



混凝土矩形贮液结构 ——动力分析理论与数值仿真

◎程选生 杜永峰 著



科学出版社

混凝土结构 ——动力分析理论与数值仿真

程选生 杜永峰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者及其研究团队多年来在混凝土矩形贮液结构动力分析方面理论研究成果的汇集和总结。

全书分为9章, 主要内容包括: 混凝土矩形贮液结构的自由振动和液-固耦合振动, 混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合动力响应分析和频域分析, 隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应和共振响应分析, 微幅和大幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液固耦合地震动响应, 带有隔板的混凝土矩形贮液结构的动力响应。

本书可供土木工程的相关科研、设计、施工等技术人员参考, 也可作为高等院校土木工程、给水排水工程、水利水电工程等专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土矩形贮液结构: 动力分析理论与数值仿真/程选生, 杜永峰著. —北京: 科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052073-9

I. ①混… II. ①程… ②杜… III. ①混凝土结构-结构动力分析-软件仿真 IV. ①TU370.1-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第050150号

责任编辑: 亢列梅 周 莎 赵鹏利/责任校对: 李 影
责任印制: 张 伟/封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年3月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 295 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



程选生 兰州理工大学教授,工学博士,博士研究生导师,国家一级注册结构工程师。1995年获郑州工学院工民建专业工学学士学位,2001年获兰州大学固体力学专业工学硕士学位,2007年获兰州理工大学结构工程专业工学博士学位,2009年和2011年分别进入中国人民解放军后勤工程学院和北京工业大学土木工程博士后流动站从事博士后研究工作,2012年国家公派赴美国西北大学访学一年。现为国际隔震与消能减震控制学会(ASSISI)理事、国际土力学协会委员、中国力学学会计算力学委员会特邀委员、中国地震工程学会岩土防震减灾委员会委员、中国岩石力学与工程学会岩土工程信息技术与应用分会理事、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会青年工作委员会委员、中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会青年分委会委员、甘肃省建设科技与建筑节能协会委员。*Ocean Engineering*、*Engineering Geology*、*Journal of Vibration Engineering and Technologies*、*Journal of Central South University of Technology*、*Plos One*、*Journal of Traffic and Transportation Engineering*、*Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*、*Structure and Infrastructure Engineering*、《振动与冲击》《中南大学学报(自然科学版)》《四川大学学报(工学版)》《中国公路学报》《交通运输工程学报》等期刊审稿人。教育部学位中心通讯评议专家,科技部国家科技库专家,国家自然科学基金项目和中国博士后基金项目通讯评议专家、甘肃省震后房屋建筑应急评估专家。主持国家自然科学基金项目2项、教育部博士点基金(博导类)项目1项、甘肃省科技支撑项目1项、甘肃省建设科技攻关项目3项;参与国家“973计划”和教育部创新团队发展计划项目各1项。发表论文100余篇(SCI/EI检索46篇,ISTP检索10篇),申请发明专利15项,获甘肃省科技进步奖一等奖1项、三等奖3项,甘肃省建设科技进步奖一等奖和二等奖各1项,获第16届甘肃省高等学校青年教师成才奖。主要研究方向:①隧道结构的地震响应、动力稳定及其施工技术;②特种结构的液-固耦合振动及减隔震性能;③混凝土结构的热力学性能;④结构设计理论和方法。

杜永峰 兰州理工大学教授，工学博士，博士研究生导师。兰州理工大学防震减灾研究所所长，西部土木工程防灾减灾教育部工程中心副主任。享受国务院特殊津贴专家、国家“新世纪百千万人才工程”国家级人员，教育部长江学者创新团队“西部恶劣环境减灾”结构减震控制方向带头人，甘肃省科技领军人才第一层次直接入选人员。担任中国振动工程学会结构控制委员会常务理事、国际隔震与消能减震控制学会（ASSISI）理事、甘肃省抗震防灾协会副理事长等 10 余项学术职务。先后被授予全国先进工作者、全国优秀教师、全国师德标兵等国家级技术荣誉奖和甘肃省教学名师等省部级荣誉奖。曾在美国、日本、意大利等多个国家做访问学者。带领的团队先后获得 15 项国家自然科学基金项目，其中本人主持 5 项。主持中美地震工程合作课题和中华人民共和国住房和城乡建设部抗震新技术专项课题各 1 项。解决串联隔震减震体系随机屈曲等关键技术难题，主持推广应用隔震结构 270 多栋。获得甘肃省科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 4 项、三等奖 7 项。主持中华人民共和国住房和城乡建设部复杂隔震减震应用指南编写等方面的工作，参与国家新抗震规范隔震耗能减震章节等国家标准的编制工作，主持甘肃省抗震设计规程减震隔震编制工作。发表论文 200 余篇，其中 60 余篇被 SCI 或 EI 收录，出版专著 4 部。



前 言

混凝土矩形贮液结构广泛应用于石油化学工业、给水排水、污水处理、水利工程、核电站工程等领域,主要功能是储存液体,如水、石油、各类化学液体等。随着当今社会的不断发展,在民用建筑和现代化工业中,贮液结构已成为一种不可或缺的附属设施。随着各个行业用水量的急剧增加,迫切需要大量的给水排水基础设施。我国正在进行工业区与居民区的建设,对给水排水设施、生活用水设施以及贮水设施有了更大的需求,然而常见的小型贮液结构并不能满足正常需要。例如,对污水处理池、石油化工中的贮液池等大型贮液结构来说,绝大多数还是使用钢筋混凝土材料制作而成,对耐久性及安全性等性能的要求很高。随着我国工业的迅速发展,复杂钢筋混凝土矩形贮液结构在石油化工和水处理工业中得到了广泛的应用。贮液结构在遭遇地震作用时,容易造成结构破坏,引发重大自然灾害。因此,研究混凝土贮液结构的动力响应已成为确保混凝土贮液结构安全运行的重要课题。

作者自 1998 年开始在兰州大学王银邦教授的指导下对混凝土矩形贮液结构的温度问题进行了较为深入的探讨,2001 年 4 月因工作变动研究工作暂停。2005 年以来,同博士生导师杜永峰教授一起并在他的指导下开展混凝土矩形贮液结构的动力响应研究,取得了若干重要成果。2007 年博士毕业后同所指导的研究生一起继续探索有关混凝土矩形贮液结构的动力响应问题,恰逢国家自然科学基金和甘肃省科技支撑计划项目立项,先后经过 6 位成员的持续工作,又综合国内外专家和学者的相关研究成果,形成了本书。

本书共 9 章,第 1 章为绪论,介绍了混凝土贮液结构的分类及研究内容;第 2 章为混凝土矩形贮液结构的自由振动,介绍了剪切模型下弹性矩形贮液结构的自振特性和弯剪型模型下弹性矩形贮液结构的自振特性;第 3 章为混凝土矩形贮液结构的液-固耦合振动,介绍了矩形贮液结构液-固耦合动力分析模型和带弹性壁板、底板、顶板的矩形贮液结构的液-固耦合振动问题;第 4 章为混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合动力响应,介绍了地震条件下液-固耦合有限元模型,分析了钢筋混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合频域问题;第 5 章为隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应,介绍了钢筋混凝土非隔震与隔震矩形贮液结构的地震动响应;第 6 章为隔震混凝土矩形贮液结构液-固耦合共振响应分析,介绍了贮液结构内液体微幅和大幅晃动动力分析、液体微幅晃动时的共振响应和液体大幅晃动时的共振响应及非线性现象;第 7 章为微幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应,介绍了微幅晃动下考虑混凝土线性弹性与非线性弹性

时隔震矩形贮液结构的地震响应,并进行了对比分析;第8章为大幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应,介绍了大幅晃动时隔震矩形贮液结构的动力响应情况;第9章为带有隔板的混凝土矩形贮液结构的动力响应,给出了动力响应分析有限元模型,进而对有隔板无隔震和隔震混凝土矩形贮液结构进行了动力响应分析。

在本书的编写过程中,得到了吴忠铁博士、博士研究生景伟以及硕士研究生史晓宇、朱海燕、赵玉蕊、张爱军、李沛江、曹亮亮、刘博等的支持,还参考了很多国内外专家和同行学者的论文及专著,并得到了国家自然科学基金项目(51368039)和甘肃省科技支撑计划项目(144GKCA032)的支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,还望读者批评指正。

程选生

2016年中秋节于兰州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 贮液结构的发展	1
1.2 贮液结构的分类及用途	2
1.3 贮液结构的破坏形式和影响因素	3
1.4 贮液结构的研究问题和方法	5
1.4.1 贮液结构液-固耦合振动	5
1.4.2 贮液结构的地震响应	7
参考文献	9
第 2 章 混凝土矩形贮液结构的自由振动	11
2.1 剪切模型下弹性矩形贮液结构的自振特性	11
2.1.1 自由振动方程的推导	11
2.1.2 算例	14
2.2 弯剪型模型下弹性矩形贮液结构的自振特性	19
2.2.1 理论推导	19
2.2.2 数值算例	26
2.2.3 不同高度不同变形理论的自振特性	26
参考文献	31
第 3 章 混凝土矩形贮液结构的液-固耦合振动	32
3.1 矩形贮液结构液-固耦合动力分析模型	32
3.1.1 液体的运动微分方程	32
3.1.2 矩形贮液结构的液-固耦合振动模型	33
3.2 带弹性壁板的矩形贮液结构的液-固耦合振动问题	35
3.2.1 基本理论	35
3.2.2 振动模型及速度势函数	36
3.2.3 液动压力	40
3.3 带弹性底板的矩形贮液结构的液-固耦合振动问题	44
3.3.1 液-固耦合振动模型	44
3.3.2 耦合边值问题的求解	46
3.3.3 数值算例 (弹性底板)	49

3.4	带弹性顶板的矩形贮液结构的液-固耦合振动问题	52
3.4.1	耦合振动分析模型	52
3.4.2	边值问题求解	53
3.4.3	数值算例 (弹性顶板)	55
	参考文献	58
第 4 章	混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合动力响应	60
4.1	正交各向异性钢筋混凝土板结构弹性常数的确定	60
4.1.1	纵向 (横向) 弹性模量、剪切模量的确定	60
4.1.2	泊松比的确定	62
4.2	混凝土矩形贮液结构的液-固耦合动力响应分析	63
4.2.1	地震作用下液-固耦合有限元模型	63
4.2.2	地震动响应分析	65
4.3	混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合频域分析	72
4.3.1	钢筋混凝土矩形贮液结构的液-固耦合有限元解法	72
4.3.2	液-固耦合频域分析	73
	参考文献	78
第 5 章	隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应	79
5.1	非隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	79
5.1.1	动力响应分析有限元模型的建立	79
5.1.2	非隔震混凝土矩形贮液结构仿真	81
5.2	隔震混凝土矩形贮液结构地震动响应	95
5.2.1	贮液结构隔震力学模型及其运动控制方程	95
5.2.2	隔震混凝土贮液结构的仿真	97
5.3	隔震和非隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应结果对比	109
5.3.1	晃动波高位移	110
5.3.2	壁板液动压力	112
5.3.3	壁板位移	116
5.3.4	等效应力	118
5.3.5	等效应变	121
5.3.6	不同液位高度下的地震动响应	123
	参考文献	128
第 6 章	隔震混凝土矩形贮液结构液-固耦合共振响应分析	129
6.1	贮液结构内液体微幅和大幅晃动的动力分析	129
6.1.1	微幅和大幅晃动的界限	129
6.1.2	液体微幅晃动时的动力响应理论解	130

6.1.3 液体大幅晃动时的动力响应数值解法	133
6.2 液体微幅晃动时的共振响应	139
6.2.1 有限元分析模型	139
6.2.2 微幅晃动下液-固耦合共振响应	142
6.3 液体大幅晃动时的共振响应及非线性现象	145
6.3.1 液体大幅晃动的有限元模型	145
6.3.2 液体大幅晃动时非线性动力响应分析	151
6.3.3 大幅晃动下液-固耦合共振响应	154
参考文献	157
第 7 章 微幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应	159
7.1 混凝土的本构关系	159
7.2 考虑混凝土线性弹性时隔震矩形贮液结构的地震动响应	160
7.2.1 分析模型	160
7.2.2 相同液位高度时隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	163
7.2.3 不同液位高度时隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	166
7.3 考虑混凝土非线性弹性时隔震矩形贮液结构的地震动响应	170
7.3.1 混凝土非线性弹性本构关系	170
7.3.2 考虑混凝土非线性弹性和相同液位高度时隔震混凝土矩形贮液结构的 地震动响应	171
7.3.3 考虑混凝土非线性弹性和不同液位高度时隔震混凝土矩形贮液结构的 地震动响应	174
7.4 考虑混凝土线性弹性与非线性弹性时隔震矩形贮液结构的地震动响应 对比	177
7.4.1 天津波作用下的隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	177
7.4.2 兰州波作用下的隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	180
7.4.3 在 El-Centro 波作用下的隔震混凝土矩形贮液结构的地震动响应	182
参考文献	184
第 8 章 大幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震动响应	185
8.1 大幅晃动时隔震矩形贮液结构动力响应分析	185
8.1.1 隔震混凝土矩形贮液结构有限元模型的建立	185
8.1.2 矩形隔震混凝土贮液结构模态分析	186
8.1.3 大幅晃动时隔震钢筋混凝土贮液结构动力响应	188
8.2 考虑混凝土非线性材料特性时隔震矩形贮液结构地震动响应	194
8.3 考虑混凝土非线性和线性时矩形贮液结构地震动响应对比	201

参考文献	206
第 9 章 带有隔板的混凝土矩形贮液结构的动力响应	207
9.1 无隔板混凝土矩形贮液结构的动力响应	207
9.1.1 动力响应分析有限元模型的建立	207
9.1.2 静力分析	209
9.1.3 动力分析	211
9.2 有隔板无隔震混凝土矩形贮液结构的动力响应	213
9.2.1 无隔震混凝土矩形贮液结构的动力响应	213
9.2.2 无隔震时计算结果对比	221
9.3 有隔板隔震混凝土矩形贮液结构的动力响应	225
9.3.1 隔震混凝土矩形贮液结构的动力响应	226
9.3.2 有隔震时计算结果的对比	232
参考文献	234

第1章 绪 论

1.1 贮液结构的发展

随着国民经济的飞速发展,人们对贮液结构的尺寸、形式及功能要求越来越高。空间尺寸的大型化、形式的多样化及功能的多元化对工程技术人员在贮液结构的设计和施工方面提出了更高的要求。贮液结构可以采用钢、混凝土或者砖石结构。钢结构的优点是重量轻、构造简单、施工方便、抗渗漏性能好,但由于耗钢量大、防腐性能差且不宜埋设于地下,使用上受到了一定的限制。砖石结构可节约木材和钢材,施工方法简单,适用于中、小型贮液结构,20世纪50~60年代曾得到广泛的应用,但由于其存在强度较低、抗渗性能差、易开裂等缺点,现已很少采用。混凝土贮液结构便于就地取材、节约钢材,防腐性能、抗渗性能及耐久性能均较好,维修费用较低,同时,结构的整体性好,适用于在地震区建设,因此,在70年代之后被广泛用于各种形式的贮液结构中。

根据平面形状,现浇整体式贮液结构可分为圆形和矩形,圆形贮液结构在水压、土压和温度等因素作用下,壁板在环向处于均匀受力状态,在竖向处于受弯状态,受力比较均匀明确。虽然在地震作用下由液动压力所引起的环向拉力呈明显的正弦分布,但由于地震作用的随机性,可以认为最大环向拉力出现在任意高度方向的截面。而矩形贮液结构的壁板则为以受弯为主的拉弯或压弯构件,因此,在同等容量下,其壁板的厚度常比圆形贮液结构大。由于矩形贮液结构对场地的适应性较强,便于节约用地和减少场地的土方开挖量,便于工艺设备的布置和操作,并易于分隔,从而形成多格矩形贮液结构,因此,本书仅介绍现浇整体式的混凝土矩形贮液结构。

对于混凝土矩形贮液结构,在结构设计中,除了考虑静液压力对结构的作用外,还必须考虑地震时液体所产生的晃动和冲击效应。对于工程设计者而言,在设计中往往更希望详细了解在不同影响因素下结构的静力和动力特性,以期达到科学可靠的设计,满足工程应用的需要。贮液结构的抗震研究经过半个多世纪的努力,有些研究成果已经比较成熟,有的问题正处于深入研究之中。由于混凝土材料的本构关系较为复杂,在地震作用下性能的研究尚不是十分透彻,因此混凝土贮液结构的抗震研究处于相对滞后的状态,还需投入更多的关注。当前针对混凝土矩形贮液结构的工程设计主要是静力分析,按弹性板理论计算结构的内力。由于

贮液结构必须防止渗漏,故根据受力形式的不同(轴心和偏心受拉或受弯、受压),分别按照抗裂度要求或裂缝宽度要求验算结构的配筋。按照抗震规范规定的需要进行抗震验算的贮液结构,虽然在计算中考虑了惯性力和动水压力的影响,但实际上是在静力计算的基础上添加经验系数来表示结构的动力特性,这显然具有近似性。可以看出,上述计算中最大缺陷是没有考虑多因素的耦合影响。对于混凝土矩形贮液结构,液-固耦合问题主要是液体和结构的相互作用问题,一般简称为FSI(fluid-structure interaction)。混凝土矩形贮液结构的液-固耦合振动问题自提出距今已有80余年,直到近40年才引起人们的兴趣和重视。

目前,随着世界上海洋资源的开发和利用,我国沿海大陆架的油气含量前景令人鼓舞,各种钻采平台、海底输油管道以及其他海洋结构物,特别是海上工厂都在不断兴建。与此同时,伴随着我国城市化的推进和已有大中城市市政建设更新换代步伐加快,以及给水排水工艺和设备的不断发展,大批混凝土矩形贮液结构需要新建、改建或扩建。海洋资源的开发利用、城市给排水工艺和设备的发展,必然会导致大量的液-固耦合振动问题迫切需要探索 and 解决。因此,研究液-固耦合振动问题有着重要的现实意义。随着现代工业的发展,混凝土矩形贮液结构在平面尺寸上越来越向大型化发展,同时其功能越来越多样化。储存石油和化学溶液的结构一旦开裂渗漏,不但会影响企业的正常生产,而且往往会产生很大的次生灾害,甚至引发严重的环境灾害,如污染地下水源、破坏土壤结构、引发生态灾害等。因此,如何提高混凝土矩形贮液结构设计和施工的合理性和可靠性,已经成为结构计算需要考虑的重要因素。在地震区,贮液结构的抗震设计必然要考虑液体与结构的相互作用。由于当前规范和各种计算手册关于混凝土矩形贮液结构抗震计算的简化方法已不能够满足当前日益发展的工程设计需要,故迫切需要研究混凝土矩形贮液结构液-固耦合动力学特性。

1.2 贮液结构的分类及用途

贮液结构是工程建设中应用极为广泛的一种构筑物,与人们日常生产和生活息息相关,广泛应用于生命线工程、能源与化工领域等。根据储存液体的不同,可分为贮水、贮油、贮化学品等贮液结构,如水塔、水箱、储油罐、化学储液罐、消化池、降温池、冷凝器等,其结构形式也多种多样;根据埋置方式不同,可分为地上式、地下式及半地下式等;根据结构材料,贮液结构分为钢制贮液结构、砖制贮液结构和混凝土制贮液结构;根据形状,可分为圆形贮液结构、矩形贮液结构和其他形式的贮液结构。

混凝土贮液结构有很多用途。例如,用在给水处理、自来水厂、污水处理厂、消防工程等大型积储水工程中的贮液结构,用在储存易燃、易爆、有毒、有刺激性

且挥发液体的石油化工企业中的贮液结构等。从其被应用的特点可看出,贮液结构多应用于大型工业企业,服务于整个国家和区域的生命线工程。

1.3 贮液结构的破坏形式和影响因素

贮液结构属于构筑物,其具体的使用形式主要有给水储水池、污水处理池、水塔、储液罐、石油化工企业的储油罐及核电厂的反应堆降温池等。此类结构的主要功能就是储存液体(包括水、油品和化学制剂等)。由此可见,贮液结构不仅结构本身比较特殊,而且有可能所储存的液体其本身有非常高的危险性,如易燃、易爆、易导致环境污染及强腐蚀性的液体。同时,由于贮液结构往往与人们的生产生活关联密切,因此其主要放置在人员密集、设施完善的城市地区。一旦这类结构发生破坏(如遭遇地震、恐怖袭击或偶然的撞击等),往往会带来高度的危险及更为严重的次生灾害(如结构破坏后往往会引发火灾、环境污染、爆炸等),对周边的居民及周围环境都会带来极大的危害。随着城市地震灾害对居民的生活环境产生越来越严重的影响,对贮液结构震害的控制显得尤为迫切。例如,2011 年 3 月日本发生的震级为里氏 9.1 级的地震,直接导致日本福岛核电站的冷却结构失去作用,进而引发核反应堆无法降温冷却,产生了极为严重的核泄漏事故,对生活在周边的居民和周围环境造成了极为严重的危害。表 1.1 列出了 60 多年来部分贮液结构因地震破坏的实例^[1]。

表 1.1 贮液结构地震破坏实例

时间	发生地点	里氏震级	灾情描述
1952 年 7 月	加利福尼亚 (美国)	7.7	储油罐罐底支座破坏,引发爆炸和火灾
1964 年 3 月	阿拉斯加 (美国)	9.2	储油罐罐身及罐壁破坏,引发火灾
1964 年 6 月	新潟(日本)	7.5	储油罐壁身破坏,引发爆炸及火灾
1965 年 3 月	智利	7.4	储油罐基础破坏
1971 年 2 月	圣费尔南多 (美国)	6.6	储油罐罐底支座破坏,引发爆炸和火灾
1975 年 2 月	海城 (中国)	7.3	储氨罐罐底支座破坏
1976 年 7 月	唐山 (中国)	7.8	储油罐壁身破坏,引发火灾泄漏物环境污染
1978 年 6 月	宫城 (日本)	7.7	储油罐壁身破坏,引发火灾泄漏物环境污染
1980 年 1 月	旧金山 (美国)	5.8	储油罐壁身破坏
1985 年 3 月	瓦尔帕莱索 (智利)	7.8	储油罐壁身破坏
1989 年 10 月	洛马普里埃塔 (美国)	6.9	软土场地,储油罐壁身破坏,内存油体泄漏
1990 年 6 月	伊朗 ^[2]	7.4	钢筋混凝土水塔壁板破坏,结构倒塌
1991 年 4 月	哥斯达黎加	7.6	储油罐壁身破坏,引发火灾
1992 年 6 月	兰德斯 (美国)	7.3	储油罐壁身破坏
1994 年 1 月	加州北岭 (美国)	6.7	储油罐壁身破坏
1995 年 1 月	阪神 (日本) ^[3]	7.2	储油罐壁身破坏,引发火灾

续表

时间	发生地点	里氏震级	灾情描述
1999 年 8 月	土耳其 ^[4]	7.6	储油罐壁身破坏, 引发火灾
1999 年 9 月	集集 (中国台湾)	7.3	储油罐壁身破坏, 引发爆炸、火灾
2001 年 1 月	库奇 (印度)	7.7	水塔壁板破坏, 结构倒塌
2003 年 12 月	伊朗	6.6	储油罐壁身破坏, 引起泄漏
2004 年 12 月	印尼	9.1	储水罐罐底支座破坏
2008 年 5 月	汶川 (中国)	8.0	储油罐壁身破坏, 底部支座破坏, 引起泄漏
2010 年 1 月	海地	7.0	储油罐壁身破坏, 引发火灾
2011 年 3 月	日本东海岸	9.1	储油罐泄漏而引发火灾、核泄漏

由表 1.1 可知, 在遭遇地震时, 贮液结构的破坏主要发生在底板、壁板、隔板等处。尤其是当贮液结构所处的地基比较软弱时, 地震会使贮液结构遭到非常严重的损失, 继而发生底板处的破坏。近年来, 伴随着城市现代化的快速发展, 特别是工矿企业及石油化工企业的迅猛发展, 大型贮液结构的建设及使用日益增多。因此, 鉴于贮液结构的广泛应用及对工矿企业发展的重要性以及此类结构一旦破坏所造成的重大次生灾害, 近年来, 随着我国工业的迅速崛起, 对贮液结构的需求量日益加大, 贮液结构的抗震性能不仅直接关系到本身的安全, 而且严重威胁震后周围环境的安全。

基于贮液结构震害统计资料, 大量学者对贮液结构的震害形式和抗震经验进行了总结, 对震害原因进行了分析, 并得到一些结论, 如贮液结构翘离产生的应力过大常常是造成结构破坏的重要原因, 液体晃动对结构振动影响很大, 液-固耦合体系水平振动比竖向振动更易导致结构失稳等。此外, 贮液结构引发次生灾害问题也不容忽视, 如日本国家火灾与灾害研究所 2006~2010 年对地震作用下贮液结构破坏引发火灾问题进行了研究和分类, 包括诊断贮液结构底部腐蚀状况、研究地震过程中浮顶振动规律、评估贮液结构振动时损伤状况等。总体而言, 贮液结构震害形式和原因主要包括以下几个方面^[1]。

(1) 贮液结构壁板破坏。主要表现为结构壁底部出现“象足”效应破坏, 其原因有多种, 包括轴向失稳, 或者是环向拉应力与轴向压应力同时作用引起强度破坏。

(2) 贮液结构顶板损坏。贮液结构顶部分为浮放式和锚固式两种形式, 顶部结构破坏主要指顶部与结构壁连接处开裂、产生屈曲等, 其主要由对流压力冲击和贮液晃动产生负压所造成, 另外, 浮放顶部构件破坏主要是由液面晃动过大造成的。

(3) 贮液结构底板、锚固件和局部焊缝的破坏。主要表现为产生贮液泄漏, 其是由贮液结构的翘离和基础不均匀沉陷造成的。

(4) 贮液结构壁板上接头管及附件破坏。主要表现为产生贮液泄漏, 其主要是由地基沉陷过大造成的。

(5) 贮液结构整体倾斜下陷。主要表现为贮液结构倾斜, 整体倾覆, 甚至出现罐身局部破坏, 液体外流, 这些一般是由地基沉陷和液化等造成。

综上所述, 贮液结构是较为重要的构筑物, 其地震破坏危害性较大, 破坏形式较多, 而且由于其与普通结构不同, 即存在着液-固耦合作用, 较为复杂, 其地震破坏原因也较多, 对应分析的理论和方法各有不同, 因此对贮液结构的地震反应进行研究, 为工程应用提供理论依据。目前数值仿真是贮液结构分析的主要手段, 对于解决如此复杂的问题, 建立有效的数值分析模型, 确定合理的数值分析方法, 采用高效的数值分析技术, 既有迫切的需要, 又有一定的困难。为了了解和解决贮液结构震害问题, 目前有许多相关课题值得去深入研究, 如贮液结构数值模拟方法、贮液结构地震反应规律、贮液结构工程抗震应用、贮液结构非线性分析方法、贮液结构抗震优化设计等。

1.4 贮液结构的研究问题和方法

贮液结构是生命线工程的重要组成部分, 在未来的城市规划使用中越来越广泛, 因此贮液结构震害预防工作也成为很多国家防灾减灾计划中的重中之重。本书主要针对传统的贮液结构和隔震的贮液结构两大类进行地震作用下动力响应的分析和研究, 主要采用理论分析和数值仿真的方法进行探讨和分析。本书以工程应用为目的, 研究主要包括混凝土矩形贮液结构的液-固耦合振动、混凝土矩形贮液结构的三维液-固耦合动力响应分析、非隔震混凝土矩形贮液结构的地震响应、隔震混凝土矩形贮液结构的地震响应、隔震混凝土矩形贮液结构液-固耦合共振响应分析、微幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震响应、大幅晃动下隔震混凝土矩形贮液结构的液-固耦合地震响应和隔板的混凝土矩形贮液结构的动力响应等几个方面的问题。主要集中为液-固耦合及隔震。研究考虑这两个问题时贮液结构的动力响应, 是一个复杂而又困难的问题。因此, 要考虑清楚这其中的每个细节。

1.4.1 贮液结构液-固耦合振动

无论隔震还是非隔震的贮液结构, 对于贮液结构而言液-固耦合总是存在的, 而动力作用下对于贮液结构的多项耦合作用依然值得关注和研究。目前虽然国内外学者对贮液结构已经进行了广泛的研究, 同时也取得了一定的研究成果, 但是依然存在诸多问题: ① 国内外研究人员在对贮液结构液体的晃动问题上主要集中在对其二维性的研究, 对三维性的研究甚少, 但实际应用中, 大多数贮液结构都表现出极为复杂的三维性, 仅研究其二维性难以与实际相符; ② 用数值模拟法对液体晃动的三维问题进行模拟计算, 所得结果与理论相差甚远, 并且此法仅能对一些简单

刚性贮液结构进行计算分析,故亟须一种能研究任何形状容器(包括考虑液体与固体之间耦合的弹性结构)内液体晃动的三维问题的方法;③大多学者只研究了贮液结构内液体在外激励荷载下的晃动规律,但在贮液结构液晃控制问题上的研究很少^[2-9]。

贮液结构在振动作用下的受力是复杂的液-固耦合作用。液体存储在固体结构内,液体和固体在交界处为液-固耦合边界,二者在此边界处运动耦合,即壁板的振动运动会引发流体相应的运动,而流体的运动又会产生作用于壁板上的液体动压力,由此形成了贮液结构壁板与液体受力及运动的耦合反应。这属于两相介质的相互作用问题,其重要特征为:在壁板运动作用下,流体会发生相应的运动,流体运动产生的液体动压力反过来作用在壁板上导致壁板运动或变形的加剧,二者相互影响相互激励,从而使二者的变形及荷载分布及大小随时发生变化。

因此,对液-固耦合作用动态响应的研究,主要有以下几种情况。

(1) 由贮液结构本身的刚体运动所引发的其液体表面的自由运动。

(2) 储存液体对其储存结构的质量附加效应。

(3) 由结构内存液体的晃动对贮液结构所产生的动压力;在实际应用中无论何种形状的贮液结构,均属于力学性能极为复杂的空间体系,故要分析其在地震荷载下的液-固耦合问题难度极大。

到目前为止,对于贮液结构的流-固耦合地震动力响应可分为两类方法进行研究和探讨。

(1) 弱耦合法。弱耦合法指通过设定一些比较合理的假定条件,也就是说对流-固耦合系统的数学模型进行简化分析。例如,系统内的流体可以通过附加质量来代替,用附加阻尼器来分析液体与固体之间的相互作用,或把液体看成一种理想化的水体等。对于这种用弱耦合描述的流-固耦合作用,由于本身的因素使计算量小且易被理解,而且其计算的精度能够容易满足工程的需要,因此受到了工程界的广泛应用。

(2) 强耦合法。由上述的弱耦合法可知,弱耦合法是一种理想化的数学力学模型,因此,在不同的外部荷载作用下,对那些要求精度非常高的工程方面会无法达到预期的精度要求,给工程设计方面造成一些危害。面对上述出现的问题,一些学者经过研究又提出了一种强耦合法。所述的强耦合法就是通过微积分方程分别建立液体和贮液结构运动的数学表达式,然后对所建立的数学表达式进行求解,从而从理论上得到液-固耦合的解。通过强耦合法的原理可以看到,强耦合法比弱耦合法更能真实地反映出液体与固体之间的耦合效应。

对于液-固耦合的问题的研究可分为线性液-固耦合和非线性液-固耦合两种类型,对于简单的线性液-固耦合系统,即可认为是线性弹性体和理想的液体组成的系统,在研究的过程中,一些学者采用半解析方法^[10,11]对线性液-固耦合进行了分