

考虑桩土非线性 LNG 储罐动力分析

牛海洋¹ 裴义飞² 徐 勇¹ 王羚瑞¹ 高 辉^{2*}

1.江苏华电赣榆液化天然气有限公司 赣榆 222000

2.中国天辰工程有限公司 天津 300400

【摘 要】：为了研究桩土非线性作用对 LNG 储罐各部分地震响应的影响，以某 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 预应力混凝土储罐为例，利用大型有限元分析软件 sap2000 建立了 LNG 储罐简化计算模型，应用振型分解反应谱法，对比分析了在 II 类场地上考虑桩土非线性作用前后的 LNG 储罐动力分析结果并对设备专业动力结果进行复核。结果表明，在水平满罐、空罐动力工况下，考虑桩土非线性作用会在一定程度上减小内罐的地震动力响应，但可能对承台的地震动力响应有所放大；在水平泄露工况下，考虑桩土非线性作用在一定程度上会减小承台地震动力响应，对其他部分影响不大；设备专业内罐动力结果较为保守，偏于安全。在实际设计中，应注意桩土非线性作用对动力结果的放大影响。

【关键词】：LNG 储罐；桩土非线性；简化模型；动力响应

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.056

LNG 液体、丙烷、丁烷等低温液体存储采用钢制双容罐、预应力混凝土全容罐等设备。在高烈度震区建造低温储罐存在地震作用引起的内罐储液剧烈晃动，从而对罐壁产生附加动水压力，造成罐底焊缝开裂，储液外流，储罐爆炸。近年来，储罐不断朝着大型化、复杂化发展。LNG 储罐在震害下引起的火灾、泄露会造成严重的生命财产损失和生态灾难，如何快速准确的计算储罐地震响应，有待进一步研究。

动力分析作为储罐设计的重要前提，各地震工况下的加速度数值会直接影响桩基、承台、外罐、内罐、穹顶等部分的设计结果。目前 LNG 储罐动力模型中，常依据 JGJ 94《建筑桩基技术规范》计算桩土等效参数，将桩土刚度简化为线性连接单元附加到承台底部，但这种简化的等效方法无法考虑不同土层与桩之间的非线性作用。本文利用 LPILE 软件求解桩在不同深度下的 P-y 曲线，基于 SAP2000 有限元软件建立储罐不同地震工况下考虑桩土非线性作用的动力分析简化质点模型，对比分析桩土非线性作用对 LNG 储罐水平地震工况下各部分动力结果的影响并对设备专业动力结果进行复核。

1 LNG 储罐简化模型理论分析

1.1 储罐质点简化模型简介

根据 EN 14620-1:2006 的要求，应对 LNG 储罐在操作基准地震（OBE）和安全停车地震（SSE）作用下的承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算，结合规范 ACI350.3-06 相关规定，LNG 储罐应分析 OBE 及 SSE 地震下十四种单一工况，包含 OBE 水平地震作用（空罐）、OBE 竖向地震作用（空罐）、OBE 水平地震作用（满罐）、OBE 竖向地震作用（满罐）、OBE 水平地震作用（低液位泄漏）、OBE 竖向地震作

用（低液位泄漏）、OBE 水平地震作用（中液位泄漏）、OBE 竖向地震作用（中液位泄漏）、OBE 水平地震作用（高液位泄漏）、OBE 竖向地震作用（高液位泄漏）、SSE 水平地震作用（空罐）、SSE 竖向地震作用（空罐）、SSE 水平地震作用（满罐）、SSE 竖向地震作用（满罐）。利用 sap2000 软件将十四种单一工况归纳建立为四种质点简化模型，如下图所示：

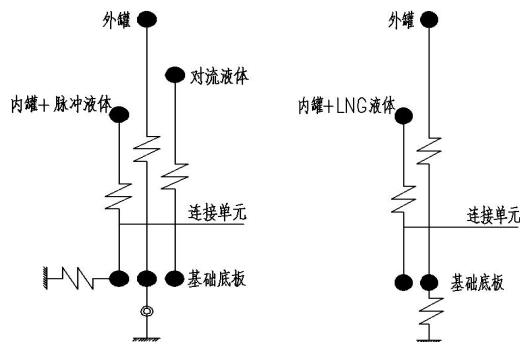


图 1-1 水平 OBE、SSE 作用下简化模型

图 1-2 竖向 OBE、SSE 作用下简化模型

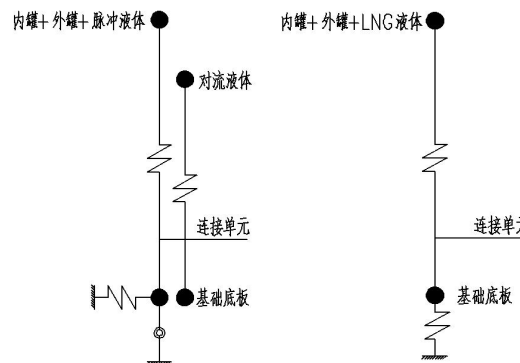


图 1-3 水平 OBE+泄露作用下简化模型

图 1-4 竖向 OBE+泄露作用下简化模型

以“水平 OBE、SSE 作用下简化模型”为例，

赋予内罐+脉冲液体质点、外罐质点、对流液体质点，基础底板质点相应的高度和质量，采用 linear 连接单元模拟储罐各部分刚度，用定义节点约束的方式把基础底板处各质点约束在一起，采用 linear 连接单元模拟桩土等效刚度以及转动刚度。

为了更好的考虑不同土层与桩之间的非线性作用，本文采用 MultiLinear Plastic（多段线性塑性连接单元）模拟不同深度下的桩土非线性刚度，以此替代桩土等效刚度连接单元，连接单元间距依据桩长与土层确定，如图 1-5 所示：

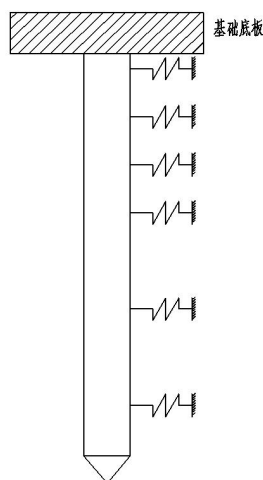


图 1-5 桩土非线性模型

其中 MultiLinear Plastic 荷载与变形的变化曲线如图 1-6 所示，每个阶段的刚度分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 。其中弹簧刚度参数根据 LPILE 软件求解桩在不同深度下的 P-y 曲线进一步确定。

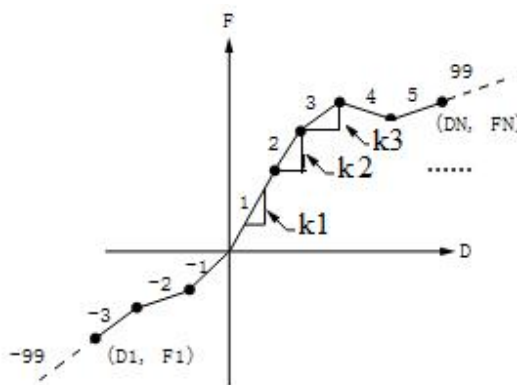


图 1-6 MultiLinear Plastic 单元刚度曲线

1.2 简化模型各部分参数计算

根据规范 ACI350.3-06 相关规定，简化模型各部分参数计算如下

各部分质量计算公式为：

$$\frac{W_l}{W_L} = \frac{\tanh[0.866(\frac{D}{H_L})]}{0.866(\frac{D}{H_L})}$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.230(\frac{D}{H_L})\tanh[3.68(\frac{D}{H_L})]$$

其中： W_l —脉冲液体重量；

W_c —对流液体重量；

W_L —LNG 液体总重量；

D —内罐直径；

H_L —LNG 液体高度。

各部分液体质心高度计算公式为：

当 $\frac{D}{H_L} < 1.333$ 时：

$$\frac{h_l}{H_L} = 0.5 - 0.09375(\frac{D}{H_L})$$

当 $\frac{D}{H_L} \geq 1.333$ 时：

$$\frac{h_l}{H_L} = 0.375$$

对所有罐：

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh[3.68(\frac{H_L}{D})] - 1}{3.68(\frac{H_L}{D})\sinh[3.68(\frac{H_L}{D})]}$$

其中： h_l —脉冲液体质心高度；

h_c —对流液体质心高度；

对流液体自振周期计算公式为：

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = (\frac{2\pi}{\lambda})\sqrt{D}$$

其中： $\lambda = \sqrt{3.68g\tanh[3.68(\frac{H_L}{D})]}$ ；

ω_c —对流液体自振频率。

余晓峰等利用数值分析方法验证《石油化工钢制设备抗震设计标准》中储罐的罐液耦联振动基本自振周期求解公式能更好的考虑到罐固体和 LNG 流体的耦合作用以及内罐底部保温层的减震作用，故本文求解内罐+脉冲液体的自振周期计算公式如下：

$$T_1 = 7.743 \times 10^{-5} \times \left(e^{\frac{H_w}{D}} + 0.7147 \times \frac{H_w}{D} \times D \times \sqrt{\frac{D}{\delta_{1/3}}} \right)$$

其中：\$T_1\$—储罐的储液耦联振动的基本自振周期（s）；

\$e\$—自然对数的底；

\$H_w\$—储罐地面至储罐液面高度（m）；

\$D\$—储罐的内直径（m）；

\$\delta_{1/3}\$—位于储罐高度 1/3 处的储罐名义厚度（m）。

泄露状态下外罐自振周期计算公式为：

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}; \omega_1 = C_1 \frac{1}{H_L} \sqrt{10^3 E_C \frac{g}{\gamma_C}}$$

$$C_1 = C_W \sqrt{10^3 \frac{t_w}{10r}}$$

$$C_W = 9.375 \times 10^{-2} + 0.2039 \left(\frac{H_L}{D} \right)^2 - 0.1253 \left(\frac{H_L}{D} \right)^3 +$$

$$0.1267 \left(\frac{H_L}{D} \right)^4 - 3.186 \times 10^{-2} \left(\frac{H_L}{D} \right)^5$$

对于非泄露状态下的外罐自振周期通过 ANSYS 对储罐进行模态分析得到。

各部分刚度计算公式如下：

$$K = \frac{(2\pi)^2 \times m}{T^2}$$

其中：\$m\$—各质点质量；

\$T\$—各质点自振周期。

1.3 振型分解反应谱法分析

设计反应谱依据 GB 50011《建筑抗震设计规范》或《地震安全性评价报告》得出。储罐不同部分在不同的地震工况下，阻尼比有所不同，应调整结构模态阻尼比，分别计算，提取各部分相应地震响应结果，各部分阻尼比如表 1-1 所示。

表 1-1 各部分阻尼比

	OBE%	SSE%
对流液体	0.50%	0.50%
内罐+脉冲	2%	5%
外罐壁	2%	5%
底板+穹顶	5%	7%

2 工程实例

2.1 基本参数

本文以某 \$6 \times 10^4 \text{ m}^3\$ 的 LNG 预应力混凝土储罐为例，外罐直径 59m，外罐高度 31.4m，壁厚 0.7m，穹顶顶面标高 39.2m，穹顶厚度 0.4m，承台直径 63.8m，承台厚度 1.3m。拟建场地为 II 类场地，地质资料如表 2-1 所示，共采用 265 根桩，桩径为 1m，桩长为 18m。

表 2-1 拟建场地的地质资料

	土质描述	备注
1	人工填土：\$q_{sk} = 0\text{kPa}\$	内摩擦角 \$10^\circ\$
2	粉质粘土 1：\$q_{sk} = 40\text{kPa}\$	内摩擦角 \$10^\circ\$
3	粉质粘土 2：\$q_{sk} = 60\text{kPa}\$	内摩擦角 \$13^\circ\$
4	强风化泥岩：\$q_{sk} = 160\text{kPa}\$ \$q_{pk} = 1600\text{Pa}\$	内摩擦角 \$25^\circ\$
5	中风化泥岩	内摩擦角 \$35^\circ\$

以 OBE 水平满罐为例，储罐各部分简化参数如表 2-2 所示。依据 JGJ 94《建筑桩基技术规范》附录 C 计算得桩土总等效水平刚度为 \$2.01\text{E}+10\text{N/m}\$，转动刚度为 \$4.33\text{E}+13 \text{ N/m}\$。

表 2-2 OBE 满罐简化参数

	内罐+脉冲	对流液体	外罐	承台
质量（kg）	1.75E+07	1.44E+07	1.50E+07	1.22E+07
质心高度（m）	10.209	16.234	20.852	-0.374
自振周期（s）	0.608	8.214	0.319	0.000
刚度（N/m）	1.86E+09	8.83E+06	5.79E+09	8.13E+05

考虑不同深度下的桩土非线性作用，将桩身长度范围内分成 16 个土层：深度 1.5m~5m 范围内，每 0.5m 划分为一个土层；深度 5m~18m 范围内，每 1.5m 划分为一个土层。利用 LPILE 软件根据桩参数、土层参数求解桩在不同深度下的 P-y 曲线进一步确定 MultiLinear Plastic 单元每个阶段的刚度，以 1.5m 连接单元为例，参数设置如图 2-1 所示。

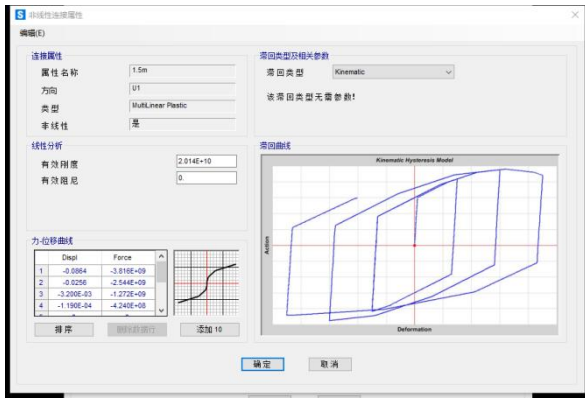


图 2-1 MultiLinear Plastic 单元设置参数

2.2 考虑桩土非线性结果对比

利用 sap2000 有限元软件分别建立桩土等效刚度简化模型以及桩土非线性作用简化模型进行反应谱分析,通过改变结构模态阻尼以考虑储罐不同部分的阻尼比,提取各部分地震响应,各工况对比如下:

表 2-3 OBE 水平满罐各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.05	0.88	-16.17
内罐+脉冲	1.11	0.99	-10.38
对流	0.26	0.26	0.00
外罐+穹顶	1.80	1.86	3.77

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

表 2-4 SSE 水平满罐各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.72	1.48	-14.13
内罐+脉冲	2.11	1.92	-8.53
对流	0.49	0.49	0.00
外罐+穹顶	2.72	2.78	2.43

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

由表 2-3、2-4 可得,考虑桩土非线性刚度后,OBE 水平满罐以及 SSE 水平满罐工况下,承台和内罐加速度有一定程度的减小,对承台及内罐设计带来一定的安全储备。

表 2-5 OBE 水平空罐各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.13	1.28	13.58
内罐+脉冲	1.63	1.49	-8.95
对流	0.07	0.07	0.00
外罐+穹顶	2.14	2.05	-4.49

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

表 2-6 SSE 水平空罐各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.90	2.15	12.93
内罐+脉冲	2.44	2.22	-8.95
对流	0.13	0.13	0.00
外罐+穹顶	3.20	3.02	-5.68

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

由表 2-5、2-6 可得,考虑桩土非线性刚度后,OBE 水平空罐以及 SSE 水平空罐工况下,内罐及外罐加速度有一定程度的减小,承台加速度有所增加,在实际设计中应注意桩土非线性作用对承台部分地震响应的放大作用。

表 2-7 OBE 水平高液位泄露各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.11	0.97	-12.31
内外罐+脉冲	2.02	2.02	0.00
对流	0.25	0.25	0.00

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

表 2-8 OBE 水平中液位泄露各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.29	1.06	-17.57

内外罐+脉冲	1.98	2.00	0.91
对流	0.20	0.20	0.00

(注:续表 2-8)

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

表 2-9 OBE 水平低液位泄露各部分结果对比

加速度结果 (m/s ²)	桩土等效刚度	桩土非线性刚度	差值百分比%
承台	1.42	1.35	-4.60
内外罐+脉冲	1.96	2.02	2.75
对流	0.12	0.12	-1.64

差值百分比%=(桩土非线性刚度结果-桩土等效刚度结果)/桩土等效刚度结果

由表 2-7、2-8、2-9 可得,考虑桩土非线性刚度后,在 OBE 水平高、中、低泄露工况下,承台加速度有一定程度的减小,其余部分影响不大。

2.3 与设备专业动力结果对比

本文依据考虑桩土非线性刚度后的动力结果对设备专业所计算地震响应结果进行复核,设备专业地震响应结果如图 2-2 所示。

The calculation results are shown as follows.

Item	Symbols	Horizontal impulsive action		Horizontal convective action		Vertical breathing action	
		OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE
amax (g)	Max. acce. Parameter	0.1530	0.2804	0.1530	0.2804	0.1020	0.1869
Tg (s)	characteristic period	0.35	0.40	0.35	0.40	0.35	0.40
ξ (%)	viscous damping ratio	0.0500	0.0500	0.0050	0.0050	0.0500	0.0500
η1	damping correction factor	0.0146	0.0146	0.0182	0.0182	0.0146	0.0146
η2	adjustment coefficient	1.00	1.00	1.51	1.51	1.00	1.00
γ	attenuation index	0.90	0.90	1.04	1.04	0.90	0.90
T (s)	Natural period	0.4495	0.4495	8.0175	8.0175	0.4062	0.4062
Se (g)	design acceleration	0.1221	0.2524	0.0261	0.0492	0.0892	0.1844

图 2-2 设备专业地震动力响应结果

图中所示工况为 OBE 满罐与 SSE 满罐,与本文动力结果对如下:

参考文献:

[1] BS EN14620:Design and manufacture of site built,vertical,cylindrical,flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated,liquefied gases with operating temperatures between 0℃and-165℃.

[2] 《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011-2010).

[3] 余晓峰,王松生,等.水平地震激励下大型 LNG 储罐流固耦合模态分析[J].世界地震工程,2014,30(1):132-138.

[4] 《石油化工钢制设备抗震设计标准》(GB/T 50761-2018).

[5] 《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008).

表 2-10 OBE 水平满罐设备专业动力结果对比

加速度结果 (m/s ²)	设备专业	本文结果	差值百分比%
内罐+脉冲	1.197	0.993	-17.04
对流	0.256	0.259	1.17

差值百分比%=(本文结果-设备专业)/设备专业

表 2-11 SSE 水平满罐设备专业动力结果对比

加速度结果 (m/s ²)	设备专业	本文结果	差值百分比%
内罐+脉冲	2.476	1.927	-22.18
对流	0.483	0.495	2.48

差值百分比%=(本文结果-设备专业)/设备专业

由表 2-10、2-11 可得,与本文结果对比,设备专业内罐地震响应结果较为保守,偏于安全,其主要原因分析如下:设备专业依据 BS EN 1998-4:2006 中固定基底圆柱形储罐的简化方法计算内罐+脉冲液体固有周期,此方法假定储罐底部固接,未考虑桩刚度以及内罐与底板间保温层的减震作用,导致周期偏小,脉冲液体加速度偏大。

3 结论

(1) 基于 sap2000 对 ACI350.3-06 中 LNG 储罐动力简化模型进行完善,建立了考虑桩土非线性作用的 LNG 储罐动力简化计算模型,对拟建 II 类场地上某 6×10⁴ m³ 的 LNG 预应力混凝土储罐进行动力分析,对比分析了考虑桩土非线性作用前后的 LNG 储罐动力分析结果并对设备专业动力结果进行复核。

(2) 结果表明在不同的地震工况下,考虑桩土非线性作用对各部分地震响应结果影响不同,整体上对内罐设计有利,但在实际设计中应该考虑个别工况下其对承台和外罐加速度的放大作用。

(3) 设备专业计算脉冲液体固有周期的简化方法未考虑桩刚度以及内罐与底板间保温层的减震作用,地震响应结果较为保守,偏于安全。