

GEOSYNTHETICS

Reinforcement Soil Structure
Application Guidance

土工合成材料

加筋土结构应用技术指南

杨广庆 徐 超 张孟喜 主 编
丁金华 苏 谦 何 波 副主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Geosynthetics

Reinforcement Soil Structure
Application Guidance

土工合成材料

加筋土结构应用技术指南

杨广庆 徐 超 张孟喜 主 编

丁金华 苏 谦 何 波 副主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书较为全面、系统地介绍了土工合成材料加筋土结构筋材特性、加筋土结构的设计计算方法、施工技术及其工程应用。全书由我国长期从事加筋土结构设计和应用研究的近 20 位专家、学者和工程技术人员撰写而成,集中体现了国内外有关土工合成材料加筋土技术研究成果及工程应用的经验,反映了我国土工合成材料加筋土技术的应用技术水平。

全书分绪论、加筋材料及其特性、加筋土边坡、加筋土挡墙、加筋垫层路堤、加筋土结构工作性能现场监测六部分。书后附有数值计算在加筋土结构设计中的应用、加筋土挡墙其他设计方法简介和加筋土结构典型工程案例三个附录。

本书可供土木、水利水电、交通等部门的设计、施工、科研人员使用,也可作为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用书。

图书在版编目(CIP)数据

土工合成材料加筋土结构应用技术指南/杨广庆, 徐超, 张孟喜主编. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.9

ISBN 978-7-114-13186-8

I. ①土… II. ①杨… ②徐… ③张… III. ①土木工程—合成材料—加筋土—土结构—指南 IV. ①TU361-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 158754 号

书 名:土工合成材料加筋土结构应用技术指南

著 者:杨广庆 徐 超 张孟喜

责任编辑:王 霞 王景景

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:18.5

字 数:368 千

版 次:2016 年 9 月 第 1 版

印 次:2016 年 9 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13186-8

定 价:80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编写委员会

顾 问:王正宏 王育人 包承纲 李广信

迟景魁 师新明 蔡 英 束一鸣

主 编:杨广庆 徐 超 张孟喜

副 主 编:丁金华 苏 谦 何 波

编写委员会:

杨广庆(石家庄铁道大学)

徐 超(同济大学)

张孟喜(上海大学)

丁金华(长江科学院)

苏 谦(西南交通大学)

何 波(坦萨土工合成材料(中国)有限公司)

徐林荣(中南大学)

汪益敏(华南理工大学)

介玉新(清华大学)

邹维列(武汉大学)

刘华北(华中科技大学)

陈建峰(同济大学)

周诗广(中国铁路经济规划研究院)

吴连海(铁道第三勘察设计院集团有限公司)

戴征杰(青岛旭域土工材料股份有限公司)

许福丁(马克菲尔(长沙)新型支挡科技开发有限公司)

杨 帆(湖北力特土工材料有限公司)

朱春笋(重庆永固建筑科技发展有限公司)

各章节编写人员名单

术语	杨广庆 徐 超
绪论	杨广庆 徐 超 周诗广
第1章 加筋材料及其特性	张孟喜 丁金华
第2章 加筋土边坡	丁金华 刘华北 周诗广 杨 帆
第3章 加筋土挡墙	杨广庆 陈建峰 邹维列 何 波
第4章 加筋垫层路堤	徐 超 徐林荣 苏 谦 汪益敏
第5章 加筋土结构工作性能现场监测	杨广庆 周诗广 吴连海 戴征杰
附录1 数值计算在加筋土结构设计中的应用	苏 谦 刘华北 介玉新
附录2 加筋土挡墙其他设计方法简介	何 波 刘华北 陈建峰
附录3 加筋土结构典型工程案例	徐 超 何 波 戴征杰 杨 帆
	许福丁 朱春笋

序 ▶ Introduction

土工加筋具有极久远的历史。古老的中华文明主要是农耕文明,生活与生产首先遇到的问题就是防洪。最新的考古发现表明,距今 5000 多年前的良渚文化时期,先人们用茅草裹泥、芦苇绑扎形成类似今天的草袋装土的“草裹泥”块体,将其纵横砌筑,修坝筑墙。约 4100 年前著名的大禹治水期间,曾用“息壤以湮洪水”,据考,所谓的息壤就是竹笼一类的加筋土结构,用以筑坝、拦洪、堵口与护岸,“开九州,通九道,陂九泽,度九山”,终于战胜了洪水。

至今尚在发挥巨大效益的都江堰工程,始建于 2000 多年前的秦代。其主要的治水工具与材料就是属于加筋土的石笼、杩槎、羊圈、条排等。汉武帝为了抵御匈奴,运送粮草,从长安出发,横穿灞河,建造大汉漕渠,为了护岸防冲,在河岸上纵横铺设麻绳网,然后铺设新鲜的柳条;上面铺一层碎石及碎砖瓦;再铺一厚层青泥膏;从一头卷成埽捆。最后逐个推下河岸,打桩固定,形成连续的护坡结构。在防洪工程中,汉武帝“自临决河,令群臣自将军以下,皆负薪填决河,……下淇园之竹以为楗”。可以想见,2000 多年前,皇帝亲临决口,高级干部们身背薪柴,杂以碎石,打下竹桩,堵塞决口的紧张场面。到了宋代,则在治河工程中出现了一个专门的加筋土工种——埽工,并有了关于设计施工技术的专门著作。

考古发现表明,中华民族呈“多元一体”的格局,各地的古老文明几乎同时采用过加筋土筑墙建房。良渚的先民们会用“草裹泥”建房。现存的古长城遗址处仍可见一层土石、一层柴草的残墙。拉哈辫草房是东北人的筑房技术:首先以谷草等编成草辫,再泥浆浸泡,分层缠绕在木立柱上,形成外墙;然后再用麻刀泥抹平;房顶苫草为湿地产的小叶葎,冬暖夏凉,坚固耐久,百年而不毁。

国外岩土界通常说,1963 年法国的工程师亨利·维达(Henri Vidal)观察到鸟类利用泥和草筑巢,受到启发而发明了加筋土,这是十分无知与可笑的。远古人类可能观察到一些动物利用加筋土筑巢建坝而模仿,但那是在 5000 多年前,而不是 50 年前。

这些古老的加筋土工艺是古人类利用天然材料而产生与应用的,它是以经验的形式流传与继承的。千差万别的天然材料也不可能形成系统的技术。

到了 20 世纪 60 年代,由于化工与高分子材料的发展,各种高强度、高模量、抗腐蚀的土

土工合成材料出现了,各种新产品按照人的期望不断涌现。它们规格统一,批量生产,指标一致,具有天然纤维材料不可比拟的优势。各种力学、数学、工程学知识也被应用于加筋土工程的设计;设计计算软件商业化;各种技术指南、手册被应用;规范、标准被颁布,这一切使加筋土成为一个独立的工程门类与科技学科。科技的发展也推动了工程的应用,土工合成材料的广泛应用使其成为继砖石、木材、钢材、水泥之后的第五大工程建筑材料,在水利、港口、公路、铁路建筑与市政工程门类中得到广泛应用。

由于历史的原因,我国的土工合成材料加筋土工程应用技术要比国际上先进国家晚十余年。但近30年是我国土木工程空前兴旺的时期,在基础建设和开拓土地工程中,土工合成材料及其加筋工程,因其良好的经济和社会效益受到欢迎。但与其相应的是科学技术落后于生产实践,在岩土工程界,很多工程技术人员对于这种工艺与计算还很不熟悉,与国际间的交流不够,指导的文献资料不足,这就制约了其在工程中的合理应用。

20世纪90年代早期,我国土工合成材料工程协会的老一代专家们编制了《土工合成材料工程应用手册》,为推广土工合成材料的工程应用起到巨大的推动作用。随后该协会的“加筋专业委员会”连续组织了5届全国加筋土学术会议,为介绍先进的设计计算方法,交流创新的科学研究成果,总结成功与失败的工程经验与教训,推广工程应用、培养年轻的科技人员和提升科技水平起到很大的作用。

岩土工程是一门实践性与经验性很强的工程门类与学科。需要理论与实践的密切结合,也需要理论与实践两方面的创新。加筋土工程更需要的是方便与实用的工具与文献,本指南正是为适应这一需要而编写。

参加编写的专家教授在这一领域具有丰富的知识与经验,他们一方面了解国内外有关的先进技术与文献,也具有亲自参与工程设计、施工、监测分析的实践。其中一些生产材料与产品的大型企业具有较高技术水平的工程技术人员,他们参与了工程设计与施工指导,积累了大量跟踪记录的工程案例,是国内推广应用土工合成材料加筋土技术非常重要的骨干力量。

本指南是在我国现行标准规范的基础上编写的,参考了国外新近的技术与文献,也总结了我们自己的工程经验和科研成果。详细介绍了基本原理、设计步骤、材料参数、施工技术和监测方法,其中也含有很多代表性很强的工程案例、设计算例与数值计算方法。相信它将为推广土工合成材料加筋土的工程应用、提升我国加筋土的技术水平发挥显著的作用。

李信

2016年5月

前 言 ▶ Preface

土工加筋技术历史悠久,可追溯到距今 5000 多年前。自 20 世纪 60 年代法国工程师 Henri Vidal 提出现代加筋土理论以后,该技术得到了快速发展,已广泛应用于土木、水利等工程建设中的各行业领域,取得了显著的社会、经济和环保效益。自 1998 年之后,我国各行业相继出版了土工合成材料应用的相关技术标准、规范和手册,对主要加筋土结构的设计应用等进行了规定和指导,为我国土工合成材料加筋土结构的应用起到了积极的推动作用。但上述文献涉及的加筋土结构材料要求、设计过程及施工技术偏于简单,为了进一步推广应用土工合成材料加筋土技术,满足广大设计、施工、科研人员和生产厂家的迫切需求,中国土工合成材料工程协会加筋专业委员会组织了有关高等学校、研究院、设计院和国内五家具有设计能力的土工合成材料加筋材料生产企业等专家共同编写《土工合成材料加筋土结构应用技术指南》,作为国内相关技术标准、规范和指南的补充。

本指南具有以下特点:一是具备实用性,内容上注重联系实际,以工程应用与推广为宗旨,同时也为相关的科学研究提供实用的技术参考;二是具备全面性,内容上以主要的加筋土结构为对象,涉及加筋材料类型及其特性、各种结构详细的设计方法、施工技术及质量控制;三是具备先进性,内容上不仅反映国内外最新的标准、规范和指南,还介绍了该领域最新的相关研究成果,充分体现国内外该领域当前达到的水平。

本指南共分 10 部分,首先从加筋材料产品、加筋材料性能和加筋土结构三方面定义了相关术语;在绪论中简要概述了土工合成材料的发展及其种类、加筋土结构及其发展以及本指南编制的目的与内容;第一章从加筋材料的类型、工程特性、筋-土界面摩擦特性、主要加筋材料产品指标以及加筋土结构设计主要参数建议值等方面分析了加筋土结构材料及其特性;第二、三、四章分别对加筋土边坡、加筋土挡墙、加筋垫层路堤等主要加筋土结构的设计计算、施工技术及质量控制方法进行了详细叙述,并对国内外规范或指南的相关规定进行了分析和评价;第五章介绍了加筋土结构工作性能的现场监测技术、传感器选择与布置原则。同时,在书后附有数值计算在加筋土结构设计中的应用、加筋土挡墙其他设计方法简介和加筋土结构典型工程案例三个附录,为读者进一步了解加筋土结构的数值计算、国外加筋土结构的设计方法及加筋土结构的工程应用提供了借鉴参考。

本指南由中国土工合成材料工程协会加筋专业委员会的主要骨干委员编写而成,经全体编写者一年多的不懈努力,召开了数次编制会议,形成初稿并经编委会互审后,提交专家进行初审,根据专家初审意见讨论修改形成第二稿,由主编再对第二稿进行复审,再经编委会讨论并进行适当调整和补充后定稿。本指南收集了国内各行业的相关技术标准以及国际流行的主要相关规范与指南,对各种主要加筋土结构的设计、施工、应用等进行了较为详细的介绍,并对工程设计及数值模拟中相关参数的选择给出了参考值,总体上内容丰富,可满足工程设计、施工、材料生产以及相关研究人员参考和应用。需要指出的是,由于目前我国岩土工程的设计理论体系主要以容许应力法为主,虽然有些行业标准采用了极限状态法的思想或在不同程度上应用了分项修正系数,但由于各相关参数仍存在模糊不清的地方,还需做大量的工作,因此本指南提供的设计方法以容许应力法为框架。由于极限状态法是岩土工程设计的发展方向之一,在本指南附录2中简单列举了英国、北美等国家或机构相关极限状态设计方法,可供读者参考。土工合成材料加筋土结构作为一种新的应用技术,目前技术理论上还不够成熟,设计理论落后于工程实践,对于一些设计准则存在不同的观点,计算方法带有一定的经验性,希望读者在使用时结合工程情况及行业要求因地制宜地选用或参考。

在本指南的筹划、启动、大纲制定、内容编写及审阅过程中得到了我国土工合成材料加筋领域的专家王正宏教授、包承纲教授、李广信教授、蔡英教授、师新明教授、束一鸣教授等给予的指导和帮助,在此表示感谢。同时也感谢中国土工合成材料工程协会的支持,感谢人民交通出版社对本指南出版的支持。

感谢坦萨土工合成材料(中国)有限公司、青岛旭域土工材料有限公司、湖北力特土工材料有限公司、重庆永固建筑科技发展有限公司、马克菲尔(长沙)新型支挡科技开发有限公司五家生产企业提供工程案例及对本指南编写的大力支持!

限于编者的认识水平、工程经验和理论水平,书中难免存在不足或错误之处,敬请各位专家、学者、同行批评指正,以便今后改正。

《土工合成材料加筋土结构应用技术指南》编写委员会

2016年3月

目 录

术语 /1

绪论 /5

0.1 土工合成材料的发展及其种类 /6

0.2 加筋土结构及其发展概述 /8

0.3 本指南编制的目的与内容 /13

第1章 加筋材料及其特性 /17

1.1 加筋材料的类型 /18

1.2 加筋材料的工程特性 /26

1.3 筋-土界面摩阻特性 /35

1.4 主要加筋材料的性能指标 /42

1.5 加筋土结构设计参数 /56

本章参考文献 /64

第2章 加筋土边坡 /65

2.1 加筋土边坡的形式和组成 /66

2.2 加筋土边坡的破坏模式 /67

2.3 加筋土边坡的设计要素 /68

2.4 加筋土边坡的设计步骤 /71

2.5 加筋土边坡坡面防护设计 /86

2.6 加筋土边坡的防/排水设计 /88

2.7 特殊加筋土边坡 /90

2.8 加筋土边坡施工 /95

本章参考文献 /97

第3章 加筋土挡墙 /99

3.1 加筋土挡墙的组成 /100

3.2 加筋土挡墙的破坏模式 /100

3.3 一般加筋土挡墙设计 /102

3.4 特殊结构加筋土挡墙设计 /128

3.5 加筋土挡墙施工技术 /139

本章参考文献 /146

第4章 加筋垫层路堤 /149

4.1 概述 /150

4.2 加筋垫层路堤设计的前提条件和资料基础 /152

4.3 软弱土地基上的加筋垫层路堤 /153

4.4 桩承式加筋(垫层)路堤 /163

4.5 其他设计内容 /177

4.6 施工技术要求与监测 /181

4.7 设计案例 /183

本章参考文献 /186

第5章 加筋土结构工作性能现场监测 /189

5.1 概述 /190

5.2 加筋土挡墙现场监测的内容 /190

5.3 加筋土挡墙现场监测传感器的类型与埋设技术 /191

5.4 加筋土挡墙现场监测方案设计 /198

5.5 加筋土结构现场监测案例——以河北省保沧高速公路
加筋土挡墙为例 /201

本章参考文献 /205

附录1 数值计算在加筋土结构设计中的应用 /207

附1.1 加筋土结构数值计算概述 /208

附 1.2 数值计算在加筋土结构设计中的应用 /209

附 1.3 加筋土结构数值计算算例分析 /226

本附录参考文献 /238

附录 2 加筋土挡墙其他设计方法简介 /241

附 2.1 概述 /242

附 2.2 美国 FHWA 方法简介 /243

附 2.3 德国 DIBt 法简介 /247

附 2.4 英国 BS8006 方法简介 /251

本附录参考文献 /254

附录 3 加筋土结构典型工程案例 /257

附 3.1 加筋土挡墙工程案例 /258

附 3.2 加筋土边坡工程案例 /270

附 3.3 加筋土垫层路堤工程案例 /276

附 3.4 桩承式加筋路堤工程案例——以意大利某高速铁路桩
承式加筋路堤工程为例 /277

附 3.5 土工合成材料加筋地基工程案例——以 CLEMSONVILL
道路改线工程岩溶加筋地基工程为例 /280

术 语

1 加筋材料产品

1.1 土工合成材料 geosynthetics

工程建设中应用的以人工合成或天然聚合物为原料制成的工程材料的总称,其主要品种有土工织物、土工格栅、土工网、土工膜、土工格室、土工复合材料、土工合成材料膨润土垫(GCL)、土工管、土工泡沫等。

1.2 土工格栅 geogrid

整体由抗拉材料联结构成的、呈规则孔状的一种平面聚合物结构体。可以由挤压拉伸、黏合或编织而成。

1.2.1 拉伸塑料土工格栅 stretched plastic geogrid

采用高密度聚乙烯(HDPE)或聚丙烯(PP)为原材料,经塑化挤出、冲孔、整体拉伸而成的平面网状结构土工格栅。分单向拉伸、双向拉伸和多向拉伸等。

1.2.2 经编涤纶土工格栅 warp knitted polyester geogrid

采用涤纶纤维长丝为原材料,经纬向定向编织成网格坯布,涂覆聚氯乙烯(PVC)胶或丁苯胶乳加工成的平面网状结构土工格栅。

1.2.3 焊接聚酯土工格栅 welded polyester geogrid

以聚酯为主料,加入抗老化剂和其他助剂,经过低倍数机械拉伸成精制肋条,或者以聚酯纤维为芯材外覆聚乙烯保护鞘形成土工加筋带,按平面经纬成直角,经焊接成型的平面网状结构土工格栅。包括焊接聚酯单向土工格栅、焊接聚酯双向土工格栅和焊接聚酯排水土工格栅。

1.2.4 焊接钢塑土工格栅 steel-plastic compound geogrid

高强钢丝(或其他纤维)经特殊处理与聚乙烯(PE)或聚丙烯(PP)并添加其他助剂,通过挤出使之成为复合型高强抗拉条带。条带经纵、横按一定间距编织或夹合排列,采用超声波焊接技术焊接其交接点而成的平面网状结构土工格栅。

1.2.5 玻璃纤维土工格栅 glass fibre geogrid

以玻璃纤维无捻粗纱为主要原料,经过编织和表面浸渍处理而成的平面网状结构土工格栅。

1.3 土工格室 geocell

由高分子聚合物片材经超声波焊接、插接或注塑等方法连接,展开后形成蜂窝状或网格状的立体结构材料。

1.4 土工加筋带 geostrip

经挤压拉伸或再加筋制成的条带抗拉材料,或者以聚酯纤维为芯材外覆聚乙烯保护鞘形成的条带抗拉材料。包括塑料土工带、钢塑土工带、聚酯土工带等。

1.5 土工织物 geotextile

以聚合物纤维为原料通过热压针刺、胶结、编织而成的透水性土工合成材料,又称土工布。包括机织土工织物、针织土工织物和非织造土工织物等。

2 加筋材料性能

2.1 单位面积质量 mass per unit area

给定尺寸的试样质量与其面积之比,以克每平方米(g/m^2)表示。

2.2 抗拉强度 tensile strength

在规定的试验方法和试验条件下,加筋材料试样在外力作用下出现初始峰值时的拉力,折算成单位宽度的拉力,以千牛每米(kN/m)表示。

2.3 标称抗拉强度 nominal tensile strength

相应型号产品要求的最小抗拉强度值,以千牛每米(kN/m)表示。

2.4 极限抗拉强度 ultimate tensile strength

材料抵抗拉伸破坏的极限能力,又称断裂强度。数值上等于试样受单轴拉伸时,单位宽度的最大拉力,以千牛每米(kN/m)表示。

2.5 设计抗拉强度 design tensile strength

考虑设计使用年限内相关因素影响后取用的加筋材料抗拉强度,以千牛每米(kN/m)表示。

2.6 蠕变强度 tensile creep strength

在环境温度和设计使用年限中,土工格栅在荷载作用下开始断裂时的拉力,折算成单位

宽度的拉力,以千牛每米(kN/m)表示。

2.7 蠕变折减系数 creep reduction factor

加筋材料的抗拉强度与蠕变强度的比值。

2.8 施工机械损伤折减系数 installation damage reduction factor

加筋材料试样抗拉强度与经过施工机械损伤后试样抗拉强度的比值。

2.9 长期老化折减系数 durability reduction factor

加筋材料试样抗拉强度与经过热氧化、化学作用、生物降解等环境影响后试样抗拉强度的比值。

2.10 延伸率 elongation

进行试样拉伸试验时,标距的伸长量与原标距长度的比值,以百分数(%)表示。

2.11 标称延伸率 nominal elongation

抗拉强度达到标称抗拉强度时的延伸率,以百分数(%)表示。

2.12 拉伸蠕变 tensile creep

在恒定的拉伸负荷下,试样长度随时间的拉伸变形。

2.13 界面摩擦系数 interface friction coefficient

在筋土界面摩擦试验中,筋材受到的最大拉力与筋土界面上施加的法向应力和筋土接触面积的乘积之比。

2.14 拉伸模量 tensile modulus

土工格栅拉伸试验过程中应力与应变之比,以千牛每米(kN/m)表示。在加筋土结构中常采用对应于加筋材料2%、5%延伸率的割线拉伸模量。

3 加筋土结构

3.1 加筋 reinforcement

把具有一定抗拉强度的土工合成材料埋于土体内适当位置,通过其与土体之间的相互作用,提高土工结构强度和稳定性,限制土体位移的措施。

3.2 加筋土边坡 reinforced soil slope

在边坡中水平分层铺设具有一定抗拉强度的土工合成材料,以提高边坡的稳定性。边坡坡角一般不大于70°。

3.3 加筋土挡墙 reinforced soil retaining wall

由墙面、墙面基础、加筋材料和墙体填土共同组成的一种支挡结构。墙面倾角大于 70° 。墙面系统有预制混凝土模块式墙面、土工格栅包裹式墙面、整体现浇混凝土墙面、预制钢筋混凝土板块式墙面和加筋格宾墙面、绿色加筋格宾墙面等几种形式。

3.4 加筋垫层路堤 reinforced embankment over soft foundation soils

在软土地基上修建路堤时,将土工格栅、土工织物或土工格室等土工合成材料设置在堤底垫层中,构成加筋垫层,以提高地基的承载力和结构的整体稳定性,调整不均匀变形,这类工法统称为加筋垫层路堤。当设置加筋垫层后,地基承载力仍无法满足设计要求时,加筋垫层常与竖向增强体联合使用,桩与桩间土共同承担上部荷载,构成广义的桩网复合结构。

3.5 桩承式加筋路堤 geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment

在松软土地基上,将刚性桩(通常设置桩帽或桩梁)与土工合成材料水平加筋垫层相结合,共同承担路堤荷载及附加荷载的复合体系,称为桩承式加筋路堤。桩承式加筋路堤属于软土地基上加筋垫层路堤的特例。

编写人:杨广庆 徐 超

审阅人:包承纲(长江科学院)

李广信(清华大学)

绪 论

编写人:杨广庆 徐 超 周诗广

审阅人:包承纲(长江科学院)

李广信(清华大学)

