

深层搅拌桩桩体强度和单桩承载力的影响因素及分析

潘殿琦

(长春工程学院 岩土与道桥工程系, 吉林 长春 130021)

摘 要: 深层搅拌法作为软土地基处理的一种方法在我国已经得到广泛应用。但在其施工过程中,常会由于冒浆、复搅深度、土体搅拌不均和外加剂选择不当等问题影响桩体强度和单桩承载力。在深层搅拌法施工过程中可以采用复搅法、喷搅法或合理选择外加剂来避免上述情况的发生,以提高桩体强度和单桩承载力。

关键词: 深层搅拌桩; 冒浆问题; 土体搅拌; 外加剂

中图分类号: TU 472. 36; TU 473. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2003)02-0138-05

1 前言

各种成因的软土层(如滨海相沉积土、三角洲相沉积土、湖相沉积土等)在我国分布较广、厚度也较大。随着人类社会生存空间的日益扩展,在软土地层上的工程建筑越来越多。为了提高软土地基的承载力、减少地基的沉降量,满足上部结构的要求,软土地基的处理方法很多,深层搅拌法作为处理软土的一种比较适应的方法,已在世界许多国家广泛应用。深层搅拌法施工工期短、无公害、无地面隆起、不污染环境和对相邻建筑无有害影响,具有较好的经济效益和社会效益。但在深层搅拌法施工时,常会由于冒浆、土体搅拌不均匀以及外加剂选择不适当等问题,从而影响桩体强度和单桩承载力。这就需要进行深入研究并采取相应措施防止这种情况的发生,以提高桩体强度和单桩承载力。

2 影响水泥搅拌桩强度和单桩承载力的因素

2.1 冒浆问题

深层搅拌法加固软弱地基是将水泥浆在一定压力下注入土中,经过与土搅拌均匀后形成的加固固结体。在灌浆过程中,主要靠被搅动土体与搅拌轴的粘着力(覆盖压力)密封阻止浆液的上返。当覆盖压力较小时,由于在土体中土颗粒之间充满气体、液体,进入到土体中的浆液不能充分渗入土中,在上部压力作用下必将沿着搅动土体与搅拌轴的间隙返回地面,从而产生冒浆现象。

在深层搅拌法施工中,假设:上返浆土体积与注入水泥浆体积之比为上返率 m ,上返浆土体积中水泥浆的体积与上返浆土体积之比为上返浆率 n ,则:

实验中水泥掺入比 a_w 为:

$$a_w = \frac{Q}{V\rho}$$

其中: Q 为水泥质量; ρ 为土的湿容重; V 为土的体积。

施工过程中:

上返浆体水泥掺入比:

$$a_{w1} = \frac{1.2n}{(1-n)V\rho}$$

桩体实际水泥掺入比:

$$a_{w2} = \frac{a_w(1-nm)}{1-1.5a_wm(1-n)}$$

由于公式中, m, n 均小于 1, 所以 $a_{w2} < a_w$, 因此, 在施工过程中桩体的实际水泥掺入比小于实验中桩

体的水泥掺入比, 桩体强度也因而降低。

例如: 当水泥掺入比分别为 12% 和 15% 时, 由于 m , n 的不同, 搅拌桩体实际水泥掺入比值(%) 见下表:

表 1 上返率 m 及上返浆率 n 与水泥掺入 a_w 的关系										
Table 1 Relation of m to n and a_w										
m	n									
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	$a_w = 12\%$					$a_w = 15\%$				
0.2	11.6	11.3	11.0	10.7	10.3	14.6	14.2	13.8	13.4	13.1
0.4	11.1	10.5	10.0	9.4	8.8	14.1	13.3	12.6	11.8	11.1
0.6	10.6	9.8	8.9	8.0	7.2	13.6	12.4	11.3	10.1	9.1
0.8	10.1	8.9	7.8	6.6	5.5	13.0	11.4	9.9	8.4	7.0

从表 1 可知, 在深层搅拌法施工中, 当水泥掺入比一定时, 随着上返率和上返浆率增加, 所在桩体实际水泥掺入比随之减少, 有时甚至会减少为原水泥掺入比的一半, 导致桩体强度降低, 达不到设计要求。这既浪费材料, 又影响质量。因此, 在施工中我们应对冒浆现象引起足够重视, 尽量减少其对桩体强度和单桩承载力的影响。

2.2 土体搅拌的均匀程度

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, 在拌入水泥浆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, 水泥不能与土团内部的土体进行化学反应, 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高、稳定性较好的水泥石区和强度较低的土块区, 即在桩体内产生不同土团水泥掺入比不同的现象, 从水泥土强度机理分析, 水泥土强度主要是由水泥水化胶结体对土颗粒包围所形成的水泥石骨架作用, 水泥石胶结骨架的厚度、密度取决于水泥掺量, 当土体搅拌不均匀时, 土块区的水泥掺入量减少, 从而使水泥土形成水泥掺入比不均的土体。水泥掺入量与水泥土体强度曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 当土体搅拌不均匀时, 土块区的强度小于水泥微区的强度, 当有外力作用时, 土块区必先破坏, 从而影响整个桩体强度和单桩承载力。

由此可以得出定性的结论: 水泥和土之间的强

制搅拌越充分, 土体被粉碎得越小, 水泥分布到土中越均匀, 则水泥土结构强度的离散性越小, 桩体的抗压抗剪强度也越高。

2.3 含水量

在深层搅拌法实验中, 我们可以发现, 当水泥土中水泥掺入比一定时, 水泥土的无侧限抗压强度随着土中含水量的变化而变化, 当水泥掺入比小于 20% 时, 水泥土的无侧限抗压强度随土中含水量降低而增大, 一般土样含水量每降低 10%, 强度增大 10% ~ 60%, 但当水泥掺入比 > 20%, 含水量与无侧限抗压强度曲线存在一个峰值(图 2)。

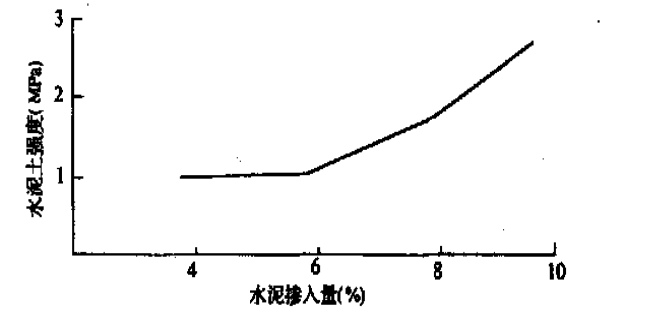


图 1 桩体强度与水泥掺入量的关系
Fig. 1 Relation of pile strength to the mixed volume of cement

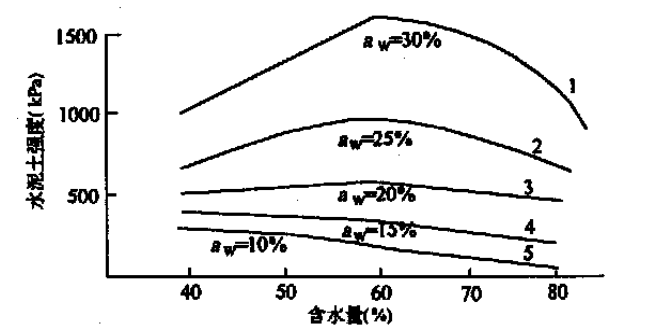


图 2 水泥土强度与含水量的关系
Fig. 2 Relation of pile strength to the water cement

从图 2 可以看出, 当水泥土中水泥掺入比较小时, 土颗粒之间具有空隙, 水比水泥更容易填充土颗粒之间的空隙, 使水泥不能较好地与土体混合而影响水泥的强度。当水泥掺入比较大时, 水泥土中含水量有最优值, 使水泥浆具有较好的流动性, 水泥颗粒有良好的水化环境, 从而更有效地填充土颗粒之间的间隙, 增加其强度。但当含水量继续增加时, 使水较水泥更容易占据土的间隙, 且使水泥土中 Ca^{2+} ,

SiO_3^{2-} , OH^- 离子浓度降低, 使水泥的硬化环境发生改变, 降低了桩体强度形成速度, 而使桩体强度和单桩承载力降低。因此在深层搅拌桩施工中含水量对桩体强度和单桩承载力有着重要的影响。

在深层搅拌桩施工中, 应对土体进行充分地搅拌, 提高土颗粒的比表面积, 则在相同条件下, 水泥与土体充分接触, 充分进行化学反应, 从而提高桩体强度和单桩承载力。

3 提高桩体强度和单桩承载力的几点措施

3.1 复搅法

在深层搅拌法施工中, 为了使水泥浆液均匀地分布到土颗粒中, 可以对桩体进行复搅。现对一个桩径 500 mm, 桩长 10 m 的水泥搅拌桩进行实验, 对桩上部进行复搅和不进行复搅所得的单桩试验荷载和沉降量关系曲线如图 3 所示:

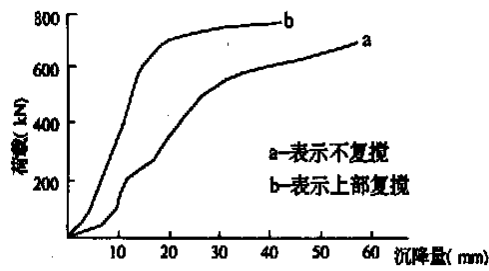


图 3 单桩试验荷载和沉降量关系曲线
Fig. 3 Load of mono-pile VS subsidence plot

从图 3 可以看出, 在深层搅拌法施工中进行复搅, 上部复搅的水泥搅拌桩承载力明显地要比不复搅的水泥搅拌承载力高, 且提高三分之一左右, 因此在进行深层搅拌法施工时可以采用上部复搅法来提高单桩承载力。

搅拌桩复搅深度与单桩极限荷载之间的关系如何呢? 对桩径 500 mm, 长 10 m 的搅拌桩进行实验, 获得如下曲线图(图 4):

从图 4 可以看出, 上部复搅可以提高水泥搅拌桩单桩极限荷载, 但当复搅深度超过某一极限值, 水泥搅拌桩的承载力不再继续提高, 从图上可以看到桩径 500 mm、桩长 10 m 的搅拌桩的复搅深度最佳

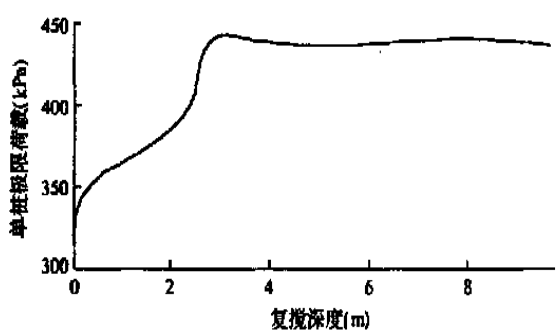


图 4 复搅深度与单桩极限荷载的关系
Fig. 4 Mixation depth VS mono-pile load limit plot

为 3 m。现对桩径 500 mm、长 10 m 的搅拌桩加压力 88.35 kN, 则在桩身 3 m 处产生的附加应力为:

$$P = \frac{88.35}{\pi(0.5)^2} 450 \text{ (kPa)}$$
$$\frac{L}{b} = \frac{0.5}{0.5} = 1$$
$$\frac{Z}{b} = \frac{3}{0.5} = 12$$

查表, 应力系数 $a_c = 0.0047$, 即在桩身 3 m 处、88.3 kN 的外力所产生的附加应力

$$P = P_{ac} = 450 \times 0.0047 = 2.115 \text{ (kPa)}$$

也就是说, 当上部荷载传到桩身 3 m 处时, 附加应力几乎为 0, 即下部桩所受到的附加应力很小。因此可以认为, 在进行上部复搅的水泥搅拌桩成桩工艺时, 复搅深度为 3 ~ 4 m, 就可以取得提高水泥搅拌桩的单桩承载力的最佳效果。

复搅次数不同, 搅拌所形成的桩体强度也不同, 其最佳搅拌次数如下列公式所示:

$$N = HRn/V$$

- N ——搅拌次数;
- V ——搅拌杆的提升速度;
- R ——搅拌杆的转速(r/min);
- n ——叶片总数;
- H ——为叶片平均的铅垂高度(m)。

$$H = \sin \alpha + \Delta B \cos \alpha$$

- B ——叶片平均宽度(m);
- ΔB ——叶片平均厚度(m);
- α ——叶片与水平面夹角。

3.2 喷搅法

喷搅法施工可以提高水泥浆喷射压力, 使水泥与土充分搅拌, 从而提高桩体强度和单桩承载力。

(1) 搅拌头在下沉过程中进行喷浆处理, 使浆液

与土体充分接触, 有利于水泥和土体之间进行物理化学反应, 从而提高桩体强度。

(2) 搅拌头上升和下沉过程中均进行高压喷浆, 高压喷浆对土体具有切割作用, 增强了土体搅拌的均匀度, 从而提高桩体强度和单桩承载力。

(3) 在喷搅法施工中, 采用 6B13 型号的高压泵进行高压注浆, 同时缩小喷浆口直径的方法来增加输浆液的压力, 当喷浆口直径设置为 2 ~ 3 mm 时, 喷浆压力可达到 10 ~ 20 MPa。增加喷浆口浆液喷出的流速, 切割土体使浆液与土充分接触, 增加土颗粒的比表面积, 使水泥与土充分的进行化学反应从而提高桩体强度和单桩承载力。

(4) 在喷搅法施工中, 可以采用调速电动机对搅拌头下沉和上升的速度加以控制, 在搅拌头下沉过程中, 由于土体较硬, 可以降低搅拌头下沉的速度, 以便更好地切削土体, 使切片更薄, 以利于与水泥拌合。当搅拌头上升时, 由于土体较松, 可以将调速电动机调到高速, 加快搅拌头搅拌速度, 并进行多次复搅来降低土块粒度, 使水泥与土充分接触, 提高桩体强度和单桩承载力。

3.3 外加剂的合理选择

从影响桩体强度的因素中可以看出, 在水泥掺入比为定值时, 降低水灰比可以提高桩体强度和单桩承载力。为了提高水泥的流动性并减少水泥浆的水灰比, 可以采用在水泥浆中加入减水剂。水泥减水剂是一类具有表面吸附活性的低分子有机物, 它吸附到水泥颗粒表面, 防止因水泥颗粒聚结而形成网状结构。因而提高了水泥颗粒的分散性, 释放了被水泥颗粒网状结构包围的水, 改善了水泥颗粒与水接触的水化条件, 增加了水泥浆的水化面积, 提高了水泥土结石强度。减水剂的类型主要有木钙粉、亚甲基二萘磺酸钠、己糖二酸钙等。其中, 木钙粉加量为水泥质量的 0.2% ~ 0.3% 时就可以减少用水量 10% ~ 15%, 亚甲基二萘磺酸钠加量为水泥质量的 0.5% ~ 1% 时就可以减少用水量 20% ~ 25%, 己糖二酸钙加量为水泥质量的 0.2% ~ 0.5% 时, 可以减少用水

量 5% ~ 10%。

在水泥搅拌桩桩体强度试验中, 我们不难发现, 若灌浆时增加土颗粒之间的间隙, 提高水泥浆的早期强度, 也会提高桩体强度, 外加剂硅酸钠(水玻璃) -水泥为主的材料具有以下特点: 浆材本身的早期强度大, 固结体强度高, 灌入 1 小时后, 浆材固结体的强度可达 0.50 ~ 0.1 MPa, 3 ~ 7 天后强度可达 5 MPa, 28 天后可达 10 MPa。浆液含有破坏粘土表面胶化膜的化学物质, 有利于浆液的渗透和粘土的离子交换, 同时, 灌入的大量浆液经化学反应释放出相当数量的热, 这些条件都有利于软土脱水、固化和硬化。被迅速凝固而固定位置的水泥颗粒, 将会慢慢水化而吸收周围的水分, 使附近的粘土进一步失水变硬, 且基本不透水。因此, 在水泥中加入外加剂水玻璃, 可以提高水泥的早期强度、桩体强度及单桩承载力。

4 结论

深层搅拌法是处理软土地基的一种有效的施工方法。但在深层搅拌法施工时, 水泥浆的冒浆问题、复搅深度、土体搅拌的均匀程度以及外加剂的选择等各种因素影响着桩体强度和单桩承载力, 因此必须对各种影响因素采取相应措施才能更有效地发挥深层搅拌法的优势, 更有效地增加复合地基的承载力。

参考文献:

[1] 龚晓南. 深层搅拌法设计与施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
[2] 张希浩, 曹辉. 地基处理与基坑支护工程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.

(Changchun institute of technology, Changchun 130021, China)

Abstract: Deep-mixing method has been used widely in our country as a way of soft-soil treatment, but during the course of construction, the strength of the pile shaft is usually influenced because of the problems such as the mixed material's returning to surface, the homogeneous degree of soil-mixing, additives and or soon. So in the course of the construction some way must be done to decrease occurrence of such phenomena.

Key words: deep-mixing method; the problems of the mixed material's returning to surface; the homogeneous degree of soil; mixing additive

(上接第 102 页)

coupling effects of the following factors: ① the Neoproterozoic granite-greenstone terrain and post collision arc geological background; ② exposition of ore-controlling fracture to multiple ductile-brittle, shearing-stretching deformation to form wide tectonite zones which are favourable for large scale ore bodies; ③ superimposition of ore-controlling fractures on contact zones of granitic bodies favourable for hydrothermal fluid activity; ④ ore materials supplied by basemental greenstone-dominated rock inferred by S, Pb isotopic feature; ⑤ incorporation of meteoric water into magmatic water to form large volume flow of ore fluid and transport large volume ore materials inferred by H, O isotope feature; ⑥ magmatism centered at ore district evidenced by close spatial relation between Au deposit and lamprophyre dykes favourable for formation of Au deposits; ⑦ the ore-forming period coincided with the late stage of large scale Yanshanian magmatism.

Key words: large-superlarge Au deposit; key factor; coupling; Zhaolai area; Shandong province

欢迎订阅 《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》经国家科技部和国家新闻出版总署批准, 由天津地质研究院主办的全国性地质科技期刊, 1986 年创刊, 国内外公开发行, 现为季刊, 每期 72 页, A4 国际开本。中国标准刊号: ISSN 1001-1412, CN 12-1131/P。

《地质找矿论丛》是国际著名检索刊物美国《化学文摘》(CA) 和俄罗斯《文摘杂志》的收录期刊, 同时作为中国科技论文统计源期刊、《中国科学引文数据库》和《中国地质文摘》来源期刊, 期刊全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和《万方数据系统科技期刊群》和《中文科技期刊数据库》, 以多种形式为读者服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、水文地质与工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报, 并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》面向从事地质科研、矿产勘查、矿山企业、矿产品开发的科技人员和地质院校师生。热忱欢迎地矿行业、地质院校、文献信息部门的单位和个人踊跃订阅。

《地质找矿论丛》为季刊, 每季度末月出版。每期定价 5.00 元, 全年共计 20.00 元, 订户可向本刊编辑部函索订单订阅, 订购款一律邮汇, 请在汇款单“附言”栏中写明订阅份数和用途, 并将订阅单的第二、三联填写详细、盖章后寄回本刊编辑部。本刊也可通过“全国非邮发报刊联合征订服务部”订阅。

《地质找矿论丛》编辑部地址: 天津市河西区友谊路 42 号, 天津地质研究院《地质找矿论丛》编辑部; 邮政编码: 300061; 联系人: 王书辉; 联系电话: 022-28367243; E-mail: luncong@yeah.net