

DOI: 10.11779/CJGE2023S10045

半地下式 LNG 储罐地震响应的离心试验研究

郭亦涵^{1,2}, 王永志^{*1,2}, 汤兆光^{1,2}, 袁晓铭^{1,2}, 王体强^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以半地下式 LNG 储罐的地震响应和桩基础对半地下式 LNG 储罐的抗震性能影响为研究目的, 设计并开展动力离心模型试验, 通过对比有桩和无桩储罐的地震响应加速度、摆角、储液晃动波高等差异, 验证桩基础对半地下式 LNG 储罐抗震性能的提升效果。结果表明: 以自振周期为控制参数的大型 LNG 储罐离心试验设计方法满足设计原则和要求; 0.05g、0.1g、0.3g El Centro 波荷载下, 桩基础减小了储罐罐顶 5.0%~36.6% 的水平加速度、13.8%~33.6% 最大摆角和 8.4%~18.8% 储液晃动波高等地震响应, 桩基础有利于提高半地下式 LNG 储罐的抗震性能。

关键词: LNG 储罐; 设计方法; 桩基础; 地震响应; 离心模型试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0210-04

作者简介: 郭亦涵(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事重大设施抗震研究方面的工作。E-mail: gyhcheericy@163.com。

Centrifugal model tests study on seismic response of semi-underground LNG storage tank

GUO Yihan^{1,2}, WANG Yongzhi^{1,2}, TANG Zhaoguang^{1,2}, YUAN Xiaoming^{1,2}, WANG Tiqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin, 150080, China)

Abstract: In order to study the seismic response laws of a semi-underground LNG storage tank and the influences of pile foundation on its seismic performance, a dynamic centrifugal model test is designed and carried out. By comparing the acceleration, swing angle and liquid slosh wave height of pile and non-pile tanks under earthquake, the improvement effects of pile foundation on the seismic performance of the semi-underground LNG storage tank are discussed. The results show that the experimental design method for the large LNG storage tank centrifuge with natural vibration period as the control parameter meets the design principles and requirements. Under the loadings of El Centro waves of 0.05g, 0.1g and 0.3g, the pile foundation reduces the horizontal acceleration of 5.0%~36.6%, the maximum swing angle of 13.8%~33.6% and the slosh wave height of 8.4%~18.8%. The pile foundation is beneficial to improve the seismic performance of semi-underground LNG storage tank.

Key words: LNG storage tank; design method; pile foundation; seismic response; centrifugal model test

0 引言

大型 LNG 储罐作为国家重大战略设施, 其地震安全性是当前工程抗震领域关注的核心问题之一。中国现有 LNG 储罐以地上为主, 而半地下和地下储罐是未来储罐发展的主要形式, 如刚刚建成的龙口 LNG 项目^⑤储罐, 原因为地下储罐具有节省地面空间、防空中碰撞安全性高、泄露产生影响小、降低风/雨/日照环境长期危害等特点。

近几年来, 国内外学者针对储罐的抗震安全问题, 通过物理试验和数值方法进行了大量研究。Park 等^[1]通过动力离心试验, 对比了 3 种不同类型基础下 LNG 储罐动力特性的差异。Sahraeian 等^[2]基于多组离心物

理试验, 探讨了饱和、干砂场地上桩筏基础油罐的力学性能。Sharari 等^[3]采用 ABAQUS 评估了 LNG 储罐在端承桩和摩擦桩基础上的地震反应, 并考虑了 SFSI 效应。Luo 等^[4]开展振动台试验, 分析了不同场地条件下保温层和场地效应对 LNG 储罐地震响应的影响, 并验证数值方法。Zhao 等^[5]利用 SPH-FEM 数值方法, 探讨了 16 万 m³ LNG 预应力储罐在不同液位条件下的

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2019EEEVLO203); 国家自然科学基金项目(51609218); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E035)

收稿日期: 2023-07-05

*通信作者 (E-mail: yong5893741@163.com)

地震响应。Chen 等^[6-7]借助振动台试验与数值模拟方法, 给出了非隔震储罐和隔震储罐地震反应特征, 并提出了简化力学模型。Luo 等^[8]探讨了振动台试验储液罐在地震作用下的晃动波高度规律, 分析了不同计算方法的适用性。总体而言, 以往 LNG 储罐的物理试验和数值方法研究, 主要集中于地上 LNG 储罐地震反应与抗震性能, 而对半地下、地下及超大型 LNG 储罐的地震响应研究尚待深入。

本文以中国某 27 万 m³ 大型 LNG 储罐为原型, 设计与开展半地下式 LNG 储罐动力离心模型试验, 发展考虑自振周期的储罐设计方法, 对比有桩、无桩基础的半地下式 LNG 储罐地震响应, 分析储罐加速度、摆角、晃动波高等影响特征与规律。设计方法和研究成果, 将为 LNG 储罐离心模型试验提供借鉴。

1 试验介绍

1.1 试验设备

试验利用中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 动力离心机完成, 该离心机有效半径 5.0 m, 离心加速度 100g, 振动负载 1500 kg, 振动台加速度 30g, 振动位移 ± 15 mm, 频宽 10~300 Hz。振动台面 1.6 m \times 0.8 m, 设备如图 1 所示。试验采用层状剪切箱(如图 2 所示), 以减小模型箱的边界效应。



图 1 DCIEM-40-300 动力离心机试验设备

Fig.1 DCIEM-40-300 dynamic centrifuge test equipment

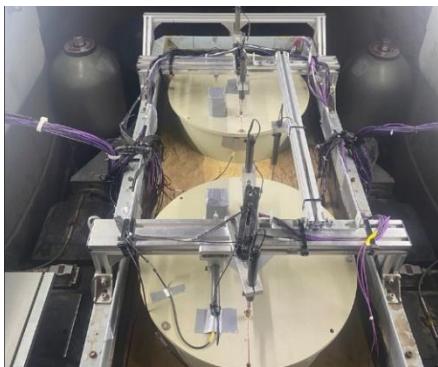


图 2 层状剪切箱和试验模型

Fig. 2 Laminar container model box and test model

1.2 试验模型

试验储罐模型设计参照 API650 规范^[9], 选取储罐

自振周期 T_i 为主要设计控制参数, 其计算公式如下:

$$T_i = \frac{1}{20\sqrt{5}} C_i H \sqrt{\frac{D}{t_u}} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (1)$$

式中: C_i 为罐液耦合系数; H 为储罐设计高度; t_u 为罐壁厚度; D 为储罐直径; ρ 为储液密度; E 为罐体材料弹性模量。

根据 LNG 储罐原型自振周期 $T_1=0.575$ s, 试验 LNG 储罐模型选用 PP 塑料, 弹性模量为 890 MPa, 外径 400 mm, 高 280 mm, 壁厚 5 mm。由式(1)计算的储罐模型自振周期 $T_2=0.01145$ s, $T_1/T_2=50.22$, 满足试验模型周期相似比要求。桩基原型为 20 根外径 0.5 m, 内径 0.3 m 的预应力管群桩, 以抗弯刚度 EI 为相似控制参数, 结合加工难度和考虑尺寸效应, 将群桩基础简化为 5 根钢管桩, 其设计参数计算公式如下:

$$4E_{\text{原}} \frac{\pi}{64} (D_{\text{原}}^4 - d_{\text{原}}^4) = N^4 E_{\text{模}} \frac{\pi}{64} (D_{\text{模}}^4 - d_{\text{模}}^4) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{原}}$ 和 $E_{\text{模}}$ 分别为原型和模型桩材料的弹性模量; N 为几何相似比; $D_{\text{原}}$ 和 $D_{\text{模}}$ 分别为原型和模型桩的外径, $d_{\text{原}}$ 和 $d_{\text{模}}$ 分别为原型和模型桩的内径。

试验桩基模型材料选用 6061-T6 铝合金, 桩长 270 mm, 外径 15 mm, 内径 13.6 mm。本试验罐体和群桩的主要设计参数和相似比, 如表 1 所示。试验选用福建标准中砂, 采用砂雨法制作地基模型, 控制相对密实度为 80%。

表 1 试验模型参数

Table 1 Parameters of test model

部件	参数	原型	模型
罐体	外径/m	96	0.4
	罐壁高度/m	47	0.28
	罐壁厚度/mm	30	5
	自振周期/s	0.575	0.01145
群桩	外径/mm	500	15.0
	内径/mm	300	13.6
	抗弯刚度/N·m ²	1.708×10^9	277.846

1.3 试验方案设计

试验模型设计和传感器布设如图 3 所示, 土体内布设 3 列加速度传感器, 用以测量土体动力响应; 储罐内壁布设孔压传感器, 监测振动荷载下罐内液体的晃动情况; 储罐底部和穹顶布设加速度传感器, 监测储罐的动力响应。试验离心加速度为 50g, 选用 El Centro 波作为振动台输入荷载, 包含峰值为 0.05g, 0.1g, 0.3g 等 3 个工况, 台面记录的 0.3g El Centro 波加速度时程, 如图 4 所示。需要指出, 本文数据除特别说明外均为经相似比换算后的原型数据。

2 试验结果分析

2.1 储罐的自振频率

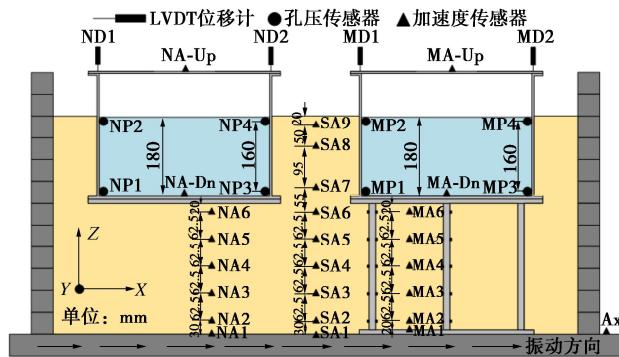


图3 试验模型设计与传感器布置

Fig. 3 Model design and layout of instruments

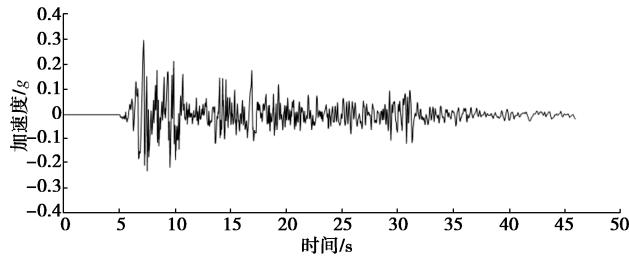


图4 台面记录 0.3g El Centro 波加速度时程

Fig. 4 Time histories of acceleration of earthquake with El Centro waves of 0.3g recorded on shaking table

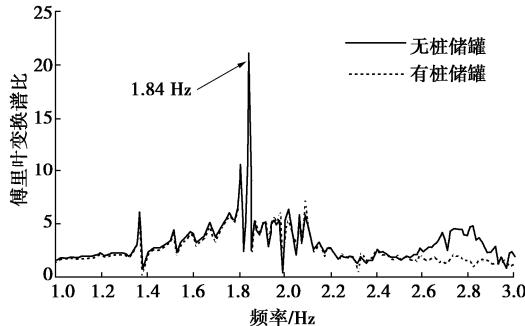


图5 储罐加速度傅里叶变换谱比

Fig. 5 Fourier transform acceleration spectral ratios of storage tank

利用罐底土体和罐顶的加速度幅值谱比分析储罐的自振频率, 0.05g El Centro 波下, 有桩和无桩储罐的加速度谱比如图 5 所示, 可知两种基础的储罐自振频率基本相同, 均约为 1.84 Hz, 对应原型自振周期为 0.543 s, 与设计目标自振周期 0.575 s 误差 5.6%。该试验结果, 一方面说明了以储罐自振周期为离心模型设计的控制参数, 具有可行性; 另一方面, 说明了该离心试验模型设计, 满足设计要求和原则。

2.2 储罐地震动力响应

图 6 给出了加速度峰值为 0.05g, 0.3g El Centro 波荷载下有桩和无桩储罐的罐顶、罐底与台面的加速度反应谱; 表 2 给出了各个工况下罐顶加速度峰值及放大系数。从图 6 可发现, 0.05g El Centro 波荷载下, 有桩和无桩储罐的加速度响应基本一致, 幅值和周期无明显差异; 而 0.3g El Centro 波荷载下, 有桩和无桩

储罐罐顶的加速度响应差异显著, 无桩储罐的加速度峰值和特征周期, 分别高于和低于有桩储罐, 一定程度说明储罐地震响应主要受周围土体影响, 而受桩基影响较小。从表 2 可得出, 在 0.05g, 0.1g, 0.3g El Centro 波荷载下, 桩基础使储罐罐顶加速度峰值分别降低了 5.0%, 20.5%, 36.6%, 表明桩基础有利于提升储罐抵御地震性, 且提升效果随着地震强度的增大而增大。

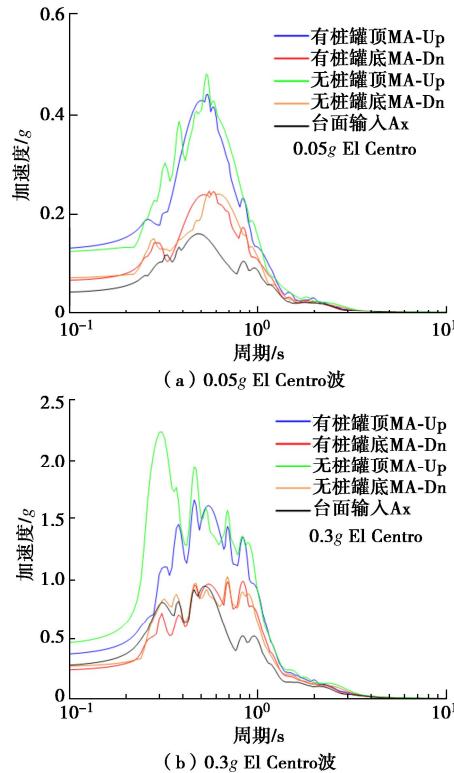


图6 加速度时程频谱对比

Fig. 6 Comparison of pseudo-spectral accelerations

此外, 由表 2 还可发现, 两种储罐罐顶加速度峰值随着输入地震强度增大而增大, 但放大系数逐渐减小, 这说明半地下储罐的地震响应受土-结作用影响, 且周围土体响应对储罐具有重要约束作用。综上, 半地下埋置和桩基础均有有利于降低 LNG 储罐的地震加速度响应与提升抗震性能。

表2 储罐罐顶加速度响应分析特征值

Table 2 Analysis of acceleration records at tank top

地震动 峰值/g	有桩罐顶加 速度峰值/g	放大 系数	无桩罐顶加 速度峰值/g	放大 系数
0.05	0.1268	2.54	0.1335	2.67
0.1	0.2040	2.04	0.2566	2.57
0.3	0.3565	1.19	0.5624	1.87

基于罐顶对称布设的竖向 LVDT 测试位移记录, 分析储罐的摆动响应时程与最大摆角, 结果如图 7 所示。不难发现, 地震作用下无桩和有桩储罐的摆动响应过程基本一致, 且无桩储罐摆角幅度明显大于有桩储罐。同时, 随着地震动增大, 储罐的最大摆角基本呈线性增加, 有桩储罐的最大摆角相比于无桩储罐,

减小 13%~33%。

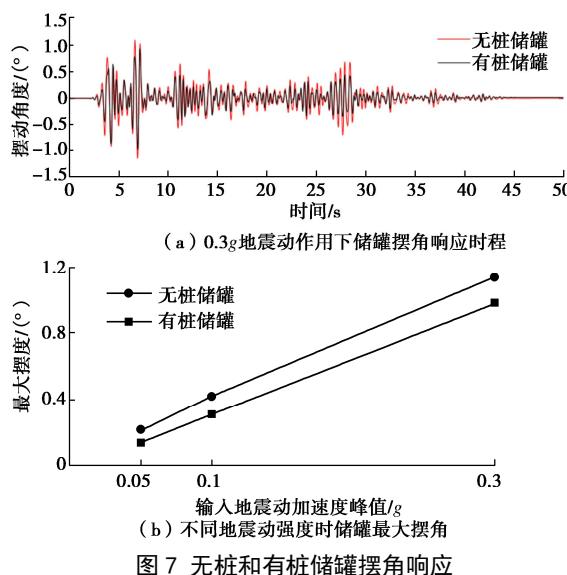


图 7 无桩和有桩储罐摆角响应

Fig. 7 Behavsior of tank-swing angles with and without piles

2.3 储液晃动波高响应

0.3g El Centro 波作用下有桩和无桩储罐内储液的晃动波高时程和各工况下储液晃动的最大波高, 如图 8 所示。可以得出, 有桩和无桩储罐的储液晃动波高响应大致相同; 随着地震动强度增大, 两类储罐的储液晃动波高均呈现增大, 有桩储罐的储液晃动波高小于无桩储罐, 约降低 8%~18%, 其规律性一定程度说明桩基础有助于降低储罐和储液的固液耦合作用。

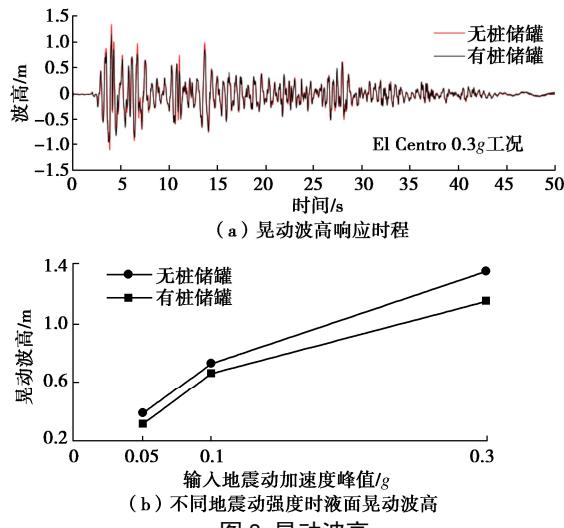


图 8 晃动波高

Fig. 8 Heights of slosh waves

3 结 论

(1) 提出了大型 LNG 储罐以自振周期为控制参数的离心模型设计方法。试验结果表明该方法可满足设计原则和要求, 为今后类似模型试验提供设计参考。

(2) 对比无桩半地下式 LNG 储罐地震响应, 桩基础减小储罐罐顶加速度峰值 5.0%~36.6%、储罐摆动响应最大摆角 13.8%~33.6%, 桩基础有利于提高半地下式 LNG 储罐的抗震性能。

(3) 储罐内储液晃动波高随地震动强度增大而增大; 桩基础减小不同工况下储液晃动波高 8.4%~18.8%, 一定程度说明其有助于降低半地下式 LNG 储罐和储液的固液耦合作用, 提升 LNG 储罐安全性。

参考文献:

- [1] PARK H J, HA J G, KWON S Y, et al. Investigation of the dynamic behavior of a storage tank with different foundation types focusing on the soil-foundation-structure interactions using centrifuge model tests[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2017, **46**(14): 2301-2316.
- [2] SAHRAEIAN S M S, TAKEMURA J, SEKI S. An investigation about seismic behavior of piled raft foundation for oil storage tanks using centrifuge modelling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **104**: 210-227.
- [3] NOOR S, BEHZAD F, HOKMABADI ASLAN S, et al. Impacts of pile foundation arrangement on seismic response of LNG tanks considering soil-foundation-structure interaction[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2022, **36**(1): 04021110.
- [4] LUO D Y, LIU C G, SUN J G, et al. Liquefied natural gas storage tank simplified mechanical model and seismic response analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **141**(6): 106491.
- [5] ZHAO Y, LI H N, FU X, et al. Seismic analysis of a large LNG tank considering the effect of liquid volume[J]. Shock and Vibration, 2020: 8889055.
- [6] CHEN Z, XU Z, LIU Y, et al. Seismic response of a large LNG storage tank based on a shaking table test[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(15): 7663.
- [7] CHEN Z, XU Z G, TENG L, et al. Experimental and numerical investigation for seismic performance of a large-scale LNG storage tank structure model[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(17): 8390.
- [8] LUO D Y, LIU C G, SUN J G, et al. Sloshing effect analysis of liquid storage tank under seismic excitation[J]. Structures, 2022, **43**: 40-58.
- [9] API 650 - 2013 Welded Tanks for Oil Storage[S]. Washington D C: A P Institute, 2013.

(编校: 黄贤沙)