

# 中美日桥梁减隔震设计规范的比较研究

石 岩<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 孙治国<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 为推动国内桥梁减隔震技术发展和促进相关规范完善, 对中国、日本、美国等减隔震设计规范的发展历程、抗震设防目标、抗震设计和分析方法、构造措施及细节等进行对比分析, 介绍了减隔震装置(支座)的性能要求和特性试验和原型试验技术要点。认为宜进一步在设计规范中细化设计方法、分析方法及构造措施要求等, 重视减隔震装置性能检测及原型试验, 增强抗震设计规范和技术标准之间的协调性。

**关键词:** 桥梁工程; 地震工程; 减隔震设计; 规范; 原型试验

中图分类号: U442.5<sup>+</sup>5; TU352.1

文献标志码: A

## Comparison and analysis of guide specifications for seismic isolation design of bridges in China , USA , and Japan

SHI Yan<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>2</sup>, SUN Zhiguo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** To promote the development of seismic isolation technology and design code for seismic isolation of bridges, a comparative study, which includes developing history, seismic design goal, seismic design and analysis methods, and design detailing of the codes for seismic isolation in China, Japan, and USA, is made. The technical points of performance requirement, system characterization tests, and prototype tests for seismic isolation are introduced. Furthermore, the clauses of design and analysis methods, construction detailing, system characterization and prototype tests in Chinese code for seismic isolation of bridges should be refined, and the coordination between seismic design code and technical norms of seismic isolation should be improved.

**Key words:** bridge engineering; earthquake engineering; isolated design; guide specification; prototype tests

## 引言

20 世纪 70 年代, 隔震技术开始应用于桥梁工程, 已在很多国家得以应用和推广<sup>[1]</sup>。本文对中国、日本、美国等桥梁减隔震设计规范的发展历程、抗震设防目标、抗震设计和分析方法、构造措施及细节等进行详细比较分析, 还就减隔震装置性能与试验要求进行了介绍, 以助益于国内桥梁减隔震技术的发展和相关规范的完善。

收稿日期: 2015 - 06 - 01; 修订日期: 2015 - 06 - 30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178071); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013053); 中央高校基本科研业务费资助项目(3132015225)

作者简介: 石 岩(1985 -), 男, 讲师, 博士, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: syky86@163.com

## 1 减隔震设计规范发展历程

日本于20世纪80年代末出版了“桥梁隔震设计(Menshin design)指南”随后建设省完成了5座桥梁的示范建造。在这期间日本土木研究所(PWRI)与其它28家公司合作,开展了为期3年的关于桥梁隔震设计的联合研究计划,研究目的是:(1)发展新的隔震装置;(2)发展伸缩缝工艺和位移限位器;(3)发展隔震设计方法;(4)隔震设计的工程应用。该项目的研究成果包括高阻尼橡胶支座开发等,具体在1992年出版的“Manual for Menshin Design of Highway Bridges”<sup>[2]</sup>(简称“日本隔震设计手册”)中体现。日本的桥梁隔震称为“免震设计(Menshin design)”,与我们通常说的“Isolation design”略有不同,它比较强调:(1)合理地分散上部结构惯性力使其传递给更多的下部结构;(2)利用阻尼消耗更多地震能量。1995年日本经历了阪神地震,由于5座示范隔震桥梁在这次地震中表现良好,故隔震设计纳入到1996年修订完成的“道桥示方书·同解说:耐震设计篇”<sup>[3]</sup>(简称“日本桥规”),列为独立一章。日本桥梁隔震不太强调利用延长周期而降低地震力,因为延长周期势必会带来较大的位移反应,给伸缩缝等的设计、维护带来困难。由于受到规范条文的约束,日本早期(1996年前)建设的隔震桥梁较多采用了铅芯橡胶支座,阻尼耗能则作为安全储备而未在设计中考虑。目前日本的高速铁路桥梁也逐步采用隔震技术,受铁路抗震设计相关规范制约亦采用类似的设计策略。

美国将隔震技术用于桥梁较早是在1984年对Sierra Point桥进行抗震加固,至1990年建成了Sexton桥,全桥采用各20个铅芯橡胶支座和普通橡胶支座。1991年起美国有了单独的桥梁隔震设计规范“Guide Specifications for Seismic Isolation Design”(简称“AASHTO隔震指南”),至1999年和2010年分别完成了2次修订,1999年的修订提出了静力等效法,将反应修正系数 $R$ 减少到1.5~2.5,还进一步完善了隔震装置恢复力要求等。2010年的修订结合USGS最新的地震区划图,引入了新的反应谱曲线<sup>[4]</sup>。

中国至2000年前后桥梁减隔震技术开始用于实际工程,先后修建了南疆铁路布谷孜桥和石黄高速公路的石津渠中桥,但相应规范的发展一直滞后。至2008年汶川地震后,“公路桥梁抗震设计细则”<sup>[5]</sup>(简称“08细则”)开始引入减隔震设计,列出了减隔震设计的原则和减隔震系统的构成以及一般的设计要求。2011年颁布的“城市桥梁抗震设计规范”<sup>[6]</sup>(简称“城规”)进一步给出了减隔震装置的基本性能要求、减隔震桥梁地震反应分析方法和抗震验算等内容。此外,2011年和2012年颁布的交通行业标准“公路桥梁铅芯隔震橡胶支座”<sup>[7]</sup>(简称“LRB行业标准”)和“公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座”<sup>[8]</sup>(简称“HDRB行业标准”),就铅芯橡胶支座(LRB)和高阻尼支座(HDRB)的分类、构造、技术要求、试验方法、检验规则等做了规定,至此桥梁相关减隔震装置和设计皆逐步趋于有规范可依,但不同规范之间尚缺协调。

## 2 减隔震桥梁抗震设防目标

“日本桥规”采用两水准抗震设防及基于性能的抗震设计框架,地震设防水准包括两级:Level 1地震作用对应加速度反应谱平台值约为0.2~0.3g,Level 2地震作用下对应加速度反应谱平台值约为1.0~3.0g,并区分板块边缘型和内陆直下型2类。隔震桥梁设计一般在Level 1地震下要求结构基本弹性并进行设计,随后进行Level 2地震下的等效线性分析或延性校核,此时桥墩可容许发生损伤,但容许延性系数对应的安全系数约为非隔震桥梁的2倍,即容许的塑性损伤要小于非隔震桥梁。

2009年美国“AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design”(简称“AASHTO桥抗规”)出炉,该规范采用单水准设防,重现期为1000年(75年超越概率7%),其设防目标是在中小地震中结构处于弹性范围,不会造成较大损坏;而在大地震下可能遭受破坏但倒塌的可能性很小,可以要求部分或者整体更换。“AASHTO隔震指南”的设防标准与“AASHTO桥抗规”一致,基本上能保证下部结构在设计地震条件下处于弹性,但未保证在最大考虑地震作用下(250年超越概率10%)的隔震装置或下部结构的性能,当然业主有权选择更高水准的最大考虑地震作用进行设计。

我国“08细则”采用了两水准设防两阶段设计方法,对于减隔震设计桥梁要求其性能水准要高于未采用情况,条文要求对E1、E2地震作用分别进行设计和计算。“城规”也采用两水准设防两阶段设计的方法,但与“08细则”不同的是减隔震桥梁只要求进行E2地震作用下的抗震设计和校核。

### 3 抗震设计和分析方法

#### 3.1 静力等效方法和反应谱法

对于可简化为单自由度系统的减隔震桥梁,可以采用静力等效的分析方法,实际上是简化的单自由度系统的反应谱分析。“日本桥规”和“AASHTO 隔震指南”都有明确的设计公式,目的是解决量大面广类简单桥梁的设计,而中国规范则通常将其忽略。“日本桥规”在等效静力分析基础上,还进一步结合等能量准则进行桥墩的保有水平耐力计算(延性校核)。

反应谱分析方法比较简洁,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,各国设计规范都将其作为减隔震桥梁分析的主要方法。由于减隔震装置在地震中力学行为通常表现为非线性,需借助于等效线性化方法才可进行反应谱分析。

对于规则结构及仅需考虑基本振型贡献情况,可以采用单振型反应谱法,这里的单振型与前述单自由度系统不同。“AASHTO 隔震指南”和“城规”中都给出了该方法,但必须满足以下条件才能使用:(1)桥梁几何形状相对规则;(2)距离最近的活动断层大于15 km(“AASHTO 隔震指南”规定为10 km);(3)场地类型为I、II、III类,且场地条件稳定(“AASHTO 隔震指南”中为A~D类场地);(4)减隔震装置等效阻尼比不超过30%;(5)结构等效周期不大于3.0 s;(6)减隔震装置具有足够的恢复能力。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地震位移反应是未知的,因而其等效刚度、等效阻尼比等也是未知的,所以反应谱分析是一个迭代和等效线性化分析过程。

对于存在多个振型对结构反应起控制作用或者不同振型在几个方向上的位移反应出现耦合时,可采用多振型分解反应谱法进行分析,“AASHTO 隔震指南”规定采用多振型反应谱法分析时注意的问题:(1)采用阻尼比5%的设计谱,但仅 $T \geq 0.8T_{eff}$ 部分进行阻尼修正, $T < 0.8T_{eff}$ 的其它振型仍采用5%的设计谱;(2)系统的阻尼比包括了隔震系统和下部结构。

#### 3.2 动力时程分析法

由于减隔震装置的非线性特性以及桥梁响应对伸缩装置、挡块等防落梁装置存在敏感性,若需合理考虑这些因素影响,需采用非线性动力时程分析方法。“AASHTO 隔震指南”规定:当结构等效周期大于3s或等效阻尼比大于30%,或距离最近的活动断层较近(小于10 km)或场地条件不稳定(E、F类)时,需采用动力时程分析。时程分析采用的减隔震装置力学特性需通过试验得以验证,并应至少采用3组地震动作为输入,减隔震系统的最大位移反应则根据各个方向时间步上的矢量叠加。当进行3组地震动的时程分析时,则取最大考察参数作为设计依据;当时程分析输入地震动达到7组及以上时,则取考察参数的平均值作为设计依据。中国的“08 细则”和“城规”亦采用了类似规定。“日本桥规”则根据地震动水准、类型和场地条件各给出了3组历史发生地震的强震记录作为分析输入地震动。

## 4 减隔震装置性能与试验要求

#### 4.1 减隔震装置性能要求

桥梁减隔震装置通常为各类支座,要求构造应尽可能简单、性能可靠,应考虑其可替换性,并需定期维护和检查。常用的桥梁减隔震支座需要满足以下基本功能:

(1)具有普通支座的正常使用功能,既可以传递竖向作用力,又要满足使用活载、温度变化、收缩与徐变等因素的要求。

(2)具有一定的柔度以延长周期及降低地震力。通常将隔震桥梁基本周期较非隔震桥梁(支座假定为铰接)基本周期的延长倍数或比值称为隔震度,“日本隔震设计手册”和“08 细则”规定隔震度为2倍,“城规”规定隔震度为2.5倍。但随着支座柔性的提高,结构的位移也随之增大,为了不使隔震系统产生过大的位移,“AASHTO 隔震指南”规定在设计位移范围内,减隔震装置切线刚度对应的结构周期应小于6 s。本文上篇提到的土耳其地震中破坏的 Bolu 高架桥,该桥减隔震装置屈服后(切线)刚度对应的结构周期为7.27 s<sup>[9]</sup>,认为不满足设计规范要求。

(3)具有一定的刚度和屈服力以满足风、制动力、轻微地震等带来的振动,以及地震后能够正常使用。

2011年东日本大地震表明:隔震支座的水平恢复力不足致其震后难以复位且在余震中可能进一步破坏,例如Rifu高架桥的3个橡胶支座发生破坏,但在随后的余震中又破坏了8个<sup>[10]</sup>。日本“隔震设计手册”规定:在设计位移 $u_B$ 范围内隔震支座不得出现负刚度;在设计地震动作用下主梁应能回复到原位;在变形位移达到设计位移 $u_B$ 时,在缓慢释放条件下,残留位移应满足 $u_{BR} \leq 10\% u_{B0}$ 。“AASHTO隔震指南”中强调了“设计位移”和“总设计位移”(TDD)的概念,前者用于计算隔震支座的有效刚度,后者用于设计和确认隔震支座的试验要求;规定当水平位移从0.5倍TDD增加到1倍TDD时,其恢复力增量不宜低于 $W/80$ ,且需要通过原型试验保证地震后具有足够的恢复力。中国“城规”采纳了该条文,并将增量放大为 $W/40$ ,但所考察的水平位移为设计位移。

(4)具有一定的耗能能力。为了验证支座的预期性能,一般要求进行原型试验。中美日规范都规定:阻尼的试验值与设计值的差别应在 $\pm 10\%$ 以内,而且日本规范要求试验所得等效阻尼系数不小于设计假定值,体现日本规范对耗能的侧重及保守。

(5)减隔震装置宜对环境温度等变化不敏感。美日两国规范规定通过原型试验确认及检验减隔震装置的温度敏感性。“LRB行业标准”和“HDRB行业标准”也对温度稳定性试验做了具体规定,但尺度偏松。“AASHTO隔震指南”中采用支座特性修正系数,考虑磨损、污染、老化、加载历程、温度以及所暴露的环境等影响因素而出现的支座位学特性变化,并建议采用上下限分析以确定减隔震桥梁的地震反应;上限分析是采用最大修正系数进行结构地震反应分析,目的是得到传递至下部结构的最大地震力(MIF),便于控制下部结构的损伤;下限分析则对应于最小修正系数,可得到隔震支座的最大位移(MID),保证支座的安全性并防止落梁发生。日本规范也提到上下限分析方法,但中国“08细则”和“城规”未涉及。

(6)支座连接件的强度。支座上、下部结构连接件及支座限位装置设计也很重要,一旦失效意味着丧失减隔震功能。“AASHTO隔震指南”中关于支座与上、下部结构连接构件的强度与桥梁所处的地震分区有关,其设计承载力为:

$$F_A = \begin{cases} K_{\text{eff}} d_a \\ K_{\text{eff}} d_t \end{cases} \quad (1)$$

式中 $d_a$ 为由 $S_{D1}$ 计算的谱加速度对应的位移值, $S_{D1}$ 为周期1s时的加速度谱值, $d_t$ 为总设计位移;当地震1区时, $F_A$ 不小于最小间隙时支座恢复力( $F_A \geq K_{\text{eff}} d_{\text{mingap}}$ );当地震2~4区时,桥梁墩柱的设计承载力不应小于弹塑性系统的屈服力、滑移系统的滑动力或牺牲性装置的能力,且基础设计应保持弹性( $R=1.0$ );同样,连接件的承载力不应小于位移为最小间隙时支座恢复力( $F_A \geq K_{\text{eff}} d_{\text{mingap}}$ ), $K_{\text{eff}}$ 为支座和桥墩的等效线性刚度之和。

日本“隔震设计手册”要求隔震支座的连接材料及与相连的上、下部结构之间的抗力必须大于按等效水平地震系数计算的惯性力。相比较而言中国“08细则”和“城规”都没有具体的规定。

## 4.2 减隔震装置试验要求

性能检测试验是确保减隔震装置(支座)在地震时发挥功能的关键。“AASHTO隔震指南”比较强调通过试验来模拟及验证支座在地震中的实际工作状态,规定了不同的试验要求,具体包括3个方面的性能检测试验,即特性试验、原型试验和质量控制试验。质量控制试验一般是工厂化进行,中国的“LRB行业标准”和“HDRB行业标准”也有类似规定,本文主要介绍前两者。

### 4.2.1 特性试验

特性试验的目的就是通过试验(如振动台)验证单个减隔震器件或系统的基本特性。单个隔震支座试验由工程师确定的相关规范执行,振动台试验的缩尺比例不小于1/4,并经工程师同意。特性试验具体包括:

(1)低温试验:隔震支座应根据所处使用环境的温度区域,测试之前隔震支座的中心温度应该达到“AASHTO桥梁抗震规范”的规定:温度区域A、B、C、D对应的温度分别为 $-7^\circ\text{C}$ 、 $-15^\circ\text{C}$ 、 $-21^\circ\text{C}$ 、 $-26^\circ\text{C}$ 。

(2)磨损和疲劳试验:隔震支座的磨损疲劳试验应根据实际的位移和转角确定,一般需考虑30年的温度位移和活载引起的支座转角。试验是在实际的接触压力、温度为 $20 \pm 8^\circ\text{C}$ 及加载速率为 $63.5 \text{ mm/min}$ 的条件下进行,最小的试验距离应满足支座总变形达到1.6 km。

### 4.2.2 原型试验

原型试验是为了验证支座正常使用和隔震性能是否能达到预期要求,每个测试至少选用2个原型支座

进行。通过原型试验,可以得到设计选用隔震装置的实际特性(变形和阻尼值),从而验证竣工后的隔震系统是否能够满足工程的需求。所有原型试验的结果要求不出现负刚度,主要测试内容包括以下几个方面:

(1) 温度试验:为了验证发生最大温度位移时的水平力,在加载水平位移为最大温度变位下,进行3个完整循环,速率不小于 $0.0762\text{ mm/min}$ 。要求试验的最大测试力应该小于规定值。

(2) 风载和刹车(震前、震后):为了验证隔震装置是否能够满足正常使用条件下(震前、震后)风载和制动力的作用,需在荷载为正负最大水平力作用下,进行20个完整循环试验,每个循环的持续时间不小于40s;且循环加载结束后,最大荷载应持续1min;要求最大测试位移应该小于规定值。

(3) 地震性能测试:该测试是整个原型试验的关键部分,是为了验证隔震性能是否能达到预期的性能目标;整个测试需进行3个完整循环,位移幅值序列为1.0、0.25、0.50、0.75、1.0和1.25倍的地震设计总位移(TDD),其测试结果需要满足:(1)最后3个TDD循环的平均等效刚度与设计值的偏差应在10%以内;(2)3个循环的最小等效刚度不应小于最大等效刚度的80%;(3)每个循环的最小耗能不应小于最大耗能的70%。

(4) 抗震性能确认测试:为了验证支座经过一系列试验以后的性能,需进行3个完整循环(TDD)的测试。

(5) 竖向稳定性测试:在竖向组合荷载最大为: $(1.2DL + LLs + OT)$ ,最小为: $0.8DL - OT$ 的作用下,进行竖向稳定性的验证试验,测试时的水平位移为: $OD + \text{Max}\{a; b; c\}$ 。其中, $DL$ 表示恒载, $LLs$ 表示地震活载, $OT$ 表示由水平力引起的倾覆力矩所产生的竖向附加力。 $OD$ 表示考虑收缩、徐变和50%温度作用的偏移位移, $a$ 表示最大地震作用下1.1倍的TDD(可以选择2500年的重现期), $b$ 表示2.0倍的TDD(在地震1和2区,重现期为1000年), $c$ 表示1.5倍的TDD(在地震3和4区,重现期为1000年)。

## 5 构造措施与细节

为了确保减隔震桥梁在地震作用下的预期性能,必须重视构造细节的设计。如当桥梁墩台上设置隔震支座时,桥墩两侧梁体与挡块、桥台处纵向伸缩缝、梁体与翼墙、以及伸缩缝装置都应具有足够的间隙。为了减轻纵、横桥向碰撞效应和防止落梁,可在伸缩缝处采用适当的防撞、缓冲措施,并对相邻梁间限位装置、防落梁装置等进行合理的设计。在以往的地震中,曾有间隙设置不足而放大地震响应的案例,如日本的Yama-age桥、美国的Sierra Point立交桥、我国台湾的Bai-Ho桥<sup>[1]</sup>。

“AASHTO 隔震指南”中采用分析得到的各个方向的最大位移值作为间隙设计的依据,桥梁纵横向的间隙根据每个方向的设计最大位移决定,且不应小于采用简化分析法计算位移的80%或者25.4mm。间隙值必须满足正常使用荷载下的位移需求,如车辆制动力(BR)、风荷载(WS)、车辆离心力(CE)、整体升温(TU)、温度梯度(TG)等作用。

“日本隔震设计手册”要求间隙原则上按动力分析确定,详见文献[11]。

中国“08细则”和“城规”中都强调了设置合理的间隙、防落梁和限位装置的重要性,但没有给出具体的量化标准。

## 6 结论

美国、日本等国家桥梁减隔震技术已有近30年历史研究及应用经验,减隔震设计规范日趋完善。我国在本世纪初才将减隔震技术应用于地震区桥梁工程,相应规范近几年才刚刚起步,存在诸多不足。首先,我国桥梁减隔震设计规范尚处初级阶段,在设计方法、构造措施、减隔震装置试验要求等方面还有很大提升空间。其次,减隔震装置技术规程(如“LRB行业标准”和“HDRB行业标准”)在若干性能要求方面尚不充分且缺少与设计方法的必要协调。最后,性能检测及原型试验是确保减隔震装置在地震时发挥功能的关键,给出相关技术标准也势在必行。

参考文献:

[1] Lee G C, Kitane Y, Buckle I G. Literature review of the observed performance of seismically isolated bridges [R]. Research Progress and Accom-

- plishments ,2001 ,51 - 62 ,NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [2] Kawashima K ,Unjoh S. Menshin design of highway bridges in Japan [C]// Berkeley: Proceedings of the third U. S. -Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges( Technical Report NCEER ,94 - 0009) ,1994
- [3] 日本道路协会. 道路桥示方书·同解说: 耐震设计篇[S]. 2002.
- [4] AASHTO. Guide Specifications for Seismic Isolation Design( 3rd Edition) [C]// Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials ,2010.
- [5] JTG/T B02 - 01 - 2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 2008.  
JTG/T B02 - 01 - 2008 Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S]. 2008. ( in Chinese)
- [6] CJJ 166 - 2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 2011.  
CJJ 166 - 2011 Code for Seismic Design of Urban Bridges[S]. 2011. ( in Chinese)
- [7] JT/T822 - 2011 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座[S]. 2011.  
JT/T822 - 2011 Lead Rubber Bearing Isolator for Highway Bridge[S]. 2011. ( in Chinese)
- [8] JT/T 842 - 2012 公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座[S]. 2012.  
JT/T 842 - 2012 High Damping Seismic Isolation Rubber Bearings for Highway Bridges[S]. 2012. ( in Chinese)
- [9] Roussis P C ,Constantinou M C ,Erdik M , et al. Assessment of performance of seismic isolation system of bolu viaduct [J]. Journal of Bridge Engineering ,2003 ,8( 4) : 182 - 190.
- [10] Takahashi Y. Damage of rubber bearings and dampers of bridges in 2011 great east Japan earthquake [C]// Tokyo: Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake ,2012.
- [11] 徐忠根 ,周福霖. 日本桥梁隔震规范评述 [J]. 世界地震工程 ,1999 ,15( 1) : 25 - 33.  
XU Zhonggen , ZHOU Fulin. Discussion on Japanese isolated bridge codes [J]. World Earthquake Engineering ,1999 ,15( 1) : 25 - 33. ( in Chinese)