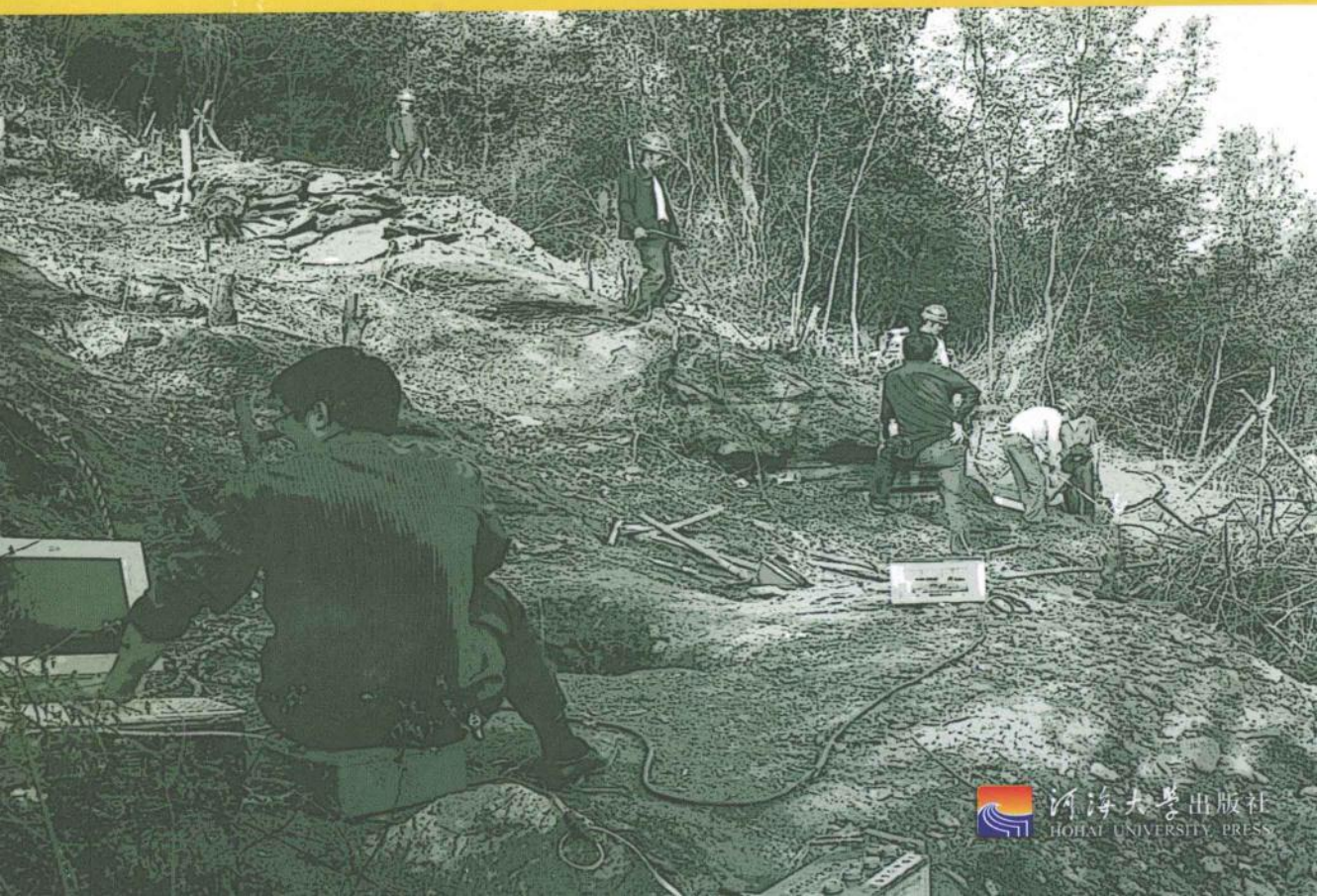


地质工程测试 技术方法及工程应用

■ 编著 杨保全 魏继红 侯玉宾



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

地质工程测试技术方法及工程应用

编 著 杨保全 魏继红 侯玉宾

河海大学出版社

内 容 简 介

地质工程原位测试技术是地质工程理论体系中一个重要组成部分,是地质工程及岩土工程理论用以解决实际问题的重要手段,在工程建设过程中受到广泛重视。本书较为详细地介绍了地质工程学科工程地质勘察中常用测试技术与方法,包括静力载荷试验、动力触探试验、静力触探试验、十字板剪切试验、旁压试验、扁铲侧胀试验、现场波速测试、岩体声波测试、岩体变形试验、岩体强度试验、岩石点荷载试验、回弹仪测定岩石强度试验;阐述了以上各种原位测试技术的基本原理、测试仪器设备、测试技术方法以及试验步骤及要点、试验资料分析整理、工程中应用实例等。

本书可作为水利水电工程高校地质工程本科专业教材,也可供土木工程专业用书,以及相关专业勘察设计施工等工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

地质工程测试技术方法及工程应用 / 杨保全, 魏继红, 侯玉宾编著. —南京: 河海大学出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5630-2923-5

I. ①地… II. ①杨…②魏…③侯… III. ①工程地质—工程测量—技术方法 IV. ①P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 218163 号

书 名 / 地质工程测试技术方法及工程应用

书 号 / ISBN 978-7-5630-2923-5

编 著 / 杨保全 魏继红 侯玉宾

责任编辑 / 谢业保

封面设计 / 张世立

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编: 210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

电子信箱 / hhup@hhu.edu.cn

照 排 / 南京紫藤制版印务中心

印 刷 / 丹阳兴华印刷厂印刷

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16 12.5 印张 312 千字

版 次 / 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 28.00 元

前 言

工程安全性问题最基础最首要的是地质问题,但仅仅认识问题已远远不能满足工程要求,必须立足地质去解决问题,这是工程地质学科发展的一个重要方向——地质工程,而工程地质勘察与测试技术方法是地质工程理论体系中的一个重要方面,它是掌握与认识自然地质条件、获取岩土体基本参数、制定与实施岩土体改造的必要技术,是解决地质问题的重要手段之一。

地质工程原位测试技术是一系列用于探测地基土工程性质的方法及技术总称,它可以有效地免除由于钻探取样等过程对土体原有结构的扰动及原位应力的释放,是地质工程基础理论体系中较为重要的一个分支。自上世纪70年代以来,国家有关部委及相关的设计院、高校均开展了工程地质勘察原位测试技术的应用研究,在理论分析、试验方法、应用技术以及与之配套的试验仪器设备等方面均取得了卓有成效的科研成果;工程实践中原位测试技术亦得到较广泛应用。随着国家现代化建设快速发展,工程规模不断加大,重大地质问题越来越多,要求工程勘察资料的可靠性及定量化程度亦越来越高,为使工程建设安全、可靠、经济合理,在地质工程勘测中应用一系列原位测试技术显得尤为重要。另一方面从工程应用观点看,原位测试技术方法本身及其应用方式和范围亦将随着地质工程学科理论发展而不断完善。

本书编写过程中,各参编人员积极收集资料,广泛征求意见,力求使本书较好地满足地质工程本科专业的教学要求,部分章节吸收和采纳了国内外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要求。广义上,地质工程测试技术方法的内容应包括水文地质参数测试、工程物探、岩土体原位测试、现场岩土体监测等多方面内容,考虑到地质工程本科专业需要以及本书容量所限,因此,本书只选择工程中岩土体常用测试技术方法。由于岩石的点荷载试验是在“现场”而不是“原位”,回弹仪测定岩石强度试验在“现场”,且在“地表”进行,但在工程实践中能方便快捷解决岩石强度问题,又由于静力载荷试验在工程勘察中用于地基土的原位测试较少,而在基桩承载力测试、复合地基质量检测中应用较多,因此,本书也较详细介绍了这方面的应用。此外,本书中较多地结合具体工程进行试验资料的整理分析及计算,使学生能更好掌握和使用该技术方法。

本书由河海大学地球科学与工程学院杨保全、魏继红、侯玉宾编著,河海大学吴继敏教授主审。

全书共12章:其中:第1—4章由杨保全编写;第5—8章由侯玉宾编写;第9—12章由魏继红编写。在编写本书过程中,江苏电力设计院蔡升华院长、勘测部任亚群、李方柱高级工程师,河南电力设计院张思军副院长都提出了宝贵意见和建议,河海大学地球科学与工程学院孙少锐、杨凤根副教授在资料收集和整理过程中提供了大量帮助,此外,河海大学地球科学与工程学院的俞晨、陈先威、吴伟、李建博研究生在本书编写过程中付出了辛勤劳动,在此谨致以衷心感谢!

限于编者水平,本书难免有不妥和错误之处,恳请读者及使用该书的师生批评指正。

编 者
2010. 12

目 录

第一章 静力载荷试验	1
第一节 概述	1
第二节 试验的基本原理与仪器设备	1
第三节 试验技术要求和操作步骤	4
第四节 试验资料整理	7
第五节 测试资料工程应用	9
第六节 螺旋板载荷试验简介	12
附:复合地基载荷试验要点	14
第二章 动力触探试验	15
第一节 概述	15
第二节 圆锥动力触探试验	17
第三节 标准贯入试验	22
第三章 静力触探试验	30
第一节 概述	30
第二节 探头-地层阻力传感器	31
第三节 静力触探设备	38
第四节 量测记录仪表	39
第五节 现场操作	42
第六节 静力触探资料整理	44
第七节 影响静力触探成果的因素	49
第八节 静力触探成果的应用	52
第九节 孔隙水压力圆锥静力触探简介	59
第四章 十字板剪切试验	63
第一节 概述	63
第二节 试验设备	63
第三节 试验原理和试验步骤	66
第四节 资料整理和应用	68
第五节 十字板剪切试验的工程应用	70
第六节 十字板剪切试验在岩土工程勘察中的应用	71

第五章 旁压试验	75
第一节 概述	75
第二节 旁压仪结构和工作原理	76
第三节 仪器的标定	78
第四节 旁压试验操作步骤	79
第五节 资料整理及成果应用	80
第六节 自钻式旁压仪简介	83
第七节 旁压试验在岩土工程勘察中的应用	85
第六章 现场波速测试	90
第一节 概述	90
第二节 试验仪器设备	91
第三节 单孔波速法	92
第四节 跨孔法	94
第五节 资料整理	96
第六节 波速资料的应用	97
第七节 瑞利波弥散特性及其在高速公路测试中的应用	100
第八节 波速测试在岩土工程勘察中的应用	104
第七章 扁铲侧胀试验	110
第一节 概述	110
第二节 试验基本原理	110
第三节 仪器设备及其工作原理	112
第四节 试验方法与技术要求	115
第五节 试验数据整理	118
第六节 试验成果的工程应用	120
第八章 岩体变形试验	125
第一节 概述	125
第二节 刚性承压板法的基本原理	125
第三节 仪器与设备	127
第四节 试验准备工作	127
第五节 试验步骤	130
第六节 试验成果整理	133
第九章 岩体强度试验	136
第一节 概述	136
第二节 斜推法试验	138

第三节	平推法试验	146
第四节	岩体沿软弱结构面直剪试验	147
第十章	岩体声波测试	155
第一节	概述	155
第二节	理论基础	155
第三节	仪器及使用	158
第四节	硐室围岩松动圈的声波测试	161
第五节	声波测井	166
第六节	围岩稳定性分类的声波测试	171
第十一章	岩石点荷载试验	175
第一节	概述	175
第二节	试验的基本原理	175
第三节	主要仪器设备	176
第四节	试样尺寸要求及试验步骤	177
第五节	记录格式及要求	180
第六节	点荷载强度指数及单轴抗压强度测定及计算	180
第七节	点荷载试验评价孔底岩基强度和承载力的方法	181
第十二章	回弹仪测定岩石强度试验	184
第一节	概述	184
第二节	仪器型号及试验原理	184
第三节	试验前的准备	185
第四节	试验步骤	186
第五节	成果整理及应用	187
参考文献		191

第一章 静力载荷试验

第一节 概 述

载荷试验(Plate Load Test,简称 PLT):在现场保持地基土天然状态和模拟建筑物的荷载条件下,通过一定面积的承压板向地基施加竖向荷载,观察研究地基土变形和强度规律的一种原位试验。本章主要涉及天然地基土的载荷试验,在工程实践中常进行单桩或复合地基载荷试验。载荷试验方法很多,按加荷性质可分为动力载荷试验和静力载荷试验;按承压板形状可分为平板载荷试验和螺旋板载荷试验;按试验深度又分为试坑载荷试验和钻孔载荷试验。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,可分为浅层平板载荷试验、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 及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。本章以浅层平板静力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体的强度和变形特性。实际上是模拟建筑物地基在受垂直荷载作用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) 确定地基土的初始压力、比例界限压力、极限压力,为评定地基土的承载力提供依据;
- (2) 计算地基土的变形模量;
- (3) 确定地基土的基床反力系数;
- (4) 载荷试验的其他应用。

第二节 试验的基本原理与仪器设备

一、试验的基本原理

在拟建建筑场地上挖一个试坑至试验深度,坑底尺寸一般为载荷承压板直径的 3 倍以上,以消除侧向土自重引起的超载影响,使试验满足半空间表面受荷边界条件要求。然后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,观察记录各级压力下沉降量 s 随时间 t 的变化,一般待前级压力沉降稳定后,再加下一级压力,直到某

级压力下,沉降量随时间增大而不能稳定于一定值。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 1-1 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_u ,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。

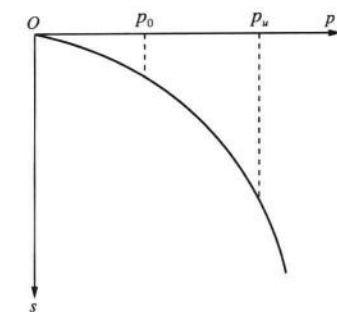


图 1-1 平板载荷试验 $p-s$ 曲线

试验研究表明:载荷试验所得到的荷载 p 与相应的土体沉降 s 的关系曲线(即 $p-s$ 曲线),直接反应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,承压板周围土体发生隆起及环形或放射状裂隙,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。

在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,刚性压力作用在弹性半空间表面或近地表时,土的变形模量为

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

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(kN/m^3);

μ ——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

$$E_{0z} = E_0 + n_v z \quad (1-2)$$

式中, E_0 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

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

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

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 1-2(a)~(d) 为千斤顶加荷方式, 图 1-2(e) 和 (f) 为重物加荷方式。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, 分为机械式千斤顶加荷装置和油压式千斤顶加荷装置; 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。

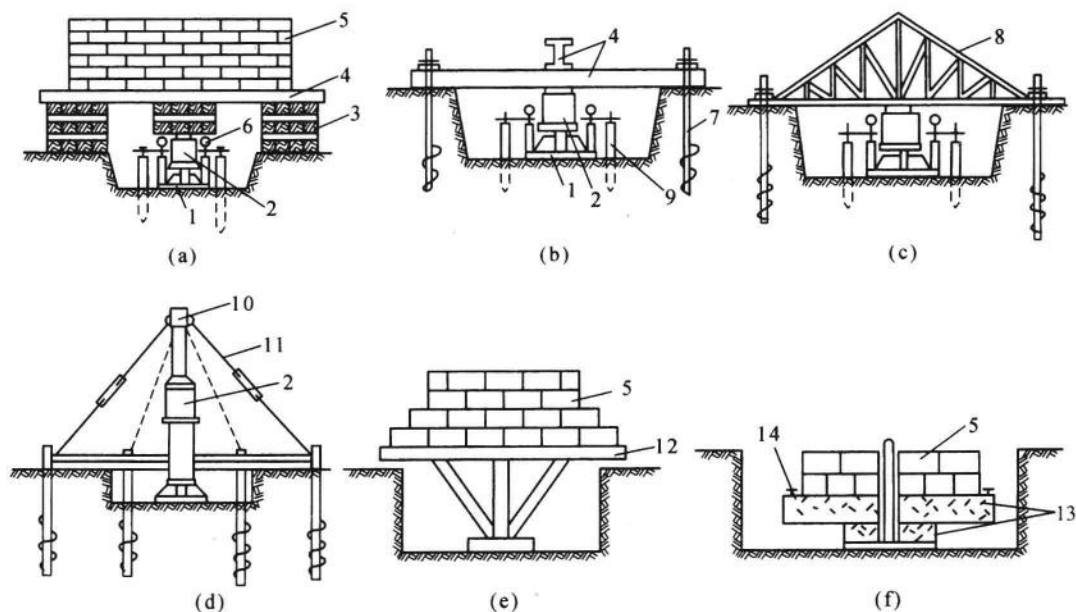


图 1-2 常见的载荷试验反力与加载布置方式

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锁定。

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 1-2(a)~(d)。载荷试验的反力可以由重物[图 1-2(a)]、地锚单独[1-2(b)~(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 1-3。

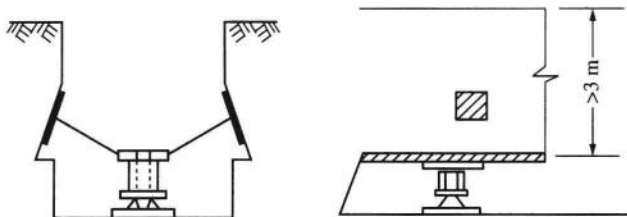


图 1-3 坚硬岩土体内载荷试验反力系统示意图

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。试坑底部的土体应避免扰动,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,根据土体的软硬程度等情况选用合适的尺寸。对于浅层平板载荷试验,承压板面积不应小于 0.25 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 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土层状况选用合适的面积,一般情况下,可参照下面的经验值选取:

- (1) 对于一般黏性土地基,常用面积为 0.5 m^2 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 老黏土或密实砂土,承压板的面积以 0.10 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),与地锚的距离应小于 0.8 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. 加载方法

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 min 、 5 min 、 10 min 、 10 min 、 15 min 、 15 min 测读一次沉降,以后间隔 30 min 测读一次沉降,当连续 2 h 、且每小时沉降量不大于 0.1 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 min 、 2 min 、 2 min 、 5 min 测读一次沉降,以后每隔 10 min 测读一次,当连续三次读数之差小于 0.01 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 min 观测一次沉降。每级荷载维持 2 h ,即可施加下一级荷载。最后一级荷载可观测至达到上述沉降相对稳定标准或仍维持 2 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

载荷试验一般加荷到设计承载力 2 倍即可终止试验,但从积累经验出发,仍以加荷到破坏荷载为好,当出现下列现象时可认为已达到极限条件而终止试验。

- (1) 承压板周边的土体出现明显裂缝并隆起;
- (2) 本级荷载的沉降量急剧增加, $p-s$ 曲线出现陡降段;
- (3) 在某级荷载下 24 h 沉降不能达到稳定标准;
- (4) 总沉降量与承压板直径或宽度之比超过 $1/12$ 。

对于深层平板载荷试验,承压板采用直径为 0.8 m 的刚性板,紧靠承压板周围外侧的土层高度不应小于 80 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) 沉降量急剧增加, $p-s$ 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 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;

(4) 当承压板下持力层坚硬, 沉降量较小时, 最大加载量已达到或超过地基土承载力设计值的 2 倍。

二、试验设备的安装及操作步骤

1. 试验设备的安装

这里以地锚反力系统为例加以叙述。

(1) 下地锚: 在确定试坑位置后, 根据计划使用地锚的数量(4 只、6 只或更多), 以试坑中心为中心点对称布置地锚。各个地锚的埋设深度应当一致, 一般地锚的螺旋叶片应全部进入较硬地层为好, 这样可以提供较大的反力。

(2) 挖试坑: 根据固定好的地锚位置来复测试坑位置, 根据前述试验技术要点开挖试坑至试验深度。

(3) 放置承压板: 在试坑的中心位置, 根据承压板的大小铺设不超过 20 mm 厚度的砂垫层并找平; 然后小心平放承压板, 防止承压板倾斜着地。

(4) 千斤顶和测力计的安装: 以承压板为中心, 从上到下在承压板上依次放置千斤顶、测力计和分力帽, 使其重心保持在一条垂直直线上。

(5) 横梁和连接件的安装: 通过连接件将次梁安装在地锚上, 以承压板为中心将主梁通过连接件安装在次梁下, 形成完整的反力系统。

(6) 沉降测量元件的安装: 打设支撑柱, 安装测量横杆(基准梁), 固定位移百分表(或位移传感器), 形成完整的沉降量测系统。

如果采用测力计来量测荷载的大小, 在试验之前还需要安装测力计的百分表。如果采用位移传感器测地基沉降, 传感器的电缆线应连接到位移记录仪上, 并进行必要的设置。

2. 试验操作步骤

(1) 加荷操作: 加荷等级一般分 10~12 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, 荷载的量测精度控制在最大加载量的 $\pm 1\%$ 以内。加载必须按照预先规定的级别进行, 第一级荷载需要考虑设备的重量和挖掉土的自重。所加荷载是通过事先标定好的油压表读数或测力计百分表的读数反映出来的, 因此, 必须预先根据标定曲线或表格计算出预定的荷载所对应的油压表读数或测力计百分表读数。

(2) 稳压操作: 每级荷重下都必须保持稳压, 由于加压后地基土沉降、设备变形和地锚受力拔起等原因, 都会引起荷载的减小, 必须随时观察油压表的读数或测力计百分表指针的变动, 并通过千斤顶不断的补压, 使所加的荷载保持相对稳定。

(3) 沉降观察: 采用慢速法时, 对于土体, 每级荷载施加后, 间隔 5 min、5 min、10 min、10 min、15 min、15 min 测读一次沉降, 以后间隔 30 min 测读一次沉降, 当连续 2 h、每小时沉降量不大于 0.1 mm 时, 可以认为沉降已达到相对稳定标准, 可再施加一次荷载, 直至达到前述试验终止条件。

(4) 试验观测与记录: 当采用百分表观测沉降时, 在试验过程中必须按规定将观测数据记录在载荷试验记录表中。试验记录是载荷试验中最重要的第一手资料, 必须正确记录, 并严格校对, 确保试验记录的可靠性。

第四节 试验资料整理

载荷试验的最后成果是通过在现场实测试验数据进行整理,整理资料包括:检查整理原始资料、校正沉降数据、绘制校正后 $p-s$ 曲线。

一、检查原始资料

在试验过程中,应对原始记录资料及时检查,试验结束后再进行全面检查整理,尤其注意检查由某种原因引起沉降和时间读数中断的前后数据,将检查后的时间、变形、压力等有关数据写于载荷试验记录表中。

二、校正沉降数据

通过试验测得各级压力下的沉降值,绘制 $p-s$ 关系曲线。该曲线是确定地基土变形模量、承载力和土体的应力—应变关系等的重要依据。然而所测得的变形值,并非都是相应压力下产生的变形值和真实反映地基土的 $p-s$ 规律。在试验中,由于一些因素的干扰,使测记变形值与真实变形值存在一定差异。这些误差的产生,在 $p-s$ 坐标中可以造成 $p-s$ 曲线不通过坐标原点,以及由于观测数据点的离散性,不能直接以这些点连线代替反映土体应力—应变的 $p-s$ 关系曲线。沉降数据的校正任务就是去掉这些误差的影响,绘出真实的 $p-s$ 关系曲线。另外还存在一种系统误差,一般不易校正,如试验中测记变形的测微器或位移传感器失灵,此时要检修仪器重新作载荷试验来解决。

土的性质状态不同, $p-s$ 关系曲线形状也不同,在工程实践中, $p-s$ 曲线可分拐点型 $p-s$ 曲线和圆滑型、不规则型 $p-s$ 曲线。不同类型曲线宜采用不同的校正方法。

1. 拐点型 $p-s$ 曲线校正

这种曲线多数是反映土体呈整体破坏,曲线有明显的比例界限点,该点以前 $p-s$ 曲线呈直线。曲线校正是要找出坐标原点校正值 S_0 和比例界限点前直线段的斜率 C 。有了 S_0 和 C 后,便可按下述方法计算出校正后的变形值 S_i :

(1) 比例界限点以前各点,根据 C 和 p_i 值按式(1-5)计算 S_i 值:

$$S_i = Cp_i \quad (1-5)$$

式中 p_i ——比例界限点前某级荷载。

(2) 比例界限点以后各点按下式计算校正后的 S_i

$$S_i = S'_i - S_0 \quad (1-6)$$

式中 S'_i ——比例界限点后荷载级为 p_i 时的变形观测值;

S_0 ——坐标原点校正值(可正可负,使校正后曲线通过原点)。

关于 C 和 S_0 值,可用下面介绍的二种方法确定:

(1) 选点法

利用观测资料,在 $p-s$ 座标中点出各相应 p_i 、 S_i 点,然后根据这些点的总体规律,找出近似的比例界限点的位置,再通过该点引一直线,使其均匀通过该点之前各观测数据坐标点,然后在引出的直线上取相近的三个点 $M(p_M, S_M)$ 、 $N(p_N, S_N)$ 、 $I(p_i, S_i^0)$,即可按下式求得

S_0 和 C ;

$$C = \frac{S_N - S_M}{p_N - p_M} \quad (1-7)$$

$$S_0 = S_i^0 - Cp_i \quad (1-8)$$

式中 p_N, S_N ——所引直线上 N 点的荷载及变形;

p_M, S_M ——所引直线上 M 点的荷载及变形;

p_i, S_i^0 ——所引直线上 I 点的荷载及变形。

(2) 最小二乘法

这是一种更准确的数理统计方法,它可以使上述直线部分拟合曲线 $S_i^0 = S_0 + Cp_i$ 计算出的 S_i^0 与相应压力下的观测变形值 S_i' 间误差更小。按最小二乘法原理,达到这一要求应使 $\sum (S_i' - S_i^0)^2 = \text{最小值}$, 即:

$$\sum [S_i' - (S_0 + Cp_i)]^2 = \text{最小值} \quad (1-9)$$

要满足式(1-9)条件,必须有

$$\frac{\partial \sum [S_i' - (S_0 + Cp_i)]^2}{\partial S_0} = 0 \quad (1-10)$$

和

$$\frac{\partial \sum [S_i' - (S_0 + Cp_i)]^2}{\partial C} = 0 \quad (1-11)$$

解上述偏微方程得到的最小二乘法两个方程:

$$NS_0 + C \sum p_i - \sum S_i' = 0 \quad (1-12)$$

$$S_0 \sum p_i + C \sum p_i^2 - \sum p_i S_i' = 0 \quad (1-13)$$

再联解上两个方程即可得到 S_0 和 C 的表达式:

$$S_0 = \frac{\sum p_i S_i' \cdot \sum p_i - \sum p_i^2 \cdot \sum S_i'}{(\sum p_i)^2 - N \sum p_i^2} \quad (1-14)$$

$$C = \frac{\sum S_i' - NS_0}{\sum p_i} \quad (1-15)$$

式中 N ——比例界限点前的加荷次数;其他符号意义同前。

(2) 圆滑型和不规则型 $p-s$ 曲线校正

由于这类曲线呈非线性,故不能用上述直线校正办法求 S_0 ,目前校正这种非线性曲线的办法也有几种,其中刘祖德教授提出的求 S_0 的公式,既考虑了土体的非线性特性,同时计算方法也简单。此外也可按三次、四次多项式拟合方法求 S_0 。刘祖德教授指出这种非线性 $p-s$ 曲线有这样的近似特点,即当三个相邻荷载的荷载增量均为 Δp 时,各级荷载下的 $p-s$ 曲线斜率(C)呈等量递增,即:

$$C_{01} - C_{12} = C_{12} - C_{23} \quad (1-16)$$

而

$$C_{01} = \frac{S_1' - S_0'}{\Delta p}, \quad C_{12} = \frac{S_2' - S_1'}{\Delta p}, \quad C_{23} = \frac{S_3' - S_2'}{\Delta p},$$

将这三个式子代入式(1-16)即可得到:

$$S_0 = 3S'_1 - 3S'_2 + S'_3 \quad (1-17)$$

式中 C_{01} 、 C_{12} 、 C_{23} ——分别为相邻各等增量 Δp 下的分段 $p-s$ 曲线斜率；

S'_1 、 S'_2 、 S'_3 ——分别为相邻各增量荷载下的沉降观测值。一般可取 $p-s$ 曲线首端相邻等增量 Δp 下的三个荷载对应的沉降观测值。

求得 S_0 后,即可按式(1-10)计算各级荷载下的沉降观测值 S_i 。

如用多项式拟合法求得 S_0 后,应根据各荷载下回归值 $\hat{S}_i$ 和 S_i ,按下式计算各荷载下校正沉降值 S_i :

$$S_i = \hat{S}_i - S_0 \quad (1-18)$$

将观测值记录稳定变形值进行校正后,填入载荷试验记录中去。

三、载荷试验综合成果

载荷试验综合成果,一般包括:简述试验场地地质条件、试验技术条件、试验方法、试验所在深度处土的物理力学性质,以及地基土变形特征描述和试验中有关问题的说明,试验所确定的承载力和变形模量等(见下节),并要附有野外载荷试验记录、实测 $s-t$ 曲线(可把各级荷载绘于同张图上)、各级荷载下沉降稳定观测值和经沉降值校正后的 $p-s$ 曲线。也可将上述主要内容编绘在一张图内。

除上述成果外,也可根据需要,绘制专门性图件并作相应说明。

第五节 测试资料工程应用

一、确定地基容许承载力

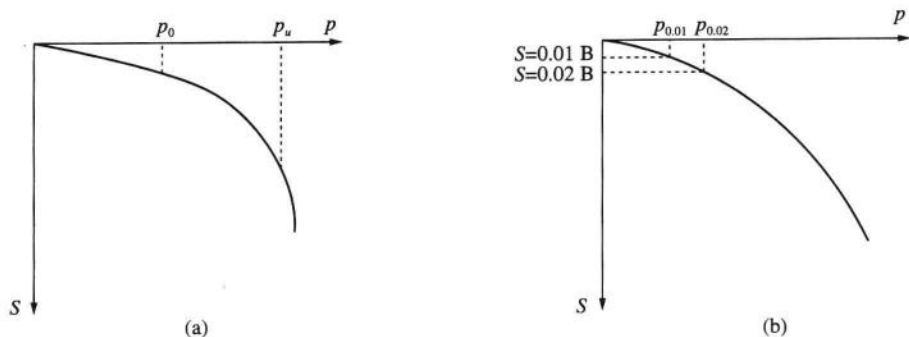
(一) 强度控制法

对密实砂土、硬黏土等低压缩性土,承压板下土体破坏往往是整体破坏, $p-s$ 曲线有明显的起始直线段、中间曲线段和尾端直线破坏段三部分[如图 1-4(a)]。当这种土的极限荷载 p_u 远大于比例极限压力 p_0 时,一般以 p_0 作为地基容许承载力。此时不仅强度满足要求,而且由于变化处在弹性直线变形阶段,变形量一般小于建筑物允许值。

当 p_0 点在 $p-s$ 坐标中不明显时,可用 $p-\Delta s/\Delta p$ 、 $\lg p-\lg s$ 曲线中第一个拐点对应的压力确定。此外,还可按最优分割算法确定,该方法的要点是,将校正后的 $p-s$ 曲线划分成压力差相等的小段进行统计分析,找出小段内变形差最小而各段间差异最大的第一分割点所对应的压力,以此作为比例界限压力。

(二) 相对性沉降控制法

对有一定强度的中高压缩性土, $p-s$ 曲线呈非线性,无明显拐点,曲线斜率随荷载增加变大,直至破坏[1-4(b)]。有时由于设备条件限制,试验做不到破坏阶段。这种土变形量大,即使是以极限荷载除以安全系数,有时变形也有可能超过建筑物允许值。基于这种情况国内外对这种土按控制变形量给出地基容许承载力。即限定 $p-s$ 曲线上 S 与对应承压板 B 的比值,以此 S 在 $p-s$ 曲线上找到对应压力作为地基容许承载力。如我国的规范规定,

图 1-4 按 $p-s$ 曲线确定地基土的容许承载力(a) 拐点型 $p-s$ 曲线 (b) 非拐点型 $p-s$ 曲线

黏性土以 $S/B=0.02$, 砂性土以 $S/B=0.01\sim0.015$ 对应的压力作为容许承载力。国外, 日本以 $S=0.08B$ 对应压力之半 ($B=30\text{ cm}$), 太沙基用 $S=0.03B$ 对应压力之半 ($B=31.6\text{ cm}$) 作为地基容许承载力。

(三) 极限荷载法

利用载荷试验确定地基容许承载力, 最好通过试验求出极限荷载 p_u , 以便校核前述两种方法给出的地基容许承载力的可靠性。如:

1. 当 $p-s$ 曲线达到 p_0 后很快发展到脆性破坏, p_0 与 p_u 相距很近。我国一些红土、黄土等载荷试验就出现过此种情况, 此时如用 p_0 作为容许承载力无论从强度和变形都不能保证足够安全度, 应以 P_u 除以安全系数 $2\sim3$ 作为地基容许承载力。

2. 当 p_0 与 p_u 相距较远, $p_0 < \frac{1}{2\sim3} p_u$, 为发挥地基潜力, 可取 $[R] \leq p_0 + \frac{p_u - p_0}{K}$, K 值取 $3\sim4$ 。

3. 通过控制沉降量给出的 $p_{0.02}$ 、 $p_{0.015}$ 等值, 再用 p_u/K 进行强度复核, K 取 $2\sim3$ 。从中取最小值作为容许承载力。

极限荷载 p_u 可参照下述方法确定:

1. 出现本章第二节所述的破坏现象之一的时刻所对应的荷载;
2. 对软黏土、砂性土, 可取 $p-s$ 曲线尾部直线段起点对应的荷载;
3. 对非饱和黏性土, 当试验由于设备条件限制, 未达到全部破坏阶段, 但 $p-s$ 曲线出现明显拐弯时, 可采用外插作图法确定, 详见有关规程。
4. 取 $\lg p - \lg S$ 、 $p - \Delta S / \Delta p$ 及 $p-s$ 曲线第二拐点对应荷载。

二、计算地基土变形模量

1. 对比例界限点清楚, 该点前 $p-s$ 呈直线关系的, 采用下式确定变形模量 (E_0)

$$E_0 = (1 - \mu^2) p / \Delta s \quad (1-19)$$

式中 p ——比例界限点荷载 (kN);

E_0 ——土的变形模量 (MPa);

μ ——土的泊松比。按土的类型可分别采取: 碎石土为 0.27 ; 砂、亚砂土为 0.30 ; 亚黏