

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.024

分级循环荷载下粉土动力特性研究

王静, 胡金虎, 杨亚源, 周邦龙, 任帅

(华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 土的动力学参数是地震安全性评估的重要依据, 为了研究粉土在振动荷载下的变形和破坏行为, 以郑州地区粉土为研究对象, 利用 GCTS 三轴振动仪对重塑土样进行分级循环加载的动三轴试验, 分析粉土在不同含水率和围压下的动剪切模量和阻尼比变化规律。结果表明: 粉土的动剪切模量随着动剪应变的增大逐渐减小, 曲线速率则随着动剪应变的增大减缓, 最后趋向稳定, 含水率和围压不改变粉土动剪切模量-动剪应变曲线的变化形态; 粉土的动剪切模量随着围压的增加而增大, 随着含水率的增加而减小; 低围压时, 围压增加对土体动剪切模量的增大作用尤为显著, 并且深度较大的土样具有抵抗破坏的天然优势; 粉土的阻尼比随着含水率的增加而增加, 随着围压的增加而减小; 阻尼比的大小与土体所处深度及周围压力有关, 围压越大, 阻尼比越小; 围压对阻尼比的影响受含水率影响, 含水率越高, 围压对阻尼比的影响越明显。

关键词: 动三轴试验; 含水率; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0166-06

Dynamic Characteristics of Silt Under Graded Cyclic Loading

WANG Jing, HU Jinhu, YANG Yayuan, ZHOU Banglong, REN Shuai

(School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: The seismic safety assessment heavily relies on soil's dynamic parameters. To investigate how silt behaves and fails under vibrational loads, a dynamic triaxial test involving graded cyclic loading was conducted on soil samples from Zhengzhou using the GCTS triaxial vibration equipment. This analysis focused on how the dynamic shear modulus and damping ratio of silt vary with different water contents and confining pressures. The results are as follows. As dynamic shear strain increases, the dynamic shear modulus of silt decreases gradually. This decrease slows down as the strain continues to rise, eventually reaching a stable state. Notably, neither water content nor confining pressure alters the overall shape of this modulus-strain curve. Higher confining pressures boost the dynamic shear modulus of silt, while increased water content has the opposite effect. At lower confining pressures, even small increases in pressure significantly enhance the soil's dynamic shear modulus, giving deeper soil samples a natural resilience against failure. Silt's damping ratio rises with water content but falls with increasing confining pressure. The damping ratio's magnitude is influenced by soil depth and surrounding pressure, where higher confining pressures result in lower damping ratios. The impact of confining pressure on damping ratio is also influenced by water content; the higher the water content, the more pronounced this pressure effect becomes.

Keywords: dynamic triaxial test; moisture content; dynamic shear modulus; damping ratio

郑州位于华北平原西南部的边缘地带, 地处黄河中下游地区, 受黄河冲积影响, 地层主要是第四纪

沉降土覆盖, 其大部分为粉土^[1]。粉土中所含的土颗粒较粗, 难以压实, 相对于砂土和黏性土而言, 表

收稿日期: 2024-07-25

修稿日期: 2024-08-27

作者简介: 王静(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 349737427@qq.com

通讯作者: 胡金虎(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: hujinhu@ncwu.edu.cn

现出“粉粒”的特性^[2-3];粉土干燥时强度较高,但是容易变形,易被压碎;一旦浸水粉土的吸收速度快,土样结构快速崩解^[4],工程性质较为复杂,在地震作用下易产生液化、流动和地面塌陷等不良工程地质现象,给建设工程带来了诸多问题^[5-6],因此研究郑州地区粉土对河南中东部地区的经济建设具有重要意义。目前,有关学者针对粉土在不同影响因素下的动力特性和影响机制进行了诸多研究。李苏春等^[7]通过粉土的三轴不排水试验,探究了围压与干密度对土体孔隙水压力变化及有效主应力比的影响规律;孙德安等^[8]利用可调控吸力的非饱和土振动三轴试验,对饱和与非饱和粉土在固结围压和含水率等因素下的动力特性进行对比,得到饱和与非饱和土的骨架曲线和动剪切模量及阻尼比的变化规律,并根据非饱和土理论进行了解释,有助于推动粉土动力响应的深入分析;吴波等^[9]针对非饱和粉土进行动强度试验,讨论了饱和度、动应力比及固结围压变化下非饱和粉土的动力强度、孔隙压力的变化规律;宋丹青等^[10]则通过对南京市某路段路基粉土进行三轴固结排水剪切试验,揭示了不同围压与初始含水率条件下粉土强度的变化规律;田竞等^[11]研究了动应力幅值、循环振动次数、固结围压、固结比等不同因素影响下对黄河冲洪积粉土动应力-动应变发展规律的影响。饶有权等^[12]通过一系列动三轴试验,研究了频率、固结度等各种参数对低液限粉土动力变形特性的影响,并建立了“稳定型”和“破坏型”累积轴向应变-振次关系的经验公式。聂如松等^[13]对粉土开展了连续及间歇加载交替循环的动三轴试验,分析了两种加载方式下粉土超孔隙水压力、回弹模量的发展规律。周正龙等^[14]利用 GCTS 循环三轴仪对琼州海峡饱和粉土进行了加载试验,深入分析了有效围压和相对密度这两个参数对饱和粉土的动剪切模量及其阻尼比特性的具体影响,给出了饱和粉土的 G/G_{max} 曲线预测模型。

本文拟利用 GCTS 振动三轴设备对重塑土样进行分级循环加载的动三轴试验,在分级循环加载条件下,分析郑州地区粉土的动剪切模量与阻尼比在不同含水率和围压下的变化规律,以为郑州地区粉土在振动荷载下的变形和破坏行为提供参考。

1 试验仪器与试验方案

1.1 试验仪器

采用的设备为 GCTS 振动三轴仪,该仪器的组成部分有液压站、通用数字信号调节控制单元、加压

轴和三轴压力室等组成。其轴向最大压力为 ± 25 kN,三轴压力室围压和反压可达 2 MPa,振动频率为 0~20 Hz,轴向位移传感器量程为 50 mm。可以实现应力路径试验、周期荷载试验、三轴压缩试验、固结试验等。

1.2 试样制备

试验的粉土土样取自郑州市区,其基本物理力学性质指标如表 1 所示。重塑土样:将得到的粉土土样进行烘干和碾碎后,自然风干一定时间,采用分层击实法,根据土样的天然干密度分三层击实,每层土之间都需进行“刮毛”以确保土颗粒充分胶结。

表 1 土样基本物理性质参数

土样类别	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 e	液限指数 I_L	塑限指数 I_P	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
粉土	1.64	0.825	0.58	7.7	11.1	23.1

1.3 试验方案

试验分别制备四种含水率不同的重塑试样,含水率为 13%、18%、23%、饱和。分别施加 4 种不同的围压,分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa,试验方案见表 2。在试验开始之前,首先对试样进行饱和。采用抽气饱和法使土样充分饱和,再对土样进行固结,以模拟实际土的真实应力状态。

试验选取正弦波荷载,逐级循环加载,每级振动次数取 10 次,加载频率设置为 1 Hz,采用固结比 $K_c = 1$ 的均等固结,同时根据地震荷载的瞬时发生时土体内水无法迅速排出的特点,将试验条件设定为不排水。当试样达到设定的应变破坏标准之后,即结束试验。

表 2 动三轴试验方案

材料	状态	试验条件					
		固结比 K_c	围压/kPa				荷载频率/Hz
重塑 样	含水率(13%)	1	50	100	200	300	1
	含水率(18%)	1	50	100	200	300	1
	含水率(23%)	1	50	100	200	300	1
	含水率(饱和)	1	50	100	200	300	1

2 试验结果与分析

依据本文的研究方向,主要从初始含水率和围压两方面分析郑州地区粉土的动力特性。

2.1 动剪切模量

重塑粉土的动剪切模量-动剪切应变关系曲线如图 2、图 3 所示;不同含水率和围压下的动剪切模量都随着动剪切应变的增大逐渐减小,曲线速率则

随着动剪切应变的增大减缓,最后趋向稳定^[15],说明初始含水率和围压并不改变粉土动剪切模量-动剪切应变曲线的变化形态。

(1) 在不同含水率条件下,试样的动剪切模量-动剪切应变关系

由图 1 可知,粉土的动剪切模量随着含水率的增加而逐渐减小,饱和含水率试样的动剪切模量均小于其他含水率试样的动剪切模量,这是因为水在颗粒间起到润滑作用,使颗粒间的凝聚力减弱,从而降低土样整体的抗变形能力。动剪切应变值为 0.01%~1% 时,动剪切模量下降速率较快,这是因为土样的孔隙结构在试验初期已遭到破坏,土体结构逐渐破坏,产生相同应变所需应力逐渐减小;动剪切应变值为 1% 时,不同初始含水率曲线之间的差值小于 7 MPa,说明含水率对土样动剪切模量的影响较小。对比图 1(a)~图 1(d) 可知,在围压较低

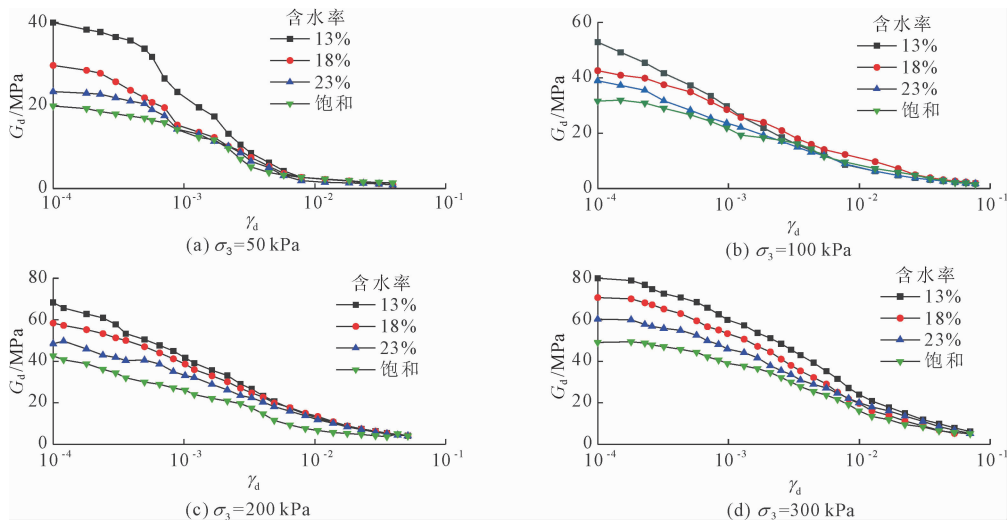


图 1 不同含水率下 $G_d-\gamma_d$ 关系曲线

(2) 在不同围压作用下,试样的动剪切模量-动剪切应变关系

由图 2 可知,粉土的动剪切模量随着围压的增加而增大,这是因为随着围压的增加,土体颗粒之间接触更加密实,孔隙空间被压缩,从而增加了颗粒间的摩擦力和咬合力,使得土体在受到剪切力时更难发生变形,增加土样的抗变形能力,因此深度较大的土样具有抵抗土体破坏的天然优势。动剪切应变值为 0.5% 时,不同围压下试样的动剪切模量值相差 20 MPa,差值较大,说明围压对土样的动剪切模量强度有显著影响。

选取围压为 100 kPa 的数据进行分析,对比不同含水率的动剪切模量曲线可知,含水率为 18% 的

时,含水率为 13% 的土体在动剪切应变值为 0.1% 时曲线变化趋势较缓,说明其初期抵抗外加荷载的能力明显强于其他含水率下的土样。

选取含水率为 18% 的数据进行分析,对比可知,围压 100 kPa 的动剪切模量比围压 50 kPa 的动剪切模量大 81%,围压为 200 kPa 的动剪切模量比围压 100 kPa 的动剪切模量大 27%,围压为 300 kPa 的动剪切模量比围压 200 kPa 的动剪切模量大 25%,基于以上分析,从围压 50 kPa 增加到 100 kPa 时,动剪切模量的大幅增长表明低围压时,围压增加对土体动剪切模量的增大作用尤为显著;从 100 kPa 增加到 200 kPa 以及从 200 kPa 增加到 300 kPa 时,动剪切模量的增长速率相较于前一段有所减缓,但仍保持正增长趋势,这进一步验证了围压对动剪切模量的增大效果明显。

动剪切模量比含水率为 13% 的动剪切模量降低 33.3%,含水率为 23% 的动剪切模量比含水率为 18% 的动剪切模量降低 16%,随着含水率的增加,土样的动剪切模量逐渐降低,但是衰减趋势变缓。即含水率从 13% 增加到 18% 时动剪切模量的降低更为显著,而从 18% 增加到 23% 时,虽然仍有减小,但减小幅度已有所减缓。

这是因为土体中水分子对颗粒间相互作用的影响,当含水率较低时,土体颗粒间有效接触面积较大,因此直接摩擦力也较大,土体在受到剪切力时能够保持较高的刚度。随着含水率的增加,水分开始填充颗粒间的孔隙,减少了颗粒间的直接接触面积,从而降低了摩擦力。此外,水还可能形成润滑层,进

一步减小颗粒间的摩擦阻力,导致动剪切模量下降。当含水率达到一定水平后,颗粒间的孔隙几乎被水完全填充,此时再增加含水率对颗粒间接触状态的影响将变得有限,因此动剪切模量的减小幅度也会

相应减小。综上所述,围压的增加显著提高了粉土的动剪切模量,而含水率的增加则逐渐降低了其动剪切模量,但衰减趋势随含水率的进一步增加而变缓。

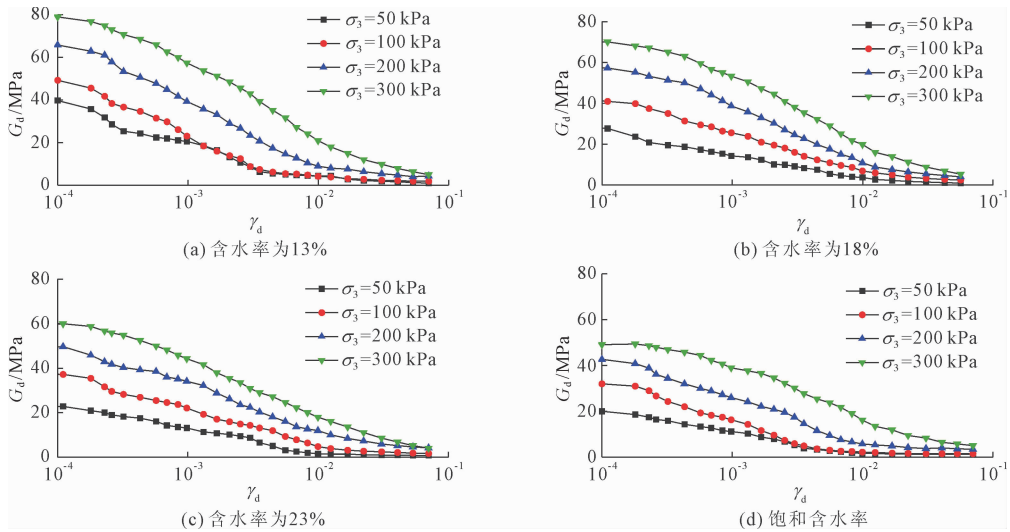


图 2 不同围压下 $G_d - \gamma_d$ 关系曲线

2.2 最大动剪切模量的变化

由于实验精度问题,最大动弹性模量通常经过计算得出。

根据 H-D 双曲线模型^[16]可以得出:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_d}{\gamma_0}} \quad (1)$$

式中: G_d 为动剪切模量; G_{dmax} 为最大动剪切模量; γ_d 为动剪切应变; γ_0 为参考剪应变,本文取动剪切模量等于最大剪切模量的一半时所对应的剪应变。

通过上式推导可得:

$$\frac{1}{G_d} = a + b\gamma_d \quad (2)$$

式中: a 、 b 为试验参数,与土的性质有关。

$1/G_d$ 与 γ_d 是线性关系,当 γ_d 趋于 0 时,可得 G_{dmax} 。图 3 为不同围压下 G_{dmax} 随含水率变化曲线。通过分析可以发现:随着含水率的增加,试样的最大弹性模量逐渐减小;在低围压条件下,随着含水率超过塑限,最大动弹性模量的降低速度明显放缓,说明在低围压条件下,含水率高于塑限时,其对粉土强度的影响便逐渐减弱。

在相同含水率下,围压越大,试样的最大弹性模量越大,说明在保持含水率不变的情况下,围压的增大显著提升了土样的最大弹性模量,且这种变化幅度明显大于含水率变化对土样的影响幅度,强调了

围压对粉土动力特性的主导作用;相较于含水率而言,围压对土体力学性能的影响更为显著。

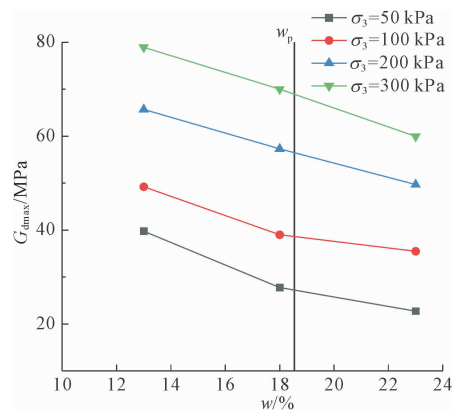


图 3 不同围压下 $G_{dmax} - w$ 关系曲线

2.3 阻尼比-应变关系

阻尼比表示振动中的能量损失,可根据动应力-应变时程曲线上的滞回圈面积进行计算,关系式为:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_L} \quad (3)$$

式中: λ 为阻尼比; A 为滞回曲线总面积; A_L 为三角形面积。

通过计算不同动剪切应变下粉土的阻尼比,得到图 4 不同条件下阻尼比-动剪切应变的关系曲线。由图 4 可知:随着动应变的增加,阻尼比增大,

并在动剪切应变达到 1% 时增大速率变缓趋于稳定;这一现象表明,在循环动荷载逐级施加的过程中,土体结构逐渐受到破坏,导致土颗粒之间的错位变化增多,进而增加了摩擦作用,使得能量消耗显著增大,因此阻尼比也随之变大。

(1) 在不同含水率条件下,粉土的阻尼比-动

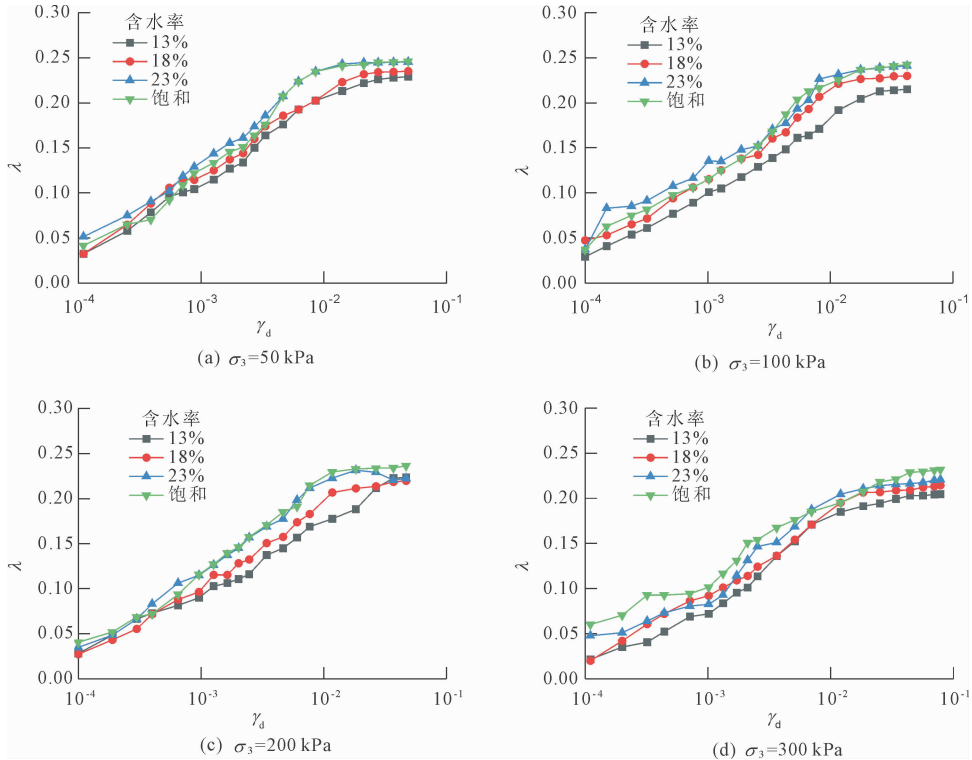


图 4 不同含水率下阻尼比-动剪切应变关系曲线

(2) 在不同围压作用下,粉土的阻尼比-动剪切应变关系

图 5 为含水率相同,不同围压下试样的阻尼比-动剪切应变的关系曲线。由图 5 可知,在含水率相同的情况下,粉土阻尼比的大小变化随着围压的增加而减小,这是因为围压增大使粉土的土颗粒接触更紧密,颗粒之间的粘结力增加,更不容易发生错动,颗粒之间的摩擦力相对减小,因此变形消耗的能量相对减少。说明阻尼比的大小与土体所处深度及周围压力有关,围压越大,阻尼比越小;对比图 5 (a)—图 5 (d) 可知,随着含水率的增加,不同围压下阻尼比曲线的差异逐渐扩大,说明围压对阻尼比的影响受含水率影响;在饱和含水率下,不同围压下试样的阻尼比在趋于稳定后没有固定在同一值上,说明含水率越高,围压对阻尼比的影响越明显。

剪切应变关系

图 4 为围压相同,不同含水率下试样的阻尼比-动剪切应变的关系曲线,通过分析可以发现以下规律:在相同围压条件下,粉土试样阻尼比整体表现出随着含水率的增加而增加的趋势,但是其影响规律并不明显,说明含水率对阻尼比的影响较小。

3 结论

本文以郑州重塑粉土为研究对象,采用 GCTS 动三轴试验仪分别研究了不同围压和含水率下各试样的动剪切模量和阻尼比的变化规律,得到以下结论:

(1) 不同含水率和围压下的动剪切模量都随着动剪切应变的增大逐渐减小,曲线速率则随着动剪切应变的增大减缓,最后趋向稳定,初始含水率和围压不改变粉土动剪切模量-动剪切应变曲线的变化形态。在围压较低时,含水率为 13% 的土体在动剪切应变值为 0.1% 时曲线变化趋势较缓,说明其初期抵抗外加荷载的能力明显强于其他含水率下的土样。

(2) 粉土的动剪切模量随着围压的增加而增大,随着含水率的增加而减小;低围压时,围压增加对土体动剪切模量的增大作用尤为显著,并且深度较大的土样具有抵抗土体破坏的天然优势。

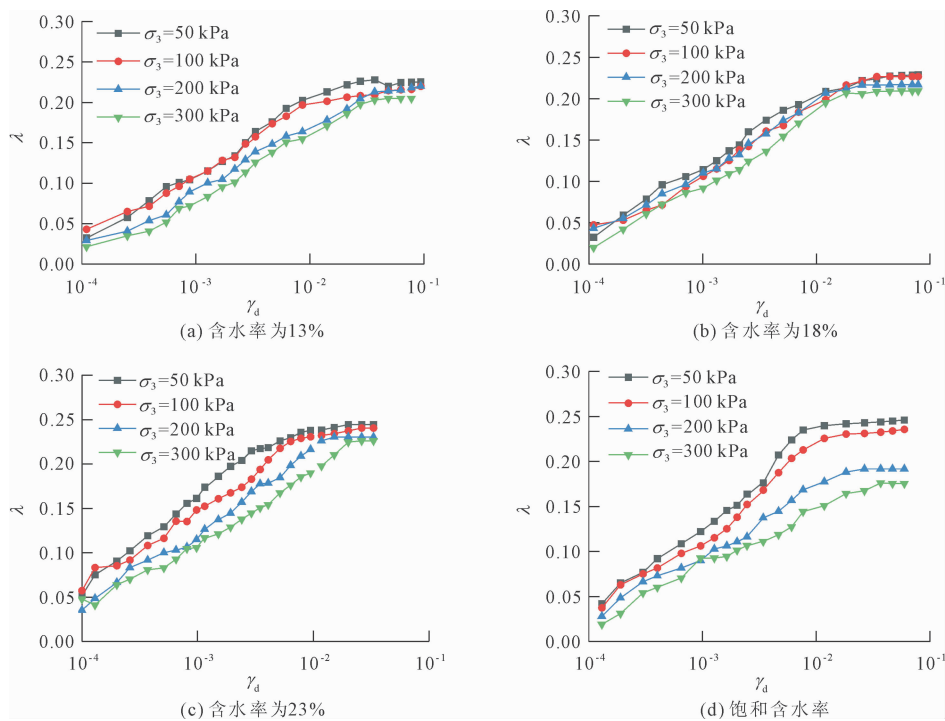


图5 不同围压下阻尼比-动剪切应变关系曲线

(3) 粉土的阻尼比整体表现出随着含水率的增加而增加的趋势,但是其影响规律并不明显,含水率对阻尼比的影响较小;阻尼比随着围压的增加而减小,阻尼比的大小与土体所处深度及周围压力有关,围压越大,阻尼比越小;围压对阻尼比的影响受含水率影响,含水率越高,围压对阻尼比的影响越明显。

(4) 围压对最大动剪切模量的影响显著强于含水率,并且在低围压条件下,含水率高于塑限时,其对粉土最大动剪切模量的影响便逐渐减弱。

参考文献:

- [1] 郭芳洁. 郑州地区饱和粉土动力特性试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016.
- [2] 黄春霞,黄敏,蔡伟,等. 不同黏粒含量粉土的微观结构研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(4):758-764.
- [3] 聂如松,李亚峰,冷伍明,等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(4):828-841.
- [4] 时维强,孙玉海,杨强,黄河冲积平原区压实粉土强度浸水衰变特性研究[J]. 公路,2021,66(4):310-314.
- [5] 黄雨,金晨,庄之敬,等. 上海地区第⑤₂层砂质粉土的液化特性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(1):45-49.
- [6] 路江鑫,孙立强,曲京辉,等. 地震荷载作用下饱和粉土地基液化深度试验研究[J]. 地震工程学报,2014,36(3):544-548.
- [7] 李苏春,蒋刚. 南京地区粉土的不排水三轴压缩试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2007,29(2):40-44.
- [8] 孙德安,吴波. 非饱和粉土的动弹性模量和阻尼比研究[J]. 水利学报,2012,43(9):1108-1113,1120.
- [9] 吴波,孙德安. 非饱和粉土的液化特性研究[J]. 岩土力学,2013,34(2):411-416.
- [10] 宋丹青,张洪瑞,冯兴波. 饱和粉土变形特性三轴试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(1):52-55,6-7.
- [11] 田竞,杜春雪,王江锋,等. 动荷载作用下饱和粉土动力特性研究[J]. 人民黄河,2018,40(8):141-144.
- [12] 饶有权,杨奇,聂如松. 重载铁路路基低液限粉土动力变形特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(7):1714-1721.
- [13] 聂如松,董俊利,梅慧浩,等. 考虑时间间歇效应的粉土动力特性[J]. 西南交通大学学报,2021,56(5):1125-1134.
- [14] 周正龙,丁芷萱,刘杰,等. 南海海域饱和粉土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 土木工程学报,2022,55(S1):227-233.
- [15] 刘帅. 昆明呈贡大学城玄武岩残积红土动力特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.
- [16] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972,98(7):667-692.

- [19] Bhat T, Fortomaris D, Kandare E, et al. Properties of thermally recycled basalt fibres and basalt fibre composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2018,53:1933-1944.
- [20] 马兴业,杨秀娟,樊恒辉,等. 木钙+玄武岩纤维对黄土边坡力学性能及抗蚀性的影响[J]. *人民黄河*, 2023,45(11):122-127.
- [21] Qin Xiao, Shen Aiqin, Guo Yinchuan, et al. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2018,159:508-516.
- [22] 张鹏,吴咪咪,董金梅,等. 玄武岩纤维与聚丙烯酰胺加筋固化粉土剪切强度[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2017,39(4):93-101.
- [23] 王桂尧,周欢,夏旖琪. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J]. *中国公路学报*, 2018,31(2):234-241.
- [24] 彭波,尚文勇,赵宏伟,等. 磷石膏综合稳定土力学性能及合理掺量研究[J]. *新型建筑材料*, 2020,47(8):86-90,127.
- [25] 陈慧娥,王仕鑫,牛壮. 玄武岩纤维对水泥固化软土性能的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2023,31(2):432-440.
- [26] 陈林万,裴向军,张晓超,等. 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022,49(2):137-147.
- [27] 穆成林,黄润秋,裴向军,等. 基于组合赋权-未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. *岩土工程学报*, 2016,38(6):1057-1063.
- [28] 黄挺,郑杰,戴国亮,等. 水下抗分散水泥土正交试验及配比优化方法研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024,44(3):678-688,744.
- [29] 罗国夫,陈开圣,骆弟普. 磷石膏稳定红黏土的压缩特性及微观机理[J]. *硅酸盐通报*, 2023,42(2):644-656.
- [30] 范荣全,王红梅,常朝凯,等. 川西高原不同纤维含量泥炭质土工程特性研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023,50(5):569-576.

(上接第 160 页)

- [4] 陈从新,黄平路,卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2007,8(3):476-481,486.
- [5] 冯君,周德培,李安洪. 顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005,42(9):1474-1478.
- [6] 顿佳伟,吴卓林,冯文凯,等. 某多次开挖边坡治理失效机制分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020,18(2):33-38.
- [7] 刘鹏飞. 希尼尔水库进水渠边坡变形及处理措施[J]. *河南水利与南水北调*, 2021,50(11):68-69,86.
- [8] 国家能源局发布. 水电工程边坡设计规范: NB/T 10512—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.
- [9] 王光进,袁利伟,孔祥云,等. 边坡工程稳定与不确定性分析 Slide 程序的应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015.
- [10] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [11] 公路工程抗震规范: JTG B02—2013[S]. 北京:人民交通出版社, 2013.
- [12] 高玮,冯威,王家超,等. 一种基于滑动带的土坡稳定分析方法研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017,15(6):1-6,15.
- [13] 袁媛,梁峰. 新疆北部某水电站导流洞进口高边坡塌方处理[J]. *西北水电*, 2011(4):20-21,25.
- [14] 占艳平,王启国,杜胜华. 某导流隧洞洞脸边坡治理方案的地质论证[J]. *水利与建筑工程学报*, 2006,4(3):33-36.
- [15] 郑理峰,樊博,周虹,等. 不同加载状态曲线锚索沿程预应力损失试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2022,20(6):1-6.
- [16] 文浩,倪婷,马青. 果多水电站尾水下游岸坡综合治理[J]. *西北水电*, 2019(1):54-58.
- [17] 张军锋,黄艳艳,钱丽云. 黄河上游某工程导流洞出口边坡蠕变体处理方案分析[J]. *陕西水利*, 2021,52(2):322-327.