土工地锚加筋地基模型试验研究*

梁 波　　刘 春
（兰州铁道学院土木建筑学院，兰州，730070）

提 要　根据土工地锚的构成形式，本文通过模型试验分析了土工地锚这一土工加筋新技术在软基加固中的作用，并提出了相应的结论。

一 概 述

软土作为工程建筑物的地基，由于其承载力低、压缩性高，往往会产生不同程度的坍滑或沉陷，危害工程安全。目前，有关处理软土地基的方法从原理上可分为排水疏干、置换法和水平加筋等几大类。

近年来兴起的土工合成材料加固软基的方法兼有上述几类作用。由于土工合成材料本身的高强度、柔韧性等特点，由土工合成材料与其他材料组合而成的土工技术应加以利用。土工地锚(Geo-Anchors)[1]正是在这一基础上应运而生的一种新型土工技术。它可应用于路基工程中的边坡稳定[2]、薄层软基加固以及减少挡土墙墙背土压力等方面。这一加筋锚定技术的研究在国内还较少见到。

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。通过土工地锚加固软基的模型试验，本文对其作用进行了分析并得到了有益的结论。

二 模型试验

1. 试验设备

在 1.38m(长)×0.84m(宽)×0.9m(深)的模型槽中作平面应变条件下的土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，两端分别安装挡板。套在

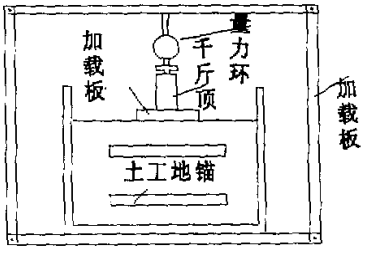


图 1 模型槽构造示意图

*国土资源部（原地矿部）岩土工程开放研究室资助课题（KF013）。

模型槽上的加力架作为试验中加载反力装置。加载设备为油压千斤顶。模型槽构造示意见图 1。

土压力盒是由江苏省金坛市土木工程仪器厂生产的 TYJ20 系列钢弦式土压力计。通过钢弦式频率接受仪的频率可求出相应的被测土压力值。

2. 试验模型制作地基加载方式

试验采用长 1.38m、宽 0.84m、厚 0.78m 的饱和软土地基模型。在距软土地基表面为 18cm 和 48cm 的水平面上布置土压力盒，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 厘米，共 13 层。在填筑过程中，水平埋设土工地锚。实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 1。模型试验中使用的土工地锚由土工布包裹小石子(粒径 3~5mm)制成，直径为 10cm，长度 L 为 40cm 和 80cm 两种，埋置深度 z 分别采用 12cm 和 30cm 两种。

表 1　试验用土的力学性质指标

内摩擦角	粘聚力	干容重	饱和含水量	饱和度
24.6^0	34.4kPa	16.7kN/m^3	33%	0.85

利用油压千斤顶分级给宽度 b=28cm、长度 L=84cm 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 5.8kPa。

3. 试验数据收集处理

数据测量设备由土压力盒、两个位移计、频率接收仪和钢尺组成。位移计的灵敏度为 0.01mm。试验过程中，位移计变化由人工纪录，土压力由频率接收仪测出并由人工纪录。荷载每增加 5.81kPa，记录基础沉降量(即刚性加载板的沉降量)、土压力盒变化值一次。

根据对比分析研究需要，采用不同长度和数量的土工地锚以及不同埋置深度共进行了五组模型试验，另外还做了天然含水量和饱和含水量的素土地基的模型试验。共计七组试验。试验中，当土挤出，在板的四周形成隆起的土堆，则认为地基完全破坏，停止加载。

4. 试验结果与分析

(1)荷载或地基承载力与沉降量的关系试验

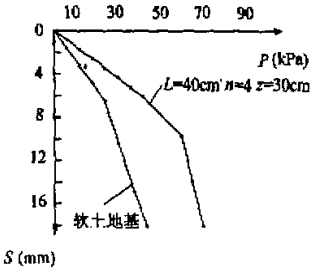


图 2 软土地基与土工地锚的 P-S 曲线

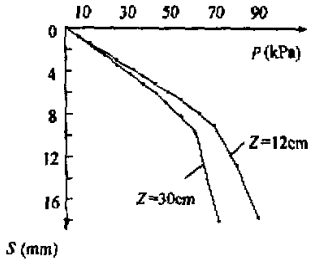


图 3 不同埋深土工地锚复合地基的 P-S 曲线(L=40cm，n=4)

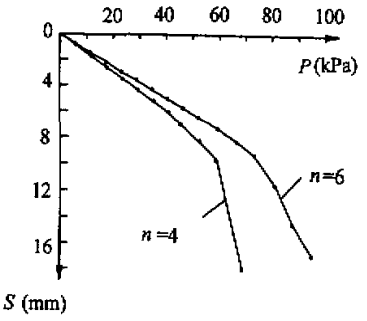


图4 不同数量土工地锚复合地基的 P~S 曲线
(L=40cm, z=30cm)

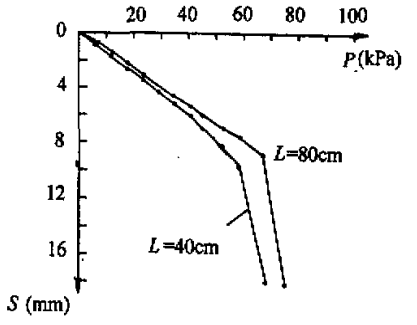


图5 不同长度土工地锚复合地基的 P~S 曲线
(n=4, z=30cm)

图2~图6给出了五组模型试验荷载与沉降关系曲线。其中 z 代表土工地锚水平埋置深度；L 代表土工地锚长度；n 代表土工地锚的数量。多数情况下，P-S 曲线大致可分为三个变形阶段：直线变形阶段、局部剪切阶段和完全破坏阶段。这三个变形阶段常在砂土地基和密实的粘性土地基中出现。在软土地基，从 P-S 曲线中常不容易清楚划分出这三个阶段。用 P-S 曲线确定地基土承载力基本值(设计值)，对中高压缩性土，可取 s/b=0.02 所对应的荷载作为基本值。这里 b=28cm，当 s_p/b=0.02，可用 s_p =6mm 作为模型地基承载力基本值[3]。以承载板沉降量 s_p =2mm、4mm、6mm(相对沉降量分别为 0.7%、1.4%、2.1%)分别来代表上述三个变形阶段，相应的地基承载力对比分析结果见表 2。

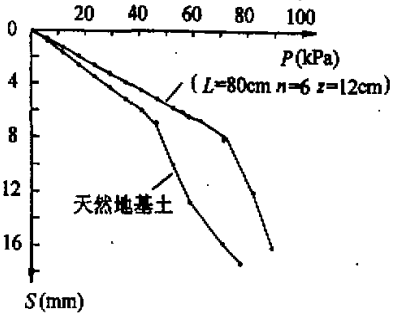


图6 软土地基与土工地锚的 P~S 曲线

表 2 素土地基和土工地锚加筋复合地基在不同沉降量下的承载力对比

不同类型地基		地基承载力（kPa）		
加载板沉降量		s_p=2mm	s_p=4mm	s_p=6mm
无筋软土地基		7.17	14.35	21.5
天然地基		15.3(2.13)	25.1(1.75)	40.6(1.89)
地锚复合地基	L=40cm、n=4、z=30cm	13.6(1.90)	26.9(1.87)	40.1(1.87)
	L=40cm、n=6、z=30cm	16.1(2.25)	31.8(2.22)	48.2(2.24)
	L=40cm、n=4、z=12cm	15.1(2.11)	30.1(2.10)	45.4(2.11)
	L=80cm、n=4、z=30cm	15.2(2.12)	30.2(2.10)	45.1(2.10)
	L=80cm、n=6、z=12cm	20.1(2.80)	40.3(2.81)	54.1(2.52)

注：括号内数字为不同类型地基承载力与无筋软土地基承载力之比值。

试验中，当沉降量突然剧增，把此时的承载力定为极限承载力。表 3 列出了软土地基和土工地锚加筋复合地基的极限承载力和复合地基极限承载力相对软土地基提高的百分比。

表 3　地基极限承载力

地基类型		极限承载力（kPa）	相对软土地基提高百分比
无筋软土地基		34.86	
天然地基		46.48	33.3%
地锚复合地基	L=40cm、n=4、z=30cm	52.29	50%
	L=40cm、n=6、z=30cm	58.1	66.7%
	L=40cm、n=4、z=12cm	52.29	50%
	L=80cm、n=4、z=30cm	63.91	83.3%
	L=80cm、n=6、z=12cm	69.72	100%

从上述图中和表中可以看出，不同类型的土工地锚复合地基明显提高了软基的承载力，降低了瞬时沉降量。除此之外还有以下特点：

(2)从表 2 中可以明显看出，要使土工地锚充分发挥加固地基的作用，需要一定的变形量。当变形量较小时，土工地锚对地基土的加固作用较小，当变形量逐渐增大时，土工地锚的加筋作用得以充分发挥，加固软基作用比较明显。这是因为在初期加载阶段，地基土在竖向荷载作用下，主要发生了较大的竖向压缩变形，在此过程中，构成土工地锚的筋材与其中包裹的小石子未能很好相互的作用，加筋复合体的结构性不强，因而使得加筋效果不明显；随着荷载的逐渐增大，地基土被逐渐压密，土工地锚形成了结构性较强的加筋复合体，约束了地基土的变形，发挥了加筋补强的作用，加固软基的效果比较明显。

(3)由于土工地锚增强了整个加筋层的刚度和整体性，有效的扩散了上部结构传递下来的附加应力，抑制了地基中塑性区的发展，缩小了塑性区的范围，限制了地基的竖向及侧向变形，使得瞬时沉降量大幅度降低，从而达到了“提高承载力，增强稳定性”的目的。

(4)根据图 3~图 5 可以看出土工地锚加筋的埋置深度对地基承载力的提高有影响，土工地锚的埋置深度不同，其加固效应不同。在其它条件相同的情况下，埋置深度较浅的土工工地锚复合地基的承载力高于埋置深度较深的复合地基的承载力。同时也可以发现，随着埋置的土工地锚的数量的增加，复合软土地基的承载力也随之提高，但是增加土工地锚的长度对软土地承载力的提高影响不大，只是略有提高。

(5)土工地锚复合地基的竖向应力分布

为了研究土工地锚加筋软土地基中的应力分布特征，在模型试验中，分别在土工地锚上方(z =18cm)和下方(z =48cm)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 7 为条形加载板平均荷载为 P=46.48kPa 时，无筋软基和土工地锚加筋软基(L=40cm、n =4、z =30cm)中 z=48cm 水平面上的竖向应力 σ_z 分布图；图 8 为 P=46.48kPa 时土工地锚上层面(z=18cm)和土工地锚下层面(z =48cm)的竖向压应力分布图。

在土工地锚加筋地基中，土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 7 所示，当 P=46.48kPa 时，峰值竖向压力由 37kPa 降低到 27.6kPa，降低了 25.5%。此外，由于土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，并使得软土地基的瞬时沉降量减小。如图 8 显示。

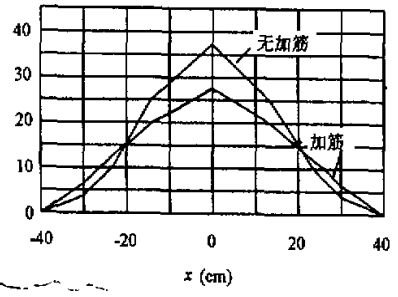


图 7　软土层面竖向压力分布(z=48cm)

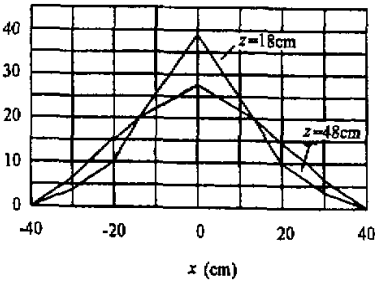


图 8　土工地锚上、下软土层面竖向压力分布

三　结　论

从上述试验结果可以得出以下几点结论：

(1)与软土地基相比，利用土工地锚进行地基加固，可以显著提高软土地基承载力，增强地基稳定性。土工地锚加筋复合地基的承载力达到甚至超过天然含水量的无筋土地基，预示着土工地锚在实际软基加固工程中运用的广阔前景。

(2)要使土工地锚充分发挥加固地基的作用，需要一定的变形量。这也符合加筋土的工作机理。

(3)在相同荷载作用下，土工地锚加筋复合软土地基的瞬时沉降量明显小于无筋软土地基的沉降量。

(4)在其它条件相同的情况下，埋置深度较浅的土工地锚复合地基的承载力高于埋置深度较深的复合地基的承载力；随着埋置的土工地锚数量的增加，复合软土地基的承载力也随之提高；但是增加土工地锚的长度对软土地承载力的提高影响不大，只是略有提高。

(5)与无筋土软基相比，土工地锚复合加筋体可以有效的扩散上部结构的荷载，使作用在土工地锚下卧层的压应力分布比较均匀，压力峰值相依减小，因而降低了地基中得剪应力水平，沉降量相应减小。

参考文献

[1]　B. B. Broms, Geo-Anchors. 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》，载《路基工程》，1997(4)，18~22。

[3]　《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)，北京，中国建筑工业出版社，1989。