**.** 

**硕士学位论文**

**(专业学位)**

**新型阻尼墙的试验与分析**

(上海市教委科研创新重点项目14zz035资助)

姓 名： 吴坦烨

学 号： 1530637

所在院系： 土木工程学院 建筑工程系

学科门类： 工程

专业领域：建筑与土木工程

指导教师： 孙飞飞 教授

副指导教师：周健 教授级高工

二〇一八年六月



A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Experiment and Analysis of New Type**

**Damping walls**

(Supported by Innovation Program of Shanghai Municipal Education Coommission No.14zz035)

Candidate: Wu Tanye

Student Number: 1530637

School/Department: College of Civil Engineering/

Department of Structural Engineering

Discipline: Engineering

Major: Architectural and Civil Engineering

Supervisor: Prof. Feifei Sun

Vice Supervisor: Prof. Senior Engineer Zhou Jian

June, 2018

**学位论文版权使用授权书**

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

**同济大学学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

地震灾害会造成惨重的人员伤亡和巨大的经济损失，这些损失很大程度上是由于建筑物的倒塌和破坏直接或间接造成的。随着科技和经济水平的不断发展，结构减震方面的研究受到越来越多的关注。利用消能减震构件来耗散地震能量是一种非常有效的减震方法，黏滞阻尼墙作为其中一种性能良好的减震构件，能够隐藏在建筑结构的墙体中，既能耗散地震能量又不影响建筑使用。因此对黏滞阻尼墙的性能研究具有较高的工程价值。

为了研究黏滞阻尼墙的动力性能，同时在已有构造的基础上，开发新型阻尼墙以满足更高的性能需求，本文主要进行了以下内容的研究：

1. 对国内外已有研究成果进行了综合评述，掌握了黏滞阻尼墙构造、工作原理以及力学模型。
2. 利用ARES旋转流变仪对六组不同配比的混合黏滞阻尼材料进行了动态性能测试，确定了合适的试验材料；利用3D打印机制作了黏滞阻尼墙模型，通过五组小振动台试验，测试了黏滞阻尼材料在材料层次和构件层次下表现出的性能指标的吻合情况。
3. 设计并进行了两组黏滞阻尼墙动力试验，测试了其耗能能力，探究了加载频率、位移幅值和速度幅值对黏滞阻尼墙性能的影响；提出了考虑加载历史的影响机制，建立了适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型；通过计算结果与试验结果的对比，验证了滞回模型的合理性。
4. 设计并进行了三组铅阻尼器往复加载试验，分析了其耗能特性，标定了基本特征参数；设计并进行了一组复合型铅-黏滞阻尼墙动力试验，通过与黏滞阻尼墙试验结果的对比分析，揭示了其小震下单独黏滞阻尼耗能以及中大震下共同耗能的特性。
5. 提出了复合减震性能曲线及相应绘制方法；对无工作间隙的复合减震系统分析了黏滞阻尼耗能与金属屈服耗能之间的复合减震效果；对有工作间隙的复合减震系统建立了双目标的减震性能设计方法，并选取相应算例加以验证。

最后，对进一步工作的方向进行了简要的讨论。

**关键词：**黏滞阻尼墙，动力性能，加载历史，滞回模型，复合型铅-黏滞阻尼墙，复合减震性能曲线，多目标减震设计方法

ABSTRACT

Earthquake disasters have brought heavy casualties and huge economic losses, which are caused directly or indirectly by the collapse and destruction of buildings. With the development of technology and economy, more and more attention has been paid to researches on seimic response control. Using energy dissipating components to dissipate seismic energy is a very effective method. Viscous damping wall, as a kind of well performing component, can be hidden in the structure walls and dissipate seismic energy without affecting the use of buildings. Therefore, researches on the performance of viscous damping walls are of great engineering value.

In order to study the dynamic performance of viscous damping walls and develop a new damping wall based on the existing construction, the following research contents were carried out in this paper:

1. Based on the comprehensive review of existing research results, the structural layout, working principle and mechanical models of viscous damping walls were summarized.
2. ARES rotational rheometer was used to test the dynamic performance of six groups of mixed viscous damping materials and determine the appropriate experimental material. Viscous damping wall models were manufactured by a 3D printer and they were tested on the small shaking table. Whether the performance index of the viscous damping material at material level and component level are the same can be validated through the shaking table test.
3. Two groups of dynamic experiments of viscous damping walls were designed and carried out to analyze their energy dissipating capacity. Influence of loading frequency, displacement amplitude and velocity amplitude on the performance of viscous damping walls was explored. Influence mechanism considering the loading history was put forward and a hysteretic model of viscous damping walls applicable to different load cases was obtained. The rationality of the hysteretic model was validated by comparing the formula curves with the experimental curves.
4. Three groups of cyclic loading experiments of lead dampers were designed and carried out to analyze their energy dissipating capacity and calibrate the basic characteristic parameters. Dynamic experiments of the composite lead damper - viscous damping wall were designed and carried out. The energy dissipating capacity was analyzed by comparing with the corresponding results of the viscous damping wall. The characteristics were revealed that the visous damping wall dissipated energy alone under small earthquakes, while the lead damper and the viscous damping wall dissipated energy together under moderate or severe earthquakes.
5. The composite damping performance curve was proposed and its corresponding plotting method was given out. For composite shock absorption system without any working gap, the composite damping effect between two dampers was analyzed. While for composite shock absorption system with working gaps, a double-target design method was put forward and a corresponding example was selected to varify the effectiveness of the design method.

Finally, the direction of further work was briefly discussed.

**Key words:** viscous damping wall, dynamic performance, loading history, hysteretic model, composite lead damper-viscous damping wall, composite damping performance curve, multi-target energy dissipation design method

目录

[第 1 章 绪 论 1](#_Toc517175419)

[1.1 课题背景及研究意义 1](#_Toc517175420)

[1.1.1 地震灾害 1](#_Toc517175421)

[1.1.2 消能减震技术 2](#_Toc517175422)

[1.2 黏滞阻尼墙研究现状和工程应用 4](#_Toc517175423)

[1.2.1 国内外黏滞阻尼墙研究现状 4](#_Toc517175424)

[1.2.2 黏滞阻尼墙相关工程应用 7](#_Toc517175425)

[1.3 铅阻尼器研究现状 8](#_Toc517175426)

[1.3.1 铅挤压阻尼器 9](#_Toc517175427)

[1.3.2 铅剪切阻尼器 10](#_Toc517175428)

[1.4 阻尼器混合布置的消能减震研究现状 11](#_Toc517175429)

[1.5 本文主要研究内容 13](#_Toc517175430)

[第 2 章 黏滞阻尼墙原理及阻尼材料试验 14](#_Toc517175431)

[2.1 引言 14](#_Toc517175432)

[2.2 黏滞阻尼墙构造及工作原理 14](#_Toc517175433)

[2.2.1 黏滞阻尼墙构造 14](#_Toc517175434)

[2.2.2 黏滞阻尼墙工作原理 15](#_Toc517175435)

[2.3 黏滞阻尼墙常用力学模型 15](#_Toc517175436)

[2.3.1 线性模型 16](#_Toc517175437)

[2.3.2 Kelvin 模型 16](#_Toc517175438)

[2.3.3 Maxwell 模型 17](#_Toc517175439)

[2.4 黏滞阻尼墙阻尼力的计算公式 19](#_Toc517175440)

[2.4.1 Miyazaki & Arima计算公式[27, 28] 19](#_Toc517175441)

[2.4.2 日本OILES公司计算公式[65] 20](#_Toc517175442)

[2.4.3 日本ADC公司计算公式[66] 21](#_Toc517175443)

[2.4.4 南京工业大学计算公式[67] 22](#_Toc517175444)

[2.5 黏滞阻尼材料 23](#_Toc517175445)

[2.5.1 黏滞阻尼材料特性及耗能机理 23](#_Toc517175446)

[2.5.2 黏滞阻尼材料ARES性能试验检测 24](#_Toc517175447)

[2.6 黏滞阻尼墙模型小振动台试验 32](#_Toc517175448)

[2.7 本章小结 34](#_Toc517175449)

[第 3 章 黏滞阻尼墙动力性能试验及理论分析 35](#_Toc517175450)

[3.1 引言 35](#_Toc517175451)

[3.2 黏滞阻尼墙试件设计及试验方案 35](#_Toc517175452)

[3.2.1 试件设计及制作 35](#_Toc517175453)

[3.2.2 试验加载方案 39](#_Toc517175454)

[3.3 试验结果 41](#_Toc517175455)

[3.3.1 试验现象 41](#_Toc517175456)

[3.3.2 试验曲线 41](#_Toc517175457)

[3.4 考虑加载历史影响的黏滞阻尼墙滞回模型 49](#_Toc517175458)

[3.4.1 黏滞阻尼墙基本力学模型确定 49](#_Toc517175459)

[3.4.2 黏滞阻尼墙加载历史影响机制 50](#_Toc517175460)

[3.4.3 弹性恢复力模型 51](#_Toc517175461)

[3.4.4 恢复力补偿模型 53](#_Toc517175462)

[3.4.5 黏滞阻尼力模型 54](#_Toc517175463)

[3.4.6 适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型 57](#_Toc517175464)

[3.4.7 稳态下统一阻尼力计算公式准确性检验 59](#_Toc517175465)

[3.5 本章小结 60](#_Toc517175466)

[第 4 章 复合型铅-黏滞阻尼墙试验及分析 61](#_Toc517175467)

[4.1 引言 61](#_Toc517175468)

[4.2 铅阻尼器力学性能试验 61](#_Toc517175469)

[4.2.1 试件设计及制作 61](#_Toc517175470)

[4.2.2 试验加载方案 64](#_Toc517175471)

[4.2.3 试验现象 64](#_Toc517175472)

[4.2.4 试验曲线及结果分析 65](#_Toc517175473)

[4.2.5 铅阻尼器阻尼力模型 67](#_Toc517175474)

[4.3 复合型铅-黏滞阻尼墙动力试验 69](#_Toc517175475)

[4.3.1 试件设计及制作 69](#_Toc517175476)

[4.3.2 试验加载方案 71](#_Toc517175477)

[4.3.3 试验现象 71](#_Toc517175478)

[4.3.4 试验曲线及结果分析 71](#_Toc517175479)

[4.3.5 复合型铅-黏滞阻尼墙阻尼力滞回模型 74](#_Toc517175480)

[4.4 本章小结 75](#_Toc517175481)

[第 5 章 基于铅-黏滞阻尼墙的复合减震性能分析 77](#_Toc517175482)

[5.1 引言 77](#_Toc517175483)

[5.2 单一类型阻尼器降低地震反应参数 77](#_Toc517175484)

[5.2.1 黏滞阻尼墙减震系统 78](#_Toc517175485)

[5.2.2 铅阻尼器减震系统 80](#_Toc517175486)

[5.3 铅-黏滞阻尼墙复合减震性能曲线 82](#_Toc517175487)

[5.3.1 无工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统 82](#_Toc517175488)

[5.3.2 有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统 84](#_Toc517175489)

[5.3.3 铅-黏滞阻尼墙复合减震性能曲线绘制方法 87](#_Toc517175490)

[5.4 无工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震效果分析 88](#_Toc517175491)

[5.4.1 固定铅阻尼器参数的复合减震系统影响分析 88](#_Toc517175492)

[5.4.2 固定黏滞阻尼墙参数的复合减震系统影响分析 91](#_Toc517175493)

[5.4.3 总附加阻尼比相同时复合减震系统影响分析 93](#_Toc517175494)

[5.5 有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙双目标减震设计方法 94](#_Toc517175495)

[5.5.1 双目标减震设计流程 94](#_Toc517175496)

[5.5.2 双目标减震设计算例 94](#_Toc517175497)

[5.6 本章小结 99](#_Toc517175498)

[第 6 章 结论与展望 101](#_Toc517175499)

[6.1 结论 101](#_Toc517175500)

[6.2 展望 102](#_Toc517175501)

[致谢 103](#_Toc517175502)

[参考文献 105](#_Toc517175503)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 109](#_Toc517175504)

# 绪 论

## 课题背景及研究意义

### 地震灾害

地震是威胁人类安全的主要自然灾害之一，它给人类造成了巨大的灾难。据统计[1]，全球每年发生地震约500万次，其中人们能够察觉到的有5万多次，能造成巨大破坏的有近千次，造成破坏性损失的强烈地震平均次数约为18次。地震不仅能够摧毁建筑、道路、桥梁、港口、大坝等重要结构，而且对人类赖以生存的生命线工程也将造成巨大的破坏，致使受灾地区的粮食、饮用水、电力、煤气供应、通讯等中断，给人类社会造成严重的人员伤亡和极大的财产损失[2, 3]。尤其是在经济发达、人口稠密地区，造成的损失更为巨大。例如：1994年1月美国洛杉矶地震，死亡55人，受伤7000余人，直接经济损失200亿美元[4]。1995年1月日本阪神地震，死亡5466人，受伤3万多人，数十万人无家可归，被毁房屋十万余栋，生命线工程和大量公共设施受到严重破坏，经济损失1000亿美元[5]。2004年12月，印尼苏门答腊西北近海地震并引发海啸，波及东南亚和南亚数个国家，据不完全统计，海啸死亡人数超过15万[6]。2010年1月12日海地发生7.0级地震，震中距离首都太子港约16公里，震源深度8公里，造成约20万人遇难[7]。2011年日本东北部海域发生里氏9.0级地震并引发海啸，造成死亡人数约为14万人，失踪人数约13万人，并引发了日本福岛核泄漏事件[8]。

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带的交界处，国内也纵横分布着多条地震带，地震发生较为频繁，是世界上遭受地震灾害比较严重的国家之一[9]。1976年7月28日，河北省唐山市发生7.8级强烈地震，为我国历史上罕见的城市地震灾害。集震区内几乎所有建筑物荡然无存，死亡24.2万人，受伤16.4万人，倒塌房屋530万间，直接经济损失54亿元，一座建设近百年，拥有105万人口的工业化城市毁于一旦[10]。1985年8月23日，新疆乌恰发生7.4级地震，人员伤亡323人，房屋损害约35万间[11]。2008年5月12日，四川汶川发生8.0级特大地震，造成约7万人死亡，约37万人受伤，1千多人失踪，1千多人被埋，受灾人口1000多万人，经济损失高达8452亿元[12]。2010年4月14日，青海玉树发生7.1级大地震，造成2千多人遇难，70人失踪，3500人在地震中致残[13]。

地震可造成惨重的人员伤亡和巨大的财产损失，而这些损失很大程度上是由于建筑物的倒塌和破坏直接或间接造成的。随着社会经济的发展，各国政府及科研人员对如何采取措施，最大限度地减轻地震灾害及由此造成的损失越来越重视。结构消能减震方面的新技术研究及应用已成为世界各国，尤其是地震多发国家和地区结构工程研究的新热点[14-17]。

### 消能减震技术

消能减震技术是把结构的某些非承重构件设计成消能构件，或在结构的某些部位设置消能部件[18-20]。在小震下，结构处于弹性状态，消能构件或消能部件能增大结构的刚度；当经受大风或者罕遇地震时，结构变形增大，消能构件或消能部件进入到塑性状态，同时产生较大的阻尼，消耗地震能量，从而减小主体结构的动力反应，避免主体结构产生大的塑性变形而遭受破坏[21]。

当地震出现时，减震结构的能量方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （1‑1） |

式中：

— 结构吸收的全部能量；

— 结构耗散的能量（动能和势能）；

— 结构自身阻尼消耗能量（低于5%）；

— 构件非弹性变形耗散的能量；

— 消能装置耗散的能量。

在上面的能量方程中，只是能量的转换，不能消耗任何能量，这部分只占总能量非常小的一部分；一般不超过总能量的5%；消能减震构件能消耗大部分的能量，因此能降低结构所要消耗的能量，从而使得主体结构得到充分保护。

由于能量耗散技术本身就具有很广的应用范围，经过40多年的时间，目前国内外已开发的各种类型的消能装置，可以大体分为4类：金属阻尼器、摩擦阻尼器、黏弹性阻尼器和黏滞阻尼器。其中黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器是利用黏性材料或黏弹性材料所制成的阻尼器，因此其性能与速度相关，因此称为速度相关型阻尼器，摩擦阻尼器和金属阻尼器的恢复力具有滞变特性，与速度无关，称为滞变型阻尼器。

1. 金属阻尼器

金属阻尼器主要是利用金属材料的弹性滞回变形来消耗能量，并且由于金属自身的良好的性能，在弹塑性滞回变形过程中会大量吸收外部输入的能量。已开发产品主要有：软钢屈服阻尼器，铅挤压阻尼器，环形钢棒阻尼器等[22]。

金属阻尼器是种具有优越的消能性能、成本低、构造相对简单、容易更换的消能减震装置。其性能相对稳定，基本不会受到温度的影响，并且长期使用的维护成本都较为经济。金属阻尼器不仅能够应用在隔震系统，作为其中的限位装置或者耗能单元，并且可以单独建筑结构里安装，布置在剪力墙的位置，或者其他变形相对比较大的位置充作耗能装置，向结构提供附加阻尼和刚度。

1. 摩擦阻尼器

摩擦阻尼器的工作原理就是利用两个固体之间的滑动所产生的摩擦力来耗散外部输入的能量的，是一种位移相关型的阻尼器。许多摩擦阻尼器是被动的装置，自身不能根据响应的需要来改变特性，它对建筑结构的控制程度是基本上完全受制于结构的运动。在大震下能滑动的摩擦阻尼器，在小震下可能不能滑动，所以在这种情况下，摩擦阻尼器是不具备小震下的减震性能，反之亦然。所以，摩擦阻尼器的性能和适用范围都有一定局限性。

对于摩擦阻尼器，更应重视的问题是它的长期维护和可靠性。结构的运动令摩擦阻尼器的频率会随着其黏性滑动而提高。与此同时，由于地震而滑动起来的摩擦阻尼器装置会发生退化，在地震过后更是会出现永久的移位，需要进行维修和纠正[23]。

1. 黏弹性阻尼器

黏弹性阻尼器是由黏弹性的材料和其周边的约束钢板组合而成，所用的黏弹性材料是一种高分子聚合物，高分子聚合物材料的分子链组成网络的压缩、错动和松弛来消耗外部输入的能量[24]。最早的黏弹性阻尼器是由美国3M公司研发的，包括两个T形约束钢板和一块矩形钢板，钢板间夹有黏弹性层。在反复的轴力作用下，钢板产生相对位移，使得夹在钢板间的黏弹性材料产生剪切变形，耗散了输入结构的外部能量。

黏弹性阻尼器没有明显的阀值，所以其在大震和小震下都有效果，黏弹性阻尼器不仅可以在抗震结构中使用，也可以在超高层结构中抗风上发挥作用。黏弹性阻尼器的耗能性能随加载的频率的增加而增加，随着温度的升高和应变幅值的增加而减少。在设计和使用时必须考虑设计温度，而在高频率和大应变下，随着越来越多的循环，黏弹性阻尼器的耗能能力将达到一个平衡值。在环境温度下和剪切变形的范围内黏弹性阻尼器是有优良的疲劳性能和稳定性，尽管循环次数会使耗能性能降低，但是影响不大。

1. 黏滞阻尼器

黏滞阻尼器的种类很多，依据阻尼力产生原理的不同可以归纳为两类：一类是剪切阻抗式，利用黏滞液体在敞开的容器中产生一定的位移来进行耗能的阻尼器，对于这类阻尼器，由于构件通过在黏滞流体中运动，使高黏度阻尼材料发生剪切变形，因此要求液体尽量黏稠以获得最大限度的阻尼；另一类是流动阻抗式，利用黏滞液体在封闭的容器中产生一定的流速来进行耗能的阻尼器，对于这类阻尼器，活塞要迫使黏滞液体在很短的时间内通过孔隙或缝隙，以产生很大的阻尼力，因此，对这类阻尼器内部工艺设计要求较高。

本课题所研究的黏滞阻尼墙是一种壁式的黏滞阻尼器，属于第一类剪切阻抗式阻尼器的一种。这种构件具有制作安装方便、装置材料普遍、能够吸收大量地震能量以及使用范围广等优点，是一种性能良好的消能减震部件。

## 黏滞阻尼墙研究现状和工程应用

### 国内外黏滞阻尼墙研究现状

黏滞阻尼墙是由日本学者Mitsuo Miyazaki等在1986年提出来的，随后许多学者对黏滞阻尼墙进行了一系列的研究[25, 26]，包括黏滞材料的力学性能和结构模型的振动台试验研究等。

1986年，日本学者Miyazaki等对一个安装有黏滞阻尼墙的5层钢框架结构缩尺模型进行了振动台试验研究[27]，模型结构总重为1t。试验表明，当模型没有设置黏滞阻尼墙时，模型的阻尼比为0.02，基本周期为0.376s；当安装黏滞阻尼墙后，模型的阻尼比为0.32，基本周期为0.286s，结构的动力反应降低到原来结构模型的66%。

1988年，日本的Arima等对4层足尺钢框架结构模型进行了振动台试验[28]，结构模型自重为102.8t，试验中对钢框架在纯框架结构、安装偏心支撑、安装黏滞阻尼墙、安装铅橡胶隔震器等多种工况下进行了同一条地震波输入的对比研究。同时他们还对黏滞阻尼墙单元在各种温度条件下进行了试验研究。试验表明，黏滞阻尼墙吸收地震能量的效果是速度梯度、位移、温度、频率等变量的函数。从这次试验和1986年Miyazaki的模型振动台试验可以得到以下结论：1）黏滞阻尼墙是很有效的消能器，能够大大降低结构的地震反应；2）黏滞阻尼墙在小震下也能起到作用；3）强震下黏滞阻尼墙的减震效果更加有效；4）安装有黏滞阻尼墙的建筑结构，在地震作用下结构的加速度反应和顶点位移能降低30%～50%。

1992年，日本的M.Miyazaki和Y.Mitsusaki设计了世界上第一幢用黏滞阻尼墙减震耗能的建筑SUT-Building[29]，他们对即将要安装的黏滞阻尼墙进行了动力试验测试，对结构进行了地震时程分析，动力方程中增加了黏滞阻尼墙的阻尼矩阵，同时也考虑了阻尼材料的非理想牛顿黏滞材料性能。

1994年，Arima等人对正在施工中的SUT-Building进行了振动测试[30]。振动测试分为四种：由塔式起重机引起的自由振动测试，冲击荷载引起的自由振动测试，微振动器测试，激振器引起的被迫振动测试。自由振动测试表明，当结构还没有安装黏滞阻尼墙时，层间最大位移X方向为，Y方向为，结构基本周期为2.5s；安装黏滞阻尼墙后，两个方向的层间最大位移只有，基本周期为1s，结构的阻尼比为0.223。

1995年，美国Buffalo大学Reinhorn等人进行了1：3的钢筋混凝土框架结构缩尺模型试验[31]，包括纯钢筋混凝土框架、安装有黏弹性阻尼器、液体阻尼器、摩擦阻尼器、黏滞阻尼墙的对比试验。试验结果表明，安装有黏滞阻尼墙的结构模型能够大大降低结构的弹塑性变形，最大降低幅度可达到85%，结构模型的阻尼和刚度都能有很大的提高，其中阻尼比可提高到50%。通过这次试验，Reinhorn等人在平面弹塑性分析程序IDARC 2D中加入了黏滞阻尼墙单元。

1996年，清华大学谭在树进行了1：10的安装有黏滞阻尼墙的4层钢筋混凝土框架结构的振动台试验[32]，试验研究了黏滞阻尼墙对结构刚度、动力特性、共振特性及地震反应的影响，同时研究了温度对阻尼墙减震效果的影响。通过试验和理论分析得出黏滞阻尼墙能提高结构的阻尼和刚度，能够有效地降低钢筋混凝土框架的地震反应的结论；同时也得出结论，黏滞阻尼墙用于钢筋混凝土框架的减震作用主要是由于黏滞阻尼墙的阻尼提供的。

2000年，香港大学Yeung Ngai进行了1：12的4层黏滞阻尼墙钢框架结构模型的风洞试验[33]，研究了黏滞阻尼墙对结构减小风振的影响。通过试验得到黏滞阻尼墙对于减小结构风振作用非常有效，模型的加速度和位移最大能够减小70%，特别是对于中小强度风减振效果最为显著。

2001年，南京航空航天大学振动工程研究所的张方与香港大学的潘德恩，进行了含转动干扰黏性阻尼墙的阻尼特性试验研究[34]。通过利用具有高黏度的硅胶黏液构成的比例试验模型，完成了具有旋转运动的黏滞阻尼墙的动力学试验研究。试验量化了黏滞阻尼墙在旋转运动下的物理参数和它的非线性特性。结构的旋转运动对黏滞阻尼墙的阻尼系数会产生明显的影响，其主要因素是对黏滞阻尼墙的内板剪切力的减少，同时造成更为复杂的黏液运动。

2003年，清华大学钱稼茹、吴美良介绍了黏滞阻尼墙的构造和减震原理、国内外的研究现状以及在日本的工程应用，提出了我国应用这项技术需要解决的问题[35]。

2004年，兰州理工大学白莉通过附加黏滞阻尼墙与无控状态下结构的动力响应分析，得出了黏滞阻尼墙对减小结构的地震响应有良好的控制效果[36]。

2005年，同济大学闫峰、吕西林分别对上海材料研究所开发的黏滞阻尼墙模型和台湾和椿公司生产的黏滞阻尼墙模型进行力学性能试验[37]。考虑黏滞流体的力学特性和阻尼墙的构造，结合试验所得的力与位移的滞回曲线和力与速度的关系曲线，参考已有的研究成果，提出了黏滞阻尼墙模型的力学性能计算公式。并对附加黏滞阻尼墙和不附加黏滞阻尼墙的两个相同钢筋混凝土框架模型分别进行振动台试验，实验分析数据表明：在不同地震波作用下，黏滞阻尼墙耗散了输入结构的地震能量65%左右，与此同时结构的动力反应（包括层间剪力、楼层位移及加速度峰值）均有减小。

2005年，南京工业大学王相智为了研究黏滞阻尼墙的动力特性及抗震性能，进行了黏滞阻尼墙结构框架的动力试验[38]，表明黏滞阻尼墙增加了框架的刚度，有效提高了建筑结构的耗能能力，并应用有限元分析软件SAP2000对黏滞阻尼墙的结构模型进行了有限元分析，对比了试验结果并证明了计算模型的正确性。

2006年，东南大学欧瑾、章征涛等分别进行了黏滞阻尼墙黏滞材料的研究、设置黏滞阻尼墙的框架结构抗震性能试验研究及黏滞阻尼墙的动力性能试验[39, 40]。通过研发自制黏滞材料的阻尼墙在框架模型的动态加载试验，研究了黏滞阻尼墙的动力性能影响因素之间的相互关系，总结了不同温度、频率、位移幅值下黏滞阻尼墙的减震效果，设置黏滞阻尼强后框架结构的动力性能和受力特点，不同布置下的减震效果等。

2010年，杜东升、王曙光等人对高层结构减震采用阻尼墙进行了研究[41]，研究结果表明：通过附加阻尼墙，结构的抗震能力明显提高，阻尼墙数量一定的情况下，通过优化布置找出合理的方案，可以有效提供更大的阻尼。

2013年，东南大学土木工程学院夏冬平、张志强等设计了一种新型黏滞阻尼墙[42]，并通过水平动力加载试验，研究新型黏滞阻尼墙在不同振动频率和位移幅值下的阻尼力与位移关系，探讨了新型黏滞阻尼墙的滞回特性，以及振动频率、位移幅值、速度、循环特性等对其动力性能的影响。研究表明，新型黏滞阻尼墙耗能效果较好，其阻尼力与速度有关，而与频率无相关性；地震作用下，其耐久性良好。

2016年，同济大学莫刚提出了三种新型黏滞阻尼墙构造，并对传统黏滞阻尼墙、黏塑性阻尼墙和位移放大型黏滞阻尼墙进行了试验研究[43]，分析其动力性能，揭示了黏塑性阻尼墙黏滞阻尼与金属阻尼共同耗能的特点，并验证了位移放大装置对提高阻尼力的有利作用。

2017年，同济大学张丹首先进行了黏滞阻尼墙的缩尺试验[44]，研究了其力学性能，发现阻尼力峰值与速度幅值相关，等效刚度与位移幅值相关。随后，设计了带黏滞阻尼墙钢框架结构的振动台试验，获得了黏滞阻尼墙的减震机理及变化规律，验证了黏滞阻尼墙显著的震动控制效果。

国内外学者对附加黏滞阻尼墙的结构模型进行的试验研究表明黏滞阻尼墙能够有效减小地震作用，保护主体结构，增大结构的阻尼比。但是目前对于黏滞阻尼墙的研究仍主要集中在结构层次，对黏滞阻尼墙构件的研究还不够充分。已有的研究表明黏滞阻尼墙的阻尼力相对较小，要想让结构达到需求的阻尼比，往往需要配置大量的黏滞阻尼墙。

### 黏滞阻尼墙相关工程应用

1995年，阪神地震前，日本仅有两幢建筑采用黏滞阻尼墙减震；由于1994年竣工的SUT-Building在这次地震中的良好表现，黏滞阻尼墙在日本受到了业主和工程师的青睐。

1992年，日本的M. Miyazaki和Y. Mitsusaka设计了世界上第一幢用黏滞阻尼墙减震耗能的建筑SUT-Building，并于1994年10月建成。该建筑地下2层，地上14层，建筑总高78m，总建筑面积11521m2，钢框架结构。地上14层一共安装了170片黏滞阻尼墙，其中X方向80片，Y方向90片，地下2层没有安装黏滞阻尼墙。该结构的设计阻尼比为0.27，全年的阻尼比随温度在0.20～0.35范围内变化。图 1.1是他们得到的时程分析结果[45]，其中图 1.1 a、b、c、d分别对应于日本建筑标准抗震规范（JBSSC）设防第一水准要求输入地震波（最大加速度为25cm/s2）所得到的有无安装黏滞阻尼墙时的楼层最大剪力、位移、层间位移和层剪力系数的对比；图 1.1 e、f是结构安装阻尼墙后输入设防第二水准地震（最大加速度为50cm/s2）和能量等效速度为150cm/s人工波得到的加速度和层间位移包络图。从图 1.1可以看出，安装黏滞阻尼墙后，结构的动力反应大大减小，降低范围可达到70%～80%；在设防第二水准地震作用下，结构构件仍然能保持在弹性范围。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 1.1 SUT-Building时程分析结果 | 图 1.2 横滨MM大厦 |

1997年开始施工，1999年完工的横滨MM大厦在结构上一共安装了180片黏滞阻尼墙。该建筑地下2层，地上23层，建筑面积为53085m2，地下为钢骨混凝土结构，地上为钢结构，如图 1.2所示。

日本鹿儿岛机场候机楼抗震加固工程也采用了黏滞阻尼墙作为减震措施[46]。鹿儿岛机场候机楼建于1972年，为局部有地下室的3层钢筋混凝土框架结构。静力弹塑性分析表明，该结构的抗震能力不足日本建筑标准抗震规范（JBSSC）大震时抗震要求的一半。抗震加固在Y方向第3层设置了9片黏滞阻尼墙，在第2层设置了8片，X方向在第2层设置了11片黏滞阻尼墙。设置黏滞阻尼墙后，减小了谱加速度和谱位移，三维弹塑性时程分析表明，大震作用下候机楼的大部分结构构件能保持在弹性范围。

黏滞阻尼墙大量应用于日本的工程建筑中，而国内应用黏滞阻尼墙的工程相对较少。2008年建造的江苏金柏年财富广场应用一定数量的黏滞阻尼墙实现了结构整体阻尼比由5%提高到7.5%的目标[47]。通过时程分析表明：该消能结构在8度多遇地震下的层间位移角小于1/900，满足《规范》不大于1/800的要求，获得了良好的减震效果。

## 铅阻尼器研究现状

铅具有较高的延性、柔性和变形跟踪能力，因此可以在变形过程中吸收大量的能量。同时，铅在变形过程中会发热、融化、再结晶，铅的熔点低，再结晶温度在室温以下。铅在室温条件下变形，通过自身的恢复与再结晶过程，应变硬化将消失，铅的组织和性能还可以恢复至变形前的状态。因此，理论上铅在室温下进行塑性循环时不会发生累积疲劳现象[48]。

铅阻尼器是一种性能优越、构造简单、制作方便的耗能减震装置，它既可以用作隔震系统中的耗能元件或限位装置，又可用作耗能减震建筑中的耗能装置，提供阻尼；既可用于结构的抗震控制中，又可用于结构的风振控制中，因此，具有广泛的应用前景。目前已经研制开发的铅阻尼器类型主要包括铅挤压阻尼器与铅剪切阻尼器等，这类阻尼器的共同特点是在小变形条件下即可获得良好的耗能能力。在新西兰，铅阻尼器已被用于4座桥梁和2座建筑物中[49]，在日本，铅阻尼器已被用于8座隔震建筑和4座消能减震建筑中[50]。由圆柱型铅阻尼器和叠层橡胶支座组成的铅芯橡胶支座是目前应用最广泛的隔震装置，已应用于500余项工程中。国内外一些学者也将其用于悬吊结构减震系统中作为耗能限位装置。A. Bakhshi等将U型铝阻尼器用在悬吊摆隔震（SPI）系统中作为耗能限位器[51]。

### 铅挤压阻尼器

铅挤压阻尼器是新西兰鲁滨逊（W. H. Robinson）等利用铅挤压产生塑性变形耗散能量的原理制成的[52]，铅挤压阻尼器的基本形式有两种：收缩管型和鼓凸轴型。图 1.3为收缩管型，它由厚壁钢管、带两活塞的中心轴及铅组成。厚壁钢管在两个活塞之间局部收缩，铅填充于两活塞之间，铅与管壁之间涂有一薄层润滑剂以减小铅与管壁的摩擦，活塞四周设有液压密封圈。当中心轴与管壁间产生相对运动时，管内的铅被挤压通过钢管中间收缩部分形成的挤压口，这一过程是个塑性变形过程，在这一过程中，铅通过塑性变形提供阻尼力，耗散能量。图 1.4为鼓凸轴型铅挤压阻尼器，其原理与收缩管型相同，但它的挤压口是由中心轴上的鼓凸部分形成的，中心轴放在支承上，支承也起铅的定位作用，当中心轴相对钢管运动时，铅被挤压通过凸轴段与管壁形成的挤压口而产生塑性挤压变形，耗散能量。

|  |
| --- |
|  |
| 图 1.3 收缩管型铅挤压阻尼器 |
|  |
| 图 1.4 鼓凸轴型铅挤压阻尼器 |

试验研究表明，铅挤压阻尼器具有下列特征[53]：

（1）铅挤压阻尼器具有“库仑摩擦”的特点，其荷载-位移滞回环基本上为一棱形，且在地震频率下，挤压力和耗能能力基本上与速度无关。

（2）由于铅的恢复、再结晶和晶粒生长是一个连续过程，且发生在铅挤压过程和挤压后，因而，铅挤压阻尼器不受工作硬化或疲劳的影响，而铅始终能回复到初始未变形状态，具有稳定的耐久性，地震作用后无需重新更换。

（3）铅挤压阻尼器的工作性能非常稳定，不会因过载而损坏。在使用过程中，随着温度的升高，挤压力下降，吸收的能量和产生的热量减少；温度越高，铅的恢复和再结晶速度越快，因而可重新获得其塑性。

（4）铅挤压阻尼器的行程长度仅受芯轴受压时屈曲荷载的限制。

另外一种形式的铅挤压阻尼器是由意大利的F. Focardi等根据金属挤压耗能原理研制的[54]，它由钢圆筒、活塞、中心轴、铅(或其它延性金属)等组成，如图 1.5所示。钢圆筒中部局部变厚部分将钢筒分成两个空腔。两个活塞分别置于两个空腔中并与中心轴相连，中心轴一端伸出钢筒外，作为受力件，铅填充于两个活塞之间的空腔内，当外荷载超过金属的挤压屈服力后，铅从一个腔挤到另一个腔中，在挤压过程中金属产生塑性流动变形并消耗能量。试验研究表明，这种铅挤压阻尼器的滞回性能稳定，耗能能力强，制作简单，震后可重复使用或更换。

|  |
| --- |
|  |
| 图 1.5 Focardi型铅挤压阻尼器 |

### 铅剪切阻尼器

铅剪切阻尼器是由新西兰Penguin Engineering公司首先研制的[55]，随后Robinson Seismic Ltd公司开发了两种类似的铅剪切阻尼器：Penguin Vibration Damper (PVD)和Robinson Vibration Damper (RVD)。它们都是利用铅受剪屈服后产生塑性变形来耗散能量，其构造如图 1.6、图 1.7所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 1.6 阻尼力为100吨的PVD | 图 1.7 铅剪切阻尼器构造及受力图 |

铅剪切阻尼器的显著特点是对微小变形十分敏感，一个标准PVD在位移下均可获得较大阻尼。因此，对由车辆或风引起的微幅振动到地震激发的较大振动，它们都能给结构提供一定阻尼，起到耗能减震的作用。比较大的PVD位移可达±100mm，力的范围在1kN到1000kN之间。铅剪切阻尼器的阻尼力大小与变形速度无关；随位移增大，对位移的敏感性降低，阻尼力增加并达到极限。由于铅具有动态再结晶功能，因此铅剪切阻尼器在设计变形范围内，可在不同位移幅值下循环几千次而不出现力学性能退化现象，保持其原有的力学性能不变，工作性能十分稳定[56]。铅剪切阻尼器所提供的阻尼力大小与变形速度无关，类似于理想的塑性体。铅剪切阻尼器具有以下优点：①使用寿命长；②提供的阻尼力可靠；③对位移变化敏感；④构造简单，不需要维护[53]。目前已有四个PVD成功地安装在韩国一座长140m的高速公路桥上，对桥板的位移和加速度都产生了良好的控制效果。

## 阻尼器混合布置的消能减震研究现状

耗能减震结构由于其自身的特点，在分析与设计时不仅需要进行反复迭代计算，而且需要进行选型及参数优化，以确定合适的耗能器类型及相应的参数、数量及布置方案。一般情况下，耗能器都均匀地沿结构高度布置，但随着结构层数的增加，这种设置方式开始变得不再有效和经济。同时，由于每种阻尼器都有其独特的优势，采用多种阻尼器的混合布置可以在一定条件下满足多目标的性能需求。因此，必须进一步研究耗能减震结构的设计方法，以期更为经济、合理、高效地达到耗能减震的效果。

目前位移型金属阻尼器和速度型黏滞阻尼器是比较常见的两种阻尼器。金属屈服阻尼器在多遇地震下往往保持弹性，只对结构附加刚度而不参与耗能；在罕遇地震下阻尼器进入弹塑性工作阶段从而参与耗能。这类阻尼器能够对结构层间位移起到良好的控制效果，但是会放大地震作用，对结构加速度控制效果较差，不利于连接节点和基础的设计。速度型阻尼器能够为结构提供的刚度较小，在多遇地震和罕遇地震下均可参与耗能，为结构附加阻尼比，减小结构地震响应，但是其对结构层间位移的控制效果相对较差。因此，若能恰当的联合使用两种阻尼器，则可在多遇地震下为结构既提供刚度又实现耗能，并且在控制结构层间位移的同时，也能在一定程度上减小结构的地震作用。

2009年，郭道远等通过有限元软件SAP2000对同时设置金属阻尼器和黏滞阻尼器的十五层钢框架结构进行了多遇地震和罕遇地震下的动力时程分析[57]，共定义了六种分析工况，比较了不同工况时的楼层最大位移、最大层间位移角、最大层间剪力系数等地震响应值，讨论了其减震效果。

2010年，Justin D.Marshall 等提出了一种混合被动减震装置[58]，该装置将屈曲约束支撑与黏弹性阻尼器串联，通过在黏弹性阻尼器中添加限位装置使得屈曲约束支撑能够进入弹塑性。算例分析表明混合阻尼器在顶层位移、底层剪力和顶层加速度三个方面都起到了减小作用。但是混合阻尼器在基底剪力和顶层位移控制方面不如屈曲约束支撑良好，原因是由于黏弹性阻尼器的加入减少了屈曲约束支撑的长度，导致刚度增加。但是混合阻尼器对于顶层加速度的控制优于屈曲约束支撑本身，而且混合阻尼器在地震过程后半段减少了基底剪力的循环圈数。

2012年，裴星洙等利用等效线性化和减震性能曲线[59]，对黏弹性阻尼器和软钢阻尼器减震结构进行了设计，并对比混合布置和单一布置情况下的控制效果。算例分析表明黏弹性阻尼器减震效果比软刚阻尼器更好，混合布置两种阻尼器时，减震效果处于两种单一类型减震结构之间，但是相比于单一布置黏弹性阻尼器造价要低。

2013年，李勇等提出了一种新型支撑型黏塑性阻尼器[60]，这种阻尼器由两条预弯曲板条、套管、支撑块和黏弹性材料组成，两条预弯曲板条正对称，设置在套管中间，如图 1.8所示。从能量的角度看，在小位移震动时，以黏弹性耗能为主，罕遇地震下金属塑性耗能增加。震动频率越大输入阻尼器的能量越大，黏弹性阻尼器的耗能越大，金属弹塑性耗能不变。

|  |
| --- |
|  |
| 图 1.8支撑型黏塑性阻尼器示意图 |

2015年，耿鹏飞针对附加黏滞阻尼器和防屈曲支撑的钢框架联合减震结构进行研究[61]，以基于反应谱的设计方法为主，以多遇地震设计罕遇地震验算的设计思路，主要针对两类阻尼器与主体结构的匹配性展开了研究。

2016年，裴少帅将黏滞阻尼墙和钢板阻尼墙混合布置在框架结构中[62]，基于两种阻尼器不同参数对减震效果的影响，提出了两种阻尼器的混合减震性能曲线及绘制方法。量化分析表明对单一布置金属阻尼器的减震结构附加适量的黏滞阻尼器，可以将剪力反应降低率减小10%~45%，而对单一布置黏滞阻尼器的减震结构附加适量的金属阻尼器，可以将位移反应降低率减小30%以上，因此混合布置两种阻尼器能够优势互补，取得更好的减震效果。

目前对于同时附加位移型阻尼器和速度型阻尼器的混合减震结构的研究相对较少，而且现有的针对混合减震结构的设计方法还比较复杂，往往带有大量的迭代计算，尚未形成一套简单、系统的设计分析方法。

## 本文主要研究内容

本文从黏滞阻尼材料的性能测试试验出发，研究了不同配比的黏滞阻尼材料的动态性能指标，并通过黏滞阻尼墙模型小振动台试验验证测试结果的可靠性。对传统黏滞阻尼墙和复合型铅-黏滞阻尼墙进行了动力性能试验与结果分析。主要研究的工作有：

1. 对国内外已有的相关研究成果进行综合评述；掌握黏滞阻尼墙构造、工作原理、力学模型以及现有理论。
2. 利用ARES旋转流变仪测试六组不同配比的混合黏滞阻尼材料的动态性能指标，确定合适的试验材料，并探究材料的复数黏度与材料标号和扫描频率的函数关系；设计并进行五组黏滞阻尼墙的小振动台试验，利用3D打印机制作黏滞阻尼墙模型，通过小振动台试验初步检验黏滞阻尼材料在材料层次与构件层次下表现出的性能指标是否吻合。
3. 设计并进行两组黏滞阻尼墙足尺试验，通过对黏滞阻尼墙往复循环加载测试其耗能能力，探究加载频率、位移幅值和速度幅值对黏滞阻尼墙性能的影响；提出考虑最大速度和最大位移加载历史的影响机制，建立适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型；通过计算结果与试验结果的对比，验证滞回模型的合理性。
4. 设计并进行三组铅阻尼器往复加载试验，标定铅块基本特征参数；设计并进行一组复合型铅-黏滞阻尼墙试验，揭示了其小震下单独黏滞阻尼耗能以及中大震下黏滞阻尼耗能和金属屈服耗能共同作用的耗能特性；建立复合型阻尼墙的滞回模型，并通过理论值与试验值的对比验证滞回模型的合理性。
5. 基于单一类型阻尼器减震性能曲线，提出铅-黏滞阻尼墙的复合减震性能曲线及相应绘制方法；同时考虑复合减震系统中是否含有工作间隙，对无工作间隙的复合减震系统分析黏滞阻尼耗能和金属屈服耗能之间的复合减震效果；对有工作间隙的复合减震系统建立双目标的减震性能设计方法，并选取相应算例加以验证。

# 黏滞阻尼墙原理及阻尼材料试验

## 引言

黏滞阻尼墙是一种新型的消能减震构件，它能够隐藏于建筑结构的墙体中，既能耗散地震能量又不影响建筑的使用，并且具有显著的减震效果。黏滞阻尼墙具有以下优点：1）制作安装方便；2）不需要复杂的装置和特殊的材料；3）墙体与高黏滞材料的作用面积大，使得结构的阻尼比可以提高到20%以上，吸收大量的地震能量；4）适用范围广，黏滞阻尼墙能够安装在一般的多层房屋结构，同时也适用于高层和超高层建筑结构，还能用于抗震加固和震后修复[35]。本章将从黏滞阻尼墙的构造、工作原理、常用力学模型和理论阻尼力公式等几个方面来阐述黏滞阻尼墙的基本特性。通过ARES旋转流变仪测试黏滞阻尼材料的动态性能，确定合适的试验材料；通过小振动台试验，检验黏滞阻尼材料在黏滞阻尼墙构件中表现出的性能指标。

## 黏滞阻尼墙构造及工作原理

### 黏滞阻尼墙构造

黏滞阻尼墙主要由A和B两个部分组成，如图 2.1所示。

A：内部黏滞阻尼墙

1）内钢板：在黏滞阻尼墙工作时，内钢板在黏滞材料中作剪切运动，类似于作往复运动的活塞。内钢板通常固定在上层楼面梁的底部，实际结构设计时必须确保内钢板与上层楼面梁之间连接可靠，楼面梁具备足够的强度和刚度。

2）外钢箱：外钢箱通过连接螺栓固定在下层楼面梁上，箱体相当于一个容器，在其内部充满了黏滞阻尼材料，在黏滞阻尼墙工作时，箱体将黏滞阻尼力传递到下一层楼面梁上。

3）黏滞阻尼材料：材料性能是决定黏滞阻尼墙耗能能力的关键，黏滞阻尼墙主要是通过黏滞材料的剪切变形耗散外部输入的能量。黏滞阻尼材料应该具备较高的黏度、良好的耐用性、适用性、经济性和安全性。

B：外部保护部分

轻质混凝土或其他防火材料作为保护墙，用于黏滞阻尼墙A部分的防火、防腐和抗冲击。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.1 黏滞阻尼墙构造示意图 |

### 黏滞阻尼墙工作原理

当结构受到风荷载或者地震作用时，上下楼面的运动速度不同，导致内钢板与外钢箱产生相对运动，从而产生相对速度，固定于上层楼面梁的剪切内钢板在钢箱内作往复运动，内外钢板之间的速度梯度使黏滞材料发生剪切变形，使结构的阻尼增大，并通过材料流动时产生的内摩擦力做功来耗散能量，从而降低了结构的动力反应，如图 2.2所示[32]。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.2 黏滞阻尼墙工作原理 | |

## 黏滞阻尼墙常用力学模型

为正确分析黏滞阻尼墙结构的抗震性能，需确立黏滞阻尼墙的恢复力模型。目前，国内外研究人员已提出了许多相关恢复力模型，针对黏滞阻尼墙而言主要包括线性模型、Maxwell模型和Kelvin模型三种[63]。

### 线性模型

线性模型中，阻尼器出力取决于速度，阻尼力可由下式表达：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑1） |

式中 ——线性黏滞阻尼器的阻尼系数；

——运动速度。

假设有正弦简谐波作用于线性黏滞阻尼器，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑2） |

式中 、、——波幅、频率和时间。

将式（2‑2）代入式（2‑1）中可得阻尼力为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑3） |

联立式（2‑2）和式（2‑3）可得力和位移的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑4） |

可见阻尼器的力和位移关系式符合椭圆关系，该椭圆及其所对应的模型如图 2.3所示。则阻尼器循环一周所消耗的能量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑5） |
|  |  |  |
|  | | |
| 图 2.3 线性阻尼器模型 | | |

### Kelvin 模型

如果线性黏滞阻尼器的性质取决于刚度，我们称这种模型为Kelvin模型，如图 2.4所示。此外同样假设有正弦简谐波作用于该阻尼器，则阻尼装置抗力的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑6） |

式中 ——阻尼器的储存刚度；

——阻尼器的阻尼常数；

——阻尼力的幅值；

——阻尼力与位移的相位差。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.4 Kelvin模型图 |

联立式（2‑2）和式（2‑6），可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑7） |

阻尼系数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑8） |

储能刚度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑9） |

相位差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑10） |

由于大部分黏滞阻尼装置都具有频率依赖性，所以利用傅里叶变换和欧拉公式可得复Kelvin模型的抗力表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑11） |

或

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑12） |

其中复合刚度可由储存刚度和损耗刚度表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑13） |

可由下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑14） |

### Maxwell 模型

当黏滞阻尼器表现出具有强烈频率依赖性时，利用Maxwell模型的“阻尼器-刚度连续化模型”，就可得出一种更为精确的力学计算模型。在该模型中，阻尼单元与“弹簧单元”串联，如图 2.5所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.5 Maxwell模型图 |

假设阻尼单元与“弹簧单元”的位移分别为和，则有下述关系式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑15） |
|  |  | （2‑16） |

联立式（2‑15）和（2‑16）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑17） |

式中 ——阻尼器的抗力；

——零频率时的线性阻尼常数；

——“无限大”频域内的刚度系数；

——放松时间系数，。

式（2‑17）也可用下式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑18） |

上式在非线性结构分析中可与其它结构构件的运动方程同时解出。

利用傅里叶变换和欧拉公式可得复Maxwell模型表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑19） |
|  |  | （2‑20） |

联立上述两式解得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑21） |

将代入上式，便可得储能刚度和耗能刚度：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑22） |
|  |  | （2‑23） |

阻尼系数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑24） |

## 黏滞阻尼墙阻尼力的计算公式

黏滞阻尼墙主要体现为一种速度相关型阻尼器，目前，根据对黏滞阻尼墙的研究，已存在的阻尼力计算公式主要有以下几种形式。

### Miyazaki & Arima计算公式[27, 28]

黏滞阻尼器的总黏滞抵抗力,可分为与速度相关的黏滞阻尼力和与位移相关的弹性恢复力两部分。

当材料是理想牛顿黏滞材料时，黏滞阻尼墙中的黏滞阻尼力符合牛顿黏滞定律，因此其阻尼力计算模型可以简化为如图 2.6所示，其中黏滞阻尼力是指作用于抵抗板与底板之间的黏滞阻尼材料上的水平剪力，该黏滞阻尼力计算表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑25） |

但是实际情况中黏滞阻尼墙中的黏滞液体通常为高分子聚合物，是非理想牛顿黏滞材料，其黏滞阻尼力计算表达式修正为[64]：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑26） |

与位移相关的弹性恢复力的计算表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑27） |

黏滞阻尼墙的总黏滞抵抗力的计算表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑28） |

式中 ——总黏滞抵抗力（kgf）；

——黏滞阻尼力（kgf）；

——弹性恢复力（kgf）；

——材料黏性系数；

——内外钢板相对运动速度（cm/s）；

——黏滞材料的厚度（cm）；

——内外钢板的相对位移（cm）；

——与黏滞材料接触的有效面积（cm2）；

——环境温度；

——温度影响系数；

——由试验取得的指数。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.6 牛顿黏滞定律模型 | 图 2.7 黏滞阻尼墙滞回曲线 |

图 2.7给出了在黏滞材料黏度为97000 Poise、频率为0.98 Hz、有效面积为5.0m2、黏滞材料厚度为1cm的实验条件下所得到的黏滞阻尼墙滞回曲线。其中实线为实验结果，虚线为理论公式计算结果，二者基本吻合较好。从图中可以看出，黏滞阻尼墙滞回曲线为具有一定倾斜度的椭圆，这表明在一定频率下，黏滞阻尼墙既能提供较大的黏滞阻尼力（即附加阻尼），又能提供一定的弹性恢复力（即附加刚度）。

Miyazaki & Arima提出的计算公式是经过理论推导修正后得出的，也是目前最具代表性的一种计算公式，该公式考虑了温度和黏弹性刚度等因素对黏滞阻尼墙的动力影响。然而，该公式中的系数是在某一特定频率下获得的，而没有考虑振动频率对阻尼墙的动力影响。因此该公式在不同频率条件下不具有通用性。

### 日本OILES公司计算公式[65]

黏滞阻尼墙在耗能过程中会受到诸多条件的影响，如振动频率、材料性能、位移幅值和温度等因素。OILES公司针对这些影响因素做了大量的动力试验，得出了各种振动频率、位移幅值及温度等条件下的滞回曲线，发现其阻尼材料的压缩性非常小，可以忽略其刚度特性。因此可以简化认为黏滞阻尼墙只提供附加阻尼，几乎不提供额外刚度。将阻尼力的计算公式不考虑弹性恢复力部分，得到的简化计算公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑29） |

式中 ——内外钢板相对运动速度（cm/s）；

——设计温度；

——与黏滞材料接触的有效面积（cm2）；

——黏滞阻尼力（kgf）；

——黏滞材料的厚度（cm）。

公式（2‑29）中，黏滞阻尼力根据的比值分段给出，主要是考虑了黏滞材料具有高分子聚合物的一般流动特征：在低剪切速率下（即时），流动曲线的斜率，符合牛顿流动定律，对应的速度梯度指数为1；当剪切速率增大（即时），流动曲线的斜率，材料的流动进入假塑性流动区，对应的速度梯度指数为0.59；随着剪切速率继续增大（即时），对应速度梯度指数为0.4。

这一阻尼力公式得到了极大的简化，并可以在一定程度上快速估计出阻尼力。然而这一阻尼力公式得到的曲线只考虑了黏滞部分的阻尼力，而忽略了黏滞材料的刚度特性，因此阻尼力公式曲线和试验曲线的形状有一定差异。而且，不同频率下的试验滞回曲线表现出明显的差异性，但是公式中并没有考虑频率的影响。

### 日本ADC公司计算公式[66]

日本ADC（Aseismic Devices Co. Ltd）公司考虑到振动频率对阻尼墙黏滞阻尼力的影响，采用了以下的阻尼力公式进行计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑30） |
|  |  | （2‑31） |

式中 ——黏滞阻尼力（kgf）；

——环境温度；

——与黏滞材料接触的有效面积（m2）；

——结构的自振频率（Hz）；

——相对运动速度（cm/s）；

——黏滞材料的厚度（mm）；

——材料在30℃的黏度值；

——速度指数，由试验确定；

——温度和频率依存系数；

——修正系数。

日本ADC公司提出的计算公式首次将加载频率的依赖性考虑在其中，具有非常重要的指导意义。但是问题在于频率是一个微观量，而且在实际地震作用下的频率往往是无法预测的，因此频率变化的影响不能在数值模拟中通过某一个单一变量反应出来。

### 南京工业大学计算公式[67]

南京工业大学欧谨等进行了一系列黏滞阻尼墙构件的动力性能试验，并得到了如下形式的阻尼力计算公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑32） |

式中 ——总黏滞抵抗力；

——黏滞阻尼力；

——弹性恢复力；

——材料黏滞特性系数；

——内外钢板相对运动速度；

——材料刚度特性系数；

——内外钢板的相对位移；

——由试验取得的指数。

从试验滞回曲线可以看出，滞回曲线的形状在很大程度上受频率的影响。因此，欧谨等人针对不同频率采用不同的参数组合进行曲线拟合，拟合结果如表 2.1所示。

表 2.1 参数拟合结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 频率(Hz) |  |  |  | |  |
|  |  |
| 0.1 | 0.948 | 0.21 | 1 | 0.88 | 1.05 |
| 0.3 | 0.668 | 0.22 | 1 | 0.93 | 1.15 |
| 0.5 | 0.465 | 0.26 | 1 | 0.95 | 1.12 |
| 0.7 | 0.366 | 0.36 | 1 | 0.95 | 1.09 |
| 1.0 | 0.298 | 0.45 | 1 | 0.97 | 1.14 |

每一种频率下的公式都能够与之对应的试验曲线较好的拟合。但是在实际的地震中，频率往往是不可预测的。例如，2011年日本东北大地震中，使用经验格林函数方法评估得到的地震频率范围在0.1~10Hz左右[68]。

表 2.2 试验曲线与公式曲线对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 曲线类型 | 频率(Hz) | 位移(mm) | 最大抵抗力 | | 能量耗散值 | |
| 峰值(kN) | 误差 | 峰值(kN) | 误差 |
| 试验曲线 | 0.3 | 15 | 16.63 | — | 828.7 | — |
| 拟合曲线 | 0.3 | 15 | 15.55 | 6.49% | 760.6 | 8.22% |
| 1.0 | 15 | 25.99 | 56.28% | 1174.4 | 41.72% |

从表 2.2中可以看出，当采用表 2.1中恰当的参数组合时，计算公式与试验曲线的最大抵抗力和能量耗散值的误差均在10%以内。但是如果误用1.0Hz中的参数组合时，两者的误差均会超过40%。这意味着对不同加载频率下的参数组合的误用会导致阻尼力的极大误差，因此采用这种公式会使得频率发生大幅度变化的地震反应评估变得十分困难。

## 黏滞阻尼材料

黏滞阻尼材料是黏滞阻尼墙的关键部分，目前所采用的黏滞材料通常是以高分子的碳氢化合物为主要材料的高黏滞流体，其主要有以下特点：

1）黏度：黏度是影响黏滞阻尼墙减震效果的一个主要因素，黏滞阻尼墙要求阻尼材料必须具有高黏度，这关系到黏滞阻尼墙能否发挥高能量耗散能力。

2）耐久性：黏滞阻尼材料应该具有良好的耐久性，在受到化学作用和腐蚀作用时，能够保持良好的稳定性能，良好的耐久性能是黏滞阻尼墙能长期有效的关键，同时阻尼材料还应该是电绝缘体。

3）适用性：阻尼材料加热时，能够变软，从而比较容易注入黏滞阻尼墙，便于施工，同时阻尼材料应该能够比较容易取材，能随时更换。

4）安全性：阻尼材料应该对人类无毒害作用。

5）经济性：阻尼材料的价格不能太高，以便能够大量使用。

### 黏滞阻尼材料特性及耗能机理

依据在简单剪切流中剪切应力与剪切应变速度（即速度梯度或剪切速率）之间关系的不同，黏滞流体可以分为牛顿流体和非牛顿流体两类[69, 70]。

牛顿内摩擦定律：不可压缩的流体流动时，流体的剪切应力与剪应变速度成正比，即

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑33） |

式中 ——剪应力；

——剪应变速度；

——牛顿流体的动力黏度（在一定温度和压力下为常数）。

当流体满足公式（2‑33）时，剪应力和剪应变速度呈线性关系，即为牛顿流体；不满足时，流体剪应力和剪应变速度呈非线性关系，称为非牛顿流体。

对于黏滞阻尼墙采用的黏滞阻尼材料通常为高分子聚合物，属于非牛顿流体。这类材料在阻尼墙工作时应力并不是恒定的，而是随着时间发生周期性变化。因此需要用复数黏度来描述这类材料在非稳定流动条件下的性能。

当高聚物材料所受的应力为时间的函数（如正弦交变应力作用）时，应力与应变间的关系就会呈现出滞后现象，即应变随时间的变化一直跟不上应力随时间的变化，存在一定相位差[71]。

设输入的正弦应变信号为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑34） |

采用复数形式来表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑35） |

复数应变速率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑36） |

对于高聚物流体材料，其应力超前于应变一定相位，应力的相应为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑37） |

根据所测得的应力输出信号和应变速率，可以得到材料的复数黏度：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑38） |

通过测得应力输出信号和应变输入信号之间的相位差，可以根据以下公式得到材料的储能模量、损耗模量以及损耗因子：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑39） |
|  |  | （2‑40） |
|  |  | （2‑41） |

其中，储能模量反应材料弹性的贡献，而损耗模量则体现了材料黏性的贡献。

因此，复数黏度公式（2‑38）可以写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑42） |

复数黏度由虚数和实数两部分组成，实数部分称为动态黏度，它表示了黏性的贡献，虚数部分则表示了材料弹性的贡献。根据Cox-Merz定律，复数黏度在数值上基本等于其表观黏度，即，所以可以根据材料的动态性能参数指标来描述材料在稳态流动的性能。

在正弦交变应力作用下，理想的弹性材料的应力与应变之间无滞后现象（相位差为0），因而只能储存能量，不能耗散能量，体现了材料的刚度特性。而对于理想的黏性材料，其应力与应变的相位差为，只能耗散能量，不能储存能量，体现了材料的阻尼特性。黏滞阻尼墙采用的黏滞材料是高分子聚合物材料，其应力与应变之间的相位差介于，因此既能储存能量，又能耗散能量。

### 黏滞阻尼材料ARES性能试验检测

高级流变扩展系统ARES是一种组合式、可扩展的高级应变控制型流变仪，可以独立控制振动频率、样品应变、应变速率和温度，通过采用一个驱动器对试样实施变形，产生应变，然后以一个独立的精密传感器测量出样品流动过程所产生的应力和力矩等，进而可以得到样品静态剪切黏度、法向应力、剪切模量、复数黏度、储能模量和损耗模量等流变参数[72]。

ARES的应用范围非常广泛，被经常用来研究聚合物的分子结构以及多组分高分子体系组分的相形态结构和组分间的相互作用等。而近年来更有研究者利用ARES来研究聚合物的结晶行为。

本次试验所采用的黏滞阻尼材料是一种聚异丁烯高分子材料混合物。聚异丁烯材料[73]具备良好的剪切稳定性，且与绝大多数有机物质相容性较好，各分子量的聚异丁烯互溶性极佳，可以得到任意期望的黏度。此外，聚异丁烯可与聚乙基硅氧烷以任意比例混合，形成均匀的混合物，这种混合物具备优良的热氧化安定性即剪切稳定性，其低温流动性和黏度指数也均表现优良。因此，本次试验共配置了六组试样用于寻找合适的黏滞阻尼材料，样品编号分别为样品1~样品6，其中样品1和样品6分别为高分子材料A和材料B，样品2~样品5中材料A和材料B的比例分别为5:1、2:3、1:2、1:4。黏滞阻尼材料样品如图 2.8所示。

黏滞材料性能测试采用美国TA仪器公司生产的Rheometrics系列高级流变扩展系统（ARES），型号为TAARES/RFS旋转流变仪，直径为25mm的平行板夹具，对黏滞阻尼材料样品进行稳态剪切速率扫描测试。旋转流变仪装置及平行板夹具处样品放置如图 2.9所示。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\Desktop\试验相关照片\2017_04\20170411_IMG_2369.JPG |  |
| 图 2.8 黏滞阻尼材料样品 | 图 2.9 ARES旋转流变仪装置 |

本次试验包括两个阶段，第一阶段测试常温条件下六种样品的动态性能指标并进行结果分析和对比；第二阶段对其中两种样品进行不同温度条件下的动态性能指标测试，从而考察不同温度对于材料特性的影响。

#### 常温条件下动态性能指标测试

首先，对样品1~样品6进行常温（20℃）条件下的频率扫描，扫描范围为10-1rad/s~103rad/s，试验样品厚度为1.0mm。

图 2.10（a）~（f）是常温条件下六种样品材料的频率扫描曲线，通过ARES测试，可以得到每种样品材料在不同频率条件下的复数黏度、储能模量、损耗模量、损耗因子等动态性能指标。图 2.11~图 2.14分别给出了六种样品在不同频率下的各个性能指标的对比情况。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 样品1 | （b）样品2 |
|  |  |
| （c）样品3 | （d）样品4 |
|  |  |
| （e）样品5 | （f）样品6 |
| 图 2.10 试验样品常温条件下频率扫描曲线 | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.11 样品复数黏度对比 | 图 2.12 样品储能模量对比 |
|  |  |
| 图 2.13 样品损耗模量对比 | 图 2.14 样品损耗因子对比 |

从上述曲线中可以得到如下结论：

1. 从图 2.11~图 2.14中可以看出，随着频率的增大，黏滞材料样品的复数黏度和损耗因子不断减小，而储能模量和损耗模量不断增大。在相同试验频率下，黏滞阻尼材料样品1到样品6的黏度呈依次增大趋势，同时储能模量和损耗模量也呈现同样的增大趋势，但是材料的损耗因子会随着样品编号的增大而减小。
2. 从图 2.14中可以看出，各样品在低频范围内损耗因子大于1，而在高频范围内损耗因子小于1。从图 2.10中也可以观察到在低频范围内，材料的损耗模量大于储能模量，材料表现出黏性的特征，此时样品具备一定的流动性；但是随着频率的增大，储能模量和损耗模量曲线出现交叉点，之后材料逐渐表现出弹性特征，而且随着材料编号的增大，交叉点出现处对应的频率值越来越小，说明高编号样品材料更容易表现出弹性特征。
3. 《被动减震结构设计·施工手册》[74]给出的黏滞阻尼墙实例中，黏滞阻尼材料常温下的黏度约为80000~90000 Poise，综合比较各样品之间的性能指标，发现样品3测得的性能指标和变化趋势与理想材料较为接近，且样品3在较宽的频率范围内损耗因子均大于1，说明其具备较强的耗能能力和较广的适用频率范围，是比较合适的黏滞阻尼材料。

由于黏滞阻尼材料的复数黏度包含实部和虚部，在ARES试验中测得的复数黏度性能指标实际上是其复数黏度的模，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑43） |

为了分析黏滞阻尼材料复数黏度与材料标号及扫描频率之间的关系，本节选取了扫描频率分别为0.1 rad/s、0.4 rad/s、1.0 rad/s、4.0 rad/s和10 rad/s的相关数据，材料的标号可以通过材料的配比间接体现出来，由此得到的复数黏度与材料配比关系曲线如图 2.15所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.15 材料复数黏度—配比关系曲线 |

从图中可以看出在同一扫描频率下，材料的复数黏度与材料配比之间大致呈指数关系，因此可以采用如下公式近似拟合任一扫描频率下的关系曲线：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑44） |

不同扫描频率下相关关系曲线的参数拟合结果如表 2.3所示。

表 2.3黏滞阻尼材料参数拟合表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 扫描频率（Hz） | 参数 | 参数 | 决定系数 |
| 0.1 | 6640 | 4.536 | 0.9994 |
| 0.4 | 6572 | 4.158 | 0.9983 |
| 1.0 | 6495 | 3.801 | 0.9975 |
| 4.0 | 6338 | 3.306 | 0.9983 |
| 10 | 6206 | 3.057 | 0.9989 |

从表中可以看出拟合参数的决定系数均大于0.995，证明拟合结果精确度较高。其中不同扫描频率下参数A的变化相对较小，因此可以采用5组拟合参数的平均值作为统一化的参数，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑45） |

而参数B的变化主要受到扫描频率值的影响，参数B与扫描频率相关关系曲线如图 2.16所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.16 拟合参数B—扫描频率关系曲线 |

从图中可以看出，两者的关系曲线大致呈幂函数关系，且采用幂函数的拟合曲线其决定系数可以达到0.988，具有很高的拟合度。因此，参数B可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑46） |

综上所述，黏滞阻尼材料的复数黏度可以表示为材料标号和扫描频率的复合函数，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑47） |

#### 不同温度下动态性能指标测试

在确定理想的黏滞阻尼材料后，本次试验又选择了样品3和样品4进行不同温度下的频率扫描，扫描范围为10-1rad/s~103rad/s，试验样品厚度为1.0mm。由于该ARES旋转流变仪只有加热装置，而没有冷却装置，需要依靠温度差进行自然降温。因此，这一阶段试验的测试温度分别为20℃、40℃和60℃。

图 2.17（a）~（f）是不同温度条件下样品3和样品4的频率扫描曲线。图 2.18~图 2.21分别给出了样品3和样品4在不同频率下复数黏度、储能模量、损耗模量、损耗因子等各个性能指标的变化曲线。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 样品3—20℃ | （b）样品4—20℃ |
|  |  |
| （c）样品3—40℃ | （d）样品4—40℃ |
|  |  |
| （e）样品3—60℃ | （f）样品4—60℃ |
| 图 2.17 试验样品不同温度下频率扫描曲线 | |
|  |  |
| 图 2.18复数黏度—频率关系曲线 | 图 2.19 储能模量—频率关系曲线 |
|  |  |
| 图 2.20 损耗模量—频率关系曲线 | 图 2.21 损耗因子—频率关系曲线 |

从上述曲线中可以得到如下结论：

1. 在同一温度条件下随着频率的增大，黏滞阻尼材料样品的复数黏度、储能模量和损耗模量会不断增大，其变化规律与常温条件相同。但是在高温条件下，当温度固定时随着频率的增大，样品的损耗因子会出现先增大后减小的情况，这一变化规律与常温条件下不完全相同。
2. 对于同一种阻尼材料在相同试验频率下，黏滞阻尼材料黏度随试验温度的升高而减小，材料的储能模量和损耗模量也具有相同的减小趋势，但是材料的损耗因子会随温度的升高而增大。
3. 从图 2.18~图 2.21中可以观察到，样品3在20℃条件下与样品4在40℃条件下的各个性能指标值基本上一致，说明试验温度对于材料特性具有较大的影响。不同的材料配比在不同温度下有可能会表现出相同的动态性能。
4. 从图 2.17中可以看到，在高温条件下黏滞阻尼材料的储能模量和损耗模量曲线交叉点处对应的频率值更大，说明随着温度的升高，材料的黏性特性表现得更加明显，材料的流动性增强。

## 黏滞阻尼墙模型小振动台试验

黏滞阻尼材料的材料性能参数可以通过ARES试验测得，但是黏滞材料在构件中表现出的性能是否与材料参数一致仍需要进一步验证。因此，本节针对上述样品进行了小振动台的正弦加载试验，从而标定黏滞材料在构件中的性能参数。

本次试验的黏滞阻尼墙墙体是用3D打印机制作的塑料墙体，同时在墙体外侧设置了加劲钢板以保证墙体在加载过程中不会破坏，内部剪切板是定制的小钢板。阻尼墙墙体固定在振动台面上，内钢板通过连接装置固定在试验桌面上。墙体尺寸约为，内钢板尺寸约为，内钢板插入黏滞材料深度约为30mm，黏滞材料剪切厚度约为5mm。黏滞阻尼墙模型小振动台试验的装置示意图如图 2.22所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.22 黏滞阻尼墙模型小振动台试验装置示意图 |

本次试验采用激光位移计测量内钢板与外钢箱的相对位移，采用力传感器测量黏滞阻尼墙的阻尼力。由于样品4的配置量较少，未能将塑料墙墙体填满，因此最终使用样品1、2、3、5、6等五种黏滞材料制作了五个黏滞阻尼墙试件，每个试件在10mm的加载位移幅值下，分别按照0.1，0.4和1.0 Hz的加载频率进行正弦加载，部分工况下的试验曲线如图 2.23所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）样品1-0.1Hz | （b）样品1-1.0Hz |
|  |  |
| （a）样品3-0.4Hz | （b）样品3-1.0Hz |
| 图 2.23 部分工况下黏滞阻尼墙滞回曲线 | |

从图 2.23中可以看出，黏滞阻尼墙的曲线总体上接近于椭圆，因此可以采用如下计算公式近似反应黏滞阻尼墙的动力性能。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑48） |

通过对黏滞阻尼墙速度最大处和位移最大处阻尼力的标定，可以确定黏滞阻尼材料在构件中所表现出的黏滞系数和动态刚度。由于本次试验的试件尺寸较小，因此较小的试验误差就会对试验结果造成很大的影响，因此部分工况的试验结果会存在一定偶然性。

由黏滞阻尼墙力学模型的相关知识可得，动态刚度与材料的储能模量、黏滞系数与材料的损耗模量之间有如下关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2‑49） |
|  |  | （2‑50） |

因此，最终可以通过振动台试验得到不同黏滞阻尼材料在构件下表现出的储能模量和损耗模量，将试验得到的不同样品在不同加载频率下的和与对应条件下ARES试验得到的和的比值汇总在表 2.4中。

表 2.4 构件层次和材料层次黏滞阻尼材料性能指标比值表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载频率（Hz） | 储能模量 | | | 损耗模量 | | |
| 0.1 | 0.4 | 1.0 | 0.1 | 0.4 | 1.0 |
| 样品1 | 1.029 | 0.863 | 0.797 | 0.968 | 0.882 | 0.753 |
| 样品2 | 0.967 | 0.876 | 0.677 | 0.977 | 0.858 | 0.659 |
| 样品3 | 0.988 | 0.819 | 0.720 | 0.947 | 0.778 | 0.583 |
| 样品5 | 0.885 | 0.653 | 0.482 | 0.859 | 0.672 | 0.522 |
| 样品6 | 0.924 | 0.726 | 0.616 | 0.840 | 0.602 | 0.446 |

通过表 2.4中的参数分析，可以发现黏滞阻尼材料在加载频率为0.1Hz时性能指标比值基本接近1，但是随着加载频率的增大，两者的比值逐渐减小。造成这一现象的主要原因包括以下两点：一方面，由于每个试件均按照加载频率从小到大的顺序进行加载，当黏滞阻尼材料受到扰动后无法在短时间内恢复到初始状态，导致加载频率为0.4Hz和1.0Hz时测得的试验结果会偏小；另一方面，黏滞阻尼墙在高频作用下运动更加剧烈，材料受到的扰动更大，因此这种降低现象也会更加明显。此外，随着材料黏度的增大，材料扰动对后续试验工况的影响会更加显著。总体而言，黏滞阻尼材料ARES试验得到的结果在很大程度上仍然适用于构件层次。因此，可以采用ARES的试验结果指导黏滞阻尼墙的尺寸设计。

## 本章小结

本章阐述了黏滞阻尼墙的构造形式、工作原理、黏滞阻尼墙常用的力学模型以及现有的阻尼力计算公式，分析了黏滞材料的特性及耗能机理并进行了ARES材料性能试验，得到了材料的复数黏度与材料标号和扫描频率的复合函数关系，最后通过小振动台试验，测试了黏滞材料在构件中的性能，并与其在材料测试中表现出的力学性能进行了对比。主要结论如下：

1. 本次试验采用的黏滞阻尼材料为聚异丁烯高分子聚合物的混合物，这种混合材料在试验过程中性能始终保持稳定。黏滞阻尼材料的耗能能力可通过复数黏度、储能模量、损耗模量、损耗因子等动态性能指标来体现。
2. 常温条件下随着频率的增大，材料的复数黏度和损耗因子不断减小，而储能模量和损耗模量不断增大。随着温度的升高，材料的黏度、储能模量和损耗模量逐渐减小，损耗因子逐渐增大，材料黏性特征表现得更加明显，流动性增强。
3. 黏滞阻尼材料的复数黏度主要取决于材料标号和扫描频率，复数黏度可以表示为两者的复合函数，且复合函数计算结果与试验结果的吻合度较好。
4. 在相同试验频率下，黏滞阻尼材料的黏度、储能模量和损耗模量随试验温度升高而减小，材料的损耗因子随温度升高而增大。同时随着温度的升高，黏滞阻尼材料的储能模量和损耗模量曲线交叉点处对应的频率值逐渐增大，表明材料的黏性特性更加明显，材料的流动性增强。
5. 黏滞阻尼墙的小振动台试验结果表明，ARES试验得到的黏滞阻尼材料性能参数与构件层次下的材料参数指标总体上具备较好的吻合度，可以用于指导黏滞阻尼墙的尺寸设计。

# 黏滞阻尼墙动力性能试验及理论分析

## 引言

黏滞阻尼墙作为一种新型消能减震构件，加载过程中振动频率、位移幅值、速度幅值、材料性能、材料厚度以及剪切面积等因素均会对其耗能能力产生较大的影响。本章根据查阅的黏滞阻尼墙文献资料，并结合课题组前一阶段试验的试件构造，设计制作了一片单层内钢板黏滞阻尼墙和一片双层内钢板黏滞阻尼墙。通过对黏滞阻尼墙进行正弦往复加载试验，测试其耗能能力，探究加载频率、位移幅值和速度幅值对黏滞阻尼墙性能的影响。在明确黏滞阻尼墙不同因素对阻尼墙性能的影响后，通过分析各加载工况下不同因素对黏滞阻尼墙力学性能的影响，提出了黏滞阻尼墙同时考虑最大速度和最大位移加载历史的影响机制，并建立适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型。对等幅正弦循环加载，其滞回模型将退化为统一的阻尼力计算公式，通过计算结果与试验结果的对比，验证了滞回模型的合理性。

## 黏滞阻尼墙试件设计及试验方案

### 试件设计及制作

本次试验在南京工业大学结构与桥梁工程实验室中进行，本次试验加载装置采用MTS公司生产的50吨作动器，其最大行程为250mm。为了探究黏滞阻尼墙的减震性能，这一部分试验共设计了两个试件，分别为单层内钢板阻尼墙试件1和双层内钢板阻尼墙试件2，其三维模型分别如图 3.1和图 3.2所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.1 试件1三维模型图 | 图 3.2 试件2三维模型图 |

试验加载框架采用一个四角均为铰接的机构，这样可以尽量减小加载框架附加摩擦力对于试验结果的影响。框架底部通过锚栓固定于地面，顶部与作动器相连，通过作动器带动顶部框架往复运动，从而模拟黏滞阻尼墙在实际工程中的耗能状况。由于试验时间为冬季，实验室内温度较低，为了保证黏滞阻尼墙能够在20℃左右工作，因此在黏滞阻尼墙面外两侧分别布置了一个取暖器作为加热热源，通过调节取暖器与黏滞阻尼墙的距离控制温度，保证所有试验工况均在设计温度允许范围内进行。

试件1和试件2主要由内钢板、外钢箱以及黏滞阻尼材料三部分组成，各子结构构造如图 3.3~图 3.6所示。其中在内钢板的顶板与剪切板连接处分别在左右两侧各焊接四个加劲板，确保在阻尼力传递过程中两者连接可靠；在内钢板剪切板左右两侧分别设置了五个限位小钢板，保证在剪切平面内黏滞阻尼材料厚度均匀，并且可以尽量避免剪切板发生面外扭转。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | |  |
|  | |  |
| 图 3.3 试件1内钢板构造图 | | |
|  |  | |
|  |  | |
| 图 3.4 试件1外钢箱构造图 | | |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | |  |
|  | |  |
| 图 3.5 试件2内钢板构造图 | | |
|  |  | |
|  |  | |
| 图 3.6 试件2外钢箱构造图 | | |

由于黏滞阻尼材料黏度较大，为了保证材料能够均匀填充入箱体，因此先将ARES试验得到的合理黏滞材料加热融化后通过漏斗倒入箱体中，之后插入内钢板。由于焊接精度有限，为使内钢板能够顺利插入，限位小钢板的实际厚度略小于钢箱间隙。同时在外钢箱上部增设了如图 3.7所示的圆形小钢棒作为滚轴，从而尽可能保证内钢板运行轨迹的稳定性，并且尽量避免附加额外摩擦力。试验装置实际安装照片如图 3.8所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.7 试件圆形钢棒滚轴 | 图 3.8 试验装置实拍图 |

### 试验加载方案

本次试验主要测量黏滞阻尼墙的变形能力和阻尼力。通过安装在作动器中的拉压力传感器来测量黏滞阻尼墙阻尼力，将量程为±50mm的位移计连接到泰斯特3828E动静态采集仪上，测量黏滞阻尼墙内钢板与外钢箱之间的相对位移。由于黏滞阻尼墙在往复运动的过程中有可能会引入气泡，并且在剪切过程中由于材料流动性较差可能会产生空腔，从而降低黏滞阻尼墙的阻尼力。为了尽可能减小上述问题对试验结果的影响，每组工况中的各单项工况按照位移幅值从小到大排列，在位移相同情况下，按照加载频率从小到大排列。本次试验通过伺服作动器自身的位移控制反馈值作为加载目标值，进行位移控制的正弦加载，每个工况加载五圈，各试验工况之间间隔五分钟，使黏滞材料液面尽可能恢复到初始状态，以保证试验结果的准确性。试件1和试件2的加载工况分别如表 3.1~表 3.3所示。

表 3.1 单层黏滞阻尼墙动力性能与位移幅值及加载频率相关性工况表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 | 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 |
| 1-1 | 3 | 0.1 | 1.88 | 1-17 | 20 | 0.5 | 62.83 |
| 1-2 | 5 | 0.1 | 3.14 | 1-18 | 30 | 0.5 | 94.25 |
| 1-3 | 10 | 0.1 | 6.28 | 1-19 | 3 | 1 | 18.85 |
| 1-4 | 15 | 0.1 | 9.42 | 1-20 | 5 | 1 | 31.42 |
| 1-5 | 20 | 0.1 | 12.57 | 1-21 | 10 | 1 | 62.83 |
| 1-6 | 30 | 0.1 | 18.85 | 1-22 | 15 | 1 | 94.25 |
| 1-7 | 3 | 0.3 | 5.65 | 1-23 | 20 | 1 | 125.66 |
| 1-8 | 5 | 0.3 | 9.42 | 1-24 | 30 | 1 | 188.50 |
| 1-9 | 10 | 0.3 | 18.85 | 1-25 | 3 | 1.5 | 28.27 |
| 1-10 | 15 | 0.3 | 28.27 | 1-26 | 5 | 1.5 | 47.12 |
| 1-11 | 20 | 0.3 | 37.70 | 1-27 | 10 | 1.5 | 94.25 |
| 1-12 | 30 | 0.3 | 56.55 | 1-28 | 15 | 1.5 | 141.37 |
| 1-13 | 3 | 0.5 | 9.42 | 1-29 | 3 | 2 | 37.70 |
| 1-14 | 5 | 0.5 | 15.71 | 1-30 | 5 | 2 | 62.83 |
| 1-15 | 10 | 0.5 | 31.42 | 1-31 | 10 | 2 | 125.66 |
| 1-16 | 15 | 0.5 | 47.12 | 1-32 | 15 | 2 | 188.50 |

表 3.2 单层黏滞阻尼墙动力性能与速度幅值相关性工况表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 | 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 |
| 2-1 | 3.18 | 0.25 | 5 | 2-9 | 4.55 | 0.7 | 20 |
| 2-2 | 3.98 | 0.2 | 5 | 2-10 | 6.37 | 0.5 | 20 |
| 2-3 | 5.31 | 0.15 | 5 | 2-11 | 10.61 | 0.3 | 20 |
| 2-4 | 7.96 | 0.1 | 5 | 2-12 | 31.83 | 0.1 | 20 |
| 2-5 | 3.98 | 0.4 | 10 | 2-13 | 6.37 | 1 | 40 |
| 2-6 | 5.31 | 0.3 | 10 | 2-14 | 9.09 | 0.7 | 40 |
| 2-7 | 7.96 | 0.2 | 10 | 2-15 | 12.73 | 0.5 | 40 |
| 2-8 | 15.92 | 0.1 | 10 | 2-16 | 21.22 | 0.3 | 40 |

表 3.3 双层黏滞阻尼墙动力性能与位移幅值及加载频率相关性工况表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 | 工况  序号 | 位移幅值/mm | 频率/Hz | 速度幅值/mm·s-1 |
| 3-1 | 3 | 0.1 | 1.88 | 3-11 | 3 | 0.5 | 9.42 |
| 3-2 | 5 | 0.1 | 3.14 | 3-12 | 5 | 0.5 | 15.71 |
| 3-3 | 10 | 0.1 | 6.28 | 3-13 | 10 | 0.5 | 31.42 |
| 3-4 | 15 | 0.1 | 9.42 | 3-14 | 15 | 0.5 | 47.12 |
| 3-5 | 20 | 0.1 | 12.57 | 3-15 | 20 | 0.5 | 62.83 |
| 3-6 | 3 | 0.3 | 5.65 | 3-16 | 3 | 1 | 18.85 |
| 3-7 | 5 | 0.3 | 9.42 | 3-17 | 5 | 1 | 31.42 |
| 3-8 | 10 | 0.3 | 18.85 | 3-18 | 10 | 1 | 62.83 |
| 3-9 | 15 | 0.3 | 28.27 | 3-19 | 15 | 1 | 94.25 |
| 3-10 | 20 | 0.3 | 37.70 | 3-20 | 20 | 1 | 125.66 |

## 试验结果

### 试验现象

试件1和试件2在各个工况加载前后，均未发生破坏现象，且各工况试验前后黏滞材料温度几乎没有明显变化。在试验加载过程中，加载框架顶部能够平稳滑动，在竖直方向高度变化较小，面外方向无明显变形及位移。试验过程中黏滞阻尼墙及其加载框架连接完好，螺栓无松动现象。在中小位移下黏滞阻尼墙可以平稳滑动；当加载频率较高且位移较大时，黏滞阻尼墙中左右两侧黏滞材料的空隙较小，因此在挤压过程中会产生较大的爆裂声。黏滞阻尼墙在进行多次往复加载后，由于黏滞材料存在剪切稀化的特性，且多次剪切后材料中会出现部分空腔，因此会出现阻尼力退化的现象。

### 试验曲线

#### 黏滞阻尼墙阻尼力—位移关系曲线

图 3.9和图 3.10分别绘制了试件1和试件2在相同加载频率、不同位移幅值下黏滞阻尼墙阻尼力与位移的关系曲线；图 3.11绘制了试件1在相同位移幅值、不同加载频率下黏滞阻尼墙阻尼力与位移的关系曲线；图 3.12绘制了试件1在相同速度幅值、不同频率和位移幅值下黏滞阻尼墙阻尼力与位移的关系曲线。为了得到黏滞阻尼墙真实的工作性能，对试验滞回曲线的数据进行了平滑化处理，基本上去除了噪声干扰，并且剔除了部分工况下的异常数据结果；同时从试验曲线可以看出，由于加载装置受到作动器频响特性的影响，在加载频率较高时，试验曲线无法达到预设的位移幅值。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 加载频率0.1Hz | （b） 加载频率0.3Hz |
|  |  |
| （c） 加载频率0.5Hz | （d） 加载频率1.0Hz |
|  |  |
| （e） 加载频率1.5Hz | （f） 加载频率2.0Hz |
| 图 3.9 同一加载频率下试件1阻尼力—位移关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 加载频率0.1Hz | （b） 加载频率0.3Hz |
|  |  |
| （c） 加载频率0.5Hz | （d） 加载频率1.0Hz |
| 图 3.10 同一加载频率下试件2阻尼力—位移关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 位移幅值5mm | （b）位移幅值10mm |
|  |  |
| （c）位移幅值15mm | （d）位移幅值20mm |
| 图 3.11 同一位移幅值下试件1阻尼力—位移关系曲线 | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 速度幅值5mm/s | （b）速度幅值10mm/s |
|  |  |
| （c）速度幅值20mm/s | （d）速度幅值40mm/s |
| 图 3.12 同一速度幅值下试件1阻尼力—位移关系曲线 | |

从以上试验曲线可以看出：

1. 黏滞阻尼墙的滞回曲线基本上为光滑且饱满的椭圆，随着位移幅值的增大，滞回环的形状逐渐偏向矩形；滞回曲线的倾斜程度会随着加载工况的不同呈现出不同的变化，说明黏滞阻尼墙在不同的试验条件下会表现出不同的动态刚度。
2. 如图 3.9和图 3.10所示，当试验的加载频率一定时，随着位移幅值的不断增大，黏滞阻尼墙滞回曲线所包围的面积呈现逐渐增大的趋势，其阻尼力也相应逐渐增大，黏滞阻尼墙的耗能能力不断增强。同时随着位移幅值的不断增大，黏滞阻尼墙滞回曲线的倾斜程度逐渐减小，说明其动态刚度随位移幅值的增大而减小。
3. 通过对比图 3.9和图 3.10相同加载工况下的滞回曲线，可以发现采用双层内钢板的黏滞阻尼墙，其耗能能力有明显的增强。由于在灌注材料时，试件2中黏滞材料的高度略低于试件1，因此相同工况下试件2的最大阻尼力只能达到试件1的1.6~1.8倍。但是通过两者滞回曲线的对比可以发现，采用双层内钢板是在墙体面积一定的情况下增大黏滞阻尼墙耗能能力的有效手段。
4. 如图 3.11所示，当试验的位移幅值一定时，随着加载频率的不断增大，黏滞阻尼墙滞回曲线所包围的面积呈现逐渐增大的趋势，其阻尼力也相应逐渐增大，黏滞阻尼墙的耗能能力不断增强。同时随着加载频率的不断增大，黏滞阻尼墙滞回曲线形状逐渐由矩形变为椭圆形。并且从图中可以明显的发现，随着加载频率的增大，作动器受到频响作用的影响，黏滞阻尼墙的位移幅值只在第一圈和最后一圈时可以达到设定值，而在往复运动过程中均存在位移幅值偏小的现象，且加载频率越高，这种现象越明显。
5. 从图 3.9和图 3.11中可以发现，试件1在加载频率和位移幅值较大的情况下，会出现滞回曲线向二四象限倾斜的情况，即材料出现了“负刚度”。这可能是由于加载过程中扰动过大，箱体内黏滞材料向其中一侧偏移，使得材料分布不均匀所致。
6. 如图 3.12所示，当试验的速度幅值一定时，随着位移幅值的增大，黏滞阻尼墙滞回曲线所包围的面积会有所增加，但是其阻尼力峰值基本相同，证明了黏滞阻尼墙是一种速度相关型的阻尼器，速度幅值对阻尼力峰值起决定作用。
7. 黏滞阻尼墙阻尼力会存在一定的退化现象，并且随着位移幅值和加载频率的增大，黏滞阻尼墙滞回性能的稳定性逐渐减小。这是由于黏滞阻尼材料存在剪切稀化的特性，并且随着位移幅值和加载频率的增大，黏滞阻尼材料所受到的扰动增加，由于材料黏度较大，在试验过程中无法迅速恢复到初始状态，导致内钢板与黏滞阻尼材料的有效接触面积减小，因此在试验过程中稳定性会变差，并且出现阻尼力退化的现象。

#### 黏滞阻尼墙阻尼力—速度关系曲线

通过图 3.12中的滞回曲线可以清晰的观察到，黏滞阻尼墙阻尼力主要取决于其运动过程中的速度幅值，因此对黏滞阻尼墙阻尼力与速度之间的相关关系进行分析也十分必要。

由于通过液压系统作动器无法直接采集到速度值，而采集到的位移值和阻尼力值会存在微小的波动，因此通过原始记录的位移值推算实际速度的过程中会出现很多的噪点干扰，从而导致速度—时间关系曲线无法反应真实的速度变化特性。因此，需要先对位移值和阻尼力值进行平滑化处理，得到光滑的曲线，再间接得到阻尼力和速度之间的对应关系。采用原始记录的位移值和平滑化处理的位移值得到的速度—时间关系曲线对比图如图 3.13所示，从图中可以清晰的观察到采用平滑化处理后噪点干扰可以得到有效的控制。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.13 速度-时间关系曲线对比图 |

图 3.14绘制了试件1在相同加载频率、不同位移幅值下黏滞阻尼墙阻尼力与速度的关系曲线；图 3.15绘制了试件1在相同位移幅值、不同加载频率下黏滞阻尼墙阻尼力与速度的关系曲线；图 3.16绘制了试件1在相同速度幅值、不同频率和位移幅值下黏滞阻尼墙阻尼力与速度的关系曲线。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 加载频率0.1Hz | （b） 加载频率0.3Hz |
|  |  |
| （c） 加载频率0.5Hz | （d） 加载频率1.0Hz |
|  |  |
| （e） 加载频率1.5Hz | （d） 加载频率2.0Hz |
| 图 3.14 同一加载频率下试件1阻尼力—速度关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 位移幅值3mm | （b）位移幅值5mm |
|  |  |
| （c）位移幅值10mm | （d）位移幅值15mm |
|  |  |
| （e）位移幅值20mm | （f）位移幅值30mm |
| 图 3.15 同一位移幅值下试件1阻尼力—速度关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 速度幅值5mm/s | （b）速度幅值10mm/s |
|  |  |
| （c）速度幅值20mm/s | （d）速度幅值40mm/s |
| 图 3.16 同一速度幅值下试件1阻尼力—速度关系曲线 | |

从以上试验曲线可以看出：

1. 黏滞阻尼墙的阻尼力—速度相关曲线基本呈现梭形，部分工况下在速度为零处附近会存在一定捏拢现象，而且所有工况下黏滞阻尼墙的阻尼力峰值均出现在速度幅值处附近，证明了速度幅值是阻尼力的主要影响因素。
2. 如图 3.14所示，当试验的加载频率一定时，随着位移幅值的不断增大，相关曲线所包围的面积逐渐增大，曲线的倾斜程度逐渐减小，但是曲线的捏拢程度并没有明显的变化。此外，图 3.14（a）中的曲线形状有些怪异，这主要是因为外钢箱设计尺寸偏小，当位移幅值较大时，钢箱沿运动方向两侧的间隙较小，使得黏滞材料的高度发生大幅度增加，导致黏滞阻尼力发生突然增大，这一现象在图 3.9（a）中滞回曲线的一、三象限中同样可以观察到。
3. 如图 3.15所示，当试验的位移幅值一定时，随着加载频率的不断增大，相关曲线包络的面积逐渐增大，曲线的倾斜程度逐渐减小，同时曲线的捏拢程度逐渐减弱，最终变成较为饱满的梭形。理论上，频率较大的相关曲线应该完全包络频率较小时的曲线，但是由于当加载频率较大时，作动器受到频响作用的影响，无法达到预设的位移幅值，从而导致高频下的相关曲线未能完全包络低频下的相关曲线。
4. 如图 3.16所示，当试验的速度幅值一定时，随着加载频率的不断增大（即位移幅值的不断减小），相关曲线逐渐变得饱满，捏拢程度不断减小，所包围的面积也不断增大。
5. 阻尼力—速度相关曲线有包络的面积，若采用单一的油壶模型（即线性模型）进行分析，则该相关曲线包络的面积应该为零，与试验现象相矛盾。因此使用这一模型来表征黏滞阻尼墙的力学特性是不准确的，应该在考虑黏滞特性的同时考虑刚度特性。

## 考虑加载历史影响的黏滞阻尼墙滞回模型

### 黏滞阻尼墙基本力学模型确定

黏滞阻尼墙常用的力学模型主要包括油壶模型（线性模型）、Maxwell模型和Kelvin模型，由于前一节分析发现黏滞阻尼墙的力学特性既与黏滞特性有关又与刚度特性有关，因此不宜采用线性模型。

Maxwell模型主要表现出黏滞材料趋近流体的宏观力学特性，对于流动性较强的黏滞液体，当黏滞阻尼墙达到最大位移并开始反向加载时，由于流体的惯性作用，使得材料在某一时刻其黏滞部分和刚度部分可能会表现出不同的速度，而两部分表现出的抵抗力始终相等，其运动原理的示意图如图 3.17所示。但是对于本试验所采用的黏滞材料，在试验过程中始终处于半固态，其流动性相对较差，因此采用Maxwell模型并不能够很好的描述黏滞阻尼墙的动力特性。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.17 Maxwell模型运动原理示意图 |

Kelvin模型描述了高分子聚合物趋近刚体的宏观力学性能，对于流动性较差的高分子材料，其黏滞部分和刚度部分始终处于相同的位移和速度下，黏滞阻尼墙抵抗力由黏滞部分和刚度部分共同承担，这一模型更加适用于本次试验的黏滞阻尼材料。此外，目前最具代表性的Miyazaki & Arima计算公式同样采用了Kelvin模型；《被动减震结构设计·施工手册》[74]中也有明确提到：“与筒型黏滞阻尼器不同，黏滞阻尼墙采用黏滞单元模型或凯尔文模型。”

因此，本文的黏滞阻尼墙力学分析模型最终确定采用Kelvin模型为基本力学模型。同时参考Miyazaki & Arima提出的计算公式，认为其总阻尼力可分为与速度相关的黏滞阻尼力和与位移相关的弹性恢复力两部分之和。

由于试验过程中，试验温度、黏滞材料的厚度、有效接触面积等相关参数均认为没有发生明显变化，因此可以将计算公式模型简化为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑1） |

式中 ——总黏滞抵抗力；

——黏滞阻尼力；

——弹性恢复力；

——材料黏滞特性系数；

——内外钢板相对运动速度；

——材料刚度特性系数；

——内外钢板的相对位移；

——由试验取得的指数，对于黏滞阻尼墙通常认为刚度指数可取为1。

### 黏滞阻尼墙加载历史影响机制

通过对课题组前一阶段黏滞阻尼墙试验以及本次试验结果的分析与研究，发现黏滞阻尼墙阻尼力并不是某一个瞬态的固有值，其阻尼力大小往往会受到以往加载历史的影响。从宏观层面上看，黏滞阻尼材料由于具有较大的黏性和较差的流动性，在加载过程中受到扰动的材料无法在短时间内恢复到初始状态，因此加载历史会对后续的加载过程产生一定的影响。从微观机理上看，当材料运动达到最大速度和最大位移后，后续的运动过程在一定范围内会受到这两个参数的影响，而加载频率的变化实际上也是最大速度和最大位移不同比例的一种宏观体现。因此可以通过定义加载历史相关的最大速度和最大位移来从一定程度上体现加载历史对阻尼力的影响，对于这两个变量进行了如下假定：

假定1：速度相关的加载历史影响会由于某一时刻速度的减小而被激活；一旦速度重新增大至原最大速度或者速度方向发生改变时，前一阶段的加载历史将会消失。对正弦加载的速度变化曲线而言，其加载历史相关的最大速度取值规则如图 3.18所示。

假定2：位移相关的加载历史影响会由于某一时刻位移的减小而被激活；一旦位移重新增大至原最大位移或者位移方向发生改变时，前一阶段的加载历史将会消失。对正弦加载的位移变化曲线而言，其加载历史相关的最大位移取值规则如图 3.19所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.18 取值规则示意图 | 图 3.19 取值规则示意图 |

### 弹性恢复力模型

当黏滞阻尼墙速度为零时，其阻尼力完全由刚度部分的弹性恢复力承担。通过试验的阻尼力与速度相关关系曲线可以快速标定黏滞阻尼墙各工况下的弹性恢复力特征参数。其特征参数对应值如表 3.4所示。

表 3.4 黏滞阻尼墙各工况刚度特征参数表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 频率 | 实际最大位移 | 弹性恢复力 | 动态刚度 |
| 1-3 | 0.1 | 10.31 | 1.86 | 0.180 |
| 1-4 | 0.1 | 15.46 | 2.26 | 0.146 |
| 1-5 | 0.1 | 20.59 | 2.96 | 0.144 |
| 1-6 | 0.1 | 30.85 | 4.32 | 0.140 |
| 1-8 | 0.3 | 5.15 | 2.44 | 0.474 |
| 1-9 | 0.3 | 10.29 | 2.37 | 0.230 |
| 1-10 | 0.3 | 15.44 | 3.64 | 0.236 |
| 1-11 | 0.3 | 20.61 | 4.17 | 0.202 |
| 1-12 | 0.3 | 31.00 | 5.93 | 0.191 |
| 1-13 | 0.5 | 3.01 | 2.48 | 0.824 |
| 1-14 | 0.5 | 5.03 | 2.56 | 0.509 |
| 1-15 | 0.5 | 10.06 | 2.86 | 0.284 |
| 1-16 | 0.5 | 15.11 | 3.16 | 0.209 |
| 1-17 | 0.5 | 20.15 | 4.52 | 0.224 |
| 1-18 | 0.5 | 30.48 | 5.06 | 0.166 |
| 1-19 | 1.0 | 2.80 | 2.76 | 0.987 |
| 1-20 | 1.0 | 4.55 | 3.08 | 0.676 |
| 1-21 | 1.0 | 9.35 | 3.16 | 0.338 |
| 1-22 | 1.0 | 13.40 | 3.54 | 0.264 |
| 1-23 | 1.0 | 17.72 | 4.17 | 0.235 |
| 1-25 | 1.5 | 3.19 | 2.94 | 0.923 |
| 1-26 | 1.5 | 4.73 | 3.44 | 0.727 |
| 1-27 | 1.5 | 9.92 | 3.28 | 0.331 |
| 1-28 | 1.5 | 13.46 | 4.48 | 0.333 |
| 1-29 | 2.0 | 2.77 | 2.42 | 0.873 |
| 1-30 | 2.0 | 4.66 | 2.37 | 0.508 |
| 1-31 | 2.0 | 8.27 | 1.95 | 0.236 |

黏滞阻尼墙各个工况下的弹性恢复力与位移的关系曲线如图 3.20所示，各工况下的线性动态刚度与位移的关系曲线如图 3.21所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.20 弹性恢复力与位移关系曲线 | 图 3.21 动态刚度与位移的关系曲线 |

从图 3.20中可以看出弹性恢复力与位移之间并没有明显的相关关系，因而拟合曲线的拟合效果相对较差，其决定系数仅有47.7%。但是从图 3.21中可以看到线性动态刚度与位移之间有比较明显的负相关关系，其拟合曲线的拟合效果比较令人满意，决定系数可以达到93.0%。

通过上述拟合分析可以发现，黏滞阻尼墙的动态刚度受加载历史最大位移值的影响，其线性动态刚度值随着加载历史最大位移值的增大而减小，动态刚度与位移之间的关系可近似表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑2） |

因此，可以采用如下表达式来描述弹性恢复力与位移之间的关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑3） |

其中，的取值规则如3.4.2节所示。

### 恢复力补偿模型

当按照公式（3‑3）确定弹性恢复力后，可以用总阻尼力减掉弹性恢复力，从而得到各工况下黏滞阻尼力与速度之间的关系曲线。以0.3Hz-10mm和0.5Hz-15mm两个工况为例，按照线弹性恢复力计算后得到的黏滞阻尼力与速度之间的关系曲线如图 3.22所示。

|  |  |
| --- | --- |
| ①  ②  ③  ④ | ②  ③  ④ |
| （a）0.3Hz-10mm | （b）0.5Hz-15mm |
| 图 3.22 黏滞阻尼力—速度关系曲线 | |

图 3.22中①和③代表加速阶段，②和④代表减速阶段，从图中曲线形状可以看出，黏滞阻尼墙在加速阶段黏滞阻尼力和速度近似呈幂函数关系，而在减速阶段两者近似呈线性关系。但是在一三象限的顶点处附近可以发现，当速度达到最大值时阻尼力已经开始有下降的趋势，这与幂函数的表达式想违背，因此拟合得到的速度指数和黏滞系数会存在较大误差，若要得到更加准确的阻尼力模型，就需要引入更多的参数。

为了保证计算公式形式上的简化性，且同时考虑加载历史对黏滞阻尼墙力学性能的影响，本文采用唯象的方法引入了一种恢复力补偿模型，通过黏滞阻尼力和弹性恢复力两者的互相补偿，使得总阻尼力符合实际情况。

针对此补偿模型其基本假定为：黏滞阻尼墙在加速阶段（即位移从最值处恢复到零点处阶段），由于黏滞材料发生扰动造成的滞后现象，使得弹性恢复力在此期间始终等于前一阶段的峰值；当黏滞阻尼墙经过零点处（即进入减速阶段），前一阶段的滞后效应消失，弹性恢复力将从前一阶段的峰值点开始线性变化，在位移到达本阶段最大值时，弹性恢复力也恰好达到本阶段的峰值。在这一阶段，补偿模型的等效刚度为黏滞阻尼墙实际动态刚度的2倍，即。该模型的示意图如图 3.23所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.23 恢复力补偿模型示意图 |

### 黏滞阻尼力模型

通过唯象方法采用上述补偿模型进行黏滞阻尼力补偿后，得到的新黏滞阻尼力与速度关系曲线形状如图 3.24所示。从图中可以看到，新的关系曲线在加速阶段更接近于幂函数模型，因此采用这种方法拟合得到的速度指数和黏滞系数，其相对误差也更小。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）0.3Hz-10mm | （b）0.5Hz-15mm |
| 图 3.24 考虑补偿模型后的黏滞阻尼力与速度关系曲线 | |

针对任意单一工况下黏滞阻尼墙正向加速和反向加速的阻尼力—速度关系曲线进行拟合，可以得到每种工况下黏滞阻尼力部分的特征参数，各参数的拟合结果如表 3.5所示。

表 3.5 黏滞阻尼墙各工况黏滞特征参数表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况序号 | 频率 | 正向加载 | | | 反向加载 | | |
| 最大速度 | 速度指数 | 黏滞 系数 | 最大速度 | 速度指数 | 黏滞系数 |
| 1-3 | 0.1  0.1  0.1  0.1 | 6.464 | 0.539 | 2.450 | -6.486 | 0.497 | 2.515 |
| 1-4 | 9.701 | 0.556 | 2.276 | -9.732 | 0.465 | 2.763 |
| 1-5 | 12.902 | 0.552 | 2.301 | -12.943 | 0.444 | 2.774 |
| 1-6 | 19.342 | 0.517 | 2.640 | -19.383 | 0.437 | 2.724 |
| 1-8 | 0.3  0.3  0.3  0.3  0.3 | 9.667 | 0.756 | 1.339 | -9.727 | 0.780 | 1.267 |
| 1-9 | 19.259 | 0.711 | 1.440 | -19.311 | 0.733 | 1.246 |
| 1-10 | 28.892 | 0.658 | 1.490 | -28.947 | 0.686 | 1.334 |
| 1-11 | 38.507 | 0.638 | 1.573 | -38.544 | 0.655 | 1.445 |
| 1-12 | 57.602 | 0.649 | 1.546 | -57.792 | 0.634 | 1.560 |
| 1-13 | 0.5  0.5  0.5  0.5  0.5  0.5 | 9.418 | 0.908 | 0.877 | -9.467 | 0.947 | 0.809 |
| 1-14 | 15.656 | 0.879 | 0.787 | -15.748 | 0.885 | 0.783 |
| 1-15 | 31.108 | 0.836 | 0.935 | -31.251 | 0.954 | 0.636 |
| 1-16 | 46.639 | 0.836 | 0.708 | -46.149 | 0.876 | 0.607 |
| 1-17 | 61.539 | 0.784 | 0.766 | -61.713 | 0.838 | 0.604 |
| 1-18 | 91.698 | 0.774 | 0.802 | -91.97 | 0.801 | 0.689 |
| 1-19 | 1.0  1.0  1.0  1.0  1.0 | 16.442 | 1.107 | 0.338 | -16.457 | 1.147 | 0.308 |
| 1-20 | 27.231 | 1.086 | 0.303 | -27.314 | 1.104 | 0.281 |
| 1-21 | 52.591 | 1.075 | 0.210 | -53.113 | 1.075 | 0.206 |
| 1-22 | 78.595 | 1.086 | 0.245 | -78.86 | 1.025 | 0.294 |
| 1-23 | 103.641 | 1.051 | 0.214 | -103.833 | 0.988 | 0.356 |
| 1-25 | 1.5  1.5  1.5  1.5 | 26.802 | 1.241 | 0.125 | -26.781 | 1.257 | 0.122 |
| 1-26 | 39.795 | 1.234 | 0.121 | -39.322 | 1.232 | 0.119 |
| 1-27 | 80.757 | 1.118 | 0.120 | -81.265 | 1.337 | 0.045 |
| 1-28 | 107.79 | 1.094 | 0.117 | -108.96 | 1.383 | 0.032 |
| 1-29 | 2.0 | 28.104 | 1.302 | 0.098 | -28.046 | 1.238 | 0.116 |
| 1-30 | 2.0 | 47.285 | 1.225 | 0.083 | -47.048 | 1.180 | 0.102 |
| 1-31 | 2.0 | 83.408 | 1.132 | 0.083 | -82.661 | 1.102 | 0.099 |

各工况拟合结果的决定系数均在95%以上，具备很好的拟合精度，且对于正向加载和反向加载情况得到的拟合速度指数及黏滞系数基本相同，可采用两者的平均值作为整个工况加速阶段的黏滞特征参数。对于减速阶段，从图 3.24中可以看出黏滞阻尼力与速度近似呈线性关系，这是由于当黏滞阻尼墙速度达到最大值后，加载历史最大速度值会对后续黏滞阻尼力产生影响。整个过程中的黏滞阻尼力与速度的关系可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑4） |

由于在整个运动过程中，黏滞阻尼力不存在突变现象，因此在速度最大处应该满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑5） |
|  |  | （3‑6） |

根据3.4.2节中的加载历史假定，在加速阶段加载历史最大速度为当前的瞬时速度。因此黏滞阻尼力模型可以统一表达为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑7） |

为了能够涵盖不同频率和不同位移幅值，本文以0.1Hz-10mm、0.3Hz-20mm、0.5Hz-15mm、1.0Hz-5mm工况为例，采用上述弹性恢复力特征参数及黏滞阻尼力特征参数得到的计算曲线与试验滞回曲线的对比情况如图 3.25所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）0.1Hz-10mm | （b）0.3Hz-20mm |
|  |  |
| （a）0.5Hz-15mm | （b）1.0Hz-5mm |
| 图 3.25 单一工况计算公式值与试验值对比曲线 | |

从图中可以看出，针对单一工况拟合得到的阻尼力计算曲线与试验曲线的吻合度很好，能够较好的还原黏滞阻尼墙在试验中表现出的力学性能。图 3.25 (a)中一、三象限吻合度较低的原因是由于材料的不均匀分布，导致黏滞阻尼墙表现出了“负刚度”，而这一偶然因素无法在计算公式中体现出来，因此试验曲线与计算曲线之间存在一定的误差。

### 适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型

通过3.4.3和3.4.4节的参数标定与模型建立，可以得到针对任意单一工况的计算滞回曲线，且计算曲线与试验曲线具备较高的吻合度。但是对于实际工程而言，需要采用统一的滞回模型进行计算。因此，本节将不同工况下速度指数和黏滞系数的分别提取出来，各工况下的参数分布情况如图 3.26、图 3.27所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.26 各工况速度指数分布图 | 图 3.27 各工况黏滞系数分布图 |

从图 3.26中可以看出，同一频率下速度指数随位移的增大略有减小，但总体上稳定在某一固定值附近；从图 3.27中可以看出，同一频率下阻尼系数基本稳定在某一固定值附近。因此，可以用同一频率下不同工况的速度指数平均值和黏滞系数平均值来标定该加载频率下的黏滞阻尼力，各参数结果如表 3.6所示。

表 3.6 黏滞阻尼墙同一频率下黏滞特征参数表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 频率 | 速度指数 | 黏滞系数 |
| 0.1 | 0.504 | 2.590 |
| 0.3 | 0.701 | 1.391 |
| 0.5 | 0.812 | 0.709 |
| 1.0 | 1.080 | 0.299 |
| 1.5 | 1.237 | 0.105 |

针对某一频率下得到的计算公式仍然能够较好的模拟黏滞阻尼墙的力学性能。但是实际上，地震作用往往跨越很宽的频率范围，例如，采用经验格林函数法模拟2011年日本东北大地震，可以估计出此次地震的频率范围可以达到0.1~10Hz[68]。同时，地震频率是一个微观量，它反映了一段时域内的震动特性，对于任一时间点而言，频率不具备物理意义。而且，在实际地震作用下往往无法预测频率的大小，因此在统一的计算公式中不应包含频率的直接变量。

对于正弦位移加载，位移幅值、速度幅值、加载频率与瞬时位移、瞬时速度满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑8） |
|  |  | （3‑9） |

因此加载频率可以用如下表达式近似表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑10） |

对于不同加载频率，黏滞阻尼墙速度指数和黏滞系数的参数拟合结果如图 3.28和图 3.29所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 3.28 速度指数—频率关系曲线 | 图 3.29 黏滞系数—频率关系曲线 |

从图 3.28和图 3.29中可以看到，拟合曲线的吻合度较高，决定系数均超过95%。因此，考虑频率变化的速度指数和黏滞系数的表达式分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑11） |
|  | | （3‑12） |

将公式（3‑11）和（3‑12）带入公式（3‑7），可以得到黏滞阻尼力部分的计算表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑13） |

将公式（3‑13）的黏滞阻尼力与公式（3‑3）的弹性恢复力相加，可以得到适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型为：

|  |  |
| --- | --- |
| = | （3‑14） |

### 稳态下统一阻尼力计算公式准确性检验

由于本次试验进行的工况均为等幅正弦循环加载，因此上述滞回模型将退化为一个统一的阻尼力公式。为了验证所得到的统一计算公式的准确性，本节采用公式（3‑14）重新计算0.1Hz-10mm、0.3Hz-20mm、0.5Hz-15mm、1.0Hz-5mm工况的阻尼力与位移关系曲线，并与试验得到的滞回曲线进行对比，其曲线对比图如图 3.30所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）0.1Hz-10mm | （b）0.3Hz-20mm |
|  |  |
| （a）0.5Hz-15mm | （b）1.0Hz-5mm |
| 图 3.30 通用工况计算公式值与试验值对比曲线 | |

从图中可以看出，采用考虑加载历史影响的统一阻尼力计算公式仍然能够比较准确的反应出黏滞阻尼墙的动力性能，尤其在中低频范围内，计算公式的精确程度更高。这可能是由于试验加载时作动器由于受到频响效应，在较高频率范围内得到的试验曲线存在一定偏差，从而导致统一计算公式与试验曲线的吻合程度受到限制。

## 本章小结

本章设计了一片单层内钢板黏滞阻尼墙和一片双层内钢板黏滞阻尼墙；对两片黏滞阻尼墙进行了正弦往复加载动力试验，测试了黏滞阻尼墙的耗能能力，分析了加载频率、位移幅值和速度幅值对黏滞阻尼墙的性能影响，验证了速度幅值对黏滞阻尼墙的决定性影响；确定了采用Kelvin模型作为基本力学模型进行分析；提出了同时考虑最大速度和最大位移加载历史的影响机制，并对黏滞阻尼墙黏滞力和恢复力部分的参数进行了标定，建立了适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型。主要结论如下：

1. 黏滞阻尼墙的阻尼力—位移滞回曲线基本上为光滑且饱满的椭圆，随着位移幅值的增大，黏滞阻尼墙滞回环倾斜程度逐渐减小，曲线形状趋近于矩形，表明其动态刚度随着加载幅值的增大而逐渐减小。随着加载频率的增大，曲线形状逐渐变成椭圆形，且作动器频响作用会在高频下表现得更加明显，从而导致位移幅值小于设定值。
2. 黏滞阻尼墙的阻尼力—速度关系曲线基本上呈现梭形，随着位移幅值的增大，曲线倾斜程度逐渐减小，曲线的捏拢程度无明显变化。随着加载频率的不断增大，曲线倾斜程度逐渐减小，且捏拢程度逐渐减小，最终变得较为饱满。
3. 提出了考虑加载历史影响的基本假定。假定认为黏滞阻尼墙阻尼力大小受到最大速度和最大位移的加载历史影响，这一影响会分别在速度或位移变量减小时被激活，一旦该变量重新增大至原最大值或者方向发生改变时，前一阶段的相应加载历史将会消失。
4. 对黏滞阻尼墙弹性恢复力模型进行了参数标定，为了用较少的参数标定黏滞阻尼力模型，提出了采用唯象方法的恢复力补偿模型。
5. 基于加载历史影响的基本假定和恢复力补偿模型，建立了适用于不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型。对等幅正弦循环加载，其滞回模型将退化为统一的阻尼力计算公式，通过计算结果与试验结果的比较，验证了滞回模型的合理性。

# 复合型铅-黏滞阻尼墙试验及分析

## 引言

传统的黏滞阻尼墙只能依靠墙体内部的高黏度黏滞液体剪切变形耗能，阻尼力较小。当墙体大小受到限制时，黏滞阻尼墙的耗能能力就变得更加有限。因此改进传统的黏滞阻尼墙，使其耗能能力增强并且具备一些新的耗能特性是非常有意义的。本章提出了一种复合型的铅-黏滞阻尼墙，在小震下铅阻尼器处于间隙阶段，只通过黏滞阻尼墙耗能；而在中震或大震下，铅阻尼器迅速屈服，与黏滞阻尼墙实现共同耗能，从而有效增大阻尼器的耗能能力。本章首先通过对铅阻尼器的力学性能试验标定铅阻尼器的基本特征参数，探究不同参数的影响因素。其次设计并进行了铅-黏滞阻尼墙的动力试验，之后将铅-黏滞阻尼墙的试验曲线与相同工况下的传统黏滞阻尼墙试验曲线进行对比，分析其耗能特性，并通过滞回模型的理论公式来验证复合型阻尼墙的耗能特性。

## 铅阻尼器力学性能试验

### 试件设计及制作

本章所采用的板式剪切型铅阻尼器三维模型如图 4.1所示，实际构造如图 4.2所示。包括有上、下两个盖板以及滑动板。两个盖板分别扣在滑动板的上下两个表面上，在两个盖板与滑动板的各接触面上各开一个凹槽，且四个凹槽的位置相对、尺寸相同，可以形成上下两个空腔，为了减小加工难度，提前按照设计尺寸预制两个铅块，分别直接嵌入两个空腔中。将六个螺杆分为两列，从盖板两侧穿过，通过锁紧螺母与锁紧螺杆固定两个盖板以及夹在盖板中间的滑动板和剪切铅块。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| 图 4.1 铅阻尼器三维模型图 | |
|  |  |
| 图 4.2 铅阻尼器实际构造 | |

为了探究板式剪切型铅阻尼器的滞回性能，共设计了三个铅阻尼器试件，试件编号分别为SPL1~SPL3，其中端板和滑动板的尺寸均相同，三个试件中铅块的尺寸分别为、和。试件主要由连接板、上下盖板、滑动板和铅块组成，各子结构构造如图 4.3所示。

试验加载装置采用量程为60吨的CMT5605系列微机控制电子万能试验机，主机结构由两根滚珠丝杠、一个移动横梁、一个底部支撑结构、四根导向光杠、一个上横梁、两个钣金侧罩等组成。将铅阻尼器试样固定在试验装置上，由滚珠丝杠驱动移动横梁运动，对试样进行低周往复加载试验。加载装置示意图和实际加载照片如图 4.4和图 4.5所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| 图 4.3 铅阻尼器子结构构造图 | |
|  |  |
| 图 4.4 加载装置示意图 | 图 4.5 实际加载照片 |

### 试验加载方案

本次试验主要测量铅阻尼器的变形能力和阻尼力之间的相关关系，试验数据通过LCD-60tM传感器测得。试验通过万能试验机自身的位移控制反馈值作为加载目标值，进行位移控制的正弦加载，每个工况加载五圈，试件SPL1~SPL3的加载位移幅值为10，20和30mm，加载顺序按照位移幅值从小到大排列，相邻工况之间间隔五分钟，以保证试验结果的准确性。为了探究加载频率（即加载速度）对铅阻尼器阻尼力的影响，对SPL3试件在位移幅值为20和30mm工况下分别按照0.25，0.5和1.0Hz进行加载。

### 试验现象

铅阻尼器在试验前后盖板无明显变形，铅阻尼器基本上具备原有的耗能能力。由于安装过程中盖板与滑动板没能完全贴紧，随着工况数量的增加，铅块由于摩擦生热软化后强度下降，导致在剪切过程中出现漏铅现象（如图 4.6所示）。当铅阻尼器加载到最大位移处时，盖板凹槽内沿运动方向前端部分的铅块会呈现卷曲状态（如图 4.7所示），而沿运动方向末端部分的铅块填充相对饱满（如图 4.8所示）。由于预制铅块与凹槽尺寸会存在少许偏差，无法完全填满凹槽，同时在加载过程中有部分铅块被剪出，导致多次循环试验后凹槽中出现间隙（如图 4.9所示）。试验后铅块沿螺杆方向有外撑趋势，导致螺杆变得更紧、更难拆卸。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.6 漏铅现象 | 图 4.7 前端铅块状态 |
|  |  |
| 图 4.8 末端铅块状态 | 图 4.9 凹槽处间隙 |

### 试验曲线及结果分析

图 4.10绘制了SPL1~SPL3分别在不同加载位移幅值下的阻尼力—位移的关系曲线；图 4.11绘制了SPL3试件在相同位移幅值，不同加载频率（即加载速率）下的阻尼力—位移的关系曲线。为了得到铅阻尼器本身真实的工作性能，对试验滞回曲线的数据进行了相应处理，剔除了由于螺栓孔与螺栓间隙导致的误差干扰。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） SPL1 | （b） SPL2 |
|  |  |
| （c） SPL3 |  |
| 图 4.10 不同位移幅值下铅阻尼器试件阻尼力—位移关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 位移幅值20mm | （b）位移幅值30mm |
| 图 4.11 不同频率下SPL3试件阻尼力—位移关系曲线 | |

从上述试验数据可以得到以下结论：

1. 通过图 4.10中的滞回曲线可以观察到，铅阻尼器对于位移变化比较敏感，在较小的变形下即可获得较大的滞回阻尼力。阻尼器的滞回曲线包围的面积近似于矩形，循环一周做功较大，耗能效率较高。
2. 铅阻尼器的滞回模型近似于双线性模型，初始弹性刚度很大，而铅块屈服后其阻尼力基本保持不变，屈服后的第二刚度相对较小。为简化分析，可以近似认为第二刚度为零，滞回模型可以简化为理想弹塑性模型。
3. 通过图 4.11中的滞回曲线可以观察到，铅阻尼器的滞回曲线在同一位移幅值、不同加载频率（即加载速率）下基本重合，其曲线形状不随加载频率的变化而变化，而且其初始弹性刚度也不会随频率的变化发生明显的改变，因此可以说明铅阻尼器是一种位移型的阻尼器，其阻尼力特性与速度变化无关。
4. 通过图 4.10可以发现，当铅阻尼器位移幅值较小时，其阻尼力并没有能够立刻达到峰值点。这是因为剪切铅块的塑性变形主要集中在它的剪切面上，当位移较小时，铅块本身长度与位移之比较大，也就是说在这一变形过程中会有一部分铅体仍然处于弹性阶段，并没有达到全截面塑性状态，因此其阻尼力会小于阻尼力峰值。
5. 从图 4.10和图 4.11可以看到，铅阻尼器的滞回曲线在第二、四象限容易出现“缺口”。这是由于试件设计时采用预制铅块嵌入凹槽，而非通过盖板开孔灌注铅芯，所以凹槽与铅块间多少会存在一定间隙；同时，在多次往复剪切后会存在一定的漏铅现象，增大了铅块与凹槽之间的间隙。因此，在铅阻尼器反向加载的过程中，铅块变形会先填满这部分间隙，导致阻尼力在这一阶段会有所下降，从而出现了“缺口”。
6. 图 4.10中试件SPL1和SPL2的差别在于剪切铅块的宽度由40mm变化为60mm，而两个试件的最大阻尼力也恰好由95KN变化为140KN，说明铅阻尼器的阻尼力确实与铅块的宽度成正比。而且，通过这一结果也使得铅阻尼器满足平面应力的基础假定得到了证实，铅阻尼器的阻尼力等于剪切面单位面积的剪应力与铅块面积的乘积。由试验曲线计算得到的铅阻尼器屈服剪应力约为11.75MPa。
7. 图 4.10中试件SPL1和SPL3的差别在于剪切铅块的厚度由20mm变化为12mm，两个试件的最大阻尼力基本相同，说明剪切铅块的厚度不会影响铅阻尼器的阻尼力峰值。但是SPL3的“缺口”现象比SPL1更加明显，这是由于铅块厚度较小，使得凹槽间隙体积占凹槽总体积比例增大，因此在反向加载的过程中，这一部分对于铅阻尼器的阻尼力降低比例更大，导致“缺口”更加显著。

### 铅阻尼器阻尼力模型

剪切型铅阻尼器的性能受到阻尼器的形状、阻尼器构造以及多种几何参数的影响。其阻尼力模型主要有刚塑性模型、双线性模型等。通过上述三个铅阻尼器试件的低周往复加载试验，发现其阻尼力模型可以近似看作理想弹塑性模型，其滞回曲线形式如图 4.12所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.12 铅阻尼器理想弹塑性模型 |

为了得到简化的理想弹塑性阻尼力模型，需要假定铅阻尼器沿铅块的剪切变形均匀且在剪切面上的屈服近似认为同时发生，即剪切型铅阻尼器的屈服力只取决于铅块的受剪面积，且与受剪面积成正比关系。铅阻尼器的屈服力为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑1） |

式中，为铅的剪切屈服强度，为铅块的受剪面积。

根据能量原理，外力做功为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑2） |

根据近似几何关系可得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑3） |

铅块的变形做功为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑4） |

根据内外功相等，即可得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑5） |

因此铅阻尼器的弹性刚度K可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑6） |

从公式（4‑6）可知，铅阻尼器的弹性刚度取决于剪切面积和铅块厚度，与铅块面积成正比，与铅块厚度成反比。

试件SPL1~SPL3在不同工况下的弹性刚度如表 4.1所示，其弹性刚度具体分布情况见图 4.13。

表 4.1 不同工况下铅阻尼器弹性刚度分布表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 方向 | 位移幅值（mm） | 弹性刚度（kN/mm） | | | |
| SPL1 | SPL2 | SPL3 | |
| 正向 | 10 | 46.6 | 71.8 | 76.9 | |
| 20 | 48.8 | 70.6 | 73.9 | |
| 30 | 45.6 | 66.7 | 78.1 | |
| 反向 | 10 | 50.5 | 72.0 | 73.8 | |
| 20 | 50.8 | 72.1 | 72.3 | |
| 30 | 46.1 | 68.3 | 75.8 | |
| 平均值 | | 48.1 | 70.3 | 75.1 | |
|  | | | | |
| 图 4.13 不同工况下铅阻尼器弹性刚度分布图 | | | | |

变异系数是原始数据标准差与平均数之比，是用于衡量数据离散程度大小的统计量。试件SPL1~SPL3在不同工况下弹性刚度变异系数值分别为4.33%、2.93%和2.64%，计算结果表明试验数据点稳定性较好，基本稳定在同一范围内。

从表 4.1可以得到，试件SPL1~SPL3的平均弹性刚度分别为48.1kN/mm、70.3kN/mm和75.1kN/mm。试验结果满足，因此公式（5-6）的弹性刚度表达式完全适用于此类剪切型铅阻尼器，由试验结果计算得到的铅块剪切模量约为240MPa。

## 复合型铅-黏滞阻尼墙动力试验

### 试件设计及制作

复合型铅-黏滞阻尼墙试件3是在单层内钢板阻尼墙试件1的基础上附加铅阻尼器得到的，试件1两侧的立柱以及内钢板上已经预先开设了螺栓孔用于连接铅阻尼器。为了实现小震下黏滞阻尼墙单独耗能，中震或大震下铅阻尼器与黏滞阻尼墙共同耗能这一特性，在内钢板上开设了长圆孔，使得小震下铅阻尼器处于间隙阶段不参与耗能，在中、大震下铅阻尼器开始屈服实现共同耗能。由于在进行铅阻尼器力学性能试验时存在漏铅的问题，为了避免这一现象的发生，且尽可能减小铅阻尼器盖板与滑动板之间摩擦力的影响，在阻尼器设计时，将凹槽两侧50mm外的滑动板进行了打磨处理，从而在不造成漏铅的前提下尽可能减小引入摩擦力，如图 4.14所示。试件3铅阻尼器部分的构造如图 4.15所示，图 4.16和图 4.17分别为试件3整体的三维模型图以及实际加载阶段的照片。由于黏滞阻尼墙试件1的实际阻尼力大小比设计值偏小，因此在实际试验中，试件3只在一侧装有铅阻尼器，以实现铅阻尼器与黏滞阻尼墙耗能能力的匹配。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.14 铅阻尼器摩擦板两侧磨光处理 | |
|  | |
| 图 4.15 铅阻尼器构造图 | |
|  |  |
| 图 4.16 试件3三维模型图 | 图 4.17 试件3实际加载图 |

### 试验加载方案

本试验的加载方式与试件1基本相同，同样测量试件的变形能力和阻尼力之间的相关关系。为了分析复合型阻尼墙的耗能特性，选取试件1中试验结果较好的工况进行对比，同时应使得铅阻尼器能够开始工作。试件3的加载频率为0.1，0.3和0.5Hz，加载位移幅值为15，20和30mm，加载顺序按照加载频率从小到大排列，在同一加载频率下位移幅值从小到大加载，每个工况加载五圈，相邻工况之间间隔五分钟，以保证试验结果的准确性。

### 试验现象

试件3在各个工况加载前后，均未发生明显破坏现象，且各个工况试验前后黏滞材料的温度基本没有发生变化。在试验加载过程中，加载框架顶部能够平稳滑动，在竖直方向高度变化较小，面外方向无明显变形及位移。试验过程中黏滞阻尼墙与铅阻尼器及其加载框架始终连接完好，螺栓无松动现象。在加载过程中，由于铅阻尼器盖板上的螺栓孔径大于螺杆直径，因此螺栓在加载过程中会存在一定的滑移。滑动板与内钢板连接处的螺栓可以在长圆孔内正常滑动。试验过程中铅阻尼器始终稳定工作，未出现漏铅现象。由于试件在安装时使用扭矩扳手严格拧紧到预设的扭矩，因此在试验过程中试件内螺栓连接处均未出现松动现象。当试验中加载位移较大时，黏滞阻尼墙中左右两侧黏滞材料的空隙较小，因此在挤压过程中会产生较大的爆裂声。试件3在进行多次往复加载后，由于铅阻尼器在反复剪切摩擦后会发生软化，导致强度下降；且黏滞阻尼墙中的黏滞材料存在剪切稀化的特性，在多次剪切后材料中容易出现空腔，因此这种复合型铅-黏滞阻尼墙在加载过程中也会存在一定的阻尼力退化现象。

### 试验曲线及结果分析

图 4.18绘制了试件3在相同加载频率、不同位移幅值下的阻尼力与位移的相关关系；图 4.19绘制了试件3和试件1在相同工况条件下阻尼力与位移相关关系的对比图。为了得到复合型铅-黏滞阻尼墙真实的工作性能，对试件3滞回曲线的数据进行了平滑化处理，基本上去除了噪音干扰。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 加载频率0.1Hz | （b）加载频率0.3Hz |
|  |  |
| （c）加载频率0.5Hz |  |
| 图 4.18 同一加载频率下试件3阻尼力—位移关系曲线 | |
|  |  |
| （a） 工况0.1Hz-15mm | （b）工况0.1Hz-30mm |
|  |  |
| （c）工况0.3Hz-20mm | （d）工况0.5Hz-20mm |
| 图 4.19 相同工况下试件3和试件1阻尼力—位移关系曲线对比图 | |

通过上述试验曲线以及对比曲线可以看出：

1. 如图 4.18、图 4.19所示，复合型阻尼墙的滞回曲线相对比较光滑，表明工作性能基本稳定良好。从试件1和试件3滞回曲线的对比图中可以观察到在循环加载过程中，当铅阻尼器处于间隙时阻尼力完全由黏滞阻尼墙提供，阻尼力较小；当铅阻尼器开始屈服耗能后，阻尼力迅速增大，阻尼墙的耗能能力有明显的提升。
2. 试件3设计时按照小震下由黏滞阻尼墙单独耗能，单侧间隙设计值选取钢结构弹性层间位移角为1/250，试件高度约为1500mm，因此长圆孔的开孔长度设定为。由于铅阻尼器盖板处的螺杆直径小于螺栓孔径，因此螺栓在加载过程中存在一定的滑移，导致试件3的间隙总长度达到16mm左右。
3. 从图 4.18和图 4.19中可以看出，当铅阻尼器位移较小时，剪切面上的部分铅体仍然处于弹性阶段，没有达到全截面塑性屈服，因此阻尼力并没有达到峰值。为了保证铅阻尼器能够放置在加载柱上，且要留出足够的滑移距离，铅块的设计长度仅为50mm。因此当铅阻尼器位移较大时，铅块剪切面的接触面积不断减小，当达到一定程度后，会出现阻尼力逐渐下降的现象。
4. 复合型铅-黏滞阻尼墙存在一定的阻尼力退化现象，并且随着加载频率和位移幅值的增大，试件3滞回性能的稳定性逐渐减小。这是由于铅阻尼器在反复剪切摩擦后会发生软化，导致强度下降；同时，黏滞阻尼材料本身具有剪切稀化的特性，且材料受到扰动后无法恢复到初始状态，导致内钢板与材料的有效接触面积减小，从而导致部分工况的滞回曲线稳定性变差，并且出现阻尼力退化现象。

### 复合型铅-黏滞阻尼墙阻尼力滞回模型

通过对上述试验曲线的结果分析，可以清楚的掌握复合型铅-黏滞阻尼墙的耗能机理，即在小震下铅阻尼器处于间隙阶段不提供阻尼力，阻尼力完全由黏滞阻尼墙部分承担，当位移大于单侧间隙值时，铅阻尼器迅速屈服并提供阻尼力，实现与黏滞阻尼墙的共同耗能，其阻尼力模型如图 4.20所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.20 铅-黏滞阻尼墙阻尼力模型 |

铅阻尼器剪切屈服后，剪力不在增加，而位移仍会继续增加。当达到最大位移时，卸载并反向加载，经过两次加载、卸载完成一次循环。其阻尼力滞回模型可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑7） |

其中为铅阻尼器阻尼力，为复合型阻尼墙实际位移值，为复合型阻尼墙单侧间隙值，为铅阻尼器弹性刚度，为铅阻尼器屈服位移，为铅阻尼器屈服剪力，为复合型阻尼墙最大加载位移。

因此，复合型铅-黏滞阻尼墙的阻尼力公式可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑8） |

利用公式（4‑8）对不同工况下的复合型阻尼墙理论滞回模型进行计算，并与相应工况下的试验结果进行对比，其滞回曲线理论值与试验值对比情况如图 4.21所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） 工况0.1Hz-15mm | （b）工况0.1Hz-30mm |
|  |  |
| （c）工况0.3Hz-20mm | （d）工况0.5Hz-20mm |
| 图 4.21试件3滞回曲线理论值与试验值对比图 | |

从图 4.21中可以看出，理论计算曲线和试验曲线吻合度相对较好，理论曲线能够基本上反映出复合型黏滞阻尼墙的力学特性，计算误差在可接受的范围内。图 4.21中在每次加载阶段试验曲线的弹性刚度均小于理论计算值，这是由于在铅块屈服的过程中伴随着盖板处螺栓的滑移，从而导致弹性刚度值偏小。但是总体而言，本节得到的滞回模型能够较好的还原复合型铅-黏滞阻尼墙在性能试验中表现出的力学性能，表明该滞回模型较为合理。

## 本章小结

本章首先对铅阻尼器进行力学性能试验，确定铅阻尼器的基本参数，探究不同参数的影响因素。其次，本章提出了一种复合型的铅-黏滞阻尼墙，通过铅-黏滞阻尼墙的试验曲线与相同工况下的传统黏滞阻尼墙曲线进行对比，分析其耗能特性，并通过建立合理的滞回模型，提出了复合型铅-黏滞阻尼墙的理论计算公式。主要结论如下：

1. 铅阻尼器滞回曲线接近矩形，具备较高的耗能效率。初始弹性刚度很大，屈服后第二刚度接近为零，可简化为理想弹塑性模型。
2. 铅阻尼器试件在小位移下剪切面未进入全截面塑性，阻尼力偏小。由于铅块与凹槽存在间隙，导致反向加载时滞回曲线会出现“缺口”。
3. 铅阻尼器的阻尼力仅与铅块剪切面面积有关，且成正比关系。而铅阻尼器的弹性刚度取决于铅块剪切面积和铅块厚度，且与铅块面积成正比，与铅块厚度成反比。
4. 复合型铅-黏滞阻尼墙工作性能基本良好，通过滞回曲线可以清晰的反映出工作间隙保证了该复合型阻尼墙小震下黏滞阻尼耗能，中、大震下金属屈服耗能与黏滞阻尼耗能共同作用这一性能目标得以实现。
5. 铅块在反复剪切作用下会发生软化，同时黏滞阻尼材料具有剪切稀化的特性，从而导致复合型铅-黏滞阻尼墙存在一定的阻尼力退化现象。
6. 基于前一章的黏滞阻尼墙滞回模型以及本章的铅阻尼器滞回模型，提出了复合型铅-黏滞阻尼墙的阻尼力滞回模型，并通过滞回曲线理论值与试验值的对比，验证了阻尼力滞回模型的合理性。

# 基于铅-黏滞阻尼墙的复合减震性能分析

## 引言

《被动减震结构设计·施工手册》[74]中提出了基于等效线性化理论和减震性能曲线的消能结构设计方法，并对主结构为弹性配置的不同类型阻尼器多层减震结构设计方法进行了全面深入的研究。这种地震反应预测和设计方法适用于各种单一类型的阻尼器和各种地震强度的情况。然而，施工手册中只针对单一类型的阻尼器，并没有提出关于两种阻尼器的复合减震性能曲线，因此本章结合施工手册中单一类型阻尼器减震性能曲线，分别提出了两种阻尼器之间是否包含工作间隙条件的复合减震性能曲线及其绘制方法。

基于性能的抗震设计思想的核心是建筑物在遭受不同水准地震作用时，能够达到相应的性能水准，以实现安全性和经济性的合理均衡。以往的结构减震设计，大多是通过反复试算直到满足需求性能与经济性能为止[75]。这样不仅计算量较大而且由此所得的设计经验往往有局限性，并不全面。当同时考虑多个性能目标时，计算量还将大大增加。由多个性能目标可以构成多维空间中的性能曲面。性能曲面虽然能同时反映多个目标间的相关关系，但并不直观。因此可将性能曲面转化为多组性能曲线，从而更为清晰的表达多个性能目标间的相关关系。因此，本章在明确阻尼器不同复合减震性能曲线形式后，借鉴处理多目标优化问题时的分层序列法思想，根据重要程度对各性能目标进行排序，在减震设计时，通过考虑多遇地震（即小震）条件下的剪力、位移性能目标来保证结构的承载力和变形能力，以此作为第一性能目标；通过考虑设防地震（即中震）条件下等效阻尼比性能目标来保证结构的可靠性和经济性，并以此作为第二性能目标。

## 单一类型阻尼器降低地震反应参数

《被动减震结构设计·施工手册》对结构被动减震技术进行系统总结的基础上，提出了基于性能的被动减震设计方法。设置阻尼器减小地震反应的原理，是基于阻尼器的附加刚度导致系统周期的缩短以及阻尼器的黏滞特性可吸收能量导致阻尼增加这样两方面的效应。根据上述效应，可将位移和拟加速度的反应降低率、表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑1） |
|  |  | （5‑2） |

式中，右边第二项的分式和第三项的分式表示周期从减小为产生的效应；第一项分式表示阻尼比从增加为产生的效应；为阻尼效应系数，用于预测初始阻尼反应谱曲线的降低程度。

对于中长周期的结构，处于常数范围内，因此式（5‑1）和（5‑2）可以简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑3） |
|  |  | （5‑4） |

而短周期结构的为常数，此时与周期成正比，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑5） |
|  |  | （5‑6） |

阻尼效应系数用于预测当阻尼比从初始阻尼比增加到等效阻尼比时反应谱值的降低比率。通过已有的研究分析表明，在周期为0.2s~3s范围内值基本与周期无关。因此，在上述周期范围内可得到只与阻尼比相关的阻尼效应系数的简易公式。在9种阻尼比及31条实际地震波的各种组合下，对各种组合算得的阻尼效应系数的平均值进行了研究，得到的阻尼效应系数平均值近似公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑7） |

式中，为主结构阻尼比，为减震结构附加等效阻尼比。

施工手册的设计方法中假定与为已知，根据阻尼器的附加刚度与阻尼值求得与，然后利用以上关系及反应谱可预测地震反应降低量并进行减震设计。

### 黏滞阻尼墙减震系统

#### 减震系统参数

黏滞阻尼墙应采用Kelvin模型进行分析，施工手册中认为Kelvin模型为一个倾斜的标准椭圆，即将速度指数取为1。但是对于黏滞阻尼墙中的阻尼材料，有必要考虑速度指数的影响，因此本节在施工手册公式的基础上同时考虑了速度指数参数。一般情况下给定在一定温度和频率条件下阻尼器的损失系数和损失刚度，则阻尼器的储存刚度。假定连接结构和主结构的弹性刚度和均已知，本章中考虑主结构在地震作用下始终处于弹性阶段，并未进入塑性屈服。因此其在稳态振动时的动力特性及反应量的计算公式如表 5.1所示，其中，。

表 5.1 黏滞阻尼墙系统动力特性及反应量计算公式表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 阻尼器 | 附加体系 | 系统 |
| 模型 |  |  |  |
| 储存刚度 |  |  |  |
| 损失刚度 |  |  |  |
| 损失系数 |  |  |  |
| 最大变形 |  |  |  |
| 最大力 |  |  |  |
| 能量 |  |  |  |

#### 等效周期和等效阻尼比

黏滞阻尼墙单质点体系减震结构中，由于速度指数的存在，使得等效周期和等效阻尼比的求解过程比较复杂。因此，本节首先求得和时系统的最大反应，然后利用插值的方法求得任意时的反应。

当时，此时阻尼器本身相当于一个摩擦型阻尼器与弹簧构件并联的情况，其等效周期和等效阻尼比中均包含了延性系数，采用黏滞阻尼墙的参数进行公式推导，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑8） |

因此，等效周期可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑9） |

在稳态反应下，可根据一个循环内的滞回吸收能量和弹性能量算得此时减震系统的等效阻尼比为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑10） |

当时，此时阻尼器本身相当于一个线性黏滞阻尼器与弹簧构件并联的情况。设仅有主结构时的自振周期为，系统的储存刚度等于主结构弹性刚度与附加体系储存刚度之和，因此系统的等效周期可以按照下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑11） |

根据相关参考文献[76, 77]，此时黏滞阻尼墙减震系统的等效阻尼比可以按照下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑12） |

式（5‑12）中的是系统在等效周期为的正弦波外部扰动作用下的稳态阻尼比理论值。但是，地震不规律外部扰动还包括了以外的周期成分，由于阻尼比与系统的振动频率相关，故实际的阻尼比是变化的。理由之一是黏滞阻尼墙的储存刚度、损失刚度与频率是相关的。此外，在正弦外部扰动作用下阻尼器的力—位移相位差为常数，但在不规则外部扰动作用下相位差发生变化，当稳态振动相位差越大时，不规则振动的阻尼效应越低于理论值。由于黏滞阻尼墙具有一定的储存刚度，因此其力—位移相位差较小，因此在式（5‑12）中将理论值乘以系数0.88以减小等效阻尼比值。

### 铅阻尼器减震系统

#### 减震系统参数

铅阻尼器与软钢阻尼器的滞回曲线虽然形状上有所差异，但是两者的滞回特性相似，这类阻尼器滞回特性与位移相关而与速度无关。因此其在稳态振动时的动力特性及反应量的计算公式如表 5.2所示。

表 5.2 铅阻尼器系统动力特性及反应量计算公式表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 阻尼器 | 附加体系 | 系统 |
| 模型 |  |  |  |
| 弹性刚度 |  |  |  |
| 储存刚度 |  |  |  |
| 损失刚度 |  |  |  |
| 延性系数 |  |  |  |
| 屈服变形 |  |  |  |
| 最大变形 |  |  |  |
| 最大力 |  |  |  |
| 能量 |  |  |  |

#### 等效周期和等效阻尼比

对于铅阻尼器而言，等效周期的评估必须知道系统的等效刚度，一般可以取最大变形时的割线刚度，即假设。设仅有主结构时的自振周期为，可以用系统延性系数和组成构件的弹性刚度表示。因此，等效周期可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑13） |

在稳态反应下，可根据一个循环内的滞回吸收能量和弹性能量算得铅阻尼器减震系统等效阻尼比为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑14） |

由式（5‑13）和（5‑14）可知，可以用附加体系的弹性刚度比及系统的最大延性系数作为基本参数来表示减震结构的基本动力特性。

## 铅-黏滞阻尼墙复合减震性能曲线

在明确黏滞阻尼墙和铅阻尼器两种类型阻尼器的减震原理及相关参数后，本节考虑同时将两种阻尼器复合起来形成铅-黏滞阻尼墙后的复合减震性能，并且分别考虑两种阻尼器之间是否存在工作间隙条件，研究各种力学性能参数对减震性能曲线的影响以及两种阻尼器相互之间的影响。

### 无工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统

#### 减震系统参数

根据施工手册中单一类型阻尼器的减震结构体系各参数之间关系，可以建立无工作间隙的复合减震结构体系各参数之间的关系，详情如表 5.3所示。复合减震系统主要参数为 ，其他参数均可根据表中公式求得。

表 5.3 无工作间隙复合减震系统动力特性及反应量计算公式表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 阻尼器 | 附加体系 | 系统 |
| 模型 |  |  |  |
| 弹性刚度 |  |  |  |
| 储存刚度 |  |  |  |
| 损失刚度 |  |  |  |
| 损失系数 |  |  |  |
| 延性系数 |  |  |  |
| 屈服变形 |  |  |  |
| 最大变形 |  |  |  |
| 最大力 |  | = |  |
| 能量 |  |  |  |

#### 等效周期和等效阻尼比

无工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统的等效刚度可以取为系统的储存刚度，即假设。根据5.2.1.2节，分别考虑和时系统的最大反应，然后利用插值的方法求得任意时的反应。

当时，此时黏滞阻尼墙部分相当于一个摩擦型阻尼器与弹簧构件并联的情况，其等效周期和等效阻尼比中均包含了延性系数，可以采用黏滞阻尼墙的参数进行公式推导，可得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑15） |

因此，复合减震系统的等效周期可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑16） |

复合减震系统的等效阻尼比可以按照下式计算:

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5‑17） |

当时，此时黏滞阻尼墙部分相当于一个线性黏滞阻尼器与弹簧构件并联的情况。设仅有主结构时的自振周期为，系统的储存刚度等于主结构弹性刚度与附加体系储存刚度之和，此时复合减震系统的等效周期可以按照下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑18） |

复合减震系统的等效阻尼比可以按照下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑19） |

### 有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统

#### 减震系统参数

根据施工手册中单一类型阻尼器的减震结构体系各参数之间关系，可以建立有工作间隙的复合减震结构体系各参数之间的关系，复合减震系统主要参数为，其他参数均可根据表中公式求得。

1）若，此时铅阻尼器始终处于间隙阶段，尚未工作，整个体系与黏滞阻尼墙单一减震系统相同，其参数取值如表 5.4所示。

表 5.4 含工作间隙复合减震系统动力特性及反应量计算公式表（1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 阻尼器 | 附加体系 | 系统 |
| 模型 |  |  |  |
| 储存刚度 |  |  |  |
| 损失刚度 |  |  |  |
| 损失系数 |  |  |  |
| 最大变形 |  |  |  |
| 最大力 |  |  |  |
| 能量 |  |  |  |

2）若，在阶段，铅阻尼器处于工作间隙阶段，只有黏滞阻尼墙工作，其参数取值仍与上表相同。在阶段，铅阻尼器与黏滞阻尼墙共同工作，其参数取值与无工作间隙条件情况类似，但应将铅阻尼器中相应变形值替换为，其参数取值如表 5.5所示。

表 5.5 含工作间隙复合减震系统动力特性及反应量计算公式表（2）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 阻尼器 | 附加体系 | 系统 |
| 模型 |  |  |  |
| 弹性刚度 |  |  |  |
| 储存刚度 |  |  |  |
| 损失刚度 |  |  |  |
| 损失系数 |  |  |  |
| 延性系数 |  |  |  |
| 屈服变形 |  |  |  |
| 最大变形 |  |  |  |
| 最大力 |  | = |  |
| 能量 |  |  |  |

#### 等效周期和等效阻尼比

有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震系统的等效刚度可以取为系统的储存刚度，即假设。根据5.2.1.2节，分别考虑和时系统的最大反应，然后利用插值的方法求得任意时的反应。

若位移值在之间，等效周期与等效阻尼比的计算方法与5.2.1.2节中单一黏滞阻尼墙构件相同。

若位移值大于，等效周期与等效阻尼比的计算方法与5.3.1.2节中无工作间隙情况基本相同，两者之间的区别在于本节中的铅阻尼器部分实际位移值应将替换为。

### 铅-黏滞阻尼墙复合减震性能曲线绘制方法

用单质点体系来表明设置阻尼器后与无阻尼器情况相比最大反应降低的程度。其减震效应可用位移、加速度的反应降低率、来表示。但是表示的是最大位移时的剪力降低率，由于黏滞阻尼墙的黏滞特性将导致最大剪力发生在其他位移点。考虑上述系统的力位移的相位差，最大剪力的降低率可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑20） |

将反应降低率、表示成黏滞阻尼墙损失刚度比、损失系数和铅阻尼器延性系数、弹性刚度比四个基本参数的连续函数，称之为复合减震系统的减震性能曲线。

在拟速度反应谱为常数的情况下，绘制减震性能曲线的步骤如下。各步骤中的各种刚度均表示成与主结构刚度之比，因此可令直接代入各种刚度比的值即可。

1. 假定黏滞阻尼墙连接构件刚度比，设定黏滞阻尼墙的速度指数。对于含有工作间隙的复合减震系统，需要给定工作间隙值。
2. 设定黏滞阻尼墙的损失系数、损失刚度比，并据此求得；同时设定铅阻尼器的延性系数、弹性刚度比。根据前文中给定的方法分别计算和时的等效周期比和等效阻尼比。
3. 利用和时的等效阻尼比及初始阻尼比分别求得相应的阻尼效应系数，如公式（5‑7）所示。
4. 分别利用和时的等效周期比和阻尼效应系数，通过式（5‑3）、（5‑4）求得相应的位移、加速度的反应降低率、。
5. 根据第2~4步的计算结果，按下式插值方法求得任意时的、。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑21） |
|  |  | （5‑22） |

1. 重复上述第2~5步，可以求得各种情况下的曲线，同理可以得到相应的曲线。

## 无工作间隙的铅-黏滞阻尼墙复合减震效果分析

本节通过复合型阻尼墙与相应单一阻尼器的对比分析，从而研究黏滞阻尼耗能和金属屈服耗能之间的复合减震效果。通过查阅相关文献[78]，发现阻尼器附加阻尼比一般在15%~25%之间为宜。因此，本节选取单独布置时提供附加阻尼比为15%的黏滞阻尼墙和铅阻尼器的相关参数，以研究铅-黏滞阻尼墙的复合减震效果，两种阻尼器不同性能参数搭配如表 5.6和表 5.7所示。为了便于分析，本节中将黏滞阻尼墙的速度指数取为1。

表 5.6 铅阻尼器性能参数搭配表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 延性系数 | 弹性刚度比 | 等效阻尼比 |
| LD1 | 5 | 2.09 | 15% |
| LD2 | 10 | 3.55 | 15% |

表 5.7 黏滞阻尼墙性能参数搭配表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 损失系数 | 损失刚度比 | 等效阻尼比 |
| VDW1 | 1 | 0.63 | 15% |
| VDW2 | 2 | 0.44 | 15% |

### 固定铅阻尼器参数的复合减震系统影响分析

图 5.1绘制了单独布置黏滞阻尼墙时的减震性能曲线，图 5.2和图 5.3分别绘制了在已有的黏滞阻尼墙基础上附加铅阻尼器LD1和LD2后的复合体系减震性能曲线。由于位移型阻尼器能够有效的控制结构的层间位移，因此复合减震体系性能曲线的横坐标为单一布置黏滞阻尼墙的加速度反应降低率，纵坐标为复合铅阻尼器后产生的位移反应降低变化率，其计算公式为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑23） |

式中，为单一布置黏滞阻尼墙的位移反应降低率，复合相应铅阻尼器后的位移反应降低率。

|  |
| --- |
|  |
| 图 5.1单独布置黏滞阻尼墙的减震性能曲线 |
|  |
|  | |
| 图 5.2 附加铅阻尼器LD1的复合减震体系性能曲线 | |
|  |
| 图 5.3附加铅阻尼器LD2的复合减震体系性能曲线 |

从图 5.1~图 5.3中可以看出：

1. 随着损失系数的增大，黏滞阻尼墙加速度降低率有明显的下降，表明减震效果更加明显，但是当到达一定值后，继续增大时的变化越来越小，因此从经济性角度考虑，不宜选取过大的。随着损失刚度比的增大，黏滞阻尼墙位移反应降低率逐渐减小，而加速度降低率呈先减小后增大的趋势，说明取值应选在合理范围内，过小或过大的选取参数都会导致结构的加速度响应增大。综合考虑后，图 5.1黏滞阻尼墙的最优性能参数组合大约为，。
2. 从图 5.2、图 5.3中可以看出，在一定时，随着的增大，位移反应降低变化率逐渐减小，说明复合减震体系对较小时的降低效果更加明显。在较小时，随着的增大而增大，但是当超过某一固定值后，随着的增大而减小，但总体上对的敏感性较小。在黏滞阻尼墙最优性能参数组合下，可以达到18%左右，说明附加铅阻尼器后位移反应降低率变得更小，位移反应得到了进一步控制。
3. 通过对比图 5.2和图 5.3相同加速度反应降低率下的可以发现，两者之间的差值很小，误差范围均在1%左右。说明当铅阻尼器所提供的附加阻尼比相同时，改变阻尼器的延性系数对于位移反应降低率的影响并不大。

### 固定黏滞阻尼墙参数的复合减震系统影响分析

图 5.4绘制了单独布置铅阻尼器时的减震性能曲线，图 5.5和图 5.6分别绘制了在已有的铅阻尼器基础上附加黏滞阻尼墙VDW1和VDW2后的复合减震体系性能曲线。由于速度型阻尼器能够有效的控制结构加速度，因此复合体系减震性能曲线的横坐标为单一布置铅阻尼器的位移反应降低率，纵坐标为复合黏滞阻尼墙后产生的加速度反应降低变化率，其计算公式为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑24） |

式中，为单一布置铅阻尼器的加速度反应降低率，复合相应黏滞阻尼墙后的加速度反应降低率。

|  |
| --- |
|  |
| 图 5.4单独布置铅阻尼器的减震性能曲线 |
|  | |
| 图 5.5 附加黏滞阻尼墙VDW1的复合减震体系性能曲线 | |
|  |
|  |
| 图 5.6附加黏滞阻尼墙VDW2的复合减震体系性能曲线 |

从图 5.4~图 5.6中可以看出：

1. 随着延性系数的增大，铅阻尼器加速度降低率逐渐减小，但是位移反应降低率呈现增大的趋势，而且当达到一定值后，继续增大时的变化越来越小，因此应当综合考虑两个参数之间的贡献值来确定取值。随着弹性刚度比的增大，铅阻尼器位移反应降低率逐渐减小，而加速度降低率呈先减小后增大的趋势，说明取值应选在合理范围内，过小或过大的选取参数都会导致结构的加速度响应增大。综合考虑后，图 5.4中铅阻尼器的最优性能参数组合大约为，。
2. 从图 5.5和图 5.6中可以看出，在一定时，随着的增大，加速度反应降低变化率逐渐减小，说明复合减震体系对较小时的降低效果更加明显。在较小时，随着的增大而增大，但是当超过某一固定值后，随着的增大而减小。在图 5.6中铅阻尼器最优性能参数组合下可以达到13%左右，说明附加黏滞阻尼墙VDW2后加速度反应降低率变得更小，加速度反应得到了进一步控制。
3. 通过对比图 5.5和图 5.6相同位移反应降低率下的可以发现，附加VDW2的复合减震系统的值明显小于附加VDW1的复合减震系统。而且，从图 5.5中可以看到，在一些铅阻尼器参数搭配下，附加VDW1后已经到达零点，说明此时附加黏滞阻尼墙后非但不能进一步降低加速度反应，反而会增大这一反应。因此，即使黏滞阻尼墙所提供的附加阻尼比相同，选取不同的黏滞阻尼墙参数搭配也会在一定程度上影响加速度反应降低率。

### 总附加阻尼比相同时复合减震系统影响分析

在考虑固定一种阻尼器参数的复合减震系统影响分析的基础上，进一步研究当总附加阻尼比一定时，两种阻尼器所占附加阻尼比比例的差异对减震效果的影响。假定复合减震系统总附加阻尼比为25%，两种阻尼器附加阻尼比占比、相应参数搭配及复合减震效果如表 5.8所示。

表 5.8总附加阻尼比相同时两种阻尼器不同占比的减震效果对照表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 黏滞阻尼墙 | | | 铅阻尼器 | | | 复合减震体系 | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 25% | 2 | 0.98 | 0 | — | — | 0.413 | 0.547 |
| 20% | 2 | 0.67 | 5% | 5 | 0.55 | 0.398 | 0.558 |
| 15% | 2 | 0.44 | 10% | 5 | 1.22 | 0.388 | 0.574 |
| 10% | 2 | 0.27 | 15% | 5 | 2.09 | 0.377 | 0.588 |
| 5% | 2 | 0.12 | 20% | 5 | 3.24 | 0.352 | 0.601 |
| 0 | — | — | 25% | 5 | 4.82 | 0.314 | 0.617 |

从表中可以清晰的观察到，当总附加阻尼比一定时，随着黏滞阻尼墙附加阻尼比占比的增大，复合减震体系的加速度反应降低率逐渐减小；随着铅阻尼器附加阻尼比占比的增大，复合减震体系的位移反应降低率逐渐减小。这一结果验证了黏滞阻尼墙对结构加速度响应的控制作用更加明显，而铅阻尼器对结构位移响应的控制作用更加明显。因此当总附加阻尼比一定时，复合减震体系的合理配比实际上是位移反应降低率和加速度反应降低率两个参数的优化问题。

## 有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙双目标减震设计方法

### 双目标减震设计流程

对于有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙，其设计目的在于实现这种复合型阻尼墙的两级耗能，即在小震状态下铅阻尼器处于工作间隙中，此时完全由黏滞阻尼墙本身耗能；当结构受到中震或大震时，铅阻尼器和黏滞阻尼墙实现共同耗能。多个性能目标可以构成多维空间中的性能曲面，这种性能曲面虽然能够同时反映多个目标间的相互关系，但并不直观。因此，针对这种构造的复合减震系统，应该采用两级性能目标指导设计，其主要流程如下：

1. 确定性能目标

根据结构可能遭受的地震作用水准确定相应的性能目标，在小震下考虑结构的承载能力和变形能力，设定位移反应降低率限值；在中震或大震下考虑结构的可靠性和经济性，设定复合减震体系等效阻尼比下限值和上限值。

1. 确定性能点

首先，确定黏滞阻尼墙的减震性能曲线，根据位移反应降低率限值确定黏滞阻尼墙性能点，得到黏滞阻尼墙的最优参数组合。其次，固定黏滞阻尼墙的相关参数，得到复合减震体系的减震性能曲线，根据等效阻尼比上下限值和确定复合体系性能点，再得到铅阻尼器的最优参数组合。如果第二性能目标无法满足，则应当重新选取黏滞阻尼墙的参数组合进行设计。

### 双目标减震设计算例

#### 算例结构参数及设计性能目标

在明确减震设计方法的主要流程之后，本节通过一个算例进行设计方法的演示及检验。算例场地条件选为《建筑抗震设计规范》[79]规定的Ⅱ类场地，设计地震分组为第二组，抗震设防烈度为8度。

算例中的框架主结构共四层，主结构基本周期,阻尼比为,每一层的结构参数如表 5.9所示。当在主结构中布置有工作间隙的铅-黏滞阻尼墙后，在小震下第一性能目标为结构最大弹性层间位移角限值。《抗规》中规定，消能部件附加给结构的有效阻尼比超过0.25时，宜按照0.25进行计算，因此本节中认为复合减震结构的附加阻尼比超过0.25时，复合体系的布置是不经济的。在中震或大震下第二性能目标为结构等效阻尼比下限值与小震条件下阻尼器提供的等效阻尼比相等，等效阻尼比上限值为0.27。

表 5.9 框架主结构参数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 楼层 | 层高 | 距地面高度 | 质量 | 层刚度 |
| 1 | 6 | 6 |  |  |
| 2 | 4 | 10 |  |  |
| 3 | 4 | 14 |  |  |
| 4 | 4 | 18 |  |  |

#### 第一性能目标下黏滞阻尼墙参数确定

由于速度指数在很大程度上会影响黏滞阻尼墙的性能，因此本节首先考虑当时黏滞阻尼墙减震性能曲线的差别，从而确定较为合理的速度指数。不同速度指数下的减震性能曲线如图 5.7~图 5.11所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 5.7 时黏滞阻尼墙减震性能曲线 |
|  |
| 图 5.8 时黏滞阻尼墙减震性能曲线 |
|  |
|  |
| 图 5.9 时黏滞阻尼墙减震性能曲线 |
|  | |
| 图 5.10 时黏滞阻尼墙减震性能曲线 | |
|  |
|  |
| 图 5.11 时黏滞阻尼墙减震性能曲线 |

从图中可以发现，当值过小时，减震性能曲线对于损失系数的敏感性逐渐减小。当时不同下的性能曲线基本重合，随着损失刚度比的增大，黏滞阻尼墙位移反应降低率逐渐减小，但是此时加速度反应降低率始终大于1，表明加速度响应并没有得到有效控制。当逐渐增大时，减震性能曲线逐渐趋于饱满，加速度反应降低率也逐渐减小，表明随着说明的增大，加速度响应逐渐得到了有效控制，因此速度指数不宜过小。

通过对比图 5.10和图 5.11可以发现，随着损失系数的增大，黏滞阻尼墙加速度降低率均有明显的下降，表明减震效果更加明显。随着损失刚度比的增大，黏滞阻尼墙位移反应降低率逐渐减小，而加速度降低率呈先减小后增大的趋势。当和时，减震性能曲线基本一致，说明当速度指数增大到一定值后，黏滞阻尼墙的减震性能受速度指数变化影响较小。因此，本节最终选取采用时的黏滞阻尼墙进行研究。

由主结构基本周期以及结构抗震设防烈度为8度，可以得到对应的规范反应谱加速度，则有

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑25） |

对于剪切型多层结构，其位移反应沿高度分布大致为直线，故可假定其一阶振型为直线，从而将其转换为等效SDOF体系。等效SDOF体系的自振周期为结构的基本周期，等效质量和等效高度分别按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑26） |
|  |  | （5‑27） |

等效SDOF体系的位移反应降低率限值可以利用上述公式换算得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5‑28） |

将上述与图 5.10中的性能点对应，发现当损失刚度比时基本可以满足性能需求，在满足位移限值需求的情况下，应使加速度反应尽可能小。考虑到当损失系数达到一定值后，继续增大加速度反应的降低效果不太明显，因此经济性欠佳，综合考虑后选取作为合理性能参数进行第二目标设计。

#### 第二性能目标下铅阻尼器参数确定

在确定黏滞阻尼墙性能参数后，绘制复合减震体系达到中震或大震下的等效阻尼比与位移反应降低率关系曲线，应使得复合体系的等效阻尼比不小于小震下单独由黏滞阻尼墙提供的等效阻尼比，且不大于等效阻尼比上限值0.27，相应关系曲线如图 5.12所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 5.12复合减震体系等效阻尼比—位移反应降低率关系曲线 |

从图 5.12中关系曲线中可以看出，随着延性系数的增大，等效阻尼比先增大后减小；随着弹性刚度比的增大，等效阻尼比逐渐增大。根据复合减震系统的第二性能目标，发现和是满足性能需要的较为优化的铅阻尼器参数组合。如果在满足结构等效阻尼比情况下优先考虑使结构位移反应降低率进一步减小，则应当选取作为最合理的性能参数。因此，该复合减震系统在两级性能目标指导下的设计参数为。

## 本章小结

本章在单一类型阻尼器减震性能曲线的基础上，提出了复合型铅-黏滞阻尼墙的复合减震性能曲线及其相应绘制方法。同时对复合减震系统中是否含有工作间隙的情况加以考虑，对无工作间隙的复合减震系统分析了黏滞阻尼耗能和金属屈服耗能之间的复合减震效果，对有工作间隙的复合减震系统建立了双目标的减震性能设计方法，并选取了相应算例加以验证。通过多个角度的减震性能曲线分析可以得到以下结论：

* 1. 黏滞阻尼墙减震系统对于加速度降低率的控制效果较为明显；而铅阻尼器减震系统对于位移反应降低率的控制效果更为显著，因此采用复合型铅-黏滞阻尼墙可以在控制结构位移的同时，减小结构的加速度响应。
  2. 对于无工作间隙的复合减震系统，复合型阻尼墙与对应的单一黏滞阻尼墙相比，位移反应降低率变得更小，位移反应得到了进一步控制。当铅阻尼器部分所提供的附加阻尼比相同时，改变阻尼器的延性系数对于复合型阻尼墙位移反应降低率的影响并不大。
  3. 对于无工作间隙的复合减震系统，复合型阻尼墙与对应的单一铅阻尼器相比，加速度反应降低率变得更小，加速度反应得到了进一步控制。即使黏滞阻尼墙所提供的附加阻尼比相同，选取不同的黏滞阻尼墙参数搭配也会在一定程度上影响复合型阻尼墙的加速度反应降低率，因此应该考虑选择较为优化的性能参数组合。
  4. 对于有工作间隙的复合减震系统，可以采用两级性能目标指导设计。小震下考虑结构的承载能力和变形能力，设定位移反应降低率限值；中震或大震下考虑结构的可靠性和经济性，设定复合减震体系等效阻尼比上、下限值。算例表明通过合理的阻尼器参数搭配，可以实现预期的各项性能目标。

# 结论与展望

## 结论

本文从黏滞阻尼材料的性能测试试验出发，研究了六组不同配比的混合黏滞阻尼材料的动态性能指标，并通过五组小振动台试验验证了测试结果的可靠性；对两片黏滞阻尼墙进行了多个工况的动力性能试验，分析了不同因素对阻尼墙力学性能的影响，建立了考虑加载历史影响的不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型；设计并进行了三组铅阻尼器往复加载试验，分析了其耗能特性，并对基本参数进行了标定；提出了一种复合型的铅-黏滞阻尼墙的构造形式，并进行了往复加载试验，分析了其耗能特性，并与相同工况下的传统黏滞阻尼墙试验结果进行了对比；提出了铅-黏滞阻尼墙的复合减震性能曲线，对无工作间隙的复合减震系统分析黏滞阻尼耗能与金属屈服耗能之间的复合减震效果，对有工作间隙的复合减震系统建立双目标的减震性能设计方法。现将本文主要结论总结如下：

1. 黏滞阻尼材料为不同配比的聚异丁烯混合物，试验过程中其性能始终保持稳定。这种材料同时具备刚度特性和黏滞特性，其耗能能力主要通过复数黏度、储能模量、损耗模量、损耗因子等动态性能指标来体现。常温条件下随着频率的增大，材料的复数黏度和损耗因子不断减小，而储能模量和损耗模量不断增大。随着温度的升高，材料的黏度、储能模量和损耗模量逐渐减小，损耗因子逐渐增大，材料黏性特性表现得更加明显，流动性增强。小振动台试验结果表明对黏滞阻尼材料本身的ARES性能测试结果与在构件层次下的材料参数指标基本吻合较好，可以用于指导黏滞阻尼墙的尺寸设计。
2. 黏滞阻尼墙动态刚度随位移幅值的增大而减小，其阻尼力幅值主要受到速度幅值的影响，用Kelvin模型可以比较准确的反应其力学性能。黏滞阻尼墙阻尼力受最大速度和最大位移的加载历史影响，这一影响会分别在速度或位移变量减小时被激活，一旦该变量重新增大至原最大值或者方向发生改变时，前一阶段的相应加载历史将会消失。在此基础上，建立了考虑加载历史影响的不同工况的黏滞阻尼墙滞回模型。对等幅正弦循环加载，其滞回模型将退化为统一的阻尼力计算公式，计算结果与试验曲线吻合较好，证明了滞回模型的合理性。
3. 对铅阻尼器进行往复加载试验，研究了铅阻尼器阻尼力的影响因素，并明确了试验中所用铅块材料的本构关系。提出并设计了新型铅-黏滞阻尼墙，利用铅阻尼器的工作间隙实现了小震下的黏滞阻尼墙单独耗能和中大震下的共同耗能。铅-黏滞阻尼墙动力试验的滞回曲线可以清楚的看出黏滞耗能部分和共同耗能部分，证明了复合型阻尼墙设计的合理性，且能够达到预期性能目标。
4. 对无工作间隙的复合减震系统分析结果表明，复合型阻尼墙与对应的单一黏滞阻尼墙相比，位移反应能够得到进一步控制，当复合型阻尼墙中铅阻尼器部分所提供的附加阻尼比相同时，改变阻尼器参数对于位移反应降低率的影响并不大；复合型阻尼墙与对应的单一铅阻尼器相比，加速度反应能够得到进一步控制，复合型阻尼墙中黏滞阻尼墙部分的参数搭配会在一定程度上影响加速度反应降低率。
5. 对于有工作间隙的复合减震系统，可以采用两级性能目标指导设计；小震下考虑结构的承载能力和变形能力，设定位移反应降低率限值；中震或大震下考虑结构的可靠性和经济性，设定复合减震体系等效阻尼比上、下限值。算例表明，按照本文建立的双目标减震设计方法进行多自由度结构的减震设计，通过合理的阻尼器参数搭配，可以实现预期的各项性能目标。

## 展望

本文对黏滞阻尼材料、黏滞阻尼墙和复合型铅-黏滞阻尼墙进行了较为系统的研究，同时对复合减震系统进行了理论分析。本文的研究虽然取得了初步的成果，但仍然有待进一步深入的研究和补充，主要体现在以下方面：

1. 通过黏滞阻尼材料的研究，虽然保证了黏滞阻尼墙力学性能的稳定性，但是阻尼力与预期目标仍有一定距离。因此，应该进一步对黏滞材料进行系统的研究和开发，寻找性能更加优良的材料，提高黏滞阻尼墙的性能。
2. 阻尼墙的构造有待进一步改进。黏滞阻尼墙的间隙较小，导致材料灌注过程中难度较大，且不易保证材料在箱体中的均匀性；黏滞阻尼墙箱体长度较小，导致位移较大时两侧空间较小，会造成黏滞阻尼墙性能稳定性下降。
3. 作动器的性能有待提高。本试验所采用的作动器由于受到频响特性的限制，导致加载频率较大时无法达到预期目标，应采用性能更加优良的作动器以获得更可靠的试验结果。
4. 由于试验数据和时间的限制，本文中的通用阻尼力计算公式及复合减震体系理论研究进行了较多的简化，后续可以考虑更多的影响参数已得到更准确的计算曲线，同时可以对减震系统进行更加深入的理论研究。
5. 本课题旨在研究新型的黏滞阻尼墙结构，目前仅考虑了使用铅阻尼器与黏滞阻尼墙形成复合型阻尼器，未来可拓展研究更多的复合阻尼器构造形式，如摩擦型阻尼器与黏滞阻尼墙并联起来，以丰富研究成果的使用范围。

# 致谢

寒来暑往，春秋几度，看着屏幕右下角的时间，只能感慨还有不到两个月就将结束我在同济三年的硕士求学生涯。从大四上学期保研时第一次见到恩师孙飞飞教授，到入学后第一次见到研究室的小伙伴们，再到今天，一路走来经历了很多，成长了很多，值得回忆的很多，终身难忘的很多。谨以此文献给曾经给予我帮助和关心的所有人。

首先要感谢我的恩师孙飞飞教授。同济土木学术氛围浓厚，能够保研进入已属幸事，最终能够成为孙老师的学生更是莫大的荣幸。在学术上，孙老师学识渊博、态度严谨、循循善诱，从论文的选题、试验方案的设计、试验的开展以及论文成果的整理等各个关键阶段孙老师都给予了我莫大的帮助与指导，每当我课题进展遇到瓶颈时，孙老师都会抽丝剥茧，理清逻辑，为我指明研究方向。在生活上，孙老师平易近人的处事方式让我既感轻松，更觉温暖。孙老师对学生未来的发展非常重视，在研一暑假推荐我到华东建筑设计院实习，让我有机会接触国内一流的设计院；在研三秋季招聘期间孙老师也为我的择业提供了很多指导，让我受益良多。能够在求学生涯的最后三年里遇到这样一位师德高尚、才思敏捷的老师，实在无比幸运，再次感谢孙老师为我付出的一切。

同时，我要感谢李国强教授，在李老师的带领下我们教研室拥有良好的学术氛围，感谢教研室陈素文老师、蒋首超老师、楼国彪老师、何亚楣老师、刘玉姝老师等在三年中给予的帮助与指导。

感谢课题组的胡智斌、冉明明、莫刚、裴少帅、黄杰、贾瑞梓、肖蕾、王述文、侯玉芳、焦联洪等师兄师姐的指导和帮助；感谢肖贲、王萌、唐志明、马志东四位同门在学习和生活中的陪伴，和你们在一起总是欢笑不断；感谢物美研究室陆晨、杨梦、彭诗涛、叶中楠、缪嘉荣、陈丕旭、胡佳韵、沈晓东、张文津、张贵鹏以及其他教研室的邱璐，和你们在一起拥有那么多美好的回忆，“物美九杰”的美好瞬间将使我终身难忘，非常庆幸可以成为这个单纯的教研室中的一员；感谢魏智锴、戴晓欣、赵琛、杨嘉琦等师弟师妹对我的支持；尤其要感谢我的室友、我的好兄弟刘邦宇，同窗七年、室友三年，能与你成为好友倍感幸运，和你在一起上课、复习、实习、求职、宵夜、夜谈，那么多点点滴滴汇聚成我们坚实的友谊，愿我们友谊长存，愿我们前途光明，愿我们来日方长！

感谢在华东建筑设计研究院实习期间，周健副导师、李彦鹏师兄等对我的悉心指导，感谢你们的帮助，让我收获了很多专业知识。

特别感谢我的父母，你们含辛茹苦的把我抚养长大，是你们从小的谆谆教诲，才有了我今天坚忍不拔的性格。你们为我营造了良好的学习环境，一直默默支持我的学业，你们的支持是我不断前进的动力，你们就是我最坚实的后盾。爸爸妈妈，你们辛苦了，在以后的工作生活中我会更加努力，报答你们的养育之恩！

最后感谢在百忙之中参与论文评审与答辩的各位专家老师，感谢您们的辛勤工作与专业指导。

终点即是新起点，走出了象牙塔便又踏进了社会这所大学。希望在今后的人生旅途中可以把握好前进的方向，一步一个脚印，扎实走好每一步，把辉煌的人生写到祖国大地上。

终有奔走红尘时，莫忘曾经是书生！

吴坦烨

2018年5月于同济大学

# 参考文献

[1] 胡聿贤. 地震工程学[M].地震出版社, 2006.

[2] 中国灾害防御协会. 中国减灾重大问题研究[M].地震出版社, 1992.

[3] 中国地震信息网. http://www.csi.ac.cn.

[4] 把志平. 居安倍需思危──美国洛杉矶地震损失的启示[J].1994.

[5] 周炳章. 日本阪神地震的震害及教训[J].工程抗震,1996(01): 39-42.

[6] 陈虹, 李成日. 印尼8.7级地震海啸灾害及应急救援[J].国际地震动态,2005(04): 22-26.

[7] 陈虹, 王志秋, 李成日. 海地地震灾害及其经验教训[J].国际地震动态,2011(09): 36-41.

[8] 宫会玲, 程建武. 日本311地震对中国大陆强震活动的影响[J].科技资讯,2015(19): 135-137.

[9] 本书编写组. 地震工程概论[M].科学出版社, 1977.

[10] 苏幼坡, 张玉敏. 唐山大地震震害分布研究[J].地震工程与工程振动,2006(03): 18-21.

[11] 冯先岳, 杨章, 栾超群, 等. 新疆乌恰地震[J].中国地震,1986(01): 62-66.

[12] 张培震, 朱守彪, 张竹琪, 等. 汶川地震的发震构造与破裂机理[J].地震地质,2012(04): 566-575.

[13] 刘吉夫, 史培军, 范一大, 等. 2010年4月14日青海玉树地震灾害特点与启示[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010(05): 630-633.

[14] 周福霖. 工程结构减震控制[M].北京: 地震出版社, 1996.

[15] 鲁正, 朱浩. 消能减震技术的工程应用与展望[J].山西建筑,2006(13): 44-45.

[16] 周云, 邓雪松, 汤统壁, 等. 中国(大陆)耗能减震技术理论研究、应用的回顾与前瞻[J].工程抗震与加固改造,2006(06): 1-15.

[17] 李尊, 陈忠范. 建筑结构抗震设计研究新进展: 第16届全国结构工程学术会议, 中国山西太原, 2007[C].

[18] Gilani A, Miyamoto H K, Kohagura T. Seismic Rehabilitation of a Nine-Story Hospital Building Using Fluid Viscous Dampers[J].Structures,2006: 1-10.

[19] Cimellaro G P, Lopez-Garcia D. Seismic Response of Adjacent Buildings Connected by Nonlinear Viscous Dampers[J].Structural Engineering Research Frontiers,2007: 1-12.

[20] Miyamoto H K, Gilani A S. Response of Structures with Viscous Dampers Subjected to Large Earthquakes[J].Structures Congress,2013: 2118-2127.

[21] 周福霖. 工程结构减震控制[M].地震出版社, 1997.

[22] 周祥瑞. 阻尼器及其在结构减震中的应用研究[D]. 武汉理工大学, 2008:

[23] 周云, 刘季. 耗能减震技术研究与应用进展[J].世界地震工程,1995(01): 20-28.

[24] 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(03): 99-110.

[25] Pan A D E, Yeung N. Wind tunnel experiments of a building model incorporating viscous-damping walls[J].Wind & Structures An International Journal,2001,4(3): 261-276.

[26] 占茜, 郑毅敏, 赵昕. 高层建筑结构粘滞阻尼墙数量优化设计: 第四届建筑结构抗震技术国际会议, 中国江苏南京, 2014[C].

[27] Miyazaki M, Kitada Y, Arima F. Earthquake response control design of buildings using viscous damping walls: Proc. 1st East Asian Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, 1986[C].

[28] Arima F, Miyazaki M, Tanaka H. A study on buildings with large damping using viscous damping walls: Proc. 9th World Conf. on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988[C].

[29] Miyazaki M, Mitsusaka Y. Design of a building with 20% or greater damping: Proc. 10th World Conf. on Earthquake Engineering, Madrid, 1992[C].

[30] Yeung N, 揚毅. Viscous-damping walls for controlling wind-induced vibrations in buildings[D]., 2000:

[31] Li C, Reinhorn A M. Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping : Part II - Friction devices[J].Technical Report Nceer,1995.

[32] 谭在树, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架用粘滞阻尼墙减震研究[J].建筑结构学报,1998(02): 50-59.

[33] Yeung N, Pan A D E. The effectiveness of viscous-damping walls for controlling wind vibrations in multi-story buildings[J].Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,1998,77(5): 337-348.

[34] 张方, 潘德恩. 含转动干扰粘性阻尼墙的阻尼特性试验研究[J].振动工程学报,2003(01): 89-92.

[35] 吴美良, 钱稼茹. 粘滞阻尼墙的研究与工程应用[J].工业建筑,2003(05): 61-65.

[36] 白莉. 阻尼墙结构和隔震结构的随机响应及可靠度[D]. 兰州理工大学, 2004:

[37] 闫锋, 吕西林. 附加或不附加粘滞阻尼墙的RC框架试验与分析[J].地震工程与工程振动,2005(04): 67-75.

[38] 王相智. 设置粘滞阻尼墙的框架动力性能试验研究[D]. 南京工业大学, 2005:

[39] 欧谨. 粘滞阻尼墙结构的减振理论分析和试验研究[D]. 东南大学, 2006:

[40] 章征涛. 粘滞阻尼墙及其动力性能的实验研究[D]. 南京工业大学, 2003:

[41] 杜东升, 王曙光, 刘伟庆, 等. 粘滞流体阻尼墙在高层结构减震中的研究与应用[J].建筑结构学报,2010(09): 87-94.

[42] 夏冬平, 张志强, 李爱群, 等. 新型黏滞阻尼墙动力性能试验研究[J].建筑结构,2013(13): 46-50.

[43] 莫刚. 新型阻尼墙的试验研究[D]. 同济大学, 2016:

[44] 张丹. 带黏滞阻尼墙消能减震高层结构设计方法研究[D]. 同济大学, 2017:

[45] 孟庆骞. 钢板剪力墙的极限抗剪承载力[J].黑龙江科技学院学报,2012(02): 195-198.

[46] 郑正昌, 森高英夫, 下田郁夫, 等. 鹿儿岛机场候机楼抗震补强——增设粘滞阻尼墙的结构三维弹塑性分析[J].建筑结构,2000(06): 19-22.

[47] 曹飞, 刘伟庆, 王曙光, 等. 阻尼墙在金柏年财富广场消能设计中的应用研究[J].建筑科学,2008(09): 56-59.

[48] 姚义. 新型铅剪切阻尼器及其工程应用研究[D]. 北京工业大学防灾减灾工程及防护工程, 2007:

[49] Lin J, Williams F W. An introduction to seismic isolation[J].Engineering Structures,1995,17(3): 233-234.

[50] 日本免震构造协会. 图解隔震结构入门[M].科学出版社, 1998.

[51] Bakhshi A, Araki H, Shimazu T. Evaluation of the performance of a suspension isolation system subjected to strong ground motion[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,27(1): 29-47.

[52] Robinson W H, Greenbank L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1976,4(3): 251-259.

[53] 周云, 吴从晓, 邓雪松. 铅粘弹性阻尼器的开发、研究与应用: 第18届全国结构工程学术会议, 广州, 2009[C].

[54] Focardi F, Manzini E. An energy-sink device for antiseismic construction: International Conference on Engineering for Protection from National Disasters., Bankok, 1980[C].

[55] Monti M D, Robinson H W. A Lead Shear Damper Suitable for Reducing the Motion Induced by Wind and Earthquake: Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Petone, New Zealand, 1996[C].

[56] 李冀龙, 欧进萍. 铅剪切阻尼器的阻尼力模型与设计[J].工程力学,2006,23(4): 67-73.

[57] 郭道远, 裴星洙.同时设置金属和粘滞阻尼器的钢框架结构减震效果初探[A].见:全国结构工程学术会议, 2009.

[58] Marshall J D, Charney F A. A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis[J].Journal of Constructional Steel Research,2010,66(10): 1278-1286.

[59] 裴星洙, 贺方倩. 同时附加位移和速度相关型阻尼的钢框架结构设计方法研究[J].工程抗震与加固改造,2012,34(5): 80-89.

[60] 李勇. 一种支撑型粘塑性阻尼器的研究[D]. 西安建筑科技大学, 2013:

[61] 耿鹏飞. 附加黏滞阻尼器和BRB的钢框架联合减震设计与分析[D]. 西南交通大学, 2015:

[62] 裴少帅. 两种阻尼器混合布置的结构减震研究[D]. 同济大学, 2016:

[63] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计[M].武汉理工大学出版社, 2006.

[64] 武田寿一. 建筑物隔震防振与控振[M].中国建筑工业出版社, 1997.

[65] Sasaki K, Miyazaki M, Sawada T. Characteristics of Viscous Wall Damper of Intense Oscillation Test against Large Earthquakes: Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal, 2012[C].

[66] 日本ADC公司. 黏滞阻尼墙技术资料[EB/OL]. http://www.adc21.co.jp.

[67] 欧谨, 刘伟庆, 章振涛. 粘滞阻尼墙动力性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2005,27(6): 55-59.

[68] Asano K, Iwata T. Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1–10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake[J].Earth Planets & Space,2012,64(12): 1111-1123.

[69] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计理论及应用[M].武汉理工大学出版社, 2013.

[70] 李玉柱, 苑明顺. 流体力学-第2版[M].高等教育出版社, 2008.

[71] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理.修订版[M].复旦大学出版社, 2000.

[72] 苏启标. 降解和抗降解聚丙烯的ARES稳态谱研究[D]. 中山大学, 2007:

[73] 李建国, 李铁宁. 聚异丁烯的性能和应用[J].中国石油润滑油科技情报站2001年年会,2007.

[74] 社团法人日本隔震结构协会. 被动减震结构设计·施工手册[M].中国建筑工业出版社, 2008.

[75] Lin Y Y, Tsai M H, Hwang J S, et al. Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems[J].Engineering Structures,2003,25(1): 25-37.

[76] 笠井和彦, 大熊潔. Kelvin体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察 : その1 弾性・弾塑性フレームをもつ一質点制振構造の場合[J].日本建築学会構造系論文集,2001: 71-78.

[77] 大熊潔, 笠井和彦. 多質点弾性・弾塑性架構における粘弾性ダンパーのKelvin体への置換方法:(Kelvin体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察 その2)[J].日本建築学会構造系論文集,2010,75(652): 1089-1097.

[78] 胡岫岩, 任晓崧, 翁大根, 等. 附加黏滞阻尼器结构附加等效阻尼比算法研究[J].力学季刊,2013,34(1): 114-124.

[79] 建筑抗震设计规范（GB50011-2010）[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

# 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

**个人简历：**

吴坦烨，男，1993年3月生。

2015年6月毕业于大连理工大学，土木工程专业，获学士学位。

2015年9月至今就读于同济大学，建筑与土木工程专业，攻读硕士学位。

**已发表论文：**

[1] Sun FF, Wu TY, Mo G. Resistant force model of viscous damping wall considering influence of loading frequency. Engineering Structures 2018, 161:96-107.

[2] 孙飞飞, 吴坦烨, 莫刚,等. 基于杠杆的位移放大型黏滞阻尼墙试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):643-650.

[3] 孙飞飞, 吴坦烨, 莫刚,等. 黏塑性阻尼墙试验研究[J]. 结构工程师, 2017(6):90-97.

**待公开专利：**

[1] 孙飞飞, 魏智锴, 莫刚, 吴坦烨. 基于杠杆的位移放大型黏滞阻尼墙. (实审)

[2] 孙飞飞, 吴坦烨, 杨嘉琦. 联合型铅-黏滞阻尼墙. (受理)

[3] 孙飞飞, 杨嘉琦, 吴坦烨. 单层钢板贴合型摩擦-黏滞阻尼墙. (受理)

[4] 杨嘉琦, 孙飞飞, 吴坦烨. 双层钢板贴合型铅-黏滞阻尼墙. (受理)