

DOI:10.13379/j.issn.1003-8825.2018.S1.01

水泥石搅拌加固技术的发展综述

陈 忠

(中设计集团股份有限公司, 南京 210014)

摘 要: 基于国内水泥石搅拌加固技术方面的研究成果, 重点对几种具有特色和代表性的水泥石搅拌加固新技术进行了论述。双向搅拌技术和粉体喷射注水搅拌技术能有效改善水泥石搅拌的均匀性, 提高施工效率和成桩质量; 整体搅拌加固技术、双轮铣深层搅拌技术、变截面搅拌桩技术在设备多功能化和土体加固形式等多方面取得了较大进展。这些针对不同土质、不同工况和不同应用领域的水泥石搅拌加固技术, 体现了水泥石搅拌加固领域技术先进性和发展方向。

关键词: 水泥石搅拌加固; 新工艺; 新设备

中图分类号: U414.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-8825(2018)S1-0001-05

0 引言

软土地基在我国东部沿海地区分布广泛, 其特点是强度低、沉降变形大、稳定性差。软土地基的加固处理是各类基础设施建设中的重大技术问题, 特别是近几年来大规模高速公路、高速铁路和地下空间的开发, 促进了软土地基处理技术向更高水平的发展。

水泥石搅拌技术经过几十年的发展, 在施工机械设备和设计理论等方面均取得了长足的进步。但是, 作为传统固化材料的波特兰水泥(PC)不能适应环境保护的需要, 主要存在下列问题:

- (1) 资源和能源消耗严重。
- (2) CO₂ 排放和大气污染严重。
- (3) 固化土强度增长较慢。

为了减少传统固化材料——水泥给环境带来的影响, 主要从两个方面对固化材料进行改进: 一是以工业副产品或废料代替 PC 作为固化材料; 二是开发低能耗、低 CO₂ 排放、易于回收进行循环利用的新型固化剂。

近几十年来, 国内外学者在传统水泥石搅拌加固技术的基础上, 对搅拌施工工艺、施工设备和加固形式等方面进行了进一步的改进与完善。

上个世纪末, 美国公路局为了推动深层搅拌法的应用, 出版了关于其新进展的专著, 并在此基础

上推行了国家深层搅拌研究计划; 日本对搅拌桩技术的研究一直处于领先水平, 近年来相继开发出了许多种具有进步意义的水泥石搅拌桩技术, 包括大直径水泥石搅拌桩、高强度搅拌桩以及紧凑型施工机械等。

我国学者在搅拌加固技术方面也进行了大量研究, 推动了我国水泥石搅拌加固技术的发展。

综上所述, 自水泥石搅拌加固技术问世以来, 在国内外学者的努力下取得了突出的进展^[1-8]。然而, 对水泥石搅拌加固技术的理论研究落后于工程实践, 特别是对一些新的水泥石搅拌加固技术的研究还不够深入。

因此, 本文拟对现有水泥石搅拌加固技术加以论述, 总结国内外水泥石搅拌加固技术的经验, 为我国水泥石搅拌加固技术向更高水平的发展提供参考。

1 水泥石搅拌加固新工艺

1.1 双向搅拌技术

水泥石搅拌加固成桩质量问题一直为行业所关注, 因此, 从施工方法、设备设施和固化剂等方面对其进行了探索改进, 东南大学成功研制出双向搅拌技术, 可从根本上改善水泥石搅拌均匀性、提高成桩质量。

通过对现行搅拌桩机械的动力传动系统、钻杆及钻头改进, 采用同心双轴钻杆, 在内钻杆上设置正向旋转叶片, 在外钻杆上安装反向旋转叶片, 通过动力系统带动内、外钻杆上的两组搅拌叶片的正、

收稿日期: 2018-03-07

作者简介: 陈 忠 (1979-), 男, 江苏扬州人。高级工程师, 硕士, 从事道路工程的设计、检测与技术服务及相关研究工作。E-mail:3148815796@qq.com。

反向旋转搅拌，见图 1。

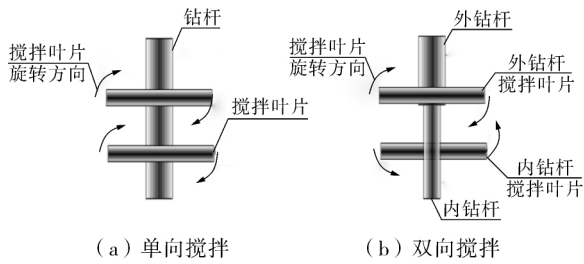


图 1 双向水泥搅拌桩搅拌叶片示意

搅拌施工时外钻杆叶片反向旋转可以阻断水泥浆上冒途径。

双向搅拌两组搅拌叶片正反旋转，解决了常规单向搅拌的不均匀、桩身强度尤其深部强度得不到保证、处理深度有限的问题。

多项工程实践证明，双向搅拌技术能有效地提高搅拌均匀性，桩身强度沿深度变化较小，其复合地基承载力高于常规搅拌桩复合地基，见图 2。

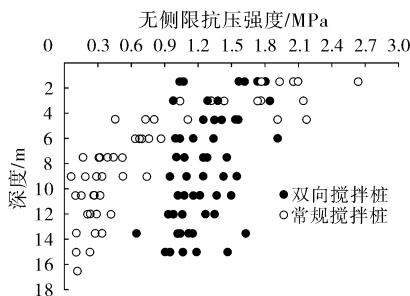


图 2 双向水泥土搅拌桩与常规水泥土搅拌桩芯样无侧限抗压强度与深度关系

1.2 粉体喷射注水搅拌技术

当需加固土层的天然含水量低或有硬土层存在的情况下，传统粉喷搅拌施工将受到严重影响，水泥不易得到充分水化，往往难以达到预期的加固效果。

针对此问题，Johan Gunther 和 Benny Lindtrom 提出了改进的粉体注水搅拌技术 (MDM)，其原理是通过改进常规粉喷桩机搅拌头、导管和喷口的改进、增加水泵、水管和水量控制装置。在使用常规粉喷桩技术施工时，通过改进的输水通道进行喷水以增加土层的含水量，从而达到常规粉喷桩技术无法达到加固土层的目的。

粉体喷射注水搅拌技术 (MDM) 与常规粉体喷射搅拌技术 (DJM) 相比，其优越性主要体现在：应用范围更广，适用于更加复杂的地层；加固土层含水量的增加，有效改善了施工搅拌效果、提高了水泥土搅拌的均匀性。

2 水泥土搅拌新的加固形式与设备

2.1 整体搅拌加固技术

为了更为有效合理地处理有机质土和疏浚土，芬兰的 YIT 公司提出了整体搅拌加固技术 (Mass Stabilization)。

整体加固技术施工示意，见图 3。

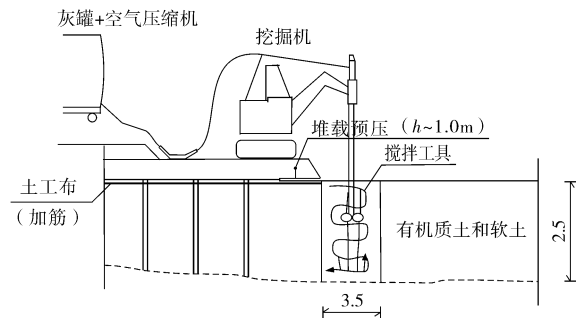


图 3 整体加固技术施工示意^[4] (单位: m)

整体搅拌加固技术的施工设备是在挖掘机的基础上改造得到，并配有灰罐、空气压缩机和搅拌装置。固化剂的添加方法与粉喷桩施工工艺相同，利用高压空气压入被加固土层中。施工搅拌过程中，水平方向与竖直方向同时进行搅拌，可有效提高固化剂在加固土层中的均匀性。其加固土层的深度，一般在 5 m 以内。

芬兰 Veittostensuo 地区的 12 号公路试验段的上部土层为淤泥，采用整体搅拌加固技术对其进行处理，下部土层为黏土，采用粉体喷射搅拌技术进行加固，见图 4。现场测试结果显示，整体搅拌加固强度达到设计要求，软基沉降处于较小范围值内 (10 年沉降值 400 ~ 450 mm)。

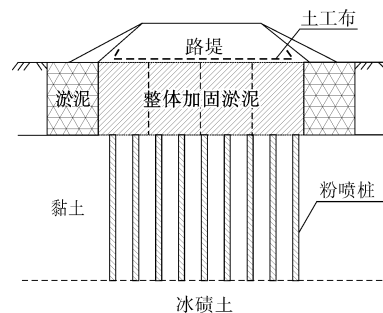


图 4 整体加固技术示意^[4]

2.2 双轮铣深层搅拌技术

德国宝峨公司研发的“双轮铣深层搅拌”技术，其主要设备为带有液压的铣削单元和电气控制系统的钢制框架，其下部在水平向并排安装有 3 个液压马达，两侧的马达分别驱动两个铣轮转动，铣轮上设置铣齿，见图 5。

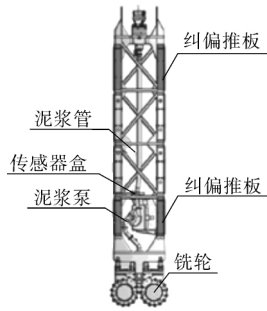


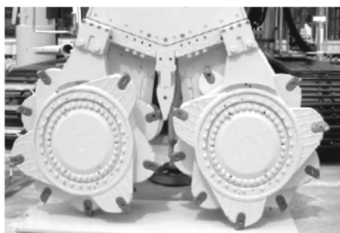
图5 铣削单元

铣槽时，两个铣轮低速转动，方向相反，铣齿将土体铣削破碎，中间的液压电动机则驱动泥浆泵，并通过位于两铣轮中间的吸砂口将钻掘产生的岩渣和泥浆混合物排到地表的泥浆池中进行除砂处理，并将经处理后的泥浆输送回槽段内，按照此循环经多次操作，直至终孔成槽。

双轮铣的铣头按照其扭矩和成墙尺寸进行了分类，并可根据施工土层的具体情况进行了配置。BCM铣轮类型，见图6。



(a) 3-1型（每排有4个铣齿座）



(b) 3-2型（每排有3个铣齿座）

图6 BCM铣轮类型

3-1型适用于松散到致密的非黏性土、含石头的砾石土、黏性土，其特点是拌合能力强；3-2型适用于密实的非黏性土、含卵砾石土层、坚硬的黏性土，其特点是切削能力强。

“双轮铣深层搅拌”技术的特点在于采用两组铣轮进行搅拌，垂直向旋转，得到矩形槽段形式的加固土体。加固体不仅可以作为单一的防渗墙，也可在其内部插入型钢，形成集挡土和止水于一身的墙体，可应用于多种复杂地质条件的土体加固中。

双轮铣深层搅拌技术在德国阿尔辛进行了大规模的首次应用，见图7。

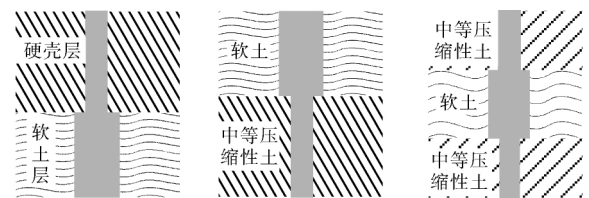


图7 德国阿尔辛工地

阿尔辛工程竖井为圆形，其内径为3m，深度为10m，由14个深搅槽段联合构成。此工程的主要机械装置为BG22H型旋挖钻机、双轮铣深层搅拌钻具以及凯式钻杆。设计水灰比为0.5左右，经试验测得水泥土加固体无侧限抗压强度为7~10MPa，净工效平均值为20m²/h。竖井的开挖面整体表现较为平整，且其防参与挡土功能性优良。我国引进双轮铣设备后，在天津地区完成了数个工程项目的施工，分别实现了止水帷幕、切削地下障碍物及形成槽、水泥土地下连续墙并与型钢结合共同组成支护结构体系等的不同功能。

2.3 变截面搅拌桩技术

由于土层沉积环境的原因，软土地基分布位置往往不同，如采用常规的等截面搅拌桩处理这种分布位置不同的软土地基，设计时须依据软土层的置换率进行设计，则会造成土体性质相对较好土层的桩体面积置换率过高，造成工程浪费。为了解决该问题，刘松玉等^[8]提出了基于竖向刚度优化的变截面搅拌桩处理分布位置不同的软土地基，在性质差的软土层中采用大直径桩体，在性质相对较好的土层采用小直径桩体，从而达到经济、有效的处理效果，见图8。



(a) 扩底搅拌桩 加固下部软弱地基 (b) 钉形搅拌桩 加固上部软弱地基 (c) 中字形搅拌桩 加固中部软弱地基

图8 变截面搅拌桩加固分布位置不同的软土地基示意

变截面搅拌桩技术是在双向搅拌桩技术基础上开发研制成功的，即变截面搅拌桩采用双向搅拌工艺，通过搅拌叶片的自动伸缩，改变搅拌桩的桩径，形成变截面搅拌桩。搅拌叶片的自动伸缩，是利用土压力原理，在施工过程中通过改变搅拌轴旋转方向，使搅拌叶片在土压力的作用下自动伸缩，见图9。

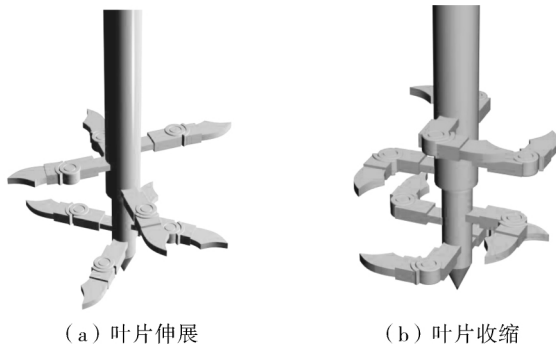


图9 可收缩搅拌叶片

该搅拌叶片可在地面以下任意深度处伸缩为两种不同的半径，从而可以施工形成具有两种桩径的单桩变截面搅拌桩，这种搅拌桩施工工艺连续、工效高，达到桩体为一个连续整体的目的。固化剂主要以水泥、石灰、粉煤灰或工业废渣等作为主剂，通过特制的深层搅拌机械，在地基深处将软土和固化剂(浆液或粉体)强制搅拌，利用固化剂与软土之间产生一系列物理、化学反应，使软土固结成具有整体性和一定强度的地基，其施工方法较传统方法更为先进。

目前，变截面搅拌桩已得到了广泛的推广应用。现场试验表明：该技术能够提高搅拌均匀性，很好地形成变截面搅拌桩，桩身强度大大高于常规搅拌

桩；变截面搅拌桩的单桩极限承载力较常规搅拌桩提高了 3~5 倍。

在处理区面积和填土高度相近的情况下，变径搅拌桩处理区比常规搅拌桩处理区能节约 15% 左右的水泥用量，具有更好的经济效益。

3 讨论分析

目前，水泥石搅拌加固技术的研究在岩土工程界非常活跃，呈现“百花齐放”的局面。近年来，水泥石搅拌技术发展的一个趋势就是在既有搅拌技术的基础上，不断发展新的搅拌技术，特别是改良传统的施工工艺，在提高水泥石搅拌桩的成桩质量方面十分显著，如：粉体喷射注水搅拌技术、双向搅拌技术。

有些新技术引入了更加多元的施工设备，丰富传统搅拌加固土体的形式，拓宽土体搅拌加固技术的应用领域，如整体搅拌加固技术、双轮铣深层搅拌技术、变截面搅拌桩技术等。

这些新技术已得到较为广泛的推广应用，例如双向搅拌技术和变截面搅拌桩技术等，已取得了较为成熟的经验，提出了可靠的设计、施工、监测与检测方法。水泥石搅拌加固新技术原理与特点汇总，见表 1。

表 1 水泥石搅拌加固新技术汇总

分类	方法原理	适用性与进步性
双向搅拌技术	采用同心双轴钻杆，由动力系统带动分别安装在内、外同心钻杆上的两组搅拌叶片，同时正反方向双向旋转搅拌	利用常规设备加工改进，易于推广；双向搅拌，阻断浆液上冒，提高搅拌均匀性，确保成桩质量；内、外钻杆旋转方向相反，搅拌产生的剪切力基本抵消，减小了施工对桩周土体的扰动；可将现有的四搅两喷施工工艺改变为两搅一喷施工工艺
粉体喷射注水搅拌技术	通过特定的输水管道喷水增加土体的含水量，从而加固传统粉体喷射搅拌工法(DJM)无法加固的某些特殊土层	具有更加广泛的适用范围，增加土中的含水量可以提高施工搅拌效益，以增加水泥土的均匀性和桩体强度
整体搅拌加固技术	施工机械由挖掘机改造而成，加固剂的输入方法通过高压空气注入土中，搅拌时水平向和垂直向同时搅拌，提高固化土的搅拌均匀程度	主要用于加固有机质土和疏松土等软土
双轮铣深层搅拌技术	在钻具底端配置两个马达驱动的铣轮，当铣轮旋转深入地层削掘土体时，注入固化剂，强制性搅拌土体，两组铣轮以垂直向旋转搅拌方式，形成矩形槽段的改良土体	具有高削掘性能，地层适应性强；高搅拌性能；高削掘精度，确保成墙连续、无缝；可完成较大深度的施工；施工期间对周边环境影响小；可在其内部插入型钢，形成集挡土和止水于一体的墙体
变截面搅拌桩技术	采用自动伸缩搅拌叶片和双向搅拌技术，在性质差的软土层中采用大直径桩体，在土体性质较好的地层采用小直径桩体，形成桩体面积置换率随土层性质变化的成层复合地基	可在地面以下任意深度处形成单桩具有两种桩径的变直径搅拌桩，针对性地对成层软弱地基进行经济、有效的处理

4 结语

随着水泥石搅拌加固新技术研究的深入，在固化材料方面主要以工业副产品或废料代替 PC 作为固化材料，开发低能耗、低 CO₂ 排放、易于回收进行循环利用的新型固化剂。土体搅拌加固技术在设备的多功能化、加固形式多元化、施工高效率 and 加固

土体提高强度等方面均取得了很大的进展。

(1) 基于粒化高炉矿渣微粉、活性氧化镁的固化土工程性能优良，生产能耗低，CO₂ 及其它污染物排放量小，解决了大量工业废料的循环利用和环境污染问题。

(2) 双向搅拌技术和粉体喷射注水搅拌技术能有效改善水泥石搅拌的均匀性，提高施工效率和成

桩质量。

(3) 整体搅拌加固技术、双轮铣深层搅拌技术、变截面搅拌桩技术在设备多功能化和土体加固形式多元化等方面取得了很大进展。

针对处理不同土质、工况和应用领域的水泥石拌搅拌加固新技术, 由于其适用性可更好地为工程建设服务。

在研究和发展的新水泥石拌搅拌加固技术的同时, 还应重视土的基本性质研究和实测数据分析, 及时总结搅拌加固技术经验, 引领我国水泥石拌搅拌加固技术迈向新高度。

参考文献(References):

- [1] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
LIU SY, QIAN GC, ZHANG DW. The Principle and Application of Dry Jet Mixing Composite Foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [2] 牛晨亮, 黄新, 李战国, 等. 利用工业废渣固化软土的试验研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 3 (10): 1871-1874.
NIU CL, HUANG X, LI ZG, et al. Experimental research on utilization of industrial wastes to stabilize soft soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3 (10): 1871-1874.
- [3] 易耀林. 基于可持续发展的搅拌桩系列新技术与理论 [D]. 南京: 东南大学, 2013.
YI YL. Sustainable novel deep mixing methods and theory [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [4] 李晨. 氧化镁活性对碳化搅拌桩加固效果试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2014.
LI C. Experimental study on the effect of MgO activity on the carbonated deep mixing method [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [5] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥石拌搅拌桩加固软土地基试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (3): 560-564.
LIU SY, XI PS, CHU HY, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (3): 560-564.
- [6] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (11): 2272-2280.
LIU SY, YI YL, ZHU ZD. Comparison tests on field bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (11): 2272-2280.
- [7] 霍镜, 朱进, 胡正亮, 等. 双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙(CSM工法)应用探讨 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (增刊1): 666-670.
HUO J, ZHU J, HU ZL, et al. Application of deep mixing cement soil mixing wall(CSM) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (S1): 666-670.
- [8] 刘松玉, 易耀林, 杜延军, 等. 变径搅拌桩处理成层软弱地基的现场试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (2): 1-8.
LIU SY, YI YL, DU YJ, et al. Field test on variable diameter deep mixed column for layered soft ground improvement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (2): 1-8.

New Development Review of Cement Soil Mixing Reinforcement Technology

CHEN Zhong

(China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the research achievements of cement soil mixing and strengthening technology in China, this paper mainly discusses several new techniques of cement soil mixing and strengthening. Two-way mixing technology and powder injection water mixing technology can effectively improve the uniformity of cement soil mixing, improve construction efficiency and pile quality; The whole mixing and strengthening technology, double milling deep mixing technology, variable cross section mixing pile technology in the equipment multifunction and soil strengthening forms have made great progress. These new technologies for cement soil mixing and strengthening in different soil quality, different working conditions and different application fields reflect the advanced technology and its development direction.

Key words: cement soil mixing and reinforcement; new technology; new equipment