

不同排水条件下饱和软黏土动力特性试验研究

黄力¹, 范思婷¹, 刘干斌^{1*}, 叶俊能¹, 陈斌²

(1. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 以宁波轨道交通1号线沿线软黏土为研究对象, 开展了不同动应力幅值下的循环动三轴试验, 研究了不排水和部分排水对饱和软黏土累积塑性应变、动孔压、动弹性模量及动阻尼比的影响。结果表明: 在排水条件下对饱和软黏土的动力特性影响较大, 尤其是动孔压; 随着振动次数的增加, 部分排水条件下的动孔压存在一个峰值, 动孔压先增大后减小; 当动应力幅值较大时, 部分排水条件下累积塑性应变和动阻尼比小于不排水条件下的结果, 动弹性模量则大于不排水条件下的值; 对试验结果进行归一化处理后, 获得了动弹性模量、动阻尼比以及累积塑性应变的内在关系。

关键词: 饱和软黏土; 动三轴试验; 排水条件; 动力特性

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 02-0058-05

近年来, 铁路、公路、城市轨道交通的快速建设, 使得动荷载作用下软土地基的变形、强度特性及地基的工后沉降问题引起了广泛的关注。许多学者对软黏土的动力特性开展了研究, 为深入了解软黏土的工程特性做出了重要贡献, 也为实际工程提供了可靠的动力设计参数。考虑到软黏土的渗透系数较小, 许多学者从动应力幅值、固结比、振动频率、次数、波形等方面对土的动力特性开展了试验研究, 但大多数是在不排水条件下进行^[1-8]。然而, 从实际工程角度考虑, 即使土的渗透系数再小, 在经年累月的长期循环荷载作用下, 完全不排水是不可能的, 地基土体在动荷载作用下处于部分排水状态。

目前, 针对不同排水条件下软黏土动力特性的研究较少, 尤其是在部分排水条件下。Hyodo等^[9]针对部分排水条件下的软土动力特性进行了早期的研究, 提出了计算部分排水条件下路基软土沉降的模型。黄锋等^[10]通过一系列不排水及排水条件下的周期三轴试验, 对南海海洋粉质土的动力特性进行了研究, 试验结果表明, 排水过程对正常

固结的粉质土有强化作用。Akira等^[11]对软黏土进行一系列不排水和排水条件下的循环三轴试验, 基于试验结果提出了计算部分排水条件下软土应变的数值计算方法。郭林等^[12]通过对温州原状饱和软黏土进行了不同循环应力比的不排水和部分排水大周数循环三轴试验, 结果表明与不排水条件相比, 部分排水条件下软黏土试样的动力特性表现出很大的不同。随着循环次数的增加, 部分排水条件下的孔压先增加后降低, 存在一个峰值; 经过较大的循环次数后, 回弹应变逐渐减小, 应力—应变滞回圈逐渐缩短, 面积也明显减小。

由于宁波市地处滨海平原, 海相沉积软土层分布广泛, 具有高含水量、大孔隙比、低强度、高压缩性、低渗透性、高灵敏度等特点。轨道交通1号线运营后, 在列车振动荷载作用下, 局部隧道产生了较大的沉降量。为此, 笔者利用TAJ-20土动三轴试验系统开展了不同排水条件下饱和软黏土的动三轴试验, 分析了排水条件对土的累积塑性应变、动孔压、动弹性模量及动阻尼比的影响, 最后经过归一化处理, 得到了土体动弹性模量、动阻

收稿日期: 2014-12-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51278256, 51178227); 宁波市科技计划项目(2013C50005); 浙江省新苗人才计划(2014R405075)。

第一作者: 黄力(1989—), 男, 安徽阜阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 软土地下工程。E-mail: 86373689@qq.com

*通信作者: 刘干斌(1976—), 男, 江西吉安人, 博士/教授, 主要研究方向: 软土地下工程。E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

尼比与累积塑性应变的内在关系,为软土隧道的沉降控制提供了理论支持。

1 试验内容

1.1 试验土样

试验土样取自宁波轨道交通1号线沿线①₁层的淤泥质软黏土,土的基本物理力学指标见表1。

表1 土的物理力学指标

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒比重
41.1	44.5	23	21.5	2.76

1.2 试验方案

按《土工试验规程》的规定制样,试样直径3.91 cm,高8.0 cm,采用真空抽气加水饱和,使饱和度 $S_r > 95\%$;然后将试样进行等向排水固结,当孔隙水压力消散至零或稳定不变,认为试样固结完成;最后将试样分别在不排水和部分排水条件下,施加静偏应力(确保试样不出现拉伸),再施加循环动应力(正弦波)进行振动。试验方案见表2。

表2 试验方案

试样 编号	围压/ kPa	静偏应 力/kPa	动应 力/kPa	频率/ Hz	振动 次数
U1	100	10	10	1	10 000
P1	100	10	10	1	10 000
U2	100	15	15	1	10 000
P2	100	15	15	1	10 000
U3	100	20	20	1	10 000
P3	100	20	20	1	10 000

注:U表示不排水试验;P表示部分排水试验。

2 试验结果及分析

2.1 排水条件对累积塑性应变的影响

饱和软黏土累积塑性应变随振动次数的变化曲线如图1所示。从图1可知,在不同排水条件下土的累积塑性应变均随着振动次数的增加而增大,且增速逐渐趋缓,曲线表现为稳定型。在同一振动次数下,应变随着动应力幅值的增大而增大。当动应力幅值为10 kPa,振动次数较小时,部分排水条件下振动产生的累积塑性应变小于不排水条件下产生的应变值。随着振动次数的增加,部分排水条件与不排水条件下的应变差值越来越大。当动应力幅值为15 kPa时,累积塑性应变的变化与10 kPa

动应力幅值下的结果类似。当动应力幅值增大到20 kPa后,不同排水条件对累积塑性应变的影响较大,不排水条件产生的应变明显大于部分排水条件的结果。

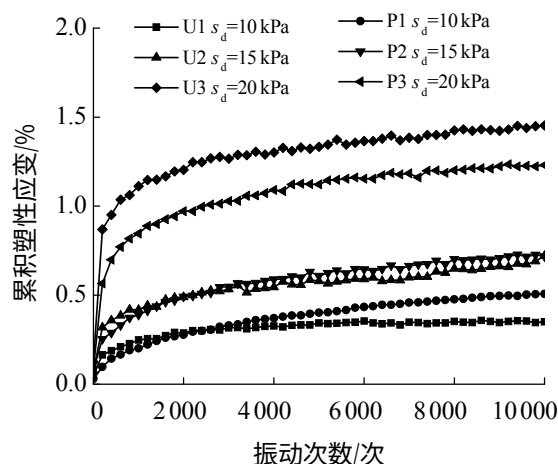


图1 累积塑性应变随振动次数变化曲线

在不同排水条件下,累积塑性应变产生的机理是不相同的。不排水条件下应变的产生仅为动应力导致的轴向应变,体应变没有发生变化。但在部分排水条件下,应变的产生包括轴向应变和孔压消散导致土体水排出的体应变^[12]。当动应力幅值较小(10 kPa)时,土体软化程度小,产生的应变也比较小,但在部分排水条件下由于应变包括轴向应变和体应变,而且以体应变为主,所以当振动次数较大时,产生的累积塑性应变大于不排水条件下的值;当动应力幅值逐渐增大(15 kPa)时,两者之间的差距越来越小,处于临界状态;当动应力幅值再增大(20 kPa)时,在不排水条件下,试样的孔压较大,软化程度较明显,产生了明显的轴向应变,而且在部分排水条件下,孔压消散,土体水排出产生的体应变占总累积塑性应变比例减小。同时,由于水的排出,土体孔隙比减小导致强度增大,限制了由于动应力所引起的轴向应变,所以部分排水条件下产生的应变值反而小于不排水条件下的值。

2.2 排水条件对动孔压的影响

图2为饱和软黏土的动孔压随振动次数的变化曲线。从图2可以看出,在不排水和部分排水条件下,动孔压与振次关系差异较大。在不排水条件下,动孔压随着振动次数的增加逐渐增大,但增大

速率逐渐减小, 曲线逐渐平缓. 而在部分排水条件下, 动孔压在振动初期逐渐增大, 但随着振动次数的增加, 动孔压达到一个峰值后, 又逐渐减小. 这是由于软黏土的渗透性很小, 振动初期孔压来不及消散, 逐渐累积增大, 但随着振动次数的增加, 孔压的增大速率逐渐减小, 当孔压的增大与消散持平时, 孔压达到峰值. 此后, 孔压的消散强于孔压的增大, 从而孔压开始逐渐减小.

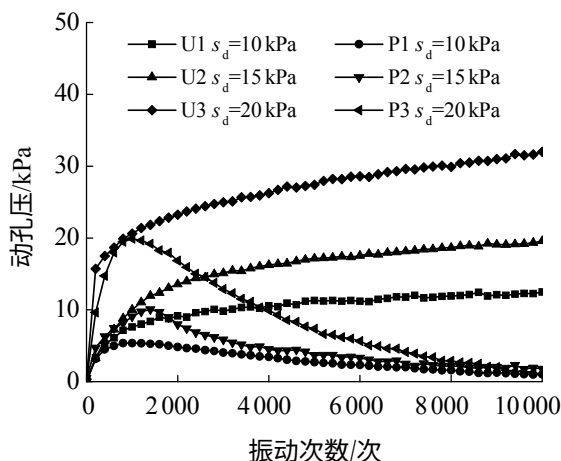


图2 动孔压随振动次数变化曲线

2.3 排水条件对动弹性模量的影响

图3为饱和软黏土动弹性模量与振动次数关系曲线. 不论排水条件如何, 相同振动次数下的动弹性模量均随动应力幅值的增大而减小, 且减小的幅度越来越大, 当动应力较小时, 动弹性模量很快趋于稳定. 另外, 当动应力较大(20 kPa), 在部分排水条件下, 由于孔压的消散, 土体内水的排出,

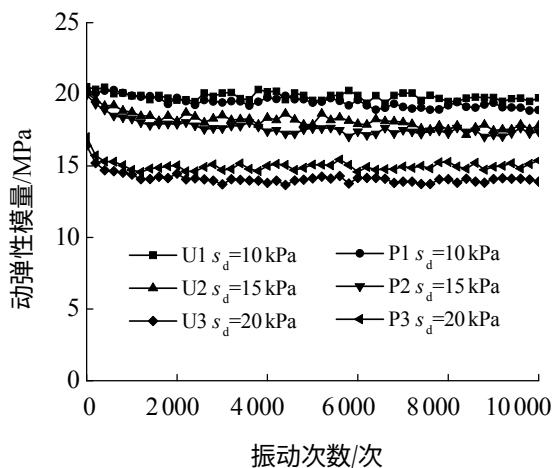


图3 动弹性模量随振动次数变化曲线

孔隙比减小导致强度增大, 使得动弹性模量随振动次数的变化曲线呈现出先减小后缓慢增大至稳定的趋势, 且 not 排水条件下的动弹性模量小于部分排水条件下的值.

2.4 排水条件对动阻尼比的影响

图4为饱和软黏土的动阻尼比随振动次数的变化曲线. 不管排水条件如何, 动阻尼比均随着振动次数的增加而增大并逐渐趋于稳定. 在相同的振动次数下, 动阻尼比均随着动应力幅值的增大而增大, 且增大的幅度越来越大. 当动应力较小时, 动阻尼比增大的速率较平缓, 排水条件对动阻尼比的影响较小; 但当动应力较大(20 kPa)时, 振动初期的动阻尼比增大较快, 随后增大速率逐渐减缓, 且 not 排水条件下的动阻尼比大于部分排水条件下的值.

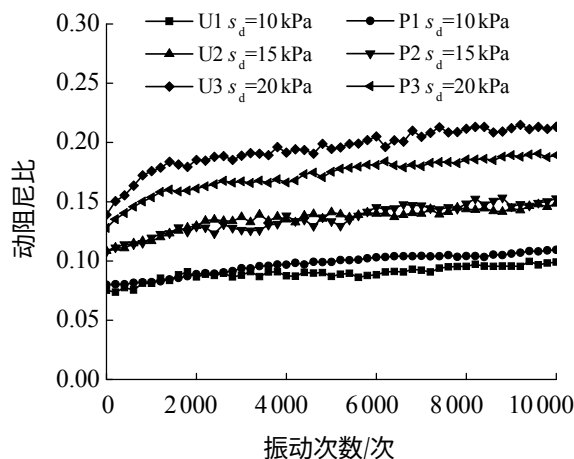


图4 动阻尼比随振动次数变化曲线

2.5 不同排水条件下的归一化处理

由图1~4可知, 累积塑性应变、动弹性模量及动阻尼比之间有着一定的内在关系, 在同一振次下, 动弹性模量随着累积塑性应变的增大而减小, 动阻尼比则随着累积塑性应变的增大而增大. 为更清楚地知道它们之间的关系, 采用归一化方法对试验结果进行整理, 定义名义累积塑性应变为 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$, 名义动弹性模量为 $E_d/E_{\max}$, 名义动阻尼比为 D_d/D_0 . 其中 $\varepsilon_{\max}$ 、 $E_{\max}$ 和 D_0 分别为每一试样对应的最大累积塑性应变、最大动弹性模量和初始动阻尼比.

图5为名义动弹性模量 $E_d/E_{\max}$ 与名义累积塑性应变 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的关系. 经归一化处理后, 不同排水

条件、不同动应力幅值下试样的名义动弹性模量有着类似的规律, 其中 $E_d/E_{\max}$ 的变化范围在 1~0.85 之间, 衰减较平缓, 最终趋于一稳定值, 表明动应力幅值小于临界动应力幅值, 试样为稳定型, 而且不论多大振动次数, 试样均存在一定的残余强度. $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的变化范围为 0.6~1, 即在振动初期, 累积塑性应变增长较快, 动弹性模量衰减也较快, 但随着振动次数的增加, 累积塑性应变和动弹性模量都逐渐趋于稳定, 值就会产生集中分布的情况.

图 6 为名义动阻尼比 D_d/D_0 与名义累积塑性应变 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的关系. 相比较于图 5, 图 6 的分布较为分散, 而且随着 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的增大而增大. D_d/D_0 的变化范围在 1.0~1.6 之间, 近似于指数增大. 另外, 数值的分布也与图 5 相似, 大部分集中在 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 为 0.6~1.0 之间.

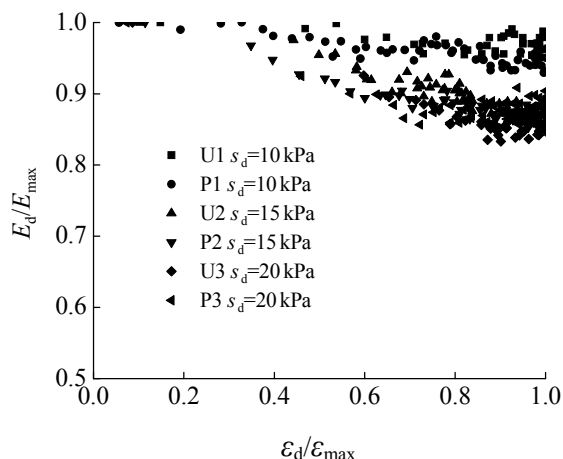


图 5 $E_d/E_{\max}$ 与 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的关系

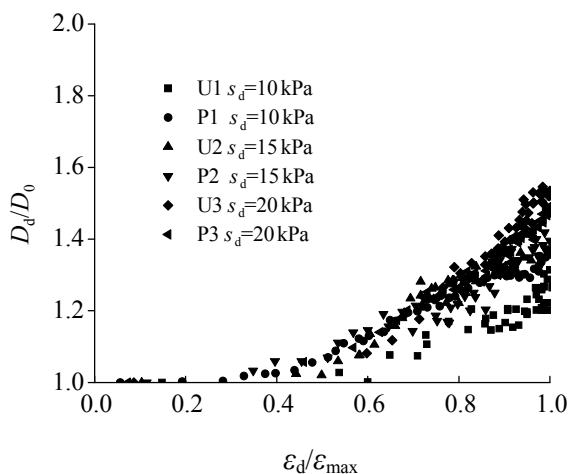


图 6 D_d/D_0 与 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的关系

3 结语

通过开展饱和软黏土不排水和部分排水条件下的动三轴试验, 分析了排水条件对土的累积塑性应变、动孔压、动弹性模量及动阻尼比的影响, 主要结论如下:

(1) 当动应力幅值较小时, 部分排水条件下产生的应变值大于不排水条件下的值; 当动应力幅值较大时, 部分排水条件下产生的应变值小于不排水条件下的值.

(2) 不同排水条件下的曲线变化完全不同. 在不排水条件下, 不同动应力幅值下的动孔压都随着振动次数的增加而逐渐增大, 随后增大速率减缓, 曲线趋于平稳; 部分排水条件下的动孔压则随着振动次数的增加呈现出先增大后减小的趋势, 存在一个峰值孔压.

(3) 不论排水条件如何, 相同振次下的动弹性模量随着动应力幅值增大而减小, 动阻尼比则增大. 在动应力幅值较小时, 排水条件的影响不大; 但是当动应力幅值较大时, 不排水条件下的动弹性模量小于部分排水条件下的值, 动阻尼比则呈相反趋势.

(4) 不同排水条件、不同动应力幅值下试样的动弹性模量和动阻尼比相差较大, 但经归一化处理后, 其变化规律较为一致, 其 $E_d/E_{\max}$ 随 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的增大逐渐减小, 最终趋于稳定; D_d/D_0 则随着 $\varepsilon_d/\varepsilon_{\max}$ 的增大近似于指数增大.

参考文献:

- [1] 王建华, 要明伦. 软黏土不排水循环特性的弹塑性模拟[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 11-18.
- [2] 许才军, 杜坚, 周洪波. 饱和软黏土在不排水循环荷载作用下孔隙水压力模型的建立[J]. 上海地质, 1997(3): 16-21.
- [3] 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.
- [4] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008(5): 764-768.
- [5] 黄博, 丁浩, 陈云敏, 等. 交通荷载作用后粉质黏土不排水强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3986-3993.
- [6] 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, 28(7):891-895.
- [7] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 工程学报, 2007, 29(11):1742-1747.
- [8] 张勇, 孔令伟, 孟庆山, 等. 武汉软土固结不排水应力—应变归一化特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1509-1513; 1518.
- [9] HYODO M, MURATA H, YASUFUKU K, et al. Field test and analysis for evaluating stresses in low embankment and base ground subjected to traffic[J]. Tsuchi-to-Kido, 1989, 10:33-38.
- [10] 黄锋, 楼志刚. 排水条件对海洋粉质土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1):24-31.
- [11] AKIRA S, LAWALENNA S, NORIHIKO M. 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.
- [12] 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(S2): 94-99.

Effects of Drainage Condition on Dynamic Characteristics of Saturated Soft Clay under Cyclic Load

HUANG Li¹, FAN Si-ting¹, LIU Gan-bin^{1*}, YE Jun-neng¹, CHEN Bin²

(1.Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Rail Transit Group Co., LTD, Ningbo 315000, China)

Abstract: Based on the cyclic triaxial tests under different dynamic stress amplitude, the effects of drainage condition on several factors is investigated. The process consists of the cumulative plastic strain, dynamic pore pressure, dynamic elastic modulus and dynamic damping ratio of soft clay around the Ningbo Rail transit Line 1. The results show that the drainage condition has a great impact on the dynamic characteristics of saturated soft clay, especially on the dynamic pore pressure. The dynamic pore pressure has a peak value with the increasing number of cycles under partially drainage condition. It increases firstly followed by decreasing with the increasing number of cycles. When the dynamic stress amplitude grows larger, the cumulative plastic strain and dynamic damping ratio under partially drainage condition become less than those of un-drained condition, while the dynamic elastic modulus turn larger than that of un-drained condition. In this paper, the intrinsic relationship is finally obtained among the dynamic elastic modulus, dynamic damping ratio and cumulative plastic strain after the process of normalization.

Key words: saturated soft clay; dynamic triaxial tests; drainage condition; dynamic characteristics

(责任编辑 史小丽)