑内的位移,因而增加坑外地表沉降。

同济大学董建国在考虑粘性土变形局部化的基坑设计方法一文中,提出了土体局部化变形理论,当土体的屈服应力接近于剪切带开始形成的偏应力特征值,土体开始发生局部变形,外力做功集中在土体的局部区域内,最后可能在这些部位造成土体的局部破坏。该文分析研究的结论是建议在基坑设计时,应采用剪切带开始形成(屈服点)这个特征点对应的偏应力,确定土体的抗剪强度指标。为避免基坑开挖过程中,被动区形成剪切带和初始损伤,确保土体不发生局部化变形或局部土体不被破坏,需对被动区的土体进行加固,并使围护墙前的总体压缩得到有效控制。

胡中雄和贾坚关于基坑大面积卸荷机理研究^[4],论述基坑开挖即大面积卸荷时,基坑开挖面以下土体由正常压密状态向超压密状态转化,土的性质也随之变化。该文通过对卸荷条件下的强度特性研究、侧向应力松弛特性研究、卸荷影响深度研究,提出临界卸荷比、极限卸荷比、强扰动区的概念,并得出对被动区裙边软弱土体进行加固可以有效改善扰动区的土体强度。

上海地区大量基坑工程实践表明,一定深度的基坑内土体和墙体变形密切相关,墙体过大的变形,表明坑内地基土已处于局部破坏状态^{[5][6]}。为避免坑内软弱土体的破坏,对地基土进行土体固结,能有效提高土体的抗压强度和土体的侧向抗力^[7],保证工程结构或邻近结构不致发生超过允许的沉降或位移。

24.1.3 加固体性质

基坑土体加固一般是指采用搅拌桩、高压旋喷桩、注浆、降水或其它方法对软弱地基掺入一定量的固化剂或使土体固结,以提高地基土的力学性能。其中搅拌桩、高压旋喷桩两种加固方法均是将原状土作为加固原材料与固化剂(一般为水泥或生石灰)通过特定的工艺使其混合发生化学反应,生成水化物和坚固的土团颗粒,再经过凝硬和碳化作用,使加固的土体具有整体性、水稳定性和一定强度的加固土桩体^{[5][6]}。不论石灰土或水泥土,它们的加固效果或强度增长都存在早期在短时期内增长较快和后期继续缓慢发展的特点。这一方面是因为固化剂本身所具有的特点,另一方面则因为它的掺入比一般都较小,而各种反应都是在具有一定活性的介质(土)包围中进行,反应又较复杂。它们不同于混凝土的凝结硬化机理,后者主要是水泥在比表面积小而活性弱的介质(粗粒材料)中进行水解和水化,其凝结速度快。

(1) 水泥加固土的物理力学特性和无侧限抗压强度与天然地基的土质、含水量、有机质含量等因素以及所采用固化剂的品种、水泥掺入比、外掺剂等因素有关,也与搅拌方法、搅拌时间、龄期、操作质量等因素有关。水泥土的含水量和孔隙比与天然软土相比,有不同程度的降低。水泥土的强度随水泥掺入比并随龄期而增长。水泥土的抗剪强度 C_u 与其法向应力 σ_u 有关。水泥土的抗剪强度随抗压强度而提高,但随着抗压强度增大,两者的比值减小。对同一强度的水泥土,不同围压下弯曲点对应的偏应力大致相同,且与水泥土无侧限抗压强度相接近。三轴试验中,试件破坏后均保持一定的残余强度,其应变也大于无侧限抗压时的应变值。水泥土与未加固土典型的应力应变关系表明,水泥土的强度虽较未加固土增加很多,但其破坏应变 ϵ_f 却急剧减小。因此设计时对加固土的抗剪强度不宜考虑最大值,而应考虑对于桩体破坏应变量的适当值。水泥土的变形模量与无侧限抗压强度 q_u 有关,试验统计资料表明,加固桩体的变形模量一般在 $E_{50}=(50\sim 200)q_u$ 。加固体室内制样试验所得到的无侧限抗压强度 q_{ul} 与现场取样试验所得到的无侧限抗压强度 q_{uf} ,由于水灰比和拌合养护条件不一样,其差异较大。此外,固化料掺合量较少时,搅拌又不充分,加固体的强度会出现很大的离散性。试验统计资料表明,现场桩体强度比室内试块强度大约低25%~35%。

(2) 石灰加固土的物理力学特性有与水泥土相似之处,也有一些截然不同之处。石灰一般以粉体与土搅拌,不给土附加新的水分。因此,加固后的土体含水量大约可降低7%~15%左右,重度可提高2%~4%。软土经石灰加固后,其液限稍有减小,但其塑限随着石灰

掺入比增大而增大。国内外现有资料表明,对于抗剪强度为 10~15kPa 的软粘土而言,用石灰加固通常可使其抗剪强度大约超过其原有值的 10~50 倍。强度增长的倍数一方面随粘土原有的液限或塑性指数的增大而减低,另一方面随石灰掺入比(主要指活性 CaO 的掺量)增加而增大。软土经石灰加固后,压缩系数减小,一般达到 10~5kPa 的量级。侧限压缩模量 E_s 增大,一般可达到 10⁴kPa 的量级。石灰土桩的现场桩体芯样强度 / 室内试块强度的比值一般在 0.65~0.75 之间。而且由于现场桩体强度的离散性大,桩沿其深度的强度往往难以做到均匀一致。

(3) 水泥土和石灰土强度的长期稳定性,由于水泥和石灰两种材料的化学性质甚为稳定,故水泥土或石灰土强度的长期稳定性应无问题。根据有关资料报道,曾将某一现场的水泥搅拌桩在施工后 4 年取样,测定桩体内各点及桩周边未加固土的含钙量,其结果显示桩体界面处的含钙量并未减少,因桩体强度主要是借硅酸钙水化合物胶体(CalciumSilicateHydrate, CSHgel)的强度来提供,故可推知桩体在四年后的强度并未衰减。此外,还比较了 95d 龄期与 4 年龄期的桩体强度,其结果也甚接近。故可以认为水泥搅拌桩强度的长期稳定性甚为可靠。至于更长期(如 10 年或 20 年)的性质是否稳定,目前尚无直接试验数据证实,但若参照一般水泥制品及云灰土的历史性状似无需疑虑。

24.2 基坑土体加固的方法与适用性

基坑土体加固的方法,包括注浆(各种注浆工艺、双液速凝注浆等)、双轴搅拌桩、三轴搅拌桩(SMW)、高压旋喷桩、降水等加固方式。基坑土体加固方法及适用性可参见下表。

各种土体加固方法的适用范围表

加固方法 \ 地基土性	对各类地基土的适用情况			
	人工填土	淤泥质土、粘性土	粉性土	砂性土
注浆法	※	※	○	○
双轴水泥土搅拌法	※	○	○	※
三轴水泥土搅拌法	※	○	○	○
高压旋喷法	○	○	○	○
降水法		※	○	○

注: ※表示慎用, ○表示可用。

表中地基加固的各施工工法可详见相关专业规程或规范。表中人工填土包括杂填土、浜填土、素填土和冲填土地基等。其中素填土是由碎石、砂土、粉土、粘性土组成的填土,其中含少量杂质;冲填土则由水力冲填泥砂形成的填土;杂填土则是由建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物组成的填土,土性不均匀,且常含有机质,会影响加固的效果和质量,故应慎重对待。

在软弱土层,如上海、广州、天津等沿海城市地区,建筑深基坑在开挖时使周围土层产生一定的变形,而这些变形又有可能对周围环境产生不利影响和危害。为避免坑内软弱土体的破坏,采用压浆、旋喷注浆、搅拌桩或其它方法对地基掺入一定量的固化剂或使土体固结,能有效提高土体的抗压强度和土体的侧向抗力,减少土体压缩和地基变形及围护墙向坑内的位移,减少基坑开挖对环境的不利影响,并使基坑围护结构或邻近结构及环境不致发生超过允许的沉降或位移。

24.2.1 注浆加固应用范围

注浆包括分层注浆法、埋管法、低坍落度砂浆法、柱状布袋注浆法等。注浆可提高地基土的承载力,增加围护墙内侧土体的被动土压力,但对提高土体抗侧向的变形能力不明显。一般在计算时不考虑提高加固区土的抗剪强度指标和土的侧向比例系数。在基坑较浅或环境

尚好的砂性或粉性土基坑内可采用注浆进行地基加固处理。

对基坑土体采用注浆加固时，一般应用范围包括：

(1) 注浆可用于坑底范围的土体加固。一般用于环境保护要求不高的基坑工程。

(2) 在分段开挖的长而大的基坑中，如果坑内土体的纵向抗滑移稳定性不足，可对斜坡体进行加固。

(3) 当围护墙是地下连续墙或灌注桩时，如果需要减少围护墙的垂直沉降、或提高围护墙的垂直承载的能力，可用埋管注浆法对围护墙底部进行注浆加固。

(4) 在围护墙外侧进行注浆加固，或用于周边环境保护的跟踪注浆以减少围护墙的侧向土压力及控制基坑周围构筑物的变形。

由于注浆工艺的局限性，注浆加固体的离散性大，均匀性和强度保证的可靠性相对较差，施工过程的质量控制和检验存在不确定性，其效果有时达不到设计对土体加固的强度要求。对开挖较深的基坑采用注浆加固工艺时应综合评估其加固施工有效性。注浆加固深度的限制不包括对基坑工程中的围护墙墙底或立柱桩桩底的注浆加固。

24.2.2 搅拌桩加固应用范围

搅拌桩是利用钻机搅拌土体把固化剂注入土体中，并是土体与浆液搅拌混合，浆液凝固后，便在土层中形成一个圆柱状固结体。搅拌桩加固可提高地基土的承载力，增加围护墙内侧土体的被动土压力，减少土体的压缩变形和围护墙的水平位移，增加基坑底部抗隆起稳定性和开挖边坡的稳定性。

对基坑土体采用搅拌桩加固时，一般应用范围包括：

(1) 搅拌桩加固可用于基坑被动区的土体加固，对于特定的基坑工程，可根据周围环境对围护墙外侧最大地层沉降(Δ_{max})的限制，确定基坑底部的允许抗隆起安全系数。

(2) 在分段开挖的长而大的基坑中，如果坑内土体的纵向抗滑移稳定性不足，可对斜坡坡底的土体进行适当加固，可采用条分法对加固后的纵向抗滑移稳定性进行计算。

(3) 在围护墙外侧进行搅拌加固，以减少围护墙的侧向土压力、防止围护墙接缝漏水和堵漏及控制基坑周围构筑物的变形。

(4) 搅拌桩加固深度

加固土体的搅拌机一般有单轴、双轴和三轴，相应的水泥土搅拌桩也包括单(双)轴搅拌桩、三轴搅拌桩，标准搅拌直径在 650~1200mm。搅拌桩的加固深度取决于施工机械的钻架高度、电机功率等技术参数。由于施工设备能力的局限性及加固效果的差别，不同工法的施工工艺的加固深度是不同的，且需根据不同环境保护要求作出选择，以确保工程实施的可行性和环境的安全性。国外最大加固深度已达 60m 以上，我国双(单)轴搅拌机的土体加固技术受限于施工工艺和施工设备能力的限制，其设备能力一般搅拌深度达到 18m，超出此深度时一般施工质量和加固效果难以保证，故在国内的双轴或单轴水泥土搅拌桩的加固深度一般控制在 18m 左右。三轴搅拌机的转轴刚度和搅拌机功率相比较优于双轴，相应的三轴水泥土搅拌桩的加固深度一般可达到 30m，少量进口的三轴设备的搅拌深度可达到 50m 以上。此外，国外海洋工程中开始采用大功率多头搅拌设备，以解决海洋工程的施工难度，提高施工效率。

24.2.3 高压喷射注浆加固应用范围

高压喷射注浆对土体进行改良，土体经过高压喷射注浆后，由原来的松散状变成圆柱形，板壁形和扇型固结体，并且有良好的强度、抗渗性、耐久性。根据国内外的实践，高压喷射注浆可提高加固土体的抗剪强度和地基承载力，降低土体压缩性，增加围护墙内侧土体的被动土压力，减少土体的压缩变形和围护墙的水平位移，增加基坑底部抗隆起稳定性和开挖边坡的稳定性。旋喷搅拌具有提高土体抗侧向的变形能力，一般在计算时可适当考虑提高加固区土的抗剪强度指标和土的侧向比例系数。

对基坑土体采用旋喷加固时，一般应用范围包括：

(1) 旋喷加固可用于基坑被动区的土体加固，可根据周围环境对围护墙外侧最大地层沉降(Δ_{\max})的限制，确定出基坑底部的允许抗隆起安全系数。

(2) 对基坑开挖的边坡的土体进行适当加固，可提高边坡的稳定性。

(3) 在围护墙外侧进行旋喷加固，以减少围护墙的侧向土压力、防止围护墙接缝漏水和堵漏及控制基坑周围构筑物的变形。

(4) 高压喷射注浆加固深度

高压喷射注浆因钻进深度较深，在软土地区的常规基坑工程中均可施工，故不作深度限制。但高压喷射注浆形成的旋喷桩桩径的离散性大，与搅拌桩桩径相比较，有一定的变化范围。

(5) 采用纯水泥浆液进行高压喷射注浆，当地下水流速较大用纯水泥浆注浆后有冲失的可能或工程有速凝早强需要时，在普通水泥中添加适量的速凝早强剂。

一般来说，下列土质的旋喷加固效果较佳。砂性土 $N < 15$ ；粘性土 $N < 10$ ；素填土，不含或含少量砾石。对于坚硬土层、软岩以上的砂质土以及 $N > 10$ 的粘性土、人工填土层等土质条件则需要慎重考虑。对于含有卵石的砾砂层，因浆液喷射不到卵石后侧，故常需通过现场试验确定。

旋喷桩的平面布置需根据加固的目的给予具体考虑。为了提高基坑土体的稳定和减少围护墙的变形，其平面布置一般采用格栅性布置。

24.2.4 土体水平加固技术

以往地基加固，受限于施工工艺和施工设备能力的限制，仅对地基进行竖向处理，近年来，随着国家经济和技术的发展，一种水平或斜向地基处理技术也已经在工程中大量运用，并已经形成《加筋水泥土桩锚支护技术规程》(CECS147-2004)。该工艺具有向土体中实现多方向加固的特点，通过对坑外土体侧向加固实现基坑稳定，是旋喷和搅拌桩土体加固技术的发展，优于现行常规的单向加固技术。该加固工艺利用专用螺旋钻机在土体中成孔，在成孔同时通过螺旋钻机向土体喷射水泥砂浆液，浆液同砂土混合成水泥土，退出螺旋钻杆时(也可插入钢筋等筋材)在施工区域形成水泥土凝固体。该工艺对土体的加固具有主动的特点，可用于堤坝、基坑围护、边坡、隧道等软弱土层的加固。

该技术已成功用于广州、杭州等地的建筑基坑工程，最大加固深度达到 10m 以上，取得了一定的工程经验。该工法采用侧向加固时是在开挖过程中实现的，故需要考虑严密的动态施工管理措施，并加强监测与试验，以确保工程施工和环境处于安全可控的范围内。此外，由于城市规划红线的限制，该工法在城市建筑基坑中应用时，尚需考虑筋材的回收，以避免对城市地下空间的不利影响。

24.2.5 坑内降水预固结地基法

1. 降水技术发展简述

上海软土层因地下水位高且有砂质粉土或夹薄层粉砂，挖深时容易发生流砂现象。自上个世纪 50 年代来，一直对降水井技术进行试验和实践，取得了很大成效。目前的降水技术包括轻型井点、喷射井点、电渗技术、深井降水等技术^{[5][8]}，已广泛应用于上海的淤泥质粉质粘土或粘土夹薄层粉砂的软土地层，也应用于粉砂、细砂和砂质粉土等地层。排水固结法施工设备简单，费用低，对环境无污染。

2. 降水作用和地质条件

在基坑内外进行地基加固以提高土的强度和刚性，对治理基坑周围地层位移问题的作用，无疑是肯定的，但加固地基需要一定代价和施工条件。基于工程经验，在密实的砂(粉)土采用降水的方法加固被动区的土体是经济合理、行之有效的方法。港口陆域或工业建筑的堆场一般通过降水和真空予压的方法来加固场地地基土的强度。实践表明，通过降低地下水位，可以排除土体中的自由水和部分空隙水，空隙水压力逐渐消散，有效应力增加，土体的

抗剪强度随着有效应力的增加而提高,达到加固坑内土体的目的,同时也可减少开挖过程的坑内土体的回弹,对环境保护有利。

一个场地的地质条件,将决定降水或排水的形式^[8]。如果地下水位以下的土层为一般均匀的、较厚的、自由排水的砂性土,则用普通井点系统或单井群井均可有效地降水,另一方面,若为成层土或粘质砂土时,则需采用滤网并适当缩短井点间距一般还要采用井外的砂粒倒滤层。若基坑底下有一薄层粘土,且下为砂层,则须考虑采用喷射井点或深井打入该砂层,用以减除下层的水压力,以免基底隆起或破坏。

在上海夹薄砂层的淤泥质粘土层中,水平渗透系数为 10^{-4} cm/s,垂直渗透系数 $\leq 10^{-6}$ cm/s,当在此地层中的降水深度为 17~18m,自地面挖至坑底的时间为 30d 时,超前降水时间 ≥ 28 d。实践说明降水固结的软弱粘土夹薄砂层强度可提高 30% 以上,对砂性土效果则更大。大量工程的总结资料可证明适宜降水的基坑土层,以降水法加固是最经济有效的方法。为提高降水加固土体的效果,降水深度要经过验算而合理确定,如图 24-1。

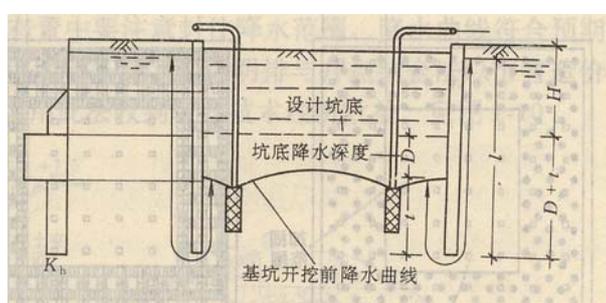


图 24-1 坑内降水预固结地基加固图

在市区建筑设施密集地区,对密封性良好的围护墙体基坑内的含水砂性土或粉质粘土夹薄砂层等可适宜降水的土层,合理布设井点,在基坑开挖前超前降水,将基坑地面至设计基坑底面以下一定深度的土层疏干并排水固结,既方便了土方开挖,更有利于提高围护墙被动区及基坑中土体的强度和刚度。降水加固方法受到土层条件的限制,对软土地基而言,其天然承载力很低,渗透系数较小,其排水作用的时间很长,如无水平向的夹砂层采用井点降水是很难有明显效果的,故而在基坑工程中的应用应慎重考虑。

一般在降水加固前须进行地质和环境调查,以判断其实施是否符合工程实际情况,或改用其他有效的加固方法。通过现场抽水试验,主要反映土体性能的变化,包括土体孔隙比、含水量、强度指标等数值,为此需进行降水效果检测。在上海粘性土夹有薄层砂层或粘土与砂性土互层的地质条件下,以井点降水加固土体,效果明显,使用广泛。此外,在选用本方法时,应考虑降水期间对四周环境可能的不利影响和经济费用,并采取措施予以消除此不利影响。

有关各种不同颗粒的土层或渗透系数采用的各种降水方法及降水设计及施工的详细说明见第 8 章和第 22 章有关内容。

24.3 基坑土体加固设计

当基坑支护工程设计及施工过程中存在下列情况时,应采取适当的地基处理措施:

- ① 基坑地基不能满足基坑侧壁的稳定要求;
- ② 对周围环境的预计影响程度超出有关标准;

- ③ 现有地基条件不能满足开挖、放坡、底板施工等正常施工要求；
- ④ 基坑开挖过程中暴露出的质量问题，严重影响基坑施工及基坑安全。

对于有管涌和水土流失危险之处则更须预先进行可靠的预防性地基处理。必须加固的位置和范围要选在可能引起突发性灾害事故的地质或环境条件之处，包括但不限于以下条件：

① 液性指数大于 1.0 的触变性及流变性较大的粘土层，基坑开挖较深，墙前土体有可能发生过大的塑性破坏；

- ② 地下水丰富的松散砂性土或粉砂土层；
- ③ 坑边设备重载区或坑外有较大的超载，或坑外有局部的松土或空洞；
- ④ 基坑附近有重要的保护设施或对沉降较敏感的建筑设施；
- ⑤ 坑周边有较大的边坡或较大的水位差；
- ⑥ 坑内局部加深区域的加固。

基坑土体对基坑和环境的影响是一个综合因素，与基坑结构型式、基坑规模与开挖深度、基坑环境保护要求、施工技术水平等有关，故基坑土体加固设计也应综合考虑上述因素的影响。基坑变形及对环境的影响程度与土性和环境状况有关，基坑土层条件和环境变化较大，单一基坑的周围环境往往也有较大区别，故坑内被动区域的土体加固设计应区别对待，以达到加固设计合理，工程投资经济、环境安全的社会效果。

24.3.1 基础资料的收集与分析

为做好加固设计方案比较，必须强调准确的地质勘察资料对加固设计的重要意义。必须具备工程场地各层土在深度和水平向的准确分布和层位标高，以及详尽的物理、力学、化学性质指标和地下水状况的资料。工程地质勘察应查明加固土层的分布范围、含水量、孔隙率等土体的物理力学性质指标。尤其要准确测定土的 pH 值、有机质含量、粘土矿物成分和颗粒组成，以免发生误导而引起工程事故。故在基坑土体加固设计前应予以查明，以便更合理地选择不同地质特性条件下的加固方法。

24.3.2 基坑加固方法的确定

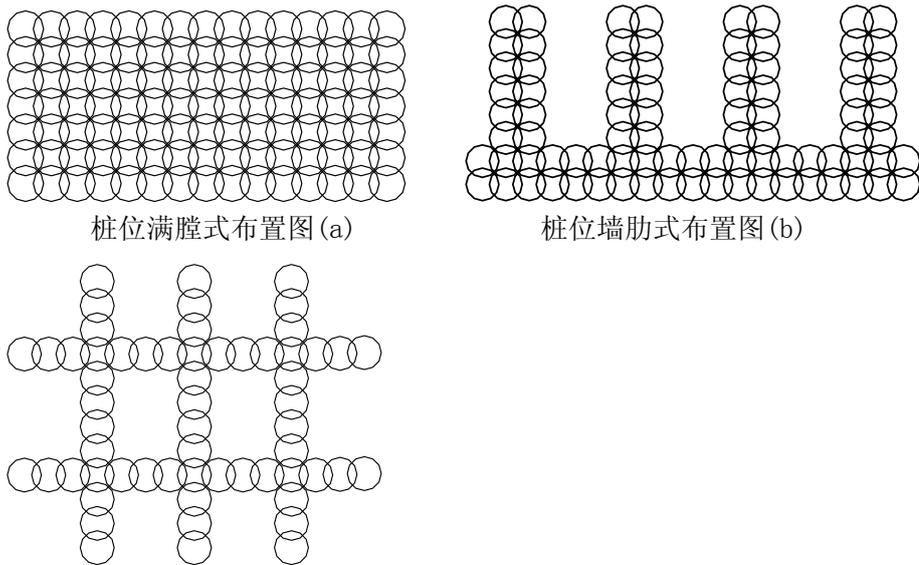
基坑开挖前，应根据基坑稳定和变形控制要求进行基坑支护设计，并进行开挖对地基稳定或地层位移对保护对象影响的计算分析。根据地质水文条件和基坑开挖施工参数所设计的支护结构体系，预测基坑周围地层位移。当经过精心优化围护墙及支撑体系结构设计及开挖施工工艺后，预测周围地层位移仍大于保护对象的允许变形量时，或基坑和环境存在安全困难和风险较大问题时，则必须考虑在计算分析所显示的基坑地基薄弱部分，预先进行可靠而合理的地基加固，使基坑变形符合要求。

基坑支护结构类型繁多，基坑工程周边环境各具特色，地质状况复杂，当对基坑土体采取加固时，首先需考虑加固区域的确定与加固方案的比较。确定地基土加固方案时应根据加固目的、周边环境、场地地质条件及施工条件、预期处理效果和造价等初步选定几种加固方案，进行综合技术经济对比分析，从中选出相对经济合理的加固方式，必要时也可采用两种处理方法联合使用或同时加强围护结构整体性和刚度的综合处理方案。

基坑土体加固设计应包括选择基坑土体加固处理方法的理由及多种经济技术比较、加固体平面布置和竖向布置及构造要求等，并对土体加固材料配比、水灰比、强度、基坑土体稳定或变形等进行计算复核。

24.3.3 基坑加固体的平面布置

1. 基坑土体加固桩位排列布置形式包括满膛式、格栅式、墙肋式等^[5]，见图24-2。



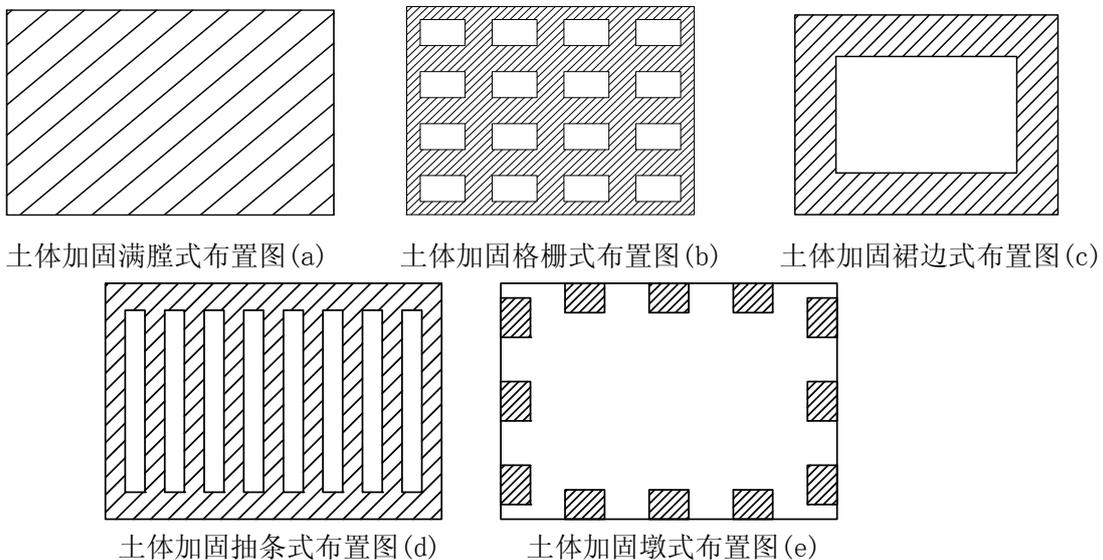
桩位满膛式布置图(a)

桩位墙肋式布置图(b)

桩位格栅式布置图(c) 图 24-2 基坑土体加固桩位排列布置形式

桩位满膛式布置的地基加固成本较大,一般仅应用于基坑外侧环境保护要求较高的与基坑对应的被动区域或基坑面积较小的区域。

2. 基坑土体加固的平面布置包括加固体宽度、顺围护边线方向的长度、间距,平面加固孔位布置原则、土体置换率要求等。基坑土体加固的平面布置原则上同水泥土重力坝的布置。土体加固平面布置形式包括满膛式、格栅式、裙边式、抽条式、墩式、墙肋式等^[5],见图24-3。



土体加固满膛式布置图(a)

土体加固格栅式布置图(b)

土体加固裙边式布置图(c)

土体加固抽条式布置图(d)

土体加固墩式布置图(e)

图 24-3 基坑土体加固平面布置形式

上述土体加固满膛式布置图、格栅式布置图、抽条式布置图一般用于基坑较窄且环境保护要求较高的基坑土体加固中。土体加固裙边式布置图一般用于基坑较宽且环境保护要求较高的基坑土体加固中。土体加固墩式布置图一般用于基坑较宽且环境保护要求一般的基坑土体加固中。

24.3.4 基坑土体加固的竖向布置

基坑土体加固竖向布置形式包括坑底平板式、回掺式、分层式、阶梯式等^[5],见图24-4。

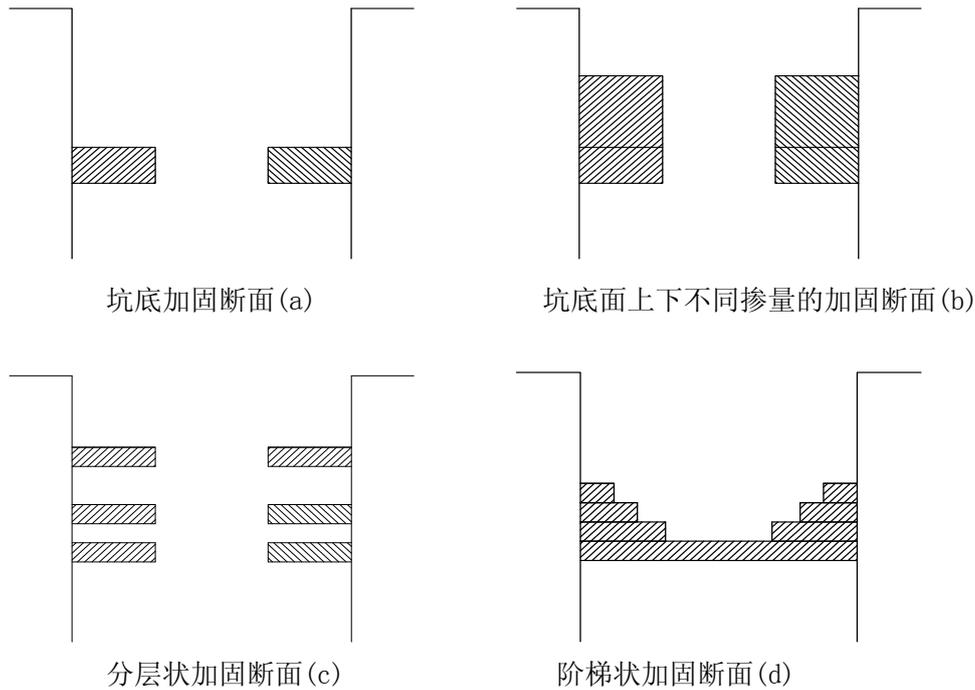


图 24-4 基坑土体加固竖向布置形式

24.3.5 基坑土体加固的构造

1. 加固体置换率

基坑土体加固体平面（置换率）和断面布置及固化剂掺量与基坑开挖深度是一个比较复杂的系统关系，很难通过单一数据予以确定，建立完全对应的比例关系在目前的技术条件下也是不现实的，必须结合不同的施工工法实践和工程经验确定，必要时进行计算复核。

有环境保护要求时或考虑加固后的土体 m 值或 k 值提高的坑内加固宜用格栅形加固体布置，其截面置换率通常可选择 0.5~0.8，在基坑较深或环境保护要求较高的一级或二级基坑中，可选用大值，反之可取用小值。

2. 加固体的搭接和垂直度要求

相邻桩的搭接长度不小于 150mm。桩的垂直度不小于 1/100。紧贴围护墙边的一排桩体宽度不宜小于 1.2m，宜连续布置，且应采取措施确保加固体与围护墙有效密贴，如搅拌桩和墙体之间的空隙应采用旋喷桩密贴。

3. 加固体水泥掺量与加固体强度

根据开挖深度和环境保护等级确定其固化剂掺量和强度技术指标。加固体材料技术指标，包括加固体材料强度指标（水泥标号）、水泥掺量、加固体龄期、加固体强度等。加固时水泥（固化剂）掺入量，是以每立方被加固软土所拌和的水泥重量计。加固体的强度取决于水泥掺合量和龄期，其能掺入土中的固化剂含量因施工工法的不同而有所区别，对水泥固化剂而言，常用的水泥种类为普通硅酸盐水泥、矿渣水泥。基坑土体加固时的固化剂掺量和强度指标，受施工工法的限制，其能掺入土中的固化剂含量因施工工法的不同而有所区别，有关加固工法的水泥掺量及加固体强度一般如下：

(1) 注浆加固时水泥掺入量不宜小于 $120\text{kg}/\text{m}^3$ ，水泥石加固体的 28 天龄期无侧限抗压强度，比原始土体的强度提高 2~3 倍；

(2) 双（单）轴水泥石搅拌桩的水泥掺入量不宜小于 $230\text{kg}/\text{m}^3$ ，水泥石加固体的 28 天龄期无侧限抗压强度 q_u 不宜低于 0.6MPa；

(3) 三轴水泥石搅拌桩的水泥掺入量不宜小于 $360\text{kg}/\text{m}^3$ ，水泥石加固体的 28 天龄期无侧限抗压强度 q_u 不宜低于 0.8MPa；

(4) 旋喷加固时水泥掺入量不宜小于 450 kg/m^3 ，水泥石加固体的 28 天龄期无侧限抗压强度不宜低于 1.0MPa；

上述水泥掺量及其强度的关系不是绝对的，因地层条件和环境保护要求有别。在固化剂种类和掺入量相同的情况下，浆液喷搅时，土的天然含水量越低，加固土的强度越高。此外，不同种类的土在相同的水泥掺入量的条件下，两者的加固体强度有差别，但其强度随土中含水量增大而减少的递减率比较接近。对有少量有机质含量和淤泥质粘土层厚度较大的地段及暗浜、杂填土、松散砂、淤泥质土，或流塑状土等，应适当增加水泥掺量，或通过加固试验确定。对重要复杂的基坑工程或基坑比较深且环境保护要求高的基坑工程，应进行现场加固试验确定其适应性，合理确定加固方法和加固强度。考虑加固体的 m 或 k 值采用比相应土体本身高的数值时，必须满足相应的水泥掺量要求。

搅拌法或高喷法的水泥用量较大，造价也高，且对空气和地下水环境有一定的污染作用。所以寻求经济合理且环保，以降低工程投资且又环保的加固方法或加固材料是急需研究探讨的课题之一。为推动地基土固化剂技术的发展，可考虑选择水泥固化剂以外的固化材料，但应选择场地土壤进行现场试验，并与采用水泥固化剂材料加固时的试验效果进行对比确定。

4. 加固体强度与龄期的关系

加固体的无侧限抗压强度比原始土体的抗压强度可提高数十倍以上，但加固体的强度与土质及含砂量、龄期、水泥品种及掺入比、土的含水量、外掺剂、水灰比等有关。水泥石的抗压强度随加固龄期而增长，它的早期强度增长并不明显，在低温条件下，水泥石的强度随龄期增长更慢。强度增长主要发生在龄期 28d 后，并且持续增长至 120d，其增长趋势才减缓。在深基坑中可利用水泥石的后期强度，但在浅基坑中则是不利因素，往往会因为工期提前开挖而发生基坑坍塌事故。

5. 搅拌加固体上部引孔段回掺要求

开挖面以上的固化剂回掺量应与施工工法的特点结合，并考虑坑边环境和基坑深度的影响。工程实践表明，以往采用搅拌工艺时基坑上段回掺 7% 的水泥掺量，加固效果往往达不到工程要求，低水泥回掺量并不符合工程计算对土体的力学性能指标要求，故而造成实测的墙体变形远大于计算值。因此，当环境保护要求较高的情况下，坑底以上适当高度宜采用与坑底接近的掺量搅拌回掺，更不能全部空钻。

6. 加固体外掺剂要求

加固体掺加外掺剂是为了改善水泥石加固体的性能和提高早期强度。由于土性的差别，水泥石强度和增长速度也有区别，为提高加固的效果，需根据不同的土性选用相应合适的外掺剂和掺量。加固体外掺剂应考虑加固土的土性（暗浜、软弱土、有机土、回填区、砂性）、开挖深度、周边环境等因素。经常使用的外掺剂有碳酸钠、氯化钙、三乙醇胺、木质素磺酸钙等。通过掺加外掺剂以改善水泥石加固体的性能和提高早期强度，但相同的外掺剂以不同的掺量加入于不同的土类或不同的水泥掺入比，会产生不同的效果。

借此介绍一种特种粘土固化浆液技术，该特种粘土固化浆液由特种结构剂、水泥、粘土、水配制而成，具有优于现行普通水泥浆液、水泥粘土浆液等多项性能。如浆液具有析水率低、稳定性高和结石率高、胶凝时间短和早期强度上升快、固化结石体强度高等特点。工程应用无环境污染、施工简便、造价很低。可用于港口码头、堤坝、基坑围护、边坡、隧道、采矿等注浆防渗加固，该技术已成功用于安徽马钢公司姑山矿采场东帮 100m 高边坡、广西南宁邕江防洪大堤江滨医院段、广西龙州金龙水库主坝、江西萍乡芦洞水库大坝和红旗水库大坝、北京地铁 5 号线雍和宫站回填土地基等几十个工程，取得了显著的技术经济效益。2004 年通过水利部科技成果鉴定，2005 年获得中国发明专利授权和广西壮族自治区政府科技进步一等奖。该技术运用于广西龙州县境内的金龙水库的堵漏加固取得成功。该金龙水库位于岩溶地区，岩溶类型繁多、发育强烈，库水大量外漏，坝头与基岩衔接处常年大量漏水，虽然过去经过历年多次注浆堵水处理（采用普通水泥浆液、水泥粘土浆液注浆），但是收效一直不显著。采用特种粘土固化浆液技术处理后，进行注浆施工效应检测结果，检测结果完全符

合设计要求。由抽取的岩芯可见，特种粘土固化浆液的结石体与碎石、土之间密实结合，见下图 24-5。



图 24-5 注浆加固体的岩芯图

24.4 基坑典型加固设计

基坑变形及对环境的影响程度与土性和环境状况密切相关，基坑土层条件和环境变化较大，单一基坑的周围环境往往也有较大区别，故土体加固设计应区别对待。土体加固方法和加固范围应考虑土层条件和环境保护等级等因素，具体的加固工法与加固范围的选用可参见相应区域的加固设计。加固方法的选择尚需考虑环境保护方面的要求，如在采用水泥土加固时应考虑是否对绿化等树木产生污染，在采用降水法加固时应考虑是否对坑外地面设施等产生不利影响。

影响基坑稳定和围护变形的主要区域包括坑内被动区、局部深坑区、放坡开挖边坡区域、坑外重载区域等位置，故基坑土体加固的范围主要是指这些相关区域的软弱土体加固。

对环境保护要求较高的基坑墙体变形必须进行设计控制，明确对地基处理范围和经地基处理后的技术指标，以便施工的可操作性，并满足工程安全和环境保护要求。

24.4.1 坑内被动区的土体加固设计

基坑工程中，过大的墙体变形即表明坑内地基已经处于塑性发展状态，局部地基已经进入破坏状态，故对墙前的地基土的压力应进行限制或对土体进行加固以满足水平承载能力或满足地基稳定要求。坑底加固应有足够的宽度和深度以有效提高坑底地基土的强度和增强被动土压力的作用。

在邻近建筑设施的流塑、软塑粘性土层中的深大基坑，为控制围护墙的侧向位移，在基坑开挖前超前一定时间，对围护墙被动区，可采用水泥搅拌桩、旋喷桩、或分层注浆法进行加固。加固范围及加固土体力学性能要求，除与基坑深度、平面几何尺寸、地质条件、支护结构体系特征相关外，与施工工艺及施工参数有很大关系，对于采用现浇钢筋混凝土支撑的基坑，即使精心地分层、分部、对称、平衡和限时地开挖及支撑，地下墙卸荷后的无支撑暴露时间 T_r 也要 $\geq 48h$ ，而采用钢支撑的基坑，精心的施工可将 T_r 控制在 $\leq 24h$ 。在同样地质环境条件下，采用现浇钢筋混凝土支撑的基坑，围护墙被动区加固范围和力学性能要求要大 50%~100%，视地质条件而定。

基坑变形及对环境的影响程度与土性和环境状况有关，基坑土层条件和环境变化较大，单一基坑的周围环境往往也有较大区别，故坑内被动区域的土体加固设计应区别对待，以达到加固设计合理，工程投资经济、环境安全的社会效果。

基坑土体加固的平面布置包括加固体宽度、顺围护边线方向的长度、间距，平面加固孔位布置原则、土体置换率要求等。坑内加固平面布置的各种构造布置形式可参见水泥土重力

坝的布置。有环境保护要求时或考虑加固后的土体强度提高的坑内加固宜用格栅形加固体布置，其截面置换率通常可选择 0.5 以上，采用搅拌桩工艺的相邻桩搭接长度不小于 150mm，紧贴围护墙边的一排桩体宜连续布置，且应采取措施确保加固体与围护墙有效密贴。

对基坑环境保护等级一级的基坑土体加固的质量可靠性要求高。比较而言，地基加固工法中的三轴搅拌桩和旋喷桩施工工艺相对成熟，且加固体的深度和强度能满足深基坑对加固体的要求，故推荐在环境保护等级一级的基坑被动区土体加固，建议优先考虑采用三轴搅拌桩或旋喷桩施工工艺。坑底面以下加固体深度一般不宜小于 4m。坑底被动区加固体宽度可取基坑深度的 0.5~1.0 倍，同时不宜小于最下一道支撑到坑底距离的 1.5 倍，且不宜小于 5m。

采用搅拌法工艺时在坑底面以上回掺水泥仅用于支撑道数为二道及以上的情况。开挖面以上的固化剂回掺量应与施工工法的特点结合，并考虑坑边环境和基坑深度的影响。工程实践表明，以往采用搅拌工艺时基坑上段回掺 7% 的水泥掺量，加固效果往往达不到工程对土体的力学性能指标要求，故而造成实测的墙体变形远大于计算值。因此，当环境保护要求较高时，坑底面以上回掺高度和回掺量需综合考虑，并满足围护结构和环境的安全要求。当为砂性或粉性地基时，宜全断面回掺，或改用其他有效的加固方法。

围护墙被动区加固形式如图 24-6。

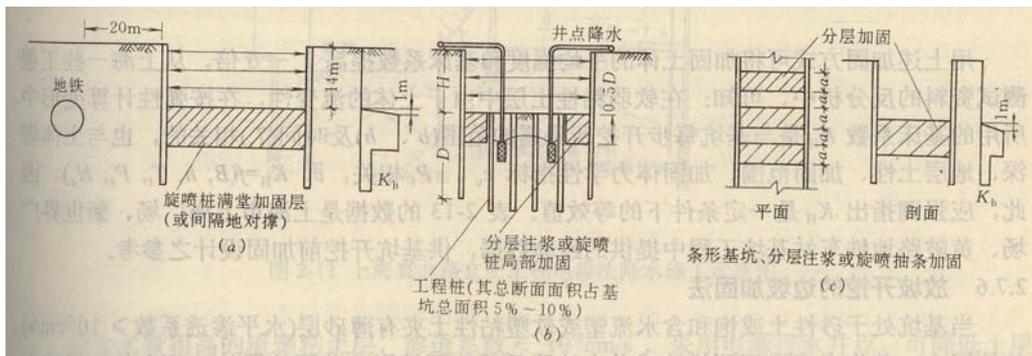


图 24-6 基坑围护墙被动区加固图

从上海地区一些工程测试资料的反分析可知，经过可靠有效的地基加固后，加固体的土体无侧限抗压强度和基床系数可提高 2~6 倍。但考虑土体的离散性和加固体的不均匀性及软弱土体的流变性，在按弹性计算变形中的水平基床系数与基坑开挖所暴露的范围和时间、土层性性质与开挖深度、加固体范围和力学性能指标等有关。在环境保护要求下，应考虑水泥土加固体的不均匀性和卸荷对岩土指标的影响，故水平基床系数的取值需综合考虑选用。

坑内被动区加固平面布置可采用裙边连续式、壁状式、格栅式、墩体式、对撑等形式。坑内加固布置宜使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体。考虑到坑内有工程桩影响及加固深度的因素，在满足工程要求的前提下，加固截面置换率取值较水泥土搅拌桩的重力坝小，但加固截面置换率不宜小于 0.50。相邻加固体宜有效搭接，搭接长度不宜小于 150mm。近坑壁一排加固体宜连续布置，加固体与围护墙之间的空隙应采取注浆或旋喷等措施进行加固。基坑坑底面以下加固体深度不宜小于 4m，坑底被动区加固体宽度不宜小于 5m。当开挖较深或环境保护有特殊要求时，加固宽度应进行专门分析确定。当坑底抗隆起、抗管涌不足或存在大面积承压水难以用帷幕隔断时，基坑底面可采用满堂加固。

在重力式基坑中，当重力式挡墙地基产生的沉降影响支护结构稳定及周围环境安全时，应对墙趾部分的地基土加固。对边长 L 较大的基坑，宜在中间局部增加墙宽或坑内加固体，以形成土墩，减小墙体位移。

对基坑环境保护等级一级的基坑被动区土体加固的质量可靠性要求高。比较而言，地基加固工法中的三轴搅拌桩和旋喷桩施工工艺相对成熟，且加固体的深度和强度能满足深基坑

对加固体的要求，故推荐在环境保护等级一级的基坑被动区土体加固，建议优先考虑采用三轴搅拌桩或旋喷桩施工工艺。

图 24-7 是基坑被动区土体加固的实例。该基坑地面积为 19200m^2 ，开挖深度为 13.1m 。围护墙采用钻孔桩加搅拌桩的挡土止水结构，采用临时钢筋混凝土内支撑顺作法施工。该工程周边有各种城市地下管线，基坑东侧 9m 处有两层旧民宅。该侧被动区的土体采用双轴水泥土搅拌桩加固，搅拌桩的平面采用空腹封闭式格栅状布置。它在深度方向采取长短结合形式。搅拌桩的垂直偏差不得超过 1% ，桩位偏差不得大于 50mm ，桩径偏差不得大于 4% 。为加强加固土体的整体性，相邻搅拌桩的搭接长度为 200mm 。该基坑被动区的土体经过双轴水泥土搅拌桩加固后，有效地控制了围护墙的变形，基坑外的地面沉降和民宅建筑沉降也被控制在允许范围内。

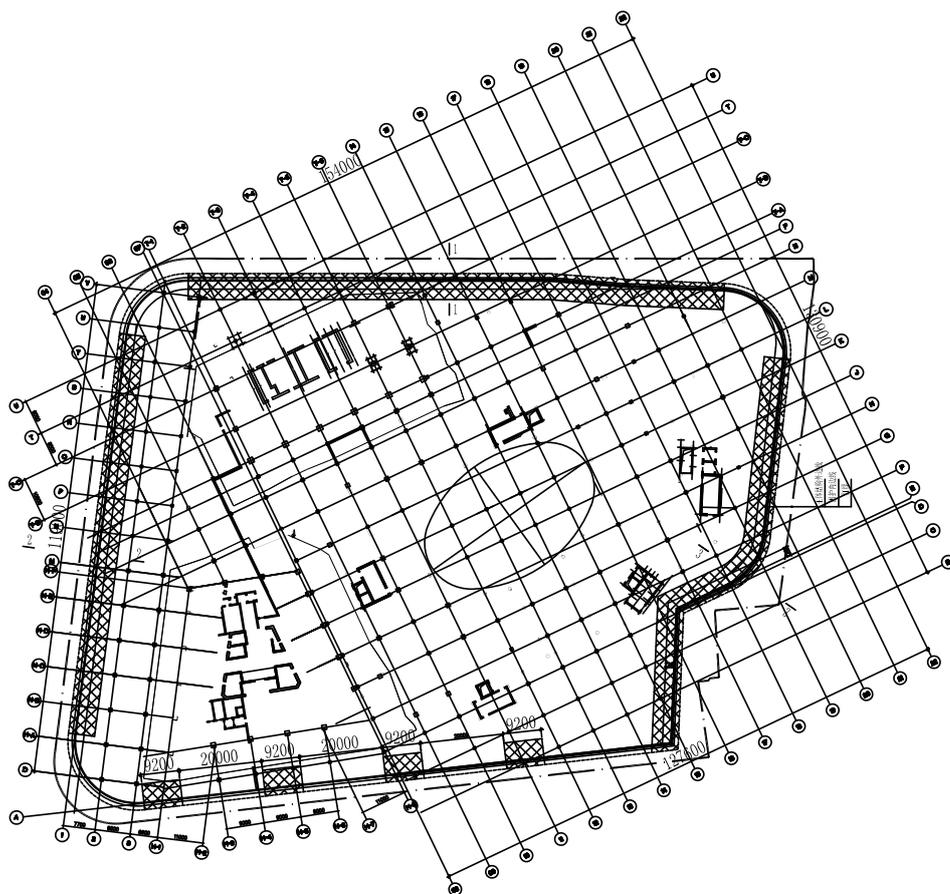


图 24-7a 鹏欣家纺中心基坑土体加固平面图

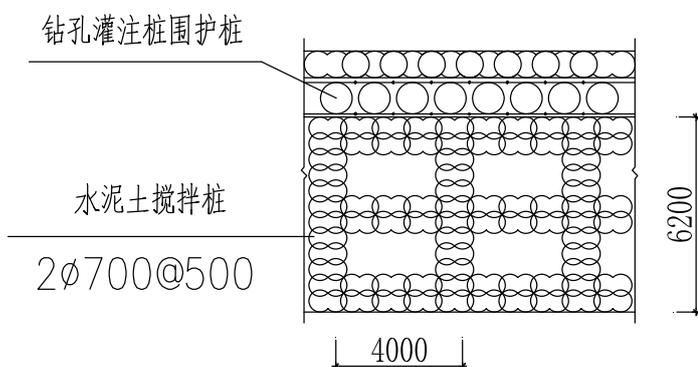


图 24-7b 鹏欣家纺中心基坑土体加固详图

图 24-8 是紧邻地铁隧道保护区的基坑被动区土体加固布置实例图。基坑占地面积为 3200m²，开挖深度为 14.75m。围护墙采用“二墙合一”的地下连续墙围护结构，采用临时钢筋混凝土内支撑顺作法施工。该工程位于上海市南京东路与贵州路转角处，工程周边除有各种城市地下管线外，基坑北侧南京东路步行街下尚有正在运营的 R2 线地铁隧道，其上行线隧道外边至地下室围护墙边线的水平距离约 8.0m。根据上海市地铁管理条例，在地铁边的深基础工程施工应满足以下条件：在地铁工程（盾构隧道外边线）两侧的临近 3.0m 范围内不能进行任何工程，地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量≤20mm，相对弯曲曲率≤1/2500。地铁边的基坑围护墙体最大水平位移≤0.14%H。

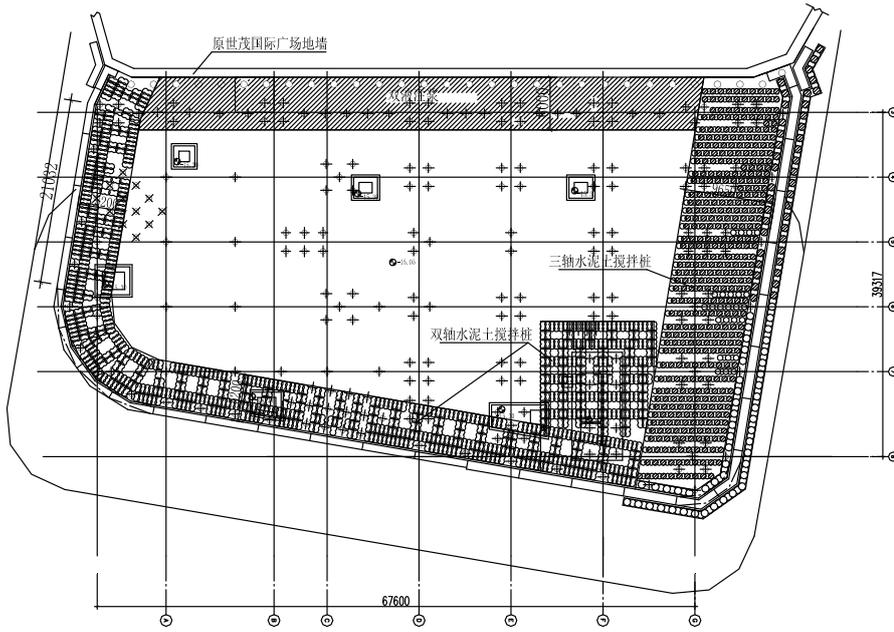
基坑围护设计参数表见下表。

基坑围护设计参数表

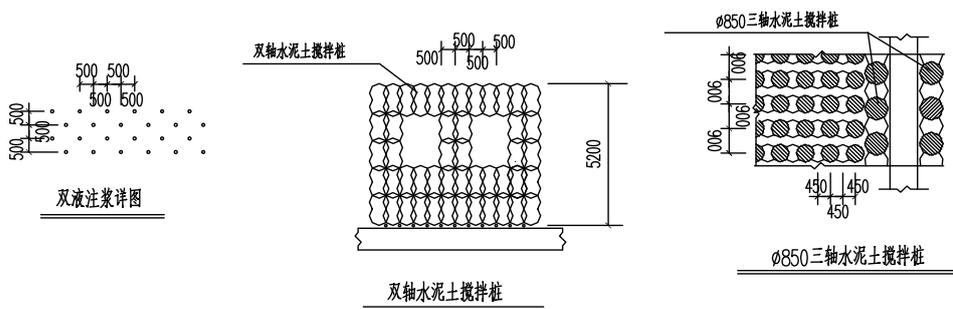
层号	土层名称	固结快剪		静止侧压力系数	十字板抗剪强度	三轴 UU 试验		原位渗透系数
		C (Kpa)	φ	K ₀	Su (KPa)	C _u (KPa)	φ _u (度)	K (cm/s)
②	粉质粘土	19	20	0.46	47.6	76	0	
③	淤泥质粉质粘土	10	18	0.52	24.8	36		2.778x10 ⁻⁵
④	淤泥质粘土	13	10	0.57	23.2	30		6.70x10 ⁻⁶
⑤1	粉质粘土	14	22	0.50	46.6	56		6.203x10 ⁻⁶
⑤3	粉质粘土夹粉砂	14	26	0.41	82.3	119		1.405x10 ⁻⁵

从工程范围内的地质剖面图可知，开挖深度范围内大多为第④层淤泥质粘土，开挖被动区的土质较差，为流塑状，对基坑稳定不利。在模拟施工工况的有限元计算分析过程中，土体弹簧刚度大小对基坑变形有很大影响。为此需考虑地基加固措施，在基坑内采用搅拌桩加固，加固深度为 4.0m，加固进入坑底以下的第⑤层土顶面，双轴搅拌桩水泥掺量为 14%，加固后土体养护期要求不少于 28 天，加固体无侧限抗压强度不低于 0.8Mpa。基坑开挖面以上回掺至至第一道支撑底面，回掺量为 8%左右，要求回掺区土体强度两倍于原状土体强度。南京东路一侧紧邻地铁 R2 线侧的围护墙前的加固宽度增加至 9.65m，采用三轴工法（Φ650@450）加固地基，水泥掺量为 20%，加固后土体养护期要求不少于 28 天，加固体无侧限抗压强度不低于 1.0Mpa。基坑开挖面以上回掺至至第一道支撑底面，回掺量为 10%左右，要求回掺区土体强度两倍于原状土体的强度。

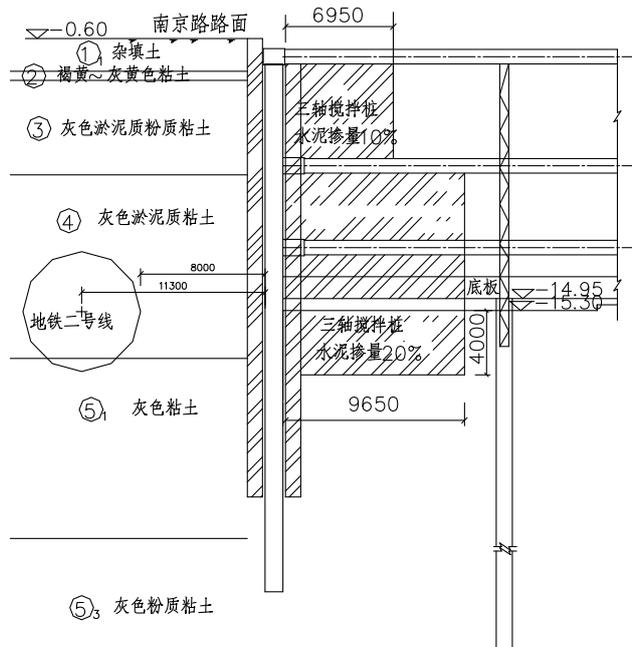
工程实践表明，基坑近地铁侧被动区的土体经过三轴水泥土搅拌桩加固后，被动区土体的抗剪强度得到提高，减少了土体的蠕变，有效地控制了该侧围护墙的变形，基坑外侧的地铁隧道最大变位小于 12mm，确保了地铁 2 号线隧道的正常使用。



土体加固平面图(a)



土体加固平面布置详图(b)



土体加固剖面图(c)

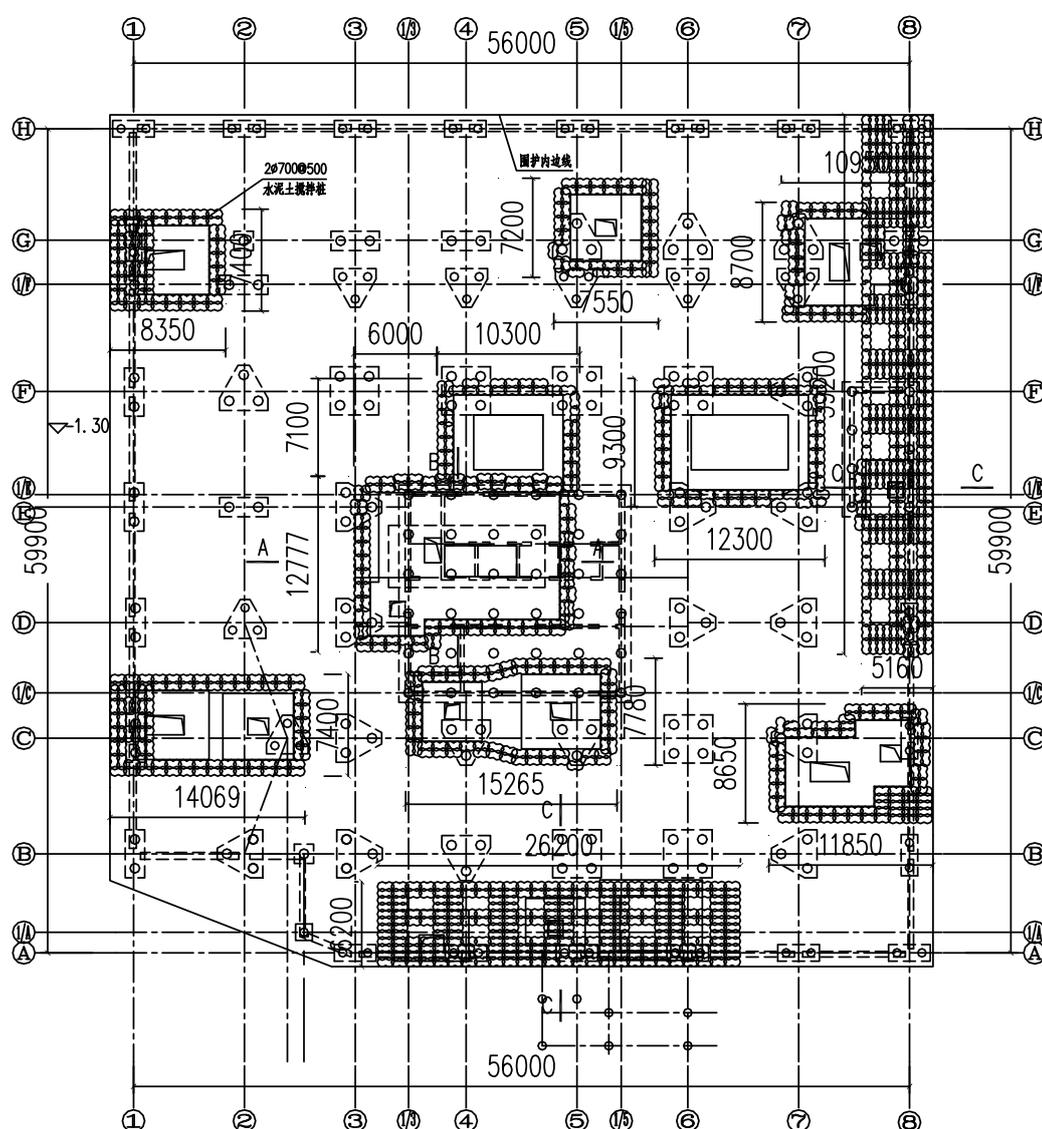
图 24-8 是紧邻地铁隧道保护区的基坑被动区土体加固布置图

24.4.2 局部深坑的土体加固设计

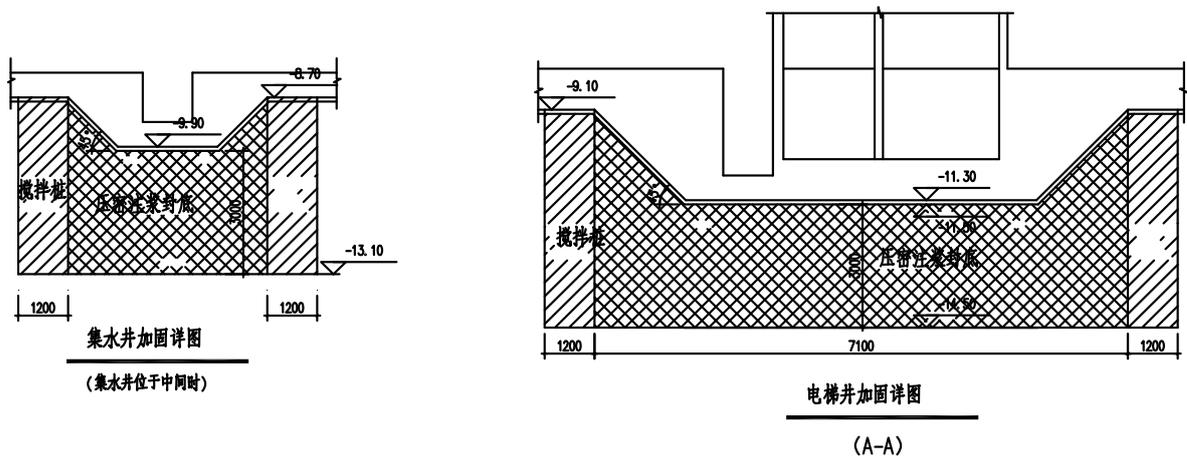
局部深坑一般指超深大于 2m 的坑中坑等状况，局部深坑的土体加固包括深坑边坡的加固和深坑坑底的土体加固(图 24-9)。局部深坑区域的土体加固应根据基坑不同地质特性，并考虑坑内结构(桩、坡等)及环境条件等要求，合理选择加固方法。加固体断面布置应满足局部深坑边坡和坑底稳定的要求。

局部深坑区域的加固体平面外围边线宜在坑边坡坡顶线外侧，加固体深度宜低于坑底面下不小于 1m。当局部深坑临近坑壁、局部深坑区域为流塑状的淤泥质土、松散的砂土时等软弱土层条件下，坑底宜进行封闭加固。

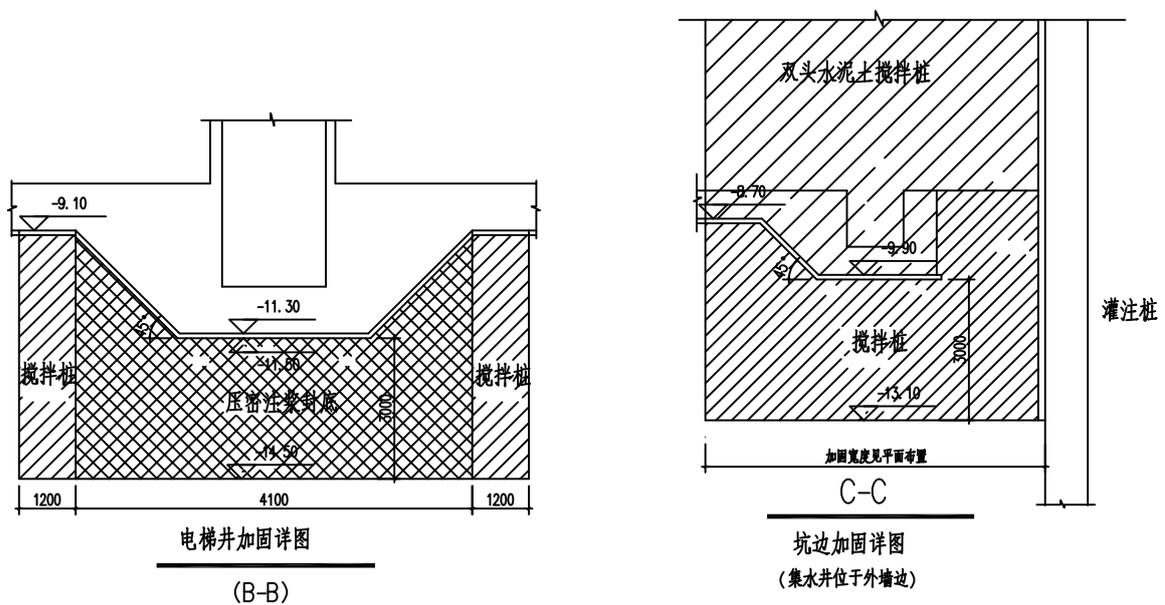
局部深坑区域加固体平面范围、加固体断面、固化剂掺量等参数的确定方法可参照被动区的土体加固。



土体加固平面图(a)



土体加固剖面图 (b)



土体加固剖面图 (c)

图 24-9 上海第二医科大学教学中心楼基坑土体加固图

一般建筑基坑坑底面有大量的工程桩，特别在塔楼区域的局部深坑边的工程桩布置密集。在基坑加固布置时应考虑一定的安全距离，以避免加固施工的困难和减少施工对工程桩的不利影响。

24.4.3 坑外重载区域的土体加固设计

1 作用于支护结构的侧压力过大，影响支护结构的稳定时，可对基坑外侧土体进行加固，提高其 c 、 φ 值，亦可内外同时加固。

2 基坑工程中的施工荷载一般比较大，尤其是重载车和材料堆场、施工平台等区域要承受较大的动荷载，对地基土产生较大的扰动，地面发生一定的沉降，导致围护和地下管线的过大变形。在坑外重载区域的土体提出加固要求，通过坑外土体加固，使坑外地面重载区域的荷载应力小于加固体的承载能力，以满足地基稳定要求。

3 坑外重载区域的土体加固应根据基坑浅层软弱地层条件考虑加固形式。加固方法可考虑注浆、水泥石搅拌桩、高压旋喷桩等工法。坑外加固时应有防止土体上抬的措施，施工工艺和回掺量应考虑对抗边环境的影响和保护。加固体平面外围边线和加固体深度应满足环境保护对围护墙的变形要求和地面沉降控制要求。当采用地基加固仍不满足环境保护和基坑安全要求时，可在重载通道区域设置桩基承台结构。

图 24-10 是基坑坑外重载区土体加固的剖面布置图。

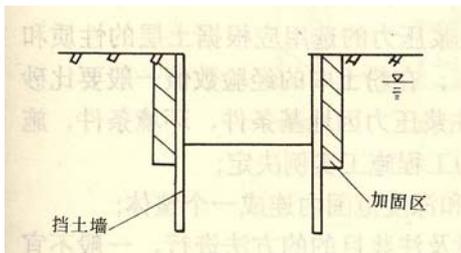


图 24-10 坑外加固竖向布置图

24.4.4 放坡开挖的土体加固设计

场地开阔，环境条件允许的情况下，经设计验算满足边坡稳定性与地基整体滑动稳定性要求时，可采用放坡开挖基坑。对开挖深度大于 5 m 的土质边坡，宜设置分级过渡平台，各级过渡平台的宽度宜为 1.0~1.5m。

当采用自然放坡不能满足边坡稳定时，则需考虑对放坡开挖的土体加固，放坡边坡区域的土体可采用降水法加固，必要时可考虑水泥石搅拌桩或注浆加固(图 24-11)。

当基坑位于砂性土或饱和含水流塑或软塑粘性土夹有薄砂层的地层中，首先应考虑采用明排法或井点降水。放坡开挖的基坑，其浅层地下水和地表水对放坡开挖的影响很大，需要对地下水进行控制，常规的方法除设置排水沟或集水井外，也可考虑在放坡平台或坡顶上设置轻型井点降水以改善土体的力学性能，降低基坑开挖影响范围内地层的地下水位，以防止开挖中动水压力引起的渗流力的作用和流砂现象。

在滨填土区域或软弱淤泥质土层区域除开挖换填方法外，也可考虑采用水泥石搅拌桩或注浆加固。边坡加固体平面外围边线和加固体深度应满足开挖边坡的整体稳定和各台阶边坡稳定。当坑顶或坑边附近有附加荷载时，坑边坡顶区域的土体宜采用水泥石搅拌桩或注浆加固。开挖面土体较差且施工周期较长的基坑，开挖坡面宜采用钢丝网水泥喷浆、喷射混凝土或高分子聚合物材料覆盖等措施进行边坡护面加固，必要时可在斜坡面土中插入筋材以提高土体的稳定性。

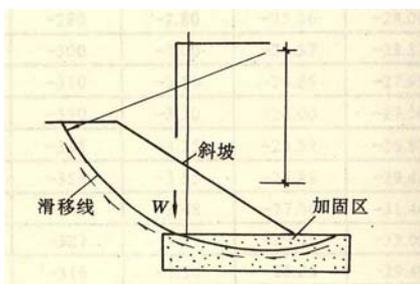


图 24-11 放坡开挖的边坡加固法

井点选型根据地质和降水深度确定，详见第 8 章和第 22 章有关内容，井点在平面和竖向布置中要注意封住降水范围，降水曲线符合预期要求，在大型放坡开挖基坑中要尽可能利

用地形条件，采用明排与井点结合法以节省造价。

工程案例一：上海浦钢搬迁宽厚板加热炉工程

上海浦钢搬迁宽厚板加热炉工程包括 1 座推钢式加热炉、2 座步进式加热炉、鼓风机房、液压站等，PHC 桩基承重。基坑总长 105m，宽 94m，开挖深为-9.5m~-12.4m，局部最深达-14.9m，基底座落于上海地区最软弱的④层土。基坑采用了多级接力大放坡开挖，总放坡系数 1:2.5，细石混凝土护坡(见图 24-12)。二级轻型井点降水+坑中真空大井降水加固方式，边坡设置了一级轻型井点射流泵 20 套泵，二级轻型井点射流泵 21 套泵，加热炉基坑内设置了深 18m 的真空大井。设备基础与土方开挖结合“分块跳仓法”施工。工程实践表明，有效的降低地下水位不仅使整个土方开挖施工场地在干燥环境下运作，更使得边坡土体的强度因降水而得到提高，大大提高了边坡的稳定性，在验算中考虑到降水效果的作用而采用了提高 50%的计算指标(土的弹性模量)，使得位移计算值接近与实测值。该工程由中国二十冶建设有限公司承建，2005 年 12 月 26 日开工，PHC 桩沉桩后开始井点降水施工，2006 年 6 月开始土方开挖，9 月结构施工完毕，工程实施获得了较大的经济效益和良好的社会效应。



图 24-12 加热炉基坑土方放坡开挖图

工程案例二：上海重型机器厂深基础基坑，东西长 78.9m，南北长 46.6m，开挖深度 7.5~11.45m。当挖土至设备基础中间最深部分时，发现基坑南面地面上出现呈圆弧形细裂缝两条，分别距基坑边为 6m 和 16m。随即在该处设立 3 个观察位移的桩，观察滑动发展情况。至第三天，基坑南 3m 处地面下沉 1.5cm，两观察桩各位移 1.2 和 1.5cm。至第七日晨，设备基础中部已有 1/3 挖到 11.45m 时，发现裂缝急剧扩大，半小时竟达 10cm。继后在-3.5m 平台处发现第三条裂缝，基坑底部出现泉眼，并有流砂及土涌现象，至此边坡滑动已趋发展，当时施工单位采取了紧急有效的措施。首先在-8m 处用 30cm 方木及 36#工字钢架设钢板桩的水平对撑；在钢板桩顶部用钢缆拉锚加固；在已挖到设计标高处分段抢做 1.0m 厚的钢筋混凝土承台板。至第十天土坡已趋稳定。

由于土坡滑动，不仅使整个基坑边缘下沉，而且钢板桩向北位移约 1.5m；厂房柱基发生位移和倾斜，有 30 根桩须补打，其中以中部靠近挖土最深处的桩基位移最大，向北移动达 1.07m，显然与深层土的滑动有关。

事后采用圆弧滑动法进行边坡的稳定计算后得知：①如果采用一级井点降水而不采用其它相应措施，则在任何情况下都将发生滑动；②如采用二级井点降水，则在堆土情况下也不能使边坡保持稳定；在无堆土情况下，其边坡稳定安全系数接近于 1；③如采用一级井点降水，同时在钢板桩间加设横撑时，才可保证上坡的稳定，但每延米约需 8 根 36#工字钢分成 2 层对撑，这对施工很不方便。

24.4.5 坑内降水加固设计

14.2.8 坑内降水法土体加固设计

1. 降水设计的一般要求与注意事项

降水井的布置要考虑与坑壁距离与水力坡度的关系。坑内采用井点降水加固土体时，降水深度一般大于坑内土体的疏干降水深度，如果止水帷幕不连续，则会发生坑外水向坑内渗漏的现象，对环境可能造成不利影响，故坑内采用井点降水加固土体时，有可靠有效的止水帷幕显得尤为重要。一般情况下隔水帷幕应尽可能地进入不透水土层。采用坑内井点降水加固土体时，应在开挖前两周进行预降水，降水深度不得小于坑底面以下 1m。

采用坑内井点降水加固土体时，考虑到土体固结度的要求，提出在开挖前 20 天进行预降水，以确保基坑开挖时墙前土体的强度满足受力要求。

坑内降水法加固地基应确保降水的可靠性，避免降水失效或降水效果消失而引发对工程安全和环境的破坏作用。

降水期间应对坑内、外地下水位及临近建筑物、地下管线等进行监测与监控，当围护墙或坑外有建筑物，或其变形速率或变形量超过警戒值时，可采用回灌水法或隔水法控制降水，以减少对环境的影响。

坑内采用井点降水加固土体时，降水深度一般大于坑内土体的疏干降水深度，如果止水帷幕不连续，则会发生坑外水向坑内渗漏的现象，对环境可能造成不利影响，这在工程设计和施工中必须给予重视。

2. 工程实例

某浅基坑工程，通过轻型井点降水，基坑深度范围内的粉质粘土和粉土的含水量，分别降低了 3.17% 和 2.17%~5.73%。降水后的含水量系在基坑开挖时取出土样的含水量。地基土在降水前后的物理力学指标发生变化。

广东文冲船厂位于广州东郊，傍依珠江，为满足航运发展需要，分别于 1963、1973 年建造了一、二号两座船坞。一号船坞于 1959 年进行水下开挖，后停工，于 1963 年复工，为确保边坡稳定，采用二级轻型真空井点降低地下水位；而后抽干坞坑积水；1973 年，于紧邻一号船坞的西侧，兴建干船坞，为保证二号船坞施工过程中，一号船坞及各厂房能正常使用，要求二号船坞的基坑具有较陡的边坡。为此，决定先做坞口围堰，后在井点降水条件下进行干开挖。一号船坞的基坑面积达到 1 万 m^2 ，集水面积为 5.8 万 m^2 ，开挖深度为 13m。地下水位高，不论潜水或承压水，在地面下 1.5m 左右。工期约为 2 年，经历梅雨季节和台风季节，暴雨集中。组成边坡的土质很复杂，土质软弱，渗透系数小，加以其是先水下开挖，后筑围堰，也增加了施工的复杂性。

工程采用二级轻型井点真空泵用 W4，离心泵用 4BA-18，一级井点总管长 60cm，井点间距 1.6m，计 397 根，共四套二级井点总管长 565m，井点间距 1.2m，计 469 根，共为四套，因工程重要，备用井 100%，全工程需 16 套轻型井点设备；

此外，尚采用一些辅助措施，包括改建防洪小土堤截水，在边坡表面布置排水沟，在基坑底部布置了排水明沟及抽水设备，以便及时排除聚积在坑底的渗出地下水或地表水，布置地下水位观测井、坡面沉降及位移观测点。工程降水前后对土的性质采用钻探及十字板强度试验。

工程实践表明，暴雨的影响并未危及坡面，乃因土已固结之故，该工程自 63 年 9 月 14 日开始井点试抽后，即遇四次暴雨，对边坡的位移和沉降影响不大。必须指出，一号坞的最大沉降量累计为平均 50cm，最大位移量近 30cm，二号坞因系采用干挖法，故最大沉降量累计为 31cm，最大位移 6.7cm。

上海新世界商城基坑工程中，以降水加固坑内土层，在基坑内设置若干套“深井泵结合真空泵降水装置”（每口井内放入一台长轴深井泵，每三口井用密封管路连接一台真空泵，进行“变流量、间断性”抽汲地下水。每 200 m^2 左右设置 1 口大井（孔径 Φ 650mm，井筒 Φ 250mm，深度 19.0m），平面布置为等边三角形（图 8-37）；小井（孔径 Φ 450mm，井筒 Φ 150mm，深 17.0m），

每 20m 左右设置 1 口小井，沿地下连续墙内侧布置(图 8-37)，设计真空度 $\geq 50\text{kPa}$ ，最终降水水位设计值为坑底以下 3.0~4.0m，降水期限：从基坑开挖前 28 天开始基础底板浇筑后 7d 结束，其中，大井降水到基础垫层浇筑后 7d 结束。降水加固后，坑内土层不排水抗剪强度提高 35%~40%，并达到软塑状态。井点平面及竖向布置见图 24-13、14。

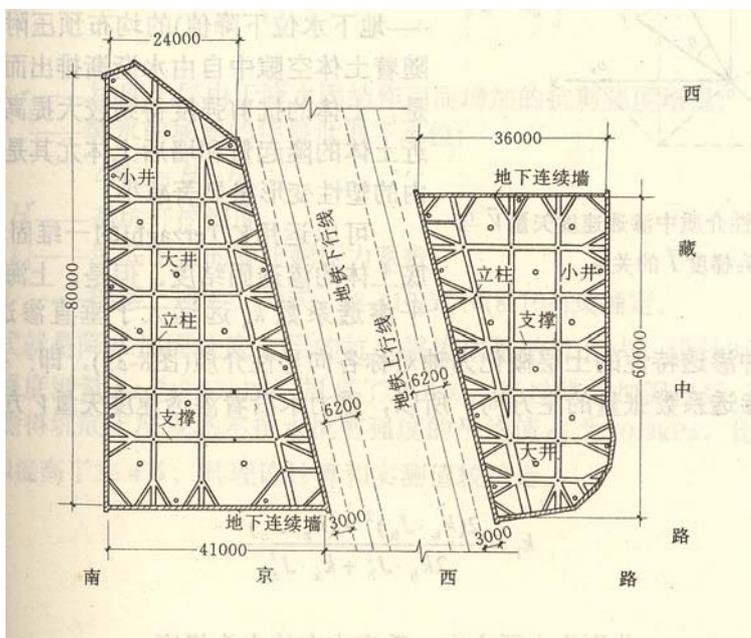


图 24-13 上海新世界商城基坑工程降水井点平面布置图

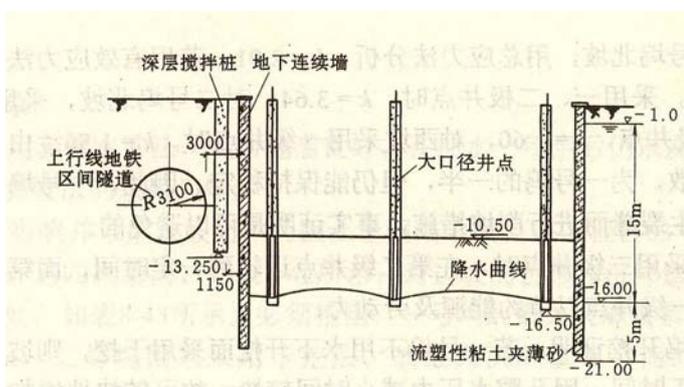


图 24-14 降水井点竖向布置图

6. 抵抗坑底承压水的坑底地基加固

当基坑坑底粘性土层以下存在有承压水的砂性上层时，坑底粘性土层要被承压水顶托上抬，乃至被承压水顶破涌砂，产生破坏性隆起，是基坑工程中最大危险事故之一。当坑底地基土不能满足抗承压水安全要求时，必须采取安全可靠的处理措施，已应用方法有以下三种：

(1) 采用高压三重管旋喷注浆法，在开挖前于基坑底面以下做成与坑周地下连续墙结成整体的抗承压水底板。上海合流污水治理一期工程中，彭越浦泵站进水总管的条形深基坑、邻近居民多层建筑，其长度 160m，宽 5.8m，深 15m，坑底不透水层仅 5m，不能承受其下 $160\text{kN}/\text{m}^2$ 的承压水压力，后采用该法得以安全完成该基坑工程，见图 24-15。

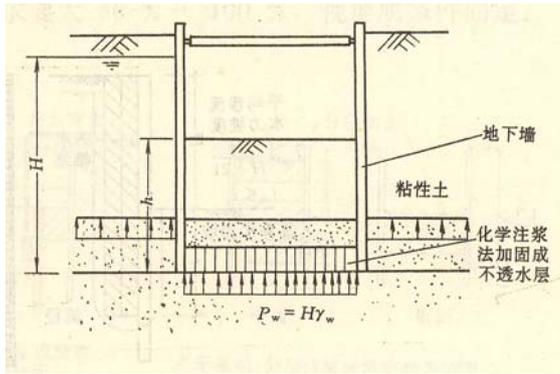


图 24-15 旋喷桩加固土体抗承压水图

(2) 采用化学注浆法或高压三重管旋喷注浆法，在开挖前于基坑周围地下墙墙底平面上做成封住基坑周围地下墙墙底平面的不透水加固土层，此加固层底面以上土重与其下面承压水压力相平衡，使基坑工程安全地完成，见图 24-16。

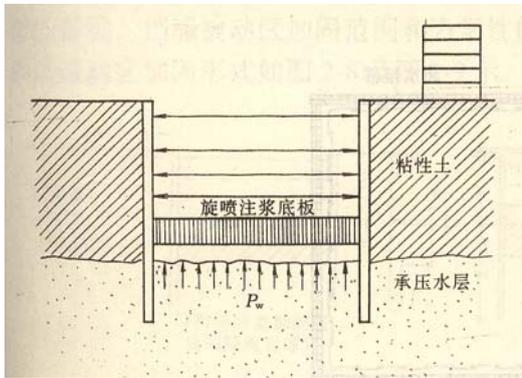


图 24-16 化学注浆法加固土体承压水图

荷兰鹿特丹市地铁区间隧道基坑工程中，用此法解决了承压水问题。

(3) 在基坑外侧或内侧以深井井点降低承压水水压，降水减压是防止涌砂最有效的措施之一。当附近有建筑物时，宜采用坑内降水或在外侧地层中用回灌水法以控制地层沉降保护建筑设施。为防止机械故障等因素，工地应有备用双路电源和备用泵，以确保正常日夜不断地运行。

关于降水设计及施工的详细说明见第 8 章和第 22 章有关内容。

24.5 基坑加固的施工、质量检测

24.5.1 基坑加固的施工

地基加固施工时应对选定方案在有代表性的地段上进行现场试验，以确定处理效果，获取技术参数。地基土加固施工前，应根据设计要求、现场条件、材料供应、工期要求等，编制施工组织设计。

地基采取加固处理属地下隐蔽工程，施工质量的控制十分重要。虽在施工时不能直接观察到地基加固的质量，但可通过施工过程中的工序操作，工艺参数和浆液浓度等因素的实际执行情况和土层的各种反应来控制加固施工质量。对所有的基坑进行土体加固试验，或现场

原位试验是不现实的。故在基坑施工过程中加强施工管理和质量控制显得极为重要。

(1) 施工管理或加固体施工要点

地基加固施工应根据工程地质、环境、基坑结构等条件编制基坑土体加固施工组织设计，应包括下列内容，但不限于此：① 土体加固概况；② 基坑土体加固的选用材料配比及强度，加固范围和布置；③ 土体加固处理施工方法的工艺及质量控制措施；④ 采用机械、设备及各种计量仪表；⑤ 施工中必要的监测及加固效果的检验；⑥ 进度计划；⑦ 主要施工操作记录表。

(2) 施工质量控制措施及要点

坑内土体加固是地基处理的一部分，施工技术要求对土体加固采取质量控制措施。

① 基坑规模大或坑边有重要保护的建构筑物时，加固效果不好时会对工程或周边环境产生较坏影响或重大损失，为此，一般要求进行加固工艺的适宜性试验。通过地基工艺性试桩，掌握对该场地的成桩经验及各种操作技术参数。施工前必须进行室内水泥土的抗压强度试验，以选择合适的外掺剂和提供各种配比的强度参数。

② 根据施工机械性能制定周密的施工方案，加固体的施工设备的性能和功能应完好，严禁没有水泥用量计量装置的设备投入使用；

③ 对施工质量实施监控技术，对在施工过程中水泥掺入量、水泥泵喷浆均匀程度直接进行实时监控，与微机系统处理而直接显示各个加固段的水泥用量与加固体深度关系。并可与加固体水泥用量设计值进行比较。确保水泥掺合的均匀度和水泥加固体的均匀性；

④ 加固施工过程中，因加固工艺的局限性，在某些土层条件下会产生漏浆和冒浆现象，使掺入的水泥浆没有有效地留置在需要加固的区域。在密集的加固区域，由于水泥浆压力或机械搅拌，会产生过大挤土现象，从而对环境产生不利影响。为此，施工过程除工程自身进行施工操作记录外，尚需进行环境监控。避免加固过程对环境造成不利影响。

⑤ 采用降水方案时应特别加强止水帷幕的施工质量管理，并进行止水帷幕的质量检测，如发现问题应在开挖前进行处理解决。坑内降水一般采用轻型井点、喷射井点或深井井点，当土层为饱和粘土、粉土、淤泥和淤泥质粘土时，此时宜辅之于电极相结合。坑内降水应在围护结构（含隔水帷幕）完工，并达到设计要求后进行。当坑内作地基加固时，也宜在地基加固完工并达到设计要求后进行。降水加固地基时，对发生混浊的井管必须关闭废弃或重新埋设。坑内降水时，对坑内外水位和土体变形进行监控。

(3) 加固施工注意事项

① 加固材料及其配方是加固工程的重要组成部分之一。采用的适当与否，将会影响到固结体的质量、物理力学指标和化学稳定性以及工程造价。在基坑工程中，有时对固化时间要求较短，需考虑在水泥中添加促凝或早强剂，以加速浆液固化和提高固结体早期强度。

在一定土质条件下，通过调节浆液的水灰比和单位时间的喷射量或改变提升速度等措施可适当提高或降低加固体强度。

② 一般对基坑土体的加固作用是考虑在基坑开挖过程中减少土体的压缩变形。但由于加固技术的局限性，在加固施工时，如施工不当也会对基坑和环境产生不利影响。如在围护体强度未达到设计强度要求时，即进行坑内旋喷加固有可能会对围护墙产生破坏作用。又如坑外边加固施工不当，加固挤土或冒浆也会对坑边土体产生破坏作用。又如降水施工时降深过度或围护壁渗漏均会对坑外地基和环境建筑等产生不利影响。为减少或消除此种影响，进行施工工艺和技术措施分析，选择合适的施工顺序和施工方案是必要的。

③ 一般条件下，先进行基坑围护体的施工，再进行坑内土体被动区加固的施工。采用搅拌法加固时应考虑坑底面标高以上部分进行回掺，双轴水泥土搅拌法加固水泥回掺量宜为8%以上，三轴水泥土搅拌法加固的水泥回掺量宜为12%以上。当对墙体变形控制为一级保护要求时，应适当提高水泥回掺量。预搅下沉时一般不宜冲水，只有遇较硬土层而下沉太慢时，

方可适量冲水，但须考虑冲水对桩身强度的影响。当在坑周边外侧进行地基加固时须考虑对环境的不利影响，对施工顺序和进度进行控制和必要的修正。

④ 在搅拌桩施工过程中，有关人员应经常检查施工记录，根据每一根桩的水泥或石灰用量、成桩时间、成桩深度等对其质量进行评价，如发现缺陷，应视其所在部位和影响程度分别采取补桩、注浆或其它加强措施。

24.5.2 基坑加固土的质量检验

地基采取加固处理后，效果好坏无法确定，直接开挖有不确定性。或当在基坑设计和工程计算中考虑加固作用时，加固体应进行必要的试验和质量检验，以数据判断加固的有效性，提高工程的可靠性，减少工程风险。

(1) 检测时间

水泥土加固体的质量检验应按加固施工期、基坑开挖前和开挖期三个阶段进行。具体检验要求参见各施工工法相应的检测内容和检测方法。

① 成桩施工期质量检验包括机械性能、材料质量、掺合比试验等资料的验证，以及检查孔位、深度、垂直度、水泥掺量、上提喷浆速度、外掺剂掺量、水灰比、搅拌合喷浆起止时间、喷浆量的均匀度、搭接施工间歇时间等；

② 基坑开挖前的质量检测包括加固体强度的验证和技术参数复核。对开挖深度超过10m的基坑或坑边有重要保护建筑的坑内加固体，应采用静力触探或钻孔取芯的方法检验加固体的长度、均匀性和加固体强度。当对加固体质量不能确定时可采用钻头连续钻取全桩长范围内的桩芯，判断桩芯是否硬塑状态，无明显的夹泥、夹砂断层，判断有效桩长范围的桩身强度及均匀性应符合设计要求；

③ 基坑开挖期的质量检测主要通过直观检验开挖面的加固体的外观质量和手感硬度，如不符合设计要求应立即采取必要的补救措施，防止出现工程事故。

(2) 加固体检测的数量可按基坑规模或加固体施工的数量或重要性分别选取一定量的桩数进行检测。

(3) 注浆加固体和水泥土搅拌桩的力学性质指标采用静力触探比贯入阻力 P_s 值检验。水泥土搅拌桩的静力触探应在成桩后第七天(喷浆搅拌)进行，必要时用轻便触探器连续钻取桩身芯样，以观察其连续性和搅拌均匀程度，并判断桩身强度。我国《建筑地基处理技术规范》规定，经触探检验对桩身强度有怀疑的桩，应在龄期28天用地质钻机钻取芯样($\phi 100$ 左右)，制成试块测定其强度。

(4) 加固体检测的质量意见

在加固体检测的质量符合工程设计要求后，才能开挖基坑土体。一般地基加固体强度随着龄期而增长，但由于土的离散性和加固工艺及其他条件的变化，水泥土加固的效果有时会受到影响，在地基加固体未达到一定强度下开挖会影响基坑安全和环境安全。

24.6 关于基坑土体加固的其它事项

24.6.1 地基加固是一种先破坏土体结构，后使土体固化的技术手段，设计和施工应考虑实施过程中对围护体和环境建筑的不利影响。基坑工程中应避免为控制坑周地层位移而不合理地采用昂贵的地基加固。注浆、喷射注浆、搅拌、降水等工法的选择应与地层特性、环境条件、基坑特征等对应，否则加固效果会适得其反。

24.6.2 软土地基上的高层建筑地下室占工程总投资的比例往往很高，随着向地下要空间的工程理念的深入，地下深基础在地下室的投资比例也日趣增加，而为地下基础施工和环境安全所采取的软土地基加固占工程投资的比例也日趋提高。有时为保护环境采取满膛加固，无论是工期还是工程投资，其影响都是巨大的。为求得合理经济的加固方式，在工程实施前，根据地质水文、环境、基坑规模等条件，进行仔细认真的分析和研究是必要的。

参 考 文 献

- [1] 阎明礼等, 地基处理技术 [M], 北京:中国环境科学出版社, 1996
- [2] “地基处理手册”编写委员会, 地基处理手册[M], 中国建筑工业出版社, 1988
- [3] 孙更生, 郑大同, 软土地基与地下工程 [M], 北京:建筑工业出版社, 1987
- [4] 胡中雄, 贾坚, 基坑大面积卸荷机理研究 [A], 上海: 同济大学, 2007
- [5] 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
- [6] 吴邦颖, 张师德, 陈绪禄等编著, 软土地基处理 [M], 北京: 中国铁道出版社, 1995
- [7] 侯学渊, 刘国彬. 软土基坑支护结构的变形控制设计 [A], 见: 侯学渊、杨敏主编, 软土地基变形控制设计理论和工程实践 [C]. 上海: 同济大学出版社, 1996
- [8] 胡展飞. 降水预压改良坑底饱和软土的理论分析与工程实践 [J]. 岩土工程学报. 1998, 20 (3): 27-30