

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.155

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



纤维对纳米二氧化硅-石灰改良粉土力学性质的影响

李国勋, 张艳美, 马丁, 毕舰心

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:山东黄泛区粉土分布广泛,在铁路路基填料紧缺的情况下,常用改良粉土作为路基填料。选用纳米二氧化硅和石灰作为改良剂,对黄泛区粉土进行改良,并通过击实试验以及无侧限抗压强度试验对其强度进行测定,发现纳米二氧化硅-石灰改良粉土虽然强度有显著提升,但也呈现出脆性较大的不良特性。为改善纳米二氧化硅-石灰改良粉土的脆性,在改良粉土中加入聚丙烯纤维,并通过试验研究了纤维掺量和长度对纳米二氧化硅-石灰改良粉土强度和脆性的影响,确定纤维的最优掺量和最优长度。结果表明:纤维的加入能改善纳米二氧化硅-石灰改良粉土的脆性,提高其抗压及抗剪强度;当纤维掺量为 0.4%、纤维长度为 2 cm 时,改良效果最好。

关键词:聚丙烯纤维;纳米二氧化硅;石灰;改良粉土;抗压强度;直剪试验

中图分类号:TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)02-0037-08

Mechanical properties of nano-silica and lime stabilized silt reinforced by fiber

Li Guoxun, Zhang Yanmei, Ma Ding, Bi Jianxin

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong),
Qingdao 266580, Shandong, P. R. China)

Abstract: In Shandong province, silt is widely distributed in the Yellow River flooding area. In the case of shortage of railway roadbed filling material, reinforced silt is commonly used as an alternative. In this study, the silt in the Yellow River floodplain area was reinforced by using nano-silica and lime as modifiers. The strength of the silt was measured by compaction test and unconfined compressive strength tests. It was found that although the strength of the silt was significantly improved, the material also showed some characteristics of brittleness. In order to overcome this disadvantage, polypropylene fibers were added to silt and then, the influences of fiber content and length on the strength and brittleness of the silt were

收稿日期:2019-06-11

基金项目:国家自然科学基金(51208510);山东省研究生教育质量提升计划(SDY17020);山东省研究生教育创新计划(SDY15140)

作者简介:李国勋(1996-),男,主要从事改良粉土研究,E-mail:s18060031@s.upc.edu.cn。

张艳美(通信作者),女,副教授,博士,E-mail:zhangym@upc.edu.cn。

Received:2019-06-11

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51208510); Shandong Province Graduate Education Quality Improvement Program (No. SDY17020); Shandong Graduate Education Innovation Program (No. SDY15140)

Author brief:Li Guoxun(1996-), main research interest: the improvement of silt, E-mail: s18060031@s.upc.edu.cn.
Zhang Yanmei (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: zhangym@upc.edu.cn.

studied through a series of experiments. The optimum fiber content and the optimum fiber content were determined. The results show that the brittleness and compressive and shear strength of the silt can be improved by adding fibers; and when the content of fibers is 0.4% and the length of fibers is 2 cm, the improvement effect is the best.

Keywords: polypropylene fiber; nano-silica; lime; improved silt; compressive strength; direct shear test

山东黄河冲积粉土覆盖面积广,约占全省总面积的 34%,在铁路路基填料紧缺的情况下,常用粉土作为路基填料。根据现行铁路路基设计规范,黄泛区粉土多属于 C 组铁路路堤填料,具有结构稳定性差、压缩性高、力学强度低等特点,必须经过改良后才可使用。

近几十年来,纳米材料迅速兴起。由于纳米材料尺寸的减小,使其具有一系列不同于宏观尺度的特性,是现如今材料科学、物理、化学等领域的研究热点^[1-4]。纳米二氧化硅是一种无毒、无味、无污染的无机非金属白色粉末。由于纳米二氧化硅具有纳米效应,使其在与聚合物复合后对聚合物性能有显著改进。目前,纳米材料在改良土方面的研究主要以砂土、黏土为主。Gallagher 等^[5]发现纳米二氧化硅可以显著减少由于砂土液化而造成的沉降;Choobbasti 等^[6-7]通过室内试验,先后得出纳米二氧化硅可显著提高水泥砂的无侧限抗压强度的结论以及纳米二氧化硅提高水泥沙力学性能和微观结构性能的最佳掺量;Bahmani 等^[8]总结了加入纳米硅后,水泥砂化学性质和微观结构随时间变化的规律;纳米材料改良黏土方面,Ali Pashabavandpouri 等^[9]、Gelsefidi 等^[10]在黏土中加入二氧化硅和石灰,发现改良土的强度明显提高,同时,也会显著降低改良土的膨胀率;Ghasabkolaei 等^[11]通过在黏土中掺入纳米二氧化硅和水泥使得改良土体的弹性模量和强度有较大提升。Ali Zomorodian 等^[12]认为,相同情况下,纳米材料在提高黏土单轴强度方面更有效。近年来,在纤维与纳米材料共同改良土的力学性质方面的研究也被广泛关注,璩继立等^[13]通过研究纤维和纳米二氧化硅对上海黏土强度的影响,发现改良土体的强度有明显改善;Changizi 等^[14]在低黏性土中添加纳米二氧化硅和聚酯纤维,通过直剪试验和无侧限抗压强度试验发现土体强度有明显提升,同时,聚酯纤维改善了纳米二氧化硅稳定土的力学性能。

以上纳米材料改良砂土以及黏土的力学特性研究表明,纳米材料能显著提高砂土以及黏土的强度,但同时,改良土体也呈现出脆性大的不良特性。目

前,对纳米材料改良黄河冲积粉土方面的研究还不够深入,笔者采用纳米二氧化硅和石灰对黄河冲积粉土进行改良,并掺加聚丙烯纤维改善其脆性,通过室内无侧限抗压强度试验和直剪试验研究不同纤维掺量和不同纤维长度对纳米二氧化硅-石灰改良粉土力学性质的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验所采用土取自东营某施工现场。其物理力学性质见表 1。根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016),试验用土为低液限粉土。

表 1 试验土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of test silt samples

液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%
22.53	12.87	9.66	1.68	14.01

纳米二氧化硅产自山东省寿光市微纳化工厂,为亲水型纳米二氧化硅,呈白色蓬松粉末状,平均粒径为 15 nm,纯度为 99.8%,无毒。纳米二氧化硅的规格指标见表 2。

表 2 纳米二氧化硅的规格指标

Table 2 Specifications of nano silica

平均粒径/nm	纯度/%	比重/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	形态
15	99.8	200	0.05	粉末状

石灰产自河南万祥水处理材料有限公司,型号为 CL 85-QP。

纤维为聚丙烯纤维,其主要物理力学性质见表 3。

表 3 试验用纤维的基本物理性质指标

Table 3 Basic physical properties of test fibers

纤维类型	直径/ μm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗拉强度/MPa	杨氏模量/GPa	抗酸碱性	安全性
单丝	31	0.91	≥ 400	≥ 3.5	极高	无毒

1.2 试验方法

将粉土烘干、碾碎、过 2 mm 筛除去杂质后备

用,精确称取所用干土、水、石灰、纳米二氧化硅、纤维,混合搅拌均匀并焖料 12 h。按照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)对试样分别进行击实试验、无侧限抗压强度试验和直接剪切试验。其中,击实试验试样直径 102 mm、高度 116 mm,击实锤质量为 4.5 kg,落距为 457 mm,击实过程分 5 层进行,每层击数 25 次。无侧限抗压强度试样直径为 50 mm、高度 100 mm;直接剪切试验直径 79.8 mm、高度 20 mm。制样完成后,用保鲜膜密封并在标准条件(温度 20 ± 2 °C,湿度 $\geq 95\%$)下养护 7 d。无侧限抗压强度试验轴向应变速度控制为每分钟应变 2%。直剪试验采用固结快剪法,分别在 100、200、300、400 kPa 共 4 种不同的垂直压力下,剪切速率为 0.8 mm/min。

1.3 试验方案

配制不同配合比的纳米二氧化硅-石灰改良粉土,进行击实试验,以确定不同配合比下改良粉土对应的最大干密度与最优含水率。

确定不同配合比下的纳米二氧化硅-石灰改良粉土所对应的最大干密度与最优含水率后,配制相对应的无侧限抗压试验试样,在标准条件下,分别养护 1、7、28、64 d 后测得其无侧限抗压强度。

根据试验结果,确定纳米二氧化硅和石灰最优配比。以该配比改良粉土为研究对象,首先,选取纤维掺量作为变量,纤维长度为 3 cm,进行无侧限抗压强度试验,试验方案见表 4,综合考虑土体的强度、脆性改良情况以及材料用量情况,确定纤维最优掺量;然后,在纤维最优掺量下,选取纤维长度作为变量进行对比试验,试验方案见表 5,确定纤维的最优长度。确定最优掺量和最优长度后,依次在最优掺量下进行不同纤维长度试样的直接剪切试验和最优长度下进行不同纤维掺量的直接剪切试验,以验证所确定的最优纤维掺量和最优纤维长度对试样抗剪强度的改良效果最好。试验方案见表 6、表 7。

表 4 纤维最优掺量试验方案

Table 4 Optimum fiber dosage test scheme

试验号	石灰掺量+ 二氧化硅掺量/%	纤维掺 量/%	纤维长 度/cm	试验
1		0		无侧限抗压 强度试验
2		0.2		
3	2+1.5	0.3	3	
4		0.4		
5		0.5		

表 5 纤维最优长度试验方案

Table 5 Optimum fiber length test scheme

试验号	石灰掺量+ 二氧化硅掺量/%	纤维掺 量/%	纤维长 度/cm	试验
1			1	无侧限抗压 强度试验
2	2+1.5	最优掺量	2	
3			3	

表 6 不同纤维长度下试样直剪试验方案

Table 6 Direct shear test scheme for specimens with different fiber length

试验号	石灰掺量+ 二氧化硅掺量/%	纤维掺 量/%	纤维长 度/cm	试验
1			0	直接 剪切 试验
2	2+1.5	最优	1	
3		掺量	2	
4			3	

表 7 不同纤维掺量下试样直剪试验方案

Table 7 Direct shear test scheme for specimens with different fiber content

试验号	石灰掺量+ 二氧化硅掺量/%	纤维掺 量/%	纤维长 度/cm	试验
1		0.2		直接 剪切 试验
2	2+1.5	0.3	最优	
3		0.4	长度	
4		0.5		

2 试验结果与分析

2.1 击实试验结果

不同配合比下,试样的干密度与含水率的变化曲线如图 1 所示。

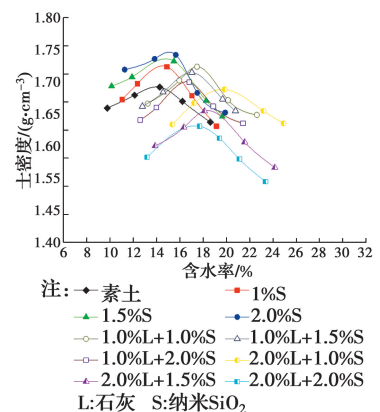


图 1 试样干密度与含水率的变化曲线

Fig. 1 Change curve of dry density and water content of sample

土样的干密度与含水率是影响其密实程度的重要因素。在无石灰的情况下,土体间孔隙被纳米二氧化硅填充,使得改良粉土的最大干密度增大,同时,纳米二氧化硅属于亲水型,在土体内会吸附一部分水,最优含水率也会有所增加。因此,无石灰时,随着纳米二氧化硅掺量的增多,土样的最大干密度与最优含水率均呈现出增大的趋势;加入石灰后,石灰的水化作用会将细颗粒黏结成较大颗粒,使土颗粒间的孔隙增大,改良粉土的最大干密度减小,同时,水化作用会消耗水,使得改良粉土的最优含水率降低。因此,土样的最大干密度与最优含水率随着纳米二氧化硅掺量的增多而减小。这说明土样的密实程度是受石灰与纳米二氧化硅双重影响的。

2.2 无侧限抗压试验结果

无侧限抗压试验结果如图2所示。

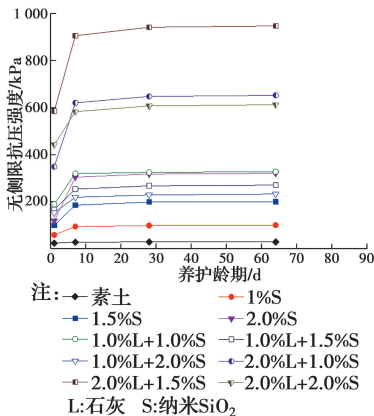


图2 配合比和养护龄期对纳米二氧化硅-石灰改良粉土无侧限抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of mix ratio and curing age on unconfined compressive strength of silt improved by nano-silica-lime

由图2可知,纳米二氧化硅与石灰的配合比为1.5:2时,试样的无侧限抗压强度明显提升,且试样的强度在养护7 d后趋于稳定,不再随养护龄期而变化。

选择纳米二氧化硅与石灰的配比为1.5:2,最优含水率为18.6%,进行纤维对纳米二氧化硅-石灰改良粉土力学性质的影响。

2.3 纤维掺量和纤维长度对改良粉土强度的影响

2.3.1 纤维掺量对无侧限抗压强度的影响 不同掺量的聚丙烯纤维改良纳米二氧化硅-石灰改良粉

土的无侧限抗压试验结果如图3和表8所示。

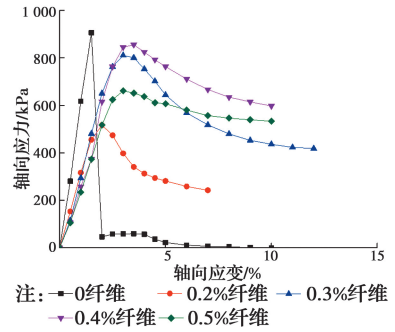


图3 不同纤维掺量下试样的轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curves of specimens with different fiber contents

表8 不同纤维掺量的改良粉土无侧限抗压强度

Table 8 Unconfined compressive strength of modified silt with different fiber contents

试样分组	纤维含量/%	无侧限抗压强度/kPa
1	0	906.14
2	0.2	516.99
3	0.3	810.69
4	0.4	855.71
5	0.5	661.20

图3给出了纤维长度为3 cm时,不同纤维掺量纳米二氧化硅-石灰改良粉土试样养护7 d的轴向应力-应变关系曲线。由图3可以看出,一方面,掺入纤维后,改良试样的无侧限抗压强度略微减小,由于试样直径为5 cm,3 cm纤维在土体内不能完全伸展开,不能较好发挥作用,甚至可能在土体内成为薄弱点,使土体发生破坏。故该结论具有一定的局限性,仅限于室内小尺寸的试样试验。其中,以纤维掺量为0.4%的试样峰值强度最高。另一方面,掺入纤维后,改良试样的脆性得到了明显的改善,引入脆性指数 I_b ^[15]作为试样脆性的参考指标。

$$I_b = (I_q - I_r) / I_q \quad (1)$$

式中: I_b 为脆性指数; I_q 为峰值强度; I_r 为残余强度。

该指数表示归一化后的峰值强度和残余强度之间的差异,也可以表示试样的收缩性。不同纤维掺量的改良粉土的脆性指数见表9。

表 9 不同纤维掺量的改良粉土脆性指数

Table 9 Brittleness index of modified silt with different fiber contents

纤维含量/%	纤维长度/cm	峰值强度/kPa	残余强度/kPa	I_b
0	0	906.14	1.08	0.998 8
0.2	3	516.99	242.55	0.530 8
0.3	3	810.69	418.33	0.484 0
0.4	3	855.71	579.48	0.301 8
0.5	3	661.20	533.47	0.193 2

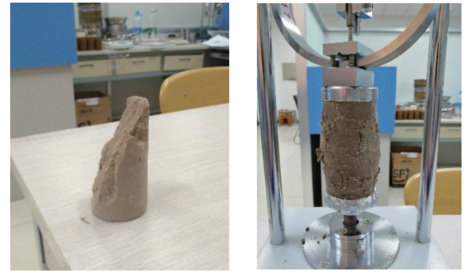
从表 9 可以看出,相比较于未掺纤维的试样,掺入纤维试样的脆性指数大幅度减小,说明纤维可以较大程度地改善试样脆性大的不良特性。同时,在同一纤维长度下,随着纤维掺量的增加,脆性指数逐渐减小,表示随着纤维掺量的增加,改良试样的脆性改善越明显。

聚丙烯纤维掺量为 0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的纳米二氧化硅-石灰改良粉土的无侧限抗压强度比无纤维改良粉土的强度下降约 42.9%、10.5%、5.5% 和 27.3%。当纤维掺量为 0.5% 时,脆性的改善效果最优,其次为 0.4%。但纤维掺量为 0.5% 时,试样强度下降幅度较大。综合改良粉土的强度和脆性指数两方面,纤维掺量为 0.4% 时,效果最好,为最佳掺量。

不掺入纤维掺量的试样,如图 4(a)所示,裂纹从上到下贯穿整个试样,裂纹发展较长较宽,破坏面与水平方向成 60° 夹角,破坏时的变形明显比掺入纤维的试样变形小,试样呈现出明显的脆性破坏。

而掺入纤维的试样,如图 4(b)所示,无明显贯穿整个试件的裂纹且裂纹相对较短较细,破坏时的变形比未掺纤维的变形大,破坏后试样的整体性保持的较好,也说明试样的脆性破坏明显得到改善。

与未掺入纤维的试样相比,掺入纤维的试样在试验出现裂纹破坏时,由于纤维的抵抗剪切变形能力,使裂纹的进一步发展得到了延缓,从而试样在破坏时表现出一定的韧性。纤维在单位体积内以较大的数量均匀的分布在土中,微裂缝在发展的过程中必然遇到纤维的阻挡,消耗了能量,难以进一步发展,从而阻断裂缝。



(a) 未掺纤维

(b) 掺入纤维

图 4 未掺纤维和掺入纤维试样破坏形式对比图

Fig. 4 Comparisons of failure modes of fibre-doped sample and non-fibre-doped sample

2.3.2 纤维长度对无侧限抗压强度的影响 取纤维掺量为 0.4%, 掺入不同长度的聚丙烯纤维时,纳米二氧化硅-石灰改良粉土无侧限抗压试验结果如图 5 所示。

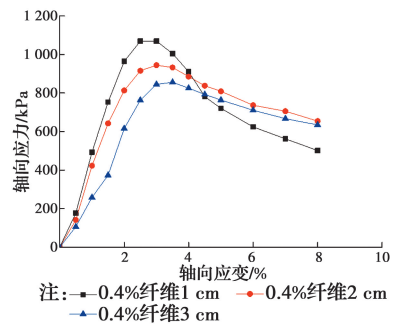


图 5 不同纤维长度下试样的轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig. 5 Axial stress-strain curves of specimens with different fiber length

由图 5 可以得到不同纤维长度的改良粉土无侧限抗压强度,见表 10,脆性指数见表 11。

图 5 结果表明,随着纤维长度的减小,试样的无侧限抗压强度逐渐提高,其中,1、2 cm 的纳米二氧化硅-石灰改良粉土的无侧限抗压强度比无纤维改良粉土的抗压强度提高约 4.1%、18%,与纤维长度为 3 cm 的试样相比,说明改良粉土的无侧限抗压强度与纤维长度与试样直径的比值有关。由表 11 可知,在同一纤维掺量下,随着纤维长度的减小,脆性指数逐渐减小,说明改良效果最佳的纤维长度为 3 cm,其次为 2 cm 和 1 cm。由于纤维长度为 2 cm 和 3 cm 时,试样的脆性指数相差不大,纤维长度为 2 cm 时,试样的强度较高,所以 2 cm 为最佳纤维长度。

表 10 不同纤维长度改良粉土的无侧限抗压强度

Table 10 Unconfined compressive strength of modified silt with different fiberlength

试样分组	纤维含量/%	纤维长度/cm	无侧限抗压强度/kPa
1	0	0	906.14
2	0.4	3	855.71
3	0.4	2	944.08
4	0.4	1	1 069.43

表 11 不同纤维长度改良粉土脆性指数

Table 11 Brittleness index of modified silt with different fiberlength

纤维含量/%	纤维长度/cm	峰值强度/kPa	残余强度/kPa	I_b
0.4	3	855.71	634.76	0.258 2
0.4	2	944.08	654.39	0.306 8
0.4	1	1069.43	510.70	0.530 9

2.4 纤维长度和纤维掺量对改良粉土抗剪强度的影响

2.4.1 纤维长度对抗剪强度的影响 选取纤维最佳掺量 0.4%，纤维长度分别为 0、1、2、3 cm 进行直剪试验，结果如图 6 所示。得到改良粉土的黏聚力和内摩擦角，见表 12，试样黏聚力与内摩擦角的变化曲线如图 7 所示。

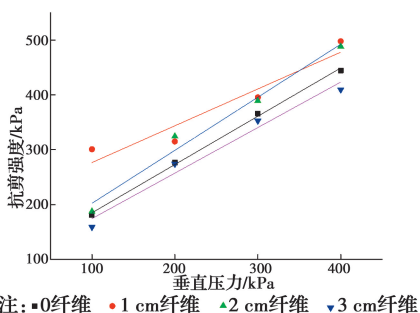


图 6 不同纤维长度下试样抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 6 Relationship between the shear strength and vertical pressure of samples with different fiber length

由图 6 可知，纤维掺量一定时，在相同的垂直压力下，改良粉土的抗剪强度随着纤维长度的减小而增强，同时，纤维长度过长，试样的抗剪强度反而不如未掺纤维的抗剪强度高。纤维长度对土体抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角也有不同程度的影响。与纤维长度为 1、2 cm 的试样相比较，未掺纤维土体的黏聚力分别提高了 112.42、8.47 kPa，而纤维长度为 3 cm 的试样的黏聚力反而有所降低；内摩擦角方面，

纤维长度对土样的内摩擦角的影响较小，上下变动幅度不大。

表 12 不同纤维长度下试样的黏聚力和内摩擦角

Table 12 Cohesion and inter friction angle of samples with different fiber length

纤维含量/%	纤维长度/cm	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	0	97.06	41.34
0.4	3	91.35	39.69
0.4	2	105.53	44
0.4	1	209.48	33.86

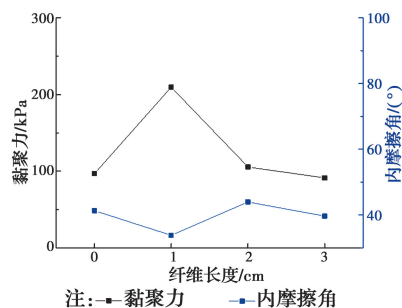


图 7 试样的黏聚力和内摩擦角随纤维长度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of cohesion and internal friction angle with different fiber length

综上所述，纤维长度为 1 cm 时，虽然黏聚力有大幅度提升，但内摩擦角有所降低；纤维长度为 2 cm 时，土体黏聚力和内摩擦角均有提升。当垂直压力达到 350 kPa 时，纤维长度为 2 cm 试样的抗剪强度超过纤维长度为 1 cm 的试样。

由上述结果可知，当纤维掺量为 0.4%、纤维长度为 2 cm 时，改良粉土的抗剪强度的改良效果最优。

2.4.2 纤维掺量对抗剪强度的影响 取纤维长度为 2 cm，纤维掺量分别为 0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 进行直接剪切试验，试验结果如图 8 所示，改良粉土的黏聚力和内摩擦角以及其随掺量的变化曲线分别见表 13、图 9。

表 13 不同纤维掺量下试样的黏聚力和内摩擦角

Table 13 Cohesion and inter friction angle of samples with different fiber content

纤维含量/%	纤维长度/cm	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0.2	2	42.5	43.74
0.3	2	61.43	45.68
0.4	2	105.43	44.13
0.5	2	94.5	41.68

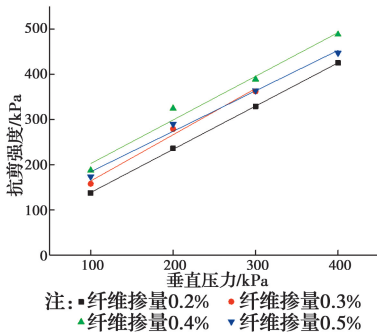


图 8 不同纤维掺量下试样抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 8 Relationship between the shear strength and vertical pressure of samples with different fiber content

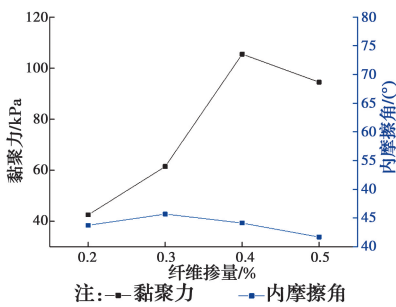


图 9 试样黏聚力和内摩擦角随纤维掺量的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of cohesion and internal friction angle with different fiber content

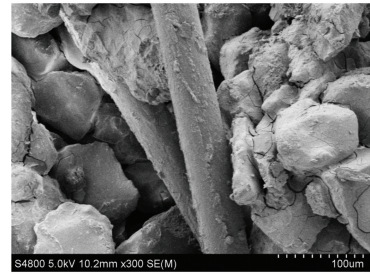
由图 8 可知,在掺入相同长度纤维后,改良粉土的抗剪强度在纤维掺量为 0.4% 时达到最大,随后开始下降。在纤维长度一定的情况下,表 13 给出纤维掺量对土体抗剪强度指标的影响。在纤维掺量由 0.3% 增加至 0.4% 时,黏聚力有大幅度提升,随后呈现下降趋势,而纤维掺量的改变对内摩擦角影响不大,这也与准黏聚力原理相符。

实验结果表明,纤维掺量为 0.4%、纤维长度为 2 cm 时,改良粉土的抗剪强度的改良效果最优。

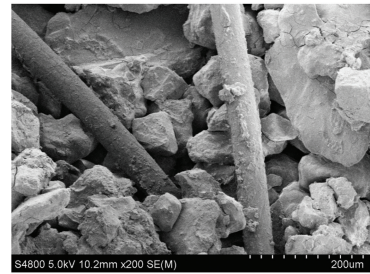
2.5 微观机理分析

改良粉土中掺入纤维增强的扫描电镜图像如图 10 所示。

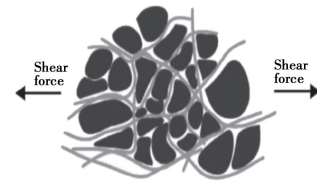
由图 10(a)、(b)可以看出,纤维如网状有效地与土壤黏结在一起。纤维增强改良粉土力学性质的机理为:一方面,在无侧限抗压试验和直剪试验中,试样在被压缩或者剪切的过程中,纤维在土体中被拉伸,如图 10(c)所示,因此,土壤-纤维基质内出现界面摩擦阻力,这种界面阻力与土壤-纤维接触面积有关^[14]。纤维与土壤颗粒之间的接触水平越高,纤维所提供的阻力就越大。因此,这种改善机制取决于纤维的长度和掺量。对于给定的纤维掺量或长度,增加纤维长度或掺量,纤维总表面积也会随之增加,从而导致纤维与土壤颗粒之间接触面积增大,产



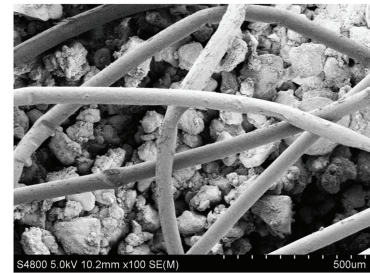
(a) 放大300倍



(b) 放大200倍



(c) 土壤颗粒与纤维表面界面力学行为示意图



(d) 放大100倍

图 10 改良粉土中掺入纤维增强的扫描电镜图像

Fig. 10 SEM images of embedded fiber reinforcement in improved silt

生更大的抗变形能力。但是,当纤维长度过长,会在土体内聚集成团,如图 10(d)所示,在土体内形成薄弱点,造成土体强度减弱,因此,纤维长度不宜过长。另一方面,随机分布的纤维作为一个空间三维网络,将土颗粒编织或连锁成一个统一的相干矩阵,从而限制变形过程中土颗粒的位移。

3 结论

纤维掺量和纤维长度对土体抗压强度和抗剪强度均有影响,通过开展聚丙烯纤维改良纳米二氧化硅-石灰改良粉土的无侧限抗压强度试验和直接剪切试验,得到如下结论:

1) 纳米二氧化硅与石灰的配合比为 1.5:2 时,

改良粉土 7 d 无侧限抗压强度有明显的提升,且试样的强度在养护 7 d 后趋于稳定,不再随养护龄期而变化。

2)在改良粉土的抗压强度和脆性改良方面,纤维长度一定时,纤维掺量为 0.4%时,改良效果最明显;纤维掺量为最优掺量 0.4%、纤维长度为 2 cm 时,改良效果最明显。因此,纤维最优掺量为 0.4%,纤维最优长度为 2 cm。

3)当纤维掺量为 0.4%时,以纤维长度作为变量分别进行直接剪切试验,试验结果表明,纤维长度为 2 cm 时,试样的抗剪强度和抗剪强度指标的改良效果最明显;当纤维长度为 2 cm 时,纤维掺量作为变量,可以得出纤维掺量为 0.4%时,试样的抗剪强度和抗剪强度指标的改良效果最明显。因此,可以验证纤维最优掺量为 0.4%,纤维最优长度为 2 cm。

4)纤维的掺入可以提升土体的力学性质。这与纤维长度、掺量均有关系,纤维长度与掺量均要适宜,纤维过长反而会导致土体强度下降。

5)通过扫描电镜图像来看,改良粉土中掺入纤维增强的机理分为两部分,一是土体与纤维的界面摩擦阻力提供的抗变形能力;二是随机分布的纤维将土颗粒编织或连锁成一个统一的相干矩阵,从而限制变形过程中土颗粒的位移。

参考文献:

- [1] GHASABKOLAEI N, JANALIZADEH CHOORBASTI A, ROSHAN N, et al. Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(3): 639-650.
- [2] JALAL M, POULADKHAN A, HARANDI O F, et al. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 90-104.
- [3] CHITHRA S, SENTHIL KUMAR S R R, CHINNARAJU K. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high performance concrete with copper slag as partial fine aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 794-804.
- [4] VARGAS P, MARÍN N A, TOBÓN J I. Performance and microstructural analysis of lightweight concrete blended with nanosilica under sulfate attack [J]. Advances in Civil Engineering, 2018: 1-11.
- [5] GALLAGHER P M, CONLEE C T, ROLLINS K M. Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 186-196.
- [6] CHOORBASTI A J, VAFAEI A, KUTANAEI S S. Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica [J]. Open Engineering, 2015, 5(1): 111-116.
- [7] CHOORBASTI A J, KUTANAEI S S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(5): 981-988.
- [8] BAHMANI S H, FARZADNIA N, ASADI A, et al. The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil [J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 294-306.
- [9] ALI PASHABAVANDPOURI M, JAHANGIRIS. Effect of nano silica on swelling, compaction and strength properties of clayey soil stabilized with lime [J]. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 2015, 5(7S): 538-548.
- [10] GELSEFIDI S A S, MAMAGHANIAN J. Stabilization of a weak low plasticity clay soil using nanomaterial [C]// 5th International Young Geotechnical Engineers' Conference, 2013: 134-137.
- [11] GHASABKOLAEI N, JANALIZADEH A, JAHANSHAHI M, et al. Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study [J]. The European Physical Journal Plus, 2016, 131(5): 134.
- [12] ALI ZOMORODIAN S M, SHABNAM M, ARMINA S, et al. Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives [J]. Applied Clay Science, 2017, 140: 140-147.
- [13] 璩继立, 胡晨凯, 赵超男. 玄武岩纤维和纳米二氧化硅加筋上海黏土的抗剪强度试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 186-192.
- QU J L, HU C K, ZHAO C M. Experimental study on shear strength of Shanghai clay reinforced with basalt fibers and nano-silica [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3): 186-192. (in Chinese)
- [14] CHANGIZI F, HADDAD A. Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(4): 367-378.
- [15] TA'NEGONBADI B, NOORZAD R. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate [J]. Transportation Geotechnics, 2017, 12: 45-55.