



研究生教学用书

现代加筋土理论与技术

*Theory and Technology of
Modern Reinforced Soil*

雷胜友 编著

郑健龙 主审



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

该书全面而系统地总结整理了既往加筋土的强度理论成果,通过多种方法和思路论述了加筋土的强度,介绍了土—筋间摩阻系数的合理测定方法,并就测定过程的注意事项作了详细说明;还介绍了离心模型试验的原理和方法、双面加筋土高挡墙的离心模型试验及数值计算、组合模块式加筋土挡墙墙面板和筋带摩擦连接的研究及高填方下加筋土高挡墙的现场试验等;另外就加筋土挡墙及加筋土地基计算方法作了简要说明和介绍,最后结合施工特点,进行了加筋土挡墙土压力计算方法的新尝试,并给出了关于加筋土方面的名词术语的区别和联系。

本书可作为岩土工程专业及铁路、公路、水利、工业与民用建筑等专业方向的研究生用书及有关科研、工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代加筋土理论与技术/雷胜友编著. —北京:人民交通出版社, 2006.6

ISBN 7-114-05981-7

I. 现… II. 雷… III. 加筋土 IV. TV443

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第034985号

书 名: 现代加筋土理论与技术

著 作 者: 雷胜友

责任编辑: 沈鸿雁 刘永超

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285656, 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787 × 960 1/16

印 张: 13.5

字 数: 202 千

版 次: 2006年8月 第1版

印 次: 2006年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 7-114-05981-7

定 价: 24.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

21 世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编写委员会

主任委员:王秉纲 (长安大学)

副主任委员:胡长顺 (长安大学)

陈艾荣 (同济大学)

王 炜 (东南大学)

杜 颖 (人民交通出版社)

委 员:周 伟 (交通部交通科学研究院)

郑建龙 (长沙理工大学)

张建仁 (长沙理工大学)

刘小明 (北京工业大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

向中富 (重庆交通大学)

徐 岳 (长安大学)

郭忠印 (同济大学)

杨晓光 (同济大学)

黄晓明 (东南大学)

叶见曙 (东南大学)

黄 侨 (哈尔滨工业大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

马松林 (哈尔滨工业大学)

赵明华 (湖南大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

王殿海 (吉林大学)

符铎砂 (华南理工大学)

秘 书 长:韩 敏 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入 WTO,中国经济已融入到世界经济发展的进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在 1998 年 7 月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程、桥梁工程、隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套面向 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成面向 21 世纪交通版高等学校教材(公

路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约130种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近20所高校的百余名教授承担约130种教材的主编工作。2001年6月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

面向21世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术发展与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同

时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21 世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套面向 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21 世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001 年 12 月

作者简介

雷胜友(Lei Shengyou)博士,长安大学公路学院教授,地质灾害防治及工程地质环境保护国家专业实验室客座研究员,1965年1月生,陕西澄城人。1984年9月考入石家庄铁道学院铁路桥梁系铁路桥梁专业学习,1988年7月大学毕业分配到铁道部第二十工程局从事铁路和公路的施工技术工作及国际招标的翻译工作,先后任技术员、助理工程师。1990年9月考入西南交通大学桥梁与地下工程系攻读硕士学位,研究方向为土动力学,1993年5月获硕士学位,1993年9月考入四川大学水利系攻读博士学位,研究方向为土体静动力特性分析,1996年6月通过博士学位论文答辩,获博士学位。1996年7月毕业分配到西安公路交通大学(现为长安大学)任教。1998年11月晋升为副教授,同年增选为硕士研究生导师。1997年成为中国土工合成材料协会会员,2004年11月晋升为教授,2005年9月成为国际土工合成材料学会中国委员会会员。至今在国内外发表论文40余篇,出版专著1部、教材1部。

作者研究的方向为土动力学、加筋土、支挡结构、黄土力学、膨胀土、土的微观结构、CT扫描技术、离心模型试验、土工数值分析、膨胀土的改良、土体损伤力学,同时还涉足固体废物的迁移规律研究。作者在学术上既重视实验也重视计算和理论工作,并关注学术成果的工程应用。



PREFACE

自法国工程师发明了加筋土的理论及技术以来,加筋土工程因具有多种优点而风靡全球,它广泛地用于公路、铁路、水利工程、房屋建筑、民航机场建筑。尤其在发展中国家,加筋土工程蓬勃发展,具有广阔的应用前景。在我国曾出版过不少关于加筋土的书,但在内容的讲述上不够系统,一些新颖的观点尚未反映在书中,使读者对加筋土不能形成一个全面的认识和理解。编著一本内容新颖并具有理论意义和工程背景的加筋土方面的教材,是作者多年的宿愿。但因水平及能力所限,对本书殷切希望读者批评指正。

本书力图在加筋土的理论方面追根溯源,深入理解前人的研究成果,但又没有求多求全,而是力求内容新颖和切合实用。本书内容多为作者近年来发表的一些研究及学习心得和指导研究生的科研成果,并吸收了国内外同行的研究成果。本书可作为高校学生用书及工程技术人员的参考书。在本书的研究和编著过程中,曾得到导师胡定先生和李克钊先生的关心和帮助;在加筋土试验方面,作者曾多次请教过高正中教授、陈禄生教授、吴文兰高级工程师,三位老师还热情地提供了他们的科研资料;在数值计算方面曾得到黄大寿教授的帮助;关于组合模块式加筋土挡墙的摩擦连接试验方面得到了欧阳仲春教授和李德贵教授级高级工程师的帮助,还同杨新利高级工程师就土压力方面进行了深入的讨论;关于加筋抑制膨胀的试验曾得到我校王希玲、王淑兰、马玉平等老师的帮助。借此机会向以上老师表示深深的谢意。书中参考引用了许多文献,也向这些文献作者表示

感谢。最后还要特别感谢长安大学公路学院领导在作者编著本书过程中所给予的鼓励、支持和帮助,正是他们的支持,才使这部抛砖引玉之作得以顺利完成。

雷胜友

二〇〇六年五月



CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 加筋土发展历史及研究进展	1
1.2 本教材的主要内容	3
第 2 章 加筋土强度理论	5
2.1 加筋土强度的宏观表示	5
2.2 加筋土的内部受力分析	14
2.3 纤维土强度的影响因素分析	34
2.4 加筋粘性土的三轴试验研究	37
2.5 加筋土的规格化应力特性研究	43
2.6 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验	46
第 3 章 土一筋之间摩擦特性	52
3.1 用直剪试验方法合理测定土一筋之间摩阻系数	52
3.2 用直剪试验方法测定土一筋间摩阻系数的 注意事项	58
3.3 加筋土接触面上剪应力与相对剪切位移关系	60
3.4 拉拔试验法测定土一筋之间摩阻系数	62
3.5 不同细粒含量填料中筋条的抗拔试验研究	75
第 4 章 加筋土高挡墙的离心模型试验	81
4.1 离心模型试验原理、技术及其在中国的应用	81
4.2 双面加筋土高挡墙的离心模型试验	88
4.3 模型试验结果的模糊数学评估方法	101
第 5 章 加筋土挡墙的数值计算	107
5.1 有限元法概述	107
5.2 土的应力一应变关系	108

5.3	有限元程序设计	110
5.4	加筋土挡墙横剖面的位移变形及应力分析	113
5.5	小结	120
第 6 章	加筋土挡墙现场试验	121
6.1	深沟谷台阶式加筋土挡墙现场实测分析	121
6.2	钢筋混凝土串联式筋带加筋土挡墙强度特性分析	128
第 7 章	组合模块式加筋土挡墙墙面板与筋带的摩擦性质	133
7.1	概述	133
7.2	材料的基本物理力学性质及试验方案	134
7.3	试验成果分析	141
7.4	试验结果在实际工程中的应用	149
7.5	小结	156
第 8 章	加筋土挡土墙的设计理论简介	157
8.1	设计思想简介	157
8.2	加筋土挡墙的设计步骤	158
8.3	外部稳定计算方法	162
第 9 章	加筋地基的承载力计算	166
9.1	加筋垫层作用机理	166
9.2	加筋地基承载力计算方法简介	170
9.3	算例介绍	178
9.4	公式中参数的取值及有关问题的讨论	182
第 10 章	加筋土有关问题的探讨	185
10.1	加筋土挡墙土压力计算方法的新尝试	185
10.2	关于加筋(强)土技术中若干概念的辨析	191
	参考文献	196

第1章

绪论

1.1 加筋土发展历史及研究进展

所谓加筋土就是在土中埋设抗拉强度比较高的材料而形成的一种复合体,其基本原理为土与加筋材料之间存在着似摩擦作用,此摩擦作用限制了土的变形,从而提高了土体的抗剪强度。加筋土挡墙是由填料(土)、填料中一定数量的拉筋以及墙面板组成的一个相互协调的整体复合结构。这种结构内存在着墙背土压力、拉筋的拉力及填土与拉筋的摩擦等相互作用,并达到相互平衡,保证了该复合体的稳定性。加筋改变了土体的性质,提高了强度,因而它的出现,得到了像从前发明钢筋混凝土或预应力混凝土那样高的评价。

加筋土的应用源于我国,远在新石器时代,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,有很多简单房屋,利用草泥修筑墙壁和屋顶,距今约五六千年。汉书记载长城的修筑方法,“非皆以土垣也,或因山岩石,木柴僵落,溪谷水门,稍稍平之”。在玉门一带,仍有用砂、砾石和红柳或芦苇压叠而成的汉长城遗址。这种土中加筋的建筑方法,在我国一直延续到现在。

在水工建筑物中,当地基软弱、不能保证堤身稳定时,常在地基上铺设树木枝条以加固地基;在河滩险工地段,常在堤身逐层压入枝条以加固之;在道路工程中也常采用加筋土,如在黄土高原地区修筑的土桥,实际上是一种在填筑过程中铺入姜石、草绳、

筋条(专指一种丛生的乔木枝条)等的加筋土路堤,这种土桥可历时数百年而不坍;在民用房屋建筑中,用掺入草筋或发丝筋料的土夯筑土墙或作抹平墙面的材料等则更为普遍。

在国外,远在公元前 3000 年以前,英国人曾在沼泽地带用木排修筑道路;公元前 2000 年至 1000 年,巴比伦人曾利用土中加筋修筑庙塔;二次世界大战期间,英军曾在路基上铺放梢捆和帆布,以便装甲车通过。在水利工程上,荷兰曾与海洋进行了长期的斗争,大量利用柳枝、梢料加固堤坝,防止冲刷。利用金属作为土的加筋材料,为岩土工程材料开辟了一个新的领域,然而直到 20 世纪 60 年代初,加筋土的概念才由法国工程师 Henri. Vidal 提出,加筋土的理论才较为系统。他首先在试验中发现,当土中掺有纤维材料时土的抗剪强度提高很多。1963 年他发表了加筋土研究成果并提出了设计理论,1965 年按他的设计理论第一座加筋土公路挡土墙在法国普拉热尔(Prageres)建造成功,于是这一具有许多优点的工程结构物立即引起了世界各国的重视,其研究和工程试验迅速而普遍地发展起来。

1967 年日本便将此项技术引进,并对其抗震性能进行了专门研究,尔后立即用于铁道工程。

1969 年美国开始研究加筋土,1972 年被美国交通部批准使用,1972 年美国的第一座加筋土挡墙在加利福尼亚州洛杉矶东北部的 39 号高速公路建成,在这一过程中,相应的试验、研究工作也同时进行。1976 年美国的 Romstad K. M. 对洛杉矶一高速公路上的加筋土挡墙进行了原型观测和有限元分析,1978 年又对一座加筋土挡墙进行了现场拉拔试验。随后加拿大、澳大利亚及一些发展中国家先后引进该项技术。

我国从 1975 年引进加筋土挡墙的技术以来,经历了调研准备、研究使用及逐步推广的发展过程,现在工程实践逐年增多,全国累计已完成千余座加筋土工程,遍布我国的广大地区。1979 年在云南省田坝矿区修建了第一座加筋土挡墙,继而于 1980 年在淮南铁路枢纽建成了第一座铁路加筋土挡墙。国内已建成的西包线古邑加筋土路肩墙高达 35m,成为国内之最,亦为世界高挡墙之一。重庆市长寿县建成的白沙湾加筋土码头墙高 26m,自 1985 年竣工以来,已多次经受了长江洪峰的考验。甘肃省公路局也先后建成了西兰线太平沟、甘青线青平崖等大型双面加筋土道路工程。1995 年太原过境高速公路东山段,修筑了一座总高度为 31.5m 的加筋土挡墙,其上路堤高 24m,这在高速公路上实属罕见。同时在工程实践的基础上,总结提高并研制了很多符合我国国情的结构形式和材料,如以各种几何图案的混凝土、钢筋混凝土小型面板以及空心砖作为面板。拉筋的材料更具有特色,钢筋

混凝土串联式拉筋,聚丙烯工程塑料带以及近年发展的复合拉筋带,均为我国首创。填料也打破了使用砂土的限制约束,大都就地取材,黄土、粉煤灰、粘性土以及膨胀性土等广泛地应用于各工程,降低了造价,建成了具有中国特色的加筋土工程。与此同时,我国的许多工程单位、设计院、大专院校、科研单位对此项技术也做了许多研究工作,如在加筋机理、设计计算方法和各项参数的选用、构件的受力状态、使用材料的各项物理力学性能试验等方面,都做了大量的模型、原型和现场观测工作,并针对具体工程特点与填料类型提出了其相应的施工工艺,为加筋土技术推广应用积累了宝贵的经验。同时国际上也进行了广泛的学术交流,仅在 1976 年到 1979 年间就召开了七次国际学术会议,如 1977 年在法国巴黎召开了“国际编织物加筋土会议”,同年在澳大利亚悉尼召开了“土壤加筋及稳定技术讨论会”。最近一次国际土工合成材料大会于 1996 年 9 月在日本的九州召开。我国已先后在武汉、昆明、重庆、泰安、宜昌、镇江召开了多次加筋土技术经验交流会,成立了全国加筋土工程情报网。铁道部于 1986 年制定了“铁路加筋挡墙设计原则”,交通部 1992 年实施了《公路加筋土工程设计规范》(JTJ 015—91)和《公路加筋土工程施工技术规范》(JTJ 035—91)。

所有这些都标志着加筋土技术在世界大范围内得到推广应用,并在理论研究方面取得很大突破。工程实践表明,这种结构具有强大的生命力。

目前国内外使用的的加筋材料有:镀锌钢片、铝片、铜片、钢筋混凝土串联块、土工织物、土工网格、格栅、高强度塑料包装带和竹子等。

加筋土结构主要有下列特点:

(1)从理论上讲,其建筑高度不受限制,目前已建成的最大加筋土支挡结构物高度已超过 50m。

(2)占地少,对各种不同地形适用性强。

(3)加筋土结构具有较好的柔性,允许发生不均匀沉降,对于柔软地基尤为适用。

(4)各种构件可以预制,对于支挡结构来说,面板还可以制成各种形状,因而工期短,造型美观,加筋材料可以用钢筋混凝土串联块。

(5)对变形的自适应能力强,防震性能好,其韧性尤为突出。

(6)造价低廉,较其他结构物可节约投资 40% ~ 60%。

1.2 本教材的主要内容

土的强度理论一直是国际上正在攻克的难题,加筋土也不例外,其中涉及

如加筋的机理、提高加筋的效果、强度参数的选取等方面,都属强度的问题,因此这些方面仍需进一步研究。另外,随着加筋土挡墙的广泛应用,对于加筋土高挡墙的需求日渐增多,提出了许多亟需解决的问题,以期达到安全、经济的效果。但是加筋土挡墙规范多是针对高度在 12m 以下的低挡墙编制,对于超过 12m 以上的加筋土高挡墙规范没有相关内容。如果还沿用现行的规范,显然是不合理的。同时积累的 12m 以上的加筋土挡墙的现场测试资料也很少。这样对于加筋土高挡墙的破坏形式、墙后土压力的分布规律、筋带应力的分布形式等方面都需要大量的试验研究和理论探讨。土一筋之间的摩擦是影响加筋土强度和加筋土挡墙稳定的一个重要因素,因此筋一土间摩擦特性的研究仍然是加筋土研究中的重要内容。直立式加筋土挡墙一直是工程上使用比较多的形式,对于直立式加筋土挡墙不设错台时的最大高度等方面仍需进一步深入研究。纵观目前已建成的加筋土挡墙,特别是加筋土高挡墙,现今设计方法还是沿用低挡墙的设计方法,说明设计方法上需要改进;对于加筋地基的设计计算资料介绍得比较少,针对以上问题,表现在本书上,主要有以下内容:

(1)在综合大量资料的基础上,介绍了加筋土的强度理论,并指出了各种强度理论的基本假定和不同之处,结合三轴试验资料,对加筋土强度提高的原因作了合理解释,探讨了土一筋之间摩阻系数的合理测定方法及其影响因素。

(2)阐述离心模型试验原理及应用情况,并详细介绍了双面加筋土高挡墙的离心模拟试验成果。

(3)结合试验资料,采取土体非线性本构关系,对加筋土挡墙进行了有限元素分析和计算,计算时按三种方法考虑筋带的作用,即水平作用力法、复合土法、杆单元法,说明了计算结果的合理性。

(4)通过对一座台阶式钢筋混凝土串联拉筋加筋土挡墙的筋带应力、土压力、土柱压力及挡墙变形的实测和分析,得到了破裂面线的简化形式,其结果可供类似支挡结构设计时参考。

(5)简要介绍了加筋土挡墙的设计计算理论。

(6)说明了加筋垫层的作用机理,介绍了加筋地基设计计算方法。

(7)进行了有关问题的探讨,结合施工特点,进行加筋土挡墙土压力计算方法的新尝试,对加筋土的研究起到了启示作用。

第2章

加筋土强度理论

2.1 加筋土强度的宏观表示

对于加筋土的强度问题,根据三轴受力条件,各国学者从试验结果到理论分析,从不同角度提出了加筋土强度公式,可分为复合材料强度理论、等效围压法、土的拱效应理论,但是对土体强度提高的认识,大家的看法还不尽相同。为了更合理地解释加筋土的这些特性,本节就加筋土作用后的宏观表现,加筋土与素土的摩尔—库仑强度线,本构关系的一致性方面作一详细论述。

2.1.1 加筋土的复合材料强度理论

加筋土强度提高的复合材料观点如下:

将加筋集中在一起,使其与土沿受力方向分层分布,形成叠层复合材料,如图 2-1 所示。

设两种材料变形是协调的,则

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_{x2} = \varepsilon_{y1} = \varepsilon_{y2} \quad (2-1)$$

若加筋材料的弹性模量 E_2 明显大于土的弹性模量 E_1 时,则加筋材料将作用于土上一个附加压应力 $\sigma_{x1} = \sigma_{y1}$, 反过来土对加筋材料施加一

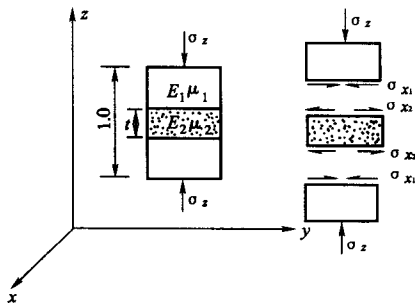


图 2-1 复合材料受力分析示意图

个拉应力 $\sigma_{x_2} = \sigma_{y_2}$, 从平衡条件有

$$t\sigma_{x_2} = -(1-t)\sigma_{x_1} \quad (2-2)$$

$$\text{进而得} \quad \sigma_{x_1} = \sigma_{y_1} = \frac{-t(\mu_2 E_1 - \mu_1 E_2)}{(1-t)E_1(1-\mu_2) + tE_2(1-\mu_1)} \sigma_z \quad (2-3)$$

与土相比, 加筋材料的厚度 $t \rightarrow 0$, 模量 $E_2 \rightarrow \infty$, 假设

$$\frac{tE_2}{E_1} = K$$

$$\text{则} \quad \sigma_{x_1} = \sigma_{y_1} = \frac{K\mu_1 \sigma_z}{(1-\mu_2) + K(1-\mu_1)} = \frac{K\mu_1}{(1-\mu_2) + K(1-\mu_1)} \varepsilon E_v \quad (2-4)$$

式中, E_v 为复合材料的竖向弹模, 如果设 E_v, μ_1, μ_2 为常数, 则加筋材料对土的附加压应力 $\sigma_{x_1} = \sigma_{y_1}$ 与复合材料的轴向变形成正比。

用以上复合材料的观点来解释加筋土的受力情况, 则认为, 由于加筋材料的弹性模量远大于土的弹性模量, 又由于变形的协调性, 这样在土—筋交界面上产生了一个平行于界面的切向力, 如图 2-2 所示。从图 2-2c) 可以发现, 试样侧面除了承受 σ_3 外, 还有一个同 σ_3 方向一致、分布形式相同的 $\Delta\sigma_3$ 的作用, 当加筋层数增多时, $\Delta\sigma_3$ 值在增大, 这是一个显著的增量, 会起到增大 σ_3 的作用, 要使试样破坏, 只有增大 σ_1 , 这样土体的抗剪强度就提高了。

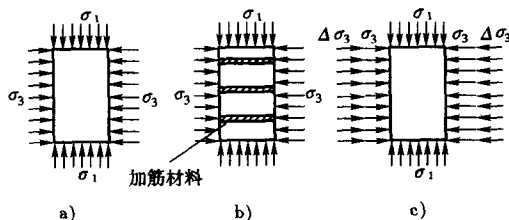


图 2-2 加筋土与未加筋土的单元受力图

a) 素土; b) 加筋土; c) 图 b) 的等效结果

由于结构和荷载都是正对称, 所以加筋层上的切向力总是成对出现, 且边缘处的值最大, 轴心处为零, 如图 2-3 所示。

2.1.2 粘聚力增量理论(准粘聚力理论)

最初法国学者 Henri · Vidal 在砂性土里加入了一些抗拉强度比较高的纤维材料进行三轴压缩剪切试验, 发现加筋土的强度包线基本上与未加筋土的强度包线平行, 加筋后砂性土有了一个粘聚力, 强度指标变为 c, φ ; 同样, 以后大量加筋粘性