

DOI: 10.11779/CJGE2024S10043

储液-桩基 LNG 储罐地震离心模型试验设计方法

逯屹腾^{1,2}, 汤兆光^{*1,2}, 王永志^{1,2}, 周中一^{1,2}, 孙锐^{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: LNG 储罐作为国家重要的战略能源储备工程, 正快速向超高容量、超大直径、半地下化趋势发展, 并对抗震安全性要求极高。针对离心模型试验规格尺寸限制, 提出一种以储罐自振周期、晃动周期和抗弯刚度为主要控制参数的 LNG 储罐试验设计方法, 并以原型为 27 万 m³ 的大型储罐开展了相应动力离心试验, 验证了设计方法的合理性并分析了其地震响应。结果表明: 试验得到的自振周期与规范计算值较为接近, 误差为 5.6%, 验证了该试验设计方法的可靠性; 储罐晃动频率与荷载幅值变化关系不大, 主要与储罐形状、液面高度有关, 储罐晃动波高与荷载幅值呈现明显正相关; 桩基础可以提升 LNG 储罐的安全性, 相同荷载激励下, 有桩储罐比无桩储罐晃动波高减小约 8.2%。

关键词: 离心模型试验; LNG 罐; 设计方法; 自振频率; 晃动波高

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0175-05

作者简介: 逯屹腾(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 LNG 储罐抗震、离心机试验方面的研究。E-mail: lyt1009962621@163.com。

Design method for seismic centrifugal model tests on liquid-storage tank-pile group interaction

LU Yiteng^{1,2}, TANG Zhaoguang^{1,2}, WANG Yongzhi^{1,2}, ZHOU Zhongyi^{1,2}, SUN Rui^{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: The LNG storage tank is a significant national strategic energy reserve project, rapidly developing towards ultra-high capacity, ultra-large diameter and semi-underground, with extremely high seismic safety requirements. In this study, aiming at the size limitations of the centrifugal model test specifications, a design method for seismic centrifugal model tests on LNG storage tanks is proposed, which takes the natural vibration period, sloshing period and bending stiffness of the tanks as the main control parameters. The dynamic centrifugal model tests are carried out on a large storage tank with a prototype of 270000 m³, the rationality of the design method is verified, and the seismic response of the storage tank is analyzed. The results indicate the natural vibration period of the storage tank obtained by the tests is close to the value of the specification, differing by 5.4%, which verifies the reliability of the test design method. The sloshing frequency of the liquid storage has little relationship with the change of the load amplitude, mainly relates to the shape of the tank, liquid level height, while the liquid sloshing wave height and the load amplitude show a significant positive correlation. The pile foundation can improve the safety of the LNG storage tanks, and under the same load excitation, the sloshing wave height of the piled tanks is reduced by about 8.2% compared with that of the unpiled tanks.

Key words: centrifugal model test; LNG storage tank; design method; natural vibration frequency; sloshing wave height

0 引言

天然气作为一种清洁绿色能源, 是现阶段高度符合中国“双碳”目标的优质高效能源^[1]。近年来, 随着国内对天然气日益增长的需求, 中国已成为全球最大的液化天然气(LNG, liquefied natural gas)进口国之一。在上述背景下, 中国正在大规模建设各类大型、超大型容量的LNG储罐(最大达 27 万 m³)^[2], 其广泛

分布在上海、山东、浙江、江苏、广东等沿海发达省份, 巨大而重要的LNG储罐设施一旦在地震中发生破坏, 将导致无法估量的经济损失及人员伤亡, 因此, LNG储罐的抗震性能研究是岩土地震工程领域中重

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(2023B08); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023E019)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者(E-mail: tzg158135@163.com)

要且有意义的课题。

目前, 诸多学者通过物理试验与数值模拟等方法对LNG储罐的抗震性能已进行相关研究, 在此对其代表性成果作扼要论述。Tazuke等^[3]利用振动台试验, 探讨了储罐屈曲破坏机制, 发现“象足”等破坏现象与倾覆力矩有关。罗东雨等^[4]利用振动台试验与数值模拟方法, 开展了桩-土-LNG储罐地震响应研究, 发现地震动会沿着桩土传播产生放大效应, 指出应重点考虑桩-土-储罐相互作用。Chen等^[5]利用振动台试验与数值模拟, 研究了LNG储罐的地震响应规律, 指出激励方向越多, 罐体加速度与位移响应越大。Zhou等^[6]通过振动台试验和数值模拟方法, 探究了不同地震强度、不同周期地震对储液晃动响应的影响, 发现长周期地震作用下储液晃动幅度更大, 且晃动幅值与荷载加速度幅值基本呈线性正相关。与振动台试验和数值模拟方法相比, 动力离心试验在考虑实际应力边界条件方面更具优势。Park等^[7]基于动力离心模型试验, 考虑土-桩-结构相互作用, 探讨了3种不同地基类型储液罐在地震作用下的性能。Sahraeian等^[8]采用动力离心试验, 研究了储罐桩筏基础在饱和砂和干砂上的性能, 指出桩筏基础可有效减小储罐的晃动与不均匀沉降。

总体而言, 针对LNG储罐的地震响应与抗震性能, 大多数研究主要基于振动台试验与数值模拟, 而在LNG储罐离心试验方面, 受限于试验条件, 其储罐模型对应的原型容量较小, 使得大型化、超大型化LNG储罐的离心模型试验设计、地震响应研究成果仍十分缺乏。针对上述问题, 本文以中国某27万m³大型LNG储罐为原型结构, 探讨大型LNG储罐离心模型试验的关键设计问题, 设计开展了有桩、无桩半地下式LNG储罐动力离心试验, 分析了储罐的自振周期、液体晃动频率与国内外规范的计算结果, 研究了储液晃动波高、晃动频率等特性的变化规律。

1 离心试验关键设计问题与试验方案

1.1 试验设备介绍

本次动力离心试验采用中国地震局工程力学研究所DCIEM-40-300型动力离心机设备, 如图1所示, 其主要性能参数: 转臂最大半径5.5m, 有效离心加速度100g, 离心振动台系统振动加速度30g, 频宽10~300Hz, 有效振动负载1.5t, 位移±15mm; 配备了160ch动态采集仪、高速摄像机和自动砂雨制模等辅助试验装置。试验选用Laminar Box-I型层状剪切模型箱, 内尺寸为1.2m(L)×0.5m(W)×0.6m(H)。试验选用DSP-II型高性能孔压计^[9], 分辨力高达58Pa, 响应时间最快4.96ms; ICP型加速度计(PCB), 量程100g, 频宽0.2~20kHz; LVDT型位移计(BEI

sensors), 量程0~100mm, 精度±0.15%FS。

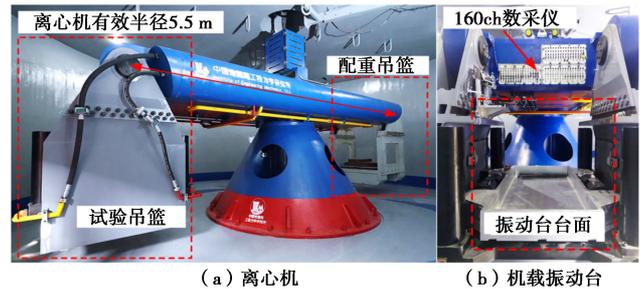


图1 DCIEM-40-300大型离心机振动台系统

Fig. 1 Shaking table test system of DCIEM-40-300 centrifuge

1.2 离心试验关键设计问题

LNG储罐与立式圆筒形储油罐结构类似, 具有类似的破坏特征, 参考油罐在地震中结构主要破坏形式如下: ①顶部破坏。储罐及储液由于地震而振动, 导致储液表面产生波浪, 若储液晃动波高大于自由距离, 易导致结构损坏。②屈曲破坏。在地震作用下, 由罐壁的轴向压缩应力引起, 在储罐底部产生的弹塑性屈曲为象足屈曲; 由罐壁的轴向压缩应力引起的, 在罐壁中间段产生的弹性屈曲为菱形壁屈曲; 还有一种是储罐晃动引起的上部屈曲。③整体倾覆。当罐体遭受强烈地震作用, 导致罐体一侧被抬起, 在未有桩基锚固时, 易发生倾覆。综上, 受地震荷载作用影响, 储罐变形、储液晃动引发的晃动波高大于液面上方自由高度、动水压力大于规范设计值是造成储罐破坏的主因。当地震荷载的卓越频率与储液的晃动频率相近时, 易导致储液发生共振现象, 此时内部液体晃动显著, 也更易造成储罐结构破坏。因此, 在LNG储罐抗震性能设计中, 需重点考虑其自振周期、储液的晃动频率、基础抗弯刚度等关键设计问题。

1.3 试验方案与模型制备

本文以国内某大型LNG储罐为原型结构, 原型内罐直径96m, 罐壁高度47m, 内罐壁厚0.03m。考虑到试验模型箱尺寸限制, 无法保证离心模型与原型在几何尺寸上满足相似比, 参考《API STD 650—2013》规范^[10], LNG储罐的自振周期 T_1 计算公式如下:

$$T_1 = \frac{1}{20\sqrt{5}} C_i H \sqrt{\frac{D}{t_u}} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (1)$$

式中: C_i 代表罐液耦合系数; 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。

根据计算储罐原型的自振周期为

$$T_1 = \frac{1}{20\sqrt{5}} \times 6.38 \times 47 \times \sqrt{\frac{96}{0.03}} \times \sqrt{\frac{0.44 \times 10^3}{2.06 \times 10^{11}}} = 0.575 \text{ s}$$

根据缩尺比例与实际试验条件, 储罐模型选择PP塑料, 弹性模量为890MPa, 外径0.4m, 高0.28m, 壁厚0.005m。根据式(1)计算可得 $T_2=0.01145$ s,

$T_1/T_2=50.22$, 满足试验模型周期相似比要求。

储罐和罐内液体在外部振动荷载作用下会发生运动和变形, 在固-液耦合作用下, 储罐和储液相互作用, 影响储液的晃动。储液晃动及相关的共振现象是大型储罐在地震荷载下失效的主要原因之一。目前, 美、中等国相关规范^[10-12]对储液晃动频率的计算均有明确规定, 且均是基于 Housner 模型, 但由于各规范对相关计算参数的选取标准不同, 也使得计算方式存在一定差异。

《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范: GB 50341—2014》中储罐内液体晃动周期计算公式^[11]:

$$T_w = K_s \sqrt{D} \quad (2)$$

式中: D 为储罐直径; K_s 为晃动周期系数, 由储罐直径与液位高度之比值得到。

《石油化工钢制设备抗震设计规范: GB 50761—2012》中储液晃动自振周期 (T_w) 计算公式^[12]:

$$T_w = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3680g} \coth\left(\frac{3.68H_w}{D}\right)} \quad (3)$$

式中: D 为储罐直径; H_w 为设计最高液位; \coth 为双曲余切函数。

API STD 650-2013 储液晃动周期的计算公式^[10]:

$$T_c = 1.8K_s \sqrt{D} \quad (4)$$

$$K_s = 0.578 \sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)} \quad (5)$$

桩基原型为 20 根预应力管桩, 外径 $D_{模}$ 为 0.5 m 内径 $d_{模}$ 为 0.3 m, 弹性模量 $E_{模}$ 为 $3.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。根据刚度等效原则, 模型选用 5 根桩进行设计, 桩基的设计以抗弯刚度 EI 为控制参数, 计算公式如下:

$$4E_{原} \frac{\pi}{64} (D_{原}^4 - d_{原}^4) = N^4 E_{模} \frac{\pi}{64} (D_{模}^4 - d_{模}^4) \quad (6)$$

式中: N 为几何相似比。

本试验罐体和群桩的主要设计参数和相似比, 如表 1 所示。试验选用陆源标准砂, 其平均粒径为 0.48 mm, 土粒相对质量密度为 2.65, 最大孔隙比为 0.893, 最小孔隙比为 0.571, 试验砂土地基总厚度为 500 mm, 采用砂雨法制备场地模型, 控制相对密实度 D_r 为 80%。

表 1 试验模型参数

Table 1 Parameters of test model

结构	参数指标	原型	模型
罐体	外径/m	96	0.4
	壁高/m	47	0.28
	壁厚/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/($\text{N}\cdot\text{m}^2$)	1.708×10^9	277.846

1.4 传感器布设与测试方案

离心试验模型设计和传感器布设如图 2, 3 所示,

左侧和右侧分别为无桩、有桩储罐, 储罐内部填充液位高度为罐壁 1/2, 用于模拟储液在振动荷载作用下的晃动情况。在每个储罐的下方及两储罐之间自由场地不同深度布设共 3 列加速度计(标识为 AN1~AN6, AS1~AS9, AM1~AM8), 用于记录不同桩基础储罐对土体动力响应的影响; 每个储罐内壁均在不同高度布设孔压计(标识为 PN1~PN4, PM1~PM4), 用于记录罐内液体晃动情况; 每个储罐的底部和穹顶均布设加速度计, 用于记录储罐在振动荷载下的动力响应。模型箱底板上布设了 1 支加速度计(标识为 A0), 用于记录台面输入振动荷载。此外, 两个储罐顶部还分别布设了 2 支位移计(标识为 LN1~LN2, LM1~LM2), 用于记录储罐沉降位移和摆动情况。

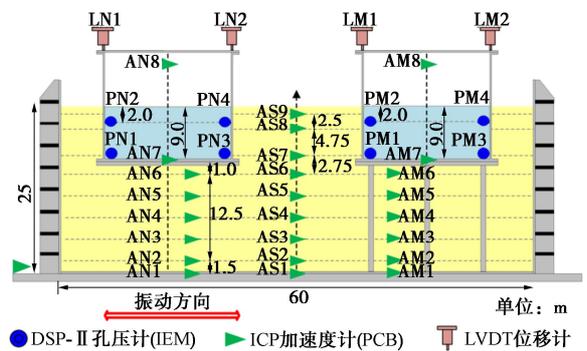


图 2 动力离心试验模型设计

Fig. 2 Design configuration of test models

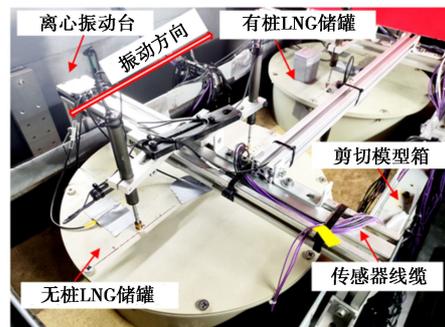


图 3 试验实物图

Fig. 3 Physical map of tests

在离心加速度稳定在 50g 时, 分别施加频率 1.0 Hz, 峰值为 0.05g, 0.1g, 0.3g 的变幅正弦荷载, 施振荷载如图 4 所示, 本文各种数据已按照相似关系转换为原型数值^[13], 特别说明除外。

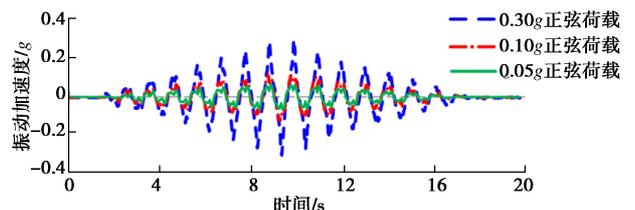


图 4 施加实测振动荷载

Fig. 4 Applied seismic loading records

2 试验结果分析

2.1 自振频率

离心试验中利用振动荷载激励下罐底和罐顶记录的加速度时程曲线，通过对罐底和罐顶的振动加速度进行傅里叶变换，可得加速度响应频谱，并得到储罐体系和台面的傅里叶谱幅值比，取二者傅里叶谱幅值比的最大值对应频率为储罐的自振频率。在 0.05g 正弦荷载下，储罐的自振频率如图 5 所示。观察图 5，可发现有桩、无桩储罐的自振频率均约为 1.84 Hz，周期为 0.543 s，与原型储罐自振周期相近，误差仅为 5.6%。

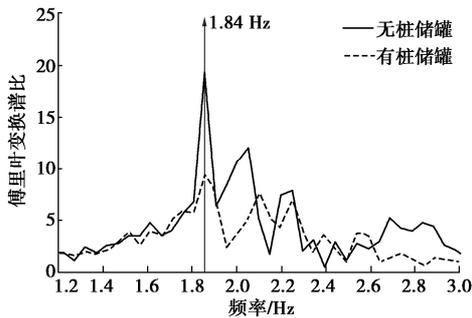


图 5 储罐加速度傅里叶变换谱比

Fig. 5 Fourier transform acceleration spectral ratios of storage tank

2.2 储液晃动频率

本次离心试验中，根据储液内部同一高度、相互对称的孔压传感器记录的储液晃动情况，经过计算^[9]，可获得振动荷载激励下罐内液体的晃动时程，如图 6 所示。观察图 6 储液晃动时程，可发现储液在结束荷载震动后自由晃动阶段时的晃动周期为 5 s。

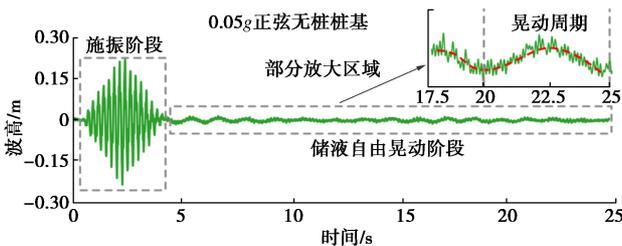


图 6 储液晃动波高时程

Fig. 6 Time histories of liquid storage of sloshing

本次试验中，储罐模型的外径 0.4 m，最大设计液位 0.28 m。在 50g 离心加速度下根据相似律转换可求得对应储罐外径为 20 m，最大设计液位为 14 m，假设储罐建造地区为 II 类场地，设计地震分组为第二组，抗震设防基本烈度为 8 度，重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。将各规范储液晃动周期计算结果与试验结果进行对比，如表 2 所示。各规范对储液晃动周期的计算理论基本相同，故计算得到的晃动周期差别也比较小，与试验结果十分吻合，误差最大仅为 3.8%。

2.3 储液晃动波高

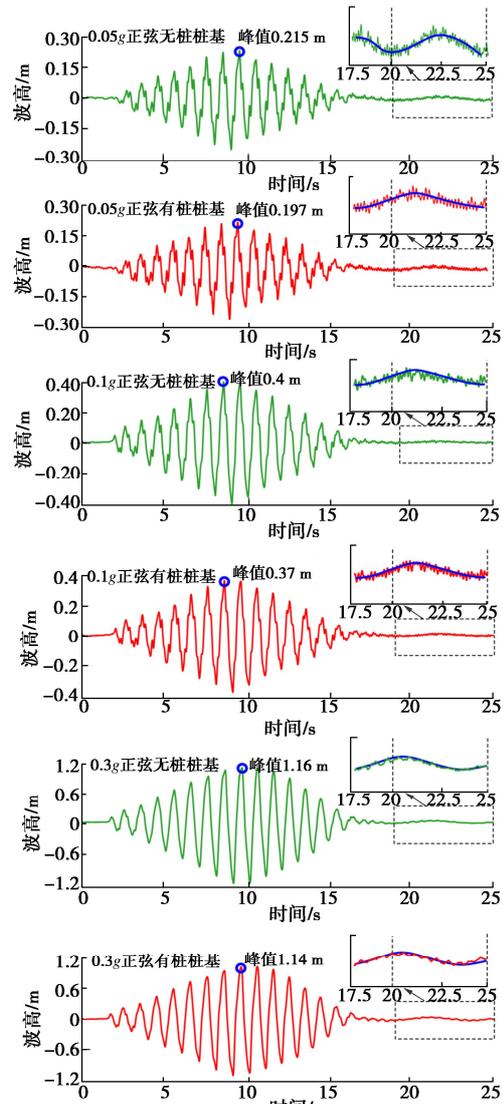
储液晃动波高是振动荷载激励下储液晃动程度对

储罐动力响应影响的关键指标，也是诸多学者关注的重要问题，不同幅值荷载，有桩、无桩储罐内储液晃动波高时程如图 7 所示。

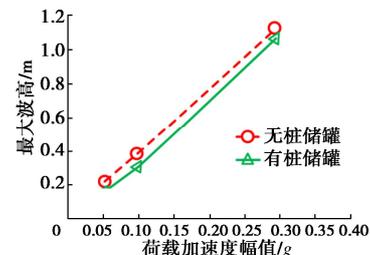
表 2 规范计算周期与试验周期对比

Table 2 Comparison between calculated and test periods

GB 50341	GB 50761	API STD 650-2013	Haroun-Housner 力学模型	试验结果
4.90 s	4.83 s	4.80 s	4.92 s	5.00 s



(a) 各幅值荷载作用下储液晃动时程



(b) 荷载幅值与最大晃动波高关系

图 7 不同幅值荷载作用下储液晃动波高

Fig. 7 Sloshing wave heights of liquid storage under different amplitude loads

观察图 7 不同幅值荷载作用下晃动波高时程，可

发现储液的晃动波高与荷载类型、储罐基础有关, 而储液自由晃动时的周期都维持 5 s 左右, 这是因为储液的晃动周期与施加荷载无关, 与储罐形状、液面高度有关。观察储液在晃动时不同荷载幅值与最大波高关系图可以发现, 在 0.05g, 0.1g 和 0.3g 的正弦荷载激励下, 储罐内储液的最大晃动波高随荷载幅值的增大而增大, 同时, 在施加荷载相同时, 有桩罐体内储液的最大晃动波高明显低于无桩储罐, 大约降低了 8.2%, 这说明桩基础对储液晃动有一定抑制作用。

3 结 论

本文针对现有关于 LNG 储罐抗震研究需求, 参考现有规范, 以储罐自振周期为主要控制参数, 对原型为 27 万 m³ 的大型 LNG 储罐进行了动力离心模型试验。探讨了大型储罐离心试验的关键设计问题, 提出了储罐地震离心模型试验设计方法。利用离心试验数据, 对比了试验结果与各个规范的自振周期计算值, 探析了该设计方法的可靠性, 分析了荷载激励下储液晃动波高、晃动频率等动力响应。主要得到以下 3 点结论。

(1) 以储罐自振周期为主要控制参数的设计方法可满足试验设计要求, 在不同幅值的正弦荷载下, 储罐试验实测自振周期与各规范计算值十分接近, 误差为 5.6%; 试验储液晃动周期与规范计算值十分吻合。

(2) 在不同幅值荷载激励下, 储液晃动波高与荷载幅值基本呈现线性变化, 随着荷载幅值的增大, 储液晃动波高也不断增大。储液晃动频率与荷载幅值变化关系不大, 主要与储罐形状、液面高度有关。

(3) 桩基础可有效减小储液晃动程度。相同荷载激励下, 有桩储罐的最大晃动波高比无桩储罐最大晃动波高减小 8.2% 左右。说明桩基础可以提升 LNG 储罐安全性。

参考文献:

[1] 国家发展改革委. 天然气发展“十三五”规划[EB/OL]. 2016. (National Development and Reform Commission. Natural gas development “The 13th Five-Year” plan[EB/OL]. 2016. (in Chinese))

[2] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. 2022. (National Development and Reform Commission, National Energy Administration. “The 14th Five-Year” Modern Energy System Plan[EB/OL]. 2022. (in Chinese))

[3] TAZUKE H, YAMAGUCHI S. Seismic proving test of equipment and structures in thermal conventional power plant[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transaction of the ASME, 2002, **124**(2): 133-143.

[4] 罗东雨, 孙建刚, 柳春光, 等. 桩-土-LNG 储罐振动台试验与数值仿真分析[J]. 振动工程学报, 2021, **34**(3): 515-527. (LUO Dongyu, SUN Jiangang, LIU Chunguang, et al. Pile-soil-LNG storage tank shaking table test and numerical simulation analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, **34**(3): 515-527. (in Chinese))

[5] 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.

[6] ZHOU L J, XU T, LU Z H, et al. A study on the sloshing problem of vertical storage tanks under the action of near-fault earthquakes[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, **2020**(2): 1-10.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 汤兆光. 超重力试验动态孔压传感器设计方法、性能评价与应用[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2023. (TANG Zhaoguang. Design Method and Performance Evaluation of Dynamic Miniature Pore Water Pressure Transducer in Centrifuge Modelling and Its Application[D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2023. (in Chinese))

[10] American Petroleum Institute. API 650-2013 Welded Tanks for Oil Storage[S]. Washington D C: A P Institute, 2013.

[11] 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范:GB 50341—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Design Specification for Vertical Cylindrical Steel Welded Oil Tanks: GB50341—2014[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2014. (in Chinese))

[12] 石油化工钢制设备抗震设计规范: GB 50761—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Code for Seismic Design of Petrochemical Steel Equipment: GB 50761—2012[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2012. (in Chinese))

[13] 土工离心模型试验技术规程: DL/T 5102-2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (Specification for Geotechnical Centrifuge Model Test Techniques: DL/T 5102-2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)