粉喷桩的工程应用和质量预控

黄富华　顾祝平　谢镇涛　周泊锟
(江苏纺织工业设计研究院常州分院,常州，213001)

提　要　本文主要针对粉喷桩在工程设计和施工中的有关问题,展开讨论,为保证施工质量,提出了质量预控的方法。

一　前　言

近年来我院在设计多层住宅或工业厂房时，若遇软土在建筑场区全部或局部分布，且软土又在目前粉喷桩机能处理的范围内，经多种方案层次模型分析对比，一般都得出粉喷桩复合地基方案为最佳方案。从我院设计和施工的数十项工程的实践证明，该工法具有安全可靠，无噪声，无振动，无污染，施工简便，工期短和造价低等优点。

目前粉喷桩出现的一些质量问题，主要是一些人受利益的驱动，偷工减料。面对混乱的岩土工程施工市场，目前关键的问题是如何规范市场，如何控制施工质量。本文将根据我们的工程实践，针对工程设计、施工中粉喷桩的有关问题，展开讨论，以供同行参考、借鉴。

二　粉喷桩的工程应用和设计原则

1.工程应用

我们工作范围主要位于长江三角洲地带，该地区河网、暗塘发育。暗塘内软土厚度不大，且软土常在建筑区内呈斜坡状局部分布。以往处理该类型地基常采用：大开挖换填砂石垫层；预制桩；人工挖孔桩；灌注桩；碎石桩……

自推广应用粉喷桩以来，我们对该工法不断总结，不断完善。如遇软土厚度不大或软土在建筑区内局部分布，一般均采用粉喷桩复合地基。获得了很好的工程效果和社会经济效益。

现举几个典型的工程实例如下：

(1)丹阳商业广场：该场地 1/3 位于软土区，淤质土厚度 0~10m 不等，局部夹泥炭，呈斜坡状分布。淤质土 f_k=80kPa,桩端土 f_k=240kPa。2/3 场区天然土 f_k =240kPa。最大柱荷重 7200kN，原设计采用全场地灌注桩处理方案，造价近百万元。后建设单位委托我院修改处理方案，我们在局部软土区采用粉喷桩复合地基加固方案，造价仅 30 余万元。竣工后沉降量 20mm，已正常运行 4 年。

(2)常州某化工厂：软土厚度 3.5m 左右。建造化工储罐，原设计采用沉井,挖除软土换填砂石层方案，处理费 20 万元左右，后改为粉喷桩加固方案，处理费仅 7 万元。

(3)常州华源雷迪斯聚合物有限公司：部分道路位于现填河塘软土区，道路要求行驶大型集装箱车辆。道路段软土厚 3~13m 不等，采用粉喷桩加固处理，由我院设计并施工。按长条格栅状布桩，m =0.14，将软土围护在粉喷桩格栅内，防止软土侧向变形。道路运行近三年，地表未见开裂痕迹。

(4)常州常信大厦：基坑开挖深度 10m，原设计采用旋喷桩加挖孔桩支护结构方案，因旋喷桩挡水支护失效，挖孔桩无法施工。后改用粉喷桩配合井点降水支护结构方案获得成功，节约造价近百万元。

(5)粉喷桩复合地基在高层建筑中的应用时有报道，如邯郸医专附属医院病房楼 14 层，总高度 48m 的邯郸水文局专家公寓 14 层均采用粉喷桩复合地基加固软基。

从以上几个工程实例可看出，粉喷桩能形成复合地基，提高地基承载力，均衡及减少地基变形；形成水泥土重力式围护结构，作为防渗帷幕延长地下水的迳流途径，防止基坑产生流砂，管涌出现。

2.设计原则

(1)设计计算：粉喷桩是具有一定压缩性的半刚性桩。为了充分发挥桩间土的承载力和复合地基的潜力，应使土对桩的支承力与桩身强度所确定的承载力相近，且后者大于前者。通过数十组复合地基静载荷试验资料反演，结合查阅有关资料，我们常采用水泥土 $f_{cu,k}$ =1000kPa，单桩承载力 R_a'=90kN 计算。有关公式参见《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 中的有关规定。

(2)在软土地区为控制建筑物沉降，当软土厚度小于 10m 时，一般均要求将桩端进入软土下持力层 0.5m。根据单桩承载力，有效桩长和上部结构要求达到的复合地基承载力，计算面积置换率，再根据面积置换率和基础形式布桩。

在软土厚度大于 10m 时，一般采用长短桩相结合的方案。短桩桩端位于软土区，有效桩长由桩身强度控制，长桩一般要求进入软土下持力层 0.5m 左右。长桩用来控制建筑物沉降，有效桩长不大于 15m。

(3)粉喷桩设计一定要设置砂石垫层，该垫层起基底应力均布、桩体与桩间土共同作用、固结排水的通道作用。且一定要碾压密实。一般厚度 20cm。

(4)在一侧为河塘等临空处，为防止软土侧向挤出，而使建筑物产生不均匀沉降，一般均布置一排连续桩以防软土侧向挤出。

(5)为保证桩身 6m 范围内强度更均匀，一般软土小于 6m 要求全复搅，软土厚度大于 6m，要求复搅深度 6m。

(6)水泥掺入量一般 50~55kg/m。在含水量大于 50%时，掺入量一般 60~65kg/m。在含水量达 170%时，掺入量 80kg/m，也获得了满意的工程效果。

三　施工质量预控

施工是实施设计方案的保证。我们收集了大量资料分析得出，造成粉喷桩处理失败的主要原因是施工质量问题。

我院勘察的某工程设计了大批水泥土桩，桩长 7m。该工程系中外合资企业，外方还从本国请来了监理。因甲方要求在水泥土桩区增加一个 3 米深的水池，开挖时发现 7m 长的桩仅 3m 长，3m 以下无桩的痕迹，这就是目前水泥土桩出现问题的主因。如何保证施工质量，我们探索出一些防止偷工减料的方法，供参考。

(1)要求水泥用量有电子称计量，深度有深度计量装置。每班单桩水泥用量均要有电子称计量记录，水泥搬运工每罐投入包数要有记录。对所进水泥定要双方签收与清点水泥袋相结合。并要每天登记，核对。就能正常地保证单桩实际水泥用量。

(2)施工中我们收集了一些工程的实际用电量。发现用电量与很多因素有关，即占进深度，占进速度，复搅深度，土质……要求每台桩机单独安装电表，每班计量用电量，并要求有专人每天详细记录数根桩的占进深度及复搅深度及用电量，将这二组数据化作每延米用电量，并进行对比。若前一组数据明显小于后一组实测数据，可能是少打多记的结果。计量用电数，这对总体控制沉桩延米数是否满足设计要求大有益处。

如有一工程，施工结束，发现不能满足设计要求。软土 f_k=70kPa，m=0.4,静载试验结，$f_{sp,k}$=103kPa。该工程是总包，施工方咬定按图施工，强度不能满足要求是设计问题。后发现施工时建设方给施工方单独安装了电表，经计算每方水泥土仅用电 1.77 度。1m^3 水泥土一般用电 6~8 度。后该工程用静压锚杆桩处理。

另一工程粉喷桩，同一建筑物先后有二台桩机施工，前一台桩机每延米用电量 1.79 度，后一台桩机每延米用电量 1.47 度。根据用电量推测后一台桩机为少打多记。经取芯证实为少打多记。经计算平均每根桩少打 0.87m，后用压密注浆处理。

(3)粉喷桩施工过程中，占头能将桩体土挤密，如果水泥掺量不足，则施工过的地表隆起不大或有微下沉现象。反之，则施工过的地表将隆起 10～20cm。有时由于局部土质较差，水泥掺量虽满足设计要求，但地表隆起不大或有下沉现象，则要及时增加水泥掺量或增补一些桩。

(4)粉喷桩施工，建设方一定要派人现场监督。我院为泰兴综合房地产开发公司设计八幢六层住宅，位于软土区，软土 4~10m 不等。原处理 4~5m 软土是井点降水，大开挖，回填砂石垫层。后我们采用粉喷桩处理软土,建设方全时段每班派二人进行施工监督。结果房屋竣工时沉降量仅 10~20mm。

(5)一般场地地质条件复杂时，按电流值控制桩长。在三档条件下淤质土电流值一般 30~35A，进入持力层电流值一般 50A 以上。但有些施工单位为虚报工作量，在试桩时用二档。三档占进电流 50A，当用二档占进时电流变成了 30~35A，持力层变成了“淤质土”，声称设计有误，勘察有误，要求设计方写变更通知，增加桩长。

(6)岩土工程市场不规范、竞争不公平是工程质量的祸根。对有偷工减料前科的施工单位可取芯检查，发现不能满足设计要求者，处理费、取芯费均由施工单位可取芯检查，发现不能满足设计要求者,处理费、取芯费均由施工单位负责，对不合格工程决不手软，这样才能对质量有保证。

在推行岩土工程体制的今日，实行谁设计，谁施工，谁负责的制度，看来是成功的经验。

四　质量检测

(1)静载荷试验：在质量能总体控制的情况下，要求做单桩复合地基静载荷试验。

通过对数十组粉喷桩复合地基静载荷试验资料反演分析得出，在正常施工状态，施工桩长与反演分析得出的桩长相近。若因偷工减料施工桩长小于设计桩长，则通过载荷试验曲线可以反演求得实际桩长。

现举某工程实例如下：

（见图 1 复合地基静载荷试验曲线）

①计算公式：

$R_k^d=(f_{sp\cdot k}-\beta(1-m)f_{s\cdot k})Ap/m$

$l=(R_k^d-\alpha q_p\cdot A_p)/\pi dq_s$

②单桩承载力反演结果：

B 区 90#桩，$f_{sp\cdot k}$=110kPa,$f_{sp\cdot k}$=54.42kN，经计算压板下连续水泥土桩段长度约 3.6m，设计桩长 6.5m。

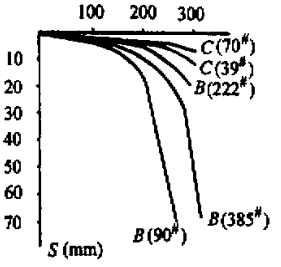


图1　复合地基静载荷试验曲线

B 区 385#桩，$f_{sp\cdot k}$=134kPa,R_{dk}=69.8kN，经计算压板下连续水泥土桩段长度约 6.7m，设计桩长 9.5m。

B 区 222#桩，$f_{sp\cdot k}$ =169kPa, R_{dk} =92.2kN，经计算连续水泥土桩段在压板下约 8m，设计桩长 8.5m，满足设计要求。由此证明 90#、385#桩的反演是可靠的，施工桩长没有满足设计桩长要求。

从以上复合地基载荷试验 *P-S* 曲线可看出，B 区与 C 区曲线为截然不同的线型。此二区为同一场地,同一建筑物，分别为二个施工队伍施工。B 区试桩三根，有二根试桩通过曲线反演实际桩长不能满足设计桩长要求，少打多记。统计了二个施工队的施工速度，按设计要求结合施工记录 B 区每天上下占具及复搅总延米数 1620m，C 区每天为 1164m。B 区施工后地表隆起较小，打桩区有积水现象。B 区每天施工 57 根桩，C 区每天施工 35 根桩。通过以上分析得出 B 区不能满足设计要求，是施工队偷工减料，少打多记。后补桩加大承台处理。

(2)要求有建设方在场监督的情况下，抽取总桩数的 2%在成桩 7 日内做 N_{10} 检测。

(3)直接观察：基槽开挖后，对桩位、桩径、水泥土的颜色、坚硬状态……进行检查。我院设计要求二档喷粉，上段进行复搅。通过大量观察，有的施工单位为求进度，用三档喷粉，不复搅。用三档喷粉，不复搅的水泥土单层层厚一般均为 1～1.5cm 左右，且桩中心大部出现一个与占杆同直径的软弱圈。用二档喷粉复搅的水泥土单层层厚一般均小于 1cm。且桩中心仅少量出现一个与占杆同直径的软弱圈。有资料表明复搅部分波速比单搅部分提高 50%，复搅桩承载力也明显大于单搅桩。

(4)桩间土 N_{10} 检测:复合地基计算中,桩间土的承载力与天然地基承载力相同。用 N_{10} 做了几个工程的对比试验,将结果列于表 1。

从表 1 可看出粉喷桩处理后的桩间土 N_{10} 将有明显提高,且随时间的推移将进一步提高。但在粉喷桩设计时桩间土承载力是按天然土承载力计算的,这是很大的安全储备,故正确的设计,正常的施工,粉喷桩复合地基的可靠度是大的。

表 1　粉喷桩处理前后 N_{10} 变化表

工　程　名　称	土　性	天然土 N_{10}	桩间土 N_{10}	N_{10} 桩间土/ N_{10} 天
常州公安局综合楼	杂填土 淤质土	28.83	46.33	1.61
常州四中体育馆	杂填土 淤质土	14.7	25.61	1.79
常州盐业公司办公楼	杂填土 淤质土	25.33	42.36	1.67
泰兴江海开发公司住宅	填粉土	17.79	29.49	1.66
常州剑湖精密自动化设备住宅	冲填淤质土	11.77	14.58	1.24
常州职业技术学院行政楼	杂填土 淤质土	17.18	22.9	1.33
常州恒力机械厂辅助车间	杂填土 淤质土	14.08	17.88	1.27
常州东亚漂染厂宿舍	杂填土 淤质土	22.57	34.46	1.53
常州新区安置住宅 4#	杂填土 淤质土	32.82	47.24	1.43
常州盐业公司成品库	杂填土 淤质土	21.55	36.22	1.6
常州恒力机械厂食堂	杂填土 淤质土	18.76	28.6	1.52

粉喷桩桩间土强度的提高与桩体因水泥水化使含水量减少，导致桩间土中水向桩体运移，桩间土含水量减少有关。浆喷桩无以上现象存在。我们的工程效果表明粉喷桩优于浆喷桩。

目前粉喷桩的检测依据主要是复合地基荷载试验，而复合地基荷载试验又受到荷载板面积的限制，影响深度有限，因而掩盖了大量的施工质量问题，故出现静载试验复合地基承载力满足了设计要求，而建筑物沉降过大的事故发生。粉喷桩的质量评价，总体质量控制是主要的。我们施工，要求每天汇总全部原始数据，进行对比分析，发现问题及时解决。总体质量有问题的复合地基，即使载荷试验能满足要求，也是不安全的。

五　工程效果——建筑物沉降观测

为验证粉喷桩设计的正确性、施工质量，保证建筑物的安全，要求对粉喷桩复合地基进行建筑物的沉降观测。通过沉降观测可看出经粉喷桩处理后的建筑物沉降量较小，在局部软土区，天然地基与复合地基沉降能相匹配，竣工时沉降量约为最终沉降量的 70%左右，是处理软土的理想方法。现举几个工程实例如表 2 所示。

六　结　语

1.通过我院几十项工程利用粉喷桩处理软基的经验表明：该工法是处理软土较好的工法，造价低,工期短,无噪声,它具有很广泛的适用性，具有很好的发展前景，技术是成熟的，可靠的。目前出现的一些问题，主要是施工单位偷工减料造成。针对目前混乱的施工市场，实行谁设计、谁施工、谁负责的制度，严格监理制度，对不合格工程决不手软，将事故消灭在萌芽状态。

2.只要粉喷桩桩端穿过软土层，到达较好持力层时，其沉降量控制是有保证的。在软土厚度较大时，采用长短桩相结合，长桩进入软土下持力层，超长部分的桩侧阻力将减少

短桩桩端的附加应力，减少沉降，节约造价。

3.粉喷桩质量的好坏是能预控的。通过水泥用量，实际用电量，地表隆起量，施工速度，水泥土单层厚度……是能总体评价施工质量的。粉喷桩的施工质量，要每天分析评价，发现问题要及时解决。

4.据有关文献记载，日本有青木、鹿岛等 53 个建设株式会社参与和组建粉喷桩工法研究机构。从 1981~1989 年的九年期间，粉喷桩工法用于土木建筑的实际工程达 1128 个，这充分说明了粉喷桩在日本已广泛使用,这点值得我们深思。

表 2　部分粉喷桩资料汇总表

工程名称	结构型式 层　数	桩间土 桩端土	浅基土 f_s(kPa)	桩长(m) 置换率 m	$F_{sp,k}$ (kPa)	S_f mm $\Delta s/\Delta T$ (mm/d)	S_T mm $\Delta s/\Delta T$ (mm/d)	$S_{1年}$ mm $\Delta s/\Delta T$ (mm/d)
	框架	80		6.5-7.7	170	16.64		23.46
	4	160		0.303		0.107		0.010
16.12	框架	75	240	6.0	220	15.42		21.53
0.0134	8~9	200		0.45		0.018		0.011
	底框砖混	60		5.4-6.5	170	22.25		
	6~7	180		0.33		0.023		
13.2	砖混	50	230	5-8	160	17.1		
0.048	6	165		0.31		0.056		
12.8	排架	65	200	3-8.5	180	13.8		
0.072	1	140-200		0.34-0.54		0.063		
	砖混	65		6-7	190	19.33		
	5	140		0.37		0.037		
常州盐业公司	框架	50		4.5	170	10.7		
北港办公楼	3	180		0.38		0.092		

说明：S_f为复合地基竣工时平均沉降量，S_T为天然地基竣工时平均沉降，$S_{1年}$为竣工一年后复合地基平均沉降量。$\Delta S/\Delta T$ 为沉降速率,浅基土项内有数值,说明粉喷桩局部处理,桩间土栏示 f_s(kPa)。常州公安局综合楼天然地基竣工一年后平均沉降量 21.51mm。

参考文献

[1] 周志峰：《水泥搅拌桩设计方法的评述》，载《岩土工程师》，1999 年第 2 期。

[2] 李建华：《粉喷桩复合地基在高层建筑中的应用》，上海交通大学出版社，2000。