

中国工程建设标准化协会标准

组合型桥梁减隔震结构技术规程

(征求意见稿)

Technical specification for combined seismic isolation design
of bridges

T/CECS XXX-XXXX

主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司
同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：

20XX 北京

中国工程建设标准化协会公告

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2017]014 号）的要求，编制组经过深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程的主要技术内容是：1.总则；2.术语和符号；3.分类及结构形式；4.材料及构造要点；5.计算分析方法；6.抗震验算与构造要求；7.技术要求与检验；8.施工与维护。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司（地址：上海市中山北二路 901 号，邮编：200092）。

主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司
同济大学

参编单位：北京市市政工程设计研究总院有限公司
广州市市政工程设计研究总院有限公司
重庆市设计院
成都市新筑路桥机械股份有限公司
四川路桥华东建设有限责任公司
上海通亿橡塑制品有限公司
成都济通路桥科技有限公司

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总则.....	6
2 术语和符号.....	7
2.1 术语.....	7
2.2 符号.....	8
3 分类及结构形式.....	10
3.1 一般规定.....	10
3.2 分类.....	10
3.3 结构形式.....	10
4 材料及构造要点.....	12
4.1 滑动摩擦类支座.....	12
4.2 叠层橡胶支座.....	12
4.3 金属阻尼器.....	13
5 计算分析方法.....	16
5.1 一般规定.....	16
5.2 计算模型.....	16
5.3 分析方法.....	23
6 抗震验算.....	26
6.1 作用效应组合.....	26
6.2 抗震验算.....	26
7 技术要求与检验.....	27
7.1 技术要求及试验方法.....	27
7.2 检验.....	27
8 施工与维护.....	30
8.1 施工安装.....	30
8.2 工程验收.....	30
8.3 装置维护.....	30
附录 A 滑动摩擦类支座水平滞回性能试验方法.....	31
附录 B 叠层橡胶支座水平剪切刚度试验方法.....	33
附录 C 金属阻尼元件试验方法.....	35
本规程用词说明.....	38

引用标准名录..... 39

Contents

1 General Provisions	6
2 Terms and Symbols	7
2.1 Terms	7
2.2 Symbols	8
3 Classification and Structural Styles	10
3.1 General Requirements	10
3.2 Classification	10
3.3 Structural Styles	10
4 Materials and Structural Details	12
4.1 Sliding Friction Bearings	12
4.2 Laminated Rubber Bearings	12
4.3 Metal Dampers	13
5 Structural Analysis	16
5.1 General Requirements	16
5.2 Calculation Models	16
5.3 Analytical Methods	23
6 Seismic Check	26
6.1 Combination of Actions	26
6.2 Seismic Check	26
7 Technical Requirements and Inspection	27
7.1 Technical Requirements and test methods	27
7.2 Inspection	27
8 Construction and Maintenance	30
8.1 Construction Installation	30
8.2 Acceptance	30
8.3 Maintenance	30
Appendix A Test Methods for Horizontal Hysteretic Performance of Sliding Friction Bearings	31
Appendix B Test Methods for Horizontal Shear Stiffness of Laminated Rubber Bearings ..	33
Appendix C Test Methods for Metal Damping Elements	35

Explanation of Wording in This Code	38
List of Quoted Standards	39
Addition: Explanation of Provisions	40

1 总则

1.0.1 为了规范和促进组合型减震耗能装置在桥梁工程中的应用，减小桥梁的地震灾害，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于抗震设防烈度为 6、7、8 和 9 度地区的新建、改建的公路及城市桥梁工程。

1.0.3 采用组合型减震耗能装置的公路和城市桥梁抗震设计，除应符合本规程的要求外，尚应符合国家现行的有关标准规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 组合型减震耗能装置 combined seismic isolator

组合型减震耗能装置由桥梁的竖向承载装置与水平减震耗能装置所组成,包括滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座、滑动摩擦类支座+金属阻尼器、叠层橡胶支座+金属阻尼器等类型。

2.1.2 竖向承载装置 vertical load bearing system

在组合型减震耗能装置用来承受桥梁竖向荷载(自重和活载)的装置。

2.1.3 水平减震耗能装置 horizontal seismic isolated system

在组合型减震耗能装置用来降低结构水平地震响应的装置。

2.1.4 伸缩缝 expansion and contraction joint

为适应桥梁结构变形的需要,在上部结构中设置的间隙。

2.1.4 挡块 retainer

防止桥梁上部结构发生较大位移而设置的保证措施。

2.1.4 滑动摩擦类支座 sliding friction bearing

提供桥梁竖向支承且在地震作用下提供摩擦耗能的装置,包括盆式活动支座、球型活动支座、板式橡胶支座等。

2.1.5 叠层橡胶支座 laminated rubber bearing

提供桥梁竖向支承或在地震作用下提供水平恢复力的装置,由上下支座板、封钢板、加劲钢板、橡胶层等组成。

2.1.6 金属阻尼器 metal damper

在地震作用下提供水平恢复力和弹塑性滞回耗能的装置,主要有C型、三角板、X型和卡榫等类型。

2.1.7 摩擦耗能 friction energy dissipation

利用界面间的滑动摩擦力耗散地震能量的效应。

2.1.8 弹塑性滞回耗能 elastic plastic hysteretic energy dissipation

利用材料的弹塑性性质耗散地震能量的效应。

2.1.9 设计位移 design displacement

组合型减震耗能装置在最不利组合作用下所能达到的最大位移。

2.1.10 等效刚度 effective stiffness

组合型减震耗能装置所承受的最大水平力与设计位移的比值。

2.1.11 等效阻尼比 effective damping ratio

组合型减震耗能装置在往复运动中,在设计位移处所耗散的能量相对应的等效阻尼与临界阻尼的比值。

2.2 符号

F_y^h ——滑动摩擦类支座的临界摩擦力;

μ_d ——滑动摩擦类支座的滑动摩擦系数;

R ——支座所承担的上部结构恒载反力;

K_h ——滑动摩擦类支座的初始刚度;

s_y ——滑动摩擦类支座的临界滑动位移;

G_d ——叠层橡胶支座或板式橡胶支座的动剪切模量;

A_r ——橡胶支座的剪切面积;

$\sum t$ ——橡胶支座的橡胶层总厚度;

K_j ——叠层橡胶支座的剪切刚度;

F_y^d ——金属阻尼器的屈服力;

X_y^d ——金属阻尼器的屈服位移;

K_1^d ——金属阻尼器的初始刚度;

K_2^d ——金属阻尼器的屈后刚度;

α ——金属阻尼器的屈后刚度与初始刚度的比;

F_y^i ——金属阻尼器的初始屈服力;

K_{eff} ——双线性模型组合体系的等效刚度;

ξ_{eff} ——双线性模型组合体系的等效阻尼比;

D_d ——双线性模型组合体系的水平设计位移;

Q_d ——双线性模型组合体系的特征强度;

K_d ——双线性模型组合体系的屈后刚度;

F_y ——双线性模型组合体系的屈服力;

K_i ——双线性模型组合体系的初始刚度;

Δ_y ——双线性模型组合体系的屈服位移;

K_1 ——三线性模型组合体系的初始刚度、卸载刚度及再加载刚度;

K_2 ——三线性模型组合体系的第二段线性刚度;

K_3 ——三线性模型组合体系的第三段线性刚度；
 F_3^u ——三线性模型组合体系的第一段线性终点对应的荷载；
 F_2^u ——三线性模型组合体系的第二段线性终点对应的荷载；
 X_1^u ——三线性模型组合体系的第一段线性终点对应的位移；
 X_2^u ——三线性模型组合体系的第二段线性终点对应的位移；
 E_{hp} ——墩身所承受的水平地震力；
 S ——相应于减隔震桥梁的等效周期，采用等效阻尼比修正的反应谱值；
 M_t ——一联桥梁总质量，应包含梁体、盖梁换算质量、墩身换算质量；
 T_{eq} ——减隔震桥梁的等效周期；
 $K_{eq,i}$ ——第*i*个桥墩、桥台与其上部的减隔震装置等效刚度串联后的组合刚度；
 $k_{p,i}$ ——第*i*个桥墩、桥台的抗推刚度；
 $k_{eff,i}$ ——第*i*个桥墩、桥台上减隔震装置的等效刚度；
 $D_{d,i}$ ——第*i*个桥墩、桥台上减隔震装置的水平设计位移；
 $E_{td,i}$ ——作用在第*i*个墩台顶的水平地震力；
 $K_{eff,i}$ ——第*i*个桥墩上减、隔震支座的有效刚度；
 Δ_i ——第*i*个桥墩上减隔震支座的水平位移。

3 分类及结构形式

3.1 一般规定

3.1.1 组合型减震耗能装置的构造应简单、性能可靠且对环境温度变化不敏感，应在其性能明确的范围内使用；组合型减震耗能装置应具有可更换性，并应进行定期维护和检查。

3.1.2 组合型减震耗能装置应具有足够的初始刚度和屈服强度，以满足正常使用条件的要求。

3.1.3 组合型减震耗能装置宜采用将桥梁结构的竖向承载装置（自重和活载）与水平减震耗能装置（地震作用）分离设计的理念。

3.1.4 采用组合型减震耗能装置桥梁相邻上部结构之间的伸缩缝、梁体和档块等处应设置足够的间隙，以满足梁体位移需求。

3.2 分类

3.2.1 组合型减震耗能装置由桥梁的竖向承载装置与水平减震耗能装置所组成。

组合型减震耗能装置主要有以下几种类型：

- 1 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座；
- 2 滑动摩擦类支座+金属阻尼器；
- 3 叠层橡胶支座+金属阻尼器。

3.2.2 滑动摩擦类支座+金属阻尼器、叠层橡胶支座+金属阻尼器可用于桥墩的横桥向减震设计及固定墩的纵桥向减震设计。

3.2.3 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座可同时用于桥墩的纵、横桥向减震设计。

3.3 结构形式

3.3.1 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座组合减震装置由滑动摩擦类支座与叠层橡胶支座并联组成，滑动摩擦类支座提供竖向支承和摩擦耗能，叠层橡胶支座提供水平恢复力。

3.3.2 滑动摩擦类支座+金属阻尼器组合减震装置由滑动摩擦类支座与金属阻尼器并联组成，滑动摩擦类支座提供竖向支承和摩擦耗能，金属阻尼器提供水平恢复力和弹塑性滞回耗能。

3.3.3 叠层橡胶支座+金属阻尼器组合减震装置由叠层橡胶支座与金属阻尼器并联组成，叠层橡胶支座提供竖向支承和水平恢复力，金属阻尼器提供弹塑性滞回

耗能。

4 材料及构造要点

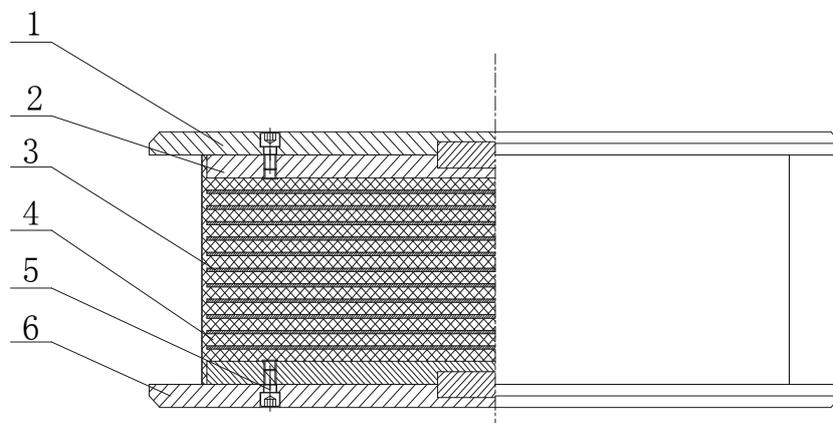
4.1 滑动摩擦类支座

4.1.1 滑动摩擦类支座主要有活动球型钢支座和活动盆式橡胶支座。球型钢支座材料及构造相关要求按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行；盆式橡胶支座材料及构造相关要求按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行。

4.1.2 当板式橡胶支座在地震作用下的抗滑性能不满足要求时，可视为滑动摩擦类支座，其材料及构造相关要求按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。

4.2 叠层橡胶支座

4.2.1 叠层橡胶支座构造示意如图 4.2.1 所示。



1-上支座板, 2-封钢板, 3-加劲钢板, 4-橡胶层, 5-高强连接螺栓, 6-下支座板

图 4.2.1 叠层橡胶支座构造示意

4.2.2 叠层橡胶支座的橡胶应采用天然橡胶，其性能符合表 4.2.2 要求。

表 4.2.2 橡胶材料性能要求

项 目		要 求
拉断伸长率 (%)		≥600
拉伸强度 (MPa)		≥18
橡胶与钢板粘结剥离强度 (N/mm)		>10
脆性温度 (°C)		≤-50
热空气老化 (70°C×168h) (与未老化前数值相比发 生的最大变化)	硬度变化 (IRHD)	-5~+10
	拉伸强度变化率 (%)	±15
	扯断伸长率变化率 (%)	±20
恒定压缩永久变形 (70°C, 24h, 压缩率为 25%) (%)		<30

耐臭氧老化（50pphm，20%伸长率，40℃×96h）

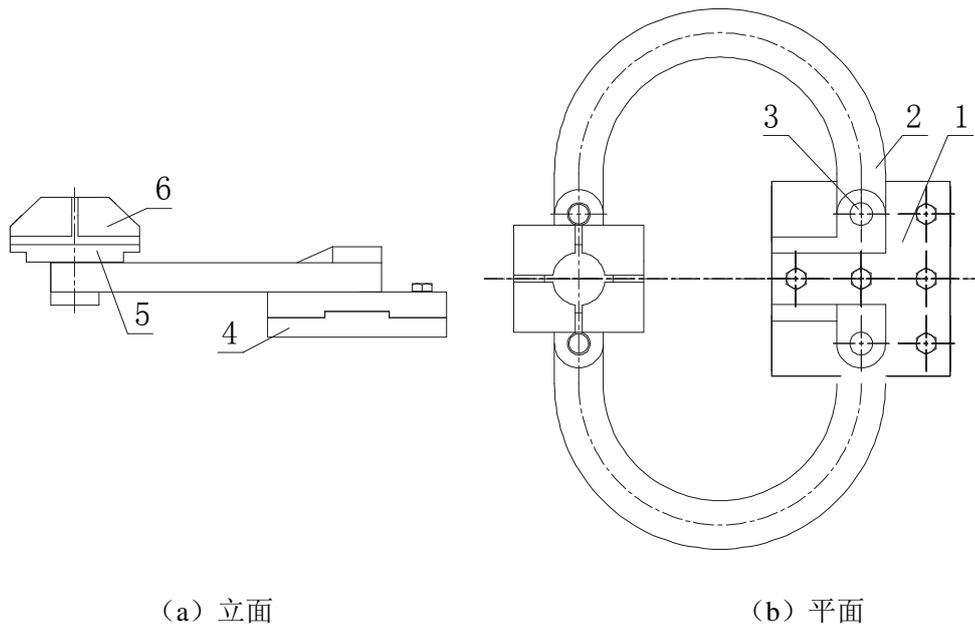
橡胶保护层不出现龟裂

4.2.3 叠层橡胶支座的加劲钢板、粘结剂相关要求按《公路桥梁板式橡胶支座》（JT/T 4）执行。其中，封钢板和连接钢板应满足《碳素结构钢》（GB/T 700）和《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）的要求。

4.3 金属阻尼器

4.3.1 金属阻尼器主要有 C 型、E 型、三角板、X 型和卡榫等类型。

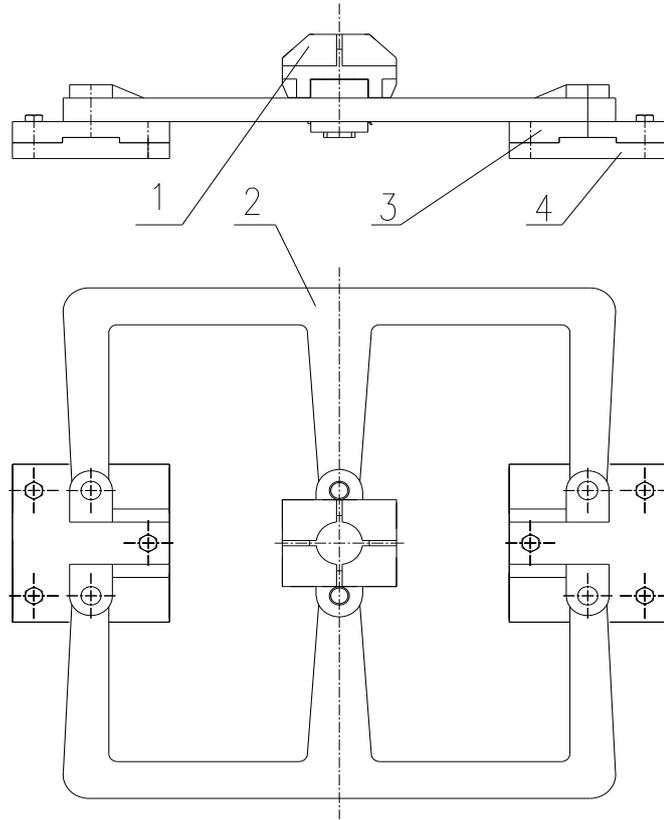
1 C 型钢阻尼器如图 4.3.1-1 所示：



1-下板，2-C 型耗能件，3-边销，4-下预埋板（含套筒），5-上板，6-上预埋板（含锚筋）

图 4.3.1-1 C 型钢阻尼器

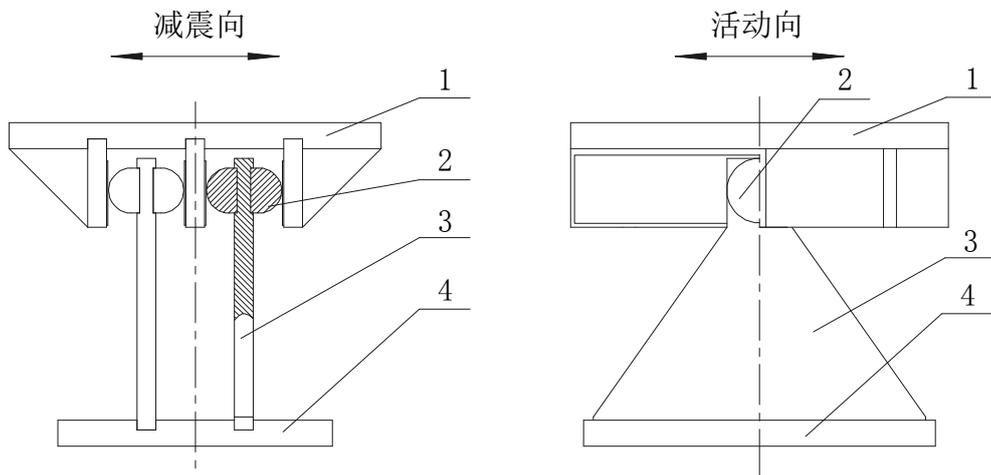
2 E 型钢阻尼器如图 4.3.1-2 所示：



1-上板, 2-E 型耗器, 3-下板, 4-预埋板

图 4.3.1-2 E 型钢阻尼器

3 三角板阻尼器如图 4.3.1-3 所示:



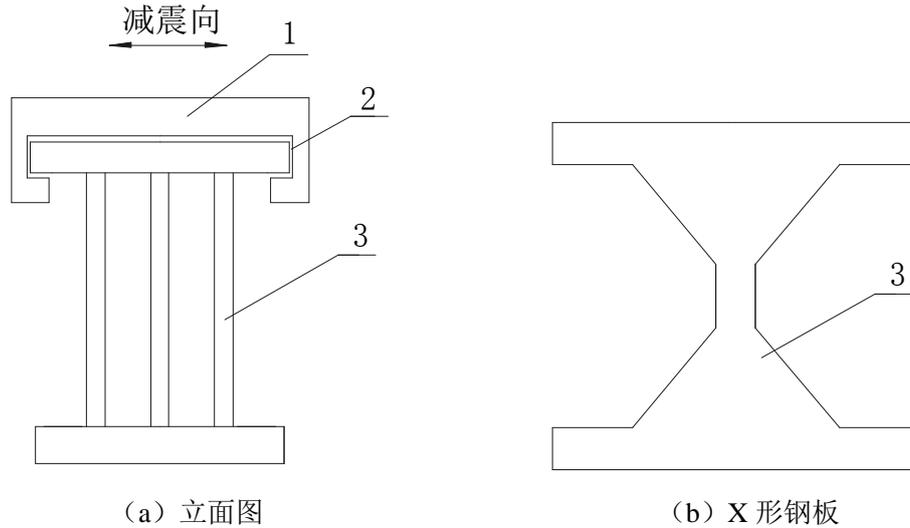
(a) 侧立面

(b) 正立面

1-上板, 2-传力件, 3-耗能三角板, 4-下板

图 4.3.1-3 三角板阻尼器

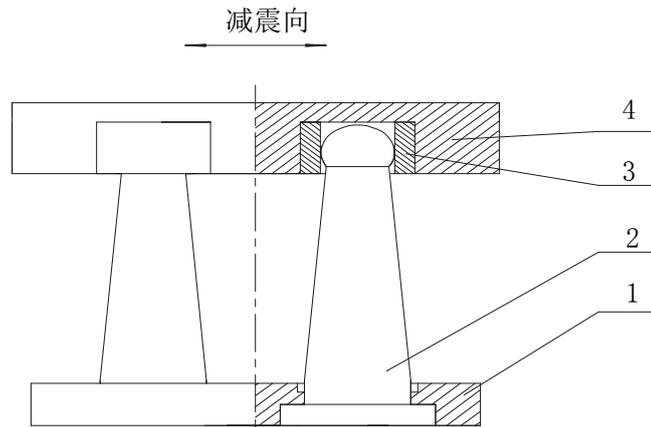
4 X 型阻尼器如图 4.3.1-4 所示:



1-顶板, 2-滑槽, 3- X形钢板

图 4.3.1-4 X 型阻尼器

5 卡榫阻尼器如图 4.3.1-5 所示:



1-下板, 2-耗能卡榫, 3-滑动导板, 4-上板

图 4.3.1-5 卡榫阻尼器

4.3.2 金属阻尼器阻尼元件机械性能应符合表 4.3.2 的要求; 阻尼元件用钢材主要化学成份应符合 GB/T 1591 的规定。

表 4.3.2 金属阻尼器阻尼元件机械性能要求

项目	技术指标
屈服强度 σ_s (Mpa)	200~400
伸长率 δ (%)	$\geq 17\%$
抗拉强度 σ_b (Mpa)	$\geq 1.5\sigma_s$
冲击韧性	按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 3.1.3 节采用

5 计算分析方法

5.1 一般规定

5.1.1 采用组合型减震耗能装置的桥梁，可只进行 E2 地震作用下的抗震设计和验算。

5.1.2 E2 地震作用下，桥墩、桥台、基础可发生局部轻微损伤，但仍处于弹性状态，震后不需修复或经简单修复可继续使用。

5.2 计算模型

5.2.1 计算采用组合型减震耗能装置桥梁的地震作用效应时，宜取全桥模型进行分析，并考虑伸缩装置、桩土相互作用等因素的影响。

5.2.2 采用组合型减震耗能装置桥梁的计算模型需满足《城市桥梁抗震设计规范》（CJJ 166）或《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）的相关规定外，尚应正确反映组合减震耗能体系的力学特性。当环境温度历年最冷月平均温度的平均值低于 0°C 时，还应考虑低温对组合型减震耗能装置力学特性的影响，对组合型减震耗能装置桥梁进行低温条件下的抗震分析和验算。

5.2.3 滑动摩擦类支座可采用双线性模型，其恢复力模型如图 5.2.3 所示。

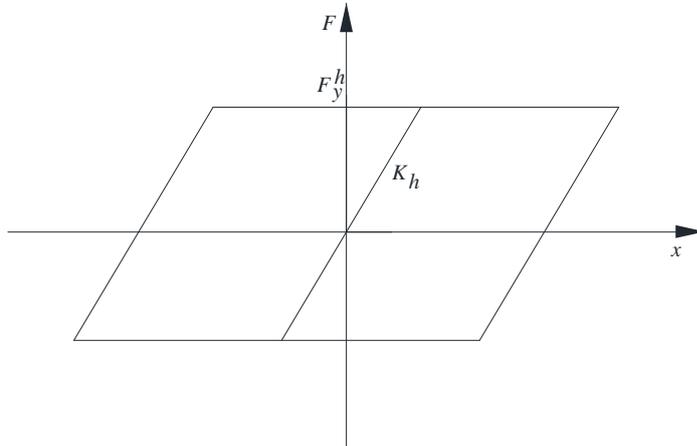


图 5.2.3 滑动摩擦类支座恢复力模型

1 滑动摩擦类支座的临界摩擦力 F_y^h ，按下式计算：

$$F_y^h = \mu_d R \quad (5.2.3-1)$$

式中： μ_d —— 滑动摩擦系数。活动球型钢支座和活动盆式橡胶支座一般取 0.02；板式橡胶支座与混凝土表面的滑动摩擦系数一般取 0.25，与钢板的滑动摩擦系数一般取 0.20。

R —— 支座所承担的上部结构恒载反力（kN）；

2 滑动摩擦类支座的初始刚度 K_h ，按下式计算：

对于活动球型钢支座和活动盆式橡胶支座，

$$K_h = \frac{F_y^h}{s_y} \quad (5.2.3-2)$$

式中： s_y ——滑动摩擦类支座的临界滑动位移（m）。活动球型钢支座和活动盆式橡胶支座一般取 0.003m。

对于板式橡胶支座，

$$K_h = \frac{G_d A_r}{\sum t} \quad (5.2.3-3)$$

式中： G_d ——板式橡胶支座的抗剪弹性模量（kN/m²），一般取 1200kN/m²；

A_r ——橡胶支座的剪切面积（m²）；

$\sum t$ ——橡胶层总厚度（m）。

5.2.4 叠层橡胶支座可采用线弹性模型，其恢复力模型如图 5.2.4 所示。

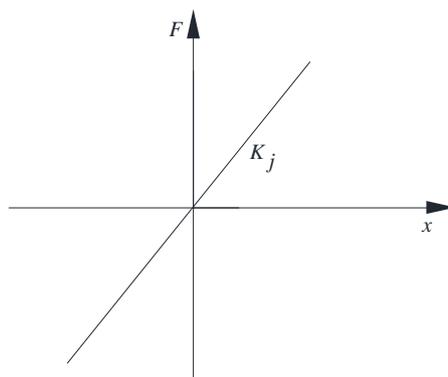


图 5.2.4 叠层橡胶支座恢复力模型

叠层橡胶支座的初始刚度 K_j ，按下式计算：

$$K_j = \frac{G_d A_r}{\sum t} \quad (5.2.4)$$

式中： G_d ——叠层橡胶支座的抗剪弹性模量（kN/m²）。一般取 1000kN/m²；

A_r ——橡胶支座的剪切面积（m²）；

$\sum t$ ——橡胶层总厚度（m）。

5.2.5 金属阻尼器可采用双线性模型，其恢复力模型如图 5.2.5 所示。

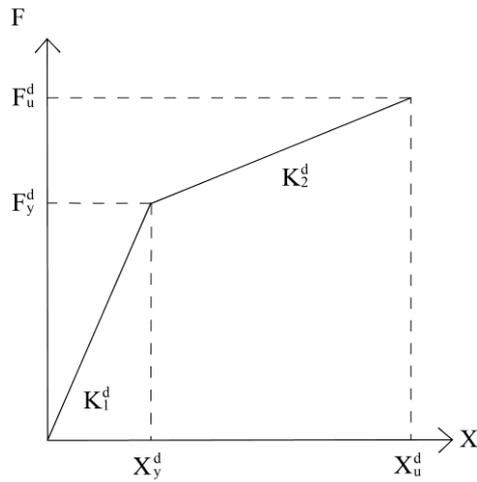


图 5.2.5 金属阻尼器恢复力模型

- 1 金属阻尼器的屈服力 F_y^d ;
- 2 金属阻尼器的初始刚度 K_1^d ;
- 3 金属阻尼器的屈服位移 X_y^d 按下式计算:

$$X_y^d = \frac{F_y^d}{K_1^d} \quad (5.2.5-1)$$

- 4 金属阻尼器的屈后刚度 K_2^d ;
- 5 金属阻尼器的屈后刚度 K_2^d 与初始刚度 K_1^d 的比 α 按下式计算:

$$\alpha = \frac{K_2^d}{K_1^d} \quad (5.2.5-2)$$

5.2.6 一般情况下，可采用试验方法或有限元分析方法得到金属阻尼器的屈服力 F_y^d 、初始刚度 K_1^d 、屈后刚度与初始刚度比 α 。

5.2.7 当金属阻尼器为三角板、X 型、卡榫类型时，金属阻尼器的屈服力 F_y^d 、初始刚度 K_1^d 、屈后刚度与初始刚度比 α 可采用如下简化方法得到。

1 三角板阻尼器

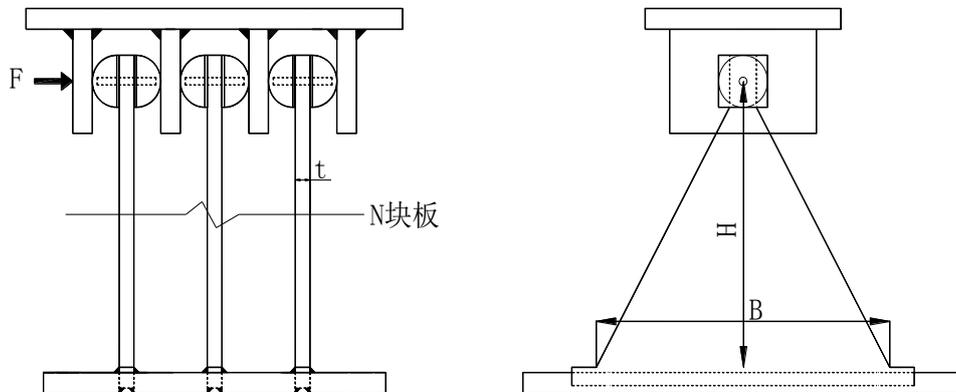


图 5.2.7-1 三角板阻尼器设计构造尺寸

1) 三角板阻尼器的等效屈服力 F_y^d 按下式计算:

$$F_y^d = \gamma F_y^i \quad (5.2.7-1)$$

式中, γ 为调整系数, 建议取 1.3, F_y^i 为阻尼器初始屈服力, 按下式计算:

$$F_y^i = \frac{n\sigma_y B t^2}{6H} \quad (5.2.7-2)$$

式中, n 、 B 、 t 、 H 分别为三角板的数目、宽度、厚度和高度 (见图 5.2.7-1), σ_y 为钢材的屈服强度, 宽高比 B/H 建议取 0.67~1.50。

2) 三角板阻尼器的初始刚度 K_1^d 按下式计算:

$$K_1^d = \frac{nEBt^3}{6H^3} \quad (5.2.7-3)$$

式中, E 为钢材的弹性模量。

3) 三角板阻尼器的屈后刚度与初始刚度比 α 取 0.03~0.05。

2 X 型阻尼器

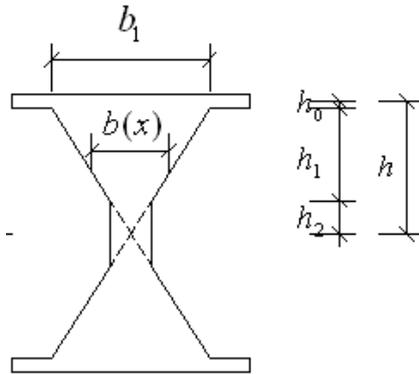


图 5.2.7-2 X 型阻尼器设计构造尺寸

1) X 型阻尼器的屈服力 F_y^d 按下式计算:

$$F_y^d = \frac{n\sigma_y t^2 b_1}{4(h_1 + h_2)} \quad (5.2.7-4)$$

式中, n 为 X 型钢板数量; h_1 、 h_2 和 b_1 分别是 X 型钢板的几何参数 (见图 5.2.7-2); t 为 X 型钢板的厚度。

2) X 型阻尼器的初始刚度 K_1^d 按下式计算:

$$K_1^d = \frac{nEt^3 b_1}{4(h_1 + h_2)(2h_2^2 + 6h_1 h_2 + 3h_1^2)} \quad (5.2.7-5)$$

3) X 型阻尼器的屈后刚度与初始刚度比 α 取 0.03~0.05。

3 卡榫阻尼器

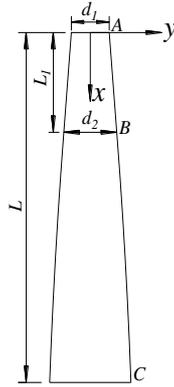


图 5.2.7-3 卡榫阻尼器设计构造尺寸

1) 卡榫阻尼器的屈服力 F_y^d 按下式计算:

$$F_y^d = \gamma F_y^i \quad (5.2.7-6)$$

式中, γ 为调整系数, 建议取 1.4, F_y^i 为阻尼器初始屈服力, 按下式计算:

$$F_y^i = \frac{\pi d_2^3 \sigma_y}{32 L_1} \quad (5.2.7-7)$$

2) 卡榫阻尼器的初始刚度 K_1^d 按下式计算:

$$K_1^d = \left[\frac{64 L_1^3}{3 E \pi d_1 (2 d_1 + d_2)^3} - \frac{192 (L_1^3 - L_1^{4/3} L^{5/3})}{5 E \pi d_2^4} \right]^{-1} \quad (5.2.7-8)$$

式中: d_1 、 d_2 、 L_1 和 L 的尺寸见图 5.2.7-3 所示, 图中 AB 为过渡段, BC 为核心段 (等屈服段)。

3) 卡榫阻尼器的屈后刚度与初始刚度比 α 为 0.03~0.04。

4 E 型钢阻尼器

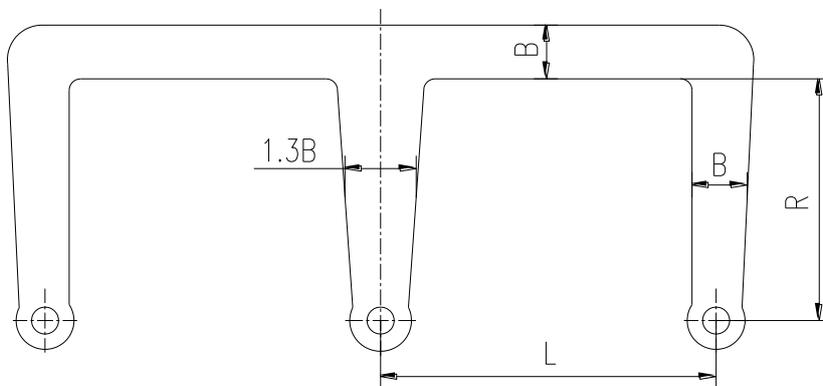


图 5.2.7-4 卡榫阻尼器设计构造尺寸

1) E 型钢阻尼器的屈服力 F_y^d 按下式计算:

$$F_y^d = \frac{1}{3} \sigma_y \frac{t(R+0.5B)^2}{R+0.5B} \quad (5.2.7-9)$$

2) E 型钢阻尼器的初始刚度 K_I^d 按下式计算:

$$K_I^d = \left[\frac{1}{3} \sigma_y \frac{t(R+0.5B)^2}{R+0.5B} \right] / \left[2\varepsilon_y \frac{R+0.5B}{B} \left(1 + \frac{2(\frac{B}{1.3B})^3 (R+0.5B)}{3L} \right) \right] \quad (5.2.7-10)$$

3) E 型钢阻尼器的屈后刚度与初始刚度比 α 为 0.03~0.05。

5.2.8 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座、叠层橡胶支座+金属阻尼器组合型减震耗能装置可采用双线性模型，其恢复力模型如图 5.2.8 所示。

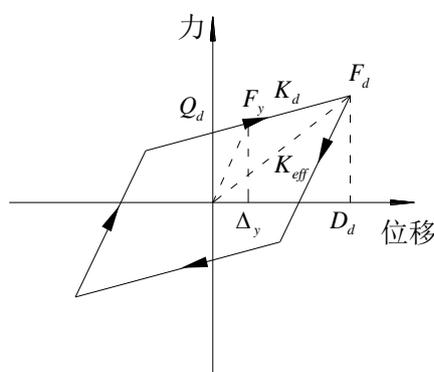


图 5.2.8 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座、叠层橡胶支座+金属阻尼器组合体系恢复力模型
其等效刚度和等效阻尼比分别为:

$$K_{eff} = \frac{F_d}{D_d} = \frac{Q_d}{D_d} + K_d \quad (5.2.8-1)$$

$$\xi_{eff} = \frac{2Q_d(D_d - \Delta_y)}{\pi D_d^2 K_{eff}} \quad (5.2.8-2)$$

式中:

D_d —— 双线性模型组合体系的水平设计位移 (m) ;

Δ_y —— 双线性模型组合体系的屈服位移 (m) ;

Q_d —— 双线性模型组合体系的特征强度 (kN) ;

K_{eff} —— 双线性模型组合体系的等效刚度 (kN/m) ;

K_d —— 双线性模型组合体系的屈后刚度 (kN/m) ;

ξ_{eff} —— 双线性模型组合体系的等效阻尼比。

1 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座组合体系

1) 双线性模型组合体系的屈服力 F_y 为滑动摩擦类支座的临界摩擦力 F_y^h ;

2) 双线性模型组合体系的初始刚度 K_i 为:

$$K_i = K_j + K_h \quad (5.2.8-3)$$

式中: K_j 为叠层橡胶支座的剪切刚度; K_h 为滑动摩擦类支座的初始刚度。

3) 双线性模型组合体系的屈服位移 Δ_y 可取滑动摩擦类支座的临界滑动位移 s_y , 即 0.003m。

4) 组合体系的屈后刚度 K_d 为叠层橡胶支座的剪切刚度, $K_d = K_j$ 。

2 叠层橡胶支座+金属阻尼器组合体系

1) 双线性模型组合体系的屈服力 F_y 为金属阻尼器屈服力 F_y^d ;

2) 双线性模型组合体系的初始刚度 K_i 为:

$$K_i = K_j + K_1^d$$

式中: K_j 为叠层橡胶支座的剪切刚度; K_1^d 为金属阻尼器的初始刚度。

3) 双线性模型组合体系的屈服位移 Δ_y 可取金属阻尼器的屈服位移 X_y^d , 按式 (5.2.5-1) 计算;

4) 双线性模型组合体系的屈后刚度 K_d 为叠层橡胶支座的剪切刚度 K_j 与金属阻尼器屈后刚度 K_2^d 之和, $K_d = K_j + K_2^d$ 。

5.2.9 滑动摩擦类支座+金属阻尼器组合型减震耗能装置可采用三线性模型, 其恢复力模型如图 5.2.9 所示。

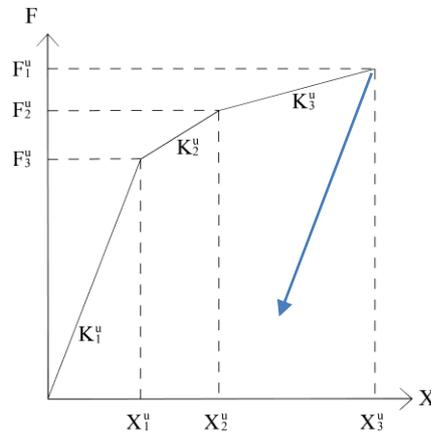


图 5.2.9 滑动摩擦类支座+金属阻尼器组合体系力学模型

1) K_1^u 为组合体系的初始刚度、卸载刚度及再加载刚度, K_1^u 可按下列式计算:

$$K_1^u = K_h + K_1^d \quad (5.2.9)$$

2) K_2^u 为第二段线性刚度, 当金属阻尼器的屈服力 F_y^d 大于滑动支座的临界摩擦力 F_y^h 时, 第二段线性的刚度 K_2^u 取金属阻尼器的初始刚度 K_1^d ; 当金属阻尼器的屈服力 F_y^d 小于滑动支座的临界摩擦力 F_y^h 时, 第二段线性的刚度 K_2^u 取滑动摩擦支座的初始刚度 K_h 。

3) K_3^u 为第三段线性刚度 (屈后刚度) 取金属阻尼器的屈后刚度 K_2^d 。

4) F_3^u 取金属阻尼器的屈服力 F_y^d 或滑动支座的临界摩擦力 F_y^h 的小值; F_2^u 取金属阻尼器的屈服力 F_y^d 和滑动支座的临界摩擦力 F_y^h 的大值。

5) X_1^u 取金属阻尼器的屈服位移或滑动支座的临界位移两者小值; X_2^u 取金属阻尼器的屈服位移或滑动支座的临界位移两者大值。

5.3 分析方法

5.3.1 采用组合型减震耗能装置的桥梁, 其水平地震力的计算可采用反应谱分析方法或非线性动力时程分析方法; 当考虑竖向地震作用时, 必须采用非线性动力时程方法。

5.3.2 对于采用滑动摩擦类支座与叠层橡胶支座组合, 叠层橡胶支座与金属阻尼器组合型减震耗能装置的桥梁结构, 当同时满足以下条件时, 可利用等效线性化方法单自由度反应谱分析方法进行抗震分析:

1 桥梁几何形状满足《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166) 或《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 对规则桥梁的要求;

2 距离最近的活动断层大于 15 km;

3 场地类型为 I、II、III 类, 且场地条件稳定;

4 采用组合型减震耗能装置桥梁结构等效阻尼比不超过 30%;

5 采用组合型减震耗能装置桥梁的基本周期 T_1 (隔震周期) 为未采用隔震桥梁基本周期 T_0 的 2.5 倍以上。

5.3.3 采用单振型反应谱法进行组合型减震耗能装置的桥梁的抗震分析时, 计算方法如下:

1 桥梁顺、横桥向的水平地震力, 可按下列公式计算:

$$E_{hp} = SM_t \quad (5.3.3-1)$$

2 梁体顺、横桥向的位移可按下列公式计算:

$$D_d = \frac{T_{eq}^2}{4\pi^2} M_t S g^2 \quad (5.3.3-2)$$

式中 S ——相应于采用组合型减震耗能装置桥梁的等效周期，采用等效阻尼比修正的反应谱值；

M_t ——一联桥梁总质量，应包含梁体、盖梁换算质量、墩身换算质量 (t)。

3 桥梁等效周期 T_{eq} (s)，可按下式计算：

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{\sum K_{eq,i}}} \quad (5.3.3-3)$$

$$\sum K_{eq,i} = \sum \frac{k_{eff,i} \cdot k_{p,i}}{k_{eff,i} + k_{p,i}} \quad (5.3.3-4)$$

式中， $K_{eq,i}$ ——第 i 个桥墩、桥台与其上部的组合型减震耗能装置等效刚度串联后的组合刚度 (kN/m)；

$k_{p,i}$ ——第 i 个桥墩、桥台的抗推刚度 (kN/m)；

$k_{eff,i}$ ——第 i 个桥墩、桥台上组合型减震耗能装置的等效刚度 (kN/m)。

4 桥梁等效阻尼比 ξ_{eq} 可根据组合型减震耗能装置的等效阻尼比 $\xi_{eff,i}$ 与桥墩等的阻尼比 $\xi_{p,i}$ ，按下式计算：

$$\xi_{eq} = \frac{\sum k_{eff,i} (D_{d,i})^2 \left(\xi_{eff,i} + \frac{\xi_{p,i} k_{eff,i}}{k_{p,i}} \right)}{\sum k_{eff,i} (D_{d,i})^2 \left(1 + \frac{k_{eff,i}}{k_{p,i}} \right)} \quad (5.3.3-5)$$

式中： $D_{d,i}$ ——地震作用下，第 i 个桥墩、桥台上组合型减震耗能装置的水平设计位移 (m)。

5.3.4 采用反应谱分析方法进行简化计算时，需要对组合型减震耗能装置的水平位移进行迭代，直到相邻 2 次迭代计算出的组合型减震耗能装置位移之差在 5% 以内。

5.3.5 采用反应谱分析方法作用在组合型减震耗能装置桥梁第 i 个墩台顶的水平地震力可按下式计算：

$$E_{ld,i} = K_{eff,i} \Delta_i \quad (5.3.5)$$

式中 $E_{ld,i}$ ——作用在第 i 个墩台顶的水平地震力 (kN)；

$K_{eff,i}$ ——第 i 个桥墩上组合型减震耗能装置的有效刚度 (kN/m);

Δ_i ——第 i 个桥墩上组合型减震耗能装置的地震水平位移 (m)。

6 抗震验算

6.1 作用效应组合

6.1.1 抗震设计应考虑如下作用：

- 1 永久作用，包括结构重力、土压力、水压力；
- 2 地震作用；
- 3 在进行支座抗震验算时，应计入 50%均匀温度作用。

6.1.2 桥梁抗震设计时的作用效应组合应包括本规程第 6.1.1 条要求的各种作用之和，组合方式应包括各种作用效应的最不利组合。

6.2 抗震验算

6.2.1 应对组合型减震装置在正常使用条件下的性能进行验算，在各种非地震水平力作用下，按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)进行组合，叠层橡胶支座应满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的相关规定，金属阻尼器的位移应小于屈服位移。

6.2.2 E2 地震作用下，桥梁墩台与基础的验算，应将组合型减震耗能装置传递的水平地震力除以 1.5 的折减系数，并考虑墩、台和承台地震水平力的贡献后，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)进行。

6.2.3 对叠层橡胶支座，E2 地震作用下产生的剪切应变应小于 250%。对严寒地区或寒冷地区，应根据低温试验相关数据确定叠层橡胶支座的容许剪切应变。

6.2.4 滑动摩擦类支座和金属阻尼器，应根据具体的产品性能指标进行验算，包括竖向承载能力、位移能力。

6.2.5 应根据 E2 地震作用下支座的受力与变形，验算允许支座变形的间隙。

7 技术要求与检验

7.1 技术要求及试验方法

7.1.1 对抗震分析中需要用到的主要力学参数，应进行试验测试验证。

7.1.2 叠层橡胶支座性能要求应符合表 7.1.2 的规定。

表 7.1.2 叠层橡胶支座性能要求

最大剪应变	实测值不应小于 300%
水平剪切刚度	实测值偏差应在产品设计值的±15%以内

7.1.3 金属阻尼器性能要求应符合表 7.1.3 的规定。同时，

表 7.1.3 金属阻尼器性能要求

屈服力	实测值偏差应在产品设计值的-10%~+10% 范围
最大位移	实测值应≥产品设计值
等效刚度	实测平均值偏差应在设计值的-10%~+10%范围
等效阻尼比	实测值应≥产品设计值
滞回曲线	实测滞回曲线应光滑饱满
阻尼元件疲劳性能	试验按设计位移加载，循环次数等于 11 次时，阻尼元件不开裂
变形强化	水平位移从 50%的设计位移增加到设计位移时，恢复力增量不宜低于其上部结构重量的 2.5%

7.1.4 应根据相关的产品标准和检测规程，对组合型减震装置的性能和特性进行检测试验。其中：

- 1 球型钢支座试验方法按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行；
- 2 盆式橡胶支座试验方法按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行；
- 3 板式橡胶支座试验方法按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。
- 4 滑动摩擦类支座（球型钢支座和盆式橡胶支座）水平滞回性能试验应按附录 A 执行。
- 5 叠层橡胶支座水平剪切刚度应按附录 B 执行。
- 6 金属阻尼元件的试验方法应按附录 C 执行。

7.2 检验

7.2.1 原材料检验

- 1 球型钢支座检验方法按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行。

- 2 盆式橡胶支座检验方法按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行。
- 3 板式橡胶支座检验方法按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。
- 4 叠层橡胶支座检验方法按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行，技术要求应符合 4.2 节规定。

5 金属阻尼器检验方法按《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591) 执行，技术要求应符合 4.3 节规定。

7.2.2 型式检验

- 1 球型钢支座检验方法按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行。
- 2 盆式橡胶支座检验方法按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行。
- 3 板式橡胶支座检验方法按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。
- 4 叠层橡胶支座和金属阻尼器有下列情况之一时，应进行型式检验：
 - 1) 新产品投产时，必须进行试制定型鉴定；
 - 2) 正常生产后，当原材料、结构、工艺等有较大改变，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) 产品停产一年以上，恢复生产时；
 - 5) 国家质量监督机构提出型式检验要求时；
 - 6) 因特殊需要应进行型式检验时。
- 5 叠层橡胶支座型式检验项目及周期应符合表 7.2.2-1 的规定。

表 7.2.2-1 叠层橡胶支座型式检验项目及周期

检验项目		试验方法	检验频次
材料	原材料及部件性能	7.2.1	不少于 2 件
	出厂检验项目	7.2.2	
成品	力学性能	7.1.2	

6 金属阻尼器型式检验项目及周期应符合表 7.2.2-2 的规定。

表 7.2.2-2 金属阻尼器型式检验项目及周期

检验项目		试验方法	检验频次
材料	原材料及部件性能	7.2.1	不少于 2 件
	出厂检验项目	7.2.2	
	阻尼元件疲劳性能	7.1.3	
成品	屈服力	7.1.4	
	阻尼特性		

7.2.3 出厂检验

- 1 球型钢支座检验方法按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行。
- 2 盆式橡胶支座检验方法按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行。
- 3 板式橡胶支座检验方法按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。
- 4 叠层橡胶支座出厂检验项目及周期应符合表 7.2.3-1 的规定。

表 7.2.3-1 叠层橡胶支座出厂检验项目及周期

检验项目		技术要求	试验方法	检验频次
叠层橡胶支座	尺寸要求	设计图纸	设计图纸、 GB/T 1804 中 m 级 和 GB/T 1184 中 L 级	100%
	性能要求	7.1.2	7.1.4	抽检不少于 20%，且不少于 1 件

- 5 金属阻尼器出厂检验项目及周期应符合表 7.2.3-2 的规定。

表 7.2.3-2 金属阻尼器出厂检验项目及周期

检验项目		技术要求	试验方法	检验频次
金属阻尼器	尺寸要求	设计图纸	设计图纸、 GB/T 1804 中 m 级 和 GB/T 1184 中 L 级	100%
	性能要求	7.1.3	7.1.4	抽检不少于 20%，且不少于 1 件

8 施工与维护

8.1 施工安装

- 8.1.1** 球型钢支座施工与安装按《桥梁球型支座》(GB/T 17955) 执行。
- 8.1.2** 盆式橡胶支座施工与安装按《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行。
- 8.1.3** 板式橡胶支座施工与安装按《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。
- 8.1.4** 叠层橡胶支座和金属阻尼器施工与安装要求如下：
- 1 装置不设预偏量，在成桥后再与梁底进行固结；
 - 2 装置顶面、底面均不设坡度；
- 8.1.5** 单个叠层橡胶支座平面面积不宜大于 2m^2 。
- 8.1.6** 与滑动摩擦类支座组合时，叠层橡胶支座顶面标高与滑动摩擦类支座顶面标高误差宜控制在 $-2\text{mm}\sim 1\text{mm}$ 。

8.2 工程验收

- 8.2.1** 材料均应符合本“技术规程”的要求。
- 8.2.2** 每套装置在验收时须有出厂合格证书。
- 8.2.3** 包装完整，外观完好无损，并提供完整的使用说明书。
- 8.2.4** 叠层橡胶支座、金属阻尼器为大桥重要的减震装置，叠层橡胶支座出厂前需提供水平剪切性能检测报告，金属阻尼器需提供阻尼元件水平疲劳性能检测报告。

8.3 装置维护

- 8.3.1** 叠层橡胶支座、金属阻尼器正常使用时，需定期对外观进行检查，如有损伤应及时修复或更换。
- 8.3.2** 地震后，叠层橡胶支座、金属阻尼器如出现表面开裂则需更换。

附录 A 滑动摩擦类支座水平滞回性能试验方法

A.1 试验条件

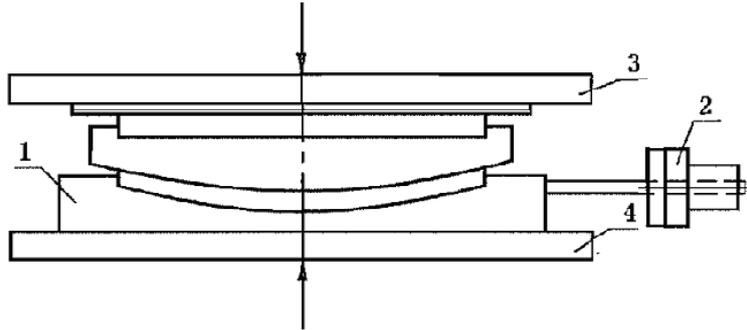
试验室的标准温度为 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

A.2 试样停放

试验前将试样直接暴露在标准温度下，停放 24h。

A.3 试验方法

按图 A.1 放置试样后，按下列步骤进行支座水平滞回性能试验。



1-试样, 2-水平加载装置, 3-上承载板, 4-下承载板

图 A.1

- 将试样按单剪组合置于试验机的承载板上，试样中心与承载板中心位置对准，偏差小于 1% 支座下座板边长。
- 将支座设计竖向荷载以连续均匀的速度加满，在整个水平滞回性能试验过程中保持不变。其预压时间为 1h。
- 正式加载。用水平位移加载装置连续匀速的施加水平位移，由专用的力传感器记录水平力大小，支座水平位移量达到设计位移值即停止，然后反向施加水平位移，直至 0mm 再反向施加水平位移直至设计位移值，试验过程连续进行 5 次，5 次得到的 5 条滞回曲线应基本重合，各条滞回曲线的最大力的最大差别应在 5% 以内。
- 以实测第五次的滞回曲线计算支座的水平滞回性能。
- 支座的滑动摩擦系数的计算公式为：

$$\mu = \frac{Q_{d1} - Q_{d2}}{2W} \quad (\text{A.1})$$

式中： Q_{d1} ， Q_{d2} ——滞回曲线正向和负向与剪力轴的交叉点，如图 A.2 所示。

W ——支座设计竖向荷载。

- 支座的滑动摩擦系数应满足 5.2.3 的要求。

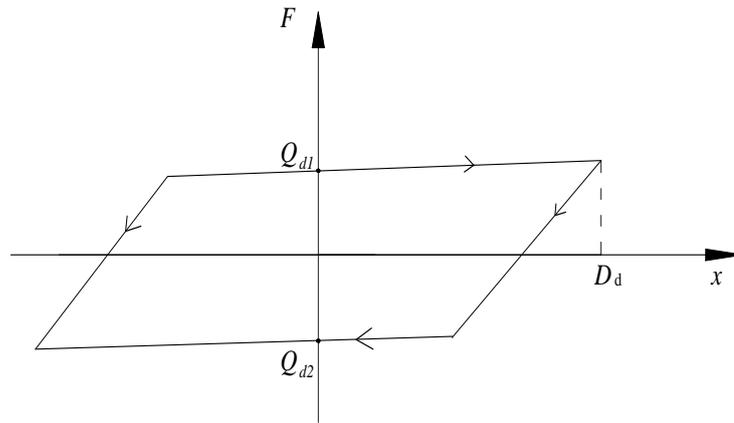


图 A.2

A.4 试验报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 试件概况描述：包括支座型号、设计承载力、转角、位移等相关参数，并附简图；
- b) 试验机性能、配置及加载速度描述；
- c) 试验过程中出现异常现象描述；
- d) 试验记录完整，并画出 5 次滞回曲线图，计算滑动摩擦系数，评定试验结果；
- e) 附试验照片。

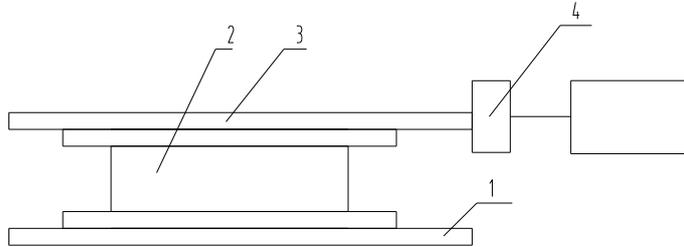
附录 B 叠层橡胶支座水平剪切刚度试验方法

B.1 试验条件与试样停放

试验条件与试样停放见 A.1 和 A.2。

B.2 试验方法

按图 B.1 放置试样后，按下列步骤进行叠层橡胶支座的水平剪切刚度试验。



1-下固定板，2-叠层橡胶支座，3-上承加载板，4-水平加载装置

图 B.1

- 将试样按单剪组合置于试验机的固定板上，试样中心与承载板中心位置对准，偏差小于 1% 支座下座板边长。
- 将支座安装完成后采用反力机构对支座进行竖向限位。
- 正式加载。用水平位移加载装置连续匀速的施加水平位移，由专用的力传感器记录水平力大小，支座水平位移量达到设计位移值（100% 变形）即停止，然后反向施加水平位移，直至 0mm 再反向施加水平位移直至设计位移值，试验过程连续进行 3 次。
- 以实测第三次的曲线计算支座的水平剪切刚度。
- 支座的水平剪切刚度的计算公式为：

$$K_t = \left[\frac{Q_1 - Q_4}{(X_1 - X_2) / 2} + \frac{Q_2 - Q_3}{(X_1 - X_2) / 2} \right] / 2$$

式中： X_1 ， X_2 ——剪切位移的最大值和最小值，如图 B.2 所示。

Q_1 ， Q_2 ， Q_3 ， Q_4 ——在滞回曲线的上、下部分，剪切位移最大值 X_1 和最小值 X_2 的 1/2 位移处(即 $X_1/2$ 和 $X_2/2$)所对应的剪力，如图 B.2 所示。

- 支座的水平剪切刚度应满足 5.2.4 的要求。

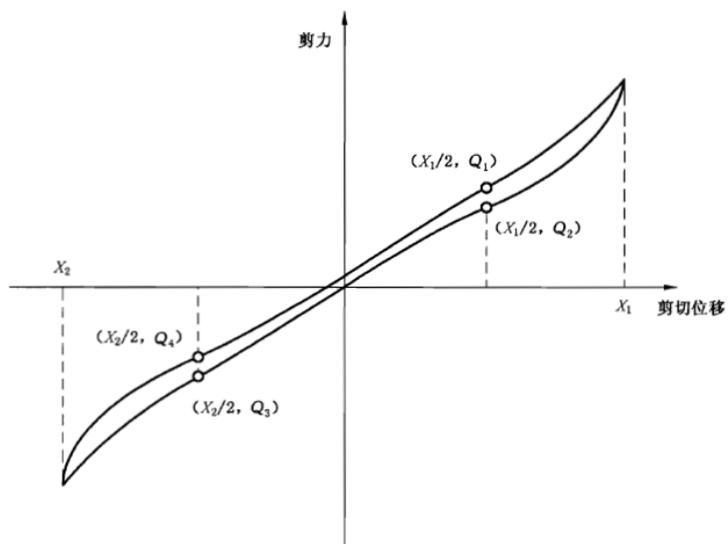


图 B.2

B.3 试验报告

试验报告应包括以下内容:

- a) 试件概况描述: 包括支座型号、设计水平承载力、水平刚度、设计位移值 (100%变形), 并附简图;
- b) 试验机性能、配置及加载速度描述;
- c) 试验过程中出现异常现象描述;
- d) 试验记录完整, 并画出 3 次滞回曲线图, 计算水平剪切刚度, 评定试验结果;
- e) 附试验照片。

附录 C 金属阻尼元件试验方法

C.1 试验条件与试样停放

试验条件与试样停放见 A.1 和 A.2。

C.2 试样要求

试验时根据金属阻尼元件类型不同，每组试样数量不同，每组成对组装。

试验用金属阻尼元件材质应符合本标准要求，相关连接部件及外形尺寸应符合设计要求。

C.3 试样数量

试样数量为三组，取三组试样试验结果平均值为该批试样试验结果。

疲劳性能试验试样数量为一组。

C.4 试验装置

试验装置应与阻尼元件在实际工作状况相吻合。阻尼元件和加载、固定板之间采用销接，用来施加载荷的销孔可随试验机移动，固定销孔仅可自由转动。

根据不同试验条件制作不同工装，但需与实际阻尼工况相吻合，避免工装本身对测试条件及测试精度造成不利影响。

C.5 试验方法

水平载荷加载采用位移控制，按正弦波循环加载，平均速度为 2mm/s。

C.6 试验要求

- a) 测试精度:± 1.0%;
- b) 阻尼元件阻尼力、阻尼位移应符合图 C.1 所示双线性恢复力模型。

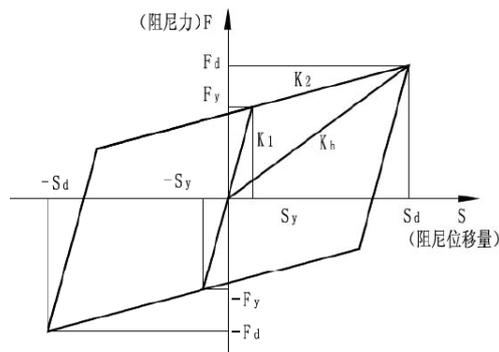


图 C.1

C.7 试验类型

C.7.1 标准位移—载荷试验

标准位移—载荷试验是测试弹塑性钢阻尼元件在设计位移条件下阻尼力

F 与位移 S 之间变化关系。该试验应按以下步骤进行，并记录相关数据：

— $\pm 0.25 S_d$ ，五次循环；

— $\pm 0.50 S_d$ ，五次循环；

— $\pm 1.00 S_d$ ，五次循环。

C.7.2 超载位移—载荷试验

超载位移—载荷试验是测试弹塑性钢阻尼元件在超出设计位移条件下的承载力。该试验加载位移按 $\pm 1.20 S_d$ (一次)进行，并记录相关数据。

C.7.3 疲劳载荷试验

疲劳性能试验荷载按 $1.00 S_d$ 设计位移持续反复加载，加载频率不应低于 0.01 Hz (不宜超过 5 Hz)，循环次数为 11 次，并记录阻尼元件开裂长度、开裂宽度等相关数据。

C.8 试验报告

C.8.1 试验结果应包含内容：

标准位移—载荷试验及超载位移—载荷试验结果应包含内容：

a) 基本参数测试结果按表 C.1 填写：

表 C.1

试验项目	F_d	S_d	K	ξ
设计值				
测试值				
最大误差 (%)				
平均值误差 (%)				

b) 阻尼元件载荷—位移图；

c) 阻尼元件等效双线性曲线 (该曲线应扣除试验装置滑动摩擦影响)；

d) 描述试验过程概况，重点记录试验过程中出现的异常现象；

e) 记录阻尼元件疲劳载荷循环次数；

f) 试验后试件损伤状态分析。

C.8.2 试验报告应包括以下内容

a) 试验装置及试验概况:试验设备、试验荷载、试验室温度，试样规格及型式等；

b) C.8.1 所包含的所有试验结果；

c) 试验结论；

d) 试样安装过程及试验过程照片等附件。

本规程用词说明

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,首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择,一定条件下可以这样做的,采用“可”。

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”。

引用标准名录

- 1 《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166)
- 2 《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01)
- 3 《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)
- 4 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)
- 5 《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363)
- 6 《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)
- 7 《桥梁球型支座》(GB/T 17955)
- 8 《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391)
- 9 《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4)
- 10 《碳素结构钢》(GB/T 700)
- 11 《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)

中国工程建设标准化协会标准

组合型桥梁减隔震结构技术规程

T/CECS XXX-XXXX

条文说明

制 定 说 明

《组合型桥梁减隔震结构技术规程》经 XXX 批准、发布。

最近十几年来，随着对地震震害的认识，国内外对桥梁采用减隔震方法来减小结构地震反应进行了大量研究和应用，开发了多种整体型减隔震支座（如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座以及摩擦摆式减隔震支座）和组合型减震耗能装置（如 E 型、X 型或三角型金属阻尼器与桥梁常规支座组合，球型支座与叠层橡胶支座组合）。我国交通行业针对整体型减隔震支座，如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座和摩擦摆式减隔震支座，编制了相应技术标准，这些技术标准促进了整体型减隔震支座在我国桥梁中的应用。但在组合型减震耗能装置方面，虽然已在一些实际桥梁中已得到应用，但目前无标准或规范可循。对组合型减震耗能装置的性能要求、检测要求不统一，阻碍了组合型减震耗能装置在实际工程的应用。编制《桥梁组合型减隔震技术规程》对于规范和促进组合型减震耗能装置在桥梁工程中的应用，减小桥梁的地震灾害，具有重要应用价值。

本规范在制定过程中，编制组进行了广泛的调查研究，认真总结了实践经验，同时参考有关国内外相关标准。为便于广大设计单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《组合型桥梁减隔震结构技术规程》编写组按照章、节、条顺序编写了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定时的参考。

目 次

1 总则.....	4
2 术语和符号.....	5
3 分类及结构形式.....	6
3.1 一般规定.....	6
3.2 分类.....	6
3.3 结构形式.....	6
4 材料及构造要点.....	7
4.1 滑动摩擦类支座.....	7
4.2 叠层橡胶支座.....	7
4.3 金属阻尼器.....	7
5 计算分析方法.....	8
5.1 一般规定.....	8
5.2 计算模型.....	8
5.3 分析方法.....	9
6 抗震验算.....	11
6.1 作用效应组合.....	11
6.2 抗震验算.....	11
7 技术要求与检验.....	12
7.1 技术要求及试验方法.....	12
7.2 检验.....	12
8 施工与维护.....	13
8.1 施工安装.....	13
8.2 工程验收.....	13
8.3 装置维护.....	13

1 总则

1.0.1 我国处于世界两大地震带即环太平洋地震带和亚欧地震带之间，是一个强震多发国家。我国地震的特点是发生频率高、强度大、分布范围广、伤亡大、灾害严重。几乎所有的省市、自治区都发生过六级以上的破坏性地震。自二十世纪八十年代以来，国外发生的强烈地震，不仅造成了人员伤亡，而且造成了极大的经济损失。突发的强烈地震使建设成果毁于一旦，引发长期的社会政治、经济问题，并带来难以慰藉的感情创伤。桥梁是生命线系统工程中的重要组成部分，为促进组合型减震耗能装置在桥梁中的应用，减小桥梁的地震灾害，特编制本规程。

1.0.2 我国现行《城市桥梁抗震设计规范》（CJJ 166-2011），《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01—2020）仅适用于抗震设防烈度为 6、7、8 和 9 度地区的新建、改建的公路及城市桥梁工程。参考这两本规范，给出了本规程的适用范围。

2 术语和符号

本章仅将本规范出现的、人们比较生疏的术语列出。术语的解释，其中部分是国际公认的定义，但大部分是概括性的涵义，并非国际或国家公认的定义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

3 分类及结构形式

3.1 一般规定

3.1.1 在地震中主要利用组合型减震耗能装置延长结构周期、耗散地震能量达到减震的目的，这就要求组合型减震耗能装置性能可靠，对环境温度变化不敏感，且震后可对这些构件进行维护。此外，为了确保组合型减震耗能装置在地震中能够发挥应有的作用，也必须对其进行定期的检查和维护。

3.1.2 组合型减震耗能装置是通过延长结构的基本周期，耗散地震能量，从而降低结构的地震力。但延长结构周期的同时，必然使得结构变柔，从而可能导致结构在正常使用荷载作用下结构发生有害振动，因此要求组合型减震耗能装置应具有一定的刚度和屈服强度，保证在正常使用荷载下（如风，制动力等）结构不发生屈服和有害振动。

3.1.3 运营荷载作用下，支座主要承受竖向荷载，而地震荷载作用下利用水平减震耗能装置减小结构地震反应，有利于震后可保持车辆运行，快速恢复交通。

3.1.4 采用组合型减震耗能装置桥梁结构梁体和支座的变形比常规桥梁大，为了确保采用组合型减震耗能装置桥梁在地震作用下的预期性能，在相邻上部结构之间应设置足够的间隙，必须对伸缩缝装置、相邻梁间限位装置、防落梁装置等进行合理的设计。

3.2 分类

3.2.1 常用的减隔震装置分为整体型和组合型两类，本规程主要适用于：（1）滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座；（2）滑动摩擦类支座+金属阻尼器；（3）叠层橡胶支座+金属阻尼器等组合型减震耗能装置。

3.2.2 由于桥梁纵向活动支座需要释放梁体的温度位移，采用与金属阻尼器所组合的耗能装置可能对梁体的温度位移产生约束，不宜在纵桥向活动支座处采用。

3.2.3 只要合理设计叠层橡胶支座的剪切刚度，滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座对梁体的温度位移约束较小，可以同时用于纵桥向和横桥向的减震设计。

3.3 结构形式

3.3.1~3.3.3 本节主要对本规程所给出的3种组合型减震耗能装置结构形式以及减震原理给出了规定和描述。

4 材料及构造要点

4.1 滑动摩擦类支座

4.1.1 在桥梁领域应用较为广泛的滑动摩擦类支座主要分为滑动型球型钢支座和滑动型盆式橡胶支座。依据支座滑动的能力和滑动的方向分为纵向活动支座、横向活动支座和双向活动支座。支座的滑动性能参数包括摩擦系数、位移、转角等，摩擦系数取值一般不大于 0.03，转角取值一般不大于 0.02rad，位移参数依据桥梁的使用环境温度变化范围、跨径、外部载荷等综合因素进行选取。

4.1.2 板式橡胶支座在正常使用情况下依靠支座本体的剪切变形适应桥梁的温度变形，地震情况下，考虑地震力的竖向作用力，板式橡胶支座抗滑移性能不足，支座与梁体支座件发生相对位移，此时，板式橡胶支座可视为滑动摩擦类支座。标准 JT/T-4 中的 GBZYH、GBZJH 也可视为滑动摩擦类支座。

4.2 叠层橡胶支座

4.2.1 叠层橡胶支座中钢板与橡胶层是相互粘合而成，钢板对橡胶层具有约束的作用，在竖向荷载的作用下，钢板束缚橡胶层一起共同承担竖向荷载，使橡胶支座具有足够的竖向承载力和刚度，当隔震支座受水平地震作用时，橡胶层能提供相当大的侧向位移且不失稳，这样就有效的消耗地震能量。

4.2.2 橡胶的性能对叠层橡胶支座的性能起到决定性因素，通常需对每批次天然橡胶的各项性能进行检测。检测的类别及指标要求见表 4.2.2。

4.2.3 封钢板及连接钢板强度影响支座与梁、墩的连接强度，本条封钢板及连接钢板强度值引用 GB 20668.2 中表 12 值。

4.3 金属阻尼器

4.3.1 对于软钢材料，主要利用材料的等强度截面性能，采用微-积数学手段，可得到不同的外形几何形状的金属阻尼器，如圆柱型、方形，具体见 5.2。依据金属阻尼器的几何结构形式，金属阻尼器可分为 C 型、三角板、X 型、卡榫、E 型等几类。该类阻尼器均运用软钢金属的弹塑性性能，且能承受正常载荷，地震情况下通过弹塑性变形耗散能量。

4.3.2 金属材料的性能直接影响金属阻尼器的性能，特别是材料的伸长率及冲击功，材料不得采用脆性材料，且冲击功应符合表 4.3.2 要求。

5 计算分析方法

5.1 一般规定

5.1.1 对于采用组合型减震耗能装置设计的减隔震桥梁，即使在 E2 地震作用下，桥梁的耗能部位主要位于组合型减震耗能装置；上部结构、桥墩和基础不受损伤、基本在弹性工作范围，因此没有必要再进行 E1 地震作用下的抗震设计和验算。

5.1.2 对于采用组合型减震耗能装置设计的减隔震桥梁，在满足正常使用功能要求的前提下，主要利用组合型减震耗能装置延长结构周期、消耗地震能量，降低结构地震响应。因此，对于采用组合型减震耗能装置设计的减隔震桥梁，最重要的因素就是设计合理、可靠的组合型减震耗能装置并使其在结构抗震中充分发挥作用，使桥梁结构的大部分耗能、塑性变形应集中于这些装置，允许这些装置在 E2 地震作用下发生大的塑性变形和存在一定的残余位移，而结构其它构件的响应基本为弹性。

5.2 计算模型

5.2.1 由于采用组合型减震耗能装置桥梁地震响应对伸缩装置、挡块等防落梁装置和桩土相互作用效应比较敏感，因此宜取全桥模型进行分析，并考虑伸缩装置、桩土相互作用等因素的影响。

5.2.2 当组合型减震耗能装置中有叠层橡胶支座时，由于橡胶支座的力学特性受温度，特别是低温的影响较大，需要考虑低温对组合型减震耗能装置中叠层橡胶支座力学特性的影响，进行低温条件下的抗震分析和验算。

5.2.3、5.2.4 本条直接引用《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011) 相关规定。

5.2.5 一般情况下，金属阻尼的恢复力模型可以用双线性模型代表，其主要设计参数有：屈服强度、初始刚度屈服位移和屈后刚度，根据这些参数可以计算减隔震装置在地震作用下的位移，可以计算等效刚度和等效阻尼比。

5.2.6、5.2.7 金属阻尼器主要是由各种不同的金属材料(如软钢、低屈服点钢等)制成，利用金属材料屈服产生滞回变形来耗散能量。金属阻尼器具有良好的耗能能力和变形能力，其滞回曲线呈纺锤形。加载频率和循环次数对其耗能性能影响较小，工作性能稳定，耐久性能良好。目前常用的金属阻尼器有三角形板钢阻尼器、X 形板钢阻尼器、卡榫阻尼器和 E 型钢阻尼器。一般情况下，可采用试验方法或有限元分析方法得到金属阻尼器的设计参数，如屈服力、初始刚度、屈后刚度与初始刚度比等。采用有限元应根据所采用钢的实际应力-应变关系进行计算。

但是为了方便实际应用，本规范根据三角形阻尼器、X形板阻尼器、卡榫阻尼器和E型钢阻尼器受力特点，给出了这几种金属阻尼器屈服力、初始刚度的计算公式；并结合试验结果建议了这几种金属阻尼器屈后刚度与初始刚度比的取值范围。

5.2.8 滑动摩擦类支座+叠层橡胶支座、叠层橡胶支座+金属阻尼器组合型减震耗能装置的屈服力分别为滑动摩擦类支座的临界摩擦力或金属阻尼器屈服力，初始刚度为两者之和，屈后刚度为叠层橡胶支座的剪切刚度。

5.2.9 滑动摩擦类支座+金属阻尼器组合型减震耗能装置力与位移关系可用本规程图 5.2.9 的 3 线性模型来代表。第一段线性的刚度为金属阻尼器与滑动摩擦类支座的初始刚度之和，第二段线性的刚度主要与金属阻尼器的屈服力和滑动支座的临界摩擦力的大小有关，第三段刚度为金属阻尼器屈后刚度。

5.3 分析方法

5.3.1 采用组合型减震耗能装置设计的减隔震桥梁，其抗震分析方法可以参考减隔震桥梁的抗震分析方法。由于弹性反应谱分析方法比较简洁，并己为大多数设计人员所熟悉，且在一定条件下，使用该分析方法进行减隔震桥梁的分析仍可得到较理想的计算结果，尤其在初步设计阶段，可帮助设计人员迅速把握结构的动力特性和响应值。因此，它仍是减隔震桥梁分析中一种十分重要的分析方法。但由于目前大多数减隔震装置的力学特性是非线性的，必须借助于等效线性化模型才能采用反应谱分析方法。由于减隔震装置的非线性特性，在分析开始时，减隔震装置的位移反应是未知的，因而其等效刚度、等效阻尼比也是未知的，所以弹性反应谱分析过程是一个迭代过程。但当考虑竖向地震作用时，由于竖向地震会引起组合型减震耗能装置所承受竖向力较大的变化，从而引起摩擦力较大的变化，应采用非线性动力时程分析方法。

5.3.2 对于比较规则的减隔震桥梁，其地震反应可以用单自由度模型代表，可采用单自由度反应谱分析。但一定要注意，反应谱方法计算时，应采用等效刚度、等效阻尼比。

5.3.3~5.3.5 由于减隔震装置的非线性性能，采用单振型反应谱法分析时，减隔震装置的等效刚度、等效阻尼比随减隔震装置变形不同而变化，因此，当考虑减隔震装置的非线性滞回特性时需要用迭代法来求解地震反应。此外，目前规范大多

数是针对普通桥梁的抗震设计给出设计谱的规定，即设计谱是针对阻尼比为 5% 给出的。但对于减隔震桥梁，减隔震装置处的耗能能力大，而其它耗能机理所耗能量相对比较少，导致整个体系耗能能力不再均匀，因此，减隔震桥梁各振动周期对应阻尼比是不相同的，基本周期(有时称为隔震周期)的阻尼比一般比较大，约 10%~20%，有时甚至更高，这就要求在反应谱分析过程中一方面要考虑不同振型采用不同的阻尼比，另一方面需考虑不同阻尼比对反应谱值的修正。

在采用单自由度反应谱分析时，具体求解过程为：

- (1) 假设上部结构(梁体)的位移初始值 D_0 ；
- (2) 按条文中式(5.3.3-4)计算等效刚度；
- (3) 按条文中式(5.3.3-3)计算等效周期；
- (4) 按条文中式(5.3.3-5)计算等效阻尼比；
- (5) 根据等效阻尼比，修正反应谱，得到相应于等效阻尼比的加速度反应谱；
- (6) 由条文中式(5.3.3-2)计算梁体位移 D_d ；
- (7) 比较假设的 D_0 和计算出的 D_d ，如两者相差大于 5%；则重新假设梁体位移 $D_0 = D_d$ ，返回到第二步进行迭代；直至假设的 D_0 和计算出的 D_d 相差在 5% 以内；
- (8) 按条文中式(5.3.5)计算减隔震桥梁顺桥向、横桥向的水平地震力。

6 抗震验算

6.1 作用效应组合

6.1.1、6.1.2 本条直接引用《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)相关规定。

6.2 抗震验算

6.2.1 虽然组合型减震装置可以通过延长结构的基本周期,避开地震能量集中的范围,从而降低结构的地震力。但正常使用条件下,组合型减震装置一定要满足相关规范的要求,需要按相关规范对组合型减震装置进行验算。

6.2.2 本条直接引用《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)相关规定。

6.2.3~6.2.5 由于减隔震装置是减隔震桥梁中的重要组成部分,必须具有预期的性能要求。因此,必须进行抗震验算。

7 技术要求与检验

7.1 技术要求及试验方法

7.1.1 抗震分析所用的力学参数主要包含水平刚度、水平位移，以试验的方式进行验证。

7.1.2 本条叠层橡胶支座剪切应变参照 GB 20668.2 中表 2 极限性能分类，采用包络取值的方法，取各种竖向压应力下的最大剪应变最低要求，即 300%。

7.1.3 金属阻尼元件疲劳性能要求引用 JT/T 843 中 5.2.1 条。强化变形是在阻尼元件在拉伸至极限状态下极限抗拉力为设计承载力的 150%，这是由材料的性能所决定的。

7.1.4 该条中规定了各类组合产品的对应项检测标准依据，其中滞回曲线的测试应按本标准中附录 A 执行。

7.2 检验

7.2.1 支座材料的检验参照《桥梁球型支座》(GB/T 17955)、《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391)、《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。对每炉批或者每张钢板、每炉胶料进行检查，可对材料的性能进行精确控制，保证叠层橡胶支座及金属阻尼器的力学性能，这是必须要进行的。

7.2.2 支座的型式检验参照《桥梁球型支座》(GB/T 17955)、《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391)、《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。对于叠层橡胶支座及金属阻尼器，成品的力学性能应符合本标准 7.1.2、7.1.3、7.1.4 条要求。

7.2.3 支座的出厂检验参照《桥梁球型支座》(GB/T 17955)、《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391)、《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行。对于叠层橡胶支座及金属阻尼器，其性能应符合本标准 7.1.2 及 7.1.3 条要求。

8 施工与维护

8.1 施工安装

8.1.1~8.1.3 球型钢支座、盆式橡胶支座、板式橡胶支座施工与安装已经比较成熟，分别按《桥梁球型支座》(GB/T 17955)、《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391) 执行、《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4) 执行即可。

8.1.4 叠层橡胶支座和金属阻尼器由于实际应用还不太广泛，应结合现场施工经验与构件性能进行施工。叠层橡胶支座和金属阻尼器宜在成桥后安装，在垫石处预留调整空间，适应上部结构，可降低施工难度，保证安装精度。

8.1.5 依据各生产厂家的设备生产能力状况及硫化工艺水平，单个叠层橡胶支座平面面积不宜大于 2m^2 。支座要求尺寸大于 2m^2 ，可做拼接处理，拼接后各个支座为串联型式，对支座竖向及水平性能基本无影响。

8.1.6 由于叠层橡胶支座仅承担水平荷载，不承担竖向荷载，所以叠层橡胶支座与滑动摩擦类支座组合时，顶面标高与滑动摩擦类支座顶面标高误差宜控制在 $-2\text{mm}\sim 1\text{mm}$ 。

8.2 工程验收

8.2.1~8.2.3 产品的验收除现场安装验收外，还应包括外观检查、资料的核对验收，资料主要包括组成产品的材料质量证明文件、出厂合格证等。

8.2.4 叠层橡胶支座、金属阻尼器的减震性能主要由水平剪切性能、阻尼元件水平疲劳性能决定，这些性能应在出厂时进行检测，并提供相应的报告。

8.3 装置维护

8.3.1 叠层橡胶支座、金属阻尼器正常使用时需定期检查，检查的重点是外观检查。检查叠层橡胶支座有无开裂、金属阻尼器有无较大的变形，裂纹等病害。如有损伤应及时修复或更换。。

8.3.2 在地震后，需对金属阻尼器各个零部件进行逐一检查，如表面未出现裂缝、严重的变形等，可采用外部加载复位后继续使用。若有裂纹或严重变形，则需进行专家评审是否需要更换，并制定更换的方案。叠层橡胶支座震后主要检查支座本体有无开裂，螺栓是否发生断裂。支座无损伤，可继续使用，若有裂纹，则需进行专家评审是否需要更换，并制定更换的方案。