



铁路科技图书出版基金

桥梁减震、隔震支座和装置

■ 庄军生 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

桥梁减震、隔震支座和装置

庄军生 编著

中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书在介绍了我国桥梁支座的发展现状的基础上,介绍了国内外有关桥梁支座的减震、隔震技术,及其在工程中的使用情况。重点介绍了刚性连接抗震装置,速度相关型减震、隔震装置,弹塑性钢减震、隔震装置,铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座,摩擦摆式隔震支座等的构造特点和性能检验要求,及其在我国桥梁工程中的应用情况。本书可供从事结构设计、施工及研究的工程技术人员、大专院校有关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁减震、隔震支座和装置/庄军生编著. —北京:
中国铁道出版社, 2012. 4
ISBN 978-7-113-14277-3

I. ①桥… II. ①庄… III. ①桥梁支座—减振装置
IV. ①U443.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 026366 号

书 名:桥梁减震、隔震支座和装置
作 者:庄军生

策划编辑:许士杰
责任编辑:徐 艳 电话:51873193 电子信箱:xy810@eyou.com
封面设计:崔 欣
责任校对:王 杰
责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址:<http://www.tdpress.com>
印 刷:北京铭成印刷有限公司
版 次:2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷
开 本:850mm×1168mm 1/32 印张:7 字数:181千
印 数:1~3000册
书 号:ISBN 978-7-113-14277-3
定 价:26.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。
电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

《桥梁支座》一书自1994年出版以来,已先后发行了三版。该书主要介绍了在我国公路、铁路桥梁上常用的各种支座类型的构造特点、设计、加工制造和施工安装等方面的技术内容。近年来,随着我国地震的频繁出现,尤其是发生四川汶川地震后,我国的抗震设计规范,将减震、隔震设计概念引入桥梁设计之中,结构延性设计和采用减震、隔震支座的隔震设计已逐渐在桥梁结构设计中得到应用,常规的桥梁支座已经无法满足地震区桥梁设计的需要。各种类型的减震、隔震支座和装置逐渐在我国得到应用,如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、摩擦摆式隔震支座、弹塑性钢阻尼装置和速度阻尼器等。但迄今为止,国内尚没有一本专业的书籍较为详细地介绍减震、隔震支座和装置,工程技术人员只能从国外零星的产品广告中了解相关产品性能的一些信息。为此,有必要编著一本较为详细的减震、隔震支座和装置方面的专业技术书籍,以供设计人员参考。

《桥梁减震、隔震支座和装置》是在《桥梁支座》一书的基础上,总结了国内减震、隔震支座的发展现状,参考国外现有的相关资料,如:欧洲标准 EN 15129—2009《减震、隔震装置》、国际标准化委员会 ISO 11762:2005《隔震橡胶支座》、日本标准《道路桥支承便览》和美国 AASHTO:1998《地震隔震设计指南》等标准编制而成。

《桥梁减震、隔震支座和装置》一书,介绍了国内外桥梁减震、隔震支座和装置的发展现状,桥梁减震、隔震支座和装置的基本性能要求及检测。常用的桥梁减震、隔震支座和装置的类型可以根据其工作原理区分为:刚性连接装置,速度相关型减震、隔震装置,弹塑性钢减震、隔震装置,铅芯橡胶支座,高阻尼橡胶支座,摩擦摆式隔震支座和防落梁装置等。书中重点介绍了各种减震、隔震支座的本构关系、主要性能(等效水平刚度和等效阻尼比)的确定及表达方式,隔震装置的隔震效果分析和各种减震、隔震支座和装置的性能检验方法。各种隔震装置的性能检验要求,包括了装置的型式检验、生产过程检验和出厂验收检验等方面的内容。上述性能检验要求,为在工程上使用性能合格的减震、隔震支座(装置)提供了可靠的保证。本书还简单地介绍了地震防落梁装置,以及在铁路桥梁和轨道交通桥梁上使用减震、隔震支座应该注意的一些问题。

在本书编写过程中,中交第一公路勘察设计研究院有限公司葛胜景、王伟等,提供了有关弹塑性钢减震、隔震装置和高阻尼橡胶支座的大量资料,在此深表感谢!

《桥梁减震、隔震支座和装置》可供从事结构设计、施工及研究的工程技术人员、大专院校有关专业师生参考使用。

庄军生

二〇一一年十一月

目 录

第一章 概 述	1
第二章 国内外桥梁减震、隔震支座的发展	10
第一节 我国桥梁减震、隔震支座的发展	10
第二节 国外常用的桥梁减震、隔震支座	13
第三节 桥梁减震、隔震支座的分类	21
第三章 桥梁减震、隔震支座基本性能要求及检测	24
第一节 桥梁减震、隔震支座基本性能要求	24
第二节 桥梁减震、隔震支座的性能变异	27
第三节 桥梁减震、隔震支座性能检测	33
第四章 刚性连接装置	43
第一节 永久连接装置	43
第二节 熔断保护装置	44
第三节 临时(动态)连接装置	45
第五章 速度相关型减震、隔震装置	56
第六章 弹塑性钢阻尼装置	64
第一节 概 述	64
第二节 E型钢阻尼器	67
第三节 弧型钢阻尼器	70
第四节 短刚臂钢阻尼器	73
第五节 弹塑性钢阻尼器的性能要求及其检验	77
第七章 铅芯橡胶支座	94
第一节 概 述	94

第二节	铅芯橡胶支座设计基本参数	99
第三节	铅芯橡胶支座设计实例	104
第四节	铅芯橡胶支座的性能检验	108
第五节	铅芯橡胶支座的减震、隔震分析	118
第八章	高阻尼橡胶支座	121
第一节	概 述	121
第二节	高阻尼橡胶支座设计基本参数	123
第三节	高阻尼隔震橡胶支座设计实例	126
第四节	高阻尼橡胶支座的基本性能要求	131
第五节	高阻尼橡胶支座的性能检验	134
第六节	国内外橡胶隔震支座的设计计算方法	142
第七节	橡胶减震、隔震支座的研究与开发	158
第八节	我国高阻尼隔震橡胶支座的研究现状	162
第九章	摩擦摆式隔震支座	167
第一节	概 述	167
第二节	摩擦摆式减震、隔震支座设计基本参数	168
第三节	摩擦摆式减震、隔震支座的结构形式	184
第四节	摩擦摆式减震、隔震支座的应用	188
第五节	摩擦摆式减震、隔震支座的性能检测	198
第十章	地震防落梁装置	202
第十一章	铁路桥梁减震、隔震支座的特点	208
参考文献		214

第一章 概 述

桥梁支座是连接桥梁上部结构与下部结构的重要部件,它能够将桥梁上部结构的反力和变形(位移和转角)可靠地传递给桥梁的下部结构,从而使结构的受力情况与理论计算图式相符合。

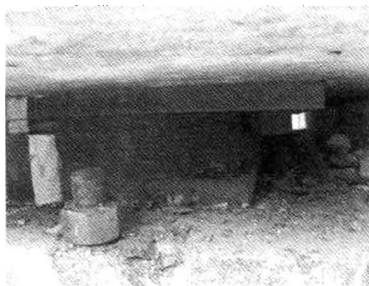
桥梁支座必须满足以下功能要求。首先桥梁支座必须具有足够的承载能力,以保证安全可靠地传递支座反力(垂直力和水平力)。其次支座对桥梁变形(位移和转角)的约束应尽可能地小,以适应梁体自由伸缩和转动的需要。此外桥梁支座还应便于安装、养护和维修,并在必要时进行更换。

自 20 世纪 70 年代以来,中国铁道科学研究院对桥梁支座进行了系统的研究,先后研究开发了盆式橡胶支座、板式橡胶支座和球型钢支座等多种形式的支座,并在我国公路、铁路桥梁上广泛应用。盆式橡胶支座和球型钢支座已经成为我国铁路桥梁上应用最为广泛的支座类型,不仅用于普通铁路桥梁,而且大量应用于铁路客运专线的桥梁支座。所有的桥梁支座在设计中均考虑了地震检算,按抗震设计的概念,一般均是根据地震加速度峰值,由支座锚栓的剪切来承受全部地震力,并未考虑地震消能的相应措施,因此,一旦发生特大地震,容易造成支座部件或支座锚栓被剪坏等现象。

桥梁支座是桥梁抗震的薄弱部位,当上部结构传来的惯性力大于桥梁支座的强度时,震害极为普遍。破坏形式主要表现为支座锚固螺栓拔出剪断、活动支座脱落及支座本身构造上的破坏。

汶川大地震发生后,宝成铁路上有不少桥梁发生支座锚栓剪断或支承压石被剪坏,给地震后桥梁的恢复带来了困难。图 1-1 为宝成铁路金龟岩大桥(53 m + 2 × 88 m + 53 m)桥梁支座震后破坏的情况。该桥的固定支座锚栓全部剪断,纵向活动支座的侧向挡板也几乎全部剪断,梁体发生横向位移(约 20 mm),给恢复支

座的原有功能带来很大困难。如何保证在发生地震时桥梁支座的工作性能,使桥梁支座不破坏或尽量少破坏,并在地震后能尽快恢复支座的功能,是当前急需研究的一个课题。



盆式橡胶支座纵向活动支座侧向挡块剪掉 盆式橡胶支座固定支座锚栓全部齐根剪断

图 1-1 宝成铁路金龟岩大桥(53 m+2×88 m+53 m)

桥梁支座震后破坏情况

常用的 32 m 简支 T 梁发生摇轴支座下支承垫石混凝土剪坏,见图 1-2。铰轴支座在铰轴处发生横向错位,见图 1-3。图 1-4 为日本某桥支座本体破坏的情况。图 1-5 为日本某桥梁体与支座滑落的情况。

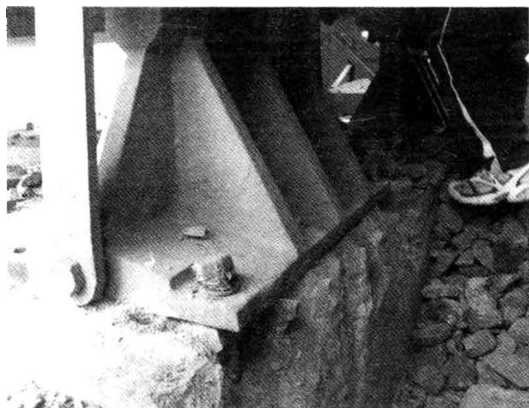


图 1-2 宝成铁路 32 m 简支 T 梁支座震后破坏情况

汶川地震桥梁支座的破坏情况,给地震区铁路桥梁支座的设



图 1-3 铰轴支座在铰轴处发生横向错位

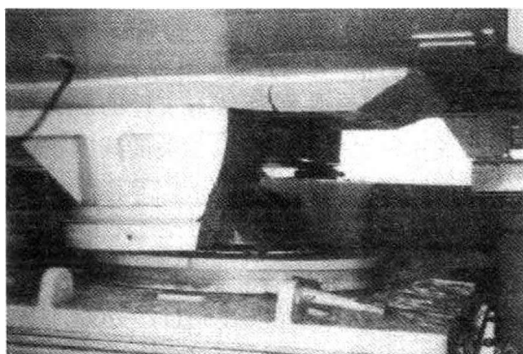


图 1-4 日本某桥支座本体破坏



图 1-5 日本某桥梁体与支座滑落

计提出了以下值得思考的问题。首先,桥梁支座的部件和锚螺栓在地震中发生剪切破坏后如何恢复。其次,支座采用的抗震设计理念是否合理。一方面,支座的锚螺栓几乎无法承受如此强大的地震力。另一方面,即使支座锚、螺栓不被剪断,则强大的地震力将全部作用在桥墩上,将会引起桥墩的开裂或破坏。因此,国内外不少学者提出减震、隔震支座的观念,通过在桥梁支座上采取必要的减震、隔震构造,使桥梁梁体在地震时可在支座上发生一定的位移,消减地震能量,但不发生落梁,从而可以减小地震力对桥梁墩、台的作用。减震、隔震支座是地震区桥梁支座设计中必须考虑的一种设计理念。

自汶川地震后,桥梁的减震、隔震设计得到重视,我国先后修订了公路、铁路桥梁的抗震设计规程,对桥梁支座的减震、隔震提出了相应的要求,为我国桥梁减震、隔震支座的发展提供了良好的契机。近年来交通系统已经着手编制相关的减震、隔震支座标准,如公路桥梁铅芯橡胶隔震支座、公路桥梁高阻尼橡胶隔震支座和弹塑性钢隔震支座等。

我国公路、铁路桥梁设计依据的抗震规程主要有:

- (1) 铁路工程抗震设计规程(GB 50111—2006)^[1];
- (2) 公路桥梁抗震设计细则(JTG/TB 02—01—2008)^[2]。

国外采用的抗震设计可参考以下标准:

- (1) 结构抗震设计 桥梁设计篇(EN 1998—2)^[3];
- (2) 日本道路桥设计示方书 第Ⅴ篇 抗震设计篇^[4]。

根据《铁路工程抗震设计规程》(GB 50111—2006),铁路桥梁抗震按三阶段设计,即:

- (1) 多遇地震(50年):地震后不损坏或轻微损害,能够保持正常使用功能,结构处于弹性工作阶段;
- (2) 设计地震(475年):地震后可能损害,经修复,短期内能恢复正常使用功能,结构整体处于非弹性工作阶段;
- (3) 罕遇地震(2475年):地震后产生较大破坏,但不出现整体倒塌,经抢修后可限速通过,结构处于弹塑性工作阶段。

根据以上要求,铁路桥梁的减震、隔震支座应满足以下安全性要求:

(1)在多遇地震作用下,桥梁结构的抗震安全应满足《铁路工程抗震设计规程》(GB 50111—2006)的要求,减震、隔震支座的耗能机构不应影响结构的正常使用功能。

(2)在设计地震作用下,桥梁连接构件的抗震安全应满足《铁路工程抗震设计规程》(GB 50111—2006)的要求,减震、隔震支座的位移锁定装置得到释放,耗能作用在地震中得到有效发挥,支座的地震位移小于容许位移。

(3)在罕遇地震作用下,结构的抗震性能应满足以下要求:

1)桥墩的延性比 μ_u 满足《铁路工程抗震设计规程》(GB 50111—2006)的相关要求,隔震桥梁钢筋混凝土桥墩的容许延性比 $[\mu_u]$ 取 2.4;

2)减震、隔震支座的最大位移必须小于装置的容许位移;

3)减震、隔震支座与桥梁之间连接构件的强度满足安全要求。

当前,铁路桥梁上建议可采用的减震、隔震支座主要有:软钢阻尼支座、黏滞阻尼器、速度锁定支座、铅芯橡胶支座和摩擦摆式支座等。

公路桥梁根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB 02—01—2008),按两阶段设计,即:

E1:地震超越概率为 475 年一遇;

E2:地震超越概率为 2000 年一遇。

对应两个阶段桥梁抗震设防类别的设防目标见表 1-1。

表 1-1 公路桥梁抗震设防类别的设防目标

桥梁抗震 设防类别	设 防 目 标	
	E1 地震作用	E2 地震作用
A 类	一般不受损害或不需要修复可继续使用	可发生局部轻微损伤,不需要修复或经简单修复可继续使用
B 类	一般不受损害或不需要修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤,经临时加固后可供维持应急交通使用

续上表

桥梁抗震 设防类别	设 防 目 标	
	E1 地震作用	E2 地震作用
C 类	一般不受损害或不需要修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤,经临时加固后可供维持应急交通使用
D 类	一般不受损害或不需要修复可继续使用	

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB 02—01—2008)提出了桥梁减震、隔震设计的要求,并对在什么条件下可以采用减震、隔震设计做了规定。满足下列条件之一的桥梁,可以采用减震、隔震设计:

- (1) 桥墩为刚性墩,桥梁的基本周期比较短。
- (2) 桥墩高度相差较大。
- (3) 桥址的预期地面运动特性比较明确,主要能量集中在高频段时。

存在以下情况之一的桥梁,不宜采用减震、隔震设计:

- (1) 地震作用下,场地可能失效。
- (2) 下部结构刚度小,桥梁的基本周期比较长。
- (3) 位于软弱场地,延长周期可能引起地基与桥梁共振。
- (4) 支座中可能出现负反力时。

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB 02—01—2008)中,对减震、隔震装置的设置原则规定如下:

(1) 减震、隔震设计的桥梁应分别对 E1 和 E2 地震作用进行设计和检算。

(2) 减震、隔震设计的桥梁应满足正常使用条件的要求,相邻上部结构之间必须在桥台和桥墩之间设置足够的间隙,以满足地震位移的要求。

(3) 减震、隔震设计的桥梁,其基本周期原则上应为不采用隔震装置时基本周期的 2 倍以上。

(4)减震、隔震桥梁抗震分析时,可分别考虑顺桥向和横桥向的地震作用。位于地震设防烈度8度和9度区的桥梁,应考虑竖向地震效应和水平地震效应的不利组合。

(5)减震、隔震装置的结构宜尽可能简单、性能可靠,应在性能明确的范围内使用,并进行定期的维护和检查;应考虑减震、隔震系统的可更换性要求。

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB 02—01—2008)中还推荐了3种减震、隔震装置:

- 铅芯橡胶支座;
- 高阻尼橡胶支座;
- 摩擦摆式隔震支座。

欧洲标准 EN 1998—2《结构抗震设计 桥梁设计篇》对地震区的桥梁按破坏极限状态(USL)和使用极限状态(SLS)进行两阶段设计。

在破坏极限状态(USL)要求桥梁不倒塌:

(1)设计地震发生后,桥梁应保证结构完整和具有足够的剩余抗力,但允许桥梁一些部件可能发生显著破坏。

(2)强震地区不设隔震装置时,桥墩中允许产生塑性铰。

(3)桥梁上部结构除伸缩缝、连接板或拉杆等局部二次构件外,通常应避免破坏。

(4)在桥梁使用寿命中,设计地震作用有较大超越概率发生时,设计目标应是允许结构破坏,可以设置能量耗散的桥梁部分构件。桥梁在设计地震作用后,应允许紧急交通使用,并容易修复。

(5)在桥梁使用寿命中,设计地震作用有较低超越概率发生时,上述第(3)、第(4)项的要求可以放松。

(6)在使用极限状态(SLS)下要求桥梁损害最小化:具有较高发生概率的地震作用可以引起次要构件以及能量耗散部件有较小的破坏,所有桥梁部件应保持不损害。

综上所述,地震区桥梁结构设计中基本上遵循“小震不坏,中震可修,大震不倒”的原则,为此在桥梁结构设计中引入了延性设

计的概念。桥梁结构设计中或者考虑在桥墩处形成塑性铰,或者通过在桥梁与桥墩之间的支座部位设置减震、隔震支座,增加桥梁结构的延性,以耗散地震的能量。地震中桥墩混凝土形成塑性铰后,结构延性增加,但将给地震后的修复工作带来很大的难度和工作量。而采用减震、隔震支座时,地震后减震、隔震部件可能损害,桥梁整体不会倒塌,地震后的修复工作相对比较容易,必要时可以更换支座。因此,采用减震、隔震支座是一种切实可行的减震方法。

桥梁采用减震、隔震支座时,应该遵循以下基本原则:

(1)减震、隔震支座必须能满足支座正常使用状态(非地震时)的功能,即能保证可靠地传递荷载(垂直力和水平力),能保证支座的转动和位移不受约束。

(2)减震、隔震支座减小地震响应的作用可通过以下功能来实现:

- 1)延长结构基本周期,减小力的作用,但增加支座位移;
- 2)增加阻尼,可以减小支座位移,也可以减小力的作用;
- 3)通过延长结构基本周期和增加阻尼两项效应组合,既延长结构基本周期又增加阻尼。

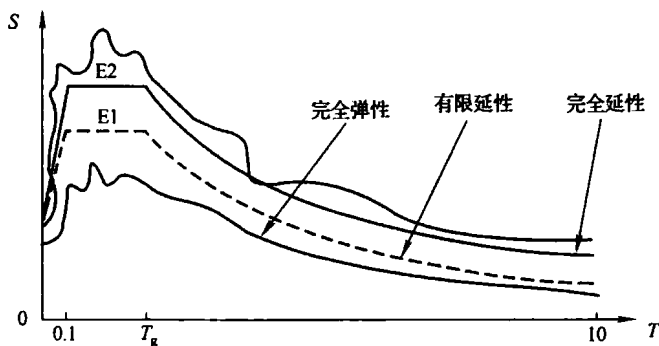


图 1-6 我国地震设计规范规定的标准地震反应谱

图 1-6 为我国地震设计规范规定的标准地震反应谱。由图可见,随着结构周期的延长,地震响应加速度减小,因此延长结构

基本周期可以减小地震对结构的作用力。

(3)采用减震、隔震支座后,隔震系统应满足相应抗震规程各个阶段的隔震要求:

1)上、下部结构在设计地震作用下的地震响应,假定为是有限延性的。

2)由于位移能力对桥梁的安全性起关键作用,应比隔震系统的强度和整体性有更高的可靠度,因此要按提高的设计位移 D_1 来设计隔震支座,设计位移的增大系数 $\gamma = 1.5$ 。

隔震系统在各个方向的最大总位移,应在设计位移 D_1 的基础上加上以下附加位移:永久作用位移、上部结构的位移(混凝土收缩、徐变,后张预应力混凝土弹性压缩)和50%温度变形。

各类减震、隔震支座的设计性能均应经过型式检验和质量控制检验。

第二章 国内外桥梁减震、隔震支座的发展

第一节 我国桥梁减震、隔震支座的发展

我国桥梁支座的发展开始于 20 世纪 60 年代,在传统的钢支座基础上,先后研发了板式橡胶支座、盆式橡胶支座和球型钢支座等,并在公路、铁路桥梁上广泛应用。但当时支座的设计采用“静力设计”的理念,对于地震区的桥梁支座所承受的水平力,根据地震动峰值加速度乘以结构自重来确定,按静力法计算支座本体及锚螺栓的抗剪强度。按此方法设计,当地震动峰值加速度较大时,支座所承受的地震水平力很大,有时可以达到支座竖向力的 30% ~40%,此时仅仅依靠加大支座本身的结构尺寸,“硬抗”地震力,无论对支座本身还是对桥墩的受力,都是不利的。最好的解决办法是通过设置减震、隔震支座,既改善支座本身的受力,又改善桥墩的受力状态。

为了改善桥梁支座的抗震性能,自 20 世纪 80 年代以来,在我国公路、铁路桥梁上,先后也采用过一些减震、隔震支座。常见的抗震支座有抗震型盆式橡胶固定支座、铅芯橡胶支座和摩擦摆式隔震支座等^[5]。

一、抗震型盆式橡胶固定支座

1988 年大桥局在设计钱塘江第二大桥时,由于钱塘江二桥为 45 m + 65 m + 14 × 80 m + 65 m + 45 m 的 18 孔预应力混凝土箱型连续梁桥,全桥长 1 340 m,仅在全桥中间设两个固定桥墩,全桥的纵向水平地震力将通过设置在固定墩上的两个固定支座和各活动墩上的支座摩阻力来承担,造成全桥固定支座处的纵向水平力很大,为此在桥梁设计中除设置必要的抗震挡块外,采用了抗震型盆