

DOI: 10.11779/CJGE2021S2058

变围压循环荷载作用下超固结软黏土变形特性试验研究

黄珏皓^{1,2,3,4}, 王应武⁵, 陈健^{*1,2,3,4,6,7}, 刘府生⁸, 侯丰⁸, 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. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 岩土力学与工程国家重点实验室宁波工程学院工程软土实验中心,
浙江 宁波 315211; 5. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021; 6. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡, 巴基斯坦;
7. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 8. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

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超固结软黏土变形特性的研究较少。因此, 通过对超固结软黏土开展一系列变围压不排水循环三轴试验, 对超固结软黏土在变围压循环荷载作用下的累积轴向应变变化规律进行了研究, 分析了超固结比和循环围压对累积轴向应变的影响。研究表明: 变围压循环荷载作用下, 不同循环围压幅值和超固结比条件对应的累积轴向应变与振动次数关系曲线相似。超固结比和循环围压对累积轴向应变的影响显著, 循环围压和超固结比对土体累积轴向应变的发展均存在较为明显的抑制作用, 具体为与恒围压循环荷载作用下土体累积轴向应变相比, 当应力路径斜率 η 为 1.00, 1.50 时, 其对应的累积轴向应变分别减少了 7.7%, 15.8%; 当超固结比 OCR 从 1 增至 8 时, 超固结土和正常固结土对应累积轴向应变比从 0.122 减少至 0.040。上述研究成果可加深对超固结土在交通荷载作用下变形规律的认识, 从而为交通荷载作用下超固结土长期变形预测方法的建立奠定试验基础。

关键词: 软黏土; 循环围压; 超固结比; 累积轴向应变

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)S2-0245-04

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 deformation behaviors of overconsolidated clay under cyclic confining pressure

HUANG Jue-hao^{1,2,3,4}, WANG Ying-wu⁵, CHEN Jian^{1,2,3,4,6,7}, LIU Fu-sheng⁸, HOU Feng⁸, 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. Hubei Key Laboratory of Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. The Soft Soil Research Center in Ningbo University of Technology, State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Ningbo 315211, China; 5. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 6. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan; 7. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunneling Technology, Wuhan 430063, China; 8. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, 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 traffic loading. Nevertheless, part of the subgrade soil is overconsolidated, rather than normally-consolidated. There are few researches on the development of the accumulated axial strain of the overconsolidated soft clay under traffic loading. Recognizing this, a series of cyclic triaxial tests with cyclic confining pressures are conducted on overconsolidated clay under undrained conditions, and the effects of the cyclic confining pressures and overconsolidated ratios on the development of accumulated axial strain are investigated. It is observed that the relationship between the accumulated axial strain and the number of cycles are similar under different test conditions, in which the accumulated axial strain increases rapidly at the beginning of tests and increases with a decreasing rate to

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(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(2021325)

收稿日期: 2021-08-15

***通信作者** (E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

achieve a stable value. Besides that, the overconsolidated ratios and cyclic confining pressures have a significant effect on the development of the accumulated axial strain: both the cyclic confining pressure and the overconsolidation ratio inhibit the development of the accumulated axial strain. By comparing with the accumulated axial strain obtained under cyclic triaxial tests with the constant confining pressure, the accumulated axial strain decreases by 7.7% and 15.8% when the slopes of stress path are 1.0 and 1.5, respectively. Additionally, the accumulated axial strain ratio of the overconsolidated soft clay and normal consolidated clay decreases from 0.122 to 0.040 as the overconsolidated ratios increases from 1 to 8. The above research results may deepen the understanding of the deformation evolution of the overconsolidated soil under traffic loading, and provide experimental basis for the establishment of prediction formula for the deformation of the overconsolidated soil under traffic loading.

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

0 引言

针对交通荷载作用下软黏土变形规律的研究,以往主要是通过室内试验对不同因素的影响展开分析,并在试验结果基础上提出了许多累积应变预测模型^[1]。其中,运用最为普遍的累积应变计算模型是 Monismith 等^[2]提出的指数型模型,然而,该模型在较大振次时得到的累积应变预测值较实测值大,这与实际情况不相符合。为了尽可能较为真实的预测累积应变,许多学者将加载频率,固结围压,循环偏应力,振动次数和土体强度等参数对累积应变的影响予以考虑,对该指数型模型进行了修正,提出了一些新的累积应变预测模型^[3]。

另一方面,交通荷载引起的真实应力场不仅包含循环变化的正应力,还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。如 Sun 等^[4]研究了部分排水条件下土体在变围压循环荷载作用下的变形特点并发现较大的循环围压幅值能产生较大的土体永久变形。

从上述研究成果来看,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。因此,本文的研究目的是通过开展变围压动三轴试验,采取定量和定性分析相结合的方式对变围压循环荷载作用下超固结软黏土的累积轴向应变变化规律进行研究,主要包含两部分内容:①通过开展变围压动三轴试验,定性分析循环围压和超固结比对软黏土累积轴向应变的影响;②基于试验结果,定量分析循环围压和超固结比对土体累积轴向应变的影响。通过上述研究成果以加深对超固结软黏土在交通荷载下累积轴向应变变化规律的认识,从而为交通荷载作用下超固结土的长期变形预测方法的建立奠定试验基础。

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)》可获取土样的基本物理性质:土样重度 17.6 kN/m³,含水率 43.9%,液、塑限分别为 51.5%, 23.3%,无侧限抗压强度为 50 kPa,土样黏粒($d < 0.005$ mm)含量为 59%,粉粒($0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.075 \text{ mm}$)含量为 41%。

1.2 试验方案

按照《土工试验规程(GB/T 50123—2019)》制备直径 38 mm,高 76 mm 的圆柱重塑试样,并采用真空饱和、反压饱和的联合饱和方式对试样进行饱和。其中,反压饱和过程采用分级加压的加载方式,当 B 检测中 B 值达到 0.95 以上时,认为反压饱和完成。为得到不同超固结比的试样,先将饱和后的试样在不同固结压力下进行第一次固结,固结完成时相应的有效固结应力分别为 100, 200, 400 kPa,然后降低固结围压对试样再次进行固结,待二次固结完成时,作用在所有试样的有效固结围压均为 50 kPa。最终得到超固结比 OCR 分别为 2, 4, 8 的试样;对于正常固结土而言(OCR=1),试样只进行一次直接在一定压力下进行固结,待固结完成时,即为超固结比 OCR=1 的正常固结土,此时对应的有效固结应力亦为 50 kPa。随后,关闭排水阀门,对不同超固结比试样进行动力加载试验,振动频率 1 Hz,振次 10000 次。

本试验采用 GDS 变围压动三轴试验系统。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,采用文献[5, 6]中对循环偏应力幅值和循环围压幅值的表征方法,来描述循环偏应力幅值和循环围压幅值对 p - q 应力平面内应力路径的影响,其表征参数分别为应力路径斜率 η 和循环应力比 CSR。其中, η 和 CSR 的表达式:

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

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

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_o' 分别表示固结完成之后的有效固结围压、平均有效正应力。

结合已有成果, 拟定循环应力比 CSR 为 0.35, 应力路径斜率 η 分别为 0.33, 1.00, 1.50。其中 $\eta=0.33$ 代表恒定围压动三轴试验, η 为 1.0, 1.5 则为变围压动三轴试验。本文试验加载路径见图 1 所示。

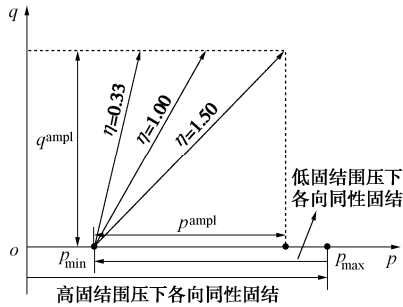


图 1 变围压动三轴应力路径

Fig. 1 Stress paths in cyclic triaxial tests

2 试验结果

2.1 累积轴向应变的定性分析

不同应力路径斜率 η 条件下, 超固结比土 (OCR=8) 累积轴向应变 ε_p 随振次 N 变化曲线见图 2 所示。从图 2 可以看出, 不同应力路径斜率下的 $\varepsilon_p - N$ 曲线趋势一致, 即 ε_p 随 N 的增长先快速增长, 后以不断减小的累积速率继续增长直至稳定值。与此同时, 在变围压应力路径条件下试样累积塑性应变均小于恒围压对应的累积塑性应变, 且相同振次条件下, 土样累积轴向应变随循环围压幅值的增大而减小。图 3 为 CSR=0.35, 应力路径斜率 η 为 1.5 时, 不同超固结比土样在变围压动三轴试验中累积轴向应变随振次的关系曲线。从图 3 可以看出, 不同超固结比土对应的累积塑性应变随振次变化曲线与图 2 类似。同时, 相同试验条件下, 累积轴向应变随超固结比的增加而减小。

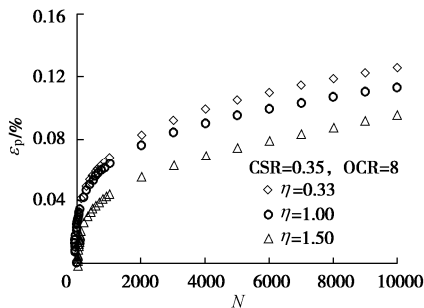


图 2 不同循环围压下累积轴向应变随振次变化曲线

Fig. 2 Variation of accumulated axial strain with number of cycles under different cyclic confining pressures

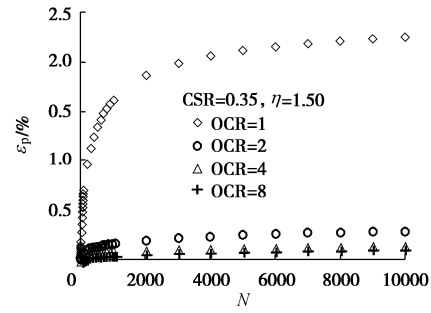


图 3 不同超固结土累积轴向应变随振次变化曲线

Fig. 3 Relationship between accumulated axial strain and number of cycles under different overconsolidated ratios

2.2 累积轴向应变的定量分析

为定量分析超固结土变围压动三轴试验中, 循环围压对土体累积轴向应变的影响, 基于试验结果, 以相同循环次数对应的恒围压和变围压循环荷载作用下的累积轴向应变分别作为横坐标、纵坐标, 即可得到恒围压和变围压循环荷载作用下累积轴向应变关系曲线 (图 4), 相同振次 η 为 0.33, 1.50 时对应的累积轴向应变关系曲线与图 4 类似。其中 η 为 0.33, 1.00, 1.50 时对应的累积轴向应变分别为 $\varepsilon_{p,\eta=1/3}$, $\varepsilon_{p,\eta=1.0}$, $\varepsilon_{p,\eta=1.5}$ 。可以看出, 无论土体是正常固结土还是超固结土, 变围压循环荷载作用下土体累积轴向应变与恒围压循环荷载作用下得到的累积轴向应变呈线性关系, 其关系表达式为

$$\varepsilon_{p,\eta=1.0} = 0.923\varepsilon_{p,\eta=1/3}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{p,\eta=1.5} = 0.842\varepsilon_{p,\eta=1/3}. \quad (4)$$

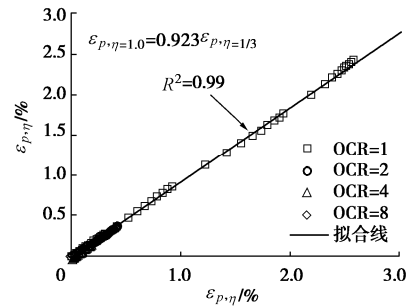


图 4 恒围压和变围压条件下累积轴向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship between accumulated axial strain under VCP tests and that under CCP tests

由式 (3), (4) 可以看出, 与恒定围压下累积轴向应变相比, 应力路径斜率 η 为 1.00, 1.50 时对应的累积轴向应变分别减少了 7.7%, 15.8%。意味着循环围压对超固结土的累积轴向应变具有限制作用, 且当循环围压增大时, 这种限制作用也愈加明显。这一结果与图 2 保持一致。进一步根据式 (3), (4) 得到 $\varepsilon_{p,VCP} / \varepsilon_{p,CCP}$ 与 η 的关系曲线, 即

$$\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP} = A(\eta - 1/3) + 1, \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_{p,VCP}$, $\varepsilon_{p,CCP}$ 分别为变围压和恒围压条件下产生的累积轴向应变; A 表征 $\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP}$ 随 η 的衰减速率, 通过回归分析可以得到 $A = -0.130$ 。

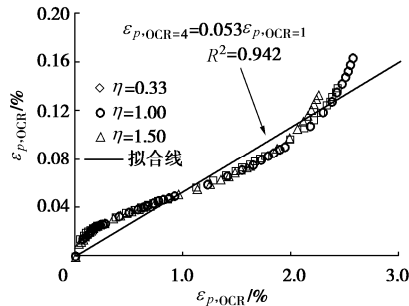


图 5 超固结土和正常固结土累积轴向应变关系曲线

Fig. 5 Relationship between accumulated axial strain of overconsolidated soil and that of normal consolidated soil

同理, 以超固结比 $OCR=4$ 时变围压循环荷载作用下产生的累积轴向应变为例, 可以得到正常固结土和超固结土相同振次条件下累积轴向应变关系曲线, 见图 5 所示。正常固结土和超固结土 ($OCR=2, 8$) 相同振次条件下累积轴向应变关系曲线与图 5 类似。为方便起见, 将不同超固结土对应的累积轴向应变分别表征为 $\varepsilon_{p,OCR=1}$, $\varepsilon_{p,OCR=2}$, $\varepsilon_{p,OCR=4}$, $\varepsilon_{p,OCR=8}$ 。从图中可以看出, 经历 3 种不同应力路径的超固结土样产生的累积轴向应变与正常固结土沿相应应力路径产生的轴向累积轴向应变关系曲线基本满足线性关系, 即

$$\varepsilon_{p,OCR=2} = 0.122\varepsilon_{p,OCR=1}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{p,OCR=4} = 0.053\varepsilon_{p,OCR=1}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{p,OCR=8} = 0.040\varepsilon_{p,OCR=1}. \quad (8)$$

由式 (6) ~ (8) 可以看出, 当超固结比 OCR 从 1 增大至 8 时, 超固结土和正常固结土的累积轴向应变比 $\varepsilon_{p,OCR}/\varepsilon_{p,OCR=1}$ 从 0.122 减少至 0.040。意味着超固结比的存在抑制了土体累积轴向应变的发展, 且超固结比越大, 对应的累积轴向应变越小。这一结果与图 3 保持一致。结合式 (6) ~ (8) 得到 $\varepsilon_{p,OCR}/\varepsilon_{p,OCR=1}$ 与 OCR 的关系曲线, 即

$$\varepsilon_{p,OCR}/\varepsilon_{p,OCR=1} = a(OCR^b - 1) + 1, \quad (9)$$

式中, a , b 为两个拟合参数, 通过回归分析可以得到

a , b 的取值分别为 0.957, -3.583。

3 结 论

(1) 相对于恒围压循环荷载作用下产生的累积轴向应变而言, 变围压循环荷载作用下, 当 η 为 1.00, 1.50 时, 其对应的累积轴向应变分别减少了 7.7% 和 15.8%。同时, 有无循环围压作用下得到的累积轴向应变比随应力路径斜率的增大呈线性减小关系。

(2) 累积轴向应变的发展受超固结比的影响也较为明显。当超固结比 OCR 从 1 增至 8 时, 超固结土和正常固结土对应累积轴向应变比从 0.122 减少至 0.040。同时, 该应变比与超固结比满足幂函数关系, 且随超固结比的增大迅速衰减。

参考文献:

- [1] SAĞLAM S, BAKIR B S. Cyclic response of saturated silts[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61/62: 164 - 175.
- [2] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975(537): 1 - 17.
- [3] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [4] SUN L, GU C, WANG P. Effects of cyclic confining pressure on the deformation characteristics of natural soft clay[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 78: 99 - 109.
- [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 N. 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: 胡海霞)