维普资讯 http://www.cqvip.com

第30卷 第1期
2008年3月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 30 No. 1
March, 2008

钢筋混凝土矩形贮液结构的液-固耦合动力分析

杜永峰，史晓宇，程选生

（兰州理工大学土木工程学院，甘肃 兰州 730050）

摘 要：由于液体的影响，贮液结构在地震作用下的动力响应与一般结构不同。本文采用通用有限元软件ADINA，考虑混凝土材料中钢筋的作用，探讨贮存液体表面重力波、壁板刚度、结构尺寸对系统液固耦合动力响应的影响，以及单向、双向和三向地震耦联作用下的液固耦合动力响应。结果为钢筋混凝土矩形贮液结构的液固耦合研究提供了理论依据。

关键词：钢筋混凝土；矩形贮液结构；ADINA；液固耦合；动力响应

中图分类号：TU311.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2008)01－0021－06

Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Rectangular Liquid Storage Structures Considering Liquid-structure Interaction

DU Yong-feng, SHI Xiao-yu, CHENG Xuan-sheng

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

Abstract: Because influence of liquids, the dynamic reponse of liquid storage structures are different with other kind of structures. In this paper, taking into account the action of rebar in concrete materials, the current finite element software ADINA is used to do finite element simulation for the reinforced concrete rectangular liquid storage structures. The influences of gravity wave of the liquids surface, the stiffness of wainscots and the shape of the structures on the dynamic response with liquid-structure interaction are discussed, and the dynamic responses are also discussed in the action of unidirectional, bidirectional and three-directional coupling seismic actions. The result provides the theoretical basis for reinforced concrete rectangular liquid storage structures.

Key words: **Reinforced concrete; Rectangular liquid storage structures; ADINA; Liquid-structure interaction; Dynamic response**

0 前言

贮液结构广泛应用于水处理、石油化工等部门，在国民生产生活中发挥着重大作用。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应用。贮液结构的震害会造成重大损失，如储存的化学溶液泄漏会产生环境污染、火灾等次生灾害，造成严重后果，因此针对贮液结构的抗震研究引起了众多研究人员的重视。

在液体的影响下，地震条件下贮液结构的液固耦合动力响应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在地面运动条件下贮液结构满液时的液动压力及运动方程；李彦民等[2]进行了圆柱形储液容器流固耦合动力响应的有限元分析；刘云贺等[3]应用有限元法进行了矩形储液池的抗震分析；刘习军等[4]研究了矩形弹性壳液耦合系统中的重力波现象；O. Andrianarison[5-6]等

收稿日期：2007-08-30

基金项目：甘肃省建设科技攻关项目(JK2004－8)；兰州市科技攻关项目(2005－2－20－2)

作者简介：杜永峰(1962－)，男，甘肃人，教授，博士生导师，现任中国振动工程学会结构减震控制委员会理事，主要从事结构工程的研究.

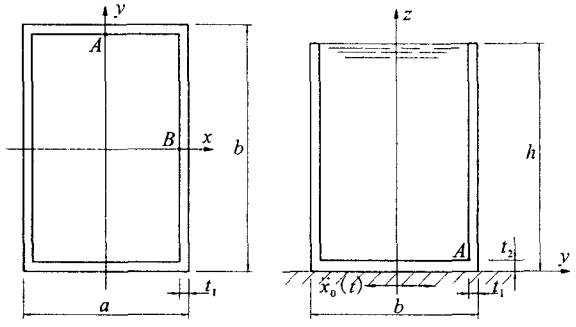
维普资讯 http://www.cqvip.com

建立了部分充液结构在重力影响下的线性振动的基本方程。但现有文献[1-2]的研究忽略了表面重力波的影响，不适用于液面大幅晃动的情况，文献[3]是将空间问题简化为平面问题近似地求解，文献[5-6]仅研究了平面内的线性振动。考虑到矩形贮液结构的壁板在平面内刚度很大，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地震条件下的三维液固耦合动力响应分析，探讨贮存液体表面重力波、壁板刚度和结构尺寸对系统液固耦合动力响应的影响，以及单向、双向和三向地震耦联作用下的系统动力响应。

1 地震条件下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，所受水平地震激励为 $\ddot{x}_0(t)$。计算简图如图 1 所示。为便于分析，取结构尺寸 $a=4$ m，$b=6$ m，$h=6$ m，壁厚 $t_1=0.25$ m，底板厚 $t_2=0.3$ m，钢筋混凝土材料的密度为 25 kN/m^3。结构内储水按满液考虑，密度为 10 kN/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功能 FSI(Fluid－Structure Interaction)。基本情况为 y 方向施加典型地震动 El Centro(1940,NS)波及兰州波，其幅值均调幅为 2.0 m/s^2，考虑液体表面重力波的影响。讨论地震条件下系统的液固耦合动力响应。



(a) 平面图 (b) 断面图

图 1 矩形贮液结构计算简图

Fig. 1 calculation diagrams of the rectangular liquid storage structure.

1.2 结构振动方程

由文献[1]，当矩形贮液结构近似地按悬臂剪切梁考虑时，在地面运动 $\ddot{x}_0(t)$ 所产生的惯性力和液动压力作用下，结构的振动微分方程为

$$\frac{GF}{K_0}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=\frac{\rho_c A}{g}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+2\varepsilon\frac{\partial u}{\partial t}+\ddot{x}_0(t)\right]-S^0(z,t)$$

式中，G 为材料的剪切弹性模量；A 为梁的横截面面积；g 为重力加速度；k 为一个与截面形状有关的系数；ρ_c 为钢筋混凝土材料的容重；$u(z,t)$ 为振动方向的位移；ε 为结构的阻尼系数；$\ddot{x}_0(t)$ 为地震地面加速度；$S^0(z,t)$ 为作用于容器壁上每单位高度的液动压力。由此可以认为结构的运动是在地面加速度所产生的惯性力和液动压力作用下的强迫振动。

1.3 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[7]，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[8]，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，钢筋配筋率 x 和 y 方向均取经济配筋率 0.8%。按文献[9]提出的公式，可得

$$E_x=E_y=E_c\left[1+\left(\frac{E_s}{E_c}-1\right)\times\rho_{sx}\right]$$
$$=1.045\,3E_c=3.136\times10^{10}\ \text{N/m}^2$$
$$E_z=\frac{1+\sqrt{\rho}(\alpha-1)}{1+\sqrt{\rho}(1-\sqrt{\rho})(\alpha-1)}E_c$$
$$=1.031\,0E_c=3.093\times10^{10}\ \text{N/m}^2$$
$$G_{xy}=G_{yx}=\frac{1-\sqrt{\rho}\left(1-\frac{G_s}{G_c}\right)}{1+\sqrt{\rho}(1-\sqrt{\rho})\left(1-\frac{G_s}{G_c}\right)}G_c$$
$$=1.03G_c=1.236\times10^{10}\ \text{N/m}^2$$
$$\mu_{xy}=\mu_{yx}=\mu_c+\rho_y(\mu_s-\mu_c)=0.200\,8$$

式中，ρ 为贮液结构的配筋率；$\alpha=\frac{E_s}{E_c}$ 是钢筋与混凝土弹性模量之比。

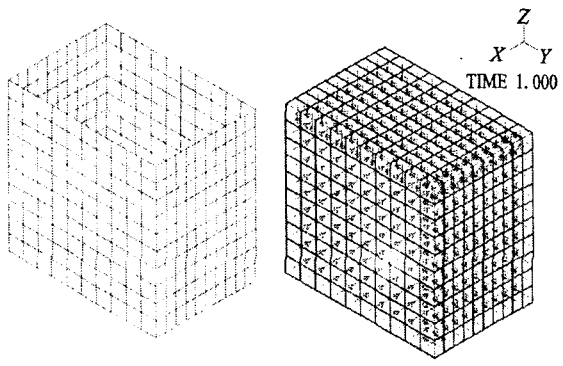
储存液体按势流体(Potential-based Fluid)材料考虑，因流动速度较低，可认为是不可压缩液体。

1.4 边界条件和网格划分

结构的边界条件为底部固定。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。

维普资讯 http://www.cqvip.com

对固体域和液体域分别划分网格。因结构形状规则，对水平两方向及高度方向分别均分为 10 份。对水体长、宽、高方向各分为 10 份，以便与结构网格对应。网格划分结果如图 2 所示。



(a) 结构网格图　　(b) 液体网格图

图 2　贮液结构网格划分图

Fig. 2　Mesh partition diagram of the liquid storage structure.

2　有限元计算结果及分析

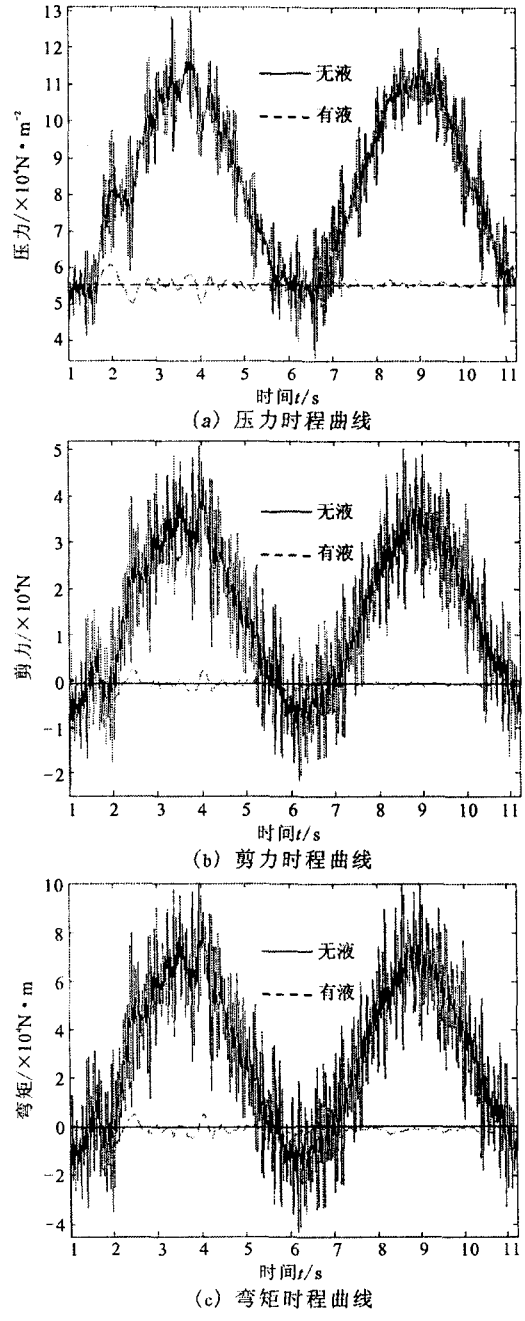
对于结构工程的抗震研究而言，主要目的是研究地震过程中结构的控制截面上的动内力的变化过程及其极值。故本文主要针对地震条件下 x 与 y 方向壁板底部跨中(A、B 点)的液动压力、动剪力及动弯矩展开讨论。

2.1　液体对贮液结构的动力响应特性的影响

为说明储存液体对结构动力响应的影响，将无液与满液情况下结构的计算结果列于图 3。由图中可见，无液时贮液结构的动力响应时程曲线与普通结构相似，形状与地震波波形相对应。而有液时结构的动力响应时程曲线不仅数值增大很多，更重要的是形状与普通结构相比有很大不同，在相邻各点响应数值无规律的变化中整体数值形成与三角函数曲线相似的有规律的形状。

2.2　液体表面重力波对动力响应特性的影响

按照考虑和不考虑液体表面重力波分别建立模型进行计算，结果列于图 4。可见无重力波时结构的液动压力远小于有重力波作用的情况，而且波形也在某一中心线处上下振荡，与考虑重力波时液动压力的波形大不相同。在液动压力的影响下，剪力和弯矩的动力响应时程曲线也呈现出相应的特点。可见重力波对于结构的动力响应特性有很大影响。兰州波激励下的响应与 El Centro 波规律基本相同，只是大小不同。图 5 仅列出了壁板 A 点在兰州波激励下的弯矩时程曲线。



(a) 压力时程曲线

(b) 剪力时程曲线

(c) 弯矩时程曲线

图 3　无液及有液时壁板 El Centro 波激励 A 点不同应力时程曲线

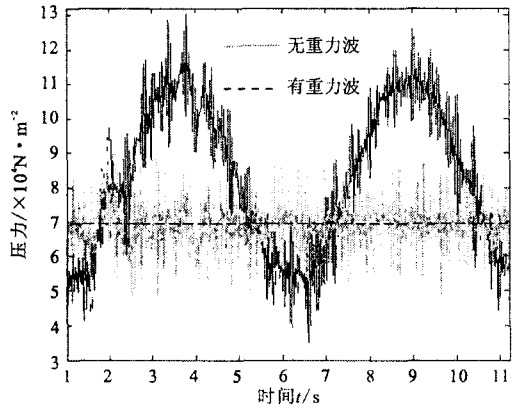
Fig. 3　Different stress time-history curves of point A under the action of El Centro seismic wave with or without liquids

2.3　壁板相对厚度对动力响应特性的影响

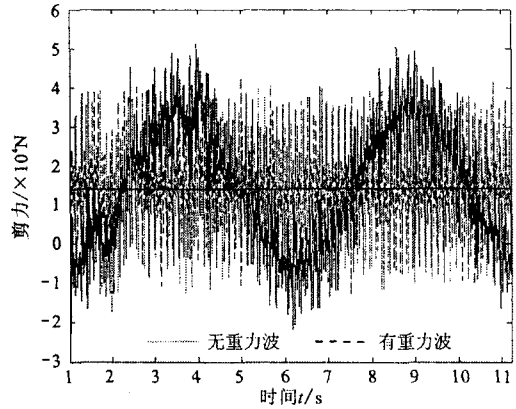
对于钢筋混凝土矩形贮液结构，根据壁板形状按单向或双向受力计算时，壁板厚度[10]按 1/10 H ～ 1/20 H 或 1/20 H ～ 1/30 H(H 为结构高度)选用。为研究壁板刚度对液固耦合动力响应的影响，对于同一模型，在考虑重力波的情况下，将壁板厚度分别取为 0.25 m、0.60 m、1.0 m，计算此时系统的

维普资讯 http://www.cqvip.com

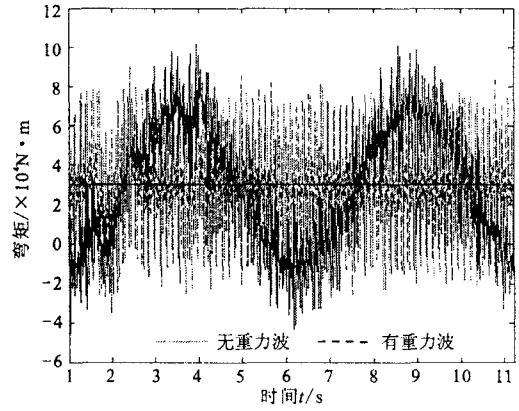
动力特性。结果列于图 6。



(a) 液动压力时程曲线



(b) 剪力时程曲线



(c) 弯矩时程曲线

图 4 有、无重力波时壁板 El Centro 波激励下 A 点应力时程曲线

Fig. 4 Different stress time-history curves of point A under the action of El Centro seismic wave with or without gravity wave.

由计算结果发现，液动压力是很敏感的物理量，随壁厚的增加液动压力时程曲线形状相似，但数值有明显的下降，可见池壁的弹性越大液固耦合作用越强。由于结构振动是在地面加速度所产生的惯性力和液动压力共同作用下的运动，壁厚较大时液动压力减小但惯性力增加，所以其共同作用下的动力

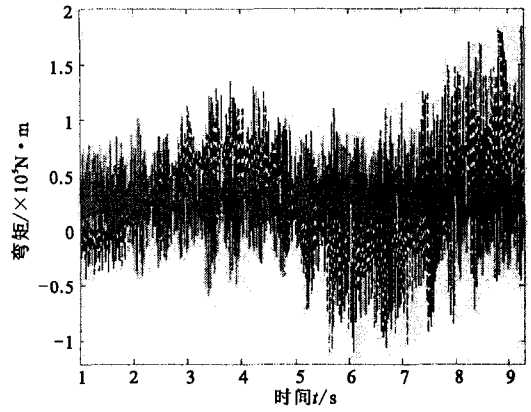


图 5 有、无重力波时壁板兰州波激励下 A 点弯矩时程曲线

Fig. 5 Bending moment curve of point A under the action of Lanzhou seismic wave with or without gravity wave.

响应(剪力和弯矩)时程曲线形状和数值都比较接近。壁厚 0.6 m 时 A 点的剪力幅值和弯矩幅值比壁厚 0.25 m 时仅分别增加了 3.73%和 3.74%。由此可见，对于工程设计允许的壁厚范围而言，壁板刚度对于结构内力的动力响应的影响可以忽略。

2.4 结构尺寸对动力响应特性的影响

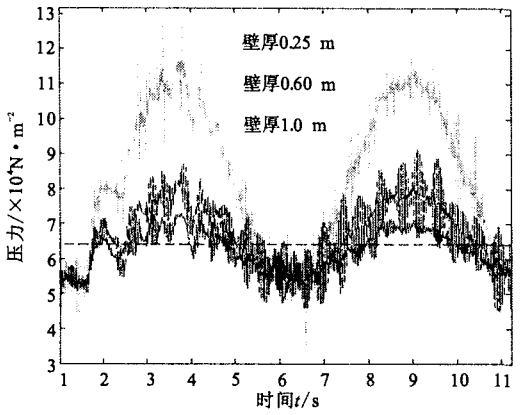
在考虑重力波的情况下，分别计算相同高度下浅贮液结构($H/b = 0.5$)和深贮液结构($H/b = 2.0$)的动力响应(H 为结构的高度，b 为矩形较长边的长度)，结果列于图 7。

由计算结果发现，浅贮液结构和深贮液结构的动力响应特性有很大不同。浅贮液结构的液动压力、剪力和弯矩等变量均远大于深贮液结构。这一点再一次证明了液面重力波对于液固耦合动力特性的重大影响。随液体深度的增加液面重力波的影响急剧下降，因此深贮液结构的动力响应大大降低。可见，对于相同深度的贮液结构而言，平面尺寸越大地震作用下的动力响应越大。

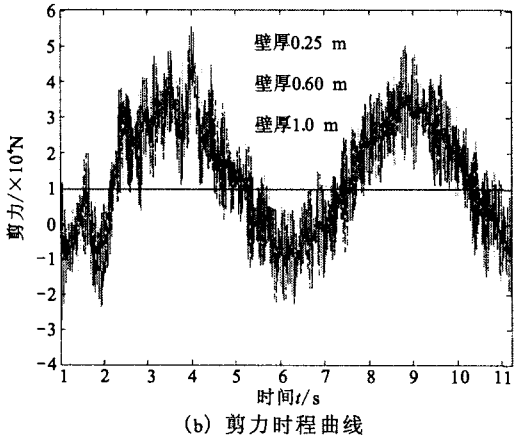
2.5 双向及三向地震耦联作用下的动力响应特性

实际的地震是非常复杂的三维振动，不仅在水平方向上 x 向与 y 向同时振动，而且还有显著的竖向(z 向)振动。为研究在双向和三向地震耦联作用下结构的动力响应特性，分别计算图 1 所示系统在迁安波(南北向、东西向和竖向)单向、双向和三向耦联作用下的动力响应，地震波幅值按比例分别调幅为 2.0 m/s²、1.47 m/s² 和 1.16 m/s²。通过将双向和三向地震下的动力响应分别与单向地震下的情况进行对比可以发现，对于矩形贮液结构，由于质量和刚度对称，双向和三向地震耦联作用下的动力响应

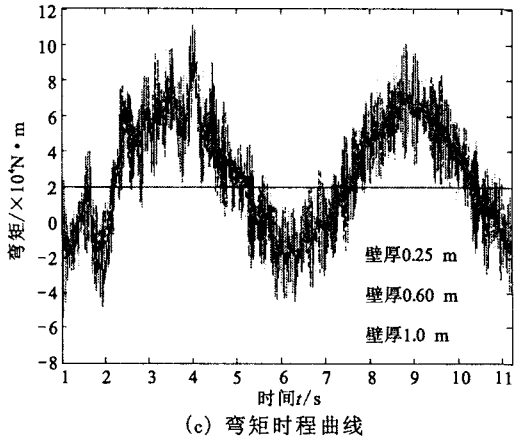
维普资讯 http://www.cqvip.com



(a) 液动压力时程曲线



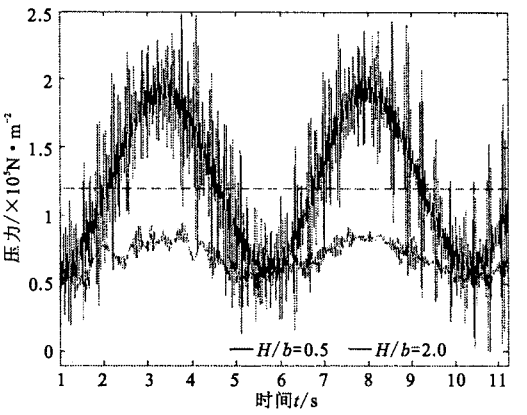
(b) 剪力时程曲线



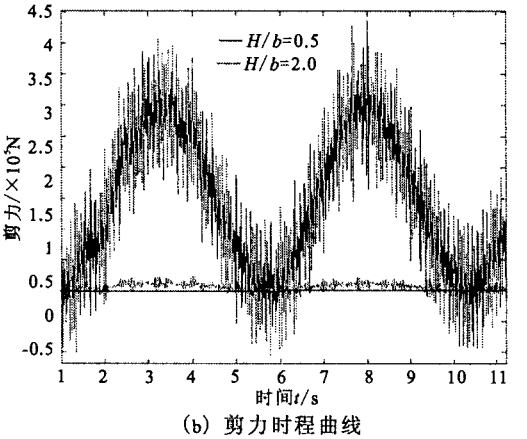
(c) 弯矩时程曲线

图 6　不同壁厚时壁板 El Centro 波激励下 A 点应力时程曲线

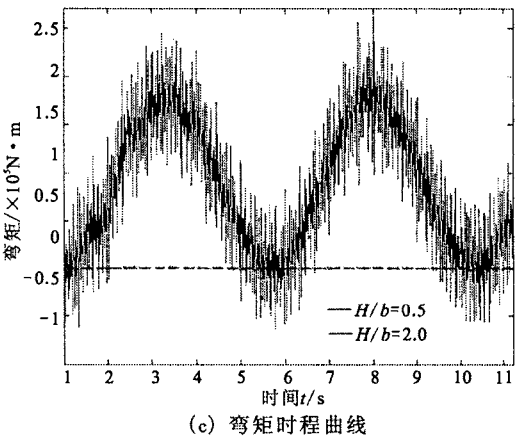
Fig. 6　Different stress time-history curves of point A under the action of El Centro seismic wave with different wainscots thickness.



(a) 液动压力时程曲线



(b) 剪力时程曲线



(c) 弯矩时程曲线

图 7　不同高宽比时壁板 El Centro 波激励下 A 点应力时程曲线

Fig. 7　Different stress time-history curves of point A under the action of El Centro seismic wave with different height and width proportion.

幅值与单向情况下相比增幅不大，均在 3% 以内，个别量甚至还有减小。因此对于关注内力幅值的贮液结构抗震设计而言，进行单向地震作用的计算就可满足设计要求。此外时程曲线中双向和三向地震极值出现的时间与单向地震作用下的极值出现时间并不一致，这正是地震作用的耦联效应的体现。如果研究者关心的是不同时刻的动力响应，就需要注意双向和三向地震作用的耦联效应。限于篇幅，只将部分结果列于图 8。

3　结论

通过钢筋混凝土矩形贮液结构的三维液固耦合动力响应分析，可得如下主要结论：

(1) 液体表面重力波对贮液结构液固耦合动力

维普资讯 http://www.cqvip.com

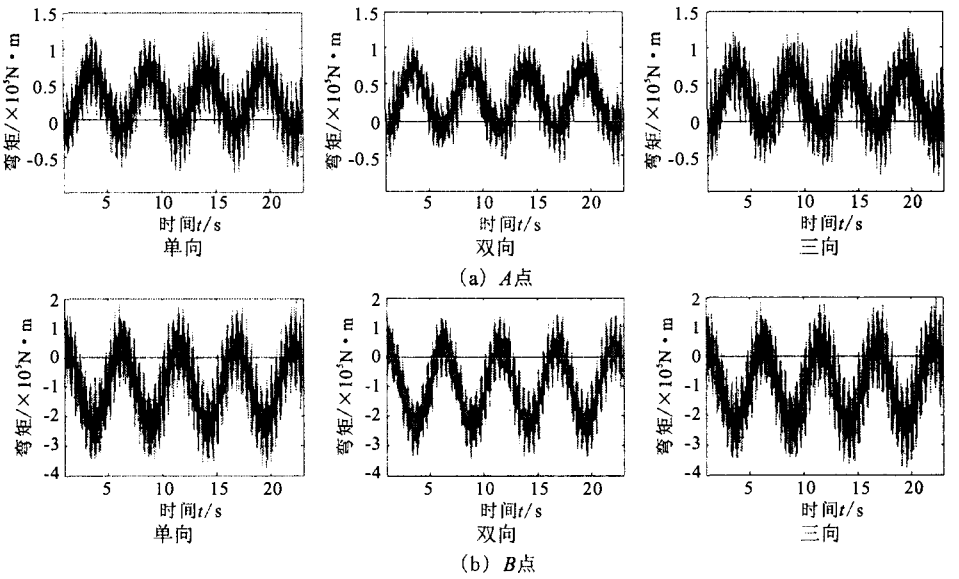


图 8 单、双、三向地震作用壁板迁安波激励下弯矩时程曲线

Fig. 8 Bending moment curves in different point under the action of unidirectional, bidirectional and three-directional Qian'an seismic wave.

响应特性的影响非常重要，不可忽略。考虑重力波时结构的动力响应时程曲线在幅值和形状上都与忽略重力波时有很大区别。

(2) 壁板的弹性越大液固耦合作用越强。但对于工程设计所用的壁板而言，其刚度对结构内力的动力响应的影响可以忽略。

(3) 由于液面重力波的影响，浅贮液结构的动力响应远大于深贮液结构。对于相同深度的贮液结构而言，平面尺寸越大地震作用下的动力响应就越大，抗震设计应更加重视。

(4) 对于矩形贮液结构的抗震设计而言，双向和三向地震耦联作用的影响较小，进行单向地震作用的计算就可满足设计要求。

[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] 李彦民、徐刚，等. 贮液容器流固耦合动力响应分析计算[J]. 工程力学，2002，19(4)：29-31.

[3] 刘云贺，王克成，等. 储液池的抗震问题探讨[J]. 地震工程与工程振动，2005，25(1)：149-154.

[4] 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，2006，38(1)：106-111.

[5] O Andrianarison, R Ohayon. Compressibility and gravity effects in internal fluid-structure vibrations: Basic equations and appropriate variational formulations[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2006，195：1958-1972.

[6] O Andrianarison, R Ohayon. Compressibility and gravity effects in vibrations of structures partially filled with liquids [A]//Proceedings of European Conference on Computational Mechanics ECCM'99[C]. Munich, Germany, 1999.

[7] 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]. 北京：中国建筑工业出版社，2006：1-10.

[8] 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.

[9] 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

[10] 上海市政工程设计院，等编. 给水排水工程结构设计手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1984：536.

[11] 崔振东，唐益群，等. 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.