



高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
高校土木工程专业规划教材

岩土工程测试和安全监测

何开胜 编著

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
高校土木工程专业规划教材

岩土工程测试和安全监测

何开胜 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程测试和安全监测/何开胜编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 7

高校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-22044-1

I. ①岩… II. ①何… III. ①岩土工程-工程测试-高等学校-教材②岩土工程-安全监测-高等学校-教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 063306 号

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》及现行标准规范编写, 介绍了岩土原位测试、桩基工程检测和安全监测三个方面的常用测试技术。原位测试包括地基载荷试验、静力触探试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验和旁压试验; 桩基工程检测包括静载试验 (压、拔、水平)、Osterberg 试桩法、低应变和高应变检测; 安全监测包括常用监测仪器, 软土地基预压加固、基坑、地铁隧道等工程监测。

本书突出测试原理、试验方法与操作要点以及工程应用, 强调案例教学, 体现了最新规范和行业发展现状, 以及国家培养学术与工程实践复合型人才的思想。本书通过二维码提供配套数字资源, 便于学生理解相关内容。本书可作为高等院校土木工程专业本科生和研究生教材, 也可供土木工程勘察、设计、检测与施工技术人员参考。

为了更好地支持本课程教学, 本书作者制作了教学课件, 有需求的读者可以发送邮件至 2917266507@qq.com 免费索取。

* * *

责任编辑: 聂伟 王跃

责任校对: 刘梦然

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材

高校土木工程专业规划教材

岩土工程测试和安全监测

何开胜 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 字数: 341 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 30.00 元 (附配套数字资源及课件)

ISBN 978-7-112-22044-1

(31937)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

岩土工程的测试与安全监测是保证工程合理设计与安全竣工的重要手段。现代土木工程对岩土工程的测试与监测的要求越来越高，我国现行的注册土木工程师类别中，将岩土工程列为一个专业方向，其重要性可见一斑。合格的土木工程师，应该是理论和实践高度结合的职业群体，除了要知晓工程的设计理论，更要具有工匠的实践能力。

工科院校是培养工程师的摇篮，为此，住房和城乡建设部颁布了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》，将“土木工程相关方向的检测技术”列为核心实践单元和知识技能点，将“岩土原位测试和现场监测技术”列为地下工程方向的知识单元。因此，对土木工程专业的大学生来说，“岩土工程的测试与安全监测”是一门很重要的专业课程。

本教材依据专业规范和教育部卓越工程师培养计划编写，特色如下：

(1) 内容全面实用。鉴于专业规范中给出的课时有限，本书有效整合了岩土工程现场测试与监测的常用内容。测试方面选取了建筑工程中应用较多的桩基工程的静、动检测，原位测试则选取了工程勘察中常用的6种类型。对监测部分，考虑各类工程监测仪器具有通用性，故专门介绍监测仪器及其原理，便于查阅。然后精选具有代表性的软土地基、基坑支护、地铁隧道等常见工程，讲解其监测方法和安全控制标准。这些测试和监测内容应用广泛，学生可在较短时间内掌握岩土的现场测试和操作知识，完成岗前知识培训。

(2) 知识点精心编排与论述。编者依据自己二十余年岩土测试工作经验和十余年教学经验，结合本课程特点、学习要求和将来工作需求，对该领域的相关知识点进行了认真梳理，摒弃冗赘的理论推导，重点着墨于测试原理、试验方法与操作要点、工程应用等方面。

(3) 体现最新规范和行业发展现状。书中各部分内容均依据最新的国家规范来编写，对规范未涉之处则采用行业或地方标准来补充，同时参考了一些论著的最新研究成果，以及编者对测试和监测的研究与认识。教材中的操作方法和监控指标可直接用于评判实际工程，学以致用。

(4) 强调案例教学。岩土测试和监测是一门实践操作性很强的课程，为了更好地体现知识的应用性，每个测试和监测都介绍一个工程案例，避免测试和监测方法教条式的讲解，将知识点融入实际工程中，加深对测试的理解和认识，增加学习兴趣。

(5) 编制了课后习题。习题根据每章应知应会知识要点而设计，针对性强，不仅便于复习要点，而且有助于读者将来参加注册土木工程师（岩土）考试。

(6) 本书通过二维码提供配套数字资源，主要为相关图片、视频，便于学生理解相关内容。

本教材由浙江理工大学何开胜编著，吴大志、余璐参与了第九章、第十章部分内容编写，研究生陈泽虎负责了绘图、校对以及编排工作。本书是浙江理工大学规划教材，得到了浙江理工大学教材出版基金的资助。

编写过程中引用了很多参考文献，详见书后所列，谨向原作者表示感谢。限于编者的水平，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 内容简介	1
第二节 土工原位测试	1
第三节 桩基工程检测	3
第四节 岩土工程安全监测	4
思考题	6
第二章 地基载荷试验	7
第一节 概述	7
第二节 平板载荷试验原理和设备	7
第三节 平板载荷试验技术要点和操作步骤	10
第四节 平板载荷试验资料整理和成果应用	13
第五节 螺旋板载荷试验	15
第六节 工程案例分析	17
思考题	18
第三章 静力触探试验	20
第一节 概述	20
第二节 贯入机理和试验设备	21
第三节 试验要点和影响因素	25
第四节 资料整理和成果应用	28
第五节 工程案例分析	34
思考题	36
第四章 圆锥动力触探试验	37
第一节 概述	37
第二节 基本原理和仪器设备	37
第三节 试验要点和影响因素	39
第四节 资料整理和成果应用	41
第五节 工程案例分析	45
思考题	46
第五章 标准贯入试验	47
第一节 概述	47
第二节 基本原理和仪器设备	47
第三节 试验要点和影响因素	49
第四节 资料整理和成果应用	50

第五节	工程案例分析	54
思考题		56
第六章	十字板剪切试验	57
第一节	概述	57
第二节	基本原理和仪器设备	57
第三节	试验要点和影响因素	60
第四节	资料整理和成果应用	62
第五节	工程案例分析	64
思考题		66
第七章	旁压试验	67
第一节	概述	67
第二节	基本原理和仪器设备	68
第三节	试验要点和影响因素	71
第四节	资料整理和成果应用	73
第五节	工程案例分析	76
思考题		78
第八章	基桩静载试验	79
第一节	概述	79
第二节	单桩竖向抗压静载试验	80
第三节	单桩竖向抗拔静载试验	85
第四节	单桩水平静载试验	87
第五节	Osterberg 试桩法	90
第六节	工程案例分析	94
思考题		96
第九章	基桩高低应变检测	97
第一节	概述	97
第二节	基桩动测的基本原理	98
第三节	单桩低应变检测	98
第四节	单桩高应变检测	105
第五节	工程案例分析	115
思考题		117
第十章	岩土工程监测常用仪器	119
第一节	概述	119
第二节	常用传感器类型和工作原理	120
第三节	常用监测仪器	131
思考题		141
第十一章	软土地基预压加固监测	142
第一节	概述	142
第二节	地表变形监测	143

第三节	深层土变形监测	146
第四节	孔隙水压力监测	149
第五节	真空度和地下水位	152
第六节	监测频率和安全控制值	153
第七节	工程案例分析	154
	思考题	160
第十二章	基坑工程监测	161
第一节	概述	161
第二节	监测项目	163
第三节	测点布置和监测方法	165
第四节	监测频率和报警值	177
第五节	工程案例分析	180
	思考题	184
第十三章	地铁隧道工程监测	185
第一节	概述	185
第二节	工程影响分区和监测等级	186
第三节	监测项目	189
第四节	测点布置	191
第五节	监测方法	198
第六节	监测频率和控制值	207
第七节	工程案例分析	212
	思考题	215
	参考文献	216

第一章 绪 论

第一节 内 容 简 介

岩土工程有三个特点:

(1) 研究对象具有不确定性。岩土工程依赖于天然岩土材料, 这些材料及其组织分布都是自然形成的, 只能通过勘察部分查明。

(2) 计算参数的不确定性。这是岩土体测试方法的多样性和测试数据的离散性所致。

(3) 岩土工程设计理论的不严密性。岩土工程是力学和地质学的结合体, 强调定量分析和定性经验相结合, 需要综合这些才能做出判断。

岩土工程的这些特点, 使其在取样测试、质量检测和安全控制上均与结构工程有很大的不同, 这大大增加了工程难度和不确定性。

首先, 岩土室内试验仅依据现场钻孔取得的少量小试样, 代表性较差。所取土样受扰动影响, 对砂卵石还无法取样, 试验人员的操作水平对试验结果影响较大。因而促使人们转而注重发展土的原位测试技术。原位测试是在工程场地的原位应力条件下对土体进行测试, 测试结果具有较好的可靠性及代表性。

其次, 基桩检测是大型建(构)筑物的主要检测项目, 应用非常广泛, 因此列入本教材。

最后, 岩土层和参数的不确定性, 加之设计理论带有的经验因素, 使工程施工过程中出险程度大增。岩土工程安全监测就是伴随着大量工程建设的需要而逐步发展起来的, 并成为保障工程安全的最后一个手段。大规模工程建设, 给岩土工程安全监测提供了巨大的市场需求。现代电子通信技术的发展极大地提高了监测仪器的性能和数据采集质量。如今, 岩土工程监测与水利、地质、结构、水利水电、道桥、隧道、采矿、港口航道等许多专业紧密相关, 不仅是安全保障所需, 更是担当了完善和发展设计理论的任务。

综上所述, 本教材重点介绍了岩土工程测试中的三个部分:

(1) 原位测试。内容包括地基载荷试验、静力触探试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验和旁压试验。

(2) 基桩检测。内容包括静载试验(压、拔、水平)、Osterberg 试桩法、低应变检测和 high 应变检测。

(3) 安全监测。内容包括岩土工程监测常用仪器、软土地基预压加固监测、基坑工程监测、地铁隧道工程监测。

第二节 土工原位测试

一、原位测试与室内试验的比较

室内试验的发展历史比较悠久, 试验的应力、应变及排水边界条件比较明确, 可以控

制，测得的物理力学性能指标已取得大量的使用经验。但是，天然地层是很复杂的，室内试验依据少量小试样，可能会漏掉对工程成败起重要作用的夹层，所得成果代表性较差，不能完全反映土层的真实情况。此外，土样有扰动，试验费时费事，有些土层（如砂、卵石等粗粒土）取土非常困难。这些缺点促使人们转而注重发展土的原位测试技术。

原位测试最大特点是在原位应力条件下进行试验，不用取样，避免或减轻了对土样的扰动程度，测定土体的范围大，能反映微观、宏观结构对土性的影响，有些测试方法通过连续测试还能获取土层的完整剖面。原位测试的最大缺点是只能测定天然应力状态下的参数，有些测试技术还不能测得加荷、卸荷条件下参数的变化，排水条件也不明确。

可见，原位测试与室内土工试验的优缺点是互补的，它们是相辅相成的。目前国内外总的趋势是以原位测试技术摸清土层分布及各土层特性的变化情况，在此基础上再钻取少量质量优良的土样进行室内试验，为设计提供两套设计指标。

这里要指出的是，由于两种测试方法的边界条件是不完全相同的，因此即使是测定同一土的指标，也不可能相等，只能是相当的，但其在土层内的变化规律应该是一致的。例如，十字板试验测得的十字板强度与室内不排水抗剪强度相当，都代表土的天然强度，但是由于扰动程度不同，应力状态不同，因此十字板强度往往会较高。在固结系数方面，由孔压静力触探测得的固结系数会比室内试验大几倍，甚至1~2个数量级，这是由于受力条件及排水边界的差异而造成的。

在进行原位试验时，应配合钻探取样进行室内土工试验，两者相互检验，相互印证，以此建立统计经验公式。在美国，有人主张，当室内与现场原位测试结果有很大差异时，应更多考虑原位测试所揭示出的土特征参数，由此选取适宜的土性指标。

二、常用的原位测试方法及其适用性

目前国际上常用的原位测试方法主要有：载荷试验（平板载荷试验及螺旋板载荷试验）、静力触探、孔压静力触探、圆锥动力触探、标准贯入试验、十字板剪切试验、旁压试验及波速试验等。

在选择原位测试方法时，应根据岩土条件、测试方法的适用性、设计对参数的要求以及该地区对此方法的使用经验等情况来确定。

原位测试可提供几大类土的特性参数，按其成熟的程度，依序描述如下：

1. 土类的判别及分层

静力触探可判定土类，孔压静力触探可较准确的判定土类并分层，分辨出薄的夹层。

2. 强度特性参数

(1) 十字板剪切试验。可测定饱和软黏土及一般黏性土的天然强度，但不适用于粉土或细砂土。

(2) 载荷试验。可判定黏性土的不排水强度，属半理论半经验的方法。

(3) 动力触探、静力触探及孔压静力触探。可由经验关系间接评定强度指标。

3. 固结特性

(1) 孔压静力触探。可测定水平向固结系数。

(2) 自钻旁压试验。可测定固结系数。

4. 变形特性

(1) 载荷试验。测定荷载板影响范围内的不排水变形模量及砂土的变形模量。

- (2) 剪切波速试验。测定小应变 (10^{-5}) 的剪切模量, 仅限于水平层的场地。
- (3) 自钻旁压试验。测定土的水平向剪切模量。

5. 承载力

主要用载荷试验及旁压试验来测定。

6. 液化判别

标准贯入试验已积累了较多的使用经验, 国内外普遍采用此法。孔压静力触探试验也可用于液化判别。

对某一项岩土参数, 会有几种原位测试方法可供选择。还须注意的是, 有些原位测试土参数是建立在统计的经验基础上, 有很强的地区性和土类的局限性。

表 1-1 给出的原位测试方法和适用范围, 可供选择时参考。

原位测试方法和适用范围

表 1-1

测试方法 \ 适用范围	适用土类							岩土参数											
	岩石	碎石土	砂土	粉土	黏性土	填土	软土	鉴别土类	剖面分层	物理状态	强度参数	模量	渗透系数	固结特征	孔隙水压力	侧压力系数	超固结比	承载力	判别液化
平板载荷试验(PLT)	○	√	√	√	√	√	√				○	√					○	√	
螺旋板载荷试验(SPLT)			√	√	√		○				○	√					○	√	
静力触探(CPT)			○	√	√	○	√	○	○	○	√							○	√
孔压静力触探(CPTU)			○	√	√	○	√	√	√	○	√		○	○	○		○	○	√
圆锥动力触探(DPT)		√	√	○	○	○	○		○	○								○	
标准贯入试验(SPT)			√	○	○			√	○	○	○	○						○	√
十字板剪切试验(VST)					√		√				√								
预钻式旁压试验(PMT)	○	○	○	○	√	○					○	√							
自钻式旁压试验(SBPMT)			○	√	√		√	○	○	○	○	√		√	√	√	○	√	○
波速试验(WVT)	○	○	○	○	○	○	○				√								

注: √为很适用; ○为适用。

第三节 桩基工程检测

桩基是土木工程最常用的基础形式, 其质量的好坏直接影响到整个建筑物的安危。桩基工程检测的目的有两个: ①通过现场试桩为桩基设计提供合理的参数; ②通过工程桩抽样检测, 检验工程桩施工质量是否合格。

桩基检测分为静载荷试验与动力测试两大类。表 1-2 给出了我国桩基不同检测方法所能检测的内容。

本教材主要介绍桩基检测的四个内容: 静载试验(压、拔、水平)、Osterberg 试桩法、桩基低应变检测、桩基高应变检测。

桩基静载试验是采用静力加荷重的办法确定其承载力、检验桩身质量, 它是最直观、最可靠的桩基检测方法。但随着建(构)筑物规模不断增大, 加载吨位越来越高, 甚至达到

基桩检测方法与检测内容

表 1-2

检测方法	检测内容	桩身材质	基桩完整性	基桩承载力
静载荷试验法		○	○	√
低应变动测法	机械阻抗法	○	√	
	反射波法	○	√	○
	动力参数法		√	○
高应变动测法	锤击贯入法		○	√
	Case 法		○	√
	Smith 波动方程法		○	√
钻探取芯法		√	○	
混凝土强度试验		√		
超声波透射检测法		√	○	
Osterberg 试桩				√
静动试桩法				√

注：√为能检测；○为能检测，但有限制条件。

30000kN 以上。对于如此大吨位试桩，不仅测试费用高、难度大，还存在试验现场的安全问题。因此，研究人员发明了桩底或下部埋设千斤顶和传感器进行载荷试验的方法，称之为 Osterberg 试桩法。东南大学土木学院对其进行了深入研究和推广应用，称之为“自平衡试桩法”。

为了增加检测数量，降低检测费用，出现了基桩动力测试法。按照测试时桩身和桩周土产生相对位移的大小，分为低应变法和高应变法。这种测试费用低廉、速度较快，尤其是低应变法，通常 100%检测全部工程桩。

第四节 岩土工程安全监测

一、监测的必要性

由于土体材料及分布的不均匀性，与岩土接触的构筑物在各种力的作用和自然因素的影响下，其工作性态和安全状况随时都在变化。如果出现异常而未及时发现和控制，任由险情发展，后果非常严重。历史上发生过堤坝溃决失事形成的巨大灾难，而这些工程均未设置必要的观测设施。如果事先进行必要监测，及时发现问题，采取有效的措施，则可避免灾难的发生。1985 年长江三峡的新滩发生大滑坡，2000 万 m^3 堆积体连同新滩古镇一并滑入长江，但由于进行了安全监测，滑坡前已做出了准确的预报，居民全部提前撤出，无一伤亡。

岩土工程的地质地形条件复杂多变，要在工程设计阶段准确无误地预测工程的基本状况及其在施工、运行过程中的变化，目前几乎是不可能的。因此，岩土工程的安全不仅取决于合理的设计，还取决于贯穿在设计、施工和运行全程的原型监测。

二、监测目的

岩土工程监测的主要目的如下：

(1) 通过对岩土体的变形和受力情况进行实时监测，随时发现潜在的危险先兆，判断工程的安全性，采取必要的工程措施，防止事故的发生；

(2) 通过监测数据指导现场施工，评价施工方案和方法的适用性，优化施工方案；

(3) 验证岩土勘察资料，校核设计理论，判断设计参数选择的合理性并进行优化；

(4) 通过监测数据，验证和发展岩土工程设计理论，为以后工程设计、施工及规范修订积累经验 and 提供依据。

三、监测内容和方法

岩土工程监测内容主要依据所在区域的岩土性质、建筑物的形式和重要性来确定。通常应包括如下监测内容：

1. 建筑物和场地周边的变形

如地表沉降，深层土的沉降和水平位移等。通常选择有代表性的监测点，用高精度的水准仪观测沉降，用交会或控制导线观测地表水平位移，用沉降仪观测深部土层的分层沉降，用测斜仪观测深层土水平位移。

2. 结构和岩土应力

如基底压力，构件的钢筋应力或应变，锚杆拉力，支撑轴力等。在结构杆件钢筋上串接钢筋应力计或应变计测量钢筋应力或应变，用柱式测力传感器测量锚固结构的拉力和支撑轴力，用埋设的土压力计测量土压力。

3. 孔隙水压力和地下水位

如加荷与施工期软土中的孔隙水压力变化，地下水的动态。用水位计监测地下水位，用孔隙水压力计监测饱和地基土中的孔隙水压力。

4. 相邻建筑物的沉降和倾斜

如基坑或隧道开挖时邻近建筑和地下管线的沉降与位移。除常规水准仪和全站仪测量方法外，对重点监测的建筑物设置电子倾角仪和连通管形变监测仪，它们都可以安置多个探头，自动连续地监测。

四、监测设计和实施方案

1. 确定观测项目

根据工程类型与复杂程度，工程所在地形、地质条件、施工方法，工程的使用寿命及工程破坏造成的生命财产损失大小等因素，综合确定观测项目。

2. 测点布置

测点布置应有针对性与代表性，应能了解整个工程的全貌，又能详细掌握工程重要部位及薄弱环节的变化状况。一般选择一个或几个最重要的断面，重点、全面地布置观测仪器，在可能出现最大、最小测值、平均测值的部位布置测点。

3. 选择观测仪器类型

根据工程的等级、规模、重要性等，对不同的仪器方案进行经济评价，明确各观测项目使用的仪器类型、型号、量程、精度、灵敏度、使用寿命等。各种仪器均应能满足准确可靠、经久耐用及长期稳定等基本要求。

4. 仪器埋设和安装

按有关监测规范，结合工程施工方案确定科学的仪器埋设方案。既要避免仪器埋设对主体工程造成破坏或留下隐患，也要防止主体工程施工对观测仪器的破坏。

监测方案设计时，还应同时进行埋设仪器的沟槽开挖与回填、钻孔与封孔、电缆的走向设计、电缆沟的开挖与回填，仪器及电缆的保护、观测房的设计。

5. 仪器的现场观测

现场观测应按规范、设计及仪器使用说明书要求进行。

要明确各种仪器的测次、观测频率、观测精度。特殊情况下，如快速加载，出现安全隐患趋势时应加密测次。观测时需将测值与前次测值对比，如有异常，立即重测。同时，还应观测水位、温度、降雨及主体工程填筑速度等相关因素。

6. 观测资料的整理分析

先对原始观测数据进行可靠性检验，再计算各物理量测值并绘制有关的观测项目的过程线和分布图。将观测值与同类物理量、理论计算或模型试验结果、监测警戒值及同类工程实测值等比较，判断工程的安全状态。

思 考 题

1. 为什么要进行岩土工程原位测试？主要方法有哪些？其能测出岩土哪些性能指标？
2. 桩基检测目的是什么？检测方法有哪些？
3. 简述岩土工程安全监测目的和主要内容。

第二章 地基载荷试验

第一节 概 述

载荷试验是在岩土体原位，用一定尺寸的承压板，施加竖向荷载，同时观测承压板沉降，测定岩土体承载力和变形特性。根据承压板的形式和设置深度不同，载荷试验可分为平板载荷试验、螺旋板载荷试验以及基桩载荷试验。其中，平板载荷试验又可分为浅层平板载荷试验和深层平板载荷试验。

平板载荷试验 (Plate Loading Test, 简称 PLT) 是在岩土体原位，用一定尺寸的承压板，施加竖向荷载，同时观测承压板沉降，测定岩土体承载力和变形特性。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大于或等于 3m 和地下水位以上的地基土。

螺旋板载荷试验 (Screw Plate Loading Test, 简称 SPLT) 是将螺旋板旋入地下预定深度，通过传力杆向螺旋板施加竖向荷载，同时量测螺旋板沉降，测定土的承载力和变形特性。螺旋板载荷试验适用于深层地基土或地下水位以下的地基土。

平板载荷试验可用于：

- (1) 根据荷载-沉降关系线确定地基土的承载力；
- (2) 计算土的变形模量；
- (3) 确定地基土的基床系数；
- (4) 估算土的不排水抗剪强度。

本章主要讲述地基平板和螺旋板载荷试验。

第二节 平板载荷试验原理和设备

一、基本原理

平板载荷试验的理论依据是假定地基为弹性半无限体，按弹性力学的方法导出表面局部荷载作用下地基土的沉降量计算公式。

布辛纳斯克解出了当竖直集中荷载 P 作用在地表面，引起的地基中任一点 N 处应力。当地基表面作用有局部分布荷载时，可对此应力进行积分求解，进而计算地基土的沉降量。

1949 年，苏联学者推导了刚性承压板下地基沉降的理论公式：

圆形刚性压板：

$$S = \frac{\pi}{4} \frac{1-\mu^2}{E_0} pd \quad (2-1)$$

方形刚性压板：

$$S = \frac{\sqrt{\pi} 1 - \mu^2}{2 E_0} p B \quad (2-2)$$

式中 p ——表面均布荷载 (kPa);
 S ——压板沉降 (mm);
 d ——压板直径 (m);
 B ——压板边长 (m);
 μ ——泊松比;
 E_0 ——地基土的变形模量 (MPa)。

以上公式表明,当地基土确定时,压板的沉降与荷载大小及板的宽度呈正比。

实际试验时,在拟建场地开挖至基础埋深处,整平后放置一定面积的方形或圆形承压板,其上逐级加荷,测定各级荷载下的地基沉降。根据试验得到的荷载-沉降关系曲线,由此确定地基土的承载力,计算地基土的变形模量。

二、试验设备

1. 浅层平板载荷试验设备

平板载荷试验的常用设备主要包括:承压板、加荷系统、反力系统及观测系统,如图 2-1 所示。



1. 常用载荷
试验装置图

(1) 加荷系统

加荷稳压系统由承压板、千斤顶、稳压器、油泵、油管等组成。

(2) 反力系统

反力系统有堆载式、锚桩式、锚杆式等多种形式。

堆载式反力装置构造简单,适应性强,常用人工装运砂包作为堆载,不需大型起重设备,使用比较广泛,尤其是复合地基承载力检测,但需注意砂包的堆载高度和安全问题。也有使用混凝土预制块作为堆重,可大大减少了堆载时间,但需要运输车辆及吊车,成本较高;使用水箱配重,试验结束后,由于要放水,试验后的排水工作较难处理。

锚桩式反力系统通常由主梁、平台、锚桩等构成。将被测桩四周的 4 根锚桩,用锚筋与反力架连接起来,当千斤顶顶起反力架,由锚桩提供反力。采用工程桩作为锚桩是最经济的方案,试验过程中需要观测锚桩的上拔量,以免拔断。

锚杆式反力装置一般由千斤顶、地锚、桁架、立柱、分立柱和拉杆等部分组成。该装置小巧轻便、安装简单、成本较低,但存在荷载不易对中的现象,常用于较小型的载荷试验。

(3) 观测系统

荷载量测一般采用压力表,并在试验前用测力环或电测压力传感器进行校定。

承压板沉降量过去采用百分表量测,现在多使用电测式位移传感器,精度不应低于 $\pm 0.01\text{mm}$ 。测试时将位移计用磁性表座固定在基准梁上。

液压加载设备和位移量测设备要定期标定。

2. 深层载荷试验设备

对于地下深处和地下水位以下的地层,浅层平板载荷试验已显得无能为力,需用深层载荷试验,有两种方法:一是深层平板载荷试验,另一是螺旋板载荷试验。

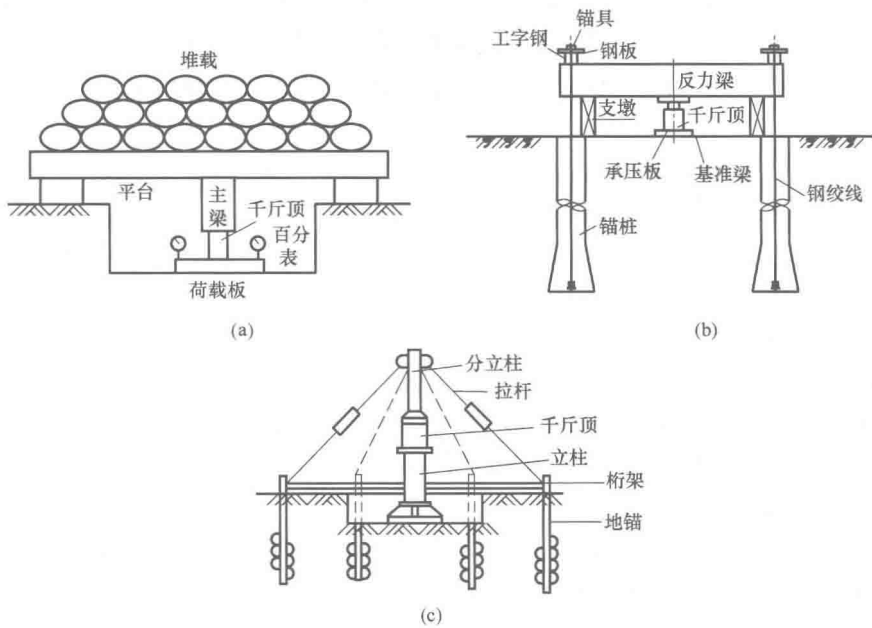


图 2-1 平板载荷试验装置示意图
(a) 堆载式；(b) 锚桩式；(c) 锚杆式

对深层平板载荷试验，目前国内常用的成孔方法有人工挖孔和机械成孔。此试验方法大多用于较重要建筑物地基土持力层、较大孔径桩和墩底持力层的承载力测试中，试验准备的工作量很大，很难大规模普及。图 2-2 (a) 为进行 $\phi 800\text{mm}$ 桩基桩端持力层的地基承载力深层平板载荷试验示意图，图 2-2 (b) 为长春工程学院为解决大深度地基承载力测试研制的深层平板载荷试验装置，最大测试深度可达到 100m。

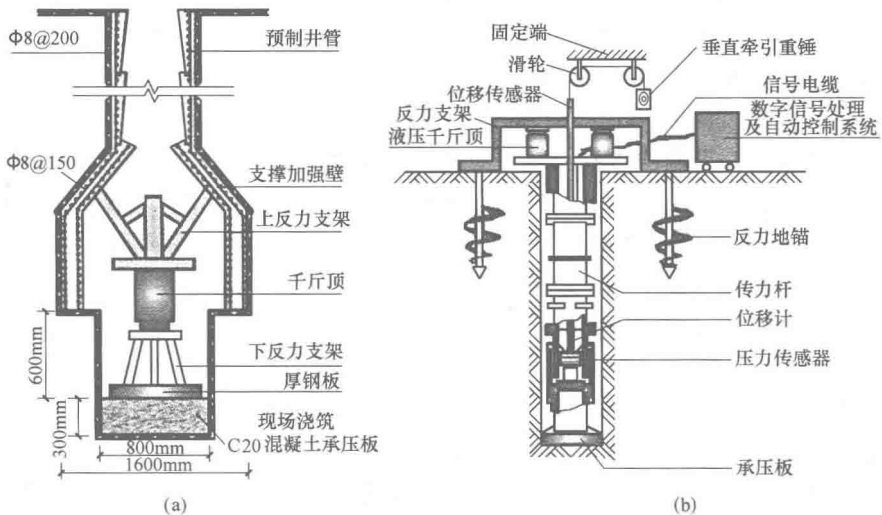


图 2-2 深层平板载荷试验装置
(a) $\phi 800\text{mm}$ 桩端持力层地基承载力测试；(b) SP-1 型深层平板载荷试验装置

但是,在钻孔底进行的深层载荷试验,由于孔底土的扰动,板土间的接触难以控制等原因,现基本不再使用。所以,2009年修订的《岩土工程勘察规范》,专门强调了深层平板载荷试验方法适用于地下水位以上的一般土和硬土,对地下水位以下的地基土要用螺旋板载荷试验。

第三节 平板载荷试验技术要点和操作步骤

一、技术要点

(一) 浅层平板载荷试验

1. 试验数量

载荷试验应布置在有代表性的地点,每个场地不宜少于3个,当场地内岩土体不均匀时,应适当增加。浅层平板载荷试验应布置在基础底面标高处。

2. 承压板尺寸

宜采用圆形刚性承压板,根据土的软硬选用合适的尺寸;浅层平板载荷试验承压板面积不应小于 0.25m^2 ,对软土和粒径较大的填土不应小于 0.5m^2 ;深层平板载荷试验承压板面积宜为 0.5m^2 。

3. 加荷方式

应采用分级维持荷载沉降相对稳定法(常规慢速法)。

有地区经验时,可采用分级加荷沉降非稳定法(快速法)或等沉降速率法。

加荷等级宜取10~12级,并不应少于8级,荷载量测精度不应低于最大荷载的 $\pm 1\%$ 。

4. 相对稳定标准

对慢速法,试验对象为土体时,每级荷载施加后,间隔5、5、10、10、15、15min测读一次沉降,以后间隔30min测读一次沉降,当连读两小时每小时沉降量小于等于 0.1mm 时,可认为沉降已达相对稳定标准,施加下一级荷载。

对快速法,分级加荷等级与慢速法相同,但每一级荷载按间隔15min观测一次沉降。每级荷载维持2h,即可施加下一级荷载。

对等沉降速率法:控制承压板以一定的沉降速率沉降,测读与沉降相应的施加荷载,直到试验达破坏状态。

5. 终止试验条件

当出现下列情况之一时,可终止试验:

(1) 承压板周边的土出现明显侧向挤出,周边岩土出现明显隆起或径向裂缝持续发展;

(2) 本级荷载的沉降量大于前级荷载沉降量的5倍,荷载与沉降曲线出现明显陡降;

(3) 在某级荷载下24h沉降速率不能达到相对稳定标准;

(4) 总沉降量与承压板直径(或宽度)之比超过0.06。

以上试验方法和技术要求源于《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001(2009年版),主要针对浅层地基土与浅层平板载荷试验。

(二) 深层平板载荷试验