

DOI: 10.11779/CJGE2017S2018

# 双向激振循环荷载和振动频率共同作用下饱和软黏土孔压试验研究

黄珏皓<sup>1, 2</sup>, 陈健<sup>1, 2</sup>, 柯文汇<sup>3</sup>, 钟宇<sup>4</sup>, 邱岳峰<sup>1, 2</sup>

(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. 武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430023; 4. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 利用 GDS 变围压动三轴试验系统模拟真实交通荷载下轴向循环正应力与水平循环正应力的耦合作用, 对宁波饱和重塑软黏土进行一系列变围压不排水循环加载试验, 对循环轴向偏应力和循环围压耦合作用下饱和软黏土的孔压变化规律进行了研究, 分析了循环应力比、循环围压及振动频率对孔压的影响。研究表明: 变围压作用下, 孔压随循环应力比、循环围压的增加而增大, 随振动频率的增加而减小。不同应力路径斜率、振动频率影响下, 孔压率随加载时间的变化规律一致, 循环应力比 CSR、应力路径斜率  $\eta$  对孔压率-时间关系影响明显, 随着循环应力比 CSR、应力路径斜率  $\eta$  的增大, 孔压率也增大, 而振动频率对孔压率-时间关系影响不显著。在上述试验结果基础上得知, 估算交通荷载作用下产生的孔压, 不能忽视循环围压及振动频率的影响。

**关键词:** 宁波黏土; 循环应力比; 循环围压; 振动频率; 孔压

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0071-04

**作者简介:** 黄珏皓(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事软土动力特性及本构模型方面的研究。E-mail: huangjuehao1234@163.com。

## Coupling effects of bidirectional cyclic loading and loading frequency on pore water pressure of saturated soft clay

HUANG Jue-hao<sup>1, 2</sup>, CHEN Jian<sup>1, 2</sup>, KE Wen-hui<sup>3</sup>, ZHONG Yu<sup>4</sup>, QIU Yue-feng<sup>1, 2</sup>

(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. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430023, China; 4. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430030, China)

**Abstract:** A series of undrained cyclic tests with variable confining pressures are conducted on Ningbo saturated soft clay by using the GDS cyclic triaxial system. In this study, the coupling effects of cyclic deviatoric stress and cyclic confining pressure on the pore water pressure of Ningbo saturated soft clay in real traffic loading are simulated. The developments of pore water pressure of saturated soft clay subjected to bidirectional cyclic loading are investigated with different cyclic stress ratios, cyclic confining pressures and vibration frequencies. It is observed that the pore water pressure increases with higher cyclic stress ratios and cyclic confining pressure, but decreases with higher frequencies under bidirectional cyclic loading. The relationships between pore water pressure ratio and cyclic time are identical under different values of  $\eta$  and frequencies. The slope of stress paths  $\eta$  and cyclic stress ratios CSR affect the relationship between pore water pressure ratio and cyclic time significantly, and the pore water pressure ratio increases with the increase of  $\eta$  and CSR. However, the effect of frequency on the curves of pore water pressure ratio and loading time is indistinct. The observations imply that the coupling effects of cyclic confining pressure and loading frequency on the pore water pressure should also be considered to estimate the values of pore water pressure.

**Key words:** Ningbo clay; cyclic stress ratio; cyclic confining pressure; loading frequency; pore water pressure

## 0 引言

饱和软黏土在循环荷载作用下, 孔压的变化规律是利用有效应力原理进行动力分析的关键, 对土体变形和强度变化会产生重要影响<sup>[1]</sup>。孔隙水压力的积累

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2015CB057905); 中国科学院科技服务网络计划(STS)(KFJ-EW-ST-122); NSFC-云南联合基金重点支持项目(U1402231)  
收稿日期: 2017-08-02

过程使土层发生软化现象,消散过程造成累积沉降增加,过大的附加沉降将严重威胁交通设施的安全运行。

目前,国内外对软黏土在循环荷载作用下的孔压变化规律进行了大量的研究工作:一部分学者依据试验结果,利用特定函数对动孔压与影响因素之间的关系进行数学拟合,从而得到估算动孔压的经验公式<sup>[1-2]</sup>;也有部分学者基于对动孔压变化机制的不同认识而建立相应计算模型,如 Cao 等<sup>[3]</sup>建立的孔压随能量变化的计算模型;也有部分学者将用于描述砂土在循环荷载作用下孔压变化的一些经典理论移植到对饱和软黏土孔压变化规律的描述中,如有效应力模型和内时模型等<sup>[4]</sup>。但目前有关交通荷载引起的动应力场的研究结果表明,交通荷载作用下土体单元不仅承受循环变化的轴向正应力,还承受同样循环变化的水平正应力<sup>[5]</sup>,而以往针对交通荷载作用下饱和软黏土孔压变化规律的研究仅仅考虑了循环变化轴向正应力的影响,并未真实反映交通荷载的作用特点。当前已进行的变围压动三轴试验结果表明,循环围压的存在对软黏土的动力特性具有显著影响<sup>[6]</sup>。另外,列车荷载作用下土体将受到不同振动频率动荷载的作用<sup>[7]</sup>,而目前未见有变围压应力路径下考虑振动频率影响的宁波软黏土孔压变化规律的研究。

因此,本文利用 GDS 变围压试验系统,针对交通荷载的作用特点对轴向纯压和径向纯压耦合作用下宁波饱和重塑软黏土的孔压变化规律进行了研究,分析了循环应力比、循环围压及振动频率对孔压变化规律的影响,以加深对宁波软黏土在动荷载下孔压变化规律的认识,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。

1 试验土样及方案

1.1 试验土样

试验所用土样取自宁波轨道交通 3 号线姜山地区,埋深约为 28.0~30.0 m,土样呈深灰色。试验所用软黏土的黏粒( $d<0.005\text{ mm}$ )含量为 59%,粉粒( $0.005\text{ mm}\leq d\leq 0.075\text{ mm}$ )含量为 41%,其基本物理特性见表 1 所示。由表 1 可见,宁波软黏土具有较高含水率、大孔隙比的特点;同时该黏土压缩系数为  $0.81\text{ MPa}^{-1}$ ,灵敏度为 3.5~5.0,说明试验用土是一种中等灵敏性且压缩性较强的黏土。

表 1 宁波黏土基本物理性质

| Table 1 Physical properties of Ningbo clay   |               |                |                |                |   |            |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|---|------------|
| 重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 含水率<br>$w/\%$ | 液限<br>$w_L/\%$ | 塑限<br>$w_p/\%$ | 塑性<br>指数 $I_p$ | 渗透系数 $K$<br>$/(10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 孔隙比<br>$e$ |
| 17.6   | 43.9          | 51.5           | 23.3           | 28.2           | 5.18  | 1.25       |

1.2 试验方案

按照《土工试验规程》制备重塑样,试样直径为 38 mm,高 76 mm。采用真空饱和、反压饱和联合饱和方式,待  $B$  检测中的  $B$  值大于 0.95 方可进行下一步固结试验,本文所有试样均采用等向固结,固结有效围压为 100 kPa,当超静孔隙水压力完全消散时,认为土样固结完成,然后进行动力加载试验。在动力加载过程中,由于试验所用软黏土的渗透系数较低,可认为处于不排水状态,故在动力加载过程中关闭排水阀。

本试验采用 GDS 变围压动三轴试验系统,独立控制围压和轴向偏应力,并设定循环围压和循环轴向偏应力加载波形均为半正弦波且相位差  $\theta$  为 0。为了衡量循环轴向偏应力、循环围压的应力水平,引入文献[2]和文献[6]中对应力水平的表示方法,记表征循环轴向偏应力、循环围压应力水平的参数分别为循环应力比 CSR、应力路径斜率  $\eta$ ,即

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

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

式中  $p^{amp}$ ,  $q^{amp}$ ,  $\sigma_3^{amp}$  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,  $\sigma'_3$ ,  $p'_o$  分别表示固结完成之后的有效侧向应力、平均有效正应力。

由式(1)、(2),根据预先设定的循环应力比 CSR、应力路径斜率  $\eta$  值,可计算变围压动三轴试验中所需轴向偏应力幅值及对应循环围压幅值。在  $p-q$  平面,当循环轴向偏应力幅值保持恒定,不同循环围压幅值会形成不同的应力路径,所采用的应力路径如图 1 所示。文献[8]中针对宁波软黏土进行的恒定围压动三轴试验中采用 0.73, 1.22 Hz 两种振动频率来研究两种车速条件对土体动力特性的影响,而列车振动荷载频率随车厢荷重、轮组间距的不同而不断变化<sup>[7]</sup>,因此有必要研究较高振动频率影响下宁波软黏土的动力特性。但受试验仪器本身性能限制,所用仪器最大施加频率为 5 Hz,且试验过程中不能独立控制循环偏应力和循环围压的振动频率,而较高的振动频率将造成循环围压波形不稳定,对试验结果造成一定影响。因此本文基于上述考虑,将双向激振动力试验中的循环偏应力和循环围压的振动频率设置一致,拟定在试验过程中施加 3 个频率: 0.5, 1.0, 2.0 Hz。另一方面由式(1)、(2)看出,循环应力比的取值不仅可以反映循环偏应力的水平,也间接影响循环围压幅值的大小。循环应力比过小,试验中循环偏应力及循环围压的幅值均较小,循环偏应力和循环围压加载波形的稳定性和完整性将受到一定影响;循环应力比过大,试样在循环加载过程中可能在较少振次下发生较大变形并最

终破坏, 导致孔压的测量不够完整。除此之外, 围压控制器内密封圈的密封性能与循环围压幅值大小密切相关, 循环围压幅值过大对密封圈造成较为严重的磨损, 对循环围压的稳定加载会造成一定影响。因此基于上述考虑, 结合已有研究成果<sup>[6]</sup>并经反复测试, 拟定循环应力比 CSR 分别为: 0.20, 0.25, 0.30; 应力路径斜率  $\eta$  分别为: 1/3, 1.0, 1.5。其中  $\eta=1/3$  代表恒定围压动三轴试验。本文总共进行了 15 组试验, 每组试验的具体试验参数列于表 2 中。

表 2 循环三轴试验方案

| Table 2 Programs of cyclic triaxial tests |                         |            |      |             |          |
|---|-------------------------|------------|------|-------------|----------|
| 编号  | 固结有效围压 $\sigma'_3$ /kPa | 频率 $f$ /Hz | CSR  | $\eta$      | 振动次数 $N$ |
| F01~F03                                   | 100                     | 0.5        | 0.20 | 1/3, 1, 1.5 | 10000    |
| F04~F06                                   | 100                     | 1.0        | 0.20 | 1/3, 1, 1.5 | 10000    |
| F07~F09                                   | 100                     | 2.0        | 0.20 | 1/3, 1, 1.5 | 10000    |
| F10~F12                                   | 100                     | 1.0        | 0.25 | 1/3, 1, 1.5 | 10000    |
| F13~F15                                   | 100                     | 1.0        | 0.30 | 1/3, 1, 1.5 | 10000    |

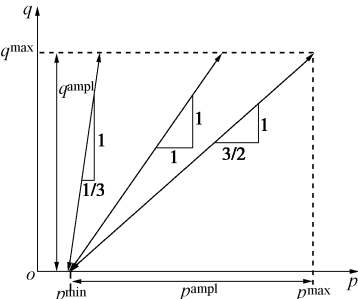


图 1 变围压动三轴应力路径

Fig. 1 Stress paths in cyclic triaxial tests under variable confining pressures

2 试验结果

2.1 循环应力比的影响

图 2 (a) 是应力路径斜率  $\eta=1.0$ , 振动频率  $f=1.0$  Hz 时, 不同循环应力比作用下循环三轴试验得到的最大动孔压随循环次数的变化曲线。不同应力路径斜率条件下, 试样经历不同循环应力比的动孔压试验结果与图 2 (a) 相似, 篇幅所限, 不一一给出。从图 2 中可以看出, 在循环偏应力和循环围压的耦合作用下, 当应力路径斜率  $\eta$ , 振动频率  $f$  相同时, 不同循环应力比 CSR 作用下的最大孔压随振次变化规律一致, 孔压随振次的增加先快速增长, 随后孔压增长速率逐渐减小, 并在一定振次时孔压趋于稳定。不同循环应力比 CSR 作用下试样所产生的最大孔压不尽相同, 相同试验条件下, 孔压随循环应力比的增大而增大。以  $\eta=1.0$  为例, 当振动次数  $N=10000$  时, 循环应力比 CSR 为 0.20, 0.25, 0.30 时, 对应的最大孔压分别为 59.26, 66.77, 85.32 kPa。

为进一步分析相同振动频率及循环围压幅值, 不

同循环应力比作用时, 孔压增长速率随加载时间的变化规律, 以图 2 (a) 为例, 对其数据进行进一步整理, 整理结果见图 3 (a) 所示。图 3 (a) 为不同循环应力比作用下孔压率随时间的变化曲线 (孔压率  $\dot{u}/p'_0 = u/(Tp'_0)$ , 加载时间  $T=N/f$ , 其中  $N$  为循环次数,  $f$  为振动频率)。该图表明, 在循环加载初期, 孔压率较大, 且曲线较为陡峭, 随加载时间的增长, 孔压率显著衰减, 并在一定加载时间后趋于稳定。除此之外, 从图 3 (a) 还可以看出, 相同加载时间, 随着循环应力比的增加, 孔压比也增加, 说明循环应力比的增加对孔压的增长起到了加速作用, 这与图 2 (a) 中不同循环应力比条件下孔压的发展规律保持一致。

2.2 加载频率的影响

以循环应力比 CSR=0.20, 应力路径斜率  $\eta=1.5$  时, 不同振动频率影响下双向激振试验得到的饱和软黏土孔压随振动次数的关系曲线为例, 分析加载频率对动孔压发展规律的影响, 见图 2 (b) 所示。应力路径斜率  $\eta=1/3, 1.0$  时, 不同振动频率条件下的孔压发展规律均与图 2 (b) 类似。从图中可以看出, 不同振动频率影响下孔压随振次关系曲线形态一致, 并与图 2 (a) 类似。除此之外, 从图 2 (b) 中还可以看出, 相同振动次数条件下, 施加在土样上的循环荷载的振动频率越小, 其孔压越大。这是因为软黏土的渗透系数较低, 在较低振动频率作用下, 孔隙水压力有足够长的时间上升, 而在较高振动频率作用下, 孔压没有足够的时间上升。采用图 3 (a) 中研究循环应力比对孔压率变化规律影响的分析方法, 可得到与图 2 (b) 对应的不同振动频率条件下孔压率随加载时间变化曲线, 见图 3 (b) 所示。从图 3 (b) 可以看出, 加载频率对孔压比与加载时间的关系曲线影响不明显, 不同振动频率条件下的孔压率与振动时间关系曲线基本重合。

2.3 循环围压的影响

图 2 (c) 是不排水条件下, 循环应力比 CSR=0.20, 振动频率  $f=1.0$  Hz 时, 不同应力路径斜率下双向激振试验得到的孔压随振次的变化曲线。从图 2 (c) 可以看出, 不同应力路径斜率  $\eta$  下孔压与振次关系曲线形态一致, 同时当其他试验条件相同, 试样在变围压应力路径 ( $\eta=1.0, 1.5$ ) 循环加载下产生的孔压均大于恒定围压 ( $\eta=1/3$ ) 作用下的孔压, 且循环围压的幅值越大 ( $\eta$  越大), 试样产生的最大孔压越大。图 3 (c) 是图 2 (c) 对应的不同应力路径斜率  $\eta$  下软黏土的孔压率随时间变化曲线。从图 3 (c) 可以看出, 应力路径斜率参数  $\eta$  对孔压率具有显著影响, 相同加载时间条件下, 随着  $\eta$  的增大, 孔压率也增大。这说明循环围压的存在不仅造成试样孔压数值的变化, 对试样孔压的累积速率也有一定影响。

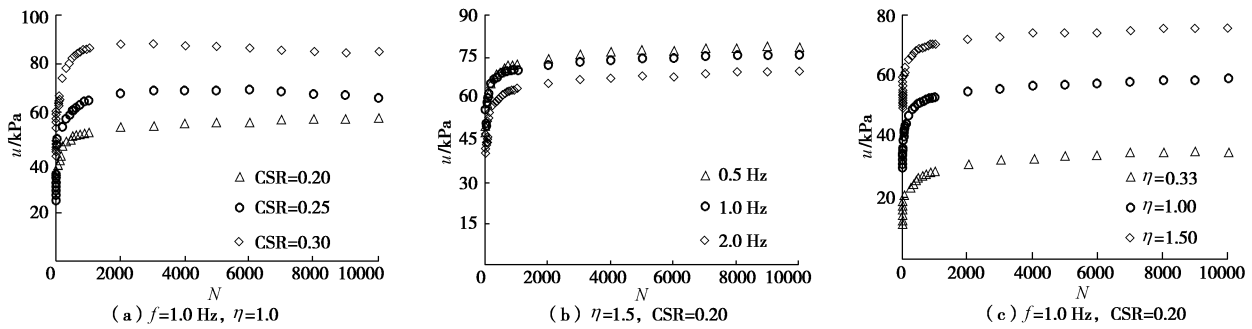


图2 不同加载条件下最大孔压与加载周数的关系

Fig. 2 Variation of maximum pore pressure with number of loading cycles under different loading conditions

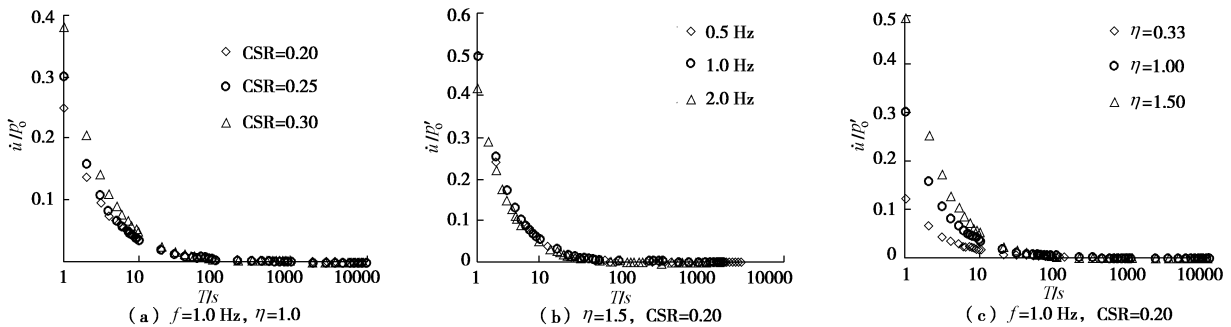


图3 不同加载条件下孔压率随时间变化曲线

Fig. 3 Relationship between pore water pressure rate and time under different loading conditions

### 3 结 论

(1) 不排水条件循环偏应力和循环围压耦合作用下, 最大孔压随振次的增加而增加。相同振动次数条件下, 最大孔压随循环应力比、循环围压幅值的增加而增加, 随振动频率的增加而减小。

(2) 不同振动频率条件下循环偏应力和循环围压耦合试验中, 孔压率随加载时间的变化规律一致。在加载初期, 孔压率较大, 随着加载时间的增加, 孔压率发生陡降, 随后孔压率随时间变化趋于稳定。其中加载频率相同时, 孔压率随循环应力比、应力路径斜率的增大而增大; 而振动频率对孔压率与时间关系曲线的影响不显著, 大部分的试验数据均集中在同一曲线上。

#### 参考文献:

- [1] MATASOVIC N, VUCETIC M. Pore pressure model for cyclic straining of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(3): 156 - 173.
- [2] 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 Foundation, 2003, **43**(1): 33 - 46.
- [3] CAO Y L, LAW K T. Energy dissipation and dynamic behaviour of clay under cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(1): 103 - 111.
- [4] FINN W D L, BHATIA S K. Prediction of seismic pore pressure[C]// On Soil Mechanics and Foundation Division, Rotterdam. The Netherland, 1981: 202 - 206.
- [5] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, **126**(1): 66 - 75.
- [6] CAI Y, 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.
- [7] 张 曦, 唐益群, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(2): 85 - 88. (ZHANG Xi, TANG Yi-qun, Zhou Nian-qing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(2): 85 - 88. (in Chinese))
- [8] 叶俊能, 陈 斌. 海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 55 - 60. (YE Jun-neng, CHEN Bin, Dynamic strength and pore pressure property of marine deposit soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 55 - 60. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)