

新型便捷式孔内载荷板试验方法研究\*

于基宁

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘 要:**孔内载荷板试验为深层地基土体力学性质的勘察评估提供了一种直观可靠的测试方法。但常规孔内载荷板试验由于设备繁重、操作复杂、成本高,且随试验深度增大测试精度也大幅降低,致使该方法在工程实际生产中应用较少。为此,笔者提出了一种便捷式测试深层土体压缩性质及承载特征的试验方法,该方法利用试验系统与钻孔孔壁之间的摩擦力作为试验所需的反力,略去了传统深孔载荷板试验中的传力柱、测量杆等测试不稳定部件,采用吊装放入试验层位,使试验过程更加科学合理、稳定可靠、简捷明晰,可快速开展孔内载荷板试验,为工程地基深层原位土体的工程特性的评价提供了一种便捷、科学的试验方法。该方法在宝鸡至兰州客运专线工程地基勘察中的取得良好应用效果,验证了该方法的实用性与可靠性,并对试验规则进行了初步探讨。

**关键词:** 孔内载荷板试验;原位测试;土体压缩试验;便捷式载荷板试验

中图分类号: TU91      文献标识码: A      文章编号: 1673-0836(2017)02-0370-04

Research on Experimental Method of the New Deep Convenient Plate  
Yu Jining

(The First Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Xi'an 710043, P.R. China)

**Abstract:** Intuitive and reliable ground mechanical parameters can be obtained by deep plate loading test, which is of great significance for settlement analysis of high-speed rail ground and high-rise buildings ground. But deep plate loading test is not widely used in engineering due to the heavy equipment, complicated operation, high precision, and low cost. A kind of convenient testing method on soil compressive property and bearing capacity in deep drilling was put forward. A method of deep convenient plate loading test was proposed. Rationality and feasibility was verified through the Baoji to Lanzhou Passenger Dedicated Line Engineering. Because the friction between test system and borehole wall is as reverse force that be required by experiment in this method, the test process is more reasonable and scientific. The testing method will be a new exploring path of evaluating engineering foundation in-situ compression characteristics and strength characteristics.

**Keywords:** deep plate loading test; in-situ test; soil compression test; convenient plate loading test

0 引言

恰当的土工勘察试验方法可为工程建设提供准确的分析设计资料,对提高工程建设质量、降低

工程成本至关重要<sup>[1]</sup>。众多工程经验表明,用单轴试验压缩模量得到的计算结果与建筑物实际沉降相比,往往相差很大,不得不采用一个经验系数来修正<sup>[2]</sup>。因此,研究获取准确的地基深层土

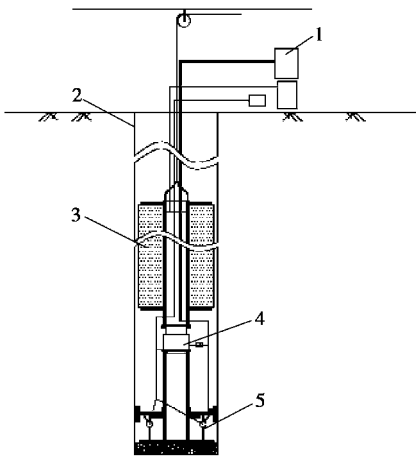
\* 收稿日期:2016-12-02(修改稿)  
作者简介:于基宁(1976-),男,山西襄汾人,博士,高工,主要从事铁路路基、基础工程等领域的设计与科研工作。  
E-mail:yu760405@163.com  
基金项目:原铁道部重点攻坚课题(2010G018-B-4)

体受力变形特征等工程设计参数成为当前超高层建筑<sup>[3]</sup>、高速铁路以及城市地下交通等压缩层深度较大工程亟待解决的问题之一<sup>[4]</sup>。无疑用原位测试方法测定地基土体参数比室内试验更能反映实际情况,不仅避免了取样导致的测试误差,且工况更贴近实际。平板荷载试验是一项使用最早、应用最广泛的原位试验方法。一般用于测试深层土体力学性质的深孔载荷板试验随着试验深度的增大,地面加载系统与连接系统将变得无比庞大、繁杂,致使试验精度降低,成本急剧加大,这是深孔载荷板试验较少应用于实际工程的原因之一。螺旋板试验与深孔载荷试验类似,用钻孔螺旋板替代刚性载荷板进行试验,试验结果需进行修正难以保证其精度<sup>[5]</sup>。随着日益增多的地下建筑工程与深基坑工程,勘察设计工作迫切需要一种高效、准确、便捷的低成本测定原位深层土体力学参数工程勘察测试方法,对准确评估分析地下建筑工程原位土体性质提供帮助<sup>[6]</sup>,提高工程分析设计精度。

### 1 试验原理和设备

现行的深孔载荷板试验的测试误差主要来自地面反力系统连接、传力钢柱及位移测试系统,解决传力柱问题是提高试验可操作性的关键。若能采用某种径向弹性装置支撑与孔壁为试验装置提供反力,满足试验要求的同时又可快速定位测试,这即是便捷式孔内载荷板试验装置的基本原理<sup>[7]</sup>。

试验装置原理如图 1 所示,装置 3 为气压橡胶装置,未充气状态下外径略小于钻孔直径,利用吊装设备放入钻孔,充气状态下其外径略大于钻孔直径,设定气压状态橡胶膜紧压在钻孔侧壁上,为其下设置的加载系统提供支撑反力。气压装置与心管小间隙连接,心管与下端的液压缸刚性连接保证其垂直同心度,充气过程中通过心管调整试验设备在钻孔中与钻孔的同心度,保证试验加载过程的精确性。装置 5 位移传感器固定在测试基准梁上,基准梁与上述反力气压装置同理,靠内部充气固定在孔壁上保持静止独立与整个试验系统。装置最底端为刚性载荷板,与心管刚性连接,在钻孔孔壁垂直度保证的条件下,由上部气压反力系统作用可保证其对下部试验土体的水平均匀加压。所有测试



(1—测试仪表;2—钻孔;3—反力装置;  
4—加载系统;5—传感器)

图 1 便捷式深孔载荷板试验装置原理

Fig. 1 Principle of convenient plate loading  
test device

均采用数字采集传输,包括位移传感器、压力传感器,在孔外地表操作和数据采集。

反力装置的极限承载力可参照摩擦桩基础极限承载力分析方法进行预估,钻孔侧壁支撑土层的极限侧摩阻力可参考《建筑桩基基础规范》(JGJ 94—2008)取值。

试验装置各组成部分为模块设计,对于不同孔径的试验,仅需更换与钻孔孔径相适的模块 3 反力装置即可满足试验要求。

### 2 试验设计

试验装置样机于 2014 年 6 月研制成功,并于同年 7 月在宝兰客运专线工程现场进行了现场调试与测试。测试场地位于天水市麦积区渭河南岸的高阶地之上,试验地层为第四系上更新统风积(Q3eol3),分布于表层,厚 25~30 m。土质疏松,天然密度介于 1.4~1.7 g/cm<sup>3</sup> 之间,含水率介于 14%~18%,液限 27%~34%,塑限 17%~20%。

本次试验钻孔孔径 400 mm,载荷板直径 330 mm,试验深度 14 m。试验设备高度 2.06 m,总重 189 kg,额定气压 0.7 MPa,额定加压液压 8.5 t。测试位移量程 50 mm,精度 0.01 mm。加载传感器量程 10 t,精度 10 kg。共进行了 3 个孔位试验,试验孔间距不小于 10 倍的孔径,试验点位于各孔内 2 m、5 m、8 m、11 m、14 m 深度处。试验设计荷载



图 2 试验现场  
Fig. 2 Testing site

为 500 kPa, 分级加载 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa。每级试验板顶压力变化幅值不大于 20 kg。数据采集频率设定为 6 s/次。

反力系统通过橡胶膜与孔壁摩擦产生,与试验土层的类型、压实度、含水量、气压等条件密切相关。在本次试验地层测试中,反力装置气压 0.7 MPa 时极限抗力可达 6.8 t,即 795 kPa,可满足一般地基土的试验测试要求。

3 试验结果分析

试验装置稳定性测试包括反力系统的稳定性、数值采集系统的稳定性,以及测试结果可靠性。距载荷板板边缘 75 mm 处以 120°均均匀布置 3 个位移传感器。刚性载荷板与心管刚性连接,保证了荷载作用垂直度,经测试传感器在工作中表现出良好的一致性。图 3 为 1 号孔 2 m 层位压力 50 kPa 时各传感器采集数据实时对比图,数据一致性良好。

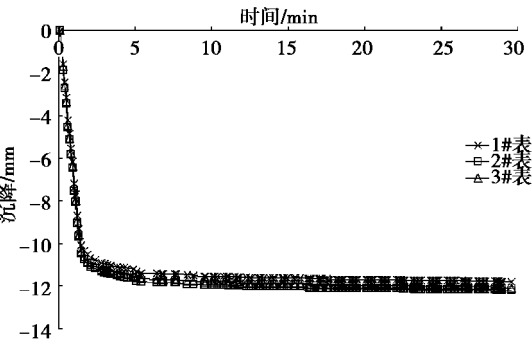


图 3 位移传感器测试结果分析  
Fig.3 Analysis of displacement sensor test results

根据钻孔资料显示,试验土层在 6.2 m 左右层深处变得相对密实,颜色变深,菌丝出现。图 4 为 1 号孔不同试验深度压缩沉降曲线对比。由图明显可知,2 m、5 m 试验层位压缩沉降量较大,曲线

趋势相同。8 m、11 m、14 m 沉降量较上部土层处小许多,但压缩曲线趋势及最终沉降量基本保持一致。因此,试验数据能够准确直接反映这一地层变化特征,并表现出来良好的一致性规律。

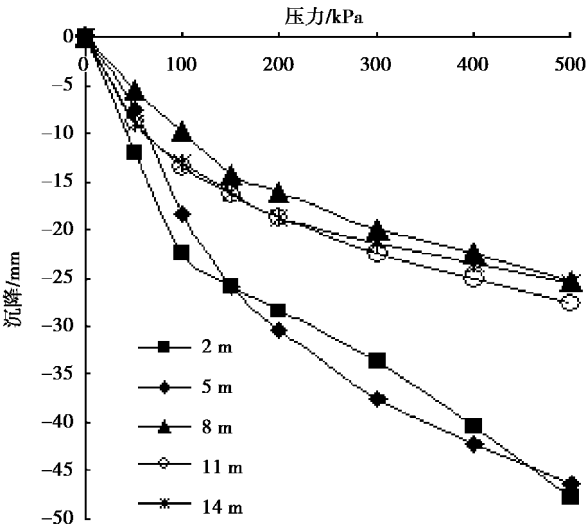


图 4 各试验层位移测试结果分析  
Fig. 4 Analysis of testing results of displacement for different layers

在试验场地的同一地层共进行了 3 组试验。图 5 为 3 组试验在 8 m 深层位的测试结果图,试验结果表现出良好的统一性,试方法具有重复试验的可靠性。

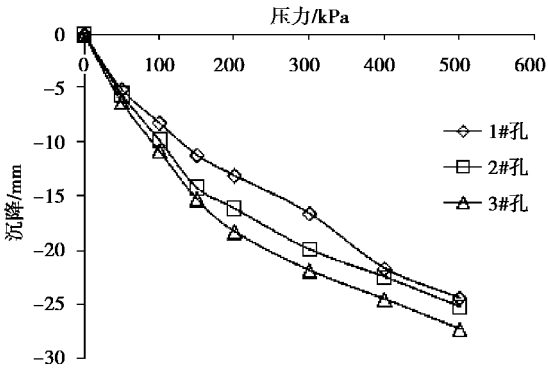


图 5 同一深度各组试验结果对比  
Fig. 5 Comparison of results at the same depth

孔内载荷板试验需要确定两个关键的试验标准,一个是压力稳定标准,另一个是沉降稳定标准。我国《建筑地基基础设计规范》规定:载荷板试验在连续两小时内,每小时的沉降量小于 0.1 mm 时,则认为已趋于稳定,可加下一级。本次试验中采用沉降数据自动采集采集频率为 6 s/次,根据分析系

统预测,砂质黄土地层加载稳定最快时间为 50 min。为进一步深入研究孔内载荷板试验加载稳定时长度问题,对 3 号孔进行了加载稳定性测试试验,图 6 为 3 号孔 5 m 试验深度在 100 kPa 压力作用下孔底土体沉降变形曲线,该级荷载完成用时 120 min,共采集数据 1 200 个。图 7 为图 6 中沉降相对稳定后局部放大图,沉降趋势与对数函数相关性较好。根据拟合对数公式计算,在 100 kPa 压力作用下,第一小时的沉降量为 17.525 mm,2 h 后的总沉降为 17.627 mm,与拟合数据极为相近,压力作用 24 h 后累计沉降量为 17.99 mm,后 22 h 共完成沉降 0.47 mm。由上述分析可知,对于砂质黄土主要压缩沉降发生在加荷初期的 20 min 内,随后进入相对稳定沉降阶段,第一小时后沉降已满足现行规范要求的累计 1 h 内不大于 0.1 mm 沉降的稳定标准。随后又对 3 号孔的 5 m、11 m 试验深度各级压力进行稳定时间测试,测试结果与上述结论相同。由此可知,当采用数字采集实时统计分析系统对试验过程进行分析时,可根据采集数据对沉降稳定时间进行初步预测,从而科学合理地安排加荷测试时间。

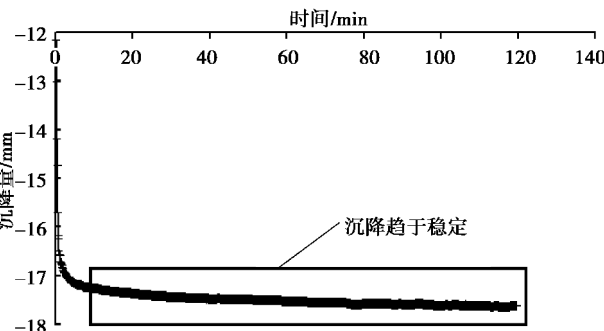


图 6 3 号孔试验深度 5 m 压力 100 kPa 沉降曲线

Fig. 6 Settlement curve with pressure of 100 kPa and depth of 5 m for hole 3#

目前深孔载荷板试验应用实例较少,试验资料的整理也基本沿用浅层载荷板试验的方法。顾宝和、岳建勇等基于 Mindlin 解给出了各自的孔内土压缩变形模量的分析方法,工程地质手册(第三版)也给出了相关系数对其进行修正。图 7 给出了同一钻孔不同测试深度土体压缩变形对比分析图,变形模量分析采用浅层载荷板数据分析方法进行了简化分析,目的是为测试试验装置对于不同深度工程设计参数测试的稳定性。在试验初始 50

kPa 压力作用下有明显的压密段,随压力的逐渐增加,100 kPa 后各曲线呈现稳定近似线性增长态势,各曲线在纵轴上截距不同,斜率相差不大,试验准确反映了孔内土层在压力作用下逐层压密向下传递的过程<sup>[8-10]</sup>。

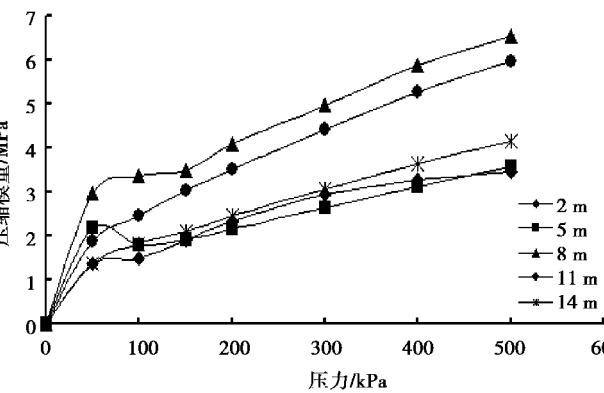


图 7 不同试验深度土体压缩模量对比

Fig. 7 Comparison of soil compression modulus at different depth

4 结论与建议

- (1)便携式深孔载荷板装置省去了地表反力系统,采用吊装的方式实现任意测试深度快速试验,解决了传统方法成本高、操作复杂、测试周期长等缺点,具有较高的实际应用价值。
- (2)试验过程中具有较高的稳定性,测试结果准确,可快速准确地对地基深层土体进行原位测,具有较高的工程应用价值。
- (3)目前关于孔内载荷板试验的现场测试数据较少,缺少系统的理论进行支撑,对其试验及理论仍需进一步系统深入的研究。

参考文献 (References)

[1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. ( Li Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghai University Press, 2004. ( in Chinese) )

[2] 顾宝和, 周红, 朱小林. 深层平板静力载荷试验测定土的变形模量[J]. 工程勘察, 2000 (4): 1-6. (Gu Baohe, Zhou Hong, Zhu Xiaolin. The deformation modulus of soil based on deep plate load test [J]. Engineering Investigation & Surveying, 2000 (4): 1-6. (in Chinese) )