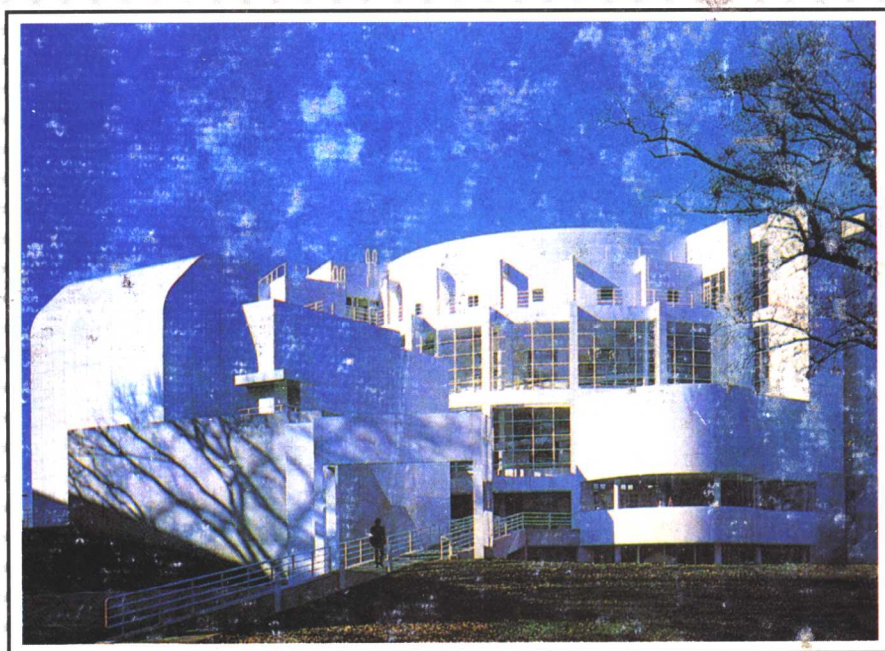


当代 CWCCEAST

当代土木建筑科技丛书 主编 许溶烈

Collected Works in Contemporary Civil Engineering
and Architectural Science and Technology



地基处理新技术

龚晓南 著

陕西科学技术出版社

CWCCEAST

地基处理新技术

龚晓南 著



陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

地基处理新技术/龚晓南著. —西安:陕西科学技术出版社, 1997. 6(2002. 2 重印)
(当代土木建筑科技丛书)
ISBN 7-5369-2648-0

I. 地... II. 龚... III. 地基处理-新技术
IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 011235 号

出 版 者	陕西科学技术出版社
	西安北大街 131 号 邮编 710003
	电话(029)7211894 传真(029)7218236
	http://www.snstp.com
发 行 者	陕西科学技术出版社
	电话(029)7212206 7260001
印 刷	西北工业大学印刷厂印刷
规 格	787mm×1092mm 16 开本 5 插页
印 张	13.25
字 数	308 千字
版 次	1997 年 6 月第 1 版
	2002 年 3 月第 2 次印刷
定 价	24.40 元

(如有印装质量问题,请与承印厂联系调换)



作者简介

龚晓南博士,男,1944年10月生,浙江金华人,浙江大学土木工程学系教授,博士生导师。1967年清华大学土建系工业与民用建筑专业毕业,1984年获浙江大学岩土工程专业博士学位,1986年获德国洪堡基金会奖学金赴 Karlsruhe 大学从事研究工作,1988年回国。主要从事软粘土地基性状、地基处理技术、复合地基理论、土塑性力学、基坑工程设计、土工问题计算机分析等方面的教学、研究工作。已发表论文120多篇,主编会议论文集8部,编著与参与编写著作10部,主要著作有《土塑性力学》、《复合地基》、《高等土力学》、《工程材料本构关系》等。

内容简介

本书全面总结、介绍了我国近年发展和应用的地基处理新技术。主要内容包括:地基处理原理和分类、复合地基理论概要、各项地基处理技术及最新发展、已有建(构)筑物地基加固和纠偏技术。本书重视理论与实践相结合,注重介绍新技术、新发展,重视工程实用。本书可供土建、水利、交通、铁道等部门从事勘察、设计、施工、科研的技术人员和管理人员以及大专院校师生参考。

当代土木建筑科技丛书编委会

主 编：许溶烈

编 委：（以姓氏笔划为序）

丁大钧	丁士昭	丁金粟	毛朝屏
刘 季	刘大海	江见鲸	许溶烈
安 昆	李家宝	李 秀	付昌宁
何广乾	宋绍铭	严星华	杨嗣信
陈家辉	陈启高	陈祥福	陈寿梁
陈一诺	张 珑	张钦楠	张祖刚
罗祥麟	周兆桐	郑坤生	郑道宏
秦 荣	袁文伯	徐永基	徐正忠
徐培福	高渠清	梅占馨	韩大建
程庆国	程耿东	谢礼立	谢行皓
鲍家声	虞福京	魏 珪	

序

中华人民共和国建设部总工程师

许溶烈

经济建设必须依靠科学技术，科学技术也必须面向经济建设。建国以来，我国土木建筑理论和技术得到了空前的发展，兴建了很多有代表性的工程，如广东国际大厦、上海南浦大桥、大瑶山隧道、秦山核电站等。这些工程规模宏大、技术难度高，有的填补了我国空白，有的达到了国际先进水平，充分体现了我国当代土木建筑的科技水平。

为适应深化改革与发展现代化建设事业的需要，由国内著名专家、学者、教授和管理者共同倡议：以高度的时代责任感和献身精神组织编著、出版能够反映当代国内外土木建筑科技方面近年来新成就的系列丛书。经过广泛调查研究和征求意见，现决定编辑出版当代土木建筑科技丛书，英文译为：“Collected Works in Contemporary Civil Engineering and Architectural Science and Technology”。

序

这套丛书的指导思想是：贯彻“百花齐放、百家争鸣”的方针，坚持理论与实践相结合的原则，为土木建筑科技人员服务，为工程建设服务。丛书内容包括工程理论和工程实践。主要分为建筑学、工程结构、工程力学、基础工程、电脑应用、技术经济、地下工程、抗震防灾、城市规划、超高层建筑、大跨度空间结构和工程风险分析及有关交叉学科、边缘学科等方面的著作。

丛书编辑出版过程中，得到了国家建设部科技委以及有关司局、中国土木工程学会和中国建筑学会的领导和同志们的关心和支持。同时，也得到陕西省新闻出版局和陕西科学技术出版社的领导和同志们的关心和支持。在此我仅以编委会的名义向参与丛书编著、出版等工作单位的领导和专家致以衷心的感谢。

我期望本丛书的相继出版、发行，对广大读者会有所裨益，本丛书不足之处，敬请读者批评指正。

前言

我国地域辽阔，各地工程地质条件差异很大，各类软弱地基分布面广。在软弱地基上进行土木工程建设，往往需要对天然地基进行地基处理，形成人工地基以满足建（构）筑物对地基的要求。近十几年来，随着土木工程建设持续、高速发展，地基处理技术发展很快，许多地基处理新方法应运而生。

应当代土木建筑科技丛书编委会邀请，撰写《地基处理新技术》。笔者力求全面总结、介绍我国近年发展和应用的地基处理新技术，主要包括：地基处理原理和分类，复合地基理论概要，各项地基技术及最新发展，已有建（构）筑物地基加固和纠偏技术。

岩土工程具有很强的区域性，地基处理一定要坚持因地制宜。每一种地基处理方法都有一定的适用范围。在学习每种地基处理技

前言

术时，一定要深入了解其加固机理，掌握其应用范围。推广应用地基处理新技术，一定要结合当地实际条件，因地制宜，并重视总结地区经验。

《地基处理新技术》撰写过程中得到许多专家和同行的鼓励和帮助，吸收了许多科研、教学、设计和施工单位的研究成果，除书后所列参考文献外，笔者还参阅了杨鸿贵、叶书麟、张继尧、李明逵、全钰琬、李杰、方永凯、王新江、郑永胜等的研究报告，在此一并表示感谢。

限于水平和认识的局限性，书中难免有错误和不当之处，敬请读者及时给予指正。

目录

第 1 章	绪论	【 1 】
1.1	地基处理的目的和意义	【 1 】
1.2	地基处理原理和分类	【 4 】
1.3	地基处理规划程序	【12】
1.4	复合地基理论概要	【14】
1.4.1	定义与分类	【14】
1.4.2	竖向增强体复合地基承载力计算	【14】
1.4.3	水平向增强体复合地基承载力计算	【21】
1.4.4	复合地基沉降计算方法	【22】
1.5	地基处理技术最新发展	【25】
第 2 章	地基处理技术及最新发展	【27】
2.1	排水固结法	【27】
2.1.1	概述	【27】
2.1.2	加固原理和计算理论	【29】
2.1.3	堆载预压法设计	【36】
2.1.4	超载预压法设计	【41】
2.1.5	真空预压法设计	【42】
2.1.6	真空和堆载联合预压法	【43】
2.1.7	降低地下水位法	【44】
2.1.8	施工	【45】
2.1.9	质量检验	【46】
2.2	深层搅拌法	【46】
2.2.1	概述	【46】
2.2.2	水泥土基本特性	【47】
2.2.3	加固原理及工程应用	【51】

目录

2.2.4	深层搅拌桩复合地基设计计算	【54】
2.2.5	水泥土重力式围护结构设计计算	【59】
2.2.6	施工	【63】
2.2.7	质量检验	【67】
2.3	强夯法和强夯置换法✓	【68】
2.3.1	概述	【68】
2.3.2	强夯法和强夯置换法加固原理	【68】
2.3.3	强夯法设计与施工	【70】
2.3.4	强夯置换法设计与施工	【74】
2.3.5	强夯法和强夯置换法质量检验及加固效果	【75】
2.4	碎石桩法✓	【79】
2.4.1	概述	【79】
2.4.2	振冲碎石桩法	【80】
2.4.3	干振挤密碎石桩法	【82】
2.4.4	沉管碎石桩法	【83】
2.4.5	夯扩碎石桩法	【83】
2.4.6	袋装碎石桩法	【84】
2.4.7	碎石桩复合地基设计	【84】
2.4.8	质量检验与加固效果	【85】
2.5	高压喷射注浆法✓	【93】
2.5.1	概述	【93】
2.5.2	加固原理及工程应用	【97】
2.5.3	设计计算	【99】
2.5.4	质量检验	【100】
2.6	低强度混凝土桩复合地基法	【100】
2.6.1	概述	【100】

目录

2.6.2	二灰混凝土桩复合地基技术	【101】
2.6.3	工程应用及设计计算	【112】
2.7	刚性桩复合地基法	【113】
2.7.1	概述	【113】
2.7.2	设计计算	【114】
2.8	土桩和灰土桩法 ✓	【117】
2.8.1	概述	【117】
2.8.2	加固原理	【117】
2.8.3	设计计算	【119】
2.8.4	施工及质量检验	【122】
2.9	石灰桩法 ✓	【123】
2.9.1	概述	【123】
2.9.2	加固原理	【124】
2.9.3	设计计算	【125】
2.9.4	施工及质量检验	【126】
2.10	其他地基处理方法	【127】
2.10.1	灌浆法 ✓	【127】
2.10.2	加筋土法 ✓	【131】
2.10.3	土钉墙法 ✓	【138】
2.10.4	泡沫苯乙烯 (EPS) 超轻质料填土法	【140】
2.10.5	冷热处理法	【146】
第3章	已有建(构)筑物地基加固与纠偏	【148】
3.1	概述	【148】
3.2	已有建(构)筑物地基加固技术	【151】

目录

3.2.1	综述	【151】
3.2.2	基础加宽技术	【151】
3.2.3	锚杆静压桩技术	【152】
3.2.4	树根桩技术	【157】
3.2.5	其他加固技术	【163】
3.2.6	综合加固技术	【165】
3.3	倾斜建筑物纠偏技术	【174】
3.3.1	综述	【174】
3.3.2	加载纠偏技术	【175】
3.3.3	掏土纠偏技术	【176】
3.3.4	顶升纠偏技术	【178】
3.3.5	其他纠偏技术	【180】
3.4	地基中防渗技术	【196】
	参考文献	【199】

第 1 章

绪 论

1.1 地基处理的目的和意义

土木工程建设中,当天然地基不能满足建(构)筑物对地基的要求时,需要对天然地基进行地基处理,形成人工地基,以满足建(构)筑物对地基的要求,保证其安全与正常使用。

建(构)筑物对地基的要求主要包括下述三个方面:

(1) 地基承载力或稳定性问题

地基承载力或稳定性问题是指地基在建(构)筑物荷载(包括静、动荷载的各种组合)作用下能否保持稳定。若地基承载力不能满足要求,在建(构)筑物荷载作用下地基将会产生局部或整体剪切破坏,影响建(构)筑物的安全与正常使用,严重的会引起建(构)筑物的破坏。天然地基承载力主要与土的抗剪强度有关,也与基础型式和埋深有关。天然地基承载力不能满足要求时,需要进行地基处理,形成人工地基,以满足建(构)筑物对地基承载力的要求。

(2) 沉降、水平位移及不均匀沉降问题

在建(构)筑物的荷载(包括静、动荷载的各种组合)作用下,地基沉降,或水平位移,或不均匀沉降会超过相应的允许值。若地基变形超过允许值,将会影响建(构)筑物的安全与正常使用,严重的会引起建(构)筑物破坏。天然地基变形主要与荷载大小和土的变形特性有关,也与基础型式有关。若天然地基变形不能满足要求,则需要进行地基处理,形成人工地基,以满足建(构)筑物对地基变形的要求。

(3) 渗透问题

渗透问题主要分两类:一类是堤坝蓄水构筑物地基渗流量超过其允许值时,其后果是造成较大水量损失,甚至蓄水失败;另一类是地基中水力比降超过其允许值时,地基



土会因潜蚀和管涌产生破坏而导致建（构）筑物破坏造成工程事故。天然地基渗透问题主要与土的渗透性有关。若天然地基不能满足要求，则需对地基土进行改良，减小土的渗透性，或在地基中设置止水帷幕，阻截渗流。

工程师们常将不能满足建（构）筑物对地基要求的天然地基称为软弱地基或不良地基。天然地基是否属于软弱地基是相对的。天然地基是否需要进行地基处理取决于地基土的性质和建（构）筑物对地基的要求两个方面。在土木工程建设中经常遇到的软弱土和不良土主要包括：软粘土、人工填土（包括素填土、杂填土和冲填土）、部分砂土和粉土、湿陷性土、有机质土和泥炭土、膨胀土、多年冻土、岩溶、土洞和山区地基等。下面分别加以简略介绍：

（1）软粘土

软粘土是软弱粘性土的简称。它是第四纪后期形成的海相、泻湖相、三角洲相、湖泊相和湖泊相的粘性土沉积物或河流冲积物，有的属于新近淤积物。大部分是饱和的，其天然含水量大于液限，孔隙比大于1.0。当天然孔隙比大于1.5时，称为淤泥；当天然孔隙比大于1.0而小于1.5时，称为淤泥质土。软粘土的特点是天然含水量高，一般为35%~80%；天然孔隙比大，一般为1.0~2.0；抗剪强度低，不排水抗剪强度约在5 kPa~25 kPa；压缩系数高，一般 $a_{1-2}=0.5\text{ MPa}^{-1}\sim 1.5\text{ MPa}^{-1}$ ，最大可达到 4.5 MPa^{-1} ；渗透系数小，一般约为 $1\times 10^{-6}\text{ cm/s}\sim 1\times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 。在荷载作用下，软粘土地基承载力低，地基沉降变形大，不均匀沉降也大，而且沉降稳定历时比较长，一般需要几年，甚至几十年。软粘土地基是在工程建设中遇到最多需要处理的软弱地基，它广泛地分布在我国沿海以及内地河流两岸和湖泊地区。例如：天津、连云港、上海、杭州、宁波、温州、福州、厦门、湛江、广州、深圳、珠海等沿海地区，以及昆明、武汉、南京、马鞍山等内陆地区。

（2）人工填土（包括素填土、杂填土和冲填土）

人工填土按照物质组成和堆填方式可以分为素填土、杂填土和冲填土三类。按堆填时间分为老填土和新填土两类。粘性土堆填时间超过10年，粉土堆填时间超过5年，称为老填土。

素填土是由碎石、砂或粉土、粘性土等一种或几种材料组成的填土，其中不含杂质或含杂质较少。若分层压实则称为压实填土。其性质取决于填土性质、压实程度以及堆填时间。

杂填土是人类活动形成的无规则堆积物，由大量建筑垃圾、工业废料或生活垃圾组成，其成分复杂，性质也不相同，且无规律性。在大多数情况下，杂填土是比较疏松和不均匀的。在同一场地的不同位置，地基承载力和压缩性也可能有较大的差异。

冲填土是由水力冲填泥沙形成的。冲填土的性质与所冲填泥沙的来源及冲填时的水力条件有密切关系。含粘土颗粒较多的冲填土往往是欠固结的，其强度和压缩性指标都比同类天然沉积土差。粉细砂为主的冲填土，其性质基本上和粉细砂相同。

（3）部分砂土和粉土

主要指饱和粉砂土、饱和细砂土和砂质粉土。粒径大于0.25 mm的颗粒不超过全重的50%，粒径大于0.075 mm的颗粒超过全重的85%称为细砂土。粒径大于0.075 mm



的颗粒不超过全重的 85%，但超过 50% 称为粉砂土。粒径大于 0.075 mm 的颗粒不超过全重的 50%，而粒径小于 0.005 mm 的颗粒含量不超过全重的 10%，塑性指数 I_p 小于或等于 10 的称为砂质粉土。处于饱和状态的细砂土、粉砂土和砂质粉土在静载作用下虽然具有较高的强度，但在机器振动、车辆荷载、波浪或地震力的反复作用下有可能产生液化或大量震陷变形。地基会因液化而丧失承载能力。如需要承担动力荷载，这类地基也需要进行处理。

(4) 湿陷性土

湿陷性土包括湿陷性黄土，粉砂土和干旱、半干旱地区具有崩解性的碎石土等。是否属湿陷性土可根据野外浸水载荷试验确定。当在 200 kPa 压力作用下附加变形量与载荷板宽之比大于 0.015 时称为湿陷性土。在工程建设中遇到较多的是湿陷性黄土。

湿陷性黄土是指在覆盖土层的自重应力或自重应力和建筑物附加应力综合作用下，受水浸湿后，土的结构迅速破坏，并发生显著的附加下沉，其强度也迅速降低的黄土。由于黄土湿陷而引起建筑物不均匀沉降是造成黄土地区事故的主要原因。由于大面积地下水水位上升等原因，部分湿陷性黄土饱和度达到 80% 以上，黄土湿陷性消退，转变为低承载力 (100 kPa) 和高压缩性土。饱和黄土既不同于软粘土，也不属湿陷性黄土。它兼具两者特性，这类地基的处理问题逐渐增多。黄土在我国特别发育，地层多、厚度大，广泛分布在甘肃、陕西、山西大部分地区，以及河南、河北、山东、宁夏、辽宁、新疆等部分地区。当黄土作为建筑物地基时，首先要判断它是否具有湿陷性，然后才考虑是否需要地基处理以及如何处理。

(5) 有机质土和泥炭土

土中有机质含量大于 5% 时称为有机质土，大于 60% 时称为泥炭土。

土中有机质含量高，强度往往降低，压缩性增大，特别是泥炭土，其含水量极高，压缩性很大，且不均匀，一般不宜作为天然地基，需要进行地基处理。

(6) 膨胀土

膨胀土是指粘粒成分主要由亲水性粘土矿物组成的粘性土，在环境的温度和湿度变化时会产生强烈的胀缩变形。利用膨胀土作为建（构）筑物地基时，如果没有采取必要措施进行地基处理，常会给建（构）筑物造成危害。膨胀土在我国分布范围很广，根据现有的资料，广西、云南、湖北、河南、安徽、四川、河北、山东、陕西、江苏、内蒙古、贵州和广东等均有不同范围的分布。

(7) 多年冻土

多年冻土是指温度连续三年或三年以上保持在摄氏零度或零度以下，并含有冰的土层。多年冻土的强度和变形有许多特殊性。例如，冻土中因有冰和未冰水存在，故在长期荷载作用下有强烈的流变性。多年冻土作为建筑物地基需慎重考虑，需要采取处理措施。

(8) 岩溶、土洞和山区地基

岩溶或称“喀斯特”，它是石灰岩、白云岩、泥灰岩、大理石、岩盐、石膏等可溶性岩层受水的化学和机械作用而形成的溶洞、溶沟、裂隙，以及由于溶洞的顶板塌落使地表产生陷穴、洼地等现象和作用的总称。土洞是岩溶地区上覆土层被地下水冲蚀或被地



下水潜蚀所形成的洞穴。岩溶和土洞对建（构）筑物的影响很大，可能造成地面变形，地基陷落，发生水的渗漏和涌水现象。在岩溶地区修建建筑物时要特别重视岩溶和土洞的影响。

山区地基地质条件比较复杂，主要表现在地基的不均匀性和场地的稳定性两方面。山区基岩表面起伏大，且可能有大块孤石，这些因素常会导致建筑物基础产生不均匀沉降。另外，在山区常有可能遇到滑坡、崩塌和泥石流等不良地质现象，给建（构）筑物造成直接的或潜在的威胁。在山区修建建（构）筑物时要重视地基的稳定性和避免过大的不均匀沉降，必要时需进行地基处理。

改革开放促进了国民经济飞速发展，土木工程建设规模日益扩大，难度不断提高。土木工程功能化、城市建设立体化、交通高速化和改善综合居住条件成为现代土木工程的特征。现代土木工程建设对地基提出了更高的要求。随着我国现代化建设事业的发展，越来越多的土木工程需要对天然地基进行处理。

除了在上述各种软弱和不良地基上建造建（构）筑物时需要考虑地基处理外，当旧房改造、加层，工厂设备更新等造成荷载增大，对原来地基提出更高要求，原地基不能满足新的要求时，或者在开挖深基坑，建造地下铁道等工程中有土体稳定、变形或渗透问题时，也需要进行地基处理或土质改良。

在现代化建设中，土木工程量面广、投资大、参与的劳动力多，全国东西南北中，到处见工地，土木工程是现代化建设中最活跃的领域之一。土木工程领域中，与上部结构比较，地基不确定因素多、问题复杂、难度大。地基问题处理不好，后果严重。据调查统计，世界各国发生的各种土木工程建设中的工程事故，地基问题常常是主要原因。地基问题处理好，不仅安全可靠而且具有较好的经济效益。需求促进发展、实践发展理论，近些年来我国地基处理技术发展很快，地基处理队伍不断壮大，地基处理水平不断提高，地基处理已成为活跃的土木工程领域中的一个热点。总结国内外地基处理方面的经验教训，推广和发展各种地基处理技术，提高地基处理水平对加快基本建设速度、节约基本建设投资具有特别重要的意义。

1.2 地基处理原理和分类

前面已经谈到，当天然地基不能满足建（构）筑物对地基稳定、变形以及渗透方面的要求时，需要对天然地基进行地基处理，以满足建（构）筑物对地基的要求，保证其安全与正常使用。已经发展的地基处理方法很多，新的地基处理方法还在不断发展。要对各种地基处理方法进行精确的分类是困难的。根据地基处理的加固原理，可对地基处理进行分类，并将各种地基处理方法归纳如下：

（1）置换

置换是用物理力学性质较好的岩土材料置换天然地基中部分或全部软弱土或不良土，形成双层地基或复合地基，以达到提高地基承载力、减少沉降的目的。它主要包括换土垫层法、挤淤置换法、褥垫法、振冲置换法（或称振冲碎石桩法）、沉管碎石桩法、强夯置换法、砂桩（置换）法、石灰桩法，以及 EPS 超轻质料填土法等。

