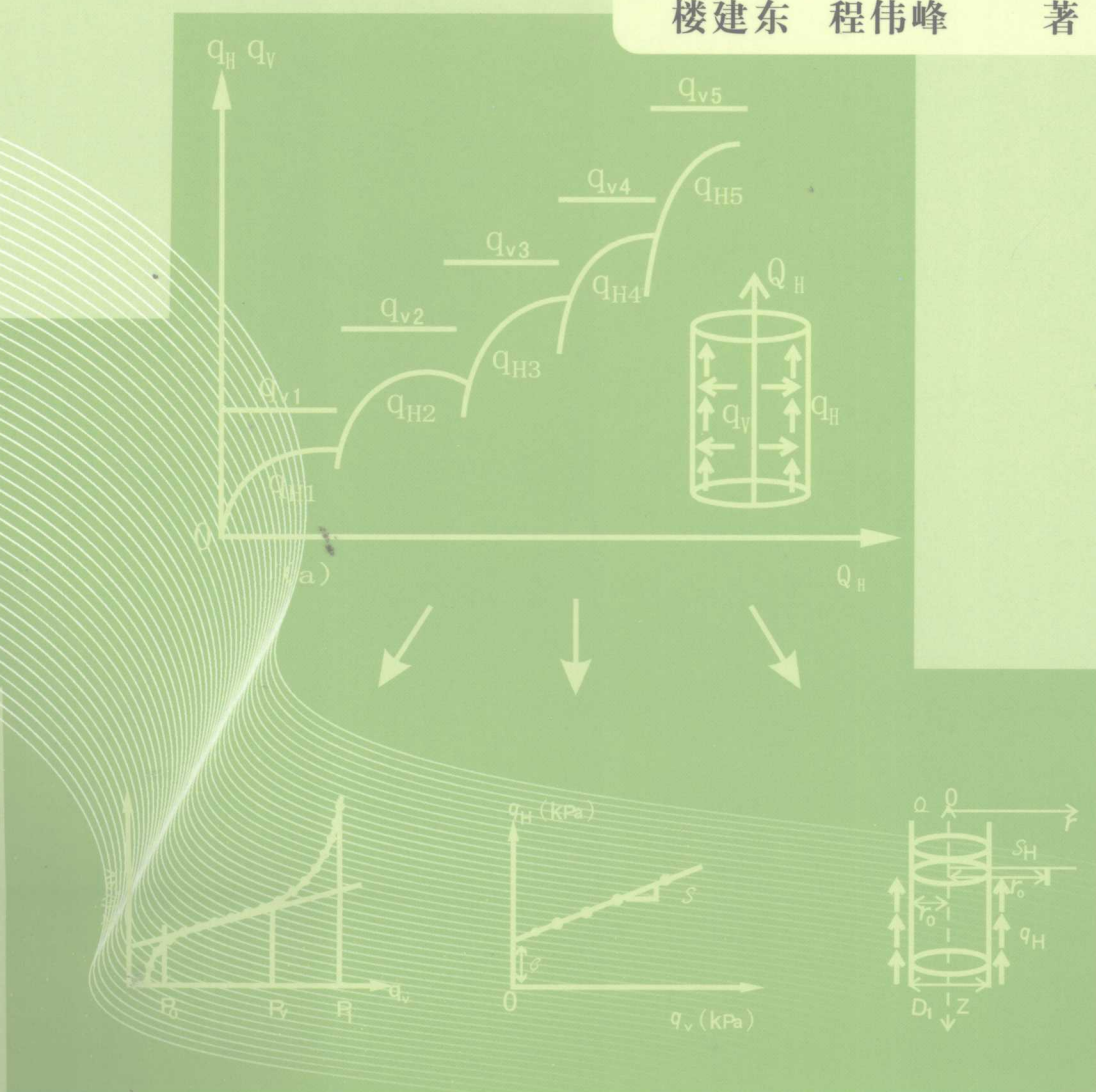


国家自然科学基金资助

新型自钻式剪切 旁压仪及其应用

徐光黎 张晓伦 王春艳
楼建东 程伟峰 著



国家自然科学基金资助

新型自钻式剪切旁压仪及其应用

徐光黎 张晓伦 著
王春艳 楼建东 程伟峰

图书在版编目(CIP)数据

新型自钻式剪切旁压仪及其应用/徐光黎,张晓伦,王春艳,楼建东,程伟峰著. —武汉:中国地质大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-5625-2367-3

- I. 新…
- II. ①徐…②张…③王…④楼…⑤程…
- III. 旁压试验-土工试验-试验设备
- IV. TU415

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 066625 号

新型自钻式剪切旁压仪及其应用

徐光黎 张晓伦 著
王春艳 楼建东 程伟峰

责任编辑:徐润英

责任校对:陆惠琴

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: cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:850 毫米×1168 毫米 1/16

字数:256 千字 印张:10 插页:1

版次:2009 年 8 月第 1 版

印次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1—1300 册

ISBN 978-7-5625-2367-3

定价:40 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

作者简介

徐光黎,男,1963年10月生,浙江省金华市人。1985年毕业于武汉地质学院,中日政府联合培养博士、日本九州大学博士后。现为中国地质大学(武汉)教授,博导,国际土力学与岩土工程协会、日本土木工程学会、地盘工学会会员委员,日本最高国家资格技术士(建设部门)。

在日本研究、工作8年余,从事加筋土技术、原位测试和地基处理新技术的应用研究工作。2002年底回国后致力于土的原位测试、地质灾害及岩土工程应用研究,发表论文80余篇,专著3部,出席国际学术会议12次。

张晓伦,男,1979年7月生,湖北省黄冈市人。2002年毕业于中国地质大学(武汉)。2005—2008年师从徐光黎教授,专攻软土地基处理技术及原位测试新技术研究,并于2008年获得工学博士学位。现就职于广州市设计院,工程师,主要从事岩土工程勘察、基坑支护设计、地基处理等方向的研究。

攻读博士学位期间,作为项目技术骨干参加了国家自然科学基金“易扰动土的变形与强度参数测试机理研究”等国家、省部级项目。发表核心期刊论文6篇,EI检索1篇。

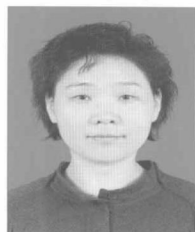
王春艳,女,1973年2月生,河南宁陵人,高级工程师。1994年中国地质大学(武汉)水文地质与工程地质专业毕业,曾就职于中南勘察设计院,从事岩土工程勘察与研究。2004年进入中国地质大学(武汉)工程学院攻读博士学位,2009年获工学博士学位,并留校工作。

楼建东,男,1969年5月生,汉族,浙江省义乌市人,博士,高级工程师,注册岩土工程师。2008年中国地质大学(武汉)地质工程专业研究生毕业,获工学博士学位。主要从事岩土工程勘察及地质灾害防治工程勘察、设计工作,现任浙江省第十一地质大队岩土工程研究院副院长。

主持完成国家及省部级重点工程勘察项目10余项,有5项成果获省(部)级一、二等奖。参与科研课题3项,公开发表论文10篇,参与编辑论文集1部。

程伟峰,男,1957年6月生,江苏溧阳人,工程师。1972年参加工作,从事PM系列旁压仪、TMS型全自动三轴剪力仪及TMG型气压固结仪等仪器的研制。曾任中国建筑学会岩土工程勘察分会原位测试中心办公室主任,现任溧阳市天日仪器厂厂长、中国建筑学会工程勘察分会岩土工程测试专业委员会委员。

参与了建设部原《旁压试验规程》行业标准的修订工作。主持设计开发了PY型第一代国产旁压仪,先后获得省、市科技成果奖3项,获得国家专利5项。



前 言

如何正确、合理地评价土的抗剪强度和变形模量等力学参数,一直是工程地质、土力学中非常重要的基础性研究课题。特别是在基础建设大力发展的今天,工程数量越来越多,工程规模越来越大,作用的荷载大而复杂,而可供利用和选择的土地资源却越来越少,人们不得不利用越来越“坏”的土地来做建筑物的地基,因此,精确地获得土的物理力学参数,对工程建设与运营尤为重要。

许多学者都在探索研制、开发室内的或原位的土工试验方法。室内试验试样体积小,脱离附存的地质环境,应力释放,原始结构在不同程度地被破坏,而且试验条件与实际问题的边界条件相异,所以室内试验得出的结果不能完全反映实际问题。现有的原位试验方法测试项目单一,只能得出土的抗剪强度或者变形参数,即土的强度参数和变形参数是由精度相异的不同的试验方法得出的,难以系统地评价土的力学参数的概率统计特征。

本书是笔者多年来在国内外研究基础上的成果总结。为高精度、高效率、多目的地测定土体强度和变形参数,在国内研制开发出了自钻式原位剪切旁压仪(简称 SBISP)。SBISP 是与日本学者一道研制的 SBIFT 的延续与完善。围绕这一新型原位测试技术,比较深入地讨论了 SBISP 多级复合加载条件下的测试机理,同时获取土的变形与强度参数的可行性,并用室内试验、现场试验和数值模拟等手段对其测试结果进行了分析和验证。全书共分八章。第一章总结了国内外原位测试技术的研究现状,重点阐述了测试土体的变形与强度参数的旁压试验与剪切试验仪器研究现状和测试机理研究现状,目的是帮助读者方便地了解国内外在这方面研究的历史与过程。第二章介绍了自钻式原位剪切旁压仪的各个组成部分及其同时获取土的变形与强度参数的方法。第三章是复合加载条件下土体内应力应变变化过程、变形破坏机理力学,为试验技术提供了理论基础。第四章介绍了第一作者及其合作者在日本留学期间的室内验证试验成果,采用室内大型三轴室进行 SBIFT 模型试验,以验证 SBIFT 的测试可行性和可靠性。第五章通过室内常规直剪试验、三轴试验的多级加载方式,来验证支撑 SBISP 测试方法的强度再生理论。第六章介绍了 SBISP 现场试验成果,并与常规原位试验结果、工程经验值进行对比。第七章运用有限元模拟方法对 SBISP 测试过程进行动态分析。第八章讨论了基于原位剪切旁压试验成果在桩基工程设计中的应用。

本书的顺利出版,得到了教育部留学回国人员科研启动基金“复合加载条件下测定土的多个力学参数机理及其可行性研究”、国家自然科学基金项目“易扰动土的变形与强度测试机理研究”(No. 40574152)的资助,得到了日本九州大学落合英俊教授、九州共立大学前田良刀教授、日本道路公团藤木和啓科长、株式会社大地咨询坂手道明社长的大力资助与通力协作,在此深表谢意!在 SBISP 研制过程中及著书过程中,得到了许多同志的热情支持和协助。陈齐博士、吴来杰副教授对本测试系统的数据采集系统做出了重要贡献;冯永博士,研究生张璐、崔振华、胡义、吴章利、余颖慧等参与了试验,承担了大量的资料整理、稿件校对和图件清绘工作;孟高头教授、林彤教授、滕伟福副教授、马淑芝副教授对本研究给予了关注,并提出了非常有益的建议。在此,对所有付出辛勤劳动并给予协助的同志致以衷心的感谢!同时,应该说明的

是,书中引用了一些非公开出版的资料,并且没有列入参考文献中。特此向拥有这些资料的单位和个人深表感谢和歉意,并请见谅。

原位试验在我国广泛应用只有二十余年的时间,试验规程的制定也是近十来年的事,有些原位试验规程至今还没有制定出来。在经过一段时间的飞速发展之后,似乎处于一种停滞的状态。在这样的背景下提出一种新的原位测试技术 SBISP,能够同时评价土的变形与强度参数,其现实意义重大。尽管 SBISP 测试技术还存在不够成熟之处,有待数据的积累,进一步探索与完善,但笔者相信 SBISP 测试技术具有很高的应用价值,具有极高的推广应用潜力。

本书是关于原位测试技术的一本实用性参考书,笔者希冀它对从事岩土工程、地质工程、地下建筑工程、水利电力工程和港口港湾工程等专业的学生、教师、工程设计人员、施工和管理人员有较高的参考价值。本书若能对同行起到抛砖引玉的作用,对推动原位测试技术的应用进程,提高岩土工程勘察技术的研究水平起到些微作用,笔者将感到由衷的欣慰。这也是著作本书的初衷。

由于笔者水平有限,加上时间仓促,书中不可避免地存在不足甚至谬误之处,恳请广大读者批评指正,不胜感激!

徐志黎

2009年1月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 研究目的与意义	(1)
第二节 国内外测试技术研究现状	(2)
一、室内剪切试验	(2)
二、原位剪切试验	(5)
三、原位旁压仪试验	(8)
四、结构-土界面力学特性试验	(11)
五、同一试样多级加载试验研究	(13)
第三节 国内外测试理论研究现状	(15)
一、圆孔扩张理论	(15)
二、应变路径法	(16)
三、数值模拟分析法	(16)
第四节 变形与强度参数获取方法研究现状	(18)
一、变形模量确定方法	(18)
二、抗剪强度 c 、 φ 值确定方法	(20)
三、静止土压力确定方法	(20)
第二章 试验装置及其测试原理	(23)
第一节 SBIFT 装置概述	(23)
第二节 SBISP 装置概述	(26)
一、试验装置	(26)
二、试验步骤	(31)
第三节 力学参数获取方法及其原理	(32)
一、力学参数获取方法	(32)
二、力学参数测试原理	(34)
第四节 本章小结	(37)
第三章 测试基本理论研究	(38)
第一节 圆孔扩张理论	(38)
一、基本方程	(38)
二、Vésic 圆孔扩张理论	(39)
第二节 抗拔桩剪切位移传递法	(44)
第三节 圆柱孔扩张理论的空间轴对称解析解	(45)

一、基本方程	(45)
二、弹性区解析解	(47)
三、塑性区解答	(49)
第四节 强度再生理论	(51)
第五节 多级三轴试验原理	(52)
第六节 地基承载力理论	(54)
一、地基承载力的公式推导	(55)
二、浅层滑动与深层滑动的判别	(60)
三、承载力问题与剪切滑移问题的界限判定	(60)
第七节 本章小结	(62)
第四章 室内验证试验研究	(64)
第一节 室内验证试验设备和试样制备	(64)
一、室内验证试验设备	(64)
二、冈垣砂物理力学性质	(65)
三、三轴土槽内验证试验准备	(68)
第二节 测定界面摩擦力的可行性及其影响因素探讨	(69)
一、下压和上拔加载方式的影响分析	(69)
二、表面粗糙度的影响分析	(70)
三、应力历史的影响分析	(72)
第三节 测定地基剪切抗力系数的可行性及其影响因素	(72)
一、试验结果比较	(72)
二、土层深度的影响分析	(73)
三、应力历史的影响分析	(74)
第四节 测定静止土压力	(74)
第五节 本章小结	(75)
第五章 多级加载方式的室内试验研究	(76)
第一节 室内多级加载试验方案	(76)
第二节 多级三轴压缩试验结果分析	(77)
第三节 多级直剪试验结果分析	(79)
一、硬质粘土多级直剪试验	(80)
二、软质粘土多级直剪试验	(82)
第四节 多级加载后土的微观结构分析	(86)
一、X射线衍射试验	(86)
二、环境扫描电镜试验	(86)
第五节 本章小结	(89)
第六章 现场验证试验研究	(90)
第一节 粘性土现场验证试验	(90)

第二节	砂性土现场验证试验	(93)
第三节	本章小结	(96)
第七章	测试过程有限元数值分析	(97)
第一节	ABAQUS 软件及本构模型简介	(97)
一、	ABAQUS 软件简介	(97)
二、	应力不变量和应力空间	(98)
三、	Mohr - Coulomb 本构模型	(99)
四、	接触	(102)
第二节	测试过程有限元数值分析	(103)
一、	建模过程	(103)
二、	结果分析	(104)
第三节	本章小结	(119)
第八章	原位剪切旁压试验成果及其应用	(120)
第一节	砂性土试验成果及其应用对比	(120)
第二节	饱和粘土试验成果及其应用对比	(124)
第三节	粉土试验成果及其应用对比	(128)
第四节	基于原位剪切旁压试验结果估算桩基承载力	(132)
一、	桩侧阻力估算方法	(132)
二、	静止土压力统计规律	(133)
三、	桩侧阻力估算值与实测值比较	(135)
四、	桩的水平承载力估算	(136)
第五节	原位剪切旁压试验结果桩基础设计实例	(138)
一、	延性抗震设计分析模型	(138)
二、	延性抗震设计实例	(140)
主要参考文献	(146)

第一章 概述

第一节 研究目的与意义

土是一种古老而又普通的建筑材料,人们很早就开始对土进行专门的研究,并形成了一门新的学科——土力学(沈珠江,2000)。就土力学的发展来说,从某种意义上也可以看作是土的实验力学(侍倩,2005)。土工试验无论在岩土工程,还是在土力学的发展中,均占有相当重要的地位。

如何正确、合理地评价土的抗剪强度和变形模量等力学参数,一直是工程地质、土力学中非常重要的基础性研究课题之一(徐光黎等,2003)。

许多学者都在探索研制、开发室内的或原位的土工试验方法。室内试验方法中,代表的方法有直剪试验、无侧限抗压强度试验和三轴压缩试验等。室内试验能很好地控制试验的排水条件、应变和应力条件,试验本身精度高、再现性强。但是,试样体积小,脱离赋存的地质环境,应力释放,原始结构在不同程度地被破坏,而且试验条件与实际问题的边界条件相异,所以室内试验得出的结果有不能完全反映实际问题之处(徐光黎等,1999;殷宗泽等,2007)。

在原位试验方法中,代表性的有标准贯入试验、十字板剪切试验、静力触探试验、旁压试验和平板载荷试验等。原位试验方法无须采样,能够在原始应力环境中直接测定土的变形或抗剪强度指标。但是,在原位试验中,由于难以控制土中的排水条件,应力、应变分布不均,边界条件含糊等不确定原因,给成果的解析造成很大的困难。标准贯入试验在世界各国十分流行,广为采用,但是,标准贯入试验的 N 值的物理意义并不明确,只能间接地、近似地估算出土的变形参数和抗剪强度。十字板剪切试验和触探试验能直接或间接地测出土的抗剪强度,但不能评价土的变形参数。旁压试验和平板载荷试验能直接评价土的变形参数,但不能评价土的抗剪强度,即现有的试验方法测试项目单一,只能测出土的力学参数中的某一个参数,不能系统地评价土的力学参数,存在变形参数与抗剪强度参数的精度差异问题。

在国外,除了探索改进这些比较成熟的试验方法存在的不足外,更注重新测试技术的研制,以及试验的机理分析和数据解析。

与此对应的是,原位试验在我国广泛应用只有二十余年的时间,试验规程的制定是最近十来年的事,有些原位试验规程至今还没有制定出来。在经过一段时间的飞速发展之后,似乎处于一种停滞的状态。

在基础建设大力发展的今天,由于工程数量越来越多,工程规模越来越大,作用的荷载大而复杂,而可供利用的土地资源却越来越少,可供选择的余地越来越小,人们不得不利用越来越“坏”的土地来做建筑物的地基。土的力学参数的准确评价直接关系到工程建设的投资大小甚至工程安全性。

随着科学技术的发展及国际化程度的提高,特别是电子计算机的普及,多样化、高度化的设计计算方法已经成为现实。可靠度设计方法、极限状态设计方法对输入数据提出了更高的

要求。遗憾的是,土的输入参数与高度化的设计计算方法、计算精度极不相称。土的测试参数精度不高,带有很大的经验性,而且土的强度参数和变形参数是由精度相异的不同的试验方法得出的,难以系统地评价土的力学参数的概率统计特征。当前设计、计算方法的现状,迫切要求土的输入参数的精度必须与其计算精度相协调。否则,多样化、高度化的计算结果也只能是个半定量的、经验性的结果。

中国科学院院士沈珠江教授在 1996 年指出:“要取得可靠的土质参数,只有通过原位测试”。土体原位试验有室内试验无可代替的优点。魏汝龙教授(1997)认为,原位试验与室内试验不可偏废,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。

研制新型的原位测试仪器,发挥原位试验能够保持天然的地质应力环境之优点,充分吸收传统原位试验和室内试验方法的长处,克服其不足之处,系统地评价土的力学参数,解决不同测试仪器获取变形参数与抗剪强度参数的精度差异问题,在原位试验机理研究上能够有所突破,将具有重要的理论意义和现实意义。

第二节 国内外测试技术研究现状

一、室内剪切试验

(一)直剪仪、单剪仪和环剪仪

早期的土力学研究及解决与土有关的工程问题都是将土的强度问题和变形问题分开考虑的,相应的强度试验仪器是直剪仪(李广信,2004)。

直剪仪(direct shear apparatus)是土力学中最古老的仪器之一,二百多年前,法国军事工程师库仑(Charles Augustin Coulomb, 1736—1806),就用它进行土的强度试验,建立了土强度的库仑公式。但是,这种试验的破坏面(即剪切面)是人为确定的,试样中的应力和应变不均匀且十分复杂,试样内各点应力状态及应力路径不同。在剪切面附近土单元上的主应力大小是变化的,方向是旋转的。

针对其应力应变不均匀、边界上存在应力集中等问题,人们对直剪仪进行了一些改进:一是对传统直剪仪的改进;二是研制新型剪切仪器。

单剪仪(simple shear apparatus)就是一种代表性仪器。它四周用一系列环形圈代替刚性盒,因而没有明显的应力应变不均匀,试样内所加的应力被认为是纯剪。值得注意的是,其水平面和竖直面都不一定是破坏面。目前两种常用的单剪仪包括挪威岩土工程研究所研制的单剪仪(NGISSD)和由 Roscoe 研制的剑桥单剪仪(CAMSSD)。一般认为,单剪仪中的土样处于平面应变状态,其应力应变分布均较传统直剪仪均匀,试验的可信度较高,但试验过程繁琐,除了少数科研单位用于研究外,工程单位很少采用。

另一种室内剪切仪是环剪仪(torsional or ring shear apparatus),如图 1-1 所示。由于试样是环状的,剪切沿着圆周方向旋转,所以剪切面的总面积不变。它特别适用于量测大应变后土的残余强度或终极强度。这一类剪切试验也常用来研究不同材料间的接触面的剪切特性,用以确定有关强度和变形参数。

为了测定粗粒土和一些特殊结构岩土体的抗剪强度,国内外均研制了一些大型直接剪切

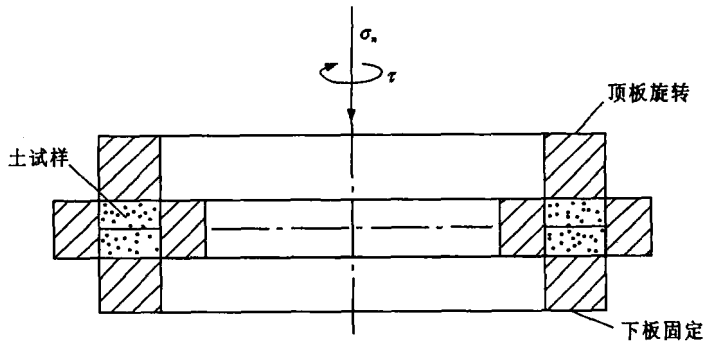


图 1-1 环剪仪示意图

(据李广信,2004)

仪(闵弘等,2006)。剪切盒的形式多样,型号繁多,大者可达 $2\,800\text{mm}\times 2\,800\text{mm}\times 920\text{mm}$ 。这些直剪仪都属于常规结构,大多数均用于室内试验研究。

长江科学研究所的室内 DHJ60 型叠环式剪切试验机,试样为 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 的立方体;该种直剪仪的最大特点是消除了常规直剪仪中剪切面单一的缺点,使试样有可能沿最弱的剪切面发生破坏(闵弘等,2006)。

四川大学水电学院研制的粗粒土直剪仪,通过上下剪切盒的相对运动以保证试验过程中垂直荷载始终不偏心。20 世纪 70 年代中期国内首台 DJ-1 型现场大型直剪仪,剪切环的内径为 356.9mm ,高 140mm ,可实现垂直压力与试样同步移动,解决了剪切过程中垂直压力的偏心问题(闵弘等,2006)。

清华大学研制了大型循环单剪仪,并进行了散粒体材料、粗粒土、分层土的试验,对粗粒土与结构接触面的静动本构规律进行了较为深入的研究,并探讨了接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律(张嘎等,2003)。

(二)三轴压缩试验

1930 年,美国哈佛大学卡萨格兰德(A. Casagrande)采用应力边界条件的圆柱形试样的压缩试验代替直剪试验,来确定土的强度指标,以后经许多土力学专家的研究与完善,发展成目前广泛应用的三轴试验(李广信,2004)。它可以模拟不同工况,进行一些不同应力路径的试验;也可很好地控制排水条件,不排水条件下还可量测试样的超静孔隙水压力。三轴试验中试样应力状态明确,应变量测简单可靠,可较容易地判断试样的破坏,操作比较方便。

我国从 20 世纪 50 年代开始研制三轴仪(朱思哲等,2003)。1953 年原南京水工仪表厂,即现在的南京电力自动化设备厂首先制造了用磅称施加轴向力的三轴仪。1957 年又仿制了应变式三轴仪。60 年代又参照国外的经验和标准,研制了用齿轮变速控制轴向变形的三轴仪。随着各科研、勘察和设计单位的应用,三轴压缩试验逐渐开展起来。当时的试样直径为 38mm 、 76mm 、 100mm 三种,周围压力只能达到 600kPa 。1970 年研制了高压大型三轴仪,试样直径为 300mm ,周围压力达到 $1\,500\text{kPa}$ 。1985 年由水利部中国水利水电科学研究院组织 3 家工厂共同研制了周围压力达到 $7\,000\text{kPa}$ 的大型三轴压缩仪,并配有自动采集数据装置。

以后又陆续出现了进行土的动力试验的动三轴仪、进行高室压的高压三轴仪、对粗粒土进行试验的大型三轴仪以及进行非饱和土试验的非饱和土三轴仪等。

尽管三轴试验应力状态比较简单,但仍存在一些问题(李广信,2004)。其一就是边界条件的影 响。由于顶帽和底座与试样间的摩擦力,使试样两端存在剪应力,从而形成对试样的端面附加约束。这样,在压缩试验中,试样破坏时呈鼓形,而在拉伸试验时,试样呈中部收缩状(颈缩)。这使试样中的应力、应变不均匀,同时使围压也在变化。其二是体变及孔压测量问题。对于粗粒土,压力室的压力水会使橡皮膜嵌入试样表面,形成麻面,产生膜嵌入的影响。对于均匀的粗粒土,在围压变化情况下,膜嵌入对试验的体变测量影响很大,使测量的试样体积压缩量偏大。这一影响不仅与试样的密度、颗粒尺寸和性状及土的级配有关,而且与膜厚度及其模量有关,还与围压有关。对于常规三轴压缩排水试验,由于围压是不变化的,所以膜嵌入对剪切过程中试验体积测量影响不大。但对三轴不排水试验,因为其有效围压随孔压变化而变化,膜嵌入对测量的孔压有较大影响。

(三)真三轴压缩试验

在普通三轴压缩试验中,其根本的不足是其中有两个主应力总是相等的。自三轴仪面世以来,人们就力图实现真正的三个主应力可以实现独立变化的试验,也即真三轴试验。

早在 1936 年,瑞典皇家地质学院的 Kjellman 就设计过六块刚性板在三个方向独立施加主应力的仪器,但仪器本身的复杂性及各方向的相互干扰使其没有得到广泛的应用。

澳大利亚新南威尔大学的 Lo 等人设计的真三轴仪,是在压力室中加入一对复合水平加压板。试样尺寸为 $140\text{mm} \times 80\text{mm} \times 80\text{mm}$ 。侧向加压板是一对柔性囊,内部有一尺寸稍小的紧贴在试样表面的刚性金属板。这样既避免了与上下边界间的相互干扰,又使试样变形较为均匀。

美国加州理工大学伯克利分校的 Lade 和 Duncan 所研制的真三轴仪也是这种系列的真三轴仪。试样为 $76\text{mm} \times 76\text{mm} \times 76\text{mm}$ 的立方体,在压力室中有一对侧压力板,它由软木和不锈钢片互层组成。软木是易于压缩的,并且泊松比接近于零。这对侧向水平加压板通过滚轮安装在刚性框架上,框架分两部分,上部分固定在竖向加压杆上,下部分与底座固定。这样在竖向加压时,加载杆通过钢架对侧向板及试样同步加压,尽可能地减少了板与试样间摩擦和加载装置间的干扰。同时半刚性的侧向加压板也减少了试样的应力分布不均匀。

盒式真三轴仪是在立方体试样上的三个方向上设置三个独立的加载系统,从而形成一个立方体“盒”。其加载系统的边界可以是刚性的,也可以是柔性的,还可以是混合的。其中最具有代表性的是 20 世纪 60 年代英国剑桥大学的 Hambly 和 Pearce 设计和发展的剑桥式真三轴仪。试样初始形状为一个 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体,被放在刚性板之中。试验中试样的六个面都被刚性板覆盖。加压刚性板为三对互相垂直的加压杆所驱动,可以是应力控制,也可以是应变控制。

真三轴仪常被用来进行在 π 平面上不同应力路径的试验。但是其应力路径与应变路径形状不同,当应力回归到原来出发点时,应变未回归到原点。目前用真三轴试验进行原状土试验困难较大。

(四)空心圆柱扭剪试验和方向剪切试验

为了全面揭示土的应力应变关系特性,需要独立变化六个应力分量并测量相应的六个应变分量,或者独立变化三个主应力并能任意改变它们的方向。为了研究主应力方向旋转情况下土的力学特点,研制出了空心圆柱扭剪仪(图 1-2)(李广信,2004)。

空心圆柱扭剪仪在独立施加内压、外压、轴向荷载及扭矩时,可以变化 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 和 τ_{rz} 四个

应力变量,也即可以独立变化三个主应力的大小和在一个方向上变化主应力方向,从而实现主应力方向的旋转。

但是空心圆柱扭剪试验存在以下几个缺点。首先,空心圆柱试样沿径向的应力是不均匀的,只有试样的厚度与直径相比很薄时,这种不均匀性才可忽略。在两端施加扭矩时,为了不使试样帽与试样间滑动,常需要有一些齿嵌入试样,所以试样沿长度方向的剪应力 τ_{θ} 也不易均匀分布,因而试样的长度要合适。另外,由于这种试样的内外表面都覆盖橡皮膜,膜嵌入对试样体变的测量有很大影响。

另一种可进行主应力方向旋转的仪器是方向剪切仪(图1-3)。它是在一个方向(常常是竖向)保持平面应变状态,而在另外两个方向上可同时施加正应力和剪应力,从而实现主应力在水平面上的旋转。

(五)土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪

大连理工大学栾茂田等新研制与引进的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪,可独立或同时进行静力和动力轴向三轴试验、扭剪试验,控制作用在土体上的外室压力、内室压力及静力扭剪应力、静力轴向应力以模拟复杂的初始固结状态,而且可以同时施加循环扭剪应力和循环轴向应力,控制循环剪应力与轴向应力的相位差,即可实现动主应力轴线序旋转等复杂的加载路径(栾茂田等,2003)。

(六)同济大学平面应变仪

同济大学平面应变仪是在原真三轴仪的基础上,对压力室进行改装,增加边界局部变形量测系统,是一种真

三轴与平面应变相容的试验装置(赵锡宏等,2003)。其主要特点是可量测土样向任意点的局部应变,能满足局部化变形捕捉的精度要求,实现试验过程的实时监控和试验数据的自动采集。试验时,大主应力可达3MPa,小主应力可达1MPa,最大侧向应变可达20%。

该平面应变仪的主要功能包括:可进行粘土或砂土的排水或不排水条件下平面应变压缩试验,研究平面应变状态条件下土的抗剪强度特性;可进行平面应变条件下土的应力应变关系的研究,对已有的本构模型在平面应变条件下的适用性做出评价;研究平面应变条件下土体局部化变形产生的条件及其发展过程,进行剪切带的研究,为土体渐进性破坏发展过程研究创造有利的试验条件;可以根据平面内应力的组合特征,研究平面应力路径对抗剪强度的影响。

二、原位剪切试验

钻孔剪切试验的发展历史只有几十年。1976年,Winland首先提出后,立即受到岩土界的重视,研究者们对这一新型试验方法进行了多方面的研究。目前,钻孔剪切试验作为原位确定土的抗剪强度的方法已在美国得到广泛的应用。有资料表明,钻孔剪切试验的结果非常接

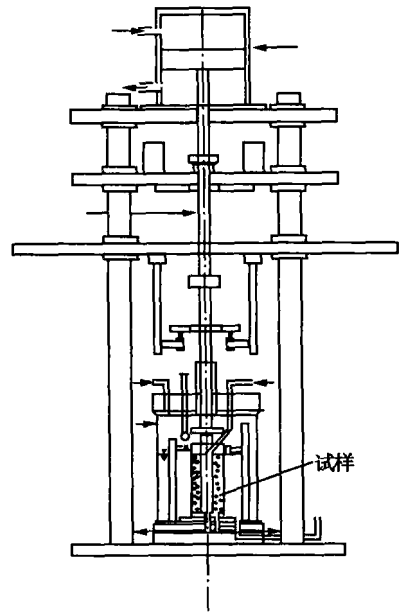


图 1-2 空心圆柱扭剪仪示意图

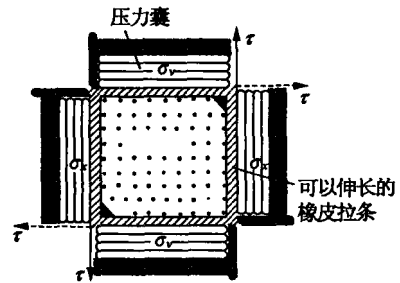


图 1-3 方向剪切仪示意图

近于固结不排水剪切参数。

钻孔剪切试验可在较大程度上避免对土体的扰动,试样的尺寸也较大,其测试结果能更加真实地反映土体的强度特性。因此,国外一些学者更注重现场剪切仪器的研发。表 1-1 是国外一些学者研制的典型的现场剪切仪参数表。

表 1-1 国外钻孔直剪试验仪

发明者	Handy, Fox (1967)	T·森 (1969)	Kizawa 等人 (1979)	Demarinecourt, Bauer(1983)	冈本等人 (1986)	Abderrahim, Tisot(1993)
仪器名称	BHSD	IST		改进 BHSD		Mini - pressure
测试对象	土	土	土	土	土/岩石	土
钻径(mm)	101/64	85	170	76	101	25
测定器长度(mm)	101/64	153	250	76	150×64	285
加载位置	孔壁	孔壁	底部	孔壁	孔壁	孔壁
围压加载方式	气压	气压		气压	气压	气压
剪应力加载方式	液压					

(据徐光黎,1999)

图 1-4 为 Handy 和 Fox(1967)研发的钻孔直剪试验装置(BHSD, Borehole Direct Shear Device)。之后, Demarinecourt, Bauer(1983)对其做了改进。用两块圆弧状剪切板膨胀来施加正应力,用拉力或压力来施加剪应力。缺点是在测定器的前端容易产生被动区,以及非对称导致应力分布极其复杂。

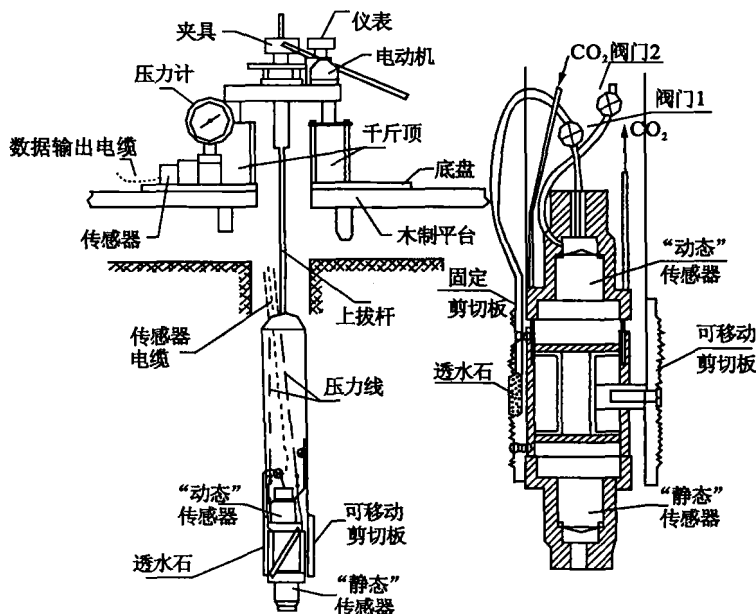


图 1-4 钻孔直剪试验装置 BHSD

(据 Handy 和 Fox,1967)

仿照 Handy 等人的装置,日本的 T·森(1969)土体剪切装置如图 1-5 所示。同样地,由于仪器的非对称性导致复杂的应力分布,也未能推广应用。

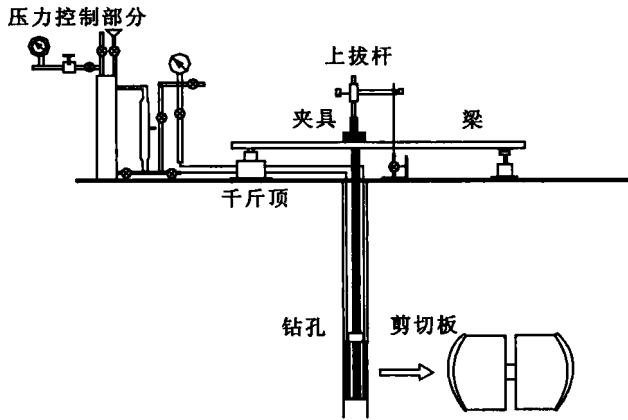


图 1-5 钻孔直剪试验装置 IST
(据 T·森,1969)

图 1-6 为日本九州电力株式会社の溝上和今林(1997)研制的钻孔内抗剪强度装置。剪切板长 30mm、宽 25mm,并设有高为 2mm、宽为 1mm 的三个齿状物。研究发现,得出的内摩擦角与三轴压缩试验结果基本相等,但内聚力偏大。分析认为,内聚力的差异来自边端效应所产生的被动阻力。

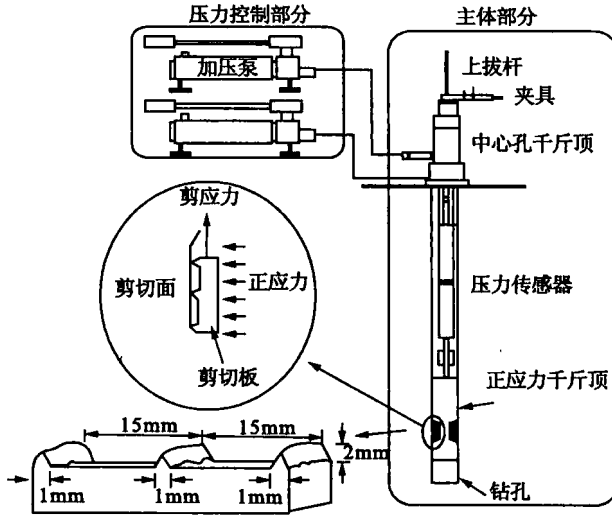


图 1-6 钻孔抗剪强度试验装置
(据沟上和今林,1997)

以上现场剪切仪存在以下几个问题:一是都采用预钻技术,这样导致土体扰动及应力释放等问题不可避免;二是在测定过程中,没有监测孔隙水压的变化。

中科院岩土所的闵弘(2006)等人研制了一种适用范围广、能较为方便地进行现场和室内

试验的现场室内两用大型直剪仪,属于应变控制式大型直剪仪。试样剪切过程中的变形比一般直剪仪均匀,同时在试验过程中对全部测试数据实现了自动采集,所以量测数值更加准确。存在的不足之处有法向力的稳压问题、仪器结构过重过大等。

三、原位旁压仪试验

(一)旁压仪的初期发展

在1930年前后,德国工程师寇克娄(Kögler)发明了可在钻孔中进行侧向荷载试验的仪器(寇克娄,夏迪许,1952)。

1957年,法国道桥工程师梅纳(Ménard)首先创造了著名的三腔式旁压仪(图1-7)(巴居兰等,1977)。该仪器在法国得到广泛的推广应用,取得了很大的成功。

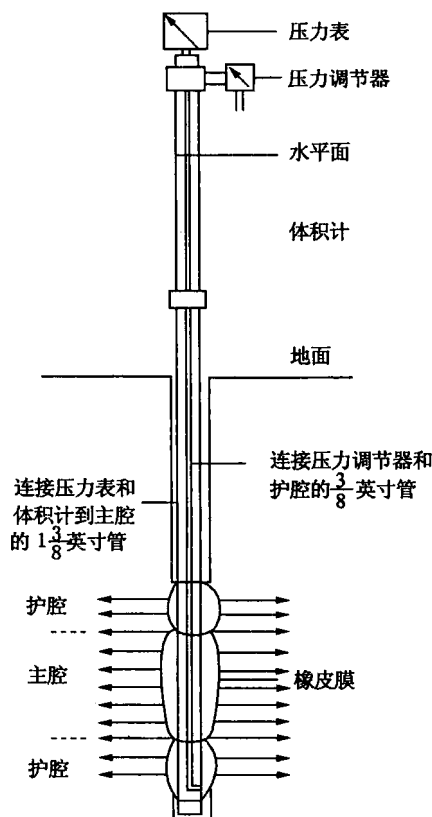


图1-7 梅纳三腔式旁压仪

在梅纳研制第一代旁压仪不久,贝尔格莱德水利工程研究院研制了一种直径为200mm、长为900mm、外面包裹一个橡胶薄膜的金属圆柱体(旁压器)(唐贤强等,1993)。岩土体的变形通过量测注水量或借助安装在旁压器中的两个传感器得到。

此外,欧洲、北美与日本也相继研制出了一些与梅纳旁压仪相类似的、用于土层或岩石的钻孔内测求土的力学性质的原位测试设备(唐贤强等,1993;赵善锐,1987),如加拿大和美国生产的GA系列。日本应用研制的LLT型旁压仪(单腔、水压式)和KKT型旁压仪(用多级活