

DOI: 10.11779/CJGE2022S2032

变围压循环荷载作用下超固结软黏土阻尼比试验研究

黄珏皓^{1, 2}, 陈健^{*1, 2, 3}, 余颂⁴, 阎晓玲^{5, 1}, 赵永峰⁴, 付晓东^{1, 2}, 马超¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 4. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050;

5. 武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023)

摘要: 通常采用单一轴向循环荷载模拟交通荷载, 然而, 真实的交通荷载引起的应力场包含循环变化的轴向偏应力和围压。除此之外, 部分下卧软黏土是超固结土, 并非正常固结土, 且针对交通荷载作用下软黏土的阻尼比变化规律鲜有研究。因此, 通过对超固结软黏土开展一系列变围压不排水循环加载试验, 对超固结软黏土在变围压循环荷载作用下的阻尼比变化规律进行了研究, 分析了超固结比和循环围压对阻尼比的影响。研究表明: 变围压循环荷载作用下, 不同试验条件对应的归一化阻尼比与累积塑性应变关系曲线相似, 且归一化阻尼比随累积塑性应变的增长逐渐减小。超固结比和循环围压对阻尼比的衰减程度影响显著, 阻尼比随超固结比和循环围压的增大而减小。基于上述试验结果, 建立了一个能反映阻尼比随累积塑性应变变化规律的计算模型。上述研究成果可加深对超固结土在动荷载下阻尼比变化规律的认识, 从而为交通荷载作用下的土体动力反应分析提供试验基础。

关键词: 软黏土; 循环围压; 超固结比; 阻尼比; 累积塑性应变

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0147-04

作者简介: 黄珏皓(1991—), 男, 助理研究员, 主要从事软土动力特性及本构模型方面的研究。E-mail: jhhuang@whrsm.ac.cn。

Experimental study on damping ratio of overconsolidated clay under different cyclic confining pressures

HUANG Jue-hao^{1, 2}, CHEN Jian^{1, 2, 3}, YU Song⁴, YAN Xiao-ling^{5, 1}, ZHAO Yong-feng⁴, FU Xiao-dong^{1, 2}, MA Chao¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National-Local Joint

Engineering Research Center of Underwater Tunneling Technology, Wuhan 430063, China; 4. China Railway Major Bridge

Reconnaissance & Design Institute Co., Wuhan 430050, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic

University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Traffic loading is usually simulated by single cyclic deviator stress. However, the vertical normal stress and horizontal stress acting on the soil elements are all varied cyclically under the traffic loading. Nevertheless, part of the subgrade soil is overconsolidated, rather than normally-consolidated. There are few researches on the development of damping ratio of soft clay under the traffic loading. Hence, a series of cyclic triaxial tests with cyclic confining pressure are conducted on the overconsolidated clay under undrained conditions, and the effects of cyclic confining pressures and overconsolidated ratios on the development of damping ratio are investigated. It is observed that the relationship between the normalized damping ratio and the cumulative axial strain are similar under different test conditions, in which the normalized damping ratio degrades with the increasing cumulative axial strain. Besides that, the overconsolidated ratios and cyclic confining pressures have significant effects on the development of damping ratio: the damping ratio decreases with the increase of the overconsolidated ratio and cyclic confining pressure. Based on that, an empirical formula as a function of the cyclic confining pressure and overconsolidated ratio is proposed to predict the damping ratio. The above results can deepen the understanding of damping ratio of the overconsolidated soft clay under the traffic loading, and provide experimental basis for the dynamic analysis of soils under the traffic loading.

Key words: soft clay; cyclic confining pressure; overconsolidated ratio; damping ratio; cumulative axial strain

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51909259); 国家自然科学基金面上项目(52079135); 中国科学院青年创新促进会项目(2021325)

收稿日期: 2022-12-06

*通信作者(E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

0 引言

长期交通荷载作用下软黏土层发生过大变形,严重影响交通设施的安全运行。因此,有必要对交通荷载作用下软黏土地层中的隧道或基坑工程进行动力响应分析。阻尼比作为一个重要的动力分析参数,可以通过室内试验的方式获取。然而,以往研究中,主要采用恒定围压动三轴试验来获取黏土或砂土的阻尼比。例如, Ishibashi 等^[1]考虑有效固结应力的影响,建立了一个阻尼比计算模型; Lee 等^[2]提出了一个适用于台北黏土的阻尼比计算模型; Ling 等^[3]针对冻土开展了恒定围压动三轴试验,研究了阻尼比随振次的变化规律,并发现了阻尼比随振次的增大呈减小趋势。

另一方面,以往研究中通常采用轴向循环荷载来模拟交通荷载,这一简化与交通荷载引起的真实应力场不相符。实际上,交通荷载引起的真实应力场既包含循环变化的正应力,也包含循环变化的水平应力^[4-5]。当前,许多学者已经开展了大量的变围压循环三轴试验来研究循环围压对土体动力特性的影响。Gu 等^[4]对比分析了有、无循环围压作用下土体的剪切模量变化规律。

从上述的研究成果来看,循环围压对土体动力特性的影响不能忽视。同时,以往研究大多针对正常固结土,对超固结土在变围压循环荷载作用下的动力特性研究较少,对其阻尼比的变化规律更是鲜有研究。因此,本文主要包含了两部分内容:①通过开展变围压动三轴试验,分析循环围压和超固结比对软黏土阻尼比的影响;②基于试验结果,建立一个能描述变围压循环荷载作用下超固结软黏土阻尼比变化规律的经验模型。

1 试验土样及方案

1.1 试验土样

试验所用土样取自宁波地区,取土深度大约为 28.0~30.0 m。按照《土工试验规程:GB/T 50123—2019》可获取天然土样重度为 17.6 kN/m³,天然含水率、液限和塑限分别为 43.9%, 51.5%, 23.3%。

1.2 试验方案

按照《土工试验规程:GB/T 50123—2019》制备重塑试样(直径 38 mm,高 76 mm),并采用真空和反压联合方式对试样进行饱和。当 B 值达到 0.95 以上时,认为达到饱和,此时施加在试样上的反压和围压分别为 300, 320 kPa。为得到不同超固结比的试样,首先,对饱和后的试样施加不同固结应力进行固结,当固结完成时施加在试样上的有效固结应力分别为 100, 200, 400 kPa;随后,降低固结围压对试样进行

卸载,当卸载完成时,施加在所有试样上的有效固结围压均为 50 kPa。通过上述方法,最终可以得到超固结比 OCR 分别为 2, 4, 8 的试样。另一方面,为了得到正常固结土(OCR=1),将饱和后的试样在一定压力下固结,固结完成时施加在试样上的有效固结应力为 50 kPa。随后,关闭排水阀门,开展动力加载试验,振动频率 1 Hz,振动 10000 次。

本试验采用 GDS 变围压动三轴试验系统,该系统可独立控制循环轴向偏应力和循环围压。为模拟交通荷载,试验中循环偏应力和循环围压的加载波形均为半正弦波,且加载波形相位差为 0。另一方面,采用应力路径斜率 η 和循环应力比 CSR 表征循环围压^[5]和循环偏应力^[6],表达式如下:

$$CSR = q^{\text{ampl}} / 2p'_0 = q^{\text{ampl}} / 2\sigma'_3, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{p^{\text{ampl}}}{q^{\text{ampl}}} = \frac{(\sigma_1^{\text{ampl}} + 2\sigma_3^{\text{ampl}}) / 3}{q^{\text{ampl}}} = 1/3 + \frac{\sigma_3^{\text{ampl}}}{q^{\text{ampl}}}, \quad (2)$$

式中, p^{ampl} , q^{ampl} , σ_3^{ampl} 分别表征循环平均主应力幅值、循环偏应力幅值及侧向应力幅值, σ'_3 , p'_0 分别表示固结完成之后的有效固结围压、平均有效正应力。不同试样加载参数见表 1 所示。

表 1 循环三轴试验方案

Table 1 Programs of cyclic triaxial tests

编号	OCR	CSR	$q^{\text{ampl}}/\text{kPa}$	$\sigma_3^{\text{ampl}}/\text{kPa}$	η
C01	1	0.35	35	24	1.00
C02	2	0.35	35	24	1.00
C03	4	0.35	35	25	1.00
C04	8	0.35	35	24	1.00
C05	4	0.35	35	0	0.33
C06	4	0.35	35	41	1.50
Y01	8	0.35	35	0	0.33
Y02	2	0.35	35	41	1.50
Y03	8	0.35	35	41	1.50
Y04	2	0.35	35	0	0.33

2 试验结果

2.1 循环围压的影响

为便于研究,利用第一次振次对应的阻尼比 D_1 对不同振次对应的阻尼比 D_N 进行归一化处理。图 1 为不同应力路径斜率 η 条件下归一化阻尼比随累积塑性应变 ε_p 的变化曲线。图 1 表明,不同应力路径斜率下的 $D_N / D_1 - \varepsilon_p$ 曲线趋势一致,即 D_N / D_1 随 ε_p 的增长而逐渐减小,同时在变围压应力路径($\eta=1.00, 1.50$)条件下试样阻尼比均小于恒围压应力路径($\eta=0.33$)

下对应阻尼比, 例如当振动次数 $N=10000$, 应力路径斜率 η 为 0.33, 1.0, 1.5 时, 对应的归一化阻尼比分别为 0.17, 0.18, 0.26。

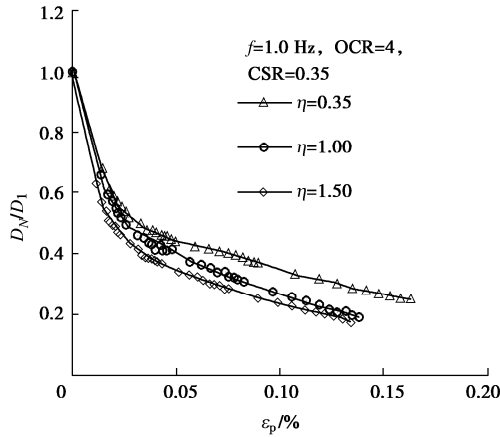


图 1 不同循环围压下归一化阻尼比随累积塑性应变变化曲线

Fig. 1 Relationship between normalized damping ratio and cumulative axial strain under different cyclic confining pressures

2.2 超固结比的影响

当 $CSR=0.35$, 应力路径斜率 $\eta=1.0$ 时, 不同超固结比土样在变围压动三轴试验中阻尼比随累积塑性应变的关系曲线与图 1 类似。不同超固结比土样对应的归一化阻尼比均随累积塑性应变的增加逐渐减小, 且衰减速率呈减小趋势。一定累积塑性应变条件下, 归一化阻尼比的衰减量随超固结比的增大而增大, 意味着正常固结土的归一化阻尼比较超固结土的归一化阻尼比大。例如, 当试验完成时, 正常固结土的归一化阻尼比为 0.34, 而超固结比 $OCR=2, 4, 8$ 时对应的归一化阻尼比分别为 0.27, 0.19, 0.18, 归一化阻尼比随超固结比 OCR 由 1 增大至 8 时, 分别减少了 20.6%, 44.1%, 47.1%。

2.3 阻尼比模型

基于上述试验结果, 本文提出了一个可以考虑阻尼比随累积塑性应变的变化规律的表达式:

$$\frac{D_N}{D_1} = \frac{1}{1 + (a\varepsilon_p)^b} \quad (3)$$

式中, 参数 a, b 为拟合参数, 受循环围压和超固结比影响, D_N, D_1 分别为第 N 次和第 1 次循环对应的阻尼比。

利用式 (3) 对试验结果进行拟合, 得到不同试验条件下对应的拟合参数取值。在此基础上, 为进一步研究参数 a, D_1 与应力路径斜率 η 、超固结比 OCR 的关系, 假设超固结比和循环围压对上述两个参数的影响独立, 则有:

$$a = a_1(OCR)a_2(\eta) \quad (4)$$

$$D_1 = D_{11}(OCR)D_{12}(\eta) \quad (5)$$

式中, a_1, D_{11} 表征超固结比的影响, a_2, D_{12} 表征循环围压的影响。

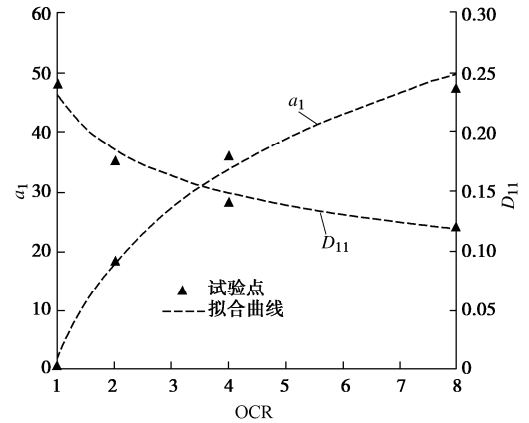


图 2 拟合参数随超固结比变化曲线

Fig. 2 Relationship between fitting parameters and OCR

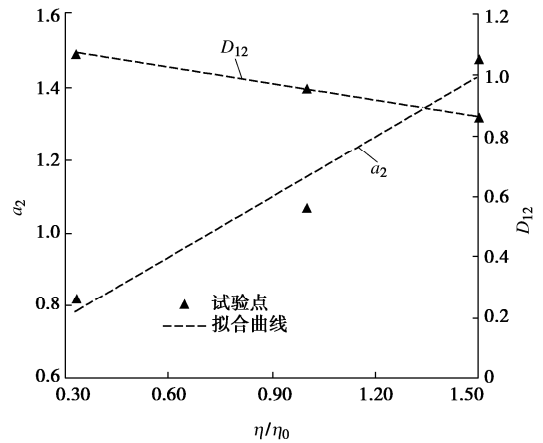


图 3 拟合参数随应力路径斜率变化曲线

Fig. 3 Relationship between fitting parameters and η/η_0

进一步的, 对相同应力路径斜率, 不同超固结比试验条件下得到的拟合参数 a_1, D_{11} 进行分析, 建立上述两个拟合参数分别和超固结比的相关关系, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 参数 a_1, D_{11} 分别与 OCR 满足对数和幂函数关系:

$$a_1 = 22.834 \ln OCR + 2.162 \quad (6)$$

$$D_{11} = 0.232 OCR^{-0.321} \quad (7)$$

然后, 为了考虑循环围压的影响, 需要先将超固结比的影响从式 (4), (5) 中去除。当应力路径斜率 $\eta=1.00$, 超固结比 $OCR=4$ 时, 通过式 (6), (7) 可以得到对应的 a_1, D_{11} 值分别为 33.817 和 0.149, 则超固结比 $OCR=4$, 应力路径斜率 $\eta=0.33, 1.00, 1.50$ 时对应的拟合参数 a, D_1 分别利用 33.817 和 0.149 进行归一化, 即为 a_2, D_{12} 的取值。最后, 即可得到归一化参数 a_2, D_{12} 分别随归一化应力路径斜率 ($\eta/\eta_0, \eta_0=1.00$) 的关系曲线, 见图 3 所示, 从图中可以看出, 参数 a_2, D_{12} 与 η/η_0 满足线性关系:

$$a_2 = 0.555\eta/\eta_0 + 0.602, \quad (8)$$

$$D_{12} = -0.177\eta/\eta_0 + 1.131. \quad (9)$$

由于参数 b 随超固结比 OCR 的变化没有一致性规律, 且其变化量较小。因此, 为方便模型的使用, 式 (3) 中参数 b 取一定值, 即 $\bar{b}=0.677$ 。

最后将式 (6), (7), (8), (9) 和 \bar{b} 代入式 (3) 中即可得到不同超固结土在变围压循环荷载作用下阻尼比与累积塑性应变的关系表达式:

$$D_N = \frac{0.232\text{OCR}^{-0.321} \cdot (-0.177\eta/\eta_0 + 1.131)}{1 + [(22.834\ln \text{OCR} + 2.162) \cdot (0.555\eta/\eta_0 + 0.602) \cdot \varepsilon_p]^{0.677}} \quad (10)$$

将不同试验条件对应的 OCR 和 η 代入式 (10) 中, 即可得到不同试验条件下阻尼比的计算值随累积塑性应变的变化曲线, 见图 4 所示。从图 4 可以看出, 由式 (10) 得到的阻尼比计算值与试验值较为接近, 表明式 (10) 能够较好地描述阻尼比随累积塑性应变的变化规律。

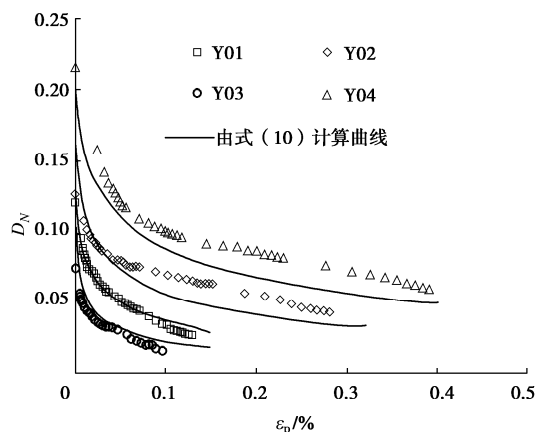


图 4 拟合和实测的 $D_N - \varepsilon_p$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison between measured and predicted curves of $D_N - \varepsilon_p$

3 结 论

(1) 不论试验条件如何, 归一化阻尼比均随累积塑性应变的增大而减小。循环围压和超固结比对归一化阻尼比的变化规律有一定影响, 且归一化阻尼比

随循环围压和超固结比的增大而减小。

(2) 不同超固结土在变围压循环荷载作用下, 其归一化阻尼比和累积塑性应变满足关系表达式 $D_N/D_1 = 1/[1 + (a\varepsilon_p)^b]$ 。

(3) 超固结比和循环围压对阻尼比的影响由拟合参数 a , D_1 体现, 其中表征超固结比影响的参数 a_1 , D_{11} 与超固结比 OCR 分别满足对数和幂函数关系, 而表征应力路径斜率影响的参数 a_2 , D_{12} 则随应力路径斜率 η 的变化分别呈线性增长和线性减小关系。

参考文献:

- [1] ISHIBASHI I, ZHANG X. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(1): 182 - 91.
- [2] LEE C J, SHEU S F. The stiffness degradation and damping ratio evolution of Taipei Silty Clay under cyclic straining[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(8): 730 - 740.
- [3] LING X Z, LI Q L, WANG L N, et al. Stiffness and damping ratio evolution of frozen clays under long-term low-level repeated cyclic loading: experimental evidence and evolution model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 45 - 54.
- [4] GU C, GU Z Q, CAI Y Q, et al. Dynamic modulus characteristics of saturated clays under variable confining pressure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(5): 729 - 735.
- [5] CAI Y Q, GU C, WANG J, et al. One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(5): 797 - 809.
- [6] SAKAI A, SAMANG L, MIURA A. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 - 46.

(编校: 明经平)