

储罐地震动力响应的尺寸效应与数值模拟研究

魏世龙* 苟卫强 金兆鑫 赵邓小江

兰州石化职业技术大学土木工程学院 甘肃兰州 730060

DOI:10.32629/ems.v8i6.20568

[摘要] 钢制储罐是能源储运核心设施,地震易引发罐壁屈曲、泄漏等灾害,其动力响应存在显著尺寸效应。为揭示尺寸与抗震性能的关联,本文基于 ADINA 平台建立 $2000\sim 100000\text{m}^3$ 八种容积储罐模型,设置五种储液高度,输入 El-Centro 波开展地震响应分析。结果表明:储液晃动最大峰值随储液高度与储罐容积增大而升高;竖向应力峰值集中于罐壁底部,高 K 值小容积储罐更易发生象足屈曲;环向应力峰值位置随 K 值减小而上移,低 K 值大容积储罐更易出现菱形屈曲。

[关键词] 尺寸效应; 变形参数; 数值模拟; 应力分析

钢制储罐作为能源储运体系的核心承载设施,是保障能源供给安全与国民经济稳定运行的关键一环。历次强震灾害表明,储罐在地震作用下容易出现如罐壁屈曲、顶盖破损、连接失效甚至整体性倒塌等形式的破坏,这些破坏又会诱发如泄漏、火灾、爆炸及生态污染等连锁风险,造成严重的灾害^[1,2]。因此,针对储罐的地震响应机理、抗震设计理论与防控方法的研究是极具理论价值与工程实践意义的,但其地震动力响应属于强非线性动力学问题,受液体晃动效应、罐壁与液体流固耦合 (Fluid-Structure Interaction, FSI) 作用等多重因素共同控制,力学行为复杂,仍处于机理揭示与量化表征方面的持续深化阶段^[3,4]。

储罐的几何尺寸,包括半径 (R)、高度 (H) 等是决定其自身动力特性的根本因素。不同尺寸的储罐,其高径比 (H/R) 等差异显著,导致其在地震作用下的动力响应行为——即“尺寸效应”表现出巨大差异。此外,储液高度不仅改变了系统的总质量和质心位置,还直接影响液体晃动模态和流固耦合效应的强度,是影响储罐地震响应的另一关键变量。目前,国内外学者已通过理论分析、振动台试验和数值模拟等手段对储罐地震响应进行了大量研究^[5,6]。其中,以 ADINA、LS-DYNA 等为代表的有限元数值模拟方法,因其能够精细模拟复杂的几何、材料非线性和流固耦合效应,已成为研究该问题的主流手段^[7,8]。然而,针对一系列不同容积储罐尺寸效应的系统

性、参数化研究尚不充分,尤其缺乏一个能够综合表征尺寸效应并指导工程设计的简化指标。

为此,本文依托 ADINA 有限元平台,选取实际工程常见的八种典型容积储罐作为研究对象,系统开展多工况下的地震动力响应分析。通过引入变形参数 K,对储液最大晃动值、罐壁竖向与环向应力、罐壁加速度峰值等标进行量化分析,系统揭示储罐地震响应的尺寸效应机制,分析尺寸效应与象足屈曲、菱形屈曲等典型震害的内在关联,为大型储罐抗震设计优化与全生命周期安全评估提供可靠的理论支撑与技术参考。

1 有限元模型的建立与参数设定

选用的八种典型容积储罐模型如图 1 所示,几何参数如表 1 所示。每种储罐分别设置了空罐 0、 $1/4H_0$ 、 $1/2H_0$ 、 $3/4H_0$ 、 H_0 (H_0 为储罐设计液位高) 五种工况。模型选用钢材弹性模量 E 、地基弹性模量 E_0 、罐体密度 ρ 、盛装液体密度 ρ_0 、钢材泊松比 ν 、地基泊松比 ν_0 、盛装液体体积模量 κ 依次为 $2.06\times 10^5\text{MPa}$ 、 230MPa 、 7850kg/m^3 、 1000kg/m^3 、 0.3 、 0.3 、 $2\times 10^9\text{Pa}$ 。模型处于 III 类场地类别,设防烈度为 7 度 (0.1g)。有限元建模时,罐壁和罐底板采用 SHELL 壳单元进行模拟。罐内液体采用三维势流体单元 (3D Potential-based Fluid Elements),该单元对模拟无旋、无粘、不可压缩流体的晃动问题十分高效。为实现流固耦合,模拟时将液体自由表面设

定为自由面单元,其余与罐体接触的界面设定为流体面单元, ADINA 软件能够很好的模拟此类问题,并兼具较高的计算效率与收敛性。地基采用 8 节点三维实体单元(3D-Solid),为保证对应力集中和晃动波高精确捕捉,对模型网格进行精细划分,对罐底与罐壁连接处及液体自由表面附近进行加密处理。模拟时,选用符合III类场地类别的 El-Centro 波作为地

震动进行输入。

引入变形参数 K,其可以综合评价储罐几何尺寸(H,R,t) 对其抗震性能的影响。K 值越大,表示储罐相对“细高”或“厚壁”,抵抗变形的能力相对较强。其表达式为:

$$K=\sqrt{H/R\sqrt{t/R}}$$
 (1)

表 1 储罐相应几何参数

容积 (m³)	半径 R (m)	罐高 H (m)	设计液位 H ₀ (m)	壁厚 t (m)	变形参数 K
2000	7.25	12.69	11.19	0.0065	0.228
3000	8.25	14.72	12.77	0.0085	0.235
5000	11	14.72	12.77	0.0115	0.205
1×104	14.25	15.85	14.35	0.0155	0.192
2×104	20.25	15.85	14.35	0.0155	0.147
3×104	23	19.35	17.85	0.0225	0.162
5×104	30	19.35	17.85	0.0315	0.145
10×104	40	21.8	20.3	0.034	0.126

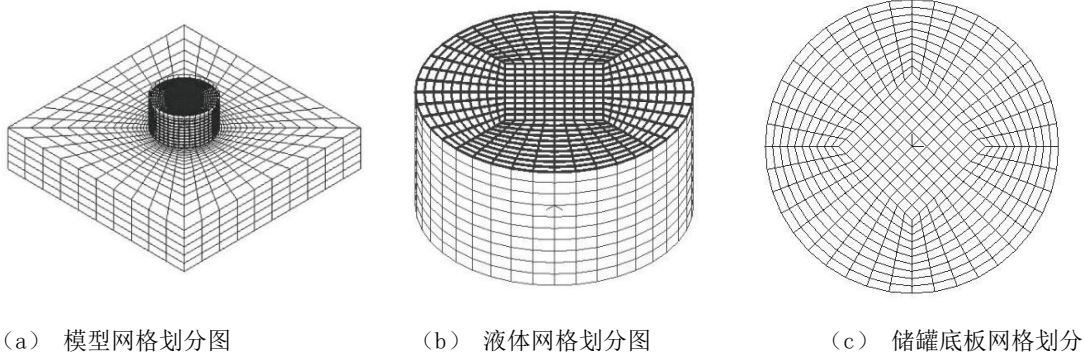


图 1 模型图

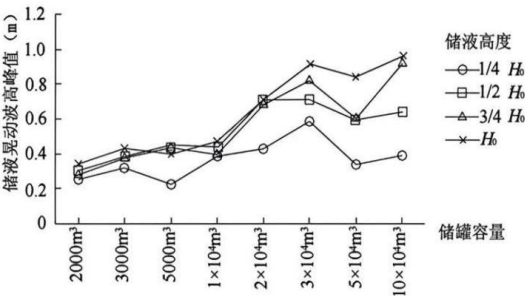


图 2 储液晃动位移最大峰值

2 计算结果与分析

2.1 储液晃动波高分析

液体晃动是储罐地震响应的重要组成部分,其产生的对流压力和冲击力是导致罐顶或浮盘等各类破坏的主要因素。不同工况下储液晃动最大峰值,如图 2 所示。

由图 2 分析得出:各储罐储液晃动峰值随储液高度的升高整体表现出上升趋势。当液位低于 1/2H₀时此种增幅区别表现的更为突出,说明该区间液体晃动的一阶频率与地震波卓越频率更有可能产生共振效应。在相同储液比例下,晃动峰值随变形参数 K 值的减小呈现出持续升高的现象,这表明矮胖型大型储罐内由于液体体积更大,液体晃动效应更显著,

对罐顶结构的冲击破坏风险更高。

2.2 罐壁竖向应力分析

罐壁竖向压应力是诱发罐体“象足屈曲”的直接诱因之一。本文通过不同液位工况,分析了竖向应力沿罐壁高度的分布规律,分析时,将储罐从下到上依次等分为12份。并给出了 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐满液状态下的竖向应力云图,同时也对各储罐在多种工况下的竖向应力峰值进行了对比分析,以揭示罐壁竖向应力的分布特性与控制机制。

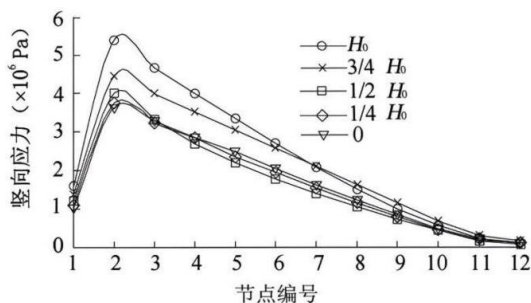


图3 储罐罐壁竖向应力分布

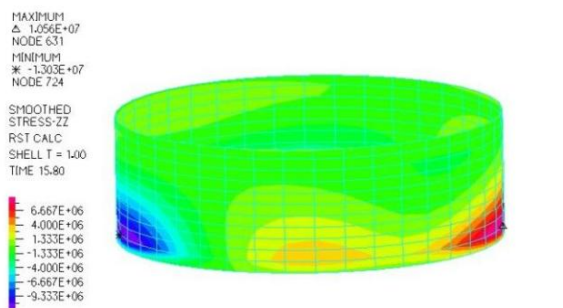


图4 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐竖向应力云图

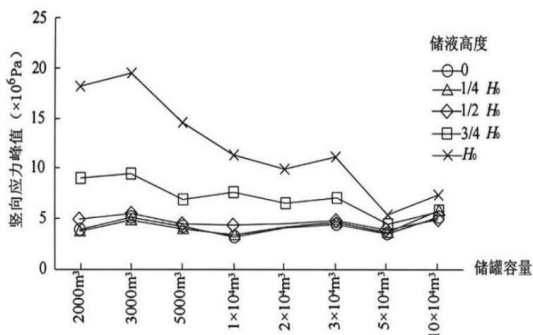


图5 各储罐罐壁竖向应力峰值对比

由图3-图5所得:各工况下罐壁竖向应力峰值均出现在底部区域,这是由罐底固支约束弯矩与地震倾覆力矩产生的轴向压力共同叠加所致,该部位为“象足屈曲”易损区,模

拟规律符合震害实测现象。应力沿罐壁高度向上快速衰减。

在满液等高液位条件下,变形参数K值更大的小容积储罐,其竖向应力峰值更高,屈曲风险更大。

2.3 罐壁环向应力分析

罐壁环向应力由动水压力的脉冲分量与对流分量共同作用产生,是诱发“菱形屈曲”的关键因素之一。本文通过图6对环向应力峰值进行对比分析,同时限于篇幅,图7仅给出高K值代表 2000 m^3 储罐与低K值代表 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐满液状态下环向应力云图,以揭示其分布规律与尺寸效应。

由图6、图7所得:罐壁环向应力峰值分布具有显著尺寸效应。高K值小容积高瘦型储罐,环向应力峰值集中于罐壁中下段;低K值大容积矮胖型储罐因罐壁刚度更低、高阶振型效应更显著,应力峰值上移至罐壁中上段,且高应力区域分布更广泛。总体看,K值越大,环向应力峰值越高,主要因为小容积储罐壁厚偏薄,对动水压力的承载能力较弱,故会因应力集中而引发“菱形屈曲”。

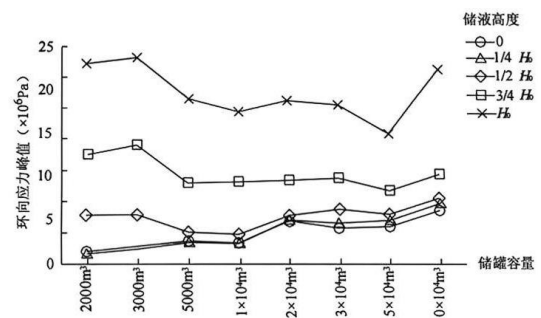
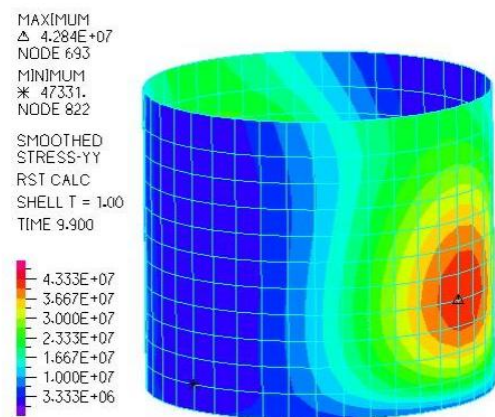


图6 不同储罐罐壁环向应力峰值分布



2000 m^3 储罐环向应力云图

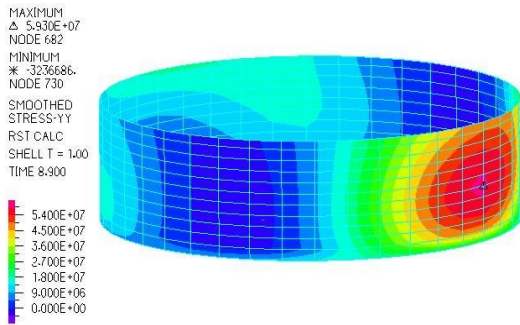
10×10⁴m³储罐环向应力云图

图7 不同储罐满罐时环向应力沿高度分布对比

2.4 罐壁加速度响应分析

空罐罐壁加速度响应能够体现结构自身动力放大特性,因此,图8给出了各储罐空罐工况下的加速度峰值分布规律。

图8结果表明:储罐加速度响应随变形参数K值减小、容积增大而显著提升,10×10⁴m³特大型储罐加速度峰值表现尤为明显,也反映出大容积储罐刚度更低,高阶振型与流固耦合效应更强,动力放大效应更为显著的特性。

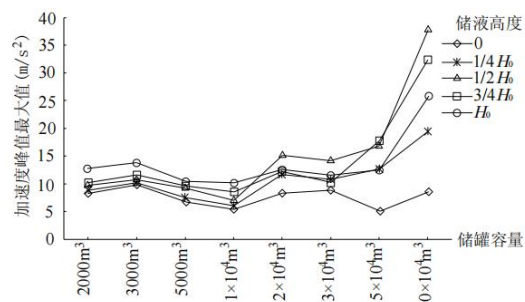


图8 不同工况下的储罐最大加速度

3 结论

本文针对八种不同容积储罐在五种储液高度工况下的地震动力响应进行了系统模拟与分析,也就储罐的尺寸效应问题进行了深入探讨,得出以下主要结论:

(1) 变形参数K值更大的小容积储罐,其竖向应力峰值更高,出现“象足屈曲”的风险更大。K值越大,环向应力峰值越高,会因应力集中而引发“菱形屈曲”的可能性也更大。

(2) 在相同储液比例下,晃动峰值K值的减小呈现出持续升高的现象,这表明矮胖型大型储罐内由于液体体积更大,液体晃动效应更显著,对罐顶结构的冲击破坏风险更高。

(3) 储罐加速度响应随K值减小、容积增大而显著提升。大容积储罐刚度更低,高阶振型与流固耦合效应更强,动力放大效应也更为显著的特性。

【参考文献】

- [1] Tkachenko V R. Dynamics of Tank with Liquid with Free Surface Under Variable External Force[J]. International Applied Mechanics, 2026, 61(5):1-7.
- [2] 李鹏飞,孔德睿,方超,等.核储液罐实体与质量弹簧流固计算模型对罐体水平地震响应影响分析[J].化工设备与管道, 2025, 62(06):44-49.
- [3] 罗诒红,周中一,唐泽寰,等.大型混凝土储液罐考虑穹顶效应的动力响应研究[J].工程力学, 2024, 41(12):128-137.
- [4] 周俊文,赵鸣.考虑竖向地震的液化天然气提离储液罐动力响应分析[J].工业建筑, 2020, 50(04):39-43+38.
- [5] 赵懿,杨轲,李宏男,等.深浅液位下储液罐振动台试验研究[J].建筑结构学报, 2026, 47(02):107-116.
- [6] 王向英,赵诗扬,张洋,等.引入SPH方法的储液罐地震反应分析[J].自然灾害学报, 2018, 27(03):103-109.
- [7] 张如林,程旭东,王淮峰,等.竖向地震作用对储液罐地震响应的影响分析[J].地震工程学报, 2017, 39(04):592-599.
- [8] 夏阳.大型储液罐的抗震性能分析及复合支座隔震研究[J].防灾减灾工程学报, 2017, 37(06):994-1000.

基金项目:甘肃化工产业研究院项目:超大型储罐地震响应分析与地基处理(2025GH-13)

作者简介:魏世龙(1987年—),男,博士,副教授,主要从事建筑结构抗震和建筑工程教学研究, E-mail: weishilong61@163.com。