

文章编号:1673-9469(2015)04-0042-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.04.010

聚丙烯腈纤维水泥土的力学性质试验研究

贺祖浩,李守德,姚燕,董薇,曹明纬
(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过试验研究聚丙烯腈纤维对水泥土力学性质的影响,对水泥土的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、抗剪强度进行试验分析。结果表明:纤维能够明显的提高水泥土的各项力学性质,纤维对水泥土劈裂抗拉和抗折强度的提高优于纤维对水泥土抗压强度的提高,纤维能够大大提高水泥土粘聚力,以及相同上浮荷载下的抗剪强度。

关键词:聚丙烯腈纤维;水泥土;力学性质;粘聚力;抗剪强度

中图分类号:P642.3 **文献标识码:**A

Experimental study on mechanical properties of PAN fiber cement soil

HE Zu-hao, LI Shou-de, YAO Yan, DONG Wei, CAO Ming-wei

(Institute of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, through the experimental study on polyacrylonitrile fiber on mechanical properties of cement stabilized soil and the cement soil without side limit compression strength, splitting tensile strength, flexural strength, shear strength test and analysis were conducted. Results show that, fiber can obviously improve the cement soil of the mechanical properties of the matter. Fiber on cement soil splitting tensile and flexural strength increase is better than fiber on the compressive strength of cement soil improve. Fiber can greatly enhance the cohesion of cement soil, and under the same floating load shear strength.

Key words:PAN fiber; cement soil; mechanical property; cohesive force; shear strength

近年来水泥土因为其易于施工、造价低、污染少等优点被广泛应用于软土地基加固、基础防渗、渠岸护坡等实际工程。但水泥土是脆性材料,容易发生断裂破坏,造成工程事故^[1]。许多学者开始研究在水泥土中加入纤维来改善水泥土的性质,并取得良好的经济效益,纤维在混凝土中的应用已经趋向成熟。石北啸研究了钢纤维混凝土动载疲劳特性^[2];石欠欠通过 Ansys 对碳纤维混凝土梁的裂缝进行模拟^[3];李广信指出聚丙烯纤维可以有效提高土体的抗拉强度,同时对土体的临界断裂韧度也有明显增强^[4];何培玲研究了钢纤维对水泥土无侧限抗压强度有小部分提高^[5];唐朝生等人按不同质量百分比的聚丙烯纤维分别加入素土、石灰土和水泥土中,用以提高水泥土的无侧限抗压强度,改善水泥土脆性破坏形式^[6];张雷等人研究了聚丙烯纤维对水泥土弹性模量的影

响^[7]。研究纤维水泥土纤维的选择大都集中在聚丙烯纤维和玻璃纤维上。聚丙烯腈纤维相较聚丙烯纤维有更高的抗拉强度,更大的密度,不会像聚丙烯纤维一样浮在水泥浆液表面;玻璃纤维在碱性条件下容易腐蚀。所以本文选择在水泥土中掺入聚丙烯腈纤维来改善水泥土的各项力学性质,分别对纤维水泥土做了无侧限抗拉、劈裂抗拉、抗折和直剪实验,以研究聚丙烯腈纤维对水泥土力学性质的改善效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样为南京地铁4号线回填所用硬质粘土,土样进行风干碾碎,并过5 mm筛,其物理力学性质如图1、表1所示。水泥为市场上销售的32.5

收稿日期:2015-08-28

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20100094110002)

作者简介:贺祖浩(1988-),男,江苏徐州,硕士,研究方向为纤维水泥土试验与边坡稳定。

表1 土壤基本物理性质

Tab. 1 The physical properties of soil

干容重/g·cm ⁻³	天然含水率/%	塑限含水率/%	液限含水率/%	塑性指数/%	液性指数
1.16	29	24.6	41.3	17	0.26

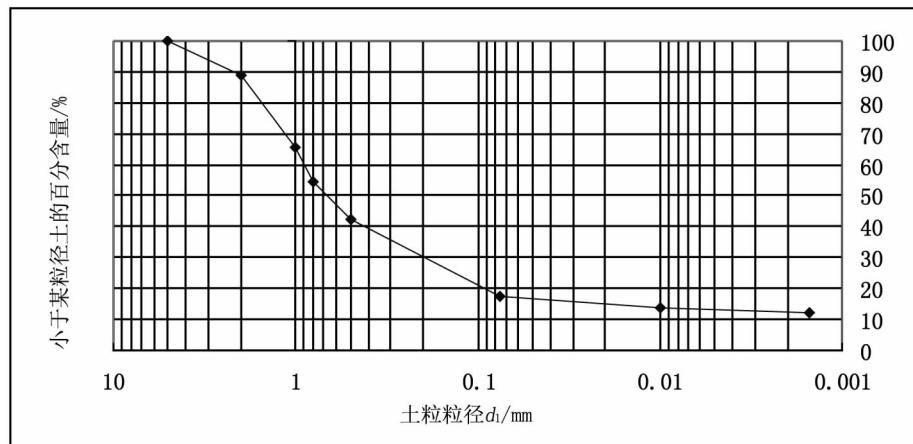


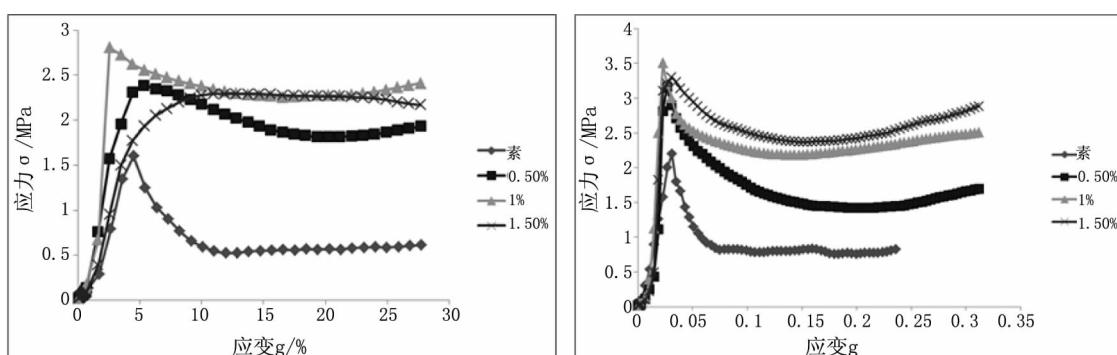
图1 土样颗粒分析曲线

Fig. 1 Grain accumulative curve of soil sample

表2 聚丙烯腈纤维的主要性能指标

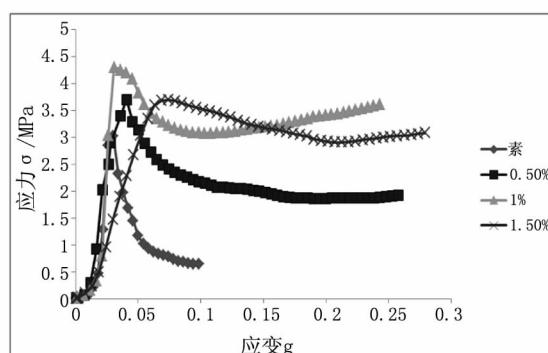
Tab. 2 Main performance of Polyacrylonitrile fiber

抗拉强度/MPa	直径/um	长度/mm	密度/kg·m ⁻³	杨氏模量/GPa	耐酸碱性
600	12 ± 1	9	1.18	≥8	极强



(a) 水泥土7 d龄期应力-应变曲线

(b) 聚丙烯腈水泥土14 d龄期应力-应变曲线



(c) 聚丙烯腈水泥土28 d龄期应力-应变曲线

图2 不同龄期聚丙烯腈纤维水泥土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of different ages of PAN fiber reinforced cement soil

级普通硅酸盐水泥。试验所选用的纤维为聚丙烯腈单丝短纤维,其物理力学参数见表2。

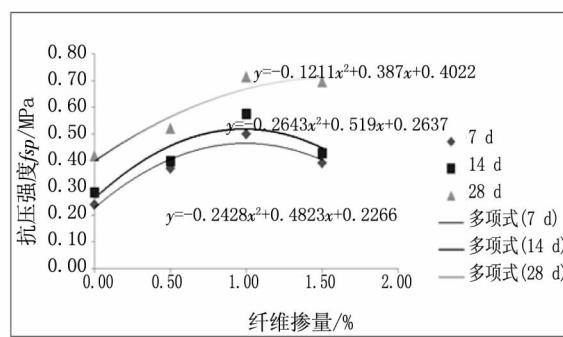
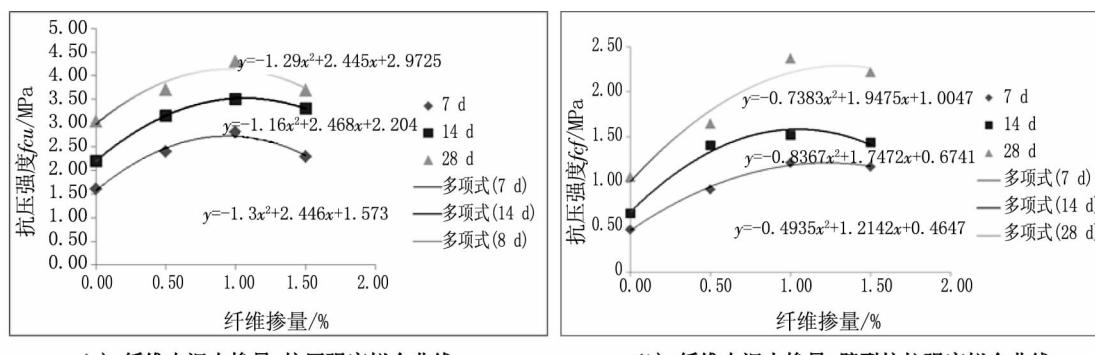
1.2 试验方案与装置

本次实验水泥掺量为15%,纤维掺量分别按与土的质量之比0.5%、1%、1.5%掺入。对纤维水泥土做了7、14、28 d的无侧限抗压、劈裂抗拉、抗折和直剪实验。其中无侧限抗压、劈裂抗拉试样尺寸是70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的标准正方体,抗折实验用的是40 mm×40 mm×160 mm的小梁试件,直剪实验用的是标准环刀试样。为保证纤维能够均匀的掺入水泥土试块中,把纤维分少量多次依次加入搅拌机中,当搅拌均匀后,把水泥土装入水泥土试模,24 h后脱模编号,在水中分别养护7、14、28 d后取出。无侧限抗压、劈裂抗拉与抗折实验在多功能万能实验机上进行。在直剪仪上做水泥土的直剪实验。

2 结果分析

2.1 聚丙烯腈纤维对水泥土荷载-位移曲线的影响

图2 不同龄期聚丙烯腈纤维水泥土应力 -



(c) 聚丙烯腈水泥土掺量-抗折强度拟合曲线

应变曲线,由曲线可以看出,在曲线达到峰值之前,应力-应变曲线基本线性增长;当应力-应变曲线达到峰值后,水泥土强度急剧减小,水泥土呈脆性破坏。纤维水泥土当强度达到峰值后,应力-应变曲线比较平缓,没有水泥土强度急剧减小的情况出现。

水泥土破坏后的特点是基体迅速丧失承载力,而纤维水泥土破坏后会有很大的残余强度,残余强度随纤维的掺入量的增加而增大。说明纤维的掺入使水泥土从脆性到柔性的变化。

2.2 聚丙烯腈纤维对水泥土无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度的影响

由图3可以看出纤维的掺入能够明显的提高水泥土的强度。水泥土的强度随纤维的掺入呈现先增大后减小的趋势。三个龄期的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度的最大值都是在掺入量为1%时。其中7、14、28 d无侧限抗压强度分别较相同龄期未掺纤维的水泥土增加了75%、59%、42%;三个龄期劈裂抗拉强度分别较相同龄期水泥土增加了110%、103%、71%;三个龄期抗

图3 不同龄期聚丙烯腈水泥土掺量-强度拟合曲线

Fig.3 The content of cement soil mixed with the same age and the intensity fitting curve

折强度分别较相同龄期水泥土增加了 156%、132.8%、124.1%。

为了能够更好的反映纤维的掺入对水泥土强度的影响,对试验所得数据进行回归分析。从图3可以看出,不同纤维掺量下纤维的掺量和抗压、劈裂抗拉、抗折强度均可用二次曲线进行拟合,其中纤维掺量与无侧限抗压强度拟合方程与拟合度检验值 R₂ 均大于 0.91;纤维掺量与劈裂抗拉强度拟合方程与拟合度检验值 R₂ 均大于 0.83;拟合方程与拟合度检验值 R₂ 均大于 0.95,相关性较高。

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中,y 为水泥土与纤维水泥土的强度(kPa);x 为干纤维的掺量;a,b,c 为公式拟合系数,取值与水泥土性质和纤维含量有关。

由实验数据可以看出,纤维水泥土不仅可以提高水泥土的无侧限抗压强度,对水泥土抗折与劈裂抗拉强度的提高更加明显,原因是纤维在水泥土基体中主要承担拉应力,基体在受拉时纤维能够很好的发挥其高模量高延伸率的特点,能够很好的提高水泥土基体的抗拉强度与抗弯性能。

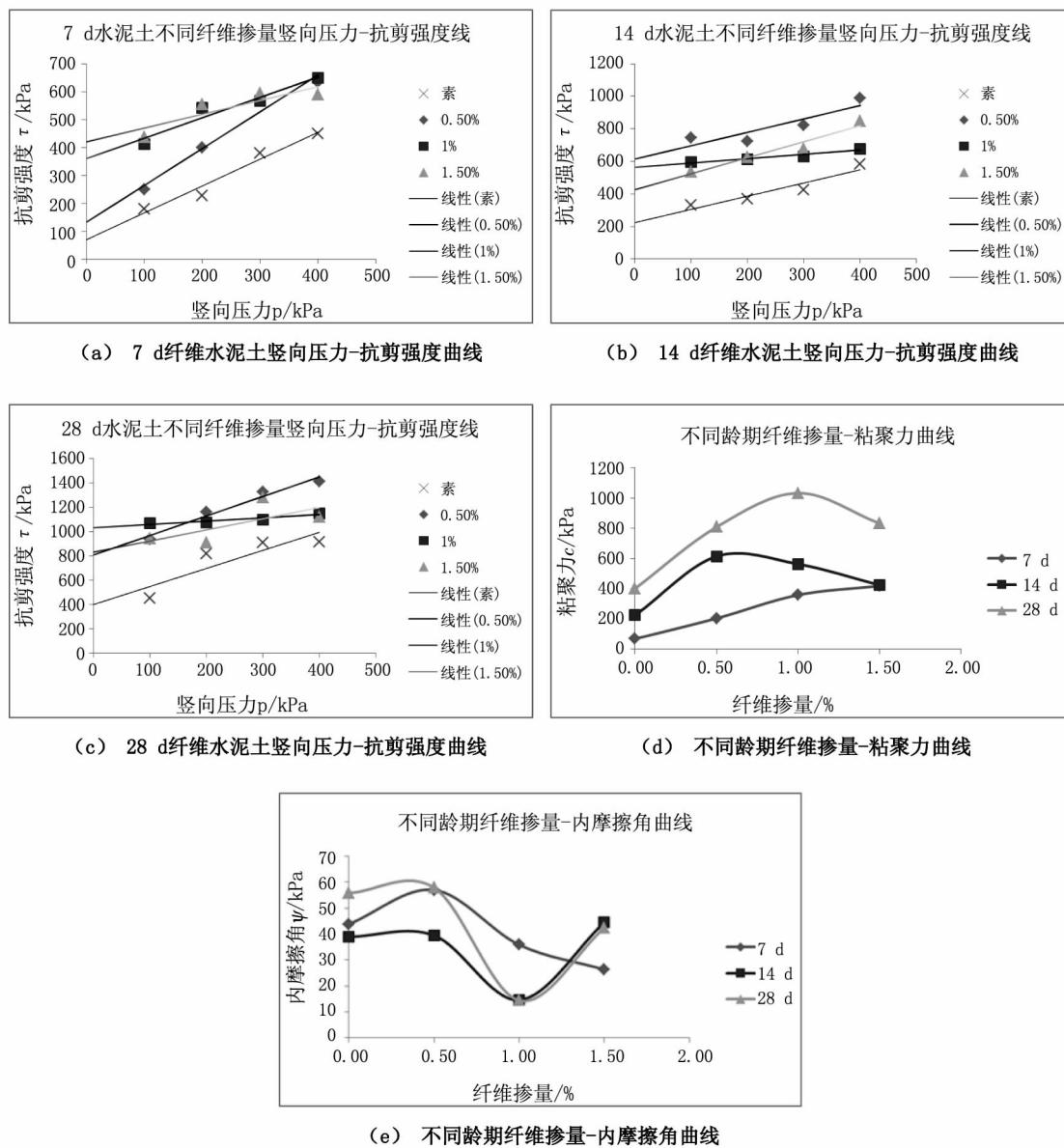


图4 不同龄期纤维掺量-抗剪强度、粘聚力、内摩擦角曲线

Fig.4 The content of fiber, shear strength, cohesion and internal friction angle of different age

2.3 聚丙烯腈纤维对水泥土抗剪强度的影响

由图4可以看出,在不同的上浮压力下纤维的掺入都能够较大幅度的提高水泥土的抗剪强度。纤维的掺入能够大幅提高水泥土的粘聚力,7 d龄期水泥土的粘聚力从69.9 kPa最高提高到了419.3 kPa;14 d龄期粘聚力由225.1 kPa提高到563.9 kPa;28 d龄期粘聚力由402 kPa最高提高到了1 032 kPa。

在考察范围内,对抗剪强度的提高并不是纤维掺量愈多越好。综合来看当上浮载荷达到400 kPa时,纤维掺量为0.5%的水泥土强度抗剪最高。在14 d与28 d龄期时纤维掺量为0.5%时对抗剪强度提高效果最好。由图4(d)、(e)可以看出当纤维掺量为0.5%时,纤维不仅能很大程度上提高水泥土的粘聚力,水泥土的内摩擦角也没有减小。而在纤维掺量为1%时,虽然能够明显提高水泥土的粘聚力,但水泥土的内摩擦角也有明显的减小。说明对于抗剪强度来说,纤维在水泥土中也有最优掺量的问题。

3 机理分析

目前对纤维在水泥土中的作用分析主要集中在摩擦加筋的作用,即随着水泥土的固结硬化,纤维和水泥土界面之间产生粘结力。在受荷初期,水泥土和纤维共同承担外力,而水泥土基体是外力的主要承担者,纤维主要起加筋的作用。当荷载进一步增大,水泥土会产生细小裂缝,由于加入的纤维嵌入了水泥土团粒结构的内部和各个团粒结构之间,阻碍了裂缝的进一步发展,使得水泥土的整体性更加紧密,纤维承受拉应力并把附加应力传给水泥土基体,进而可以阻止裂缝进一步扩展。从而提高纤维水泥土的强度。

观察纤维水泥土的应力-应变曲线,我们会发现水泥土的韧性与延性均有显著的提高。岩石与混凝土等脆性材料在不同围压下也表现出不同的特征。随着围压的增大,材料的延性和强度均得到显著的提高,围压的作用犹如在圆柱形混凝土外设置箍筋或螺旋筋对混凝土柱的约束效应,阻止了裂纹的传播和扩展。

所以笔者认为纤维在水泥土中也存在等效围压的作用。纤维在水泥土中乱向分布,在竖向应力作用下,水泥土产生侧向变形,而相对于水平分布的纤维嵌入水泥土中则产生了类似箍筋或螺旋

筋的效果,对水泥土起到侧向约束。在水泥土直剪实验中发现纤维的掺入能够大大增加水泥土的粘聚力,内摩擦角除在纤维掺量为1%龄期为14、28 d有明显减小外,其它变化不大。在竖向压力与抗剪强度曲线来看,利用摩尔库伦强度理论,Mohr圆与包络线相切使水泥土破坏。若Mohr圆都过原点,那么明显掺入纤维的水泥土主应力较大;若主应力相同,那么未掺纤维的水泥土Mohr圆定要向右移动,与坐标轴的交点离原点的距离,就是等效围压。这从另一个方面证明了等效围压假设的正确性。

4 结论

1)聚丙烯腈纤维能够很好的提高水泥土的各项力学性质,改善水泥土脆断破坏的性质。纤维水泥土具有更好的整体性,裂而不断,其中对水泥土抗折、抗拉强度的提高较无侧限抗压强度的提高更加明显。

2)聚丙烯腈纤维能够大大提高水泥土的粘聚力,对内摩擦角的影响规律不是特别明显,纤维的掺入能够大大提高水泥土的抗剪强度。

3)纤维对水泥土的作用不仅有摩擦加筋的作用,还有类似混凝土中箍筋的作用,阻止水泥土的侧向变形,起到等效围压的作用。

参考文献:

- [1]ZHANG Y,SUN W,et al. The effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27 (12):1885 - 1891.
- [2]石北啸. 钢纤维混凝土动载疲劳特性的试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(2):9 - 12.
- [3]石欠欠,姜新佩. 基于Ansys碳纤维加固混凝土梁的裂缝模拟分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2010,27(2):25 - 29.
- [4]李广信,陈轮,蔡飞. 加筋土体应力变形计算的新途径 [J]. 岩土工程学报,1994,16(3):46 - 53.
- [5]何培玲,张厚先,杨平,等. 钢纤维水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 南京工程学院学报:自然科学版, 2006,4(2):38 - 42.
- [6]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.
- [7]张雷,张振,曹吉庆,等. 聚丙烯纤维对水泥土力学性能的影响[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(Z1): 1129 - 1131.

(特约编辑 李军)