

文章编号 : 0258-0926(2015)05-0091-05 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0091

AP1000 安全壳冷却水箱长周期地震下 晃动特性研究

曾晓佳¹, 陆道纲¹, 党俊杰², 刘雨¹

1. 华北电力大学非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京, 102206;
2. 中国核电工程有限公司, 北京, 100840

摘要:长周期地震动会对自振周期较长的结构造成严重危害,对于 AP1000 顶部的大型重力排水箱,尤其要考虑在低频范围内的晃动情况。对于这一非线性问题,数值模拟具有一定的局限性和复杂性,因此建立实验模型,通过振动台模拟实验,选取与水晃动频率一致的正弦三波作为激励,测量不同液深时顶盖各位置的冲击力,并通过与陆道纲提出的计算方法对比,进一步证明了该计算方法的可行性和准确性。同时得出,该计算结果在小振幅晃动时相对偏小,在大振幅晃动时相对偏大,具有一定的保守性。

关键词:非线性;正弦三波;冲击力

中图分类号:TL33 **文献标志码:**A

Research on Sloshing Characteristics in Passive Cooling Storage Tank of AP1000 under Long-Period Earthquake

Zeng Xiaojia¹, Lu Daogang¹, Dang Junjie², Liu Yu¹

1. Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing, 100840, China

Abstract: The structure with long natural vibration period, such as the large-scaled gravity drain tank on the top of AP1000 containment, is vulnerable to long period ground motion. Particularly, the sloshing phenomena in a low frequency range are of great concern. For this kind of nonlinear problem, numerical simulations are complex and possess certain limitations, therefore, we established the experimental models to measure the impact force of the top cover in different positions with various fill depths. The experiments were carried out on the shaking table and the three cycle sine which has the same frequency with the sloshing water was selected as the input excitation. In addition, by comparing with the calculation method proposed by Lu Daogang, the feasibility and accuracy of this calculation method was further verified. At the same time, we found that the calculation results of small amplitude sloshing were relatively small and the results of large amplitude sloshing was relatively large. Hence, the calculation method is considered to be certain conservative.

Key words: Nonlinear, Three cycle sine, Impact force

0 引言

非能动安全壳冷却系统 (PCS) 是 AP1000 核电站的关键设施,在地震载荷作用下的性能至关重要。当发生长周期地震时,非能动安全壳冷

却水储水箱 (PCCWST) 中自由液面的晃动波高可达数米,并有可能冲击储水箱顶盖,对容器造成破坏,危及核电站的安全。本研究对于此类非线性问题,建立储水箱缩比模型,进行地震动模

拟试验，研究在不同的正弦三波激励下，储水箱自由液面的晃动响应特性。测量晃动的最大波高及顶盖受到的冲击力，通过有无顶盖的实验对比，经过数据处理和分析计算，为 PCS 的抗震分析提供设计输入。

1 实验装置及测量系统

主要针对地震情况下 PCCWST 的晃动特性进行研究，根据现有地震试验台的参数和水箱结构原型的特殊性，按照 1/40 的缩比尺寸确定实验模型。另外，为了便于观察晃动的最大波高，将实验模型在高度方向加高 3 倍，以模拟无限高水箱。模型结构及尺寸如图 1 所示。

为了方便观察水箱晃动情况，整个模型的材料为透明的有机玻璃。水箱的内置顶盖和上部顶盖分别开有 4 个 M8 的孔，通过 4 个连接杆及螺母将 2 个盖子固定，水箱上部顶盖与水箱之间通过法兰连接进行固定。通过这样的安装方式将内置顶盖完全固定，且所有部件都连接为一个整体。载荷传感器安装在一个连接杆上，两端通过螺纹与连接杆连接。

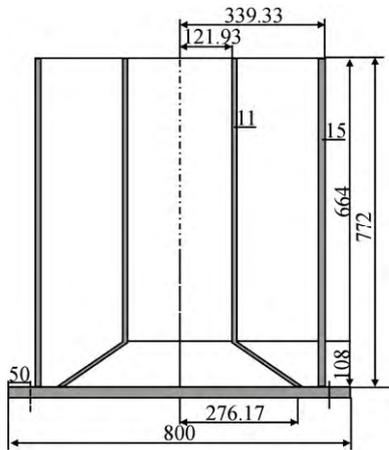


图 1 模型结构及尺寸 mm
Fig. 1 Structure and Dimension of Model mm

2 实验过程及结果分析

2.1 冷却水储水箱中水晃动频率测量

采用振动台扫频试验测量储水箱中水晃动的频率^[1]。由理论分析可知，该实验模型水晃动的频率相对较小，并且考虑到振动台在低频范围的准确性，因此确定扫频范围为 0.5~20 Hz。

根据几何相似确定水箱中的水深为 220 mm。

在水箱顶部与激励方向相同且靠近水箱外圆筒壁的位置安装激光位移传感器，测量水晃动时的位移，分析其晃动频率。实验测得水晃动的位移时程曲线如图 2 所示。

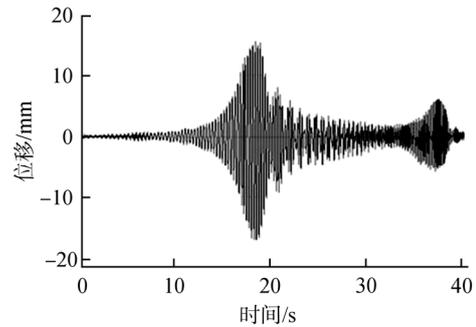


图 2 水晃动位移时程曲线
Fig. 2 Displacement Time History of Sloshing Wave

由图 2 可以得出：在扫频进行到 18 s 时，液面的晃动幅值达到最大值，通过分析此时对应的频率为 1.02 Hz，即为 1 阶晃动频率。

2.2 实验工况

(1) 保持水深为 220 mm，输入正弦三波的振幅分别为 12、20、28、36 mm，测量在不同正弦三波激励下液面晃动的最大波高。

(2) 水箱增加内置顶盖，安装载荷传感器，分别测量上述实验条件下顶盖受到的冲击力。

(3) 调整内置顶盖与液面的距离，测量顶盖受到的冲击力。

(4) 使水箱的装水量为零，测量不同液面距下内置顶盖的受力情况。

2.3 位移响应

本实验通过非接触式激光位移传感器测量了不同正弦三波激励下水箱内某一点（与激励方向相同且靠近容器壁面）的液位变化情况，并记录最大波高。

在每个输入量级下进行 5 次实验，通过多次测量取平均值的方法来减小实验误差。表 1 给出了不同输入量级下晃动最大波高的平均值。

由表 1 可以看出，当输入量级相对较小时，

表 1 晃动最大波高平均值
Table 1 Average Maximum Wave Height of Sloshing Liquid

输入量级/%	30	50	70	90
振幅/mm	12	20	28	36
最大波高平均值/mm	55	85	110	130

晃动波高和输入振幅基本呈线性关系。当输入量级增大时，晃动波高和输入振幅呈非线性关系，即输入振幅比例增加时，晃动波高增加得较少。

2.4 冲击力响应

由对称性原理，选取内置顶盖的 1/4 布置测点。首先在与外部激励相同的方向（设为 0° ）且靠近水箱外圆筒壁的位置布置测点，其次在 45° 方向和 90° 方向也布置测点，即共有 3 个测点。冲击力测点示意图如图 3 所示。

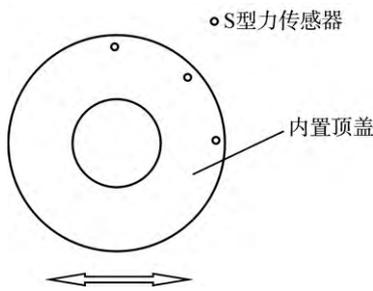


图 3 冲击力测点示意图

Fig. 3 Sketch of Measurement Points of Impact Force

本实验输入条件与上述实验保持一致，通过调整内置顶盖的位置，测量不同液面距时顶盖受到的冲击力大小。

(1) 内置顶盖距自由液面 40 mm (与原型几何相似)。分别测量 0° 、 45° 和 90° 方向受到冲击力大小。图 4 表示的是 0° 方向在 28 mm 振幅的正弦三波激励下的冲击力。

由实验结果可知，在该振幅下， 45° 方向的冲击力为 20 N， 90° 方向的冲击力为 9 N，都小于 0° 方向，这和激励方向不一致有关。且由于 90° 的位置是与激励方向垂直的方向，所以该位置的

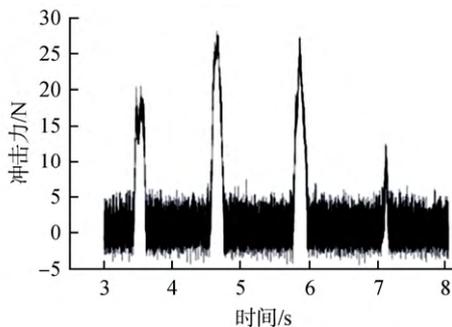


图 4 0° 方向冲击力曲线图—内置顶盖距自由液面 40 mm

Fig. 4 Curve of Impact Force in Direction of 0° —with a Distance of 40 mm between Inner Cap and Free Surface

晃动冲击力很小，最大不超过 10 N。

(2) 内置顶盖距自由液面 60 mm。通过调整内置顶盖的位置，使它与自由液面的距离为 60 mm，在 0° 方向布置载荷传感器，测量晃动冲击力。图 5 表示 0° 方向在 36 mm 振幅的正弦三波激励下的冲击力。

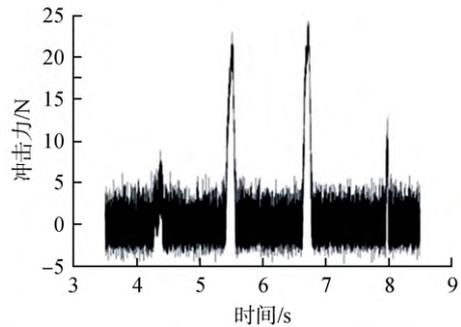


图 5 0° 方向冲击力曲线图—内置顶盖距自由液面 60 mm

Fig. 5 Curve of Impact Force in Direction of 0° —with a Distance of 60 mm between Inner Cap and Free Surface

由于与自由液面的距离增大，液面距为 60 mm 时，晃动冲击力都对应地小于液面距为 40 mm 的数据。

(3) 水装量为零。再增加 1 组实验，测量水装量为零时内置顶盖的受力情况。由测量结果可知，无水情况下不同液面距处内置顶盖的受力情况大致相同，且该力只出现在正弦三波激励开始和结束的时间点。

3 计算值与实验值对比分析

3.1 计算方法

采用陆道纲^[2]提出的基于液体压强的计算方法，将晃动冲击力的计算值和实验值进行对比。首先由之前的实验得到晃动的最大波高 h_{max} ，如图 6 所示，斜线段表示晃动出现最大波高时的液

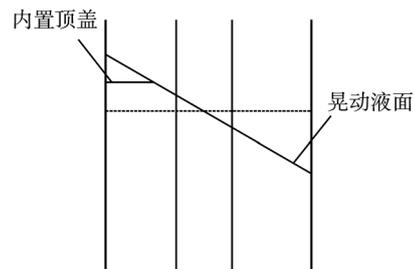


图 6 自由液面晃动示意图

Fig. 6 Sketch of Sloshing with Free Surface

面，实线段表示内置顶盖受冲击的部分。利用式(1)求得内置顶盖处的最大静水压强。

$$P_1 = \rho g(h_{\max} - h) \quad (1)$$

式中， P_1 为内置顶盖处的最大静水压强； ρ 为水的密度； h_{\max} 为晃动的最大波高； h 为自由液面与内置顶盖的距离；

由式(2)可以估算内置顶盖所承受的晃动冲击力：

$$F = PS \quad (2)$$

式中， P 为水箱壁面处的压强。由于整个冲击面的压强处处不等，所以暂时以压强的 1/2 来代替； S 为晃动波对内置顶盖的冲击面积。

以下介绍冲击面积的计算方法。将图 6 中内置顶盖受冲击的部分展开，如图 7 所示，阴影部分即为冲击面积。首先根据图 6，由式(3)求得水平实线的长度 l ：

$$\frac{l}{r_2} = \frac{h_{\max} - h}{h_{\max}} \quad (3)$$

式中， l 为图 6 中水平实线的长度； r_2 为同轴圆柱体的外圆半径。

再由式(4)和式(5)计算出图 7 中所示的夹角 θ 和 φ ：

$$\cos \theta = \frac{r_2 - l}{r_2} \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{r_2 - l}{r_1} \quad (5)$$

式中， r_1 为同轴圆柱体的内圆半径。

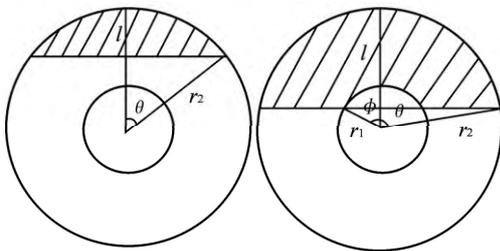


图 7 冲击面积示意图

Fig. 7 Sketch of Impact Area

由图 7 可以看出不同输入量级下的冲击面积计算方法有所不同。由式(6)和式(7)得出该面积：

$$S_1 = \frac{2\theta}{360} \pi r_2^2 - r_2 \sin \theta (r_2 - l) \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{2\theta}{360} \pi r_2^2 - r_2 \sin \theta \left\{ r_2 - l - \left[\frac{2\varphi}{360} \pi r_1^2 - r_2 \sin \varphi (r_1 - l) \right] \right\} \quad (7)$$

3.2 对比分析

经过水装量为零的实验可知，在振动开始和结束的时间点存在一个力，该力对实验的测量值存在一定的影响，因此对计算数据进行修正。将修正结果和误差分析示于表 2 和表 3，其中表 2 的液面距为 40 mm，表 3 液面距为 60 mm。图 8 为液面距 40 mm 和 60 mm 计算值和实验值的对比。

由表 2 和表 3 可以看出：在输入量级适中及较大的情况下(输入量级为 50%、70%和 90%时)，实验值和计算值相差较小，误差能保持在 20%的范围之内，同时可以看到实验值先是略大于计算值，后是略小于计算值。在小输入量级情况下，实验值与计算值相差较大，且实验值要大于计算值。

表 2 晃动冲击力比较—内置顶盖距自由液面 40 mm

Table2 Contrast of Impact Force—with a Distance of 40 mm between Inner Cap and Free Surface

输入量级/%	30	50	70	90
实验值/N	17.37	18.11	27.16	34.35
计算值/N	1.98	15.41	30.53	42.91
比例	—	1.17	0.90	0.80
误差/%	—	17.52	11.03	19.94

表 3 晃动冲击力比较—内置顶盖距自由液面 60 mm

Table3 Contrast of Impact Force—with a Distance of 60mm between Inner Cap and Free Surface

输入量级/%	30	50	70	90
实验值/N	5.73	7.86	16.36	22.52
计算值/N	0	3.69	13.8	24.54
比例	—	—	1.18	0.92
误差/%	—	—	18.55	8.23

4 误差分析及结论

本研究所涉及到的实验在操作过程中，由于测量仪器和人为观察等其他方面的因素，难免使得实验数据存在一定的误差，首先使用非接触式激光位移传感器和载荷传感器测量时，由于振动台本身的晃动，影响测量值的准确性；其次计算方法中的假设，如冲击面积和晃动波面较为粗略和理想。

通过以上的对比和误差分析，认为在中等及

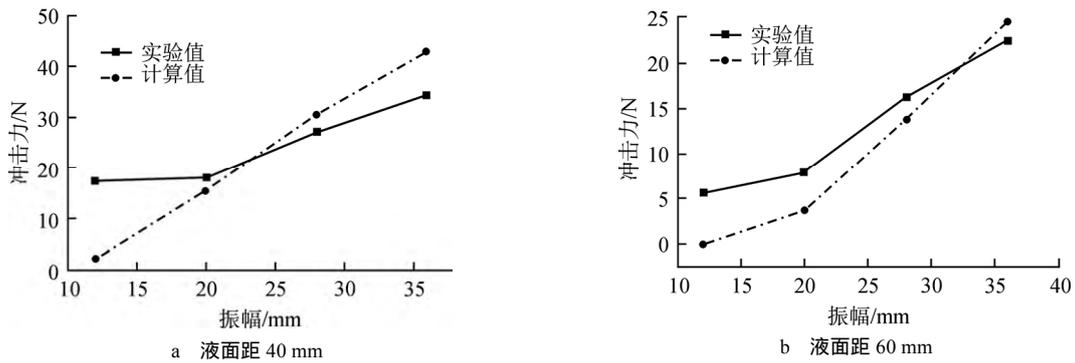


图 8 冲击力对比

Fig. 8 Contrast of Impact Force

较大的输入量级下，该实验方案和计算方法能够吻合，具有一定的可行性和准确性。对于小输入量级的情况还需要做进一步的修正分析和实验验证。本研究由实验方法进一步验证了陆道纲提出的正弦三波激励下液面晃动对容器壁和顶盖冲击压力的工程计算方法的可靠性，同时也证明利用公式 $P = \rho g(h_{\max} - h)$ 计算晃动冲击力这一假设的可行性，为工程抗震研究提供一定的参考。

参考文献：

- [1] 曾国英. 三维振动台的正弦扫频分析与模态分析[J]. 机电工程技术, 2006, 35(1): 30-31.
- [2] 陆道纲. CEFR 主容器内正弦三波激励下液面晃动响应[J]. 核科学与工程, 2003, 4: 306-310.

(责任编辑：张明军)