

# 深层水泥搅拌法成桩机理分析 及其质量通病的防治

郑永枢 (浙江省平阳县建筑设计院)

【提要】 本文详细介绍了 DCM 工法成桩的适应性、机理、以及影响桩身质量强度的因素,提出了桩身质量通病的防治,并对水泥搅拌桩质量事故的工程实例进行了分析。

## 1. 前言

深层水泥搅拌法又称 DCM 工法,它是利用特制的深层搅拌机械,在地基中将粉体或浆体固化剂(水泥)与软土就地强制搅拌混合,使其在硬化后形成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体。搅拌桩最早于本世纪 50 年代起源于美国,但自 60 年代后发展至今,尤以日本和瑞典的技术领先于世,经过许多国家 40 年的研究和应用,已成为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。它具有施工操作简单、效率高、工期短、成本低、施工中无振动、无噪声、无泥浆水污染、无土体隆起等优点,具有广泛的应用前景。

我国对搅拌桩的研究始于 1977 年,起步较晚,和国际上技术先进的国家相比具有一定的差距,但经过 10 多年的努力,搅拌桩在软土地基处理方面已经被广泛地采用,并取得一定的经验。但在实际施工过程中仍然存在桩体质量不合格、承载力不够的现象。其主要原因是对 DCM 工法成桩的适应性、机理等没有引起足够的重视。本文意在通过对 DCM 工法的适应性及成桩机理分析,在此基础上,探讨水泥搅拌桩质量通病的防治方法,为其推广应用提供理论上的基础。

## 2. DCM 工法成桩的机理分析

### 2.1 深层水泥搅拌桩的适应性

根据资料研究和工程实际表明,水泥搅拌桩的适应性主要体现以下几个方面:

(1)水泥搅拌桩适应于加固淤泥、淤泥质土、含水量较高而地基承载力较小粘土、粉质粘土、粉土等软土地基;

(2)当土中含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等矿物时,加固效果较好;当土中含有伊里石、氯化物和小铝英石等矿物时加固效果较差;

(3)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,宜通过实验确定其适用性;

(4)当地表杂填土层较厚,且含直径大于 100mm 石块时,一般不宜采用搅拌桩。

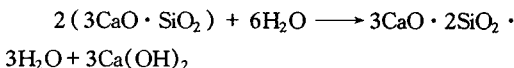
### 2.2 深层水泥搅拌桩的加固机理

水泥与土搅拌而产生加固效果,这是水泥遇水后所发生一系列化学反应的结果。

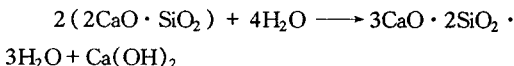
#### 2.2.1 水泥的水解与水化反应

普通硅酸盐水泥主要由硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等组成。水泥和软土拌和时,水泥颗粒表面的矿物很快和软土中的水发生水解和水化反应,生成氢氧化钙、含水硅酸钙及含水铁酸钙等化合物。各自的反应过程如下:

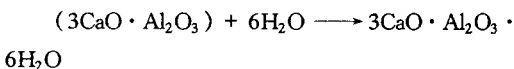
(1)硅酸三钙:



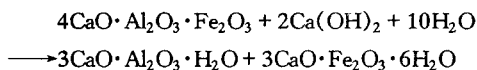
(2)硅酸二钙:



(3)铝酸三钙:



(4)铁铝酸四钙:



水泥中四种矿物的水化强度如图 1, 由此可见, 硅酸三钙、硅酸二钙是决定强度的主要因素。

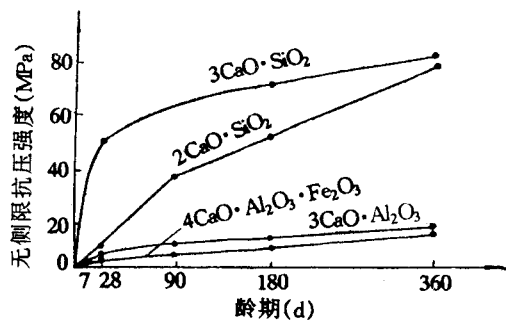
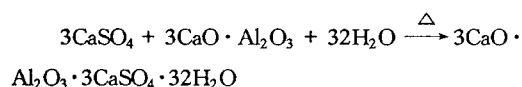


图 1 水泥矿物的水化强度

#### (5) 硫酸钙:

虽然在水泥含量中约占 3%, 但它与硅酸三钙一起与水发生反应, 生成一种被称为“水泥杆菌”的化合物。



这种水泥杆菌能将土中大量的自由水固定下来, 以提高含水粘土地基的强度, 但  $\text{CaSO}_4$  过多, 水泥杆菌会使水泥土膨胀产生破坏。

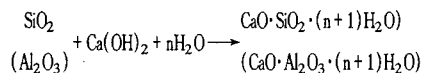
#### 2.2.2 离子交换和固粒化作用

软土中二氧化硅  $\xrightarrow{\text{结合 H}_2\text{O}}$  硅酸胶微粒(表面带有  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$ )  
与水泥水化产生  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中  $\text{Ca}^{2+}$  进行交换吸附  $\rightarrow$  形成较大土粒用  $\rightarrow$  提高土体强度

同时, 水泥水化产生的胶结粘子, 充填土粒间的空隙, 形成坚固的空间网络骨架, 大大地提高了水泥土的强度。

#### 2.2.3 凝硬作用

随着水泥水化反应的深入, 溶液中析出大量的钙离子, 超出离子交换需要量的  $\text{Ca}^{2+}$  离子, 能使组成粘土矿物的二氧化硅及三氧化二铝的一部分或大部分进行化学反应, 逐渐生成不溶于水的稳定的结晶化合物:



这些新生成的化合物在水和空气中逐渐硬化, 增大了水泥土的强度, 而且由于其结构比较致密, 水分子不易侵入, 使水泥土具有足够的水稳定性。

#### 2.2.4 碳酸化作用

水泥水化物中游离的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  能吸收水和空气中的  $\text{CO}_2$ , 生成不溶于水的  $\text{CaCO}_3$ :



这种反应也能使水泥土增加强度, 但增长速度较慢, 幅度也较小。

### 2.3 影响水泥土抗压强度的因素分析

影响水泥土抗压强度的因素很多, 主要有:

#### 2.3.1 水泥掺入比

水泥掺入比通常指水泥掺入重量与被加固土体天然湿重之比(%). 其影响见图 2。由此可见, 水泥掺入比越大, 其后期强度越大, 在实际工程中, 水泥掺入比以 7%~15% 为宜, 过低不能满足工程要求, 过高加固费用较大。

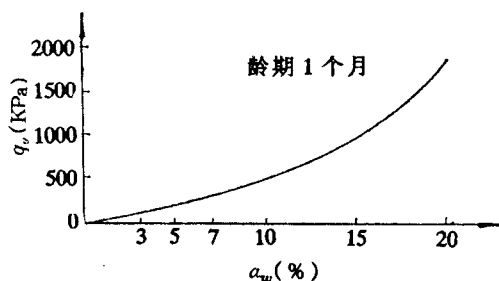


图 2 水泥掺入比与强度的关系

#### 2.3.2 龄期的影响

水泥土抗压强度随着加固龄期而增长, 其增长规律有两个特点: 一是早期强度增长不明显(如 7~14d); 二是强度增长主要发生在 28 天后, 并且持续增长 120 天后才趋缓和。如图 3 所示。

#### 2.3.3 土质的影响

不同的土质虽然水泥掺入比相同, 但水泥土加固的强度也不同。国外研究表明: 水泥土加固的强度与土的含砂量有关, 当含砂量为 40%~60% 时, 加固土的强度达到最大值, 故在加固软土时, 在固化剂中可适当掺入细砂, 既可提高加固土

的强度,又可节约水泥用量。

### 2.3.7 外掺剂对强度的影响

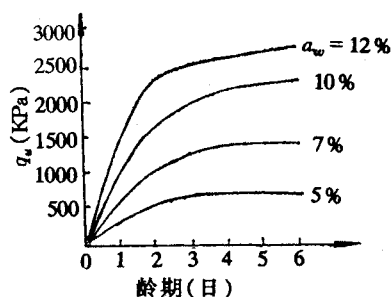


图3 水泥土龄期与强度的关系

### 2.3.4 土的含水量

天然土的含水量越小,水泥土的抗压强度越高。图4为不同含水量的淤泥质粘土掺入12%的水泥制成试块在不同龄期下测得的强度曲线。含水量对强度的影响还与水泥掺入比有关。

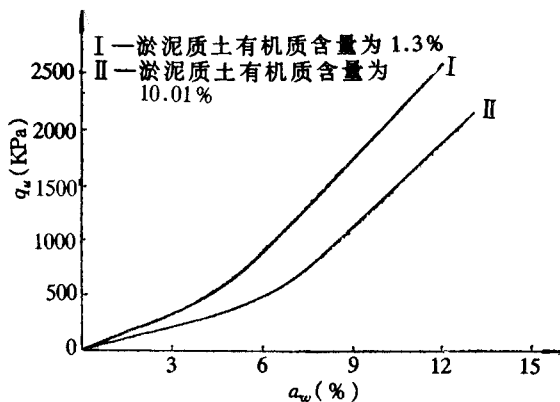


图4 含水量对水泥土强度影响

### 2.3.5 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影响较大,酸性土(pH<7)加固后的强度较碱性差,且pH值越小,强度越低。土中的有机质或腐殖质会使土具有酸性,并且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,从而降低加固土的强度。不同的有机质含量对水泥土强度的影响见图5。

### 2.3.6 水泥品种与标号

水泥品种与标号对水泥土强度都有一定的影响,在其它条件不变时,普通水泥标号每增加100号,可使水泥土强度提高约20%~30%。

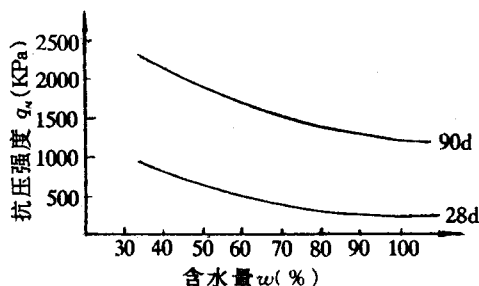


图5 有机质含量对水泥土强度的影响

不同的外掺剂对水泥土的强度有着不同的影响,选择合适的外掺剂可提高水泥土的强度或节约水泥用量。

### 2.3.8 水泥与土搅拌效果的影响

被加固的土体破碎得越细,水泥与水强制搅拌越充分,水泥分布在土中越均匀,则水泥土的强度越高,否则会使水泥土强度离散性较大。

## 3. 深层水泥搅拌桩质量通病的防治

深层水泥搅拌桩质量通病防治见下页。

## 4. 水泥搅拌桩质量事故分析实例

### 4.1 工程概况

该工程为平阳县县城改建三期工程,要求对该工程三、七区块的深层小层搅拌桩桩身质量进行鉴定。三区块位于汇水河路东首,七区块位于白石街中段南侧,建筑物均为7层高住楼,基础设计为水泥搅拌桩,桩长15m,桩径500mm,设计单桩承载力标准值  $R_k = 130\text{kN}$ ,设计桩基受力层处在淤泥之中,经工程地质勘察,七区块地基土分布为表面填土1.2m,淤泥深度至19.6m,以下为粘土和砂质粘土等土层分布,三号区块土层分布为表面填土1.70m,淤泥深度至17.0m,以下为粘土和砂质粘土等土层分布。

### 4.2 水泥搅拌桩取芯及试压

分别对七区块的326#桩及三区块的238#桩分别采用钻机进行取芯试压,具体情况见表1。

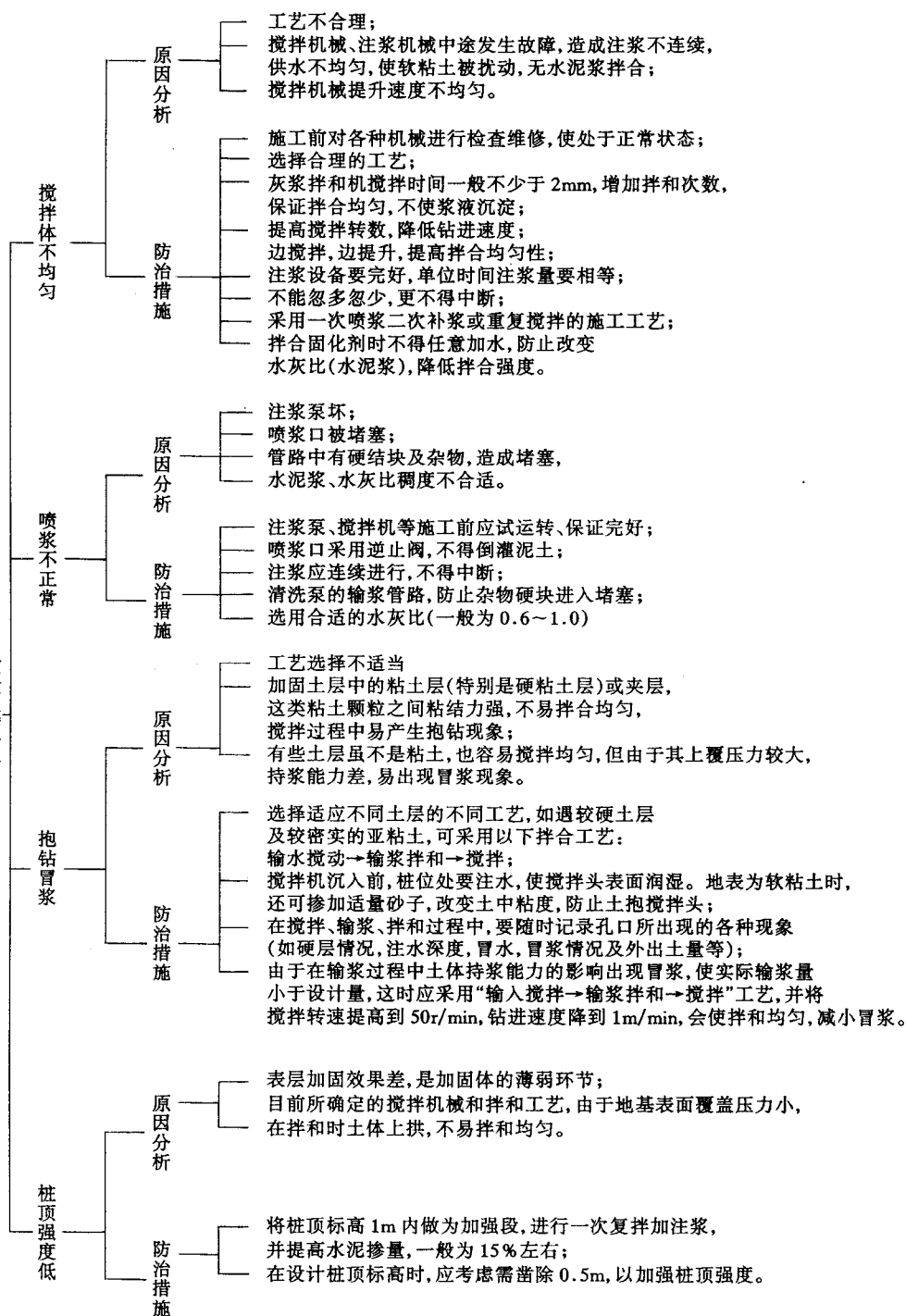


表 1

类别	桩号	水泥掺入比	龄期	芯样数	岩芯松散、含淤泥段芯样强度 (kPa)	岩芯整齐段芯样强度 (MPa)	芯样描述
三区块	238#	15%	40	8	158.6~634.4	1.22~1.81	深度 4.9~5.3m, 8.10~8.4m 岩芯松散含淤泥夹层, 其它岩芯整齐较好
七区块	326#	15%	42	8	159.2~632.2	1.1~1.89	深度 5.8~6.2m, 10.6~11m, 12.3~12.8m 岩芯松散, 含淤泥夹层, 其它整齐

### 4.3 桩身质量分析

根据试验,同等条件下,当水泥掺入比 15%,龄期为 28 天,水泥土的抗压强度达到 1.3~1.4MPa,龄期为 90 天时,其强度达到 1.75MPa 以上。由此可见,表中岩芯松散含淤泥段芯样强度较低,存在明显的质量缺陷。强度的较大离散性及松散脱节现象,归结于水泥搅拌的不均匀性,其主要原因可能是工艺不合理,搅拌机提升速度不均匀,注浆不连续,供水不均匀,无水泥浆拌和等,但也不排除机械中途发生故障、管路堵塞可能。根据验算,搅拌桩承载力达不到设计承载力  $R_k = 130\text{kN}$ ,需进一步对全场桩身质量进行鉴定,并提出加固措施。

## 5. 结 语

DCM 工法处理软土地基,在我国得到进一步的发展,在平阳县高住楼开发中、水泥搅拌桩加固

地基以它的优点而被广泛采用,取得较好的经济效益。但在施工中屡屡出现桩身不合格质量事故,不仅拖延工期,而且造成一定的经济损失。文中从机理分析影响桩身质量的因素,提出了质量通病的防治,以杜绝水泥搅拌桩质量事故的发生。

### 参 考 文 献

- 1.《地基处理手册》编写委员会编写“地基处理手册”,中国建筑工业出版社,1994.4. P399—P437
- 2.“基础工程施工手册”中国计划出版社,1996.8. P120—P128
- 3.段新胜、顾湘编著“桩基础工程”,中国地质大学出版社,1995.6. P162—P172
- 4.彭圣浩主编“建筑工程质量通病防治手册”,中国建筑工业出版社,1990.7. P69—P70.
- 5.刘建航、修学渊主编“基坑工程手册”,中国建筑工业出版社,1997.4. P609—P623.
- 6.“第四届地基处理学术讨论会论文集”,浙江大学出版社,1995.12. P145—P243.
- 7.“建筑地基处理技术规范”,JGJ79—91,1992 北京, P55—P66

(上接 44 页)

理。为此,需要制作一部分异型模板,这在设计和施工方面无特别困难。因为是局部加粗加厚与整体加粗加厚相比较,可以节省很多混凝土等材料,认为是可取的。但必须对既有的长期受损害的海洋混凝土构筑物做实地调研取得资料后进行设计和施工。

## 5. 附 记

我们还应看到,我国沿海和内陆,尚有大量未开发利用的盐碱地和咸水湖滨地,土地中的盐碱在高地下水位的情况下,对于混凝土构筑物(特别是地下构筑物)所受  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  等的侵

蚀与沿海构筑物的情况基本相似。笔者认为,本文可供在这些地区开发、建设,在分析研究当地环境因素对混凝土构筑物的侵蚀作用时,以及为此进行设计和施工时,采取必要的防范技术措施的参考,有助于增进这些地区混凝土构筑物的安全性和耐久性。

### 参 考 文 献

- 1.海青编《富饶的海洋》天津人民出版社 1972 年版 30~32 页
- 2.R.H.鲍格等著《波特兰水泥化学》上册,中国工业出版社 1963 年版
- 3.A.M.内维尔著、李国洋等译《混凝土的性能》中国建筑工业出版社 1983 年版 464~465 页
- 4.“混凝土中钢筋的锈蚀”载《混凝土工学》(日文)1986 年 10 月号