

渣土改良流态固化土路用动力特性研究

Study on the Dynamic Characteristics of Road Use of Slag-amended Fluid-consolidated Soils

吴跃东, 张瑞星, 刘 坚, 杨博文

(河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘 要: 针对我国工程建设中废弃渣土改良固态土路用动力特性问题, 提出采用水泥-粉煤灰复合固化剂改良废弃渣土制备流态固化土, 通过 DDS-70 电磁式动三轴试验系统模拟交通荷载 (半正弦波, 1 Hz, 20~520 kPa 分级加载), 系统研究水固比与灰土比对材料动力特性的影响规律。结果表明: 渣土改良流态固化土的动应力-动应变关系呈显著非线性特征, 灰土比增加可缩短弹性阶段并提升弹性极限应力至 280 kPa; 阻尼比随动应变呈现先减后增趋势, 峰值达 35%, 灰土比提高显著增强能量吸收效率; 长期动载下累积塑性变形可控, 典型市政交通荷载 (≤ 200 kPa) 下的应变值满足路基稳定性阈值要求。流态固化土凭借其自密实性、低水泥用量及泵送施工优势, 不仅实现了工程废弃渣土的高效资源化利用, 同时降低了施工成本与碳排放, 为绿色基础设施建设提供了兼具性能与环保效益的创新型解决方案。

关键词: 废弃渣土资源化利用; 流态固化土; 动三轴试验; 动力特性; 灰土比

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0100-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.019

WU Yuedong, ZHANG Ruixing, LIU Jian, YANG Bowen

(College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the problem of road dynamics of solid soil improved by waste residue in engineering construction in China, it is proposed to adopt cement-fly ash composite curing agent to improve waste residue to prepare fluid cured soil, simulate traffic load (half sine wave, 1 Hz, 20-520 kPa graded loading) by DDS-70 electromagnetic dynamic triaxial test system, and systematically study the influence of the water-to-solid ratio and the grey-to-soil ratio on the dynamics of the material. The results shows that the dynamic stress-strain relationship of slag-improved fluid-consolidated soil shows significant non-linear characteristics, and the increase of grey-soil ratio can shorten the elastic phase and raise the elastic ultimate stress to 280 kPa; the damping ratio shows a trend of decreasing and then increasing with the dynamic strain, and the peak value reaches 35%, and the increase of grey-soil ratio significantly enhances the efficiency of energy absorption; the cumulative plastic deformation is controllable under long-term dynamic loading, and the strain value under typical municipal traffic load (≤ 200 kPa) meets the requirements of the roadway dynamic characteristics. With its self-compacting, low cement consumption and pumping advantages, fluid cured soil not only realises the efficient resource utilisation of engineering waste soil, but also reduces construction costs and carbon emissions, providing an innovative solution for green infrastructure construction that

基金项目: 国家自然科学基金 (52378337)。

作者简介: 吴跃东 (1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 软土地基处理和基础工程。

通信作者: 张瑞星 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2025-03-23

combines performance and environmental benefits.

Key words: resource utilisation of waste dirt; fluidised solidified soil; dynamic triaxial test; dynamic behaviour; fly ash content ratio

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进，工程建设产生的废弃渣土年产量已逾数十亿立方米。传统填埋处置模式不仅占用土地资源，更引发环境污染与碳排放问题^[1-3]。同时，市政道路路基在长期交通循环荷载作用下面临沉降变形、结构失稳等风险，尤其在狭窄地下空间（如电缆管道回填）中，传统压实工艺难以满足质量要求。在此背景下，渣土改良流态固化土凭借其自密实性、可泵送性及低碳特性，成为破解废弃土资源化利用与工程性能提升双重难题的关键技术^[4-5]。

近年来，流态固化土的制备与性能优化研究取得显著进展。在材料配比方面，朱伟等^[6]、朱龙飞等^[7]通过建筑垃圾渣土改良试验，系统分析了水固比、灰土比对无侧限抗压强度与抗冻胀能力的影响，提出灰土比与强度呈显著正相关的调控规律；王成斌^[8]利用合肥地铁工程案例进一步验证了水泥-碱激发矿渣复合固化剂在盾构渣土改良中的可行性，其干湿循环耐久性满足地下回填标准。此外，张鹏等^[9]针对矿渣水泥改良土的动剪切模量与阻尼比展开研究，发现矿渣掺量对动力性能的优化作用显著，为材料动力特性研究提供了理论支撑。

在动力特性研究领域，早期研究成果为流态固化土技术提供了重要支撑：Hardin 等^[10]揭示了土体动弹性模量与动应力幅值、围压及内部结构的关联规律；刘增祥等^[11]、何俊等^[12]分别通过动三轴试验验证了轻质土与碱渣固化土的动应力-动应变关系符合双曲线模型及 Hardin-Drnevich 模型，为本构模型构建奠定了基础。材料优化方面，张鹏等^[9]证实矿渣水泥可显著提升动剪切模量，而钟秀梅等^[13]提出的粉煤灰掺量-动强度定量关系为低强度需求场景提供了经济性方案。环境耦合效应研究中，Chen 等^[14]指出冻融循环会加剧动剪切模量衰减，Shang 等^[15]则证明水泥固化技术可使动剪强度提升 2~3

倍。针对工程应用场景，周盈等^[16]通过 GDS 动三轴试验探究长三角滨海公路软黏土在交通荷载下的动力特性，研究发现，高频荷载作用会显著加剧土体轴向累积应变的发展，而采用真空预压联合塑料排水板（PVD）处理后，土体回弹性能大幅增强，有效控制了塑性变形。然而，既有研究多聚焦静力性能或单一动力因素，对交通循环荷载作用下的长期动力响应机制仍缺乏系统性探讨，制约了流态固化土在高标准路基工程中的规模化应用。

以南京市浦口区电力地下工程为背景，基于前期配合比优化结果（粉煤灰掺量 21%），采用水泥-粉煤灰复合固化剂改良渣土，通过 DDS-70 电磁式动三轴试验系统，模拟交通荷载条件（半正弦波，1 Hz 频率，20~520 kPa 动应力分级加载），系统探究不同水固比（0.6~0.64）与灰土比（0.08~0.16）下材料的动应力-动应变关系、阻尼比及累积塑性变形特性。研究旨在揭示流态固化土动力性能的配比调控规律，建立累积变形预测模型，为提升市政道路路基的动载适应性与服役寿命提供理论支撑，推动废弃渣土资源化与低碳施工技术的深度融合。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验材料以南京市浦口区某电力地下工程产生的废弃渣土为基材，采用水泥（普通硅酸盐水泥）与粉煤灰作为复合固化剂进行改良。其中，粉煤灰掺量固定为 21%（双掺比例），灰土比（水泥与粉煤灰总质量占干土质量的百分比）设置为 0.08、0.12、0.16 三个梯度，水固比（水与固相总质量比）选取 0.60、0.62、0.64 三种工况。废弃渣土物理性质指标见表 1。

Table 1 Indicators of physical properties of waste soil on site						
土体密度 /(g/cm ³)	天然含水率/%	风干含水率/%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	比重
2.44	19.4	6.23	36.9	17.7	19	2.69

道桥技术

1.2 试件制备及养护

试件制备采用直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱形模具。将废弃渣土、固化剂（水泥 + 粉煤灰）与水按设计配比均匀搅拌至流态，静置消泡后浇筑入模，振捣密实后脱模。试件在标准养护室（温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 95\%$ ）中密封养护 28 d，确保水化反应充分。试验前，所有试件需进行真空抽气饱和处理：将试件置于真空抽气缸内抽气至真空度达 1 个大气压并维持 1~2 h，随后注入无气水浸没试件，静置 10 h 后检测质量，剔除不合格试件。

1.3 试件方案

试验以等向固结条件（固结应力比 $K_0 = 1$ ）为基础，围压设定为 100 kPa，模拟市政道路路基低填筑高度的典型工况。动荷载频率通常与交通车辆行驶频率及交通工具种类相关^[17]，动荷载加载采用等幅单侧半正弦波，频率为 1 Hz。动应力从 20~520 kPa 分 18 级逐级施加，每级振动 12 次，试验全程采用不排水条件，以反映瞬时动荷载作用下土体的实际排水状态。试验配比见表 2。

表 2 试验参数设置方案				
Table 2 Scheme for setting test parameters				
编号	水固比	灰土比	双掺粉煤灰/%	围压/kPa
D1-1	0.6	0.08	21	100
D1-2	0.6	0.12	21	100
D1-3	0.6	0.16	21	100
D2-1	0.62	0.08	21	100
D2-2	0.62	0.12	21	100
D2-3	0.62	0.16	21	100
D3-1	0.64	0.08	21	100
D3-2	0.64	0.12	21	100
D3-3	0.64	0.16	21	100

2 试验结果分析

2.1 动应力 - 动应变关系

渣土改良流态固化土的动应力 - 动应变关系呈现显著的非线性特征，如图 1 所示。在初始加载阶段（动应力 < 200 kPa），动应变随应力近似线性增长，材料处于弹性变形阶段，此时土体内部的水化产物（如 C-S-H 凝胶）形成的胶结结构有效抵抗外部荷载，颗粒间滑动受限。当动应力增至 200~520 kPa 时，曲线斜率逐渐降低，动应变累计速率加快，材料进入弹塑性阶段。这一现象表明，随着荷载增大，土体内部胶结结构开始局部破坏，颗粒间滑动与孔隙压缩成为主导变形机制，动应力 - 动应变曲线整体呈现对数增长趋势，与刘增祥等^[11]提出的双曲线模型规律一致。进一步分析发现，灰土比从 0.08 增至 0.16 时，线弹性阶段缩短约 30%（由初始应变 0.15% 缩短至 0.10%），弹性极限应力提高至 280 kPa（灰土比 0.16），表明固化剂掺量增加可显著增强土体刚度，延缓塑性变形发展。其机理在于水泥与粉煤灰的水化反应生成更多 C-S-H 凝胶，填充颗粒间隙并强化骨架结构。此外，水固比升高（0.6~0.64）导致初始动剪切模量 $G_{\max}$ 下降 18%~25%，如图 2 所示，水固比 0.6 试件在低应变阶段（ $\gamma < 0.05\%$ ）呈现凹形上升曲线，应变增幅较同应力水平下其他配比高约 35%，反映出低含水量下土体对剪应力的敏感性增强，可能因水分不足导致颗粒间润滑作用减弱，局部应力集中加剧。

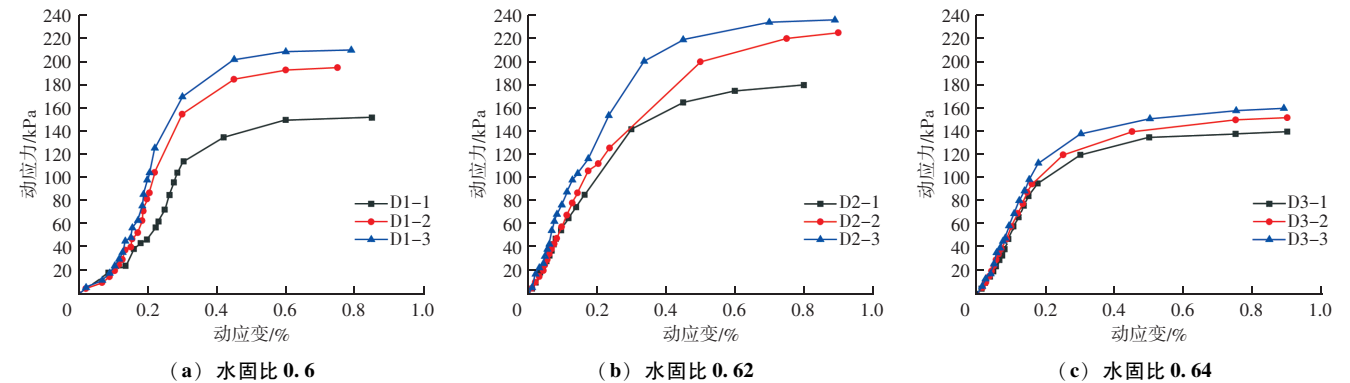


图 1 各水固比下的动应力 - 动应变关系图

Fig. 1 Dynamic stress - dynamic strain relationship for each water - solid ratio

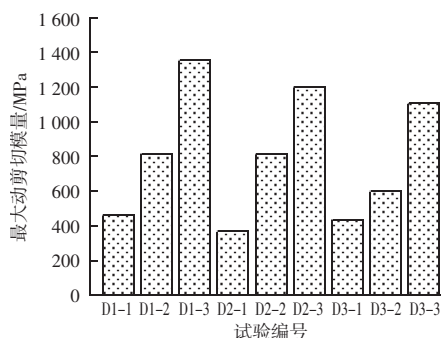


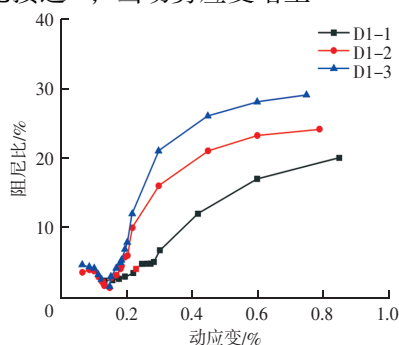
图2 各组试件的最大动剪切模量

Fig. 2 Maximum dynamic shear modulus of each group of specimens

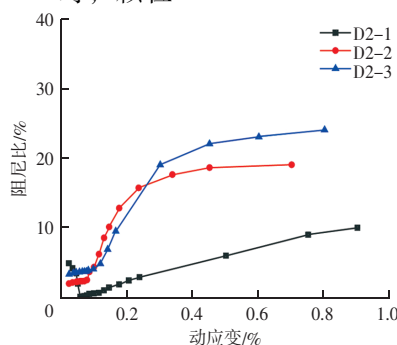
2.2 阻尼比

如图3所示, 阻尼比随动剪应变增加呈现“先减小后上升”的非单调趋势, 整体变化范围为0~35%。在初始低应变阶段 ($\gamma < 0.1\%$), 土体内部孔隙受压实作用主导, 能量耗散以黏滞摩擦为主, 阻尼比接近0; 当动剪应变增至0.1%~0.5%时, 颗粒

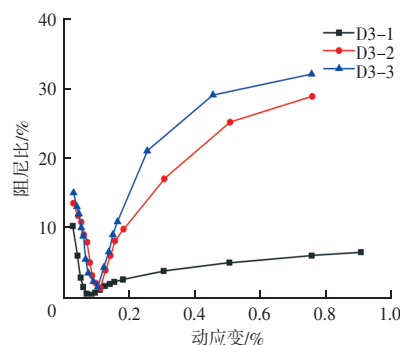
重排与胶结结构破坏加剧, 阻尼比快速上升至峰值(25%~35%), 此时土体通过内部摩擦与裂隙扩展消耗大量能量; 随着应变进一步增大 ($\gamma > 0.5\%$), 土体结构趋于密实, 阻尼比逐渐稳定。配比参数的影响显著: 灰土比由0.08提升至0.16时, 峰值阻尼比从28%增至32%, 且达到峰值所需的临界应变由0.3%降低至0.25%。这一现象归因于固化剂掺量增加优化了颗粒级配, 粉煤灰微珠的填充效应与水泥水化产物的胶结作用协同增强土体密实度, 从而提升能量吸收效率。此外, 水固比0.64试件的阻尼比曲线较0.6试件整体下移约5%, 表明高含水量削弱了颗粒间有效接触, 降低摩擦耗能能力。值得注意的是, 水固比0.6试件在应变0.2%~0.4%区间出现阻尼比陡升现象, 可能与局部孔隙坍塌导致的能量突变释放有关, 这为后续微观结构分析提供了研究方向。



(a) 水固比 0.6



(b) 水固比 0.62



(c) 水固比 0.64

图3 各水固比下的阻尼比与动应变关系图

Fig. 3 Damping ratio versus dynamic strain for each water - solid ratio

2.3 累计塑性变形

为评估流态固化土在长期动荷载下的变形稳定性, 采用对数模型(式(1))对累积塑性应变 ε_p 与振动次数 N 进行拟合, 如图4所示。

$$\varepsilon_p = a \ln N + b \quad (1)$$

拟合结果显示, 模型相关系数 $R^2 = 0.9785$, 参数 a (累积变形速率系数) 与 b (初始变形偏移量) 随配比变化显著。灰土比从0.08增至0.16时, 参数 a 由0.012降至0.008, 表明固化剂掺量增加可抑制变形累积速率, 提升抗疲劳性能; 而水固比0.64试件的参数 a 较0.6试件增加约40% (0.010~0.014), 证明高含水量加剧塑性应变发展。工程适用性分析表明, 在典型市政交通荷载 (动应力 ≤ 200 kPa, 对应振动次数 10^4 次) 下, 灰土比0.12、水固比0.62试

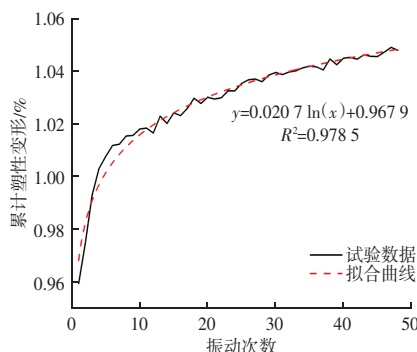


图4 累计塑性变形与振动次数的拟合关系曲线

Fig. 4 Fitted curve of cumulative plastic deformation versus number of vibrations

件的累积塑性应变预测值为1.2%, 远低于路基允许变形阈值(3%)。当动应力超过400 kPa时, 应变累积速率显著加快 ($\varepsilon_p > 2.5\%$), 需通过限制重载车辆通行或优化配比 (如灰土比 ≥ 0.16) 确保长期稳

道桥技术

定性。

此外, 试验中发现的低水固比试件在高应力下的应变突变现象, 提示未来需结合微观孔隙演化研究, 以完善变形预测模型的普适性。

3 结论

基于室内动三轴试验系统, 以水泥-粉煤灰复合固化剂改良废弃渣土制备流态固化土, 通过模拟市政交通荷载, 系统揭示了不同水固比与灰土比配比参数对材料动力特性的影响规律, 并量化其长期动载响应机制; 研究动应力-动应变关系、阻尼比演化及累积塑性变形预测模型, 得到以下主要结论:

(1) 最大动剪切模量 ($G_{\max}$) 与水固比呈负相关, 与灰土比呈正相关。建议在流动性允许范围内采用水固比 ≤ 0.62 、灰土比 ≥ 0.12 的配比, 以兼顾施工性能与动刚度需求。

(2) 动应力-动应变曲线呈对数增长, 灰土比增加可缩短弹性阶段, 增强材料抗塑性变形能力; 阻尼比随动应变先减后增, 灰土比提升至 0.16 时, 能量吸收效率提高 12%~15%。

(3) 对数模型可精准预测累积塑性变形 ($R^2 = 0.9785$), 长期动荷载下变形量可控, 表明流态固化土能够满足市政道路路基的稳定性要求。该技术不仅实现了废弃渣土的资源化利用, 还可降低施工成本与碳排放, 为绿色基础设施建设提供可靠解决方案。

参 考 文 献

[1] 贺深阳. 建筑渣土的资源化利用研究进展 [J]. 砖瓦, 2020 (7): 58, 62.

[2] 易富, 姜珊, 慕德慧, 等. 流态地聚物固化土强度特性及其强度预测 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50 (1): 60-68.

[3] 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见 [J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14 (4): 1-3.

[4] 李泽喧. 流态固化土的改良性状及其工程应用 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.

[5] 孙景卫, 邢崇恩, 董洪山, 等. 全固废流态固化土的制备及性能研究 [J]. 山东化工, 2024, 53 (23): 246-249, 254.

[6] 朱伟, 赵笛, 范惜辉, 等. 渣土改良为流动化回填土的应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (2): 134-139.

[7] 朱龙飞, 徐云飞, 王国宇, 等. 建筑垃圾渣土制备流态固化土及其性能研究 [J]. 市政技术, 2023, 41 (5): 246-250.

[8] 王成斌. 合肥地区盾构渣土制备流态固化土的试验研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.

[9] 张鹏, 朱珍德, 王军, 等. 不同掺剂对水泥土动力特性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31 (5): 62-67.

[10] HARDIN B, RICHART F E. Elastic wave velocities in granular soils [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1963, 89: 33-66.

[11] 刘增祥, 陆勇, 娄玥玥, 等. 河道淤泥气泡混合轻质土动力特性及本构模型研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024 (1): 171-179.

[12] 何俊, 张驰, 管家贤, 等. 碱渣固化疏浚淤泥的动变形特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (增刊1): 3712-3721.

[13] 钟秀梅, 王谦, 刘钊钊, 等. 干湿循环作用下粉煤灰改良黄土路基的动强度试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (增刊1): 95-99.

[14] CHEN Q, YAN G, ZHUANG X, et al. Dynamic characteristics and microstructural study of nano calcium carbonate modified cemented soil under different salt water solutions [J]. Transportation Geotechnics, 2022, 32: 100700.

[15] SHANG Y, XU L, ZHAO Y, et al. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as subgrade filling of heavy haul railway [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2017, 10: 136-145.

[16] 周盈, 孙苗苗, 夏凡, 等. 不同循环荷载频率下软黏土动力特性试验研究 [J]. 地基处理, 2024, 6 (4): 337-346.

[17] 邹锦华, 陈焰华, 黄龙田, 等. 交通荷载作用下市政道路路面振动测试与分析 [J]. 路基工程, 2019 (5): 40-46.