

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.027

# 湿-压-振耦合作用下原状 $Q_3$ 黄土的黏滞特性研究

王强<sup>1,2</sup>, 张喆<sup>1</sup>, 王恩波<sup>1</sup>

(1. 陕西工业职业技术大学 咸阳市黄土力学与灾害防治工程技术研究中心, 陕西 咸阳 712000;

2. 陕西工业职业技术大学 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 黄土的黏滞特性对其在湿-压-振耦合作用下的工程行为具有重要影响。为考察湿载、固结压力及振动荷载综合作用下黄土的黏性响应特性, 以天然原状  $Q_3$  黄土为研究对象, 开展系统的动单剪试验。试验设置了4种初始水分含量(5%、10%、15%、20%)、4种固结压力(50、100、150、200 kPa)及6种动剪切应变幅度(0.15%、0.5%、1.0%、2.2%、3.3%、4.5%), 系统分析了滞回曲线形态、动剪切模量、耗能能力及棘轮效应随加载周次的演变规律。结果表明: 随着循环加载的进行, 滞回曲线从前两周期扁平、对称性较差且含多个滑动平台的梭状形态, 逐渐转变为三周期后陡峭、对称性强且仅含单一滑动平台的Z字形; 在低含水率、高固结压力条件下, 滞回曲线趋近于梭形, 面积较大, 耗能能力强; 相反, 而在高水分、低固结压力条件下滞回曲线则趋于“Z”字形, 面积减小, 耗能能力减弱; 黄土在加载初期展现出显著的棘轮效应, 但随循环次数增加逐渐减弱。该研究揭示了湿-压-振耦合作用对原状  $Q_3$  黄土黏滞特性的联合影响机制, 明确了湿载与固结压力对结构强度和能量耗散的影响作用, 即黄土的黏性特征不仅显著依赖于水分含量, 还受土体内部结构和固结压力的共同影响。通过合理调控黄土的水分和压实条件, 可以有效提升其结构强度与能量耗散能力, 对于增强黄土工程结构的稳定性和耐久性至关重要。

**关键词:** 黄土; 黏滞特性; 动单剪试验; 耦合作用; 滞回曲线

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0187-05

## Viscous Properties of Undisturbed $Q_3$ -loess Under the Coupling Action of Moisture, Pressure and Vibration

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, WANG Enbo<sup>1</sup>

(1. Xianyang Engineering Technology Research Center for Loess Mechanics and Disaster Prevention,

Shaanxi Polytechnic University, Xianyang, Shaanxi 712000, China;

2. School of Civil Engineering, Shaanxi Polytechnic University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** The viscous behavior of loess plays a critical role in its engineering performance under coupled moisture-pressure-vibration conditions. To systematically reveal the viscous response mechanism of loess under combined effects of water content, consolidation pressure and dynamic loading, a series of dynamic simple shear tests were conducted on undisturbed  $Q_3$ -loess. Tests covered four initial water contents (5%, 10%, 15%, 20%), four consolidation pressures (50, 100, 150, 200 kPa), and six dynamic shear strain amplitudes (0.15%, 0.5%, 1.0%, 2.2%, 3.3%, 4.5%). The evolution of hysteresis loop shape, dynamic shear modulus, energy dissipation capacity and ratcheting effect with loading cycles was analyzed. The results indicate that as cyclic loading progresses, the hysteresis loops transform from a flat, spindle-like shape with poor symmetry and multiple sliding platforms in the first two cycles to a steep, Z-shaped curve with strong symmetry and a single sliding platform after the third cycle. Under low water content and high consolidation pressure conditions, the hysteresis loops were spindle-shaped with larger area and higher energy dissipation capacity. Conversely, under high water content and low consolidation pressure conditions, the hysteresis loops tended to

收稿日期: 2025-10-04

修稿日期: 2025-11-10

基金项目: 博士基金(BSJ2021-08)

作者简介: 王强(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土动力学与岩土地震工程等方面的研究工作。E-mail: wangqiangbj@163.com

be zigzag-shaped with smaller area and weakened energy dissipation capacity. This work systematically reveals for the first time the coupled influence mechanism of water, pressure and vibration on the viscous properties of undisturbed  $Q_3$ -loess. The ratcheting effect of loess was pronounced during the initial stages of cyclic loading but gradually weakened during subsequent multi-cycle loading. The viscous properties of loess are significantly influenced by water content, soil structure, and consolidation pressure. It is demonstrated that appropriately regulating the water content and compaction conditions of loess can effectively enhance its structural strength and energy dissipation capacity, which is crucial for improving the stability and longevity of loess engineering structures.

**Keywords:** loess; viscous property; cyclic simple shear test; coupled action; hysteresis loop

黄土作为一种在全球范围内广泛分布的特殊土,其物理力学性质与工程行为密切相关,尤其在地震、降雨及上部荷载耦合作用下的黏滞特性,直接影响着黄土地区工程结构的安全性与耐久性。黏滞特性反映了土体在受力过程中内部颗粒间粘结与摩擦的综合响应,是评价土体动力稳定性、变形能力与能量耗散机制的关键指标,一直是地质工程、土力学及环境科学等领域的研究热点。黄土的黏滞特性不仅直接关系到其动力稳定性、强度及变形行为,还深刻影响着工程建设、地质灾害防治以及土性改良等方面。黏滞特性是黄土物理力学性质的重要组成部分,它描述了黄土在受到外力作用时,颗粒间相互粘结、阻碍流动的能力。这种特性对于黄土地区的基础设施建设、道路施工、边坡稳定等工程问题具有直接影响。因此,深入理解和研究黄土的黏滞特性对于提高工程质量和保障安全具有重要意义。

为了深入研究黄土的黏滞特性,研究者们采用了多种方法和技术。例如,通过三轴压缩试验、直剪试验、水稳定性试验等室内试验,模拟不同条件下黄土的受力情况,测定其黏滞性指标<sup>[1-3]</sup>。利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等微观观测技术,观察黄土颗粒的形态、排列和孔隙结构,揭示其黏滞特性的微观机制<sup>[4-5]</sup>。借助有限元分析、离散元等数值模拟方法,建立黄土黏滞特性的数学模型,进行定量分析和预测<sup>[6-7]</sup>。近年来,黄土黏滞特性的研究取得了显著进展。研究者们不仅揭示了黄土黏滞特性的主要影响因素和微观机制,还提出了一系列改善黄土黏滞性的技术措施。例如,通过添加石灰、水泥等固化剂,可以显著提高黄土的强度和稳定性;通过优化施工工艺和参数,可以降低黄土在工程建设中的黏滞性风险<sup>[8-9]</sup>。尽管黄土黏滞特性的研究已经取得了丰硕成果,但仍面临诸多挑战。已有研究表明,固结压力、湿载和振动荷载对黄土的黏滞变形特性都具有重要的影响作用,如文献[10]在研究黄土的流变特性时发现,法向应力的增大可以加大土

体中的黏滞阻力,即黏滞系数也随之增大;文献[11]通过针对马兰黄土的剪应力松弛试验发现土体黏滞系数随含水率的增加而降低。此外,有些学者从结构性方面探讨了黄土的黏滞特性及本构模型,如文献[12]基于动三轴试验探讨了振动损伤作用对黄土黏滞阻尼系数的影响作用;文献[13]从微结构视角研究了颗粒级配对黄土黏滞特性的影响;文献[14-15]通过黄土蠕变实验,基于塑性元件的微元化建立了重塑黄土的黏弹塑性本构模型;文献[16]开展了裂隙对黄土蠕变特性的研究。显然,已有研究多是集中于单因素的影响,而对固结压力、湿载和振动荷载等三者之间的耦合作用机制及联动关系仍未完全探明,需要深入研究。

本研究选取典型未扰动  $Q_3$  黄土作为对象,在 5%、10%、15%、20% 四种初始含水率条件下,分别施加 50、100、150、200 kPa 的固结压力,并设置了 0.15%、0.5%、1.0%、2.2%、3.3%、4.5% 等 6 种动剪应变幅,系统开展了动单剪试验。基于试验结果,分析了非饱和原状  $Q_3$  黄土的滞回曲线形态随加载周次发展的变化规律,探讨了湿-压-振耦合作用下黄土的黏滞耗能机制,并比较分析了湿载、固结压力和振动荷载对黄土黏滞特性的影响作用。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验仪器

本试验使用了西安理工大学开发的立方体铰接式动单剪仪。该设备采用边长为 70 mm 的立方体试样。其压力室设计独特:沿剪切方向由四块刚性板通过铰链连接构成。特别地,上顶面板与相邻侧板之间采用了假铰接连接形式。该加载装置的结构原理及试样受力状态如图 1 所示。从图 1 可以看出,加载装置在底部施加水平剪切力,此时,位于试样四周的顶板、底板与两侧竖直的约束板之间发生相对旋转,使得原本方形的试样在四块刚性板的约束下发生剪切变形,此时的四块加载板形成了菱形

空间。在该过程中,剪应变被均匀地作用于整个试样体,从而确保了变形分布的均匀性。为了模拟实际地震中的剪切波作用,通过往复作用的剪切力来施加循环水平剪应力  $\tau$ ,该应力模拟了地震时产生的水平剪切作用。同时,为了模拟上覆土层重量对土体的影响,还施加了竖向压应力  $\sigma$ 。该加载机制综合了地震剪切波与上覆荷载的双重作用,能够高度模拟真实地震作用对土体的影响,从而被广泛认为是最贴近实际地震作用的一种室内试验手段。同时,该加载机构的剪应力和剪应变均可直接测量,对大应变条件下的土体变形研究尤为适用。

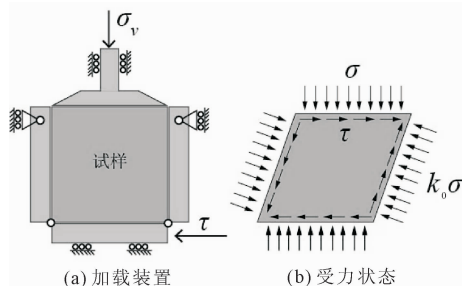


图 1 动单剪加载与应力条件示意图

## 1.2 试样及试验工况

本次试验的取样场地位于西安市浐河西岸一级台地,通过人工探井方式取样。试样取样深度 8 m,位于典型的  $Q_3$  黄土地层。通过室内土工实验测定,该处天然原状黄土的基本物性指标如表 1 所示。

表 1 黄土的基本物性指标

天然密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	干密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	含水率 /%	土颗粒 比重	孔隙 比	液限 /%	塑限 /%
1.54	1.35	14	2.7	1.01	35	22

试验土样取自现场天然原状黄土。通过风干法与水膜转移法结合,制备了含水率分别为 5%、10%、15% 和 20% 的试样。试验加载采用应变控制模式,对试样施加频率为 1 Hz 的正弦波荷载,剪应变幅值设定为 0.15%、0.5%、1.0%、2.2%、3.3% 和 4.5% 共六种水平。加载过程分为两类:单级加载(单个试样仅承受单一应变幅的动荷载)和分级加载(单个试样依次承受递增的多级应变幅动荷载)。本试验系统考察了四组固结压力(50、100、150、200 kPa)、四种含水率(5%、10%、15%、20%)和六种剪应变幅(0.15%、0.5%、1.0%、2.2%、3.3%、4.5%)的组合工况。其中,单级加载主要用于获取初始滞回曲线,并分析含水率、固结压力及加载周次的影响规律;分级加载则主要用于探索结构

性较强黄土的滞回曲线测试方法。本次试验中,固结压力(50~200 kPa)覆盖浅表层至深层土体自重应力,含水率(5%~20%)涵盖干燥、天然及湿润状态,剪应变幅值(0.15%~4.5%)完整刻画小变形至破坏全过程。参数组合通过多因素耦合揭示黄土黏滞特性,高压低含水率诱发脆性破坏,低压高含水率触发塑性流动,大应变幅值追踪结构损伤演化,该研究成果可为黄土地区抗震设计提供科学依据。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 循环加载条件下含水率对滞回曲线形态的影响规律

图 2 展示了在恒定固结压力、恒定剪应变幅及不同湿载条件下, $Q_3$  原状黄土在前十个加载周期内的应力-应变响应曲线(即滞回圈)。分析图 2,可观察到三种测试条件下滞回曲线形态随加载周期的增加呈现出一系列规律性变化。

前两个加载周期的滞回曲线形态与后续 3 至 10 周期的滞回曲线相比,展现出较为显著的差异。初期滞回曲线相对于后续周期的滞回曲线,在原点对称性上较弱,且包含多段滑移平台,而 3 至 10 周期的滞回圈则仅含单一滑移平台,且形态趋于一致。此现象揭示了原状黄土内部结构空间分布的非均质性,该非均质性在加载初期尤为显著,但随着加载周期的累积,初始结构逐渐破坏,转变为空间分布相对均匀的次生结构。

随着加载周期的递增,滞回圈的形状由梭形向 Z 字形演变,滞回圈面积先增大后减小,反映了土体耗能能力的相应变化。土颗粒间的连接因加载而受损,产生滑移效应。此外,前两个周期的滞回圈在水平方向上的分布较为平缓,而 3 至 10 周期的滞回圈则更为陡峭。这表明动剪切模量随加载周期的增加先减小后增大,初期减小显著,随后趋于稳定。初期动剪切模量的降低归因于土结构的损伤,而后期的增大则体现了原状黄土在循环加载下的硬化特征,即土体因强烈的动荷载引起的震陷变形而变得更加密实坚硬。

土体含水率显著改变其滞回圈形态、动剪切模量及体积应变特性。如图 2(a)、图 2(b)所示,低含水率下,滞回圈近似梭形;随含水率升高,滞回圈中滑移平台现象增多,形态逐渐向 Z 形转变,见图 2(c)。图 2(c)展示了在相同固结压力(50 kPa)下,高含水率(20%)条件的滞回曲线。与低含水率试件相比,其滞回圈形态呈现显著的“Z”字形,滑移平台更长

且更明显,滞回圈包围面积显著减小。这表明在高含水率下,水分充填颗粒孔隙,削弱了黄土的胶结结构,导致其以摩擦为主的滑移变形更容易发生,结构强度与能量耗散能力大幅降低。相应地,动剪切模量随含水率增加而衰减,体积应变则随之增大。在循环加载初始阶段,土粒间的联结强度主导黄土的耗能过程;至加载中后期,颗粒间的摩擦强度成为能量耗散的主要来源。

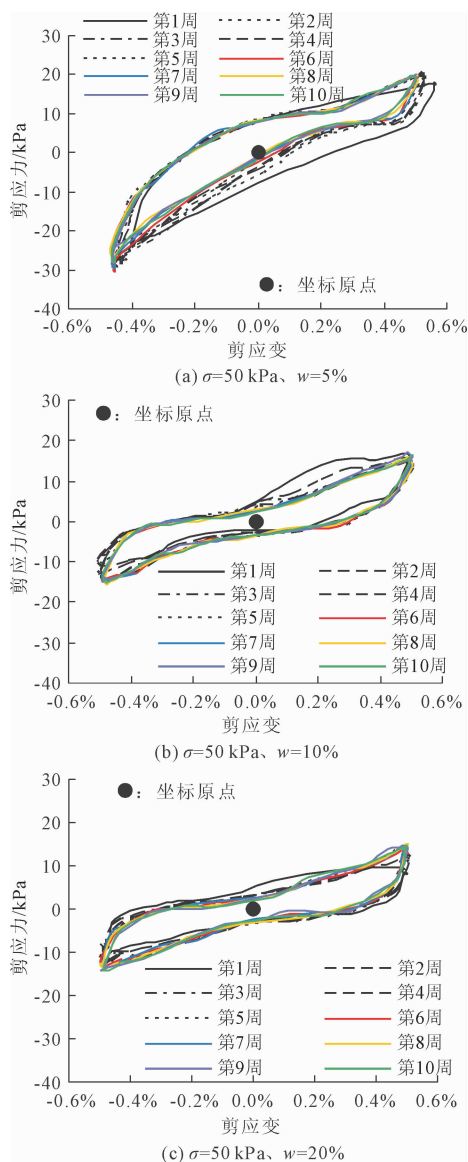


图 2 相同固结压力( $\sigma$ )、不同含水率( $w$ )条件下滞回曲线形态的变化规律

## 2.2 循环加载条件下固结压力对滞回曲线形态的影响规律

图 3 所展示的不同固结压力情况下,滞回曲线随加载循环的演变特征。对比各固结压力条件下的滞回曲线形态,结果显示,随着固结压力水平的提

升,滞回圈面积呈现递增趋势,显示了土体耗能能力的增强。进一步观察可见,固结压力的增加亦伴随着土体动剪切模量的显著增大,此现象与含水率对耗能性能及动剪切模量的影响模式相一致,分别反映了球应力在强化散粒材料抗剪性能方面的积极作用,以及水分对钙质胶结结构及散粒材料抗剪性能的削弱效应。

此外,随着固结压力逐步升高,滞回曲线在零剪应变点两侧的水平位移段长度呈现扩展趋势。具体而言,当固结压力设定为 50 kPa 时,该水平段的剪应变差异约为 0.1%;而当固结压力提升至 100 kPa 与 200 kPa 时,相应的剪应变差异则分别扩大至约 0.20% 与 0.25%。这一变化明显反映了固结压力对黄土原始结构的损伤效应,即固结压力的增强加剧了土颗粒间连接的破坏,导致黄土的原始结构大量瓦解,散粒特性愈发显著。在此条件下,土颗粒间的摩擦阻力逐渐成为影响土体性能的主导因素。该现象在低含水率条件下较为明显,在高含水率条件下则不明显。

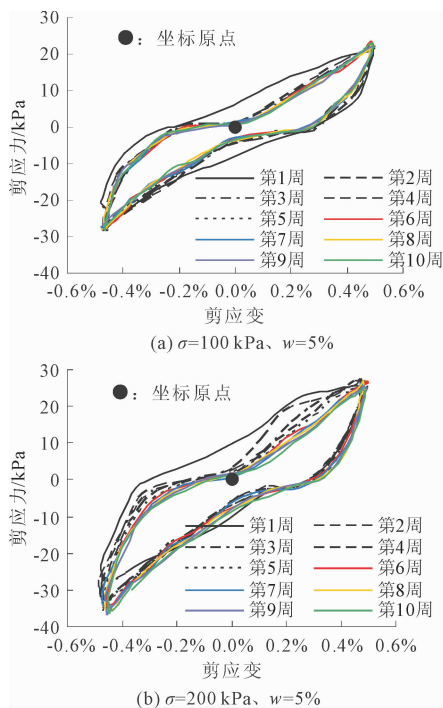


图 3 相同含水率( $w$ )、不同固结压力( $\sigma$ )条件下滞回曲线形态的变化规律

## 2.3 压、动载变化条件下卸载对滞回曲线的影响作用

图 4 详细展示了三种不同试验条件下, $Q_3$  黄土在第 1 周、第 11 周至第 91 周期间的滞回曲线演变情况。观察图 4 可明显看出,三种试验条件下,首个

加载周期的滞回曲线形态与后续第 11 周至第 91 周的滞回曲线存在显著差异。具体而言,首个周期的滞回圈斜率显著低于接下来九个周期的斜率,这一差异揭示了动单剪应力作用下,黄土因振密效应而展现出的硬化特性。进一步分析滞回圈随加载周期的发展变化,发现在三种试验条件下,首个周期的滞回曲线均未完全闭合,而自第 11 周起至第 91 周,滞回曲线逐渐趋于闭合,且后 9 个周期的滞回曲线形态近乎一致。此现象表明,黄土在循环加载初期表现出显著的棘轮效应,但随着加载周期的增多,棘轮效应逐渐减弱,这归因于黄土的震陷变形增量随循环次数的增加而逐渐减小。

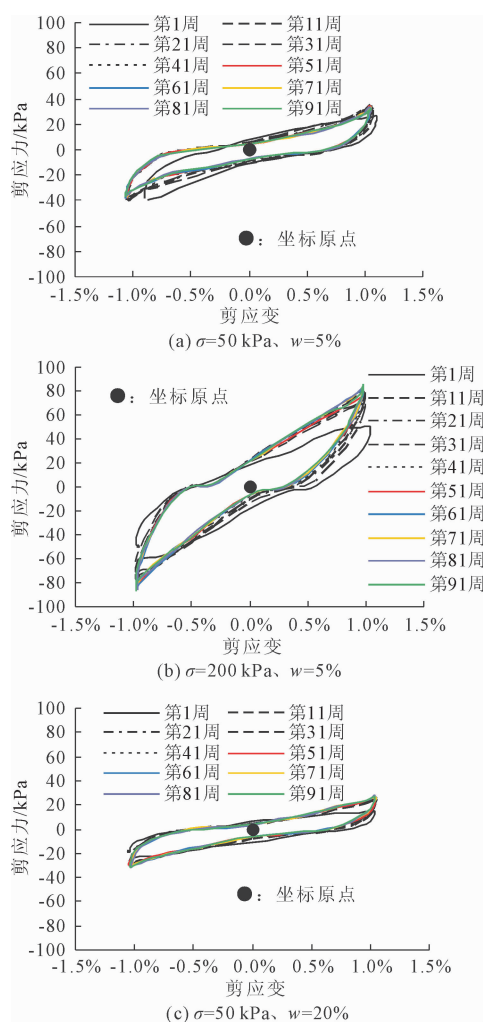


图 4 不同固结压力( $\sigma$ )、不同含水率( $w$ )条件下滞回曲线形态的变化规律

图 4 进一步对比了不同固结压力(两种水平)与含水率(两种水平)下滞回圈的形态变化。结果表明:固结压力对黄土能力耗散性能提升作用显著,较高固结压力对应的滞回圈面积明显大于较低压力

下的情况;含水率是主导黄土耗能性能劣化的关键因素,如较高含水率条件下的滞回圈面积则低于较低含水率状态。低含水率下,能量耗散主要源于初始胶结结构的损伤;高含水率下,则转化为以颗粒间摩擦滑移为主。湿-压耦合效应体现为:高压可部分抵消高含水率带来的不利影响,但无法根本改变由水分主导的耗能机制弱化趋势。这一现象与图 2、图 3 揭示的水分削弱结构性、固结压力增强土体响应的规律相互印证,共同证实了水分和固结压力对黄土结构强度及能量耗散能力的显著调控作用。

### 3 结 论

- (1) 含水率升高显著弱化黄土结构,滞回曲线由梭形向 Z 形转变,耗能能力下降。
- (2) 固结压力增大可有效提升黄土的滞回圈面积与动剪切模量,而循环加载促使土体结构由非均匀向均匀演化,形态由扁平趋向陡峭。
- (3) 黄土在循环初期表现出明显棘轮效应,随周次增加效应减弱,滞回曲线逐渐闭合并趋于稳定。
- (4) 含水率与固结压力是影响黄土黏滞性能的关键耦合因素,合理控制二者可提升工程结构的抗震稳定性与耐久性。

#### 参考文献:

- [1] 陈铁林,李国英,沈珠江. 结构性粘土的流变模型[J]. 水利水运工程学报,2003,25(2):7-11.
- [2] 赵国华,段钰锋,徐 峰,等. 高浓度水煤浆流变特性和稳定性试验研究[J]. 热能动力工程,2008,23(2):201-205,219-220.
- [3] 刘 羊,孙 茜,王晓文. 软土黏滞系数的测量方法及影响因素研究[J]. 土工基础,2021,35(6):772-776.
- [4] 张先伟. 结构性软土蠕变特性及扰动状态模型[D]. 长春:吉林大学,2010:99-127.
- [5] 唐 旭,李金华. 透射电子显微镜技术新进展及其在地球和行星科学研究中的应用[J]. 地球科学,2021,46(4):1374-1415.
- [6] 弋鹏飞,张建鹏,马 瑞,等. 伊犁黄土水分入渗规律试验研究[J]. 地下水,2024,46(3):119-122.
- [7] 罗 琦,周凤玺,马 强. 电场作用下非饱和黄土中铅离子迁移机理研究[J/OL]. 工程力学. [2025-12-31] <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240308.1617.015>.
- [8] 郭李娜,张永波,段 清,等. 改性材料固化黄土的微观机理研究[J]. 节水灌溉,2021(7):1-6,13.

在测试土体热力学指标方面的可靠性。

(3) 教学应用方面:该实验的开设实现了“科研反哺教学”。通过引入RAP再生材料与温控技术,将前沿的绿色工程理念与多场耦合理论融入实验课堂,不仅加深了学生对土体界面力学行为的理解,更通过“设备搭建-参数设置-现象观测-机理分析”的全过程锻炼,有效提升了学生的创新思维与工程实践能力。

### 参考文献:

- [1] 高磊,龚云皓,宋涵韬. 土力学实验教学中存在的问题与改革建议[J]. 实验技术与管理,2017,34(7):200-202,206.
- [2] 李春红,曹苏南,李志刚,等. 温控静动力直剪实验系统设计与实验教学应用[J]. 实验技术与管理,2024,41(3):203-209.
- [3] 李清富,裴俊杰,吕小永,等. 废旧沥青路面再生利用研究现状与进展[J]. 河南科技,2019(20):108-111.
- [4] 张静玉. 废旧沥青路面混合料的力学特性试验研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
- [5] 蔡国庆,赵成刚,白冰,等. 温控非饱和土三轴试验装置的研制及其应用[J]. 岩土工程学报,2012,34(6):1013-1019.
- [6] 李剑,王勇,孔令伟,等. 一种新型非饱和土温控三轴试验系统的研制与初步应用[J]. 岩土工程学报,2018,40(3):468-474.
- [7] 薛晨阳,扎西顿珠,毛航宇,等. 考虑温度-湿度联合控制的三轴仪研制及初步应用[J]. 水利水电技术,2019,50(3):72-78.
- [8] 陈正汉,谢云,孙树国,等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):928-933.
- [9] 何玉琪,廖红建,董琪,等. 加筋材料改良黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(S1):181-185.
- [10] Sudarsanan N, Karpurapu R, Amrithalingam V. An investigation on the interface bond strength of geosynthetic-reinforced asphalt concrete using Leutner shear test[J]. Construction and Building Materials, 2018,186:423-437.
- [11] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [12] 次仁云旦,王柳江,扎西顿珠,等. 温度对水工沥青混凝土强度及剪胀特性的影响试验研究[J]. 长江科学院院报,2024,41(1):190-195.
- [13] 迟明杰,赵成刚,李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. 土木工程学报,2009,42(3):99-104.
- [14] 周爱兆,张静玉,殷杰,等. 废旧回收沥青路面材料的强度特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(6):733-738.
- [15] Anubhav J, Basudhar P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010,28(4):403-408.
- [16] 李强,侯睿,马翔,等. 沥青混合料抗剪性能试验方法及影响因素研究[J]. 公路工程,2016,41(4):50-54.
- [17] 王民,汪昊,肖丽,等. 基于三轴剪切强度的浇注式沥青混合料抗剪性能影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(11):118-122.
- [9] 张大铭,李建东,王旭,等. 复合型固化剂加固黄土物理力学特性试验研究[J]. 材料导报,2024,38(S1):151-156.
- [10] 马莉英,肖树芳,王清. 黄土的流变特性模拟与研究[J]. 实验力学,2004(2):178-182.
- [11] 耿兴福,李保雄,苗天德. 马兰黄土剪应力松弛特性研究[J]. 西北地震学报,2010,32(1):36-41.
- [12] 王强,邵生俊,邵帅,等. 黄土的动力损伤耗能机制和变形特性的研究[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(6):160-169.
- [13] 赵宁. 粘粒级配对黄土动力特性影响的微观机理分析[J]. 价值工程,2024,43(5):109-111.
- [14] 骆亚生,赵程斌,孙哲,等. 基于塑性元件微元化的重塑黄土黏弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报,2024,46(3):624-631.
- [15] 赵程斌. 基于塑性元件微元化的重塑黄土黏弹塑性本构模型[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:35-62.
- [16] 刘凯. 裂隙性黄土三轴蠕变特性试验研究[D]. 西安:西北大学,2022:71-80.

(上接第191页)