

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.073



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



循环荷载下软黏土阻尼比特性及其简化计算方法

魏子航^{1,4}, 朱义欢², 王涛², 邓永锋¹, 庄海洋³

(1. 东南大学交通学院, 南京 211189; 2. 华设设计集团, 南京 210014; 3. 南京工业大学交通运输工程学院, 南京 211816; 4. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013)

摘要:土体的阻尼比是土层动力分析和评价必不可少的重要动力性能参数,但滞回曲线具有多样性和复杂性,利用规范法计算阻尼比时数据量过多导致数据的筛选和整理困难,适当地对滞回曲线进行简化有助于快速处理和分析试验数据。为研究南京地区长江漫滩淤泥质粉质黏土在地铁列车循环荷载作用下阻尼比的变化和特性,对土体进行动三轴试验,分析土体的阻尼比在不同固结围压和动荷载幅值下的变化过程,并根据土体动应力-应变滞回曲线的几何特征和循环荷载的物理意义,采用多个循环次数作为一个代表性循环单元的思路对阻尼比进行简化计算。结果表明:土体的阻尼比随着动应变的增加呈快速增长—缓慢增长—保持平稳的3阶段发展趋势;随着固结围压的增加,土体的阻尼比逐渐减小;随着动荷载幅值的增大,土体的阻尼比增加。简化方法中,代表性循环单元内循环次数越多,计算得到的阻尼比规范法所得数值越小,在精度合适的情况下,可以作为阻尼比计算的实用方法,以减少计算时的数据处理及计算量。

关键词:循环荷载;软黏土;滞回曲线;阻尼比;动三轴试验

中图分类号:TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)05-0204-07

Damping ratio characteristics and simplified calculation method of soft clay under metro operation cyclic loading

WEI Zihang^{1,4}, ZHU Yihuan², WANG Tao², DENG Yongfeng¹, ZHUANG Haiyang³

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China; 2. China Design Group Co., Ltd, Nanjing 210014, P. R. China; 3. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China; 4. CCTEG Beijing China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100013)

Abstract: The damping ratio of soil is an essential and important dynamic parameter in soil dynamic analysis and evaluation. For the diversity and complexity of the hysteretic curve, it is difficult to calculate the damping ratio by the standard method for the excessive amount of data. The simplification of the hysteretic curve is helpful to process and analyze the test data quickly. To investigate the characteristics of the damping ratio of muddy silty clay in the Yangtze River floodplain in Nanjing under the cyclic load of the subway train, the triaxial dynamic test was carried out, and the damping ratio under different confining pressures and dynamic amplitudes was analyzed. For the geometric characteristics of the stress-strain hysteretic curves and the physical significance

收稿日期:2022-03-23

基金项目:国家自然科学基金(51378117)

作者简介:魏子航(1997-),男,主要从事地基地动力特性研究,E-mail:220194495@seu.edu.cn。

邓永锋(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:noden@seu.edu.cn。

Received:2022-03-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51378117)

Author brief: WEI Zihang (1997-), main research interest: dynamic characteristics of foundation, E-mail: 220194495@seu.edu.cn.

DENG Yongfeng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: noden@seu.edu.cn.

of the cyclic loading, the calculation method is simplified by assembling the hysteresis cycles as a group. The results show that with the increase of dynamic strain, the damping ratio shows a three-stage trend, i.e., rapid, slow and stable growth. With the increase of confining pressure, the damping ratio decreases gradually. When dynamic amplitude increases, the ratio also increases. In the simplified method, the greater the number of cycles in the representative cycle element, the smaller the calculated damping value compared with the standard method. Under the condition of appropriate accuracy, it can be used as a practical method to calculate the damping ratio, so as to reduce the amount of data processing and calculation.

Keywords: cyclic loading; soft clay; hysteretic curve; damping ratio; dynamic triaxial test

土体的阻尼比是土体在变形时内摩擦作用能量的耗散造成的,反映了动能因土体内部阻力的存在而损失的性质。由于阻尼比的存在,在动荷载作用下,其动应力-应变关系具有滞后性的特征。作为土层动力分析和评价必不可少的重要动力性能参数,合理选用阻尼比对工程建设质量及安全评估具有重要的影响。

确定土体阻尼比的方法有规范法、Das and Luo法^[1]、Kokusho法^[2]、Kumar法^[3]和互相关函数法^[4-6]。规范法利用滞回曲线中的面积几何关系,求得阻尼比。但是,不同土体滞回曲线的形态特征,如长轴斜率、曲线面积、不闭合程度等在动力加载过程中差异显著。

阻尼比计算和研究基于土体变形的应力-应变滞回曲线。一方面,对不同种类的土体进行动力学试验,对滞回曲线在动力加载过程中的形态变化进行定性及定量的描述和总结。魏新江等^[7]对冻融土进行动三轴试验,总结了土体在冻融作用下滞回曲线的形状、面积、不闭合程度及阻尼比的变化规律。刘超等^[8]以重塑泥炭质土为研究对象,通过动三轴循环加载试验对土体滞回曲线的长轴斜率、中心偏移量、动应变幅值及包围面积的演化规律进行了定量描述。庄心善等^[9-10]通过动三轴试验,研究了不同试验条件下风化砂改良膨胀土和重塑弱膨胀土的滞回曲线形态特征的变化规律。焦贵德等^[11]对冻土试样进行循环荷载下的单轴压缩试验,探讨了冻土在循环荷载下的滞回圈演化规律,总结了破坏型和稳定型两种应变-循环关系曲线。李玥^[12]通过动扭剪试验模拟交通荷载对压实粉砂土路基的作用,研究了初始静剪应力对粉砂土累积变形的影响,结果显示了滞回曲线形状由饱满逐渐变为扁平梭状的变化过程。郭林等^[13]通过不排水静剪和循环加载试验,研究了结构性软黏土在长期循环荷载作用下的应变特性,软黏土的结构性导致了土体在不同围压下的应变行为有着明显不同,表现在应力-应变滞回曲线之上。宋金良等^[14]对珠江口海洋原结构软土进行动三轴试验,对软土的滞回曲线的不闭合程度、

倾斜程度和面积等形态变化进行了研究和分析。另一方面,根据滞回曲线的形态特征,有学者对阻尼比的不同计算方法进行对比和提出改进。陈伟等^[15]提出了一种利用多边形逼近计算土体阻尼比的方法,利用原状弱膨胀土的动三轴试验数据,计算并对比了椭圆拟合法和多边形逼近滞回曲线的方法的结果。宋东松等^[16]以福建标准砂为研究对象,采用动三轴试验,对确定土体阻尼比的不同方法进行了差异性的探讨和对比,并给出了不同土体条件建议选用的方法。董正方等^[17]以黄泛区粉砂土为研究对象,通过动三轴试验,分别采用了3种常用的动本构模型对阻尼比进行计算并进行了分析对比。张向东等^[18]为研究循环荷载给煤渣改良土阻尼比带来的影响,利用动三轴试验,建立了阻尼比的增长模型并确定了模型中的各参数物理意义。

对于黏弹性材料,理想的滞回曲线应该近似为一个椭圆曲线。实际分析中,土体滞回曲线形态变化的多样性和复杂性给阻尼比的计算带来一定困难,在此基础之上的修正计算方法大都复杂且难以统一。准确地把握滞回曲线的几何特征是有有效确定阻尼比的关键。软土地基在遭受行车荷载作用时,软土的流变特性和高灵敏度可能会导致地铁在长期运营过程中土层产生长达几年甚至几十年的持续不均匀沉降,这对地铁的运营安全和地铁维护极其不利。因此,研究列车振动影响下高压缩性土的动力特性,如阻尼比等指标,有助于更好地认识和把握运营地铁及地下结构病害的发展规律和过程,从而制定合理有效的安全保护及风险防控措施。笔者首先探讨南京河西淤泥质粉质黏土的滞回和阻尼特性,在此基础上尝试将多个循环归并为一个循环单元,探讨该模式阻尼比的特征,为简化分析和后期动荷载下长期变形的数值计算提供参考。

1 试验概述

1.1 试验设备

试验仪器为动态循环三轴试验系统,采用应力

控制加载方式,加载波形选用正弦波,根据电子荷重传感器和位移传感器的反馈对荷载和变形的大小进行计算机控制。

1.2 试验方案

南京河西地区长江漫滩淤泥质粉质黏土浮容重为 7.2~9.3 kN/m³,取上覆土体平均浮重度为 8.3 kN/m³。根据淤泥质粉质黏土埋深及浮容重,考虑等向固结,估算隧道埋深为 15、18、24 m 的土体试验围压分别为 124.5、149.4、199.2 kPa,动三轴试验固结阶段中设置相应固结围压为 120、150、200 kPa。根据地铁运行的实测动应力时程曲线^[19]的动应力区间和振动周期,并考虑轨道线路不平顺与轮轨冲击对土体的影响,确定动应力幅值分别为 2、6 kPa,以模拟地铁列车循环荷载在不同深度处土体中的动应力,振动频率为 0.75 Hz。根据试验经验以及土体轴向应变特征,最大循环加载次数为 5 000 次。改变试验参数变量的控制和组合,模拟土层不同深度处列车振动荷载的传递差异对土体动力特性的影响。动三轴试验方案的参数如表 1 所示,对淤泥质粉质黏土进行共计 6 组试验,组序如表 2

所示。

表 1 室内动三轴试验参数

Table 1 Parameters of indoor dynamic triaxial test

荷载幅值 q_d/kPa	固结围压 σ_c/kPa	振动频率 f/Hz	K_0	振动次数 N
2、6	120、150、200	0.75	1.0	0~5 000

表 2 动三轴试验组序

Table 2 Sequence of dynamic triaxial test group

序号	土样类型	固结围压 σ_c/kPa	荷载幅值 q_d/kPa
1	淤泥质粉质黏土	120	2
2		120	6
3		150	2
4		150	6
5		200	2
6		200	6

1.3 试样

南京河西某地铁车站附近自上而下取淤泥质粉质黏土原状,取样深度为 8.9~10.6 m,土样的基本物理力学指标如表 3 所示。试验时,切削后试样安装至试验设备的压力室底座上,如图 1 所示。

表 3 试样土体的基本物理力学指标

Table 3 Basic physical and mechanical index

土体类别	含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$
淤泥质粉质黏土	45.30	1.74	1.20	1.28	34.88	19.28

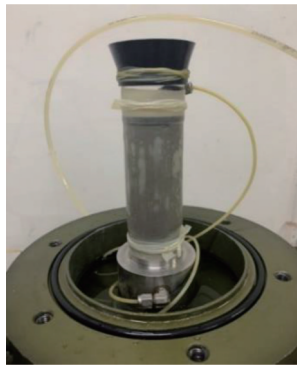


图 1 试样制备

Fig. 1 Specimen preparation

2 滞回曲线及阻尼比计算

2.1 滞回曲线

滞回曲线反映了土体在剪切过程中因自身内摩擦作用的存在而产生能量损失的性质,在动荷载下动应力-应变关系表现出滞后性的特征。利用试验数据绘制土体在一个周期动荷载作用下的动应力-应变曲线,可得土体的滞回曲线。

试验过程中,由于试验条件及试验材料自身性质的多样性和差异性,滞回圈常呈现不规则封闭或

半封闭曲线,且随着动荷载不断地施加,曲线的尺寸及形状逐渐变化和移动。试验中,代表性滞回圈的形状如图 2 所示。

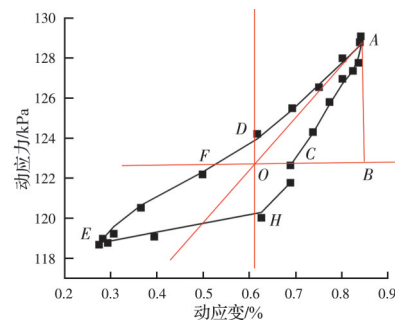


图 2 代表性滞回曲线

Fig. 2 Representative hysteretic curve

2.2 阻尼比

规范法确定的阻尼比计算方法如式(1)所示。

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{4\pi} \frac{A_0}{A_T} \quad (1)$$

式中: ΔW 为土体在一个荷载作用周期内损耗的能量; W 为一个周期内荷载作用的总能量; A_0 为图 2 中滞回曲线 $ADFEHC$ 所围定的面积; A_T 为图 2 中滞回曲线由原点到最大幅值点 $A(\gamma_m, \tau_m)$ 连线下的三

角形 AOB 面积。

式(1)为确定土体阻尼比的基本关系式,求得任意一循环阻尼比,即得出阻尼比与动应变的关系曲线。当实测的滞回圈与标准的椭圆曲线相差较大时,应对滞回圈进行简化处理,使其接近于椭圆曲线形状。而在实际处理的过程中,因滞回曲线在加载过程中的不断变化以及几何特征不突出等问题,难以建立统一的简化椭圆标准和方法,导致了阻尼比计算的误差。利用数学思想求取滞回曲线面积可以最大限度避免简化椭圆过程所带来的计算误差,其中利用多边形逼近滞回曲线^[10]的方法可以有效和便捷地计算滞回曲线的面积。该方法已得到国内外学者的公认,计算式如式(2)所示。

$$\Delta W = \sum_i^n \frac{\tau_{i+1} + \tau_i}{2} (\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (2)$$

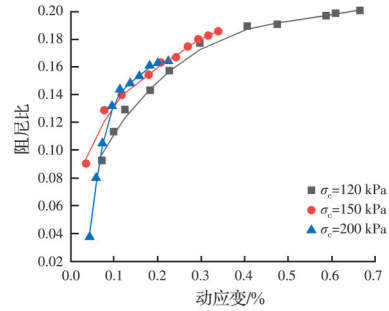
式中: τ_i 、 γ_i 分别为一个荷载循环周期内的剪应变; n 为一个荷载循环周期内剪应力-剪应变记录点数。

3 阻尼比特性分析

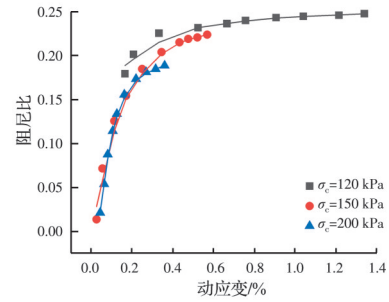
3.1 固结围压的影响

考虑固结围压对土体施加循环荷载时阻尼比变化的影响,根据动三轴试验数据,绘制土样的动应变和阻尼比之间的关系变化曲线,见图 3。

图 3 表明,动荷载幅值一定时,固结围压发生变化的试验条件下,淤泥质粉质黏土试样在加载稳定后的阻尼比随着固结围压的增大略有降低,表明土体随着固结围压的增加内部结构变得越紧密,其抵抗变形的能力越强,颗粒间相互运动发生摩擦作用对外部能量吸收越小,因此,阻尼比水平降低。在不同的荷载幅值下,阻尼比随动剪应变的发展规律一致,在加荷初期阻尼比曲线的斜率较大,阻尼比增长较快,随着动剪应变的增大,阻尼比的增长逐渐减慢,逐渐趋于稳定。



(a) 荷载幅值 $q_d=2$ kPa

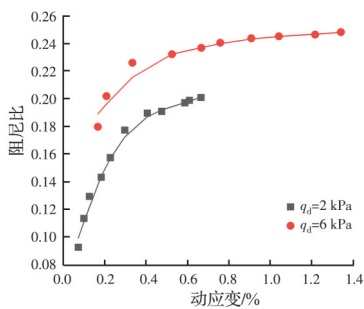


(b) 荷载幅值 $q_d=6$ kPa

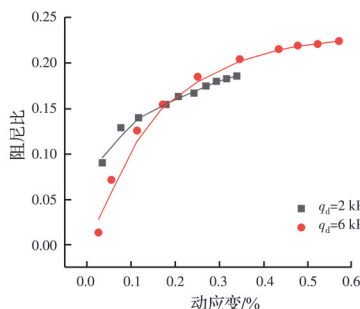
图 3 不同固结围压下土体动应变-阻尼比变化关系
Fig. 3 Relationship of dynamic strain and damping ratio of soil under different consolidation confining pressures

3.2 荷载幅值的影响

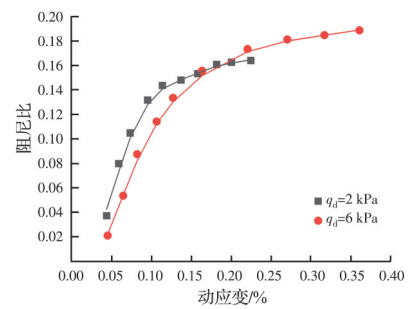
考虑荷载幅值对土体施加循环荷载时阻尼比变化的影响,根据动三轴试验数据,绘制土样的动应变和阻尼比之间的关系变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可见,固结围压一定时,动荷载幅值发生变化的条件下,淤泥质粉质黏土试样在加载稳定后的阻尼比随着荷载幅值的增大而增加,在固结围压较小时(σ_c 为 120 kPa),两种荷载幅值下的阻尼比数值相差较大。该现象的主要原因为固结围压越小,试样越松散颗粒间隙越大,内摩擦作用所消耗的能量越多,动荷载幅值较大时这种消耗的表现较突出。



(a) 固结围压 $\sigma_c=120$ kPa



(b) 固结围压 $\sigma_c=150$ kPa



(c) 固结围压 $\sigma_c=200$ kPa

图 4 不同荷载幅值下土体动应变-阻尼比变化关系

Fig. 4 Relationship of dynamic strain and damping ratio of soil under different load amplitudes

4 阻尼比计算简化

4.1 滞回曲线简化方法

在动三轴的试验过程中,土体因自身性质的差异性需要开展几千至上万次不等的循环荷载,每一次荷载施加的过程中控制系统都会产生几十个数据点,图5为实际试验中试样的应变-应力滞回曲线示意图。由图可以看出,在加载过程中,由于加载的次数过多以及土样变形过程缓慢,所有单次循环的滞回曲线堆叠在一起,导致难以分析滞回曲线的演化过程,同时,所对应的阻尼比变化曲线也因循环荷载的存在而表现出循环变化的特性,且变化的连续性和规律性不显著。因此,在处理试验数据时,产生了大量且复杂的数据整理筛选的工作,给分析工作带来了较大的难度。提出一种对滞回曲线进行简化表征方法,简化数据处理流程,使得对土体阻尼比的获取更加方便,同时也降低后续数值仿真计算的难度。

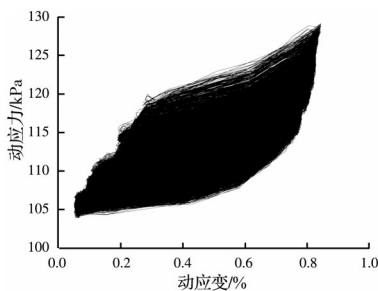


图5 土体应变-应力滞回曲线示意图

Fig. 5 Diagram of soil strain-stress hysteretic curve

该方法从循环次数出发,考虑将多次单圈循环设定为一次新循环单元,例如,每20次单圈循环为一次大循环(代表20次周期荷载作为新的一个循环周期),从而直接减少整体循环次数,降低数据点数,相应单次大循环的滞回曲线如图6所示。

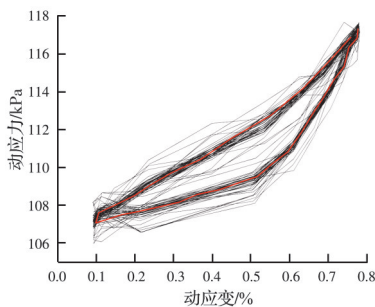


图6 20圈循环滞回曲线示意图

Fig. 6 Diagram of 20-loop hysteretic curve

4.2 阻尼比计算简化

由于循环单元数的减少,阻尼比计算工作量相应降低,计算的关键在于如何确定新循环中的滞回曲线面积,即式(1)中的 A_0 ,同时利用滞回曲线几何

特征,确定最大幅值点 $A(\gamma_m, \tau_m)$ 后,即可计算得到 A_T 。由图6可以看出,在20圈循环内,每次循环之间的滞回曲线缓慢移动和变化,总体上有清晰的重叠线可作为大循环的滞回曲线,进而考虑采用多次单圈循环滞回曲线的平均面积进行阻尼比的计算。由于对循环次数的简化并未直接改变单次循环荷载的形式和大小,仅仅对循环荷载进行重新分组,使其由单次循环变为多循环所组成的循环单元,且任一相邻两次大循环内单循环次数和形式完全一致,因此,该方法未破坏循环荷载的特征,在物理意义上与原来保证了一致性。

4.3 计算结果对比分析

对试验数据分别采用20圈以及50圈循环简化处理,并将计算所得阻尼比与常规规范法处理结果进行对比分析,绘制动应变-阻尼比变化曲线,如图7所示。

图7表明,在相同的试验条件下,采用3种方式对试验数据进行处理计算得到的阻尼比在总体上保持相同的变化发展趋势,即在动应变发展初期快速上升,随后增速放缓至动应变继续增大后保持稳定。3种方法的阻尼比变化曲线在快速上升期保持了接近,最终在稳定后出现了较明显的差距。50圈循环法所得阻尼比总是小于20圈循环法,规范法始终保持了最大的阻尼比计算值,表明随着大循环内单圈循环次数的增加,所得阻尼比会继续保持减小的趋势。由式(1)可见,当大循环内单圈循环次数逐渐增加时,由相应滞回曲线上所确定的最大幅值点 $A(\gamma_m, \tau_m)$ 会逐渐向远离坐标原点的方向偏移,导致计算的 A_T 偏大。随着循环次数的增加,土体动力响应滞后性减弱,单圈循环的滞回曲线面积 A_0 也会逐渐减小,相应大循环的滞回曲线取平均值后面积也会减小,两部分因素共同促进了阻尼比计算数值的降低。

不同计算方法的阻尼比数值随着动应变的增加差异逐渐增大,因此,采用曲线端部动应变最大时对应的阻尼比数值作为比较计算误差的标准,与规范法相比,20圈循环法和50圈循环法的相对计算误差分别在4.3%~9.7%和6.0%~16.2%之间,平均为7.1%和13.2%,均方根误差分别为7.4%和13.7%,误差范围保持在一个较低的水平。为此,可根据所需精度及误差要求,确定大循环内单圈循环的次数,如误差允许范围为 $\pm 5\%$,则根据单圈循环次数与阻尼比数值变化的规律,可以减小单圈循环次数至20次以下并通过验证法调试,至计算量合理的情况下满足误差精度。计算结果表明,该简化方法在精度要求不太高的情况下可以用来计

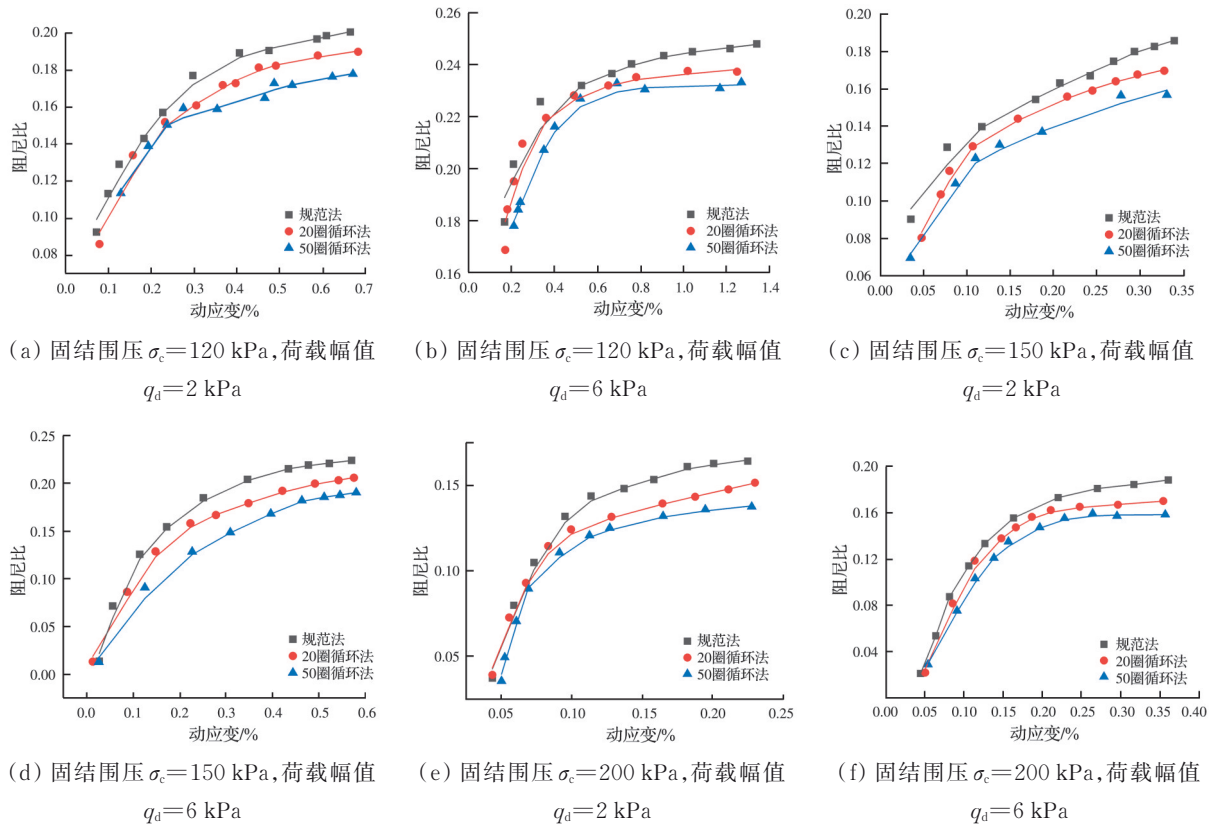


图 7 不同方法下土体动应变-阻尼比变化关系

Fig. 7 Relationship of dynamic strain and damping ratio of soil under different methods

算土体的阻尼比数值,该方法可减少数据处理工作量,使定性分析阻尼比变化情况更加便捷。

5 结论

对淤泥质粉质黏土在不同围压和动荷载幅值的情况下进行了动三轴试验,根据试验数据分析了土体的阻尼比这一动力特性的变化过程,并对土体动应力-应变滞回曲线和阻尼比的计算方法进行简化,得到以下结论:

1) 阻尼比随着动剪应变增加而逐渐增大,在加荷初期阻尼比曲线的斜率较大,曲线快速增长,随着动剪应变的继续增加,阻尼比增长速度逐渐变缓,最终趋于稳定。

2) 固结围压影响土体内部结构,当围压提高时其变得更加紧密,颗粒相互运动滑滚所消耗的动能变少,土体的阻尼比随着固结围压的增加而降低。

3) 随着动荷载幅值的增加,土体的阻尼比逐渐增大,且固结围压越小时,不同荷载幅值下的阻尼比差异越明显。

4) 可采用以动三轴试验数据中多圈循环作为单个大循环的方法简化阻尼比计算。将简化方法与规范法计算所得阻尼比进行对比,发现简化方法计算的数值小于规范法结果,且随着大循环内单圈

循环次数的增加,减小更明显,但整体误差范围在 4.3%~16.2% 内。简化方法减少了数据量,降低了计算量,在适当的精度要求下可作为阻尼比计算的一种简化方法。

参考文献

[1] DAS B M, LUO Z. Principles of soil dynamics [M]. 3rd ed. Stanford: Cengage Learning, 2016.

[2] KOKUSHO T. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range [J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 45-60.

[3] KUMAR S S, KRISHNA A M, DEY A. Evaluation of dynamic properties of sandy soil at high cyclic strains [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 99: 157-167.

[4] 刘保健,周加林. 土阻尼比的滞后角测试法[J]. 大坝观测与土工测试, 1995(4): 37-40.
LIU B J, ZHOU J L. Lag angle test method of soil damping ratio [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1995(4): 37-40. (in Chinese)

[5] 罗飞,赵淑萍,马巍,等. 冻结黏土的动力学参数确定方法研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1340-1345.
LUO F, ZHAO S P, MA W, et al. Study of determining the dynamic parameters of frozen clay [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5):

- 1340-1345. (in Chinese)
- [6] 梁珂, 陈国兴, 何杨, 等. 基于相关函数理论的动模量和阻尼比计算新方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1368-1376, 1386.
LIANG K, CHEN G X, HE Y, et al. An new method for calculation of dynamic modulus and damping ratio based on theory of correlation function [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1368-1376, 1386. (in Chinese)
- [7] 魏新江, 庄家煌, 丁智, 等. 地铁循环荷载作用下冻融土滞回曲线及阻尼比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2092-2102.
WEI X J, ZHUANG J H, DING Z, et al. Research on the characteristics of hysteretic curves and damping ratio of frozen-thawed soils under cyclic subway loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2092-2102. (in Chinese)
- [8] 刘超, 屈俊童, 段自侠, 等. 洱海泥炭质土滞回曲线形态特征的定量研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 688-693.
LIU C, QU J T, DUAN Z X, et al. Quantitative research on morphological characteristics of hysteretic curves of peaty soil in Erhai [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 688-693. (in Chinese)
- [9] 庄心善, 王俊翔, 李凯, 等. 风化砂改良膨胀土的滞回曲线特征对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(Sup 2): 3709-3716.
ZHUANG X S, WANG J X, LI K, et al. Comparative study on characteristic of hysteretic curves of expansive soil improved by weathered sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup 2): 3709-3716. (in Chinese)
- [10] 庄心善, 赵汉文, 王俊翔, 等. 循环荷载下重塑弱膨胀土滞回曲线形态特征定量研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1845-1854.
ZHUANG X S, ZHAO H W, WANG J X, et al. Quantitative research on morphological characteristics of hysteretic curves of remolded weak expansive soil under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1845-1854. (in Chinese)
- [11] 焦贵德, 赵淑萍, 马巍, 等. 循环荷载下冻土的滞回圈演化规律[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1343-1349.
JIAO G D, ZHAO S P, MA W, et al. Evolution laws of hysteresis loops of frozen soil under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1343-1349. (in Chinese)
- [12] 李玥. 长期循环荷载下初始静剪应力对粉砂土累积变形的影响[J]. 水科学与工程技术, 2021(3): 8-12.
LI Y. Effect of initial static shear stress on cumulative deformation of silty sand under long-term cyclic loading [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2021(3): 8-12. (in Chinese)
- [13] 郭林, 蔡袁强, 王军, 等. 长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2249-2254.
GUO L, CAI Y Q, WANG J, et al. Long-term cyclic strain behavior of Wenzhou structural soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2249-2254. (in Chinese)
- [14] 宋金良, 刘文程, 陈章毅, 等. 珠江口海洋原结构软土滞回曲线特征研究[J]. 工程勘察, 2015, 43(4): 7-11, 25.
SONG J L, LIU W C, CHEN Z Y, et al. Research on the characteristics of hysteresis curves of marine soft soil with the original structure in Pearl River Estuary [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(4): 7-11, 25. (in Chinese)
- [15] 陈伟, 孔令伟, 朱建群. 一种土的阻尼比近似计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(Sup1): 789-791.
CHEN W, KONG L W, ZHU J Q. A simple method to approximately determine the damping ratio of soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup1): 789-791. (in Chinese)
- [16] 宋东松, 冯震, 金红山, 等. 确定砂土动剪切模量和阻尼比的方法对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1366-1380.
SONG D S, FENG Z, JIN H S, et al. Comparison of methods for determining sand dynamic shear modulus and damping ratio [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1366-1380. (in Chinese)
- [17] 董正方, 翟鹏飞, 曾繁凯, 等. 黄泛区粉砂土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 332-340.
DONG Z F, ZHAI P F, ZENG F K, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of silty soil in the Yellow River flooded area [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(3): 332-340. (in Chinese)
- [18] 张向东, 任昆. 煤渣改良土的阻尼比影响因素试验研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 43-51.
ZHANG X D, REN K. Experimental study on influencing factors of damping ratio of cinder improved soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(10): 43-51. (in Chinese)
- [19] 杨兵明, 刘保国. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 61-67.
YANG B M, LIU B G. Analysis of long-term settlement of shield tunnel in soft soil area under cyclic loading of subway train [J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 61-67. (in Chinese)