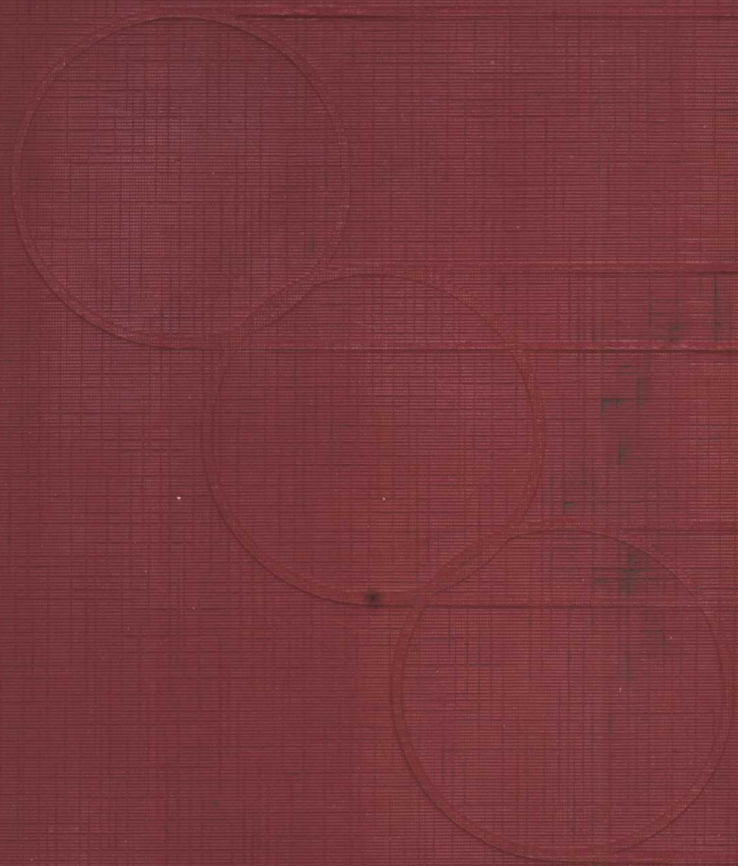


立式儲罐抗震



地震出版社

立式儲罐抗震

項忠權 李清林 主編

地震出版社

内 容 提 要

本文集汇编了中国石油化工总公司抗震办公室为编制储液罐抗震设计规范 and 抗震鉴定标准, 委托天津大学、水利电力科学研究院、上海工业大学等有关单位进行的大量模型试验和理论分析的研究成果。内容包括 5 米见方振动台上的储液罐模型地震模拟试验、粘性流动力试验及储罐底部贴角焊缝强度试验; 长周期反应谱研究、储液罐动液压力和晃动波高的分析、浮顶及贴角焊缝的抗震强度分析以及地基基础对罐体地震反应的影响的研究。此外还提出了计算翘离应力的近似法。

本书可供从事储液罐和水池设计、制造、施工及科研的工程技术人员、地震工程研究人员及有关专业的大专院校师生参考。

立式储罐抗震

项忠权 李清林 主编

责任编辑: 何寿欢

*

地震出版社 出版

北京民族学院南路 9 号

国防大学第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13.25 印张 339 千字

1990 年 7 月第一版 1990 年 7 月第一次印刷

印数 001—700

ISBN 7-5028-0441-2/T.14

(829) 定价: 10.00 元

《立式储罐抗震》编委会

主编	项忠权	李清林
编委	陈厚群	何福保
	孙家孔	吴文华
	王彪	韩精忠

序 言

钢制立式圆筒形储液罐在许多行业中广泛用以储存原油、油品和石油化工液体产品。储罐容积由几十、几百立方米到几万乃至十几万立方米。5000 立方米以下的小型储罐，多为固定顶，有的装有内浮顶以减少储液的挥发；1 万立方米以上的大型储罐则多为浮顶式。在石油化工企业中储罐都是储存易燃易爆的液体物料，所以储罐的安全是十分重要的。一旦储罐发生泄漏、着火和爆炸事故，特别是大型储罐，其后果是非常严重的。

近几十年来的几次大地震中，由于储罐破坏而引发的油品外溢、燃烧或爆炸等次生灾害多有发生，有的甚至造成整个工厂的毁灭。所以，储液罐的抗震是石化工业的一个重要研究课题。

使用经验以及对罐体在静液压力作用下的强度分析表明，按照现有设计标准建造的储罐在正常条件下是安全的。但是，在多次地震中储罐遭受到各种破坏的事实，说明现有储罐在地震作用下存在薄弱环节，确有可能发生破坏并导致严重的次生灾害。

由于对大型储罐的抗震缺乏系统的理论研究，也缺乏大型储罐强地震反应的详细资料，因此不能对储罐的抗震性能作出科学的评价，也难以提出有效的措施来提高储罐的抗震性能。为此，中国石油化工总公司抗震办公室责成由上海高桥石油化工公司负责，委托天津大学、水利电力科学研究院和上海工业大学等单位对钢制立式圆筒形储油罐的抗震性能进行了一系列试验和理论研究，并取得了丰硕的成果。

我们选定了我国目前石化系统中容积最大的 5 万立方米储油罐及高径比较大的 3000 立方米储油罐为研究原型，在振动台上进行了模型罐的地震模拟试验，模型的几何比分别为 1:16 和 1:6。为了尽量满足模型相似率的各项要求，对模型罐进行了精心设计和精心制作安装，安装后的非圆度误差小于 0.005。模型罐安装在按照实际工程相似尺寸的内填砂土的钢筋混凝土环墙基础上。地震模拟试验是在 5m 宽 5m 长、三向六自由度振动台上进行的，采用了三种输入波形，即含长周期分量的人工地震波、El Centro 地震波和共振三波，它们代表了不同的设计地震波。利用具备一百多个通道的数据采集和处理系统，取得了大量的试验数据，包括罐壁加速度、罐壁和浮顶所受的动液压力、液面晃动波高、罐壁与罐底应力和罐底翘离等。

根据试验结果和储罐震害的资料，建议一个经验公式，用以计算储罐翘离情况下的压应力。计算结果与储罐震害现象相比是符合的，而且比其他的翘离计算模型更为简单和可靠。

为了研究液体的粘性，对地震时储液晃动波高和罐壁动液压力的影响，在小型振动台上采用有机玻璃模型罐进行了油、水储液的对比试验，证明了粘性液体的晃动波高和动液压力小于理想流体的情况。为了研究罐壁与底板间贴角焊缝的抗震强度，对各种容积的储油罐，按实际材料和尺寸制作的试件进行了静力试验和有限元分析，并提出了简化的分析方法。通过对储罐浮顶的静力校核和抗震分析了解了浮顶的地震破坏机理。用有限元法分析了考虑液体、罐、基础和土壤间共同作用情况下的储罐地震反应，得出了一些有价值的结论。

文集汇编了本课题的主要研究成果。负责本课题研究工作的项忠权、陈厚群和何福保同志都是我国结构抗震领域的知名专家，其他参加研究工作的同志也都是各个专业的专家，所取得的研究成果不仅具有独创性，而且对实际工程有重要的指导作用。由于储罐抗震是一个十分复杂的问题，尚有许多问题需要进一步研究，文中提出的一些见解难免有不妥之处，希望读者指正。相信本文集的出版将进一步推动储罐抗震的研究，为我国抗震防灾作出贡献。

中国石油化工总公司抗震办公室

一九九〇年三月

Preface

Steel vertical cylindrical liquid storage tanks are widely used in many national economic areas for storing raw oil, oil products and petrochemical products. The storage capacity varies from dozens of cubic meters to hundreds of thousands cubic meters. Most small storage tanks with capacity less than 5000m^3 have fixed roof, and most large storage tanks with capacity more than 10000m^3 have floating roof to reduce the volatilization of the stored liquid. As all storage tanks in petrochemical industry are used to store the combustible and explosive liquid, the safety of tanks is of extremely importance. If incident of leakage, inflammation or explosion happened to the storage tanks, especially to the large capacity tanks, the fire is very hard to be extinguished and the damage is serious. During some major strong earthquakes in recent decades, a few of storage tanks were damaged, and it led frequently to secondary disasters as spilling of oil, inflammation or explosion, which even destroyed a factory. So research on earthquake resistance of storage tanks is an important subject in petrochemical industry.

Both the operating experience and the structural analysis of tanks under the hydrostatic pressure show that the storage tanks built on the basis of current code are safe in resisting operating loads. However, such tanks are actually vulnerable to earthquakes and might cause serious secondary disasters.

Due to lack of systematic theoretical research and detailed data on response of large tanks to strong earthquakes, the seismic behavior of the storage tanks can not be evaluated scientifically. Hence, it is difficult to offer efficient measures for improving earthquake resistant performance of the tanks, and also can not provide scientific basis to improve aseismic design of tanks. So an extensive experimental and theoretical research program on earthquake behavior of steel vertical cylindrical storage tanks was carried out by Gaoqiao Petrochemical Corporation, Tianjin University, Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research and Shanghai Industry University. This project was sponsored and supported by Earthquake Resistance Office of SINOPEC. Now plentiful results have been obtained.

In the experimental investigation two model tanks installed on the shaking table were subjected to simulated earthquake motions, one is a 1:16 scale model of a 50000m^3 tank which is the largest existing tank in SINOPEC, the other is a 1:6 scale model of a 3000m^3 tank which has a quite large height to radius ratio. In order to satisfy the requirements of similitude theory as far as possible, the model tanks were designed and carefully made with an out-of-round distortion less than 0.005. The model tanks were installed on the concrete ring wall filled with sandy soil inside to simulate the actual situation. The tests were performed on a $5\text{m} \times 5\text{m}$ triaxial shaking table with six degrees of freedom. Three pat-

terns of motion used as input signal to shaking table represent different kinds of design earthquake motions: artificial accelerogram with sufficient long-period components, up to 10 seconds, El Centro accelerogram and three sine waves with sloshing resonance frequencies. By using PCM data acquisition system up to 100 channels and a powerful data processing software, a large amount of test data including wall accelerations, hydrodynamic pressures acting on shell or floating roof, sloshing wave heights, stresses of shell and bottom plate, and uplift displacements of tank have been obtained and analysed.

Based on the results of experiments and the observed data of tank response to earthquakes an empirical method was recommended to calculate the compression stresses in the uplifted tank wall under earthquakes. The correlation between the predicted results by this method and the performance of tanks during earthquakes is good enough. Comparing with previous uplift models this method is rather simple and reliable.

In order to study the effect of viscosity of liquid on the sloshing wave height and hydrodynamic pressure on the tank wall, the comparative dynamic experiments using oil or water respectively inside polymethylmethacrylate model tanks were performed on a small shaking table. The results of experiments have proved that both the height of sloshing wave and the hydrodynamic pressure of viscous liquid are smaller than those of the ideal liquid. For the study of aseismic strength of the fillet welds between shell and bottom plate, both the static experiment of full scale samples for different capacity tanks with the same material as in prototype and an analysis of welding stresses by finite element method were conducted, and then a simplified analytical procedure was suggested. The damage mechanism of floating roof under earthquakes was revealed through static and dynamic analyses. The seismic response of tanks in consideration of the interaction among liquid, tank, foundation and soil, was analysed using finite element method, some valuable conclusions were drawn.

The papers collected in this volume contain major achievements of abovementioned research program led by Xiang Zhongquan, Chen Houqun and He Fubao, well known experts on earthquake engineering in China. Owing to the complication of earthquake resistance of tanks, many problems remain to be further studied, therefore some views in the collected papers of this volume may still be discussed, we hope readers will point out and correct them. We believe that the publication of this volume will further promote the researches on earthquake resistance of storage tank and make contribution to earthquake resistance and disaster prevention for our country.

Earthquake Resistance Office of SINOPEC
Marth 1990

目 录

立式储油罐的地震作用及抗震分析	项忠权 孙家孔 周建明(1)
外浮顶储液罐模型抗震试验研究	
..... 陈厚群 王森元 胡 晓 朱栗武(22)	
粘性液体储罐模型振动试验	李长昇(67)
油罐的动液压力和地震荷载	沈国光 李德筠 林 欣(75)
关于粘性波浪	沈国光 李德筠(82)
储液罐液固耦合水弹性分析	张义同(88)
储油罐抗震设计反应谱研究	王亚勇 王 理 刘小弟(94)
储液罐梁式基本周期的近似计算	项忠权 周建明(107)
储罐液面的安全超高	李德筠 沈国光 项忠权(113)
弹性地基上的储液罐地震响应分析	何福保 邵仁兴(121)
考虑液固耦合的液体泛函及有限元分析	邵仁兴 楼建雄(131)
储液罐翘离影响的近似计算	周建明 项忠权(140)
立式储油罐罐壁与罐底连接焊缝的有限元分析及强度试验研究	
..... 任兴华 杜光兴 潘延东(162)	
立式储罐罐壁与罐底连接角焊缝的计算方法	
..... 任兴华 杜光兴 潘延东(168)	
浮顶静力校核准则及工程应用	孟昭寅 张泽盛 王日新(176)
地震作用下储罐浮顶强度及稳定性	张泽盛 孟昭寅 王日新(189)

Contents

Earthquake Action and Aseismic Analysis of Vertical Steel Oil Storage Tanks	Xiang Zhongquan Sun Jiakong Zhou Jianming (1)
Dynamic Experimental Research of Large-capacity Oil Storage Tanks with Floating Roof	Chen Hougun Wang Senyuan Hu Xiao Zhu Liwu (22)
Shaking Table Tests of Viscous Liquid Storage Tanks	Li Changsheng (67)
Dynamic Liquid Pressures and Earthquake Loads on Fluid Containers	Shen Guoguang Li Dejun Lin Xin (75)
On the Surface Waves of Viscous Fluid	Shen Guoguang Li Dejun (82)
Hydroelastic Analysis of Fluid-Structure Interaction for Storage Tanks under Earthquake	Zhang Yitong (88)
Seismic Design Response Spectra for Broad Cylindrical Tanks	Wang Yayong Wang Li Liu Xiaodi (94)
Approximate Calculation of Fundamental Beam Period of Oil Storage Tanks	Xiang Zhongquan Zhou Jianming (107)
Free Board of Liquid Storage Tanks under Earthquake	Li Dejun Shen Guoguang Xiang Zhongquan (113)
Earthquake Response of Liquid storage Tanks on Elastic Foundation	He Fubao Shao Rexing (121)
Tank-Stored Liquid Interaction Using Variation Principles and Finite Element Method	Shao Rexing Lou Jianxiong (131)
Approximate Evaluation of the Effect of Uplift	Zhou Jianming Xiang Zhongquan (140)
Analysis by the Finite Element Method and Experimental Evaluation of Fillet Welded Joint between Wall and Bottom for Vertical Storage Tanks	

.....	Ren Xinghua	Du Guangxing	Pan Yandong	(162)
The Calculation of Fillet Welded Joint between Wall and Bottom for Vertical				
Storage Tanks		Ren Xinghua	Du Guangxing	Pan Yandong (168)
Criterion of Static Check in the Design of Floating Roofs and Its Engineering				
Application		Meng Zhaoyin	Zhang Zesheng	Wang Rixin (176)
Stresses and Stability of Floating Roofs under Earthquake Action				
.....	Zhang Zesheng	Meng Zhaoyin	Wang Rixin	(189)

立式储油罐的地震作用及抗震分析^①

项忠权

(天津大学)

孙家孔

(石化总公司北京设计院)

周建明

(上海高桥石化公司)

一、引言

立式钢制圆柱型储油罐在石油化工企业以及其他企业中应用广泛,量大面广,但是它的抗震问题迄今没有很好地解决。近二三十年来,很多次强震中都发现储油罐受到严重破坏,有的还伴随着发生火灾及环境污染等次生灾害,损失极为严重,因此储油罐的抗震研究国内外一直很重视⁽¹⁾。为了编制《立式钢制储油罐抗震鉴定标准》,作者组织了一系列试验及理论研究。本文介绍储油罐的地震作用、地震反应及许用应力部分,着重于工程应用。

二、圆柱形储罐的结构特点

众所周知,立式钢制圆柱形储油罐对于承受静液压力是非常有效的,能充分发挥金属的抗拉能力,并有很好的延性,因而节省材料,在工程上得到广泛的应用。由于静液压力是随液深增加,所以储油罐往往设计成变壁厚的圆柱壳,对于一般的钢储油罐,罐半径 R 与最厚的底圈壁厚 t 之比即 R/t 往往超过 1000。设计时罐壁只考虑环向拉应力作用,不考虑边缘效应引起的弯曲应力。甚至连罐壁底部也不考虑。石油部管道局对 5 万立方米储油罐的测量结果表明,满罐时罐壁及底部环形板连接处的虚拟弯曲应力已超过 500Mpa (实际上进入了局部屈服阶段),形成了塑性铰,这种结构显得既柔且强度不足。但是工程应用表明按这种方法设计的罐在静液压作用下并没有出现问题,是符合安定性分析的。

由于储油罐抗震性能不好且抗震措施未能完善解决,所以在近年来国内外地震中,储油罐的震害屡见不鲜,更为严重的是储油罐的损坏有时还伴随着火灾、爆炸和环境污染等次生灾害。1964 年 6 月 16 日日本新潟地震中储油罐破坏后发生大火和爆炸,火灾延续 15 天,烧毁 84 座储油罐;1964 年 3 月 27 日美国阿拉斯加地震中四个罐区中有三个着火,有的罐还引起爆炸。在其后的几次大地震中,储油罐及水罐、酒罐都受到了各种形式的损坏。1978 年 6 月 12 日日本的宫城地震及 1976 年 7 月 28 日唐山地震中,储油罐遭受破坏,有的引起了环境污染。归纳起来,储油罐的地震灾害有以下几个方面:

(1) 罐壁的损坏 主要表现为罐壁底部的“象足式鼓曲”,罐壁变形过大或钻石型失稳;有的整个罐壁严重外鼓。目前对象足式鼓曲的产生原因认识不一,有的认为是轴向失

^① 水利科学研究院陈厚群高级工程师及上海工业大学何福保教授参加了讨论。

稳的一种形式；有的认为是由环向拉应力与轴向压力同时作用引起的强度破坏。罐壁整体外鼓显然是由环向拉应力引起的。罐壁变形过大不一定引起储液泄漏，但应力过大会撕裂罐壁和底部的连接。罐壁失稳鼓曲过大会使储液溢出，因此现有的规范都着重校核罐壁的失稳，对储罐的环向应力也应给以重视⁽²⁾。

(2) 罐顶的损坏 罐顶大致可分为浮顶和固定顶两类。固定顶的破坏主要有罐顶与罐壁连接处开裂；固定顶屈曲等。其原因主要是储液晃动引起的对流压力的冲击及储液晃动形成负压所造成。浮顶的破坏主要是浮顶上部构件损坏；浮舱和单盘的焊缝撕裂及浮顶卡住不能升降造成破坏。其原因是液面晃动过大所致。

(3) 罐底板、锚固件和罐底贴角焊缝的破坏 这些破坏往往引起储油大量外流。造成这些破坏的原因是由于储油罐的翘离和储罐基础的不均匀沉陷。

(4) 管接头及附件的破坏 这种破坏是由于储罐的翘离、移位和沉陷所引起，一般可采用构造措施加以防止，如管接头采用柔性连接方式。

(5) 地基液化 地基不均匀沉陷不仅可引起罐体破坏，也可能引起罐底板破坏。

储油罐的地震震害说明，尽管储油罐对于抵抗静油压力是有效的，但抗震能力还有薄弱之处。根据震害现象，我们着重对下列问题进行了试验与理论研究，取得了符合国内储罐实际情况的抗震数据，并综合这些成果及国外的资料编制了 SHJ26-90《常压立式储罐抗震鉴定标准》。

三、储罐的地震作用

地震对储罐的作用主要是储液的动液压力以及罐体自重的惯性力，后者的地震影响仅占 1%—5%，而动液压力在工程中又分为液面晃动（长周期位移型地震引起）产生的对流压力和罐液耦连振动（由短周期加速度型地震引起）产生的脉冲压力。60 年代以前动液压力计算中都假设罐壁为刚性，但由储油罐震害看出，根据刚性壁假定（动力系数 $\beta=1$ ）计算的动液压力比实际发生的要小，是不够安全的。目前国内外采用地震反应谱计算储罐的地震力，已考虑了罐壁的变形。理论上已经证明，计算液面晃动高度和对流压力时可不考虑罐壁变形的影响。在储油罐的实际震害及振动台试验中，因罐体制造的偏差会产生环向的壳体多波振动效应，但在理论计算中，理想的壳体地震时只能出现 $n=1$ 的梁式振动，不可能出现多波的壳体振动。在计算罐液耦连振动引起的脉冲压力时，可不考虑液面晃动（也即忽略重力波的影响）。由于这两种振动的周期相差甚大，如耦连振动的周期一般小于 0.3s，储液晃动的周期对于现有的储油罐系列为 3—12s，两种振动基本上没有耦连影响，在地震时不可能同时出现最大值。

目前在计算储油罐地震作用时，无论是动液压力或是罐体惯性力，都是假设储罐固定在基础上，作为一端固定的悬臂结构考虑，有的将储罐作为圆柱壳⁽³⁾，也有的简化成圆截面的梁⁽⁴⁾。按壳体储液耦连振动计算时，采用有限元法（将壳及液体都分为有限元）⁽⁵⁾或半解析半数值法（将壳作为有限元，液体按速度势的解析法）⁽⁶⁾；按悬臂梁及液体耦合振动计算时常采用解析法，解振动方程时一般用无水振型来代替有水振型，进行近似计算。

上述理论已逐步在各国的储罐抗震规范中应用，但在具体问题上还存在差异，主要表现在：

1. 对流压力与脉冲压力的叠加问题

目前存在三种做法:

(1) 美国 API650^[7] 储油罐规范及 AWWA^[8] 储水罐规范规定的办法, 将对流压力与脉冲压力叠加来设计储液罐。

(2) 日本 JIS B 8501 钢油罐规范^[9] 及其他日本储油罐抗震规范规定的办法, 认为加速度型地震引起脉冲压力, 而位移型地震引起对流压力, 两者不能叠加, 应该分别验算。

(3) 我国《工业设备抗震鉴定标准》^[10] 及水池^[11] 抗震规范的规定, 认为从现有地震记录来看地面运动的卓越周期为 0.1—1s, 在这种地震作用下由计算与试验结果都看出对流压力很小, 液面几乎不晃动, 其影响可以忽略, 所以只验算脉冲压力。

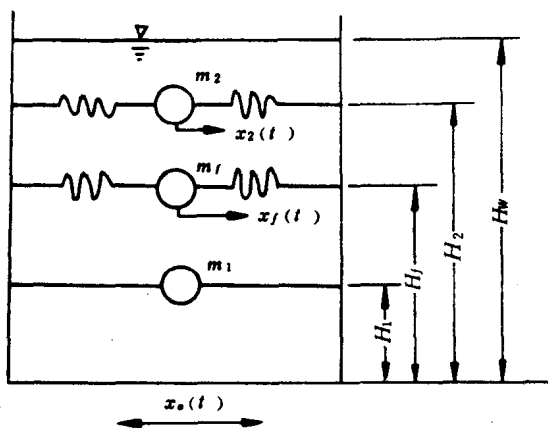


图1 弹性储罐简化模型图

m_1 ——储液参予地面运动的等价质量(刚性壁运动), H_1 为其高度; m_f ——储液参予壳壁相对变形的等价质量, H_f 为其高度; m_2 ——储液参予晃动的等价质量, H_2 为其高度; $x_0(t)$ ——地面位移; $x_f(t)$ ——壳壁弹性位移; $x_2(t)$ ——储液晃动位移

从地震中储罐震害可知, 尽管储罐罐震害大部分是罐壁损坏, 但仍有一部分罐发生罐顶损坏, 且明显有储液溢出。说明地震时有储液晃动, 由于晃动周期与结构周期相差一个数量级, 按反应谱计算时, 将两种压力的最大值同时叠加过于保守。比较合理的是: 求出两种压力分别作用下的储罐反应, 然后将反应按平方和开方进行组合。

2. 罐壁变形的影响

目前大家都认为计算脉冲压力时不能忽略变形的影响, 但是国内外规范中存在两种考虑方法。我国《工业设备抗震鉴定标准》中将储液罐视作剪切变形梁, 然后求解梁液耦合振动并简化处理, 得出脉冲压力。而美、日等国的规范采用修正的 Housner 方法, 即将 Housner 导出的刚性壁的脉冲压力乘以

反应谱的动力系数, 以近似代替考虑变形影响的脉冲压力。

后一种方法比较简单, 但压力分布不合适, 需要修正。Haroun 和 Housner^[12] 采用壳液耦合的数学模型并用半解析半数值的方法研究了储罐的地震反应。为便于工程应用, 他们还提出了一个简化模型, 将罐液系统视作三个自由度系统:

因此基底剪力 Q 和基底弯矩 M 为

$$\begin{aligned} Q(t) &= m_2 \ddot{x}_2(t) + m_f \ddot{x}_f(t) + m_1 \ddot{x}_0(t) \\ &= m_2 \ddot{x}_2(t) + m_f [\ddot{x}_f(t) + \ddot{x}_0(t)] + (m_1 - m_f) \ddot{x}_0(t) \\ M(t) &= m_2 H_2 \ddot{x}_2(t) + m_f H_f \ddot{x}_f(t) + m_1 H_1 \ddot{x}_0(t) \\ &= m_2 H_2 \ddot{x}_2(t) + m_f H_f [\ddot{x}_f(t) + \ddot{x}_0(t)] + (m_1 H_1 - m_f H_f) \ddot{x}_0(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\ddot{x}_0(t)$ 、 $\ddot{x}_f(t)$ 及 $\ddot{x}_2(t)$ 为相应的加速度。

按地震反应谱理论计算地震力时因为 $\ddot{x}_2(t)$ 、 $\ddot{x}_f(t) + \ddot{x}_0(t)$ 和 $\ddot{x}_0(t)$ 的最大值不可能同时发

生, 所以對於地震反應通常採用平方和開方的組合方法:

$$\begin{aligned} |Q|_{\max} &= g\sqrt{(m_2 + \alpha_2)^2 + (m_f \alpha_f)^2 + [(m_1 - m_f)k]^2} \\ |M|_{\max} &= g\sqrt{(m_2 H_2 \alpha_2)^2 + (m_f H_f \alpha_f)^2 + [(m_1 H_1 - m_f H_f)k]^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 α_2 為對應於儲液晃動的地震影響係數:

$$\alpha_2 = \frac{\ddot{x}_2(t)_{\max}}{g} = \beta_2 k$$

α_f 為對應於罐液耦連振動的地震影響係數:

$$\alpha_f = \frac{[\ddot{x}_f(t) + \ddot{x}_0(t)]_{\max}}{g} = \beta_f k$$

k 為地震係數:

$$k = \frac{\ddot{x}_0(t)_{\max}}{g}$$

β_2 及 β_f 為相應的動力係數。

利用式 (2), 計算了一個高儲罐及一個矮儲罐。高罐的尺寸為罐高 $H=21.96\text{m}$, 半徑 $R=7.32\text{m}$, 壁厚 2.54cm , 計算滿罐情況。按照 Haroun⁽¹²⁾ 的圖表查得晃動周期 T_2 為 4s ; 耦連振動周期 T_f 為 0.189s ; $m_2=5585\text{N} \cdot \text{S}^2/\text{cm}$; $H_2=18\text{m}$; $m_f=27251\text{N} \cdot \text{S}^2/\text{cm}$; $H_f=12.17\text{m}$; $m_1=33073\text{N} \cdot \text{S}^2/\text{cm}$; $H_1=9.71\text{m}$; 如果採用 1940El Centro 地震中南北分量作為加速度輸入, 則 $k=0.348$, 對應 T_2 且阻尼比為 0.5% 的 α_2 為 0.063 ; 對應 T_f 且阻尼比為 2% 的 α_f 為 0.856 。

因此由式 (2) 可得:

$$\begin{aligned} |Q|_{\max} &= g\sqrt{(5585 \times 0.063)^2 + (27251 \times 0.856)^2 + [(33073 - 27251) \times 0.348]^2} \\ &= g\sqrt{1.24 \times 10^5 + 5.44 \times 10^8 + 4.10 \times 10^6} \\ &= 2.3 \times 10^7 \text{N} \\ |M|_{\max} &= g\sqrt{(5585 \times 18 \times 0.063)^2 + (27251 \times 12.17 \times 0.856)^2 + [(33073 \times 9.71 - 27251 \times 12.17) \times 0.348]^2} \\ &= g\sqrt{4.01 \times 10^7 + 8.06 \times 10^{10} + 1.34 \times 10^7} \\ &= 278.6 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

上兩式中, 表示罐壁彈性變形的第二項 $m_f \alpha_f$ 或 $m_f H_f \alpha_f$ 為其餘兩項的 100 倍以上, 如果近似地只取一項, 即:

$$\begin{aligned} |Q|_{\max} &\approx g\sqrt{(m_f \alpha_f)^2} = g m_f \alpha_f \\ |M|_{\max} &\approx g\sqrt{(m_f H_f \alpha_f)^2} = g m_f H_f \alpha_f \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)算得

$$\begin{aligned} |Q|_{\max} &= 2.29 \times 10^7 \text{N} \\ |M|_{\max} &= 278.5 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

矮罐的尺寸: 罐高 H 為 12.2m , 半徑 R 為 18.3m , 壁厚為 2.54cm 。查得相應參數為:

T_2	T_f	m_2	m_f	m_1	H_2	H_f	H_1	k	α_2	α_f
(s)	(s)	(N · S ² / cm)			(m)					
6.89	0.162	73980	52140	53428	6.77	4.86	4.94	0.348	0.028	0.828

按式(2)计算,

$$|Q|_{\max} = g\sqrt{(73980 \times 0.028)^2 + (52140 \times 0.828)^2 + [(53428 - 52140) \times 0.348]^2}$$

$$= 4.24 \times 10^7 \text{ N}$$

$$|M|_{\max} = g\sqrt{(73980 \times 6.77 \times 0.028)^2 + (52140 \times 4.89 \times 0.828)^2}$$

$$+ [(53428 \times 4.94 - 52140 \times 4.89) \times 0.348]^2$$

$$= 2.076 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

按式(3)计算,

$$|Q|_{\max} = 4.235 \times 10^7 \text{ N}$$

$$|M|_{\max} = 2.071 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

由此可见,按式(3)计算的结果与式(2)计算结果相比,误差远小于1%,所以推荐采用式(3)。即只要计算储液的脉冲压力就可满足工程要求。

将上述近似法与 Haroun 的半解析半有限元的精确计算比较,说明,近似法满足工程要求,结果如下表。

罐型	$R(\text{m})$	$H(\text{m})$	$t(\text{cm})$	$Q_{\max}(\text{N})$	$Q_{\max}(\text{N})$	$M_{\max}(\text{N} \cdot \text{m})$	$M_{\max}(\text{N} \cdot \text{m})$
				精确解	近似法	精确解	近似法
高罐	7.32	21.96	2.54	2.27×10^7	2.3×10^7	2.47×10^8	2.58×10^8
矮罐	18.3	12.2	2.54	3.97×10^7	4.24×10^7	2.0×10^8	2.08×10^8

* 距罐底 1m 处的弯矩。

3. 阻尼对储罐反应的影响

储油罐的地震作用大小与罐的阻尼有关,主要有两个问题,一是罐阻尼的取值;二是阻尼对地震反应的影响。对于罐的阻尼取值也有两种看法,美国 API650 规定及美国一些学者认为罐液的晃动阻尼为 0.5%,罐液耦连振动阻尼为 2%;我国石油部工程技术研究所及大连工学院实测了罐的阻尼,其值接近 2%^(13,14);日本的规范及一些学者认为晃动阻尼为 0.5%量级,耦连振动阻尼为 8—10%⁽¹⁵⁾。可见对晃动阻尼取用 0.5%意见一致,对计算脉冲压力的罐液耦连振动阻尼看法不一,如美国 API 储罐抗震标准取阻尼比 2%,而日本储罐抗震规范取 8—10%,这是由于在微幅振动情况下,储罐采用地脉动法或激振器激振测得阻尼为 2%,而强震情况下考虑向地基辐射能量时阻尼显著增大,称为辐射阻尼,随地基软弱而不同,辐射阻尼据计算最大可达 20%—30%⁽¹⁶⁾,一般地基约为 10%。我国设备抗震鉴定标准考虑微幅阻尼取 2%,而辐射阻尼的影响则概括在综合影响系数中。

阻尼对地震反应的影响问题,日本有关设备抗震标准中规定,随着储罐阻尼变化需对地震反应乘以修正系数,随着阻尼的减少地震反应加大,见下表。

阻尼	0.3	0.2	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01	0.005
修正系数	0.44	0.56	0.78	1.00	1.18	1.32	1.53	1.79

此次制定标准,在长周期储液晃动计算波高时,当阻尼减少到 0.005 时,则乘以修正系数 1.79。但在计算罐液耦连振动的地震反应时,因为使用由振动台试验所得的数据,已含有阻尼的影响,故不再对阻尼进行修正。

但储液粘度对地震反应的影响如何呢?美国科学基金项目的学者对刚性罐计算分析曾得出“液体的粘性增大,会使储液动液压力加大”。对此我们进行了模型储罐不同粘度储液的振动试验,得出结论为“粘度较大的石油动液压力小于粘度小的水动液压力。因此在工程应用上,按水的阻尼计算地震反应(储液压力)是偏于安全的”。

4. 翘离及罐体环向多波变形对地震作用的影响

迄今为止,从理论上分析储罐的地震作用时都是假设罐体与基础固定,而且储罐在地震时不出现环向多波振动,只出现环向一个波的梁式振动^[17]。实际上常压立式储罐是浮搁在环墙基础上,墙内填砂层,显然储罐并不固定在基础上,地震时罐体出现明显翘离。此外我们的模型试验以及国外试验中^[18,19,20],罐壁明显出现环向多波的壳体振动。这种情况属于非线性边界,目前从理论上还没有解决。为了求得浮放情况下作用在储罐的地震力,只能通过试验来探索。我们在 5×5m 振动台中进行了两个模型试验,一个模型罐模

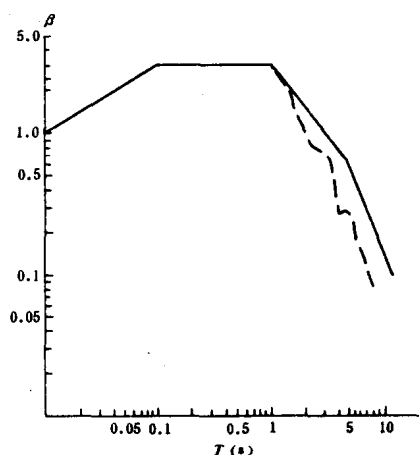


图2 生成模拟波的反应谱曲线

拟 5 万方罐($H/R = \frac{19.35}{30}$),属于矮罐,几何比为 16;另一个模型罐模拟 3 千方罐($H/R = \frac{14.27}{8.25}$),属于高罐,几何比为 6。振动台输入三种地震波型,即按给定加速度反应谱生成的模拟地震波、EL Centro 波及正弦共振三波(是日本对长周期地震作用所采用的等效地震输入),进行了水平振动和竖向振动试验,竖向振动的最大振幅取水平振动最大振幅的 $1/2 \sim 2/3$ 。

在确定模拟地震波的反应谱时,综合考虑了我国现行规范及美国 API650 中的有关规定,参照了墨西哥地震中远场强震记录的分析成果。加速度反应谱曲线见图 2,图中以虚线表示墨西哥地震中由硬地基记录分析得出的反应谱,显然,给出的反应谱更富含长周期分量。根据这一反应谱生成地震波的时程曲线时,取强震部分为 14s,总的持时为 20s。模拟波在烈度为九度情况下,当 T 为 4.5—12s 时,对应 3% 阻尼比的位移谱为 54cm,对应 0.5% 阻尼比的位移谱为 108cm;在烈度为七度情况下,位移谱为 27cm,接近墨西哥地震记录的分析结果 31cm。

试验结果表明,综合晃动及耦连振动效应、罐壁弹性变形、环向多波效应、罐底翘离以及基础影响等因素,储罐所受的动液压力约为刚性壁动液压力理论值的 2 倍左右^[18]。