

# 储液罐地震安全问题研究综述

方浩<sup>1)</sup> 吴昊<sup>2)</sup> 王笃国<sup>2)</sup> 陈国星<sup>2)</sup>

1) 中国石油化工股份有限公司天然气分公司, 北京 100029

2) 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

**摘要** 储液罐的地震安全问题主要涉及到抗震设防水准的确定和储液罐本身的抗震设计。本文简要介绍了储液罐的震害现象及机理, 对比分析了中国、美国、欧洲等国家有关储液罐抗震设防水准, 并阐述了国内外学者在储液罐抗震计算方面所做的工作及获得的成果, 同时还指出了存在的问题和今后研究工作的的发展趋势。

**关键词:** 储液罐 抗震设防标准 耦合

## 引言

在全球经济快速发展的今天, 石油依然是经济发展的重要资源, 虽然我国是石油大国, 有着丰富的石油储藏, 但是每年仍需进口大量的石油以满足国民经济快速发展的需求。为此, 我国必须进一步增加石油储备资源, 以减少国际局势动荡对我国经济的影响。而储液罐在石油、化工等行业中已被广泛应用, 早在上世纪 60、70 年代, 委内瑞拉、日本和沙特阿拉伯就已经相继建成了 15 万  $\text{m}^3$ 、16 万  $\text{m}^3$ 、24 万  $\text{m}^3$  的大型浮顶油罐, 在欧洲也出现了 30 万  $\text{m}^3$  以上的立式储液罐。而我国的大型浮顶油罐建设在上世纪 70 年代才开始, 并且在 2000 年以前我国的储液罐建设全部依赖日本, 储液罐造价居高不下, 从设计到建造都处于学习摸索阶段。2000 年以后, 我国储液罐建造技术逐渐成熟, 已经具备了大型储液罐设计、建造的能力, 设计能力已达 20 万  $\text{m}^3$ 。2007 年在福建青岚山建成了 2 座 15 万  $\text{m}^3$  的大型储液罐; 2008 年在上海白沙湾建成了 8 座 15 万  $\text{m}^3$  的大型储液罐; 2012 年即将进行江苏仪征 3 座 15 万  $\text{m}^3$  的大型原油储液罐建设。我国大型储液罐的建设已经进入了全面发展的新阶段。

地震灾害是人类各种自然灾害中最大的一种灾害, 而大型储油罐则是石油化工设备中震害最大的设备, 在历次地震中储油罐遭到严重破坏的现实, 引起了国内外学者对储液罐研究的极大兴趣。对储液罐动力特性的研究可以追溯到 1883 年, 它是由 Rayleigh 等人对充液圆柱壳振动所做的工作。而实际储液罐的抗震研究是从 20 世纪 30 年代开始的。由于地震的直接破坏作用及其严重的次生灾害, 半个多世纪以来, 学者们对储液罐的抗震研究主要集中在

【收稿日期】 2012-04-24

【作者简介】 方浩, 男, 生于 1963 年。中国石油化工股份有限公司天然气分公司高级工程师。主要研究方向: 石化工业油气储运。E-mail: fanghao9999@vip.sina.com

从震害调查、抗震设防水准、理论分析和实验研究等方面。为此各国都先后形成了自己的抗震规范，但是仍有不少按照规范设计的储液罐在地震中遭到破坏，所以，储液罐地震安全问题研究仍然是目前的一个热门领域。

## 1 震害现象及其分析

1964年3月27日，美国阿拉斯加发生8.4级地震，地震中1座锥顶罐的罐壁与顶板的连接处发生破坏，罐壁中部和下部发生屈曲；有的储罐罐壁与罐底环形板之间的角焊缝发生破裂，接管开口处被破坏（徐英等，2005）。

1964年6月16日，日本新潟发生7.5级地震，地震中储罐发生破坏后引起爆炸和大火，火灾延续15天，烧毁84座储罐。同时部分储罐基础发生砂土液化和地裂，造成基础的不均匀沉降，引起各相关部位发生破坏，导致储液漏出，甚至出现储液罐倒塌现象；地震中有1座30000m<sup>3</sup>的油罐约160t重的浮顶因油面晃动被抛起，机械密封脱落，浮顶再次下降时，因与罐壁冲击，引燃油气发生火灾。

1976年7月28日，中国唐山发生7.8级地震，天津化工厂和唐山钢厂各有2座1000m<sup>3</sup>的燃料油罐最下圈壁板发生外屈曲，角焊缝开裂，罐内储油全部泄漏；罐壁与罐底环形板之间的角焊缝和最下层壁板与第二层壁板之间的环焊缝开裂多处；唐山市地震烈度为11度的地区，有2座1000m<sup>3</sup>无力矩油罐罐壁下部有明显外凸，其中1座罐壁与底板连接处开裂，形成长2250mm、高80mm的裂口，罐内300多吨汽油全部漏出；在地震烈度为8度的地区，有1座正在建设的5000m<sup>3</sup>拱顶油罐由于罐基础出现喷砂现象把罐底向上顶起，形成锥体，罐底中心比周边高出500mm，使板底与基础脱离；另1座1000m<sup>3</sup>无力矩油罐，在东南一侧下沉约500mm，并向东南方向移动70mm，油罐倾斜，油品从罐项上部入孔溢出。

1978年阿根廷地震和1980年美国加州中部地震，造成近100座油罐破坏（初大勇等，2005）。1995年1月17日，日本阪神地区发生7.2级地震，港口区有几座液化石油气罐，其中1座出现裂缝，迫使70000人临时疏散。岸边2组大型球罐（每组3个）有紧固的对角管支撑，未受到损害。

从历次储液罐震害调查的结果看，其震害可以归纳为以下几种类型：

（1）罐壁的破坏。圆柱形薄壁金属储液罐的外壁局部失稳是常见的破坏形式。这种管壁的失稳又分为两种形式：象足鼓胀和菱形褶皱。前者是罐壁由于竖向受压使其向外凸出发生塑性变形，并且这种变形发生在同一水平带上。1971年的费尔南多地震、1976年的唐山地震、1980年加州中部迪亚布洛山地震，均造成了储液罐象足鼓胀失稳。通过震害分析可知，发生这种失稳的原因主要有：储液罐在满罐时容易发生象足失稳，空罐或半罐时不易发生；象足失稳多发生于非锚固储液罐，而锚固储液罐很少发生，说明罐底的提离可能是导致象足失稳的重要因素。

（2）罐顶的损坏。大型储液罐罐顶分为固定顶和浮顶两类。前者多采用锥顶或拱顶；后者又分为外浮顶和内浮顶。内浮顶储液罐是在拱顶储液罐内部增设可随液面上下移动的浮盘而成，用以减少介质的挥发；外浮顶只有可随液面上下移动的浮盘，而没有固定的罐顶。固定顶储液罐的罐顶破坏主要有：罐顶与罐壁连接处开裂或屈曲等；浮顶储液罐罐顶的破坏主要有：浮顶上部构件损坏。罐顶的破坏主要是由于液体的晃动对罐顶造成的冲击而引起的。

（3）罐底板、锚固件和罐底贴角处焊缝的破坏。这些破坏主要是由于罐底的提离或基础

的不均匀沉降而引起的。罐底与壁板的连接处是储液罐受力最复杂、最危险之处，一旦遭遇地震很容易发生破坏。

(4) 管道接头及附件的破坏。这种破坏主要是由于储液罐与附件的位移不一致而造成的。

(5) 软土地基沉降、液化等引起罐体强度及稳定方面的破坏。

## 2 抗震设防水准

我国现行的储罐抗震规范主要包括国家标准《构筑物抗震设计规范(GB 50191—93)》(中华人民共和国国家标准, 1993)和行业标准《石油化工钢制设备抗震设计规范(SH 3048—1999)》(中华人民共和国行业标准, 1999)、《钢制常压立式圆筒形储罐抗震鉴定标准(SHT 3026—2005)》(中华人民共和国石油化工行业标准, 2005)。其中, 2005 年最新修订的标准 SHT 3026—2005 应用最广泛, 它是在《构筑物抗震设计规范(GB 50191—93)》(中华人民共和国国家标准, 1993)的基础上, 修订了一些参数和内容, 并与《建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)》(中华人民共和国国家标准, 2001)协调一致。

我国石油化工行业标准 SHT 3026—2005 与建筑物抗震设计规范思路一致, 采用地区 50 年超越概率 10% 的基本地震烈度作为设防烈度。设防目标是当遭受本地区设防烈度地震影响时, 储罐可能损坏但经一般修理或不需修理仍可继续使用。类似建筑物抗震设计中“中震可修”的概念, 在多遇地震作用下进行承载力设计, 以达到中震可修的设防目标。

对比中国、美国、欧洲的储罐抗震设防要求(李扬, 2009)可以看出, 欧洲和美国进行钢制储罐抗震设计遵循的规范主要是欧洲建筑规范 EN1998-4(2004 版)(European Committee for Standardization, 2004)和美国 API650 附录 E(2007 版)(American Petroleum Institute, 2007)。

通过对中国鉴定标准、欧洲和美国储罐抗震规范的对比, 3 个抗震规范抗震设防标准存在不少区别, 具体分析如表 1 所示。

表 1 各规范抗震设防水准与抗震设防目标对比

Table 1 Fortification levels and goals from different seismic codes

规范名称	抗震设防基准	抗震设防目标	地震重现期(年)
SHT3026-2005	50 年超越概率 10%	中震可修	475
API650	50 年超越概率 2%	不倒塌	2500
EC-8	10 年超越概率 10%	破坏极限状态	95
	50 年超越概率 10%	不倒塌状态	475

美国 API650 是采用构筑物抗倒塌目标为抗震设防目标。由于美国东西部地区地震危险性存在显著差异, 过去使用地震重现期 475 年的地震动作为基准设防地震作用, 会使得各地区抗倒塌风险概率不一致。因此, 为实现统一抗倒塌水平的设防目标, 借助最大可能地震 MCE(50 年超越概率 2% 的地震动)来定义设防地震作用。根据经验, 设防地震作用取为最大可能地震 MCE 的 2/3, 这样与原来设防水准相比, 美国中部和东部地区基准设防地震作用明显提高; 而西部地区则基本保持重现期 475 年的水准。

欧洲 EC-8 采用 2 种水准抗震设防。①极限破坏要求: 在该水准地震作用下储罐能够保

持完整性和最基本的操作功能，即储液没有出现泄露和外溢、晃动液体对罐壁和灌顶破坏有限、罐体连接管线正常工作等；②不倒塌要求：相当于我国“中震”设防水准，储罐在该水准下保持整体稳定性，罐体屈曲变形能得到控制，不发生大量储液外泄。欧洲 EC-8 在“不倒塌要求”水准下进行结构强度设计。

综合来看，我国标准与美国 API650、欧洲 EC-8 抗震设防水准基本相当，但欧洲 EC-8 “不倒塌要求”的设防目标偏低。

目前，我国在油罐项目地震安全性评价工作报告中，如：“曹妃甸原油商业储备基地工程场地地震安全性评价报告”、“天津国家石油储备基地工程和天津原油商业储备基地工程场地地震安全性评价报告”，一般给出 50 年超越概率 63%、10%、3% 和 100 年超越概率 2% 的设计地震动参数供设计部门使用。采用的反应谱形式为《石油化工钢制设备抗震设计规范(SH 3048-1999)》(中华人民共和国行业标准，1999) 推荐的反应谱形式。

### 3 抗震计算理论

储液罐的抗震研究始于 20 世纪 30 年代中期，早期主要研究储罐运动及刚性壁动水压力，并建立了基于刚性罐壁分析的抗震设计方法。1964 年美国阿拉斯加地震中大量油罐被破坏，促使人们将研究重心转向柔性罐。柔性储液罐的振动问题是典型的固-液耦合问题，它涉及到相互联系、相互作用的两种不同介质，这一特点使得它比刚性储液罐的研究更为复杂。早期的研究一般都是假定罐底固定不动，这类假设对于锚固罐是适用的，但是应用于非锚固罐上，就会造成较大的误差。由于锚固罐与非锚固罐存在较大的差别，因此储液罐的抗震研究又分为以锚固罐和非锚固罐两条主线。

#### 3.1 锚固罐

在 20 世纪 30、40 年代中期，Hoskins 等(1934)进行了刚性储液罐研究的开创性工作。Housner(1957)提出的质量-弹簧系统的模型影响较为深远，该模型假设液体无旋、不可压，且流体质点位移为小量，将地震引起的作用在刚性壁上的动液效应分为脉冲分量和对流分量。但 Housner(1957)的模型没有考虑罐壁的弹性变形与液体的耦联及储罐与地基的相互作用，其给出的地震剪力和地震弯矩偏低，按其理论设计的大量美国储罐在 1964 年的阿拉斯加地震中遭到破坏，从而促使人们去研究液体和罐壁的耦联振动问题，即按弹性罐壁考虑储液罐振动。基于 Chopra 关于坝-库水系统动水压力研究工作(Habenberger, 2003)考虑柔性罐壁与液体耦联振动的影响，较著名的理论为 Veletsos 理论。该理论表明，柔性储液罐的动水压力比假定为刚性壁罐时的动水压力大得多，说明刚性罐壁低估了动水压力的影响，刚性罐壁的假定在抗震设计中是偏于不安全的。

第一位应用有限元方法研究罐-液耦合振动的是 Edwards(1969)。后来用有限元理论研究储罐抗震的主要有 Haroun(1983)。罐体采用壳理论，流体应用势流理论，结构和流体的位移是小量，整个研究按线性处理。采用三维有限元计算固有特性和动力响应，从理论上说这种分析是合理的，它能够真实的从数值上模拟储罐的振动情况，但缺点是计算量太大，尤其再考虑非线性，程序无法编制，工程上很难应用。

Harnoun 等(1981)将罐内液体看作一连续体，应用速度势理论和边界积分法将液体的质量转化为附加质量而施加到罐壁上，同时，对罐壁则用四自由度环壳进行有限元离散。该方法使得系统的自由度数为减少。

Hwang 等 (1989) 将罐壁和流体分成 2 个子结构, 由液体的动压力将 2 个子结构联系起来, 罐壁的位移用空罐的前几个固有频率的线性组合来表示, 在流体域用边界积分确定液动压力, 再将其组合到罐的有限元方程中, 在忽略液体自由表面晃动的情况下, 分析了柔性储液罐对任意地面运动的反应。

Lay (1993) 用类似的方法对充液圆柱罐和球罐作了地震反应时程分析。对储罐简化分析模型的研究历来受到重视, 其中, Haroun-Housner 模型 (Haroun, 1983) 已经被我国储罐抗震鉴定标准所采纳 (中华人民共和国石油化工行业标准, 2005), 该模型考虑了对流分量、柔性脉动分量 (随罐壁同步运动) 和刚性脉动分量 (随地面一起运动)。

曹志远等 (1986) 研究了流体介质的半解析处理方法, 并和结构有限元一起建立一种组合单元, 采用结构与流体泛函的联合变分, 建立耦联算式, 以解决流体与结构动力相互作用问题, 可以给出液面晃动特性和考虑结构变形的动水压力分布。

目前, 对锚固储液罐的研究已经得出了以下一些结论: 储液罐容器的动力响应在环向主要是多波的壳体振动, 而非梁式振动; 罐体的弹性变形增加了动水压力, 液体的晃动影响在罐体的响应中是重要的; 罐体振动模态由竖向模态和环向模态组合构成; 在相同幅值振动力作用下, 水平振动要比竖向振动容易使储液罐出现失稳; “象足效应”和“菱形效应”破坏是稳定问题; 脉动压力与晃动压力之间耦合作用很弱。

### 3.2 非锚固罐

非锚固罐的抗震研究起步较晚, 真正用于工程实际的研究成果更少。目前主要研究提高机理及失稳、强度破坏等问题。罐的脱离振动非常复杂, 涉及到底板、罐壁的几何非线性, 罐底与地基的边界非线性, 国内外多采用模型试验和理论研究相结合的途径。

非锚固罐脱离实验研究始于 1964 年阿拉斯加地震后, Clough 领导的地震工程研究中心 (EERC) 从 1977 年到 1982 年进行了一系列大规模的实验研究。陈厚群等 (1990) 按几何相似原理模拟了  $5 \times 10^4 \text{m}^3$  浮顶油罐, 进行了抗震试验研究, 试验证明罐壁振动的动力放大效应十分显著, 罐壁地震反应中的多波效应非常突出, 油罐罐底翘离影响很大, 浮顶能显著降低晃动波高。Liu 等 (1983) 将底板视为刚性, 罐体倾斜小角度, 用有限元进行求解。Ralf Peek 等 (1988) 采用有限差分法进行了翘离计算, 这些工作都是采用二维模型。Cambra (1982) 也提出了一个近似分析方法。

20 世纪 80 年代中期至 90 年代, 国内学者对油罐的抗震安全分析进行了大量的试验及理论研究, 如: 采用化学震爆 (韦树莲等, 1986a; 1986b; 徐振贤等, 1986)、地震台激励 (覃柳林等, 1986; 秦延龙等, 1986; 李长昇等, 1990) 等方法, 对非锚固模型罐的动态响应、液面波动、底板脱离、屈曲等进行了一系列的研究。沈国光等 (1990)、李德笃等 (1990) 对粘性波浪及储液罐液面安全超高进行了研究, 并考虑了阻尼的影响。周建明等 (1990) 提出了储液翘离影响的近似计算。韦树莲等 (1986a; 1986b) 进行了模型罐的屈曲破坏试验。唐友刚等 (1996; 1997a; 1997b) 对储液罐翘离进行了实验研究, 并对液-固-土耦合非线性振动进行了研究, 提出了储液罐翘离振动分析理论, 给出了考虑翘离的储液罐地震响应的计算方法。

随着计算机技术的发展, 有限元分析技术也得到了发展, 能够考虑多种非线性因素的影响。Ali (2000; 2002) 在其博士论文中采用 DYNAB 软件对非锚固储液罐的非线性地震时程响应进行了研究, 该程序考虑了液面的大幅晃动、几何非线性、材料非线性、接触非线性等。

日本学者采用有限元计算及大比例模型台实验的方法进行了储液罐抗震的相互验证 (Hideyuld Tazuke 等, 2002), 结果表明实验与有限元分析结果很接近, 并由此将有限元计算推广到一个实际储液罐的计算方法中。近年来, 国内学者采用有限元方法对储液罐的抗震问题进行了一系列的研究, 如: 储液罐耗能减震、场地土对油罐性能影响、基于损伤的抗提离研究等 (秦小勇, 2002; 周利剑, 2003; 王莉莉, 2003; 刘焕忠, 2004)。

根据目前已有的研究结果, 得到的有关非锚固罐的主要结论有: 无锚固储液罐的主要动态特征就是提离和它的非线性; 无锚固罐的动力响应远大于锚固罐的情况; 提离时储液罐的动态放大效应十分显著; 提离振动和变形是多重非线性的, 线性分析不能反映提离的动态特性; 柔性基础与刚性基础相比, 能够增加提离高度, 降低罐壁底部竖向应力集中程度; “象足屈曲”是由于环向应力和竖向应力共同作用的结果; 临界屈曲应力高于规范的建议值, 也高于其他提离简化模型的计算值; 菱形屈曲是在接近屈曲极限的环向应力和超过屈曲临界值的竖向应力共同作用的结果; “象足效应”和“菱形屈曲”是由提离导致失稳而破坏的问题。

## 4 现阶段研究及展望

近年来, 越来越多的大型储液罐建在软弱场地上, 由于罐液晃动周期较长, 软土地场长周期成份地震波丰富, 因此, 软土-罐-液耦合作用问题一直是研究的重点。合理确定不同型号的储液罐的抗震设防标准尤其重要。在储液罐抗震设计方面, 我国学者在储液罐的抗震研究方面多集中于无锚固储液罐, 特别是针对其强度、刚度和稳定性等问题。采用有限元法模拟分析其在地震激励作用下的响应; 同时还采用了一些实验方法进行研究, 对理论成果进行了验证, 为储液罐的抗震设计提供依据。储液罐抗震研究非常复杂, 涉及到材料非线性、几何非线性、移动边界等多重非线性的耦合。在今后的工作中还需要考虑非轴对称载荷和罐的几何缺陷等对失稳条件的影响, 国内进行模型试验研究较少, 今后应予以重视, 以达到理论与实践的统一。

## 参考文献

- 曹志远, 翟桐, 1986. 结构-内部流体耦合振动的半解析元法. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 陈厚群, 王森元, 胡晓, 朱栗武, 1990. 外浮顶储液罐抗震试验研究. 见: 立式储液罐抗震. 北京: 地震出版社.
- 初大勇, 孙建刚, 2005. 立式浮放储液罐地震反应试验研究 [硕士学位论文]. 大庆石油学院.
- 李长昇, 1990. 粘性液体储液罐模型振动试验. 见: 立式储液罐抗震. 北京: 地震出版社.
- 李德笃, 沈国光, 项忠权, 1990. 储液罐液面的安全超高. 见: 立式储液罐抗震. 北京: 地震出版社.
- 李扬, 李自力, 张艳, 2009. 中美欧储液罐抗震规范中地震作用的比较研究. 世界地震工程, **25** (1): 122—130.
- 刘焕忠, 2004. 附加质量法在储液罐动力分析中的应用研究 [硕士学位论文]. 清华大学.
- 秦小勇, 2002. 储液罐静力与地震动力响应有限元数值分析 [硕士学位论文]. 大连理工大学.
- 秦延龙, 孙纪安, 杨庭振, 杨玉霞, 刘凤岐, 徐振贤, 1986. 三万方浮顶油罐地震反应的模型试验与分析. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 沈国光, 李德笃, 1990. 关于粘性波浪. 见: 立式储液罐抗震. 北京: 地震出版社.

- 覃柳林, 李力, 1986. 储液罐动力载荷的试验分析. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 唐友刚, 1996. 储液罐翘离实验研究及流-固-土耦合非线性振动分析 [博士学位论文]. 天津大学.
- 唐友刚, 董艳秋, 项忠权, 田凯强, 1997a. 储液罐液-固-土耦合非线性形翘离振动分析. 地震工程与工程振动, **17** (1): 95, 101.
- 唐友刚, 张泽盛, 李长升, 杨春晖, 1997b. 无锚固储液罐流体速度势及简化模型. 水利学报, **9**: 42—47.
- 王莉莉, 2003. 季节性冻土影响的储罐地震反应分析 [硕士学位论文]. 大庆石油学院.
- 韦树莲, 覃柳林, 梁羽, 孙恒智, 倪振理, 汤卫和, 1986a. 储液罐野外化爆振动试验报告: 敞口罐与浮顶罐的比较. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 韦树莲, 覃柳林, 梁羽, 孙恒智, 倪振理, 汤卫和, 1986b. 模型储液罐野外屈曲破坏试验. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 徐英, 杨一凡, 朱萍, 2005. 等球罐和大型储罐. 北京: 化学工业出版社, 176—178.
- 徐振贤, 刘凤岐, 杨庭振, 李宝贵, 傅同增, 1986. 人工地震作用下储液罐模型的动力反应. 见: 圆柱形储液罐抗震论文集. 北京: 地震出版社.
- 周建明, 项忠权, 1990. 储液罐翘离影响的近似计算. 见: 立式储罐抗震. 北京: 地震出版社.
- 周利剑, 2003. 立式钢制储罐基于损伤性能的抗提离研究 [硕士学位论文]. 大庆石油学院.
- 中华人民共和国国家标准, 1993. 构筑物抗震设计规范 (GB 50191-93). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国行业标准, 1999. 石油化工钢制设备抗震设计规范 (SH 3048-1999). 北京: 中国石化出版社.
- 中华人民共和国石油化工行业标准, 2005. 钢制常压立式圆筒形储罐抗震鉴定标准 (SHT 3026-2005). 北京: 中国石化出版社.
- Ali El-Zeiny, 2000. Nonlinear Time-Dependent Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tanks [Ph.D dissertation]. University of California.
- Ali El-Zeiny, 2002. Study of Factors Affecting The Seismic Response of Unanchored Tanks. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference June 2-5, 2002, Columbia University, New York: 1—9.
- American Petroleum Institute (API), 2007. Welded Storage Tanks for Oil Storage, API650.
- Cambra F.J., 1982. Earthquake Response Considerations of Broad Liquid Storage Tanks. Univ. of Calif, Berkeley Calif, UCB/EERC-82/07.
- European Committee for Standardization, 2004. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance.
- Edwards N.W., 1969. A procedure for dynamic analysis of thin walled liquid storage tanks subjected to lateral ground motions [Ph.D dissertation]. University of Michigan.
- Hwang I.T., Ting K., 1989. Boundary element method for fluid-structure interaction problems in liquid storage tanks. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, **111** (4): 435—440.
- Harnoun M.A., Housner G.W., 1981. Earthquake response of deformable liquid storage tanks. Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, **48** (2): 411—418.
- Haroun Medhat A., 1983. Vibration studies and tests of liquid storage tanks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **1** (2): 179—206.
- Hideyuld Tazuke, Satoru Yamaguchi, Kazuo Ishida, Tomoki Sakurai, Hiroshi Akiyama, Toshio Chiba, 2002. Seismic proving test of equipment and structures in Thermal Conventional Power Plant. J. Pressure Vessel

- Technology, **124** (5): 133—143.
- Hoskins L.M. and Jacobsen L.S., 1934. Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. Bulletin of the Seismological Society of American 24 (January 1934): 1—32.
- Housner G.W., 1957. Dynamic pressure on accelerated fluid containers. Bull. Seism. Soc. Am., **47** (1): 15—35.
- Habenberger J., 2003. Tanks and Its Application Schwarz. Simplified Models for Flexibly Supported Liquid Storage to Eurocode 8, Part 4. 339—348.
- Lay Khai Seong, 1993. Seismic coupled modeling of axisymmetric tanks containing liquid. Journal of Engineering Mechanics, **119** (9): 1747—1761.
- Liu Wing Kam, Lam Dennis, 1983. Nonlinear analysis of liquid-filled tank. Journal of Engineering Mechanics, **109** (6): 1344—1357.
- Ralf Peek, 1988. Analysis of unanchored liquid storage tanks under lateral loads. Earthquake Engineer and Structure Dynamics, **16** (7): 1087—1100.

## An Overview on Earthquake Safety of Liquid Storage Tank

Fang Hao<sup>1)</sup>, Wu Hao<sup>2)</sup>, Wang Duguo<sup>2)</sup> and Chen Guoxing<sup>2)</sup>

1) Sinopec Gas Company, Beijing 100029, China

2) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

**Abstract** The determination of seismic fortification standards and the anti-seismic design of tanks are two main issues in earthquake safety of liquid storage tanks. In this paper we briefly describe the damage phenomena of the tanks and their mechanism, then compare and analyze the earthquake-proof standards of China, the United States and Europe. After summarizing the current results from Chinese and foreign scholars on the seismic fortification calculation of the liquid storage tank, we point out some existing problems and the development trend in future research.

**Key words:** Liquid storage tanks; Seismic fortification standard; Coupling