

文章编号: 1000-7598-(2005) 12-1885-07

土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析

王 伟, 王 俭, 薛剑豪, 薛 震, 偶丹萍

(江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 基于压缩、剪切、拉拔、抗拉试验结果分析了土工格栅加筋土的力学特性。通过室内模型试验研究了加土工格栅和不加土工格栅地基土的侧向位移和竖向位移随深度的变化规律、位移场、应力场、应变场。结果表明, 土工格栅加筋垫层能有效地改变和阻止塑性区的形成和发展, 对下卧软土地基起到扩散应力、均化应力的作用, 控制软土地基塑性变形, 增强地基延性和刚度, 有效地控制地基竖向位移和侧向位移, 增强地基的抗剪强度, 增强整个地基的稳定性, 提高了加筋土体的承载能力, 为实际工程应用提供了可靠的理论依据。

关 键 词: 土工格栅; 加固软土; 模型试验; 位移场; 应力场; 应变场

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Analysis of model tests on soft soil subgrade reinforced by geogrid

WANG Wei, WANG Jian, XUE Jian-hao, XUE Zheng, OU Dan-ping

(Department of Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The mechanical characteristics are analysed based on compression test, shear test, tensile test, extraction test of soft soil reinforced by geogrid. Through laboratory model tests, the following studies are performed: the lateral and vertical displacement of the variation with depth, displacement field, stress field, strain field of the foundation reinforced and non-reinforced by geogrid. The results show that it is feasible to change and to resist the formation and development of plastic zone; the influence of reinforced cushion to spread and even up distribute stress of soft soil of substratum, and as well the role of geogrid, to control plastic deformation, to strengthen ductility and stiffness, to decrease lateral and vertical displacements, to strengthen shear strength of soft soil foundation, to improve the stability of the foundation and bearing capacity of reinforced soft soil; the study provides reliable basis for engineering applications.

Key words: geogrid; soft soil foundation reinforcement; model test; displacement field; stress field; strain field

1 引 言

土工格栅是经济压成型的聚合物板, 再经冷拉后, 其强度和刚度大大增强, 土工格栅的孔网与散体材料颗粒之间具有的咬合力和镶嵌力, 使其摩阻力增大, 抗拉强度提高。既轻又韧的土工格栅具有良好的力学性能、优良的抗变形能力和良好的水理性, 加入炭黑等抗老化材料后, 具有较高的抗腐蚀、抗老化等耐久性能。据资料表明, 在适应的环境下, 可达到百年的使用寿命, 现已广泛的用于软土加固处理, 海岸、堤坝防护与加固、路基路面的加固^[1~4], 是一种理想的加筋材料, 但目前理论研究滞后于应用。本文通过对土工格栅加筋土的力学特性的研究, 加筋土室内模型试验的研究, 以及对这

些试验成果的分析, 对于实际工程加固软土地基的设计和施工具有参考意义和实用价值。

2 土工格栅加筋土的力学特性

2.1 土工格栅加筋土的变形特性

试验用土为无锡地区粘性土, 液限 $w_L=40.8\%$, 塑限 $w_p=23.5\%$, 分别做了不加、加 1 层、加 2 层土工格栅压缩试验, 由不加土工格栅和加土工格栅试样结果表 1 可看出, 加土工格栅试样压缩系数 a_{1-2} 降低, 压缩模量 E_s 增大, 显然铺设土工格栅后, 加筋土压缩性降低, 抵抗变形的能力明显提高, 土工格栅增强了加筋土体的整体性和连续性, 土的密实度增大, 抗挠曲刚度提高, 承载能力相应增大。

收稿日期: 2004-10-08

修改稿收到日期: 2005-02-01

作者简介: 王伟, 女, 1952 年生, 硕士, 副教授, 主要从事土力学地基基础教学及软土地基处理、抗震等方面研究。E-mail: wangwei@sytu.edu.cn

表 1 土工格栅加筋土的力学特性指标

Table 1 Mechanical properties of soil reinforced by geogrid

土工格栅 试样	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	的减 小速率/%	压缩模量 E_s/MPa	增加速率 /%	凝聚力 c/kPa	增加速率 /%
不加筋	0.45		4.33		25.9	
加 1 层	0.33	27	5.99	38	30.4	17
加 2 层	0.28	38	7.1	64	31.38	21
加 3 层					33.21	28
加 4 层					41.2	59
加 5 层					45.6	76

由图 1 $e-p$ 压缩曲线可看出：(1) 即使加一层土工格栅加筋效果已很明显，而一层和二层曲线比较加筋效果增加不多。(2) 当荷载较小时就显示出明显的加筋效果， $e-p$ 压缩曲线较平缓，压缩变形小，未加筋 $e-p$ 曲线较陡，压缩变形大。(3) 加筋与不加曲线之间孔隙比 e 的减少量随着荷载的增大而增大，说明荷载越大，加筋效果越明显。加土工格栅之后不仅总变形减少，关键的是土不可恢复的塑性变形大为减少。

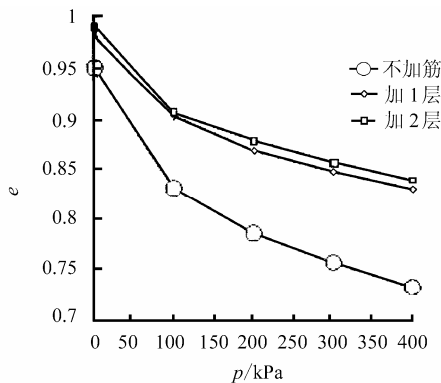


图 1 $e-p$ 压缩曲线

Fig.1 Curves of relation between e and p

2.2 土工格栅加筋土强度特性

分别做了不加、加 1 层、加 2 层、加 3 层、加 4 层、加 5 层土工格栅三轴压缩试验。

(1) 由表 1 可知，加土工格栅的试样，凝聚力随着加筋层数的增加而增大，土与土工格栅之间的摩阻力增强，每两层土工格栅之间的土被嵌固成一个密实的整体，土颗粒之间接触面积增大，颗粒之间联结强度提高，土工格栅的加入使土结构内能发生变化，加筋土的结构强度增加，抗剪强度得到提高。

(2) 由图 2 应力-应变关系曲线可看出：①加 2 层土工格栅的抗剪强度明显大于不加土工格栅，而且是在加荷的初期 2 条曲线就彼此分开，说明土工格栅在应变较小时就发挥加筋作用，这一点与土工织物明显不同^[5]，②加 4 层土工格栅和加 2 层比较，应力-应变曲线初期比较靠近，随着应变的增大，2 条曲线之间的距离拉大，加筋垫层具有明显的后期

加筋效果。与不加筋的比较，表现出在相同应力作用下应变明显减小，线性段明显，并且范围大，两条曲线在初期就表现出较大应变差值，并且随着应力的增大，应变差值越来越大，说明加筋效果在逐渐增强，曲线的斜率增大，切线的模量增大，土工格栅加筋土抵抗剪切变形能力增强，则土的抗剪强度增加幅度大。

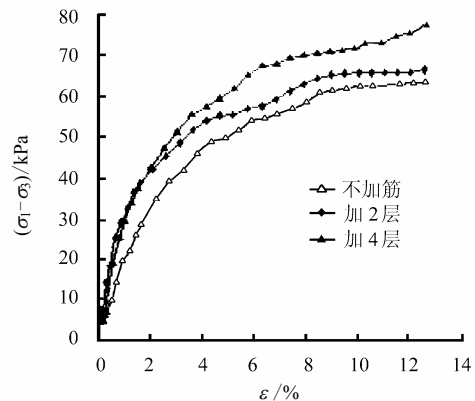


图 2 应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -应变 ϵ 关系曲线

Fig.2 Curves of relation between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ϵ

2.3 加筋土的抗拔特性

分别对土工格栅、土工织物、钢条进行拉拔试验，其结果如图 3 所示。由图可看出，不同的土工合成材料其抗拔特性差异很大，加土工织物试样随着压力 P 增大，抗拔力 S 增加非常缓慢，而土工格栅在压力 P 很小时，抗拔力 S 就急剧增长，并随着压力逐渐增大，抗拔力增加速率快，抗拔性能稳定。土工格栅埋入土中其抗拔力不仅远大于土工织物的，而且还大于钢带的抗拔能力，这是由于柔韧的土工格栅的孔网与土颗粒之间的镶嵌、联锁、摩擦咬合力增强，加筋土的整体刚度加大，使加筋土体的抗拔能力大大提高。

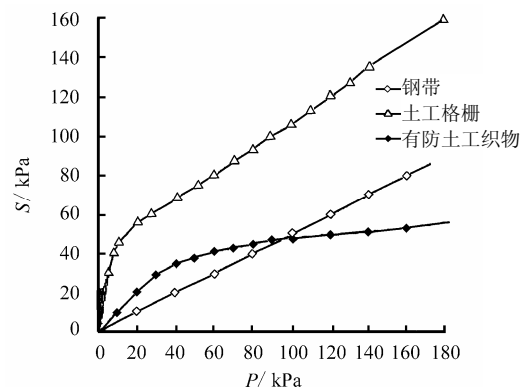


图 3 加筋土抗拔能力试验曲线

Fig.3 Test curve of pull-out resistance of reinforced soil

2.4 加筋材料抗拉特性

分别对不同的土工合成材料进行抗拉特性试验

研究,土工格栅、无纺土工织物、未拉伸的聚乙烯、软钢结果如图 4 所示。由图可看出,土工格栅的抗拉强度 T 已接近软钢的抗拉强度,而远远大于无纺土工织物,而无纺土工织物的延伸率 ε 又远远大于土工格栅的。未拉伸的聚乙烯线性变形段微弱,变形在荷载很小时就已具有连续的蠕变,变形表现为明显的塑性流动,而拉伸过的土工格栅与其截然不同,表现为连续稳定的线性变形段,在变形很小时就具有很高的抗拉强度,并且抗拉强度增加速率很快,曲线呈现硬化特征,所以将土工格栅埋入土中在一定的荷载作用下不会出现长期蠕变破坏的可能性。土工格栅在制造过程中经过了定向冷拉伸,使聚合物分子沿着拉伸方向定向排列,加强了分子链间的联结力,土工格栅的抗拉强度比未拉伸前提高 5~10 倍,而拉伸过的土工格栅其延伸率却只是原板材的 10%~15%。土工格栅埋入土中与土相互咬合、联锁,与土融为一体,恰到好处的弥补了散体材料的不足。土工格栅具有高的抗拉强度、低的延伸率,并且价格低廉、便于施工,是加固软土地基较理想的加筋材料。

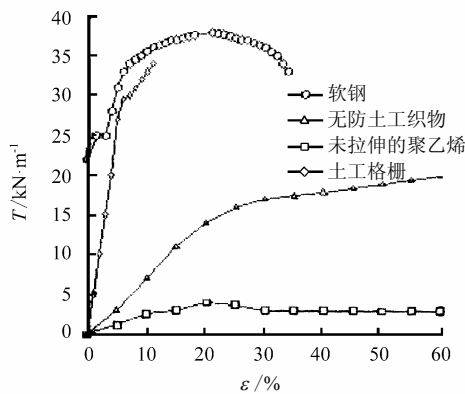


图 4 加筋材料抗拉强度与延伸率图

Fig.4 Curves of relation between tensile strength and extensibility

3 土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验

3.1 试验条件

模型槽底部铺软粘土,埋设 3 排测点,其之上是砂垫层,埋设 5 排测点,在砂土垫层中分别铺 5 层土工格栅和不铺土工格栅两种基本条件相同的对比试验,测记各级荷载作用下的每个测点的位移,在承压板上用磁性支架固定测微表,量测在各级荷载下的沉降变形。由于模型装置的限制不能使试验达到破坏状态,所以加荷较小。采用弹性模型,用反分析法,用有限元法编程处理这些数据并将其结

果绘出加土工格栅和不加土工格栅地基的应力场、应变场、位移场。图 5 为模型示意图,划分了 42 个单元,1—42 是单元编号。在整个试验过程中,分级加荷共 10 级,由于篇幅有限,这里只给出第一级荷载下的部分应力、应变分布图。

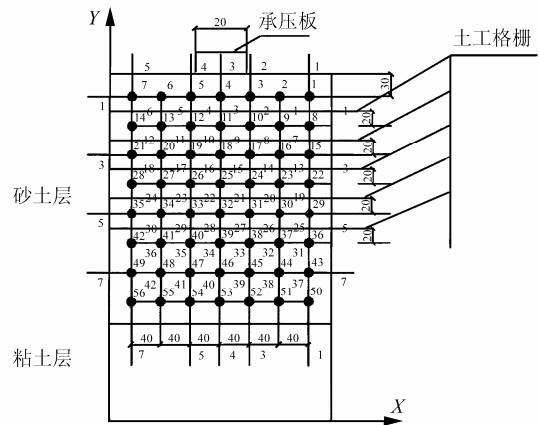


图 5 土工格栅加筋处理软土地基模型试验示意图

Fig.5 Test installation

3.2 试验结果分析

3.2.1 荷载与沉降 s - p 关系曲线

荷载 p 与沉降 s 关系曲线见图 6,由图 6 可知:

- (1) 加土工格栅比不加土工格栅的竖向沉降明显减小。
- (2) 随着荷载的逐渐增大,加土工格栅和不加土工格栅试样之间的差值也增大,并且出现明显的分叉而偏离,加土工格栅曲线开始变得平缓,而不加土工格栅的曲线变化趋势仍然较陡,说明土工格栅加筋作用有较强烈的后期效应,荷载越大,加筋效果越明显,沉降的增值减小。不加土工格栅的沉降变形呈现逐渐增加的趋势,曲线末端二者的差值最大。

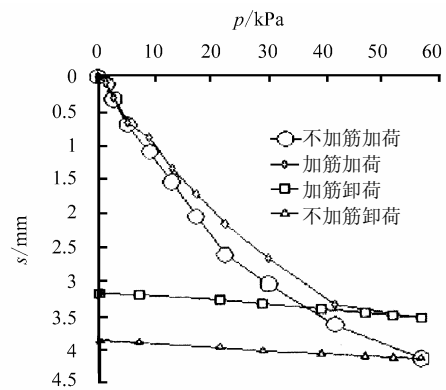


图 6 荷载 p 与沉降 s 曲线

Fig.6 Test curves of relation between p and s

- (3) 变形由弹性变形和塑性变形两部分组成,

可看出塑性变形远大于弹性变形。加土工格栅之后,加载曲线和回弹曲线的差值即塑性变形明显小于不加土工格栅的塑性变形,塑性变形是颗粒之间滑移形成的,必然引起颗粒间重新组合、排列,软土、松砂塑性变形分量占的比例大,硬塑、密实、结构强度大的土塑性变形分量占的比例相对小一点,当土体局部进入剪切破坏状态时,必然引起塑性变形,土微结构的变化是导致塑性变形的根本原因,加土工格栅之后,土与格栅间的摩阻力增大,颗粒间联结强度增强,地基土体的结构强度提高,塑性变形显著减小,说明土工格栅加筋垫层改变了地基的应力状态,并阻止软土地基过早进入塑性状态,从而提高软土地基抵抗塑性破坏能力,有效的防止剪切破坏的发生,能改变和阻止塑性区的形成和发展,加筋地基整体刚度、延性增强。

(4) 两条回弹曲线基本上是平行的,但加工土工格栅的回弹值稍微大一点,这也是情理之中的,因压力释放,应变减少,土工格栅抗拉强度相对会变小一点。 $s-p$ 曲线形状与 $e-p$ 压缩曲线相似。

3.2.2 不同水平断面的竖向位移

为了了解不同深处某一个平面上的竖向变形情况,选取从上往下不同深处的 4 个水平断面,其位置见模型示意图 5,由图 7 可知:

(1) 在第 1 级荷载作用下 1-1 断面到 4-4 断面的竖向位移曲线,加土工格栅的曲线非常平缓,而不加土工格栅的曲线则表现为抛物线形状,两条曲线性状完全不同,土工格栅在加荷的初期就显示出极强的加筋效应,神奇地约束了散体材料的竖向变形。分析其加筋机理,一方面,荷载通过承压板传给地基,地基土是散体材料,整体性差,所以在承压板周边会出现较大的沉降,沉降曲线表现为抛物线形状;同时软土地基由于竖向荷载的作用会以承压板

为对称中心向两侧的水平方向扩散,在剪应力作用下,如没有周围的约束,剪切应变可以持续增加,即会出现软粘土的侧向塑性流动,此时两侧地基土相当于承受了一个水平向推力,即部分竖向力转化为水平推力,致使地基在竖向荷载作用下产生侧向变形,竖向变形也变大,但加了土工格栅之后,由于土工格栅本身的强度和刚度较高,土工格栅的孔网与散体颗粒之间的联锁咬合力,因而在土工格栅与颗粒接触的表面摩阻力增大,相应产生了一个附加的阻力约束土体产生侧向变形,在竖向荷载作用下引起地基两侧水平向推力由土工格栅承受,与此同时,也有效地约束了竖向变形,这正是土工格栅在散体材料中的最大贡献,即抗拉强度所发挥的作用。

(2) 在同一荷载作用下,从 1-1 断面到 4-4 断面,竖向变形的最大值在地基的对称中心处,并随着深度的增大逐渐减少。当荷载逐渐增大,竖向变形也增大。

(3) 加土工格栅的 1-1、2-2、3-3 断面在加筋垫层内,其竖向变形比不加土工格栅的要小得多,而 4-4 断面不在加筋垫层内,在加筋垫层之下的下卧软粘土中,其竖向沉降和其它断面一样比不加土工格栅的软粘土要小得多,这就是土工格栅在散体材料中的第二大贡献,即土工格栅的整体连续性所发挥的作用。将土工格栅分层铺设在散体材料中,相当于连续整体筏板的作用,每两层土工格栅之间的土被嵌固在一起,土颗粒之间联接强度被强化,土的结构强度增大,增强了加筋垫层的整体刚度,对下卧软粘土层起到扩散应力、均化应力重要作用,土工格栅加筋垫层的复合模量提高,抵抗变形的能力增强,整体抗弯抗剪能力增强,能较多地承担外加荷载,增强了整个地基的稳定性。

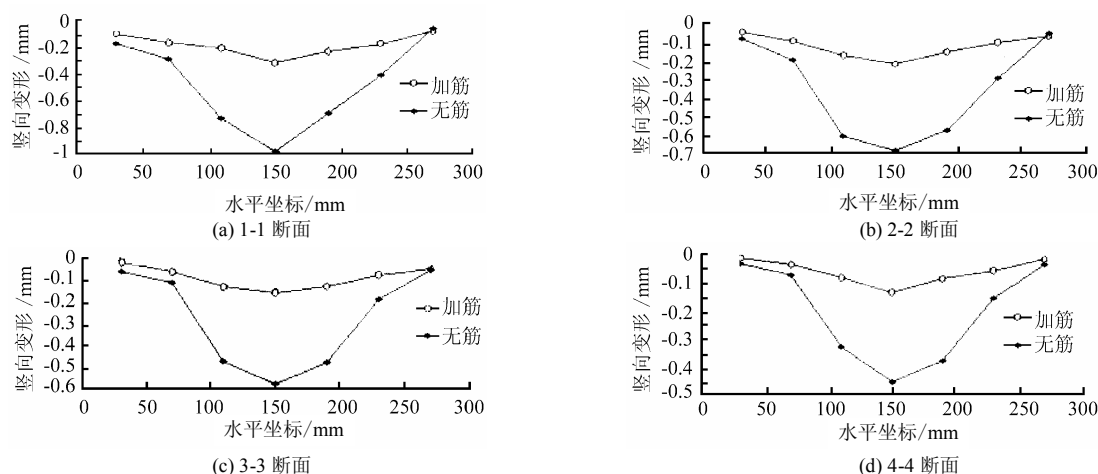


图 7 无筋和加筋地基不同水平断面竖向位移曲线

Fig.7 Non-reinforced and reinforced variation of vertical displacement with depth

3.2.3 不同铅垂断面侧向位移分析

在地基范围内从右向左选取 5 个铅垂断面见图 5, 分析侧向位移随深度变化情况, 由图 8 可看出: (1) 以 3-3 断面为对称中心, 不同铅垂断面在不同荷载作用下, 最大侧向位移值都在地基的浅表处。(2) 加土工格栅的侧向位移都比不加的要小, 在前面已讨论过, 土工格栅与土体间的咬合镶嵌的摩阻力对侧向变形有极强的约束力。(3) 在加筋垫层之下的下卧软粘土侧向位移明显减小, 加筋垫层对下卧软粘土层侧向变形同样有极强的约束力, 能有效地约束并阻止下卧软粘土地基的塑性流动。

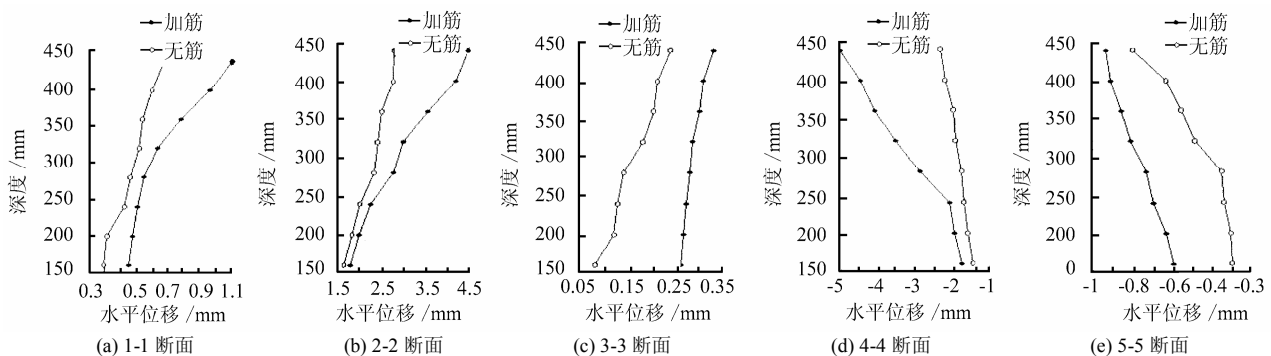


图 8 无筋和加筋地基不同铅垂断面横向位移曲线

Fig.8 Non-reinforced and reinforced variation of horizontal displacement with depth

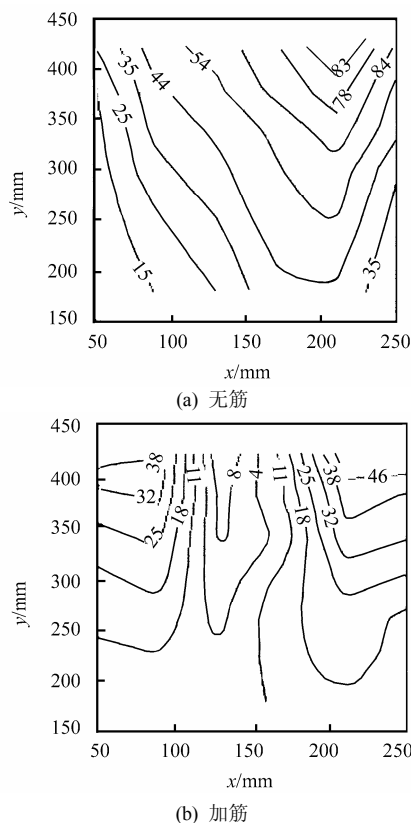


图 9 无筋与加筋地基 σ_y 等值线图 (单位: kPa)

Fig.9 Non-reinforced and reinforced isopleth of σ_y (unit: kPa)

3.2.4 σ_y 应力场分析

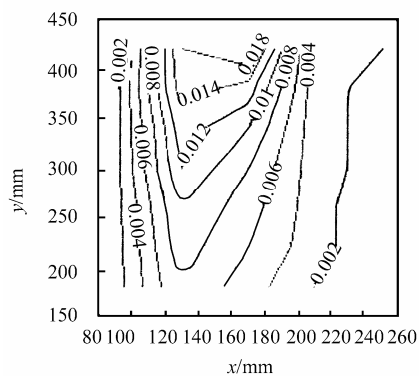
(1) 图 9 表明, 加土工格栅的 σ_y 明显减小, 与不加土工格栅的比较, σ_y 的分布在整個地基范围内上移, 并将 σ_y 的分布调整到承压板以下受压层的两侧, 可见加筋垫层有极强的调整应力的能力。(2) 在加筋垫层的底部, 即下卧软粘土的 σ_y 分布非常稀疏, σ_y 值也很小, 显然土工格栅加筋垫层对下卧软土层同样能有效地起到均化应力、扩散应力的作用, 土工格栅加筋垫层如同一个很厚的硬壳层, 作为主要持力层承担外来荷载。随着荷载等级的增大, 在加筋垫层的顶部和下卧软粘土层的 σ_y 与不加筋的减少增量值也在逐渐增加。

3.2.5 小主应变 ε_3 应变场分析

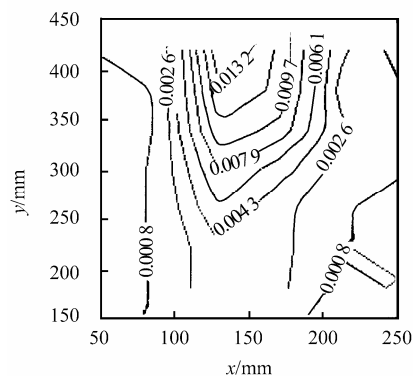
图 10 表明: (1) 加土工格栅后的 ε_3 明显减小, 其应变随着荷载等级的增大, 减小的增量值也不断增加。(2) 加土工格栅后 ε_3 其分布明显上移, 而加筋垫层的下卧软粘土层的分布稀疏, 其值也显著减小, 显然对下卧软粘土层起到减荷的作用, 对应变的扩散与均化能有效地约束地基土的侧向位移和竖向位移, 好像形成一个独立的支撑体系, 承担主要的外加荷载, 无疑增强了整个地基的稳定性。另外, 由图可看出, 这两个模型试验都存在向右偏心的情况。

3.2.6 最大剪应力 $\tau_{\max}$ 应变场分析

由图 11 可看出: (1) 加土工格栅的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 分布曲线向上移, 最大剪应力主要由加筋垫层承担。(2) 土工格栅加筋垫层的顶部(承压板之下)和底部(下卧软粘土层) $\tau_{\max}$ 明显减小, 并且 $\tau_{\max}$ 减小的速率都随着荷载逐渐增大而增大, 显示土工格栅具有强劲的后期加筋效应和潜能, 土工格栅加筋垫层提高地基抗剪切滑移的能力、抗挠曲变形的能力, 加筋地基的复合剪切模量提高, 承受剪应力的能力提高, 提高了整个地基的承载能力。

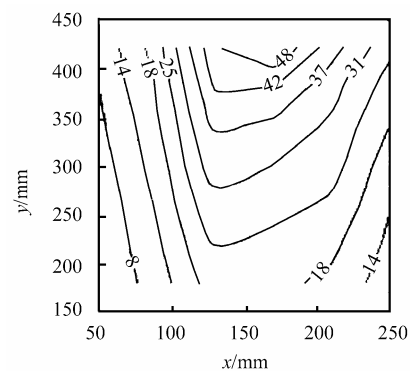


(a) 无筋

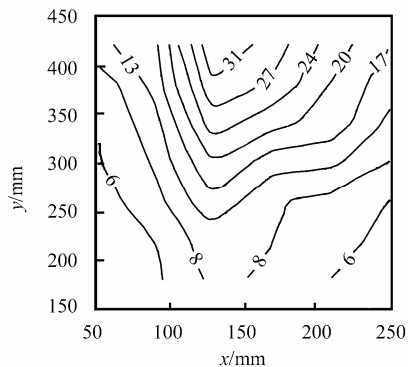


(b) 加筋

图 10 无筋与加筋地基 ε_3 等值线图
Fig.10 Non-reinforced and reinforced Isopleth of ε_3



(a) 无筋



(b) 加筋

图 11 无筋与加筋地基 $\tau_{\max}$ 等值线图 (单位: kPa)
Fig.11 Non-reinforced and reinforced Isopleth of $\tau_{\max}$
(unit: kPa)

4 结 论

(1) 土工格栅的应力-应变关系曲线在初期具有连续稳定的线性变形段, 并在变形很小时就具有很高的抗拉强度, 抗拉强度增加速率很快, 而非线性段范围很小, 将土工格栅埋入土中在一定的荷载作用下不会出现长期蠕变破坏的可能性。土工格栅的抗拉强度已接近软钢的抗拉强度, 而远远大于无纺土工织物。抗拔能力不仅远大于土工织物的, 还大于钢带的。加 2 层和 4 层的比较, 随着荷载的逐渐增大, 抗剪强度增强, 加筋作用显著。

(2) 由 $s-p$ 曲线分析得出加土工格栅地基比不加土工格栅的塑性变形大为减少, 土微结构的变化是导致塑性变形的根本原因, 加筋垫层增强了地基土体的结构强度, 其整体刚度、延性和刚韧性增强, 抵抗塑性变形的能力、抵抗塑性破坏的能力、防止地基剪切破坏能力增强, 从而可有效地阻止软土地基过早进入塑性状态, 能改变和阻止塑性区的形成和发展, 提高了软土地基的承载能力。

(3) 在第 1 级荷载作用下土工格栅加筋复合地基各水平平面的竖向变形为很平缓的曲线, 而不加的为很陡的抛物线形状曲线, 两条曲线竖向变形差值很大, 特别值得注意的是最大竖向变形值大大减小, 说明土工格栅在受力初期, 即应变较小时就显示出很强的加筋效能, 这一点与土工织物不同。

(4) 加土工格栅后, 由于土工格栅的孔网与散体颗粒之间的联锁咬合力, 二者接触面摩阻力增大, 相应地产生一个附加的抵抗力约束土体侧向变形, 阻止粘性土产生塑性流动, 同时也有效地约束竖向变形, 土工格栅作为抗拉构件使加筋垫层显示出较高的抗拉性能, 大大提高承受剪应力的能力, 改善了地基的位移场、应力场和应变场, 这就是土工格栅在散体材料中所发挥的最大贡献。

(5) 土工格栅第二贡献是提高散体材料整体连续性和空间刚度的重要作用, 土工格栅在土中如同一个整体连续的筏板, 每两层土工格栅之间的土在上覆压力作用下被嵌固在一起, 强化土颗粒之间联结强度, 土的结构强度得到提高, 加筋土的整体刚度、复合变形模量、复合剪切模量增强, 抵抗挠曲变形能力、抵抗剪切变形能力、抵抗软土塑性流动能力增强。加土工格栅软土地基的位移场、应力场、应变场的各项值的减小增量值和减小百分比都随着荷载的增大而增大, 这些都显示出土工格栅加固软土地基具有极强的后期加筋效应与潜能^[6]。

(6) 刚度增强的土工格栅加筋垫层对下卧软土

层起到扩散应力和均化应力的重要作用,使传递到下卧软土层的应力、应变大幅度减小,使下卧软土层的竖向变形、侧向变形、应力、应变都明显减小。无疑土工格栅加筋垫层如同下卧粘土层之上的一个硬壳层承担主要的外来荷载,对下卧粘土层起到减荷作用,增强了加筋复合地基的整体稳定性。

参 考 文 献

- [1] Takemura. Bearing capacity and deformations of sand reinforced with geogrid[A]. **Proc. Int. symposium on Earth Reinforcement Prac.**[C]. Fukuoka: [s. n.], 1992. 695—700.
- [2] Ju J W. Bearing Capacity of Sand foundation reinforced by geonet[A]. **Earth Reinforcement**[C]. Fukuoka: [s. n.], 1996. 603—608.
- [3] 牛志荣. 加筋砂卵石垫层在地基加固工程中的应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 195—198.
- NIU Zhi-rong. Application of the reinforced sand-stone cushion in foundation consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 195—198.
- [4] 吴景德, 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.
- WU Jing-de, WANG De-qun, CHEN Huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 199—204.
- [5] 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.
- WANG Wei, YANG Yao-zhi. Study on the mechanism of soil-geotextile interaction[J]. **Journal of Wuxi University of Light Industry**, 1999, 18(3): 107—112.
- [6] 王伟, 王钊. 有纺土工织物加固软土地基可靠性分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 219—223.
- WANG Wei, WANG Zhao. Reliability analysis of the reinforcement of soft soil foundation by geotextile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 219—223.

第六届全国工程排水与加固技术研讨会会议纪要

由中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会主办, 南京水利科学研究院承办的第六届全国工程排水与加固技术研讨会于 2005 年 10 月 25~28 日在南京召开, 来自国内外高校、科研、设计、施工、生产等单位 100 多位代表出席了会议, 会议邀请了国内外有关专家作了专题报告, 同时组织了从事多年相关工作的专家对工程排水与加固技术中存在的问题以及今后的发展方向进行了研讨。

会议由人民交通出版社出版了《第六届全国工程排水与加固技术研讨会论文集》和《排水固结加固软基技术指南》, 论文集收入了国内外近年来有关工程排水与加固技术的科研成果、实践经验及工程实录等, 这些论文较全面反映了工程排水与加固技术的应用现状及发展水平。

会议期间还召开了第六届工程排水与加固专业委员会年会, 选举产生了新一届学术委员会组成人员, 同时商定“第七届全国工程排水与加固技术研讨会”将于 2008 年 10 月在深圳举行, 并由铁道科学研究院深圳设计院承办。

(中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会 供稿)