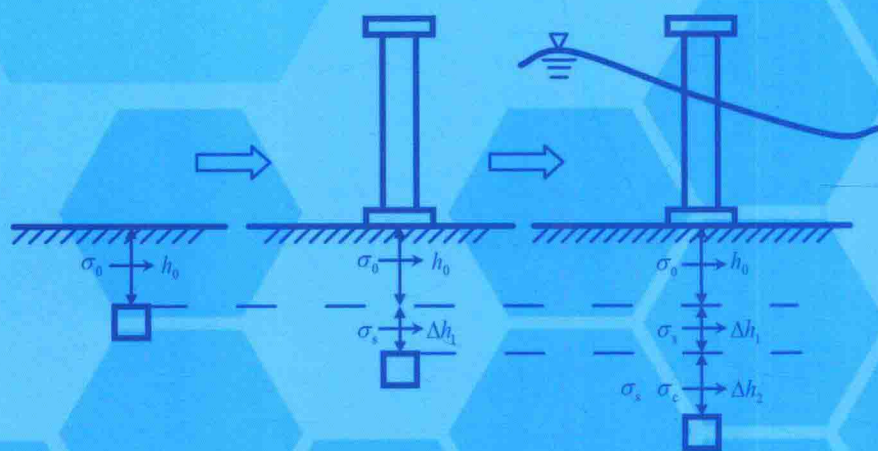


河北地质大学学术著作出版基金资助

饱和黏土的动力特性及应用

● 齐剑峰 王 飞 聂 影 等著



地质出版社

河北地质大学学术著作出版基金资助

饱和黏土的动力特性及应用

齐剑峰 王 飞 聂 影 周爱红 著
齐 欢 彭玉明 李常锁

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

海洋资源与海洋空间的开发和利用日益受到重视,然而波浪荷载作用下黏土地基的工作机理、工程特性及分析方法一直困扰着工程界,是一个亟待解决的问题。本书研究利用先进的土工试验设备,通过对不同固结状态、应力路径、初始条件下的土工试验成果分析,详细探讨了波浪荷载作用下饱和黏土的剪切变形特性、动强度特性,建立拟静力的循环蠕变计算模型,并在大型有限元软件 ADINA 平台上进行了开发和应用,提出了均匀黏土地基稳定性分析方法。

本书可供从事土动力学、岩土工程、海洋工程地质的工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

饱和黏土的动力特性及应用 / 齐剑峰等著. —北京:
地质出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-116-10210-1

I. ①饱… II. ①齐… III. ①饱和土-动力特性-研究 IV. ①TU44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 319964 号

Baohe Niantu de Dongli Texing ji Yingyong

责任编辑: 李惠娣

责任校对: 张 冬

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)66554653 (邮购部); (010)66554579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)66554582

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 300 千字

印 数: 1—400 册

版 次: 2017 年 3 月北京第 1 版

印 次: 2017 年 3 月北京第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-10210-1

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

海洋资源与海洋空间的开发和利用日益受到重视,我国东海、南海等海洋油气资源开发已经从较浅的近岸水域进入深海水域,同时我国港口工程建设与航道工程建设也得到了前所未有的发展,上海、天津、大连、秦皇岛、青岛等沿海港口管理局或集团公司纷纷加大投资力度,无论从工程规模上还是从技术难度上都是历史空前的。在深海和极浅滩海域,传统的混凝土重力式平台与导管架平台结构型式受到限制,新型的结构理念与新型的基础型式应运而生,如张力腿平台(TLP)、独柱式平台(SP)及浮式生产储运系统(FPSO)等新型浮式结构。为了解决大型浮式结构在海底的锚泊问题,作为一种新型的浮式结构基础型式,吸力式沉箱(又称吸力桩、吸力锚或桶形基础)受到了海洋石油界的广泛关注。但是目前关于TLP和FPSO吸力式沉箱基础的设计方法与施工技术等方面的探索仍落后于工程实践,对于吸力式沉箱等新型海洋基础与海洋地基相互作用的工作机理及其稳定性分析问题尚未得到有效解决。因此,研究波浪荷载作用下海洋地基土体的工程性质迫在眉睫。海洋工程地基往往由软黏土、粉质黏土与可液化砂土等不良工程土壤组成,在对海域土质的循环特性没有深入了解的情况下进行工程建设与设计,将会造成海床与地基失稳,以致带来巨大的生命和财产损失。

海底软黏土不仅要经受巨大自重与小振幅波浪的长期作用,还可能遇到暴风巨浪等非常环境荷载的瞬时或反复作用,使得软土地基或海床处于复杂的应力状态。海洋建筑物地基内由于剪应力的作用,大主应力方向将偏离竖轴,其偏离的程度随着与建筑物中心轴距离的增大而增大,这导致初始大主应力方向角会在 0° 到 90° 之间变化。对弹性孔隙介质的固结分析表明:在表面简谐波浪荷载的作用下,无限厚度的弹性孔隙海床中任一固定点处的偏差应力幅值保持为常数而主应力轴发生连续旋转。然而由于认识水平的限制,以往对波浪荷载作用下海洋土的变形与强度特性的研究,仍然套用了陆地上对于一般场地与地基的试验方法与分析方法,没有充分的考虑海洋土的自身特点,也未能合理地计入波浪作用下海床的实际应力状态及其变形与破坏机理。由于砂土颗粒较大、容易制备试样等优势,在室内土的动力特性试样中,对主应力轴连

续旋转条件下变形与强度特性的研究成果较多。然而在我国沿海地区,海洋建筑物下覆地基表层土大都为数米厚的软黏土覆盖层,目前对于饱和黏土在波浪荷载作用下变形与强度特性的研究成果较少。因此,根据海床和海洋建筑物地基的特点,开展海洋饱和黏土的工程特性与本构模型、海床与海洋建筑物地基的动力响应分析方法是十分必要的。

本书研究针对饱和黏土试样,利用土工静力—动力液压—三轴扭转多功能剪切仪等土工试验设备,模拟波浪荷载的耦合循环应力状态、主应力轴连续旋转的作用机理,对饱和黏土的单调剪切试验特性、动剪切模量与阻尼比、循环软化变形特性进行了深入而系统地对比分析。在大量的单调与循环剪切试验基础上,建立了能够考虑应变速率效应的双曲线静力本构模型,以及考虑静应力与循环应力联合作用的循环软化总变形拟静力计算模型,并在大型有限元软件 ADINA 平台上对建议的模型进行了数值实施与二次开发,考虑桶形基础单调加载阶段地基变形速率的影响,对沉箱地基的竖向与水平向单调承载力以及循环软化变形进行了数值计算分析。本书所取得的研究成果主要包括如下几个方面:

(1) 循环剪切变形特性与应变破坏标准。通过单向与双向耦合循环剪切试验对饱和黏土的不排水剪切变形特性与应变破坏标准及其孔隙水压力发展特性进行了研究,试验结果表明:初始剪应力对于黏土的循环应力—应变关系模式具有显著的影响,在竖向—扭转耦合剪切试验中,尽管在耦合双向都施加对称的循环应力,但剪切向应变分量的循环效应比较明显,而轴向应变的累积效应比较显著,这与普通循环三轴或扭剪试验的结果不同。同时还研究了不同波形、不同超固结比和不同频率耦合循环应力对饱和黏土的动强度和孔隙水压力发展的影响。通过对各种循环应力路径模式下的试验数据比较分析,建议了一个能够综合考虑轴向应变和剪切向应变,同时反映残余应变与循环应变特征的综合应变算式,该算式与单向总应变的表达式是一致的,试验数据表明这个综合应变具有普遍适用性和较好的稳定性,能够作为耦合等复杂循环应力下饱和黏土的破坏标准。

(2) 动强度特性。循环剪切试验表明,对于给定的初始剪应力,循环剪切强度的大小是由循环软化效应和应变速率效应共同作用的结果。结合单调强度与应变速率之间的对应关系,提出了近似消除速率效应的循环强度归一化方法,通过归一化表明,不同破坏次数的循环强度与初始剪应力之间关系的数据点落在一个相当狭窄的区域内,初始剪应力与归一化循环剪切强度之间关系可用一个二次方程拟合表示。以此为

基础,对循环强度简便确定方法进行了初步探讨,通过少量单调与循环剪切试验对待定参数确定之后,就可以估算不同循环次数的循环剪切强度。同时在耦合循环应力下不同初始主应力方向角对饱和黏土动强度的影响进行了研究。

(3) 饱和黏土的单调剪切特性与非线性本构模型。在 CU 和 UU 条件下进行了单调三轴和单调扭剪试验,着重探讨了应变速率和约束压力对黏土应力—应变关系特性、强度特性与孔隙水压力发展特性的影响。考虑三向非均等固结和超固结条件,研究了初始主应力方向角和超固结比对饱和黏土应力—应变关系、强度和孔隙水压力发展的影响。进而考虑不固结不排水条件和应力—应变关系的应变速率效应,建立了饱和黏土的非线性本构模型,在达到破坏时的偏应力之前,应力—应变关系基本上符合双曲线模式,而在超过之后的应力—应变关系按理想塑性处理,所建议的模型含有 4 个待定常数,由 UU 三轴试验确定。

(4) 耦合循环应力对动模量与阻尼比的影响。对于某一给定的剪应变幅值,耦合循环应力中的轴向偏差应力对动剪切模量具有增大作用,动剪切模量发展与轴向偏差应力的大小关系密切,尤其是在扭转向循环剪应力较小的情况下,轴向偏差应力越大,动剪切模量的增大越显著,而当扭转向循环剪应力较大时,轴向偏差循环应力对动剪切模量的增大效用降低。研究了主应力轴连续旋转下饱和黏土的动模量和阻尼比的变化规律,建立了动模量和阻尼比计算的经验公式。

(5) 循环蠕变计算模型及其在桶形基础稳定性分析中的应用。根据循环蠕变随循环次数的变化特点,将循环次数与时间等效,仿照 Singh—Mitchell 蠕变模型参数确定方法,建议了循环蠕变的计算模型。对非线性弹性材料模型与循环蠕变计算模型在大型有限元软件 ADINA 平台上二次开发进行了探索,详细叙述了模型的二次开发过程及其计算方法与步骤。进而考虑单调加载阶段桶形基础地基变形速率的影响,对桶形基础地基的单调承载力与循环软化总变形进行了数值分析。计算结果表明:对于单个沉箱基础,黏土地基的竖向与水平向单调承载力随着地基变形速率的增加而增大;对于给定的单调荷载与循环荷载组合,竖向与水平向循环软化总变形随循环次数的增加而增长,循环软化总变形的逐次增长速率逐渐减小。

(6) 改进的饱和黏土制样技术。通常获取原状土样花费较大,而且原状土样的饱和程度往往较低,土工试验时需要对试样进行真空处理使其饱和,经过如此处理的试样很难反映实际应力状态,而对于实际的非饱和土样目前无论在试验技术还是计算理论方面尚处于探索阶段。通过对比泥浆加压固结制样法和真空预压制样法存在的优缺

点,在吸取两种制样方法优点及其使用经验的基础上,对饱和黏土的制样设备进行了改进。改进黏土制样方法具有操作简便、制样时间短等优点,所制备试样具有成分均一、饱和程度高,且易于切削制备圆柱或空心圆柱试样等特点。

本书的研究成果是国家自然科学基金项目(项目编号:50579006)“波浪作用下海洋软土的循环软化效应特性与本构模型及其在海洋地基分析中的应用”的部分内容总结和完善。该项目是由导师栾茂田教授主持完成的,导师为此付出了大量心血和汗水,向他致敬!大连理工大学郭莹教授、杨庆教授、张金利老师、王忠涛老师给予了指导和帮助。本书的出版得到了河北地质大学的大力支持。借此机会向所有给予支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏错误之处在所难免,恳请有关专家与读者批评指正。

作者

2016年8月

目 录

前 言

1 绪论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 国内外研究现状及动态	(3)
1.2.1 实验设备与黏土试样	(3)
1.2.2 土的动力特性研究	(8)
1.2.3 土的本构模型研究	(14)
1.2.4 新型基础的稳定性分析	(20)
2 试验设备及饱和黏土制样技术	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 试验设备	(24)
2.2.1 试验设备功能简介	(24)
2.2.2 技术参数指标	(26)
2.3 空心圆柱试样应力状态分析与计算公式	(27)
2.3.1 应力状态分析	(27)
2.3.2 应力状态公式	(27)
2.4 改进的饱和黏土制样技术	(30)
2.4.1 黏土制样技术概述	(30)
2.4.2 饱和黏土制备装置	(32)
2.4.3 制样过程	(34)
2.4.4 制样效果	(36)
2.5 试验条件	(37)
2.5.1 土样	(37)
2.5.2 试样尺寸及固结	(38)
3 饱和黏土的单调剪切特性	(40)
3.1 概述	(40)
3.2 不同应变速率下饱和黏土的单调剪切特性	(41)
3.2.1 固结不排水剪切特性	(41)
3.2.2 不固结不排水剪切特性	(44)
3.3 三向非均等固结条件下饱和黏土的单调剪切特性	(50)
3.3.1 应力参数的定义	(50)

3.3.2	试验方法	(51)
3.3.3	不同初始主应力方向角对强度的影响	(52)
3.3.4	不同初始主应力方向角对孔压的影响	(54)
3.4	超固结条件下饱和黏土单调剪切特性	(54)
3.4.1	应力—应变关系特性	(54)
3.4.2	强度特性	(55)
4	饱和黏土动模量与阻尼比试验研究	(57)
4.1	概述	(57)
4.2	UU 试验条件下饱和黏土分级加载动力特性	(58)
4.2.1	动剪切模量与阻尼比的定义	(58)
4.2.2	分级加载历史对动剪切模量与阻尼比的影响	(59)
4.2.3	初始剪应力对动剪切模量与阻尼比的影响	(61)
4.2.4	耦合循环应力对动剪切模量与阻尼比的影响	(63)
4.3	CU 试验条件下饱和黏土分级加载动力特性研究	(66)
4.3.1	加、卸围压固结条件对动剪切模量的影响	(68)
4.3.2	加、卸围压固结条件对阻尼比的影响	(73)
4.4	CU 试验条件下耦合循环应力对饱和黏土动力特性的影响	(75)
4.4.1	试验概况	(75)
4.4.2	耦合循环应力对动剪切模量的影响	(76)
4.4.3	耦合循环应力对阻尼比的影响	(79)
5	饱和黏土的循环剪切变形特性	(81)
5.1	概述	(81)
5.2	UU 试验条件下饱和黏土循环剪切变形特性及破坏标准	(82)
5.2.1	加载模式及应力路径	(82)
5.2.2	循环剪切变形特性	(82)
5.2.3	综合应变与应变破坏标准	(86)
5.3	CU 试验条件下饱和黏土的循环剪切变形特性	(90)
5.3.1	耦合循环应力对剪切变形特性影响	(90)
5.3.2	波形不同的耦合循环应力对剪切变形特性影响	(96)
5.3.3	耦合循环应力对不同超固结比黏土剪切变形特性影响	(101)
5.3.4	耦合循环应力作用下频率对饱和黏土剪切变形特性影响	(104)
6	饱和黏土的动强度特性	(107)
6.1	概述	(107)
6.2	UU 试验条件下饱和黏土循环强度及其确定方法	(108)
6.2.1	试验概况	(108)
6.2.2	循环剪切强度	(109)
6.2.3	归一化循环剪切强度及其存在的问题	(111)
6.2.4	归一化循环剪切强度简便确定方法	(113)

6.3	CU 试验条件下饱和黏土的动强度特性	(114)
6.3.1	试验概况	(114)
6.3.2	耦合循环应力作用下初始主应力方向角对黏土动强度的影响	(115)
6.3.3	耦合循环应力作用下初始主应力方向角对黏土孔隙水压力的影响	(119)
7	饱和黏土的循环蠕变特性及其计算模型	(121)
7.1	概述	(121)
7.2	试验条件的确定	(122)
7.2.1	海洋平台地基变形过程的简化模式	(122)
7.2.2	黏土的残余应变经验模式	(122)
7.2.3	试验条件	(123)
7.3	循环蠕变特性	(124)
7.3.1	应力—应变关系的循环蠕变特性	(124)
7.3.2	循环蠕变特性的影响因素对比分析	(126)
7.4	循环软化总变形的计算模式	(127)
7.4.1	循环蠕变的计算模式	(127)
7.4.2	循环软化总变形计算模型的建立	(129)
8	循环蠕变计算模型在桶形基础稳定性分析中的应用	(134)
8.1	概述	(134)
8.2	模型的有限元实施	(137)
8.2.1	循环荷载作用下地基土单元的应力状态分析	(137)
8.2.2	ADINA 自定义材料的开发环境及其工作流程	(138)
8.2.3	计算模型的二次开发过程	(138)
8.2.4	循环软化总变形的计算步骤	(141)
8.3	桶形基础承载力及循环变形分析	(143)
8.3.1	有限元几何模型及边界条件	(143)
8.3.2	有限元接触算法	(144)
8.3.3	桶形基础的单调承载力	(145)
8.3.4	桶形基础地基的循环软化变形分析	(148)
	参考文献	(155)
	附录 1 非线性弹性材料模型二次开发程序源代码	(164)
	附录 2 非线性循环蠕变材料模型二次开发程序源代码	(171)

1 绪 论

1.1 问题的提出

为使我国在 21 世纪中叶进入中等发达国家水平,解决人口、资源和环境问题的一条重要出路就是有效地开发、利用和保护港湾与海洋资源与空间。近年来,海洋资源与海洋空间的开发和利用日益引起国内外的高度重视。尤其是随着海洋油气资源开发的进一步深入,海上油气开发已经从较浅的近岸水域进入到深海水域,未来的发展将会达到 2000~3000 m 或更深的水域 (Aubeny et al., 2001b)。因此,未来深海油气的开采在经济与技术上将会遇到前所未有的机遇与挑战。同时在国内与国际航运市场的激烈竞争中,我国港口工程建设与航道工程建设也得到了前所未有的发展,上海、天津、大连、秦皇岛、青岛等沿海港口管理局或集团公司纷纷加大投资力度,无论从工程规模上还是从技术难度上都是空前的。在深海和极浅滩海域,传统的混凝土重力式平台与导管架平台结构型式受到限制,新型的结构理念与新型的基础型式应运而生,如张力腿平台 (TLP)、独柱式平台 (SP) 及浮式生产储运系统 (FPSO) 等新型浮式结构。为了解决大型浮式结构在海底的锚泊问题,作为一种新型的浮式结构基础型式,吸力式沉箱 (又称吸力桩、吸力锚或桶形基础) 受到了海洋石油界的广泛关注。但是,目前关于 TLP 和 FPSO 吸力式沉箱基础的设计方法与施工技术等方面的探索仍落后于工程实践,对于吸力式沉箱等新型海洋基础的工作机理及其稳定性分析尚未得到统一认识,在复杂海况条件下新型海洋基础的设计与建造技术是深海海洋工程建设中面临的新挑战。

然而由于港湾与海洋环境极端恶劣,海洋建筑物地基往往由软黏土、粉质黏土和可液化砂土等不良工程土壤组成,在对海域土质的循环特性没有深入了解的情况下进行工程建设与设计,将会造成海床与地基失稳,以致带来巨大的生命和财产损失。例如,在长江口深水航道治理二期工程建设中,由于威马逊台风的袭击,造成了试验段大圆筒防波堤结构的整体倾覆 (中交第四航务工程勘察设计院, 2002)。再如我国渤海地区发生的平台滑移和倾斜、渤海湾的某石油管道的沉降位移超标、1994 年胜利油田 3 号钻井平台的地基液化等都与海域土质的循环剪切特性认识不足有关。软土是一种对工程建设不利的细颗粒黏性土,在世界范围内分布较为广泛,如北欧的瑞典、挪威和芬兰,北美的加拿大、美国北部地区和墨西哥城,以及世界上主要河流的河口三角洲地区。在我国沿海地区也广泛分布着这种软土,由于沉积环境、组成成分及天然固结状态等条件的不同,这种软土的物理力学性质与陆地上黏土存在差异,其主要力学特性是强度低,渗透性差,具有明显的高压缩性、流变性、触变性 (吴建政, 1995) 及在波浪等荷载往复作用下软化的特性。海洋建筑物地基不仅要承受建筑物自重引起的静荷载,还要遭受波浪等循环荷载的作用。由于上部建筑物结构的自重,建筑物地基中的土单元体将产生初始剪应力,因而当建筑物地基经受



波浪等循环荷载作用时, 需要考虑初始剪应力对土体循环变形特性的影响。在对海上建筑物地基的承载力进行设计时, 必须确保土体能够支撑结构物自重和波浪等循环荷载, 然而往往由于循环荷载的作用, 导致地基土体的抗剪强度降低, 并引起地基产生较大的残余变形, 对海上建筑物的正常运行构成威胁。因此, 需要深入研究静应力与循环应力联合作用下黏土的循环剪切特性, 探讨这种联合应力作用下黏土的变形规律, 进行合理的设计以防止地基土体的过量变形。

海床地基受力情况非常复杂, 比如在半无限的水平地基中, 土体处于无侧向变形的状态, 初始水平面上没有剪应力的作用, 竖直方向即为大主应力方向; 当在水平场地上构建海洋建筑物时, 建筑物底部附近主应力方向基本上没有变化, 而在建筑物下面的地基内由于剪应力的作用, 大主应力方向将偏离竖轴, 其偏离的程度随着与建筑物中心轴距离的增大而增大, 这导致初始大主应力方向角会在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化。海床地基除了承受建筑物自重长期作用以外, 还经常遭受暴风波浪、冰荷载、水流、风与地震荷载的瞬时或循环作用, 风浪将激起建筑物地基产生水平振动、竖向振动以及摆动等多种耦合的复杂合成振动。海底软土不仅要经受巨大自重与小振幅波浪的长期作用, 还可能遇到暴风巨浪等非常环境荷载的瞬时或反复作用, 使得软土地基或海床处于复杂的应力状态, 如图 1.1 所示。在海洋工程中波浪荷载是最重要的基本荷载, 波浪荷载直接作用于海底土层与海洋建筑物上, 在海洋地基中引起循环应力、循环应变和孔隙水压力。这种循环荷载的作用将导致土的刚度降低、强度衰减, 甚至引起海床液化和滑动, 从而造成海床与地基失稳 (栾茂田等, 2002; 王栋, 2002; Luan & Wang, 2001; 钱寿易等, 1982)。对弹性孔隙介质的固结分析表明: 在表面简谐波浪荷载作用下, 无限厚度的弹性孔隙海床中任一固定点处的偏差应力幅值保持为常数而主应力轴发生连续旋转 (Madsen, 1978), 这将对土的变形和强度特性产生显著影响 (Ishihara & Towhata, 1983)。在波浪荷载作用下, 海床土体中的超静孔隙水压力可分为瞬态振荡孔压和残余孔压 (栾茂田等, 2004), 在瞬态振荡孔压交替循环变化的同时, 残余孔压将随着循环荷载作用而逐渐上升和累积, 乃至造成地基的液化破坏。海床中土体的循环压密和循环液化可能同时交替进行 (Zen & Yamazaki, 1990a,

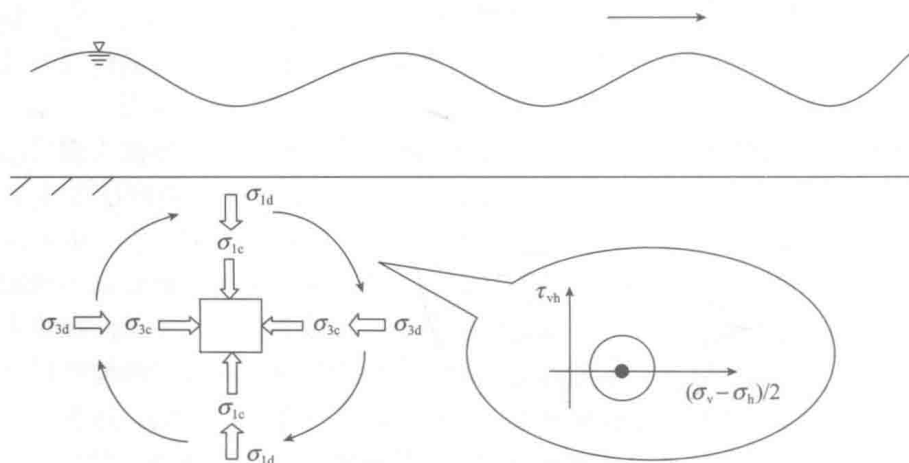


图 1.1 波浪荷载及海床中土体应力状态

σ_{1c} , σ_{3c} —固结时的大主应力和小主应力; σ_{1d} , σ_{3d} —波浪荷载作用下的大主应力和小主应力;
 τ_{vh} —土单元体受到的剪应力; $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ —土单元体受到的偏差应力



b), 而且通常海洋建筑物在经受最大海洋波浪荷载达到破坏之前, 已受若干小振幅波浪的多年作用, 形成所谓的预剪效应。

由于试验技术和认识水平的限制, 以往对波浪荷载作用下海洋土的变形与强度特性的研究仍然套用陆地上对于一般场地与地基的试验方法与分析方法, 没有充分考虑海洋土的自身特点, 也未能合理地计入波浪作用下海床的实际应力状态及其变形与破坏机理。而且对于海洋土体在主应力轴连续旋转条件下变形与强度特性进行研究时, 大多数都是采用的重塑砂或粉土进行试验, 成果也较多(蔡燕燕等, 2013; 许成顺, 2006; 路德春和姚仰平, 2005)。然而在我国沿海地区, 海洋建筑物下覆地基表层土大都为数米厚的软黏土覆盖层, 目前对于饱和黏土在波浪荷载作用下的动力特性及其强度的研究相对较少。因此, 根据海床和海洋建筑物地基的特点, 开展海洋饱和黏土的工程特性及本构模型、海床与海洋建筑物地基的动力响应分析方法是十分必要的, 具有重要的学术意义与工程实用价值, 不仅会推动海洋土力学学科的发展, 而且还将为海洋资源开发与利用提供技术支持。

1.2 国内外研究现状及动态

在地球表面上, 海洋面积约占 71%, 蕴藏着无穷的宝藏, 为开发利用这些宝藏需要进行海洋工程建设。目前海洋工程已经发展成为一支独立的工程分支, 受到各国的高度重视。海洋建筑物的地基基础又一致被认为是海洋工程成败的关键、造价高低的关键。这就使海洋工程的基础设计者面临着许多新的严峻的考验和巨大的压力。海洋土力学和海洋工程密切相关。在近海石油开采中, 这门土力学的学科分支的研究, 正是为海上作业的各种采油平台结构和其他构筑物基础的设计提供必要的理论依据、设计参数和变形一稳定性的分析计算方法, 使工程设计具有较大的把握, 并且比较合理和经济。近年来, 由于海洋工程建设的需要, 我国对波浪荷载下海洋土的循环特性与海床及地基动力响应等方面做了大量的研究工作, 对砂性土循环变形及液化破坏等方面的研究数量所占比例较大, 但无论是试验方法和手段, 还是理论与数值分析方面, 对细颗粒黏性土的研究相对较为落后。下面结合海洋波浪等循环荷载的特征, 对近年来土动力学研究比较活跃且与论文密切相关的试验技术与本构理论及其数值分析方法加以综述。

1.2.1 实验设备与黏土试样

目前对黏土剪切特性的试验研究途径主要有室内的土单元试验、物理模型试验与户外的原位测试试验, 三种试验方式各存在优缺点。土单元试验不能完全反映土体的真实应力状态, 试验结果仅代表土体中某一点的平均应力; 物理模型试验中土的比尺效应很难解决, 而且饱和度不易控制; 原位测试试验尽管能够反映实际的应力状态, 但由于影响因素众多, 很难对试验数据作较为精确的分析与解释。与其他两种试验方式相比, 土单元试验由于试验条件易于控制和试样的受力状态比较明确等优点, 在科研和工程实践中应用最为广泛。

(1) 波浪荷载特征

海洋中的潮汐、潮流一般作恒定的周期性变化, 对大潮、小潮、涨潮、落潮、潮位、



潮速、方向都可以准确预测。然而海浪在海洋中最不稳定,具有季节性、周期性,而且海上波浪的变化形式极其复杂,即使同一传播方向上波浪的波高、波长和波周期也不完全相同,有时来自不同方向的波浪还相互叠加。波浪的传播状况与相对水深(水深与波长之比)密切相关,相对水深大于或等于 $1/2$ 的为深水波,小于 $1/20$ 的为长波,介于二者之间的为浅水表面波,长波和浅水表面波合称为浅水波。深水波由于波浪运动不能达到海底而不受水深的影响,长波受水深的影响显著(常瑞芳,1997)。当波浪由深水正向行近岸滩时,由于水深的减小,波速与波长均减小,波能传递速度增大,从而波高将发生复杂的变化过程(李玉成,1990)。波浪荷载即是海洋中传播的波浪在海底沉积层表面引起的循环波压力,因此波浪荷载是不规则循环和大小瞬时变化的长期荷载。

波浪荷载对于海床与海洋建筑物地基的作用特征主要体现在:①波浪荷载周期较长,一般在 $5\sim 20$ s 之间;②波浪荷载作用时间长,较小波浪荷载作用是长年累月,破坏性的大波浪荷载作用时间为 $3\sim 9$ h 甚至更长;③波浪荷载是由波浪传播时压力差引起的;④较强波浪荷载对中密到疏松土体的作用和超孔隙水压力都将发生累积,直至超过上覆土层的自重应力发生液化破坏,或在较强风浪作用后,由于孔隙水压力消散较快而停止累加;⑤波浪荷载对土体的主应力轴旋转效应会明显降低饱和砂土的抗液化强度,影响孔隙水压力的分布与发展,其作用不可忽视(钱寿易等,1982;杨少丽等,1995;Ishihara & Yamazaki, 1984;郭莹,2003)。

(2) 室内土试样试验设备

室内土动力试验设备主要包括振动三轴仪、循环直剪、循环扭剪仪、共振柱仪、振动台及离心机六种类型,而且针对模拟波浪等循环荷载对土体形成的复杂加载模式与应力状态,高级的土工试验设备已经开发和研制。

黄文熙较早提出采用振动三轴仪来研究土的动力特性(栾茂田等,2003),其后国内外利用振动三轴仪进行了大量土的动力性质的研究。然而在常规振动三轴试验中,对试样的振动上拉容易造成试样帽与试样脱离,可能对试验结果产生较大影响。Tatsuoka (1988)总结了非黏性土的振动三轴仪研究进展,指出尽管振动三轴仪存在不能模拟主应力连续旋转的局限性,但在测定土的强度和变形方面仍是一种有效的试验手段。在对地震等循环荷载作用下土的循环特性进行试验研究中,循环直剪和循环扭剪仪得到较为广泛的应用(Andersen et al., 1988; Lefebvre & Pfendler, 1996; Lanzo et al., 1977; Lai et al., 1998; Matešić & Vucetic, 2003)。目前振动三轴仪和循环直剪仪发展的一个重要方向是利用计算机进行自动控制、数据采集和数据处理,同时重点对加载系统和三轴室进行开发,例如,同时能进行多个试样和双向振动的试验设备研制等。

循环扭剪仪是一种主要针对空心圆柱试样进行土的动力特性测试的试验设备,李作勤(1994)在综合分析国内外类似设备的基础上,通过比较循环扭剪仪和振动三轴仪的优势和局限性,指出循环扭剪仪是功能相对较为齐全的科研试验设备。然而上述扭剪仪仅能模拟主应力方向发生 90° 交替突变的情况,为了使试验仪器能够模拟主应力方向的连续旋转,Hight et al. (1983)发展了一种新的扭剪设备,通过对试样联合施加轴向荷载、扭矩和内外侧压力,以便控制大、小主应力的方向和大小以及中主应力的方向。Nakata et al. (1998)研制了类似设备,并在应变控制的条件下进行了试验,探讨了主应力方向连续旋转对砂土的变形与强度特性的影响。我国对这种高级试验设备的研制相对较晚,率先

由清华大学研制，最初是对共振柱仪进行一系列改造。李万明和周景星（1991）通过添加轴向加载系统使之能改变初始主应力方向，但内外侧压力仍无法独立控制，不能考虑中主应力系数的影响。张国平等（1994）在此基础上进行改造，使内外侧压力可以独立控制。西安理工大学与中国水利水电科学研究院合作，在动三轴仪上增设扭矩施加及测试系统，研制了“拉压一扭剪耦合的新型振动三轴仪器”（郭莹，2003）。大连理工大学栾茂田等（2003）和郭莹（2003）研制了试验功能比较齐全的“土工静力—动力液压三轴—扭转多功能剪切仪”，同时河海大学也完成了类似设备的研制工作（刘汉龙等，2002）。这类高级试验设备的研制成功为复杂应力条件下土的强度与变形特性研究提供了物质技术保证。室内土动力特性的试验设备优缺点见表 1.1。

表 1.1 室内土动力学仪器简表

设备名称	主应力幅值改变能力	主应力方向变化能力
动三轴仪	σ_1 可变, $\sigma_2=\sigma_3$ 且恒定 (当 σ_1 突变为 σ_3 时, 变为 $\sigma_1=\sigma_2$ 恒定)	σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向均固定不变或 σ_1 与 σ_3 方向正交突变互换
动单 (直) 剪仪	σ_1 、 σ_3 可变 (变幅限制较多)	σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向均固定不变或 σ_2 方向固定不变, σ_1 和 σ_3 在垂直于 σ_2 方向的平面上连续旋转 (但主应力轴转角限制较大, 且 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_3$ 方向固定不变)
双向振动三轴仪	σ_1 可变, $\sigma_2=\sigma_3$ 可变或 σ_3 可变, $\sigma_1=\sigma_2$ 可变	σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向均固定不变或 σ_1 与 σ_3 方向正交突变互换
动真三轴仪	σ_1 、 σ_2 、 σ_3 可任意独立改变	σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向可在固定的三个正交方向上突变互换
空心圆柱仪	σ_1 、 σ_3 可变 (变幅限制较小)	σ_2 方向固定不变, σ_1 和 σ_3 在垂直于 σ_2 方向的平面上连续旋转 (主应力轴转角无限制, $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_3$ 方向也可以连续旋转)

注： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别代表试样单元体所受的大、中、小主应力； $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_3$ 分别代表单元体所受大、小主应力增量。

岩土共振柱仪是一种根据共振原理来测定土样动剪切模量与阻尼比等参数的土工试验设备。由于共振柱试验是一种非破坏性试验（顾尧章等，1984），对土的动力参数测试较为稳定和可靠，因而在土的动力特性测试中应用较为广泛。其基本原理是通过对圆柱或圆筒状试样施加不同频率的激振力来测定共振频率，然后通过得到的弹性波传播速度来确定土的动力参数。振动台自 20 世纪 70 年代后期得到了发展，主要用于地震液化方面研究的大型动力试验设备，能够量测出砂土液化时孔压变化及地震残余变形。模拟地震的单向振动台系统最早是在日本开发的，目前国内外已经研制出较多的三相振动 6 个自由度的大型振动台（李敏霞等，1996；方重，1999）。土工离心试验是将原型土体按一定比例缩小为模型，然后放置于高速旋转的离心机中施加单调、循环荷载，测定出循环应力与应变，最后按预定比尺反算到模型的一种高级模型试验。近年来该技术在岩土工程领域快速发展起来（黄志全和王思敬，1998），尤其是动态离心模型试验技术发展更为迅速，英国、美国、日本、法国、德国等国家相继建立了模拟循环荷载的离心试验设备。我国南京水利科学研究院成功研制一台模拟循环荷载的离心机振动台（章为民等，2002），利用这种离心试验设备，不仅能够研究地震作用下土体液化问题，也能够研究波浪荷载下土体的变化状况



(闫澍旺等, 1998)。

(3) 黏土取样及制样技术

对于饱和黏土循环特性的试验研究, 室内试验所用试样主要依靠两种方法获得: ①利用海上取土器械获得原状土样, 然后根据试验需要切削制备尺寸合适的试样; ②在实验室内通过控制颗粒级配、黏性含量等由人工制备重塑土样, 制备土样必须保持与研究用土的性质比较接近。从经济和技术角度考虑, 土样的这两种获取方法各有利弊。

原状土样的优点是能够保持现场土的组成成分, 在一定程度上反映原始沉积结构和固结状态, 能够为实际工程设计和施工提供参考。缺点也较为明显, 主要包括 5 个方面: ①取样技术与土样的扰动问题。原状土样的取样技术与取样时对土样的扰动影响等问题, 国内外的研究较多。魏汝龙 (1986a, b) 对软黏土的取样技术进行了改进, 通过对土样扰动的影响因素的对比分析, 指出取土器械的振动对土样的扰动将使土样的强度和变形特性产生较为显著的改变; 王年香和魏汝龙 (1994) 通过对比采用不同取样器取土时对土样的影响, 指出薄壁取土器对于获取高质量土样具有明显的优越性。Strachan (1983) 和 Dyvik et al. (1993) 对海洋环境工程问题进行分析时也阐述了取样的扰动问题, Leroueil et al. (1983) 在分析野外和室内两种方法确定预固结压力存在的差异时, 指出取样扰动问题较为明显。Bennett et al. (1990) 通过对比分析原位土的孔隙和渗透性, 指出砂土试样受扰动后由于细颗粒的重新排列堵塞孔隙通道, 试样的渗透系数可能降低一个数量级。张荣堂和 Lunne (2002) 通过比较挪威 Sherbrooke 取样器和活塞取样器的取样质量, 探讨了取样扰动对土样的影响程度, 研究表明一些土性参数 (如重压缩体变、不排水剪切强度、剪胀性参数等) 非常有规律地受到土样扰动的影响, 并结合试验结果提出了一个评价扰动土样质量的新标准。②取样造成土样应力释放。在将海底的原状土样取上船以后, 总应力突然减小, 应力状态也由各向异性变为各向同性, 取样可能引起长期小振幅波浪荷载形成的强度丧失 (Strachan, 1983; Dyvik et al., 1993)。而且由于应力释放导致溶于水中的气体扩散到土骨架, 此时测得的饱和度小于原位土样的饱和度, Esring & Kirby (1977) 指出应对室内试验测得的饱和度进行修正。Zhang & Lunne (2003) 研究了 Lierstanda 黏土由于应力释放所引起的深水土样扰动问题, 认为土的力学性质参数与气体饱和度之间存在一定的规律。③取样困难, 花费较大。由于海洋环境条件恶劣, 海底原状样的获取非常困难, 尤其对于水深 200 m 以下的深海取样更为困难。目前国内深海取样一般只能取到重力柱状样和底质样, 取样方法有重力取样、振动活塞取样和挖泥斗取样。而且在深海取样需要 2000 t 以上的船和特殊的深海取样设备, 花费巨大。④原状土样的空间差异明显, 试验数据的可比性较差。地质取样资料表明, 同一深度不同地点或同一地点不同深度所取的天然土样的组成成分及成因等存在较大差异 (吴建政, 1995), 这种差异能够反映不同土层的实际物理力学性质, 但对室内试验寻找土性规律极为不利。⑤原状土样试验结果的影响因素较多, 不利于精确分析土性差异。由于海洋土的物理力学性质与陆地土存在较大的差异 (钱易寿等, 1982), 对海洋土进行常规土工试验时, 必须考虑这种差异对试验结果的影响。如海洋土富含有机物与盐分, 测量土样相对密度时需要修正盐分的影响, 因为相对密度是土的基础性物理指标, 它的精度直接影响孔隙比及其他物理指标的计算结果 (徐杨青和郭见扬, 1989)。现场试验表明, 海底沉积物的实际饱和度在 0.9~1.0 之间, 细颗粒的黏性土或粉土比砂土更容易包含不溶于水的气泡, 如果土颗粒间的气泡直径过大



或形成空腔时,海洋土的工程力学性质会发生不容忽视的变化(Lu et al., 1998; Sills & Gonzalez, 2001)。然而对于海底非饱和土样,目前无论在试验技术还是计算理论方面尚处于探索阶段。为了理论分析和计算的需要,在室内进行单调、循环三轴或扭剪试验时往往需要对试样进行真空饱和处理,经过如此处理的试样扰动较大,也很难反映实际土性。因此,国内外学者开展了实验室土样人工制备技术的探索,采用人工制备的重塑土样研究土的变形与强度特性。

人工制备土样的优点主要有:①试样均匀程度高,试验结果可比性好;②同种试样的试验能够重复进行;③能够控制试样某一成分或饱和度,能部分模拟土的沉积结构等;④制备土样方便,花费较小。缺点是不能模拟地质历史时期的沉积过程与天然环境的影响,不能完全反映土的实际组成成分及沉积结构与实际固结应力状态。尽管如此,由于试验设备与试验技术水平的限制,为研究土性及其在不同荷载模式下的发展规律,采用人工制备土样进行试验研究理论上是可行的,而且应用较为广泛。

目前人工制备纯净砂土试样一般采用分层干装法或水湿后分层压密方法。干装法通常利用通 CO_2 、脱气水和施加反压等方法进行试样的饱和(栾茂田等, 2005),也有采用充水后抽真空的方法使试样饱和(沈瑞福和王洪瑾, 1996),湿法则采用通脱气水和加反压的方法使试样饱和(Boulanger & Seed, 1995)。对于含粉粒或黏粒的砂土土样的实验室制备,除了干装法(Yamamuro & Covert, 2001)和湿装法(Høeg et al., 2000)之外,还有较多的改进方法。王淑云等(2005)根据颗粒级配相近的原则配制了多种不同成分与颗粒级配的粉砂土样,指出颗粒级配稍有不同的一种配制粉砂与原状粉砂力学性质相近,可代替原状粉砂作为模型试验用土。衡朝阳等(2001)通过控制土样的干密度,采用泥浆分层排水法制备了含黏粒砂土。杨少丽等(2000)直接在三轴仪的底座上将混合均匀的粉土样加压固结制备试样,既模拟了粉土沉积结构又避免了装样时的扰动。另外,吴京平等(1997)通过控制土样的干密度和颗粒级配,用天然贝壳经人工粉碎和酸化腐蚀后制备胶结钙质砂来模拟海洋环境中的天然钙质砂,然后采用干装法制备三轴试样,底部通水加反压使试样饱和。

在室内人工制备黏土试样,通常采用泥浆加压固结法和真空抽吸法两大类。Hyde & Ward (1985)和 Yasuhara et al. (1982, 2003)采用泥浆加压固结法制备黏土试样,制样过程主要分为三个步骤:①将土烘干后碾碎成粉末,然后与脱气蒸馏水混合制成黏土泥浆。②将泥浆倒入圆柱形固结模具,固结模具使用前用脱气蒸馏水除去气体,然后在底部的排水板放置滤纸以阻止黏土颗粒阻塞排水板。当泥浆注满时,轻轻震荡固结模具以便释放由边壁进入的气泡。再将上部排水板装入模具中,此时允许气体排出。③使用空气压力机施加压力进行固结,固结完成后挤压到薄壁不锈钢桶中,通过蜡封保持含水量储藏。Lin & Penumadu (2005)采用泥浆加压固结法直接制备空心圆柱状高岭土试样,在试验时利用通 CO_2 、无气水和施加反压等方法进行试样的饱和。目前真空抽吸制备黏土技术得到了发展。Sheahan et al. (1996)在室内采用小型真空容器制备单个黏土试样,纪玉诚和闫澍旺(1997)设计了室内真空预压黏土制样方法,都属于真空抽吸制样技术。与泥浆加压固结法相比,该法能够在较短的时间内制备大量的比较均匀的黏土样品,泥浆中气体相对容易抽出,饱和度容易控制,而且无需笨重的加荷设备,土样经切削后制成的试样无需再进行饱和处理。但从制样的效果来看,往往由于真空度不足,所制成的土样饱和度难