

劲性复合桩提升地基承载力创新技术的应用

陈智贤^{*1}, 陈圣杰¹, 郭典塔²

(1. 广东堃华建设工程有限公司, 广东广州 510080; 2. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东广州 510080)

摘要:随着我国工程建设的不断兴起和发展, 工程施工技术也在不断地进步和创新, 加上各地区的工程地质条件不同, 出现各种不同形式的复合地基处理新技术, 在地基处理中出现一种新型组合桩—劲性复合桩, 具有传统桩基技术难以比拟的优点, 劲性复合桩在地基基础工程中得到应用, 尤其是在一些工程地质条件较为复杂的地区, 如软土地区、河流地带、海岸、厚填土地区等, 传统的管桩单桩承载力相对较小、容易出现沉降、倾斜或成本较大等问题, 需要寻找新技术和材料来解决这些问题。劲性复合桩就是一种应用于地基基础领域的新型材料, 具有广泛应用前景的技术。

关键词:劲性复合桩; 地基处理; 新技术; 新型材料

中图分类号: TU476 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-5716(2025)07-0024-06

1 概述

劲性复合桩是一种复合载体, 适用于淤泥、淤泥质土、黏性土、人工填土、粉土、砂土等不同的地基处理^[1-3], 即通过水泥土搅拌桩(或旋喷桩)与预应力管桩的组合, 从而提高桩的侧摩阻力, 达到提高桩的承载能力, 同时确保桩身的稳定, 在上部荷载作用下, 两种材料共同承担并协调承担上部荷载^[12]。

两种桩体组合成复合桩^[1-12], 目前较常见的 MC 桩, 在 M 桩中心施打 C 桩, 形成劲芯水泥土类复合桩, 其中水泥土搅拌桩是采用水泥作为固化剂, 掺入一定比例的外加剂(如粉煤灰), 利用深层搅拌桩机切碎土体, 然后通过灌入水泥浆, 将土体和水泥强制搅拌形成水泥土, 搅拌桩成桩后, 在初凝前约 6~12h 内, 再施打刚性桩, 水泥土硬化后将刚性桩体紧紧包裹住, 从而形成强度更高的新型桩体^[5-12], 通过桩及桩间土体共同作用, 承担上部荷载。

劲性复合桩作为一种创新的复合载体, 结合了水泥土搅拌桩和管桩的优势, 通过两者之间的相互作用, 既提高了地基土的强度, 也提高了桩的承载能力, 同时提高了桩的抗变形能力。

在实际工程的应用中, 通过对常规桩型的优化改造及组合, 可以将劲性复合桩应用于各种地基之中。这种方法能够使地基土与桩材相互结合, 产生复合作用^[10], 从而提高地基的承载力和稳定性。

本文根据一个工程实例, 着重分析研讨 MC 劲性复合桩的设计、施工、质量控制等关键问题, 为类似地基加固处理做借鉴。

2 劲性复合桩简介

M 桩: 半刚性桩, 桩身多为水泥土, 采用深层搅拌法成桩, 也可采用高压旋喷、旋搅、注浆、夯实水泥土等方法成桩^[3]。

C 桩: 刚性桩, 主要混凝土类桩, 多采用静压、锤击、振动沉管、螺旋成孔、柱锤冲击等方法成桩^[3]。

MC 桩: M 桩成桩后, 在 M 桩中心施打 C 桩, 形成 MC 桩^[3]。两种桩型复合为同一桩体、形成有互补增强作用的复合桩, 桩身具有较高的强度、刚度、密度和均匀性且与桩周土具有共同工作性能^[3]。

3 劲性复合桩的原理

是将两种工艺成熟的桩型进行组合, 通过不同的施工方法, 在已施工完成的桩中心, 将另一种不同类型的桩植入桩体内进行组合一种或两种材料的新桩型^[5-12], 以形成具有特定功能的新型复合桩。MC 劲性复合桩是通过水泥土搅拌桩与预应力管桩的结合, 形成一种新的复合体。这种复合体不仅能够提高地基的承载能力, 还能够抵抗一定的变形, 它具有以下几个优点:

(1) 具有灵活多样性: 根据区域工程地质状况、上部构造要求、有针对性采取多种组合方式, 它综合了两种单一桩型的优点, 改变了现有桩型的概念。

* 收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2024-10-14

第一作者简介: 陈智贤(1964-), 男(汉族), 广东南雄人, 高级工程师, 现从事岩土工程方面的工作。

(2)可靠性程度高:采用现有常用施工工艺成熟的桩型而重新组合而成,匹配材料强度高的桩,充分发挥出桩及桩间土体共同作用,从而提高单桩竖向承载力,有效地加固及改善软基强度及稳定性,降低地基压缩性沉降。

(3)经济合理性:通过多种静载试验,MC 劲性复合桩具有较大的竖向承载力优势,承载力不小于同体积刚性桩的承载力,且沉降量较小,性价比高于其他单一的刚性桩,与传统桩型相比具有一定的经济优势^[10]。

4 MC 劲性复合桩在地基处理中的应用

4.1 工程概况

清远某项目工程规划建设 10 栋建筑,1~3 栋高层(25 层),4~6 栋高层(29 层),7~10 栋高层(31 层),设地下室 1 层,基坑开挖深度约为 2.10m。

本工程(以 2#楼为例)原设计基础类型为灌注桩,采用旋挖桩机成孔,桩径为 3 种规格(1.00m、1.20m、1.60m)共 60 根桩,桩端持力层为微风化灰岩,旋挖桩有效桩长约 35.00~40.00m,其中 3 种桩的单桩竖向承载力

特征值 Ra 分别为 3500kN、5000kN、8000kN。

4.2 工程地质概况

该项目位于清远市清新区清四公路南侧、北江河旁,原地貌属滨江一级冲积阶地及笔架山洪积扇交接地段,原地势略有起伏,河漫滩改造为耕地,后经人工填土堆积平整,场地较平坦,根据业主提供的场地岩土工程地质报告显示的地质资料如表 1,工程地质剖面图见图 1。

表 1 工程地质地层统计表

层号	成因代号	土层名称	地层厚度(m)	平均厚度(m)
1	Q ^{ml}	杂填土(松散)	3.50~5.20	4.35
2	Q ^{al}	淤泥质土(流塑)	9.65~13.80	12.05
3	Q ^{al}	粉质黏土(软塑)	2.10~4.33	3.35
4	Q ^{al}	淤泥((流塑)	4.85~8.72	6.05
5	Q ^{al}	粉砂(松散)	8.00~13.72	12.05
6	Q ^{al}	卵石(中密)	1.35~2.65	2.05
7	Q ^{el}	粉质黏土(软塑)	1.35~4.35	2.83
8	C	微风化灰岩	3.50~5.50	4.5

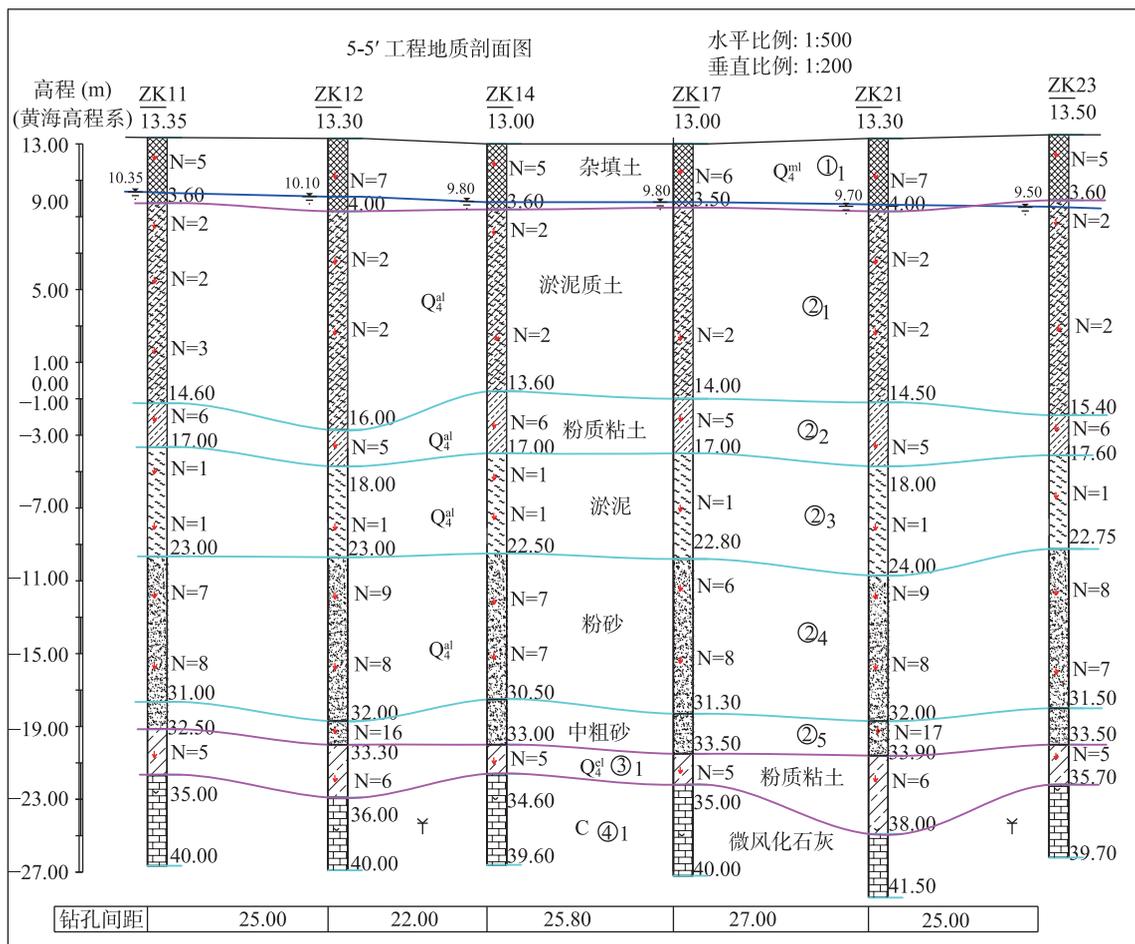


图 1 工程地质剖面图

4.3 试验结果与分析

在本项目桩基开始施工前,分别对混凝土管桩(PHC-500AB-125)及MC劲性复合桩进行了试桩工作,并对试验后的3根管桩及3根MC劲性复合桩进行了极限静载试验(M桩为 $\varnothing 800\text{mm}$ 水泥土搅拌桩,C桩为PHC-500AB-125混凝土管桩),采用慢速维持荷载

法,现场试验结果见表2。

从单桩竖向抗压静载试验中看到,单一的混凝土管桩单桩竖向抗压极限承载力相对较低(2700~3300kN),组合后的MC劲性复合桩单桩竖向抗压极限承载力相对较高(4600~5000kN),其极限承载力比单独的管桩提高了1.5~2.0两倍以上。

表2 管桩及MC劲性复合桩静载试验结果汇总表

试验桩号(#)	单桩竖向抗压承载力特征值(kN)	最大试验荷载(kN)	单桩竖向抗压极限承载力 Q_u (kN)	累计最大沉降量(mm)	承载力特征值对应沉降量(mm)
管桩-1	1450	3000	2900	> 66.94	2.52
管桩-1	1650	3500	3300	> 77.83	3.42
管桩-1	1350	3000	2700	> 70.61	4.5
MC-1	2500	5200	5000	> 71.05	3.55
MC-2	2400	5000	4800	> 115.4	5.37
MC-3	2300	4800	4600	> 81.04	3.48

4.4 方案的比选

原设计基础采用钻孔灌注桩,基础持力层为微风化灰岩,预估桩长约35.00~40.00m,虽然钻孔灌注桩的承载力较大,但施工工期较长,工程造价成本高、费用大,根据场地的工程地质条件,场地上部冲积层软弱土层较厚,为淤泥质土(流塑)、粉质黏土(软塑)、淤泥(流塑)、粉砂(松散),钻孔灌注桩易产生坍孔、颈缩^[10],桩底沉渣不易清除,桩身质量不易控制,且存在噪声污染严重、泥浆排放量大等环境问题;而采用单一的混凝土预制管桩,由于上部土层强度低,各土层承载力不高,不能充分发挥预制桩的强度作用,容易发生桩身反弹(负摩阻)从而带来损坏的可能性,且单桩承载力较小,桩的稳定性相对较差,所采用桩的数量较多,施工的工程造价成本高;按业主要求为节省工期、降低工程造价成本,寻求一种新工艺桩。

考虑到上部的结构形式和场地的工程地质条件,结合工程结构基础形式(桩基础),就工程的施工进度及工期、施工环境的便利条件和施工成本的经济性,同时要确保桩的竖向承载力和变形性能,避免出现倾斜和破坏等工程质量问题,又能提高桩的竖向承载能力,经过现场试桩比对、并结合工程实际状况,采用一种工艺先进的新型桩—劲性复合桩(MC劲性复合桩),可充分利用和发挥地基土体与桩材相互结合共同协调的复合作用,劲性复合桩通过承担地基的荷载,将荷载传递到地层深处,从而提高地基的承载力和稳定性。

施工中现场配比调整劲性桩(M桩)的水泥参数和中心劲性桩(C桩)的强度,确保桩身质量承载力达到桩

身承载力的要求^[11],并在通过几组桩的静载试验后,确定基础的桩型及单桩竖向承载力。

本项目采用等芯MC劲性复合桩,由大直径深层搅拌桩及芯桩(PHC管桩)组成(图2),即M桩采用水泥土搅拌桩($\varnothing 800\text{mm}$),C桩采用混凝土管桩(PHC-500AB-125),初凝前在水泥土搅拌桩中芯压入PHC管桩。

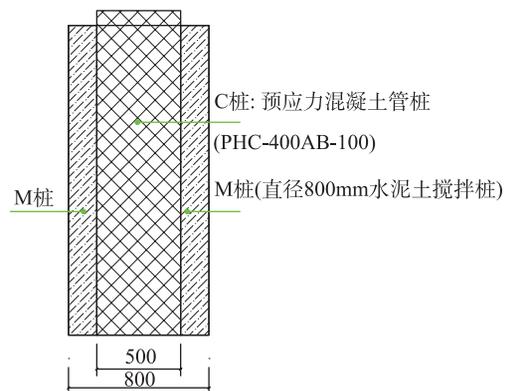


图2 等芯MC桩(单位:mm)

桩的布置采用多桩承台,本工程2#楼共布MC劲性复合桩232根(图3,2#楼MC桩基础平面布置图);通过现场试桩结果表明劲性复合桩单桩竖向抗压承载力为2300~2500kN,设计取值2000kN,有效桩长35~38m,桩端持力层为微风化灰岩。

5 劲性复合桩施工工艺

5.1 外芯搅拌桩(M桩)的施工工艺

根据本场地软弱层较厚的特点,结合施工经验,试桩

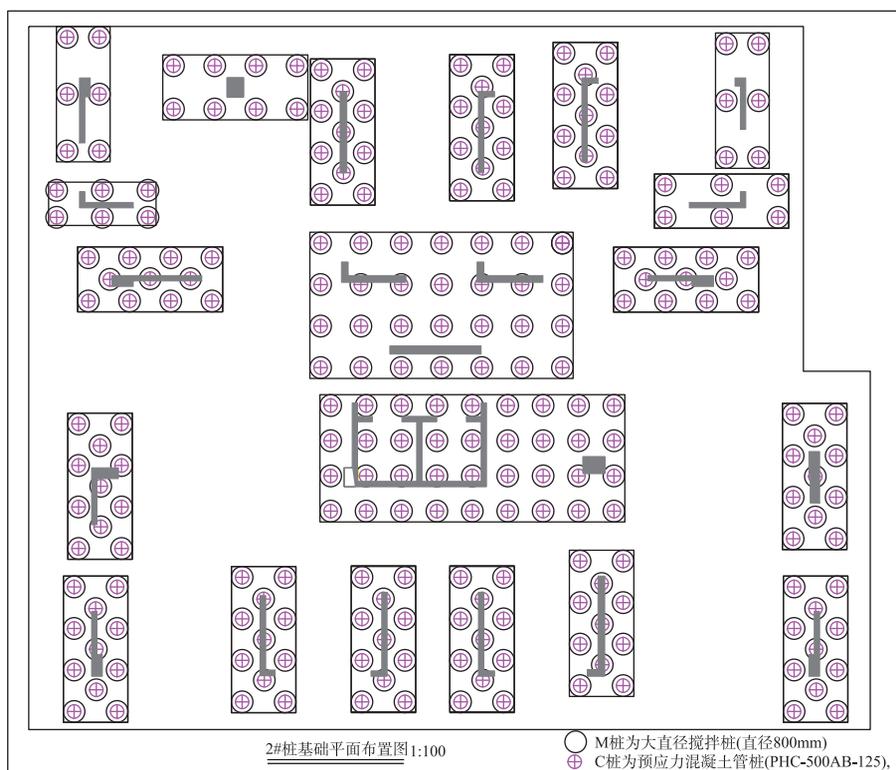


图3 2#楼MC桩基础平面布置图

后对M桩的参数设计如下:水泥土搅拌桩($\varnothing 800\text{mm}$),水泥掺入比为15%(重量比约120kg/m),采用普硅酸盐42.5R水泥,水泥浆液配比为:水灰比0.50,采用四搅四喷工艺,搅拌提升速度0.8~1m/min。

搅拌桩施工程序:

搅拌桩机就位→制备水泥浆→边搅边喷下沉→边喷边提升→边搅边喷下沉→边搅边喷提升→移位重复上述步骤。

5.1.1 深层搅拌机械就位

采用加强型大功率深层搅拌桩机施工,将桩机移至桩位,调整机身,使桩机平稳、确保搅拌桩机的搅拌轴呈垂直状态,桩架就位后,将其钻头中心与设计桩位对准。

5.1.2 制备水泥浆

按设计确定的配合比相关技术参数,进行拌制水泥浆。

5.1.3 搅拌喷浆下沉

桩机就位后,对准桩中心位,开启搅拌桩机电机,放松钢丝绳,使搅拌桩沿导向架搅拌切土下沉,喷浆作业,下沉速度、送浆量严格按设计要求进行。

5.1.4 提升喷浆搅拌

在深层搅拌桩机下沉到设计深度后,开始提升作业,边喷浆边搅拌提升,直到设计桩顶标高位置时为完

成一次搅拌过程。

5.1.5 重复上下搅拌

为使软土和水泥浆搅拌均匀,按第3、4步骤再次重复,即完成一根柱状加固体。

5.1.6 清洗

完成上下重复搅拌时,向送浆泵注入清水,清洗全部管路中残存的水泥浆,直到基本干净,并将黏附在搅拌头的软土清洗干净。

5.1.7 移位

重复上述(1~6)步骤,进行下一根搅拌桩的施工。

为使搅拌桩机在桩端土体与水泥浆的充分结合,确保桩端土体的加固效果,尤其是解决灰岩地区岩面处存在斜岩状况,当浆液到达出浆口后,在岩面处应喷浆30~60s,使浆液完全到达桩端^[13]。

最后一次提升宜采用慢速提升,速度控制在0.8m/min。

本工程中,对外芯搅拌桩施工设计桩长约35.00m以达到岩层面搅不动为止。

5.2 混凝土管桩(C桩)的施工工艺

C桩的施工是在外芯搅拌桩完工后、在初凝前,根据本工程场地的工程地质及水文地质条件确定约在10~12h左右内进行。

液压管桩的施工程序:

测量定位→桩机就位→复核桩位→吊桩插桩→桩身对中调直→静压沉桩→电焊接桩→再静压沉桩→送桩至满足静压力要求→稳压与终压→移机。

5.2.1 植桩定位

对已施工完成的搅拌桩(M桩),重新进行测量复核桩位^[6],复测桩位后,在搅拌桩中心偏差不大于50mm的位置埋置钢桩尖,确保该桩垂直度偏差在0.5%以内。

5.2.2 接桩

管桩对接前,上下端板表面应用铁刷子清刷干净,坡口处应刷至露出金属光泽^[4],接桩应保证上、下节桩的轴线一致,并使接桩时间尽可能地缩短,上下节桩段错位偏差不宜大于2mm^[4],桩节弯曲矢高不得大于桩长的0.1%,且不得大于20mm,焊缝应饱满连续;焊好的桩接头应自然冷却后才可继续压桩,自然冷却时间不宜少于8min;严禁用水冷却或焊好即压^[4],用自动熔接机熔接可缩短冷却时间。

5.2.3 送桩

采用液压管桩机将预制桩送至设计标高,植桩桩顶标高允许存在±50mm的误差,垂直度误差需要控制在0.5%内^[4],送桩时要结合桩长并观察压力表是否达到设计承载力要求,桩压至接近设计标高时,不可过早停压。

5.2.4 稳压与终压

根据试桩后设计单位要求静压时单桩终压力2.2倍 R_a 。 $\varnothing 500$ 管桩静压桩机终加载量为4400kN,终压条件为满载复压3次(满载→卸载→再满载,反复3次)每次稳压时间为5~10s^[4],每次复压贯入度均在10mm以内。

5.2.5 移机

满足设计要求停压,完成1根劲性复合桩的施工后移机至下一桩位,重复上述(1~4)步骤,进行下一根桩的施工。

6 劲性复合桩的施工质量保证控制措施

6.1 搅拌桩(M桩)施工质量控制

6.1.1 技术的质量控制

严格按照设计要求及各方审批的施工方案进行施工,施工前做好技术交底工作,施工过程中的每一环节应做好相应的监督及记录。

6.1.2 桩位及成孔质量控制

严格控制桩的垂直度及桩位偏差,应在规范范围内,确保对土体搅拌切碎,充分利用喷浆控制保证水泥浆与土体均匀搅拌,确保成孔施工质量。

6.1.3 注浆的质量控制

控制水灰比的质量,严格按照设计的配合比参数进行施工,施工前做好浆液的配比试验,防止水泥浆发生离析,同时要确保浆液均匀搅拌。

6.1.4 桩身质量控制

按设计要求严格控制下沉速度、提升速度、喷浆量等参数,确保桩搅拌的均匀性,保证搅拌桩的桩身质量。

6.2 混凝土管桩(C桩)施工质量控制

6.2.1 桩位复核的质量控制

复核场地桩位点,检查桩机平整度,桩尖对准M桩中心位置,桩中心偏差不大于50mm。

6.2.2 吊装、压桩的质量控制

吊装时,防止桩身碰撞桩机,吊装到位后,方可安装插杆,沉桩时核准,桩身应垂直,垂直度偏差不应超过0.5%,首节沉桩插入地面时的垂直度偏差不应超过0.5%^[4]。

6.2.3 接桩的质量控制

接桩、送桩应连续进行,中间停歇时间不应超过30min。沉桩施工开始时间宜控制在M桩施工完成后初凝前(约10~12h以内)。

7 工程效果及评价

7.1 载荷试验结果

根据第三方检测单位对劲性复合桩进行静载试验,通过现场随机抽查检测,结果表明劲性复合桩单桩竖向抗压承载力均达到设计要求(2000kN)。

7.2 沉降观测

本工程(2#楼)的劲性复合桩基础于2017年8月施工完成,主体工程于2019年12月竣工,工程竣工后经过长达3年对建筑物定期的沉降观测,从沉降观测点(建筑物的4个角点及中部核心筒分别布2点)的数据反映,表明建筑物在封顶后约半年已趋于稳定(见表3),建筑物的沉降量在规范允许的范围内,沉降观测数据表明,建筑物的沉降基本稳定。

8 结语

(1)劲性复合桩是采用工艺成熟的2种或3种不同材料类型的桩重新组合在一起的新型桩,而组合的各种桩型施工经验较为成熟.通过本工程检测及试验结果表明,劲性复合桩,桩及桩间土共同协调作用,不仅提高了桩的摩擦侧阻,也提高了桩的竖向承载力,且工程质量可靠,工期短,可节省材料,有效地减少工程施工成本,具有较大的经济效益。

表3 建筑物沉降观测结果表

观测点编号	最大沉降量(mm)	沉降差(mm)	允许沉降量(mm)	允许沉降差(mm)
1	6.29	1.69	220	0.0025H
2	8.13	2.57	220	0.0025H
3	6.05	2.09	220	0.0025H
4	7.16	2.63	220	0.0025H
5	5.79	1.53	220	0.0025H
6	6.69	2.01	220	0.0025H

(2) 劲性复合桩比单一的刚性桩基础的竖向承载力高,提高值约1.50~2.0倍,且更为经济;能充分有效地发挥桩及桩间土的承载作用,使桩和土共同受力,提高单桩竖向抗压承载力和减少沉降,是软土地区及工程地质较为复杂的场地,地基处理的一种新型的工艺方法。从本工程的应用表明,劲性复合桩施工工艺有着良好的社会、经济和环境效益。

(3) 劲性复合桩技术上可行、各类桩型施工工艺成熟、质量可靠、安全稳妥、经济合理,是值得推广使用的一种地基处理方法。

参考文献:

- [1] 劲性复合桩技术规程 JGJ/T3277-2014、J1741-2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 复合地基技术规范 GB/T50783-2012 [S].北京:中国计划出版社,2012.
- [3] 劲性复合桩技术规程 DGJ32TJ151-2013[S].江苏省工程建设标准.江苏科学技术出版社,2013.
- [4] 建筑桩基技术规范 JGJ94-2008 [S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 傅国强.MC 劲性复合桩在基坑工程中的应用[J].建筑施工,2018(10):1691-1703.
- [6] 高林.劲性复合桩在建筑工程中的应用[J].建筑学研究前沿,2019(8):44-48.
- [7] 张志华.MC 劲性复合桩技术在高层住宅工程中的应用[J].建筑技术,2015,46(6):532-535.
- [8] 陆善辉.MC 劲性复合搅拌桩在地基加固工程中的运用与质量控制[J].新建设:现代物业上旬刊,2011.
- [9] 毛由田.劲性复合管桩承载力设计的应用研究 [J].江苏建材,2019(2):29-34.
- [10] 郭延义.劲性复合桩施工工艺的应用[J].建筑施工,2018,40(7):1089-1091.
- [11] 吴晓飞.程先春.劲性复合桩在软弱地基处理中的应用[J].江苏建筑,2017,182(2):89-98.
- [12] 蔡海峰.劲性复合桩施工工艺的应用[J].基层建设,2019(9).
- [13] 黄耀辉,陈智贤.深层搅拌桩加固地基在工程中的应用[J].探矿工程,2006,33(4).