

建筑地基处理技术丛书

水泥土搅拌法处理地基

徐至钧 主编

曹名葆 编著



机械工业出版社

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)已由建设部2002年第64号文发布,自2003年1月1日起实施,为了便于有关单位的工程技术人员更好地掌握和应用新规范,本书针对新规范中水泥土搅拌法加固地基的内容,深入介绍了这种地基处理技术的设计、施工经验、地基处理的应用范围、质量检验、测试和技术经济分析等内容,并收集了多个工程应用实例,以帮助读者加深对新规范的理解和应用。

本书可供设计施工工程技术人员在推广新技术中参考,也可供高等院校教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水泥土搅拌法处理地基/徐至钧主编.曹名葆编著.—北京:机械工业出版社,2004.2

(建筑地基处理技术丛书)

ISBN 7-111-13964-X

.水... .徐... 曹... .地基处理 .TU472

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第007950号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:何文军 版式设计:霍永明 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年4月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm A5·7印张·2插页·212千字

0 001— 册

定价: 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)已由建设部2002年第64号文发布,自2003年1月1日起实施,为了便于有关单位的工程技术人员更好地掌握和应用新规范,徐至钧组织编写了《建筑地基处理技术丛书》,针对新规范主要内容,分成七个专题,深入地介绍各种地基的设计、施工经验和地基处理的应用范围,并收集了大量工程应用实例,以帮助读者加深对新规范的理解和应用。

本书是这套丛书中的一本。用于加固软土地基的水泥土搅拌法,具有无振动、无噪声、无污染、施工机具简单和加固费用低廉等优点;尤其是在深基坑支挡结构体系中,常被用来作为防水帷幕,它是工程中被广泛采纳的一种地基处理方法。

近年来,水泥土搅拌法在设计、施工方面有了新的进展。本书汇集和反映国内外这方面新的研究成果和成功经验。撰写时力求切合实际工程,反映的内容具有真实性和参考性。本书内容安排上具有下列特点:

1. 介绍四个典型室内水泥土配比试验的系统资料。读者可由此全面了解水泥土的特性,以及反映这些特性各个指标之间的内在关系。其中,日本做过养护龄期历时五年之久的水泥土强度测试的完整成果,富有参考价值。

2. 增加了拱形水泥土搅拌桩挡墙的设计内容。反映新型复合材料桩,如:锚杆、混凝土芯等复合型水泥土搅拌桩的应用情况。同时,对当前设计中关注的九个问题,如长短桩复合地基、褥垫层的布置、变参数设计等问题作了阐述。

3. 给出水泥石搅拌桩工程造价的计算方法，同时，其他地基处理项目，如碎石桩、塑料排水法等工程造价计算所需的基本资料也一并列出，便于读者对各种地基处理方案做出经济比较分析。

4. 附有六个典型的工程实例，特别是用超深水泥石搅拌桩处理大型油罐（5万 m³）软土地基的成功例子，积累了丰富的资料，拓宽和推进了水泥石搅拌法的应用与发展。

5. 列出我国典型软土（温州、宁波、福州、上海）的地层分布及其物理力学性质指标，有助于水泥石搅拌法等地基处理方案的比较选择。

本书内容可供土木工程技术人员参考。

值得提及的是，近些年来，随着施工机具设备的改进、水泥自动化计量监控装置的采用等，水泥石搅拌法的工艺将更趋于完善，其优点更为显著。

本书撰写过程中得到了教授级高级工程师徐至钧的支持和鼓励。同时，还得到深圳粤地建设工程有限公司张亦农、上海申元岩土工程有限公司裴捷和梁志荣、中国石化镇海炼化工程公司褚友才、河南洛阳石油化工工程公司陈登荣和张继文、上海高桥石化工程公司炼油厂彭森森和金国荣以及同济大学陈强华、曾朝杰、蔡来炳等同仁们的许多有益启示和提供的宝贵资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，有不妥之处，敬请读者批评指正。

曹名葆

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 发展概况	1
第二节 特点和适用范围	4
第三节 工程应用情况	5
第四节 工程地质勘察的要求	8
第二章 水泥土的加固机理	9
第一节 一般水泥的固化原理	9
一、水泥的水解和水化反应	9
二、粘土颗粒与水泥水化物的作用	11
三、碳酸化作用	13
第二节 水泥系固化剂的固化原理	14
第三节 普通硅酸盐水泥和矿渣水泥的特性及其适用条件	16
一、普通硅酸盐水泥的特性和适用条件	16
二、矿渣水泥的特性和应用范围	17
三、两种水泥的主要力学指标	17
第三章 水泥土的室内外试验	19
第一节 室内试验方法简述	19
第二节 若干室内水泥土配比试验系列成果介绍	20
一、配比试验系列成果之一	20
二、配比试验系列成果之二	24
三、配比试验系列成果之三	30
四、配比试验系列成果之四	35
五、水泥土物理、力学指标的经验取值	41
第三节 水泥土搅拌桩的野外试验	42
一、试验目的	42

目 录

二、试验方法	42
三、试验结果	46
第四章 水泥石搅拌桩复合地基设计计算	47
第一节 三种复合地基中的应力分布及其变形特征	47
一、水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 复合地基	47
二、水泥石搅拌桩复合地基	48
三、双层复合地基	49
第二节 复合地基设计前要考虑的几个问题	49
一、对工程地质勘察资料的了解	49
二、对施工机具设备的了解	50
三、加固形式 (柱状、壁状、格栅状、块状) 的选择	50
四、加固范围的确定	51
第三节 柱状水泥石搅拌桩复合地基的设计与计算	51
一、单桩竖向承载力特征值 R_a 的计算	51
二、复合地基承载力的计算	52
三、设计技术参数的选取	53
四、软弱下卧层的强度计算	58
五、水泥石搅拌桩复合地基的变形计算	59
六、柱状水泥石搅拌桩复合地基的设计步骤	62
第四节 壁状水泥石搅拌桩的设计计算	63
一、格栅形水泥石支挡墙的设计原则	63
二、挡墙的侧压力计算	66
三、抗倾覆的计算	68
四、抗滑移的计算	68
五、整体稳定性计算	69
六、坑内地基土抗隆起计算	70
七、抗渗流 (或抗管涌) 计算	72
八、水泥石挡墙墙身强度计算	73
第五节 拱形水泥石搅拌桩挡墙的设计计算	73
一、拱形水泥石挡墙的应用及其优点	73
二、圆拱的几何数据	74

三、双铰（无铰）等截面圆拱的内力计算.....	74
四、拱脚处钢筋混凝土桩水平位移和内力（弯矩、剪力）的计算	78
第六节 工程实践（设计）中值得关注的若干问题	83
一、海水对水泥土的侵蚀的问题	83
二、暗浜区（塘区）的地基加固设计问题.....	84
三、泥炭土、有机质土地地区的地基加固设计问题	85
四、刚性基础下褥垫层的布置问题	88
五、水泥土搅拌桩的挤土效应问题	89
六、复合材料型水泥土搅拌桩的应用问题.....	97
七、布桩的原则和要考虑的问题.....	102
八、变参数设计在控制复合地基变形中的应用	104
九、长短桩复合地基的设计	106
第五章 水泥土搅拌法的施工与质量检验.....	108
第一节 水泥浆喷射搅拌法施工.....	108
一、施工机械设备及其主要性能.....	108
二、施工工艺	115
三、施工注意事项	119
第二节 水泥粉喷射搅拌法施工.....	122
一、施工机械设备及其主要性能.....	123
二、施工工艺	125
三、施工中需注意的事项	129
第三节 质量检验	130
一、施工期间的质量检验	130
二、工程竣工后的质量检验	131
第六章 工程造价预算.....	137
第一节 概述	137
第二节 建筑工程造价的构成	138
第三节 建筑工程类别和各项费率标准	140
第四节 单项工程预算定额单价及其使用说明	143
第五节 工程造价预算编制的步骤和计算实例	153
一、工程造价预算编制的步骤	153

目 录

二、水泥石搅拌桩工程计算实例.....	154
三、其他各种地基处理工程造价的计算	156
第七章 水泥石搅拌法的工程实例.....	157
工程实例一—超深水泥石搅拌桩处理大型油罐 (5万 m ³) 深厚软土地基	157
工程实例二—拱壁形水泥石搅拌桩挡墙	171
工程实例三—水泥粉喷桩在码头工程中的应用	180
工程实例四—应用长、短粉喷桩处理油罐软土地基	184
工程实例五—多层住宅地基采用短水泥粉喷桩的加固效果	193
工程实例六—水泥石搅拌桩在土钉支挡结构中的应用	197
附录 四个软土地区地层分布及物理力学性质指标.....	204
附录 A 福州大学城 福建师范大学新校区	204
附录 B 浙江温州大学新校园区	206
附录 C 宁波中国石化镇海炼化股份公司	208
附录 D 上海浦东张江高科技园区	210
参考文献.....	212

第一章 概 述

水泥土搅拌法是用于加固饱和软粘土地基的一种较常用的地基加固方法。它是利用水泥作为固化剂，通过特制的深层搅拌机械，边钻进边往软土中喷射浆液或雾状粉体，在地基深处就地将软土固化成为具有足够的强度、变形模量和稳定性的水泥土，从而达到地基加固的目的。这些加固土柱体与柱体间的土构成了一种复合地基；或者把深层搅拌而成的水泥土柱体，逐根紧密排列成连续壁状墙体，而作为一种支挡结构和防水帷幕。

水泥土搅拌法是“深层”搅拌法的一种类型，它在我国的应用也仅有十几年的历史。目前，固化剂采用的有水泥浆液和干水泥粉；因此，它有湿法和干法之分，前者又有多头搅拌和单头搅拌之别。在国内，搅拌的最大的深度达 30m，搅拌加固的柱体直径为 500 ~ 850mm。

水泥土搅拌法适应于软土地基的加固，如沿海一带的海滨平原、河口三角洲、湖盆地沉积的河海相软土。对于在这类沉积厚度大、含水量高、孔隙比大于 1.0、抗剪强度低、压缩性高和渗透性差的软土地区建造建筑物时，通常都需要进行地基处理。水泥土搅拌法具有施工工期短、效率高的特点；在施工过程中，无振动、无噪声、无地面隆起、不排污、不挤土、不污染环境以及施工机具简单、加固费用低廉等优点；尤其是在深基坑支挡结构体系中，水泥土搅拌法常用作防水帷幕；因此，它是一种有效的地基处理方法。

第一节 发展概况

水泥浆搅拌法最早在美国研制成功，称为 Mixed-in-Place Pile (简称 MIP 法)；在日本，称此为 Cement Deep Mixing Method (CDM 工作法)，1973 ~ 1974 年日本进行 CDM 工作法的研究开发工作，

1975年起就投入实际使用。目前,日本有海上和陆上两种施工机械:陆上的机械为双轴,成孔直径 1000mm,最大钻深达 40m;而海上的施工机械有多种类型,成孔的最大直径 2000mm,最多的轴有 8 根 (2×4),即一次成孔 8 个,最大的钻孔深度为 70m (自水面向下算起) [9]。

国内 1977 年由冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院进行了室内试验和机械研制工作,于 1978 年底制造出国内第一台 SJB—1 型双搅拌轴中心管输浆的搅拌机械,并由江阴市江阴振冲器厂成批生产 (目前 SJB—2 型加固深度可达 18m)。1980 年初,在上海宝钢三座卷管设备基础的软土地基加固工程中首次获得成功。1980 年初,天津市机械施工公司与交通部第一航务工程局研究所利用日本进口螺旋钻孔机械进行改装,制成单搅拌轴和叶片输浆型搅拌机,并在 1981 年成功用于天津造纸厂蒸煮锅改造扩建工程中。上海探矿机械厂于 1994 年生产出 GDP—72 型双轴深层搅拌机,加固深度 18m,成孔直径 700mm。

值得提及的是,南京金陵石化公司炼油厂对增建 2 台、直径 60m 的 5 万 m^3 油罐下的软土地基 (其下卧有大于 10% 倾斜率的基岩),采用了单头直径 700mm、长 17~27m 的超长水泥土搅拌桩进行地基加固,每台油罐下布置桩 3000 多根。施工机械是由原 SJB 型深层搅拌机改制而成。实践结果表明,加固后的复合地基承载力 (240kPa) 是原天然地基 (70kPa) 的 3.5 倍,满足了设计的要求,而加固后罐中心的地基沉降量仅为 20cm 左右。这是国内首次采用超长水泥搅拌桩加固软基并获得成功的例子 [14]。

2002 年上海探矿机械厂为配合土壤水泥墙工法——SMW (Soil Mixing Wall) 工法而研究生产出二种三轴钻孔搅拌机 (ZKD65—3 型和 ZKD85—3 型),钻孔深度达 27~30m,钻孔直径 650~850mm。目前上海隧道工程股份有限公司为提高国产深层搅拌机的成墙深度、成墙质量和施工效率,研究开发了四轴深层搅拌机,搅拌成孔的直径为 4×700 mm,钻进成孔深度 25.2m,型钢插入深度 24m,成墙的厚度达 1.26m [35]。

与此同时,1997 年由上海申元岩土工程有限公司和上海航天局

809 研究所联合研制出的“施工监控自动化——SJC 型水泥搅拌桩注浆量监测记录仪”得到了广泛的采用。它不仅是施工时测定水泥浆量的一种装置，而且可以控制并记录水泥浆量在桩身范围内分布的均匀程度，有效地解决了水泥土搅拌桩施工质量失控的难题，使施工质量得到可靠保证。

粉体喷射搅拌法是采用粉体作为固化剂，不再向地基中注入附加水分，这样能充分吸收周围软土中的水分。因此加固后，地基的初期强度较高，对含水量高的软土其加固效果尤为显著。另外，施工中无噪声、无振动、无污染，对周围环境和建筑物也无不良影响，所以，该技术在国内外得到广泛应用。

粉体喷射搅拌法（Dry Jet Mixing Method 简称 DJM 法）最早由瑞典人 Kjeld Paus 于 1967 年提出了使用石灰搅拌桩加固 15m 深度范围内软土地基的设想，并于 1971 年瑞典 Linden-Alimat 公司在现场制成第一根用石灰粉和软土搅拌成的桩，1974 年获得粉喷技术专利。那时生产出的专用机械其桩径 500mm，加固深度 15m。

日本在 1978 ~ 1980 年对粉体喷射搅拌法进行了研究开发，1981 年起正式将此法用于实际工程。现有单轴和双轴二种粉喷搅拌机械，成孔直径 800 ~ 1000mm，钻孔深度 15 ~ 33m。日本羽田机场跑道的软土地基就是采用粉体喷射搅拌法进行处理的 [10]。

我国由铁道部第四勘测设计院于 1983 年用 DPP—100 型汽车钻改装成国内第一台粉体喷射搅拌机，并使用石灰作为固化剂，应用于铁路涵洞加固。1986 年开始使用水泥作为固化剂，应用于房屋建筑的软土地基加固。1987 年铁四院和上海探矿机械厂制成 GPP—5 型步履式粉喷机，成桩直径 500mm，加固深度 12.5m。此后，该厂又生产出 GPP—7 型步履式粉喷机，成桩直径 500mm，加固深度达 18m。当前国内粉喷机的成桩直径一般在 500 ~ 700mm 之间，成孔深度可达 18m。

1997 年，杭州森宇电控机械有限公司生产出“FZ—1 喷粉记录器”，它采用工业电脑能自动显示出不同深度处喷入的水泥粉数量，

对评价桩的质量提供了可靠的依据。

第二节 特点和适用范围

水泥石搅拌法加固软土地基，具有如下的独特优点：

- (1) 最大限度地利用了原土。
- (2) 搅拌时无振动、无噪声和无污染，可在密集建筑群中进行施工，对周围原有的建筑物及地下沟管影响很小。
- (3) 根据上部结构的需要，可灵活地采用柱状、壁状、格栅状和块状等平面布置加固型式。
- (4) 与钢筋混凝土桩基相比，可节约钢材并降低造价。

水泥石搅拌法最适用于加固各种成因的饱和软粘土。水泥固化剂一般适用于正常固结的淤泥与淤泥质土（避免产生负摩擦力）、粘性土、粉土、素填土（包括冲填土）、饱和黄土、粉砂以及中粗砂、砂砾（当加固粗粒土时，应注意有无明显的流动地下水，以防固化剂尚未硬结而被地下水冲洗掉；也要考虑到钻头阻力的增大而引起搅拌机钻进的困难）等地基的加固。

根据室内试验，一般认为用水泥作为固化剂，对含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等粘土矿物的软土加固效果较好；而对含有伊利石、氯化物和水铝石英等矿物的粘性土以及有机质含量高、pH 值较低的粘性土加固效果较差。

在粘粒含量不足的情况下，可以添加粉煤灰。而当粘土的塑性指数 I_p 大于 25 时，容易在搅拌头叶片上形成泥团，无法完成水泥石的拌和。当 pH 值小于 4 时，掺入百分之几的石灰，通常 pH 值就会大于 12。当地基土的天然含水量小于 30% 时，在采用干法施工时，为保证水泥充分水化，宜在搅拌喷水泥干粉的同时，掺入一定量的水。

在某些地区的地下水中含有大量硫酸盐（海水渗入地区），因硫酸盐与水泥发生反应时对水泥石具有结晶性侵蚀，会出现开裂、崩

解而丧失强度。为此，应选用抗硫酸盐水泥，使水泥土中产生的结晶膨胀物质控制在一定的数量范围内，藉以提高水泥土的抗侵蚀性能。

在我国北纬 40° 以南的冬季负温条件下，冰冻对水泥土的结构损害甚微。在负温时，由于水泥与粘土矿物的各种反应减弱，水泥土的强度增长缓慢（甚至停止）；但正温后，随着水泥水化等反应的继续深入，水泥土的强度可接近标准强度。

第三节 工程应用情况

由于水泥土搅拌法具有许多独特的优点而被广泛应用。在日本，这种方法可用于如图 1-1 所示的这些工程类型中，如：建筑物的地基加固、边坡加固与稳定、隔水帷幕、防止砂土液化、桥台后背填土加固、地下构筑物地基加固、基坑坑底土加固、支挡墙体工程和提高桩基础横向反力系数等。在国内的近十多年来，尤其是在珠江三角洲、长江三角洲等沿海软土地基中，同样被广泛应用。这些工程中，有沪宁、沪杭、深广等高速公路工程，深基坑支挡结构工程，港口码头水池的市政工程，以及建（构）筑物（如大型油罐）的软土地基加固等工程。

在基坑支挡结构中，由于围护结构场地狭小或环境的限制，所以采用水泥土搅拌法施工过程中的“套打”技术，即在水泥土墙体中套打钢筋混凝土钻孔围护灌注桩（直径 650mm），或套打直径 300 ~ 400mm 的树根桩作为基坑竖向斜支撑基础。另外，为获得较高的抗拔和抗压承载能力，一种新型锚杆粉喷桩复合地基也得到应用 [27] [32] [34]。

随着搅拌机械创新开发和施工效率的进一步提高，以及施工监控自动化装置的采用，水泥土搅拌法的工艺将更趋于完善，适应性将更为广泛。可以预见，水泥土搅拌法也将愈来愈多地体现出它的显著优点，更为被广大工程技术人员所采用。

第四节 工程地质勘察的要求

对拟采用水泥石搅拌法的工程，除了常规的工程地质勘察要求外，尚应注意查明：

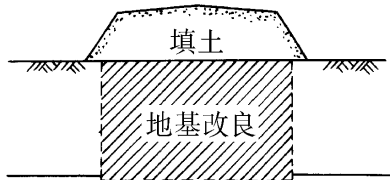
(1) 填土层的组成 特别是大块物质（石块和树根等）的尺寸和含量。大块石对水泥石搅拌法施工速度有很大的影响，所以必须清除大块石等障碍物后再予施工。

(2) 土的含水量 当水泥石配比相同时，其强度随土样的天然含水量的降低而增大。试验表明，当土的含水量在 50% ~ 85% 之间变化时，含水量每降低 10%，水泥石强度可提高 30% [1]。

(3) 有机质含量 有机质含量较高会阻碍水泥水化反应，影响水泥石的强度增长。故对有机质含量较高的明、暗浜填土及吹填土应予慎重考虑。许多设计单位往往采用在浜域内加大桩长设计方案，却得不到理想的效果，应从提高置换率和增加水泥掺入量的角度来保证浜域内的水泥石达到一定的桩身强度。工程实践表明，采用在浜内提高置换率（长、短桩结合）往往能得到理想的加固效果。对生活垃圾的填土不应采用水泥石搅拌法加固。

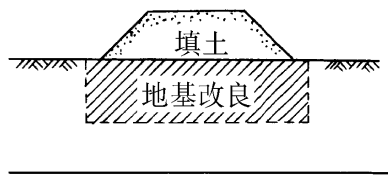
(4) 水质分析 对地下水的酸碱度（pH 值）以及硫酸盐含量等进行分析，以判断对水泥侵蚀性的影响。

填土等基础I



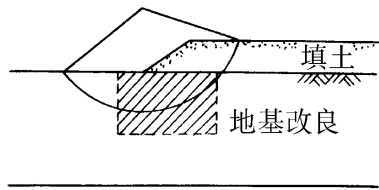
a)

填土等基础II



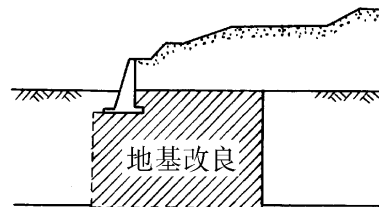
b)

防止填土的滑动破坏



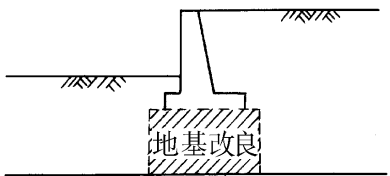
c)

防止高填土引起的滑动破坏



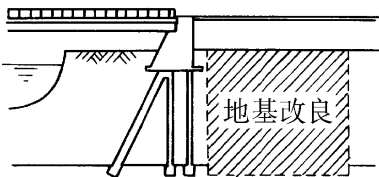
d)

护壁基础



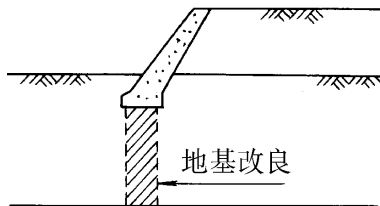
e)

桥台背面基础



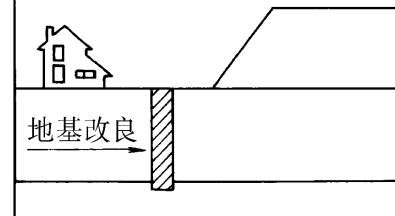
f)

堆石基础



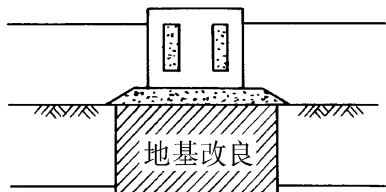
g)

防止牵引式的沉降



h)

构筑物基础



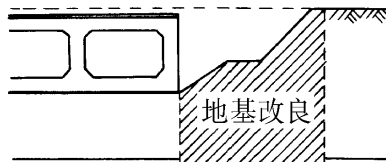
i)

地下埋设物基础



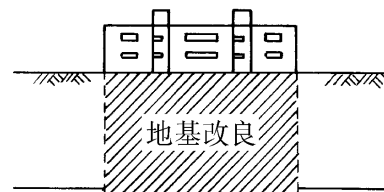
j)

开挖过程的斜坡坡面稳定



k)

中低层住宅基础



l)

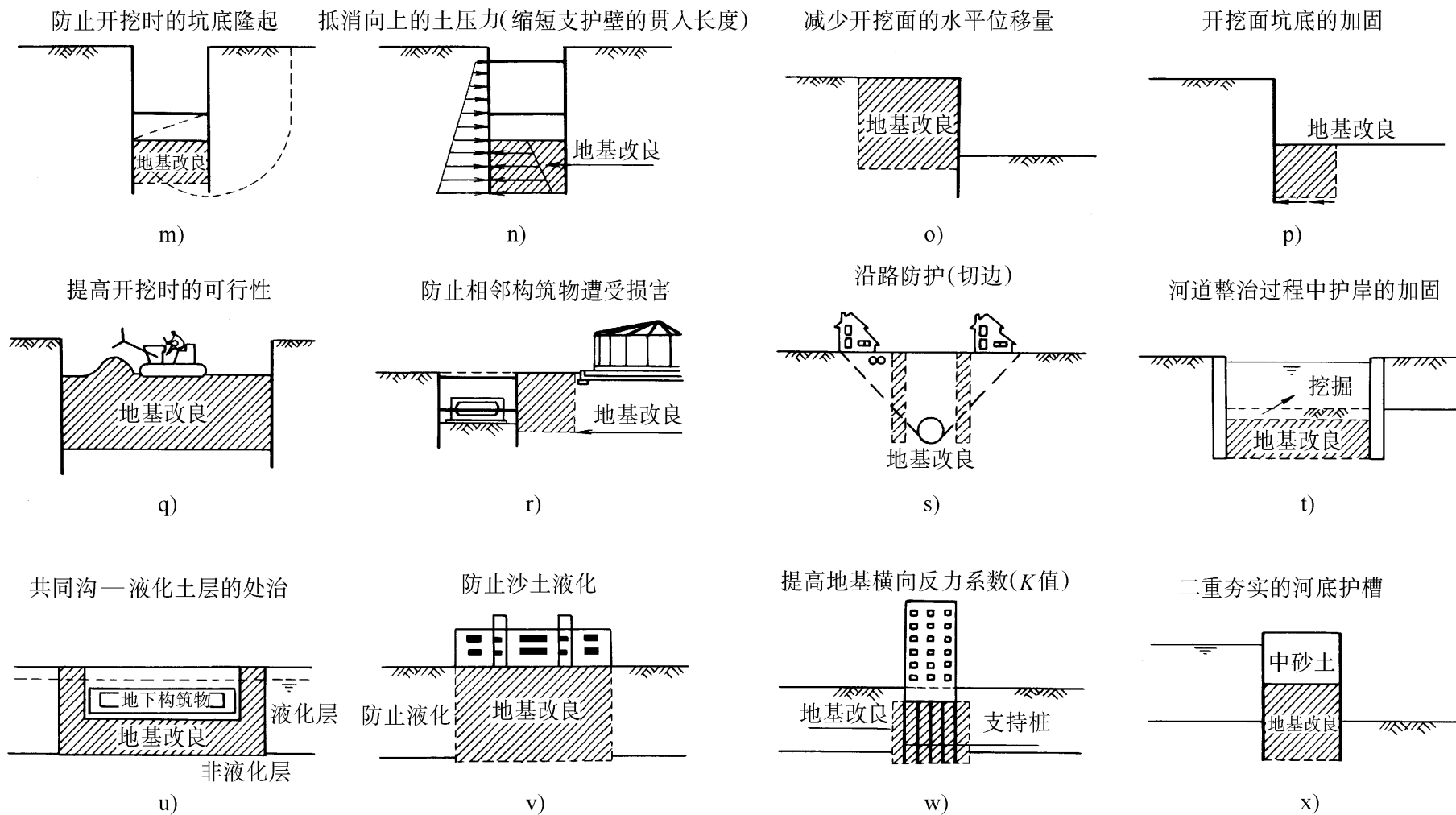


图 1-1 可供采用水泥土搅拌法加固地基的工程类型

第二章 水泥土的加固机理

水泥土搅拌法是用固化剂水泥浆（或水泥粉）与外加剂（石膏、木质素磺酸钙等）通过搅拌机输送到软土中并加以充分拌和；于是，固化剂和软土之间产生一系列的物理-化学反应，改变了原状土的结构，使之硬结成为具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥土固化材料（见图 2-1）。由于土质不同，其固化机理也有差别。应用于砂性土时，水泥土的固化原理类同于建筑上常用的水泥砂浆，具有很高的强度，固化时间也相对较短。然而，用于粘性土时，由于水泥掺量有限（7% ~ 20%）且粘粒具有很大的比表面积并含有一定的活性物质，水泥的水解和水化反应完全处于粘土颗粒包围之下，硬化速度比较缓慢，固化机理也比较复杂。

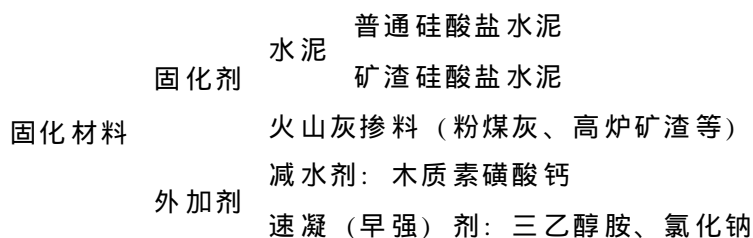


图 2-1 固化材料

第一节 一般水泥的固化原理

一、水泥的水解和水化反应

普通硅酸盐水泥主要是由氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁及三氧化硫等组成，由这些不同的氧化物分别组成了不同的水泥矿物：硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙、硫酸钙等。用水泥加固软土时，水泥颗粒表面的矿物很快与软土中的水发生水解和水化反应，生成氢氧化钙、含水硅酸钙、含水铝酸钙及含水铁酸钙等化合物。

各自的反应过程如下 [8]：