

聚丙烯纤维加筋淤泥的实验研究

王艳芳¹, 周 锋², 蔡燕燕³, 薛 鹏³

(1. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 水利部太湖流域管理局, 上海 200434;
3. 华侨大学岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

摘 要:将河道底泥清淤, 对除完杂质的“出泥”拌入不同长度和不同掺量的聚丙烯纤维, 进行直接剪切和单向压缩实验, 以研究聚丙烯纤维对“出泥”力学性质的改良程度。据直接剪切实验可知: 土体黏聚力受纤维掺量和纤维长度的影响较为显著, 内摩擦角随纤维掺量和纤维长度变化并不特别明显; 当聚丙烯纤维长度为 12 mm、掺量为 1.5% 时, “出泥”剪切强度提高最明显。当土体含水率为 55% 时, 土体黏聚力随纤维掺量上升; 当土体含水率为 80% 时, 纤维掺量对土体的黏聚力提高不明显。据不同含水率纤维土的压缩实验可知: 聚丙烯纤维的拌入对土体压缩指标的影响不是特别明显。说明要充分发挥纤维的补强加筋作用, 土体含水率不能过高。

关键词:聚丙烯纤维; 掺量; 长度; 出泥; 黏聚力; 剪切强度

中图分类号: TU4

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)03-0073-06

Study on the Tests of Polypropylene Fiber-reinforced Sludge

WANG Yan-fang¹, ZHOU Feng², CAI Yan-yan³, XUE Peng³

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China; 3. Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The river sludge is cleaned and purified, and after removing impurities the “outlet mud” is mixed with polypropylene fibers of different lengths and contents. Direct shear and unidirectional compression tests are carried out in order to study the improvement degree of mechanical properties of “outlet mud” by polypropylene fibers. According to the direct shear test, the soil cohesion force is significantly affected by fiber content and fiber length, while the internal friction angle does not change significantly with fiber content and fiber length. When the length of polypropylene fiber is 12 mm and the fiber content is 1.5%, the shear strength of “outlet mud” is enhanced most obviously. When the soil moisture content is 55%, the soil cohesion force increases obviously with the fiber content, and when the soil moisture content is 80%, the cohesion force to the soil body does not increase significantly with the fiber content. According to the compression test result of fiber soils with different moisture content, it is found that the addition of polypropylene fibers to “outlet mud” has no obvious influence on the soil compression index. It shows that to give full play to the reinforcing effect of fiber, the soil moisture content cannot be too high.

Key words: polypropylene fiber; content; length; outlet mud; cohesion force; shear strength

河湖每年会产生大量淤泥, 导致河湖淤塞。为改善这一状况, 保证河湖正常的泄洪和通行能力, 提高河湖水质, 我国正逐步开展大范围的湖泊疏浚和清淤工程^[1-3]。以往疏浚泥大多只能废弃或以倾倒入其

收稿日期: 2021-07-11

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51908278); 国家自然科学基金面上项目(51978292); 江苏省高校自然科学基金面上项目(19KJD410002); 金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-202017)

作者简介: 王艳芳(1983—), 女, 湖北荆州人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程基础理论研究。

他附近水域的方式进行处理,不经济也不环保。随着吹填工程的出现,这些疏浚泥可通过脱水—固结—一体化技术进行初步处理,成为工程上能使用的无污染的地基土^[3-6]。但往往这些地基土的承载力和抗剪强度并不高,其力学性质在工程实际应用中需要进一步改良。

将一定量的纤维拌入一些低强度土体中,纤维能对土体起到三维包裹加筋作用,明显改良土体力学性质,提高抗剪强度,减少竖向和侧向变形^[7-9]。目前,关于纤维加筋的砂土、软土、黄土、膨胀土等力学性状的研究成果颇多^[10-15]。已有研究表明,影响纤维对土体力学性状改良程度的 2 个主要因素为纤维长度和纤维掺量。聚丙烯纤维是土体纤维加筋技术中比较常见的柔性加筋材料之一,具有较高的强度,可以完全分散地、均匀地拌和在土中。本文选用聚丙烯纤维作为加筋材料,通过掺入不同长度和不同掺量的纤维,研究纤维对清污后的高含水量淤泥力学性质的改良效果,并对纤维拌和淤泥进行直接剪切实验和单向压缩实验,以期了解纤维对高含水量淤泥的力学补强机理。

1 疏浚泥脱水—固结—清污处理

1.1 脱水—固结—清污处理技术

一般来说,未处理的河道疏浚泥中含有大量的砂砾。取城市河道疏浚泥,并使用脱水—固结—一体化技术按顺序进行杂质分离、砂分离和泥水分离,具体流程为:滚筛除杂、旋流除砂、搅拌絮凝、椭圆压滤等。本文使用的淤泥脱水固结一体化处理流程及设备如图 1 所示^[16-17]。

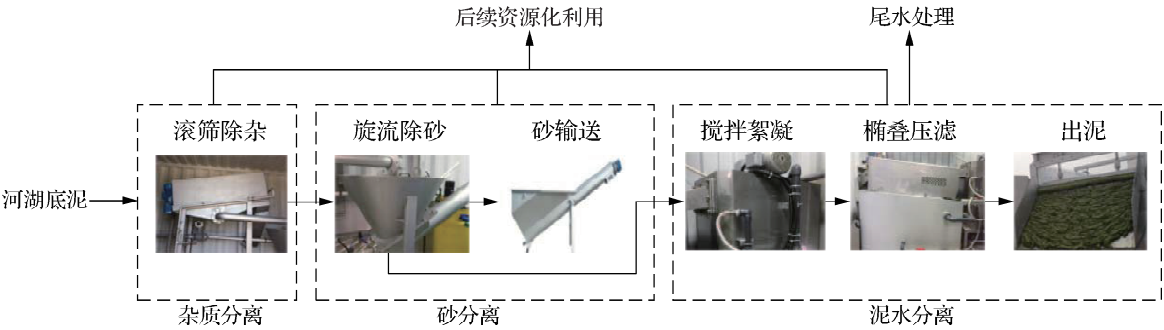


图 1 淤泥脱水固结一体化处理流程及设备

1.2 “出泥”物理力学参数

泥水分离脱水后的剩余淤泥(俗称“出泥”)可以进行资源再利用,常见形式有淤泥堆肥作为绿化土及固化处理后作为路基填方土等。本实验使用的“出泥”及其基本物理力学参数分别如图 2 及表 1 所示。由表 1 可知,“出泥”抗剪强度低、承载力低,用作路基填土还需要进一步增强力学性质。



图 2 处理后的城市河道疏浚泥(“出泥”)



图 3 实验用的聚丙烯纤维

表 1 “出泥”的物理力学参数

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	比重 G_s	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩系数 a/MPa^{-1}	孔隙比 e
1.54	55	2.55	3.38	0.9	0.808	1.556

2 “出泥”力学性质改良方案

2.1 聚丙烯纤维物理力学参数

本实验采用的聚丙烯纤维为束状单丝纤维(图 3),其物理力学参数如表 2 所示,低温 50 ℃烘干聚丙烯纤维。

表 2 聚丙烯纤维的物理力学参数

类型	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	直径/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	熔点/ ℃	燃点/ ℃	含湿度/ %	断裂延伸 率/%	分散性
束状单丝	0.91	0.048	>400	>3 500	160	580	<0.1	10	极好

2.2 实验方案

先用鼓风机强力吹散束状纤维,再用手将束状纤维捻成单丝状,均匀撒入干燥土体中。纤维拌入方法为:一层干土均匀撒一层纤维,直至将纤维完全分散地掺入土体中。最后加水拌和均匀,静置土样 24 h 备用。掺入聚丙烯纤维的“出泥”视为具有各向同性。

将 5 mm 长的聚丙烯纤维与“出泥”充分拌和,并将聚丙烯纤维掺入量为 0.2%、0.5%、1.0%、1.5%、2%和 5%的土样分别标记为 5-a、5-b、5-c、5-d、5-e 和 5-f;同理,掺入不同掺入量的 12 mm 纤维时,标记为 12-a~12-f;掺入不同掺量的 20 mm 纤维时,标记为 20-a~20-f。

直剪实验和单向压缩实验的制样尺寸均为直径 63.1 mm、高度 20 mm。

3 直剪实验结果与分析

3.1 不同掺和情况下纤维土的剪切强度

图 4 为 5 mm、12 mm 和 20 mm 聚丙烯纤维在不同掺量时,土体剪切强度 τ 随垂直压力 σ (50、100 和 150 kPa)变化的曲线。图 4(a)、4(b)、4(c)的对比表明,纤维掺量对剪切强度的影响要大于纤维长度对剪切强度的影响。不论纤维长度为多少,在掺量等于 1.5%情况下,纤维土的剪切强度曲线均高于其他掺量的曲线;另外,在掺量为 1.5%情况下,纤维长度为 12 mm 时的剪切强度要略高于 5 mm、20 mm 时的,纤维土的 c 值可提高到 37.13 kPa, φ 值可提高到 7.1°,远好于表 1 中的原始“出泥”的物理力学参数。

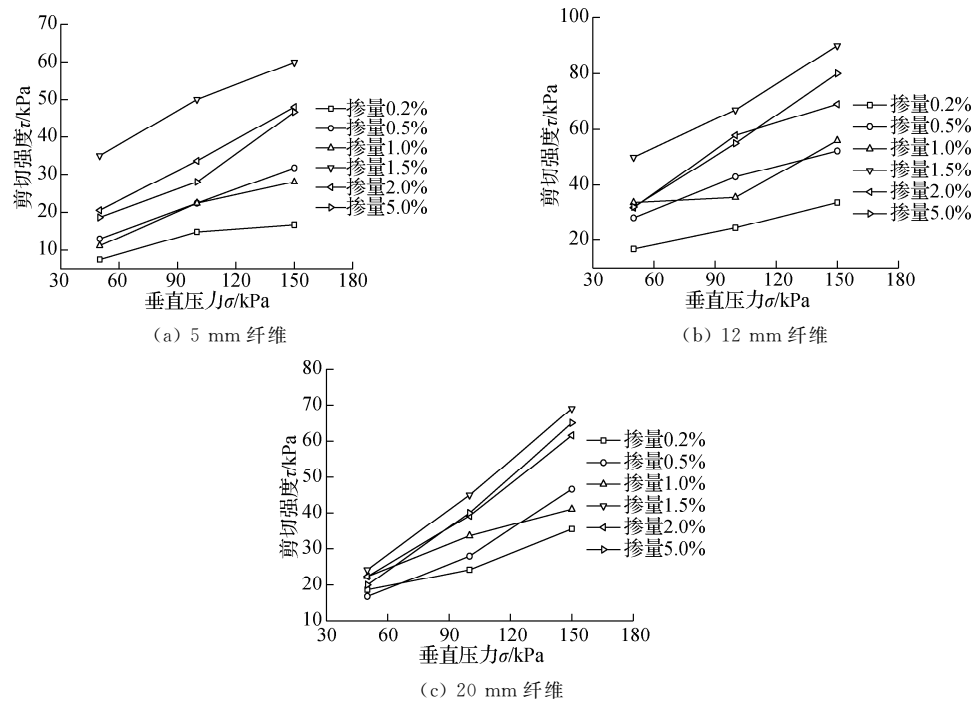


图 4 不同掺和情况下纤维土的剪切强度

3.2 纤维掺量对黏聚力的影响

由图 5 可知,纤维掺量对纤维土黏聚力影响较大。随着纤维掺量的增加,加筋土样的黏聚力整体呈先增加后减少的变化趋势。当纤维掺量 $\leq 1.5\%$ 时,黏聚力呈增大趋势;纤维掺量 $> 1.5\%$ 时,黏聚力呈下降趋势。说明纤维掺入并不是越多越好,而是存在一个最佳掺量。本实验中,在纤维长度为 12 mm、掺量为 1.5%时,黏聚力取得最大值,为 37.13 kPa。因此,对于本实验的“出泥”而言,最佳掺量值可取 1.5%。

当纤维掺量过低时,少量的纤维在土体内部无法形成有效的网状结构。纤维掺量逐渐增多,纤维才开始交织,从而形成密集的纤维网,对土体起到网状交织的加筋作用,增强了土体的力学性质。当纤维掺入过多时,纤维与土体充分拌和难度增大,纤维和土体颗粒无法有效粘结,大部分纤维成团地分布在土体周围,网状交织的拉筋作用不能充分体现,故黏聚力降低。

3.3 纤维长度对黏聚力的影响

从图 5 还可看出,纤维长度对黏聚力的影响不如纤维掺量明显。当纤维长度等于 12 mm 时,不同掺入量的土体的黏聚力均取得峰值,说明纤维的拌入长度存在最佳值 12 mm。直剪实验过程中土体处于剪切状态,纤维的存在增强了土体的抗剪强度,故土体在被剪切破坏时,土体中的纤维应处于受拉状态。短纤维在土体中易被拉动,纤维长度不足,对土体的包裹力不够,土体与纤维相互作用力较小,纤维加筋效果不良。当纤维长度增加时,纤维在土中的“锚固”长度变大,对土体包裹性更好,此时纤维在界面网织作用力下,不会被轻易拔出,从而增加了土体的抗剪强度。当纤维过长时,细长纤维分散效果降低,会在土体中缠绕打结形成团聚体。缠绕的纤维团聚体有“微弹簧”效应,影响土体在外力作用下进一步被挤压密实,导致土体黏聚力降低。

3.4 纤维掺量对内摩擦角的影响

图 6 为内摩擦角随纤维掺量变化的曲线。由图 6 可知,随着纤维掺量增加,内摩擦角整体上呈现增加趋势,但增加不明显,个别点较离散,说明纤维的拌入对土体内摩擦角的影响并不显著,这与其他相关文献的研究结果^[18-20]基本一致。究其原因,纤维对土体力学性质的改良主要体现在三维空间的网状交织拉筋作用,对黏聚力有良好的补强作用,在增加颗粒相互错动的摩阻力方面不会有太大影响,甚至有的文献报道纤维起到的是润滑的作用^[21],故本文实验得出内摩擦角随纤维掺量的增加呈不明显增加趋势的结论亦是合理的。

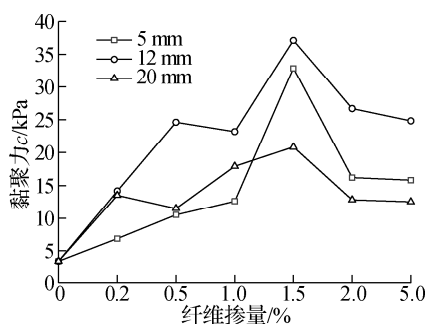


图 5 聚丙烯纤维掺量与黏聚力的关系曲线

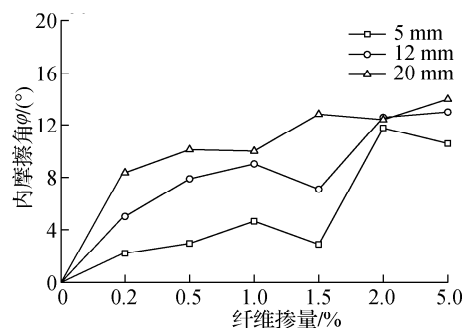


图 6 聚丙烯纤维掺量与内摩擦角的关系曲线

3.5 纤维长度对内摩擦角的影响

从图 6 还可看出,在纤维掺量相同时内摩擦角随纤维长度增加而小幅度增加,说明纤维长度变化对内摩擦角的影响不十分明显。分析原因,聚丙烯纤维为光滑纤维,纤维长度对增强土颗粒相互错动的摩阻力十分有限,而土体内摩擦角主要与土颗粒粗糙度和土体压实度有关,纤维长度对两者影响不大,故纤维长度对内摩擦角不会有太大影响。

3.6 含水率对黏聚力的影响

为研究含水率对纤维土力学性质的影响,配制含水率为 80% 和 55% 的淤泥土,拌入不同长度和不同掺量的纤维,分析土体初始含水率对纤维土黏聚力的影响。图 7、图 8 分别为纤维长度 5 mm、12 mm 情

况下,纤维土黏聚力随纤维掺量变化的曲线。当土体含水率为80%时,黏聚力随纤维掺量的增加,提高不明显,说明含水率过高时,土体近似流体状态,纤维的网织加筋补强作用无法充分发挥。当土体含水率为55%时,黏聚力呈较明显上升趋势,纤维的补强作用有较好的体现。

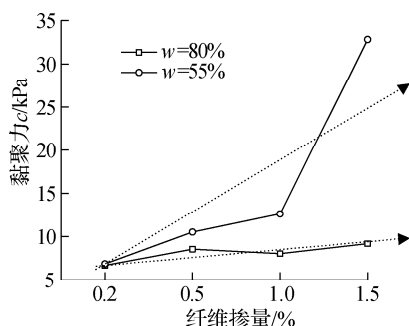


图7 5 mm 纤维土不同含水率时的黏聚力曲线

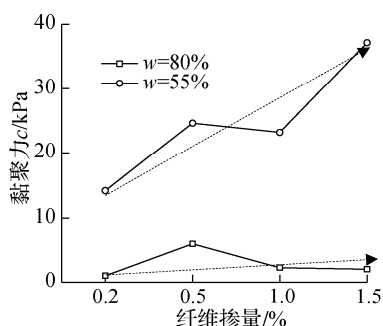


图8 12 mm 纤维土不同含水率时的黏聚力曲线

4 单向压缩实验结果与分析

图9为不同纤维长度下压缩系数随纤维掺量变化的曲线。由图9可知:在纤维掺量为0.2%时纤维土压缩系数最小为 0.65 MPa^{-1} ,比“出泥”的压缩系数 0.808 MPa^{-1} 减少了20%,说明对土体抗压强度而言,聚丙烯纤维的最佳掺量为0.2%。当纤维掺量 $>0.2\%$ 时,纤维的拌入对压缩系数的影响并不大。原因是从补强机制来说,纤维对土体的改良主要体现在拉筋作用,对“出泥”抗剪强度有一定的增强作用,但对抗压强度并不会太大影响。从图9还可以看出,相同纤维掺量下,纤维长度的变化对压缩系数的影响不明显。由此可知纤维掺量对压缩强度的影响要大于纤维长度对压缩强度的影响。

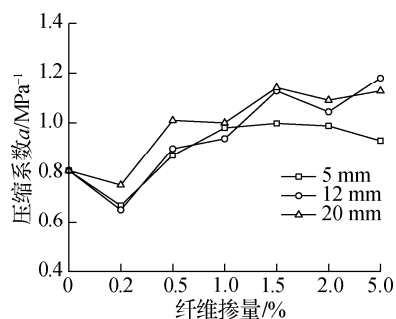


图9 压缩系数与聚丙烯纤维掺量的关系曲线

5 结论

本文使用聚丙烯纤维改良河道“出泥”。将河道疏浚泥先进行清理,然后对除完杂质的“出泥”拌入不同长度和不同掺量的纤维,并进行纤维土的直接剪切实验和单向压缩实验,讨论聚丙烯纤维对“出泥”力学性质改良的可行性及加筋机理。得出以下主要结论:

1)依据直接剪切实验结果,土体黏聚力受纤维掺量和纤维长度的影响较为显著。纤维掺量 $\leq 1.5\%$ 时,黏聚力随掺量呈增大趋势;纤维掺量 $>1.5\%$ 时,黏聚力呈下降趋势。内摩擦角随纤维掺量和纤维长度变化不明显。当纤维长度为12 mm、掺量为1.5%时,“出泥”剪切强度提高最为明显。

2)通过对比不同含水率下的加筋纤维土的黏聚力可知:当土体含水率为55%时,土体黏聚力随纤维掺量的增长呈较明显的上升趋势,纤维补强作用有较好的体现;当土体含水率为80%时,纤维对土体的黏聚力提高不明显。说明土体初始含水率过高时,纤维的加筋效果发挥不出来。

3)依据单向压缩实验结果,聚丙烯纤维长度和掺量对压缩系数的影响均不是特别明显。纤维的拌入对剪切强度的影响大于对压缩强度的影响。由直剪实验和压缩实验中纤维掺量及纤维长度对土体的影响可知,纤维掺量对土体性状的改良效果要优于纤维长度对土体性状的改良效果。

参考文献:

- [1] 敖翔. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术[J]. 中国水运, 2019(8): 81-82
- [2] 徐晓敏, 王俊广. 城市河道清淤疏浚环境保护技术措施探索与实践[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 51-53

- [3] 冯霞. 城市污水污泥深度脱水技术研究[J]. 科技创新与应用, 2021(12):140-142
- [4] 吴军, 明华军, 谈云志, 等. 污泥脱水方法及其物理力学效应[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017(1):268-273
- [5] 王宇霞, 冯云. “淤泥脱水固结一体化”技术在滇池底泥疏浚工程中的应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(20):127-129
- [6] 何强, 吉芳英, 李家杰. 污泥处理处置及资源化途径与新技术[J]. 给水排水, 2016, 52(2):1-3
- [7] 杨爱武, 胡垚, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4439-4449
- [8] GUO X P, ZHANG H, LIU L L. Planar geosynthetic-reinforced soil foundations: a review[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(12):1-18
- [9] KOLATHAYAR S, ARAVIND C A, SHUKLA S K. Performance assessment of areca leaf grids for soil reinforcement applications[J]. Journal of Natural Fibers, 2021, 18(6):813-822
- [10] TANG H, LI H H, DUAN Z, et al. Direct shear creep characteristics and microstructure of fiber-reinforced soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2(21):1-13
- [11] ZHAO Y Y, LING X Z, GONG W G, et al. Mechanical properties of fiber-reinforced soil under triaxial compression and parameter determination based on the duncan-chang model[J]. Applied Sciences, 2020, 10(24):9033-9043
- [12] WANG Y, LIU J, SHAO Y, et al. Water-induced changes in strength characteristics of polyurethane polymer and polypropylene fiber reinforced sand[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(6):1829-1842
- [13] SINGH P, BOORA A, GUPTA A K. Geotechnical characteristics of clayey soil admixed with municipal solid waste incineration ash, cement and polypropylene fiber[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(4):781-790
- [14] HOU T S, LIU J L, LUO Y S, et al. Triaxial compression test on consolidated undrained shear strength characteristics of fiber reinforced soil[J]. Soils and Rocks, 2020, 43(1):361-372
- [15] 张志韬, 陈生水, 吉恩跃, 等. 聚丙烯纤维加筋砾质黏土的拉伸断裂特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10):2713-2721
- [16] KAMARUDDIN H, ANGGRAINI N. Modified natural fiber on soil stabilization with lime and alkaline activation treated marine clay[J]. International Journal of Geomate, 2019, 16(58):69-75
- [17] ABOU D A, SADEK S, NAJJAR S, et al. Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 10(3):263-270
- [18] 沈飞凡, 孔玉侠, 王慧娟. 聚丙烯纤维膨润土的试验研究和机制分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2018, 40(3):55-60
- [19] 詹锐生. 高压压滤脱水固结一体化处理河道淤泥的技术应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019
- [20] 骆文广, 杨国录, 陆晶, 等. 武汉市墨水湖疏浚泥浆脱水固结一体化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017(2):187-192
- [21] 李沛达. 纤维加筋土承载比试验研究及路用工况分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020

(责任编辑: 湛江)