

·基础理论研究·

# 土—土工织物界面摩擦特性试验研究

王俊林\*, 马 艳

(郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**在 DJS 剪力仪上, 利用常州产有纺土工织物分别对砂土(干砂)和黏土(2 种不同含水量的黏土)进行了剪切试验, 确定土—土工织物接触面的合理参数与性质。结果表明, 界面抗剪强度与界面法向应力成线性关系, 其大小与土的种类及含水量有关; 界面剪应力与剪位移  $L$  为非线性关系, 可用双曲线来拟合。

**关键词:**土工织物; 剪切应力; 剪位移

**中图分类号:** TU52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0972(2007)03-0294-03

## Test Studies on the Surface Friction Characteristics of the Soil-fabric

WANG Jun-lin, MA Yan

(School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The soil-fabric and spins produced by Changzhou were used for friction test to sandy soil (dry sand) and the clay (two kinds of different water content clay), respectively, on the shearing force meter of DJS. The parameters and nature of the soil-fabric interface were determined. The results showed that the interface shearing stresses and displacement  $L$  can be fitted to a hyperbolic curve.

**Key words:** soil-fabric; shearing stress; displacement

近 20 多年来, 土工织物作为一种新兴的建筑材料被广泛地应用于土木工程的各个领域, 如软弱地基处理、路基加固、堤坝加固等, 随着加筋土的应用与发展, 加筋土体稳定性的计算方法也得以迅速发展及改进。目前用于加筋土稳定分析与计算较为流行的是极限平衡方法和有限单元方法<sup>[1-5]</sup>。在利用这 2 种方法对加筋土体进行稳定分析与计算时, 均需要用到土—土工织物界面摩擦特性参数。因此, 确定合理的界面摩擦特性参数对加筋土体的计算和分析非常重要。

为确定土—土工织物接触面计算参数, 在 DJS 剪力仪上, 利用常州产有纺土工织物分别对砂土(干砂)和黏土(两种含水量下)进行了摩擦试验, 分析界面抗剪强度的影响因素以及剪切应力与剪位移  $L$  之间的关系。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原理与方法

图 1 为土—土工织物摩擦试验简图。试验时将土工织物固定在剪切盒下部的混凝土块上, 剪切盒上半部填土, 受剪面积为  $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ 。试验时剪切盒上半部固定, 对

下半部施加水平剪力进行试验。

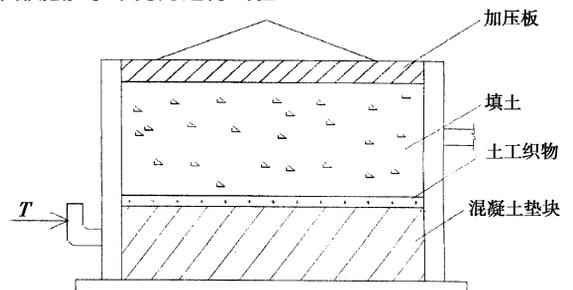


图 1 土工织物摩擦试验装置简图

Fig 1 Soil-fabric friction testing device schematic

当土工织物和土相接触, 如果接触面上有法向压力作用, 欲使两者发生相对位移, 则需克服界面上的摩擦阻力和咬合力, 单位面积最大抗剪力即为界面上的摩擦剪切强度, 其值与摩擦阻力和咬合力之间的关系应通过试验确定。试验时将土工织物平放于混凝土块上, 将其受剪方向的一端固定于下盒侧壁, 另一端自由。放置上盒调整上、下盒间缝隙, 使上盒边框不与织物相接触。插入销钉使上、下盒联为

收稿日期: 2007-03-10; 修订日期: 2007-05-18; \* 通讯联系人, E-mail: junlinwang@zzu.edu.cn.

基金项目: 河南省科技攻关项目 (0624250008)

作者简介: 王俊林 (1963-), 男, 河南项城人, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩土工程方面的科研工作。

一体,将符合要求的土料填入上盒,分层压密.在土面上放透水石及加压板.施加垂直荷载(为50、100、150、200 kPa),待土样固结,施加水平力进行试验,记录水平位移和相应剪位移值.

1.2 试验材料

土工织物采用常州产的扁丝编织布,其密度为28×28根/5 cm,厚度为0.43 mm,重量为87.3 g/m<sup>2</sup>,平均孔径为0.23 mm.土样分别采用砂土和黏土(含水率分别为7.5%与22%),它们的物理力学指标见表1.

表1 土样物理力学性能表

Tab 1 Soil physical mechanical properties table

土样	含水量 / %	重度 / kN · m <sup>-3</sup>	C / kPa	(°)
砂土	0	16	0	34
黏土	7.5	18	8.5	32
黏土	22	20	25	28

2 试验结果整理分析

2.1 τ ~ σ<sub>n</sub> 关系曲线分析

图2为摩擦试验 τ ~ σ<sub>n</sub> 关系曲线,从图2中可以看出土—土工织物交界面最大抗剪应力与法向应力之间的关系为一直线,可用式(1)表示:

$$\tau = C_m + \sigma_n \tan \phi \tag{1}$$

式(1)中: τ 为最大剪应力,  $\tau = \frac{T_m}{A}$ , T<sub>m</sub> 为 σ<sub>n</sub> 作用下最大水平力(kPa), A 为受剪面积(18×18 cm<sup>2</sup>); σ<sub>n</sub> 为垂直应力(kPa); C<sub>m</sub> 为交界面黏结力(kPa); φ 为交界面摩擦角(°).

对于砂土, C<sub>m</sub> = 0, φ = 35.8°; 略大于其自身内摩擦角 = 34°. 对于黏性土, 当含水量为 7.5% 时, C<sub>m</sub> = 5 kPa, φ = 31°; 其黏结力和摩擦角分别小于土体自身的凝聚力 (C = 8.5 kPa) 和内摩擦角 (φ = 32°); 当含水量为 22% 时 C<sub>m</sub> = 15 kPa, φ = 26.5°; 小于土体自身的凝聚力 (C = 25 kPa) 和内摩

擦角 (φ = 28°).

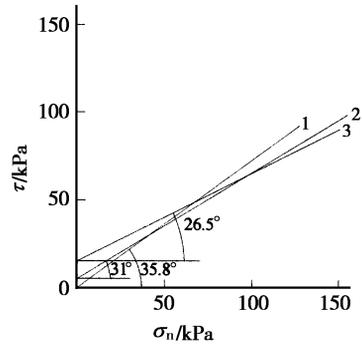


图2 τ ~ σ<sub>n</sub> 关系曲线

Fig 2 τ ~ σ<sub>n</sub> curve

1. 砂土; 2. 黏土 (φ = 7.5%); 3. 黏土 (φ = 22%)

3种不同土质(砂土、含水量为7.5%的黏土和含水量为22%的黏土)情况下的黏着系数(界面摩擦角与土的内摩擦角之比)分别为1.05、0.97和0.95.可见填土中细颗粒含量的多少,对土—土工织物界面的黏着效应有很大的影响.细颗粒含量超过一定值时,其相互作用就会减弱.因此:为保证土—土工织物界面有较高的抗剪力,工程界对填土作了严格限制,小于0.015 mm粒径的土含量不大于15%.对于黏性土,2种含水量下(7.5%和22%)的黏着系数分别为0.97和0.95,后者小于前者;其原因可能是:由于剪切速率较大(2.4 mm/min)剪切过程中来不及排水,当φ = 22%时在界面上产生的孔隙水压力较大,因此抗剪力较小.试验表明,在快剪情况下,黏性土的含水量对土—土工织物界面摩擦特性影响较大.

2.2 剪应力 τ 与剪位移 L 关系分析

图3表示变换坐标后  $\frac{\Delta L}{\tau} \sim L$  关系曲线.  $\frac{\Delta L}{\tau} \sim L$  为一直线关系,因此 τ ~ L 可用双曲线来拟合.

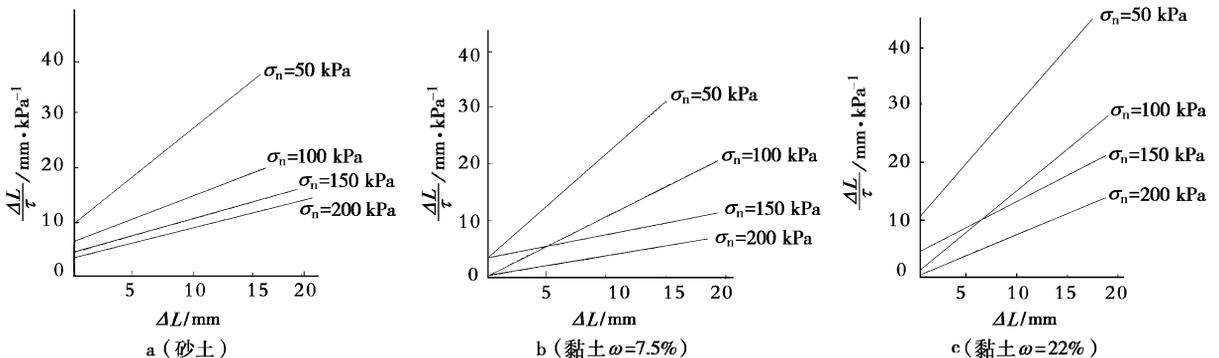


图3  $\frac{1}{\tau} \sim L$  关系曲线

Fig 3  $\frac{1}{\tau} \sim L$  Curve

图4表示界面切应力与切位移 (τ ~ L) 之间的关系曲线.可以看出剪应力与剪位移间为非线性关系,剪位移较

小时,随 L 的增加增长较快,随着 L 的增加 τ 的增长速率变小并趋于稳定.图中虚线即为用来拟合实测曲线

的理论曲线,实线为实测曲线.从图 3 中可以看出黏土的理论曲线与实测基本吻合,砂土的峰值略小于理论值.

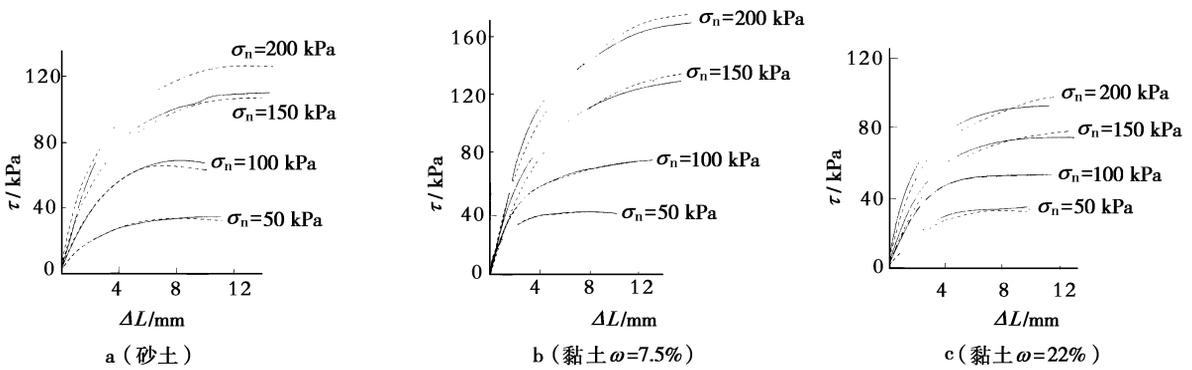


图 4 实测曲线与理论曲线比较图(中砂)

Fig 4 The compare map of measured curve with theoretical curve

注:实线为实测曲线;虚线为理论曲线

2.3 界面特性分析

在加筋土的有限元计算中,常在土与土工织物间设置接触面单元<sup>[6-7]</sup>,为求得接触面单元的参数,在线弹性假定下,将界面上的剪切应力与相对位移  $L$  间存在的非线性关系用双曲线方程近似写成式(2)形式:

$$\tau = \frac{L}{a + bL} \quad (2)$$

式(2)中  $a, b$  为由试验确定的经验参数.

克拉夫和邓肯<sup>[8]</sup>将  $a, b$  与  $\sigma_n$  的关系分别表示为:

$$a = \frac{1}{k_1 w \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n}, \quad b = \frac{R_f}{n \operatorname{tg} \phi + C_m} \quad (3)$$

式(3)中,  $k_1$  是无因次的劲度数;  $R_n$  是劲度指数;  $R_f$  破坏比;  $R_f = b \cdot \phi$  是界面摩擦角(度);  $C_m$  是界面黏结力(kPa);  $w$  是水重度( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $P_a$  是大气压力,与  $\sigma_n$  为同一单位(kPa);  $\phi$  是接触面破坏强度(kPa).

接触面的性能可由与应力有关的 5 个参数 ( $k_1, n, R_f, C_m, w$ ) 来表示.它们的数值可由实测资料来确定.将式(2)两边对  $L$  求偏导,并消去  $L$ . 剪切劲度系数  $K_a$  表达式为:

$$K_a = k_1 \cdot w \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \left(1 - \frac{R_f}{n \operatorname{tg} \phi + C_m}\right)^2 \quad (4)$$

初始劲度系数  $K_{a0}$  ( $L=0$ ) 为:

$$K_{a0} = k_1 w \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \quad (5)$$

由式(3)得

$$\frac{1}{a} = k_1 w \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \quad (6)$$

对式(6)两边取对数得:

$$\lg \frac{1}{a} = \lg k_1 w + n \lg \frac{\sigma_n}{P_a} \quad (7)$$

以  $\lg \frac{1}{a}$  为纵坐标,以  $\lg \frac{\sigma_n}{P_a}$  为横坐标作直线,即可得直线的

截距  $k_1$  和斜率  $n$ , 见图 5.

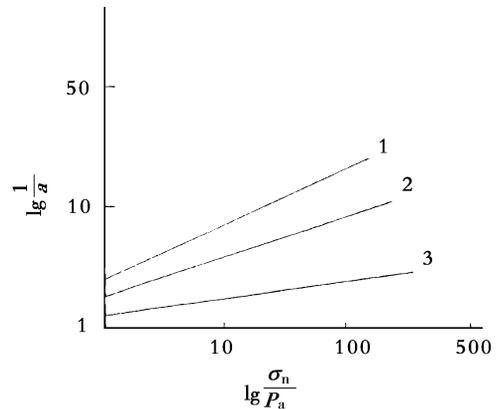


图 5  $\lg \frac{1}{a} - \lg \frac{\sigma_n}{P_a}$  关系曲线

Fig 5  $\lg \frac{1}{a} - \lg \frac{\sigma_n}{P_a}$  curve

按  $R_f = b \cdot \phi$  求出  $R_f$  并取其平均值.所得 5 个参数见表 2. 图 4 中的的虚线是将所求得的 5 个参数代入  $\tau = L/(a + bL)$  中计算出的剪应力—剪位移曲线,与实测曲线(以实线表示)相比较为接近,尤其是在  $\sigma_n$  和  $L$  较小时二者更为接近.

从图 2 和图 4 中还可以看出,同一种土工织物与不同的填土之间,其剪应力—剪位移之间的关系不完全相同.同时通过劲度值的比较,发现接触面上强度高者,其劲度数  $k_1$  也大.

表 2 土—土工织物接触面试验参数值

Tab 2 The test parameters of soil - fabric interface						
接触面类型	$\phi / ^\circ$	$C/\text{kPa}$	$R_f$	$k_1$	$n$	
砂土与土工织物	35.8	0	0.61	1636	0.891	
	=7.5%	31.0	5	0.72	1546	0.66
黏土与土工织物	=22%	26.5	15	0.64	1429	0.52

(下转第 316 页)

型,而是白昼型中光照强度较低的接近黄昏型的类型.叶唇鱼在黄昏和晚上即在弱光和黑暗条件下,摄食活动最强烈<sup>[6]</sup>.鲱鱼在完全黑暗下摄食活动停止<sup>[7]</sup>.虹鳟在光照强度为 3.2 lx 时比 0.1 lx 时捕食活动强烈<sup>[8]</sup>.

从本试验的研究结果看,黄缘闭壳龟的摄食量与光照强度之间的关系符合 S 型摄食曲线,其摄食活动在人工养殖条件下可在白昼进行,但仍以黄昏和夜间群体的摄食量最大.据报道<sup>[9]</sup>具有 S 型摄食曲线的动物,除了依靠视觉摄食外,尚有其他感觉在起作用.黄缘闭壳龟的日均摄食量和生长速度随着光照强度的增加而明显减小,说明强光对黄

#### 参考文献:

- [1] 翟文元.河南省珍稀濒危动物[M].郑州:河南科技出版社,1999:268-272.
- [2] 赵尔宓.中国濒危动物红皮书(两栖类和爬行类)[M].北京:科学技术出版社,1998:96
- [3] 黄斌.黄缘闭壳龟的生活习性与驯养[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2002,15(3):268-272
- [4] PETERSEN J H, GADOMSKID M. Light mediated Predation by Northern Squawfish on Juvenile Chinook Salmon[J]. J Fish Biol(S0022-1112), 1994 45A: 227-242
- [5] EMERY A R. Preliminary Comparisons of Day and Night Habits of Freshwater Fish in Ontario Lakes[J]. Fish Res Bd Can(S0702-9861), 1973, 30: 761-774
- [6] STEIGENBERGER L W, LARKIN P A. Feeding Activity and Rates of Digestion of Northern Squawfish (*Stychocheilus oregonensis*) [J]. Fish Res Bd Can(S0702-9861), 1974, 31: 411-420
- [7] VERHEIGEN F J. Laboratory Experiments with the Herring[J]. Clupea harengus Experientia(S0014-4754), 1953, 9: 193
- [8] GNETZ R M, LARKIN P A. Factors Affecting Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) Predation on Migrant Fry of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) [J]. Fish Res Bd Can(S0702-9861), 1976, 33: 19-24
- [9] 李大勇,何大仁,刘晓春.光照对真鲷仔、稚、幼鱼摄食的影响[J].台湾海峡,1994,13(1):26-31.
- [10] 周显青,牛翠娟,李庆芬,等.光照强度对中华鳖稚鳖摄食和生长的影响[J].动物学报,1998,44(2):157-161.

(上接第 296 页)

### 3 结语

在剪力仪上,利用常州产有纺土工织物分别对砂土(干砂)和黏土(2种不同含水量的黏土)进行了摩擦试验,通过分析得出结论如下:

(1)土—土工织物界面抗剪强度可用式  $\tau = C_m + \sigma_n \tan \phi$  来表示.界面黏着力  $C_m$  随着土样中细颗粒含量的增加而

#### 参考文献:

- [1] 钱家欢.土工数值分析[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [2] SHEN Zhujiang. Limit Analysis of Soft Ground Reinforced by Geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering(S1000-4548). 1998, 20(4): 82-86
- [3] 张晓君.土工合成材料加筋地基承载力的可靠度分析[J].南方冶金学院学报,2001,22(3):217-219
- [4] 陈永辉,于祥生,熊伟明.土工织物加筋堤坝地基的有限元稳定计算方法[J].岩土工程界,2003,12(5):46-48
- [5] 刘春虹,肖朝昀,王建华,等.土工织物加固软土地路堤的有限元分析[J].岩土力学,2004,25(增刊):325-328
- [6] JTJ/T 060-89.公路土工合成材料试验规程[S].
- [7] 李咸亨.柔性加劲材拉出行为之完全非线性有限元分析[J].岩土工程学报,1996,18(6):10-17.
- [8] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,2003

责任编辑:任长江

缘闭壳龟摄食活动有抑制作用,这和周显青等<sup>[10]</sup>研究光照强度对中华鳖稚鳖摄食和生长的影响结果相似.

### 4 结论

1)黄缘闭壳龟喜暗光,厌强光,对光照强度的变化和温度变化十分敏感.

2)人工养殖黄缘闭壳龟,应在养殖池中设置龟巢,养殖池的光照强度应控制在 3 000 lx 以下.

3)黄缘闭壳龟活动的适宜温度为 25 ~ 33 ℃,活动的温度下限为 15 ℃,当其生活的环境温度达到 35 ℃ 以上时,进入“伏夏”.

增加,界摩擦角  $\phi$  随着土样中细颗粒含量的增加而减小.

(2)当  $\sigma_n$  一定时,抗剪强度  $\tau$  与填土的细颗粒含量、含水量等因素有关.细颗粒含量越多其黏着系数越小,对黏性土而言,快剪条件下,含水量越大其黏着系数越小.

(3)土—土工织物界面剪应力  $\tau$  与剪位移  $L$  之间具有明显的非线性,其关系曲线可用双曲线来拟合.