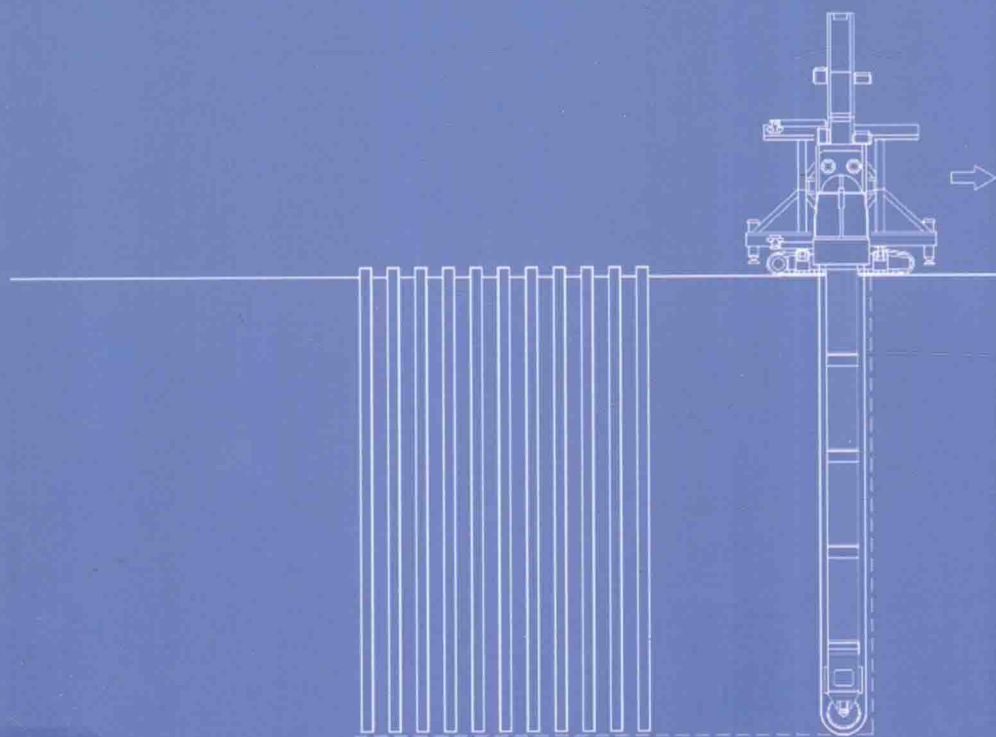


超深等厚度水泥土搅拌墙技术与工程应用实例

Technology and Practice of Uniformly Thick Cement Soil Mixing Wall

王卫东 著



中国建筑工业出版社

超深等厚度水泥土搅拌墙技术 与工程应用实例

王卫东 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

超深等厚度水泥土搅拌墙技术与工程应用实例/王卫东著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-112-20167-9

I. ①超… II. ①王… III. ①水泥搅拌桩-研究 IV. ①TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308610 号

本书以大量翔实的实际工程为背景, 详细介绍了等厚度水泥土搅拌墙作为基坑超深隔水帷幕、内插型钢作为围护结构等形式的设计计算方法、施工工艺、施工与控制以及墙体强度和抗渗效果, 可为类似工程提供参考。全书共分为 5 章, 包括绪论、等厚度水泥土搅拌墙承载特性与设计方法、TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙施工与环境影响控制、等厚度水泥土搅拌墙的强度与抗渗性能、工程应用实例。

本书可供从事地下工程、岩土工程技术人员和科研人员学习参考, 也作为高等院校相关专业师生参考用书。

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 张 颖

超深等厚度水泥土搅拌墙技术与工程应用实例

王卫东 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 287 千字

2017 年 3 月第一版 2017 年 3 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-20167-9

(29653)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



前 言

随着沿江沿海经济发达地区城市土地资源日益紧缺,城市建设进入全新纵向立体化开发阶段,现阶段浅层地下空间的开发日趋饱和,深大地下空间开发成为土体资源利用的必然趋势;与此同时中心城区建筑物密集、管线繁多、地铁隧道纵横交错,环境条件日趋复杂敏感,深大地下空间开发难度大、风险高。以上海、天津、武汉、南京为代表的沿江沿海地区含水层深厚、水量丰富、水头压力高、渗透性强,对地下工程安全影响显著。长时间大面积开敞抽降地下水将引起周边地面大范围沉降,影响周边建(构)筑物的安全,深大地下空间开发面临严峻的深层地下水控制问题。城市地下空间开发中对深层地下水通常采取隔断控制措施,常规的水泥土搅拌桩仅适用于软土层,隔水深度有限;而混凝土地下连续墙作为隔水帷幕,造价高,且墙幅接头易渗漏。因此对安全高效、节能降耗的深层地下水控制新技术研发有着迫切的工程需求。

超深等厚度水泥土搅拌墙技术(TRD工法)的研发,为深大地下空间开发中深层地下水控制提供了一种安全可靠且节能降耗的技术手段,成为超深隔水帷幕发展的新方向。该技术通过将链锯型刀具插入地基至设计深度后,在全深度范围内对成层地基土整体上下回转切割喷浆搅拌,并持续横向推进,构筑成上下强度均一、连续无缝的高品质等厚度水泥土搅拌墙。该技术自2009年引进国内后,经过多年的吸收、创新和实践,形成了适应国内多种复杂地质条件和作业工况的国产化施工装备和关键技术,目前已在上海、天津、武汉、南京、杭州、南昌等十余个地区近百项工程中应用,水泥土墙体最大实施深度达到65m,适用软土、硬土、卵砾石和软岩等多种地层。等厚度水泥土搅拌墙技术也形成了行业标准《渠式切割水泥土搅拌墙技术规程》JGJ/T 303—2013,相关的关键设计方法和施工技术也纳入了多项国家、行业和地方标准,为该技术在国内的推广应用提供了很好的指南。

国内地质条件复杂,等厚度水泥土搅拌墙的应用形式多样,为了更全面系统地反映该技术在全国各地区的应用情况和实施效果,作者基于超深等厚度水泥土搅拌墙技术在上海、天津、武汉、南京等地区大量工程中的设计实践和在工程实践中提炼出的若干科研课题的研究成果,在总结大量成功案例的基础上形成本书。全书主要内容包括等厚度水泥土搅拌墙承载特性与设计方法、施工与环境影响控制、强度与抗渗性能及工程应用实例四部分。在承载特性与设计方法方面,结合室内试验和数值模拟,系统地分析了等厚度型钢水泥土搅拌墙的承载变形特性、型钢和水泥土的相互作用模式及水泥土抗剪承载特性等,从而提出了等厚度水泥土搅拌墙内插型钢作为隔水挡土复合围护结构以及作为超深隔水帷幕的设计计算方法及构造措施。在施工与环境影响控制方面,基于等厚度水泥土搅拌墙技术在国内多种地质条件和城市敏感环境条件下的成功实践,系统地阐述了等厚度水泥土搅拌墙的施工工艺、施工与控制以及超深墙体施工环境影响控制。在强度与抗渗性能方面,通过多种复杂地层条件下等厚度水泥土搅拌墙的室内试验和现场检测成果的统计分析,详细

阐述了水泥土墙体的强度、抗渗性能和实施效果。在工程实例方面，详细介绍了上海、天津、南京和南昌地区多个地质条件、环境条件或等厚度水泥土搅拌墙应用形式各具特点的基坑工程设计和实施情况。

本书的编写得到相关人士的大力帮助，常林越博士参与了部分资料的整理和全书的校对工作，邸国恩、谭轲、黄炳德、翁其平、陈永才、胡耘、沈健、谈永卫、李青参与了部分设计资料和计算结果的整理工作。本书中相关成果得到国家“十二五”科技支撑项目(2012BAJ01B02)和上海市多项科技支撑计划的资助，并得到上海市基础工程集团有限公司、上海工程机械厂有限公司、上海广大基础工程有限公司、上海智平基础工程有限公司、上海市机械施工集团有限公司、上海远方基础工程有限公司和上海建工七建集团有限公司等单位工程技术人员的帮助，在此表示衷心的感谢！

随着地下空间往深层发展，超深等厚度水泥土搅拌墙技术的应用将越来越广泛，并可推广至水利工程、地基加固工程、环境工程等领域。希望本书能给广大工程技术人员提供参考，能对我国等厚度水泥土搅拌墙技术的推广与发展起到推动作用。由于作者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，敬请广大读者不吝指正。

王卫东

2016年12月13日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 城市深大地下空间发展	1
1.1.1 地下空间开发趋势	1
1.1.2 深大地下空间开发中的地下水控制	3
1.2 等厚度水泥土搅拌墙技术简介	4
1.3 施工装备的研发与发展	7
1.4 国内外工程应用状况	12
第2章 等厚度水泥土搅拌墙承载特性与设计方法	22
2.1 概述	22
2.2 等厚度型钢水泥土搅拌墙承载变形特性	22
2.2.1 计算原理与模型	23
2.2.2 型钢-水泥土承载变形特性	26
2.3 等厚度水泥土搅拌墙设计计算	34
2.3.1 型钢水泥土搅拌墙设计计算	34
2.3.2 超深隔水帷幕设计	38
2.4 试成墙试验	40
2.4.1 试成墙试验的目的和要求	40
2.4.2 试成墙实例	41
2.5 设计实例	45
第3章 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙施工与环境影响控制	48
3.1 概述	48
3.2 施工工艺	48
3.2.1 施工流程	48
3.2.2 施工准备	49
3.2.3 施工工艺	51
3.3 施工与控制	54
3.3.1 墙体垂直度和切割行进控制	54
3.3.2 切割箱刀具选用和刀具优化组合	56
3.3.3 浆液配制及工艺参数控制	58
3.3.4 成墙工序控制	60

3.3.5 喷浆成墙控制	61
3.3.6 嵌岩切割行进控制	62
3.3.7 先后施工墙体及转角墙体搭接控制	63
3.3.8 切割箱起拔控制	64
3.3.9 型钢插入与回收控制	65
3.3.10 墙体施工全过程质量控制	67
3.4 墙体施工环境影响控制	70
3.4.1 墙体施工对周边环境实测	70
3.4.2 墙体施工影响控制措施	79
第4章 等厚度水泥土搅拌墙的强度与抗渗性能	81
4.1 概述	81
4.2 上海地区水泥土搅拌墙的强度与抗渗性能	82
4.3 天津、武汉、南京地区水泥土搅拌墙的强度与抗渗性能	97
4.4 南昌、淮安、苏州地区水泥土搅拌墙的强度与抗渗性能	108
第5章 工程应用实例	118
5.1 上海国际金融中心工程	118
5.1.1 工程概况	118
5.1.2 基坑支护设计概况	120
5.1.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	122
5.1.4 试成墙试验	125
5.1.5 实施效果	128
5.2 上海白玉兰广场工程	133
5.2.1 工程概况	133
5.2.2 基坑支护设计概况	136
5.2.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	140
5.2.4 试成墙试验	140
5.2.5 实施效果	140
5.3 江苏南京河西生态公园工程	143
5.3.1 工程概况	143
5.3.2 基坑支护设计概况	146
5.3.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	147
5.3.4 实施效果	148
5.4 天津中钢响螺湾工程	151
5.4.1 工程概况	151
5.4.2 基坑支护设计概况	154
5.4.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	155
5.4.4 试成墙试验	155

5.4.5 实施效果	157
5.5 上海奉贤中小企业总部大厦工程	158
5.5.1 工程概况	158
5.5.2 基坑支护设计概况	159
5.5.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	161
5.5.4 试成墙试验	162
5.5.5 实施效果	165
5.6 江西南昌绿地中央广场工程	166
5.6.1 工程概况	166
5.6.2 基坑支护设计概况	168
5.6.3 等厚度水泥土搅拌墙设计	172
5.6.4 试成墙试验	172
5.6.5 实施效果	173
参考文献	175

第1章 绪 论

1.1 城市深大地下空间发展

1.1.1 地下空间开发趋势

地下空间的开发和利用已经成为全球性发展趋势，是缓解城市人口、资源、环境三大危机和城市可持续发展的主要途径以及衡量城市现代化的重要标志。随着工业化、城市化进程的稳步推进，我国城市地下空间开发利用进入快速增长阶段。“十二五”时期，我国城市地下空间建设量年均增速达到20%以上，据不完全统计，地下空间与同期地面建筑竣工面积的比例从约10%增长到15%。尤其在人口和经济活动高度集聚的大城市，在轨道交通和地上地下综合建设带动下，城市地下空间开发规模增长迅速，需求动力充足。近年来，国家和地方政府提出了一系列综合开发利用城市地下空间资源的重要举措，如“推行城市地下综合管廊”、“推进城市轨道交通建设”、“大力发展海绵城市”等，将进一步促进地下空间的开发利用。

目前，我国沿江沿海地区城市建设进入地上和地下同步发展的全新纵向立体化开发阶段，地下空间的开发和利用在提高土地利用率、缓解中心城区建筑高密度、增强防灾减灾能力、保持城市历史文化景观、缓解市区交通拥堵、扩充基础设施容量、改善城市生态环境等方面发挥了积极的作用。地下空间的开发由大型建筑物向地下的自然延伸发展到复杂的地下空间综合体，再到地下城市的建设。大规模地下空间开发（如高层建筑地下室、地下商场、地下停车场、大型地铁车站、地下变电站、大型排水及污水处理系统）产生大量的深开挖工程，随着地下空间向大规模、大深度方向发展，同时周边的环境条件越来越复杂，给地下空间开发带来更高的难度和风险。

(1) 地下空间规模越来越大。主楼与裙楼地下空间相连、大面积地下车库、地下商业与休闲娱乐一体化开发的模式频频出现，地下空间开发规模越来越大，占地面积在1~5万 m^2 的工程越来越多，有的甚至超过10万 m^2 。如天津117大厦项目地下空间占地面积9.6万 m^2 、天津于家堡项目地下空间占地总面积13.6万 m^2 ；上海西岸传媒港地下空间项目（“九宫格”项目）占地总面积15.2万 m^2 ；杭州国际金融会展中心项目地下空间占地15.7万 m^2 ；上海虹桥交通枢纽工程地下空间占地面积更是高达35万 m^2 ，成为国内规模最大的枢纽型地下空间综合体，方便地实现了航空、高铁、公交、地铁等交通换乘。

(2) 地下空间开挖深度越来越深。随着城市建设用地的日趋紧张和土地价格的急剧攀升，高层建筑地下空间结构层数也不断增加，由先前的地下2层，发展到地下3~4层，部分达到地下5层，甚至6层，地下空间开挖的深度也由原来的十几米迅速增大到二十米

以上，甚至达到三十几米的量级。如天津 117 大厦，开挖深度达到 26m；武汉绿地中心大厦，裙楼开挖深度 23.1m，塔楼开挖深度 30.4m；上海中心大厦，裙楼开挖深度 26.7m，塔楼开挖深度 31.2m；上海世博 500kV 地下变电站，开挖深度 34.0m；上海轨道交通 4 号线董家渡修复工程，开挖深度达到 41.2m；上海正在筹建的深层排水调蓄管道系统工程工作井开挖深度更是达到 60m。

(3) 周边环境日趋复杂。上海、广州、天津、武汉、南京等沿江沿海城市，城区建筑物密集、管线繁多、地铁车站密布、地铁区间隧道纵横交错，地下空间开发面临的环境条件日趋复杂敏感。项目场地周边常常紧邻（或穿越）区间隧道、地铁车站、浅基础建筑、桩基础建筑、防汛墙和市政管线等复杂敏感的环境条件，如图 1-1 所示。实际工程中，往往面临上述多种环境条件并存，深大地下空间开发面临复杂敏感环境的保护问题。

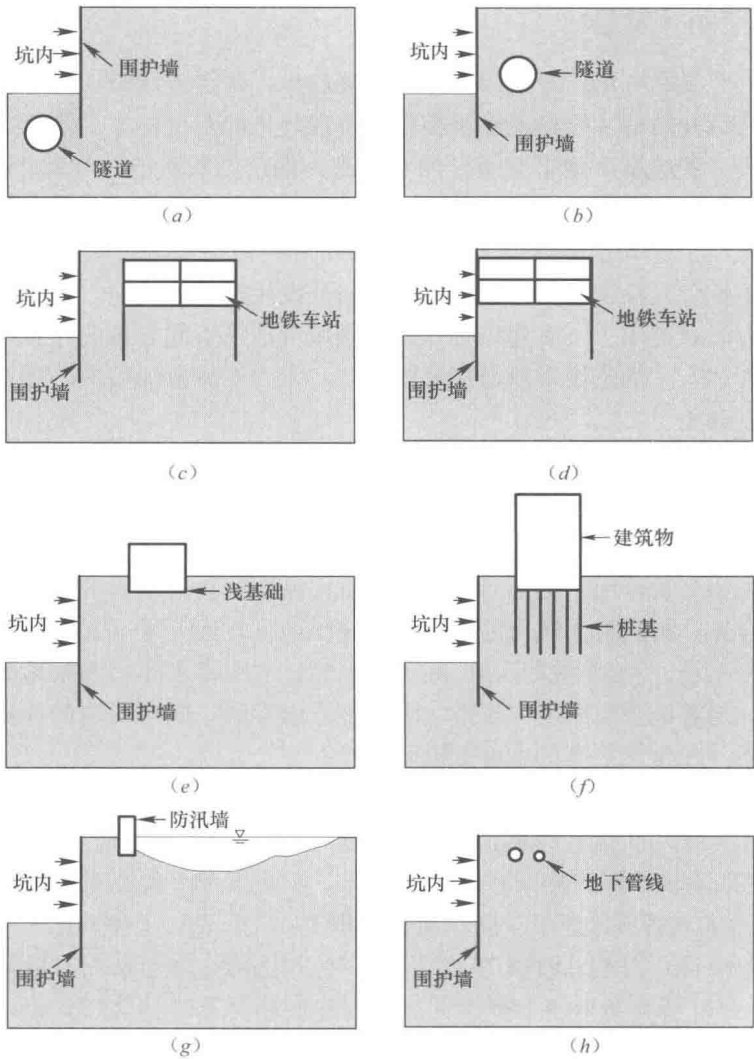


图 1-1 城市地下空间开发面临复杂敏感环境示意图

(a) 开挖面以下存在隧道；(b) 邻近隧道；(c) 邻近地铁车站；(d) 紧邻地铁车站；(e) 邻近浅基础建筑物；
(f) 邻近桩基础建筑物；(g) 邻近防汛墙；(h) 邻近市政管线

沿江沿海地区含水层深厚、水量丰富、水头压力高、渗透性强,地下空间开挖过程中需采取降水措施,长时间开挖和开敞降水引致的地层移动会使得周边的建(构)筑物发生附加变形,当附加变形过大会引起结构的开裂和破坏,影响周边建(构)筑物的正常使用。随着地下空间往深层发展,面临严峻的深层地下水控制问题,地下空间建设的难度和风险越来越高,由深层地下水降水引起的安全和环境保护问题变得日益突出,对深层地下水控制技术的研发有着迫切的工程需求。

1.1.2 深大地下空间开发中的地下水控制

地下空间开发产生大量的深基坑工程,沿江沿海地区地下水位高、含水层深厚、水量丰富,为增加地下空间开挖过程中基坑底部和周边围护侧壁的稳定性的,防止流砂和坑底突涌,便于施工,开挖过程中不可避免地涉及地下水的处理问题。统计资料表明,沿江沿海城市中约有70%的工程事故与地下水控制措施不当有关,因此地下空间开发过程对地下水的合理控制是确保关键性因素之一。通常地下水包含上层滞水、潜水及承压水三种不同类型。对于不同的开挖深度,涉及的地下水类型也不相同,需针对性地进行地下水的处理。对于开挖深度较浅(挖深一般小于10m)的地下空间工程,一般仅涉及上层滞水和潜水,为防止浅层粉土、粉砂层发生管涌,通常在基坑周边设置隔水帷幕(一般采用水泥土搅拌桩),坑内通过轻型井点或降水井进行疏干降水。而对于挖深超过10m的地下空间工程,除了上层滞水和潜水,往往还涉及承压水,基坑周边隔水帷幕需插入基底以下足够的深度,对坑内潜水采用深井进行疏干降水,当坑底不满足抗承压水稳定性要求时,同时设置深井进行按需减压降水。

近年来,上海、武汉、南京等地区浅层地下空间开发已经具有相当的规模,浅层地下空间的利用也日趋饱和。深层地下空间开发已成为沿江沿海地区地下空间资源开发利用的必然趋势,深层地下空间的开发必然会遇到复杂的深层地下水处理问题。以上海地区为例,与地下空间开发利用紧密相关的承压含水层包括第⑤₂层砂质粉土微承压含水层、第⑦层粉细砂层和第⑨层中粗砂层承压含水层,其中第⑦层为上海地区的第一承压含水层,埋深约25~35m,局部地区埋深小于20m或超过40m;第⑨层为第二承压含水层,埋深约60~70m。深层地下水水量大、渗透性强、水头压力高,对地下空间的安全和环境影响非常显著,处理不慎将会引发重大安全事故和经济损失。2003年7月1日,上海轨道交通4号线(浦东南路至南浦大桥)区间隧道浦西联络通道发生渗水,随后出现大量流砂涌入,引起地面大幅沉降,导致地面建筑物倾斜和部分倒塌,造成严重的损失和恶劣的社会影响。

除上海外,武汉、天津、南京、南昌、苏州等沿江沿海地区深大地下空间开发也都面临严峻的承压水处理问题。如南京河西生态公园工程(全埋式地下结构),场地土层为南京河西地块典型地层,虽然挖深仅10.25m,但开挖范围内及基底以下为近40m厚的富含承压水的粉砂层,且场地地下水与长江存在密切的水力联系,场地北侧邻近地铁车站和区间隧道,地下水处理问题突出,如何采用合理的方式处理地下水是确保地下空间开发及周边环境安全的关键;武汉长江航运中心大厦工程,地下空间占地面积3.8万m²,普遍挖深约19.6~22.3m,局部最大挖深约28.9m,距离长江堤防仅60m,场地承压含水层与长江存在密切的水力联系,场地周边邻近多幢保护建筑,地下水处理问题更为突出。

对于这类挖深较大的地下空间工程的承压水处理方法主要有两种,一种方法是通过在基坑内部设置降压井,根据开挖深度和降水设计计算要求按需降水,防止基坑底部管涌和隆起引发工程事故。但长时间大面积抽降承压水会引起基坑周边土体大面积沉降,而地下空间往往紧邻建筑、地铁隧道、市政管线等重要建(构)筑物,一旦发生大规模地表沉降,将影响周边环境安全,造成不良社会影响。另一种方法是通过增加基坑周边围护结构深度,形成超深隔水帷幕,隔断承压含水层,该方法也是城市地下空间开发中对深层承压水采用的最有效控制方法,通过超深隔水帷幕完全或部分隔断深层地下水,以减小抽降承压水对周边环境的影响。但是对于上海典型地层,承压含水层顶面埋深往往超过 30m,而当前常规三轴水泥土搅拌桩隔水帷幕施工技术仅能达到 25~30m 的施工深度,无法形成超深隔水帷幕有效阻隔深层地下水。目前上海地区也开展了超深三轴水泥土搅拌技术的应用研究,但该技术仍然采用垂直搅拌的工艺,在深厚密实含水砂层中施工工效和隔水效果都大幅降低。此外对南昌等地区的涉及承压水的地下空间工程,虽然隔水帷幕的深度要求不深,但场地地层复杂,隔水帷幕需穿过埋深较浅的卵砾石层、嵌入隔水性较好的软岩层,采用常规的三轴水泥土搅拌桩(一般适用于标贯击数不大于 30 的土层)也无法实施。因此工程中对于超深隔水帷幕一般采用混凝土地下连续墙,但其能耗造价高,墙幅接头位置易发生渗漏,通常需要在墙幅接头位置增设封堵体,也进一步增加了工程造价。如浦东东方路世纪大道某工程地下空间开挖到基底时地下连续墙发生深层地下水渗漏,引起邻近地铁隧道的大幅变形,最后基坑内注水并对围护结构重新封堵后再行开挖,造成了巨大的经济损失。

为解决深大地下空间开发中深层地下水控制问题,亟须研发一种深度大、抗渗性能可靠、造价经济的隔水帷幕新技术。等厚度水泥土搅拌墙技术应运而生,成为超深隔水帷幕发展的新方向。该技术通过水泥浆液和原位土体混合搅拌构筑成等厚度连续的水泥土搅拌墙作为隔水帷幕,相比常规三轴水泥土搅拌桩隔水帷幕,水泥土墙体更均匀,深度提高一倍(达到 60m),强度提高一倍以上(达到 1~3MPa),工效提高逾 50%,地层适应更广;相比混凝土地下连续墙隔水帷幕,工效提高逾 50%,能耗显著降低,造价降低逾 50%,是节能降耗、可持续发展的绿色新技术。

1.2 等厚度水泥土搅拌墙技术简介

等厚度水泥土搅拌墙技术是近些年为满足深大地下空间开发深层地下水控制以及复杂地层地下水控制需求而发展起来的安全可靠且节能降耗的新技术。根据搅拌成墙施工工艺不同,等厚度水泥土搅拌墙技术包括 CSM 工法(Cutter Soil Mixing Method)和 TRD 工法(Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall Method)两种,本书中介绍的等厚度水泥土搅拌墙技术均指 TRD 工法。TRD 工法的原理是通过将链锯型刀具插入地基至设计深度后如图 1-2(a)所示,在全深度范围内对成层地基土整体上下回转切割喷浆搅拌,并持续横向推进,如图 1-2(b)所示,构筑成上下强度均一的等厚度连续水泥土搅拌墙,如图 1-2(c)所示。从施工工艺角度,TRD 工法构建的水泥土墙体连续无搭接,整个墙深范围水泥土均匀质量高,抗渗性能好,图 1-3 为 TRD 工法构建的水泥土连续墙实景照片。

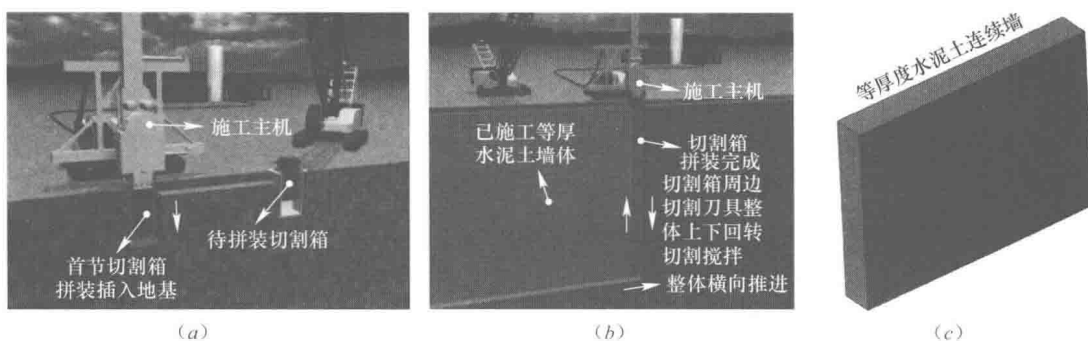


图 1-2 TRD 工法成墙工艺示意图

(a) 切割刀具插入地基; (b) 搅拌成墙施工; (c) TRD 工法构筑的墙体

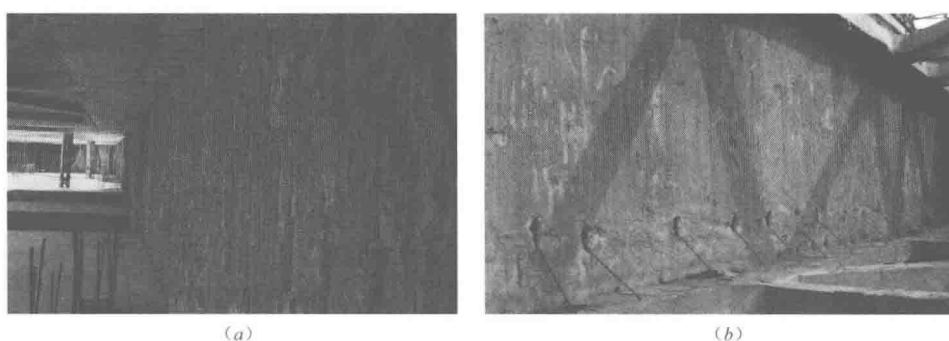


图 1-3 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙实景

(a) 上海奉贤中小企业总部大厦; (b) 南昌绿地中央广场

TRD 工法是日本神钢集团于 1993 年开发的一种新型水泥土搅拌墙施工技术, 该工法机具有自行掘削和混合喷浆搅拌的功能, 施工工艺与传统三轴水泥土搅拌桩采用的垂直轴纵向切削和搅拌方式明显不同, TRD 工法通过链锯型刀具对全深度范围内的成层地基土整体切割喷浆搅拌并持续横向推进形成等厚度连续水泥土搅拌墙。1997 年, TRD 工法获得日本建设机械化协会的技术审查证明, 被正式认定为一种行业施工方法。2009 年, 该工法被引进国内, 并在长三角地区率先开展了应用。随着等厚度水泥土搅拌墙技术的不断发展和完善, 该工法施工设备已形成系列化的产品, 其中进口设备中由日本神钢集团研发生产的 TRD-Ⅲ型工法机最具代表性, 也是最先引进国内的设备。2012 年, 上海工程机械厂有限公司自主研制了国产化 TRD-D 型工法机, 如图 1-4 所示, 并批量生产, 进一步推动了 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术在国内的应用。

TRD 工法构建的水泥土搅拌墙厚度和最大深度视施工设备型号不同而异, 成墙厚度一般为 550~900mm, 设备设计最大施工深度可达 60m。根据国内外工程实践, 等厚度水泥土搅拌墙技术应用地层广泛, 不仅适用于标贯击数不大于 100 击的密实砂土层, 还可在粒径 10cm 内的卵砾石层及单轴饱和抗压强度 10MPa 内的软

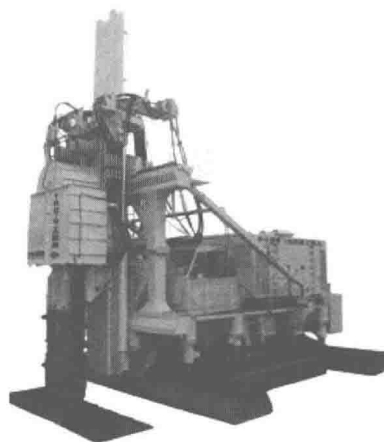


图 1-4 TRD-D 型工法机

岩地层中施工，图 1-5 所示为国内典型地层中应用的工程案例。TRD 工法构建的水泥土搅拌墙质量好，沿深度方向水泥土搅拌均匀，相比传统的三轴水泥土搅拌桩隔水帷幕在相同地层条件下可节约水泥 20%~25%，整个墙身范围的水泥土搅拌更加均匀，水泥土无侧限抗压强度达到 1~3MPa（水泥掺量 20%~30%）。成墙作业连续等厚度，无接缝，隔水性能好，水泥土墙体渗透系数可以达到 10^{-7} cm/s 量级。等厚度水泥土搅拌墙在地下空间工程中可作为超深隔水帷幕，也可内插型钢等劲性构件作为隔水挡土复合围护结构，内插构件间距可以根据设计要求任意调整，相比传统的三轴水泥土搅拌桩，在适应地层和劲性构件设置方面均具有更强的适用性。TRD 工法施工装备机架重心低、稳定性好，施工机械最大高度一般不超过 12m，国产 TRD-D 型机可在 7m 高度净空范围内作业，并可紧邻建筑物（最近 0.5m）作业，对于城市狭小低空作业环境具有很好的适应性。表 1-1 为传统三轴水泥土搅拌桩技术和 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术主要特性对比。

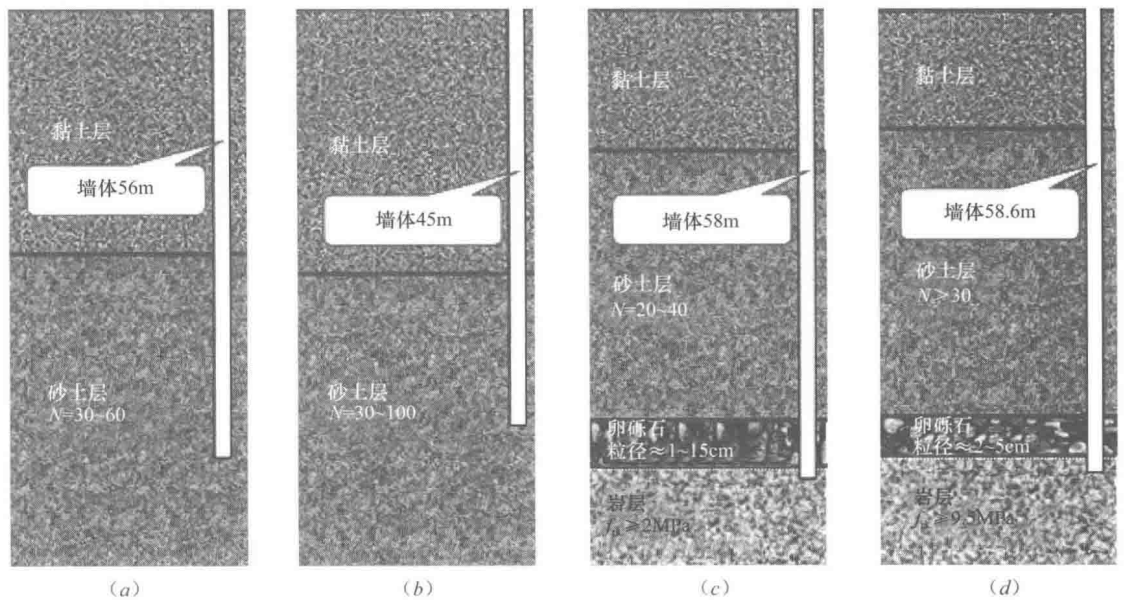


图 1-5 TRD 工法超深墙体典型应用地层示意图

(a) 上海典型地层（上海国金中心）；(b) 天津典型地层（天津中钢响螺湾）；
(c) 南京河西典型地层（南京安省金融大厦）；(d) 武汉典型地层（武汉长江航运中心）

水泥土搅拌技术对比

表 1-1

隔水帷幕技术	三轴水泥土搅拌桩技术	TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术
墙体示意图		

续表

隔水帷幕技术		三轴水泥土搅拌桩技术	TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术
最大厚度		直径 1000mm，有效厚度 660mm	900mm
设备最大设计深度		30m	60m
内插构件		间距受限制	无限制
搅拌方式		垂直定点搅拌	水平掘削，整体搅拌
搭接接头		多	无
墙身质量		良	优
隔水效果		良	优
施工地层	软黏土	可施工	可施工
	砂土	标贯击数 $N<30$	标贯击数 $N<100$
	卵砾石	无法实施	粒径 $<10\text{cm}$
	岩层	无法实施	单轴抗压强度 $<10\text{MPa}$
设备占用空间		大	小
土体置换率		中	高

1.3 施工装备的研发与发展

1993 年日本神户制钢所开发了 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术，并先后研制生产了 TRD-Ⅰ型、TRD-Ⅱ型和 TRD-Ⅲ型工法机，如图 1-6 所示。这三种机型均采用了移动灵活的步履式底盘结构；TRD-Ⅰ型和 TRD-Ⅲ型工法机采用油缸升降切割箱刀具，TRD-Ⅱ型工法机采用卷扬机升降切割箱刀具；TRD-Ⅰ型工法机最大施工墙体深度 20m 左右，TRD-Ⅱ型工法机最大施工深度 45m 左右，TRD-Ⅲ型工法机最大施工深度约 60m；TRD-Ⅰ型工法机成墙深度虽不大，但可以大角度倾斜施工，最大倾斜角度约 60°。随着 TRD 工法的发展和工程应用需求，目前日本工程界应用较多的主要是 TRD-Ⅱ型和 TRD-Ⅲ型工法机。

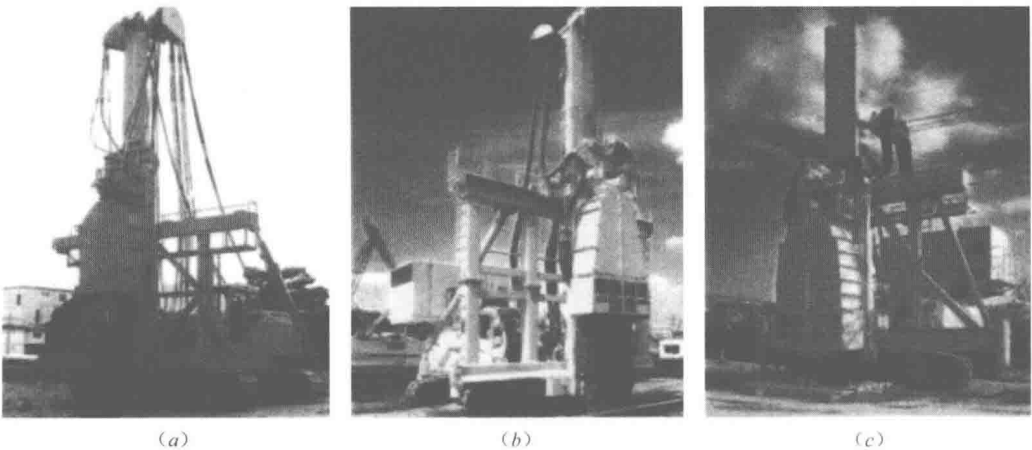


图 1-6 日本 TRD 工法机
(a) TRD-Ⅰ型工法机；(b) TRD-Ⅱ型工法机；(c) TRD-Ⅲ型工法机

2009 年上海广大基础工程有限公司和东通岩土科技（杭州）有限公司率先从日本引进了 TRD-Ⅲ型工法机，如图 1-6（c）所示，并开始在长三角地区基坑工程中进行实践。TRD-Ⅲ型工法机基于日本的地层条件和作业工况进行研发生产，成墙厚度 550~850mm，最大成墙深度约 60m；主机采用履带式底盘，接地比压（设备重量和设备接地面积的比值）大，对地基的承载力要求较高；主动力系统为 345kW 的柴油机；切割箱、引导轮、链条和刀具等易磨损部件均为日本进口部件。TRD-Ⅲ型工法机引进国内后，在多个深大基坑工程中得到应用，如天津中钢响螺湾项目（水泥土墙体厚度 700mm，深度 45m）、苏州国际财富广场项目（水泥土墙体厚度 700mm，深度 46m）等，取得良好效果，推动了等厚度水泥土搅拌墙技术在国内的应用。

2010 年日本和抚挖重机械股份有限公司合资生产了 TRD-CMD850 型工法机，如图 1-7 所示。TRD-CMD850 型工法机在原型机的基础上，调整了柴油发动机配置，降低油耗，简化了驱动部件结构，提高支撑稳定性，增加横行液压油缸行程。主机总重量 140t，成墙厚度 550~850mm，最大设计成墙深度 50m，柴油发动机总功率 380kW。该机型在上海奉贤中小企业总部大厦项目中应用，墙体厚度 850mm，深度 26.6m，成墙效果较好。与 TRD-Ⅲ型工法机一样，该机型采用了履带式底盘，接地比压大，要求地基有足够的承载力以确保施工稳定性。

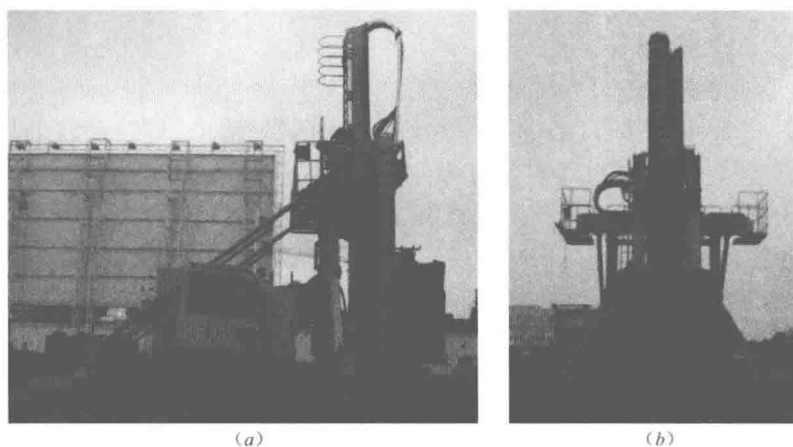


图 1-7 TRD-CMD850 型工法机

2011 年日本三和机材联合上海振中机械制造有限公司开发研制了 TRD-E 型工法机，如图 1-8 所示。为适应国内施工特点，该机型在原型机的基础上作了一系列改进。主机采用电动马达驱动，减少了能耗；采用步履式底盘移位，大大降低了接地比压；锯链式切割箱配置油缸和卷扬机双套提升系统；切割箱长度由 3.65m 加长至 4.88m，以加快拼装速度。该机型主机总重量 145t，主动力为 4 台 90kW 的电动机，副动力为 3 台 37kW 的电动机，成墙厚度 550~850mm，最大设计成墙深度 60m。该机型切削机构采用卷扬机升降，使得整机高度相比其他机型加高 [外形尺寸：12.2m×8.1m×13.2m（高）]。该机型在上海国际金融中心项目（水泥土墙体厚度 700mm，深度 53m）、南京河西生态公园项目（水泥土墙体厚度 800mm，深度 50m）等工程中应用，成墙质量和效果较好。相比 TRD-Ⅲ型和 TRD-CMD850 型工法机，该机型采用步履式底盘替代履带式底盘，提高了施工稳定性。

但切割箱、引导轮、链条和刀具等部件仍为日本进口部件。此外由于该机型采用纯电驱动，要求项目现场提供稳定的电力系统。

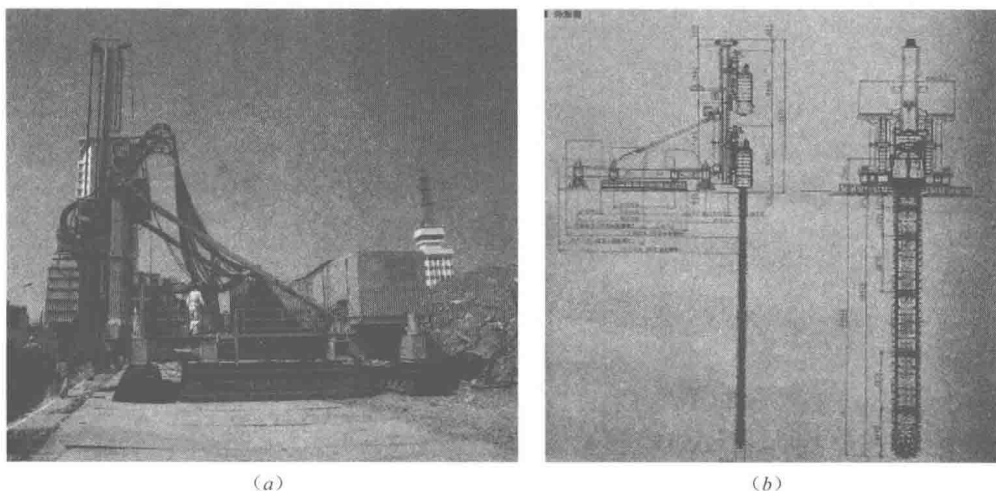


图 1-8 TRD-E 型工法机

2012 年上海工程机械厂有限公司自主研发了 TRD-D 型工法机，如图 1-9 所示。TRD-D 型工法机采用步履式行进方式；由一台主动力为 380kW 的柴油机和一台副动力为 90kW 的电动机组成混合动力系统，总功率 470kW；切削机构采用双级油缸升降方式；成墙厚度 550~900mm，最大设计施工深度 61m；外形尺寸为 11.4m(长)×6.8m(宽)×10.7m(高)。该机型针对国内地质条件和作业工况，通过大量结构试验分析、高强耐磨材料性能研究、结构优化分析、智能化控制研究对主机底盘、前部工作机构、切割机构、动力系统、电气控制系统等部件（图 1-10）采用了一系列自主创新技术，实现了整机的完全国产化生产。

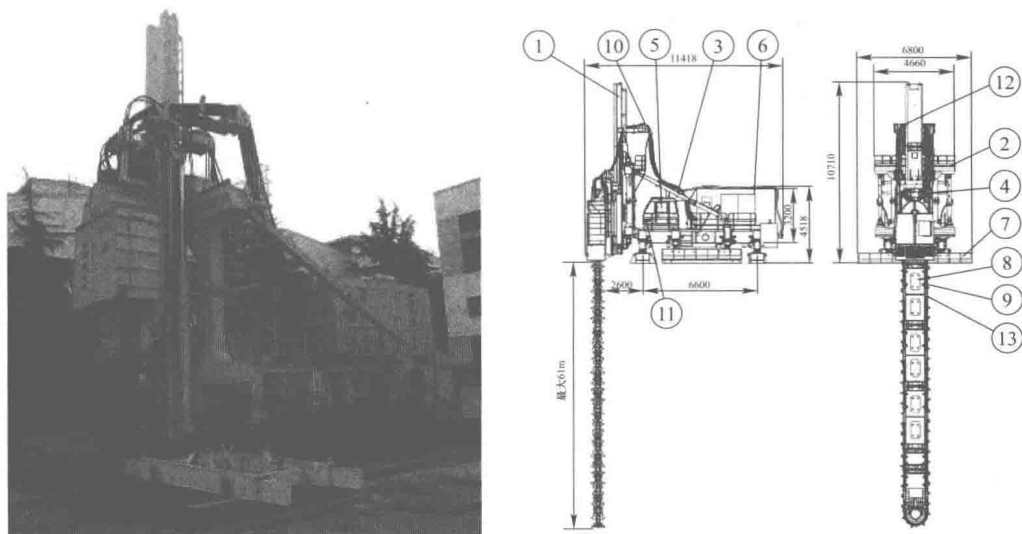


图 1-9 TRD-D 型工法机

- 1—立柱；2—门架；3—斜撑；4—驱动部；5—驾驶室；6—动力柜；7—步履主机（包括步履、主平台、支腿）；
8—切割箱；9—切削刀；10—液压系统；11—电气系统；12—注浆系统；13—传动链