

DOI: 10.11779/CJGE2024S10039

多频段循环荷载下海洋黏土动力特性试验研究

孙淼军¹, 闻怡玲², 单治钢¹, 王 威¹, 吴帅峰³, 胡敏云^{3,2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023;

3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 为探究海洋土的动力特性及动力影响因素, 采取原状黄海海洋黏土, 利用 GCTS 动三轴试验系统开展室内试验研究, 探讨偏应力水平、动应力幅值和动荷载频率对海洋土动应力应变关系和动孔压的影响规律, 分析动剪切模量和阻尼比的变化特征。试验结果表明: 海洋黏土的动应变随偏应力水平提高和动应力幅值增大而增大, 且具有显著的频率效应, 低频段动荷载 (0.02~0.1 Hz) 引起的动应变累积量高于高频段动荷载 (1~10 Hz) 的应变累积量; 在低频段动荷载作用下, 土样内超静孔压显著上升, 而在高频段下, 动孔压的累积变化量很小; 土样的动剪切模量对动荷载的频率反应不十分明显, 仅在低频段, 动剪切模量会随动荷载频率的提高略有下降, 但是会随动应力幅值增加而显著提高, 随偏应力水平提高而显著下降; 土样的阻尼比对动荷载频率也很敏感, 在低频段, 阻尼比随频率的增大而降低, 在 0.1 Hz 时的阻尼比最低; 在高频段, 土样的阻尼比随动荷载频率增加明显提高, 提高幅度可达到 1 倍以上; 阻尼比会随动应力幅值增长而略有减小, 随偏应力水平提高而略有增加。

关键词: 海洋黏土; 动应力应变; 孔压; 动剪切模量; 阻尼比; 频率效应

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0086-06

作者简介: 孙淼军(1987—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋工程地质方面的研究工作。E-mail: sun_mjz@hdec.com。

Experimental study on dynamic characteristics of marine soil under multi-frequency loading

SUN Miaojun¹, WEN Yiling², SHAN Zhigang¹, WANG Wei¹, WU Shuaifeng³, HU Minyun^{3,2}

(1. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, 311100, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of

Technology, Zhejiang 310023, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute

of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to explore the dynamic characteristics of marine soil and their dynamic influential factors, the laboratory dynamic triaxial tests are carried out on the undisturbed marine soil from an investigated site in Yellow Sea, China by using the GCTS dynamic apparatus. The influences of the deviator stress, dynamic stress amplitude and dynamic load frequency on the dynamic stress-strain behavior and dynamic pore pressure of the marine soil are discussed, and the variation characteristics of dynamic shear modulus and damping ratio are analyzed. The test results show that the dynamic strain of the marine soil increases with the increase of the deviator stress and dynamic stress amplitude, and that the behavior of the marine clay is significantly affected by the loading frequency, i.e., in the low frequency band (0.02~0.1 Hz) of loading, the dynamic strain accumulation is much higher than that happens in the high frequency band (5~10 Hz) of loading. The excess pore water pressure increases sharply during low frequency loading cycles, but within the high frequency of loading, it is scarcely accumulated. The dynamic shear modulus of the marine clay exhibits weak response to the frequency of dynamic loading, i.e., within the low frequency band of loading, the dynamic shear modulus drops a little with the frequency transition, and it increases with the increase of the dynamic stress amplitude and decreases with the increase of the deviator stress level. In the high frequency band (1~10 Hz), the damping ratio of the soil samples increases significantly with the increase of the dynamic load frequency, and the increase range can reach more than 1 time. The damping ratio decreases slightly with the increase of the dynamic stress amplitude, and increases slightly with the increase of the deviator stress level.

Key words: marine soil; dynamic stress-strain; pore pressure; dynamic shear modulus; damping ratio; frequency effect

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划项目 (2022C03009); 国家自然科学基金面上项目 (51878616)

收稿日期: 2024-04-29

***通信作者** (E-mail: wushf@iwhr.com)

0 引言

海上工程常受到风、浪、流等长期循环往复的动荷载作用, 并通过基础传递至海床地基, 致使海相土在多变环境下可能遭受结构损伤与破坏, 进而造成海床变形和失稳, 因此, 研究海洋土的动力特性至关重要。

研究者们通过动三轴试验来观察海相土的动应力应变和动孔压变化, 影响因素包括动荷载频率和幅值等。不同学者对动荷载频率的影响进行了研究^[1-3], 发现循环荷载频率对黏土动强度和变形模量影响不明显, 但高频动荷载作用下土样中会产生较大动孔压。荷载幅值大小是土体动力响应的重要的影响因素, 研究表明^[4]较大的循环振动幅值会引起饱和软黏土的瞬时动孔压增长, 是引起土体动力变形和破坏的主要影响因素。

动剪切模量 G 和阻尼比 λ 是描述土体动力特性的基本参数, 在动荷载作用下会发生改变。有研究发现动荷载的频率对黏土的动力参数变化有影响^[1, 4], 振动频率越高, 土的阻尼比 λ 和动剪切模量 G 越大。而且, 动应力幅值和、固结压力和固结历史对这些参数也有显著影响^[5-7, 8-10]。

上述研究中大多采用的是稳定动荷载, 即动荷载特征(频率、幅值)在试验中不发生变化。但是, 真实的海洋环境动荷载是多种因素的相互作用, 为了更准确地预测和评估海上工程的稳定性和安全性, 需要研究多种动荷载组合情况下海相土的动力特性和动力参数变化。因此, 本研究结合黄海某海上风电工程的地质勘察采取现场海相土样, 开展室内不排水动三轴试验, 研究海洋土在交替的偏应力加载与变频、变幅值的循环荷载作用下的动力特性与动参数演化规律。

1 取样及试样准备

试验土样取自黄海某海上风电场工程勘察钻孔, 该钻孔离海岸距离约32 km, 取样点水深30~33 m, 选取海床面以下钻孔深度22~23 m的原状土样, 取样后第一时间进行保水、隔震处理。土样的基本物理指标见表1, 土样呈黄褐色, 判定为饱和黏性土。试验设备选用了GCTS公司的MSTX-300动三轴试验机, 加载控制和量测精度均可满足试验要求。采用圆柱体土样, 直径50 mm, 高度100 mm。

表 1 海洋土基本物性参数

Table 1 Basic physical parameters of marine soil						
土样	含水率/ %	初始孔隙比	比重	湿密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %
ZK66-2	24.25	0.61	2.62	2.02	35.3	14.7

2 动三轴试验方案

首先进行试样饱和, 然后施加围压进行等压固结, 固结主应力比为 $k_c=1.0$, 固结压力 $\sigma_{3c}=300$ kPa; 固结完成后施加偏应力 $\Delta(\sigma_1-\sigma_3)$, 偏应力分三次施加, 分别为 $q=60, 90, 120$ kPa; 在每级偏应力施加后, 即开始连续变频的循环动荷载试验。试验中施加的动荷载幅值共分为 4 个等级, 分别为 $\sigma_d=\pm 15$ kPa, ± 30 kPa, ± 45 kPa, ± 60 kPa; 每一级动荷载采用变频率作用, 频率变化顺序依次为 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz; 每个频率下循环加载次数为 100 次。试样破坏标准设为 $\varepsilon_d=50\%$ 。循环荷载采用正弦波形。

本次试验采用了三级偏应力、8 组频率和 4 级动应力幅值, 共进行了 8100 次循环加载。试验方案见表 2, 图 1 给出了固结完成后的试样加载过程。

表 2 多频率动荷载交替加载方案

Table 2 Multi-frequency dynamic load alternating loading scheme				
土样编号	围压/ kPa	偏应力/ kPa	动应力幅值/ kPa	频率/Hz
ZK66-2	300	60	15 (第一步)	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10
			30 (第二步)	
			15 (第三步)	
		90	30 (第四步)	
			45 (第五步)	
			15 (第六步)	
		120	30 (第七步)	
			45 (第八步)	
			60 (第九步)	

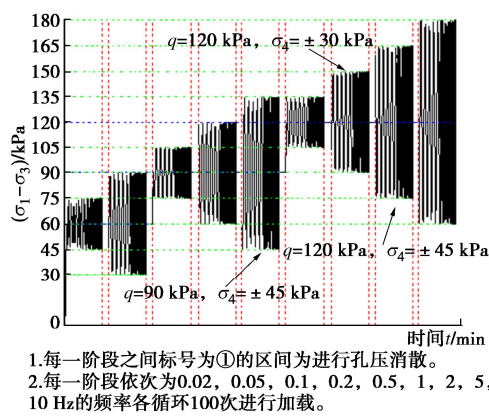


图 1 试样加载过程

Fig. 1 Specimen loading process

3 试验结果

3.1 动应力应变

图 2 给出了原状海相土固结后在加载过程中获得的动应力应变关系。由图可见, 在偏应力加载、变频过程以及动应力幅值提高后, 试样的轴向应变不断累积, 但是试样的累积应变始终未达到破坏标准 ($\varepsilon_d <$

5.0%)。从图中还可以看出,不同频段的轴向应变累积发展量不相同,说明土样对不同的动荷载频率有不同响应。

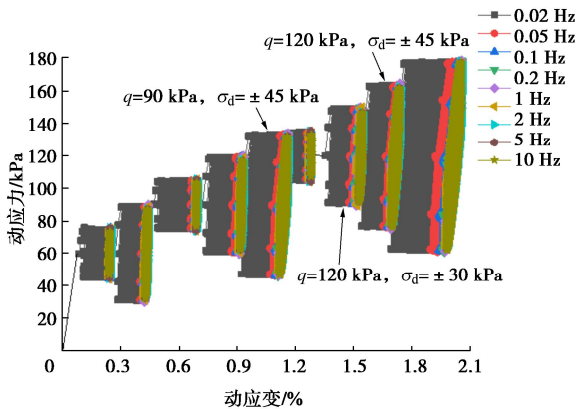


图2 动应力应变全过程曲线

Fig. 2 Curve of the whole process of dynamic stress and strain

为了分析偏应力水平对海相土动力应变的影响,在图2中选取了 $\sigma_d = \pm 45$ kPa的动荷载分别在 $q=90$ kPa和 $q=120$ kPa条件下的应变累积曲线,如图3(a,b)所示。通过对比可见,在较高的偏应力水平下,相同动荷载幅值引起的试样的应变累积量较小。为了分析动应力幅值对海相土动力应变的影响,在图2中选取了 $q=120$ kPa条件下 $\sigma_d = \pm 30$ kPa和 $\sigma_d = \pm 45$ kPa时的应变累积曲线,如图3(c),(d)所示。由图可见,当动荷载幅值增大时,试样的累积应变没有明显增加,但是滞回圈的主轴更“倾斜”,表明海相土的变形模量有所降低。

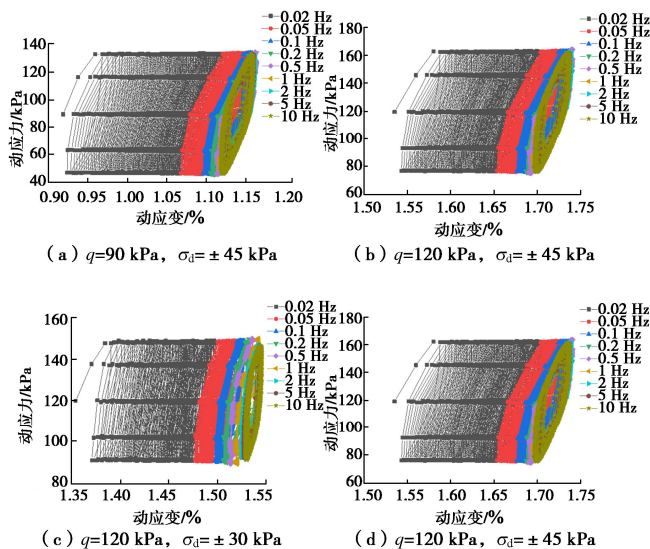
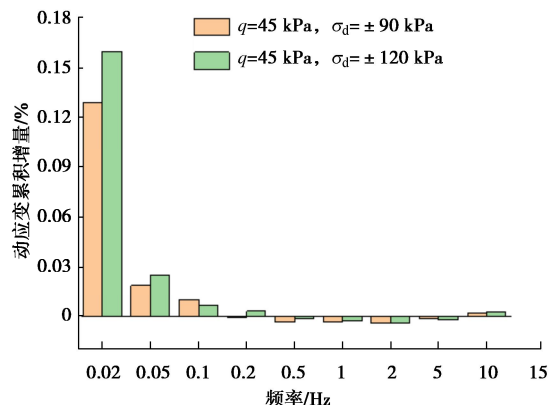


图3 分段动应力-动应变曲线

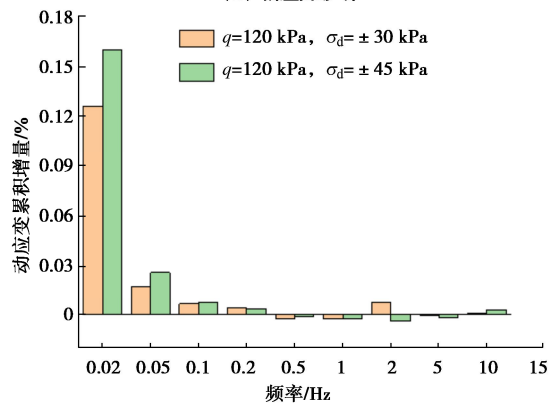
Fig. 3 Piecewise dynamic stress-dynamic strain curves

根据图3,可以分析不同频段下海相土的变形响应,如图4给出了各频段下动应变累积量统计情况。由图4可见,动荷载频率较低时,频段内动荷载引起

的动应变累积增量较高;当动荷载频率提高后,频段内的动应变累积增量迅速减小,甚至出现微小的负值。例如,循环荷载频率为0.02 Hz对应的动应变累积增量为0.13%至0.16%,而在频率为0.5~10 Hz的频段内,试样的竖向累积应变几乎不发展。而且,无论是偏应力水平高低还是动应力幅值大小,频率对应变发展的影响都呈现一致的规律性。当然,通过图4(a)的比较和图4(b)的比较可以看出,偏应力水平提高或动荷载幅值的增加都会提高低频段下土样的应变累积量,但是对高频段,偏应力水平的提高和动荷载的幅值增加都未见明显影响。



(a) 偏应力影响



(b) 动应力幅值影响

图4 多频段动应变累积增量对比

Fig. 4 Comparison of multi-band dynamic strain accumulation increments

从以上的分析可以看出,频率对土的动应变发展有显著影响。本次试验采用的是不排水试验,因此,在试样体积保持不变的条件下,动应变累积量大也显示了试样的形变更显著,则试样抵抗剪切变形的能力更低。这提示了低频段的动荷载作用更不利于海相土维持土体自身结构的稳定。

3.2 动孔压

风、浪、流动荷载影响下,海床内会产生超静孔隙水压力,孔隙水压力累积到一定程度会导致黏性土强度与刚度不可逆的降低,因此考察土体在循环荷载

作用下动孔压的变化具有重要意义。

图 5 (a), (b) 给出了动荷载幅值为 $\sigma_d = \pm 45$ kPa 时, 偏应力水平分别为 $q=90$ kPa 和 $q=120$ kPa 条件下的各频段孔压累积曲线。通过对比可见, 在较高的偏应力水平下, 相同动荷载幅值引起的试样内超静孔压累积量更大。图 5 (c), (d) 给出了偏应力水平为 $q=120$ kPa 条件下, 动应力幅值分别为 $\sigma_d = \pm 30$ kPa 和 $\sigma_d = \pm 45$ kPa 时的动孔压累积曲线。由图 6 可见, 当动荷载幅值增大时, 试样的累积孔压并没有明显增加。

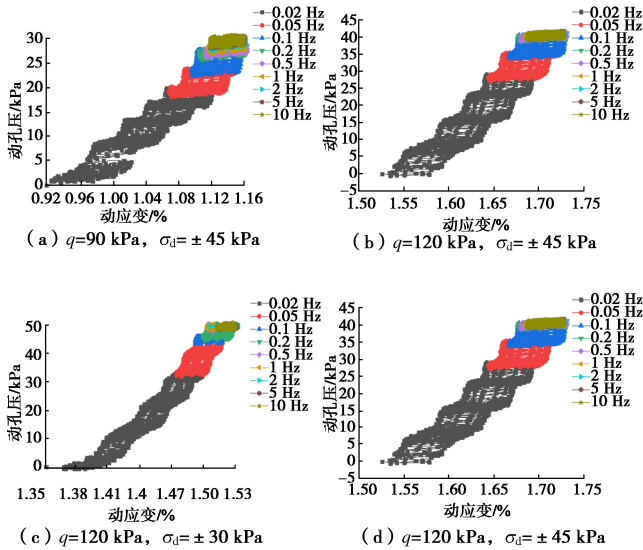
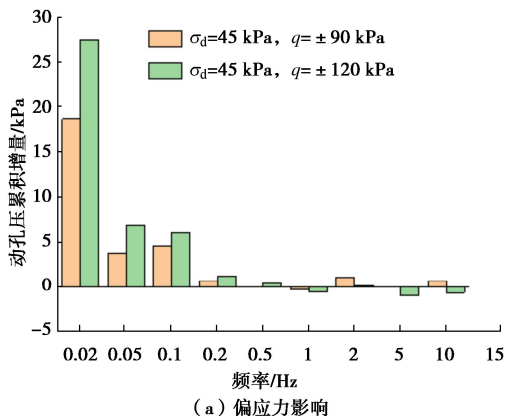


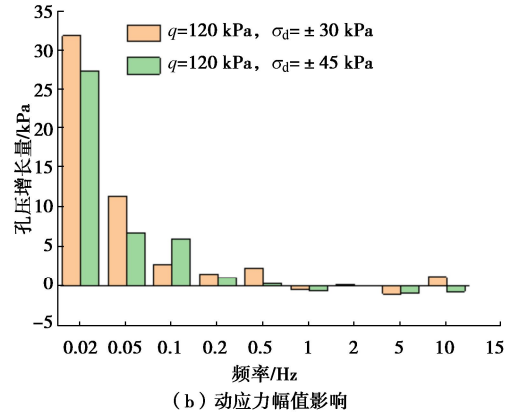
图 5 动孔压-动应变曲线

Fig. 5 Dynamic strain curve of moving holes

根据图 5, 可以分析不同频段下海相土的孔压响应。图 6 给出了各频段下动孔压累积量统计情况。由图 6 可见, 在低频率动荷载作用下, 试样内的动孔压迅速上升, 尤其是在动荷载频率为 0.02 Hz 时, 动孔压累积上升量最大; 在 0.1~0.5 Hz 时, 动孔压累积上升变慢; 当频率达到 1~10 Hz 时, 动孔压累积量会变为微弱负值。这说明试样的孔压累积响应对动荷载的频率是敏感的, 在高频段动荷载作用下, 动孔隙水压力累积不明显, 说明高频段动荷载没有造成试样结构明显损伤。



(a) 偏应力影响



(b) 动应力幅值影响

图 6 多频段动孔压累积增量对比

Fig. 6 Comparison of the cumulative increment of multi-band dynamic pore pressure

而且, 无论偏应力水平高低或动荷载幅值大小, 频率对动孔压累积的影响具有一致性, 只是偏应力水平提高会促进动荷载下超孔压累积, 而动荷载幅值的增加似乎对超孔压的累积增长没有产生明显的影响。

4 动参数分析

4.1 动剪切模量

当假定土是各向同性材料时, 土的剪切模量可不依赖于排水条件, 能够反映土剪切特性。动剪切模量可计算如下:

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

式中: E_d 为动弹性模量, 由动应力应变曲线获得; ν 为泊松比, 对不排水试验, $\nu = 0.5$ 。

由图 7 可见, 无论偏应力水平的高低和动荷载幅值的大小, 土样的动剪切模量对动荷载的频率反应并不显著但具有一致性: 除低频率的动剪切模量略大, 其余频率的动剪切模量几近不变。

图 7 (a) 给出了动荷载幅值为 $\sigma_d = \pm 45$ kPa 时, $q=90$ kPa 和 $q=120$ kPa 两种偏应力水平下土样动剪切模量与频率的关系曲线。由图可见, 在相同的动荷载作用下, 偏应力水平越高, 土样的动剪切模量减小。由于原状海洋土的结构骨架具有较强的抵抗剪切变形能力, 因此表现为循环荷载加载初期在较小的偏应力下有较大的动剪切模量, 而随着偏应力的增加, 结构性逐渐被破坏, 动剪切模量迅速减小。

图 7 (b) 给出了 $q=120$ kPa 偏应力水平下, 动荷载幅值为 $\sigma_d = \pm 30$ kPa 和 $\sigma_d = \pm 45$ kPa 时, 土样动剪切模量与频率的关系曲线。由图可见, 在相同偏应力作用下, 动应力幅值越大, 土样的动剪切模量增加。试样在受到较大动应力幅值作用, 土体会更加紧密, 孔隙也逐渐减少, 土颗粒之间的黏聚力增大, 抵抗剪

切变形能力不断增强, 动剪切模量逐渐增大。

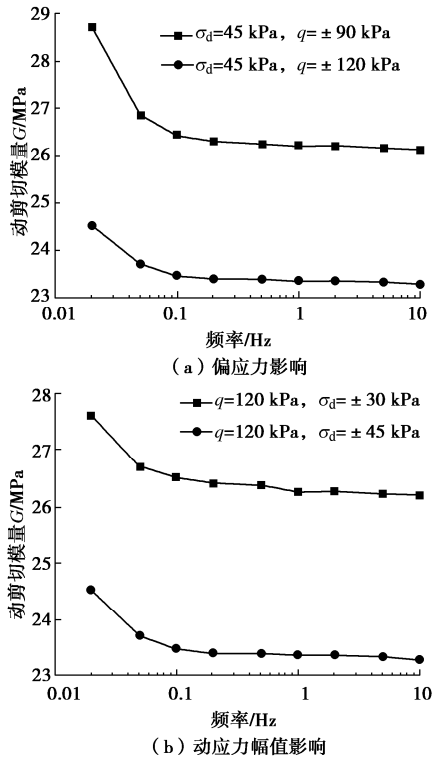


图 7 动应力幅值、偏应力对动剪切模量的影响

Fig. 7 The effects of dynamic stress amplitude and deviator stress on dynamic shear modulus

4.2 阻尼比

阻尼比表示在振动过程中试样能量耗散的情况, 如下式:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{A_c}{A_T} \quad (2)$$

式中: A_c 为循环滞回圈面积; A_T 为滞回圈顶点与滞回中心连线在移动应变轴上投影形成的三角形的面积。

本试验中各动荷载在每个频率下均进行了 100 次循环, 每 10 次循环取一个平均值, 则一个频率下可获得十个平均值。图 8 (a), (b) 分别给出了两种不同偏应力水平和两种不同动荷载幅值下, 土样阻尼比在多频段连续加载过程中的变化情况。

由图 8 可见, 无论偏应力水平的高低和动荷载幅值的大小, 土样的阻尼比对动荷载的频率反应非常显著且具有一致性: 当频率在 0.02~0.1 Hz 时, 阻尼比随频率增大略有降低, 在动荷载频率为 0.1 Hz 时土样的阻尼比最小; 当频率在 0.1~0.5 Hz 时, 土样的阻尼比明显增加; 当动荷载频率增加到 1~10 Hz 时, 阻尼比迅速增长并在 10 Hz 时达到最大值。

由图 8 (a) 可见, 在相同的动荷载作用下, 偏应力水平越高, 土样的阻尼比会略有增加, 表明在土体

结构更致密时, 土样的耗能水平也会更高些; 但是, 由图 8 (b) 可见, 在保持偏应力水平不变时, 动应力幅值越大, 土样的阻尼比会降低, 但是两种动应力幅值下土样的阻尼比基本处于同一量级。

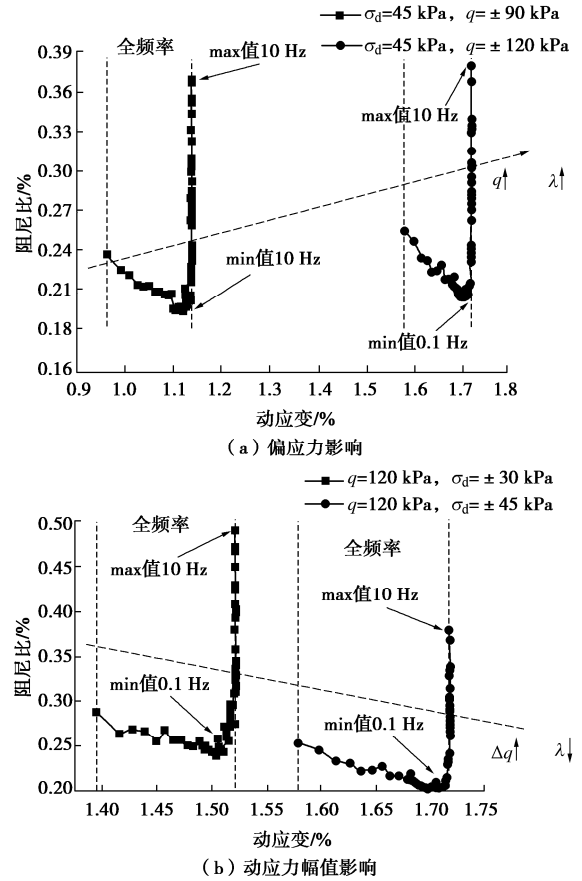


图 8 动应力幅值、偏应力对阻尼比的影响

Fig. 8 The effects of dynamic stress amplitude and deviator stress on the damping ration

5 结 论

本文通过开展室内动三轴试验, 研究了多频段动荷载连续作用下海相饱和黏土的动应力应变、动孔压响应特征以及动剪切模量、阻尼比变化规律, 主要得出以下 3 点结论。

(1) 海相饱和黏土的累积动应变和动孔压都具有明显的频率效应。低频动荷载对土样的应变累积和孔压累积的影响都明显 应力幅值和偏应力水平的影响。其中动荷载频率的影响最为显著, 表现为在低频段动荷载作用下, 土样的阻尼比随荷载频率增大而降低, 但是在高频段动荷载作用下, 土样的阻尼比随荷载作用频率大幅提高。动应力幅值的增加会引起土样阻尼比的略微下降, 而偏应力水平增高则可能引起阻尼比的上升。

(2) 土样的动剪切模量对动荷载的频率反应并不

显著, 动应力幅值的增加会引起动剪切模量的上升, 而偏应力水平增高则可能引起动剪切模量的下降。

(3) 土样的阻尼比在动荷载作用下会发生显著变化, 受到动荷载作用频率、动应力幅值和偏应力水平的影响。其中动荷载频率的影响最为显著, 表现为在低频段动荷载作用下, 土样的阻尼比随荷载频率增大而降低, 但是在高频段动荷载作用下, 土样的阻尼比随荷载作用频率大幅提高。动应力幅值的增加会引起土样阻尼比的略微下降, 而偏应力水平增高则可能引起阻尼比的上升。

参考文献:

- [1] 张 茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5): 699-704. (ZHANG Ru, TU Yangju, FEI Wenping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 699-704. (in Chinese))
- [2] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997(2): 42-51. (HE Changrong. dynamic triaxial test of dynamic modulus and damping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**. (in Chinese))
- [3] MORTEZAIE A R, VUCETIC M. Effect of frequency and vertical stress on cyclic degradation and pore water pressure in clay in the NGI simple shear device[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(10): 1727-1737.
- [4] 王 军, 谷 川, 蔡袁强, 等. 动三轴试验中饱和软黏土的孔压特性及其对有效应力路径的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1290-1296. (WANG Jun, GU Chuan, CAI Yuanqiang, et al. Behavior of pore water pressure in dynamic triaxial tests of saturated soft clay and its effect on effective stress path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1290-1296. (in Chinese))
- [5] 王钰轲, 李俊豪, 邵景干, 等. 不同影响因素下路用黄河泥沙动剪切模量和阻尼比试验及理论模型研究[J]. 工程科学学报, 2023, **45**(3): 509-519. (WANG Yuke, LI Junhao, SHAO Jinggan, et al. Experimental investigation and theoretical models on dynamic shear moduli and damping ratios for Yellow River sediment under different influence factors[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, **45**(3): 509-519. (in Chinese))
- [6] 吴 琪, 王子凡, 王常德, 等. 长江漫滩相软土动剪切模量与阻尼比特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, **56**(9): 125-135+145. (WU Qi, WANG Zifan, WANG Changde, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of Yangtze River floodplain soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, **56**(9): 125-135, 145. (in Chinese))
- [7] WANG M Y, SHAN Z G, WANG Y J, et al. dynamic elastic moduli and damping ratios of marine sediments at zhou shan daishan based on dynamic triaxial tests under strain control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1503-1512.
- [8] YANG W B, WU Q, CHEN G X. Dynamic shear modulus prediction method of undisturbed soil in the estuary of the Yangtze River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **10**.
- [9] 陈国兴, 卜屹凡, 周正龙, 等. 沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1344-1350. (CHEN Guoxing, BU Yifan, ZHOU Zhenglong, et al. Influence of sedimentary facies and depth on normalized dynamic shear modulus and damping ratio of quaternary soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1344-1350. (in Chinese))
- [10] 战吉艳, 陈国兴, 杨伟林, 等. 苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 559-566. (ZHAN Jiyang, CHEN Guoxing, YANG Weilin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of quaternary sedimentary soil in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 559-566. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)