

循环荷载作用下土工格栅加筋泡沫轻质土动力特性

密启亮¹, 王艺璇^{2*}, 陈 宁¹

¹新泰市交通运输局公路事业发展中心, 山东 新泰

²山东长兴路桥工程集团有限公司, 山东 新泰

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月13日

摘 要

为探究土工格栅加筋泡沫轻质土的动力特性及其影响因素, 基于动静三轴试验系统, 开展了室内动三轴试验, 探讨了加筋层数和湿密度对其动态力学特性的影响规律, 分析了骨干曲线、动剪切模量及阻尼比的变化特征。试验结果表明, 双曲线形式的骨干曲线可由Hardin-Drnevich模型较好地描述。土工格栅加筋泡沫轻质土的动弹性模量和阻尼比均随动应变的增大而增大; 采用格栅加筋和提高湿密度均可有效提升动弹性模量, 而阻尼比的显著提升仅依赖于增大湿密度。最后, 建立了考虑湿密度和加筋层数的动弹性模量强化模型与阻尼比预测模型, 间接反映了土工格栅加筋泡沫轻质土的动偏应力-动应变关系。

关键词

泡沫轻质土, 土工格栅加筋, 动三轴试验, 动弹性模量, 阻尼比

Dynamic Characteristics of Geogrid-Reinforced Foamed Lightweight Soil under Cyclic Loading

Qiliang Mi¹, Yixuan Wang^{2*}, Ning Chen¹

¹The Highway Development Center of Xintai City Transportation Bureau, Xintai Shandong

²Shandong Changxing Road & Bridge Engineering Group Co., Ltd., Xintai Shandong

Received: March 9, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 密启亮, 王艺璇, 陈宁. 循环荷载作用下土工格栅加筋泡沫轻质土动力特性[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 127-142. DOI: 10.12677/ms.2026.164080

Abstract

To investigate the dynamic characteristics of geogrid-reinforced foamed lightweight soil and their influencing factors, laboratory dynamic triaxial tests were conducted using a dynamic and static triaxial testing system. The effects of the number of reinforcement layers and the wet density on the dynamic mechanical properties were explored, and the variation characteristics of the backbone curve, dynamic elastic modulus, and damping ratio were analyzed. The experimental results indicate that the hyperbolic form of the backbone curve can be well described by the Hardin-Drnevich model. Both the dynamic elastic modulus and damping ratio of the geogrid-reinforced foamed lightweight soil increase with the increase of dynamic strain; the use of geogrid reinforcement and an increase in wet density can effectively enhance the dynamic elastic modulus, while a significant increase in the damping ratio depends solely on the increase in wet density. Finally, a dynamic elastic modulus strengthening model and a damping ratio prediction model were established, taking into account the wet density and the number of reinforcement layers, which indirectly reflect the relationship between dynamic deviatoric stress and dynamic strain of the geogrid-reinforced foamed lightweight soil.

Keywords

Foamed Lightweight Soil, Geogrid Reinforcement, Dynamic Triaxial Test, Dynamic Elastic Modulus, Damping Ratio

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加快和交通基础设施的迅猛发展,工程填筑材料面临轻量化、高强度与绿色低碳的迫切需求。而泡沫轻质土作为一种新型轻质环保材料,由水泥、水和发泡剂按一定比例混合,然后通过物理和化学反应硬化制成[1]。泡沫轻质土具有流动性高、力学性能可控、轻质高强、保温隔热、防火、隔声、抗震及耐久等优点,在各种岩土工程中得到广泛应用[2],特别是在公路路基换填减载[3]、隧道隔震[4]、台背回填[5]、高速铁路路基填筑[6][7]、铁路路基加宽[8]、结构隔震[9]中,但泡沫轻质土不可避免地要受到交通、波浪、地震等振动荷载的作用,必须考虑振动荷载的影响。当泡沫轻质土作为路基回填时,随着泡沫轻质土厚度的增加,其破坏模式由拉伸破坏逐渐变为剪切破坏。如何通过材料改性或结构增强提升其动力学性能,成为当前工程材料领域的研究热点。

现有研究多集中于静荷载作用下的泡沫轻质土[10][11],而实际工程常受动荷载影响,静荷载的研究已难以满足工程需求。学者们对泡沫轻质土的动力特性开展了一系列研究[12][13]。泡沫轻质土的动力特性表现出明显的密度依赖性,发现泡沫轻质土的临界动应力随密度增大而增大[14]。Wu *et al.* [15]发现粉土基泡沫轻质土具有典型的弹塑性特征,动强度随湿密度增加而增加,但随粉土掺量的增加而降低,并构建了基于 Ramberg-Osgood 方程的损伤变量与塑性应变及循环次数的量化模型。Li *et al.* [16]采用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统研究泡沫轻质土在冲击荷载下的动力特性,动态力学性能随应变速率的增大而增大,表现出较好的能量吸收能力[17]。随着动应力幅值和振动循环次数的增加,泡沫轻质土的累积应变逐渐增大,直至试件发生脆性破坏[15]。发现泡沫轻质土的动剪切模量随着动应变[18]、

围压[19]和湿密度[20]的增大而增大,且随着加载循环次数的增加先增大后减小,阻尼比随动应变的增大先减小后增大。

目前,对复合泡沫轻质土的研究多集中在固废材料的利用[21]、配合比的研究与开发[22]、基本力学性能与强度微观机理[23]等方面,对于普通泡沫轻质土易发生拉伸破坏和剪切破坏,缺乏对其进行加筋技术材料处理与结构改性研究,虽然对纤维类加筋泡沫轻质土[24][25]和钢筋类加筋泡沫轻质土[26][27]开展了大量研究,但对土工格栅加筋泡沫轻质土未展开详细研究,不足以覆盖实际路基工程应用下的复杂工况与条件,不利于其工程应用。土工格栅加筋泡沫轻质土作为一种新型环保建筑材料[28],在道路工程领域有着广阔的应用前景,而对土工格栅加筋泡沫轻质土的动力力学性能尚未进行全面系统的评价,因此,有必要进一步研究其动态特性,以指导该材料在实际工程中的应用。

与普通泡沫轻质土相比,土工格栅加筋泡沫轻质土的作用机制存在明显的差异,虽然对泡沫轻质土的动力特性进行了一些研究,但在循环荷载作用下,加筋层数和湿密度对土工格栅加筋泡沫轻质土动弹性模量和阻尼比的影响研究仍然非常缺乏,特别是循环动荷载作用下其力学性能的变化不容忽视。因此,本文通过分级循环加载动三轴试验,研究了土工格栅加筋泡沫轻质土的骨干曲线、动弹性模量和阻尼比,根据试验结果建立了动弹性模量的强化模型和阻尼比预测模型,为工程建设提供了理论依据。

2. 材料和方法

2.1. 试验材料

试验选用抗拉强度较高和价格低廉的双向拉伸塑料土工格栅[29],将土工格栅裁剪成直径为 145 mm 的圆形[30],如图 1 所示,土工格栅主要性能参数见表 1。水泥采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥。水泥的物理力学性能见表 2。发泡剂采用 PM-D50 复合型发泡剂。

Table 1. Basic performance parameters of geogrid

表 1. 土工格栅基本性能参数

型号	网格尺寸/(mm × mm)	抗拉强度/(kN·m ⁻¹)		断裂伸长率/%	
		纵向	横向	纵向	横向
TGSG50-50	33 × 33	55.8	60.3	6.3	7.6

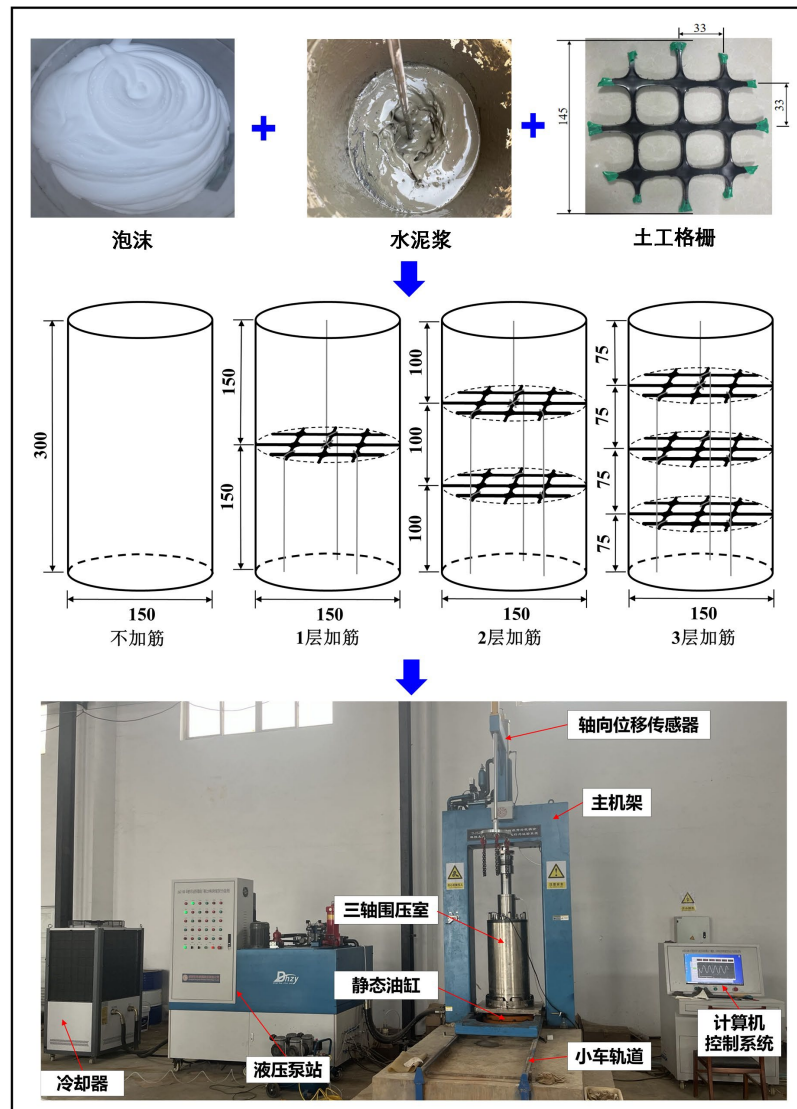
Table 2. Physical and mechanical properties of cement

表 2. 水泥的物理力学性能

比表面积 (m ² ·kg ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	标准稠度/%	凝结时间/min		3 d 抗压强度/MPa	3 d 抗折强度/MPa
			初凝	终凝		
359	3100	28.5	230	294	5.60	2.72

2.2. 试样制备

为探究湿密度和加筋层数产生的影响,试验中采用 3 种湿密度 600、700 和 800 kg/m³ 和 4 种土工格栅加筋层数 0、1、2 和 3 层[30],如表 3 所示。本研究主要集中在土工格栅加筋泡沫轻质土的动力特性,所有泡沫轻质土的水灰比固定为 0.55。制备土工格栅加筋泡沫轻质土时,先将裁切后的土工格栅用不影响试样性能的细铁丝固定于尺寸为 150 mm × 300 mm (直径 × 高度)的圆柱模具内,其布置方式如图 1 所示,随后按配合比制备的泡沫轻质土浇筑入模具,经养护硬化后成型。



单位: mm

Figure 1. Preparation and testing method of geogrid-reinforced foamed lightweight soil
图 1. 土工格栅加筋泡沫轻质土的制备及测试方法

Table 3. Mix proportion of foamed lightweight soil
表 3. 泡沫轻质土的配合比

湿密度/(kg·m ⁻³)	水泥用量/(kg·m ⁻³)	用水量/(kg·m ⁻³)	泡沫用量/(kg·m ⁻³)	水灰比
600	365	201	34	
700	432	237	31	0.55
800	498	274	28	

2.3. 试验装置与加载方法

DJSZ-100D 型动静三轴试验系统如图 1 所示, 试验装置主要包括主机、液压泵站、围压室、试验机控制系统、冷却器等。动静三轴试验采用圆柱形试样, 直径为 15 cm, 高为 30 cm。由于在动三轴试验中,

试样会被浸在充满水的压力室中，为了防止水对试样产生影响，将制备好的试样套上橡皮膜密封放置底座上。

多级加载示意图如图 2 所示。动三轴试验采用不固结不排水(UU)条件，围压 100 kPa，加载波形为 3 Hz 等效正弦波[31]，每级循环 20 次；加载级别按动偏应力(σ_d)与静三轴峰值应力(σ_{max})的比值设定， σ_{max} 采用课题组已完成相关静三轴试验数据，由于试验仪器初始力值较大，首级从 20% σ_{max} 开始，每级增加 10% σ_{max} ，直至试样破坏。多级循环加载试验方案如表 4 所示。

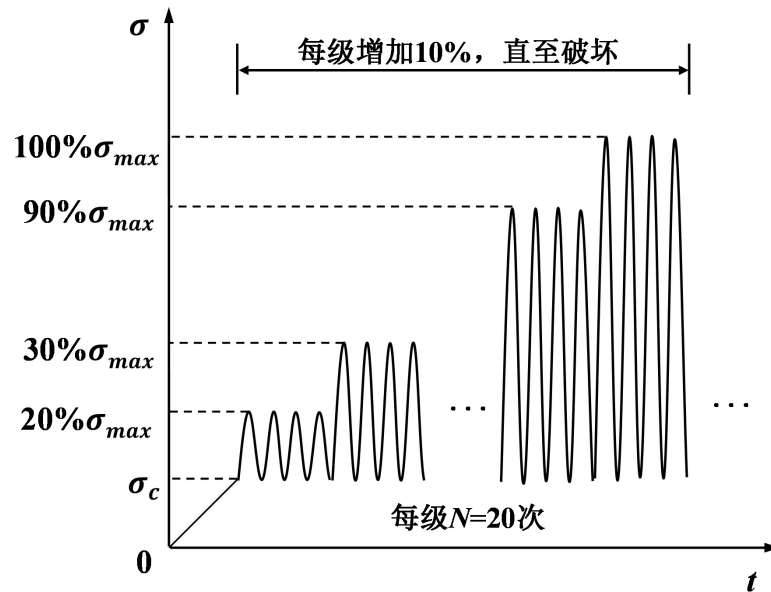


Figure 2. Schematic diagram of multi-stage loading
图 2. 多级加载示意图

Table 4. Multi-stage cyclic loading test scheme
表 4. 多级循环加载试验方案

工况序号	湿密度(kg/m ³)	加筋层数(层)	σ_{max} (MPa)	振幅(%)
D1	600	0	1.965	20→90
D2	600	1	1.799	20→100
D3	600	2	1.786	20→100
D4	600	3	1.757	20→90
D5	700	0	2.910	20→80
D6	700	1	3.279	20→80
D7	700	2	2.738	20→100
D8	700	3	2.675	20→100
D9	800	0	3.275	20→80
D10	800	1	3.708	20→50
D11	800	2	4.001	20→70
D12	800	3	4.510	20→50

2.4. 动态变形参数

图 3 所示的典型滞回曲线可用于阐明土工格栅加筋泡沫轻质土的动弹性模量和阻尼比的演变规律。在周期性荷载作用下，循环加卸载过程中应变相位始终滞后于应力相位，形成滞回曲线，并根据试验数据发现，当振动循环次数超过 10 次时，滞回曲线趋于稳定。因此，本研究采用第 15 个滞回曲线进行动态变形参数分析。

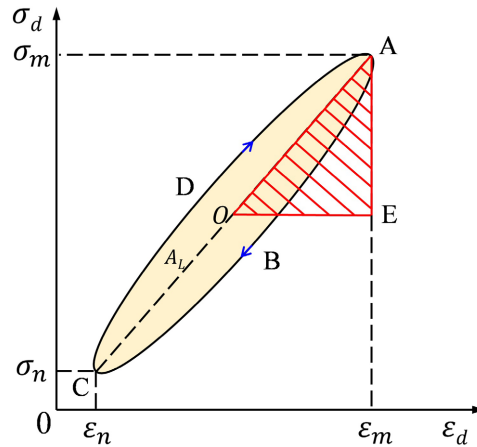


Figure 3. Schematic diagram of typical hysteresis curve
图 3. 典型滞回曲线示意图

动弹性模量表征土工格栅加筋泡沫轻质土在动力作用下抵抗变形的能力，典型滞回曲线示意图如图 3 所示，动弹性模量如式(1)所示。

$$E_d = \frac{\sigma_m - \sigma_n}{\varepsilon_m - \varepsilon_n} \quad (1)$$

式中， E_d 为动弹性模量，MPa； σ_m 和 σ_n 分别是滞回曲线中的最大与最小动偏应力，MPa； ε_m 和 ε_n 分别是最大与最小动应力对应的动应变，%； ε_d 是动应变，%。

阻尼比可反映循环动荷载作用在试样上的能量因阻尼作用而耗散的比例，表征在一个循环周期过程中损耗的能量与输入的能量之比[32]，典型滞回曲线如图 3 所示，阻尼比如式(2)所示。

$$\lambda = \frac{A_L}{4\pi A_S} \quad (2)$$

式中， λ 为阻尼比； A_L 为滞回曲线 ABCDA 面积； A_S 为上半部分三角形 AOE 面积。

3. 试验结果与讨论

3.1. 骨干曲线特性分析

现有研究中，最常用的 3 种骨干曲线表达式为 Hardin-Drnevich (简称 H-D 模型)模型[33]、Ramberg-Osgood 模型[15]和 Davidenkov 模型[34]。假设土工格栅加筋泡沫轻质土为黏弹性介质，同时考虑到 H-D 模型较容易获取模型参数且其应用也最为广泛，因此基于 H-D 模型对多级循环荷载作用下土工格栅加筋泡沫轻质土的骨干曲线进行分析。基于黏弹性理论，H-D 模型通过等效的动弹性模量和等效的阻尼比来反映土动偏应力 - 动应变关系的非线性与滞后性，构建动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ 的经验函数， $E_d = E(\varepsilon_d)$ 和 $\lambda = \lambda(\varepsilon_d)$ [35]。

在多级循环动荷载作用下, 动偏应力 - 动应变的典型骨干曲线示意图如图 4 所示, 骨干曲线是由每级的第 15 个滞回曲线顶点的连线, 描述了动荷载下土工格栅加筋泡沫轻质土的动偏应力 - 动应变关系。

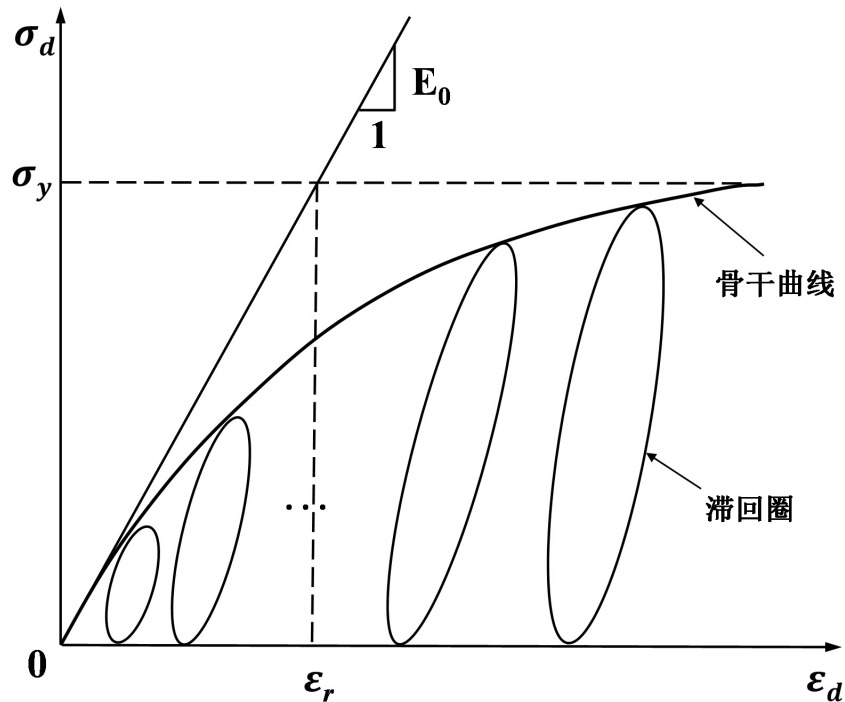


Figure 4. Schematic diagram of typical dynamic deviatoric stress-dynamic strain backbone curve
图 4. 动偏应力 - 动应变典型骨干曲线示意图

多级循环试验的试验结果采用 H-D 模型进行分析, H-D 模型如式(3)所示。

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{\frac{1}{E_0} + \frac{\varepsilon_d}{\sigma_y}} = \frac{\varepsilon_d}{u + v\varepsilon_d} \quad (3)$$

式中, σ_d 为动偏应力, MPa; ε_d 为动应变, %; E_0 为初始动弹性模量, MPa; σ_y 为最大轴向动偏应力, MPa; u 、 v 为拟合参数。

在图 4 中, 将 E_0 的坡线与 σ_y 的水平线交点所对应的横坐标定义为参考应变 ε_r , 则有式(4)。

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_y}{E_0} \quad (4)$$

拟合参数 u 、 v 的意义如式(5)所示。

$$u = \frac{1}{E_0}, v = \frac{1}{\sigma_y}, \varepsilon_r = \frac{u}{v} \quad (5)$$

采用 H-D 模型对试验数据拟合, H-D 模型拟合参数、初始动弹性模量和参考应变的结果如表 5 所示, 拟合参数 R^2 的最小值为 0.984, 表明 H-D 模型能够较好地反映土工格栅加筋泡沫轻质土骨干曲线的变化。

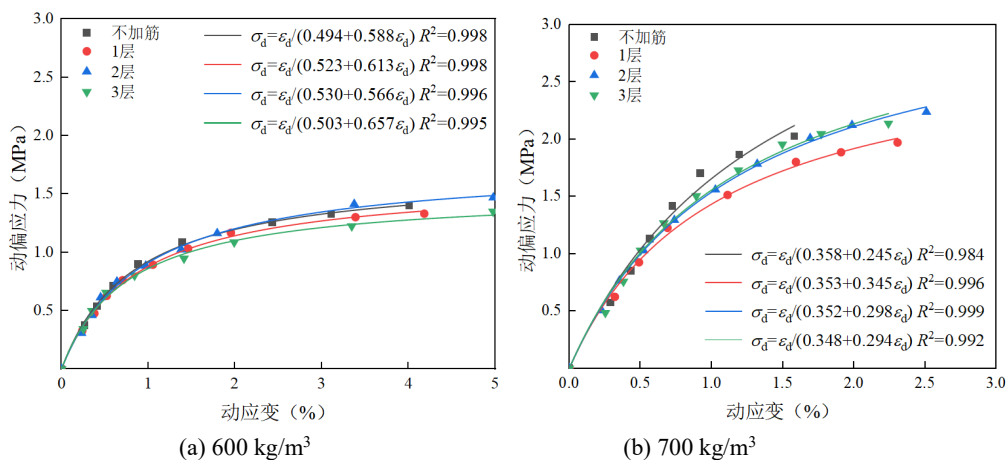
Table 5. Results of H-D model fitting parameters, initial dynamic elastic modulus, and reference strain
表 5. H-D 模型拟合参数、初始动弹性模量和参考应变的结果

编号	u	v	R^2	E_0 (MPa)	ε_r (%)
D1	0.494	0.588	0.998	202.400	0.840
D2	0.523	0.613	0.997	191.234	0.853
D3	0.530	0.566	0.996	188.601	0.937
D4	0.503	0.657	0.995	198.989	0.765
D5	0.358	0.245	0.984	279.166	1.460
D6	0.353	0.345	0.996	283.511	1.023
D7	0.352	0.298	0.999	283.704	1.184
D8	0.348	0.294	0.992	287.356	1.182
D9	0.270	0.241	0.999	370.288	1.121
D10	0.274	0.199	0.999	365.110	1.379
D11	0.280	0.218	0.999	357.411	1.286
D12	0.277	0.167	0.999	361.376	1.659

加筋层数和湿密度对骨干曲线如图 5 所示。初始阶段的土工格栅加筋泡沫轻质土表现出良好的弹性变形性能，动应变缓慢增加，骨干曲线线性增长，以弹性变形为主，随着湿密度增大，初始阶段的动应变从 0.1% 增加到 0.25% [36]。随着动偏应力的继续增加，试样开始产生弹塑性变形，动偏应力增长变缓，直至试样破坏。

在加筋层数 2 层时，通过增大动应变显著提升泡沫轻质土的动偏应力，但 1 层加筋与 3 层加筋效果相似，甚至出现动偏应力降低。在动应变 0%~0.5% 范围内，土工格栅加筋效果并不显著；当动应变达到 1% 时，其强化作用开始显现，表明加入土工格栅在小应变条件下对动偏应力提升有限 [37]。只有当试样达到临界变形阈值时，加筋体系方能有效提升整体动偏应力。由于泡沫轻质土固化后为一个整体，土工格栅的加入因边界效应一定程度上削弱了整体性，在不同加筋层数的影响下部分试样的动偏应力出现降低。

在相同加筋层数下，随着湿密度的增加，动应变逐渐减小，而承受的动偏应力逐渐增加。表明随着湿密度的增加，水泥水化可以产生更多的水化产物，试样中的泡沫含量和气孔结构更少，因此试样中固体颗粒之间产生更强的黏结力，试样自身的变形刚度变大，脆性增加，使固体颗粒彼此移动更加困难，从而产生更强的抵抗变形能力。



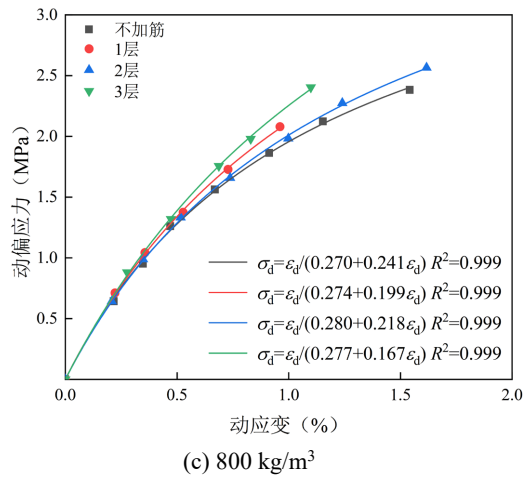


Figure 5. Effect of reinforcement layers on backbone curve
图 5. 加筋层数对骨干曲线的影响

3.2. 力学参数分析

3.2.1. 动弹性模量

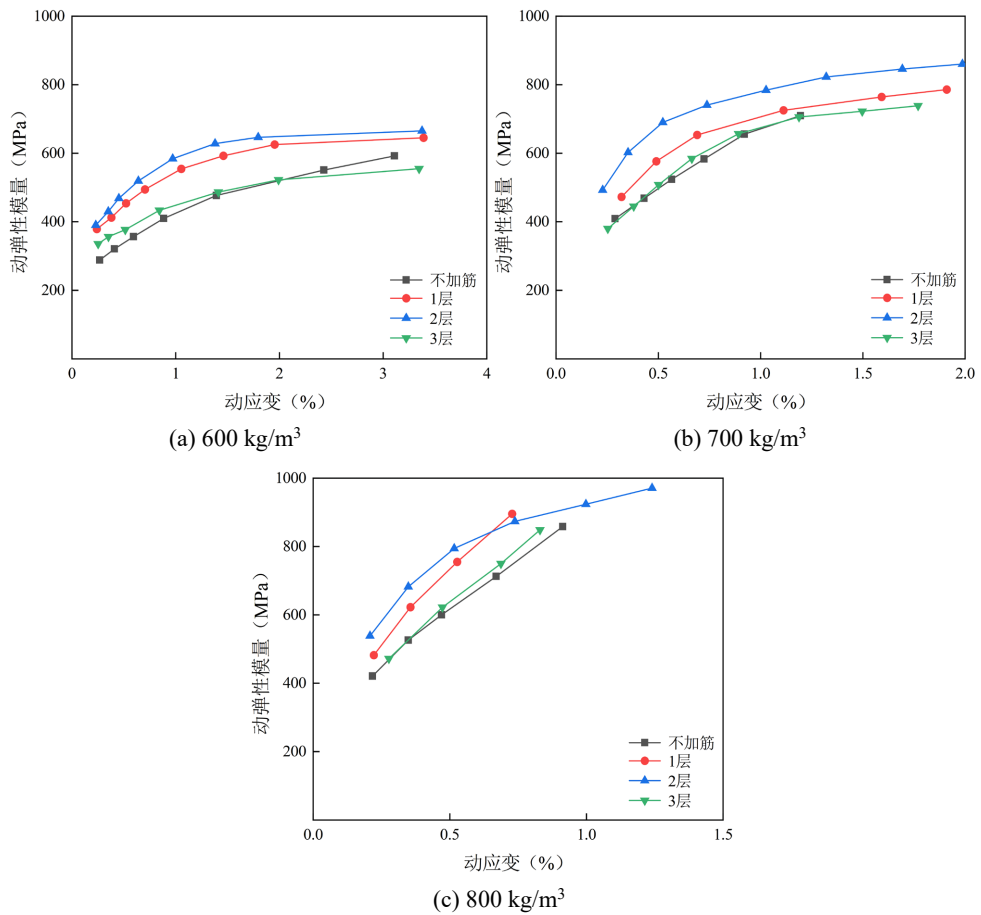


Figure 6. Effect of reinforcement layers on the relationship between dynamic elastic modulus and dynamic strain
图 6. 加筋层数对动弹性模量与动应变关系的影响

3.2.2. 阻尼比

加筋层数对动弹性模量与动应变关系的影响如图 6 所示。当湿密度不变时，加筋 1 和 2 层试样的动弹性模量大于不加筋和加筋 3 层，其中不加筋和加筋 3 层试样的动弹性模量较为接近。当加筋层数不变时，试样的动弹性模量随着泡沫轻质土湿密度的增加而增加，因为泡沫轻质土的湿密度越大，水泥固体物质占比越大，内部的黏聚力越大，试样抵抗变形的能力增强，使动弹性模量逐渐增大。

加筋层数对阻尼比与动应变关系的影响如图 7 所示。当湿密度不变时，不同加筋层数的阻尼比增长速率呈现显著趋同性。土工格栅的加入不能改变泡沫轻质土的微观结构，故对能量耗散特性的改善作用有限。动应变较小时，阻尼比增幅平缓，此时土工格栅加筋体系尚未显著改变泡沫轻质土微观力学响应；而在动应变较大时，试样内部逐渐产生微裂隙扩展与界面滑移等损伤机制，促使阻尼比呈现持续增长趋势。当加筋层数不变时，湿密度减小使孔隙率增大，受动荷载作用下，通过压缩体积和增大动应变来产生塑限变形吸收更多能量，使阻尼比逐渐增大。

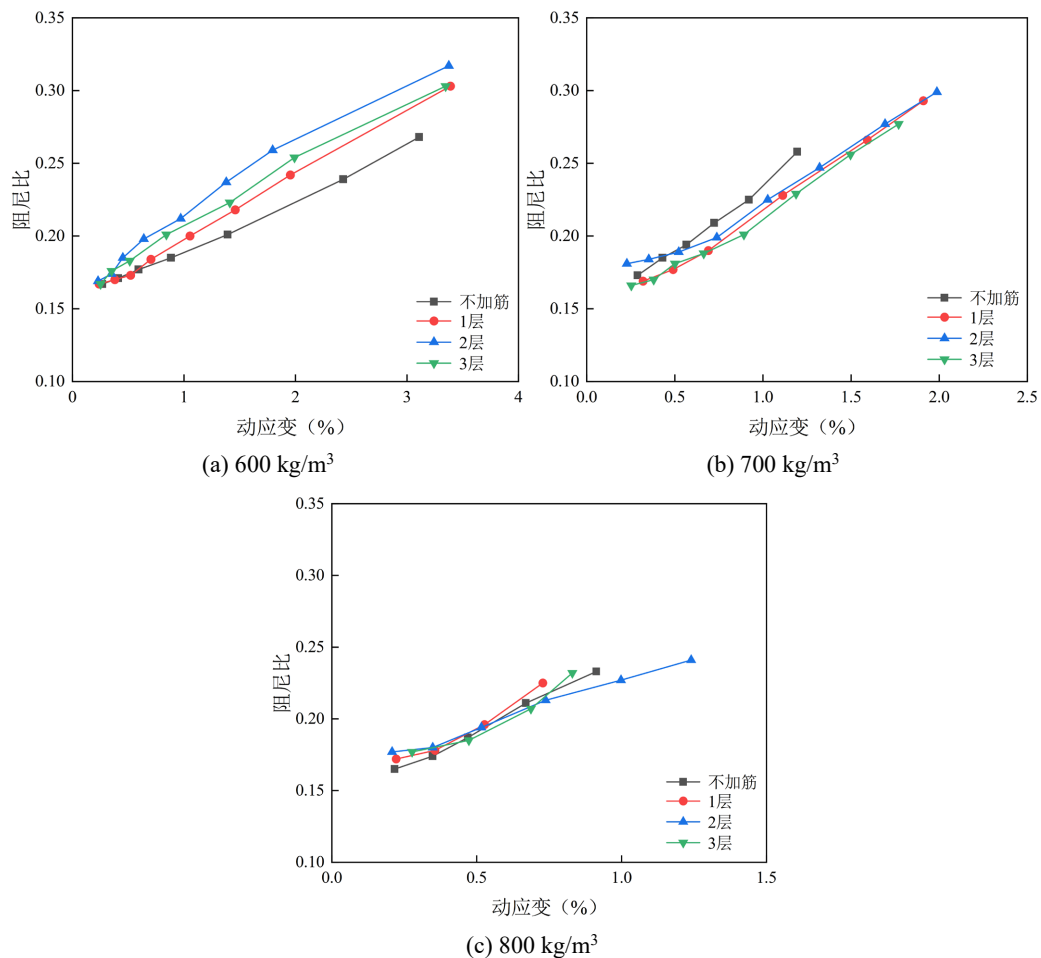


Figure 7. Effect of reinforcement layers on the relationship between damping ratio and dynamic strain
图 7. 加筋层数对阻尼比与动应变关系的影响

3.3. 力学参数模型的建立及验证

3.3.1. 动弹性模量强化模型

根据许天增等[38]的研究发现，土的动弹性模量是随动应变的增大而减小。如图 6 所示，在湿密度和

加筋层数的影响下, 土工格栅加筋泡沫轻质土的动弹性模量随着动应变的增大而增大。初始动弹性模量反映了材料在初始状态下抵抗动荷载的能力, 是建立动弹性模量强化模型不可缺少的参数。当动应变接近零时, 动弹性模量定义为初始动弹性模量。前述 H-D 模型在循环动荷载作用下动偏应力 - 动应变的骨干曲线双曲线形式作为基础, 如式(6)所示。

$$\frac{E_d}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_r}} \quad (6)$$

式中, E_d 为动弹性模量, MPa; E_0 为初始动弹性模量, MPa。

结合图 6 发现, 动弹性模量与动应变呈明显递增关系, 而 H-D 模型的动弹性模量与动应变函数呈递减关系, 因此对 H-D 模型进行修正。当湿密度从 600 kg/m^3 增至 800 kg/m^3 时, 土工格栅加筋泡沫轻质土的初始动弹性模量平均增大 45.4%; 当加筋层数从不加筋增加到 2 层时, 初始动弹性模量平均增加 15.6%。考虑到湿密度和加筋层数对初始动弹性模量的影响, 建立初始动弹性模量多元线性回归方程如式(7)所示, 初始动弹性模量与湿密度和加筋层数的关系如图 8 所示。

$$E_0 = 0.841\rho - 0.751X - 306.952 \quad (7)$$

式中, E_0 为初始动弹性模量, MPa; ρ 为湿密度, kg/m^3 ; X 为加筋层数, 层。

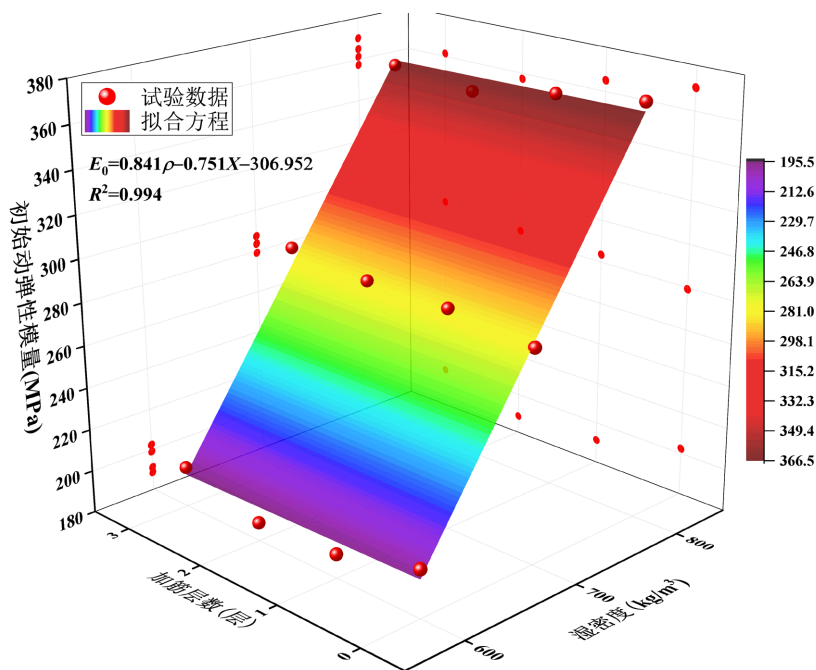


Figure 8. Relationship between initial dynamic elastic modulus, wet density, and reinforcement layers
图 8. 初始动弹性模量与湿密度和加筋层数的关系

建立动弹性模量随动应变的强化曲线, 动弹性模量和初始动弹性模量之比与动应变之间的关系曲线如图 9 所示。用公式(8)来定量描述曲线。

$$\frac{E_d}{E_0} = 2.438\varepsilon_d^{0.271} \quad (8)$$

式中, E_d 和 E_0 分别为动弹性模量和初始动弹性模量, MPa; ε_d 为动应变, %。

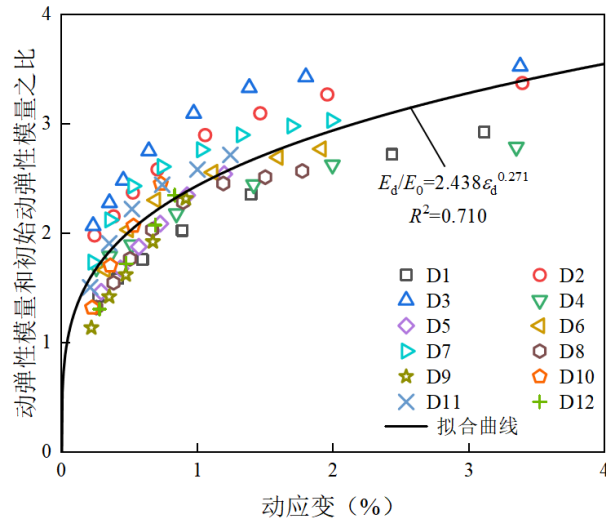


Figure 9. Relationship curve between the ratio of dynamic elastic modulus to initial dynamic elastic modulus and dynamic strain
图 9. 动弹性模量和初始动弹性模量之比与动应变之间的关系曲线

3.3.2. 阻尼比预测模型

如图 7 所示，随着动应变的增大，土工格栅加筋泡沫轻质土的阻尼比逐渐增大至最大值。整体上土工格栅的加入对泡沫轻质土的最大阻尼比平均提升 9.4%，特别是加筋 2 层与不加筋相比，最大阻尼比平均提升 12.9%。当湿密度每增加 100 kg/m³，最大阻尼比分别降低 5.4% 和 17.4%。考虑到湿密度和加筋层数对最大阻尼比的影响，建立最大阻尼比多元线性回归方程如式(9)所示，最大阻尼比与湿密度和加筋层数的关系图如图 10 所示。

$$\lambda_{\max} = 0.002\rho - 1.563 \times 10^{-6} \rho^2 + 0.046X - 0.012X^2 - 0.266 \quad (9)$$

式中， λ_{\max} 为最大阻尼比； ρ 为湿密度，kg/m³； X 为加筋层数，层。

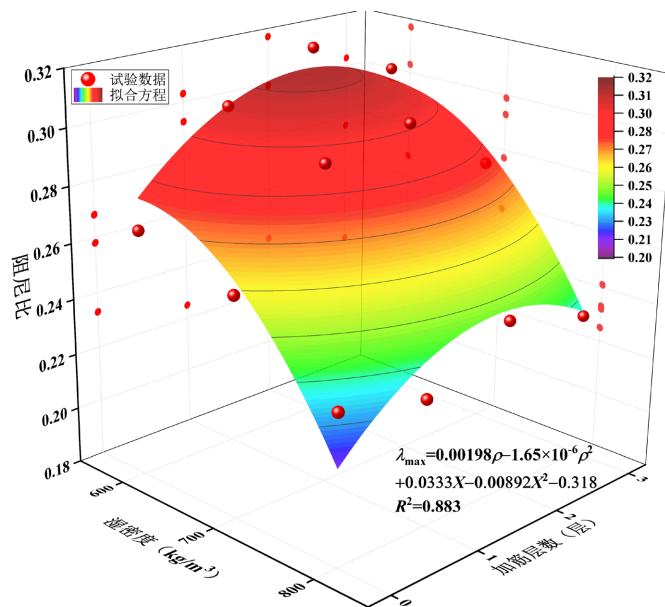


Figure 10. Relationship between maximum damping ratio, wet density, and reinforcement layers
图 10. 最大阻尼比与湿密度和加筋层数的关系图

阻尼比与最大阻尼比之比与动应变的关系如图 11 所示。在不同湿密度下阻尼比与最大阻尼比之比随动应变的增大线性增长，通过线性拟合结果如式(10)所示。

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = r\varepsilon_d + s \quad (10)$$

式中， λ 为阻尼比； r 和 s 为拟合参数，见表 6。

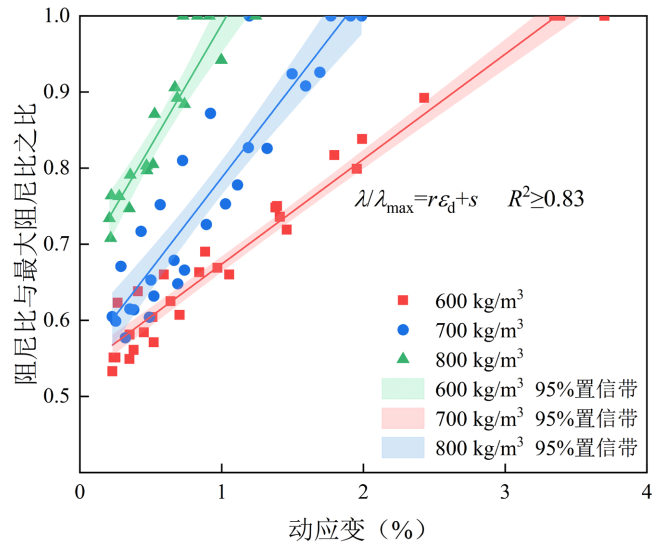


Figure 11. Relationship between the ratio of damping ratio to maximum damping ratio and dynamic strain
图 11. 阻尼比与最大阻尼比之比与动应变关系

Table 6. Values of fitting parameters r and s
表 6. 拟合参数 r 和 s 的值

湿密度(kg/m ³)	r	s	R^2
600	0.138	0.536	0.968
700	0.242	0.546	0.841
800	0.320	0.669	0.832

3.3.3. 模型验证

为验证模型准确性，分别采用公式(7)和(9)计算动弹性模量预测值、公式(9)和(10)计算阻尼比预测值，加筋 1 层试样的预测与实测结果对比如图 12 和图 13 所示。动弹性模量与阻尼比的预测结果均与实测值具有较高的一致性，表明所建立的动弹性模量强化模型与阻尼比预测模型均能较准确地反映土工格栅加筋泡沫轻质土在中大变形作用下的变形特性。

4. 讨论

为进一步阐明土工格栅加筋泡沫轻质土的动力性能特性，与普通泡沫轻质土进行对比分析发现，普通泡沫轻质土在 3 Hz 循环荷载作用下的动弹性模量为 225 MPa [19]，而采用两层土工格栅加筋后，该值提高至 610 MPa，增幅达 171.1%。表明在低应变幅条件下，加筋效应即表现出显著的增强作用。在阻尼比方面，本研究测得的试样阻尼比变化范围为 0.15~0.30，与已有文献报道结果相近[19] [39]，反映出加筋措施对泡沫轻质土阻尼比的影响较为有限。综上所述，土工格栅加筋泡沫轻质土在动模量方面表现

出明显优势，验证了其作为高性能轻质路基填料的工程适用性。然而，本研究仍存在一定局限性，未充分考虑应力路径、荷载类型及土工格栅种类等因素的综合影响，亦未对干湿循环、冻融循环等耐久性试验开展深入探讨。今后研究应从多工况、多维度出发，进一步探究土工格栅加筋泡沫轻质土在动荷载作用下的加筋机理及其耐久性能。

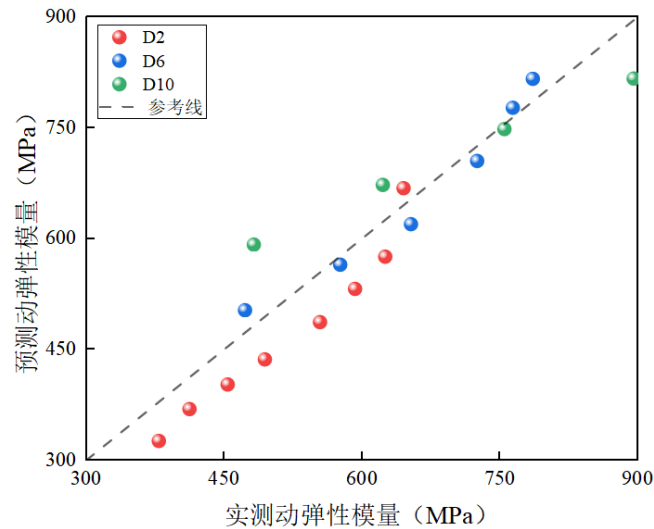


Figure 12. Comparison of predicted and measured dynamic elastic modulus for specimens with 1 reinforcement layer
图 12. 加筋 1 层试样的动弹性模量预测与实测结果的比较

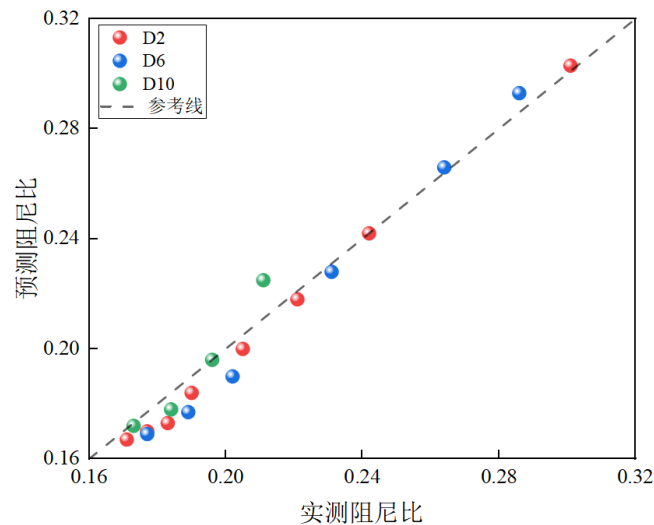


Figure 13. Comparison of predicted and measured damping ratio for specimens with 1 reinforcement layer
图 13. 加筋 1 层试样的阻尼比预测与实测结果的比较

5. 结论

(1) 土工格栅加筋泡沫轻质土的骨干曲线呈双曲线，可以用 Hardin-Drnevich 模型来描述，具有典型的非线性和滞后性。加筋作用在动应变达到 0.5% 后逐渐开始显现；随着湿密度的增加，动应变逐渐减小，而动偏应力逐渐增大。

(2) 土工格栅加筋泡沫轻质土的动弹性模量随动应变的增大而增加。加筋 1 和 2 层可有效分散动荷

载, 湿密度增加提升了水泥固体物质占比, 两者都提高了动弹性模量, 共同增强了材料的抗变形能力。

(3) 土工格栅加筋泡沫轻质土的阻尼比随动应变的增大而增加。加筋层数对阻尼比增长趋势无显著影响; 低湿密度试样因孔隙压缩吸收更多能量, 最大阻尼比较大; 高湿密度下材料刚度增大, 能量耗散减弱, 最大阻尼比较小。

(4) 基于 Hardin-Drnevich 模型, 通过初始动弹性模量和最大阻尼比, 建立了动弹性模量和阻尼比的预测函数, 用 $E_d = E(\epsilon_d)$ 和 $\lambda = \lambda(\epsilon_d)$ 来反映土工格栅加筋泡沫轻质土的动偏应力 - 动应变关系, 并验证了模型具有良好的准确性。

参考文献

- [1] Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. and Abang Ali, A.A. (2015) Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. *Construction and Building Materials*, **101**, 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- [2] Amran, M., Onaizi, A.M., Fediuk, R., Danish, A., Vatin, N.I., Murali, G., et al. (2022) An Ultra-Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications—A Review. *Case Studies in Construction Materials*, **16**, e01096. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096>
- [3] Decký, M., Drusa, M., Zgútová, K., Blaško, M., Hájek, M. and Scherfel, W. (2016) Foam Concrete as New Material in Road Constructions. *Procedia Engineering*, **161**, 428-433. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.585>
- [4] Ma, S., Chen, W. and Zhao, W. (2019) Mechanical Properties and Associated Seismic Isolation Effects of Foamed Concrete Layer in Rock Tunnel. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **11**, 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.06.006>
- [5] Zhang, H., Qi, X., Wan, L., Zuo, Z., Ge, Z., Wu, J., et al. (2020) Properties of Silt-Based Foamed Concrete: A Type of Material for Use in Backfill behind an Abutment. *Construction and Building Materials*, **261**, Article 119966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119966>
- [6] Cai, D.G., Wei, S.W., Ye, Y.S., et al. (2021) Mechanical Properties of Lightweight Foam Concrete Filler for Roadbed of High-Speed Railway. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, Article No. 902. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07115-1>
- [7] Huang, J., Cai, D., Su, Q., Yao, H., Fan, R., Pei, Y., et al. (2025) Comparative Study on Static and Dynamic Characteristics of Foamed Concrete Interlayer-Type and Traditional Layered Ballastless Track Subgrades. *Construction and Building Materials*, **489**, Article 140651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140651>
- [8] Zhao, W., Zhang, K., Liu, X. and Liu, X. (2025) Deformation Monitoring of an Adjacent Subgrade Consisting of Lightweight Foam Concrete in a Loess Region. *Construction and Building Materials*, **458**, Article 139641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139641>
- [9] Hao, Y., Wang, H., Qin, L., Hou, Y. and Shi, Y. (2023) Dynamic Characteristics and Response Analysis of a New Type of Prefabricated Fly Ash Foam Concrete Structure. *Structures*, **57**, Article 105074. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105074>
- [10] Feng, L., Chen, X., Ning, Y., Wang, J. and Zhang, W. (2022) High Temperature Effect of Foamed Concrete under Equal Displacement Increment Triaxial Cyclic Compression. *Construction and Building Materials*, **327**, Article 126989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126989>
- [11] 张宏博, 刘明朋, 孙玉海, 等. 粉土基泡沫轻质土三轴力学特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(1): 39-46+57.
- [12] 慕欣, 陈洪祥, 陈喜坤. 泡沫混凝土材料静、动力特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 126-129.
- [13] Mei, L., Cheng, T., He, J., Zhuang, X. and Gu, H. (2023) Dynamic Properties of EPS Beads Lightweight Soil Mixed with Polypropylene Fiber. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02637. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02637>
- [14] Shi, X., Huang, J. and Su, Q. (2020) Experimental and Numerical Analyses of Lightweight Foamed Concrete as Filler for Widening Embankment. *Construction and Building Materials*, **250**, Article 118897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118897>
- [15] Wu, J., Wang, J., Liu, M., Zhuang, P., Zhang, H. and Song, X. (2022) Dynamic Properties of Silt-Based Foamed Concrete as Filler in Subgrade. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **34**, Article 04022241. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004398](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004398)
- [16] Li, Z., Chen, W., Sun, G., Chen, Y., Li, Z., Li, H., et al. (2025) Dynamic Mechanical Properties of Nanoparticle-Stabilized Foam Concrete (NFC). *Case Studies in Construction Materials*, **22**, e04805. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04805>

- [17] Wang, J. and Xu, Z. (2024) Dynamic Mechanical Behaviors of Foamed Concrete Using Modified Viscoelastic SHPB. *Journal of Building Engineering*, **95**, Article 110185. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110185>
- [18] Li, M., Zhang, Y., Liu, S., Wu, K., Wang, Z. and Zhang, X. (2024) Dynamic Properties of Alkali Residue-Based Foamed Concrete under Dry-Wet Cycles. *Journal of Building Engineering*, **98**, Article 111508. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111508>
- [19] 陈忠平, 汪建斌, 刘吉福, 等. 泡沫轻质土动力工程特性试验研究[J]. 公路, 2019, 64(2): 77-80.
- [20] Ma, Z., Ma, C., Du, C., Zhang, S., Zhang, H., Zhang, X., et al. (2023) Research on Dynamic Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Modified Rubber Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, **404**, Article 133282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133282>
- [21] Hamada, H.M., Shi, J., Abed, F., Humada, A.M. and Majdi, A. (2023) Recycling Solid Waste to Produce Eco-Friendly Foamed Concrete: A Comprehensive Review of Approaches. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article 111353. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111353>
- [22] 周中, 邓卓湘, 陈云, 等. 基于 GA-BP 神经网络的泡沫轻质土强度预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 125-132.
- [23] 张彩利, 王怀毅, 王犇, 等. 大掺量钢渣微粉-水泥泡沫轻质土的孔结构表征及其对力学性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(1): 177-185.
- [24] Jiang, P., Chen, Y., Li, N., Zhou, L., Pu, S. and Wang, W. (2022) Strength Properties and Microscopic Mechanism of Lime and Fly Ash Modified Expandable Poly Styrene Lightweight Soil Reinforced by Polypropylene Fiber. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01250. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01250>
- [25] Bayraktar, O.Y., Danish, A., Bodur, B., Kaplan, G., Aydın, A.C. and Ozbakkaloglu, T. (2024) Performance Assessment of Fiber-Reinforced Coral Aggregate-Based Lightweight Foam Concrete for Sustainable Marine Construction. *Construction and Building Materials*, **449**, Article 138368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138368>
- [26] Ramezani, M., Vilches, J. and Neitzert, T. (2013) Pull-Out Behavior of Galvanized Steel Strip in Foam Concrete. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, **5**, Article No. 24. <https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-24>
- [27] Ye, Y., Han, J., Liu, H., Rachford, S.M., Parsons, R.L., Dolton, B., et al. (2022) Pullout Resistance of Geogrid and Steel Reinforcement Embedded in Lightweight Cellular Concrete Backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, **50**, 432-443. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.01.001>
- [28] Li, Y., Liu, Y., Zhang, H., An, N. and Fan, Z. (2025) Experimental Study on the Flexural Performance of Geogrid-Reinforced Foamed Lightweight Soil. *Buildings*, **15**, Article 461. <https://doi.org/10.3390/buildings15030461>
- [29] 吴黎明, 朱亚林, 许倩, 等. 土工格栅加筋砂土的三轴试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(1): 83-90.
- [30] 王志杰, 蔡永明, 齐逸飞, 等. 土工格栅加筋橡胶碎石混合料大型三轴试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2509-2520.
- [31] 姚义胜. 基于泡沫轻质土复合路基的半刚性路面结构优化及动力响应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [32] 常建梅, 李晓慧, 张伏光, 等. 基于大型动三轴试验和图形分析法的有砟道床劣化特性研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(7): 107-116.
- [33] Du, X., Zhu, L., Li, Y., Wang, H. and Xu, K. (2024) Research on the Damage Evolution Law of Iron Tailing Sand Based Foam Concrete under Cyclic Loading. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e04117. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04117>
- [34] 董正方, 翟鹏飞, 曾繁凯, 等. 黄泛区粉砂土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 332-340.
- [35] 马晓文, 梁庆国, 赵涛, 等. 土动力学研究综述及思考[J]. 世界地震工程, 2021, 37(4): 217-230.
- [36] Peng, F., Li, M.Y., Li, Y.H. and Huang, M. (2024) Dynamic Modulus and Damping Ratio Characteristics of Unsaturated Silt in the Yellow River Flood Field. *Journal of Central South University*, **31**, 237-249. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5455-9>
- [37] 唐富春, 张吾渝, 唐鑫, 等. 循环荷载作用下土工格栅加筋黄土动力特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(3): 148-161.
- [38] 许天增, 赫中营, 文浩. 黄泛区粉土动力特性及动本构模型适用性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 369-378.
- [39] 李续靖, 马镠, 尹文峰, 等. 泡沫轻质土应用于路基的动静力学研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2025, 43(2): 65-73.