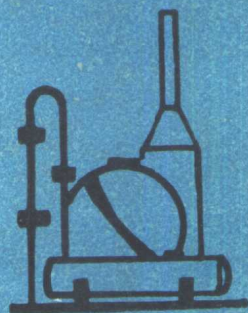


设备

SHEBE

KANGZHEH 抗震

设备抗震学术会议报告汇编



中国石油化工总公司抗震办公室
中国建筑学会地震工程学会设备抗震学组
《工程抗震》编辑部

设 备 抗 震

设备抗震学术会议报告汇编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国石油化工总公司抗震办公室
中国建筑学会地震工程学会设备抗震学组
《工程抗震》编辑部

前 言

在國內外的地震中,工业設備遭受了巨大的震害,有的还发生惨痛的次生灾害,經濟損失及社会影响极为严重,因此設備抗震引起了人們的重視。七十年代以来,国外对一些重要的电器設備和石油化工設備开展了抗震研究,取得了一些进展。近年来,在国家抗震主管部門的统一部署下,我国各地区、各部門大力开展了工业設備的抗震鉴定与加固工作。由于工业設備种类繁多,各类設備的功能与抗震特点大不相同,抗震經驗較少,抗震理论和設計水平較低。为提高工业設備抗震能力,近年来國內进行了大量的科学試驗和分析研究工作,取得了不少成果,在某些方面达到了国际水平。为了交流經驗,中国建筑学会地震工程学术委员会設備抗震学组于1986年12月在北京燕山石化公司召开了設備抗震学术會議。各科研、設計和生产单位以及高等院校在会上发表了四十余篇技术论文、研究報告和工作总结,涉及石油化工、电力、机械和管道等各类設備。内容包括試驗研究、抗震理论、計算方法和加固措施等方面,絕大部分是应用性的。鉴于各地区、各部門設備抗震鉴定和加固还刚刚开始,而这方面資料又比較缺乏,根据与会同志的建議,在《工程抗震》編輯部的大力支持下,我们将会議上的報告及个别会后送来的论文汇编成本文集。

設備抗震是一个新課題,目前还沿袭工业与民用建筑的一套办法,但是工业設備往往也是一种工业产品,它具有和工业与民用建筑不同的特点。本文集中多数文章是配合当前抗震鉴定与加固的需要,着重研究各类設備的动力特性,并根据設備特点提出抗震計算方法与

加固措施。这很适合当前需要，但是由于有的设备基本周期长达十几秒，阻尼小于0.5%，现有的用于工业与民用建筑的地震反应谱已不适用于设备抗震，应该研究、建立设备的地震反应谱，设备破坏机理及抗震设计安全度的研究也应提到日程上来了。

本文集的文章主要讨论设备的单体抗震，由于有些工业生产的特点是高度的连续性，一个设备的破坏可能影响整个工厂的停产，因此对整个系统的地震危险性分析是十分必要的，这方面的研究也急待加强。

由于设备抗震还处于发轫阶段，现有研究结果还不成熟，在一系列问题中存在不同观点，本着百家争鸣藉以推动设备抗震发展的精神编辑了本文集，其中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

《设备抗震学术会议报告会编》编委会

1987年9月

简 介

《设备抗震学术会識报告汇编》是在中国建筑学会地震工程学术委员会 设备抗震学组第一次设备抗震学术会識论文的基础上,经过精选汇编而成。共纳入论文32篇約33万多字。主要包括:石油化工、电力、井架、管线、电子仪器等各类设备的动力试验研究、抗震计算方法、减震与隔震技术应用以及抗震鉴定与加固技术措施等。

本汇编适合于有关科研、设计、教学、厂矿企业和管理部门人员阅读和参考。

编 委 会 名 单

李清林 韩精忠 项忠权 李德虎 葛学礼

目 录

圆柱形储液罐提高分析的半理论半经验解	郭 骅 秦文欣 (1)
立式化工储液容器抗震试验研究	施卫星 朱伯龙 吕西林 (8)
垂直地震下储液罐的动力响应	奚肖凤 曲乃泗 郭瑞锋 (15)
圆柱形贮液罐在竖向地震作用下的动力、 稳定分析	邹道勤 郭瑞锋 曲乃泗 (25)
利用反应谱分析刚性壁贮液罐的液体动力反应	仇伟德 蔡强康 (36)
立式钢制储液罐的抗震加固和频率的简化公式	郭瑞锋 曲乃泗 奚肖凤 (51)
常压立式储液罐抗震鉴定标准的编写过程及问题讨论	韦树莲 (55)
一万立方米大形浮顶贮油罐模态试验分析介绍	应怀樵 韦树莲 盛森芝等 (61)
球罐抗震设计中自振周期算法研究	温德超 (65)
自由液重弯曲刚度对球罐周期影响的探讨	孙恒智 (73)
立式设备自振周期的计算	方亚男 (80)
框架支承塔自振特性的计算	陈国详 李明 (82)
排塔动力特性分析	孟昭禄 汤卫和 (89)
塔器类设备抗震计算的模型简化	倪正理 梁 羽 (93)
自立式设备抗震计算的探讨	梁 羽 倪正理 孙恒智 (100)
楼面上卧式及立式化工设备的抗震计算方法	吕西林 朱伯龙 (108)
凸起对流室立式炉的动力特征	张端午 (114)
圆筒形立管式加热炉的动力计算及抗震加固	耿艳玲 (121)
石油化工企业装置内工艺管线的抗震试验研究	徐振贤 孙纪安 项忠权 (126)
系统管线的动力试验及抗震分析	沈建军 贺为民 徐振贤等 (135)
应用改进的RITZ向量法和波阵法在微机上计算SW2-220/2000-40型 少油断路器的动力地震响应	曲乃泗 沈聿修 张钟鼎等 (143)
石油钻井井架动力特性与抗震分析	孙纪安 秦延龙 贺为民等 (152)
高架活动地板振动试验	王者相 朱 晞 李庆炎等 (161)
微型计算机数据采集系统在大型设备测试中的应用	汤卫和 (168)
500KV隔离开关抗震性能研究	赵玉祥 朱伯龙 (175)
高压电器及其实验设备抗震性能的评定及减震研究	鲍 臻 周书瑞 (180)
三相垂直布置水泥电抗器抗震加固研究	周建明 姚海根 (185)
隔震装置在电气设备上的应用	赵道揆 焦悦琴 (191)
500千伏超高压避雷器实型地震试验	周书瑞 (197)
电气设备安装设计的抗震措施	赵道揆 (203)
高压电气设备抗震问题的讨论	赵玉祥 朱伯龙 (209)
电气设备抗震设计主要参数的确定	周书瑞 (212)

圆柱型储液罐提离分析的半理论半经验解

郭 驊 秦文欣

(哈尔滨建筑工程学院)

〔提要〕已知地震产生的倾复力矩后,分析罐底提离产生的应力场是圆柱型储液罐抗震设计中重要的一步〔1〕〔11〕。但文〔5〕〔2〕给出的计算模型存在一些明显的缺点〔3〕〔4〕。本文舍弃了文〔5〕〔2〕的不合理假设,在实验基础上〔8〕〔9〕〔10〕提出了一个半理论半经验解法。其结果与实验结果基本是一致的,可供修订我国规范时参考。

一、美国规范API和日本有关提离研究中存在的问题

美国 API 规范考虑提离计算的数学模型是带有两个塑性铰的小变形一维板条,详见文献〔3〕或〔5〕。这一模型存在下列缺点:

1. 由于是一维板条模型,无法反应储液罐提离后空间应力场特性;
2. 模型假设一当提离发生,板条就出现两个塑性铰。而文〔6〕的理论结果和文〔8〕〔9〕的实验结果都说明在相当大的提离范围内,罐底板各点均未发现进入屈服应力状态。文〔6〕还指出提离超过某一临界值之后底板的受力状态更接近于薄膜。这说明API的小变形带塑性铰板条模型和实验结果是不符合的。
3. 用API的提离模型进行抗震计算时,若某一烈度(设为 n)设计地震使罐产生部分提离,则 $n+1$ 烈度下罐将以倾复形式失去抗震能力。但是,多次实验和大量震害都没有观察到倾复现象,观察到的只是不同地震引起了不同程度的提离最终导致储液罐的破坏。

日本的小林信之等提出了一个考虑提离后罐壁内力空间分布的简化模型〔2〕。但是,这一模型也存在着三方面的缺点:

1. 由于利用模型假设能列出的方程数比待求的未知数个数少,文〔2〕增补了一个方程。该方程仍然建立在弹塑性大变形一维板条模型基础之上。虽然已考虑了底板的大变形,但仍具有一维模型的缺点。
2. 文〔2〕假设罐壁母线方向内力分布中提离最大的点母线方向拉应力也最大。但在文〔8〕〔9〕〔10〕中的实验结果证实罐底提离后提离最大点的罐壁母线方向拉应力很小(几乎为零),罐底的部分提离是罐壁环向内力作用的结果。
3. 文〔2〕假设罐壁和罐底相交处圆环在提离过程中保持在一同平面之中。这一假设对很小的模型罐是合理的,但大型罐的提离过程很难使这一圆环继续保持在同一平面。

二、提离分析的模型和假设

地震作用下储罐所受的动水压力是比较复杂的。文〔10〕设计了一个通过倾斜储液罐

产生静倾复力矩的实验方案，并试图用静倾复力矩近似等量代替地震倾复力矩研究罐壁和罐底的应力场。

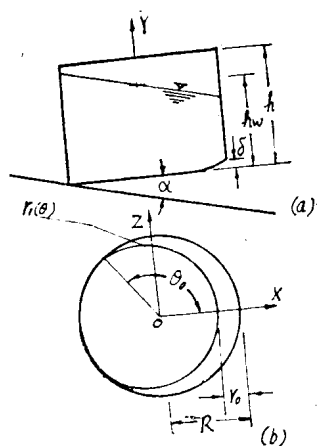


图 1

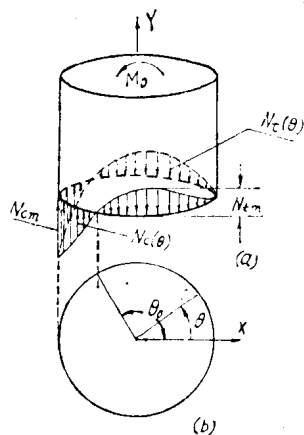


图 2

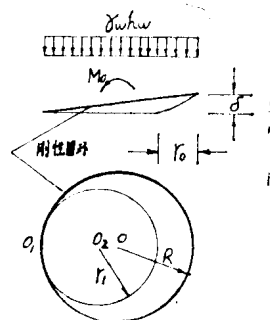


图 3

图 1 给出了倾斜实验的示意图。本文对提离过程作了如下几点假设：

1. 罐底板在一定的提离范围内假设为薄膜。
2. 考虑到罐壁环向应力的存在，假设最大提离点的母线方向拉应力可忽略不计，沿周长母线方向内力呈图 2 (a) 分布：（参阅文〔8〕〔9〕〔10〕的实验结果）。

$$N_c(\theta) = N_{cm} f_c(\theta) \quad (1)$$

$$N_t(\theta) = N_{tm} f_t(\theta) \quad (2)$$

3. 罐底被提离的区域呈月牙形，其中最大提离深度为 r_0 ，月牙形的半角为 θ_0 (图 1 (b))。文〔7〕研究了张在刚性圆环上薄膜受均布压力作用的提离反应 (图 3)。比较图 3 和图 1 可以看出虽然在等效倾复力矩作用下基础对罐壁的反力和基础对刚性环的反力性质十分不同（前者为分布力，最大值有限；后者为集中力，最大应力值无限），但两者最大提离深度是十分接近的。因此，我们建议用同一倾复力矩作用下张在刚性环上薄膜的最大提离深度代替罐底的最大提离深度即假定罐底最大提离深度和倾复力矩的关系为：

$$r_0 = 2R \left[1 - 3\sqrt{1 - \frac{M_0}{\pi \gamma_w h_w R^3}} \right] \quad (3)$$

其中 M_0 —— 等效倾复力矩

γ_w —— 液体容重

h_w —— 液深（倾斜前）

R —— 罐半径

在上述假设的基础上可以看出：提离产生的罐壁母线方向内力分布仅取决于下面三个参数：

N_{cm} —— 罐壁母线方向最大压力（力/长度）；

N_{tm} —— 罐壁母线方向最大拉力（力/长度）；

θ_0 —— 罐底被提离月牙区的半角。

三、进行提离分析的平衡方程

在罐壁底部截取自由体，以整个罐壁为研究对象可以列出两个平衡方程。

$$\Sigma Y = 0$$

$$2 \int_{\theta_0}^{\pi} N_c(\theta) R d\theta - 2 \int_0^{\theta_0} N_t(\theta) R d\theta - W_s \cos \alpha = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma M_z = 0$$

$$M_0 + W_s \frac{h}{2} \sin \alpha - 2 \int_{\theta_0}^{\pi} N_c(\theta) R d\theta (-R \cos \theta) - 2 \int_0^{\theta_0} N_t(\theta) R^2 d\theta \cos \theta = 0 \quad (5)$$

再以整个罐（连底及内部液体）为研究对象，考虑到罐底的薄膜假设可列出方程

$$\Sigma M_z = 0$$

$$M_0 + \frac{W_s h}{2} \sin \alpha - 2 \int_0^{\theta_0} \int_{r_1(\theta)}^R \gamma_b (h_w - r \cos \theta \tan \alpha) r^2 \cos \alpha \cos \theta dr d\theta - 2 \int_{\theta_0}^{\pi} N_c(\theta) R d\theta (-R \cos \theta) - 2 \int_0^{\theta_0} \int_{r_1(\theta)}^R \gamma_b t_b r^2 \cos \alpha \cos \theta dr d\theta \quad (6)$$

其中 W_s ——罐壁和顶盖自重

α ——倾斜角

h ——罐高

γ_b ——罐底材料容重

t_b ——罐底厚度

$r_1(\theta)$ ——图1中罐底提离月牙区方程，设它为：

$$r_1(\theta) = R - r_0(1 - \theta/\theta_0) \quad (7)$$

把方程 (1) (2) 代入式 (4) (5) (6) 可得

$$2RN_{cm} \int_{\theta_0}^{\pi} f_c(\theta) d\theta - 2RN_{tm} \int_0^{\theta_0} f_t(\theta) d\theta - W_s \cos \alpha = 0 \quad (8)$$

$$M_0 + \frac{1}{2} W_s h \sin \alpha + 2R^2 N_{cm} \int_{\theta_0}^{\pi} f_c(\theta) \cos \theta d\theta - 2R^2 N_{tm} \int_0^{\theta_0} f_t(\theta) \cos \theta d\theta = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
M_0 + \frac{1}{2} W_s h \sin \alpha + 2 R^2 N_{cm} \int_{\theta_0}^{\pi} f_c(\theta) \cos \theta d\theta \\
- 2 \gamma_s \cos \alpha \int_0^{\theta_0} \int_{r_1(\theta)}^R (h_w - r \cos \theta \tan \alpha) r^2 \cos \theta dr d\theta \\
- 2 \int_0^{\theta_0} \int_{r_1(\theta)}^R \gamma_b t_b r^2 \cos \alpha \cos \theta dr d\theta = 0
\end{aligned} \quad (10)$$

在 $f_c(\theta)$ 和 $f_t(\theta)$ 的形式确定之后, 方程 (8) (9) (10) 及式 (3) 可求出 N_{cm} 、 N_{tm} 及 θ_0 三个未知数, 从而得到提离引起的罐壁母线方向内力分布。

本文取:

$$f_c(\theta) = \frac{(\cos \theta_0 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos \theta_0)^2} \quad (11)$$

$$f_t(\theta) = \begin{cases} \theta / c \theta_0 & 0 \leq \theta \leq c \theta_0 \\ (\theta_0 - \theta) / (1 - c) \theta_0 & c \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中 } c = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{R}{H}} \quad (13)$$

经过试算, β 取 1.3。

四、半理论半经验公式和实验结果的比较

1977年至1983年, 加州大学伯克利地震工程研究中心对有代表性的高矮两种类型的储罐模型进行了一系列静力和动力实验, 其中包括静力倾斜提离和自由放置在振动台基础上的动力提离实验。其中两个主要的模型罐的尺寸见表 1。

表 1

	罐 高 h	半 径 R	壁 厚 t_s	底 厚 t_b	水 深 h_w	壁材料容重 γ_s
矮 罐	1.8288	1.8288	0.002032	0.002032	1.524	2702
高 罐	4.572	1.181	0.002286	0.002286	3.9624	2702

单位为公斤和米。

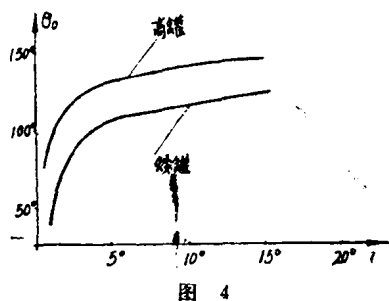


图 4

矮罐和高罐的倾斜角 α 和提离区半角 θ_0 的计算结果见图 4, 可以看出, 当倾斜角在较大范围内 (对应的等效倾复力矩 M_0 也在较大范围内) θ_0 基本上和 α 成正比。

矮罐和高罐在不同倾斜角情况下的倾复力矩和最大母线方向压应力值见表 2。

矮罐及高罐倾斜角和罐壁母线方向压应力最大值的

关系与实验值的比较见图 5 和图 6。可以看出, 半理论半经验公式和实验结果的规律是比较接近的。

表 2

倾 斜 角(度)	矮 罐		高 罐	
	倾复力矩	最大压应力	倾复力矩	最大压应力
1	213	2.26	600	15.8
2	426	4.87	1201	39.5
3	639	7.94	1800	66.3
4	853	11.23	2400	95.3
5	1066	14.67	2999	126.1
6	1281	18.28	3596	159.1
7	1495	22.04	4193	194.3
8	1710	25.98	4789	232.2
9	1926	30.11	5384	273.1
10	2143	34.43	5977	317.3
11	2360	38.96	6569	365.6
12	2578	43.72	7159	418.5
13	2797	48.72	7747	476.9
14	3018	53.98	8333	541.8
15	3240	59.51	8917	614.5
16	3463	65.35		
17	3687	71.51		
18	3914	78.01		
19	4142	84.88		
20	4372	92.14		
21	4605	99.83		
22	4839	108.0		
23	5077	116.6		
24	5317	125.8		
25	5560	135.5		
26	5807	145.9		
27	6057	156.9		
28	6311	168.6		
29	6570	181.1		
30	6833	194.4		
31	7101	208.6		
32	7375	223.8		
33	7654	240.0		
34	7941	257.3		

单位: 力矩——公斤米; 应力——公斤/厘米²。

表 3 给出了矮罐和高罐按我国鉴定标准[11], 美国API及本文计算静力斜倾实验中最大母线方向压应力值(公斤/厘米²)的比较。明显地看出, 本文误差大大低于API的误差。

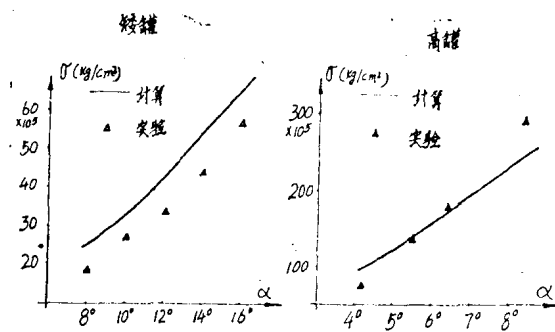


图 5

图 6

表 3

	倾斜角 α	我国 鉴 标		美 国 API		本 文		实 验
		结 果	误 差	结 果	误 差	结 果	误 差	
矮 罐	16°	16.2	69%	16.2	69%	65.3	24%	52.5
高 罐	8.45°	50.5	88%	76.4	75%	250.6	17%	302

表 4 和表 5 给出了这两个模型罐在地震模拟震动台上受到三个不同地面运动输入 (EL Centro、Pacoima 和 Parkfield) 实测的最大母线方向压应力和不同计算模型的结果比较。各种情况下, 本文结果均明显优于 API 的提高模型。

矮罐在最大地面加速度为 0.5g 时的结果

表 4

地 震 信 息	实测倾复力矩	鉴 标	API	本 文	实 测
EL Centro	6643	31.1	48.3	184.8	262.3
Pacoima	7876	36.9	208	253.4	368.4
Parkfield	4811	22.5	23.5	107	204.6

高罐在最大地面加速度为 0.125g 时的结果

表 5

地 震 信 息	实测倾复力矩	鉴 标	API	本 文	实 测
EL Centro	4150	41.5	47.9	191.8	165.9
Pacoima	2048	20.4	20.4	78.3	80.0
Parkfield	4510	45.0	57.4	214.5	177.4

结 论

本文在假定底板为薄膜、最大提离深度和倾复力矩的关系满足(3)式并利用已有的静力、动力实验结果对母线方向内力分布作了合理假设,在此基础上对储罐在等效倾复力矩作用下的提离进行了分析。与实验相比,本文结果明显优于美国API一维板条提离分析模型。在进行更多实验的基础上修正公式中的系数,精度还可以提高。因此,这一半理论半经验公式可供修订我国圆柱型立式储罐抗震规范时参考使用。

致谢 本文工作过程中多次和中国石化总公司洛阳化工公司郝承明同志(原兰州炼油厂)进行讨论,得到他的许多宝贵建议和鼓励,在此表示深切谢意。

考 参 文 献

- [1] American Petroleum Institute, Welded Steel Tank for Oil Storage, API Standard 650, Sixth Edition, 1979.
- [2] 中国石化总公司抗震办 石油化工设计抗震资料译文集(162—176页) 1986.5.
无锚固件固定的圆筒罐倾复抗震分析方法(作者小林信之,石田和雄)。
- [3] 郭骅 美国储液罐地震反应的研究概况 地震工程与工程振动 1卷3期, 1982. 11.
- [4] 郭骅、秦文欣 对现行储液罐抗震设计条款的评价和修订建议 地震工程与工程振动 5卷1期, 1985.3.
- [5] Wozniak, R.S et al Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks, API 43rd Mid Year Meeting Toronto, 1978.
- [6] Guo Hua and Qin Wenxin The Axisymmetrical Uplift Mechanism of Cylindrical Liquid Storage Tanks, ASME TFLER Conference或哈尔滨建筑工程学院学报, 82年4期。
- [7] 郭骅、秦文欣 最优化方法在非线性弹性力学提离问题中的应用 哈尔滨建筑工程学院学报 1985.1期
- [8] Manos, G et al Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid Storage Model UCB/EERC, 82/07.
- [9] Cambra, F Relevant Consideration on the Earthquake Response of Broad Liquid Storage Tanks M.S. Thesis of U.C.B.
- [10] Clough, R.W et al Static Tilt Tests of a Tall Cylindrical Liquid Storage Tank UCB/EERC, 79/06.
- [11] 工业设备抗震鉴定标准 1979.

立式化工储液容器抗震试验研究

施卫星 朱伯龙 吕西林

(同济大学)

前 言

化工设备在地震中破坏的现象已屡见不鲜,由此而给人类带来的灾难更是极为严重,人们已逐渐注意到了化工设备抗震鉴定及加固的重要性。在日本,对化工设备的抗震试验已有一些,而在我国却搞得较少。为此,受上海高桥石油化工公司的委托,我们同济大学工程结构所于今年六、七月对卧式及立式化工工艺设备做了模拟振动台试验。本文是在立式化工储液容器模拟振动台试验的基础上写成的。

一、试 验 目 的

本试验目的在于对浮放的立式化工储液容器在不同地震烈度和场地土的情况下的抗震性能作鉴定,并提出相应的加固措施。

我国化工厂中大部分小型贮液容器(容积小于 50m^3)是浮放在基础上或楼层上的,有关这种设备的抗震性能和破坏机制研究的试验还未曾见到,所以对浮放的立式化工贮液容器抗震性能及破坏机制研究是本试验的主要目的之一。对加固后容器抗震性能的研究,也是本试验的重要部分。

试验分浮放和固定两个阶段进行,主要着眼于:

- (1) 浮放时容器和相连管道作为整个系统的破坏现象。
- (2) 固定后整个系统的地震反应、破坏现象、管道应力、支脚应力、液体的影响等。

由于现在使用的立式化工贮液容器都在支脚底板上开有螺栓孔,为此固定时采用螺栓固定。

二、试 验 方 法

1. 试件

根据现场调查及振动台的实际情况,本文选择一个容积适中的旧容器作为试件。该容器容积为 2m^3 ,容器壁厚为 5.9mm ,角钢支脚,其他尺寸见图1。为模拟实际的摩擦和支承情况,容器安装在混凝土基础板上,混凝土基础板与振动台台面连接。在容器的法兰处接了一根 $\phi 57 \times 3.5$ 的管道,管道与台外地面连接,见图1、图2。

2. 试验设备

本试验是在我所 $4 \times 4\text{m}$ 地震模拟振动台上进行的,有关该振动台的情况请参阅有关资料。

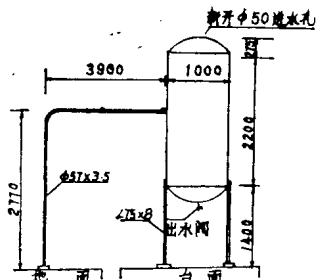


图1 试件示意图

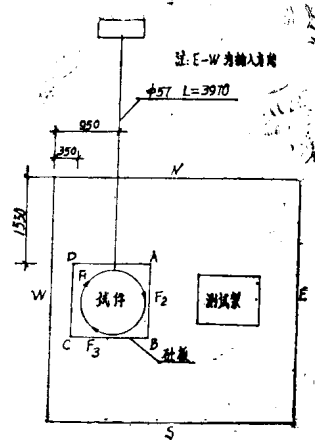


图2 试件安装平面图

3. 测量方法

本试验测量工作主要着眼于测量容器的位移和加速度反应，支脚及管道的应变；同时也测量了罐体某些部位的应变，测点布置见图3。图中“○”表示加速度计，“□”表示位移计，“×”表示应变计。

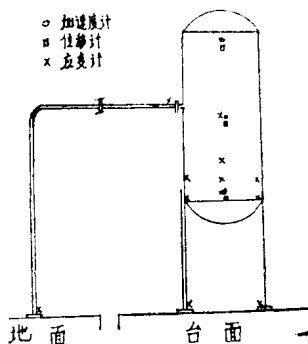


图3 测点布置示意图

4. 试验内容

试验分为两阶段进行，即浮放阶段和固定阶段。整个试验过程中容器为常压。台面输入为：

- (1) 正弦波，主要用来测试储液容器的自振频率。
- (2) G—3波，它是根据规范反应谱反算的相应于Ⅲ类场地土时的地震反应。
- (3) Elcentro 1940地震记录，作为相当于Ⅱ类场地土的地震波。主要用来测试储液容器建于Ⅱ类场地土时的地震反应。

为了研究在各种地震烈度下容器的地震反应，台面输入的加速度峰值取0.1g、0.2g、0.4g，相应于地震烈度为7、8、9度。

三、试验结果

1. 储液容器的自振特性

为了搞清容器的自振特性，我们用输入0~24Hz正弦波扫描的方法测得功率谱，经整理后得到的自振频率和阻尼比见表1。

立式储液容器的自振频率和阻尼比

表 1

工 况	第 一 频 率		第 二 频 率	
	频率 f_1 (Hz)	阻 尼 比	频率 f_2 (Hz)	阻 尼 比
浮放空罐	0.98	0.051	12.75	0.005
浮放加80%水	1.42	0.023	9.7	0.026
固定空罐	5.47	0.010		
固定加50%水	3.51	0.014		
固定加30%水	2.93	0.017		

由表 1 我们可推得下列结论:

- (1) 浮放时结构的阻尼较固定时大;
- (2) 浮放时结构刚度是变化的, 有液体情况下能增大结构刚度, 使一阶自振频率提高;
- (3) 固定时液体能增大结构阻尼, 且阻尼比与液体高度成正比, 几乎成线性关系;
- (4) 固定时, 支脚与基础的连接介于铰接与固接之间, 结构刚度约为铰接时的2倍;
- (5) 浮放时结构具有剪切振动和弯曲振动二个频率, 而固定时结构只作剪切振动, 弯曲振动频率大于 24Hz。

2. 输入地震波试验

(1) 浮放试验

浮放试验是将容器浮放在混凝土板上进行的, 混凝土板与台面固定, 管道固定于台外地面上。

当分别输入 0.1g G—3 波和 0.1g Elcentro 波时, 没有发生滑移和提离现象。加大输入波幅值到 0.2g 时, 在 E—W 及 N—S 方向上均发生滑移现象。经过几次地震波输入后, 在 N—S 方向上, F_2 脚 (见图 2) 向 S 方向滑移了 18cm, 且 F_3 脚提起达 2cm, 而在地震波输入方向的滑移很小, 仅 0.5cm 左右。表 2 给出了 F_2 脚向 S 方向滑移的试验记录。

 F_2 脚向 S 方向滑移记录

表 2

次 序	输入波名称	输入波幅值	滑移量 cm	滑移增量 cm
1	G—3	0.1g	0	0
2	G—3	0.2g	6.5	6.5
3	Elcentro	0.1g	6.5	0
4	Elcentro	0.2g	8.5	2.0
5	Elcentro	0.4g	18.0	9.5

管道对容器有牵扯作用,阻止了容器倾覆破坏。当0.2g G—3波输入时,容器的位移反应已超过了位移计量程范围,但由于管道的牵扯作用,容器没发生倾覆。试验测得的容器最大加速度反应、最大管道应力和最大支脚应力见表3。

浮放加80%水工况下测试结果

表 3

工 况	最大加速度	动力系数	管道应力	支脚应力
0.1g G—3波	0.3g	3.00	75.7	66.7 (F_2)
0.2g G—3波	0.659g	3.30	147.4	86.8 (F_2)
0.1g Elcentro波	0.311g	3.11	61.5	41.6 (F_1)
0.2g Elcentro波	0.393g	1.97	74.3	60.6 (F_1)
0.4g Elcentro波	0.672g	1.68	78.7	68.0 (F_1)

注: 1. (F_2)表示最大应力发生在 F_2 脚, (F_1)表示最大应力发生在 F_1 脚。

2. 应力单位为MPa。

(2) 固定试验

固定试验是将容器用螺栓固定在混凝土基础板上进行的,每次试验前螺栓用测力扳手预紧至15kg—m。在地震波输入时螺栓有松动现象,地震波加速度幅值越大,松动越严重。表4给出了不同地震波输入后,测到的各地脚螺栓预紧力值。

表 4

工 况	F_1 支脚	F_2 支脚	F_3 支脚
0.1g Elcentro波	15	15	15
0.1g G—3波	15	15	15
0.2g Elcentro波	15	15	15
0.2g G—3波	15	12	11
0.4g Elcentro波	3	12	10
0.4g G—3		14	13

注:单位为kg—m。

在试验过程中,容器内的水剧烈地晃动,当输入0.4g G—3波时,液体竟从上部进水孔冲出。但罐体的动应力不大,均小于10MPa。表5给出了在不同工况下,罐体各部位的应力测试记录。表中动应力为振动台作用下罐体固定各工况下罐体应力。