

第 11 章 水泥土搅拌法

11.1 概述

水泥土搅拌法是利用水泥（或石灰）等材料作为固化剂，通过特制的搅拌机械，在地基深处就地将软土和固化剂（浆液或粉体）强制搅拌，由固化剂和软土间所产生的一系列物理化学反应，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土，从而提高地基土强度和增大变形模量的地基处理方法。根据施工方法的不同，水泥土搅拌法分为水泥浆搅拌和粉体喷射搅拌两种。前者是用水泥浆和地基土搅拌，后者是用水泥粉或石灰粉和地基土搅拌。

水泥土搅拌法分为深层搅拌法（湿法）和粉体喷搅法（干法）。水泥土搅拌法适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、粘性土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基。当地基土的天然含水量小于 30%（黄土含水量小于 25%）、大于 70%或地下水的 pH 值小于 4 时不宜采用干法。冬季施工时，应注意负温对处理效果的影响。

水泥浆搅拌法是美国在第二次世界大战后研制成功的，称之为就地搅拌法（Mixed-in-Place Pile（简称MIP法）。这种方法是从不断回旋的中空轴端部向周围已被搅松的土中喷出水泥浆，经叶片搅拌而形成水泥土桩，桩径 0.3~0.4m，长度 10~12m。1953 年日本清水建设株式会社从美国引进此法，1967 年日本港湾技术研究所土工部开始研制石灰搅拌施工机械。1974 年由日本港湾技术研究所等单位又合作开发研制成功水泥搅拌固化法（CMC），用于加固钢铁厂矿石堆场地基，加固深度达 32m。接着日本各大施工企业接连开发研制出加固原理、机械规格和施工效率各异的深层搅拌机械，例如DCM法、DMIC法、DCCM法。这些机械一般具有偶数个搅拌轴，搅拌叶片的最大直径可达 1.25m，一次加固的最大面积达 9.5m²，常在港工建筑中的防波堤、码头岸壁及高速公路高填方下的深厚软土地基加固工程中应用。

国内 1977 年由冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院进行了室内试验和机械研制工作，于 1978 年底制造出我国第一台 SJB-1 型双搅拌轴、中心管输浆、陆上型的深层搅拌机。1980 年初，首次在上海宝山钢铁总厂由第五冶金建设公司在三座卷管设备基础软土地基加固工程中正式开始应用并获得成功。同年 11 月由冶金部基建局主持，通过了“饱和软粘土深层搅拌加固技术”鉴定。1984 年开始，国内已能批量生产 SJB 型成套深层搅拌机械，并组建了专门的施工公司。1980 年初，天津市机械施工公司与交通部一航局科研所等单位合作，利用日本进口螺旋钻孔机械进行改装，制成单搅拌轴、叶片喷浆型深层搅拌机，1981 年在天津造纸厂蒸煮锅改造扩建工程中首次应用也获得成功。1983 年 1985 年浙江省建筑设计院在衢州市新建八层大楼工程中应用深层搅拌法加固人工杂填土地基，扩大了深层搅拌法适用土质范围。

粉体喷射搅拌法（Dry Jet Mixing Method，简称 DJM 法）由瑞典人 Kjeld Paus 于 1967 年提出设想，该设想为使用石灰搅拌桩加固 15m 深度范围内软土地基。并于 1971 年现场制成第一根用生石灰和软土搅拌制成的桩。次年在瑞典斯德哥尔摩以南约 10km 处的 Hudding 用石灰粉体喷射搅拌桩作为路堤和深基坑边坡稳定措施。瑞典 Linden-Alimak 公司还生产出专用的粉体搅拌施工机械，桩径可达 500mm，最大加固深度 10~15m。目前瑞典所施工的石灰搅拌桩已逾数百万延米。

同一时期，日本于 1967 年由运输部港湾技术研究所开始研制石灰搅拌施工机械，1974

年开始在软土地基加固工程中应用，并研制出两类石灰搅拌机械，形成两种施工方法。一类为使用颗粒状生石灰的深层石灰搅拌法（DLM法），另一类为使用生石灰粉末的粉体喷射搅拌法（DJM法）。

由于粉体喷射搅拌法采用粉体作为固化剂，不再向地基注入附加水分，反而能充分吸收周围软土中的水分，因此加固后地基的初期强度高，对含水量高的软土加固效果尤为显著。该技术在国外得到广泛应用。

铁道部第四勘测设计院于1983年初开始进行粉体喷射搅拌法加固软土的试验研究，并于1984年在广东省云浮硫铁矿铁路专用线上单孔4.5m盖板箱涵软土地基加固工程中使用，后来相继在武昌和连云港用于下水道沟槽挡土墙和铁路涵洞软基加固，均获得良好效果。它为软土地基加固技术开拓了一种新的方法，可在铁路、公路、市政工程、港口码头、工业与民用建筑等软土地基加固方面推广使用。

当水泥土搅拌法用于处理泥炭土、有机质土、塑性指数 I_p 大于25的粘土或地下水具有腐蚀性时以及无工程经验的地区，必须通过现场试验确定其适用性。

水泥土搅拌法加固软土技术，具有独特的优点：

(1) 水泥土搅拌法由于将固化剂和原地基软土就地搅拌混合，因而最大限度地利用了原土；

(2) 搅拌时无振动、无噪音和无污染，可在市区内和密集建筑群中进行施工；

(3) 搅拌时不会使地基侧向挤出，所以对周围原有建筑物及地下沟管影响很小；

(4) 水泥土搅拌法形成的水泥土加固体，可作为竖向承载的复合地基；基坑工程围护挡墙、被动区加固、防渗帷幕；大体积水泥稳定土等。设计灵活，可按不同地基土的性质及工程设计要求，合理选择固化剂及其配方；

(5) 根据上部结构的需要，可灵活地采用柱状、壁状、格栅状和块状等加固形式；

(6) 与钢筋混凝土桩基相比，可节约大量的钢材，并降低造价。

水泥加固土的室内试验表明，有些软土的加固效果较好，而有的不够理想。一般认为含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等粘土矿物的软土加固效果较好，而含有伊利石、氯化物和水铝英石等矿物的粘性土以及有机质含量高、酸碱度（pH值）较低的粘性土加固效果较差。

11.2 加固机理

11.2.1 水泥土的固化原理

一、水泥的水解和水化反应

普通硅酸盐水泥的主要成份有氧化钙(CaO)，二氧化硅(SiO₂)，三氧化二铝(Al₂O₃)和三氧化二铁(Fe₂O₃)，它们通常占95%以上，其余5%以下的成份还有氧化镁(MgO)，氧化硫(SO₃)等，由这些不同的氧化物分别组成了不同的水泥矿物、铝酸三钙、硅酸三钙、硅酸二钙、硫酸三钙、铁铝酸四钙、硫酸钙等。

国外使用水泥土搅拌法加固的土质有新吹填的超软土、泥炭土和淤泥质土等饱和软土。加固场所从陆地软土到海底软土，加固深度达60m。国内目前采用水泥土搅拌法加固的土质有淤泥、淤泥质土、地基承载力不大于120kPa的粘性土和粉土地基。当用于处理软土时，由不同的氧化物分别形成了不同的水泥矿物：硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙、

硫酸钙等。用水泥加固软土时，水泥颗粒表面矿物很快与土中的水发生水解和水化作用。目前认为，铝酸三钙水化反应迅速；硅酸三钙和铁铝酸四钙水化反应也较快，早期强度高，硅酸二钙水化反应较慢，但对水泥后期强度增长和抗水化性较好。其水泥的水化反应生成氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ），含水硅酸钙（ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ），含水铝酸钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ），含水铁酸钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）等化合物。

各自的反应过程如下：

(1)硅酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）：在水泥中含量最高（约占全重的 50%左右），是决定强度的主要因素。

(2)硅酸二钙（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）：在水泥中的含量较高，它主要产生后期强度。

(3)铝酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）：占水泥重量的 10%，水化速度最快，促进早凝。

(4)铁铝酸四钙（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）：占水泥重量的 10%左右，能促进早期强度。

所生成的氢氧化钙，含水硅酸钙能迅速溶于水中，使水泥颗粒表面重新暴露出来，再与水发生反应，这样周围的水溶液就逐渐达到饱和。当溶液达到饱和后，水分子虽继续深入颗粒内部，但新生成物已不再溶解，只能以细分散状态的胶体析出，悬浮于溶液中，形成胶体。

(5)硫酸钙（ CaSO_4 ）：虽然它在水泥中的含量仅占 3%左右，但它与铝酸三钙一起与水反应，生成一种被称为“水泥杆菌”的化合物。

根据电子显微镜的观察，水泥杆菌最初以针状结晶形式在比较短的时间里析出，其生成量随着水泥掺入量的多少和龄期的长短而异。由于 X 射线衍射分析可知，这种反应很迅速，反应结果把大量的自由水以结晶水的形式固定下来，这对于含水量高的软土的强度增长有特殊意义，使土中的自由水的减少量约为水泥杆菌生成量的 46%。当然，硫酸钙的掺量不能过多，否则这种水泥杆菌针状结晶会使水泥发生膨胀而遭到破坏。所以，如果使用得合适，在某种特定条件下可利用这种膨胀势来增加地基加固效果。

当水泥的各种水化物生成后，有的自身继续硬化，形成水泥石骨架；有的则与其周围具有一定活性的粘土颗粒发生反应。

二、离子交换和团粒化作用

软粘土中粒径小于 0.005mm 的颗粒较多，它是一种多相散布体，当它和水结合时，组成胶体分散系，表现出一种胶体特征。如粘土中含量最多的二氧化硅（ SiO_2 ）遇水后，形成硅酸胶体微粒，其表面带有钠离子（ Na^+ ）或钾离子（ K^+ ），它们形成的扩散层较厚，土颗粒距离也较大。它们能和水泥水化生成的氢氧化钙[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]中的钙离子（ Ca^+ ）进行当量吸附交换，这种离子当量交换，使土颗粒表面吸附的钙离子所形成的扩散层减薄，大量较小的土颗粒形成较大的土团粒，从而使土体强度提高。

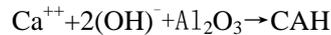
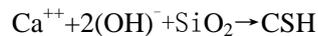
水泥水化后生成的凝胶离子的比表面积约比原水泥颗粒大 1000 倍，因而产生很大的表面能，有强烈的吸附活性，能使较大的土团颗粒进一步结合起来，形成水泥土的团粒结构，并封闭各土团之间的空隙，形成坚固的联结。从宏观上看，也就是水泥土的强度大大提高。

三、水泥的凝结与硬化

水泥的凝结与硬化是同一个过程的不同阶段。凝结标志着水泥浆失去流动性而具有一定的塑性强度；硬化则表示水泥浆固化所建立的结果具有一定的机械强度的过程。

水泥的水化反应开始处在碱性的氢氧化钙、硫酸钙的饱和溶液环境中，随着水泥水化反

应的深入，溶液中析出大量的钙离子，当其数量超过离子交换的需要量时，在碱性环境中，钙离子能使粘土矿物中的二氧化硅及三氧化二铝的一部分或大部分参与化学反应，并逐渐生成不溶于水的稳定的结晶化合物。其反应通式为



根据电子显微镜扫描，X射线衍射和差热分析得知这些结晶物大致是属于铝酸钙水化物CAH系的 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ 、 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、等；属于硅酸钙水化物CSH系的 $4\text{Ca}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 等，还有钙黄长石水化物 $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等。

这些化合物在水中和空气中逐渐硬化，增大了水泥土的强度。而且由于其结构比较致密，水分不易侵入，从而使水泥土具有足够的水稳定性。

四、碳酸化作用

水泥水化物中游离的氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 能吸收软土中的水和土孔隙中的二氧化碳(CO_2)，发生碳酸化反应，生成不溶于水的碳酸钙(CaCO_3)和水(H_2O)。

这种反应能使水泥土强度增加，但增长的速度较慢，幅度也很小。

而其他水化物继续与 CO_2 反应，使 CaCO_3 成份增加。如



反应生成的 CaCO_3 能使地基土的分散度降低，而强度及防渗性能增强。

碳酸化作用有时由于土中 CO_2 的含量很少，且反应缓慢，在实际工程中可以不予考虑。

11.2.2 水泥系固化剂的固化原理

以上为普通硅酸盐水泥的固化原理。如果使用水泥系固化材料，则因为水泥系固化材料中除水泥外尚加入了火山灰材料或无机化合物，其固化原理除了水泥的固化外，火山灰掺料(粉煤灰，高炉水淬炉渣等)及无机化合物(硫酸钙等)通过火山灰反应可以生成各种水化物，如硫酸铝酸钙、钙矾石、碳酸铝酸钙等。这些水化物有助于水泥土的强度增长。

从水泥加固土的机理分析可见，对软土地基深层搅拌加固技术来说，由于机械的切削搅拌作用，实际上不可避免地会留下一些未被粉碎的大小土团。在拌入水泥后将出现水泥浆包裹土团的现象，而土团之间的大孔隙基本上已被水泥颗粒填满。所以加固后的水泥土中形成一些水泥较多的微区，而在大小土团内部则没有水泥。只有经过较长的时间，土团内的土颗粒在水泥水解产物渗透作用下，才逐渐改变其性质。因此在水泥土中不可避免地会产生强度较大的和水稳定性较好的水泥石区和强度较低的土块区。两者在空间相互交替，从而形成一种独特的水泥土结构。因此可以得出定性的结论：水泥和土之间的强制搅拌越充分，土块被粉碎得越小，水泥分布到土中越均匀，则水泥土结构强度的离散性越小，其宏观的总体强度也越高。

11.2.3 水泥粉体喷射深层搅拌加固机理

粉体喷射深层搅拌常用的固化剂有水泥粉体、生石灰和消石灰，也有掺入粉煤灰、石膏等外加剂的，粉体固化剂与原状土搅拌混合后，使地基土和固化剂发生一系列物理化学反应，生成稳定的水泥土或石灰土。用水泥粉体作固化剂加固软土地基与水泥浆作固化剂加固原理

基本相同，只是用水泥粉体作固化剂水化反应放热直接在地基土中，使水分蒸发和吸收水分的能力提高。

11.3 室内外试验

软土地基深层搅拌加固法是基于水泥对软土的作用，而目前这项技术的发展仅经过二十余年，无论从加固机理到设计计算方法或者施工工艺均有不完善的地方，有些还处于半理论半经验的状态，因此应该特别重视水泥土的室内外试验。

11.3.1 水泥土的室内配合比试验

一、试验方法

1. 试验目的

进行水泥土的室内配比试验是为了达到以下目的：

- 1) 了解用水泥加固每一个工程中不同成因软土的可能性；
- 2) 了解加固各种软土最合适的水泥品种；
- 3) 了解加固某种软土所用水泥的掺入量、水灰比和最佳的外掺剂；
- 4) 了解水泥土强度增长的规律，求得龄期与强度的关系。

通过这些试验可为深层搅拌法的设计计算和施工工艺提供可靠的参数。

2. 试验设备

目前水泥土的室内物理力学性质试验尚未形成统一的操作规程，基本上都是利用现有的土工试验仪器及砂浆混凝土试验仪器，按照土工或砂浆混凝土的试验规程进行试验。

3. 土样制备

制备水泥土的土样一般分为两种

- 1) 风干土样：将现场挖掘的原状软土经过风干、碾碎、过筛而制成；
- 2) 原状土样：将现场挖掘的天然软土立即封装在双层厚塑料袋内，基本保持天然含水量。

4. 固化剂

制备水泥土的水泥可用不同品种（普通硅酸盐水泥、矿渣水泥、火山灰水泥及其他特别水泥）、各种标号的水泥、水泥掺入比可根据要求选用 7%~20% 等。水泥掺入比 α_w 是指水泥重量与被加固的软土重量之比，即

$$\alpha_w(\%) = \frac{\text{参加的水泥重量}}{\text{被加固软土的天然重量}} \times 100\%$$

5. 外掺剂

为改善水泥土的性能和提高其强度，可选用木质素磺酸钙、天然石膏、三乙醇胺、等外掺剂。结合工业废料处理，还可掺入不同比例的粉煤灰。

6. 试件的制作和养护

按照拟订的试验计划，根据配方分别称量土、水泥、外掺剂和水，放在容器内搅拌均匀。然后在选定的试模内装入一半试料，放在振动台上振动一分钟。再装入其余的试料后振动一分钟。最后将试件表面刮平，盖上塑料布防止蒸发过快。

试件成型后，根据水泥土强度决定拆模时间，一般为 1~2 天。拆模后的试件放入标准

养护室进行养护，达到规定龄期即可进行各种试验。

二、试验结果

1. 水泥土的物理性质

1) 重度：由于拌入软土中的水泥浆的容重与软土的容重相近，所以水泥土的容重与天然软土的容重相近。表 11-1 为水泥土的容重试验结果。由表可见，尽管水泥掺入比为 25%，水泥土的容重也仅比天然软土增加 3%。因此采用深层搅拌加固厚层软土地基时，其加固部分对下部未加固部分不致产生过大的附加荷重，也不会发生较大的附加沉降。

2) 比重：由于水泥的比重（3.1）比一般软土的比重（2.65~2.75）大，故水泥土的比重也比天然土稍大。当水泥掺入比为 15%~20%时，水泥土的比重比软土约增加 4%。

表 11-1 水泥土的容重试验结果

软土天然重度 γ_0 (kN/m ³)	水泥掺入比 a_w (%)	水泥土的重度 γ (kN/m ³)	$\frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} \times 100\%$
17.1	5	17.3	1.1%
	15	17.5	2.3%
	25	17.6	2.9%
17.5	7	17.6	0.6%
	15	17.8	1.7%
	20	17.8	1.7%

2. 水泥土的力学性质

1) 无侧限抗压强度及其影响因素

水泥土的无侧限抗压强度一般为 300~4000kPa，即比天然软土大几十倍至数百倍。其变形特征随强度不同而介于脆性体与弹塑性体之间。水泥土受力开始阶段，应力与应变关系基本上符合虎克定律。当外力达到极限强度的 70%~80%时，试块的应力和应变关系不再继续保持直线关系。当外力达到极限强度时，对于强度大于 2000kPa 的水泥土很快出现脆性破坏，破坏后残余强度很小，此时的轴向应变约为 0.8%~1.2%（如图 11-1 中的 A₂₀、A₂₅ 试件）；对于强度小于 2000kPa 的水泥土则表现为塑性破坏（如图 11-1 中的 A₅、A₁₀ 和 A₁₅ 试件）。

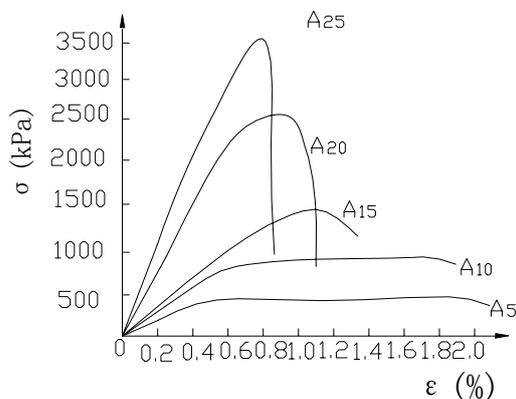


图 11-1 水泥土的应力—应变变形

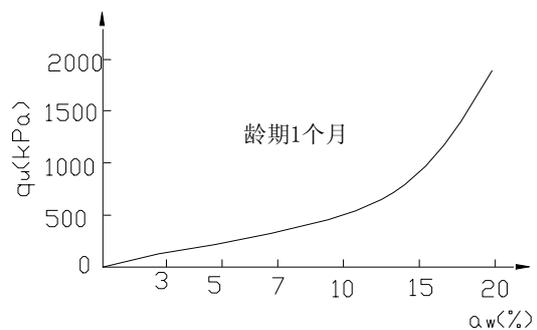


图 11-2 水泥掺入比与强度的关系

影响水泥石抗压强度的因素很多，主要有：

①水泥掺入比 a_w

水泥石的强度随着水泥掺入比的增加而增大（参见图 11-2），当 $a_w \leq 5\%$ 时由于水泥与土的反应过弱，水泥石固化程度低，强度离散性也较大，故在深层搅拌法的实际施工中，选用的水泥掺入比以大于 5% 为宜。

②龄期对强度的影响

水泥石强度随着龄期的增长而增大，一般在龄期超过 28 天后仍有明显增加（见图 11-3）。当水泥掺入比为 7% 时，120 天的强度为 28 天的 2.03 倍；当 $a_w = 12\%$ 时，180 天强度为 28 天强度的 1.83 倍。当龄期超过三个月后，水泥石的强度增长才减缓。根据电子显微镜观察，水泥和土的硬凝反应约需三个月才能充分完成。因此选用三个月龄期强度作为水泥石的标准强度较为适宜。

③水泥石的强度随水泥标号提高而增加，水泥标号提高 100 号，水泥石的强度 q_u 约增大 20%~30%。

④土样含水量对强度的影响

水泥石的无侧限抗压强度 q_u 随着土样含水量的降低而增大，当含水量从 157% 降低为 47% 时，强度则从 260kPa 增加到 2320kPa，见表 11-2。当土的含水量在 50%~85% 范围内变化时，含水量每降低 10%，水泥石强度可提高 30%。

表 11-2 含水量与强度的关系

含水量	天然土	47	62	86	106	125	157
(%)	水泥石 ^①	44	59	76	91	100	126
无侧限抗压强度 ^②		2320	2120	1340	730	470	260

①水泥掺入比 10%；②龄期 28 天

⑤土样中有机质含量对强度的影响

图 11-4 为两种有机质含量不同的软土所配制的水泥石的强度曲线。这两种土样均为某地海相沉积的淤泥质土，I 号土的有机质含量为 1.3%，II 号土的有机质含量为 10.01%。由图可见有机质含量少的水泥石强度比有机质含量高的水泥石强度高得多。由于有机质使土壤具有较大的水容量和塑性，较大的膨胀性和低渗透性，并使土壤具有酸性，这些因素都阻碍水泥水化反应的进行。因此有机质含量高的软土，单纯用水泥加固的效果较差。

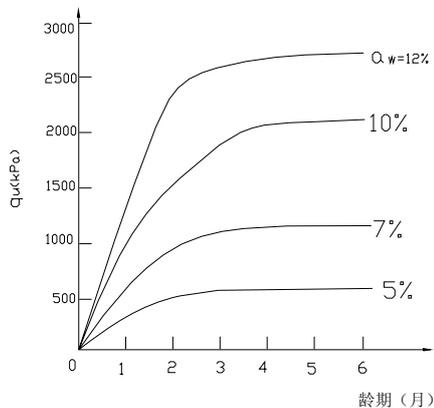


图 11-3 水泥石龄期与强度的关系

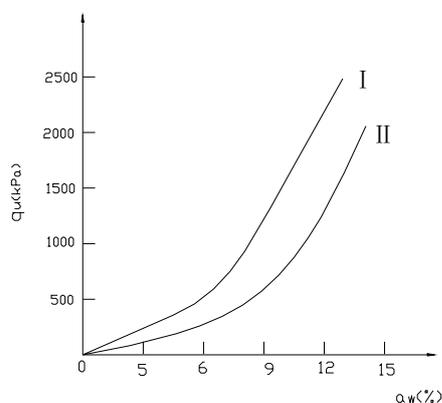


图 11-4 有机质含量与水泥石强度关系曲线

⑥外掺剂对强度的影响

不同的外掺剂对水泥土强度有着不同的影响，例如木质素磺酸钙对水泥土强度增长影响不大，主要起减水作用。石膏、三乙醇胺对水泥土强度有增强作用，而其增强效果对不同土样和不同水泥掺入比又有所不同，所以选择合适的外掺剂可以提高水泥土强度或节省水泥用量。

⑦粉煤灰对强度的影响

掺加粉煤灰的水泥土，其强度一般都比不掺粉煤灰的有所增长，如图 11-5 所示。不同水泥掺入比的水泥土，当掺入与水泥等量的粉煤灰后，强度均比不掺粉煤灰的提高 10%，因此采用深层搅拌法加固软土时掺入粉煤灰，不仅可消耗工业废料，还可稍微提高水泥土的强度。

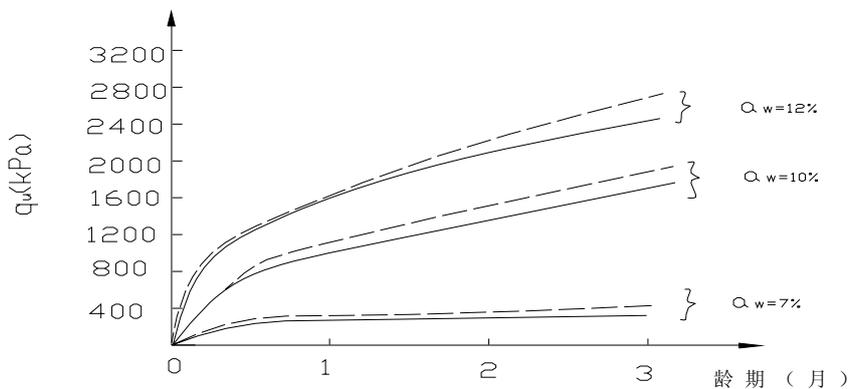


图 11-5 粉煤灰对强度的影响

2) 抗拉强度 σ_t

水泥土的抗拉强度随抗压强度的增长而提高，当水泥土的抗压强度 $q_u = 500 \sim 3485 \text{ kPa}$ 时，其抗拉强度 $\sigma_t = 46 \sim 222 \text{ kPa}$ 。即 $\sigma_t = (1/10 \sim 1/15)q_u$ 。

3) 抗剪强度

用高压三轴仪进行剪切试验表明：水泥土的抗剪强度随抗压强度的增加而提高。当 $q_u = 500 \sim 4000 \text{ kPa}$ 时，其粘聚力 $c = 100 \sim 1100 \text{ kPa}$ ，一般约为 q_u 的 20%~30%，其内摩擦角变化在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间。

水泥土在三轴剪切试验中受剪破坏时，试件有清楚而平整的剪切面，剪切面与最大主应力面夹角约为 60° 。

4) 变形模量

表 11-3 为不同无侧限抗压强度的水泥土进行变形模量试验的结果。由表可见，当 $q_u = 300 \sim 4000 \text{ kPa}$ 时，其变形模量 $E_{50} = 40 \sim 600 \text{ MPa}$ ，一般为 q_u 的 120~150 倍，即 $E_{50} = (120 \sim 150)q_u$ 。

表 11-3 水泥土的变形模量

试件编号	无侧限抗压强度 q_u (kPa)	破坏应变 ε_f (%)	变形模量 E_{50} (kPa)	$\frac{E_{50}}{q_u}$

1	274	0.80	37000	135
2	482	1.15	63400	131
3	524	0.95	74800	142
4	10.93	0.90	165700	151
5	1554	1.00	191800	123
6	1651	0.90	223500	135
7	2008	1.15	285700	142
8	2393	1.20	291800	121
9	2573	1.20	330600	131
10	3036	0.90	474300	156
11	3450	1.00	420700	121
12	3518	0.80	541200	153

5) 压缩系数和压缩模量

水泥石试件的压缩系数 a_{1-4} 约为 $(2.0 \sim 3.5) \times 10^{-5} \text{ (kPa)}^{-1}$ ，其相应的压缩模量 $E_0 = 60 \sim 100 \text{ MPa}$ 。

3. 水泥石的抗冻性能

将水泥石试件放置于自然负温下进行抗冻试验表明，其外观无显著变化，仅少数试块表面出现裂缝，有局部微膨胀或出现片状剥落及边角脱落，但深度及面积均不大，可见自然冰冻没有造成水泥石深部的结构破坏。

水泥石试块经长期冰冻后的强度与冰冻前的强度相比几乎没有增长。但恢复正温后其强度能继续提高，冻后正常养护 90 天的强度与标准强度非常接近，抗冻系数达 0.9 以上。

在自然温度不低于 -15°C 的条件下，冻胀对水泥石结构损害甚微。在负温时，由于水泥石与粘土之间的反应减弱，水泥石强度增长缓慢；恢复正温后随着水泥石水化等反应的继续深入，水泥石的强度可接近标准强度。因此只要地温不低于 -10°C ，就可以进行深层搅拌法的冬季施工。

11.3.2 深层搅拌桩的现场载荷试验

一、试验目的

1. 根据水泥石室内配合比试验求得的最佳配方，进行现场成桩工艺试验；
2. 在相同的水泥掺入比条件下，推求室内试块与现场桩身强度的关系；
3. 比较不同桩长与不同桩身强度的单桩承载力；
4. 确定桩土共同作用的复合地基承载力。

二、试验方法

1. 在桩身不同部位切取试件，运回实验室内分割成与室内试块同样尺寸的现场试件，在相同龄期时比较室内外试块强度之间的关系。

2. 单桩与复合地基的承载力试验，一般可采用荷重平台和千斤顶分级加载，用百分表测量桩身沉降量。

3. 为了解复合地基的反力分布、桩土应力分担比，可在荷载板下不同部位埋设土压力盒。

三、试验结果

1. 可选用二次喷浆搅拌的成桩工艺，使水泥浆同软土能均匀地拌合，并可保证到达最佳的水泥掺入比。

2. 当桩身强度大于 800kPa 时，桩长 10m 和 7m 的单桩允许承载力可达 250kN 和 200kN，相应沉降量小于 7mm，桩侧软土的平均容许摩阻力为 80~90kPa；当桩身强度小于 800kPa 时长度相同的单桩承载力随桩身强度减少而降低，例如桩身强度从 890kPa 减小至 250kPa，单桩容许承载力将从 250kN 降至 120kN。可见保证搅拌桩的长度和桩身强度达到设计要求是保证加固质量的关键。

3. 由搅拌桩和软土所组成的复合地基的承载力是由桩与桩间土共同承担的，当桩长为 10m，加固置换率（即在加固范围内的搅拌桩截面积之总和与加固面积之比）为 36% 的搅拌桩地基容许承载力可达 150kPa，比天然软土地基的容许承载力提高 1~1.5 倍。

11.4 设计计算

确定处理方案前应搜集拟处理区域内详尽的岩土工程资料。尤其是填土层的厚度和组成；软土层的分布范围、分层情况；地下水位及 pH 值；土的含水量、塑性指数和有机质含量等。

设计前还应进行拟处理土的室内配比试验。针对现场拟处理的最弱层软土的性质，选择合适的固化剂、外掺剂及其掺量，为设计提供各种龄期、各种配比的强度参数。

对竖向承载的水泥土桩强度宜取 90d 龄期试块的立方体抗压强度平均值；对承受水平荷载的水泥土桩强度宜取 28d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

(1) 固化剂

宜选用强度等级为 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥。水泥掺量除块状加固时可用被加固湿土质量的 7%~12% 外，其余宜为 12%~20%。湿法的水泥浆水灰比可选用 0.45~0.55。外掺剂可根据工程需要和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节省水泥等作用的材料，但应避免污染环境。

(2) 桩长

水泥土搅拌法的设计，主要是确定搅拌桩的置换率和长度。竖向承载搅拌桩的长度应根据上部结构对承载力和变形的要求确定，并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层。为提高抗滑稳定性而设置的搅拌桩，其桩长应超过危险滑弧以下 2m。

湿法的加固深度不宜大于 20m，干法的加固深度不宜大于 15m。

(3) 桩径

水泥土搅拌桩常用桩径为 500mm。

(4) 承载力

竖向承载水泥土搅拌桩复合地基的承载力特征值应通过现场单桩或多桩复合地基荷载试验的确定。在初步设计时也可按下式估算：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (11-1)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力特征值 (kPa)；

m ——面积置换率；

R_a ——单桩竖向承载力特征值 (kN);

A_p ——桩的截面积 (m^2);

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征 (kPa), 宜按当地经验取值, 如无经验时, 可取天然地基承载力特征值;

β ——桩间土承载力折减系数。

当桩端土未经修正的承载力特征值大于桩周土的承载力特征值的平均值时, 可取 0.1~0.4, 差值大时取低值; 当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土的承载力特征值的平均值时, 可取 0.5~0.9, 差值大时或设置褥垫层时均取高值。

单桩竖向承载力特征值应通过现场载荷试验确定。初步设计时也可由下两式估算, 取小值。应使由桩身材料强度确定的单桩承载力大于 (或等于) 由桩周土和桩端土的抗力所提供的单桩承载力:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (11-2)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (11-3)$$

式中 f_{cu} ——与搅拌桩桩身水泥配比相同的室内加固土试块 (边长 70.7mm 的立方体) 在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度平均值 (kPa);

η ——桩身强度折减系数, 干法可取 0.20~0.30, 湿法可取 0.25~0.33;

A_p ——桩的截面积 (m^2);

u_p ——桩的周长 (m);

n ——桩长范围内所划分的土层数;

q_{si} ——桩周第 i 层土的侧阻力特征值。对淤泥可取 4~7kPa; 对淤泥质土可取 6~12kPa; 对软塑状态的粘性土可取 10~15kPa; 对可塑状态的粘性土可取 12~18kPa;

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度 (m);

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力特征值 (kPa), 可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定确定;

α ——桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 0.4~0.6, 承载力高时取低值。

桩身强度折减系数 η 是一个与工程经验以及拟建工程性质密切相关的参数。工程经验包括对施工队伍素质、施工质量、室内强度试验与实际加固强度比值以及对实际工程加固效果等情况的掌握。拟建工程性质包括工程地质条件、上部结构对地基的要求以及工程的重要性等。目前在设计中一般取 $\eta = 0.2 \sim 0.33$ 。

桩端地基承载力折减系数 α 取值与施工时桩端施工质量及桩端土质等条件有关。当桩较短且桩端为较硬土层时取高值。如果桩底施工质量不好, 水泥土桩没能真正支撑在硬土层上, 桩端地基承载力不能发挥, 这时取 $\alpha = 0.4$ 。反之, 当桩底质量可靠时, 取 $\alpha = 0.6$, 通常情况下取 $\alpha = 0.5$ 。目前上海地区的水泥土搅拌桩均较长且桩端无较好土层, 故一般取 $\alpha = 0$ 。

对式 (11-2) 和式 (11-3) 进行分析可以看出, 当桩身强度大于式 (11-2) 所提出的强度值时, 相同桩长的桩的承载力相近, 而不同桩长的桩的承载力明显不同。此时桩的承载力

由地基土承载力控制,增加桩长可提高桩的承载力。但桩身强度是有一定限制的,也就是说,水泥土桩从承载力角度存在一个有效桩长,单桩承载力在一定程度上并不随桩长的增加而增大。上海地区桩身水泥土强度一般为 $1.0\sim 1.2\text{MPa}$ ($a_w = 12\%$ 左右),根据式(11-2)和式(11-3),直径500mm的单头搅拌桩有效桩长为7m左右,双头搅拌桩的有效桩长为10m左右。

根据上海地区大量的单桩静载荷试验结果,直径500mm的单头搅拌桩的单桩承载力一般为100kN左右,双头搅拌桩的单桩承载力为250kN左右。

湖北省地方标准《建筑地基基础技术规范》DB 42 / 242—2003中规定,水泥土搅拌桩复合地基承载力特征值不宜大于180kPa,桩径500mm的水泥土搅拌桩单桩承载力特征值不大于120kN。

(5) 垫层

竖向承载搅拌桩复合地基应在基础和桩之间设置150~300mm厚褥垫层,其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等,最大粒径不宜大于20mm。

(6) 布桩

竖向承载搅拌桩的平面布置可根据上部结构特点及对地基承载力和变形的要求,采用柱状、壁状、格栅状或块状等加固型式。桩可只在基础平面范围内布置,独立基础下的桩数不宜少于3根。柱状加固可采用正方形、等边三角形等布桩型式。

(7) 沉降计算

水泥土搅拌桩复合地基的变形 s 包括复合土层的平均压缩变形 s_1 与桩端下未加固土层的压缩变形 s_2 :

$$s = s_1 + s_2 \quad (11-4)$$

其中,复合土层压缩变形可按下式计算:

$$s_1 = \frac{(p_z + p_{z1})l}{2E_{sp}} \quad (11-5)$$

式中 s_1 ——复合土层的平均压缩变形;

p_z ——复合土层顶面的附加压力值(kPa);

p_{z1} ——复合土层底面的附加压力值(kPa);

l ——复合土层的厚度(m);

E_{sp} ——水泥土搅拌桩复合土层的压缩模量(kPa);可按下式计算:

$$E_{sp} = m E_p + (1 - m) E_s \quad (11-6)$$

E_p ——水泥土搅拌桩的压缩模量,可取(100~120) f_{cu} (kPa),对桩较短或桩身强度较低者可取低值;

E_s ——桩间土的压缩模量(kPa)。

桩端以下未加固土层的压缩变形可按等代实体基础法进行计算。

11.5 施工

水泥土搅拌法施工现场事先应予平整,必须清除地上和地下的障碍物。遇有明浜、池塘及洼地时应抽水和清淤,回填粘性土料并予以压实,不得回填杂填土或生活垃圾。

水泥土搅拌桩施工前应根据设计进行工艺性试桩,数量不得少于2根。当桩周为多层土

时，应对相对软土层增加搅拌次数或增加水泥掺量。

搅拌头翼片的枚数、宽度、与搅拌轴的垂直夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相互匹配，以确保加固深度范围内土体的任何一点均能经过 20 次以上的搅拌。

竖向承载搅拌桩施工时，停浆（灰）面应高于桩顶设计标高 300~500mm。在开挖基坑时，应浆搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

施工中应保持搅拌机底盘的水平和导向架的竖直，搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%；桩位的偏差不得大于 50mm；成桩直径和桩长不得小于设计值。

水泥土搅拌法的施工步骤由于湿法和干法的施工设备不同而略有差异。其主要步骤应为：

- (1) 搅拌机械就位、调平；
- (2) 预搅下沉至设计加固深度；
- (3) 边喷浆（粉）、边搅拌提升直至预定的停浆（灰）面；
- (4) 重复搅拌下沉至设计加固深度；
- (5) 根据设计要求，喷浆（粉）或仅搅拌提升直至预定的停浆（灰）面；
- (6) 关闭搅拌机械。

在预（复）搅下沉时，也可采用喷浆（粉）的施工工艺，但必须确保全桩长上下至少再重复搅拌一次。

11.5.1 湿法

施工前应确定灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管到达搅拌机喷浆口的时间和起吊设备提升速度等施工参数，并根据设计要求通过工艺性成桩试验确定施工工艺。

所使用的水泥都应过筛，制备好的浆液不得离析，泵送必须连续。拌制水泥浆液的灌数、水泥和外掺剂用量以及泵送浆液的时间等应有专人记录；喷浆量及搅拌深度必须采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录。

搅拌机喷浆提升的速度和次数必须符合施工工艺的要求，并应有专人记录。

当水泥浆液到达出浆口后，应喷浆搅拌 30s，在水泥浆与桩端土充分搅拌后，再开始提升搅拌头。

搅拌机预搅下沉时不宜冲水，当遇到硬土层下沉太慢时，方可适量冲水，但应考虑冲水对桩身强度的影响。

施工时如因故停浆，应将搅拌头下沉至停浆点以下 0.5m 处，待恢复供浆时再喷浆搅拌提升。若停机超过三个小时，宜先拆卸输浆管路，并妥善加以清洗。

壁状加固时，相邻桩的施工时间间隔不宜超过 24h。如间隔时间太长，与相邻桩无法搭接时，应采取局部补桩或注浆等补强措施。

11.5.2 干法

喷粉施工前应仔细检查搅拌机械、供粉泵、送气（粉）管路、接头和阀门的密封性、可靠性。送气（粉）管路的长度不宜大于 60m。

水泥土搅拌法（干法）喷粉施工机械必须配置经国家计量部门确认的具有能瞬时检测并记录出粉量的粉体计量装置及搅拌深度自动记录仪。

搅拌头每旋转一周，其提升高度不得超过 16mm。搅拌头的直径应定期复核检查，其磨

耗量不得大于 10mm。当搅拌头到达设计桩底以上 1.5m 时，应即开启喷粉机提前进行喷粉作业。当搅拌头提升至底面下 500mm 时，喷粉机应停止喷粉。

成桩过程中若因故停止喷粉，则应将搅拌头下沉至停灰面以下 1m 处，待恢复喷粉时再喷粉搅拌提升。

需在地基土天然含水量小于 30% 土层中喷粉成桩时，应采用地面注水搅拌工艺。

11.6 质量检验

混凝土搅拌桩的质量控制应贯穿在施工的全过程，并应坚持全程的施工监理。施工过程中必须随时检查施工记录和计量记录，并对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。检查重点是：水泥用量、桩长、搅拌头转数和提升速度、复搅次数和复搅深度、停浆处理方法等。

11.6.1 施工质量检验

在施工期，每根桩均应有一份完整的质量检验单，施工人员和监理人员签名后作为施工档案。质量检验主要有下列各项：

1 桩位。通常定位偏差不应超出 50mm。施工前在桩中心插桩位标，施工后将桩位标复原，以便验收。

2 桩顶、桩底高程。均应满足设计要求。桩底一般应超过 100~200mm，桩顶应超过 0.5m。

3 桩身垂直度。每个桩施工时均应用水准尺或其他方法检查导向架和搅拌轴的垂直度，间接测定桩身垂直度。通常垂直度误差不应超过 1%。当设计对垂直度有严格要求时，应按设计标准检验。

4 桩身水泥掺量。按设计要求检查每根桩的水泥用量。通常考虑到按整包水泥计量的方便，允许每根桩的水泥用量在 $\pm 25\text{kg}$ （半包水泥）范围内调整。

5 水泥标号。水泥品种按设计要求选用。对无质保书或有质保书的小水泥厂的产品，应先做试块强度试验，试验合格后方可使用。对有质保书（非乡办企业）的水泥产品，可在搅拌施工时，进行抽查试验。

6 搅拌头上提喷浆（或喷粉）的速度。一般均在上提时喷浆或喷粉，提升速度不超过 0.5m/min。通常采用二次搅拌。当第二次搅拌时，不允许出现搅拌头未到桩顶时浆液（或水泥粉）就已拌完的现象。有剩余时可在桩身上部第三次搅拌。

7 外掺剂的选用。采用的外掺剂应按设计要求配制。常用的外掺剂有氯化钙、碳酸钠、三乙醇胺、木质素磺酸钙、水玻璃等。

8 浆液水灰比。通常为 0.45~0.5 范围，不宜超过 0.5。浆液拌和时间应按此水灰比定量加水。

9 水泥浆液搅拌均匀性。应注意贮浆桶内浆液的均匀性和连续性，喷浆搅拌时不允许出现输浆管道堵塞或爆裂的现象。

10 喷粉搅拌的均匀性。应有水泥自动计量装置，随时指示喷粉过程中的各项参数，包括压力、喷粉速度和喷粉量等。

11 喷粉到距地面 1~2m 时，应无大量粉末飞扬，通常需适当减小压力，在孔口加防护罩。

12 对基坑开挖工程中的侧向围护桩，相邻桩体要搭接施工，施工应连续，其施工间歇时间不宜超过 8~10h。

13 成桩后 3d 内，可用轻型动力触探 (N_{10}) 检查每米桩身的均匀性，检验数量为总桩数的 1%，且不少于 3 根。

14 成桩 7d 后，采用浅部开挖桩头，目测检查搅拌的均匀性，量测成桩直径。检查量为总桩数的 5%。

11.6.2 竣工验收检测

(1) 竖向承载水泥土搅拌桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

(2) 载荷试验必须在桩身强度满足试验荷载条件时，并宜在成桩 28d 后进行。检验数量为桩总数的 0.5%~1%，且每项单体工程不应少于 3 点。

(3) 经触探和荷载试验检验后对桩身质量有怀疑时，应在成桩 28d 后，用双管单动取样器钻取芯样作抗压强度检验，检验数量为桩总数的 0.5%，且不少于 3 根。

(4) 对相邻桩搭接要求严格的工程，应在成桩 15d 后，选取数根桩进行开挖，检查搭接情况。

(5) 基槽开挖后，应检验桩位、桩数与桩顶质量，如不符合设计要求，应采取有效补强措施。

(6) 建筑物竣工后，尚应进行沉降、侧向位移等观测。这是最为直观检验加固效果的理想方法。

对作为侧向围护的水泥土搅拌桩，开挖时主要检验以下项目：

- ① 墙面渗漏情况；
- ② 桩墙的垂直和整齐度情况；
- ③ 桩体裂缝、缺损和漏桩情况；
- ④ 桩体强度和均匀性；
- ⑤ 桩顶和路面顶板的连接情况；
- ⑥ 桩顶水平位移量；
- ⑦ 坑底渗漏情况；
- ⑧ 坑底隆起情况。

11.7 工程实例

11.7.1 工程实例一

一、工程概况

广州市某粮食仓库长 30m，宽 16m，单层承重墙结构，拱形屋面。条形基础宽度 1.5m，埋深 0.9m。设计要求基础下地基承载力达到 100kPa，而地坪下的地基承载力要求达到 40kPa。拟建场地表层为 1.5m 厚的杂填土，其下即为厚度 30m、含水量高达 70%、地基承载力仅 30kPa、压缩模量为 1.45MPa 的淤泥层。地基土不能满足上部结构的要求，需经人工加固。经多种地基加固方案的比较，根据现场的施工条件，决定采用喷粉搅拌法加固淤泥土层。

二、设计

根据现场施工机械条件和土质条件，软土地基的加固深度选定为 9m。所以计算桩长 L 为：

$$L = 9.0 - 0.9 = 8.1\text{m}$$

喷粉搅拌桩机的钻头直径选用 500mm, 所以单桩截面积 $A_p = 0.2\text{m}^2$, 周长为 $U_p = 1.57\text{m}$ 。由于桩长未穿透软土, 故为纯摩擦桩。侧摩阻力取 $\bar{q}_s = 5.5\text{kPa}$ 。

故单桩承载力为 $\bar{q}_s U_p L = 70\text{kPa}$ 。

天然地基的承载力 $f_{sk} = 30\text{kPa}$, 要求复合地基承载力 $f_{spk} = 100\text{kPa}$, 因此喷粉桩的面积置换率 m 为:

$$m = \frac{f_{sp,k} - \beta f_{s,k}}{\frac{R_k^d}{A_p} - \beta f_{s,k}}$$

上式中 β 取 0.9, 因此条形基础下每根喷粉桩的加固面积为 $A = \frac{A_p}{m} = 0.88\text{m}^2$ 。

对条形基础下的喷粉搅拌桩布桩形式为: 以基础中心线向两边外推 0.5m, 布置两排, 排距 1m, 桩距 0.8m, 两排桩交叉排列。

地坪处理要求较低, 按 $1.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ 间距布桩, 面积置换率 m 为 0.07。加固深度仍为 9m, 因此该复合地基的承载力可达到: $f_{spk} = 0.07 \times \frac{70}{0.2} + (1 - 0.07) \times 30 = 52\text{kPa} > 40\text{kPa}$ 。

已满足地坪设计要求。

三、施工情况

喷粉搅拌桩的施工采用 GPP-5 型粉体搅拌机械。条形基础部分的处理固化剂采用 32.5 号普通硅酸盐水泥, 掺入比 18%, 即每延米喷水泥粉 60kg, 为降低原淤泥层的含水量, 提高条形基础部分的地基承载力, 施工中又间隔一定距离增加了 50 根石灰粉体搅拌桩。地坪处理部分采用石灰粉体搅拌法, 掺入比 15%, 即每延米喷入石灰粉 50kg。运抵工地的石灰为生石灰块料, 在现场加工粉碎后立即使用, 该石灰粉的 CaO 含量高达 90%。

施工钻进根据不同土质采用不同的转速, 对上部杂填土的钻进速度为 0.45m/min; 而对淤泥层为 1.47m/min。钻进中最大风压 0.2MPa, 最大风量 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。喷粉搅拌时采用 0.45m/min 的提升速度, 最大的压缩空气压力为 0.3MPa, 风量 $50 \sim 70\text{m}^3/\text{h}$ 。为了保证桩体的均匀性, 采用了以下施工工艺: 切土钻进—提升喷粉搅拌—重复钻进搅拌—提升搅拌的。

本工程共施工水泥粉搅拌桩 137 根, 计 1233 延米; 施工石灰粉搅拌桩 163 根, 计 1232 延米。工期半个月。工程费用 10 万元。

四、加固效果检验

为了对粉体搅拌法处理深厚层淤泥的效果进行检验, 在施工完毕后进行了桩头开挖检查, 进行了现场单桩及复合地基荷载试验、桩体标准贯入试验以及桩间土取样试验。

桩头开挖共 30 余根, 桩体成形完整, 桩身坚硬, 强度超过设计要求, 桩间土质也得到了明显的改善。

单桩荷载试验采用 $\phi 500\text{mm}$ 的压板置于桩顶; 单桩复合地基采用 $1.05\text{m} \times 1.05\text{m}$ 方形压板, 板下铺设 2cm 的砂垫层, 桩位于压板正中央。

图 11-6 为单桩和复合地基试验所得的荷载—沉降关系曲线。

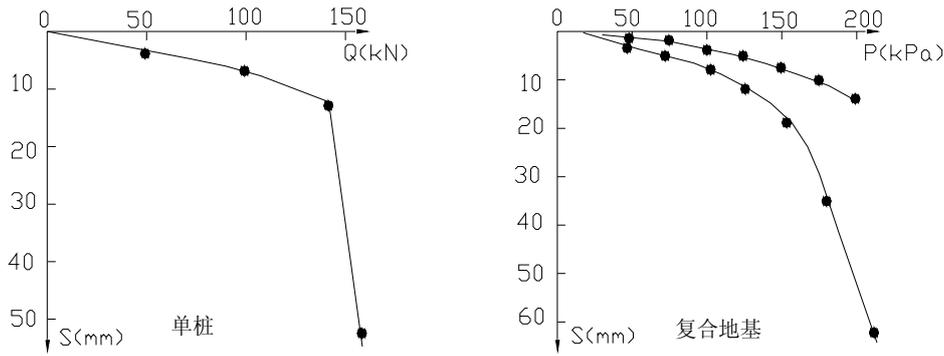


图 11-6 现场荷载试验曲线

由图 11-6 可以得出单桩极限荷载为 140kN，此时的累计沉降为 15mm。因此单桩允许承载力可取 70kN，相应的沉降为 4.0mm。而复合地基的荷载—沉降曲线为一条无明显拐点的渐增曲线，如按取荷载板宽的 0.4%（现行规范为 0.6%）（即 4mm）所对应的荷载作为承载力的标准值，则两组试验承载力可取 100kPa 和 125kPa，相应的变形模量可取 13 和 20MPa，满足设计要求。共进行了 5 根桩的桩体标准贯入试验，结果汇总见表 11-4。

表 11-4 桩体标贯击数平均值

桩号	固化剂种类	龄期（天）	平均标贯击数 $N_{63.5}$
1	水泥	65	15.7
2	水泥	57	13.4
3	水泥	54	13.0
4	石灰	43	6.4
5	石灰	30	5.1

由表 11-4 可见：桩体强度随龄期的增长而增加。例如石灰粉体搅拌桩 30d 龄期的平均标贯击数为 5.1；而 43d 龄期的平均标贯击数为 6.4。即 13 天中增加了 25.5%。

对 28d 龄期的石灰粉体搅拌桩的桩间土取样后进行室内物理力学性质检验；并与施工前原状土的有关指标进行对比，其结果见表 11-5。

通过工程检测可以得到下列结论：

1. 水泥粉体搅拌桩的桩体强度比石灰粉体搅拌桩的高。水泥土的强度将随水泥掺量的增加而增加；而石灰土随石灰掺量增加而增长的幅度小得多，而且当石灰掺入比大于 20% 后，石灰土的强度不会再随掺入比的增大再有多少增加。

2. 石灰粉体搅拌桩会使桩周土的性质得到明显的改善，其改善的程度则随桩周土与桩的距离的增大而减弱。而且与水泥粉体搅拌桩相比，石灰搅拌法对桩间土的改善要好得多。

表 11-5 与桩不同距离的桩周土的物理力学指标改善对比

试验项目 试验数据 取样时间		含水量 $w(\%)$	天然重度 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	变形模量 $E(\text{MPa})$
原状土		70.4	16.0	1.86	1.78	1.45
加固后	距桩 45cm	56.09	16.9	1.49	0.97	2.20
	距桩 75cm	62.31	16.8	1.59	1.20	1.84

11.7.2 工程实例二

一、工程概况

南湖新村系江苏省南京市重点新建的住宅小区之一，占地面积 0.64km^2 ，拟建 200 余栋多层住宅，建筑面积达 $550,000\text{m}^2$ 。场地为长江及秦淮河的漫滩地带，主要地层为高压缩性流塑状的淤泥质亚粘土，厚度超过 30m，土质松软，承载力很低。

为了提高软土地基的承载能力，充分利用有限的建筑场地，增加住宅楼层数，南京市城镇建设综合开发公司第五处和南京市建筑设计院除采用大开挖深换土、使用大板和折板基础外，还采用了碎石桩、石灰桩、现场灌注素混凝土桩、锥形桩以及深层搅拌法等地基处理措施。

受冶金工业部建筑研究总院地基室、南京市城镇建设综合开发公司和南京市建筑设计院的委托，对南湖新村 18 栋六层和七层的住宅楼软土地基进行深层搅拌桩加固，于 1984 年 8 月至 1985 年 4 月共施工搅拌桩 2861 根，共计 27657.5 延米，完成搅拌桩荷载试验四组，水泥石强度检验两百余组和 95 根桩的桩身质量检验。在正常施工的情况下，每栋住宅楼地基加固工期仅 7~10 天，与原拟采用的钢筋混凝土现场灌注桩相比，节约地基加固费用 100 万元。

二、拟建场地工程地质条件

南湖新村场地主要地层为高压缩性的淤泥质亚粘土，其表面有 1.5~3.0m 厚的人工填土，容许承载力为 75kPa，其下为未被钻穿的厚层淤泥质亚粘土，容许承载力仅 60kPa。土样有机质含量为 2.37%，可溶盐含量为 0.135%，烧失量为 6.94%。各土层物理力学性质指标见表 11-6。

表 11-6 各土层物理力学性质指标

层次	厚度 (m)	土名	含水量 $w(\%)$	容重 $\gamma /$ kN/m^3	孔隙 比 e	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	粘聚 力 $c /$ kPa	内摩 擦角 $\phi(^{\circ})$	压缩 模量 $E_s /$	容许 承载 力 /
----	-----------	----	----------------	-------------------------------------	-------------	-------------------	-------------------	----------------------	------------------------------	---------------------	-----------------

										kPa	kPa
①-2	0~1.5	淤泥 及淤 泥质 填土	54	16.9	1.50	18	1.66	4	12.6	1560	
①-3	1.5 ~ 3.0	素填 土	40	18.2	1.10	20	0.85	12	13.5	3640	75
②	未穿	淤泥 质亚 粘土	47	17.4	1.31	14	1.78	4	17.5	2090	60

三、设计

为获得设计工作必需的搅拌桩参数，在施工现场附近进行了现场试验。这里主要介绍一下地基加固设计。

(一) 布桩方案

南湖新村采用深层搅拌加固的住宅楼主要有七层点式和六层条式两种。七层点式住宅楼荷重较大，基底压力达 150kPa，但其上部建筑相对刚度较大，因此建筑物沉降将比较均匀，根据这一个特点，深层搅拌加固采用柱状加固型式。对于六层条式住宅楼来说，虽其基底压力小于 140kPa，但其上部建筑长高比较大，刚度相对较小，易产生不均匀沉降；尤其是六栋底层为商店的临街住宅楼，建在地势低洼、又是新近刚回填的鱼塘上，极易产生不均匀沉降，因此搅拌加固设计中采用了壁状加固型式，即桩与桩搭接成壁，纵横方向的水泥土壁又交叉成格栅状，使全部的搅拌桩连成一个整体，如同一个不封底的箱形基础，以减少不均匀沉降。此外对于一半基础座落在新填的鱼塘上，另一半座落在岸坡上的条式住宅楼，则通过不同的桩长设计来调整不均匀沉降。

(二) 七层点式住宅楼地基加固设计

南湖新村西五区七层点式住宅楼场地为征用的菜地，主要地基土为厚层淤泥质亚粘土，容许承载力为 70kPa，表层有 1.5~2.0m厚的素填土，容许承载力为 80kPa。这种七层点式住宅楼的建筑面积 1560m²，基础占地面积为 228.04m²，基底压力为 152.2kPa。分别包括以下三方面：

1. 搅拌单桩的设计

设计桩长考虑场地标高与基底标高之间的距离，单桩承载力按摩擦型桩计算。

2 搅拌桩置换率 a_c 和桩数 n 的计算

3. 群桩基础验算

将加固后的桩群视为一个格子状的假想实体基础，然后分别进行承载力验算和沉降验算。

(三) 底层为商店的六层条式住宅楼地基加固设计

南湖新村西三区 13 号商店住宅楼建在西三区东部鱼塘上，塘底标高 +3.8~+4.0m，基底设计标高为 +5.5m，鱼塘在地基加固施工前新填素粘土 1.5~2.0m，其下为淤泥质亚粘土，

容许承载力为 65kPa, 新填土容许承载力根据轻便触探锤击数并考虑未固结等因素取 50kPa。六层条式住宅楼建筑面积 2037m², 条基底面积 426.7m², 基底压力 121.6kPa。分别包括以下三方面:

1. 搅拌单桩的设计

计算桩长按摩擦型桩考虑, 不考虑新填土层桩段长度。

2. 水泥土搅拌桩置换率 a_c 和桩数 n 的计算

3. 群桩基础验算

将加固后的桩群视为一格子状的假想实体基础; 然后, 再分别进行承载力验算和沉降验算。

四、施工

施工参数以及施工工艺此处从略, 本小节主要介绍一下变掺量搅拌。

在搅拌桩施工中, 根据摩擦型搅拌桩的受力特性, 采用了变掺量的施工工艺。所谓变掺量即桩端、桩中段和桩顶的水泥掺入比相应于桩身应力而变化, 即用不同的注浆提升速度和注浆次数来满足各桩段水泥掺入比的要求。

对于土质条件比较复杂的区段, 为了保证搅拌质量, 在搅拌施工前先用轻便触探仪对全场地进行触探, 划分各土层分界线, 确定相应的注浆量。

在成桩过程中, 凡是由于电压过低或其他原因造成停机或使成桩工艺中断的, 当搅拌机重新启动后, 为了防止断桩, 均将深层搅拌机下沉 0.5m 再继续成桩。

五、质量检验

(一) 水泥加固土强度检验

水泥加固土除与被加固土性质、状态、水泥掺入比以及养护龄期等因素有关以外, 还与所用水泥土的质量密切相关。由于搅拌桩水泥掺入比的设计是以水泥加固土的室内试验为根据的, 而施工现场所用的水泥牌号往往与室内试验所用的不同, 因此实际工程所用的水泥能否达到设计的加固效果是质量检验的首要项目。

为保证水泥加固土强度满足设计要求, 当每批施工用的水泥进场后, 将事先准备好的土样, 按设计配方制作成水泥土试块, 进行短期的 (1 天、3 天、7 天) 的强度试验, 试验满足要求的水泥方允许投入工程使用, 试验不满足者根据具体情况作进一步水泥检验 (包括强度和成分) 或加大掺量使用。

(二) 制桩质量评定

在保证施工用水泥符合要求的前提下, 决定搅拌桩质量的关键是注浆量和搅拌均匀程度。南湖新村搅拌桩加固工程施工现场有专人负责制桩记录, 详细记录每根工程桩的施工工艺, 质量检验员根据制桩记录, 对照标准工艺对每根工程桩进行质量评定, 对于不合格的工程桩由质检员根据具体情况, 通过分析提出补救措施。

(三) 搅拌桩施工质量的现场检验

根据水泥土桩室内模型试验资料 and 水泥土桩工作原理分析, 水泥土搅拌桩的桩轴力自上而下逐渐减小, 最大桩轴力位于桩顶以下两倍桩直径的深度范围内。由此推断, 现场搅拌工程桩最大的桩轴力应在桩顶以下 3m 范围内。但这部分受力较大的桩段却往往因为缺少上覆土层压力或施工不慎而不密实或搅拌均匀, 从而影响成桩质量。因此, 搅拌桩质量检验的重

点一般都放在桩顶以下 4m 范围内。

南湖深层搅拌工程桩的质量检验主要使用轻便触探仪,在工程桩成桩后的一周时间内利用轻便触探的钻头提取桩身水泥土样以观察搅拌均匀程度,同时根据轻便触探击数判断各桩段水泥土的强度。检验桩的数量一般占工程桩总数的 3%~5%。

(四) 基槽开挖后验收

南湖新村的搅拌桩是根据基础荷载大小布桩,设计要求桩位误差不小于 10cm,在填石层内遇到障碍物时也不得大于 20cm。搅拌桩施工时,由于各种因素的影响,有可能造成桩位偏离,但偏离程度只有在基槽开挖后才能准确测定,根据施工记录发现桩头质量有疑问的桩也只有在开挖后才能确定和加以补救。因此验收工作一般均在基槽开挖时进行。

(1) 桩位验收

基槽开挖后,测放基础轴线或基础轮廓线,记录实际桩位,根据桩偏位的数量、部位和程度、对安全度加以分析,确认处理方案。

(2) 桩头水泥土强度验收

水泥土强度随土样的变化而有较大的差异,搅拌桩水泥土强度参数是根据现场主要土类试验得出的。表层是回填土层,由于回填土类混杂,因此对加固后的水泥土强度有较大影响,一般根据施工记录和钎探检验,对有疑问的桩头进行水泥土强度检查,如有强度不足,即可将软弱部分挖除,回填素混凝土或砂浆。

六、住宅楼竣工后的沉降观测

对南湖新村 18 栋采用深层搅拌法加固软土地基的住宅楼,进行了定期沉降观测。使用一年半后的累计沉降表明,总沉降量较小,而且每栋住宅楼各观测点的沉降量也比较均匀,倾斜率很小,建筑物没有产生裂缝,使用正常。