

DOI: 10.11779/CJGE201409017

基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究

李 建¹, 唐朝生^{1, 2*}, 王德银¹, 施 斌¹, 裴向军²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验, 四川 成都 610059)

摘 要: 纤维/土界面间的力学作用特性是决定纤维加筋土工程性质的关键因素。为了改善纤维/土界面作用力, 开发了一种新型的波形纤维作为加筋材料, 并自主设计了一套拉拔试验装置, 对单根纤维加筋土开展了多组拉拔试验, 定量获得了波形纤维加筋土的拉拔特性及界面剪切强度, 通过与传统直线形纤维对比, 分析了波形纤维/土界面的力学作用机理, 并从理论上探讨了波形纤维的最大临界加筋长度。结果表明: 提出的单根纤维拉拔试验方法及设计的试验装置为研究纤维/土界面力学作用提供了有效的途径, 试验结果具有较好的可重复性; 直线形纤维的拉拔曲线呈典型的单峰特征, 拉力达到峰值后迅速减小到残余值并逐渐趋于稳定, 而波形纤维的拉拔曲线呈显著的多峰特征, 曲线波长与纤维的波长基本一致; 通过对比, 波形纤维/土界面剪切强度明显高于直线形纤维, 强度值提高了 178%, 极大改善了纤维的加筋效果, 此外, 波形纤维拉拔曲线各峰值对应的界面剪切强度及残余剪切强度随拉拔位移呈指数递减趋势; 利用测得的纤维/土界面剪切强度, 结合纤维自身的抗拉强度和一些假设条件, 能确定纤维的最大临界加筋长度, 对实际工程设计有一定参考意义。

关键词: 波形纤维加筋土; 拉拔试验; 界面剪切强度; 界面力学作用; 临界加筋长度; 纤维加筋机理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1696-09

作者简介: 李 建(1989-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程和工程地质方面的研究工作。E-mail: ljspeci@163.com。

Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils

LI Jian¹, TANG Chao-sheng^{1, 2}, WANG De-yin¹, SHI Bin¹, PEI Xiang-jun²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The interfacial mechanical interaction between fibers and soils is the key factor controlling the engineering properties of fiber-reinforced soils. In order to improve the mechanical properties of fiber-soil interface, a new wave-shape fiber is developed as a reinforcement material. An innovative pullout test device is designed. By applying this device, a series of single fiber pullout tests are carried out on fiber-reinforced soil samples. The pullout characteristics and interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils are quantitatively obtained. As compared to the conventional straight fibers, the interfacial mechanical interaction character of wave-shape fiber-reinforced soils is analyzed. Moreover, the maximum critical reinforcement length and techniques of wave-shape fibers are discussed. The results show that the proposed single fiber pullout test method and the designed pullout test device are effective to quantify the interfacial mechanical behaviours of the fiber-reinforced soils, with simple operation and good repeatability. The pullout curves of straight fiber present a typical single peak characteristic. As the pullout load reaches the peak value, it decreases rapidly to the residual value, and then gradually reaches stabilization. However, the pullout curves of the wave-shape fibers present a typical characteristic of multiple peaks, and the wavelength of the curve is consistent with that of the wave-shape fibers. It is found that the interfacial shear strength of the wave-shape fiber-soil is significantly higher than that of the conventional straight fiber, and the corresponding strength increases by 178%. It indicates that the wave-shape fibers can dramatically improve the reinforcement benefit as compared with the straight fibers. In addition, the interfacial shear strength and residual shear strength, which are corresponding to the peak values of wave-shape fiber pullout curve, generally decrease exponentially with an increase in pullout displacement. According to the measured fiber-soil interfacial shear strength,

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(41322019); 国家自然科学基金重点项目(41230636); 江苏省自然科学基金项目(BK2011339); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2013K010)

收稿日期: 2014-01-20

***通讯作者**

and with the combination of the fiber tensile strength and some assumptions, the maximum critical fiber length can be determined. It is of great significance to practical engineering design of fiber-reinforced soils.

Key words: wave-shape fiber-reinforced soil; pullout test; interfacial shear strength; interfacial mechanical interaction; critical fiber length; fiber reinforcement mechanism

0 引 言

加筋土技术具有非常悠久的历史,远在几千年前,人们就已经尝试将树枝、秸秆、草茎等掺入土体或墙体用于提高结构的稳定性和耐久性。现代加筋技术由法国著名建筑工程师 Henri Vidal 在 20 世纪 60 年代提出,并成功设计了世界上的第一个加筋土挡墙。在此之后,加筋土技术便引起了学术界和工程界的广泛关注,并得到了迅速的发展。中国于 20 世纪 70 年代末和 80 年代初引进加筋土技术,经过 30 多年的发展,在加筋土理论计算、施工设计、新材料开发和技术推广等方面都取得了长足的发展^[1-6]。

纤维加筋是近些年来出现的一种新型土质改良技术。该技术是通过在土体中随机掺入离散的短纤维丝,形成一种复合土工材料。同传统的加筋技术相比,纤维加筋主要有以下优点:

(1) 纤维丝具有很好的分散性,能均匀地分布在土体中,在各个方向上都能发挥加筋作用,是一种典型的三维加筋技术。在一些理论分析和计算中,通常将纤维加筋土视为各向同性的复合材料加以考虑。而传统的面状土工合成材料(土工布、土工格栅、土工网等)一般是按设计间距进行水平布设,本质上是一种二维加筋形式,筋材与土体界面之间往往形成潜在的软弱结构面,导致加筋土力学性质呈显著的各向异性,在荷载作用下土体有可能沿筋/土界面发生相对滑动,出现较大变形甚至破坏。

(2) 纤维具有强度高、耐腐蚀、易于拌合等优点,能像石灰、水泥、粉煤灰等无机结合料一样快速均匀地掺入土体中,施工工艺简单。正因为如此,纤维加筋技术在近年来得到了快速发展,国内外学者对纤维加筋土的工程性质开展了大量研究。

首先,在纤维加筋材料方面,主要采用了两类纤维:自然纤维和人工合成纤维。自然纤维如剑麻纤维、竹纤维和椰子纤维等,具有成本低、绿色环保等优点,得到了许多研究人员的青睐^[7-8]。但这类纤维容易降解,长期性能差。人工合成纤维则具有强度高、耐酸碱、耐热等特性,种类较多,常见的有聚丙烯、聚乙烯、玻璃纤维和尼龙纤维^[9-14]等,在实际工程中有较多应用。在纤维加筋土的工程性质方面,清华大学李广信课题组较早地开展了相关研究。如陈轮等^[15]通过单轴拉伸试验,发现纤维加筋土试样呈现裂而不断的

特性;李广信等^[16]通过开展三轴压缩试验,发现连续纤维加筋能显著提高土体黏聚力;介玉新等^[17]通过开展离心模型试验,得到纤维加筋能提高土质边坡稳定性的结论;Puppala 等通过开展无侧限抗压试验,发现纤维能够增强土体的抗压强度^[18];唐朝生等^[19]和 Cai 等^[20]分别针对聚丙烯纤维加筋水泥土和石灰土开展了无侧限抗压试验,得到了类似的结果,并发现在水泥土和石灰土中纤维的加筋效果更佳;王德银等^[21]对纤维加筋非饱和黏性土开展了直剪试验,发现纤维加筋不仅能提高非饱和土的剪切强度,还能改善土体的破坏韧性,且低含水率和高密实度条件更有利于发挥纤维的拉筋效果;蔡奕等^[22]对纤维加筋石灰土也开展了类似试验,得到最佳纤维掺量为干土重的 0.3%,最佳纤维长度为 15 mm;Marandi 等^[23]对纤维加筋粉砂土进行了三轴试验,发现抗剪强度随纤维掺量的增加而增加;Nataraj 等^[24]为了研究纤维加筋土的力学性质,开展了一系列直剪、无侧限抗压和 CBR 试验,结果表明:土体的强度和承载力均随纤维的加入而显著提高;Mesbah 等^[25]和李建等^[26]等采用直接拉伸试验研究了纤维加筋土的抗拉特性,发现纤维能有效抑制初始拉伸裂隙的扩展,增强土体的抗拉强度。除了室内试验,国内外学者还开展了一系列现场试验,研究结果均表明纤维加筋能显著改善土体的工程性质,是一种优良的土质改良技术^[27-29]。

针对纤维加筋机理,Tang 等^[11,30]分别从宏观和微观的角度开展了系统研究,他们指出,纤维/土界面力学作用状态是制约纤维加筋效果的关键因素。纤维之所以能提高土体力学性质,根本原因是纤维/土界面作用力(界面黏聚力和摩擦力)限制了纤维在土体中的相对滑动,使分散在土体中的纤维起到拉筋作用,具备分担荷载和限制土体变形的能力。因此,改善纤维/土界面力学强度是提高纤维加筋土力学性质的重要途径。然而,到目前为止,国内外岩土工程领域关于纤维/土界面力学作用的系统研究还比较鲜见,且以往研究中所采用的纤维加筋材料几乎都是圆柱状直线形纤维,表面光滑(图 1),纤维的拉筋效果无法得到充分发挥。

为此,开发了一种新型的波形纤维,为了定量获得该波形纤维/土界面剪切强度,提出了一种单根纤维拉拔试验方法,并自主设计了一套拉拔试验装置,对波形纤维加筋土开展了多组拉拔试验,通过与传统直

线形纤维对比,分析了波形纤维/土界面的力学作用特性及机理,并从理论上探讨了最大临界加筋长度,相关结果对深入认识波形纤维加筋土的力学性质有重要意义。

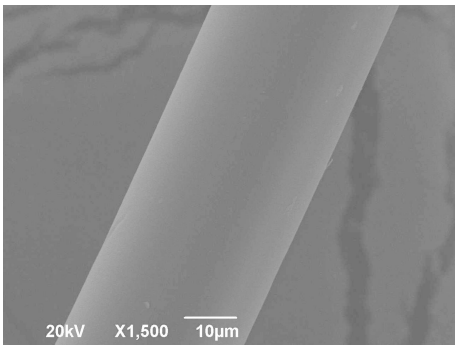


图 1 直线形聚丙烯纤维的 SEM 照片
Fig. 1 SEM photo of straight polypropylene fiber

1 试验材料与方法

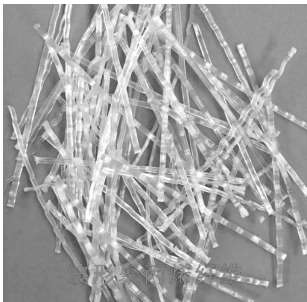
1.1 试验材料

所用的土样为南京地区广泛分布的粉质黏土,其物理力学性质如表 1 所示。所用的加筋材料为波形聚丙烯纤维(图 2 (a)),外形示意图见图 2 (b),其物理力学参数如表 2 所示。该波形纤维的截面近似圆形,等效直径为 0.9 mm,波高为 0.24 mm,波长为 3.97 mm。

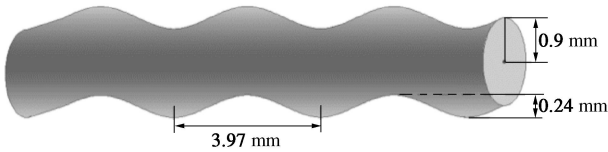
1.2 试验方法

在岩土和地质工程中,岩土体与结构接触面间的力学性质一直是一个非常重要的研究课题,尤其在加筋土工程中,筋/土界面剪切强度是关键设计参数之一。对于传统的土工合成材料加筋土而言,筋/土界面剪切强度主要是通过直剪试验和拉拔试验进行确定。但对于纤维加筋土而言,由于纤维尺寸非常微小,且纤维在土体中随机分布,目前国内外还没有非常有效的方法能测得纤维/土界面作用力大小。为此,本文提出了一种单根纤维拉拔试验方法,并开发了一套拉拔试验装置(专利申请号:201210301366.3),用于定量

分析波形纤维/土界面剪切强度特性。下文将对试样制备过程、试验装置和方法进行具体介绍。



(a) 波形聚丙烯照片



(b) 波形聚丙烯纤维示意图

图 2 波形聚丙烯纤维

Fig. 2 Wave-shape polypropylene fiber

(1) 试样制备

将取回的土样风干碾碎,并过 2 mm 筛,土样的风干含水率为 4.16%。试验过程中,首先在称取的土中洒入适量的水配制到表 1 的最优含水率 16.5%,然后装入塑料袋,密封养护 24 h,以便土样中的水分分布均匀。

养护结束后,称取适量的土样,倒入本文专门设计的楔形模具(图 3 (a))中,压实到表 1 的最大干密度 1.7 g/cm³。土样的制备过程如图 3 (b)~(e) 所示:

- a) 在压样时,先称取一半的土样放入模具中,抚平表面(图 3 (b));
- b) 将一根波形纤维穿过模具两侧的预留缝隙,置于土样上方中间位置(图 3 (c)),加入另一半土,再次抚平表面(图 3 (d));

表 1 土样的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of Xiashu soils

| 比重 | 液限 | 塑限 | 塑性指数 | 最佳含水率 | 最大干密度 | 颗粒百分含量/% | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------|--------------|--|----------|-------------|--------|----------|----------|----------|-------|-------|
| | $w_L/\%$ | $w_P/\%$ | I_P | $w_{opt}/\%$ | $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 2~0.074 | 0.074~0.005 | <0.005 | D_{60} | D_{30} | D_{10} | C_u | C_c |
| 2.7 | 36.4 | 18.6 | 17.8 | 16.5 | 1.7 | 2 | 67 | 31 | 0.0117 | 0.0048 | 0.0011 | 10.6 | 1.8 |

注: D_{60} 为限制粒径, D_{30} 为颗粒百分含量小于 30% 的粒径, D_{10} 为有效粒径, C_u 为均匀系数, C_c 为曲率系。

表 2 波形聚丙烯纤维的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical behaviors of polypropylene fibers

| 类型 | 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 长度 /mm | 等效直径 /mm | 波高 /mm | 波长 /mm | 抗拉强度 /MPa | 弹性模量 /MPa | 断裂伸 长率/% | 耐酸 碱性 | 分散 性 |
|-----|--|-----------|-------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-------------|----------|---------|
| 波形 | 0.91 | 50 | 0.90 | 0.24 | 3.97 | 540 | 5650 | 18 | 极强 | 极好 |
| 直线形 | 0.91 | 50 | 0.90 | — | — | ≥ 350 | ≥ 3500 | 18 | 极强 | 极好 |

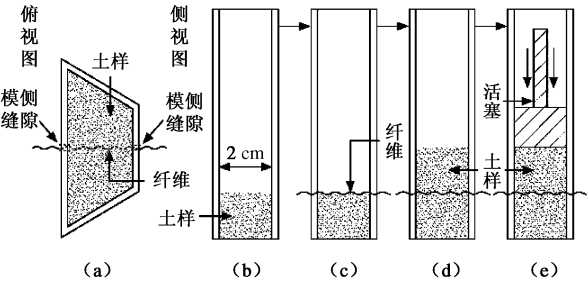


图 3 土样制备过程示意图

Fig. 3 Sketch drawing of sample preparing process

c) 在模具中放入配套的楔形活塞, 用千斤顶将土样压实到目标干密度 (图 3 (e)), 然后再挤出模具。

图 4 (a) 为压制好的单根波形纤维加筋土试样示意图, 试样的长度为 20 mm, 厚度为 20 mm, 端部的宽度分别为 40 mm 和 20 mm, 其中纤维与土样的实际接触长度为 20.18 mm。按上述方法, 本次研究共压制了 4 个平行样。对于直线形纤维加筋土样, 准备过程同上。

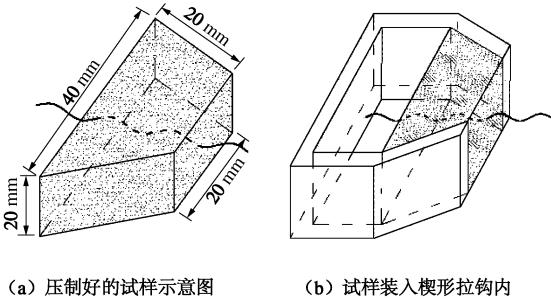


图 4 压制好的单根纤维加筋土试样示意图

Fig. 4 Schematic drawing of compacted single fiber-reinforced soil sample

(2) 拉拔试验装置与方法

图 5 为自主设计的单根纤维拉拔试验装置示意图, 主要由试验机、拉力传感器 (精度为 0.01 N, 量程为 300 N)、位移传感器 (精度为 0.01 mm, 量程为 50 mm) 及数据采集系统组成。在试验前, 首先将图 4 (a) 所示的试样安装在专门设计的楔形拉钩内 (图 4 (b)), 然后将楔形拉钩与固定在试验机横梁中央的拉力传感器下端连接, 将试样下端延伸出来的纤维通过夹具与试验机升降台进行连接并固定。位移传感器安装在升降台上。

试验过程中, 启动试验机, 使连接纤维的夹具随升降台以 0.5 mm/min 的恒定速率向下移动, 对纤维施加拉力, 拉力的变化和对应的拉伸位移通过数据采集系统自动采集 (纤维受到的拉力为数据采集系统采集的拉力值消除下方拉钩的重量), 当拉伸位移达到 20 mm 后, 停止试验。为了防止试验过程中土样水分蒸

发对试验结果的影响, 在土样表面粘贴了一层胶带。试验结束后, 将试样置入烘箱中再次测试含水率, 同试验前进行了对比, 发现含水率差异均小于 0.5%, 在可接受范围之内。

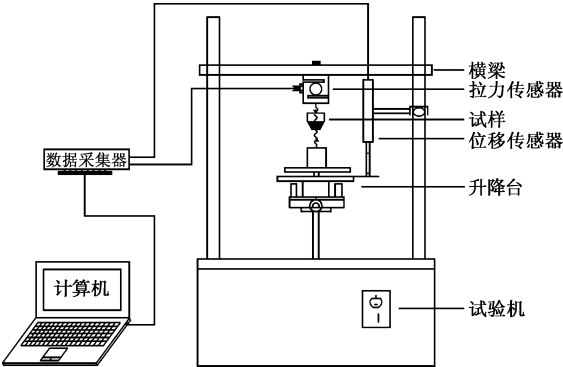


图 5 单根纤维拉拔试验装置示意图

Fig. 5 Schematic drawing of single fiber pullout test device

2 结果与分析

2.1 拉拔特性

图 6 给出了 4 组平行样的拉拔曲线, 从图 6 可以看出, 各平行样的拉拔试验结果呈现较好的一致性, 说明本文提出的单根纤维拉拔试验方法及设计的试验装置具有较好的可重复性。

总体上, 拉力 - 位移曲线呈明显的多峰特征。在试验初期, 拉力随位移的增加而快速增大, 当拉力达到峰值后则开始减小, 此后拉力随位移再次增大到第二个峰值后又开始减小, 如此往复。

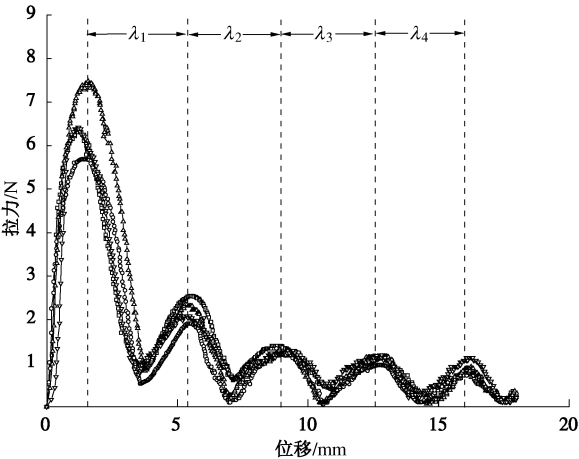


图 6 波形纤维加筋土拉拔曲线

Fig. 6 Pullout curve of wave-shape fiber-reinforced soils

拉拔曲线的多峰结构与试验用的纤维呈波浪形有关。为了证实这一点, 采用上述方法对圆柱状的直线形纤维 (直径 0.9 mm) 也开展了类似拉拔试验, 图 7 给出了该直线形纤维的典型拉拔曲线, 与图 6 的结果

进行对比可知,直线形纤维的拉拔曲线呈典型的单峰结构,拉力达到峰值后迅速减小到残余值,此后基本维持稳定直到试验结束。

波形纤维和直线形纤维在拉拔曲线上所呈现的差异性,本质上是因为纤维形状改变了筋/土界面力学作用机制。在拉拔过程中,作用在纤维下端的拉力会导致筋/土界面产生剪应力,剪应力主要来源于两个方面:界面摩擦力和黏聚力。在试验初期,由于拉力较小,界面剪应力未达到界面剪切强度,拉力作用主要是导致纤维的拉伸变形或界面局部的剪切变形。当拉力达到峰值后,界面剪应力达到了界面剪切强度,纤维/土界面发生完全剪切破坏,即界面脱黏且纤维与土体之间发生明显相对滑动。因此,直线形纤维在脱黏后界面作用力以滑动摩擦为主,拉力只需克服滑动摩擦产生的阻力便能将纤维拉拔出土样,而滑动摩擦相对比较稳定,这也解释了图 7 中的残余拉力为常数的原因。

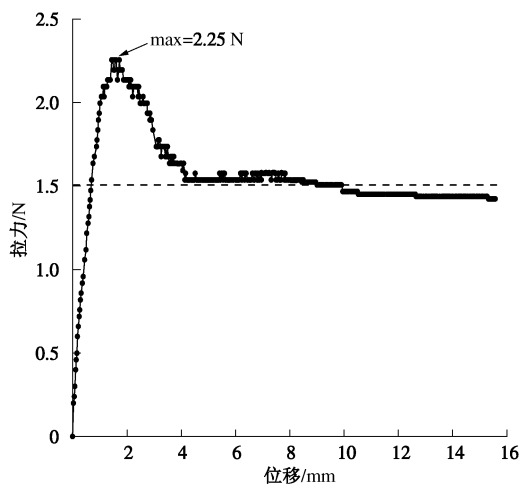


图 7 直线形纤维加筋土拉拔试验曲线

Fig. 7 Pullout curve of straight fiber reinforced soil

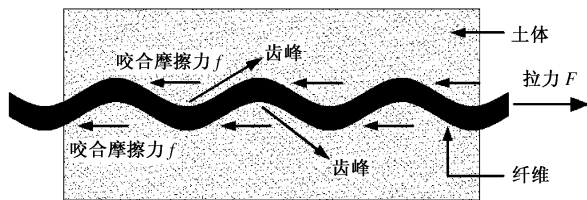


图 8 波形纤维/土界面力学作用示意图

Fig. 8 Sketch drawing of wave-shape fiber/soil interfacial mechanical interactions

但是,对于波形纤维而言,界面作用力比直线形纤维要复杂的多。如图 8 的示意图所示,土样压实后波形纤维和土体相互啮合,纤维波峰和波谷之间由土体充满形成齿峰。当纤维受拉时,界面除了滑动摩擦力和黏聚力外,还存在着显著的咬合摩擦力。只有当

拉力增大到足以克服齿峰对纤维的咬合阻力时,纤维才会在土体中发生明显的相对滑动。理论上,当波形纤维的波峰恰好达到临近的土体齿峰时,拉力达到最大值,此后由于纤维和土体之间的接触面积减小,咬合阻力及其它界面作用也相应减小,拉力开始下降。但当波形纤维在土体中发生半个波长的相对位移后,又会与土体主机再度啮合,界面阻力随之增加,拉力也因此再次增加直到纤维再次越过齿峰,如此往复进行,使拉拔曲线呈现图 6 的多峰特征。

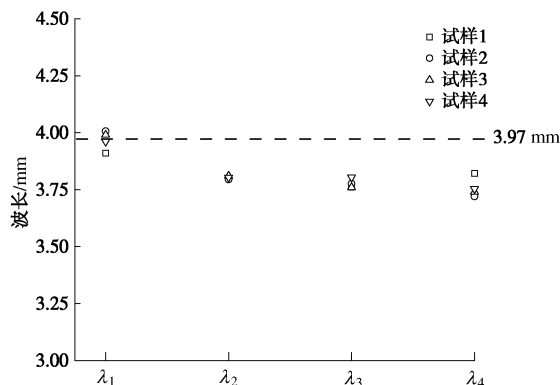


图 9 波形纤维拉拔曲线波长变化图

Fig. 9 Change of wavelength of pullout curve of wave-shape fiber-reinforced soils

图 9 展示了图 6 中拉拔曲线波长(波峰之间的间距)的变化,不难发现曲线的波长均处于 3.75~4 mm 之间,随着拉拔过程的进行,波长略有减小,但基本与本文采用的波形纤维的波长(3.97 mm)一致,进一步说明拉拔曲线的多峰特征与纤维的波形结构密切相关。由此可见,通过改变加筋纤维的波形参数(波长和波高),理论上是可以对纤维/土界面作用特性进行调整,以满足不同的工程需求,这对合理选用纤维加筋材料和优化设计波形纤维加筋土工程有一定参考价值。

2.2 界面剪切强度

考虑到波形纤维拉拔曲线的多峰特征,为了定量分析波形纤维/土界面之间力学作用关系,本文引入界面剪切强度 τ_f 和界面残余剪切强度 τ_{r-i} 的概念,定义如下:

$$\tau_f = \frac{F_{\max}}{S}, \quad (1)$$

$$\tau_{r-i} = \frac{F_{\max-i}}{S}. \quad (2)$$

式中 F_{\max} 为拉拔试验中纤维所承受的最大拉力,一般出现在纤维被明显拉动的一刻,即拉拔曲线中的第一个峰值拉力; $F_{\max-i}$ 为纤维被明显拉动后拉力达到的第 i 次峰值,即拉拔曲线中除了第一个峰值拉力之外

的其它残余峰值拉力; S 为波形纤维与土体之间的实际接触面积, 可据图 1 及表 2 的相关参数进行计算。在本文中, 纤维与土样的实际接触长度为 20.18 mm, 对应的 S 值为 58.52 mm²。

图 10 分别给出了波形纤维和直线形纤维试样界面剪切强度和各级残余剪切强度平均值的变化规律。对于波形纤维而言, 界面强度值随拉拔位移总体上呈指数递减的趋势, 其中界面剪切强度远远高于残余剪切强度, 其值为 110.89 kPa, 第一、二、三和四级残余剪切强度分别为 38.02, 22.08, 18.93 和 15.41 kPa。此外, 各级强度的衰减幅度随拉拔位移也总体呈递减趋势, 如从 τ_f 到 τ_{r-1} , 强度减小了 65.7%, 从 τ_{r-1} 到 τ_{r-2} 、 τ_{r-2} 到 τ_{r-3} 和 τ_{r-3} 到 τ_{r-4} 则分别减小了 41.9%、14.3% 和 18.6%。这些结果说明波形纤维每越过一个齿峰时对应的界面作用力逐渐减小, 且界面作用力从第一个峰值过渡到第二个峰值时衰减最为明显。主要是因为纤维在滑动过程中对齿峰产生了破坏作用, 齿峰有可能被磨平甚至剪断, 纤维和土体之间的啮合程度随拉拔位移的增加逐渐变弱, 这可能也是图 9 中曲线波长发生轻微减小的原因。

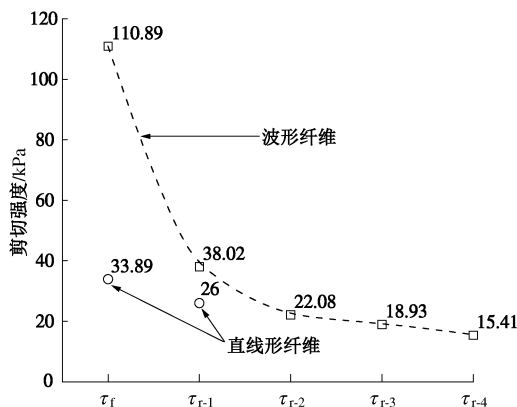


图 10 纤维加筋土界面剪切强度及残余强度变化曲线

Fig. 10 Change of interfacial shear strength and residual shear strength of fiber-reinforced soils

为了进一步验证上述分析, 课题组对波形纤维加筋土的界面作用特征进行了观测, 图 11 给出了纤维被拉动前的剖面照片, 可以很清晰的看出纤维/土界面啮合良好。图 12 为纤维被完全拔出后留下的坑槽, 此时坑槽壁比较光滑, 基本呈直线形, 说明之前的齿峰已基本被磨平消失, 纤维和土体之间的咬合作用力势必减弱。

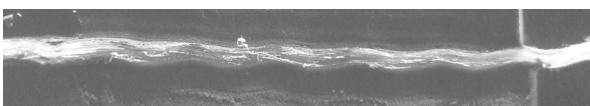


图 11 波形纤维被拉动前的剖面照片

Fig. 11 Photo of wave-shape fiber in soil mass before pullout

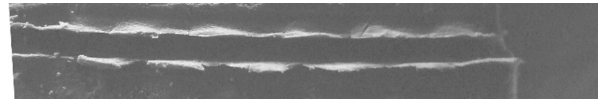


图 12 波形纤维被完全拔出后留下的坑槽照片

Fig. 12 Photo of left tunnel after pullout of wave-shape fiber

从图 10 的结果还可以发现, 波形纤维的界面剪切强度远远高于直线形纤维 (39.89 kPa), 提高了 178%, 对应的第一级残余剪切强度提高了 46.2%。这些数据充分说明, 相比直线形纤维, 波形纤维能显著改善筋/土界面力学作用, 使纤维的拉筋作用得到更好的发挥。由于波形纤维加筋土具有较高的残余强度, 即使加筋土体在荷载作用下发生破坏开裂, 土体中的纤维依然能承担一定的应力, 对延缓结构的整体失稳和提高工程的安全性有重要意义。

2.3 波形纤维最大临界加筋长度

选择合适的纤维长度是纤维加筋土工程设计过程中优先需要考虑的问题。如前所述, 纤维的加筋效果取决于纤维/土界面剪切强度, 当界面剪切强度恒定时, 土体中纤维在荷载作用下能否被拔出则取决于加筋长度。如果纤维过短, 纤维的抗拔能力较弱, 容易被拔出而丧失加筋作用, 其加筋能力未得到充分发挥。相反, 如果纤维过长, 当界面作用力大于纤维自身的抗拉强度时, 纤维则有可能被拉断而丧失加筋作用, 造成材料浪费。此外, 长纤维也难于与土体拌合均匀。因此, 理论上当纤维/土界面作用力与纤维自身的抗拉断能力相当时, 对应的纤维长度为最优加筋长度。但在实际工程中, 纤维在土体中随机分布, 纤维的受拉方向也不是严格沿纤维轴向, 有可能呈任意角度, 特别对于稍长一点的纤维, 容易在土体中发生弯曲和扭转, 其界面受力情况更加复杂, 要准确确定纤维的最优加筋长度面临巨大挑战。为此, 本文提出最大临界加筋长度作为工程设计参考, 即实际工程中纤维长度应该小于该临界值, 以避免材料浪费。

为了确定纤维的最大临界加筋长度, 本文作如下假设: ①加筋纤维在土体中平直分布, 不发生弯曲和扭转, 纤维/土界面剪切强度沿纤维均匀分布; ②纤维的受拉方向与纤维轴向一致; ③拉力作用点位于纤维的中点。如图 13 的示意图所示, 纤维最大临界加筋长度 l_{\max} 可由下式计算:

$$l_{\max} = \frac{R_f d}{2\tau_f} \quad (3)$$

式中 R_f 为纤维的抗拉强度, 本文取 540 MPa (见表 2); d 为纤维的等效直径; τ_f 为界面剪切强度。根据表 2 及图 10 的数据, 可计算得本文试验条件下 l_{\max} 为 1994.1 mm。

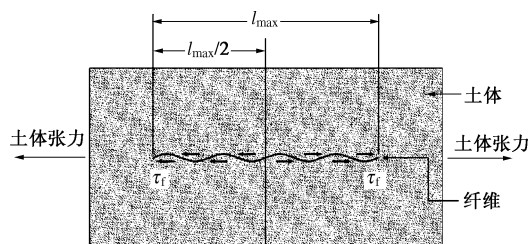
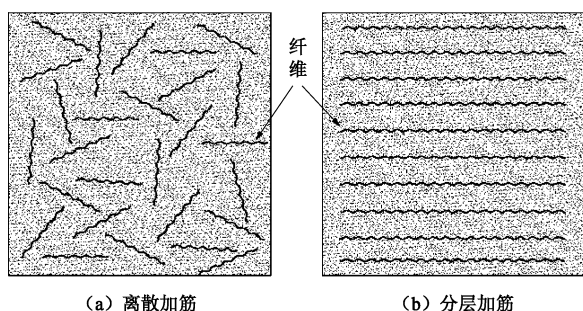


图 13 确定波形纤维最大临界加筋长度的原理示意图

Fig. 13 Sketch drawing of principle for determining maximum critical fiber length

考虑到该波形纤维的 l_{max} 较大, 结合当前加筋土施工工艺, 本文提出两种可行的加筋方式: 离散加筋 (图 14 (a)) 和分层加筋 (图 14 (b)). 前者适用于短纤维加筋土 ($l < 100$ mm), 主要是因为短纤维易于均匀掺入土体中。后者适用于长纤维加筋土 ($l \geq 100$ mm), 施工时按一定间距将纤维分层埋设于土体中, 达到加筋的目的。



(a) 离散加筋

(b) 分层加筋

图 14 两种波形纤维加筋方式

Fig. 14 Two possible techniques for wave-shape fiber-reinforced soils

需要强调的是, 本文提出的最大临界加筋长度不是最优加筋长度, 但可作为工程设计的初步参考。由于纤维/土界面作用力受土质成分、干密度、含水率、纤维材料、直径、表面粗糙度及加筋方式等诸多因素的影响, 因此, 对于不同的工况条件, 纤维最大临界加筋长度 l_{max} 不同, 土体的工程性质也不同, 目前课题组围绕这些问题正在开展试验和理论研究工作。

3 结 论

(1) 本文提出的单根纤维拉拔试验方法及设计的试验装置具有操作简单、测试效率高和结果可靠等优点, 为定量分析纤维/土界面力学强度提供了新的途径。

(2) 传统的直线形纤维加筋土的拉拔曲线呈典型的单峰特征, 而新开发的波形纤维加筋土的拉拔曲线呈显著的多峰特征, 该现象主要与纤维的波浪外形有关, 曲线的波长与纤维的波长基本一致。

(3) 相比传统的直线形纤维, 波形纤维能极大改

善筋材与土体界面之间的力学作用特性, 其界面剪切强度比直线形纤维提高了 178%。主要是因为波形纤维能跟土体相互啮合, 抗拔能力显著提高, 加筋作用得到更好的发挥。

(4) 波形纤维拉拔曲线各峰值对应的界面剪切强度及残余剪切强度随拉拔位移总体呈指数递减趋势, 尤其是从第一个峰值到第二个峰值时强度衰减最为明显。这些规律与纤维受拉脱粘后界面啮合程度减弱有关。

(5) 由单根纤维拉拔试验测得的界面强度可用于确定纤维的最大临界加筋长度, 为实际工程设计提供参考。对于本文采用的波形纤维及对应的土体压实参数, 其最大临界加筋长度为 1994.1 mm。针对不同的纤维长度和施工工况条件, 本文提出了两种加筋方式: 离散加筋和分层加筋。

需要指出的是, 本文对纤维/土界面力学作用特性所开展的研究还局限于比较理想的二维加筋条件, 在今后的工作中, 有必要围绕三维加筋条件开展更系统更深入的研究。

参考文献:

- [1] 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 Jing-hai, 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. (in Chinese))
- [2] 吴景海, 陈 环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 89 - 93. (WU Jing-hai, CHEN Huan, WANG Ling-juan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 89 - 93. (in Chinese))
- [3] 陈永辉, 赵维炳, 汪志强. 一个加筋复合土体的本构关系[J]. 水利学报, 2002, 12: 26 - 32. (CHEN Yong-hui, ZHAO Wei-bing, WANG Zhi-qiang. The constitutive relationship of reinforced soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 12: 26 - 32. (in Chinese))
- [4] 张功新, 莫海鸿, 曾庆军, 等. 土工合成材料对路堤长期稳定性及工后沉降的负面影响分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 686 - 689. (ZHANG Gong-xin, MO Hai-hong, ZENG Qing-jun, et al. Analysis of negative effect of geotextile on long term stability and post construction settlement of embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 686 - 689. (in Chinese))

- [5] 刘华北. 地震作用下模块式面板土工合成材料加筋土挡墙的内部稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **29**(6): 917 - 921. (LIU Hua-bei. Internal stability analysis of segmental geosynthetic reinforced soil retaining walls subjected to seismic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **29**(6): 917 - 921. (in Chinese))
- [6] 郭大华. 土工合成材料在公路软基处理中的应用与设计[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(3): 84 - 89. (GUO Da-hua. Application and design of geosynthetics to reinforced highway bed[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(3): 84 - 89. (in Chinese))
- [7] PRABAKARA J, SRIDHAR R. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil[J]. Construct Build Mater, 2002, **16**: 123 - 31.
- [8] 吴燕开, 牛 斌, 桑贤松. 随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究[J]. 水文地质工程地质学报, 2012, **39**(6): 77 - 81. (WU Yan-kai, NIU Bin, SANG Xian-song. Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced soil with random distribution[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, **39**(6): 77 - 81. (in Chinese))
- [9] 雷胜友, 丁万涛. 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 482 - 485. (LEI Sheng-you, DING Wan-tao. Experimental investigation on restraining the swell of expansive soil with fibre-reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 482 - 485. (in Chinese))
- [10] 唐朝生, 施 斌, 高 玮, 等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2225 - 2230. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiber reinforcement length for fiber reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2225 - 2230. (in Chinese))
- [11] VISWANADHAM S, PHANIKUMAR R, MUKHERJEE V. Swelling behavior of a geofiber-reinforced expansive soil[J]. Geotextile and Geomembranes, 2009, **27**: 73 - 76.
- [12] TANG CS, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. Geotextile and Geomembranes, 2007, **25**: 194 - 202.
- [13] 张小江, 周克骥, 周景星. 纤维加筋土的动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(3): 45 - 49. (ZHANG Xiao-jiang, ZHOU Ke-ji, ZHOU Jing-xing. Experimental study on dynamic properties of cohesive soil reinforced with fibers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 45 - 49. (in Chinese))
- [14] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. Applied Clay Science, 2007, **38**(1/2): 23 - 32.
- [15] 陈 轮, 李广信. 纤维加筋粘性土的抗拉和抗裂性能研究[J]. 地基处理, 1992, **3**(2): 25 - 31. (CHEN Lun, LI Guang-xin. Tensile strength and crack resistance of fiber reinforced cohesive soil[J]. Ground Improvement, 1992, **3**(2): 25 - 31. (in Chinese))
- [16] 李广信, 陈 轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋黏性土的试验研究[J]. 水利学报, 1995(6): 31 - 36. (LI Guang-xin, CHEN Lun, ZHENG Ji-qin, et al. Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 31 - 36. (in Chinese))
- [17] 介玉新, 李广信, 陈 轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(4): 12 - 15. (JIE Yu-xin, LI Guang-xin, CHEN Lun. Study on centrifugal model tests on textile and cohesive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(4): 12 - 15. (in Chinese))
- [18] PUPPALA J, MUSENDA C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change in expansive soils[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, **1736**(1): 134 - 140.
- [19] 唐朝生, 施 斌, 蔡 奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1796 - 1800. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CAI Yi, et al. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1796 - 1800. (in Chinese))
- [20] CAI Y, SHI B, NG C W W, et al. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil[J]. Engineering Geology, 2006, **87**(3/4): 230 - 240.
- [21] 王德银, 唐朝生, 李 建, 等. 纤维加筋土非饱和和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1933 - 1940. (WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1933 - 1940. (in Chinese))
- [22] 蔡 奕, 施 斌, 高 玮, 等. 纤维石灰土工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1283 - 1287. (CAI Yi, SHI Bin, GAO Wei, et al. Experimental study on engineering properties of fibre-lime treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1283 -

1287. (in Chinese))
- [23] MARANDI M, BAGHERIPOUR H, RAHGOZAR R, et al. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils[J]. *Am J Appl Sci*, 2008, **5**: 209 – 20.
- [24] NATARAJ M S, MCMANIS K L. Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers[J]. *Geosynthetics International*, 1997, **4**(1): 65 – 79.
- [25] MESBAH A, MOREL JC, WALKER P, et al. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, **16**(1): 95 – 98.
- [26] 李 建, 唐朝生, 王德银, 等. 纤维加筋土的抗拉强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2012, **20**(增刊 1): 1004 – 9665. (LI Jian, TANG Chao-sheng, WANG De-yin, et al. Experimental study on the tensile strength of fiber reinforced soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, **20**(S1): 1004 – 9665. (in Chinese))
- [27] CONSOLI NC, CASAGRANDE MDT, PRIETTO PDM, et al. Plate load test on fiber-teinforced soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(10): 951 – 955.
- [28] SANTONI L, WEBSTER L. Airfields and road construction using fiber stabilization of sands[J]. *J Trans Eng, ASCE*, 2001, **127**: 96 – 104.
- [29] TINGLE J, SANTONI R, WEBSTER S. Full-scale field tests of discrete fiber-reinforced sand[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2002, **128**(1): 9 – 16.
- [30] TANG C, SHI B, ZHAO L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. *Geotextile and Geomembranes*, 2010, **28**(1): 54 – 62.
-

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 西安力创材料检测技术有限公司