

## 中文摘要

加筋土技术自60年代问世以来，国内外的学者们对其基础理论进行了大量试验研究。目前，国内外对于加筋土的界面特性试验仍然以直剪试验与拉拔试验为主。但理论研究远落后于工程实践，还需要不断地改进试验方法与手段。加筋土结构的设计需要了解筋土界面特性，其中筋土界面摩擦力的大小及变化是进行结构稳定分析最重要的参数。因此，土工合成材料与填料的界面作用特性直接决定加筋土工程的内稳定性，土工合成材料与填料之间的相互作用成为揭示加筋材料加固机理的最关键的技术课题。

为了能更为科学的研究土工合成材料的界面特性，比较直剪试验与拉拔试验各自的特点，得出它们之间的关系，根据土工合成材料的试验要求，自行研制了直剪试验箱，通过测试此设备的性能完全能满足本次试验的要求。

本文通过直剪试验研究了加筋土壤料为不同土质的情况下，各种规格的土工合成材料的界面特性，分析土质的不同对加筋效果的影响，并与拉拔试验的结果进行比较分析。还研究了土体不同容重对加筋效果的影响。通过对格栅界面特性的研究，给土工合成材料的生产和加筋土工程设计提供建设性的意见。

**关键词：**土工合成材料，加筋土，挡土墙，直剪试验，界面特性

## **ABSTRACT**

Since the technique of reinforced soil appeared in 1960's, the scholars carried out a lot of researches and tests for its basic theory. Recently, the main tests for the interface characteristics of reinforced soil are pullout test and shear test. However, the academic research is more laggar than practice of engineering. It is necessary to ameliorate the method of test. We should know the interface characteristics of reinforced soil to design the frame of it. The most important parameter is the magnitude and change of friction. So the interface characteristics of the geosynthetics and soil directly determine the interior stability of the reinforced soil project. The interaction between the geosynthetics and soil becomes the most key technological subject of strengthening mechanism of geosynthetics.

In order to scientifically research interface characteristic of geosynthetics, compare the characteristics of pullout test and shear test, get their relationship, we have developed and drawn the testing machine by myself according to the test demand for the geosynthetics, by the test this equipment can totally meet our request.

This paper studies the interface characteristic of the geosynthetics of different specifications through shear test under the different situations of soil property. The paper analyzed the impact on the result of reinforced of different soil property, especially disturbed layers of thickness and mechanism of destruction with reinforced soil and compared the result with that of pullout test. It also studied the different closely knit degree of soil body it to influence with reinforce result. The paper provides the constructive suggestion for the production of geosynthetics and the reinforced soil engineering design through the study on interface characteristic.

**KEY WORDS:** Geosynthetics, Reinforced soil, Shear test, Interface characteristics

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 张锐 签字日期：2006 年 1 月 20 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名： 张锐

导师签名： 王海

签字日期：2006 年 1 月 20 日

签字日期：2006 年 1 月 20 日

# 第一章 绪论

## 1.1 背景

土工合成材料(Geosynthetics)加筋土作为一种复合材料及新型加固技术，被称为“岩土工程界的一场革命”，它具有施工简单、造价低廉、美化环境的特点，为岩土工程提供了一种经济而实用的加固手段。加筋增强土体的基本原理是：在软弱土中加入抗拉筋材，通过筋土界面间的应变协调(此处仅指应变的相互影响作用，并非完全应变协调)约束土体的侧向变形，使土的抗压强度和筋材的抗拉性能结合起来，从而改变了原软弱土体性状，力学性能得到改善，提高了土体的整体强度。

加筋土技术的推广和应用起始于 1965 年法国工程师 Henri vidal 提出的加筋土的概念和设计理论。起初的加筋材料主要是金属材料，由于金属材料抵御化学腐蚀的能力较弱，而且成本高，其使用范围受到较大限制。

土工合成材料是以人工合成的聚合物，如纤维、塑料、合成橡胶等为原料制成的新型岩土工程材料，将其置于土体内部、表面或土、砂、碎石等之间，发挥排水、反滤、加筋、保护或防渗作用。从上世纪 80 年代初我国开始将土工合成材料应用于加筋土工程，到 90 年代中期，其应用范围已涉及铁路、公路工程的软基处理，加筋挡土墙，加筋土桥台，加筋陡坡，加筋地基等。近年来，在海岸工程中也得到迅速推广应用。但是，目前国内在现场观测、模型试验和理论研究方面还相对滞后。

因此，尽快完善加筋土的计算方法及设计理论成为当前迫切需要解决的关键问题。

加筋土工程以其显著的技术经济效益使其迅猛发展，我国从 1979 年至今，建筑的加筋土工程数以万计。当初引进技术时，主要是用拉筋带修建加筋土挡墙，后来应用范围发展到以土工格栅加固软土地基，修建挡土墙、边坡、护岸和防止路面开裂等等。

在土工合成材料加筋土工程中，利用筋材的抗拉特性，通过加筋材料与周围土体间的摩擦和嵌固作用，改变了加筋土内部应力及位移场的分布，使土的强度及稳定性得到提高。因此，土工合成材料与填料的界面作用特性直接决定加筋土工程的内稳定性，所以土工合成材料与填料之间的相互作用成为揭示加筋材料对

土体加筋加固机理的最关键的技术课题。国外许多学者 (Holtz, 1977; Myles, 1982; Miyamori, 1986; Williams, 1986; Degoutte, 1986; Ochiai, 1992; Bergado, 1992; Hausmann, 1994; Koutsourais, 1998), 利用直剪试验和拉拔试验研究了土工合成材料与填料的界面作用特性。其中, Hausmann 和 Clarke(1994) 是通过直剪试验和拉拔试验对塑料拉伸土工格栅与粉煤灰的界面特性进行初步研究<sup>[1-11]</sup>。国内学者 (赵爱根等, 1987; 李海芳等, 王吉力等, 1992; 吴景海, 陈环等, 2001; 施有志, 2003) 也通过直剪试验和拉拔试验研究了国产土工合成材料与填料的界面作用特性<sup>[14-24]</sup>。

鉴于当前国内外的土工合成材料与填料的界面作用特性研究现状, 国内外很多学者都对现有的界面特性成果存在争议, 观点难统一, 这可以从多次国内、国际土工合成材料会议上可以看出, 存在着很多不足之处。急需要通过科学试验更深层次的对土工合成材料与填料作用的界面作用特性进行研究。

## 1.2 土工合成材料的分类及其功能简介

### 1.2.1 土工合成材料的分类

土工合成材料大体可以分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料四大类, 每类材料又都有各自的相关产品。

#### 1. 土工织物

土工织物是采用编织技术生产的透水性土工合成材料, 他的特点是重量轻、整体连续性好。可作成较大面积的整体, 长度可达数百米乃至上千米。并且施工简便、抗拉强度高、耐腐蚀和微生物侵蚀性好, 根据制作方法的不同又可分为以下几种:

- (1) 编织物是采用缠结、扎结等工艺制作;
- (2) 机织物是用机器编织而成的具有经、纬线的土工织物;
- (3) 无纺织物是采用机械固结法、化学粘结法将纤维集成在一起的织物;
- (4) 复合织物是采用缝制、针刺方法将上述产品组合在一起的织物。

#### 2. 土工膜

土工膜是一种不透水的土工合成材料, 可分为沥青土工膜和聚合物土工膜两类。沥青土工膜主要为复合型的。聚合物土工膜视原材料的不同分为塑性土工膜和组合型土工膜。

土工膜的主要特点是透水性极低, 其工程特性随类别、制作方法、产品类型的不同而发生很大的变化。土工膜还有很好的弹性和应变能力、良好的耐老化能

力，尤其适用于水下工程。

### 3. 特种土工合成材料

土工格栅、土工网、土工模袋、土工垫和土工室以及轻型土工合成材料统称为土工合成材料。土工格栅是经过拉伸工艺形成的具有方形或矩形格栅的聚合物板材，主要用作加筋材料。土工网是合成材料条带编织或合成树脂压制成的具有较大孔眼、刚度较大的网状合成材料，是主要的加筋材料。土工模袋是一种双层聚合物化纤织物制成的袋状材料，他可以代替模板成型混凝土或砂浆。土工垫和土工室是合成材料特制的三维结构，前者多为透水聚合物网垫，后者多为蜂窝状或网状三维结构，主要用于护坡或植草绿化。

### 4. 复合型土工合成材料

#### (1) 复合土工膜

土工膜——土工织物组合，称为复合土工膜，主要用于防渗、加筋和增加与土面之间摩阻力的作用。

#### (2) 土工复合排水材

土工复合排水材是以无纺土工织物和土工网或不同形状合成材料芯材组成的土工应用的排水材料，常用的入塑料排水板，用于软土地基处理，可加速排水固结<sup>[13]</sup>。

## 1.2.2 土工合成材料的功能

### 1. 过滤功能

把土工织物置于土体表面或相临土层之间，可以有效的阻止土颗粒的通过，从而防止土颗粒过量流失而造成土体的破坏，同时允许土中的水或气体穿过织物自由排出，以免由于空隙水压力的升高造成土的失稳破坏。

### 2. 排水功能

较厚的针刺无纺织物和具有多孔隙的复合型土工合成材料多可以起到排水作用，在土体中形成排水通道，把土中的水分汇集起来，并沿着材料的平面排出，增强土体的水稳定性和抗冻性。

### 3. 隔离功能

土工织物和土工膜都可以起到隔离作用。把两种不同粒径的填料(如土、砂、碎石等)与其他结构分隔开来，从而保持材料和结构各自的完整性，或避免发生土质流失现象。这种功能用于公路路基与地基之间、土石混合坝、石笼及沙袋与软土地基之间的隔离等。

### 4. 加筋功能

加筋功能可以有效的分布土体的应力，增加土体的强度，限制土体的侧限位

移，提高土体的整体性及稳定性。可以利用土工格栅加筋粒料垫层处理公路软土地基，可以有效的控制土基的工后沉降，避免路基不均匀沉降造成路面开裂破坏。随着土工合成材料的日益发展，产品形式的日益增多，其分类和功能也将日趋复杂，因此，他是不能按某些分类进行限制的。

### 1.3 土工合成材料试验研究现状

#### 1.3.1 试验研究

加筋土结构的设计需要了解筋土界面特性，其中筋土界面摩擦力的大小及变化是进行结构稳定分析最重要的参数。目前，国内外对于加筋土的界面特性试验仍然以直剪试验与拉拔试验为主。下面分别论述直剪试验和拉拔试验的方法与成果。

##### 1. 直剪试验

###### 1) 试验仪器及材料

一般是由有机玻璃或铁板做成的剪切盒，尺寸一般在  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \sim 300\text{mm} \times 300\text{mm}$  左右，垂直加荷和水平加荷方式各有不同，法向压力有利用杠杆系统的，也有用螺旋千斤顶施加的；水平剪切力，有利用蜗杆加手轮的，也有利用变速电动机控制的螺旋千斤顶施加的。在直剪试验中，随着剪切位移的产生，上下盒相互错动，当上下盒尺寸相同时，随着剪切变形的逐渐增加将导致试验过程中筋材与填料接触面积逐渐减小，由于接触面积的变化，对试验结果产生影响，为消除接触面积变化对试验结果的影响，所以有些试验，采取上下试验盒大小不一样的试验方法，试验装置见图 1-1。

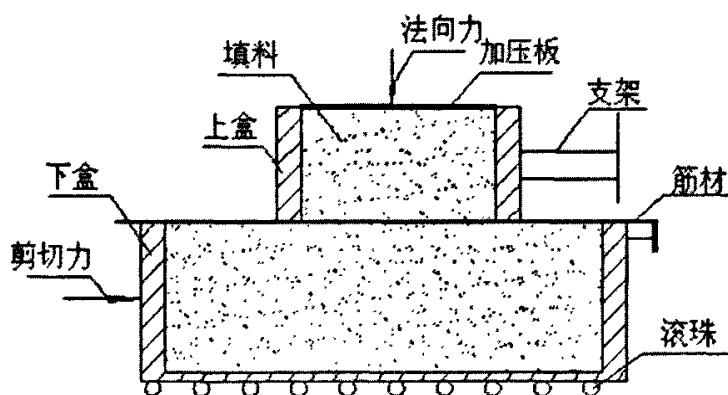


图 1-1 直剪试验装置示意图

国内试验采用的加筋材料大都是国产的土工合成材料，有聚乙烯单向土工格栅、聚丙烯双向土工格栅、聚乙烯土工网、涤纶纤维经编土工格栅、玻纤土工格栅和有纺土工织物、针刺无纺土工织物等等。

填料土采用砾石、粗砂、残积土和粉煤灰等。

## 2) 试验方法

上、下盒内均为填料土，土工合成材料放在上下盒之间并固定，施加垂直荷载，使土样固结一定时间后，再施加水平荷载，剪切速度一般为 $0.5\text{mm/min}$ 。通常施加4组以上不同垂直荷载。

## 3) 已有试验成果

1986年，艾金布德和拉克制造了两种简单的直接剪切仪，采用四种类型的土(无粘性土、粘土)、十九种土工织物(织造和非织造)以及二种土工膜进行试验，发现土与土工织物之间的摩擦角小于土本身的摩擦角<sup>[5]</sup>。1987年，威廉姆，豪维利汉，莱佛柳等(Lafleur, et al)报导了同样的试验结果，同时还发现密实砂与土工织物反复剪切后，所发挥出的摩阻力几乎与疏松状态下的相同<sup>[4]</sup>。

1986年，赵爱根用应变式直剪仪测定了上海产和天津产针刺型土工织物与高岭土及标准中砂接触界面的抗剪强度。试验发现，土与土工织物界面剪应力—剪切位移曲线呈非线性性状，界面剪应力的发挥需筋材和土体发生一定的相对位移，影响土与土工织物界面相关系数的主要因素是材料的物理、力学性质；当土工合成材料相同时，上覆法向应力和试验剪切速率对界面相关系数也有一定影响。砂与土工织物界面抗剪强度线呈折线；粘土与土工织物界面抗剪强度线呈直线，而且粘性土的固结状态对界面抗剪强度有明显影响，欠固结粘土的界面强度比正常固结粘土的界面强度值要小<sup>[14]</sup>。

1988年，李海芳和李放芝用应变控制式直剪仪(剪切盒尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 三种)做了土与土工织物接触界面间摩擦特性试验，得出结论：剪切盒的尺寸对界面的摩擦角有一定的影响，尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 时，界面摩擦角有较大值。但土工织物的不均一性对界面特性的影响比较大，建议尽量采用较大尺寸的剪切盒为好。

1989年，姚代禄在研究加筋土挡墙筋与土摩擦性质时发现：加筋后，筋材与土之间的剪阻力比原压实土的剪阻力有所降低，但加筋却增加了土的整体强度；土与加筋的摩擦性质是线性关系，符合摩尔—库仑强度包线的直线表达式。建议在加筋土挡墙的设计中，对粘性填土要考虑粘聚力作用<sup>[15]</sup>。

2003年，华侨大学的施有志、马时冬用直剪试验研究了土工格栅的界面特性。剪应力随着剪切位移的增大到剪切位移达到 $6\text{—}8\text{mm}$ ，达到最大值<sup>[19]</sup>。

## 2. 拉拔试验

### 1) 试验仪器及材料

试验仪器有应变式和应力式两种。拉拔试验箱大小也各异，垂直加载方式，一般利用千斤顶配量力环，水平荷载有利用机械千斤顶配压力传感器、施加砝码等，试验装置见图 1-2。

国内试验采用的加筋材料大都是国产的土工合成材料，有聚乙烯单向土工格栅、聚丙烯双向土工格栅、聚乙烯土工网、涤纶纤维经编土工格栅、玻纤土工格栅和有纺土工织物、针刺无纺土工织物等等。

填料土采用砾石、粗砂、残积土和粉煤灰等。

### 2) 试验方法

试验盒固定，逐级施加水平荷载，拉拔土工合成材料，力的大小随试验仪器及要求而定。

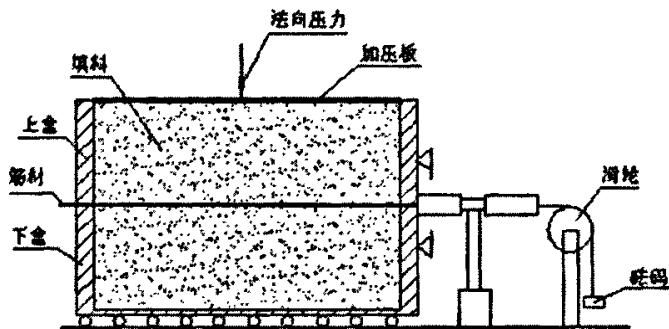


图 1-2 拉拔试验装置示意图

### 3) 已有试验成果

1986 年，俄乃斯特·柯劳斯和摩力普·得尔玛斯等在大型剪切盒(500mm × 250mm)做了剪切试验和拉拔试验，得出结论：在所有情况下，拉拔试验所获得的相关系数小于剪切试验所获得的值；土工织物自身的特性对土—土工织物系统的剪切强度有影响，其主要影响因素是织物的孔径和变形模量。

1992 年，王吉力和马时冬通过拉拔试验和直剪试验研究了土与土工织物接触界面间摩擦特性，获得以下初步成果：砂与土工织物的共同作用产生不为零的凝聚力，其大小随着砂密度的增加而增大。砂与土工织物之间的摩擦角小于砂本身的摩擦角；在所有情况下，拉拔试验所获得的土与土工织物之间的相关系数皆小于剪切试验所获得的相关系数值；在加筋土工程中，土与土工织物之间有剪切(粘结)和拉拔(锚固)两种形式。因此，设计时要针对不同的工程问题，选用剪切作用参量或拉拔作用参量<sup>[16]</sup>。

1997 年, 阎澍旺和英国的 Ben Barr 合作对土工格栅与土相互作用进行有限元分析, 分别做了小型格栅拉拔试验和大型格栅拉拔试验, 通过有限元分析方法, 采用小型拉拔试验所取得的计算参数, 对大型拉拔试验进行了分析计算, 并与实验结果进行了比较, 计算结果与试验数据吻合较好。从试验可以看到, 土对处于拉拔状态格栅的阻力由两部分组成: 土与格栅的表面摩阻力以及土对横肋的阻力, 其发挥程度与格栅变形的大小有关。摩阻力在较小的变形时即已达到峰值, 此后横肋阻力随格栅变形的进一步增加而逐渐占主导地位, 承担着 90% 左右的荷载<sup>[17]</sup>。

2001 年, 陈环教授和吴景海等人用自行研制的试验装置对土工合成材料与土界面作用特性进行了研究, 对不同土工合成材料分别做了直剪试验和拉拔试验, 比较了几种材料与不同填料的界面特性, 得出了一些对工程实践颇有价值研究结果, 并且验证了前人的研究成果<sup>[18]</sup>。

综上所述, 拉拔试验测得的摩擦系数大于直剪摩擦试验值, 这是因为在直剪摩擦试验中, 筋材只有一个面与填料产生摩擦作用, 而在拉拔试验中则有两个面。填料为砂砾石时, 比值较大, 这是因为格栅孔眼对砂砾石颗粒的咬合、嵌固作用较强。

### 1.3.2 计算方法的研究

目前, 对加筋土工程的设计计算, 主要有极限平衡法和有限单元法两种方法<sup>[20]</sup>。从分析思路上分, 通常有两种思路, 一种是把加筋土看成由土与筋材两种不同性质的材料组成, 两者通过界面相互影响、相互作用; 另一种是把加筋土看成宏观上均匀的各向异性复合材料。第一种方法需要筋材、土、界面三种本构关系模型和相应计算参数, 当加筋层较多时, 计算的工作量较大。后一种思路的缺点在于复合材料是各向异性的, 其刚度矩阵计算、方程求解都比较困难, 而且它的各向异性复合材料参数也难以获得。所以现在用的比较多的还是第一种, 计算时皆要列入土与筋材的界面反应特性。

在用极限平衡法和有限元法中, 第一种思路是最常见的。目前人们提出的极限平衡法有很多, 对挡土墙的计算方法如下:

经典朗肯法: 假定土体主应力方向为竖直和水平方向, 最大垂直应力等于上覆土重, 加筋材料承担上下两个 $\frac{1}{2}$ 间距的水平土压力。潜在破裂面为与墙底水平面成 $45^\circ + \varphi/2$  的斜面。朗肯方法也称之为楔形体分析法。

半经验的 0.3H 法: 假定潜在破裂面为折线型, 在墙顶宽度为 0.3H(H 为墙高)。下部为一与墙底水平面成 $45^\circ + \varphi/2$  的斜面。该方法又称有粘聚力的重力分析法或粘聚重力分析法。

对加筋土边坡，常用计算方法如下：

直线滑动楔形体破坏分析法：假定破坏面为直线，土坡破坏以楔体形式下滑。这种方法对垂直边坡来说，等价于朗肯方法。

折线滑动楔形体破坏分析法：即假定破坏面是由两条直线组成的折线，土坡破坏以楔体形式下滑。此种方法相似直线滑动楔体破坏分析法。

圆弧滑动法：假定破坏面为圆弧，筋材中的力为土坡提供一个附加抗滑力矩。可以用瑞典条分法或毕肖普法计算其安全系数，这是一种较为常用的方法、其中又分瑞典法和荷兰法。

对数螺旋线滑动法：假定滑裂面为对数螺旋线，有一些以此为基础的改进方法：Leshchinsky 和 Volk 在假定滑裂面为对数螺旋线的同时还考虑了筋材中力方向的改变。魏戈峰在其研究工作中也做了相应的考虑<sup>[21]</sup>。

位移法：Gourc 等提出了位移法。位移法以极限平衡理论为基础，假定织物的作用为一嵌压膜，考虑了织物变形以及土与织物间的相互作用关系。位移法对加筋土坡和挡土墙都是适用的。

Juran 法。Juran 提出了一种应变相容分析的方法(strain compatibility analysis)。

此外，王钊、刘祖德等利用弹性理论和极限平衡分析所提出的方法对加筋挡土墙及加筋土坡的设计计算也具有重要的指导意义。在加筋土计算方法上，Scholsser、Segrestin 等都做过许多工作，osman 也用能量法原理分析加筋土结构的内部稳定性。

极限平衡法是目前广泛采用的方法，它的优点是能给出安全系数的指标；设计时仅需考虑强度方面的参数。计算工作量较小，而且与素土边坡及挡墙的分析方法相近，易为工程界接受。但它偏于保守，易造成浪费，对筋材强度、许可变形等取值具有很大的任意性；所研究的是假想的极限平衡状态而不是实际工作状态。没有充分揭示土与织物的相互作用机理，不能充分考虑各种影响稳定的因素；目前各种计算结果与实际情况出入较大，此外这种计算方法不能计算土体的应力和变形，也不能模拟施工进程。

有限元法一般是分别考虑土、筋材及二者界面的应力应变关系，应用表示这些关系的本构模型和有限元基本方法进行分析计算。把筋土看成两种不同材料并考虑其相互作用关系的思路比较直观，应用也较为广泛。由于有限元法要进一步表征土、筋材的应力—应变关系的本构方程使计算更为复杂，除对特殊问题的探讨，目前应用尚不普遍。所以有些学者，针对某些情况，如地基填料、纤维加筋土等，建议采用第二种思路的方法，即把由筋与土组成的加筋土复合体看成一种均质材料，土与筋材的作用表现为内力而不对其进行具体的应力分析。在这种

思想指导下的算法也有极限平衡法、结构力学或弹性力学解析法、有限元法等。

但是，长期以来的理论与实践均表明，土的力学性复杂多变，而土工合成材料更是应力一应变非线性，具明显的蠕变性和时温效应，测试指标又是离散性大的材料，加上埋在土内时的力学性状与无侧限时的差别很大，故企图单纯凭借力学分析与理论计算来用定值法设计加筋土体，较为困难。为此，有的情况下，特别是以集中荷载和往复荷载为主的加筋土，半经验或经验方法仍然是目前工程设计中采用的主要方法。这类方法的建立有赖于原型观测的大量积累和合理的反馈分析。

## 1.4 目前存在问题

首先，从产品生产上来看，目前我国的土工合成材料产品与先进国家相比，存在着制造工艺与质量上的差距，产品离规格化和系列化有一定的距离，并且对产品的基础理论研究也不够，新产品的开发比较缓慢。我国土工合成材料应用的经验和技术大体上是仿照外国，土工合成材料与其他建筑材料相比，应用经验比较多，相对的理论研究比较少，还很不成熟。理论落后于实践造成了现有规范的局限性，使土工合成材料的特点和长处没有充分体现。测试标准和方法尚不完善。为使土工合成材料在实际施工中更好的应用，应加强土工合成材料计算理论和试验方面的研究，特别是有关界面特性的研究。

还有，虽然前人的研究取得了一定的成果，但只是从表面得出一些与相应材料有关的数据，由于受到自身试验条件的限制，例如采用的试验仪器也都相对较小，误差较大，很多理论与实际不相适用，没有更深层次的对土体与土工合成材料的作用机理进行研究。界面摩擦力是设计、计算加筋结构物的重要参数，它应模拟工程实际情况，经现场、室内的界面摩擦试验和拉拔试验确定，不应仅由经验推测，所以很有必要加强土工合成材料的界面特性的研究。

我们虽已经知道土与土工合成材料之间的摩擦力由几个方面组成，但是各占多大的比重，哪部分起主要作用还不清楚，还有土的扰动层厚度，以及其扰动变形和界面特性参数之间的关系也是目前急需要解决的。这些都会对土工合成材料的设计和应用产生有很大的影响。这也是今后试验研究的一个发展趋势。

此外，还必须加强加筋土计算方法的研究，现有极限平衡法虽比较成熟，但对加筋材料作用机理的考虑还存在很多问题，由此造成的计算结果远小于实际情况，使工程设计很难应用。有限元法是比较先进的方法，也是目前研究较多的对象。还有上面我们提到的第二种思路的计算方法也是加强研究的对象。

土工合成材料的广泛应用是在 20 世纪中期以后，80 年代进入我国。但它发

展迅速，并渗入到土建工程的各个领域。加筋是土工合成材料的主要功能之一，在陡坡、软土地基加固及修建加筋土挡墙中具有重要的作用。目前土工合成材料的加筋机理不是十分清楚，计算方法不成熟，理论研究落后于工程实践。因此，需要进行更深入的研究。

本文通过直剪试验，研究不同土质条件下各种型号格栅的界面特性，并对试验结果及现象进行分析，与拉拔试验的结果进行比较分析，还对在加筋土工程中，土工合成材料的加筋效果进行了探讨。

## 1.5 本文的主要研究工作和意义

鉴于先前国内外研究土工合成材料的界面特性存在不少的缺点和不足，本文将通过拉拔试验和直剪试验对土工合成材料的界面特性进行分析研究。

目前，虽然已有若干利用拉拔试验和直剪试验对土工合成材料的研究成果，但是由于试验设备及方法的局限性，试验结果的分析并未取得系统的、有实用价值的结果。对土工合成材料界面特性的试验研究更是缺乏。鉴于目前的研究现状[31~60]，本文进行的主要工作如下：

- 1) 对已有的先进的拉拔试验机进行改进，自制了直剪试验箱，使其不仅能完成拉拔试验，也可以较好地完成直剪试验；
- 2) 土工合成材料加筋效果随不同土质的变化关系；
- 3) 土工合成材料加筋效果与密实度的变化关系；
- 4) 提出对土工合成材料进行直剪试验的注意要点及建议；
- 5) 提出在实际工程运用中，运用土工合成材料的建议。

对土工合成材料的界面特性研究尤为重要，搞清楚土工合成材料的界面特性，不仅对研究加筋土的加筋机理有重要意义，还给加筋土工程的设计与计算提供更为可靠的科学依据，可以验证和推导出更为科学的理论计算公式。研究土工合成材料的界面特性还能更好的指导土工合成材料的生产，指导生产工艺的改进，节省原材料，提高产品质量，增加加筋土工程的安全性。

## 第二章 直剪试验设备的研制

### 2.1 试验设备调研

#### 2.1.1 加筋土试验的现状及问题

土工合成材料是一种较为新兴的土工建筑材料，所以国内对土工合成材料尚无统一的测试标准，国际比较著名的标准有：国际土工合成材料学会(IGS)，美国材料试验学会(ASM)，国际标准组织(ISO)，德国标准化研究所(DIN)等。国内外的科研单位设备都是根据自身的试验要求，自行设计加工。这也就导致试验设备的多样性，且各设备的性能也高低不等。由于没有统一的规范，所以至今国内外没有一个土工仪器厂生产过这种类型的设备。根据目前情况很有必要研制一种国际先进的试验机，既能完成拉拔试验，又能完成相同条件的直剪试验，以便对二者的结果进行对比，要求此设备能吸收当今较先进设备的优点，并排除其缺点，为科学试验研究以及以后制定规范提供借鉴。

本次试验计划利用具有国际先进水平的试验设备，此设备至少能满足现行土工合成材料试验规范所需的最高标准，拉拔速度必须保持匀速，速度范围  $0.5\sim 5\text{mm/min}$ 。同时，设备还需能自动施加并调节垂直荷载，保持垂直压力不变的特点，数据采集方面要求实现全自动采集并绘制数据曲线，达到整个试验过程的全自动化。

根据本次试验的要求及设备的研制计划，首先对国内各科研单位的拉拔试验设备进行了调研，经过调研发现拉拔试验设备各种形式都有，从水平加载形式上分，主要有应变式控制和应力式控制两种，以前者为主。应力式设备都比较简单，缺点突出。

国内外多数科研单位的拉拔设备采用的是应变式控制方式，绝大多数单位的拉拔试验设备都比较简单，普遍存在上面提到的缺点。也有个别单位投入了不少人力物力，制造出的设备与同类设备比还是相当先进的，但不是纯粹的拉拔试验设备，针对性不够强，所以从控制拉拔试验的精度要求等上面来说，还是存在缺陷。另外，国内外的许多设备虽然具备了一定的优点，但有的投入太大，而且比较笨重，不具推广性。

- 1) 试验台简陋，一般为木制的，箱体材料也多为木质，整体框架的强度不能满足试验要求，即使是钢制的，普通角钢以及这种螺母连接的方式，

也存在很多缺点，变形太大，不稳定，试验中箱体容易发生变形破坏。

- 2) 难以控制水平拉拔速度保持匀速，而且也达不到现行规范规定的拉拔速度应控制在  $0.5\sim5\text{mm/min}$ ，控制不方便，各种量测精度也不够。而且所受拉力不均匀，将会对试验结果的可靠性产生很大影响。
- 3) 不能自动补压，无法自动调节上覆压力，严重不能满足试验要求。
- 4) 无观察视窗，不能观察拉拔过程中土体扰动的情况。
- 5) 加荷及数据采集根本不能实现自动化采集，数据记录完全人工记录，采集量不够，后处理也麻烦。

以下是国内外一些仪器的照片。

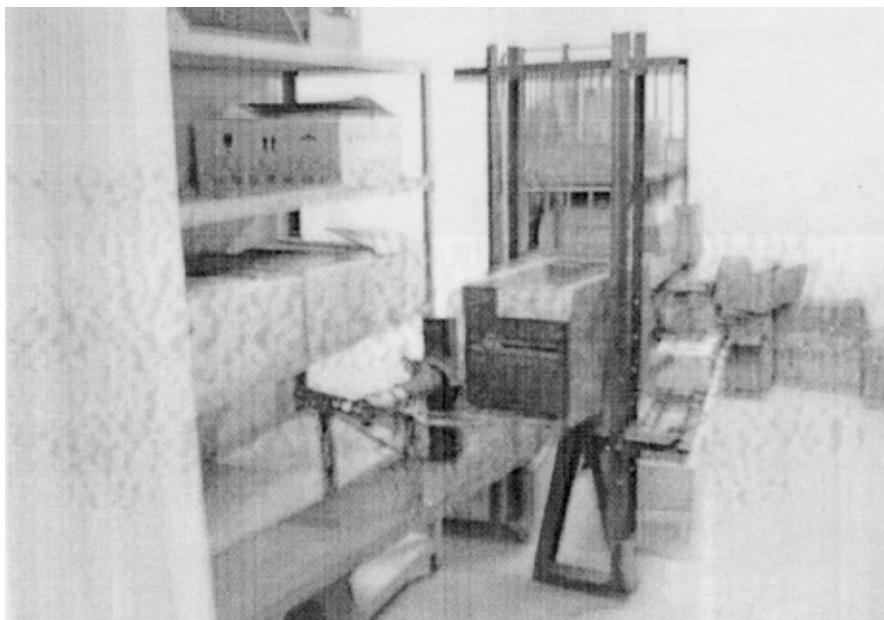


图 2-1 拉拔试验机雏形

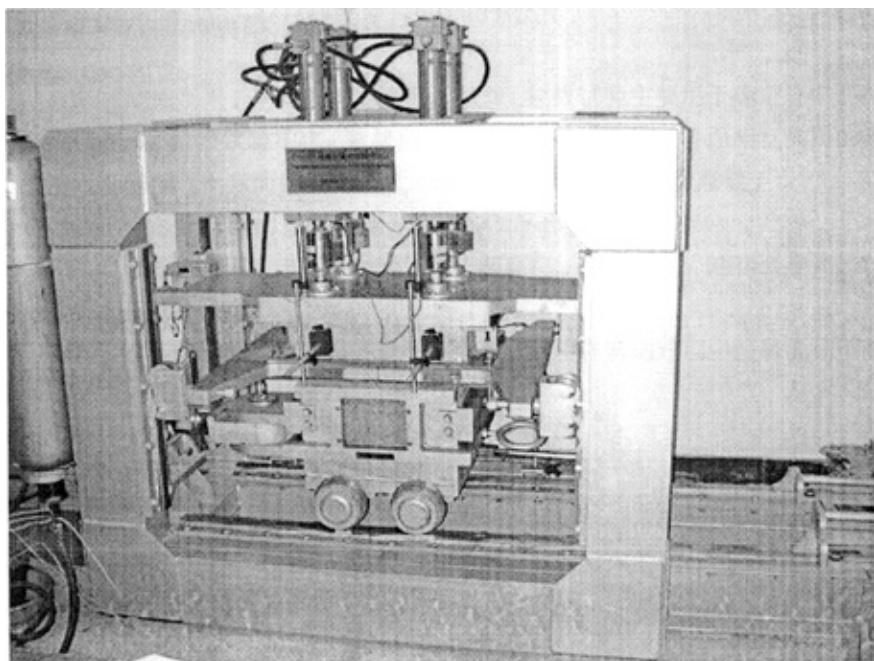


图 2-2 接触面剪切仪（清华大学）

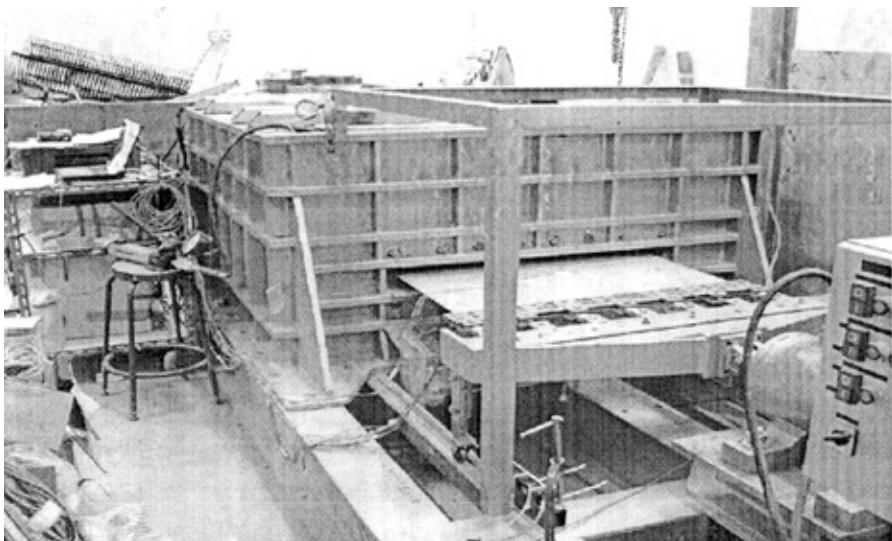


图 2-3 大型拉拔试验机（新加坡国立大学）

此设备的研制应不仅吸收国内外现有较为先进设备所具有的优点，还能克服它们的缺点，同时还应创新出现有所有设备所不具有的优点，能达到国际领先水平。

## 2.1.2 直剪试验的缺陷

直剪试验主要用于土与筋材界面强度验算，拉拔试验主要用于确定土中筋材地抗拔强度。和拉拔试验相比，直接剪切试验侧重于模拟筋土界面相互作用的抗剪特性，可获得筋土界面的粘聚力  $C_a$  和摩擦角  $\delta$  或视摩擦剪切系数  $f^*$ 。

目前，国内外所做的直剪试验一般存在以下一些缺陷：

- 1) 在法向应力作用下，土工织物会下陷，即存在一碗状拱面，这样会导致筋材与土体界面应力不均匀分布，剪应力非平面。
- 2) 由于常规直剪试验的上盒与下盒面积相等，致使在剪切过程中接触面积不断减少，以致：

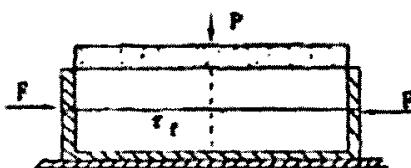
①土工织物与土界面面积不断减少；

②正应力不稳定；

在直剪试验中，土样所受正应力是由作用于试样形心顶部的竖向荷载  $p$  通过刚性传压装置产生的，见图 2-4。剪切开始前，剪切盒内的试样上表面受大小均等的正应力  $\sigma$ ，见图 2-5。

$$\sigma = \frac{p}{A_0}$$

式中：  $p$  为垂直压力；  $A_0$  为初始剪切面面积。



$\tau_f$ ：单位面积上的剪应力；F：作用于剪切盒上的剪力。

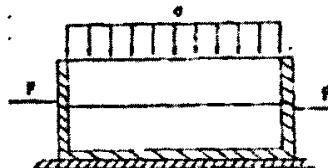


图 2-4 理想剪切面示意图      图 2-5 剪切开始时各点正应力分布示意图

当剪切开始后，由于上下剪切盒发生了相对位移，使作用于上剪切盒顶部的集中力  $p$  的作用线偏离了剪切盒内试样的形心位置（见图 2-6），从而导致剪切盒内试样所受正应力的大小随剪切位移的增加不断发生变化，使各点正应力的大小发生了重新分布，而不再是剪切前各点大小均等的正应力，见图 2-7。由于上下剪切盒内的土样产生相对位移，此时，上剪切盒内土样相对于下剪切盒内土样移出的部分相当于悬臂梁，见图 2-8。作用于 AB 段的线性荷载使 AB 段试样产生绕 B 点的力矩，从而使 AB 段试样形成绕 B 点顺时针转动的趋势。此时，A 点的线性荷载  $\sigma_A < \sigma$ ，而 B 点的线性荷载  $\sigma_B > \sigma$ 。由力学平衡可知，当剪切位移产生后，作用于剪切盒内土样有效剪切面上的正应力大于剪切开始时的正应力，并随剪切位移的增加和有效剪切面积的减小不断增大。同时，由于剪切盒内土样偏心受力导致

有效剪切面上正应力的非均匀分布。

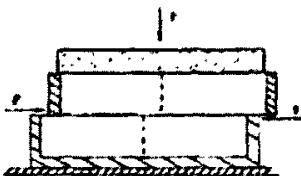


图2-6 试样偏心受力示意图

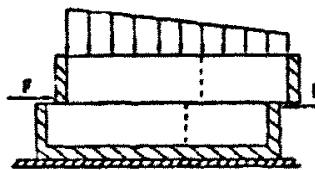


图2-7 剪切开始后各点正应力的重新分布图

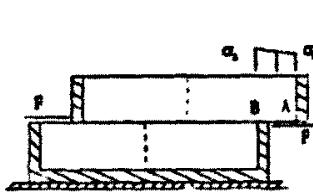


图2-8 上剪切盒相对移出部分受力示意图

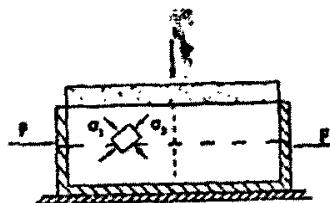


图2-9 主应力示意图

试验在施加剪应力前，试样内最大主应力 $\sigma_1$ ，为作用于试样上的竖向应力 $\sigma$ 。因试样处于侧限状态，故 $\sigma_2 = \sigma_3 = k\sigma_1$ ，( $k$ 为侧压力系数)。有学者认为，当剪应力施加后，主应力的方向发生偏转并随剪应力的增大偏转方向逐渐增大，见图2-9。

- ③剪应变分布是不均匀的，这与库仑公式的应用条件存在差异；
- ④在剪切过程中，垂直荷载发生偏心，致使应力计算误差加大。
- 3) 由于剪切位移有限，不能得到准确的残余应力值。
- 4) 剪应力集中及剪应力分布不均匀。

目前，国内普遍采用的应变控制式直剪仪的剪切盒为圆形。在试验资料的分析中，假定试样所受剪应力均匀分布。但实际上并非如此。土样剪切时先从试样边缘开始，而圆形剪切盒一开始则在剪切盒边缘处形成了明显的应力集中现象，靠近剪力作用于剪切盒的作用点处剪应力最大，向两侧分布逐渐减小，并且有使试样向剪力作用点处挤密的趋势，见图2-10。在整个剪切过程中，虽然剪力作用于剪切盒作用点处的剪应力在逐渐减小，其两侧的剪应力在逐渐增大，但始终存在剪应力分布不均匀的问题。此外，整个剪切面上在剪切过程中也始终存在剪应力分布不均匀的问题。

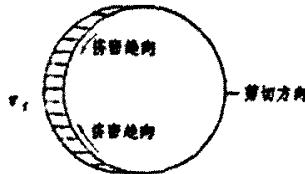


图2-10 剪应力分布示意图

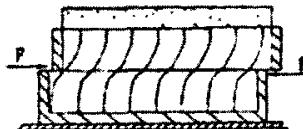


图2-11 应变分布示意图

同时，圆形剪切盒不利于按实际剪切面积计算剪应力。国外一些著名仪器生产厂商(如ELE公司)生产的直剪仪的剪切盒则为方形。直剪试验的试样被剪坏时，靠近剪力盒边缘处的应变最大，而试样中间部分的应变要小得多，见图2-11。

### 5) 实际剪切面并非理想剪切面

理想剪切面为限定在上下剪切盒中间的平面，见图2-12。虽然该平面未必是剪切盒内试样剪切破坏时的最薄弱面，但实际剪切面既非理想剪切面，也未必是破坏时的最薄弱面。试验开始时，施加在试样上的压力为轴向正压力 $p$ 。当剪切开始后，试样上下被剪开的两部分随剪切盒发生相对位移，这样的相对位移使原来的轴向正压力变成了偏离轴向的偏轴压力，从而使实际剪切面偏离了原来预定的理想剪切面，发生了斜剪现象。

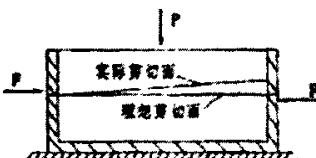


图2-12 剪切面对比示意图

在剪切过程中，随着剪切位移的增加，土样有效剪切面积在不断减小，而且随着剪应力的增加，破坏时的相对位移最大，其有效剪切面积变得更小。土工试验方法在标准或规程中给定的计算剪应力的公式为：

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10$$

式中： $\tau$  为剪应力， $kPa$ ； $C$  为测力计率定系数  $N/0.01mm$ ； $R$  为测力计读数  $0.01mm$ ；10 为单位换算系数。上式中： $A_0$  为剪切盒内土样初始剪切面面积，但在实际剪切过程中，土样有效剪切面积是变化的。因此，在利用该公式计算时，始终采用剪切开始前试样的初始剪切面面积不符合实际情况<sup>[12]</sup>。

根据以上一些问题，所设计的直剪试验仪应具备以下几点特征：

- (1) 垂直加载系统能自动改变压力等级，并能长时间稳定在某压力值，误差范围不超过 1%。
- (2) 水平拉拔系统保持匀速拉拔，拉拔速度能超过现行规范的最高要求。
- (3) 垂直和水平方向都配备高精度拉压力传感器，水平方向还配高精度的位移传感器，每个传感器都配备采集显示仪表，和与计算机连接的接口。
- (4) 试验箱留有透明的观察视窗，可以方便观察土体扰动变形情况。能满足做各种剪切和拉拔试验，还要轻便，不显得太笨重。
- (5) 编制采集数据软件，可实现试验过程中采集数据的可视化。
- (6) 自动化控制系统，可以在一个人操作下完成试验的全过程。

- (7) 使下箱体的面积大于上箱体的面积,以便在剪切工程中使得接触面积保持不变。
- (8) 在剪切面上可以固定土工格栅,防止格栅拱起变形。

## 2.2 试验设备的研制改进

### 2.2.1 现有实验台简介

#### 1) 试验台的特点和基本参数

- ① 试验台能承受 10 吨重的垂直荷载, 5 吨左右的水平荷载, 所以试验台的结构合理, 能保证在极限荷载下稳定不变形, 而且尺寸不适宜, 不笨重。可放入试验室, 有操作空间。
- ② 台面高度不超过 0.5m, 方便抬动拉拔试验箱。
- ③ 留有安装固定垂直加载和水平加载设备的空间。
- ④ 结构钢梁不遮盖观察视窗。

#### 2) 水平加载架及试验箱的特点

- ① 水平加载架能保证在拉拔状态下不变形, 可以均匀施加拉拔力, 避免格栅受水平力不均匀。
- ② 与加载架相连的夹具能夹住各种土工合成材料, 而且能达到不让土工合成材料从夹具中脱落, 还不会破坏土工合成材料。
- ③ 试验箱的尺寸为 400mm×300mm×300mm, 试验箱要求能在极限荷载下, 不损坏, 不变形, 重量还不太重。
- ④ 试验箱上的加载板能在承受 10 吨的压力下不变形。

#### 3) 垂直加载系统

设计了液压装置配传感器的系统, 此系统要求能自动调节垂直压力, 压力范围 0~5 吨可调, 试验整个过程中能保持恒压不变, 并且能精确测量的垂直荷载的数值。

此系统包括:

- ① 液压装置, 包括比例阀、液压包、变送器、控制箱、蓄能器、液压表;
- ② 高精度推力传感器(包括数字显示仪表)。

#### 4) 水平加载系统

此系统要求能以 0.5~5mm/min 的速度匀速推行加载架, 推力范围 0~5 吨可自动调节, 并且能自动化采集数据, 精确测出水平力(即拉拔力)的大小。

此系统包括如下装置:

- ① 液压装置, 包括比例阀、液压包、液压缸;

- ② 变频调速器及变频电机、控制箱；
- ③ 高精度的推力传感器（包括数字显示仪表、带有标准通讯 RS485 接口，— MODBUS 协议或其它通用公控协议）；
- ④ 高精度的位移传感器（包括数字显示仪表、带有标准通讯 RS485 接口，— MODBUS 协议或其它通用公控协议）。

### 5) 数据采集系统

要求满足能全自动采集数据，可以观察试验过程中采集数据的关系曲线，控制试验过程，采集系统主要包括：

- ① 多串口数据采集卡
- ② 数据采集软件
- ③ 数据采集用的高性能计算机

该设备已经过多次试验，表明此设备确实能满足本次的试验精度要求，能实现自动化操作。拉拔试验机的整体图如图 2-13 所示：

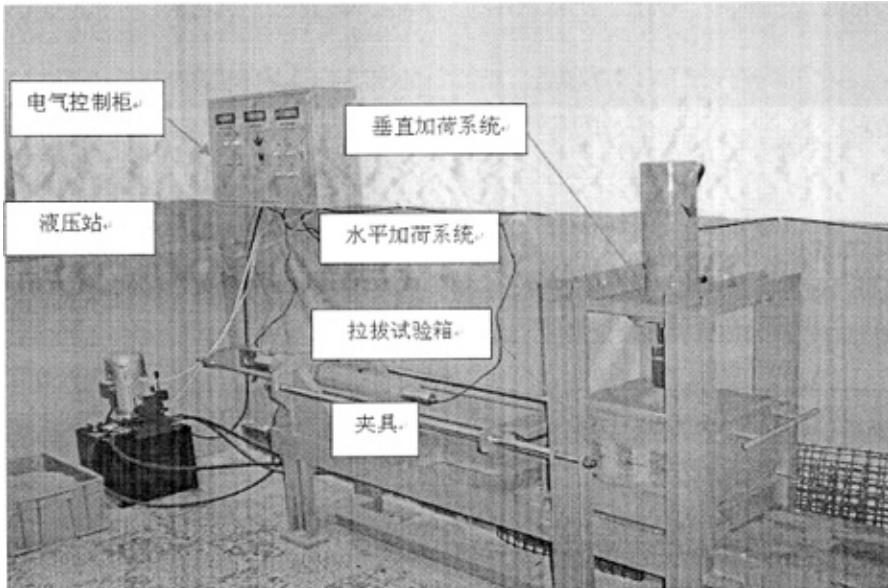


图 2-13 拉拔试验机的整体图

此设备是一台性能优越的拉拔试验机，动力系统是由液压控制，设有液压泵站，水平加荷装置是由四部分组成：液压缸、拉压传感器、高精度的位移传感器、夹具及加载架。垂直加载系统是由液压缸、拉压传感器、加压板三部分组成。

在控制部分，为本台试验机专门设计了一个电气柜，电气柜内配有三块传感器的数据显示、采集仪表，一个变频器，可达到水平方向加载变速度匀速拉拔。

还有就是电源控制开关及一些显示灯<sup>[61]</sup>。电气柜的图如图 2-14 所示：



图 2-14 电气控制柜

## 2.2.2 试验仪器的改进

现有的试验仪器是进行拉拔试验先进的仪器设备，为了丰富试验试验内容，在同等条件下，对拉拔试验和直剪试验进行比较，我们根据现有的仪器自行研制了直剪试验仪。

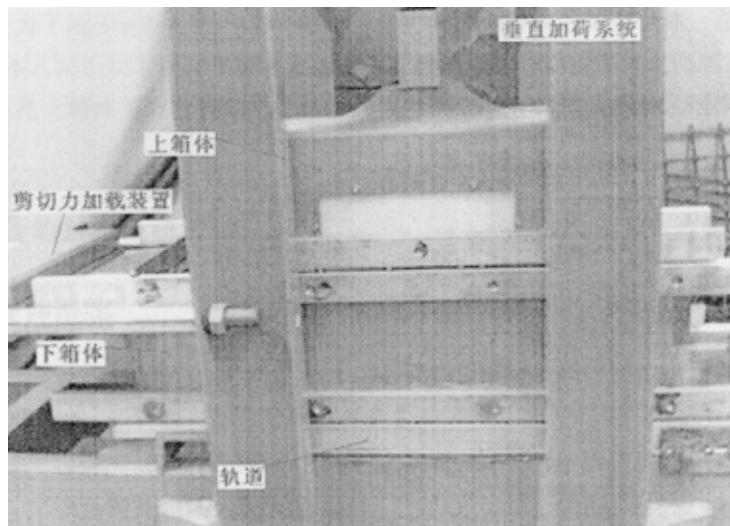


图 2-15 直剪试验箱各部件示意图

1、根据现有的垂直加载设备，设计直剪试验仪的上箱体尺寸为  $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 180\text{mm}$ 。

2、在试验过程中，保持上箱体位置固定，使下箱体移动，为了避免在剪切过程中的接触面不断变小，使下箱体的长度尺寸大于上箱体，设计为  $800\text{mm} \times 300\text{mm} \times 120\text{mm}$ 。

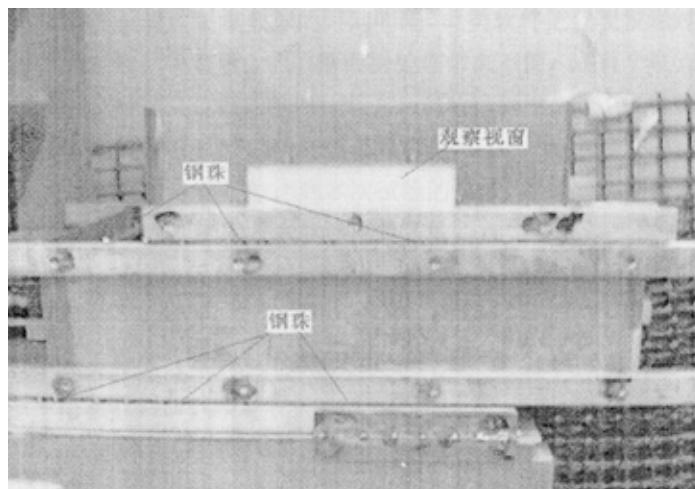


图 2-16 直剪试验箱滑动原理示意图

3、为了减少试验过程中剪切的摩擦阻力和控制箱体的侧向位移，在上箱体与下箱体之间以及下箱体与轨道之间放置光滑的钢珠，以使箱体之间顺利滑动。

4、在下箱体的上边缘即与上箱体的接触面上装有铁片及螺丝，用来固定土工织物。

## 2.3 设备的采集系统

### 2.3.1 硬件系统

根据拉拔试验机的研制方案，此设备的采集系统是利用计算机自动采集数据，为此，本试验需购买如下配套硬件设备：

- 1) 一台性能优越的计算机，PIII以上配置，windows 操作系统；
- 2) 三块高精度的显示采集仪表；
- 3) 一块支持多串口的数据采集卡；
- 4) 三个串行接口（9 针或 9 孔），以及三根串口采集数据线。

### 2.3.2 软件系统

本试验开始采用了共享的通用工业软件，串口调试助手之类的串口采集软件，采集控制柜上仪表发送过来的数据。经过试用，发现这种共享的软件不能达到我们的要求，串口调试助手有一次只能采集一个仪表，而且多数这样的免费软件还不能以 10 进制显示及保存，对数据的后处理带了很大的麻烦，还有的就是不能按照试验要求设定采集数据的时间间隔，此类软件把仪表发送过来的所有数据都保存下来，数据采集量太大，给数据处理带来不便，还有个缺点就是不能显示采集的曲线，对试验过程的控制比较差，试验过程中，看不了数据之间的关系曲线，不能及时发现此试验的数据是否可靠。

由于现有的采集软件都不能达到本次试验的要求，本试验决定自主开发一个适合本台试验机的独立的程序。本软件应具备的特点如下：

- 1) 能够同时采集 3 块仪表的读数；
- 2) 界面友好，操作方便；
- 3) 可以显示每个仪表采集下来的读数，并且可以分别保存；
- 4) 可以绘制数据曲线图。

本台试验机的采集软件使用了 Visual Basic 6.0 编程调试软件，和 office 2000 办公软件进行编写。Visual Basic 6.0 是微软公司推出一种采用图形界面，操作更方便，使用更灵活的高级编程软件，可用于各种软件的开发。Visual Basic 利用

可视化技术进行编程，使编程工作变得轻松快捷，摆脱了面向过程语言的许多细节，而将主要精力集中在解决实际问题和设计友好界面上。因此 Visual Basic 在国内外各个领域中应用非常广泛，许多计算机专业和非计算机专业的人员常利用它来编制开发应用程序和软件。

本程序中主要利用了 Visual Basic 6.0 中的串口采集控件，编写了数据采集程序，通过 Visual Basic 6.0 良好的界面开发功能编写了本软件的程序运行界面，同时运用 office 办公软件中 Excel 的强大的绘图功能，把程序采集过来的数据绘成图表显示出来。

本程序的流程图如图 2-17 所示：

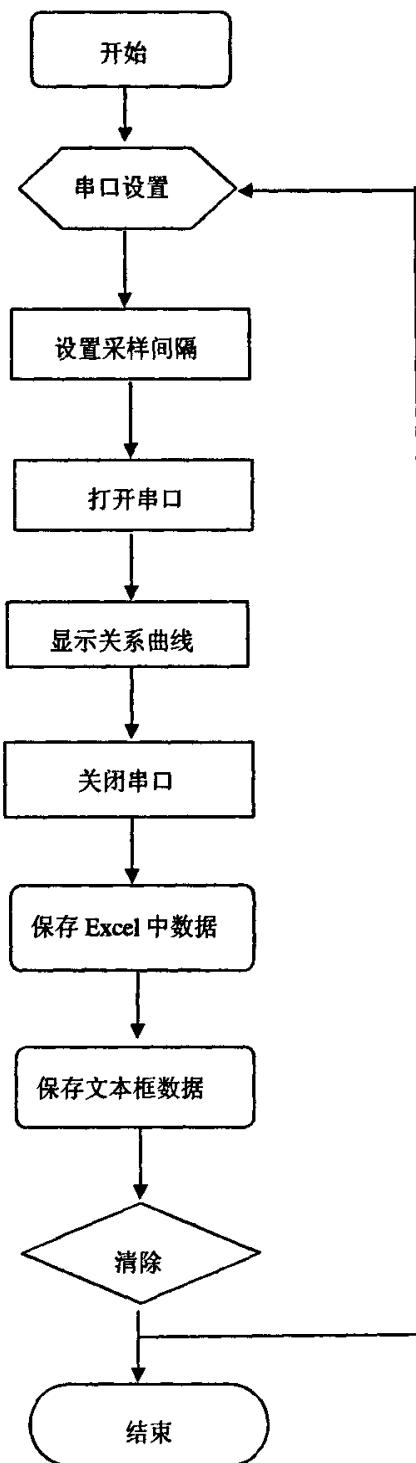


图 2-17 程序流程图

本采集软件具体功能完全满足预订的要求。下面简要的介绍一下本采集程序的使用说明。双击打开本程序，出现友好的采集界面，如图 2-18 所示：

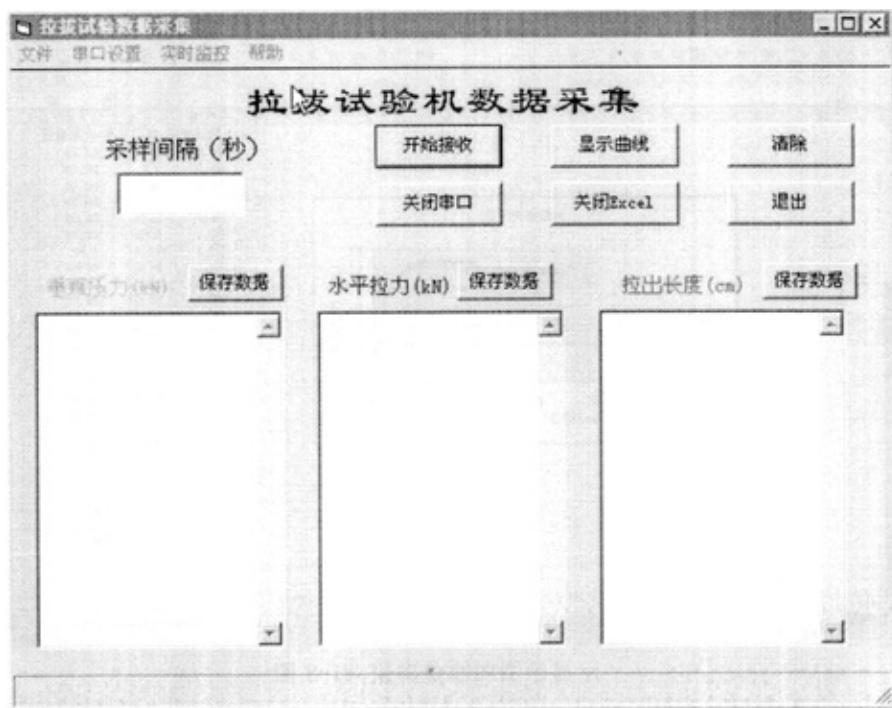


图 2-18 数据采集窗口

先点击串口设置，初始化串口设置，然后设置采样的时间间隔，点击“开始接收”按钮，就开始采集仪表上的数据，三个对话框分别显示三块仪表的数据，点击显示曲线，就会打开 Excel 把采集的三块仪表的数据打印到 Excel 上，并画出关系曲线，采集数据的关系曲线如图 2-19 所示：

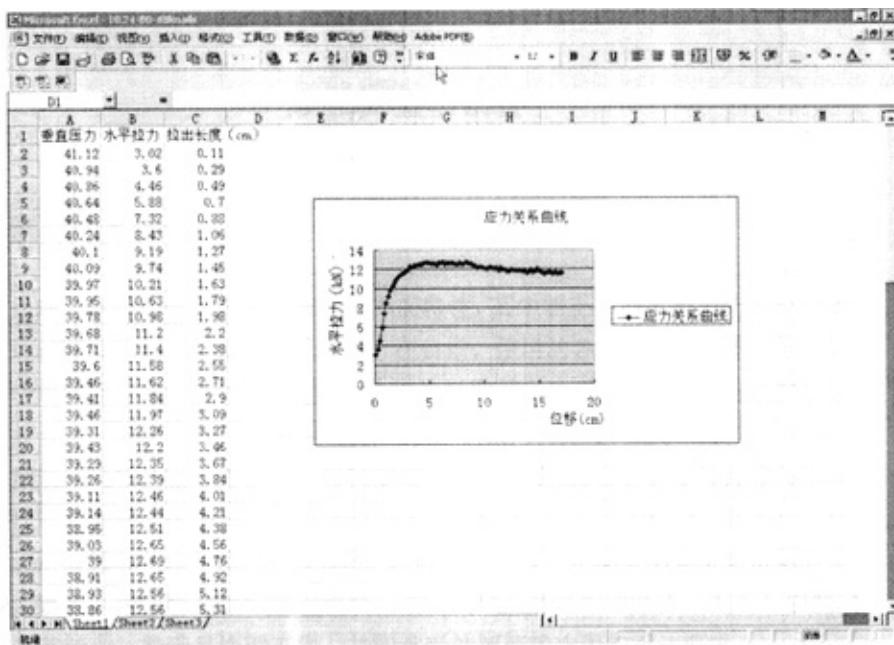


图 2-19 采集数据的图形显示

试验结束时，单击“关闭串口”按钮，停止采集数据，然后，先分别保存对话框中的数据，接着保存 Excel 文件，此文件保存时候必须改写文件名，以免覆盖原文件。本程序保存数据分两个部分，一部分是对话框中显示的文本格式的数据，可以分类单独保存，还有一部分就是 Excel 中的所有数据一起保存的，其实数据内容都是一样的，只是避免出现数据丢失的意外，做了个数据备份。

此软件不光可以自动采集数据，而且，可以把采集下来的数据自动画出关系曲线，可以实现自动化处理数据，减少后处理的工作量。

## 第三章 直剪试验

### 3.1 试验的背景

加筋土结构的设计需要了解筋土界面特性，其中筋土界面摩擦力的大小及变化是进行结构稳定分析最重要的参数。在目前，使用的各种加筋材料中，土工格栅的应用较为普遍。在加筋结构物中，将筋材埋设在填土中，使筋材与土体形成一个复合体，依靠筋材与土相互作用的界面特性，来共同承受和传递外部荷载。

加筋结构物的稳定性包括外部稳定性及内部稳定性。外部稳定性亦称为整体稳定性即将加筋范围内的复合土体看成是一个整体，按一般工程结构物的稳定性计算方法验算其抗水平滑移、抗倾覆、承载力和抗深层滑动等的安全系数是否复合规定要求。内部稳定性即筋材和填土之间应该具有足够的联接（握裹）强度，相对位移较小，能满足协调工作，共同承受外部荷载作用的设计要求。

目前的研究成果表明：加筋土的内部破坏有几种可能，其一、是筋材所受的拉力超过了自身的抗拉强度，筋材被拉断；第二种是筋材被动段与土间的抗拔力（握裹力）小于其所受拉力，筋材被拔出；筋材在长期拉力作用下产生蠕变，致使加筋失效；第四种是筋材间距过大，超过筋材的影响范围，不能满足共同承载的要求，以致降低或失去加筋作用。

另外在镀锌钢带加筋土的研究中，国外曾发表过文章讲，筋土之间的摩擦角高达 50 度，填料本身的摩擦角也有所提高，他们认为主要是填料（砂土）在试验过程中会产生剪胀现象。目前一些研究成果显示，加筋后土的摩擦角有些高于土自身的摩擦角，有些低于土自身的摩擦角<sup>[25~30]</sup>。

本试验主要想研究发挥筋、土界面强度时，材料的受力状态和填料被扰动的厚度及状态，尤其是发挥筋、土界面强度时填料被扰动的厚度及状态，以及直剪试验所得到的摩擦力与拉拔试验中所得到的摩擦力的关系，探讨加筋后土体摩擦角的变化趋势，并提出一些对提高加筋效果的合理建议。

### 3.2 试验的目的、仪器、材料及试验方法

#### 3.2.1 试验的目的

- 1) 土工合成材料与土相互作用产生的扰动层厚度，以及其扰动变形和界面

特性参数之间的关系;

- 2) 土工合成材料加筋效果中, 相同情况下直剪摩擦力与拉拔力的关系;
- 3) 土工合成材料加筋效果随不同土质的变化关系;
- 4) 土工合成材料加筋效果与密实度的变化关系;
- 5) 土工合成材料加筋效果与上覆压力的关系。

### 3.2.2 试验的仪器

本次试验主要设备是自行研制的直剪试验装置, 整个装置的指标参数如下: 上箱体尺寸为  $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 180\text{mm}$  (长×宽×高), 有  $200\text{mm} \times 100\text{mm}$  的观察视窗。下箱体尺寸为  $800\text{mm} \times 300\text{mm} \times 120\text{mm}$  (长×宽×高)。直剪试验机的荷载部分由液压系统自动控制, 可以提供 10t 的拉拔力, 和 10t 的垂直压力。同时配备高精度的力传感器和位移传感器及其仪表, 还有数据采集计算机及其配套软件。总之, 此设备可达到国际领先水平, 完全符合设计的要求, 超出现行试验的规范要求。

### 3.2.3 试验的材料

根据本次试验的目的, 选择了三种不同的填料土, 分别为 ①石屑 ②粗砂 ③粉质粘土, 三种填料的土质参数如下表 3-1、图 3-1~3-3 所示,

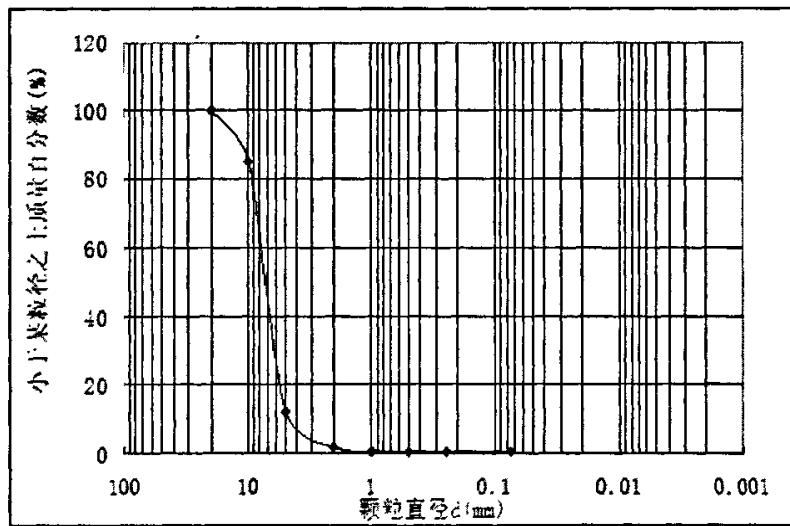


图 3-1 石屑颗粒级配曲线

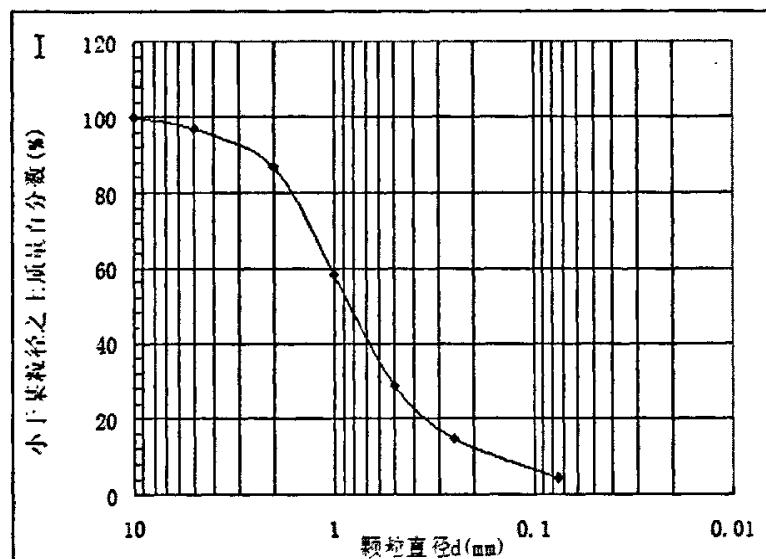


图 3-2 粗砂颗粒级配曲线

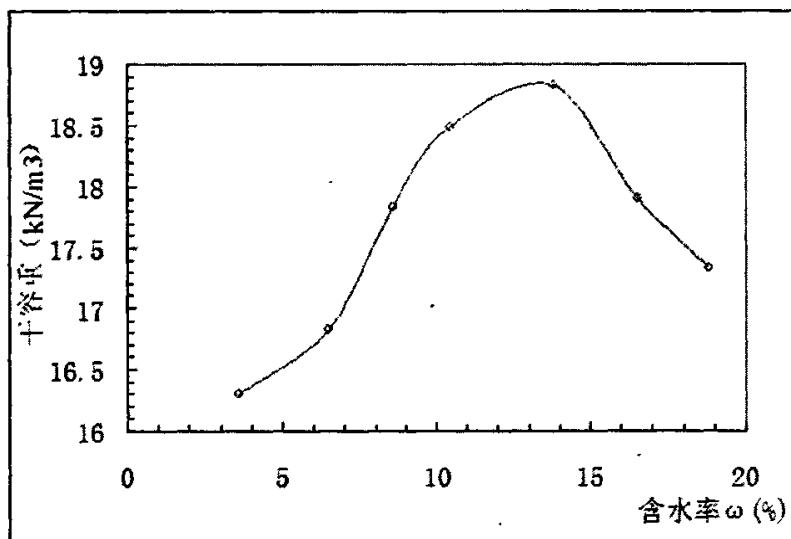


图 3-3 粉质粘土的击实曲线

表 3-1 土的物理指标

	液限 $w_L$ (%)	塑限 $w_P$ (%)	塑性指数 $I_p$	天然含水量 $w$ (%)	最优含水量 $w^*$ (%)	最大干容重 $(kN/m^3)$
粉质黏土	31	17.73	13.27	11.98	13.5	18.83

土工合成材料选择了泰安经纬有限公司的单向土工格栅，根据试验的不同要求，本次试验选择了多种规格，分别为 50kN/m-PP, 50kN/m-PE, 65kN/m-PE, 80kN/m-PP, 120kN/m-PP。（注：PP—聚丙烯，PE—聚乙烯）

### 3.2.4 试验的方法

直剪试验的上箱体上下底面敞口，可以通过加载板施加垂直压力，下箱体上底面开口，与上箱体通过钢珠接触，下箱体内部前后各有长 280mm，宽 10mm 的铁片及螺丝固定土工格栅。试验时，先往下箱体中装土，边装边击实，使土体密实度达到试验要求，当土装填到下箱体上底面时，放置土工格栅，土工格栅固定在下箱体上面，然后，在上箱体两侧的轨道内均匀布置钢珠，然后固定上箱体，在上箱体内继续装填土料，边装边击实，击实度和下层土相同，土箱装满后，通过调整仪器的前后位置，使上箱体与垂直压力的加载板位置一致，施加垂直压力，接着调试数据显示仪表，及采集软件，开动水平向拉拔装置的阀门，采用应变式控制方式，拉拔速度为 1mm/min。

## 3.3 试验数据及整理分析

试验选择了三种土质作对比分析，分析不同土质对加筋效果的影响，下面分别介绍试验结果。

### 3.3.1 石屑填料

模拟现场的荷载条件，分别选择了 50kN/m-PP，50kN/m-PE，65kN/m-PE，80kN/m-PP，120kN/m-PP 等单向格栅。

填料为石屑的直剪试验结果离散性比较大，数据曲线波动性比较大，试验中压力不易稳定，但也有很多曲线趋势比较好。

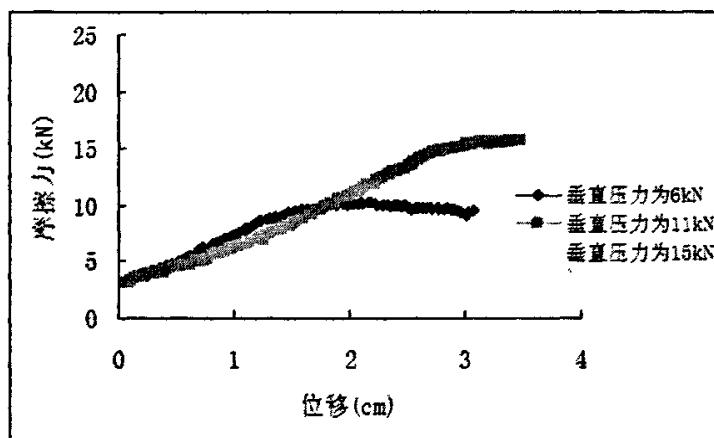


图 3-4 石屑中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线 (50kN/m-PP)

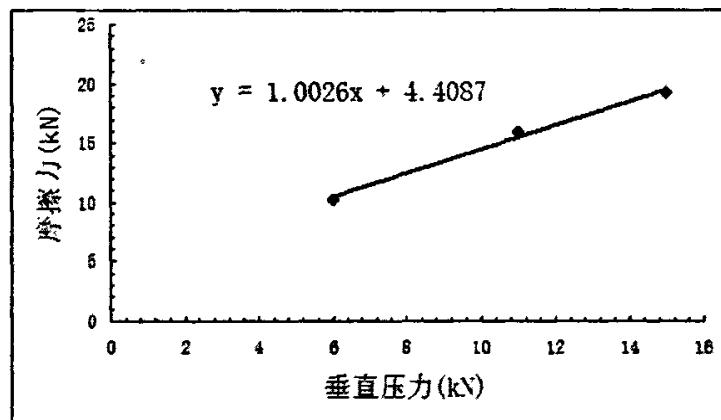


图 3-5 石屑中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线 (50kN/m-PP)

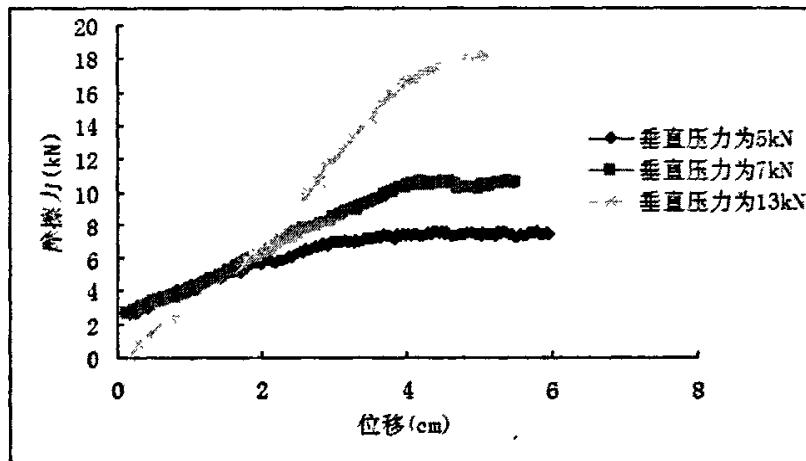


图 3-6 石屑中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线 (65kN/m-PE)

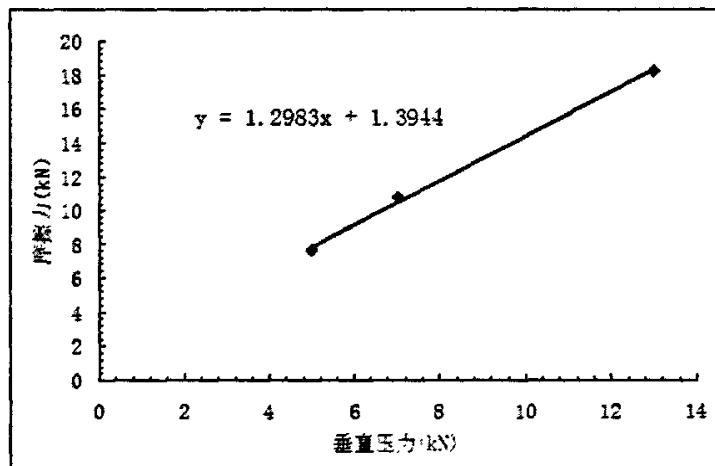


图 3-7 石屑中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线 (65kN/m-PE)

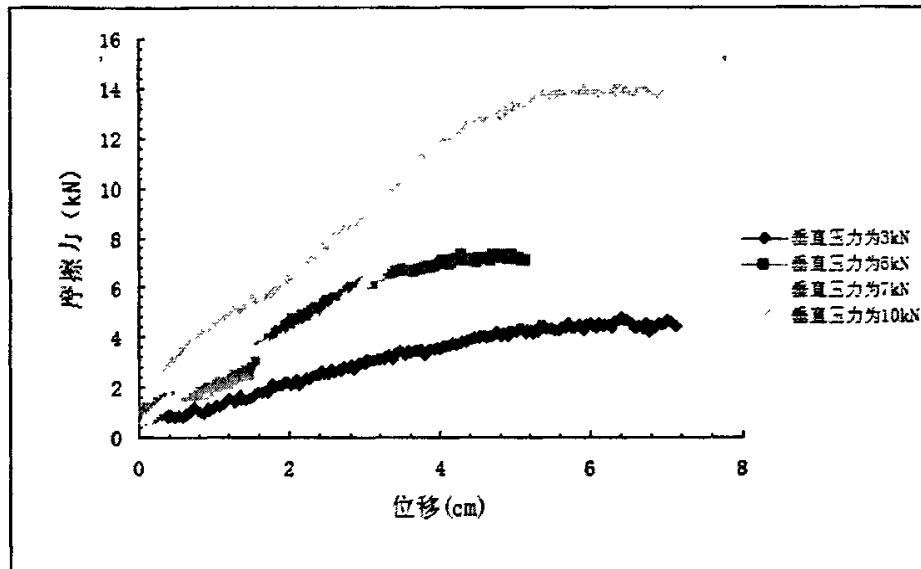


图 3-8 石屑中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线 (80kN/m-PP)

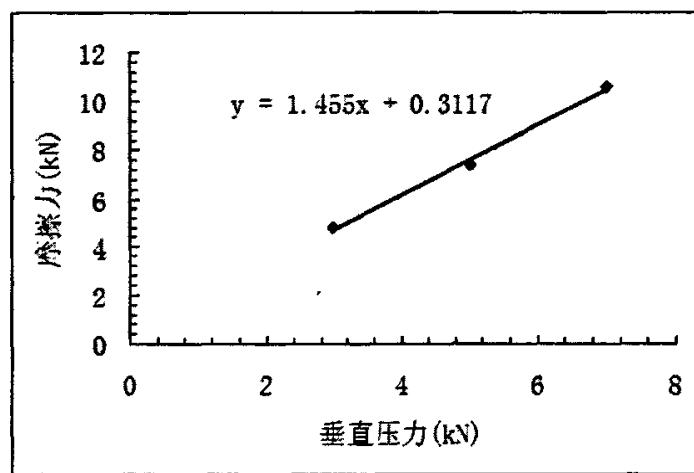


图 3-9 石屑中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线 (80kN/m-PE)

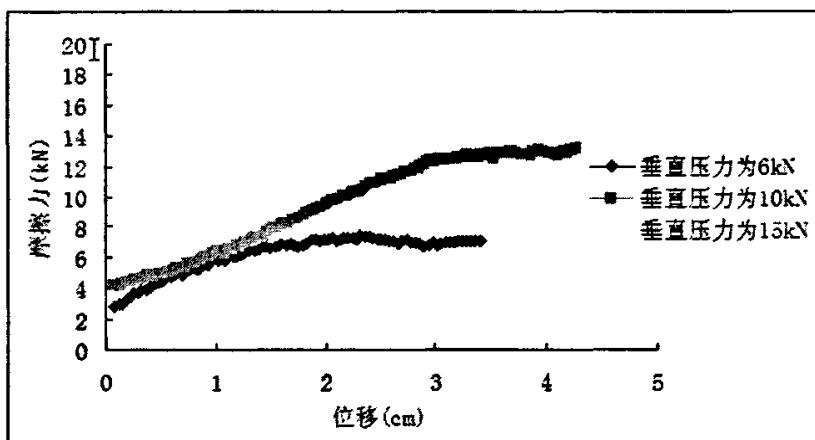


图 3-10 石屑中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线 (120kN/m-PP)

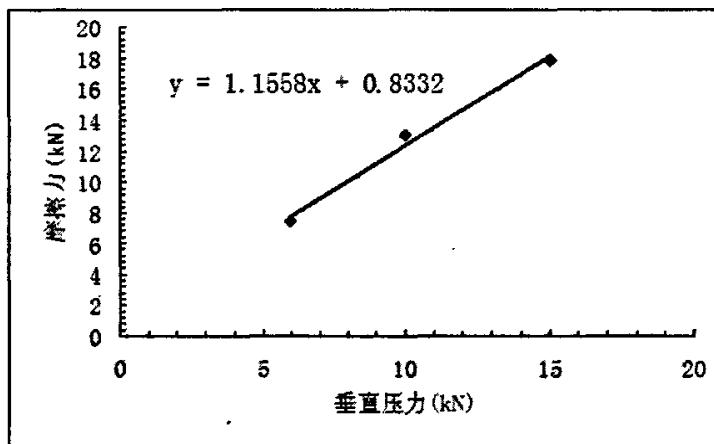


图 3-11 石屑中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线 (120kN/m-PE)

所有规格的格栅的直剪试验数据如表 3-2 所示：

表 3-2 石屑填料的各种规格格栅直剪试验结果

格栅规格	纵肋数×横肋数	等效外摩擦角 $\delta' = \delta_1 + \delta_2$	等效粘聚力合力 $C' = C_1 + C_2$	关系曲线
50kN/m-PP	16×3	45.074	4.4087	$y = 1.0026x + 4.4087$
65kN/m-PE	16×2	52.395	1.3944	$y = 1.2983x + 1.3944$
80kN/m-PP	12×2	55.5	0.3117	$y = 1.455x + 0.3117$
120kN/m-PP	13×2	49.134	0.8332	$y = 1.1558x + 0.8332$

所有规格的格栅的拉拔试验数据如表 3-3 所示：

表 3-3 石屑填料的各种规格格栅拉拔试验结果

格栅规格	纵肋数×横肋数	等效外摩擦角 $\delta' = \delta_1 + \delta_2$	等效粘聚力合力 $C' = C_1 + C_2$	关系曲线
50kN/m-PP	13×1	30.11	2.45	$y = 0.58x + 2.45$

65kN/m-PE	$14 \times 1$	47.73	0.7067	$y = 1.1x + 0.7067$
80kN/m-PP	$15 \times 1$	38.46	1.4214	$y = 0.794x + 1.421$
120kN/m-PP	$13 \times 2$	60.17	0.7811	$y = 1.744x + 0.781$

从试验结果中我们可以看出,直剪试验所得到的摩擦力与拉拔试验所得到的摩擦力的关系并不是十分突出。这其中也有石屑这种材料的特殊性,石屑的粒径与格栅的缝隙宽度相似,嵌固力起了很大的作用。另外,两种试验的界面破坏方式有很大区别。直剪试验主要是填料与填料之间的剪切,格栅主要是在破坏面之间起增大摩擦的作用,拉拔试验中,填料与填料之间并没有明显的错动,主要是格栅与填料之间的摩擦。在直剪试验中,由于是石屑与石屑之间的错动,在格栅的横肋处,石屑有可能被横肋卡住,造成部分石屑被拱起,所以对结果会造成一定的影响,这点与拉拔试验是不同的。

### 3.3.2 粗砂填料

对于填料为粗砂的情况,分别选择了型号 50kN/m-PP, 50kN/m-PE, 65kN/m-PE, 80kN/m-PP, 120kN/m-PP 等规格的格栅。

粗砂填料的直剪试验结果都比较好,下面介绍两个比较有代表性的格栅型号的直剪数据曲线图。

1) 型号 80kN/m-PP, 切取了 12 根纵肋, 2 根横肋的格栅试样, 分别做了 3kN、7kN、10kN、15kN, 四个等级的垂直压力的直剪试验。数据如图 3-12~3-13 所示:

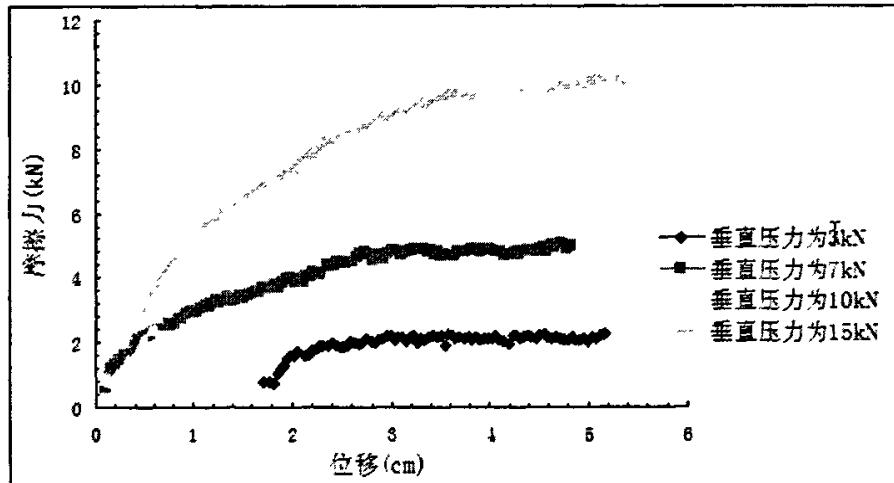


图 3-12 粗砂中筋材摩擦力与位移关系曲线 (80kN/m-PP)

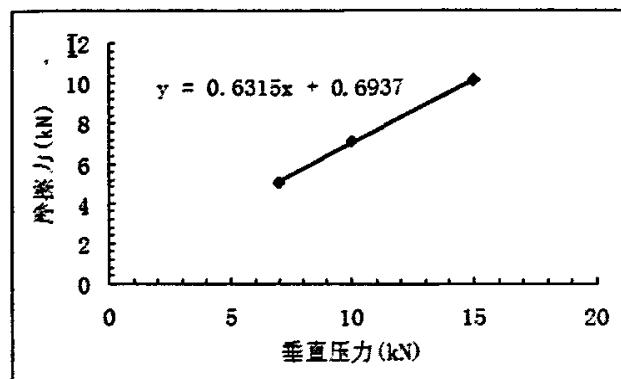


图 3-13 粗砂中筋材摩擦力与垂直压力关系曲线 (80kN/m-PP)

另外,切取了 15 根纵肋,1 根横肋的格栅试样,分别做了 10kN、20kN、30kN、40kN, 四个等级的垂直压力的拉拔试验。数据如图 3-14~3-15 所示:

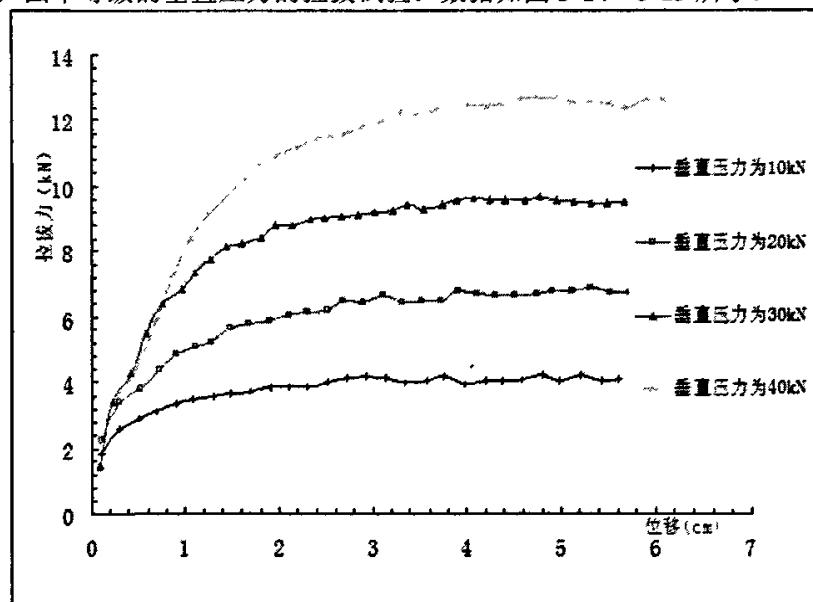


图 3-14 粗砂中筋材拉拔力与位移关系曲线 (80kN/m-PP)

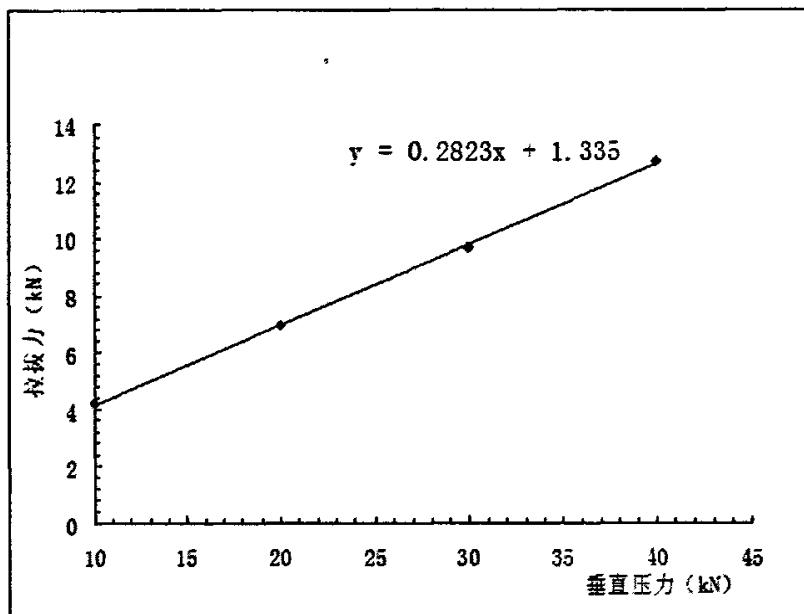


图 3-15 粗砂中筋材拉拔力与压力关系曲线 (80kN/m-PP)

2) 型号 120kN/m-PP, 切取了 13 根纵肋, 2 根横肋的格栅试样, 分别做了 5kN、10kN、15kN, 三个等级的垂直压力的直剪试验。数据如图 3-16~3-17 所示:

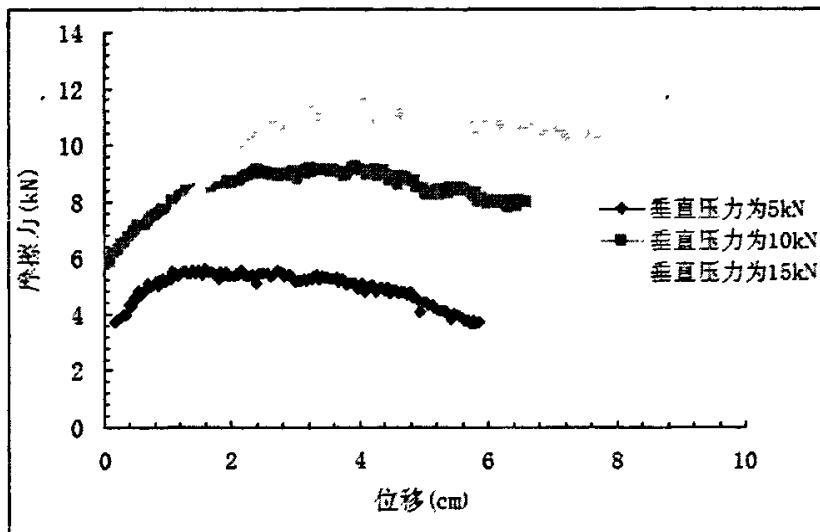


图 3-16 粗砂中筋材摩擦力与位移关系曲线 (120kN/m-PP)

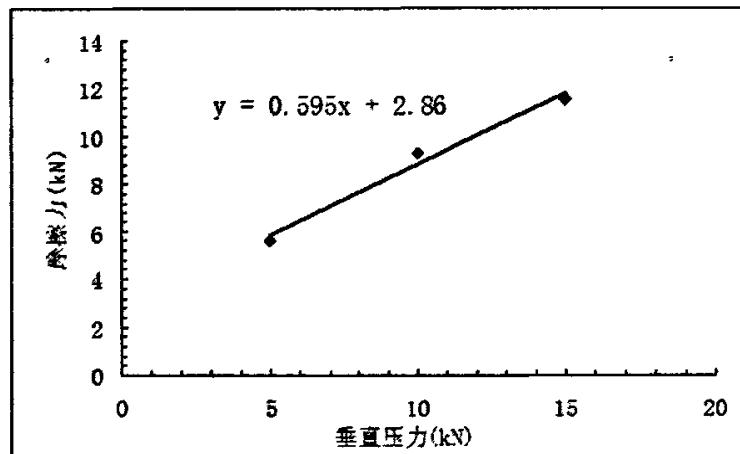


图 3-17 粗砂中筋材摩擦力与垂直压力关系曲线 (120kN/m-PP)

另外，分别做了 10kN、20kN、30kN、40kN，四个等级的垂直压力的拉拔试验。数据如图 3-18~3-19 所示：

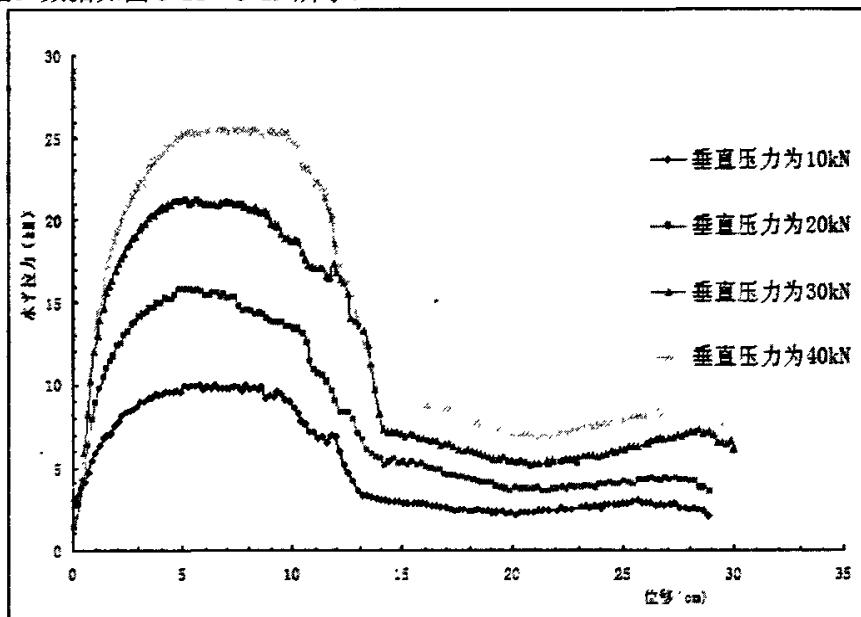


图 3-18 粗砂中筋材拉拔力与位移关系曲线 (120kN/m-PP)

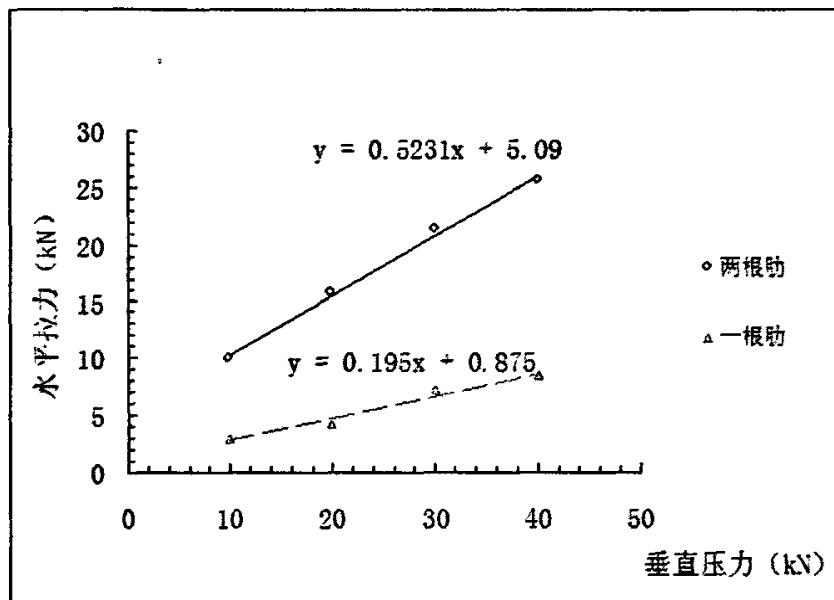


图 3-19 粗砂中筋材拉拔力与压力关系曲线 (120kN/m-PP)

所有规格的格栅的直剪试验数据如表 3-4 所示：

表 3-4 粗砂填料各种规格格栅直剪试验结果

格栅规格	纵肋数×横肋数	等效外摩擦角 $\delta^* = \delta_1 + \delta_2$	等效合粘聚力 $C^* = C_1 + C_2$	关系曲线
50kN-PP	16×3	20.96	0.4551	$y = 0.3831x + 0.4551$
50kN-PE	14×3	25.97	1.3357	$y = 0.4871x + 1.3357$
65kN-PE	16×2	34.18	0.7795	$y = 0.679x + 0.7795$
80kN-PP	12×2	32.27	0.6937	$y = 0.6315x + 0.6937$
120kN-PP	13×2	30.75	2.86	$y = 0.595x + 2.86$

所有规格的格栅的拉拔试验数据如表 3-5 所示：

表 3-5 粗砂填料各种规格格栅拉拔试验结果

格栅规格	纵肋数×横肋数	等效外摩擦角 $\delta^* = \delta_1 + \delta_2$	等效合粘聚力 $C^* = C_1 + C_2$	关系曲线
50kN-PP	13×1	11.75	0.325	$y = 0.208x + 0.325$
50kN-PE	12×2	18.95	2.091	$y = 0.343x + 2.091$
65kN-PE	14×1	17.74	0	$y = 0.32x - 0.0136$
80kN-PP	15×1	15.76	1.335	$y = 0.2823x + 1.335$
120kN-PP	13×2	27.61	5.09	$y = 0.523x + 5.09$

由试验结果我们可以看出，直剪试验所得到的摩擦力比拉拔试验所得到的摩擦力普遍大一些，主要还是试验方式的区别，直剪试验主要是粗砂与粗砂之间的剪切，格栅主要是在破坏面之间起增大摩擦的作用，直剪试验能模拟加筋土局部剪应力与位移关系，拉拔试验中，粗砂与粗砂之间并没有明显的错动，主要是格栅与填料之间的摩擦，拉拔试验反映的是沿筋材剪应力与位移间的变化关系。这其中虽然有格栅尺寸的差异，但这个因素影响不大。

### 3.2.3 填料为粉质粘土

填料为粉质粘土时，选择了型号为 80kN/m-PP 的格栅，切取了 12 根纵肋，2 根横肋的格栅试样，做了垂直压力为 5kN、7kN、10kN、15kN 的直剪试验，土性指标见表 3-1，土体击实后的容重为  $21.2\text{kN/m}^3$ 。数据如图 3-20~3-21 所示。

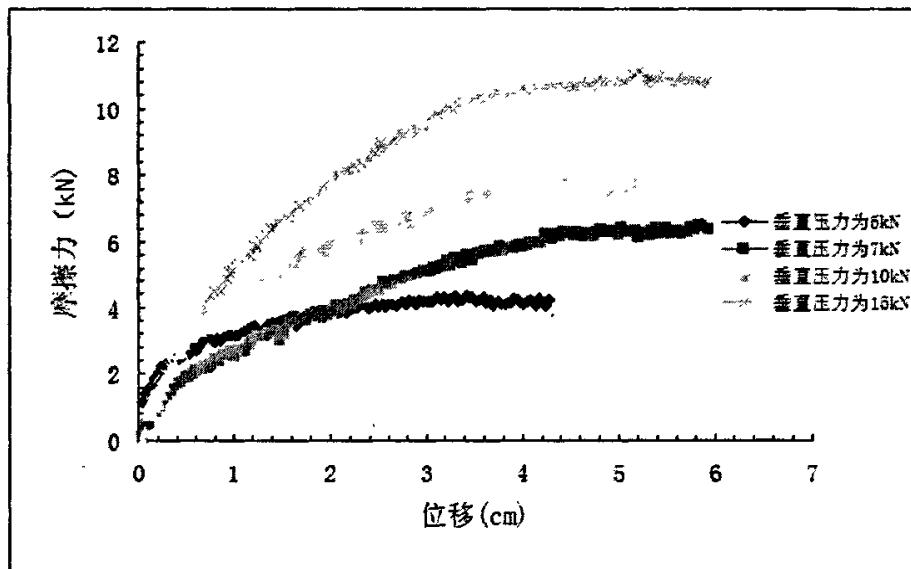


图 3-20 粉质粘土中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

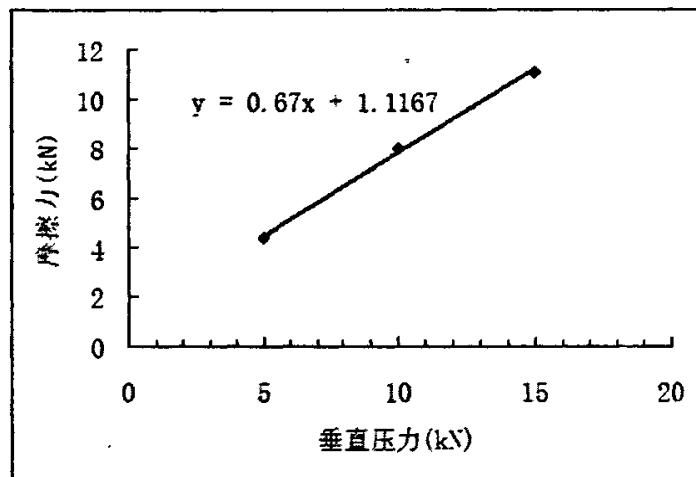


图 3-21 粉质粘土中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线

另外，切取了 15 根纵肋，1 根横肋的格栅试样，分别做了垂直压力为 10kN，15kN，25kN 三个垂直压力的拉拔试验，数据如图 3-22~3-23 所示。

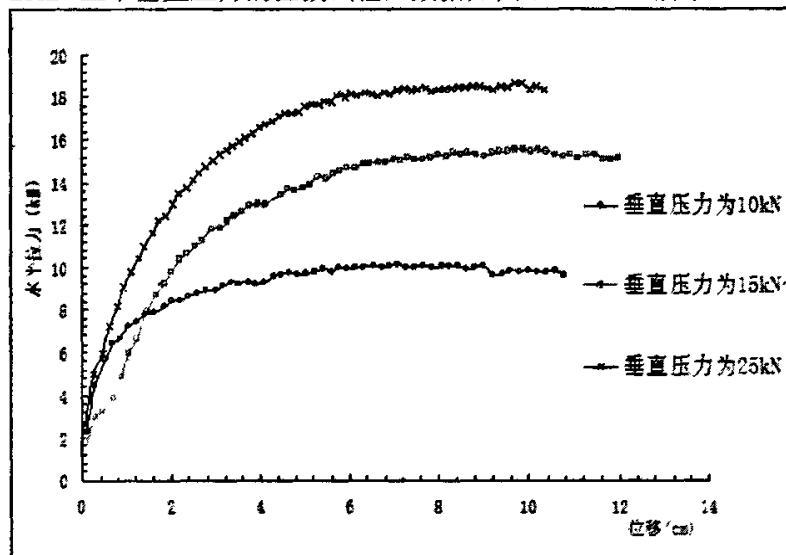


图 3-22 粉质粘土中筋材拉拔力与位移关系曲线

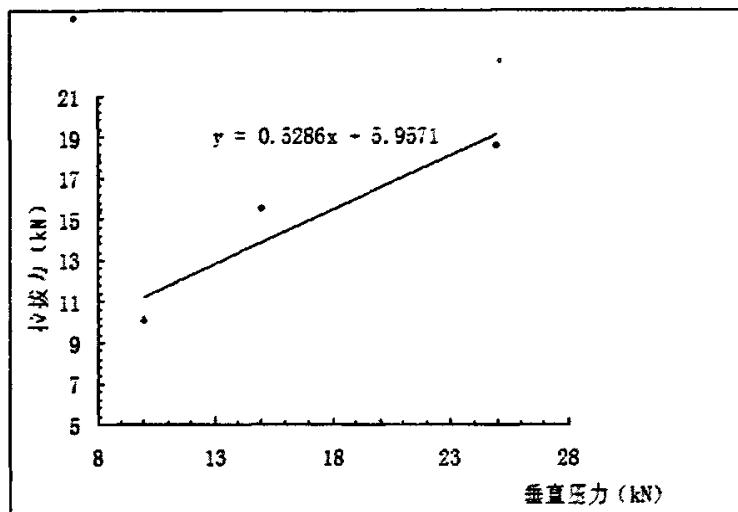


图 3-23 粉质粘土中筋材拉拔力与压力关系曲线

由试验结果我们可以看出,直剪试验所得到的摩擦力仍然比拉拔试验所得到的摩擦力普遍大一些,主要还是试验方式的区别,直剪试验主要是土与土之间的剪切,格栅主要是在破坏面之间起增大摩擦的作用,直剪试验模拟的是加筋土局部剪应力与位移关系。拉拔试验中,土与土之间并没有明显的错动,主要是格栅与填料之间的摩擦,拉拔试验则反映的是沿筋材剪应力与位移间的变化关系。对填料剪坏所需的摩擦力还是要大于格栅拉拔的摩擦力,所以直剪试验所得到的摩擦力比拉拔试验所得到的摩擦力大一些。

## 第四章 加筋土界面特性研究分析

### 4.1 影响加筋土界面特性的主要因素

土体是由松散的颗粒组成，颗粒间的联结微弱，其稳定性主要依靠颗粒间的嵌固和摩擦来维持。利用土工合成材料抗拉强度较高特点，将其布置在土体中与土体共同组成一个复合加筋土体，用以增加土体抗剪、抗拉的能力。土工合成材料的加筋效果是通过其与周围土体间的相互作用表现出来。评价加筋材料的加筋效果，可用筋材的界面特性来衡量。根据国内外相关文献资料及本课题的试验研究成果，土工合成材料界面特性的主要影响因素有以下几方面。

- 1、填土性质；
- 2、填土密实度；
- 3、筋材表面粗糙度；
- 4、筋才结构形式；
- 5、筋材刚度；
- 6、作用于筋材的上覆压力大小；
- 7、边界效应，箱体尺寸大小，以及筋材尺寸。

### 4.2 不同土质对土工合成材料界面特性的影响

为探讨填土性质对土工合成材料界面特性的影响，选择了三种不同性质的填土，对相同型号的格栅进行了试验，试验结果表明三种不同的土质中呈现出来的界面特性有显著的不同。

试验选择的三种土质分别为粗砂、石屑和粉质黏土，土性参数见表 3-1 及图 3-1~3-3。

1、填料为粗砂 取平均粒径为  $d_{50} = 0.85 \text{ mm}$ ，干容重为  $\gamma_d = 16.7 \text{ kN/m}^3$  的粗砂，分层填入试验箱，控制其密实度。取型号为 80kN/m-PP 的单向格栅，截取纵肋为 12 根，横肋为 2 根的试样，采用不同上覆压力进行直剪试验，试验结果如图 4-1~4-2 所示。

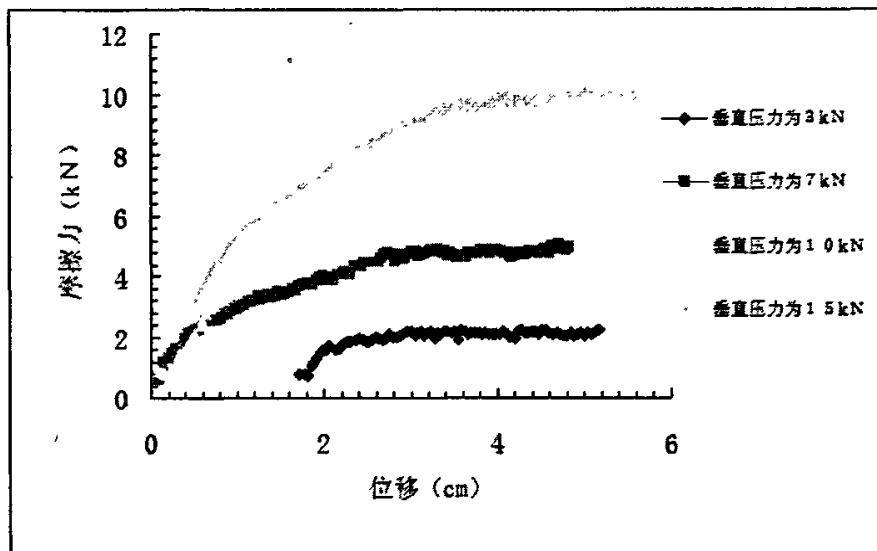


图 4-1 粗砂中直剪摩擦力与位移关系曲线

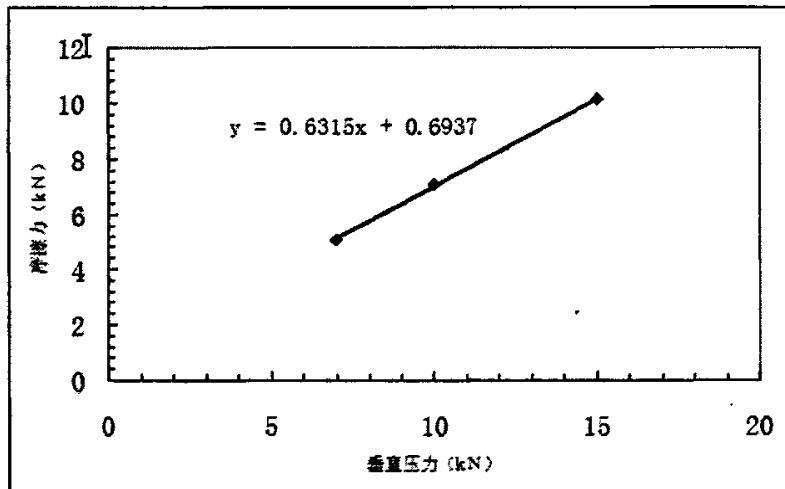


图 4-2 粗砂中直剪摩擦力与垂直压力的关系曲线

由试验结果可以看出，在填土密实度相同的情况下，摩擦力与位移  $u$  关系曲线的变化规律基本相同，随着上覆压力的增大，剪坏时的摩擦力也随之增大，曲线的双曲线形态越来越明显，摩擦力达到水平段所需要的位移值也越来越大。摩擦力与垂直压力之间的关系曲线如图 4-2 所示，由图曲线表明两者之间存在着良好的线性关系， $y = 0.6315x + 0.6937$ ，由关系曲线可以得出，粗砂与格栅的等效外摩擦角  $\delta'$  为  $32.27^\circ$ ，等效粘聚力  $C'$  合力为  $0.6937\text{kN}$ 。

2、填料为石屑 取平均粒径为  $d_{50} = 7.5\text{mm}$  的石屑，分层夯实，在相同密实度的情况下，采用不同的上覆压力进行直剪试验，试验结果如图 4-3~4-4 所示。

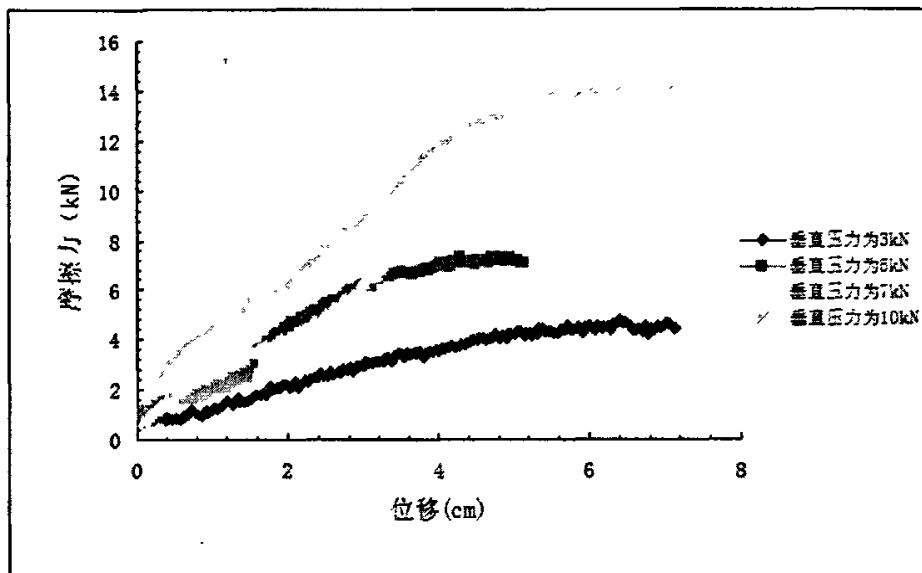


图 4-3 石屑中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

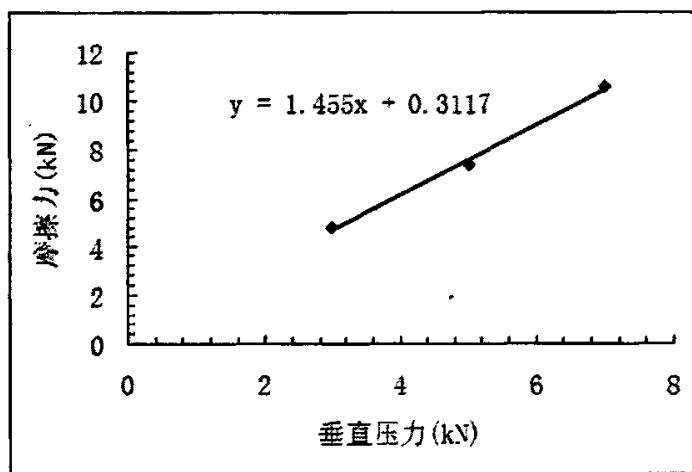


图 4-4 石屑中直剪摩擦力与垂直压力的关系曲线

由图 4-4 也可以看出摩擦力和上覆压力的曲线关系表明，压力愈大，摩擦力也愈大。以试验点拟合的关系曲线为  $y = 1.455x + 0.3117$ ，由此可以得出，石屑与格栅的等效外摩擦角  $\delta'$  为 55.5° 度，等效粘聚力合力  $C'$  为 0.3117kN。

**3、填土为粉质粘土** 试验时，把土样击实到干容重  $\gamma_d = 18.5kN/m^3$ ，试验结果如图 4-5~4-6 所示。

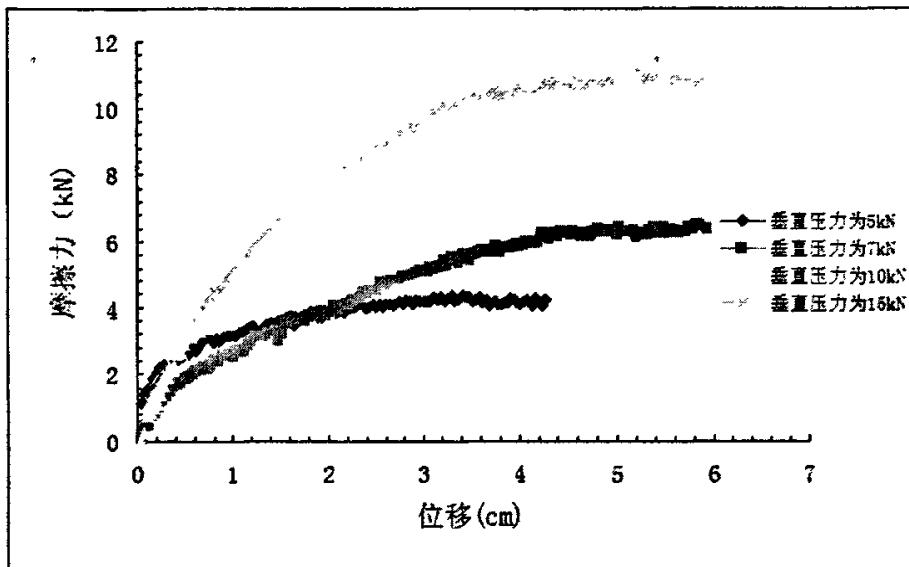


图 4-5 粉质粘土中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

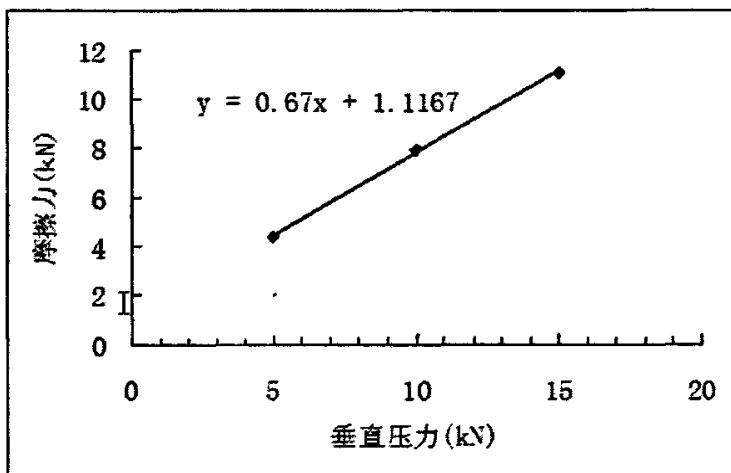


图 4-6 粉质粘土中直剪摩擦力与垂直压力的关系曲线

由图可以得出直剪摩擦力与上覆压力之间存在着线性关系，试验点拟合的曲线为  $y = 0.67x + 1.1167$ ，由关系曲线可以得出，粉质黏土与格栅的等效外摩擦角  $\delta^{\circ}$  为 33.82 度，等效粘聚力合力  $C^{\circ}$  为 1.1167kN。

表 4-1 三种土的直剪试验结果比较

	干容重 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	等效粘聚力合力 $C^{\circ}$ (kN)	等效外摩擦角 $\delta^{\circ}$ (°)
粗砂	16.7	0.6937	32.27
石屑	16.1	0.3117	55.5
粉质粘土	18.5	1.1167	33.82

表 4-2 三种土的拉拔试验结果比较

	干容重 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	等效粘聚力合力 $C^*$ (kN)	等效外摩擦角 $\delta^*$ (°)
粗砂	16.7	1.335	15.76
石屑	16.1	1.4214	38.46
粉质粘土	18.5	5.96	27.86

从表中的结果可以看出，不同的土质显然它们的容重是不同的，在同等击实条件下，它们的试验结果所得的结论是不一样的，由于粉质黏土更容易击实，所以加筋效果相对于粗砂来说是更为可靠的。这个结果和拉拔试验的结果是一样的。粗砂的效果不够理想，等效外摩擦角  $\delta^*$  较小，甚至比粗砂的内摩擦角  $\varphi$  都小的多，一个是从容重来看，密实度没有达到要求，还有一个砂子是散体更容易破坏，所以得出的结果都没有另外两种效果好。从两种试验的结果中看出，石屑并不是一种可靠的材料，本次试验采用的石屑最大粒径基本和格栅的孔径相当。当石屑的粒径和格栅间距吻合很好时，石屑的加筋效果也不错，当它的破坏方式不同时，受格栅干扰影响较大，加筋效果偶然性比较大，而且石屑对格栅的破坏比较严重，对要求较高的加筋土工程不提倡使用。

### 4.3 相同土质不同容重对土工合成材料界面特性的影响

为了研究不同密实度对土工合成材料界面特性的影响，填料选择了粗砂，粗砂的颗粒级配曲线见图 3-2，分别把砂土击实成三种不同的密实度，每种密实度的粗砂分别在不同上覆压力条件下做四组左右的直剪试验，试验结果及其分析如下。

1) 松散的砂 选择了型号为 50kN/m-PP 的单向格栅，土体击实后的干容重为  $\gamma_d = 16.7 \text{ kN/m}^3$ ，直剪试验结果如图 4-7 所示。

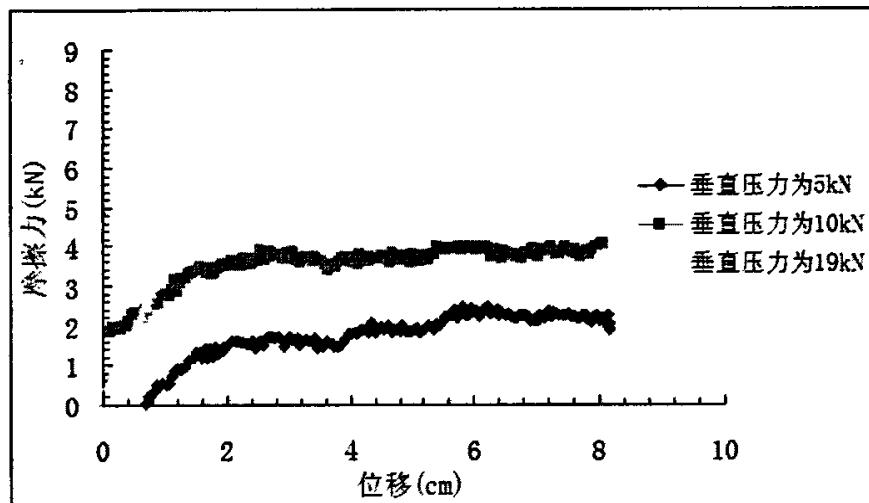


图 4-7 松砂中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

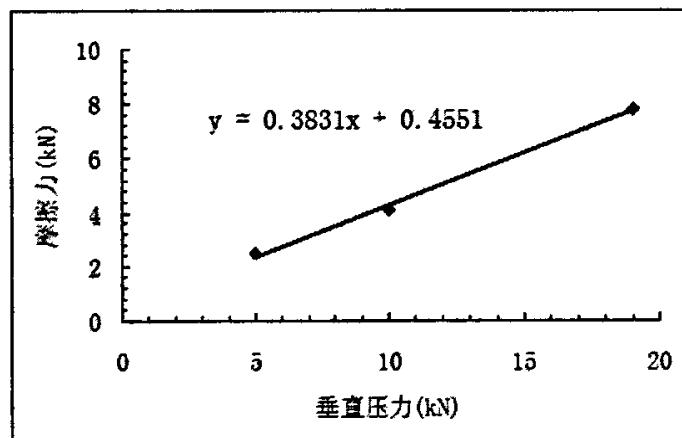


图 4-8 松砂中筋材直剪摩擦力与垂直压力的关系曲线

2) 中密的砂 格栅型号同上, 土体击实后的干容重为  $\gamma_d = 17.5kN/m^3$ , 直剪试验结果如图 4-9~4-10 所示。

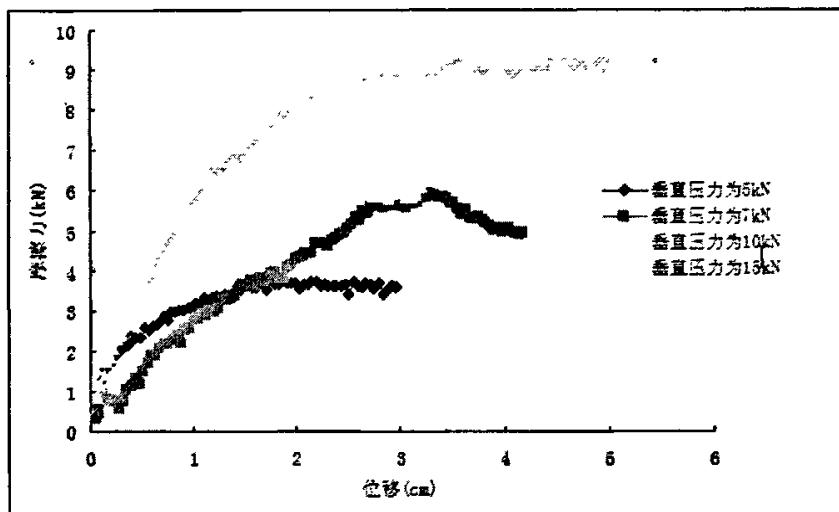


图 4-9 中密砂中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

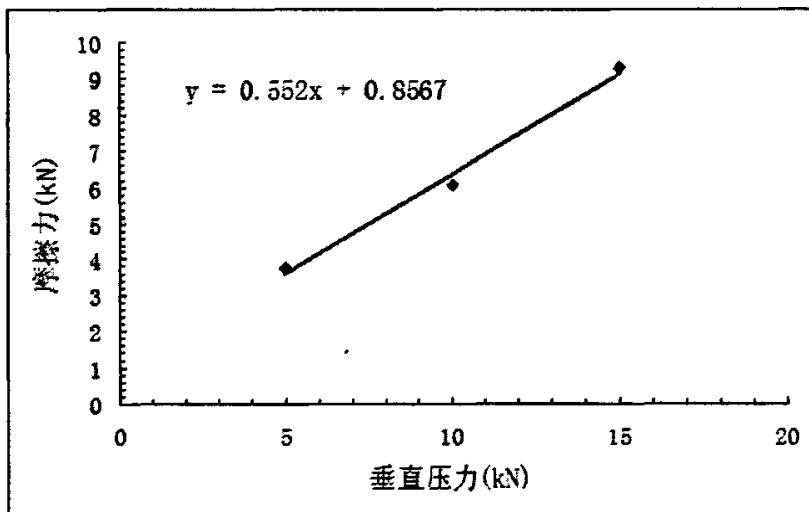


图 4-10 中密砂中筋材直剪摩擦力与垂直压力的关系曲线

3) 密实的砂 格栅型号同上, 土体击实后的干容重为  $\gamma_d = 18.4 kN/m^3$ , 直剪试验结果如图 4-11~4-12 所示。

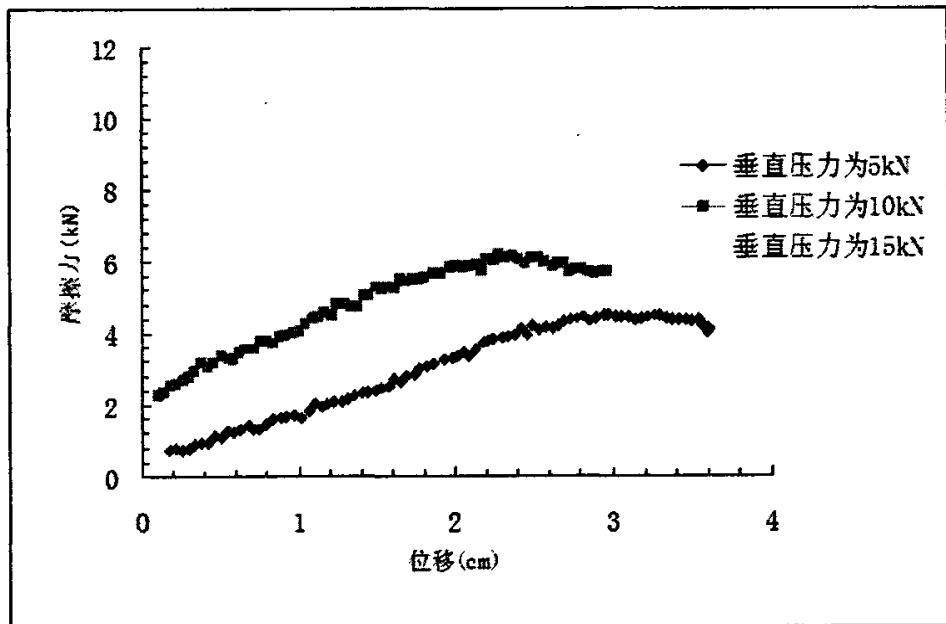


图 4-11 密实砂中筋材直剪摩擦力与位移关系曲线

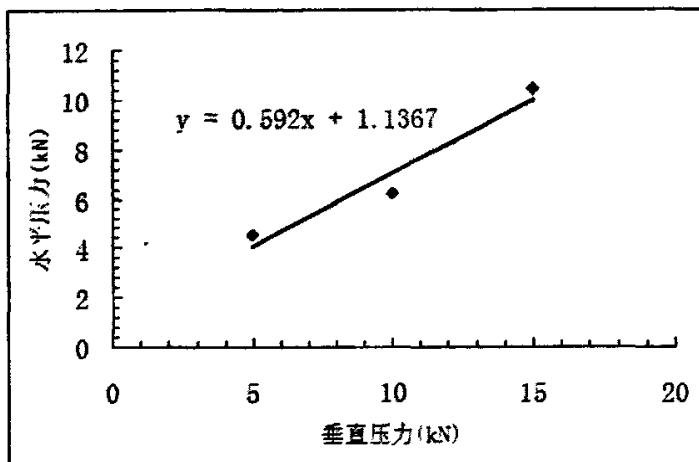


图 4-12 密实砂中筋材直剪摩擦力与垂直压力关系曲线

根据试验结果可绘制出如图 4-12 的直剪摩擦力与压力关系曲线，经过计算整理可以得出如下表的试验结论。

表 4-3 直剪试验界面特性随砂土密实度变化关系表

	干容重 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	等效外摩擦角 $\delta^*$	等效粘聚力合力 $C'$	拉压力关系曲线
粗砂(较松)	16.7	20.96	0.4557	$y = 0.3831x + 0.4557$
粗砂(中密)	17.5	28.9	0.8567	$y = 0.552x + 0.8567$
粗砂(密实)	18.4	30.61	1.1367	$y = 0.592x + 1.1367$

表 4-4 拉拔试验界面特性随砂土密实度变化关系表

	干容重 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	等效外摩擦角 $\delta^\circ$	等效粘聚力合力 $C'$	拉压力关系曲线
粗砂（较松）	16.7	18.02	0.3253	$y = 0.2083x + 0.3253$
粗砂（中密）	17.5	18.4	1.301	$y = 0.3328x + 1.301$
粗砂（密实）	18.4	30.09	2.7885	$y = 0.5794x + 2.7885$

从表 4-3 可以看出，在相同的垂直压力下，随着密实度的提高，直剪力也增加，土与格栅之间的等效外摩擦角  $\delta^\circ$  也增大，等效合粘聚力  $C'$  也增大，试验中可以看出等效外摩擦角  $\delta^\circ$  在填土较松的情况下非常小，这说明了一种情况就是在填料不够密实的情况下，因为土体在没有夯密实的情况下，由于格栅表面比较光滑，填土和格栅表面的摩擦力就很小，不够密实的土体对格栅的嵌固作用非常微弱，剪切时格栅很容易向前滑动。随着密实度的提高，等效外摩擦角  $\delta^\circ$  增大的很快，比内摩擦角  $\varphi$  大的多，等效合粘聚力  $C'$  也越来越大，这充分说明了填料的密实度对加筋土工程尤为重要，这和拉拔试验的结果趋势相同。这也提醒我们在加筋土工程施工中一定要注意碾压质量，应该严格检测碾压密实度。

#### 4.4 光板摩擦力

为了比较直剪摩擦力与拉拔力的比例，本文还采用了光板格栅做了直剪试验。试验结果如下。

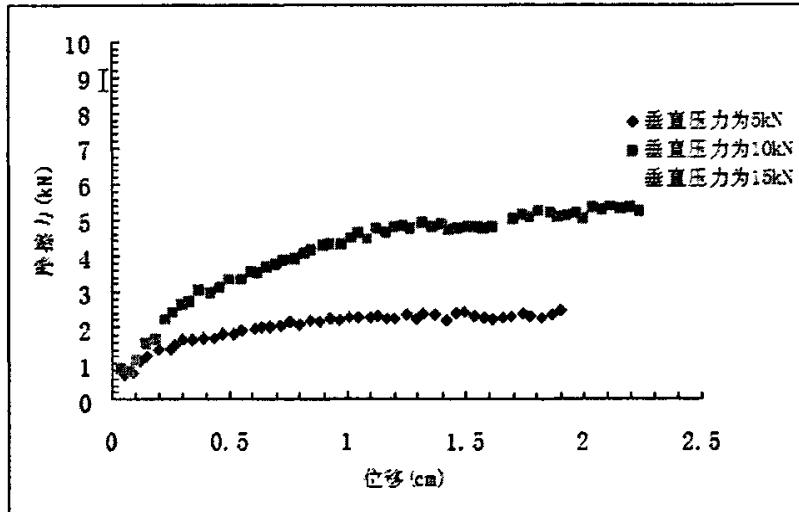
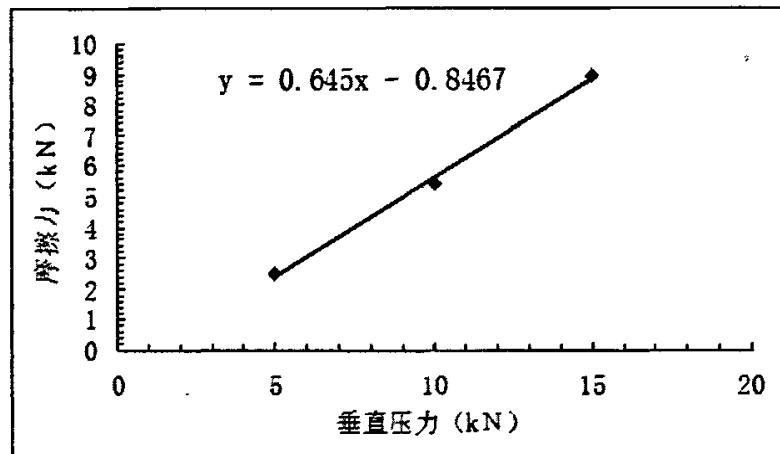
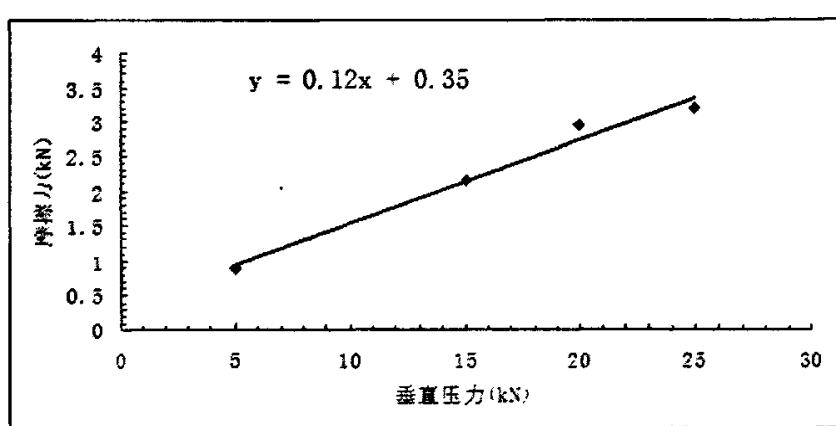
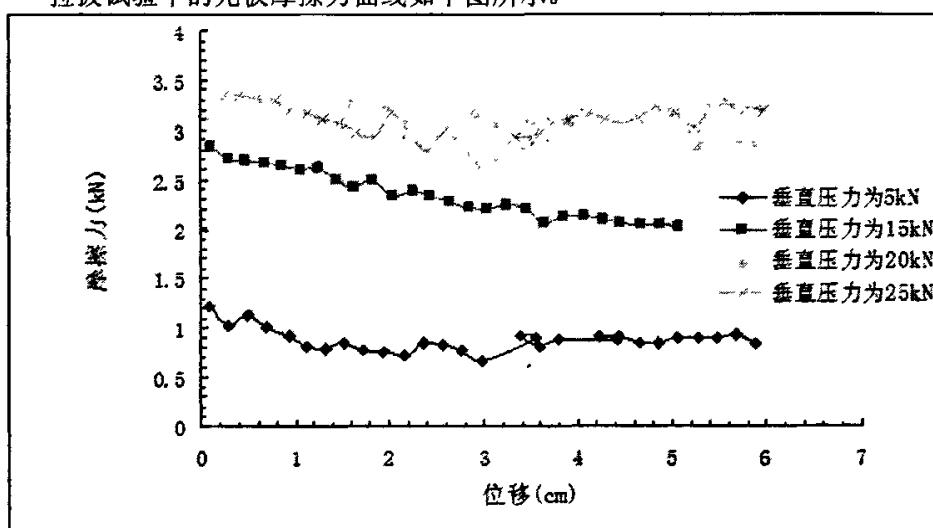


图 4-13 松散砂中光板直剪摩擦力与位移关系曲线



拉拔试验中的光板摩擦力曲线如下图所示。



从图中我们可以看出，对于光板格栅，直剪试验和拉拔试验的曲线不同。主要是因为两者的试验机理不同。对于光板来说，不存在格栅缝隙中有填料的问题，填料已被光板格栅分隔，填料是不连续的。在拉拔试验中，拉出光板格栅类似于简单的直线运动，填料与填料之间没有相对运动，所受的摩擦力都是格栅与填料之间的摩擦力，所以其大小几乎前后一致，只是由静止到运动时所需的摩擦力大一些。而在直剪试验中，只是破坏面的界面性质不同，所以曲线的性质与普通直剪试验相同。这也验证了直剪试验和拉拔试验是两种性质不同的试验，所得的结果可比性不大。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 本文的结论

本文通过试验及理论研究得出如下结论：

- 1) 在研究土工合成材料加筋效果的试验方法中，直剪试验和拉拔试验是两种方式不同，机理不同的试验，因此，为了使试验的结果更为有效，更为科学，必须根据试验要求选择研制合格的试验器材。
- 2) 土工格栅的加筋效果，不光与加筋材料有关，还与加筋填料土的性质有关，加筋材料的选择应该因工程需要进行选择，应该满足既能保证了工程的安全性，还能节省工程费用。这就要求设计者的计算和设计经验丰富。填料土介质的选择也是加筋土工程中必须考虑的重点，试验中分别选择了三种不同介质进行了试验，发现3种填料都有其优点和缺点，砂填料不光可以起到加筋的作用，还能作为渗透排水层，不足之处就是砂子是散体，不易压密实。石屑填料的优点就是对于合适尺寸的格栅起嵌固作用很明显，可以很快就能起到加筋作用，缺点就是石屑棱角太多，容易划伤破坏格栅，而且由于破坏方式的不同，加筋效果的偶然性比较大。土的加筋效果也很明显，由于土更容易击实，不同密实度的土体加筋效果也不一样，密实的土中，土工格栅的加筋效果也是很明显的，对格栅的伤害也很少，缺点就是没有排水作用。
- 3) 试验研究还发现，加筋土的格栅加筋作用还与上覆压力有关，在相同的密实度条件下，上覆压力越大，加筋材料的效果越好，这和拉拔试验的研究结果一致。
- 4) 在加筋土工程中，土工格栅的加筋效果还与填料的击实的密实程度有很大的关系，试验中，我们分别对粗砂作为填料按不同密实度做了直剪试验，密实度越高，摩擦力就会增加的越大，而且，发挥筋材作用的时间也越短。
- 5) 在加筋土试验研究中，直剪试验和拉拔试验是两种不同的试验，试验机理不同，直剪试验能模拟加筋土局部剪应力与位移关系，而拉拔试验能反映沿筋材剪应力与位移间的变化关系。尤其是采用的加筋材料为土工格栅，在格栅表面，填料的相对运动方式不同。因此，两种试验的结果不具太大的可比性，在实际工程中，应根据实际情况选择更接近工程情况的试验方式，用其试验结果为实际工程提供依据。

## 5.2 对今后研究的展望

1) 对于不同介质的土体中的直剪试验，科研人员做的试验不少，可是他们得出的规律性很多都是矛盾的，例如经常是相同的试验，但结论往往相差很多。试验研究的随机性很大，这就需要我们要通过大量的试验数据来说话，多做平行试验。这样的试验结果才能具有说服性。

2) 拉拔试验和直剪试验是研究界面特性最好也是最经济合算的研究方法，但是很多研究单位，还是不愿意投入太多，试验设备太简陋，根本不能作为科研之用，这种条件下搞出来的研究成果可信度就可想而知了。

3) 通过多组直剪试验发现了很多规律，以及试验中不可避免的误差希望下面的研究者能找到更好的方法予以解决，例如，试验过程中，土体的密实度对试验结果的影响很大，希望能找到更好的控制密实度方法，还有直剪试验中箱体之间摩擦力的控制，随着上覆压力的增大，如何有效减小箱体之间以及箱体与轨道之间的摩擦力，使数据更为可靠，是今后试验研究中仍需改进的地方。我们设计的仪器在箱体之间采用了光滑的钢珠，摩擦力很小，但随着上覆压力的增大，个人认为仍需研究更先进的方法来控制摩擦力。

4) 对于上覆压力的施加，如果通过载荷板加载，由于击实后的土体不是很平整的，这样使加载不均匀，以后这样的试验，最好找到更好的加力措施使加载均匀（例如把力通过沙袋传递到土体上，是一个比较好的方法）。

5) 在剪切的过程中，随着箱体的移动，在加载板下的部分土体会在下方土体的挤压下朝一侧堆积，在加载板下形成一个斜坡，这种情况在粒径较大的填料中尤为明显，如石屑。这样在剪切过程中，压力很难稳定，希望以后的试验者在设计仪器时能够有好的解决办法。

6) 直剪试验的试验箱不能太小（根据经验最好大于  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ），太小了格栅的纵肋和横肋都较少，边界效应更为明显，研究的结果不具有可推广性，可根据试验需要，加工适合的试验设备。尽量消除边界影响，试验设备的操作尽量采用机械化和自动化采集，这样能有效避免人为误差，提高试验结果精度。

7) 剪切速度的快慢，对加筋效果的影响，还需要一定的试验研究，希望后面的试验者能进一步进行研究。

8) 曾经有学者提出直剪试验所得的摩擦力与拉拔试验所得的摩擦力相比，占一定的比例，本次试验试图得出这个比值，但由试验结果分析，两者的机理不同，而且在格栅的缝隙中，土的相对运动方式不同，所以可比性不大。个人认为若采用无纺布或编制袋等土工材料，结果可比性较大，由于研究时间限制，本次试验没有对这些材料进行分析。希望后面的研究者对此进行研究，并得出可推广

的结论。

## 参考文献

- [1] Holtz R D, Laboratory studies of reinforced earth using a woven polyester fabrics [A]. Proc Int Conf On the Use of Fabrics in Geotechnics : Vol 1[C] .Paris ,1977,113~117
- [2] Myles B. Assessment of soil fabric friction by means of shear[A] Proc 2nd Int Conf on Geosynthetics : Vol 3[C] . Las Vegas, USA , 1982.787~792
- [3] Miyamori T, Iwai S, Maiuchi K. Prictional characteristics of non-woven fabrics[A]. Proc 3rd Int Conf on Geosynthetics:Vol 3[C] .Vienna,Austria,1986,701~705.
- [4] Williams N D, Houlihan M.Evaluation of friction coefficients between geomembranes, geotextiles and related products[A]. Proc 3rd Int Conf on Geosynthetics[C]. Vienna, Austria, 1986.
- [5] Eigenbrod K D and Lucker J G. Determination of Friction Values for the design of side slopes lined or protected with geosynthetics. Canadian Geotechnical Journal, 1987. 24(4)
- [6] Degoutte G, Mathieu G Experimental research of friction between soil and geomembranes or geotextiles using a 30cm×30cm shear box[A] . Proc 3rd Int Conf On Geosynthetics[C] .Vienna, Austria, 1986.
- [7] Ochiai H; Hayashi S, Otani J, Hirai H. Evaluation of pull out resistance of geogrid reinforced soils[A]. Proc Earth Reinforcement Practice: Vol 1[C] . Balkema, 1992. 141~146.
- [8] Bergado D T, Chai J C, Balasubramaniam A S. Interaction between grid reinforcement and cohesive – frictional soil[A]. Proc Earth Reinforcement Practice: Vol 1[C]. Balkema, 1992. 29~34.
- [9] Hausmann M R, Clarke J. Fly ash-geosynthetic interaction[A]. Proc 5th Int Conf On Geosynthetics[C]. Singapore,1994.433~436.
- [10] Koutsourais M, Sandri D, Swan R.Soil interaction characteristics of geotetiles and geogrids[A].Proc 6th Int Conf On Geosynthetics[C].Atlanta,USA,1998.739~744.
- [11] Broms B B, Chandrasekaran B, Wong K S. Fabric reingorced retaining walls [A]. Proc; Int Symposium on Application of Geosynthe tic Technology [c], K III,Jakarta,1992.1~30
- [12] 刘建锋, 徐进, 高春玉, 土的直剪试验缺陷探讨, 四川水力发电, 2005 年2月, 第 24 卷第 1 期
- [13] 杨荣实, 张喜军, 土工合成材料的分类及其功能简介, 黑龙江交通科技, 2005 年第 1 期

- [14] 赵爱根, 盛崇文. 土与土工织物界面抗剪强度研究, 水利水运科学研究所, 1987
- [15] 姚代禄, 张光羽, 加筋土挡墙中加筋与土之间的摩擦性质初探, 岩土工程学报, 1989, 11(1): 49~54
- [16] 王吉力, 马时冬, 土与土工织物接触界面间摩擦特性的试验研究, 岩土力学, 1992, 13 (4): 35~44
- [17] 阎树旺, Ben Barr, 土工格栅与土相互作用的有限元分析, 岩土工程学报, 1997, 19 (6): 56~61
- [18] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 崔颖, 土工合成材料与土界面作用特性的研究, 2001, 23 (1): 89~93
- [19] 施有志, 马时冬, 土工格栅的界面特性试验, 岩土力学, 2003, 24 (2): 296~299
- [20] 介玉新, 李广信, 加筋土的计算方法, 水利水电技术, 1999, 5: 67~69
- [21] 李广信, 魏戈峰, 土工织物在土中沿不同角度的拉拔试验及加筋土的稳定分析, 地基处理, 1992, 3 (1): 51~60
- [22] 杨光煦, 土工网格与土体的界面效应及其在堤防与路堤工程中的应用, 全国第五届土工合成材料学术会议论文集, 2000, 168~181
- [23] 吴景海, 王德群, 陈环, 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J], 岩土工程学报, 2000, 22 (2): 199~204
- [24] 吴景海, 王德群, 陈环等, 土工合成材料加筋的试验研究, 土木工程学报, 2002, 35 (6): 93~98
- [25] 伍元, 李英才, 土工织物加筋粉煤灰堤模型试验浅析, 广东水利水电, 2003, 第一期: 41~43
- [26] 王钊, 陆士强, 土工织物的拉伸、蠕变及加筋土的剪切特性, 武汉水利电力学院, 1992, 3 (2): 9~16
- [27] 施有志, 土工合成材料的拉拔试验研究, 岩土工程界, 2003, 6 (10): 75~78
- [28] 马学宁, 杨有海, 土工格栅与土界面特性的试验研究, 兰州铁道学院学报, 2003, 22 (4): 88~104
- [29] 王钊, 土工织物加筋全线的设计与模型试验, [博士学位论文], 武汉, 武汉水利水电学院, 1988
- [30] 王俊林, 郑培成, 盛崇文, 土工织物抗拔试验分析研究, 土工织物抗拔试验分析研究, 郑州工学院学报, 1991, 12 (3): 156~160
- [31] 赵川, 周亦唐, 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究, 岩土力学, 2001, 22 (4): 419~422
- [32] 保华富, 龚涛, 土工格栅加筋碎石土的强度和变形特性, 水文学报, 2001, 第1期: 76~85

- [33] 苏谦, 蔡英, 土工格栅、格室加筋砂填料大模型试验及抗变形能力分析, 西南交通大学学报. 2001, 36 (2): 176~180
- [34] 徐少曼, 洪昌华, 土工织物加筋堤坝软基朗非线性分析[J], 岩土工程学报, 1992, 21 (4): 438~443
- [35] 陈群, 何昌荣, 两种加筋土挡墙的现场拉拔试验, 四川建筑. 1997, 17 (3): 40~43
- [36] 保华富, 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究, 岩土工程学报. 1999, 21(2): 217~221
- [37] 杨锡武, 钟以明, 筋材结构对其加筋土强度特性的影响研究, 重庆交通学院学报, 2002, 21 (1): 46~50
- [38] 高江平, 李中志, 李满屯, 加筋与土体间界面反应特性的大型拉拔试验研究, 西北建筑工程学院学报, 2001, 18 (2): 9~12
- [39] 张茹, 何昌荣, 谢嘉琼, 潘俊英, 余建华, 加筋土土工带的拉拔试验研究, 四川大学学报, 2002, 34 (4): 26~29
- [40] 邓荣基, 加筋土强度的试验研究, 兰州铁道科学学院学报, 1994, 13 (3): 1~8
- [41] 梁波, 孙遇祺, 加筋土模型试验中的拉力破坏研究, 岩土工程学报, 1995, 17 (2): 83~87
- [42] 杨果林, 王永和, 加筋土筋材拉拔试验研究, 煤炭学报, 2000, 25 (1): 51~54
- [43] 杨果林, 王永和, 加筋土筋材工程特性试验研究, 中国公路学报.2001, 14 (3): 11~16
- [44] 张光明等, 加筋土挡墙中加筋与土之间的摩擦性质初探, 岩土工程学报, 1989, 11 (1): 49~54
- [45] 黄英, 保华富, 加筋碎石土的抗剪强度特性研究, 大坝观测与土工测试, 2000, 24 (5): 44~47
- [46] 李佳川, 加筋砂土的抗剪强度特性, 勘察科学技术, 1992, 第 2 期: 22~25
- [47] 王志玲, 加筋粉土的抗剪强度特性探讨, 人民黄河, 1994, 第 4 期: 39~41
- [48] 石名磊, 邓学钩, 江瑞龄, 谈长庆, 加筋粉煤灰的力学特性室内试验研究, 东南大学学报. 1999, 29 (1): 159~162
- [49] 岳祖润, 赵维钧, 张兴明, 马培德, 粉煤灰中的筋条拉拔试验, 石家庄铁道学院学报, 1994, 7 (2): 78~82
- [50] 梁波, 孙遇祺, 饱和粘性加筋土的强度特性研究, 兰州铁道学院学报. 1992, 11 (2): 49~59
- [51] 王正宏, 包承刚, 李广信 土工合成材料的加筋作用及其分析计算 地基处理 1992 3 (1): 1~10

- [52] 雷胜友, 胡定, 土与加筋之间摩阻系数问题的新认识, 石家庄铁道学院学报, 1998, 11 (1): 70~74
- [53] 魏红卫, 喻泽红, 邹银生, 土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究, 水利学报, 2005年5月, 第36卷第5期
- [54] 白晓红, 黄仙枝, 张苇, 加筋土技术在土木工程中的应用, 太原理工大学学报, 2003年9月, 第5期
- [55] 彭从文, 张子新, 加筋土试验研究进展, Geotechnical Engineering World, VOL 6, No.8
- [56] 张茹, 何昌荣, 谢嘉琼, 潘俊英, 余建华, 土工合成材料加筋土拉拔试验研究, 四川水力发电, 2002, 21 (1): 87~93
- [57] 王小军译, 土工格栅加筋支挡结构物的足尺试验研究, 国外公路, 1995, 15 (3): 47~52
- [58] 秦丰, 土工合成材料加筋软基路堤的有限元分析: [硕士学位论文], 天津; 天津大学, 2000
- [59] 冯艺, 土工合成材料加筋土坡的有限元分析: [硕士学位论文], 天津; 天津大学, 2004
- [60] 周建萍, 土工合成材料加筋软基路堤的应用研究: [硕士学位论文], 天津; 天津大学, 2001
- [61] 孙训海, 土工合成材料界面特性研究: [硕士学位论文], 天津; 天津大学, 2004

## 发表论文和科研情况说明

发表的论文：

1. 《The Finite Element Analysis of the Deep Foundation Pit Excavation And the model test》，严驰，冯驰，孙红月，刘润；天津大学学报
2. 《土工合成材料不同位置加筋效果的对比分析》，严驰，冯驰，冯仲武；港工技术

参与的科研项目：

1. 参与“国家 863 计划——正压冲固平台基础加固及承载机理研究”，主要参与了模型试验和计算软件的编写；
2. 参与了“沿海高速公路秦乐段软基处理—深层水泥土搅拌桩强度室内试验研究”
3. 参与了土工格栅的界面特性的试验研究，前期还参与了试验设备的设计与制造以及设备的改进。
4. 参与了碱渣土性现场试验的研究；
5. 参与了天津市自来水大厦的基坑支护的设计与制图
6. 参与了天津市华苑地铁三号线抽水试验
7. 参与了“天津港散货物流中心煤注水试验渗透性分析可行性研究”

## 致 谢

本文是在导师严驰副教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。在论文期间，导师自始至终给予关键性的指导。导师严谨的治学态度、渊博的知识和忘我的敬业精神给我留下了深刻的印象，将对我今后的人生历程产生重要影响。导师不仅在学业上，而且在生活上也给予了我无微不至的关怀和帮助，使我能顺利完成学业。在此，向尊敬的导师表示衷心的感谢和深深的谢意！

试验工作得到了导师和师弟的帮助和大力支持，试验设备的加工还要感谢有关单位的大力帮助。

在本人研究生期间，要感谢我的师弟张书杰的帮助；感谢同届的李学山，王传成，栾晶晶的关心，感谢我亲人对我的帮助。此外，还要感谢我的朋友们对我的关心和鼓励，正是他们使得我的研究生阶段成为我人生中最重要而难忘的一个阶段。