

# 国内外高压旋喷技术的发展现状与趋势

余暄平

(上海隧道工程股份有限公司,上海市 200082)

**摘 要:**自上世纪 70 年代高压喷射注浆问世以来,该技术得到了迅猛发展和广泛应用,随着中国地下空间开发高峰的到来,我国的高压旋喷技术也必将向着追求大深度、大直径、高可靠度方向发展。该文就当前高压旋喷新技术中的双高压旋喷、超级旋喷和交叉搅拌喷射技术进行扼要介绍,并就我国未来高压旋喷技术的发展方向阐明作者的观点。

**关键词:**双高压旋喷;超级旋喷;交叉喷射;高压泵;喷嘴

**中图分类号:**TU472.36 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0185-05

## 0 引言

高压喷射注浆是将高压水力喷射切割技术和化学注浆技术相结合用于地基加固的一种施工工艺<sup>[1][2]</sup>。其原理是利用钻机等设备,把安装在注浆管最底部的特殊喷嘴,置于土层预定的深度,以高压的水流(或水泥浆)或压缩空气流在地下切碎软弱土体后,再以高压注入水泥浆体与切碎的土体混合形成加固柱体。根据施工过程中喷管旋转与提升的方式不同可实现旋喷、摆喷和定向喷射,相应地可形成旋喷桩、成片的止水帷幕和挡土墙等地下结构。不同喷射方式的原理基本相同,本文重点讨论旋喷。旋喷施工的基本步骤见图 1,通过桩间搭接形成完整的加固区域。

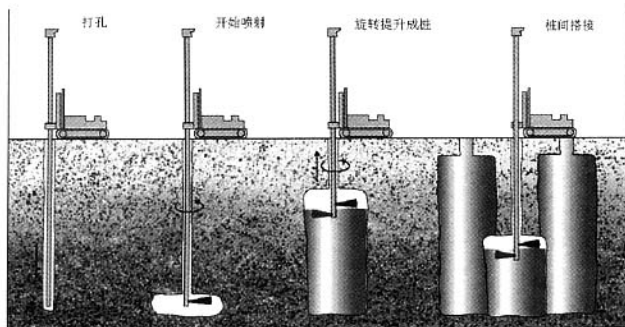


图 1 旋喷加固施工步骤

该工法于 1968 年由日本化学注浆协会开发而成,1983 年八寻晖夫对该成果进行了公开介绍。最初仅为单管法称 Chemical Churning Pile (CCP)工法,该工法直接以单管在转动和提升过程中注入高压水泥浆,边切割土体边混合形成加固柱体。该工法由于切割土体的能量小,形成的柱体直径在 0.6~1.0 m 之间。该工法研制成功后首先被应用于地基加固和防水帷幕施工,逐渐形成一种新的地基加固技术。上世纪 70 年代初期,专

收稿日期:2006-05-29

作者简介:余暄平(1966-),男,浙江诸暨人,高级工程师,副总经理,从事隧道工程设计施工工作。

家们在高压浆液喷射流的外部增加环绕压缩空气喷射流,形成复合式高压喷射流,使切割土体的能量增大,加固体的直径也相应增大,这就是二重管旋喷工法,日本称 Jambo Special Pile (JSP)。该工法产生的加固体桩径较 CCP 大,约为 1.0~1.5 m。上世纪 80 年代初为了提高加固效率,日本化学注浆协会又开发出了 Column Jet Pile (CJP)即三重管法。该法是在二重管工法的基础上,外套高压水,使破坏土体的能量更高,产生的加固体直径更大,可达 1.5 m,深度达 30 m。这也是我国目前的旋喷技术水平。

进入 20 世纪末,为了适应大深度地下空间开发的需要,提高施工效率,降低施工成本,国外专家学者在普通三重管的基础上又开发出一系列的高压旋喷新技术,包括双高压旋喷、超级旋喷、交叉喷射与搅拌以及直接对障碍物钻孔喷射的 QSJ 工法等。这些技术具有加固桩径大(最大桩径达到 5 m),施工效率高,加固深度大(最大深度达到 30 m 左右),加固体均匀质量可靠(用于坑底封水)等共同特点。纵观整个旋喷技术的发展历史,日本既是这一技术的开创者,也一直是这一技术的领跑者,与此同时韩国、欧洲以及北美等一些发达国家在这一领域也实现了跨越式发展,相继开发出适于本国国情的旋喷新技术。今天的旋喷加固工法已发展成为一个繁荣的大家族,其发展谱系图见图 2。下面就当前国际上具有代表性的高压旋喷新技术进行扼要介绍。

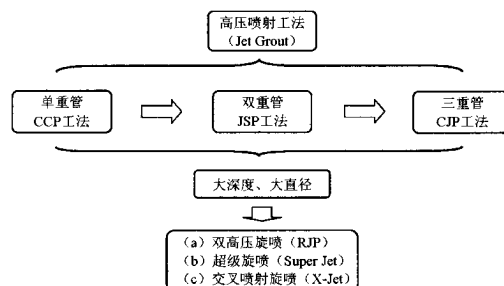


图 2 高压旋喷技术发展谱系图

## 1 双高压旋喷技术

双高压旋喷工法 Rodin Jet Pile(RJP)是将超高压水和压缩空气喷射流,以及超高压水泥浆和压缩空气喷射流通过安装在多重管前端的喷射器分两个阶段对土体进行切割搅拌,位于上部的高压水刀对土体进行先行导向切割破碎,位于下部的高压浆刀对土体进行二次扩大切割破碎,同时水泥浆与土体搅拌混合形成加固体的一种地基加固方法。RJP 工法的概念图见图 3。与普通三重管旋喷不同的是 RJP 工法中固化材料喷射流也是高压介质,对土体形成二次切割与搅拌,因此 RJP 工法所获得的桩径较普通三重管要大,一般桩径在 2.0 m 以上。旋喷器的示意图见图 4。

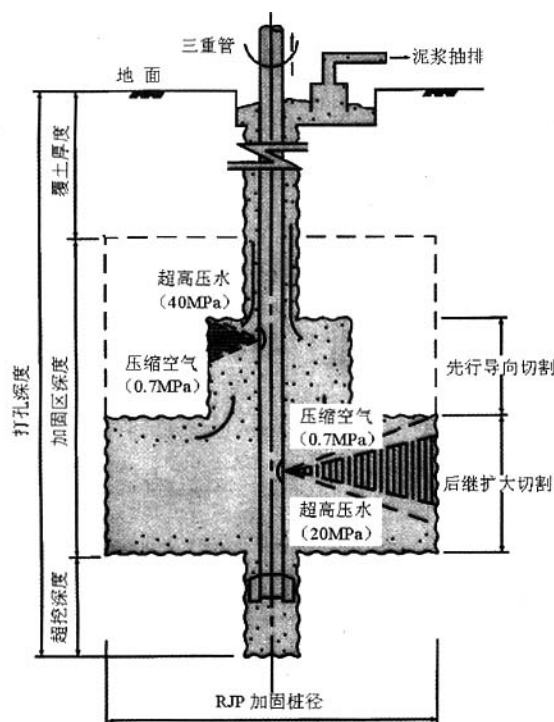


图 3 双高压旋喷概念图

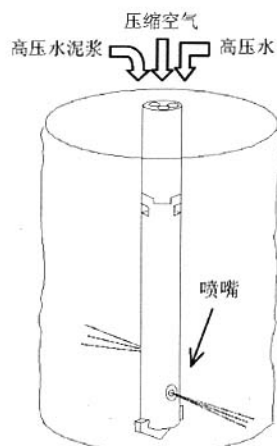


图 4 旋喷器示意图

该工法首先由日本的 Rodin 公司开发出来,通过系统的室内试验与现场试验得到了该工法的标准工艺。日本推荐的不同土质,加固深度在 30 m 范围内的标准有效桩径,见表 1。

表 1 砂性土、粘性土的标准设计有效桩径 (单位:m)

土质条件	设计 N 值					
砂性土	0<N≤15	15<N≤30	30<N≤50	50<N≤75	75<N≤100	
粘性土	0<N≤1	1<N≤3	3<N≤5	—	—	
提升	3.3	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0
速度	2.5	3.0	2.8	2.6	2.3	2.1
(cm/min)	2.0	3.1	2.9	2.7	—	—
	1.7	3.2	3.0	2.8	—	—

针对表 1 有几点需要说明:(1)粘性土仅适用于粘结力  $C \leq 0.05$  MPa 的情况;(2)N 值为被加固土体的最大 N 值;(3)表中的桩径为加固深度 30 m 以内的有效加固体直径,加固深度大于 30 m 的有效加固直径为标准设计有效直径减去 30 cm;(4)砂砾土的有效直径在 N 值小于等于 50 时,可按砂性土的 90% 计;当 N 值大于 50 时,必须进一步慎重考虑,可通过现场试验确定;(5)粘性土 N 值小于等于 5 而粘结力大于 0.09 MPa 时,可通过试验施工来确定。从表 1 中可以看出土质条件和 N 值的变化对成桩直径均有显著的影响,但总体上来说加固深度 30 m 范围内桩径可达到 2.0~3.0 m。在该工法的研究过程中曾进行了大量的现场试验,现场试验桩暴露开挖见图 5。

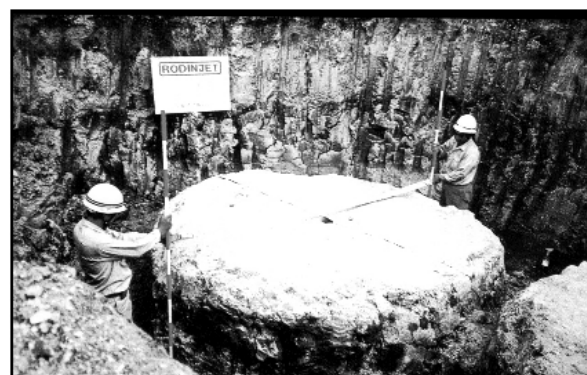
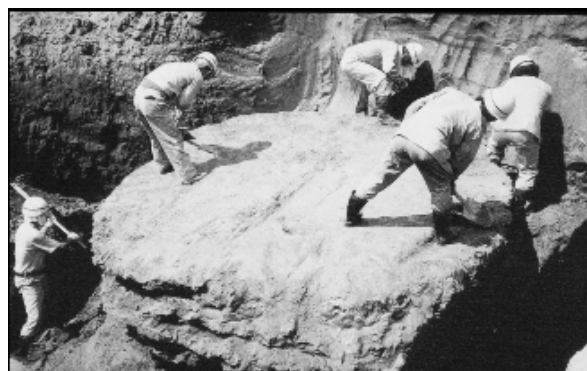


图 5 RJP 加固体桩径暴露开挖实物(日本)



这一工法于 1996 年由我国的基础工程专家查振衡教授引入中国,并应用于长江三峡工程引航道的隔流堤加固施工中,但遗憾的是针对该工法的研究工作并未深入开展,该工法也没有得到大范围的推广与应用。在 2003 年上海轨道交通 4 号线抢险工程中,通过比选论证确定采用原位修复方案,工程中多处需要进行旋喷加固,设计加固桩径为 1.8 m,最大加固深度为 50 m,加之需要加固的范围内障碍物异常复杂,需要对常规的三重管高压旋喷技术进行改进。为了给修复工程提供技术支持并为将来上海软土地区大深度地下空间开发提供技术储备,由上海隧道工程股份有限公司牵头成立专门的科研项目“大深度、大直径旋喷设备及工艺研究”,课题的目标是达到加固深度 50 m,加固桩径 2.0 m,这一目标已经达到目前的国际先进水平。课题组选择了 RJP 工艺,并对设备选型、施工参数匹配以及喷嘴的结构形式等方面进行了专题研究,取得了初步成果。图 6 分别为不同施工现场对试验桩进行暴露开挖的照片(开挖深度为 17 m 左右,最大桩径达到 3.0 m),结果表明桩径均达到 2.0 m 以上。该工法已在上海轨道交通 4 号线修复工程中得到应用,目前累计完成坑内裙边加固桩 827 根,最大加固深度 46 m,坑外接缝止水旋喷桩 223 根,最大加固深度 50 m,桩径均为 1.8 m。这一工艺代表我国当前旋喷工艺的最高水平。

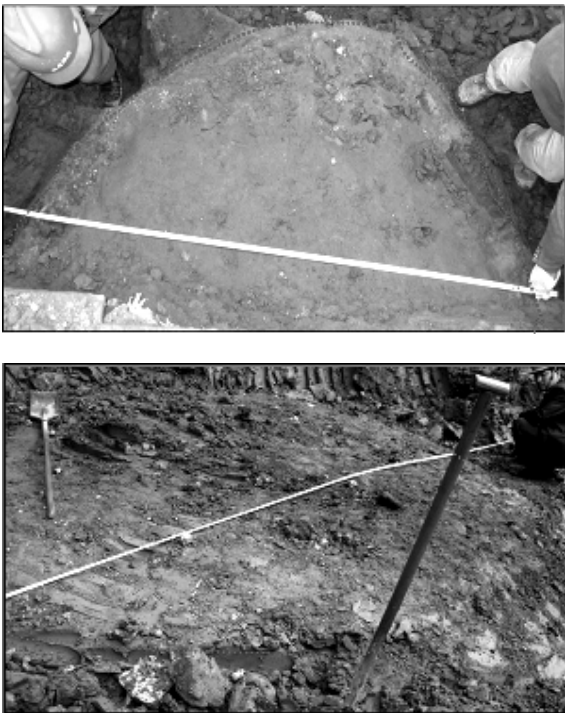


图 6 RJP 旋喷试验桩暴露开挖实物(上海)

2 超级旋喷技术

超级旋喷工法(Super jet)是一种可在地下形成直径达 5 m 的巨大旋喷桩的高速地基加固工法。是在普通二重管法的基础上,使高压水泥浆双向喷射,压力为 30 MPa,流量为 2 × 300 L/min;压缩空气的压力为 0.7 MPa,流量 78 m³/min。在现场施工中,该工法在粉质粘土中形成了直径达 9 m 的超大型旋喷桩。

超级旋喷桩具有以下特点或优势:(1)形成加固体的桩径较大:只要在土体中打设直径 20 cm 左右的导孔即可在地下形成直径 5 m 的巨大的旋喷桩;(2)可一定程度上削减泥浆排放量,从而节省费用,以最小的水泥浆液进行高效率的施工,因此泥浆排放量较以往的工法相比可大幅度减小;(3)施工速度快,质量高:强大的喷射流通过背向喷嘴水平喷射,土体切削和充填同时进行,故和以往的工法相比其速度高达 10 多倍,而且质量也得到了提高;(4)经济性好。

这一工法在日本、韩国和欧洲均有深入系统的研究。有文献对超级旋喷的室内试验与现场试验进行了详细介绍,内容包括喷嘴断面形式优化的室内试验研究,以及施工参数现场匹配试验研究。日本根据研究成果以及对现场实践情况的总结给出了不同土质条件下超级旋喷的设计有效桩径,见表 2。

表 2 不同土质条件下超级旋喷设计有效桩径(单位:m)				
名称	项目	施工条件和标准有效设计直径		
N 值	砂质土	N ≤ 50	50 < N ≤ 100	N < 100
	粘性土	N ≤ 3	3 < N ≤ 5	5 < N ≤ 7
	砂砾土	另行研究		
深度	0 ~ 30m	5.0	4.5	4.0
	30m ~	4.5	4.0	3.5

对砂砾土质而言在预研阶段的有效加固直径原则上对 N ≤ 50 的砂性土的情况减小 10%。对 N > 100 的砂性土作为未固结土处理。N > 7 的粘性土作为特殊施工规格需根据施工目的另行研究,同样加固深度限于 30 m 以内。日本现场试验桩见图



(a)粘性土中浅层开挖(桩径 5.0 m 左右)



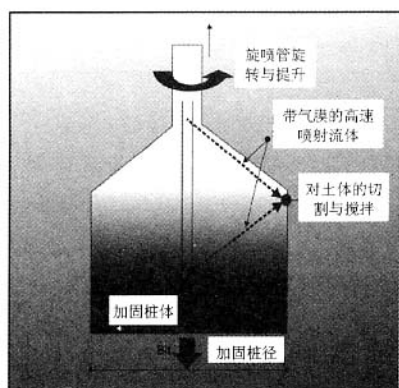
(b) 砂性土中浅层开挖(桩径近 3.0 m 左右)

图 7 超级旋喷试验桩暴露开挖实物(日本)

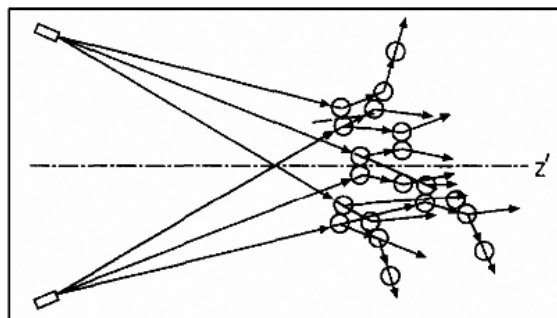
7。超级旋喷工艺在国内工程上亦有应用,但施工企业是国外承包商。我国黄河小浪底水利枢纽工程上游围堰防渗墙左岸河床段用高压旋喷灌浆法施工,旋喷工艺为超级旋喷,结构形式为单排桩成墙,深度在 30~50.3 m,旋喷防渗墙体强度要求为 28d 无侧限抗压强度为 1.5~2.2 MPa,抗渗系数  $1 \times 10^{-6}$  cm/s,单个旋喷桩直径均大于 1.20 m,钻孔偏斜在 0.5% 以内,桩底要求深入强风化岩 50 cm。工程由意大利的 SGF 公司施工,成孔采用 C6 和 C8 两种履带自行冲击回转式钻机。操作自动化程度高,具有跟套管钻进功能,对地层适应性强,并能较好地控制孔斜率,旋喷钻机采用 SIRI-O-2C 型高压旋喷机,为履带自行式,具有一定的钻进功能,机架高达 46 m,输浆泵为 HT-400 和 HT-450,最大输出浆压可达 100 MPa,施工时的压力为 50 MPa,输出流量可达 453 L/min。

### 3 交叉喷射技术

为了获得更加可靠的桩径和加固体,在现有高压喷射技术的基础上,北美、日本以及韩国等国家先后又开发出交叉喷射搅拌技术,即上下喷嘴互成一定角度确保交叉的位置达到需要加固范围的边缘,这样保证在加固范围内经过两次切割,可以确保搅拌充分。其中韩国开发出的 Twin-jet 工法就是这一原理。交叉喷射施工的概念及喷射切削图见图 8。



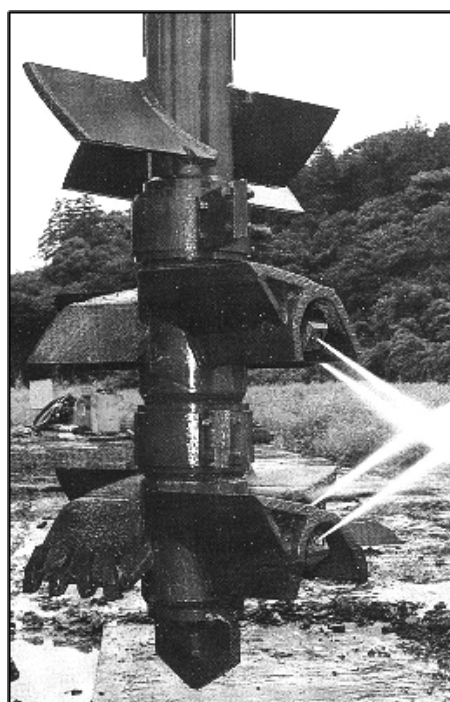
(a) 交叉喷射



(b) 喷射流切割土体示意图

图 8 交叉喷射施工概念图

最近在日本又开发出机械搅拌与喷射搅拌相结合的高压喷射工艺,喷射的设备与效果实物见图 9。施工的工艺参数见表 3。



(a) 机械设备



(b) 成桩实物

图 9 机械与交叉喷射搅拌相结合(日本)



表 3 机械搅拌与交叉喷射施工参数

搅拌区	喷射压力 (MPa)	排量 (L/min)	提升速度 (cm/min)
机械搅拌区	6	200~300	500~100
交叉喷射搅拌区	30	600	

4 结语

自 20 世纪 70 年代高压旋喷工艺问世以来,该工艺得到了迅猛发展和广泛应用,经历了从单重管到普通三重管的发展历程后,随着地下空间开发向着大深度方向发展,高压旋喷技术也正向追求大深度、大桩径方向发展。通过对该领域的文献资料进行调查和总结可以得出如下结论:

(1)日本作为该技术的发源地,直到今天仍然是这一技术的领跑者,相关的行业协会及企业一直对这一领域进行系统研究,研究内容包括超高压大排量泵,喷嘴的结构形式以及不同深度不同土质条件下的参数匹配等等。同时韩国、欧洲和北美一些发达国家在这一领域也实现了跨越式发展,济身于世界先进水平;

(2)代表当前国际先进水平的高压旋喷技术

主要包括:双高压旋喷、超级旋喷等,这些工法具有桩径大、效率高、加固深度大、施工质量可靠等特点;

(3)作为高压旋喷核心设备的高压泵,目前水平是最高压力 100 MPa,最大输出流量 500~600 L/min,意大利、日本和韩国的专用高压旋喷泵已达到或接近这一水平;

(4)我国旋喷技术的主流代表为普通三重管,加固深度在 40 m 以内,加固桩径为 1.5 m。新开发的双高压旋喷工艺加固深度为 50 m,桩径达到 2 m,但这一技术的稳定性与可靠性有待在将来的工程实践中接受检验;

(5)我国未来的旋喷技术发展在追求大深度、大直径的同时,也应加强施工控制技术(如施工过程中各类参数的实时采集与显示)研究,以确保隐蔽工程的质量。

参考文献

[1]刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.  
[2]牛虹.高压旋喷法的施工特性及设备[J].工业建筑,2002,32(10):52-59.

(上接 184 页)固土桩(目前主要为水泥深层搅拌桩)或碎石料桩处理。对软基地区等级较高的新老路拼接地段的地基处理方法,一般采用高压喷射注浆法,形成 17~20 cm 厚的沉降隔墙,进行分离式拼接段地基处理,以避免了由于修建新路而导致老路沉降的影响。常用的具体方法如下。

(1)预压排水法:此法主要是形成排水系统和加压系统。其中排水系统分为水平排水和竖向排水系统,水平排水系统是指路堤下设置的砂、碎石垫层或砂沟或复合土工布形成地表水平排水系统。竖向排水系统目前主要采用塑料排水板(一般间距 1.5 m~2.0 m)和砂井(最大间距 4 m)两种形式。加压系统采用路堤填土进行堆载预压的方法,可分为等载预压和超载预压。对一般路段采用等载预压,桥头部位及重点地段可采用超载预压。

(2)深层搅拌桩(粉体或浆喷两种):能减少总沉降量 20~49%;这主要与桩长、面积置换率等有关。主要通过以下方面来控制沉降:a)桩身范围内的沉降减少。一般情况下,最好打穿软土层;b)处理后的路基能抵抗侧向变形,有利于减小桥台桩的侧向压力;c)能适应快速加荷的施工条件。

(3)其它形式的土桩复合地基的效果类似于深层搅拌桩,目前使用较多的是水泥深层搅拌桩。

8 结语

地基变形分析是一门比较复杂的研究课题,在日常的工程处理中,主要是从施工周期、技术可行、投资经济以及施工、检测方便的角度去限制和利用地基变形。