

## 附加 TL-PD 的钢框架振动台试验及简化分析\*

戴靠山<sup>†</sup>,毛日丰,王健泽,鲁正

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

**摘要:**为考察分析 TL-PD 在地震作用下的减震性能,并比较其与 TLD 和 PD 控制效果,将阻尼器安装在 5 层钢框架顶部,分别对有控和无控结构进行 3 条天然地震波作用下的振动台试验.试验结果表明:TL-PD 具有良好的振动控制效果,对各楼层均有一定的减震作用,位移均方根减震效果最优达到 63.2%,加速度均方根控制最优达到 51.0%.TL-PD 改善了 TLD 对激励敏感的特点,鲁棒性较好,但减震效果在一定程度上还受输入激励特性的影响.提出的 TL-PD 相对单纯 PD 装置对颗粒摩擦碰撞有一定的降噪作用.通过理论分析,基于经验模型,提出了 TL-PD 简化数值模型,可用于 TL-PD 初步设计的近似模拟.

**关键词:**振动台试验;结构振动控制;TL-PD;数值模拟

**中图分类号:**TU317.1;TU352.1

**文献标志码:**A

## Shaking Table Testing of a Steel Frame with TL-PD and Simplified Numerical Modeling

DAI Kaoshan<sup>†</sup>, MAO Rifeng, WANG Jianze, LU Zheng

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to investigate the vibration mitigation performance of the Tuned Liquid-Particle Damper (TL-PD) during earthquakes, a series of shaking table tests were conducted on a steel frame structure with different damping devices, including Tuned Liquid Damper (TLD), Particle Damper (PD), and TL-PD. During the testing, three ground motions were adopted as excitation inputs. Testing results show that the TL-PD has a good vibration suppression effect. The root-mean-square values of displacement and acceleration responses of the structure can be reduced by 63.2% and 50.5% at most, respectively. The TL-PD also shows a better robustness than that of the TLD, although the performance of the TL-PD is still influenced by the ground motion characteristics. Additionally, the TL-PD produced less noise than that of the PD in the tests. Based on empirical model, a mathematical model was developed to capture the behaviors of TL-PD in the preliminary design.

**Key words:** shaking table test; structural vibration control; Tuned Liquid-Particle Damper (TL-PD); numerical simulation

\* 收稿日期:2016-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208382), National Natural Science Foundation of China(51208382); 土木工程防灾国家重点实验室自主课题资助项目(SLDRCE14-B-02), State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering(SLDRCE14-B-02); 上海市国际合作项目(16510711300), International Collaboration Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(16510711300); 科技部重点研发计划政府间国际合作项目(2016YFE0105600), China National Key R & D Program, Special Key Program for International Cooperation(2016YFE0105600)

作者简介:戴靠山(1977-),男,同济大学副教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人: E-mail: kdai@tongji.edu.cn

结构振动控制是指在结构的特定部位装设某种装置,使结构在地震或风荷载作用下的动力反应得到合理控制<sup>[1]</sup>,从而降低结构疲劳损伤或防止结构在极端荷载下破坏.其中,调谐液体阻尼器(TLD)在建筑振动控制的实际工程中得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>.其机理是通过液体晃动产生动侧压力而控制结构振动,具有造价低、易安装、易维修、自动激活性能好的优点.但其只针对结构基频设计,工作阻尼低,减振频带窄,且鲁棒性较差.为提高 TLD 的工作阻尼,国内外学者提出了各种方案,如在容器中增加内置格栅<sup>[5-8]</sup>,或采用高粘性液体<sup>[9]</sup>.Xin<sup>[10]</sup>等人也基于传统 TLD 提出一种变密度调谐液体阻尼器(DVTLD),通过设置坡度箱底并铺细沙的方式以增加阻尼器的耗能效果与鲁棒性.近些年,颗粒阻尼技术(PD)在土木工程领域引起关注<sup>[11-12]</sup>,其耗能机理是利用颗粒间摩擦与冲击作用消耗系统振动能量,具有耐久性好、可靠度高、适用于恶劣环境的特点,且具有较宽的减振频带<sup>[13]</sup>.然而,单纯的颗粒阻尼器在使用中往往会产生一定的噪声,专门为其设计减噪装置则会带来额外的成本.

为发展更有效的被动吸能器,一些学者提出了新型装置,如陈政清等人<sup>[14]</sup>提出了电涡流阻尼器.本文结合调谐液体阻尼器(TLD)和颗粒阻尼器(PD)技术的特点,发展了一种新型阻尼器 TL-PD<sup>[15]</sup>,以期改善传统 TLD 低阻尼、鲁棒性差的缺陷.通过开展小型单自由度振动台试验,对 TL-PD 的减振机理进行了初步探索<sup>[15-16]</sup>,试验结果发现在简谐激励下 TL-PD 阻尼装置能有效减小主体结构的动力响应,且装置内部颗粒的运动对深水 TLD 有一定的改善作用,而液体对颗粒摩擦碰撞的降噪有一定的功效.为研究 TL-PD 对多自由度体系在随机激励下的振动控制效果,利用一 5 层钢框架大比例模型,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室分别对空框架(即无控结构)和安装不同阻尼器的受控结构进行 3 条天然地震波作用下的振动台试验.利用试验数据,分析 TL-PD 的减振特征;同时与单独分别安装 TLD,PD 的控制效果进行比较,探讨 TL-PD 在相同质量比下的控制优势.在试验基础上,通过理论分析,基于经验计算模型,提出针对 TL-PD 的简化设计步骤,通过数值模拟与试验结果对比,初步验证方法的可行性.

## 1 TL-PD 减震分析及简化设计步骤

TLD 根据液深与振动方向的尺寸之比,一般可

分为深水 TLD 和浅水 TLD.对于深水 TLD,根据 Housner 模型<sup>[17]</sup>,装置中只有部分质量液体参与晃动,减震效率受到影响.且作为调谐类阻尼器,一般 TLD 只对调谐频率下的结构振动控制效果显著.TL-PD 作为对传统调谐液体阻尼器(TLD)的一种改良,主要是通过调谐液体阻尼器装置中放置一定数量的颗粒,而颗粒的材料、大小、数量经试验总结进行设计<sup>[15-16]</sup>.颗粒的主要作用是为了激励未参与晃动的液体,同时颗粒阻尼器具有减振频带宽的特点,以弥补液体晃动在非调谐情况下耗能能力低的缺陷.

在 TL-PD 工作状态下单颗粒的受力分析如图 1 所示.颗粒受力分析见式(1)一式(3),由于受到浮力和流体阻力的作用,颗粒会做加速度减小的加速运动,且颗粒的加速度大小受液体与颗粒密度比( $\rho_l/\rho_p$ )、颗粒半径( $R_p$ )、材料摩擦因数( $\mu$ )、流体阻力系数( $C$ )等因素影响.颗粒之间碰撞耗能的大小取决于颗粒碰撞时的相对速度,而颗粒对液体的激励也依赖于颗粒(群)相对于液体的运动.故颗粒和液体之间的相互作用使 TL-PD 的减振机理比单独的 TLD 和 PD 的工作机理要复杂,目前大多是通过试验研究探讨其减震效果.

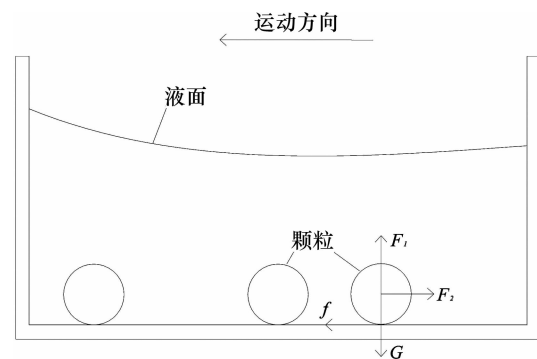


图 1 单个颗粒受力分析图

Fig.1 Force equilibrium analysis of a single particle

$$f = \mu(G - F_1) = \mu g V_p (\rho_p - \rho_l) \quad (1)$$

$$m_p a = f - F_2 = \mu g V_p (\rho_p - \rho_l) - 0.5 C \rho_l A_p v^2 \quad (2)$$

$$a = \mu g - \frac{\rho_l}{\rho_p} (\mu g + 0.375 C v^2 / R_p) \quad (3)$$

式中: $\rho_p, \rho_l$ 分别为颗粒和液体密度; $V_p, A_p$ 分别为颗粒的体积和投影面积; $\mu, C$ 分别为材料摩擦因数和流体阻力系数; $v, a$ 分别为颗粒的速度和加速度.

经文献<sup>[15]</sup>中开展小型单自由度振动台试验对 TL-PD 的减震效果影响因素的研究,颗粒的存在

对液体晃荡的调谐频率影响较小,颗粒材料密度对减震效果的影响最为显著,而颗粒大小和颗粒数量产生的影响较小.因此,在对 TL-PD 装置进行初步设计时,可以遵循以下步骤:1)根据结构基频与建筑空间要求,设计装置尺寸与液体深度,且液体深度按式(4)计算,满足调谐条件;2)颗粒材料优先选择密度较大材料,根据试验经验<sup>[15]</sup>填充率达 70%时减震效果较优;3)确定颗粒尺寸,使整体装置达到与主体结构的质量比在 1%~3%内.

$$2\pi f_w = \sqrt{\frac{\pi g}{l} \tanh \frac{h\pi}{l}} \quad (4)$$

式中:  $f_w$  为按照 TLD 推算的液体晃荡频率;  $h$  为液体深度;  $l$  为晃动方向的水平长度.

## 2 试验概况

### 2.1 模型及测点

试验模型采用一个 5 层钢框架进行振动台试验.模型总高度为 5 480 mm,其中柱尺寸为 1060 mm×180 mm×15 mm(长×宽×厚),采用 Q690 高强度钢板,在弱轴(定义为 X 轴)与强轴(定义为 Y 轴)方向结构整体表现出明显的方向性;楼板尺寸为 2000 mm×2000 mm×30 mm(长×宽×厚),采用 Q345 钢板,仅考虑结构自重,不增加附加质量;模型结构顶板预留 4 个直径 14 mm 的孔洞用于安装阻尼器.结构平面及立面尺寸如图 2 所示.

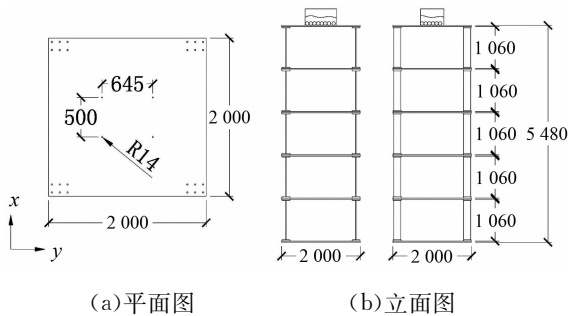


图 2 钢框架结构几何尺寸

实测纯框架模型(无控结构)总质量约为 5.65 t,经扫频测试,前 3 阶频率为  $f_1 = 0.98$  Hz,  $f_2 = 2.89$  Hz,  $f_3 = 4.55$  Hz,第 1 阶模态表现为弱轴(X 轴)方向的平动.在试验中,各层沿弱轴 X 向各布置两个水平加速度计和两个位移计,所以共设置 10 个加速度计,10 个位移计,具体布置如图 3 所示.

### 2.2 阻尼器设计

试验中阻尼器容器由 6 块有机玻璃板拼装制



图 3 试验现场及传感器布置图

Fig.3 Test set-up and measurement system design

成,选择厚度较大的板材,侧板刚度达到  $1.2 \times 10^3$  kN/m,故容器变形可忽略.按照上述的简化设计步骤,容器尺寸选择根据阻尼器质量比控制,同时综合考虑钢框架平面尺寸大小,容器最终选择为:580 mm×450 mm×800 mm(长×宽×高),底板:750 mm×900 mm×20 mm(长×宽×厚),设置与钢框架顶板匹配的螺孔用于固定,容器质量 48.8 kg,几何尺寸如图 4 所示.

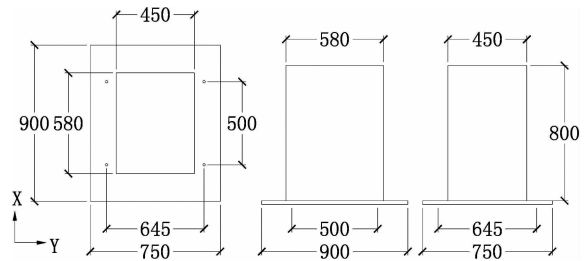


图 4 容器几何尺寸

Fig.4 Container dimensions

在确定容器尺寸的基础上,进一步对液体深度和颗粒进行设计.在本文中,为探究 TL-PD 振动控制效果及相同质量比下 TL-PD 相对于 TLD 和 PD 的控制优势,综合考虑 TLD 调谐液深<sup>[17-18]</sup>、PD 最优填充率<sup>[19]</sup>及 TL-PD 初步试验的结果<sup>[15-16]</sup>,颗粒选择为 51 mm 直径钢球,液体为水,所设计的阻尼器参数如表 1 所示.

表 1 各阻尼器参数  
Tab.1 Damper parameters

阻尼器	液深/mm	颗粒填充率/%	质量比/%
TL-PD <sub>1</sub>	220	70.4	1.7
TL-PD <sub>2</sub>	150	31.3	1.0
TLD	220	—	1.0
PD	—	82.2	1.0

表1中PD所选82.2%颗粒填充率靠近颗粒阻尼器最优填充率;TLD所选220mm液深为调谐液深,由式(4)计算得到.

### 2.3 输入激励及工况选择

依据实际工程情况,按7度抗震设防及IV类场地的要求,选用如下3条地震波:汶川波、日本311地震波和El Centro波,时间步长0.02s,各地震波时程加速度变化分别为0.05g、0.1g和0.15g,3条地震波的加速度时程与自功率谱如图5所示.本试验时间相似比为1,不考虑缩尺,地震波沿弱轴X方向输入,分别对空框架及安装如表1中所示的4

种阻尼器的有控结构进行试验,试验工况如表2所示.

表2 试验工况  
Tab.2 Testing cases

框架类型	加速度输入顺序	地震波输入顺序
空框架	0.05 g	汶川波
附加 TL-PD <sub>1</sub>	↓	↓
附加 TL-PD <sub>2</sub>	0.10 g	日本311地震波
附加 TLD	↓	↓
附加 PD	0.15 g	El Centro波

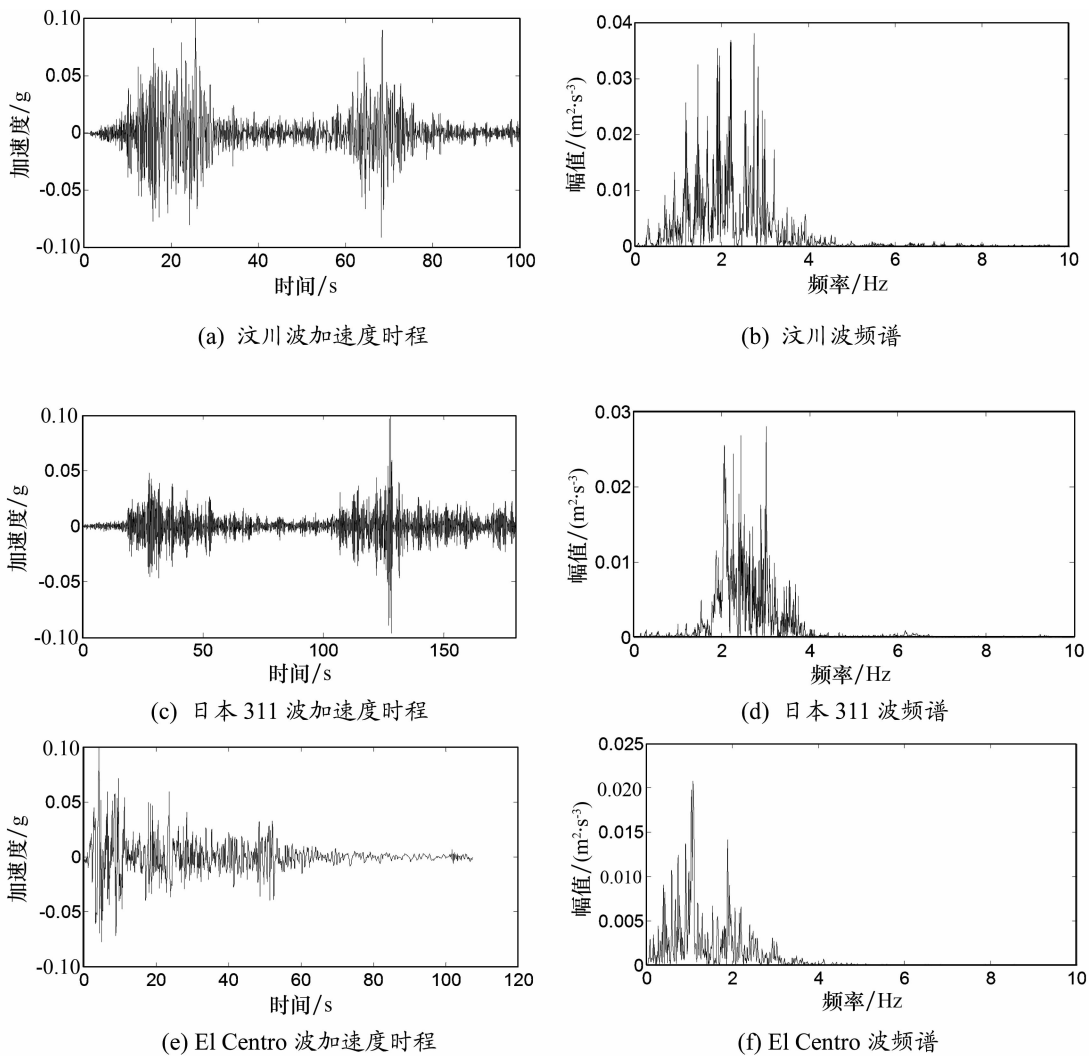


图5 地震波加速度时程与自功率谱(PGA缩比到0.1g)

Fig.5 Acceleration time histories and auto-power spectra of excitation inputs (PGA scaled to 0.1 g)

### 3 试验结果及分析

结构的峰值响应在抗震设计中是一个重要参数,而在评估结构能量损失时,还需要通过均方根响

应来表示随机变量的能量水平.因此,在对试验结果分析前,首先定义参数减震率,如式(5)和式(6)所示:

$$R_m = \frac{\max |X|_{\text{NODAMPER}} - \max |X|_{\text{DAMPER}}}{\max |X|_{\text{NODAMPER}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$R_d = \frac{\sigma_{\text{NODAMPER}} - \sigma_{\text{DAMPER}}}{\sigma_{\text{NODAMPER}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\max |X|_{\text{DAMPER}}$ ,  $\max |X|_{\text{NODAMPER}}$  分别为有无安装阻尼器时结构动力响应峰值;  $\sigma_{\text{DAMPER}}$ ,  $\sigma_{\text{NODAMPER}}$  分别为有无安装阻尼器时结构动力响应均方根值。

试验中结构几乎不发生扭转,因此取各层两个位移计均值和加速度计均值作为每层 X 向的实际响应值。

### 3.1 TL-PD 控制效果

根据表 3 中列出的各工况下 TL-PD<sub>1</sub> 试验数据可以发现,TL-PD<sub>1</sub> 能有效控制结构位移和加速度峰值响应。首先,位移峰值控制效果在 -7.8% ~ 23.7% 范围内,加速度峰值控制达到 1.9% ~ 29.7%;同时相对于峰值控制,TL-PD<sub>1</sub> 的均方根控制效果更明显,位移均方根减振效果为 6.4% ~ 63.2%、加速度均方根控制达到 17.3% ~ 51.0%。

图 6 中给出了输入峰值加速度为 0.10 g 时各地震波激励下,结构各层相对于振动台面的位移和加速度峰值曲线。可以看到,由于 TL-PD 设置在框架顶部,在 3 种不同频谱成分的地震波激励下,4-5 层的动力响应均有明显的控制效果,而对 1-3 层动力响应的控制受不同地震波的影响不同。在汶川波作用下,1-2 层的位移响应稍大于无控结构的位移响应,而在日本 311 和 El Centro 地震波作用下,1-3 层的加速度响应几乎与无控结构的响应相同。分析认为,由于 3 条地震波的频谱差异,其导致的结构响应不同,且阻尼器安装在结构顶部,对于底层结构响应控制效果不明显。图 7 为输入峰值加速度为 0.10 g 时各地震波激励下有无安装 TL-PD<sub>1</sub> 的框架顶层响应时程对比图,可以看到有控结构和无控结构在激励前期响应区别不大,经过一段时间的振动后液体充分晃动、颗粒充分摩擦耗能,TL-PD<sub>1</sub> 发挥减震作用,使结构响应迅速衰减。

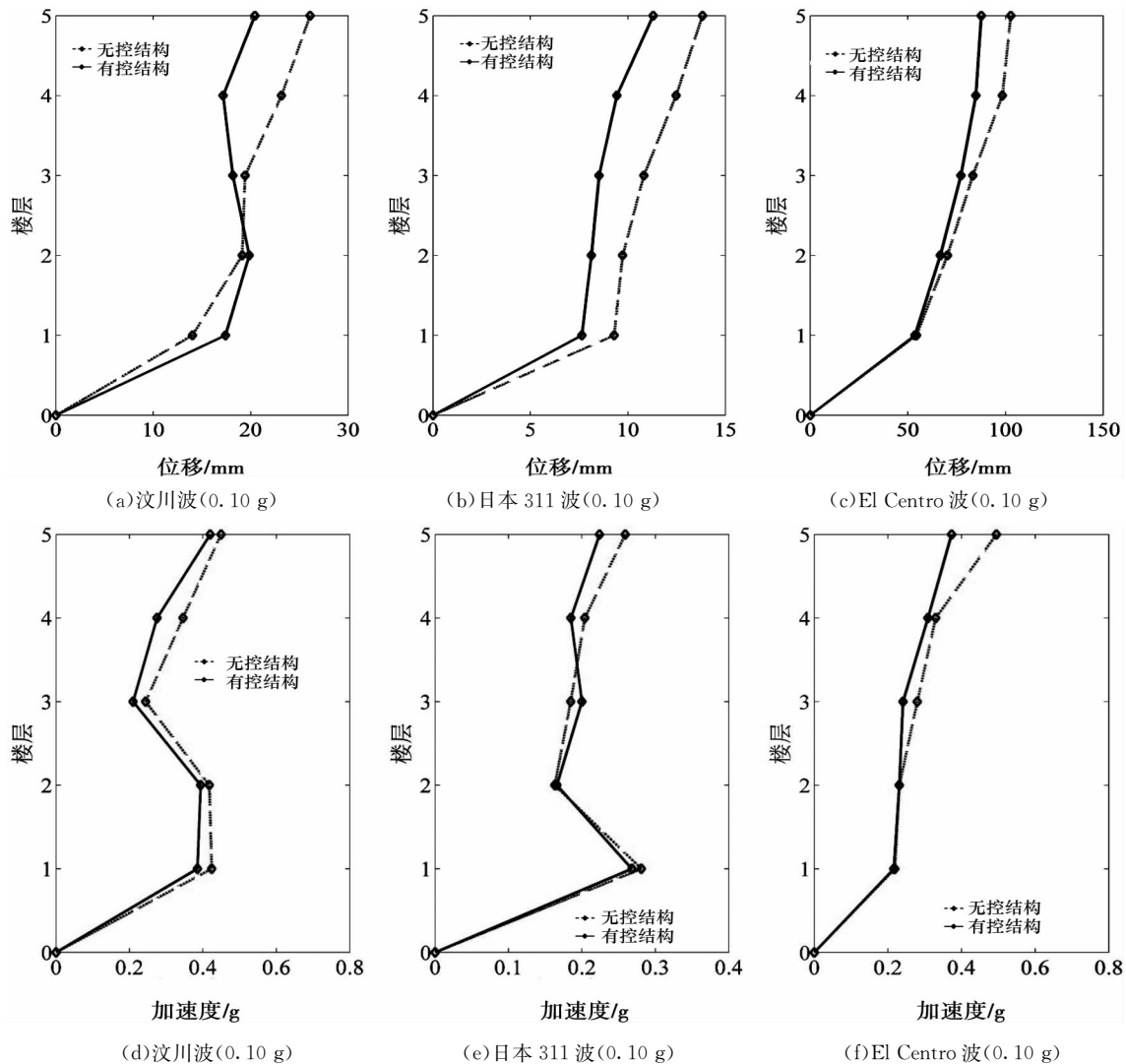


图 6 地震波激励下有无附加 TL-PD<sub>1</sub> 框架各层峰值响应曲线

Fig.6 The maximum dynamic responses at each floor for the cases with or without TL-PD<sub>1</sub> under 0.10 g excitations

由表3可以看到,不同激励下 TL-PD 的减震控制效果有一定的差异,El Centro 波激励下控制效果最好,而在汶川波与日本 311 波作用下效果小.其原因可通过对图5中3条地震波的频谱分析可知,El Centro 波的主要频带在 1.0 Hz 左右,靠近结构基频,有利于阻尼器发挥作用,而汶川波和日本 311 波的主要频带在 2.7 Hz 左右.由图7也可知,在输入相同加速度峰值的条件下,汶川波和日本 311 波较 El Centro 波激发的结构振动响应较小.此时液体晃动程度低、颗粒摩擦碰撞耗能少,因此控制效果相对于主要频率靠近结构基频的 El Centro 波较差.汶川波的加速度值在较长时间里比日本 311 波的加速度值大,而日本 311 地震波仅在 130 s 左右有个相对较大的脉冲,在其余时间内加速度数值相对较小;另外,汶川波的频带相对于日本 311 波较宽,在结构基频 1.0 Hz 附近的能量明显大于日本

311 波,这些可能是导致汶川波与日本 311 波作用下减震效果差别的原因.3 种地震波作用下 TL-PD 的减震效果的差别反映了其受输入激励影响的复杂性.

表3 附加 TL-PD<sub>1</sub> 结构顶部响应  
Tab.3 Dynamic responses at the roof of the structure for the TL-PD<sub>1</sub> case

地震波	PGA/g	减震率/%		减震率/%	
		位移 $R_m$	位移 $R_o$	加速度 $R_m$	加速度 $R_o$
汶川波	0.05	0.9	7.0	1.9	17.3
	0.10	20.8	35.2	6.5	19.3
	0.15	-7.8	6.4	3.4	18.2
日本 311 波	0.05	21.3	36.6	3.7	47.9
	0.10	18.9	52.2	13.4	47.8
	0.15	23.7	63.2	9.0	45.2
El Centro 波	0.05	20.0	57.9	29.7	50.2
	0.10	14.0	60.3	24.5	51.0
	0.15	10.6	60.5	28.9	50.5

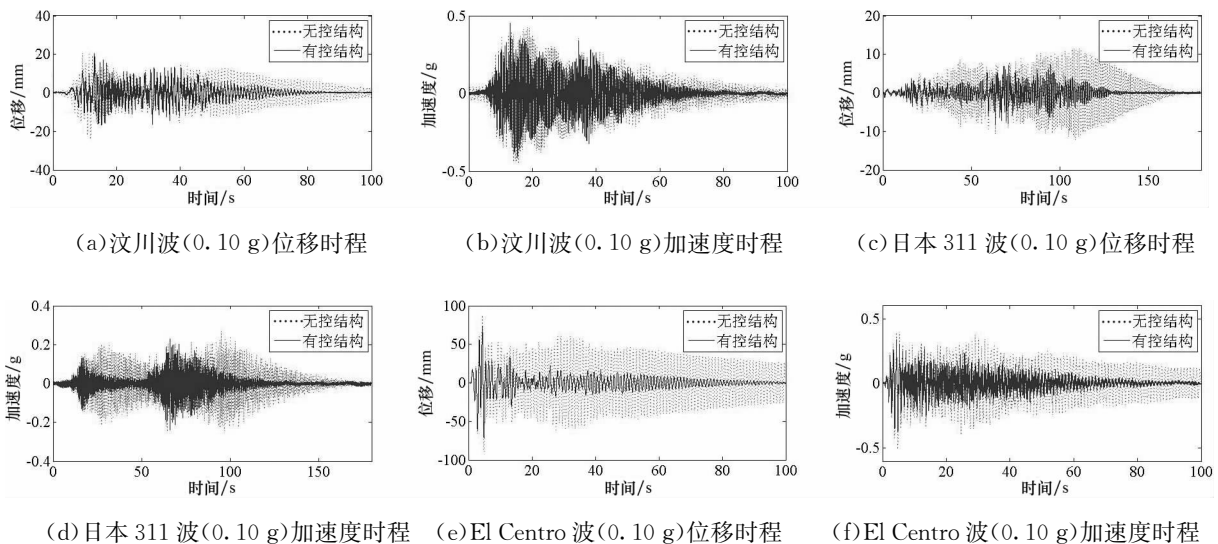


图7 有无附加 TL-PD<sub>1</sub> 框架顶层响应时程对比图

Fig.7 Roof dynamic response time histories for the cases with or without TL-PD<sub>1</sub> under 0.10 g excitations

### 3.2 TL-PD 与 TLD 和 PD 控制效果对比

为对比相同质量比下 TL-PD 与 TLD, PD 减震效果,选取表1中质量比均为 1% 的 TL-PD<sub>2</sub>, TLD 和 PD 3 种阻尼器试验数据进行分析.表4为3条天然(0.05 g, 0.10 g, 0.15 g)地震波激励下附加各阻尼器时框架顶层均方根减震率对比.由表4可知,在日本 311 波和 El Centro 地震波作用下,TL-PD 对位移均方根响应的控制优于 TLD 与 PD.不同于调谐类阻尼器,PD 阻尼技术受激励频率的影响较小,

PD 阻尼器在控制加速度响应上优于 TLD 与 TL-PD.

在大多数工况下,TL-PD 对位移和加速度均方根响应的控制皆优于 TLD.由此也可说明 TL-PD 实现了其设计初衷,即 TL-PD 作为对深水 TLD 的改良,其鲁棒性相对 TLD 稍好,由于颗粒的参与使其加速度控制效果相对同质量比的 TLD 提升显著.在汶川波作用下,发现 TL-PD 的减震效果是介于 TLD 与 PD 之间.然而,通过试验现场观察,将 PD

阻尼器安装于钢框架顶部进行试验时,在地震波作用下往往产生的噪声较大,如果专门为其设计减噪装置则会带来额外的成本.而 TL-PD 对颗粒摩擦碰撞有一定的降噪作用,液体的存在削弱颗粒摩擦碰撞强度的同时,阻隔了部分噪声的传播.综合来看,

TL-PD 在一定程度上改善了 TLD 的性能,同时对颗粒摩擦碰撞有一定的降噪作用.由于试验条件所限,该试验中 TL-PD 非最优参数,理论上最优 TL-PD 在相同质量比下应该具有较好的结构控制效果.

表 4 附加不同阻尼器结构顶层均方根减振效果

Tab.4 Vibration mitigation of roof dynamic responses with different dampers

地震波	PGA/g	TL-PD/%		TLD/%		PD/%	
		位移 $R_\sigma$	加速度 $R_\sigma$	位移 $R_\sigma$	加速度 $R_\sigma$	位移 $R_\sigma$	加速度 $R_\sigma$
汶川波	0.05	3.65	10.46	-1.29	0.50	41.73	35.73
	0.10	33.84	9.98	-1.04	5.60	38.03	42.71
	0.15	4.85	1.37	7.57	6.81	-1.66	37.57
日本 311 波	0.05	47.67	48.13	31.34	32.33	17.20	48.37
	0.10	56.23	49.23	44.12	46.89	31.22	52.26
	0.15	60.91	45.40	49.11	40.05	45.43	51.73
El Centro 波	0.05	59.19	49.68	50.61	38.40	54.89	59.55
	0.10	58.06	49.49	54.76	48.41	55.17	58.01
	0.15	58.37	46.14	58.01	51.87	53.42	57.05

#### 4 简化数值分析

对 TLD 数值模型的研究较为广泛,且得到较多的试验研究与实际工程的验证<sup>[20-23]</sup>.较为经典的表达是如图 8 所示,结构受到 TLD 的作用力  $F_L(t)$ .运动方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f(t) + F_L \quad (7)$$

式中: $M, C, K$  分别为质量、阻尼和刚度矩阵; $X, \dot{X}, \ddot{X}$  分别为位移、速度和加速度向量; $f(t)$  为外部激励荷载随时间  $t$  变化函数; $F_L$  为液体附加阻尼力.

根据已有研究<sup>[23]</sup>对深水理论的基本假定:1)水不可压缩、无粘滞且只作无旋运动;2)容器壁是刚性且与水间无摩擦和粘附作用;3)水的波浪运动是微幅和缓慢的.根据线性化伯努利方程可以得到矩形容器仅考虑第一振型时对结构产生的附加阻尼力  $F_L$  的表达式为:

$$F_L = -M_L [\ddot{x}_s + a_1 f_1 \ddot{\omega}_1(t)] \quad (8)$$

$$a_1 = 8/\pi^2 \quad (9)$$

$$f_1 = \frac{L}{\pi h} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (10)$$

式中: $L$  为振动方向尺寸; $M_L$  为液体质量; $\omega_1$  为水的一阶自振圆频率; $\ddot{x}_s$  为阻尼器所在处结构加速度.

因本文提出的 TL-PD 是基于传统 TLD 技术的改善,基于上述 TLD 数值模型表达,将颗粒的作用同样以附加力  $F_P$  的形式进行考虑.经文献<sup>[15]</sup>中对 TL-PD 开展的小型单自由度振动台试验研究,建立简化模型为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = a_1 F_L + a_2 F_P + f(t) \quad (11)$$

式中: $F_P$  为颗粒附加阻尼力; $a_1$  与  $a_2$  为试验总结得出的经验参数<sup>[18]</sup>, $a_1$  取 1.1, $a_2$  取 0.9.

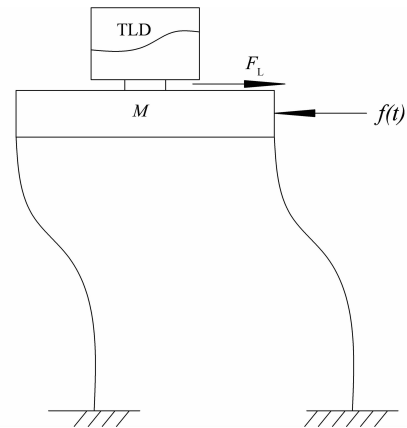


图 8 TLD 简化计算模型

Fig.8 The simplified mathematical model of TLD

尽管有很多学者通过理论与试验等手段对颗粒阻尼器(PD)的数值模型进行研究<sup>[24-26]</sup>,由于 PD 的耗能机理具有很高的非线性,较为精确的模拟还是存在一定的困难.研究表明,当弹性颗粒间、颗粒与腔体间的相对碰撞速度小于 5 m/s,碰撞耗能小

于颗粒碰前动能的1%<sup>[27]</sup>时,鉴于PD土木工程结构中应用多在低频低幅振动激励下,为简化分析,不考虑颗粒碰撞耗能,仅考虑摩擦耗能.闫维明等<sup>[28]</sup>针对颗粒的阻尼效果提出了一种计算方法:考虑到颗粒碰撞力大小随激励条件变化,在仅考虑其摩擦耗能下,PD的等效阻尼系数由下式估算:

$$c_d = 2\sqrt{M_{Pj}k_s\xi_{eq}/\delta_{ij}^2} \quad (12)$$

式中:  $M_{Pj}$  为第  $j$  个 PD 的颗粒质量;  $k_s$  为 PD 初始刚度;  $\xi_{eq}$  为等效阻尼比;  $\delta_{ij}$  为第  $j$  个 PD 设置位置处的相对位移振型向量.考虑到 TL-PD 中液体对颗粒的运动存在阻碍作用,给出 TL-PD 中由颗粒提供的附加阻尼力  $F_P$  建议取值如式(13)所示,其中  $\dot{\delta}(t)$  表示阻尼器位置的相对速度.

$$F_P = -c_d\dot{\delta}(t) \quad (13)$$

作为验证,本文在上述经验公式的基础上,通过编制多自由度体系模型,对附加 TL-PD 的结构在不同地震波激励下的动力时程响应进行数值模拟,并和试验结果进行对比.作为示例,图 9 为 PGA 为

0.1 g 时 El Centro 波激励下数值模拟与试验结构顶部响应时程对比图.对比可见,El Centro 波激励下的数值计算时程曲线和试验结果在 50 s 左右与试验结果有明显误差,原因在于 El Centro 波在 50 s 左右有一个较小的脉冲变化,而 TL-PD 简化计算模型较难捕捉低幅激励突变处的真实减震效果.当输入加速度峰值为 0.1 g 时,3 条地震波工况下,数值模拟结果与试验结果如表 5 所示.由表 5 可知,数值计算结果与试验结果基本吻合,其中对 El Centro 地震波工况的模拟结果偏差最大,位移峰值误差 6.85%,加速度峰值误差 13.51%,其他两条地震波激励下,模拟结果产生的位移峰值误差在 6% 以内,加速度峰值误差在 10% 以内,在工程应用的初步设计阶段可以接受.由此表明,在现有的试验结果下,本文提出的 TL-PD 的简化模型初步证明了其可行性.但由于 TL-PD 中液体与颗粒运动存在的复杂非线性,在其他不同特征的地震激励下,其适用性及精确的数值模型需要进一步研究.

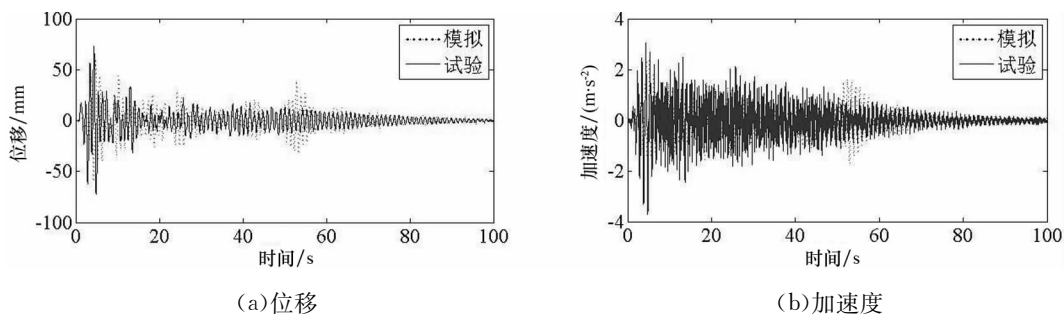


图 9 El Centro 波激励下结构顶部响应数值模拟与试验结果对比

Fig.9 Comparison between experimental and numerical results of the roof responses under the El Centro excitations

表 5 结构顶部响应数值模拟与试验结果对比

Tab.5 Roof dynamic responses of the structure with the TL-PD

地震波	位移峰值/mm		差值/%	加速度峰值/g		差值/%
	模拟	试验		模拟	试验	
汶川波	18.65	19.83	5.95	0.41	0.45	8.89
日本 311 波	7.64	8.06	5.21	0.19	0.21	9.52
El Centro 波	67.70	72.68	6.85	0.32	0.37	13.51

## 5 结论

通过对 5 层钢框架附加 TL-PD 及其他阻尼器的振动台试验,对 TL-PD 与 TLD,PD 的控制效果进行对比,结论如下:

1) 提出的新型阻尼器 TL-PD 在 3 种天然地震激励下均有一定的减震效果,位移峰值减震效果最优达 23.7%、加速度峰值控制最优达 29.7%;位移均方根减振效果为 6.4%~63.2%,加速度均方根控制达到 17.3%~51.0%.该阻尼器对结构整体具



有一定的减震效果,并对其所在的楼层及相邻楼层效果较为明显,故实际工程中可根据需要合理选择阻尼器安装位置。

2) 试验中有控结构和无控结构在激励初期响应区别不大,激励初期之后安装阻尼装置的结构响应较空框架减小程度较为明显。试验发现,TL-PD 控制效果随结构振动剧烈程度增加而增加,主要是强烈的结构振动加剧了液体晃动,也使颗粒摩擦耗能充分发挥。不同特性地震波作用对 TL-PD 的减震效果影响较为复杂。

3) 通过对比 TL-PD 与相同质量的 PD, TLD 阻尼器在相同激励下的减震效果,TL-PD 的工作阻尼优于 TLD,并在一定程度上改善了 TLD 对激励敏感的特点,且对颗粒摩擦碰撞有一定的降噪作用。

4) 发展了 TL-PD 简化设计步骤,利用经验模型开展的数值分析结果与 El Centro 地震波工况下试验结果吻合度相对较好,表明该计算模型的初步可行性,但 TL-PD 中液体与颗粒运动存在复杂的非线性,发展更为精确的数值模型需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震, 减振和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 2-12.  
ZHOU Xiyuan, YAN Weiming, YANG Runlin. Seismic base isolation, energy dissipation and vibration control of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 2-12. (In Chinese)
- [2] TAMURA Y, FUJII K, OHTSUKI T, *et al.* Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation [J]. Engineering Structures, 1995, 17(9): 609-621.
- [3] 瞿伟廉, 宋波, 陈妍桂, 等. TLD 对珠海金山大厦主楼风震控制的设计[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(3): 21-28.  
QU Weilian, SONG Bo, CHEN Yangui, *et al.* Design of wind-induced vibration depression with TLD for Jinshan Building in Zhuhai[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(3): 21-28. (In Chinese)
- [4] 钱稼茹. 用 TLD 减小电视塔动力反应的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(5): 32-39.  
QIAN Jiaru. Shaking table test study on a television tower equipped with TLD [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(5): 32-39. (In Chinese)
- [5] KANEKO S, ISHIKAWA M. Modeling of tuned liquid damper with submerged nets[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1999, 121: 334-343.
- [6] TAIT M J, EL DAMATY A A, ISYUMOV N, *et al.* Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(8): 1007-1023.
- [7] WARNITCHAI P, PINKAEW T. Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices[J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 593-600.
- [8] 谭平, 尹飞, 黄东阳, 等. 内置挡板调谐液体阻尼器的减振性能研究[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2011, 10(4): 41-45.  
TAN Ping, YIN Fei, HUANG Dongyang, *et al.* Study on performance of a new TLD with embedded baffles[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2011, 10(4): 41-45. (In Chinese)
- [9] FUJINO Y, SUN L, PACHECO B M, *et al.* Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(10): 2017-2030.
- [10] XIN Y X, CHEN G D, LOU M L. Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 4: 537-546.
- [11] 鲁正, 吕西林, 闫维明. 颗粒阻尼技术的研究综述[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 1-7.  
LU Zheng, LU Xilin, YAN Weiming. A survey of particle damping technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 1-7. (In Chinese)
- [12] 闫维明, 张向东, 黄韵文, 等. 基于颗粒阻尼技术的结构减振控制[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(9): 1316-1320.  
YAN Weiming, ZHANG Xiangdong, HUANG Yunwen, *et al.* Structure vibration control based on particle damping technology[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(9): 1316-1320. (In Chinese)
- [13] PANOSSIAN H V. Structural damping enhancement via non-obstructive particle damping technique[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114(1): 101-105.
- [14] 陈政清, 黄智文, 王建辉, 等. 桥梁用 TMD 的基本要求与电涡流 TMD[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(8): 6-10.  
CHEN Zhengqing, HUANG Zhiwen, WANG Jianhui, *et al.* Basic requirements of tuned mass damper for bridges and the eddy current TMD[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(8): 6-10. (In Chinese)
- [15] 戴靠山, 王健泽, 毛日丰, 等. 一种风电塔架减震耗能装置的振动台试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2014, 34(S1): 868-872.  
DAI Kaoshan, WANG Jianze, MAO Rifeng, *et al.* Shaking table test study on a new passive damper for wind turbine tower vibration control [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 868-872. (In Chinese)
- [16] 戴靠山, 王健泽, 毛日丰, 等. 新型风电塔架减震器的概念设计和试验初步验证[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S1): 90-95.  
DAI Kaoshan, WANG Jianze, MAO Rifeng, *et al.* Conceptual

- design and shaking table test of a new passive damper for wind turbine towers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47 (S1): 90–95. (In Chinese)
- [17] HOUSNER G W. Vibration of structures induced by seismic waves[J]. *Shock and Vibration Handbook*, 1961, 3: 1–32.
- [18] DOROTHY R, JINKYU Y, HANG Y, *et al.* Investigation of tuned dampers under large amplitude excitation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 328–340.
- [19] 周天平, 马崇武, 慕青松. 颗粒阻尼器最优填充率的实验研究 [C]//第22届全国结构工程学术会议论文集第Ⅲ册. 北京: 中国工程力学杂志社编辑部, 2013: 343–346.
- ZHOU Tianping, MA Chongwu, MU Qingsong. Experimental study on optimum packing ratio of particle damper [C]//The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics Engineering Mechanics Press. Proceedings of the 22nd National Symposium on Structural Engineering (Volume III). Beijing: The Chinese Engineering Mechanics, 2013: 343–346. (In Chinese)
- [20] 柳国环, 李宏男, 国巍. TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系的减振计算方法[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 31–34.
- LIU Guohuan, LI Hongnan, GUO Wei. An equivalent calculation method for analysis of structural vibration control of transforming TLD-structure to TMD-structure system[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 31–34.
- [21] SUN L. Semi-analytical modelling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing [D]. Tokyo: University of Tokyo, 1991.
- [22] TAIT M J. Modelling and preliminary design of a structure-TLD system[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10): 2644–2655.
- [23] 井秦阳, 李宏男, 王立长, 等. 大连国贸大厦高层水箱风振控制研究及应用[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(2): 111–118.
- JING Qinyang, LI Hongnan, WANG Lichang, *et al.* Wind-induced vibration control of International Trade Building of Dalian using tuned liquid dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2006, 26(2): 111–118. (In Chinese)
- [24] PAPALOU A, MASRI S F. An experimental investigation of particle dampers under harmonic excitation[J]. *Journal of Vibration and Control*, 1998, 4(4): 361–379.
- [25] LIU W, TOMLINSON G R, RONGONG J A. The dynamic characterisation of disk geometry particle dampers[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280(3): 849–861.
- [26] LU Z, LU X, JIANG H, *et al.* Discrete element method simulation and experimental validation of particle damper system[J]. *Engineering Computations*, 2014, 31(4): 810–823.
- [27] WU CH Y, LI L Y. Energy dissipation during normal impact of elastic and elastic-plastic spheres [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1): 593–604.
- [28] 闫维明, 许维炳, 王瑾, 等. 调谐型颗粒阻尼器简化力学模型及其参数计算方法研究与减震桥梁试验[J]. *工程力学*, 2014, 31(6): 79–84.
- YAN Weiming, XU Weibing, WANG Jin, *et al.* Experimental and theoretical research on the simplified mechanical model of a tuned particle damper, its parameter determination method and earthquake-induced vibration control of bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 79–84. (In Chinese)