

文章编号:1007-6069(2017)04-0151-09

考虑重力水箱影响的核电安全壳厂房地震反应分析

姜丙瑞,金波,高永武,刘国强

(中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:近代核电工业发展迅速,核电安全问题越来越受到重视。2011年日本福岛核泄漏事件在世界核电安全问题上产生重大影响,尤其是中国,研究地震作用下核电安全具有重大意义。第三代核电技术 AP1000 应用了非能动安全系统,来减轻或阻止重大事故的发生,获得了各国的关注。首先介绍了 AP1000 的非能动安全壳冷却系统 PCS 以及安全壳厂房;其次分析和比较了单向和双向地震输入下水箱对整体结构耗能效应和地震动响应的影响。在该过程中,通过应用耦合拉格朗日技术 (CEL) 和简化的附加质量法建立了 ABAQUS 模型,模拟了水和结构之间的相互作用,同时研究了不同储水量下重力水箱对安全壳厂房地震反应的影响。研究表明:水箱内液体的晃动对结构没有明显的耗能效应,并且储水量的增加会加强地震动反应;最后给出了一些建议和讨论。

关键词:重力排水水箱;双向地震动输入;地震动反应;ABAQUS;耦合拉格朗日-欧拉分析

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Analysis of seismic response of passive tank of a new generation nuclear power plant

JIANG Bingrui, JIN Bo, GAO Yongwu, LIU Guoqiang

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: With the rapid development of nuclear power industry in modern times, more and more attention is paid to the safety of nuclear power. In 2011, Japan Fukushima serious nuclear accident brought a deep influence on the world's nuclear power development, especially for China, so it is of great significance to study the safety of nuclear power under earthquake. Then the third generation nuclear power plant, applying passive safety system to prevent and mitigate the serious accidents, is getting many countries' attention. In this paper, firstly the PCS (Passive Containment Cooling System) gravity drainage water tank of a nuclear power plant (AP1000) is introduced. Then the energy dissipation effect and the responses of different kinds of earthquake inputs to a tank are generally analyzed and compared, which includes different wave frequency, single and bidirectional input directions and so on. In the analysis process, an ABAQUS model is used to simulate the fluid structure interaction between water and tank wall by using the Coupled Euler Lagrange analysis technique (CEL) and the simplified added mass method. Meanwhile, the effect of tanks with different volume of water storage on the containment building is also studied, and it shows that the sloshing of the water in the tank does not play a shocking absorbing effect on the building, while the ground motion response of the building increases along with the volume of the water. Finally, some suggestions and discussions are presented.

收稿日期:2016-09-16; 修订日期:2016-12-07

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务专项(2013B09);大中城市地震灾害情景构建重点专项(2016QJGJ08);黑龙江省自然科学基金项目(E201245)

作者简介:姜丙瑞(1990-),男,硕士,主要从事结构防灾减灾研究. E-mail: jbr2009@163.com

通讯作者:金波(1973-),男,副研究员,博士,主要从事防灾减灾和计算机应用研究. E-mail: jinbo@iem.net.cn

Key words: drainage water tank; bidirectional input; seismic response gravity; ABAQUS; coupled Euler Lagrange analysis

引言

AP1000 作为第 3 代核电技术,相比前几代核电技术具有更简单、安全和经济等特点,是核电技术未来发展的主要方向。其中非能动安全壳冷却系统(如图 1 所示)正是其重要设计特点之一,其作用原理是:重力排水水箱内水通过重力作用自发向钢安全壳喷水,水在钢安全壳表面受热后蒸发,通过自然对流通道排出厂房,以达到降低厂房内部钢安全壳温度的目的。非能动安全壳冷却系统的外层建筑结构是由一个筒状钢筋混凝土构筑物 and 1 台与之相连的水箱组成,下面称之为安全壳厂房,如图 2 所示^[1]。安全壳厂房是非能动安全壳冷却系统的重要组成部分,更是核反应堆承受事故的最后一道安全保障,因此其正常与完整对核电站安全有着至关重要的影响。

为了保证核电站安全壳厂房的安全,就必须考虑安全壳厂房在可能的能够引发重大破坏的地震荷载下的地震动反应。然而,在地震作用下,水箱内液体的振动与固体振动不同,箱内液体和箱壁存在液固耦合现象。很早以前液固耦合问题的提出就引发了工程界高度重视,随着研究深入,工程界在液体晃动问题的相关理论、模拟以及实验都达到了一定水平。参照以往理论可将水箱内的液体晃动分为线性晃动和非线性晃动两种情况,在对安全厂房做地震动反应分析时水箱内液体处于非线性晃动的状态,而非线性晃动的液体在频率上是变动的,阻尼也不能线性表述,液体内部晃动还可能会产生共振,而且晃动液体自由面有溢出的可能,因此对液体非线性晃动问题在理论计算上一直面临着很大的困难^[2-3]。然而,随着计算机功能的日益强大以及有限元技术的发展并在工程应用上的成熟,在液体非线性晃动问题的处理上有了新的突破,即有限元法自由液面波动仿真技术。采用有限元软件 ABAQUS 中耦合欧拉—拉格朗日分析技术(CEL)进行了数值模拟,很好的处理了液固耦合问题并完成了自由液面波动仿真,并且与传统的附加质量法比较,辨别其差异。

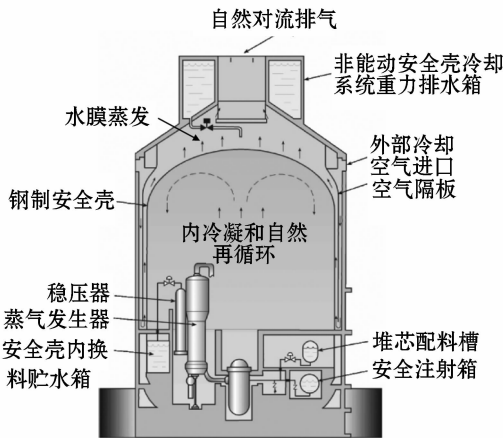


图 1 非能动安全壳冷却系统

Fig. 1 Passive containment cooling system



图 2 安全壳厂房

Fig. 2 Containment building

1 分析方法与原理

1.1 液固耦合

液固耦合动力学问题就是研究液体和固体两种介质相互作用的一门力学分支。在安全厂房的水箱模拟中,水箱会在运动液体的荷载作用下发生变形或运动,同时水箱变形或运动又反作用影响液体的运动,进一步又改变液体作用于水箱上的荷载,这便是一种液固耦合现象。液固耦合问题可以通过耦合方程来定义,方程的定义域有流体域和固体域,方程的变量有描述流体现象的变量和描述固体现象的变量。然而通常流体

域或固体域均不可能单独求解并且无法显式消掉描述流体现象和描述固体现象的变量,这正是液固耦合的特点所在。因此在耦合界面上,只有求解了整个耦合系统才能知道液体和固体的运动情况^[4-6]。

在最近的几年中,液固耦合理论慢慢引入了科学研究当中,发展迅猛,具体表现在以下3个方面:第1方面是由原来的液固耦合线性问题逐步发展到液固耦合非线性的问题;第2方面是把过去所研究的固体结构变形和固体结构强度问题逐步延伸成有关固体结构的屈曲问题;第3方面是液固耦合的融合模式,具体计算形式是由过去的单一的固体有限元格式和单一的流体差分格式发展到液固耦合相互融合的兼并形式。通过对液固耦合问题的研究和发展,现今已经能全面考虑材料非线性和几何的非线性问题,这不只是在固体的结构中,在流体中也取得了突出成绩:现今已经对流体模型开始考虑粘性和空化等问题,进而通过液固耦合这一研究模拟出飞溅、空化和晃动等现象。^[4-6]

1.2 附加质量法和 ABAQUS 耦合欧拉—拉格朗日分析技术(CEL)

在处理储液容器液固耦合问题上,常用附加质量法来简化模型。Housner 提出的将刚性储罐简化为质量弹性系统的方法,具有模型简单和实际工程的意义,得到了工程界的认可。这一方法将液动压力分为两部分:一部分是随容器做同步运动的液体惯性力产生的脉冲压力;另一部分是由容器内液体自由晃动而产生的对流压力;Housner 将流体部分简化为不同的质量单元和弹簧单元,如图3所示^[7-8]。然而,附加质量法计算储液容器的地震动反应时,计算出的地震剪力和地震弯矩往往偏低,并不能完全应用于安全壳厂房水箱的计算。随着有限元软件的出现和发展,储液容器的计算方面有了新的突破:在有限元软件 ABAQUS-6.8 版本之前,已经实现了使用 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 适应网格的方法模拟流固耦合效应,之后 ABAQUS 又提供了一种新的技术 The coupled Eulerian-Lagrangian (CEL),这种方法利用拉格朗日网格模拟固体,利用欧拉网格模拟液体,能够很好地贴近实际,在数值模拟和实际应用上更具有参考价值^[9]。

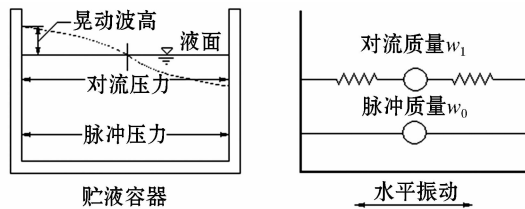


图3 Housner 附加质量法简化模型

Fig.3 Simplified model of Housner's additional mass method

2 计算模型及材料参数

建模所需的安全壳厂房基本信息:安全壳圆筒结构外径为 44.2 m,壁厚为 0.984 m。忽略重力水箱与壳体的连接方式带来的影响,视为一体。水箱为底部倾斜圆环型筒状结构,材料为钢顶板厚度为 0.38 m,容积为 2 864 m³。如图4所示。

主要研究在地震作用下水箱对整个安全壳厂房的影响,在不影响到研究目的的情况下为了便于建模,忽略了厂房设计中的一些细部构造,建立了较为理想的模型。例如:忽略安全壳上洞口的开设;忽略水箱和混凝土安全壳的连接方式并视为一体;忽略外安全壳内壁上一些非结构附属构件的影响;理想认为地基为刚性地基,厂房底部与地基的连接方式为简单的刚接。

此次计算分析针对的是材料的弹性阶段,在定义外壳体钢筋混凝土的本构模型时,采用了复合式本构模型,即将钢筋混凝土作为一种材料定义,在具体操作时需设置适当权数以贴近实际。另外假设水箱内水为不可压缩理想液体。定义所需具体数据见表1-表2。

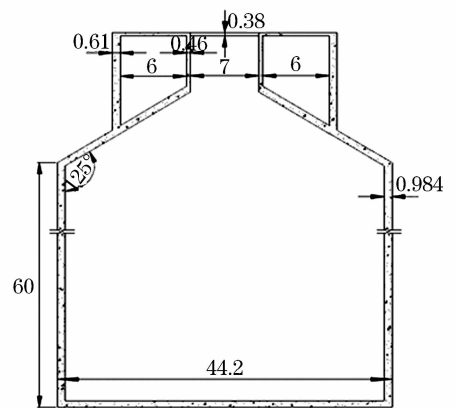


图4 安全壳厂房基本尺寸

Fig.4 Basic dimensions of the containment building

表1 混凝土材料

Table 1 Concrete parameters

| 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 泊松比 | 线膨胀系数 数/ K | 导热系数 $/(W/m^{\circ}C)$ | 轴心抗拉强度 标准值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 轴心抗拉强度 设计值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 轴心抗压强度 标准值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 轴心抗压强度 设计值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ |
|--|--|-----|-----------------|---------------------------|---|---|---|---|
| 2 500 | 3.25e10 | 0.2 | 1e-5 | 1.74 | 2.86e6 | 1.71e6 | 26.8e6 | 19.1e6 |

表2 液体材料

Table 2 Liquid parameters

| 密度 ρ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 粘滞性系数 $\eta(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2})$ | 介质中声速 $C_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $U_s - U_p$ 曲线 斜率 S | Grüneisen 率/ T_0 |
|--|--|---|--------------------------|-----------------------|
| 983.204 | 0.001 13 | 1 500 | 0 | 0 |

分别用 ABAQUS 建立 1/4 水水箱安全壳厂房和 2/4 水水箱安全壳厂房模型,3/4 水水箱安全壳厂房模型,其中每种模型又分别以附加质量法和 CEL 法 2 种方法模拟水。附加质量法模拟水时采用实体单元,忽略对流作用,只考虑脉冲作用;用 CEL 法建立水的欧拉体模型后,还需定义欧拉体的边界约束,以禁止欧拉体通过箱壁流出。安全壳屏蔽厂房及 PCS 重力排水水箱采用单元类型为 C3D8R;PCS 水箱液体采用单元类型为 EC3D8R,沙漏控制采用释放刚度类型。模型网格划分如图 5 所示。

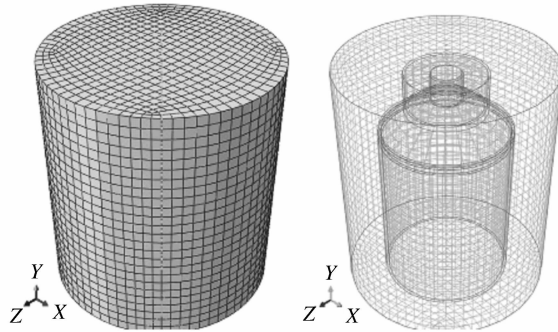


图5 欧拉体网格划分模型与重力水箱网格划分模型

Fig. 5 Euler body and water tank's model grid

3 模态计算结果分析

通过 ABAQUS 定义线性摄动的分析步,计算了无水厂房前 30 阶的模态,结果显示在水平两方向出现重频现象,原因是由于结构的规整对称性;同时总模态有效质量占到了结构质量的 95%,表明:这 30 阶模态已经可以充分反应结构的动态特性,见表 3 给出前 10 阶的模态。

表3 安全壳厂房前 10 阶模态

Table 3 First ten order modes of the containment building

| 阶数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 频率/Hz | 3.148 6 | 3.149 0 | 3.422 9 | 3.520 1 | 3.959 1 | 4.289 0 | 4.292 0 | 4.587 1 | 4.587 3 | 5.401 7 |
| 周期/s | 0.317 6 | 0.317 6 | 0.292 1 | 0.284 0 | 0.252 6 | 0.233 2 | 0.233 0 | 0.218 0 | 0.218 0 | 0.185 1 |

4 不同储水量下单向水平地震动反应分析

在建立模型期间需要输入地震波,才能完成模型在地震激励下的反应分析。研究不同储水量下水箱对安全壳厂房的影响,应用控制变量法在水平单方向输入唯一地震波 EL-Centro 波,以加速度的方式输入,峰值加速度为 0.4 g,地震动持时按经验取 12 s。

4.1 1/4 水箱安全壳厂房地震反应

当贮水体积占 PCS 水箱体积 1/4 时,液面高度约为水箱总高度的 52%,分别采用附加质量法和 CEL 技术的液固耦合法建立模型,经 ABAQUS 计算完成后绘制应力云图及水箱顶点的位移时程曲线。

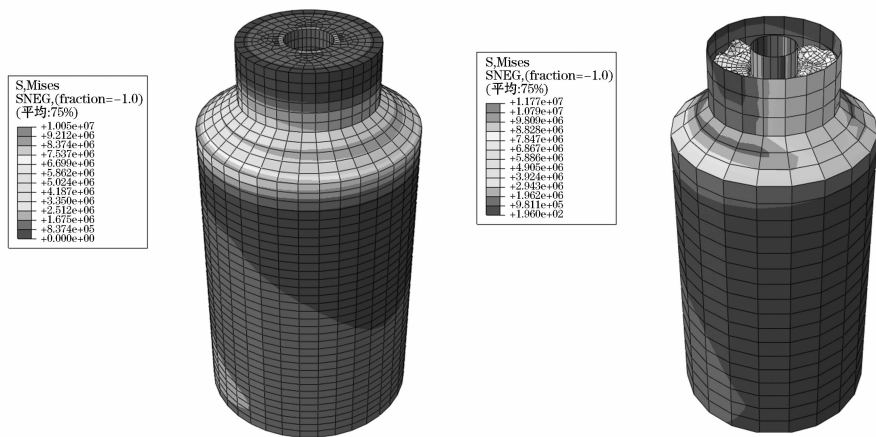


图6 1/4水水箱安全壳厂房附加质量模型和CEL模型某时刻应力云图

Fig. 6 Additional mass model's stress nephogram and the CEL model's stress nephogram of the containment building at a certain moment with 1/4 volume of water tank

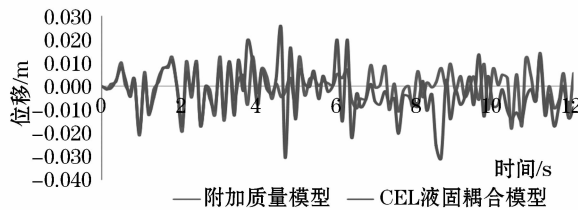


图7 1/4水水箱安全壳厂房顶点位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time history curve of water tank vertex with 1/4 volume of water tank

通过应力云图发现:(1)附加质量模型最大应力位置集中在厂房缩颈处,在3 s时 Mises 应力达到最大值 7.101 Mpa;(2)CEL 液固耦合模型最大应力位置集中在 PCS 重力排水水箱处,在 4.5 s 时 Mises 应力达到最大值 11.01 Mpa。

通过时程曲线发现:(1)附加质量模型顶点位移在 0.96 s 时达到最大值 0.021 m;(2)CEL 液固耦合模型顶点位移在 4.68 s 时达到最大值 0.031 m。

4.2 2/4水水箱安全壳厂房地震反应

当贮水体积占 PCS 水箱体积 2/4 时,液面高度约为水箱总高度的 66%,分别采用附加质量法和 CEL 技术的液固耦合法建立模型,经 Abaqus 计算完成后绘制应力云图及水箱顶点的位移时程曲线。

通过应力云图发现:(1)附加质量模型最大应力位置集中在厂房缩颈处,在 1.8 s 时 Mises 应力达到最大值 7.849 Mpa;(2)CEL 液固耦合模型最大应力位置集中在 PCS 重力排水水箱处,在 4.5 s 时 Mises 应力达到最大值 12.34 Mpa。

通过时程曲线发现:(1)附加质量模型顶点位移在 0.96 s 时达到最大值 0.022 m;(2)CEL 液固耦合模型顶点位移在 4.68 s 时达到最大值 0.033 m。

4.3 3/4水水箱安全壳厂房地震反应

当贮水体积占 PCS 水箱体积 3/4 时,液面高度约为水箱总高度的 80%,分别采用附加质量法和 CEL 技术的液固耦合法建立模型,经 Abaqus 计算完成后绘制应力云图及水箱顶点的位移时程曲线,如下所示

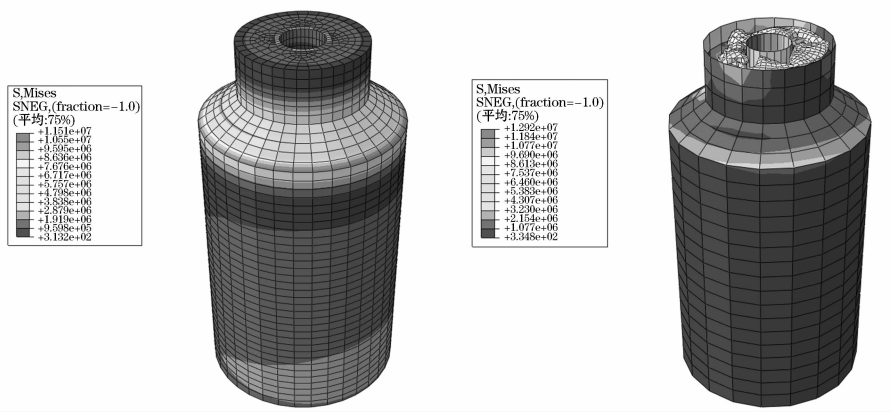


图8 2/4 水水箱安全壳厂房附加质量模型和 CEL 模型某时刻应力云图

Fig.8 Additional mass model's stress nephogram and the CEL model's stress nephogram of the containment building at a certain moment with 2/4 volume of water tank

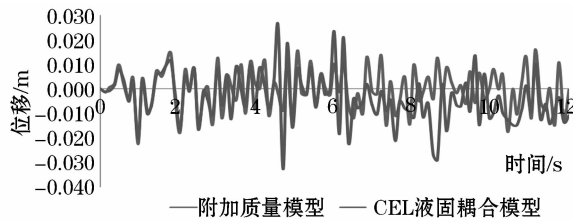


图9 2/4 水水箱安全壳厂房顶点位移时程曲线

Fig.9 Displacement time history curve of water tank vertex with 2/4 volume of water tank

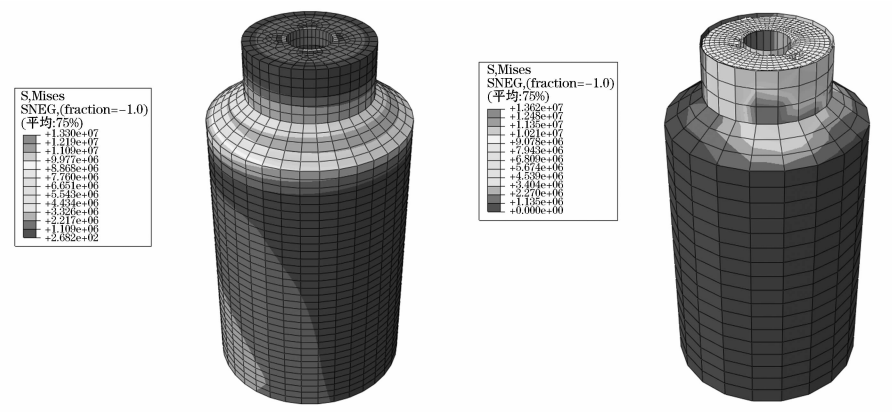


图10 3/4 水水箱安全壳厂房附加质量模型和 CEL 模型某时刻应力云图

Fig.10 Additional mass model's stress nephogram and the CEL model's stress nephogram of the containment building at a certain moment with 3/4 volume of water tank

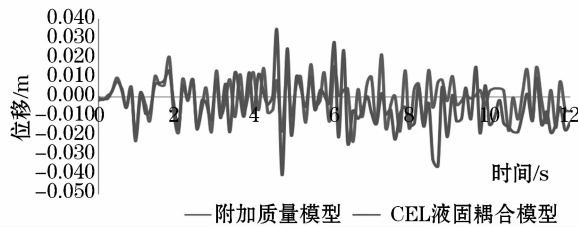


图 11 3/4 水水箱安全壳厂房顶点位移时程曲线

Fig. 11 Displacement time history curve of water tank vertex with 3/4 volume of water tank

通过应力云图发现:(1)附加质量模型最大应力位置集中在厂房缩颈处,在1.8 s时 Mises 应力达到最大值 9.660 Mpa;(2)CEL 液固耦合模型最大应力位置集中在 PCS 重力排水水箱处,在4.5 s时 Mises 应力达到最大值 19.34 Mpa。

通过时程曲线发现:(1)附加质量模型顶点位移在0.96 s时达到最大值0.023 m;(2)CEL 液固耦合模型顶点位移在4.68 s时达到最大值0.040 m。

4.4 各种情况综合分析

由于模型做了一些简化,不排除模拟值与实际值的差异,但是定性说明是适当的。在不同储水状态下,发现附加质量模型下最大应力都集中在厂房的缩颈处,CEL 液固耦合模型下最大应力都集中在重力排水水箱上。在相同储水状态下,CEL 液固耦合模型相比附加质量模型,最大应力出现的时间晚、数据大;而顶点位移时程变化大小相当,只是在一些时刻 CEL 液固耦合模型的顶点位移相对要大很多。分析出现这种差别的主要原因是:此次附加质量模型对水的建模为实体单元,只模拟了脉冲质量的影响,没有模拟水的对流所带来的影响;而 CEL 液固耦合模型则能很好的模拟两方面带来的影响;也可初步判定出液体的对流作用也即是液体的晃动对最大应力的大小是有增益的。

结合应力云图和顶点时程曲线,不难看出:在地震动作用下,不同储水量的重力水箱对安全壳厂房的影响不同;无论是附加质量法建模还是 CEL 液固耦合法建模,在相同地震动下,应力云中最大应力和顶点最大位移随着储水量的增加而增加。重力水箱内水的晃动对结构地震动反应并没有起到减震效果,反而地震动响应随着储水量的增加而增加。

5 单向水平地震动 + 竖向地震动反应分析

上述对安全壳厂房的单向水平地震动反应进行了分析,可是在实际工况中存在着竖向地震动的影响。因此,应用 CEL 液固耦合模型,在输入单向水平地震动的基础上再输入竖向地震动,分析不同储水量和不同地震波工况下厂房的地震动反应状况。以 El-Centro 地震波、汶川 Ms8.0 级地震波(by 001BAH station)以及庐山 Ms7.0 级地震波(by 51BXD station)作为研究对象,得到以下几种地震波工况:(1)水平方向输入 0.4 g 峰值加速度 EL-centro 波,竖直方向输入 0.2 g 峰值加速度 El-centro 波;(2)水平方向输入 0.4 g 峰值加速度汶川地震波,竖直方向输入 0.2 g 峰值加速度汶川地震波;(3)水平方向输入 0.4 g 峰值加速度庐山地震波,竖直方向输入 0.2 g 峰值加速度庐山地震波。通过模型计算分析初步得到以下结果,如表 4 所示。

由表 4 可以看出:(1)相同地震波下,不同储水量下模型的最大应力出现的位置不尽相同,集中在水箱、厂房缩颈处和厂房下部;最大应力最大值大小不同,随着储水量增加而增加;(2)在相同地震波下,顶点位移随着储水量增加而增加;(3)相比单向 El-Eentro 输入,相同储水量下双向地震波输入的模型所得的最大位移和最大应力数值要大。由此可以初步得到以下结论:单向水平地震动 + 竖向地震动输入下的模型所得数值规律与单向输入所得数值规律相差不大,进一步验证了水箱内水没有起到耗能减震的效果;竖向地震动的输入加大了模型的地震动反应。

表4 不同地震波工况下的最大应力和最大顶点位移

Table 4 Maximum stress and maximum peak displacement under different seismic wave input conditions

| 地震波 | 含水量 | 最大应力位置 | 最大应力大小/MPa | 顶点最大位移/m |
|---------------|-----|--------|------------|----------|
| El-centro 波 | 1/4 | 厂房缩颈处 | 12.63 | 0.049 |
| | 2/4 | 厂房缩颈处 | 14.17 | 0.061 |
| | 3/4 | 厂房缩颈处 | 17.54 | 0.076 |
| 庐山 51BXD 地震波 | 1/4 | 厂房下部 | 11.30 | 0.038 |
| | 2/4 | 厂房下部 | 13.85 | 0.042 |
| | 3/4 | 厂房下部 | 14.70 | 0.047 |
| 汶川 001BAH 地震波 | 1/4 | 厂房缩颈处 | 6.936 | 0.068 |
| | 2/4 | 水箱 | 9.696 | 0.071 |
| | 3/4 | 厂房缩颈处 | 13.66 | 0.079 |

为初步对模型在多向地震动下的反应分析研究,存在进一步研究的空间。例如尝试三向地震动输入;根据厂房抗震设计谱确定人工合成波,作为输入波,以更符合抗震设计规范要求;进行多组地震波单向、双向输入以便统计出竖向地震动对地震动反应放大效果的大小等等。

6 结论及展望

6.1 结论

(1)通过 ABAQUS 建模及数据分析,发现两种方法建模的地震动响应是有差别的,CEL 液固耦合技术建模地震动响应大些,究其原因是 CEL 液固耦合模型能够模拟水的脉冲和对流两方面作用,简化了的附加质量建模只模拟了水的脉冲作用;

(2)结构地震动响应的大小随水箱内储水量的增加而增加,水箱内水非但没有对安全壳厂房整体结构起到减震效果,反而有放大地震动反应的趋势,因此在进行安全壳厂房结构设计时必须将水的影响考虑在内;

(3)单向水平地震动 + 竖向地震动输入下的厂房地震动反应比单向水平地震动输入下的大。

6.2 展望

主要应用 ABAQUS 中 CEL 技术模拟了不同储水情况下安全壳厂房的地震动反应,得出了一些初步结论,不过还存在一些问题需要进一步完善和研究,包括:

(1)采用了简化附加质量法,未考虑水的对流作用影响,这样处理是为了与考虑了对流作用的 CEL 技术作比较,不过下一步可以在同时考虑水脉冲作用和对流作用的情况下应用附加质量法进行理论推导求解,并与建模分析比较;

(2)只做了简单的单向、双向地震动输入,下一步可以尝试三向地震动输入和不同频率、加速度峰值的地震动输入;

(3)贮水质量与结构总质量的比重对研究的影响需要进一步分析;

(4)在非能动水箱方面,可进行水箱安全裕度评估方面的研究;

(5)建模比较粗糙,下步可做精细化建模并做相应实验。

参考文献

- [1] 王丽新. API1000 非能动安全理论及其工艺流程简述[J]. 中国新技术新产品, 2012, (13): 30.
WANG Lixin. Passive safety theory of API1000 and the brief description of its process flow[J]. China New Technology and New Products, 2010, (13): 30.
- [2] 程旭东. 大型储罐的抗震可靠性分析及其震害预测[D]. 北京: 中国石油大学, 2010, 4-5.
CHENG Xudong. Earthquake-resistance reliability analysis and seismic disaster prediction of large scale storage tank[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010, 4-5.
- [3] 高晓安, 陆道纲, 朱玉巧, 等. 考虑流固耦合的储液容器地震反应计算[J]. 工程抗震, 2001, 9(3): 328-335.

- GAO Xiaolan, LU Daogang, ZHU Yuqiao, et al. Earthquake response calculation of liquid storage tank considering the fluid-structure coupling reaction[J], 2010, Earthquake Resistant Engineering, 9(3): 328 - 335.
- [4] 邢景棠,周盛,崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展,1997,27(1):19 - 38.
XING Jingtang, ZHOU Sheng, CUI Erjie. Overview of fluid solid coupling mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1): 19 - 38.
- [5] 蒋莉,沈孟育. 求解流体域结构相互作用问题的 ALE 有限元体积方法[J]. 水动力学研究与进展,2000, (2):149 - 154.
JIANG Li, SHEN Mengyu. ALE finite volume computations of fluid-structure interaction problems[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, (2): 149 - 154.
- [6] 李青,王天舒,马兴瑞. 充液航天器液体晃动和液固耦合动力学的研究与应用[J]. 力学进展.2012,42(4):472 - 478.
LI Qing, WANG Tianshu, MA Xingrui. Study and application of the liquid sloshing of liquid filled space craft and fluid solid coupling dynamics [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(4): 472 - 478.
- [7] HOUSNER G W. Dynamic Pressure on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1957,47(1): 15 - 35.
- [8] 李晓蒙,何铮. 核电厂非能动安全壳冷却系统储水箱的振动特性分析[J]. 南方能源建设,2015, 2(4):102 - 106.
LI Xiaomeng, HE Zheng. Dynamic characteristic analysis of the passive containment cooling system water tank of nuclear power plant[J]. Southern Energy Construction. 2015, 2(4): 102 - 106.
- [9] 杜显赫. 预应力 LNG 储罐在地震作用下的流固耦合数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2010, 4 - 6.
DU Xianhe. Numerical simulation of fluid-structure interaction of LNG pre-stressed storage tank under seismic influence[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010, 4 - 6.