

# 西安近断层区黄土动力特性研究

刘妮娜<sup>1,2</sup>, 温 凯<sup>1</sup>, 飞 菲<sup>1</sup>, 田开飞<sup>1</sup>, 刘松彪<sup>3</sup>, 高 帅<sup>4</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;  
3. 长江三峡勘测研究院(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 天津公路工程设计研究院有限公司, 天津 300171)

**摘要:** 为研究近断层区黄土的动剪切模量和阻尼比特性, 以近骊山断层区黄土为研究对象, 采用 GDS 动三轴试验仪进行动三轴试验, 分析黄土动剪切模量和阻尼比在围压、饱和度、频率三种因素影响下的变化规律。结果表明: 近断层区黄土动剪切模量和饱和度、固结比呈负相关关系, 且降幅逐渐减小; 与振动频率呈正相关关系, 并且随着振动频率的增加, 增幅逐渐减小。近断层区饱和黄土的动剪切模量出现反弹现象, 其值高于非饱和黄土, 其原因可能为断裂带黄土次生裂隙更为发育。其孔隙水溶解土骨架中的可溶盐增多, 土体趋于软化, 黏滞性增强, 所需的动剪切应力增加。近断层区黄土阻尼比与饱和度、围压和固结比呈负相关关系, 且降幅逐渐减小, 最后趋于稳定。饱和度对黄土阻尼比影响最大, 围压和固结比对阻尼比影响较小。近断层区原状黄土与重塑黄土阻尼比大致近似, 近似可认为土体扰动对骊山山前断裂场地黄土影响较小。本文采用半对数坐标系下的线性函数来量化动剪切模量、阻尼比与动应变的关系, 且拟合效果较好。这一研究结果可为近断层区的动力响应机制分析提供参考。

**关键词:** 活动断裂; 动三轴试验; 黄土; 动剪切模量; 阻尼比

**中图分类号:** TU411.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2024)04-0544-10

## Study on dynamic characteristics of loess in Xi'an near-fault zone

LIU Nina<sup>1,2</sup>, WEN Kai<sup>1</sup>, FEI Fei<sup>1</sup>, TIAN Kai-fei<sup>1</sup>, LIU Song-biao<sup>3</sup>, GAO Shuai<sup>4</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering,  
Ministry of Education, Xi'an 710054, China;

3. Yangtze Three Gorges Survey and Research Institute, Wuhan 430074, China;

4. Tianjin Highway Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300171, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of dynamic shear modulus and damping ratio of loess in the near-fault area, the dynamic triaxial test was carried out by GDS dynamic triaxial tester with the loess in the near-fault area as the research object, and the dynamic shear modulus and damping ratio of loess were analyzed under the influence of confining pressure, saturation and frequency. The results show that the dynamic shear modulus of loess in the near-fault area is negatively correlated with saturation and consolidation ratio, and the decline decreases gradually, but it is positively correlated with the vibration frequency, and the amplification gradually decreases with the increase of vibration frequency. The dynamic shear modulus of saturated loess in the near-fault zone rebounds, and its value is higher than that of unsaturated loess, which may be due to the fact that the secondary fissures of loess in the fault zone are more developed. The dissolution of soluble salts in the soil skeleton by pore water increases, causing the soil to soften and enhance its viscosity, resulting in an increase in the required dynamic shear stress. The damping ratio of loess in the near-fault zone is negatively correlated with saturation, confining pressure and consolidation ratio, and the decrease gradually decreases and finally tends to be stable. Saturation has the greatest influence on the damping ratio of loess, while confining pressure and consolidation ratio have little influence on the damping ratio. The damping ratio of undisturbed loess and remolded loess in the near-fault zone is roughly similar, indicating

收稿日期: 2023-03-01

修回日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41977231)

第一作者: 刘妮娜(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究。E-mail: dcdgx16@chd.edu.cn

通信作者: 温 凯(1999—), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 2021126112@chd.edu.cn

that soil disturbance has a relatively small impact on the loess at the Lishan Mountain front fault site. In this paper, the linear function in semi logarithmic coordinate system is used to quantify the relationship between dynamic shear modulus, damping ratio and dynamic strain, and the fitting effect is good. The results of this study can provide a reference for the analysis of the dynamic response mechanism in the near-fault zone.

**Key words:** active fault; dynamic triaxial test; loess; dynamic shear modulus; damping ratio

活动断裂是指第四纪以来活动过, 且未来有可能活动的断裂, 其极强的发震破坏性严重制约了近断层区的工程建设<sup>[1-5]</sup>. 据统计, 全球 80% 的地震由断裂活动引起<sup>[6]</sup>. 中国已探明的地震断裂带超过 495 条<sup>[7-8]</sup>, 超过 20 个城市均有活动断裂发育<sup>[9-10]</sup>, 我国拟建、在建和已建的多条地铁线路不可避免地需要穿越活断层发育地区, 而目前探明的活动断层在未来均有活动的可能. 西安地区处于渭河断陷盆地和内部发育不同走向的正断层<sup>[11]</sup>. 同时, 西安地区黄土地层分布非常广, 湿陷性黄土和饱和软黄土发育, 贯穿于市内地下综合管廊、地铁、隧道等重大工程项目<sup>[12-14]</sup>. 由于处于活动断裂极强的发震破坏性和黄土特殊的震敏性结构, 黄土地区的地震灾害问题尤为突出<sup>[15-16]</sup>. 因此, 研究黄土的动力特性成为了从根源上解决黄土震害问题的手段之一.

动剪切模量和阻尼比是描述土体动力特性的两个基本参数, 也是动力响应机制和地震反应分析的重要依据. 由于黄土地区地震灾害问题尤为突出<sup>[17-20]</sup>, 国内学者对黄土的动剪切模量和阻尼比研究已经取得了丰硕成果. 慕焕东等<sup>[21]</sup>对地裂缝带黄土进行动三轴试验, 分析其动力特性, 并建立了等效动黏弹性模型. 王谦等<sup>[22]</sup>为研究不同区域饱和和黄土动剪切模量和阻尼比的变化特征, 选取了 11 个典型地区的黄土进行动三轴试验. 代倩等<sup>[23]</sup>对高填方场地黄土开展动三轴试验, 揭示了不同围压和循环应力比下黄土的变形机制. 李帅等<sup>[24]</sup>对滑坡后壁黄土开展动三轴试验, 并结合扫描电镜试验分析黄土的动剪切模量和阻尼比特性. 同样地, 国外学者也对活断层和黄土的动力特性做了大量研究. Azizkandi 等<sup>[25]</sup>利用 ABAQUS 有

限元方法发现改变跨活断层的隧道直径不会对一般破坏模式和隧道附近剪切面的位置造成任何显著变化. Chermahini<sup>[26]</sup>使用显式动态分析法, 研究了隧道位置、交叉角、倾角和隧道周围土壤特性等不同因素对断层移动的影响. Mehdi 等<sup>[27]</sup>建立物理模型试验, 分析不同土壤性质、不同断层角度和隧道深度对处于正断层和逆断层隧道的影响. Puri<sup>[28]</sup>以美国东部的黄土进行重复动载下的液化试验, 对动力特性进行了研究, 并将孔压值作为黄土是否发生液化的一个依据.

以往学者揭示了路基、地裂缝带、滑坡等场地黄土的动力特性, 但对近断层区黄土的动力特性研究涉及不多, 且对于近断层区黄土基本动力参数的选取还未有统一的标准. 此外, 断层活动会引发地震, 近断面处的黄土受应力作用后, 其原生结构会发生破坏, 出现空隙压实、结构定向性、次级滑面发育等特征<sup>[29]</sup>. 这与其他场地黄土的性质具有较大差异. 因此, 深入研究近断层区黄土的动剪切模量特性和阻尼比特性就尤为必要.

针对近断层区黄土动力特性研究的不足, 基于以上背景, 选用骊山山前近断层区第四系马兰黄土, 开展室内动三轴试验. 基于动三轴试验数据, 分析饱和度、频率和固结比与近断层区黄土动剪切模量和阻尼比的规律.

1 试验概述

1.1 试验土样及制备

试验使用的黄土取自西安市临潼区骊山山前近断层区, 属于  $Q_3^{col}$  新黄土, 具体物理性质指标见表 1.

表 1 近断层区黄土物理性质  
Tab. 1 Physical properties of loess at fault zone site

天然重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	天然含水率/ $\%$	液限/ $\%$	塑限/ $\%$	液性指数	塑性指数
17.4	1.47	22.3	33.7	17.2	0.31	16.5

按照《中华人民共和国行业标准: 土工试验规程(SL 237—1999)》, 采用制样器制备不同条件下的试样. 其尺寸为: 直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱试样, 如图 1 所示.

1.2 试验设备及方案

对骊山山前近断层区黄土试样进行固结不排水动三轴试验. 试样仪器采用 GDS 动三轴仪, 设备全貌如图 2 所示. 试验使用应力控制进行动荷载

加载,动荷载的波形选用等幅正弦波。对试样采用逐级循环加载法,即每级荷载量级的振动次数为12次,相当于7级地震。试验中实时记录每级动应力下的试验数据。



图1 骊山山前近断层区马兰黄土试样

Fig. 1 Malan loess samples near the fault zone in the piedmont of Lishan mountain

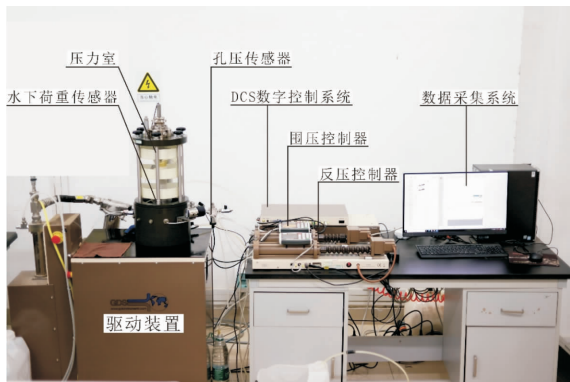


图2 GDS动三轴试验仪器

Fig. 2 GDS dynamic triaxial test system

本次试验的影响因素为饱和度、振动频率和固结比。为避免某一因素作用时,其他因素对试验造成影响,本次动三轴试验采用控制变量法,根据土体的物理性质指标,并结合前期研究,试验所采用的饱和度设置为:  $S_r = 50\%$ 、 $S_r = 60\%$ 、 $S_r = 70\%$ 和饱和试样  $S_r \geq 95\%$  四种类型;骊山山前断裂场地动力特性现场测试结果显示,该场地卓越频率为3.3 Hz,卓越周期为0.3 s,并根据动三轴试验特点,试验所采用的振动频率分别设置为1、2、3 Hz三种类型;由于该地黄土具有强度低、易扰动的特点,选取黄土固结比  $K_c$  分别为1、1.5、2三种类型。针对饱和度、频率和固结比3个水平因素,试验试样共分为10组,每组5个试样,选取特征相对明显的试验数据,研究近断层区黄土的动力特性规律,试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Tab. 2 Test plans

饱和度 $S_r$				
饱和度 $S_r/\%$	频率 $f/\text{Hz}$	固结比 $K_c$	围压/ $\text{kPa}$	试样 个数/个
50	1	1	200、300、400	5
60			200、300、400	5
70			200、300、400	5
$\geq 95$			200、300、400	5
频率 $f$				
频率 $f/\text{Hz}$	固结比 $K_c$	饱和度 $S_r/\%$	围压/ $\text{kPa}$	试样 个数/个
1	1	60	200、300、400	5
2			200、300、400	5
3			200、300、400	5
固结比 $K_c$				
固结比 $K_c$	频率 $f/\text{Hz}$	饱和度 $S_r/\%$	围压/ $\text{kPa}$	试样 个数/个
1	1	60	50、100、200	5
1.5			50、100、200	5
2			50、100、200	5

### 1.3 理论基础

动应力-应变关系可以作为求解其他动力特性的重要依据<sup>[31]</sup>。根据动三轴试验所得的动应力和动应变数据,由式(1)确定土体的动弹性模量。

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_d$  为动应力;  $\epsilon_d$  为动应变;  $E_d$  为动弹性模量。

通过动应变和动弹性模量,利用式(2)~式(3)计算动剪切模量和动剪切应变为

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

$$\gamma_d = (1+\mu)\epsilon_d \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为泊松比,黄土泊松比常用0.35。可根据动应力-动应变曲线的试验结果,分别计算  $G_d$ 、 $\gamma_d$ ,发现动剪切模量的倒数  $1/G_d$  与动剪切应变  $\gamma_d$  之间的关系可引入拟合参数  $a$ 、 $b$  后用式(4)表示。

$$\frac{1}{G_d} = \frac{\gamma_d}{\tau_d} = \frac{1}{G_{d,\max}} + \frac{\gamma_d}{\tau_{d,\max}} = a + b\gamma_d \quad (4)$$

式中:  $G_d$  为动剪切模量;  $\gamma_d$  为动剪切应变,引入参数引入试验参数  $a$ 、 $b$  后,将  $1/G_d - \gamma_d$  的关系曲线拟合为一条直线。同样可以得出,当动剪应变  $\gamma_d$  接近于0时,最大等效动剪切模量  $G_{d,\max}$  近于  $1/a$ ;当动剪应变  $\gamma_d$  无限大时,最大动剪应力  $\tau_{d,\max}$  近于  $1/b$ 。

阻尼比可根据动应力-动应变滞回曲线进行计

算. 滞回曲线如图3所示, 计算公式如式(5)所示.

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_0}{A_r} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为阻尼比;  $A_0$  为滞回曲线所包围的面积;  $A_r$  为三角形面积.

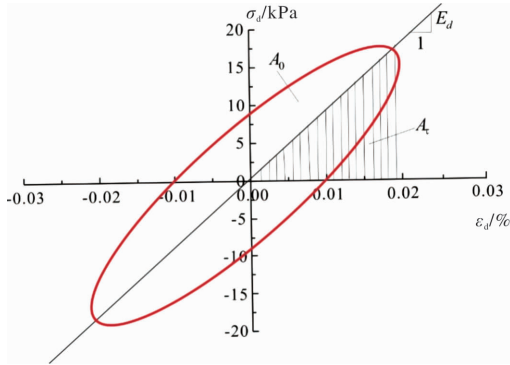


图3 动应力-动应变滞回曲线

Fig. 3 Dynamic stress-dynamic strain hysteresis loop

## 2 动剪切模量特性分析

采用式(1)~式(3)对近断层区黄土动三轴试验数据进行处理, 得到不同条件下动剪切模量随动剪切应变变化的曲线.

### 2.1 饱和度和频率对动剪切模量的影响

由图4(a)~(c)可知, 饱和度对近断层区黄土的动剪切模量具有显著影响. 在同一围压条件下, 非

饱和黄土的动剪切模量和饱和度呈负相关, 且降幅逐渐减小. 这是因为随着饱和度的升高, 土颗粒间的连接力减弱, 土颗粒易于移动, 土体的强度大幅度减弱, 试样产生相同的动剪应变只需更小的动剪切应力, 所以动剪切模量减小. 而土体的强度并不能随着饱和度的升高而进一步减弱, 动剪切模量的降幅逐渐减小.

由图4(d)可知, 黄土达到饱和以后出现了反弹现象, 即按照非饱和土体随饱和度的变化规律, 饱和土体动剪切模量本应低于非饱和土体, 但实验结果相反. 这可能是因为接近断裂带的黄土次生裂隙发育, 易形成次生矿物, 致使孔隙水溶解土骨架中的可溶盐增多, 土体趋于软化, 黏滞性增强, 所需动剪切应力增加, 动剪切模量也随之增大.

由图5可知, 频率与近断层区黄土的动剪切模量呈正相关, 且随着频率增大, 增幅逐渐减小. 这是因为频率高, 动载作用在土体上的时间短且次数多, 土体不能充分发生形变, 强度有所提升, 所以动剪切模量逐步增大, 动剪应力也逐渐增大, 反映出土体的振动剪切破坏过程, 在剪应变发展的后期, 很小的剪应力即可使土体产生很大的剪应变变形, 即土体在受到振动剪切破坏之后, 本身已不能再承受力的作用.

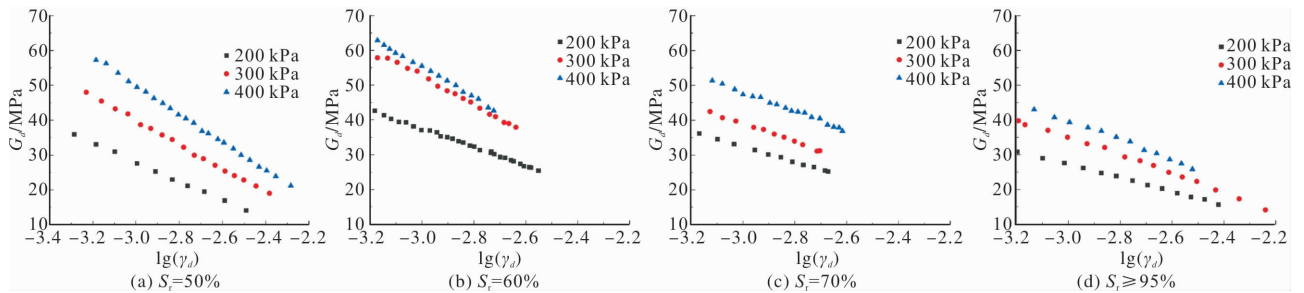


图4 不同饱和度下  $G_d$ - $\gamma_d$  关系曲线

Fig. 4  $G_d$ - $\gamma_d$  curves of different saturation

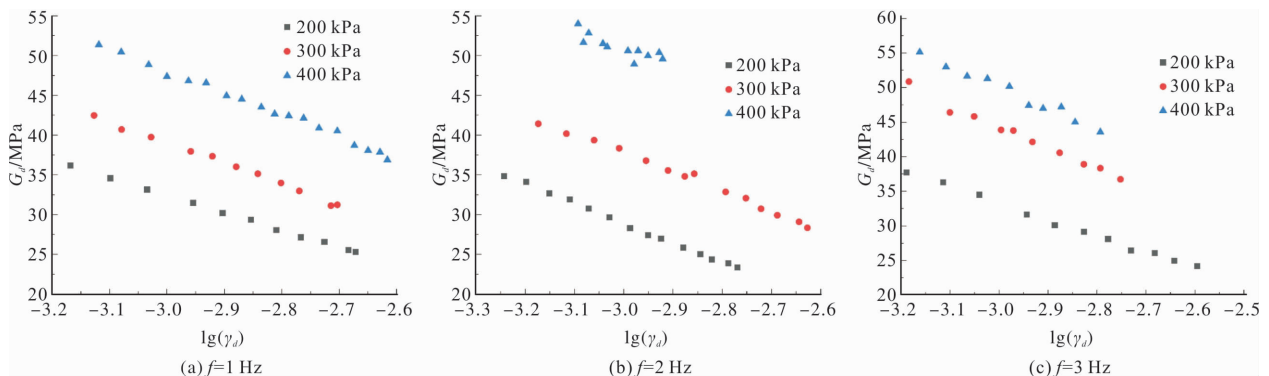


图5 不同频率下  $G_d$ - $\gamma_d$  关系曲线

Fig. 5  $G_d$ - $\gamma_d$  curves of different frequencies

由图 4 和图 5 可知,不同饱和度和频率条件下的动剪切模量  $G_d$  均随  $\lg(\gamma_d)$  的增大呈线性下降,采用式(6)对图 4 和图 5 进行拟合,拟合参数取值表如表 3 所示.

$$\lambda=a+b\lg(\gamma_d) \tag{6}$$

式中:  $a$ 、 $b$  为拟合参数.

表 3  $\lambda$ - $\gamma_d$  曲线的拟合参数取值表 ( $K_c=1$ )

Tab. 3 Fitting parameter of $\lambda$ - $\gamma_d$ curves					
频率 $f/\text{Hz}$	饱和度 $S_r/\%$	围压/ $\text{kPa}$	$a$	$b$	相关 系数
1	50	200	-42.14	-26.55	0.997
		300	-67.82	-40.07	0.995
		400	-75.94	-43.72	0.997
	60	200	-33.26	-21.90	0.999
		300	-39.79	-26.68	0.995
		400	-34.81	-27.62	0.992
	70	200	-31.21	-19.48	0.999
		300	-44.07	-26.36	0.996
		400	-43.62	-27.78	0.993
	95	200	-54.41	-27.45	0.999
		300	-63.79	-34.57	0.999
		400	-71.11	-40.56	0.999
2	60	200	-45.94	-24.96	0.998
		300	-34.68	-24.14	0.992
		400	-8.24	-19.72	0.997
3	60	200	-37.14	-23.47	0.995
		300	-47.65	-30.66	0.985
		400	-41.17	-30.41	0.972

由表 3 可知,拟合公式的相关系数基本在 0.97 以上,这说明采用半对数坐标系下的线性函数拟合近断层区黄土的  $G_d$ - $\gamma_d$  曲线,具有较高的精度.不同条件下拟合参数  $a$ 、 $b$  的差值较大,这表明拟合参数  $a$ 、 $b$  与围压、饱和度和频率具有明显的相关性.

为了深入探究不同振动频率对最大动剪切模量的影响,用 Janbu<sup>[31]</sup> 提出的土动三轴关系公式  $E_i=Kp_a(\sigma_3/p_a)^n$ , 对最大动剪切模量  $G_{d,\max}$  与围压

$\sigma_3$  进行拟合,拟合方程为

$$G_{d,\max}=Kp_a(\sigma_3/p_a)^n \tag{7}$$

$$\lg(G_{d,\max}/p_a)=K'+n\lg(\sigma_3/p_a) \tag{8}$$

式中:  $P_a$  为大气压;拟合直线斜率为  $n$ ;截距为  $t$ ;  $K=10^t$ . 相关参数见表 4.

表 4 试验拟合参数

Tab. 4 Test fitting parameters			
振动频率 $f/\text{Hz}$	$t$	$K$	$n$
1	2.50	316.23	0.47
2	2.51	323.59	0.44
3	2.58	380.19	0.39

由表 4 及图 6 可知试验常数  $K$  随振动频率的增大而增大,试验常数  $n$  则随振动频率的增大而减小,变化范围均介于 0.4~0.5 之间,拟合曲线近似为直线,且三条直线近乎平行.

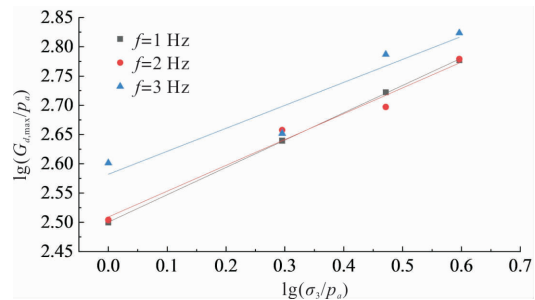


图 6  $\lg(G_{d,\max}/p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$  试验关系

Fig. 6 Experimental relationship of  $\lg(G_{d,\max}/p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$

## 2.2 固结比对动剪切模量的影响

由图 7 和图 8 可知,黄土动剪切模量与动剪应变呈负相关,且降幅减小.在相同的固结围压下,产生相同的动剪应变时,固结比越大,动剪切模量也越大.围压相同时,固结比增加,意味着土样所承受的轴向应力增大,土样被压密的程度增大,土颗粒之间结合得更为紧密.此时,相同的动应力水平对土样所造成的剪切变形变小,即土样抵抗剪切变形的能力增强.由此可知,固结比的变化,对土的动剪切模量影响较大.

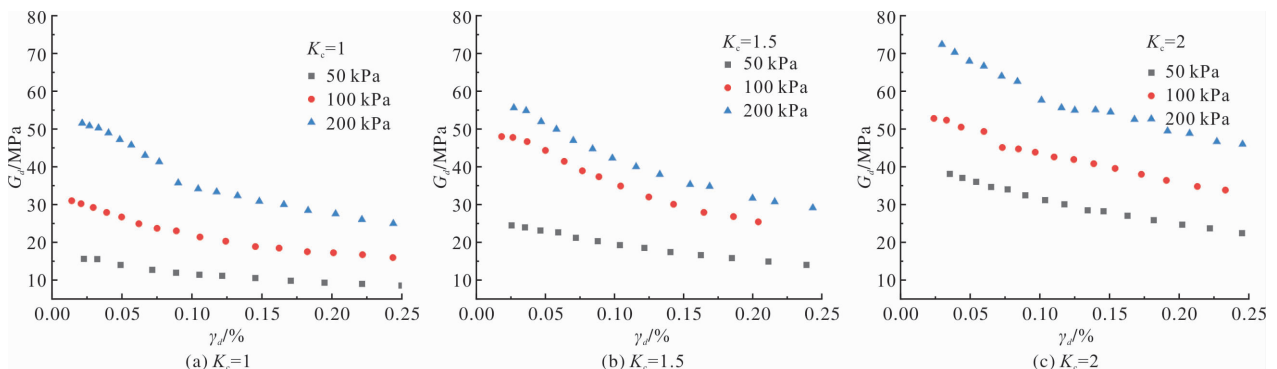


图 7 不同围压下动剪切模量与动剪应变关系曲线

Fig. 7 Relationship between dynamic shear modulus and dynamic shear strain under different confining pressures



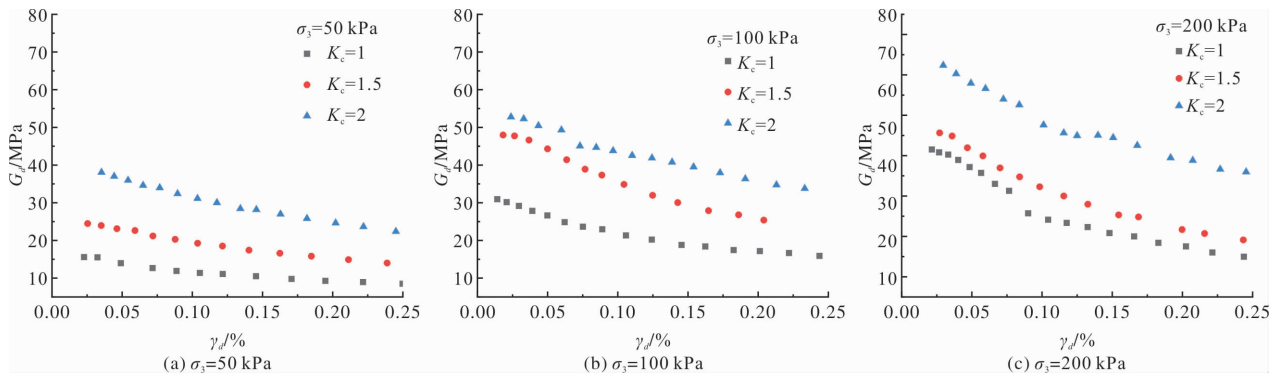


图8 不同固结比下动剪切模量与动剪应变关系曲线

Fig. 8 Relationship between dynamic shear modulus and dynamic shear strain under different consolidation ratios

另外,围压也会对动剪切模量造成一定影响.通过对三轴试验数据进行处理,得到三种围压下近断层区黄土动剪切模量与动剪应变关系曲线,如图7所示.在相同固结比条件下,黄土试样的动剪切模量与围压呈正相关,但增大幅值随动剪应变的增大而逐渐减小.这是因为围压的增大使得原状黄土试样中的土颗粒接触得更为紧密,颗粒之间的粘结力和咬合力增大,更不容易发生相互错动.因此,试样产生相同的动剪应变需要更大的动剪应力,即动剪切模量更大.同时,在加载过程中,随着动剪应变逐渐增大,土颗粒之间逐渐开始相互错动,抵抗剪切变形破坏的能力被削弱,动剪切模量的增大幅值变小.

根据式(1)~式(4)对动剪切模量数据进行拟合处理, $\lambda$ 与 $\lg(\gamma_d)$ 之间具有线性关系,采用公式(9)进行拟合,拟合参数表如表4所示.

$$\lambda = c + d \lg(\gamma_d) \quad (9)$$

式中: $c$ 、 $d$ 为拟合参数.

表4  $\lambda$ - $\gamma_d$  曲线的拟合参数取值表 ( $f=1$ ,  $S_r=60\%$ )Tab. 4 Fitting parameter of  $\lambda$ - $\gamma_d$  curves

固结比	围压/kPa	$c$	$d$	相关系数
1.0	50	62.57	216.60	0.988
	100	30.78	142.04	0.991
	200	17.42	95.53	0.983
1.5	50	36.76	143.80	0.999
	100	17.85	105.72	0.997
	200	15.75	78.14	0.998
2.0	50	23.00	87.88	0.998
	100	17.70	51.09	0.992
	200	13.08	36.25	0.983

由表可知,曲线拟合效果较好,相关系数均在0.98以上,具体拟合参数,如表4所示.

结合图7和图8、表4可知,在相同固结比条

件下,随着围压的增大,拟合参数 $c$ 均随之减小,即最大动剪切模量与围压呈正相关,与加载过程中动剪切模量变化规律一致.相同围压下随着固结比的增大,拟合参数 $c$ 均随之减小,即最大动剪切模量增大.这是因为,围压相同时,固结比增加,意味着土样所承受的轴向应力增大,土样被压密的程度增大,土颗粒之间结合得更为紧密.此时,相同的动应力水平对土样所造成的剪切变形变小,即土样抵抗剪切变形的能力增强.由此可知,固结比的变化,对土的动剪切模量影响较大.

### 3 阻尼比特性分析

采用式(5)计算出不同动剪切应变下黄土的阻尼比,得到不同条件下近断层区黄土阻尼比随动剪应变变化的曲线.阻尼比反映了土样在周期循环荷载作用下应力-应变关系非线性和滞后性的特点,表现了土体受到动荷载时材料内部作用所消耗的能量,是土动力特性中一个重要的参数.取12次振动循环中的稳定曲线作为该循环周期的动应力-动应变关系曲线,采用式(5)计算出不同动剪切应变下黄土的阻尼比,得到不同条件下近断层区黄土阻尼比随动剪应变变化的曲线,图9为黄土阻尼比随动剪应变变化曲线图.

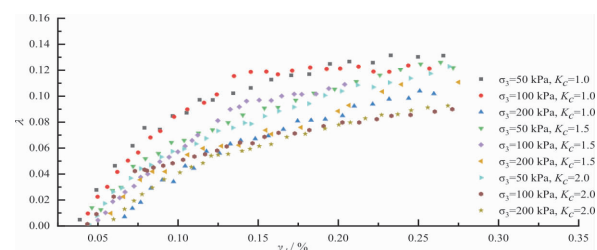


图9 阻尼比随动剪应变变化曲线图

Fig. 9 The curve of damping ratio with dynamic shear strain

由图9可知,原状黄土阻尼比随动应变增大而增大.当动剪应变小于0.12%时,阻尼比增长速度较快,动剪应变大于0.12%后其发展趋势逐渐平缓.试验初期,土颗粒间错动量较小,振动波的耗损较少,表现出阻尼比初值较小.随着动荷载逐级增加,土体变形量越来越大,内部摩擦作用消耗的能量增大,阻尼比增大.随着试验进行,土体在外力作用下其内阻变化逐渐减缓,试样变形速度下降,表现出随动剪应变增加阻尼比增大但增长减慢的现象.进入试验后期,消耗的能量逐渐稳定,阻尼比趋于平稳.

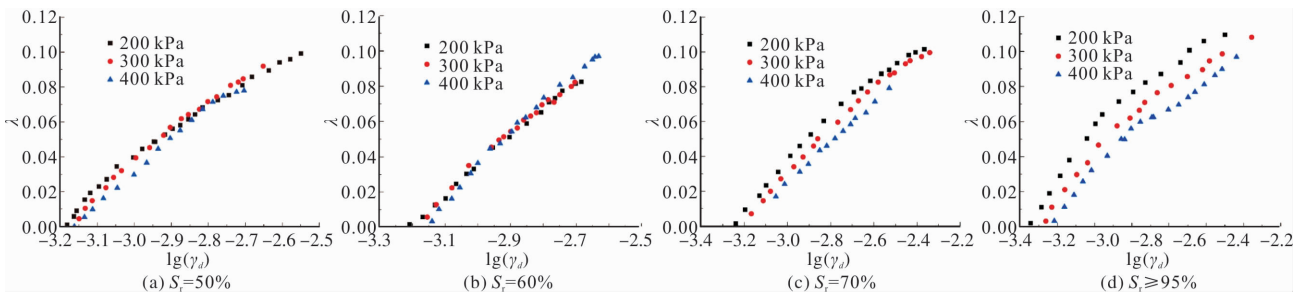


图10 不同饱和度下  $\lambda$ - $\gamma_d$  关系曲线

Fig. 10  $\lambda$ - $\gamma_d$  curves of different saturation

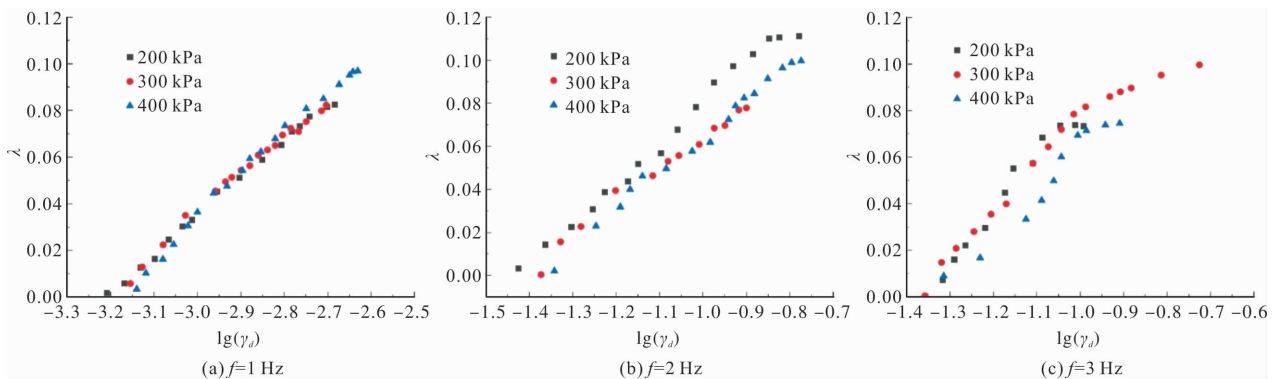


图11 不同频率下  $\lambda$ - $\gamma_d$  关系曲线

Fig. 11  $\lambda$ - $\gamma_d$  curves of different frequencies

由图8和图9可知,  $\lambda$  与  $\lg(\gamma_d)$  之间具有线性关系,采用公式(10)对图11和图12进行拟合,拟合参数表如表5所示.

$$\lambda = e + f \lg(\gamma_d) \quad (10)$$

式中:  $e$ 、 $f$  为拟合参数.

由表5可知,拟合公式的相关系数均大于0.94,采用半对数坐标系下的线性函数拟合  $\lambda$  与  $\lg(\gamma_d)$  的效果较好.不同饱和度条件下,拟合参数  $e$ 、 $f$  的差值分别为0.1和0.05.不同频率条件下,拟合参数  $e$ 、 $f$  的差值分别为0.36和0.07.拟合参数  $e$ 、 $f$  与围压、饱和度和频率的相关性不明显.

### 3.1 饱和度和频率对阻尼比的影响

由图10和图11可知,不同条件下的阻尼比均随动剪应变的增大呈现出上升趋势.这是因为动剪应变较小时,土体未发生较大的扰动,颗粒之间的错动摩擦微弱,所需消耗的能量较低,而随着动剪应变的增大,土体产生破坏,颗粒间发生错动摩擦,能量消耗较高,导致阻尼比增加.图9中,阻尼比主要分布在0.002~0.16之间.图10中,阻尼比数值在0.002~0.11之间.相较于饱和度,频率影响下的阻尼比分布范围更窄.但不同饱和度和频率条件下的阻尼比数据比较离散,无明显规律性,饱和度和频率对阻尼比的影响不显著.

### 3.2 固结比对阻尼比的影响

图12为不同围压下黄土阻尼比随动剪应变变化曲线图.由图可知,阻尼比整体表现出随围压增加而减小的趋势,但影响较小.在固结过程中,土体结构受外力作用产生的变形较慢,内部裂隙的增长被抑制,且固结围压越大,其作用就越明显,故能量消耗就随之减少,表现出阻尼比曲线随围压增加而下降的现象.

图13为不同固结比下黄土阻尼比随动剪应变变化曲线图.如图所示,固结比  $K_c = 1$  时阻尼比稳定于0.102~0.14,  $K_c = 1.5$  时阻尼比稳定于

0.098~0.125,  $K_c=2$  时阻尼比稳定于 0.087~0.123. 由此可知, 固结比越大, 阻尼比越小, 最终稳定区间也越小. 同一固结围压下, 固结比越

大, 土体轴向压力增大, 土样强度提升, 土颗粒间难以发生较大错动, 消耗能量较少, 阻尼比随之减小.

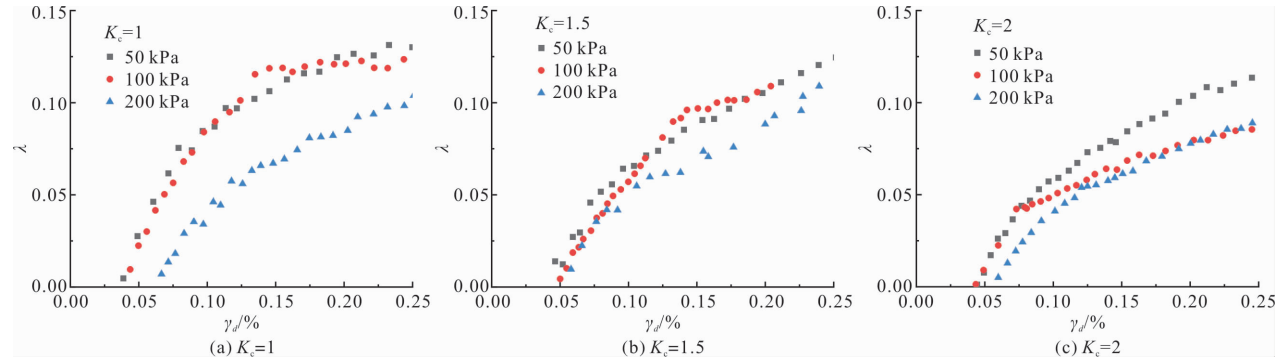


图 12 不同围压下阻尼比随动剪应变变化曲线图

Fig. 12 Curves of damping ratio with dynamic shear strain under different confining pressures

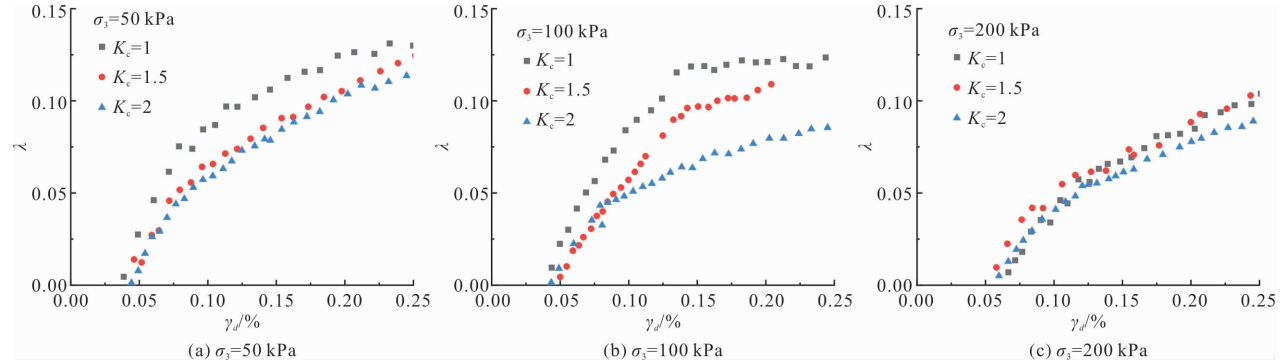


图 13 不同固结比下原状黄土阻尼比随动剪应变变化曲线图

Fig. 13 Curves of damping ratio of undisturbed loess with dynamic shear strain under different consolidation ratios

表 5  $\lambda$ - $\gamma_d$  曲线的拟合参数取值表

Tab. 5 Fitting parameter of  $\lambda$ - $\gamma_d$  curves

频率 $f/\text{Hz}$	饱和度 $S_r/\%$	围压/ $\text{kPa}$	$e$	$f$	相关 系数
1	50	200	0.49	0.15	0.984
		300	0.56	0.17	0.989
		400	0.57	0.18	0.991
	60	200	0.51	0.16	0.997
		300	0.53	0.16	0.987
		400	0.58	0.18	0.992
	70	200	0.57	0.17	0.983
		300	0.56	0.17	0.989
		400	0.56	0.17	0.998
	95	200	0.54	0.15	0.953
		300	0.48	0.14	0.965
		400	0.45	0.13	0.973
2	60	200	0.26	0.18	0.989
		300	0.22	0.15	0.984
		400	0.23	0.17	0.990
3	60	200	0.30	0.22	0.955
		300	0.24	0.17	0.945
		400	0.25	0.19	0.947

4 结论

(1)饱和度、频率、固结比对近断层区黄土的动剪切模量有显著的影响. 非饱和黄土的动剪切模量随饱和度的呈负相关非线性关系, 但饱和黄土的动剪切模量大于非饱和黄土; 非饱和黄土动剪切模量与振动频率、围压、固结比呈正相关非线性关系;

(2) $G_d$  与  $\gamma_d$  之间的变化规律可用半对数坐标系下的线性函数拟合, 拟合相关系数悉在 0.95 以上. 拟合参数与围压、饱和度和频率、围压和固结比明显相关, 参数取值则依赖于具体的试验条件. 动剪切模量与围压拟合公式中试验常数  $K$  与振动频率呈正相关关系, 试验常数  $n$  则与振动频率呈负相关, 变化范围均介于 0.4~0.5 之间;

(3)近断层区原状黄土阻尼比与动应变呈正相关非线性关系, 当动剪应变小于 0.12% 时, 阻尼比增长速度较快; 动剪应变大于 0.12% 时, 阻尼比随动剪应变的增大而缓慢增大. 近断层区黄土阻尼比受围压与固结比的影响较小, 总体表现为



随围压和固结比的增大而减小,饱和度和频率对阻尼比的影响不显著。

## 参考文献 References

- [1] 尹力峰,王坚,高杰.地下管道的震害特征与研究概述[J].高原地震,2004(2):27-37.  
YIN Lifeng, WANG Jian, GAO Jie. Summary on earthquake disaster features and anti-seismic research of underground pipes[J]. Earthquake Research in Plateau, 2004(2):27-37.
- [2] 张曦.龙门山地区地震前后地应力特征及突变规律[D].成都:成都理工大学,2014.  
ZHANG Xi. The Characteristics of geostress and the mutation rules in longmen mountain area before and after Wenchuan earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [3] 王彦东,杜宇本,袁传保.地震次生地质灾害与成兰铁路选线[J].地质灾害与环境保护,2013,24(4):63-68.  
WANG Yandong, DU Yuben, YUAN Chuanbao. Secondary geological disasters caused by earthquake and Cheng-Lan Railway selection[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013,24(4):63-68.
- [4] SUMYD F, GAHERTY J B, KIM W Y, et al. 加利福尼亚湾南部地震和断层作用的机制[J].世界地震译丛,2013(Z1):24-51.  
SUMY D F, GAHERTY J B, KIM W Y, et al. The mechanisms of earthquake and fault in the Southern Gulf of California[J]. Translated world Seismology, 2013(Z1):24-51.
- [5] 马兰,曹广超,曹生奎.1971年以来土耳其强震时空特征研究[J].地震学报,2014,36(2):244-251,339.  
MA Lan, CAO Guangchao, CAO Shengkui. Spatio-temporal characteristics of strong earthquakes in Turkey since the year 1971[J]. Acta Seismology Sinica, 2014,36(2):244-251,339.
- [6] 徐良鑫,卞菊梅,呼楠,等.骊山山前断裂华清池以西段晚更新世以来的活动性[J].地震地质,2019,41(3):561-575.  
XU Liangxin, BIAN Jumei, HU Nan, et al. Activity since late Pleistocene in the western segment of Huaqingchi, Lishan piedmont fault[J]. Seismogeology, 2019,41(3):561-575.
- [7] 薄峰.城市建设地质环境适宜性评价——以西安市区为例[D].西安:长安大学,2014.  
BO Feng. Geological environment suitability evaluation of urban construction: A case study on the urban area of Xi'an city[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [8] 万学谦.下穿居民区黄土隧道变形及施工方法优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.  
WAN Xueqian. Study on deformation and construction method optimization of loess tunnel under residential area[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [9] 于文龙,邓国华,亢佳伟.西安地铁工程降水风险评价及处置措施研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(6):158-164.  
YU Wenlong, DENG Guohua, KANG Jiawei. Research on risk assessment and treatment measures of precipitation in Xi'an subway project[J]. Journal of Water Conservancy and Construction Engineering, 2021,19(6):158-164.
- [10] 谢霞霞.湿陷性黄土地区地下综合管廊施工安全风险评价研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.  
XIE Xiaxia. Study on safety risk assessment of underground utility tunnel construction in collapsible loess area[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2021.
- [11] 王谦,刘钊钊,王兰民,等.黄土地基抗震处理技术研究进展与展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(6):1366-1381.  
WANG Qian, LIU Zhaozhao, WANG Lanmin, et al. Research progress and prospect of seismic treatment technology for loess foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(6):1366-1381.
- [12] 颜灵勇,李孝波,欧阳刚垒.黄土地震滑坡形成机理研究的若干进展[J].防灾科技学院学报,2021,23(2):46-53.  
YAN Lingyong, LI Xiaobo, OUYANG Ganglei. Some progress in the study of the formation mechanism of loess seismic landslide[J]. Journal of College of Disaster Prevention Science and Technology, 2021,23(2):46-53.
- [13] 程波,赵阿宁,张新社.西安城市地质与可持续发展研究[J].西北地质,2021,54(4):259-265.  
CHENG Bo, ZHAO Aning, ZHANG Xinshe. Xi'an urban geology and sustainable development research[J]. Northwest Geology, 2021,54(4):259-265.
- [14] 甘忠颖.基于活动断层的城市地震灾害评价研究[D].北京:北京交通大学,2020.  
GAN Zhongying. Research on urban earthquake disaster evaluation based on active faults[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [15] 吴中海.活断层的定义与分类——历史、现状和进展[J].地球学报,2019,40(5):661-697.  
WU Zhonghai. The definition and classification of active faults: History, current status and progress[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019,40(5):661-697.
- [16] 黄强兵,彭建兵,王飞永,等.特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J].地学前缘,2019,26(3):85-94.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, WANG Feiyong, et al. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment

- ment[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 2019, 26(3): 85-94.
- [17] 彭建兵, 卢全中, 黄强兵, 等. 汾渭盆地地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
PENG Jianbing, LU Quanzhong, HUANG Qiangbing, et al. Ground fissure disaster in Fenhe and Wei basins[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [18] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2013, 43(10): 1607-1620.  
ZHANG Peizheng, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43: 1607-1620.
- [19] 田文通, 孙军杰, 王兰民, 等. 黄土动力学研究进展与前沿科学问题[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 2119-2127.  
TIAN Wentong, SUN Junjie, WANG Lanmin, et al. Research progress and frontier scientific problems in loess dynamics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(11): 2119-2127.
- [20] 张振中, 王兰民. 1920 年海源地震时的黄土地质灾害[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技出版社, 1994.  
ZHANG Zhenzhong, WANG Lanmin. Loess geological disaster during 1920 Haiyuan earthquake[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 1994.
- [21] 慕焕东, 邓亚虹, 彭建兵. 西安地区地裂缝带黄土动力特性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(5): 951-957.  
MU Huangdong, DENG Yahong, PENG Jianbing. Experimental research on loess dynamic characteristics at ground fissure belt in Xi'an area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 951-957.
- [22] 王谦, 马金莲, 马海萍, 等. 饱和黄土动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1919-1927.  
WANG Qian, MA Jinlian, MA Haiping, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1919-1927.
- [23] 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. Behaviors of dynamic strain and pore pressure of compacted loess in loess-filled foundation induced by dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(S1): 235-240.
- [24] 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 Chenglin, et al. Dynamic characteristics and microstructure of loess under cyclic loading[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(12): 142-149.
- [25] AZIZKANDI A S, GHAVAMI S, BAZIAR M H, et al. Assessment of damages in fault rupture-shallow foundation interaction due to the existence of underground structures[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2019, 89(JUL.): 222-237.
- [26] CHERMAHINI A G, TAHHIGHI H. Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: a case study on the Sabzkouh segmental tunnel[J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2019, 14(3): 155-166.
- [27] MEHDI G, HASLINDA N, ZAINUDDIN M Y, et al. A novel experimental study on the Effects of soil and faults' properties on tunnels induced by normal and reverse faults[J]. *Applied Science*, 2020, 10, 3969.
- [28] PURI V K. Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils[D]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1984.
- [29] 田西堂. 西安东部黄土断层活动性与显微结构的相关性[J]. *地质论评*, 1993(2): 149-155, 190-191.  
TIAN Xitang. The relation between fault activity and microstructure in loess east of Xi'an[J]. *Geological Review*, 1993(2): 149-155, 190-191.
- [30] 王峻, 王谦, 王平, 等. 粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(S1): 156-160.  
WANG Jun, WANG Qian, WANG Ping, et al. Effect of adding amount of fly ash on dynamic constitutive relationship of modified loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S1): 156-160.
- [31] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

(编辑 李睿奇)