

有纺土工织物加筋软土地基的模型试验和机理研究*

Study on model tests and mechanism of soft soil foundation reinforced by goetexiles

王伟

(江南大学 建筑工程系, 江苏 无锡 214063)

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0750- 04

作者简介: 王伟, 女, 1952年生, 硕士, 副教授。主要从事软土地基及地基基础抗震问题的研究。

1 引言*

为了研究有纺土工织物加筋垫层处理软弱土地基对地基承载力、沉降变形及加筋地基中应力分布的实际效果, 揭示有纺土工织物加筋垫层的加筋机理, 观测加筋地基的变形规律, 本文借助室内模型试验模拟实际工程软土地基上铺设无纺土工织物加筋砂垫层来处理地基, 对实际工程具有可靠的参考价值。

2 试验概述

狭形模型槽如图1。荷载板采用矩形承压板。因整个试验模型为半模, 所以荷载板取半。为了掌握和了解地基中各点的位移、应变、应力的变化情况和规律, 在地基中每隔5 cm的间距分别在纵向、横向共埋设了96个测点, 每一点的位移变形用精度为 $\pm 6 \mu\text{m}$ 的读数显微镜测读^[1], 坐标读数显微镜用位移跟踪法测读每一点的数据。

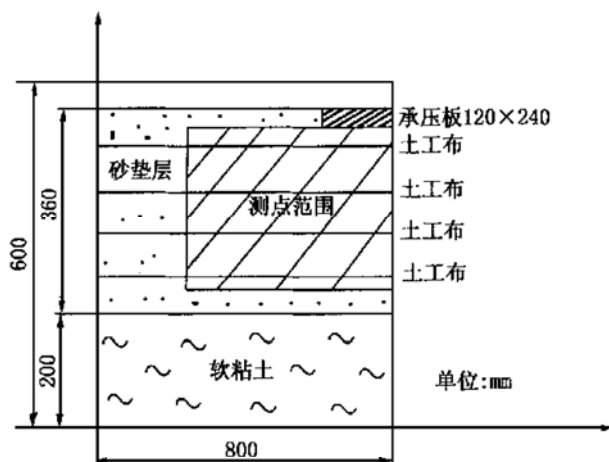


图1 土工织物加筋处理软土地基的模型试验示意图
(半模试验)

Fig. 1 Test installation

试验用土: 地基土为软粘土, 垫层选用平潭标准砂, 物理力学性质指标见表1、表2。对加筋垫层来说,

尤为重要是加筋材料的抗拉强度、蠕变性、摩阻特性, 本次试验选强度较高、延伸率较小、高模量、界面粗糙的有纺土工织物^[2]。

表1 试验用砂物理力学性质指标

Table 1 physical and mechanical properties of sand in test

标准分类	土粒 相对密度	有效粒径	不均匀 系数	天然容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
SP	2.65	0.33	1.67	15.0

表2 试验用软粘土物理力学性质指标

Table 2 physical and mechanical properties of soft soil in test

土粒相 对密度	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_P / \%$	塑性指 数 I_P	天然容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦 角 $\varphi / (^\circ)$
2.7	33	23	10	17.5	18	33

2.2 试验内容及方法

试验分别在无筋砂垫层和加筋砂垫层条件下进行。模型试验地基软土每5 cm填一层, 用干容重 $\gamma_d = 12.5 \text{ kN/m}^3$ 控制模型槽装土质量, 粘土的控制含水率为40%。砂垫层同样分层装入, 用控制每层砂的重量的方法以及相对密度 D_r 与砂的落高差 h 的关系控制每层砂的密实度^[2], 本次试验选用 $D_r = 50\%$, $h = 25.5 \text{ cm}$ 进行装砂。

有纺土工织物全部水平铺设, 铺设时特别注意平展拉紧, 并在试验槽左右两端折起压土, 将折起部分也平铺, 层数 N 选为4, 并按 $d/B = 0.5$, $\Delta H/B = 0.5$ 进行加筋布置。其中 d 为垫层表面距离第一层土工织物距离, B 为基础承压板宽, ΔH 为各层土工织物之间距离。

3 结果分析

3.1 分析方法

由模型试验测得无筋和有筋砂垫层地基各个测点的位移后, 利用反分析的方法($\{\delta\} \rightarrow \{\epsilon\} \rightarrow \{\sigma\}$) 即位

* 收稿日期: 2000- 02- 01

移 $\rightarrow$ 应变 $\rightarrow$ 应力),采用有限元法处理试验数据,求出各单元的 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} 、 $\gamma_{\max}$ 、 ε_1 、 ε_2 、 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 σ_1 、 σ_3 、 $\tau_{\max}$ 。因篇幅有限,本文只给出 $\tau_{\max}$ 等值线图。

3.2 参数 E 和 μ 的确定

土工织物加筋软弱地基的模型试验中,地基的复合模量 E 和泊松比 μ 是两个非常重要的参数。

(1) E 的确定

复合模量 E ,可用平面应变仪测定,还可借鉴经验数据作为参考,Fowler提出

$$E = \frac{T(N)}{\varepsilon_t} = \frac{T(N)}{0.10}$$

式中 $T(N)$ 为加筋地基单位长度上的抗拉强度, N/m; ε_t 为允许应力值下的最大应变值,一般大约按10%取值。抗拉强度 $T(N)$ 可参照 Binquet 提出的公式^[3]

$$T(N) = \frac{1}{N} [q_0 \left(\frac{q}{q_0} - 1 \right) (A_1 \left(\frac{Z}{B} \right) B - A_2 \left(\frac{Z}{B} \right) \Delta H)]$$

式中 N 为土工织物加筋垫层的层数; q_0 、 q 分别为无筋和加筋地基承受的荷载压力, kN/m²; B 为基础承压板宽度; ΔH 为加筋层间的间距; A_1 、 A_2 为与 Z/B 有关的系数。据经验数据,土工织物加筋地基的复合模量 E ,可根据实际情况,在 $(2 \sim 6) \times 10^4$ kPa 之间取值。

(2) μ 的取值

根据经验加筋砂垫层的泊松比 μ 可在0.3~0.35之间取值。

3.3 模型试验结果分析

图2为加筋与无筋复合地基荷载 p -沉降 s 关系曲线,从无筋 $\rightarrow$ 加筋:①表现出地基承载力逐渐增大,提高的幅度较大;②在相同压力作用下,加筋复合地基的沉降大大减少。表明随着压力增大,有纺土工织物复合地基能发挥出不可低估的效能,显示出很强的后期效应。以突出的高抗拉强度、极好的整体性和连续性,弥补了岩土散粒体之不足。

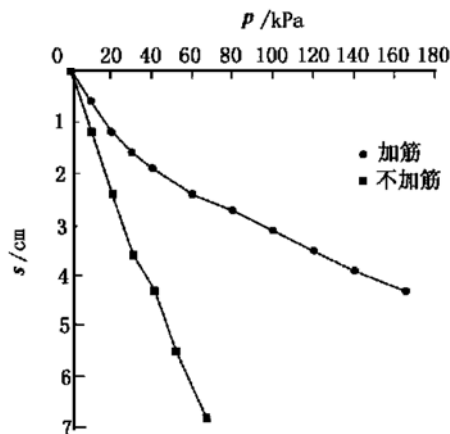


图2 地基荷载 p 与沉降 s 关系曲线

Fig. 2 Relationship between pressure p and settlement s

图3为加筋和无筋复合地基的位移向量图,宏观地反映了整个地基的位移趋势,以承压板为中心,无筋复合地基向外侧移膨胀变形,而加筋复合地基则上内下外侧移,加筋砂垫层复合地基约束基土的横向侧移性能极强,明显地改变了地基的位移场,实质上加筋砂垫层复合地基基本上形成了一个自撑式的持力层体系。

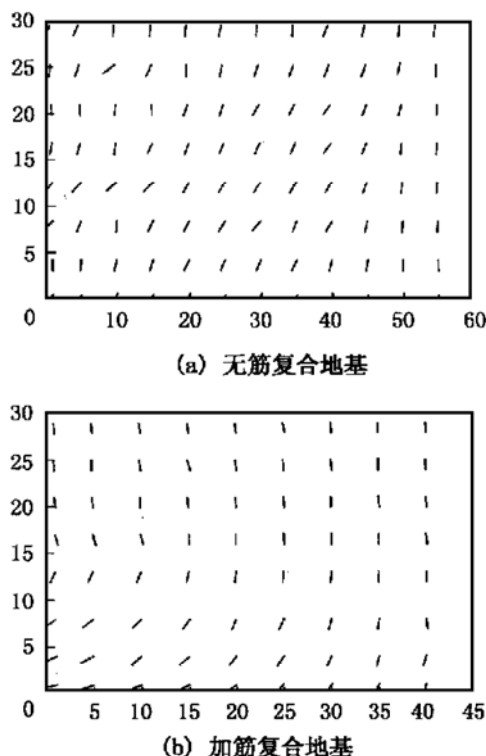


图3 地基位移向量图

Fig. 3 Displacement vector diagram

图4表示离基础承压板的中心分别为10 cm、15 cm和20 cm铅垂断面上随深度变化的水平位移曲线。图4表明:①无筋砂垫层向外的横向位移远远大于加筋复合地基的横向位移;②三个不同断面的加筋复合地基基本上是先内后外的侧移变形,在浅层有极强的约束基土向外侧胀变形的能力;③把浅层的侧向变形向外向两侧扩散、分配、传递和均化,而浅层地基正好是主要持力层。对于浅基础,3倍左右基础宽的深度变形占全部变形的60%~77%,同时,地基中的附加应力 σ_z 在浅层比较大,而随着深度逐渐地减少,所以,前者和后者共同作用时,势必使有纺土工织物加筋复合地基的竖向沉降变形大大减少,这也正是土工织物加筋地基内在加固机理之一。另外,由于有纺土工织物的加筋作用,使整个加筋复合地基的整体刚度增强,整体连续性得到提高,同样,使地基的不均匀沉降大为减少。在无筋地基中,横向位移最大值在地基的浅层,应力集中严重,使地基出现大的沉降变形,显然,土工

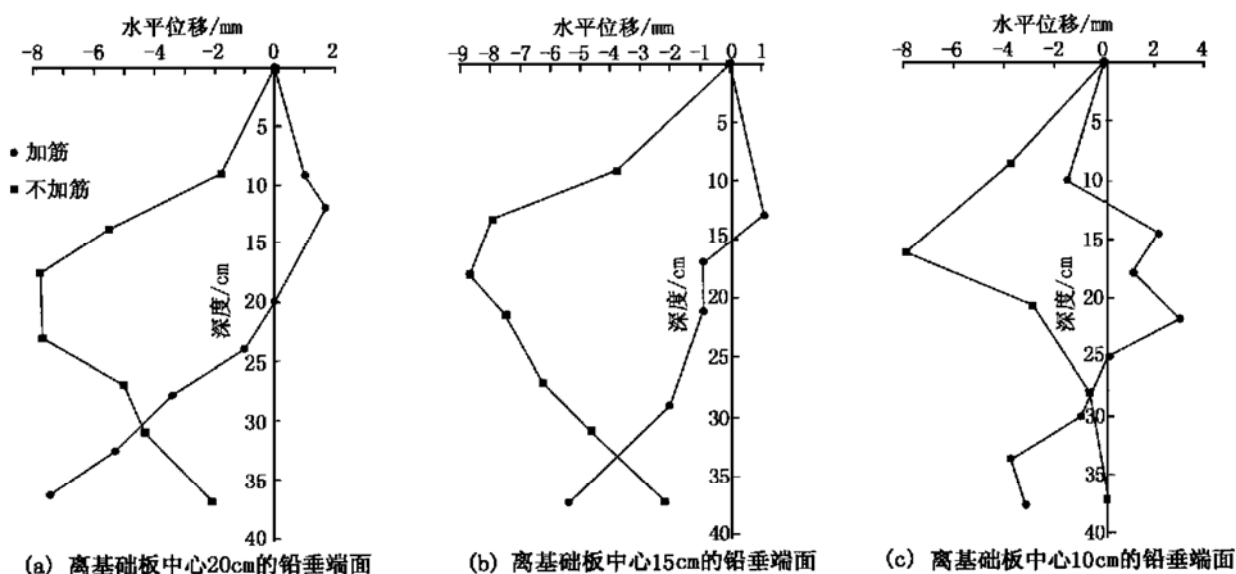


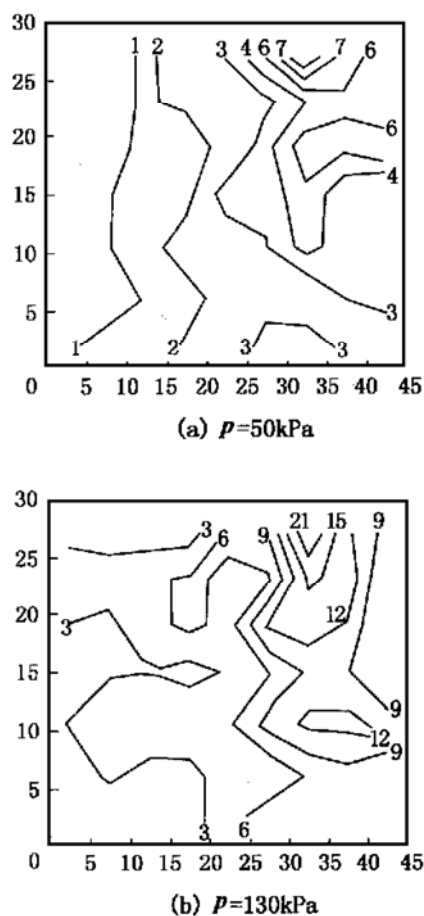
图4 无筋和加筋地基不同铅垂面随深度而变化的水平位移曲线图

Fig. 4 Horizontal displacement at different depth

织物的加筋作用改变了整个地基的位移场,改变了地基的原有应力状态,重新调整了整个地基的应力分布,对浅层的作用极为明显。

图5为加筋复合地基在 $p = 50, 130 \text{ kPa}$ 时最大剪应力等值线图,显示了应力变化趋势、发展过程和类型。图5显示:①有土工织物加筋垫层作为承压板的持力层,其刚度较大,而下卧软土层刚度小,一般来说,这时过高的荷载条件会产生持力层刺入软土层,形成刺入破坏模式。然而,有土工织物加筋垫层将应力扩散、调整到垫层的两侧,而不是向下卧软土层传递,在加筋垫层的底部没有应力集中现象,应力被均化,对下卧软土层不会造成危险,加筋垫层基本上形成一个自撑式的受荷持力层,结果提高了整个地基的承载能力;②有土工织物作为加筋材料与其它刚性的加筋材料相比,最大的特点为柔韧材料,能与砂在加筋复合地基内有机的相互作用。在小应变下,有土工织物与砂相互作用取决于接触界面的摩擦特性及较大的粘着固结作用和嵌固效应而使横向变形受阻^[2],加筋土体向内剪缩而被压密,这时土工织物承受拉力,表现出有较大的抗拉刚度,此时,加筋土体为弹性变形;③随着外荷逐渐增大,在承压板端部的浅层首先出现局部的向内发展的塑性区,随着荷载的继续增加,塑性区由内向外不断的扩展,其发展是一个渐近的和荷载大小、速率和时间相关的过程。地基的破坏过程是逐步发展的,由局部塑性化的超载区域向受荷较小的区域传递、扩展和均化。有土工织物进入伸长变形的塑性屈服阶段,无筋砂垫层屈服应力随着塑性应变 ε_p 增加而减小,而加筋砂垫层屈服应力随 ε_p 增加而增加。同时由于地基土的压密,密实度愈来愈高,粘着固

结作用愈大,界面摩擦特性被强化,较高的抗拉刚度逐渐发挥作用。逐渐形成和增强的嵌固效应、波纹效应,能增强加筋砂垫层的抗剪强度,使整个加筋复合地基的承载能力大大的提高。

图5 加筋地基最大剪应力 $\tau_{\max}$ 等值线Fig. 5 Isopleth of maximum shear stress $\tau_{\max}$

4 有土工织物加筋砂垫层加固机理

4.1 对侧向变形的约束作用

垂直荷载使有土工织物产生拉伸变形,同时抗拉强度得到发挥,抗拉强度对土体侧向位移有较强的约束作用,有土工织物加筋的抗拉强度越大,则产生的侧向约束力就越大,能防止垫层剪切破坏,阻止垫层的断裂破坏,增强加筋垫层的整体稳定性和连续性,加筋垫层的刚度越大,效果越显著。并能使基底的垂直应力重新分布,垂直应力的重新分布,使地基竖向变形大大减小,意味着失稳的机率减少。

4.2 加筋砂垫层的隔离效应

加筋砂垫层的隔离作用,犹如在地基中放置了压缩刚度大且抗拉强度高的隔离垫层,似乎形成了力与位移锁闭的持力层,由图5显示出在基础板底面形成一个高的剪应力层。隔离作用间接地提高土体的整体性和连续性,起到扩散应力、均化应力、改变地基的应力场和应变场。加筋砂垫层对下卧软土地基有重新分布应力的作用,下卧软土层顶面的应力大大减少,使加筋复合地基的沉降相应减少。

4.3 加筋砂垫层的波纹效应

当应变较小时砂与有土工织物的相互作用主要是受它们之间的摩擦特性所控制^[2],随着应变的增大,有土工织物呈现波浪状^[2],土与有土工织物发生挠曲变形,在加筋复合地基内出现波纹效应,有土工织物柔韧性越好,其波纹效应越明显。在加筋垫层平面有土工织物产生张力,就好像一条张紧的薄膜,约束基土变形,改变地基的应力状况。这时荷载承压板外的有土工织物呈现为反向曲线产生一个向下的压力,约束地基土的隆起而形成超载效应,在荷载板下的地基土承受荷载后产生一个向外离散的趋势,而此时有土工织物则约束土体,给土体提供抗拉强度,相应约束土体侧向位移。有土工织物张力的竖向分力在荷载板下可起到减载效应,而在荷载板以外的起加载效应。这些作用的重叠和交叉效应能强有力地限制地基的塑性流动。试验表明,随着压力的增大,加筋砂垫

层的波纹效应逐渐增强,所发挥的效能就越大。

5 结 论

(1)有土工织物加筋复合地基承载能力表现出压力越大,提高的幅度较大,同时,地基的沉降也大大减少,显示出很强的后期效应。

(2)随着外荷的增大,有土工织物拉伸变形,显示出较高的抗拉强度,高的抗拉性能使加筋土体强度高于无筋土体,提高了承受剪应力的能力。能防止加筋垫层的剪切破坏,显示出极强的约束地基横向变形的性能,对浅层的作用尤为明显。

(3)加筋复合地基,随着荷载的增加,塑性区由内向外不断地扩展,是一个渐进的、与荷载的大小、速率和时间相关的过程。由局部塑性化的超载区域逐步向受荷较小的区域传递、扩展和均化。

(4)刚度较大的加筋砂垫层将应力向加筋砂垫层两侧扩散、调整。在加筋垫层底部没有应力集中现象,应力被均化,基本上形成了一个自撑式的受荷体系。

(5)有土工织物垫层的隔离效应提高了加筋复合地基的整体稳定性和连续性,并起到扩散应力和均化应力的作用,使加筋复合地基的整体刚度增强。

(6)有土工织物的波纹效应随着荷载的逐渐增加而增大。加筋复合地基中的隔离效应、波纹效应等各种加筋效应,有些是先后依次出现的,有些是重叠交叉作用,这些重叠的复合效应,最终将改变或阻止塑性区的形成和发展。

本次试验得到了武汉水利电力大学王 钊教授的指导和帮助,特此致谢!

参考文献:

- [1] 王 钊. 土工织物加筋土坡的设计与模型试验[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1988.
- [2] 王 伟, 杨尧志. 土工织物与土相互作用的机理[J]. 无锡轻工大学学报, 1999, 18(3): 107~ 112.
- [3] Binquet J, Lee K L. Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs[J]. J Geotech Engng ASCE, 1975, 101(12): 1257~ 1276.

本刊为赠读者补缺启事

1. 凡论文第一作者尚未收到赠阅本刊者, 请函告本部, 以便补寄。
2. 本刊向历届编委赠送《岩土工程学报》, 凡缺期者请函告本部, 以便补寄。
3. 凡读者持装订错误之本刊, 请退还本部, 以便补寄。
4. 本刊之长期赠阅对象(单位或个人), 当投寄地址变更时, 请及时通报本部, 以免邮件误投。