

# 土工地锚在软基加固中的应用\*

梁 波 , 刘 春 , 王安正

( 兰州铁道学院 土木建筑学院 ,甘肃 兰州 730070 )

摘 要 通过土工地锚的三轴试验和加固软基的承载力模型试验 ,研究了土工地锚加筋土的强度特性和加筋地基的承载力特性 . 试验和分析表明了土工地锚这一加筋形式具有广泛的工程应用前景 .  
关键词 土工地锚 加筋土 软土地基 模型试验 极限承载力  
中图分类号 :TU447 文献标识码 :A

土工合成材料( Geosynthetics )是由高分子聚合物制成的用于岩土工程的材料 . 由于土工合成材料本身的高强度、延展性、柔韧性等特点 ,由土工合成材料与其它材料组合而成的土工技术应加以考虑并充分利用 . 土工地锚正是在这一基础上应运而生的一种新型土工技术 . 土工地锚的定义应该是针对不同工程 ,采用不同土工合成材料 ,在一定面积上对砂石等粗骨料进行包裹形成矩形或圆形断面并有一定长度、放置在土体中类似于锚定物的土工加筋技术<sup>[1]</sup> . 它可应用于路基工程中的边坡稳定<sup>[2]</sup>、薄层软基加固以及减少挡墙墙背土压力等方面 . 因此 ,研究土工地锚的加筋机理、加筋效果是很有意义的 .

本文对土工地锚的强度特性和加固软基的承载力进行了研究 ,为此作了大量的三轴试验和模型试验 ,以探求土工地锚加筋土的工程特性 .

## 1 土工地锚加筋土的强度特性

用加筋的方式提高土体的强度 ,自古以来在各个国家都采用着 . 由土工地锚和填土组成的复合体称之为土工地锚加筋土 . 为研究这一特性 ,主要进行了大量的三轴试验 .

土工地锚加筋土室内实验的试件是由人工制备的 ,试样直径为 10 cm ,高径比为 2 . 试验采用的土工合成材料有四种类型和型号 ,一种是山东泰安塑料一厂生产的土工网( 产品型号 :CE131 ) ;一种是仪

征阿莫科织物有限公司生产的无纺布( 产品型号 : CEF - 2104 和 CEF - 2105 ) ;另一种是核工业湖南土工布厂生产的聚酯长纤维土工布 . 土工地锚分别采用土工网、土工布、无纺布包裹粒径为 2 ~ 3 mm 的石子制成 . 为对比研究 ,对单层土工地锚和双层土工地锚以及筋材平铺的加筋形式分别进行了试验 .

强度试验项目包括无筋土和四种材料的地锚加筋土 . 五组试验中 ,利用同一种密实度和同一种含水量的砂粘土 .

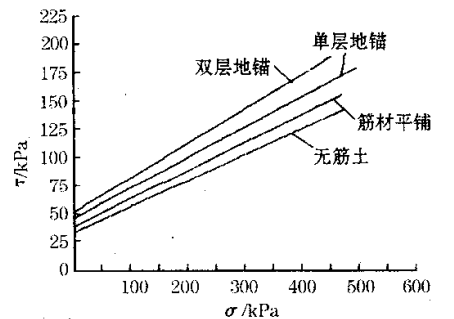
利用最小二乘法得到的无筋土及各种形式的加筋土抗剪强度指标及强度包线见表 1 和图 1 .

表 1 无筋土及各种加筋土抗剪强度指标汇总

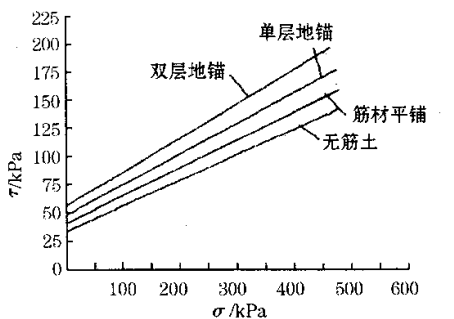
材 料	加筋形式	$\Phi / (^\circ)$	$C / (kPa)$
无筋土		24.6	34.4
	筋材平铺	26.4	40.2
土工网	层土工地锚	28.3	47.7
	双层土工地锚	30.4	53.4
土工布	筋材平铺	26.4	42.2
	单层土工地锚	28.7	49.8
	双层土工地锚	31.4	57.7
无纺布 2104	筋材平铺	25.2	40.8
	单层土工地锚	27.9	48.1
	双层土工地锚	29.9	55.3
无纺布 2105	筋材平铺	25.8	41.4
	单层土工地锚	28.1	48.8
	双层土工地锚	31.2	56.4

\* 收稿日期 2000 - 06 - 30  
基金项目 地矿部岩土工程开放研究实验室基金资助( KF013 )  
作者简介 梁 波( 1964 - ) ,男 ,四川隆昌人 ,博士 ,兰州铁道学院教授 .

的加力架作为试验中加载的反力装置. 加载设备为油压千斤顶. 模型槽构造示意图见图 2.



(a) 采用不同土工网加筋形式的土体抗剪强度线



(b) 采用不同土工布加筋形式的土体抗剪强度线

图 1 各种材料不同加筋形式的加筋土和无筋土的抗剪强度线

由上述试验结果,可以得出以下结论:

- 1)在土中合理布设士工地锚,可以显著的提高土体的抗剪强度;
- 2)在加筋率相同时,在保证士工地锚本身的结构不发生破坏的前提下,士工地锚加筋土的抗剪强度高于筋材平铺加筋土的抗剪强度.平铺加筋时,加筋体只是筋材本身,而对士工地锚加筋土而言,加筋体为筋材与其中的填料所构成的复合体,由于士工地锚的三维立体结构,相邻加筋层之间的土体变薄了,因而其加筋效果比筋材平铺的好.
- 3)在士工地锚加筋土中,影响加筋效果的主要因素是地锚的厚度和加筋层数.地锚厚度越厚,加筋效果越好,在地锚厚度相同的情况下,增加加筋层数,将提高加筋效果.

2 士工地锚加筋软土地基模型试验及分析

2.1 模型槽构造

在 1.38 m×0.84 m×0.9 m 的模型槽中作平面应变条件下的士工地锚软土地基的模型试验.

模型槽用角钢焊接而成,两侧安装有机玻璃以观察地基变形,两端分层安装挡板.套在模型槽上

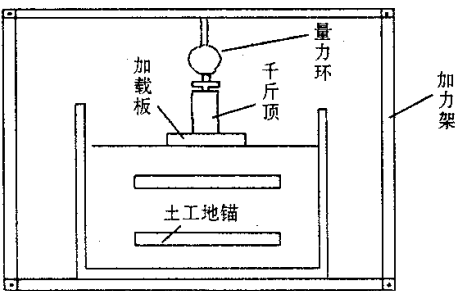


图 2 模型槽构造及士工地锚布置示意

2.2 加载方式

利用油压千斤顶分级给宽度  $b = 28\text{ cm}$ 、长度  $L = 84\text{ cm}$  的刚性加载板加载. 利用量力环来测定加载的大小. 每级加载的增量为  $5.81\text{ kPa}$ .

2.3 试验及数据采集及士工地锚构成和布置

数据测量设备由士压力盒、两个位移计、频率接收仪和钢尺组成. 位移计的灵敏度为  $0.01\text{ mm}$ , 其中一个量程为  $50\text{ mm}$ , 另一个量程为  $30\text{ mm}$ . 试验过程中,位移计变化由人工纪录,士压力盒数据由频率接收仪测定. 荷载每增加  $5.81\text{ kPa}$ ,记录基础沉降量(即刚性加载板的沉降量),士压力盒变化值一次.

试验采用长  $1.38\text{ m}$ 、宽  $0.84\text{ m}$ 、厚  $0.78\text{ m}$  的饱和和软土地基模型. 在距软土地基表面为  $18\text{ cm}$  和  $48\text{ cm}$  的水平面上布置士压力盒,用于测量地基内部的竖向应力分布. 每次试验用土的含水量和级配曲线保持恒定. 装试样时,分层填充并击实每层土,每层厚为  $6\text{ cm}$ ,共  $13$  层. 在填筑过程中,水平埋设士工地锚. 最后加水浸泡,使地基土含水量达到  $23\%$ ,饱和度为  $85\%$ . 试验是在平面应变条件下进行的. 试验用土为砂粘土,其物理力学性质指标见表 2 所示.

表 2 试验用土的物理力学参数

内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	粘聚力 $c / \text{kPa}$	干容重 $\gamma_d / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和含水量 $w / \%$	饱和度
24.6	34.4	16.7	23	0.85

模型试验中使用的士工地锚由土工布包裹小石子(粒径  $3 \sim 5\text{ mm}$ )制成,直径为  $10\text{ cm}$ ,长度  $L$  为  $40\text{ cm}$  和  $80\text{ cm}$  两种,埋置深度  $Z$  分别采用  $18\text{ cm}$  和  $30\text{ cm}$  两种.

2.4 试验结果

表 3 列出了试验测得的素土地基与士工地锚复

合软基的极限承载力.

表 3 不同情况下地基承载力

地基类型	条 件	极限承载力/kPa
无筋软 土地基		34.86
天然地基		46.48
土工 地锚 复合 软基	$L = 40\text{ cm}, m = 4, Z = 30\text{ cm}$	52.29
	$L = 40\text{ cm}, m = 6, Z = 30\text{ cm}$	58.10
	$L = 40\text{ cm}, m = 4, Z = 18\text{ cm}$	52.29
	$L = 80\text{ cm}, m = 4, Z = 30\text{ cm}$	63.91
	$L = 80\text{ cm}, m = 6, Z = 18\text{ cm}$	69.72

注 : $Z$  代表士工地锚水平埋置深度 ; $L$  代表士工地锚长度 ; $m$  代表士工地锚的数量.

2.5 试验结果与理论分析结果的对比

文献[3]给出了一般加筋土复合地基极限承载力理论计算公式.

加筋地基发生粘着破坏时的极限承载力  $q$  为

$$q = q_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[q_0 B + \gamma(D + Z_i)L]f \cdot CR \cdot Z_i}{(B^2/4) - B \cdot f \cdot CR \cdot Z_i} \tag{1}$$

表 4 理论分析与试验结果对比

地基类型	条 件	极限承载力/kPa		
		粘着破坏	拉力破坏	实测值
无筋软 土地基				34.86
地锚 复合 地基	$L = 40\text{ cm}, m = 4, Z = 30\text{ cm}$	55.94	93.75	52.29
	$L = 40\text{ cm}, m = 6, Z = 30\text{ cm}$	63.10	106.49	58.10
	$L = 40\text{ cm}, m = 4, Z = 18\text{ cm}$	39.27	58.41	52.29
	$L = 80\text{ cm}, m = 4, Z = 30\text{ cm}$	63.88	93.75	63.91
	$L = 80\text{ cm}, m = 6, Z = 18\text{ cm}$	42.32	63.51	69.72

注 :当士工地锚埋置深度较浅时(一般  $Z/B \leq 1$ ),复合地基主要发生拉力破坏 ;当士工地锚埋置深度较深时(一般  $Z/B > 1$ ),复合地基主要发生粘着破坏.

从表 4 对比分析可看出 :当士工地锚埋置深度  $Z$  为 30 cm 时,复合地基极限承载力实测值与按粘着破坏理论计算公式计算值相符 ;当士工地锚埋置深度  $Z$  为 18 cm 时,复合地基极限承载力实测值与按拉力破坏理论计算公式计算值相符.

此外,为了研究士工地锚加筋软土地基中的应力分布特征,在模型试验中,分别在士工地锚上方( $Z = 18\text{ cm}$ )和下方( $Z = 48\text{ cm}$ )埋设土压力盒,土压力盒布设在与模型槽同向的模型槽中线上.图 3 为条形加载板平均荷载为  $P = 46.48\text{ kPa}$  时,无筋软基和士工地锚加筋软基( $L = 40\text{ cm}, m = 4$ )中上

式中, $D$  为基础埋深 ; $q_0$  为无筋土地基极限承载力 ; $B$  为基础宽度 ; $Z_i$  为第  $i$  层加筋至基础底面的距离 ; $L$  为地基中加筋长度 ; $f$  为筋土之间的摩擦系数 ; $\gamma$  为地基土容重 ; $CR$  为水平加筋率.

若筋条宽度为  $\omega$ ,筋条之间的净距为  $S$ ,则  $CR$  为

$$CR = \frac{\omega}{\omega + S} \tag{2}$$

拉力破坏时加筋地基极限承载力为

$$q = q_0 + (4R_T \cdot CR/B^2) \sum_{i=1}^n Z_i \tag{3}$$

式中, $R_T$  为加筋单宽抗拉强度,其余符号意义同前.

试验测得无筋软土地基的极限承载力  $q_0$  为 34.86 kPa,埋置深度  $Z$  分别采用 18 cm 和 30 cm,士工地锚长度  $L$  为 40 cm 和 80 cm,加筋层数为一层,水平加筋率  $CR$  为 37% 和 45%,基础宽度  $B = 28\text{ cm}$ ,试验测得软土与士工地锚间摩擦系数  $f$  为 0.21,土工布的单宽抗拉强度为 520 N/5cm.

根据上述的参数分别按粘着破坏和拉力破坏理论公式计算各种加筋条件下的地基极限承载力和试验结果对比分析.计算结果见表 4.

层面( $Z = 18\text{ cm}$ )水平面上的竖向应力  $\sigma_z$  分布图.

在士工地锚加筋地基中,士工地锚与其中包裹的粗骨料构成了加筋复合体.这种加筋复合体的抗弯刚度大、整体性强,使得这种加筋复合体对上部结构传递下来的荷载的扩散作用明显增强,使得筋体下卧层的竖向附加应力峰值明显减小,竖向附加应力分布更为均匀.如图 3 所示,当  $P = 46.48\text{ kPa}$  时,峰值竖向压力由 36.18 kPa 降低到 23.76 kPa,降低了 34.32%.由于士工地锚对软基的侧向变形约束作用,使得软基的强度、刚度和整体性明显加强,作用在筋体下卧层的竖向压应力分布更为均匀,

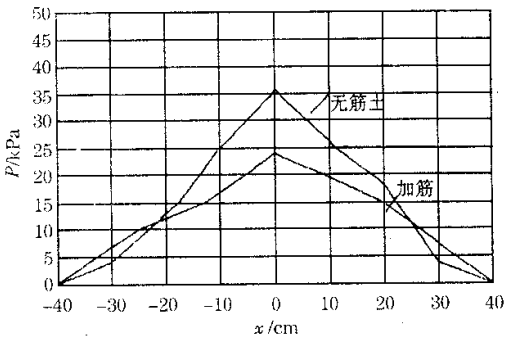


图 3 上层面竖向压应力分布(  $Z = 18\text{ cm}$  )

在  $x = \pm 30\text{ cm}$  处 , 竖向压力由  $3.92\text{ kPa}$  增加到  $7.01\text{ kPa}$  增加了  $78.8\%$  . 此外 , 降低了软土地基的沉降量 . 有效的保护了下卧层 , 使下卧层沉降更加均匀 , 从而提高了上部结构的稳定性 .

3 结论与讨论

1) 土工地锚加筋土不但提高了土体的内摩擦角 , 而且提高了土体的粘聚力 , 从而提高了土工地锚加筋土的抗剪强度 . 研究表明 : 土工地锚加筋土的强度高于筋材平铺时加筋土的强度 ; 采用层数多的土工地锚加筋土强度高于层数少的加筋土 .

2) 在软基加固中 , 土工地锚的主要作用有两个方面 : 一是土工地锚加筋材料提供了较大的抗拉强度 ; 二是土工地锚加筋材料和其中包裹的粗骨料共同组成了复合加筋结构 , 这种结构所提供的抗拉强

度可以满足防止加筋土发生破坏的需要 , 它与周围软土产生的粘着力、摩擦力可以满足防止加筋土发生粘着破坏的需要 .

3) 当土工地锚埋置深度较浅时( 一般  $Z/B \leq 1$  ) , 复合地基主要发生拉力破坏 ; 当土工地锚埋置深度较深时( 一般  $Z/B > 1$  ) , 复合地基主要发生粘着破坏 .

4) 应用土工地锚加固软基 , 既能降低地基峰值压力 , 又起到了扩散地基应力的作用 .

土工地锚加筋土和加筋复合地基是十分复杂的结构 , 本文对土工地锚加筋土的强度特性和加筋地基的工作机理进行了定性的研究 ; 并对加筋参数对加固软基效果的影响进行了探讨 . 为使土工地锚能在实际工程中进行应用仍有许多问题有待解决 . 在今后的研究工作中还应包括以下内容 : 土工地锚在软基中的排水机理的研究、土工地锚复合地基承载力的计算、土工地锚复合地基沉降量的计算及土工地锚的最佳长度、布置间距和埋置深度等 .

参考文献 :

[ 1 ] Broms B B. Geo - Anchors[ J ]. Geotextiles and Geomembranes , 1993 ( 2 ) 215 - 230 .  
[ 2 ] 梁 波 . 土工地锚在边坡稳定中的分析计算[ J ]. 路基工程 , 1997 ( 4 ) : 18 - 22 .  
[ 3 ] 杨有海 , 丁 立 . 短加筋地基极限承载力研究[ J ]. 兰州铁道学院学报 , 1993 , 12 ( 4 ) : 15 - 20 .

Application of Geo - Anchor on Strengthening Soft Earth - foundation

LIANG Bo , LIU Chun , WANG An - zheng

( College of Civil Engineering and Architecture , Lanzhou Railway University , Lanzhou 730070 , China )

**Abstract :** According to three trial test of Geo - Anchor and the model test of Geo - Anchor ' s strengthening soft earth - foundation , the character of Geo - Anchor reinforced - earth and the mechanism of Geo - Anchor ' s strengthening soft earth - foundation are studied in this paper . The experiment and analysis indicate the prospect for Geo - Anchor being used in engineering .

**Key words :** Geo - Anchor ; reinforced - earth ; soft earth - foundation ; model experiment ; terminal bearing - capacity