

纤维对水玻璃粉煤灰固化体力学性能的影响

张建伟^{1,2}, 尹悦¹, 赵聪聪¹, 王小锯¹, 石磊¹

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南开封 475004;

2. 河南省轨道交通智能建造工程技术中心, 河南开封 475004)

摘要: 为改善水玻璃和粉煤灰固化黄泛区粉土的力学和水理性质, 在改良土中加入不同长度、不同掺量的聚丙烯纤维, 进行无侧限抗压强度试验和水稳性试验, 探究聚丙烯纤维对改良土强度、韧性及水理性质的改良效果。结果表明: 聚丙烯纤维可以提高改良土的无侧限抗压强度, 土体强度随纤维掺量的增加先增大后减小, 随纤维长度的增加先增大后稍有减小, 最佳掺量和最佳纤维长度分别为 0.4% 和 12 mm, 此时土体的无侧限抗压强度为 575 kPa; 加筋改良土的破坏应变大于未加筋改良土, 土体的破坏应变随纤维掺量的增加先增大后减小, 随纤维长度的增加逐渐增大; 加筋改良土呈韧性破坏, 峰后应力-应变曲线呈阶梯式下降, 有残余强度; 加筋改良土的水稳性优于素土和未加筋改良土。纤维强化了改良土体内部联结, 改善了水玻璃粉煤灰固化体的强度、韧性和水理性质。

关键词: 聚丙烯纤维; 黄泛区粉土; 水玻璃; 粉煤灰; 无侧限抗压强度; 水理性质

中图分类号: TU433

本文已被《中国科技论文》收录

Effect of fiber on mechanical properties of soil solidified by sodium silicate and fly ash

ZHANG Jianwei^{1,2}, YIN Yue¹, ZHAO Congcong¹, WANG Xiaoju¹, SHI Lei¹

(1. School of Civil Eng. and Architecture, Henan Univ., Kaifeng, Henan 475004, China;

2. Henan Provincial Research Center of Eng. on Intelligent Construction of Rail Transit, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract: In order to improve the curing of the Yellow River flooded area of fly ash and sodium silicate powder soil mechanical and hydraulic properties of the modified soil with different length, content of polypropylene fiber, unconfined compressive strength test, water stability test and capillary water absorption test, to explore the polypropylene fiber on the improvement of silt strength, toughness and rational water quality improvement effect. The results show that polypropylene fiber can improve the unconfined compressive strength of the soil, and the soil strength first increases and then decreases with the increase of fiber content, and the soil strength first increases and then slightly decreases with the increase of fiber length. The optimal content and fiber length are 0.4% and 12 mm, and the unconfined compressive strength of the soil is 575 kPa. The failure strain of the soil with fibers is greater than that of the soil without fibers. With the increase of the fiber content, the failure strain of the soil first increases and then decreases. The failure strain increases gradually with the increase of fiber length. After reinforcement, the specimens show ductile failure, the post-peak stress-strain curve decreases step by step, and there is residual strength. The water stability of the reinforced soil is better than that of the plain soil and the unreinforced soil. The fiber strengthens the internal connection of the soil, and improves the strength, toughness and hydrologic properties of the solidified body of sodium silicate fly ash.

Key words: polypropylene fiber; silt in the floodplain; sodium silicate; fly ash; unconfined compressive strength; water properties

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2019GGJS041); 河南大学研究生教育创新与质量提升计划项目 (YJS2021JD13)

作者简介: 张建伟 (1981—), 男, 教授, 主要研究方向为桩基础工程、微生物加固技术

通信联系人: 石磊, 讲师, 主要研究方向为岩土工程, shilei@henu.edu.cn. E-mail: paper@cutech.edu.cn

粉土在我国分布广泛,其颗粒级配差,颗粒磨圆度高,难以压实,潮湿后易流动液化^[1]。粉土颗粒之间的联结较弱,土体强度较低,在用粉土进行路堤填筑时,须经过处理方可使用^[2]。近年来,国内外学者就粉土加固和工程性质改良展开了细致的研究。粉土加固方式可以分为物理加固、生物加固和化学加固^[3]。物理加固指利用机械方法对土体进行加固,土体实质上并未改变^[4]。生物加固,如利用微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术加固土体,近年来逐渐成为土体加固的研究热点^[5]。化学加固是通过向土体中掺入外加剂,如水泥、高分子材料等,使其与土中矿物相互作用,从而改善土的工程性质^[6]。化学加固方法起步较早,一些技术已经很成熟并广泛应用于实际工程中,其中水玻璃和粉煤灰是近些年发展起来的新型土体改良剂^[7]。

水玻璃是常用的碱性激发剂,是目前广泛使用的土体化学注浆材料,具有材料成本低、适应性好、无毒等优点^[8]。水玻璃加固土体的基本原理是利用水玻璃的碱激发剂作用,使粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 水化产生具有凝胶性能的水化硅酸钙和水化铝酸钙^[9]。吕擎峰等^[10]通过一系列试验研究了石灰粉、煤灰、水玻璃联合固化硫酸盐渍土的强度特征,并分析了其固化机制,得出了石灰、粉煤灰、水玻璃联合处理可以大幅度提升硫酸盐渍土的抗压和抗剪强度的结论。为了加强固化效果,吕擎峰等^[11]进一步进行试验,研究了温度改性水玻璃对硫酸盐渍土的固化作用,结果表明,温度改性后,水玻璃的固化效果得到明显提升。段丽军等^[12]通过对泰州某地区粉土添加不同比例的石灰和水玻璃来研究其水稳性,结果表明,能有效提升土体的抗蚀性。朱文旺等^[13]用石灰和水玻璃对泰州地区粉土进行了室内改良试验,研究了不同掺量石灰和水玻璃改良粉土的效果,结果表明,改良土的无侧限抗压强度有大幅度提升。

水玻璃和粉煤灰可以大幅度提高土体的无侧限抗压强度,但改良后土体呈脆性破坏,破坏突然且破坏应变往往低于 1%^[14]。纤维加筋常用于增强土体韧性和提升土体强度,纤维掺入土体中,可提升土体强度并弱化改良后材料的脆性^[15]。安宁等^[16]研究了纤维长度和纤维掺量对加筋黄土抗剪强度、抗崩解性和渗透系数的影响规律,并开展了降雨冲刷模型试验,获得了黄土加筋的最佳配合比。周超云等^[17]研究了玻璃纤维对水玻璃、氯化钙固化紫色土抗剪强度的影响。邓友生等^[18]通过室内试验研究了不同长度的聚丙烯纤维对膨胀土强度的影响规律。Xiao 等^[19]研究了玄武岩纤维对 MICP 固化砂土的改良。Zhao 等^[20]通过无侧限抗压强度试验探究了多种纤维对于 MICP 固化砂土韧性的加强。

本文在采用水玻璃和粉煤灰改良黄泛区粉土的同时,加入不同长度、不同掺量的聚丙烯纤维,进行无侧限抗压强度试验和水稳性试验,探究聚丙烯纤维对改良土强度、韧性及水理性质的改良效果,旨在为粉土改良提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本次试验用土为黄泛区粉土,取自河南省开封市北部黄河段南岸,其颗粒级配曲线如图 1 所示。

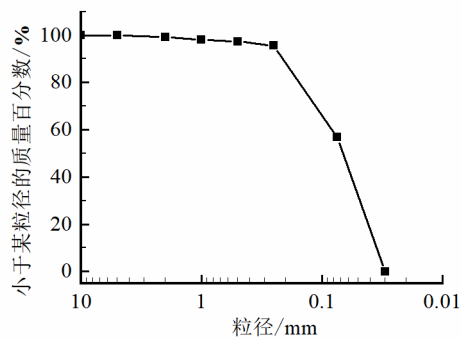


图 1 土的颗粒级配曲线
Fig. 1 Grain gradation curve of soil

85 土样颜色呈灰黄色，难压密实，松散干燥，粉土的物理力学指标见表 1。

表 1 黄泛区粉土的物理力学指标					
Table 1 Physical and mechanical indexes of silt in the floodplain area					
液限 (ω_L)/%	塑限 (ω_P)/%	塑性指数 (I_P)/%	最大干密度 (ρ_{max})/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最优含水率 (ω_{opt})/%	天然含水率 /%
26.5	16.8	9.7	1.67	15.6	9.8

试验中采用的水玻璃模数为 2.8，外观为白色的粉末状晶体，常温下易溶于水。一级粉煤灰为煤炭研磨成 100 微米以上的煤粉燃烧，由集尘装置捕捉收集得到。

90 试验所用纤维为束状单丝聚丙烯纤维，其基本参数见表 2。本试验考虑纤维长度和纤维掺量对改良土韧性和水稳性的影响，在试件制备过程中，纤维长度取值为 3、6、9、12、15 mm，纤维掺量（质量加筋率）取值为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%。

表 2 聚丙烯纤维基本参数					
Table 2 Basic parameters of polypropylene fiber					
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	直径/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	拉伸极限/ %	燃点/ $^{\circ}\text{C}$
0.91	0.048	>358	>3 500	17	>590

95 1.2 试验方法

1.2.1 试样的制备

将取得的黄泛区粉土碾碎并过 2 mm 筛，放入电热恒温鼓风烘干箱中，温度设置为 110 ℃。待 48 h 烘干、冷却后，称取烘干粉土，制备试验试件。试件均为圆柱体，直径为 39.1 mm，高度为 80 mm，密度为 1.61g/cm³。

100 素土试样的制备：称取一定量的土，而后用喷壶均匀撒入纯净水，并将土拌匀，直至达到目标含水率（9.8%）。将制得的土样用保鲜膜密封闷料 24 h，使水分均匀分布。然后将一定质量的土样分 3 层装入三轴试验的模具中，每层之间都用刀刮毛以防止分层。

水玻璃、粉煤灰改良土试件的制备：粉煤灰和水玻璃的质量分数均设置为 5%。称取一定量的土，计算达到目标含水率时所需水的量，首先将一半的水加入土中，拌合均匀后放置密封袋内静置 24 h，第 2 天再将定量的水玻璃和粉煤灰加入另一半水中，拌合在土中并迅速制样，制样方法与素土试件相同。此方法旨在使试件中的水分均匀分布并充分与固化材料接触反应。

105 加筋改良土试件的制备：预先将纤维与土均匀拌合，再按照水玻璃、粉煤灰改良土试件

制备步骤制样。

以上制备的试件，均在恒温恒湿条件下养护 7 d 后进行试验。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

将养护好的试样放在 TSZ-10 型无侧限抗压强度试验机上，以 1 mm/min 的速率进行轴向加载，记录试验过程中的应力-应变曲线及试件破坏后的状态。

1.2.2 水稳性试验

取素土，未加筋改良土，12 mm、0.2%加筋改良土，12 mm、0.4%加筋改良土，12 mm、0.6%加筋改良土，12 mm、0.8%加筋改良土，12 mm、1.0%加筋改良土，12 mm、1.2%加筋改良土等 8 组试件。水稳试验中，将试件放入盛满水的烧杯中，环境温度恒定为 20 ℃，24 h 后观察各烧杯中试件状态。

2 试验结果

2.1 无侧限抗压强度

7 d 养护龄期下，土体的无侧限抗压强度如图 2 所示。可以看出：未加筋改良土的无侧限抗压强度为 327 kPa；加筋改良土的无侧限抗压强度随着纤维掺量的增加先增大后减小。纤维长度为 12、15 mm 时的最佳掺量为 0.4%，此时土体的无侧限抗压强度分别为 575、533 kPa；纤维长度为 6、9 mm 时，土体在 0.6%纤维掺量下达到最大强度；纤维长度为 3 mm 时，土体无侧限抗压强度随着纤维掺量的增加先减小后增大，无侧限抗压强度在纤维掺量为 0.6%时低至 71 kPa。当纤维掺量一定时，无侧限抗压强度随着纤维长度的增加先增大后减小。加入 12 mm、0.4%的聚丙烯纤维时，土体无侧限抗压强度达到峰值 575 kPa。

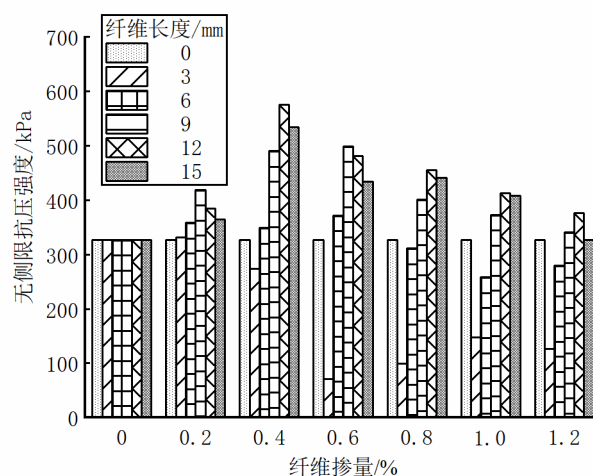


图 2 无侧限抗压强度

Fig. 2 Unconfined compressive strength

加筋改良土的实物及结构如图 3 所示。聚丙烯纤维的掺入使得土体内部各部分的联结加强，单根纤维在土中起到一维拉筋的作用，随着纤维掺量的增大，聚丙烯纤维的一维拉筋作用变为联结力更强的三维拉筋作用，抑制土体内部的破坏，土体内部即使产生了细微裂纹也不能迅速开展。当纤维掺量不高时，纤维团聚现象较少，可以均匀分布在土体内部，纤维的加筋作用充分发挥，且随着纤维掺量的增加而增强；但当纤维掺量过高时，由于聚丙烯纤维自身携带静电，团聚现象明显，纤维丝之间相互吸附，难以均匀分散到土体内部，因此纤维掺量过高反而会影响其加筋效果。因此，加筋土体的无侧限抗压强度随着聚丙烯纤维掺量的

增大呈现先增大后减小的现象。

当聚丙烯纤维较短时,难以联结土体内部各部分,并由于纤维自身不具有黏聚力而对改良土的强度产生负面影响,因此3 mm加筋改良土的无侧限抗压强度普遍低于未加筋改良土。纤维较长时,纤维可以联结更多土体部分,锚固越长,锚固力越大,产生的抗力越强,因此一定范围内加筋土体的强度随纤维长度的增大而增大,但同掺量下当纤维长度过长时会失去数量优势,过少的纤维反而会使加筋效果有所降低。

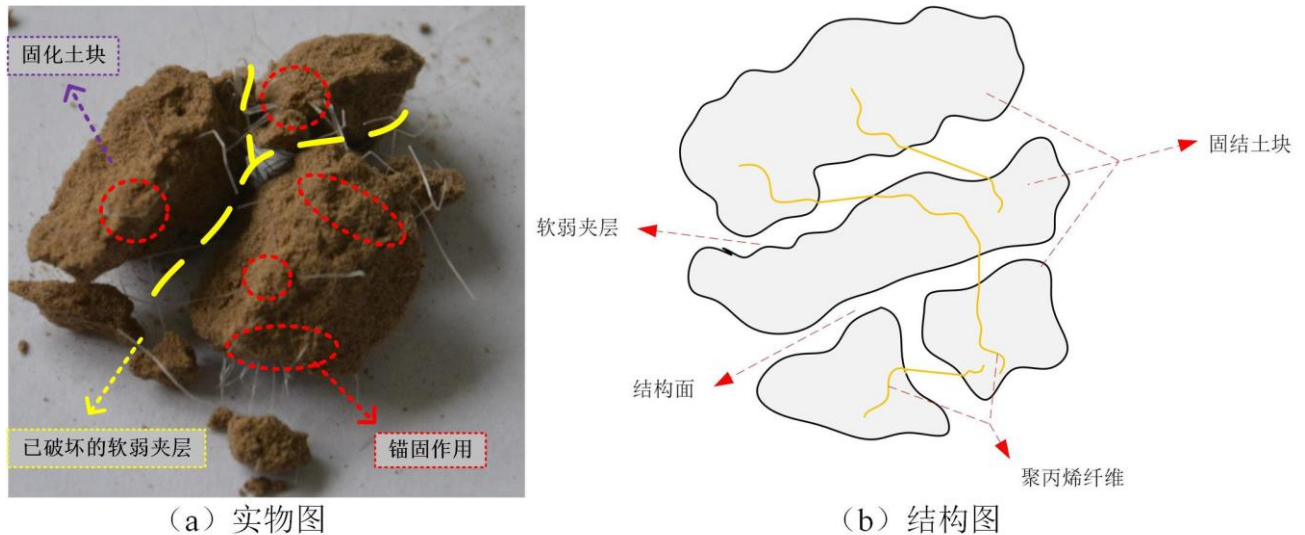


图3 加筋改良土实物及结构
Fig. 3 Picture and structure of reinforced modified soil

2.2 破坏应变

7 d 养护龄期下,纤维掺量对破坏应变的影响如图4所示。可以看出:加筋改良土的破坏应变均高于未加筋改良土;当纤维长度较短(3 mm)时,整体趋势上,试件的破坏应变随纤维掺量的增加而增大;当纤维长度大于3 mm时,随着纤维掺量的增加,试件的破坏应变整体上呈先增大后减小的趋势;纤维加筋试样破坏应变的最大值多数情况下出现在纤维掺量0.4%~0.8%范围内。

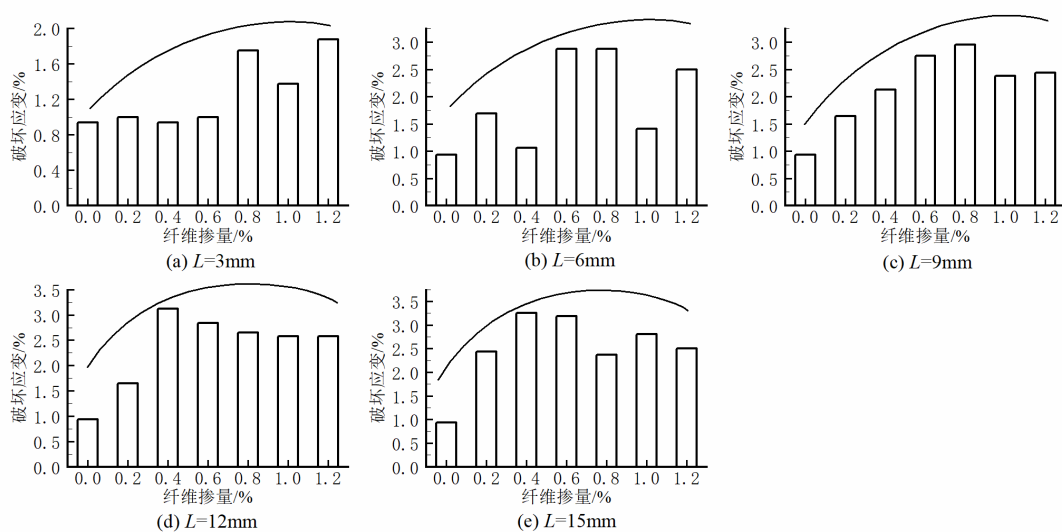


图4 纤维掺量对破坏应变的影响

Fig. 4 Effect of fiber content on failure strain

7 d 养护龄期下,纤维长度对破坏应变的影响如图5所示。可以看出:随着纤维长度的

增加,破坏应变整体上呈现逐渐增大的趋势;当纤维长度为 9~15 mm 时,试件的破坏应变最大。

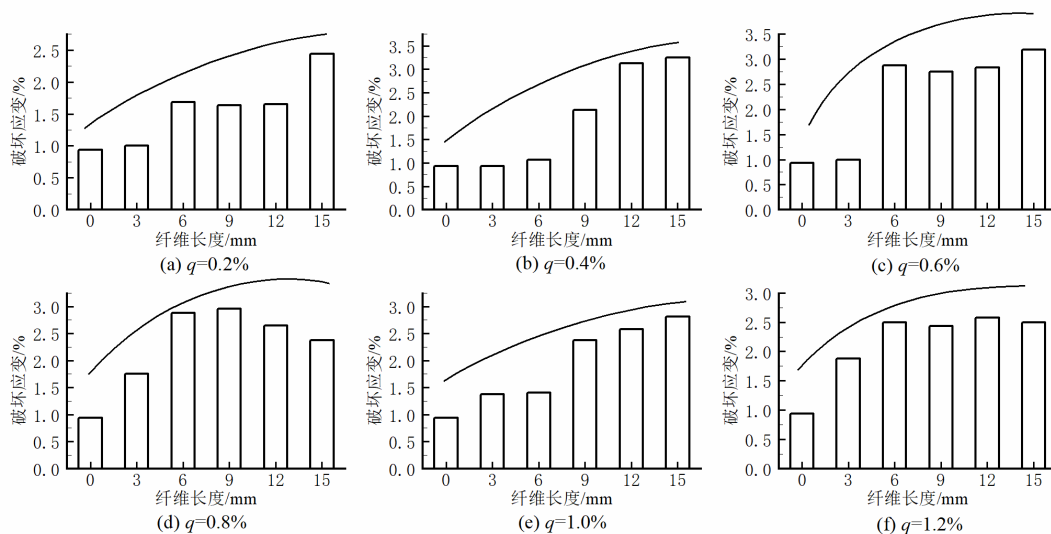


图 5 纤维长度对破坏应变的影响

Fig. 5 Effect of fiber length on failure strain

当土体变形很大时,微裂隙之间存在纤维的锚固作用,限制裂缝的开展,因此其在较高的应变下仍保持了一定的承载能力。这种锚固作用也随着纤维掺量和纤维长度的增加而增大,当纤维掺量过大时,多余的纤维不能提供抗力,反而影响了其在较高应变下的承载力,破坏应变因此降低。

2.3 应力-应变曲线

7 d 养护龄期下,素土、未加筋改良土及 12 mm、0.4%加筋改良土的应力-应变曲线如图 6 所示。可以看出:相较于素土,未加筋改良土在应变为 0.88%时就达到峰值强度,之后急剧减小,失去承载力,是典型的脆性破坏模式;而纤维加筋改良土试件在应变为 3.19%时达到峰值强度,且破坏后存在明显的残余强度,依然能够承受一定的荷载作用,展现出明显的韧性。当破坏裂缝发展到一定程度后,试件的承载能力开始下降,但是裂缝中存在的纤维限制了裂缝的进一步发展,要先克服裂缝中纤维的抗拉和抗剪力,变形才能进一步发展,当试件的变形发展很大时,残余的纤维限制土体的脱落和进一步破坏。

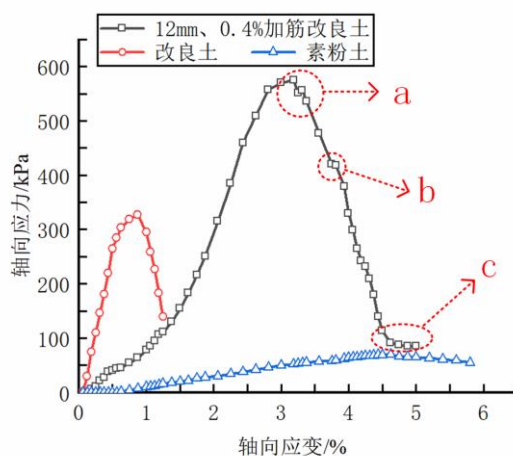


图 6 应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves

进一步取应力-应变曲线中峰值应力后下降段的 a、b、c 部位（图 6）进行放大，如图 7 所示。可以看出：曲线呈现明显的波动性，虽然总体上呈递减趋势，但存在局部应力小幅增加再减小、应变增大而应力保持不变、末端有残余应力等现象。

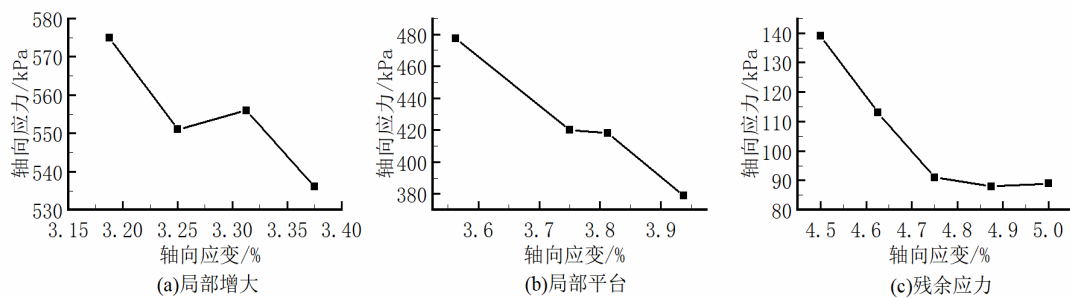


图 7 应力-应变曲线局部放大

Fig. 7 Local amplification of stress-strain curve

2.4 破坏形态

不同试件无侧限抗压试验后的破坏状态如图 8 所示。可以看出：素土破坏时整体性很差，呈典型的脆性破坏，上部土柱破碎为粉末及体积较小的条块；未加筋改良土试件丧失承载力后仍保持一定的整体性，沿破坏面有部分土体脱落，其他部分仍然比较完整，脱落部分有一定的刚度，试件破坏突然，几乎没有产生轴向压缩；加筋改良土试件破坏时完整性很好，达到破坏应力后未见土体脱落，且相较于未加筋改良土产生了一定的轴向变形，为塑性破坏。其中，12 mm、0.2%加筋改良土试件的破坏面为与底面呈约 45° 面的斜拉裂缝，斜裂缝在腹部出现，向上下延伸，形成斜裂缝将试件劈裂为 2 个部分而破坏，破坏时轴向变形稍大但小于其他 2 种更高掺量的加筋改良土试件。12 mm、0.4%加筋改良土试件的破坏面靠近试件底部，为数条细小裂缝连接而成的裂缝群，裂缝宽度小于 12 mm、0.2%加筋改良土试件。首先在顶部出现垂直裂缝，然后斜向延伸，形成较宽的主裂缝，随着荷载的增大，斜裂缝缓慢发展，宽度逐渐加宽，丧失承载力时轴向变形较大并伴随横向变形，试件始终未脱落。12 mm、0.8%加筋改良土试件的破坏发生在顶部和中部，破坏时先在腹部出现多条密集而大体上平行的斜裂缝群，随着荷载的增加，腹部被斜裂缝分割为若干个部分，当土体压应力超过其抗压强度时，发生类似受压短柱的破坏。

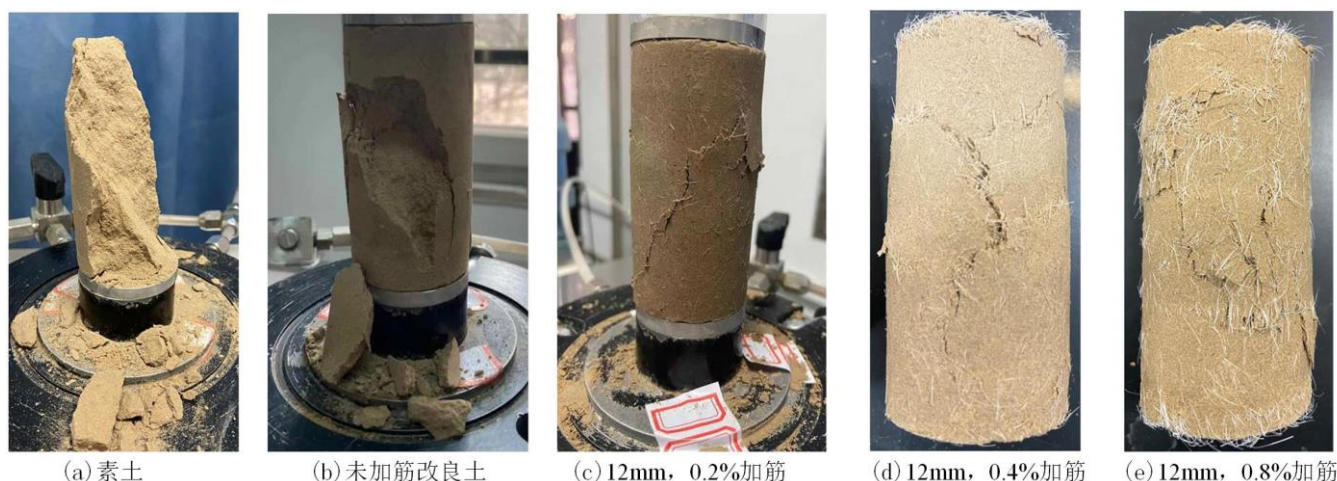


图 8 破坏状态

Fig. 8 Failure state

素土颗粒间联结较弱，当承受的荷载较大时，颗粒间的联结被破坏，试样大范围脱落、碎裂，甚至有部分土体在荷载的作用下被研成粉末。经水玻璃和粉煤灰改良后，粉土颗粒间

的联结力被大大增强，当达到破坏荷载后，试件出现破坏裂缝并迅速开展，沿破坏面破坏，土体脱落，由于土颗粒间胶结力较强，碎裂的土体仍然保持整体而未碎成粉末，破坏面以外的土体也基本完好，没有细小裂缝，为脆性破坏。加筋改良土试件破坏时整体性更好，纤维的掺入起到了类似于消栓的作用，将土体内部各部分紧密联结起来，当荷载增大时，纤维限制了裂缝的出现和开展，并使可能脱落的块体与试件整体保持联结。当纤维掺量较低时，纤维对土体内部各部分的联结作用有限，因此，试件呈现与未加筋改良土试件类似的破坏状态，但在纤维的作用下碎块未脱落。当纤维掺量较高时，由于团聚现象的出现，较多的纤维形成的团聚现象反而影响了水玻璃产生的胶结力，土体内部多个薄弱部位产生裂缝并开展。

本文对比了纤维长度为 12 mm 时不同掺量（0.4% 和 1.2%）下纤维的分布状态，如图 9 所示。可以看出：1.2% 掺量的土中不可避免地出现了多个纤维团聚体，但纤维另一方面又在一定程度上限制了裂缝的发展，因此呈现多个裂缝形成的裂缝群；当纤维掺量适中时，足够的纤维强化了土体内部各部分的联结，加固了土体内部的薄弱部位，使裂缝难以出现和开展，当荷载足够大时，裂缝开展受到纤维的限制，纤维大大增加了土体沿裂缝的抗剪力，因此出现裂缝时，土柱仍有一定的承载能力，在发生较大轴向变形后才破坏，破坏形式呈韧性。

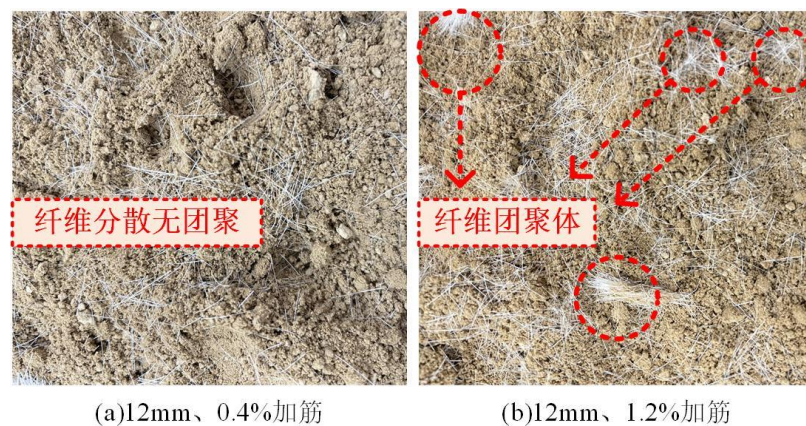


图 9 不同掺量下纤维的分布状态

Fig. 9 The distribution of fibers with different contents

2.5 水稳性

7 d 养护龄期下，在水中浸泡 24 h 后的试件破坏状态如图 9 所示。可以看出：素土崩解剧烈，浸水 24 h 后试件完全崩解，形成黄褐色溶液；未加筋改良土浸水 24 h 后崩塌，在容器底部形成块状及片状堆积，由于水玻璃和粉煤灰的掺入，使得粉土的水稳性有了一定程度的提高，浸水 24 h 后部分土颗粒间仍有胶结力，溶液相对于素土较为清澈，土中可溶于水或悬浮于水中的细小颗粒仍被紧密地胶结；12 mm、0.2% 加筋改良土浸水 24 h 后出现了多条细小裂缝，细小裂缝逐渐开展形成劈裂裂缝；掺量为 0.4%~0.8% 的加筋改良土浸水后未出现肉眼可见的裂缝；12 mm、1.0% 加筋改良土浸水 24 h 后，土体表面出现多条细小裂缝；12 mm、1.2% 加筋改良土表面形成大裂缝，但土体保持了一定的整体性并未崩塌。

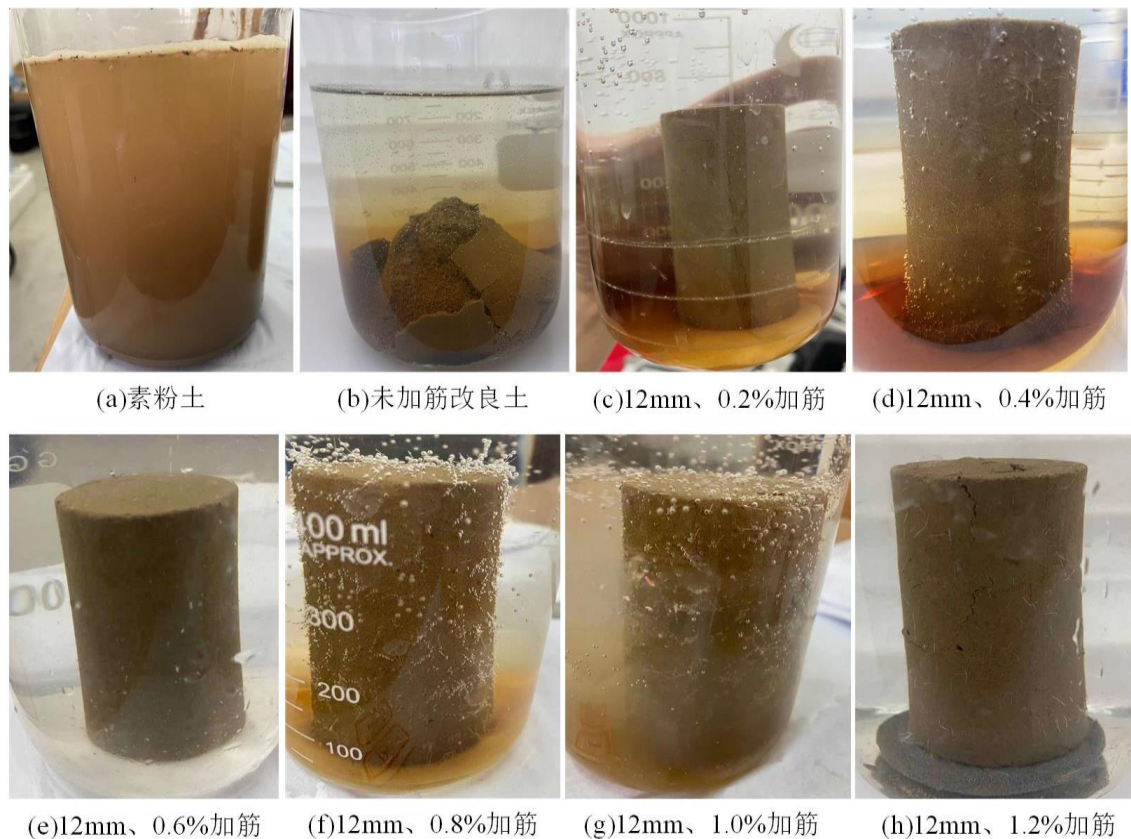


图 10 水稳试验试件破坏状态

Fig. 10 Water stability experiment

素土黏粒含量不高, 颗粒之间黏聚力较小, 在水中浸泡后黏粒吸水失去粘结力, 因而完全崩解, 形成黄褐色的溶液。而水玻璃和粉煤灰的掺入使土体中形成胶结物, 在水的作用下能保持较好的整体性, 但试件中仍然存在水稳性差的薄弱区域, 浸水后薄弱区域丧失胶结力而破坏, 形成块状堆积。加入聚丙烯纤维后的试件均未崩塌, 纤维与土体间存在锚固作用, 薄弱区域的开展受到纤维的限制, 即使形成较大裂缝也始终保持一定的整体性而没有完全崩塌。当纤维掺量较低时, 土柱内部受到纤维的锚固力较小, 裂缝容易在纤维作用力不足的部位开展, 但过多的纤维会形成团聚现象, 影响土体内部连结。裂缝的形成是由于水玻璃和粉煤灰固化作用不均匀, 纤维的掺入可以较好地限制裂缝的发展。

3 结 论

1) 掺入聚丙烯纤维可以改善水玻璃和粉煤灰改良土的力学性能, 土体强度随纤维掺量的增加先增大后减小, 随纤维长度的增加先增大后稍有减小, 最佳纤维长度和最佳掺量分别为 12 mm 和 0.4%, 此时土体的无侧限抗压强度达 575 kPa。

2) 聚丙烯纤维可在提高改良土无侧限抗压强度的同时增强其韧性, 掺入纤维后土体的破坏应变增大。随着纤维掺量的增加, 土体的破坏应变先增大后减小; 随着纤维长度的增加, 破坏应变呈现逐渐增大的趋势。加筋改良土峰后应力-应变曲线呈阶梯式下降, 存在残余强度。

3) 聚丙烯纤维可以改善改良粉土的水理性质, 增强其水稳性。

[参考文献] (References)

[1] 张建伟, 余杭, 王仕卿, 等. 黄泛区粉土-玻璃纤维增强聚合物复合材料布界面摩擦特性试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2469-2477.

ZHANG J W, YU H, WANG S Q, et al. Experimental study on interfacial friction characteristics of silty soil-glass fiber reinforced polymer composites in flooding area [J]. Acta Materialia Sinica, 2019, 36(10): 2469-2477. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国交通部. 公路路基施工技术规范: JTG F10—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway subgrades: JTG F10—2006 [S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)

[3] ZHANG J W, WANG X J, WANG H, et al. Model test and numerical simulation of single pile response under combined loading in slope [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 6140.

[4] 刘松玉. 公路地基处理[M]. 2 版. 南京: 东南大学出版社, 2009: 33-35.

LIU S Y. Ground improvement in highway engineering [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2009: 33-35. (in Chinese)

[5] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.

LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)

[6] MILANI A, FREIRE W J. Physical and mechanical characteristics of soil-cement and rice husk mixtures [J]. Engenharia Agrícola, 2006, 26(1): 1-10.

[7] YE G B, SHU H, ZHANG Z, et al. Solidification and field assessment of soft soil stabilized by a waste-based binder using deep mixing method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 5061-5074.

[8] HINCHBERGER S D, ROWE R K. Modelling the rate-sensitive characteristics of the Gloucester foundation soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(5): 769-789.

[9] BODAS FREITAS T M, POTTS D M, ZDRAVKOVIC L. Implications of the definition of the Φ function in elastic-viscoplastic models [J]. Geotechnique, 2012, 62(7): 643-648.

[10] 吕擎峰, 申贝, 王生新, 等. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 687-693.

LÜ Q F, SHEN B, WANG S X, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 687-693. (in Chinese)

[11] 吕擎峰, 孟惠芳, 王生新, 等. 改性水玻璃固化盐渍土强度及冻融循环耐久性试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(1): 108-112.

LÜ Q F, MENG H F, WANG S X, et al. Research of strength and freezing-thawing durability of saline soil solidified by modified sodium silicate [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(1): 108-112. (in Chinese)

[12] 段丽军, 张福海, 胡明涛, 等. 石灰和水玻璃改良粉土的水稳定性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 35-39.

DUAN L J, ZHANG F H, HU M T, et al. Experimental study on water stability of lime and water glass modified silt [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 35-39. (in Chinese)

- 290 [13] 朱文旺, 张文慧, 姜冲, 等. 石灰和水玻璃共同改良粉土试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10): 91-94.
- ZHU W W, ZHANG W H, JIANG C, et al. Experimental study on silt improved by lime and sodium silicate [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(10): 91-94. (in Chinese)
- [14] 申贝. 地聚物胶凝材料固化硫酸盐渍土试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 17-19.
- 295 SHEN B. Research on sulphate salty soil reinforced by geopolymers [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016: 17-19. (in Chinese)
- [15] HAO Y, CHENG L, HAO H, et al. Enhancing fiber/matrix bonding in polypropylene fiber reinforced cementitious composites by microbially induced calcite precipitation pre-treatment [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 1-7.
- 300 [16] 安宁, 晏长根, 王亚冲, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 501-510.
- AN N, YAN C G, WANG Y C, et al. Experimental study on anti-erosion performance of polypropylene fiber-reinforced loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 501-510. (in Chinese)
- 305 [17] 周超云, 汪时机, 李贤, 等. 水玻璃和玻璃纤维联合改良砂质黏性紫色土抗剪强度研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 592-601.
- ZHOU C Y, WANG S J, LI X, et al. Shearing strength of sandy clayey purple soil reinforced with sodium silicate and glass fiber in combination [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 592-601. (in Chinese)
- [18] 邓友生, 吴鹏, 赵明华, 等. 基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 349-353.
- 310 DENG Y S, WU P, ZHAO M H, et al. Strength of expansive soil reinforced by polypropylene fiber under optimal water content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 349-353. (in Chinese)
- [19] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 04019048.
- 315 [20] ZHAO Y, FAN C B, GE F, et al. Enhancing strength of MICP-treated sand with scrap of activated carbon-fiber felt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(4): 04020061.1-04020061.8.