

国家自然科学基金资助
工程勘察新技术

孔压静力触探 测试机理 方法及工程应用

马淑芝 汤艳春 编著
孟高头 高金川



中国地质大学出版社

国家自然科学基金资助

工程勘察新技术

孔压静力触探测试机理、 方法及工程应用

(附：土体原位测试技术)

马淑芝 汤艳春 孟高头 高金川 编著

中国地质大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

孔压静力触探测试机理、方法及工程应用/马淑芝, 汤艳春, 孟高头, 高金川, 编著. — 武汉: 中国地质大学出版社, 2007.

ISBN 978-7-5625-2159-4

I. 孔…

II. ①马…②汤…③孟…④高…

III. 土体-原位试验-技术-研究

IV. TU413

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 009205 号

孔压静力触探测试机理、方法及工程应用

马淑芝 汤艳春 编著
孟高头 高金川

责任编辑: 徐润英

责任校对: 戴莹

出版发行: 中国地质大学出版社 (武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编: 430074

电话: (027) 67883511

传真: 67883580

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销: 全国新华书店

Http: //www. cugp. cn

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16

字数: 260 千字 印张: 10

版次: 2007 年 1 月第 1 版

印次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

印刷: 中国地质大学出版社印刷厂

印数: 1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2159-4

定价: 26.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

Supported by National Natural Science Fund

Geotechnical Investigation

**Piezocone Penetration Test Mechanism,
Methods and Its Engineering Application**
(Appendix: In-situ testings of soils)

Ma Shuzhi Tang Yanchun Meng Gaotou Gao Jinchuan

The China University of Geosciences Press

前言

可测孔隙水压力静力触探（简称“孔压静探”）自 20 世纪 70 年代末被研制出来后，被迅速推广应用。在欧美以及众多发展中国家，目前孔压静探已成为土体工程勘察最常用和最主要的手段之一。与单桥和双桥静探相比较，孔压静探能够测试贯入所产生的超孔隙水压力及其消散过程，划分土类和土层精度高，所测土性参数多，测试速度快，既可在勘察现场、又可在室内用计算机处理测试成果，因此极大地拓展了其应用范围。

我国自 1985 年开始引进孔压静探仪，之后许多高等院校、科研院所及勘测单位相继进行了孔压静探的测试和研究。南京水利科学研究院、同济大学、铁道第四勘测设计院、中国地质大学等单位都做出了较大贡献。浙江温岭南光地质仪器有限公司等单位还进行了国产孔压静探仪的开发与商品化生产。但到目前为止，孔压静探还远未在我国普及。国内孔压静探仪器开发滞后，缺乏专门的测试规范等原因，严重阻碍了孔压静探的推广与应用。

本书是笔者多年从事孔压静探教学、科研与生产的成果总结。笔者曾将进口和国产的孔压静探仪应用于黄河流域、长江流域、珠江三角洲等地区，积累了丰富的实践经验，并进行了相关的理论和应用研究。特别是曾两次得到国家自然科学基金资助，进行孔压静探测试机理的研究，进行了仿真型孔压静探模型槽试验及孔压探头贯入的应力场与渗流场计算机数值模拟。笔者在珠江三角洲开展的孔压静探应用研究获得了广东省科委科技成果奖，先后出版了 3 本与孔压静探有关的专著，在国内外发表了数十篇相关论文。这些都为本书的编写奠定了良好的基础。

出版本书的目的，主要是为了在我国推广孔压静探的应用，特别是在地下水位埋藏较浅的平原和沿江、沿海、沿湖等地区，大力提倡应用孔压静探，提高土体原位测试精度和应用范围，尽快赶上和超过国外工程勘察先进水平。

本书详尽论述了孔压静探的测试机理、方法及工程应用，力求科学性、实用性与先进性统一。为了使初学者易于自学，本书从比较基础的东西写起；同时为了实用性，又列进了大量的实用图表和关系式。为了加强本书的实用性，还将常用的土体原位测试方法列于附录中。希望本书能成为岩土工程勘察人员深感有用的必备书之一。

许多人参加了相关的研究工作，有林彤、吴来杰、王浩、鲁少宏、姜珂、刘健、张德波、安岚、何风雨、张振坤、陈新国、王先忠、李长冬等，还有南光地质仪器有限公司的陈怀峰、陈思、陈捷华等，在此一并表示感谢。

由于笔者水平有限以及科学技术不断在发展创新，书中缺点和错误在所难免，敬请读者不吝指教，以便更正。

笔 者

2006 年 10 月

Preface

Piezococone Penetration Test (the abbreviation is CPTU), developed in 1980s, can measure the excess pore water pressure except cone resistance, sleeve friction generated by CPTU, has been used widely in the geotechnical investigation in the world. Now in the Europe, American and the most of developing countries and areas, the CPTU has been the conventional and primary means, the reason is that the CPTU can measure an important parameter which is the excess pore water pressure being generated during the course of CPTU which the Cone Penetration Test (CPT) can not, and can do the experiment of the excess pore water pressure dissipation. As well-known, the water in the soil can change the engineering properties of soil greatly, the permeability of the water in the soil can reflect the soil character and types, so the application of CPTU has been expanded very largely. In other words, the CPTU can not only measure the parameters that the CPT can do, but also measure the parameter that the CPT can not do. The main advantages of CPTU are the more parameters measured, the higher accuracy of dividing soil types, and the faster testing, and the result of CPTU test can be analysed both on the investigating scene and in office using computer.

Since 1985, the equipment of CPTU has been introduced into China, many colleges and universities, the science academies and the companies of investigation started the test and research of CPTU, and the development of the equipment of CPTU one after the other. The Tongji university, the China university of geosciences, the ministry of railways, and the in-situ testing team of the fourth survey and design institute of China railway have done the more important contributions. Some companies such as the NanGuang geology equipment limited company in Wenling city of Zhejiang Province has developed the homemade CPTU equipments and put these into market. But by far, CPTU can not still be used popularly in our country, the main reasons are the lag of development of CPTU equipment in China, the decreasing price due to the competition of the market of the engineering investigation, and the unperfected criterion and so on. These aspects have blocked the popularization and application of new technique. This situation must be changed quickly.

This book is the summary of the authors' CPTU result of teaching, researching and working in more than twenty years. Using the importing and homemade CPTU equipments the authors ever accumulated many useful experiences in overseas and in many places and engineering investigation items in China, such as the area along Yellow River, the ChangJiang River, the JiangHan plain, the ZhuJiang delta and the ShenZhen airport and the express roads investigation, and started researching the correlative theories and application. Especially the authors got two items for researching the mechanism of CPTU test from the national natural science foundation of China (No. 49372154 and 40172090 respectively). The authors made the CPTU model chamber test, and simulated the stress field and the seepage field around the probe with the method of computer numerical modeling, and researched the

CPTU application in the ZhuJiang delta specially, which item received the technological award by the science and technology committee of GuangDong province, and published three monographies relating to CPTU, and scores of articles published in China and abroad. The aim of publishing this book is mainly popularizing the CPTU application in China, especially in the area along the rivers, seas and lakes where the groundwater level is higher, advocating to apply the CPTU new technology, improving the precision and the application range of the in-situ in soil test, and reaching and exceeding the advanced level of the overseas engineering investigation as soon as possible.

To make the beginner easy to learn, the authors wrote the book from the more basic content, at the same time, to the aid the practitioners of the engineering investigation, the authors added up many charts, figures and expressions to the book. So this book includes not only the theories but also the test rules that can be practiced, and throughout this book, the readers can not only know how to do, but also know why to do. The authors have specified the almost all aspects of CPTU in detail, and wish to have the character of science, practicality and the advanced character. There are also other important techniques of in-situ testing of soils in the appendix 2 for practitioners to use conveniently, and hope this book to become the one of the necessary book that can be effectively used for the practitioners in geotechnical investigation.

Besides the authors, some people participated in the correlative researching and writing work, such as Lin Tong, Wu Laijie, Wang Hao, Lu Shaohong, Jiang Ke, Liu Jian, Zhang Debo, An Lan, He Fengyu, Zhang Zhenkun, Chen Xinguo, Wang Xianzhong, Li Changdong and Chen Huaifeng, Chen Si, Chen Jiehua of the NanGuang geology equipment limited company. Thank for the above people!

Because of the limited level of the authors and the continual development of science and technology, it is unavoidable to find the disadvantages and mistakes in the book. So welcome the readers to point out the mistakes so that improvements can be made to future edition.

The authors
October, 2006

本书主要参数符号

A_f ——孔隙水压力系数；	P ——荷载，压力；
B_q ——孔压参数比；	P_s ——比贯入阻力；
C ——内聚力；	q_c ——锥尖（头）阻力；
C_c ——再压缩指数；	q_d ——桩端阻力；
C_s ——压缩指数；	q_p ——桩极限承载力；
C_h ——水平向固结系数；	q_T ——锥尖（头）总阻力；
C_v ——垂直向固结系数；	R_c ——重复压缩比；
C_u ——不排水抗剪强度；	R_h ——渗透系数的各向异性比；
D_{50} ——平均粒径；	r_0 ——孔压探头半径；
D_r ——相对密度；	RR ——土的再压缩系数；
E ——弹性模量；	T ——时间因素；
E_s ——压缩模量；	u ——孔隙水压力；
E_0 ——变形模量；	u_w ——静水压力（也可表达为 u_0 ）；
e ——孔隙比；	Δu ——超孔隙水压力；
f_s ——侧壁摩阻力；	$u_{\max}$ ——消散试验开始最大孔压值；
f_0 ——承载力基本值（单个试验值）；	u_T ——孔隙水压力（锥面所测）；
f_T ——总侧壁摩阻力；	$\bar{U}$ ——归一化超孔压比（消散度）；
f_k ——承载力标准值（容许承载力）；	U ——固结度；
F_R ——摩阻比；	w ——含水量；
G ——剪切模量；	w_L ——液限；
H_{cr} ——临界深度；	w_p ——塑限；
I_L ——液性指数；	α ——系数；
I_p ——塑性指数；	β ——系数，角度；
I_r ——刚度（性）指数；	γ ——重力密度（重度）；
K ——安全系数；	γ_w ——水的重度；
k_h ——水平向渗透系数；	ϵ ——应变；
k_v ——垂直向渗透系数；	λ ——综合修正系数；
M ——切线模量；	μ ——泊松比；
m_h ——水平向体积压缩系数；	σ ——应力；
m_v ——垂直向体积压缩系数；	σ_{w0} ——上覆压力；
N_{cr} ——液化判别标贯击数临界值；	σ'_{w0} ——有效上覆应力；
N_k ——锥尖承载力系数；	τ ——剪应力；
n ——土的孔隙率；	φ ——内摩擦角。
OCR ——超固结比；	

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 孔压静探的仪器设备和测试程序	(4)
第一节 孔压静探的仪器设备	(4)
第二节 孔压静探测试的程序与要求	(9)
第三节 孔压静探测试的成果整理	(18)
第四节 影响孔压静探测试成果精度的主要因素及对策	(21)
第三章 孔压静探测试机理研究	(25)
第一节 孔压静探测试机理的理论分析	(25)
第二节 孔压静探模型槽试验	(30)
第三节 孔压静探测试机理有限元分析	(45)
第四章 孔压静探测试成果的工程应用	(61)
第一节 判别土类	(61)
第二节 划分土层与土层剖面	(64)
第三节 确定土的物理力学性质指标	(68)
第四节 确定固结系数与渗透系数	(72)
第五节 判别土层液化势	(77)
第六节 确定应力历史	(80)
第七节 求浅基承载力	(81)
第八节 求桩基承载力	(84)
第九节 静探成果应用的通用性与地区经验	(88)
第五章 孔压静探在珠江三角洲地区的应用研究	(90)
第一节 工程概况	(90)
第二节 利用孔压静探消散试验估算土层固结系数	(90)
第三节 利用孔压静探划分土层、土类	(95)
第四节 利用孔压静探测试软粘土不排水抗剪强度	(99)
第五节 结 论	(101)
附录 其他的主要土体原位测试技术	(103)
参考文献	(148)

Contents

Chapter 1 Introduction	(1)
Chapter 2 Apparatus and Test Procedure of Piezocone Penetration Test(CPTU)	(4)
Section 1 Apparatus of CPTU	(4)
Section 2 Test procedure and requirement of CPTU	(9)
Section 3 Result of CPTU	(18)
Section 4 Influence factors of CPTU	(21)
Chapter 3 Mechanism Research of CPTU	(25)
Section 1 Theoretical analysis of CPTU mechanism	(25)
Section 2 Chamber Test of CPTU	(30)
Section 3 Limited elements analysis of CPTU mechanism	(45)
Chapter 4 Engineering Application of CPTU	(61)
Section 1 Identifying soil type	(61)
Section 2 Dividing soil layer	(64)
Section 3 Determining engineering property index of soils	(68)
Section 4 Evaluating coefficient of consolidation and permeability of soils	(72)
Section 5 Evaluating liquifying potential of soils	(77)
Section 6 Evaluating stress history of soils	(80)
Section 7 Determining bearing capacity of shalow foundation	(81)
Section 8 Determining bearing capacity of pile foundation	(84)
Section 9 General or region use for CPTU	(88)
Chapter 5 CPTU Application Research in Pearl River Delta	(90)
Section 1 Engineering case	(90)
Section 2 Evaluating coefficient of consolidation	(90)
Section 3 Identifying soil type and layer	(95)
Section 4 Determining undrain shear strength of soft soil	(99)
Section 5 Conclusion	(101)
Appendix Other Major In-situ Testing Techniques of Soils	(103)
References	(148)

第一章 绪 论

土体原位测试常被用于滨海、河湖附近及平原地区的工程勘察，尤其是静力触探技术是其中最为常用的。这是因为：

(1) 在工程勘察现场进行静力触探，不用取样，对土体扰动小，可以直接自行贯入土体内成孔；

(2) 静力触探测试结果和土的工程性质及土类有显著的相关关系，所以具有勘探与测试双重作用；

(3) 静力触探可以采用电测技术，便于实现测试过程自动化，测试结果可由计算机自动处理，大大减轻了人的工作强度；

(4) 静力触探的测试数据精度高，再现性好，重复性误差小；

(5) 静力触探探头内可以安装多种传感器，因而测试功能多。如果在探头中装入可测孔隙水压力的传感器，就称为孔隙水压力静力触探。

一、孔压静力触探技术的发展

孔隙水压力静力触探 (Piezocone Penetration Test) 简称孔压静探 (缩写为 CPTU)，于 20 世纪 70 年代末研制成功。它是在标准电测式圆锥静力触探贯入仪 (CPT) 的探头中安装上透水滤器及量测孔隙水压力的传感元件。加入这些设备之后，孔压静探贯入仪不仅可以与普通静力触探贯入仪一样能够测试到探头所受的锥尖阻力和侧壁摩阻力，当探头在饱水土体内贯入时，还可以测试到土中的孔隙水压力——既可以测试到探头贯入引起的超孔隙水压力，还可以测试到探头停止贯入时超孔隙水压力随时间的消散过程，一直可以测试到超孔隙水压力全部消散，直至达到稳定的静水压力。

由于孔压探头的使用，可以大大提高静力触探的用途，除普通静力触探的功能外还增加了其他一些新功能，尤其是可以估算土体的固结和渗透系数，成为原位测试技术的重大新进展。在国外，目前孔压静探已成为土体原位试验的一个重要方面，在工程勘察中已发展为占主导地位，在土工设计参数的获取上已成为一种有效的测试手段，并得到迅速推广。如挪威土工研究所 (N. G. I) 在这一方面做了大量的工作，他们把室内试验、孔压静探试验、理论与现场监测的结果相互验证，建立经验关系，确定经验系数，从而成功地解决了一些离岸工程，如采油平台等复杂工程的勘探。

孔压静探适用于地下水位以下的软粘土、粘性土、粉土、非密实性砂土、黄土、素填土等；对于不饱和的土层、砾石层、碎石层等则不适用。

二、孔压静力触探的优点

通常所说的静力触探包括单桥静力触探 (只能量测比贯入阻力) 和双桥静力触探 (能同

时量测锥尖阻力和侧壁摩阻力)。孔压静力触探与它们相比有突出的优点,具体表现为:

(1) 孔压静探在现场测定土层土类和确定土的工程性质的同时,可以通过量测孔压为评定土的渗透性和固结特性提供依据,利用测试超孔隙水压力的消散求取土的固结系数,改变室内固结试验试样小、易扰动带来的影响,可以大大提高测试结果的准确性;

(2) 由于孔压静探增加了测试孔隙水压力的功能,可以用孔压值修正锥尖阻力值,确定土的固结和渗透系数,能够大大提高判别土的分类、划分土层和获取土的工程性质指标的能力;

(3) 孔压静探的探头上透水滤器厚度只有 3mm,并且孔压传感器反应灵敏,因此能测试薄夹层较多及结构性强的土层,能更真实地反映土体的特性;

(4) 孔压静探的测试数据精度高,再现性好,为了解土体更多工程性质和提高测试精度提供了极大的可能性和现实性,具有勘探与测试双重功能;

(5) 孔压静探可随时配合沉降观测以实测地基中任一位置、任一时刻的固结度,为深化理论认识、积累实践经验创造条件。

总之,孔压静探的优点很多,应在我国大力推广。特别是在地下水位埋深不大的平原、三角洲、沿江河湖地区,优先选用孔压静探是适宜的,因为在贯入同样深度和同样土层的情况下,利用孔压静探能够获得更多和精度更高、更有用的土性参数,可以提高工程勘察精度和节省勘察工作量。

三、孔压静力触探在国内的应用

我国自 1985 年开始引进孔压静探仪,之后许多高等院校、科研院所及勘测单位相继进行了孔压静探的测试和研究。南京水利科学研究院、同济大学、中国地质大学、铁道科学研究院、铁道第四勘测设计院等单位都做出较大贡献,使孔压静探在国内逐渐开始应用到工程实践中。

但是,国内长期以来依然是单桥静力触探占统治地位,孔压静探和双桥静力触探的应用都较少,只有少数单位才应用到孔压静探。造成这种情况的主要原因是因为单桥静力触探在我国应用历史长,经验公式多,相关规范早已将其列入其中,而双桥和孔压静探在我国应用历史短,相关经验公式少,20 世纪 90 年代才被相关规范承认。同时孔压静探的设备复杂、进口价格较高也是其未能大范围应用的原因。

现在,随着对孔压静探研究的深入,我国已经能够自行研制生产出性能稳定可靠、价格经济合理的国产孔压探头,大范围推广和使用孔压静探成为可能。1996 年南京水利科学研究院应用水电部自动化研究所研制的孔压探头在沪宁高速公路进行了大量的试验研究,在土的分类、固结系数的求取等方面做了大量工作,积累了不少经验。浙江温岭市南光地质仪器有限公司等单位也进行了国产孔压静探仪的开发与商品化生产。与此同时,孔压静探也开始逐步走向规范化、标准化。

由于土体原位测试技术的发展历史较短,对测试机理及工程应用的研究都有待于进一步深入。土体的原位测试也不同于室内简单应力条件下的试验,有时还不能从试验结果直接求取参数,而是要通过反馈分析的办法间接求出参数。往往要先选定计算模型,根据求解的结果与实测值之间相差最小的原则决定一组最优参数。孔压静探所测出的数据和土的工程性质之间的关系,多是建立在由大量统计得到的经验、半经验关系之上的公式,在理论和应用上

仍存在不少问题。目前还没有一种理论能比较全面地解释其测试的机理,对其贯入和超孔压消散过程中出现的许多现象的解释还停留在定性阶段,仍需做进一步的深入探讨,但其在勘察实践中的应用性及其高精度已被广泛认可。

四、本书的主要内容

本书详细介绍了孔压静力触探技术的仪器设备、操作过程以及注意事项、试验数据分析与影响因素及其在工程上的应用,通过孔压静探模型槽试验以及数值模拟对孔压静探的机理进行了探讨,并通过工程实例“孔压静力触探在珠江三角洲地区中的应用研究——以高速公路建设为例”进行了实例验证。

另外,为了增加本书的实用性和便于读者应用,本书还将除孔压静探之外的其他主要土体原位测试方法作为附录列于书后。

第二章 孔压静探的仪器设备和测试程序

第一节 孔压静探的仪器设备

孔压静力触探设备，俗称孔压静力触探仪，一般由三部分构成：①孔压静力触探头：是孔压静力触探仪的关键部件，可测锥尖阻力、侧壁摩阻力以及孔隙水压力；②量测记录仪表：用于测量与记录探头所受的各种阻力；③贯入系统：包括触探主机与反力装置，共同负责将探头压入土中，触探主机借助探杆将装在其底端的探头压入土中，反力装置则在贯入探头过程中为主机提供所需要的反力。

静力触探仪的贯入力一般为 $2 \sim 20t$ 。贯入力不能过大是因为细长探杆的受力极限不能太大，太大容易弯曲或折断。贯入力为 $2 \sim 3t$ 者，一般为手摇链式电测十字板-触探两用仪；贯入力大于 $5t$ 者，一般为液压式主机。贯入力等于 $5t$ 或小于 $5t$ 者属于轻型静力触探仪，在交通不便、勘测深度不大或土层较软的地区使用很广泛，这是因为它便于搬运、测试成本低及灵活方便。静力触探车集贯入系统（贯入力一般大于 $10t$ ）、量测记录仪表等为一整体，具有贯入深度大、效率高、劳动强度低、不受天气影响等优点，但它仅适用于交通便利、地形较平坦及汽车可开进的勘测场地。

一、孔压静力触探头

孔压静力触探的探头一般是在普通探头的基础上再安装上可测孔隙水压力的装置，外形结构如图 2-1 所示，它包括摩擦筒、锥头以及透水滤器三部分。

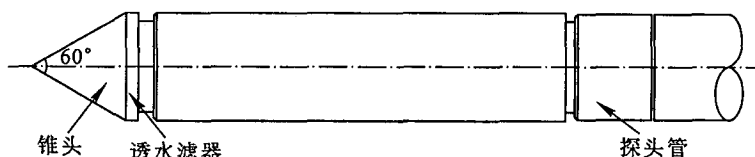


图 2-1 孔压静力触探头示意图

表 2-1 列出常用孔压探头的规格。探头底面积不同，主要是为了适应不同的土层强度，探头底面积越大，能承受的抗压强度越高，越适宜于强度较高的土层，但同时土层的扰动也越大。在工程勘察时，应根据测试目的和场地条件选用合适的探头，但一般情况下应优先选用符合国际标准的探头，即探头顶角为 60° 、底面积为 10cm^2 、侧壁摩擦筒表面积为 150cm^2 的探头。

表 2-1 孔压探头的规格

锥底面积 (cm ²)		10	15	20
锥 头	锥角 θ (°)	60±1		
	公称直径 D_1 (mm)	35.7	43.7	50.4
	直径公差 (mm)	+0.18 0	+0.22 0	+0.25 0
	圆柱高度 h (mm)	≤10		
	有效面积比 a	0.4±0.05		
	过滤片与土接触面积 S_1 (cm ²)	≥1.7		
摩 擦 筒	公称直径 D_2 (mm)	35.7	43.7	50.4
	直径公差 (mm)	+0.35 +0.20	+0.43 +0.24	+0.50 +0.27
	公称长度 L (mm)	133.7	218.5	189.5
	长度公差 (mm)	+0.60 -0.90	+0.90 -1.10	+0.80 -0.95
	有效表面积 S (cm ²)	150	300	300
锥头与摩擦筒间距 ^① e_1 (mm)		≤5		
摩擦筒与探头管间距 e_2 (mm)		≤3		
孔压探头全长 (mm)		$h+e_1+L+e_2+l \geq 1\ 000$		
探头管直径 D_3 (mm)		$(D_1-1.1) \leq D_3 \leq (D_1-0.3)$		
更 新 标 准	D_1 (mm)	<34.8	<42.6	<49.2
	D_2 (mm)	≤34.8	≤42.6	≤49.2
	锥高 H (mm)	<25	<31	<37
	外形	1. 锥面、套筒出现明显变形或刻痕多处; 2. 摩擦筒活动不便; 3. 锥头的公称直径小于摩擦筒的公称直径时; 4. 锥尖受损; 5. 过滤片与土接触面凹于锥头表面或透水失效		

注: ① e_1 、 e_2 为工作状态下的间距。

(一) 透水滤器的位置

孔压静探探头内透水滤器的位置有位于锥尖、锥面、锥头之后（紧接或远离锥头）等几种（图 2-2）。

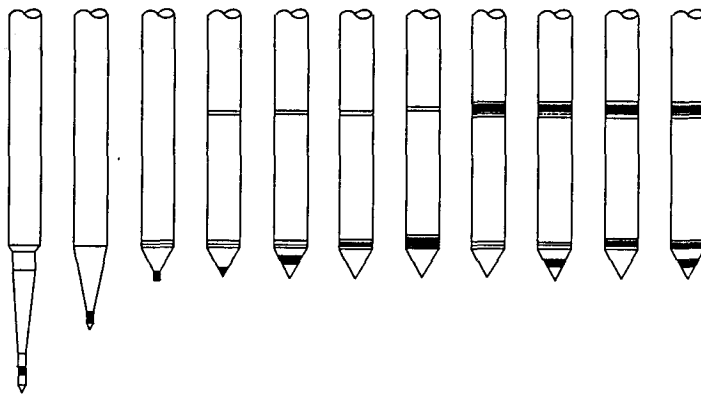


图 2-2 透水滤器在探头上的不同位置

透水滤器安置在不同位置上,探头所测得的超孔隙水压力不同,超孔隙水压力的消散条件和消散速率也不同。当透水滤器安置在锥尖或圆锥侧面时,测得超孔压最大,对土层变化的反应最灵敏,但透水滤器易于磨损,且锥尖附近土体应力条件复杂,使锥尖和锥面量测的孔压稳定性较差。当透水滤器安置在锥头之后等直径圆柱面上时,由于避开了锥头底下的复杂应力区,所测得的孔压比较稳定,孔压的消散接近于圆柱轴对称径向排水条件,但测得的孔压值较小,消散的初期孔压会略微上升,以后才逐渐消散下降,给消散曲线的解释带来困难。当将透水滤器装在圆锥底面上时,不仅可以较灵敏地反应孔隙水压力的变化,透水滤器也不易磨损或堵塞,探头使用寿命较长。目前广泛使用的孔压触探探头的透水滤器位于圆锥底面上(见图 2-1)。本书中如无特殊交待,均为此种探头。

(二) 孔压静探探头的设计要求

无论透水滤器位于探头的什么部位,仍有一些因素影响着孔隙水压力量测结果的可靠性和准确性。这些因素往往与探头的设计特征有关。

1. 探头的机械设计

对于探头机械设计有一个特殊的要求,那就是要保证锥尖所受荷载不能传递到孔隙水压力传感器、透水滤器和饱和液体上。可以通过对安装好的并已饱和过的孔压静探探头加荷,观察孔压传感器的反应来进行检验。如果达到设计要求,不存在压力传递的问题,那么孔压传感器就不会有所反应。

2. 透水滤器的材料

透水滤器由微孔材料制成,如微孔不锈钢、微孔陶瓷、微孔砂石、微孔塑料、粉末冶金材料等。对透水滤器材料的选择要考虑以下几个因素:

(1) 有高的耐磨性;

(2) 有足够的刚度,否则会显著干扰孔压的反应;

(3) 微孔孔径适当,既要有一定的渗透性($1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$),又要能防止土粒进入微孔堵塞渗水通道。另外,还要有高的进气压力,以保证探头拿在手中或经过不饱和土层时透水滤器不至于进气,保持探头的饱水状态。微孔孔径一般为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。

(4) 透水滤器材料要易于加工;

(5) 透水滤器材料的价格低廉,以便于更换透水滤器。

3. 透水滤器的大小

为了保证透水滤器与土有良好的接触以便更精确地测量到孔隙水压力,透水滤器与土的接触面积要足够大,一般要大于 1.7 cm^2 。当透水滤器位于锥头之后时,透水滤器外径不得小于锥头直径。

4. 透水滤器的传压空腔

为了更好地将孔压传递给传感器,透水滤器与孔压电测传感器之间的通道应由排除了气体的液体所填充。该通道称为传压空腔,空腔容积要尽可能小,液压增高后空腔容积的变化要小于 $1 \sim 2 \text{ mm}^3$ 。空腔容积的变化取决于传感器圆膜的直径、厚度及弹性模量。空腔容积越小,孔压的响应越迅速,响应滞后时间越短。另外,空腔通道应尽可能短,不宜多转折或急转折,防止存留气泡。

二、量测记录仪表

与孔压静力触探相配套的量测记录仪表主要有 4 种类型:电阻应变仪、自动记录绘图

仪、数字式测力仪以及数据采集仪。

多数电阻应变仪、自动记录绘图仪和数字式测力仪的功能均不够完善,有的只能人工间隔读数,不能绘图;有的只能绘图,不能显示打印数据。这些仪器虽能满足一般生产需要,但资料整理的工作量大、效率低。目前,计算机采集和数据处理系统已在孔压触探测试中开始得到应用,如中国地质大学研制成功的孔压静力触探数据采集系统就是采用计算机进行数据的自动采集和处理。

该系统由 TCY 型岩土测试仪、探头、深度编码器、PC 机及打印机等部分组成(如图 2-3 所示)。TCY 型岩土测试仪的功能是每隔一定深度(一般 0.1m,由深度编码器发出信号)或一定时间(一般 1s,由测试仪的内部时钟发出信号)采集一次探头数据,包括锥尖阻力、侧壁摩阻力以及孔隙水压力等参数,将这些数据保存、显示并向上位 PC 机发送,绘出它们随深度变化的原始曲线。PC 机的作用是实时接收测试仪发送的数据,进行显示与保存,对测试仪工作进程进行实时监控;另外,PC 机也可以一次批量读取保存在测试仪中的数据,自动生成 EXCEL 电子表格,以便于数据的整理与成果应用,还可以通过打印机输出数据报表。

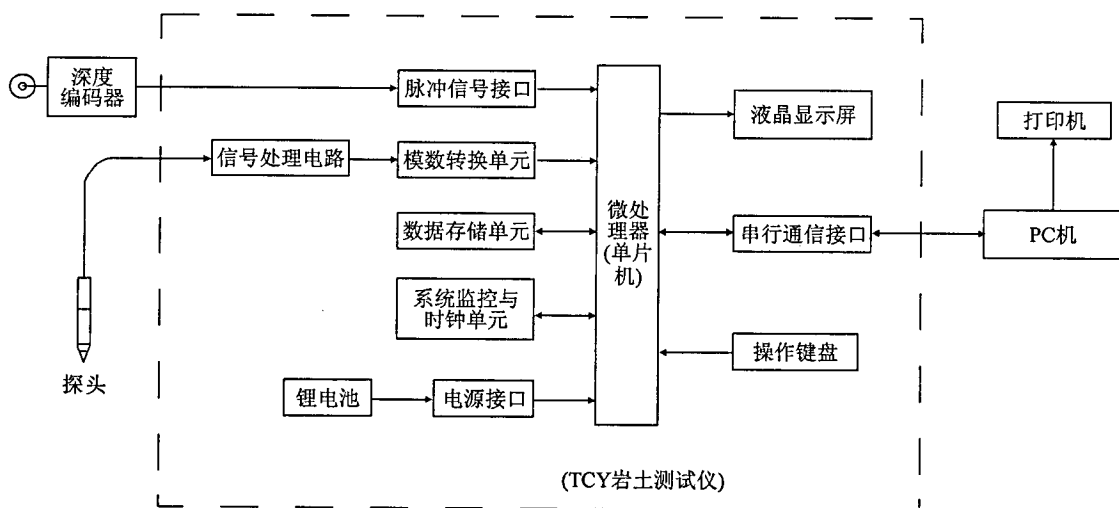


图 2-3 孔压静力触探数据采集系统

1. TCY 型岩土测试仪的工作原理

TCY 型岩土测试仪由中国地质大学研制,包括微处理器(单片机)、信号处理电路、模数转换单元、脉冲信号接口、数据存储单元、系统监控与时钟单元、锂电池与电源接口、串行通信接口、操作键盘与液晶显示屏等单元。测试仪的基本工作原理是:探头的信号(单桥、双桥或三桥)通过屏蔽电缆送入测试仪,经过信号的放大与滤波处理,获得与被测量成正比的模拟电压信号,然后由模数转换单元转换为数字量。触探时,探杆的贯入带动深度编码器回转,每隔一定深度编码器便产生一个脉冲信号(一般为 1 个/0.1m),通过接口电路送入测试仪,微处理器启动一次数据采集,从模数转换单元分别读取各路被测信号的数字量,微处理器首先将数据保存于数据存储单元中,以备以后上位 PC 机批量读取;同时微处理器将这些数据显示在液晶显示屏上,绘出它们随深度变化的原始曲线,从而有利于实时监