

旁压仪在地基工程原位测试中的应用及其成果分析

胡建华, 汪稔, 周平, 张家铭, 和礼红, 孟庆山

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 介绍了法国梅纳(Menard)旁压仪的结构和工作原理, 并应用于地基勘察工程的原位测试, 对旁压试验结果进行分析, 以确定确定高层建筑物的地基承载力, 并与理论计算结果进行对比, 证明其结果能够很好的应用于工程设计。在旁压试验结果中, 提供了测试地层的其他变形参数, 并为类似工程提供参考。

关 键 词: 梅纳旁压仪 原位测试 地基工程

中图分类号: TU 413.4 文献标识码:

Application and analysis of pressiometer to in-situ measurement of foundation works

HU Jian-hua, WANG Ren, ZHOU Ping, ZHANG Jia-ming, HE Li-hong, MENG Qing-shan

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: The menard pressuremeter (GA) is described in terms of its basic structure, operating principle and testing with relevant calculating methods, and the application and the analysis to the in-suit measurement of the foundation engineering. Especially, the results of the bearing capacity of the foundation, which in compared to the theoretically calculation results, it is proved that it can be well used for engineering design and for the references of similar project.

Key words: Menard pressuremeter, foundation engineering, in-suit measurement

1 引 言

在软土地基中进行工程地质勘探, 长期以来是依靠钻探、取样、室内试验等常规手段来提供地基土的物理力学性质指标, 作出工程地质评价。但是, 目前“高、重、大”的工程项目日益增多, 遇到越来越多复杂的工程地质问题。同时, 近几十年来, 土力学也取得了很大的进步, 对地基土的应力-应变关系有了深入的了解, 已由线弹性关系发展到非线性关系; 由各向同性发展到各向异性, 出现了有限单元法对复杂边界条件及土的应力-应变关系求解完整的数学解。为此, 工程上要求勘察能够提供更为确切、可靠的测试指标并能反映地基土的原始应力状态, 这就要求地基勘探中更注重原位测试技术。

旁压试验又称横压试验, 它利用旁压器对钻孔壁施加横向均匀应力, 使孔壁土体发生径向变形直至破坏, 利用量测仪器量测压力和径向变形的关系推求地基土力学参数的一种原位测试技术, 根据试验的读数可以得到应力-应变或体积-压力之间的关系曲线, 据此可用来对试验土体进行分类, 评估它的物理状态, 确定土体的强度参数、变形参数、地基的承载能力、建筑物基础的沉降、单桩的承载力与沉降以及侧向的地基反力系数等。它具有以下的优点:

(1) 旁压试验的物理模型为轴对称的圆柱形孔的扩张问题, 它是一个轴对称的平面应变问题, 这个问题的弹塑性解已经得到了很好的解决;

(2) 旁压试验可在不同深度、任何指定的位置

进行试验，且不受地下水的限制；

(3) 同其他原位测试相比，旁压试验的测试深度大，并可用于较难测试的松散地层；

(4) 与室内试验相比，旁压试验涉及的试样大得多，且扰动较小；

(5) 除了可测定土的横向压缩性外，还可测定原位侧压力系数 K_0 ，强度参数及应力应变关系。

本文介绍法国GA型梅纳旁压仪探头外径58 mm，测量腔长度200 mm，容积为535 cm³。

2 梅纳旁压仪结构及其工作原理

法国梅纳旁压仪是最早引进到我国并得到广泛推广的一种旁压仪，其结构由三部分组成，分别是读数箱、管路和旁压器。读数箱：它能够精确量测出施加到探头上的压力，并能够随着压力与时间的变化同时读出量测腔中的体积变化。压缩气体瓶提供了整个试验用的压力来源。管路：一般使用塑料管，用它来连接读数器和旁压器，对该管路的要求是柔软和具有高强度，以减小体积读数中的误差。旁压器：三腔式旁压器，即中间的一个量测腔和上下各一个保护腔。工作示意图见图1。

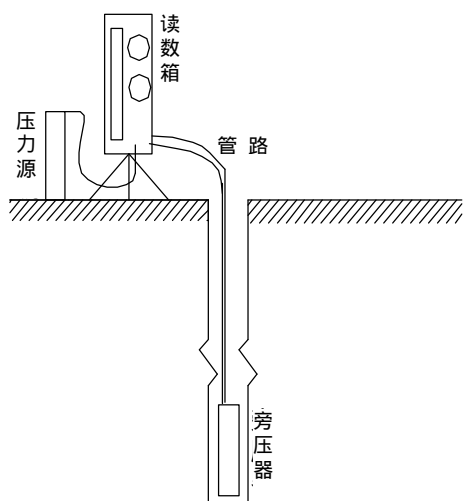


图1 旁压仪工作示意图

Fig. 1 Pressuremeter test principle

旁压试验的工作原理：试验时，首先打开水源阀门，向旁压器中空充入一定量的水后关闭。此时，读数箱体积测管的水位与地下水位的差值即为试验初始压力。然后打开气源阀，通过控制装置将高压气源减压，并分成两部分，一部分供给量测腔，另

一部分供给上下保护腔，使旁压器受压(量测腔为气压水)而膨胀，对旁压器施加一定的横向压力，并由压力表和体积测管测出压力值和水位值，它即反映孔壁试验土层的应力和变形的关系。保护腔的主要作用是延长孔壁的试验土层的长度，以减少量测腔的端部影响，使量测腔对孔壁产生严格、均匀的压力，从而将复杂的空间应变状态简化为近似的平面应变状态。

3 工程应用

武汉某拟建高层住宅楼建筑，总高约80 m，地面以上28层，地下1层，根据勘察结果，本场地在地貌上属于长江级阶地垄岗地带。场区岩土在钻探的范围内，根据其特征可划分为七个单元层，即：(1)层为杂填土；(2)层为第四系上更新统洪冲积粘土；(3)层为第四系中更新统洪冲积粘土夹碎石；(4)层为第四系中更新统洪冲积粉质粘土；(5-1)~(5-3)层为第四系中更新统冲积砂土，(5-4)层为第四系中更新统残坡积土；(6)层二叠系泥质灰岩，(7)层石炭系(含碳质)含粉沙质泥岩。第(4)和(5-1)、(5-3)的形成与长江古河道的变迁有关，由于该层取样、室内试验易扰动，试验结果与实际有一定的出入，其存在直接影响到拟建高层住宅楼的安全。因此，本次旁压试验的目的是确定该土层的初始压力 P_0 、临塑压力 P_L 、极限压力 P_L 和旁压模量 E_m 等变形参数，以及由此推算地基承载力和变形参数。

4 试验成果分析

本次试验共作了4个钻孔，5个试验点。最大测试深度为19.0 m，最大测试压力为2.4 MPa，试验采用多级逐次加载的方法。

4.1 旁压器探头标定

旁压试验要得到土的真实压力—变形关系，进而计算出地基土的参数，必须对所经过的一定管路观测的压力和变形(体积变化)进行校正，图2为探头的弹性膜约束力率定曲线，其是探头在无外压力约束作用下其自身弹性膜的约束力与体积的关系，试验中土体受到的实际压力—体变曲线应由试验曲线中每点扣去相应体变时标定的压力值。图3是综合变形率定曲线，消除在压力作用下，连接单元和旁压器的管路膨胀，以及橡胶膜和水的压缩造成的变形系统体积的损失。因此，作用于土体的真实的

压力值 P 和变形值 V ，应由试验结果进行校正，其校正公式如下：

$$P = P_m + U_w - P_i \tag{1}$$

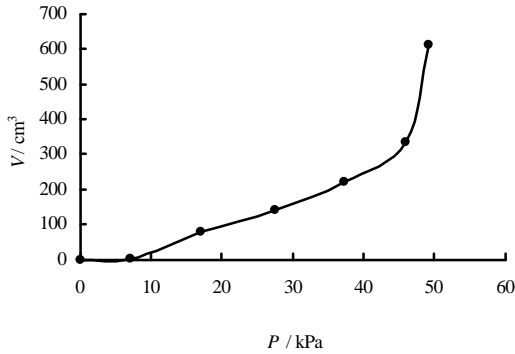


图2 探头旁压膜约束力校正曲线
Fig. 2 Calibration for pressure losses

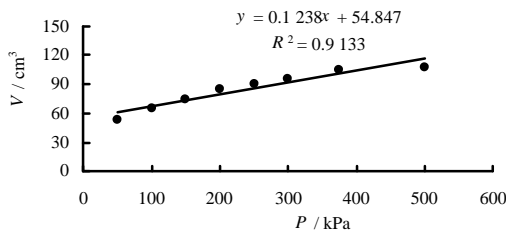


图3 仪器综合变形率定曲线
Fig. 3 Calibration for volume losses

$$V = V_m - a_p(P_m + U_w) \tag{2}$$

式中 P 为校正后的压力； P_m 压力表的读数； U_w 静水压力； P_i 弹性膜约束力，由各级总压力(P_m+U_w)对应的体积 V_m 查弹性膜约束力率定曲线； V 为校正后的体积； V_m 为(P_m+U_w)对应的体积； a_p 为仪器综合变形校正系数，由仪器综合变形率定曲线上的点作回归分析，得线性回归方程：

$y = 0.1238x + 54.847$ (相关系数 $r = 0.96$)，则 a_p 值为 0.1238。

4.2 旁压试验结果与分析

一个完整的旁压曲线可划分为三段(见图4的标准曲线)，第一段为初始阶段-OA段，曲线的上凸段，反映探头本身的变化规律以及探头部分与孔壁接触，由于应力释放、钻孔的缩孔而产生的扰动土体变形；第二段为似弹性阶段-AB段，该段为直线段，表明土体处于弹性变形阶段；第三段为塑性变形阶段-BC段，曲线为下凹段，土体进入受压屈服，处于弹塑性阶段直至破坏，由于预钻式旁压仪 P-V 曲线一般较短破坏点在曲线中难以定出。

(1) 图4中的1#孔6.0 m 2#孔5.5 m 2#孔13.7 m, 3#孔18.7 m以及4#孔19.0 m分别为各自的旁压 P-V 曲线，由曲线的形状可以看出曲线都比较完整，均有明显的初始、似弹性、和屈服三段，直线段两端拐点比较明显，试验数据理想。

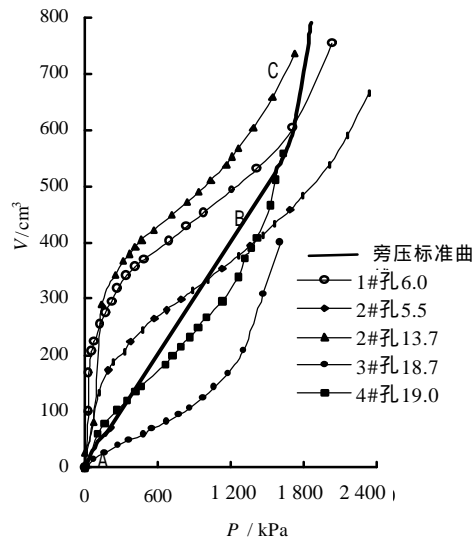


图4 标准旁压试验曲线和各测点旁压 V-P 曲线
Fig. 4 Ideal shape of pressuremeter corrected curve and pressuremeter test curve

(2) 图4中曲线1#孔6.0 m, 2#孔5.5 m和3#孔18.7 m, 4#孔19.0 m分别为不同钻孔同一地层-(2)层第四纪上更新统洪冲积粘土和(5-1)~(5-3)层为第四系中更新统冲积砂土的旁压曲线，曲线的直线段明显，1#孔6.0 m, 2#孔5.5 m 极限压力较大，在测量中进入塑性段的试验点数少，曲线中塑性段较短。而在3#孔18.7 m 4#孔19.0 m 试验中各段数据合理，进入塑性区的曲线段的最大数值与该土层的极限压力较接近，其下凹曲线段表现明显。

(3) 图4中曲线1#孔6.0 m的起始段较长，这是由于钻孔成孔后未及时进行旁压试验，成孔后扰动较大，同时，由于孔壁周围的土体受水浸泡，土体软化，孔壁周围的土体与原状土有较大的差别，将扰动土体压到钻孔前的状态变形较大。而曲线2#孔13.7 m为钻孔2中的(4)层第四系中更新统洪冲积粉质粘土，由于钻孔成孔时，水冲洗成孔对孔壁粉质粘土有冲刷作用，孔径有一定的扩孔，曲线起始段较长，这两条曲线段的上凸段表现明显。

(4) 旁压特征参数的确定

由试验曲线1#孔6.0 m为例来说明。

地层的原始水平压力 P_0 由图4中的 P-V 曲线的直线段延长与 V 轴的交点定义为 V_0 ，其垂线与

P-V 曲线的交点为 P₀，为 267.3 kPa，临塑压力 P_f 为曲线段中直线段的终点，其值为 1 414.1 kPa。

极限压力 P_l，由于旁压仪本身构造和成孔孔径大小的关系，试验难以直接求出极限压力，利用图 5 的 P_l/V 曲线的延长线与 1/(2V₀+V_c)的交点对应的压力为 P_l，其值为 2 490 kPa。其他的试验结果见表 1。

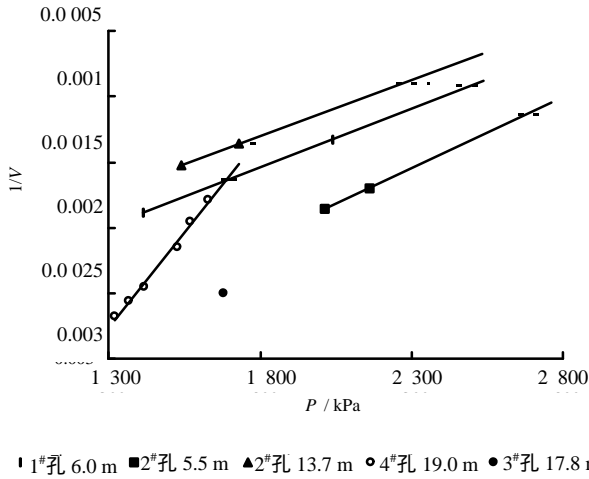


图 5 测点的 P - 1/V 曲线
Fig. 5 Determination of Limit pressure from inverse of volume versus pressure

表 1 旁压试验条件及其成果表
Table 1 The condition and test results of the pressuermeter test

编号	钻孔深度 / m	初始	临塑	极限	地基承载力 R	旁压模量 E _m	旁压剪切模量 G _m	变形模量 E ₀	压缩模量 E _s
		压力 P ₀	压力 P _f	压力 P _l					
ZK1	6.0	267.3	1414.1	2490	854.9	14.18	5.14	25.69	30.83
ZK2	5.5	227.8	1686.6	2670	954.0	12.68	4.82	25.36	30.43
ZK2	13.7	250.2	1212.6	2250	666.6	12.70	4.78	23.95	28.74
ZK3	19.0	256.0	1127.6	1780	506.3	9.06	3.54	18.11	21.74
ZK4	17.8	162.9	864.6	1690	501.0	8.67	3.03	17.34	20.81

4.3 旁压参数的计算

利用旁压试验结果可以计算和推求地基土的旁压变形参数、地基承载力和变形参数。

旁压试验是典型的轴对称平面应变问题，由轴对称平面应变问题的弹性理论和 Lamé 提出的无限弹性介质中的圆柱孔穴径向膨胀方程可得旁压模量 E_m，旁压剪切模量 G_m。

圆柱孔穴径向膨胀方程：

$$\begin{cases} G_m = V \times \frac{\Delta P}{\Delta V} \\ G_m = \frac{E_m}{2(1+\mu)} \\ V = V_c + \frac{V_0 + V_m}{2} \end{cases} \quad (3)$$

则：

$$E_m = 2(1+\mu)(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2}) \frac{\Delta P}{\Delta V} \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$G_m = (V_c + \frac{V_0 + V_f}{2}) \frac{\Delta P}{\Delta V} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中 μ 为泊松比，本试验建议值，一般正常固结和轻度超固结砂土和粉土取 0.33，可塑和坚硬状态粘性土取 0.38，软塑粘性土、淤泥和淤泥质土取 0.41，V_c 旁压器测量腔的固有体积 535 cm³，V₀ 为 P₀ 对应的体积，V_f 为临塑压力 P_f 对应的体积 cm³，P/V 为旁压曲线似弹性直线段的斜率 kPa/cm³；E_m 和 G_m 分别为旁压模量和旁压剪切模量 MPa。

浅基础的地基承载力[R]的确定，运用极限压力法计算，以净极限压力 P_l^{*}=P_l-P₀ 为依据，地基承载力[R]为

$$[R] = \frac{1}{F} (P_l - P_0) = \frac{1}{F} \cdot P_l^* \quad (6)$$

由于 P_l^{*} 已扣除了试验深度的初始压力 P₀，在使用时仍需进行深度修订。对于粘土和粉质粘土 F 取值为 2.6，粉土取值为 3.0。

由旁压模量和旁压剪切模量可以推算地基土体的变形参数：

$$E_0 = E_m / a \quad (7)$$

式中 E₀ 为土的弹性模量，a 为土的结构系数(见文献[6]236 页)。

土的弹性模量 E₀ 和压缩模量 E_s 的关系：

$$E_0 = (1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}) E_s \quad (8)$$

式中 E_s 为压缩模量。

以上各计算结果见表 1。

4.4 地基承载力的比较研究

旁压试验由于在砂土中类比资料较少，因此本次旁压试验首先利用浅层粘土和粉质粘土中的旁压试验结果与理论计算结果进行比较。由(2)层第四系上更新统洪冲积粘土理论计算的承载力设计值为 736 kPa，而在 ZK1-6.0 m 和 ZK2-5.5 m 的旁压试验中地基承载力分别为 854.9 kPa 和 954.0 kPa，其平均值为 904.5 kPa，旁压试验的结果值偏大，其可能是安全系数取值偏小，或室内理论计算结果过于保

守；(4)层第四系中更新统洪冲积粉质粘土承载力理论计算经深宽修正后的承载力为 662 kPa，在 ZK2-13.7 m 旁压试验的结果为 666.6 kPa，数值结果较符合；(5-1)~(5-3)层为第四系中更新统冲积砂土在 ZK3-19.0 m 和 ZK4-17.8 m 中旁压试验的结果分别为 506.3 和 501.0 kPa，理论计算结果经深宽修正后的承载力为 698 kPa，旁压试验结果偏小，这是由于旁压试验的结果在计算时未进行深宽修正和安全系数取值偏大。总之，试验结果与理论计算结果较吻合，为地基承载力的确定提供了一种很好的原位测试技术。

5 结 论

(1) 现代高层建筑物所涉及的土层越来越复杂，为了工程的安全可靠，需要了解这些土层的力学状态，在实际工作中涉及到的土层又很复杂，取不得完整的岩芯，或者对原始状态土层扰动很大，得不到可靠的参数，应用旁压仪进行原位测试将作为一种很好的方法，本文在应用旁压仪进行了某拟建高层建筑物的粘土、粉质粘土和砂土的原位测试，为工程设计中的粉质粘土和砂土提供了基本数据，取得了很好的效果；

(2) 影响旁压试验结果的因素很多，有钻孔孔径的大小，钻孔内的泥浆压力，钻孔对岩、土层原始状态的扰动，以及试验与钻孔成孔的时间间隔等，在试验中应该保证钻孔的质量，并且试验应该在钻孔成孔后立即进行，以免造成缩孔和塌孔以及对孔

周土体的扰动，试验中由于试验时间的原因造成了周土体的扰动，试验中由于试验时间的原因造成了部分旁压试验曲线的其初始段曲线较长；

(3) 旁压试验以平面轴对称的加压方式进行工作，试验的全部过程和所得的数据都是水平方向的力学关系，为了直接应用旁压试验的结果，应该开展旁压试验与荷载试验、压缩试验的对比研究。

参 考 文 献

- [1] 祝龙根, 刘利民等编著. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 唐贤强, 谢瑛等编著. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [3] 中华人民共和国国家标准. 《岩土工程勘察规范》(GBJ 50021-1994) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [4] 吴 文, 徐松林. 旁压仪在岩土工程深部原位测试技术中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1).
- [5] 祝德生. GA 型旁压仪的应用及成果分析[J]. 探矿工程, 1998, 2.
- [6] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [7] 陈希哲编著. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.