

流固耦合对脱硫塔结构简化模型的动力反应分析

贺文山[✉] 宋波 王树和

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

✉通信作者 E-mail: 563789006@qq.com

摘要 为研究流固耦合对脱硫塔结构简化模型动力反应的影响,采用有限元程序(Adina)模拟脱硫塔结构简化模型在地震作用下的流固耦合效应。首先对脱硫塔结构进行合理简化,在不同液位下进行了脱硫塔结构的模态分析,研究了塔内液位高度对脱硫塔结构的频率和振型的影响;其次,通过对脱硫塔结构进行地震波加载,研究了塔内液位高度、地震波输入角度和加速度峰值对脱硫塔结构的位移和加速度的影响,并与试验结果进行比较。结果表明,脱硫塔结构的频率会随着液位增高而减小,塔内液位高度、地震波加载方向及加速度峰值对脱硫塔结构加速度的影响比较大,而对其位移影响不大。

关键词 脱硫; 锅炉; 流固耦合; 动力学分析; 地震波; 位移; 加速度

分类号 TU33+3

Fluid-solid coupling dynamic response analysis of a simplified desulfurization tower model

HE Wen-shan[✉], SONG Bo, WANG Shu-he

School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: 563789006@qq.com

ABSTRACT In order to study the influence of fluid-solid coupling on the dynamic response of a simplified desulfurization tower structure model, the fluid-solid coupling effects of the model under seismic waves were simulated by using the finite element program Adina. Firstly, the desulfurization tower structure was reasonably simplified, its modal analysis was done at different liquid levels, and the influences of the liquid level on its self-oscillation frequency and vibration mode were analyzed. Secondly, the effects of the liquid level, the input angle and the peak value of earthquake acceleration on the acceleration and displacement of the desulfurization tower were discussed by loading seismic waves and were compared with experimental results. The result shows that the self-oscillation frequency intensifies with the liquid level rising. The liquid level, the input angle and the peak value of earthquake acceleration all have great influence on the acceleration of the desulfurization tower, but they have little effect on the displacement of the desulfurization tower.

KEY WORDS desulfurization; boilers; fluid-solid coupling; dynamic analysis; seismic waves; displacement; acceleration

服役期间的筒仓、储罐和脱硫塔等储液结构在静态受力时,若等效应力保持在塑性屈服应力以下,容器就是安全的,但在地震中由于塔内液体的存在,塔壁会与塔内液体发生相互作用,很容易引起结构破坏,其一旦发生破坏,不仅会造成较大的直接经济损失,还可能导致储存物质泄露,产生严重的地震次生灾害,造成严重的环境污染^[1]。例如,1976年我国发生的7.8级唐山大地震,地震区的钢制储罐遭

受到相当严重的震害。在唐山、天津等地区现场调查的52座容量为500~10 000 m³的立式钢油罐中,都曾发生过一些破坏,从震害看,罐壁屈曲是该类结构的主要破坏形式之一。目前对这些破坏形式的研究还不足,不仅表现在对结构的理论分析中存在差异上,也反映在各国规范的不一致上。例如,美国API650标准和AWWA标准是按均匀轴压圆柱壳验算水平地震作用下储液罐的稳定性,而我国《工业

收稿日期: 2011-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078033)

设备抗震鉴定标准》(YB/T9260—98) 则是按受扭圆柱壳体验算^[2]。

国内外学者对流固耦合的基础理论做了大量的研究工作,国外学者的研究一直处于领先地位,其主要集中在美国、英国、德国和日本。在美国,对流固耦合的应用有许多研究成果,其中最为突出的是麻省理工学院的 Bathe 等^[3-4]。在 Bathe 的主持下,美国每年都会召开关于流固耦合问题的学术交流会,其在商用软件中也实现了流固耦合问题的计算。在英国已经成功应用流固耦合理论对 F1(不可压缩的黏性流体的压力和速度)进行计算,Zienkiewicz 等^[5]在他们的有限元法专著中详细地讨论了对流体的计算方法。德国学者的论文中也显示了他们在流固耦合理论方面的成果。

1991 年 Hesla 最早提出了将流体域和固体域建立一个统一的求解方程。德国的 Gluck 和 Halfmann 等采用分区耦合算法对膜结构进行流固耦合的数值模拟^[5]。Namkoong 等^[6]开发了一个可以直接求解混合统一方程的方法,研究了充满流体的腔中竖直板的振动,并利用其对称性,将三维问题简化为二维问题。Zhang 和 Hisada^[7]为了克服由于薄壳结构的屈曲引起的数值计算的不稳定性,开发出了一个用于求解三维结构的屈曲和大变形的 FSI(fluid-structure interaction)程序。建立了自动网格更新的 ALE(arbitrary lagrangian eulerian)有限元法的方程。

1 脱硫塔结构有限元建模及模态分析

本文采用通用有限元软件 Adina^[8-9]对脱硫塔结构的简化模型进行了流固耦合数值模拟分析。建模时考虑以下因素:脱硫塔半径为 6.55 m,高为 36.5 m,在塔体的标高为 16 m 和 33 m 处分别有烟气入口(5.0 m×9.4 m)和烟气出口(2.6 m×13.1 m);脱硫塔壳壁部分采用 Q235 钢,壁厚为 0.013 m,材料密度为 7 850 kg·m⁻³,弹性模量为 2.06×10¹¹ Pa,壳壁单元类型为 shell63 单元;塔内液体为碳酸钙溶液,其质量浓度为 1 050 kg·m⁻³,液体的单元类型为 3-D Fluid 单元,体变模量为 2.3×10⁸ Pa;结构底部与基础固结。取空塔和塔内液位分别为 4.5、9.0 和 13.5 m 进行研究。脱硫塔的实际结构图及液位高为 9 m 的脱硫塔结构有限元模型图如图 1 所示。

在对脱硫塔结构进行动力时程分析之前,首先要了解结构的自振特性,因此需要对脱硫塔结构进行模态分析。

1.1 脱硫塔结构的自振频率

利用 Adina 软件对塔内无液体时以及液位高度

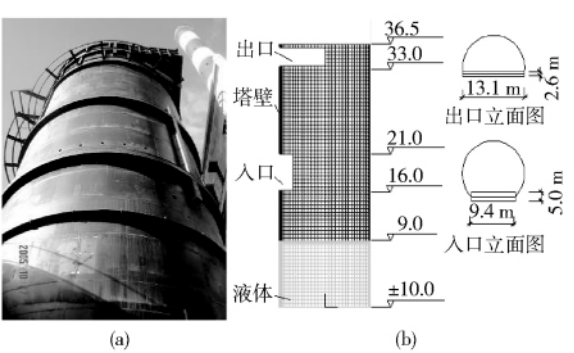


图 1 脱硫塔的结构图。(a) 实际结构图;(b) 有限元模型图
Fig. 1 Configuration map of a desulfurization tower: (a) actual structure; (b) finite element model

分别为 4.5、9.0 和 13.5 m 时的情况进行模态分析,得到四种情况下结构各阶模态的自振频率如表 1 所示。

表 1 四种液位下脱硫塔的自振频率
Table 1 self-oscillation frequencies of the structure with four liquid levels

阶数	自振频率/Hz			
	无液体	液位高度 4.5 m	液位高度 9.0 m	液位高度 13.5 m
1	0.491 5	2.158 3×10 ⁻⁶	2.158 3×10 ⁻⁶	2.105 8×10 ⁻⁶
2	0.582 2	0.491 5	0.491 5	0.491 5
3	0.905 1	0.582 2	0.581 8	0.579 5
4	0.960 4	0.905 1	0.905 1	0.904 9
5	1.400 0	0.960 4	0.958 1	0.938 4
6	1.487 0	1.398 9	1.384 9	1.311 6
7	1.682 0	1.487 1	1.486 5	1.381 8
8	1.718 0	1.681 0	1.665 6	1.395 3
9	1.957 0	1.718 4	1.718 3	1.465 2
10	2.046 0	1.955 9	1.938 2	1.483 5
11	2.329 0	2.045 4	1.985 2	1.677 1
12	2.365 0	2.323 1	2.129 2	1.678 4
13	2.549 0	2.365 0	2.338 6	1.718 8
14	2.670 0	2.549 0	2.361 8	1.815 9
15	2.834 0	2.661 6	2.405 8	1.823 4
16	3.066 0	2.833 2	2.553 5	1.908 7
17	3.119 0	3.047 3	2.551 5	1.909 2
18	3.120 0	3.151 7	2.725 9	2.043 6

由表 1 可知,有液体时第一阶频率很小,这是因为其表现出的是液体的自振特性。从第二阶开始频率和无液体时接近,其表现出的是塔体的自振特性,但随着塔内液位高度的增加,结构的自振频率呈减小的趋势,这是因为结构重心随着液位高度的增加而上升,从而导致结构的自振频率下降。

1.2 脱硫塔结构的模态图

分别取四种液位高度模型的第一阶和第八阶模态图进行分析,如图2和图3所示。

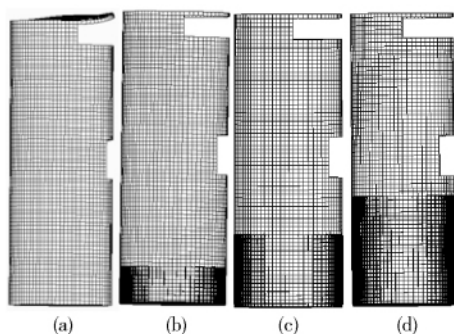


图2 四种液位高度下结构第一阶模态图。(a)空塔;(b)4.5 m;(c)9.0 m;(d)13.5 m

Fig. 2 The first modal figure of the structure with four liquid levels: (a) vacant tower; (b) 4.5 m; (c) 9.0 m; (d) 13.5 m

由图2可知,在无液体时结构的第一阶振型表现在塔顶的局部位移上,而有液体时,由于液体的刚度远远小于结构的刚度,第一阶的振动表现在液体的振动上,而结构本身的反应不大,这与表1中自振频率表现出来的规律是相符合的。

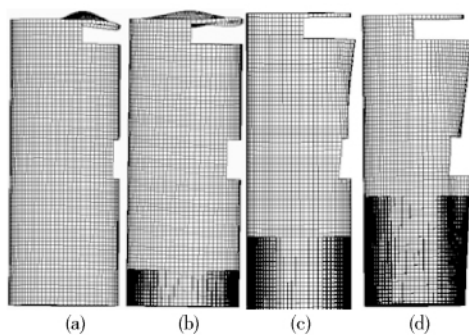


图3 四种液位高度下结构第八阶模态图。(a)空塔;(b)4.5 m;(c)9.0 m;(d)13.5 m

Fig. 3 The eighth modal figure of the structure with four liquid levels: (a) vacant tower; (b) 4.5 m; (c) 9.0 m; (d) 13.5 m

由图3可知,从第八阶振型开始,结构下部出现了明显随液体振动的趋势,说明随着振动频率的提高,液体对结构的影响越来越明显。

2 地震波作用下结构模型的流固耦合动力效应分析

2.1 液体与结构的流固耦合分析

在地震波的作用下,结构与塔内液体会通过节点传力的方式产生相互作用,但由于结构与液体在密度、刚度和流动性等方面都存在很大的差异,他们之间的流固耦合动力特性变得非常复杂。Adina软件根据动量守恒定律、质量守恒定律及液体和结构

的边界条件列出平衡方程^[10],从而达到解决液体与结构的流固耦合问题的目的。本研究采用牛顿迭代法进行动力计算。划分网格时,在塔壁和液体接触部位的节点相互重合,这保证了塔壁和液体之间可以通过节点很好的相互传力;在液体表面处设有自由液面。

本文主要研究液位高度、地震波加载方向及地震波加速度峰值对脱硫塔结构流固耦合动力特性的影响,故选择天津波对结构进行加载模拟。天津波的加速度时程曲线如图4所示。

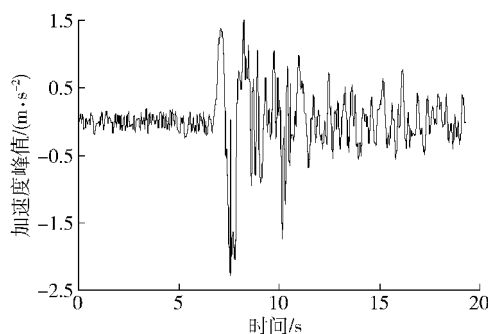


图4 天津波加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration time history curves of Tianjin seismic wave

2.2 四种液位高度下塔体的动力反应

取加速度峰值为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的天津波,从与进出口方向成 0° 和 90° 的方向输入模型结构,对四种液位高度的脱硫塔结构进行流固耦合动力反应研究。

2.2.1 从 0° 方向输入天津波

从 0° 方向输入天津波,得到塔体加速度峰值与位移峰值分布曲线如图5所示。

由图5(a)可知,液位高度不仅对塔体结构加速度峰值分布趋势有一定的影响,在数值上也有很大的影响。随着液位高度的增大,加速度峰值也会相应增大,并且在液位高度附近会出现明显的突变,这是因为在自由液面处,液体不受约束,从而会产生较大的晃动幅度,造成较大的动力效应。

由图5(b)可知,液位高度变化时,塔体各质点的位移值都很接近,说明塔内液位对塔体的位移影响不大。

表2为天津波沿着与脱硫塔开口成 0° 的方向输入时四种液位高度的塔体加速度峰值的放大比例。由表2可知,从 0° 方向输入地震波时随着塔内液位高度的增加,塔底的加速度峰值会显著增大,但塔顶加速度的增量却不大,甚至会出现减小的情况,说明液体的增多可以吸收更多的地震波能量。

2.2.2 从 90° 方向输入天津波

与 0° 方向输入天津波的情况类似,从 90° 方向

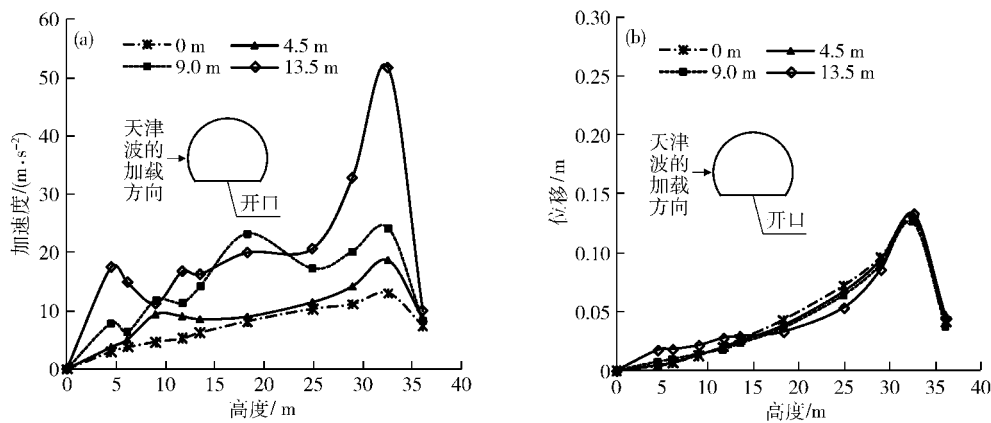


图 5 四种液位塔体加速度 (a) 及位移峰值 (b) 分布曲线 (0°)

Fig. 5 Distribution curves of acceleration (a) and displacement (b) of the tower body with four liquid levels (0°)

表 2 四种液位高度塔顶与塔底加速度峰值的比较 (0°)

Table 2 Comparison of acceleration between the tower overhead and tower bottom with four liquid levels (0°)

液位高度 / m	塔底加速度峰 值 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	塔顶加速度峰 值 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	放大比例 / %
0	2.985	7.441	149.3
4.5	3.784	8.695	129.8
9.0	7.895	8.264	4.7
13.5	17.479	10.000	-42.8

输入天津波,得到塔体加速度峰值与位移峰值分布曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,从 90°方向输入地震波时,结构的流固耦合动力反应与 0°方向表现出近似的特征,即随着液位高度的增加,塔体加速度峰值有相同的变化趋势,液位高度对塔体加速度的峰值大小也会产生影响,而对结构位移峰值的影响也不大。

2.3 不同激励波输入角度下塔体的动力反应

选取相同的液位高度 (13.5 m),取加速度峰值为 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的天津波沿着四个角度输入结构,得到

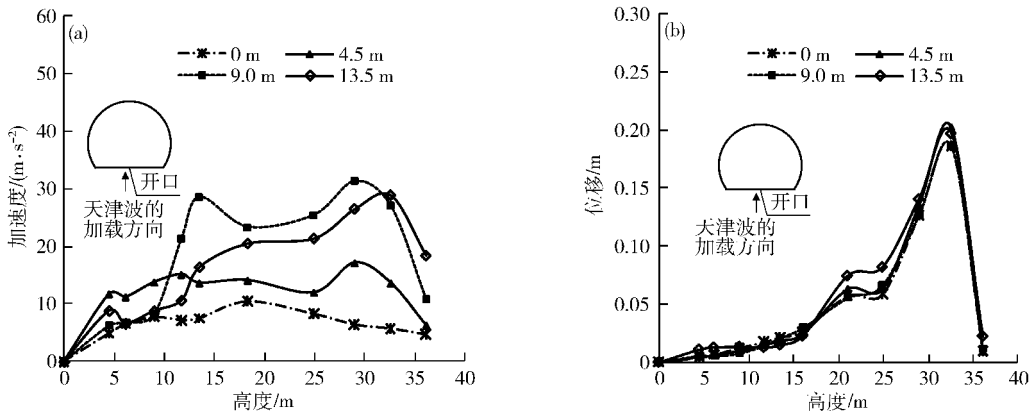


图 6 四种液位塔体加速度 (a) 及位移峰值 (b) 分布曲线 (90°)

Fig. 6 Distribution curves of acceleration (a) and displacement (b) of the tower body with four liquid levels (90°)

塔体加速度峰值和位移峰值分布曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,塔内液位高度相同时,当同一地震波分别沿四个不同角度输入结构时,塔体的流固耦合动力反应区别较大。尤其是在烟气入口和液位高度附近,沿着 90°方向输入地震波时塔体的振动方向与其他角度的方向相反,这是因为液体的动力反应在此方向上正好与结构的反应相互抵消所致;在烟气出口位置,四个角度的动力反应趋于一致,都会发生突变。通过比较四个方向的加速度峰值和位移峰值曲线,可以看到,30°方向输入地震波时结构的流固耦合动力反应最为明显,这是由于从 30°方向输入地震波时,塔体产生了较大的扭矩,弯、剪和扭三种的力组合使得塔体产生了较大的应力,从而产生较大的位移。因此可以认定,当输入结构的地震波与该结构进出口方向成 30°角时,为结构的最不利输入角度。

2.4 不同加速度峰值下塔体的动力反应

取塔内液位高为 13.5 m,沿 0°方向输入加速度峰值分别为 1.5 、 2.5 和 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的天津波,对不同

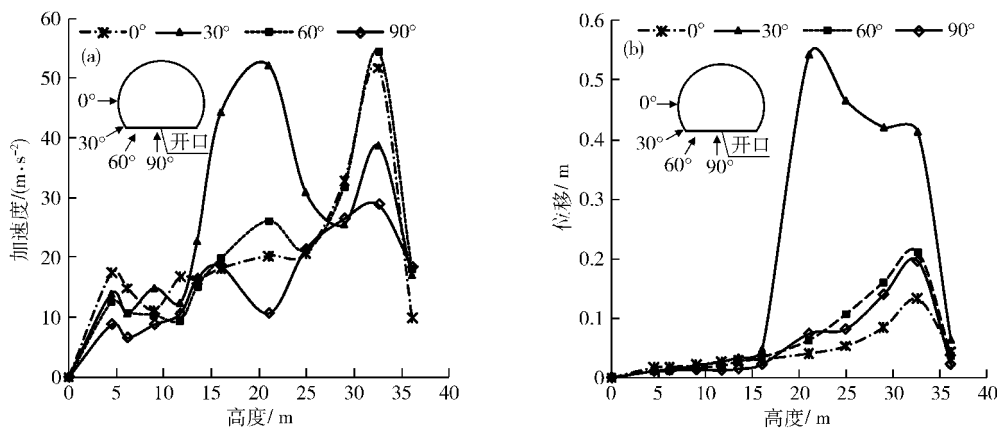


图 7 不同角度输入地震波塔体加速度 (a) 及位移峰值 (b) 分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of acceleration (a) and displacement (b) of the tower body with seismic wave input in different degrees

加速度峰值作用下塔体的流固耦合动力反应进行研究,得到塔体加速度峰值和位移峰值分布曲线如图 8 所示.

从图 8 可知,塔体的加速度和位移分布曲线,在

有液体和无液体时表现出相近的特征,均是随着地震波加速度峰值的提高,塔体的加速度和位移会相应增大.在出口处都会发生突变,加速度和位移分布曲线也与空塔时的情况具有相同的发展趋势.

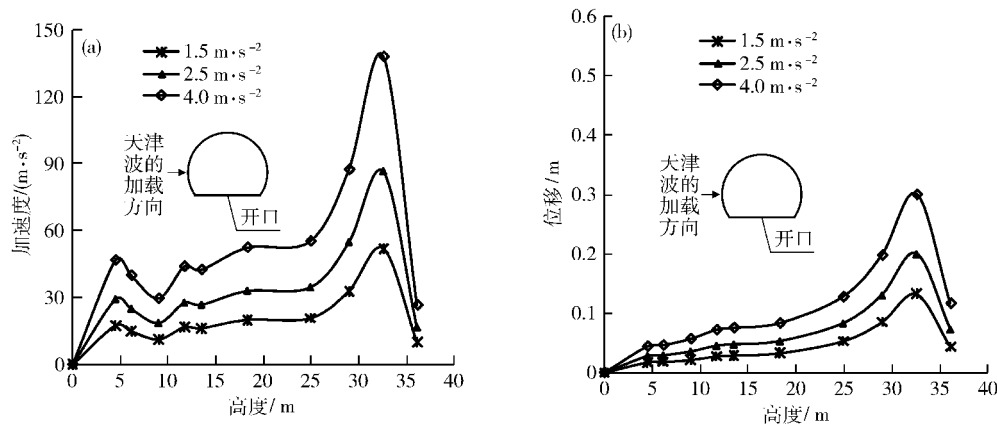


图 8 不同地震波大小塔体加速度 (a) 及位移峰值 (b) 分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of acceleration (a) and displacement (b) of the tower body with different peak values of earthquake acceleration

表 3 为在不同地震波作用下塔体的加速度及位移峰值的增大比例.结果表明:当地震波加速度峰值由 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 变为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,即增大到原来的 167% 时,结构的加速度峰值增大到原来的 167%,位移峰值增大到原来的 150%;地震波加速度峰值

由 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 变为 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,即增大到原来的 160% 时,结构的加速度峰值增到原来的 160%,位移峰值增大到原来的 151%.这说明结构的加速度及位移峰值与加载地震波的峰值大小基本上呈正比关系.

表 3 不同地震波作用下塔体加速度及位移峰值的增大比例

Table 3 Magnification of the acceleration and displacement of the tower body with different peak values of earthquake acceleration

地震波加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	塔体加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	塔体加速度峰值增大 比例/%	塔体位移峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	塔体位移峰值增大 比例/%
1.5	51.70	100	0.133	100
2.5	86.34	167	0.200	150
4.0	138.30	160	0.301	151

为验证本文的脱硫塔结构数值模拟结果的可靠

性,利用振动台对脱硫塔实际结构的缩尺模型(缩

小为原型结构的 1/15) 进行地震波加载试验,地震波是加速度峰值为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的天津波,加载方向为与开口成 90° 的方向,塔内液位高度分别为 0 m 和 0.9 m. 在此基础上,本文利用计算机模拟的方法研究了相同条件下脱硫塔结构的动力反应,并与试验结果进行对比,得到的塔体加速度峰值分布曲线如图 9 所示.

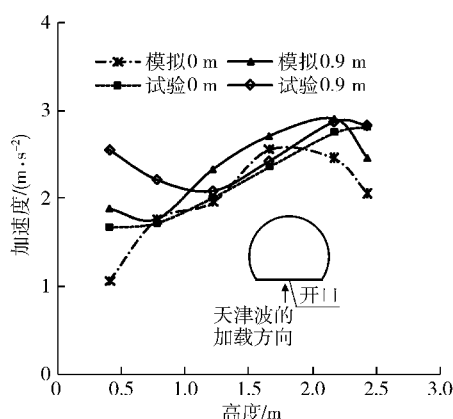


图9 地震波模拟及试验的加速度峰值分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of acceleration under the simulated seismic wave and experiment of earthquake

由图 9 可知,分别采用试验和计算机模拟方法对脱硫塔结构进行动力反应特性研究,两种方法得到的加速度在数值上有一定的差别,这是由于试验仪器存在局限性及试验操作过程中会产生不可避免的误差.但是,从发展趋势上进行对比可知,两者的塔体加速度峰值沿高度分布曲线具有相同的发展趋势,其在有液体时塔体的加速度峰值比无液体时的都要大,说明本文采用的有限元模拟方法是正确的.

3 结论

(1) 由模态分析可以看出,液体对结构的自振特性会产生很大的影响,尤其对结构的下部影响更为明显,故应予以加强,防止结构的整体倒塌.

(2) 随着液位高度的增大,塔体加速度峰值也会相应增大,并且在液位高度附近会出现明显的突变;而液位高度对塔体各质点位移的影响不大.

(3) 在入口位置,同一地震波沿着 90° 方向输入塔体时的动力反应与其他输入角度的相反;在出口位置,四个角度的动力反应趋于一致,都会发生突

变;沿着 30° 方向时,结构的流固耦合动力反应最为明显,为结构的最不利输入角度.

(4) 增大地震加速度峰值,塔体的动力反应也会相应增加,且塔体加速度和位移的峰值大小增量与地震加速度峰值基本上呈正比关系.

(5) 通过试验结果与有限元模拟结果进行对比,进一步确定了计算机模拟方法的正确性.

参考文献

- [1] Xu G, Ren W M, Zhang W, et al. Dynamic characteristic analysis of liquid-filled tanks as a 3-D fluid-structure coupling system. *Acta Mech Sin*, 2004, 36(3): 328
(徐刚, 任文敏, 张维, 等. 储液容器的三维流固耦合动力特性分析. *力学学报*, 2004, 36(3): 328)
- [2] Sheng Z H, Song B. Influence of fluid-solid coupling on dynamic characteristics of large desulfurization tower. *J Archit Civ Eng*, 2010, 27(1): 36
(盛朝晖, 宋波. 流固耦合对大型脱硫塔动力特性的影响. *建筑科学与工程学报*, 2010, 27(1): 36)
- [3] Bathe K J, Zhang H. A flow-condition-based interpolation finite element procedure for incompressible fluid flows. *Comput Struct*, 2002, 80(14/15): 1267
- [4] Kohno H, Bathe K J. A nine-node quadrilateral FCBI element for incompressible fluid flows. *Commun Numer Methods Eng*, 2006, 22(8): 917
- [5] Zienkiewicz O C, Taylor R L, Nithiarasu P. *The Finite Element Method: Vol. 3, Fluid Dynamics*. 6th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000
- [6] Namkoong K, Choi H G, Yoo J Y. Computation of dynamic fluid-structure interaction in two-dimensional laminar flows using combined formulation. *J Fluid Struct*, 2005, 20(1): 51
- [7] Zhang Q, Hisada T. Analysis of fluid-structure interaction problems with structural buckling and large domain changes by ALE finite element method. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2001, 190(48): 6341
- [8] Yue G, Chen Q. *Fundamental Application and Example Explanation of Adina*. Beijing: People's Transportation Press, 2008
(岳戈, 陈权. *Adina 应用基础与实例详解*. 北京: 人民交通出版社, 2008)
- [9] Yue G, Liang Y B. *Advanced User Training of the Function of Fluid and Fluid-Structure Interaction on Adina*. Beijing: People's Transportation Press, 2010
(岳戈, 梁宇白. *Adina 流体与流固耦合功能的高级应用*. 北京: 人民交通出版社, 2010)
- [10] Degroote J, Bathe K J, Vierendeels J. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction. *Comput Struct*, 2009, 87(11/12): 793