

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.001



MJS 法地基处理技术综述与应用

张子新, 李佳宇

(同济大学 地下建筑与工程系; 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 20 世纪 90 年代, MJS 法起源于日本, 是一种新型的全方位高压喷射地基处理技术; 自 2008 年引入中国以来, 已经在基坑开挖、建筑物保护和地基改良等方面取得了良好的应用效果。但由于技术复杂、成本较高, MJS 法还未在中国广泛普及开来。笔者对 MJS 法的技术进行较为全面的回顾与介绍, 包括技术背景、原理、特点、工艺、设备等, 并对 MJS 法在日本及中国的实践应用进行回顾, 特别是对中国所取得的巨大成就进行介绍。

关键词: MJS 法; 地基处理; 高压喷射; 环境保护

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0001-11

Review and applications of MJS techniques for ground improvement

Zhang Zixin, Li Jiayu

(Department of Geotechnical Engineering; Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: MJS method, invented by Japanese in 1990s last century, is a new all-round type reinforcing and consolidation method for ground improvement. Since 2008 when MJS method is introduced to China, MJS method has been widely used in the field of pit excavation, structure protection and ground improvement with good results. The main purpose of this article is to review and introduce MJS method fully relatively, including invention background, principle, characters, technics, equipment etc. In addition, applications of MJS method in Japan and China are reviewed, especially the great achievement in our country. By reading this article, readers will understand MJS method comprehensively.

Keywords: MJS method; ground improvement; high pressure jetting; environment-protection

地下工程的发展,也是人类对地基的认识与改造的过程。远古时期,人类只能利用天然洞穴作为庇护所,五六十万年前,北京猿人就已经利用洞穴藏身及保存火种^[1];随着文明的发展,人类渐渐学会了如何简单地对天然地基进行处理,以达到特定的目的,并兴建了很多大规模的地下工程,如李斯动用几

十万人力为秦始皇修建皇陵。但此时,人类仍受限于极低水平的地基处理技术,只能在天然地基较好的地方修建地下工程。到了现代社会,在城市发展需求和科技进步的共同推动下,地基处理技术获得了极大的发展,借助这些技术,人类可以在一定程度上摆脱天然地基的限制,更为自由地开发和利用地

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(41372276);上海隧道工程有限公司资助项目(2014)

作者简介: 张子新(1966-),教授、博士生导师,主要从事隧道及地下建筑工程研究, (E-mail) zxzhang@tongji.edu.cn。

Received: 2016-10-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41372276); Foundation of Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd (2014)

Author brief: Zhang Zixin(1966-), professor, PhD supervisor, main research interests: tunnel engineering and underground structures, (E-mail) zxzhang@tongji.edu.cn.

下空间。

当天然地基无法满足建构筑物对地基稳定、变形以及渗透方便的要求时,就需要对天然地基进行处理,以满足建构筑物对地基的要求^[2]。根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)的定义^[3],地基处理就是提高地基强度,改善其变形性质或渗透性质而采取的技术措施。在土质较为软弱的地区,几乎所有地下工程都涉及到不同方式的地基处理,其中,复合地基处理越来越成为地基处理的主要形式^[4-5]。柱状复合加固体是比较常见的一种复合地基形式,传统的柱状加固体主要有碎石桩、挤密砂桩、深层搅拌桩、旋喷桩等。其中,旋喷桩复合地基的应用相对比较广泛,它适用于淤泥、淤泥质土、一般粘性土、粉土、砂土、黄土、素填土天然地基的处理^[3]。

随着中国城市的不断发展,部分大城市的地下空间趋于紧张,越来越多的地下工程需要面对狭窄的施工场地、复杂且需要保护的周边环境以及无法回避的不良地质条件^[6-7]。特别是在中国经济最发达、地下空间开发强度最大的珠江三角洲、长江三角洲和东南沿海地区,软土地层分布十分广泛^[8],在合理的成本控制范围内,传统的复合地基已经无法应对部分复杂情况,由此导致的工程事故也屡见不鲜。

本文介绍的 MJS(Metro Jet System)法地基处理技术,是在传统的旋喷桩技术基础上完善、发展而来。相比于传统技术,MJS 法施工更灵活、加固体强度更高,对周边环境的控制和保护效果更好。

1 技术背景

高压喷射注浆法(CCP, Chemical Churning Pile),又称旋喷法,20 世纪 70 年代末引入中国,并开始广泛应用^[10]。高压喷射注浆方法可置换原状土中的部分颗粒,其余颗粒在喷射流、离心力和重力等共同作用下,会形成具有特殊结构的较高强度桩体,桩体表面通常比较粗糙,因此,具有较大承载力;另一方面,高压注浆对周围土体有一定的压密作用,且桩体的存在可使得周围土体转变为有侧限受压状态,从而提高土体承载力,因此,高压喷射注浆法复合地基具有较好的地基加固效果^[11]。根据日本喷射注浆协会(Japan Jet Grouting Association)提供的资料,高压喷射注浆法能够形成的桩体直径最大可达 1 500 mm,采用不同硬化材料时,高压喷射注浆法的强度设计值如表 1 所示^[12]。

表 1 CCP 工法强度设计值

Table 1 Design strength of improved ground by CCP

硬化材料	土质	水灰比	单轴抗压强度 q_u /MPa	粘聚力 c	附着力	抗弯强度	弹性模量
CCP-5	砂性土		1.0				
	粘性土	0.9	0.8				
	腐殖土		0.2				
CCP-6	砂性土	1.0	3.0	$1/6q_u$	$1/3c$	$2/3c$	$100q_u$
	粘性土		1.0				
CCP-7A	砂性土	1.5	2.0				
	粘性土		0.5				
CCP-7B	砂性土	1.1	1.0				
	粘性土		0.5				
CCP-8	腐殖土	1.0	0.3				

经过中国工程技术人员不断应用及改进,高压喷射注浆法已广泛用于建筑地基改良、地下工程止水、路堤加固、堤坝防渗、防治砂土液化等领域,其形成的旋喷桩体直径可达 2 m,桩身最大强度在粘性土中可达 3~5 MPa,在粉土中可达 5~8 MPa,在砂土中可达 8~20 MPa^[11]。在软土地区,高压喷射注浆法加固体强度通常可为 1~2 MPa^[12-14]。

尽管如此,面对复杂的城市环境和技术难度越来越高的工程项目,高压喷射注浆法已经暴露出了很多问题:

1)只能在竖直方向施工,且深度有限。高压喷射注浆法只能在一定深度的竖直方向施作,如果施工深度很大或在水平方向施工,就必然要提高喷射压力,由此产生的高压泥浆不能顺利的消散,因而,不能形成有效的加固桩体。

2)形成的桩体直径较小,强度较低。这里讲的桩径较小和强度较低,指的是在部分特殊施工需求条件下,高压喷射注浆法已经不能满足要求。中国部分地区的施工设备、硬化材料和施工水平落后也进一步加剧了这个问题。

3)被动排泥,无法控制孔内的混合液体压力,施工易造成地表隆起。高压喷射注浆法孔内的泥浆,有相当大一部分向上流出至地表,这个比例可高达 80%^[16]。这种流出是被动且不稳定的,会造成地内压力的波动,从而引起地表变形,通常是引起地表隆起^[17]。

为克服上述问题,Nakashima 等^[18]发明了一种改进的高压喷射注浆法——全方位高压喷射法(Metro Jet System),也称为 MJS 法。MJS 法可以朝向任意方形施作加固桩体,能够主动调控地内压

力,形成的加固桩体具有更大的直径和强度。

2 MJS 法技术及施工工艺

2.1 MJS 法原理

MJS 法的原理与传统高压喷射注浆法类似,都是采用高压流体切割地层,同时,喷射硬化材料,最终形成具有一定强度的加固桩体。MJS 法的核心技术是主动排泥和孔内压力监测,这依靠的是全新的前端施工装置,如图 1 所示^[18],该装置具有以下 3 个主要特点:

1)有 3 个独立的喷嘴,喷嘴 1~3 分别用来向地层中喷射硬化控制剂、硬化材料、高压空气或水,其中喷嘴 3 是包围着喷嘴 2 的。硬化控制剂用来调整硬化材料的初凝时间。

2)带有压力传感器,可探测孔内压力并传回至控制中心。前端施工装置还带有一个弹性块,孔内的高压空气可使得该弹性块膨胀,密封其与孔壁的间隙,因此,通过调节喷嘴的喷射压力和流量,可保持孔内压力为某个恒定值。

3)含有主动排泥口,主动排泥口内部通过高速流体(空气或水)产生负压,可以主动吸走多余的泥浆。主动排泥还能够帮助硬化材料向各个方向均匀扩散。根据不同的工况需要,可将弹性块和主动排泥口的位置对调。

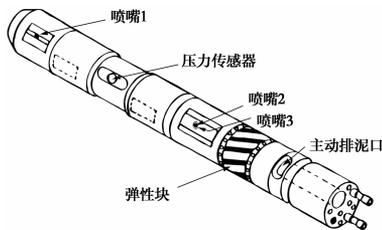


图 1 前端施工装置
Fig. 1 Injection rod (Monitor)

前端施工装置与多孔管相连,多孔管内部的孔与前端施工装置相连,向前端供给电力、喷射材料等。多孔管结构及每孔的作用如图 2 所示。

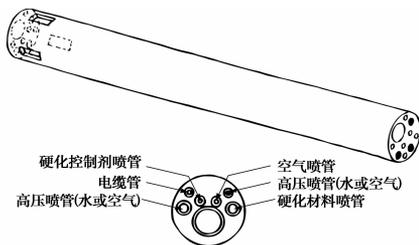


图 2 多孔管
Fig. 2 Connection rod

中国的工程技术人员对多孔管进行了本土化改进^[10],除连接孔外,有多达 11 个孔用于供应空气、

水、硬化材料以及排浆,如图 3 所示。

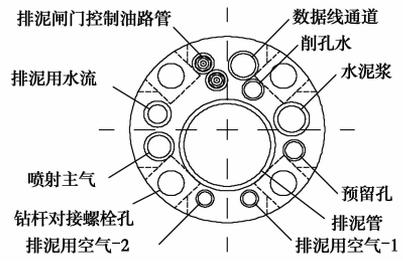


图 3 改进的多孔管
Fig. 3 Section of modified connection rod

MJS 的施工原理图分别如图 4(垂直施工)和图 5(水平施工)所示。

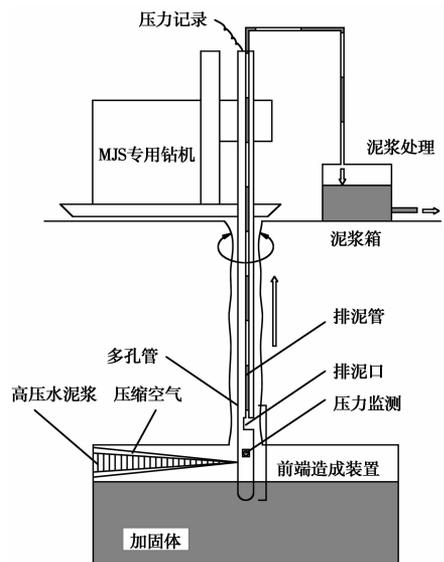


图 4 MJS 法施工原理图(垂直)
Fig. 4 Schematic of MJS (vertical)

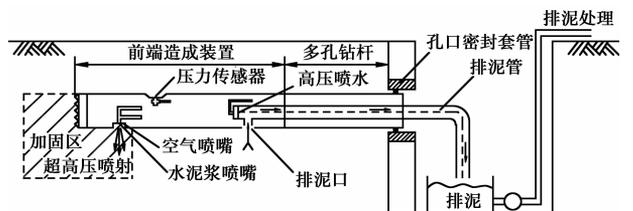


图 5 MJS 法施工原理图(水平)
Fig. 5 Schematic of MJS (horizontal)

2.2 MJS 法特点

由于 MJS 法采用了特殊的前端施工装置和多孔管,使得该技术在很多方面超越了传统高压喷射注浆法,主要体现如下:

1)可在任意方向进行地基处理,除了传统的数垂直方向,还可进行水平方向和倾斜方向的地基处理作业。主动排泥方式使得在富水条件下的水平地基处理施工变得安全可行^[10]。

2)传统高压喷射注浆法仅通过气升作用自然排泥,这通常会造孔内压力偏大,容易导致地表隆起,MJS法可通过孔内压力监测和合主动排泥进行压力精确管理,能够稳定的控制孔内压力,能够大大减小施工对周围地层及环境的影响。

3)在处理深部地基时,传统高压喷射注浆法会产生排泥困难,造成喷嘴附近压力增大,导致喷嘴工作效率降低,硬化材料喷射效果不好。MJS法的压力管理能够保证孔内压力稳定,因此,MJS法可超深地基(40 m以上)进行改良处理。

4)MJS法喷嘴压力和流量都很大,再加上稳定的同轴高压空气的保护和对地内压力的精确管理,使得MJS法成桩直径可达 $2\sim 2.8\text{ m}^{[10]}$;且加固桩体截面既可以为传统的圆形,也可以为任意角度的扇形。

5)主动排泥能够方便泥浆的管理,多余的泥浆可以进行集中收集、存储和处理,减少了废浆对周围土壤及水体的污染。

另外,MJS法施工机械化程度高,所有关键参数,包括转速、提升速度、摇摆角度等均为提前设定,施工过程中可对这些参数进行全程监控,减少了人为因素,施工质量可靠。施工所用钻机高度一般不

超过4 m,可在狭小空间内正常施工。

2.3 MJS法施工工艺

2.3.1 施工参数 根据日本MJS工法协会提供的资料,MJS法的基本技术规格如表2所示。

表2 MJS法技术规格

Table 2 Technical parameters of MJS

项目	硬化材料 喷射压力/ MPa	硬化材料 流量/ (L·min ⁻¹)	空气压力/ MPa	空气排出 量/(Nm ³ · min ⁻¹)	钻杆 转速/ rpm
规格范围	20~50	55~150	0~1.0	0~17	1~15
水平施工	40	130	0.7	<1.2	>3
垂直施工	40	130	0.7<2.0		

笔者查阅了MJS工法协会公开的部分资料中MJS法成功案例,实际工程中所采用的参数如表3所示。可以看出,日本MJS法地基处理都为不加气施工,同时,提升速度一般较快,形成的桩径也相对较小,只有一个案例为大于2 m的目标直径。

经过在中国的实践与发展,MJS法的技术参数也有所变动,笔者统计了部分上海地区成功实施的MJS法地基处理案例,其施工参数如表4所示。

表3 日本地区MJS法主要施工参数

Table 3 Main parameters of MJS in Japan

工程名称	方向	硬化材料喷射 压力/MPa	硬化材料流 量/(L·min ⁻¹)	空气压力/ MPa	空气排出量/ (Nm ³ ·min ⁻¹)	提升速度/ (min·m ⁻¹)	目标直 径/m
第二神明道路(改造) 小东山隧道工程	水平	50	90		0.8~1.2	20(全圆)	0.7
两国干线工程(盾 构隧道,直径3.25 m)	水平、垂直	40	90		0.8~2.0	50(全圆、半 圆、扇形)	1.5
都营地铁一号线12的环 形部中落月岛工程区	水平	40	90		0.8~2.0	40(全圆)	2.4
曳舟一业平桥地 铁复线工程	垂直	40	90		0.8~1.2	20(半圆)	0.9

表4 上海地区MJS法主要施工参数

Table 4 Main parameters of MJS in Shanghai

工程名称	方向	硬化材料喷射 压力/MPa	硬化材料流 量/(L·min ⁻¹)	空气压力/ MPa	空气排出量/ (Nm ³ ·min ⁻¹)	提升速度/ (min·m ⁻¹)	目标直 径/m
徐家汇地下商城 向下加层工程 ^[10]	垂直	40	90	0.6~0.7	1.0~2.0	40(全圆)	2.2
虹桥商务核心区(二期) 区域供能管沟工程 ^[19]	水平	≥40	85~100	0.7	1.0~2.0	20(半圆)	2.4

续表 4

工程名称	方向	硬化材料喷射压力/MPa	硬化材料流量/(L·min ⁻¹)	空气压力/MPa	空气排出量/(Nm ³ ·min ⁻¹)	提升速度/(min·m ⁻¹)	目标直径/m
某外包井组合式围护工程 ^[20]	垂直	40	130	0.5~0.7	1.0~2.0	60(全圆)	>1.55
上海 12 号线盾构进出洞加固工程 ^[21]	垂直	40		0.7	1.0~2.0	40(全圆)	2.2
轻轨车站换乘通道工程 ^[22]	垂直	≥38	85~120	0.5~0.7	1.0~2.0	20(扇形)	0.65
某邻近地铁车站的深基坑工程 ^[23]	垂直	40±2	85~100	1.05	1.0~2.0	40(全圆、半圆、扇形)	2.0
迎宾三路隧道新建工程东侧明挖段工程 ^[24]	垂直	≥38	85~110	0.5~0.7	1.0~2.0	20(半圆)	2.4
上海某地铁工程超深地基加固工程 ^[25]	垂直	≥38	90~100	0.7		40(全圆)、20(半圆)	2.0

从表 4 可以看出,中国 MJS 法施工通常会加入高压空气,高压同轴空气辅助施工能够大幅度减少喷射流的能量损失,可以有效扩大桩径,进而形成大直径的加固桩体。相比于不加气施工方法,加入高压空气可使桩径扩大约 1 m。MJS 法施工参数基本比较稳定,变动较大的是提升速度这项指标,反映到最终施工成果上的就是预估直径的变化,由于全圆加固体单位长度所需的硬化材料更多,所以,其提升速度也比非全圆加固体的慢很多。

2.3.2 施工步骤 根据不同的目的和设备,MJS 法地基处理技术的施工过程也不完全相同,但总体上可以分为 4 步,如图 6 所示^[26]。现简述如下:

1)安放施工机械,设定钻杆钻入角度并安装钻孔套管(图 6(a))。

2)将多孔管钻入至预定深度(图 6(b))。

3)多孔管到达预定深度后,按照设计好的参数进行改良体施工,喷射硬化材料并逐渐收回多孔管;同时,在施工过程中观测现有建(构)筑物的变形(图 6(c))。

4)多孔管完全收回完成施工后,移动施工机械到下一个预定位置(图 6(d))。

2.3.3 硬化材料 根据日本 MJS 工法协会提供的材料,硬化材料的标准配合如表 5 所示,此时的加固体的单轴抗压强度,在砂性土和粘性土中分别可达 3 MPa 和 1 MPa。中国 MJS 法所采用的硬化材料多为水泥浆液,采用的水泥标号为 P. O42. 5,水灰比 1 : 1,水泥用量约为 1. 36~2. 72 t/m³(根据桩径及桩身截面形状不同而不同)。粘性土中,MJS 加固体 28 d 单轴抗压强度≥1. 5 MPa,最大可达 5 MPa,平均强度可达日本 MJS 法的 1. 5~2 倍。中国砂性土中的 MJS 法加固体强度在文献中比较少见,故缺乏可靠的强度经验指标。

表 5 硬化材料的标准配合

Table 5 Standard composition of harden material m³

种类	水泥/kg	混合剂/kg	水/kg
MJ-1 号 A	普通硅酸盐水泥 760	混合剂 A 8	752
	高炉水泥 B 760	混合剂 A 8	743
MJ-1 号 B	普通硅酸盐水泥 760	混合剂 B 6	756
	高炉水泥 B 760	混合剂 B 6	748

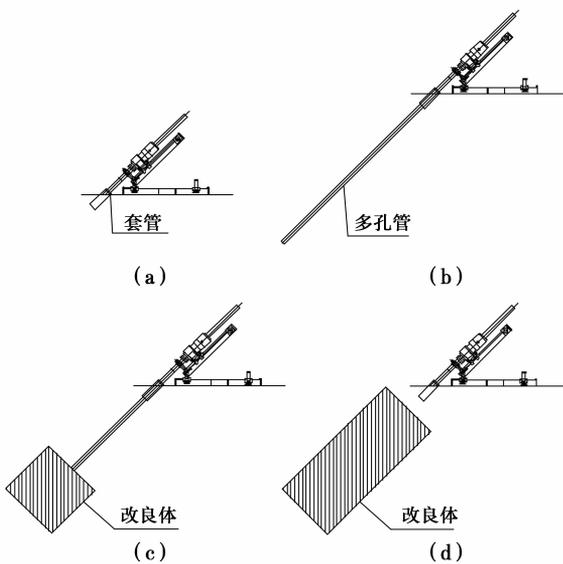


图 6 MJS 法施工步骤

Fig. 6 Construction steps of MJS

2.4 MJS 法施工设备

MJS 法施工设备主要包括 MJS 专用钻机、集中管理装置、高压泵、水泥浆泵、空气压缩机等和其他辅助装置。其中, MJS 专用钻机是 MJS 法最核心的施工设备, 分为水平专用钻机、垂直钻机和全方位多用钻机, 分别如图 7~9 所示。MJS 专用钻机的高度一般均小于 4 m, 相应的最小施工净空要求为 4 m 左右。

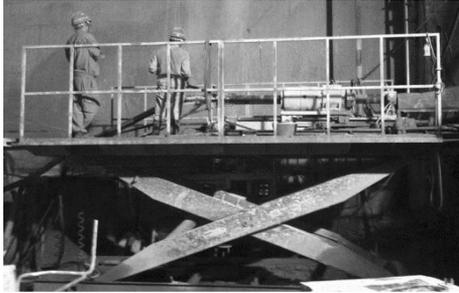


图 7 MJS 水平专用钻机及升降架

Fig. 7 Specific drill for horizontal MJS and lifter



图 8 MJS 垂直专用钻机

Fig. 8 Specific drill for vertical MJS



图 9 MJS 全方位多用钻机

Fig. 9 Specific drill for all-round MJS

目前, MJS 法核心设备主要为进口或与日本合作研发, 具有一定的自主性, 在国产化和小型化方面做了很多改进和研发, 但还不能完全国产。

2.5 施工控制及监测

如前所述, MJS 法施工采用全信息化控制, 这便于施工人员及时掌握和调整各项施工参数及控制地内压力。MJS 法主控界面如图 10 所示, 上排从左至右分别为地内压力、高压水泥浆压力、倒吸水流压力及空气压力; 下排从左至右为地内压力预警值、高压水泥浆流量、回流水流量和空气流量; 右下角的数值为地内压力比。

MJS 施工过程中, 除了进行常规的地表沉降、建(构)筑物沉降监测等, 还应该重点监测 MJS 法成孔的垂直度或水平度。任何方向施工的 MJS 法都可以用测斜仪监测成孔精度, 对于水平方向的 MJS

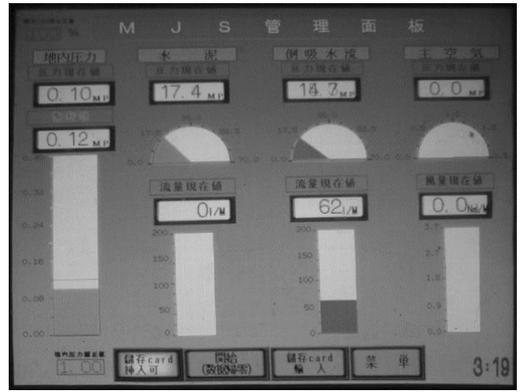


图 10 MJS 法信息化施工控制界面

Fig. 10 Interface console of MJS

法还可采用水平测斜用 LED 灯来确定成孔水平度, 如图 11 所示。

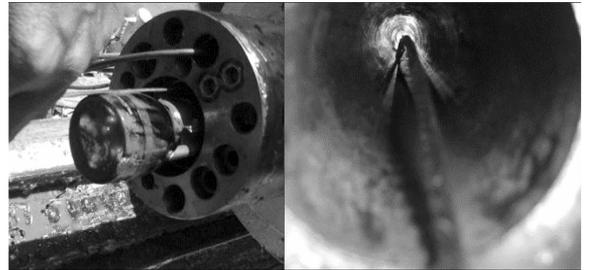


图 11 水平测斜用 LED 灯

Fig. 11 LED light for inclinometer

3 MJS 法的发展现状分析

MJS 法兴起于日本, 并在随后的近 30 年间得到了广泛的应用; 自引入中国后, MJS 技术得到了更进一步的发展, 目前, 中国 MJS 法的施工总量早已超过 10 万 m^3 , 成为世界上 MJS 技术应用最蓬勃发展的国家。由于 MJS 法多用于极端条件下的地基处理, 因此, 在发展程度较高且人口密度较低的欧美国家并没有被广泛的使用。

3.1 MJS 法在日本的发展

日本于 1992 年就建立了 MJS 工法协会。1995 年, 日本学者小田惠之辅等^[27]对 MJS 法水平施工所涉及到的各项工艺进行了细致研究, 包括高压喷水或喷水的有效距离、喷射量、主动排泥装置的效果等, 并进行了成桩试验, 对成桩形状、直径、强度等进行了详细记录和研究。之后, MJS 法多被城市土木、山岭隧道等各种高难度施工中被采用, 取得了很好的施工效果, 施工业绩数逐年递增。

根据日本 MJS 工法协会提供的资料, MJS 法在日本应用的相关统计如图 12 所示。MJS 法有 80%

以上被使用在各种隧道工程中,且绝大多数为水平或倾斜施工,这也是 MJS 法发明的主要目的。MJS 法加固体强大、对周围环境影响小是选择 MJS 法的主要原因,这也是该方法区别于传统高压喷射注浆法的主要特征。

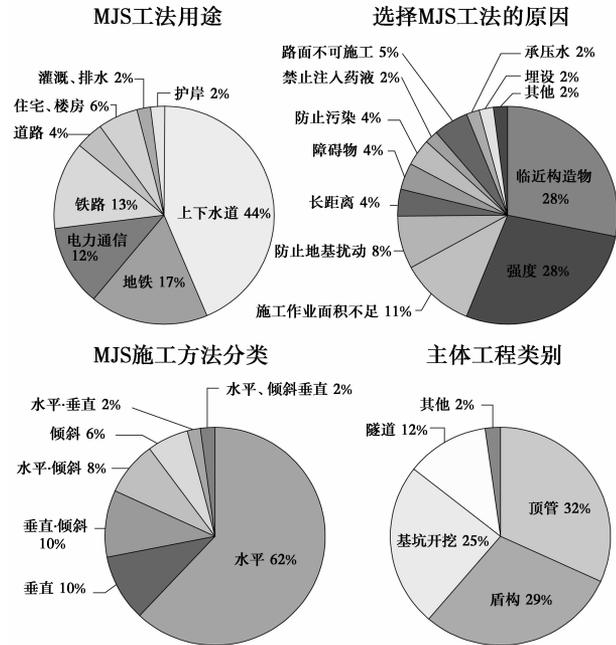


图 12 MJS 工法在日本应用的相关统计
Fig. 12 Pie chart of MJS applications in Japan

1996 年,日本在排水隧道建设中使用了水平 MJS 法加固软泥沙冲积层,水平施工深度达到了 54.4 mm,施工精度较高,且对周围环境影响较小^[28]。Hara 等^[29]将 MJS 法成功使用于 Kozukayama 隧道的普通碎石地基(40N70)改良,该隧道覆土厚度仅为 8~25 m 且下穿城市繁华地区。坪井忠弘等^[30]研究了 MJS 法在灌溉函渠下穿公路地基中的应用,该工程采用 MJS 法对公路下方腐殖质地基进行了加固,以确保函渠穿越对公路的影响降到最低,该工程完成了 40 m 长距离水平成孔作业,水平切削精度在 1/500 以下,加固体单轴抗压强度达到 1 MPa 以上,道路最大沉降为 26 mm。

图 13~15 分别为 MJS 法在水平、倾斜及垂直方向的施工现场情况(案例来自东兴土力有限公司(東興ジオテック株式会社))。图 13 对应为需要对地下结构进行加固,而地表没有施工空间的情况;图 14 对应为施工净空高度有限的情况;图 15 对应为水下大深度地基处理的情况。

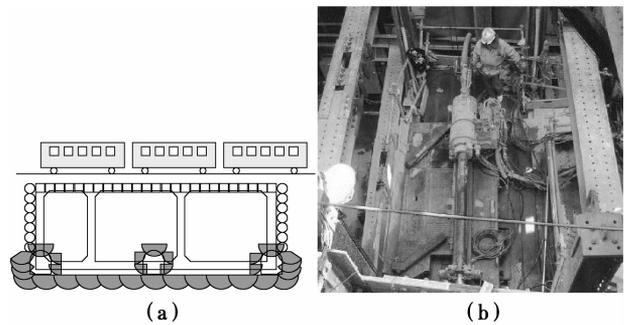


图 13 MJS 水平施工案例
Fig. 13 Case of horizontal MJS construction

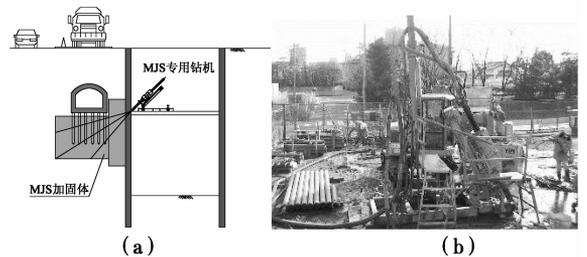


图 14 MJS 倾斜施工案例
Fig. 14 Case of inclined MJS construction

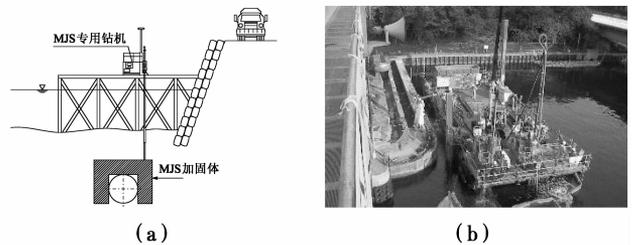


图 15 MJS 垂直施工案例
Fig. 15 Case of vertical MJS construction

3.2 MJS 法在中国的发展分析

1)MJS 法的应用 2007 年 1 月 27 日,上海市土木工程学会地下工程专业委员会在上海举办 MJS 水平旋喷桩工法技术交流会,日本 MJS 工法协会会长中西康晴及相关施工专家在会上向中国工程技术人员介绍了 MJS 法的特点及工程案例。2008 年, MJS 法由上海隧道地基基础工程有限公司(原上海隧道地基注浆工程有限公司)引入中国。短短几年时间,已采用 MJS 法进行了数十项工程的施工并取得了成功。在这个过程中,中国的工程技术人员对 MJS 法工艺及设备进行了本土化改造和发展,如今,该项技术在中国的使用已日趋成熟。

第 1 个在中国成功使用 MJS 法地基处理技术的工程是徐家汇地下商城向下加层工程(2009)^[31]。该工程是中国首次采用地下室向下盖挖加层技术,

施工面临的主要挑战有:1)紧邻 1 号线徐家汇车站,变形控制极其严格,要求地下结构抬升 $<5\text{ mm}$ 且沉降小于 10 mm ;2)地下施工净空仅为 4.1 m ,要求施工设备要小型化。如图 16 所示,向下开挖前要求对原地基进行加固处理,如采用常规的高压旋喷法会造成地下室的抬升,因此施工方引入 MJS 法施工技术,监测结果表明,MJS 法施工期间,地下室呈隆起趋势,但速度仅为 0.45 mm/月 ,保证了地铁车站及运营安全。

题,为应对这些问题,施工单位摒弃了原有的日本技术,研制出预钻孔安装分离式同步提升套管工艺,可在施工 MJS 工法时可在不拆卸 MJS 钻杆的前提下拆卸外套管,这不仅保护了孔壁及钻头,同时,也使得施工效率提高了 50% 以上。分离式套管如图 17 所示。

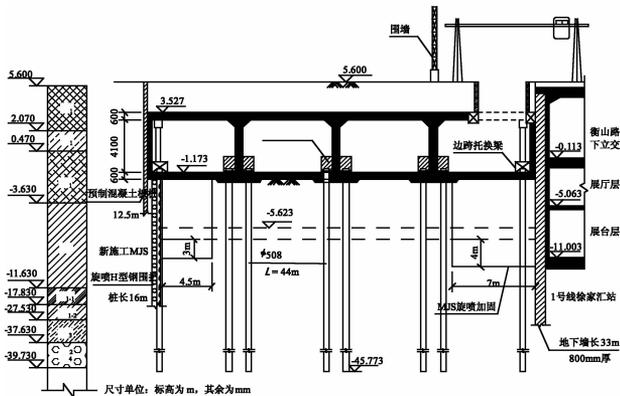


图 16 向下加层剖面图

Fig. 16 Profile of added-level downward

广东华隧建设股份有限公司承建的广州地铁 9 号线高增站工程(2012)为中国第一个使用 MJS 法水平地基处理技术的工程。该工程共完成 MJS 法水平加固桩体 4 根,成桩直径大于 2.4 m ,桩身抗压强度为 $1.5\sim 8.4\text{ MPa}$,施工质量达到设计要求。同年,华隧建设召开中国首次 MJS 水平旋喷桩试验成果交流会,介绍 MJS 法施工成果及经验。2016 年,广东华隧建设股份有限公司承建的世界首例下穿高铁的 MJS 法水平地基处理工程在广州开工,加固体设计桩径 $2\ 000\text{ mm}$,采用 160° 扇形截面,水平施工深度达到 59.5 m ,是中国 MJS 法水平施工的最大深度。MJS 法用于高铁下方地基处理,说明了 MJS 法工艺在环境保护方面的出色性能,也标志着中国在 MJS 法施工工艺方面已达到世界先进水平。

由上海城建隧道股份有限公司承建的世纪汇广场修复工程(2013),设计施工 MJS 法加固桩体 143 跟,直径 $2\ 000\text{ mm}$,将 MJS 法地基处理的深度提高到 60 m ,创下 MJS 法施工深度的世界纪录;MJS 法施工方量超过 2.2 万 m^3 ,成为世界上 MJS 工法施工方量最大的工程^[32]。此工程属于超深地基处理,面临孔壁易失稳、深处钻杆与土体摩阻力大等问



图 17 分离式套管

Fig. 17 Separated casing pipes

2)MJS 法技术创新 中国的工程技术人员在多年实践的基础上,对 MJS 法进行了不断的发展与完善。上海隧道地基基础工程公司通过延长喷射时间,增大喷射流量等方式,成功开发出直径 4.2 m 的超大直径 MJS 加固桩体,并已经成功运用于上海轨道交通 10 号线江湾体育场站地下空间开发工程。中国目前已取得 MJS 技术相关专利 2 项:一项专利^[33]是利用 MJS 法施工对周围环境影响较小的优点,将 MJS 法用于地下连续墙的修复技术中。另一项专利^[34]发明了一种适用于 MJS 法施工的多孔管,其作用是输送高压水泥浆进入地底进行地基处理,同时实现主动排泥和监测地内压力的作用。

针对水平超长 MJS 法加固钻孔易向下偏斜的问题,上海市基础工程集团有限公司研发了一种可纠偏钻头,如图 18 所示。图 18(a)中为日本进口钻头,在长距离水平钻进过程中无法达到精度要求,在钻进 20 m 后,竖直偏差可达 40 cm 以上。如图 18(b)所示,改进后的钻头将前端平钻头加焊尖角并把原有中隔板去除,同时,将削孔水出口位置延伸至钻头前端。改进后钻头尖角能够起到明显的导向作用,纠偏钻头的改进创新保证了 30 m 超长钻进精度可控制在 1% 以内。

在 MJS 法成桩直径判断方面,采用常规的试桩开挖或取芯判断桩径耗时较长,有时不能满足工期要求。上海市基础工程集团有限公司创新的采用了“听管法”快速判断 MJS 法成桩直径,取得了良好的

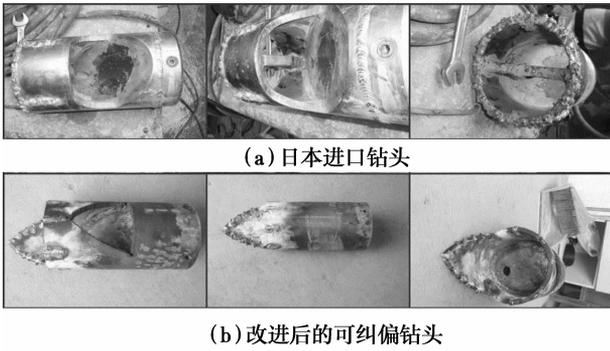


图 18 水平纠偏钻头

Fig. 18 Rectifiable drill head

效果。所谓听管法,即在预估的成桩范围内预先埋设与桩中心不同间距的钢管,钢管深度与钻管深度相同,当钻管下至设计深度时开始喷射,通过喷射流冲击钢管的声音以判断成桩直径,如图 19 所示。

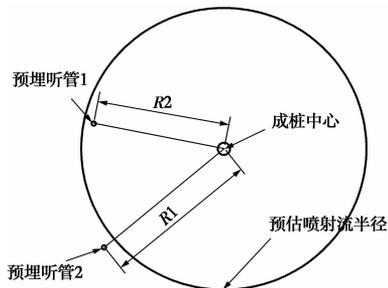


图 19 听管法原理示意图

Fig. 19 Schematic of sonic judgment method

4 结论

自 2008 年 MJS 法被引入中国以来,经过近 10 年的实践、总结与改进,MJS 法已经被证明是优于传统高压喷射注浆法的全新地基基础处理技术,经过对 MJS 法的回顾,主要结论如下:

1) MJS 法技术在中国的应用已经日渐成熟,尤其是在水平方向施工方面,已经有了很多成功案例,特别是在下穿高铁工程的应用,表明了 MJS 法在控制地层变形方面卓越的性能。

2) MJS 法的应用使得超近距离隧道穿越、超深基坑开挖等成为现实,可以预见,MJS 法的进一步广泛应用必将给地下空间开发提供更多的可能和选择。

3) 由于中国城市建设方面的巨大需求,MJS 法的应用正朝着桩径更大、地基处理深度更深、加固体强度更大的方向发展,伴随而来的将是 MJS 法技术的不断日新月异,不久的将来,定会涌现出很多新的

施工技术和施工装备。

4) 相比于 MJS 法的实践应用,中国在 MJS 法技术及装备方面相对落后,关键技术和专业装备还在一定程度上依赖国外进口。因此,中国应该在 MJS 法的科研方面投入更多的力量,实现理论与实践同步健康发展。

参考文献:

- [1] 康宁. 中国地下空间发展史概述[J]. 地下空间, 1988(4): 70-76.
KANG N. History of underground space development in China [J]. Underground Space, 1988(4): 70-76. (in Chinese)
- [2] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
GONG X N. New technology of ground treatment [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
ZHENG G, GONG X N, XIE Y L, et al. State-of-art of ground improvement techniques in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146. (in Chinese)
- [5] 陈祥龙, 江舜武, 金亚伟, 等. 海南海花岛软基处理工程中真空预压法的改进与机理分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 75-83.
CHEN X L, JIANG S W, JIN Y W, et al. Amendment of vacuum preloading technique in the application at Hainan Sea Flower Island and its improvement mechanism [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental, 2017, 39(2): 75-83. (in Chinese)
- [6] 刘宝琛. 综合利用城市地面及地下空间的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 109-111.
LIU B C. Some aspects for utilization of ground surface and underground space in cities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 109-111. (in Chinese)
- [7] 许崧, 阎长虹, 孙亚哲. 城市地下工程中的环境岩土工程问题[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 127-132.
XU S, YAN C C, SUN Y Z. Environmental geotechnical

- problems of urban underground engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11 (2): 127-132. (in Chinese)
- [8] 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10): 87-91.
XUE R, HU R L, MAO L Q. Fractal study on the microstructure variation of soft soil in consolidation process [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39 (10): 87-91. (in Chinese)
- [9] NAKANISHI W. Method for forming an underground wall comprising a plurality of columns in the earth and soil formation; U. S. Patent 3,800,544[P], 1974-4-2.
- [10] 张帆. 二种先进的高压喷射注浆工艺[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(Sup2): 406-409.
ZHANG F. Two advanced jet grout methods [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32 (Sup2): 406-409. (in Chinese)
- [11] 杨凤灵. 高压旋喷桩复合地基在高层住宅楼中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
YANG F L. Application of jet grouting piles composite foundations in high-rise building [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [12] KITAZUME M, TERASHI M. The deep mixing method [M]. CRC Press, 2013.
- [13] 张荣. 高压旋喷桩在软土地基处理中的应用[J]. *科技创业月刊*, 2011(2): 179-181.
ZHANG R. Application of high pressure jet grouting pile in soft soil foundation treatment [J]. *Pioneering with Science & Technology Monthly*, 2011 (2): 179-181. (in Chinese)
- [14] 孙文娟, 沈水龙, 罗春泳, 等. 二重管双液旋喷施工技术快速加固软土地基[J]. *工业建筑*, 2010, 40 (3): 135-138.
SUN W J, SHEN S L, LUO C Y. Twin jet-grouting technology with dual-rod for instant solidification of soft ground [J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(3): 135-138. (in Chinese)
- [15] 史珉钰, 皮泉江, 张永强. 高压旋喷桩技术加固软土地基设计与施工[J]. *石家庄铁路职业技术学院学报*, 2009 (1): 32-36.
SHI M Y, PI Q J, ZHANG Y Q. Designing constructing high pressure jet grouting pile technology in reinforcing soft ground [J]. *Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology*, 2009(1): 32-36. (in Chinese)
- [16] KAUSCHINGER L J, HANKOUR R, PERRY E B. Methods to estimate composition of jet grout bodies [C]// *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, 1992: 194-205.
- [17] CROCE P, FLORA A, MODONI G. Jet grouting: technology, design and control [M]. CRC Press, 2014.
- [18] NAKASHIMA S, NAKANISHI W. All-around type reinforcing and consolidating method in the ground and apparatus thereof; U. S. Patent 5,401,121[P], 1995-3-28.
- [19] 李洪运. MJS 水平加固技术在顶管施工中的应用[J]. *建筑结构*, 2015, 45(Sup2): 90-92.
LI H Y. Application of horizontal reinforcement technology of metro jet system in pipejacking [J]. *Building Structure*, 2015, 45 (Sup2): 90-92. (in Chinese)
- [20] 叶辉. MJS 工法在外包井组合式围护施工中的应用[J]. *上海建设科技*, 2013(3): 15.
YE H. Application of MJS method in the construction of the deep shaft [J]. *Shanghai Construction Science & Technology*, 2013(3): 15. (in Chinese)
- [21] 王会锋, 姚文娟. MJS 工法在上海 12 号线盾构进出洞加固中的应用[J]. *江西建材*, 2016(6): 146-146.
WANG H F, YAO W J. Application of MJS method in the reinforcement for shield tunneling breakthrough of Shanghai metro line 12 [J]. *Jiangxi Building Materials*, 2016(6): 146-146. (in Chinese)
- [22] 梁利, 李恩璞, 王庆国, 等. MJS 工法在轻轨车站换乘通道中的工程实践[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 135-139.
LIANG L, LI E P, WANG Q G, et al. Practice of MJS method in light railway inter change passage construction in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 135-139. (in Chinese)
- [23] 徐宝康. MJS 工法在邻近地铁车站的深基坑中的工程实践[J]. *建筑施工*, 2015(7): 781-783.
XU B K. Engineering practice on MJS construction method for deep foundation pit close to metro station [J]. *Building Construction*, 2015 (7): 781-783. (in Chinese)
- [24] 韩会山. MJS 工法在管线保护中的应用[J]. *城市建筑*, 2015(14): 250-250.
HAN H S. Application of MJS method in pipeline protection [J]. *Urbanism and Architecture*, 2015(14): 250-250. (in Chinese)
- [25] 张志勇, 李淑海, 孙浩. MJS 工法及其在上海某地铁工程超深地基加固中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2012, 39(7): 41-45.
ZHANG Z Y, LI S H, SUN H. MJS engineering method

- and its application in super deep foundation reinforcement of a metro project in Shanghai [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(7): 41-45. (in Chinese)
- [26] CPR工法研究会. CPR工法技術資料[Z]. 2014. Engineering Research Association of CPR. CPR technical material [Z]. 2014. (in Japanese)
- [27] 小田惠之輔, 鍛治茂仁, 中島浩平, 等. 強制排泥装置を有する水平方向噴射攪はん工法に関する実験的研究 [C]//土木学会論文集, 1995, 528: 155-165. ODA K, KAJI S, NAKAJIMA K, et al. Experimental study on horizontal jet-mixing method using forced slime discharger [C]//Proceedings-Japan Society of Civil Engineers Dotoku gakkai, 1995: 155-166.
- [28] 伊東三夫, 高久節夫, 小田信幸. 河底下の複雑な近接施工をMJSで克服都下水道墨田区緑4丁目付近シーールド工事[J]. トンネルと地下, 1996, 27(5): 411-417. ITO M, TAKAKU S, ODA N. Success by MJS in complexed access shield work under river bed. Shield work for metropolitan sewerage at midori 4-chome, sumida-ku, Tokyo [J]. Tunnels and Underground, 1996, 27(5): 411-417.
- [29] HARA S, IGARASHI M. Tunnel Ground Improvement by MJS [J]. Geotechnical Engineering Bulletin, 1998, 7: 29-42.
- [30] 坪井忠弘, 中沢太, 近藤正巳. 幹線道路直下における高圧噴射工法による水平方向地盤改良 [C]//地盤工学研究発表会発表講演集, 1999, 34(2): 1705-1706. TSUBOI T, NAKAZAWA F, KONDOU M, et al. Soil improvement by horizontal high pressure jet grouting directly under the arterial road [C]//Proceedings of Japan National Conference on Geotechnical, 1999, 34(2): 1705-1706.
- [31] 杨磊. 上海紧邻地铁车站的既有地下空间盖挖加层施工技术 [C]//第四届中国国际隧道工程研讨会, 上海, 2009. YANG L. The construction technology for adding another lower floor of the existing underground space adjacent to metro station in Shanghai [C]//The fourth China International Symposium on Tunnel Engineering, Shanghai, 2009. (in Chinese)
- [32] 王元满, 乔华山, 王中兵. MJS工法在世纪汇广场深基坑修复加固中的应用 [C]//中国建筑学会工程勘察分会 2013 年学术大会, 2013. WANG Y M, QIAO H S, WANG Z B. Application of MJS method in repairing and reinforcing a deep pit of Century Plaza [C]//Academic Conference of Engineering Investigation Branch of Architectural Society of China, 2013. (in Chinese)
- [33] 黄德中. 地下连续墙修复方法: 102758458B [P]. 2014-10-1. HUANG D Z. Repairing method for underground diaphragm: 102758458B [P]. 2014-10-1. (in Chinese)
- [34] 汲亮. 用于地基加固的多孔管: 103174148B [P]. 2016-4-27. JI L. Injection rod for ground reinforcement: 103174148B [P]. 2016-4-27. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)