DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.006

饱和黄土在地震作用下动力特性及损伤规律研究

叶万军, 王嘉豪, 吴云涛, 徐志远, 马仟千, 田金洋

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

摘要: 黄土是广泛分布在我国西北地区的一种特殊土,重塑黄土和原状黄土的结构差异较大,为探究饱和重塑黄土和原状黄土在地震荷载作用下的动力特性和损伤规律,利用德国 WILLE 的应力-应变控制动静三轴仪对泾阳南塬滑坡体的黄土进行动三轴试验研究,滑坡体的黄土体为软黄土,其结构性较弱,是研究地震作用较为适合的土体。试验使用动三轴伺服系统对地震荷载进行模拟,研究了饱和重塑黄土和原状黄土不同固结围压强度、不同加载频率和不同固结比下的动应力 σ_d、动应变 ε_d、阻尼比 λ 及损伤变量 D 的变化规律。结果表明:在加载初期饱和原状黄土和重塑黄土的动应变都快速增长,围压的增加、荷载频率的增大使饱和黄土试样破坏时的动应变减小。阻尼比和动应变的关系为正相关,饱和原状黄土的阻尼比增长的趋势要比饱和重塑黄土的增长趋势平缓,饱和黄土的动弹性模量计算所得的离散性较大,但是根据数据进行线性拟合结果可以得出随着损伤变量的积累逐渐减少。该研究表明所取的原状土中具有大孔隙的骨架结构,在自然条件中受到地震荷载容易发生振动变形,研究可为地区震级高、周期长、降水量大的黄土地基抗震设计提供参考。

关键词: 饱和黄土; 地震荷载; 三轴试验

中图分类号: TU435 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0524-09

Research on dynamic characteristics and damage law of saturated loess under seismic action

YE Wanjun, *WANG Jiahao*, *WU Yuntao*, *XU Zhiyuan*, *MA Qianqian*, *TIAN Jinyang*

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi′an University of Science and Technology, Xi′an 710054, China)

Abstract: Loess is a special soil widely distributed in the northwest region of China, and distinct structural discrepancies exist between remolded and undisturbed loess. To investigate the dynamic properties and damage evolution laws of saturated remolded loess and intact undisturbed loess under seismic loading, dynamic triaxial tests are performed on loess sampled from the landslide mass at the South Plateau of Jingyang using a stress-strain controlled dynamic-static triaxial apparatus manufactured by WILLE, Germany. The loess within this landslide is categorized as soft loess with weak soil structure, which makes it an ideal material for studying soil responses under seismic actions. The test uses the dynamic triaxial servo system to simulate the seismic loading, and investigates the variation rules of dynamic stress σ_d, dynamic strain ε_d, damping ratio λ and damage variable D under different consolidation confining pressures, loading frequencies, and consolidation ratios for both saturated remolded loess and undisturbed loess. The results show that the dynamic strain of saturated undisturbed loess and remolded loess increases rapidly at the initial stage of loading, and the increase in confining pressure and loading frequency reduces the dynamic strain at failure of the saturated loess samples. The relationship between damping ratio and dynamic strain is positively correlated, and the damping ratio of saturated loess increases more gently than that of saturated remolded loess. The calculated dynamic elastic modulus of saturated loess exhibits considerable discreteness, but linear fitting of the data reveals a gradual decrease as the damage variable accumulates. This study shows that the undisturbed soil taken has a skeleton structure with large pores, which is prone to vibration and deformation under seismic loading in natural conditions, and the study can provide a reference for the seismic design of loess foundations in areas with high seismic magnitude, long period, and high precipitation.

Key words: saturated loess; seismic load; triaxial test

收稿日期: 2024-06-17 **修回日期**: 2025-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(42372323,42072319)

第一作者: 叶万军(1976—),男,博士,教授,主要从事地质工程防灾减灾与边坡岩土体加固与防护方面的研究。E-mail:1768457389@qq.com

黄土主要分布在我国的西北地区，是一种特殊的土体。在自然环境中逐渐形成了特殊的结构体系，这些特殊性在工程上带来了巨大的难题[1]。近些年地震活动多发且地震烈度较高，黄土在地震荷载作用下引发的滑坡、崩塌以及液化等众多地质问题给人类和社会造成了巨大的损失，如2018年汉中市发生的5.3级地震，所引起的房屋地基沉陷大部分是因地震造成的黄土地层振陷所导致地质灾害。

对于黄土动载问题涉及的内容多且复杂，国内外众多学者从不同的含水率、干密度以及加载频率等因素对黄土的动力学特性进行了一系列研究。张熙胤等[2]通过对黄土在不同围压、温度、含水率和加载频率下的动载试验，得出在动荷载条件下黄土多种因素耦合下的变化规律。杨丰华等[3]对冻融循环下的各向异性西宁原状黄土进行了研究，得出黄土在不同沉积角度下的动剪切角度的差异性。郜晓等[4]对临潼区内的黄土进行加筋处理，对其进行动三轴试验研究，揭示了对黄土动弹性模量的主要影响因素。李帅等[5]研究了在循环荷载作用下的黄土剪切模量和阻尼比，从微观角度上解释黄土动力特性的变化原因。代倩等[6]对饱和重塑黄土在动荷载作用下的动应变与孔压变化进行了研究，以不同围压和不同循环应力对黄土填方体进行动力分析。文少杰等[7]对不同含水率、不同固结压力条件下的海东原状黄土进行动三轴试验研究，得出两种因素下对黄土动剪切模量的影响规律。Liu等[8]对黄土施加地震荷载模拟地震作用过程，研究在不同含水率下黄土的液化响应机制。张军等[9]对饱和压实黄土进行动三轴试验，研究了饱和压实黄土在循环荷载下的动力特性的变化规律。以上学者对黄土进行了多方面的研究，主要是对一定含水率下的原状黄土和重塑黄土进行研究，但是对于饱和状态下的黄土研究很少，饱和状态下黄土有着明显的软化，受到动荷载作用下的内部结构会很大程度降低，所造成的危害性更大。

本文以泾阳南塬典型滑坡处的黄土作为研究对象，采用德国的WILLE生产的LO7010/5/DYM型应力-应变控制动静三轴仪进行试验，对做好的原状土样和重塑土样进行饱和，随后施加大振幅的动荷载进行对地震荷载的有效模拟，分析固结围压强度、加载频率大小等因素对饱和重塑黄土和饱和原状黄土的动力特性的影响，为饱和黄土动力特性的研究提供一定的参考价值。通过对两种土样进行损伤分析，研究饱和黄土的损伤变量的变形情况。

1　试验概况

1.1　重塑黄土与原状黄土的制备

试验用土取自咸阳市泾阳县南塬滑坡的某处边坡坡脚，该地区地表植被茂盛，取土时选择表面光滑的土体，防止大量植物根系对土体结构的影响，地理环境见图1。现场取样观察取得黄土颜色呈黄褐色，含有极少的植物根系，内部孔隙大，土体为垂直性发育（少部分有明显的倾斜）。根据《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）采用烘干法和环刀法测得原状黄土的天然含水率、天然干密度。其基本的物理性指标如表1所示。



图1　土样地理环境

Fig. 1　Geographical environment of soil sample

表1　原状黄土的物理指标

Tab. 1　Physical index of undisturbed loess

天然含水率 W_0/%	天然干密度 ρ_d/g·cm^{-3}	塑限 W_p/%	液限 W_L/%	塑性指数 I_p
15.61	1.67	12.24	24.67	12.43

土样取回经过烘干、打碎、过筛，配置初始含水率为15.61%的土料，装入盛土器皿中用保鲜膜密封48 h。将配好含水率的土样采用分层击实法制备出直径38 mm，高76 mm的重塑黄土见图2，其干密度和原状土相同。原状黄土见图3。采用特制削土盘见图4，进行原状土的削样，制备原状样选择同一土层的黄土，确保土样的含水率、干密度相差不超过0.1%，保证试验的误差性。

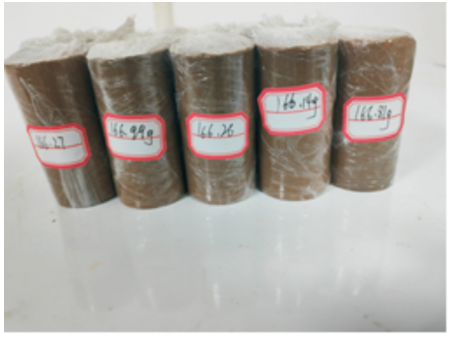


图2　重塑土土样

Fig. 2　Remolded soil samples



图 3 原状土土样

Fig. 3 Undisturbed soil samples



图 4 原状土削土盘

Fig. 4 Undisturbed soil cutting disc

1.2 试验仪器及方法

试验使用德国 WILLE 生产的 LO7010/5/DYM 型应力-应变控制动静三轴仪(图 5),该装置可以实现对土的常规应力试验以及复杂应力动态循环加载试验等,可以有效的对地震荷载、交通荷载、基坑开挖等各种复杂工况进行模拟,使用专业的分析软件对试验过程中土样数据的记录。通过动三轴试验对饱和原状黄土和重塑黄土加载地震荷载,研究土样在加载过程中循环次数和动应变的关系、围压和加载频率对两种土样的动力特性影响规律,试验方案见表 2。本次试验的过程分为饱和阶段、固结阶段、动力加载阶段(图 6)。将土样处于围压分别为 100、150、200 kPa 状态下进行各向同性饱和固结,饱和的效果使用仪器自带的 B-test 检测以保证饱和度在 95% 以上,在饱和和固结完成后施加频率为 1.0、3.0 Hz、振幅为 60 kPa 的正弦循环荷载 10 000 次。

2 试验结果与分析

本次试验通过对重塑黄土和原状黄土施加不同的固结围压、加载频率、固结比等因素进行动三轴试验,对两种试样进行循环加载下的定性分析,研究泾阳饱和状态下重塑黄土和原状黄土的动力特性。

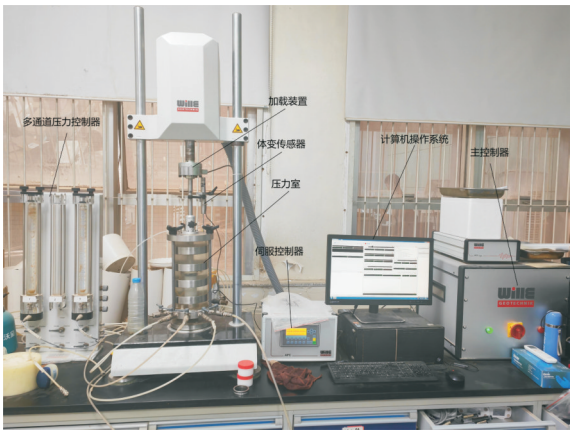


图 5 动三轴系统装置组成

Fig. 5 Composition of dynamic triaxial system device

表 2 动三轴试验方案

Tab. 2 Dynamic triaxial test scheme

试样类型	试样质量/g	固结围压 σ_3/kPa	固结比 K_c	加载频率/Hz
重塑土(理论质量为 166.68 g)	166.27	100	1.0	1
	166.40	100		3
	166.97	150		1
	166.99	150		3
	166.26	200		1
	167.77	200		3
	166.50	100	1.69	1
	166.27	150		1
	165.87	200		1
原状土	159.34	100	1.0	1
	159.09	100		3
	161.83	150		1
	155.05	150		3
	160.14	200		1
	149.43	200		3
	153.45	100	1.69	1
	156.12	150		1
	162.42	200		1

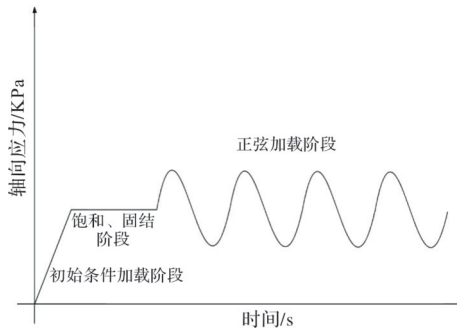


图 6 试样加载过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sample loading process

2.1　饱和黄土动应变和循环次数的关系

自然环境中土体受到的压力不尽相同，此次试验选取三种围压，从不同围压状态下重塑黄土的动应变ε随着循环次数 N 的曲线图，见图 7 可以看出，在前期加载时动应变随着循环荷载次数的增加在迅速增加，当循环次数达到 600 次左右时曲线出现拐点，在拐点后的动应变随着循环次数增加而缓慢增加，随着动应变增加到一定的数值后最后趋于稳定状态。在后期加载阶段会出现一段动应变的突变阶梯过程，主要是由于在很多次的循环动荷载下重塑黄土的内部结构随着振动发生了改变，在这一阶段动应变产生了突变，随后恢复平稳。对比图 7 和图 8 原状黄土在围压 100、150 kPa 时和重塑黄土的动应变与循环荷载次数的变化基本一致；当围压增大到 200 kPa 时原状黄土的动应变随着循环荷载次数的增加在前期并不是快速增加，而是趋于正比例函数缓慢增加，最后趋于稳定。而围压 200 kPa 时重塑黄土与原状黄土曲线图像差别很大，两者表现出了完全不同的特性。该现象的产生说明原状黄土在自然环境的形成中内部的孔隙较多，在低围压的状态中随着动荷载作用，其中的大孔隙发生破坏，使得初期荷载条件下应变的变化快速增长，随着循环动荷载作用让土体中孔隙逐渐重新排列，增加结构紧密度，使其具有更高的抗应变能力，曲线图前期迅速增加而后期缓慢增加至趋于稳定。而原状黄土在高围压状态下内部的颗粒之间受外力作用紧密接触，让土颗粒之间的咬合力、粘结力和摩擦阻力大幅度提升[10]，在加载阶段土样内部颗粒的约束效果让动应变随着循环次数的增加呈线性增加至趋于稳定。重塑黄土为人工后期使用模具进行压制而成，其中孔隙较小且重塑土样之间孔隙率相似，在围压增大条件下曲线变化基本一致。

从图中可以看出，围压对饱和重塑黄土和原状黄土的动应变有显著的影响，随着围压的增高两种土样的动应变都随之减少，而高围压的状态对于原状黄土的影响最大，其直接影响了动应变-循环次数曲线的变化趋势。

2.2　饱和黄土动应变和荷载频率的关系

根据在不同荷载频率下的两种饱和土样的动应变和循环次数的曲线图中可以看出（图 7、图 8），饱和重塑黄土和原状黄土在随着荷载频率的增加下，两者土样受到破坏后的动应变随之减小，而变化趋势基本不变。主要是由于随着荷载频率的增加使两种饱和土样中的土颗粒之间运动次数增加，加速土体孔隙中水的运动，土体结构变紧密的速度

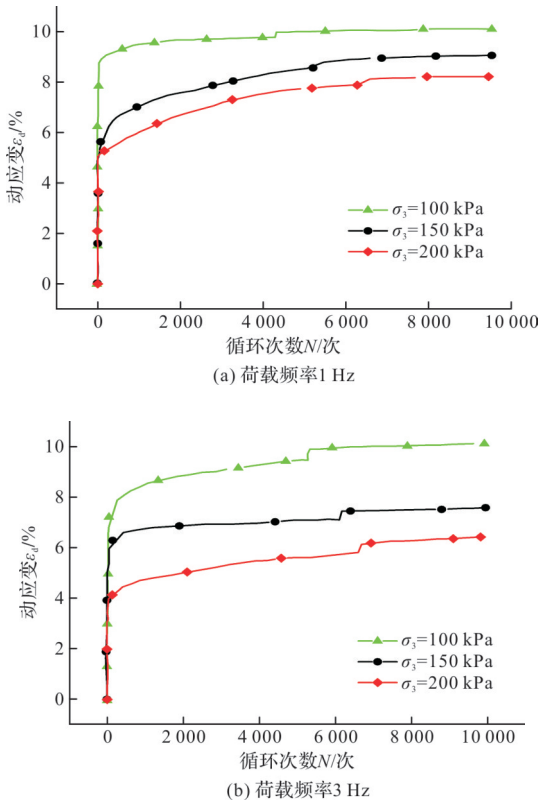


图 7　饱和重塑黄土不同围压下的 ε_d-N 曲线

Fig. 7　ε_d-N curves of saturated remolded loess under different confining pressures

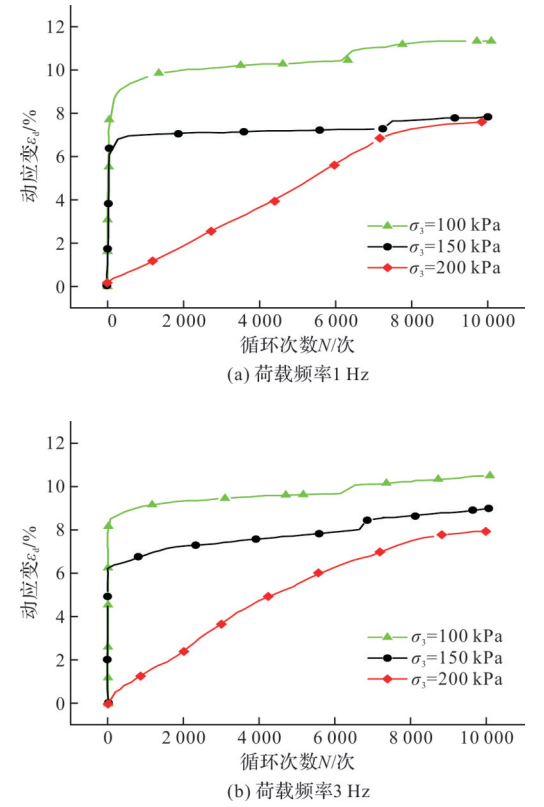


图 8　饱和原状黄土不同围压下的 ε_d -N 曲线

Fig. 8　ε_d-N curves of saturated undisturbed loess under different confining pressures

加快,随着循环荷载的加载动应变的增加就没有低频率下的变化大;高频率作用下对土体内重力水的影响最大,其存在于土体的孔隙中且具有自由活动的能力,在动荷载下受到围压的约束作用大部分重力水进行上下的移动。饱和土样中内部孔隙的水分随着高频率的振动向土体表面进行析出,土体内部的水分的减小可以增加土内颗粒的紧密度,动应变随着土体结构强度的增加变化的峰值降低。

2.3 饱和黄土动应力—动应变关系曲线分析

土的动应力-动应变曲线形状与边界约束条件的选取以及动荷载的类型有关[11],黄土在动荷载作用下呈现出来的动应力-动应变关系曲线是一个滞回曲线,具有非常显著的非线性特性,可以用 Hardin-Drnevich[12]的双曲线模型来进行分析:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d} \tag{1}$$

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} = \frac{1}{a + b\varepsilon_d} \tag{2}$$

式中:σ_d、ε_d分别为动弹性应力和动弹性应变,当动应变趋于无限大时,动应力的最大值趋于 1/b。

从图 9(a、b)可以看出,在荷载频率为 1 Hz 的相同条件下,饱和原状黄土和重塑黄土的动应力-动应变曲线的斜率随着围压的增加而变大。两者表现出相同的变化规律和趋势说明在饱和情况下,低频率中重塑黄土和原状黄土受到的作用效果是相似的,土颗粒之间的相互作用下表现出了相似的结构特性[13]。该趋势说明在围压变大条件下,对于同一个动应变的产生、土样所要的动应力就越大。这主要是在围压增大的情况下,土样中的土颗粒之间的相互作用力增大,要出现同一个动应变就需要一个更大的动应力作用,从而导致原状黄土和重塑黄土的动应力的变化随着围压的增大同步增减。从原状黄土和重塑黄土的比较之间可以看出围压对原状黄土动应变的影响要比对重塑黄土动应变的影响要大,主要是原状黄土的土样内部孔隙结构比重塑黄土的要松散,在围压增加的条件下对内部结构相互之间的作用效果要比重塑黄土的效果强,在动应力上表现的更加明显,在较大围压的条件下动应力-动应变曲线图趋于直线。

通过查阅相关资料,西北地区黄土的内摩擦角 φ 一般为 24°左右,为了更加契合自然环境中的黄土受地震作用下的影响,选择 k_c=1.69 对黄土进行不排水固结(图 9c、d)。从图中可以看出原状黄土和重塑黄土在固结比一定时,动应变随着动应力的增

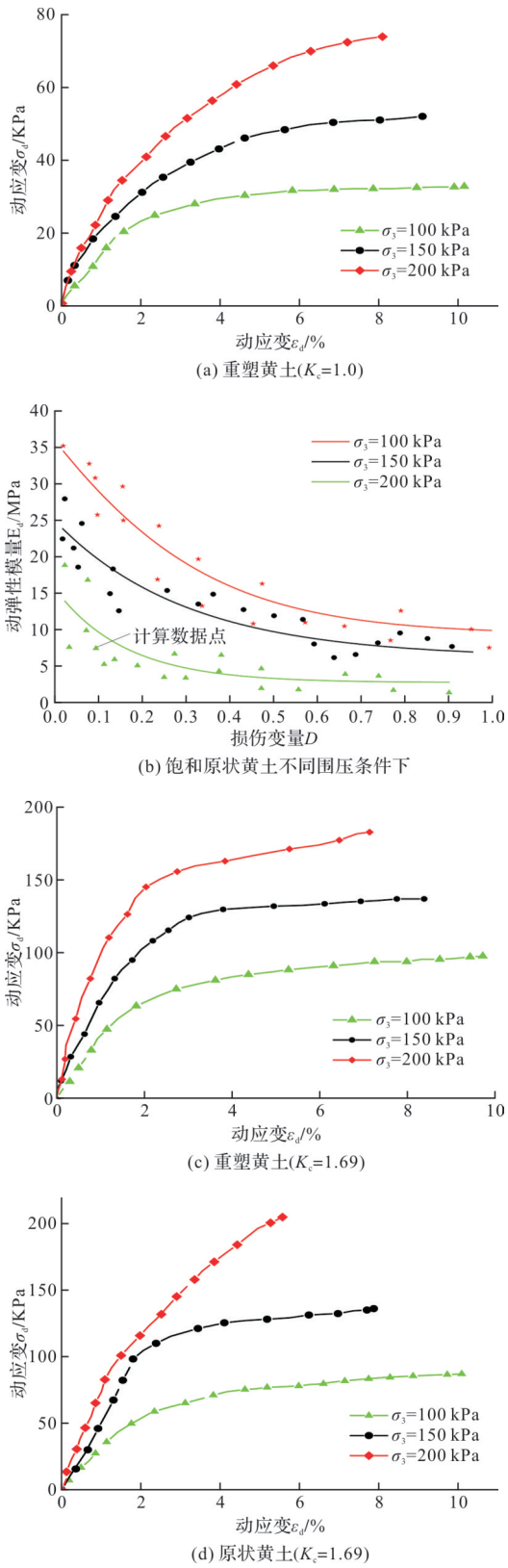


图 9 荷载频率为 1 Hz 下的不同围压的 σ_d-ε_d 曲线图

Fig. 9 σ_d-ε_d Curves of different confining pressures under 1 Hz load frequency

减同步变化,随着固结比的增大,要达到同一个动应变所需要更大动应力。这主要是随着固结比的增大,使土颗粒之间的相互作用增大,产生相同动

应变所需要的动应力也随之增大。从不同的固结比可以看出，原状黄土和重塑黄土在固结比增大情况下两者的动应变均减小，重塑黄土受到的影响要比原状黄土的大，主要是重塑黄土中孔隙比与原状黄土的少，在固结比增大的情况下对重塑的土体结构强度进行直接性影响，而原状土体中的多孔隙给于了足够的缓冲时间，变化不是很明显。该规律说明固结比对饱和状态下黄土的影响反应是显著的，对黄土自身本构体系有着直接作用。

2.4　饱和黄土阻尼比结果分析

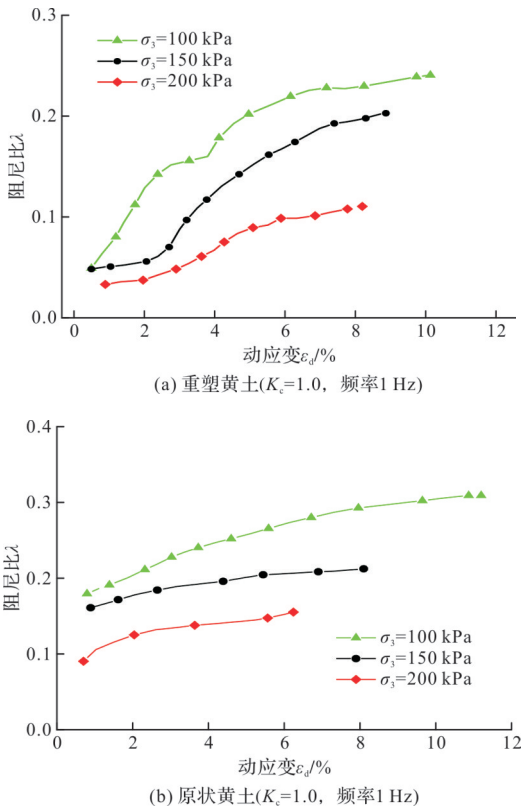
阻尼是土动力特性中的一个重要指标，它能够反映土在动荷载作用下，土体中土颗粒在加载中摩擦造成动应变滞后于动应力的现象[14]。土体在动荷载的重复作用下可以分为两部分：优先出现的是弹性变形部分，弹性变形主要是幅度小的动载下，随着动载的增加土体的塑性变形会逐渐发展；第二部分塑性变形部分的出现会在动应力-动应变表现出非线性的特点。土体在动载下受到的阻尼越大，所需要的能量更多、振动衰减越大，阻尼比 λ 可以由下式计算：

$$\lambda=\frac{A_0}{4\pi A} \tag{3}$$

式中：A_0为滞回圈中包围的面积，表示动荷载加载到卸载所损失的能量；A 表示在滞回曲线的顶点与原点的连线和横轴形成的三角形面积，表示其中产生的应变能。

通过试验所得出的数据对饱和重塑黄土和原状黄土进行阻尼比的计算，通过研究阻尼比和动应变的变化规律，揭示阻尼比在围压增大条件下的变化规律。

分析图 10 可以看出饱和原状黄土和重塑黄土当固结比一定时，阻尼比和动应变为同步增减，阻尼比的趋势随着动应变的逐步增大而减小，这说明阻尼比在趋于自身的上限，随着动应变的增加在土中的能量的向外部发散将越来越困难。这一现象说明围压对土体存在着轴向的拉伸作用，在相同的动应力作用下土体的应变减小，土中的能量耗散减小。造成阻尼比随着围压的增大而减小。其中围压在 100 kPa 和 150 kPa 的阻尼比-动应变曲线之间的距离相比较 150 kPa 和 200 kPa 曲线之间的距离近，表明在围压对阻尼比的影响下产生同一个应变时，随着围压的增大，对阻尼比的影响随之增大。



(a) 重塑黄土(K_c=1.0，频率1 Hz)

(b) 原状黄土(K_c=1.0，频率1 Hz)

图 10　阻尼比 λ-动应变 ε_d 曲线与围压的变化关系图

Fig. 10　Relationship between damping ratio λ-dynamic strain ε_d curve and confining pressure

3　饱和黄土的动力损伤研究

损伤力学主要对材料的应力、应变和损伤的相互关系进行分析，系统的对物体缺陷发展对应力-应变产生的影响进行研究，从其中找到规律[15-17]。黄土本身的特殊性使其在动荷载作用下的损伤强度有很大的离散性，本次研究对黄土进行饱和处理，减少因不同含水率对黄土敏感作用的影响，在不同的围压、频率等作用下对饱和黄土的动力损伤进行研究。

在进行损伤的研究前，应该对损伤理论建立一个可以描述损伤演化的变量，这个变量就称为损伤变量[18]。本文对饱和黄土进行正弦函数的动力加载，在加载过程中饱和黄土的应力-应变和损伤都是逐渐积累的变化，根据 Miner 线性累积的损伤变量为基础[19]，可以将此次的损伤定义为

$$D=\sum_{i=1}^{n_i}\frac{\omega_i}{W} \tag{4}$$

式中：ω_i表示对应的循环次数 i 次时土样所吸收的能量；n_i表示从第一次循环到最后一次循环加载的积累过程；W 是土样在破坏时吸收的能量。

对于本次试验中的正弦（连续）荷载，可以将

(5)写为积分形式:

$$D=\frac{\int_{S_1}^{S_2}\omega \mathrm{d}s}{W} \tag{5}$$

式中:S_1、S_2是加载中应力幅值的最大值和最小值;

从前面的应力-应变曲线可以看出,在饱和黄土加载的前期应变表现出可以恢复的弹性变形,随着次数的增加表现出了塑性。在循环荷载的作用下,土样中动应力做的功就是其中吸收的能量[19]:

$$W=\int_0^{\infty}\sigma_{\mathrm{d}}\mathrm{d}\varepsilon \tag{6}$$

动三轴试验得出的数据连接起来可以视为封闭的多边形,采用多边形面积计算方法可以近似得到滞回曲线的总面积,利用式(6)可以得到黄土受到破坏时吸收的总能量。

将式(6)带入到式(5)中可以得到加载过程中积累损伤变量的变化。

土体的力学特征和金属材料一样,都是随着积累损伤变量演化而发生变化的。在土的动力学中[20],在循环荷载的作用下,动应力幅值和动应变幅值的比定义为一次循环中的土体的动弹性模量:

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{\sigma_{\mathrm{m}}}{\varepsilon_{\mathrm{m}}} \tag{7}$$

式中:σ_{m}、ε_{m}分别为动应力、动应变的幅值;

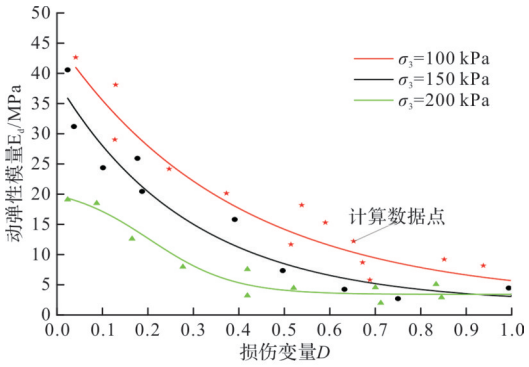
在正弦函数动荷载的作用中,动应变包含着可恢复和不可恢复的动应变,根据动弹性模量的定义,可以将式(7)变为

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{\sigma_{\mathrm{d}}}{\varepsilon_{\mathrm{d}}} \tag{8}$$

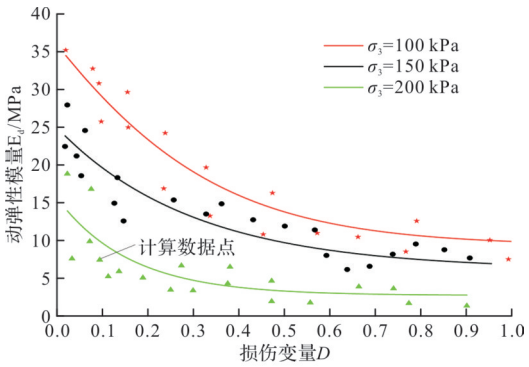
根据上述对黄土的动弹性模量的定义,对不同围压状态下的正弦动荷载下的动弹性模量进行计算,得出动弹性模量与损伤变量D的拟合化曲线,见图11。

由图11可知,不同围压状态下的饱和重塑黄土和原状黄土的动弹性模量都是随着损伤的积累在逐渐的减小,当损伤量到达一定程度后(本文中将该拐点称为D_0),两种土样的动弹性模量减小的趋势逐渐平稳,随后稳定在一个定值上,说明土样破坏。当动弹性模量E_{d}相同时,随着围压的增大对应的累积损伤量也随之增加;饱和重塑黄土的三种不同围压的曲线间隔较小,而饱和原状黄土三种曲线的间隔较大,说明原状土的累积损伤量的变化对围压的增加更为敏感;但重塑黄土的初始动弹性模量要比原状黄土的大,说明重塑黄土越不容易变形。

试验的变化规律说明了饱和重塑黄土和原状黄土结构强度的关系,在不同围压荷载的扰动作用



(a) 饱和重塑黄土不同围压条件下



(b) 饱和原状黄土不同围压条件下

图11 K_c=1.0,频率1 Hz动弹性模量随损伤变化曲线图

Fig. 11 Dynamic elastic modulus variation with damage at K_c=1.0 and frequency of 1 Hz

下,土体的结构逐渐发生破坏强度降低。加载初期土体结构性强,随着加载对结构产生损伤,损伤缓慢的积累对结构产生了不可逆的破坏形式,让整个土样的动变形迅速发展,动弹性模量迅速减小。在后期结构已经几乎完全受到破坏,产生的次生结构在土样的内部形成并且构成了土样的整体结构,形成“损伤土”。

4 结论

根据对泾阳南塬滑坡处黄土在模拟地震荷载作用下进行的一系列动三轴试验,分析了在不同围压、不同固结比、不同荷载频率条件下的饱和状态下原状黄土和重塑黄土的动力特性和损伤特性,在试验条件范围内所得到的结论如下:

(1)在地震荷载作用下的饱和原状黄土和重塑黄土的动应变在前期迅速的增加,随着循环次数的增加两种土样的动应变曲线出现拐点,后面动应变增加的趋势逐渐缓慢增加至趋于稳定。高固结围压下的原状黄土动应变变化趋势不同,动应变与循环次数的曲线前期趋于一条直线,后面随着动应变的增加趋于稳定。

(2)对于不同的加载频率对饱和原状黄土和重塑黄土的影响主要为动应变,当频率增加动应变随

着减小,变化趋势不同频率之间基本相同。

(3)饱和原状黄土与重塑黄土的动应变-动应力的变化趋势大致相同,其中饱和原状黄土由于土体内部的结构特性和自然环境作用,曲线变化要比饱和重塑黄土明显。

(4)饱和重塑黄土的阻尼比随着动应变的增加斜率变化较大,饱和原状黄土的阻尼比随着动应变的增加斜率变化平缓,说明在动荷载的作用下,原状黄土的土体内部摩擦造成的动应变滞后现象比重塑土更强烈,原状土的塑性变形阶段不明显。

(5)在动荷载作用下,两种土样的动弹性模量随着损伤变量的积累逐渐减小,最后趋于定值,揭示了动载下饱和黄土的损伤特性。

根据试验结果从而看出,在实际的工程中应该对建筑近地表周围土层进行预处理,该土层在地震作用时受到约束比深层土要小,产生的应变大,尤其是在饱水的状态下。针对此现象在表层土体中可以添加细骨料对其进行加筋处理,以及优化防渗水和排水,这样可以有效的加强黄土地基的抗震性。

参考文献 References

[1] 符锐. 咸阳黄土动力特性及其损伤规律研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
FU Yue. Study on the dynamic characteristics and damage law of Xianyang loess [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[2] 张熙胤,孙斌洁,徐振江,等. 考虑多因素耦合效应的冻结兰州黄土动力学参数研究[J]. 岩土学,2023, 44(S1):289-299.
ZHANG Xiyi, SUN Binjie, XU Zhengjiang, et al. Study on dynamic parameters of frozen Lanzhou loess considering multi-factor coupling effect [J]. Geotechnical, 2023,44(S1):289-299.

[3] 杨丰华,马艳霞,高英,等. 冻融循环及各向异性对原状黄土动力特性的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024 ,55(2): 167-179.
YANG Fenghua, MA Yanxia, GAO Ying, et al. Study on the influence of freeze-thaw cycles and anisotropy on the dynamic characteristics of undisturbed loess [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology (Chinese and English) , 2024 ,55(2): 167-179.

[4] 郜晓,刘妮娜,李俊,等. 加筋黄土的动力特性研究[J]. 地震工程学报,2022,44(4):854-864
HAO Xiao, LIU Nina, LI Jun, et al. Study on dynamic characteristics of reinforced loess [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022,44(4): 854-864

[5] 李帅,王家鼎,李承霖,等. 循环荷载下黄土的动力特性试验研究及微观结构分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021,35(12):142-149.
LI Shuai, WANG Jiading, LI Chengsen, et al. Experimental study on dynamic characteristics and microstructure analysis of loess under cyclic loading [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2021, 35(12): 142-149.

[6] 代倩,廖红建,康孝森,等. 动荷载下填方体压实黄土动应变与动孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2021,43(S1):235-240.
DAI Qian, LIAO Hongjian, KANG Xiaosen, et al. Study on the variation of dynamic strain and dynamic pore pressure of compacted loess under dynamic load [J]. Geotechnical Engineering, 2021,43(S1): 235-240.

[7] 文少杰,张吾渝,王鹏. 重复循环荷载作用下原状黄土动力特性试验研究[J]. 地震工程学报,2020,42(6): 1659-1665.
WEN Shaojie, ZHANG Wuyu, WANG Peng. Experimental study on dynamic characteristics of undisturbed loess under repeated cyclic loading [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, 42 (6) : 1659-1665.

[8] LIU Wei, WANG Qian, LIN Gaochao, et al. Effect of pre-dynamic loading on dynamic liquefaction of undisturbed loess[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020,18(13):5779-5806.

[9] 张军,郑俊杰,曹文昭,等. 循环荷载作用下饱和压实黄土动力特性研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):322-327.
ZHANG Jun, ZHENG Junjie, CAO Wenzhao, et al. Study on dynamic characteristics of saturated compacted loess under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35 (S1) : 322-327.

[10] CHEN Qiong, CUI Deshan, CHEN Yu, et al. Effect of prior cyclic loading on triaxial compression strength of sliding zone soil of the Huangtupo landslide [J]. Advances in Civil Engineering,2021,2021(26):1-12.

[11] 郭可骅. 非饱和黄土的动三轴试验研究[D]. 西安:长安大学,2015.
GUO Kexing. Dynamic triaxial test of unsaturated loess [D]. Xi′an: Chang′an University, 2015.

[12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972. 7, 98(7): 667-692

[13] 刘斌. 重复荷载作用下非饱和黄土的动力特性试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
LIU Bing. Experimental study on dynamic characteristics of unsaturated loess under repeated loading [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.

[14] 唐鑫,张吾渝,童国庆,等. 冻融循环作用下西宁地区黄土动力特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2023, 43(4):887-895.
TANG Xin, ZHANG Wuyu, TONG Guoqinget al.

Experimental study on dynamic characteristics of loess in Xining area under cyclic loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4):887-895.

[15] 余寿文. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社,1997.
YU Shouwen. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

[16] 沈珠江,章为民. 损伤力学在土力学中的应用[C]//第三届全国岩土力学数值分析和解析方法讨论会. 1988,595-603.
SHEN Zhujiang, ZHANG Weimin. Application of damage mechanics in soil mechanics[C]// 3rd National Symposium on Numerical Analysis and Analytical Methods of Rock and Soil Mechanics 1988,595-603.

[17] 张雪燕,贾雪梅,聂小丽,等. 循环荷载作用下西北地区非饱和重塑黄土变形特性研究[C]//2022年工业建筑学术交流会论文集(上册),兰州:甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,2022.
ZHANG Xueyan, JIA Xuemei, NIE Xiaoli, et al. Research on deformation characteristics of unsaturated remodeled loess in Northwest China under cyclic loading [C]// Proceedings of the 2022 Academic Exchange Conference on Industrial Construction (1), Lanzhou: Institute of Geological Natural Disaster Prevention and Control, 2022.

[18] 龙吉勇. Q_3黄土的等效循环荷载及动力损伤变形特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
LONG Jiyong. Study on the equivalent cyclic load and dynamic damage deformation characteristics of Q_3 loess [D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2006.

[19] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学(I)[M]. 第4版,北京:高等教育出版社,2004.
SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. Material mechanics (I) [M]. 4th ed, Beijing: Higher Education Press, 2004.

[20] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988.
XIE Dingyi. Soil dynamics [M]. Xi′an: Xi′an Jiaotong University Press, 1988.

(编辑 吴海西)

(上接483页)

[18] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[19] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials - Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature:GB/T 228.1-2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准:GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101-2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2015.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings [S]. GB 50011-2010. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑隔震设计标准:GB/T 51408-2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for seismic isolation design of building: GB/T 51408-2021 [S]. Beijing: China Planning Press,2021.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震橡胶支座:JG/T 118-2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Rubber isolation bearings for buildings: JG/T 118-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China,2018.

(编辑 吴海西)