

土工合成材料加筋砂土三轴试验研究*

Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test

吴景海 王德群

陈 环

(天津市市政工程研究院, 天津, 300074) (天津大学水利系, 天津, 300074)

文 摘 本文以5种国产土工合成材料为加筋材料, 它们分别是针刺无纺土工织物、涤纶纤维经编土工格栅、玻璃纤维土工格栅、聚丙烯双向土工格栅和聚乙烯土工网, 用三轴试验比较各种土工合成材料对砂土的加筋效果, 得到一些有益的结论, 可指导土工合成材料的优选和研究加筋机理, 同时指出部分国产土工合成材料产品的不足。

关键词 土工合成材料, 加筋, 砂, 三轴压缩试验

中图法分类号 TU 472.3⁺4

作者简介 吴景海, 男, 1965年生, 高级工程师。1993年3月毕业于天津大学, 获岩土工程硕士学位。曾从事过结构工程设计、工程地质勘察, 现主要从事软基处理、土工合成材料的工程应用和科研工作。

Wu Jinghai Wang Dequn

Chen Huan

(Tianjin Municipal Engineering Research Institute, Tianjin, 300074) (Tianjin University, Tianjin, 300074)

Abstract Systematic triaxial compression tests are made for the sand reinforced by geosynthetics which include (1) needle-punched nonwoven geotextile, (2) polyester fiber warp knitting geogrid, (3) glass fiber geogrid, (4) PP biaxial geogrid and (5) PE geonet. On basis of experimental results, this paper presents some conclusions that can be used to guide choosing geosynthetic type and to make research on geosynthetic reinforcement mechanism.

Key words geosynthetic, reinforcement, sand, triaxial compression test

1 引 言*

加筋土已经有数千年的历史。法国工程师 Henri Vidal (1965) 提出现代加筋土的理论。Schlosser 和 Long (1974) 首先用三轴压缩试验研究金属加筋砂土^[1]。后来, 国内外许多学者 (Lee, 1974; Broms, 1977; McGown, 1977; McGown, 1978; Gray, 1982; Gray, 1983; Gray, 1986; Long, 1983; Chandrasekaran, 1988; Moroto, 1992; Atmatzidis, 1994; 王俊林, 1992; 保华富, 1999) 利用三轴压缩试验研究了土工合成材料加筋砂土和加筋碎石土, 加筋材料主要是土工织物, 其次是土工格栅, 同时提出了“等效围压原理 (Equivalent confining stress concept)”和“准粘聚力原理 (Pseudo-cohesion concept)”。目前国内外学者主要研究加筋对砂土强度变形的影响^[1~7]。本文重点是对各种土工合成材料的加筋效果进行比较。

本文以5种不同种类国产土工合成材料 (含土工织物、土工格栅和土工网) 为加筋材料, 用三轴压缩试验比较它们对砂土的加筋效果, 得到一些有益的结论, 可指导土工合成材料的优选和研究加筋机理, 同时指出部分国产土工合成材料产品的不足。

2 试验仪器 材料和试验方法

2.1 试验仪器

试验仪器采用从美国引进的材料试验系统 (Mate-

rials Testing System, 简称 MTS), 试验过程控制和数据采集全由计算机完成。三轴试样尺寸为 $\phi 152.8 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 最大轴向荷载为 98 kN。

2.2 试验材料

试验采用5种不同种类的国产土工合成材料: 针刺无纺土工织物 (TW)、涤纶纤维经编土工格栅 (ZH)、玻璃纤维土工格栅 (JJ)、聚丙烯双向土工格栅 (ST) 和聚乙烯土工网 (TS)。土工合成材料的拉伸曲线见图1, 技术指标见表1。土工合成材料极限抗拉强度从大到小的排序为: 玻璃纤维土工格栅, 经编土工格栅, 双向土工格栅, 无纺土工织物和土工网。极限抗拉强度最大相差10倍左右。极限延伸率从小到大排序为: 玻璃纤维土工格栅, 双向土工格栅, 经编土工格栅, 土工网和无纺土工织物。极限延伸率最大相差40倍左右。综合极限抗拉强度和极限延伸率, 抗拉模量从大到小的排序为: 玻璃纤维土工格栅, 经编土工格栅, 双向土工格栅, 土工网和无纺土工织物。试验采用干粗砂。级配曲线见图2, 技术指标见表2。

2.3 试样制备

制备砂样的干密度 $\rho_d = 1.66 \text{ g/cm}^3$ 。将土工合成材料剪成圆盘形, 直径为 150 mm, 沿水平方向铺设在砂样的中间位置。

* 到稿日期: 1999-06-04

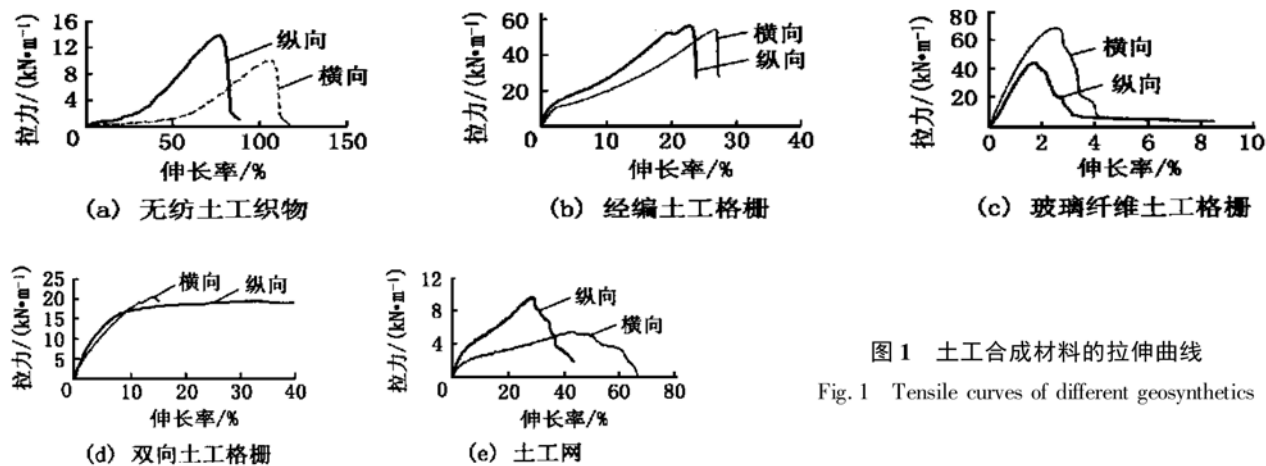


图 1 土工合成材料的拉伸曲线
Fig. 1 Tensile curves of different geosynthetics

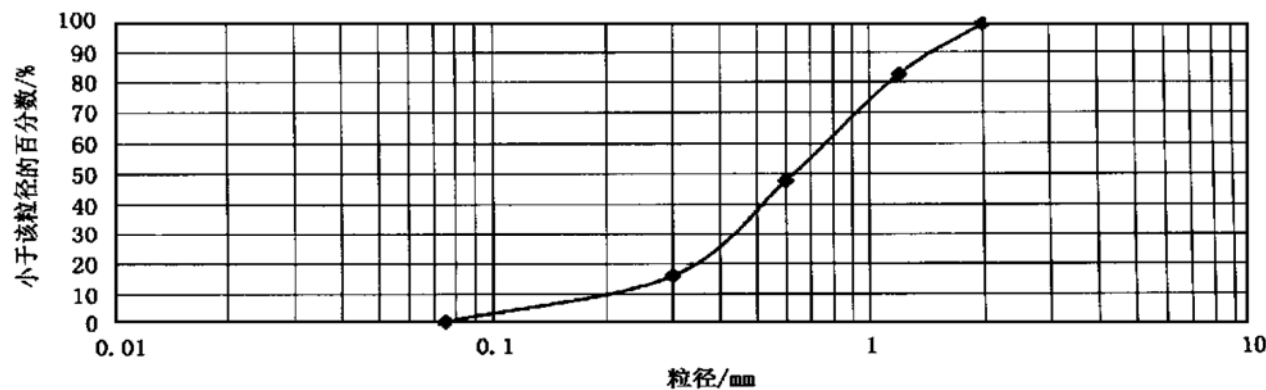


图 2 砂的级配曲线
Fig. 2 Grain-size curve of the sand

表 1 土工合成材料的技术指标
Table 1 Technical indexes of different geosynthetics

		无纺 土工织物	经编 土工格栅	玻璃纤维 土工格栅	双向 土工格栅	土工网
纵向	产地	天津	浙江	江苏	山东	天津
	规格		TGS- 2	GGB1012	TGDC25	CE131
	原材料	丙纶	涤纶纤维	玻璃纤维	聚丙烯	聚乙烯
	刺破强度/kN	0.43				
	CBR 顶破强度/kN	2.05				
	单位面积质量/(g•m ⁻²)	398	560	643	415	673
	极限抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	13.7	55.2	40.3	19.1	9.4
	极限延伸率/ %	78.4	23.6	1.9	33.2	29.6
	2% 延伸率抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	< 0.5	9.8		6.5	1.1
	5% 延伸率抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	< 0.5	17.8		12.2	3.3
横向	极限抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	10.1	52.6	62.4	20.0	5.1
	极限延伸率/ %	106.7	27.3	2.7	15.2	44.1
	2% 延伸率抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	< 0.5	9.5	59.7	5.1	1.1
	5% 延伸率抗拉强度/(kN•m ⁻¹)	< 0.5	13.1		10.5	1.8
	网孔尺寸/mm		27×25	25×25	40×50	φ20

表 2 砂的技术指标
Table 2 Technical indexes of the sand

颗粒组成/%				限制粒径/mm						
2~ 0.50	0.50~ 0.25	0.25~ 0.10	< 0.10	d ₆₀	d ₅₀	d ₃₀	d ₁₀	C _u	C _c	
62	25	9	4	0.77	0.62	0.43	0.20	3.8	1.20	名称: 粗砂

2.4 试验方法

三轴压缩试验是在圆柱形试样上施加轴向大主应力 σ_1 与周围小主应力 σ_3 , 保持 σ_3 不变, 增加 σ_1 , 使试样的剪应力逐渐增加, 直至试样破坏。

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_i}{h_0} \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

式中 ε_1 为轴向应变; Δh_i 为剪切过程中试样高度的变化; h_0 为试样的起始高度; σ_1 为大主应力; σ_3 为小主应力; P 为轴向荷载; A_0 为试样的起始面积。

试验时砂样不饱和。加荷速率为 1 mm/min (1 mm 为 0.5% 轴向应变), 剪切过程中关闭排水阀, 剪切到峰值后或达到 15% 轴向应变。试验结束后, 记录土工合成材料的尺寸变化和破坏情况。

3 加筋对砂土抗剪强度指标的影响

在加筋砂土中, 土工合成材料加筋限制砂土的侧向变形, 相当于增加了周围压力, 使加筋砂土具有了准粘聚力, 因而目前对土工合成材料加筋机理有两种等价的解释, 分别如下:

(1) 等效围压原理

$$(\sigma_1)_f^R = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) K_p \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{\alpha_f}{\Delta H} \quad (4)$$

(2) 准粘聚力原理

$$(\sigma_1)_f^R = (\sigma_3) K_p + 2c_R \sqrt{K_p} \quad (5)$$

$$c_R = \frac{\alpha_f \sqrt{K_p}}{2\Delta H} \quad (6)$$

$$c_R = \frac{\Delta\sigma_3 \sqrt{K_p}}{2} \quad (7)$$

式中 $\Delta\sigma_3$ 为等效周围压力; $(\sigma_1)_f^R$ 为加筋砂土破坏时的大主应力; σ_3 为周围压力; $K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 为被动土压力系数; φ 为纯砂的摩擦角; c_R 为准粘聚力; α_f 为加筋砂土破坏时加筋单位宽度的拉力; ΔH 为加筋的间距。

从图 3 和表 3 可以看出: ①各种土工合成材料加筋砂土的大主应力 σ_1 与周围压力 σ_3 保持良好的线性关系, 并且试验数据的相关性非常好; ②无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋砂土的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系直线与纯砂的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系直线基本平行, 也就是说无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋砂土的摩擦角与纯砂的摩擦角基本相同, 加筋砂土摩擦角的相对变化范围为 -3.7% ~ +5.9%; ③经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋砂土的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系直线基本相同,

并且比纯砂的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系直线更陡, 即经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋砂土的摩擦角比纯砂的摩擦角较大, 相对增加量为 11.0% 左右; ④各种土工合成材料加筋砂土的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 关系直线均有纵向截距, 除无纺土工织物加筋砂土的纵向截距较大和土工网(残余强度)的纵向截距较小外, 其它土工合成材料加筋砂土的纵向截距比较接近, 变化范围为 29.3 ~ 35.7 kPa; ⑤加筋砂土破坏时, 除无纺土工织物加筋的拉力较大外, 其它土工合成材料加筋的拉力相近, 变化范围为 4.0 ~ 5.2 kN/m。对上面所得到的试验结果进一步分析如下:

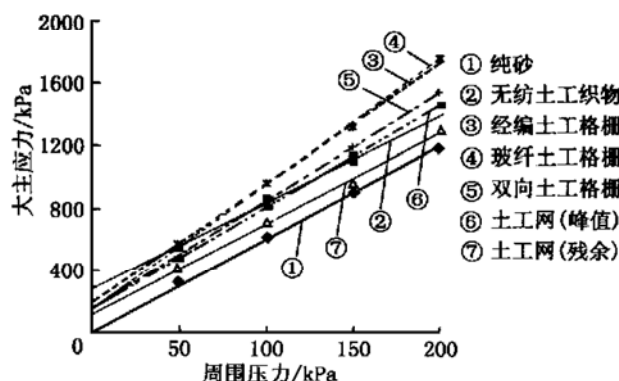


图 3 周围压力与大主应力的关系曲线

Fig. 3 Confining pressure (σ_3) - major principle stress (σ_1) curves

a) 土工合成材料加筋砂土的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 保持良好的线性关系, 并且加筋砂土具有准粘聚力, 表明加筋砂土仍符合 Mohr-Coulomb 抗剪强度理论。无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋不改变砂土的摩擦分量, 仅增加砂土的粘聚力分量; 而经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋不但增加砂土的摩擦分量, 而且增加砂土的粘聚力分量, 这与土工合成材料加筋的破坏方式密切相关。无纺土工织物加筋沿径向均匀伸长; 双向土工格栅加筋的纵、横向筋条被拉长; 土工网加筋形成两条互相垂直宽的串“糖葫芦”式拉伸破坏带, 加筋在试验中不被拉断和滑动, 加筋砂土的破坏由砂土破坏控制, 因此加筋仅增加砂土的粘聚力分量, 而不改变砂土的摩擦分量。经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋的纵、横向筋条在结点处相对摩擦滑动, 加筋砂土的破坏由加筋的结点抗剪强度控制, 因此加筋既改变砂土的摩擦分量, 又增加砂土的粘聚力分量。

b) 经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅的结点连接相对太弱, 导致筋条的抗拉强度远没有充分发挥, 即加筋砂土的强度与筋条的极限抗拉强度无关, 由筋条的结点抗剪强度所决定, 所以国产经编土工格栅和玻

玻璃纤维土工格栅需要提高结点的连接强度,以便充分发挥筋条的抗拉强度。

c)在加筋砂土中,砂土会限制土工合成材料的侧向收缩,阻止土工合成材料的“颈缩”,与无约束拉伸试验的试验结果相比,土工合成材料加筋的延伸率大幅度减小,导致土工合成材料的抗拉模量大大增加,故无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋发挥的拉力相应非常大,无约束拉伸试验的延伸率是合理的。加筋砂土破坏时,无纺土工织物的拉力高达

10.4 kN/m,其它土工合成材料加筋的拉力相近,但是加筋的极限抗拉强度最大相差 10 倍左右和极限延伸率最大相差 40 倍左右,并且各种加筋的极限抗拉强度和极限延伸率各不相同,所以,在加筋砂土中,砂土对各种土工合成材料侧向收缩的约束作用程度是有差异,对易于“颈缩”的土工合成材料(如无纺土工织物和土工网)侧向收缩的约束作用显著。加筋土工工程中需要考虑填料对土工合成材料侧向收缩的约束作用。

表 3 加筋效果的比较(准粘聚力)

Table 3 Comparison of reinforcement (pseudocohesion)

	纯砂	无纺 土工织物	经编 土工格栅	玻璃纤维 土工格栅	双向 土工格栅	土工网 (峰值)	土工网 (残余)
摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	45.6	43.9	50.3	50.8	48.4	47.2	44.5
粘聚力 c_R/kPa	0	61.0	35.7	29.8	29.3	31.3	23.9
相关系数 R^2	0.9954	0.9927	0.9995	0.9959	0.9978	0.9998	0.9948
$\alpha_F = \frac{2\Delta H}{(K_p)^{1/2}} c_R/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	—	10.4	5.2*	4.2*	4.5	4.9	4.0

* 由于加筋砂土与纯砂的摩擦角不同,仅相差 10% 左右,故作为近似估算。

表 4 加筋效果的比较(主应力差和轴向应变)

Table 4 Comparison of reinforcement (deviator stress and axial strain)

周围压力/kPa		50	100	150	200	
主应力差(σ_1 - σ_3) /kPa	未加筋破坏时的主应力差(σ_1 - σ_3) _f	纯砂	304	520	755	976
	加筋破坏时的主应力差(σ_1 - σ_3) _f ^R	无纺土工织物	499	800	951	
		经编土工格栅	540	855	1186	1540
		玻璃纤维土工格栅		870	1170	1558
		双向土工格栅	440	764	1011	1322
		土工网(峰值)	436	713	977	1266
		土工网(残余)	350	600	780	1072
		强度加筋效果系数 R_σ	无纺土工织物	1. 64	1. 58	1. 26
	经编土工格栅		1. 78	1. 64	1. 27	1. 58
	玻璃纤维土工格栅			1. 67	1. 55	1. 60
	双向土工格栅		1. 45	1. 47	1. 33	1. 35
	土工网(峰值)		1. 44	1. 37	1. 29	1. 30
	土工网(残余)		1. 15	1. 15	1. 03	1. 10
	轴向应力变 ε_l / %	未加筋破坏时的轴向应变 ε_{lf}	纯砂	5. 7	5. 7	6. 0
加筋破坏时的轴向应变 ε_{lf}^R		无纺土工织物	12. 0	12. 0	14. 0	
		经编土工格栅	6. 0	7. 0	14. 0	14. 0
		玻璃纤维土工格栅		5. 7	6. 0	6. 0
		双向土工格栅	5. 7	6. 7	13. 0	11. 7
		土工网(峰值)	5. 7	5. 7	6. 0	6. 0
		土工网(残余)	10. 0	10. 0	10. 0	10. 0
		轴向应变加筋效果系数 R_ε	无纺土工织物	2. 11	2. 11	2. 33
经编土工格栅			1. 05	1. 22	2. 33	2. 33
玻璃纤维土工格栅				1. 0	1. 0	1. 0
双向土工格栅			1. 0	1. 18	2. 17	1. 95
土工网(峰值)			1. 0	1. 0	1. 0	1. 0
土工网(残余)			1. 75	1. 75	1. 67	1. 67

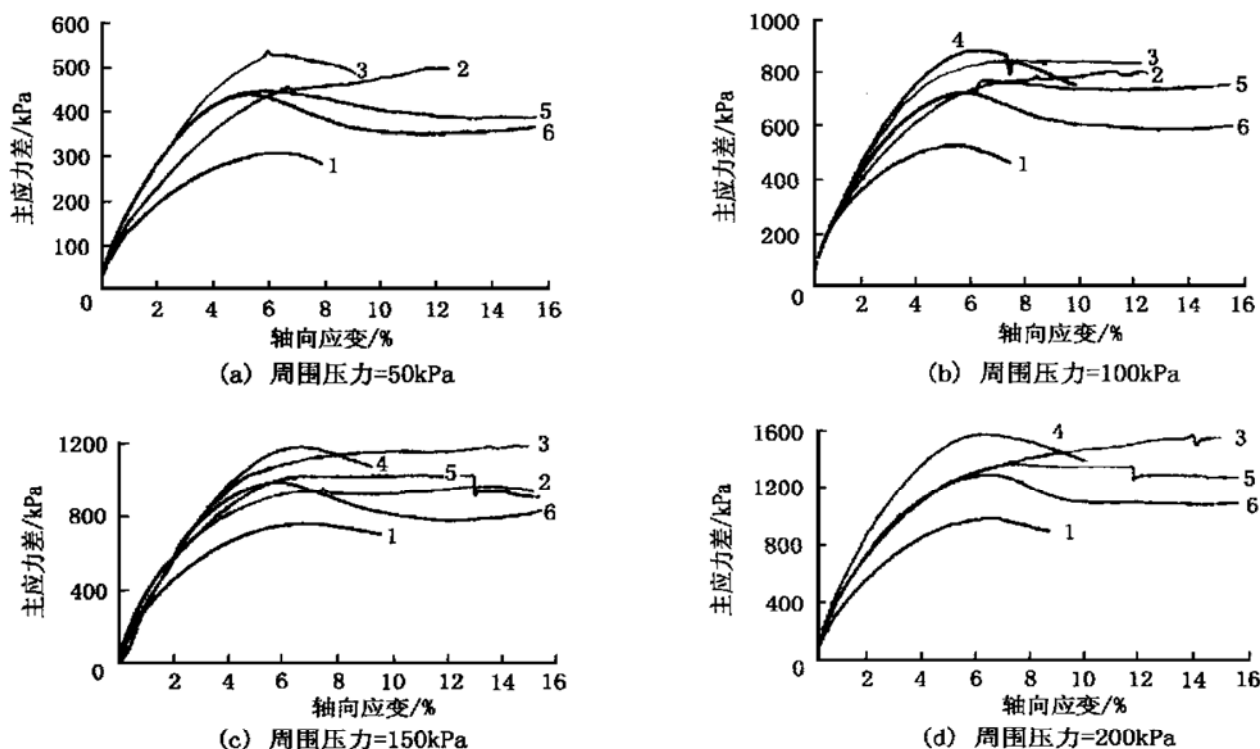


图4 轴向应变与主应力差的关系曲线

Fig. 4 Axial strain (ϵ_1) - deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) curves

1. 纯砂; 2. 无纺土工织物加筋砂土; 3. 经编土工格栅加筋砂土; 4. 玻璃纤维土工格栅加筋砂土; 5. 双向土工格栅加筋砂土; 6. 土工网加筋砂土

4 加筋对砂土应力与应变特性的影响

为了更好地评价土工合成材料对加筋砂土强度和变形的影响, 引入两个评价土工合成材料加筋效果系数 R_σ 和 R_ϵ 。

$$R_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (8)$$

$$R_\epsilon = \frac{\epsilon_{1f}^R}{\epsilon_{1f}} \quad (9)$$

式中 R_σ 为强度加筋效果系数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R$ 为加筋砂土破坏时的主应力差; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为纯砂破坏时的主应力差; R_ϵ 为轴向应变加筋效果系数; ϵ_{1f}^R 为加筋砂土破坏时的轴向应变; ϵ_{1f} 为纯砂破坏时的轴向应变。

从图4和表4可知, 当轴向应变较小($< 1\%$)时, 加筋砂土与纯砂的应力与应变关系曲线很接近; 随着轴向应变的逐渐增大, 加筋砂土与纯砂的应力与应变关系曲线距离逐渐加大, 说明土工合成材料加筋作用只有当轴向应变较大时才比较明显; 当轴向应变继续增大时, 各种土工合成材料加筋砂土应力与应变关系曲线的变化趋势是不一致, 分述如下:

(1) 加筋砂土应力应变关系曲线变化

a) 无纺土工织物加筋砂土的强度继续增大;

b) 经编土工格栅加筋砂土的强度开始继续增大,

当轴向应变超过 $6\% \sim 8\%$ 时, 加筋砂土的强度趋向稳定;

c) 玻璃纤维土工格栅加筋砂土的应力与应变关系曲线的变化趋势与纯砂的应力与应变关系曲线的变化趋势一致;

d) 双向土工格栅加筋砂土: 当超过峰值强度对应的轴向应变时, 加筋砂土的强度趋向稳定, 但当轴向应变超过 12% 左右时, 由于横向土工格栅部分拉断, 出现加筋砂土的强度突然减小;

e) 土工网加筋砂土: 当超过峰值强度对应的轴向应变 6% 时, 加筋砂土的强度逐渐减小; 当轴向应变超过 10% 左右后, 加筋砂土的强度趋向稳定, 出现残余强度。

在不同周围压力下, 各种土工合成材料的强度加筋效果系数均大于 1.0 , 说明土工合成材料加筋可以提高砂土的破坏强度。强度加筋效果系数从高到低对应的土工合成材料依次为: 玻璃纤维土工格栅, 无纺土工织物, 土工网(峰值强度)与双向土工格栅, 土工网(残余强度)。土工网(峰值强度)和双向土工格栅的强度加筋效果系数基本相同。随着周围压力逐渐增大, 土工合成材料的强度加筋效果系数 R_σ 逐渐减小, 这是由于周围压力较低时, 砂土的侧向变形较强, 土工合成材料加筋限制砂土侧向变形的作用较强, 因而强度

加筋效果系数 R_0 较大; 周围压力较高时, 砂土的侧向变形较弱, 土工合成材料加筋限制砂土侧向变形的作用较弱, 因而强度加筋效果系数 R_0 较小。

玻璃纤维土工格栅、土工网(峰值强度)的轴向应变加筋效果系数 R_e 均为 1.0, 说明加筋砂土与纯砂破坏强度对应的轴向应变基本相同, 即加筋没有改变破坏强度对应的轴向应变。无纺土工织物、经编土工格栅、双向土工格栅和土工网(残余强度)的轴向应变加筋效果系数 R_e 均大于 1.0, 说明加筋砂土比纯砂破坏强度对应的轴向应变大。

(2) 关于加筋土工合成材料选型的讨论:

a) 无纺土工织物加筋, 既可以提高砂土的破坏强度, 又可以改善砂土的延性。随着轴向应变逐渐增加, 无纺土工织物加筋砂土的强度逐渐增大。当轴向应变较低($< 4\%$)时, 无纺土工织物的加筋效果低于其它土工合成材料的加筋效果; 当轴向应变较高($> 6\%$)时, 加筋效果才比较明显。认为无纺土工织物适用于允许大变形的加筋土工程, 如无纺土工织物加筋砂垫层处理软土地基。

b) 玻璃纤维土工格栅加筋, 可以大幅度提高砂土的破坏强度, 但不能改善砂土的延性, 属于脆性破坏, 认为玻璃纤维土工格栅适合用于对变形有严格限制的加筋工程, 如防治沥青混凝土路面的反射裂缝, 设计时需要较大的安全系数。

c) 土工网加筋, 可以提高砂土的峰值强度, 但加筋砂土的残余强度与纯砂的峰值强度相差较小, 并且不能提高砂土达到峰值强度对应的轴向应变, 认为土工网适用于低等级的加筋土工程。

d) 经编土工格栅和双向土工格栅加筋, 可以提高砂土的破坏强度, 随着轴向应变逐渐增加, 加筋砂土的强度逐渐趋向稳定, 也可以改善砂土的延性, 认为经编土工格栅和双向土工格栅均适合用于对变形有较严格要求的加筋土工程, 如加筋土挡墙和加筋土桥台。

5 结 论

(1) 土工合成材料加筋砂土具有准粘聚力, 加筋砂土仍符合 Mohr-Coulomb 抗剪强度理论。无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋砂土的摩擦角与纯砂的摩擦角基本相同; 经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋砂土的摩擦角与纯砂的摩擦角不同。

(2) 无纺土工织物、双向土工格栅和土工网加筋砂土的破坏由砂土破坏控制; 经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅加筋砂土破坏由加筋纵、横向筋条结点的抗剪强度控制。目前国产经编土工格栅和玻璃纤维土工格栅需要提高结点的连接强度。

(4) 在加筋砂土中, 砂土会限制土工合成材料的侧向收缩, 导致土工合成材料的抗拉模量增加, 但砂土对各种土工合成材料侧向收缩约束作用程度是有差异, 对易于“颈缩”的土工合成材料效果显著。加筋土工程中需要考虑填料对土工合成材料侧向收缩的约束作用。

(5) 无纺土工织物适合用于允许大变形的加筋土工程, 如无纺土工织物加筋砂垫层处理软土地基; 经编土工格栅和双向土工格栅均适合用于对变形有较严格要求的加筋土工程, 如加筋土挡墙和加筋土桥台; 玻璃纤维土工格栅适合用于对变形有严格限制的加筋工程, 如防治沥青混凝土路面的反射裂缝, 设计时需要较大的安全系数; 土工网适用于低等级的加筋土工程。

参 考 文 献

- 1 Broms B B, Chandrasekaran B, Wong K S. Fabric reinforced retaining walls. In: Int Symposium on Application of Geosynthetic Technology, K III Jakarta, 1992. 1~ 30
- 2 Moroto N. Triaxial compression test for reinforced sand with a flexible tension member. In: Int Symposium on Earth Reinforcement Practice, Vol 1. Kyushu, 1992. 131~ 134
- 3 Atmatzidis D K, Athanasopoulos G A, Papantonopoulos C I. Sand-geotextile interaction by triaxial compression testing. In: 5th Int Conf on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Vol 1. Singapore, 1994. 377~ 380
- 4 McGown A, Andrawes K Z, Al-Hasani M M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. Geotechnique, 1978, 28 (3): 327~ 346
- 5 Gray D H, Al-Refeai T. Behavior of fabric vs. fiber-reinforced sand. J Geotech Engrg ASCE. 1986. 112(8): 804~ 820
- 6 王俊林. 土工织物加筋土三轴试验研究. 见: 朱向荣主编. 首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集(岩土力学与工程的理论与实践). 杭州: 浙江大学出版社. 1992. 235~ 238.
- 7 保华富等. 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