

JIAJINTU

JIEGOU FENXI LILUN
YU GONGCHENG YINGYONG XINJISHU

加筋土结构分析理论 与 工程应用新技术

杨果林 彭立 黄向京 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

加筋土结构分析理论与 工程应用新技术

杨果林 彭立 黄向京 著



中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

加筋土结构是一种新型的土工结构,具有结构轻,柔性大,节省材料,工程造价低,抗震性能好,适用于承载力较低的地基等特点,因而在公路、铁路、市政、矿山等工程领域得到了广泛应用。

本书主要介绍了加筋土结构的研究现状与发展趋势;深入研究了加筋土结构的强度、稳定性、本构关系;进行了加筋土结构动力特性模型试验、动态响应分析与数值计算;加筋土的筋材流变特性分析与蠕变试验;对高速铁路桥台加筋过渡段、高速公路膨胀土加筋处治技术、加筋膨胀土结构进行了理论分析与试验研究;探讨了加筋膨胀土地基的设计方法;此外,提出并设计了三种新型加筋土挡土结构,对其进行了理论分析并修筑了实体工程。

本书可供从事岩土工程、道路与铁道工程的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

加筋土结构分析理论与工程应用新技术/杨果林等著.
北京:中国铁道出版社,2007.2
ISBN 978-7-113-07690-0

I. 加… II. 杨… III. ①加筋土-结构分析②加
筋土-新技术应用 IV. TU361

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 160161 号

书 名:加筋土结构分析理论与工程应用新技术

作 者:杨果林 彭 立 黄向京 著

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:李丽娟

责任编辑:李丽娟

印 刷:北京市彩桥印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:18.25 字数:455 千

版 本:2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-07690-0/TU·862

定 价:35.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135

发行部电话(010)51873124

前 言

本书总结了作者十多年来在加筋土结构分析理论与工程应用新技术方面的研究成果,包括了第一作者所指导的多名毕业博士生、硕士生的学位论文成果及在市政、公路、铁路、矿山等行业修筑的十几座加筋土实体工程。为了更好地推广加筋土技术,使广大设计、施工、研究人员对加筋土技术有更深入、全面的了解,特著成本书。

本书是在完成下面十多项与加筋土结构相关的研究成果及实体工程的基础上,针对加筋土结构分析与工程应用中的一些新技术、新成果写成的。

1. 湖南省建设科技计划项目:“加筋土结构分析理论与工程应用新技术研究”,项目编号:2002-33,2006年获湖南省科技进步奖。

2. 铁道部科技攻关项目:“秦沈客运专线路桥过渡段设置方法试验研究”,项目编号:2000G47-C,于2004年通过铁道部评审验收。

3. 铁道部专项基金项目:“加筋土结构动力特性研究”,项目编号:99-1,于2001年通过铁道部评审验收。

4. 湖南省交通厅科技发展基金项目:“潭邵高速公路膨胀土处治技术研究”,项目编号:200006,2004年获湖南省科技进步奖。

5. 原煤炭部青年基金项目:“煤矸石混凝土网格式加筋土挡墙治理矸石山滑坡应用研究”,项目编号:96-083,于2001年通过原煤炭部评审验收。

6. 湖南省交通厅立项项目:“膨胀土地区公路路基与构造物地基处治技术研究”,项目编号:2003-04,2006年获湖南省科技进步奖。

7. 湖南省自然科学基金项目:“水对膨胀土路基损害作用机理试验研究”,项目编号:04JJ3085,于2006年通过湖南省科技厅成果鉴定。

8. 湖南省交通厅立项项目:“膨胀土地区公路防排水技术研究”,项目编号:2003-03,于2005年通过湖南省交通厅鉴定。

9. 湖南省交通厅立项项目:“高速公路加筋土结构应用技术示范工程”,项目编号:200612。

10. 湖南省科技计划项目:“潭衡高速公路加筋土结构新技术与工程应用研究”,项目编号:06CK3030。

11. 湖南省建设科技计划项目:“城镇景观加筋土结构新技术与工程应用研究”,项目编号:湘建科[2006]468号文第9项。

12. 结合长沙市市政公路重点工程—潇湘大道,在潇湘大道上修建了土工格栅加筋土挡墙。

13. 结合湘潭市政公路工程,修建了包裹体—对拉锚板复合挡土结构。

14. 结合常张高速公路工程,修建了加筋处治膨胀土路段。
15. 结合潭邵高速公路工程,修建了加筋处治膨胀土路段。
16. 在广西南友公路工程,采用土工格栅柔性挡墙进行膨胀土路堑滑坡治理。
17. 结合秦沈客运专线,修建了桥台加筋土过渡段。
18. 获得专利——钢筋混凝土网格式挡墙,结合专利技术,在矿山修建了两座钢筋煤矸石混凝土网格式挡墙。

本专著由杨果林负责完成,其中第八章、第十一章由黄向京撰写,第十章由彭立撰写。

本专著引用了第一作者所指导的研究生乔运峰、郑波、许岩、张廷柱、罗文柯、陈果元、杨立传、陈兴岗、孟庆云的部分学位论文成果。博士生刘晓红、硕士生林宇亮、陈似华、刘冬、赵伟等在专著整理过程中进行了校对、绘图、打印等工作。在项目完成过程中得到了西部交通建设项目中心、铁道部、交通部、原煤炭部及湖南省交通厅、科技厅、建设厅等主管部门的立项支持;得到了湖南省交通规划勘察设计院,铁道第三、第四勘察设计院等设计单位的协作;得到了常张高速公路、潭邵高速公路、南友公路等业主及施工单位的配合,在此一一表示感谢!

作 者
2006 年 9 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 土工合成材料应用与研究	1
1.2 加筋土结构国内外研究动态	4
参考文献	8
2 加筋土结构强度特性与稳定分析	10
2.1 加筋土的基本原理	10
2.2 加筋土挡墙破坏模式分析	13
2.3 加筋土挡墙内部稳定分析	15
2.4 加筋土的强度特性	17
2.5 网格式加筋土挡土结构强度特性	20
参考文献	27
3 加筋土本构模型	29
3.1 概 述	29
3.2 土体的非线性弹性本构模型	30
3.3 土体的弹塑性本构模型	34
3.4 加筋土的弹塑性本构模型	36
3.5 加筋土的动弹塑性本构模型	39
3.6 本章结论	44
参考文献	45
4 加筋土结构动力特性分析与数值计算	46
4.1 概 述	46
4.2 隐式—显式瞬变动态分析	52
4.3 动态分析程序介绍	57
4.4 动态分析程序的实现	60
4.5 动态分析程序部分结果输出	62
4.6 本章结论	64
参考文献	65

5 加筋土结构动力特性模型试验与动态响应分析	66
5.1 加筋土挡土结构动态响应分析.....	66
5.2 加筋土挡墙动力特性模型试验.....	74
5.3 加筋土挡墙在重复荷载作用下的动态响应分析.....	83
5.4 本章结论.....	86
参考文献	87
6 加筋土筋材流变特性分析与蠕变试验	88
6.1 概 述.....	88
6.2 筋材在加一卸载循环荷载作用下的变形特性与约束条件下的变形方程.....	89
6.3 筋材与土界面摩擦特性与拉拔试验.....	91
6.4 筋材流变特性与蠕变试验.....	95
6.5 试验数据统计分析与数据处理方法	106
6.6 本章结论	110
参考文献.....	111
7 高速铁路桥台加筋过渡段试验研究	112
7.1 概 述	112
7.2 试验工点概况与测试方案的确定	113
7.3 测试结果与初步分析	123
7.4 动力特性试验结果分析	130
7.5 本章结论	140
8 高速公路膨胀土加筋处治技术与试验研究	143
8.1 土工合成材料在处治膨胀土路基工程中的应用	143
8.2 常德—张家界高速公路膨胀土路堤加筋处治技术工程概况	145
8.3 本章结论	165
9 加筋膨胀土结构分析与试验研究	167
9.1 概 述	167
9.2 加筋膨胀土挡土结构承载力特性分析	173
9.3 加筋膨胀土挡土结构变形特性分析	178
9.4 加筋膨胀土挡土结构稳定性分析	189
9.5 加筋膨胀土挡土结构试验研究	199
9.6 加筋膨胀土挡墙的蠕变实验与分析	215
9.7 加筋膨胀土挡土结构的数值分析	219
9.8 本章结论	233
参考文献.....	234

10 加筋膨胀土地基设计方法	239
10.1 加筋膨胀土地基工作性状研究.....	239
10.2 加筋膨胀土地基稳定分析方法.....	242
10.3 加筋膨胀土地基承载力和沉降特性研究.....	246
10.4 加筋膨胀土地基的施工与质量控制.....	259
10.5 加筋膨胀土地基设计方法相关问题的探讨.....	263
参考文献.....	267
11 新型加筋土挡土结构分析与实体工程	269
11.1 潇湘大道预张拉加筋土挡墙.....	269
11.2 包裹体—对拉锚板复合式挡土结构.....	280
11.3 高速公路新型加筋土结构及工程实例.....	280
参考文献.....	284

研究加筋土技术的发展,首先必须研究其材料——土工合成材料的发展。土工合成材料是岩土工程中应用的合成材料的总称。据文献记载,土工合成材料的最早利用,是20世纪30、40年代将聚乙烯、聚氯乙烯土工膜用作渠道和水池的防渗。随着化纤工业的发展,20世纪50年代才有以化纤制成的织造型土工织物问世^[1]。1958年美国佛罗里达州将土工织物铺在海岸块石护坡下作为防冲垫层,公认为是土工合成材料用于岩土工程的开端。随着新产品的开发和新技术的发展,除了带状、幅状、格栅状外,还有短纤维丝,它可与土拌和,制成另一种土即纤维土。加筋材料从天然植物、帆布、金属和预制钢筋混凝土到土工合成材料。20世纪70年代后,土工合成材料迅猛发展,被誉为继砖石、木材、钢铁、水泥之后的第五大工程建筑材料,广泛应用于铁路、公路、水利、港工、城建等领域。

1.1 土工合成材料应用与研究

1977年,Giroud和J. Pefetti建议将土工合成材料分为两大类:土工织物和土膜,分别代表透水和不透水的合成材料^[2]。由于新产品不断涌现,超出了旧的分类体系,因此,1983年J. P. Giroud和P. G. Carroll提出了另一个分类方案,该方案把土工合成材料分为土工织物和相关产品两大类^[3]。这一分类没有纳入土工膜,而用土工织物相关产品这个名称也不确切。在中国,许多专家建议将土工合成材料划分为四大类:土工织物、土工膜、土工特种材料和土工复合材料^{[4]-[5]},如图1.1所示。这一分类体系主要是依据产品的功能和制造工艺的不同,它基本上纳入了现在的所有产品^[6]。

土工材料的主要功能可以分为以下六种,即加筋、反滤、排水、隔离、防渗、防护。

(1) 加筋。土中加拉筋材料,可改变土中的应力分布,约束土体的侧向变形,从而提高

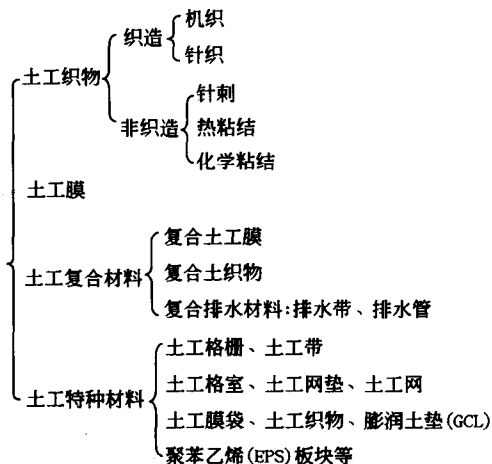


图 1.1 土工合成材料分类

该结构的稳定性。用于加筋的材料要求具有较高的抗拉强度和刚度,并且与填土之间的咬合力强,对于永久性结构还要求蠕变小、耐久性好。常用的加筋材料有土工格栅、土工带、机织土工织物。

(2) 反滤。土工织物置于土体表面或相邻土层之间,一方面,可以有效地阻止土颗粒的通过,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自由排除,以免由于孔隙水压力的升高而造成土体失稳。它可代替传统的砂粒料过滤层。

(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,并排出。

(4) 隔离。利用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,还可以防止环境污染。常用的隔离材料包括土工膜、复合土工膜、土工织物。

(5) 防渗。土工膜和复合土工膜都可以有效地防止液体的渗漏或气体的挥发。

(6) 防护。土工合成材料在防护方面的应用很广,如防冲、防沙、防震、保温、植生绿化、环境保护等。常用的防护材料包括软体排、土工带、土工膜带、土工网垫、土工网、聚苯乙烯(EPS)板块等。

土工合成材料的主要创始人之一 J·基劳德先生将土工合成材料发展进程划分为三个阶段:1960~1975 年为开拓时期;1975~1990 年为设计施工方法研究和新产品开发时期;1990 年以后为土工聚合物时期,即岩土工程师与聚合物专家合作进行改进设计施工方法和研制新产品时期。

20 世纪 60 年代末,非织物型无纺土工织物投入市场,由于它具有反滤、排水功能,因而极大地拓宽了土工织物的应用领域。然而,那时的土工合成材料的类型还仅限于土工膜和土工织物。60 年代初、中期,由材料复合概念导致了塑料排水带的研制和生产;与此同时,荷兰人首先以双层土工织物缝制成土工模袋。这样,土工合成材料又增加了土工复合材料和土工特种材料两大类。早期的发展,侧重于工程的需要,研制开发品种繁多的各类产品,按经验办事,和其他技术的拓展规律类似,应用与实践居于主导地位。

20 世纪 70 年代初,才开始了材料机理和设计准则的探讨,人们初步总结土工合成材料具有隔离、反滤和加筋 3 种基本功能。稍后,进一步认识到还有排水(导水)功能。如 20 世纪 60 年代中后期,法国岩土工程师 Henri. Vidal 提出了土的加筋理论,逐步形成了加筋土的设计方法;70 年代初,美国学者参考了粒状土的反滤需要,提出了最早的适用于土工织物的反滤准则。1979 年在巴黎召开国际加筋土会议后,利用土工合成材料取代初期的金属条带来加筋土体的技术才被正式提上日程,从而有土工格栅产品的兴起。由于涉及土工合成材料应用的大部分问题也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,所以一开始,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;渗流分析服从达西定律。土体本来就是一种性状十分复杂的材料,当它和另外一种随变形、压力甚至温度的变化而非线性地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。这两种材料复合后,共同的工作机理有许多问题到现在还没有摸索清楚,这是由许多因

素造成的。如直接引用土力学方法不恰当,或是改进这些方法时所作的假设欠合理,或是考虑的因素不周全,还有的是依据的经验不同等原因所致。

在学术交流方面,4年1次的国际土工合成材料学术会议(巴黎,1979年;美国,1982年;维也纳,1986年;荷兰,1990年;新加坡,1994年;亚特兰大,1998年;Nice-Riviera,法国,2002年)已举行7次。同时还召开了多次地区性或专门性的会议,大大促进了土工合成材料这一新材料和新技术的发展。

土工合成材料在我国的应用和发展,大体上也可以分为三个阶段^[7]:

第一阶段自20世纪60年代中期至70年代末期,可称为自发应用阶段。当时在我国市场上已经出现很多塑料和化纤产品。在河南、陕西、北京、山西、山东等省的多处灌溉渠道,河北省的一座进洪闸和辽宁省一座混凝土支墩坝上,曾先后利用塑料薄膜作为防渗材料。60年代初,铁路成功地利用氯丁橡胶作为路基的封闭层。1978年在云南田坝贮煤场修建了我国第一座试验性加筋土挡土墙。1980年在山西铜城—陵川公路上修建了第一座公路加筋土挡墙。

第二阶段自20世纪80年代初期至80年代末期,可称为技术引进阶段。1981年我国铁路部门研究试用美国、英国生产的无纺布及国产透水和不透水合成材料作为路基的基层,以防止翻浆冒泥,取得了良好效果。同年,天津新港引进日本生产的塑料排水带,同时研制成功自制的产品。1982~1983年进行了塑料排水带与袋装砂井的对比试验,作为加固软弱地基的措施,在我国首次获得成功。水利、交通等部门也开始研究土工织物在反滤防冲和排水等方面的应用。

第三阶段从20世纪80年代末至现在,可称为建设与发展阶段。加筋土筋材测试方法和设计规范不断完善。1991年由南京水利科学研究院编写了《土工合成材料测试手册》^[8];1992年由土工合成材料协会编写了《土工合成材料工程应用百例》^[9];1994年由土工合成材料协会编写了《土工合成材料工程应用手册》^[10];1998年由交通部发布了《公路土工合成材料应用技术规程》^[11];1998年由建设部发布了《土工合成材料应用技术规程》^[12];1998年由水利部发布了《水利水电土工合成材料应用技术规程》^[13];1998年由铁道部发布了《铁路路基土工合成材料应用技术规程》^[14];1998年由水利部发布了《土工合成材料测试规程》^[15]。这些,对规范筋材的测试方法及工程应用发挥了重要作用。

在学术交流方面,我国土工合成材料学术交流会已举行6次(天津,1984年;沈阳,1989年;江苏仪征,1992年;上海,1996年;湖北宜昌,2000年;陕西西安,2004年)。

在铁路系统,大规模的系统研究是从1982年开始的。铁道部科技局将“铁路基床翻浆冒泥防治的研究”列入科技发展计划,在全路范围内选择多个典型试验路段进行试验研究,历时4年。通过现场试验、室内足尺动载模型试验和材料性能试验等,对土工膜和土工织物综合防治路基翻浆冒泥的技术进行了较为系统的研究。针对基床的下沉、外挤,西南交通大学就土工格室和土工网加固基床的效果进行了室内模型试验研究,他们详细分析了试验所得数据,认为土工网在提高基床刚度和改善荷载扩散方面作用十分微小,它的主要功能是起加筋作用;土工格室在提高基床刚度、降低填土动应力方面有一定的效果,在改善基床弹性变形和减少永久变形方面作用十分突出,且格室高度越高,加固效果越好。原上海铁道大学和蚌埠铁路分局,在淮南铁路现场采用土工格室处理基床下沉、外挤病害,并埋设测试元件实测了基床铺设土工格室后土工格室动应力的情况。分析指出铺设土工格室与基床换填中粗砂相比,动应力沿深度衰减明显,在轨下衰减15%~25%,在枕木端相差不大。动应力的横向分布趋于均匀,枕木端

与轨下动应力之比为 0.94,而换填法为 0.60,从而明显地改善了基床的动应力分布。为了探讨土工膜的合理铺设位置,是铺在路基表面好还是埋入土中一定深度好,铁道第二勘察设计院与西南交通大学共同开展了室内试验和有限元计算分析。着重研究了不同砂垫层厚度下路基面动应力的响应和沉降规律,观察分析土工膜在动应力作用下的受损情况,以确定铺设土工膜的最佳位置和保护层厚度^[16]。

在煤炭系统,本专著第一作者根据土工合成材料的功能和作用及煤矿生产中需要排水、煤与矸石需要分离、厚煤层开采需作再生顶板、采空区巷道需临时支护、岩石裂隙水需防治、需锚喷支护、锚杆支护、边坡支护等特点,探索了土工合成材料在煤矿生产中的十大应用^{[17]-[18]};

1.2 加筋土结构国内外研究动态

加筋土是在土中加入抗拉材料,以改善土的工程性质。加筋土的应用具有悠久的历史。在陕西半坡村发现的仰韶文化遗址中,有许多简单的房屋,其墙壁和屋顶是利用草泥修筑而成的。据估计,这些建筑距今已有五六千年的历史(中国建筑简史,1962年^[19]);在玉门一带,还保留有用砂、砾石和红柳或芦苇压叠而成的汉长城遗址(中国大百科全书,1987年^[20])。在国外,也有类似的记载。在近代,约1822年,Colonnel Plasley将加筋土技术引进英国军队,新采用的加筋材料包括有帆布,与天然植物相比,帆布的使用具有一定的优越性。后来土工织物的使用使得加筋土的应用更加广泛。

土体具有一定的抗压和抗剪强度,而它们的抗拉强度却很低。在土内掺入或铺设适当的筋材后,可以不同程度地改善土体的强度与变形特征。筋材埋在土体中,可以扩散土体的应力,增加土体的变形模量,传递拉应力,限制土体侧向位移;还增加土体和其他材料之间的摩阻力,提高土体及有关建筑物的稳定性。法国工程师 Henri. Vidal 于 20 世纪 60 年代初提出了现代加筋土技术,他在模型试验中发现,当土中掺入有机纤维材料后,其强度可明显提高,据此提出了加筋土概念,并于 1963 年首先公布了其研究成果,提出了土的加筋方法和设计理论。应用此理论,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^[21]。由于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、学术界的重视,其发展速度相当快,应用范围也日益广泛。在过去的 20 余年中,37 个国家已修建 2 万余座加筋土结构,其墙面面积超过 7 000 万 m^2 ^[22]。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。前西德《地下建设》杂志(1979 年)曾誉之为“继钢筋混凝土之后又一造福于人类的复合材料”。

20 世纪 70 年代是加筋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。在筋带拉力、墙背土压力的分布和计算,以及破裂面的形态等方面,法国 F. Schlosser, N. C. Long, I. Juran, 美国加州大学 K. L. Lee 以及 D. P. Mckittrick 等学者作出了突出贡献。为了交流研究成果和实践经验,1978 年和 1979 年先后在匹兹堡、悉尼和巴黎等地召开了加筋土技术的国际性研讨会。“加筋土工程协会”和国际间的合作研究机构相继成立,法、美、英、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。

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、筋材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 J. K. 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 R. D. Holtz 和 R. A. Jewell 等人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 年代中期,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。

20 世纪 90 年代加筋土的研究工作主要集中在如下几个方面:

- (1) 完善设计计算理论,进一步拓宽应用范围,并研究与其他加固技术的配合应用问题;
- (2) 将加筋土体看成匀质“复合材料”,用有限元法和弹塑性理论进行分析;
- (3) 进行加筋带使用寿命的研究;
- (4) 加筋土体变形的因素和计算方法;
- (5) 外荷载在加筋体内的扩散及其对加筋土体内部稳定性的影响和加筋地基承载力计算等。

在加筋土的设计方法上,仍以极限平衡法最为普遍,其次是有限元法。极限平衡法是一种保守而安全的设计方法,迄今仍适用于各种土建类工程中,不过在分析计算中未考虑土体变形,设计时要限制筋材的延伸长度^[23]。与极限平衡法相比,有限元法可以提供受荷载土体的应力场和位移场,在计算中考虑土体的非均匀和非线性、土性随时间的变化、施工程序和荷载变化,因而计算成果可反映从施工开始到运行期间土体性质变化的全过程。由于近期对土与加筋材料本构关系研究的日益深入,有限元法的应用发展很快,尤其是对于比较重要的或对变形有严格要求的建筑物,常常用有限元法进行核算。法国的 J. G. Gourc 和 Ph. Delmas 等人,在极限平衡法的基础上,引入了土与筋的应变相容关系,于 1986 年提出了位移法(Displacement Method)(Gourc 等,1986 年)。这一方法已在法国开始应用,并在不断地改进。我国的刘祖德等人,曾应用弹性理论预测陡坡极限平衡所需的加筋力和滑动面的位置,对极限平衡法进行了改进(刘祖德等,1989 年)。进入 90 年代,在加筋土设计方面,有些国家的设计人员,开始采用极限状态法(Limit State Method),设计时分为最终极限状态和使用极限状态两大类,考虑建筑物的使用寿命和筋材与土的应变相容性,对材料特性指标、土力学指标和作用力等,采用分项系数以代替单一的安全系数,较大地改进了极限平衡法,但目前尚未被普遍使用(McGown 等,1998 年)。土本身的力学性质复杂多变,而土工合成材料品种繁多,性能各异,并具有明显的蠕变性和温度效应,埋在土体内的应力与应变关系不同于无侧限条件下的性状。此外,还要考虑土和筋材界面的相互作用等,单纯靠分析手段来准确估计土与筋材受力是相当困难的。因此,加筋土的设计尚未能完全依靠严密的理论分析方法去解决实际问题。所以,在设计中,基本原则是以岩土力学原理为基础,结合加筋工程的具体条件建立实用分析方法,配合工程实践得到的经验或半经验方法,或利用原型观测和试验以解决实际问题。

在加筋技术交流方面,4 年一次的加筋土技术研讨会(International Symposium of Earth Reinforcement)已在日本连续举行 4 届。

在工程应用方面,1996 年日本福岗市完成了第一座预压预张力(PLPS)土工格栅加筋土桥墩,用于支承长度为 16 m 的铁路桥钢梁,桥墩地基为软黏土,在建墩前已用水泥加固,并建成一座土工格栅加筋土桥台支承钢梁的另一端^[9]。徐少曼等根据室内土工织物加筋软基模型试验,对采用预应变加筋法加固软基方法进行了研究。软基加筋土工织物的理想受力机制是

使织物在填土开始就与填土及地基同步变形受力,拉力沿织物不应出现突变,填土不出现脆性破坏及筋材的强度与界面的强度相匹配等。试验表明,预应变加筋法可使筋材受力尽量接近理想受力机制。同时提出了预应变值 ϵ_0 的估算公式,并指出 R. K. Rowe 提出的容许相应应变算法有时不符合工程实际^[22]。

20 世纪 80 年代,也是我国试验、研究、应用和发展加筋技术的重要时期。十年间,相继修建各类加筋土工程 300 多座,突破了一些国家规范中对填料的限制和筋材的应用范围,其中 80% 以上工程的筋材为聚合物。与此同时,广泛开展了加筋技术的研究,从理论研究、模型试验和现场测试到机理分析,都取得了有益的成果,使加筋土技术的应用得到了更好的推广,并且在设计计算理论的研究方面也取得了进展。交通部制定的《公路加筋土工程设计及施工规范汇编》^[24];原长沙铁道学院加筋土课题组主编的《湖南省加筋土支挡结构设计及施工规范》^[25]于 1992 年颁布施行。

在工程应用方面,在重庆长江护岸工程中修建的加筋土挡墙,高 8~28 m,全长 5 600 m;在陕西铜川公路上修建的加筋土挡土墙高达 51 m。

全国先后共举行过 6 次(武汉,1982 年;昆明,1986 年;重庆,1990 年;济南,1994 年;泰安,1998 年;镇江,2002 年)全国加筋土技术经验交流会。

铁路系统开展加筋土挡墙试验研究是国内最早的,但在使用加筋土挡土墙上又是国内最为慎重和保守的。基于铁路运输的重要性与安全性考虑,多年来规范规定加筋土挡墙高度不得超过 6 m。针对国内高强度土工合成材料的出现和其他部门建设加筋土高挡墙的经验,在铁道科学研究所和原路内各大院校多年进行研究和试验的基础上,铁道部组织有关设计、施工和科研单位,分别在南昆线、京九线结合工程建设,开展土工合成材料加筋土挡土墙试验研究。南昆线工点(1996 年)选在 DK283 田林车站,墙高 12.29 m,远远突破原规范 6 m 的规定,是我国铁路目前最高的单级加筋土挡墙,拉筋采用一种新型土工合成材料——CAT 钢塑复合拉筋带,另外还做了使用少量钢筋的混凝土楔型拉筋挡墙进行对比。京九线工点(1993 年)选在 DK188 饶阳车站牵出线上,墙高 7 m,设计包裹式加筋土挡土墙,即加筋材料采用高强聚丙烯编织物一层一层包裹填料形成自立式加筋土墙体,为美化墙面并保护加筋材料不被紫外线照射,在墙体侧面设置了拼装式钢筋混凝土预制面板进行保护。面板与墙体利用聚丙烯土工带连接,其间留 0.2 m 间隙充填中粗砂^[16]。在秦沈客运专线,大量使用土工合成材料,并开展了多项科研试验观测。

杨果林教授在进行矸石山滑坡治理过程中,针对煤矸石对筋材的腐蚀作用及矸石填料的特点,设计出了一种用煤矸石混凝土包裹钢筋的钢筋煤矸石混凝土网格式加筋土挡土墙,并获得专利^{[26][27]}。在某公路改道取直工程中,设计了一种包裹体一对拉锚板复合式挡土结构,用包裹体形成挡墙自稳体系,用粗钢筋两端各设置一块方形钢筋混凝土板形成对拉锚板,对拉锚板一端的一块锚板置于包裹体内,另一端的一块锚板置于稳定的填土中,使对拉锚板承受包裹体后填土的主动土压力。该结构受力明确,发挥筋材各自优势,取得了较好的经济效益^[28]。

从上可以看出,加筋土技术是一门新的土工技术,虽然发展迅速,但目前仍停留在与设计、施工、测试有关的规范(规程)的建立和健全阶段,理论滞后于实践。传统的分析方法建立在加筋土体的极限平衡理论基础上,即假设破裂面、筋材从土中拔出或拔断来分析加筋土体拉力破坏或黏着破坏时的承载力,无法描述结构的变形机理。20 世纪 70 年代后期才开始的加筋土结构有限元分析将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,

至今为止研究仍处于初始阶段,即将加筋土结构视为平面应变问题,筋带视为线弹性杆单元,面板视为梁单元,结构中不同材料接触面引入界面反应单元,土体本构关系采用非线性弹性或弹塑性模型,土体破坏准则常用莫尔—库仑准则,仅考虑静力荷载作用。以上研究均未涉及动荷载的作用和影响问题。然而,振动或地震作用对加筋土结构的影响是不容忽视的。

美国加州大学 G. N. Richardson(1997 年)和加拿大 M. Yongendrakumar(1992 年)等学者曾在实验基础上作了些理论分析,但因试验次数有限,且多局限于为数很少的金属筋材,所以提出的“Iterative Equivalent Linear Elastic Approach”和“Incremental Elastic Approach”等计算理论也只是作为一种观点^[29]。意大利国家铁路公司,为了研究加固方法的短期和长期效果,应用双向土工格栅加固铁路路堤,在路堤不同断面上的土工格栅肋条上安装了应变片进行观察,确定不同类型车辆经过时产生的动应力场^[30]。日本大地震后,大部分加筋土挡土结构完好无损,但“加筋土挡土结构是柔性结构,具有较好的抗震性”只是一个定性的结论。

一些室内模型试验,如德国的 Claus H. Gobel, Ulrike C. Weisemann 等人^[31],在室内用长 1.4 m、宽 1.0 m、高 1.0 m 的模型箱,模型箱四周由多层方形框堆叠而成,在高度范围内分别模拟基床上层、道碴层,中间加入土工格栅层,为了模拟时速为 160 km/h 的列车,采用振动频率为 7~12 Hz,加载 500 万次,最大荷载值为 76 kN,来模拟一年的交通量,用来测试土工格栅的合理加筋位置,比较加筋与不加筋时,承载力的增加及沉降的变化。

另外,在震动台上给模型箱中的加筋土挡土结构施加震动荷载,用于模拟地震荷载作用下的加筋土挡土结构的动力特性。

室内动三轴试验,原兰州铁道学院梁波等人从加筋机理入手,建立了加筋强度的等效约束力模型,分析了粉煤灰静、动强度的拉力破坏和黏着破坏两种情况下的强度指标^[32],用窗纱和硬塑料板作模拟材料,作振动三轴试验测得动内摩擦角和动内聚力两个强度指标。

Mohamam H. Maher^[33]等人,利用共振柱试验测量加筋砂的动力反应,即剪切模量 G 和阻尼率 D ,得出了加筋砂在动力荷载作用下纤维含量对剪应变值、侧向应力、剪切模量 G 和阻尼率 D 等的影响。

另一种方法是在离心机里作小比例加筋土挡土模型试验。土工离心模型试验是目前较为完善的模型试验,它克服了静力模型试验不能模拟原型重力场的缺陷,同时又自然满足许多相似准则。如原上海铁道大学在 L-30 土工离心机上分别作了在刚性和在软黏土地基上土工织物加筋土挡墙的离心模型试验;土工织物对偏心荷载刚性基础下软黏土地基加固离心模型试验,得出了一些有益的结论^[34]。

还有一种方法是用爆炸作为振动源,来研究加筋土挡土结构的动力特性。如文献^[29]中, Richard 报道了美国加利福尼亚大学所进行的加筋土挡墙遭受随机激励荷载的现场试验。加筋土挡墙高 6.1 m,加筋采用钢条带,筋带长 4.88 m,垂直间距 0.76 m,挡墙遭受几次爆炸荷载,从爆炸荷载的连续性提供最为理想的模拟地震荷载,4 个 0.60 kg 的炸药包置于距挡土墙墙址 9.46 m 处,4 个炸药爆炸的延时时间从 0 开始分别为 0.012 5、0.025 0、0.050 0、0.075 0 s。在墙体内选择适当的位置测量加速度—时间历程和动应力—时间历程。

铁道科学研究院从 20 世纪 60 年代开始系统的研究路基土的动态反应和状态变化,包括应力与应变观测、正常固结和正常固结原状土及击实土的动力性质试验等^[35]。但没有涉及加筋土挡土结构的动力问题。西南交通大学曹新文等人通过分析铁路路基在列车荷载作用下的特点,通过做 1:1 室内模型试验,研究了路基的动应力、永久变形、弹性变形和加速度随列车

荷载的重复作用次数、轴重及行车速度的变化规律^[36],但仅仅是针对路基而言,没有涉及加筋问题。西南交通大学蔡英等人针对路基填土在列车荷载重复作用下产生永久变形的问题,利用三轴试验,研究了重复加载条件下,土体的临界动应力和永久应变随加载次数、加载频率和周围压力变化的规律^[37],同样仅仅是针对路基而言,没有涉及加筋挡墙问题。长沙铁路总公司周卓强从动力学观点出发,采用三轴试验模拟列车荷载下基床土体的受力性状,对裂土原状土和三种灰土的石灰土的动强度模量等动力特性进行了试验研究^[38],同样仅仅是针对裂土而言,没有涉及加筋土问题。原上海铁道大学王炳龙等人^[39]分别在轨下、道心及枕木端头,深度为0.45 m的位置埋设土压力传感器,用动态应变仪进行提速状态下路基动应力测试,得出了不同列车速度下的动应力波形,同样也仅仅是针对一般路基,没有加筋的情况。

所有这些方法,均不能全面反映铁路加筋土挡墙在列车荷载作用下的动力特性。加筋土路基承受列车随机荷载作用,加筋土中筋材受到车辆加一卸载的重复荷载作用,筋材长期处于拉伸状态,加筋路基主要承受竖向动荷载作用。随着高速铁路、高速公路的建设和发展,往返车辆动荷作用对沿线加筋土结构的影响问题也将提到议事日程上。铁路的提速、车辆轴重的增加和客运专线的建设,对于桥梁和路堤过渡段的刚度不均匀和沉降不均匀等提出了更严格的要求,铁道部为此设立了专题开展研究工作,其中利用土工格室、土工格栅加筋加固过渡段的研究课题,进行室内大比例的模型试验和试验工点的现场测试工作。本专著部分内容专门研究加筋土挡墙的动力特性。所以,开展以选材为目的的筋材工程特性试验(包括目前普遍应用于工程中的几种典型筋材力学参数试验、在加一卸载多循环荷载作用下筋材在土体中的应力—应变关系试验、筋材在长期荷载作用下的蠕变试验、筋材在填料中的拉拔试验等);开展以模拟加筋土挡墙在列车动力荷载作用下的动态响应测试;开展对加筋土挡墙在动力荷载作用下的理论分析、解析方法研究、动力参数研究;动力荷载作用对加筋土结构影响的研究;编制在振动荷载作用下铁路加筋挡墙的动态响应—动应力、动位移、动应变弹塑性有限元程序等具有十分重要的意义,可为今后加筋土挡墙的设计计算提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] 王正宏. 总结经验加强研究将我国土工合成材料规范提高到一个新水平[A]. 见: 全国第五届土工合成材料学术会议论文集[C]. 湖北宜昌, 2000; 37-43.
- [2] Giroud J P, Perfetti J. Classification of Fabrics and Measurement of their Properties with a View to Utilization in Geotechnics[A]. Proc. Of 1st Int. Conf. on Geotextiles[C]. 1977.
- [3] Giroud J P, et al. Geotextiles Products[A]. Geotechnical Fabrics Report[C]. IFAI St. Paul Minnesota, 1983; 1(1)12-15.
- [4] GB 50290—98. 土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [5] 土工合成材料工程应用手册编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [6] 黄广军. 加筋土挡墙的性状及设计理论研究[D]. 铁道部科学研究院, 1999.
- [7] 中国土工合成材料工程协会. 土工合成材料科技通讯, 第 78、79 期.
- [8] 南京水利科学研究院. 土工合成材料测试手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [9] 土工合成材料技术协作网. 土工合成材料工程应用百例[M]. 北京: 水利部科教司、国家防汛办公室联合出版, 1992.

- [10] 土工合成材料工程应用手册编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [11] JTJ/T 019—98. 公路土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [12] GB 50290—98. 土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [13] SL/T 225—98. 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国水利部发布, 1998.
- [14] TB 10118—99. 铁路土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部发布, 1999.
- [15] SL/T 235—1999. 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中华人民共和国水利部发布, 1999.
- [16] 师新明, 黄广军. 土工合成材料在铁路路基工程中的研究与应用[A]. 全国第五届土工合成材料学术会议论文集[C]. 2000: 62-70.
- [17] 杨果林, 罗文柯. 土工合成材料在煤矿生产中的应用研究[A]. 全国第五届土工合成材料学术会议论文集[C]. 2000: 806-809.
- [18] 杨果林. 土工合成材料在煤矿生产中的应用研究[A]. 湘潭矿业学院研究报告[C]. 1998.
- [19] 中国建筑史编辑委员会编. 中国建筑简史(第一册)[M]. 1962.
- [20] 中国大百科全书总编辑委员会—土木工程编辑委员会. 中国大百科全书—土木工程[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1961.
- [21] 陈忠达. 公路挡土墙设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [22] 周志刚, 郑健龙. 公路土工合成材料设计原理及工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [23] 中国土工合成材料工程协会. 土工合成材料科技通讯. 第 90 期. 1999.
- [24] 公路加筋土工程设计及施工规范汇编编辑委员会. 公路加筋土工程设计及施工规范汇编[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992.
- [25] 长沙铁道学院加筋土课题组主编. 湖南省加筋土支挡结构设计及施工规程[M]. 1992.
- [26] 杨果林. 钢筋(煤矸石)混凝土网格式挡墙[P]. 中国专利: ZL97238922. 9.
- [27] 杨果林. 网格式加筋土挡土结构治理矸石山滑坡应用研究[J]. 湘潭矿业学院研究报告, 1998.
- [28] 杨果林, 李海深. 包裹体-对拉锚板复合式挡土结构力学分析与工程应用[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(3): 76-80.
- [29] Muthucumarasamy Yongendrakumar, Richard J Bathurst, D Liam Finn. Dynamic Response Analysis of Reinforced-Soil Retaining Wall[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(8): 1158-1167.
- [30] 波阿诺等. 应用土工合成材料(双向土工格栅+土工布)加固铁路路堤[A]. 全国第五届土工合成材料学术会议论文集[C]. 2000: 147-152.
- [31] Claus H Gobel, Ulrike C Weisemann. Effectiveness of a Reinforcing Geogrid in a Railway Subbase under Danamic Loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1994, 13: 91-99.
- [32] 梁波. 加筋粉煤灰的静动强度指标试验研究[J]. 实验力学, 1998, 13(1): 85-91.
- [33] Mohamam H Maher, Richard D Woods. Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(7): 1116-1131.
- [34] 孙钧等. 新型土工合成材料与工程整治[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 110-132.
- [35] 杨灿文等. 铁路路基土动力性质[A]. 第五届土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 304-307.
- [36] 曹新文, 蔡英. 铁路路基动态特性的模型试型研究[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 36-41.
- [37] 蔡英, 曹新文. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1-5.
- [38] 周卓强. 裂土灰土动力特性试验研究[J]. 路基工程, 1998, 4: 29-35.
- [39] 王炳龙等. 提速状态下路基动应力测试分析[J]. 铁道学报(增刊), 2000, 22(5): 79-81.