

刘建民,付海清,郭婷婷,等.不同循环荷载作用下软黏土动力特性对比试验研究[J].地震工程学报,2020,42(4):973-981.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.973

LIU Jianmin, FU Haiqing, GUO Tingting, et al. Comparative Experimental Study on Dynamic Characteristics of Soft Clay under Different Cyclic Loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 973-981. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.973

不同循环荷载作用下软黏土动力特性对比试验研究

刘建民¹, 付海清¹, 郭婷婷¹, 张广成¹, 谷 川², 王 冰³, 宋文智⁴

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035;
3. 山东省电力工程咨询院, 山东 济南 250013; 4. 上海二十冶建设有限公司, 上海 201999)

摘要: 研究交通循环荷载作用下路基软黏土的长期沉降和动力力学性质对路基设计具有重要意义。本文通过 GDS 动三轴实验, 研究(不排水条件下)振动波形、排水条件以及动应力比三因素对于软黏土动应变和动孔压的影响。试验结果显示: 排水条件对饱和软黏土的动应变和动孔压影响最大, 在部分排水条件下动孔压逐渐消散, 动应变迅速发展。振动波形对软黏土动应变和动孔压影响较大, 单向纯压半正弦波作用下软黏土的动应变和动孔压较容易达到最大值。在较少的振次内动应力比对孔压影响较大, 但在归一化的孔压模型中, 动应力比对孔压影响较小。通过以上分析, 本文建立包含循环振次和纯压因素的孔压增长模型。

关键词: 动孔压; 动应变; 动三轴; 孔压模型

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0973-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.973

Comparative Experimental Study on Dynamic Characteristics of Soft Clay under Different Cyclic Loads

LIU Jianmin¹, FU Haiqing¹, GUO Tingting¹, ZHANG Guangcheng¹,
GU Chuan², WANG Bing³, SONG Wenzhi⁴

(1. Shandong Earthquake Agency, Ji'nan 250014, Shandong, China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China;
3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd, Ji'nan 250013, Shandong, China;
4. China MCC20 Group Corp., Ltd, Shanghai 201999, China)

Abstract: Investigation of long-term settlement and dynamic mechanical properties of soft clay under cyclic loads is important to its subgrade design. In this study, we determined the effects of vibration waveform, drainage condition, and dynamic stress ratio on the dynamic strain and dynamic pore pressure of soft clay under undrained condition through GDS dynamic triaxial test. Results show that the drainage condition exhibits the most serious influence on the dynamic strain

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578426); 山东省自然科学基金(ZR2014DQ022); 山东省地震局青年基金项目(JJ1806Y); 山东省地震局重点基金项目(JJ1801)

第一作者简介: 刘建民(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: liujianmin888@163.com。

通信作者: 付海清(1985—), 男, 工程师, 博士, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: haiqing85@163.com。

and dynamic pore pressure of saturated soft clay. Under the condition of partial drainage, the dynamic pore pressure gradually dissipates and the dynamic strain develops rapidly. The vibration waveform also influences the dynamic strain and pore pressure of soft clay, and these parameters easily reach the maximum value under the action of unidirectional pure pressure semi-sine wave. The dynamic stress ratio has a great effect on pore pressure under few vibration times. However, the dynamic stress ratio minimally affects pore pressure in the normalized pore pressure model. Through the above analysis, a pore pressure growth model including the indices of cyclic vibration time and pore pressure, was established.

Keywords: dynamic pore pressure; dynamic strain; dynamic triaxial; pore pressure model

0 引言

近年来,随着高速公路、铁路、地铁等交通工程的大力兴建,此类工程运行引起的地基沉降问题尤为突出。如高速铁路的发展,按照我国铁路中长期发展规划,预计到 2020 年我国 200 km/h 的高速铁路里程将超过 1.8 万公里,高速铁路的安全运行对路基的变形有着严格的要求;交通循环荷载不同于地震荷载,长期的循环作用是引起软弱黏土的沉降问题的重要原因。故交通循环荷载作用下路基黏土的长期沉降和动力力学性质有待于进一步研究。

交通循环荷载作用下,软弱黏土长期沉降的原因在于固结过程中超孔隙水压力的消散。目前,针对黏土、粉土和砂土的研究有所不同^[24],如在特定室内试验基础上,前人对饱和砂土循环荷载下孔压发展的模型类型及试验条件砂土等应力幅循环荷载作用下的孔压增长模式提出的模型约 20 个,根据模型曲线形态划分为指数模型、Seed 模型、双曲线模型等三种曲线模型^[1]。魏新江等^[2]将比较有代表性的循环荷载下饱和软黏土孔压模型及试验条件进行了归纳总结,分为双曲线模型、幂函数模型、负指数模型、对数模型、孔压—应变模型、孔压—应变软化模型等,并建立了考虑孔压滞后的孔压增长拟合模型;沈扬等^[3-4]研究了主应力旋转和突变条件下饱和软黏土孔压特征;年廷凯等^[5]针对南海北部陆坡软黏土进行一系列试验,建立了软黏土软化-孔压模型。

交通循环荷载下土体的残余应变是进行铁路、公路、机场等设计的重要参数。C. L. Monismith 等^[6]基于土体的初始特性、循环应力和循环次数,建立了针对永久应变预测的经验模型;Chai 和 Miura^[7]考虑到土体的初始剪应力,提出一种新的指数经验公式模型,用来预测软黏土路堤在交通荷

载作用下的沉降;Yasuhara 等^[8-9]给出了塑性应变和循环加载次数的半对数模型;国内黄茂松、王军、蒋军、丁智等^[10-13]研究了相对偏应力、超固结比、动应力幅值、固结围压以及振动频率等对软黏土应变发展的影响规律。

在众多孔压、应变模型的研究成果中,多采用拟合程度较高的幂函数模型,但在试验中随着循环次数的增加,孔压和应变都将趋于稳定,存在后期收敛性的问题^[14-19]。前人的动三轴试验多考虑采用既有“拉”又有“压”的正弦荷载和不排水条件下进行加载,但由于地基软土经受长年累月的长期循环作用,严格意义上说,完全不排水条件是不成立的,路基土在长期循环荷载作用下应该是处于半排水或者部分排水状态^[20],故本文加入了部分排水条件下的试样研究。图 1 是根据 Lekarp 等^[21]给出的交通荷载作用下地基土的动应力场示意图,可以清晰地看到交通荷载作用下路基土体的动应力场中不但存在循环剪应力,而且还存在竖向循环正应力,故本文对纯压的半正弦波进行了研究。

鉴于以上原因,本文使用 GDS 动三轴设备,对比波形、排水条件和动应力比对交通荷载作用下软黏土孔压、应变变化的影响,并给出纯压排水条件下不同动应力比的孔压增长模型和软化指数与塑性累积应变的关系。

1 试验仪器及试验方案

1.1 试验土样

试验土样取自广州某高速公路工地,为淤泥质黏土,具有低强度、高压缩性和高含水率的特点。采用薄壁取土器进行取样,土样的基本物理参数如下:密度 ρ 为 1.76 g/cm³,比重 G_s 为 2.74,含水率 ω 为 45.2%,液限 ω_l 为 60.4%,塑限 ω_p 为 29.3%,黏粒含量为 61.2%,细粒含量为 99.4%。

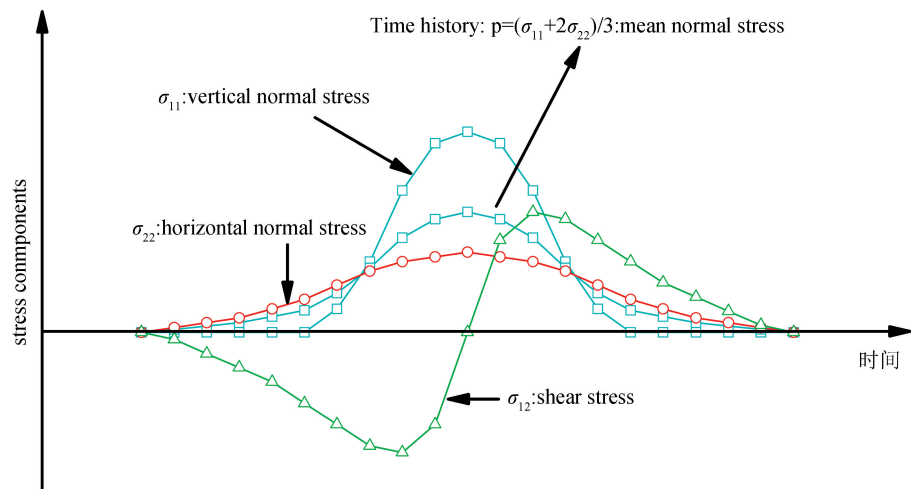


图 1 交通荷载下路基土中的动应力场分布

Fig.1 Distribution of dynamic stress field in subgrade soil under traffic load

1.2 试验内容及方案

试验用仪器为英国 GDS 应力控制式动三轴仪,试样为现场取原状样采用切土器按 50 mm×100 mm 单元体试样切割而成,使用真空泵进行抽真空饱和,在仪器上采用反压饱和,饱和过程中对饱和度进行 B 值检测,饱和度大于 98%之后进行下一步固结试验,当超静孔隙水压力消散到等于反压且每小时排水量小于 6 mm³,认为土样固结完成。

根据 Skempton 的孔压理论,对于不排水条件下饱和土体,各向相等压力增量等于孔隙应力增量,即认为围压的变化即转化为孔压的变化,而对有效应力影响甚小,本文有效围压统一采用 100 kPa;排水条件的选取,文献[13,20]认为土样受橡皮膜包裹后排水路径受到限制,可以认为其处于部分排水状态,故本文的半排水试验是在振动过程中打开排水阀进行试验;陈云敏等^[25]认为交通荷载的动力波频率范围为 0.1~10 Hz,以 1~2 Hz 为主,通过研究

表明当频率在 3 Hz 以下时,频率对土的动力特性影响较小,故本试验选取振动荷载为 1 Hz。同时考虑到高频加载情况下容易出现孔压和应变的滞后性,为了减少仪器数据记录的滞后和量测的滞后本试验采用分级加载,在前 100 圈的振次内每圈记录 50 个数据点,第 101~900 圈每隔 10 圈记录 1 圈 50 个数据点,1 000 圈之后每隔 20 圈记录 1 圈 50 个数据点;振动波形根据 Lekarp 动应力场中应力分布,采用模拟交通荷载最常见的正弦波和纯压下的半正弦波;文献[22]给出了 20 种模拟交通荷载时采用的最大振次,有小于 1 万次的,极少大于 5 万次,本文选取加载循环次数为 10 000、50 000 和 100 000 次;定义动应力比 $\gamma=\sigma_d/2\sigma'_v$,为模拟不同动力加载模式下动应力幅,采用动应力比 γ 为 0.10、0.15 和 0.20;部分排水试验和不排水试验的孔隙水压力均在试样底部测量,测量精度为 0.5 kPa。具体试验方案如表 1 所列。

表 1 加载试验方案

Table 1 Scheme of cyclic triaxial tests

试样编号	σ'_v /kPa	动应力比 r	加载频率/Hz	波形	加载次数 N
U1	100	0.15	1	正弦波	10 000
U2	100	0.15	1	半正弦波	50 000
U3	100	0.20	1	半正弦波	100 000
U4	100	0.10	1	半正弦波	100 000
D1	100	0.15	1	半正弦波	10 000

注:D 表示部分排水试验;U 表示不排水试验

2 试验结果分析

2.1 正弦波及半正弦波条件下的试验结果

图 3、图 4 为动应力比 0.15、不排水条件下振次

为 10 000 圈软黏土的孔压、应变发展曲线;根据数据记录,每 10 000 圈孔压和应变曲线数据记录点超过 25 000 个,故分阶段进行数据处理;图 5 和图 6 为前 1 000 振次的孔压、应变发展曲线。

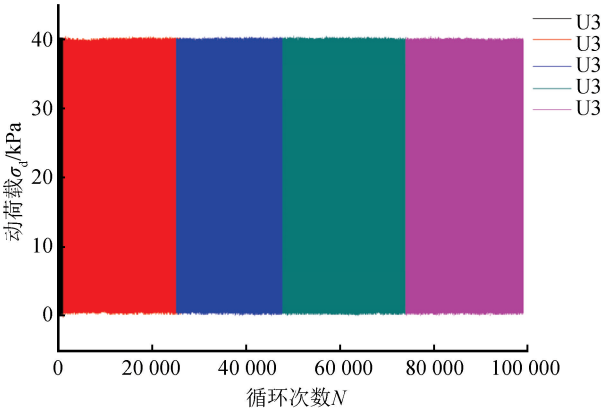


图 2 典型动荷载示意图
Fig.2 Typical dynamic load diagram

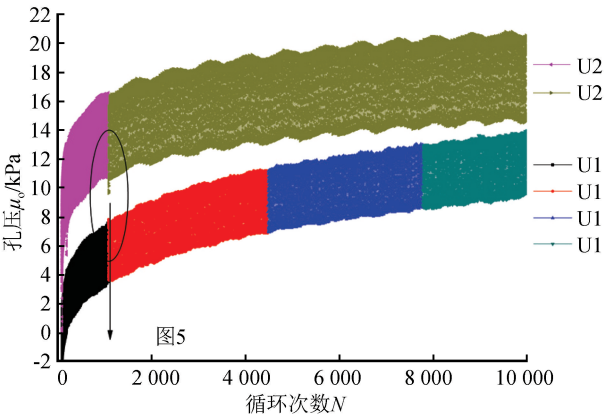


图 3 不同波形孔压发展曲线

Fig.3 Pore pressure curve under different waveform

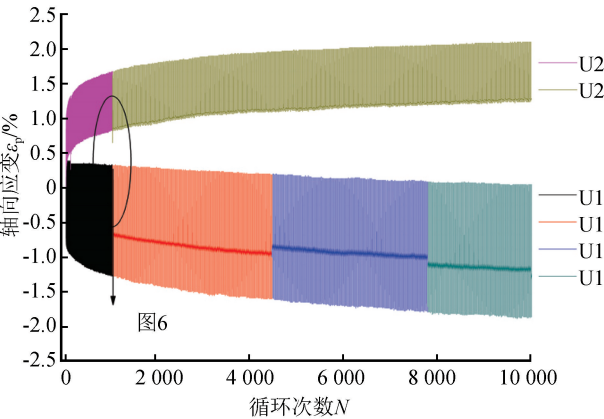


图 4 不同波形轴向应变发展曲线

Fig.4 Axial strain curve under different waveform

从图 3 和图 5 可以看出,不论加载波形如何,在不排水条件下,循环荷载作用下动孔压的发展规律呈现相似性,均随着振次的增大孔压迅速发展,随着循环加载的增加,孔压逐渐稳定。这是由于循环加载初期,黏土的渗透性差,孔压来不及消散,而随着振动次数的增加,孔压的增长速率开始衰减,孔压的

增长与孔压的消散逐步达到平衡,孔压逐步平稳。有所不同的是,正弦波加载下孔压的增长速率与半正弦波加载下孔压的增长速率是有所不同的。如图 5 所示,在前 1 000 个振次,纯压荷载下孔压迅速发展,而双向“拉、压”的正弦波孔压增长较为缓慢;但如图 3 所示,在 5 000 圈之后半正弦的纯压荷载孔压逐步达到稳定,而正弦波加载的 U1 试样孔压还在缓慢上升。

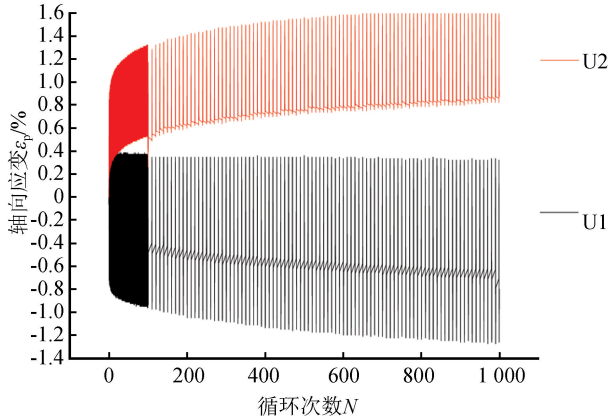


图 5 不同波形孔压发展曲线(1 000 圈)

Fig.5 Pore pressure curve under different waveform (1 000 cycles)

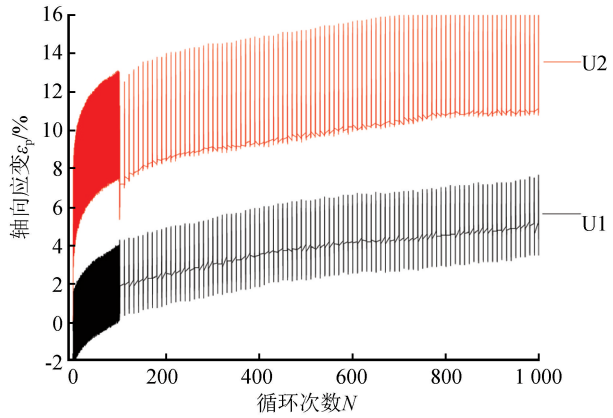


图 6 不同波形轴向应变发展曲线(1 000 圈)

Fig.6 Axial strain curve under different waveform (1 000 cycles)

从图 4 和图 6 可以看出,正弦波加载下应变的增长形式与半正弦波加载下应变的增长形式是有所不同的。如图 4 所示单向纯压的半正弦波试样 U2 应变开始迅速增长,而后逐渐变缓。从图 6 可以看出在 500 个振次之后应变的发展就相当缓慢;而双向“拉、压”的正弦波应变呈现出“拉、压”状态的不均衡发展,这主要是由于动三轴试样的尺寸和受力状态的原因,所谓的“拉”状态是在轴向应力小于侧向围压的挤压状态下产生的,而竖向受力面积要远远大于上下底面的受压面积。为了更直观地对双向正

弦波作用下试样的轴向应变发展进行分析,笔者对 U1 试样的双向应变进行了单向处理,选取每一个振次的最大最小应变计算得到轴向应变的单向变化如图 7 所示,其中小图为前 1 000 振次下应变的变化曲线,与 U2 试样不同的是,双向“拉、压”的正弦波试样应变发展更为均衡,在 10 000 振次内应变的发展仍未平稳。

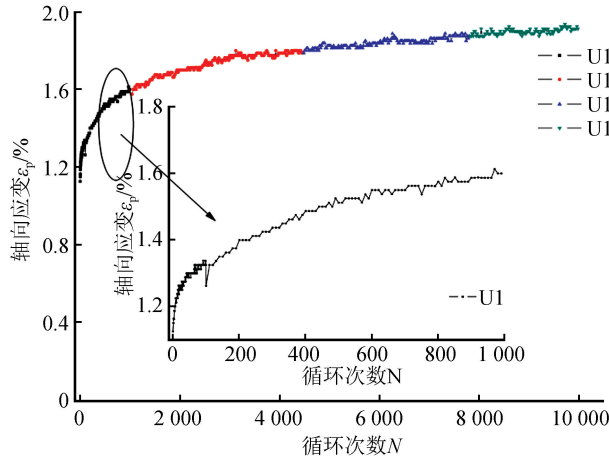


图 7 U1 试样轴向应变发展曲线

Fig.7 Axial strain development curve (U1 sample)

综合来看,在不排水条件下,双向“拉、压”的正弦波孔压发展相对缓慢,应变发展更为平稳;而单向纯压的半正弦波孔压发展更为迅速,孔压和应变更容易到达最大值。

2.2 部分排水和不排水条件下的试验结果

图 8、图 9 为 30 kPa 动荷载、不排水条件下振次为 10 000 圈软黏土的孔压、应变发展曲线;图 10 和图 11 为前 1 000 振次的孔压、应变发展曲线。

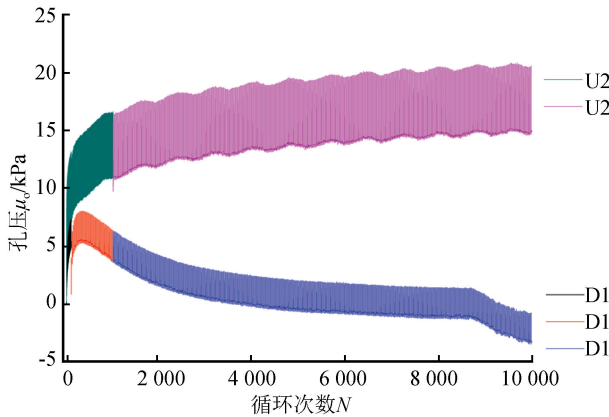


图 8 不同排水条件孔压发展曲线

Fig.8 Pore pressure curve under different drainage conditions

从图 8 和图 10 可以看出,不同排水条件下孔压的发展规律表现出很大的不同。在不排水条件下孔

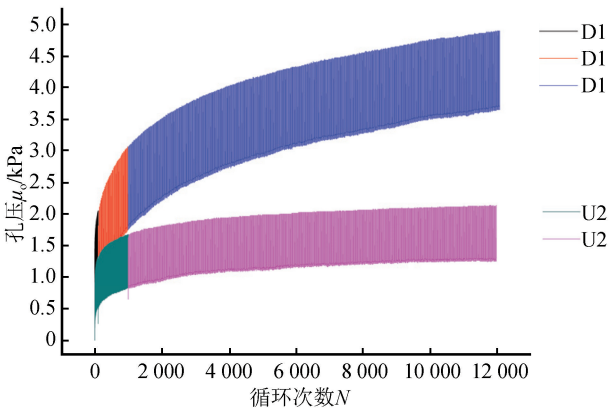


图 9 不同排水条件轴向应变发展曲线

Fig.9 Axial strain curve under different drainage conditions

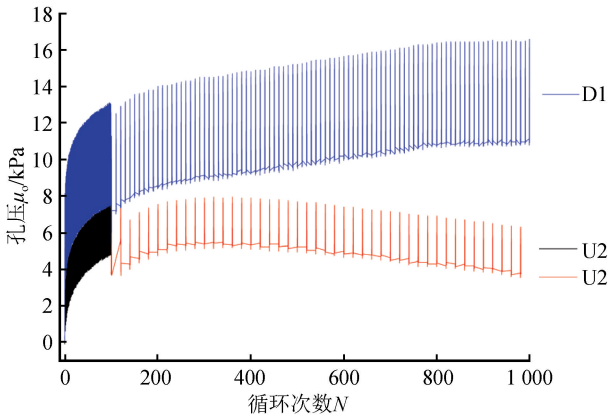


图 10 不同排水条件孔压发展曲线(1 000 圈)

Fig.10 Pore pressure curve under different drainage conditions (1 000 cycles)

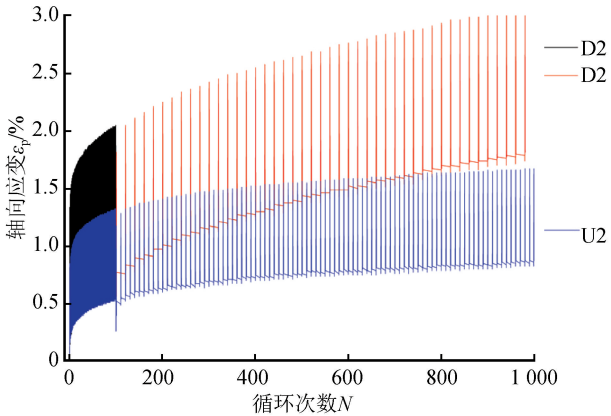


图 11 不同排水条件轴向应变发展曲线(1 000 圈)

Fig.11 Axial strain curve under different drainage conditions (1 000 cycles)

压的发展规律在 2.1 节已有论述,不再重述;在部分排水条件下孔压的发展呈现出不同的特点,从图 10 可以清晰看到,在加载初期,孔压随着循环次数的增加而逐渐增大,但孔压的发展速率要远远低于不排水试验的结果;图 8 可以看到随着循环次数的增加,

部分排水状态的试样孔压值达到一个最大值,然后随着循环次数的增加孔压逐步消散。这表明,排水与否对孔压的增长有着显著的影响。图 12 给出了 D1 试样部分排水过程中体积变化与振动次数的关系,图 13 给出了 D1 试样部分排水过程中体积变化与孔压发展关系和体积变化与应变发展关系,从土力学基本理论可以知道,体积变化、动孔压消散、动应变发展三者之间存在着相互关联,三者是互相作用、互相促进的。但目前为止,针对体积变化和孔压、应变关系的研究甚少。但从图 13 中可以比较清楚地看到,体积变化和轴向应变有很好的线性关联性;同样的现象也出现在图中体积变化和动孔压关系上,由此可以猜测体积变化的发展是动孔压和动应变耦合作用的结果,体积变化的发展促进了动应变的发展,加快了动孔压的消散。这一点与

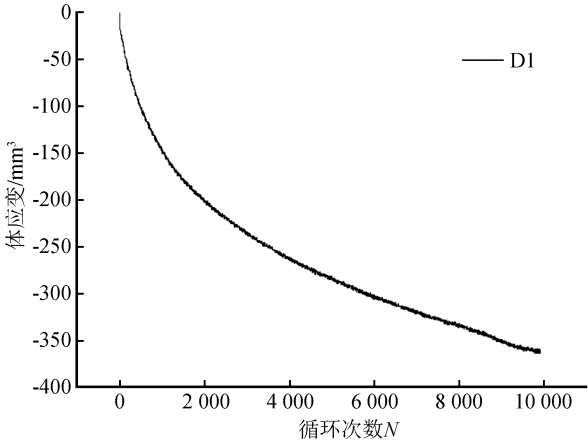


图 12 部分排水条件体积变化发展曲线
Fig.12 Volume change curve under partial drainage

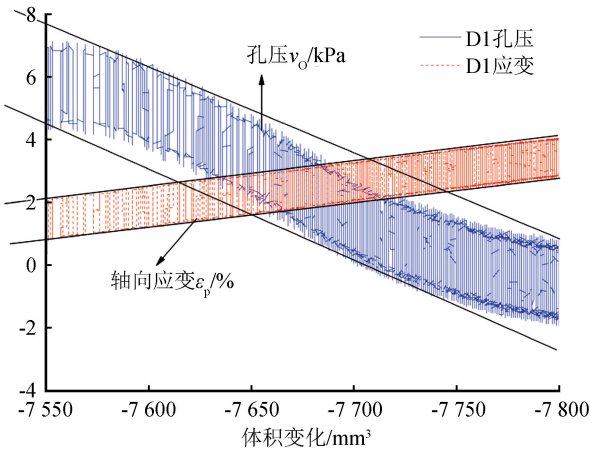


图 13 部分排水条件体积变化与孔压、轴向应变关系曲线
Fig.13 Relationship curve among volume change, pore pressure, and axial strain under partial drainage

Hyodo^[23]等认为软土长期沉降的主要原因在于超孔隙水压力的消散的观点一致,充分说明了本试验结果的可靠性;并且进一步说明如图 9 结果显示那样,排水条件能够加速动孔压的消散,并使应变发展更快。

2.3 不同循环应力比下的试验结果

2.3.1 孔压

3 个不同应力比试样的孔压发展曲线如图 14 所示,我们可以看到孔压的发展与动应力比成正相关。图 15 给出了每一振次下孔压的组成,可以清晰地看到每一个振次的最大超孔压为孔压累积和回弹孔压的总和。

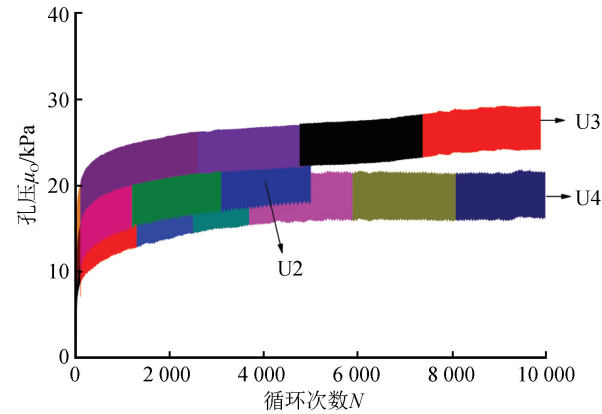


图 14 不同循环应力比孔压发展曲线
Fig.14 Pore pressure curve under different cyclic stress ratios

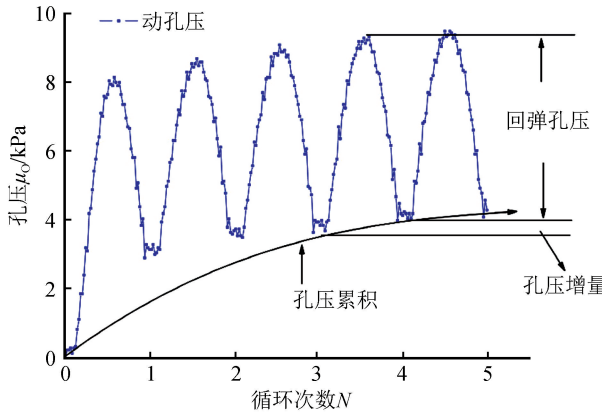


图 15 孔压发展曲线示意图
Fig.15 Schematic diagram of pore pressure development

为了更直观地显示振动循环过程中孔压累积的发展,将图 14 中累积孔压归一化处理后绘制在图 16 中,可见累积孔压的发展基本随着循环次数逐步发展,在振动后期回弹孔增量压逐步稳定。对于孔压的发展前人做了一些研究,提出了诸多针对孔压

的拟合孔压模型,但对于纯压荷载下循环次数的多少没有进行考虑,本文对纯压下不同振次的试样孔压发展曲线进行归一化,绘制如图 17 所示。根据不同循环次数孔压的增长曲线形势,建立循环荷载下黏土累积孔压增长模型如下:

$$\frac{\mu_d}{\mu_i} = \left(\frac{N}{N_f}\right)^{\beta} \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\alpha}\right]$$

式中: μ_d 为振动时的累积孔压; μ_i 为一定振次内的最大孔压; N 为振动圈数; N_f 为选定的振动圈数; α 、 β 为试验参数; α 为土性参数,与土性有关,本文取值为 0.15; β 为试验参数,与试验中动应力比有关。具体参数入表 2 所列。上式不但给出了循环荷载下黏土孔压发展的定量计算,还解释了其孔压发展的特殊规律。

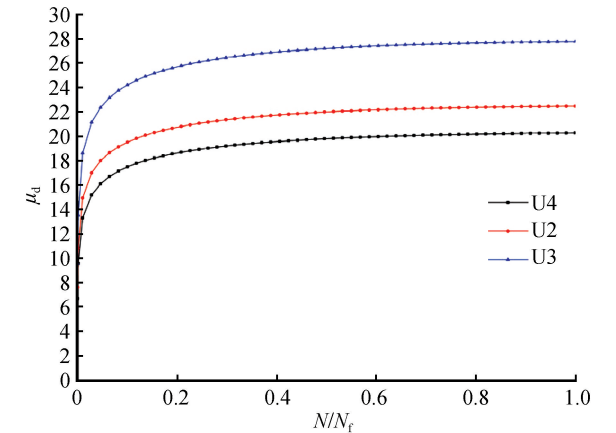


图 16 不同循环应力比孔压发展曲线示意图
Fig.16 Pore pressure curve under different cyclic stress ratios

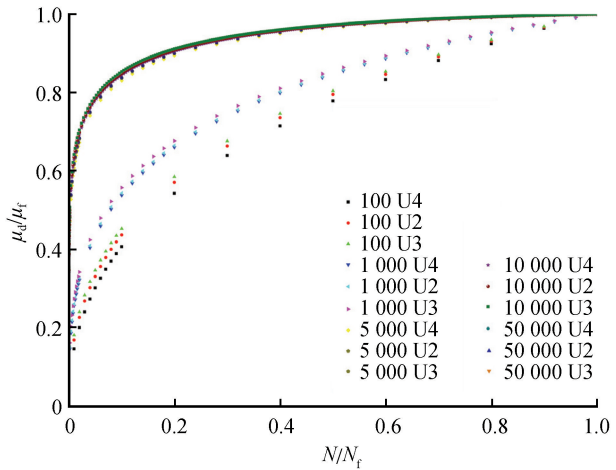


图 17 不同振次孔压发展曲线图
Fig.17 Pore pressure curve under different vibration times

2.3.2 应变

在不排水的循环纯压动三轴试验中,不同循环应力比轴向累积塑性应变发展曲线如图 18 所示。

如同图 15 孔压发展相类似,动应变的发展分为累积塑性应变,即循环加载过程中每一圈的最小应变;回弹应变,即由于动荷载加载产生的存在于每一个循环圈次内的单独一圈应变;残余应变,即上下两圈产生的不可恢复的应变。在动三轴试验中,永久应变基本对应了实际循环荷载下路基土体的永久沉降,这方面的产生是与循环应力比成正相关的,即荷载的大小决定了永久应变产生的快慢。在半对数坐标下,累积塑性应变的发展与循环次数呈现出比较好的线性相关性。

表 2 孔压模型参数

Table 2 Parameters of pore pressure model				
N_f	α	β		
		U4	U2	U3
50 000	0.15	0.016 6	0.013 7	0.011 9
10 000	0.15	0.025 8	0.023 7	0.021 5
5 000	0.15	0.033 2	0.030 1	0.029 1
1 000	0.15	0.221 8	0.217 5	0.206 5
100	0.15	0.343 5	0.312 4	0.296 8

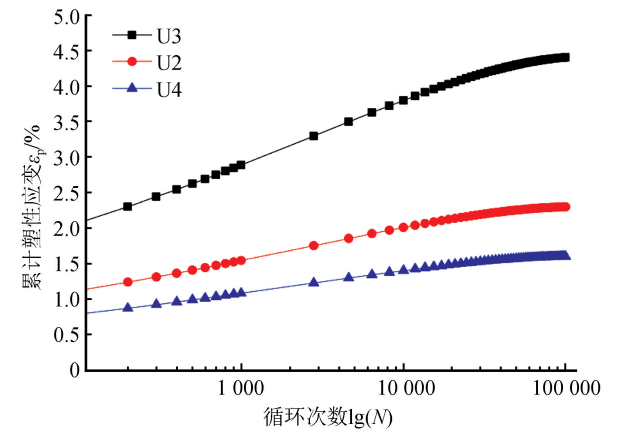


图 18 不同循环应力比累积塑性应变发展曲线
Fig.18 Cumulative plastic strain development curve under different cyclic stress ratios

根据 Idriss 对软化指数 δ 的定义,并考虑到试验进行的是以应力控制的循环动三轴试验,定义软化指数 δ 如下:

$$\delta = \frac{G_N}{G_1} = \frac{\frac{q_{\max} - q_{\min}}{\epsilon_{N,\max} - \epsilon_{N,\min}}}{\frac{q_{\max} - q_{\min}}{\epsilon_{1,\max} - \epsilon_{1,\min}}} = \frac{\epsilon_{1,\max} - \epsilon_{1,\min}}{\epsilon_{N,\max} - \epsilon_{N,\min}}$$

式中: $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$ 为每次循环中土样的最大与最小剪应力; $\epsilon_{1,\max}$ 、 $\epsilon_{1,\min}$ 为第 1 次循环中最大与最小轴向应变; $\epsilon_{N,\max}$ 、 $\epsilon_{N,\min}$ 为第 N 次循环中最大与最小轴向应变。

图 19 给出了不同循环应力比下,软化指数与累

积塑性应变关系曲线。从图中可以看出,随着累积塑性应变的增加,软化指数逐渐减小,其变化显著的分两个阶段,前半阶段累积塑性应变较小,软化指数向斜下方呈线性减小,当累积塑性应变继续增加,在较小的应变范围内软化指数急剧减小。

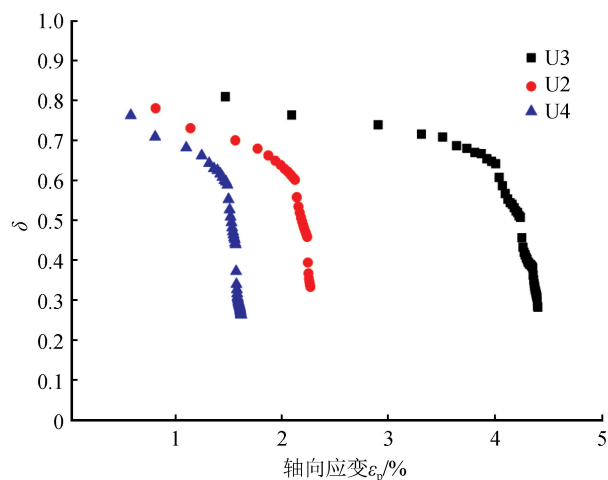


图 19 不同循环应力下软化指数与累积塑性应变关系

Fig.19 Relationship curve between softening index and cumulative plastic strain under different cyclic stress ratios

3 结论

本文通过一系列循环动三轴试验,对比了排水条件、波形和动应力比对饱和软黏土的孔压、应变发展规律的影响,结果表明:

(1) 在不排水条件下,波形对软黏土孔压和应变的影响较大,双向“拉、压”的正弦波孔压发展相对缓慢,应变发展更为平稳;而单向纯压的半正弦波孔压发展更为迅速,孔压和应变更容易到达最大值。

(2) 相同半正弦波和动应力比下排水条件对饱和软黏土孔压、应变增长影响显著;在部分排水状态下,孔压发展和消散、动应变发展和体积变化三者是互相作用、互相促进的。排水条件能够加速动孔压的消散,应变发展的更快。

(3) 在不排水条件下,动应力比对孔压增长的影响呈正相关,但影响主要集中在前 1 000 圈的振动内,后期动应力比的影响减缓,在给出的孔压增长模型可以看出随着振动次数的增长,归一化的孔压模型逐渐一致,参数也归于一致。

(4) 在不排水条件下,动应力比对累积塑性应变的产生与循环正应力成正比,累积塑性应变较小时软化指数呈线性缓慢减小,当累积塑性应变增大

到某一拐点时,软化指数急剧减小。

参考文献(References)

- [1] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991(8): 45-51.
ZHANG Jianmin, XIE Dingyi. A practical algorithm for increasing the vibration pore water pressure of saturated sand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(8): 45-51.
- [2] 魏新江, 张涛, 丁智, 等. 地铁荷载下不同固结度软黏土的孔压试验模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2761-2768, 2874.
WEI Xinjiang, ZHANG Tao, DING Zhi, et al. Experimental Study of Pore Pressure Model of Soft Clay with Different Consolidation Degrees under Subway Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2761-2768, 2874.
- [3] 沈扬, 徐海东, 王保光, 等. 列车荷载引起心形应力路径下软土非共轴应变特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 1-9.
SHEN Yang, XU Haidong, WANG Baoguang, et al. Strain Characteristics of Non-coaxiality under Heart-Shaped Stress Path Caused by Train Loads in Soft Clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 1-9.
- [4] WANG Y K, GAO Y F, GUO L, et al. Cyclic Response of Natural Soft Marine Clay under Principal Stress Rotation as Induced by Wave Loads [J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 191-202.
- [5] 年廷凯, 焦厚滨, 范宁, 等. 南海北部陆坡软黏土动力应变-孔压特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1564-1572, 1580.
NIAN Tingkai, JIAO Houbin, FAN Ning, et al. Experiment on Dynamic Strain-pore Pressure of Soft Clay in the Northern Slope of South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1564-1572, 1580.
- [6] Monismith C L, Ogawan, Freeme C R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading [R]. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1975: 1-17.
- [7] 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.
- [8] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A F. Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100-116.
- [9] Parr GB. Some Aspects of the Behavior of London Clay under Repeated Loading [Ph.D. Thesis] [D]. UK: University of Nottingham, 1972.
- [10] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 27(7): 891-895.
HUANG Maosong, LI Jinjun, LI Xingzhao. Cumulative Deformation Behaviour of Soft Clay in Cyclic Undrained Tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 27(7): 891-895.
- [11] 王军, 蔡袁强, 李校兵. 循环荷载作用下超固结软黏土软化-孔

- 压模型研究[J].岩土力学,2008,29(12):3217-3222.
- WANG Jun, CAI Yuanqiang, LI Xiaobing. Cyclic Softening-pore Pressure Generation Model for Overconsolidated Clay under Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12):3217-3222.
- [12] 王军,蔡袁强,徐长节,等.循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1713-1719.
- WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie, et al. Study on Strain Softening Model of Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8):1713-1719.
- [13] 蒋军.循环荷载作用下粘土应变速率试验研究[J].岩土工程学报,2002,24(4):528-531.
- JIANG Jun. Study on the Strain Rate of Clay under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4):528-531.
- [14] 丁智,张涛,魏新江,等.排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(5):893-899.
- DING Zhi, ZHANG Tao, WEI Xinjiang, et al. Experimental Study on Effect of Different Drainage Conditions on Dynamic Characteristics of Soft Clay under Different Degrees of Consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5):893-899.
- [15] LIU H J, SHAN W, GUO Y, et al. The Effect of Freeze-Thaw on Shear Strength of Roadbed Soil in Different States of Water Content and Soil Density[C]. Second International Conference on Transportation Engineering, July 25-27, 2009, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2009.
- [16] 陈春雷,王军,丁光亚.交通荷载作用下饱和软粘土孔压-应变分析模型[J].自然灾害学报,2009,18(6):64-70.
- CHEN Chunlei, WANG Jun, DING Guangya. Pore Water Pressure-residual Strain Model of Soft Clay under Traffic Loading[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6):64-70.
- [17] MATASOVIC N, VUCETIC M. A Pore Pressure Model for Cyclic Straining of Clay[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3):156-173.
- [18] WILSON N E, GREENWOOD J R. Pore Pressures and Strains after Repeated Loading of Saturated Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(2):269-277.
- [19] 付海清,袁晓铭,汪云龙.基于现场液化试验的砂土孔压与剪应变关系研究[J].振动与冲击,2018,37(18):158-164.
- FU Haiqing, YUAN Xiaoming, WANG Yunlong. Pore Pressure-shear Strain Relationship of Saturated Sand Based on In-situ Liquefaction Tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(18):158-164.
- [20] 郭林,蔡袁强,王军.长期循环荷载作用下排水条件对饱和软黏土动力特性影响[J].岩土力学,2013,34(增刊2):94-99.
- GUO Lin, CAI Yuanqiang, WANG Jun. Influence of Drainage Condition on Dynamic Cyclic Behavior of Saturated Soft Clay under Long-term Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2):94-99.
- [21] 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.
- [22] 黄博,丁浩,陈云敏.高速列车荷载作用的动三轴模拟[J].岩土工程学报,2011,33(2):195-202.
- HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of High-speed Train Load by Dynamic Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):195-201.
- [23] HYODO M, YASUHARA K, HIRAO K. Prediction of Clay Behaviour in Undrained and Partially Drained Cyclic Triaxial Tests[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4):117-127.
- [24] 董林,王兰民,夏坤.饱和黄土液化判别方法的两点发现[J].地震工程学报,2016,38(5):770-774.
- DONG Lin, WANG Lanmin, XIA Kun. Two Discoveries in the Liquefaction Evaluation Method of Saturated Loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5):770-774.
- [25] 黄博,丁浩,陈云敏.高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J].岩土工程学报,2011,33(2):195-202.
- HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yunmin. Simulation of High-speed Train Load by Dynamic Triaxial Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):195-202.