

中国工程建设标准化协会标准

# 粘弹性减震材料与器件应用技术规程

Technical specification for application  
of viscoelastic vibration mitigation materials and dampers

(征求意见稿)

二〇二三年十一月

## 前 言

本规程是根据中国工程建设标准化协会《2021年第一批协会标准制订、修订计划》的要求，由东南大学会同有关单位编制而成。编制组开展了专题调查和研究，总结了我国近年来黏弹性减震材料与器件的实践经验并借鉴现行的有关规范标准和相关技术资料，在广泛征求意见的基础上，制订了本规程。

本规程共有10章，主要内容有：总则，术语和符号，基本规定，黏弹性减震材料的性能参数和测试方法，黏弹性减震器的技术性能和测试方法，黏弹性减震结构的设计计算，黏弹性减震器的连接件与构造，黏弹性减震器的施工、验收与维护、本规程用词说明、引用标准名录、条文说明等。

本规程由中国工程建设标准化协会负责管理，由主编单位负责具体技术内容的解释。在执行本规程的过程中，请各单位结合工程实践，注意总结经验，收集资料，并将有关的意见和建议反馈给主编单位，以供再次修订时参考。

**主编单位：**东南大学

**参编单位：**同济大学

清华大学

哈尔滨工业大学

广州大学

华南理工大学

华中科技大学

大连理工大学

昆明理工大学

兰州理工大学

西安建筑科技大学

北京建筑大学

航天材料及工艺研究所

中国建筑科学研究院有限公司

上海材料研究所

南京东瑞减震控制科技有限公司

震安科技股份有限公司

青岛科而泰环境控制技术有限公司

江苏东南特种技术工程有限公司

科技部重大基础设施智慧防灾“一带一路”联合实验室

**主编：**徐赵东

**主要起草人（按拼音顺序）：**董尧荣、杜永峰、葛 腾、管庆松、  
郭安薪、黄兴淮、李爱群、李宏男、李 惠、李今保、潘 鹏、潘  
文、谭 平、滕 军、王 兵、王海深、吴 波、徐 斌、徐业守、  
薛彦涛、尹学军、袁 涌、张中文、赵云峰、周 颖、周 云、朱  
丽华、朱宏平

**主要审查人：**

# 目 次

<b>1 总则</b> .....	1
<b>2 术语与符号</b> .....	2
2.1 术语 .....	2
2.2 符号 .....	5
<b>3 基本规定</b> .....	9
3.1 一般要求 .....	9
3.2 黏弹性减震材料要求 .....	9
3.3 黏弹性减震器要求 .....	9
3.4 结构分析 .....	9
3.5 连接与节点 .....	10
3.6 施工与验收 .....	10
3.7 维护与检查 .....	10
<b>4 黏弹性减震材料的性能参数和测试方法</b> .....	11
4.1 一般规定 .....	11
4.2 黏弹性减震材料的性能参数及要求 .....	11
4.3 黏弹性减震材料性能的测试方法 .....	12
4.4 黏弹性减震材料的检验规则 .....	13
<b>5 黏弹性减震器的技术性能和测试方法</b> .....	15
5.1 一般规定 .....	15
5.2 黏弹性减震器的性能参数及要求 .....	15
5.3 黏弹性减震器性能的测试方法 .....	17
5.4 黏弹性减震器性能参数的确定 .....	18
5.5 黏弹性减震器的检验规则 .....	19
<b>6 黏弹性减震结构的设计计算</b> .....	22
6.1 一般规定 .....	22
6.2 黏弹性减震结构抗震性能计算 .....	22
6.3 黏弹性减振结构抗风性能计算 .....	24
6.4 大型管道结构的黏弹性减振性能计算 .....	22
<b>7 黏弹性减震器的连接与构造</b> .....	25
7.1 一般规定 .....	25
7.2 预埋件计算 .....	26
7.3 支撑和传力柱、传力墙计算 .....	26

7.4 节点板计算 .....	27
7.5 黏弹性减震器与结构连接的构造要求 .....	28
<b>8 黏弹性减震器的施工、验收和维护 .....</b>	<b>29</b>
8.1 一般规定 .....	29
8.2 进场验收 .....	29
8.3 施工 .....	30
8.4 质量验收 .....	31
8.5 维护 .....	34
<b>9 本规程用词说明 .....</b>	<b>35</b>
<b>10 引用标准名录 .....</b>	<b>36</b>
附录 A 节点稳定性计算 .....	38
附录 B 材料进场验收记录 .....	40
附录 C 检验批质量验收记录 .....	41
附：条文说明 .....	43

# Contents

<b>1 General Provisions</b> .....	1
<b>2 Terms and Symbols</b> .....	2
2.1 Terms .....	2
2.2 Symbols .....	5
<b>3 Basic Requirements</b> .....	9
3.1 General Requirements .....	9
3.2 Requirements for Viscoelastic Materials .....	9
3.3 Requirements for Viscoelastic vibration mitigation devices .....	9
3.4 Structural Analysis .....	9
3.5 Connections and Joints .....	10
3.6 Construction and Quality Acceptance .....	10
3.7 Maintenance and Checking .....	10
<b>4 Performance Parameters and Test Methods of Viscoelastic Materials</b> .....	11
4.1 General Requirements .....	11
4.2 Performance Parameters and Requirements of Viscoelastic Materials .....	11
4.3 Test Methods for the Performance of Viscoelastic Materials .....	12
4.4 Judgement Rules for Viscoelastic Materials .....	13
<b>5 Technical Performance and Test Methods of Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	15
5.1 General Requirements .....	15
5.2 Performance Parameters and Requirements of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	15
5.3 Test Methods for the Performance of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	17
5.4 Determination of Performance Parameters of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	18
5.5 Judgement Rules for Viscoelastic vibration mitigation devices .....	19
<b>6 Calculation and Design of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	22
6.1 General Requirements .....	22
6.2 Calculation of Seismic Performance of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	22
6.3 Calculation of Wind Resistance Performance of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	24
6.4 Calculation of Performance of Large Pipe Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	22
<b>7 Connection and Construction of Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	25
7.1 General Requirements .....	25
7.2 Embedded Calculations .....	26
7.3 Calculation of Support and Transmission Columns, Transmission Walls .....	26
7.4 Calculation of Connection and Joint Plate .....	27

7.5 Construction Requirements for Connections Between VE Dampers and Structures .....	28
<b>8 Construction, Quality Acceptance and Maintenance of Viscoelastic vibration mitigation devices .....</b>	<b>29</b>
8.1 General Requirements .....	29
8.2 Site Acceptance .....	29
8.3 Construction .....	30
8.4 Quality Acceptance .....	312
8.5 Maintenance .....	34
<b>9 Explanation of Wording in This Code .....</b>	<b>35</b>
<b>10 List of Quoted Standards .....</b>	<b>36</b>
Appendix A Stability Calculation of Connections and Joints .....	38
Appendix B Acceptance Record for Viscoelastic Materials .....	40
Appendix C Acceptance Record for Quality Acceptance .....	41
Addition: Explanation of Provisions .....	43

# 1 总则

**1.0.1** 为了在黏弹性减震工程的设计、生产、施工、验收和维护中贯彻执行国家的有关法规和技术政策，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制订本规程。

**1.0.2** 本规程适用于抗震设防烈度为 6 度~9 度地区新建建筑结构和既有建筑抗震加固结构的黏弹性减震设计、生产、施工、验收和维护。

抗震设防烈度大于 9 度地区及有特殊要求的新建建筑结构和既有建筑抗震加固结构的黏弹性减震设计、生产、施工、验收和维护，应按有关专门规定执行。

**1.0.3** 本规程适用于风荷载作用下建筑结构抗风的黏弹性减振设计、生产、施工、验收和维护。

**1.0.4** 本规程适用于管道结构振动控制的黏弹性减振设计、生产、施工、验收和维护。

**1.0.5** 按本规程设计与施工的黏弹性减震结构，其抗震设防目标是：当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震影响时，黏弹性减震器正常工作，主体结构不受损坏或不需要修理可继续使用；当遭受相当于本地区抗震设防烈度的设防地震影响时，黏弹性减震器正常工作，主体结构可能发生损坏，但经一般修理仍可继续使用；当遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时，黏弹性减震器不应丧失功能，主体结构不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

**1.0.6** 黏弹性减震结构设计、生产、施工、验收和维护，除应符合本规程的要求外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**1.0.7** 黏弹性减震器可用于控制地震、风振等各类振动，本标准统一表述为黏弹性减震器。

## 2 术语与符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 黏弹性减震材料 viscoelastic materials

黏弹性减震材料是一种兼具粘性和弹性的高分子聚合物,在受到交变应力作用发生变形时,一部分能量以位能的形式储存起来,另一部分能量则以热能的形式耗散掉,以此减小结构振动响应。

#### 2.1.2 黏弹性减震器件(以下简称为黏弹性减震器或减震器) viscoelastic vibration mitigation device vibration mitigation device

黏弹性减震器是通过其内部的黏弹性减震材料滞回变形来耗散或吸收振动能量的装置,通常是由黏弹性减震材料和刚性约束板或约束筒组成的速度相关型减震器。

#### 2.1.3 黏弹性减震部件 viscoelastic vibration mitigation components

由黏弹性减震器和连接减震器的构件(如支撑)组成的部分。

#### 2.1.4 黏弹性减震结构 structures with viscoelastic vibration mitigation devices

设置黏弹性减震器的结构,黏弹性减震结构包括主体结构和黏弹性减震部件。

#### 2.1.5 速度相关型减震器 velocity-dependent vibration mitigation device

耗能能力与减震器两端的相对运动速度有关的减震器,如黏弹性减震器、黏滞流体减震器等。

#### 2.1.6 黏弹性阻尼墙 viscoelastic damping wall

黏弹性阻尼墙是一种由钢板和黏弹性减震材料组成的墙状黏弹性减震器,使黏弹性减震材料在拉压或剪切变形中耗能减震。

#### 2.1.7 工作频率 working frequency

工作频率是黏弹性减震器正常工作时往复运动的频率,当黏弹性减震器加设到结构中时,用于地震或风振控制时,工作频率通常采用黏弹性减震结构的第一自振频率。

#### 2.1.8 设计频率

#### 2.1.9 最大阻尼力 maximum damping force

最大阻尼力是黏弹性减震器在环境温度、工作频率和给定位移幅值条件下所能提供的最大出力。

#### 2.1.10 阻尼力设计值 design force of damper

黏弹性减震结构在罕遇地震或其它最大设计荷载作用下黏弹性减震器能够达到的最大阻尼力。

### 2.1.11 位移设计值 design displacement of damper

黏弹性减震结构在罕遇地震或其它最大设计荷载作用下黏弹性减震器两端可能发生的最大相对变形值。

### 2.1.12 极限位移 ultimate displacement

极限位移是指黏弹性减震器在环境温度和工作频率条件下能达到的最大变形值,黏弹性减震器的变形超过该值后减震器发生破坏或者其滞回曲线呈现明显反“S”形,极限位移应不小于减震器位移设计值的120%。

### 2.1.13 极限剪切应变 ultimate shear strain

极限剪切应变是指黏弹性减震器在环境温度和工作频率条件下,黏弹性减震材料与刚性约束板或约束筒未发生剥离前黏弹性减震材料最大切向位移与黏弹性减震材料层厚度之比。

### 2.1.14 剪切应变设计值 design shear strain

黏弹性减震结构在罕遇地震或其它最大设计荷载作用下黏弹性减震器中的黏弹性减震材料达到的切向位移与黏弹性减震材料层厚度之比。

### 2.1.15 剪切应力设计值 design shear force

黏弹性减震结构在罕遇地震或其它最大设计荷载作用下黏弹性减震器中的黏弹性减震材料达到的最大切向力与黏弹性减震材料层面积之比。

### 2.1.16 储能模量 storage modulus

储能模量是黏弹性减震材料的剪切(或拉压)应变设计值所对应的剪切(或拉压)应力与剪切(或拉压)应变设计值的比值。

### 2.1.17 表观剪切模量 apparent shear modulus

表观剪切模量是黏弹性减震材料的剪切应力设计值与剪切应变设计值的比值。

### 2.1.18 储能刚度 storage stiffness

储能刚度是黏弹性减震器位移设计值所对应的阻尼力与位移设计值的比值。

### 2.1.19 等效刚度 equivalent stiffness

等效刚度是黏弹性减震器阻尼力设计值与减震器位移设计值的比值。

### 2.1.20 等效阻尼 equivalent damping

等效阻尼是黏弹性减震器零位移时阻尼力与减震器位移设计值和工作频率乘积的比值。

### 2.1.21 附加阻尼比 additional damping ratio

附加阻尼比是黏弹性减震器耗散能量的总和在结构总耗散能量中的体现。

### 2.1.22 损耗因子 loss factor

衡量黏弹性减震材料阻尼特性的重要指标,表示一个周期交变应力场作用下材料耗散能量与最大储存能量的比值。

#### **2.1.23 诺莫图 Nomogram**

一种利用图像来进行计算的工具,其使用的坐标系不同于笛卡尔坐标系,通过固定一些参数来研究固定参数和未固定参数之间的关系。

#### **2.1.24 滞回曲线 hysteretic curve**

滞回曲线是黏弹性减震器的力-位移曲线。

#### **2.1.25 设计使用年限 design serving period**

在正常使用和维护情况下,不丧失有效使用功能的期限。

#### **2.1.26 附加刚度 additional stiffness**

附加刚度是减震部件附加给主体结构的刚度。

#### **2.1.27 拉伸应力 tension stress**

拉伸试样所施加的应力,由施加的力除以试样测试长度范围内的原始横截面面积计算而得。

#### **2.1.28 拉伸强度 elongation strength**

试样拉伸至断裂过程中的最大拉伸应力。

#### **2.1.29 扯断伸长率 elongation at break**

试样断裂时的百分比伸长率。

#### **2.1.30 扯断永久变形 permanent deformation after break**

试样断裂后放置 3 分钟,再把断裂的两部分吻合在一起测量到的变形。

#### **2.1.31 邵氏硬度 Shore hardness**

材料硬度的一种测试和表示方法。

#### **2.1.32 动态热机械分析仪 dynamic mechanical analyser**

一种测量黏弹性减震材料的力学性能与时间、温度或频率关系的仪器。

#### **2.1.33 动态热机械分析法 (DMA) dynamic mechanical analysis method**

采用动态热机械分析仪测量黏弹性减震材料的力学性能与时间、温度或频率关系的方法。

#### **2.1.34 剪切粘合强度 shear adhesive strength**

在平行于胶层的载荷作用下,胶结试样破坏时,单位胶结面积所承受的剪切力。

#### **2.1.35 型式检验 type testing**

当需对生产厂家用于工程应用的黏弹性减震器新产品（新种类、新规格、新型号）进行检验时，或已有黏弹性减震器产品的规格、型号，结构、材料、工艺方法等有较大改变时，委托具有相应资质的第三方检测机构进行的针对产品性能的相关检验活动。

#### 2.1.36 出厂检验 factory inspection

对正式生产的产品在出厂时必须进行的最终检验，用以评定已通过型式检验的产品在出厂时是否具有型式检验中确认的质量，是否达到良好的质量特性的要求。产品经出厂检验合格，才能作为合格品交付，可选择型式检验项目的一部分指标进行检验。

#### 2.1.37 见证检验 evidential testing

也称为进场见证检验，是指在见证单位的见证下，按照有关规定从施工现场随机抽取试样，送至具备相应资质的检测机构进行检验。

## 2.2 符号

### 2.2.1 黏弹性减震材料参数

$E_b$  —— 扯断伸长率

$G_{DMA}$  —— 采用 DMA 方法测得的黏弹性减震材料的储能模量

$H_d$  —— 扯断后试样的永久变形

$HA$  —— 邵氏硬度

$L_0$  —— 试样在拉伸前的原始长度

$L_2$  —— 试样在拉伸试验机上拉伸至断裂后，扯断试样停放 3 分钟时的长度

$p$  —— 试样破坏的最大力

$P_a$  —— 老化和未老化试件的性能变化率

$s$  —— 黏弹性减震材料与刚性约束板粘结面的面积

$t$  —— 测试长度部分的厚度

$T_s$  —— 拉伸强度

$W$  —— 裁刀狭窄部分的宽度

$x_0$  —— 老化前的性能值

$x_a$  —— 老化后的性能值

$\eta_{DMA}$  —— 采用 DMA 方法测得的黏弹性减震材料损耗因子

$\tau$  —— 钢板与黏弹性减震层之间的剪切粘合强度

### 2.2.2 黏弹性减震器参数

- $A_v$  —— 黏弹性减震材料层面积  
 $C_j$  —— 第  $j$  个减震器由测试确定的线性阻尼系数  
 $C_D$  —— 黏弹性减震器的线性阻尼系数  
 $C_d$  —— 黏弹性减震器等效阻尼  
 $F_{djmax}$  —— 第  $j$  个减震器在水平地震作用下的最大阻尼力  
 $f_1$  —— 结构的第一自振频率  
 $f_d$  —— 黏弹性减震器动态加载频率  
 $F_0$  —— 黏弹性减震器最大阻尼力  
 $F_1$  —— 黏弹性减震器正向和负向设计位移  $u_0$  处阻尼力绝对值的平均值  
 $F_2$  —— 黏弹性减震器正向和负向零位移处阻尼力绝对值的平均值  
 $G_l$  —— 黏弹性减震材料的储能模量  
 $G'_1$  —— 黏弹性减震材料的表观储能模量  
 $h_v$  —— 黏弹性减震材料层厚度  
 $K_d$  —— 黏弹性减震器的储能刚度  
 $K_e$  —— 黏弹性减震器的等效刚度  
 $n$  —— 黏弹性减震材料层数量  
 $u_0$  —— 黏弹性减震器设计位移  
 $u_1$  —— 极限剪切应变测试的加载幅值  
 $u_d$  —— 黏弹性减震器位移  
 $u_w$  —— 风荷载下黏弹性减震器设计位移的 1.2 倍  
 $\Delta u_j$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器两端的相对水平位移  
 $W_{cj}$  —— 第  $j$  个减震部件在结构预期层间位移  $\Delta u_j$  下往复循环一周所耗散的能量  
 $W_j$  —— 黏弹性减震器 30 圈疲劳滞回面积平均值  
 $\eta$  —— 通过疲劳试验机周期往复加载测得黏弹性减震器的损耗因子  
 $\theta_j$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器的工作变形方向与水平面的夹角  
 $\omega$  —— 黏弹性减震器周期往复加载圆频率

### 2.2.3 黏弹性减震结构参数

- $A_i$  —— 节点板在拉力、剪力作用下第  $i$  段破坏面的截面积  
 $C$  —— 黏弹性减震器提供的附加阻尼矩阵，由黏弹性减震器的等效线性阻尼计算

- $C_j$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器的等效阻尼系数
- $f$  —— 钢材的抗拉和抗剪强度设计值
- $F_{DM}$  —— 黏弹性减震器的最大出力
- $F_i$  —— 质点  $i$  的水平地震力标准值
- $k_j$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器的等效刚度
- $K_b$  —— 支撑构件沿黏弹性减震器工作方向的刚度
- $l_i$  —— 第  $i$  段破坏段的长度
- $M_i$  —— 黏弹性减震结构的第  $i$  阶模态质量
- $N$  —— 作用于节点板上的黏弹性减震器作用力
- $T_1$  —— 减震结构的基本自振周期
- $T_i$  —— 减震结构的第  $i$  阶自振周期
- $t_i$  —— 板件厚度
- $\Delta u_{sy}$  —— 设置减震部件的主体结构层间屈服位移
- $u_i$  —— 质点  $i$  在水平地震作用下的位移
- $W_{c_j}$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器在结构该振型特征圆频率及预期层间位移下往复循环一周所耗散的能量
- $W_S$  —— 设置黏弹性减震构件的结构在预期位移下的总应变能
- $W_S$  —— 减震结构在水平地震作用下的总应变能
- $\alpha_i$  —— 第  $i$  段破坏线与拉力轴线的夹角
- $\xi_a$  —— 黏弹性减震结构的附加阻尼比
- $\xi_{ai}$  —— 黏弹性减震器提供的第  $i$  阶振型附加阻尼比
- $\eta_i$  —— 第  $i$  段的拉剪折算系数
- $\theta_j$  —— 第  $j$  个黏弹性减震器工作方向与水平面的夹角
- $\phi_i$  —— 减震结构的第  $i$  阶振型
- $\omega_{D1}$  —— 结构的第一阶自振圆频率

#### 2.2.4 单位

- $cm$  —— 厘米
- $kN$  —— 千牛
- $h$  —— 小时

*min* —— 分钟

°C —— 摄氏度

*m* —— 米

*mm* —— 毫米

*MP<sub>a</sub>* —— 兆帕

*N* —— 牛

*P<sub>a</sub>* —— 帕

*s* —— 秒

## 3 基本规定

### 3.1 一般要求

- 3.1.1** 黏弹性减震器应用于工程结构或设备时，其设防目标应参考国家及相关规范确定。
- 3.1.2** 黏弹性减震器在工程结构或设备中的布置应符合下列规定：
- 1 黏弹性减震器的布置宜使结构形成均匀合理的受力体系；
  - 2 黏弹性减震器宜设置在结构或设备中相对变形或速度较大的位置；
  - 3 黏弹性减震器的设置应便于检查、维护和更换，设计文件中应注明其使用环境、检查和维护要求。
- 3.1.3** 黏弹性减震器的选择应考虑结构类型、使用环境、结构减震要求等因素，根据结构或设备在不同荷载作用下的位移或内力控制要求选择不同参数的黏弹性减震器。
- 3.1.4** 当结构或设备遭遇设计及超越设计的荷载作用后，应对黏弹性减震器进行检查和维护。

### 3.2 黏弹性减震材料要求

- 3.2.1** 黏弹性减震材料应具有良好的耗能能力。
- 3.2.2** 黏弹性减震材料应具有良好的耐久性。

### 3.3 黏弹性减震器要求

- 3.3.1** 黏弹性减震器应具备良好的变形能力和耗能能力，其滞回曲线应光滑、无异常。
- 3.3.2** 黏弹性减震器应具有良好的耐久性和环境适应性。
- 3.3.3** 黏弹性减震器的刚性约束部件应具有足够的强度和耐久性，以保证传力要求。
- 3.3.4** 黏弹性减震器的性能参数和使用数量应在设计文件中注明。

### 3.4 结构分析

- 3.4.1** 黏弹性减震器的恢复力模型应采用成熟的模型并经试验验证。
- 3.4.2** 采用黏弹性减震器的结构总阻尼比应为主体结构阻尼比和黏弹性减震器阻尼比之和，结构阻尼比应根据主体结构处于弹性或弹塑性工作状态分别确定。
- 3.4.3** 对黏弹性减震结构进行弹性或弹塑性动力分析时，宜采用不少于两个合适和成熟的不同软件进行对比分析，计算结果应与简化设计方法对比，经分析判断确认其合理、有效后

方可用于工程设计。

### 3.5 连接与节点

**3.5.1** 黏弹性减震器与支撑、支承构件的连接，应符合钢构件连接、钢与钢筋混凝土构件连接、钢与钢管混凝土构件连接等现行国家标准要求的构造规定。

**3.5.2** 黏弹性减震器与支撑、连接件之间宜采用高强度螺栓连接或销轴连接，也可采用焊接，但应做好降温处理，以减小高温对黏弹性减震器的影响。

**3.5.3** 黏弹性减震器的连接及节点应具有足够的强度和耐久性，以保证传力要求。在黏弹性减震器对应的最大阻尼力作用下，与其连接的支撑、墙、支墩应处于弹性工作状态，且具有足够的刚度，以保证连接构件将变形有效传递到黏弹性减震器中。

**3.5.4** 在最大阻尼力作用下，黏弹性减震器与主体结构相连的预埋件、节点板等应处于弹性工作状态，且不应出现滑移或拔出等破坏。

### 3.6 施工与验收

**3.6.1** 黏弹性减震器的安装可在主体结构或设备安装完成后进行，或在主体结构施工或设备安装时进行，安装完成后不应出现影响其正常工作的变形，且计算分析应考虑安装次序的影响。

**3.6.2** 黏弹性减震器的验收应包括黏弹性减震器和减震器连接部件的验收，应分批进行。划分批次时，同一种规格和同一生产工艺条件下生产的产品可列为同一批次。

### 3.7 维护与检查

**3.7.1** 黏弹性减震器根据应用环境应具有良好的维护措施，其耐久性应符合我国现行相关国家标准的规定。

**3.7.2** 黏弹性减震器应用后应进行定期检查和应急检查。应根据应用环境和甲方要求具体对正常使用的黏弹性减震器进行定期检查；在结构或设备遭遇地震、强风、火灾等灾害后应进行应急检查和性能测试。

## 4 黏弹性减震材料的性能参数和测试方法

### 4.1 一般规定

- 4.1.1 黏弹性减震材料应具有良好的耗能能力和耐久性。
- 4.1.2 黏弹性减震材料表面应密实、平整，不应有明显的气泡、蜂窝、裂纹。
- 4.1.3 黏弹性减震材料的加工应选用无毒、环保的生产工艺。
- 4.1.4 黏弹性减震材料在强腐蚀等环境下应采用提高耐腐蚀性能的措施。

### 4.2 黏弹性减震材料的性能参数及要求

- 4.2.1 黏弹性减震材料的力学性能指标应符合表 4.2.1 的要求。

表 4.2.1 黏弹性减震材料力学性能指标

项目	指标
拉伸强度/MPa	≥10
扯断伸长率/%	≥300
扯断永久变形/%	≤22
-10°C~40°C工作频率下材料损耗因子 $\eta_{DMA}$	≥0.3
刚性约束板与黏弹性减震材料之间的剪切粘合强度/MPa	≥2.5
邵氏硬度 HA	≥6

- 4.2.2 黏弹性减震材料的热空气老化性能指标应符合表 4.2.2 的要求。

表 4.2.2 黏弹性减震材料老化性能指标

项目	性能要求
外观	目测无变化
储能模量变化率	-15%到 15%之间
损耗因子变化率	-15%到 15%之间
拉伸强度变化率	-20%到 20%之间
扯断伸长率变化率	-20%到 20%之间

- 4.2.3 黏弹性减震材料具有温度和频率相关性，选择黏弹性减震材料时，其诺莫图中损耗因子峰值对应的温度宜靠近应用环境的平均温度，损耗因子峰值对应的频率宜靠近结构的第一自振频率。

### 4.3 黏弹性减震材料性能的测试方法

4.3.1 黏弹性减震材料的外观检测应通过目视法确定。

4.3.2 黏弹性减震材料的主要性能指标测试方法

4.3.2.1 储能模量  $G_{1DMA}$  和损耗因子  $\eta_{DMA}$

应采用动态热机械分析法 (DMA) 测量黏弹性减震材料的储能模量  $G_{1DMA}$  和损耗因子  $\eta_{DMA}$ , 温度范围  $-10^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ , 频率为工作频率, 剪切或拉压应变幅值宜为千分之一到千分之五 (0.1%~0.5%)。仪器操作的具体步骤如下:

1 仪器校正 (包括电子校正、力学校正、动态校正和位标校正, 通常只作位标校正), 将夹具 (包括运动部分和固定部分) 全部卸下, 关上炉体, 进行位标校正;

2 夹具安装校正 (夹具质量校正、柔量校正);

3 样品安装;

4 开始测量, 测量温度范围应为  $-10^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ , 测量频率宜为减震器的工作频率, 升温速度应为  $2^{\circ}C/min$ 。

4.3.2.2 拉伸强度

应在动夹持器或滑轮恒速移动的拉力试验机上, 将哑铃状标准试样进行拉伸, 按要求记录试样在不断拉伸过程中和断裂时拉伸力和伸长率的值。拉伸强度应按式 4.3.2.2 计算:

$$T_S = \frac{F_m}{wt} \quad (4.3.2.2)$$

其中  $F_m$  是记录的最大力, 单位为 N;  $W$  是裁刀狭窄部分的宽度, 单位为 mm;  $t$  是测试长度部分的厚度, 单位为 mm。黏弹性减震材料拉伸强度的详细测试方法应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528 的规定执行。

4.3.2.3 扯断伸长率

扯断伸长率应按式 4.3.2.3 计算:

$$E_b = \frac{(L_b - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (4.3.2.3)$$

其中  $E_b$  是扯断伸长率, 以%表示;  $L_b$  是断裂时的试件长度, 单位为 mm;  $L_0$  是初始测试长度, 单位为 mm。黏弹性减震材料扯断伸长率的详细测试方法应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528 的规定执行。

4.3.2.4 扯断永久变形

扯断永久变形应按式 4.3.2.4 计算, 以百分数表示:

$$H_d = \frac{L_2 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4.3.2.4)$$

其中， $H_d$ 是扯断后试样的永久变形，以%表示； $L_2$ 是试样在拉伸试验机上拉伸至断裂后，扯断试样停放3分钟时的长度，单位为mm； $L_0$ 是试样在拉伸前的原始长度，单位为mm。黏弹性减震材料扯断永久变形的详细测试方法应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528的规定执行。

#### 4.3.2.5 热空气老化

黏弹性减震材料老化测试所需的温度和时间应依据阿累尼乌斯方程计算得到，计算所需的参数一般由黏弹性减震材料的生产厂家根据测试结果提供。当无法得到计算所需的参数时，可将黏弹性减震材料在80℃老化箱内放置804小时或者在100℃老化箱内放置155小时，对应于20℃环境下使用50年的等效温度和等效时间。老化和未老化试件的性能变化率应按式4.3.2.5计算：

$$P_a = \frac{x_a - x_0}{x_0} \times 100 \quad (4.3.3.5)$$

其中 $P_a$ 为性能变化率，以%表示； $x_0$ 为老化前的性能值； $x_a$ 为老化后的性能值。为了保证测试结果的准确性，应将三组同样的试件进行热空气老化测试，各组结果相差不超过10%。黏弹性减震材料热空气老化的详细测定方法应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验》GB/T 3512的规定执行。

#### 4.3.2.6 刚性约束板与黏弹性减震材料之间的剪切粘合强度

对于需要将黏弹性减震材料与刚性约束板粘合的试样，黏弹性减震材料和刚性约束板宜采用高温硫化或粘接剂粘合。黏弹性减震材料与刚性约束板的剪切粘合强度应按式4.3.2.6计算

$$\tau = \frac{p}{s} \quad (4.3.2.6)$$

其中 $\tau$ 为黏弹性减震材料与刚性约束板的剪切粘合强度， $p$ 为试样破坏的最大力，单位为N； $s$ 为粘合面的面积，单位是 $\text{mm}^2$ 。黏弹性减震材料粘合强度的详细测定方法应按现行国家标准《硫化橡胶与金属粘合强度的测定拉伸法》GB/T 11211的规定执行。

#### 4.3.2.7 邵氏硬度

邵氏硬度应采用针式橡塑硬度计或球形橡塑硬度计测量，具体测量方法应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法》GB/T 531.1的规定执行。

## 4.4 黏弹性减震材料的检验规则

4.4.1 黏弹性减震材料的检验分为型式检验和出厂检验。

4.4.2 应对每件黏弹性减震材料产品检测其外观质量,外观质量检测由产品生产厂家质检部门进行,检验合格后方可进行下一步生产加工。

4.4.3 黏弹性减震材料有下列情况之一时,应由独立的第三方检测机构进行型式检验,并提供型式检验报告:

- 1 新产品的试制、定型、鉴定;
- 2 当原料、结构、工艺等有较大改变,有可能对产品质量影响较大时;
- 3 正常生产时每五年检验一次;
- 4 停产一年以上恢复生产时;
- 5 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时;
- 6 国家质量监督机构提出型式检验要求时。

4.4.4 黏弹性减震材料的出厂检验应由产品生产厂家自身或具有检验资质的第三方检测机构进行。同一批黏弹性减震材料抽检数量不应少于3个,抽检合格率应为100%。被抽检产品检测后不得用于主体结构。

4.4.5 黏弹性减震材料的型式检验和出厂检验项目见下表:

表 4.4.5 黏弹性减震材料型式检验和出厂检验项目

性能	项目	型式检验	出厂检验	合格标准	检测方法
材料损耗因子	损耗因子	√	√	4.2	4.3
拉伸性能	拉伸强度	√	√		
	扯断伸长率	√	√		
	扯断永久变形	√	√		
粘合性能	剪切粘合强度	√	×		
热空气老化性能	拉伸强度变化率	√	×		
	扯断伸长率变化率	√	×		
硬度	硬度	√	√		
注:√—要进行测试;×—不进行测试					

4.4.6 判定规则

4.4.6.1 型式检验

应由具有检测资质的第三方进行,检验结果应全部符合本规程 4.2.1-4.2.3 的要求,否则为不合格。

4.4.6.2 出厂检验

按 4.4.2 进行检查时,如果有一条不符合标准要求,则该件产品判为不合格产品。

按 4.4.3 进行抽检时,如果有一件抽样的一项性能不符合标准要求,对同批产品按原抽样数加倍抽样,并重新进行所有项目的检测,若仍有一项不合格时,则判为该批产品不合格。

## 5 黏弹性减震器的技术性能和测试方法

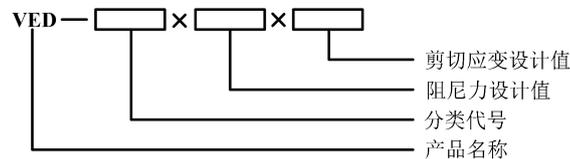
### 5.1 一般规定

5.1.1 黏弹性减震器一般可分为板式黏弹性减震器和筒式黏弹性减震器。

1 板式黏弹性减震器由黏弹性减震材料和刚性约束板构成,刚性约束板和黏弹性减震材料层均为板状,代号为 P;

2 筒式黏弹性减震器由黏弹性减震材料和刚性约束筒构成,刚性约束筒和黏弹性减震材料层均为筒状,代号为 T;

3 黏弹性减震器标记由产品名称 VED、分类代号、阻尼力设计值(kN)、剪切应变设计值(%)组成。



示例 1: 板式黏弹性减震器阻尼力设计值为 100kN, 剪切应变设计值为 280%, 标记为 VED-P×100×280;

示例 2: 筒式黏弹性减震器阻尼力设计值为 200kN, 剪切应变设计值为 300%, 标记为 VED-T×200×300。

5.1.2 黏弹性减震器的设计使用年限不宜小于减震结构的设计使用年限。当黏弹性减震器的设计使用年限小于减震结构的设计使用年限时,黏弹性减震器达到设计使用年限应及时检测,重新确定黏弹性减震器使用年限或进行更换。

### 5.2 黏弹性减震器的性能参数及要求

5.2.1 黏弹性减震器的外观应符合下列规定:

- 1 黏弹性减震器刚性约束板应平整、光滑、无毛刺、无锈蚀。
- 2 如采用钢板,表面宜涂刷防锈涂料,涂料厚度参照《建筑钢结构防腐技术规程》JGJ/T251 规定执行,坡口焊接,焊缝一级、平整。
- 3 黏弹性减震材料表面应密实平整。
- 4 黏弹性减震材料与刚性约束板之间应紧密连接、无裂缝。

5 黏弹性减震器的刚性构件和黏弹性层长宽的尺寸允许偏差应为产品设计值的 $\pm 2\%$ ，黏弹性层厚度允许偏差应为产品设计值的 $\pm 3\%$ ，不同位置厚度允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

**5.2.2** 黏弹性减震器中的黏弹性减震材料性能要求应符合本规程 4.2 节相关要求。黏弹性减震器中的钢材质量指标应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 中碳素结构钢或低合金钢的规定；除钢材外，黏弹性减震器的刚性约束部件也可采用塑料等其他材质，但应满足强度和承载力等要求。

**5.2.3** 黏弹性减震器的力学性能应符合表 5.2.3 的规定。

**表 5.2.3 黏弹性减震器的力学性能要求**

项目	性能要求
极限剪切应变	极限剪切应变实测值不应小于 300%，在设计温度和设计频率下各试件极限剪切应变实测值不应小于剪切应变设计值的 1.2 倍
滞回曲线	滞回曲线应为饱满的椭圆，在设计温度、设计频率和设计位移幅值下各试件滞回曲线单圈滞回耗能(即滞回曲线面积)实测值偏差应在设计值的 $\pm 20\%$ 以内，实测值偏差的平均值应在设计值的 $\pm 15\%$ 以内。
最大阻尼力	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下各试件最大阻尼力实测值偏差应在设计值的 $\pm 20\%$ 以内，实测值偏差的平均值应在设计值的 $\pm 15\%$ 以内
储能刚度	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下各试件储能刚度实测值偏差应在设计值的 $\pm 20\%$ 以内，实测值偏差的平均值应在设计值的 $\pm 15\%$ 以内
等效阻尼	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下各试件等效阻尼实测值偏差应在设计值的 $\pm 20\%$ 以内，实测值偏差的平均值应在设计值的 $\pm 15\%$ 以内

**5.2.4** 黏弹性减震器的老化性能应符合表 5.2.4 的规定：

**表 5.2.4 黏弹性减震器老化性能要求**

项目	性能要求
外观	目测无变化
几何尺寸变化率	黏弹性减震器各部件几何尺寸变化率应在 $\pm 20\%$ 以内
最大阻尼力变化率 储能刚度变化率 等效阻尼变化率 单圈滞回耗能变化率	在相同测量温度、频率和位移幅值下，最大阻尼力、储能刚度、等效阻尼和单圈滞回耗能变化率应在 $\pm 20\%$ 以内

**5.2.5** 黏弹性减震器的疲劳性能应符合表 5.2.5 的规定。

**表 5.2.5 黏弹性减震器疲劳性能要求**

项目	性能要求
外观	目测无变化
变形	黏弹性减震器各部件变形率应在±20%以内
储能刚度变化率 等效阻尼变化率	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下，储能刚度和等效阻尼变化率应在±20%以内
最大阻尼力变化率	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下，任一个循环中正向和负向最大阻尼力与所有循环中正向和负向最大阻尼力平均值的偏差应在±20%以内
单圈滞回耗能变化率	在设计温度、设计频率和设计位移幅值下，任一个循环的单圈滞回耗能与所有循环的单圈滞回耗能平均值的偏差应在±20%以内

**5.2.6** 同种黏弹性减震材料加工的同一批黏弹性减震器不同试件，在相同测量温度、频率和位移幅值下最大阻尼力、储能刚度和等效阻尼的实测值偏差不宜超过 20%。

**5.2.7** 黏弹性减震器在遭遇火灾后应进行力学性能测试，在相同测量温度、频率和位移幅值下最大阻尼力、储能刚度和等效阻尼下降超过 20%时需要更换。

### 5.3 黏弹性减震器性能的测试方法

**5.3.1** 黏弹性减震器外观检测应通过目视确定，变形率和尺寸偏差通过游标卡尺、卷尺等测量确定。

**5.3.2** 黏弹性减震器在设计温度下的力学性能试验应按表 5.3.2 执行。

**表 5.3.2 黏弹性减震器力学性能试验**

项目	试验方法
最大阻尼力 储能刚度 等效阻尼 单圈滞回耗能	控制位移 $u=u_0\sin(\omega t)$ ，连续加载 5 个循环，每次均绘制阻尼力-位移滞回曲线；取第 3 个循环时滞回曲线的最大阻尼力作为黏弹性减震器最大阻尼力实测值；依据第 3 个循环时滞回曲线计算得到的黏弹性减震器储能刚度、等效阻尼和单圈滞回耗能作为黏弹性减震器储能刚度、等效阻尼和单圈滞回耗能实测值
极限剪切应变	控制位移 $u=u_1\sin(\omega t)$ ， $u_1$ 取值不小于 $u_0$ ，并逐步增大，每个位移幅值下加载 5 个循环。当任意一循环出现黏弹性减震材料与刚性约束板撕裂剥离，或力学性能参数下降超过 20%时，则认为黏弹性减震器破坏，试验停止，并取这时剪切应变作为极限剪切应变的实测值
注： $\omega=2\pi f$ ， $\omega$ 为黏弹性减震器周期往复加载圆频率， $f$ 为结构的第一自振频率， $u_0$ 为黏弹性减震器设计位移， $u_1$ 为极限剪切应变试验中加载的各位移幅值	

**5.3.3** 黏弹性减震器热空气老化应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验》GB/T 3512 的规定执行。将黏弹性减震器试件放入老化箱中，所需的温度和

时间应依据阿累尼乌斯方程计算得到,计算所需的参数一般由黏弹性减震器的生产厂家根据测试结果提供。无法得到计算所需的参数时,可将黏弹性减震器在 100°C老化箱内放置 155 小时或者 80°C老化箱内放置 804 小时后取出,按表 5.3.2 做力学性能试验,对应于 20°C环境下使用 50 年。

**5.3.4** 黏弹性减震器疲劳性能试验应按如下规定执行:对减震器施加频率为  $f_1$  的正弦位移激励,主要用于地震时,输入位移  $u=u_0\sin(\omega t)$ ,连续施加 30 个循环;主要用于风振时,输入位移  $u=u_w\sin(\omega t)$ ,每次加载不应少于 2000 次,累计加载 10000 个循环。

注:  $\omega=2\pi f_1$ ,  $\omega$  为黏弹性减震器动态周期往复加载圆频率,  $f_1$  为结构的第一自振频率,  $u_0$  为黏弹性减震器设计位移,  $u_w$  为风荷载下黏弹性减震器设计位移的 1.2 倍。

## 5.4 黏弹性减震器性能参数的确定

**5.4.1** 根据试验数据确定黏弹性减震器的性能参数,黏弹性减震器的阻尼力-位移滞回曲线应简化为图 5.4.1 所示的椭圆。

注:椭圆形心应平移至坐标原点,  $F_1$  为黏弹性减震器正向和负向加载位移幅值  $u_d$  处阻尼力绝对值的平均值,单位为 kN,  $u_d$  单位为 mm;  $F_2$  为黏弹性减震器正向和负向零位移处阻尼力绝对值的平均值,单位为 kN;  $F_0$  是黏弹性减震器的最大阻尼力,单位为 kN。

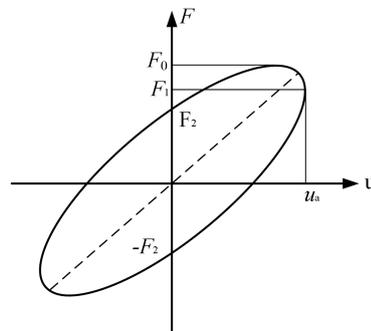


图 5.4.1 黏弹性减震器的阻尼力-位移滞回曲线

**5.4.2** 黏弹性减震器阻尼力应按下列公式计算:

$$F_d = K_d u_d + C_d \dot{u}_d \quad (5.4.2-1)$$

式中,  $u_d$  为黏弹性减震器位移,单位为 mm,  $u_d = u_a \sin(\omega_d t)$ ;  $\omega_d$  为黏弹性减震器动态加载角频率,单位为 rad/s,  $\omega_d = 2\pi f_d$ ;  $f_d$  为减震器动态加载频率,单位为 Hz;  $K_d$  为黏弹性减震器储能刚度,单位为 kN/m;  $C_d$  为黏弹性减震器等效阻尼,单位为 kN s m<sup>-1</sup>。

黏弹性减震器储能刚度、等效刚度和等效阻尼可按下列公式计算:

$$K_d = \frac{F_1}{u_a} \quad (5.4.2-2)$$

$$K_e = \frac{F_0}{u_a} \quad (5.4.2-3)$$

$$C_d = \frac{F_2}{\omega_d u_a} \quad (5.4.2-4)$$

其中 $K_e$ 为黏弹性减震器等效刚度，单位为 kN/m。

**5.4.3** 黏弹性减震器储能模量、损耗因子和单圈滞回耗能可按下列公式计算：

$$G_1 = \frac{F_1 h_v}{n A_v u_a} \quad (5.4.3-1)$$

$$\eta = \frac{F_2}{F_1} \quad (5.4.3-2)$$

$$E_d = \pi F_2 u_a \quad (5.4.3-3)$$

式中， $G_1$ 为黏弹性减震器储能模量，单位为 MPa； $h_v$ 为黏弹性减震材料层厚度，单位为 mm； $A_v$ 为黏弹性减震材料层面积，单位为 mm<sup>2</sup>； $n$ 为黏弹性减震材料层数量； $\eta$ 为黏弹性减震器损耗因子； $E_d$ 为黏弹性减震器单圈滞回耗能，单位为 kN·m。

## 5.5 黏弹性减震器的检验规则

**5.5.1** 黏弹性减震器的检验分为型式检验、出厂检验和进场见证检验。

**5.5.2** 黏弹性减震器型式检验应符合以下规定：

5.5.2.1 黏弹性减震器有下列情况之一时应进行型式检验：

- 1 新产品的试制、定型、鉴定；
- 2 当原料、结构、工艺等有较大改变，有可能对产品质量影响较大时；
- 3 正常生产时每五年检验一次；
- 4 停产一年以上恢复生产时；
- 5 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时；
- 6 国家质量监督机构提出型式检验要求时。

5.5.2.2 黏弹性减震器型式检验试件数目不应少于 3 件。

**5.5.3** 黏弹性减震器的出厂检验应符合以下规定：出厂检验的减震器样品应当随机抽取，若产品检测合格率未达到 100%，应对同批产品按原抽样数量加倍抽检，并重新进行所有项目的检测；如加倍抽检的检测合格率仍未达到 100%，则该批次黏弹性减震器不得在主体结构中使用。

5.5.3.1 黏弹性减震器出厂检验的项目应包括黏弹性减震器的外观、尺寸偏差和基本力学性能。

5.5.3.2 黏弹性减震器出厂检验抽检数量不少于同一工程同一规格数量的 3%，当同一规格的减震器数量较少时，可确定抽检数量为总数量的 3%，但不应少于 2 件，检测合格率应为 100%，测试后产品可用于主体结构。

5.5.4 黏弹性减震器的进场见证检验应符合以下规定：进场见证检验的黏弹性减震器样品应当从项目的产品中随机抽取。同一项目同一生产厂家的产品抽检总数量的 2%且不少于 2 件；当同一项目同一生产厂家的产品总数量较少时，抽检数量应为总数量的 2%且不少于 1 件。抽取其中不少于 1 件按 5.3.4 进行疲劳性能检测，疲劳性能检验后的产品不得用于主体结构。

5.5.5 黏弹性减震器检验项目应按表 5.5.5 执行。

表 5.5.5 黏弹性减震器检验项目

性能	项目	型式检验	出厂检验	进场见证检验	合格标准	检测方法
基本力学性能	最大阻尼力	√	√	√	5.2	5.3
	储能刚度	√	√	√		
	等效阻尼	√	√	√		
	单圈滞回耗能	√	√	√		
极限性能	极限剪切应变	√	×	√		
外观特性	外观	√	√	×		
	变形	√	√	×		
老化性能	最大阻尼力	√	×	×		
	储能刚度	√	×	×		
	等效阻尼	√	×	×		
	单圈滞回耗能	√	×	×		
疲劳性能	最大阻尼力	√	×	×		
	储能刚度	√	×	√		
	等效阻尼	√	×	√		
	单圈滞回耗能	√	×	√		
注：√—要进行测试；×—不进行测试						

### 5.5.6 判定规则

5.5.6.1 黏弹性减震器出厂检验应由产品生产厂家自检或由具有检验资质的第三方检测机构单位进行。型式检验和进场见证检验均应由具有检测资质的第三方检测机构进行，并提供检验报告。

5.5.6.2 出厂检验时黏弹性减震器的外观、尺寸偏差应根据本规程 5.2.1 的要求，按本规程 5.3.1 的规定进行，要求检验率 100%；如果有一条不符合标准要求，则该件产品判为不合格产品。

5.5.6.3 黏弹性减震器的力学性能、极限性能、老化性能和疲劳性能应根据本规程 5.2 节的要求，按 5.3 节规定执行。

## 6 黏弹性减震结构的设计计算

### 6.1 一般规定

6.1.1 当对黏弹性减震结构进行设计和计算时,应根据减震结构所处环境的平均温度、减震器的工作频率来确定黏弹性减震器的主要力学性能指标,其储能刚度、等效阻尼、最大阻尼力、极限剪切应变等主要力学性能指标实测值与设计值偏差应满足本规程5.2.3条的规定。

6.1.2 黏弹性减震器宜在平面上和竖向均匀布置,宜布置于相对位移及速度较大处,布置位置应兼顾检查、维修、更换与建筑的使用功能要求。

6.1.3 在分析黏弹性减震结构的动力响应时,应根据本规程5.4.2条的规定计算黏弹性减震器对结构的附加刚度和附加阻尼。应根据分析结果计算黏弹性减震器的阻尼力设计值与位移设计值,并验算减震器的最大阻尼力与极限位移。

### 6.2 黏弹性减震结构抗震性能计算

6.2.1 应根据设防烈度、抗震设防类别、设计使用年限及结构类型,对黏弹性减震结构两主轴方向分别计算水平地震作用;当黏弹性减震器或抗侧力构件与结构主轴方向斜交,且相交角度大于15°时,应额外取各斜交部件方向计算水平地震作用;设防烈度8度及以上区域的大跨度、长悬臂黏弹性减震结构,9度区域的高层黏弹性减震结构应计算竖向地震作用。

6.2.2 黏弹性减震器宜沿结构主轴方向布置,使减震结构的质量与刚度中心尽量靠近,以减小扭转振动;宜沿竖向均匀布置,避免造成竖向刚度突变与薄弱层;布置减震器不应使减震结构产生现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011规定的平面与竖向不规则。

6.2.3 黏弹性减震器给减震结构提供的附加阻尼比不宜超过25%,超过25%时宜按25%计算。

6.2.4 黏弹性减震结构的阻尼比由主体结构阻尼比和减震器提供的附加阻尼比组成,不同地震水准下结构总阻尼比应分别计算,速度线性相关型减震器的附加阻尼比可按下列公式计算:

$$\xi_a = (\sum_j W_{c_j}) / (4\pi W_s) \quad (6.2.5-1)$$

其中: $\xi_a$ 为黏弹性减震结构的附加阻尼比; $W_{c_j}$ 为第j个黏弹性减震器在工作频率及预期位移下往复循环一周所耗散的能量; $W_s$ 为黏弹性减震结构在预期位移下的总应变能。

不计入扭转影响时,减震结构在水平地震作用下的总应变能按以下公式计算:

$$W_s = \frac{1}{2} \sum_i F_i u_i \quad (6.2.5-2)$$

其中： $F_i$  为质点  $i$  的水平地震作用标准值； $u_i$  为质点  $i$  在水平地震作用标准值下的预期位移。

黏弹性减震器在水平地震作用下往复一周所耗散的能量，按以下公式计算：

$$W_{cj} = (2\pi^2/T_1) C_j \cos^2 \theta_j \Delta u_j^2 \quad (6.2.5-3)$$

其中： $T_1$  为黏弹性减震结构的第一自振周期； $C_j$  为第  $j$  个减震器的等效阻尼； $\theta_j$  为第  $j$  个减震器工作方向与水平面的夹角； $\Delta u_j$  为第  $j$  个减震器两端的预期相对水平位移。

**6.2.5** 当黏弹性减震主体结构处于弹性工作状态，且满足现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011规定的底部剪力法或振型分解反应谱法适用范围时，可采用底部剪力法或振型分解反应谱法计算减震结构的地震作用。采用实振型分解反应谱法计算时，结构阻尼比超过25%，取25%。可通过下式计算不同振型中黏弹性减震器贡献的附加阻尼比：

$$\xi_{ai} = \frac{T_i}{4\pi M_i} \phi_i^T C \phi_i \quad (6.2.6)$$

其中， $\xi_{ai}$  为黏弹性减震器提供的第  $i$  阶振型附加阻尼比； $M_i$  为减震结构的第  $i$  阶模态质量； $\phi_i$  为减震结构的第  $i$  阶振型； $T_i$  为减震结构的第  $i$  阶自振周期； $C$  为黏弹性减震器提供的附加阻尼矩阵，由黏弹性减震器的等效阻尼计算。

**6.2.6** 黏弹性减震主体结构处于弹性工作状态时，减震结构的阻尼比大于20%，或结构层高、不规则程度按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011规定需采用时程分析法补充计算时，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的要求通过时程分析法进行补充抗震计算，此时应采用本规程5.4.2条的规定计算储能刚度和等效阻尼。

**6.2.7** 罕遇地震下黏弹性减震主体结构处于弹塑性工作状态时，应采用现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011中的静力弹塑性分析方法或弹塑性时程分析方法对减震结构进行抗震计算，减震结构的层间弹塑性位移角限值应符合预期的变形控制要求，且宜比非减震结构适当减小。

**6.2.8** 采用静力弹塑性分析方法时，第  $j$  个黏弹性减震器的最大阻尼力，可由结构在地震作用下的层间变形与第一自振频率计算：

$$F_{Dmj} = \cos \theta_j \Delta u_j \sqrt{k_j^2 + \omega_{D1}^2 C_j^2} \quad (6.2.9)$$

其中， $F_{Dmj}$  为该黏弹性减震器的最大出力； $\omega_{D1}$  为黏弹性减震结构的第一阶自振圆频率； $k_j$  为第  $j$  个黏弹性减震器的储能刚度； $C_j$  为第  $j$  个黏弹性减震器的等效阻尼； $\theta_j$  为第  $j$  个减震器与水平面的夹角； $\Delta u_j$  为第  $j$  个黏弹性减震器两端的预期相对位移。

采用时程分析法时，黏弹性减震器的阻尼力设计值与位移设计值应根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的时程分析要求，取3组地震动时程分析结果的最大值或7组及以上的时程分析结果的平均值。

**6.2.9** 应根据罕遇地震弹塑性分析结果验算黏弹性减震器的最大阻尼力与极限位移，黏弹性减震器的极限位移应不小于罕遇地震下减震器位移设计值的120%。

**6.2.10** 当黏弹性减震结构的抗震性能明显提高时，主体结构的抗震构造措施要求可适当降低，降低程度可根据设置与不设置黏弹性减震器主体结构的地震剪力之比确定，最大降低程度应控制在烈度1度以内。

### 6.3 黏弹性减振结构抗风性能计算

**6.3.1** 计算一般竖向悬臂结构的顺风向风振，或立面规则、平面为圆形或矩形的横风向或扭转风振时，可采用等效风荷载法计算结构的风振响应，通过附加阻尼比考虑黏弹性减震器对风振响应的控制作用，附加阻尼比应由公式6.2.5-1计算。

**6.3.2** 结构立面复杂或高阶振型影响显著时，应采用本规程5.4.2条的规定计算黏弹性减震器的储能刚度与等效阻尼，采用现行国家标准《建筑结构风振控制技术标准》JGJ/T 487及《建筑结构荷载规范》GB 50009规定的时程分析法计算结构的风振响应，黏弹性减震器的阻尼力设计值不应小于3条以上风荷载时程计算得到的黏弹性减震器最大出力包络值的140%。

### 6.4 特种结构的黏弹性减振性能计算

**6.4.1** 黏弹性减震器可用于控制气液管道、高层塔架、风电机组等特种结构因自身或环境因素引起的有害振动。计算其动力响应时，应根据结构中减震器工作位置的平均温度与减震器的工作频率，确定减震器的主要力学性能指标，建立动力分析模型计算特种结构的黏弹性减震性能。宜采用多个分析软件，对比验证动力分析结果。

**6.4.2** 当特种结构的振动频谱存在多个峰值或有非线性特征时，宜在其动力分析模型时考虑黏弹性减震器力学性能的频率相关性，同时宜进行减震结构的试验验证。

**6.4.3** 减震器的极限位移不应小于由动力分析或试验所得的减震器最大位移包络值的120%。宜根据动力分析、试验或实际使用中减震器的位移幅值与工作频率，参考本规程5.3.4条规定的测试方法，验证减震器的疲劳性能。

## 7 黏弹性减震器的连接与构造

### 7.1 一般规定

7.1.1 黏弹性减震器与主体结构的连接一般分为：斜撑型、门架型、墙柱型、腋撑型等，如图 7.1.1 所示，设计时应根据工程具体情况合理选择连接形式。

7.1.2 当黏弹性减震器采用斜撑型连接时，不宜采用“K”字形布置。支撑宜采用双轴对称截面，宽厚比或径厚比应满足现行国家标准《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的要求。当采用单轴对称截面（如双角钢组合 T 形截面等）时，应采取防止绕对称轴屈曲的构造措施。

7.1.3 黏弹性减震器与主体结构的连接构造详图宜参考现行国家标准《建筑结构消能减震(振)设计图集》09SG610-2。

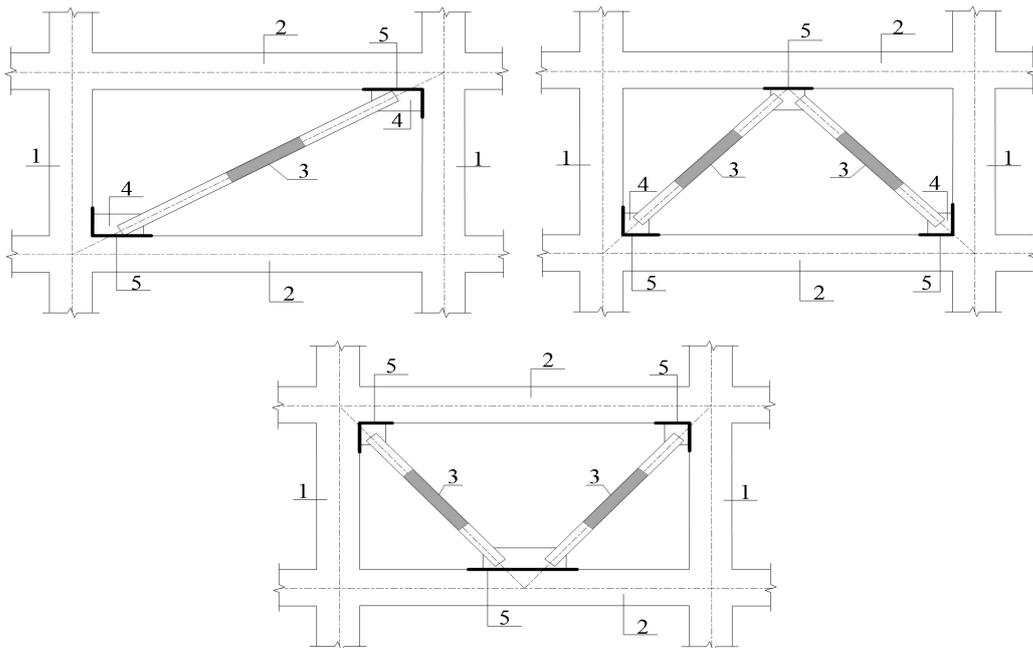
7.1.4 黏弹性减震器与支撑、节点板、预埋件的连接可采用高强度螺栓、焊接或销轴连接，其计算、构造要求应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定。

7.1.5 预埋件、支撑、传力柱（墙）及节点板应具有足够的刚度、强度和稳定性。

7.1.6 黏弹性减震器的连接支撑或连接板应始终保持弹性，不应发生屈曲和失稳。

7.1.7 与黏弹性减震器相连的预埋件、支撑、传力柱（墙）及节点板的作用力取值应为减震器最大阻尼力设计值的 1.2 倍。

7.1.8 黏弹性减震器与管道结构的连接件应在工作状态下保持弹性，不应发生屈曲和失稳。



(a) 斜撑型

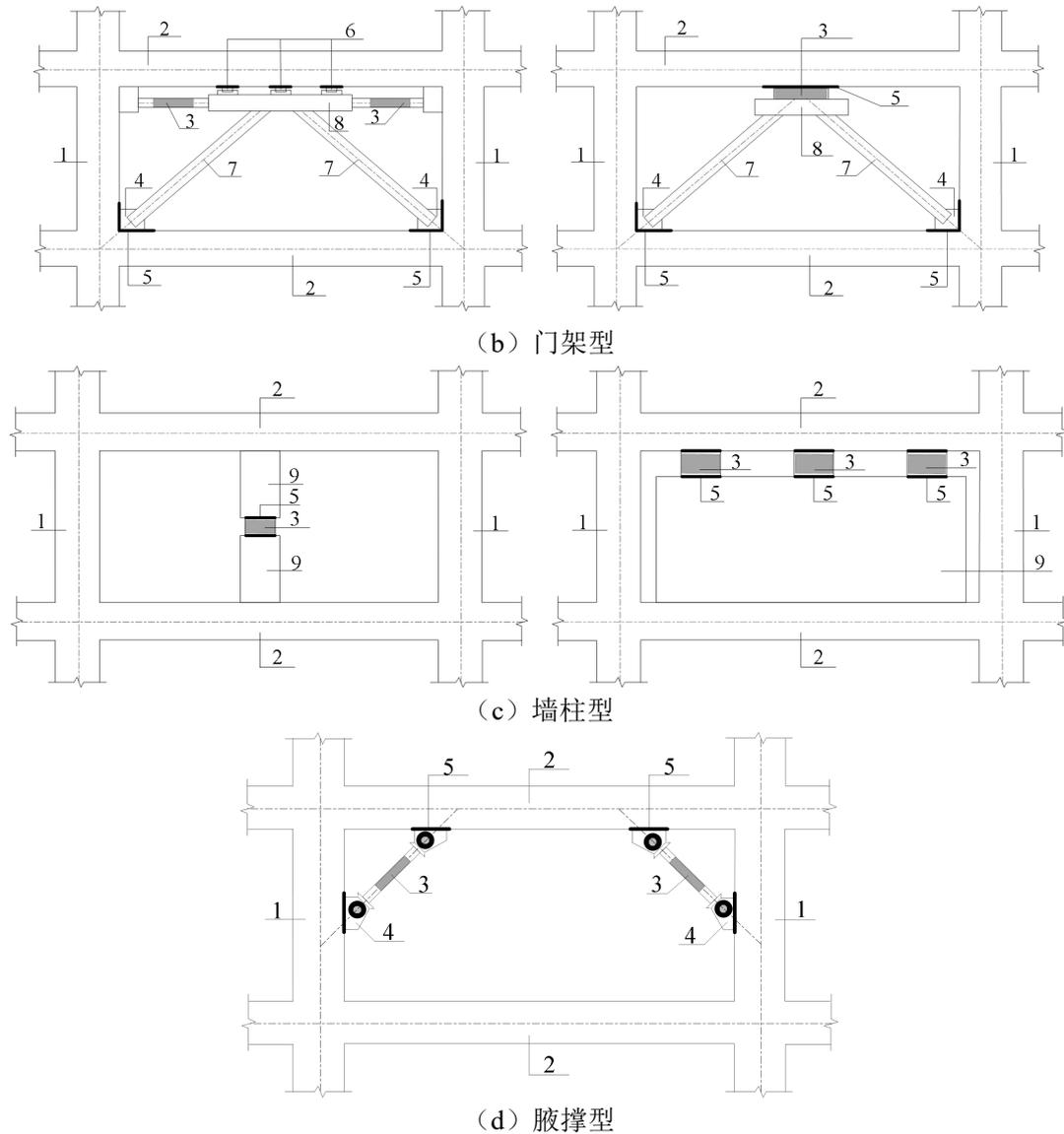


图 7.1.1 黏弹性减震器布置形式

1-柱；2-梁；3-黏弹性减震器；4-节点板；5-预制板；6-平面外限位装置；7-支撑；8-水平平台；9-传力柱或传力墙

## 7.2 预埋件计算

7.2.1 预埋件的锚筋应按拉剪构件或纯剪构件计算总截面面积。

7.2.2 预埋件的锚筋和锚板设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145 的规定。

## 7.3 支撑和传力柱、传力墙计算

7.3.1 传力柱（墙）应按本规程第 7.1.7 条黏弹性减震器附加的水平剪力进行截面验算。

7.3.2 支撑和传力柱、传力墙的计算长度应符合下列规定：

1 采用单斜撑型时,支撑计算长度应取支撑与黏弹性减震器连接处到主体结构预埋连接板连接中心处的距离;

2 采用人字形支撑时,支撑计算长度应取布置黏弹性减震器水平梁平台底部到主体结构预埋连接板连接中心处的距离;

3 采用柱型支撑时,支撑计算长度应取黏弹性减震器上连接板或下连接板到主体结构梁底或顶面的距离;

4 支撑的计算长度取值应遵循如下原则:计算支撑的轴向刚度时,计算长度应取其净长。计算平面内、外失稳时,计算长度应取支撑与黏弹性减震器的长度总和。

**7.3.3** 与黏弹性减震器连接的支撑、传力柱、传力墙的刚度不宜小于黏弹性减震器等效刚度的 3 倍。

## 7.4 节点板计算

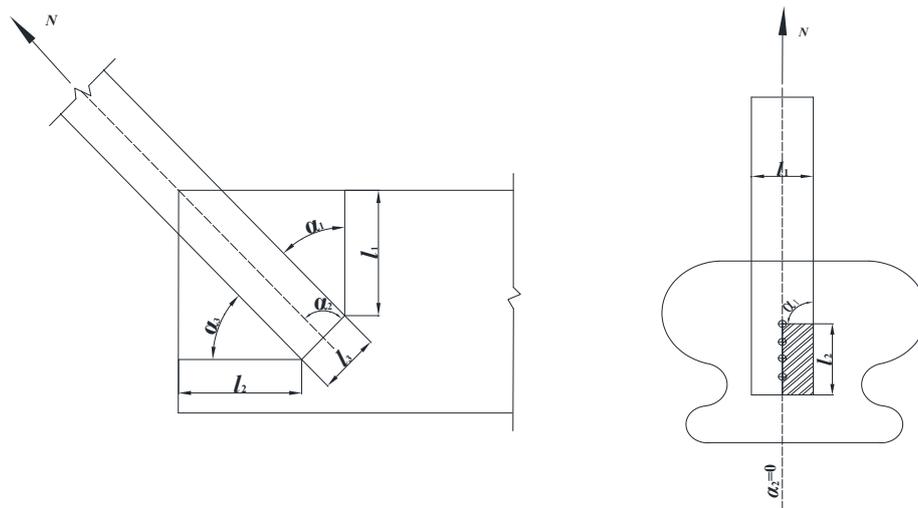
**7.4.1** 节点板设计时应验算节点板构件的截面、节点板与预埋板之间高强度螺栓或焊缝的强度、焊缝抗疲劳性能应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017。

**7.4.2** 节点板的抗拉、抗剪强度应按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{N}{\sum(\eta_i A_i)} \leq f \quad (7.4.2-1)$$

$$\eta_i = \frac{N}{\sqrt{1+2\cos^2\alpha_i}} \leq f \quad (7.4.2-2)$$

式中:  $N$  为作用于节点板上黏弹性减震器作用力,按本规程第 7.1.7 条的规定取值,单位为 kN;  $\eta_i$  为第  $i$  段的拉剪折算系数;  $f$  为钢材的抗拉和抗剪强度设计值,单位为 N/mm<sup>2</sup>;  $\alpha_i$  为第  $i$  段破坏线与拉力轴线的夹角;  $A_i$  为第  $i$  段破坏面的截面积,  $A_i = t_i l_i$ , 当为螺栓连接时,应取净截面面积,单位为 mm<sup>2</sup>;  $t_i$  为板件厚度,单位为 mm;  $l_i$  为第  $i$  段破坏段的长度,单位为 mm,应取板件中最危险的破坏线的长度,如图 7.4.2。



(a) 焊接

(b) 螺栓连接

图 7.4.2 节点板的拉、剪撕裂

7.4.3 节点板在压力作用下的稳定性，应符合附录 A 的规定。

7.4.4 黏弹性减震器的连接节点应能够承担 V 形、人字形支撑产生的竖向力差值

7.4.5 连接节点的施工应满足现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB50755 及《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ82 的规定。

### 7.5 黏弹性减震器与结构连接的构造要求

7.5.1 对于混凝土结构，预埋件的锚筋应与钢板牢固连接，锚筋的锚固长度宜大于 20 倍锚筋直径，且不应小于 250mm。当无法满足锚固长度的要求时，应采取其他有效的锚固措施。

7.5.2 支撑长细比、宽厚比应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 中中心支撑的规定。

7.5.3 传力墙、传力柱沿长度方向全截面箍筋应加密，并配置网状钢筋。

7.5.4 对于既有损伤构件，应对局部严重损伤部位采用置换混凝土法、外包型钢法、粘贴钢板法和粘贴复合材料法等进行加固后，再使用黏弹性减震器进行整体加固。

## 8 黏弹性减震器的施工、验收和维护

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 黏弹性减震器应作为主体结构分部工程中的减震部件子分部工程的一个分项工程进行施工和验收。

**8.1.2** 黏弹性减震器施工前，应由建设单位组织设计、施工、监理、生产厂家等单位相关人员进行图纸会审和技术交底。

**8.1.3** 编制黏弹性减震器施工方案时，宜考虑主体结构的材料、体系、连接方式和施工条件，施工方案应按规定进行报批。

**8.1.4** 根据减震器的施工特点，在施工方案中应制定专门的安全技术措施。

**8.1.5** 减震部件的运输进场、存储及保管应符合生产厂家提供的施工操作说明书和国家有关标准的规定。

**8.1.6** 见证取样送检要求如下：

1 试样抽取后应进行唯一性标识，标识字迹应清晰，试样经妥善封样后应及时送到具备检测资质的检测单位进行检验；

2 见证取样数量为同一工程、同一规格数量的 2%，且不少于 2 件，当同一项目同一生产厂家的产品总数量较少时，取样数量应为总数量的 2% 且不少于 1 件，检测合格率为 100%。检测后的减震器件不能用于主体结构。

### 8.2 进场验收

**8.2.1** 黏弹性减震器进场验收时，黏弹性减震器的规格、数量、类型和性能应符合设计文件和本规程的要求。

**8.2.2** 黏弹性减震器应进行进场验收，并提供如下证明材料：

- 1 黏弹性减震器所用原材料的质量证明文件；
- 2 黏弹性减震器应提供产品合格证、外观质量及尺寸偏差检查记录等；
- 3 项目所使用黏弹性减震器的型式检验报告和出厂检验报告。

**8.2.3** 黏弹性减震器观感质量应符合本规程 5.2.4 条规定。

- 1 检查数量：全数；
- 2 检查方法：观察。

**8.2.4** 黏弹性减震器尺寸偏差应符合本规程 5.2.4 条规定。

- 1 检查数量：全数的 20%，且不少于 2 件；
- 2 检查方法：观察、拉线、钢尺测量。

**8.2.5** 高强螺栓连接副应进行复验，并应符合现行国家标准《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ82 和《钢结构工程施工质量验收标准》GB50025 的规定。

- 1 检查数量：从施工现场待安装的螺栓批中随机抽取，每批抽取 8 套连接副；
- 2 检查方法：检查复验报告。

### 8.3 施工安装

**8.3.1** 黏弹性减震器的施工顺序，应符合下列规定：

- 1 划分结构施工流水段和减震器安装流水段；
- 2 根据结构特点、施工条件确定减震部件在黏弹性减震结构中的安装顺序；
- 3 确定同一部位各黏弹性减震器及主体结构构件的局部安装顺序。

**8.3.2** 对于钢结构，宜采用平行安装法与钢结构主体结构同步施工。

**8.3.3** 对于混凝土结构，预埋件与主体结构同步安装，减震器和连接件宜采用后装法进行安装。对于连梁式安装方法宜采用先装法。

**8.3.4** 确定同一部位减震器的安装连接顺序，包括减震器、连接板的安装顺序和型号数量。

**8.3.5** 减震部件安装前，准备工作应包括下列内容：

- 1 按照设计文件确定减震器安装的平面位置、标高，并核对安装位置减震器的规格；
- 2 应复查减震部件的定位轴线、标高、垂直度，以及安装空间的净高、净宽等；
- 3 按照减震部件的施工方，以及吊装要求，应核查安装方法和步骤。

**8.3.6** 墙型连接的减震部件安装应符合下列规定：

1 对于钢筋混凝土结构悬臂墙的施工：

- 1) 下悬臂墙钢筋绑扎时，应预先确定预埋件位置，不应相互阻挡；
- 2) 上、下悬臂墙平面位置、标高、垂直度偏差应满足本规程要求；
- 3) 上、下悬臂墙两方向轴线相对偏差及墙（柱）间净空高度应满足本规程要求；
- 4) 预埋件应与上、下悬臂墙连接牢固，平面位置、标高、水平度应满足本规程要求；
- 5) 上、下悬臂墙混凝土浇筑前应按要求对预埋件或预埋锚筋进行隐蔽验收，合格后方可进行浇筑，浇筑质量应符合相关规范的要求。

2 对于钢结构悬臂墙的施工：

- 1) 上、下悬臂墙平面位置、标高、垂直度偏差应满足本规程要求；
- 2) 上、下悬臂墙两方向轴线相对偏差及墙（柱）间净空高度应满足本规程要求；
- 3) 上、下悬臂墙与主体结构应连接牢固。

3 减震器安装完成后平面位置、标高、垂直度应满足本规程要求。

**8.3.7** 支撑式连接的减震部件安装应符合下列规定：

1 对于混凝土结构，减震部件的施工：

- 1) 安装节点处梁、柱钢筋绑扎时，应预先确定预埋件位置，不应相互阻挡；
- 2) 预埋件应与安装节点处梁、柱连接牢固，平面位置、标高、水平度、垂直度应满足本规程要求；

3) 安装节点处梁、柱混凝土浇筑前应按要求对预埋件或预埋锚筋进行隐蔽验收，合格后方可进行浇筑，浇筑质量应符合相关规范要求；

- 4) 减震部件安装前应复核与其相连上下梁、柱节点与设计文件的偏移量；
- 5) 节点板应与预埋件连接牢固，节点板安装完成后应复核上下节点板的平面偏移量；
- 6) 减震部件安装前应对安装净空进行复核。

2 对于钢结构，减震部件的施工：

- 1) 减震部件的节点板安装前应复核与其相连上下梁、柱节点与设计文件的偏移量；
- 2) 节点板应与安装节点梁、柱连接牢固，节点板安装完成后应复核上下节点板的平面偏移量；
- 3) 减震部件安装前应对安装净空进行复核。

3 减震器或支撑安装完成后的平面外垂直度、弯曲矢高应满足本规程要求。

**8.3.8** 其他连接形式应符合下列规定：

1 其他连接形式的减震器安装，可参考本规程墙型连接和支撑式连接相关规定；

2 其他连接形式的减震器安装，减震器与主体结构连接、减震器与支撑连接、减震器与节点板连接、支撑与节点板连接、节点板与主体结构连接的施工均应符合设计文件和相关规范规定。

**8.3.9** 当采用普通螺栓连接时，采用普通扳手拧紧螺栓，螺栓紧固应使被接触面、螺栓头、垫片密贴。

**8.3.10** 当采用高强度螺栓连接时，螺栓级别、初扭、复扭、终扭应满足设计文件和现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB50755 要求。

**8.3.11** 当采用焊接，焊缝形式、焊缝高度、焊缝等级、焊接方法应满足设计文件要求，应做好黏弹性减震器的降温处理，以减小高温对黏弹性减震器的影响。

## 8.4 质量验收

**8.4.1** 焊工应持证上岗并在认可范围内进行作业。

#### 8.4.2 减震器及连接件验收应符合下列规定：

##### I 主控项目

1 减震器的型号、数量、安装位置应符合设计要求。

- 1) 检查数量：全数检查；
- 2) 检验方法：观察，检查施工记录。

2 减震器现场连接采用焊接连接时，焊缝质量应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB50661 和《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205 的有关规定。

- 1) 检查数量：全数检查；
- 2) 检验方法：外观检查采用观察或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查；内部缺陷检查超声波或射线探伤记录。

3 减震器现场连接采用螺栓连接时，连接质量应符合现行国家标准《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82 和《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定。

- 1) 检查数量：全数检查。
- 2) 检验方法：观察、施工记录。

##### II 一般项目

1 减震器连接允许偏差如下表：

项目		允许偏差 (mm)	检查数量	检查方法
预埋件	轴线	5	全数	尺量
	标高	5	全数	水准仪或拉线、尺量
	水平度	3‰	全数	水准仪或水平尺、塞尺测量
	垂直度	H/1000	全数	经纬仪或吊线、尺量
上下预埋件净高或两侧预埋件净宽		+5 +10	全数	尺量四角（混凝土结构量预埋板四角）及中心，取最大值
减震器材	轴线	5	全数	尺量
	标高	5	全数	水准仪或拉线、尺量
	垂直度	H <sub>1</sub> /1000	全数	经纬仪或吊线、尺量
	水平度	5‰	全数	水准仪或水平尺、塞尺测量

注：H-悬臂墙高度；H<sub>1</sub>-减震器本体净高。

2 减震器及连接部位漆面应完整均匀，无明显破坏，减震器标记和编号应清晰完整。

- 1) 检查数量：全数
- 2) 检查方法：观察

3 永久性普通螺栓紧固应牢固、可靠，外露丝扣不应少于 2 扣。

- 1) 检查数量：单个节点不少于 50%螺栓且不少于 6 个；
- 2) 检查方法：观察、小锤敲击检查。

4 焊缝外观质量应符合下表要求：

1) 检查数量: 全数

2) 检查方法: 观察

检验项目	焊缝质量等级		
	一级	二级	三级
裂纹	不允许	不允许	不允许
未焊满	不允许	$\leq 0.2\text{mm} + 0.02t$ 且 $\leq 1\text{mm}$ , 每 100mm 长度焊缝内未焊满累积长度 $\leq 25\text{mm}$	$\leq 0.2\text{mm} + 0.04t$ 且 $\leq 2\text{mm}$ , 每 100mm 长度焊缝内未焊满累积长度 $\leq 25\text{mm}$
根部收缩	不允许	$\leq 0.2\text{mm} + 0.02t$ 且 $\leq 1\text{mm}$ , 长度不限	$\leq 0.2\text{mm} + 0.04t$ 且 $\leq 2\text{mm}$ , 长度不限
咬边	不允许	$\leq 0.05t$ 且 $\leq 0.5\text{mm}$ , 连续长度 $\leq 100\text{mm}$ , 且焊缝两侧咬边总长 $\leq 10\%$ 焊缝全长	$\leq 0.1t$ 且 $\leq 1\text{mm}$ , 长度不限
电弧擦伤	不允许	不允许	允许存在个别电弧擦伤
接头不良	不允许	缺口深度 $\leq 0.05t$ 且 $\leq 0.5\text{mm}$ , 每 1000mm 长度焊缝内不得超过 1 处	缺口深度 $\leq 0.1t$ 且 $\leq 1\text{mm}$ , 每 1000mm 长度焊缝内不得超过 1 处
表面气孔	不允许	不允许	每 50mm 长度焊缝内允许存在直径 $< 0.4t$ 且 $\leq 3\text{mm}$ 的气孔 2 个, 孔距应 $\geq 6$ 倍孔径
表面夹渣	不允许	不允许	深 $\leq 0.2t$ , 长 $\leq 0.5t$ 且 $\leq 20\text{mm}$

注: t 为接头较薄件母材厚度。

#### 8.4.3 减震子分部工程施工质量验收应符合下列规定:

1 减震子分部工程有关安全及功能的检验和见证取样检测结果应满足本规程 8.1.6 条的相关规定;

- 2 减震器见证检验应合格;
- 3 所含分项工程质量验收应合格;
- 4 质量控制资料应完整;
- 5 观感质量验收应合格。

#### 8.4.4 减震子分部工程验收应提供如下资料:

- 1 工程相关设计文件及设计变更文件;
- 2 减震器及相关材料供货企业的合法性证明文件;
- 3 减震器及相关材料质量合格证明文件、标识、性能检测报告和复验报告;
- 4 减震子分部工程有关安全及功能的检验和见证取样检测项目检查记录;
- 5 减震器的型式检验报告、出厂检验报告(或高校、科研机构出具的论证报告)、见证检验报告等;

- 6 施工现场质量管理检查记录;
- 7 有关观感质量检验项目检查记录;
- 8 分项工程质量验收记录;
- 9 检验批质量验收记录;

- 10 隐蔽工程验收记录；
- 11 工程重大质量问题的处理方案和验收记录；
- 12 其他必要的文件和记录。

## 8.5 维护

- 8.5.1** 减震器的维护检查可分为常规检查、定期检查、应急检查。
- 8.5.2** 常规检查应至少每一年进行一次，检查单位为减震结构使用或管理单位。
- 8.5.3** 定期检查应根据减震器类型、使用期间的具体情况、减震器设计使用年限和设计文件要求等进行，设计无要求时为竣工验收后正常使用情况下每 10 年进行一次，定期检查宜由专业人员进行。
- 8.5.4** 当发生地震、火灾等可能会损伤减震器的灾害后，应及时进行应急检查，应急检查应由专业人员进行。
- 8.5.5** 减震器检查内容及方法：

检查项目	检查内容	检查方法	维护方法
减震器	弯曲、损伤、变形	观察、尺量	更换减震器
	黏弹材料老化、龟裂、变形、损伤	观察、尺量	更换减震器
	螺栓松动、焊缝损伤、焊缝开裂	观察、小锤敲击，卡尺测量	拧紧螺栓、补焊
	涂料层锈蚀、脱落、起皮、老化	观察	清除、重新涂装

## 9 本规程用词说明

**9.0.1** 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**9.0.2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合...的规定”或“应按...执行”。

## 10 引用标准名录

1. 《云南省建筑消能减震应用技术规程》 DBJ53T 125
2. 《消能减震加固技术规程》 TCECS 547
3. 《橡胶支座第 3 部分:建筑隔震橡胶支座》 GB 20688.3
4. 《橡胶支座第 2 部分:桥梁隔震橡胶支座》 GB 20688.2
5. 《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》 GB/T 2941
6. 《碳素结构钢》 GB/T 700
7. 《塑料 聚合物热重法 (TG) 第 2 部分:活化能的测定》 GB/T 33047.2
8. 《上海市建筑消能减震及隔震技术标准》 DG/T J08-2326
9. 《砌体结构设计规范》 GB 50003
10. 《黏弹性阻尼器》 Q-ZAN 002
11. 《硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度测定方法》 GB/T 13936
12. 《硫化橡胶与金属粘合强度的测定拉伸法》 GB/T 11211
13. 《硫化橡胶与金属粘合剪切强度测定方法四板法》 GB/T 12830-91
14. 《硫化橡胶或热塑性橡胶与织物粘合强度的测定》 GB/T 532
15. 《硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法》 GB/T 531.1
16. 《硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验》 GB/T 3512
17. 《硫化橡胶或热塑性橡胶耐液体试验方法》 GB/T 1690
18. 《硫化橡胶或热塑性橡胶—拉伸应力应变性能的测定》 JIS K6251
19. 《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》 GB/T 528
20. 《硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度》 GB/T 20028
21. 《硫化橡胶低温脆性的测定单试样法》 GB/T 1682
22. 《聚合物基复合材料玻璃化转变温度试验方法动态力学分析方法 (DMA)》 GB/T 40396
23. 《金属材料室温压缩试验方法》 GB/T 7314
24. 《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》 GB/T 228.1
25. 《建筑消能阻尼器》 JG/T 209
26. 《建筑消能减震技术规程》 JGJ297
27. 《建筑施工高处作业安全技术规范》 JGJ 80
28. 《建筑设计防火规范》 GB 50016
29. 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
30. 《建筑抗震鉴定标准》 GB 50023
31. 《建筑抗震加固技术规程》 JGJ 116

32. 《建筑结构消能减震(振)设计图集》 09SG610-2
33. 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
34. 《建筑结构风振控制技术标准》 JGJ 487
35. 《建筑构件耐火试验方法》 GB/T 9978.7
36. 《建筑工程抗震设防分类标准》 GB 50223
37. 《建筑工程隔震与减震技术规程》 DB 54T 0268
38. 《建筑隔震橡胶支座》 JG 118
39. 《建筑材料及制品燃烧性能分级》 GB 8624
40. 《建筑边坡工程技术规范》 GB 50330
41. 《既有建筑消能减震加固技术规程》 DB 32T3752
42. 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
43. 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
44. 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
45. 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
46. 《厚度方向性能钢板》 GB/T 5313
47. 《工程测量规范》 GB 50026
48. 《高层民用建筑钢结构技术规程》 JGJ 99
49. 《高层建筑混凝土结构技术规程》 JGJ 3
50. 《高层民用建筑设计防火规范》 GB 50045
51. 《钢丝镀锌层》 GB/T 15393
52. 《钢结构设计规范》 GB 50017
53. 《钢结构焊接规范》 GB 50661
54. 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
55. 《钢结构高强度螺栓连接技术规程》 JGJ 82

## 附录 A 节点稳定性计算

**A.1** 对梁柱相交处有斜向支撑或黏弹性减震器的节点，其节点板  $c/t$  不得大于  $22\sqrt{235/f_y}$ 。当  $c/t$  不大于  $15\sqrt{235/f_y}$  时，可不进行稳定验算。否则，按本条第 A.2 款进行计算。

**A.2** 对框架梁上的节点，其节点板  $c/t$  不得大于  $17.5\sqrt{235/f_y}$ 。当  $c/t$  不大于  $10\sqrt{235/f_y}$  时，节点板的稳定承载力可取为  $0.8b_c t f$ ；当  $c/t$  大于  $10\sqrt{235/f_y}$  时，按本条第 3 款进行计算。节点板  $\overline{BA}$ 、 $\overline{AC}$  和  $\overline{CD}$  的稳定性应满足下列要求，如图 A.2-1、图 A.2-2 所示：

$\overline{BA}$ 区：

$$\frac{b_1}{(b_1+b_2+b_3)} N \sin\theta_1 \leq l_1 t_s \varphi_1 f \quad (\text{A.2-1})$$

$\overline{AC}$ 区：

$$\frac{b_2}{(b_1+b_2+b_3)} N \leq l_2 t_s \varphi_2 f \quad (\text{A.2-2})$$

$\overline{CD}$ 区：

$$\frac{b_3}{(b_1+b_2+b_3)} N \cos\theta_1 \leq l_3 t_s \varphi_3 f \quad (\text{A.2-3})$$

式中： $N$ 为作用于节点板上的黏弹性减震器的极限承载力，单位为 kN； $t_s$ 为节点板厚度，单位为 mm； $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 为分别为屈折线 $\overline{BA}$ 、 $\overline{AC}$ 和 $\overline{CD}$ 的长度，单位为 mm； $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ —各受压区板件的轴心受压稳定系数，可按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中 b 类截面查取；其相应的长细比分别为： $\lambda_1 = 2.77 \frac{\overline{QR}}{t}$ ， $\lambda_2 = 2.77 \frac{\overline{ST}}{t}$ ， $\lambda_3 = 2.77 \frac{\overline{UV}}{t}$ ；式中 $\overline{QR}$ 、 $\overline{ST}$ 、 $\overline{UV}$ 为 $\overline{BA}$ 、 $\overline{AC}$ 、 $\overline{CD}$ 三区受压板件的中线长度；其中 $\overline{ST}=c$ ； $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 为各屈折线段在有效宽度线上的投影长度， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 分别为 $\overline{WA}$ 、 $\overline{AC}$ 、 $\overline{CZ}$ 的长度。

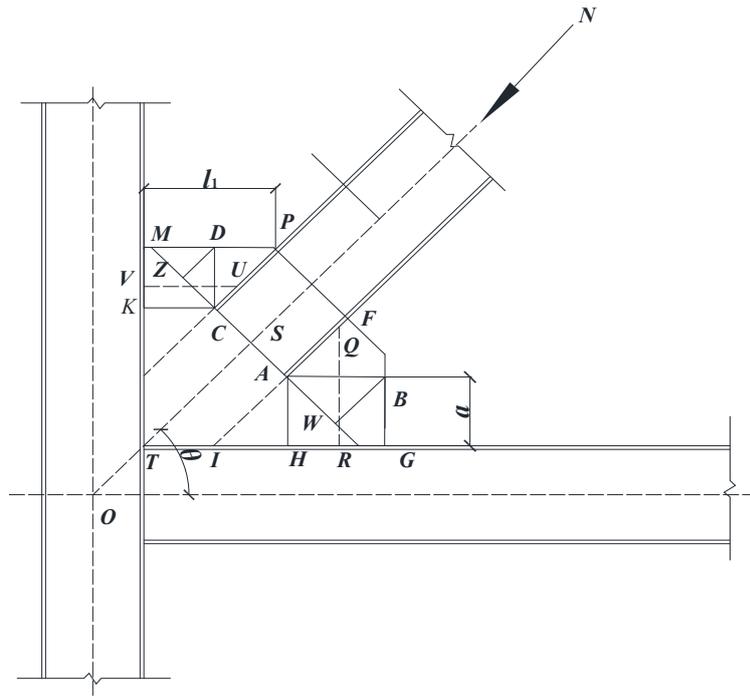


图 A.2-1 单斜撑节点板

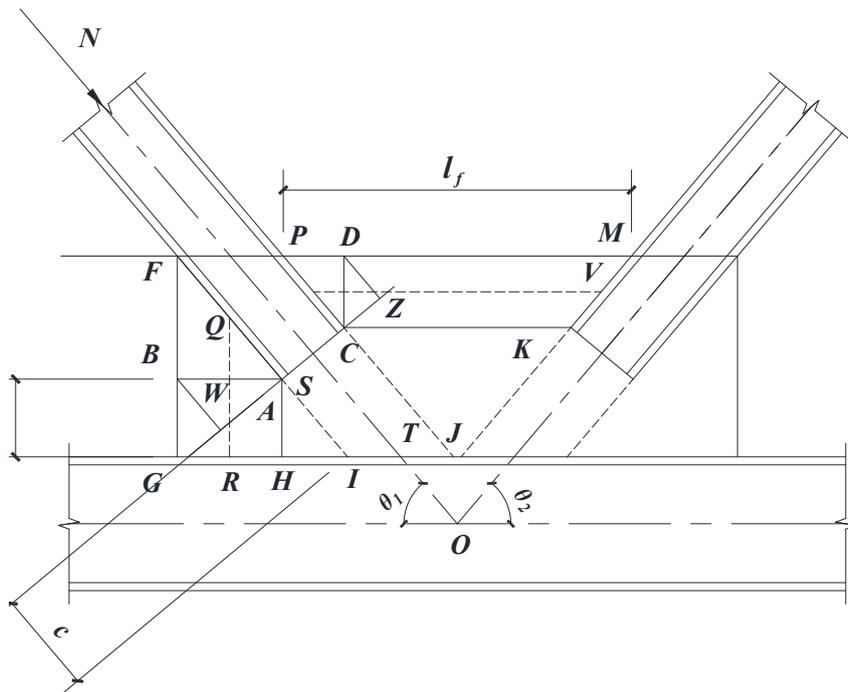


图 A.2-2 双斜撑节点板

## 附录 B 材料进场验收记录

B.1. 减震部件观感质量和尺寸偏差检查进场检查应按表 B.1 进行记录。

表 B.1 减震部件观感质量和尺寸偏差检查进场检查记录

减震部件观感质量和尺寸偏差检查 进场检查记录			资料编号		
工程名称					
减震器型号		供货厂家			
减震器数量		检查数量		进场日期	
验收标准					
序号	减震器 类型	检验 项目	质量要求	检查记录	备注
1	通用	观感质 量	表面平整，无机械损伤，无锈蚀、 无毛刺，标记清晰，无渗漏，黏 弹材料表面密实，相对平整，外 表防锈涂层均匀		
2	通用	长度	产品设计值的±2%		
3	通用	截面有 效尺寸	产品设计值的±5%		
结论					
施工单位		技术负责人		专业质检员	记录人
监理（建设）单位				专业监理工程师	

## 附录 C 检验批质量验收记录

表 C 检验批质量验收记录

工程名称			检验批部位		
施工单位			项目经理		
监理单位			总监理工程师		
施工依据标准			分包单位负责人		
主控项目		合格质量标准	施工单位检验评分 记录或结果	监理(建设)单位验收 记录或结果	备注
1	减震器	减震器或支撑的型号、数量、安装 位置应符合设计要求			
2					
3					
一般项目		合格质量标准	施工单位检验评分 记录或结果	监理(建设)单位验收 记录或结果	备注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
施工单位检验 评定结果		班组长: _____ 质 检 员: _____ 或专业工长: _____ 或项目技术人员: _____ 年 月 日 年 月 日 日			
监理(建设)单位 验收结论		监理工程师(建设单位项目技术人员): _____ 年 月 日			

中国工程建设标准化协会标准

# 黏弹性减震材料与器件工程应用技术规程

Technical specification for application  
of viscoelastic vibration mitigation materials and dampers

(初稿)

## 条文说明

## 制订说明

本规程制订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，参考了黏弹性减震材料与器件相关的已有研究成果和技术标准，并通过试验和工程实践总结了关于黏弹性减震材料与器件工程应用技术。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条款规定，《黏弹性减震材料与器件工程应用技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

# 目 次

1 总则 .....	48
2 术语与符号 .....	49
2.1 术语 .....	49
2.2 符号 .....	50
3 基本规定 .....	51
3.1 一般要求 .....	51
3.2 黏弹性减震材料要求 .....	51
3.3 黏弹性减震器要求 .....	51
3.4 结构分析 .....	51
3.5 连接与节点 .....	52
3.6 施工与验收 .....	52
3.7 维护与检查 .....	53
4 黏弹性减震材料的性能参数和测试方法 .....	54
4.1 一般规定 .....	54
4.2 黏弹性减震材料的性能参数及要求 .....	54
4.3 黏弹性减震材料的测试方法 .....	55
4.4 黏弹性减震材料的检验规则 .....	60
5 黏弹性减震器的技术性能和测试方法 .....	61
5.1 一般规定 .....	61
5.2 黏弹性减震器的性能参数及要求 .....	61
5.3 黏弹性减震器性能的测试方法 .....	61
5.4 黏弹性减震器性能参数的确定 .....	62
5.5 黏弹性减震器的检验规则 .....	62
6 黏弹性减震结构的设计计算 .....	63
6.1 一般规定 .....	错误！未定义书签。
6.2 黏弹性减震结构抗震性能计算 .....	错误！未定义书签。
6.3 黏弹性减震结构抗风性能计算 .....	错误！未定义书签。
6.4 大型管道结构的减振性能计算 .....	错误！未定义书签。
7 黏弹性减震器的连接与构造 .....	66
7.1 一般规定 .....	66

7.2 预埋件计算 .....	67
7.3 支撑和传力柱、传力墙计算 .....	67
7.4 节点板计算 .....	67
7.5 黏弹性减震器与结构连接的构造要求 .....	68
<b>8 黏弹性减震器施工、验收和维护 .....</b>	<b>69</b>
8.1 一般规定 .....	69
8.2 进场验收 .....	69
8.3 施工 .....	69
8.4 质量验收 .....	70
8.5 维护 .....	70

# Contents

<b>1 General Provisions</b> .....	48
<b>2 Terms and Symbols</b> .....	49
2.1 Terms .....	49
2.2 Symbols .....	50
<b>3 Basic Requirements</b> .....	51
3.1 General Requirements .....	51
3.2 Requirements for Viscoelastic Materials .....	51
3.3 Requirements for Viscoelastic vibration mitigation devices .....	51
3.4 Structural Analysis .....	51
3.5 Connections and Joints .....	52
3.6 Construction and Acceptance .....	52
3.7 Maintenance and Checking .....	53
<b>4 Performance Parameters and Test Methods of Viscoelastic Materials</b> .....	54
4.1 General Requirements .....	55
4.2 Performance Parameters and Requirements of Viscoelastic Materials .....	54
4.3 Test Methods for the Performance of Viscoelastic Materials .....	55
4.4 Judgement Rules for Viscoelastic Materials .....	61
<b>5 Technical Performance and Test Methods of Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	61
5.1 General Requirements .....	62
5.2 Performance Parameters and Requirements of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	61
5.3 Test Methods for the Performance of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	61
5.4 Determination of Performance Parameters of Viscoelastic vibration mitigation devices .....	62
5.5 Judgement Rules for Viscoelastic vibration mitigation devices .....	63
<b>6 Calculation and Design of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	63
6.1 General Requirements .....	63
6.2 Calculation of Seismic Performance of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	63
6.3 Calculation of Wind Resistance Performance of Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	64
6.4 Calculation of Performance of Large Pipe Structures with Viscoelastic vibration mitigation devices .....	64
<b>7 Connection and Construction of Viscoelastic vibration mitigation devices</b> .....	66
7.1 General Requirements .....	66
7.2 Embedded Calculations .....	67
7.3 Calculation of Support and Transmission Columns, Transmission Walls .....	67
7.4 Calculation of Connection and Joint plate .....	67

7.5 Construction Requirements for Connections Between VE Dampers and Structures .....	68
<b>8 Construction, Quality Acceptance and Maintenance of Viscoelastic vibration mitigation devices .....</b>	<b>69</b>
8.1 General Requirements .....	69
8.2 Site Acceptance .....	69
8.3 Construction .....	69
8.4 Quality Acceptance .....	70
8.5 Maintenance .....	70

# 1 总则

**1.0.1** 黏弹性减震技术具有性能可靠、构造简单、造价低廉、便于维护的优点，目前已大量应用于工程结构的地震、风振等有害振动的控制中。但是黏弹性减震材料和器件的性能参数多，这些性能往往又受到环境温度、工作频率、位移幅值的影响而相对复杂，使得黏弹性减震材料和器件容易出现计算分析错误和产品质量问题。本规程正是在这样的背景下制订，旨在为黏弹性减震材料和减震器件的设计、生产、施工、验收和维护等提供系统的技术标准，推进黏弹性减震技术的应用和发展。

**1.0.2** 本规程的适用范围与现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《建筑消能减震技术规程》JGJ 297、《建筑消能阻尼器》JG/T 209 基本一致，有些条款的规定是在总结了近几年国内外黏弹性减震材料与器件的工程应用经验和最新科研成果的基础上提出的。

**1.0.3、1.0.4** 因为黏弹性减震材料在微小幅值的震动下就具有良好的耗能效果，也具有优异的抗疲劳性能，所以除了在地震工程领域，黏弹性减震材料和其制作的减震器件也适用于工程结构的风振控制、管道结构的振动控制和机械设备的微振控制等。

**1.0.5** 该条与现行强制性国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 中第 2.1.1 条相协调。

## 2 术语与符号

### 2.1 术语

本节汇总了本规程所采用的黏弹性减震材料与器件相关专门术语。本规程中采用的其它术语均符合现行国家标准《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T 50083、《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

**2.1.15、2.1.16** 为了更好地解释储能模量和表观剪切模量的区别，将黏弹性减震器的阻尼力—位移滞回曲线简化为图 1 所示的椭圆。

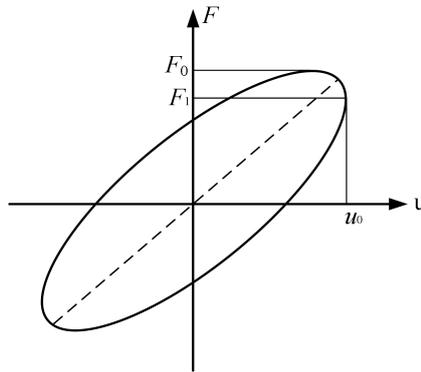


图 1 黏弹性减震器的阻尼力-位移滞回曲线

图中， $u_0$ 为黏弹性减震器位移设计值； $F_1$ 为黏弹性减震器正向和负向位移设计值 $u_0$ 对应的阻尼力绝对值的平均值； $F_0$ 为黏弹性减震器最大阻尼力。

黏弹性减震材料的储能模量可按下列公式计算：

$$G_1 = \frac{F_1 h_v}{n A_v u_0} \quad (1)$$

式中， $G_1$ 为黏弹性减震材料的储能模量； $h_v$ 为黏弹性减震材料层厚度； $A_v$ 为黏弹性减震材料层面积； $n$ 为黏弹性减震材料层数量。

黏弹性减震材料的表观储能模量可按下列公式计算：

$$G'_1 = \frac{F_0 h_v}{n A_v u_0} \quad (2)$$

式中， $G'_1$ 为黏弹性减震材料的表观储能模量。

**2.1.17、2.1.18** 黏弹性减震材料储能刚度和等效刚度的区别如下：

黏弹性减震器储能刚度、等效刚度可按下列公式计算：

$$K_d = \frac{F_1}{u_0} \quad (3)$$

$$K_e = \frac{F_0}{u_0} \quad (4)$$

式中， $K_d$ 为黏弹性减震器储能刚度； $K_e$ 为黏弹性减震器等效刚度。

## 2.2 符号

本节汇总了本规程所采用的主要符号及其含义，按拉丁字母和希腊字母顺序排列。每个符号由主体符号或主体符号带上、下标构成。主体符号一般代表物理量，上、下标代表物理量以外的术语、说明语，用以进一步说明符号的涵义。本节未列出的其它符号及其含义均在各有关章节的条文中列出。

## 3 基本规定

### 3.1 一般要求

**3.1.1** 新建黏弹性减震结构的抗震设防目标应符合本规程第 1.0.2 条的规定；既有建筑结构采用黏弹性减震加固时，抗震设防目标不应低于现行国家标准《建筑抗震鉴定标准》GB 50023 规定。黏弹性减震技术用于建筑抗风振、管道及其它工程结构减振时，应满足相关标准及规程的规定。

### 3.2 黏弹性减震材料要求

**3.2.1** 能量耗散是黏弹性减震材料的主要特性，一般用损耗因子表征。

**3.2.2** 黏弹性减震材料的耐久性主要包括耐老化、耐疲劳、耐强腐蚀等性能。

### 3.3 黏弹性减震器要求

**3.3.1** 黏弹性减震器在设计位移和工作频率下的滞回曲线越饱满，说明耗能能力越强。

**3.3.3** 黏弹性减震器刚性约束部件的刚度和强度如果不足，会导致刚性约束部件发生较大的变形，从而削弱黏弹性减震材料的耗能减震效果，这种现象在设计和施工中应予以避免。

**3.3.4** 黏弹性减震器型式检验内容和要求应符合现行行业标准《建筑消能阻尼器》JG/T209 和《建筑消能减震技术规程》JGJ297 中的相关规定。为了提高黏弹性减震器工作性能的稳定性和产品质量，应对减震器进行严格检验。首先，生产厂商应对减震器进行必要的力学性能检验，出具产品合格证。其次，在工程安装前应进行抽检，检验由具有资质的第三方单位完成。黏弹性减震器的检验规则应参照本规程 5.4 的要求，对重要工程，设计人员可增加减震器的抽检数量。

**3.3.5** 黏弹性减震器供应商应根据力学性能指标将减震器产品标准化、规格化，设计单位在配置黏弹性减震器过程中宜选用标准化产品，以减少加工制作成本和保证产品质量。

### 3.4 结构分析

**3.4.1** 常用的黏弹性减震器的恢复力模型包括开尔文(Kelvin)模型、麦克斯韦尔(Maxwell)模型、标准线性固体模型、等效标准线性固体模型、分数导数模型、有限元模型等，分析人员宜根据计算条件选用成熟、计算精度高的模型进行结构分析。

**3.4.2** 结构由于黏弹性减震器的存在，增加了结构的总阻尼比。因此，黏弹性减震器附加给结构的有效阻尼比的计算是减震结构设计中的一个关键问题。当计算过高时，会高估黏弹性减震器的耗能能力，使结构设计偏于不安全；当计算过小时，黏弹性减震器作用未能有效计入其减震效果，将增加建造成本。因此，需合理地计算黏弹性减震器附加给结构的阻尼比，使结构设计既安全又经济。黏弹性减震结构的阻尼比由主体结构阻尼比和黏弹性减震器附加给结构的有效阻尼比组成，当结构处于弹性状态时，主体结构阻尼比为一定值（混凝土结构可取为 0.05、钢结构可取为 0.02~0.04）；当主体结构进入塑性状态后，部分结构构件发生塑性变形，总阻尼比相对于弹性状态有所提高，主体结构阻尼比应重新计算，并考虑结构构件塑性变形的影响。按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的要求，当黏弹性减震结构总阻尼比超过 25%时，宜取 25%。黏弹性减震结构中的黏弹性减震器会给结构提供附加（动力）刚度，且附加刚度与黏弹性减震器的相对速度有关。因此，在计算结构地震反应和振动周期时应考虑附加刚度的影响。

**3.4.3** 由于黏弹性减震器具有速度相关性，静力分析难以合理可靠地估计黏弹性减震器的耗能效果，因此宜采用动力弹性或弹塑性时程分析法进行分析。黏弹性减震结构应采用成熟和广泛使用的软件建立三维空间模型，且把支撑、连接件用合适的单元模拟，对于一般多层结构则硬性规定使用两个不同的软件分析黏弹性减震器的减震效果。

### 3.5 连接与节点

**3.5.2** 考虑到施工制作方便和易于更换，黏弹性减震器与支撑构件和主体结构的连接一般采用螺栓连接或销轴连接。焊接连接件的现场施工应注意避免焊接高温对黏弹性减震材料和混凝土构件的损伤。

**3.5.3** 通过对经历过实际地震考验的减震结构调研分析，发现减震部件存在一定的侧向失稳现象，其原因在于建筑结构的复杂性及不规则性，使得按照平面框架理论分析设计的减震部件与实际情况可能存在较大偏差，而侧向失稳与否直接关系到黏弹性减震器的减震效果。因此，在黏弹性减震设计中，需保证在地震作用下，黏弹性减震部件及其与结构构件相连的节点不发生侧向失稳或破坏，以保证黏弹性减震器正常工作。

### 3.6 施工与验收

**3.6.1** 黏弹性减震器施工安装要求应在设计文件中予以注明，计算分析时可采用施工过程模拟考虑施工次序的影响。

### 3.7 维护与检查

**3.7.1** 黏弹性减震部件的混凝土部分的耐久性应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，钢构件的防护应满足现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

**3.7.2** 对于黏弹性减震结构，为了避免减震器在建筑自重下出现明显的变形，一般情况下布置于建筑中的黏弹性减震器不承受建筑的竖向荷载，为此，黏弹性减震器在发生火灾后即使出现失效，也不会导致结构失去竖向承载能力。

## 4 黏弹性减震材料的性能参数和测试方法

### 4.1 一般规定

4.1.4 在强腐蚀等环境下提高黏弹性减震材料耐腐蚀性能的措施主要是利用合成阶段的改性和多元共聚、加工阶段的不同橡胶共混、橡塑并用、添加有用的填充剂等方法。此外还可以采用表面改性的方法提高耐腐蚀性能，分为表面化学改性和物理包覆。表面化学改性方法有氟化、溴化、碘化和磺化等。物理包覆方法主要有聚对亚苯基二甲基薄膜包覆、润滑膜表面涂覆、聚四氟乙烯包覆和其它氟化物包覆等。

### 4.2 黏弹性减震材料的性能参数及要求

4.2.1 若黏弹性材料的设计温度低于-10℃或高于40℃，如需使用黏弹性材料，其力学性能指标也应满足本条款时，且损耗因子  $\eta_{\text{DMA}}$  在设计温度和工作频率下应  $\geq 0.3$ 。

4.2.2 热空气加速老化的计算理论主要依据阿累尼乌斯方程，其反应速率与温度之间存在如下关系：

$$t = t_0 \times 10^{\frac{0.434E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

式中， $t_0$ 和 $T_0$ 为设计基准期（小时）和使用环境的绝对温度（K）， $t$ 和 $T$ 分别为试验所需的时间（小时）和试验所需的绝对温度（K）， $R$ 为气体常数8.31 J/(mol·K)， $E$ 为黏弹性减震材料的老化反应活化能。不同的黏弹性减震材料的老化反应活化能不同，一般由黏弹性减震材料的生产厂家根据测试结果提供。当无测试结果时，老化反应活化能的值宜取为90.4 kJ/mol。由此可以计算出对应于某一工作环境温度和和设计使用年限的高温加速老化试验所需的温度和时间。

以下给出两个确定黏弹性减震材料老化时间的计算实例。当老化反应活化能的值取为90.4 kJ/mol时，黏弹性减震材料在20℃下工作50年所对应的老化试验时间计算如下：

1：当试验温度为100℃时， $t = 50 \times 365 \times 24 \times 10^{\frac{0.434 \times 90.4 \times 10^3 \times \left( \frac{1}{373.15} - \frac{1}{293.15} \right)}{8.31}} \approx 154.4h$ ，老化试验时长取155小时。

2：当试验温度为80℃时， $t = 50 \times 365 \times 24 \times 10^{\frac{0.434 \times 90.4 \times 10^3 \times \left( \frac{1}{353.15} - \frac{1}{293.15} \right)}{8.31}} \approx 803.9h$ ，老化试验时长取804小时。

4.2.3 黏弹性减震材料是一种高分子材料，材料的损耗因子和储能模量是两个最主要的性能参数。其应力、应变通常用复模量的关系来表示，即：

$$\tau = G_1(\omega, T)(1 + i\eta(\omega, T))\varepsilon \quad (2)$$

式中， $\tau$ 、 $\varepsilon$ 分别为应力和应变； $G_1$ 、 $\eta$ 是材料的储能模量和损耗因子， $\omega$ 是圆频率； $T$ 是温度。其储能模量和损耗因子的诺莫图如图 2 所示。

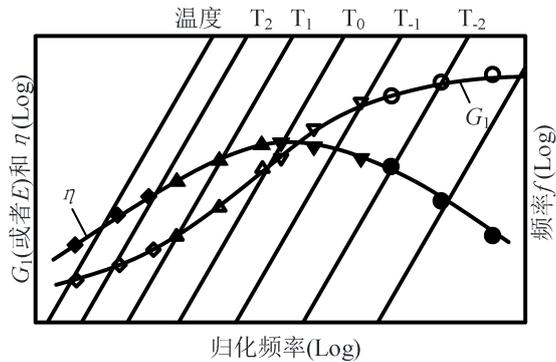


图 2 黏弹性减震材料的典型诺莫图 (Nomogram)

诺莫图 (Nomogram) 是一种利用图像来进行计算的工具，通过固定一些参数来研究固定参数和未固定参数之间的关系，其使用的坐标系不同于笛卡尔坐标系。从图 2 的诺莫图可以看出，损耗因子随温度的变化有一最大值，随频率的变化也有一最大值。这就说明，对于用特定的黏弹性材料制成的黏弹性减震器，其耗能性能受到温度和频率的影响，而且对于该减震器存在一最优使用温度和最优使用频率。所以当诺莫图中损耗因子峰值对应的温度靠近应用环境的平均温度，损耗因子峰值对应的频率靠近结构的第一自振频率时，黏弹性减震材料具有较高的损耗因子。

### 4.3 黏弹性减震材料的测试方法

4.3.1 黏弹性减震材料外观检测的目视法为在足够的光照条件下目测产品的外观，并对比产品的颜色。判定标准包括：

- 1 产品应无裂口、气泡、杂物、缺胶和修边过度现象，制品表面应无较大批锋、毛边（不影响产品试装效果）。
- 2 产品表面不得有喷霜、吐蜡等发白现象。
- 3 手感不粘手、不能有脱色现象。
- 4 产品外观不得有明显差异。

4.3.2 黏弹性减震材料的主要性能指标

4.3.2.1 损耗因子

应采用动态热机械分析法（DMA）测量黏弹性减震材料的储能模量  $G_{DMA}$  和损耗因子  $\eta_{DMA}$ ，温度范围  $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，频率为工作频率，剪切或拉压应变幅值宜为千分之一到千分之五（0.1%~0.5%），其中拉压模式的黏弹性减震材料试件尺寸宜为  $4\text{mm}\times 100\text{mm}\times 2\text{mm}$ ，剪切模式的黏弹性减震材料试件尺寸宜为  $4\text{mm}\times 9\text{mm}\times 9\text{mm}$ 。

如果施加在试样上的交变应力为  $\tau$ ，则产生的应变为  $\varepsilon$ ，由于黏弹性减震材料滞后效应，其应变将滞后于应力，如图 3 所示，则  $\varepsilon$ 、 $\tau$  分别以下式表示：

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 e^{i\omega t} \\ \tau &= \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}\end{aligned}\quad (3)$$

式中， $\varepsilon_0$ 、 $\tau_0$  为最大振幅下材料的应变和应力； $\omega$  为交变力的圆频率； $\delta$  为滞后相位角。复模量： $G^* = \tau/\varepsilon = (\tau_0/\varepsilon_0)\exp(i\delta) = (\tau_0/\varepsilon_0)(\cos\delta + i\sin\delta) = G_1 + iG_2$ ，其中  $G_1 = (\tau_0/\varepsilon_0)\cos\delta$ ，为实数模量，即模量的储能部分，而  $G_2 = (\tau_0/\varepsilon_0)\sin\delta$  表示与应变相差  $\pi/2$  的虚数模量，是能量的损耗部分。另外用滞后相位角正切  $\tan\delta$  来表示损耗，即  $\eta_{DMA} = \tan\delta = G_2/G_1$ ， $\eta_{DMA}$  为黏弹性减震材料的损耗因子。

因此在程序控制的条件下不断测定黏弹性减震材料的  $G_1$ 、 $G_2$  和  $\eta$  值，可以得到如图 4 所示的动态力学—温度谱（动态热机械分析图谱）。从图中看到储能模量  $G_1$  呈阶梯状下降，而在阶梯下降阶段相对应的温度区， $G_2$  和  $\eta$  则出现高峰，表明在这些温度区分子运动发生运动的解冻，其中对非晶态高分子材料而言，最主要的转变是玻璃化转变，所以模量明显下降，同时分子链段克服环境黏性运动而耗散能量，从而出现材料损耗指标  $G_2$  和  $\eta$  的高峰。

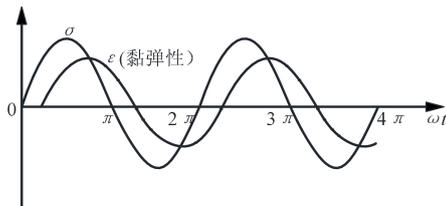


图 3 黏弹性减震材料在正弦交变荷载下的应力应变响应

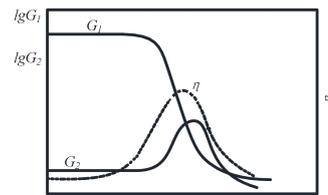


图 4 典型的黏弹性减震材料动态力学—温度谱

#### 4.3.2.2 拉伸强度

试验用的哑铃状标准试样如图 5 所示。制作该试样所用的裁刀和裁片机应符合现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528 和《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》GB/T 2941 的要求。制备哑铃状试样用的裁刀尺寸见表 1 和图 6，裁刀的狭窄平行部分任意一点宽度的偏差应不大于 0.05 mm。详细的试验流程应按《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528 的规定进行。

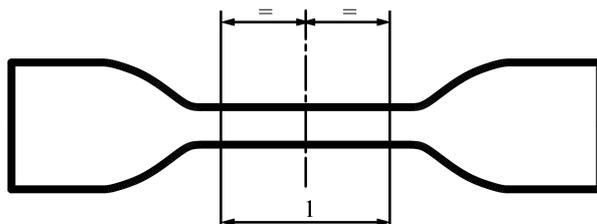


图 5 哑铃状试样的形状

表 1 哑铃状试样的试验长度

试样类型	1 型	1A 型	2 型	3 型	4 型
试样长度/mm	25.0±0.5	20.0±0.5 <sup>a</sup>	20.0±0.5	10.0±0.5	10.0±0.5
a 测试长度不应超过试样狭窄部分的长度（表 2 中尺寸 C）。					

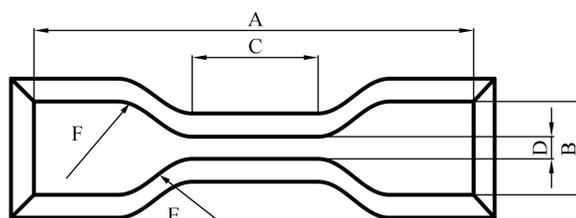


图 6 哑铃状试样用的裁刀（注：A~F 各尺寸见表 2）

表 2 哑铃状试样用裁刀尺寸

尺寸	1 型	1A 型	2 型	3 型	4 型
A 总长度（最小） <sup>a</sup> /mm	115	100	75	50	35
B 端部宽度	25.0±1.0	25.0±1.0	12.5±1.0	8.5±0.5	6.0±0.5
C 狭窄部分长度/mm	33.0±2.0	20.0 <sup>-2</sup> <sub>0</sub>	25.0±1.0	16.0±1.0	12.0±0.5
D 狭窄部分宽度/mm	6.0 <sup>+0.4</sup> <sub>0</sub>	5.0±0.1	4.0±0.1	4.0±0.1	2.0±0.1
E 外侧过渡边半径/mm	14.0±1.0	11.0±1.0	8.0±0.5	7.5±0.5	3.0±0.1
F 内测过渡边半径/mm	25.0±2.0	25.0±2.0	12.5±1.0	10.0±0.5	3.0±0.1
a 为确保只有两端宽大部分与机器夹持器接触，增加总长度从而避免“肩部断裂”					

#### 4.3.2.3 扯断伸长率

扯断伸长率的测试曲线见图 7:

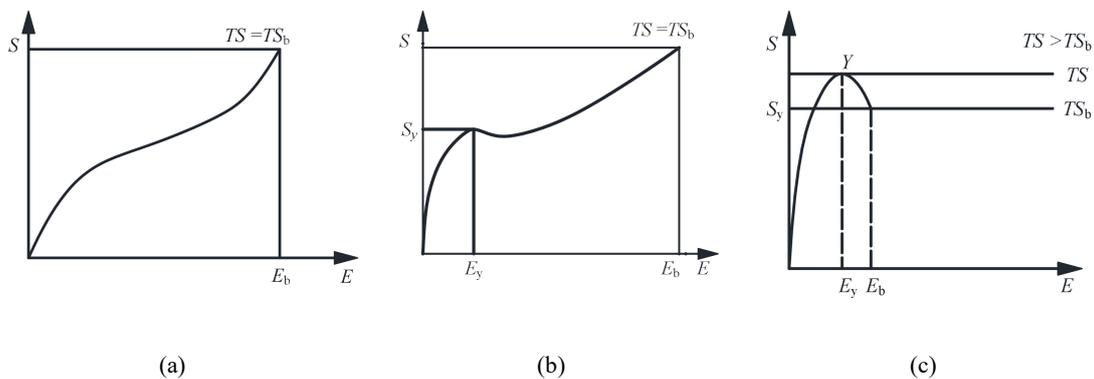


图 7 扯断伸长率的测试曲线图

图中 E 表示百分比伸长率； $S_y$  表示屈服点拉伸应力； $E_b$  表示拉断伸长率，是试样断裂时的百分比伸长率；TS 表示拉伸强度，是试样拉伸至断裂过程中的最大拉伸应力； $E_y$  表示屈服点伸长率； $TS_b$  表示拉断强度，TS 和  $TS_b$  值可能有差异，如果在  $S_y$  处屈服后继续伸长并伴随着应力下降，则导致  $TS_b$  低于 TS 的结果，如图 7(c)；S 表示拉应力；Y 表示屈服点。详细的试验流程应按 GB/T 528 的规定进行。

#### 4.3.2.4 扯断永久变形

测扯断永久变形时，应将断裂后的试样放置 3min，再把断裂的两部分吻合在一起，用精度为 0.05mm 的量具测量吻合后的两条平行标线间的距离。详细的试验流程应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》GB/T 528 的规定进行。

#### 4.3.2.5 热空气老化

热空气老化试验原理：黏弹性减震材料在贮存条件下主要发生热氧老化。热的作用将加速硫化橡胶交联、降解等化学变化，宏观表现出物理机械性能的改变，某些性能与老化时间呈单一变化，如：扯断伸长率、应变松弛系数、压缩变形率等。按照性能与老化时间关系的经验公式，可求得性能变化速度常数(K)。在一定温度范围内，速度常数与热力学温度(温度)的关系符合阿累尼乌斯(Arrhenius)方程。对试验数据统计计算，可预测室温下的老化性能。

黏弹性减震材料热空气老化试验温度应符合如下规定：高温老化试验温度应视橡胶基体种类、硫化体系和测试项目而定。黏弹性减震材料热空气老化试验可使用多单元老化箱。首先加热老化箱到测试温度，将试样放入到老化箱中，每个单元中只能放一种黏弹性减震材料试样。试样应不受应力，各面自由暴露在空气中，且不受光照。达到规定的老化时间后，从老化箱中取出试样，取出的试样以不受应力的方式在待测试的试验性能所要求的环境下放置 16h~144h，按照有关性能试验方法测试，试验结果的表示应符合与待测性能相关的标准。详细的试验流程应按现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验》GB/T 3512 的规定执行。

#### 4.3.2.6 刚性约束板与阻尼材料之间的剪切粘结强度

测定黏弹性减震材料与刚性约束板的正截面粘合强度可以采用图 8 所示的两板法，测定黏弹性减震材料与刚性约束板的剪切粘合强度可以采用如图 9、10 所示的三板法和四板法。在试样的粘合面上施加均匀垂直的拉力或剪切力，测定试样破坏的最大力，试样单位面积上的最大力为黏弹性减震材料与刚性约束板粘合强度。

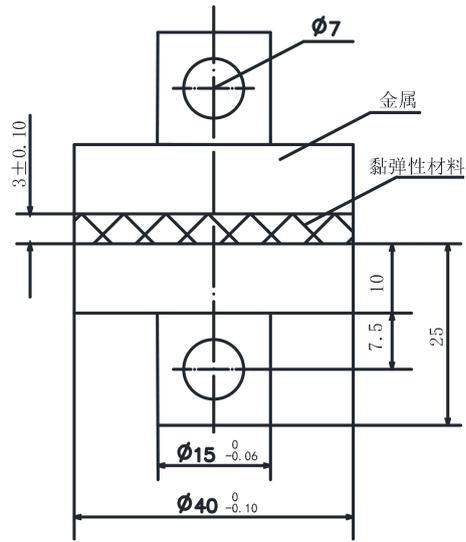


图 8 两板法试样形状和尺寸图

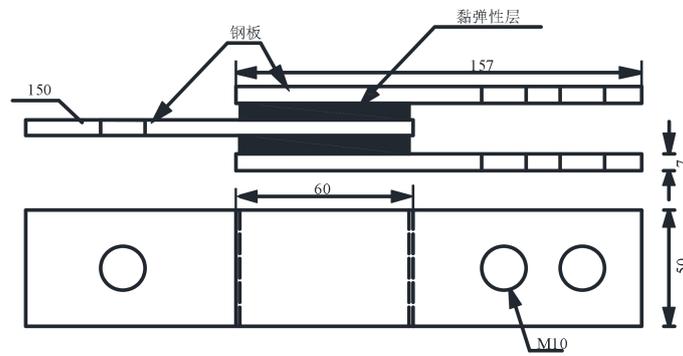


图 9 三板法试样形状和尺寸图

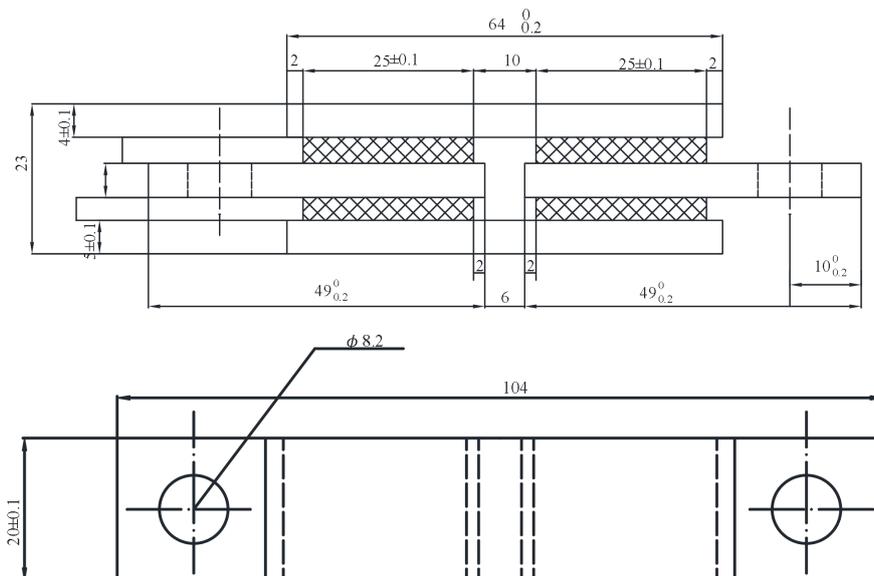


图 10 四板法试样形状和尺寸图

#### 4.3.2.7 邵氏硬度

材料规格：厚度应 $\geq 6\text{mm}$ ，平坦区域直径 $\geq 20\text{mm}$ 。若单层材料不够 $6\text{mm}$ ，则叠加层数 $\leq 3$ 层，试样应平行叠加，若3层材料的厚度仍不够 $6\text{mm}$ ，则以厂商提供的试片为准。测试方法：拿住硬度计，平稳地把压足压在试样上，不能有任何振动，并保持压足平行于试样表面，以使压针垂直地压入试样，所施加的力要刚好使压足和试样完全接触，必须在压足和试样完全接触后1秒钟内读数，如果是其它间隔时间读数则必须说明。测试点：分别在材料的中央和边缘测至少4个点（取平均值）。记录方式：指针所指之刻度为被测物之硬度，一次性读数，记下最高和最低值。

#### **4.4 黏弹性减震材料的检验规则**

**4.4.1** 因为黏弹性减震材料一般作为黏弹性减震器的内部零部件，不易拆卸，所以黏弹性减震材料的检验不包括进场见证检验。

## 5 黏弹性减震器的技术性能和测试方法

### 5.1 一般规定

5.1.1 根据现有行业标准《建筑消能阻尼器》JG/T 209，黏弹性减震器主要分为板式黏弹性减震器和筒式黏弹性减震器两种类型。

5.1.2 达到一定服役年限的黏弹性减震器应进行老化性能试验。老化性能不满足使用要求的黏弹性减震器应进行更换。

### 5.2 黏弹性减震器的性能参数及要求

5.2.1 黏弹性减震器刚性构件和黏弹性层长、宽和厚度方向的尺寸偏差需进行限制，避免与减震器设计性能偏差过大。

5.2.2 随着新材料新技术的不断发展，黏弹性减震器约束构件同样可以在保证强度和承载力等性能的前提下采用其他材料，如高强塑料等以塑代钢。

5.2.3 黏弹性减震器极限剪切应变应留有安全冗余，依据现有文献和材性试验，优良黏弹性减震器极限剪切应变往往在 300%以上，故本条文极限剪切应变取 300%和设计剪应变的 1.2 倍二者的较小值作为临界值。单圈滞回耗能、最大阻尼力、储能刚度和等效阻尼等器件力学性能指标实测值与设计值的偏差应满足一定的限制要求。现有规范中，力学性能指标实测值与设计值的偏差及偏差平均值限值多取 15%和 10%，单这一限值在工程实际中较难实现，故本条文中取 20%和 15%。

5.2.4 在一定服役年限下对黏弹性减震器进行外观检查和动态性能试验，对其老化性能进行判断。对于不满足黏弹性减震器老化性能要求的减震器要及时更换。

5.2.5 黏弹性减震器需满足疲劳性能要求，在一定圈数的加载循环后，性能降低不能超出限值，对于不满足疲劳性能要求的黏弹性减震器不得使用。

5.2.6 相同材料加工的一批黏弹性减震器不同试样，同一工况下最大阻尼力、储能刚度和等效阻尼偏差需满足一定的限值要求。

5.2.7 依据我国现行国家标准《高层民用建筑设计防火规范》GB50045-95 的规定，对建筑物的耐火等级进行确定。

### 5.3 黏弹性减震器性能的测试方法

5.3.2 黏弹性减震器的力学性能试验应在伺服加载试验机上进行，试验采用设计温度、设计位移和结构基频。极限剪应变测试中，若黏弹性减震材料与刚性约束板间产生明显撕裂剥

离，或同一工况下最大阻尼力、储能刚度和等效阻尼下降超过 20%即认为黏弹性减震器已破坏。

**5.3.3** 现行国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度》GB/T 20028 采用阿累尼乌斯图在橡胶材料老化试验的基础上推算橡胶材料使用寿命。不考虑光老化、臭氧老化和不均匀老化等因素的影响，黏弹性减震器热空气老化性能采用本规范 4.4.2 节所示方法进行测试。

**5.3.4** 在地震和风振应用条件下，采用结构基频和减震器设计位移，通过对减震器连续施加一定圈数的正弦位移激励来测试黏弹性减震器的疲劳性能。

#### **5.4 黏弹性减震器性能参数的确定**

**5.4.1** 黏弹性减震器性能参数根据不同工况下减震器的阻尼力-位移滞回曲线进行计算分析，黏弹性减震器的阻尼力-位移滞回曲线可简化为标准椭圆。加入金属等其它类型耗能元件的复合型黏弹性阻尼器滞回曲线可依据滞回面积相等原则等效为标准椭圆进行处理。

**5.4.2** 黏弹性减震器的等效刚度和等效阻尼可根据减震器的阻尼力-位移滞回曲线计算得到。

**5.4.3** 黏弹性减震器的性能参数主要由黏弹性减震材料本身性能决定，同时与减震器几何尺寸密切相关。

#### **5.5 黏弹性减震器的检验规则**

**5.5.1、5.5.2、5.5.3** 黏弹性减震器的检验包括型式检验、出厂检验和进场见证检验。型式检验和出厂检验均需满足一定的抽检数量和产品检测合格率要求。

**5.5.4** 黏弹性减震器的进场见证检验应包括基本力学性能、极限性能和疲劳性能。

**5.5.5** 出厂检验应由厂家自检或由具有检验资质的第三方检测机构进行。型式检验和进场见证检验均应由具有检验资质的第三方检测机构进行。型式检验、出厂检验和进场见证检验时，黏弹性减震器的力学性能、极限性能、老化性能和疲劳性能均需满足本规程 5.2 节的要求。

## 6 黏弹性减震结构的设计计算

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 黏弹性减震器的力学性能受其工作温度与频率的影响。为保证黏弹性减震器的控制效果，要求根据减震结构的工作环境温度与频率考虑减震器的力学性能，其实际性能与设计值差异应满足本规程规定。同时，黏弹性减震材料老化等原因也会造成性能指标的降低，但在减震器使用寿命内，性能指标降幅不应超过 20%。

**6.1.2** 黏弹性减震结构是通过在主体结构中安装黏弹性减震器，提升结构阻尼比，从而减小结构在不同外部荷载作用下的动力响应。减震结构设计需解决的主要问题是评估减震结构在设计动力激励下，受减震器影响的动力响应，以此设计主体结构、减震器及其连接构造。黏弹性减震器的耗能能力与减震器两端的相对变形及相对变形速度有关。将减震器安装于结构变形较大的位置可充分发挥减震器耗能性能。同时，需考虑减震器布置对主体结构受力体系影响，形成均匀、合理、冗余的受力体系。

**6.1.3** 黏弹性减震器为速度相关型减震器，需要同时考虑减震器对结构刚度和阻尼的贡献，通过储能刚度和等效阻尼计算提供给被控结构的附加刚度和附加阻尼，综合速度、位移指标考虑减震器的最大阻尼力及等效刚度，设计减震器的连接构造。近期地震事件表明，减震器及其连接构造常在主体结构严重损伤前发生平面外破坏，特别是通过钢板焊缝的连接构造，需特别注意，宜额外验算减震器在平面外作用下的变形能力。

### 6.2 黏弹性减震结构抗震性能计算

**6.2.1** 已有研究表明，通过在结构中合理设置黏弹性减震器，不仅可以减小结构罕遇地震作用下的损伤破坏，避免结构倒塌，也可以有效降低结构多遇地震作用下的动力响应，节约成本。黏弹性减震结构设计的主要步骤包括：评估减震器对结构的附加阻尼与附加刚度，对比减震结构与原结构在多遇与罕遇地震作用下的动力响应，进行减震器及主体结构的抗震设计与变形验算，确定结构抗震构造措施。

**6.2.5-6.2.6** 振型分解反应谱法包括实振型分解反应谱法和复振型分解反应谱法。实振型分解反应谱法基于比例阻尼假定，而黏弹性减震器附加给结构的阻尼矩阵不一定能满足比例阻尼假定。此时，结构振型向量无法完全在实数域表达。然而，国内外的研究表明，当减震器较均匀分布且附加阻尼比不大于 20%时，采用实振型向量对阻尼矩阵强行解耦求解与精确解的误差，大多数可控制在 5%以内。不满足上述条件时，应采用不进行振型分解的时程分

析法计算黏弹性减震结构动力响应或采用非比例阻尼假定的复振型分解反应谱法计算黏弹性减震结构动力响应。

**6.2.7** 进入弹塑性变形阶段的结构薄弱部位会出现一定程度的塑性变形集中,结构整体变形分布发生改变,此时黏弹性减震器耗能特征与弹性阶段有显著不同。为计算罕遇地震作用下的黏弹性减震结构弹塑性动力响应,需采用静力弹塑性分析方法或弹塑性时程分析方法。而影响弹塑性位移计算结果的因素很多,其计算值的离散性比较大。应分别对比多个软件、不同地震激励下的结构响应,包括原结构与减震结构的层间剪力与层间位移。减震结构的层间弹塑性位移角限值应符合变形控制要求,且比非减震结构适当减小。同时,应根据减震器的阻尼力设计值与位移设计值验算减震器与连接构造在罕遇地震作用下的强度与变形能力。

**6.2.8** 现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 中规定一般可以根据小样本容量下(不少于 2 组实际地震动记录和 1 组人工模拟的加速度时程曲线作为输入)的计算结果来估计结构地震作用效应值,也可以采用较大样本容量(不少于 5 组实际地震动记录和 2 组人工模拟时程曲线作为输入)的计算结果来估计。如果 3 条地震波能满足现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 中规定的“在统计意义上相符”要求,则分别计算 3 条地震波输入结构的地震作用效应不应偏差太大。为了使设计出的结构更为安全,则选用 3 条地震波时程曲线输入计算出结构地震反应的包络值反算黏弹性减震器的附加阻尼比。当取 7 组及 7 组以上的地震波时程曲线输入时,计算出结构的地震作用效应的保证率更高,可选用 7 组及 7 组以上的地震波时程曲线输入计算出结构地震反应的平均值反算黏弹性减震器附加阻尼比。

### 6.3 黏弹性减震结构抗风性能计算

**6.3.1** 采用黏弹性减震器的被控结构,需要同时考虑减震器刚度和阻尼对结构风振控制效果的影响。沿顺风向布置的黏弹性减震器,可仅考虑其对顺风向风振的控制作用;沿横风向布置的黏弹性减震器,可仅考虑其对横风向风振的控制作用。

**6.3.2** 采用时程分析法计算被控结构风振响应时,宜采用包括结构力学模型和减震器力学模型在内的结构控制体系的总力学模型,进行结构风振控制体系的风振响应分析。

### 6.4 特种结构的减振性能计算

**6.4.2** 特种结构振动的成因较为复杂:如管道结构的振动与管道中流体运动相关,具体表现为液体与管道内壁之间的摩擦、管道内液体的内摩擦、液体压力脉动与管壁之间的相互作用、管道结构的弯曲等;高层电力塔架结构的振动常受线缆影响,可表现非线性特征。一般

而言，需结合现场实测数据与结构应用场景，采用精细模型进行动力时程分析。特别的，当特种结构振动有显著非线性特征时，结构动力响应对减震器不同频率的刚度与阻尼特征非常敏感，宜采用减震器的精细化非线性模型进行数值计算，考虑减震器力学性能的频率和幅值相关性。

## 7 黏弹性减震器的连接与构造

### 7.1 一般规定

**7.1.1、7.1.2** 黏弹性减震器与主体结构的连接,根据工程具体情况的不同,可采用不同的连接形式,如图 7.1.1。“K”形支撑布置时会在框架柱中部交点处给柱带来侧向集中力的不利作用,在地震作用下,可能因受压斜杆屈曲或受拉斜杆屈服,引起较大的侧向变形,使柱发生屈曲甚至造成倒塌,故不宜采用“K”字形布置。

支撑斜杆宜采用双轴对称截面。当采用单轴对称截面(双角钢组合 T 形截面)时,应采取防止绕对称轴屈曲的构造措施。当板件局部失稳影响支撑斜杆的承载力和耗能能力时,其宽厚比需要加以限制。

**7.1.4** 本条内容同现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 有关条文。连接板(或连接件)和结构构件间的连接采用高强度螺栓连接或焊接,当采用螺栓连接时,应保证相连节点在罕遇地震下不发生滑移;当黏弹性减震器的阻尼力较大时,宜采用刚接;与黏弹性减震器相连的支撑应保证在黏弹性减震器最大输出阻尼力作用下处于弹性状态,不发生平面内、外整体失稳,同时与主体相连的预埋件、节点板等也应处于弹性状态,不得发生滑移、拔出和局部失稳等破坏。与支撑相连接的节点承载力应大于支撑的极限承载力,以保证节点足以承受罕遇地震下可能产生的最大内力。黏弹性减震器与连接支撑、主体结构之间的连接节点,应符合钢构件连接、钢与混凝土构件连接或钢与钢-混凝土组合构件连接的构造要求。

**7.1.5** 黏弹性减震器属非承重构件,其功能仅在结构变形过程中发挥耗能作用,而不承担结构的竖向承载作用,即增设黏弹性减震器不改变主体结构的竖向受力体系,因此,无论是新建黏弹性减震结构还是既有建筑的抗震加固主体结构都必须满足竖向承载力的要求。与黏弹性减震器相连的支撑应具有足够刚度,以保证黏弹性减震部件中的变形绝大部分发生在黏弹性减震器上,黏弹性减震器支撑的刚度应根据计算确定。节点板在支撑力(考虑附加弯矩)作用下,除具有足够的承载力和刚度外,还应防止其发生面外失稳、破坏,一般可采用增加节点板厚度或设置加劲肋的措施。

对于黏弹性减震结构分析,一般将黏弹性减震器视为单方向的耗能构件,即沿着框架的平面方向耗能,所以一些相关研究皆是以平面框架(二维构架)装设黏弹性减震器来探讨减震结构在地震作用下的反应。由于应用平面框架的概念,对于黏弹性减震器平面外方向皆视为不受地震作用而忽视黏弹性减震器平面外的力学特性。然而,由于建筑结构体系复杂及结

构不规则，以及应用平面框架理论条件限制，建筑结构大部分已经不再适用平面框架理论，加上近年来结构分析技术的进步，目前皆是以三维空间结构来做结构分析设计。所以，在三维空间结构分析时，黏弹性减震器不仅需考虑框架平面内的力学特性，亦需考虑黏弹性减震器在框架平面外的力学特性。并且由于附加支撑在黏弹性减震器的阻尼力作用下，常产生轴压变形，在设计附加支撑时经常只考虑到附加支撑平面内的刚度，来保证黏弹性减震器的大变形而忽略了附加支撑的平面外刚度，导致附加支撑在地震作用时平面外屈曲破坏，使黏弹性减震器不能发挥其应有的耗能效果。为此，需要保证附加支撑在轴力作用的平面外刚度。

**7.1.6** 由于黏弹性减震器的支撑常采用连接板与主体结构相连，从现有的混凝土钢支撑结构和钢结构的支撑破坏情况发现，在地震中常出现连接钢板部分发生互不相同平面外的失稳，由此导致梁发生大的扭转变形并使钢筋混凝土剥落，使黏弹性减震器不能产生相对位移，从而不能发挥相应的耗能效果。

**7.1.7** 与黏弹性减震器相连接的主体结构构件与节点应考虑黏弹性减震器的最大阻尼力作用，从而保证黏弹性减震器在罕遇地震作用下不丧失功能。

## 7.2 预埋件计算

**7.2.1** 混凝土结构中的预埋件的构造形式应根据受力性能和施工条件确定，力求构造简单，传力直接。预埋件可分为受力预埋件与构造预埋件两种。均由两部分组成：埋设在混凝土中的锚筋和外露在混凝土表面的锚板。锚筋和锚板都采用可焊性良好的结构钢。锚筋常用钢筋，对于受力较大的预埋件常采用角钢。对于和 L 形预埋板相互垂直方向的预埋板承担的内力，宜按支撑角度分解轴向力获取。

**7.2.2** 黏弹性减震器的附加内力通过预埋件等传递给主体结构构件，因此，要求预埋件在黏弹性减震器极限位移时附加的外力作用下不会出现失效，其构造措施比一般预埋件要求更高。

## 7.3 支撑和传力柱、传力墙计算

**7.3.2** 支撑的计算长度取值遵循如下原则：计算支撑的轴向刚度时，计算长度取其净长。计算平面内、外失稳时，计算长度应取支撑与黏弹性减震器的长度总和。

## 7.4 节点板计算

**7.4.2、7.4.3** 本条内容应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 有关条文。

## 7.5 黏弹性减震器与结构连接的构造要求

**7.5.1~7.5.3** 黏弹性减震器的附加内力通过预埋件、支撑和剪力墙（支墩）传递给主体结构构件，因此，要求预埋件、支撑和剪力墙（支墩）在黏弹性减震器极限位移时附加的外力作用下不会出现失效，其构造措施比一般预埋件要求更高。

**7.5.4** 对损伤构件，应对局部严重损伤部位进行加固处理后，再使用黏弹性减震器进行整体加固，将更加有效提升结构抗震性能。

## 8 黏弹性减震器施工、验收和维护

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 黏弹性减震器作为消能阻尼器的一种类别,可划分为主体结构分部工程中的消能部件子分部工程的一个分项工程进行施工管理和验收。

**8.1.3** 黏弹性减震器的施工是土建、安装等多工种、多单位的交叉混合施工,制定施工顺序,并应严格遵守国家、行业、企业有关施工安全的技术标准和规定,并根据消能减震结构的施工安装特点,在编制专项施工方案时应制定安全施工、消防和环保等措施。

### 8.2 进场验收

**8.2.2** 进场验收应检查产品的型式检验报告、出厂检验报告、见证检验报告或者高校、科研机构出具的论证报告等,以及外观质量和几何尺寸。黏弹性减震器现场堆放宜采用仓库堆放,当采用露天堆放时,不得积水,不得与酸、碱、盐、水泥等对黏弹性减震器及其连接件有侵蚀性的材料堆放在一起。同一项目黏弹性减震器有多种型号时,宜按型号分开堆放。应采取维护措施和标识管理。

### 8.3 施工

**8.3.1** 考虑到施工安装顺序对施工安装质量有重要影响,黏弹性减震器施工安装前首先应确定结构的流水段划分、各类普通构件和黏弹性减震器部件的总体的施工安装顺序,以确保施工安装质量。

**8.3.2** 黏弹性减震器在钢结构的安装顺序,是根据一般钢结构的安装顺序并结合黏弹性减震器部件的特点,按施工方案和相关规范规定综合制定的。

**8.3.3** 黏弹性减震器在现浇混凝土结构的施工中,黏弹性减震器和主体结构构件的总体安装顺序,应根据结构特点、施工条件等确定。黏弹性减震器在混凝土结构的后装法可先施工一个或多个结构层的混凝土墙柱和梁板等构件,黏弹性减震器预埋件必须与主体混凝土结构同步安装。混凝土结构层强度达到设计强度后再安装黏弹性减震器。黏弹性减震器后装法与主体结构连接可分为墙式、连梁式、支撑式等,根据不同的设计连接方式确定安装顺序。

**8.3.5** 黏弹性减震器安装前对安装位置的平面尺寸、标高、净高、净宽等项目的检查是保证安装精度的重要步骤,应严格执行。

## 8.4 质量验收

**8.4.3** 根据现行《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300 要求，黏弹性减震器为分项工程，应按照分项工程组织施工质量验收。除满足本规程要求外，应满足现行国家行业标准《钢结构施工规范》GB50755、《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205 的相关要求。

## 8.5 维护

**8.5.1** 常规检查是对减震器本身进行的正常检查，其目的是尽早发现减震器的明显异常。定期检查是对黏弹性减震器本身及其与建筑物连接的状况进行的正常检查，其目的是力求尽早发现可能的异常，以避免黏弹性减震器不能正常使用。应急检查是指在发生强震、强风、火灾等灾害后立即实施的检查，目的是检查确认上述灾害对黏弹性减震器性能有无影响。

**8.5.4** 黏弹性减震器的应急检查包括目测检查和抽样检查，与主体结构的应急检查要求是一致的，即在地震及其他外部扰动发生后（如地震、强风、火灾等灾害后），同样应对黏弹性减震器实施应急检查，通过应急检查，确认黏弹性减震器是否超过极限能力或受到超预估的损伤，以判断是否需要修理或更换。另外，即使黏弹性减震器经检查未遭受损伤，也要检查附加支撑、连接件是否受到影响。