

# 不同地震动对矩形贮液结构研究

## ——以水体耦合动力响应的影响为例

朱雨

河北地质大学

DOI:10.12238/gmsm.v7i2.1654

**[摘要]** 本文针对四种不同液高比的固定尺寸矩形贮液结构,输入两条具有代表性的地震波通过CEL法、时域分析、频率分析等技术手段,深入研究不同地震波及不同液高比在水池水平切向、水平法向及竖向的水体动力响应的影响。研究表明,地震波能够显著放大贮液结构的地震动加速度峰值,并改变其频率特性。同时,随着液高比的增加,贮液结构在水平法向和竖向的峰值加速度呈现逐渐增大的趋势,并在4/5液高比时达到最大放大系数,这一放大系数明显高于水平切向的情况。这一研究结果对于预测和优化贮液结构在地震中的安全性能具有重要意义。

**[关键词]** 水池; 流固耦合; CEL; 傅里叶变换

中图分类号: TU991.34+3 文献标识码: A

### Research on the effect of different seismic motions on rectangular liquid storage structures

#### ——Taking the influence of water coupling dynamic response as an example

Yu Zhu

Hebei GEO University

**[Abstract]** In this paper, for four kinds of fixed-size rectangular liquid storage structures with different liquid-height ratios, two representative seismic waves are input to study the effects of different seismic waves and different liquid-height ratios on the dynamic response of the water body in the horizontal tangential direction, the horizontal normal direction, and the vertical direction of the pool by means of the CEL method, the time-domain analysis, and the frequency analysis technique. The results show that seismic waves can significantly amplify the peak ground vibration acceleration of the liquid storage structure and change its frequency characteristics. Meanwhile, with the increase of the liquid-height ratio, the peak acceleration of the liquid storage structure in the horizontal normal and vertical directions shows a gradual increase, and reaches the maximum amplification coefficient at 4/5 liquid-height ratio, which is significantly higher than that in the horizontal tangential direction. The results of this study are of great significance for predicting and optimizing the safety performance of liquid storage structures in earthquakes.

**[Key words]** Pool; Fluid-solid coupling; CEL; Fourier transform

### 前言

流固耦合由于水体在地震作用下产生的重量远超其原重量,以及池壁较柔,在这种情况下会产生动水压力和冲击力<sup>[1,2]</sup>。若直接对乏燃料池进行动力结构特性反应分析,不考虑流固耦合情况可能会造成设计计算结果与实际产生偏差,在设计上存在安全问题<sup>[3-5]</sup>。现将水池在地震作用下的动力特性进行分析,为水池中的贮存格架奠定设计基础,使得整体结构更加安全。因此探讨不同地震波激励下不同水位对水池结构的影响分析对此类问题具有重要的研究意义。

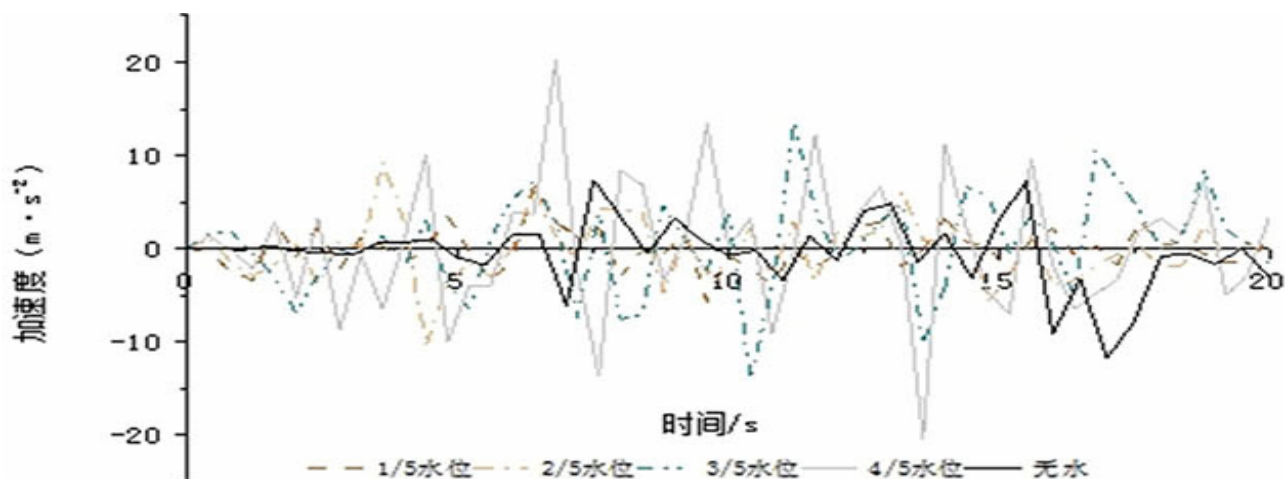
### 1 参数设置

水池材料采用C30钢筋混凝土材料,密度为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ,

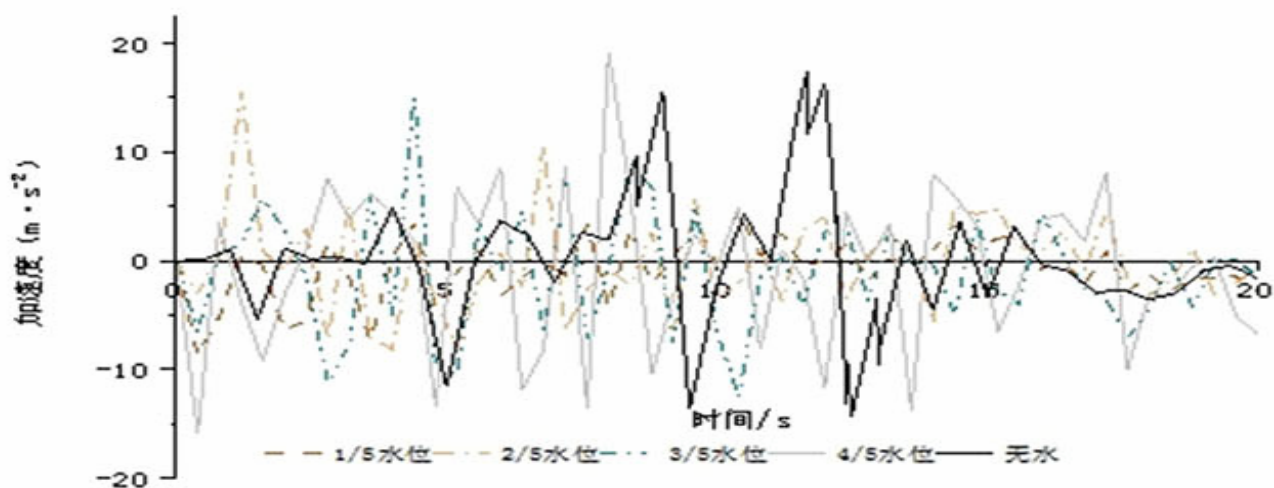
$E = 3.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ ,泊松比取 $\mu = 0.3$ ,池内水密度

$\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ , $c_0 = 1483\text{m}/\text{s}$ ,水的动力粘度

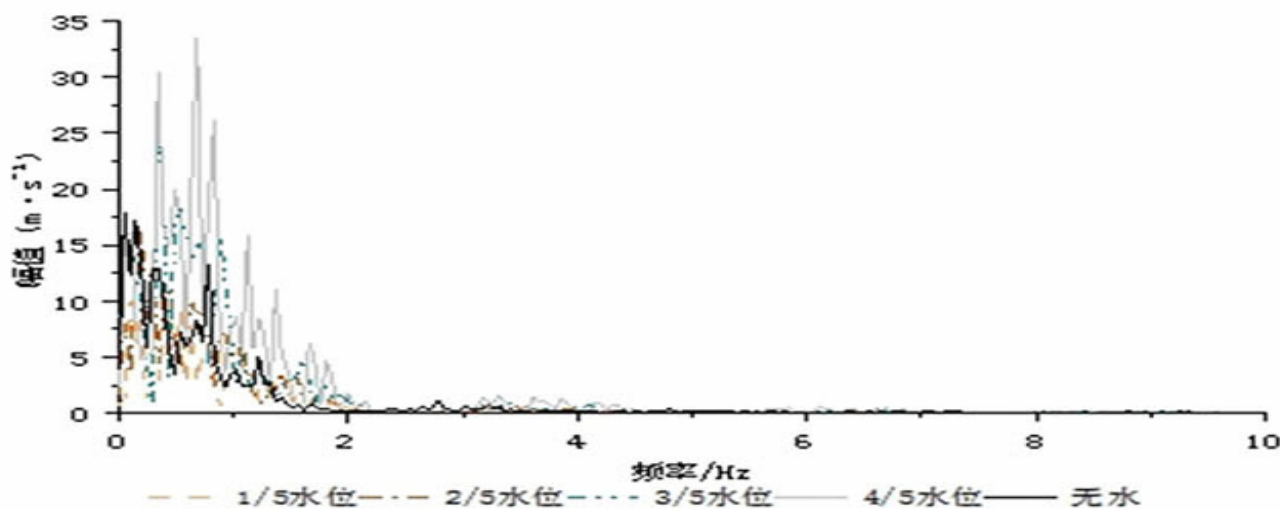
$\nu = 0.001\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。



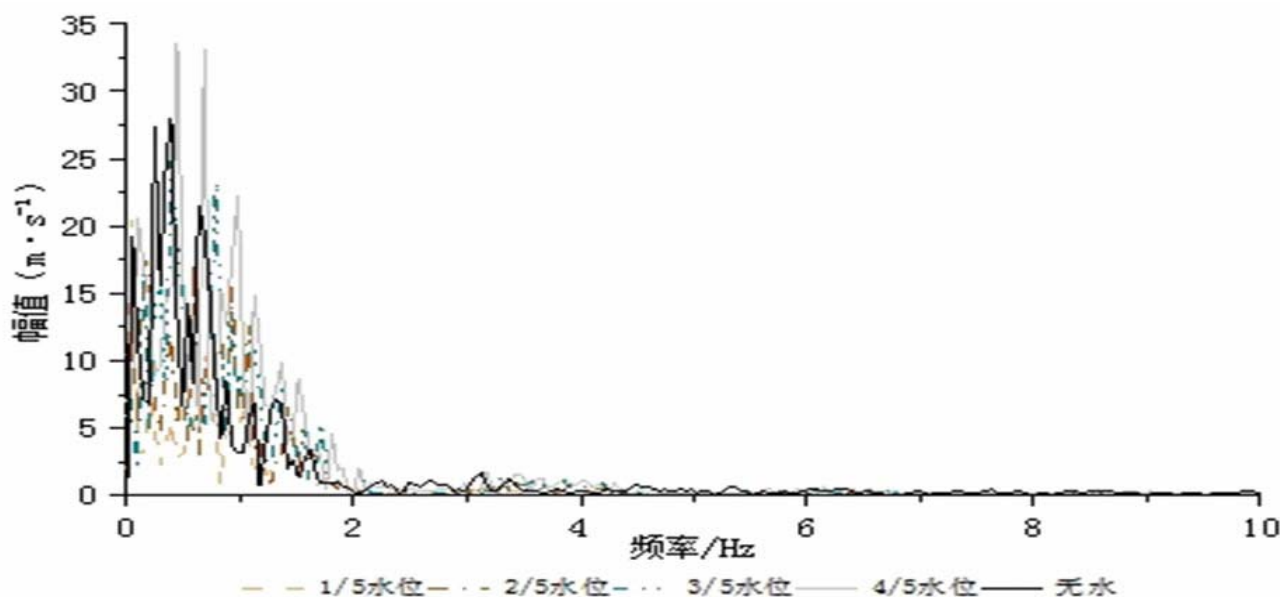
(a)311地震波-水平切向



(b)EL-Centro波-水平切向 图1 不同地震动作用下水平切向不同储水量池壁加速



(a)311地震波-水平切向



(b) EL-Centro波-水平切向 图2 不同地震动作用下不同储水量池壁傅里叶变换

## 2 水池模型及地震工况

### 2.1 水池模型

构建水池基本信息:核水池结构刚度大,参考以往乏燃料水池尺寸,将水池设计如下:水池长 $a=17\text{m}$ ,宽 $b=11\text{m}$ ,壁厚 $t=2\text{m}$ ,池高 $h=20\text{m}$ ;分别用有限元软件ABAQUS建立水池水位为1/5、2/5、3/5、4/5的模型,水体假设为不可压缩理想液体。

### 2.2 地震动工况设置

本文分别采用日本311地震、EL-Centro地震数据。根据“华龙一号”楼层反应谱规定将水平切向调幅为 $0.531\text{g}$ ;水平法向为 $0.532\text{g}$ ;竖向为 $0.664\text{g}$ 。地震波时间间隔为 $0.01\text{s}$ ,持续时间为 $20\text{s}$ 。设计四组实验组。

## 3 地震作用下不同液位对池壁影响

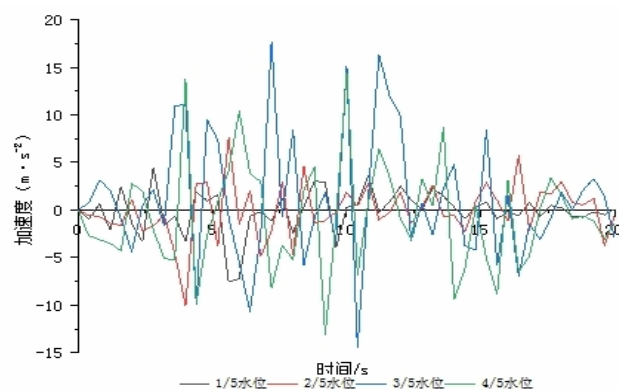
### 3.1 水平切向时频分析

在不同的地震动激励下水池壁水平切向加速度时程如图1所示,对应的傅里叶变化图2所示:

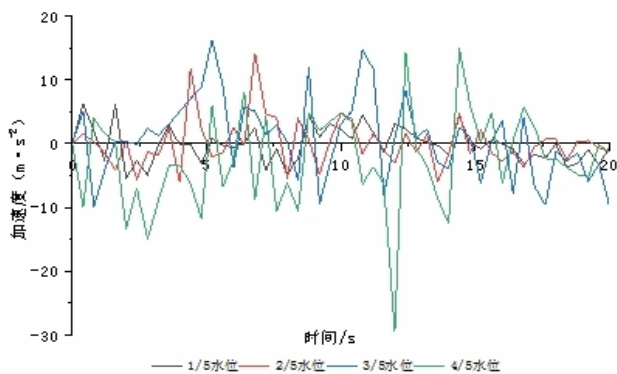
根据图1、图2, EL-Centro波水平切向为例分析,加速度峰值无水状态时的 $13.75\text{m/s}^2$ 放大到 $19.16\text{m/s}^2$ 。随着水位的不断上升地震动的中高频被显著放大,根据图2分析在4/5水位时EL-Centro波-水平切向在 $0.4\sim 0.6\text{Hz}$ 频率放大明显;311地震波-水平切向在 $0\sim 1.5\text{Hz}$ 时频率放大效果显著。在地震的作用下,液体高度的变化会将地震波的频率放大,进而对结构产生影响。

放大系数为含水时峰值加速度与无水时水池峰值加速度比例关系。由图1知日本311地震波水平切向无水时加速度为 $7.34\text{g}$ ,水位在1/5时加速度峰值为 $6.80\text{g}$ 放大系数为 $0.93$ ;水位2/5时加速度峰值 $9.20\text{g}$ 放大系数 $1.25$ ;水位3/5时加速度峰值 $13.49\text{g}$ 放大系数 $1.84$ ;水位4/5时加速度峰值 $20.21\text{g}$ 放大系数 $2.75$ 。EL-Centro波水平切向无水时加速度为 $17.35\text{g}$ ,水位在1/5时加

速度峰值为 $4.62\text{g}$ 放大系数为 $0.27$ ;水位2/5时加速度峰值 $15.41\text{g}$ 放大系数 $0.89$ ;水位3/5时加速度峰值 $14.92\text{g}$ 放大系数 $0.86$ ;水位4/5时加速度峰值 $19.16\text{g}$ 放大系数 $1.10$ 。



(a) 311地震波-水平法向

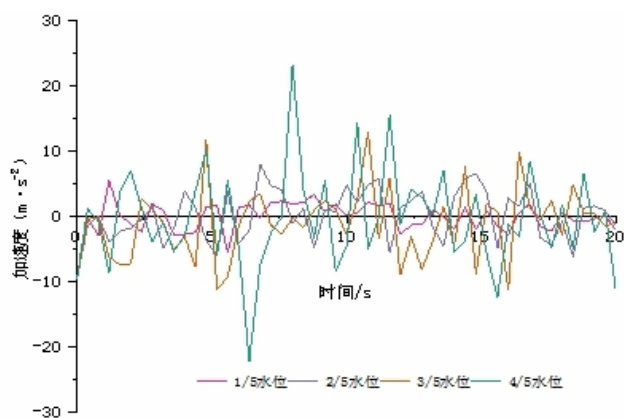


(b) EL-Centro波-水平法向

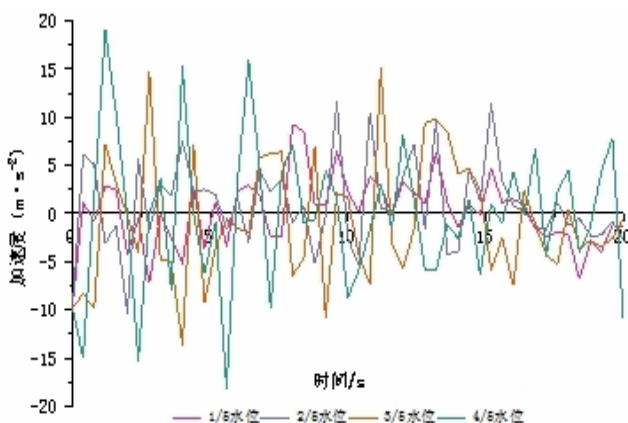
图3 不同地震动作用下不同储水量池壁水平法向加速度时程曲线

311地震波作用下其缩放系数逐渐变大;在EL-Centro波地震作用下缩放系数呈现先减后递增的趋势。

### 3.2 水平法向、竖向时频分析



(a) 311地震波-竖向



(b) EL-Centro波-竖向

图4 不同地震作用下不同储水量池壁竖向加速度时程曲线  
由图3图4分析知:

(1) 311地震波水平法向无水时加速度为12.88g, 水位在1/5时加速度峰值为4.52g放大系数为0.35; 水位2/5时加速度峰值7.61g放大系数0.59; 水位3/5时加速度峰值15.50g放大系数1.20; 水位4/5时加速度峰值14.48g放大系数1.12。EL-Centro波水平法向无水时加速度为12.40g, 水位在1/5时加速度峰值为6.25g放大系数为0.50; 水位2/5时加速度峰值14.21g放大系数1.15; 水位3/5时加速度峰值16.23g放大系数1.31; 水位4/5时加速度峰值14.92g放大系数1.20。

(2) 311地震波竖向无水时加速度为21.72g, 水位在1/5时加速度峰值为5.40g放大系数为0.25; 水位2/5时加速度峰值7.91g放大系数0.36; 水位3/5时加速度峰值12.89g放大系数0.59; 水位4/5时加速度峰值23.18g放大系数1.07。EL-Centro波竖向无水时加速度为16.81g, 水位在1/5时加速度峰值为9.27g放大系数为0.55; 水位2/5时加速度峰值11.55g放大系数0.69; 水位3/5时加速度峰值15.04g放大系数0.89; 水位4/5时加速度峰值19.04g放大系数1.13。

不同液高水位的同一点的峰值加速度基本呈现递增趋势,在含高频成分相对较多EL-Centro波的地加速度激励下,在水平切向液高为3/5处及竖向液高为4/5时放大系数较大,说明随着所含频率的高频成分增大及液高的增高,水体对矩形水池结构的过滤作用降低,将地震激励放大,造成水体对结构的冲击作用显著。

## 4 结论

根据上述分析得出如下结论:

(1) 不同的地震波施加时,由于其不同的频率特性会对水池同一液高比造成不同程度的加速度峰值放大系数。

(2) 在水平切向方向,水体会放大地震动加速度峰值、改变地震波频率成分,造成作用在水池的地震动加速度峰值放大,此时放大效果与液-结构的液高比及地震波频率特性相关,因此在考虑液-结构相互作用时应充分考虑液高比及地震动特性。

(3) 在水平法向及竖向方向,水池的不同液高比的峰值加速度呈现逐渐增大的趋势,且放大系数相较于水平切向较大,因此水池结构在实际工程中应注意水平法向和竖向的抗震。

## [参考文献]

- [1] 王建军,李其汉,朱梓根,等.自由液面大晃动的流固耦合数值分析方法研究进展[J].力学季刊,2001,22(4):447-454.
- [2] 翁羽,邓志安,刘佳伦,等.基于流固耦合法的储罐地震响应分析[J].机械工程与自动化,2020,(03):1-3.
- [3] 孟剑,张春龙,刘玉林,等.流固耦合分析方法在核电厂水箱结构抗震设计中的应用[J].工业建筑,2017,47(01):36-39.
- [4] 宋辰宁.考虑重力冷却水箱流固耦合效应的核岛结构地震反应分析[D].北京工业大学,2018.
- [5] 李波,丁月,赵又群,等.液罐车流-固耦合分析及优化设计[J].机械工程学报,2022,58(22):321-333.