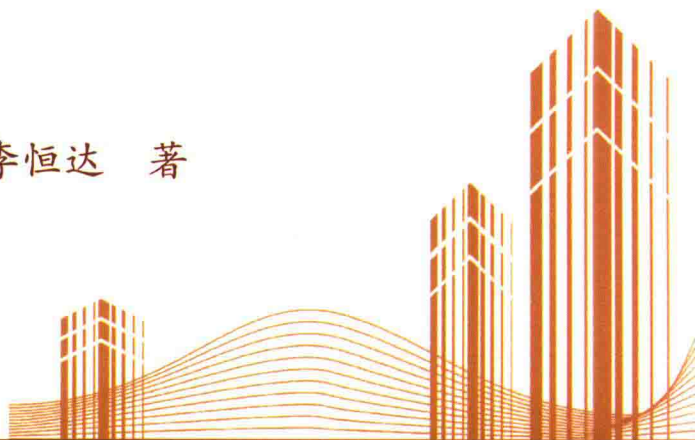


国家自然科学基金资助项目 (U1304526)

长期反复荷载作用下 软土地基沉降研究

CHANGQI FANFU HEZAI ZUOYONGXIA
RUANTU DIJI CHENJIANG YANJIU

■ 师旭超 李恒达 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金资助项目(U1304526)

长期反复荷载作用下软土地基沉降研究

师旭超 李恒达 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内容提要

本书主要论述了长期反复荷载作用下软土地基的固结变形机制。全书共分7章,内容包括绪论、反复荷载类型及其傅里叶级数、反复荷载下一维固结理论、软土材料及其强度理论、相关计算软件及工程实例分析、反复荷载下理论计算与ABAQUS模拟分析、结论与展望。

本书可供土木工程等领域科技工作者、高等院校相关领域的师生及研究生阅读参考,对相关领域的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

长期反复荷载作用下软土地基沉降研究/师旭超,李恒达著. —郑州:黄河水利出版社,2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1582 - 4

I. ①长… II. ①师…②李… III. ①荷载 - 作用 - 软土地基 - 地基沉降 - 研究 IV. ①TU471

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281760 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:郑州红火蓝焰印刷有限公司

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:4.5

字数:130 千字

印数:1—1000

版次:2016 年 11 月第 1 版

印次:2016 年 11 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

饱和软土在我国分布广泛,随着地区经济建设的发展,兴建在此类软基上的大型工程项目越来越多,从而对软基工程提出了更高、更新的要求。例如,近年来随着国家粮食流通规划的实施,在全国各地投资兴建了许多大型粮油食品储备工程。这些设施在投入运营后,由于受到粮仓粮面或储油罐油面变化所引起的重复荷载作用,软土地基经常出现工后变形量过大、沉降时间长等问题。长期沉降不仅可能给工程造成极大的安全隐患,更重要的是影响粮食油脂等储藏物的品质,进而影响广大人民群众的身体健康,造成不可估量的损失。因此,如何较为准确地预测长期变形,并有效、合理地控制减小沉降成为软土地区粮食物流建设中亟待解决的一大难题。

粮仓、油罐等设施在役期间所受荷载是一种特殊的长时间重复施加的循环荷载。循环荷载根据其作用频率,可以分为高频、中频和低频三类。Zienkewicz 曾提出判别这三类荷载的准则。对于高频循环荷载下的软土固结变形问题,须同时考虑土整体的运动惯性力和孔隙水相对于土骨架运动的惯性力;而对于低频循环荷载下的固结变形问题,这两项惯性力均可忽略不计,即可按静力固结问题考虑。目前,我国众多研究者将粮仓、油罐等设施在役期间所受荷载与地下水位周期性变化、海上风浪所产生的荷载等同归于低频循环荷载的范畴。循环荷载若根据其荷载持续时间,又可以分为短期循环荷载(如地震荷载)和长期循环荷载(如交通荷载)两类,粮仓、油罐等设施在役期间所受荷载则属于长期循环荷载范畴。

但是,粮仓、油罐等特殊设施在役期间的荷载与其他类荷载具有明显的不同。例如地下水位周期性变化中的土体在饱和与非饱和之间转

换,海上风浪荷载持续时间非常短暂,交通荷载的荷载循环次数偏多。而本书中所研究的荷载具有持续时间比较长、荷载频率偏低、循环次数低等特点。故本书将该类荷载定义为长期反复荷载。由于荷载形式的特殊性以及工程实际中出现的广泛性,长期反复荷载作用下饱和软黏土的工程力学特性研究具有较高的理论意义及实用价值。

本书是在国家自然科学基金——河南人才培养联合基金项目“反复荷载作用下软土地基沉降机理研究”(U1304526)的研究成果基础上深化完成的。依据太沙基一维固结理论导出了变荷载作用下的弹性固结解析解,对各种形式的反复荷载进行了详细分析,借鉴前人对反复荷载作用下软土地基固结理论的研究成果,将其加以总结,将固结解析式进行一般化,以便于进行计算机编程和变换荷载类型,并用该方法对各种荷载作用下的软土地基固结性状进行了分析。固结模拟部分分别基于修正剑桥模型理论与弹性理论,利用 ABAQUS 有限元软件及其相关子程序,分别对所列各种反复荷载进行模拟。通过两种有限元数值模拟结果与弹性理论计算结果比较分析,研究了长期反复荷载作用下的软土地基固结机制。

全书共分为 7 章。主要研究成果是将梯形、矩形和三角形波的公式进行统一化,以广义梯形波表示,并对其采用傅里叶级数展开,将波形用傅里叶级数表示,只需变换广义梯形波参数就可以得到梯形、矩形和三角形的任意波形,表达简单而且实用;另外,采用同样的方法,分别对广义正弦波、广义半正弦波和广义余弦波进行分析,得到各种波形下的傅里叶级数展开式;对不同荷载形式下的固结偏微分方程进行求解,得到各种荷载作用下透水边界条件下弹性地基解析解的通解,利用 Maple 数学软件进行编程,输入土体参数进行单层软土地基的固结性状分析。弹性与弹塑性固结模拟在 ABAQUS 软件中进行,采用与弹性固结理论相同的荷载参数,用软件的 DLOAD 子程序编制循环加载,并利用 UVARM 用户输出场变量子程序进行固结度等一些自设定场变量的输出。通过上述三种方法对软土地基长期沉降机制进行详细分析,研究成果可为仓储等设施的设计、施工及运营管理提供参考与指导。

感谢 2015 级硕士研究生魏茹、袁磊在成果整理分析过程中所付出

的辛勤劳动!

感谢河南工业大学土木建筑学院领导与同事的关心与支持!

在撰写过程中参考了大量国内外学者的相关研究成果,在此向他们表示感谢!

限于作者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者不吝指教。

作 者

2016 年 9 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 研究目的和意义	(2)
1.3 研究背景与研究现状	(3)
1.4 研究内容和思路	(8)
第2章 反复荷载类型及其傅里叶级数	(11)
2.1 反复荷载变化规律	(11)
2.2 常见等效反复荷载类型	(23)
2.3 Maple 软件简介	(27)
2.4 广义反复荷载的傅里叶级数表示	(36)
第3章 反复荷载下一维固结理论	(44)
3.1 太沙基一维固结理论	(44)
3.2 反复荷载下软土地基的一维固结解	(52)
3.3 反复荷载——沉降算例分析	(62)
第4章 软土材料及其强度理论	(65)
4.1 软土的工程性质	(65)
4.2 土体的强度理论	(70)
4.3 剑桥模型	(80)
第5章 相关计算软件及工程实例分析	(89)
5.1 ABAQUS 软件及相关应用	(89)
5.2 ABAQUS 中修正剑桥模型表示形式	(95)
5.3 地基模型实例	(99)

第 6 章	反复荷载下理论计算与 ABAQUS 模拟分析	(104)
6.1	解析解与太沙基解的比较	(104)
6.2	理论数值计算与有限元模拟对比分析	(105)
第 7 章	结论与展望	(126)
7.1	主要工作与结论	(126)
7.2	进一步研究的建议和设想	(127)
参考文献		(129)

第1章 绪论

1.1 概述

软土地基在变荷载作用下的变形一直是土力学中研究的重要课题。在加载条件下,土体中产生超孔隙水压力,由于排水边界的存在,随着加载时长的增加,土中孔隙水被逐渐排出,超孔隙水压力慢慢消散,土体中的有效应力逐渐增大,直到超孔隙水压力全部消散,荷载全部由土骨架承担,这一过程称为固结。固结分析包括孔隙水压力变化、沉降以及固结度随时间的发展等方面。土体在固结过程中,由于排水条件变化,土体孔隙比减小,产生压缩,随着有效应力增加,土体的承载力也逐渐增强,抗剪强度提高,这是土体压硬性的一个重要体现。因此,在地基处理中常常采用预压法等。Terzaghi(太沙基)(1924)首先提出了一维固结理论,在其假设下,他建立了一维固结偏微分方程,并在相应边界条件下得出了一维固结解析解。太沙基一维固结理论的基本假设如下:

(1) 土体材料各向均匀,并且完全饱和。

(2) 土骨架与孔隙水皆不可压缩,土体变形完全由孔隙水排出、孔隙比减小所致。

(3) 土中渗流符合 Darcy(达西)定律,土的透水性不随时间、应力改变,渗透系数为常数。

(4) 在压缩过程中,土体视为理想弹性材料。

(5) 土层中只发生纵向的渗流与压缩。

(6) 外荷载是一次性施加的,并在固结过程中不再变化。

而在实际中,土体的力学性质一般为非线性,对于软土往往为弹黏塑性,对于荷载的反应具有压硬性,绝非线弹性变化,土层变化也较大,

渗透系数在固结过程中也不是一个定值,实际情况非常复杂;另外,对于加载形式,不同的建筑物类型有不同的荷载形式,并非大面积加载、瞬时加载和恒定加载。加载方式往往千奇百怪,对于粮油储罐类建筑,一般为周期较长的反复施加的荷载。

软土地基在我国分布相当广泛,在滨海地区、长江珠江流域等都分布着深厚的软土。软土有机质含量高、孔隙比大、含水率高、强度低、压缩性高、渗透性小等特性,导致在其上建造的建筑物变形量大、变形发展时间长等。据相关资料显示,有些软土地基上的建筑物沉降多达数米,给正常使用及安全性造成严重影响,因此做好软土地基上建筑物的工后沉降预测对地基处理至关重要。

对长期反复荷载作用下软土的工后固结性状及沉降进行预分析,有深刻的实际工程指导意义。本书针对饱和软土地基,对常规形式下的反复荷载类型利用一维固结理论和弹塑性强度理论,通过 ABAQUS 有限元软件进行软土沉降的有限元模拟。在考虑土体压缩性、孔隙比与渗透系数等参数特点的情况下,研究在各种超低频反复荷载下饱和软土地基的长期固结性状。

1.2 研究目的和意义

本课题来源于国家自然科学基金项目,该项目主要涉及建造在软土地基上的粮油仓储等建(构)筑物,其地基在反复荷载作用下长期沉降机制研究。筒仓分农业筒仓和工业筒仓两大类,其中农业筒仓主要用于储存粮油、饲料等粒状或粉状物料,而工业筒仓主要用于储存煤炭、建筑材料、石油、盐、糖等液态、颗粒或粉状材料,根据筒仓数量的多少可以分为独立仓和群仓^[1]。由于筒仓用途的特殊性,筒仓荷载也有特殊的一面,故筒仓地基所受荷载与普通建筑物有很大区别。首先,其荷载在不同时期内变化较大,卸载与满载受力相差悬殊,这必然会对地基沉降有不同程度的影响;其次,它不同于动力荷载,但也有别于静力单调荷载,荷载变化频率非常小,往往短则数月,长则数年,但对于不同的仓储建筑物,比如粮仓可以分为收纳仓、中转仓及储备仓等,其周转

周期与仓储量相差较大,同样荷载大小也有较大差异。对于此类荷载,软土地基长期沉降预测比较困难,以往主要以实地观测为主,但耗时较长,实施起来很烦琐。此法的优点是数据比较真实,能够反映地基的真实沉降。

工业化的不断进步与城市的不断扩大,使得建筑行业无论是在建造技术还是建造规模上都得到了较大的提高。以仓储建筑为例,以前的仓储类型多以房屋式仓储为主,结构为砖墙或者混凝土结构,而且空间小、储量少,对地基的承载力要求较低。目前,随着人口增加、工业化程度的提高,仓储结构的储量越来越大,在结构形式和规模上有很大提升,不但对结构设计有了更专业的要求,而且对地基的承载力有了更大的考验。此外,由于土地资源的局限性,承载力良好的土地在逐渐被城市所吞噬或者为耕地林地而受到保护,而承载力很差的软土成为了开发建设争取的对象。在我国,软土分布十分广泛,大多在沿海与长江流域,这些地区有着发达的经济,国内较多大型建筑物都在这些地区兴建。虽然对软土地基的处理方法较多,但是软土地基在长期反复荷载下的沉降仍不能较准确推断。因此,对在反复荷载下软土地基的长期固结性状方面需要进行深入的研究,对孔压、固结度以及变形的相互影响需要进行分析。

随着计算机性能的不断提高,各种有限元软件相继出现,使人力所不能实现的计算成为可能,并且能够较精确地计算和预测软土地基长时期的受力和变形。本文的重点是利用计算机软件辅助技术,导入相应类型的反复荷载,设置需要的预测年限,通过一维固结与剑桥模型弹塑性理论,对软土地基的长期固结性状进行预测。

1.3 研究背景与研究现状

自20世纪后期以来,国内外学者对反复荷载作用下土体的固结理论与试验研究从未中断,研究成果较多,但各有特点,针对性各有不同。较成熟的研究是交通荷载^[2,3]、风浪荷载、地震荷载及其他反复荷载下土体的破坏与变形研究。国内外相关学者对反复荷载类型的研究一

般有以下几种形式(见图 1-1 ~ 图 1-6)。

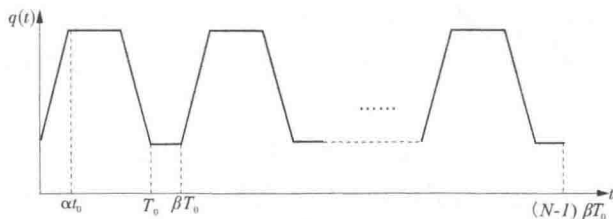


图 1-1 梯形荷载

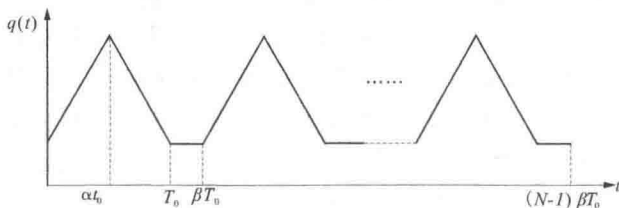


图 1-2 三角形荷载

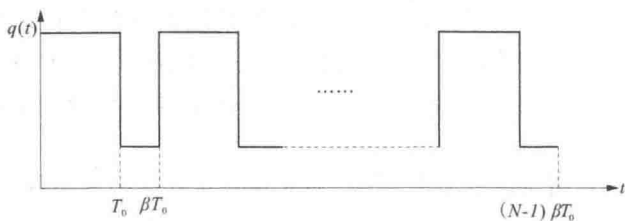


图 1-3 矩形荷载

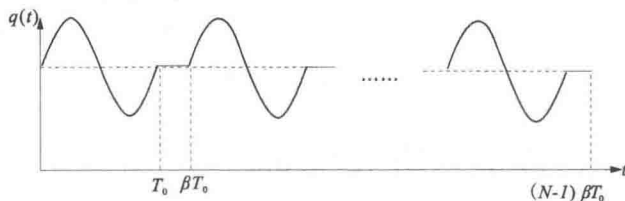


图 1-4 正弦波载

按照反复荷载频率划分,可以分为高频、中频、低频三种。对于三者的判定,Zienkewicz 和 Bettess^[4]给出了判别方法,相关方面的知识可以参考相关资料。

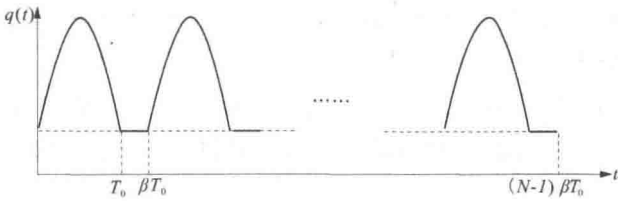


图 1-5 半正弦波载

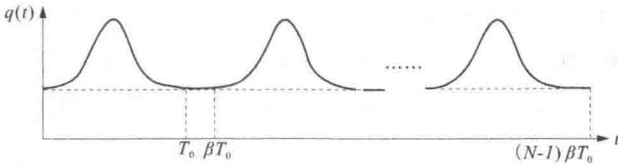


图 1-6 余弦波载

在国外,关于变荷载下土体固结的研究从 20 世纪 50 年代后期开始,较早的是 Schiffman^[5] (1958) 求出了线性加载条件下单维地基问题的理论解答。

Wilson 等^[6] (1974) 基于太沙基线性固结理论,采用分段方式推导了矩形反复荷载作用下的饱水地基一维固结解,并导出了矩形反复荷载下土体有效应力及固结度的解;Alonso 和 Krizek^[7] (1974) 研究了弹性软土地基在随机荷载下的沉降机制。

Baligh 等^[8] (1978) 运用迭加原理得出了黏土层在矩形反复荷载下的一维固结问题的解答;Fujiwara (1990) 分析了预压对反复荷载作用下土体固结性状的影响,认为超载大小、卸荷时的固结度、恒荷载和反复荷载的大小与工后沉降有直接的关系^[9]。

Seed 等在 20 世纪 50 年代末 60 年代初对反复荷载作用下道路路基、路堤的沉降及稳定方面做了研究^[10]。

Favaretti 及 Mohammed 等通过现场观测研究了筒仓运营期间满仓与空仓反复荷载下地基的变形规律,并依据太沙基理论分析了孔压变化规律。之后 Rahal 等^[11] (1998) 将筒仓 (silo) 和储罐 (tank) 荷载等效为正弦波载,并对地基的沉降和孔隙水压进行了分析,并通过与意大利一筒仓的工程实例进行对比分析,通过孔隙水压力的比较,发现了筒

仓中心的孔隙水压力的变化规律,孔压的改变要先于荷载的改变,这一点与有效应力相反。

Knut H. Andersen^[12] (1988) 通过试验和数值计算描述了地基在静态荷载与反复荷载下的不排水承载力特性,并为建筑物所受风荷载提供了参考。

在国内,相关方面的研究起于 20 世纪 80 年代初期,大多理论形成于 21 世纪初期,国内相关方面较著名的研究学者及贡献有:

黄文熙(1983)在其著作《土的工程性质》^[13]中对土体固结有较全面的概述,其中包括外荷随时间的变化、土层厚度随时间的变化、成层地基土和参数指标沿深度改变等情况下的固结解,非常全面地补充了相关方面的理论知识。

郑大同、王惠昌^[14] (1983)等在伊万(Iwan)模型的基础上提出了动力反复荷载作用下土体的非线性应力—应变模型,文章讨论了由材料固体颗粒之间的内摩擦作用引起的滞后阻尼,并未考虑黏滞阻尼、水与土之间的相互作用和时间因素的影响。

吴世明^[15] (1988) 等将固结方程与荷载进行 Laplace 变换,导出了周期荷载下双面排水条件的饱和黏土的一维固结方程的解,并详细推导了恒载、矩形荷载、三角形荷载、正弦荷载和梯形荷载固结方程的解和沉降计算式,并就浙江萧山黏土在矩形荷载作用下的固结试验结果和理论分析做了初步对比。

杨峻、蔡袁强、吴世明^[16] (1996)求得了反复荷载作用下双层软土地基的一维理论解,并对特定的矩形和三角形荷载算例进行了分析,与太沙基计算结果做了比对;蔡袁强、徐长节(1998)^[17]以成层饱和地基模型为对象,根据 Terzaghi 理论,运用 Laplace 变换、逆变换及其矩阵传递法,求出了反复荷载下成层饱和地基的沉降及有效应力问题,并求得了加载时域内的通解;蔡袁强^[18]、徐长节、袁海明等^[19]得出了任意加载下成层黏弹性地基的一维固结解析解;梁旭等^[20] (2002)基于固结理论及 Laplace 得到了半透水边界条件下,任意变荷载作用下的一维固结解答。

关山海、谢康和^[21](2003)获得了不考虑土体压缩性变化的低频梯形反复荷载下地基一维固结问题的解析解,由梯形荷载下解答的解析曲线表明:在任一周期中,有效应力的变化并不与荷载的变化一致进行,而是按一定规律延滞变化;庄迎春、胡安峰、谢康和等^[11](2005)得出了反复荷载参数取不同值时对固结发展及固结度的影响;谢康和、周瑾、董亚钦^[22,23](2006)通过求解低频反复荷载下单层地基的一维非线性固结微分方程,推出了低频梯形反复荷载下的一维理论的解析解;李西斌、谢康和^[24](2007)利用黏弹性元件(流变元件),对反复荷载下土体一维流变固结进行了研究,并得出了解析解。

另外,也有不少关于此方面研究的学位论文,比如蒋军^[25,26]、耿雪玉^[27]、夏森炜^[28,29](2005)对反复荷载作用下软黏土地基非线性一维固结分析做了相关研究,利用循环波的 Laplace 变换和傅里叶级数展开,求得了正常固结或欠固结土体在多种反复荷载下的一维固结理论,并对黏弹性地基、半透水边界地基及分层地基等条件下的固结理论进行了详细的介绍,通过对比分析得出了重要结论;李志星^[30](2006)将循环波用傅里叶级数表示,对高频反复荷载作用下的饱和软黏土地基一维非线性固结理论与孔隙水压力进行了分析,并得出了不同类型荷载下的固结度与孔压的变化。

从国内外研究现状可以看出,大多数研究都是基于太沙基一维固结理论,当然也沿用了太沙基理论的一些假设,大多认为土体具有弹性、孔隙比与渗透系数是定值等,这些都与实际工程情况不符合。另外,较多的研究以交通荷载为研究对象,如李进军^[3](2006)、白顺果^[2](2005)等,大部分研究成果的荷载频率取值都较大,多以分钟为循环周期。但实际上,大型筒仓油罐等建筑物的荷载在运营期间的变化非常缓慢,有的数月甚至数年循环一次,这样的荷载不同于动力荷载,也不能按照单一的静力荷载来考虑。以筒仓为例,依据筒仓的功能,在运营期限内(假设 50 年)的荷载循环次数为 30 ~ 3 000,其频率非常小,在实验室内模拟困难。而大部分学者做试验研究时,利用固结仪或者三轴仪施加周期为几十分钟或者数小时的试验来进行分析,显

然,这种荷载与筒仓所受荷载周期相差较大。因此,寻求一种方法来预测软基在低频周期荷载作用下任意时间内的沉降量十分必要。预测几十年以后的沉降量,不但能对建筑物的正常使用做到率先评判,而且可以在准确时间采取加固措施,防范次生灾害的发生。

在国内外的相关研究中,大多学者在文章中往往只给出了任意荷载作用下固结解的表示形式,由于周期波 Laplace 变换的复杂性,并未能完全求出表达式解析解,只是给出了某些简单特例的解析解,如果荷载参数改变,则需要重新求解解析解。本书结合周期波的傅里叶级数叠加知识,针对常见的荷载类型,各以一个傅里叶级数通项表示,可以简单方便获取常见的荷载类型及加载形状,在数学软件的帮助下可以得到任意的固结解答。另外,数值模拟技术已经相当成熟,对于复杂条件的土体,可以通过有限元的模拟来分析固结性状、不均匀沉降等,并可以选择多种土体模型,简单方便,分析结果直观,目前的应用非常广泛,本书也采用了数值计算方法进行了分析,补充了软土地基长期反复荷载下数值模拟方面的一些空白。

1.4 研究内容和思路

1.4.1 研究内容

本书的研究方向为软土地基上的粮油仓储建筑,在寿命周期内(50年)拟对其地基在各种反复荷载作用下的沉降进行模拟,通过查阅国内外相关文献,借鉴前人理论成果、研究思路与研究工具,对我国有代表性的粮油仓储荷载进行模拟分析。按照规律化后的反复荷载进行模拟^[27,31],具体研究内容有以下几个方面:

(1)根据相关资料^[1,24,31]对现代筒仓的荷载工况与通用设计尺寸有所了解,并通过土力学理论^[32,33]学习对计算深度进行核算,从而准确有效地进行建模。

(2)以软土地基上的粮油仓储设施为研究对象,通过实际工程案

例,根据周期荷载下软土的一维固结理论^[21]与剑桥黏土弹塑性模型^[32],对不同循环类型的荷载通过 Fortran 语言进行编程导入到软件中进行分析。通过有限元软件进行土体的弹塑性流固耦合分析,并提取分析数据。理论数值计算部分采用 Maple 数学软件进行分析与数据提取。最后,利用 Origin 绘图软件进行数据处理,形成曲线,进行对比分析。

(3)根据实际工程的试验参数,将土体的材料参数作为已知数据输入,以 ABAQUS 为分析工具,以修正剑桥模型与一维固结理论为分析方法,并考虑土体分层的影响,在孔隙比、孔隙水、渗透性及土颗粒的相互耦合的条件下,建立更符合工程实际的模型,从而让结果尽可能地靠近实际数据。

(4)对计算的沉降、有效应力、孔压及固结度等进行分析,得出最终沉降量及影响固结度的荷载因素。

(5)对荷载类型与沉降、孔压与有效应力、固结度与时间等相互之间的影响进行分析。

1.4.2 研究思路

本书依据一维固结理论和修正剑桥模型弹塑性强度理论,以 ABAQUS 有限元软件为研究工具,研究软土地基上以 1 年为循环周期的储备仓及储油罐在反复荷载作用下的长期沉降机制,以及荷载类型对沉降、有效应力、固结度、孔隙水压力等的影响。用有限元模拟与理论验算的方法对地基进行长期沉降预测,然后对两者进行分析,通过对工程实例的理论数值计算与有限元模拟结果的对比,验证理论结果与模拟结果的差异与优缺点,比较两种方法的分析结果,并确定哪种方法可广泛用于预测。本书从弹性理论知识到弹塑性有限元模拟分析,最终运用于实践,研究思路具体如图 1-7 所示。