

雷墉,李小军,宋辰宁,等.核电结构 PCS 水箱液动压力分析等效模型 [J].地震工程学报,2017,39(5):890-897.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.890.

LEI Yong, LI Xiaojun, SONG Chenning, et al. Equivalent Model for Dynamic Fluid Pressure Analysis of PCS Tanks in Nuclear Power Plants [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 890-897. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.890

核电结构 PCS 水箱液动压力分析等效模型^①

雷 �墉¹, 李小军^{1, 2}, 宋辰宁¹, 张慧颖¹, 李再先¹

(1.北京工业大学建筑工程学院,北京 100124; 2.中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘要:中国核电厂抗震设计规范推荐采用的 Housner 模型不适用于复杂形状核电储液结构的流固耦合分析。对于 AP1000 和 CAP1400 核电站屏蔽厂房顶部非能动安全壳冷却系统重力水箱(简称 PCS 水箱),基于圆柱形水箱的 Housner 等效质量-弹簧模型,通过引入水箱体积修正参数,提出 PCS 水箱的三维等效质量-弹簧模型。采用有限元软件 ADINA 建立水箱结构流固耦合整体有限元模型以进行模态分析,计算分析 PCS 水箱和对应环形水箱在不同尺寸和液体深度条件下的液体晃动自振特性。对比整体有限元模型与三维等效质量-弹簧模型计算结果发现,提出的 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型能给出其内液体晃动各阶振型的液动压力合理估计值,适用于具有复杂形状的 PCS 水箱液动压力分析。本文的等效模型方法可推广应用到其他复杂形状水箱的液动压力分析。

关键词:PCS 水箱; Housner 模型; 液动压力; 等效质量-弹簧模型

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0844(2017)05-0890-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0890

Equivalent Model for Dynamic Fluid Pressure Analysis of PCS Tanks in Nuclear Power Plants

LEI Yong¹, LI Xiaojun^{1,2}, SONG Chenning¹, ZHANG Huiying¹, LI Zaixian¹

(1. College of Architectural and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: As a two-dimensional equivalent mass-spring model based on a rectangular or cylindrical liquid storage tank, the Housner model is used in seismic response analysis of liquid storage tanks with different geometric shapes. However, based on previous studies, this model is not suitable for fluid-structure coupling analysis of complex-shaped nuclear liquid storage structures. To analyze the passive containment cooling system water tanks (PCS tank for short) installed at the top of shield buildings in AP1000 and CAP1400 nuclear power plants, a three-dimensional equivalent mass-spring model is proposed through the introduction of volume correction parameters based on the Housner equivalent mass-spring model of a cylindrical tank. Then, several fluid-structure coupling finite element models of different tank systems, established with the finite element software ADINA, are used for modal analysis. The natural vibration characteristics of liquid

① 收稿日期:2016-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51421005, 51408255); 国家科技重大专项资助项目(2013ZX06002001)

作者简介:雷 �墉(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:岩土工程与结构抗震技术。E-mail:381289774@qq.com。

sloshing in PCS and corresponding annular water tanks are calculated and analyzed with different box sizes and liquid depths. The calculation results from the integrated finite element and three-dimensional equivalent mass-spring models are compared, and it is found that the proposed three-dimensional equivalent mass-spring model of PCS tank can give reasonable estimated values of dynamic fluid pressure of liquid sloshing under different modes. It is concluded that the proposed model is suitable for dynamic fluid pressure analysis of a complex-shaped PCS tank. This model or method can also be applied to the dynamic fluid pressure analysis of other complex-shaped liquid storage tanks.

Key words: PCS tank; Housner model; dynamic fluid pressure; equivalent mass-spring model

0 引言

以浙江三门和山东海阳的核电站为依托,我国积极推进第三代 AP1000 型核电站的国产化,以 CAP1400 型先进压水堆为代表的自主设计核电项目也处于研究攻关时期。CAP1400 型压水堆核电机组是具有我国自主知识产权的装机容量为 140 万 kW 级的非能动大型先进压水堆核电机组。该核电项目工程与已有的核电工程相比,其屏蔽厂房顶部非能动安全壳冷却系统(Passive Containment Cooling System,以下简称 PCS)重力水箱(以下简称 PCS 水箱)是一个新的结构设计理念,其主要依靠体系重力作用驱动水体沿钢安全壳向下流动,通过水分蒸发带走核反应堆热量,具有更可靠的功能实现保障。

针对 CAP1400 型核电站屏蔽厂房的抗震研究,尤其是其原型 AP1000 型核电站屏蔽厂房的研究,成为近几年行业研究热点。一些学者^[1]对相关核电工程结构进行了地震反应数值模拟分析,但这些核电工程结构均为钢筋混凝土结构,而 AP1000 和 CAP1400 型核电站的核岛墙体是双钢板混凝土剪力墙。钢板混凝土结构因具有良好的抗震性能在房屋建筑中得到广泛使用,相关学者对其抗震性能已进行较深入的研究^[2-4]。核岛结构双钢板混凝土剪力墙有特殊的较厚墙体(厚度达 1 m 或更大),近几年才开始对这种墙体结构的抗震性能进行研究,且多数是对结构的剪力墙单元开展拟静力试验并进行数值模拟分析^[5-8]。本文主要关注的是 AP1000 或 CAP1400 型核电工程 PCS 水箱中结构-水体系的地震反应及其对屏蔽厂房整体地震反应的影响。PCS 水箱与下部核岛结构的直接相互作用较为复杂,且考虑下部结构的研究有较多的可参考性成果,本文研究则主要对 PCS 水箱进行直接的单独分析,以研究水箱结构与箱中液体之间的动力相互作用效应,包括谐波输入下的振动台试验和数值模拟分

析^[9-11]。其他核电结构(如叠层板状结构)的流体动压力振动问题^[12]也在实际工程领域中出现,并亟待解决。

PCS 水箱结构剖面图如图 1 所示。与传统理论研究的矩形或圆柱形储液容器不同,其为有一段斜坡底的类环形刚性储液容器,设计上按安全停堆地震 SSE 基准及抗震 I 类物项计算^[13],其异形结构对地震作用下流固耦合系统动力响应的影响较复杂。

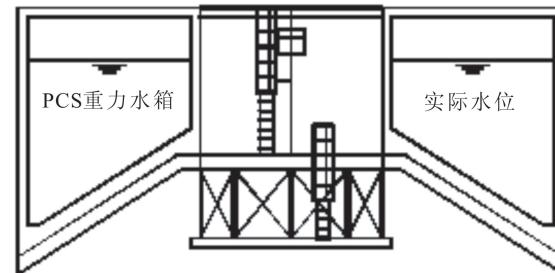


图 1 PCS 水箱结构剖面图

Fig.1 Structure section of PCS tank

分析储液容器内流体晃动问题不可避免会涉及到求解带有自由液面大幅波动问题的 Navier-Stokes 及 LaPlace 方程的初边值问题。由于方程的非线性、自由液面的位置事先未知,且自由液面边界条件是复杂的非线性方程,大多数相关研究和求解过程较复杂困难^[14]。Housner^[15]提出了等效质量-弹簧力学模型,集理论分析、计算精度与稳定性于一体,以研究储罐内流体晃动固有频率及不同外激励下流体晃动力学特性^[10,16],此方法已被广泛应用于石油、航天、船舶等领域的相关计算分析。

PCS 水箱是保证核电机组在地震作用下实现安全停堆并保持停堆状态的关键物项,不仅要考虑水平地震作用下液动压力效应及液体外溢造成的影响,还要考虑竖向地震作用下竖向液压力对水箱底部的影响^[17]。目前中国核电厂抗震设计规范^[18]规

定可采用刚性壁理论计算储液容器的动水压力,因此可采用 Housner 方法考虑地震作用下储液结构的液动压力效应。考虑到 Housner 模型是针对矩形柱或圆柱形等规则形状储液容器建立的等效力学模型,不适用于复杂形状的核电储液结构的流固耦合分析,本文针对 AP1000 和 CAP1400 核电站屏蔽厂房 PCS 水箱,开展计算分析方法研究。基于 Housner 模型和国内外相关规范及文献,通过质量等效为圆柱形流体的理论分析,提出 PCS 水箱的三维等效质量-弹簧模型。采用有限元软件 ADINA 对不同水箱结构的流固耦合模型进行模态分析,并与本文提出的等效质量-弹簧模型计算的水箱结构流体晃动自振特性结果进行比较,以验证本文模型的适用性。

1 Housner 模型

分析储液容器液动压力时,可将液动压力分为脉冲压力和对流压力两部分^[15,19]。前者与由容器壁运动引起的流体惯性力相关,且压力值与容器壁的加速度成正比;而后者是流体振动产生的流体压力。水平激励下流体动力响应以脉冲分量为主,对流分量相对较小,以产生晃动波高为主,且与器壁弹性几乎无关^[20]。Housner 发展出应用广泛的等效质量-弹簧力学模型(图 2),基于此模型的分析方法避开了求解非线性方程,其求解形式简单明了,且具有较高的计算精度。该模型实质上是基于一个脉冲质量和若干组对流质量与无阻尼弹簧组成的系统构成的圆柱形容器的流体液动压力模型,其参数包括脉冲压力的等效质量 M_0 、位置高度 h_0 以及对流压力的等效质量 M_i 、等效弹簧刚度 K_i 和质心高度 h_i ($i = 1, 2, 3, \dots$),它们可基于理论方法推导确定^[15,19]。本文仅针对“浅水”圆柱形容器($\frac{h}{R} \leqslant 1.5$)水平振动情形进行介绍。圆柱形容器及尺寸参数如图 3 所示。

(1) 脉冲压力等效参数

脉冲压力参数,即等效质量 M_0 和位置高度 h_0 由下面各式确定:

$$M_0 = \frac{\tanh \frac{\sqrt{3}R}{h}}{\frac{\sqrt{3}R}{h}} M \quad (1)$$

$$h_0 = \frac{3}{8} h \quad (2)$$

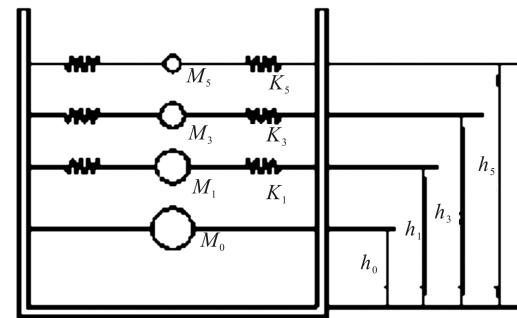


图 2 圆柱形容器质量-弹簧模型

Fig.2 Mass-spring model of the cylindrical container

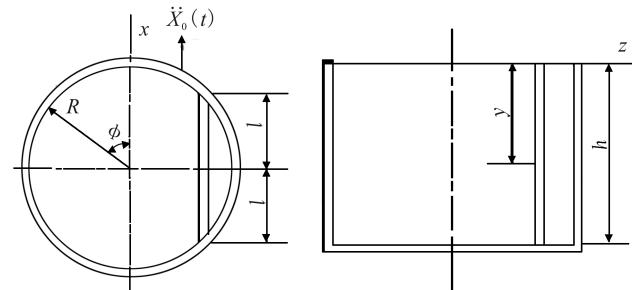


图 3 圆柱形容器

Fig.3 Cylindrical container

式中: $M = \rho\pi R^2 h$ 为圆柱形容器液体的总质量, R 和 h 分别为容器的内半径(相对于容器外壁)和内装液体液面高度(相对于容器内底面), ρ 为内装液体的质量密度。

若考虑流体作用于容器底面的液动压力所产生的力矩,则等效质量作用位置高度 h_0 修正为:

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{\frac{\sqrt{3}R}{h}}{\tanh \frac{\sqrt{3}R}{h}} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

(2) 对流压力等效参数

对流压力的等效质量 M_i 、等效弹簧刚度 K_i 和质心高度 h_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) 分别表示流体晃动第 i 阶振型的等效值。它们的确定方法如下:

$$M_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{11}{12} \right)^2 \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{h} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) M \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{g}{R} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) M_1 \quad (5)$$

$$h_1 = \left(1 - \frac{\cosh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) - 1}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \sinh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right)} \right) h \quad (6)$$

上面给出了第 1 阶振型的等效参数($i=1$)计算

公式。进一步,只需用 R/i 代替式(4)、(5)和(6)中的 R ,则可导出流体非对称高阶振型($i=3,5,7,\dots$)的计算公式。另外,由于三维圆柱形容器与液体体系在水平 X 和 Z 方向振动的对称性,如果等效质量 M_i 、等效弹簧刚度 K_i 和质心高度 h_i ($i=1,3,5,\dots$)代表体系在 X 方向振动的等效参数,则其与 Z 方向振动的等效参数完全一致。

2 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型

Housner 模型适用于几何形状规则的矩形柱或圆柱形储液容器的地震响应分析,而针对含有斜坡底的类环形 PCS 水箱,孔宪京等^[20]研究指出 Housner 模型不能确保满足安全要求。因此本文参考了 TID-7024^[22] 的修正思路,基于 Housner 模型和 ASCE4-98 规范^[23]给出了计算流动压力的解析公式的修正方法,并提出 PCS 水箱流体流动压力分析的三维质量-弹簧等效模型,以用于 AP1000 和 CAP1400 重力水箱核岛结构的抗震分析。

类似于 Housner 模型,本文建立 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型(图 4)。脉冲分量仍采用等效质量固定在距容器底部以上等效高度处,数值仿真模拟时等效质量在平面内以相等角度均匀分布 n_2 个;对流分量采用质量-弹簧体系模拟,按等效高度分布 n_1 层,而每层平面内以相等角度均匀分布 n_2 个质量-弹簧单元,质量-弹簧单元由 1 个质量块和 2 根连接质量块至水箱壁的相同刚度的弹簧组成。

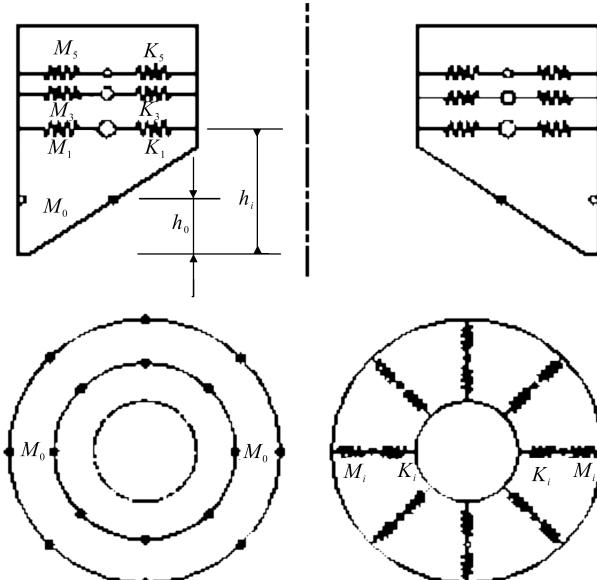


图 4 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型

Fig.4 Three-dimensional equivalent mass-spring model of PCS tank

三维等效质量-弹簧模型中各参数,包括脉冲压力的等效质量 M_0 和位置高度 h_0 以及对流压力的等效质量 M_i 、等效弹簧刚度 K_i 和质心高度 h_i ($i=1,2,3,\dots$),将基于前文介绍的 Housner 模型参数的计算公式及理论假定。引入等效体积修正参数 α ,给出本文三维质量-弹簧等效模型参数及计算公式。

2.1 PCS 水箱体积修正参数

PCS 水箱为内衬不锈钢板的钢筋混凝土结构,底部与屏蔽厂房连成一体,外半径 R 为 14 m(除壁厚 0.6 m),内半径 r 为 5.33 m(含壁厚 0.45 m),水箱内侧壁高 5.86 m,外侧壁高 11.05 m,斜坡底高 5.19 m,实际液体深度 h 为 8.73 m,储水总体积约 3 700 m³。若考虑相同尺寸、材料及液体深度的等效圆柱形水箱,其储水总体积约 5 375.5 m³。

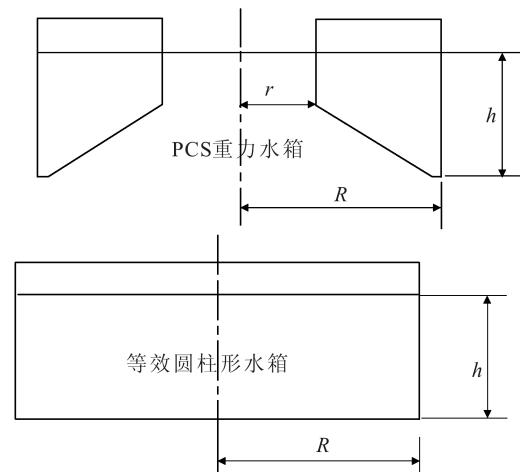


图 5 PCS 水箱及等效圆柱形水箱

Fig.5 PCS tank and the equivalent cylindrical tank

构建 PCS 水箱(类环形水箱)的一个等效圆柱形水箱,如图 5 所示。记 R 和 r 为 PCS 水箱的水槽外半径和内半径, h 为水箱中液面高度(相对于箱底)。为将 PCS 水箱等效为相同 R 和 h 的圆柱形水箱,本文引入 PCS 水箱的体积修正参数 α :

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} \quad (7)$$

式中: V_1 为等效圆柱形水箱流体的体积; V_2 为 PCS 水箱中流体的体积。该系数实质上反映的是由类环形水箱等效成圆柱水箱的流体体积影响。

2.2 PCS 水箱等效质量-弹簧模型参数

借助于 PCS 水箱的等效圆柱形水箱,利用上节给出的圆柱形水箱的 Housner 模型参数计算公式,并利用式(7)给出的体积修正参数 α ,即可得到 PCS

水箱的等效质量-弹簧模型参数计算公式。我们通过不同修正公式的分析比较,最终确定了一个 PCS 水箱等效质量-弹簧模型参数计算公式。

(1) PCS 水箱的脉冲压力等效参数计算公式如下:

$$M_0 = M \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3}R}{ah}\right)}{\frac{\sqrt{3}R}{ah}} \quad (8)$$

$$h_0 = \frac{3h}{8\alpha} \quad (9)$$

上式及后续各式中, M 为 PCS 水箱中液体的质量, R 和 h 为水箱的水槽外半径和液面高度。

若考虑流体作用于容器底面的液动压力所产生的力矩,则等效质量作用位置高度 h_0 修正为:

$$h_0 = \frac{3}{8\alpha} h \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{\frac{\sqrt{3}R}{ah}}{\tanh\left(\frac{\sqrt{3}R}{ah}\right)} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

(2) PCS 水箱的对流压力等效参数计算公式如下:

$$M_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{11}{12} \right)^2 \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{ah} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{aR}\right) M \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{g}{aR} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{aR}\right) M_1 \quad (12)$$

$$h_1 = \left(1 - \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{aR}\right) - 1}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{aR} \sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{aR}\right)} \right) ah \quad (13)$$

上面给出了第 1 阶振型的等效参数($i=1$)计算公式。进一步,只需用 R/i 代替式(11)、(12)和(13)中的 R ,则可导出流体非对称高阶振型($i=3, 5, 7, \dots$)的计算公式。另外,由于三维圆柱形容器与液体体系在水平 X 和 Z 方向振动的对称性,如果等效质量 M_i 、等效弹簧刚度 K_i 和质心高度 h_i ($i=1, 3, 5, \dots$)代表体系在 X 方向振动的等效参数,则其与 Z 方向振动的等效质量参数完全一致。

3 等效模型与实体模型对比分析

为验证本文的 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型及其参数确定的适用性,本节分别以 PCS 水箱和

环形水箱的模态分析为例进行计算分析与结果比较。采用 ADINA 有限元软件分别建立 PCS 水箱和环形水箱的实体模型,调整水箱的参数值:内半径 r 、外半径 R 和液体深度 h ,对比分析本文的三维等效质量-弹簧模型与流固耦合有限元方法计算结果的差异及参数确定的适用性。

3.1 两种水箱有限元模型

分别建立 PCS 水箱和环形水箱的流固耦合有限元模型(图 6)。箱体材料等效为全截面混凝土,并符合材料力学的构件等截面刚度和质量一致原则,采用 3-D Solid 实体单元模拟。材料特性如下:弹性模量 $E=32.5$ GPa, 泊松比 $\mu=0.2$, 密度 $\rho=2\,400$ kg/m³。

水箱内理想流体为无旋、无粘、不可压缩的,采用 3-D Fluid 势流体单元模拟^[24],势流体单元网格与水箱实体网格共节点。材料特性如下:弹性模量 $E=2.3$ GPa, 密度 $\rho=1\,000$ kg/m³。

3.2 PCS 水箱流体晃动固有频率

采用本文的 PCS 水箱三维等效质量-弹簧模型计算出流体晃动固有频率,并与 ADINA 有限元流固耦合模态分析得到的流体晃动固有频率作比较,结果列于表 1、表 2 和表 3。

从表 1 中看到,当水深 $h>5.19$ m,即水位高于斜坡面时,两种方法分析得到的流体晃动固有频率均随水深增加而增大,且两种结果的相对误差也随水深增加而有所增大,但增大幅度均很小,最大相对误差为 3%;PCS 重力水箱在实际的内半径 $r=5.33$ m、外半径 $R=14$ m 和水深 $h=8.73$ m 的情况下,本文模型计算得到的流体晃动固有频率为 0.12 Hz,分析结果与有限元模拟结果及相关文献[11]均较吻合。表明本文模型适用于 PCS 水箱在水位高于斜坡面条件下的流体晃动分析。

从表 2、3 中看到,随着 PCS 水箱的内、外半径分别增加,两种方法分析得到的流体晃动固有频率均减小;对比 PCS 水箱在实际的外半径 $R=14$ m 和内半径 $r=5.33$ m 下的频率结果,当外半径较小和内半径较大时,流体晃动固有频率的相对误差较大。表明本文模型适用于 PCS 水箱在内、外半径适中条件下的流体晃动分析。

3.3 环形水箱流体晃动固有频率

为进一步探讨本文等效质量-弹簧模型对环形

表 1 液体深度变化时液体晃动固有频率比较

Table 1 Comparison of liquid sloshing frequencies when liquid depth changes

h/m	5.70	6.71	7.72	8.73	9.74	10.75
修正参数 α	1.705	1.595	1.522	1.471	1.433	1.403
本文模型频率/Hz	0.089	0.101	0.112	0.120	0.127	0.133
有限元模拟频率/Hz	0.090	0.103	0.114	0.123	0.130	0.137
频率相对误差/%	1.1	2.0	1.8	2.5	2.4	3

表 2 外半径变化时液体晃动固有频率比较

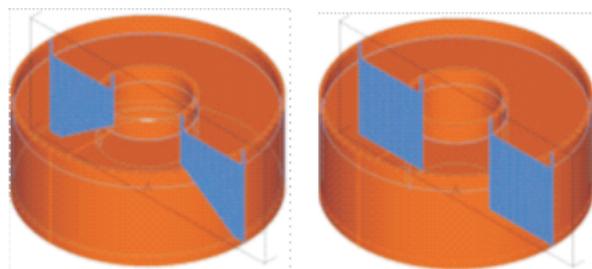
Table 2 Comparison of liquid sloshing frequencies when outer radius changes

R/m	11	12	13	14	15	16	17
修正参数 α	1.618	1.554	1.507	1.471	1.443	1.420	1.402
本文模型频率/Hz	0.136	0.130	0.125	0.120	0.115	0.110	0.106
有限元模拟频率/Hz	0.143	0.135	0.129	0.123	0.117	0.112	0.108
频率相对误差/%	5.1	3.8	3.2	2.5	1.7	1.8	1.9

表 3 内半径变化时液体晃动固有频率比较

Table 3 Comparison of liquid sloshing frequencies when inside radius changes

r/m	2.33	3.33	4.33	5.33	6.33	7.33
修正参数 α	1.267	1.318	1.384	1.471	1.585	1.736
本文模型频率/Hz	0.136	0.132	0.126	0.120	0.113	0.104
有限元模拟频率/Hz	0.142	0.135	0.129	0.123	0.117	0.113
频率相对误差/%	4.4	2.3	2.4	2.5	3.5	8.6



(a) PCS水箱

(b) 圆环形水箱

图 6 两种水箱的有限元模型

Fig.6 Finite element models of two kinds of tanks

水箱(不存在 PCS 水箱中的斜坡底情况)的适用性,并分析 PCS 水箱的底部斜坡对流体晃动分量的影响程度,假设针对相同尺寸、材料及液体深度的无底部斜坡的圆环形水箱,分别调整其内半径 r 、外半径 R 和液体深度 h ,采用本文模型计算环形水箱的流体晃动固有频率,并与 ADINA 有限元流固耦合模态分析得到的流体晃动固有频率比较,结果列于表 4、表 5 和表 6。

表 4 的结果显示,两种方法分析得到的流体晃动固有频率均随水深增加而增大,且相对误差均很小,最大相对误差 5.2%。表明本文模型同样适用于环形水箱的流体晃动分析,且在较低水位条件下(即低于 5.19 m)仍然适用。

表 5 和表 6 的结果显示,两种方法分析得到的环形水箱流体晃动固有频率均随结构内、外半径的增加而减小,但体积修正参数 α 的变化规律不同。对比分析得到,在环形水箱内半径 $r=7.33$ m、外半径 $R=17$ m 和水深 $h=9.74$ m 的情况下,两种方法分析得到的流体晃动固有频率相对误差最小。

对比表 1 和表 4 的结果,尤其当水深 $h=4.69$ m 时,发现 PCS 水箱由于存在斜坡底,异形结构对流体晃动结果有一定影响,通常表现为流体对流分量所占比例增加,晃动固有频率增大。

3.4 流体晃动高阶振型频率比较

采用本文三维等效质量-弹簧模型分别计算 PCS 水箱和环形水箱液体晃动的前二十阶频率,并与 ADINA 有限元流固耦合模态的分析结果作比较,结果如图 7 所示。参考本文流体非对称高阶振型的计算公式,由于水平 X 、 Z 两个正交方向分别对应于本文模型及有限元模拟的奇、偶阶频率结果,且计算公式完全相同,故下图中结果均以奇数阶频率结果为代表,并作对比。

图 7 结果表明,两种方法分析得到的 PCS 水箱液体晃动频率相对误差随频率阶数增加,先增加后减小,且一阶主频和高阶频率吻合很好;环形水箱的结果与 PCS 水箱的趋势一致,但两种方法计算频率的相对误差值均较 PCS 水箱大。研究表明,本文三

表 4 液体深度变化时液体晃动固有频率比较

Table 4 Comparison of liquid sloshing frequencies when fluid depth changes

h/m	4.69	5.70	6.71	7.72	8.73	9.74	10.75
修正参数 α	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
本文模型频率/Hz	0.116	0.125	0.133	0.139	0.145	0.149	0.152
有限元模拟频率/Hz	0.110	0.120	0.127	0.133	0.143	0.149	0.148
频率相对误差/%	5.2	4	4.5	4.3	1.4	0	2.6

表 5 外半径变化时液体晃动固有频率比较

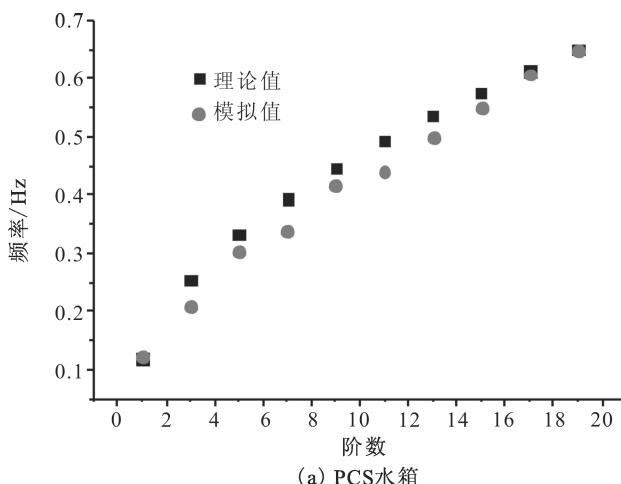
Table 5 Comparison of liquid sloshing frequencies when outer radius changes

R/m	11	12	13	14	15	16	17
修正参数 α	1.307	1.246	1.202	1.170	1.145	1.125	1.109
本文模型频率/Hz	0.160	0.155	0.150	0.145	0.139	0.134	0.129
有限元模拟频率/Hz	0.157	0.151	0.145	0.143	0.133	0.130	0.130
频率相对误差/%	1.9	2.6	3.3	1.4	4.3	3.0	0.8

表 6 内半径变化时液体晃动固有频率比较

Table 6 Comparison of liquid sloshing frequencies when the inside radius changes

r/m	2.33	3.33	4.33	5.33	6.33	7.33
修正参数 α	1.029	1.060	1.106	1.170	1.257	1.378
本文模型频率/Hz	0.160	0.156	0.151	0.145	0.137	0.127
有限元模拟频率/Hz	0.159	0.157	0.145	0.143	0.133	0.127
频率相对误差/%	0.6	0.6	4.0	1.4	2.9	0



(a) PCS水箱

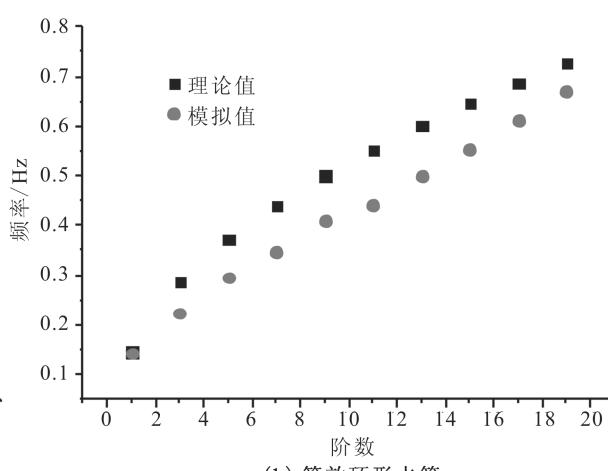


图 7 PCS 水箱和等效环形水箱的前二十阶频率

Fig.7 The first twenty frequencies of PCS tank and equivalent annular tank

维等效质量-弹簧模型不仅适用于流体第一振型的响应分析,针对更高的非对称高阶振型($i=1, 3, 5, \dots$)也具有良好的适用性。

4 结论

针对 AP1000 和 CAP1400 核电站屏蔽厂房顶部非规则形状的 PCS 水箱,基于 Housner 模型简化分析方法,提出基于 Housner 模型流动压力解析公式的体积修正参数确定方法及三维等效质量-弹簧

模型,利用有限元软件 ADINA 建立 PCS 水箱和环形水箱的流固耦合模型,并进行模态分析及变参数对比分析。研究表明,基于 Housner 模型,并采用液体体积修正参数 α 的本文模型适用于不同尺寸及液体深度的环形水箱和液面高于斜坡面的 PCS 水箱的流动压力计算,对流体高阶振型亦有良好适用性。本文模型适用于理想流体小幅线性振荡时的流动压力分析,其力学分析模型及解析公式简单明了,且具有较高的模拟精度。

参考文献(References)

- [1] 贺秋梅,李小军,李亚琦,等.地震动速度脉冲对高温气冷堆核电厂地震反应的影响[J].爆炸与冲击,2015,35(6):799-806.
HE Qiumei, LI Xiaojun, LI Yaqi, et al. Influence of Near-fault Velocity Pulse on the Seismic Response of High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant[J]. Explosion and Shock Wave, 2015, 35(6): 799-806.
- [2] 廖飞宇,陶忠,韩林海.钢-混凝土组合剪力墙抗震性能研究简述[J].地震工程与工程振动,2006,26(5):129-135.
LIAO Feiyu, TAO Zhong, HAN Linhai. A State-of-the-art Review of Composite Shear Walls under Cyclic Loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26 (5): 129-135.
- [3] 聂建国,卜凡民,樊健生.高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J].工程力学,2013,30(6):60-66.
NIE Jianguo, BU Fanmin, FAN Jiansheng. Quasistatic Test on Low Shear-span Ratio Composite Shear Wall with Double Steel Plates and Infill Concrete under High Axial Compression Ratio [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60-66.
- [4] 杨悦,刘晶波,樊健生,等.钢板-混凝土组合板受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(10):24-31.
YANG Yue, LIU Jingbo, FAN Jiansheng, et al. Experimental Study on Flexural Capacity of Steel Plate-concrete Composite Slabs[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 24-31.
- [5] OZAKI M, AKITA S. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Bearing Wall for Nuclear Power Plants Part 1: Shear and Bending Loading Tests of SC Walls[R]. Washington DC: Transactions SMiRT16, 2001.
- [6] OZAKI M, AKITA S. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Bearing Wall for Nuclear Power Plants Part. 2: Analytical Method to Evaluate Response of SC Walls[R]. Washington DC: Transactions SMiRT16, 2001.
- [7] 张有佳,李小军.基于钢板弹性屈曲理论的组合墙轴压试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(6):1198-1209.
ZHANG Youjia, LI Xiaojun. Axial Compression Experimental Study of Composite Walls Based on Steel Plate Elastic Buckling Theory[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23 (6): 1198-1209.
- [8] 熊峰,何涛,周宁.核电站双钢板混凝土剪力墙抗剪强度研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(9):33-41.
XIONG Feng, HE Tao, ZHOU Ning. Study on the Shear Strength of Double Steel Plate Composite Shear Wall in Nuclear Plant[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(9): 33-41.
- [9] 曾晓佳,陆道纲,党俊杰,等.AP1000 安全壳冷却水箱长周期地震下晃动特性研究[J].核动力工程,2015,36(5):91-95.
ZENG Xiaojia, LU Daogang, DANG Junjie, et al. Research on Sloshing Characteristics in Passive Cooling Storage Tank of AP1000 under Long-period Earthquake[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(5): 91-95.
- [10] 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.
- [11] 黄江德,韩博宇.CAP1400 屏蔽厂房屋顶 PCS 水箱流固耦合分析[J].核电工程与技术,2015(1):43-45.
HUANG Jiangde, HAN Boyu. Fluidstructure Interaction Analysis of PCS Tank on CAP1400 Shield Building Roof[J]. Nuclear Power Engineering and Technology, 2015(1): 43-45.
- [12] 崔振东,唐益群,郭长青.叠层板状结构在非线性支承下的流固耦合振动[J].西北地震学报,2007,29(2):119-122.
CUI Zhendong, TANG Yiqun, GUO Changqing. Fluid-structure Interaction Vibration of the Parallel-plate Fuel Assembly with Nonlinear Support[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(2): 119-122.
- [13] 林诚格,郁祖盛.非能动安全先进压水堆核电技术(中册)[M].北京:原子能出版社,2010.
LIN Chengge, YU Zhusheng. Nuclear Power Technology for Passive Safety Advanced PWR (II)[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.
- [14] 岳宝增,祝乐梅,于丹.储液罐动力学与控制研究进展[J].力学进展,2011,41(1):79-92.
YUE Baozeng, ZHU Lemei, YU Dan. Recent Advances in Liquid-filled Tank Dynamics and Control[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(1): 79-92.
- [15] Housner G W. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Container[J]. Bull Seism Soc Am, 1957, 47(1): 15-35.
- [16] 刘嘉一,白欣然,李晓轩.质量-弹簧模型在储液容器抗震分析中的应用[J].原子能科学技术,2013,47(6):947-951.
LIU Jiayi, BAI Xinran, LI Xiaoxuan. Application of Mass-spring Modal in Seismic Analysis of Liquid Storage Tank[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47 (6): 947-951.
- [17] 刘国强.国内外核电厂抗震设计规范比较研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014.
LIU Guoqiang. Comparison of Nuclear Power Plant Seismic Design in Chinese and Foreign Code[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014.
- [18] 中华人民共和国建设部.中华人民共和国国家标准核电厂抗震设计规范:GB50267-97[S].北京:中国计划出版社,1998.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Nuclear Power Plant: GB50267-97 [S]. Beijing: China Planning Press, 1998.
- [19] 居荣初,曾心传.弹性结构与液体的耦联振动理论[M].北京:地震出版社,1983.
JU Rongchu, ZENG Xinchuan. Vibration Theory of Elastic Structure Coupled With the Liquid[M]. Beijing: Seismological Press, 1983.
- [20] MOSLEMI M, KIANOUSH M R. Parametric Study on Dynamic Behavior of Cylindrical Ground-supported Tanks[J]. Engineering Structures, 2012(42):214-230.

- [11] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Seismic CPT to Measure In-situ Shear Wave Velocity[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(8): 791-803.
- [12] HEPTON P. Shear Wave Velocity Measurements during Penetration Testing[C]//Proceedings of the Geotechnology Conference on Penetration Testing in the United Kingdom (PTUK). 1989: 275-283.
- [13] STOKOE K H, WRIGHT S G, JAMES A B, et al. Geophysical Characterization of Sites[M]. Balkema A A, Rotterdam, 1994.
- [14] 王建华,程国勇,张立.取样扰动引起土层剪切波速变化的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2604-2608.
WANG Jianhua, CHENG Guoyong, ZHANG Li. Study on Variation of Shear Wave Velocity Caused by Sampling Disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2604-2608.
- [15] 高志兵,高玉峰,谭慧明.饱和黏性土最大动剪切模量的室内和原位试验对比研究[J].岩土工程学报,2010, 32(5): 731-735.
GAO Zhibing, GAO Yufeng, TAN Huiming. Lab and in-situ Tests on Maximum Dynamic Shear Modulus of Saturated Clay Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (5): 731-735.
- [16] SANTOS J A, CORREIA A G. Reference Threshold Shear Strain of Soil. Its Application to Obtain a Unique Strain-dependent Shear Modulus Curve for Soil[C]//Proc of the 15th Int Conf on Soil Mech and Geotech Eng, Istanbul, Turkey, 2001: 267-270.
- [17] 张亚军,兰宏亮,崔永高.上海地区土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J].世界地震工程,2010, 26(2): 171-175.
ZHANG Yajun, LAN Hongliang, CUI Yonggao. Statistical Studies on Shear Modulus Ratios and Damping Ratios of Soil in Shanghai Area[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 171-175.

(上接第 897 页)

- [21] 孔宪京,林皋.核电厂工程结构抗震研究进展[J].中国工程科学,2013,15(4):62-74.
KONG Xianjing, LIN Gao. Research Advances on Engineering Structural Seismic Safety of Nuclear Power Plant[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4): 62-74.
- [22] Nuclear Reactors and Earthquakes; TID-7024[S]. California: Lockheed Aircraft Corporation and Holmes and Narver Inc., 1963.
- [23] Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary: ASCE4-98[S]. New York: ASCE, 2000.
- [24] 马野,袁志丹,曹金凤. ADINA 有限元经典实例分析[M].北京(人民交通出版社),2010.
MA Ye, YUAN Zhidan, CAO Jinfeng. Classical Examples of ADINA Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.