复杂地基中采用粉喷桩(水泥)加固工程实例及分析

邓亚光　　朱　江　解旭传
（江苏省如东基础工程建设公司，如东，226400）（江苏省如东县建筑设计院，如东，226400）

提　要　本文介绍了位于长江下游沿海地区，在有较多暗河浜及淤质粉土的复杂地基中，采用粉喷桩加固取得成功的经验，并对比了采用浆喷法加固的实例，认为粉喷法加固此类含水量较高，存在杂填土、素填土、淤泥、淤质粉土的复杂地基，有广泛的应用前景，提出了些观点和结论与大家商讨。

一　前　言

粉体喷射搅拌桩加固软土地基技术，是利用特制的搅拌机械，在地基深处使水泥与土体强制搅拌，最大限度地利用原位土与水泥粉充分混合，产生一系列物理化学反应，形成有整体性和水稳定性、强度较高的水泥土体——介于刚性桩和柔性桩之间的水泥粉喷桩，稳定桩周土体，减少桩周土体的含水量，增强桩间土的强度，整体优质的复合地基，从而起到加固软土的作用。

由于施工简便，成本低廉，工期短，无噪音、振动、污染等不良影响，有着显著经济、技术、环保等效益，我国自 1983 年引进该技术，在全国软土区特别在软土含水量较高的江、浙、沪地区得到快速的推广、应用。但在 1993 年左右，由于一些施工队伍素质低下，建筑市场管理混乱、规范标准不完善，又缺乏准确的计量装置，发生了较多的工程质量问题，而对该工法提出了怀疑和否定。如东位于邻近上海的苏北沿海地区，区内河道较多，有大量的沿海滩涂，地下水位较高，软土以含水量较高的淤质粉土为主，过去虽有成功的粉喷桩加固实例，但一些设计单位在“慎用粉喷桩”的影响下，较多地采用了深层搅拌桩，即浆喷法，甚至出现了将粉喷桩机械加高压水泥泵等装置改作浆喷工法，但因本地区软土层含水量较高，浆喷效果远不如粉喷好，甚至出现了几次失败的实例。

1997 年以来，江、浙、沪地区兴建高速公路，粉喷桩大规模应用于路基加固。由于有了严格的招标制度和监理制度，加强了对施工队伍的管理，并配备了电子计量装置和应用较全面的技术，取得了很明显的经济技术效果。又促使该法在该地区民用建筑上的重新推广应用。

本文介绍的如东物资市场和职中综合楼粉喷桩工程正是在此“大气候”下，运用于复杂的软土地基中，取得较好的经济技术效果的实例。

二　工程实例

1. 工程实例一：如东物资市场综合楼粉喷桩工程

(1)工程概况及地质条件

工程概况:如东物资市场拟在老河床及边缘地带建三幢 5~6 层砖混结构的商住楼，B_1、B_2、B_3三栋楼紧密相联，设置了沉降缝分开。

B_1、B_2大部分和B_3幢西南部位于老河床上，暗河最深达 4.10m，大部分地段有砼块石挡土墙，及乱石、老石驳，因而进行了开挖清除并分层回填了夹有碎砖的素填土，因回填期间下雨，地下水排出不畅，回填土质较差，形成了明显的“橡皮土”现象，经轻便触探测试，N_{10}均小于 10，加上整个场地南侧无老石驳地段仅开挖到原地表下 1.5m 处即回填，未彻底开挖，仍有大量含块石的杂填土。B_3幢一部分地段不在老河床之上，下卧层为粉质粘土加粉土，f_k=120kPa，整个地基差异较大，原设计深层搅拌桩，即浆喷法，考虑到该地域地下水位较高，回填至原地面下 60cm 处即停止回填，地下水位距现地面仅为 0.5m，加上下雨等因素，整个场地内各软弱土层含水量均较高，决定改用粉喷工艺施工。

(2)设计及施工

设计要求：复合地基承载力达 120kPa，单桩承载力达 100kN，桩径 500mm，桩顶距现地面（现地面为-0.6m）0.3m，在B_1、B_2及B_3一部分地段有效桩长 6.0m，桩间距为 1.0×1.0m 满堂布置，B_3大部分下无暗河，有效桩长为 4.0m，桩间距为 1.3×1.3m。要求桩身 90d 无侧限抗压强度达 1350kPa，水泥掺入量为 15%，上段 3m 范围内要求复喷复搅，再掺入 5%的水泥。

施工：该工程施工了 1800 根桩，投入施工机械为两台铁道部武汉工程机械研究所产 PH-5A 型粉喷桩机，计施工工期 28 天。施工中严格按江苏省建筑安装工程操作规范和图纸要求，采用电子秤计量水泥粉量，并认真配合监理的工作，在施工中由于场地差异较大，分别制定了不同的施工组织计划，在有大量填土存在的地段，减慢了钻进及提升速度，对有块石钻不进的桩位，采取了周围补钻等方法，最终顺利地完成了施工任务。取得了较好的加固效果。因含较多石块、砖瓦，在施工中也断裂了两次钻杆，磨损了 8 个钻头。

(3)检测

直接观察：打桩完成后 28 天左右，对基槽进行了开挖，对桩位、桩径、桩顶水泥体的颜色、形状、硬度、搅拌均匀性等进行了直接观察。表明均满足设计的要求，且桩周的土体的含水量较施工前大幅度降低，再未见“橡皮土”现象。

轻便触探：在施工后 1d~7d 时间内共做了 43 组桩体轻便触探测试，表明在桩顶 1.5m 范围内N_{10}指标均大于 50 击，远远大于规范要求。

单桩复合地基载荷试验：加荷总量大于设计复合地基承载力的两倍。在 *P-S* 曲线上，均未见明显拐点，故采用相对沉降量法，即取 *S*/*B*=0.01 时对应的荷载为地基允许承载力：

第一组试验：（在B_1栋中部南侧）　　f_k=158 kPa；

第二组试验：（在B_2栋中部南侧）　　f_k=156 kPa；

第三组试验：（在B_3与B_2交界处南侧）　f_k=163 kPa；

第四组试验：（在B_3栋中部）　　f_k=158kPa。

试验的结果表明加荷后的复合地基承载力均大于设计要求的 120kPa。前三组试验，载荷板规格为 1.0×1.0m，试板下留有未完全清除的杂填土，有效桩长为 6m，桩距为 1.0×1.0m，第四组试验，试板规格为 1.3×1.3m，下无杂填土层，有效桩桩长 4m，桩距为 1.3×1.3m。

2. 工程实例二：如东职中综合楼粉喷桩工程

(1)工程概况及地质条件

该综合楼为二至三层的框架结构,独立柱基础,埋深地表下 2.35 米,要求复合地基承载力达到 160kPa。拟建场地内有四条暗河，南端东西向暗河内填土较杂，有大量腐植质、生活垃圾、建筑垃圾及冲填土和素填土，暗河内含淤泥较多；除南端东西暗河外其它三条暗河填土以素填土为主，暗河填土密度不均匀，除暗河位置外，场地下卧土层分布均匀。

各土层地质情况见下表：

层号	土层名	层厚(m)		ω	γ	e	I_l	Sr	Es	F_K	备
		最大	最小	(%)	(kN/m³)			(%)	(MPa)	(MPa)	注
①	素填土	0.8	0.0								
①-a	含淤泥杂填土	3.5	0.0	40.8	17.2	1.25		87.6	1.46		
②	粉质粘土	1.4	0.0	28.3	19.5	0.79	0.55	97.5	0.23	120	
③	淤质粉土	2.5	2.0	37.4	18.5	1.04	1.17	97.6	0.52	90	
④	粉砂夹粉土	6.0	4.0	29.9	19.1	0.83		97.3	0.12	140	
⑤	淤质粉土	1.5	0.8	38.4	18.2	1.08	0.90	96.4	0.32	100	
⑥	粉砂夹粉土	未钻透		29.3	19.2	0.81		97.0	0.17	170	

(2)设计与施工

设计要求：考虑到拟建场地范围内有东西南北向各二条暗河浜，特别是南端东西向暗河内有大量的生活垃圾和未固结冲填土，埋深最大处为地表下 3.5m，含水量高达 59%，设计在该地段先打挤密砂桩，桩径为 220mm，桩长为 4.5m，桩顶标高为地表下 2.35 米，即进入第④层深度大于 1.0m，使地基承载力达到 90kPa 后再进行粉喷桩施工。设计粉喷桩有效桩长大于 5.0m，桩径为 600mm，桩距为 1.0×1.0m，桩顶标高为地表下 2.35 米，采用 425 普通硅酸盐水泥，水泥掺入量一般地段为 13%~15%，暗河部分水泥掺入量为 15%~18%，并在桩顶下 3m 内复搅，要求加固后水泥土体强度（90d 龄期）$q_u \geq 1415$kPa。

施工：本工程计施工了粉喷桩 1982 根，投入机械为 2 台铁道部武汉机械研究所产的 PH-5A 型粉喷桩机，施工工期为 30 天，施工中严格按江苏省建筑安装工程操作规范和图纸要求，采用电子秤计量水泥粉量，并认真配合监理的工作，在南端东西向暗河部位先施打了 535 根挤密砂桩，砂桩的位置在各粉喷桩中心和桩间，使得原暗河部位的杂填土先得到挤密，再使水泥与砂均匀搅拌，形成了有较高强度的水泥砂土混合体。此部位的水泥掺入量达到 75kg/m，高于一般暗河部位（素填土为主）65~70kg/m，水泥停粉面位于天然地表下 1.8m，这样一般土层中的每根桩的水泥用量为 360kg 左右，而暗河部位的每根桩的水泥用量为 400kg 左右。

(3)检测

直接观察：打桩完成后 30 天左右，对基槽进行了开挖，开挖深度为地表下 1.8m，对

桩径水泥土的颜色、形状、硬度、搅拌均匀性进行了直接观察，表明均满足设计要求。

轻便测探：在施工后 1~7 天内共做了 40 组桩体轻便触探测试，表明在桩顶 1.5m 范围内 N_{10} 指标均大于 65 击，最高达 120 击，远远大于规范要求。

单桩复合地基载荷实验：由于场地内地下水位较高，载荷板底面位于地表下 1.8m 左右，未达到基础埋深的地表下 2.35m 深度，即板下桩长达 6.5m 左右，共进行了 6 组试验，加荷总量大于设计要求的复合地基承载力的两倍，在 P—S 曲线上均未见明显拐点，故采用相对沉降量法，考虑到本工程为框架结构的独立柱基，对不均匀沉降很敏感，故取 S/B =0.006 时对应的荷载为地基允许承载力：

第一组试验：（在北端东西向暗河内，河内为土质较均匀的素填土）f_k=232 kPa；

第二组试验：（在北端东西向暗河内，河内为土质较均匀的素填土）f_k=248 kPa；

第三组试验：（在场地中部无暗河内） f_k=182 kPa

第四组试验：（在场地内东侧南北向暗河内）f_k=165 kPa

第五组试验：（在场地内南端东西向暗河内）f_k=163 kPa

第六组试验：（在场地内西测南北向暗河内）f_k=165 kPa

三　分析及讨论

1.物资局工程地质条件较复杂，地基差异较大，整个场地开挖回填后低于原地面 60cm，加上天气下雨，地下水位较高，整个场地的含水量较高，原设计采用浆喷法加固，后因地制宜，采用了粉喷法加固，取得了成功。如东职中工程原设计将南端东西向暗河开挖回填后再打桩，现采用砂桩先行加固，使原地基承载力有一定的提高，然后再进行粉喷桩施工，使水泥加砂与原土搅拌后提高了桩体强度，也取得了成功。说明采用桩长不同，桩距不同，提升搅拌速度不同，水泥掺入量不同等措施进行粉喷桩加固，对于含水量较高的杂填土、素填土等复杂地基有较好的经济技术效果。

2.我们曾用浆喷法加固过与本场地地质条件相近的工程，其地质情况为：第一层：素填土，层厚为 0.7~2.3m；第二层：淤泥质粉土，层厚 2.2~2.5m，f_k=70kPa；第三层：粉土层，层厚大于 3m，f_k=140kPa，设计有效桩长为 5m，桩距 1.0×1.0m，桩径 500mm。加固后经载荷试验测试，第一组：f_k=130kPa；第二组：f_k=136kPa。并进行了 20 组低应变检测，波速平均达 1527m/s，该值小于一般粉喷桩所达到的 1700m/s~1900m/s。基槽开挖后发现浆喷法施工的水泥土搅拌均匀性较差，常常在桩体外壳形成一层水泥面，而桩体中间可见原土与水泥各成富集块状，整体强度较低，可能是由于搅拌土上提时带有较多的粘性土块，如工人清理不及时，或清理时又带下复搅，在桩顶部位 80cm 内形成这种情况。而粉喷法施工所形成的水泥土搅拌均匀，桩顶部分搅拌纹理清晰，桩体完整性较好，整体强度较高。在我们施工过的许多工程载荷试验中发现，同等土质、同样的桩径、桩距、桩长、水泥掺入量而浆喷法的沉降量较大、承载力偏低。结合其它资料表明：粉喷桩更适用于含水量大于 30%的软土的加固。而浆喷法采用的水灰比一般为 0.4~0.6，水泥水化硬凝仅耗掉自身重量 25%左右的水分，而一般天然含水量每增大 10%，水泥加固土体强度会降低 10%~15%。所以浆喷相当于在软土含水量本来较高时又增加了一定的水分，这显然不利于强度的增长。当含水量达 30%时，12%左右的水泥掺入量的土体强度大于含水量为 80%

同等水泥掺入量的土体强度的两倍；用 10%左右的水泥掺入量的粉喷工法施工，相当于用 20%的水泥掺入量配置成的浆喷法施工所达到的水泥土体的强度。而粉喷加固后，水泥会吸收桩周土体的水分，在使水泥土体强度较浆喷法高的同时，又能提高桩间土的强度。经粉喷法加固后的桩间土的轻便触探击数较原土提高 60%以上。

3.粉喷桩形成的复合地基，在上部荷载作用下，桩土应力比一般在 3~10 左右，即桩所承担的荷载一般要达总荷载的 75%以上，而桩体的轴向应力分布最大值一般为桩径 5 倍范围内。且该部位也往往是加固土层中最软弱部位。因此，在该部位增加水泥掺入量和复搅次数，增加该部位桩体的强度以匹配桩体不同深度所承担不同的应力，对提高整个地基整体稳定性、均匀性会有明显的作用。

4.在含水量较高的沿海地区，一般原承载力为 80~100 kPa 的软土地基，经粉喷桩加固后，复合地基承载力一般可达 150kPa~250kPa，单桩桩径为 500~600mm，有效桩长 6.5m 以上，其单桩承载力一般可达 120kN 以上，能满足九层以下民用建筑对地基强度的要求。对于素填土和以掺有少量建筑垃圾的杂填土、甚至对含有机质的生活垃圾的杂填土配合挤密砂桩，粉喷法加固也有较好的效果。与浆喷法比较，粉喷法有电子计量装置，较易控制不同深度、不同土层的水泥掺入量。施工速度也较快，搅拌均匀性较好，能有效减除含水量较高的软土层的水份，提高桩体强度和桩间土体强度，具有广泛的适用性、实用性，其技术是成熟可靠的，因而被认为是沿海含水量较高地区最有潜力和发展前景的地基加固手段。

参考文献

[1] 曹正康，钱玉林：《水泥加固上海软土工程性能的试验研究》，见《第三届全国地基处理学术讨论会论文集》，1992.

[2] 叶观宝，叶书麟：《深层搅拌桩桩身荷载传递量测与分析》，见《第三届全国地基处理学术讨论会论文集》，1992.

[3] 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》，1997.

[4] 刘清海：《反射波测定粉喷桩研究》，载《地基处理》，1998.3.

[5] 刘建航，侯学渊：《基坑工程手册》，1997.

[6] 林琼等：《水泥搅拌桩复合地基工程特性初探》，见《第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集》，上海，1997.

[7] 周泊银等：《水泥粉喷桩的工程应用和质量预控》，见《江苏省土木建筑学会地基基础联合年会论文选集》，1999.