

高位水箱改造成调谐液体阻尼器的设计与分析

田志昌,于亚东,孟亚楠,韩育民

内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010

摘要: 随着钢结构与绿色建筑快速发展,通常置于高层结构顶部的大容量水箱将导致钢结构的抗震性能严重降低。如果调整这些水箱尺寸,将其用作 TLD 设备,不仅可以降低水箱在受到横向荷载作用时对结构的影响,甚至可以缓解地震的影响。通过建立一个 14 层的高层钢结构建筑 Abaqus 模型,对 TLD 水箱在地震作用下的行为进行分析,根据不同参数的水箱的响应,得出了最优 TLD 水箱设计参数。

关键词: 高位水箱;调谐液体阻尼器;设计

中图分类号: TU972+.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)01-0075-04

The Design and Analysis on High Level Cistern to Tuned Liquid Dampers

TIAN Zhi-chang, YU Ya-dong, MENG Ya-nan, HAN Yu-min

School of Civil Engineering/Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract: With the development of green architecture, a cistern with large capacity on high position usually results in a negative impact on structural seismic resistance, but if these cisterns can be modified to tuned liquid dampers (TLD). A high-rise steel structure with 14 stories with this kind of tank was analyzed in this paper to introduce the action about the cistern TLD. A finite element fluid-structure interaction model was established for Abaqus software and the effects of different parameters and the optimal parameters about the tank-TLD were studied.

Keywords: High level dampers; TLD; design

随着轻质高强钢材的广泛应用,现代高层钢结构的刚度和阻尼通常较低,并且自重很小,在受到地震荷载影响时,结构通常难以满足安全性和舒适性要求^[1]。同时,由于用作太阳能储热水箱或消防水箱的高位水箱的存在,水箱容积较大且置于结构顶部,其质量不可被忽略,在发生地震时,将产生较大的惯性力,从而增大建筑的底部弯矩,导致其地震响应被放大^[2]。

TLD——即调频液体阻尼器,是一种利用水箱中的水晃动时产生的动水压力进行减振的被动控制装置^[3],它可把广泛存在于结构顶部的太阳能储热水箱或消防水箱设计成 TLD 水箱,在不影响水箱原使用功能的同时,消除结构在遭遇地震时水箱产生的不利影响,并起到抗震的作用^[4]。

本文将介绍怎样使用依靠液体振荡来吸收耗散主结构振动能量的调谐液体阻尼器技术来减少结构动力响应。

1 TLD 系统减振原理

固定调谐液体阻尼器(TLD)于结构顶部,当地震发生时,结构产生振动,从而 TLD 中的液体发生振荡。液体振荡时会对刚性的水箱壁产生动态的水压力,而水箱和结构之间刚结,动水压力被传播至结构,从而结构的运动受到其影响。水箱中液体的惯性力和耗能作用组成了这个对结构的作用,TLD 就是利用水箱中液体的阻尼和惯性达到了减振耗能的作用,从而减小结构在地震作用下的位移响应。水的阻尼十分微小,运动时产生的粘滞力可忽略不计,故在使用水作为 TLD 中的填充液体时,调谐液体阻尼器对结构的减振力由水运动产生的惯性力构成^[5]。由此可知 TLD 的运动方程:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) - F_{TLD} \quad (1)$$

TLD 系统力学模型如图 1 所示。

根据实际情况和 TLD 的基本原理,做出如下假设^[6]:

- (1) 水箱是刚性的,且忽略自重;

收稿日期: 2016-12-20

修回日期: 2017-01-03

基金项目: 包头市科技计划资助项目(2013J2001-2)

作者简介: 田志昌(1961-),男,教授,硕士研究生导师,主要从事工程防灾减灾方面的研究. E-mail:1435227030@qq.com

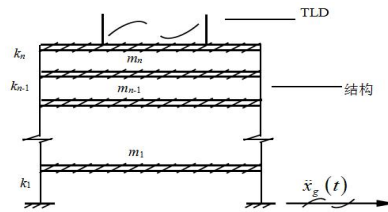


图 1 TLD 系统力学模型

Fig.1 The mechanical model of TLD

(2) 水箱中的液体不可被压缩且无旋，其粘性忽略不计；

(3) 水箱做小振幅运动。

由于高阶振型对结构的影响很小，在进行 TLD 设计时仅考虑液体晃动一阶振型的质量系数。

2 设计实例

选取一个 14 层钢结构框架建筑，层高 2.8 m。自重约 521.1 t，平面尺寸为 57.6 m×12 m。结构顶部设置有消防水箱。抗震设防烈度 8 度。使用 Abaqus 对结构建立三维分析模型并通过其 Lanczos 算法，计算结构的前 30 阶振型，前 3 阶振型见表 1。结构的基本信息见表 2。

表 1 建筑的前 3 阶振型信息

Table 1 Information in front of three orders on architecture

振型 Mode	圆频率 ω (rad/s) Frequency	周期 T(s) Cycle	X 向平动质量系数 Q factor at X	Y 向平动质量系数 Q factor at Y	Z 向扭转质量系数 Q factor at Z
1	3.062	2.0 523	0	0.7 927	0
2	3.488	1.8 004	0.7586	0	0
3	3.956	1.5 876	0	0	0.7 993

表 2 结构基本信息

Table 2 The basic structures

楼层号 Floor	层高(m) Height	楼层质量($\times 10^5$ kg) Story quality	X 向刚度($\times 10^5$ kN/m) Stiffness at X	Y 向刚度($\times 10^5$ kN/m) Stiffness at Y
1	2.85	4.4	9.506	5.901
2	2.85	4.4	6.090	3.697
3	2.85	4.4	5.354	3.431
4	2.85	4.4	4.866	3.318
5	2.85	4.4	4.493	3.225
6	2.85	4.4	4.194	3.141
7	2.85	4.39	3.912	3.038
8	2.85	4.39	3.700	2.962
9	2.85	4.39	3.502	2.883
10	2.85	4.39	3.315	2.795
11	2.85	4.39	3.114	2.695
12	2.85	4.39	2.882	2.565
13	2.85	4.39	2.543	2.380
14	2.85	4.39	1.832	1.855

选择薄弱方向进行单一方向的振动控制，将置于屋面的高位水箱改装为 TLD。

2.1 TLD 设计方案

使用 Abaqus 建立其二维有限元分析模型用于分析不同参数对 TLD 系统减振率的影响。地震作用下，结构的响应基于第一振型，所以在 TLD 设计时，只控制结构的第一振型响应。结构第一阶自振频率 0.4831 Hz。二维有限元模型见图 2。

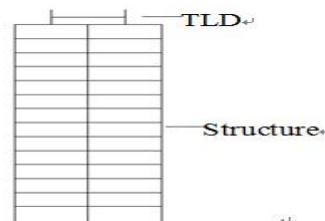


图 2 二维有限元模型

Fig.2 The 2D finite element model

为了控制结构的第一振型响应,选择矩形调谐液体阻尼器,其中 TLD 中液体的自振频率计算公式见式(2)^[7]:

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} (2n-1) \tanh \left[\frac{(2n-1)\pi h}{L} \right]} \quad (2)$$

式中 h ——水箱中水的深度; L ——沿地震荷载输入方向的水箱边长。

根据式 2 可知,水箱边长 L 约 2 m 至 3 m,此时,不仅可以满足结构抗震要求,还可满足日常生活保障。

根据式 2 设计了 12 种不同方案对不同参数对结构减振率的影响进行分析后得出最优设计。详细设计参数见表 3。

表 3 水箱设计参数
Table 3 The designed parameters of cistern

编号 No.	h/m	L/m	h/L	f_w	f	f_w/f	$M/(%)$
1	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	0.5
2	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	1.0
3	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	1.5
4	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	2.0
5	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	2.5
6	0.73	2.42	0.3	0.48731 Hz	0.48731 Hz	1.0	3.0
7	1.13	3.78	0.3	0.38985 Hz	0.48731 Hz	0.8	3.0
8	1	3.34	0.3	0.41421 Hz	0.48731 Hz	0.85	3.0
9	0.89	2.98	0.3	0.43858 Hz	0.48731 Hz	0.9	3.0
10	0.8	2.68	0.3	0.46294 Hz	0.48731 Hz	0.95	3.0
11	0.66	2.19	0.3	0.51168 Hz	0.48731 Hz	1.05	3.0
12	0.6	2.0	0.3	0.53604 Hz	0.48731 Hz	1.1	3.0

3 影响减振率因素分析

地震作用下结构顶部的位移是判断结构抗震性能的一个重要指标,故采用结构顶部位移为定义结构减振率的参数,则有:

$$\text{减振率} = \frac{(\text{无控位移绝对值} - \text{有控位移绝对值})}{\text{无控位移绝对值}} \times 100\%$$

3.1 质量比

为了研究质量比对 TLD 系统减振率的影响,控制水箱尺寸和频率不变,调正水箱质量,即选择 1~6 号水箱,在 EI-Centro 波作用下,质量比的变化对 TLD 减振率的影响见图 3。

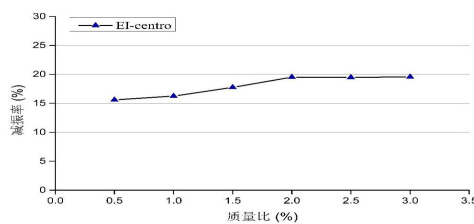


图 3 质量比的变化对减振率的影响

Fig.3 The effect of mass ratio on the damping rate

从质量比和减振率的关系曲线可以看出,随着质量比的增大,TLD 对结构减振作用亦随之提升。质量比在 0.5%~1.0%时,随着质量比的增大,减振率增长近于平缓;而当质量比从 1.0%增长到 1.5%时,相应的增长减振率增长迅速;当质量比达到 2%~3%时,TLD 的减振率保持在一个稳定的状态。由于过大的质量比会增加结构的恒荷载,并且不利于静力响应,所以不建议无限制的增大质量比。

3.2 频率比

选择两个强地震波(EI-centro、天津波)和一个人工波(上海波)以及 7~12 号水箱,取水箱的质量比为 3.0%,控制结构的第一振型,对比不同频率比对结构减振率的影响。结果见图 3。

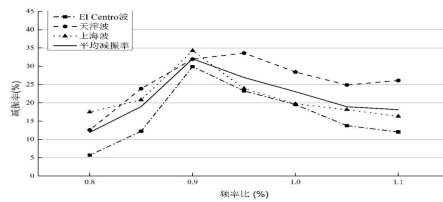


图 4 不同频率比对 TLD 减振率的影响

Fig.4 The effects of frequency ratios on the damping rate

由图 4 可以看出,水箱中水的晃动频率与结构第一阶自振频率的比值对 TLD 系统的减振率有明显的影响。在 EI-centro 波和上海波作用下,当频率比为 0.90 时,减振率曲线取得最大值;在天津波作用下,当频率比 0.9 时,减震效果最佳。从平均减振率曲线观察可知,随着频率比接近 0.9,减震率逐渐增大;随着频率比远离 0.9,减振率呈降低趋势。也就是说,当调谐液体阻尼器中的水的晃荡频率略小于结构第一阶自振频率时,TLD 对结构的减振效果达到最优。

由曲线看出,在对结构施加不同的地震荷载时,调谐液体阻尼器呈现出相同的减震规律。天津波的振动周期为 1.2 s, EI-centro 波的周期为 0.9 s, 上海波周期为 0.72 s, 因此,由于 TLD 中水的晃荡周期和天津波的自振周期最为接近,当作用天津波时,调谐液体阻尼器对结构的控制效果最佳。

3.3 最优方案

根据以上分析并结合各种因素,当质量比取 3.0%, 频率比取 0.95 时, TLD 系统对结构的减振性能最优,即 10 号方案可被认为是水箱尺寸的最优方案。在 EI-centro 波、上海波和天津波作用下,结构顶部位移时程曲线分别见图 5、图 6 和图 7。

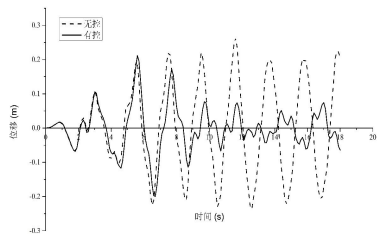


图 5 加载 EI-centro 波结构顶部位移曲线对比
Fig.5 Contrast of displacement curves loading EI-centro on the roof

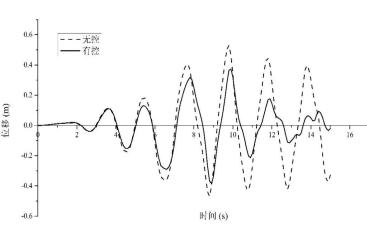


图 6 加载上海波结构顶部位移曲线对比
Fig.6 Contrast of displacement curves loading Shanghai wave on the roof

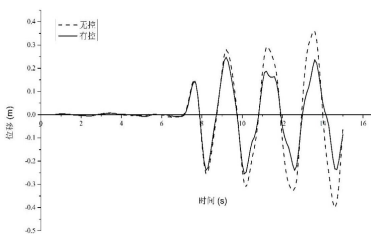


图 7 加载天津波结构顶部位移曲线对比
Fig.7 Contrast of displacement curves loading Tianjin wave on the roof

4 结论

通过数值分析可以发现将导致钢结构地震响应增大的高位水箱改装为调谐液体阻尼器是可行的。通过控制水箱与结构的质量比和频率比,其减振率通常可达到 30%。由图 5、图 6、图 7 可以发现,虽然地震波会影响 TLD 系统的减振率,当地震波频率和水箱频率相差较大时,TLD 系统减振率会有所降低,但是 TLD 系统仍然具有较明显的减震效果。

水箱中液体晃动产生的动水压力可用于抵抗包括钢结构在内的高柔轻建筑的振动。TLD 设备与太阳能储热水箱结合,更是响应了国家推广绿色建筑的政策,与传统 TLD 设备相比,这种利用高位水箱控制结构振动的方法更具有实用价值。

参考文献

- [1] 黄旭芒.建筑钢结构发展应用及其用材概述[J].现代冶金,2003,31(2):1-5
- [2] 田志昌,张 猛,张 晓.用于高层结构减振的高位 TLD 设计[J].内蒙古科技大学学报,2013,32(3):298-302
- [3] 田志昌,辛洪强,郑 果.矩形 TLD 深水模型公式推导与验证[J]. 内蒙古科技大学学报,2015,34(1):76-80
- [4] 刘云贺,张俊发.顶部设置水箱的建筑结构抗震研究[J].西安理工大学学报,1999,15(4):71-75
- [5] 贾 影,梁玉君,李宏男.调频液体阻尼器对建筑结构震动控制作用的研究[C]//2000 年辽宁省暨沈阳市工程结构学术会议,2000
- [6] 田志昌,郑 果,辛洪强.圆柱形 TLD 水箱反力解析解与精确数值解的比较[J].内蒙古科技大学学报,2014,33(4):390-393
- [7] Kim YM, You KP, Cho JE. The Vibration Performance Experiment of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid Column Damper[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006,20(6):795-805