



高等学校教材

岩土工程 原位测试

YANTUGONGCHENG YUANWEI CESHI

石林珂 孙文怀 郝小红 编著



郑州大学出版社

高等学校教材

岩土工程原位测试

YAN TU GONG CHENG YUAN WEI CE SHI

石林珂 孙文怀 郝小红 编著

郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程原位测试/石林珂,孙文怀,郝小红编著. —郑州:郑州大学出版社,2003.9

ISBN 7-81048-812-0

I. 岩… II. ①石…②孙…③郝… III. 岩土工程-原位试验-高等学校-教材 IV. TU413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 066143 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:谷振清

全国新华书店经销

郑州文华印刷厂印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:12.25

字数:276 千字

版次:2003 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-6966070

1/16

印次:2003 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-81048-812-0/G·62

定价:29.80 元

本书如有印装质量问题,由承印厂负责调换

内容提要

原位测试方法是岩土工程和工程地质学科的重要组成部分,是岩土工程和工程地质理论得以用于解决实际问题的重要技术手段。《岩土工程原位测试》一书以上、下篇十章的篇幅全面对此作以介绍。本书的前六章为土体原位测试,重点介绍静力荷载试验,静力触探,动力触探,原位十字板剪切试验,旁压试验及现场波速试验。后四章为岩体原位测试,重点介绍岩体变形试验,岩体强度试验,岩体应力测试及岩体声波测试方法。书中详细介绍了各种原位测试方法的原理、仪器设备组成、试验成果的整理及应用等,着重论述了各项测试成果在工程上的应用。

该书可作为岩土工程专业、地质工程专业的教材,同时也可作为岩土工程、地质、矿山、水利水电、交通运输及军工等部门从事工程地质工作的工程技术人员的参考书。

前 言

岩土工程、地质工程的勘察工作常常需要进行大量的试验,而试验又常常分为室内试验和原位试验(即原位测试)。所谓原位测试,是指在岩土原来所处的位置上,基本保持其天然结构、天然含水量以及天然应力状况下测定岩土工程性能指标。它与室内试验取长补短、相辅相成。

近年来,随着我国的改革开放和现代化进程的飞速发展,建设规模不断加大,建筑类型日益增多。与此同时,对工程勘察资料可靠性和定量化程度的要求也愈来愈高。为使工程建设做到安全、可靠、经济、合理,在勘察中原位测试方法的使用越来越多,有的已被列为国家和行业规范的强制性条文。

随着电子技术及仪器制造技术的发展,原位测试技术日趋完善并且逐渐发展和成熟起来。经过近 30 年的发展,尤其是进入 21 世纪以后,国家对原位测试技术更为重视,在相关规范中不仅将原位测试部分单独列为一章,而且对各项测试技术的有关内容作了详细规定。该项技术及相应规范都在发展,而相应的专业书籍却较为缺乏,已有的书籍则因为不够全面、实用等原因,不能很好地满足读者的需求。

为此,编者深感有必要从实用角度出发,全面、系统地介绍岩土工程中各种原位测试方法的原理、设备、技术要求和成果应用等,因而编写了本书。参编人员都是长期工作在岩土工程、地质工程科研和教学第一线的专业技术人员,大家将丰富、成熟的实践经验和最新的科技成果有机结合于一体,使本书既有较强的科学性、实用性,又有一定的先进性。在内容的编排上,编者从基础知识入手,由浅入深,从易到难,使读者逐渐领悟和掌握所介绍的原位测试技术。编者谨希望本书既能成为工程一线技术人员的好帮手,也能成为科研工作者的好参谋。

本书在编写过程中,以我国最新规范为依据。

全书分上、下两篇,共 10 章。其中,第 1、2、3、4 章由孙文怀、杨庆编写,第 7、8、9 章由郝小红编写,第 5、6、10 章及绪论由石林珂编写,最后由石林珂统一书稿。

限于编者的水平,书中疏漏之处在所难免。恳请读者,特别是使用本书的教师和学生多提批评和改进意见,以便今后不断完善。

编者

2003 年 5 月

目 录

绪论	(1)
0.1 原位测试技术的优缺点	(1)
0.2 原位测试技术的种类	(2)
0.3 原位测试技术在我国的发展及现状	(2)
0.4 基本要求	(3)

上篇 土体原位测试

第1章 荷载试验	(7)
1.1 概述	(7)
1.2 平板荷载试验	(7)
1.3 螺旋板荷载试验	(14)
第2章 静力触探试验	(20)
2.1 概述	(20)
2.2 静力触探的设备组成	(20)
2.3 静力触探现场试验	(27)
2.4 成果整理	(28)
2.5 成果应用	(32)
第3章 动力触探试验	(40)
3.1 概述	(40)
3.2 标准贯入试验	(41)
3.3 圆锥动力触探	(51)
第4章 十字板剪切试验	(62)
4.1 概述	(62)
4.2 十字板剪切试验的基本理论	(62)
4.3 机械十字板剪切试验	(63)
4.4 电测十字板剪切试验	(65)
4.5 资料整理	(67)
4.6 成果应用	(67)

第5章 旁压试验	(71)
5.1 旁压试验的基本原理	(71)
5.2 旁压试验的仪器设备	(74)
5.3 影响旁压试验的因素	(77)
5.4 旁压试验的技术要求	(78)
5.5 旁压试验的资料整理	(79)
5.6 旁压试验成果的应用	(81)
第6章 波速测试	(82)
6.1 概述	(82)
6.2 波速测试的技术要求	(82)
6.3 单孔法	(83)
6.4 单孔声波法	(90)
6.5 跨孔法	(91)
6.6 面波法——稳态振动法	(94)
6.7 面波法——瞬态振动法	(96)

下篇 岩体原位测试

第7章 岩体变形特征指标的原位测试	(105)
7.1 概述	(105)
7.2 承压板法的基本原理	(105)
7.3 钻孔变形试验	(116)
第8章 岩体强度试验	(120)
8.1 概述	(120)
8.2 各直剪试验的适用范围	(121)
8.3 试验准备工作	(121)
8.4 试验步骤	(129)
8.5 试验成果整理	(130)
8.6 工程实例	(133)
8.7 岩石现场三轴试验	(135)
第9章 岩体应力测试	(143)
9.1 概述	(143)
9.2 水压致裂法	(143)
9.3 应力解除法	(145)
9.4 钻孔孔壁应变测试法	(151)
9.5 孔径变形法应力测试	(158)
9.6 孔底应变法测试	(161)

第 10 章 岩体声波测试	(165)
10.1 概述	(165)
10.2 理论基础	(165)
10.3 仪器及使用	(168)
10.4 硐室围岩松动圈的声波测试	(172)
10.5 声波测井	(176)
10.6 围岩稳定性分类的声波测试	(180)
参考文献	(184)

绪 论

试验工作在岩土工程(地质)勘察中占有很重要的位置。它不仅为学科理论的研究与发展所必需,而且也为岩土工程设计提供资料所必需。因此,岩土工程界历来很重视试验工作。就土工试验而论,可分为室内试验和原位试验(或原位测试)。两者都很重要,又各有优缺点,在为理论和实践服务方面起着相辅相成的作用。两者合称为实验土力学(experimental soil mechanics)。

岩石的室内试验历史较长,经验也比较丰富。其主要优点是,试验时的边界条件和排水条件都很易控制,清楚明了,试验中的应力路径可事先选定。对小应变来说,土样中的应变场是均一的,所测土的物理力学性质指标已得到公认。其主要缺点是,试验需要取样,样品小,受扰动,代表性差,所测力学指标严重“失真”;一般来说,也费时费力。为了克服室内试验的致命弱点,原位测试技术就应运而生了。

原位测试(in - site testing)一般是指在岩土工程勘察现场,在不扰动或基本不扰动岩土层的情况下对岩土层进行测试,以获得所测岩土层的物理力学性质指标及划分岩土层的一种勘察技术。这里的岩土层包括粘性土、粉土、砂性土、碎石土、软弱岩层及各种岩体等。原位测试与室内试验取长补短,相辅相成。

0.1 原位测试技术的优缺点

1. 优点

原位测试技术在工程勘察中占有很重要的位置。这是因为它与钻探、取样、室内试验等传统方法比较起来,具有下列明显的优点。

(1) 可在拟建工程场地进行测试,不用取样。众所周知,钻探取样,特别是取原状土样,不可避免地会使土样产生不同程度的扰动。扰动原因包括取样时的应力解除、样品运输中的碰撞及制样中的扰动等。因此,室内试验所测“原状土”的物理力学性质指标往往不能代表土层的原始状态指标,大大降低了所测指标的工程应用价值。再加上淤泥、砂层等的原状样更难取等致命弱点,就更体现了原位测试的重要性。

(2) 原位测试涉及的岩土体积比室内试验样品要大得多,因而更能反映岩土的宏观结构(如裂隙、夹层等)对岩土性质的影响。

(3) 很多岩土的原位测试技术方法可连续进行,可以得到完整的土层剖面及其物理力学性质指标,因而它是一门自成体系的实验科学。

(4) 原位测试技术一般具有快速、经济的优点。如用静力触探车进行测试,8 h可触探120 ~ 300 m,并可自动记录、打印和处理成果,速度之快是钻探、取样、室内试验所无法比

拟的。

由于原位测试技术具备以上优点,近30年来,该项技术得到了迅猛的发展:原有测试仪器不断被更新换代,新仪器不断被研制成功,测试机理和成果应用的深入研究等都超过了以往任何时期。工程勘测实践证明,原位测试技术的应用效果良好,经济效益明显,勘测周期也大为缩短,应用范围越来越广。目前,电子计算机已应用于原位测试技术中。这更加提高了测试精度和进度,有力地推动了原位测试技术的应用和发展。

2. 缺点

原位测试技术的发展历史较短,对测试机理及应用的研究,都有待于进一步深入。目前,它的主要缺点是,难以控制测试中的边界条件,如测试周围土层的排水条件和应力条件。为了在室内模拟土的原位测试,国内外有些高等院校和科研单位进行了大型的室内率定槽实验(chamber test),以求控制测试中的排水条件和应力条件,企图得出测试成果和边界条件的关系以及测试机理的科学解释。但到目前为止,原位测试技术所测出的数据与岩土的工程性质之间的关系,仍建立在大量统计的经验关系之上。

3. 原位测试与传统的钻探、取样、室内试验的关系

虽然原位测试成果和岩土的工程性质之间的关系大多是建立在经验关系之上的,但由于它的优点远大于它的缺点,所以这并不妨碍它在实践中的广泛应用。实践证明,在岩土工程勘察中,可以大量使用原位测试技术,只须对需要作对比的岩土层或关键部位配以少量钻探和室内试验即可。这样做的目的是,可以建立很多适合勘测现场的经验关系,提高原位测试精度,大量减少工程地质钻探和室内试验费用,缩短勘测周期。

0.2 原位测试技术的种类

原位测试方法很多,但可以归纳为下面两种。

1. 剖面测试法(logging or stratigraphic profiling methods)

该方法主要包括静力触探、动力触探、土的压入式板状膨胀仪测试及电阻率法等。剖面测试法具有可连续进行测试且快速、经济的优点。

2. 专门测试法(specific test methods)

该方法主要包括荷载试验、旁压试验、标准贯入试验、抽水和注水试验、十字板剪切试验、岩体应力测试等。专门测试法可得到岩土层中关键部位土的各种工程性质指标,精度高,测试成果可直接供设计部门使用。其精度一般可超过钻探和室内试验成果的精度。

专门测试法和剖面测试法经常配合使用,点面结合,既提高了勘测精度,又加快了勘测进度。

0.3 原位测试技术在我国的发展及现状

无数实践经验和理论计算证明,岩土的工程性质试验成果和精度,会因岩土的类型、状态、试验方法和技巧的不同而有较大出入。在测试方法中,以原位测试方法最为可靠,所求测试成果精度最高。工程设计中的土工计算成果的可靠性,主要取决于所选计算参数

(土的工程性质测试指标)的准确性,所选参数精度的重要性远比所选的计算方法要重要得多。因此可以说,在工程勘察中,不进行原位测试是没有质量保证的。特别是在大型工程勘察中,它是不可缺少的手段。有了高质量的原位测试成果,才能进行可靠的工程设计,既不过于保守而浪费大量资金,又不过于冒险而造成安全问题。所以原位测试技术在我国受到越来越大的重视。

以全国性勘察规范和地基基础设计规范为例,自1974年11月1日起试行的全国通用的《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ 7—74)只在附录中列进了触探试验与单桩的静荷载试验要点,且只在正文中“容许承载力”一节提到荷载试验与触探试验。自1978年5月1日起试行的全国通用的《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ 21—77)在正文中列进了触探、荷载和十字板试验,并在附录中第一次列出静力触探试验要点,而且较多地列出了单桥静力触探与动力触探指标与土的主要力学性质指标的关系。自1990年1月1日起实施的国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)在附录中增设了地基土荷载试验要点、岩基荷载试验要点和标准贯入与轻便触探试验要点,与《工业与民用建筑地基基础设计规范》相比较,原位测试比重增加了。自1995年3月1日起实施的《岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)第一次将原位测试单独列为一章,计有荷载试验、静力触探试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、旁压试验、现场剪切试验、波速测试、岩体原位应力测试及块体基础振动测试。该规范中的原位测试技术比重已远远超过《工业与民用建筑工程地质勘察规范》,并对各项测试技术的适用范围、仪器主要部件的规格、测试要点、成果分析与应用等作了规定。进入21世纪,国家对《岩土工程勘察规范》又作了进一步修改(编号为GB 50021—2001,自2002年3月1日起实施),其中原位测试部分仍单独列为一章,其内容进一步更新。可见,国家对原位测试技术极为重视,同时也说明原位测试技术在不断发展和成熟。此外,自20世纪80年代后期以来,各项原位测试技术规程也陆续出台,主要有原水电部《土工试验规程》(SDI 28—86)第二分册(原位测试部分),铁道部《静力触探技术规则》(TBJ 37—93),建设部《PY型预钻式旁压试验规程》(JCJ 69—90)等行业标准。从以上资料可以看出,原位测试技术的重要性在我国正在逐渐被广泛承认,测试技术逐渐成熟,相应法规日趋完善,原位测试技术将发挥越来越大的作用。

0.4 基本要求

在阅读本书的过程中,建议既要掌握测试方法,又要懂得原理和应用。因为掌握了测试方法,才会使用仪器设备进行工程勘察和研究;懂得了原理和影响精度的因素,才能提高测试精度和灵活运用,避免测试的盲目性;懂得成果的应用才是学习原位测试技术的目的所在,也是指导测试的原则。对于相关技术人员和研究人员,书中有大量公式和图表可供参考。对于须进一步深入探讨的问题,欢迎读者共同研究,推动本学科的进一步发展。

上篇 土体原位测试

第 1 章 荷载试验

1.1 概 述

荷载试验是一种地基土的原位测试方法,可用于测定承压板下应力主要影响范围内岩土体的承载力和变形特性。荷载试验可分为浅层平板荷载试验、深层平板荷载试验和螺旋板荷载试验三种。浅层平板荷载试验适用于浅层地基土;深层平板荷载试验适用于埋深大于 3 m 和地下水位以上的地基土;螺旋板荷载试验适用于深层地基土或地下水位以下的地基土。

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)第 10.2.2 条规定,荷载试验应布置在有代表性的地点,每个场地不宜少于 3 个点,当场地内岩土体不均匀时,应适当增加试验点。浅层平板荷载试验应布置在基础底面标高处。

荷载试验是岩土工程勘察的一个重要手段。本章就荷载试验的方法、要求、资料整理及成果应用等作以介绍。

1.2 平板荷载试验

平板荷载试验是在一定面积的刚性承压板上加荷,通过承压板向地基土逐级加荷,测定地基土的压力与变形特性的原位测试方法。它反映承压板下 1.5 ~ 2.0 倍承压板直径或宽度范围内地基土强度、变形的综合性状。平板荷载试验可用于以下目的:

- (1) 确定地基土承载力的特征值,为评定地基土的承载力提供依据;
- (2) 确定地基土的变形模量(排水或不排水);
- (3) 估算地基土的不排水抗剪强度;
- (4) 确定地基土基床反力系数;
- (5) 估算地基土的固结系数。

平板荷载试验分为浅层荷载试验和深层荷载试验,适用于各种地基土,特别适用于各种填土和含碎石的土。

平板荷载试验反映承压板下不超过 2 倍承压板宽度(或直径)范围内地基土的特性。如在该影响范围内地基土为非均质土时,试验结果为一综合性状,将会给试验数据的分析造成一定的困难。

1.2.1 平板荷载试验的常规技术要求及基本理论

1.2.1.1 平板荷载试验的技术要求

1. 平板荷载试验的常用装置

平板荷载试验的常用装置示意图见图 1-1。

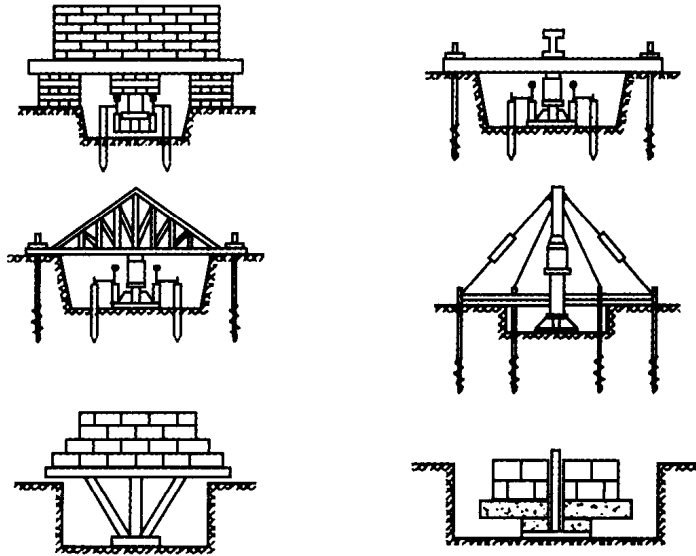


图 1-1 平板荷载试验的常用装置示意图

2. 承压板尺寸

承压板尺寸对评定承载力影响一般不大。对于含碎石的土,承压板宽度应为最大碎石直径的 10 ~ 20 倍;对于不均匀的土层,承压板面积不宜小于 0.5 m^2 。一般情况下,宜采用面积介于 $0.25 \sim 0.5 \text{ m}^2$ 之间的承压板。

3. 承压板埋深对评定承载力的影响

承压板埋深对评定承载力有影响,一般要求承压板埋深等于零(要求荷载施加在半无限空间的表面),即承压板在基坑底面时,试坑宽度应等于或大于承压板宽度的 3 倍。在个别情况下,为了挖掘地基土承载力的潜力,可模拟实际基础的埋深进行有一定埋深的嵌入式荷载试验。

4. 加荷方式

(1) 分级维持荷载沉降相对稳定法(常规慢速法) 分级加荷按等荷载增量均衡施加。荷载增量一般取预估试验土层极限荷载的 0.1 ~ 0.125 倍,或临塑荷载的 0.2 ~ 0.25 倍。

每一级荷载,自加荷开始按时间间隔 10、10、10、15、15 min,以后每隔 30 min 观测一次承压板沉降,直至连续 2 h 内每小时沉降量不超过 0.1 mm,或连续 1 h 内每 30 min 沉降量不超过 0.05 mm,即可施加下一级荷载。

(2) 分级维持荷载沉降非稳定法(快速法) 分级加荷与慢速法相同,但每一级荷载按间隔 15 min 观察一次沉降。每级荷载维持 2 h,即可施加下一级荷载。

(3) 等沉降速率法 控制承压板以一定的沉降速率沉降,测读与沉降相对应的所施加的荷载,直至试验达破坏状态。

5. 试验结束条件

一般应尽可能进行到试验土层达到破坏阶段,然后终止试验。当出现下列情况之一时,可认为已达破坏阶段:

- (1) 在某级荷载作用下,24 h 沉降速率不能达到相对稳定标准;
- (2) 承压板周围出现明显侧向挤出,周边岩土出现明显隆起或径向裂缝持续发展;
- (3) 相对沉降(s/b) 超过 0.06 ~ 0.08。

1.2.1.2 平板荷载试验基本理论

典型的平板荷载试验 $p-s$ 曲线(p ——施加于承压板上的压力; s ——在相应压力下的沉降)可分为以下三个阶段(图 1-2)。

1. 直线变形阶段

当压力小于临塑荷载 p_L (比例极限压力)时, $p-s$ 成直线关系。

2. 剪切阶段

当压力大于 p_L 、小于极限压力 p_u 时, $p-s$ 关系曲线由直线变为曲线。

3. 破坏阶段

当压力大于 p_u 时,沉降急剧增加。

对于直线变形阶段,可以用弹性理论来分析压力与变形的关系。

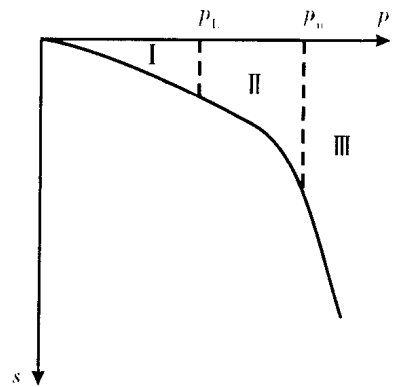


图 1-2 典型的 $p-s$ 曲线

1.2.2 浅层平板荷载试验要点

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 规定浅层平板荷载试验的要点如下。

(1) 地基土浅层平板荷载试验可适用于浅部地基土层的承压板下应力主要影响范围内的承载力。承压板面积不应小于 0.25 m^2 ,对于软土不应小于 0.5 m^2 。

(2) 试验基坑深度不应小于承压板宽度或直径的 3 倍。应保持试验土层的原状结构和天然湿度。宜在拟试压表面用粗砂或中砂找平,其厚度不超过 20 mm。

(3) 加荷分级不应少于 8 级。最大加载量不应小于设计要求的 2 倍。

(4) 每级加载后,按间隔 10、10、10、15、15 min 测读沉降量,以后为每隔 30 min 测读一次的沉降量。当在连续 2 h 内,每小时的沉降量小于 0.1 mm 时,则认为已稳定,可加下一级荷载。

(5) 当出现下列情况之一时,即可终止加载:

- 1) 承压板周围的土明显地侧向挤出;
- 2) 沉降 s 急剧增大,荷载 - 沉降($p-s$) 曲线出现陡降段;
- 3) 在某一级荷载下,24 h 内沉降速率不能达到稳定;