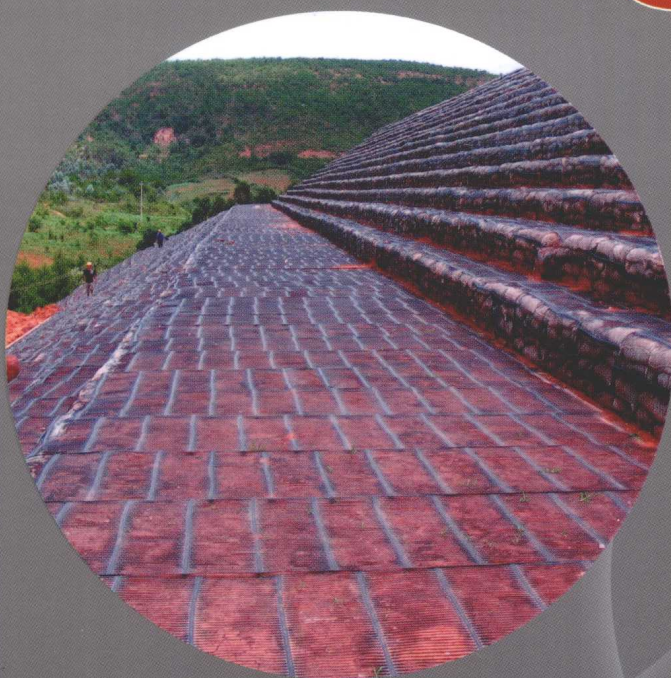




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

土工格栅加筋土 结构理论及工程应用

杨广庆 著



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



土工格栅加筋土结构 理论及工程应用

杨广庆 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为全面、系统地分析了土工格栅加筋土结构的设计计算理论及其工程应用,集中体现了作者多年来关于土工格栅加筋土结构的研究理论及其成果,并结合多个工程实践,研究了不同结构体的作用机理及其工作特性。

在基于分析加筋土结构设计计算方法及其应用的基础上,本书首先对土工格栅拉筋材料的工程特性进行了系统研究,试验研究了不同强度、不同速率条件下的土工格栅拉伸特性以及在不同填料介质中的筋/土摩擦特性和长期蠕变特性;然后分析了加筋土挡墙及边坡的设计计算和稳定性分析中的科学问题,并对土工格栅加筋土挡墙水平变形进行了深入的理论与研究。在此基础上,书中对8种不同结构形式加筋土结构的工作机理和工程特性进行了现场试验研究和有限元分析,最后提出了各种土工格栅加筋土结构的施工工艺及质量控制技术措施。这些内容不仅能促进土工格栅及加筋土结构的学术理论发展,而且可以指导工程建设实践。

本书可供土建、水利、交通、铁道等领域的科研、勘察、设计、施工人员,高等学校师生,以及从事土工合成材料产品研发和生产的企业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土工格栅加筋土结构理论及工程应用/杨广庆著. —北京:科学出版社,2010

(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-027486-1

I. ①土… II. ①杨… III. ①加筋土-土结构-研究 IV. ①TU361

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 082231 号

责任编辑:童安齐 王晶晶 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—1 500 字数:405 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

《山海经》中讲到“洪水滔天，鲧窃帝之息壤以堙洪水”，讲的是鲧盗窃了天帝的“息壤”用以治水。《淮南子》中也讲到“禹乃以息土填洪水，以为名山”。可见大禹也是用息土来治水的。那么这个息壤或者息土是什么东西呢？郭璞在《山海经注》中说：“息壤者，言土自长息无限，故可以塞洪水也。”看来息壤是一种可以自己增长的土，由于在洪水中也不会被冲毁，所以可以用来阻截洪水。

屈原在《天问》中一口气向上天提出了 170 多个问题，其中一些是岩土工程问题。例如他问：“洪象极深，何以填之？”“鲧何所营？禹何所成？”应该说屈原提出的这些问题是很有专业水平的：当时洪水滔滔，既深又急，用什么岩土材料和工艺填筑以修堤建坝，拦截洪水？既然鲧和他的儿子禹都使用了息壤或者息土，那么息壤是什么东西，为什么鲧“九年而水不息，功用不成”，结果被“殛于羽山而死”，而大禹却功成于天下，二者的治水方略有什么不同呢？我们知道，大禹治水是十分辛苦的，充分发挥了艰苦奋斗的精神。“劳身焦思，居外十三年，过家门而不入”（《史记》）；也很重视规划和技术，“左准绳，右规矩”，亲自勘察测量，规划设计；但是成功的关键恐怕还是治水的总体方案正确，没有单纯依靠息土来拦截洪水，而是湮、导、蓄相结合，综合治理，即“开九州，通九道，陂九泽，度九山”，最终战胜了洪水。

这里就有一个让岩土工程技术人员十分感兴趣的问题，那就是“息壤”既然是一种土，它的实物应当是什么东西？首先它是在治水中应用的，它能够保持整体而不被冲散，其次是它能够在水中不断地增高增大筑成围堰、堤坝。

在 20 世纪 60 年代，我在黄河的青铜峡水库工地，见到当地农民在黄河用“草土围堰”在水中筑堤的过程。首先从岸边的一端出发，在水中用土压下大量的草排，在土上面再铺一层草排，压一层土，逐层增厚，人们站在水面以上的草土体上面，再向前推进。在草排的保护下土不会被水冲走，草土混合体不断加厚、加宽、加长，不断的进展，最后筑成大堤。后来在黑龙江省一个县的水利局工作，见到当地农民在柳条捆子上压碎石拦河筑坝，也是采用类似的施工工艺，建成过水坝，雍高水位，引水灌溉稻田。我也亲自指挥民工用这种条排在呼兰河铺底护岸。在四川的都江堰，曾见到用竹笼、木桩和杓槎修建的鱼嘴，两三千年来，在滚滚江水中将水分流，灌区千万亩农田，即时在 2008 年的汶川大地震中也安然无恙。那么这些在水中不会被冲毁，可以不断加高加厚，不断生息增长的加筋土不正是传说中所谓的息壤吗。可以想见，当时古代在遍地洪水的大地上，先民们是用草与树枝加土石这种加筋土来围筑堤防、排除洪水、重建家园的。

所以说,加筋土并不是天外来客,也不是泊来的洋货和新货,它土生土长了几千年,世代相传,造福于人民。可见,岩土工程从来都是实践先于理论,经验先于科技。几千年来人们在加筋土工程方面取得了丰富的经验和建造了巧妙实用的工程,本身也是人类文明的一个重要的部组成分。但是感性的经验毕竟有其局限性和区域性,有待上升到具有普遍性和揭示其机理的理论。

到了 20 世纪七八十年代,由于化学工业和合成材料的发展,高强度、高模量的土工合成材料出现了。随后,人们造出了各种性状、各种功能和各种用途的产品。作为人造产品,它们规格统一、性能一致、批量生产,可按照人们的需求不断开发新产品,具有天然筋材不可比拟的优势。与此同时,各种工程学、力学和计算机手段和技术也被用于加筋土工程设计,各种规范和商用程序也被普遍用于工程设计,使加筋土工程定量化和规范化。这是科学技术的进步。加筋土构造物的稳定分析和变形计算也成为岩土工程中的重要分支。

过去的 30 年也正是我国国民经济和土木工程飞速发展的时期,土工合成材料加筋在各个工程领域都得到广泛的应用。但是使用广泛、规模宏大不等同于技术先进。我国在这一领域的科学研究和技术创新还很不够,技术水平不平衡,技术的掌握还不够普及,不少工程的设计和修建存在着盲目性,有的工程甚至是在蛮干,工程事故时有发生,因而普及和提高加筋土科学技术已成为当务之急。

杨广庆是一位年轻的教授,却已在土工加筋领域工作多年。他对于加筋土的理论和技术有深刻和全面的了解,也在科学研究方面做出了突出的成果。更为难得的是他热心工程实践,主持和参与许多加筋土挡墙和陡坡的工程项目,在工程实践中注意监测、勤于思考、总结提高,在实践中进行了一些创造性的探索。

这本书一方面介绍和总结了加筋土的基本知识、理论和技术,另一方面也结合作者在工程实践中的体会和经验,分析了不少工程案例,这是十分宝贵的。该书是我国有关加筋土工程的一本内容丰富、系统深入、图文并茂、密切结合实际的著作,其中包括第一手的测试和监测资料。这对于加筋土工程的科学研究和工程设计都有参考价值。近年来,我国发表的有关土工加筋领域的科技论文和专著日渐增多,表明我国年轻一代的土工合成材料加筋科技人员已经走到前台,成为骨干,也说明这一领域后继有人,兴旺发达。

希望我国的岩土工程技术人员能够成为土木工程建设中的息壤,能够抵御风浪,不断发展壮大自己,为堤为坝,成墙成城,造福于人民。

中国土工合成材料工程协会理事长
国际土工合成材料学会中国分会主席
清华大学教授

李 信

2010 年 2 月 3 日于清华园

前 言

土体加筋技术历史悠久,自 20 世纪 60 年代 Henri Vidal 提出现代加筋土理论后该技术得到了快速发展,加筋土也被评价为继钢筋混凝土之后又一造福人类的复合材料。20 世纪 80 年代初塑料拉伸土工格栅引入加筋土工程之后,基于这种具有网孔结构的新型土工合成材料依靠其特有的网孔对土的嵌固作用与咬合作用,加筋效果更加明显,大大促进了加筋土结构的广泛应用和发展。但是,由于土工格栅新材料本身的特殊工程性质以及加筋土结构作用机理的复杂性,其设计计算理论还不是很成熟。

本书结合作者多年来在加筋土技术方面的研究成果,基于系统研究分析方法,采用室内试验和现场试验相结合,理论分析与有限元分析、工程实体相结合的研究思路,以理论分析和设计计算为基础,以实际应用与推广为宗旨,对土工格栅拉筋材料的工程特性以及加筋土结构的设计计算理论、作用机理、工作特性与施工技术进行了系统研究。全书结构体系合理,内容充实、新颖、实用,体现了作者一些新的观点和认识,写作上注重脉络清晰,论理有据。

全书共分 13 章,首先试验研究了不同强度、不同速率条件下的土工格栅拉伸特性和在不同填料介质中筋/土摩擦特性以及不同环境温度条件下的长期蠕变特性;然后研究分析了不同结构形式的加筋土挡墙及边坡的设计计算和稳定性问题,并对土工格栅加筋土挡墙水平变形进行了深入的理论分析与研究;在此基础上,对整体现浇混凝土面板式及返包式加筋土铁路高挡墙、台阶式钢筋混凝土预制块加筋土铁路高挡墙、模块式加筋石灰土公路挡墙、加筋土陡边坡铁路路基以及加筋土高边坡等 8 种结构的工作机理和工程特性进行了现场试验研究和有限元分析,最后提出了不同结构形式加筋土结构的施工工艺及质量控制技术措施。

感谢西南交通大学蔡英教授,清华大学李广信教授,北京工业大学王正宏教授,长江科学院包承纲教授,铁道第四勘察设计院顾湘生教授级高工、李小和教授级高工、周宏元教授级高工,以及青岛旭域土工材料股份有限公司陈泽明经理多年来对作者的帮助和支持。本书的部分研究成果得到了铁道部建设管理司、河北省自然科学基金委员会、河北省交通运输厅的资助,在此表示衷心的感谢。感谢铁道部第四勘察设计院、青岛旭域土工材料股份有限公司提供的许多宝贵资料。同时感谢张保俭副教授、吕鹏副教授以及席健、周亦涛、周玲、孙伟、李朋卫、张杰等研究

生在本书的编排、整理和校阅过程中付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2010年1月于石家庄

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 加筋土结构及其发展概述	1
1.1.1 加筋土结构的组成	1
1.1.2 加筋土结构的发展现状	2
1.2 土工合成材料的发展及种类	4
1.2.1 土工合成材料工程应用发展史	4
1.2.2 土工合成材料的种类	5
1.2.3 土工格栅的分类	7
1.3 土工格栅加筋土结构设计方法	8
1.3.1 锚固楔体法	9
1.3.2 双楔体法	9
1.3.3 基于考虑水平变形的极限平衡理论设计方法	9
1.3.4 极限状态法	11
1.3.5 基于剪力滞理论的设计方法	12
1.3.6 位移法	12
1.3.7 有限单元法	13
1.3.8 条分法	13
1.4 本书的研究目的与内容	13
1.4.1 研究目的	13
1.4.2 主要研究内容	14
参考文献	14
第 2 章 土工格栅的工程特性研究	17
2.1 土工格栅的拉伸特性研究	17
2.1.1 简述	17
2.1.2 拉伸速率对土工格栅拉伸性能的影响	19
2.2 土工格栅与土体的界面摩擦特性研究	25
2.2.1 简述	25
2.2.2 影响土工格栅与土体界面摩擦特性试验结果的主要因素	28
2.2.3 土工格栅拉拔力组成	32
2.2.4 土工格栅在砂砾料、黏性土中的摩擦特性试验研究	33

2.2.5 试验条件对土工格栅与土体界面摩擦特性的影响	39
2.3 土工格栅蠕变特性研究	48
2.3.1 蠕变曲线与模型	48
2.3.2 土工格栅蠕变特性试验研究	52
参考文献	56
第3章 加筋土结构形式及设计理论研究	59
3.1 加筋土结构的断面形式	59
3.2 加筋土结构的破坏形态	59
3.3 土工格栅加筋机理	61
3.3.1 摩擦加筋原理	61
3.3.2 准黏聚力原理	63
3.3.3 基于断裂理论的加筋土边坡稳定性分析	67
3.4 加筋土陡边坡设计方法研究	70
3.4.1 条分法	70
3.4.2 双楔体法	74
3.4.3 设计方法比较	78
3.4.4 有关问题的探讨	79
3.5 加筋土挡墙设计方法研究	80
3.5.1 路肩挡墙设计方法	80
3.5.2 路堤挡墙设计方法	88
3.5.3 斜面挡墙设计方法	95
3.5.4 多级台阶式挡墙设计方法	96
参考文献	101
第4章 土工格栅加筋土挡墙水平变形计算	103
4.1 土工合成材料加筋土挡墙水平变形的形状	104
4.2 土工合成材料加筋土挡墙水平变形来源与计算方法	106
4.3 基于黏弹性特征的土工格栅拉筋伸长变形	107
4.4 筋/土相对位移	109
4.4.1 拉筋单元	109
4.4.2 土体单元	110
4.4.3 筋/土相对位移	111
4.5 基于各向异性弹性体假定的加筋土挡墙墙体水平变形	111
4.5.1 加筋土挡墙等效的各向异性弹性体	111
4.5.2 各向异性加筋土挡墙的弹性特征	112
4.5.3 加筋土挡墙墙体的水平变形	116

4.6	土工格栅拉筋的蠕变变形	118
4.7	算例	120
4.8	土工格栅加筋土挡墙水平变形影响因素分析	120
4.8.1	土工格栅加筋土挡墙有限元分析模式	121
4.8.2	地基土弹性模量对墙面水平变形的影响	122
4.8.3	土工格栅拉筋刚度对墙面水平变形的影响	123
4.8.4	土工格栅竖向间距(加筋率)对墙面水平变形的影响	124
4.8.5	土工格栅长度对墙面水平变形的影响	126
4.8.6	填料变化对加筋土挡墙水平变形的影响	128
4.8.7	墙高变化对墙面水平变形的影响	129
4.8.8	不同墙面板形式对墙面水平变形的影响	129
4.8.9	加筋体断面型式对墙面水平变形的影响	130
4.8.10	墙顶荷载对墙面水平变形的影响	132
4.8.11	墙面板基础埋深对墙面水平变形的影响	135
4.9	小结	135
	参考文献	135
第5章	整体现浇面板式土工格栅加筋土高挡墙应用技术研究	138
5.1	试验工点工程概况	138
5.2	测试方案的确定	139
5.3	测试结果数据分析	141
5.3.1	垂直土压力特征	142
5.3.2	墙背侧向土压力特征	144
5.3.3	土工格栅拉筋变形特征	145
5.3.4	加筋土墙体潜在破裂面特征	148
5.3.5	墙面水平变形特征	149
5.4	小结	150
第6章	返包式土工格栅加筋土高挡墙应用技术研究	152
6.1	试验工点工程概况	152
6.2	测试方案的确定	152
6.3	测试结果数据分析	154
6.3.1	垂直土压力特征	154
6.3.2	墙背侧向土压力特征	155
6.3.3	土工格栅拉筋变形特征	158
6.3.4	墙体潜在破裂面特征	160
6.3.5	墙面水平变形特征	160

6.4	土工格栅加筋土高挡墙有限元分析	162
6.4.1	计算模型的建立	163
6.4.2	土体加筋效果分析与评价	165
6.4.3	有限元数值分析	170
6.5	小结	176
第7章	模块式土工格栅加筋石灰土挡墙应用技术研究	178
7.1	试验工点工程概况	178
7.2	测试方案的确定	182
7.3	测试结果分析	185
7.3.1	垂直土压力特征	185
7.3.2	墙背侧向土压力特征	189
7.3.3	土工格栅拉筋变形特征	192
7.3.4	墙体潜在破裂面特征	197
7.4	模块式土工格栅加筋石灰土挡墙有限元分析	198
7.4.1	计算模型的建立	198
7.4.2	垂直土压力特征	199
7.4.3	墙背侧向土压力特征	200
7.4.4	土工格栅拉筋变形特征	201
7.4.5	墙体潜在破裂面特征	202
7.5	小结	203
第8章	土工格栅加筋土挡墙水平变形试验研究	205
8.1	工程概况	205
8.2	试验方案	206
8.3	试验结果分析	209
第9章	路堤式加筋土铁路挡墙应用技术研究	211
9.1	试验工点工程概况	211
9.2	测试方案的确定	212
9.3	测试结果数据分析	213
9.3.1	垂直土压力特征	213
9.3.2	墙背侧向土压力特征	216
9.3.3	土工格栅拉筋变形特征	217
9.3.4	墙体潜在破裂面特征	220
9.4	路堤式加筋土铁路挡墙有限元分析	222
9.4.1	垂直土压力特征	222
9.4.2	墙背侧向土压力特征	224

9.4.3 土工格栅拉筋变形特征	227
9.4 小结	230
第 10 章 双级台阶式土工格栅加筋土铁路挡墙应用技术研究	232
10.1 试验工点工程概况	232
10.2 测试方案的确定	232
10.2.1 测试内容	234
10.2.2 测试方法及测试元件布置	234
10.3 测试结果数据分析	236
10.3.1 垂直土压力特征	236
10.3.2 墙背侧向土压力特征	237
10.3.3 土工格栅拉筋变形特征	240
10.4 双级台阶式土工格栅加筋土铁路挡墙有限元分析	243
10.4.1 垂直土压力特征	244
10.4.2 墙背侧向土压力特征	247
10.4.3 拉筋变形特征	248
10.4.4 挡墙潜在破裂面特征	251
10.5 小结	252
第 11 章 土工格栅加筋土陡边坡路堤应用技术研究	253
11.1 试验工点工程概况	253
11.2 测试方案的确定	254
11.3 测试结果数据分析	257
11.3.1 垂直土压力特征	257
11.3.2 墙背侧向土压力特征	259
11.3.3 土工格栅拉筋变形特征	260
11.4 土工格栅加筋土陡边坡路堤有限元分析	262
11.4.1 加筋土陡坡垂直土压力特征	263
11.4.2 重力式挡墙墙背侧向土压力特征	265
11.4.3 土工格栅拉筋变形特征	266
11.4.4 坡面水平变形特征	268
11.5 小结	269
第 12 章 土工格栅加筋土高边坡应用技术研究	271
12.1 试验工点工程概况	271
12.2 测试方案的确定	271
12.2.1 试验内容	272
12.2.2 试验测试仪器	276

12.3	测试结果数据分析	279
12.3.1	垂直土压力特征	279
12.3.2	坡面侧向土压力特征	283
12.3.3	土工格栅拉筋变性特征	285
12.3.4	坡面水平变形特征	293
12.3.5	加筋土结构孔隙水压力特征	294
12.4	小结	296
第13章	土工格栅加筋土结构施工技术研究	298
13.1	施工准备	298
13.2	填前基底处理技术	299
13.2.1	伐树、除根及表土处理	299
13.2.2	加筋土结构基底处理的施工技术	299
13.3	返包式土工格栅加筋土挡墙施工技术	300
13.4	整体现浇面板式土工格栅加筋土挡墙施工技术	300
13.5	模块式土工格栅加筋土挡墙施工技术	301
13.6	土工格栅加筋土边坡施工技术	304
13.6.1	第一层土工格栅加筋材料铺设方法	304
13.6.2	填料的摊铺与压实	306
13.6.3	土工格栅返包与连接	307
13.7	质量控制措施	308

第 1 章 绪 论

1.1 加筋土结构及其发展概述

土体具有一定的抗压强度和抗剪强度,但抗拉强度却很低。在土体中掺入或铺设适量的拉筋材料后,可以不同程度地改善土体的强度与变形特征。将拉筋材料埋置在土体中,可以扩散土体的应力、增加土体模量、传递拉应力、限制土体侧向变形,同时还能增加土体和其他材料之间的摩阻力,提高土体及有关结构物的稳定性。因此,在填土中加入抗拉材料,通过摩擦力将拉筋材料的抗拉强度与土体的抗压强度结合起来,增强土体的稳定性,使土体的整体强度得以提高。该技术已广泛用于修筑路基、挡土墙、桥台、堤坝等工程^[1]。

从广义上讲,凡在土体内加入筋材,充分利用土体的抗压强度和筋材的抗拉强度的稳定结合体均可称为加筋土结构,如:在软土路基的基底铺设单层或多层高强度的土工织物或土工格栅来约束浅层软土地基的侧向变形,提高路基的抗滑稳定性;在复合地基表面,利用土工合成材料和砂、碎石等组成加筋垫层,以传递和调整基底应力分布,减少不均匀沉降;在路基边坡内加入筋材,以增强边坡的稳定,防止边坡溜坍等。本书中的加筋土结构指加筋土作为一个整体在工程中发挥作用,如加筋土挡墙、加筋土陡边坡等。

1.1.1 加筋土结构的组成

加筋土结构主要由加筋材料、面层系统和回填材料三部分组成^[2]。

1. 加筋材料

在加筋土结构系统中采用的加筋材料,按其几何形状可分为条带式加筋(包括钢带、聚合物加筋带、混凝土板条等)、网眼型宽幅加筋(包括土工网格、土工格栅或钢筋网)和非网眼型宽幅加筋(主要为土工布)三种类型。目前,大部分加筋土结构采用连续的土工合成材料(土工网格、土工格栅或土工布)。尤其是土工格栅,由于其具有变形模量大、抗拉强度高、韧性好、重量轻、耐腐蚀、抗老化、与土颗粒之间的相互作用强以及能在较短时间内发挥加筋作用等优点而得到了广泛应用。

2. 面层系统

面层系统是阻止两层加筋材料之间土的表面剥落而使用的加筋土结构的一部

分,一般包括预制混凝土块、现浇混凝土面板、石笼、焊接钢丝网、喷浆混凝土、土工合成材料返包式面板等。

加筋土结构系统中使用的面层系统由于是加筋土结构中唯一的可视部分,对美观影响很大。另外,面层系统对结构的稳定也起到了一定的作用,可保护回填土,防止其滑塌和侵蚀;在某种情况下,也能提供排水通道。

3. 回填材料

对于加筋土结构,为了保证其耐久性、良好的排水性能、施工方便以及良好的筋土相互作用,一般需要采用级配良好的粗粒土。由于筋材和填土之间的摩擦力对加筋土结构的稳定性起着重要作用,一般要求尽量选用具有良好摩擦特性的材料。国内外研究者对黏性土的加筋性能也做了一些研究工作,但一般不推荐使用黏性土作为填料,一是因为黏性土的内摩擦角较小,二是它的低渗透性往往会存在超孔隙水压力,降低加筋土工程的安全度。就加筋性能而言,加筋土结构可采用质量较差的回填土,但高质量的回填土有排水方便的优点,而且粒料土在装卸、填土和压实过程中也有显著的优点,可提高筑坡成功率和改善坡体线性偏差。

1.1.2 加筋土结构的发展现状

加筋土的应用具有悠久的历史。公元前 3000 年以前,英国人曾在沼泽地带用木排修筑道路(Koerner, 1986)^[37];公元前 2500 年古罗马人就采用编织的芦苇在软基上筑路;公元前 2000~公元前 1000 年,巴比伦人曾利用土中加筋来修筑庙塔;20 世纪二三十年代美国还尝试用棉织品加强路面;在第二次世界大战中,英国曾在软基铺设梢辊和帆布,以便装甲车通过,这些早期的加筋土技术完全依靠经验来指导实践。现代加筋土理论是由法国工程师 Henri Vidal 于 20 世纪 60 年代初提出的,并于 1963 年首先公布了其研究成果,1965 年法国在比利牛斯山的普拉聂尔斯修建了世界上第一座加筋土挡土墙^[3]。由于加筋土技术在法国的成功应用,引起了世界各国工程界、学术界的重视,其发展速度相当快,应用范围也日益广泛。加筋土结构作为支挡结构,被应用于挡墙、桥台、港口岸墙和地下结构等;作为土体的稳定体系,被应用于道路路堤、水工坝体、码头护墙、边坡稳定和加固地基等,联邦德国《地下建设》杂志(1979 年)曾誉之为“继钢筋混凝土之后又一造福人类的复合材料”^[2]。

20 世纪 70 年代是加筋土技术在世界范围传播、发展的阶段,相应的试验、研究工作也同时进行。当时,研究最为活跃的当属法国桥梁道路中心、美国加州大学、日本国铁和建设省等。法、美、日、德等国也先后制定了有关加筋土工程的规程、条例和手册^[4]。

20 世纪 80 年代,除了进一步探讨加筋土结构的基本性状、完善设计计算理论

之外,许多国家还在拓宽填料、加筋材料的应用范围方面做了大量工作。美国联邦公路管理局提供研究基金,以加州大学 Mitchell 为首,与英国、法国学者合作的研究项目“加筋土坡和路堤”于 1987 年完成了研究报告。美国、英国学者 Holtz 和 Jewell 等开展的用土工合成材料稳定路堤、处理软弱地基方面的研究也取得了重要成果。80 年代以后,美国、法国合作,利用离心机进行模拟试验,以了解不同的筋材、面板刚度、地基土的压缩性以及不同的超载和填料对加筋土结构内部稳定性的影响,并利用有限元法对加筋土结构的设计和试验成果进行数值分析。

我国是加筋土的故乡,自古以来,筑土墙加草筋或竹筋,用柴排处理软弱地基,用土袋或树枝压条加固堤岸等,都是应用加筋土的例子。现代加筋土技术引入我国是在 20 世纪 70 年代后期,1979 年云南省煤炭设计院在云南田坝矿区建成了我国第一座加筋土挡墙储煤仓,其挡墙部分长度 80m,高 2.3~8.3m,由填土和布置在填土中的筋带及墙面板三部分组成^[4]。该挡墙的成功建造引起了我国土木建筑行业技术人员的兴趣,因为这种结构不仅施工容易,而且具有一定的经济性。与传统的砌石挡墙相比,加筋土挡墙的造价较低。从技术上看,加筋土是柔性结构,对地基承载力的要求较低,易于处理,施工也无需专用机具和特别技术,工效高,易于推广,外形平整美观。因此,很多人对这种结构进行了深入研究并迅速推广应用,各省、自治区和直辖市修建的加筋土工程已逾千项,砌墙面积超过 70 万 m²。在大量工程实践的基础上,随着经验的积累,创造了符合我国国情的加筋土技术。

多年以来,支挡结构多为重力式或悬臂式的混凝土挡墙或石砌挡墙一类刚性结构。这类结构浪费材料、墙面不美观且沉降不均匀。自从法国工程师 Henri Vidal 最早将加筋原理上升到理论高度以来,大量不同性质材料的加筋结构出现在生产实践中:较早一类材料的加筋构想来源于钢筋混凝土,加筋材料为钢筋混凝土预制件,即在受拉钢筋外表面包裹一层混凝土,这种加筋形式类似于深基坑支护中经常用的土钉,目前在加筋土挡墙工程中还经常被使用;与早期加筋土挡墙结构相比,土工合成材料加筋土挡墙以其施工简单、经济有效的特点越来越受到广大岩土工作者的青睐,世界上第一座土工合成材料加筋土挡墙是 1971 年在法国 Rouen 修建的无纺土工织物包裹式挡土墙,墙高 13feet^①、长 66feet,墙后填料为黏性土^[5]。自从 20 世纪 80 年代初塑料拉伸土工格栅引入加筋土工程,仅 1983~1990 年美国就修建了 300 多座土工合成材料加筋土挡土墙(geosynthetics reinforced soil walls, GRSW)和加筋土陡坡(geosynthetics reinforced soil slopes, GRSS)(Mitchell and Christopher, 1990)^[6]。由于土工格栅这种具有网孔结构的新型土工合成材料依靠其特有的网孔对土的嵌固作用与咬合作用,加筋效果更加明显,在挡土墙中的应用比例日益增加。

① 1feet=0.3048m,下同。

1.2 土工合成材料的发展及种类

1.2.1 土工合成材料工程应用发展史

土工合成材料是工程建设中应用的土工织物、土工膜、土工复合材料、土工特种材料的总称,是一种新型的岩土工程材料^[7]。它以人工合成的聚合物,如塑料、化纤、合成橡胶等为原料,制成各种类型的产品,置于土体内部、表面或各层土体之间,发挥加强或保护土体的作用。目前土工合成材料已经广泛应用于水利、电力、公路、铁路、建筑、海港、采矿、军工等工程的各个领域。

近代土工合成材料的发展,是建立在合成材料——塑料、合成纤维和合成橡胶发展基础之上的。1870年美国 John W 和 Hyatt I S 发明的“赛璐珞”,就是用硝化纤维加入樟脑增塑剂制成的一种塑料。1908年 Leo Baekland 研制了酚醛塑料。20世纪30年代,聚氯乙烯、低密度聚乙烯、聚酰胺相继出现在市场。20世纪50年代,聚酯、高密度聚乙烯和聚丙烯相继问世。随着各种塑料的成功研制,不同类型的合成纤维也陆续投入生产。

20世纪30年代末或40年代初,土工合成材料开始应用于土工建筑中。聚氯乙烯薄膜首先应用于游泳池防渗,大量塑料防渗薄膜的应用始于灌溉工程。之后各种土工合成材料产品相继问世,并得到快速发展,被誉为继砖石、木材、钢铁、水泥之后的第五大工程建筑材料。

现代土工合成材料的应用是以1958年 Barret R J 在美国佛罗里达州利用聚氯乙烯织物作为海岸块石护坡的垫层工程为开端的。这种土工合成材料主要是以机织型的有纺织物为主,大部分用于护岸防冲等工程,在美国、欧洲和日本逐渐推广。但是,由于有纺土工织物具有方向性,且价格较高,限制了它的发展与应用。到20世纪60年代末无纺土工织物的应用使土工织物的发展有了新的飞跃。无纺土工织物首先在欧洲开始使用,相继用于英国无路面道路、德国护岸工程、法国土坝的上游护坡垫层和下游的反滤排水。而随后的整个70年代是土工织物从幼年成长为壮年的时代,应用范围发展到水利、公路、海港、建筑等各个领域。无纺土工织物很快从欧洲传播到美洲、非洲和澳洲,最后传播到亚洲。从20世纪70年代末开始,为了更好地满足不同工程的需要,以合成聚合物为原料的特种土工合成材料,如土工格栅、土工网、三维土工网垫和土工格室等纷纷问世,同时各种复合型的土工合成材料也有了长足的发展。

我国在20世纪60年代中期开始应用塑料防渗膜,首先用于渠道防渗,以后推广到水库、水闸和蓄水池等工程之中。合成纤维土工织物在我国的应用较晚,但发