

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1323-04

土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用

张艳美^{1,2}, 张旭东², 张鸿儒¹

(1. 北京交通大学 土建学院, 北京 100044; 2. 中国石油大学(华东), 山东 东营 257062)

摘 要: 对土工合成纤维土 (TEXSOL) 的补强机理进行了理论分析, 研究了各种因素对纤维土补强特性的影响规律及已有纤维土强度计算经验公式的缺陷, 并在大量试验的基础上确定了一系列经验系数如 K , Q , R , P 等, 得出了各种影响因素与纤维土补强特性的关系。研究结果表明, 纤维土粘聚力的增量与纤维的韧度、细度及纤维土的配合比等参数有关; 提出了能反映多种影响因素的纤维土补强计算经验公式; 最后将直壁高度法推广到纤维土挡墙的设计中, 并应用所提公式对纤维土挡墙进行了内部稳定分析。

关 键 词: 土工合成纤维土; 交织机理; 弯曲机理; 纤维配合比; 细度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Test research of geotechnique textile soil reinforcement mechanism and engineering application

ZHANG Yan-mei^{1,2}, ZHANG Xu-dong², ZHANG Hong-ru¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Petroleum University of China (East China), Dongying 257062, China)

Abstract: The TEXSOL reinforcement mechanism was analyzed theoretically. The influencing rule of several factors on TEXSOL reinforcement character was researched; and the defect of the existing experimental calculating formula of TEXSOL strength was analyzed. Based on a lot of experimental results, a series of empirical coefficients were determined. The relationship of influencing factors and TEXSOL reinforcement character was gained. The research shows that the increment of TEXSOL cohesive strength is related to the fiber toughness, fiber fineness and TEXSOL mixing ratio. The empirical formula of TEXSOL reinforcement was proposed. Finally, the straight-wall height method was extended to the design of TEXSOL retaining wall; and the proposed empirical formula was used to analyze the internal stabilization of TEXSOL retaining wall.

Key words: TEXSOL; intercrossing mechanism; bending mechanism; mixing ratio; fineness

1 引 言

土工合成纤维土 (TEXSOL) 是指通过在土中加入连续不断的合成纤维来加固土体而形成的一种土工复合材料^[1], 它是广义上的加筋土, 其作用机理也类似于加筋土, 但它具有近似各向同性的力学性质以及良好的工程性质。纤维土不仅可以限制土体的侧向变形, 也可以控制土体的竖向变形, 因此适宜于解决土木工程中经常出现的变形问题^[2]。这项技术是 20 世纪 80 年代初由法国提出, 并已被应用于高速公路路堤、挡土墙、斜坡稳定等工程中^[3,4]。

本文针对纤维土的补强机理进行了系统的试验研究, 考虑了纤维材料各参数对纤维土补强特性

的影响, 对已有的补强公式进行了修正。并将直壁高度法的思想推广到纤维土挡墙的设计中。最后, 通过工程算例对纤维土挡墙进行了稳定分析。

2 纤维土补强特性的理论分析

2.1 纤维土的补强机理^[5, 6]

土中随机分布的连续纤维对土体的补强机理可概括为“弯曲机理”和“交织机理”。

弯曲机理是指纤维在土中的分布形态是由无数个弯曲转折组成的, 几乎没有直线段。当土体承受外力而使纤维受拉时, 在纤维弯曲的凹侧就会产生纤维对土颗粒的压力 N 和摩擦力 f , 从而起到加固土体的作用, 如图 1(a) 所示。

交织机理是指由于土中无序分布的纤维存在着无数的交织点,如果在纤维的交叉处受到力的作用,从而有位移的趋势,就会遇到其它纤维阻止这种位移,即任何一段纤维的受力变形都会牵动与之交织的各个方向的纤维,从而形成空间的受力区,如图 1(b)所示。

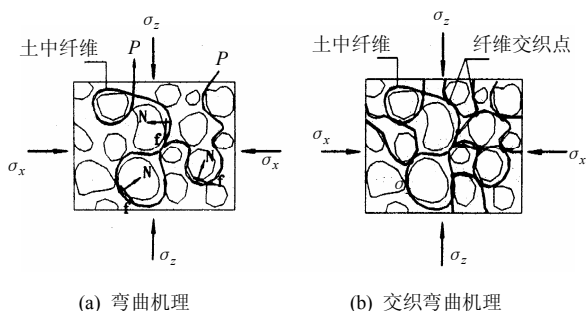


图 1 弯曲机理与交织弯曲机理示意图
Fig.1 Bending, Intercrossing mechanism

纤维对土体的补强机理是极为复杂的。其对土体的补强作用不仅来自于纤维与土体间的摩阻力或咬合力,还来自于纤维网对土体的空间约束作用,故纤维土的补强属体积补强。

2.2 计算纤维土粘聚力的方法及影响因素

在纤维土粘聚力的计算中,首先假定掺入土中的纤维所形成的纤维网是各向同性的,且纤维有一个破坏极限。若假定在各方向上纤维所提供的约束力为 H ,则它所产生的粘聚力为

$$c = H \tan \varphi \quad (1)$$

法国道桥中心研究所的 C. Stefam 针对由砂土和纤维所构成的纤维土,给出了一个计算 H 的理论关系式^[1]:

$$H = 10^7 t m \gamma / 3 \quad (2)$$

式中 t 为纤维的韧度; m 为纤维土的配合比; γ 为土的重度。

实际上,影响纤维土强度的因素不仅包括纤维土的配合比、纤维的韧度和土的重度,还应包括土的内摩擦角、纤维的细度等参数。因此,式(2)不能反映纤维各参数对强度的影响,用于工程计算时会导致较大的偏差。笔者通过大量资料研究认为,由于土中加入纤维,使土的粘聚力产生了一个增量 Δc ,而 Δc 与 m , F , t , φ , γ 之间存在着如下关系式:

$$\Delta c = K t^Q F^R \gamma m^P \tan \varphi \quad (3)$$

式中 Δc 为纤维土与素土的粘聚力差值; F 为纤维的细度; φ 为土的内摩擦角; K , Q , R , P 均为经验系数。

3 补强特性试验及结果分析

3.1 试样参数

土样及纤维的主要性能指标见表1、表2。试件尺寸:高为20 cm,直径为10 cm。制备试件时采用0.96的压实系数,试件的含水量控制在16 %左右。

3.2 试验资料及试验结果

3.2.1 素土的三轴试验结果

素土三轴试验采用4种围压,即 $\sigma_3 = 50, 100, 150, 200$ kPa,试验结果见表3。

表1 土样的性能指标

Table 1 Properties indexes of soil sample

土的比重	最优含水量 /%	最大干密度 /g·cm ⁻³	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%
2.65	15	1.80	28	16	12

表2 试验用纤维的性能指标

Table 2 Properties indexes of fiber used in test

名称	细度/dfex	韧度/cN·dfex ⁻¹
纯棉纤维	130	9.0
纯棉纤维	300	9.0
涤棉纤维	130	11.96

表3 素土试件的试验结果

Table 3 Test result of packed soil sample

围压 /kPa	最大主应力差 /kPa	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
50	202.98	51.29	20.4
100	261.16		
150	306.41		
200	371.05		

3.2.2 纤维土配合比对其补强性能的影响

纤维土的配合比为纤维与土的质量百分比。在试验过程中,所用纤维的长度均为10 cm,细度为130 dfex,韧度为9.0 cN/dfex,试验结果如表4所列。

表4 配合比试验结果

Table 4 Test result of mixing ratio test

纤维种类	配合比 /%	强度指标		
		内摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa	粘聚力增量 /kPa
纯棉	1	20.4	76.65	25.35
纯棉	2		82.53	31.23
纯棉	3		86.98	35.68

3.2.3 纤维的韧度对纤维土补强性能的影响

在该试验过程中, 纤维的细度均取为130 dfex, 长度均取为10 cm, 土的内摩擦角为 20.4° , 试验结果见表5。

表5 韧度试验的试验结果

Table 5 Test result of toughness test

纤维种类	配合比 / %	韧度 / $\text{cN} \cdot \text{dfex}^{-1}$	粘聚力 / kPa	粘聚力增量 / kPa
涤棉	1	11.96	78.08	26.78
纯棉	1	9.0	76.65	25.35
涤棉	2	11.96	86.48	35.18
纯棉	2	9.0	82.53	31.23
涤棉	3	11.96	95.41	44.11
纯棉	3	9.0	86.98	35.68

3.2.4 纤维的细度对纤维土补强性能的影响

在该试验过程中, 纤维的韧度均取 9.0 cN/dfex , 长度取为10 cm, 土的内摩擦角为 20.4° 。试验结果见表6。

表6 细度试验的试验结果

Table 6 Test result of fineness test

纤维种类	配合比 / %	细度 / dfex	粘聚力 / kPa	粘聚力增量 / kPa
纯棉	1	300	64.52	13.22
纯棉	1	130	75.65	25.35
纯棉	2	300	76.48	25.18
纯棉	2	130	82.53	31.23
纯棉	3	300	83.05	31.75
纯棉	3	130	86.98	35.68

3.3 试验结果分析

通过对表4~6的试验数据进行回归分析可知, 粘聚力增量 Δc 与 $m^{0.36}$, $t^{0.46}$, $F^{-0.2}$ 近似成正比, 因此可取式(3)中的系数 $P=0.36$, $Q=0.46$, $R=-0.20$, 即由于加入纤维而使土体产生的粘聚力增量 Δc , 可用下式进行计算:

$$\Delta c = K t^{0.46} F^{-0.20} \gamma m^{0.36} \tan \varphi \quad (4)$$

式中 $K=3.192$, 是对试验数据的回归分析而得到。

纤维土的粘聚力表达式为

$$c = c_0 + \Delta c \quad (5)$$

式中 c 为纤维土的粘聚力; c_0 为素土的粘聚力。

将本文提出公式的计算结果与法国公式的计算结果及各组试验结果进行对比(表7), 结果表明笔者提出的补强经验公式的计算结果与实测值基本一致, 并且明显优于法国公式。

表7 实测强度值与计算值的对比

Table 7 Comparison between calculation result and test result

纤维类别	配合比 / %	纤维韧度 / $\text{cN} \cdot \text{dfex}^{-1}$	纤维细度 / dfex	粘聚力/kPa		
				实测	本文公式	法国公式
纯棉	1	9.0	300	64.5	72.0	73.4
	2	9.0	300	76.5	77.9	95.5
	3	9.0	300	83.1	82.1	117.6
纯棉	1	9.0	130	76.7	75.8	73.4
	2	9.0	130	82.5	82.7	95.5
	3	9.0	130	87.0	87.6	117.6
涤棉	1	11.96	130	78.1	79.2	80.6
	2	11.96	130	86.5	87.1	109.9
	3	11.96	130	95.4	92.7	139.7

4 直壁高度法及其基本思想

由朗肯土压力理论知, 主动土压力 σ_a 与深度 z 之间满足下列极限平衡关系式:

$$\sigma_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6)$$

当 $\sigma_a = 0$ 时, 可得:

$$Z_0 = [2c \tan(45^\circ + \varphi/2)] / \gamma \quad (7)$$

当 $z > Z_0$ 时, 土体产生正值土压力; 当 $z < Z_0$ 时, 土体产生负值土压力。

基于朗肯理论, 兰州交通大学孙遇祺教授^[1]在加筋土挡墙设计理论方面提出了直壁高度法的概念。他认为, 土体处于主动极限平衡状态下, 在地表至深度 Z_0 范围内不会产生正值土压力, 即如果在粘性土中开挖深度不大于 Z_0 的竖直边坡, 它就能保持自身的稳定, 而不需要任何支护, 并称 Z_0 为直壁高度。

由式(7)可以看出, 直壁高度与粘聚力 c 成正比关系。因此, 在加筋土挡墙的设计中可以通过提高 c 值的办法, 使直壁高度达到挡墙的设计高度, 这时土体结构就可以保持其自身的稳定性, 而构成一个挡土结构物, 这就是直壁高度法的基本思想。

为此将直壁高度法的这一思路扩展到对纤维土挡墙的分析中。由前述的分析可知, 由于加入纤维而使土体产生了粘聚力增量 Δc , 故纤维土的粘聚力变为式(5)。将式(5)带入式(7)并整理得:

$$Z_0 = [2(c + \Delta c) \tan(45^\circ + \varphi/2)] / \gamma \quad (8)$$

令 $Z_0 = H_0 + \Delta H$, 并将式(4)带入式(8)得:

$$H_0 = 2c_0 \tan(45^\circ + \varphi/2) / \gamma \quad (9)$$

$$\Delta H = 6.384 F^{-0.20} t^{0.46} m^{0.36} \tan \varphi \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (10)$$

式中 H_0 为未加纤维以前土体的直壁高度; ΔH 为纤维所提供的土体直壁高度增加值。

如果取一定的安全系数 ξ , 则纤维土挡墙的设计高度 H 可取为 Z_0/ξ , 纤维土结构就可以保持其自身的稳定性。

5 工程算例

某高速公路路边拟通过喷射作业将连续的很细的涤纶纤维与砂粘土结合来修建纤维土挡墙, 挡墙高度为 6 m, 墙后填土的主要指标: 内摩擦角为 23° , 粘聚力为 50 kPa, 重度为 20 kN/m²。采用聚酯纤维, 配合比 1 ‰, 纤维初度为 9.0 cN/dfex, 细度为 130 dfex。取挡墙安全系数 $\xi=1.3$ 。

对纤维土挡墙的内部稳定性进行验算。将已知条件代入式 (9) 和式 (10), 可得到 $H=7.554$ m, $\Delta H=4.249$ m, 则 $H=H_0/\xi+\Delta H/\xi=5.811+3.268=9.079$ m。

由此可知, 纤维土挡墙的直壁高度为 9.079 m, 远大于要求的高度 6 m, 纤维土挡墙满足自身稳定性。由于 $\Delta H/H_0=0.56$, 可见纤维的加入, 使土体的直壁高度有了较大幅度的增加。也可以由此对纤维土的补强效果有一个定量的认识。

6 结 论

(1) 土工合成纤维土技术明显地增加了土体的粘聚力, 提高了土体的抗剪强度。并在试验分析基础上, 提出了纤维土补强计算经验公式。

(2) 将直壁高度法的思路应用到纤维土挡墙的分析中, 这一思路对纤维土的工程设计理论和设计方法具有一定的参考价值。

(3) 试验研究中还发现, 纤维土的应力-应变关系表现出变形硬化的特点, 并且一般不会出现典

型的拉力破坏和粘着破坏, 而具有塑性破坏的特征。

(4) 由于所采用的土样和纤维种类有限, 笔者提出的纤维土补强经验公式还只是初步的, 且主要是针对砂粘土。今后进一步还要加强这方面的研究工作, 尤其是对纤维与其它类土结合使用情况进行研究, 以使纤维土补强经验公式更具普遍性。

参 考 文 献

- [1] 熊有言. 土工合成纤维土[J]. 中国公路学报, 1990, 3(4): 84—88.
XIONG You-yan. TEXTSOL [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1990, 3(4): 84—88.
- [2] 潘军, 王桢. 纤维土的发展及其在膨胀土中的应用[J]. 路基工程, 1996, (5): 12—15.
PAN Jun, WANG Zhen. The development and the application in swelling soil of TEXTSOL [J]. *Subgrade Engineering*, 1996, (5): 12—15.
- [3] 黄文生. 纤维土——一种新的加固材料[J]. 国外公路, 1990, (3): 48—51.
HUANG Wen-sheng. TEXTSOL——A new reinforcement material[J]. *Foreign Highway*, 1990, (3): 48—51.
- [4] 孙遇祺, 马骥, 弗. 帕. 季托夫, 弗. 达. 卡扎尔诺夫斯基. 铁路公路灾害防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [5] 孙遇祺. 粘性加筋土若干问题的研究[J]. 兰州交通大学学报, 1996, (2): 11—15.
SUN Yun-qi. The research of cohesive reinforced earth problems[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 1996, (2): 11—15.
- [6] 朱诗鳌. 土工合成材料的应用[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1994.