

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

璩继立, 胡晨凯, 赵超男

(上海理工大学 土木工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了了解玄武岩纤维和纳米二氧化硅加筋土的剪切强度特性, 采用玄武岩纤维和纳米二氧化硅作为加筋材料以单掺或复掺形式掺入上海黏土, 进行直剪试验, 通过改变二者加筋率研究二者对上海黏土的抗剪强度的影响。试验表明: 玄武岩纤维可以有效提高上海黏土的抗剪强度, 质量加筋率为 0.5% 时效果最佳; 纳米二氧化硅也能提高上海黏土的抗剪强度, 质量加筋率为 1.0% 时效果最好; 同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅能进一步提升土的抗剪强度, 0.5% 玄武岩纤维和 1.0% 纳米二氧化硅的组合效果最好; 加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅对土的黏聚力提升较大, 内摩擦角提升较小。

关键词: 玄武岩纤维; 纳米二氧化硅; 加筋黏性土; 抗剪强度

中图分类号: TV41 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)03-0186-07

Shear strength experimental study on basalt fiber and nano silica reinforced Shanghai clay

QU Jili, HU Chenkai, ZHAO Chaonan

(College of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For a more comprehensive study on the shear strength characteristic of basalt fiber and nano silica reinforced clay, the basalt fiber and nano silica were used as reinforcement materials to be incorporated into Shanghai clay in single or mixed form. The direct shear test was carried out to study the influence of the two materials on the shear strength of Shanghai clay by changing the reinforcement ratio of the two materials. The result shows that: the basalt fiber can effectively improve the shear strength of Shanghai clay, when the reinforcement ratio is 0.5%, the reinforcing performance is the most efficient; the addition of nano silica to Shanghai clay also increases the shear strength, and 1.0% is the best reinforced ratio; the shear strength of fiber - nano silica reinforced clay rise significantly under severe conditions (reinforcement ratio), the combined effect of the 0.5% basalt fiber (by weight) and 1.0% nano - silica (by weight) is the most effective; mixing basalt fiber with nano silica can obviously enlarge clay's cohesion, however the angle of internal friction was slightly influenced.

Key words: basalt fiber; nano-silica; reinforced clay; shear strength

1 研究背景

土体的各项力学性能在岩土工程学科中是重点研究对象。在一些实际工程问题中, 会发现原状土土体强度无法满足工程地基的要求。上海黏土具有含水量较高、强度低、易变形的特点^[1], 因此通常会对

土体进行加固处理, 使得土体的物理、力学性能得到改善。室内试验已经验证, 在土体中加入纤维和添加剂能提高土体的强度。近年来纤维加筋土的研究较为广泛, 纤维加筋土中纤维均匀分布, 在各个方向上都能发挥加筋作用, 弥补了传统土工合成材料须根据间距进行布设, 土体存在软弱结构面的弱点^[2]。

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2017-01-03

基金项目: 诺华上海实验室科研项目(3A-11-307-110)

作者简介: 璩继立(1964-), 男, 河南孟州人, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地基处理与加固和水文地质。

通讯作者: 胡晨凯(1993-), 男, 上海人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为软土地基处理与加固及加筋土的力学特性。

柴寿喜等^[3]认为麦秸秆作为加筋材料可以提升滨海盐渍土的抗剪强度和抗变形性能。杨继位等^[4]、李敏等^[5]通过无侧限抗压强度试验分析了不同尺寸的麦秸秆加筋土体的抗压强度增长的影响,并研究了麦秸秆加筋土的合理布筋位置对其抗剪强度的影响。玄武岩纤维是继碳纤维和玻璃纤维之后又一种值得关注的无机纤维。玄武岩纤维以玄武岩矿石为原料熔融纺丝制成,是对环境无污染的绿色健康纤维材料^[6]。王剑焯等^[7]通过在粉土中加入玄武岩纤维筋材,研究发现了其加筋土的粉土抗剪强度、压缩性能和渗透性能均得到了提高。

纳米二氧化硅为无定形的白色粉末,是一种无毒、无味、无污染的非金属材料^[8],目前其在土木工程领域的应用与研究还较少。Lin等^[9]发现在稳定土壤中加入0.25%的纳米二氧化硅可以提高其抗压强度。Luo等^[10]在研究中发现,在土中加入纳米氧化铝能减小土的最大干密度和增大土的最优含水率,并且不同的纳米二氧化硅掺量的影响也不同。

本文在土中加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅,对加筋土体进行抗剪强度的试验研究,并分析研究玄武岩纤维和纳米二氧化硅对上海黏土的影响机理,以期为将来工程地基或公路路基的加固应用提供参考。

2 试验方法

2.1 试验材料

试验用土来自浦东张江高科某大型基坑项目施工现场,使用时将土用碎土机碾碎并过2mm筛,土的主要物理性质如表1所示;试验用玄武岩纤维采用的是统一规格的15mm长短切玄武岩纤维,其物理性质如表2所示;试验用纳米二氧化硅由成都麦卡希化工有限公司生产,其性质如表3所示。图1为试验用玄武岩纤维,图2为电子显微镜下纳米二氧化硅图像。

表1 试验用土的物理性质指标

最优含水率/%	液限含水率/%	塑限含水率/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm ⁻³)	土的相对密度
20.72	42.34	20.56	21.78	1.62	2.73

表2 试验用玄武岩纤维物理性能指标

单位直径/μm	比重	工作温度/℃	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%
14~18	2.75	-270~700	3400~4800	90	3

表3 纳米二氧化硅性质

性质	指标
含量	≥99.5%
平均粒径	15±5 nm
比表面积	250±50 m ² /g



图1 试验用玄武岩纤维

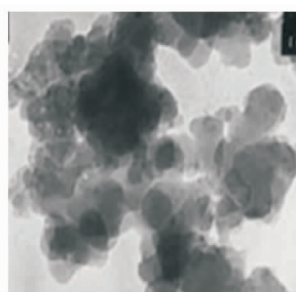


图2 电子显微镜下纳米二氧化硅图像

2.2 试样制备

试验以玄武岩纤维筋材和纳米二氧化硅的质量加筋率作为抗剪强度的主要影响因素。按照《公路土工试验规程》^[11]制备土样,按土的最优含水率20.72%制样,试样密度为1.96 g/cm³。所购玄武岩纤维为压制而成的条状纤维,因此需先将玄武岩纤维用手撕开,再均匀地与干土拌合,加水制样;纳米二氧化硅粒径极小,呈粉状,均匀地随机分散到干土中后加水搅拌制样,每个配比制作3个平行试样进行对比试验,试验数据取平均值。玄武岩纤维的质量加筋率为0.3%、0.5%和0.7%,纳米二氧化硅的质量加筋率为0.5%、0.7%和1.0%,按照最优含水率制备加筋土样,均匀混合,在标准养护条件下养护24 h,试样制作完成后进行直接剪切试验。

2.3 试验与设备

在试验用土中分别单掺质量加筋率0.3%、0.5%和0.7%的玄武岩纤维、0.5%、0.7%和1.0%的纳米二氧化硅,以及二者两两混合的9个配比,在100、200和400 kPa垂直荷载下对土样进行直剪试验。试验仪器采用浙江土工仪器制造有限公司制造的EDJ-1型电动等应变直剪仪。

3 试验结果与讨论

3.1 玄武岩纤维加筋土对上海黏土的影响

3.1.1 对抗剪强度的影响 图3(a)、3(b)、3(c)所示分别为垂直应力100、200、400 kPa下,玄武岩纤维加筋土的剪切位移-剪应力关系曲线。由图3可以看出,当剪切位移较小时,100 kPa下,加筋土与

素土的应力-应变曲线较为接近,随着剪切位移的增大,曲线间距离变大,加筋土的剪应力有明显不同程度的增大;而200和400 kPa下,加筋土的剪应力就在位移较小时就有较为明显的增大。而随着位移的增大,应力-应变曲线逐渐分离,可见,相同位移

下,加筋土的抗剪能力均明显大于素土。说明在上海黏土中的土体中加入玄武岩纤维能增大其抗剪能力。且由图3(a)、3(b)、3(c)可见,随着剪应变的增大,剪应力也逐渐增大,达到峰值强度后无明显下降趋势,其应力-应变曲线呈应变硬化型。

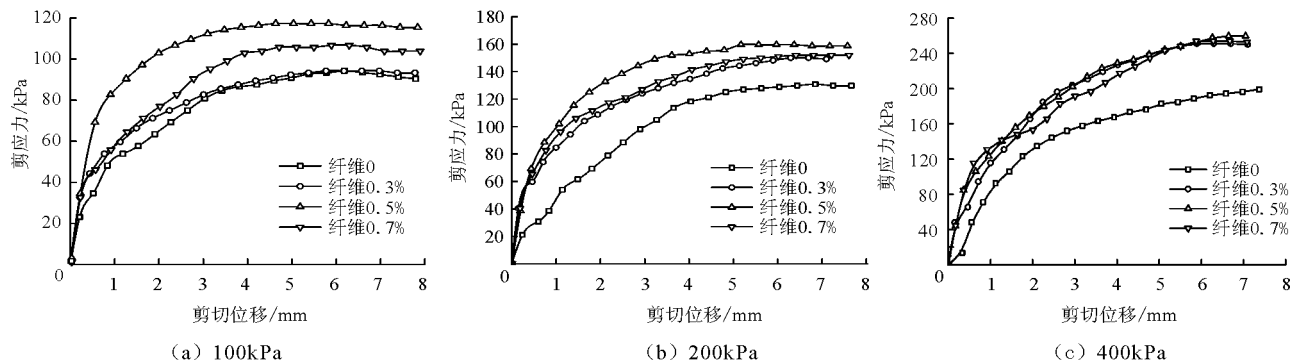


图3 不同垂直应力下玄武岩纤维加筋上海黏土的剪切位移-剪应力关系曲线

由图3可知,随着加筋率的增大,抗剪强度呈先增大后减小的趋势。加入0.5%玄武岩纤维对土体的抗剪强度提高最大。与素土相比,强度提高最大的0.5%加筋土的峰值强度在100、200和400 kPa下分别提高了13.3%、22.1%和30.4%;同时,土体的残余强度增大也较为明显,在100、200和400 kPa下,分别增加了14.9%、26.9%和30.4%。0.5%的玄武岩纤维加筋土在100 kPa下的残余应变降低了2.7%,而素土降低了4.1%;200 kPa下,加筋土仅为0.6%,素土为4.4%;400 kPa下,均未出现峰值点,由此可见,玄武岩纤维作为一种加筋材料,同时提高了上海黏土的抗剪能力、延性和抗变形能力。

3.1.2 对黏聚力和内摩擦角的影响 由图4和表4可以看出,加入筋材对土的抗剪强度提升较大,但不同的加筋率之间,抗剪强度差距较小。各直线间斜率变化不大,表4中的数据证明,筋材的加入对土体的黏聚力影响较大,对内摩擦角影响较小。与素土相比,最佳加筋率0.5%下黏聚力和内摩擦角分别提高了33.5%和13.2%,这说明玄武纤土的黏聚力增长是上海黏土抗剪强度提升的主要因素。

3.2 纳米二氧化硅对上海黏土的影响

3.2.1 对抗剪强度的影响 图5所示(a)、(b)、(c)分别为100、200和400 kPa垂直荷载下,掺入纳米二氧化硅的上海黏土的剪切位移-剪应力关系曲线。曲线达到峰值强度后趋向较平缓,残余强度略有下降,曲线呈应变硬化型。由图5可以看出,相对于素土,纳米二氧化硅土的抗剪强度的峰值应力均明显增大。

而且在3个垂直荷载下,位移较小时,纳米二氧化硅土的剪应力就明显大于素土。说明加入纳米二氧化硅在土受剪切破坏的起始状态就提高了它的抗剪能力。随着位移的不断增大,纳米二氧化硅土的剪应力也均大于素土,对于其抗剪能力的增强效果明显。

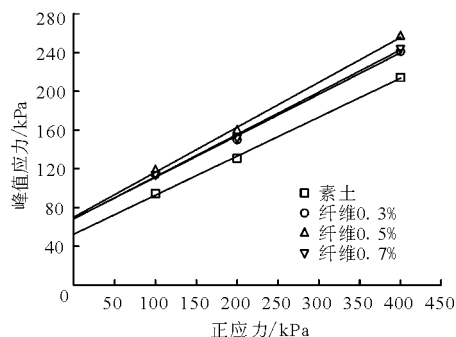


图4 玄武岩纤维加筋上海黏土的垂直荷载与峰值剪切强度的关系

表4 不同加筋率下上海黏土的强度参数

加筋率/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
0	52.50	21.9
0.3	68.45	23.2
0.5	70.10	24.8
0.7	68.23	23.6

相对于素土而言,纳米二氧化硅掺加量分别为0.5%、0.7%和1.0%的加筋土,在100 kPa下,剪应力的峰值增幅分别为7.1%、14.3%和23.5%;200kPa下,增幅分别为12.5%、17.6%和25.7%;

400 kPa 下增幅分别为 24.6%、26.6% 和 28.0%;峰值应力随着纳米二氧化硅掺量的增加而增加,各垂直应力下 1.0% 纳米二氧化硅土的峰值剪切应力最

大,抗剪能力最强而且,所有纳米二氧化硅土的残余强度均与峰值强度相差无几,说明加入纳米二氧化硅后土的延性和抗变形能力同样很好。

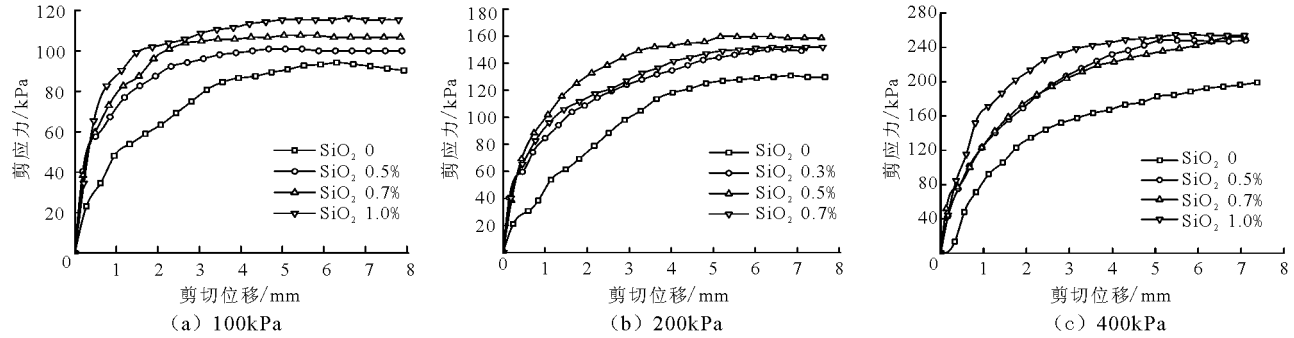


图 5 不同垂直荷载下纳米二氧化硅加筋上海黏土的剪切位移 - 剪应力关系曲线

3.2.2 对黏聚力和内摩擦角的影响 由图 6 可见,直线间差距由小变大,直线斜率增加较为明显,说明随着垂直荷载的增大,土的抗剪强度相对增大更多。而随着掺量的增加,土的抗剪强度值呈逐渐增大的趋势,而且加筋土的直线斜率较为稳定,变化不大。

3.3 同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅对上海黏土的影响

3.3.1 对抗剪强度的影响 试验继续在玄武岩纤维加筋土中再分别加入 0.5%、0.7% 和 1.0% 的纳米二氧化硅。

从表 5 中的数据可以看出,加入纳米二氧化硅使得上海黏土的黏聚力和内摩擦角都增大,效果最好的 1.0% 掺量分别提升了 26% 和 17.8%。相对来说,在上海黏土中加入纳米二氧化硅对黏聚力提升效果比玄武岩纤维加筋土较差,但是对土的内摩擦角提升却优于后者,二者从不同方面提升土体工程性能,对抗剪强度的提升作用也较为接近,黏聚力影响稍大。

图 7、8、9 分别为在 0.3%、0.5% 和 0.7% 的玄武岩纤维土中加入不同比例的纳米二氧化硅的的剪切位移 - 剪应力关系曲线。

由图 7、8、9 可以看出,在玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅,相比于只加纤维,其抗剪强度均有进一步提升。

由图 7 可见,在 0.3% 的纤维土中加入 0.5%、0.7% 和 1.0% 的纳米二氧化硅,100kPa 垂直荷载下,其峰值应力分别增加了 8.2%、13.1% 和 15.6%;200kPa 下,峰值应力增加了 23.8%、26.9% 和 30.8%;400kPa 下,峰值应力增加了 3.8%、5.0% 和 6.9%。

可见,在 0.3% 玄武岩纤维土中加筋越多的纳米二氧化硅,抗剪强度提升越大。

由图 8 可见,0.5% 玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅相比玄武岩纤维土的抗剪强度提升也较为显著。纤维土中加入 0.5%、0.7% 和 1.0% 的纳米二氧化硅在 100kPa 垂直荷载下,峰值应力分别增加了 13.5%、22.5% 和 33.3%;200kPa 下,峰值应力分别增加了 4.2%、6.0% 和 22.9%;400kPa 下,峰值应力分别增加了 10.0%、15.4% 和 25.0%。相同于 0.3% 的纤维加筋率,0.5% 玄武岩纤维土加纳米二氧化硅的抗剪强度也随着纳米二氧化硅的掺量的增加而增强,0.5% 玄武岩纤维和 1.0% 纳米二氧化硅的组合抗剪强度增强效果最好。

图 9 中,0.7% 的玄武岩纤维土中加入纳米二氧化

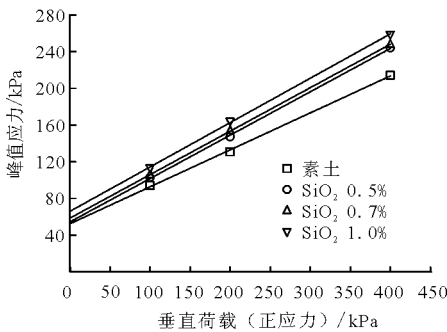


图 6 素土及加入纳米二氧化硅的上海黏土的垂直荷载与峰值剪切强度的关系

表 5 不同纳米二氧化硅掺量下上海黏土的强度参数

掺量/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
0	52.50	21.9
0.5	54.50	25.3
0.7	58.65	25.3
1.0	66.05	25.8

硅也比仅加玄武岩纤维的抗剪强度高。但是,增强效果和纳米二氧化硅的掺量之间关系却与0.3%和0.5%的玄武土中加纳米二氧化硅相反。其具体峰值应力增强比例为:100kPa下,分别增加了50.0%,36.7%和32.7%;200kPa下分别增加了25.9%,17.7%和6.3%;

400kPa下分别增加了15.9%,8.7%和3.0%。由图9可知,随着纳米二氧化硅掺量的增加,其抗剪强度反而减小,这一点与0.3%和0.5%的相反,说明玄武岩纤维和纳米二氧化硅的联合作用对上海黏土的抗剪强度的提升有最佳配比。

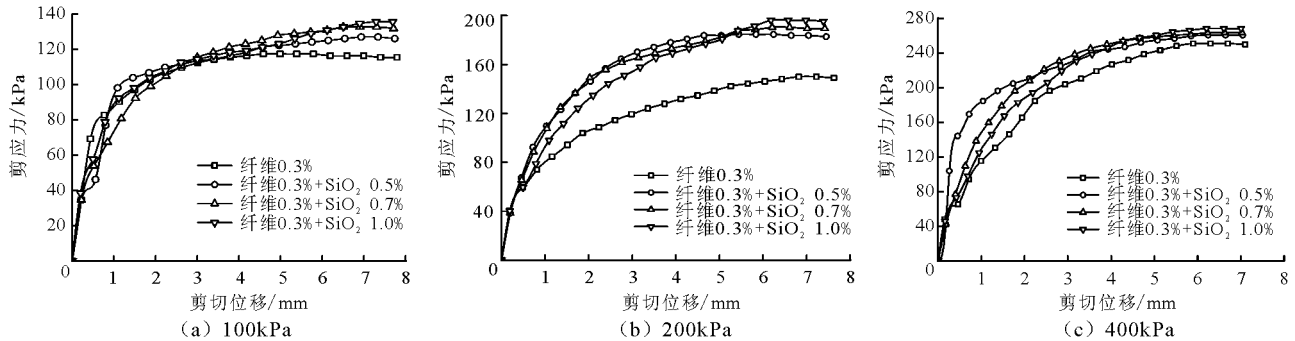


图7 在0.3%玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅的剪切位移-剪应力关系曲线

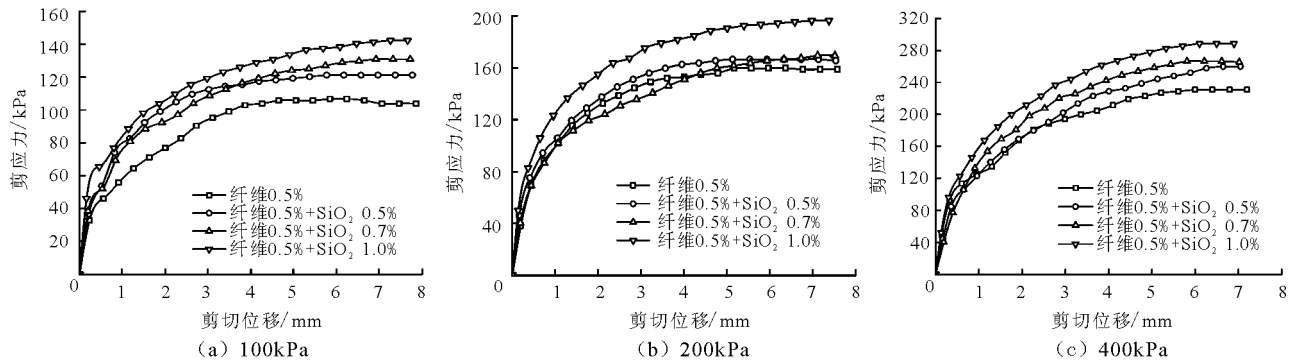


图8 在0.5%玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅的剪切位移-剪应力关系曲线

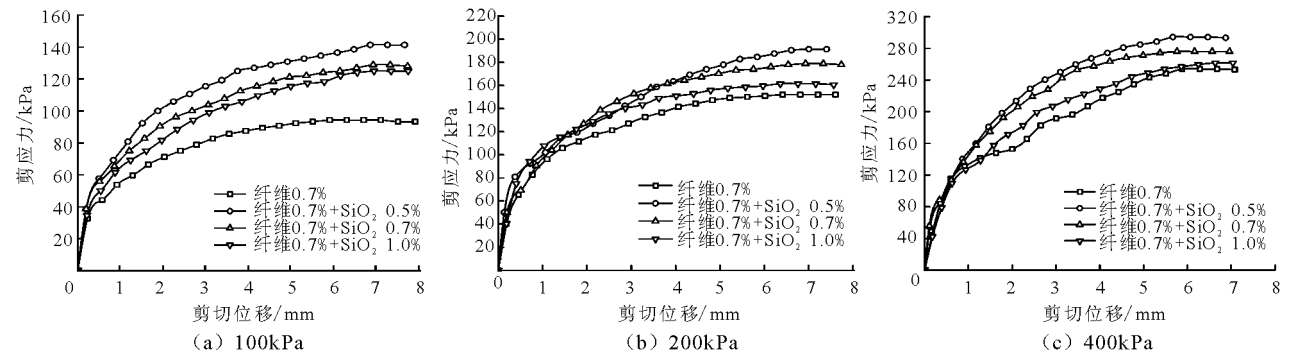


图9 在0.7%玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅的剪切位移-剪应力关系曲线

总体来看,0.5%玄武岩纤维和1.0%的纳米二氧化硅与0.7%玄武岩纤维和0.5%的纳米二氧化硅的组合配比对于上海黏土的抗剪能力增强效果相比其余配比比较好。相比于素土,0.5%和1.0%的组合在100kPa、200kPa和400kPa下峰值应力分别增强了51%,50%和44.9%;0.7%和0.5%的组合分别增加了49.9%,46.1%和47.8%。它们的增强效果较为接近,其中0.5%和1.0%的组合最好。而

且,所有图中曲线均为应变硬化型曲线,这说明,在上海黏土中加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅在增强其抗剪能力的情况下并未影响其延性和抗变形能力,这两个指标依旧表现良好。

3.3.2 对黏聚力和内摩擦角的影响 图10(a),(b),(c)为同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅垂直荷载和峰值剪切应力的关系线。由图10中可以看出,加入纳米二氧化硅的玄武土相比只加纤维的

土,在各个垂直荷载下的抗剪强度都有提升,直线斜率均有增长。表6中选取了双掺的两个较优配比、只加纤维的0.5%最佳配比以及素土的黏聚力和内摩擦角数据,可以看出,在玄武岩纤维土中加入纳米二氧化硅进一步提升上海黏土的黏聚力,两个配比相对于0.5%玄纤土黏聚力提升了37.1%和28.2%,相比素土提升了83.1%和71.1%;内摩擦角相比0.5%玄纤土提升了4%和8.9%,相比素土

提升了17.8%和23.3%。0.5%+1.0%对黏聚力提升较大,0.7%+0.5%对内摩擦角提升较大。不过,黏聚力的提升相比内摩擦角大得多,因此也对抗剪强度的影响更大,0.5%+1.0%的组合在黏聚力的提升方面优势明显,内摩擦角的提升也仅比0.7%+0.5%的小一点,结合峰值应力的增幅,在上海黏土中加入0.5%的玄武岩纤维和1.0%的纳米二氧化硅提升上海黏土抗剪强度的效果最好。

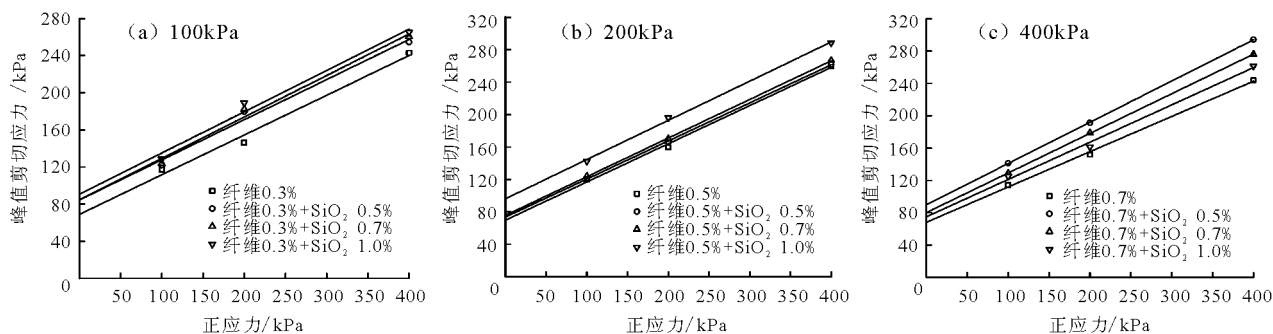


图10 同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅的上海黏土的垂直荷载与峰值剪切强度的关系

表6 加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅的上海黏土的强度参数

纤维加筋率和纳米二氧化硅掺量配比	黏聚力 c /kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
0+0	52.50	21.9
0.5%+0	70.10	24.8
0.5%+1.0%	96.15	25.8
0.7%+0.5%	89.85	27.0

抗剪强度反而有所下降。这是由于加筋率有一个最佳比例值,当超过这个值继续加入纤维后,筋材过多就会发生重叠,重叠的纤维不能与土体充分接触,破坏了土的整体性^[13]。

纳米二氧化硅作为一种纳米材料,其粒径仅为10~20nm,远远小于土颗粒。通过击实试验验证,试验中加入纳米二氧化硅对土的最优含水率基本无影响。纳米二氧化硅具有一定的亲水性,会吸收一小部分水形成凝胶状物质,并且,由于纳米二氧化硅的掺量较少,也仅有一小部分会结合水形成凝胶,形成的这部分凝胶均匀分散土颗粒之间,使得颗粒与颗粒之间的黏聚力增强。同时,凝胶状物质也使得土颗粒之间的距离更小,土样变得更加紧密。而未结合水的纳米二氧化硅聚集的小团也均匀分散在土颗粒的空隙之间,这相当于改善了土的级配,也起到使土更密实,优化土的性能的作用。

在进行直剪试验时,纳米二氧化硅的加入使得土颗粒之间的接触面积增大,相比于素土,其黏聚力无疑是增大的,内摩擦角也随之增大。随着剪切位移的产生,土与土,土与凝胶之间的黏聚力发挥阻碍其剪切变形的作用,这样,相比与同位移下的素土,其剪应力也一定增加,起到增强其抗剪能力的效果。试验结果也显示,随着试验中纳米二氧化硅掺量的增加,土的抗剪能力也随之增强,掺量最多的1.0%纳米二氧化硅土的抗剪能力最好。说明掺入的1.0%纳米二氧化硅均在土中充分发挥作用,也说明

4 玄武岩纤维和纳米二氧化硅加筋作用机制

玄武岩纤维作为一种高性能无机纤维,具有抗拉强度大的优点。在土中充分拌合后,玄武岩纤维呈单丝状,在土中分布均匀,不易使试样出现应力薄弱点。在土中,每根单丝状的玄武岩纤维以一定的角度穿插交织,使纤维交织紧密,形成空间约束作用,提高了加筋土的黏聚力,这样在一定程度上加大了剪切阻力,增强了其抗剪强度。在剪切土时,随着剪切位移的增大,土将改变原土组构单元的排列方向,使土颗粒具有沿剪切面定向排列的趋势,加筋后,筋材与土相互作用,阻碍了土颗粒向剪切方向的运动^[12]。在加入玄武岩纤维后,土与土,土与纤维,纤维与纤维互相的摩擦力是大于土与土的摩擦力的,这种摩擦力传递至纤维,使得玄武岩纤维的抗拉强度发挥作用,二者也主要是使其抗剪强度增强的主要原因。其中,加入0.5%的玄武岩纤维效果最好,当继续加到0.7%时,

0.3%和0.5%的掺量并未使纳米二氧化硅增强土的抗剪能力的作用达到饱和。

当在土中同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅,二者联合作用,其抗剪强度相对于单掺配比均有提升,这说明玄武岩纤维和纳米二氧化硅的适当组合可以进一步提升上海黏土的抗剪能力。但加入量过多时,其抗剪能力呈现下降的趋势,0.5%和1.0%与0.7%与0.5%两个配比对上海黏土的抗剪能力增强效果接近,其中0.5%和1.0%的组合为最优配比。0.7%和0.7%与0.7%和1.0%的效果开始下降,这说明加入的玄武岩纤维和纳米二氧化硅已过饱和,多余掺入的只会起负面效果,多余的筋材和纳米二氧化硅只会阻隔土颗粒,破坏其整体性,影响抗剪能力。

5 结 论

(1) 加筋玄武岩纤维能提高上海黏土的抗剪强度,质量加筋率为0.5%时改善效果最佳。

(2) 加筋纳米二氧化硅也能提升上海黏土的抗剪强度,质量加筋率为1.0%时效果最佳。

(3) 在上海黏土中同时加入玄武岩纤维和纳米二氧化硅相比只加纤维可以进一步提升其抗剪强度,加入0.5%的玄武岩纤维和1.0%的纳米二氧化硅效果最佳,相比素土,黏聚力提升83.1%,内摩擦角提升17.8%。

(4) 加筋玄武岩纤维和纳米二氧化硅在提升抗剪强度的同时不影响其延性和抗形变能力,应力应变曲线始终保持应变硬化型。

(5) 玄武岩纤维和纳米二氧化硅的加入使得上海黏土的两个强度指标:黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均有提升,其中对黏聚力的提升较内摩擦角更为明显,这也是上海黏土抗剪强度提升的主要因素。

参考文献:

- [1] 高彦斌,李赫,张阿晋. 结构性对上海软土次压缩特性的影响[J]. 上海国土资源,2011,32(4):73-77.
- [2] 王德银,唐朝生,李建,等. 纤维加筋非饱和粘性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1933-1940.
- [3] 柴寿喜,王沛,王晓燕. 麦秸秆布筋区域和截面形状下的加筋土抗剪强度[J]. 岩土力学,2013,34(1):92-100.
- [4] 杨继位,柴寿喜,王晓燕,等. 以抗压强度确定麦秸秆加筋盐渍土的加筋条件[J]. 岩土力学,2010,31(10):3260-3264.
- [5] 李敏,柴寿喜,杜红普,等. 麦秸秆加筋土的合理布筋位置和抗剪强度模型[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):3923-3929.
- [6] 崔毅华. 玄武岩连续纤维的基本特性[J]. 纺织学报,2005,26(5):120-121.
- [7] 王剑辉,彭丽云. 玄武岩纤维加固粉土性能试验研究[J]. 北京建筑大学学报,2015,31(3):33-38.
- [8] 曹淑超,伍林,易德莲,等. 纳米二氧化硅的制备工艺及其进展[J]. 化学与生物工程,2005,22(9):1-3.
- [9] Lin D F, Lin K L, Chang W C, et al. Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar[J]. Waste Management, 2008, 28(6):1081-1087.
- [10] Luo H L, Hsiao D H, Lin D F, et al. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide[J]. International Journal of Transportation Science & Technology, 2012, 1(1):83-100.
- [11] 中国交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [12] 喻泽红,魏红卫,邹银生. 加筋红砂岩风化土强度和变形特征[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2770-2779.
- [13] 包承纲,丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础,2012,26(1):80-83.