

# 两级变阻尼 TMD 考虑环形水箱内液体晃动的地震响应分析

区彤<sup>1</sup>, 骆杰鑫<sup>1</sup>, 林松伟<sup>1,2</sup>, 刘彦辉<sup>3</sup>

(1. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010; 2. 广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006;  
3. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为考虑环形水箱内液体晃动作用对两级变阻尼 TMD 受力性能的影响, 以某实际高耸结构为例, 通过 ABAQUS 软件建立考虑水箱为质点的整体模型以及满水状态和非满水状态的水箱液-固耦合模型, 对比分析了不同液-固耦合状态下的两级变阻尼 TMD 地震响应。研究表明: 较大地震激励下, 考虑液体晃动作用后的两级变阻尼 TMD 振幅、最大阻尼力更大, 并且液体晃动作用抑制了两级变阻尼 TMD 二级阻尼耗能的充分发挥; 随着地震激励作用的增大, 液-固耦合模型的基底最大剪力较质点模型大, 且基底剪力随地震激励的增大, 其增幅也增大。

**关键词:** 高耸结构; 两级变阻尼; 液-固耦合; 环形水箱; TMD; 地震激励

**中图分类号:** TU973.2; TU973.3<sup>†</sup>1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202308042

## Seismic response analysis of two-stage variable damping TMD considering liquid sloshing in an annular water tank

OU Tong<sup>1</sup>, LUO Jiexin<sup>1</sup>, LIN Songwei<sup>1,2</sup>, LIU Yanhui<sup>3</sup>

(1. Guangdong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China;  
2. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;  
3. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to consider the effect of liquid sloshing in an annular water tank on mechanical performance of a two-stage variable damping TMD, taking an actual high-rise structure as an example, a global model considering the water tank as a particle and the liquid-solid coupling model of the water tank under the full water state and the non-full water state are established by ABAQUS software. The seismic responses of the two-stage variable damping TMD under different liquid-solid coupling states are compared and analyzed. The results show that the amplitude and maximum damping force of the two-stage variable damping TMD considering liquid sloshing are larger under larger seismic excitation, and the sloshing effect of liquid inhibits the full development of the second-stage damping energy consumption of the two-stage variable damping TMD. With the increase of seismic excitation, the maximum base shear force of the liquid-solid coupling model is larger than that of the particle model, and the relative increase amplitude increases accordingly.

**Keywords:** high-rise structure; two-stage variable damping; liquid-solid coupling; annular water tank; TMD; seismic excitation

高耸建筑往往在顶部楼层设置水箱, 以适应消防要求。在高耸结构设置调谐质量阻尼器(TMD), 利用顶部消防水箱作为阻尼器的调谐质量, 能够得到良好的减振效果<sup>[1-3]</sup>。在工程项目开展过程中, 为了达到简化设计的目的, 通常将含有液体质量的水箱当成质点, 忽略水箱在运动过程中液体的晃动, 导致计算结果与实际存在偏差, 液体晃动过大时甚至

可能带来安全隐患。

国内外学者对液体晃动对容器力学特性的影响进行了研究。ABRAMSON等<sup>[4]</sup>通过建立势流理论模型, 得到了圆柱形和球形刚性容器内液体非线性晃动特性。FALTINSEN等<sup>[5]</sup>推导建立了多维模态分析理论, 描述了水箱内液体非线性晃荡现象下的流体运动。HOUSNER<sup>[6-7]</sup>采用等效弹簧-质量模型

模拟液体对水箱结构的压力作用。CELEBI 等<sup>[8]</sup>通过有限差分法揭示了矩形贮液容器中液体的晃动规律。沈国光<sup>[9]</sup>应用 MAC 法对矩形容器内的单、双层流体晃动问题进行了数值模拟。端木玉等<sup>[10]</sup>基于 VOF 法追踪自由液面,分析了不同液舱结构形式对液体晃荡的影响。岳宝增<sup>[11]</sup>将 ALE 方法引入到 Navier-Stokes 方程中,用于模拟俯仰激励下的圆筒形贮腔中的液体大幅晃动现象。管延敏等<sup>[12]</sup>运用 BEM 法对三维带挡板箱体液体晃动现象进行了数值模拟,预测了带水平、竖直挡板箱体内的液体晃动现象。近年来,随着计算机技术和有限元理论不断发展,基于 CAS 法<sup>[13-15]</sup>、CEL 法<sup>[16-19]</sup>、SPH 法<sup>[20-26]</sup>的数值模拟技术也越来越成熟,为解决液体非线性晃动问题带来了更有效的分析手段。

以上考虑液体晃动作用的研究主要是以固定边界条件的传统液体容器结构作为研究对象,未考虑不同边界条件下液体晃动对容器受力及结构振动响应的影响。本文以应用两级变阻尼调谐质量阻尼器(顶部环形消防水箱作为调谐质量)的某实际高耸结构为例,在前期计算分析时,将消防水箱简化为单质点,TMD 具有良好的减振效果<sup>[27-28]</sup>。为了进一步分析消防水箱内部液体晃动对水箱受力性能的影响,通过 ABAQUS 软件建立水箱数值模型,对比分析了不同液-固耦合状态模型的地震响应,为高耸结构 TMD 的设计应用提供参考。

## 1 水箱 TMD 数值模型

### 1.1 TMD 设计

本两级变阻尼 TMD 以质量为 258 t(含水重)的环形水箱作为调谐质量,与水箱底部 4 个双向对称设置的变阻尼双向滑轨支座组成。两级变阻尼 TMD 的设计参数如表 1 所示。双向滑轨支座由底座平台、X 和 Y 两个方向两层(中、下部)的滑轨副平台及顶部连接平台组成,如图 1 所示。滑轨副平台设有滑轨,并沿滑轨滑动方向设置钢弹簧和电涡流阻尼器,分别提供 TMD 系统的水平刚度和阻尼。其中水箱下表面与磁钢相连,通过调节电涡流阻尼器中的铜板厚度可改变阻尼系数的大小。滑轨支座构造示意如图 1 所示,两级变阻尼 TMD 的立面和三维示意图分别如图 2 和 3 所示。

表 1 TMD 设计参数

Tab. 1 TMD design parameters

阻尼级别	行程 $U$ / mm	弹簧刚度 $K$ / ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	阻尼系数 $C$ / ( $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ )
一级	$\pm(0\sim 200)$	324.56	67.62
二级	$\pm(200\sim 900)$	324.56	202.86

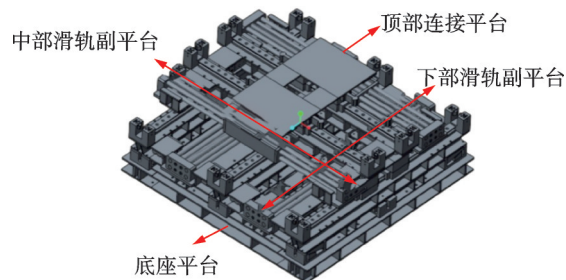


图 1 一体化两级变阻尼双向滑轨支座

Fig. 1 Integrated two-stage variable damping bidirectional slide support

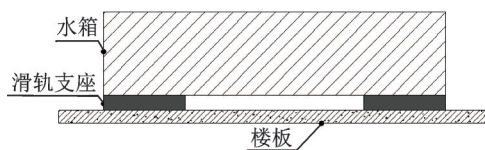


图 2 TMD 立面示意图

Fig. 2 TMD elevation diagram

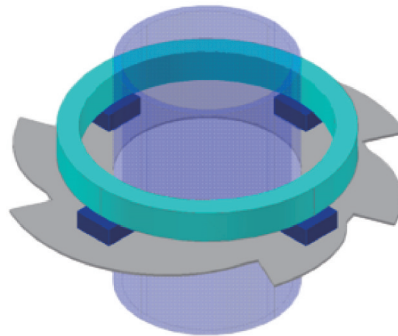


图 3 TMD 三维示意图

Fig. 3 TMD three-dimensional diagram

### 1.2 模型建立

通过 ABAQUS 软件建立考虑水箱为质点的高耸结构整体模型和两级变阻尼 TMD 环形水箱液-固耦合模型,如图 4 所示。在水箱质点模型中利用 ABAQUS 的 UEL 接口子程序开发了可以考虑两级变阻尼的单元,用于模拟两级变阻尼 TMD,水箱相当于两级变阻尼单元上的一个质点,不考虑液-固耦合作用,该模型基于隐式动力学分析模块进行计算。

环形水箱液-固耦合模型外径为 18.7 m,内径为 15.7 m,高度为 2.282 m。水箱内部沿环向均分设置 40 个回形加劲肋,沿竖向在内、外侧壁中间各设置 1 道环形加劲肋,加劲肋宽度均为 250 mm,无水状态下水箱部分内部构造如图 5 所示。箱体采用 S30408 不锈钢,钢板厚 16 mm。水箱结构采用壳单元,水体按 SPH 粒子模拟,水体密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ 。通过 ABAQUS 软件 Interaction 模块的连接器定义两级变阻尼边界条件,该模型基于显式动力学分析模块进行计算。



图 4 数值模型示意图

Fig. 4 Diagram of numerical model

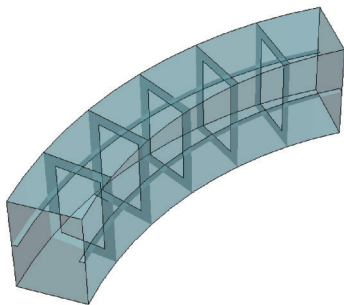


图 5 无水状态下水箱内部构造示意图

Fig. 5 Internal structure of the water tank in the state of no water

为研究液体晃动效应对地震响应的影响,将液-固耦合模型又分为满水状态和非满水状态两种模型,环形水箱截面状态如图 6 所示。为了与水箱质点模型的总质量保持一致,非满水状态模型通过质量密度的定义对水箱干重相应放大。

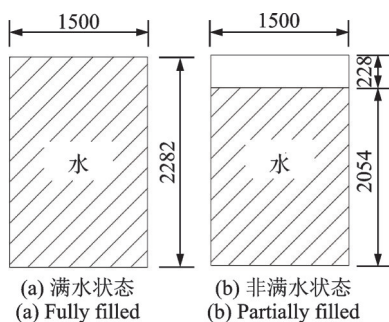


图 6 环形水箱状态示意图(单位: mm)

Fig. 6 Diagram of state of annular tank(Unit: mm)

液-固耦合模型采用  $U_s-U_p$  状态方程描述水体,声速取为 1500 m/s。水体在数值模拟中并非理想的不可压缩材料,并且 SPH 粒子域是按初始网格间距离散化成型,因此即使满水状态下的水体也具有微小的晃动空间。

### 1.3 变阻尼触发条件

TMD 的水箱质量块放在固定于地面的一体化两级变阻尼双向滑轨支座上,可沿水平正交双向与地面产生相对运动位移。由于高耸结构一般是风致振动,两级变阻尼 TMD 根据 10 年一遇风荷载下的 TMD 位移响应峰值作为 TMD 阻尼的切换依据,即设置 TMD 行程超过 0.2 m 作为二级阻尼触发条件。

对于质点模型,在水箱相对地面运动位移不超过 0.2 m 时,TMD 阻尼采用表 1 中的一级阻尼系数;当位移超过 0.2 m 时,TMD 阻尼切换为表 1 中的二级阻尼系数,其中二级阻尼系数是一级阻尼系数的 3 倍,用于控制极端不利工况下的行程。因此质点模型两级变阻尼 TMD 单元的力学控制方程如下式所示:

$$F = \begin{cases} C\Delta\dot{u} + K\Delta u, & |\Delta u| \leq 0.2 \text{ m} \\ 3C\Delta\dot{u} + K\Delta u, & |\Delta u| > 0.2 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $F$  为 TMD 的输出力;  $\Delta\dot{u}$  为水箱质量块  $M$  的相对速度;  $\Delta u$  为水箱质量块  $M$  的相对位移;  $K$  为表 1 中 TMD 的弹簧刚度;  $C$  为表 1 中 TMD 的阻尼系数。

质点模型 TMD 计算简图如图 7 所示。

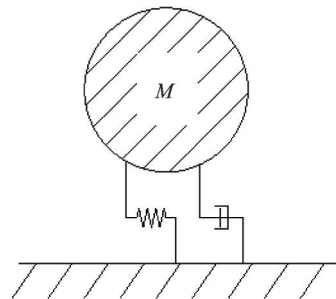


图 7 质点模型计算简图

Fig. 7 Mass point model calculation diagram

对于液-固耦合模型,水箱及其内部液体按实际三维建模。相比质点模型,其水箱底部有 4 个滑轨支座,因此每个滑轨支座的刚度系数和阻尼系数均取为质点模型的四分之一,以此保证其 TMD 设计参数与质点模型一致,其计算简图如图 8 所示。

质点模型中假定 TMD 惯性质量由水箱和水组成,两者具有同样的加速度,产生的惯性力与水箱底部弹簧恢复力和阻尼力组成 TMD 的动力平衡方程,如下式所示:

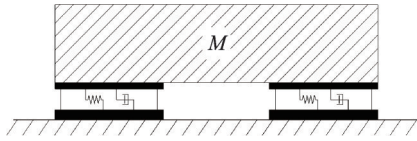


图 8 液-固耦合模型计算简图

Fig. 8 Calculation diagram of liquid-solid coupling model

$$m_{wT} \ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2)$$

式中,  $m_{wT}$  为水质量和水箱质量之和;  $x$  为水箱相对位移;  $\dot{x}$  为水箱相对速度;  $\ddot{x}$  为水箱相对加速度; 在 TMD 一级阻尼行程范围内,  $c$  为表 1 中 TMD 的一级阻尼系数, 在二级阻尼行程范围内,  $c$  为表 1 中 TMD 的二级阻尼系数;  $k$  为表 1 中 TMD 的弹簧刚度。

液-固耦合模型中水箱和水的加速度不一致, 需要考虑液体晃动效应, 也就是水对水箱侧壁的晃动压力, 当取不含水的水箱为隔离体时, 水晃动压力变为水箱的外力, TMD 的动力平衡方程就变为下式:

$$m_T \ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_w \quad (3)$$

式中,  $m_T$  为无水时的水箱质量;  $P_w$  为考虑液体晃动效应的水晃动压力。

### 1.4 时程荷载输入

高耸结构设防烈度为 7 度, 根据反应谱生成并筛选出一条人工地震波作为高耸结构整体模型的底部时程荷载输入条件。其中小震、中震、大震、超大震的主方向 (X 向) 加速度峰值分别为 35、100、220、320  $\text{cm/s}^2$ , 次方向 (Y 向) 为相应主方向的 0.85 倍。以大震地震波为例, 如图 9 所示, 其余地震波依此相应缩放。

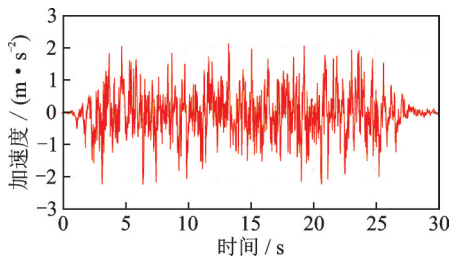


图 9 大震地震波时程

Fig. 9 Seismic wave time-history of large earthquake

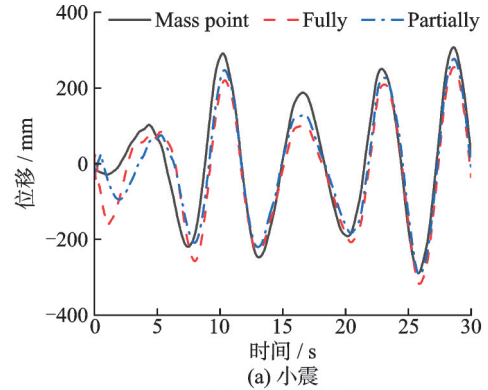
质点模型两级变阻尼 TMD 单元两端节点分别是水箱质点和主体结构楼面中心区域主节点, 液-固耦合模型采用质点模型中 TMD 所在楼面主节点的位移响应作为水箱底部地面时程荷载输入条件。

## 2 地震响应分析

三个模型的两级变阻尼 TMD 环形水箱以主方向 (X 向) 地震响应进行对比分析, 其中“Mass point”表示质点模型, “Fully”表示满水状态的液-固耦合模型, “Partially”表示非满水状态的液-固耦合模型。

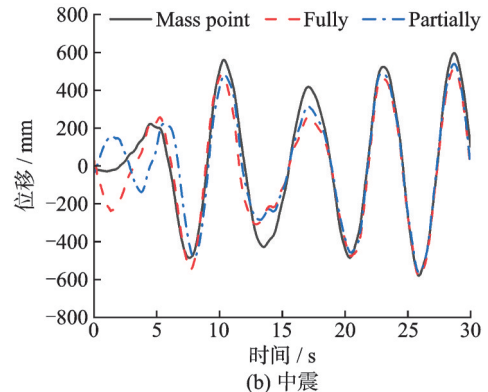
### 2.1 位移响应

水箱的位移响应如图 10 所示。以第 5 s 后的第 1 个位移零点时刻为界, 记该时刻为第 1 个振动周期的终点即第 2 个振动周期初始零点。在考虑液体晃



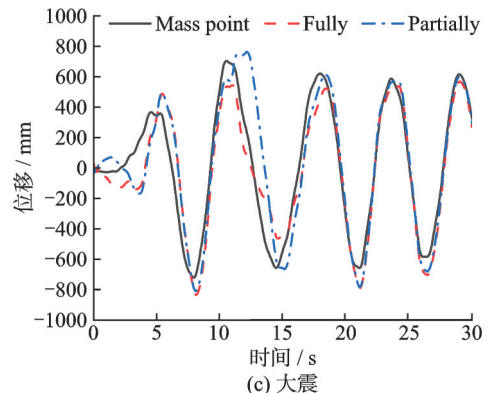
(a) 小震

(a) Small earthquake



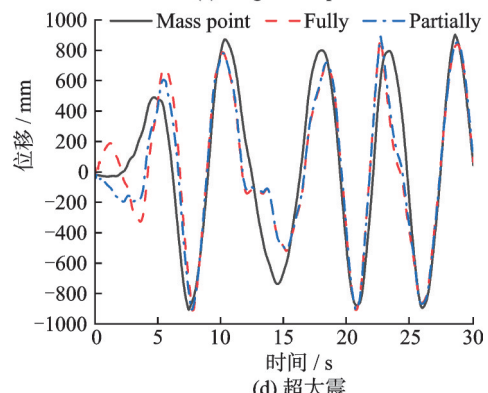
(b) 中震

(b) Medium earthquake



(c) 大震

(c) Large earthquake



(d) 超大震

(d) Super large earthquake

图 10 位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of displacement

动效应后,水箱在外部激励下运动,水箱内部液体相当于水箱的附加动质量,在惯性作用下产生了式(3)的水晃动压力,导致在第1个振动周期内液-固耦合模型振动幅度变化较大。在第1个振动周期内,虽然液-固耦合模型和质点模型的水箱均在中震、大震、超大震下进入二级阻尼行程,仅在小震下均处于一级阻尼行程范围内,液-固耦合模型振幅在不同级别地震激励下均比质点模型振幅大,并且地震激励越大,处于二级阻尼行程时较质点模型的振幅差有变大的趋势。但液-固耦合模型不同满水状态下的水箱振动方向和振动幅度并不规律,表现出较大的非线性,与质点模型相比存在较大的相位差,改变了TMD系统的动力特性。

在第2个振动周期开始后,可以看到液-固耦合模型和质点模型的振动步调开始总体趋向一致,说明此时液体晃动趋向相对稳定状态,液体与水箱基本形成一个稳定的动力平衡系统,表现出了单质点系统的运动趋势。在第2个振动周期结束后,液-固耦合模型在小震作用下在第15 s附近为位移零点,在中震作用下在第16 s附近为位移零点,在大震和超大震作用下在第17 s附近为位移零点,达到相对稳定状态,并且液体与水箱达到相对稳定状态后各模型间的相位差较小。

在第3个振动周期的波谷(即第13~16 s内的振幅)中,质点模型的振幅比的Fully模型大,在小

震下相对增大6.4%,在中震下相对增大39.1%,在大震下相对增大41.6%,在超大震下相对增大42.1%;晃动作用大的Partially模型此时段振幅表现较不稳定,仅在大震下与质点模型振幅几乎一致,在其他地震激励下与Fully模型一样比质点模型振幅小。

总体上看,在中震、小震这样的较小地震激励下,质点模型比液-固耦合模型的最大振幅大;在大震下,液-固耦合模型的最大振幅超过了质点模型;在超大震下,液-固耦合模型与质点模型的最大振幅基本持平,并且在超大震下,水箱行程依然都能控制在设计最大行程0.9 m内,表明二级阻尼能够实现设计预期目的,防止TMD超出行程与主体结构产生碰撞。

## 2.2 滞回曲线

如图11~14所示,可以看到质点模型和液-固耦合模型从小震到超大震下均发挥了二级阻尼耗能作用,滞回曲线均明显呈“双耳状”。在小震下,质点模型和Fully模型的最大阻尼力均为负值方向,大小几乎一致,Partially模型最大阻尼力相对较小;在中震下,Fully模型和Partially模型的最大阻尼力几乎一致,质点模型最大阻尼力相对液-固耦合模型较大;在大震、超大震下,质点模型最大阻尼力相对液-固耦合模型较小。

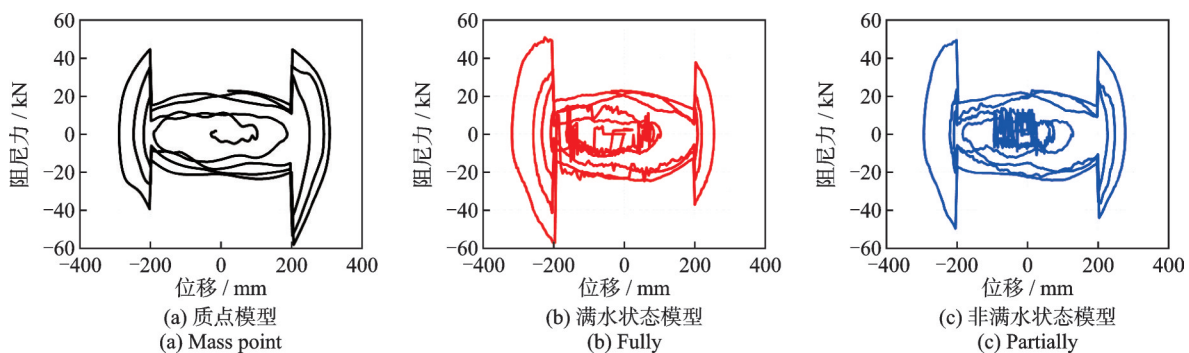


图11 小震下滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curves under small earthquake

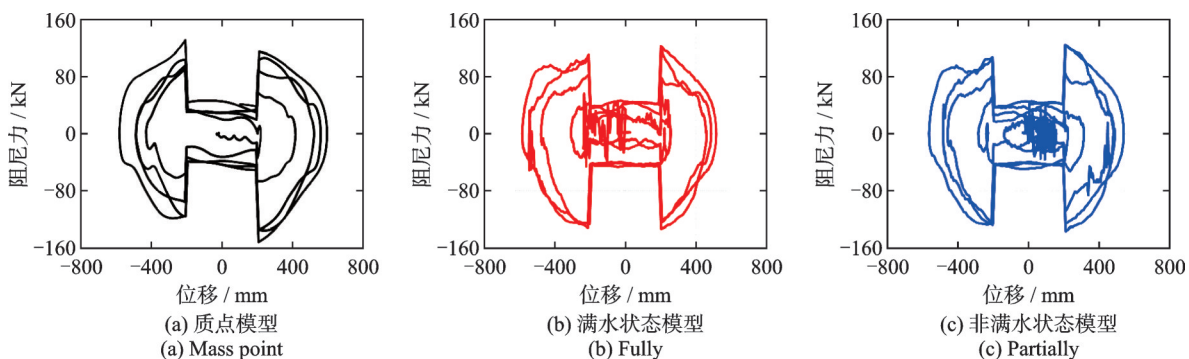


图12 中震下滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves under medium earthquake

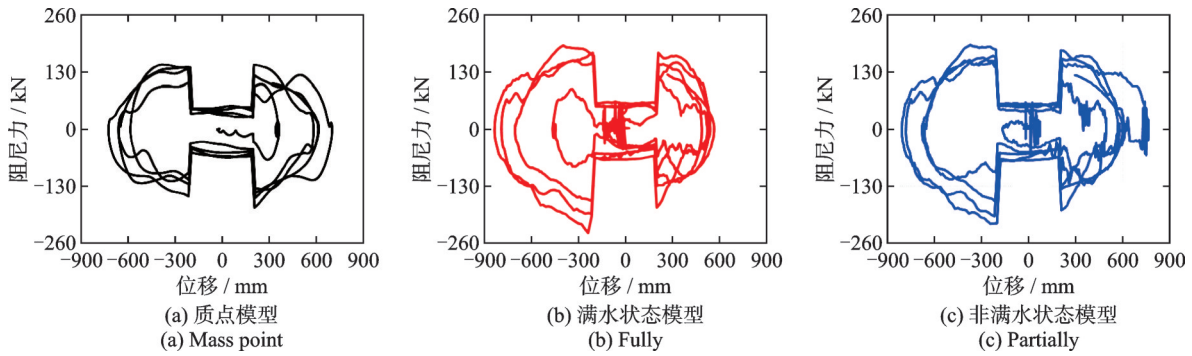


图 13 大震下滞回曲线

Fig. 13 Hysteresis curves under large earthquake

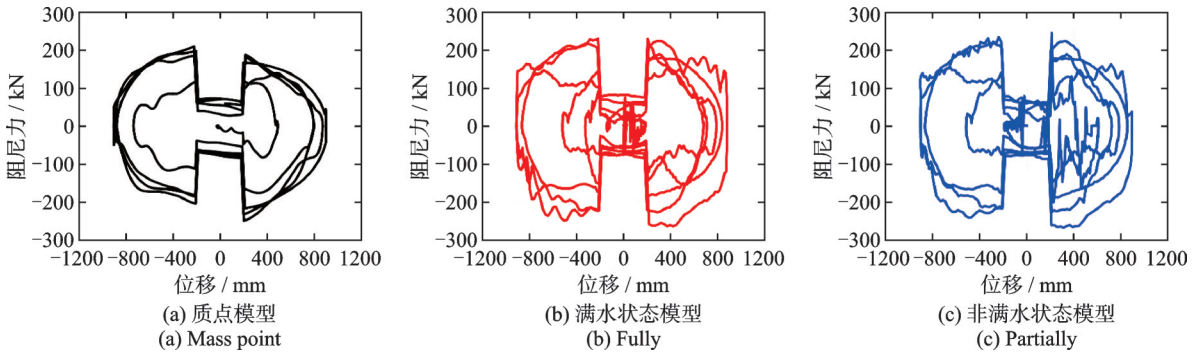


图 14 超大震下滞回曲线

Fig. 14 Hysteresis curves under super large earthquake

总体上看,在小震、中震、大震下,三个模型的最大阻尼力均出现在二级阻尼变级位上,但在超大震下,液体晃动强烈,液-固耦合模型最大阻尼力出现在二级阻尼范围的较大行程位置上,而质点模型仅在二级阻尼变级位上出现。

在液体非线性晃动作用下,相比质点模型较稳定的滞回曲线表现,在小震、中震下,液-固耦合模型滞回曲线在原点附近出现局部振荡现象,在大震、超大震下局部振荡现象扩展到了二级阻尼行程范围,表明液-固耦合模型滞回耗能能力较不稳定,在较大地震激励下难以充分发挥二级阻尼耗能能力。

### 2.3 基底剪力

水箱的最大基底剪力响应如图 15 所示。从图 15

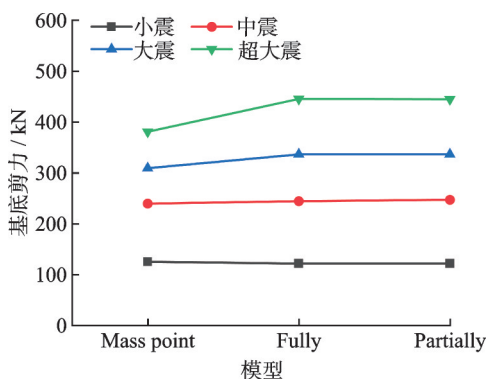


图 15 最大基底剪力

Fig. 15 Maximum base shear force

中可以看出,从小震到超大震下 Fully 和 Partially 两种液-固耦合模型最大基底剪力较小。在小震下,液-固耦合模型最大基底剪力略微小于质点模型,但随着地震激励作用的增大,液-固耦合模型最大基底剪力相对质点模型较大,其中 Fully 模型的最大基底剪力相对质点模型在中震下增大了 2.0%,在大震下增大了 8.8%,在超大震下增大了 17.0%。

### 3 结 论

(1) 在地震激励下,在液体晃动达到相对稳定状态前液体晃动效应对两级变阻尼 TMD 振动相位影响较大,在液体晃动稳定后影响较小。

(2) 地震激励的大小对考虑液体晃动作用的两级变阻尼 TMD 振幅影响较大,在较大地震激励下其振幅比不考虑液体晃动作用的振幅更大,但二级阻尼作用能够有效限制 TMD 的最大行程处于设计行程范围内。

(3) 在较大地震激励下,考虑液体晃动作用的两级变阻尼 TMD 相比不考虑液体晃动作用时的最大阻尼力大,并且液体晃动作用抑制了两级变阻尼 TMD 二级阻尼耗能能力的充分发挥。

(4) 两级变阻尼 TMD 液-固耦合模型比质点模型的基底最大剪力大,并且相对增幅随地震激励作用的增大而增大。

(5)为保证两级变阻尼 TMD 环形水箱的运行安全可控,建议 TMD 的设计行程需要考虑液体晃动作用的影响,并且也要考虑液体晃动作用对主体结构楼层剪力的附加影响。

#### 参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
- [2] 周云. 结构风振控制的设计方法与应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [3] 徐怀兵, 欧进萍. 设置混合调谐质量阻尼器的高层建筑风振控制实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 144-154.  
XU Huaibing, OU Jinping. Design method for wind-induced vibration control of high-rise buildings with hybrid tuned mass dampers[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 144-154.
- [4] ABRAMSON H N, CHU W H, KANA D D. Some studies of nonlinear lateral sloshing in rigid containers[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(4): 777-784.
- [5] FALTINSEN O M, ROGNEBAKKE O F, LUKOVSKY I A, et al. Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 407(1): 201-234.
- [6] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 381-387.
- [7] HOUSNER G W. Dynamic pressures on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1957, 47(1): 15-35.
- [8] CELEBI M S, AKYILDIZ H. Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(12): 1527-1553.
- [9] 沈国光. 矩形容器内流体晃动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1997, 12(3): 281-288.  
SHEN Guoguang. Numerical simulation of liquid sloshing in a rectangular container[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 1997, 12(3): 281-288.
- [10] 端木玉, 朱仁庆, 陈正云, 等. 不同液舱结构形式对晃动的影响分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2006, 21(6): 760-769.  
DUANMU Mu, ZHU Renqing, CHEN Zhengyun, et al. Analysis on sloshing of different ship tanks[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2006, 21(6): 760-769.
- [11] 岳宝增. 俯仰激励下三维液体大幅晃动问题研究[J]. 力学学报, 2005, 37(2): 199-203.  
YUE Baozeng. Three dimensional large amplitude liquid sloshing under pitching excitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(2): 199-203.
- [12] 管延敏, 叶恒奎, 陈庆任, 等. 三维带挡板箱体液体晃动数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 102-104.  
GUAN Yanmin, YE Hengkui, CHEN Qingren, et al. Numerical simulating liquid sloshing in 3D tanks with baffles based boundary element method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2010, 38(4): 102-104.
- [13] RAWAT A, MATSAGAR V A, NAGPAL A K. Numerical study of base-isolated cylindrical liquid storage tanks using coupled acoustic-structural approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 196-219.
- [14] RAWAT A, MATSAGAR V A, NAGPAL A K. Seismic analysis of steel cylindrical liquid storage tank using coupled acoustic-structural finite element method for fluid-structure interaction[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2020, 25(1): 27-40.
- [15] 齐玮. 基于 CAS 法的储液罐地震响应分析研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.  
QI Wei. Research on seismic response analysis of liquid storage tanks based on coupled acoustic-structural approach[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] MITTAL V, CHAKRABORTY T, MATSAGAR V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 84: 91-111.
- [17] 詹自敏, 邢皓. 储液容器地震响应的 CEL 和 SPH 法数值模拟对比研究[C]// 中国核科学技术进展报告(第四卷)——中国核学会 2015 年学术年会论文集第 2 册(核能动力分卷(上)). 2015: 156-161.  
ZHAN Zimin, XING Hao. Numerical study of seismic response of liquid-filled tank using CEL and SPH methods[C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol.4)——Proceedings of the 2015 Annual Conference of Chinese Nuclear Society, Volume 2 (Nuclear Power Volume (Part 1)). 2015: 156-161.
- [18] 王骁峰, 梁德利, 王喆, 等. 基于欧拉-拉格朗日方法的囊式贮箱流固耦合晃动问题的有限元仿真研究[J]. 强度与环境, 2016, 43(5): 24-29.  
WANG Xiaofeng, LIANG Deli, WANG Zhe, et al. Research on the simulation of the fluid-solid coupling of tank with a rubber bag sloshing by fem based on coupled Eulerian-Lagrangian[J]. Structure & Environment Engineering, 2016, 43(5): 24-29.

- [19] 王培. 橡胶隔膜贮箱流固耦合动力学数值仿真研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019.  
WANG Pei. Numerical simulation study on fluid-solid coupling dynamics of rubber diaphragm tank[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [20] 于强, 王天舒. 航天器贮箱内液体大幅晃动动力学分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(2): 131-138.  
YU Qiang, WANG Tianshu. Dynamic analysis of large-scale amplitude liquid sloshing in the spacecraft[J]. Scientia Sinica (Physics, Mechanics & Astronomy), 2019, 49(2): 131-138.
- [21] 于强, 王天舒. 充液航天器变质量液体大幅晃动的SPH分析方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(1): 22-30.  
YU Qiang, WANG Tianshu. SPH method for large-amplitude liquid sloshing with variable mass in liquid-filled spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(1): 22-30.
- [22] 马亮, 刘昊, 魏承, 等. 含隔板球形贮箱液体晃动激励频率影响分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 257-262.  
MA Liang, LIU Hao, WEI Cheng, et al. Effect of excitation frequency on the liquid sloshing in spherical tanks with baffle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 257-262.
- [23] 马骏骁, 马亮, 魏承, 等. 基于SPH方法的球形贮箱液体晃动动力学分析[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(1): 7-18.  
MA Junxiao, MA Liang, WEI Cheng, et al. Dynamic analysis of liquid sloshing in spherical tank based on SPH method[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(1): 7-18.
- [24] 曾滨, 王宇威, 潘钻峰, 等. 核电厂安全壳流固耦合动力响应分析[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 159-167.  
ZENG Bin, WANG Yuwei, PAN Zuanfeng, et al. The dynamic response of NPP containment considering the fluid-structure interaction effects[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(2): 159-167.
- [25] 刘汉武, 张华, 胡震宇, 等. 基于SPH方法航天器含贮箱液体晃动分离动力学研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(8): 938-947.  
LIU Hanwu, ZHANG Hua, HU Zhenyu, et al. Simulation analysis of liquid sloshing separation in spacecraft with tank based on SPH method[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(8): 938-947.
- [26] 张诗琪, 刘锦阳. 基于SPH的充液刚体刚-液耦合动力学建模[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(4): 86-94.  
ZHANG Shiqi, LIU Jinyang. Dynamic modeling for liquid-filled rigid body based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) method[J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(4): 86-94.
- [27] 区彤, 林松伟, 刘彦辉, 等. 景观塔两级变阻尼电涡流TMD减振分析与试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(13): 139-144.  
OU Tong, LIN Songwei, LIU Yanhui, et al. Analysis and experimental research on vibration reduction of landscape tower with two-stage variable damping eddy current TMD[J]. Building Structure, 2021, 51(13): 139-144.
- [28] 贺辉, 谭平, 刘彦辉, 等. 圆形高耸结构两级变阻尼TMD风振控制[J]. 振动工程学报, 2020, 33(3): 503-508.  
HE Hui, TAN Ping, LIU Yanhui, et al. Wind-induced vibration control of circular section high-rise structures employing TMD with two-stage damping level[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(3): 503-508.

第一作者: 区彤(1968—),男,学士,正高级工程师。

E-mail: ot@gdadri.com

通信作者: 骆杰鑫(1994—),男,硕士,工程师。

E-mail: luojx@gdadri.com