

基于再生轮胎聚合物纤维和玻璃纤维的 沿河软基固化研究^{*}

史誉州¹, 郑晓燕², 房世龙¹

(1. 江苏航运职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南通 226000;

2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210018)

摘要: 针对地基软黏土, 研究利用再生轮胎聚合物纤维(RTPF)和玻璃纤维(GF)改良对软黏土物理力学性质的影响。制备不同纤维类型、纤维尺寸、纤维掺量的改良土试样, 进行击实、无侧限抗压强度(UCS)和直剪试验, 分析最大干密度、UCS、黏聚力、内摩擦角等指标的变化规律, 探讨合理的改良配比方案。结果表明, RTPF和GF的掺入使改良土的最大干密度降低, 而最优含水率有所增加; 纤维的掺入主要是通过提高黏聚力改善软黏土的抗剪强度, 对于RTPF、GF都存在临界掺量, 分别为0.5%、1.0%, 超过这个掺量之后纤维的增加对强度不利; 尽管RTPF与黏土的黏结性可能优于GF, 但其改良效果却低于GF, 这是由于RTPF的直径较大、长径比较小, 纤维尺寸也是固化时应考虑的重要因素。

关键词: 软黏土; 纤维改良; 再生轮胎聚合物纤维; 玻璃纤维; 直剪试验; 强度

中图分类号: U 654; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0026-07

River bank soft foundation reinforcement based on recycled tire polymer fiber and glass fiber

SHI Yu-zhou¹, ZHENG Xiao-yan², FANG Shi-long¹

(1. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226000, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210018, China)

Abstract: Aiming at the soft clay for foundation, we study the effects of recycled tire polymer fiber(RTPF) and glass fiber(GF) on the physical and mechanical properties of soft clay. We prepare the modified soil samples with different fiber types, fiber sizes and fiber contents, carry out the compaction test, unconfined compressive strength(UCS) test and direct shear test, analyze the variation rules of the indexes such as maximum dry density, UCS, cohesion and internal friction angle, and discuss the reasonable improved proportioning scheme. The results show that the incorporation of RTPF and GF decreases the maximum dry density, while the optimal water content increases. The incorporation of fiber is mainly to improve the shear strength of soft clay by increasing cohesion. There are critical fiber contents for RTPF and GF, which are 0.5% and 1.0% respectively. Beyond the critical content, the increase of fiber is unfavorable to the strength. Although RTPF may have better adhesion to clay than GF, its improvement effect is lower than that of GF because of larger diameter and smaller length-diameter ratio. Fiber size is also considered as an important factor for solidification.

Keywords: soft clay; fiber reinforcement; recycled tire polymer fiber; glass fiber; direct shear test; strength

收稿日期: 2021-09-08

***基金项目:** 南通市科技计划项目(MSZ21017); 江苏航运职业技术学院科技类项目(HYKY/2020B04); 南通市科技计划项目(MSZ2020021)

作者简介: 史誉州(1987—), 男, 硕士, 讲师, 从事水运岩土工程及结构工程方面的研究。

我国长江、黄河中下游沿河岸区广泛分布着软土层，在航道整治过程中往往先进行沿河软基处治再修筑护岸，软基处治问题一直是水运工程岩土领域的重要研究内容之一^[1-2]。改良换填法是一种适应性较广的软基加固技术，其目的是提高强度和减少沉降，改善地基承载力和渗透性。常用的改良材料为水泥^[3]、石灰^[4]、火山灰^[5]等，但水泥、石灰的使用无疑会加大建设成本，而且生产和使用过程中都对环境造成一定的污染。

在过去的几十年里，一直将工业废弃物进行循环再生利用，从而对沿河软基加固引起了广泛的关注，为达到“变废为宝”的效果，许多学者开展了相关研究工作。Ta'negonbadir^[6]将造纸工业副产品的木质素加入软黏土中，发现软黏土刚度和无侧限抗压强度 (unconfined compressive strength, UCS) 有明显增加；Yadav 等^[7]利用 NaOH 处理过的椰子纤维、火电厂产生的池灰以及水泥进行黏土改良，通过试验研究发现其劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加而先增加后减小，在纤维掺量为 1% 时强度达到最大值；杜思勇等^[8]将不同掺量、不同级配组合的建筑垃圾掺入膨胀土后进行室内试验，发现一定掺量的建筑垃圾可显著改善土的物理力学、膨胀性能，建筑垃圾改良膨胀土的力学特性、胀缩性取决于建筑垃圾的掺量和土的初始含水率大小；汪艺等^[9]提出微生物橡胶颗粒改良土的方法，重点对比研究橡胶含量、围压对混合土动剪切模量和等效阻尼比的影响，发现当橡胶含量在一定范围 (3% 左右) 内，能够提高混合土的无侧限抗压强度；李国勋等^[10]从纤维长径比角度研究了软基纤维固化效果，指出对于聚丙烯纤维而言，长径比在 600~650 时固化效果最好。

再生轮胎聚合物纤维 (recycled tire polymer fiber, RTPF) 属于废旧轮胎副产品之一，这些聚合物纤维连同钢丝，可为轮胎提供足够的抗拉强度；而玻璃纤维 (glass fiber, GF) 是一种性能优异的无机非金属材料，种类繁多，优点是绝缘性好、耐热性强、抗腐蚀性好、机械强度高^[11]。上述两种

材料在改良土方面都有一定的应用潜力，但目前对其改良土力学性能及影响因素的研究报道较少。鉴于此，本文针对地基软黏土，制备了不同纤维类型 (RTPF 和 GF)、纤维长度、纤维掺量的改良土试样，开展击实、UCS、直剪试验，分析最大干密度、UCS、黏聚力、内摩擦角等指标的变化规律，探讨合理的 RTPF 和 GF 改良配比方案，以期为沿河软基固化工程提供参考。

1 试验材料

某水运堤防工程位于浙江省北部的宁绍平原地区，河网密集，属典型的湖沼积平原，沿河软基十分发育，软黏土厚度 15.8~26.1 m，含水率高、承载力低，部分位置存在淤泥、粉土、粉质黏土交错互层。以往在修筑堤防前，首先将地基软黏土挖除，换填土石混合透水性材料处理，但现场附近废弃场地难以落实，通过破坏山体而取得的土石混合料资源也十分紧缺。因此，计划将现场的软黏土固化后进行换填。为了研究再生轮胎纤维和玻璃纤维对该软黏土的固化规律，在软基顶面以下 2~3 m 取土，并将其转移至实验室进行试验，其级配曲线和基础物理性质分别见图 1、表 1。该软黏土颗粒粒径较小，小于 0.075 mm 粒径的颗粒占 95% 以上。利用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 对矿物组成进行分析的结果见图 2，其黏土矿物包括蒙脱石和伊利石，含量占 18.3%，这是其塑性指数 I_p 较高的原因，方解石和石英也是该软黏土层中的典型矿物。

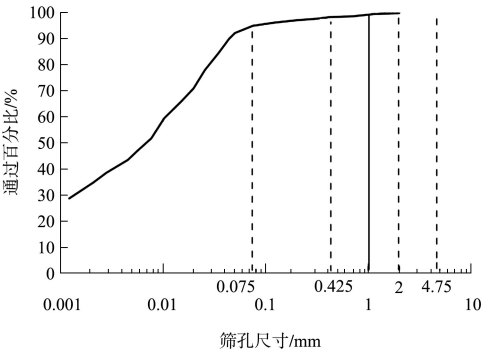


图 1 软黏土级配曲线

表 1 软黏土的基本物理性质

指标	相对密度	最大干密度/(t·m ⁻³)	最优含水率/%	<0.075 mm 颗粒含量/%	液限 w _L /%	塑性指数 I _p /%	统一土壤分类
数值	2.68	1.75	18.1	93.2	41.8	22.8	低液限黏土

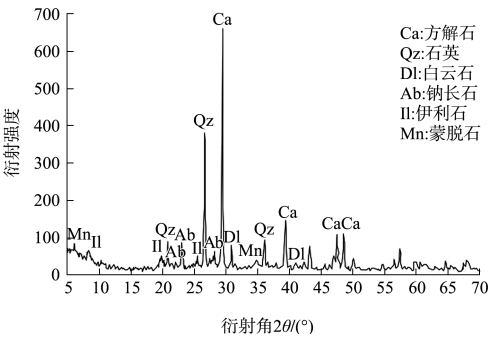


图 2 软黏土的 X 射线衍射谱

本文使用的固化原材料见图 3。其中 RTPF 来自于回收汽车轮胎，每根 RTPF 本身由许多纤细的尼龙聚合物构成，上面附着一些橡胶颗粒；GF 主要成分为 SiO₂，含量超过 50%。



a) RTPF



b) GF

图 3 固化原材料

2 试验方法

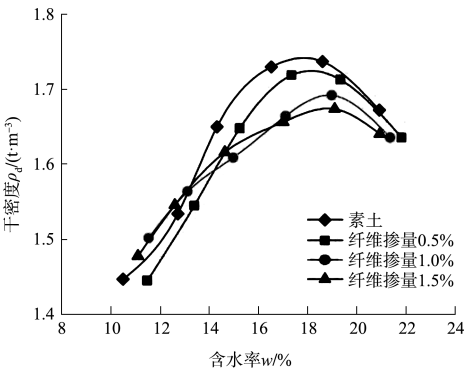
将软黏土在室温下干燥，干燥结块后用橡皮锤敲碎形成散粒状，然后在烘箱中烘 24 h，随后掺入 RTPF 和 GF，将混合物进行充分搅拌，以确保纤维均匀分散在土中。对于本次软黏土改良试验，RTPF 和 GF 分别设置 0.5%、1.0% 和 1.5% 共 3 种掺量，纤维长度 L 设置 5 和 10 mm 两种情况，长度误差在 ± 0.5 mm。RTPF 的长径比分别为 7.2 ($L=5$ mm)、14.4 ($L=10$ mm)，而 GF 长径比分别为 103 ($L=5$ mm)、206 ($L=10$ mm)。

对上述试样开展击实、UCS 和直剪试验，试验过程参照《土工试验规程》^[12]，其中 UCS 和直剪试验，试样压实度选择为 95%，为掌握最不利条件下的强度，试样均为饱和状态。进行直剪试验时法向应力 σ_n 分别设置为 50、100 和 200 kPa，在整个剪切过程中，水平和垂直位移由位移计测量（分辨率为 0.010 和 0.002 mm），施加 σ_n 后以 0.75 mm/min 的速率剪切，水平位移达到 10 mm 时停止剪切。

3 试验结果分析

3.1 密度和含水率的变化

不同配比改良土的压实曲线见图 4。总体上掺入 RTPF 和 GF 使改良土的最大干密度 ρ_{dmax} 降低，最优含水率 w_{opt} 有所增加，而且纤维含量越大，上述作用越明显。以图 4a) 为例，随着 RTPF 掺量由 0% 增加至 0.5%、1.0%、1.5%，最大干密度由 1.74 t/m³ 下降至 1.72、1.69、1.67 t/m³，最优含水率则由 18.1% 增加至 18.5%、19.0%、19.2%。这是由于：1) 改良土中的纤维会阻碍土的压实，导致土骨架中含有更多的孔隙；2) 由于纤维对压实的阻碍，在标准的压实功下为达到最佳的压实效果，需要更多的水分作为“润滑剂”，因而 w_{opt} 较高；3) 纤维的相对密度（分别为 1.16、2.48）比土颗粒（2.68）小，因此掺入纤维导致改良土干密度的降低。同样的规律可见文献[13]。同时无论是 RTPF 还是 GF，纤维长度对压实曲线的影响都不大。



a) $L=5$ mm, RTPF

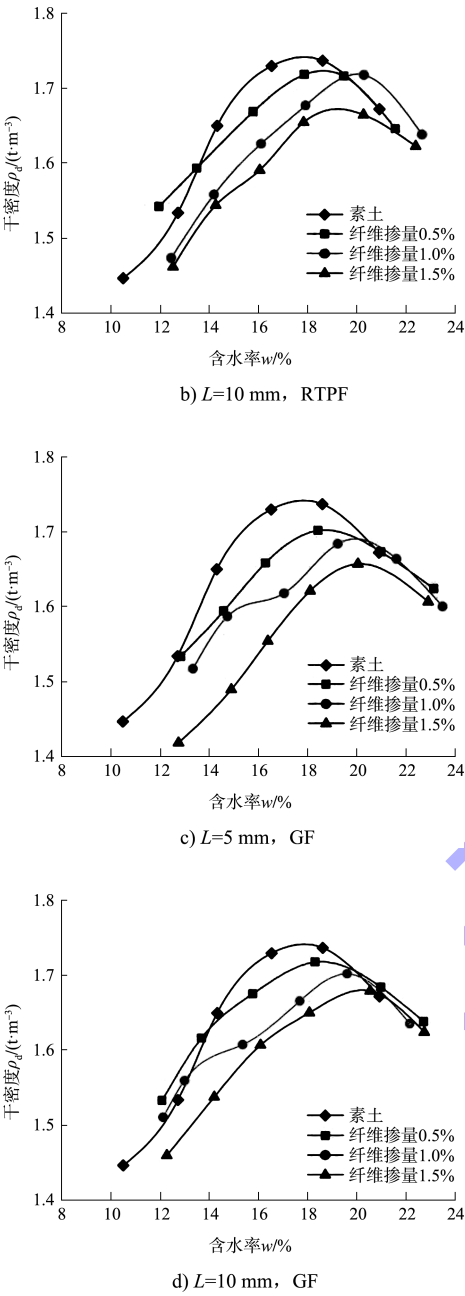
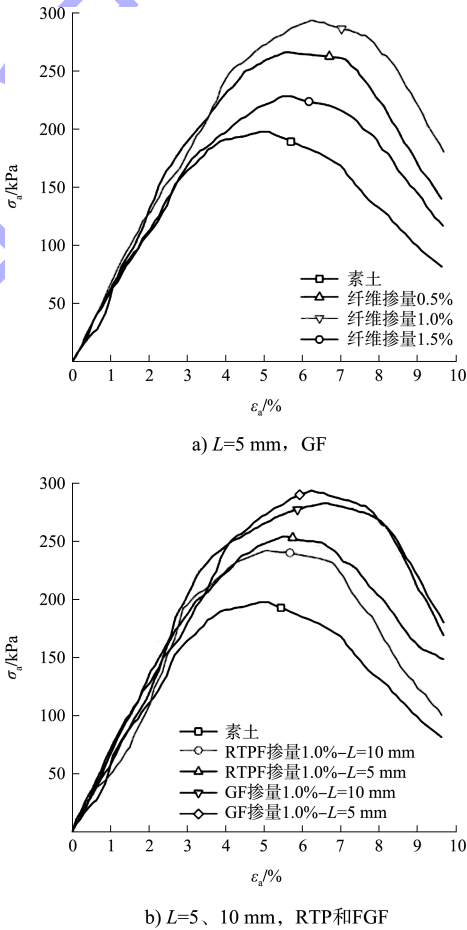


图 4 不同配比改良土的压实曲线

3.2 UCS 变化

改良土 UCS 试验的应力-应变曲线见图 5。值得注意的是, 在达到破坏标准 $\varepsilon_a = 10\%$ 之前, 试样都出现轴向应力峰值, 随后轴向应力呈下降趋势, 这代表了试样的应变软化行为。不论纤维含量、纤维长度和纤维类型, 所有改良土的 σ_a 都较素土有所提高。由图 5a) 可看出, 对于长度为 5 mm 的 GF 改良土, 当 GF 含量为 1% 时, 改良土

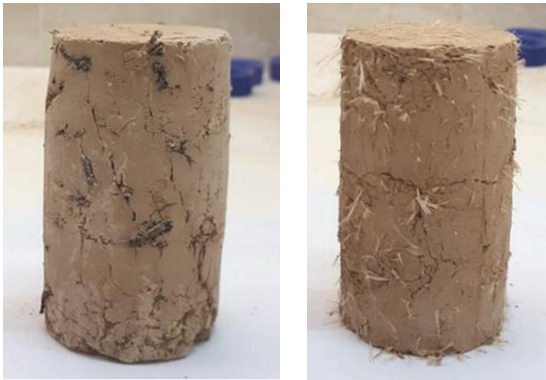
的 UCS 最高为 293.3 kPa, 相当于素土 197 kPa 的 1.5 倍, 而当纤维含量进一步增加至 1.5% 时, UCS 降至 228.4 kPa, 甚至低于 0.5%GF 含量时的改良土, 这说明过多掺入纤维反而对 UCS 不利; 所有曲线在 $\varepsilon_a \approx 2\%$ 之前都是相似的, 表明了在小应变情况下, 纤维的作用还没有发挥; 改良土的应力-应变曲线在达到峰值后, σ_a 缓慢下降, 表明纤维的掺入在一定程度上提高了改良土的延性。由图 5b) 可看出, 在相同的含量和纤维长度下, GF 改良土的 UCS 比 RTPF 改良土高 50 kPa 左右; 而 $L = 5\text{ mm}$ 的纤维改良土的 UCS 略高于 $(10 \sim 12\text{ kPa})L = 10\text{ mm}$ 的纤维改良土。



注: σ_a 、 ε_a 分别为轴向应力、应变。

图 5 UCS 试验的应力-应变曲线

试验后的试样状态见图 6, 经过 UCS 试验的试样虽然有膨胀和裂缝, 但未发生完全开裂, 整体仍维持圆柱体, 无脱落碎块。



a) RTPF改良试样 b) GF改良试样

图 6 UCS 试验后的试样

不同纤维掺量下改良土 UCS 变化情况见图 7。可以更加明显地看出，不论纤维类型和长度，1.5% 纤维掺量下的 UCS 改善效果是最差的，对于 RTPF 改良土，最优纤维含量为 0.5%，而对于 GF 该值为 1.0%，而 5 mm 长的纤维更有助于提高 UCS。

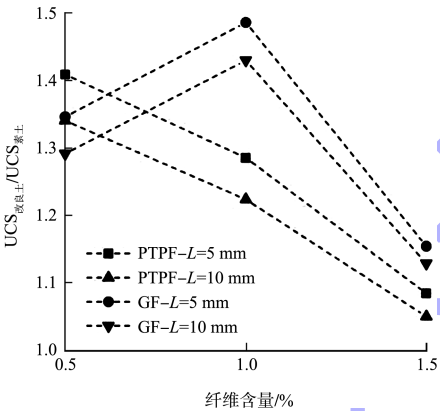


图 7 UCS 改善程度与纤维含量的关系

3.3 抗剪强度变化

线性摩尔-库仑强度模型被认为是描述岩土工程大多数实际问题的理想模型，对于直剪试验，其表述形式为：

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \varphi_p \tag{1}$$

式中： c 为黏聚力； τ_p 为抗剪强度； φ_p 为内摩擦角。

RTPF 和 GF 改良土的抗剪强度包络线及相应的 c 、 φ_p 值见图 8。可以看出，不论纤维的种类和长度，纤维改良土的抗剪强度始终高于素土，内摩擦角和黏聚力都同时增大。由图 8a)、b) 可看出，RTPF 掺量为 0.5% 时，抗剪强度的提升效果最佳；当 $L=5\text{ mm}$ 时，相对于素土，在掺入 0.5% RTPF 条件下 φ_p 、 c 值分别提高 5%、70%；而当 $L=10\text{ mm}$ 时，在掺入 0.5% 的 RTPF 条件下 φ_p 、

c 值分别提高 10%、40%。由图 8c)、d) 可看出，GF 掺量为 1.0% 时，抗剪强度的提升效果最佳；当 $L=5\text{ mm}$ 时，相对于素土，在掺入 1.0% GF 条件下 φ_p 、 c 值分别提高 7%、74%；而当 $L=10\text{ mm}$ 时，在掺入 1.0% GF 条件下 φ_p 、 c 值分别提高 11.4%、66%。由此表明，不论纤维类型如何，纤维加固主要提高软黏土内部黏聚力，而对内摩擦角的影响相对较小。

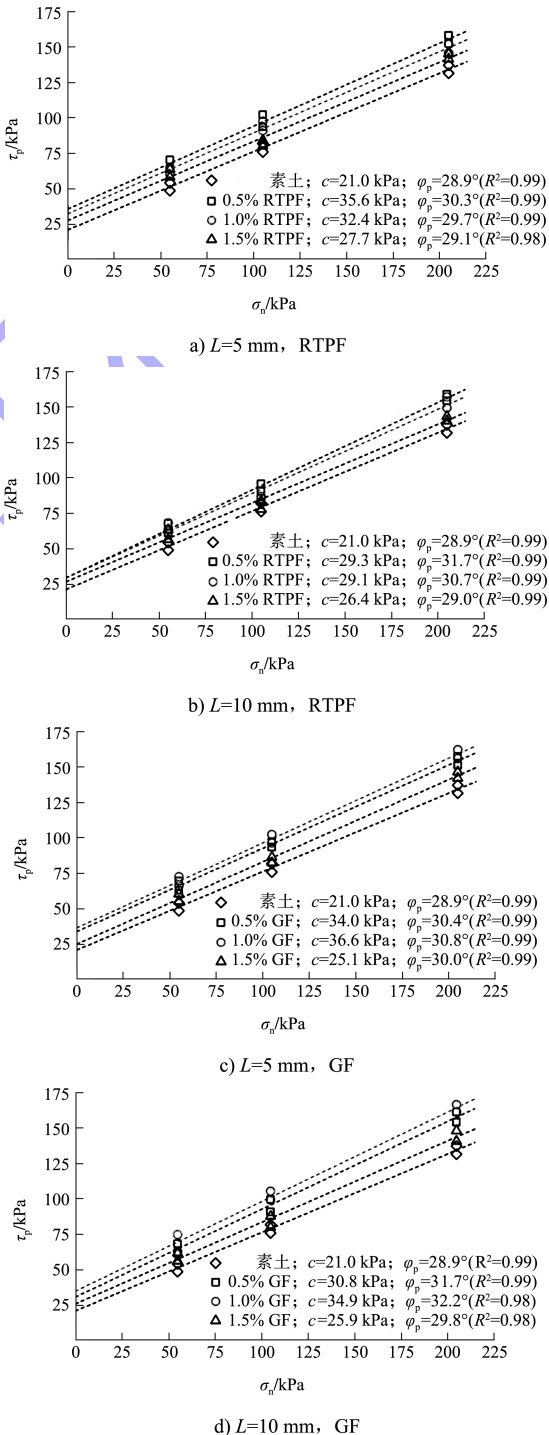
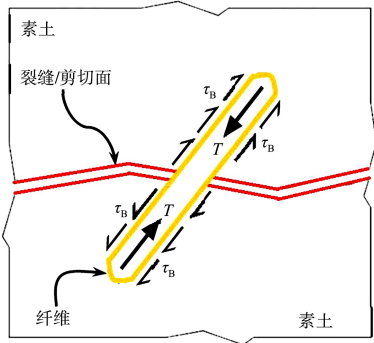


图 8 RTPF 和 GF 改良土的强度包络线

4 探讨

4.1 机理分析

纤维对软黏土的加固作用主要是其抗拉强度的发挥所致(图 9)，当含有纤维的土单元出现裂缝，例如 UCS 试验中的膨胀或在直剪试验中出现剪切面，纤维将被扭曲、拉伸，只要纤维足够长而不被拉出土体，其抗拉强度将发挥作用，使得土在裂缝处仍然有一定连接，从而增强改良土整体的强度。纤维的抗拉强度由纤维与土颗粒之间的摩阻力决定，包含纤维与土颗粒的黏着、摩擦和嵌固作用，这些作用又与纤维类型(表面质地、直径、长度、弹性等)以及围压、压实程度有关。

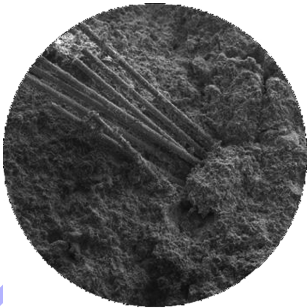


注： τ_B 为纤维与素土接触面的抗剪强度； T 为纤维抗拉强度。

图 9 纤维改良机理

值得指出的是，RTPF 和 GF 的掺量在 1.5% 时，改良土的 UCS 和抗剪强度都最低，这是由于高含量纤维会改变土的结构，影响土颗粒之间的黏结，阻碍其形成统一、连贯、具有一定承载能力的微观结构。此外，在纤维含量较高时，出现纤维结块现象，这对强度有不利影响。RTPF 和 GF 改良土的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图像见图 10。由图 10a)、b) 可看出，GF 直径非常小，很容易嵌入软黏土中，而其表面似乎没有软黏土吸附。相反，由图 10c)、d) 可看出，RTPF 则不是简单地嵌入软黏土，其表面有破碎，这一特征归因于 RTPF 的直径较大，尤其在图 10d) 中软黏土黏附在 RTPF 表面。尽管 RTPF 与黏土的黏结性可能优于 GF，但其改良效

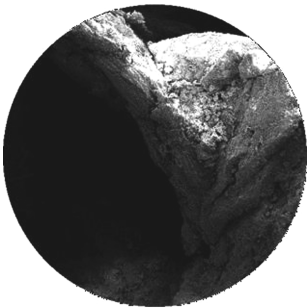
果却低于 GF，这是由于其直径过大所致(对于 $L=5\text{ mm}$ 纤维, GF、RTPF 长径比分别为 7.4、403)。因为直径过大、长径比过小，纤维在土体内不能完全伸展开，不能较好地发挥黏结、摩擦和嵌固作用。



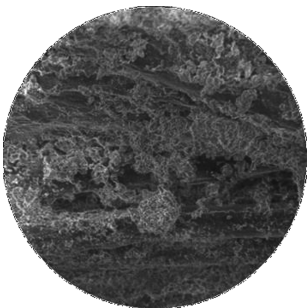
a) GF改良土，放大250倍



b) GF改良土，放大500倍



c) RTPF改良土，放大25倍



d) RTPF改良土，放大500倍

图 10 改良土 SEM 图像

4.2 经济性分析

目前,国内各地均有大量废旧轮胎资源,玻璃纤维的供应也十分充足。以本试验为例,RTPF 的材料成本约 1 000 元/t,考虑土的固化成本 15~25 元/t (RTPF 掺量 0.5%),GF 的材料成本约 2 500 元/t,考虑土的固化成本 40~50 元/t (GF 含量 1.0%),而在当地向外购土换填成本 100~135 元/t。因此,利用 RTPF 和 GF 进行沿河软基固化有助于降低工程成本,具有一定的应用前景。

5 结论

1)总体上 RTPF 和 GF 的掺入使得改良土的最大干密度 ρ_{dmax} 降低,而最优含水率 w_{opt} 有所增加,而且纤维含量越大,上述作用越明显。无论是 RTPF 还是 GF,纤维长度对压实曲线的影响都不大。

2)对于 RTPF 和 GF,都存在临界掺量,分别为 0.5%和 1.0%,超过这个掺量之后,纤维的增加对强度不利。

3)纤维尺寸也是固化时应考虑的重要因素,5 mm 的纤维长度对于 UCS 的提升效果更加明显,如果直径过大、长径比过小,纤维在土体内将不能完全展开,不能较好地发挥黏结、摩擦和嵌固作用。

4)纤维的掺入主要是通过提高黏聚力改善软黏土的抗剪强度,而对内摩擦角的影响相对较小。

5)从微观结构来看,GF 直径非常小,很容易嵌入软黏土中,其表面似乎没有软黏土吸附。尽管 RTPF 与黏土的黏结性可能优于 GF,但其改良效果却低于 GF。

参考文献:

[1] 王学广,李震,康楠,等.改良土换填法与石灰桩法加固

膨胀土边坡比较[J].人民黄河,2019,41(5):129-134.

[2] 冯兴国,朱超,沈阳,等.含水率对水泥-钢渣复合固化疏浚土性能的影响[J].水运工程,2021(7):1-6.

[3] 陈劲松,顾缙琴,盛小涛,等.大坝心墙料分散性及处理措施试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(4):144-150.

[4] 严应佳,樊恒辉,杨秀娟.粉煤灰改性分散性土的工程特性试验研究[J].水力发电学报,2017,36(4):86-94.

[5] 赵高文,樊恒辉,石美,等.基于灰色系统及验证试验的黏性土分散机理分析[J].岩土工程学报,2015,37(S2):186-190.

[6] TA'NEGONBADI B, NOORZAD R. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate [J]. Transportation geotechnics, 2017(12):45-55.

[7] YADAV J S, TIWARI S K. Behaviour of cement stabilized treated coir fibre-reinforced clay pond ash mixtures[J]. Journal of building engineering, 2016(8):131-140.

[8] 杜思勇,张留俊,周志清,等.建筑垃圾改良膨胀土特性试验研究[J].路基工程,2020(3):94-99,113.

[9] 汪艺,童华炜,邱荣康,等.微生物固化橡胶颗粒改良土的力学特性研究[J].工业建筑,2020,50(12):8-14,7.

[10] 李国勋,张艳美,马丁,等.纤维对纳米二氧化硅石灰改良粉土力学性质的影响[J].土木与环境工程学报(中英文版),2020,42(2):37-44.

[11] 姜恒超,李青林,杨志勇,等.玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11):2742-2747.

[12] 南京水利科学研究院.土工试验规程:SL 237—1999 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[13] MIRZABABAEI M, MIRAFTAB M, MOHAMED M, et al. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers[J]. Journal of geotechnical geoenvironmental engineering, 2013, 139(3):483-493.

(本文编辑 王璁)

欢迎投稿 欢迎订阅