

建筑地基处理技术丛书

水泥粉煤灰碎石桩 复合地基

徐至钧 主编

徐至钧 王曙光 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

建筑地基处理技术丛书

水泥粉煤灰碎石桩复合地基

徐至钧 主编

徐至钧 王曙光 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粉煤灰碎石桩复合地基的内容,深入介绍这种地基处理的设计、施工经验,地基处理的应用范围,质量检验及验收,技术经济分析等,并收集了工程应用实例十二例,以便帮助读者加深对新规范的理解和推广使用。

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

水泥粉煤灰碎石桩复合地基/徐至钧,王曙光编著.

—北京:机械工业出版社,2004.1

(建筑地基处理技术丛书)

ISBN 7-111-13743-4

I. 水... II. ①徐...②王... III. 人工地基
IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 122529 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:冉晓华 责任校对:张晓蓉

封面设计:姚毅 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·9 印张·262 千字

0001—4000 册

定价:22.00 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”,针对新规范的主要内容,分成七个专题,深入地介绍各种地基处理的设计、施工经验和地基处理的应用范围等,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。

本书是丛书中的一本,主要介绍水泥粉煤灰碎石桩复合地基的地基处理概论、复合地基的性状、垂直荷载作用下水泥粉煤灰碎石桩复合地基的性状、材料配合比及其力学性能、褥垫层的作用、复合地基的设计计算和施工、质量检验及验收等,并收集了各类有代表性的工程应用实例共十二例。最后通过实例分析技术经济效益,说明采用水泥粉煤灰碎石桩复合地基的工程费用比预制方桩节省 54.8%,比 $\phi 600\text{mm}$ 灌注桩节省 53.6%,比采用 $\phi 400\text{mm}$ 的预应力管桩节省 65.6%,比各类桩基平均可节约工程费用 58%,而施工工期仅为其他桩施工工期的 15%,具有明显的经济优势和缩短工期的效益,在合适的土质中可以推广应用。

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在工作中参考。

本书由教授级高级工程师徐至钧主编,深圳粤地建设工程有限公司董事长、总经理王曙光硕士协助编写,并得到中国建筑科学研究院阎明礼研究员大力支持,为全书提供了大量的工程应用资料,谨表谢意。

在编写过程中还有深圳市地质建设公司李景博士和深圳张亦农、杨瑞清、郭晰娥、徐斐、周作仁、宋宏伟、陈月妮、吕会云、周超宏等参加了部分编写和提供实例等工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，本书难免有欠妥和错误之处，敬请读者不吝赐教。

编著者

2003 年 9 月于深圳

目 录

前言

第一章 概论	1
一、地基处理技术的发展	1
二、各类地基处理技术发展简况	4
三、地基处理方法分类及应用范围	10
四、对今后地基处理发展的几点意见	15
五、地基处理的基本原则	16
第二章 复合地基的性状	18
一、纵向增强体复合地基承载力计算模式	18
二、刚性桩极限承载力计算公式	22
三、柔性桩极限承载力计算	22
四、散体材料桩极限承载力计算	23
五、桩间土极限承载力计算	27
六、复合地基加固区下卧层承载力验算	30
第三章 垂直荷载作用下水泥粉煤灰碎石桩复合地基的性状	32
一、水泥粉煤灰碎石桩一般规定	33
二、水泥粉煤灰碎石桩的作用机理	34
三、桩、土受力特性	37
四、复合地基变形特性	43
五、边载对水泥粉煤灰碎石桩复合地基承载特性的影响	53
第四章 水泥粉煤灰碎石桩材料的配合比及性能	60
一、水泥粉煤灰碎石桩材料配合比及其力学性能	60

二、振动沉管成桩工艺桩体材料的性状	62
三、长螺旋钻管内泵压灌注成桩工艺桩体材料的性状	65
第五章 褥垫层的作用	71
一、褥垫层技术	71
二、褥垫层的作用	71
三、褥垫层的合理厚度	76
四、褥垫层在刚性桩复合地基中的作用	77
第六章 水泥粉煤灰碎石桩复合地基设计计算	83
一、水泥粉煤灰碎石桩复合地基设计对勘察的要求	83
二、土的分类	84
三、土的变形和强度特性	85
四、水泥粉煤灰碎石桩	89
五、《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)的规定	93
六、水泥粉煤灰碎石桩复合地基变形计算	96
七、水泥粉煤灰碎石桩复合地基设计	104
八、复合地基中桩体间距的设计计算	112
九、复合地基单桩载荷试验推算大型载荷试验的方法	120
十、当前对水泥粉煤灰碎石桩使用中的误区必须纠正	131
第七章 水泥粉煤灰碎石桩复合地基施工	133
一、水泥粉煤灰碎石桩施工技术发展简况	133
二、《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)对施工的要求	136
三、振动沉管水泥粉煤灰碎石桩施工工艺	139
四、长螺旋钻管内泵压水泥粉煤灰碎石桩施工工艺	150
五、清土及水泥粉煤灰碎石桩桩头处理	162
六、褥垫层铺设及质量控制	164
七、水泥粉煤灰碎石桩复合地基冬季施工措施	166
第八章 施工质量检验及验收	169

一、水泥粉煤灰碎石桩施工中易出现的问题及解决措施	169
二、施工质量检测	170
三、《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)对质量检验的要求	171
四、水泥粉煤灰碎石桩复合地基施工验收	172
第九章 工程应用实例	173
工程实例一 山东省德州地区医药管理局综合住宅楼地基处理工程	173
工程实例二 航天部 621 所 35、36 号住宅楼地基处理工程	177
工程实例三 浦镇车辆厂生活区住宅楼地基处理工程	179
工程实例四 华亭嘉园小区超高层建筑地基处理工程	188
工程实例五 嘉和丽园 A、B、C 座楼地基处理工程	207
工程实例六 望京新城 A4 区 II 组团 6 栋高层建筑地基处理工程	217
工程实例七 北京大屯慧忠北里三塔 3~5 号楼地基处理工程	229
工程实例八 南京造纸厂地基处理工程	235
工程实例九 仪征化纤厂涤纶长丝主车间地基处理工程	241
工程实例十 天津盘山发电厂冷却塔地基处理工程	246
工程实例十一 CFG 桩在高速公路软基加固中的应用	249
工程实例十二 山东黄岛某油库 10 万 m ³ 油罐基础采用 CFG 桩	252
第十章 水泥粉煤灰碎石桩复合地基加固地基后的技术经济对比	257
一、水泥粉煤灰碎石桩长螺旋成孔泵送混凝土成桩复合地基在沧州的应用	257
二、从多种地基基础处理方式的住宅楼沉降实测分析看水泥粉煤灰碎石桩的技术经济效益	262
附录 A 复合地基载荷试验要点	272
附录 B 国家地基规范对建筑物变形允许值的规定	274
参考文献	276

第一章 概 论

一、地基处理技术的发展

近些年来,基本建设规模不断扩大,在建筑、水利、交通和铁道等土木工程建设中,人们愈来愈多地遇到不良地基问题,各种不良地基需要进行地基处理才能满足建造构筑物的要求。地基处理是否恰当关系到整个工程质量、进度和投资。合理地选择地基处理方法和基础形式是降低工程造价的重要途径之一。地基处理日益得到人们重视。

自第五届全国土力学及基础工程学术讨论会(厦门,1987年)以来,国内在各种地基处理技术的普及和提高两个方面都得到了较大的发展,积累了丰富的经验。在此期间,召开了多次全国性和区域性、综合性或专项地基处理技术学术讨论会。中国土木工程学会土力学及基础工程学会于1989年在烟台召开了第二届全国地基处理学术讨论会,收入讨论会论文集论文131篇;中国建筑学会地基基础学术委员会于1989年在南京召开了全国地基基础新技术学术会议,收入论文集的论文地基处理方面占1/3以上;1990年在承德市召开了复合地基会议,收入论文集论文77篇,还有其他兄弟学会召开了各种形式的地基处理学术讨论会。1988年中国建筑工业出版社出版了由地基处理学术委员会组织编写的《地基处理手册》,受到广大同行的欢迎。中国土木工程学会学术部以及有关单位还在全国各地举办了各种类型的地基处理技术研讨班。这些活动对地基处理技术的推广和普及起了很好的作用。中国建筑科学研究院会同有关高校和科研单位,组织编写了两版《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—91)(JGJ79—2002)。上海、天津、深圳、浙江、福建等地已经编制了地区性地基和地基处理规范,根据各自的情况,因地制宜,把一些地基处理方法编入规范。应广大同行的要求,中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会和浙江大学土木工程学系共同主办《地基处理》刊物为同行

们提供了推广、交流地基处理新技术的园地。

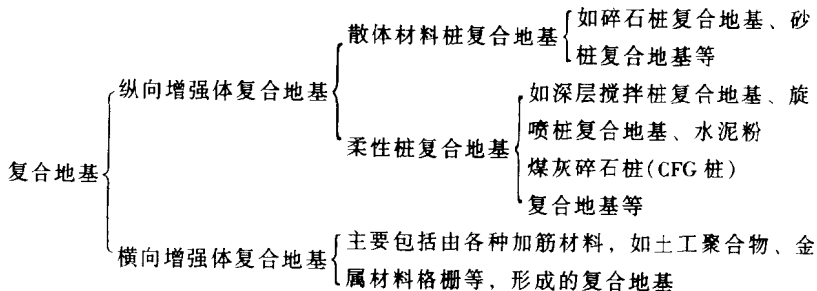
近几年来,地基处理的发展主要表现在以下几个方面:

(1) 对各种地基处理方法的适用性和优缺点有了进一步的认识,在根据工程实际选用合理的地基处理方法上减少了盲目性。能够注意从实际出发,因地制宜,选用技术先进、确保质量、经济合理的地基处理方案。对有争议的问题,能够采取科学的态度,注意调查研究,开展试验研究,在确定地基方案时持慎重态度。能够注意综合应用多种地基处理方法,使选用的地基处理方案更加合理。

(2) 地基处理能力的提高。一方面,已有的地基处理技术本身的发展,如施工机具、工艺的改进,使地基处理能力提高。另一方面,近年来,各地在实践中因地制宜发展了一些新的地基处理方法,取得了很好的社会效益。各类地基处理技术的发展情况将在第二部分介绍。

(3) 复合地基理论的发展。随着地基处理技术的发展和各种地基处理方法的推广使用,复合地基概念在土木工程中得到愈来愈多的应用。工程实践要求加强对复合地基基础理论的研究。然而对复合地基承载力和变形计算理论的研究还很不够,复合地基理论正处于发展之中,还不够成熟,甚至对什么是复合地基无论是学术界还是工程界尚无统一认识。

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强,或被置换,或在天然地基中设置加筋材料,加固区是由基体(天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。加固区整体是非均质和各向异性的。根据地基中增强体的方向又可分为纵向增强体和横向增强体复合地基。纵向增强体复合地基根据纵向增强体的性质,可分为散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基。复合地基的分类如下:



横向增强体复合地基、散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基它们荷载传递机理是不同的,应该分别加以研究。国内也有人狭义地只把通过以桩柱形式置换形成的由填料与地基土相互作用并共同承担荷载的地基定义为复合地基。

复合地基有两个基本特点:①它是由基体和增强体组成的,是非均质和各向异性的;②在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载的作用。后一特征使复合地基区别于桩基础。一般说来,对桩基础,荷载是先传给桩,然后通过桩侧摩擦阻力和桩底端承力把荷载传递给地基土体的。若钢筋混凝土摩擦桩桩径较小,桩距较大,形成所谓疏桩基础,桩土共同承担荷载,也可视为复合地基,应用复合地基理论来计算。

人工地基中有均质地基、双层地基和复合地基等。事实上,对人工地基进行精确分类是很困难的。大家知道,天然地基也不是均质的、各向同性的半无限体,天然地基往往是分层的,而且对每一层土,土体的强度和刚度也是随着深度变化的。天然地基需要进行地基处理时,被处理的区域在满足设计要求的前提下尽可能小,以求较好的经济效果。各种地基处理方法在加固地基的原理上又有很大差异。因此,将形成的人工地基进行精确分类是很困难的。然而,上述的分类有利于我们对各种人工地基的承载力和变形计算理论的研究。按照上述的思路,常见的各种地基,包括天然地基和人工地基粗略地大致上可分为均质地基、双层地基(或多层地基)、复合地基和桩基四大类。以往对均质地基和桩基础的承载力和变形计算理论研究较多,而对双层地基和复合地基的计算理论研究较少。特别是对复合地基,其承载力和变形计算的一般理论尚未形成,需加强研究。

各国学者对碎石桩复合地基研究较多,通过载荷试验积累了不少资料,并提出了多个碎石桩复合地基承载力计算公式。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法形成的水泥土桩的应用,人们开始注意柔性桩复合地基的研究。小桩技术的应用还促使人们注意小桩复合地基设计计算方法的研究。复合地基承载力计算应以增强体和天然地基土体共同作用为基础。对桩体复合地基,人们不仅注意散体材料桩和柔性桩的承载力研究,还注意桩间土承载力的研究。起初用天然地基承载力作

为桩间土承载力,现在则已开始考虑由固结引起强度增长、周围桩体的围护、成桩过程中的挤压以及扰动等因素对桩间土承载力的影响。近年来对桩土应力比的确定及影响因素开展了大量研究。试验资料分析表明,桩土应力比与桩体性质、桩距、天然地基承载力、复合地基强度发挥度等因素密切相关,还与施工方法、质量控制等因素有关。桩土应力的确定通常采用现场载荷试验,其测定值也受荷载板尺寸的影响。近几年来,各类复合地基承载力与变形计算的研究工作愈来愈得到人们的重视。然而复合地基计算理论的发展,还远远不能满足工程实践的要求。

二、各类地基处理技术发展简况

1. 强夯法和强夯置换法

强夯法处理地基首先由法国 Menard 技术公司于 20 世纪 60 年代末创用。我国于 1978 年引进,交通部第一航务工程局科研所及协作单位在天津首先开展试验研究。由于该法设备简单、效果显著、经济和施工快,很快得到推广。除强夯挤密外,近年来,强夯置换得到不少应用。强夯置换和强夯挤密在加固机理上是不同的,应用范围也不相同。强夯挤密法常用来加固碎石土、砂土、低饱和度的粘性土、素填土、杂填土、湿陷性黄土等各类地基。对于饱和度较高的粘性土等地基,如有工程经验或试验证明采用强夯法有加固效果的也可采用。通常认为强夯挤密法只适用于塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。对于设置有竖向排水系统的软粘土地基,是否适用强夯法处理目前尚有不同看法。对于厚度小于 6m 的软粘土层采用强夯置换法处理,边夯边填碎石等粗粒料形成深度为 3~6m,直径为 2m 左右的碎石桩体与周围土体形成复合地基,也已取得较好的加固效果。

强夯法至今还没有一套成熟的理论和设计计算方法,还需要在实践中总结和提高。

强夯施工主要设备包括夯锤、起重机、脱钩器和门架等部分。工程实践表明,施工机具和工艺直接影响加固效果和经济效益。近几年来人们重视强夯机具装置的科学化、系列化和规格化的研究。

强夯置换对厚度小于 6m 的较弱土层,边夯边填碎石,形成深度

3~6m, 直径为 2m 左右的碎石桩体与周围土体形成复合地基。

强夯造成的振动、噪声等公害也应引起足够的重视。

2. 排水固结法

排水固结法又称预压法, 适用于淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和粘性土地基。饱和软粘土在荷载作用下, 孔隙中的水慢慢被排出, 土的孔隙比减小, 随着超静孔隙水压力消散, 有效应力提高, 土的强度增加。通过排水固结法处理地基可以使地基沉降在加载预压期间大部或基本完成, 减少建筑物在使用期间的沉降和沉降差, 也可提高地基承载力。排水固结法是由排水系统和加压系统两部分共同组合而成的。排水系统通常有普通砂井、袋装砂井和塑料排水带等; 加压系统通常有堆载预压法、真空预压法、降低地下水位法、电渗法和联合法。近几年来, 排水系统采用塑料排水带和袋装砂井较多, 加压系统采用堆载预压和真空预压法较多, 也有采用真空加堆载联合预压法, 以及利用建筑自重加载法。

袋装砂井和塑料排水带的长细比大, 井阻影响得到人们的重视。近年来非理想井的固结理论得到发展, 谢康和和曾国熙(1989 年)为非理想井的设计提供了简易曲线和设计方法。为了消除地基在使用荷载下的主固结变形, 减小或消除次固结变形, 可以采用超载预压。所谓超载预压就是在预压过程中采用比使用荷载大的预压荷载预压。宁波机场和温州机场都建筑在深厚的软粘土地基上, 为满足场道对地基变形和回弹模量的严格要求, 采用超载预压处理均取得良好效果。

真空预压法一般能够取得相当于 78~92kPa 的等效荷载, 为了进一步提高加固效果, 可采用真空-堆载联合预压法。几年来根据工程要求已获得相当于 130kPa 的等效荷载。真空-堆载联合预压法先后在天津、上海和福州等地得到应用。对真空预压法的有效加固深度学术界看法不一致, 有的学者认为有效深度在 10m 以内, 有的则认为可达 20m, 甚至更深。真空预压的有效深度需引起重视和进一步研究。袋装砂井也存在一个有效深度问题, 有的日本学者认为袋装砂井有效深度在 15m 以内。对于超软弱地基, 要注意防止地基固结过程中塑料排水带或袋装砂井的折断问题。要研制柔性塑料排水带以满足工程需要。

3. 振冲法

利用振动和水冲加固地基的方法叫做振冲法。振冲法由德国 S.Steuerman 在 1939 年提出,我国应用始于 1977 年。由于大量工业民用建筑、水利和交通工程地基抗震加固的需要,该法得到迅速推广。振冲法早期用来振密松砂地基,后来也应用于粘性土地基,振冲法演变成两类:振冲密实法和振冲置换法。振冲密实法的加固原理是一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂层发生液化,砂颗粒重新排列,孔隙减少,另一方面依靠振冲器的水平振动力,在加回填料情况下还通过填料使砂层挤压加密。振冲置换的加固原理是利用振冲器在高压水流下边振边冲,在软弱粘性土地基中成孔,再在孔内分批填入碎石等坚硬材料,制成一根根桩体,碎石桩体和原地基构成碎石桩复合地基,以提高地基承载力,减小地基沉降。振冲密实法适用于颗粒含量小于 10% 的松砂地基;振冲置换法适用于不排水抗剪强度大于 20kPa 的粘性土、粉土和人工填土等地基,有时还可用来处理粉煤灰地基。

振冲法施工需要大量水,并在施工过程中排放泥浆,污染现场。为了克服这一缺点,干法振动加固地基技术得到应用。利用干法振动成孔器在软弱地基中设置碎石桩,干法振动加固地基技术主要适用于松散的非饱和粘土、杂填土和素填土,以及二级以上非自重湿陷性黄土。

另外,各地还因地制宜应用沉管干夯挤密碎石桩、干振道渣石屑桩、钢渣桩加固地基。为了提高碎石桩桩体本身的刚度,发展了水泥粉煤灰碎石桩技术和低标号混凝土桩技术。这类低标号柔性桩形成的复合地基具有承载力提高幅度大、变形模量高的特点,是一种有发展潜力的地基处理技术。

4. 石灰桩、土桩、灰土桩法

石灰加固地基的传统方法受到了国内外岩土工程工作者的重视。1989 年 3 月我国在上海召开了一次石灰加固软弱地基的专题学术讨论会,交流论文 25 篇。1989 年 7 月第二届全国地基处理学术讨论会上又作了进一步的交流和讨论,会上对石灰桩法加固地基技术的现状和展望作了较全面的综述和总结。

石灰桩法工艺简单,不需复杂的施工机具,应用较广泛。其加固

机理包括：打桩时挤密、石灰吸水、膨胀、升温、离子交换、胶凝、碳化和置换等，但基本加固作用则可归纳为打桩挤密、桩周土脱水挤密和桩身的置换作用。从提高承载能力看，在正常情况下置换作用占的份额最大。经验与实践证明，只要填充石灰达到必要的密实度则不会出现软心现象。另外，采用粉煤灰等适宜的掺合料也有助于避免发生软心现象。杭州和湖北两地挖出的工程桩桩身的抗压强度分别达到 750kPa 和 564kPa。桩土应力比是衡量置换作用的主要指标。要满足一般工程要求，不需追求过高的应力比。当需要提高应力比时除了要保证桩身具有较高强度外，桩还必需打穿软土层以免桩尖刺入降低应力比。

目前在实用概念上认为，若加固着眼点为石灰的吸水与膨胀作用，则必须采用新鲜生石灰且不加掺和料，最好采用细桩径小桩距。若放弃石灰熟化的吸水脱水作用（此作用提高地基承载力不超过 5%）则用熟石灰亦能取得好的加固效果，掺入粉煤灰可节约石灰并可达到与不掺粉煤灰相近的效果，最高掺和量可达 80% ~ 90%，此时称为二灰桩。

当被加固的渗透系数太小时不利于软土脱水固结，脱水加固效果很小；若被加固土的渗透性太大，孔中充水，石灰难予密实，效果不好；工程实例中发生过浓酸碱腐蚀损坏灰土的实例。在考虑采用石灰桩法加固地基时，应注意石灰桩法的适用条件，以及正确的施工方法。采用石灰桩加固地基有成功的经验，但也有些达不到预期效果。

此外 Broms (1987 年) 还指出，当用石灰桩处理软土时，如果遇有透水砂层或粉土层时则石灰的膨胀比粘土地基的固结来得快，桩体积增加将会产生软粘土地基的隆起而不是固结和含水量的减小。

砂桩法于 19 世纪 30 年代起源于欧洲，50 年代引进我国。起初砂桩法用于处理松散砂地基，视施工方法不同，又可分为挤密砂桩和振密砂桩。后来，也有用来加固软弱粘性土地基，通过砂桩的置换作用，形成砂桩复合地基，对其进行加载预压，也可加快地基固结。

土桩和灰土桩法在我国西北和华北地区得到广泛应用。土桩和灰土桩适用于地下水位以上的湿陷性黄土、杂填土和素填土等地基。

在采用土桩和灰土桩加固地基时，近几年来重视工业废料的利

用,如采用石灰和粉煤灰二灰桩处理粉煤灰地基和杂填土地基等。为了利用城市渣土,北京地区发展了渣土桩专利技术。它不但消除了渣土对环境的污染,而且为地基处理提供了廉价的原材料。在挤密桩施工中,除了打管挤密、爆扩挤密和冲击锥挤密外,还发展了采用橄榄锤锤击挤密成桩法,该法具有设备简单、施工方便和不需三材等优点。

5. 深层搅拌法和高压喷射注浆法

深层搅拌法是通过特制机械沿深度将固化剂与地基土强制搅拌就地成桩加固地基的方法,当固化剂(水泥或石灰)为粉体时又称粉体喷射搅拌法。深层搅拌适用于处理淤泥、淤泥质土和含水量较高的地基及承载力标准值不大于 120kPa 的粘性土、粉土等软土地基。当处理泥炭土或地下水具有侵蚀性时宜通过试验确定其适用性,冬季施工应注意负温对处理效果的影响。

深层搅拌法目前在国外特别是日本和美国应用很广,国内近些年发展较快,在房屋地基加固、开挖工程代替板桩支护、铁路软基加固等方面,有大量的工程实践,对整套技术已有一定经验。在机械设备上虽然分别由冶金工业部建筑研究总院和交通部规划设计研究院、天津机械化施工公司和交通部第一航务工程局研究所、浙江大学岩土工程研究所等单位研制成了双搅拌轴中心管输浆及单轴搅拌叶片输浆的浆体深层搅拌专用机械,铁四院和上海探矿机械厂研制成深层粉喷搅拌专用机械,但与国外同类型机械相比还有一定的差距。深层搅拌法可以根据工程需要做块状、格子状、壁状和圆柱状等形状的加强体,同时具有施工中无振动、无噪声、无地面隆起、不排污、对相邻建筑不会产生有害的影响等优点,该法较受工程界欢迎。深层搅拌桩地基的设计可按复合地基考虑。许多工程实测资料表明,在正确设计和施工的情况下,深层搅拌法处理的地基沉降较小。

高压喷射注浆法是将带有特殊喷嘴的注浆管置于土层预定深度,以高压喷射流使固化浆液与土体混合、凝固硬化加固地基土体的方法。它适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基。当土中含有较多的大粒径块石、坚硬粘性土、大量植物根茎或有过多的有机质时,应根据现场试验结果确定其适用程

度。遇地下水流速过大和已涌水的工程应慎重使用。注浆形式分旋喷、定喷和摆喷,施工分单管法、二重管法及三重管法。

高压喷射注浆法用于处理新建和原有建筑的地基处理的作为深基挡土结构、坑底加固、防止管涌与隆起、处理隧道坍方和修建地下防水帷幕等都有很多工程实例。例如,1989年曾成功地应用高压喷射注浆法处理了18层近68m高的威海大厦软弱地基,经观测该建筑下沉均匀,沉降量仅 $0.7 \sim 1.3\text{cm}$ 。哈尔滨松花江江堤应用高压喷射注浆法修建板墙防渗工程2km多,深 $25 \sim 30\text{m}$,板墙面积达 5.1万 m^2 。

为适应隧道、地下工程及深基开挖等施工的需要,水平高压喷射及灌浆加固技术在意大利、日本和联邦德国得到较快的发展。意大利Radio公司还开发了可同时在钻进中检测地层土质、机器控制和自动调节设计浆量并收集反馈信息的机械,国内也很重视并已进行过一些探索性试验。

6. 灌浆法和化学处理

灌浆法是沿用至今的一种传统方法,它用于处理黄土、砂土以及洞穴、裂缝等均能获得很好的效果。近些年在改进浆液材料如用超细水泥和其他新掺合剂,以及灌浆对环境的污染等方面做了不少工作。

实践证明,在渗透性差的粘土地基中灌浆液难以有效地灌入,加固效果常不理想。新的压密灌浆法(Compaction grouting)的应用,使灌浆加固粘土获得了新的生命力。压密灌浆与一般灌浆法不同之处是采用的浆液稠度大,灌浆压力高,浆液通过挤压形成浆泡,或填充裂隙使土体强化。这种方法始于20世纪50年代,之后不断得到完善(Brown和Warner,1969年),近些年受到重视。美国和法国已有很多工程实例,在第十二届国际土力学会上法国提出三篇论文讨论了这种灌浆方法的适用条件和工程实例,国内在石油勘探方面与采油方面大量应用这种方法作为压裂岩扩大采油量的有效手段。在铁路上用以加固黄土和软土地基的试验取得了效果。早在20世纪70年代铁路上曾用类似的方法加固桥基:一处由于软土深度大加固后虽初期有效,但长期却未能解决下沉的问题;另一处为浅层处理,因发生地面隆起影响了加固的效果。可见应用这种方法还必须考虑其适用条件。