

文章编号: 1673-2049(2008)01-0122-05

高层建筑地震反应的 TLD 振动控制

陈招平, 董平, 黄丽婷

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 利用调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper, TLD)对高层建筑地震反应进行振动控制研究。根据 Fujino 等提出的矩形 TLD 减振基本原理, 建立了 TLD 中液体动水压力的控制方程, 并采用有限差分法对矩形浅水 TLD 液体动水压力进行数值模拟, 然后根据 1 栋 91.0 m 的高层建筑实际情况提出几种 TLD 设计方案, 分别对其进行 TLD-结构地震作用下的动力分析, 比较几种方案的减振效果, 确定最佳方案及具体的结构振动控制设计。结果表明, TLD 系统对高层建筑地震作用下的加速度反应和位移反应均具有比较好的控制效果。

关键词: 结构控制; 高层建筑; 调谐液体阻尼器; 动力反应; 层间位移

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A

TLD Vibrational Controlling for Seismic Response of High-rise Building

CHEN Zhao-ping, DONG Ping, HUANG Li-ting

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The vibration control was presented for the high-rise building using tuned liquid damper (TLD) to reduce seismic response. Authors first formulated the governing equation of the movement of the water in the TLD based on the basic principle of the vibration suppression of the structure with shallow water rectangular TLD presented by Fujino. The finite difference method was used to simulate the dynamic liquid pressure. According to the present situation in the example of a 91.0 m high-rise building, authors then proposed several kinds of TLD design plans according to the conditions of the project, chosed the best one according to the dynamic response analysis of the TLD-structure system. The results show that the TLD system can efficiently reduce the responses of acceleration and displacement for high-rise building under the condition of seismic.

Key words: structure control; high-rise building; tuned liquid damper; dynamic response; story displacement

0 引言

地震荷载是高层建筑和高耸结构设计中不可忽略的重要荷载之一^[1]。随着高层建筑高度的不断增加, 质量也不断增大, 虽然抵抗地震的能力会加强, 却由于质量的过快增大而导致地震力的增长, 使其

十分不经济。这样结构振动控制孕育而生, 振动控制在机械工程、航海、航空等领域早有应用, 但直到 1972 年美国普渡大学 Yao 教授^[2]提出结构控制的概念后, 才在结构工程中引入控制理论和控制系统, 使结构和控制系统共同抵御外界动荷载的作用, 达到控制结构形态、减轻结构动力响应的目的,

收稿日期: 2007-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778079)

作者简介: 陈招平(1981-), 男, 江西高安人, 工学硕士, E-mail: zaopin008.student@sina.com。

因此称之为结构振动控制,或简称结构控制。

调谐液体阻尼器(TLD)是一种主要用于高层建筑和高耸结构振动控制的水箱,它利用结构上固定容器中液体的惯性和黏性耗能减小结构的振动,是一种被动控制装置。笔者利用 TLD 对高层建筑地震反应进行了振动控制研究。首先根据工程实例的实际情况提出几种 TLD 设计方案,然后分别对其进行 TLD-结构地震作用下的动力分析,比较几种方案的减振效果,选择最佳方案,最后针对这一方案做具体的结构振动控制设计,得出 TLD 系统对高层建筑地震作用下的加速度反应和位移反应均具有一定的控制作用,以及随着 TLD 中水的质量比的不断增大,TLD 对结构的振动控制也不断增强的结论。

1 水箱中液体运动控制方程

研究表明,当水深 h 与波长 λ' 的比值满足 $\frac{1}{25} \leq \frac{h}{\lambda'} \leq \frac{1}{2}$ 时,水箱中水的运动可用浅水波动理论描述。

此时波高与水深在尺寸上是一个数量级的,波动方程中非线性项不能忽略,水箱中水的运动是非线性的;另外,由于地震作用的剧烈性,势必造成 TLD 在大振幅条件下的运动,这时水波不再连续,开始破碎。由于考虑的矩形水箱中是浅水,根据 Fujino 的研究^[3]可知,矩形浅水水箱中水运动的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} + h\sigma \frac{\partial(\psi u)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (1 - T_H^2)u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial x} + gh\sigma\psi \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial x^2} \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial x} &= -\lambda u - \ddot{x}_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: η 、 u 分别为水箱中自由水面波高和水平方向自由水面质点速度; \ddot{x}_s 为 TLD 基底水平方向加速度,与 TLD 放置层加速度相等; g 为重力加速度; σ 、 ψ 、 T_H 可由式(2)确定

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \tanh kh / (kh) \\ \psi &= \tanh k(h + \eta) / \tanh kh \\ T_H &= \tanh k(h + \eta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: k 为波数; h 为水箱中水深。

式(1)中的 λ 是考虑了水箱底部边界层液体、水箱侧壁液体,以及自由表面液体作用的一个阻尼参数,其计算表达式为

$$\lambda = \frac{1}{\eta + h} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_1 v} (1 + \frac{2b}{h} + s) \quad (3)$$

式中: ω_1 为水箱中水的晃荡基本频率; v 为液体黏度; s 为考虑自由表面液体作用的系数,一般可取 1~2。水箱中水晃荡基本频率为

$$\omega_1 = \pi \frac{(gh)^{\frac{1}{2}}}{L} \left[1 - \frac{1}{6} \pi^2 \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: L 为水箱长度。

2 控制方程的有限差分法求解

由第 1 节的讨论可知,TLD 中液体晃荡的控制方程是一个关于 η 、 u 的非齐次非线性偏微分方程组,笔者采用有限差分法^[4]来求解,即分别采用有限体积法和 L-F 格式离散控制方程求解波高 η 。考虑到水箱对结构的减振力是由于水的晃动对侧壁的合动压力所引起的,因此,减振力应为

$$F_{TLD} = \frac{1}{2} \rho g b [(\eta_n + h)^2 - (\eta_0 + h)^2] \quad (5)$$

式中: η_0 、 η_n 分别为 $x=0$ 、 $x=L$ 处的波高。

3 计算实例及结构参数

计算实例为高 91.0 m、31 层的框架-核心筒结构,结构设计中引入被动控制装置 TLD,使其在地震作用下具有更好的耗能机制。实例计算中,将实际结构按结构分层进行简化^[5],将结构简化为 31 个质点。结构各层的质量及等效刚度见表 1。

表 1 结构参数

Tab. 1 Parameters of Structure

层数	层高/m	质量/ 10 ⁶ kg	等效刚度/ (10 ⁷ kN· m ⁻¹)	层数	层高/m	质量/ 10 ⁶ kg	等效刚度/ (10 ⁷ kN· m ⁻¹)
1	4.80	2.989	1.764	17	3.25	2.211	2.840
2	4.20	2.170	2.080	18	3.25	2.211	2.840
3	3.90	2.170	2.080	19	3.25	2.211	2.840
4	3.25	2.170	2.080	20	3.25	2.211	2.840
5	3.25	2.170	2.080	21	3.25	2.086	1.980
6	3.25	2.170	2.080	22	3.25	1.928	1.980
7	3.25	2.074	2.410	23	3.25	1.928	1.980
8	3.25	1.787	2.320	24	3.25	1.928	1.980
9	3.25	2.222	2.840	25	3.25	1.928	1.980
10	3.25	2.211	2.840	26	3.25	1.928	1.980
11	3.25	2.211	2.840	27	3.25	1.928	1.980
12	3.25	2.211	2.840	28	3.25	1.928	1.980
13	3.25	2.211	2.840	29	3.25	1.928	1.980
14	3.25	2.211	2.840	30	3.25	1.928	1.980
15	3.25	2.211	2.840	31	3.25	1.966	1.980
16	3.25	2.211	2.840				

利用 Matlab 软件自编程序对结构进行动力分析并计算得出其前 3 阶自振周期及频率,见表 2。

表 2 结构自振特性

Tab. 2 Free-vibration Characteristics of Structure

振型	1 阶	2 阶	3 阶
周期/s	2.66	0.92	0.55
频率/Hz	2.36	6.82	11.40

4 TLD 参数设计

要使得 TLD 发挥比较好的减振效果,就必须使水箱中的水尽可能地晃动起来,即要求水箱中水的晃荡频率与结构自振频率相等,此时效果最佳。另外,要使水箱中的水产生足够大的动水压力,水箱中的水必须都在动,这则要求水深不能太大,即要求水深与水箱长度的比值不能太大。对于高层建筑物这样一个庞然大物来说,如果水箱水的质量达不到一定的比例,减振效果也将甚微,所以质量比 μ 必须达到一定的要求。结构在安装 TLD 系统后在地震作用下的动力反应不仅与结构自身的质量、刚度、阻尼有关,而且还与 TLD 的设计参数有关^[6]。

(1)调谐比 β ,即水箱中水的晃荡基本频率 ω_1 与结构自振频率 ω_s 之比,而 ω_1 可由式(4)计算。

(2)水深比 Δ ,即水箱中水深 h 与水箱长度 L 的比值,是一个对 TLD 系统减振效果是否明显的关键控制参数。研究表明,当 $\Delta \leq 0.2$ 时,水箱中水的运动可以假设为浅水运动。早期的研究对 Δ 有比较严格的限制,一般要求 $\Delta \leq 0.1$,主要原因是早期研究是在小振幅条件下进行的,而现在要计算的是在地震条件下 TLD-结构系统的动力响应,所以 Δ 可适当放宽要求。

(3)质量比 μ ,即水箱中水的总质量与结构总质量之比,同样是一个重要的参数。按照一般的抗震理论,随着 TLD 水箱中水总的质量的增加,地震作用下的地震力也不断增加,对结构抗震不利,但由于水箱中水的运动可以吸收能量,质量比 μ 越大,吸收的能量越多,考虑楼层空间位置及水的总质量产生的地震力影响等因数,质量比 μ 一般可取的范围为 1%~3%。

综合考虑以上各因数就可以设计 TLD 系统,步骤如下。

步骤 1:确定结构的基本频率 ω_s ,并使水箱中水的晃荡基本频率 ω_1 与 ω_s 相等,即 $\beta = \omega_1 / \omega_s = 1$ 。

步骤 2:根据式(4)求出水的晃荡基本频率 ω_1 、结构的实际空间位置及施工等条件给定水箱长度

L ,然后由浅水条件下的极限水深比 $\Delta = 0.15$ 就可以确定水深 $h = L\Delta$ 。

步骤 3:根据步骤 1、2 的过程确定水箱另一方向的尺寸 B ,如果 2 个方向结构尺寸一样,由于两方向的频率相等,可以使 $B = L$ 。

步骤 4:计算单个 TLD 质量 $m_1 = \rho b L H$,给定质量比 μ ,就可以计算结构所需 TLD 的个数 $n = \frac{\mu m_s}{m_1}$ 。

该结构第 31 层为一宽敞的活动大厅,结构抗震设计中把该层作为 TLD 的放置层,水箱中的水用普通的生活用水。

为比较不同水深比、不同质量比条件下 TLD 的减振效果,分别取 $\Delta = 0.05, 0.08, 0.15, \mu = 1\%, 2\%, 3\%$ 进行 TLD 设计出的 TLD 尺寸见表 3。

表 3 矩形 TLD 的尺寸和数目

Tab. 3 Dimensions and Numbers of Rectangular TLD

Δ	L/m	B/m	h/m	h_s/m	不同质量比(%)下的 TLD 个数			层叠数
					1	2	3	
0.05	1.0	1.0	0.1	0.05	10 000	20 000	30 000	40
0.08	1.5	1.5	0.4	0.12	2 000	4 000	6 000	10
0.15	2.6	2.6	1.0	0.39	300	600	900	4

5 地震反应的 TLD 振动控制计算

5.1 计算方法

在相对地面的坐标系中,可以将结构简化成 n 个质点,如图 1 所示,利用 TLD 减振时,其 TLD 结构系统的运动方程为

$$\mathbf{M}_S \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_S \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_S \mathbf{x} = \mathbf{F} - \boldsymbol{\varphi} F_{\text{TLD}} \quad (6)$$

式中: \mathbf{M}_S 、 \mathbf{C}_S 、 \mathbf{K}_S 分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{F} 为外激荷载; F_{TLD} 为 TLD 中晃荡液体所产生的减振力; $\boldsymbol{\varphi}$ 为 TLD 设置向量。阻尼矩阵 \mathbf{C}_S 采用瑞利阻尼,可写为

$$\mathbf{C}_S = \alpha_1 \mathbf{M}_S + \alpha_2 \mathbf{K}_S \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \\ \alpha_2 &= \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: α_1 为 α 阻尼系数; α_2 为 β 阻尼系数; ξ_1 、 ξ_2 分别为结构第 1、2 振型的阻尼比; ω_1 、 ω_2 分别为结构第 1、2 阶振型自振圆频率。

5.2 参数优化

该实例建筑位于地震烈度为 7 度的地区,根据抗震规范^[7],7 度中震条件下地震波强度基准值为 $55 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在结构振动控制的计算中,输入

的地震动的最大值为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的 El Centro 波乘以地震动调整系数就可以得到 $\ddot{x}_{g\max} = 0.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

利用 TLD 控制结构的第 1 阶振型反应, TLD 水箱中的质量比 $\mu \leq 3\%$, 根据第 4 节 TLD 的设计得到的 TLD 参数, 利用本节介绍的方法对结构进行动力分析, 结构第 31 层在没有设置 TLD 与设

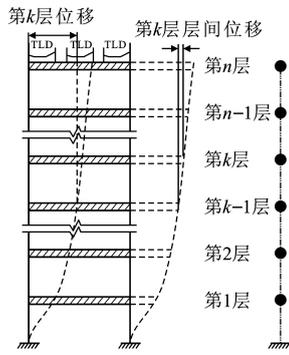


图 1 高层结构变形

Fig. 1 Structure Deformation of High-rise Building

置 TLD 的位移及加速度反应见表 4。

由表 4 可以看出, 随着 TLD 中水的质量比的增加, TLD 对第 31 层结构加速度反应和位移反应的控制作用也不断增大; 从不同水深比的计算结果可知, 随着水深比的增大, TLD 对结构反应的控制作用并没有明显增强的迹象, 相反, 当 $\Delta = 0.15$ 时, 位移和加速度反应都开始下降, 究其原因, 是水深比增大后, 部分水不能被充分激荡起来, 造成 TLD 控制作用减弱, 所以综合考虑以上因素以及 TLD 放置空间位置的限制, 可采用 $\Delta = 0.08$ 、 $\mu = 2\%$ 这一 TLD 设计方案。

5.3 效果分析

图 2、3 分别为输入 El Centro 地震波, 并将地

表 4 不同水深比、不同质量比条件下 TLD 减振率比较

Tab. 4 Comparisons of TLD Vibration Reduction Ratios Under Different Water Depth Ratios and Mass Ratios

水深比		$\mu = 1\%$				$\mu = 2\%$				$\mu = 3\%$			
		加速度反应		位移反应		加速度反应		位移反应		加速度反应		位移反应	
		峰-峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	减振率/ %										
0.05	无 TLD	1.00		0.070		1.00		0.070		1.00		0.070	
	有 TLD	0.85	15	0.068	3	0.80	20	0.063	10	0.09	10	0.059	16
0.08	无 TLD	1.00		0.070		1.00		0.070		1.00		0.070	
	有 TLD	0.88	12	0.065	7	0.85	15	0.060	14	0.80	20	0.053	24
0.15	无 TLD	1.00		0.070		1.00		0.070		1.00		0.070	
	有 TLD	0.88	12	0.068	3	0.91	9	0.064	8	0.82	18	0.060	14

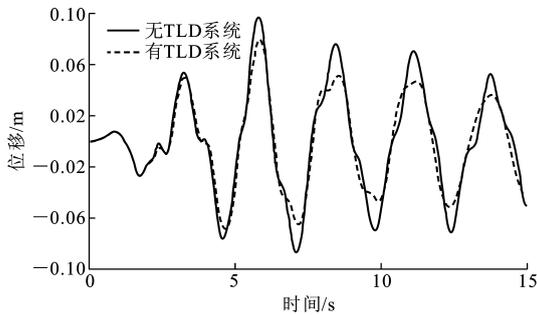


图 2 第 31 层位移反应时程曲线

Fig. 2 Time-history Curves of Displacement Response of the 31st Story

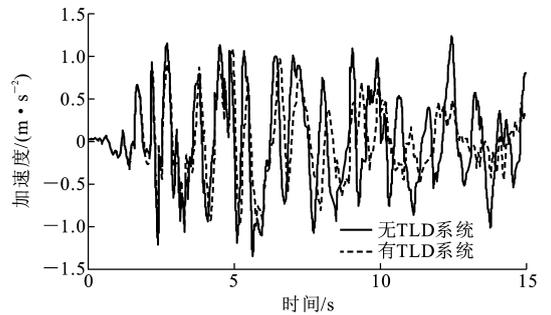


图 3 第 31 层加速度反应时程曲线

Fig. 3 Time-history Curves of Acceleration Response of the 31st Story

震动调整系数调整为 $\ddot{x}_{g\max} = 0.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 采用 TLD 控制结构第 1 阶振型, TLD 中的 $\mu = 2\%$ 、 $\Delta = 0.08$ 时, 结构第 31 层在安装 TLD 前后位移、加速度反应的时程曲线比较。

由图 2、3 可以看出, 结构第 31 层在安装 TLD 后, 在地震作用的开始阶段 (0~5 s), 由于水箱中的水还没有被激起, 所以减振作用比较小; 当结构被激起后, 结构第 31 层位移减幅最大可以达到 15% 以

上, 加速度减振幅度最大可以达到 25% 左右。

图 4 为结构第 2、10、20、30 层在安装 TLD 前后层间位移反应的时程曲线比较。

由图 4 可见, 受控后结构各层的最大层间位移也减小了许多, 最大减幅为 20%。对于高层建筑这样一个庞然大物而言, 在没有增加很多土建施工及投资的条件下, 就可以达到这样的控制效果是比较令人满意的。

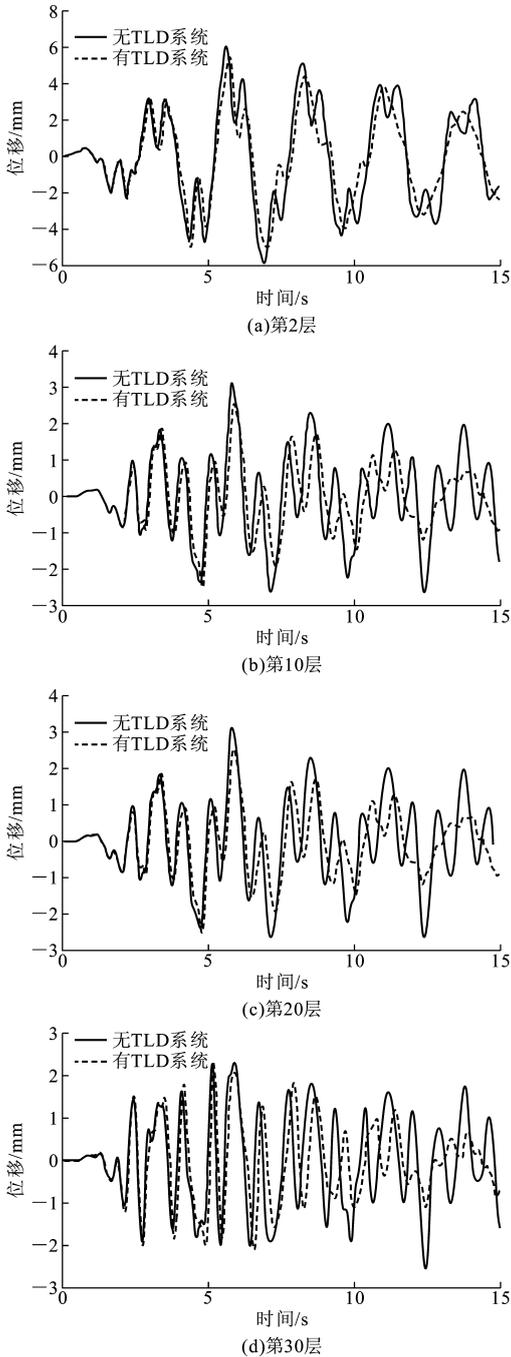


图4 层间位移反应时程曲线

Fig. 4 Time-history Curves of Story Displacement

6 结语

(1)随着 TLD 中水的质量比 μ 的增大, TLD 对结构的振动控制作用也不断增大,但由于结构空间位置的限制,只能选择有限的质量比 μ 来控制结构地震反应,本文中最终选择质量比 $\mu=2\%$ 。

(2)随着 TLD 中水深比 Δ 的增大, TLD 对结构的加速度反应和位移反应的控制作用并没有增大的趋势,究其原因主要是因为当水深比 Δ 达到一定程度时, TLD 中的水不能激起,发挥不了应有的作用,所以, TLD 设计中选择水深比 $\Delta=0.08$ 。

(3)通过实例计算分析可知,当结构自振周期大于 2 s 时,即使对长周期的高层建筑而言,采用 TLD 进行结构振动控制可以得到较好的减振效果,所需的费用不高且施工极其方便,因此,采用 TLD 控制高层建筑地震反应是一种既经济又有效的控制方式。

参考文献:

References:

- [1] 楼梦麟, 雍国柱, 李建元. 阻尼特性对组合结构地震反应的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 24-29.
LOU Meng-lin, YONG Guo-zhu, LI Jian-yuan. Influence of Damping Characteristics on Seismic Responses of Composite Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 24-29.
- [2] YAO J T P. Concept of Structural Control[J]. Journal of Structural Division, 1972, 98(7): 1 567-1 574.
- [3] SONG T T, DARGUSH G F. Passive Energy Dissipation System in Structure Engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [4] 陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LU Jin-fu, GUAN Zhi. Numerical Solution Method of the Partial Differential Equation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 刘大海, 杨翠如, 钟锡根. 高层建筑抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
LIU Da-hai, YANG Cui-ru, ZHONG Xi-gen. Seismic Design of the High-rise Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.
- [6] PRADIPTA B, MOHAN M. Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(5): 588-602.
- [7] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings [S].