粉喷桩施工质量的保证措施

徐敬业　王双全
（铁道部第四勘测设计院第一勘测设计研究处，武汉，430063）

提　要　由于粉喷桩自身的特点及其操作工艺决定了该法加固软土地基成功的关键在于施工。为此，本文在工程实践的基础上探讨了粉喷桩施工质量的保证措施和应注意的问题。

一　引　言

由于水泥加固土机理复杂，影响因素繁多[1]，粉喷桩具有自身的特点和弱点，再者，目前该法为人工操作，施工人员的主观观念和施工经验对施工质量影响很大，从而决定了该法成功的关键在于施工。为此，必须加强控制，才能保证施工质量。

二　粉喷桩施工质量控制

1. 施工单位的选择

粉喷技术在全国范围内得到迅速推广的一个重要原因是：机具简单、价格低廉、操作方便，单位和个人均有能力购置，施工操作只需简单培训，但工程实践表明：粉喷应用成功与否的关键在于施工，因而选择真正具有施工能力的施工单位是保证质量的首要关键。

2. 监理单位的选择和监理制度

我国施行监理制度已数年，但实质是“通用型”监理，监理过程中监理不力的现象时有发生。监理工程师及其代表必须具有相应施工经验和专业知识，这样才能肩负起质量监控的重任，因此，选择监理单位和监理人员时，必须将其专业知识作为一个重要考核指标。

3. 材料控制

粉喷桩所用的水泥占整个粉喷桩造价的 50%左右，是影响桩体质量的关键，因此，水泥控制是保证施工质量的重要一环。所选择的水泥供应方式应确保水泥保质保量并全部用于工程中。必须附有厂家质量保证单、发票，由监理人员验收，并抽查水泥单包重量。每班组建立水泥台账，由施工班组、现场监理签认，备查。每个机组每班所用过的水泥袋各自独立保存并予以清点、回收，避免水泥流失。监理工程师分批抽验水泥，确保水泥质量。

由于水泥易于吸水变潮、结块，造成喷粉不匀、喷粉困难、管道堵塞，影响成桩质量，因此应防潮、防雨。结块变质的水泥应在水泥台账中列出，保证真实地反映水泥的净用量。

不同厂家、不同种类水泥的组分和特性存在差别，这种差别会对水泥土强度产生一定

的影响，所以宜根据不同场地水泥土强度的试验结果选择水泥厂家和水泥种类。[1]

4. 施工机具监控

(1)机械设备　一般地，不同机械设备的施工能力有所差异，这与机械设备的型号、配套情况、保养水平等密切相关。在确定施工单位时，应考核其拥有的机械设备数量、型号、性能、保养水平等。机械设备进场应严格把关，以保证施工质量和工期。空压机是喷粉的动力，当产气量和排气压力不足时，直接影响粉体喷送。在易出现沉桩的区域，产气量和排气压力过大，又易出现沉桩现象[3]，因此，应选择合适的空压机和储气罐。

(2)施工钻具　不同形式、不同轴向和径向倾角的钻头，切削、粉碎、钻进、搅拌、压密等作用有所不同，适用于不同地层。随着工程量的增加，钻头叶片将逐渐磨损，当叶片在投影面上覆盖喷粉口的宽度不足时，水泥粉将在气流作用下逸出桩体。当覆盖喷粉口的叶片轴向倾角过大，也会造成水泥粉的逸出。叶片下部磨损过大或轴向倾角过小时，桩体压密效果差，影响成桩质量。若钻头叶片下部磨损过大，水泥土搅拌均匀性较差，同样影响质量。在易出现沉桩的区域，钻头轴向倾角和径向倾角过大则易造成沉桩现象[3]。

施工过程中应注意控制钻头的直径。钻头直径过小，则成桩直径小而导致单桩承载力和复合地基置换率达不到要求；钻头直径过大，桩体单位体积水泥量少，强度低，桩间相互影响增大，群桩效应增加，同样影响处理效果。钻头直径一般控制在 49～52cm 之间。

在粘性土地层中，叶距短、仰角小的钻头叶片间易产生夹土现象并形成很大的土团随钻头转动，钻头形成一个锥体，仅留一个喷灰孔，而喷灰孔又在钻头的下方，所喷灰大多集中在中心盲区部分，形成土、气泡、水泥的松散结合体，桩质量极差。由于这种钻头处于“抱团”状态，复搅效果也较差[4]。当钻头叶片间距稍大时，压密效果一般均较好。

5.施工工艺控制

(1)现场工艺性试桩　不同区域地质条件有所不同，为避免盲目施工、确保施工质量，应根据场地情况、施工机具和水泥品种等的变化，进行工艺性试桩，经检验合格后方可大面积施工。通过试桩，可以达到了解机械设备的性能、选择合适的机具、验证并改进设计、确定合适的施工工艺、施工参数和操作参数以指导施工的目的并作为施工监控的依据[5]。

从钻孔取芯检查来看：桩身下部成桩质量普遍较差，除搅拌不到位等人为原因及下部反压过大外，另一原因是某些粘性很大的软土含水量太高，钻头搅拌过程中被紧密包围，喷出来的气体因形成不了回路而不能喷出，形成不了水泥土。对此，可通过加强空压机和进行多次复搅来解决。

(2)桩长控制　一般地，地质条件存在空间变异性，加之地基处理面广量大而勘探点数量有限，所以，勘探精度有限，勘探资料仅能在宏观上反映整体地质情况，为避免以设计桩长进行桩长控制可能造成的浪费和欠缺，可以持力层实际位置来控制。由于各台(套)机械的运行状况、功率内耗、型号和性能及配套情况、电流表量程、主机配电箱互感率、线路连接状况、施工场地地质情况等的差异，同一层位不同主机电流表电流值大小不同，但同一台(套)在同一施工场地施工时，主机电流表的电流值大小很有规律：在同一层位基本不变而在软土层和相对硬土层中电流值相差很大。因此，可用主机电流表电流值大小变化判断是否到达持力层，但应避免将硬夹层当作持力层。

在粉喷桩施工过程中由于土体扰动、密实度下降、桩体原位土被水泥置换、桩身水泥土在气流作用下逸至地表等原因造成地表隆起，其隆起量可达 20～50cm。进行停粉面控

制和桩长控制时应注意这一问题。

为方便地进行桩长控制和准确控制喷粉故障后的搭接，所选择的桩机应有深度计或深度标尺。在使用深度计时应注意：指针不复零时，应移动深度计指针使其复零。

由于螺旋钻头受力复杂，施工中可用下式估算桩机的钻进的最大深度[6]：

$$w=[(H\gamma+F)\,tg\,\phi]D/3 \qquad (1)$$

式中：w为搅拌桩机转盘扭矩(kN·m)；H为钻头入土深(m)；ϕ为土的内摩擦角(°)；γ为钻头以上土的平均容重(kN/m^3)；F为桩机钻进、提升能力(kN)；D为钻头直径(m)。

(3)钻架竖直度　为保证桩体在竖直荷载作用下充分发挥承载能力，钻架倾斜度应控制在 1.5%以内，这可通过在钻架上吊设重锤来实现，即通过重锤与钻架竖直情况下对应标志点的偏移程度来判断并依此调整钻架的倾斜度。

(4)桩身复搅　水泥土相对于混凝土是以土的粒团或土块为集料，土粒团或土块内部只有经过很长时间，由于水泥水化、水解物的渗透而使其性质逐渐得到一定改善，但强度仍然很小，而集料强度是决定水泥加固系强度的重要因素，所以，增加搅拌次数、提高水泥土的均匀性可以提高整体强度，明显增强加固效果[1]。

施工过程中，可以以机械设备损耗不大的前提下所能达到的复搅深度作为复搅深度控制的依据。为更为直观，可以以此时主机电流表电流值来控制。由于各台（套）机械设备的性能各异，各场地地质条件不一，因而不宜不分机械设备而对电流控制值整齐划一。

路堤复合地基设计一般有承载力理论和滑弧理论。前者的置换率通常比后者大，而二者均能满足稳定性要求。现有规范规定复搅桩长是基于粉喷桩受力特性而言的。从滑弧理论角度，复搅应达到滑弧面以下，而从沉降控制角度，则应为整个桩长，当粉喷桩进入持力层而作为摩擦端承桩或有抗震要求时也应全桩长复搅。由于水泥喷入后，摩擦力增大、含水量减小、第一期压密等作用，复搅过程中下钻和提升时的电流值均显著大于第一期，因而复搅桩长受机械设备性能限制。施工中可由(1)式估算机械设备的最大复搅能力（γ、ϕ应为水泥土的相应指标）[6]。为保证桩身密实度，复搅过程中提升速度不宜过大。

为避免复搅时桩身水泥和桩体上部水泥土随气流逸出，桩机在地表 4～5m 以下运行时，应尽量减少管道中气体的流量和压力；在地表 3～4m 范围内，甚至可以关闭送气阀门。

(5)施工速度　为确保喷粉均匀及每米喷粉量符合要求，喷粉时桩机提升应控制在0.8～1.2m/min。施工速度过快是沉桩的一个重要诱因，在易于沉桩的区域，应予限制[3]。

(6)喷粉量　粉喷桩的质量与粉体喷入状况密切相关，因而，喷粉量大小和喷粉均匀程度是质量控制的核心，而其中的关键是粉体的计量。电子称可通过直接或去皮清零方式显示大灰罐中水泥量的变化或快慢控制喷粉量和喷粉均匀程度，但必须注意防止操作工出现“凑数”倾向。施工中还应注意：电子称的数值包括存在于管路中的水泥，所以该数值并非喷入桩体的真实值，另外，在施工过程中必须随时校核电子称的准确程度。

目前采用流量计的桩机，流量计安放位置并非送粉管道和桩机之间，所测得的流量值仅仅是通过流量计的气体流量而已，既不能反映喷粉量大小，也不能真正反映喷粉的均匀程度，而只能通过“浮子”上下浮动的快慢在一定程度上间接地反映喷粉的均匀程度。

施工中也可以通过每班所用的水泥袋数与所完成的工程量相对比从而宏观上控制水泥

用量，通过触觉感受送粉胶管中水泥的脉动情况来粗略判断喷粉状况和喷粉的均匀程度。

由于地下反压与深度正相关使得常常出现以下问题：①桩身上部喷粉量过多造成“烧桩”现象，即桩体外侧强度比内侧稍硬、成桩强度很低，取出试块用手即可捏碎；②下部喷粉量过少，造成桩身沉降量大、承载力低及沉桩现象；③地表返灰严重，桩体实际水泥用量不足；④易于出现堵钻现象，为避免堵钻，有些操作工人不断关停送粉机，当关停时间过长时又派生出断桩现象；⑤桩身上部水泥土强度过高，由于桩身强度与单桩承载力不匹配及桩身在复合地基中的地位不匹配，桩间土变形过小，不利于充分发挥复合地基的潜力。以上几种情况出现的一个重要原因都是管道压力和气体流量不合适。

气固双相流的计量和气固双相流量仪是比较难的课题，控制气固二相流也相当困难。现有电子称法、流量计等计量方法均不理想。某些单位研制的在灰罐处采集信号、用电子称计量并通过电子计算机将相对深度的粉体喷出量一并打印输出的控制装置虽然前进了一大步，但本质上并未取得突破，目前使用的电子称静态下精度较高而动态下精度不够及灰罐重量的减少不等于钻头喷出的水泥量等主要弊病仍然存在。我院软土地基研究所通过近两年研究，采用装在灰罐下部的电子称和装在水龙头上的射频导纳气固双相流计量仪进行计量，在粉体加固料未到达水龙头之前不显示读数并将其间进入喷粉管道的粉体重量储存起来，而在钻杆提升至停粉面标高下 1m 时予以释放，从而较好地解决了在加固料未到达钻头喷粉口之前提升和灰罐重量的减少不等于钻头喷出的水泥量的问题。目前其他单位也提出气固双向流称量计量法，它可以较大程度地克服现有计量装置所产生的误差，同时也提出了改良目前电子称称重法的方案，从而使得粉喷桩施工工艺更趋完善，质量更加可靠。

由于目前粉喷桩施工为人工操作，喷粉量大小和喷粉的均匀程度完全靠经验控制，因此，根除目前粉喷桩施工中的固有缺陷可采取的惟一途径是计算机控制化。

目前，部分单位将粉喷桩桩顶标高定为停粉面标高，停止喷粉时，送粉管道中仍然有一部分水泥并被喷于停粉面以上，造成桩体实际水泥量偏小，桩顶质量也不易保证。

三　结束语

由于软土具有受荷变形大、持续时间长的特点，粉喷技术虽能很好地解决问题，但由于种种原因使得该法成功与否的关键在于施工。为确保施工质量，必须采取适当措施进行施工质量监控，从而取得良好的经济和社会效益。

参考文献

[1] 徐敬业：《粉体喷搅加固法的影响因素》，见《第五届全国地基处理学术讨论会论文集》，北京，中国建筑工业出版社，1997。

[2] 徐敬业：《粉喷桩施工中喷粉量控制》，载《路基工程》，1999.5。

[3] 徐敬业：《粉喷桩的沉桩现象及其处理》，载《铁道建筑》，1999.4。

[4] 吴祖福：《影响粉喷桩质量的几种因素探讨》，载《铁路地质与路基》，1999.1。

[5] 徐敬业：《粉喷技术在连徐高速公路中的应用》，见《高速公路软弱地基处理理论与实践》，上海，上海大学出版社，1998。

[6] 刘亚楼，丁军华：《关于粉喷桩施工若干问题的探讨》，载《高速公路软弱地基处理理论与实践》，上海，上海大学出版社，1998。