

文章编号:1672-3961(2011)03-0089-04

基于筋材断裂的加筋膨胀土强度特性分析

丁万涛,李术才

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:基于三轴剪切试验对加筋膨胀土的强度特性进行研究,得出加筋土与对应素土的强度指标关系,分析了加筋土强度的提高宏观表现;结合不同层数加筋土体的应力应变关系及加筋土等效围压分析原理,分析了基于筋材断裂的加筋膨胀土的强度特性,得出不同加筋层数筋材刚断裂时应力莫尔圆应相切于同一条直线,随着轴向压力的增加,多层加筋膨胀土试验筋材逐层断裂,应力莫尔圆向外扩展,表明多层加筋膨胀土的强度逐渐增大,而且试验表明对于柔性筋材,多层加筋土体的强度包络线基本平行,加筋土体强度的增加,只是粘聚力 c 的增加引起的。

关键词:三轴试验;加筋膨胀土;断裂;柔性筋材

中图分类号: TU411.7; TU443 **文献标志码:** A

Study of strength properties of reinforced expansive soils with fault material

DING Wan-tao, LI Shu-cai

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on triaxial tests, the stress-strain relationship and strength properties of reinforced expansive soils were studied to obtain the relation between the strength index of reinforced soil and that of corresponding plain soil. The macro behavior of reinforced soil strength was analyzed. Combining the stress-strain relationship of reinforced soil with different layers and equivalent surrounding pressure analysis principle, the strength properties of reinforcement soil were analyzed when the reinforced material broke. Mohr circles were tangent to the same line when the reinforced materials of one layer broke. With the increase of axial compression, many layers reinforced materials begin to break, and the Mohr circles extended outward. It showed that the strength of reinforced soil increases with the increase of reinforced layers. The test showed that strength envelope of different reinforce layers is approximately parallel and the increase of reinforced soil strength was caused by the increase of cohesion when the reinforced materials are flexible materials.

Key words: triaxial test; reinforced expansive soils; fracture; flexible material

0 引言

所谓加筋土就是在土中加入抗拉强度比较大的柔性或刚性材料形成一种复合体。通过柔性或刚性材料同土体接触面上的相互作用,约束土体的侧向变形,提高土体的强度,从而达到提高构筑物稳定性的目的。目前基于各种加筋材料、加筋形式及其不

同加筋材料的使用范围等方面进行了各种各样的试验研究,并提出了一系列的加筋理论^[1-7]。

利用加筋土的特点,在膨胀土地区修建公路、大坝等工程时,可以合理地处理膨胀土遇水膨胀和失水干缩的问题,修建经济、实用的加筋土工程。本文模拟膨胀土地区公路路堤加筋工况,通过室内加筋三轴试验,探究加筋膨胀土的加筋效果及其强度特性。

收稿日期:2011-03-28

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(40872203; 50779073)

作者简介:丁万涛(1975-),男,山东菏泽人,副教授,博士,主要研究方向为加筋材料强度特性。E-mail: dingwantao@sdu.edu.cn

1 试验材料、试验设备及试验方法

试验土样取自徐州某地,颜色呈黑色,中间混有褐色铁锰质结核和钙质结核,属弱膨胀土,密度为 2.70 g/cm^3 ,液限为 42.6% ,塑限为 22.5% ,塑性指数为 20.1 ,其级配曲线如图1所示。

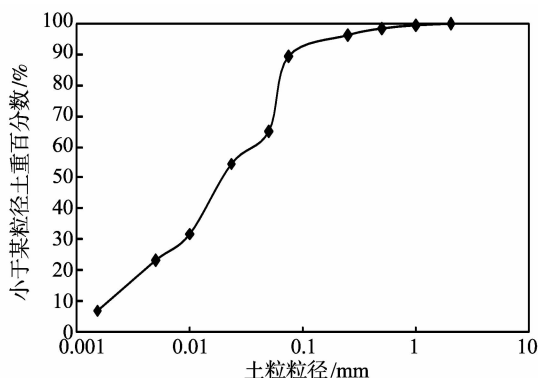


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain composition curve

由图1可知颗粒直径大于 0.074 mm 的占 10.25% ,粒径在 $0.074 \sim 0.0015 \text{ mm}$ 的粉粒占 82.45% ,粒径小于 0.0015 mm 的黏粒占 7.3% 。由此得知该膨胀土的不均匀系数 $C_u = 13.9$,曲率系数 $C_c = 1.8$,属级配良的土。加筋材料为纱窗,其单宽极限抗拉强度 $R_t = 56.4 \text{ N/cm}$,延伸率 $\delta = 41\%$ 。试验是在应变控制式三轴仪(标准三轴仪型号为 TSZ30-2.0)上进行的,试样直径 $D = 6.18 \text{ cm}$,高度 $H = 12.5 \text{ cm}$,剪切速率控制为 0.9 mm/min 。试样采用最佳含水量 23.2% ,最大干容重 1.623 g/cm^3 ,取 0.95 的压实系数制样进行试验。试样制备采用分层击实法,并在预定的位置刨毛置筋,成样后拉筋的偏差控制在 1 mm 之内,加筋层数 $N = 2, 4$,考虑该试验模拟工况已基本完工,故采用固结不排水剪切试验。为了便于研究加筋对膨胀土的约束效果,同时作了素土的剪切三轴试验。

2 试验结果整理分析

应力应变关系曲线见图2和图3,从图中可以看出,随着轴向应变的增加,主应力差在不断增加,且应力无峰值,说明该曲线为硬化型。压力为 200 kPa 作用下,当曲线轴向应变达到 20% 左右时,两种加筋情况的曲线均出现波动现象,这是由于试样在加压的过程中筋材出现了部分断裂破坏。在加筋的应力应变曲线中,当轴向应力在 5% 以内时,相同的轴向应变下,围压大的曲线的主应力差比围压小的

低,说明筋材在小应变低围压下发挥作用比高围压快。

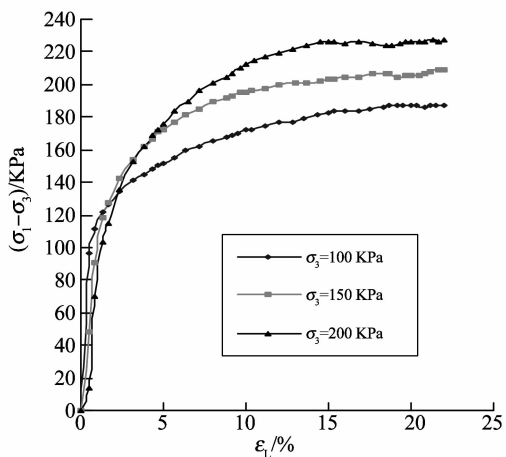


图2 应力应变关系曲线($n=2$)

Fig. 2 Stress-strain curves under two layers ($n=2$)

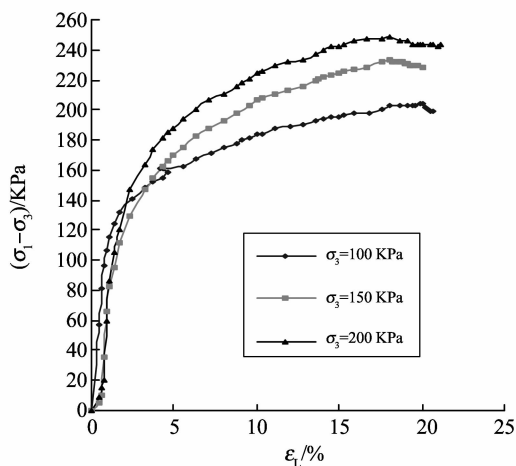


图3 应力应变关系曲线($n=4$)

Fig. 3 Stress-strain curves under four layers ($n=4$)

图4为不同加筋层数试样和素土试样应力应变关系比较曲线,从中可以看出,在相同围压下,加筋土的强度随着加筋层数的增加而增大。

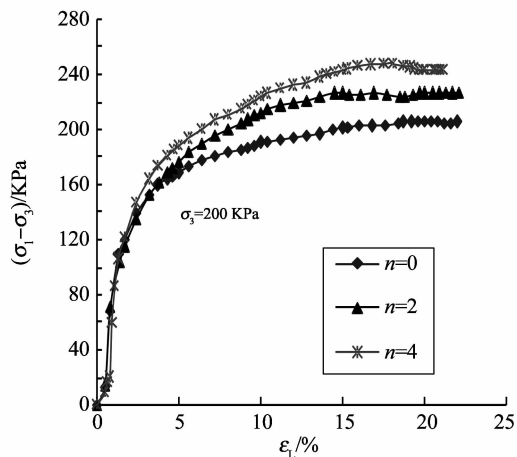


图4 不同加筋层时应力应变关系比较曲线

Fig. 4 The stress-strain curves under different reinforced layers

分析该试验中加筋土、素土强度指标发现,加筋试样的内摩擦角与素土的内摩擦角相比,没有明显地变化,而粘聚力都比素土的大,说明土体加筋后的视粘聚力得到提高,而内摩擦角没有受到大的影响。其结果如表1所示。

表1 加筋土、素土强度指标

Table 1 Strength index of reinforced soils & plain soils

加筋层数 n	$K=0.95$	
	c/kPa	$\phi/(^\circ)$
素土	44.12	11.3
2层	58.32	10.3
4层	61.97	11.0

3 加筋土强度提高宏观表现分析

试验结果表明随着加筋层数的增加, c 值有明显增加,而 ϕ 值则稍小于素土的值,减小的 ϕ 值小于素土的 8.85%,在小于 10% 的范围内,可以认为 ϕ 值几乎没有变化。而从素土和加筋土的轴向应变与主应力差关系比较曲线上,可以明显地看出轴向应变在 5% 以后,素土和加筋土在相同的轴向应变情况下,素土主应力差的值要小于加筋土的值,说明加筋土由于筋材的加入而强度得到了提高。根据摩擦加筋原理,从微观分析,土粒的形状各种各样,其与筋材的接触也会随着形状的不同而各异。当土粒呈棱状时,它与筋材的接触会随着接触的位置不同而变化,当纱窗的纵横条带与棱状土粒的尖角接触时,它们之间只是产生点点接触,在其接触面上产生摩擦力;而当棱状土粒的尖角与纱窗的孔洞接触时,就有形成嵌入式作用,这种接触形式相对前一种形式来说,能向土体提供更大的侧向约束,从而加筋效果会更好。当土粒接近圆形时,其与筋材接触的形式也大致分为点点接触及嵌入式接触,其中嵌入式发挥的作用相对来说比较明显。当然,对于素土本身来说,土粒和土粒之间的接触也随着其形状的不同而有不同的接触形式,比如点点接触,点面接触,面面接触,当土粒之间有相对移动的趋势时,它们就会产生滑动摩擦和咬合摩擦,形成土体的抗剪强度,宏观表现为土体具有一定的粘聚力和内摩擦角。但是比较素土中土粒之间接触作用和加筋土中土粒和筋材的接触作用可知,素土中土粒之间的接触产生的摩擦力方向由于土粒排列的不规则性而不同;当土中加入纱窗后,在纱窗的布置平面上,土粒和筋材接触而产生的摩擦力的作用方向将会沿着同一个指向。对于等高的素土试样和加筋土试样,假如土粒之间产生的摩擦力和土粒与筋材产生的相同,但在

加入筋材的平面上,指向一致的摩擦力形成的合力显然比不规则指向的摩擦力形成的合力大,况且土粒只是靠微弱的各种物理化学作用力联结在一起,其相互作用产生的胶合作用力显然要小于土粒与筋材作用产生的摩擦力,因而加筋土的强度要比素土的大。根据等效围压理论从宏观分析,当土中加入筋材后,筋材与土粒界面之间提供的摩擦力可以看作是施加在土体上额外的周围压力,因此由摩尔圆可知,当素土刚好达到极限状态时,加筋土由于其周围应力的变大而只处于弹性状态,如果让加筋土达到极限状态,就必须对其增加竖向应力,即增加它的主应力差的值,体现在强度指标上,就是强度参数 c 的增大^[2-12]。

4 加筋膨胀土等效围压原理分析

从以上试验曲线可见加筋土属于应变硬化曲线。在加筋膨胀土三轴剪切试验中,由于随着轴向压力的增大,轴向变形的增加,加筋筋材出现断裂的现象,因此假定筋材刚开始断裂时,加筋土处于破坏,分析加筋膨胀土的强度特性。

Yang(1972) 等效围压原理,认为筋材引起的附加围压可由下式计算:

$$\Delta\sigma_{3f} = \frac{R_f}{\Delta H}, \quad (1)$$

其中, ΔH 为筋材的布筋间距;由于假定三轴剪切试验破坏为筋材拉断破坏,所以 R_f 为筋材的拉断强度 R_T 。

利用等效围压原理在分析加筋试样破坏时,不需分开考虑筋材和土的作用,而只是把加筋土等效为增加了附加应力 $\Delta\sigma_{3f}$ 的素土体。图5为不同层数的加筋试验试样。

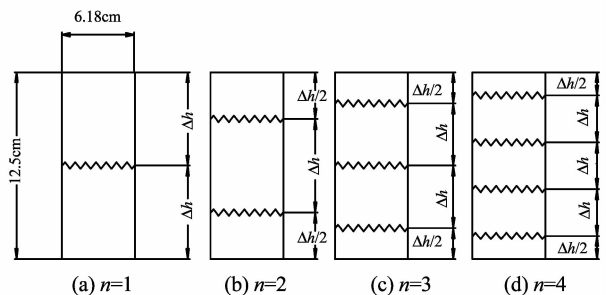


图5 不同加筋层数试验试样

Fig. 5 Sample of test with different reinforcement layers

由加筋膨胀土三轴剪切试验可知,并不是所有的加筋同时达到断裂,而是最接近试样中部的筋材首先开始断裂,而后依次向外延伸,对于上面布筋形式来说,偶数层筋,对称于中心轴且最靠近中心轴的

两层加筋首先发生断裂;奇数层筋,位于中心轴上的水平布筋先断裂。取最不利受力筋材刚断裂时状态,认为试样土体达到破坏状态,而假定此时另外加筋层的筋材与土体的变形是协调的,断裂层上的筋材应变为 ξ_g 。

假设筋材在达到其极限状态下一一直处于弹性变形状态,可对应在加筋的地方布置应变计测量该点的变形 ξ_c ,取折减系数 $\alpha = \frac{\xi_c}{\xi_g}$ 。因此对应不同层数布筋试样的计算公式为

$$\Delta\sigma_{3f} = \frac{nR_f}{H} = R_f \cdot \frac{n}{H}, \quad n = 1, 2; \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{3f} = (R_f + 2 \sum_{i=1}^{m=\frac{n-1}{2}} \alpha_i R_f) / H = R_f (1 + 2 \sum_{i=1}^{m=\frac{n-1}{2}} \alpha_i) / H, \quad n = 3, 5 \dots; \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{3f} = \frac{(2R_f + 2 \sum_{i=1}^{m=\frac{n-2}{2}} \alpha_i R_f)}{H} = R_f \left(\frac{2 + 2 \sum_{i=1}^{m=\frac{n-2}{2}} \alpha_i}{H} \right), \quad n = 4, 6 \dots. \quad (4)$$

其中, R_f 可由筋材拉伸试验测出,而对应于不同加筋层的应变 ξ_c 可由在相应布筋位置布置应变计测出,由此可知对应不同层数的折减系数 α_i 。

在筋材刚断裂时,由协调变形可知,该点的剪应力应等于 R_f ,因此对于不同层数的加筋试样来说,认为一层筋材刚断裂时的状态为极限破坏状态,由莫尔-库仑理论可知,它们的应力莫尔圆这时应该同时相切于一条包络线;对于一层加筋土来说,此时加筋土达到极限状态,而对于多层加筋土来说,其它层的筋材还未达到极限状态,因此还可以承担土体的剪切应力,因此随着加筋层数的增加,土体的强度特性出现逐渐增大的现象。

由试验可知,对于柔性筋材加筋土强度的增加,只是由粘聚力 c 的增加引起的,其内摩擦角几乎没有变化,因而对应不同层数的加筋试样的破坏线,应该基本平行^[13-17]。

5 小结

通过室内加筋土三轴剪切试验分析,并假定筋材刚开始断裂时土体进入极限状态,应用加筋膨胀土等效围压原理分析得到:

(1) 在工程应用中,当以筋材的断裂作为实际工程中土体破坏的判断标准时,试验表明偶数层加筋方式将比奇数层加筋方式更有效地发挥筋材的作用,从而更好地增强土体的抗剪特性。

(2) 室内加筋土三轴剪切试验表明随着加筋层数的增加,土体的抗剪强度也逐渐增大,但增大的幅度逐渐减小,说明加筋土中并不是加筋层数越多越好。

参考文献:

- [1] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 1-5.
LEI Shengyou. Study on reinforced loess by triaxial tests [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 1-5.
- [2] 丁万涛, 雷胜友. 加筋膨胀土不同布筋型式三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1147-1151.
DING Wantao, LEI Shengyou. Triaxial tests on reinforced expansive soil under different reinforced modes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1147-1151.
- [3] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 931-936.
ZHANG Mengxi, MIN Xing. Triaxial tests on sand reinforced with one-layer 3D reinforcement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 931-936.
- [4] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045.
CHEN Changfu, LIU Huaixing, LI Yaping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045.
- [5] 胡幼常, 邓伟, 林汉清, 等. 双向土工格栅加筋土回弹模量试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 759-763.
HU Youchang, DENG Wei, LIN Hanqing, et al. Experimental study on resilient modulus of soil reinforced by biaxial geogrid [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 759-763.
- [6] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425.
YANG Qing, ZHANG Huizhen, LUAN Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425.
- [7] 魏红卫, 喻泽红, 邹银生. 土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 555-562.
WEI Hongwei, YU Zehong, ZOU Yinsheng. Shear characteristics of soil reinforced with geosynthetic material [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 555-562.
- [8] SAWICKI A. Rheological model of geosynthetic-reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17: 33-49.
- [9] LESCHCHINSKY D. Creep and relaxation of grids [J].

- Geosynthetics International, 1997, 4(5):463-479.
- [10] 卢再华, 陈正汉, 孙树国. 南阳膨胀土变形与强度特性的三轴试样研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5):717-723.
LU Zaihua, CHEN Zhenghan, SUN Shuguo. Study on deformation and strength characteristic of expansive soil with triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5):717-723.
- [11] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5):614-616.
JIE Yuxin, LI Guangxin. Equivalent additional stress method for numerical analysis of reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5):614-616.
- [12] 介玉新, 李广信, 郑继勤. 纤维加筋土计算的新方法[J]. 工程力学, 1999, 16(3):81-89.
JIE Yuxin, LI Guangxin, ZHENG Jiqin. A new method for analysis of textsol[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(3):81-89.
- [13] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京:人民交通出版社, 1991, 6.
- [14] 中华人民共和国水利电力部. 土工试验规程(SD 128-84)第一分册[M]. 北京:水利电力出版, 1987.
- [15] 中华人民共和国水利电力部. 土工试验规程(SD 128-84)第二分册[M]. 北京:水利电力出版, 1987.
- [16] 邓恩. 安得森. 土工分析基础[M]. 孔德坊, 译. 北京:地质出版社, 1982.
- [17] 吴景海, 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 Jinghai, WANG Dequn, CHEN Huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2):199-204.

(编辑:孙培芹)