

DOI: 10.11779/CJGE2019S2022

往复移动荷载下超固结软黏土重力模型试验研究

王家超^{1,2}, 钱建固^{1,2}, 张甲峰³, 王其伟^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 研发了能够进行往复移动荷载下超固结软土地基的室内重力模型试验装置, 并基于该试验平台开展了上海浅层超固结饱和软黏土的重力模型试验研究。通过一系列试验, 揭示了超固结饱和软黏土地基在往复移动荷载下的累计孔压及累计变形随往复次数及动载幅值的时空演化规律。试验表明, 深层土体处的超孔压动力响应明显较浅层的动力响应低, 但其动力响应更为迅速。同时, 土体在交通荷载行进方向上的动力响应比其他方向上更为强烈, 其孔压衰减也最不明显。此外, 动载幅值越大, 初期的塑性变形和后期的位移增量也明显变大, 并且不同水平位置处的差异沉降也越大。

关键词: 移动荷载; 试验装置; 模型试验; 累计孔压; 累计变形

中图分类号: TU416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0085-04

作者简介: 王家超(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土工程与本构理论研究。E-mail: jwang@tongji.edu.cn。

Gravity model testing overconsolidated soft clay under repeated moving loads

WANG Jia-chao^{1,2}, QIAN Jian-gu^{1,2}, ZHANG Jia-feng³, WANG Qi-wei^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai CAAC New Era Airport Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: A gravity model test device is developed to simulate overconsolidated soft clay under repeated moving loads. Using this device, the model tests on Shanghai shallow overconsolidated saturated soft clay are carried out. Through a series of tests, it is revealed that temporal and spatial variation of the accumulated pore pressure and deformation about overconsolidated saturated soft clay foundation with the number and amplitude of changing repeated moving loads. The test results show that the dynamic response of the excess pore pressure in the deep soil is obviously lower than that of shallow soil, but its peak value comes earlier. At the same time, the dynamic response of soil in the direction of moving loads is stronger than that in other directions, and the dissipation of the excess pore pressure in that direction is also the least obvious. In addition, with the amplitude of increasing dynamic loads, the plastic deformation at the initial stage and the displacement increment at the later stage get larger, and the difference of settlements at different horizontal positions becomes larger too.

Key words: moving load; test device; model test; accumulated pore pressure; accumulated deformation

0 引言

在软土地地区的路基沉降预测中, 工程中普遍将车辆荷载简单地等效为填土静载。然而, 交通荷载实质上是典型的往复移动荷载, 其移动性将导致地基土单元的应力路径呈现出心形旋转路径, 由心形循环加载路径产生的累计孔压和累计变形将显著大于传统的循环三轴加载路径, 这也将直接诱发软土路基更大的长期运营沉降^[1]; 另一方面, 软土地地区的路基施工往往会采用降水、堆载预压的加固措施来减小路基的长期运营沉降, 这使得路基下方的软黏土往往形成一定的超固结效应^[2]。由于实际工程中路基沉降计算时一般

无法考虑上述两方面因素的影响, 使得理论预测往往远远偏离原位观察。因此, 开展往复移动荷载下超固结饱和软黏土的累计变形的试验与理论研究, 是揭示软土路基长期运营沉降规律与定量计算的重要基础性研究工作。

目前, 关于循环荷载下饱和软黏土动力特性及变形响应的试验研究主要有室内单元试验和重力模型试

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578413, 51238009)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者(E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn)

验,其中,室内单元试验大多采用循环三轴剪切仪^[3]或空心圆柱扭剪仪^[1]来考虑循环动载作用下土单元变形与强度特性,相关研究已有很多。而对于离心试验,由于在离心场中循环加载难以实现,并且很难控制超重固结条件下的地基自重应力场,因此采用离心试验的相关研究在国内外鲜有报道。对于重力模型试验,其研究对象大多针对于碎石土^[4],对于饱和软黏土的研究则较少。因此,本文以上海第3层粉质黏土为研究对象,研发一种能够模拟往复移动荷载加载的试验装置,通过模型试验研究超固结软黏土在往复移动荷载下的累计孔压及累计变形响应特征,从而揭示超固结软黏土路基长期运营沉降的时空演化规律。

1 试验原理

本文以有轨电车加载系统为模拟对象,假定轮载直接作用于轮轨,再传递给轨枕,并认为轮载只由其作用点相邻的3个轨枕承担^[5]。在轮载往复移动过程中,每个位置处的轨枕承担的荷载呈现周期性变化,继而本文采用3个独立控制的液压伺服激振器去模拟往复移动交通荷载,激振器加载波形示意图见图1。

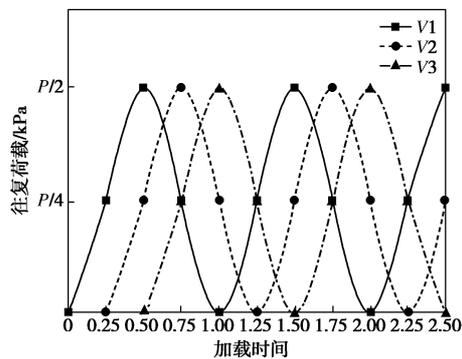


图1 激振器加载波形示意图

Fig. 1 Diagram of loading waveform of vibration exciter

2 试验模拟

2.1 附加动应力

为了给激振器的波形输入提供依据,本文基于有轨电车标准横断面,建立三维无限元模型,通过计算获取地基不同深度处自重应力和附加动应力。同时还采用了一种等效的思想,即将现场土层按深度分为浅层、中层及深层3个区段,分别对各个区段进行试验,并保证模型箱中的土体所受应力与原位状态下一致。

2.2 地基超固结状态

本文采用超载预压法,先对重塑土体施加超载 P 预压,而后卸载再施加路基静载 P_s 。那么,地基各深度处的超固结比就可以定义为

$$\text{OCR} = P/P_0, \quad (1)$$

式中,前期固结压力 P_c 和当前固结压力 P_0 分别为

$$P_c = \sigma_{cz} + P, \quad P_0 = \sigma_{cz} + P_s, \quad (2)$$

其中, σ_{cz} 为土体竖向自重应力。

考虑在地基顶面处施加超载 $P=45 \text{ kPa}$,结合前述自重应力的计算结果及OCR的定义,就可以得到各分层地基顶面处的超固结比,分别约为2.0,1.5以及1.5。此外,为了避免试验的误差性以及强调模拟荷载移动效应的必要性,本文又增加了几组对比试验。

3 监测方案

本文在模型试验中分别对路基沉降以及孔压进行了监测,其中在路基模型纵向上($y=0$)布置3个竖向位移测点D1、D2、D3,在路基模型3个加载点正下方处布置3个孔压测点P1、P2、P3,再在路基模型中心加载点处沿深度方向上布置3个孔压测点P4、P5、P6,最后,在路基模型横向对称轴上($x=0$)再布置两个孔压测点P7、P8,测点布置示意图见图2。

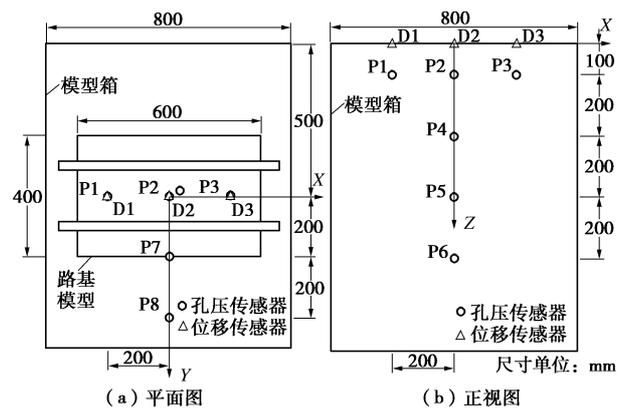


图2 测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring points

4 试验过程

在模型箱中置入重塑泥浆,并在其表面分级加载至预压固结压力 P_c ,期间布设好孔压及位移传感器,再将 P_c 依次卸载至试验压力,之后短暂移除试验压力,在路基表面处挖除部分土体放置路基面板,在其上安装固定钢轨,重新加载至试验压力。针对各个工况,在路基表面处施加动载幅值为 P_0 的往复荷载,荷载频率为1 Hz,荷载波形采用正弦波形,并在往复荷载满足预设的加载次数后停止加载。

5 试验结果分析

5.1 荷载移动性的影响

图3和图4反映了不同相位差下动荷载对软黏土地基累计孔压及累计变形的影响,需要说明,本文是通过调整各个激振器的相位差来考虑往复荷载的移动

性, 即移动荷载对应相位差 90° , 而固定荷载为 0° 。由图可见, 考虑荷载的移动效应后, 其诱发的累计孔压及累计变形明显大于循环固定荷载加载。

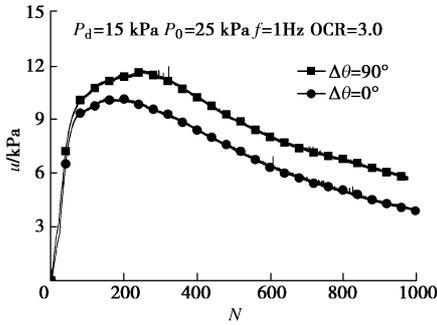


图 3 两种相位差下累计孔压对比图

Fig. 3 Contrast diagram of accumulated pore pressure under two phase differences

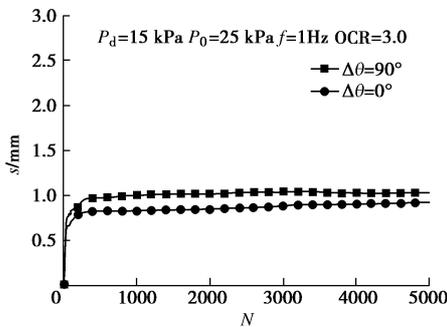


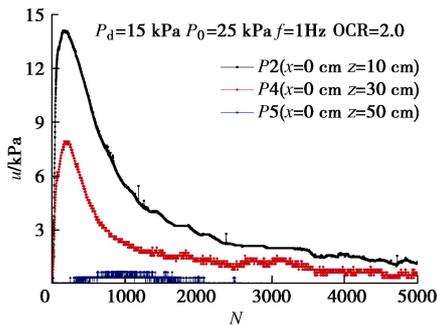
图 4 两种相位差下累计变形对比图

Fig. 4 Contrast diagram of accumulated deformation under two phase differences

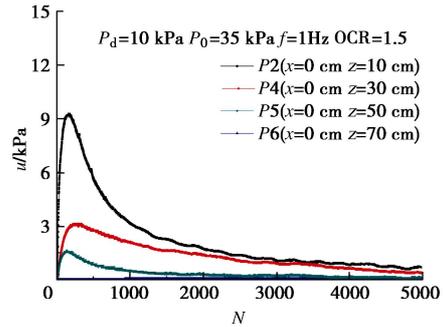
由图 3, 4 表明, 忽略车辆荷载的移动效应, 将显著低估路基的长期运营沉降。限于篇幅, 下文将主要探讨考虑荷载移动效应下不同超固结状态地基长期累积变形效应规律。

5.2 累计孔压响应

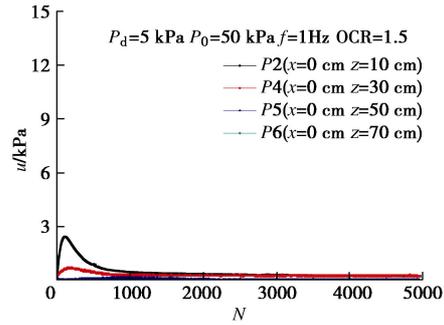
图 5 反映了往复荷载作用下各分层不同深度处超孔压动力响应。可以看出, 深层土体处的超孔压动力响应明显较浅层的动力响应低, 但其动力响应更为迅速, 这主要是因为深层土体固结程度高, 导致其超孔压响应速度也就更快。



(a) 浅层土体



(b) 中层土体

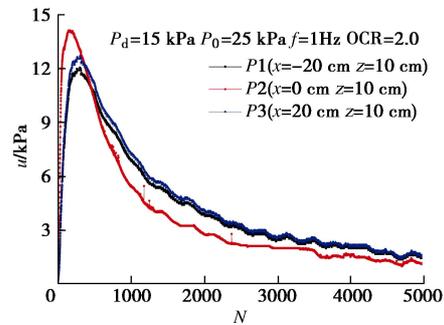


(c) 深层土体

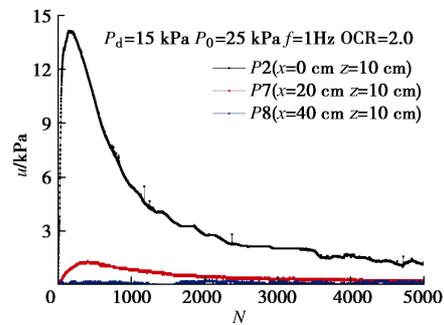
图 5 各分层深度方向上超孔压变化规律

Fig. 5 Variation of excess pore pressure of various layers along depth

考虑到不同方向上各分层超孔压变化存在相似性, 故在路基纵向及横向上, 只需对比浅层土体同一深度处超孔压随往复次数的变化规律, 如图 6 所示。



(a) 浅层土体纵向



(b) 浅层土体横向

图 6 浅层土体纵向及横向上超孔压的变化规律

Fig. 6 Variation of longitudinal and transversal excess pore pressure of shallow soils

可以看出, 路基纵向上累计孔压的动力响应明显较横向上大, 也即土体在交通荷载行进方向上的动力

响应更为强烈。此外,在路基横向上、纵向上以及沿深度方向上的超孔压分布均存在不同程度的衰减,其中沿深度方向上的衰减作用最为显著,而沿纵向上的衰减作用则最弱,也即在交通荷载行进方向上的超孔压衰减并不明显。

5.3 累计变形响应

图7反映了各分层顶面不同水平位置处累计沉降随往复次数的变化规律。可以看出,随着动载幅值的增大,地基土的初期塑性变形和后期位移增量也明显变大,土体由处于安定状态逐渐过渡到塑性蠕变状态,并且路基表面不同水平位置处的差异沉降也越大。

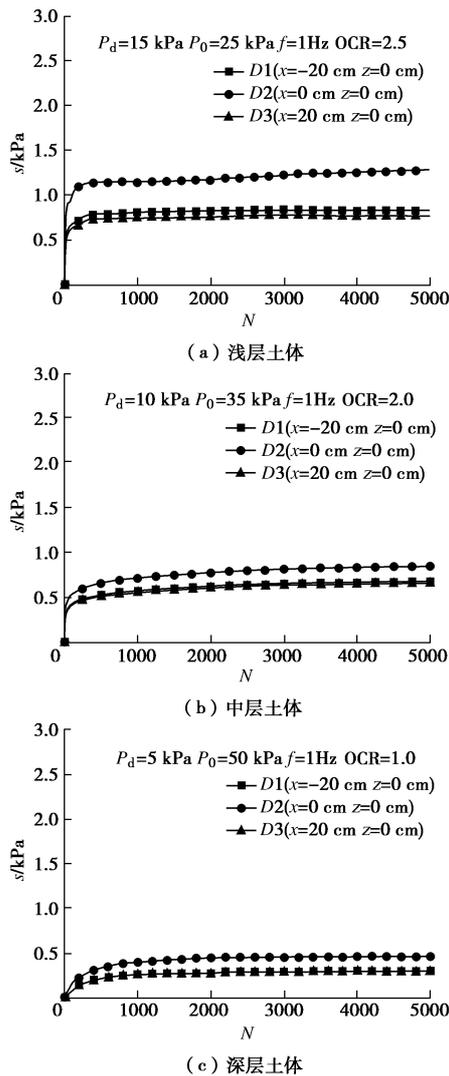


图7 各分层累计沉降的变化规律

Fig. 7 Variation of accumulated settlement of various layers

6 结 论

本文利用自主研发的可进行往复移动荷载模拟的室内重力模型试验装置,将现场路基分为浅层、中层与深层3个模拟区段,根据原位应力状态对各分层施加动静荷载,并重点探讨了累计孔压及累计变形的时

空变化规律。试验研究表明:

(1) 在往复动载作用下,深层土体处的超孔压动力响应明显较浅层的动力响应低,但其动力响应更为迅速。此外,土体在交通荷载行进方向上的动力响应比其他方向上更为强烈。

(2) 由于应力扩散效应,在路基横向、纵向以及沿深度方向的孔压分布均存在不同程度的衰减,其中沿深度方向的衰减作用最为显著,而纵向上最弱,即在交通荷载行进方向上的超孔压衰减不明显。

(3) 动载幅值越大,地基土体初期的塑性变形和后期的位移增量也明显变大,并且不同水平位置处的差异沉降也越大。

参考文献:

- [1] 钱建固,王永刚,张甲峰,等. 交通动载下饱和软黏土累计变形的不排水往复扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1790 - 1798. (QIAN Jian-gu, WANG Yong-gang, ZHANG Jia-feng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1790 - 1798. (in Chinese))
- [2] 魏道焱,胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(4): 13 - 22. (WEI Dao-duo, HU Zhong-xiong. Experimental study of preconsolidation pressure and compressibility parameters of Shanghai subsoil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(4): 13 - 22. (in Chinese))
- [3] 黄茂松,李进军,李兴照. 饱和软粘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. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [4] 蒋红光,边学成,徐翔,等. 列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基动力性态的全比尺物理模型试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 354 - 362. (JIANG Hong-guang, BIAN Xue-cheng, XU Xiang, et al. Full-scale model tests on dynamic performances of ballastless high-speed railways under moving train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 354 - 362. (in Chinese))
- [5] AWOLEYE E O A. Ballast type-ballast life prediction[M]. Derby: British Rail Research LR CES 122, 1993.