

# 建筑垃圾和纤维联合改性膨胀土路用性能研究

Research on the Performance of Expansive Soil Modified by Construction Waste and Fiber

郑和武

(广西百马机场高速公路有限公司, 广西 南宁 530028)

**摘要:** 为了提高膨胀土路用性能和实现建筑垃圾资源化利用, 本文研究了玻璃纤维与建筑垃圾改良膨胀土的强度特性和胀缩特性, 并结合微观特征探索改良机理。研究发现: 建筑垃圾和玻璃纤维均能显著提高膨胀土的强度和降低膨胀土的胀缩特性。建筑垃圾和玻璃纤维掺量过高会导致改良膨胀土内部孔隙无法有效填充以及纤维成团现象, 从而影响改良膨胀土的路用性能。建筑垃圾和纤维的最佳掺量分别为 40% 和 0.6%; 微观测试结果表明纤维能为膨胀土提供附着点, 从而达到增密膨胀土内部结构的效果。上述研究成果能为膨胀土改良和建筑垃圾的资源化利用提供理论基础。

**关键词:** 膨胀土; 建筑垃圾; 玻璃纤维; 强度特征; 胀缩特性; 微观结构

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0001-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.001

ZHENG Hewu

(Guangxi Baima Airport Expressway Co., Ltd., Nanning 530028, China)

**Abstract:** To improve the road performance of expansive soil and realize the resource utilization of construction waste, this paper studies the strength and expansion characteristics of expansive soil improved by glass fiber and construction waste, and explores the improvement mechanism combined with the microscopic characteristics. It is found that both construction waste and glass fiber can significantly improve the strength of expansive soil and reduce the swelling and shrinkage characteristics of expansive soil. The high content of construction waste and glass fiber will cause the internal pores of the improved expansive soil to be unable to fill effectively and the fiber clumping phenomenon, which will affect the road performance of the improved expansive soil. The optimal content of construction waste and glass fiber is 40% and 0.6% respectively. The microscopic test results show that fiber can provide adhesion points for expansive soil, thus enhancing the internal structure of expansive soil. The above research results can provide a theoretical basis for the improvement of expansive soil and the resource utilization of construction waste.

**Keywords:** expansive soil; construction waste; glass fiber; strength characteristics; expansion and shrinkage characteristics; microstructure

## 0 引言

以膨胀土为基础修建的既有工程在遇水时会由于膨胀土的体积膨胀而产生破坏<sup>[1-2]</sup>, 工程上通常以土壤更换或土壤改良等技术增强膨胀土性能。土壤更换因施工工作量大且更换的土壤难以处置等因素

应用较少; 土壤改良技术应用较为广泛, 常采用机械加固、化学改性, 或两种技术的有机结合<sup>[3-4]</sup>。

化学改良技术能较大程度地改善膨胀土的胀缩特性, 增加其耐久性、强度和抗变形能力<sup>[5]</sup>。膨胀土化学改良中应用较广的材料有矿渣复合料、水泥、风化砂、石灰和沥青等<sup>[6-8]</sup>, 且研究表明使用这些物质改良后的膨胀土抗变形能力和承载能力显著提高, 能够保障既有工程的安全运行。但是, 化学改良中使用的某些改良剂也存在一定的缺陷, 如能耗高、

作者简介: 郑和武 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 道路与桥梁等。

收稿日期: 2023-10-28

## 材料科学

环境污染、施工难度大和经济成本较高等<sup>[9]</sup>。因此,寻找更加环保和经济的改良材料改良膨胀土工程特性成为目前研究的重点。

近年来,纤维加固土的研究取得了较多的成果,在土壤中添加纤维可以增强土壤的物理特性、剪切面的抗剪切强度、延性和降低黏性土的膨胀潜力和压缩性等<sup>[10-11]</sup>。宋金岩等<sup>[12]</sup>研究表明,加入玻璃纤维后粉砂土的峰值强度显著提高;姜恒超等<sup>[13]</sup>在水泥处理土中加入1%~4%的玻璃纤维,其抗拉强度比未掺纤维时提高了50%;Hejazi等<sup>[14]</sup>总结了纤维在土壤中使用取得的研究成果,得到纤维能增加土壤的峰值抗剪强度,减少应变软化,并阻碍受压变形过程的结果。同时,随着城市建筑的不断更新换代,原有建筑拆除后产生的建筑垃圾处理问题目前尚未形成一套系统,建筑垃圾的堆放给环境造成了严重的影响,建筑垃圾改良土壤工程特性的研究表明这一处理手段的可行性<sup>[15]</sup>。

目前纤维和建筑垃圾单独改善膨胀土的性能研究已经取得了一定的成果,但是二者联合作用下对膨胀土的性能影响研究还处于起步阶段。因此,本研究将以原始膨胀土为研究对象,通过掺加一定比例的建筑垃圾和玻璃纤维,研究不同建筑垃圾和玻璃纤维掺量下膨胀土的工程特性,并结合微观结构分析探索改良机理。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 原材料

试验用膨胀土取自单位承接的百色市近郊某项目现场,土样呈黄褐色,其基本物理力学参数见表1;建筑垃圾选自百色市近郊房屋拆迁后的混合材料,主要含有砖渣、混凝土块及其碎屑,各占一半左右,将其破碎制备成0~19粒径的连续级配材料,其基本物理参数见表2;玻璃纤维参数见表3。

表1 试验用土基本物理力学参数  
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of test soil

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	自由膨胀率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	孔隙率/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
2.50	42.00	42.60	20.30	21.40	166.00	12.40	0.91	18.40	1.820

表2 建筑垃圾基本物理参数  
Table 2 Basic physical parameters of construction waste

表观密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	毛体积密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率 /%	液限	塑限
2.47	2.12	1.88	13.50	27.60	7.80

表3 玻璃纤维基本物理力学参数  
Table 3 Basic physical and mechanical parameters of glass fiber

直径 /μm	长度 /mm	断裂伸长 率/%	抗拉强度 /GPa	吸水率 /%
14.0~20.0	30.0	3.8	1.6	<1.0

### 1.2 试验方案

依据《土工试验方法标准》进行试验设计,膨胀土进行烘干和研磨后过2 mm筛,随后与不同掺量的建筑垃圾和玻璃纤维进行混合,利用重型击实试验进行制样,试样尺寸为39.1 mm×80 mm,制样完成后用保鲜膜进行包裹,放置在养护箱((22±1)℃,65%相对湿度)中养护28 d。通过击实试验获取原始膨胀土和改良膨胀土的最优含水率等相关参数,具体见表4。

表4 试验配比及控制参数  
Table 4 Test ratio and control parameters

质量比/%			最优含水率/%	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
膨胀土	建筑垃圾	纤维		
100	0	0	18.40	1.820
100	0	0.2	17.88	1.822
80	20	0.2	15.45	1.832
70	30	0.2	13.81	1.845
60	40	0.2	12.58	1.855
50	50	0.2	11.46	1.837
100	0	0.4	17.35	1.838
80	20	0.4	15.95	1.844
70	30	0.4	14.01	1.858
60	40	0.4	12.77	1.869
50	50	0.4	11.68	1.841
100	0	0.6	17.02	1.817
80	20	0.6	16.12	1.851
70	30	0.6	14.22	1.862
60	40	0.6	12.99	1.873
50	50	0.6	11.89	1.857
100	0	0.8	16.68	1.824
80	20	0.8	16.32	1.858
70	30	0.8	14.56	1.869
60	40	0.8	13.21	1.878
50	50	0.8	12.03	1.853

对完成养护的试样进行浸水饱和并记录膨胀量；并对不同组别浸水饱和和试样进行贯入试验，测得其加州承载比 ( $CBR_{5.0}$ )；为了更加符合现场工程条件，在不同组别的最佳含水率基础上，以 94% 压实度进行静压成型制样，并测其膨胀量、膨胀率和  $CBR_{5.0}$ ；最后通过扫描电镜对试样的微观结构进行分析。

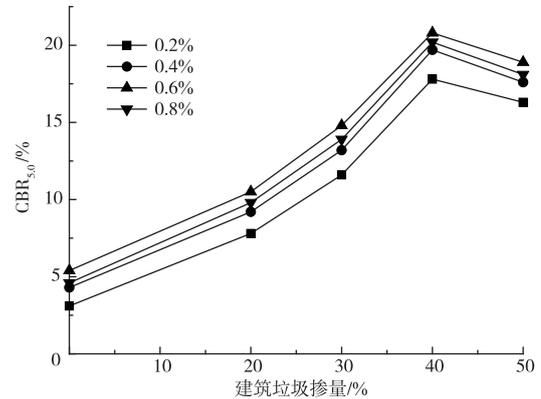
## 2 试验结果与分析

### 2.1 击实试验结果

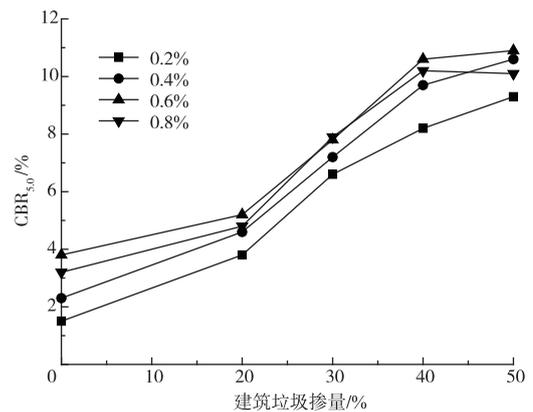
不同配比的试样最优含水率和最大干密度值见表 4。从表 4 可以看出，未添加建筑垃圾和纤维的原始膨胀土的最优含水率和最大干密度分别为 18.40% 和  $1.820 \text{ g/cm}^3$ ；当纤维掺量一定时，随着建筑垃圾掺量的增加，改良膨胀土的最优含水率呈现逐渐降低的趋势，而最大干密度呈先升高后降低的趋势，转折点为建筑垃圾掺量为 40% 左右。这是因为建筑垃圾的掺入相当于在膨胀土中添加了粗骨料，而膨胀土主要起到填充的效果，从而导致试样的级配更好。

### 2.2 $CBR_{5.0}$ 试验结果

重型击实和静压成型两种试样的  $CBR_{5.0}$  如图 1 所示。由图 1 可知，添加纤维和建筑垃圾均能提高膨胀土的强度，且随着建筑垃圾掺量的增加，试样的  $CBR_{5.0}$  呈现递增的趋势；随着纤维掺量的增加，试样的  $CBR_{5.0}$  呈现先递增后减小的趋势。相较于纤维而言，掺入建筑垃圾对膨胀土的强度提升效果更加明显。但是当建筑垃圾掺量大于 40% 后， $CBR_{5.0}$  值增长趋势减弱。这是由于膨胀土占比减小后无法有效填充建筑垃圾中的孔隙导致的。纤维掺量高于 0.6% 后会影响到土体的强度特性，这是由于适量的纤维能在土体中均匀分布，起到连接孔隙的效果；但是纤维掺量过高会导致其分布不均匀，从而导致试样内部孔隙增大<sup>[12]</sup>。在相同的配比条件下，重型击实下试样的强度高于静压成型下试样的强度。根据《公路路基设计规范》要求，一级公路的路基填料压实度高于 94% 时， $CBR_{5.0}$  值应高于 4，因此，建筑垃圾  $\geq 30\%$  时能满足规范要求。综合试验结果，建筑垃圾及纤维的最佳掺量为 40% 和 0.6%。



(a) 重型击实



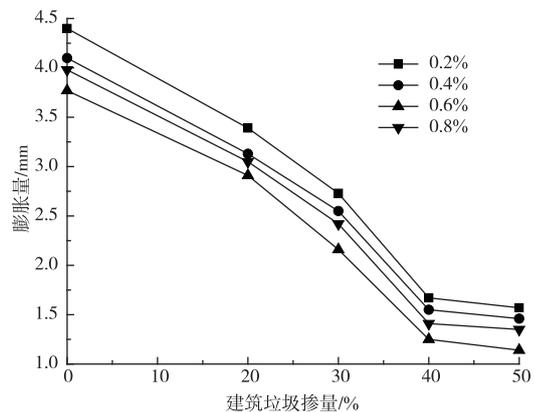
(b) 静压成型

图 1 重型击实和静压成型试样  $CBR_{5.0}$  值  
Fig. 1  $CBR_{5.0}$  values of different groups of samples under heavy compaction and static pressing

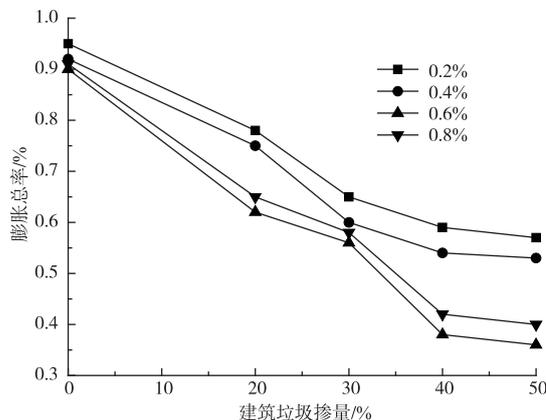
### 2.3 膨胀量试验结果

重型击实和静压成型两种试样的膨胀量如图 2 所示。由图 2 可知，添加纤维和建筑垃圾均能降低膨胀土的膨胀量，且随着建筑垃圾掺量的增加，试样的膨胀量呈现递减的趋势；随着纤维掺量的增加，试样的膨胀量呈现先递减后增大的趋势。相较于纤维而言，掺入建筑垃圾对膨胀土的膨胀量减小效果更加明显。但是当建筑垃圾掺量大于 40% 后，膨胀量降低幅度减弱。这是由于建筑垃圾掺量过高后骨料内部的孔隙无法完全填充，对膨胀土的膨胀抑制效果减弱；掺入纤维降低膨胀土膨胀的原因是纤维能增强土体之间的粘结性能，从而抑制其膨胀。在相同的建筑垃圾和纤维掺量下，静压成型的试样膨胀量更小，这是由于静压成型能够使建筑垃圾破碎、嵌固和土体充填效果更密实。

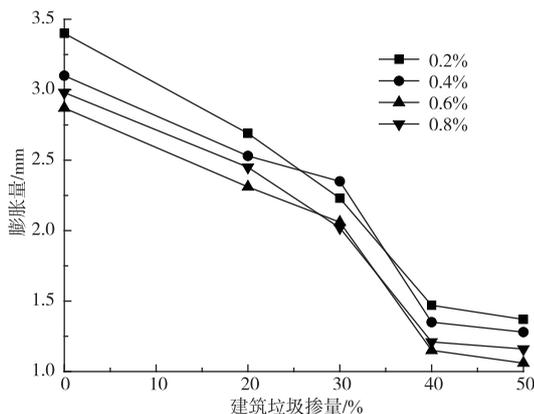
材料科学



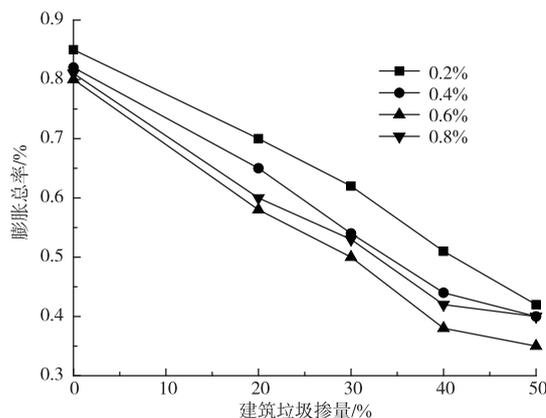
(a) 重型击实



(a) 重型击实



(b) 静压成型



(b) 静压成型

图2 重型击实和静压成型下试样膨胀量

Fig.2 Expansions of different groups of samples under heavy compaction and static pressing

图3 重型击实和静压成型下试样膨胀总率

Fig.3 Total expansion rate of different groups of samples under heavy compaction and static pressing

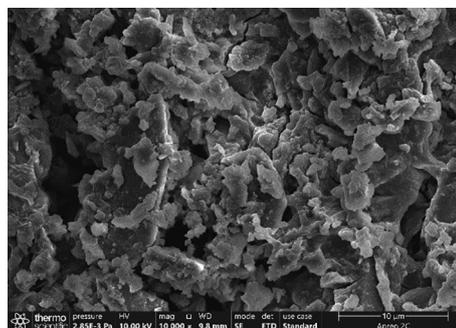
2.4 膨胀总率

重型击实和静压成型两种试样的膨胀总率如图3所示。由图3可知，添加纤维和建筑垃圾均能降低膨胀土的膨胀总率，且随着建筑垃圾掺量的增加，试样的膨胀总率呈现递减的趋势；随着纤维掺量的增加，试样的膨胀总率呈现先递减后增大的趋势。相较于纤维而言，掺入建筑垃圾对膨胀土的膨胀量减小效果更加明显。但是当建筑垃圾掺量大于40%后，膨胀量降低幅度减弱，与膨胀量变化规律一致。根据《公路路基设计规范》要求，路基的膨胀总率应低于0.7%，当建筑垃圾及纤维的掺量为40%和0.6%时，试样的膨胀总率远远低于0.7%。

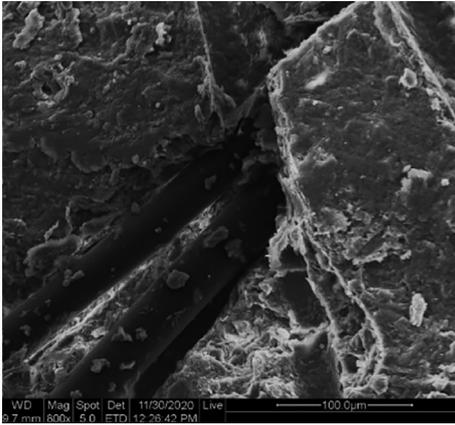
2.5 微观结构

图4为原始膨胀土和添加40%建筑垃圾及0.6%

纤维后的膨胀土微观结构图。由图4可以看出，原始膨胀土内部结构松散，含有较多孔隙；添加建筑垃圾和纤维后，纤维有效地连接建筑垃圾内部孔隙，为膨胀土提供附着点，使其能更加有效地填充内部孔隙，达到增强内部结构和强化性能的效果。



(a) 原始膨胀土



(b) 40%建筑垃圾+0.6%纤维

图4 原始膨胀土和改良膨胀土微观结构

Fig. 4 Microstructure of original expansive soil and improved expansive soil

### 3 结论

通过击实试验、加州承载比测试试验、膨胀量和电镜扫描等一系列试验研究了建筑垃圾和纤维联合改良膨胀土的改良效果和路用性能，得到结论如下：

(1) 建筑垃圾和纤维单独或联合作用下均能显著提高膨胀土的  $CBR_{5.0}$  和降低膨胀土的胀缩特性，当建筑垃圾和纤维掺量分别高于 40% 和 0.6% 后，改良效果减弱。最佳掺量下改良膨胀土  $CBR_{5.0}$  强度能满足一级公路路基填料和路床要求，胀缩总率也满足规范要求。

(2) 在相同的建筑垃圾和纤维掺量下，94% 压实度静压条件下制备的试样比 100% 压实度重型击实条件下制备的试样  $CBR_{5.0}$  更低，膨胀量和膨胀总率也更低。

(3) 微观测试结果表明纤维能有效地连接建筑垃圾内部孔隙，给膨胀土提供附着点，从而达到增强其内部结构和强化性能的效果。

### 参 考 文 献

[1] 程天成, 张承帅, 占雪芳. 水泥改良膨胀土次固结特征的

试验研究 [J]. 公路工程, 2021, 46 (3): 208-213, 262.

- [2] 侯铁军, 王岩. 膨润土杂化改性聚丙烯共混体系性能研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48 (2): 19-23, 123.
- [3] 晁军. 碱渣-石膏-水泥联合固化粉土的力学特性及微观机理研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 98-105.
- [4] 陆正, 王保田, 康靖宇, 等. 含充填裂隙的膨胀土强度特性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 24-28.
- [5] 张伟刚, 王瑞虎, 朱经亮, 等. 高速公路膨胀土边坡化学改良试验研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51 (3): 86-88, 179.
- [6] 郭雁翔, 陈庚, 陈荣伟, 等. 矿渣基地聚合物固化有机质土的强度试验及影响因素分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (2): 28-33, 63.
- [7] 肖田, 张俊峰, 陈明, 等. 石灰稳定建筑垃圾土修筑基层的适用性研究 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44 (5): 19-21, 33.
- [8] 冉武平, 李世彤, 陈远国. 油污泥热解残渣改良新疆盐渍土回弹模量试验研究 [J]. 公路工程, 2022, 47 (4): 111-116.
- [9] 阮永芬, 杨冰, 吴龙, 等. 化学改良湖相泥炭质土的配合比设计及其应用 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (7): 2240-2247.
- [10] 杨若辰, 张吾渝, 孙晓辉, 等. 芯吸纤维作用下盐渍土水盐降低效果研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (2): 58-67.
- [11] 戎泽斌, 王成, 李曦彤, 等. 新疆盐渍土环境下聚乙烯醇纤维混凝土抗冻性能试验 [J]. 塑料科技, 2022, 50 (6): 48-53.
- [12] 宋金岩, 孙红, 葛修润, 等. 玻璃纤维加筋土强度特征试验研究 [J]. 中外公路, 2012, 32 (5): 261-264.
- [13] 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.
- [14] S. M. HEJAZI, M. SHEIKHZADEH, S. M. ABTAHI, A. ZADHOUSH. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers [J]. Constr. Build. Mater, 2012, 30 (5) 100-116.
- [15] 周志清, 王定鹏. 建筑垃圾改良膨胀土填筑路基可行性研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53 (5): 716-722.