

文章编号: 1007-6069(2014)03-0176-06

时效及环境因素对桥梁隔震支座力学特性的影响概述

石岩^{1,2}, 王进³, 沈永林³, 王东升^{1,2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026;
3. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650011)

摘要: 隔震支座的力学特性随着使用时间的推移和周围环境的改变而不断变化, 国外学者据此提出了考虑温度、老化、速率、累计行程、污染、扰动等因素的特性修正系数。根据美国 AASHTO 规范并结合国外的最新研究成果, 简述了各修正系数的概念、取值及其理论和试验背景, 旨在帮助国内工程师和研究人员对其有个概括性的了解, 并为推动国内桥梁减、隔震技术的发展及相关规范的修订提供参考。

关键词: 桥梁工程; 隔震支座; 特性修正系数; 界限分析
中图分类号: U442.5+5 **文献标志码:** A

Review of effects of aging and environmental conditions on mechanical properties of isolated bearing of bridges

SHI Yan^{1,2}, WANG Jin³, SHEN Yonglin³, WANG Dongsheng^{1,2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian 116026, China; 3. Planning and Design Institute of Yunnan Province, Kunming 650011, China)

Abstract: The mechanical properties of isolated bearing are continuously changed with the environmental and aging conditions. So the property modification factors, accounting for the effects of the temperature, aging, velocity, cumulative movement or travel, contamination and scragging, are proposed by some foreign scholars. According to the Guide Specification for Seismic Isolation Design compiled by AASHTO of USA and the latest research abroad, the concept, choice of value, and the background of theory and experiment of the property modification factors were introduced, for the purpose of providing references to Chinese bridge engineers and to the revision of Chinese design code for seismic isolation.

Key words: bridge engineering; isolated bearing; property modification factors; bound analysis

引言

地震是对人类生产和生活有着重大影响的自然灾害之一。为了减小地震灾害的影响, 工程师一直在寻求合理的抗震技术和措施, 而减隔震技术的出现和快速发展体现了其提高结构抗震性能的卓越能力^[1]。20世纪70年代, 隔震技术开始应用于桥梁工程, 其中应用最广泛的当属隔震支座, 如橡胶类支座和摩擦类支座。减隔震设计中的结构动力反应一般是根据隔震支座出厂时提供的参数进行预测的, 但当支座使用若干年后或外界环境发生变化时, 其性能与初始设计值可能有较大差异。如果设计中不考虑支座力学特性改变

收稿日期: 2013-05-27; 修订日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51178071); 云南省交通厅科技课题(云交科2011(B)04-b)

作者简介: 石岩(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁结构抗震研究. E-mail: syky86@163.com

带来的影响, 则可能存在一定的安全隐患。例如, 处于日本北部严寒地带的 On-neton 新桥引桥的 3 个中墩上采用铅芯橡胶支座, 虽在 1993 年 Kushiro-oki 地震中没有发生较严重破坏, 但研究人员利用距离新桥不足 200m 的旧桥处采集到的地震记录, 对新桥进行分析计算发现: 在 -20℃ 时墩底峰值弯矩比设计值(20℃) 几乎大一倍^[2-3]。胡紫东等^[4]认为隔震反应分析中若不考虑支座温度带来的影响, 会导致墩顶剪力和梁加速度有较大的误差。

对于一般的隔震支座, 其力学特性随着磨损、污染、老化、加载历程、温度以及所处环境而不断变化。尽管很难确定地震时支座的真实情况, 但还是可以通过支座使用期间关键力学特性的最大值与最小值进行界限值分析, 以图涵盖隔震支座可能产生的各种响应。20 世纪 90 年代中期, 这些工作最早是美国布法罗大学的 Constantinou 等人通过隔震支座理论分析和试验逐步开展和完成^[5]。随后这套理论和方法先后被 AASHTO 隔震设计指南^[6]、美国荷载规范 ASCE-7-05^[7] 以及欧洲规范 EN1998^[8] 所采纳。

2008 年汶川地震后, 我国先后颁布了《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008) 和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011), 二者均将减隔震设计纳入其中。新颁布的《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822-2011) 就铅芯橡胶支座的技术要求、试验方法、检验规则等做了较完善的规定, 使得减隔震设计和减隔震装置的规范(程) 皆逐步往前发展。但是, 这些规范(程) 尚未提到隔震系统特性修正问题, 国内减隔震研究中也鲜有类似的文献。为此, 本文以美国 AASHTO 隔震设计指南^[9] 为基准, 结合相关最新研究成果, 简述了修正系数的概念及其取值。同时, 为便于国内工程师和研究人员理解和接受, 以 Constantinou 等人^[15,10] 的研究工作为基础简要介绍了各项修正系数的理论和试验背景。

1 设计特性修正系数

合理减隔震设计的前提是利用相对准确的支座力学特性进行结构动力反应的预测^[5]。等效刚度 K_{eff} 、等效阻尼 ξ_{eff} 、特征强度 Q_d 和屈服后刚度 K_d 是广泛用于描述橡胶隔震支座特性的 4 个参数, 如图 1 所示。

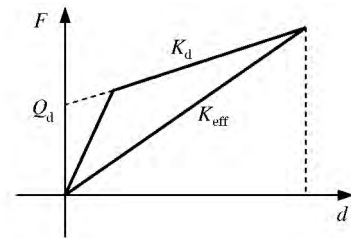


图 1 隔震支座特性

Fig. 1 Characteristic of isolation bearing

前两个用于线性时程和反应谱分析, 后两个用于非线性时程分析。通常, 支座生产厂家会根据原型支座试验提供力学特性标准值供设计师使用。但是, 使用若干年后或外界使用环境发生较大变化时, 其性能与标准特性值可能有较大不同。即仅依靠厂家提供的标准值进行分析可能不能正确反映隔震支座在使用期内的真实状况, 完全不考虑特性变化的结果可能偏不安全。当特性标准值考虑了一系列因素的影响后, 即可得到修正后的特性最小值和最大值:

$$K_{d,max} = K_d \lambda_{max,Kd} \quad K_{d,min} = K_d \lambda_{min,Kd} \tag{1}$$

$$Q_{d,max} = Q_d \lambda_{max,Qd} \quad Q_{d,min} = Q_d \lambda_{min,Qd} \tag{2}$$

其中 λ 称为系统特性的修正系数, 其最小值与最大值定义为:

$$\lambda_{min} = (\lambda_{min,t}) (\lambda_{min,a}) (\lambda_{min,v}) (\lambda_{min,r}) (\lambda_{min,c}) (\lambda_{min,scrag}) \tag{3}$$

$$\lambda_{max} = (\lambda_{max,t}) (\lambda_{max,a}) (\lambda_{max,v}) (\lambda_{max,r}) (\lambda_{max,c}) (\lambda_{max,scrag}) \tag{4}$$

其中: λ_t 为温度影响系数; λ_a 为老化影响系数(包括腐蚀); λ_v 为速率影响系数, 是设计速率(或频率)与测试速率(或频率)之比; λ_r 为行程影响系数; λ_c 为(摩擦系统的)污染影响系数; λ_{scrag} 为(橡胶支座的)扰动影响系数。

AASHTO 减隔震设计指南^[9] 中规定最小修正系数统一取 1.0, 而最大修正系数需要考虑以上 6 个因素。可见, 当引入最大、最小特性修正系数之后, 必然要采用一种分析方法——界限分析, 即修正系数改变引起的结构上、下限反应, 其最终目的是计算下部结构的最大地震力和隔震支座的最大位移。

2 调整系数

上面提到的各个分项修正系数只反映了对支座力学特性某一特定的影响, 但各个分项系数相乘得到的

系统修正系数是非常保守的,几种不同因素与考虑最大地震作用同时发生的概率非常小,故采用系统特性调整系数来反映要求的保守程度。调整后的系统特性修正系数为:

$$\bar{\lambda}_{\max} = 1 + (\lambda_{\max j} - 1) a \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_{\min} = 1 + (\lambda_{\min j} - 1) a \quad (6)$$

式中 $\bar{\lambda}_{\max}$ 和 $\bar{\lambda}_{\min}$ 为调整后的特性修正系数, $\lambda_{\max j}$ 和 $\lambda_{\min j}$ 为除 λ_v 外的特性影响系数; a 为支座特性调整系数,特重要桥梁取 1.0,重要桥梁取 0.75,其他桥梁取 0.66。例如,假设隔震支座的最大污染修正系数 $\lambda_{\max f}$,对于一座重要桥梁,调整后的修正系数为 $\bar{\lambda}_{\max f} = 1 + (1.2 - 1) \times 0.75 = 1.15$ 。

3 橡胶支座特性修正系数

对于橡胶支座,最大速率、累计行程修正系数需根据试验确定,最大污染修正系数取 1.0,其他各项按如下规定取值。

3.1 老化的影响

老化是指橡胶支座在使用过程中由于持续硫化以及氧化和臭氧作用引起的退化而使其力学性能产生长期变化的现象。首先,生产加工过程中未被完全硫化的自由硫会持续硫化,从而引起橡胶体的时效硬化和刚化,使屈服后刚度和特征强度增加。支座剪切模量的增加程度与一些因素有关,其中包括初始硫化程度和温度的影响。随着时间的推移,自由硫逐渐被消耗殆尽,橡胶体刚度的时效增加也变得很小或为零,支座的有效模量将趋于一个极限值(稳定值);当考虑扰动与否的特性差异较大或这些特性可以恢复时,表明一直在持续硫化,并成为时效硬化的潜在因素。其次,通过在橡胶基质中添加蜡和一些化学抗氧化剂,以及在支座外面覆盖保护橡胶层来抵抗氧和臭氧侵蚀。一般情况下,低阻尼天然橡胶的老化效应比较一致,而高阻尼支座则需考虑是否发生扰动。铅芯橡胶支座的特征强度由铅芯的屈服强度决定,即不随时间变化;而屈服后刚度虽与人工橡胶的老化有关,但如果完全硫化(低阻尼),则时效硬化也非常小。关于橡胶支座的老龄化理、老化效应引起的失效案例及加速老化试验等研究情况详细可见文献[10-12]。AASHTO 规范关于最大老化修正系数 $\lambda_{\max \mu}$ 的规定见表 1 所示。

3.2 温度的影响

低温使隔震橡胶支座的刚度和强度增大已成为众所周知的事实。我国地域辽阔,气候相差较大,北部、西部地区冬季气温相对较低,东北及西北大部分地区冬季温度可能一直处于 -10°C 以下,故对于该地区的减隔震桥梁,设计时考虑温度的影响至关重要。

一般认为,低温效应包括达到热平衡过程中形成的瞬时热硬化效应和与时间相关的结晶硬化效应。Roeder 等^[13]给出了与冷却时间相关的橡胶支座低温性能变化机理。另外,低温下的持续暴露时间也是一个重要因素,但对此的研究相对较少。Yakut 等^[14]研究发现:(1)小型氯丁橡胶和天然橡胶支座低温下的剪切模量与室温下的剪切模量比是一个关于温度和持续暴露时间的函数;(2)就低温下剪切模量的增加程度而言,天然橡胶比氯丁橡胶表现出更优越的性能;(3)具有时间依赖性的低温硬化效应对大剪切模量的橡胶的影响更加显著。

关于温度对橡胶支座性能的影响,我国学者也做过一些研究。李慧等^[15]认为低温环境下隔震支座的水平刚度增大、等效阻尼比降低,时程分析发现隔震层的总水平地震剪力略有增加。由世岐等^[16]建议设计使用叠层橡胶支座时,应给出不同环境温度下的垂直压缩刚度及水平刚度。胡紫东等^[4]通过拟静力试验回归得到了支座温度影响相关系数函数,并结合一座隔震桥梁进行了非线性时程分析,发现不考虑支座的低温效应对墩顶剪力和梁加速度可能引起较大的误差。AASHTO 规范中的最大温度修正系数见表 2 规定。

表 1 最大老化修正系数

Table 1 Maximum value of property modification factor for aging

| 支座类型 | Q_d | K_d |
|--------------|-------|-------|
| 低阻尼天然橡胶 | 1.1 | 1.1 |
| 高阻尼橡胶(小扰动影响) | 1.2 | 1.2 |
| 高阻尼橡胶(大扰动影响) | 1.3 | 1.3 |
| 铅 | — | 1.0 |
| 氯丁橡胶 | 3.0 | 3.0 |

注:大扰动影响是指未扰动比扰动的特性值至少大 25%。

表 2 最大温度修正系数

Table 2 Maximum value of property modification factor for temperature

| 最低温 度/°C | Q_d | | | | K_d | | | |
|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|
| | HDRB ^{i,iii} | HDRB ^{ii,iii} | LDRB ^{ii,iv} | LRB ^v | HDRB ^{i,iii} | HDRB ^{ii,iii} | LDRB ^{ii,iv} | LRB ^v |
| 21 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 0 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| -10 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.1 |
| -30 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 1.4 | 1.3 | 1.3 |

注: (i) 扰动对支座特性影响较大, 即未扰动比扰动的至少大 25%; (ii) 扰动对支座特性影响较小; (iii) c HDRB = High - Damping Rubber Bearing(高阻尼橡胶支座); (iv) LDRB = Low - Damping Rubber Bearing(低阻尼橡胶支座); (v) LRB = Lead Rubber Bearing(铅芯橡胶支座)。

3.3 扰动的影响

扰动效应是指支座初次变形(前半周)时通常具有较高的刚度和强度, 而随后其特性逐渐趋于稳定且比初次值较低的现象。英国学者 Mullins^[17] 最早发现该现象, 故扰动也称为 Mullins 效应; 他认为扰动是橡胶发生中~大剪应变时体积弹模减小所致。Clark^[18] 将体积模量减小归为两个因素: 扰动和 Mullins 效应; 这里的扰动是指长期的减小, 而 Mullins 效应是指循环应变引起的暂时减小。但后来的研究者基本未区分, 将二者统称为扰动^[11]。Thompson 等^[11] 通过对 23 个中等尺寸、有效阻尼比在 0.05 ~ 0.17 之间的橡胶支座测试发现: 其扰动系数(第一个循环的有效刚度和处于循环稳定状态时的有效刚度之比) 介于 1.4 ~ 2.1 之间。Morgan 等^[12] 在 Thompson 等人的基础上又对 45 个中等尺寸支座进行试验, 其结果与 Thompson 等人的结果非常相近。可以认为扰动过程中有效模量的减小程度取决于橡胶合成物的成分、生产过程中的硫化程度和所受应变的履历。其中, 为了改变支座的阻尼和剪切模量而给天然橡胶中添加的添加料(炭黑、合成橡胶、油类和树脂等) 越多, 扰动效应越明显; 即随着橡胶支座有效阻尼比的增大、剪切模量的减小, 其扰动系数增大。Morgan 等^[12] 的试验还发现: 沿着单个轴的扰动对垂直方向有着显著影响, 其影响程度可能与其组成成分有关。另外, 扰动后的支座性能在短时间内会有显著恢复, 随着时间的推移很有可能恢复到初始状态, 而这一时间取决于橡胶合成物的成分、硫化程度和环境温度。因此, 有人认为在满足质量控制检验的前提下, 安装支座前支座的扰动并不重要。可见, 扰动效应对高阻尼橡胶支座最明显, 对于采用低模量、低阻尼橡胶制成的低阻尼橡胶支座和铅芯橡胶支座扰动效应影响较小。因此, 最大扰动修正系数按表 3 取值。

表 3 最大扰动修正系数

Table 3 Maximum value of property modification factor for scragging

| 特性 | LDRB | HDRB($\xi < 0.15$) | LDRB($\xi > 0.15$) |
|-------|------|----------------------|----------------------|
| Q_d | 1.0 | 1.2 | 1.5 |
| K_d | 1.0 | 1.2 | 1.8 |

4 滑动支座特性修正系数

滑动隔震支座靠两种接触材料在滑动面上滑动时的摩擦力提供恢复力, 通过改变材料的光滑程度可调节其大小。滑动隔震支座类型多样, 我国使用较多的滑板支座、盆式橡胶支座、球形支座、摩擦摆支座皆可列入其范畴。由于滑动支座的力学性能与滑动面接触材料的性质密切相关, 故国外学者和规范^[9-10] 根据滑动接触面的不同将其分为 3 类:

- (1) 未润滑聚四氟乙烯: 由高抛光的不锈钢和聚四氟乙烯(PTFE) 或者与其相似的复合材料组成接触面;
- (2) 润滑聚四氟乙烯: 由高抛光的不锈钢和含有储油凹坑的 PTFE 组成, PTFE 板上的小凹坑(直径不超过 8mm, 深度不超过 2mm 且小于 PTFE 板厚度的一半) 用于储存润滑油;
- (3) 双金属接触面: 接触面的材料皆为金属, 如不锈钢和铜或者类似的金属或合金; 应避免某一界面有不同的金属, 如碳钢和低合金钢与铜合金钢接触; 这类接触面受荷载停歇(Load dwell) 的影响较大, 接触面可加一些固体润滑剂。

对于滑动支座, 各项最小修正系数取 1.0, 最大速率修正系数需根据试验确定, 其他各项按如下规定取值。

4.1 老化的影响

摩擦支座最常见的老化现象是接触面的老化, 其老化原因可能与污染、累计行程、使用环境等有关。AASHTO 规范中的最大老化修正系数 $\lambda_{max,a}$ 按表 4 取值。

4.2 污染的影响

大量实验研究证明^[10]: 滑动接触面侵入一些污染物而引起附加摩擦力, 导致支座的恢复力增大。Long^[19]、Campbell 等^[20-21] 研究认为: 摩擦支座在使用期间滑动面未必能受到污染, 即便是在离心力较大的情况下也是如此。不能一概认为摩擦支座会在使用时受到污染而适当增大摩擦力, 因为这主要取决于不锈钢接表面面的安装方法。例如, 不锈钢表面朝上的支座在使用过程中, 灰尘随着支座转动而进入滑动面, 几年后就会积累灰尘; 而不锈钢表面朝下时, 则污染较轻。另外, 在施工现场拆开或组装支座容易引起滑动面的污染, 建议滑动支座组装完好后再进入现场, 并用侧板轻轻的预压并锁定。最大污染修正系数根据安装方法的不同按表 5 取值。

表 4 最大老化修正系数

Table 4 Maximum value of property modification factor for aging

| 条件 / 环境 | 未润滑 PTFE | | 润滑 PTFE | | 双金属界面 | |
|---------|----------|-----|---------|-----|-------|-----|
| | 密封 | 非密封 | 密封 | 非密封 | 密封 | 非密封 |
| 正常环境 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 2.0 | 2.2 |
| 严苛环境 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.5 |

注: (i) 暴露时间为 30 年, 镀铬碳钢取 3.0; (ii) 未密封支座可暴露在水和盐, 会加速腐蚀; (iii) 严苛环境包括海洋和工业环境; (iv) 双金属界面是指不锈钢和铜组成的接触面。

表 5 最大污染修正系数

Table 5 Maximum value of property modification factor for contamination

| 安装方法 | 未润滑 PTFE | 润滑 PTFE | 双金属界面 |
|-----------------------|----------|---------|-------|
| 密封不锈钢面朝下 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 密封不锈钢面朝上 ^a | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| 非密封不锈钢面朝下 | 1.1 | 3.0 | 1.1 |
| 非密封不锈钢面朝上 | 不允许 | 不允许 | 不允许 |

注: 当支座的电镀或油漆有 30a 的寿命时, 系数取 1.0。

4.3 累计行程的影响

英国学者 Long^[19] 和德国学者 Kauschke 等^[22] 关于累计行程对摩擦系数的影响, 其结论呈矛盾之势: (1) 在近似相同的表面压力和滑动速度下, 两份研究得到的摩擦力值有很大差别; (2) Long 认为随着运动的增加摩擦力减小, Kauschke 认为则反之。Constantinou 等^[10] 注意到了二者的矛盾, 并详细分析了产生这种矛盾的可能原因, 得出结论: 摩擦系数随短行程运动而减少, 随长行程运动而增加; 增长的百分比取决于不锈钢表面的粗糙程度以及滑动界面的组成。AASHTO 规范中最大累计行程修正系数的取值也是基于 Constantinou 等人的工作, 修正系数以非填充 PTFE 板和高抛光不锈钢接触面的数据为基础, 见表 6 所示。因为尚没有累计行程超过 2km 时的足够数据, 故建议生产商根据复合材料的厚度、不锈钢刚度以及支座表面压力给出实验值。

4.4 温度的影响

Campbell 等^[23] 试验发现: 温度对最大静摩擦力系数和滑动摩擦系数有显著的影响。Constantinou 等^[5] 认为温度对低速下摩擦系数及最大静摩擦力系数具有显著的影响, 但由于摩擦生热的缘故, 对高速下的摩擦力系数的影响有限。通过以上及其他试验可以认为, 摩擦系数随着滑动面温度的降低而升高, 摩擦的增加程度取决于从试验开始到测量时的摩擦生热量。AASHTO 规范关于最大温度修正系数 λ_{max} 按表 7 取值。

表 6 最大累计行程修正系数

Table 6 Maximum value of property modification factor for travel (wear)

| 累计行程 / m | 未润滑 PTFE | 有润滑 PTFE | 双金属界面 |
|----------|----------|----------|-------|
| <1000 | 1.0 | 1.0 | 试验决定 |
| <2000 | 1.2 | 1.0 | 试验决定 |
| >2000 | 试验决定 | 试验决定 | 试验决定 |

表 7 最大温度修正系数

Table 7 Maximum value of property modification factor for temperature

| 设计最小温度 / °C | 未润滑 PTFE | 润滑 PTFE | 双金属界面 |
|-------------|----------|---------|-------|
| 21 | 1.0 | 1.0 | |
| 0 | 1.1 | 1.3 | 试验决定 |
| -10 | 1.2 | 1.5 | |
| -30 | 1.5 | 3.0 | |

5 结论

(1) 隔震支座随着使用时间和外界环境的变化, 其力学特性也随之发生改变, 与标准特性值可能有较大不同, 故提出了考虑不同因素影响的最大和最小特性修正系数, 并根据桥梁的重要性程度对特性修正系数进行调整, 再用调整后的修正系数对支座力学特性修正后进行界限分析, 界限分析的结果可以包络支座使用期

内的响应。

(2) 界限分析中,最大特性修正系数对应的结果是支座传递给下部结构的最大地震力,而最小修正系数得到的是支座的最大位移;为了保证下部结构的安全,最小特性修正系数统一取1.0。

(3) 对于橡胶隔震支座,对力学特性影响较大的因素有老化、温度、扰动、速率和累计行程;而对于滑动类支座,主要影响因素有老化、温度、污染和累计行程。

参考文献

- [1] Constantinou MC, Quarshie JK. Response modification factors for seismically isolated bridges, MCEER 98-0014 [R]. New York: University at Buffalo, 1998.
- [2] Sato M, Nishi H, Kawashima K, et al. Response of On-Netoh bridge during Kushiro-Oki earthquake of January 1993, NCEER-94-0009 [R]. New York: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.
- [3] 陈永祁, 王静, 刘林. 国外减隔震桥梁的失效分析[J]. 工程抗震与加固改造. 2008, 30(5): 41-47.
CHEN Yongqi, WANG Jing, LIU Lin. Failure analysis of overseas seismic isolated bridges [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting. 2008, 30(5): 41-47.
- [4] 胡紫东, 李黎, 聂肃非. 考虑温度相关性的 LRB 隔震桥梁地震响应分析[J]. 振动与冲击. 2011, 30(9): 40-45.
HU Zidong, LI Li, NIE Sufei. Seismic response of isolated bridges considering temperature effect [J]. Journal of Vibration and Shock. 2011, 30(9): 40-45.
- [5] Constantinou MC, Tsopelas P, Kasalanati A, et al. Property modification factors for seismic isolation bearings, MCEER-99-0012 [R]. New York: University at Buffalo, 1999.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide specifications for seismic isolation design(2nd Edition) [S]. Washington D. C.: AASHTO, 1999.
- [7] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures [S] Washington D. C.: Standard ASCE/SEI 7-05, 2005.
- [8] European Committee for Standardization. Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges [S]. Eurocode 8, EN1998-2, 2005.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide Specifications for Seismic Isolation Design (3rd Edition) [S]. Washington, D. C.: AASHTO, 2010.
- [10] Constantinou MC, Whittaker AS, Kalpakidis Y, et al. Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading (MCEER 07-0012) [R]. New York: University at Buffalo, 2007.
- [11] Thompson ACT, Whittaker AS, Fenves GL et al. Property modification factors for elastomeric seismic isolation bearings [C]. //Proceedings of 12th World Congress in Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [12] Morgan, T., Whittaker, A. S. and Thompson, A. Cyclic behavior of high-damping rubber bearings [C]. //Proceedings of 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome, Italy, 2001.
- [13] Roeder, CW, Stanton, JF, Taylor AW. Performance of Elastomeric Bearings, No. 298 [R]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 1987.
- [14] Yakut A, Yura JA. Parameters influencing performance of elastomeric bearings at low temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8): 986-994.
- [15] 李慧, 邓学晶, 杜永峰, 等. 寒区叠层橡胶隔震支座拟静力试验研究[J]. 低温建筑技术. 2003(4): 33-35.
LI Hui, DENG Xuejing, DU Yongfeng, et al. Pseudo-static experimental study of rubber isolator under low temperature [J]. Low Temperature Architecture Technology. 2003(4): 33-35.
- [16] 由世岐, 刘斌, 楼永林. 低温环境对叠层橡胶支座变形特性影响的试验研究[J]. 东北大学学报. 2005, 26(3): 297-299.
YOU Shiqi, LIU Bin, LOU Yonglin. Low-temperature effect on deformation behavior of laminated rubber isolators [J]. Journal of Northeastern University. 2005, 26(3): 297-299.
- [17] Mullins L. Softening of rubber by deformation [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1969, 42(1): 339-362.
- [18] Clark PW, Aiken ID, Kelly JM. Experimental studies of the ultimate behavior of seismically isolated structures, UCB/EERC-97/18 [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1997.
- [19] Long JE. The performance of PTFE in bridge bearings [J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1969(5): 459-462.
- [20] Campbell TI, Fatemi MJ. Further Laboratory Studies of Friction in TFE Slide Surface of a Bridge Bearing, ME-89-06 [R]. Ontario: Ministry of Transportation and Communications, Canada, 1989.
- [21] Campbell TI, Fatemi MJ, Manning DG. Friction in bridge bearings with contaminated TFE slide surface [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(11): 3169-3177.
- [22] Kauschke W, Baigen M. Improvements in the Long Term Durability of Bearings in Bridges, Especially of PTFE Slide Bearings [C]. //Proceeding of 2nd World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, American Concrete Institute, Detroit, USA, 1986.
- [23] Campbell TI, Pucchio JB, Roeder CW, et al. Frictional characteristics of PTFE used in slide surfaces of bridge bearings [C]. //Proceeding of 3rd World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, Toronto, Canada, 1991.