

钢筋混凝土矩形贮液结构的液固耦合频域分析^{*}

杜永峰 史晓宇 程选生

(兰州理工大学 土木工程学院 730050)

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 730050)

[摘要] 由于其中液体的影响,贮液结构的频域特性与普通结构不同。本文采用通用有限元软件 ADINA,综合考虑材料中混凝土和钢筋的作用,对钢筋混凝土矩形贮液结构进行三维有限元模拟。分别探讨了液体表面重力波、液位高度、壁板刚度以及结构尺寸对系统液固耦合频域特性的影响,为矩形贮液结构的研究及设计提供理论依据。

[关键词] 钢筋混凝土 矩形贮液结构 ADINA 液固耦合 频域分析

ABSTRACT: Because the influence of the liquids, the frequency domain characteristics of liquid storage structures are different from other kind of structures. In this paper, taking into account the actions of the concrete and rebar in the materials synthetically, the current finite element software ADINA is used to do some 3-D finite element simulation for reinforced concrete rectangular liquid storage structures. The influence of the surface gravity waves upon the liquids, the depth of the liquids, the stiffness of the wainscots and the shape of the structures on the frequency domain characteristics of liquid storage structures with liquid-structure interaction are discussed respectively. This provides the theoretical basis for the research and design of rectangular liquid storage structures.

KEYWORDS: Reinforced concrete Rectangular liquid storage structures ADINA Liquid-structure interaction Frequency domain analysis

前言

贮液结构广泛应用于国民生产生活的各部门,诸如给水排水工程中的各类储水池和水处理工程中的结构、石化工业及铁路部门的储油罐,等等。其中,钢筋混凝土矩形贮液结构由于选材及施工方便、造价低廉、能适应各种地形等优点而得到了越来越多的重视。

由于其中液体的影响,贮液结构的液固耦合频域特性具有与普通结构不同的特点。居荣初等^[1]针对微幅晃动的液体得出了矩形贮液结构满液时基本频率随高宽比的变化规律;黄玉盈^[2]利用变分原理得出了液固耦联系统固有频率的变分式;刘习军等^[3]研究了矩形弹性壳液耦合系统中

的重力波现象;但文献[1、2]等的结论忽略了表面重力波的影响,不适用于液面大幅晃动的情況。并且,以上研究都是将空间问题简化为平面问题而近似地求解。考虑到矩形贮液结构相邻壁板在水平振动方向的刚度很大,相互影响不可忽视,本文拟采用通用有限元软件 ADINA 对钢筋混凝土矩形贮液结构进行三维液固耦合频域分析,探讨液体表面重力波、液位高度、壁板刚度以及结构尺寸对系统液固耦合频域特性的影响,从而为矩形贮液结构的研究提供理论依据。

1 液固耦合有限元模型

1.1 计算简图

设矩形贮液结构的平面边长为 a 和 b , 高为 h , 壁厚为 t_1 , 底板厚为 t_2 , 计算简图如图 1 所示。取结构尺寸 $a = b = 4\text{m}$, $h = 6\text{m}$, $t_1 = 0.25\text{m}$, $t_2 = 0.3\text{m}$ 。为研究不同结构参数影响下系统液固耦

^{*} 基金项目:甘肃省建设科技攻关项目(JK2004-8)与兰州市科技攻关项目(2005-2-20-2)联合资助

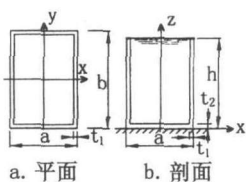


图 1 矩形贮液结构
计算简图

合频域特性的变化规律,并考虑到平面尺寸较大的浅贮液结构在实际工程中较为常见,本文同时对平面边长为 3m~12m,高为 6m 的贮液结构进行了分析。钢筋混凝土材料的密度为 2500kg/m^3 。结构内储水按满液考虑,密度为 1000kg/m^3 。建立钢筋混凝土矩形贮液结构的三维模型,使用 ADINA 提供的流固耦合求解器 Determinant-Search,讨论各因素对系统液固耦合频域特性的影响。

1.2 弹性常数的确定

钢筋混凝土材料按正交各向异性材料考虑^[4],由三个方向的弹性模量 E 、剪切模量 G 和泊松比 μ 决定材料属性。在以往的钢筋混凝土结构有限元分析中^[5],将钢筋混凝土视为钢筋和混凝土两种材料的组合,提出了分离单元、组合单元和均匀单元的计算模型。但是实际贮液结构的仿真分析中,因为构造复杂,体量庞大,采用以上计算模型并不可行。考虑到矩形贮液结构钢筋一般为按一定间距双层双向配置,分布均匀,故可利用复合材料的性质综合考虑混凝土和钢筋的作用,确定其计算参数。本例中,取混凝土为 C30,钢筋 HRB335 级,因平面尺寸 $a = b$,钢筋配筋率 x 和 y 方向均取经济配筋率 0.8%,按文献^[6]提出的公式,可得:

$$E_x = E_y = E_c \left[1 + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \times \rho_{sx} \right]$$

$$= 1.0453 E_c = 3.136 \times 10^{10} \text{N/m}^2$$

$$E_z = \frac{1 + \sqrt{\rho}(\alpha - 1)}{1 + \sqrt{\rho}(1 - \sqrt{\rho})(\alpha - 1)} E_c$$

$$= 1.0310 E_c = 3.093 \times 10^{10} \text{N/m}^2$$

$$G_{xy} = G_{yx} = \frac{1 - \sqrt{\rho} \left(1 - \frac{G_s}{G_c} \right)}{1 + \sqrt{\rho}(1 - \sqrt{\rho}) \left(1 - \frac{G_s}{G_c} \right)} G_c$$

$$= 1.03 G_c = 1.236 \times 10^{10} \text{N/m}^2$$

$$\mu_{xy} = \mu_{yx} = \mu_c + \rho_y(\mu_s - \mu_c) = 0.2008$$

— 66 —

式中: G 为材料的剪切模量; E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比; ρ 为贮液结构的配筋率; 下标 c 和 s 分别代表混凝土和钢筋, 下标 x, y 和 z 分别表示三个主轴方向; $\alpha = E_s/E_c$ 是钢筋与混凝土弹性模量之比。

储存液体按势流体(Potential-based Fluid)材料考虑, 体积模量为 $2.3 \times 10^9 \text{Pa}$ 。

1.3 边界条件和网格划分

结构的边界条件为底部固定。其中液体由于流动速度较低, 可认为是不可压缩液体。如果忽略水面运动的影响, 即不考虑液体表面重力波, 可将液体表面流体势设置为 0; 如果考虑液体表面重力波的影响, 则可以使用 ADINA 提供给势流体的自由液面边界条件 Free Surface。结构和其中水体分别使用 Shell(壳体)单元和 3D-Fluid 单元。

对固体域和液体域分别划分网格。因结构形状规则, 对水平两方向均分为 10 份, 高度方向分为 20 份。考虑到运算速度并根据计算结果, 经试算, 对水体水平两方向均分为 5 份, 高度方向分为 10 份。网格划分结果如图 2 所示。

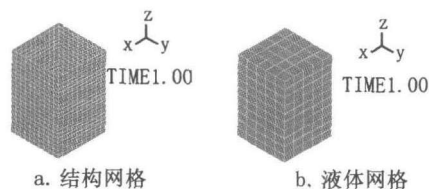


图 2 网格划分示意

2 有限元计算结果及分析

2.1 液体表面重力波对液固耦合频域特性的影响

根据是否考虑液体表面重力波分别建立模型, 进行液固耦合频域分析。通过分析, 考虑重力波时系统的前 81 阶模态为液面水波模态, 然后是与结构振型相关的高阶模态。限于篇幅, 表 1 仅列出了不考虑重力波时结构的前 10 阶频率 ω_{i1} 和考虑重力波时结构的前 10 阶频率 ω_{i2} , 图 3 为不考虑重力波时结构的前 4 阶振型, 图 4 为考虑重力波时液体表面的前 4 阶振型。考虑重力波时结构的振型与不考虑时基本一致, 不再列出其振型图。

表1 考虑和不考虑重力波情况下的结构频率

模态阶数	频率 ω_1	模态阶数	频率 ω_2	$(\omega_2/\omega_1)\%$
1	5.79665E+01	82	5.75449E+01	99.27
2	5.79688E+01	83	5.75472E+01	99.27
3	7.43500E+01	84	7.39438E+01	99.45
4	1.24299E+02	85	1.23528E+02	99.38
5	1.49107E+02	86	1.48306E+02	99.46
6	1.50034E+02	87	1.48816E+02	99.19
7	1.57179E+02	88	1.57066E+02	99.93
8	1.57186E+02	89	1.57074E+02	99.93
9	1.64232E+02	90	1.63261E+02	99.41
10	1.64977E+02	91	1.63842E+02	99.31

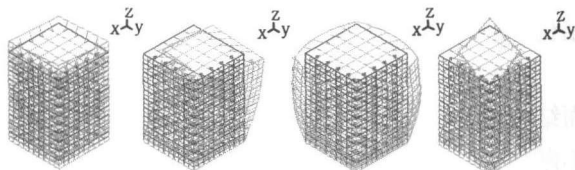


图3 不考虑重力波时结构的前4阶振型

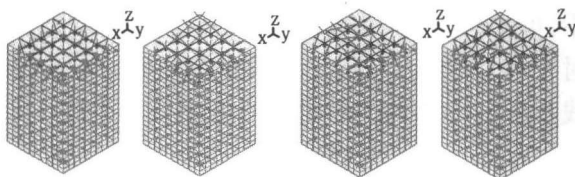


图4 考虑重力波时液体表面的前4阶振型

从表1可见,考虑液面重力波时结构的频率略有下降,即重力波对结构液固耦合频域特性有一定影响。影响程度与结构的刚度有关,具体研究见下文。液面重力波对于结构振型的影响不大。

2.2 液位高度对系统液固耦合频域特性的影响

在不考虑重力波的情况下,分别计算结构中水深为0、0.2h、0.4h、0.6h、0.8h、1.0h时系统的频率特性,将各种水深下系统的前25阶频率连线绘于图5。图中自上而下分别是水深为0到1.0h时的频率曲线。值得注意的是,水深为0和0.2h时结构频率计算结果完全一致,这说明水位较浅时液体对结构的影响很小,可以忽略。随水深的增加,结构频率逐渐减小,即液体对结构的作用逐渐增强。

2.3 壁板相对厚度对液固耦合频域特性的影响

对于钢筋混凝土矩形贮液结构,根据壁板形状按单向或双向受力计算时,壁板厚度^[7]按1/

10H~1/20H或1/20H~1/30H(H为结构高度)选用。为研究壁板刚度对液固耦合频域特性的影响,对于同一模型,在考虑重力波的情况下,将壁板厚度分别取为0.25m、0.3m、0.35m、0.4m、0.45m、0.5m,计算此时系统的频率特性。由计算结果发现,对于液面水波模态,不同壁厚下的频率特性几乎完全一致,可见壁板厚度对液面水波模态几乎没有影响。而结构模态则随壁板厚度有不同表现。现将各种壁厚下结构的前12阶频率连线绘于图6,图中自上而下分别是壁厚为0.5m到0.25m时的频率曲线。可见,随壁厚的减小,结构频率逐渐减小,即液体表面重力波对结构液固耦合频域特性的影响随结构刚度的减小逐渐增强。

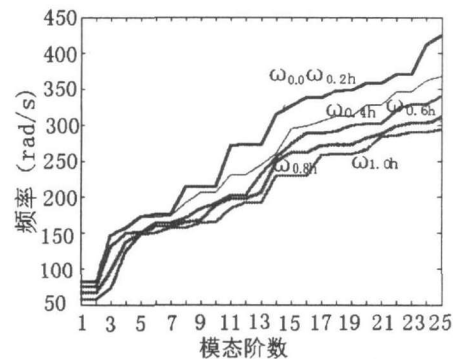


图5 不同水深时结构的频率曲线

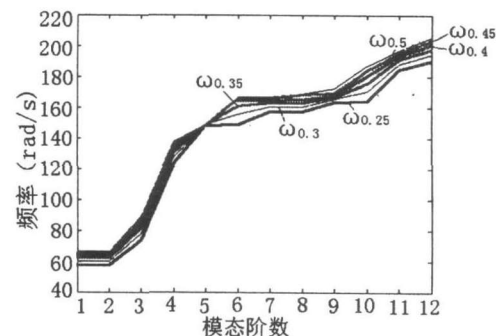


图6 不同壁厚时结构的频率曲线

由以上分析结果,对于壁厚为0.25m的贮液结构,考虑重力波时的振动频率与不考虑重力波时的振动频率的比值最小仅为99.19%,壁厚加大时重力波的影响更小。因此,对于工程计算而言,可忽略液体表面重力波对钢筋混凝土矩形贮液结构频域特性的影响。

2.4 结构尺寸对系统液固耦合频域特性的影响

为研究结构尺寸对系统液固耦合频域特性的

影响,计算不同高宽比和不同长宽比贮液结构的液固耦合频域特性。

在高度不变的情况下,分别计算结构高宽比为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 时系统的频率特性,将各种情况下系统的前 20 阶频率连线绘于图 7。图中自上而下分别是高宽比为 2.5 到 0.5 时的频率曲线。由此可见,浅贮液结构比深贮液结构的液固耦合效应强。

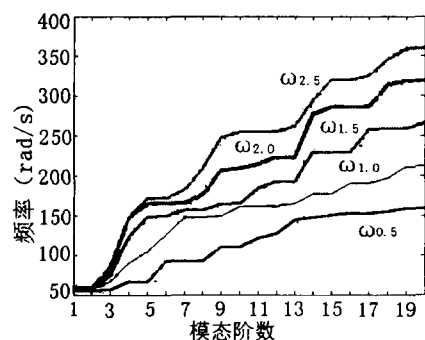


图 7 不同高宽比时结构的频率曲线

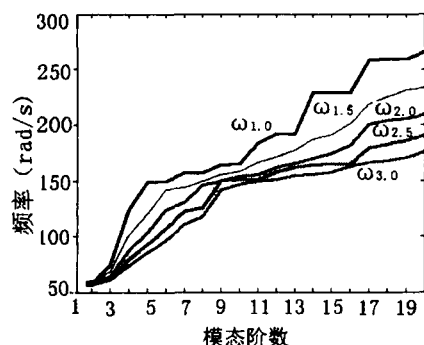


图 8 不同长宽比时结构的频率曲线

在高度不变的情况下,分别计算相同宽度下结构长宽比为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 时系统的频率特性,将各种情况下系统的前 20 阶频率连线绘于图 8。图中自上而下分别是长宽比为 1.0 到 3.0 时的频率曲线。由此可见,窄贮液结构比宽贮液结构的液固耦合效应强。

3 结论

通过钢筋混凝土矩形贮液结构的三维液固耦合频域分析,可得如下主要结论。

1. 在液体表面重力波的影响下,系统液固耦合频率与自由液面情况下相比有所降低;浅贮液结构比深贮液结构的液固耦合效应强;窄贮液结构比宽贮液结构的液固耦合效应强。由此可见液体表面重力波对于系统液固耦合频域特性的影响非常重要。

2. 随结构中液位高度的增加,液体对结构的作用逐渐增强。水位较浅(低于 0.2h)时液体对结构的影响可以忽略。

3. 壁板刚度对液面水波模态几乎没有影响,而结构模态则随壁板刚度的减小,液固耦合效应不断增强。

4. 在钢筋混凝土矩形贮液结构的工程设计中,可忽略液体表面重力波对频域特性的影响,同时应尽量避免结构尺寸比例相差较大的情况(如浅贮液结构或窄贮液结构)的出现。

参考文献

- [1] 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,1983:31-33,40-89
- [2] 黄玉盈.结构振动分析基础[M].华中工学院出版社,1988.2:204-224,248-254
- [3] 刘习军,张素侠等.矩形弹性壳液耦合系统中的重力波分析[J].力学学报,2006.1.38(1):106-111
- [4] Wilson, E. L., 结构静力与动力分析—强调地震工程学的物理方法[M].中国建筑工业出版社,2006.1:1-10
- [5] 宋天霞,郭建生等,非线性固体计算力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.11
- [6] 程选生,杜永峰.正交各向异性钢筋混凝土板结构弹性常数的确定[J].四川建筑科学研究,2006.32(5):30-33
- [7] 上海市市政工程设计院等编.给水排水工程结构设计手册.中国建筑工业出版社,1984:536

(上接第 64 页)

- [2] 高湛,彭少民.变电构架中刚性法兰的有限元分析.工业建筑,2005 年第 35 卷增刊
- [3] 陈亦,马星,王肇民.无肋法兰节点的研究与应用.建筑结构 2005 年第 32 卷第 5 期
- [4] 薛伟辰,黄永嘉,王贵年.500KV 吴淞口大跨越塔柔性法兰原型实验研究.工业建筑,2004 年第 34 卷第 3 期
- [5] 陈俊岭,马人乐,何敏娟.塔桅结构中有加劲肋法兰连接的受

力研究. Structural Engineers. 1999(4)

- [6] 匡祯斌,孙炳楠,顾正维.螺栓端板连接节点的三维非线性有限元分析.钢结构,2004 年第 2 期第 19 卷总第 71 期
- [7] 得·艾伯哈特,胡斌.现代接触动力学.南京东南大学出版社,2003 年
- [8] 行业标准.架空送电线路杆塔结构设计技术规定. DL/T5154—2002
- [9] 国家标准.高耸结构设计规范. GB50135—2006