

加筋土结构原理及应用

张师德 吴邦颖 编



中国铁道出版社

1986年·北京

内 容 简 介

加筋土是一种新型结构，目前已用于建造挡土墙、填土地基、桥台、海堤等工程。本书介绍近几年来国内外加筋土结构的设计理论和工程实践，探讨加筋土的工作机理，重点研究影响加筋土结构强度的因素和内部稳定分析方法。书末附有设计实例和电算程序。本书可供土建工程技术人员、科研人员及大专院校师生参考。

加筋土结构原理及应用

张师德 吴邦颖 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 王顺庆

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米1/32印张：7 字数：152千

1986年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6,500册 定价：1.55元

目 录

绪 言	1
第一章 加筋土结构的力学分析	8
§ 1-1 加筋土结构的工作原理	8
§ 1-2 加筋土的强度特性	12
§ 1-3 实测拉筋拉力	21
第二章 加筋土结构的稳定性分析	27
§ 2-1 内部稳定性分析	27
一、根据锚固结构的假设进行分析	27
二、根据“粘结”重力式结构的假设进行分析	37
三、滑裂楔体法（总体平衡法）	42
四、其它分析法简介	55
§ 2-2 外部稳定性分析	64
一、整体稳定性分析	64
二、滑移稳定性分析	71
三、倾覆稳定性分析	71
四、基底应力检算	72
五、沉降计算	75
§ 2-3 破裂面形成和扩展规律讨论	78
一、极限荷载法	79
二、力系平衡法	84
第三章 拉筋的极限抗拔阻力	97
§ 3-1 填土与拉筋间的摩擦机理	97
§ 3-2 似摩擦系数 f^* 值的测定	101

一、直剪试验	102
二、拉筋的抗拔试验	108
§ 3-3 影响拉筋抗拔力峰值和剩余抗拔力的因素	116
一、填土密实度的影响	116
二、似摩擦系数与垂直应力的关系	121
三、与拉筋尺寸及表面性质的关系	123
四、拉筋间距的影响	125
§ 3-4 似摩擦系数测定方法的讨论	126
第四章 加筋土结构的材料	128
§ 4-1 带状拉筋	128
§ 4-2 墙面板	141
一、墙面板类型	141
二、墙面板设计	144
§ 4-3 填 料	145
一、土工标准	145
二、化学标准和电化学标准	150
第五章 加筋土结构设计实例	154
§ 5-1 铁路正线路肩式加筋土挡墙设计	154
一、轨道荷载平行破裂面扩散法	154
二、轨道荷载按分布角扩散法	183
§ 5-2 铁路加筋土桥台设计	199
一、概 述	199
二、加筋土桥台的设计计算	199
参考文献	214

绪 言

加筋土是一种在土中加入筋条（或称拉筋）的复合土。在土中加入筋条可以提高土体的强度，增加土体的稳定性。在我国，加筋土的应用实际上已有悠久的历史，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，据实测，土桥的高度有达61.5 m的；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，加筋土的应用也有类似的记载。然而作为近代的建筑技术加以研究和推广应用，则是近二十年来的事。六十年代初期，法国人亨利·维达尔（Henri·Vidal）首先在试验中发现，当土中掺有纤维材料时，其强度可明显提高到原有强度的好几倍。1960年他据三轴试验结果提出了加筋土概念；1963年发表了其加筋土研究成果并提出了设计理论；1965年按照他的设计理论修建的第一座加筋土公路挡土墙在法国普拉聂尔斯（Prageres）建造成功，于是这一具有许多独特优点的加筋土结构立即引起了世界各国的重视，加筋土结构的研究和工程试验普遍而迅速地发展起来。据1982年发表的资料，已有三十七个国家建成了五千多项加筋土工程，加筋土技术的应用也从最初的用作挡土墙而扩展到用于桥台、护

岸、堤坝、沉淀池、半地下仓斜墙、建筑物基础、核电站反应堆等复杂条件下工作的结构中（见表1及图1~图5）。由于加筋土技术的研究不断深入，仅在1976年至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”等，到会的各国学者交流了加筋土技术的研究成果，使加筋土技术获得了新的进展。

加筋土技术研究在我国是七十年代中期才开始的，第一批试验工程于1978~1979年在云南宣威田坝和富源后所煤矿区建成了三座高仅2~4m的试验性加筋土挡土墙。1980年又在田坝矿区建成了一座长57m、高8.3m的加筋土挡土墙（见图4），建成后使用效果良好。同年在山西晋城—陵川公路上也建成了一座长81.75m、最高达12m的路肩式加筋土挡土墙；其后，云南后所选煤厂又建成了一段窄轨铁路双侧路肩挡土墙；湖北大冶电厂在铁路专用线上建造了一座长44m、墙高4.4m的加筋土路肩挡土墙；浙江天台清溪河护岸（图1）及临海二级公路河头一段路堤也都分别采用了单侧和双侧加筋土结构挡土墙；广东省的广州—丛化公路改线也建成了一段高6m的加筋土挡土墙。在修筑这些加筋土挡土墙的同时，各有关单位都做了大量的试验研究工作和进行了现场观测，为开展加筋土技术的研究与推广积累了可贵的经验。1982年6月在武汉召开的我国第一次“加筋土学术研究会”，及1985年元月在四川峨嵋召开的“新型支挡结构学术会议”，广泛交流了试验研究的成果和设计施工的经验，对加筋土技术的发展和应用起了良好的促进作用。

通过已有的工程试验和研究结果，可以认为加筋土结构具有如下独特的优点：

世界各地加筋土建筑物统计

表 1

地区	山区公路		城市公路		住宅建筑挡墙		桥 台		铁路工程		水工建筑		工业建筑	
	工程数量	面积	工程数量	面积	工程数量	面积	工程数量	面积	工程数量	面积	工程数量	面积	工程数量	面积
欧 洲	221	184170	591	274062	149	45212	463	184703	21	12884	28	92965	63	54414
美 洲	170	158075	91	69375	19	10320	35	24090	4	2600	27	38215	45	50935
大 洋 洲	—	—	26	15200	—	—	12	3620	4	930	1	500	4	515
远 东	85	27010	25	7000	16	4670	3	194	37	15780	—	—	12	2800
中 东	2	2100	4	3000	4	2000	14	3540	—	—	10	20000	2	3000
非 洲	4	2180	7	1250	—	—	4	2100	3	1140	2	500	58	30070
总 计	482	373535	744	369887	188	62202	531	218247	64	33334	68	151910	184	141734

注: 1) 面积以m²为单位, 2) 据1980年资料统计。



图 1 浙江天台清溪河护岸挡土墙 (长70m, 高4.7m)

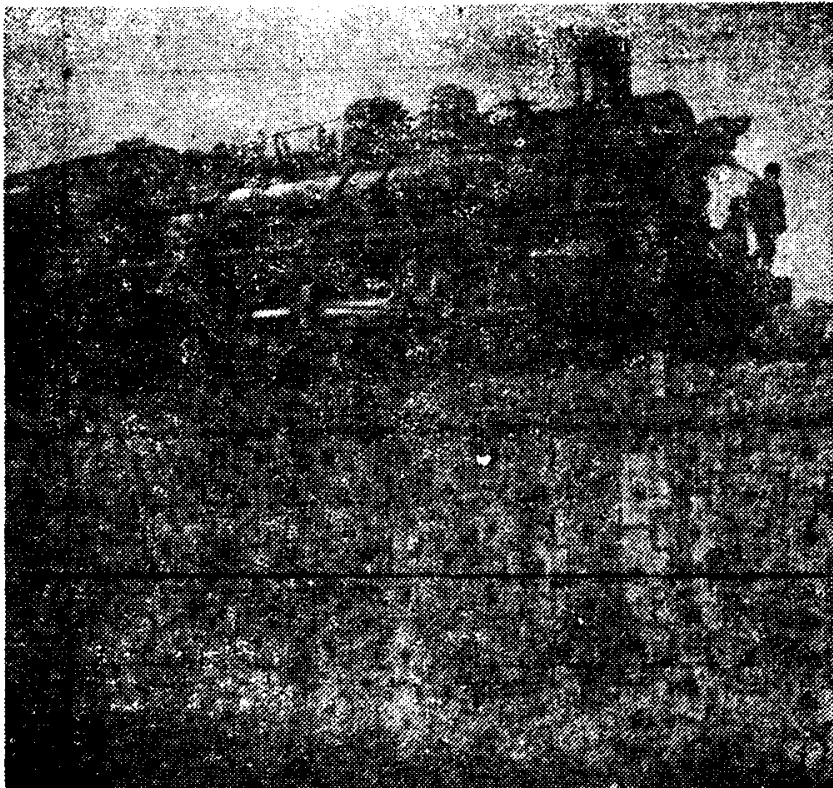


图 2 湖北大冶电厂铁路专用线加筋土路堤墙

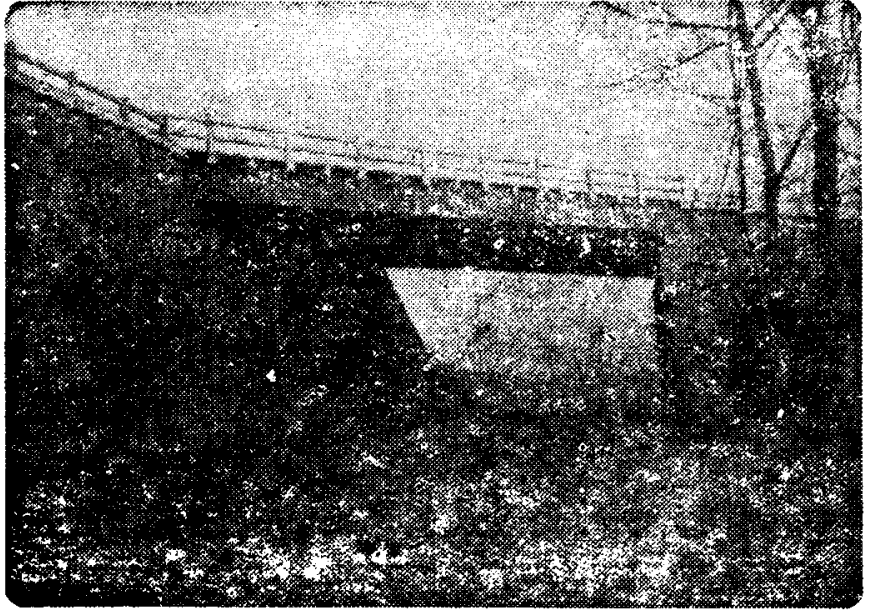


图 3 山西孝义,一20m组合式加筋土公路桥台

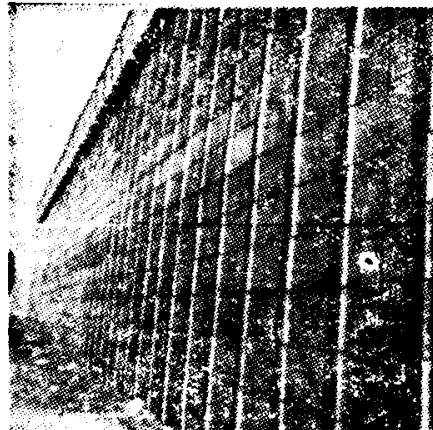


图 4 云南宣威田坝矿区产品煤仓上方挡墙

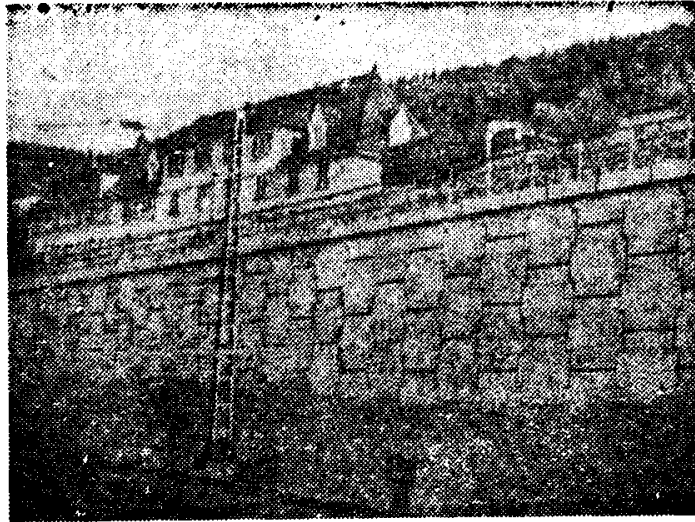


图 5 法国某地加筋土路肩墙

一、施工简便。加筋土的组成构件可以预先制作，运往工地安装，简化施工作业，缩短工期；在较软弱地基上填筑时，由于拉筋是在填土过程中逐层埋设的，所以，因填土引起的地基变形对加筋土结构稳定性的影响比对其它土工建筑物为小，地基的处理因而也较简便；

二、造价低。和钢筋混凝土结构相比，可减少造价一半以上，填筑的高度愈大，节约的效果愈显著。和其它土工加固设施相比，加筋土工程的总造价也较低廉；

三、稳定性好。结构良好的加筋土建筑物几乎是一个整体，即使地基由于承载力不足而滑动、下陷，加筋土结构本身仍能保持完好状态；

四、节约占地、造型美观。加筋土结构的墙面板可以垂直砌筑，大量节约占地，这对于场地受到限制的陡峭山区和繁华都市至关重要；墙面板型式可以根据需要，按结构受力特点进行各种设计，并使之拼装成造型美观的建筑物。

这些优点使加筋土结构的应用日益广泛。

第一章 加筋土结构的力学分析

§1-1 加筋土结构的工作原理

在土工建筑中，加筋土结构常用作支挡建筑，有时也用于加固地基。

用作支挡建筑的加筋土结构如图 1-1 所示，它由以下几部分组成。

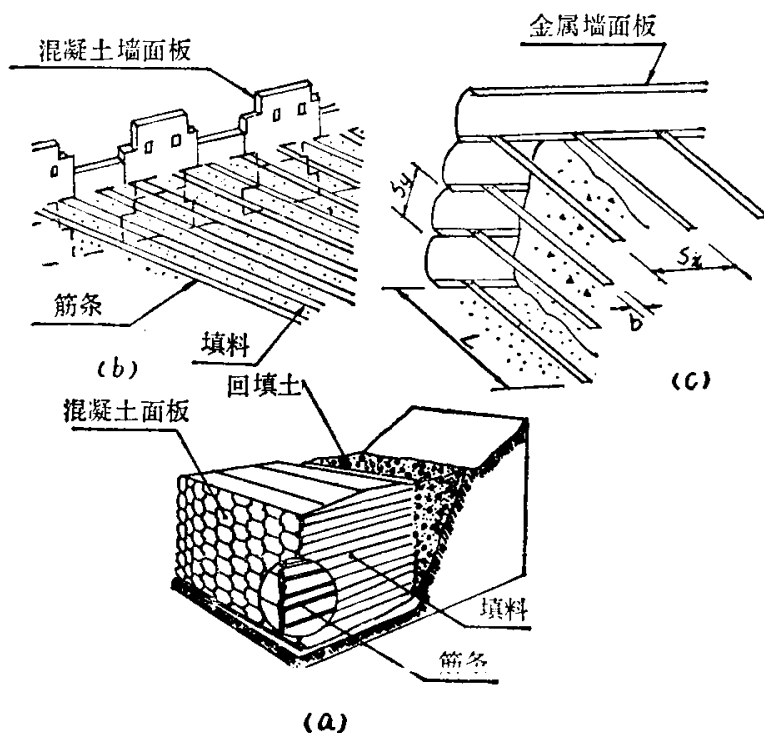


图 1-1 加筋土挡墙

1. 填土：在加筋土结构中一般选用砂性土；

2. 筋条：为薄型带钢或其它材料；
3. 面板：常用的为钢筋混凝土板和金属板；
4. 面板基础：混凝土基础；
5. 面板与筋条的连接件；
6. 其它：如板间嵌缝材料等。

用于加固地基的加筋土结构，如图 1-2、图 1-3 所示，其组成部分为土和筋条，必要时也设有面板。

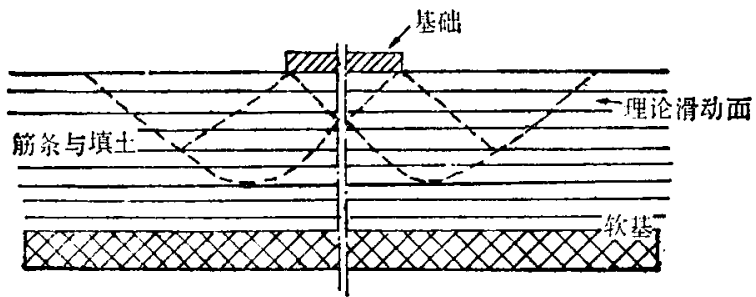


图 1-2 加筋土地基

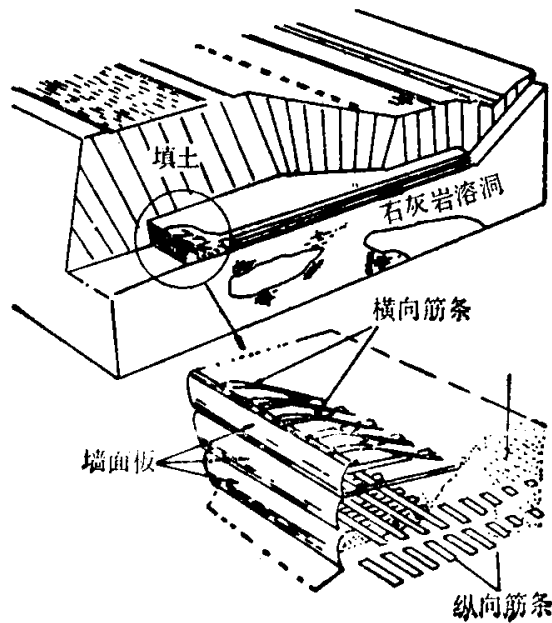


图 1-3 加筋土地基

由图可知，在加筋土结构物中筋条常铺设成水平状，相间、成层地放置在土中。在筋条的埋设全长中，有一部分埋设在需要加固的不稳定土体中，而另一部分则应埋设在稳定土体中。图 1-4 表示在不稳定土体中，筋条上作用着上部土体和外加荷载的总压力 N ，设其压强为 σ_v ，则筋条对土的每单位面积上的反作用力 $\sigma_v = -\sigma_v$ ，当土体对筋条作相对位移时，如果土与筋条的摩擦系数为 f^* ，则筋条对上部土体将产生阻止其位移的摩擦阻力 F_m ，如图 1-4 (a)；同时作用

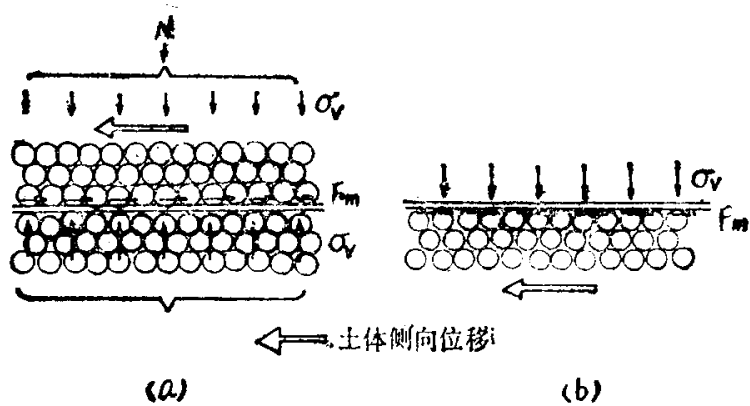


图 1-4 筋条对土体的摩擦阻力

在筋条上的压力通过筋条传递给下部土体，如果忽略筋条本身的重量，并且筋条与下部土体的摩擦系数也为 f^* ，则筋条对下部土体的摩擦阻力也为 F_m ，如图 1-4 (b)，它当然也起着阻止土体位移的作用。由此可知，在不稳定土体中埋设筋条，可以约束土体的侧向位移。如果土体密实，筋条布置的竖向间距较小，上下筋条间的土体能因筋条对土的法向反力和摩擦阻力在土颗粒中传递，而形成与侧压力 σ_n 相平衡的承压拱，如图 1-5 (a)，这时，在上、下筋条之间的土体，除端拱外的土不稳定外，将与筋条形成一个稳定的整体。同理，如左右筋条的间距不大，左右筋条间的土体也能在侧向

力的作用下，通过土拱作用，传递给上下筋条间已形成的土拱，最后也由筋条对土的摩擦阻力承受侧压力，于是，除尽端拱外土体外，左右筋条间的土体也将获得稳定。

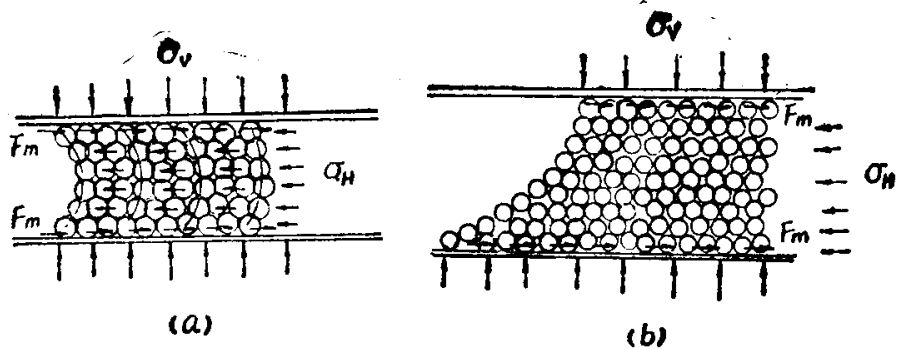


图 1-5 筋条间土体的稳定

加筋土体的成拱条件十分复杂，特别是在筋条间距较大而填土颗粒细小，以及土的密实度不足的情况下，这时，在筋条间土体较难形成稳定的土拱，筋条间的土体将失去约束而出现坍塌和侧向位移，如图 1-5(b)。所以，用作支挡建筑时，加筋土结构应在筋条尽端加设面板——挡土板，面板支挡不稳定的土体，承受筋条与土间的摩擦阻力未能克服的剩余侧压力，并通过连接件传递给筋条。图 1-6 表示加筋土结构中每个加筋单元的工作情况。由图可知，面板承受的土压力为 AC 、 DB 部分土压力，在图 1-6(a) 中，阴影部分的土压力可直接由不稳定区的筋条与土间的摩擦力所抵消。由于面板上的土压力和阴影部分的土压力均由筋条承受，所以，当筋条能从稳定区的土体中获得和土压力相等的抗拔力并有足够的抗拉强度时，加筋单元的土体便能稳定。图 1-7 表示埋有筋条的土中，各加筋单元分担土压力的范围。

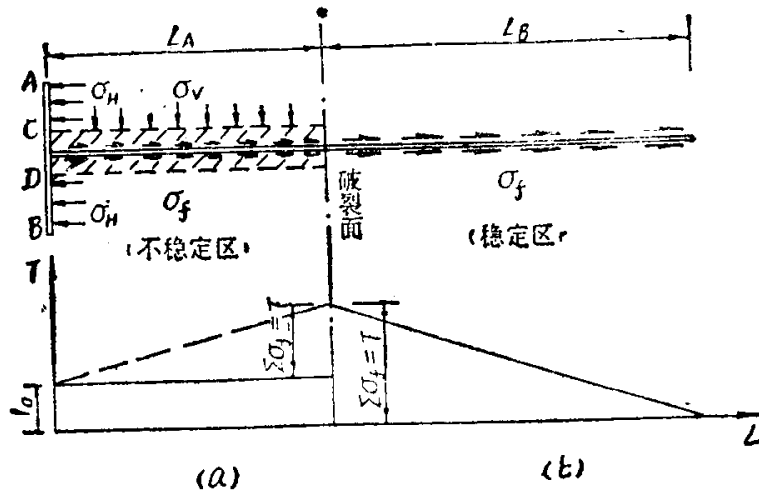


图 1-6 筋条内拉应力的分布

- 图中 σ_f' —— 不稳定区内在主动条件下，填土位移时筋条产生的摩擦阻力，它能稳定厚度为 CD 的土层；
- $\Sigma\sigma_f'$ —— 不稳定区填土对筋条摩擦阻力的总和；
- σ_H —— 加筋单元内主动土压力；
- σ'_H —— 加筋单元内除去 CD 外，对面板 AC 、 DB 所形成的主动土压力， $\sigma'_H = \sigma_H - \sigma'_f$ ；
- σ_f —— 稳定区填土对筋条的摩擦阻力；
- $\Sigma\sigma_f$ —— 稳定区填土对筋条摩擦阻力的总和；
- T, T' —— 分别为在稳定区和不稳定区由土压力形成的筋条拉力；
- T_0 —— 不稳定区剩余土压力形成的筋条拉力， $T_0 = \Sigma\sigma_f - T'$ 。

埋在稳定区内的筋条抗拔力 F ，可按 $F = 2\sigma_v \cdot b \cdot L \cdot f^*$ 计算，其中 σ_v 为筋条所受的垂直应力； b 为筋条宽度； L_B 为埋在稳定区的筋条长度； f^* 为拉筋与土间的摩擦系数。欲使结构稳定，筋条还应有足够的抗拉强度和弹性模

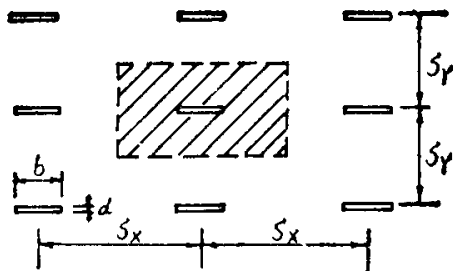


图 1-7 筋条分布状态和分担范围

S_y ——筋条排列的垂直间距； S_x ——筋条排列的水平间距； b ——筋条宽度； d ——筋条厚度。

量，保证筋条在受拉后不被拉断和拉伸应变量能控制在一定范围以内。

由于在加筋土结构中筋条承受拉力，所以也常称为拉筋（以下均称“拉筋”）。拉筋的工作，类似将结构锚固在稳定土体中，所以稳定区也常被比拟为锚固区。拉筋在稳定区的长度称为锚固段长度或有效长度；而在不稳定区的长度相对地称为无效长度。上述对加筋土结构工作原理的分析，基于将加筋土结构视为锚固系统的认识，近年来经国内外学者的进一步研究，对此有了一些新的认识，这将在下几章中加以介绍。

§1-2 加筋土强度特性

加筋土结构可以看作是各向异性复合材料，通常采用的拉筋材料，其弹性模量远远大于填土，在这种情况下，拉筋与填土的共同作用，包括填土的抗剪力、填土与拉筋的摩擦阻力及拉筋的抗拉力作用，使得加筋土的强度明显提高。这可从三轴试验中得到验证，一般砂土在单轴压力下受到压实，由于侧压力而发生的侧向应变可达到轴向应变的一半以上（图 1-8(a)），如在土中布置了拉筋，由于拉筋对土的

摩擦阻力约束了土的侧向变形，则土的侧压力被拉筋与土的摩擦阻力所平衡或减弱，于是使土的侧向变形消失或减少，相当于在土中增加了一个对侧压力的反力，使土的强度提高了。亨利·维达尔最先在三轴试验中得出，加有带状拉筋的砂土，其强度可比不加拉筋的砂土强度提高到原强度的四倍左右（图 1-8 (b)），虽然强度提高多少与拉筋布置的密度有

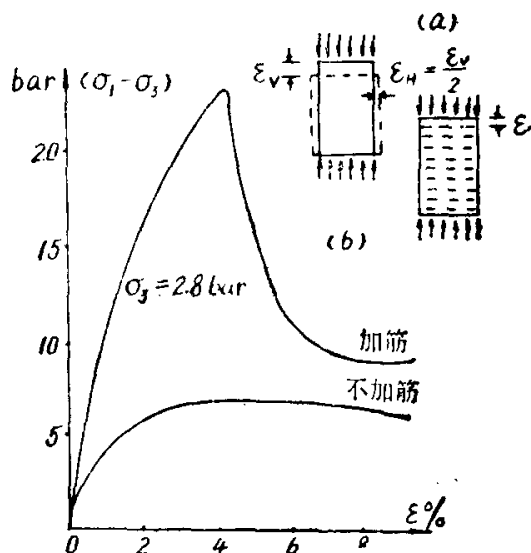


图 1-8 加筋砂土与无筋砂土的三轴试验

关，但显著改善了土原来的力学性质是无疑的。因之，加筋土的强度受着土的抗剪强度、土和拉筋间的摩擦系数、拉筋的抗拉强度以及拉筋数量的控制。在加筋土受力变形过程中可能出现三种极限状态：

1. 拉筋抗拉的极限状态；
2. 拉筋与填土间摩擦——粘着的极限状态；
3. 填土抗剪的极限状态。这种状态只有当拉筋的弹性模量与填土相近时，才有出现的可能。

上述情况可以用摩尔-库仑破坏理论分析，从而认识强度提高的原理。当土体受到垂直应力作用时，在拉筋中将产