

# 软土场地桩-土-LNG储罐地震响应 及场地放大效应分析

罗东雨<sup>1</sup>,孙建刚<sup>2</sup>,柳春光<sup>1</sup>,崔利富<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院,辽宁 大连 116024;2. 大连民族大学土木工程学院,  
辽宁 大连 116605)

**摘要** 目的 研究中软场地上大型 LNG 储罐的地震响应,分析桩土相互作用对上部结构的影响.方法 利用有限元软件 ADINA 建立了  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  刚性基础储罐与 80 m 桩土储罐模型;计算刚性基础储罐和桩土储罐的地震响应、桩土储罐和纯土体情况下沿地基深度分布的最大加速度值并进行对比分析.结果 考虑桩-土-储罐的相互作用后除晃动波高外,其他地震响应均有不同程度的减小;长周期地震动的场地放大效应小于短周期地震动,而频谱特性复杂且具有多峰性的地震动场地放大效应最大;纯土体的场地放大效应小于有上部结构的场地放大效应.结论 地震动沿土体传播具有放大效应,上部结构的存在会增大放大效果,且按照刚性地基标准设计 LNG 储罐可以保证其安全性.

**关键词** 中软场地;LNG 储罐;桩土结构;放大效应;基岩波

中图分类号 TU352 文献标志码 A

## Seismic Response Analysis and Site Amplification Effect of Pile-Soil-LNG Tank in Soft Site

LUO Dongyu<sup>1</sup>, SUN Jiangan<sup>2</sup>, LIU Chunguang<sup>1</sup>, CUI Lifu<sup>2</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. College of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian, China, 116605)

**Abstract:** In order to study the seismic response of large LNG tanks in soft site and analyze the effect of pile-soil interaction on the superstructure, the finite element analysis software ADINA was used to establish  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  storage tank without pile-soil and 80 m with pile-soil storage tank models in this paper. In addition, the seismic response of without and with pile-soil storage tanks, the maximum acceleration along the ground depth of pile-soil storage tanks and that of the case of pure soil were calculated and compared. The results show that, after considering the interaction between pile-soil and storage tanks, except for the sloshing wave, the seismic responses are reduced to different degrees; The site amplification effect of long period ground motion is less than that of

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51478090)

作者简介:罗东雨(1990—),女,博士研究生,主要从事防灾减灾及防护工程方面研究.

short period ground motion, the site amplification effect of ground motions with complex spectral characteristics and multi peaks is the largest; the site amplification effect of pure soil is less than that of soil with superstructure. The conclusion is as follows: The propagation of seismic motion along the soil has magnifying effect, the superstructure will increase the amplification effect, according to the standard of rigid foundation, the design of LNG storage tank is safety.

**Key words:** soft site; LNG storage tank; pile-soil-structure; amplification effect; bedrock wave

近年来,世界范围内都开始重视对绿色能源的开发与使用,因此液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为绿色能源得到了广泛的推崇,很多国家都建立了大型 LNG 接收站和储备基地. 由于其选址多在沿海地区,地质偏软,故采用桩基础来加强储罐的强度和稳定性. 在地震来临时,地震动会经由各层土体与桩基础传至上部结构引起罐体的振动,该振动也将作为新的震源传播给下部桩土,因此桩土储罐的地震响应较为复杂. 关于 LNG 储罐的理论研究已经经历了半个多世纪,研究者做了大量研究:文献[1-7]推导出储罐的简化力学模型,该理论一直沿用至今;在数值仿真研究方面,文献[8-9]进行了深入计算分析,得出了具有工程参考价值的结论;关于储罐隔震研究方面,文献[10-12]对储罐的隔震形式、效果与反应谱设计进行研究,总结出适用于 LNG 储罐的隔震方式与隔震反应谱设计. 关于桩-土-结构相互作用研究方面: RANDOLPH M J<sup>[13]</sup>对摩擦桩的受力特性进行研究,得到了简化模型的等效刚度和阻尼系数; LUO C 等<sup>[14]</sup>采用有限元分析方法,对比了等效线性化土模型和非线性土模型在计算桩-土-结构地震作用时的差异,并研究了土的膨胀系数对桩土相互作用的影响,得出等效线性化模型可以较好的模拟桩-土-结构的地震响应,且土膨胀系数对地震响应的影响甚微;林杨<sup>[15]</sup>、阎韩生等<sup>[16]</sup>都采用彭津模型对大型桩土 LNG 储罐进行了动力分析,得到边缘位置桩基础沉降量较大,建议实际工程适当增大桩径或桩长;崔利富<sup>[17]</sup>计算了土与储罐相互作用的地震响应,研究成果表明考虑土与结构

相互作用后地震响应较刚性地基上的结构偏小. 在大多数学者进行的过程中,所采用的地震激励均为地表波,而实际地震过程为基岩波通过场地土与桩基础传播至上部结构引起响应.

基于此,笔者以  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  桩土 LNG 储罐为研究对象,利用有限元软件 ADINA 建立桩-土-储罐三维整体模型,选择三条基岩地震波作为地震激励施加在桩基础底部,同时将经过纯土体传播后采集到的地震波进行提取与合成,将此作为地表波施加给刚性地基储罐. 通过对比刚性基础储罐与桩土储罐的地震响应来分析桩土相互作用对 LNG 储罐地震响应的影响,同时也对不同基岩波的场地放大效应进行了对比分析. 研究表明:考虑桩土相互作用后储罐的地震响应有所降低,针对笔者所选择的场地条件,短周期地震动作用下场地的放大效应大于长周期地震动,且上部储罐的存在会加大放大效果.

## 1 模型建立及场地条件

### 1.1 模型尺寸及单元选取

笔者选择的 LNG 储罐模型按照某实际工程建立,内罐直径 80 m,外罐直径 82 m,内罐高 35.43 m,按高度平均分为 10 层,罐壁由下至上逐渐变薄. 外罐厚 0.8 m,外罐壁高 38.55 m,储液高度为 34.26 m. 罐顶是钢筋混凝土球面穹顶,边缘厚 0.8 m,顶部厚 0.4 m,底板为 0.9 m 厚的混凝土板,桩基础长度为 80 m,直径 1.2 m,分析过程中不考虑外罐地震作用因此忽略内、外罐之间的保温层,具体分布图与罐体几何参数如图 1 所示.

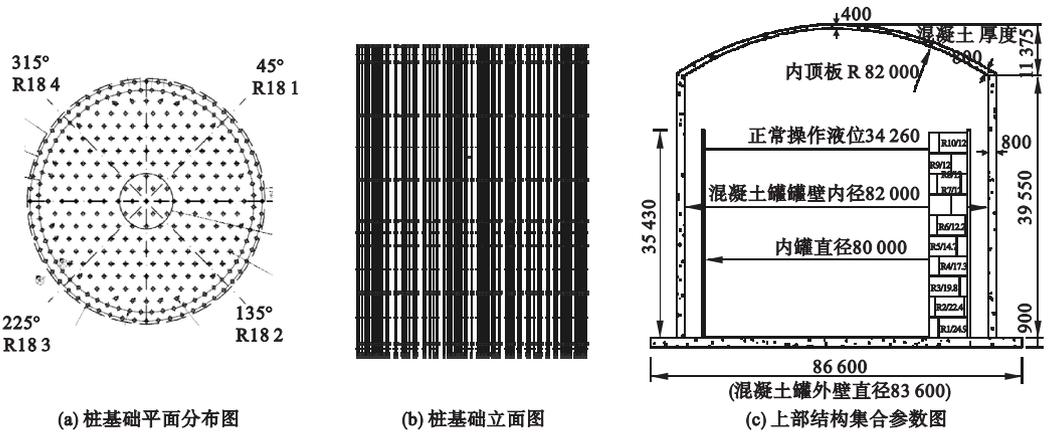


图1 LNG储罐几何参数图

Fig. 1 Geometric parameters of LNG tank

在 ADINA 中,由于内罐壁属于薄壁结构,采用 shell 单元进行简化,混凝土外罐及底板、穹顶较厚,采用 3-D solid 单元,储液采用 3-D fluid 单元,桩基础采用 beam 单元,土体采用 spring 单元进行简化.在计算土体的等效刚度和阻尼时,采用文献[18]中由学者 Francis 和 Randolph 等提出的经验公式进行计算,具体见式(1)~(6).建好后的有限元模型如图2所示.

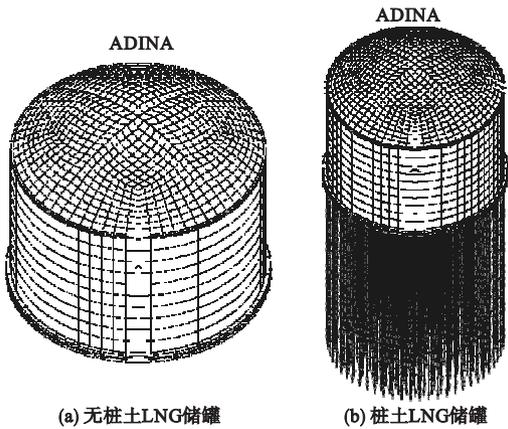


图2 LNG储罐有限元模型

Fig. 2 Finite element model of LNG tank

$$(K_h)_i = \begin{cases} 0.5(K_h)_1 H_i, & i=1; \\ 0.5[(K_h)_{i-1} H_{i-1} + (K_h)_i H_i], & i=2,3,\dots,N-1; \\ 0.5(K_h)_{N-1} H_{N-1}, & i=N. \end{cases}$$

(1)

$$(c_h)_i = \begin{cases} 0.5(c_h)_1 H_i, & i=1; \\ 0.5[(c_h)_{i-1} H_{i-1} + (c_h)_i H_i], & i=2,3,\dots,N-1; \\ 0.5(c_h)_{N-1} H_{N-1}, & i=N. \end{cases}$$

(2)

文献[20]介绍了由桩基础的受力特性提出的单桩地基水平刚度系数,如式(3)所示.

$$(K_h)_i = 1.30 \left( \frac{E_{si} B^4}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{(1 - V_{si}^2)}. \quad (3)$$

单桩桩周土的等效阻尼系数,可按式(4)计算<sup>[21]</sup>.

$$(c_h)_i = 2\rho_{si} (V_{si} + V_{Lsi}) B. \quad (4)$$

桩侧竖向弹簧刚度和阻尼的计算方法<sup>[21]</sup>,可按式(5)和(6)计算.

$$(K_s)_i = \frac{2\pi G_{si}}{\ln[5H_i(1 - \nu/B)]}. \quad (5)$$

$$c_{vsi} = \rho_{si} B V_{si} + \frac{2\xi K_{si}}{\omega}. \quad (6)$$

式中: $E_{si}$ 为第*i*层土的弹性模量; $\nu_{si}$ 为第*i*层土的泊松比; $B$ 为桩基础直径; $E_p$ 、 $I_p$ 分别为单桩的弹性模量和截面惯性矩; $\rho_{si}$ 为第*i*层土的密度; $V_{si}$ 和 $V_{Lsi}$ 分别为第*i*层土体的剪切波速和拉压波速; $\xi$ 为土的阻尼系数; $\omega$ 为场地土的卓越周期.

### 1.2 软土地场条件

笔者根据某沿海地区实际 LNG 储罐工

程为例进行分析,根据《场地地震安全性评价报告》得知,该场地的等效剪切波速为146 m/s,小于150 m/s,场地覆盖层厚度在15~80 m,根据《建筑抗震设计规范》

(GB50011—2010)相关条款规定,该场地类别属于Ⅲ类中软场地,且存在较厚的软土层,属于抗震不利地段.其土层参数如表1所示.

表1 场地土基本参数

Table 1 Basic parameters of site soil

岩土名称	层厚/m	泊松比	剪切波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	剪切模量/ MPa	弹性模量/ MPa
杂填土	2.38	0.488	214	68.7	204.4
吹填土	5.87	0.493	180	55.1	164.5
淤泥质粉质黏土	10.26	0.496	130	30.4	91.0
淤泥质粉质黏土	10.02	0.496	125	27.5	82.3
淤泥质黏土	11.62	0.496	136	32.7	97.9
粉质黏土	9.51	0.490	223	92.5	275.7
含砾粉质黏土	3.24	0.486	317	196.0	582.3
粉质黏土	3.76	0.485	424	356.0	1 057.0
粉质黏土	4.43	0.485	382	284.6	845.2
粉质黏土	9.76	0.486	340	228.9	680.4
含砾粉质黏土	5.95	0.481	511	519.6	1 539.0
强风化凝灰岩	3.74	0.469	751	1 410.0	4 142.9
中风化凝灰岩	—	0.423	1 198	3 903.8	11 112.4

## 2 地震动的输入

笔者选用三条基岩波进行计算,分别为BVP090、绵竹清平、什邡八角,加速度峰值均调为0.2 g,其加速度时程见图3.对应的地表波由经场地土体传播后提取的加速度时程

与原始基岩波合成而得到,其加速度时程见图4.三条原始基岩波的频谱特性如图5所示,从频谱特性可以看出BVP090地震动周期较长,什邡八角地震动周期较短,而绵竹清平地震动的频谱复杂,具有多峰性,但其卓越周期为0.43 s,具体地震特性见表2.

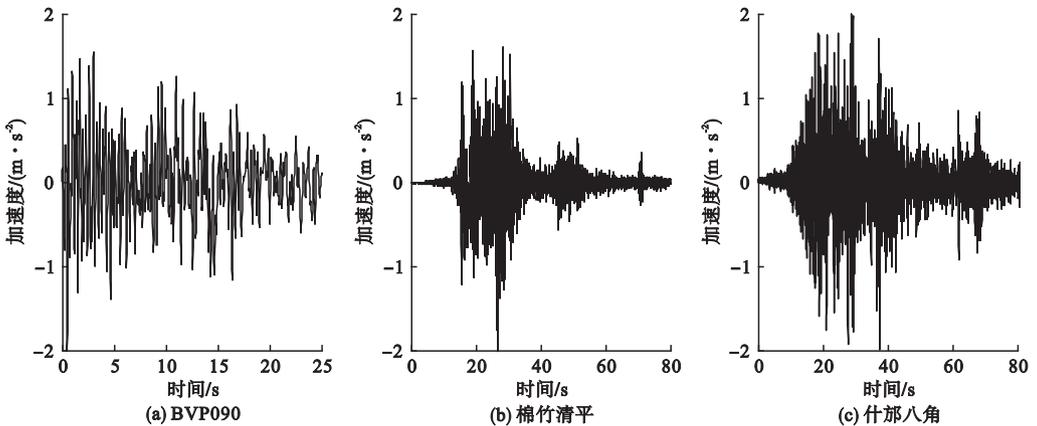


图3 三条基岩波加速度时程

Fig. 3 Three bedrock acceleration waves

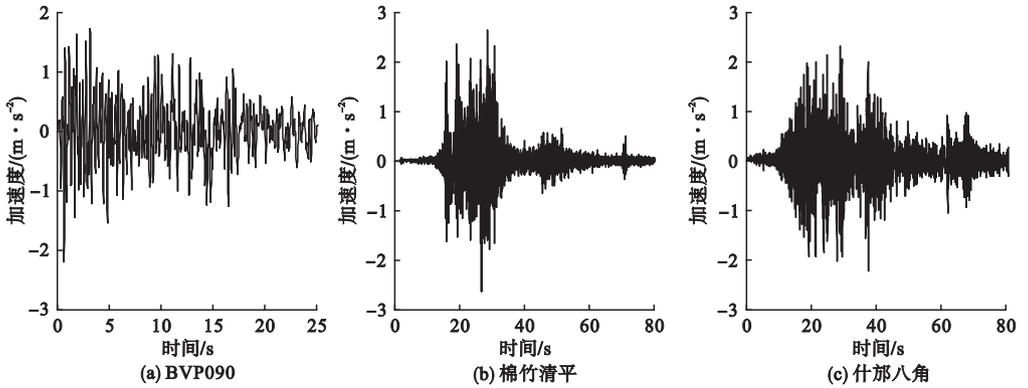


图4 三条地表波加速度时程

Fig. 4 Three surface acceleration waves

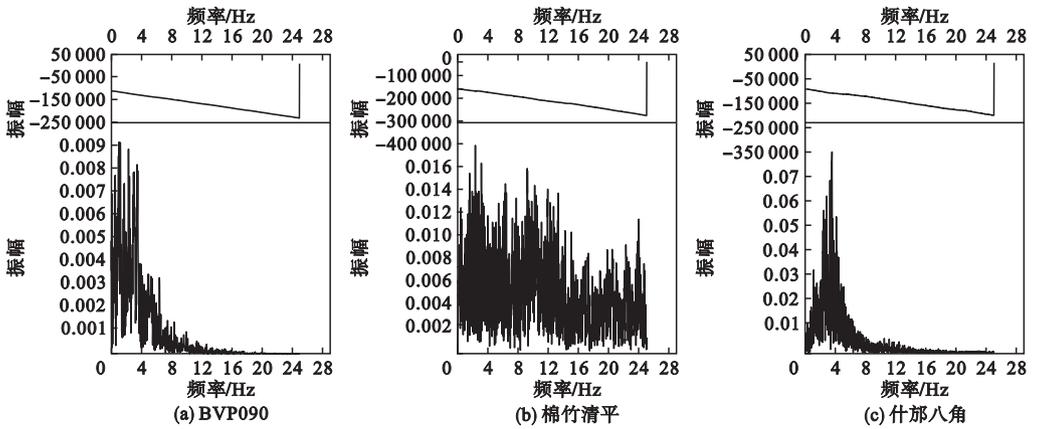


图5 三条地震波频谱

Fig. 5 Three seismic wave spectra

表2 地震波特性

Table 2 Seismic wave characteristics

地震波	持时/s	频率/Hz	周期/s
BVP090	30	1.00	1.00
绵竹清平	80	2.34	0.43
什邡八角	80	3.47	0.29

### 3 数值分析结果

#### 3.1 桩土效应分析

通过计算桩土储罐和刚性地基储罐的地震响应,提取基底剪力、倾覆弯矩、晃动波高与罐壁应力等响应数值,结果见表3。

表3 有、无桩土储罐地震响应

Table 3 Seismic response of without pile soil storage tank and pile soil tank

地震波	储罐类型	基底剪力/ $10^8\text{N}$	倾覆弯矩/ $10^9(\text{N}\cdot\text{m})$	晃动波高/m	动液力/kPa	内罐壁有效动应力/MPa	内罐壁轴向动应力/MPa	内罐壁加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
BVP090	无桩土	2.19	4.10	1.81	37.01	186.67	5.96	14.94
	桩土	1.86	3.56	1.82	29.99	178.71	4.57	13.91
绵竹清平	无桩土	1.18	2.42	1.35	20.00	167.29	4.16	7.01
	桩土	1.01	2.01	1.36	16.71	162.37	3.52	5.64
什邡八角	无桩土	2.83	5.03	0.66	47.14	204.65	7.37	7.70
	桩土	2.51	4.69	0.67	41.15	196.46	5.55	6.35

通过表3 计算结果可以看出,桩土储罐与刚性地基储罐相比,除晃动波高以外,其他地震响应均有所降低,各个地震响应降低百分比的计算结果见表4. 各地震的响应曲线见图6.

表4 地震响应降低百分比

Table 4 Percentage reduction in seismic response

%

地震波	基底剪力	倾覆弯矩	晃动波高	动液压力	内罐壁有效应力	内罐壁轴向应力	内罐壁加速度
BVP090	15.07	13.17	-0.50	18.97	4.26	23.32	6.89
绵竹清平	14.41	16.94	-0.74	16.45	2.94	15.38	19.54
什邡八角	11.31	6.76	-1.52	12.71	4.00	24.69	17.53

$$\text{注:降低百分比} = \frac{\text{无桩土储罐地震响应} - \text{桩土储罐地震响应}}{\text{无桩土储罐地震响应}}$$

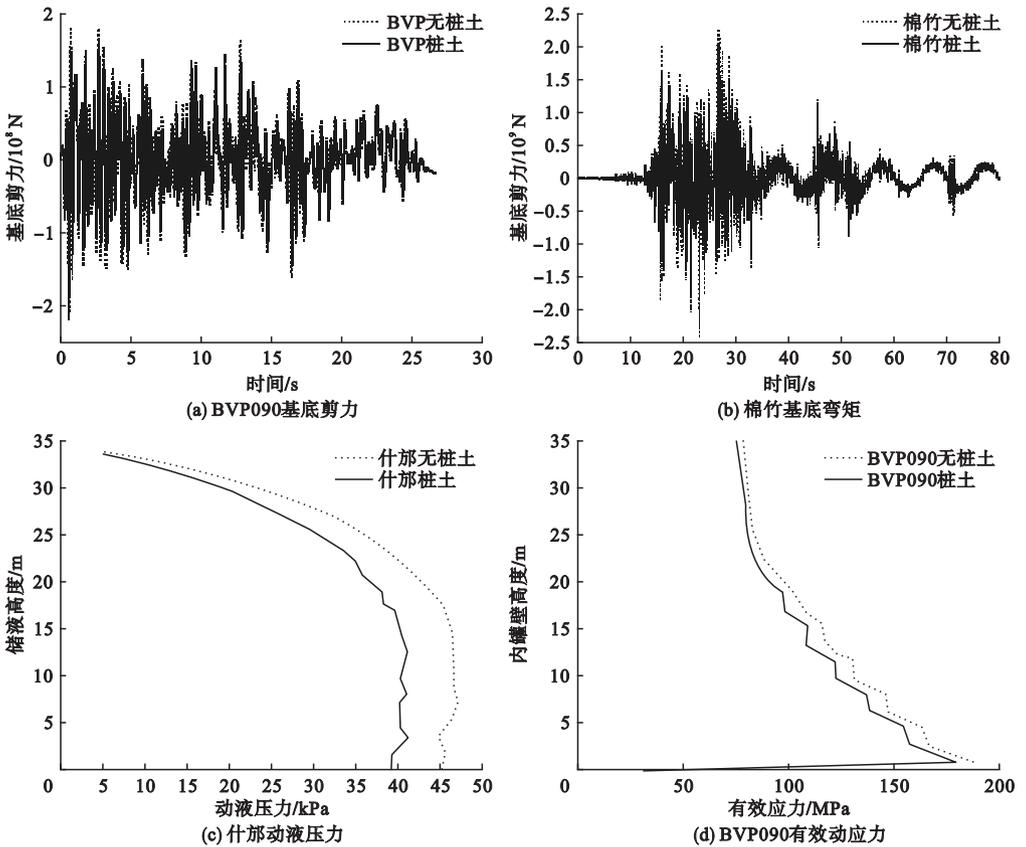


图6 地震响应曲线

Fig. 6 Seismic response curves

由表3、表4可知:在三条基岩波作用下,两种储罐的地震响应趋势相同,考虑桩土相互作用后除晃动波高略有增大以外,储罐的其他地震响应均有所降低. 基底剪力、倾覆弯矩和晃动波高的降低幅度在10%~15%,有效应力的降低幅度最小,保持在5%以内,轴向应力的降低幅度最大,最大值近25%.

在BVP090地震动作用下,液体晃动明显,波高达到1.8 m以上,是什邡八角地震动的三倍左右. 由表3可知:BVP090地震波的卓越周期为1 s,而什邡八角的卓越周期仅为0.29 s. 相关文献表明<sup>[19]</sup>: $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG储罐的储液具有较长的晃动周期,在长周期地震动作用下容易被激发,因此,在BVP090

地震动作用下晃动波高较为明显.在绵竹清平地震动作用下,晃动波高达到了1.36 m,观察绵竹清平地地震波的频谱特性发现该地震动的低频段较为丰富,说明含有长周期成分,晃动波高也相对较大.

表5 桩底与桩头加速度对比

Table 5 Comparison of acceleration at the bottom of pile and pile head

计算工况	地下80m处 加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	地表加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	地表加速度扩 大百分比/%	土层中最大 加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	最大加速度扩 大百分比/%
BVP090 纯土体	2.00	2.20	10.00	2.61	30.50
BVP090 桩-土-储罐	2.00	2.38	19.00	2.61	30.50
绵竹清平桩-土-储罐	2.00	3.03	51.50	3.65	82.50
什邡八角桩-土-储罐	2.00	2.50	25.00	2.72	36.00

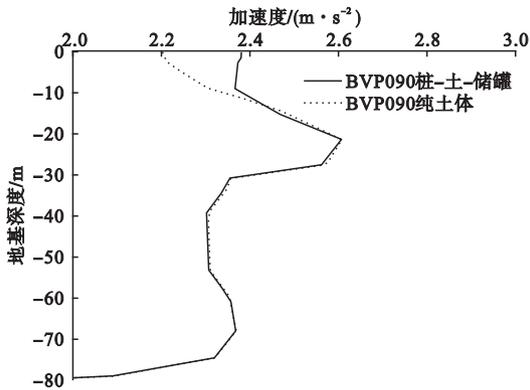


图7 加速度沿地基深度对比

Fig. 7 Comparison of acceleration along the foundation

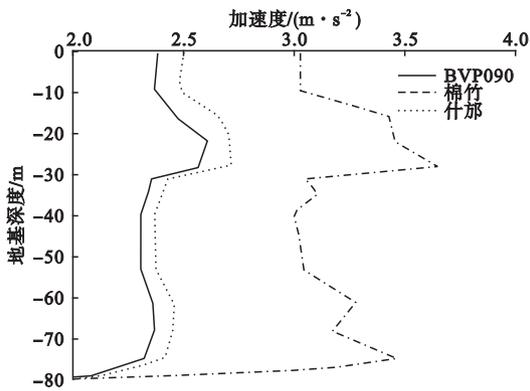


图8 桩-土-储罐模型加速度沿地基深度变化

Fig. 8 Acceleration along the ground depth of pile-soil-tank model

由表5和图7、图8可以看出,地震动沿桩基础和土体向上传播具有放大效应,对比地表加速度和基岩加速度发现:周期较长的

### 3.2 场地放大效应分析

分别提取三条地震波作用下的桩底加速度与桩头加速度进行对比分析,结果见表5、图7、图8所示.

BVP090地震动放大效果最小,地表加速度扩大19%,周期较短的什邡八角地震动的放大效果为25%,而对于频谱特性复杂,存在多峰值的绵竹地震动来说放大效果最大,达到了51.5%.地基石呈层状分布,且具有很强的非线性性质,地震动在每层土中的传播效应也有所不同,在地基深度20~30m的淤泥质黏土层加速度最大,在笔者所选的场地条件下,基岩波在土体中首先增大,随后在地下深度30~70m内变化幅度较小,到达淤泥质土层时加速度值达到了最大.除此之外,上部结构也会对地震动的放大效应产生影响,在纯土体计算下,BVP090地震动沿土体的放大效果为10%,而桩-土-储罐整体模型的放大效果更大,达到了19%,由此说明文中上部储罐会加强地震动的放大效应,在实际工程的设计和建设中应该对此类问题加以考虑.

## 4 结论

(1)考虑桩土相互作用后,除晃动波高以外,桩土储罐的地震响应与刚性地基储罐相比有明显减小,在设计或计算储罐的地震响应时,应该考虑桩-土-储罐的相互作用.

(2)考虑桩土相互作用后,储罐的自振周期变大,这对晃动波高会有放大效应.此外

地震波的卓越周期对储液晃动影响较大,周期较长的地震动会激发较大的晃动波高。

(3)地震动沿桩基础与土体传播会有放大效应,并且不同特性的地震动放大效果不同,从笔者所选的地震波来看,长周期地震动的放大效果最小,短周期其次,而对于频谱特性复杂的地震动来说,放大效应最为明显。除此之外, $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐的上部结构也会影响场地的放大效应,与纯土体相比,考虑上部结构的土体放大效果更为明显。因此,在实际工程中,需要考虑上部结构对场地放大效应的影响。

## 参考文献

- [ 1 ] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the seismological society of America,1963,53(2):381—387.
- [ 2 ] HAROUN M A, HOUSNER G W. Dynamic interaction of liquid storage tanks and foundation soil[C]// Dynamic response of structures @ experimentation, observation, prediction and control. [S. l.]:ASCE,2014:346—360.
- [ 3 ] HAROUN M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks[J]. Earthquake engineering & structural dynamics,2010,11(2):179—206.
- [ 4 ] 孙建刚. 大型立式储罐隔震理论方法及实验[M]. 北京:科学出版社,2009.  
(SUN Jiangang. Isolation of large vertical storage tank theory, method, test[M]. Beijing: Science Press,2009.)
- [ 5 ] KIANOUSH M R, CHEN J Z. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks [J]. Engineering structures,2006,28(5):704—715.
- [ 6 ] 林树潮. LNG 储罐变曲率摩擦摆隔震与罐壳结构预应力施工仿真分析[D]. 北京:北京工业大学,2016.  
(LIN Shuchao. VCFPB base isolation and prestressed tendon construction research for LNG storage tank[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2016.)
- [ 7 ] American Petroleum Institute. Welded steel tanks for oil storage: API standard 650 [S]. USA:API Publishing Services,2010.
- [ 8 ] 孙颖,崔利富,孙建刚,等. 三向地震激励下立式浮顶储罐隔震数值分析[J]. 大连海事大学学报,2011,37(4):104—108.  
(SUN Ying, CUI Lifu, SUN Jiangang, et al. Base isolation numerical analysis of vertical storage tanks with floating roof under three dimensional excitation [J]. Journal of Dalian maritime university,2011,37(4):104—108.)
- [ 9 ] AYMAN A. Seleemah, mohamed El-sharkawy. Seismic response of base isolated liquid storage ground tanks[J]. Ain shams engineering journal,2011,2:33—42.
- [ 10 ] ZHANG Ruifu, WENG Dagen, REN Xiaosong. Seismic analysis of a LNG storage tank isolated by a multiple friction pendulum system [J]. Earthquake engineering and engineering vibration,2011,10(2):253—262.
- [ 11 ] SONIA D P, MISTRY B B, PANCHAL V R. Double variable frequency pendulum isolator for seismic isolation of liquid storage tanks [J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241:700—713.
- [ 12 ] 崔利富,孙建刚,赵颖华. 大型立式储罐竖向基础隔震研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(12):132—137.  
(CUI Lifu, SUN Jiangang, ZHAO Yinghua. Study on vertical base isolation of large vertical storage tanks[J]. Journal of Harbin institute of technology,2011,43(12):132—137.)
- [ 13 ] RANDOLPH M J. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1978, 104(12):1465—1488.
- [ 14 ] LUO C, YANG X, ZHAN C, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of soil-pile-structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation [J]. Soil dynamics & earthquake engineering,2016,84:145—156.
- [ 15 ] 林杨. 大型 LNG 储罐桩—土—结构—隔震体系地震形影分析[D]. 天津:天津大学,2011.  
(LIN Yang. Seismic responses analysis of pile-soil-structure-isolation system of large-scale LNG tanks[D]. Tianjin:Tianjin University,2011.)
- [ 16 ] 阎韩生,赵琦. 地震时桩土动力相互作用的 Penzien 模型研究[J]. 西安工业大学学报,2008,28(1):76—80.  
(YAN Hansheng, ZHAO Qi. Study on Penzien model of dynamic interaction of soil and soil under earthquake [J]. Journal of Xi'an technological university,2008,28(1):76—80.)
- [ 17 ] 崔利富. 立式储罐三维基础隔震体系动力学分析研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2008.  
(CUI Lifu. Research on the dynamic response analysis of three-dimensional seismic base isolation system of stand storage tanks [D]. Daqing:Daqing Petroleum Institute,2008.)
- [ 18 ] 蒋通. 地基—结构动力相互作用分析方法[M]. 上海:同济大学出版社,2009.  
(JIANG Tong. Analysis method of dynamic interaction of foundation-structure [M]. Beijing: Tongji University Press,2009.)
- [ 19 ] 张营. 大型全容式 LNG 储罐地震响应数值模拟研究[D]. 大庆:东北石油大学,2011.  
(ZHANG Ying. Seismic response numerical simulation of large full capacity LNG storage tanks [D]. Daqing: Northeast Petroleum University,2011.)