

柔性生态型加筋土结构 工程应用研究

杨果林 沈 坚 著
陈建荣 杨 啸



科学出版社

柔性生态型加筋土结构 工程应用研究

杨果林 沈 坚 著
陈建荣 杨 啸

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

柔性生态型加筋土结构是一种新型的加筋土结构,不仅具有加筋土结构的优点,即结构轻,柔性大,节省材料,工程造价低,抗震性能好,耐久性能好,适用于承载力较低的地基等,而且其墙面还是柔性的,具有生态功能,因而在公路、铁路、市政、水利、矿山等工程领域具有广泛的推广应用价值。

本书主要介绍柔性生态型加筋土结构,特别是加筋格宾挡墙、土工格栅包生态袋加筋挡墙的研究现状和发展趋势;研究了柔性生态加筋土结构的填料及筋材的工程特性、结构的强度、稳定性;进行了柔性加筋土挡墙的动、静模型试验,抗震模型试验,在此基础上对柔性生态加筋土挡墙的结构特性、动力响应特性和抗震特性进行了深入分析;对柔性生态加筋土挡墙进行现场监测,并对监测结果进行分析;对柔性生态加筋格宾挡墙、土木格栅生态加筋挡墙进行抗震数值模拟分析;此外,还进行了新型加筋土挡墙的设计方法和填筑技术研究。

本书可供从事岩土工程、道路与铁道工程研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

柔性生态型加筋土结构工程应用研究/杨果林等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-036457-9

I. ①柔… II. ①杨… III. ①柔性结构-生态型-加筋土-土结构-建筑工程-研究 IV. ①TU361

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 010177 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:耿 耘

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

*

2013年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:29

字数:569 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

生态型加筋土挡墙是集现代加筋土技术与植被护坡技术于一体的新型支挡结构,在实际工程中得到越来越广泛的应用。柔性生态型加筋土结构是加筋土结构发展的一种新形式,不仅具有加筋土结构的优点,而且柔性面墙还具有生态功能。生态型加筋土挡墙的相关研究很少,设计时也是套用传统加筋土挡墙的相关理论与方法,使得理论研究落后于工程实践,制约了生态型加筋土挡墙的推广。本书主要针对双绞合六边形钢丝网格宾挡墙和土工格栅包生态袋柔性生态型加筋土结构等进行研究。在浙江省交通科技项目“柔性生态在高速公路中的应用专题研究”(2010H08)、湖南省交通科技项目“高速公路新型加筋土结构技术与示范工程”(200612)和国家自然科学基金“高速铁路路基长期动力稳定性评价方法研究”(51278499)的资助下,作者及其科研团队以绍诸高速公路、黄衢高速公路、潭衡湘西线高速公路柔性生态挡墙等为依托工程,以加筋格宾挡墙、绿色加筋格宾挡墙和土工格栅包生态袋加筋土挡墙为代表,通过理论分析、室内外试验研究和数值模拟,对柔性生态型加筋土结构的筋材进行了拉伸试验、耐久性试验、在填土中的拉拔试验;加筋红砂岩粗粒土三轴试验;红砂岩路堤原位推剪试验;柔性生态型加筋土结构在交通荷载作用下的动、静力特性,疲劳特性,水平抗震性能模型试验;对施工现场进行了长期的监测,获得了大量的监测数据。在此基础上,采用理论分析和数值分析相结合的方法,对柔性生态型挡土结构的结构特性、疲劳特性、抗震性能及计算理论和设计方法进行了系统的研究,取得了如下主要研究成果:

(1) 通过不同筋材加筋土的直剪试验和拉拔试验,对加筋土的加筋机理和筋土界面关系进行研究,分析了平面网状筋材的加筋特点,获得含水量、加筋间距对加筋土抗剪强度影响的计算公式、黏土与不同筋材间的摩擦系数,为工程设计提供了参数,并基于拉拔试验成果提出筋土界面关系的幂函数模型。

(2) 对红砂岩路堤进行大尺寸原位推剪试验,分析红砂岩粗粒土在推剪力作用下的变形特性、力学特性以及破坏特征;并以极限平衡为理论基础,推导在考虑三维滑动面时路堤填料强度参数的计算公式。

(3) 以双绞合六边形钢丝网和土工格栅为筋材,以红砂岩为填料,进行了一系列粗粒土三轴试验。研究了加筋红砂岩粗粒土强度和应力-应变特性;分析了红砂岩加筋粗粒土的宏观力学机理;并引入强度参数分析加筋效果,探讨土的含水量和压实度、加筋层数等对加筋红砂岩粗粒土力学特性和变形的影响;建立了加筋土弹性非线性本构方程。

(4) 以 PFC^{3D}程序和离散颗粒流理论为研究平台,建立格宾网加筋红砂岩粗粒土颗粒流数值模型,以粗粒土三轴试验、筋材拉伸试验及拉拔试验等为基础,校正颗粒流模型的细观力学参数,研究加筋红砂岩粗粒土细观加筋机理和细观力学特性,分析围压和加筋层数等对其细观力学特性的影响,并获得不同应变阶段加筋红砂岩粗粒土颗粒位移场分布特性和内部剪切带发展规律。

(5) 通过模型试验研究了不同工况(普通工况、半填半挖工况)、不同结构(绿色加筋格宾挡墙和土工格栅包生态袋加筋土挡墙)的生态型加筋土挡墙在交通重复荷载作用下的动力特性,获得不同荷载幅值、频率和加载次数下生态型加筋土挡墙不同部位的加速度、动土压力响应规律,挡墙的竖向和水平向变形的累积变形规律以及筋材累积拉应变增长规律。

(6) 通过模型试验和数值分析研究了不同工况、不同结构形式的生态型加筋土挡墙的静力特性,获得生态型加筋土挡墙的变形规律、筋带应变的分布与发展规律、极限承载力、挡墙的失稳破坏方式。

(7) 通过疲劳特性模型试验,对柔性生态型加筋土挡墙在重复荷载作用下的动力特性进行探讨;利用相似原理,对柔性生态型加筋土挡墙在重复荷载作用下的动态响应进行室内模型试验,得出柔性生态型加筋土挡墙在动力荷载作用下动态响应特性;运用疲劳寿命分析理论,对柔性生态加筋挡土结构墙的寿命进行了分析。

(8) 利用相似设计原理,对柔性生态型加筋土挡墙在地震荷载作用下的地震响应进行室内模型试验,得出柔性生态型加筋土挡墙在地震荷载作用下地震响应特性;利用 Newmark“滑动模型”理论,对柔性生态加筋土挡墙的动土压力、加速度、随机位移反应进行了分析;并利用 FLAC^{3D}动力分析模块,进行柔性生态型加筋土结构的抗震性能数值分析;同时,系统分析结构材料参数以及地震动参数变化对挡墙动力响应的影响。

(9) 在对土工合成材料耐久性损伤规律进行研究的基础上,分析了加筋土挡墙耐久性的主要影响因素,并基于筋材应变控制和加筋土结构侧向变形控制两个角度提出加筋土结构耐久性评估准则,建立了加筋土结构寿命预测方法。

(10) 基于塑性极限分析的上限法理论,分析了普通工况和半填半挖工况生态型加筋土挡墙的破坏失稳机制,获得两种工况生态型加筋土挡墙的承载能力计算公式。

(11) 基于结构系统可靠性理论,建立了加筋土挡墙在不同失效模式下的极限状态方程,分析了各失效模式之间的逻辑关系,提出加筋土挡墙结构系统可靠度计算方法,并进行了实例分析。

(12) 提出加筋土结构稳定性分析的点安全系数法,推导了岩土体、筋材和筋土界面的点安全系数计算公式,建立了筋材的抗拉、抗拔安全系数计算方法,给出

点安全系数法在 FLAC^{3D}中实现的步骤和 FISH 命令,并进行了实例分析。

(13) 对以绍诸高速公路、黄衢高速公路、潭衡阳西线高速公路柔性生态挡墙试验段进行系统的监测,得到柔性生态型挡墙墙面变形、墙后土压力分布、格宾网拉筋变形等规律。以 FLAC^{3D}为研究工具,建立格宾石笼面墙、土、格宾网以及接触面的三维耦合数值模型,对影响挡墙受力和变形的参数进行数值仿真与优化分析。

(14) 针对国内加筋土挡墙工程设计的现状,提出基于极限平衡理论、可靠性和数值分析的双绞合六边形钢丝网加筋土挡墙的计算与设计方法,研究了地震荷载作用、膨胀土填料的加筋土挡墙设计方法,并成功应用于实际工程。

本书是在三个科研成果报告的基础上形成的,第一作者所指导的研究生做了大量的研究工作,部分引用了第一作者所指导的博士研究生刘泽、黄向京、李昀、蒋建清、林宇亮,硕士研究生许桂林、刘哲哲、申超、徐健楠等的学位论文。在本书的整理过程中研究生徐健楠做了大量的整理工作。

另外,课题参加人员王维、杜勇立、王祥、俞红光、武可爽、李卫炎、张仁根、单金耀、许福丁等提供了现场实测资料,并提出了宝贵的修改意见。

课题合作单位浙江省交通规划设计研究院、湖南省交通规划勘察设计院、浙江省交通工程建设集团有限公司、湖南潭衡高速公路开发有限公司、绍诸高速公路工程指挥部、马克菲尔(中国)公司、浙江省科威工程咨询有限公司等在科研过程中提供了部分资料和大力帮助,在此表示感谢!

随着高速公路的跨越式发展,加筋土的研究也日新月异,柔性生态型加筋土问题涉及面广、内容丰富,发展迅速,加之作者水平有限,书中难免有不当之处,热忱期待各界同仁批评指正。

目 录

前言

第一章 综述	1
1.1 引言	1
1.2 加筋土的发展	3
1.2.1 加筋土筋材的发展历史	5
1.2.2 双绞合六边形钢丝网	7
1.2.3 加筋土的研究进展	9
1.3 加筋土填料的研究现状	10
1.3.1 加筋土工程填料的选择	10
1.3.2 土体细观力学行为研究	10
1.3.3 红砂岩粗粒土填料的应用与研究	13
1.4 柔性生态型加筋土结构简介	14
1.4.1 加筋格宾结构	14
1.4.2 绿色加筋格宾结构	16
1.4.3 双绞合六边形钢丝网+土工格栅新型复合加筋结构	17
1.5 柔性生态型加筋土结构的研究现状与工程应用	18
1.5.1 柔性生态型加筋土结构的研究现状	18
1.5.2 柔性生态型加筋土结构的工程应用	20
参考文献	21
第二章 依托工程及材料的工程特性	26
2.1 工程背景	26
2.2 红砂岩的工程特性	27
2.2.1 红砂岩的结构特性	28
2.2.2 红砂岩的强度特性	29
2.2.3 红砂岩的变形特性	29
2.3 红砂岩填料土工试验	30
2.4 红砂岩路堤原位剪切试验	31
2.4.1 试验概况	32
2.4.2 试验方法	33
2.4.3 试验结果及分析	35

2.5	双绞合六边形钢丝网的工程特性	48
2.5.1	物理特性	48
2.5.2	力学特性	50
2.5.3	长期特性	50
2.6	筋材拉伸试验	52
2.7	柔性生态加筋土挡墙耐久性研究	56
2.7.1	土工合成材料的耐久性损伤规律与寿命预测	56
2.7.2	加筋土挡墙的蠕变耐久性研究	65
	参考文献	71
第三章	柔性生态挡墙动静力学特性模型试验研究	74
3.1	试验目的与意义	74
3.2	试验概况	76
3.2.1	模型设计与元器件布置	76
3.2.2	试验材料	76
3.2.3	试验加载系统、测试元器件与数据采集系统	80
3.2.4	模型挡墙填筑	82
3.2.5	交通荷载的特点及其简化	82
3.2.6	试验内容	86
3.3	动力特性试验结果与分析	87
3.3.1	土工格栅包生态袋挡墙的动力特性试验结果分析	87
3.3.2	半挖半填工况土工格栅包生态袋挡墙的动力试验结果分析	101
3.3.3	绿色加筋格宾挡墙的动力特性试验结果分析	114
3.3.4	半挖半填工况绿色加筋格宾挡墙的动力特性试验结果分析	129
3.4	静力特性试验结果与分析	140
3.4.1	土工格栅包生态袋挡墙承载力特性	140
3.4.2	半挖半填工况土工格栅包生态袋挡墙承载力特性	144
3.4.3	绿色加筋格宾挡墙的承载力特性	148
3.4.4	半挖半填工况绿色加筋格宾挡墙的承载力特性	152
3.5	柔性生态加筋挡墙设计施工建议	156
第四章	柔性生态加筋土挡墙稳定性分析方法	158
4.1	引言	158
4.2	基于极限平衡法的柔性生态加筋土挡墙的设计方法	159
4.2.1	柔性生态加筋土挡墙的安全系数	159
4.2.2	筋材的长期强度	159
4.2.3	柔性生态加筋土挡墙的设计计算方法	160

4.3 生态型加筋土挡墙极限承载力分析的上限法	165
4.3.1 塑性极限分析的上限法	165
4.3.2 一般工况生态型加筋土挡墙极限承载力分析的上限法	166
4.3.3 半填半挖工况生态型加筋土挡墙极限承载力分析的上限法	169
4.3.4 实例分析	171
4.4 加筋土挡墙结构系统稳定的可靠性分析	171
4.4.1 工程结构系统可靠性分析模型	172
4.4.2 加筋土挡墙结构系统稳定的可靠性	174
4.5 加筋土挡墙稳定性分析的点安全系数法	178
4.5.1 点安全系数的定义	178
4.5.2 点安全系数法在 FLAC ^{3D} 中的实现方法	180
4.5.3 实例分析	181
第五章 柔性生态加筋挡墙的疲劳特性	187
5.1 模型试验设计	187
5.1.1 加筋格宾挡土墙模型设计	188
5.1.2 绿色加筋格宾挡土墙模型设计	191
5.1.3 柔性网面土工格栅加筋挡土墙模型设计	193
5.2 材料	195
5.2.1 红砂岩	195
5.2.2 格宾及土工格栅	196
5.3 元器件布置	196
5.3.1 柔性位移计	196
5.3.2 数显百分表	196
5.3.3 土压力盒	196
5.3.4 动位移计及加速度计	197
5.4 加载设备及数据采集系统	197
5.4.1 MTS 作动器	197
5.4.2 数据采集系统	198
5.5 加载波型与加载程序	198
5.5.1 加载波型	198
5.5.2 加载程序	199
5.6 试验结果分析	201
5.6.1 加速度	201
5.6.2 动位移	213
5.6.3 动土压力	226

5.6.4 残余土压力	230
5.6.5 累计变形	236
5.6.6 筋材应力	243
5.6.7 试验结果比较分析	248
5.7 疲劳寿命分析	248
5.7.1 疲劳累积损伤理论	248
5.7.2 S-N 方程	252
5.7.3 疲劳寿命的离散性分析	253
5.7.4 计算实例	253
参考文献	254
第六章 柔性生态加筋挡墙抗震工程特性	255
6.1 引言	255
6.2 加筋土挡墙地震稳定性分析的水平条分方法	255
6.2.1 水平条分分析方法	256
6.2.2 水平条分分析方法的验证	259
6.3 SIMULINK 高填方加筋路堤地震反应分析	263
6.3.1 加筋路堤结构多质点离散体系	263
6.3.2 水平地震作用下结构的动力方程	265
6.3.3 加筋路堤地震反应 SIMULINK 模型	267
6.3.4 算例	270
6.4 格宾加筋挡土墙抗震模型试验及地震响应分析	272
6.4.1 模型试验相似关系设计	272
6.4.2 模型挡墙设计及传感器布置	278
6.4.3 输入地震波	281
6.4.4 试验设备及方法	282
6.4.5 试验结果分析	283
6.4.6 加筋土挡墙地震响应分析	312
参考文献	324
第七章 柔性生态加筋挡墙现场试验	326
7.1 引言	326
7.1.1 格宾结构及其组合结构	326
7.1.2 柔性网面土工格栅加筋土挡墙	326
7.1.3 加筋格宾桥台	327
7.1.4 绿色加筋格宾结构	327
7.1.5 土工格栅包生态袋加筋土挡墙	327

7.2 现场监测方案	328
7.2.1 依托工程概况	328
7.2.2 监测方案	329
7.2.3 现场监测频次	333
7.3 加筋格宾挡墙现场监测结果及分析	333
7.3.1 土压力监测结果及分析	333
7.3.2 拉筋及格宾笼变形监测结果及分析	337
7.3.3 潜在破裂面研究	341
7.3.4 格宾笼沉降规律研究	344
7.3.5 格宾笼面板水平位移研究	346
7.4 柔性网面土工格栅现场监测结果及分析	348
7.4.1 垂直土压力监测结果及分析	348
7.4.2 水平土压力监测结果及分析	350
7.4.3 格栅拉筋变形监测结果及分析	351
7.5 加筋格宾桥台现场监测结果及分析	352
7.5.1 垂直土压力监测结果及分析	352
7.5.2 水平土压力监测结果及分析	353
7.5.3 格宾网拉筋变形监测结果及分析	354
7.6 绿色加筋格宾挡墙监测结果及分析	355
7.6.1 基底不同方向的土压力	355
7.6.2 墙内竖向土压力	356
7.6.3 面墙后的水平土压力	358
7.6.4 筋材的拉应变	358
7.6.5 加筋体的变形	361
7.7 土工格栅包生态袋挡墙监测结果及分析	362
7.7.1 竖向土压力监测结果及分析	362
7.7.2 水平土压力监测结果及分析	365
7.7.3 格栅拉筋变形监测结果及分析	365
参考文献	368
第八章 柔性生态加筋挡墙数值模拟	369
8.1 格宾加筋挡土墙抗震数值模拟分析	369
8.1.1 FLAC/FLAC ^{3D} 简介	370
8.1.2 绿色加筋格宾模型试验挡墙抗震有限差分法分析	371
8.1.3 加筋格宾模型试验挡墙抗震有限差分法分析	374
8.1.4 工程实体挡墙抗震有限差分法分析	394

8.2	柔性生态挡墙破坏机理数值分析	401
8.2.1	普通工况柔性生态挡墙破坏机理数值分析	401
8.2.2	半挖半填工况柔性生态加筋挡墙的破坏机理数值分析	407
8.3	交通荷载作用下生态型加筋挡墙的动力响应数值分析	413
8.3.1	模型建立	414
8.3.2	动荷载选取与加载方式	415
8.3.3	交通荷载作用下生态型加筋挡墙的动力响应数值分析	417
8.4	加筋红砂岩粗粒土细观力学特性研究	430
8.4.1	红砂岩粗粒土细观力学特性三维颗粒流模拟	430
8.4.2	加筋红砂岩粗粒土细观力学特性三维颗粒流模拟	435
	参考文献	449

第一章 综 述

1.1 引 言

土体的抗压性能很好,抗剪性能相对较差,基本无抗拉能力,因此在工程应用中受到很大程度的限制。通过在土体内加入适当的加筋材料,利用筋材与土体之间的摩擦和嵌固咬合作用,可以传递拉应力,从而分担土体应力,增加土体的变形模量,改善土体的强度和变形特征,达到提高土体及其构筑物稳定性的目的。土中加筋,古已有之,早期人类就知道将自然界中的天然植物如茅草、柳条之类等埋入土体中来改善土体整体稳定性,但是这都是建立在感性基础上的,是依靠经验来指导实践,真正将加筋技术升华为理论并作为近代建筑技术加以研究和推广应用,则是近半个世纪的事。20世纪60年代,法国工程师 Henry Vidal 在模型试验中发现,当土中掺入有机纤维材料后,其强度可明显提高,据此提出加筋土(reinforced earth)概念,并于1963年首先公布了其研究成果,初步分析了加筋的机制,并为土体加筋的设计计算提供了一套分析方法。

应用 Henry Vidal 提出的加筋土技术和设计理论^[1],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。法国在加筋土技术方面的成功应用,引起了世界各国工程界、学术界的广泛重视,其发展速度相当快,应用范围也日益广泛。

1979年英国开发了高强度土工加筋材料土工格栅(geogrid)并提出了设计方法,这导致现代加筋技术迅猛发展。加筋土结构的形式、功能越来越多样化。加筋土作为支挡结构,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、水工坝体和地基加固等^[2]。

与传统重力式挡墙相比,加筋土挡墙属于柔性结构,其特点是:对地基承载力要求相对较低;适应性强,整体性好,抗震性能高,能够承受大的沉降变形;施工速度快、工程质量容易得到保证;造价低,可以节约工程造价25%~50%。更为重要的是,与中国古代的“天人合一”、现代西方的“回归自然”理念相一致,柔性生态型加筋土结构表现的就是营造自然的生态景观,符合当今建设环境友好型与资源节约型社会的总体要求。在高速公路、高速铁路方兴未艾的今天,采用新的加筋材料、加筋结构,研究新的设计理论与计算方法已是目前国内工程界的迫切要求。

加筋土挡墙是由面板、填料、筋材等组成的复合结构,其结构特性与各组成成

分各自的工程力学特性及其之间的相互作用密切相关。面板一般采用钢筋混凝土材料,其工程力学特性受外界因素的影响较小。填料是加筋土的主要材料之一,一般就地取材,采用工程现场附近的开山土、碎石土和砂卵石等。由于填料的多样性,加之其工程力学特性受外界因素(如荷载性质,加载方式,地表水、地下水作用等)影响较大,因此填料的工程力学特性及其在外界因素作用下的变化规律是影响加筋土挡墙结构特性的一个主要因素。筋材是组成加筋土挡墙结构的另一主要材料,目前在加筋土挡墙中使用最为广泛的筋材是土工格栅。土工格栅是一种新型的土工聚合材料,其力学特性同样受外界诸多因素(如荷载性质、加载方式、温度、紫外线、地下水的腐蚀性等)影响,因此筋材的工程力学特性及其在外界因素作用下的变化规律是影响加筋土挡墙结构特性的第二个主要因素。填料与筋材在加筋土挡墙中并非孤立存在,而是通过相互作用(如摩擦、咬合和嵌固)组成筋-土复合体(加筋体),共同承担外界因素的作用。因此,筋土之间的相互作用及其作用效果的变化规律是影响加筋土挡墙结构特性的第三个主要因素。加筋土挡墙作为岩土工程中的一种挡土结构形式,必然建于某一特定的地基之上,工程实际中的基地有岩基和非岩基,两者又有许多不同的类型和性质,因此,地基的特性是影响加筋土挡墙结构特性的另一个主要因素。此外,实际工程中的加筋土挡墙根据工程现场的实际情况的差异,可能采用不同的结构形式,如直立式、分阶直立式、斜坡式、分阶斜坡式和混合式等。显然,不同结构形式的加筋土挡墙的结构特性会有一定的甚至很大的差异。虽然国际工程界和学术界早就意识到这些因素,但它们对加筋土挡墙结构特性的影响却远没有研究清楚。这是由于土工合成材料应用的大部分问题是为了解决土体的稳定、变形和渗流等问题,这些问题也正是土力学研究的对象。有关土工合成材料设计理论和施工方法的拟定,自然以土力学原理为基础,如土体的稳定性分析基本上采用极限平衡理论;变形计算依赖于土体的固结理论;渗流分析则服从达西定律。土体本来就是一种十分复杂的材料,当它和另外一种工程力学性质随变形、压力甚至温度的变化而非线性变化的土工合成材料复合时由它们的相互作用而表现出来的现象当然就更复杂了。

目前,加筋土挡墙传统的分析方法建立在加筋土体极限平衡理论的基础上,即假设破裂面、筋材从土中拔出或拉断来分析加筋土体拉力破坏或黏着破坏时承载力,无法将结构的强度和变形统一考虑,无法计算面板位移和填土沉降等,20世纪70年代后期才开始的加筋土结构有限元分析,将结构变形协调与力的平衡结合起来,使某些复杂的性质及过程的模拟成为可能,但至今为止研究仍处于初期阶段,即将加筋土结构视为平面应变问题,然后采用组合结构或复合材料的观点加以研究,土体本构关系采用非线性弹性或弹塑性模型,土体破坏准则常采用 Mohr-Coulomb 准则,考虑静力荷载的作用较多,考虑动力荷载作用较少,一般都不考虑水的作用,或仅将水作为一种外部荷载,以静止水压力的形式作用在结构上。

分析中考虑动力荷载作用较少是基于“加筋土挡土结构是柔性结构,具有好的抗震性能”这一工程界普遍认可的定性结论^[3]。事实上,振动或地震荷载作用对加筋土结构的影响不容忽视。例如,加筋土挡墙作为铁路路基,在列车重复荷载作用下表现出的动力特性,会引起线路运营条件的恶化。首先,在列车荷载作用下以加筋土挡墙为路基累积的永久变形过大,会引起线路不均匀下沉,造成线路不平顺,同时也影响正常维修与养护;其次,列车产生过大的弹性变形,会加大线路与车辆的相互作用和振动,影响列车运行的稳定性和舒适性;最后,过大动应力会导致加筋土挡墙产生过大的侧向变形和竖向变形,从而影响列车的运营质量。我国是一个多地震的国家,而且地震区域分布广泛,地震频繁而强烈。地震荷载作用下加筋土挡墙的受力机理、摩擦特性、变形特征等,由于其内容的杂性,影响因素的多样性,还较缺乏对其进行深入分析和研究,极大地影响和制约了加筋土挡墙在地震区的应用。因此,在加筋土挡土结构特性研究中,考虑动力荷载作用,对其动态力学响应进行研究十分必要。

鉴于此,结合湖南省交通厅科技项目“高速公路新型加筋土结构技术与示范工程”(200612)、浙江省交通科技计划项目“柔性生态挡墙在高速公路中的应用专题研究”(2010H08)和国家自然科学基金项目“高速铁路路基长期动力稳定性评价方法研究”(51278499),对柔性生态型加筋土挡墙的结构特性、加筋机理、动力学响应、耐久性和抗震性能等进行了系统研究。本书涉及材料的力学模型和破坏模式的研究,材料的耐久性研究,不同柔性生态加筋土挡墙动、静特性和动力响应规律的研究,在重复荷载作用下的疲劳特性研究,在地震荷载作用下的地震反应研究等。这对完善加筋土的理论体系,解决加筋土支挡结构在工程应用中存在的问题具有十分重要的意义。同时,开展加筋土挡墙动力和抗震分析与数值模拟技术研究也具有较高的学术价值。

1.2 加筋土的发展

土工合成材料是岩土工程和土木工程中应用的合成材料总称。它是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、表面或各种土体之间,发挥加强或保护土体的作用。《土工合成材料应用技术规范》(GB50290—98)将土工合成材料分为土工织物、土工膜、土工特种材料和土工复合材料等四大类型。

土工合成材料具有加固补强、反滤、排水、隔离、防渗、防护六种主要的功能。

(1) 加固补强。土中加入拉筋材料,依靠土和土工合成材料的相互作用,约束了土体的侧向变形,增大土的抗变形能力,减少沉降量,从而提高土工结构的稳定性和抗变形能力。

(2) 反滤。土工织物置于土体表面或相邻土层之间,一方面,可以有效阻止土颗粒的通过,从而防止由于土颗粒的过量流失而造成土体的破坏;另一方面,又允许土中的水或气体穿过土工织物而自由排出,以免由于孔隙水压力的升高而造成土体失稳。

(3) 排水。厚的无纺土工织物和复合排水材料均具有较高的导水率,这类土工合成材料可以在土体中形成排水通道,把土中的水分汇集起来,并将其排出。

(4) 隔离。利用土工合成材料把两种不同粒径的土、砂、石料或把土、砂、石料与其他结构物隔离开来,以免相互混杂,造成土料污染、流失,或其他不良效果。用于受力结构,有助于保证结构的状态和设计功能;用于材料储存、堆放,可避免材料损失或劣化,对于垃圾、废料的处置还可以防止环境污染。

(5) 防渗。利用土工合成材料中的弱透水材料防止液体的渗透、气体的挥发,以保护环境或建筑物的安全。

(6) 防护。土工合成材料可以限制或防止岩土体受外界环境作用而破坏,可用于防冲、防沙、防震、保温、植物绿化、环境保护等。

由于土工合成材料的轻质量、高强度、多功能、易施工、造价低等特点,土工合成材料在土木工程的各个领域得到广泛应用。无论是在应用领域还是在应用数量上,其势头均有增无减。在交通运输工程中,土工合成材料作为隔离材料被应用到道路、填土路基工程、飞机跑道、堆场等方面;作为排水层和反滤层,被广泛应用到软基工程、高速公路排水沟工程中。作为加筋材料,被广泛应用到斜坡稳定与保护、加筋土挡墙和加筋陡坡、路基路面工程、加筋桥台等方面。在水利水资源工程中,土工合成材料被广泛应用在水库、河流、渠道等库岸或边坡的保护以及水下地面的保护中。土工合成材料的多种性能在海岸工程中也得到广泛应用,如用土工织物设置反滤层,防止侵蚀,保护海岸。用土工带、土工垫压脚以保护海中的桥墩,防止海浪掏蚀桥基。土工合成材料在环境工程中的应用更是比较普遍,如运用土工织物在废物堆放、处理和管理时可防止土工膜被骨料顶破。目前,土工合成材料加筋土挡墙的抗震研究、加筋复合地基是土工合成材料在工程中的一些最新应用,如桩-网复合地基,土工格室-碎石桩双向增强复合地基^[4]已广泛用于工程实践。

在土工合成材料应用研究方面,霍凯成等^[5]采用复合土工膜、沥青玻璃布、沥青棉胶布、竹排等土工合成材料,成功治理了道路路基翻浆冒泥问题。国内外许多学者^[6]对土工合成材料在路面结构中的应用做了大量的研究。结果表明,土工合成材料在路面中可以保证结构层的完整性,增强结构层刚度,减少表面车辙变形,增强沥青混合材料抗疲劳性能,提高沥青面层抵抗反射裂缝能力,延长道路使用寿命,并且可以作为加筋材料减少基层或路面结构层的厚度。刘建华^[7]通过大量的室内试验,着重研究了土工防排水材料的物理特性、水力学性能及力学性能,系统

地提出土工合成材料在公路排水设施中的设计标准与方法。梁波^[8]结合理论分析与试验结果,分析了筋土复合体增加刚度、减少沉降的机理,探讨了土工合成材料在高速铁路路桥过渡段中的应用。

在土工合成材料作为加筋筋材时的加筋机理研究方面,土工合成材料与填料的界面摩擦特性是最关键的技术指标,直接决定了加筋土工程的稳定性。因此,国内外许多学者利用直剪试验和拉拔试验研究土工合成材料与填料的界面摩擦特性。在加筋土结构静动力特性研究方面,刘华北^[9]应用双曲线方程、修正曼辛准则和过应力型黏塑性理论,建立了一种可以同时描述土工合成材料应力-应变关系的非线性、循环荷载作用下的弹塑性和滞回性、蠕变和应力松弛的一维本构模型。肖成志^[10]通过考虑格栅材料的蠕变特性,采用有限元数值分析和计算的方法,系统地深入探讨了土工加筋结构的长期变形特性及其工作机理。蒋文凯等^[11]通过对公路路堤加筋工程条件下土工格栅的铺设损伤模拟试验,得到了在5种典型路堤填料下土工格栅的强度损伤特性,并给出铺设损伤强度折减系数值。

在土工合成材料蠕变特性和耐久性研究方面,王钊等^[12]详细地介绍了蠕变的机理和影响因素,比较了获得拉伸蠕变破坏荷载-时间曲线以及蠕变应变-时间曲线的试验方法,根据时温叠加法和分级等温法,确定了蠕变强度和蠕变折减系数。匡希龙等^[13]通过长期荷载作用下土工合成材料的室内蠕变试验,研究了土工网蠕变特性及其影响因素,探讨了蠕变机理,得到土工网的蠕变方程。郑智能等^[14]对土工膜及土工带的热氧老化、光氧老化和化学耐久性等方面进行了试验研究,探讨了这些材料的老化规律及耐久性能。王殿武等^[15]通过室内外试验,提出土工合成材料力学耐久性的理论模型,用力学性能衰减规律评价其耐久性。闵兴等^[16]将土工合成材料所处环境的温度、湿度、紫外线照射情况以及土工合成材料的老化时间作为网络的输入参数,以描述土工合成材料耐久性状态的强度和延伸率作为网络的输出,建立了BP神经网络模型,对土工合成材料的耐久性进行了预测。

1.2.1 加筋土筋材的发展历史

土工合成材料的出现对促进加筋土技术的发展发挥了极其重要的作用,现在修建的大部分加筋工程也都采用土工合成材料作为筋材。但是,早在新石器时代,我们的祖先就利用茅草作为土的加筋材料。在陕西半坡村发现的仰韶遗址,有很多简单的房屋利用草泥修筑墙壁和屋顶,距今有五六千年历史。在国外,远在公元前3000年左右,英国人就曾在沼泽地带用木排修筑道路;公元前2000~前1000年,巴比伦人利用加筋土修筑庙塔;荷兰在与海洋进行长期斗争的过程中,大量利用柳枝、梢料加固堤坝,防止冲刷^[17]。在第二次世界大战中,英国曾在软基上铺设梢棍和帆布,以便装甲车通过^[18]。在我国,远在新石器时代,我们勤劳的祖先就已经将茅草作为加筋材料掺在土体中。在陕西半坡村的仰韶遗址,发现很多简单房