

TLD 结构减震控制的数值分析^{*}

韩 军^{1,2} 李英民^{1,2} 刘立平^{1,2} 吕 晖

(1. 重庆大学土木工程学院,重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要: TLD 作为一种有效的被动耗能减震控制方法,其减震规律及其分析设计方法一直较受关注。以往的研究较多依赖于试验,并在试验的基础上发展了简化分析方法。但由于模型受限于有限的试验结果,其应用具有一定的局限性。近年来,随着计算机技术的发展,开展考虑流固耦合的 TLD 数值模拟分析研究成为可能。首先采用流固耦合分析方法对设置屋顶水箱 TLD 控制的高层框架结构进行地震反应分析,并与已有试验规律及简化方法进行了对比验证;初步探讨了流固耦合问题的计算及建模,并对其进行了验证,实现了考虑流固耦合的 TLD 数值模拟,总结了高层框架结构的减震规律;并对太原钢铁集团 150t 不锈钢炼钢主厂房进行了 TLD 减震效应分析和设计。结果表明,采用考虑流固耦合的 FSI 分析方法符合试验规律,物理意义更加明确、直观,用于 TLD 减震效应分析将是一种趋势,也是对现有分析方法的有益补充。

关键词: TLD;流固耦合;有限元;减震;ADINA

NUMERICAL ANALYSIS ON THE DAMPING EFFECT OF STRUCTURE WITH TUNED LIQUID DAMPERS SUBJECTED TO SEISMIC EXCITATIONS

Han Jun^{1,2} Li Yingmin^{1,2} Liu Liping^{1,2} Lü Hui

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technique for Construction of Cities in Mountain Area,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: TLD is an efficient passive control device for vibration energy-dissipating, whose rule and analysis design method have received much attention. Actually, the previous researches were mainly relied on tests and have got fruitful achievements in the damping of vibration rule. Though the simplified analysis method of damping of vibration effect has also been developed based on those tests, its application has been greatly limited due to the rough models. Recently, with the development of computer technology, it is likely to do research into TLD numerical modeling analysis of fluid-structure interaction, which would become a valuable supplement. The fluid-structure interaction of general structural analysis software ADINA is applied to conduct the seismic response analysis of fluid-structure interaction in a high-rise frame structure controlled by installing TLD of roof tank. Meanwhile, earlier test rules and simplified methods are also compared and checked in this paper. Besides, the calculation and modeling of fluid-structure interaction are initially explored and examined, whereby realizing the TLD numerical modeling of fluid-structures interaction as well as summarizing the TLD damping of vibration rule of high-rise frame structure.

Keywords: TLD, fluid-structure interaction, finite element, damping of vibration, ADINA

调谐液体阻尼器(tuned liquid damper,简称 TLD)是一种固定在结构楼层或屋面上的水箱被动耗能减振装置,其减震机理为 TLD-结构体系在受到地震或风荷载作用下发生振动,带动水箱一起运动,从而使水箱中的液体产生晃动,并引起表面的波浪,这种液体晃动和波浪对箱壁产生动水压力差,以及液体随结构一起运动引起的惯性力,合理设计水箱及参数即可构成建筑物的减振力。TLD 具有构造简单,安装容易,自动激活性能好,不需要启动装置,可兼作供水水箱使用等优点,近年来在风振控制中

得到了较为广泛的应用。但用于地震震动控制的研究及应用还不成熟,TLD 的减震规律及其分析设计方法还有待进一步研究。由于结构与水箱中液体的动力相互作用的复杂性,以往的研究较多依赖于试验,在减震规律方面得到了一些有益的结论,并在试验的基础上发展了减震效应简化分析方法。但由于

^{*} 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0765)。

第一作者:韩军,男,1978 年出生,讲师,博士。

E-mail:hanjun009@126.com

收稿日期:2009-07-28

简化模型受限于有限的试验结果,其应用具有一定的局限性。近年来,随着计算机技术的发展,开展考虑流固耦合的 TLD 数值模拟分析成为可能,这项研究将是对目前 TLD 设计方法及减震规律研究的一个有益补充。

本文对设置屋顶水箱 TLD 控制的高层框架结构进行考虑流固耦合效应的地震反应分析,并与已有试验规律及简化方法进行了对比验证。初步探讨了流固耦合问题的计算及建模,并对其进行了验证,实现了考虑流固耦合的 TLD 数值模拟,总结了高层框架结构的减震规律;对太原钢铁集团 150t 不锈钢炼钢主厂房进行了 TLD 减震效应分析和设计。

1 流固耦合分析模型

TLD 减振效应分析方法分为数值分析方法和实验验证方法两种。其中关键问题是水箱液体动水压力的计算,计算采用的理论基础为流体动力学,所有的数值计算方法都是在此基础上进行的简化或细化。数值分析方法大致分为三类:一是理论分析方法,根据流体动力学理论,直接对 Navier - Stokes 方程进行理论分析;二是集中质量法,即将液体简化为质量 - 弹簧体系;三是考虑流固耦合数值计算方法,即采用数值计算技术和有限元技术对 TLD - 结构体系进行分析。理论分析方法边界条件简单的情况下可以得到理论解,但求解过程复杂,当边界条件较复杂时,难以得出理论解;简化的集中质量法受限于有限的试验结果;而基于流固耦合技术的数值计算分析具有理论先进、物理意义明确等优点,可以采用实体有限元模型来模拟 TLD 的减振过程,除可以考虑小振幅的振动外,还能反映体系的非线性特性,是试验方法的有效补充,但流体的高度非线性计算复杂,要通过编程或专用计算软件来实现,对使用者计算要求高。

TLD 中涉及流体和固体两种不同的介质,在运动中两介质间存在耦合,很难从数学上得到精确的解析解。有效方法是采用数值方法进行分析,对固体结构采用有限元法处理,而对流体部分采用差分法、有限法、边界元法等方法。本文采用有限元结构分析软件 ADINA 进行考虑流固耦合 FSI (fluid - structure interactions) 分析^[1]的 TLD 减震效应分析。

1.1 FSI 分析模型

在 FSI 分析中,流体力作用于固体上,而固体的变形反过来改变流体域。对大部分的相互作用问题,计算域被分成流体域和固体域,它们在软件中将分别建模。相互作用发生在两个域的交接面上。这

两个模型也必须分别使用在 ADINA 和 ADINA - F 模块中可用的单元类型。FSI 分析的目的是通过耦合求解分别获得流体和结构的反应。结构模型是基于拉格朗日坐标系,位移是基本未知量;纯流体问题的模型使用欧拉坐标系;而对于 FSI 问题,流体模型必须基于任意拉格朗日 - 欧拉 (ALE) 坐标系,因为流固耦合面是变形的。流体的求解变量除了位移外还有流体变量,如压力、速度等。

一般耦合在两计算域的边界发生,应用在耦合边界上的基本条件是运动条件和动力条件:

$$\underline{d}_f = \underline{d}_s; \quad n \cdot \underline{\tau} = n \cdot \underline{\tau}_s \quad (1)$$

式中: $\underline{d}_f$ 和 $\underline{d}_s$ 分别代表流体和固体的位移; $\underline{\tau}$ 和 $\underline{\tau}_s$ 分别表示流体和固体的应力。流体速度在无滑动发生时定义为 $\underline{v} = \dot{\underline{d}}_s$, 有滑动时由 $n \cdot \underline{v} = n \cdot \dot{\underline{d}}_s$ 确定。流体和固体模型按下列方式耦合:耦合边界上的流体节点坐标由运动条件决定;其他流体节点的位移自动由程序确定,以保持初始的网格划分质量。程序通过求解用 ALE 表达的流体控制方程 (Navier - Stokes) 来获得。

根据动力条件,流体的压应力可沿着耦合边界积分得到流体压力,再作用到结构的耦合节点上去。其积分方程如下:

$$\underline{F}(t) = \int h^d \underline{\tau} dS \quad (2)$$

式中: h^d 为结构的虚位移。

流体模型和结构模型可以使用完全不同的单元和网格划分,因此两个模型在耦合边界上通常会不共结点位置。但建模时可尽量使其结点在相同位置,这样模型计算不易出现问题。

1.2 流固耦合系统有限元方程

令耦合系统的求解向量为 $X = (X_f, X_s)$, 其中 X_f 和 X_s 分别为定义在流体和结构结点上的流体和结构求解向量。 $\underline{d}_s = \underline{d}_s(X_s)$ 和 $\underline{\tau}_s = \underline{\tau}_s(X_s)$ 。流固耦合系统的有限元方程可表示为:

$$F(X) = \begin{bmatrix} F_f[X_f, \underline{d}_s(X_s)] \\ F_s[X_s, \underline{\tau}_f(X_f)] \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

求解方法采用适用于瞬态分析的直接求解法,流体应力和结构位移通过应力松弛因子和位移松弛因子加强收敛性。

1.3 参数设置

1.3.1 ADINA 结构模型

1) 积分方法为 NEWMARK 隐式积分法,阻尼采用瑞利阻尼;

2) 打开自动时间步,根据模型的收敛情况可不

断调整荷载步和荷载子步数;选取 FSI 选项;

3) FSI 边界设置:选择和液体接触的水箱壁为 FSI 边界,若为多个水箱应分别设置多个不同编号的 FSI 边界。

1.3.2 ADINA-F 流体模型

1) 在 ADINA-F 中选择分析类型为 TRANSIENT,在动力分析选项里打开自动时间步,根据模型的收敛情况可不断调整荷载步和荷载子步数,由于水箱中流体在地震作用下为高度非线性,一般可先设置较大子步数;

2) 在 FSI OPTION 设置中选择 FSI SOLUTION 为 DIRECT,设置收敛容差和力和位移松弛因子,鉴于土木工程结构内力计算精度要求不是很高,可适当将收敛容差设置较大如 0.05,可增强计算收敛性;

3) 迭代方法选用 NEWTON 法,最大迭代数和收敛容差可采取默认值,若计算不收敛可适当增大;

4) 边界设置:流体模型中需设置两种特殊边界,一种是自由表面边界,即将水的表面设置成自由表面边界,另一种是将与水箱接触的水边线设置为 FSI 边界,若为多个水箱则应分别设置多个不同编号的 FSI 边界,但 FSI 边界编号应和结构模型中设置的 FSI 边界编号一一对应,否则将出错。

2 TLD 减震效应算例分析

本节欲对设置 TLD 的高层建筑结构减震效应进行数值模型分析,为此建立三种模型,即 FSI 有控模型、非控模型和无控模型进行对比分析。FSI 有控模型即采用上述的 FSI 流固耦合分析;非控模型是将水箱中的水体看作一刚性质量块固定在结构顶部,只考虑水的质量不考虑水的动力作用;无控模型是屋顶未设置水箱即不考虑水的动力作用、也不考虑水的质量。在以往设计过程中很多时候采用的是非控模型,而水箱实际在地震过程中是起到减震作

用还是要放大地震作用,设计者并没有把握,故通过 FSI 模型与非控模型的对比计算分析可知设计中采用的计算模型是否安全;FSI 模型与无控模型对比可知结构屋顶设置 TLD 水箱的减震效果,为决策是否安装 TLD 水箱提供依据。

2.1 算例设计

算例以一 20 层高层规则框架结构为研究对象,结构计算模型参数如表 1 所示。由模态分析得结构无控模型的第一、二阶振型频率分别为 0.44 和 1.30,计算得瑞雷阻尼系数 $\alpha = 0.206$ 、 $\beta = 0.009$ 。水箱中的水计算参数如下:运动黏度为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,流体体积模量为 2.0×10^9 ,密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。为了考察不同质量比、频率比等对减震效果的影响规律,本文设计了如表 2 所示的 5 组算例,每一组算例包含前述的三种模型。算例 1~3 的水箱及水深相同但个数不同,考察的是不同质量比对减震规律的影响;算例 1、4、5 考察频率比对减震规律的影响。算例 1~5 模型输入地震波为 EL CENTRO 波,对于算例 1 还选择了 TAFT 波进行计算,以比较不同地震波对减震效果的影响。建立的 FSI 有限元计算模型如图 1 和图 2 所示。图 1 给出了在 ADINA 里建立的结构模型,图 2 给出了在 ADINA-F 里建立的流体模型。非控模型即是把流体单元换成平面实体单元,人为取较大刚度值;无控模型即是把水箱去掉,限于篇幅模型图略去。

表 1 结构计算模型参数

Table 1 Parameters for structural calculation models

层数 范围	构件 类型	截面尺寸/ mm	混凝土强 度等级	弹性模量/ MPa	钢筋配 筋率/%
1~10	梁	300×600	C30	3.00×10^4	1.0
	柱	850×850	C40	3.25×10^4	1.2
11~20	梁	300×600	C30	3.00×10^4	1.0
	柱	650×650	C40	3.25×10^4	1.2

表 2 算例设计

Table 2 Design of calculating examples

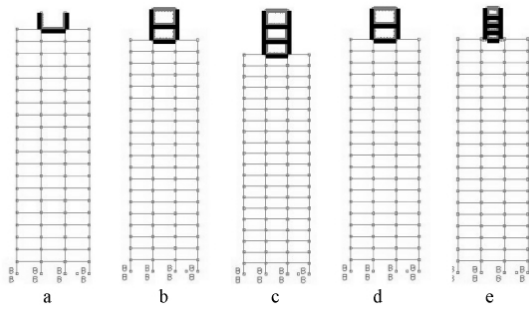
算例编号/组	水高 H/m	水箱宽 L/m	水箱个数	H/L	水晃动频率	结构第一频率 f_1	f_w/f_1	质量比/%
1	2	6	1	0.333	0.320	0.440	0.71	0.65
2	2	6	2	0.333	0.320	0.440	0.71	1.31
3	2	6	3	0.333	0.320	0.440	0.71	1.95
4	1	6	2	0.167	0.250	0.440	0.57	0.65
5	1	3	4	0.333	0.451	0.440	1.02	0.65

2.2 计算结果

对上述 5 组算例输入 EL CENTRO 进行 FSI 动力相互作用分析,图 3 给出了结构-流体体系某时刻的晃动示意图,从体系的地震时程反应动画可以看出,

水箱中的水晃动方向与结构的运动方向多数时刻是相反的,由此可知体系的减震力主要来源于水箱中水的反向动压力。但不同质量比和频率比的 TLD 水箱产生的动水压力是不一样的,表 3 给出了算例 1~5

顶层位移峰值、加速度峰值的减震率计算结果。

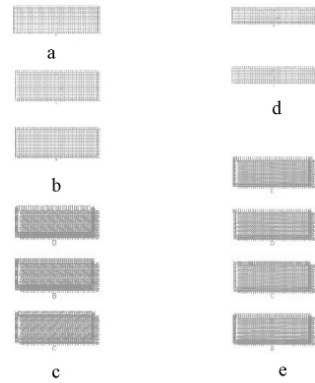


a—算例 1; b—算例 2; c—算例 3; d—算例 4; e—算例 5

图 1 算例 1~5 结构模型 (ADINA 模块)

Fig. 1 Structural models of examples 1-5 (module ADINA)

由表 3 可以看出,设置了 TLD 水箱后,FSI 模型的结构地震反应相对于非控、无控模型来说都要减小 10%~30%;非控模型的顶层位移减震率要高于无控模型,顶层加速度减震率要低于无控模型。由算例 1~3 可知,相同频率比时,质量比越大减震效果越好;由算例 1、4、5 可知,相同质量比时,频率比越接近 1 减震效果越好,算例 1 的位移减震率要大

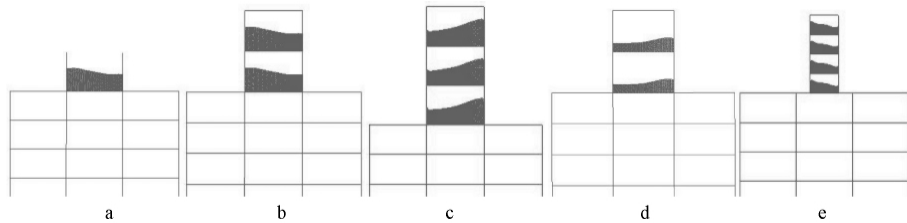


a—算例 1; b—算例 2; c—算例 3; d—算例 4; e—算例 5

图 2 算例 1~5 流体模型 (ADINA-F 模块)

Fig. 2 Fluid models of examples 1-5

于算例 4,而加速度减震率却稍稍低于算例 4。算例 1a 和算例 1 计算结果反映输入不同的地震波减震效果也不相同,TAFT 波作用下顶层位移减震率要高于 EL CENTRO 波,原因可能是 TAFT 波的卓越频率比 EL CENTRO 波的卓越频率更为接近结构的第一自振频率 0.44。



a—算例 1; b—算例 2; c—算例 3; d—算例 4; e—算例 5

图 3 算例 1~5 某时刻流体-结构体系晃动图 (EL CENTRO 波)

Fig. 3 Shaking of the fluid-structure system at a moment in examples 1-5 (Wave EL CENTRO)

表 3 算例 1~5 顶层位移、加速度计算结果 (EL CENTRO 波)

Table 3 Displacement and acceleration results of top floors in examples 1-5 (wave EL CENTRO)

算例 编号	FSI 模型		非控模型				无控模型			
			顶层位移		顶层加速度		顶层位移		顶层加速度	
	d/m	$a/(m \cdot s^{-2})$	d/m	减震率 / %	$a/(m \cdot s^{-2})$	减震率 / %	d/m	减震率 / %	$a/(m \cdot s^{-2})$	减震率 / %
1	0.293	4.745	0.366	19.9	5.220	9.1	0.350	16.3	5.500	13.7
2	0.290	4.415	0.376	22.9	5.370	17.8	0.350	17.1	5.500	19.7
3	0.278	4.076	0.381	27.0	5.466	25.4	0.350	20.6	5.500	25.9
4	0.318	4.680	0.366	13.1	5.220	10.3	0.350	9.1	5.500	14.9
5	0.289	4.396	0.366	21.0	5.220	15.8	0.350	17.4	5.500	20.1
1a	0.101	2.490	0.196	48.5	2.740	9.1	0.184	45.1	2.960	15.8

注:算例 1~5 采用 EL CENTRO 波输入;算例 1a 采用 TAFT 波输入。

2.3 结果评价

将以上 FSI 流固耦合分析的计算结果与已有试验规律进行对比,可以考察其计算结果的合理性。以上计算结果表明:1) 相同频率比时,质量比越大

减震效果越好;2) 相同质量比时,频率比越接近 1 减震效果越好;3) 输入地震波的卓越频率越接近结构的基本频率时,减震效果越好。而文献 [3-5] 中的已有试验结果验证了第 1、3 条,文献 [6] 验证了

第 2 条。

而以往的 TLD 减震分析常采用 HOUSNER^[9]提出的集中质量简化分析法。此方法是将水箱中的流体对水箱壁产生的动液压力分别用两个与箱体连接形式不同的等效质量的振动效应来模拟,其中一个质量用刚杆与刚性水箱壁连接,另一个质量用弹簧连接。其具体参数选取详见文献[7]。对算例 1 的情况采用集中质量简化方法计算考虑动水压力的模型,计算得顶层水平位移峰值为 0.363 6 m,不起减震效果,反而比无控模型的反应稍大;加速度峰值为 5.19 m/s²,减震率为 5.5%。图 4、图 5 分别给出了 FSI 耦合计算与集中质量法位移、加速度时程反应的对比。可见,集中质量法计算的位移、加速度时程与 FSI 法趋势基本相同,但峰值相差较大。因此,由少数单层或多层房屋试验结果总结得出的集中质量法分析模型用于高层建筑 TLD 减震效应分析可能精度较差。本文采用基于流固耦合 FSI 分析进行 TLD 减震效应分析应用范围将更为宽广。

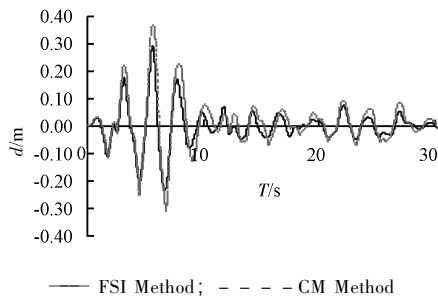


图 4 两种方法的位移时程对比

Fig.4 Comparison of the displacement time history of the top point of structure with two different methods

3 工程实例

大型炼钢厂房常设置有相当规模的水箱,在设计模型中常常将水箱中的水仅作为质量考虑来进行地震反应分析,顶部集中大质量将导致较大的地震效应(特别在高烈度区)。根据上述的 TLD 减震效应分析可知,将厂房平台上设置的水箱兼做 TLD 减

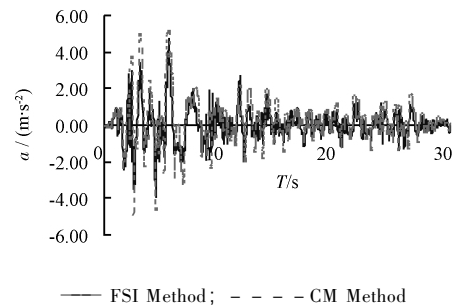


图 5 两种方法的加速度时程对比

Fig.5 Comparison of the acceleration time history of the top point of structure with two different methods

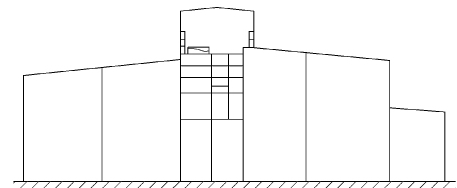


图 6 主厂房结构示意图

Fig.6 Elevation drawing of main workshop

震水箱将有效减小结构在地震中的反应。太原钢铁集团 150 t 不锈钢炼钢主厂房平面尺寸为 471 m × 305 m,进深为 27 ~ 18 m,开间为 42 ~ 21 m,水平向设有两道变形缝,主屋面标高 66.3 m;在每跨中均行使多台重型吊车;柱子底部采用格构式柱。在厂房的中间段炉子跨处为安全起见设计有安全水箱,水箱的初定尺寸为 98 m × 8 m × 3 m,水箱底标高为 49.30 m。水箱内水体约 1 800 m³,水重约 1 800 t。抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20 g,设计分组为第一组。此工程由中冶赛迪工程技术股份有限公司总承包,委托作者立项进行 TLD 减震效应研究。

为此,对表 4 所示的 6 种水箱设置方案进行减震效应分析。根据双频段选波法^[8]选用两条实际地震波和 1 条采用 ARMA 模型拟合相应规范反应谱的人工波对各模型进行多波动力时程分析。表 5 列出了各模型地震反应(顶点位移峰值)的平均值

表 4 水箱设置方案
Table 4 Layout Scheme of water tank

方案	方案基本情况	水晃动频率	基频与水晃 动频率比	水箱 类型	工艺难 易程度
方案 1	横向不分隔 8 m	0.265	1.302	接近浅水箱	容易
方案 2	横向分两隔 4 m	0.430	0.802	深水箱	较容易
方案 3	横向不分隔 8 m 竖向按 1.5 m 分隔	0.203	1.700	接近浅水箱	较复杂
方案 4	横向分两隔 4 m;竖向分三隔 1 m	0.325	1.062	浅水箱	复杂
方案 5	横向分四隔 2 m;竖向分三隔 1 m	0.571	0.604	深水箱	复杂
方案 6	横向分四隔 2 m;竖向 12 隔 0.25 m	0.344	1.003	浅水箱	太复杂

(下转第 74 页)

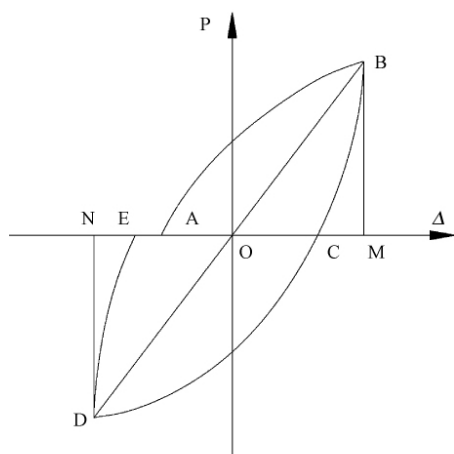


图7 等效黏滞阻尼系数 h_e 计算图

Fig. 7 Analytical sketch for equivalent viscous damping factor

力作用十分明显,套管不仅改变了柱的破坏形态,提高了柱的水平承载力,更重要的是提高了柱的延性和耗能能力。2)相同轴压比条件下,高强混凝土套管柱的延性略低于普通混凝土套管柱。3)套管混凝土柱在一定的轴压比范围内,随着轴压比的增大,柱的水平承载力提高,但延性有小幅度的降低。轴压比对套

(上接第59页)

其相对于非控模型的减震率。由表可知,1)方案6减震效果最好,方案1、3和4次之,方案2、5效果最差。2)非控结构与无控结构相比,顶部侧移增加6.56%。即水箱仅作为质量会增大地震作用。3)对于厂房结构受第一振型影响较多,采用单一TLD仍具有较好的减振效果。4)综合考虑设置方便等因素,建议采用方案1和方案4的设置方案。

表5 各方案结构顶点位移峰值及减震率

Table 5 Maximum top displacement and decreasing amplitude ratio of different Schemes

模型	顶点最大侧移/m	位移降低系数/%
无控结构	0.113 12	6.56
非控结构	0.121 06	0.00
方案1	0.103 8	14.19
方案2	0.111 3	7.92
方案3	0.108 4	10.45
方案4	0.099 9	17.46
方案5	0.119 4	1.36
方案6	0.119 4	23.57

4 结 论

本文在探讨了ADINA软件中进行流固耦合计算及建模方法的基础上,采用ADINA对设置TLD控制的高层框架结构进行了考虑流固耦合的地震反应分析,得出高层框架结构的TLD减震规律,即:相同频率比时,质量比越大减震效果越好;相同质量比

管混凝土柱延性的影响小于对无套管柱的影响。

参考文献

- [1] Mirmiran. Amir. A New Concrete-Filled Hollow FRP Composite Column [J]. Composites: Part B, 1996, 27 (B): 263-268.
- [2] Mirmiran. Amir. Design, Manufacture and Testing of a New Hybrid Column [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12 (1): 39-49.
- [3] 崔文涛. GFRP 套管钢筋混凝土柱轴压力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [4] 鲁国昌. FRP 管约束混凝土的轴压应力-应变关系研究 [J]. 工程力学, 2006, 23 (9): 98-103.
- [5] Shao Yutian. Fiber-Element Model for Cyclic Analysis of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (2): 292-303.
- [6] Zhu Zhenyu. Seismic Performance of Concrete-Filled FRP Tube Columns for Bridge Substructure [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11 (3): 359-370.
- [7] 陆铁坚. 钢-混凝土组合梁与混凝土柱节点的抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (1): 70-74.
- [8] 王清湘. 高强混凝土柱延性的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1995, 16 (4): 22-31.
- [9] 姜睿. 超高强混凝土组合柱抗震性能的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

参考文献

- [1] ADINA R&D. ADINA Theory and Modeling Guide Volume III: ADINA - F [R]. USA: 2001. 235-262.
- [2] Zhang H, Bathe K J. Direct and Iterative Computing of Fluid Flows fully Coupled with Structures [J]. Computational Fluid and Solid Mechanics, K. J. Bathe, editor, Elsevier Science, 2001.
- [3] 梁启智, 熊俊明, 黄庆辉. 调谐液体阻尼器对高层建筑和高耸结构动力反应控制研究综述 [J]. 世界地震工程, 2002, 18 (1): 123-128.
- [4] 屈成忠, 金载南, 赵岩松, 等. 调频液态阻尼器 (TLD) 系统在结构减振中的应用试验 [J]. 东北电力学报, 1999, 19 (4): 53-58.
- [5] 李宏男, 闫石, 贾连光. 利用调液阻尼器减振的结构控制研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15 (3): 99-110.
- [6] 魏春明, 金载南, 陈景彦, 等. MTLTD 系统的参数分析和优化 [J]. 东北电力学院学报, 2002, 22 (3): 41-44.
- [7] Housner G W. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers [J]. Bull Seism Soc. Am. 1957, 47 (1): 15-35.
- [8] 杨溥, 李英民. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标 [J]. 土木工程学报, 2000, 33 (6): 33-37.