

DOI: 10.11779/CJGE2017S2025

# 循环动载下软黏土路基变形响应的离心试验模拟

钱建固<sup>1, 2</sup>, 王其伟<sup>1, 2</sup>

(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)

**摘 要:** 介绍了动力离心模型试验的关键性试验技术及循环动载下饱和软土累计变形响应规律。路面结构分别采用刚性路基板, 路基基层采用压密的砂垫层模拟, 地基采用上海地区的饱和软黏土, 并考虑了地基土的超固结效应。详细探讨了离心试验过程中若干试验技术的实现过程, 包括饱和黏土的重塑土制样技术、重力场的固结技术及不同超固结比的实现技术, 并给出了如何在离心场实现地基变形的图像分析技术 (PIV)。最后, 给出典型的试验观察成果, 揭示往复动载下饱和软黏土累计变形时空演变规律。试验表明, 累计超孔隙压表现为先增大后减小的变化规律; 通过 PIV 技术分析发现, 在循环动作用下饱和软黏土路基竖向变形影响区域随着循环次数的增大而增大。

**关键词:** 离心模型; 饱和软土地基; 循环动载

**中图分类号:** TU416

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0099-04

**作者简介:** 钱建固(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事软土工程与本构理论研究。E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn。

## Centrifuge tests on behaviors of soft clay subgrade under cyclic loading

QIAN Jian-gu<sup>1, 2</sup>, WANG Qi-wei<sup>1, 2</sup>

(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)

**Abstract:** A couple of key test technologies for dynamic centrifuge modeling and the permanent deformation responses of saturated clay to cyclic loading are introduced. The rigid pavement is used in the model system. The subgrade base is simulated by using the compacted sand cushion. The modeling subsoil is Shanghai saturated soft clay in an over-consolidation state. The testing process and key test techniques are discussed, such as the reconstruction of saturated clay and the pre-loading consolidation with an given over-consolidation ratio in clay subsoil. The image analysis techniques (PIV) is also adopted for the calibration of deformation. Finally, a series of test results are given to reveal the cumulative deformation behaviors of saturated soft clay under cyclic loading. It is shown that the cumulative pore pressure increases rapidly and then decreases slowly. PIV indicates that the effective impact zone in the deformation of subsoil subgrade expands with the increasing number of load cycling.

**Key words:** centrifuge model; saturated soft clay subsoil; cyclic loading

## 0 引 言

长期交通动载下饱和软黏土地基变形相当复杂, 相关试验研究工作存在诸多的困难性, 主要有以下几个原因: ①交通荷载的复杂性, 交通荷载属于长期往复的中低频循环荷载, 循环数目大, 持续时间长; ②由于路基施工过程中开挖回填、地下水位下降或地基加固等因素作用, 下伏地基表层往往形成深达数米的超固结硬壳层, 超固结比 (OCR) 自上而下逐渐减小<sup>[1]</sup>; ③常规 1g 模型试验与现场存在较大的尺度差异, 不能真实反映原位状态变形响应; ④循环动载下饱和软黏土变形响应复杂, 路基设计允许的动应力水平难以确定。因此, 开展有效的模型试验来精确地模拟真实饱和软黏土路基变形响应是交通岩土领域的重要课题之

一。

目前, 对交通动载诱发饱和软黏土地基变形的试验研究多限于室内单元试验或 1g 模型试验研究<sup>[2-3]</sup>, 然而 1g 模型试验无法模拟原位条件下地应力条件, 试验结果难以直接推广至真实问题。鉴于此, 本文将采用离心试验研究来探讨交通循环动载下软黏土地基的累计变形响应, 并以低频交通动载下软黏土路基响应为研究内容。考虑到飞机或慢速轨道等交通荷载属于低频动载, 同时考虑到表层地基的超固结状态, 试验将实现饱和软黏土地基的超固结原位应力历史, 利用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51238009, 51578413)

收稿日期: 2017-08-02

频率为 0.5 Hz 的正弦波循环荷载模拟交通荷载,在模型路基上进行加载,研究超固结状态下的饱和软土在往复动载作用下的循环变形响应特征,并结合 PIV 技术揭示地基的位移演化规律。

## 1 试验模拟

试验采用清华大学 TH-50 g-t 土工离心机设备以及电液伺服作动器。土工离心机有效半径为 2 m,最大离心加速度 250g,最大容量 50 g-t。模型箱为矩形,采用不锈钢制成,内部尺寸为:长 500 mm,宽 200 mm,高 300 mm。所有试验均在 50g 加速度下完成。

### 1.1 路基模拟

试验的路堤结构原型为:1 m 厚的沥青混凝土结构层、0.5 m 厚的碎石垫层,碎石层的干密度  $2.0 \text{ g/cm}^3$ 。试验中,沥青混凝土结构层采用高压聚丙烯板模拟,密度为  $0.9 \text{ g/cm}^3$ ,模型长 200 mm,宽 50 mm,高 20 mm (图 1),弹性模量为 1500 MPa。路基板下部铺有 10 mm 标准砂,压实后的干密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ,用于模拟路基下部的碎石垫层。下部为厚度 200 mm 的饱和软黏土层,固结后的干密度约为  $1.50 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ ,最下部设置 50 mm 厚的砂层用于排水。在 50g 离心场中对应的原型为高 1 m、宽 2.5 m、长 10 m 的路基,下部为高 0.5 m,干密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$  的碎石垫层,10 m 厚的软黏土层。

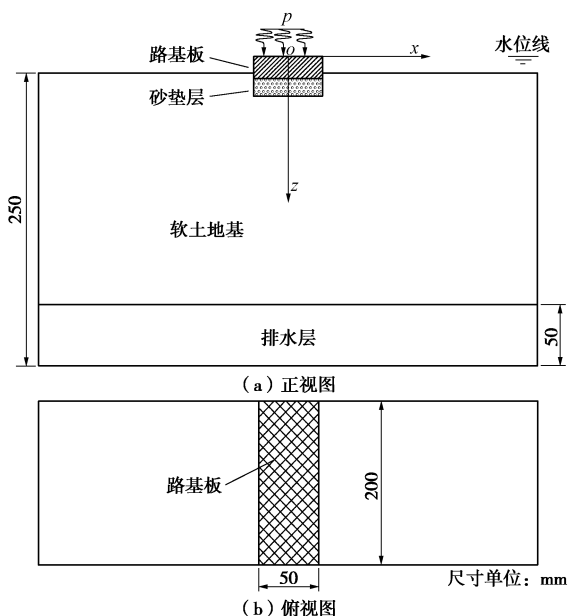


图 1 模型箱与加载设备示意图

Fig. 1 Photos of model box and loading equipment

### 1.2 荷载模拟

考虑到飞机动载的循环频率取决于其轮载作用于跑道的滑行频次<sup>[4]</sup>,属于典型的低频荷载(0.01 Hz 以下),且飞机荷载属于非对称拉压动载。为此,本次模

型试验利用非对称正弦波循环荷载( $p_{\min}=5 \text{ kPa}$ ,  $p_{\max}=30 \text{ kPa}$ )模拟交通动载,频率为 0.5 Hz,试验在 50g 的离心场中完成,根据相似定律,对应原型荷载的频率为 0.01 Hz。

## 2 模型制备

试验土样比重为 2.73,塑限  $w_p=27.8\%$ ,液限  $w_L=40\%$ ,渗透系数约为  $6.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。以上海第三层黏土为土样,制作含水率约为 80% 的黏土重塑泥浆,并预压固结为重塑土层。试验采用分层预压固结的方法制作原状的饱和软土地基,分层固结厚度 50 mm,按对应于原位竖向自重应力水平控制预压固结应力。土样固结后的饱和密度约为  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ,将地基分 4 层固结,每层土体固结完成后的厚度为 50 mm。首先将第四层(最底层)泥浆静置 12 h 具有初步强度时方施加 5 kPa 的压力,维持 24 h 后,当每小时监测沉降值小于 1 mm 时施加下一级荷载,直至加到最大荷载 60 kPa。第三层与第二层的固结压力最大值分别为 40 kPa 及 20 kPa。;最终在表层施加 60 kPa 固结压力,并在土体表面放置一个孔压传感器,当孔压计测得的超孔压降到接近 0 kPa 时停止加载。

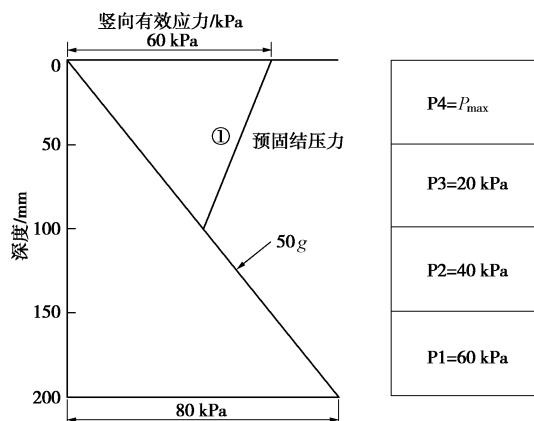


图 2 模型土体应力历史 (1 : N=1 : 50)

Fig. 2 Stress histories of clay models (1 : N=1 : 50)

由于是单面排水的原因,第一、二层土体先期固结应力接近图 2 中的线①,高于 50g 条件下土体自重应力,在试验过程中便形成了超固结深度为 5 m 的地基,5 m 以上为超固结土,以下为正常固结土。

## 3 循环响应监测

离心试验中分别进行孔压、土压及地表沉降的监测(图 3),自上而下布置 4 个土压力传感器,;此外,在地表布置 3 个激光位移传感器,位移量程为 160 mm 及 350 mm。模型比尺 1 : N=1 : 50,土体竖向位移采用非接触位移测量系统测取<sup>[5]</sup>。地基制备完成后,去掉侧面玻璃板,在试样上随机布置白色泡沫小片,用

小钉固定, 形成具有色彩差异的测量区域。利用颗粒流软件 PIVlab 分析该系统获得的图像分析土体位移场的演变过程。

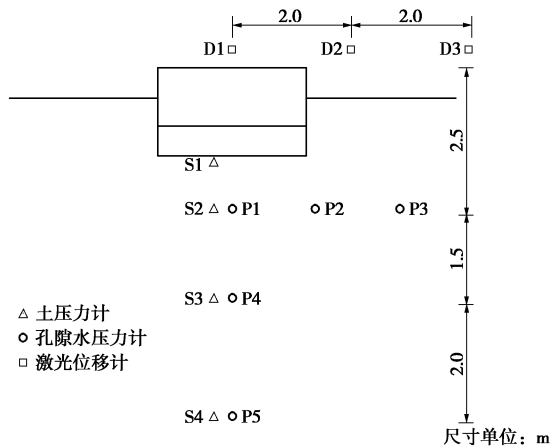


图 3 测量仪器布置示意图

Fig. 3 Layout of measuring instruments

## 4 试验过程

在模型地基表面中间处挖除  $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的土体, 填充  $200 \text{ g}$  的标准砂, 压实到  $10 \text{ mm}$  厚度, 然后放置模型路基板, 其中路基板采用刚度较大的聚丙烯板代替, 这与机场跑道的刚性路基相吻合。用密封胶封住模型箱后固定支架和液压缸, 安装激光位移计, 然后加水至刚刚漫过路基板。将模型箱放置到离心机吊篮上进行试验, 在  $50g$  离心条件下固结  $3 \text{ h}$ , 以消除路基板和砂土垫层设置时的扰动。由于路基板密度较小, 因此在施加循环荷载前施加了  $5 \text{ kPa}$  静荷载作为补充至原位自重应力状态。最后待各孔压传感器测得的压力值接近静水压时进行循环加载试验, 循环荷载的幅值为  $30 \text{ kPa}$ , 频率为  $0.5 \text{ Hz}$ 。

## 5 试验结果分析

### 5.1 累积孔压响应

图 4 和图 5 反映了不同深度和同一深度不同水平距离处的孔隙水压力在循环荷载作用下的反应。随着循环次数的增加, 孔隙水压力呈现先累积增大后逐渐衰减的过程, 即前期孔压增长比孔压消散的更快的结果; 随着循环次数的进一步增大, 后期累计孔压增速减缓而趋于稳定, 此时孔压消散比孔压增长更快, 残余孔压逐渐减小而趋于稳定。同时, 由于加载试验时仅上表面排水 (单面排水), 浅部孔压消散更快些。此外, 可以见出, 埋深  $2.5 \text{ m}$  处与埋深  $4 \text{ m}$  累计孔压幅值较为接近, 直至埋深  $6 \text{ m}$  处, 累计孔压幅值明显的衰减, 这应与动土压力值随深度的显著衰减相关 (图 6)。

图 5 给出了埋深  $2.5 \text{ m}$  处距离路基中心不同距离的累积孔压变化规律。可以看出, 距离路基中心距离

越远, 动载引起的超孔压越小, 说明动载诱发的超孔压在水平向衰减规律与竖向有较大差异性。

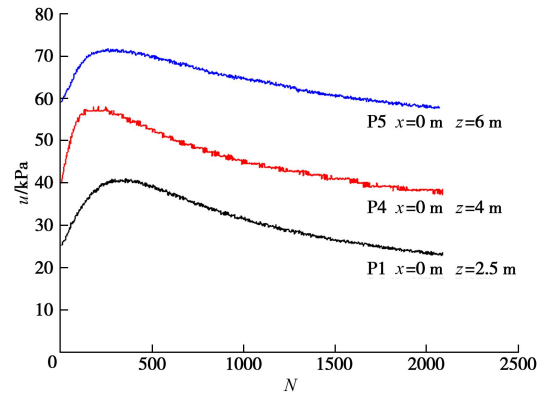


图 4 路基中心不同埋深处超孔压随循环次数的变化规律

Fig. 4 Relationship between pore water pressure and number of cycles at different depths of subsoil

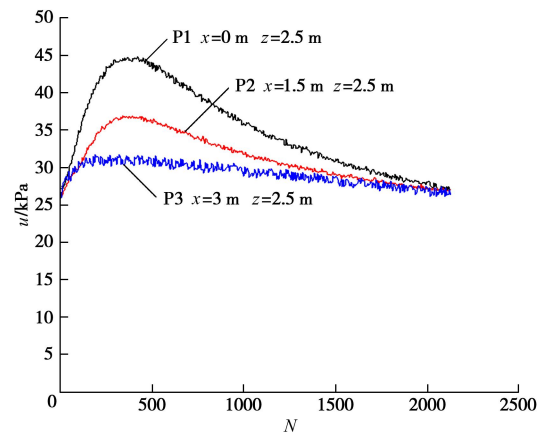


图 5 不同水平距离处超孔压随循环次数的变化规律 ( $z=2.5 \text{ m}$ )

Fig. 5 Relationship between pore water pressure and number of cycles at same depth of  $2.5 \text{ m}$

### 5.2 土压力响应

图 6 是不同深度处土压力与循环次数的关系, 可以看出, 图 6 (a) 土压力与循环次数的关系中, 由于超孔压的消散, 土体的总应力随着循环次数的增加也逐渐变大, 同时单个循环的幅值基本保持不变, 土体附加应力不随循环次数的增加而变大。图 6 (b) 中土压力响应曲线中, 土压力幅值随着循环次数的增加也逐渐减小。对比图 6 (a)、(b) 发现, 深度  $2.5 \text{ m}$  处附加土压力幅值约为  $16 \sim 18 \text{ kPa}$ , 而  $6 \text{ m}$  处动土压力幅值明显减小, 约为  $5 \text{ kPa}$ 。

### 5.3 位移响应

图 7 给出了路基中心处正下方不同埋深处观察的竖向位移 ( $w$ ) 环次随循环次数 ( $N$ ) 的演化规律。可以看出, 路基中心处的地表沉降 (即  $z=0$  处  $w$ ) 变化规律表现为逐渐减小的变化规律, 而距离路基中心  $2 \text{ m}$  与  $4 \text{ m}$  处地表沉降都表现为前期累计变形较小而后期反而增大的异常变化规律, 这里因为刚性路基边缘

处的竖向位移随着循环次数的增大逐渐演化为裂缝破坏, 试验观察的裂缝走向与道路走向平行。

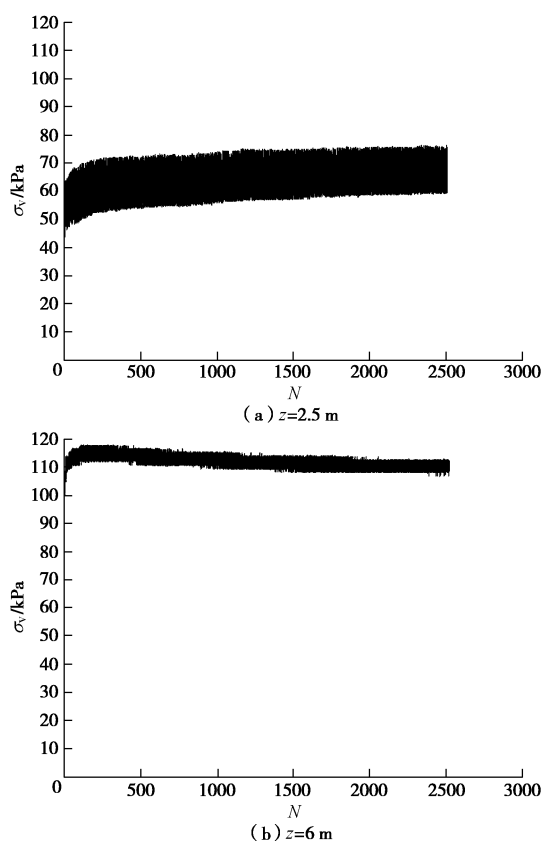


图 6 不同深度处土压力与循环次数的关系

Fig. 6 Relationship between earth pressure and number of cycles at different depths of subsoil

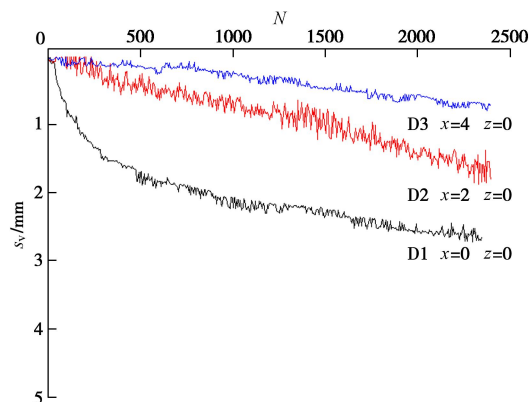


图 7 地表沉降随循环次数 (N) 发展规律

Fig. 7 Development of ground settlement with cyclic numbers

试验中利用 PIV 技术分析监测了循环动载下竖向位移场发展规律 (图 8)。通过竖向位移等值线图可以发现, 在深度方向上土体的累积沉降不断增大, 影响深度及宽度也在增加, 表明随着循环次数增大荷载有效影响区域也随之扩展。此外, 路肩处等值线最为密集, 表明此处差异沉降最明显。路基下方 5~6 m 处等值线明显稀疏, 可代表影响深度, 这一临界影响深

度与超孔压的临界影响深度相一致。

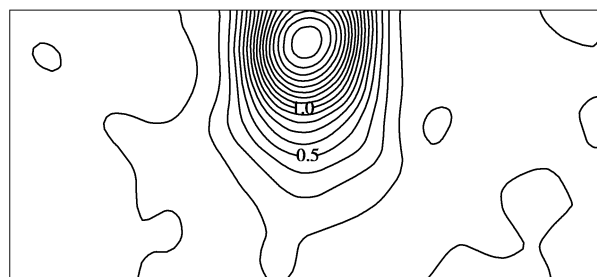


图 8 PIV 技术量测土体竖向位移 (w) 等值线图 (N=1000)

Fig. 8 Contours of vertical displacement of soil using PIV (N=1000)

## 6 结 论

利用土工离心机研究了往复交通动载作用下超固结饱和软土地基的累积变形与孔压响应特征, 并结合 PIV 技术详细模拟饱和软黏土地基位移场分布规律。试验研究表明:

(1) 往复循环动载下, 累计超孔压表现为先增大后减小的变化规律; 循环动载产生的超孔压峰值随着深度变化表现为, 在浅埋处变化不大, 较大埋深处才有显著的减小, 表明循环动载下存在特定的影响深度。

(2) 往复循环动载下饱和软黏土路基其竖向变形表现为: 随着循环次数的增大, 路基竖向变形影响区域越大越大。其中, 路基中心处地表沉降表现为先增大后减小并区域稳定的发展趋势, 而路基边缘处沉降表现为逐渐增大的演化规律。

## 参考文献:

- [1] ALMEIDA M S S, DAVIES M C R, PARRY R H G. Centrifuge tests of embankments on strengthened and unstrengthened clay foundations[J]. Géotechnique, 1985, 35(4): 425 - 441.
- [2] DAS B M, SHIN E C. Laboratory model tests for cyclic load-induced settlement of a strip foundation on clayey soil[J]. Geotech Geol Eng, 1996, 14(3): 213 - 225
- [3] ISLAM MA, GNANENDRAN C T. Behaviour of two closely spaced strip footings placed on a stiff clay bed under cyclic loading[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(2): 1 - 6.
- [4] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87 - 96.