

废旧土工织物在农村公路路基填料中的力学性能研究

杨 智

(上海虹桥国际机场有限责任公司, 上海市 201105)

摘 要: 废旧无纺土工布作为天然聚丙烯材料, 具有较好的力学性能。使用0.25%~1.00%比例聚丙烯纤维对阜西西路路基填料进行加固, 并通过击实试验、CBR试验和渗透试验研究不同比例聚丙烯纤维加固原位土后土的物理力学性能变化。结果表明, 随着纤维比例的增加, 土的最大干密度略有减小, 最佳含水率增大。加固土的CBR随着纤维比例的增加而减小, 当纤维比例为0.5%时, CBR存在峰值, 各项参数均满足农村公路设计规范的相关要求。此外, 加入聚丙烯纤维后, 土的渗透系数显著提高, 表明使用聚丙烯纤维加固路基土可以改善路基的排水性能。

关键词: 路基加固; 聚丙烯纤维比例; 最大干密度; 加州承载比; 渗透系数

中图分类号: U416.1; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0125-05

Research on Mechanical Properties of Waste Geotextiles in Rural Highway Roadbed Stuffing

YANG Zhi

(Shanghai Hongqiao International Airport Co., Ltd., Shanghai 201105, China)

Abstract: Waste non-woven geotextiles, as natural polypropylene materials, have good mechanical properties. The polypropylene fibers with a proportion of 0.25% ~ 1.00% are used to reinforce the roadbed stuffing of West Fuxi Road. The changes in the physical and mechanical properties of the in-situ soil after reinforcement with polypropylene fibers of different proportions are studied through compaction tests, CBR tests and permeability tests. The results show that with the increase of the fiber proportion, the maximum dry density of the soil slightly decreases and the optimal moisture content increases. The CBR of the reinforced soil decreases with the rise of the fiber proportion. When the fiber proportion is 0.5%, there is a peak in CBR. All parameters meet the relevant requirements of the rural highway design standards. Furthermore, after adding polypropylene fibers, the permeability coefficient of the soil is significantly increased, indicating that using polypropylene fibers to reinforce the roadbed soil can improve the drainage property of roadbed.

Keywords: roadbed reinforcement; polypropylene fiber percentage; maximum dry density; CBR; permeability coefficient

0 引 言

由于农村公路路幅窄、后期养护维修投入较少, 路基、路面等结构在长期交通负荷、降雨和风蚀等作用下遭受破坏。Hatmoko等^[1]认为由于路基填料级配不良, 压实度水平较差, 导致承载能力较弱, 运营后路面病害向下延伸。另外, 土颗粒间缺乏水分和黏结力、碎石质量差等因素, 加速了路基表层土的侵蚀。因此, 农村公路路基建设用土的加固改良

迫在眉睫。

近年来, 废旧材料在道路建设中的运用逐渐增加, Mishra等^[2]研究了粉煤灰、废塑料袋和水泥窑粉尘在农村公路建设中的使用, 并证明水泥粉尘的吸湿性、胶凝性可以提高软土路基的承载力。此外, Murugadoss等^[3]证明黏性土中掺入4%水泥+10%橡胶的混合物将使土的CBR值控制在规范要求的合理强度范围内。Rajagopal等^[4]发现废弃植物纤维可使弱黏土的承载力增加约25%。Aggarwal等^[5]使用0.2%~1.0%掺量、5~20 mm长的黄麻纤维加固土壤, 发现随着纤维含量增加, 土的最大干密度降低, 最优含水率增加; 且纤维长度小于10 mm时, 土的

收稿日期: 2025-07-31

作者简介: 杨智(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路设计工作。

CBR 值增加 2.5 倍。Ghazavi 等^[6]通过冻融循环试验发现 3% 掺量、12 mm 长的聚丙烯纤维加固土体可以使黏土的无侧限抗压强度提高 60% ~ 160%, 冻胀率减少 70%。Gosavi 等^[7]对尼龙和黄麻纤维加固土的 CBR 进行了测试, 发现采用 0.75% 掺量, 可使土的 CBR 值提高约 50%。Saghari 等^[8]对聚合物纤维加固的细粒土进行了渗透性试验, 发现渗透系数随着纤维含量的增加而增加; 当纤维含量为 0.6%、纤维长度为 5 cm 时, 最大渗透系数为 6.67×10^{-7} cm/s。

本文将改扩建铁路道砟下方镇流作用的废弃无纺土工布用于农村公路的建设中, 运用破碎后的高强度原生聚丙烯纤维, 对农村公路路基土进行加固, 并对加固土的压实度、承载能力和渗透系数等参数进行分析。原生聚丙烯纤维与工业聚丙烯纤维相比, 具有纯度高、强度高、均匀性好、熔点稳定、耐酸碱、使用寿命长、稳定性好等优点, 被广泛运用于工程领域。本文采用的废弃无纺土工布回收来源与破碎方式均具有可操作性和可实施性。回收方式根据不同废弃部位采用不同方法, 如小型挖掘机或人工开挖的机械开挖法(路基基层交界处), 卷扬机、夹具或人工拖拽的抽拉法(路基边坡或排水层处), 高压水枪等水力冲刷辅助回收法(路表浅层处)。破碎方式可采用剪切式破碎机、低温冷冻破碎法, 或者选择性破碎(溶解-析出)等。

1 工程概况

阜西西路位于上海市崇明区向化镇, 路线呈南北走向, 工程范围南起堤北路, 北至北沿公路, 路线全长约 2.84 km。拟建场地勘察深度范围内各地基土构成及特性见表 1。

表 1 土层描述一览

层号	土层名称	分布状况	土的描述等级				持力层
			摇振反应	光泽	干强度	韧性	
① ₁	素填土	遍布	—	—	—	—	不适宜
① ₂	淤泥	遍布	—	—	—	—	不适宜
② ₁	黏质粉土夹粉质黏土	遍布	中等	无	低	低	适宜
② ₃	砂质粉土	遍布	迅速	无	低	低	适宜
④	淤泥质黏土	遍布	无	有光泽	高	高	不适宜
⑤ ₁	黏土	遍布	无	有光泽	高	高	—
⑤ ₂	砂质粉土	遍布	迅速	无	低	低	—
⑤ ₃	粉质黏土夹砂质粉土	遍布	无	稍有光泽	中等	中等	—
⑦	砂质粉土	遍布	迅速	无	低	低	—

根据勘察报告推荐土层, 本次路基加固设计采用②₃砂质粉土层作为路基持力层, 采用不同掺量的聚丙烯纤维对翻晒后的原位土进行加固设计, 并对路基混合填料开展击实试验、土的承载比(CBR)实验和渗透实验, 以测试加固土的力学性能是否能满足设计规范要求。

2 试验设计

(1)筛分试验。通过筛分试验数据对原位土的级配和工程适用性进行分析。

(2)击实试验。通过击实试验得到原位土和 0.25%、0.5%、0.75%、1% 掺量加固土的最大干密度和最优含水率, 分析加固土的压实效果。

(3)CBR 试验。根据击实试验的参数, 制作不同掺量的聚丙烯纤维加固土样并进行加载, 分析 CBR 值是否满足规范, 同时探讨采用直径 10 cm 和直径 15.2 cm 的压实筒对 CBR 值的影响。

(4)渗透试验。分析加固土的渗透系数是否满足规范。试样在不同含水率和不同纤维比例下进行多组次试验, 组次和重复次数见表 2。

表 2 试验组重复次数

土样	击实试验		CBR 试验		渗透试验	
	组数	重复性	组数	重复性	组数	重复性
原位土	5	3	2	3	1	3
原位土+0.25% 纤维	5	3	2	3	1	3
原位土+0.5% 纤维	5	3	2	3	1	3
原位土+0.75% 纤维	5	3	2	3	1	3
原位土+1% 纤维	5	3	2	3	1	3
总计	75		30		15	

3 试验结果分析

3.1 原位土的级配曲线

土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 是衡量其质量的重要指标, 它影响土的干密度、稳定性和强度。对原位土取样 2.5 kg 烘干后, 进行筛分试验并得出土的颗粒级配曲线(见图 1)。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[9], 原位土 $C_u=7.5$, 大于 5, $C_c=2.9$ 处于 [1, 3] 区间内, 原位土级配良好, 可直接用于路基建设。

3.2 击实试验

对烘干后原位土和 0.25%、0.5%、0.75%、1% 比例纤维加固土分别进行击实试验。原位土分别采用 3.5%、7%、10.5%、14%、17.5% 的含水率, 加固土采用的含水率随纤维比例的增加动态调整。各组土样压

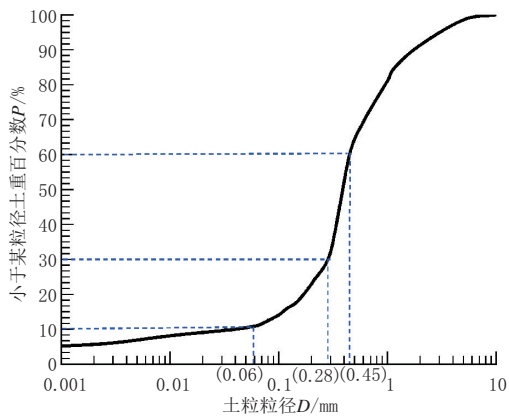


图1 土的颗粒级配曲线

实结果见图2。

聚丙烯纤维加固土的最大干密度小于原位土的最大干密度,最优含水率大于原位土的最优含水率。

表3 不同纤维掺量加固土的最大干密度和最优含水率

土样	原位土	原位土+ 0.25% 聚丙烯纤维	原位土+ 0.5% 聚丙烯纤维	原位土+ 0.75% 聚丙烯纤维	原位土+ 1% 聚丙烯纤维
最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.00	1.98	1.95	1.91	1.89
最优含水率/%	10.50	11.50	12	12.50	13

原位土最大干密度为 $2.00 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$, 加入聚丙烯纤维后, 土的最大干密度减小。由于聚丙烯纤维具有较好的延展性, 在加固土中的使用减少了原位土的体积和质量; 且随着纤维含量的增加, 土中空气和土颗粒的体积也会减少, 导致土的总质量减少, 从而不断降低加固土的密度和干密度。

原位土的最优含水率为 10.5%, 加入聚丙烯纤维后, 土的最优含水率增大。由于聚丙烯纤维较强的吸水性, 最大吸水量为 3.908 L/m^2 , 饱水状态下储水率约为 9.83%。因此, 同等质量和体积下聚丙烯纤维的含水量明显高于原位土颗粒间结合水的含量, 直接增大了加固土的最优含水率。

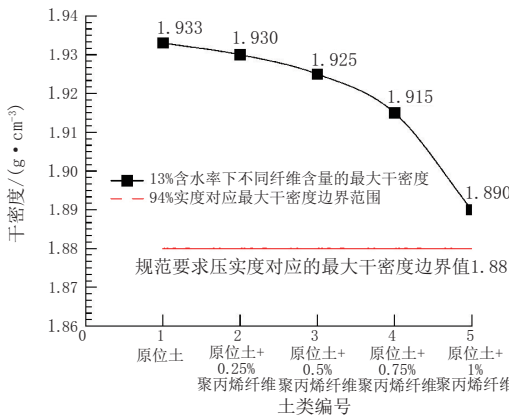


图3 13%含水率下不同纤维比例加固土的干密度

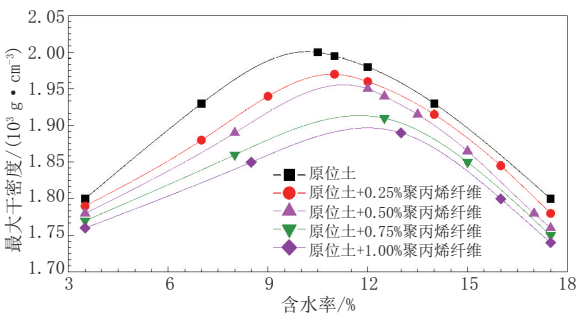


图2 不同比例纤维含量的压实曲线

从压实曲线的峰值特征可知, 随纤维掺量增加, 加固土的压实曲线峰值高度逐次降低(反映最大干密度递减), 位置逐次右移(反映最优含水率递增), 且所有加固土的峰值均低于原位土、优于原位土。各组土样的最大干密度和最优含水率见表3。

以 1% 纤维比例加固土的最优含水率 13% 为基准, 测出不同纤维比例土样在该含水率的干密度, 详见图3。相同的含水率下, 加入聚丙烯纤维后土的干密度小于原位土的干密度, 且加固土的干密度随着纤维比例的增加而减小。

根据《小交通量农村公路工程设计规范》(JTG/T 3311—2021)^[10], 路基顶以下 0 ~ 0.8 m 深度内路基压实度不小于 94%。原位土的最大干密度为 $2.00 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$, 反算得到加固土的临界干密度为 $1.88 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ 。根据图3 临界干密度分界线, 所有加固土的最大干密度均在临界干密度之上。因此, 0.25% ~ 1% 比例的聚丙烯纤维加固路基原位土在农村公路建设中符合国家设计规范对路基压实度的相关要求。

3.3 CBR 试验

通常 CBR 试验土样需浸水 24 ~ 96 h, 以确定贯入深度与荷载之间的关系。考虑到原位土为砂质粉土, 采用标准时间浸泡后, 样本内细小的土颗粒会流失, 故本次 CBR 试验中所有土样均未浸水。为研究土样浸水与否对 CBR 的影响, 保证试验结果的有效性, 设置一组对照试验, 对照试验 CBR 误差见图4。

对照试验结果表明, 本次试验采用的纤维加固土样是否按规范浸水对试验结果影响微小, 误差均可控制在 1% 内, 忽略不计。因此, 本次未浸水土样

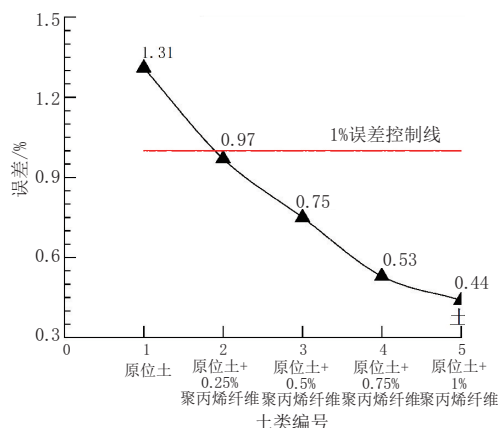


图4 CBR对照试验误差值

的CBR试验结果对实际应用具有科学指导性。其余土样试验结果见图5。

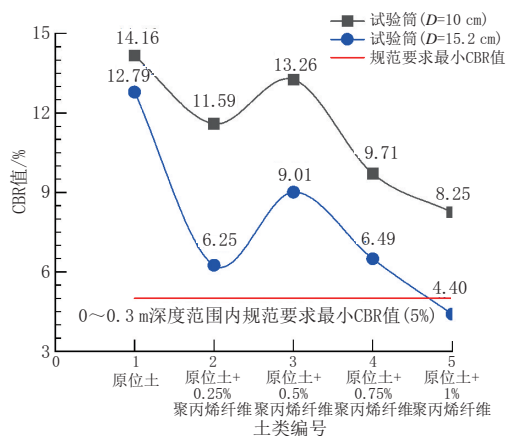


图5 不同比例纤维加固土的CBR值

以直径10 cm试验筒为例,原位土CBR大于加固土CBR。加固土CBR曲线先线性上升,随着纤维比例的增加再呈指数级下降,峰值出现在0.5%比例处。因此,存在一个最佳纤维混合比例,使加固土获得最大CBR。

土的三相组成中,水的存在使土的容重必然小于其干密度。因此,土粒比重是用于分析土物理特性的最佳参数^[11-12]。聚丙烯纤维比重小于土粒比重,同等条件下加固土的总应力小于原位土。随着纤维比例增加,加固土的含水率增大,土内孔隙水压力增大,有效应力减小。因此,同等条件下的加固土仅需较小的力即可达到相同的贯入深度,导致其CBR低于原位土CBR。

界面摩阻方面,土的抗剪强度取决于土粒间的黏聚力和滑动摩擦。加固土样加载后发生剪切变形或破坏,土中的纤维处于受拉状态,纤维所能抵抗的拉应力取决于黏聚力,随着纤维比例增大,含水率增加,水分子的润滑作用明显,黏聚力减小。此外,纤维比例和含水率的增加会带来土内摩阻损失,弱化

界面、降低纤维/土的界面摩擦系数,引发加筋失效(CBR降幅达20%~40%),从而降低土的抗剪强度。

微观结构方面,随机分布的纤维在土中形成空间结构与土颗粒互相嵌锁,限制位移和变形,提高土的强度和稳定性。随着纤维比例增加和分布不均匀,土粒产生移动和重排,纤维/土作用面的胶结作用被削弱,土体的片状结构从紧密排列变为松散分布,大孔隙连通性增加,导致土的内摩擦角和黏聚力减小^[13]。此外,含水率增大后,水分子间的双电层增厚、结合水膜增厚、毛细力丧失,削弱土粒间的范德华力,导致微观结构失稳,变形增大,进而降低土的承载力。

用直径15.2 cm试验筒得到的结果趋势与直径10 cm试验筒得到结果的趋势一致,但CBR均小于直径10 cm的试验筒得到的CBR。根据连续弹性半空间理论^[14],路基是一个连续、均匀、无限大小的弹性体,从路表受到结构所在面的约束和作用力,载荷的传递方向和范围将以45°角向下扩散(见图6)。在相同贯入深度下,直径10 cm试验筒由于空间小,更早出现侧向围压小主应力,从而更快获得竖向大主应力。因此,同等条件下,小直径试验筒测得的CBR大于大直径试验筒测得的CBR。

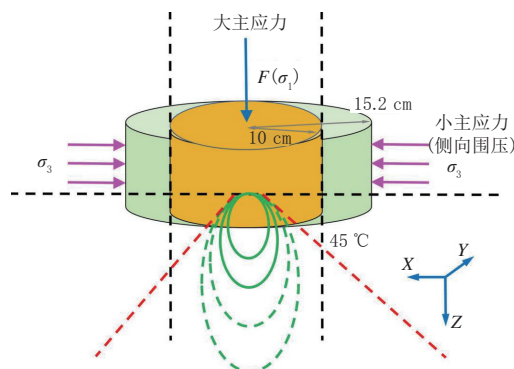


图6 基于弹性半无限空间原理的荷载传递模拟图

根据《小交通量农村公路工程设计规范》(JTG/T 3311—2021)^[10],路基顶以下0~0.3 m范围内填料CBR不小于5%,0.3~0.8 m范围内填料CBR不小于3%。由图4中CBR临界分界线判断,所有加固土的CBR值均大于3%。因此,0.25%~1.00%比例聚丙烯纤维加固农村公路路基符合设计规范对路基压实度的相关规定。

3.4 渗透试验

地勘报告显示,原位土为砂质粉土,因此本次渗透试验采用常水头试验。根据击实试验得出的原位土和不同聚丙烯纤维掺量加固土的最优含水率和最

大干密度数据制作渗透试验土样,试验得到各组土样的渗透系数见图 7。

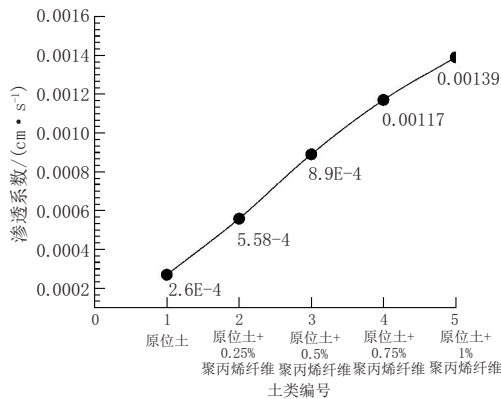


图 7 渗透系数曲线

原位土的渗透系数为 2.69×10^{-4} cm/s,加入聚丙烯纤维后,土的渗透系数增大,且上升趋势与使用的纤维比例呈正相关关系。当聚丙烯纤维比例达到 1% 时,其渗透系数增大到 1.39×10^{-3} cm/s。在相同体积下,纤维取代了土粒,且聚丙烯纤维的吸水性远高于土粒自身,因而渗透系数由 2.69×10^{-4} cm/s 上升到 1.39×10^{-3} cm/s。渗透试验结果显示,0.25%~1.00% 比例聚丙烯纤维加固农村公路路基符合设计规范对路基填料透水性能的相关规定,有利于提升农村公路路基的抗冲刷和抗侵蚀能力。

4 结 论

(1)0.25%~1% 比例聚丙烯纤维加固砂质粉土会降低原位土的最大干密度,且加固土的最大干密度随纤维比例的增加而减小。当加入 1% 比例的纤维时,加固土的最大干密度降低到 1.89×10^3 g/cm³,反算后得出的路基压实度仍满足农村公路设计要求。

(2)0.25%~1% 比例聚丙烯纤维加固砂质粉土后,加固土 CBR 曲线呈下降趋势。以直径 10 cm 击实筒为例, CBR 从 14.16 将至 8.15,当加入 0.5% 比例的纤维时,加固土 CBR 存在峰值 13.26%,满足农村公路设计要求。

(3)0.25%~1% 比例聚丙烯纤维加固砂质粉土后,最优含水率和渗透系数随着纤维比例的增加而

增大。最优含水率从 10.5% 增大至 13%,渗透系数从 2.69×10^{-4} cm/s 增大至 1.39×10^{-3} cm/s。当加入 0.5% 比例的纤维时,加固土除 CBR 存在峰值外,对应渗透系数 8.9×10^{-4} cm/s 也满足农村公路设计要求。

参考文献:

[1] Hatmoko J U D, Setiadji B H and Wibowo M A. Investigating causal factors of road damage: a case study[C]. In MATEC Web of Conferences (EDP Sciences), 2019: 02007.

[2] Mishra R S and Mishra1 B. A study on use of industrial wastes in Rural Road Construction[J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2015, 4(11): 10387 - 10398.

[3] Murugadoss J R, Prasanth A R and Saranya K. Soil stabilisation using rubber waste and cement (standard proctor test and CBR) [J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2017: 630-639.

[4] Rajagopal K and Ramakrishna S. Coir geotextiles as separation and filtration layer for low intensity road bases[C]. India: Guntur (IGC, GEOTIDE), 2009: 941-946.

[5] Aggarwal P and Sharma B. Application of jute fibre in the improvement of subgrade characteristics[J]. In Proc of int conf on adva in civ eng, 2010: 27-30.

[6] Ghazavi M and Roustae M. The influence of freeze - thaw cycles on the unconfined compressive strength of fibre-reinforced clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(2-3): 125-131.

[7] Gosavi M, Patil K A, Mittal S and Saran S. Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division, 2004, 84: 223-228.

[8] Saghari S, Bagheri G and Shabanzadeh H. Evaluation of permeability characteristics of a polymer fibres-reinforced soil through laboratory tests[J]. Journal of the Geological Society of India, 2015, 85: 243-246.

[9] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].

[10] JTG/T 3311—2021 小交通量农村公路工程设计规范[S].

[11] Knappett J, Craig R F. Craig' s soil mechanics[M]. London: CRC Press, 2019.

[12] 杨平. 土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[13] 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.

[14] Boussinesq Joseph.. Application des potentiels à l' étude de l' équilibre et du mouvement des solides élastiques: principalement au calcul des deformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exercés sur und petite partie de leur surface ou de leur intérieur; memoire suivi de notes étendues sur divers points de physique mathématique et d' analyse[M]. Paris: Gauthier-Villars, 1985.