



地下工程绿色支护 设计与施工

刘兴旺 施祖元 编著

中国建筑工业出版社

地下工程绿色支护设计与施工

刘兴旺 施祖元 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下工程绿色支护设计与施工/刘兴旺, 施祖元编
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-112-19224-3

I. ①地… II. ①刘… ②施… III. ①地下工程-支
护工程-结构设计②地下工程-支护工程-工程施工
IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 049872 号

本书对多种地下工程绿色支护技术进行了详细介绍, 并配合大量工程实例予以说明, 理论与实践紧密结合。本书主要内容包括: 绿色理念与地下空间、可重复使用的基坑支护体系、与主体结构相结合的支护技术、超深地下空间组合支护技术、环境保护技术。本书可供相关专业技术人员参考使用。

责任编辑: 李 明 李 阳 周 觅

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 赵 颖

地下工程绿色支护设计与施工

刘兴旺 施祖元 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 409 千字

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-19224-3

(28488)

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)

序

近年来随着我国经济的发展和城市化的推进，地下空间开发利用的力度逐步加大。为解决交通拥堵问题，不少城市正在建设地铁；为解决停车难问题，大量地下停车库不断新建；为解决城市的有机更新，地下综合管廊、地下排洪系统等也已列入建设计划。地下空间开发利用首屈一指的技术难题即为深基坑支护，支护设计或施工不当，不仅可能危及自身安全，同时影响到周边环境要素（如邻近建筑物、道路、管线等）的安全和正常使用。在举国上下大力发展绿色建筑的今天，绿色理念也正逐步融入深基坑支护中。

浙江省建筑设计研究院于1995年成立了结构与岩土工程研究室，引进了一批优秀的博士和硕士，在建筑结构及岩土工程领域开展了卓有成效的工作。特别是在绿色支护技术方面，多年来在引进国外先进技术的基础上，结合我国国情及水文地质条件，取得了一大批创新性较强的科技研究成果，并在实际工程中大胆应用，社会效益和经济效益显著。该书的作者刘兴旺博士、施祖元博士具有多年的从业经验，结合浙江省建筑设计研究院多年来的工程实践，针对传统支护形式存在的问题，系统地介绍了绿色支护技术的设计与施工要点，涉及的主要技术包括：可重复使用的支护结构（由SMW工法或TRD工法形成的型钢水泥土连续墙、多种形式的预应力钢结构支撑）、与主体结构相结合的支护技术（地下连续墙“二墙合一”、逆作法、中心岛法）、超深地下空间组合支护技术（基坑施工过程中临时加深的组合支护结构、超深坑中坑、复杂地下障碍物的处理）以及环境保护技术（保护地铁盾构隧道、历史建筑、浅基房屋等）。

该书对涉及的各种绿色支护技术，均提供了多个具体的工程案例，这些案例是理论与实践相结合的较好的典型，不仅总结了应用中存在的主要问题，而且提出了解决方案，对工程设计和施工具有重要的参考价值。

益德清

前 言

自 1995 年学校毕业参加工作至今已有 20 年，正赶上我国改革开放以来的高速发展期。1995 年以前，地下空间开发的规模很小，建筑物大多不设地下室或仅设置 1 层地下室，采用的支护形式也相对简单。随着高层建筑的不断建设和城市规模的扩大，地下空间的开发力度持续加大，基坑工程逐步呈现“数量多、面积大、开挖深”等特点，同时，环境保护和可持续发展要求日益提高，支护设计原则正逐步从稳定、强度控制为主转向变形控制为主，绿色理念正逐步贯入支护设计与施工中。

本书介绍的实例基本反映了绿色支护技术在我国应用与发展的过程。1997 年~2000 年，杭州凯悦大酒店工程，设三层地下室，采用地下连续墙“两墙合一”和上下同步逆作法施工技术，充分将主体结构与支护结构相结合。2006 年~2010 年，浙江省建筑设计研究院和杭州大通建筑工程有限公司开展了型钢水泥土搅拌墙和预应力装配式钢管内支撑组合支护应用研究，并在杭州运河宾馆、宁波恒丰金融商贸中心等项目中，运用该技术取代传统的钻孔灌注桩结合混凝土内支撑方案，取得成功。2010 年，杭州大通建筑工程有限公司从日本引入渠式切割型钢水泥土连续墙技术，并在国内首次应用到杭州下沙智格办公楼项目，效果较好。鉴于传统钢管支撑存在的问题，2012 年以来，在中国工程院院士、浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心主任龚晓南教授的关心和支持下，预应力装配式型钢组合支撑在杭州、上海、昆明、南京等地广泛应用，杭州上塘单元 R22-02 地块小学工程（4 号楼）项目首次应用了预应力装配式型钢拱形支撑，余政储出【2014】22 号地块项目，将预应力装配式鱼腹梁组合支撑应用于软土地基平面尺寸约 200m×120m、开挖深度约 16m 的大型基坑。型钢水泥土墙与预应力装配式钢结构支撑的组合支护结构，在确保安全的基础上，可重复使用型钢，缩短建设工期，节省工程造价，减少环境影响，同时避免了围护体成为地下障碍物，保证了土地资源的持续开发利用。

为充分利用地下空间，工程建设中需要解决一些特殊的技术难题。杭州湖滨 25、22、19 号地块工程和杭州钱江时代国际广场项目，均面临着基坑工程已进入挖土施工阶段而地下室需要增加一层的若干技术难题；杭州广利大厦、杭州地铁 1 号线龙翔桥上盖物业以及杭州城西银泰等项目，建设场地原有围护桩、工程桩及地下结构等成为深层地下障碍物。杭州武林门旅游客运中心改造项目，三层地下室的一部分位于大型河道范围，涉及的地下障碍物包括原有河道驳坎、码头基础及工程桩等，基坑各侧侧压力严重不平衡，本书介绍了上述技术难题的解决方案。

在环境保护方面，运营地铁盾构隧道、浅基础老旧房屋、文保或历史保护建筑等环境设施对基坑变形相当敏感，本书结合浙二医院脑科中心、萧山华润万象汇、浙江广发大厦等项目，介绍了针对各种复杂条件的环境保护技术。

本书在编写过程中自始至终均得到中国工程设计大师益德清教授级高级工程师的关心和指导，浙大网新科技股份有限公司吴世明教授对本书的结构及内容提出了很好的建议，

前 言

在此深表感谢！浙江省建筑设计研究院杨学林、袁静、李冰河、曹国强、陈东、陈卫林、童磊、马少俊、陈萍和黄杰卿等同志为本书提供了丰富的工程资料，东通岩土科技（杭州）有限公司李瑛博士、上海强劲地基工程股份有限公司刘全林教授、浙江大学童根树教授和潘秋元教授为本书提供了宝贵的技术资料，在此一并表示感谢！

由于水平和能力所限，书中定有不妥之处，请予批评指正！

浙江省建筑设计研究院

刘兴旺

2015年11月26日

目 录

1 绿色理念与地下空间	1
1.1 绿色建筑	1
1.2 地下空间	1
1.3 传统支护技术	2
1.4 绿色支护技术	3
1.5 环境效应	5
2 可重复使用的基坑支护体系	7
2.1 概述	7
2.2 型钢水泥土搅拌墙	8
2.3 渠式切割水泥土连续墙	40
2.4 钢结构支撑	62
2.5 综合实例	83
3 与主体结构相结合的支护技术	109
3.1 概述	109
3.2 地下连续墙	110
3.3 逆作法	120
3.4 中心岛法	139
3.5 工程实例	144
4 超深地下工程组合支护技术	178
4.1 概述	178
4.2 组合支护结构侧压力	178
4.3 组合支护结构稳定性	179
4.4 组合支护结构变形性状	180
4.5 复杂地下障碍物处理技术	181
4.6 实例	182

5 环境保护技术	223
5.1 概述	223
5.2 环境保护措施	224
5.3 常见问题	229
5.4 工程实例	231
参考文献	253

1 绿色理念与地下空间

1.1 绿色建筑

改革开放以来,我国的经济建设取得了举世瞩目的成就,人民生活水平不断提高,城市面貌日新月异。与此同时,经济发展过程所带来的环境问题也日益严峻,空气质量、水土污染等环境问题困扰了人们的生活。我国人口众多、资源紧张,如何在稳步发展的同时减少资源的消耗,保护环境,实现“青山、绿水、蓝天、白云”,具有重要的现实意义。绿色建筑在我国的大力发展也正基于此时代背景。

绿色建筑是指在建筑的全寿命周期内,最大限度节约资源,节能、节地、节水、节材、保护环境和减少污染,提供健康适用、高效使用、与自然和谐共生的建筑。为应对全球气候变化、资源能源短缺、生态环境恶化的挑战,1980年,世界自然保护联盟首次提出“可持续发展”的口号,节能建筑体系逐渐完善,并在德、英、法、加拿大等发达国家广泛应用。中国政府自1992年以来相续颁布了若干相关纲要、导则和法规,大力推动绿色建筑的发展。2004年9月,建设部“全国绿色建筑创新奖”的启动标志着中国的绿色建筑发展进入了全面发展阶段。2006年,建设部正式颁布了《绿色建筑评价标准》。2009年8月27日,中国政府发布了《关于积极应对气候变化的决议》,提出要立足国情发展绿色经济、低碳经济。2009年11月底,在积极迎接哥本哈根气候变化会议召开之前,中国政府作出决定,到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降40%~45%,作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划,并制定相应的国内统计、监测、考核制度。

我国目前正处于新型城镇化的过程中,从传统建筑转向绿色建筑,以低碳为导向,发展循环经济,建设低碳生态城市。节约、智能、绿色、低碳等生态文明的新理念需要融入到工程建设的方方面面,最终实现可持续发展。

1.2 地下空间

在大力发展绿色建筑的同时,地下空间由于具有节能、节地、环保等概念而具有广阔的开发利用前景。所谓地下空间,主要是指人类为满足某方面的需要而对地表以下的介质进行有目的的改造而生成的人工空间,如地下储物库、地下停车场、地下商城、地铁站及隧道、地下通道、人防战备工程、地下工厂、地下河川等。人类开发和利用地下空间已经有悠久的历史。中国在地下储粮已有5000多年的历史,公元前8世纪到前5世纪,中国的铜矿矿井就有竖井和斜井,深达40m以上。进入20世纪,人们开辟了地下空间利用的新领域。20世纪30年代初,日本首先在地铁出入口的通道两侧设置商店,随后开始兴

建地下商业街。20 世纪 40 年代初，瑞典在岩石中建成了地下污水处理厂。第二次世界大战后，许多国家都有步骤地将一些重要的工业和军事工程转入地下，并在城市中大量构筑平时和战时两用的地下民防工程。20 世纪 70 年代以来，随着现代科学技术和工业的发展，地下空间的利用逐步转到保护地面环境、节省能源、解决城市交通等方面，地下快速轨道交通系统与地下街区的有机连接形成地下城。地下高速道路、排洪与蓄水的地下河川、地下热电站和蓄水的融雪槽等设施的建设进一步发挥了地下空间的作用。进入到 21 世纪后，我国地下空间的开发利用突飞猛进，逐步呈现出“数量多、规模大、功能多元化”的特点。地下空间的建设也同时面临着基坑开挖深度深、水文地质条件复杂、环境保护要求高等问题，由于缺少宏观、长远、系统的地下空间规划，后期的地下空间开发对既有地下空间的保护和综合利用已成为困扰工程界的难题。

与地面建筑内部空间相比，地下空间主要具有下列优越性：

- (1) 恒温，能较好地绝热和蓄热，节约能源；
- (2) 抗震性能好；
- (3) 隐蔽性好，能经受和抗御武器的破坏；
- (4) 节约土地资源。

当然地下空间同时存在阳光短缺、温差小、湿度大、空间封闭压抑、空气不易流通、人员活动不自在、环境噪声、微生物繁殖快等缺点。这些问题已引起人们的日益关注，并在进行研究解决，以使人们在其内部能更好地生产和生活。

基于绿色、低碳的发展理念，地下空间的开发利用在我国具有广阔的前景。

1.3 传统支护技术

地下空间开发中首当其冲的难题即为深基坑支护，支护技术随着工程实践的发展而不断发展。基坑支护形式的选取需要考虑的主要因素包括：基坑开挖深度、地质条件、场地条件及环境保护要求等，常用的基坑围护形式有放坡、土钉墙、复合土钉墙、重力式挡墙、桩墙式支护结构、组合支护结构等。

放坡开挖在开挖深度浅、环境及土质条件较好的基坑工程中应用广泛，在粉土地基上的应用最大开挖深度超过 10m，但在软土地基上成功应用的开挖深度一般不超过 5m。

优点：

- (1) 施工简单、建设工期快；
- (2) 成本低；
- (3) 地下室施工完成后如注意填料的选择，不会形成地下障碍物。

缺点：

(1) 需要较大的建设场地，在城市中心区域基本没有实施的可能，在郊区、开发区等用地较为宽松的区域应用较多；

(2) 适用的开挖深度较浅，开挖深度较深时，除了稳定及变形控制难度大之外，地下室完成后需要进行大量的回填工作，大体积回填土的要求严格、费用高、时间长，回填不密实时易产生地面沉降，曾有不少项目在工程完成后由于回填地面下沉造成进户管线断裂，影响居民的生活；

(3) 在软土地基上基坑变形控制难,适用于周边环境对基坑变形控制要求不严的工程。

土钉墙或复合土钉墙在放坡开挖的基础上通过增设土钉、竖向加强体等措施,改善边坡土体的性质,提高其地基承载力,增加边坡的稳定和变形控制能力,应用范围在技术上较放坡开挖更广。但土钉伸入到坑外,形成永久的地下障碍物,可能会影响后续工程的施工,而且土钉如超越用地红线,还需得到相关部门的同意和协调好与周边的关系。由于土钉墙对基坑土方开挖的要求较为严格,在软土地基上,当开挖深度较深、土钉竖向道数较多时,施工常常因为土方开挖难度大而出现违规现象,从而容易引发工程事故。因此,在软土地基上土钉墙的适用开挖深度一般不超过5m,复合土钉墙的适用开挖深度一般不超过7m。

重力式挡墙一般由多排水泥土搅拌桩或高压旋喷桩组成,通过边坡土体加固措施,使边坡的稳定得到保证,基坑变形满足要求。其主要优点是施工简单,土方开挖方便;但同时存在围护体占地面积大、对较深基坑变形控制效果不好的缺点。多排水泥土搅拌桩或高压旋喷桩施工时,挤土效应对周边环境的影响不容忽视,施工速度过快、施工次序不当易产生环境灾害。由于近年来环境保护要求越来越高、建设场地有限,因此重力式挡墙的应用趋于减少,但在基坑内部局部电梯井等坑中坑的支护中应用广泛。

桩墙式支护结构的应用最为广泛。桩墙式支护结构是由围护墙和内支撑或锚杆(索)组成的支护结构,地下水位较高时,当采用沉管灌注桩、钻孔灌注桩等桩型作为围护桩,需要在围护桩后设置由连续搭接的水泥土搅拌桩或高压旋喷桩形成的截水帷幕;近年来集挡土与截水于一体的地下连续墙、咬合桩等的应用逐渐增多;内支撑常用材料为钢筋混凝土内支撑,有条件时也采用预应力锚杆(索)代替内支撑。目前工程中应用桩墙式支护结构的主要问题如下:

(1) 部分围护桩型施工过程中存在较大的环境影响,如沉管灌注桩施工时存在振动及挤土效应,当基坑周边存在浅基础建筑物、地铁盾构隧道等对外界扰动较为敏感的建筑物或设施时,成桩施工易产生过大的变形,甚至使结构开裂;采用钻孔灌注桩工艺时,大量的泥浆排放成为社会环境负担,处理难度大、成本高。

(2) 围护桩在围护功能结束后不能重复利用,形成地下障碍物,当地下空间需要进一步开发利用时,破除既有围护桩成为工程难点。

(3) 钢筋混凝土内支撑施工工期长,拆除困难,且拆除后成为建筑垃圾,不能重复利用。基坑平面尺寸较大时,这个问题更加突出。

(4) 采用预应力锚杆(索),存在变形控制效果不佳、环境保护及锚杆(索)形成地下障碍物、超越红线等问题。

实际工程中采取的围护措施常常是以上各种形式的组合。

1.4 绿色支护技术

针对传统支护技术存在的问题,近年来具有绿色概念的支护技术在工程中逐步推广使用和深入发展。传统的支护技术存在的共性问题,主要包括如下几类:

(1) 材料的不可重复利用。

在目前的基坑工程中，钢筋混凝土钻孔灌注桩和钢筋混凝土内支撑量大面广，应用最为广泛。但基坑工程完成后，钻孔灌注桩成为地下障碍物，而混凝土内支撑拆除后成为建筑垃圾，需另行处理；拆除过程中，产生噪声、粉尘，对周边环境有一定影响；机械拆除时，操作不当，也易使围护墙在拆撑阶段产生较大变形，影响周边环境的安全。

(2) 部分施工工艺存在严重的材料浪费现象。

如软土地基上的三重管高压旋喷桩，成桩过程中，不少水泥浆液从桩孔溢出，形成废浆。某工程现场统计表明，近30%~50%的水泥浆溢出后成为废浆，现场需准备较大的废浆池，并需要考虑外运。

(3) 基坑围护工作结束后，围护体成为地下障碍物，影响了后续工程的进行。

与围护桩相比，土钉、锚杆、锚索等的影响更为突出。有些土钉伸入到市政道路之下，市政管线顶管施工时，遇到土钉而无法进行下去；有些土钉伸入到邻近建设工地，造成邻近围护桩及工程桩施工困难。

目前工程中采用较多的绿色支护技术，主要包括：

(1) 可重复使用的支护体系。

型钢水泥土墙和钢结构支撑是住房和城乡建设部一直在大力推广应用的基坑支护技术，型钢水泥土墙技术通过在水泥土中插入型钢，形成集挡土与截水于一体的围护墙，地下室施工完成、围护功能结束后，将型钢从水泥土中拔出，经整修后供下个工程再次使用。

采用钢管、H型钢等作为主要受力构件，通过标准节点、现场装配和预应力技术，形成刚度较大、装拆方便的钢结构支撑，克服了传统混凝土支撑的缺点。型钢水泥土墙与钢结构支撑的组合，在具有绿色概念的同时，能缩短基坑的施工时间，促进材料的周转利用。

(2) 对平面尺寸超大的深基坑工程，将基坑支护与主体结构相结合，充分利用主体结构作为支护结构的一部分。具体包括：

1) 地下连续墙同时作为地下室外墙，即“二墙合一”，需要时，地下连续墙可进一步作为竖向承重或抗拔构件。

2) 对超大超深基坑工程，利用主体地下结构作为基坑施工过程的支撑系统，采用“逆作法”或“中心岛”的施工工艺，在提高整体安全度的同时，减少资源消耗。

(3) 复杂地层的地下空间开发利用技术，主要包括：

1) 既有地下空间的深化利用技术。在不少城市的中心区域，由于历史原因，已经形成的地下室往往只有一层，由于轨道交通建设和城市地下空间的综合开发需要，既有浅部地下结构需要拆除、改造或加深。

2) 深层障碍物的清除技术。超深地下空间开发过程中，需要克服废弃的江堤、驳坎、飘石等深层障碍物的不利影响，保证围护墙的施工质量和性能。

3) 超深地下空间的开发利用。在许多城市，为解决交通、停车问题，大量城市综合体不断兴建，地下室层数达到5层以上，如本书实例中的浙江国贸总部大楼、杭州国大城市广场等；新型的智能停车系统促进了超深地下立体车库的建设，如本书实例中的杭州荣邦水岸莲花项目和杭州密渡桥路地下车库。超深地下空间开发时，涉及到各种复杂地层和

承压水问题。

(4) 复杂环境条件下的基坑支护措施。

随着地下空间的深入开发利用,地下室的面积越来越大、深度越来越深,环境保护面临较为严峻的形势。一旦建筑物因损伤严重需要拆除,将直接造成房屋资源的损失;当由于基坑坍塌而导致房屋倒塌时,直接影响到人民的生命财产安全;当房屋因损伤而需加固时,技术难度大,费用高,甚至影响建筑使用寿命,降低整体安全度。基坑周边管线遭到破坏,将引起电力中断、煤气泄漏、供水和排水中断等问题,管线安全同样关系到社会安全和人们的正常生活。随着轨道交通的建设,不少城市面临着轨道交通设施,如地铁车站、盾构隧道等保护的难题,由于邻近地下空间开发造成盾构隧道收敛变形过大、管片开裂和渗漏的事故屡见不鲜。

复杂环境条件下的地下空间开发,应严格控制周边土体的变形,确保环境要素的安全。对超大超深地下空间,采取常规的基坑支护措施很难达到有效的环境保护目的,需要根据具体情况进行深入研究。

先进有效的环境保护技术,应能够保证邻近建筑物、周边市政道路及管线、轨道交通设施等环境要素的全生命周期的正常使用,从而给地下空间的大力开发利用奠定了良好的基础,促进了资源的充分使用和社会的持续发展。

1.5 环境效应

地下空间开发过程中,需要进行桩基、土方开挖、降水等施工作业,施工影响区域的保护对象包括既有建筑物、城市道路、轨道交通设施、各类地下管线及河道等水利设施等,深基坑开挖对环境的影响主要包括下列几个方面:

(1) 围护墙或地基加固施工过程中,成孔、挤土或冲击等施工作业改变了地基土体的平衡状态,地基土体受到扰动后强度降低,周边环境设施相应产生移位。

(2) 坑内卸荷改变了地基原有的平衡状态,土体产生位移,当由于支护不当致使土体位移过大,环境影响更为明显;当支护强度或稳定安全度不足时,支护体系破坏、土体失稳可能产生较为严重的环境灾害。

(3) 由于地下水没有处理好,基坑开挖过程坑外地下水位下降、坑壁流砂、管涌,坑底土体突涌等,均会恶化基坑周边环境设施的地基条件。

(4) 施工车辆的重载、施工过程的振动。

由于设计和施工不当而产生环境灾害的案例屡见不鲜。1998年,我国南方某基坑倒塌,两栋楼倒入基坑;2003年,某地铁隧道联络通道施工时,流砂管涌致使地面建筑整体下陷,江水倒灌;2008年,某地铁基坑坍塌,造成21人死亡,社会影响恶劣。

不同的保护对象,其灾变机理和变形控制要求也不一样,应区别对待。

20世纪80年代、90年代及以前建造的砌体结构浅基础住宅,由于年代久、设计标准低、施工技术落后等因素,对基坑变形较为敏感,对楼盖采用预制板、未设置圈梁和构造柱的房屋,问题更为突出。

超大、超深基坑工程施工,对桩基础建筑也有可能具有明显的影响。某软土地区地铁车站基坑,长度约300m,开挖深度约16~17m,邻近一幢10层的桩基础建筑,采用钻孔

灌注桩以中风化岩层为持力层，且已使用多年，沉降稳定；基坑施工期间产生了 20~30mm 的沉降，部分结构构件因不均匀变形产生裂缝。事后经分析，基坑开挖改变了桩基周边土体的性状，主动区土体的变位使土体强度降低，由于基坑施工时间长，影响区域大，桩基的侧摩阻力明显下降，端阻增加，从而产生了较大附加沉降。

近几年我国许多城市均在进行城市轨道交通设施的建设，工程建设对邻近轨道交通设施的保护已成为关注的热点。特别是软土地基上的盾构隧道，由于邻近工程建设造成隧道变位过大、管片开裂和渗水的事故案例逐年增多。由于盾构隧道的变形控制要求相当严格，如何从设计、施工角度采取有效的变形控制措施尚是困扰工程界的难题。

2 可重复使用的基坑支护体系

2.1 概 述

随着地下空间开发力度的加大，基坑稳定性、支护结构的受力性能、环境保护等要求越来越高，桩墙式支护结构在实际工程中应用广泛。传统的围护墙技术中，灌注桩排桩由于具有地层适应性强、桩径及桩长可根据需要灵活设置以及施工技术成熟等优点而得到广泛应用，但该技术同时存在下列问题：

(1) 采用泥浆护壁湿作业灌注桩工艺时，围护桩施工产生大量泥浆，后续外运及处理复杂，对环境有一定影响。

(2) 高地下水位地区，采用灌注桩作为围护桩时，一般情况下需要在排桩后另外设置一道连续封闭的截水帷幕，围护墙占地面积大、施工工序复杂、工期长，处理不当易因桩间土流失影响围护墙挡土和截水的综合性能（图 2.1）。

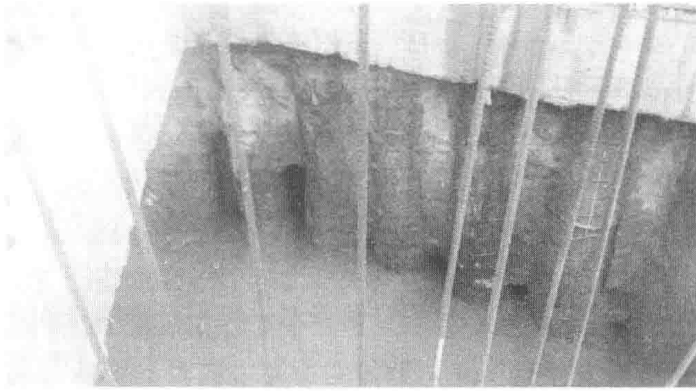


图 2.1 截水帷幕失效

(3) 围护墙一般仅作为临时结构，基坑施工结束后，成为地下障碍物，对后续道路、景观和管线工程存在一定影响。当工程的地下空间进一步开挖利用时，围护墙形成的深层地下障碍物往往给工程建设带来较大的难度，本书第 4 章介绍的实例即为对此类情况的处理。

对较深的基坑或环境保护要求较高的基坑工程，为改善围护墙的受力性状、有效控制基坑变形，常需在围护墙上设置内支撑。传统的钢筋混凝土内支撑由于具有刚度大、平面布置灵活、挖土施工方便等特点而得到广泛应用，但同时也存在下列问题：

(1) 施工时间长。开挖到支撑标高后需要完成地模施工、钢筋绑扎、架立模板和浇筑混凝土等工序，混凝土养护到规定强度后，才能进行下一阶段土方开挖；基础或地下结构楼板混凝土养护到规定强度后，才能拆除支撑。

(2) 支撑拆除费时费力，且噪声大、粉尘多，对环境影响大。

(3) 支撑拆除后产生大量建筑垃圾。

(4) 由于不能施加预应力，控制基坑变形只能通过增加支撑数量和平面刚度等措施，对平面尺寸较大的基坑，综合考虑长细比、混凝土收缩、徐变等因素，支撑系统往往规模非常庞大。

针对传统的围护墙或混凝土内支撑所存在的问题，近几年我国陆续出现了型钢水泥土搅拌墙、渠式切割水泥土连续墙、钢结构内支撑等技术，其共同特点是：

(1) 节材。将钢结构技术应用到基坑支护的围护墙和内支撑中，通过标准化手段实现材料的可循环重复使用，节约了资源。

(2) 节地。通过在水泥土中插入型钢，形成集挡土与截水于一体的围护墙，减少了围护体的用地，节约了场地。型钢回收后，在地基中不存在刚性、难以清除的地下障碍物，利于场地的进一步开发利用。

(3) 节时。采用钢结构技术，减少了传统混凝土技术所需的养护时间；且装配式构件的拆卸方便，施工效率高。

(4) 环保。施工过程噪声小，大大减少了泥浆排放，通过预应力技术和信息化监测手段可有效控制基坑变形，保证周边环境的安全。

2.2 型钢水泥土搅拌墙

型钢水泥土搅拌墙（简称 SMW 工法）通过在连续搭接的三轴水泥土搅拌桩中插入 H 型钢，形成集挡土与截水于一体的围护结构，地下室施工完成后，将 H 型钢从水泥土搅拌桩中拔出，达到回收和再次使用的目的。该工法节约了资源，同时避免围护体成为地下障碍物，实现了可持续发展。与常规围护形式（指常用的排桩方案）相比，施工过程无污染、场地整洁干净、噪声小，具有环保的概念。在工期方面，也较常规的围护形式有所缩短。整体来看，采用 SMW 工法具有节约资源、可持续发展、环保以及减少工期、提高施工效率等特点。目前该工法在我国的应用日渐普遍，应用于基坑工程的最大开挖深度已超过 18m。

2.2.1 三轴水泥土搅拌桩

普通的水泥土搅拌桩常常用于地基加固、基坑截水帷幕、重力式挡土结构等等。一般适用于正常固结的淤泥和淤泥质土、粉土、素填土、黏性土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基。由于施工机械本身的性能限制，一般在软土地基上的应用深度不超过 18m，粉土地区不超过 10m。曾有工程利用普通桩机在粉砂土地基施工 13m 长的水泥土搅拌桩，完工后取芯检测桩身强度时，发现地表下 6m 范围成桩尚可，但 6m 以下搅拌桩基本没有成型，甚至较深处取出来的均为粉土。SMW 工法首先需要解决的就是不同地质条件下水泥土搅拌桩的施工质量问题，其对水泥土搅拌桩的主要技术要求是：

(1) 搅拌桩施工后型钢能顺利插入，地下室施工完成后，型钢能顺利拔除；

(2) 搅拌桩要具有一定的抗剪、抗拉和抗压强度，以与型钢共同作用，形成挡土结构；

(3) 在基坑土方开挖过程中, 搅拌桩能形成一道连续的地下截水帷幕。

针对普通深层搅拌技术存在的问题而研制成功的三轴搅拌技术, 在有效提高水泥土质量的基础上, 拓宽了深层搅拌技术的适用土层和适用深度, 为 SMW 工法技术的形成建立了良好的基础。近年来, 陆续出现的五轴、六轴等多轴搅拌技术, 进一步提高了型钢水泥土搅拌桩的性能和技术优势。

对 SMW 工法而言, 水泥土搅拌桩主要技术性能包括如下几个方面:

1. 水泥土搅拌桩的水泥土配比

根据 SMW 工法的特点, 水泥土配比的常规技术要求如下:

(1) 设计合理的水泥浆水灰比, 在确保水泥土强度的同时, 在插入型钢时, 尽量使型钢靠自重插入, 或略微借助外力, 就能使型钢顺利插入到位;

(2) 水泥土 28d 的无侧限抗压强度需满足设计要求, 应大于 0.5MPa;

(3) 使水泥土与涂有减摩剂的型钢之间具有良好的握裹力, 确保受力性能满足要求, 并为型钢回收创造有利条件, 使在拔除型钢时, 水泥土能够自立不坍, 便于充填空隙。

常用的 SMW 工法水泥浆配比表如下:

SMW 工法水泥浆配比表

表 2.2.1

地质	配比(加固 1m ³ 土)			水灰比	压缩强度(MPa)
	水泥(kg)	膨润土(kg)	水(L)		
黏性土	300~450	5~15	450~900	1.5~2.0	0.5~1
砂质土	200~400	5~20	300~800	1.5~2.0	0.5~3.0
砂砾土	200~400	5~30	300~800	1.5~2.0	0.5~3.0
高黏性土	室内试验配合调整				

浙江地区的应用实践表明, 在软土地基上, 三轴水泥土搅拌桩的水泥掺量可适当加大, 一般不宜少于 20%, 在淤泥的有机质含量较高时, 可考虑掺入适量针对性的外加剂(如 SN-201), 以保证水泥土的强度满足要求。在软土中的三轴水泥土搅拌桩中起拔型钢比较容易, 较少出现型钢起拔困难的情况。

在粉性土地基上, 当地下水位高、流动性强时, 水泥浆中宜适当增加膨润土的掺量, 以在孔壁形成一定厚度的泥皮, 阻止水泥浆的流失。同时适当控制水泥土的强度, 增加桩体的均匀度, 保证型钢的顺利起拔。杭州四堡污水处理厂、东杭大厦工程, 由于水泥土强度很高, 开始阶段的型钢起拔难度相当大。紧邻钱塘江的杭州某超深基坑工程, 由于对地下水的流动性认识不足、措施不到位, 按常规方法施工的三轴水泥土搅拌桩由于水泥浆流失而出现局部缺陷, 产生了较为严重的渗漏现象。

2. 水泥土的强度

水泥土的强度影响因素主要有: 土质条件、水泥掺量、水泥强度等级、龄期、外加剂等。

(1) 土质条件

在水泥掺量相同的情况下, 软土地基中形成的水泥土强度低, 粉性土地基中形成的水泥土强度高。影响水泥土抗压强度的主要土性指标是颗粒级配、稠度、有机质含量等。就级配而言, 土的平均粒径越大, 水泥土抗压强度越大, 反之则越小。稠度而言, 土的天然