

文章编号: 1007-2993(2024)03-0344-07

重载铁路路基填料性能改良试验研究

王伟刚^{1,2} 李岩³

(1. 四川铁道职业学院, 四川成都 170032; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 170032; 3. 中国十九冶集团有限公司, 河北石家庄 050000)

【摘要】 基于静动力学试验, 研究纤维改良、固化剂改良及纤维-固化剂改良三种加固方法对重载铁路路基填料性能的影响, 进而提出最佳改良方案。结果表明: 采用固化剂改良, 固化土中固化剂掺量为 5% 时, 强度达到峰值, 养护时间越长强度越高。采用纤维改良, 当纤维掺量为 0.2% 时, 纤维土静动力学性能达到最佳; 当纤维长度为 0~12 mm 时, 强度随着纤维长度的增加而增强, 当长度为 12~18 mm 时, 强度随着纤维长度的增加而降低。采用纤维-固化剂联合改良方案加固效果最好。建议该地区采用纤维-固化剂联合改良方案增强路基填料物理力学性能, 试验得出的最佳掺量为: 固化剂掺量 5%, 纤维掺量 0.2%, 纤维长度 12 mm。

【关键词】 路基填料; 纤维改良; 固化剂改良; 纤维-固化剂改良

【中图分类号】 TU41

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.013

Experimental Study on Improvement of Heavy-haul Railway Subgrade Filler

Wu Weigang^{1,2} Li Yan³

(1. Sichuan Railway Vocational College, Chengdu 170032, Sichuan, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 170032, Sichuan, China; 3. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

【Abstract】 Based on static and dynamic triaxial tests, the effects of three reinforcement methods, including fiber improvement, curing agent improvement, and fiber - curing agent improvement, on the performance of heavy-haul railway subgrade filler were studied, and the best improvement scheme was proposed. The results show that when the curing agent content in the curing soil is 5%, the strength reaches the peak, and the longer the curing time, the higher the strength. With fiber improvement, when the fiber content is 0.2%, the soil static dynamic performance of fiber reaches the best; When the fiber length is 0~12 mm, the strength increases with the increase of fiber length, and when the length is 12~18 mm, the strength decreases with the increase of fiber length. The fiber-curing agent combined improvement scheme is the best reinforcement effect. It is recommended that the fiber-curing agent combined improvement scheme be used to enhance the mechanical properties of the subgrade filler, and the optimal curing agent content is 5%, fiber content is 0.2%, and fiber length is 12 mm.

【Key words】 subgrade filler; fiber improvement; curing agent improvement; fiber-curing agent improvement

0 引言

铁路路基填料是用于基床表层、底层及路堤本体的一种重要填筑材料, 路基质量的高低完全取决于路基填料的物理力学特性。当天然路基填料强度不能满足设计承载要求时, 需要对填料土进行改良, 常用的填料改良方法有纤维加筋法和改良剂法。

将纤维作为土体加固材料, 能有效抑制土体侧向变形及竖向变形, 国内外学者对纤维加固改良路基填料性能进行了大量研究。一些研究者通过三轴压缩试验, 确定了纤维掺入量对加筋砂填料强度的影响规律^[1-4]; Santoni 等^[5] 通过研究提出纤维加固最佳加

筋掺入量为 0.6%~1%, 纤维的最佳长度为 5.1 mm; 也有研究者对高岭石黏土、粉煤灰、软土、膨胀土等采用纤维进行了改良研究^[6-9], 结果均表明纤维加筋措施是一种优良的土体加固技术, 能够有效提高土体的抗拉压强度、增加土体破坏韧性、降低土体裂隙发育程度。

改良剂改良路基填料能大幅提高土的工程和力学特性, 国内学者进行了多方面的研究。张守超^[10] 使用改良剂和水泥对粉砂和粉质黏土进行改良试验, 结果表明掺加改良剂比掺加水泥时无侧限抗压强度提高, 强度损失率及质量损失率比水泥小, 耐久性也

作者简介: 王伟刚, 男, 1984 年生, 汉族, 甘肃秦安人, 硕士, 讲师, 主要从事道路与铁道工程方面研究。E-mail: 59927903@qq.com

好于水泥,并给出改良剂掺入量的使用建议。王翰越等^[11]通过冻胀率试验和无侧限抗压强度试验,研究石灰改良黄土抗冻性能,建议该地区改良黄土石灰剂量 $\geq 5\%$;贺建清等^[12]对石灰改良软土路基填料的强度特性进行了研究,结果表明改良软土的最优含水率与石灰掺入量成正比,改良土的强度随掺灰量先增加后减小。王天亮等^[13]在冻融情况下通过动三轴试验对不同掺和率的水泥及石灰改良土进行了研究,试验结果表明反复冻融作用下水泥改良土效果优于石灰改良土,均优于素土的力学性能。刘永红^[14]通过物理特性试验和力学特性试验对黄土地区石灰改良土进行了研究,结果表明最佳石灰掺量为3%。

重载铁路路基承受的外部荷载高于普通铁路路基,相应的重载铁路路基强度和稳定性要求也较普通铁路路基高。因此,在重载列车动荷载和自然因素影响下,必须保证路基稳定,且确保变形控制在允许范围内。为探索重载铁路路基填料改良方法,本文基于静动力试验,研究纤维改良、固化剂改良及纤维-固化剂联合改良三种加固方法对路基填料性能的影响,对比分析单一和联合改良填料对路基工作性状及力学特性的影响,进而判断三种路基改良材料运用于重载铁路路基的可行性与有效性。

1 试验材料与方案

1.1 试验土样

试验土样采用某重载铁路某路段路基填料,将

路基土样风干碾压过筛(孔径 20 mm)后进行筛分,路基填料颗粒级配分布见表 1,由表 1 数据计算得到: $d_{10}=0.132$ 、 $d_{30}=0.41$ 和 $d_{60}=1.37$,土的不均匀系数 $C_u=10.833$,曲率半径 $C_c=1.026$ 。因此,路基土样为级配良好的粗粒土填料。

表 1 路基填料土样颗粒级配

粒径/mm	质量含量/%	粒径/mm	质量含量/%
>10	1.130	1~0.5	15.613
10~5	10.130	0.5~0.25	13.144
5~2	11.233	0.25~0.075	18.188
2~1	27.700	≤ 0.075	2.862

采用轻型击实法制作路基土样。由击实试验结果得出土样最优含水率为 8.5%,对应的最大干密度为 2.06 g/cm^3 。

1.2 改良材料

纤维加筋材料选用易于推广且经济性好的聚丙烯纤维 MP-I。这种纤维具有高耐酸碱性及低导电导热性,分散性好且安全无毒。聚丙烯纤维物理力学性能见表 2。

固化剂选用哈尔滨工业大学研制的高性能建筑材料固化剂。这种固化剂呈灰白色粉末状,细度 200 目以上,无味无毒,且易溶于水,原材料易获取,价格低廉。固化剂主要成份见表 3。

表 2 聚丙烯纤维的物理力学性能

类型	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	直径/ μm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	燃点/ $^{\circ}\text{C}$	断裂伸长率/%	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
单丝Y型	0.91	31	165~170	590	30	≥ 3.5	≥ 350

表 3 固化剂主要成分

成份	铝酸盐	铁铝酸盐	四钙硅酸盐	硫酸盐	二氧化硅	硫铝酸盐
质量含量/%	36	21	14	9	3	17

1.3 土样制备

根据试验含水量,加所需蒸馏水,拌制均匀后,将土样装入密封袋中,密封 24 h 备用^[15]。3 种不同改良方式土样制备方法如下:

1)纤维土样。将所需纤维量掺入土中,混合均匀,保证纤维三维均匀分布于土中,制成纤维土制样。

2)固化剂土样。将所需固化剂量掺入土中,拌匀后制成固化土样。

3)纤维-固化剂土样。制备纤维固化土时,要先掺入所需的固化剂搅拌均匀后,再掺入所需的纤维量,

混合均匀后制件,保证纤维三维均匀分布于土中,最后将试样放入养护箱进行养护。

采用相同的压实度,按照 100% 的压实度控制土样干密度。图 1 为试模及试件,试件高度 125 mm,直径 61.8 mm。将制备好的土样放入成模筒,在制样机上成批制样,应同时制作同组对比试样,以保证试样间的差别最小,便于试验对比分析。

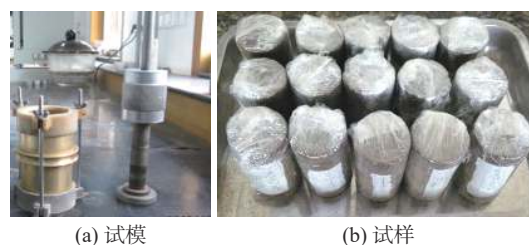


图 1 试模及试样

1.4 试验方案

(1) 静力试验

对不同含水量、围压、纤维掺量、纤维长度、固化剂掺量、养护时间的试样进行三轴试验。在静三轴材料试验机上进行时采用应变控制式,加载速率为 1.25 mm/min。

通过对已有文献 [10-14] 中的各类土质土体加固研究进行统计分析,固化剂最佳掺量在 5%~6% 范围内,结合《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)化学改良试验,固化土最经济合理的固化剂掺量不大于 5%,因此,应在固化剂最佳掺量范围内进行研究,此试验选取 5%、3% 及 0% 的固化剂掺量^[16]。路基填料改良静力试验工况见表 4。

表 4 路基填料改良静力试验工况

编号	土的类型	含水率 w/%	围压 σ_3 /MPa	纤维长度/mm	纤维掺量/%	固化剂掺量/%	养护时间/天
X-L1				0	0		
X-L2					0.05		
X-L3					0.1		
X-L4				18	0.2		
X-L5					0.3		
X-M1	纤维土	8.5	0.3	0	0		
X-M2				3			
X-M3				9			
X-M4				12	0.3		
X-M5				18			
G-3						3	
G-4						4	3
G-5						5	
G-D1	固化土	11.5	0.3				3
G-D2						5	14
G-D3							28

(2) 动力试验

图 2 为动三轴试验加载过程。将试样置于动三轴试验机,等压固结 120 min 后,采用正弦波型的方式加载动荷载。并以动荷载幅值为变量模拟列车荷载对应变速率的影响,由小到大分级逐级循环加载,加载级数需超过 12 级且每级振动 12 圈,直至试件破坏,即当应变达到 5% 时,试验终止。具体工况参数见表 5。

由于单次试验结果具有偶然性,因此同一组试验相同条件下做 3 次,取 3 次试验结果的平均值作为最终值。

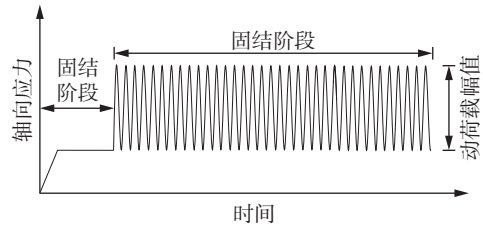


图 2 动三轴试验加载过程

表 5 动力试验工况与拟合参数

编号	压实度	围压 σ_3 /MPa	频率 f /Hz	含水量 w /%
WY0.5		0.5		
WY0.9		0.9	4	8.5
WY1.2		1.2		
f1			1	
f2	1.00	0.3	2	8.5
f3			3	
f5			5	
w10				10
w12		0.3	4	12
w14				14
YS0.85	0.98			
YS0.98	0.85	0.3	2	8.5

2 填料性能改良试验结果

2.1 填料掺入固化剂性能改良试验结果

(1) 固化剂掺量

图 3 为不同的固化剂掺量下固化土的应力-应变关系及破坏应力曲线(围压为 0.3 MPa、养护时间为 3 天)。由图 3 得出,固化土初始切线模量、峰值强度明显高于素土($n=0%$),固化剂掺量 $n=5%$ 的固化土峰值强度可达 2000 kPa,约为素土峰值强度的 2 倍,表明掺入固化剂能提高路基土强度。但随着固化剂掺量增加,固化土峰值强度和残余强度增加。随着应变增加,素土应力不断的增加,应力无明显峰值点,表现为加工硬化型,一般表现为鼓胀破坏特征,为塑性破坏特征;随着应变增加,固化土应力先增加后减小,具有明显应力峰值点现象,表现为加工软化型,一般为剪切破坏,存在明显的剪切面,为脆性破坏特征。随着固化剂掺量的增加,初始切线模量变化并不明显。

(2) 养护时间

图 4 为不同养护时间下固化土应力-应变关系及破坏应力曲线(围压为 0.3 MPa、固化剂掺量 $n=5%$)。由图 4 得出,在条件相同的情况下,随着应变的增加,固化土的应力-应变关系曲线出现明显峰

值, 养护 28 天的固化土峰值强度约为 3300 kPa, 是养护 3 天的 1.3 ~ 1.4 倍。峰值点后存在较大的应力降, 但仍有一定的承受力, 固化土应力-应变关系曲线呈应变软化型特征, 属于脆性破坏。随着养护时间的增加, 固化土初始切线模量变化并不明显, 而峰值强度不断增加, 但峰值后应力不断趋于平稳, 平稳值比较接近, 应力降增加。这是由于养护时间越长, 固化剂与土颗粒之间的化学反应越完全, 固结硬化和结晶程度越好, 土体越坚硬, 强度越高。

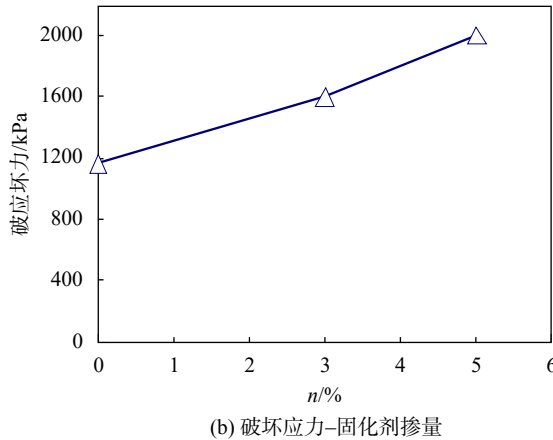
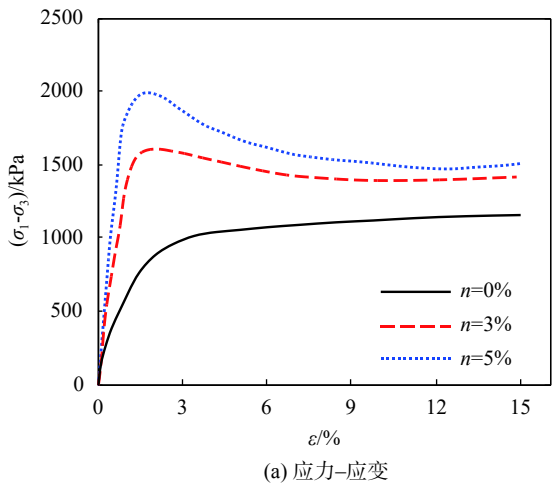


图 3 不同固化剂掺量下固化土的应力-应变关系及破坏应力曲线

(3) 围压

图 5 为固化剂掺量 $n=5\%$ 、养护龄期 3 天和 28 天时不同围压下固化土的应力-应变关系曲线。由图 5 得出, 养护 28 天强度达 2000 kPa 以上, 约为养护 3 天强度的 2 倍, 由此可知, 围压对养护 28 天的固化土强度的影响比对养护 3 天的固化土强度的影响要大。

2.2 填料纤维加筋性能改良试验结果

(1) 纤维掺量

图 6 为不同纤维掺量纤维土的应力-应变关系

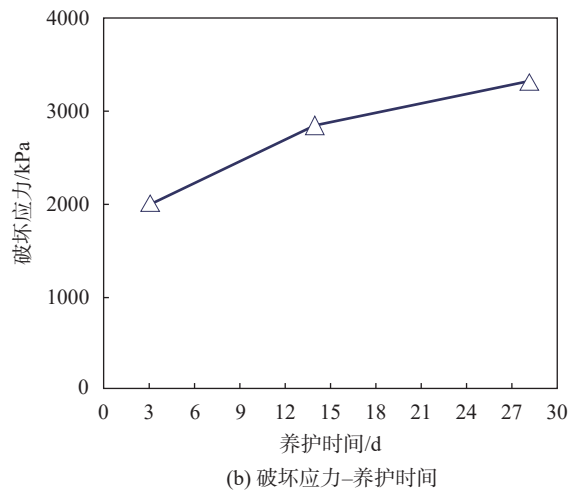
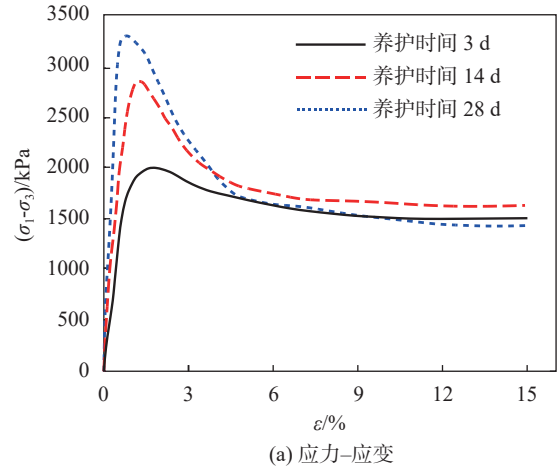


图 4 不同养护时间下固化土的应力-应变关系及破坏应力曲线

及破坏应力曲线(围压为 0.3 MPa、纤维长度 $L=18$ mm)。由图 6 得出, 随着应变增加, 素土和纤维土的应力开始急剧增加, 随后增加放缓且趋于平稳。由于纤维掺入使得土体中纤维与土颗粒之间的摩擦力大于土颗粒之间的摩擦力, 使得纤维土强度高于素土强度。当纤维掺量为 0.05% 时, 纤维掺入对土体损伤作用大于纤维对土体的加强作用, 因此初始切线模量和峰值强度低于素土。随着纤维掺量增多, 纤维使土体产生约束力增大, 当纤维掺量达到 0.2% 时, 改良效果最佳。但当纤维含量超过最佳含量 0.2% 时, 会出现纤维分布的不均匀, 纤维与纤维之间的间距减小, 甚至互相接触, 导致纤维土黏结力和摩擦力分布的不均衡, 纤维本身比较轻质, 更容易引起土体的不均匀沉降, 进而强度降低^[17]。

(2) 纤维长度

图 7 为不同纤维长度纤维土的应力-应变关系及破坏应力曲线(围压为 0.3 MPa、纤维掺量 $m=0.3\%$)。由图 7 得出, 掺入纤维长度在 0 ~ 12 mm 时,

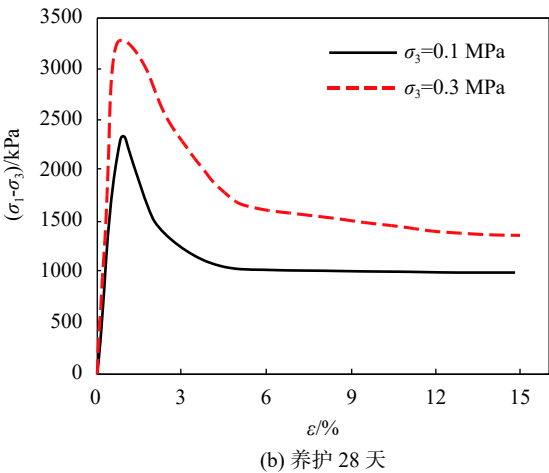
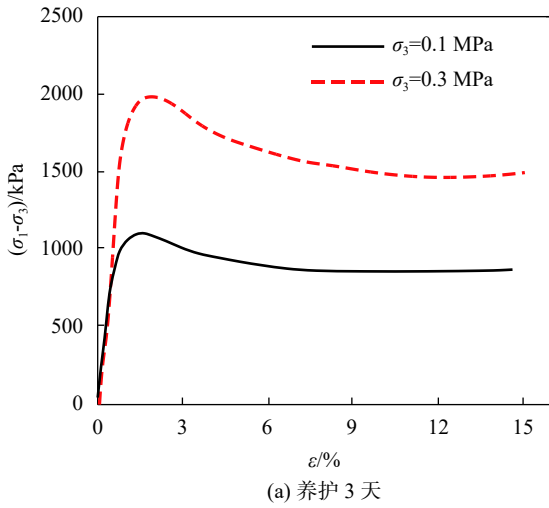


图 5 不同围压下固化土的应力-应变关系曲线

纤维土的初始切线模量随纤维长度的增长而增加,峰值强度也随之增强,这是由于土中摩擦力和弯曲交织嵌锁力约束作用随纤维增长而越强,土体整体骨架结构因此而更加结实。但当掺入纤维长度在 12~18 mm 时,随着纤维长度越长,纤维土的初始切线模量反而降低,峰值强度随之减少,这是由于纤维长度超过限值,容易导致纤维间互相缠绕交织结团,使得纤维在土中分布呈不均匀性,从而出现强度降低现象。

2.3 填料掺入固化剂与纤维加筋联合性能改良试验结果

为对比不同加固方法的改良效果,分别对纤维法(代号 X,纤维长度 $L=9$ mm,掺量 $m=0.3\%$)、固化剂法(代号 G,掺量 $n=5\%$)、纤维-固化剂法(代号 XG,纤维长度 $L=9$ mm,纤维掺量 $m=0.3\%$,固化剂掺量 $n=5\%$)及素土(代号 S)的试验结果进行整理分析。图 8 为频率为 2 Hz、围压 0.1MPa 时不同加固方案下路基土骨干曲线。由图 8 可知,纤维-固化剂法加固土体的效果最佳,其次是固化法,而纤维法效果最

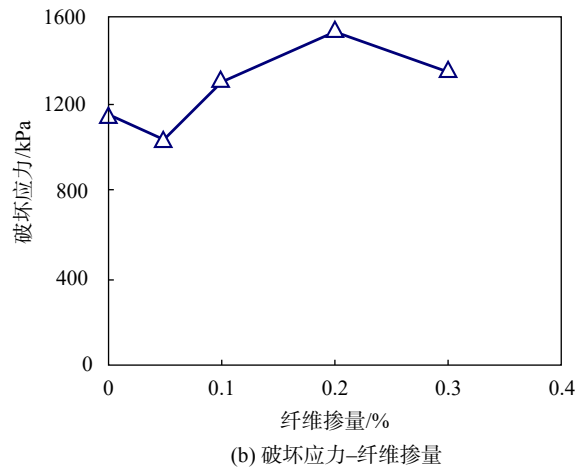
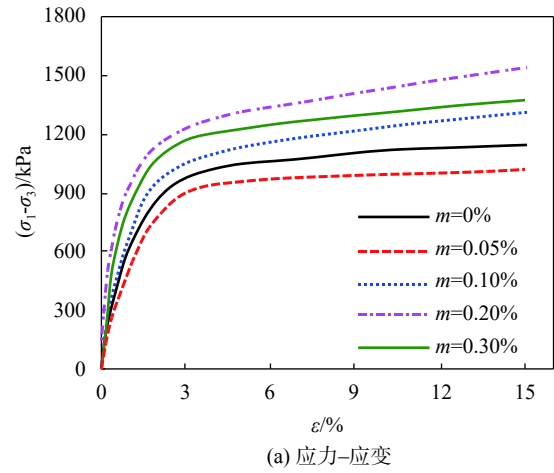


图 6 不同纤维掺量下纤维土的应力-应变关系及破坏应力曲线

差,不管单一加固还是联合加固,均能很好的起到良好的加固效果,但纤维具有很好的抗拉性能,能解决固化土由于开裂引起的工程问题,同时联合加固的强度也最好。

图 9 为不同加固方案路基土归一化动剪切模量比-动剪应变关系曲线。根据图 9 可知,随着动剪应变增加,归一化动剪切模量比减小,呈衰减状态。相同动剪应变下,纤维加固土动剪切模量比最大,其归一化动剪切模量比衰减的程度最快;固化剂加固土动剪切模量比最小,其归一化动剪切模量比衰减的程度最慢。

图 10 为不同方案路基土最大动剪切模量分布情况。由图 10 可以看出,固化土的最大动剪切模量值最大,素土最小,这是由于固化土中掺入固化剂产生胶结硬化物,比较密实,最大动剪切模量也最大。

图 11 为不同加固方案路基土参考剪应变分布情况。由图 11 可以看出,纤维土的参考剪应变最大,固化土的参考剪应变最小。

图 12 为不同加固方案下路基土阻尼比-动剪切

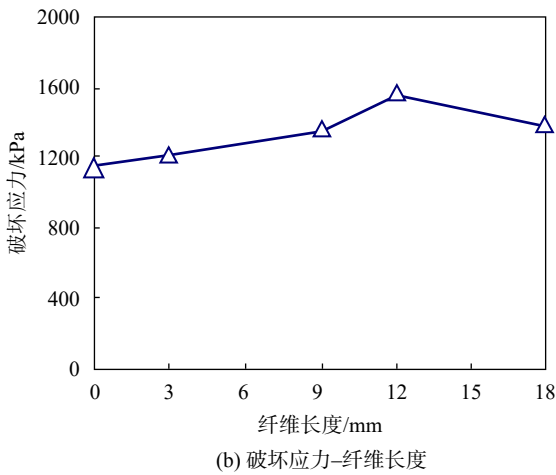
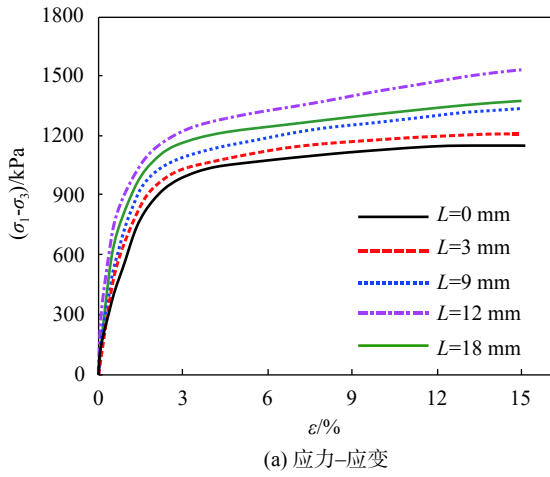


图7 不同纤维长度纤维土的应力-应变关系及破坏应力曲线

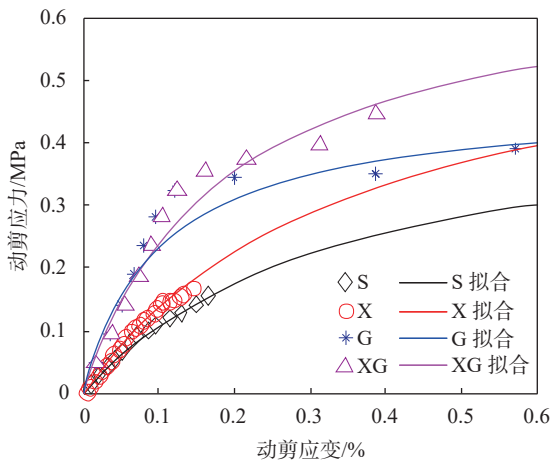


图8 不同加固方案路基土骨干曲线

模量关系。由图12可以看出,素土的阻尼比最小,固化土阻尼比最大。这表明素土路基土最不密实,土颗粒之间接触最为不紧密,能量消耗要多,因此阻尼比要大。

图13为不同加固方案下路基土阻尼比-动剪切模量关系曲线。由图13可以看出,随着动剪切模

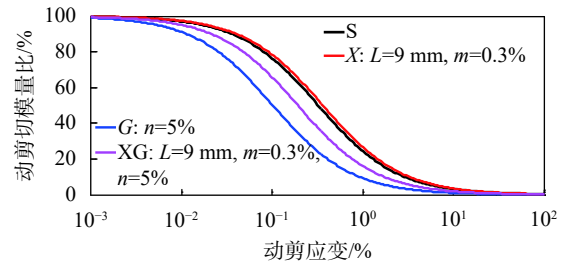


图9 不同加固方案路基土动剪切模量比-动剪应变关系

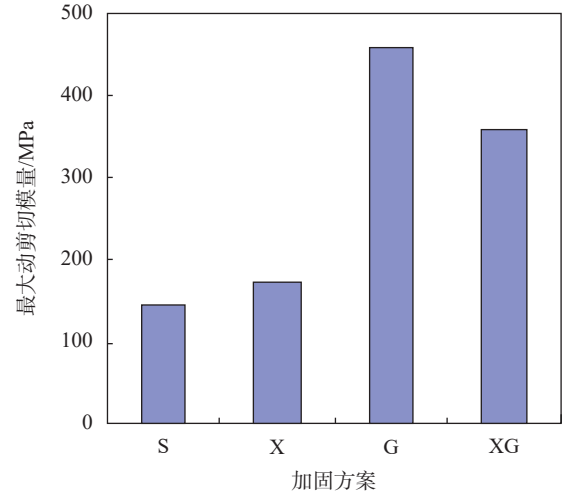


图10 不同加固方案路基土的最大动剪切模量

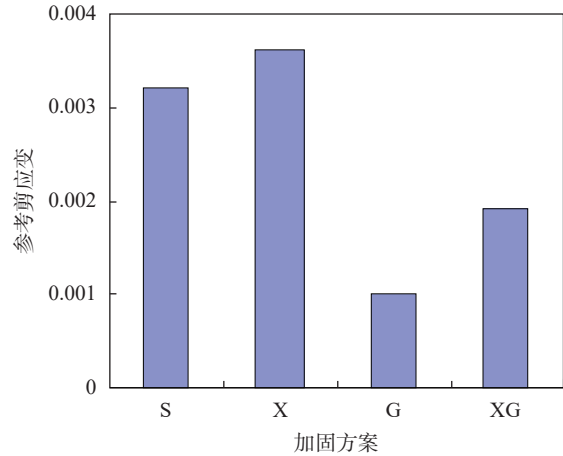


图11 不同加固方案地基土的参考剪应变

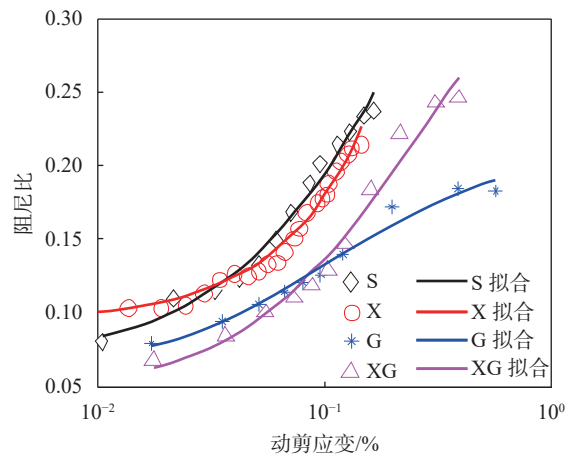


图12 不同加固方案路基土阻尼比-动剪应变关系

量比的增加,阻尼比呈衰减状态,素土和纤维土最不密实,故而衰减越快。

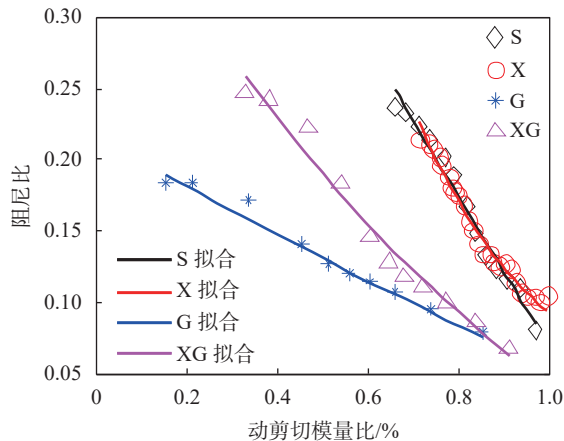


图 13 不同加固方案路基土阻尼比-动剪切模量比关系

3 结论

本研究通过静动力试验研究了改良重载铁路路基填料性能,得到了以下结论:

(1) 固化剂可显著提高路基土强度,固化剂掺量为 5% 的固化土峰值强度大约为素土峰值强度的 2 倍;固化剂与土颗粒之间的化学反应完全程度及土体坚硬程度与养护时间成正比关系。

(2) 纤维加筋改良方案中,随着纤维掺量的增加,纤维土的初始切线模量和峰值强度呈先增后减的变化趋势,纤维土的最佳纤维含量为 2%;纤维长度为 0~12 mm 时,随着纤维长度的增加,峰值强度增强;纤维长度为 12~18 mm 时,随着纤维长度的增加,峰值强度降低。

(3) 采用纤维-固化剂联合改良路基土,既能提高土体强度,同时由于纤维的作用可以解决固化土的开裂问题,其加固效果最好。因此,建议该地区采用纤维-固化剂联合改良方案增强路基填料物理力学性能。试验得出的最佳掺量为:固化剂掺量 5%,纤维掺量 0.2%,纤维长度 12 mm。

参 考 文 献

- [1] HIRAKAWA D, MIYATA Y. Roller compaction behavior of short fiber reinforced gravelly soil[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(64): 2164-2169.
- [2] PATEL S K, SINGH B. Strength and deformation behavior of fiber reinforced cohesive soil under varying moisture and compaction states[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(4): 1767-1781.
- [3] 李 建,唐朝生,王德银,等.基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J].*岩土工程学报*, 2014, 36(9): 1696-1704.
- [4] 朱定华,董磊平,何 峰,等.聚苯乙烯纤维轻质混合土的抗压强度特性[J].*南京工业大学学报*, 2010, 32(2): 53-57.
- [5] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(3): 258-268.
- [6] MAHMOUD G, MAHYA R. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber reinforced clay[J]. *Cold Region Science and Technology*, 2010, 61(2/3): 125-131.
- [7] MAHIPAL S C, SATYENDRA M, BIJAYANANDA M. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(5): 429-435.
- [8] 唐朝生,施 斌,高 玮,等.含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 2968-2973.
- [9] 雷胜友,丁万涛.加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验[J].*岩土工程学报*, 2005, 27(4): 482-485.
- [10] 张守超.严寒地区高速铁路路基填料新型防冻胀改良技术研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2017.
- [11] 王翰越,蒋应军.石灰改良黄土路基填料抗冻性能分析[J].*中国科技论文*, 2020, 2(15): 154-158.
- [12] 贺建清,张家生.石灰改良软土路基填料饱水强度特征性研究[J].*矿冶工程*, 2004, 24(4): 18-21.
- [13] 王天亮,刘建坤,田亚护.水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J].*岩土工程学报*, 2010(11): 1733-1737.
- [14] 刘永红.石灰改良黄土路堤特性试验研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [15] 刘 鹭.冻融作用下秸秆纤维加筋土力学特性研究[J].*岩土工程技术*, 2022, 36(3): 243-247.
- [16] 周易平.高速铁路路基填料改良技术的研究[D].北京:铁道部科学研究院,2000.
- [17] 仇安兵.废弃纤维改良水泥固化土力学特性及破坏模式研究[J].*岩土工程技术*, 2022, 36(1): 79-85.

收稿日期: 2023-03-14