

上海黏土掺入聚乙烯醇纤维后的强度试验研究

璩继立, 江海洋, 赵冬雪, 俞汉宁
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为研究聚乙烯醇纤维对上海黏土抗剪和抗压强度的影响以及聚乙烯醇纤维加筋材料对上海黏土强度的作用机制, 分别对不同条件下的聚乙烯醇加筋上海黏土进行直剪慢剪和无侧限抗压强度试验。试验结果表明: 掺入聚乙烯醇纤维后, 上海黏土的抗剪强度、抗压强度均提高了, 相对于素土, 抗剪强度和抗压强度分别最大提高了73.7%和49.5%; 抗剪强度和抗压强度的最佳加筋率分别为1.0%和0.8%, 且相对于素土, 抗变形能力有所提高; 当垂直压力为50 kPa时, 直剪试验的应力-应变曲线呈应变软化状态; 当垂直压力为100, 150和200 kPa时, 应力-应变曲线呈应变硬化状态; 直剪试验中, 聚乙烯醇纤维掺入上海黏土对黏聚力影响较大, 对内摩擦角几乎没有影响。

关键词: 聚乙烯醇纤维; 加筋; 抗剪强度; 抗压强度; 上海黏土

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0182-04

Study on strength experiment after incorporating polyvinyl alcohol fiber into Shanghai clay

QU Jili, JIANG Haiyang, ZHAO Dongxue, YU Hanning

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper carried out direct slow shear test and unconfined compressive strength test for reinforced Shanghai clay with polyvinyl alcohol fiber under different conditions in order to study the effect of polyvinyl alcohol fiber on Shanghai clay shear and compressive strength, and the mechanism of polyvinyl alcohol fiber reinforced materials on the strength of Shanghai clay. The results show that after incorporating polyvinyl alcohol fiber in Shanghai clay, the shear strength and compressive strength are improved compared with the pure soil, which increase by 73.7% and 49.5% respectively; the optimal reinforcement rates of shear strength and compressive strength are 1.0% and 0.8% respectively, while the anti-deformation ability is improved compared with pure soil; in direct slow shear test, when the vertical load is 50kPa, the stress-strain curve possesses strain softening; when the vertical load is 100, 150 and 200kPa, the stress-strain curve is strain hardening; in the direct shear tests, the influence of Shanghai clay incorporated by polyvinyl alcohol fiber on cohesion is larger and that has almost no effect on internal friction angle.

Key words: polyvinyl alcohol fiber; reinforced; shear strength; compressive strength; Shanghai clay

1 研究背景

上海地区浅部分布着厚度较大的软黏土层^[1]。上海地区黏土特有的高含水量、大孔隙比、高压缩性等性质可引起土的强度降低, 严重影响建设工程地基或路基的稳定性和耐久性^[2], 因此, 未经处理的黏土不能满足建设工程的强度和变形要求, 因此利

用上海黏土之前要提前进行加固处理。

纤维作为一种新型的土体加筋材料直到20世纪80年代才引起重视, 我国自20世纪90年代初陆续出现了关于纤维加筋土的研究。目前, 在土体工程中得到应用的纤维加筋材料可分为两类: 人工合成纤维和自然纤维。李敏等^[3]分析了麦秸秆加筋土的合理布筋位置和抗剪强度模型; Parbakar等^[4]

收稿日期: 2015-03-14; 修回日期: 2015-05-14

基金项目: 诺华上海实验室科研经费(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, 主要从事岩土工程、水文地质等方面的研究与教学工作。

通过剪切和抗压强度试验得到不同加筋长度以及不同加筋率条件下,剑麻纤维加筋土的最大强度值;王伟等^[5]通过三轴压缩试验证明了聚丙烯纤维加筋土微结构联结强度得到明显改善,抗裂补强,黏性土抗剪强度得到极大提高。

聚乙烯醇纤维是一种以聚乙烯醇为原料纺丝制得的人工合成纤维,具有良好的耐酸碱性、耐久性、分散性,与一般常用的合成纤维相比,还具有很高的弹性模量与抗拉强度。

在我国,聚乙烯醇纤维用于加筋土的研究很少,更普遍的用于提高混凝土的力学性能上,比如姜睿等^[6]探讨了聚乙烯醇纤维高强混凝土的配制方法,研究表明聚乙烯醇纤维可以显著提高高强混凝土的劈拉强度,有效改善了高强混凝土的脆性。周霖^[7]通过聚乙烯醇纤维加入混凝土后的力学性能试验,证明了聚乙烯醇纤维可以改善水泥基材料的抗裂性和韧性,提高抗拉和抗冲击性能。

由于聚乙烯醇纤维具有优良的特性以及对混凝土力学性能具有很大的改善,因而开展对聚乙烯醇纤维加筋土力学性能的影响研究有进一步探讨的必要性。

本文选择聚乙烯醇纤维作为提高上海黏土强度的筋材。对不同条件下加筋试件进行直剪慢剪试验、无侧限抗压强度试验,研究提高上海黏土强度的

适宜加筋条件,并对其加筋影响因素进行分析。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 土壤 试验用土取自上海市某大型基坑项目施工现场,取回后将土重新碾碎,过 2 mm 土工筛。并测得其最佳含水率为 20.78%,最大干密度为 1.63 g/cm³,液限含水率为 42.27%,塑限含水率为 20.46%。

2.1.2 聚乙烯醇纤维 聚乙烯醇纤维选自上海瑞高实业发展有限公司生产的 PF-2000 型聚乙烯醇纤维,性能如表 1。

2.2 试验仪器和方法

2.2.1 塑液限测定试验 试验前将试验用土风干,用碎土机碾碎,按《公路土工试验规程》^[8] JTGE40-2007 制备土样。试验仪器采用浙江土工仪器制造有限公司生产的型号为 STYS-1 数量塑液限联合测定仪。

2.2.2 直接剪切试验 我们的直接剪切试验采用直剪慢剪,试验仪器采用南京河海南水电自动化公司生产的 DJY-4L 四联等应变直剪仪。采取应变控制式直接剪切。应变速率为每分钟应变 0.02 mm/min,目的是使黏土充分排水,使测得的剪切强度更加稳定,当剪应变达到 5 mm 左右时,停止剪切。

表 1 聚乙烯醇纤维物理性能指标

材料名称	比重/(g·cm ⁻³)	拉伸极限/%	抗拉强度/MPa	熔点/°C	长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	颜色
聚乙烯醇纤维	1.30	6.0~8.0	800~1600	230	6~10	0.026	20	淡黄色或白色

试验中,分别以 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2% 的质量比将聚乙烯醇纤维掺入素土中,掺入之前,尽可能的把聚在一团的纤维丝分散开,边加入纤维丝边搅拌土体,最大程度地增大纤维丝表面与土体的接触面积,然后加入 20.78% 的水,再次搅拌均匀后装进保鲜袋,放入养护缸中养护 24 h。然后按《公路土工试验规程》^[8] 中制样,制成试样高 20 mm,直径 61.8 mm。垂直荷载一共 4 级,分别为 50、100、150、200 kPa,每组制备 3 个试样。

2.2.3 无侧限抗压强度试验 无侧限抗压强度试验采用南京土壤仪器厂生产的 PY-3 型应变控制式无侧限压缩仪。其位移测量范围为 0~30 mm,升降速率为 2.3~2.7 mm/min。试验按照 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2% 的加筋率和相同的工艺及方法配制试样。制得试样直径为 39.1

mm,高度为 80 mm,每组制备 3 个试样。

3 试验结果与分析

3.1 对抗剪强度的影响

图 1、2、3 和 4 分别为聚乙烯醇纤维在 50、100、150 和 200 kPa 垂直压力作用下应力-应变关系图,可以看出,当剪切位移较小时,同一垂直压力下不同加筋率的剪应力值很接近,各种含量的曲线甚至相互交织在一起;当剪切位移较大时,各种含量的剪应力值差距增大,曲线出现明显分离。图 1 中,可以看出应力有明显的峰值,随着应变的增大,应力先增大到达峰值,然后减小,故 50 kPa 时应力应变曲线呈现应力-应变软化型;图 2、3 和 4 中,随着剪应变的增大,剪应力也逐渐增大,无明显峰值,故垂直压力为 100、150、200 kPa 时,应力应变曲线呈现应力-

应变硬化型。

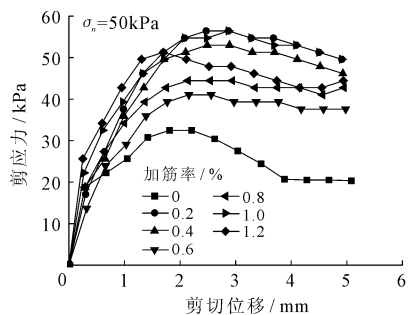


图1 50 kPa时聚乙烯醇纤维加筋土
应力-应变关系曲线

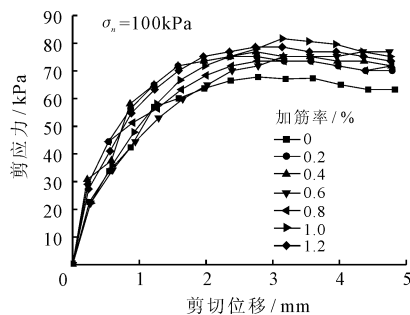


图2 100 kPa时聚乙烯醇纤维加筋土
应力-应变关系曲线

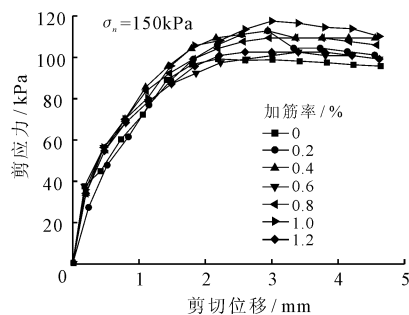


图3 150 kPa时聚乙烯醇纤维加筋土
应力-应变关系曲线

从图中可以看出,整体上加筋土的抗剪强度均大于素土的抗剪强度,所以,用聚乙烯纤维作为加筋材料,可以提高上海黏土的抗剪强度。随着加筋率的增加,抗剪强度先增大后减小,出现峰值,加筋率为1.0%时,4种垂直压力作用下抗剪强度均达到最大值。与素土相比,上海黏土加筋聚乙烯醇纤维抗剪强度50、100、150和200 kPa时分别提高了73.7%、21.8%、18.8%和17.2%。残余强度50、100、150和200 kPa时分别提高了143.1%、22.2%、14.9%和20.7%。同时,与素土相比,当剪切位移较大时,加筋土剪切强度仍然保持较大值,这对提高土体的延性起到了一定的作用。

纤维加入土体后,原本光滑的纤维表面黏附了大量的黏土颗粒,当土样在荷载作用下发生剪切变形或者破坏时,土中的纤维将处于受拉状态,此时纤维所承受拉应力的大小取决于黏土颗粒与纤维表面黏结力和摩擦力的大小。在这种界面力的作用下,纤维与土介质的相对滑动受到一定的限制,大量随机分布的纤维加入到土体后,会形成一种空间网状结构,这种结构使得土颗粒互锁,从而很好的约束了土颗粒的位移和变形,增加了土体的整体性、强度和稳定性^[9]。

3.2 对黏聚力和内摩擦角的影响

直接剪切试验结果所得的抗剪强度与正应力的关系以及黏聚力和内摩擦角结果如图5和表2所示。

从上述剪切试验结果分析,素土中加入聚乙烯醇纤维后,当加筋率小于0.8%时,黏聚力随着加筋率的增加而增加,当加筋率大于0.8%时,黏聚力有下降趋势,但下降非常缓慢,这表明存在最佳加筋率,结合图1到图4对抗剪强度的分析,可以定义最佳加筋率为1.0%。与素土相比,最佳加筋率处黏

聚力提高了55.6%。

表2 直剪试验抗剪强度指标

加筋率/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ψ /($^{\circ}$)
0.0	15.1	28.1
0.2	19.9	29.0
0.4	20.9	29.1
0.6	22.7	30.1
0.8	23.8	31.6
1.0	23.5	30.7
1.2	23.2	28.2

在试验中,当加筋率小于0.8%时,根据“弯曲机理”,纤维在土中的分布形态是由很多个弯曲转折形成的,当土体承受外力使纤维受拉时,在先弯曲的凹侧就会产生纤维对土颗粒的压力和摩擦力,从而起到加固土体的作用^[10]。但由于筋材含量不足,不能与土充分作用,无法最大程度上发挥出加筋土的强度,因此黏聚力随着加筋率增大而增大;当加筋率接近1.0%时,根据“交织机理”,足够多的纤维在土中形成了无数的交点,形成了空间的网状结构,如果在纤维的交叉处受到了力的作用,以至于出现了位移的趋势,那么就会遇到其他的纤维阻止这种位移,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,更大程度上提高了土体的强度^[10]。当加筋率大于1.0%时,纤维会有部分重叠,使土颗粒之间发生隔断,影响土体的整体性,降低土的黏聚力。

从表2可以看出,随着加筋率的增大,内摩擦角先增大后减小,但变化范围很小。0.8%加筋率时,内摩擦角达到最大值,比素土提高了12.4%。所以,聚乙烯醇纤维加筋土抗剪参数与素土相比,总体上黏聚力有明显增加,相对于黏聚力的增加,内摩擦

角基本没有变化。定义最佳加筋率为 1.0%。

3.3 对抗压强度的影响

图 6 表示无侧限抗压强度试验中,不同加筋率

下聚乙烯醇纤维加筋土应力 - 应变关系曲线图,图 7 表示不同加筋率下加筋土残余强度和抗压强度关系图,并以此说明加筋土对抗压强度的影响。

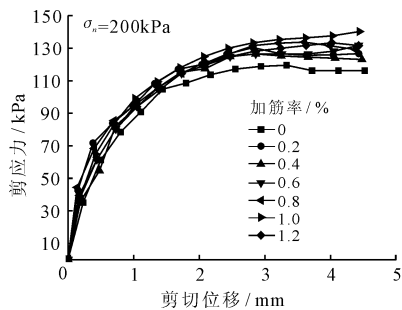


图 4 200 kPa 时聚乙烯醇纤维加筋土应力 - 应变关系曲线

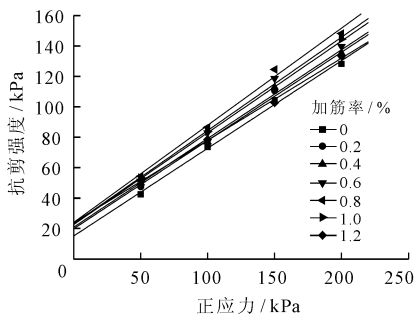


图 5 不同加筋率下抗剪强度与正应力关系曲线

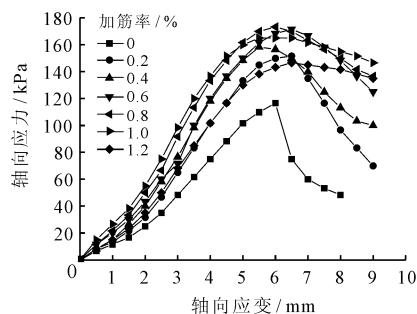


图 6 不同加筋率下聚乙烯醇纤维加筋土应力 - 应变关系曲线

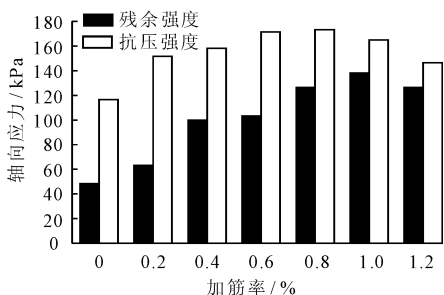


图 7 聚乙烯醇纤维加筋土残余强度和抗压强度

从图 6 和 7 中可以看出,与素土相比,聚乙烯醇纤维显著提高了土的抗压强度和抗变形能力。如图 6 所示,应力应变曲线表现为应变软化型,但残余强度较大,特别是当加筋率大于 0.6% 时,轴向应力超过峰值之后减小缓慢,存在较高的残余应力。抗压强度随着加筋率增大,先增大后减小,当加筋率为 0.8% 时,抗压强度达到最大值,与素土相比,抗压强度提高了 49.5%;当加筋率为 1.0% 时,残余强度达到最大值,与素土相比,残余强度提高了 187.5%。因此定义无侧限抗压强度试验最佳加筋率为 0.8%。由此可见,聚乙烯醇纤维对上海地区的黏土能有效的延缓土样脆性破坏的发生,显著增强了土的抗变形性能。

出现这种情况的原因主要是聚乙烯醇纤维的空间交织作用相当于给试件施加了很大的围压^[11],并且围压随竖向应变的增加而不断增强;其次是纤维的摩擦加筋作用,在试件的变形过程中,聚乙烯醇纤维承担了土样在荷载作用下发生变形产生的部分拉应力,从而有效阻碍了裂缝的进一步发展,增强了土的抗变形能力。此外,从试件的整个破坏过程看,即使发生较大的竖向应变,加筋土试件依然能够保持

较好的整体性,不会出现整体破坏现象。

可见,聚乙烯醇纤维加筋土可以一定程度上改善上海黏土的抗变形性能,对控制和减小地基土的变形具有重要的工程意义。

4 结 语

通过对不同加筋率下聚乙烯醇纤维加筋土的直剪慢剪和无侧限抗压强度试验,利用 Origin8.5 软件,研究分析了聚乙烯醇纤维掺入上海黏土后对抗剪强度、抗压强度、黏聚力和内摩擦角的影响,结论如下:

- (1) 上海黏土中掺入聚乙烯醇纤维,可以有效提高上海黏土的抗剪强度、无侧限抗压强度和抗变形能力。
- (2) 直剪慢剪试验的最佳加筋率为 1.0%,无侧限抗压强度试验的最佳加筋率为 0.8%。
- (3) 直剪慢剪试验中,当垂直压力为 50 kPa 时,应力应变曲线呈现应力 - 应变软化型;垂直压力为 100、150 和 200 kPa 时,应力应变曲线呈现应力 - 应变硬化型。最大抗剪强度与残余强度分别比素土提高了 73.7% 和 143.1%。对提高土体的延性起到了一定的作用。
- (4) 直剪慢剪试验中,总体上黏聚力有明显增加,内摩擦角基本没有变化,最佳加筋率处黏聚力提高了 55.6%。
- (5) 无侧限抗压强度随着加筋率增大呈现先增大后减小趋势,当加筋率为 0.8% 时,抗压强度达到最大值,比素土提高了 49.5%;应力应变曲线表现为应变软化型,但残余强度较大,最大残余强度比素土提高了 187.5%。

(下转第 191 页)

5 结 语

对在役钢筋混凝土桥梁进行可靠度评估,寿命预测中,抗力是可靠度计算的重要因素,建立抗力模型至关重要。围绕这一问题,本文主要解决了以下问题:

(1)总结了影响钢筋混凝土桥梁抗力的3大因素。分析了各因素随时间的变化规律,分析中考虑了钢筋锈蚀引起的强度的降低。

(2)建立了钢筋混凝土桥梁抗力随时间衰减的模型,模型中的计算模式不定性参数引用了更符合在役结构基于纤维模型的参数。

(3)以所建模型为基础,建立了某在役钢筋混凝土简支T梁桥弯曲抗力随时间衰减模型,计算出了两种混凝土强度下不同年份的弯曲抗力均值与标准差,所求结果符合结构的衰减规律。

(4)本文所建模型可为类似的抗力模型的建立提供参考,也为钢筋混凝土结构可靠性评估、寿命预测打下基础。

本文只考虑了一般大气环境下钢筋混凝土桥梁的衰减,腐蚀环境下钢筋混凝土桥梁的衰减和预应力混凝土桥梁的衰减是以后进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 闫磊. 服役期砼桥梁加固前后的可靠度研究[D]. 陕西:长安大学, 2010, 2-3.
- [2] 张建仁, 秦权. 现有混凝土桥梁的时变可靠度分析[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 90-95.
- [3] 牛荻涛, 陈亦奇. 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命分

析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1995, 27(4): 365-369.

- [4] 李广慧, 杜朝, 蒋晓东. 在役建筑结构的剩余寿命预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 1999, 20(3): 6-9.
- [5] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 15-20.
- [6] 彭建新, 张建仁, 张克波, 等. 锈蚀RC桥梁弯曲抗力时变概率模型与试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 125-131.
- [7] 李运生, 张彦玲. 在役公路钢筋混凝土梁剩余寿命估算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2003, (1): 13-16.
- [8] 王晓明, 石雪飞, 阮欣. 在役梁桥弯曲抗力概率模型的确定方法[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 51-55.
- [9] Stewart M G. Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams [J]. Structural Safety, 2009, 31(1): 19-30.
- [10] Coronelli D, Gambarova P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(8): 1214-1224.
- [11] 中华人民共和国交通部. GB/T50283-1999. 公路工程施工结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [12] 石雪飞, 王晓明, 阮欣, 等. 考虑空间变异性的在役钢筋混凝土梁桥失效概率评估[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 74-79.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG D62-2004. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范. [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 张树仁. 桥梁设计规范学习与应用讲评[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. 26-27.

(上接第185页)

参考文献:

- [1] 李晓. 上海地区晚新生代地层划分与沉积环境演化[J]. 上海地质, 2009(1): 1-7.
- [2] 周学明, 袁良英, 蔡坚强, 等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质, 2005(4): 6-9+61.
- [3] 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(增2): 3923-3929.
- [4] Prabakar J, Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(2): 123-131.
- [5] 王伟, 王中华, 曾媛, 等. 聚丙烯纤维复合土抗裂补强特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 703-708.
- [6] 姜睿, 董香军, 刘鑫. 聚乙烯醇纤维高强混凝土的配制及基

本力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(9): 106-110.

- [7] 周霖. 聚乙烯醇纤维在混凝土中的应用[J]. 四川纺织科技, 2003(3): 27-29.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [9] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 610-614.
- [10] 张旭东, 战永亮, 张艳美, 等. 纤维土强度特性的试验研究[J]. 路基工程, 2001(1): 36-38.
- [11] Qu Jili, Li Chencai, Liu Baoshi, et al. Effect of random inclusion of wheat straw fibers on shear strength characteristics of Shanghai cohesive soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(2): 511-518.