

同济大学本科教材出版基金资助教材

岩土工程

# 原位测试

徐超  
高彦斌

石振明  
赵春风 编著

同济大学出版社

13  
6

TU413  
X686

同济大学本科教材出版基金资助教材

岩土工程

# 原位测试

徐超 石振明 编著  
高彦斌 赵春风

同济大学出版社

## 内 容 提 要

本书是高等学校建筑工程专业岩土工程和原位测试课程的教材。它详细地介绍了当前国内外岩土工程原位测试的新技术,包括静载荷试验、静力触探试验、十字板剪切试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验、旁压试验、扁铲侧胀试验、现场直接剪切试验、波速测试、岩体原位应力测试和激振法测试;阐述了以上各种原位测试技术的基本原理、所用的仪器设备、测试方法与技术要点、试验资料整理与分析,以及试验成果的工程应用。在每章末,选编有复习思考题。

本书除了可作为高校相关专业的教材外,也可供土木工程领域内各专业勘察、设计、检测与施工的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩土工程原位测试/徐超等编著. —上海:同济大学出版社,2005.5

ISBN 7-5608-3038-2

I. 岩... II. ①徐... III. 岩土工程-原位试验  
IV. TU413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 040132 号

### 岩土工程原位测试

徐超 石振明 编著  
高彦斌 赵春风

责任编辑 陈全明 责任校对 杨江淮 装帧设计 李志云

---

出 版 同济大学出版社  
发 行

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.25

字 数 313000

印 数 1—3100

版 次 2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-3038-2/TU·596

定 价 19.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

## 前 言

本书是同济大学“九五计划”教材之一,得到了同济大学本科教材出版基金的资助。在本书的编写过程中,各参编人员积极收集资料,广泛征求意见,力求使本书能较好地满足建筑工程专业的教学要求;部分章节较多地吸收了国内外原位测试技术的最新内容,以适应我国工程建设对原位测试技术的需要。

岩土工程原位测试成果的应用依赖于工程经验和地区经验的积累。在编写本书时,以一般的工程经验为主,兼顾了一些地区经验;在应用原位测试成果时,应注重借鉴他人的经验,而不是照搬;每一种原位测试技术方法都有自己的使用范围,在工程实践中应关注技术方法对被测试对象的适应性;在我国不同行业和相关技术规范或规程中,对原位测试的技术要点和试验资料整理分析方法,或多或少存在不一致的地方,本书以《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)为主要参考依据,兼顾了其他行业和地方规范。

本书共分十二章,第一章绪言对原位测试技术的特点进行了概括与总结,并与室内试验进行了对比,由徐超编写;第二章至第九章分别介绍了载荷试验、静力触探试验、动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、扁铲侧胀试验和现场直接剪切试验的原理、设备、方法、资料整理与工程应用,由徐超和石振明编写;第十章至第十二章分别介绍了波速测试、岩体原位应力测试和激振法测试的原理、设备、方法、资料整理与工程应用,由石振明、高彦斌、徐超和赵春风编写。在本书的编写过程中,同济大学袁聚云教授和上海勘察设计院辛伟高级工程师提出了宝贵的意见和建议;同济大学地下建筑与工程系岩土加固与测试技术研究所的研究生汤竞、董天林、邓治纲、罗松、肖媛媛为资料收集与整理提供了大量帮助,在此谨致由衷的谢意。

全书由徐超主编,费涵昌教授主审。

限于编者的水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005年4月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 概述 .....	1
第二节 原位测试的特点 .....	2
第三节 本书的特点及使用建议 .....	4
<b>第二章 载荷试验</b> .....	6
第一节 概述 .....	6
第二节 试验的基本原理与仪器设备 .....	6
第三节 试验的技术要求和操作步骤 .....	9
第四节 试验资料整理与应用 .....	12
第五节 螺旋板载荷试验简介 .....	14
复习思考题 .....	16
<b>第三章 静力触探试验</b> .....	18
第一节 概述 .....	18
第二节 静力触探试验的仪器设备 .....	19
第三节 静力触探试验原理 .....	24
第四节 试验方法与技术要求 .....	28
第五节 试验资料的整理与分析 .....	32
第六节 试验成果的工程应用 .....	49
复习思考题 .....	58
<b>第四章 圆锥动力触探试验</b> .....	59
第一节 概述 .....	59
第二节 试验的设备与基本原理 .....	59
第三节 试验方法和技术要求 .....	60
第四节 影响因素和试验指标的修正 .....	62
第五节 试验资料整理与成果应用 .....	64
复习思考题 .....	68

<b>第五章 标准贯入试验</b> .....	69
第一节 概述 .....	69
第二节 试验的原理与设备 .....	69
第三节 试验方法与技术要求 .....	72
第四节 试验资料整理 .....	72
第五节 试验成果的工程应用 .....	77
复习思考题 .....	81
<b>第六章 十字板剪切试验</b> .....	82
第一节 概述 .....	82
第二节 试验的原理与仪器设备 .....	82
第三节 试验方法与技术要求 .....	85
第四节 试验资料的整理与应用 .....	87
复习思考题 .....	90
<b>第七章 旁压试验</b> .....	91
第一节 概述 .....	91
第二节 试验的基本原理 .....	91
第三节 试验的仪器设备 .....	92
第四节 技术要求与试验方法 .....	94
第五节 试验资料整理与成果应用 .....	97
复习思考题 .....	101
<b>第八章 扁铲侧胀试验</b> .....	102
第一节 概述 .....	102
第二节 试验的基本原理 .....	102
第三节 仪器设备及其工作原理 .....	104
第四节 试验方法与技术要求 .....	107
第五节 试验资料整理 .....	110
第六节 试验成果的工程应用 .....	120
复习思考题 .....	125
<b>第九章 现场直接剪切试验</b> .....	126
第一节 概述 .....	126
第二节 试验原理 .....	127
第三节 仪器设备构成 .....	128
第四节 试验方法 .....	131
第五节 资料整理分析 .....	135

复习思考题 .....	138
<b>第十章 波速测试 .....</b>	<b>139</b>
第一节 概述 .....	139
第二节 单孔法 .....	139
第三节 跨孔法 .....	144
第四节 面波法 .....	147
第五节 试验成果应用 .....	150
复习思考题 .....	153
<b>第十一章 岩体原位应力测试 .....</b>	<b>154</b>
第一节 概述 .....	154
第二节 试验的基本原理 .....	155
第三节 仪器设备构成 .....	161
第四节 试验方法与步骤 .....	165
第五节 试验资料的整理与分析 .....	167
复习思考题 .....	172
<b>第十二章 块体基础激振法 .....</b>	<b>173</b>
第一节 概述 .....	173
第二节 块体基础与仪器设备 .....	173
第三节 块体基础自由振动试验 .....	175
第四节 块体基础强迫振动试验 .....	179
复习思考题 .....	183
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>185</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

原位测试(in Situ Test,或 Field Test),从广义上讲,应包括原位检测和原位试验两部分,即指在被测试对象的原始位置,在不破坏、不扰动或少扰动被测试或检测对象原有(天然)状态的情况下,通过试验手段测定特定的物理量,进而评价被测试对象的性能和状态;从狭义上讲,原位测试是岩土工程勘察与地基评价中的重要手段之一,是指利用一定的试验手段在天然状态(天然应力、天然结构和天然含水量)下,测试岩土的反应或一些特定的物理、力学指标,进而依据理论分析或经验公式评定岩土的工程性能和状态。原位测试技术是岩土工程中的一个重要分支,它不仅是岩土工程勘察的重要组成部分和获得岩土体设计参数的重要手段,而且是岩土工程施工质量检验的主要手段,并可用于施工过程中岩土体物理、力学性质及状态变化的监测。

本书参照我国国家标准《岩土工程勘察规范》(GB50021—2002)所列的原位测试内容,论述岩土工程勘察与地基评价中常用的原位测试基本理论及技术方法。这些技术方法包括:

(1) 载荷试验:用于测定承压板下应力主要影响范围内,岩土的承载能力和变形特性。

(2) 触探试验:包括静力触探、圆锥动力触探和标准贯入试验。通过将一定规格的圆锥型探头压入或贯入土中,量测土体对探头的反应(阻力),然后间接地测定和评价土的工程力学性能参数。

(3) 剪切试验:包括十字板剪切试验和直接剪切试验。前者用于测定饱和软粘性土的不排水抗剪强度和土的灵敏度;后者是用于评定岩土体本身、岩土体沿软弱结构面和岩土体与其他材料接触面的抗剪强度的试验方法。

(4) 侧胀试验:包括旁压试验和扁铲侧胀试验。通过量测土体在侧向压力作用下一定位移时所施加的压力(扁铲侧胀试验),或一定压力下土体的侧向位移(旁压试验),主要用于评定土体的侧向变形性能,如静止侧压力系数、侧向基床系数等。

(5) 岩体原位应力测试:用于测定岩体原位的空间应力和平面应力。

(6) 动力参数测试:包括声波及弹性波波速测试和激振法测试。前者通过量测波在岩土体内的传播速度,进而测求岩土体的弹性参数和动力参数;后者用于测定地基的动力特性,为动力基础设计提供参数。

原位测试的目的在于获得有代表性的、能够反映岩土体现场实际状态下的岩土参数,认识岩土体的空间分布特征和物理力学特性,为岩土工程设计和治理提供工程设计参数。这些参数包括:

(1) 岩土体的空间分布几何参数(如土层厚度);

(2) 岩土体的物理参数和状态参数(如土的容重和粗颗粒土的密实度);



- (3) 岩土体原位初始应力状态和应力历史参数(如静止侧压力系数和超固结比);
- (4) 岩土体的强度参数(如粘性土的不排水抗剪强度);
- (5) 岩土体的变形性质参数(如土的变形模量);
- (6) 岩土体的渗透性质参数(如固结参数和渗透参数)。

除了获得被测试岩土体的物理力学性质和渗透性质参数外,原位测试的试验结果还可以直接应用于岩土工程实践。笼统地讲,原位测试可用于以下几个方面:

- (1) 浅基础的设计,包括地基承载力的确定和进行浅基础的沉降计算;
- (2) 深基础的设计,主要用于单桩竖向承载力和水平向承载力计算;
- (3) 砂性土地基的液化评价;
- (4) 地基加固效果检测与评价;
- (5) 土质边坡滑动面的确定。

## 第二节 原位测试的特点

与室内试验对比,岩土工程原位测试作为认识岩土体特性和获取岩土体工程设计参数的重要手段之一,其特点是显而易见的,见表 1-1。

**表 1-1 原位测试与室内试验对比**

项 目	原 位 测 试	室 内 试 验
试验对象	1. 测定土体范围大,能反映微观、宏观结构对土性的影响,代表性好; 2. 对难以取样的土层仍能试验; 3. 对试验土层基本不扰动或少扰动; 4. 有的能给出连续的土性变化剖面,可用以确定分层界线; 5. 测试土体边界条件不明显	1. 试样尺寸小,不能反映宏观结构、非均质对土性的影响,代表性较差; 2. 对难以或无法取样的土层无法试验,只能人工制备土样进行试验; 3. 无法避免钻进取样对土样的扰动; 4. 只能对有限的若干点取样试验,点间土样变化是推测的; 5. 试验土样边界条件明显
应力条件	1. 基本上在原位应力条件下进行试验; 2. 试验应力路径无法很好控制; 3. 排水条件不能很好控制; 4. 试验时应力条件有局限性	1. 在明确、可控制的应力条件下进行试验; 2. 试验应力路径可以事先预定; 3. 能严格控制排水条件; 4. 可模拟各种应力条件进行试验
应变条件	1. 应变场不均匀; 2. 应变速率一般大于实际工程条件下的应变速率	1. 试样内应变场比较均匀; 2. 可以控制应变速率
岩土参数	反映实际状态下的基本特性	反映取样点上,在室内控制条件下的特性
试验周期	周期短,效率高	周期较长,效率较低

从表 1-1 可以看出,尽管原位测试和室内试验都是利用一定的技术手段获取岩土体参数,但二者区别明显,各有特点。在岩土工程勘察和地基评价中,原位测试和室内试验总是相互补充,相辅相成。

室内试验具有试验条件(边界条件、排水条件、应力条件和应变速率等)的可控性和建立在此基础上的计算理论比较清晰的优点。但是,室内试验需要取样和制样,而取样和试验过程中对土样的扰动,以及小的试样(看作土体中的一个点)可能缺乏代表性。尽管现有的一

些精细的取土技术,降低取土对土样的扰动影响,但在整个钻探—取样—试验过程中这种影响是难以克服的。因此,在利用通过室内试验得出的岩土参数时须认真对待。

原位测试的优点不只是表现在对难以取得不扰动土样或根本无法采样的土层,仍能通过现场原位试验评定岩土的工程性能,更表现在它不需要采样,从而最大限度地减少了对土层的扰动,而且所测定的土体体积大,代表性好。原位测试一般并不直接测定土层的某一物理或力学指标,如标准贯入试验的标贯击数、静力触探试验的测试指标锥尖阻力和侧壁摩阻力等,加之试验结果的影响因素较多,传统的做法是建立试验测试指标与土性参数之间的经验关系式,通过经验关系式来评价土的参数。但这一做法也在发生改变,近 20 年时间内对原位测试试验现象和试验过程的模拟和机理研究已经取得了一些成果,目前仍是原位测试的主要研究方向之一。这里并无否定实践经验的意思,一些地区的经验关系式,经过原型观测数据的修正和检验,其计算结果比较可靠,是岩土工程实践的宝贵财富;而原位测试的应力条件复杂,试验边界条件相对模糊,给理论研究带来极大的困难。因此,在相当长的时间内,原位测试成果的判译和应用将不得不依赖于经验关系式或半经验半理论公式。

各种原位测试方法都有其自身的适用性,表现在一些原位测试手段只能适应于一定的地基条件,而且在评价岩土体的某一工程性能参数时,有些能够直接测定,而有些参数只能通过经验积累间接估算。按所能提供的参数分述如下:

#### (1) 土类鉴别和土层剖面划分

静力触探试验和扁铲侧胀试验因其采样间隔小和仪器反应相对灵敏,可用于土类鉴别和土层剖面划分。在静力触探试验中,孔压静力触探因其孔压量测的敏感性,在土类鉴别和土层划分上具有很大优越性,可分辨薄层土的存在,但对孔压量测系统的排气、饱和有严格要求。而双桥静力触探试验,尽管可用于划分大土类,但由于侧壁摩阻力的量测不太稳定,故对土类鉴别和地基土分层的能力不如孔压静力触探反应灵敏。尽管国外的研究认为,可利用扁铲侧胀试验的材料指数进行土性鉴别和地基土分层,但是在国内这方面的研究和实践还不成熟,有待进一步积累经验。

#### (2) 原位水平应力( $\sigma_{ho}$ )、静止侧土压力系数( $K_0$ )或侧向基床系数( $k_h$ )

旁压试验和扁铲侧胀试验可用于直接测定一般粘性土和软粘土的原位水平应力,并经换算得到土层的静止侧压力系数、侧向土压力系数或侧向基床系数;但对坚硬粘土、密实砂土,利用扁铲侧胀试验测求原位水平应力或侧向基床系数时,还缺乏实践经验和严密的理论依据,计算结果离散性较大。

#### (3) 前期固结压力( $\sigma'_p$ )或超固结比(OCR)

载荷试验、孔压静力触探和扁铲侧胀试验都可用于确定土体的前期固结压力。浅层平板载荷试验限于均匀土层,而且影响深度不大;螺旋板载荷试验可用于测定深层土体的前期固结压力,但螺旋板形状及旋入引起的扰动对荷载-沉降关系的影响还有待于研究。利用孔压静力触探和扁铲侧胀试验估算地基土的超固结比,是建立在工程经验积累上的,目前国外已经积累了丰富的研究成果;而国内由于基于地基土应力历史的岩土工程设计还不普遍,对地基土的应力历史的研究尚未得到应有的重视。

#### (4) 变形特性

载荷试验利用荷载与沉降曲线的直线段(地基以弹性变形为主),可以测定承压板下应力影响范围内,砂土的平均排水杨氏模量和粘性土的平均不排水杨氏模量。

根据旁压试验的旁压曲线,测定土的旁压模量和旁压剪切模量,并通过建立的经验关系式,估算土体的其他变形参数。

由扁铲侧胀试验的扁胀模量,可以依据已经建立的经验关系式评定土的变形参数,但由于扁铲测头上的弹性膜的最大位移量很小,所估算的变形参数只能反映小变形条件下的变形性质,不宜盲目地推广到其他变形参数。

另外,利用剪切波速试验结果可以测定小应变下土体的剪切模量;也可以采用静力触探、标准贯入试验和动力触探试验手段,通过一些经验公式,估算土体的变形参数。

#### (5) 固结特性

现场测定土体的固结系数,最直观的方法是孔压静力触探,既经济,而且再现性较好;也可以利用旁压试验、螺旋板载荷试验和扁铲侧胀试验评价土体的固结特性,但技术要求高,且操作过程比较复杂。

#### (6) 强度特性

在原位测试中,十字板剪切试验和岩土体直接剪切试验可以直接测定土的抗剪强度,而其他原位测试手段,如动力触探、标准贯入试验、静力触探等,则由经验关系式间接地评定土的强度指标,如载荷试验可直接确定地基土的承载力,然后换算出地基土的强度指标。

基于以上对原位测试特点的分析,在进行原位测试以及对原位测试结果进行岩土工程判译时,读者应注意以下两个方面:

第一,原位测试手段的地基条件适用性和经验公式的地区适用性。前者强调的是一种测试方法,一般只适用于一定的地基条件(如土类及其结构性),换言之,每一种原位测试技术都有其自身的使用条件和应用范围;后者是指岩土参数判译所采用的经验公式一般都建立在一定的地区经验上,不能照搬硬套。从两个方面可以说明这个问题:1)相同成分而成因不同的地基土在工程性能上会有很大的差别;2)以上多种原位测试大多不能对土样进行直接的鉴别,只能从测试指标上感知地基土力学性能的变化。

第二,原位测试技术要点的一致性问题。一种原位测试从发明到走向成熟而广泛使用,其操作规程一般都有一个逐步趋向统一的过程,但在没有完全统一之前,试验技术要点或多或少存在差别。这种差异不仅表现在国内规范(或规程)与国际相关规范(或规程)之间,而且表现在国内不同地区、不同行业标准之间。这就要求读者在使用经验公式或引用已有成果时考虑试验技术要点的一致性和已有成果的可比较性问题。

### 第三节 本书的特点及使用建议

本书作为教材,具备以下特点:

(1) 注重培养学生的实践能力、创新能力,起到提高专业素质的作用,力求做到原理清晰、技术要点具体可行、理论与实践相结合;

(2) 将原位测试试验结果的工程应用建立在成熟的、公认无误的研究成果基础之上,界定各种原位测试技术的适用范围,而对于影响因素的讨论以及有争论问题的分析进行了简化;

(3) 与现行国家规范相适应,国家规范是面向全国的,因此本书没有偏重某一地区的经验,而是注重内容的普遍性;

(4) 涵盖最新的技术发展成果。

除本章外,从第二章至第十二章分别阐述了 11 种原位测试技术的基本概念、测试原理、所需的主要仪器设备、试验资料整理与成果应用。本书各章自成体系,以便于只对部分章节感兴趣的读者使用本书。为了让读者了解原位测试技术的最新发展,对于一些目前学术界的研究内容也作了简介。其中各种原位测试的试验原理、试验技术要点和资料整理与成果应用应该是读者学习的重点。在使用本书时,通过对各章第一节的学习,了解原位测试的基本概念、历史发展和适用范围;通过对各章仪器设备的学习,了解各种原位测试所需要的仪器和设备;通过对试验方法的学习,使读者掌握各种原位测试手段的技术要点和注意事项;原位测试只是技术手段,目的是为工程设计与应用实践服务,在资料整理、分析和应用中,读者可以学习各种原位测试的资料整理和成果判译的方法,掌握将原位测试成果应用于工程设计的公式和方法;每章最后的复习思考题,是根据各章的主要内容选编的,旨在帮助读者巩固和加深理解相关章节的学习内容。

## 第二章 载 荷 试 验

### 第一节 概 述

载荷试验(Plate Load Test,简称PLT)是在现场用一个刚性承压板逐级加荷,测定天然地基、单桩或复合地基的沉降随荷载的变化,借以确定它们承载能力的现场试验。本章主要涉及天然地基的载荷试验。载荷试验的承压板的形式和设置深度可以不同,根据承压板的设置深度及特点,可分为浅层、深层平板载荷试验和螺旋板载荷试验。其中浅层平板载荷试验适用于浅层地基土,深层平板载荷试验适用于埋深等于或大于3.0 m和地下水位以上的地基土,螺旋板载荷试验适用于深层地基或地下水位以下的土层。本章以浅层平板载荷试验及其工程应用为主进行论述,并简单介绍深层平板载荷试验和螺旋板载荷试验的原理、特点及工程应用。

浅层平板载荷试验是在现场用一定面积的刚性承压板逐级加荷,测定天然埋藏条件下浅层地基沉降随荷载而变化的现场试验,用以评价承压板下应力影响范围内岩土的和变形特性。实际上是模拟建筑物地基在受垂直荷载条件下工程性能的一种现场模型试验。深层平板载荷试验可用于确定深部地基土层及大直径桩桩端土层在承压板应力主要影响范围内的承载力。

载荷试验可用于以下目的:

- (1) 确定地基土的比例界限压力、极限压力,为评定地基上的承载力提供依据;
- (2) 确定地基土的变形模量;
- (3) 估算地基土的不排水抗剪强度;
- (4) 确定地基土的基床系数。

浅层平板载荷试验适用地表浅层地基土,包括各种填土和含碎石的土。

### 第二节 试验的基本原理与仪器设备

#### 一、试验的基本原理

在拟建建筑场地上将一定尺寸和几何形状(方形或圆形)的刚性板,安放在被测的地基持力层上,逐级增加荷载,并测得相应的稳定沉降,直至达到地基破坏标准,由此可得到荷载( $p$ )-沉降( $s$ )曲线(即 $p-s$ 曲线)。典型的平板载荷试验 $p-s$ 曲线可以划分为三个阶段,见图2-1所示。

- (1) 直线变形阶段: $p-s$ 呈线性关系,对应于此线性段的最大压力 $p_0$ ,称为比例界限。
- (2) 剪切变形阶段:当荷载大于 $p_0$ ,而小于极限压力 $p_u$ , $p-s$ 关系由直线变为曲线关系,曲线的斜率逐渐变大;

(3) 破坏阶段:当荷载大于极限压力  $p_0$ ,即使荷载维持不变,沉降也会持续发展或急剧增大,始终达不到稳定标准。

试验研究表明,载荷试验所得到的荷载  $p$  与相应的岩土体沉降  $s$  的关系曲线,即  $p-s$  曲线,直接反映岩土体所处的应力状态。在直线变形阶段,受荷土体中任意点产生的剪应力小于土体的抗剪强度。土的变形主要由土中空隙的压缩而引起,土体变形主要是竖向压缩,并随时间逐渐趋于稳定。

在剪切变形阶段, $p-s$  关系曲线的斜率随压力  $p$  的增大而增大,土体除了产生竖向压缩变形之外,在承压板的边缘已有小范围内土体承受的剪应力达到了或超过了土的抗剪强度,并开始向周围土体发展。处于该阶段土体的变形由土体的竖向压缩和土粒的剪切变位共同引起。

在破坏阶段,即使荷载不再增加,承压板仍会不断下沉,土体内部开始形成连续的滑动面,在承压板周围土体发生隆起及环状或放射状裂隙,此时在滑动土体的剪切面上各点的剪应力均达到或超过土体的抗剪强度。

对于载荷试验的直线变形阶段,可以用弹性理论分析压力与变形之间的关系。

(1) 对于各向同性弹性半空间,由弹性理论可知,刚性压板作用在弹性半空间表面或近地表时,土的变形模量为

$$E_0 = I_0 I_1 K (1 - \mu^2) b \quad (2-1)$$

式中  $b$ ——承压板直径或方形承压板边长(m);

$I_0$ ——压板位于半空间表面的影响系数;对于圆形刚性板,  $I_0 = \frac{\pi}{4} = 0.785$ ;对于方形承压板,  $I_0 = 0.886$ ;

$I_1$ ——承压板埋深  $z$  时的修正系数;当  $z < b$  时,  $I_1 \approx 1 - \frac{0.27z}{b}$ ;当  $z > b$  时,  $I_1 \approx 0.5 + \frac{0.23b}{z}$ ;

$K$ —— $p-s$  关系曲线直线段的斜率( $\text{kN}/\text{m}^3$ );

$\mu$ ——土的泊松比。

(2) 对于非均质各向异性弹性半空间,情况比较复杂。这里只给出考虑地基土的模量随深度线性增加的情形。由于载荷试验的影响深度取决于承压板的大小,可通过采用不同直径的圆形承压板进行载荷试验,测得不同影响深度范围内地基土的综合变形模量,然后评价地基土变形模量随深度的变化规律。

假设地基土变形模量随深度的变化规律可表示为

$$E_{0z} = E_0 + n_v z \quad (2-2)$$

式中  $E_{0z}$  为承压板放置深度  $z = ab$  ( $b$  为承压板直径) 的变形模量。 $E_0$  和  $n_v$  可分别由下式给出

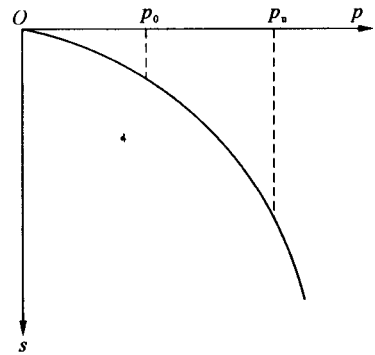


图 2-1 平板载荷试验  $p-s$  曲线

$$E_0 = (1 - \mu^2) \left( \frac{K_1 - K_2}{b_1 - b_2} \right) b_1 b_2 \quad (2-3)$$

$$n_v = \frac{I_0 (1 - \mu^2)}{\alpha} \left( \frac{K_1 b_1 - K_2 b_2}{b_1 - b_2} \right) \quad (2-4)$$

式中  $K_1$ 、 $K_2$ ——承压板直径分别为  $b_1$ 、 $b_2$  时载荷试验  $p-s$  关系曲线直线段的斜率。

## 二、试验的仪器设备

浅层平板载荷试验的试验设备由三部分组成：加荷系统、反力系统和量测系统。

### 1. 加荷系统

加荷系统包括承压板和加荷装置，承压板的功能类似于建筑物的基础，所施加的荷载通过承压板传递给地基土。承压板一般采用圆形或方形的刚性板，也有根据试验的具体要求采用矩形承压板。

加荷装置总体上可分为千斤顶加荷装置和重物加荷装置两种，图 2-2a~d 为千斤顶加载方式，图 2-2e 和 f 为重物加载方式。重物加荷装置是将具有已知重量的标准钢锭、钢轨或混凝土块等重物按试验加载计划依次地放置到加载台上，达到对地基土分级施加荷载的目的。千斤顶加荷装置是在反力装置的配合下对承压板施加荷载，根据使用的千斤顶类型，又分为机械式和油压式；根据使用千斤顶数量的不同，又分为单个千斤顶加荷装置和多个千斤顶联合加荷装置。

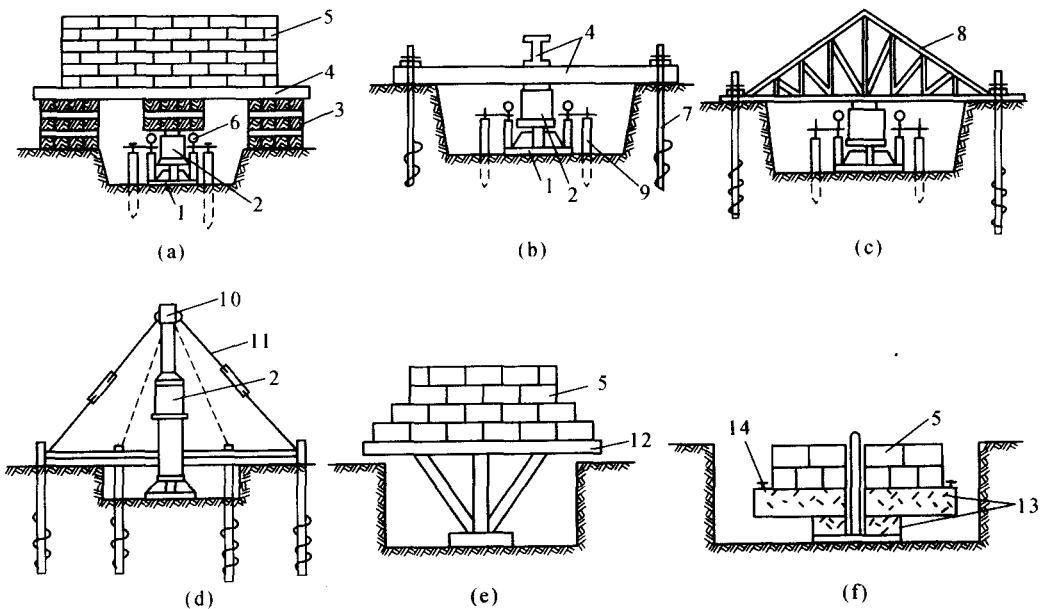


图 2-2 常见的载荷试验反力与加载布置方式

1—承压板；2—千斤顶；3—木垛；4—钢梁；5—钢锭；6—百分表；7—地锚；8—桁架；  
9—立柱；10—分力帽；11—拉杆；12—载荷台；13—混凝土板；14—测点

经过标定的、带有油压表的千斤顶可以直接读取施加荷载的大小。如果采用不带油压表的千斤顶或机械式千斤顶,则需要配置应力计以确定施加荷载的大小,并在试验之前对应力计进行标定。

### 2. 反力系统

几种常见的载荷试验的反力系统布置形式见图 2-2a~d。载荷试验的反力可以由重物(图 2-2a)、地锚单独(图 2-2b~d)或地锚与重物联合提供。然后再与梁架组合成稳定的反力系统。当在岩体内(如探坑或探槽)进行载荷试验时,可以利用周围稳定的岩体提供所需要的反力,见图 2-3。

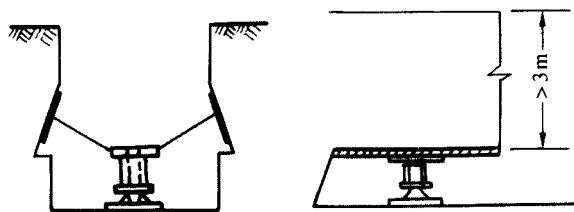


图 2-3 坚硬岩土体内载荷试验反力系统示意图

### 3. 量测系统

主要是指沉降量测系统,承压板的沉降量测系统包括支撑柱、基准梁、位移测量元件和其他附件。根据载荷试验的技术要求,将支撑柱打设在试坑内适当的位置,将基准梁架设在支撑柱上,采用万向磁性表座将位移量测元件固定在基准梁上,组成完整的沉降量测系统。位移(沉降)测量元件可以采用百分表或位移传感器。

## 第三节 试验技术要求和操作步骤

### 一、试验技术要求

对于浅层平板载荷试验,应当满足下列技术要求:

#### 1. 试坑的尺寸及要求

浅层平板载荷试验的试坑宽度或直径不应小于承压板宽度或直径的 3 倍。试坑底部的岩土应避免扰动,保持其原状结构和天然含水量,在承压板下铺设不超过 20 mm 的砂垫层找平,并尽快安装设备。

#### 2. 承压板的尺寸

载荷试验宜采用圆形刚性承压板,根据土的软硬或岩体裂隙密度选用合适的尺寸;对于浅层平板载荷试验,承压板面积不应小于  $0.25 \text{ m}^2$ ,当在软土和粒径较大的填土上进行试验时,承压板面积不应小于  $0.5 \text{ m}^2$ 。对于强夯处理后的场地的地基强度测定,有时要求承压板的面积应大于  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。

对于土的浅层平板载荷试验,承压板的面积还应根据地基土的类型和试验要求有所不同。在工程实践中可根据试验岩土层状况选用适合的面积,一般情况下,可参照下面的经验值选取:



- (1) 对于一般粘性土地基,常用面积为  $0.5 \text{ m}^2$  的圆形或方形承压板;
- (2) 对于碎石类土,承压板直径(或宽度)应为最大碎石直径的  $10\sim 20$  倍;
- (3) 对于岩石类土或均质密实土,如  $Q_3$  老粘土或密实砂土,承压板的面积以  $0.10 \text{ m}^2$  为宜。

### 3. 位移量测系统的安装

基准梁的支撑柱或其他类型的支点应离承压板和地锚(如果采用地锚提供反力)一定的距离,以避免再试验过程中地表变形对基准梁的影响。与承压板中心的距离应大于  $1.5d$  ( $d$  为边长或直径),与地锚的距离应不小于  $0.8 \text{ m}$ 。

基准梁架设在支撑柱上时,不应两端固定,以避免由于基准梁杆热胀冷缩引起沉降观测的误差。沉降测量元件应对称地布置在承压板上,百分表或位移传感器的测头应垂直于承压板设置。

### 4. 加载方式

载荷试验的加载方式一般采用分级维持荷载沉降相对稳定法(通常称为慢速法);有地区经验时,也可采用分级加荷沉降非稳定法(通常称为快速法)或等沉降速率法。关于加荷等级的划分,一般取  $10\sim 12$  级,并不应小于 8 级。最大加载量不应小于地基土承载力设计值的 2 倍,荷载的量测精度应控制在最大加载量的  $\pm 1\%$  以内。

### 5. 沉降观测

当采用慢速法时,对于土体,每级荷载施加后,间隔  $5 \text{ min}$ 、 $5 \text{ min}$ 、 $10 \text{ min}$ 、 $10 \text{ min}$ 、 $15 \text{ min}$ 、 $15 \text{ min}$  测读一次沉降,以后间隔  $30 \text{ min}$  测读一次沉降,当连续  $2 \text{ h}$ 、且每小时沉降量不大于  $0.1 \text{ mm}$  时,可以认为沉降已达到相对稳定标准,可施加下一级荷载;当试验对象是岩体时,间隔  $1 \text{ min}$ 、 $2 \text{ min}$ 、 $2 \text{ min}$ 、 $5 \text{ min}$  测读一次沉降,以后每隔  $10 \text{ min}$  测读一次,当连续三次读数之差小于  $0.01 \text{ mm}$  时,认为沉降已达到相对稳定标准,可施加下一级荷载。

采用快速法时,每加一级荷载按间隔  $15 \text{ min}$  观测一次沉降。每级荷载维持  $2 \text{ h}$ ,即可施加下一级荷载。最后一级荷载可观测至沉降达到上述沉降相对稳定标准或仍维持  $2 \text{ h}$ 。

当采用等沉降速率法时,控制承压板以一定的沉降速率沉降,测读与沉降相应的所施加的荷载,直至试验达到破坏阶段。

### 6. 试验终止条件

载荷试验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,认为地基已达破坏阶段,可终止试验:

- (1) 承压板周边的土体出现明显侧向挤出;
- (2) 本级荷载的沉降量急剧增大, $p-s$  曲线出现陡降段;
- (3) 在某级荷载下  $24 \text{ h}$  沉降速率不能达到稳定标准;
- (4) 总沉降量与承压板直径(或边长)之比超过  $0.06$ 。

对于深层平板载荷试验,承压板采用直径为  $0.8 \text{ m}$  的刚性板,紧靠承压板周围外侧的土层高度不应小于  $80 \text{ cm}$ 。关于终止试验条件,深层平板载荷试验也略有不同,表述如下:

- (1) 沉降量急剧增大, $p-s$  曲线出现可判定极限承载力的陡降段,且总沉降量超过  $0.04b$  ( $b$  为承压板的直径);
- (2) 在某级荷载下  $24 \text{ h}$  沉降速率不能达到稳定标准;
- (3) 本级荷载下的沉降量大于前一级荷载下沉降量的 5 倍;