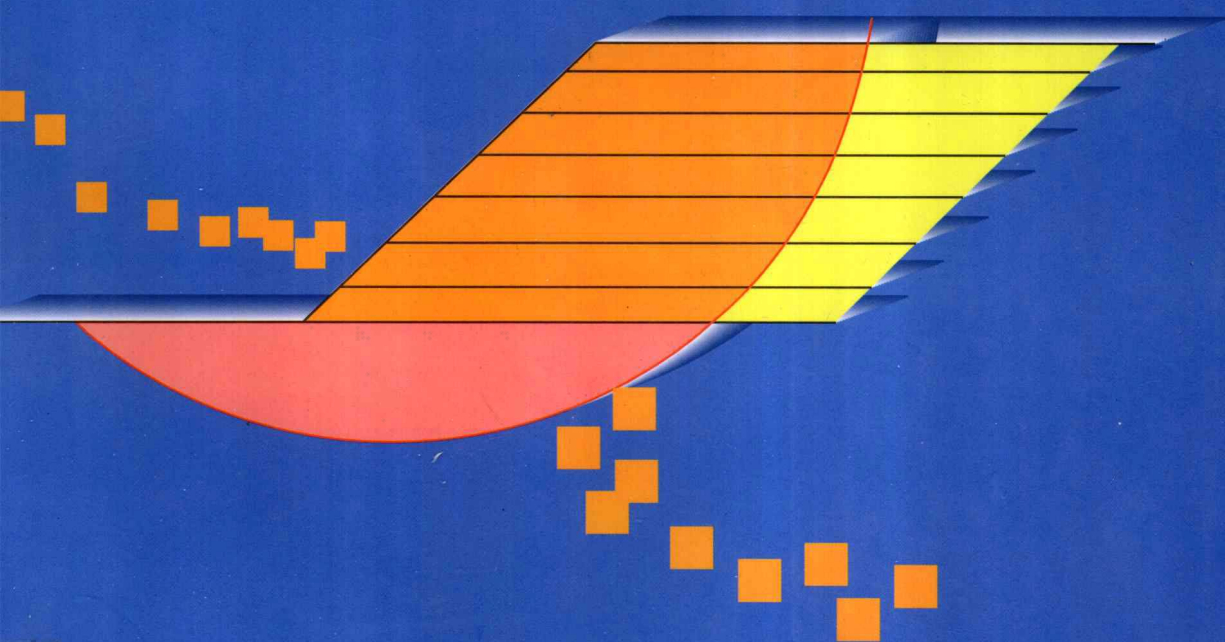


# 现代加筋土技术 理论与工程应用

■ 徐光黎 刘丰收 唐辉明 编著 ■



中国地质大学出版社

# 现代加筋土技术理论与工程应用

徐光黎 刘丰收 唐辉明 编著

中国地质大学出版社

## 内 容 简 介

本书着力介绍现代土工合成材料在土木工程中的应用——加筋土的理论、设计与施工技术。第一章是概述,阐述土工合成材料的定义、分类、性能,加筋土技术的应用现状和发展历史;第二章介绍土工合成材料的特性评价及其试验方法;第三章介绍加筋材料与土的相互作用机理、试验方法及其影响因素;第四、五、六章是加筋土的三大应用,即加筋土在加筋土堤、加筋土挡墙和加筋土地基中的设计理论与实践应用,并给出了具体的应用事例。最后一章是土工合成物在抗震设计中的应用,介绍了加筋土的抗震效果、抗震设计理论,以及土工合成材料在其他方面的一些最新应用,同时对轻量土的类型、特点,轻量土的设计内容等最新研究成果作了简要介绍。本书体系合理,内容充实、新颖,反映了现代加筋土技术的研究现状和学科的发展水平,通俗易懂,简明实用。

本书是介绍加筋土技术理论与实践应用的实用参考书,可供从事岩土工程、地质工程、地下建筑工程、水利水电工程、港口港湾工程、道路桥梁工程和环境工程等专业的大学、研究生、教师、工程设计人员和工程施工人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代加筋土技术理论与工程应用/徐光黎,刘丰收,唐辉明编著. —武汉:中国地质大学出版社,2004. 12

ISBN 7-5625-1979-X

I. 现…

II. ①徐… ②刘… ③唐…

III. 加筋土-技术理论-工程应用

IV. TU521

现代加筋土技术理论与工程应用

徐光黎 刘丰收 唐辉明 编著

责任编辑:徐润英

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号) 邮编:430074

电话:(027) 87482760 传真:87481537 E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:330千字 印张:12.75 彩图:1

版次:2004年12月第1版

印次:2004年12月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—2 000册

ISBN 7-5625-1979-X/TU·35

定价:28.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

## 作者简介



**徐光黎**，男，1963年10月出生，浙江省金华市人，1985年毕业于中国地质大学（武汉），中日政府联合培养博士、博士后。留学日本九州大学，在日本从事研究、工作8年，获得日本最高国家资格技术士（建设部门）。为国际土力学与岩土工程协会（ISSMGE）、日本土木工学会、日本地盘工学会、日本技术士会会员。现为中国地质大学（武汉）工程学院教授、博士生导师。

在国内外刊物上发表论文50余篇，出版了《岩体结构模型与应用》等专著，承担岩土力学等教学任务，从事地质工程、岩土工程和道路桥梁工程等相关的教学与科学研究工作。



**刘丰收**，男，1965年11月出生，河南省扶沟市人，1988年获中国地质大学（武汉）水文地质与工程地质硕士学位，在读博士。1999年11月在荷兰学习地下工程技术，现任黄河勘测规划设计有限公司地质工程院总工，教授级高级工程师，国际工程地质与环境协会（IAEG）会员，中国地质学会工程地质专委会青年委员会委员，中国地质大学（武汉）、华北水利水电学院兼职教授。

主要从事水利水电工程地质、岩体工程地质力学、滑坡及地下硐室方面的工程咨询工作，参加了小浪底、南水北调等多项大中型水利水电工程的设计与施工工作。出版译著一部，发表论文20余篇。



**唐辉明**，男，1962年5月出生，江苏省东台市人，博士，中国地质大学教授、博士生导师，楚天学者特聘教授。中国地质学会工程地质专委会副主任委员。享受国务院政府特殊津贴（2000），湖北省人民政府专项津贴（1998），湖北省有突出贡献中青年专家（1995），首批入选湖北省“111人才工程”（1996），原地矿部百名跨世纪人才（1997），湖北省新世纪高层次人才（2003）。

主要研究方向为岩体断裂力学、数值模拟、地质灾害防治。获国家级教学成果二等奖1项，省部级一等奖2项，二等奖1项，三等奖4项。出版中英文专著5部，论文90余篇，其中进入国际著名三大检索系统22篇。

# 前 言

加筋土技术是土木工程中的一次技术革命。本书的目的就在于介绍现代土工合成材料在土木工程中的应用，内容涉及加筋材料、加筋土的理论、设计、施工技术及其最新进展。

全书共分三大部分，概括为：总论（第一章）；土工合成材料和加筋土的特性、作用机理及其评价方法（第二、三章）；理论及设计应用（第四、五、六、七章）。

总论概述了加筋材料土工合成材料的定义、分类和性能，以及加筋土技术的应用现状和发展历史。与以往相比，当今土木工程师所面临的土的强度、变形、水和环境等问题显得更加突出和严峻。幸运的是，化学工业、纺织工业的兴起和发展，给我们带来了一种崭新的工程材料——土工合成材料，不仅拓展了地基处理和加固技术，而且使得传统的技术观念发生了根本性的改变。加筋土技术已成为当今最引人注目的地基处理与加固方法。土工织物、土工格栅、土工网、土工垫和土工格室等土工合成材料的诸多性能，被广泛地应用于交通运输工程、水利水資源工程、海岸工程和环境工程中。

土工合成材料和加筋土的特性、作用机理及性能评价是设计应用的基础。土工合成材料的物理特性、力学特性、破坏特性和水理特性及其评价方法和影响因素，是设计、施工和管理人员必须把握的，是选择工程材料的先决条件。土与土工合成材料的相互作用特性，以及土工合成材料的加筋补强机理决定着加筋材料的铺设长度、铺设位置和铺设层数的多少。由于加筋材料的抗拉强度、抗拉刚度及其摩擦作用，使土体的变形受到约束，从而能够增大土体的稳定性，减小土体的变形量。土与土工合成材料的相互作用包括拉拔摩擦作用和剪切摩擦作用。根据它们之间的作用机理，采用相应的拉拔摩擦试验或直剪摩擦试验来评价其力学作用。

加筋土堤、加筋土挡墙和加筋土地基是加筋土设计理论在工程中的具体应用。随着人类的生存和经济活动的发展，迫使人们去利用那些原来被遗弃、漠视的滩涂，陡峻的山地等土地资源，许多建筑物不得不建在软弱的地基上或陡坡上。加筋土技术为充分利用“越来越坏”的土地和越来越大的作用载荷提供了崭新的途径和可能。与传统土堤、挡墙相比，加筋土堤、加筋挡墙可以做得更高、更陡且稳定；加筋土地基可以确保机械在软土地基上行走、施工，并承受上部种种载荷。针对每个具体应用，编著者尽可能全面地介绍各种设计理论方法，再从中推出比较成熟的设计流程、思想和理论。为便于理解和设计参考，给出了具体的设计示例，对施工方法、注意事项以及质量管理方面也作了较详尽的介绍。在反映现代加筋土技术的研究现状和学科的发展水平的同时，着力考虑研究人员、设计人员、施工和管理人员不同层次的需求，力求做到通俗易懂，容易被工程师们理解和接受。

加筋土的抗震设计、加筋复合地基、连续纤维加筋土和轻量土是土工合成材料在工程中的一些最新应用，已引起了普遍的关注。对高填土路堤和重要加筋土构造物，由于其一旦发生破坏，将造成损失或灾害巨大，进行抗震设计是有必要的。系统地阐述加筋土的抗震设计在我国尚属首次，其借鉴意义重大。加筋复合地基、连续纤维加筋土和轻量土是当今土工合

成材料应用的研究热点,在我国尚处于起步技术引入阶段。尽管这些技术还存在不够成熟之处,有待进一步研究,以及我国化学工业材料价格偏高的影响,在短时期内不会大面积地推广应用,但笔者深信在许多特定的场合,这些新技术作为工程的应急措施具有很高的应用价值,具有推广应用之潜力。而且这些最新研究成果对我们突破传统的设计理念、扩大视野、广开思路也大有裨益。

本书是加筋土理论研究与工程应用的一本实用参考书,笔者希冀它对从事岩土工程、地质工程、地下建筑工程、水利水电工程、港口港湾工程、道路桥梁工程和环境工程等专业的大学毕业生、研究生、教师、工程设计人员、施工和管理工程人员有较高的参考价值。本书若能对同行起到抛砖引玉的作用,对推动加筋土技术的应用步伐,提高加筋土的研究、设计水平,积累和发展加筋土施工技术起到些微作用,笔者将感到由衷的欣慰。

早在上世纪80年代末90年代初,笔者就对加筋土新技术予以了非常的关注,时刻跟踪国际上的最新研究进展。笔者之一徐光黎于1994年有幸师从国际著名土工合成材料资深专家、历届IS-KYUSHU加筋土国际学术会议主席、日本九州大学落合英俊教授,在日本留学做博士、博士后研究和咨询设计公司工作8年。在落合英俊教授指导下,结识了许多国际知名加筋土专家、教授,有机会参阅了最新的加筋土资料和信息。在九州大学研究期间,作了大量的加筋土对比试验研究,并为探索加筋土合理的设计方法,共同研制出一种新的可调角度的剪切试验机,在国际学术会议上发表了其成果。笔者之二刘丰收在德国学习访问期间,考察收集了不少德国的加筋土技术资料,特别是土工格栅在挡墙上的应用。笔者之三唐辉明在培养研究生、博士生时,积极倡导学生学习新知识,吸收、消化新技术。在三峡库区新县城移民工程中,采用了超高加筋土挡土墙,取得了较好的研究成果。由于特高大加筋土挡墙在现场测试资料、可借鉴利用的资料太少,专门对特高大加筋土挡墙的设计与施工进行了试验研究,积累了一些经验。在某种意义上讲,本书是合著者在国内、外研究成果的一个总结。应该说明的是,书中引用了一些非公开出版的资料,未列入参考文献中。特此,向拥有这些资料的单位和个人深表感谢和歉意,并请见谅。

本书在著述过程中,得到了许多同志的热情支持和协助。协助资料整理、稿件校对和图件清绘的有研究生徐俊、李春鹏、杜文哲、陈国华、陈继慧、史宣涛等;刘昌辉副教授认真地校对了全书,并提出了许多非常有益的建议。同时,本书得到了中国地质大学(武汉)学术著作出版基金的部分资助。在此,对所有付出辛勤劳动并给予协助的同志致以衷心的感谢。

由于著者水平有限,书中不可避免地存在不足甚至谬误之处,恳切广大读者批评指正。

编著者

2004年6月

# 目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 加筋土的发展简史	(2)
一、天然土工材料加筋土	(2)
二、人工合成材料加筋土	(5)
三、人工合成材料加筋土技术发展阶段	(6)
第三节 土工合成材料	(9)
一、土工合成材料的类型	(9)
二、土工合成材料的特性	(10)
三、土工合成材料的性能	(12)
四、土工合成材料的优点	(16)
第四节 土工合成材料的应用领域	(17)
一、交通运输工程	(17)
二、水利水资源工程	(19)
三、海岸工程	(20)
四、环境工程	(21)
第二章 土工合成材料的特性评价及其试验方法	(22)
第一节 土工合成材料的物理特性及其试验方法	(22)
一、厚度	(22)
二、单位面积质量	(22)
三、开孔尺寸	(23)
第二节 土工合成材料的力学特性及其试验方法	(24)
一、抗拉强度试验	(24)
二、蠕变性能试验	(28)
第三节 土工合成材料的破坏特性及其试验方法	(29)
一、撕裂试验	(29)
二、顶破试验	(30)
三、落锥穿透试验	(31)
第四节 土工合成材料的水理特性及其试验方法	(31)
一、水平(面内)排水试验	(31)
二、垂直透水试验	(32)
三、淤堵试验	(33)
第五节 土工合成材料的耐久性及其试验方法	(35)

一、抗气候性能试验 .....	(35)
二、抗热性能试验 .....	(36)
三、抗化学性能试验 .....	(36)
四、抗微生物性能试验 .....	(38)
<b>第三章 加筋土的试验方法 .....</b>	<b>(39)</b>
第一节 概述 .....	(39)
第二节 加筋土的拉拔摩擦试验 .....	(40)
一、拉拔摩擦试验 .....	(40)
二、拉拔力力学分析 .....	(42)
三、拉拔摩擦试验的应用 .....	(45)
第三节 加筋土的直剪摩擦试验 .....	(46)
一、直剪摩擦试验 .....	(46)
二、与拉拔摩擦试验的关系 .....	(47)
第四节 加筋土的倾斜剪切摩擦试验 .....	(48)
一、改进直剪摩擦试验 .....	(48)
二、倾斜剪切摩擦试验 .....	(50)
第五节 加筋土试验的影响因素分析 .....	(52)
<b>第四章 加筋土堤的设计与施工 .....</b>	<b>(58)</b>
第一节 概述 .....	(58)
第二节 加筋土堤的设计及计算示例 .....	(59)
一、设计流程 .....	(59)
二、设计条件 .....	(60)
三、设计 .....	(64)
四、设计计算示例 .....	(69)
第三节 高含水量加筋土堤的设计及计算示例 .....	(71)
一、设计流程 .....	(72)
二、理论 .....	(72)
三、设计 .....	(75)
四、设计计算示例 .....	(78)
第四节 加筋土堤的施工 .....	(79)
一、施工流程 .....	(79)
二、施工机械 .....	(79)
三、土工合成材料的铺设、缝合 .....	(79)
四、填土及碾压 .....	(80)
五、排水 .....	(80)
六、坡面处理 .....	(81)
<b>第五章 加筋土挡墙的设计与施工 .....</b>	<b>(82)</b>
第一节 概述 .....	(82)
第二节 加筋土挡墙的组成和类型 .....	(83)
一、加筋土挡墙的组成 .....	(83)



二、加筋土挡墙的结构与分类 .....	(87)
三、加筋土挡墙的优缺点 .....	(89)
第三节 加筋土挡墙的设计 .....	(90)
一、设计流程 .....	(90)
二、设计条件 .....	(91)
三、设计 .....	(94)
四、设计计算示例 .....	(107)
第四节 加筋土挡墙的施工 .....	(110)
一、施工流程 .....	(110)
二、施工机械 .....	(111)
三、基础 .....	(111)
四、土工合成材料的铺设、缝合 .....	(112)
五、填土及碾压 .....	(113)
六、排水 .....	(113)
七、墙面处理 .....	(115)
八、施工管理 .....	(117)
九、施工示例 .....	(117)
第六章 加筋土地基的设计与施工 .....	(120)
第一节 概述 .....	(120)
第二节 加筋土垫层的设计与施工 .....	(121)
一、加筋土垫层增加地基承载力的机理分析 .....	(121)
二、设计流程 .....	(124)
三、设计 .....	(125)
四、设计计算示例 .....	(126)
五、施工 .....	(127)
第三节 加筋土地基的设计 .....	(128)
一、设计流程 .....	(128)
二、设计条件 .....	(130)
三、设计 .....	(130)
四、设计计算示例 .....	(132)
五、施工 .....	(133)
第四节 加筋土工垫地基的设计与施工 .....	(134)
一、概述 .....	(134)
二、设计流程 .....	(135)
三、设计条件 .....	(136)
四、设计 .....	(136)
五、设计计算示例 .....	(138)
六、施工 .....	(139)
七、施工示例 .....	(141)

第七章 抗震设计以及土工合成材料的新应用	(143)
第一节 加筋土的抗震效果	(143)
一、加筋土的抗震效果	(143)
二、加筋土的抗震试验简介	(144)
第二节 加筋土的抗震设计及计算示例	(148)
一、加筋土的抗震设计	(148)
二、设计计算示例	(155)
第三节 加筋复合地基	(158)
一、软土地基产生的病害	(158)
二、病害常用的处治方法	(159)
三、加筋复合地基、加筋桩基础	(160)
四、加筋桩基础沉降设计计算	(163)
五、加筋复合地基沉降设计计算	(164)
第四节 连续纤维加筋土及其工程应用	(167)
一、概述	(167)
二、连续纤维加筋土的工程性质	(168)
三、连续纤维加筋土挡墙应用设计	(169)
四、连续纤维加筋土护坡应用设计	(171)
第五节 轻量土概念及其应用	(171)
一、轻量土的种类	(171)
二、轻量土的发展简史	(173)
三、轻量土的应用	(175)
四、轻量土的设计	(177)
五、轻量土应用实例	(177)
中英文专业名词对照	(183)
参考文献	(188)

# CONTENTS

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b>	(1)
Section 1 Introduction	(1)
Section 2 Development history of reinforced earth	(2)
Section 2.1 Natural material reinforced earth	(2)
Section 2.2 Geosynthetic reinforced earth	(5)
Section 2.3 Development stages of reinforced earth	(6)
Section 3 Reinforcement	(9)
Section 3.1 Types of reinforcement	(9)
Section 3.2 Properties of reinforcement	(10)
Section 3.3 Functions of reinforcement	(12)
Section 3.4 Advantages of reinforcement	(16)
Section 4 Application fields of reinforcement	(17)
Section 4.1 Transportation engineering	(17)
Section 4.2 Water resources engineering	(19)
Section 4.3 Coastal engineering	(20)
Section 4.4 Environmental engineering	(21)
<b>CHAPTER 2 PROPERTIES AND EXPERIMENT METHODS OF REINFORCEMENT</b>	(22)
Section 1 Physical properties and experiment methods of reinforcement	(22)
Section 1.1 Thickness	(22)
Section 1.2 Unit weight	(22)
Section 1.3 Opening size	(23)
Section 2 Mechanical properties and experiment methods of reinforcement	(24)
Section 2.1 Tensile test	(24)
Section 2.2 Creep test	(28)
Section 3 Puncture properties and their test methods of reinforcement	(29)
Section 3.1 Tearing test	(29)
Section 3.2 Burst test	(30)
Section 3.3 Cone penetration test	(31)
Section 4 Hydraulic properties and their test methods of reinforcement	(31)
Section 4.1 In-plane hydraulic test	(31)
Section 4.2 Permittivity test	(32)
Section 4.3 Filter test	(33)

Section 5	Duration and its test methods of reinforcement .....	(35)
Section 5.1	Resistance to ultra-violet light test .....	(35)
Section 5.2	Heat resistance test .....	(36)
Section 5.3	Chemical resistance test .....	(36)
Section 5.4	Biological resistance test .....	(38)
<b>CHAPTER 3</b>	<b>EXPERIMENT METHODS OF REINFORCED EARTH</b> .....	(39)
Section 1	Introduction .....	(39)
Section 2	Pull out test of reinforced earth .....	(40)
Section 2.1	Pull out test .....	(40)
Section 2.2	Mechanical analysis of pull out test .....	(42)
Section 2.3	Application of pull out test result .....	(45)
Section 3	Direct shear test of reinforced earth .....	(46)
Section 3.1	Direct shear test .....	(46)
Section 3.2	Comparison with pull out test result .....	(47)
Section 4	Inclination shear test of reinforced earth .....	(48)
Section 4.1	Improved direct shear test .....	(48)
Section 4.2	Inclination shear test .....	(50)
Section 5	Effect factors analysis .....	(52)
<b>CHAPTER 4</b>	<b>DESIGN AND COSTRUCTION OF REINFORCED EMBANKMENT</b> .....	(58)
Section 1	Introduction .....	(58)
Section 2	Design and example of reinforced embankment .....	(59)
Section 2.1	Design flowchart .....	(59)
Section 2.2	Design conditions .....	(60)
Section 2.3	Design .....	(64)
Section 2.4	Design example .....	(69)
Section 3	Design and example of high water content reinforced embankment .....	(71)
Section 3.1	Design flowchart .....	(72)
Section 3.2	Design theory .....	(72)
Section 3.3	Design .....	(75)
Section 3.4	Design example .....	(78)
Section 4	Construction of reinforced embankment .....	(79)
Section 4.1	Construction flowchart .....	(79)
Section 4.2	Construction machinery .....	(79)
Section 4.3	Paving and connection of reinforcement .....	(79)
Section 4.4	Back fill and compaction .....	(80)
Section 4.5	Drainage .....	(80)
Section 4.6	Facing .....	(81)
<b>CHAPTER 5</b>	<b>DESIGN AND COSTRUCTION OF REINFORCED RETAINING WALL</b> .....	(82)
Section 1	Introduction .....	(82)

Section 2	Structure and types of reinforced retaining wall	(83)
Section 2.1	Structure of reinforced retaining wall	(83)
Section 2.2	Types of reinforced retaining wall	(87)
Section 2.3	Advantages and disadvantages of reinforced retaining wall	(89)
Section 3	Design of reinforced retaining wall	(90)
Section 3.1	Design flowchart	(90)
Section 3.2	Design conditions	(91)
Section 3.3	Design	(94)
Section 3.4	Design example	(107)
Section 4	Construction of reinforced retaining wall	(110)
Section 4.1	Construction flowchart	(110)
Section 4.2	Construction machinery	(111)
Section 4.3	Foundation	(111)
Section 4.4	Paving and connection of reinforcement	(112)
Section 4.5	Back fill and compaction	(113)
Section 4.6	Drainage	(113)
Section 4.7	Facing	(115)
Section 4.8	Construction management	(117)
Section 4.9	Construction example	(117)
<b>CHAPTER 6</b>	<b>DESIGN AND COSTRUCTION OF REINFORCED FOUADATION</b>	<b>(120)</b>
Section 1	Introduction	(120)
Section 2	Design and construction of reinforced layer	(121)
Section 2.1	Design flowchart	(121)
Section 2.2	Design conditions	(124)
Section 2.3	Design	(125)
Section 2.4	Design example	(126)
Section 2.5	Construction	(127)
Section 3	Design and construction of reinforced foundation	(128)
Section 3.1	Design flowchart	(128)
Section 3.2	Design conditions	(130)
Section 3.3	Design	(130)
Section 3.4	Design example	(132)
Section 3.5	Construction	(133)
Section 4	Design and construction of geosynthetics mattress	(134)
Section 4.1	Introduction	(134)
Section 4.2	Design flowchart	(135)
Section 4.3	Design conditions	(136)
Section 4.4	Design	(136)
Section 4.5	Design example	(138)
Section 4.6	Construction	(139)

Section 4.7	Construction example .....	(141)
<b>CHAPTER 7</b>	<b>SEISMIC DESIGN AND OTHER NEW APPLICATIONS</b> .....	(143)
Section 1	Seismic effect of reinforcement .....	(143)
Section 1.1	Seismic effect of reinforced earth .....	(143)
Section 1.2	Vibration test of reinforced earth .....	(144)
Section 2	Seismic design of reinforced earth and example .....	(148)
Section 2.1	Seismic design of reinforced earth .....	(148)
Section 2.2	Seismic design example .....	(155)
Section 3	Reinforced piled embankment .....	(158)
Section 3.1	Hazards induced by soft soil foundation .....	(158)
Section 3.2	Improvement of soft soil foundation .....	(159)
Section 3.3	Reinforced improvement and pile foundation .....	(160)
Section 3.4	Settlement analysis of reinforced pile foundation .....	(163)
Section 3.5	Settlement analysis of reinforced improvement foundation .....	(164)
Section 4	Geofiber soils and their applications .....	(167)
Section 4.1	Introduction .....	(167)
Section 4.2	Property of the geofiber soils .....	(168)
Section 4.3	Geofiber soil retaining wall .....	(169)
Section 4.4	Slope protection with geofiber soils .....	(171)
Section 5	Light weighted soils and their applications .....	(171)
Section 5.1	Classification of light weighted soil .....	(171)
Section 5.2	Development of light weighted soil .....	(173)
Section 5.3	Light weighted soil applications .....	(175)
Section 5.4	Light weighted soil design .....	(177)
Section 5.5	Light weighted soil application example .....	(177)
<b>Chinese-English of terms</b>	.....	(183)
<b>References</b>	.....	(188)

# 第一章 概述

## 第一节 概述

随着人类的生存和经济活动的发展,建筑物的数量越来越多,而且建筑物的载荷强度越来越大,但另一方面可利用的土地资源却越来越少。这就迫使人们去利用那些原来被遗弃、漠视的滩涂、陡峻的山地等土地资源,使许多建筑物不得不建在软弱的地基上。而土是一种由固、液、气等多相介质组成的物质,它软弱、可压缩、易变形,在力学性质上表现为各向异性,其剪切强度和变形模量受多种因素的影响而变化。由此,土木工程师不得不接受这越来越严峻的挑战,要面对“越来越坏”的土和越来越大的建筑物载荷这一现实问题并作出决策。

概括起来,土木工程师必须面对以下四个问题:

(1)土的抗剪强度与结构物的稳定性问题(强度问题)。当土的抗剪强度小于结构物的自重、外部的永久、可变荷载和地震等动荷载时,土体就会产生局部的或整体的剪切破坏,如路基、路堤的剪切破坏、边坡的弧形滑动、洞室的塌落失稳、挡土墙的转动和移动等。

(2)土的压缩与不均匀沉降问题(变形问题)。当土的变形模量很小或者结构物的荷载很大时,地基就会产生过大的变形、沉降,从而影响结构物的正常使用。当地基的土层分布不均、结构变化时,地基就可能产生不均匀沉降。这种现象在软土地区非常普遍,不仅沉降量大,而且不均匀沉降量也较大。如地基的沉降或不均匀沉降会造成路基下沉外挤、路肩宽度不足、路基抬道及拨道、桥台跳车、地下水给(排)水系统失效等。

(3)土的渗透变形、水流侵蚀问题(水的问题)。当渗透水流的水力梯度大于临界梯度,会发生潜蚀、流砂、管涌等现象。如在基坑开挖进行基坑排水时,有可能产生流砂、管涌和基坑突涌,从而导致坑壁土体坍塌。当渗漏量大于一定程度时,会发生水量损失。如建在岩溶地区、砂砾石层上的水库、渠道,就会因为水库渗漏而蓄不住水,造成水量损失而达不到预期的目的。当受雨水、河流、潮汐、海浪等水流作用时,库岸、河床、海岸和边坡等土工结构物就会产生侵蚀问题。天长日久,导致库岸、海岸和边坡垮塌,失去设计之功效。

(4)土的污染、水的污染问题(环境问题)。固、液、气废料的排出、堆放,会导致土的污染、水的污染和大气的污染。如尾矿、疏浚土、固体废料、城市垃圾的处理,或多或少会影响周围的环境,对土、地下水和地表水产生污染。人类为了谋求可持续发展,环境保护变得日益重要。

面对以上四个问题,自古以来,人们就孜孜以求。只不过在当今这四个问题显得更加突出,迫切需要适宜的、多快好省的解决方法。随着科学与技术的发展,各种各样的地基处理和加固方法与技术应运而生。加筋土技术就是地基处理方法中非常引人注目的方法之一。加筋土技术的诞生和发展与材料技术的发展是密不可分的。纺织工业、化学工业的兴起和发展,带来了材料技术的革命。土工合成材料的出现,给土木工程师带来了一种崭新的工程材料。除

了传统的工程材料以外,土木工程师有了更多的材料选择余地,不仅拓展了地基处理和地基加固方法与技术,而且使得传统的技术观念也发生了根本性的变化。

加筋土技术是土木工程中的一次技术革命。本书的目的就在于介绍现代土工合成材料在土木工程中的应用——加筋土的理论、设计与施工技术。第一章是概述,阐述土工合成材料的定义、分类、性能,加筋土技术的应用现状和发展简史;第二章介绍土工合成材料的特性评价及其试验方法;第三章介绍加筋材料与土的相互作用机理、试验方法及其影响因素;第四、五、六章是加筋土的三大应用,即加筋土在加筋土堤、加筋土挡墙和加筋土地基中的设计理论与实践应用。最后一章是土工合成物在其他方面的应用介绍。本书将尽量避免高深的理论推导,而刻意做到体系合理,内容充实、新颖,能够反映现代加筋土技术的现状和学科的发展水平,并且通俗易懂,简明实用。希冀它能成为大学生、研究生学习的入门教材,也能成为土木工程师设计与施工时的一本实用参考书。由此,推动加筋土技术的应用步伐,提高加筋土的设计水平,积累和发展加筋土的施工技术。

## 第二节 加筋土的发展简史

### 一、天然土工材料加筋土

中文中的“土木”一词,源于汉朝,意为构土筑木。用现代的词来说,则可称之为土工木材(Geotimber)。利用木材或其他天然材料的张力,将其加入到土中,从而形成相对强度大、不易变形的加筋土,以便建筑房子或其他建筑物。

也就是说,加筋土这个概念并不新。在自然界中,也有大量的现象或事实运用了加筋土技术。一些动物和禽鸟,比如燕子,天生地对加筋土技术运用自如。树,为了充分吸收大地的营养,加固自己的基础,千丝万缕的树根和土浑然一体,任凭风吹雨打,牢牢地根植于大地。这种树根作用就是一种加筋土技术。

人类利用木材、竹子、芦苇、稻草等天然材料到土中的应用技术,一直可以追溯到远古。基督教圣经(V6-9)就有用加有树根或草的粘土、砖块来构建房子的关于加筋土技术的记录。已有资料表明,加筋土技术早在公元前四五千年前就已经存在了。与人工高分子土工合成材料相对应,我们可以称木材、竹子、芦苇、稻草等天然材料为天然土工材料(Geotimber, Geobamboo)。

运用天然的土工材料的加筋土技术,古老的建筑有中东国家的美索不达米亚的填土堤(山内,1993),伊拉克的 Agar-Quf ziggurrant(Jones,1985),罗马的 Londinium 港码头(Jones,1985)和中国的万里长城。美索不达米亚的填土堤建于公元前 3 000 年之前,堤身由土砖坯砌成,坐落在用芦苇编成辫状的基础之上(Kerisel,1985)。Agar-Quf ziggurrant 位于伊拉克首都巴格达以北 5km,距今至少超过 3 000 年,是由 130~400mm 不等厚度的粘土砖块做成的。砖块由水平方向的芦苇编织垫加固而成。在垂直方向上,砖块每隔 0.5~2.0m 铺有一层砂砾层。它现残存 45m 高,估计当时的高度超过 80m。

图 1-1 为罗马的 Londinium 港码头的加筋土示意图。这是最近在伦敦发现的第一世纪罗马军队的一个码头工程。据估计,此码头长 1.5km,它的一部分在泰晤士河泥中保存了 1 200 余年。此木材加筋土挡墙高 2m、长 9m,壁面垂直,木材一层一层地嵌到填土当中。填料为混



入芦苇的加筋土,它顺着木材而填筑。当时的这种施工技术与现代施工技术极为相似。

勤劳智慧的中国劳动人民,很早以前就开始了加筋土技术运用。在民间,有许多称之为“土法”的建筑技术就是加筋土技术。比如,民间的“夯筑”技术,可以追溯到公元前 4 000 年。在土中加入适量的水,并混入一些竹片、芦苇或稻草,每隔 10cm 左右厚度用夯锤分层夯实来填筑土堤或建造房子(图 1-2)。这种方法对黄土特别适用,由此而建筑的土堤、土墙可以延续几个世纪之久!目前,此法在农村还被广为采用。驰名中外的万里长城就是用这种技术筑成的。图 1-3 为甘肃省敦煌附近的长城西端之景。建于汉朝的长城能保留至今,不能不说是个奇迹。表 1-1 列出了一些中国古代的天然土工材料加筋土的工程遗迹。

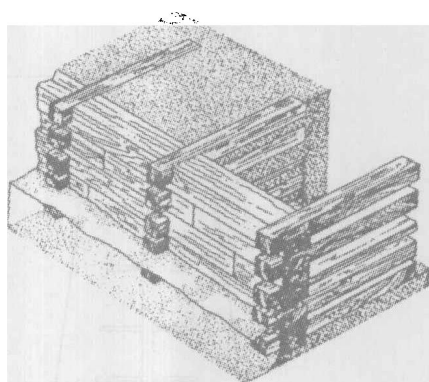


图 1-1 Londinium 港码头的加筋土  
(Bassett,1981)

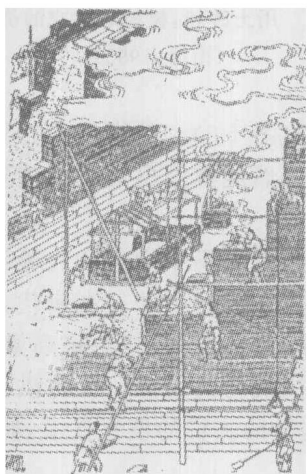


图 1-2 我国传统的夯筑方法

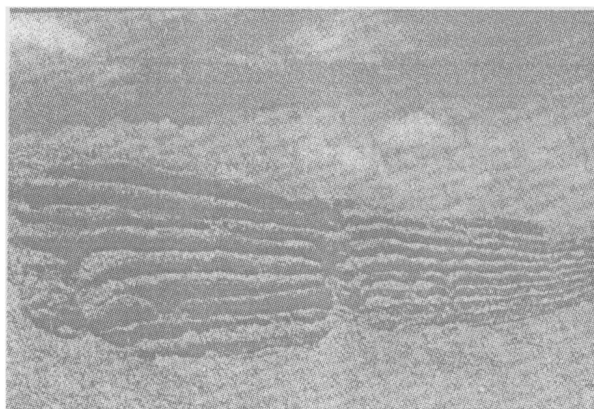


图 1-3 万里长城天然材料加筋土(山内,1993)

表 1-1 中国古代天然土工材料加筋土工程遗迹

朝代	公元	建筑方法	遗址	说明
汉朝(前汉)	公元前 202 年~公元 8 年	土墙,夯筑,芦苇、树枝 城门,土砖坯和芦苇 官房或宫殿	甘肃省敦煌附近	汉朝长城 玉门关 三间房
汉朝(后汉)	公元 25~220 年	城墙,夯筑,木材	陕西省等地	参见图 1-4
唐朝	公元 8~907 年	土墙,夯筑,芦苇、树枝 佛塔,土砖坯、木材和树枝	甘肃省敦煌	参见图 1-5

如图 1-4 所示,古代的城墙也为天然土工材料加筋土工程。夯筑城墙时,每隔一定的间距,在土中铺设一层木材,然后覆土夯实,如此重复,直至填筑到预定的高度。丝绸之路甘肃省