

土工合成材料在加筋土中的应用

刘 明, 李豪杰, 钱重昌

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州
Email: 1195683511@qq.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月25日

摘 要

土工合成材料作为一种新型的岩土工程材料, 近年来被广泛应用于交通、水利、建筑等工程领域, 在工程实际中发挥着重要作用, 尤其是随着加筋土技术开始发展起来, 土工合成材料在加筋土结构中发挥着重要的作用。本文通过介绍土工合成材料的发展、分类、工程特性实验研究的主要方法, 以及加筋土技术的发展历程、加筋作用发挥效应的原理, 分析了土工合成材料在加筋土中的应用情况, 重点对加筋土挡土墙、加筋土边坡以及加筋土地基的布设方式、作用机理、设计计算方法、变形和承载力计算以及破坏方式等方面进行总结归纳, 并指出目前本行业研究所欠缺的方向, 对以后的研究方向做好规划。

关键词

土工合成材料, 加筋土技术, 工程应用, 作用机理, 承载力计算

Application of Geosynthetics in Reinforced Soil

Ming Liu, Haojie Li, Zhongchang Qian

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu
Email: 1195683511@qq.com

Received: Nov. 23rd, 2020; accepted: Dec. 16th, 2020; published: Dec. 25th, 2020

Abstract

As a new type of geotechnical engineering material, geosynthetic has been widely used in transportation, water conservancy, construction and other engineering fields in recent years, and plays an important role in engineering practice, especially with the development of reinforced soil technology, geotechnical synthetic materials play an important role in reinforced soil structures. This paper analyzes the application of geosynthetics in reinforced soil by introducing the main

methods of the development, classification and engineering characteristics of geosynthetics, as well as the development process of reinforced soil technology and the principle of reinforced effect. The paper focuses on the layout, mechanism, design calculation method, deformation and bearing capacity calculation and failure mode of reinforced earth retaining wall, reinforced soil slope and reinforced soil foundation, and points out the current research in this industry in the direction that is lacking, and plans for future research directions.

Keywords

Geosynthetics, Reinforced Soil Technology, Engineering Application, Mechanism of Action, Bearing Capacity Calculation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土工合成材料是指以人工合成的聚合物，如塑料、纤维、橡胶等作为原料制成的各种类型的产品，通常被置于土体内部、土体表面或各层土体之间，以发挥加强或保护土体的作用[1]。目前，土工合成材料的应用已几乎渗透到了水利工程和土木工程的所有领域，尤其是在岩土工程中使用极其广泛。

土工合成材料在实际工程中可用于方方面面，总的来说，可以分为七个方面的作用，分别为过滤功能、排水作用、隔离作用、加筋作用、防渗作用、防护作用和减载作用。

其中，加筋作用主要是在土中掺入或铺设适当的加筋材料，多为土工格栅，形成加筋土，来达到提高和改善土体强度与变形的性能。典型的加筋土结构有加筋土挡土墙、加筋土边坡、加筋土地基、加筋土路堤、加筋土桥台等。

通过查阅相关论文文献，整理相关资料，总结了土工合成材料的种类及其在工程中的应用现状，就土工合成材料在加筋土中的应用这一问题展开论述，主要研究加筋土地基、加筋土边坡、加筋土挡墙。

2. 土工合成材料概述

2.1. 土工合成材料的发展简史

土工合成材料的发展，是与合成材料如合成树脂(塑料)、合成纤维、合成橡胶等的发展密切联系的。在人工聚合物发展之前，虽然已经有天然树脂及塑料产品，但是由于其产量小，成本高，所以应用范围较窄。随着人工聚合物的发展，合成塑料、合成纤维、合成橡胶的成本越来越低且制作简单，适用性强，所以很快便在工程中广泛使用。

在我国，土工合成材料在岩土工程等领域的应用历史还较短。最早应用的是土工膜，大约在 20 世纪 60 年代初期，用于渠道防渗，较早的工程如河南人民胜利渠、陕西人民引渭渠等；70 年代中期，在长江护岸和长江堤防中首次用织造型土工织物；80 年代初期，非织造型土工织物开始应用于工程中；80 年代末，土工模袋首次引入工程应用[2] [3]。

2.2. 土工合成材料的分类

土工合成材料的分类，国际上至今还没有统一的规则。早期人们将它分成土工织物和土工膜两类，

分别代表透水和不透水合成材料。随后各工程方向都根据自己专业需要进行划分,中国土工合成材料工程协会组织编写的《土工合成材料工程应用手册》将土工合成材料分为四大类,即土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料。

土工织物是透水性的合成材料,根据是否为织造可以分为有纺土工织物和无纺土工织物两种;土工膜是由聚合物或沥青制成的一种相对不透水的薄膜;特种土工合成材料包括土工网、土工格栅、土工格室、土工条带、土工模袋等;复合型的土工合成材料包括复合土工膜、复合土工布、塑料排水板等。由此可见,土工合成材料的种类繁多,在工程中的应用也是方方面面的。

2.3. 土工合成材料的工程特性

当前我国还没有完全统一的土工合成材料工程特性试验规范,水利、交通土建等方向都有自己独立的实验规范。水利部发布的行业标准《土工合成材料测试规程》(SL/T 235-2012)规定了为反映土工合成材料的工程特性,需进行以下项目的测试:1) 物理特性,包括测量厚度、单位面积质量等;2) 力学性能,土工格栅、土工网及土工带的抗拉伸试验、握持拉伸试验、撕裂试验、胀破试验、CBR 顶破试验、刺破试验和蠕变试验等;3) 水力学特性,进行孔径试验、渗透试验、淤堵试验和土工膜抗渗试验等,测量孔隙率和孔径大小;4) 土与土工合成材料的相互作用,研究界面摩擦特性,直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验;5) 耐久性试验,如抗老化、抗氧化试验、抗化学腐蚀试验和铺设损伤试验等。此外,还有塑料排水带和软式透水管等试验。

通过以上实验,可以表征土工合成材料在产品性态、物理性质、力学性质、水力学性质、耐久性等方面的指标,对土工合成材料的各方面的材料性能进行全面完善的总结,更好的发挥其更有利的方面,提高材料的利用率。

2.4. 土工合成材料在我国的发展展望

土工合成材料在我国经过半个多世纪的应用和发展,目前各方面都已经趋于成熟,主要表现在三方面,一是产品的多样性,目前国内厂家已经基本上可以生产所有种类的土工合成材料产品,有较强的施工生产技艺;二是使用的广泛性,几乎所有可以采用土工合成材料的部门都在积极使用这类新材料,进行技术的推广;三是应用技术也在不断进步,随着诸多学者在此方面的研究,工程实际中对土工合成材料性能的把控也更为精准,相关规范和标准也在逐步的简历和完善。

在看到取得可喜可贺的进步的同时,也应该理性的认识到我们与国外发达国家之间的差距,像北美、欧洲等发达国家,在产品种类、质量、应用范围的广度与深度等方面都较我国有不小的优势。更重要的一点,是对于土工合成材料,目前只了解其主要功能,却不了解其性能,不了解材料在一定条件时甚至可能出现的副作用,更不能充分利用材料,发挥其特长和功效。因此,如何“用对”,使所选的材料对路。使用的场合和部位正确;“用好”,使所选的材料物尽其用,能发挥其最大的效能,并进而“用精”,还有许多文章可做,还有待继续研究[4]。

3. 加筋土技术的研究现状及应用

土工合成材料在工程中的应用主要有七个,分别为过过滤作用、排水作用、隔离作用、加筋作用、防渗作用、防护作用和减载作用,其中加筋作用应用较为广泛。

3.1. 加筋土技术的由来与发展

加筋土技术就是在土中铺设拉筋材料而使得整个土工系统的性能得到改善的一种土体加固方法[5]。其实在我国,加筋土技术的应用可谓是历史悠久,比如在汉长城建设中加入红柳、芦苇等植物,在民用

建筑中用建筑掺入草筋泥壁，加入发丝等筋料抹墙面，在河滩河岸地段用树木枝条、竹条等逐层填入土中以加固河岸或堤基等。虽然这在我国古代建筑人心中都是稀松平常的事，但由于一直无人对其加固机理进行总结和研究，所以也没能有较深入的发展。

现代加筋土技术起源于法国，20世纪60年代初，法国工程师亨利·维达尔首次提出了加筋分析理论和计算方法，于1965冬在法国比利牛斯山区的普拉聂尔建成第一座加筋土工程，1966年获得法国专利，开创了加筋土技术的现代新篇章。

1979我国于云南的田坝矿区的小型工程中第一次试用，修建了一座高2m的储煤仓下挡土墙，这是我国修建的第一座加筋土结构物。80年代以后，相继修建了大量加筋土工程，逐步在公路、水运、铁路、矿山和水利工程中试用，近几年在公路建设和水利、矿山工程建设中的软弱地基处理和挡土结构中应用较多，取得了可观的经济和社会效益。

3.2. 加筋土结构的特点

加筋土技术从根本上来说其实就是对土体进行增强的一门技术，与传统的重力式支挡结构相比，具有以下特点[6]：

- 1) 技术简单、施工方便：不需要专门的施工机具，且加筋体逐层回填压实形成柔性结构，加载引起的地基变形对加筋陡坡本身影响很小；
- 2) 就地取材、节省土地：填料为一般砂性土，来源广泛，加筋材料也可以就近取材，降低运输成本，结构体可以设置直立或陡坡以减少工程占地；
- 3) 施工工期短、造价低、效益明显：与传统的重力式挡墙相比，造价降低幅度一般在10%~50%；
- 4) 整体性好：通过筋材的连接性能，可以很好地保持土体间的受力分担，对变形的适应性较好；
- 5) 结构新颖、造型美观：在施工后，可以通过坡面绿化使工程与大自然融为一体。

3.3. 加筋作用机理

砂性土在自重作用或外荷载作用下易产生严重的变形或坍塌，但是若在土中沿应变方向埋置有挠性的拉筋材料，由于土与拉筋材料产生摩擦，便会使加筋土犹如具有某种程度的粘聚力，从而改良了土的力学特性，这就是加筋土作用的机理[7] [8] [9] [10]。

有关加筋机理的理论有很多种，如摩擦加筋原理(锚固理论)、准粘聚力原理、均质等代材料原理、弹塑性层板理论、弹性薄膜理论、被动抵抗理论以及考虑抗侧应力环和环形锚作用的锚环理论等。目前我们常用摩擦加筋原理和准粘聚力原理来解释。

1) 摩擦加筋原理：

将加筋土视为锚固系统，锚固土体和加筋紧密咬合，当滑动土体下滑或有下滑趋势时，土体与加筋之间就会产生摩擦力，限制了土的侧向变形，从而相当于在土体侧面上施加了约束力，提高了土体的承受力，达到加固的目的。只要拉筋材料具有足够的强度，并与土产生足够的摩阻力，则加筋的土体就可保持稳定。

加筋土技术在挡土墙中应用的摩擦加筋原理如图1所示，依据朗金理论，沿主动破裂面BC将墙体分为主动区和稳定区，下滑土楔体ABC自重产生的水平推力对每一层拉筋形成拉力，欲将拉筋从土中拔出，而稳定区土体与筋带的摩擦阻力阻止拉筋被拔出。如果每一层拉筋与土体的摩擦阻力均能抵抗相应的土推力，则整个墙体就不会出现BC滑动面，加筋土体的内部稳定就有保证。简单来说，就是依据土体与加筋材料之间的摩擦力来维持边坡及土体的稳定。较好的发挥了筋材的抗拉性能，也很好的利用了土体的自重来增大摩擦力。

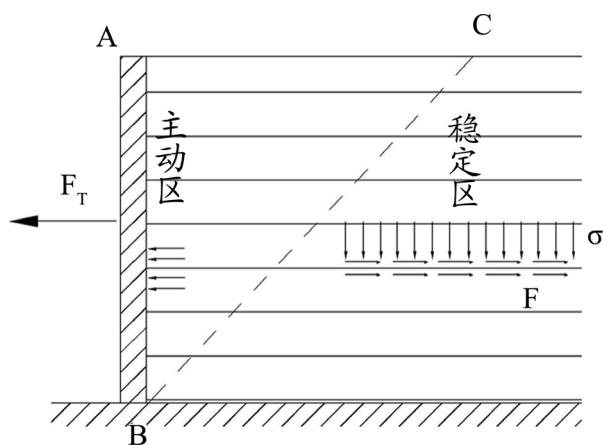


Figure 1. Schematic diagram of friction reinforcement in retaining wall
图 1. 挡土墙中摩擦加筋原理示意图

2) 准粘聚力原理:

准粘聚力原理又称为复合材料理论, 即将加筋土视为各向异性的复合材料, 认为在土中加入加筋材料后, 加筋复合土体的内摩擦角不变, 而产生新的粘聚力, 称为“准粘聚力”或“似粘聚力”。因此, 加筋材料与路基填料之间的共同作用是由填土的抗剪力、土与筋条之间的摩阻力及筋条的抗拉力提供, 他们使加筋土强度提高。

通过加筋土样和未加筋土样的三轴对比试验, 对上述理论进行实验验证。根据库仑理论和摩尔破坏准则分析可得出, 如图 2 所示, 比较加筋前后砂土的极限平衡条件, 加筋砂土比未加筋砂土多了一项由 C'引起的强度增量, 这个 C'就是强度理论中的“准粘聚力”。增加准粘聚力实际上就是增加了土体与加筋材料复合体的复合强度, 有利于复合土体的稳定性。

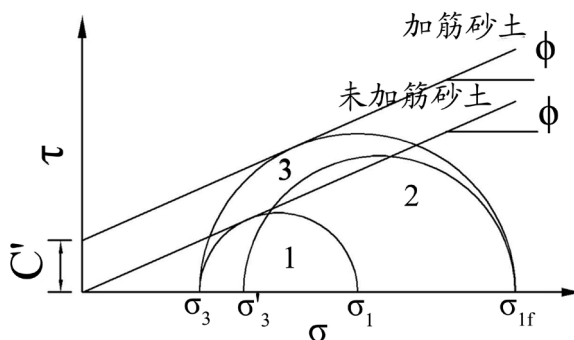


Figure 2. Comparative added reinforcement material and unreinforced material strength
图 2. 加筋和无加筋强度对比

综合比较两个原理, 可以发现, 摩擦加筋原理和准粘聚力原理两个理论都是通过加筋增大了土样的侧向约束力, 从而提高了土的抗剪强度和抗压强度。

4. 加筋土技术的工程应用

加筋土技术在实际工程中的应用很广泛, 典型的加筋土结构有: 加筋土挡土墙、加筋土边坡、加筋土地基、软土地基加筋、加筋土路堤、桥台背后填土加筋、加筋土桥台、软基上桩承加筋堤, 以及加筋土碎石桩、纤维土边坡、加进基层、加筋道床等。其中, 应用最为普遍且目前研究最为完善的是加筋土

挡墙、加筋土边坡、加筋土地基。

4.1. 加筋土挡土墙

加筋土挡墙是加筋材料应用最早，数量较多的一种工程形式。它依靠其良好的力学与变形特性、施工方便高效和外部美观等特点被广泛用于道路工程、机场高边坡和堤防工程领域。

加筋土挡土墙是一种由墙基础、墙面(板)、筋材(拉筋或加筋)以及墙后填土所组成的一种支挡结构。布置形式如图 3 所示。其构造简单，施工方便，面板可以现场浇筑，也可由钢板或预制钢筋混凝土板拼装而成，拉筋用抗拉性能强的材料组成，面板与拉筋相连，拉筋范围内由填料填充压实通过填料与拉筋之间产生的摩阻力来改变填土原有的力学特性，从而使填土承载力得到很大的提高。

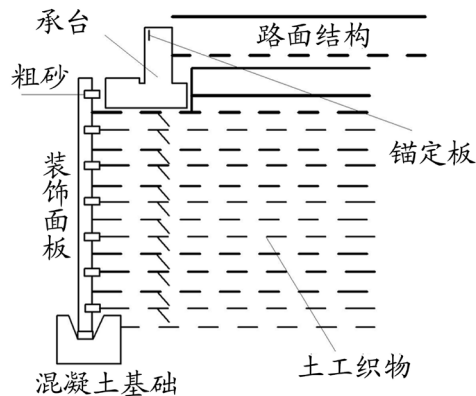


Figure 3. Reinforced earth retaining wall
图 3. 加筋土挡墙示意图

加筋土挡墙稳定性计算采用极限平衡法。外部稳定验算与重力式挡墙一致，墙背土压力按朗金土压力理论计算。内部稳定性验算包括筋材强度和抗拔稳定性验算。筋材布置应满足材料抗拉强度要求，长度应满足抗拔验算，考虑构造要求。

4.2. 加筋土边坡

加筋土边坡有两种方式，一种是对自然斜坡的加筋加固，一种是填土形成的人工边坡的加筋。对于前者一般采用锚钉，将筋材锚入边坡进行加固，要求筋材具有较高的强度和模量；对于后者，可以将筋材随着填土的升高分层填入土中，达到分层加筋分层压实的效果，一般采用土工织物或土工格栅。加筋土陡坡的形式如上图 4 所示。

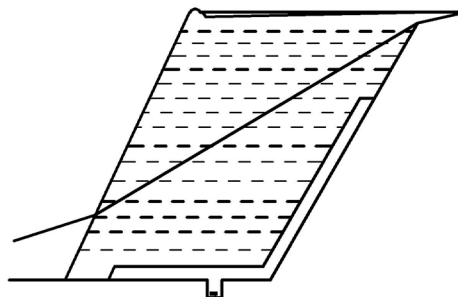


Figure 4. Reinforced steep slope schematic
图 4. 加筋陡坡示意图

加筋土边坡的设计方法为极限平衡法,通过计算内部稳定性和外部稳定性,确定筋材的尺寸和布置及边坡结构。参考文献[11]-[17]中,介玉新、罗长青、李广信、马学宁、王旭、李玉瑞、顾婕等基于数值模拟、模型试验和理论计算,对加筋土边坡的设计方法、稳定性分析以及可能存在的破坏形式进行了研究,提出加筋土边坡安全稳定性的验算方法及影响因素,对实际工程中进行加筋土边坡设计具有指导意义。

4.3. 加筋土地基

加筋土地基的做法是将基础下一定范围内的软弱土层挖去,然后逐层铺设土工合成材料与砂石等作为垫层来作为地基的持力层。加筋土地基具有提高地基承载力、减少地基沉降、控制不均匀沉降的优点。加筋土地基的筋材一般为土工织物、土工格栅、土工格室或土工带。

加筋土地基的设计主要包括承载力、变形和稳定性三个方面的计算,参考文献[18][19][20][21][22]中,张玲、王钊、王协群、徐超等就加筋土地基的承载力计算进行了公式的改进、实验数据分析和软件数值模拟,给出了相近的加筋土地基设计计算公式和方法,提出了多种复合地基沉降计算的新方法,并结合实际进行了验证和分析,各方法均有可取之处,具体做法需要结合工程实际进行设计计算。

如图5所示,是软土路堤上的加筋土路堤示意图,其中用拉筋作为垫层,关于此时的加筋土路堤可能出现的破坏形式也是研究的方向之一。

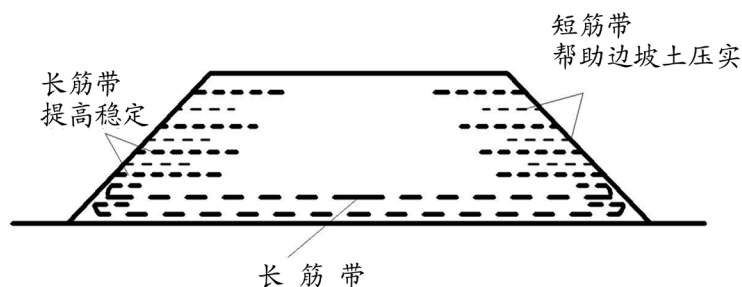


Figure 5. Reinforced embankment schematic
图5. 加筋路堤示意图

5. 结论

1) 关于土工合成材料的分类和工程特性研究,目前行业内已经有了公认的分类方法,各行业根据自己的实际需要,对土工合成材料的工程特性试验方法都制定了行业内的相关规范,用于指导实验研究的开展和对材料性能的评判;

2) 加筋作用是土工合成材料应用的重要作用之一,加筋土技术虽然起步较晚,但是其发展也在逐步完善,在公路、水运、铁路、矿山和水利工程等行业中都发挥着重要作用;其作用机理有多种,比较被广泛认可的是摩擦加筋原理和准粘聚力原理两种,通过加筋对土体产生约束力,提高土体强度;

3) 认识加筋土挡土墙、加筋土边坡、加筋土地基的铺设方法、作用机理、承载力计算方法、破坏的主要形式、强度和变形的验算等方面研究情况,对土工合成材料在加筋土中的应用有了初步认识。

参考文献

- [1] 马时冬. 土工合成材料工程应用现状[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 113-118.
- [2] 高海军, 蔡光艳, 艾涛, 景宏君. 土工合成材料综述[J]. 交通建设与管理, 2013(Z1): 94-96.

- [3] 刘丽芳, 储才元. 国内外土工合成材料的发展[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2002, 17(2): 50-53.
- [4] 何培玲, 孙磊. 土工合成材料应用研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008, 6(1): 63-68.
- [5] 吴景海, 王德群, 王玲娟, 陈环. 土工合成材料加筋的试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 93-99.
- [6] 李广信. 关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 605-610.
- [7] 金兴男, 张晓辉. 国内外加筋土技术研究与应用进展[J]. 吉林水利, 2008(10): 52-54.
- [8] 游立超. 浅谈加筋土技术在工程中的应用[J]. 广东科技, 2012, 21(15): 127-128.
- [9] 任小艳. 加筋土技术在工程中的应用[J]. 科技信息, 2010(32): 734.
- [10] 徐伟. 浅谈加筋土技术研究进展[J]. 治淮, 2014(8): 36.
- [11] 马学宁, 吴培元, 王旭, 王博林. 加筋土边坡稳定性分析水平条分简化计算方法[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 155-160.
- [12] 介玉新, 周诗博, 郭政豪, 陈杰. 平台分级对加筋土边坡稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1178-1187.
- [13] 罗常青, 陈征宙, 李文勇, 李松龄. 某加筋土边坡稳定性系数影响因素的敏感性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 479-483.
- [14] 顾婕, 张孟喜. 基于强度折减理论的加筋土边坡稳定性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(6): 990-1002.
- [15] 李玉瑞, 吴红刚, 赵金, 牌立芳. 模拟降雨作用桩锚-加筋土组合结构加固边坡研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 516-523.
- [16] 介玉新, 洛桑尼玛, 郑瑞华, 李广信. 加筋土边坡的破坏形式[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 693-699.
- [17] 高文华, Richard J. Bathurst. 条形荷载下加筋土边坡破坏机制的数值模拟[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 54-58.
- [18] 张玲, 邓云, 欧强, 黄璇. 考虑土拱效应的双向增强复合地基沉降计算[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 73-78.
- [19] 王协群, 王陶, 王钊. 土工格室加筋地基的承载力[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 60-62.
- [20] 王钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基的设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 731-733.
- [21] 沈盼盼, 徐超. 土工合成材料加筋土地基承载性能数值分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 106-110+127.
- [22] 徐超, 沈盼盼, 胡荣. 土工格栅加筋土地基载荷试验的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1330-1336.