

高层建筑下的劲性复合桩工程实例及研究

2018 年 5 月

邓亚光 沙焕焕

1 引言

邓亚光发明的(SMC)劲性复合桩作为一种具有系列国家专利(复合桩的施工方法: ZL 01 1 08106.6)和国家级工法的新式桩型, 集柔性散粒体桩(S)、半刚性水泥土类桩(M)和刚性高强度混凝土类桩(C)优势于一体, 已在全国数千项工程中得到了应用。劲性复合桩的设计已得到了明确规范, 并纳入江苏省地方标准(DGJ32/TJ 151-2013)与国家行业标准(JGJ/T 327-2014)^[1]。

中国建筑科学研究自筹基金课题《高层建筑沉降量控制研究及计算方法》(刘金波等著)72页中提出“桩距、桩长、桩间土性质和基桩数量对沉降的影响都可通过桩身轴力的分布来衡量, 桩身轴力分布是控制桩基础沉降的关键因素, 也是目前可以相对准确测量的参数。桩基础沉降的组成部分无论桩长范围内的压缩还是桩端以下土的压缩都和桩身轴力分布有关; 另一方面桩身轴力衰减速度越快, 桩身范围内压缩越小, 另一方面桩身轴力衰减速度越快, 桩端部传给地基土的附加应力越小, 桩端以下土的变形越小。因此, 桩身轴力的衰减速度和分布是决定桩基础沉降的关键因素。影响桩身轴力衰减速度和桩身轴力分布的主要因素是桩侧摩阻力的发挥, 而桩侧摩阻力的发挥和桩侧土的性质、桩土结合状态以及桩侧土压力有关, 这三个因素都受桩基础沉降量的影响。在一定荷载作用下, 桩基础产生一定沉降, 沉降对桩间土的压缩使土的性质提高、桩土结合状态改善和桩侧土压力增大, 最终使桩侧摩阻力提高。这也是群桩和单桩受力状态的不同之处。”

天津大学郑刚教授在《桩基手册》(张雁, 刘金波主编, 一北京: 中国建筑工业出版社, 2009)739页提出“劲性搅拌桩在芯桩长度范围内搅拌桩局部的质量缺陷并不影响其单桩承载力。”

以上两个观点与我们近年来在一些高层建筑下的劲性复合桩工程实例相吻合, 详见 3.1~3.3。

2 MC 劲性复合桩桩体结构及作用机理



内芯C桩: PHC管桩

外芯M桩: 水泥土桩

(M 以水泥搅拌桩为例,C 以 PHC 管桩为例) 作用机理:

①压密挤扩作用: 劲芯的打入能压密挤扩水泥土体和桩周土体, 增加水泥土

体密度，使桩周土体的界面粗糙紧密。

②改善荷载传递途径及深度：上部荷载作用下的应力会由劲芯快速传递到其侧壁和桩端的水泥土体，再由水泥土体迅速传递给桩周及桩端土体，芯桩承受的荷载会急剧减少。实测 12m 长的管桩芯桩桩底应力仅为桩顶应力的 12%左右，因此对持力层强度要求不高。

③形成桩土共同工作用的复合地基。

3 劲性复合桩工程实例及试验研究

3.1 江苏省南通市如东中天润园小区

3.1.1 工程概况

中天润园项目位于南通市如东县掘港镇，劲性复合桩基于 2012 年施工。试验桩所在 11、12#楼为 26+1F 住宅楼，工后三年累计沉降 2 公分多。

拟建场地地貌类型属长江下游冲积平原区滨海平原。场地成陆时间较晚，主要覆盖第四纪松散沉积物，以粉土、粉砂、粉质黏土为主。本工程软土层厚度大、压缩性高、承载力低，不能满足上部结构荷载的需要，原设计方案采用φ500 mm PHC 管桩，桩底进入较理想的 11 - 1 粉砂层，单桩承载力极限值 4000 kN；自地表起所需桩长约 38 m，工程造价较高。经对比分析现采用管桩水泥土复合桩，充分利用场地地表下 18 m 左右，承载力 180 kPa，厚度较大的中等压缩性 6 - 3 粉砂层。在复合桩成桩 90 d 后进行单桩载荷试验，其承载力比单一管桩高一倍以上，而造价仅为原方案的一半左右。

土层物理力学参数表

层号	土层	层厚/m	孔隙比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	含水率 w/%	压缩模量 Es/MPa	qc/MPa	fs/kPa	fak/kPa
1	素填土混杂填土	1.0	1.045	16.6	10.4	31.1	3.04	1.31	31.96	50
2	粉质黏土夹粉土	1.0	0.976	19.0	12.4	32.1	3.49	0.90	21.31	80
3 - 1	淤泥质粉质黏土夹粉土	1.2	1.199	13.8	6.3	41.8	2.55	0.50	8.62	60
3 - 2	粉土夹粉质黏土	1.1	0.930	13.4	20.1	31.9	5.39	1.64	19.49	100
4	粉砂夹粉土	3.2	0.802	5.1	27.6	29.4	9.72	3.93	38.16	135
5 - 1	粉砂	2.3	0.753	3.9	30.0	28.1	13.64	6.70	64.46	160
5 - 2	粉砂夹粉土	1.0	0.804	5.0	27.5	29.7	9.96	3.28	51.33	130
5 - 3	粉砂	1.7	0.772	3.8	30.5	29.5	13.63	6.95	68.02	170
6 - 1	粉砂夹粉土	2.5	0.806	4.7	27.4	29.4	9.86	3.60	52.06	135
6 - 2	粉砂夹粉土	2.2	0.758	4.5	28.9	28.1	12.40	5.25	57.08	150
6 - 3	粉砂	2.9	0.714	3.1	32.4	25.8	15.76	8.78	71.19	180
6 - a	粉砂夹粉土	1.9	0.809	5.0	27.4	29.8	10.11	3.12	55.82	125
7	粉砂	2.9	0.634	1.9	35.0	24.1	18.95	14.04	107.55	230
8 - 1	粉质黏土夹粉土	2.5	0.973	30.1	15.7	33.2	6.25	1.25	30.38	120
8 - 2	粉质黏土	2.9	0.844	42.4	14.0	27.2	6.19	1.84	67.86	160
9	粉砂粉质黏土互层	2.3	0.796	4.0	29.6	29.0	11.59	3.81	68.03	135
10	粉砂夹粉土	2.9	0.712	3.1	31.9	26.1	14.97	8.08	95.03	185
11 - 1	粉砂	5.1	0.683	2.4	32.8	25.1	16.16	10.99	126.44	220
11 - 2	粉砂夹粉土	1.5	0.745	4.7	28.9	27.5	12.82	5.89	83.12	160
11 - 3	粉砂	6.0	0.709	3.1	32.4	26.0	15.56	9.51	113.97	200
12	粉细砂	16.0	0.612	1.4	37.3	23.9	20.53	15.67	240.17	250

注：表中 qc 为锥尖阻力标准值，fs 为侧壁摩阻力标准值，fak 为地基承载力特征值。

现场试验桩采用 ZYC900S 型压桩机在水泥土初凝前将 PHC500AB-(125)-11 m 单节管桩压入长 14 m，直径 $\phi 800$ mm 的水泥粉喷桩中至地面下约 16.6 m，形成管桩水泥土复合桩(送桩深度 5.6 m)，其桩身结构见图 17-6。粉喷桩采用 42.5 (R) 级复合硅酸盐水泥，掺入量为 18%，管桩下端另加 5%复搅。粉喷机械为国内最大功率的武汉产天宝深搅机械，送灰压力达 0.7 MPa，单桩送灰总质量达 1800kg。每栋楼还单独施工了 120 根 8m 长的 700mm 水泥土桩以协调桩间土共同承载。

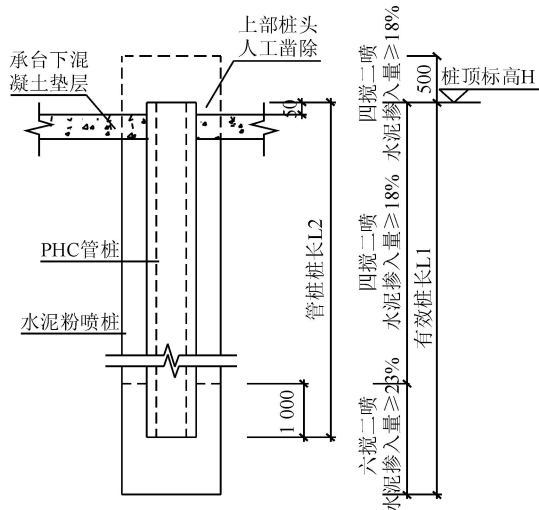
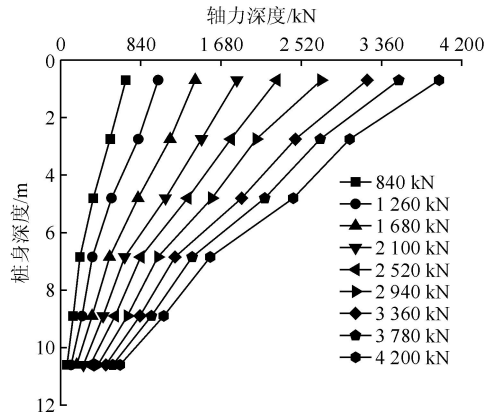


图 17-6 管桩水泥土复合桩结构

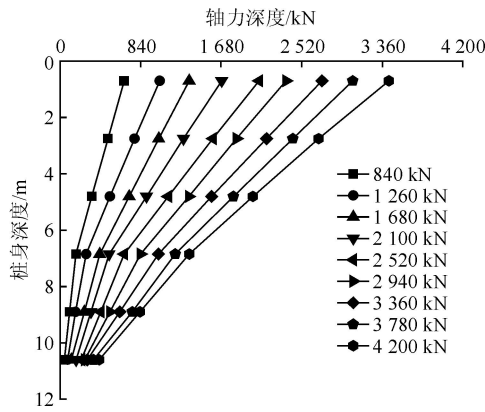
3.1.2 试验研究

(1) 桩身轴力、桩端阻力

实测管桩桩身轴力见图 6，各级荷载下桩端阻力承载比例见图 7。



(a) 1#试验桩



(b) 2#试验桩
图 6 管桩桩身轴力

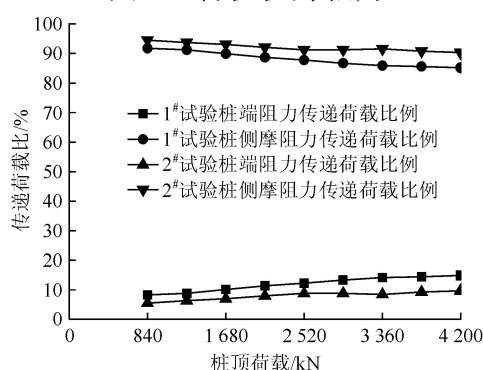


图 7 桩侧、桩端传递荷载比

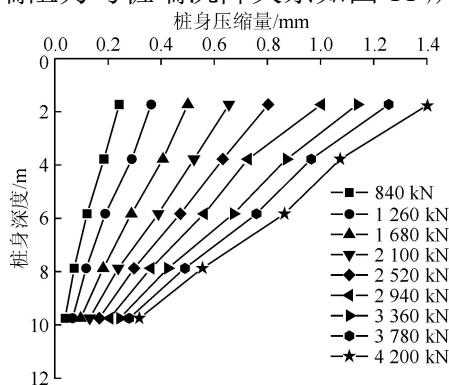
如图 6 所示，管桩桩身轴力随荷载的增加而增加，轴力沿桩身急剧减小，随桩顶荷载增加轴力沿深度衰减速率逐渐变小且趋于稳定，即桩端阻力所承担的荷载比例逐渐增大且逐渐趋于一个稳定值。各级荷载下管桩桩端承担的荷载为总荷载的 8.2%~14.8%。如图 7 所示，最大荷载下桩端阻力约占桩顶荷载的 10%~15%，复合桩表现出摩擦桩的工作特性。随着桩顶荷载的增加，桩端阻力传递荷载比例逐渐增大。原因在于：随着桩顶荷载的增加，桩顶位移、桩身位移及桩端位移均逐渐增大，而管桩水泥土复合桩桩侧阻力充分发挥所需位移远小于桩端阻力充分发挥所需位移，即桩侧阻力要先于桩端阻力充分发挥。

(2) 桩侧摩阻力

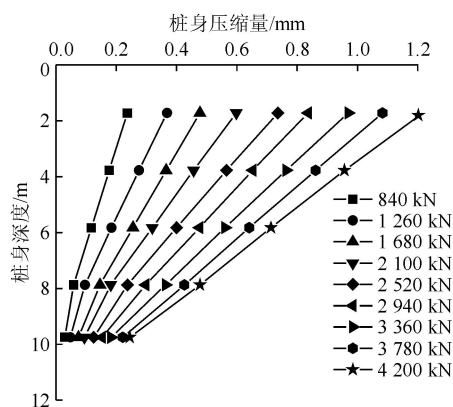
实测管桩水泥土复合桩水泥土和桩周土、单一管桩、钻孔灌注桩侧摩阻力如表 2 所示。管桩水泥土复合桩水泥土侧摩阻力为单一管桩桩周土的 3.9~7.7 倍。按等效均一土层计算是其 5.2 倍；为钻孔灌注桩的 4.3~8.2 倍，按等效均一土层计算是其 5.6 倍。即水泥土桩所能提供的侧摩阻力是原地基土的 5 倍以上。管桩水泥土复合桩充分利用大直径水泥土桩提供侧摩阻力的能力。水泥土在搅拌过程中有一定的喷浆压力，使桩侧土被挤密，管桩压入过程中水泥土除自身被挤压外又对桩周土产生挤密，接触面凸凹交替彼此咬合促使桩周土侧摩阻力远大于单一管桩的桩周土的数值。实测管桩水泥土复合桩桩周土侧阻力值为单一管桩桩周土的 2.4~4.8 倍。按等效均一土层计算是其 3.2 倍，为钻孔灌注桩的 2.7~5.1 倍)。

(3) 桩身压缩变形

计算得到各级荷载下 2 个试验桩的管桩桩身各断面压缩量如图 10 所示；相应的，1#试验桩的桩端阻力与桩端沉降关系如图 11 所示。



(a) 1#试验桩



(b) 2#试验桩

图 10 管桩桩身压缩量

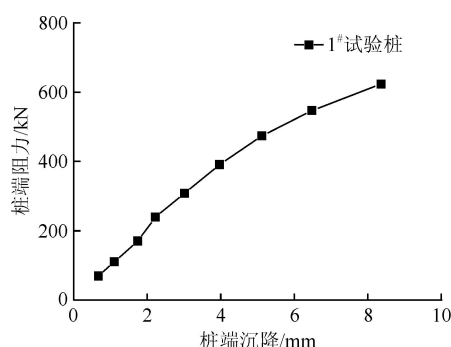


图 11 桩端阻力与桩端沉降关系

管桩桩顶受荷后，桩身压缩而向下产生位移。由于桩侧摩阻力的发挥，桩身轴力沿深度减小，因此桩身压缩量也随深度递减。桩端位移加大了桩身各截面的位移，并促使侧摩阻力进一步发挥。当桩端产生位移时，桩端阻力才开始发挥，桩端阻力与桩端位移近似呈双曲线分布表示，即

$$q_n = s / (a + b \cdot s) \quad (14)$$

式中： q_n 为桩端阻力， a ， b 为拟合系数。

3.1.3 研究结论^[2]

以管桩水泥土桩（MC 桩）为例开展试验，经实测数据系统分析后得以下荷载传递规律：

(1) 管桩水泥土复合桩在各级荷载作用下的沉降稳定时间不完全一致，Q-s 曲线呈缓变型。

(2) 管桩复合基桩工作特性与刚性单桩相似。桩端阻力大约只占桩顶荷载的 10%~15%，复合桩表现出摩擦桩的工作特性。

(3) 管桩和水泥土桩侧摩阻力分布规律类似，其比值约为水泥土桩和管桩外径的比值。水泥土桩所能提供的侧摩阻力是原桩周土的 5 倍以上。管桩水泥土复合桩桩周土极限侧摩阻力是原桩周土的 3 倍以上。

(4) 管桩是竖向荷载的主要承担者，各级荷载下管桩承载比例为 93.43%~94.34%，水泥土承担荷载比例为 5.66%~6.57%，且荷载越大，应力向管桩集中现象越显著，管桩承担的荷载比例越高。

3.2 江苏省南通市星湖城市广场项目

3.2.1 工程概况

星湖城市广场位于南通市开发区星湖大道北侧、通盛大道东侧。该工程占地面积 113230 m²，建筑面积 303312 m²，框架结构，地上 4 层，地下 1~2 层。该工程拟采用天然地基或桩基，无地下室部分基础埋深约为 2.00 m，一层地下室埋深 5.80 m，二层地下室埋深 10.60 m，一层地下室区域为 I 号场地，二层地下室区域为 II 号场地，如图 17-7 所示。

对比单一管桩，管桩水泥土复合桩兼有承载力高及成本低的优势，本工程桩基础采用管桩水泥土复合桩作抗拔桩。I 号场地采用直径为 800 mm 水泥粉喷桩内插 PHA-500-B-125-11 m 型管桩，两桩标高：桩顶为-6.05 m，桩底为-17.05 m，有效桩长 11 m，设计单桩竖向抗拔承载力特征值 650 kN；II 号场地试桩采用直径为 800 mm 水泥粉喷桩内插 PHA-500-B-125-13 m，两桩标高：桩顶为-10.45 m，桩底为-23.45 m，有效桩长 13 m，设计单桩竖向抗拔承载力特征值 800 kN，场地及布桩如图 17-7 所示，A 线区域内为 II 号场地，B 线左边场地水泥土桩均为湿喷法成桩，右边场地均为粉喷法成桩，粉喷法与湿喷法均采用 42.5 级复合硅酸盐水泥，水泥掺入量均为 15%，湿喷法中水灰比为 0.5。

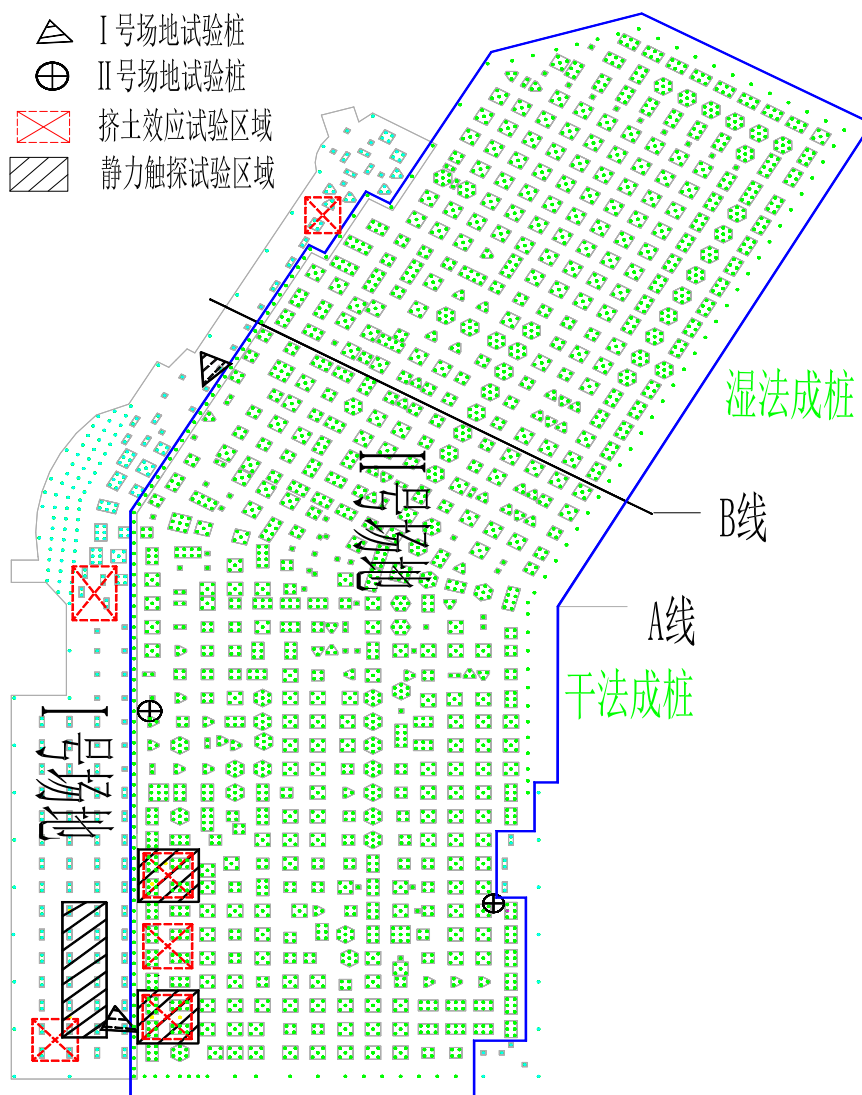


图 17-7 场地布桩示意图

3.2.2 水文地质条件

拟建场地地貌类型属于长江下游冲积平原区滨海平原，土层以粉土、粉砂、粉质黏土为主。在勘探深度范围内可分为 7 个工程地质层，自上而下土层分布及工程地质特性描述如下：

①-1 层素填土：杂色，以粉土、粉质黏土为主，浅部夹植物根茎，松散不均。层厚 0.30~4.00m。

①-2 层淤泥：灰黑色~黑色，流塑，夹腐烂的植物根茎，具腐臭。该层土分布于明河底部，层厚 0.80~1.20m。

②层粉质黏土夹粉土：黄褐色~灰色，软塑，含少量铁锰质斑痕，具明显层理。粉土稍密、很湿。无摇振反应，稍有光泽，干强度中等，韧性中等。层厚 0.40~2.30m。

③层粉砂夹粉土：青灰色，中密为主，局部稍密，饱和，含云母碎片。层厚 2.30~4.80m。

④粉土夹粉砂：青灰色，中密，很湿，含云母碎片，局部夹粉质黏土。摇振反应中等，无光泽反应，干强度低，韧性低。层厚 1.60~5.80m。

⑤层粉砂：青灰色，中密，饱和，含云母碎片，局部夹细砂或粉土。层厚 10.70~16.00m。

⑥层粉质黏土：灰色，软塑为主，局部流塑，含少量腐殖质，局部夹薄层粉土。层厚 7.40~10.60m。

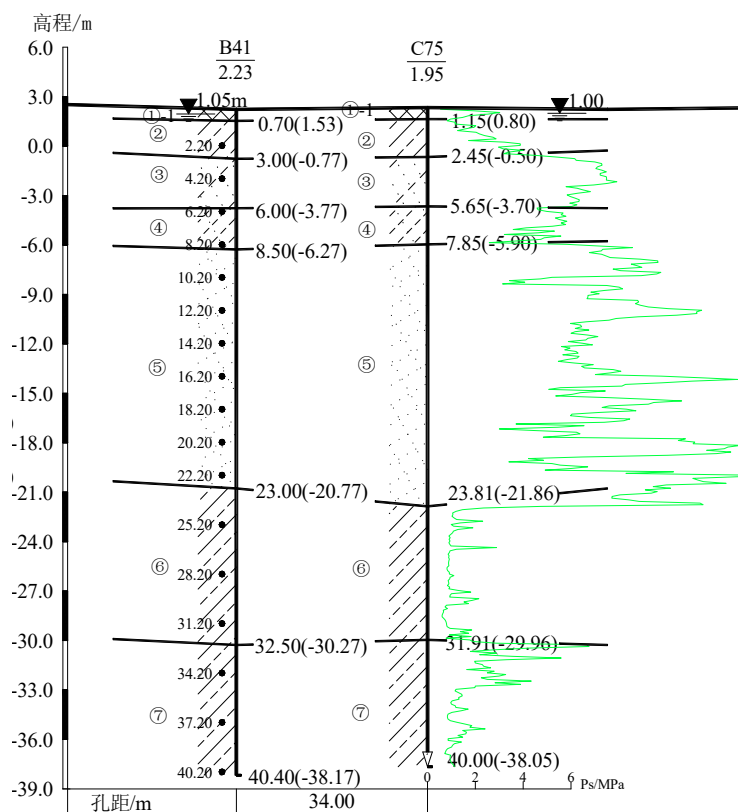
⑦层粉质黏土夹粉土：灰色~青灰色，软塑，局部夹薄层粉砂。该层土未钻穿。

场地地下水以孔隙潜水为主。勘察期间测得场地内孔隙潜水稳定水位在 85 国家高程 2.00 m 左右，年变幅约 1.00m。场地内地基土物理力学参数见表 4-2，地层剖面图如图 17-8 所示。

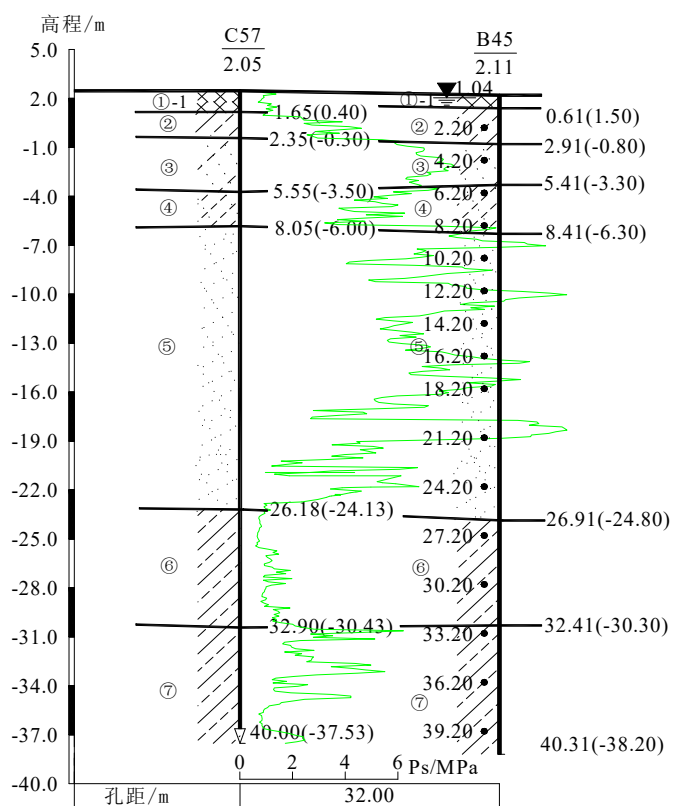
表 17-5 土层物理力学参数表

层号	土层	平均厚度/ m	天然重 度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	黏聚 力 C/kPa	内摩 擦角 $\varphi/^\circ$	天然含 水量 w/%	液性指 数 I_L	塑性指 数 I_P	孔隙比 e	$q_{sik}/$ kPa	$f_{ak}/$ kPa
①	素填土	2.2									
②	粉质黏土夹 粉土	1.7	17.9	24.3	9.3	33.2	0.71	15.8	0.985	26	120
③	粉砂夹粉土	3.3	18.7	6.1	31.0	29.9			0.828	48	160
④	粉土夹粉砂	3.7	18.5	8.4	27.7	30.7			0.865	40	140
⑤	粉砂	13.6	18.8	6.0	32.0	29.3			0.812	55	180
⑥	粉质黏土	9.0	17.5	21.5	7.2	33.9	0.80	13.2	1.042		110
⑦	粉质黏土夹 粉土	未揭穿	17.9	24.6	9.2	33.1	0.71	11.1	0.980		120

注： q_{sik} 为各土层极限侧阻力标准值； f_{ak} 为地基承载力特征值。



(a) I 号场地地质剖面图



(b) II 号场地地质剖面图

图 17-8 地质剖面图

3.2.3 试验研究内容

(1) 水泥土搅拌桩和静压管桩在施工过程中, 会不可避免地切割和挤压桩侧土体, 桩侧土体的极限侧摩阻力将会发生变化, 通过对桩侧土体的径向总应力和孔隙水压力进行测试, 并结合施工前后静力触探试验结果, 进一步探讨管桩水泥土复合基桩承载力提高的机理。

(2) 结合现场单桩抗拔静力载荷试验与桩身光纤布拉格光栅应力测试结果, 探究复合基桩受上拔荷载时桩身应力应变荷载传递规律, 得到管桩桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力分布特征, 探讨复合基桩承载力提高的机理。

3.2.4 研究结论

管桩水泥土复合桩群桩挤土效应:

(1) 复合桩群桩施工完成三小时后承台间超孔压消散率达 85%以上。

(2) 同一深度处, 超孔压随径向距离增大而减小; 同一孔压计组, 超孔压随深度增大而增大。

(3) 深搅桩施打后所产生的超孔压要大于管桩插入后所产生的超孔压。水泥土桩施打 3 小时后桩周应力场基本稳定, 可控制管桩在深搅桩施打结束后 3~8 小时内压入。

(4) 管桩水泥土复合群桩施工阶段易产生较明显的挤土效应, 其影响范围约为 12 倍管桩外径。对桩数较多、间距较小的承台建议采取跳打方式减小挤土效应的不利影响。

(5) 在同一深度处, 有效应力随着与桩径向距离增大而减小; 同一土压力盒组, 径向有效应力随着深度的增大而变大; 随着时间的推移, 有效应力趋于一个稳定值。

(6) 场地施工完成后, 在 I 号场地内, 有效应力提高 1.20~1.80 倍, II 号场地内, 有效应力提高了 1.53~2.03 倍。

(7) 水泥土桩湿喷法成桩区域有效应力提高倍数较干喷法成桩区域小, 约为干喷法成桩区域有效应力提高倍数的 78%。

静力触探试验:

(1) 在 I 号场地内, 管桩所在土层锥尖阻力提高了 1.84~1.89 倍, 侧壁阻力提高了 1.97~2.02 倍, 桩顶上部土层锥尖阻力提高了 1.13~1.71 倍, 侧壁阻力提高 1.05~1.45 倍

(2) II 号场地内, 管桩所在土层锥尖阻力提高了 1.59~1.99 倍, 侧壁阻力提高了 1.78~2.45 倍, 桩顶上部土层锥尖阻力提高了 1.23~2.05 倍, 侧壁阻力提高 1.28~2.33 倍。

(3) II 号场地中在距离桩 5 米范围内, 随着径向距离的增大, 土体侧摩阻力增大倍数呈线性递减趋势。

单桩抗拔荷载传递规律试验:

(1) 管桩水泥土复合基桩荷载与上拔量呈近似线性关系, Q-S 曲线变化较缓, 尚未出现陡升趋势, 试桩抗拔性能仍未完全发挥。

(2) 随着桩端上托荷载增加, 桩身轴力逐渐变大。轴力在桩端最大, 沿桩身向上逐渐减小, 桩身下部往上截面轴力减小速度较快, 而上部截面轴力减小缓慢, 管桩主要依靠桩身下部和中部承担上托荷载。

(3) 按等效均一土层计算, 管桩水泥土复合基桩侧摩阻力相较于单一管桩与土体之间侧摩阻力增长了约 1.6~1.9 倍, 管桩水泥土复合基桩结合了管桩承载力高与水泥土桩侧摩阻力大的双重优点。

(4) 桩身载荷较小时, 变形主要以桩身弹性变形为主。随着荷载逐渐增大, 桩与土体之间出现微小相对位移趋势。

3.3 江苏省南通市如东老县政府 2 号地块

3.3.1 工程概况

拟建如东县老县政府 2 号地块项目位于江苏省如东县城人民路西侧、江海中路北侧、掘苴河南侧。包括 1 幢 31 层住宅、2 幢 29 层住宅、2 幢 17 层住宅、2 幢 9 层住宅、2 幢 7 层住宅、6 幢 2 层住宅、1 栋 1 层配电房和 1 栋 2 层商业和大底盘地下室(地下 1 层)。总建筑 135825.5 平方米左右, 总占地面积: 40489.1 平方米。

3.3.2 地质概况

根据勘察成果, 拟建场区各土层分述如下:

①层素填土(Q4ml): 灰褐色, 稍密~中密, 主要成份为粉质黏土、粉土, 表层含少量植物根系, 夹少量建筑垃圾, 以碎砖块为主, 粒径一般 10~30cm, 含量 10~30%, 分布不均, 填龄小于 5 年。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 1.00~4.90m, 层顶标高为 2.77~5.43m。

①1 层淤泥质填土(Q4ml): 灰黑色, 流塑, 加少量的粉砂、粉土, 见腐植物, 有臭味, 夹有少量建筑垃圾, 填龄小于 5 年。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 0.50~2.30m, 层顶标高为-0.41~1.18m。

②层粉质黏土(Q4al): 灰色~灰褐色, 软塑, 夹稍密粉土, 见少量铁锰质斑及高岭土条纹, 稍有光泽, 干强度中等, 韧性中等, 无摇晃反应。该层普遍分布, 该层部分揭穿, 本次钻孔揭露厚度 0.80~3.50m, 层顶标高为 0.36~3.53m, 层顶埋深 1.00~3.90m。

③1 层粉土(Q4al): 灰色~青灰色, 湿~很湿, 稍密~中密, 夹软塑粉质黏土, 无光泽反应, 干强度低, 韧性低, 摇晃反应轻微。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 0.60~3.60m, 层顶标高为-1.35~1.33m, 层顶埋深 2.90~4.70m。

③2 层粉砂(Q4al): 灰色~青灰色, 饱和, 中密, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片, 含少量腐植质。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 2.50~6.50m, 层顶标高为-2.67~0.43m, 层顶埋深 3.50~6.50m。

③3 层粉土(Q4al): 灰色, 很湿, 中密, 见软塑粉质黏土薄层, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 0.60~3.10m, 层顶标高为-6.31~-2.47m, 层顶埋深 7.50~10.50m。

④层粉砂(Q4al): 青灰色, 饱和, 中密, 夹稍密~中密粉土, 见软塑粉质黏土薄层, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 4.00~7.50m, 层顶标高为-8.22~-4.17m, 层顶埋深 9.40~11.50m。

⑤1 层粉砂夹粉土(Q4al): 灰色~灰黄色, 饱和, 中密, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片, 夹稍密~中密粉土, 摇晃反应轻微。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 2.00~7.00m, 层顶标高为-14.06~-9.17m, 层顶埋深 13.90~17.70m。

⑤2 层粉砂(Q4al): 青灰色, 饱和, 中密, 夹稍密~中密粉土, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片, 含少量腐植质。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 0.70~6.10m, 层顶标高为-19.65~-12.76m, 层顶埋深 17.40~23.00m。

⑥粉砂(Q4al): 灰色~青灰色, 饱和, 中密~密实, 主要矿物成份长石、石英, 含少量云母碎片, 含少量腐植质。该层普遍分布, 本次钻孔揭露厚度 2.40~8.00m, 层顶标高为-22.26~-16.37m, 层顶埋深 21.00~25.70m。

⑦层粉质黏土（Q4al）：灰色～灰黄色，可塑，夹中密粉砂、粉土薄层，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇晃反应。该层普遍分布，该层部分揭穿，本次钻孔揭露厚度 0.50～6.60m，层顶标高为-26.63～-22.78m，层顶埋深 26.50～30.00m。

⑧层粉砂（Q4al）：灰色～青灰色，饱和，中密～密实，主要矿物成份长石、石英，含少量云母碎片，含少量腐植质。该层普遍分布，该层未揭穿，本次钻孔揭露厚度 0.60～13.00m，层顶标高为-31.29～-27.36m，层顶埋深 31.30～34.50m。

⑨层粉质粘土夹粉土（Q4al）：灰色～灰黄色，软塑，夹中密粉细砂薄层，夹少量高岭土，稍有光泽，干强度中等，韧性中等，无摇晃反应。该层普遍分布，该层部分揭穿，本次钻孔揭露厚度 0.70～16.90m，层顶标高为-42.46～-35.63m，层顶埋深 39.00～45.80m。

⑩层粉砂（Q4al）：灰色～青灰色，饱和，密实，主要矿物成份长石、石英，含少量云母碎片，含少量腐植质。该层普遍分布，该层未揭穿，本次钻孔揭露厚度 1.10～19.10m，层顶标高为-55.31～-45.95m，层顶埋深 49.40～59.90m。

3.3.3 桩基概况

该项目共九栋楼，最高建筑 29 层，7 栋采用 MC 劲性复合桩基，2 栋采用钻孔灌注桩基。

本工程劲性复合桩共进行了 9 根试桩（干法，详见试桩表），检测结果均满足设计要求。

试桩参数：①有效长度 25m 的 Φ1000mm 水泥土桩内插 PHC600（130）-C80-24 管桩，单桩极限抗压承载力超过 8000kN；②有效长度 20m 的 Φ900mm 水泥土桩内插 PHC500（125）-C80-16 管桩，单桩极限抗压承载力超过 6000kN；③有效长度 16m 的 Φ800mm 水泥土桩内插 PHC400（95）-C80-14 管桩，单桩极限抗压承载力超过 4300kN。

劲性复合桩试桩表

序号	试桩号	外径(内芯)	桩顶绝对标高	桩底绝对标高	单桩抗压承载力特征值(KN)	单桩试桩加载量极限值(KN)	外芯桩长(m)	内芯桩长(m)	桩端持力层	进入持力层深度(m)	数量
13#	试桩1-x(抗压)	Φ1000(Φ600)	3.300	-21.700	3650	7400	25	24(12+12)	⑥	1.0	3
14#	试桩2-x(抗压)	Φ1000(Φ600)	4.300	-21.700	3750	7600	26	25(12+13)	⑥	1.0	3
15#	试桩3-x(抗压)	Φ1000(Φ600)	4.300	-21.700	3750	7600	26	25(12+13)	⑥	1.0	3
11#	试桩4-x(抗压)	Φ900(Φ500)	2.700	-17.300	2250	4600	20	16(8+8)	⑤ ₂	1.0	3
12#	试桩5-x(抗压)	Φ900(Φ500)	3.700	-17.300	2350	4800	21	17(8+9)	⑤ ₂	1.0	3
7#	试桩6-x(抗压)	Φ800(Φ400)	3.000	-13.000	1550	3300	16	14	⑤ ₁	1.0	3
8#	试桩7-x(抗压)	Φ800(Φ400)	3.000	-13.000	1550	3300	16	14	⑤ ₁	1.0	3
9#	试桩8-x(抗压)	Φ800(Φ400)	3.000	-13.000	1550	3300	16	14	⑤ ₁	1.0	3
10#	试桩9-x(抗压)	Φ800(Φ400)	3.000	-13.000	1550	3300	16	14	⑤ ₁	1.0	3

注 1) 试桩桩顶标高同现有场地标高，现场地面标高如有调整，桩长另行调整。2) 试桩前应通知设计人员交底，试桩时应通知设计人员到场。

工程桩施工设备：（干法）150kw 高喷旋搅桩机/（湿法）220kw 高喷湿搅桩机+90kw 浆泵、55kw 空压机、1060t 静压桩机



工艺：先施工水泥土桩：干法为四搅两喷喷入 15%的 P.C32.5 水泥粉+气，两次提升搅拌叶片可螺旋反压挤扩水泥土；湿法为四搅两喷喷入 15%的 P.C42.5 水泥浆+气。再用静压桩机在水泥土桩中心压入管桩。

成桩效果：水泥土被挤扩，直径增大，现场实测 900mm 干法水泥土桩挤扩后直径达 1100mm 左右；水泥土被挤密，强度提高，水泥土桩身取样实测无侧限抗压强度干法 11~24Mpa/湿法 23~27Mpa，远高于设计要求的实验室 28d 无侧限抗压强度 1.6Mpa。



[illegible]

有见证取样

16101006067

311006060

水泥土抗压强度检测报告

试验报告编号

报告编号 161025111800062

样品名称 水泥土

取样地点 望溪河

检测项目 抗压

样品编号 311180060

委托单位 市港航

委托日期 2018-02-05

见证人 章兆光

委托日期 2018-01-25

检测单位

资质证书

见证人

见证日期

执行标准 JGJ57-2015《水泥土试验方法》

试样尺寸/数量

抗压强度 (MPa)

代表值

备注

试验日期

地点

养护天数

养护条件

养护温度

养护湿度

制作日期

试验日期

龄期 (d)

承压面积 (mm²)

承压值

抗压强度 (MPa)

代表值

备注

水泥土

标准

2

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

2018-02-09

检测环境

温度

20±2℃~22℃

检测设备

LMOE 型 500kN 压力试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

检测环境

温度

20±2℃~22℃

检测设备

LMOE 型 500kN 压力试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

检测环境

温度

20±2℃~22℃

检测设备

LMOE 型 500kN 压力试验机

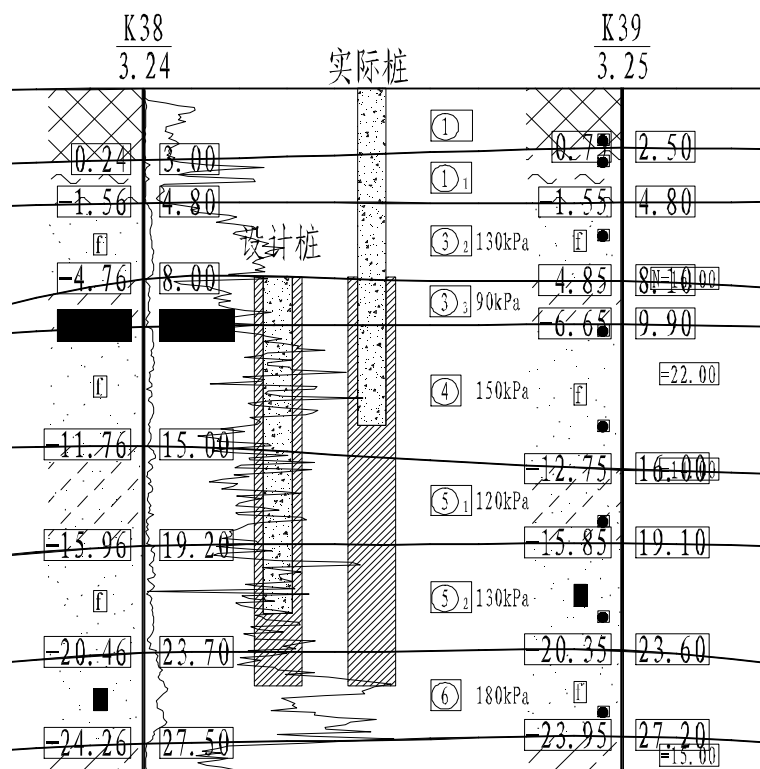
200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

200kN 试验机

其中某根桩为“上部 8mC 桩，中间 6mMC 桩，下部 11mM 桩”的非设计劲性复合桩。现已对该桩进行静载荷检测，共加载 4500kN，累计沉降量仅 6.7mm，满足设计要求。该结果可说明：1、本工程劲性复合桩设计安全系数高，即承载力富余较多；2、劲性复合桩桩身应力扩散较快，应力主要集中在 MC 复合段上部很短的范围内，因此仅需很短的 MC 复合段即可承受很大的承载力；3、该桩也可看成上部 8m 水泥土桩缺失的劲性复合桩，但承载力依然很高，证明了“劲性搅拌桩在芯桩长度范围内搅拌桩局部的质量缺陷并不影响其单桩承载力”。



本工程应采用的最佳桩基方案为长短协力劲性复合桩体系，即：15%的长劲性复合桩（控制沉降）+85%的短劲性复合桩（提供承载力）+若干有效长度 8m 的 900mm 水泥土桩（协调长短桩的受力）。2013 年施工的“如东县中天润园小区”最高建筑 26 层，采用有效长度 14m 的 $\Phi 800\text{mm}$ 水泥土桩内插 PHC500(125)-C80-11 管桩+每栋楼 120 根 8m 长的 700mm 水泥土桩方案，工后三年沉降仅 2 公分多。这种匹配应力梯度的长短劲性复合桩已在大丰、徐州、盐城、南通等多地高层建筑得到成功应用，与钻孔灌注桩相比有巨大优势。

如东老县政府 2#地块 13、14、15#楼桩基静载检测结果

桩位	桩型	桩径/mm	桩长/m	极限承载力/kN	沉降量/mm
14#	劲性复合桩	600 (130)	35	7100	9.10
14#	劲性复合桩	600 (130)	35	7100	14.44
14#	劲性复合桩	600 (130)	35	7100	11.20
14#	劲性复合桩	600 (130)	18.7	7100	12.29
14#	劲性复合桩	600 (130)	24.7	7100	12.38
14#	劲性复合桩	600 (130)	22	7100	13.17
13#	钻孔灌注桩	700	55	6200	18.46
13#	钻孔灌注桩	700	55	6200	17.66
13#	钻孔灌注桩	700	55	6200	26.98
15#	钻孔灌注桩	700	55	6200	10.94
15#	钻孔灌注桩	700	55	6200	13.74
15#	钻孔灌注桩	700	55	6200	18.43

备注：

1. 劲性复合桩外围 1000mm 水泥土桩有效长度 21m，湿法施工。
2. 钻孔灌注桩采用后注浆工艺。
3. 本工程劲性复合桩造价与钻孔灌注桩相比，造价节约一半，工效提高一倍，无泥浆污染，检测承载力和沉降量更优。

4 劲性复合桩配套设备材料研发

4.1 大功率水泥土搅拌桩机^[3]

为实现劲性复合桩的快速推广应用，我们已授权多个厂家生产出大直径、大扭矩、大功率水泥土搅拌桩机。主机功率分双 55、双 75、双 90、双 110kW 等多种，远高于传统设备的 35kW。可同时喷水、喷浆、喷粉或其他固化剂，喷粉压力大于 0.8MPa，喷浆压力大于 1.2MPa。搅拌轴每分钟转速高达 36 转。这些设备动力头分上置、中置与下置三种，动力头上置时 25m 的搅拌轴可全轴布置 156 根叶片，切削土体更均匀，一次性搅拌成型，水泥土体强度更高，在泰兴某工地 20m 长 80cm 直径的纯水泥土搅拌桩单桩极限承载力达 2800kN。动力头下置时在螺旋叶片和动力装置之间的搅拌轴上可分布 4 层 12 片左右的搅拌叶片，一次性搅拌成桩，25m 左右的桩长施工时间可控制在 35 分钟左右，桩身强度要求较高时可反复提升喷搅。

4.2 专用芯桩

因劲性桩承载力较大，需配备一系列特定芯桩：高强度薄壁钢管管桩、填芯管桩、钢绞线抗拔管桩。在 MC 劲性复合桩（M 桩为 $\Phi 850$ 粉喷桩；C 桩为 TSC-II-500-100-8-27 米高强薄壁管桩）静载试验中，单桩极限承载力为 12000kN。在工程中实测长度 22m（外芯直径 800 干湿双管水泥土搅拌桩体，内芯为 PHA500 钢绞线抗拔管桩）的复合桩极限抗拔力已达到 3600kN，15m 的复合桩极限抗拔力达 2600kN，性价比及施工速度远远高于国内同类产品。

4.3 固化剂^[4]及人造泥岩

为最大程度拓宽该新式桩型应用范围，针对不同土质（黏性土、液化砂土和粉土等）研发出相应固化剂，由主剂、辅剂组成，其中主剂由水泥、砂、石灰、粉煤灰、矿渣、石膏、纳米硅基氧化物等成分组成；辅剂由三乙醇胺、木质素磺酸钙、氯化钠、氯化镁、氯化钙、氯化铁、明矾或水玻璃、聚丙烯酰胺、硫酸钙、硫酸钠、氢氧化钠等成分组成。本发明使用效果好，可作为粉喷桩施工时用的粉剂（干喷用）或浆剂成分（湿喷用），可在水泥搅拌桩、注浆、旋喷桩、浅层垫层加固、路基加固、夯实等施工中使用。

将上述搅拌设备和固化剂结合可形成一种原位土改性制造人造泥岩的方法包括下列步骤：

（1）对原位土进行的调整处理（对含水量较高的软土采用管井抽水、电渗、真空预压、碾压强夯等动力固结方法、塑料排水板、振动沉管挤密砂石桩、低强度水泥土桩、施工中高压喷气排水中的一种或几种的结合；对含水量较低的地基，采用施工中喷浆喷水处理），改良土体的物理力学性质，使土体含水量达到 30% 左右，孔隙比达到 0.8 左右，密实度 ≥ 0.92 ，塑性指数 ≤ 17 ；

（2）改良后的土体加入掺入量 13%~25% 的水泥和固化剂，采用大功率（主电机功率 $\geq 90\text{kW}$ ）大扭矩（扭矩 $\geq 15\text{t} \cdot \text{m}$ ）大直径（搅拌头直径 800-1500mm）多通道（搅拌轴数 ≥ 2 或单轴输料管数 ≥ 2 ）搅拌机在 0.7-1.2Mpa 气压下进行喷粉喷砂搅拌、5-35Mpa 压力下喷浆喷水搅拌，使水泥砂土复合体中的粒径 $\geq 0.075\text{mm}$ 的骨料含量 $\geq 15\%$ ，水灰比 ≤ 0.6 ；搅拌头上按一定的倾斜角度布置刀型叶片（数量 ≥ 4 片）和螺旋叶片（数量 ≥ 2 片），每旋转一圈提升高度 $\leq 15\text{mm}$ ，使土体每点的搅拌次数 ≥ 20 次，利用链条和螺旋搅拌叶片共同旋转加压，使水泥砂土复合体密实度 ≥ 0.94 ，塑性指数 ≤ 10 ，含水量 $\leq 25\%$ 。

（3）然后通过夯实、挤密、静压、锤击等方法中的一种或几种的结合再次强力挤扩水泥砂土复合体，形成单轴抗压强度 $\geq 10\text{Mpa}$ 的人造泥岩。

4.4 劲性复合桩智能施工系统^[5]

为符合新时代桩基施工越来越高的要求,严格把控劲性复合桩施工质量,已研发生产出智能化信息化劲性复合桩机及施工数据管理平台并申请了专利。本发明能通过分析电机电流、静力触探结果、取样结果及时掌握实际土质情况和成桩质量情况,并通过控制主机及时调整供料机和桩机的施工参数;能通过卫星定位系统管理所有劲性复合桩机,并减小桩位偏差;能对施工数据(包括喷灰、喷浆量、搅拌速度、搅拌均匀性、反压力、提升速度等)及时记录、统计,并通过云平台管理系统的数据库展示,保证各工程参与方全程把控劲性复合桩的施工,有效提高施工质量。图 17-9 为劲性复合桩智能施工系统。



图 17-9 劲性复合桩智能施工系统

5 结论

劲性复合桩能依土质情况、上部结构类型、加固目的等灵活变换组合方式,针对性调整桩径、桩长、掺灰量、强度、颗粒级配、搅拌和复打次数,充分发挥复合桩周软土摩阻力和桩底阻力并匹配材料强度而提供充足的单桩承载力,满足不同的设计要求,是一种适用于沿海软基处理以及针对各种黏性土、液化砂土和粉土采取相匹配的施工工艺的经济有效的新桩型。

劲性复合桩综合作用十分显著:集置换、竖向增强、排水排气、固结、胶结、压密、充填、振密、挤密等于一体。有效提高软基强度及稳定性,降低地基压缩沉降量,并保证地基均匀性,从而满足不同设计要求(复合桩长一般仅需达浅层相对较硬持力层)。桩身造价低廉、强度较高、质量可靠。能大幅提高地基承载力、加快软土固结,减少地基沉降(沉降量仅为天然地基的 20%、单一桩型的 50%左右),缩短工后稳定期,同时解决了由软弱土层共生的复杂地基不均匀性问题,减少建筑物不均匀沉降的发生。具有可观的经济技术优势和广阔的工程应用前景。

劲性复合桩由成熟工法组合或复打而成,融合各桩优点的同时有效避免了单一桩型的固有缺陷。其单桩承载力、复合地基承载力、压缩模量和变形计算、验

收检测等均有国家规范规程、桩基理论参照，避免了一般新技术、新工艺推广应用中的不利因素障碍，确保建造部门无风险。同时邓亚光及其团队多年来投入大量人力和物力，研发出劲性复合桩专用固化剂、大功率大直径搅拌桩机和质量监控平台，全方面保证了该技术的施工可行性和质量可靠性。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.劲性复合桩技术规程：JGJ/T327-2014[S].北京.建筑工业出版社，2014.
- [2]李俊才，张永刚，邓亚光，华小龙.管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J].岩石力学与工程学报，2014 年 1 月，卷 33 增 1
- [3] 邓亚光 . 高压旋喷、干湿搅拌桩及专用施工设备： ZL2015 2 0456202.7[P].2015-10-28
- [4]邓亚光.软土固化剂： ZL 2008 1 0019417.7[P].2010-06-16
- [5]邓亚光.复合桩施工控制系统： ZL 2015 2 0467658.3[P].2015-06-30