

第10章 水泥土重力式围护墙的设计与施工

10.1 概述

10.1.1 水泥土重力式围护墙的概念

水泥土重力式围护墙是以水泥系材料为固化剂，通过搅拌机械采用喷浆施工将固化剂和地基土强行搅拌，形成连续搭接的水泥土柱状加固体挡墙。

1996年5月在日本东京召开的第二届地基加固国际会议上，这种加固法被称为DMM工法(Deep Mixing Method)。我国《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)称之为深层搅拌法(简称“湿法”)，并启用了“水泥土”这一专用名词。上海市《地基处理技术规范》(DBJ08-40-94)称之为水泥土搅拌法。本手册将采用这种加固法、连续搭接施工所形成的挡土墙定名为水泥土重力式围护墙。

将水泥系材料和原状土强行搅拌的施工技术，近年来得到大力发展和改进，加固深度和搅拌密实性、均匀性均得到提高。目前常用的施工机械包括：双轴水泥土搅拌机、三轴水泥土搅拌机、高压喷射注浆机。由于施工工艺的不同，形成目前常用的水泥土重力式围护墙。

水泥土搅拌桩是指利用一种特殊的搅拌头或钻头，在地基中钻进至一定深度后，喷出固化剂，使其沿着钻孔深度与地基土强行拌和而形成的加固土桩体。固化剂通常采用水泥浆体或石灰浆体。

高压喷射注浆是指将固化剂形成高压喷射流，借助高压喷射流的切削和混合，使固化剂和土体混合，达到加固土体的目的。高压喷射注浆有单管、双重管和三重管法等，固化剂通常采用水泥浆体。

10.1.2 水泥土的发展与现状

搅拌法原是我国及古罗马、古埃及等文明古国，以石灰为拌合材料，应用最早而且流传最广泛的一种加固地基土的方法。例如，我国房屋或道路建设中传统的灰土垫层(或面层)，就是将石灰与土按一定比例拌合、铺筑、碾压或夯实而成；又如万里长城和西藏佛塔以及古罗马的加普亚军用大道、古埃及的金字塔和尼罗河的河堤等，都是用灰土加固地基的范例。

应用水泥土较早的一些国家，如日本约始于1915年，美国约始于1917年。随后，许多国家纷纷将水泥土用于道路、水利等工程。

搅拌桩最早于本世纪50年代初问世于美国。但自60年代以后的发展直到现在，不论在施工机械、质量检测、设计方法、工程应用等方面均以日本和瑞典领先于世。经过40多年的应用和研究，已形成了一种基础和支护结构两用、海上和陆地两用、水泥和石灰两用、浆体和粉体两用、加筋和非加筋两用的软土地基处理技术，它可根据加固土受力特点沿加固深度合理调整它的强度，施工操作简便、效率高、工期短、成本低，施工中无振动、无噪声、无泥浆废水污染，

土体侧移或隆起较小。故在世界各地获得广泛的应用，并在应用中获得进一步发展。

我国自1977年以来在中央部属和地方各级科研、设计、施工、生产、高教等部门的共同协作努力下，仅10余年时间已开发研制出适合我国国情、具有不同特色而且互相配套的多种专用搅拌机械和由地质钻机等改装成功的搅拌机械，并且已经形成了庞大的专业施工队伍。每年施工各种搅拌桩达数千万延长米之多，施工点遍布沿海和内陆的软土地区。

10.1.3 水泥土重力式围护墙的应用

搅拌桩在我国应用的头10年中，其主要用途是加固软土，构成复合地基以支承建筑物或结构物。将搅拌桩用于基坑工程，虽在其发展初期已有成功的实例，但大量应用则是90年代初随着我国各地高层建筑和地下设施大量兴建而迅速兴起的，其中尤以上海及沿海各地为最多。与此同时，在设计中利用弹塑性有限元分析、土工离心模拟试验等方法，结合基坑开挖现场监测，对搅拌桩重力式围护墙的稳定和变形特性进行了深入的研究。通过20多年的应用与研究，搅拌桩重力式围护墙的结构、计算和构造等均有了较大的发展，也出现了一些新的水泥土与其它受力构件相结合的结构形式。

随着改革开放政策的深化和经济建设的发展，我国的搅拌桩技术适应国情特点，不断登上新的台阶。大功率的三轴搅拌机，加固深度可达到25~30m，已经得到广泛应用。

10.2 水泥土重力式围护墙的类型与适用范围

10.2.1 水泥土重力式围护墙的类型

水泥土重力式围护墙的类型主要包括采用搅拌桩、高压喷射注浆等施工设备将水泥等固化剂和地基土强行搅拌，形成连续搭接的水泥土柱状加固体挡墙。

根据搅拌机械的类型，由于其搅拌轴数的不同，搅拌桩的截面主要有双轴和三轴两类，前者由双轴搅拌机形成，后者由三轴搅拌机形成。国外尚有用4、6、8搅拌轴等形成的块状大型截面，以及单搅拌轴同时作垂直向和横向移动而形成的长度不受限制的连续一字形大型截面。

此外，搅拌桩还有加筋和非加筋，或加劲和非加劲之分。目前我国除型钢水泥土（SMW）工法为加筋（劲）工法外，其余各种工法均为非加筋（劲）工法。

近些年来，以水泥土为主体的复合重力式围护墙得到了一定的发展，主要有水泥土结合钢筋混凝土预制板桩、钻孔灌注桩、型钢、斜向或竖向土锚等结构形式。

水泥土重力式围护墙按平面布置区分可以有：满膛布置、格栅型布置和宽窄结合的锯齿形布置等形式，常见的布置形式为格栅型布置。

混凝土重力式围护墙按竖向布置区分可以有等断面布置、台阶形布置等形式，常见的布置形式为台阶形布置。

10.2.2 混凝土重力式围护墙的特点

混凝土重力式围护墙系通过固化剂对土体进行加固后形成有一定厚度和嵌固深度的重力墙体，以承受墙后水、土压力的一种挡土结构。

混凝土重力式围护墙是无支撑自立式挡土墙，依靠墙体自重、墙底摩阻力和墙前基坑开挖面以下土体的被动土压力稳定墙体，以满足围护墙的整体稳定、抗倾稳定、抗滑稳定和控制墙体变形等要求。

混凝土重力式围护墙可近似看作软土地基中的刚性墙体，其变形主要表现为墙体水平平移、墙顶前倾、墙底前滑以及几种变形的叠加等。

混凝土重力式围护墙的破坏形式主要有以下几种：

1. 由于墙体入土深度不够，或由于墙底土体太软弱，抗剪强度不够等原因，导致墙体及附近土体整体滑动破坏，基底土体隆起，如图10-1 (a)；
2. 由于墙体后侧发生挤土施工、基坑边堆载、重型施工机械作用等引起墙后土压力增加、或者由于墙体抗倾覆稳定性不够，导致墙体倾覆，如图10-1 (b)；
3. 由于墙前被动区土体强度较低、设计抗滑稳定性不够，导致墙体变形过大或整体刚性移动，如图10-1 (c)；
4. 当设计墙体抗压强度、抗剪强度或抗拉强度不够，或者由于施工质量达不到设计要求时，导致墙体压、剪或拉等破坏，如图10-1 (d)。

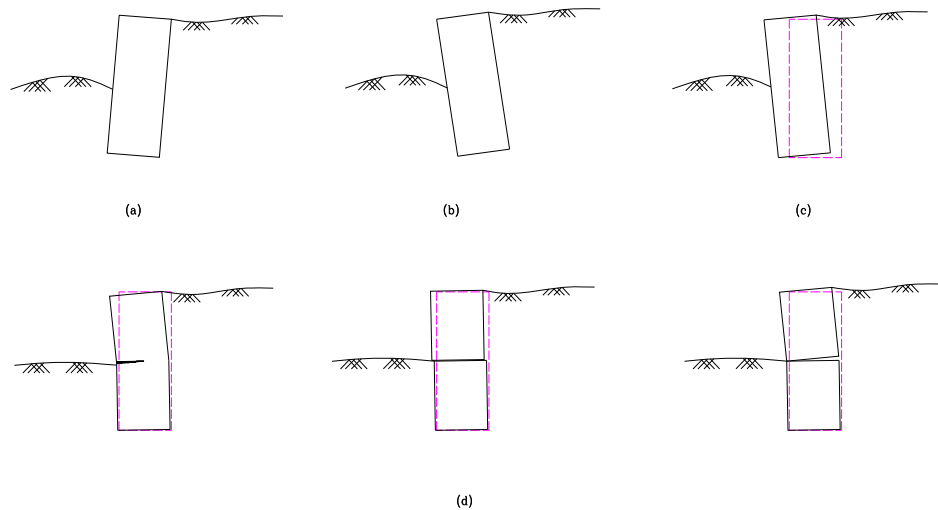


图10-1

10.2.3 水泥土重力式围护墙的适用条件

10.2.3.1 基坑开挖深度

采用水泥土重力式围护墙的基坑开挖深度起先一般不超出 5m，自九十年代起，陆续出现开挖深度超出 6m 基坑。93 年底施工的某商厦的基坑开挖深度达 9.5m（部分达 12.1m），平面面积达 12900m²。基坑开挖愈深，面积愈大，墙体侧向位移愈难以控制，水泥土重力式围护墙开挖深度超出 7m 的基坑工程，墙体最大位移可能达到 20cm 以上，使工程的风险相应增加。鉴于目前施工机械、工艺和控制质量的水平，开挖深度不宜超出 7m。

由于水泥土重力式围护墙侧向位移控制能力在很大程度上取决于桩身的搅拌均匀性和强度指标，相比其他基坑围护墙体来说，位移控制能力较弱。因此，在基坑周边环境要求较高的情况下，若采用水泥土重力式围护墙，基坑深度应控制在 5m 范围以内，降低工程的风险。

10.2.3.2 土质条件

国内外试验研究和工程实践表明，水泥土搅拌桩和高压喷射注浆均适用于加固淤泥质土、含水量较高而地基承载力小于 120 kPa 的粘土、粉土、砂土等软土地基。对于地基承载力较高、粘性较大或较密实的粘土或砂土，可采用先行钻孔套打、添加外加剂或其它辅助方法施工。

当土中含高岭石、多水高岭石、蒙脱石等矿物时，加固效果较好；土中含伊里石、氯化物和水铝英石等矿物时，加固效果较差，土的原始抗剪强度小于 20~30kPa 时，加固效果也较差。

水泥土搅拌桩当用于泥炭土或土中有机质含量较高，酸碱度 (pH 值) 较低 (<7) 及地下水有侵蚀性时，宜通过试验确定其适用性。

当地表杂填土层厚度大或土层中含直径大于 100mm 的石块时，宜慎重采用搅拌桩。

10.2.3.3 环境条件

水泥土重力式围护墙在整个施工过程中对环境可能产生两个方面的影响：

1. 水泥土重力式围护墙的体量一般较大，搅拌桩施工过程中由于注浆压力的挤压作用，周边土体会产生一定的隆起或侧移；
2. 基坑开挖阶段围护墙体的侧向位移较大，会使坑外一定范围的土体产生沉降和变位。

因此，在基坑周边距离 1~2 倍开挖深度范围内存在对沉降和变形较敏感的建（构）筑物时，应慎重选用水泥土重力式围护墙。

10.2.4 加固土的物理力学特性

加固土的物理力学特性，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、掺入比、外掺剂等因素有关，也与搅拌方法、搅拌时间、操作质量等因素有关。

一、水泥土的物理力学特性

（一）物理性质

1. 重度

水泥土的重度主要与被加固土体的性质、水泥掺入比及所用的水泥浆有关。水泥土重度室内试验结果表明，当水泥掺入比为5%~20%、水灰比=0.45~0.5时，水泥土较被加固的土体重度增加约1%~3%左右。

2. 含水量和孔隙比

与天然软土相比，水泥土的含水量和孔隙比有不同程度的降低。一般地说，天然软土含水量越大或水泥掺入比越大，则水泥土加固体的含水量降低幅度越大。

3. 液限与塑限

不同含水量的软土用不同的水泥掺入比加固后，其液限将稍有降低，而其塑限则有较大提高。

(二) 力学特性

1. 无侧限抗压强度

水泥土的无侧限抗压强度在0.3~4.0MPa之间，大约比天然软土强度提高数十倍到数百倍，主要受以下诸多因素的影响。

(1) 土质

加固土的强度随水泥掺入比的增加和龄期的加长而增长，但有不同的增长幅度，一般初始性质较好的土加固后强度增量较大，初始性质较差的土加固后强度增量较小。

(2) 龄期

水泥土的抗压强度随其加固龄期而增长。这一增长规律具有两个特点：(a)它的早期(例如7~14天)强度增长不甚明显，对于初始性质差的土尤其如此；(b)强度增长主要发生在龄期28天后，并且持续增长至120天，其趋势才减缓，这同混凝土的情况不一样。由此应合理利用水泥土的后期强度。

(3) 水泥掺入比

水泥掺入比通常指水泥掺入重量与被加固土天然重度之比(%)。试验表明水泥土的强度随水泥掺入比的增加而增长。其特点是随水泥掺入比的增加，水泥土的后期强度增长幅度加大。

在实际应用中，当水泥掺入比小于7%时，加固效果往往不能满足工程要求，而当掺入比大于15%时，加固费用偏高。因此，规定双轴搅拌桩水泥的掺入比以7%~15%为宜，一般双轴搅拌桩施工的水泥土重力式围护墙体的水泥掺量为12%~15%。

(4) 土的含水量

天然土的含水量越小，加固后水泥土的抗压强度越高。含水量对强度的影响还与水泥掺入比有关，水泥掺入比越大，则含水量对强度的影响越大。反之，水泥掺入比较小时，含水量对强度的影响不甚明显。

(5) 土的化学性质

土的化学性质，如酸碱度(pH值)、有机质含量、硫酸盐含量等对加固土强度的影响甚大。酸性土(pH<7)加固后的强度较碱性土为差，且pH值越低，强度越低。

土的有机质或腐殖质会使土具有酸性，并会增加土的水溶性和膨胀性，降低其透水性，影响水泥水化反应的进行，从而会降低加固土的强度。

在实际工程中，当土层局部范围遇到pH值偏低的情况时，可在水泥中掺入少量石膏CaSO₄，即可使土的pH值明显提高。

(6) 水泥品种与标号

水泥搅拌桩可以采用不同品种的水泥，如普通硅酸盐水泥、矿渣水泥、火山灰水泥等。其标号一般也不受限制。但水泥的品种和标号对水泥土的强度有一定影响。一般在其它条件均相同时，普通水泥的标号每提高一级，可使水泥土强度有一定的提高。

(7) 外掺剂

固化剂中常选用某些工业废料或化学品作为外掺剂，因它们分别具有改善土性、提高强度、节约水泥、促进早强、缓凝或减水等作用，所以掺加外掺剂是改善水泥土加固体的性能和提高早期强度的有效措施，常用的外掺剂有碳酸钙、氯化钙、三乙醇胺、木质素磺酸钙等，但相同的外掺剂以不同的掺量加入不同的土类或不同的水泥掺入比，会产生不同的效果。

粉煤灰是具有较高的活性和明显的水硬性的工业废料，可作为搅拌桩的外掺剂。室内试验表明，用10%的水泥加固淤泥质粘土，当掺入占土重5%~10%的粉煤灰时，其90天龄期强度比不掺入粉煤灰时提高45%~85%，而且其早期强度增长十分明显。

在水泥中掺入相当于水泥重量2%的石膏(CaSO₄)可使水泥土强度提高20%左右，并具有早强作用。但石膏掺量不能过大，否则会使水泥土变成脆性。

曾用几种化学外掺剂，按照不同配方掺入水泥，研究其对加固土的抗压强度的影响，其结果列于表10-1。该表表明，水泥土强度以掺三乙醇胺0.05%+木质素磺酸钙0.2%时(10号配方)为最高。其次是三乙醇胺0.05%+氯化钠0.5%(7号配方)。

不同外掺剂配方对水泥土强度的影响 表10-1

编号	外掺剂及掺量 (占水泥重量%)	抗压强度 q_u (kPa)			
		7d龄期		28d龄期	
0	不掺外掺剂	640	100%	1190	100%
1	塑化剂0.25	700	110%	1270	107%
2	木质磺酸钙0.30	800	125%	1220	103%
3	氯化钙1.5	650	103%	1230	103%
4	氯化钠1.0	680	106%	1070	90%
5	木质磺酸钙0.2+氯化钙1.0	760	119%	1350	113%

6	氢氧化钠0.4+硫酸钠1.0	800	125%	1320	111%
7	三乙醇胺0.05+氯化钠0.5	930	146%	1740	146%
8	硫酸钙2.0+木钙0.2+硫酸钠1.0	760	119%	1330	112%
9	三乙醇胺0.02+FeCl ₃ +木钙0.25	732	114%	1160	97.5%
10	三乙醇胺0.05+木钙0.2	1370	214%	1870	157%

注：水泥掺入比均为10%；天然含水量60.56%。

2. 抗剪和抗拉强度

水泥土的抗剪强度 c_u 与其法向应力有关。设计时如做较保守之考虑，可取 σ_u 为零时的抗剪强度 τ_{f0} 作为桩体不排水抗剪强度设计值。 τ_{f0} 与无侧限抗压强度 q_u 的比例介于1/2~1/5之间。

水泥土的抗剪强度随抗压强度的增大而提高，但随着抗压强度增大，两者的比值减小。一般地说，当无侧限抗压强度 $q_u = 0.5 \sim 4.0MPa$ 时，其粘聚力 $c = 0.1 \sim 1.1MPa$ ，内摩擦角 φ 约在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间。

水泥土的抗拉强度 σ_t 与无侧限抗压强度 q_u 的关系：当 $q_u < 1.5MPa$ 时， σ_t 约等于 $0.2MPa$ 。

3. 变形特性：

水泥土与未加固土典型的应力应变关系的比较表明，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。因此设计时对未加固土的抗剪强度不宜考虑最大值，而应考虑相对于桩体破坏应变量的适当值。水泥土无侧限抗压强度愈大，破坏应变量愈小。当 $q_u > 0.4MPa$ 时， $\varepsilon_f < 2\%$ ；当 $q_u < 0.4MPa$ 时， ε_f 约为 $2\% \sim 10\%$ 。

水泥土的变形模量与无侧限抗压强度 q_u 有关，但其关系尚无定论。国内的研究认为：当 $q_u = 0.5 \sim 4.0MPa$ 时， $E = (100 \sim 150)q_u$ 。

4. 渗透系数

水泥土的渗透系数 k 随着加固龄期的增加和水泥掺入比的增加而减小，对于 k 值为 $10^{-6}cm/sec$ 的软土用10%的水泥加固一个月后， k 值可减小到 $10^{-7}cm/sec$ 以下。它的抗渗性能明显改善。

5. 负温对强度的影响

试验表明，负温一般并不影响水泥搅拌桩施工，但它会使水泥土化学反应停滞而推迟搅拌桩强度的发展。

6. 现场桩体强度与室内试块强度的差别

通过对有关试验资料鉴别分析，目前认为在一般情况下，现场桩体强度比室内试块强度大约低 $25\% \sim 35\%$ ，亦即现场桩体强度/室内试块强度的比值约为 $0.6 \sim 0.75$ 。

7. 水泥石强度的长期稳定性

由于水泥的化学性质甚为稳定，故水泥石强度的长期稳定性应无问题。根据近几年的工程实测结果分析，十年龄期和一年龄期水泥石搅拌桩的强度基本相同。

10.3 水泥石重力式围护墙的设计计算

10.3.1 水泥石重力式围护墙的设计方法

水泥石重力式围护墙的设计应包括：设计方案比选、结构与稳定计算、位移计算和环境影响分析等。

10.3.1.1 设计方案比选

由于支护结构类型繁多，各具特色，工程师必须熟悉各类支护结构的适用性和局限性乃至它们的许多细节，以便在设计时先作好方案比选，而使设计取得最佳的技术经济效果。

水泥石重力式围护墙结构与其它支护体系相比，具有以下优点：

1. 施工时无振动、噪声小、无泥浆废水污染；
2. 施工操作简便、成桩工期较短，造价较低；
3. 基坑开挖时一般不需要支撑、拉锚；
4. 隔水防渗性能良好；
5. 基坑内空间宽敞，方便土方开挖和后期结构施工；
6. 挡墙顶面可设置路面行驶施工车辆，而路面结构又可增加挡墙刚度；
7. 同一墙体可设计成变截面、变深度、变强度；
8. 有利于缩短综合工期；
9. 可就近利用一部分粉煤灰等工业废料作为固化剂的外掺剂。

然而，水泥石重力式围护墙在应用上存在下列制约：

1. 对有机质含量高、pH值低（ <7 ）、初始抗剪强度甚低（ $<2\sim 3\text{kPa}$ ）的土，或土中含伊里石、氯化物、水铝石英等矿物及地下水具有侵蚀性时，加固效果差；
2. 贯穿地面或地下硬土或其它障碍物有困难，有时可用冲水或注水下沉解决，有时难以解决；
3. 根据国内现有设备，目前常用的支挡高度为 $4\sim 7\text{m}$ ；一般情况下，当采用湿法（喷浆）施工时，开挖深度不超过 7m ；当支挡高度较大或工程量较大时，可能不经济；
4. 墙体占地面积大，水泥石搅拌桩按格栅形布置，墙宽约 $0.7\sim 1.0$ 倍开挖深度，桩插入基坑底深度约 $0.8\sim 1.4$ 倍开挖深度；
5. 水泥用量较大，以一般软土中 10m 深的墙体（包括插入坑底部分）为例，每 100 延长米墙体约需水泥 $500\sim 600\text{t}$ ；
6. 成桩后需要 28 天以上的养护期，一般不能立即开挖土方；

7. 与有支撑支护结构相比,重力式围护基坑周围地基变形较大,对邻近建筑物或地下设施影响较大。

以上列举了进行方案比较需着重注意的事项和影响方案取舍的各种因素。其中有些因素常会立即显示其控制作用,只需设计人作一种选择。但有些因素并非绝对性,而是互为补偿或须经具体的设计计算,才能从工程整体效益衡量而作出抉择。

为做好设计方案比较,还必须强调准确的地质勘察数据对水泥土重力式围护墙设计的特殊重要意义。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,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。

10.3.1.2 结构设计与稳定计算

水泥土重力式围护墙的平面形状除了简单的连续壁状或肋状外,从安全和经济角度考虑,目前较多地采用空腹封闭式格栅状布置。为加强墙体的整体性,相邻搅拌桩的搭接应不小于200mm。

水泥土重力式围护墙宽度的选取,一般可按开挖深度的0.7~1.0倍进行试算。鉴于加固土的重度与天然土的重度相近似,当采用格栅状布置时,按桩体与它所包围的土体共同作用考虑,通常取格栅状外包线宽度作为挡墙宽度。

搅拌桩的加固深度,亦即桩的长度,与开挖深度及土层分布等因素有关,一般取开挖深度的1.8~2.4倍进行试算。

搅拌桩墙体强度的选取与施工质量密切相关。由于基坑开挖时墙体要承受剪切力和弯矩,墙体的质量显得特别重要。搅拌桩强度的离散性很大,标准差可达30%~70%。基于这一实际情况,目前设计中一般要求搅拌桩的无侧限抗压强度不低于0.8MPa,以留有充裕的安全储备,使墙体强度不成为设计的控制条件,而以结构和边坡的整体稳定控制设计。

水泥土重力式围护墙的土压力可按朗金理论计算。在此基础上对挡墙进行抗倾覆验算、抗滑动验算和墙身强度验算,并按圆弧滑动法进行边坡整体稳定验算。当基坑底涉及流砂或管涌问题时,尚须进行抗渗流验算。在验算中如发现所选用的挡墙截面尺寸或强度不足或富余过多,应作调整后再进行验算,以满足一定的安全系数为原则。

水泥土重力式围护墙各项安全系数的选用,与地基土强度指标的试验方法、桩的施工质量、基坑开挖暴露期的长短、设计阶段是否已作了有限元分析或离心模拟试验,以及开挖过程是否实施现场监测等条件有关。应从各方面综合创造条件,避免采用过高的安全系数,以求经济合理。

10.3.1.3 位移计算和环境影响分析

由于水泥土桩是介于刚性桩和柔性桩之间的结构物,与常规的重力式挡墙相比,此类挡墙

的宽度相对地要小一些，而埋置深度相对地要大一些，墙体本身也比混凝土要“柔弱”得多，它的变形会相对地大一些，因此宜参照柔性挡墙对基坑开挖过程地基和挡墙的变形进行计算。

应当理解，不论采用土体极限平衡理论，还是采用有限元分析计算，由于对土方开挖步骤、坑内外降水等因素都作了一定的假设，且土工参数取值可能偏高或偏低，故设计与施工实际之间的误差总是会存在的，因此对开挖过程实施监测具有重要意义。

10.3.2 水、土压力的计算

水泥土重力式围护墙的设计计算图式如图10-2所示。

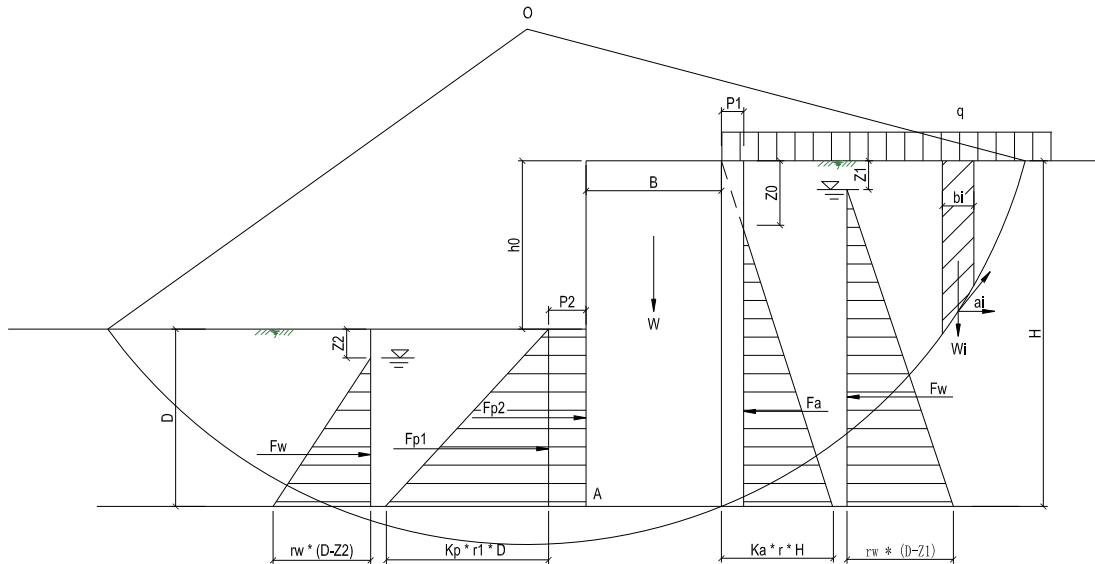


图10-2 水泥土重力式围护墙的设计计算图式

土体作用在围护墙上的侧压力，粘性土应按水土合算原则计算，粉性、砂性土应按水土分算的原则计算（侧压力等于土压力和水压力之和）。

计算中通常考虑粘性土的内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c 的影响。为简化计算土体，墙底以上各层土的物理力学性质指标按各层土的厚度加权平均计算，即公式10-1、10-2、10-3：

$$\text{重度} \quad \gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{H} \quad (10-1)$$

$$\text{内摩擦角} \quad \varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i h_i}{H} \quad (10-2)$$

$$\text{粘聚力} \quad c = \frac{\sum_{i=1}^n c_i h_i}{H} \quad (10-3)$$

式中 γ_i ——墙底以上各层土的有效重度 (kN/m^3)；

φ_i ——墙底以上各层土的内摩擦角 ($^{\circ}$)；

c_i ——墙底以上各层土的粘聚力 (kPa)；

h_i ——墙底以上各层土的厚度 (m)；

H ——墙的高度 (m)， $H = \sum h_i$ 。

主动土压力、被动土压力、水压力计算见本手册第4章等有关章节。

10.3.3 稳定性验算

稳定性验算包括整体稳定、坑底抗隆起稳定、墙体绕前趾的抗倾覆稳定、沿墙底面的抗滑动稳定和抗渗流稳定等，具体验算方法详见本手册第5章等有关章节。

10.3.4 墙体应力验算

水泥石重力式围护墙坑底截面处墙体应力应满足式(10-4)和(10-5)的要求：

$$\gamma_Q h_0 - 6M / B^2 \geq 0 \quad (10-4)$$

$$\gamma_s \left[\gamma_Q h_0 + q + 6M / (\eta B^2) \right] \leq q_u / (2\gamma_j) \quad (10-5)$$

$$M = (h_0 - z_0)F_{a0} / 3 + (h_0 - z_1)F_{w0} / 3 + qh_0^2 K_a / 2 \quad (\text{kN} \cdot \text{m}) \quad (10-6)$$

$$F_{a0} = \gamma_0 (h_0 - z_0)^2 K_a / 2 \quad (\text{kN}) \quad (10-7)$$

$$F_{w0} = \gamma_w (h_0 - z_1)^2 / 2 \quad (\text{kN}) \quad (10-8)$$

$$z_0 = 2c_0 / \gamma_0 / \text{tg}(45^{\circ} - \varphi_0 / 2) \quad (10-9)$$

式中： γ_s ——荷载作用分项系数，取 1.25。

h_0 ——开挖面以上墙体高度 (m)。

B ——水泥石墙体的宽度 (m)。

c_0 ——坑底以上各土层粘聚力按土层厚度的加权平均值 (kPa)；

φ_0 ——坑底以上各土层内摩擦角按土层厚度的加权平均值 ($^{\circ}$)；

γ_0 ——坑底以上各土层有效重度按土层厚度的加权平均值 (kN/m^3)。

γ_w ——地下水的重度 (kN/m^3)。

γ_Q ——水泥石墙体的重度 (kN/m^3)

z_1 ——坑外地下水面至自然地面距离 (m)。

q ——墙后地面超载 (kN/m^2)。

η ——墙体截面水泥石置换率，为水泥石加固体和墙体截面积之比；

γ_j ——分项系数。考虑水泥石加固体强度的不均匀性，取 1.2，当墙体插钢管或毛竹时，可取 $\gamma_j=1.0$ 。

10.3.5 水泥石重力式围护墙结构加固体平面通常呈格栅型布置，每个格子的土体面积 A 应满足式(10-10)的要求。

$$A \leq \frac{c_0 \cdot u}{\gamma \cdot \gamma_f} \quad (10-10)$$

式中： u ——格子的周长(m)，按图 10-3 规定的边框线计算；

γ_f ——分项系数。对砂土和砂质粉土取 1.0，粘土取 2.0。

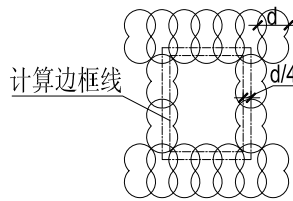


图 10-3 格栅截面布置验算

10.3.6 墙体变形计算

1. 当水泥石重力式围护墙符合墙宽 $B=(0.7\sim 1.0)h_0$ 、坑底以下插入深度 $D=(0.8\sim 1.4)h_0$ (h_0 为基坑开挖深度) 时，墙顶的水平位移量可按(10-11)式估算

$$\delta_{OH} = \frac{0.18\zeta \cdot K_a \cdot L \cdot h_0^2}{D \cdot B} \quad (10-11)$$

式中： δ_{OH} ——墙顶估算水平位移(cm)；

L ——开挖基坑的最大边长(m)，超过 100m 时，按 100m 计算；

ζ ——施工质量影响系数，取 0.8~1.5。

经验公式法，来自数十个工程实测资料，在本手册编写过程中又经过一些工程的应用。水泥石重力式围护墙的水平位移除对开挖深度特别敏感之外，还受围护墙的宽度、插入深度和土质条件等的影响。施工质量是个不可忽略的因素，在按本规程规定的正常工序施工时，一般取 $\zeta=1.0$ ；达不到正常施工工序控制要求，但平均水泥用量达到要求时，取 $\zeta=1.5$ 。对施工质量控制严格、经验丰富的施工单位，可取 $\zeta=0.8\sim 1.0$ 。

2. 收集上海地区几十个水泥石重力式围护工程实测资料，研究围护结构最大侧移和坑底抗隆起稳定系数之间的关系。

根据收集的资料得出 δ_{OH}/h_0 与抗隆起安全系数 F_s 之间的散点图(图 10-4)，发现这些点分布的离散性不大，因此拟合出散点分布区域的上下区间曲线，将这些点包括进去。

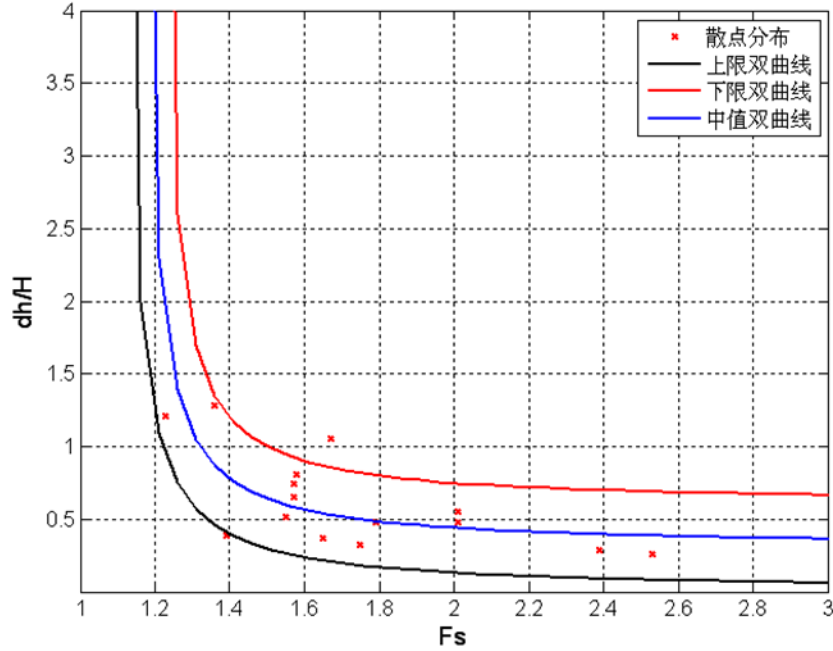


图 10-4

上限双曲线的函数为:

$$\delta_{0H}/h_0 = \frac{0.12}{F_s - 1.2} + 0.6 \quad \text{即 } \delta_{0H} = h_0 \left(\frac{0.12}{F_s - 1.2} + 0.6 \right) \quad (10-12)$$

下限双曲线的函数为:

$$\delta_{0H}/h_0 = \frac{0.12}{F_s - 1.1} \quad \text{即 } \delta_{0H} = \frac{0.12h_0}{F_s - 1.1} \quad (10-13)$$

中值双曲线的函数为:

$$\delta_{0H}/h_0 = \frac{0.12}{F_s - 1.15} + 0.3 \quad (10-14)$$

即 Δh 分布区间为 $\left\{ h_0 \left(\frac{0.12}{F_s - 1.2} + 0.6 \right), \frac{0.12h_0}{F_s - 1.1} \right\}$ 。

其中, 0.12 的选取, 参照了所有的数据的 $\Delta h/H$ 和 F_s 最小乘积; 各种平移参数的选择参照散点的分布情况。

3. 基坑环境保护等级为二级或以上时, 宜采用有限元分析计算或非岩石地基土中刚性墙体 m 法计算围护墙墙顶的水平位移量。

非岩石地基土中刚性墙体 m 法墙顶位移:

$$\begin{aligned} Y = Y_0 + H\theta_0 &= \frac{D(24\alpha - 8\beta D)}{mD^4 + 3mB^3} + \frac{2\beta}{mD^2} + \frac{36\alpha H - 12\beta DH}{mD - 3mB^3} \\ &= \frac{1}{m} \left(\frac{24D\alpha - 8\beta D^2}{D^4 + 3B^3} + \frac{2\beta}{D^2} + \frac{36\alpha H - 12\beta DH}{D - 3B^3} \right) \end{aligned} \quad (10-15)$$

其中: $\alpha = M_0 + H_0 D + E_a h - M_w \quad (10-16)$

$$\beta = H_0 + E_a - Wtg\varphi - cB \quad (10-17)$$

公式中：D——围护墙体插入深度（m）；

E_a ——坑底以下墙背主动土压力合力（kN）；

f ——墙底面摩阻力（kN），取 $f = Wtg\varphi + cB$ ；

W ——计算单元长度墙体自重（kN）；

M_0 ——坑底以上的墙背主动土压力在坑底截面处的力矩（kN·m）；

H_0 ——坑底以上的墙背主动土压力在坑底截面处的合力（kN）；

M_w ——墙体单元长度的自重力矩（kN·m）， $M_w = W \cdot \frac{B}{2}$ ；

m_v ——墙底土竖向抗力系数（kN/m⁴），由于对 Y_0 、 θ_0 影响小，取 $m_v = m$ ；

计算说明：

（1）墙后土压力系数 c 、 φ 值均为加权平均值。

（2） m 值的选取参照地质勘察报告及各地《地基基础设计规范》和有关经验选取。

10.4 水泥土重力式围护墙的构造要求

10.4.1 水泥土重力式围护墙的平面布置

水泥土重力式围护墙的墙体宽度可按经验确定，一般墙宽 B 可取开挖深度 h_0 的 0.7 至 1.0 倍；平面布置有满膛布置、格栅型布置和宽窄结合的锯齿形布置等，常用的平面布置形式为格栅型布置，可节省工程量。

双轴搅拌桩水泥土重力式围护墙平面布置见图 10-5：

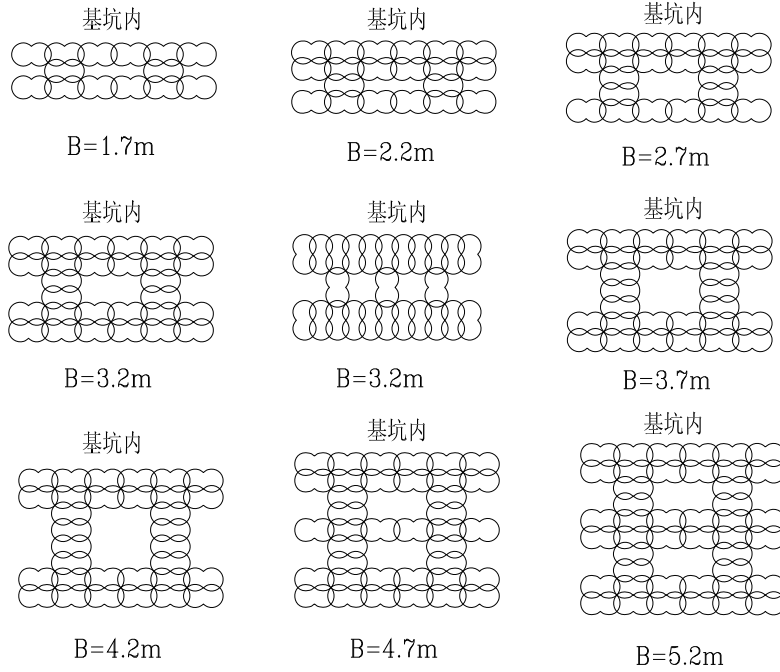


图 10-5 二轴搅拌桩常见平面布置形式

三轴搅拌桩水泥土重力式围护墙平面布置见图 10-6:

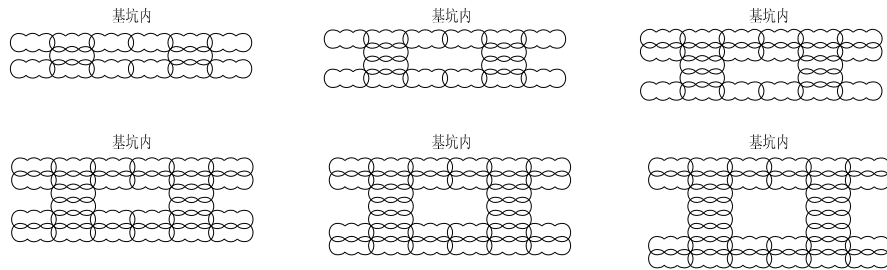


图 10-6 三轴搅拌桩常见平面布置形式

高压旋喷注浆水泥土重力式围护墙平面布置见图 10-7:

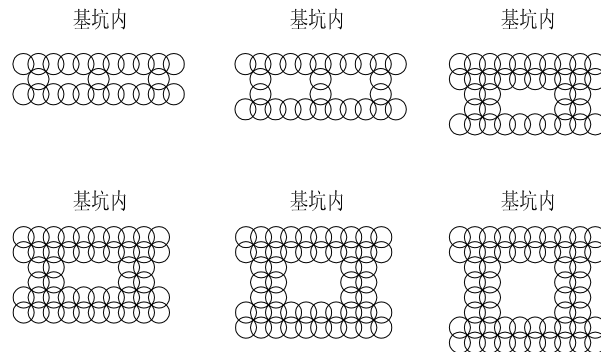


图 10-7 高压旋喷注浆常见平面布置形式

截面置换率为水泥土截面积和断面外包面积之比，由于采用搭接施工，水泥土的实际工程量略大于按置换率计算量。

10.4.2 水泥土重力式围护墙的竖向布置

水泥土重力式围护墙坑底以下的插入深度 D 一般可取开挖深度 h_0 的 0.8~1.4 倍，断面布置有等断面布置、台阶形布置等，常见的布置形式为台阶形布置见图 10-8：

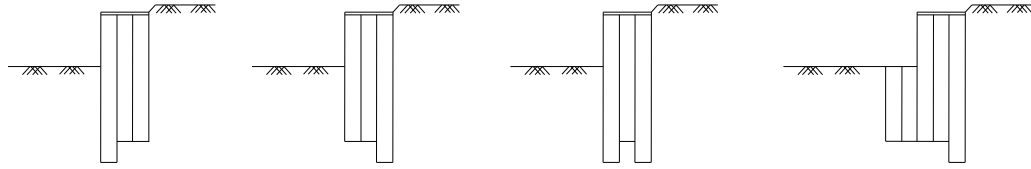


图 10-8

10.4.3 水泥土重力式围护墙加固体技术要求

1. 水泥土水泥掺含量以每立方加固体所拌和的水泥重量计，常用掺含量为双轴水泥土搅拌桩 12~15%，三轴水泥土搅拌桩 18~22%，高压喷射注浆不少于 25%。
2. 水泥土加固体的强度以龄期 28 天的无侧限抗压强度 q_u 为标准， q_u 应不低于 0.8MPa。
3. 水泥土加固体的渗透系数不大于 $10^{-7} \text{cm} / \text{sec}$ ，水泥土围护墙兼作隔水帷幕。
4. 水泥土重力式围护墙搅拌桩搭接长度应不小于 200mm。墙体宽度大于等于 3.2m 时，前后墙厚度不宜小于 1.2m。在墙体圆弧段或折角处，搭接长度宜适当加大。水泥土加固体在习惯上称为搅拌桩，相邻桩搭接部分的截面积为双弧形，搭接长度 200mm 指搅拌转轴中心连线位置的最大搭接长度。
5. 水泥土重力式围护墙转角及两侧剪力较大的部位应采用搅拌桩满打、加宽或加深墙体等措施对围护墙进行加强。
6. 当基坑开挖深度有变化，围护墙体宽度和深度变化较大的断面附近应当对墙体进行加强。

10.4.4 水泥土重力式围护墙压顶板及联结的构造

1. 水泥土重力式围护墙结构顶部需设置 150~200mm 厚的钢筋混凝土压顶板，压顶板应设置双向配筋，钢筋直径不小于 $\phi 8$ ，间距不大于 200mm。墙顶现浇的混凝土压顶板是水泥土重力式围护墙的一个组成部分，不但有利于墙体整体性，防止因坑外地表水从墙顶渗入挡墙格栅而损坏墙体，也有利于施工场地的利用。
2. 水泥土重力式围护墙内、外排加固体中宜插入钢管、毛竹等加强构件。加强构件上端应进入压顶板，下端宜进入开挖面以下。目前常用的方法是内排或内外排搅拌体内插钢管，深度至开挖面以下，对开挖较浅的基坑，可以插毛竹，毛竹直径不小于 50mm。
3. 水泥土加固体与压顶板之间应设置连接钢筋。连接钢筋上端应锚入压顶板，下端应插入水泥土加固体中 1~2 米，间隔梅花形布置。

10.4.5 外掺剂

水泥土加固体采用设计强度和养护龄期双重控制标准。为改善水泥土加固体的性能和提高

早期强度，可掺加外掺剂。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。外掺剂的选用和水泥品种、水灰比、气候条件等有关，选用外掺剂时应有一定的经验或进行室内试块试验。碳酸钠的掺量一般为水泥用量的 0.2%~0.4%，氯化钙为 2%~5%，三乙醇胺为 0.05%~0.2%。木质素磺酸钙是一种减水剂，对早期强度的提高也略有影响，掺量变化范围一般为 0.2%~0.5%。

10.5 控制和减少墙体变位的措施

为了有效地控制和减少水泥土重力式围护墙的变位，在墙体设计和施工过程中可采取以下的措施：

1. 增加围护墙体的宽度；
2. 沿围护边长方向每隔 20~30m 增加重力墩；
3. 适度增加围护墙的插入深度；
4. 在坑内开挖面以下加加固墩；
5. 在水泥土加固体中插型钢、钢管、刚性桩或增加土锚等；
6. 基坑开挖施工时采取分段、分层开挖等。

10.6 水泥土重力式围护墙施工

10.6.1 双轴水泥土搅拌机

喷浆型式的水泥土搅拌机是以水泥浆作为固化剂的主剂，通过搅拌头强制将软土和水泥浆拌合在一起。目前国内有单轴和双轴二种机型，此地主要介绍双轴水泥土搅拌机。

1. SJB 型双轴水泥土搅拌机

SJB 型双轴水泥土搅拌机，每施工一次可形成一幅双联“8”字形的水泥土搅拌桩。主机由动滑轮组、电动机、减速器、搅拌轴、搅拌头、输浆管、单向阀、保持架等组成，见图 10-9

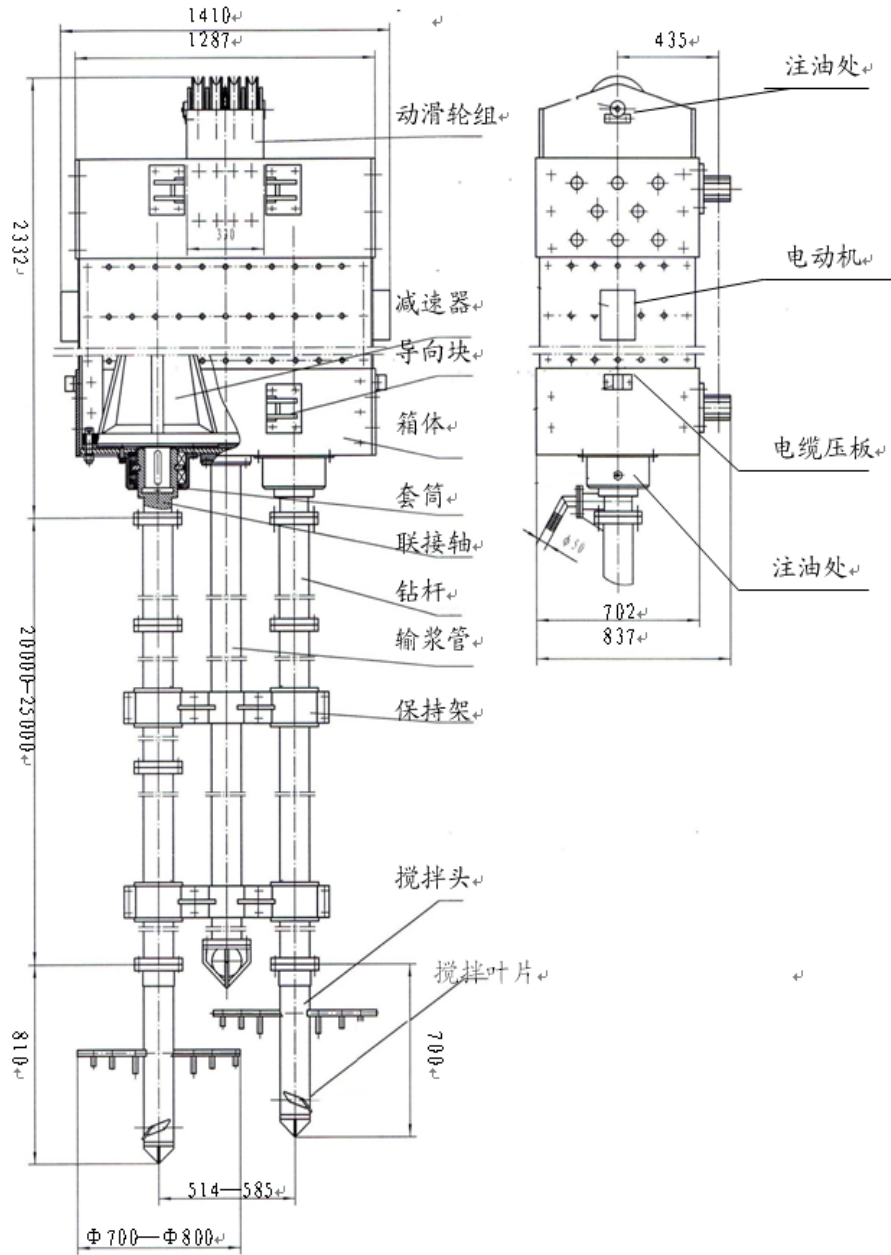


图 10-9 SJBF45 双轴水泥土搅拌机

双轴水泥土搅拌机技术参数

表 10-2

型 号	SJBF37	SJBF45
电机功率 (Kw)	2×37	2×45
搅拌头直径 (mm)	2×Φ700 (800)	2×Φ700 (800)
搅拌头数量 (个)	2	2
搅拌头转速 (r/min)	42	40

预定扭矩 (KN·m)	2×8.4	2×10
搅拌机间距 (mm)	514-585	514-585
一次加固面积 (m ²)	0.71-0.93	0.71-0.93
搅拌深度 (m)	12月18日	18-25
喷浆方式	中心管喷浆	中心管喷浆
电机减速装置	摆线针轮减速	摆线针轮减速
外形尺寸 (mm)	1262×702×1690	1410×837×2332
主机重量 (kg)	3500	4300
制造厂家	江阴市振冲机械制造有限公司	

2. 配套设备

(1) 灰浆泵, 采用 HB6-3 型柱塞泵, 其技术规格见表 10-3

HB6-3 灰浆泵技术规格

表 10-3

输浆量 (m ³ /h)	工作压力 (kpa)	运输距离 (m)		电机转速 (r/min)	电机功率 (kw)	活塞往复 次数 (次/min)	排浆口 内径 (mm)	最佳输 浆稠度 (cm)
		垂直	水平					
3	1500	40	150	1440	4	150	50	8~12

(2) 灰浆拌制机: 采用两台 200L 容积的拌制机, 轮流供料; 多台双轴搅拌机施工时可采用 2m³ 电脑计量的浆液拌合系统, 集中供浆;

(3) 灰浆集料斗, 容积应大于 0.4m³, 也可根据具体情况而定;

(4) 桩架: 起重能力应大于 10T, 提升速度 200-800mm/min, 纵横向均可移位, 各种配套桩架有: JJB 系列步履式桩架, JJ 系列走管式桩架和简易履带式桩架。

10.6.2 双轴水泥土搅拌桩施工工艺

1 施工准备

(1) 技术准备

依据岩土工程勘察资料, 对于无成熟施工经验的土层, 必要时应进行加固土室内配合比试验, 依据设计施工图和环境调查与分析, 编制施工组织设计, 安排好围护搅拌桩的施工顺序, 通过试成桩, 选择最佳水泥掺量, 确定水泥土搅拌桩施工工艺参数;

(2) 材料准备

水泥进场, 按每一袋装水泥或散装水泥出厂编号进行取样、送检, 不得有两个以上的出厂编号混合取样, 并须在开工前取得水泥检验合格证, 搭设水泥棚, 布置浆液拌站, 面积宜大于 40m², 一般泵送距离不宜大于 100m;

(3) 场地准备

清表及原地面整平。首先路基地面清表处理，在开挖表土后应彻底清除地表、地下的石块、树根块等一切障碍物；同时应清除高空障碍物；路基两侧必须开挖排水沟，以保证在施工期间不被水浸泡。沟槽开挖。开挖时应使沟槽平直，尽量往基坑外侧平移 10cm 左右，以免搅拌桩墙直接侵占到底板施工面。桩位放样。根据测量放出平面布桩图；并根据布桩图现场布桩桩位应用小木桩或竹片定位并做出醒目标志以利查找，定位误差 $<2\text{cm}$ 。

(4) 设备准备

设备进场。认真检查搅拌桩机的主要技术性能（包括桩机的加固深度、成桩直径、桩机转速及浆泵压力和泵送能力等）。搅拌头直径误差不大于 5mm，喷浆口直径不宜过大，应满足喷浆要求，从而确保所用桩机能满足该施工段的施工要求。桩机就位。桩机到达指定桩位、桩机置平，检查钻杆垂直度、钻头直径、桩位对中、道木铺设，必须做到相对水平，若遇地表软弱时，应采取措施，确保机架平稳，要求钻杆垂直度 $<1\%$ ，桩位偏移（纵横向）容许误差 $\pm 50\text{mm}$ 。

2 施工工艺

双轴水泥土搅拌桩（喷浆）施工顺序如图 10-10：

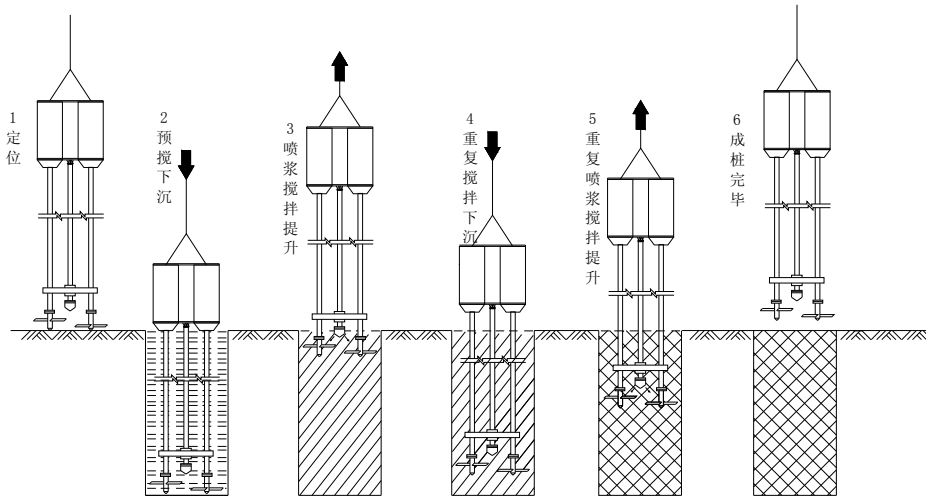


图 10-10 双轴搅拌桩施工顺序图

双轴搅拌桩施工工艺流程见图 10-11

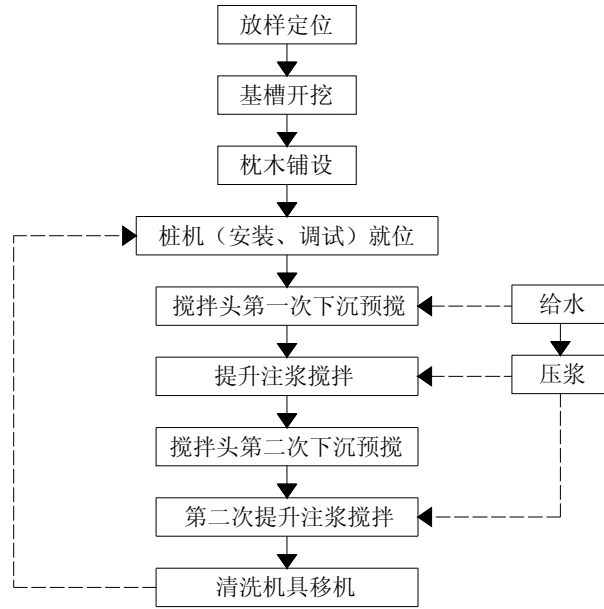


图 10-11 双轴搅拌桩施工工艺流程图

- (1) 桩机（安装、调试）就位。
- (2) 预搅下沉。待搅拌机及相关设备运行正常后，启动搅拌机电机，放松桩机钢丝绳，使搅拌机旋转切土下沉，钻进速度 $\leq 1.0\text{m}/\text{min}$ 。
- (3) 制备水泥浆。当桩机下降到一定深度时，即开始按设计及实验确定的配合比拌制水泥浆。水泥浆采用普通硅酸盐水泥，标号 P042.5 级，严禁使用快硬型水泥。制浆时，水泥浆拌和时间不得少于 5~10min，制备好的水泥浆不得离析、沉淀，每个存浆池必须配备专门的搅拌机具进行搅拌，以防水泥浆离析、沉淀，已配制好的水泥浆在倒入存浆池时，应加筛过滤，以免浆内结块。水泥浆存放时间不得超过 2h，否则应予以废弃。注浆压力控制在 0.5~1.0Mpa，流量控制在 30~50L/min，单桩水泥用量严格按设计计算量，浆液配比为水泥：清水=1：0.45~0.55，制好水泥浆，通过控制注浆压力和泵量，使水泥浆均匀地喷搅在桩体中。
- (4) 提升喷浆搅拌。当搅拌机下降到设计标高，打开送浆阀门，喷送水泥浆。确认水泥浆已到桩底后，边提升边搅拌，确保喷浆均匀性，同时严格按照设计确定的提升速度提升搅拌机。平均提升速度 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$ ，确保喷浆量，以满足桩身强度达到设计要求。在水泥土搅拌桩成桩过程中，如遇到故障停止喷浆时，应在 12 小时内采取补喷措施，补喷重叠长度不小于 1.0m。
- (5) 重复搅拌下沉和喷浆提升。当搅拌头提升至设计桩顶标高后，再次重复搅拌至桩底，第二次喷浆搅拌提升至地面停机，复搅时下钻速度 $\leq 1\text{m}/\text{min}$ ，提升速度 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$ 。
- (6) 移位。钻机移位，重复以上步骤，进行下一根桩的施工。相邻桩施工时间间隔保持在 16 小时内，若超过 16 小时，在搭接部位采取加桩防渗措施。
- (7) 清洗。当施工告一段落后，向集料斗中注入适量清水，开启灰浆泵，清洗全部管路

中的残存的水泥浆，并将粘附在搅拌头上的软土清洗干净。

10.6.3 水泥土搅拌墙施工要点

1 双轴水泥土搅拌桩重力式围护墙施工要点

(1) 工艺试成桩

试成桩的目的是确定各项施工技术参数，其中包括：

a. 搅拌机钻进深度、桩底、桩顶或喷、停浆面标高；

b. 搅拌机提升速度与浆泵流量的匹配；

c. 每 m 桩长或每根桩的送浆量、浆液到达喷浆口的时间；

d. 双轴搅拌机单位时间 (min) 内，固化剂浆液的喷出量 q (KN)，取决于搅拌头叶片直径、固化剂掺入比及搅拌机钻头提升速度。其关系如下(公式 10-18)：

$$q = \frac{\pi}{4} D \cdot \gamma_s \cdot a_w \cdot v \quad (10-18)$$

式中：

D ——搅拌头叶片直径 (m)；

γ_s ——土的重度 (kN/m^3)；

a_w ——固化剂掺入比 (%)；

v ——搅拌头提升速度 (m/min)；

e. 当喷浆量为定值时，土体中任意一点经搅拌头搅拌的次数越多，加固效果越好，搅拌次数 t 与搅拌头的叶片、转速和提升速度有如下关系：

$$t = \frac{h \cdot \Sigma_z \cdot n}{v} \quad (10-19)$$

式中：

h ——搅拌轴叶片垂直投影高度 (m)；

Σ_z ——搅拌头叶片总数；

n ——搅拌头转速 (r/min)；

v ——搅拌头提升速度 (m/min)；

(2) 施工参数与质量标准

水泥土搅拌桩采用 P042.5 新鲜普通硅酸盐水泥，单幅桩断面一般 $\Phi 700@500$ 双头搭接 200mm，常用水泥掺入比为被加固湿土重的 12%~15%，在暗浜区水泥掺量应再适当提高，水灰比 0.45~0.55。搅拌桩垂直度偏差不得小于 1%，桩位偏差不得大于 50mm，桩径偏差不得大于 4%。

(3) 施工浆液拌制及管理

水泥浆液应按预定配合比拌制，每根桩所需水泥浆液一次单独拌制完成；制备好的泥浆不

得离析，停置时间不得超过 2h，否则予以废弃，浆液倒入时应加筛过滤，以免浆内结块，损坏泵体。供浆必须连续，搅拌均匀。一旦因故停浆，为防止断桩和缺浆，应使搅拌机钻头下沉至停浆面以下 1.0m，待恢复供浆后再喷浆提升。如因故停机超过 3h，应先拆卸输浆管路，清洗后备用，以防止浆液结硬堵管。泵送水泥浆前管路应保持湿润，以便输浆。应定期拆卸清洗浆泵，注意保持齿轮减速箱内润滑油的清洗。

（4）施工技术

a. 搅拌桩施工必须坚持两喷三搅的操作顺序，且喷浆搅拌时，搅拌头提升速度不宜大于 0.5m/min，钻头每转一圈提升（或下降）量以 1.0~1.5cm 为宜，最后一次提升搅拌宜采用慢速提升，当喷浆口达桩顶标高时，宜停止提升，搅拌数秒，以保证桩头均匀密实。水泥搅拌桩预搅下沉时不宜冲水，当遇到较硬粘土层下沉太慢时，可适当冲水，但应考虑冲水成桩对桩身质量的影响。水泥石搅拌桩应连续搭接施工，相邻桩施工间隙不得超过 12h，如因特殊原因造成搭接时间超过 12h，应对最后一根桩先进行空钻留出榫头，以待下一批桩搭接，如间隙时间太长，超过 24h 与下一根桩无法搭接时，须采取局部补桩或注浆措施。

b. 对于双轴水泥重力式围护墙内套打钻孔灌注围护桩时，钻孔桩待重力式围护墙施工结束，未完成形成强度之前套打施工。水泥石重力式围护墙顶部插钢筋和插脚手架钢管，必须在成桩后 2~4h 后完成，应确保重力式墙体内部插钢筋和钢管的插入可行性。水泥石搅拌桩成桩后 7 天，采取轻便触探器，连续钻取桩身加固土样，检查墙体的均匀性和桩身强度，若不符合设计要求应及时调整施工工艺。水泥石重力式围护墙顶面的砼面应尽早铺筑，并使面层钢筋与水泥石搅拌墙体锚固筋（插筋）连成一体，砼面层未完成或未达设计强度，基坑不得开挖。水泥石重力坝围护墙须达到 28 天龄期或达到设计强度，基坑方可进行开挖。

（5）施工安全

当发现搅拌机的入土切削和提升搅拌负荷太大及电机工作电流超过额定值时，应减慢升降速度或补给清水；发生卡钻，整车等现象时应切断电源，并将搅拌机强制提升出地面，然后再重新启动电机。当电网电压低于 350V 时，应暂停施工，以保护电机。

2 三轴水泥石搅拌桩重力式围护墙施工要点

（1）三轴水泥石搅拌桩施工详见本手册 13-4。正常情况下搅拌机搅拌翼（含钻头）下沉喷浆、搅拌和提升喷浆、搅拌各一次，即二喷二搅的施工工艺，桩体范围做到水泥搅拌均匀，桩体垂直度偏差不得大于 1/200，桩位偏差不大于 20mm，浆液水灰比一般为 1.5~2.0，在满足施工的前提下，浆液水灰比可以适当降低。

（2）三轴水泥石搅拌桩施工前必须对施工区域地下障碍物进行探测，如有障碍物必须对其清理及回填素土（不得含有块石和生活垃圾）分层夯实后方可进行三轴水泥石搅拌桩施工，并应适当提高水泥掺量。第一批试桩（不少于 3 根）必须在监理人员监管下施工，以确定水泥投放量、浆液水灰比（用比重法控制）、浆液泵送时间和搅拌头下沉及上升速度、桩长垂直度

控制方法。

(3) 桩体施工必须保持连续性，近开挖面一排桩宜采用套接一孔法施工，确保防渗可靠性。其余桩体可以采用搭接法施工，搭接厚度不小于 200mm。施工时如因故停浆，应在恢复压浆前将三轴搅拌机提升或下降 0.5m 后再注浆搅拌施工，以保证搅拌桩的连续性。桩与桩的搭接时间间隔不得大于 24h。如因特殊原因造成搭接时间超过 24h，则需在图纸及现场标明位置并记录在案，经监理和设计单位认可后，采取在搭接处补做旋喷桩等技术措施，确保搅拌桩的质量。

(4) 三轴水泥土搅拌桩设计作为隔断场地内浅部浅水层或深部承压水层时，施工应采取有效措施确保截水帷幕的质量，在砂性土中搅拌桩施工应外加膨润土，以提高截水帷幕的止水及隔水效果。基坑开挖前应采用预降水法进行截水帷幕封闭性检测，并制定检验方案，予以实施。

(5) 采用三轴水泥土搅拌桩进行重力坝施工时，在坝体顶标高深度以上的土层被扰动区应采用低掺量水泥回掺加固。

(6) 三轴搅拌桩施工中产生的弃土必须及时清理，若长时间停止施工，应对压浆管道及设备进行清洗。

(7) 三轴水泥土搅拌桩施工过程，搅拌头的直径应定期检查，其磨损量不应大于 10mm，水泥土搅拌桩的施工直径应符合设计要求。

(8) 可以选用普通叶片与螺旋叶片交互配置的搅拌翼或在螺旋叶片上开孔，添加外掺剂等辅助方法施工，以避免较硬的粘土层发生三轴水泥土搅拌翼大量包泥“糊钻”影响施工质量。

10.6.4 施工环境保护

1. 水泥土搅拌桩重力式围护墙施工时，应预先了解下列周边环境资料：

- (1) 邻近建（构）筑物的结构、基础形式及现状；
- (2) 被保护建（构）筑物的保护要求；
- (3) 邻近管线的位置、类型、材质、使用状况及保护要求。

2. 坚持信息化施工管理。在施工过程中，应对周边环境及围护体系进行全过程监测控制，根据监测数据，对施工工艺、施工参数、施工顺序、施工速度进行及时的调整，尽量减少挤土效应对周边环境的影响，可采取以下措施：

- (1) 适当的降低注浆压力和减少流量，控制下沉（提升）速度。
- (2) 在靠近需保护建筑物和管线一侧，先施工单排水泥土搅拌桩封隔墙，再由近向远逐步向反向施工。
- (3) 限制每日水泥土搅拌桩墙体的施工总量，必要时采取跳打的方式。
- (4) 在被保护建筑物与水泥土搅拌桩墙体之间，设置应力释放孔或防挤沟。
- (5) 将浅部的重要管线开挖暴露并使其处于悬吊自由状态。
- (6) 三轴水泥土搅拌机通过螺旋叶片连续提升，因此挤土量较小，建议在环境保护要求

高、有条件的地区，优先选择三轴搅拌桩施工。

3. 施工中产生的水泥石浆，可集积在导向沟内或现场临时设置的沟槽内，待自然固结后，运至指定地点。

10.7 质量检验

水泥石重力式围护墙的质量检验按成桩施工期、开挖前和开挖期三个阶段进行。

10.7.1 成桩施工期质量检验包括机械性能、材料质量、掺合比试验等材料的验证，以及逐根检查桩位、桩长、桩顶高程、桩架垂直度、桩身水泥掺量、上提喷浆速度、外掺剂掺量、水灰比、搅拌和喷浆起止时间、喷浆量的均匀、搭接桩施工间歇时间等。

成桩施工期质量检验标准应符合表 10-4 的规定：

成桩施工期质量检验标准

表 10-4

检查项目	质量标准
水泥及外掺剂	设计要求
水泥用量	参数指标
水灰比	设计及施工工艺要求
桩底标高	±100mm
桩顶标高	+100mm、-50mm
桩位偏差	<50mm
垂直度偏差	<1%
搭接	≥200mm
搭接桩施工间歇时间	<16 小时

10.7.2 基坑开挖前的质量检测宜在围护结构压顶板浇注之前进行。检测包括桩身强度的验证和桩数的复核。对开挖深度超过5m的基坑应采用制作试块和钻取桩芯的方法检验桩长和桩身强度：

1. 试块制作应采用 70.7mm×70.7mm×70.7mm 立方体试模，宜每个机械台班制作一组。试块载荷试验宜在龄期 28 天后进行。
2. 钻取桩芯宜采用Φ110 钻头，连续钻取全桩长范围内的桩芯，桩芯应呈硬塑状态并无明显的夹泥、夹砂断层。取样数量不少于总桩数的 1%且不少于 5 根。有效桩长范围内的桩身强度应符合设计要求。

10.7.3 基坑开挖期的质量检测主要通过外观检验开挖面桩体的质量以及墙体和坑底渗漏水情况。

10.8 工程实例

上海浦东新区xx小区基坑围护工程

1. 工程概况

上海 xx 花园位于浦东桃林路、灵山路。拟建场地内将建四栋高层建筑及地下车库、商场、会所，地下 1 层，基坑开挖深度为 4.43 米~3.65 米。平面形状呈矩形，基坑占地面积约 5160 平方米，围护周长为 523 米。

2. 周围环境及地质资料

1) 周围环境

基坑东、南两侧临马路，西、北两侧临小区，马路下均有市政管线通过，基坑边离桃林路距离较近，最近的电力管线距基坑边约 3 米；小区内有多栋六层楼住宅及招商中心，均为天然地基条形基础，建筑物距基坑边约 10 米。

2) 地质资料

拟建场地，地面绝对标高约 4.1 米（吴淞零点，下同）。

在拟建场地钻探所达深度范围内地基土层均属第四系沉积物，主要由饱和粘性土、粉土、砂土等组成，场地土的类型为软弱场土。第③层砂性较重，渗透系数较大，当基坑开挖至底部时，在基坑内外水头差的作用下，土体易产生管涌、流砂等现象，施工时须特别注意。地下水位在地面下 1.2 米至 1.75 米。

地基土的物理力学性质指标见“地基土物理力学性质综合成果表”。

地基土物理力学性质综合成果(围护设计参数)表

层名	土层名称	重度 γ kN/m ³	固结快剪		渗透系数 K($\times 10^{-7}$ cm/s)	
			C	Φ	K_H	K_V
			(kPa)	(°)		
①	填土					
②	粘土	18.70	22.0	12.5	1.04	24.6
③	淤泥质粉质粘土夹砂质粉土	18.20	7.0	20.0	5150	3790
④	淤泥质粘土	17.10	14.0	10.5	20.0	4.03

3. 结构型式

根据总平面图的布置，整个场地较为狭长，近马路两侧有地下管线需要保护，且桃林路一侧离开较近；另外两边有多栋六层楼住宅及招商中心需要保护，因此，围护结构型式考虑采用既安全经济又利于加快工程进度的水泥土搅拌桩重力式结构，具体方案如下：

1) 围护墙采用双头水泥土搅拌桩，墙厚 2.7~3.2 米，桩深 8 米，内排加至深 10.5 米，搅拌桩水泥掺量为 13%。

2) 围护墙体顶部为现浇钢筋混凝土压顶板，板厚 0.15 米，加强墙体的整体性。

3) 围护墙体与钢筋混凝土压顶板之间设置 $\Phi 12@1000$ 的连接钢筋，长度 1.5 米。

4. 施工要求

1) 水泥掺量通过掺合比试验确定,一般水泥掺合比为 13% (重量比),局部暗浜区域掺量加大为 15%,水泥采用普通硅酸盐水泥,水灰比 0.45~0.55;

2) 开挖时水泥土搅拌桩的强度要求:无侧限抗压强度不低于 0.8MPa,抗剪强度不低于 0.2MPa;

3) 施工单位可根据土方开挖的时间要求掺加适量的外加剂以利于早期强度的提高,水泥土搅拌桩的养护期不得少于 28 天;

4) 相邻桩施工间隙时间不得大于 16 小时,否则认为出现冷缝,应采取补救措施;

5) 钢筋混凝土顶圈板混凝土强度等级为 C25,主筋净保护层厚度为 30mm;

5. 土方开挖、基坑降水要求

1) 土方开挖根据施工情况合理确定分区、分层开挖顺序。

2) 土方开挖必须分层进行,分层厚度不大于 2.0 米。必须严格控制相邻分区之间的土层高差(一般为 2 米左右),必须确保土坡自身稳定。

3) 场内堆载必须在坑边 10 米以外,10 米以内堆载不得大于 20kN/m²。

4) 坑内排水沟不得靠坑边布置。

5) 为便于基坑开挖和减少围护结构在开挖中变形,基坑内应设置井点预降水。水位宜降至基坑开挖面以下 0.5~1.0 米。

6) 井点降水应在基坑开挖前 2 周以上完成布设并开始降水。

7) 根据上海地区土质特点,井点应采用真空型式,确保降水效果。

8) 基坑内降水应注意坑内、外地下水位观测,防止影响周围环境。

6. 监测要求

为确保工程施工,附近建筑物、道路和地下管线等的安全,及时预报施工中出现的问題,指导施工,必须进行如下施工监测:

1) 墙体水平变形监测(测斜);

2) 墙顶变形及沉降监测;

3) 基坑外地面沉降监测;

4) 基坑内、外地下水位监测;

5) 附近地下管线的变形监测;

6) 附近建筑物沉降及倾斜监测。

7. 施工情况简介

1) 围护搅拌桩施工初期,由于施工工期紧张,搅拌桩施工速度比较快,造成相近的道路路面上抬 23mm,路沿石开裂,后来调整了施工顺序,由外排向内排后退施工,并采取了减慢施工速度、调整施工参数等措施,有效控制了施工搅拌桩阶段对周边环境的影响。

