

文章编号:1007-6069(2008)02-0131-07

## 减隔震技术在桥梁结构中的应用

刘延芳, 叶爱君

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:**首先对减隔震技术的概念、原理等作了一定的介绍,并通过与传统的利用结构自身强度抵抗地震作用方法的比较,说明了减隔震技术在减小结构的地震反应、工程造价方面的优越性。在对几座典型的减隔震桥梁介绍基础上,表明了减隔震技术在一些桥梁结构抗震设计或加固中的应用情况与所取得的良好抗震性能。阐述了目前减隔震技术研究的情况及今后需要进一步研究的问题,为我国从事相关工作的工程人员和研究人员提供一点参考。

**关键词:**桥梁;减隔震;优越性

中图分类号:P315.966

文献标识码:A

### Seismic isolation in bridge engineering

LIU Yanfang, YE Aijun

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** First, the conception and principle of isolation technology are introduced, and then the superiority of the isolation technology is explained, the seismic response and project cost can be reduced by the isolation technology in comparison with the traditional design methods which are resistant to the action of earthquake by self-strength. Based on the introduction of several isolated bridges, it is demonstrated that the seismic isolation has been more and more widely used in the seismic design and aseismic strengthening in bridge engineering, and it has great seismic performance. Finally, the current studies on the isolation technology and the future questions are elaborated, which may be provided a good reference for engineers and researchers engaging in this field.

**Key words:** bridges; seismic isolation; superiority

### 引言

为了降低结构所受地震的影响,将结构与地面隔离开来的想法由来已久。上世纪六十年代以前,根据这种想法申请了很多的发明专利,但是应用于实践的较少。60年代,美国 Kelly 提出了叠层橡胶支座隔震的方法,这种方法在以后的桥梁设计中得到了广泛应用。1994年的美国圣费南尔多地震、1995年日本阪神地震中已经证明了减隔震技术对于提高结构抗震的能力,具有良好的减震效果。到目前为止,在世界范围内,至少有20个国家在桥梁的抗震抗风设计和抗震加固中采用了减隔震技术。

与依靠增加结构构件自身强度、变形能力来抵抗地震反应的传统结构的抗震设计方法相比,结构的减隔震技术无论在提高结构的整体抗震性能方面还是在降低结构的工程造价方面都具有很明显的好处<sup>[18]</sup>。如图1(a)所示,对于左面未采用隔震的常规结构,主要由结构的破坏来消耗能量,很大的地震力使结构产生了

收稿日期:2006-11-21; 修订日期:2007-12-13

作者简介:刘延芳(1982-),男,硕士研究生,主要从事桥梁抗震研究工作. E-mail:sky722@163.com

很大的变形和裂缝。对于右面采用减隔震装置的结构,地震力大大减小,结构本身的变形较小,主要变形发生在隔震装置中。图1(b)中实线表示隔震结构的最大反应与对应的未隔震结构基本周期的函数关系,虚线表示未隔震结构的同一函数关系。可以看出,隔震均使基底剪力明显减小。

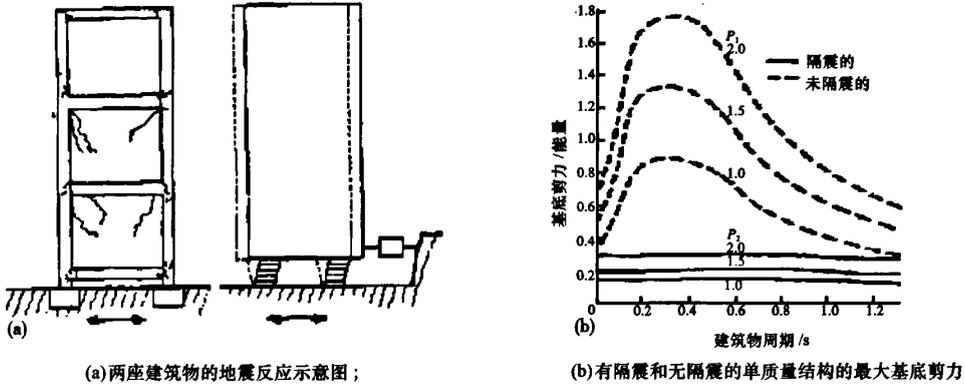


图1 融震效果示意图

Fig.1 Isolation effect of structures

所谓的减隔震技术是指通过采用减隔震装置来尽可能的将结构或构件与可能引起破坏的地震地面运动或支座运动分离开来,大大减少传递到结构中的地震力和能量。随着研究的深入,减隔震技术已不仅仅应用于新建桥梁的抗震设计中并且正在广泛的应用于桥梁结构的加固设计中。

## 1 减隔震原理、分类及适用条件

### 1.1 减隔震原理

隔震的本质和目的是将结构与可能引起结构破坏的地面运动尽可能的分离开来。为了达到这个目的可以通过延长结构的周期,避开地震的卓越周期,从而降低传入到结构中的地震能量。但是随着结构周期的延长,结构的位移反应必然随着增加,可能会造成设计上的困难。此外,由于结构较柔,在正常使用荷载作用下结构可能会发生有害的振动。为了控制结构的有害振动减小结构的变形,可以通过增加结构阻尼来吸收一部分地震能量,减小结构的地震反应。

减隔震的基本原理可以用能量的观点来理解。减隔震结构在任意时刻的能量方程为<sup>[25]</sup>:  $E_{in} = E_{ve} + E_c + E_p + E_i$ 。式中  $E_{in}$  为地震输入到结构中的总能量;  $E_{ve}$  为结构的动能与弹性势能之和;  $E_c$  为结构的自身阻尼耗能;  $E_p$  为结构的弹塑性变形耗能;  $E_i$  为减隔震装置的耗能。减隔震的原理可以认为减隔震装置比结构率先进入塑性阶段,利用自身消耗大量的能量,从而减小结构自身的耗能与塑性耗能,减轻结构的损伤破坏。

### 1.2 减隔震分类

减隔震技术包括地基隔震、基础隔震以及上部结构的隔震。(1)地基隔震方法可分成绝缘和屏蔽两种:绝缘是希望在地基自身中降低输入波的方法,可以采用软弱地基或高刚性基础及利用地基逸散衰减的方法;屏蔽是在建筑物周围挖深沟或埋入屏蔽板等,将长周期为卓越的那部分表面波隔断,但这种方法不能屏蔽直下型输入波。(2)基础的隔震是在基础与上部结构之间设置隔震装置,分为周期延长、能量吸收及绝缘等方法:周期延长法是采用某种装置将整个结构体系周期加长的方法;能量吸收是采用减震装置以控制地震时结构物不产生过大变形,并在地震结束时尽早停止振动;绝缘是采用液体浮油、磁悬浮、滑动支承、滚动轴承等装置将地震动断开,如能保证机构的稳定性,这种方法是理想的隔震方法。(3)上部结构的隔震是指在桥墩与上部结构之间设置隔震装置,可以分为能量吸收和附加振动两种型式:能量吸收型是在任意层设置弹塑性履歴型、粘液体或像油那样速度比例型或摩擦型等各种阻尼器以吸收能量;附加振动体型式则是在任意层上加设振动体,构成新的振动体系,将振动由结构物本身向附加振动体转移<sup>[26]</sup>。

### 1.3 减隔震技术适用条件

减隔震技术并不是适合应用于各种情况。场地比较软弱、不稳定、或延长桥梁结构周期后容易发生共振等情况,不宜使用隔震技术。因此,在进行桥梁结构的抗震设计之前需要判断该桥是否适合采用隔震技术。经研究表明,只要满足下面任何一条条件,就可以尝试采用隔震技术进行桥梁结构的抗震设计。

(1)地震波的角度:适用于能量集中于高频的波。

(2)结构的角:桥梁是高度不规则的,例如相邻桥墩的高度显著不同,因而可能存在对某个墩延性要求很高的情况。

(3)场地的角:对于给定的场地,预期地面运动特性比较明确,具有较高的卓越频率和在长周期范围内所含能量较低。

## 2 工程实例

自上世纪 70 年代初期,法国、新西兰、意大利、美国、日本等国家开始将减隔震装置应用于实践。自那一时期至现在,各个国家对于各类的减隔震装置和减隔震设计方法投入了大量的研究,取得了很大的成就。桥梁减隔震技术不但应用于各类新建桥梁的抗震设计而且在对于已建桥梁的加固设计中也得到了应用。

### 2.1 新西兰的 South Rangitikei Rail Bridge

新西兰的 South Rangitikei Rail Bridge 建成于 1981 年,由 6 跨预应力混凝土箱型空心支架梁组成,总长 315m,桥墩高 70m。对于这种高柔结构的抗震设计荷载和变形一般与基底平面处的大倾覆力矩有关。如果允许这种结构的狭窄基础发生摆动和提离,则基底弯矩被限制到为克服重力约束而产生提离所需要的程度,这种对基底弯矩的限制一般将可以大大降低整体结构的地震荷载和变形。

South Rangitikei Rail Bridge 就是通过控制横向摆动下的基底提离来实现隔震的一个例子。如图 2 所示,通过桥墩墩底的交替升降,使桥墩作横向摆动来控制传递到细长钢筋混凝土 H 型桥墩上的地震应力,并通过设置在两个交替升降的桥墩墩底与大刚度支承桩的顶部之间的扭转钢梁阻尼器的滞回耗能来限制墩柱摇摆提升及相应桥台面横向位移的范围。因为这座桥的重心很高,因此非隔震设计主要为墩脚处的倾覆力矩所控制,所以摇摆提升作用对这座桥减轻地震力是非常有效的。因桩帽刚度相对较大,估计摇摆提升机构自身的阻尼很低,所以摇摆提升过程中的滞回阻尼效果相当显著。

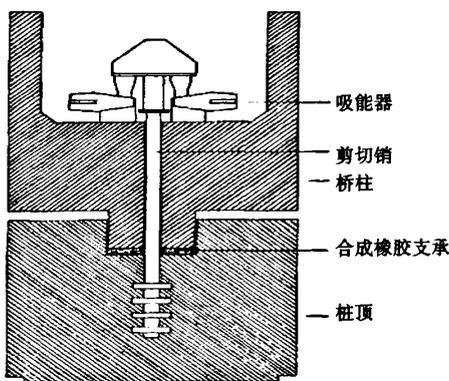


图 2 摇摆提升式桥墩基底示意图

Fig. 2 Rocking pad at the base of the South Rangitikei Rail Bridge

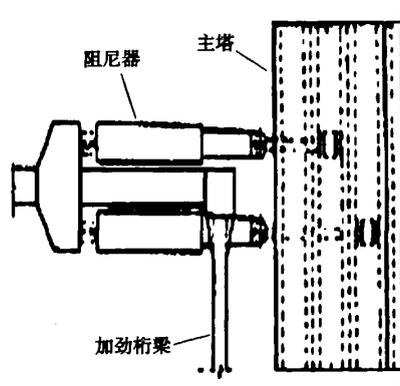


图 3 加固中阻尼器的布置图

Fig. 3 The damping devices of the Golden Gate Bridge

### 2.2 美国的 Golden Gate Bridge

Golden Gate Bridge 建于 1937 年,总长 1966m,主跨 1280m。Golden Gate Bridge 位于 1906 年旧金山地震的圣安得烈断层以东 11.31km 处。以 1989 年 10 月发生的罗马普里塔地震为契机,金门大桥管理局作了一系列调查,决定要对 Golden Gate Bridge 进行抗震加固。

为了使风阀与伸缩缝处必要的位移量发生根本性的减少,减少加劲桁梁与主塔间产生的直接撞击,决定

在加劲桁梁与主塔之间设置粘性阻尼器装置(见图3),这也是该桥抗震加固的项目之一,并为今后阻尼器在桥梁抗震加固中的使用奠定了理论与实践的基础。

之所以选择粘性阻尼器是因为,与其它减隔震装置相比,粘性阻尼器具有以下几个优点:(1)弹塑性阻尼器装置、摩擦阻尼器装置的屈服力或摩擦力是常值,且在墩最大变形时,这些值也同时达到。而粘性阻尼器装置因其反力与速度变形成比例,因此在桥墩达到最大变形时,粘性阻尼器的阻尼力反而最小,接近于零;在桥墩变形速度最大时,粘性阻尼器阻尼力最大,而此时桥墩的变形最小,其内力也最小,因此,粘性阻尼器并不增加桥墩的受力;(2)在温度变形的作用下,弹塑性阻尼器装置、摩擦阻尼器装置要求必须在克服弹性阻尼器装置的屈服力或摩擦力后才允许自由变形;而粘性阻尼器在蠕变变形下,产生抗力接近于零;(3)理想弹塑性阻尼器装置、摩擦阻尼器装置在震后易存在较大的残余变形,结构不能自动回复到原来的位置;而粘性阻尼器允许结构在震后回复到原来的位置。

粘滞阻尼器可以使加劲桁梁弦杆与主塔的应力、塔根部的剪力与上浮力减少,不约束桥体由于温度变化引起的变位并且吸收大量的能量。

有关于附加阻尼对结构反应的影响,文献[8,10]对于建筑结构的基础隔震附加阻尼进行了研究,认为,减隔震结构为了减小由于周期的延长而导致的较大地震位移所附加较大的阻尼会导致上部结构的地震反应增大,从而达不到设置减隔震装置的初始目的。

### 2.3 日本的宫川大桥

宫川大桥是日本的第一座隔震桥梁,建于1991年。3跨连续梁桥,钢板型主梁结构,墙式墩,墩高11m,建于坚硬场地土上,装有铅芯橡胶支座,支座布置见图4。

在没有采用隔震设计时,其顺桥向的基本周期为0.3s(假定所有支座均为铰接);隔震设计后,桥梁在第一水准地震作用下顺桥向基本周期变为0.8s,第二水准地震作用下基本周期变为1.0s,大大延长了结构在地震作用下的基本周期,减小了地震时传入到结构中的能量。并通过适当的选择和设置铅芯橡胶支座,使其将37.5%和12.5%的地震总惯性力分配到各个桥墩和桥台上。

对于像宫川大桥这样的梁式桥梁来说,由于其自身的刚度较大,将会受到较大的地震荷载。采用减隔震设计后,不但会降低整体结构所受到的地震荷载,还可以通过调整支座的刚度、尺寸、铅芯放置的位置,在很宽的范围内调整地震力的分配,使地震力尽量避开强度、延性能力不足的构件,在各桥墩与桥台之间合理的分配地震力。

对于铅芯橡胶支座等减隔震支座,龚一琼<sup>[9]</sup>针对不同的场地条件、不同的地震波,对各种减隔震支座对于梁式桥梁的减震效果进行了研究:(1)对于铅芯橡胶支座而言,对于大多数场地类型,在结构基本周期不超过1.25s时,可以获得满意的隔震效果。但对于脉冲型地震波或场地较软时,采用铅芯橡胶支座不会获得预期的减震效果,同时还会产生较大的位移;(2)对于板式橡胶支座而言,比较适用于一、二类场地,虽然减震效果不如铅芯橡胶支座明显,而且在基本周期较大时,结构响应增大。但其使用简单,与铅芯橡胶支座相比较为经济;(3)对于大多数场地类型,对于大多数梁桥结构,采用滑板橡胶支座可以获得非常令人满意的减震效果。但是对于在场地可能产生高频脉冲型地震波时,采用滑板橡胶支座需要特别注意,以防止产生过大的支座位移或支座的就座长度不足而导致落梁。建议今后对滑板橡胶支座同限位装置的组合使用多进行研究。并且,当墩梁采用滑板橡胶支座连接时,墩顶剪力的最大值与墩底的剪力最大值几乎都不在同一时刻达到,也就是说,桥墩顶部与底部的运动是不一致的,桥墩本身的振动对墩底截面的受力影响很大。因此,在进行地震分析时,应该注意墩梁的连接方式对结构地震反应的影响,不仅要注意墩梁的连接方式对墩底内力及支座位移大小的影响,而且还要注意到连接方式对桥墩本身振动的影响。

### 2.4 意大利的 Mortaiolo Bridge

Mortaiolo Bridge 建成于1992年,桥长9.6 km,主体结构为预应力钢筋混凝土,该桥位于厚软泥土层形成

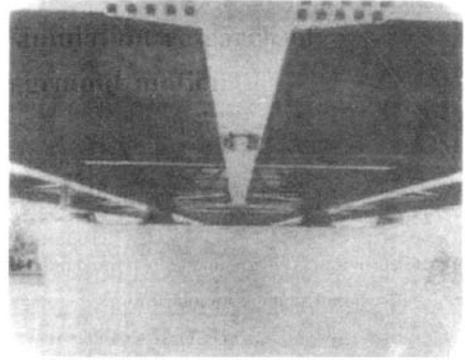


图4 宫川大桥隔震支座布置图

Fig. 4 The isolation devices of the Matsuo and Hara Bridge

的大片平地上,该地区属高地震危险区。

该桥在所有桥墩上部安装了弹性装置,并沿纵桥向有冲击传递系统。该桥使用的是意大利公司生产的两种等效隔震系统(隔震装置示意图见图 5)。尽管这两种隔震系统的机械系统不同,但是他们均以相同的弹性方式来进行反应。利用球形支承来承受上部结构的重量并保证桥墩与上部结构之间的相对转动,由大量沿环形分布的悬臂构件的变形来提供弹性阻尼。

对于像 Mortaiolo Bridge 这种采用组合隔震装置来进行桥梁的减隔震设计,表现了减隔震设计理论上的一个突破。利用两种不同隔震原理的装置组合来进行桥梁减隔震设计,发挥各自减隔震装置自身的优点,来达到更好的设计效果。郭磊、李建中等<sup>[5]</sup>针对大跨度连续梁桥其固定盆式支座在地震作用下往往会发生剪切破坏,如仅采用加强固定盆式支座的方法来强行保证其安全,将会使固定墩承受较大的地震荷载和变形。提出了将固定盆式支座改为活动盆式支座,并与弹性减震耗能装置并联使用。通过算例对这种组合减隔震装置进行研究,表明,采用组合隔震装置的固定墩其所受到的地震力得到了有效的减小,并使结构的整体抗震性能得到了改善。蒋建军、李建中等<sup>[6]</sup>将粘滞阻尼器与板式橡胶支座相组合,研究了这种组合装置的减震性能,并对其中的设计参数进行了分析,认为这种组合装置既能显著地减小结构所地震力,又能有效的控制梁体位移及墩梁相对位移。

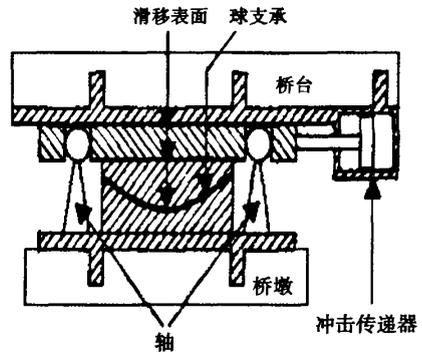


图 5 Mortaiolo Bridge 采用的隔震装置示意图  
Fig. 5 The isolation devices of the Mortaiolo Bridge

### 2.5 希腊的 Rion-Antirion bridge

Rion-Antirion Bridge 主桥为多跨斜拉桥,采用桥面连续的漂浮体系,总长 2252m,跨度为 286m + 560m + 560m + 560m + 286m。;两侧引桥全长分别为 392m 与 239m。该桥横跨希腊科林斯海峡,地处高强度地震区,整个结构的抗震按最大地面加速度 0.48g(重现期 2000 年)设计并考虑两桥墩间任意方向 2m 的地质构造运动。

由于该桥所处的地质条件十分恶劣,研究决定该桥基础采用加强土体的浅基础,该桥基础和桥塔采用如图 6 所示的结构。土体由直径为 2m,厚 20cm,长度 25~30m 的钢管加强,基础为大型沉箱,放在可以起到隔震和控制基础与地基间的相互位移的垫层上,该垫层由 90cm 厚的沙砾层、1.6m~2.3m 厚的河卵石、50cm 厚的碎石组成。基础与垫层之间没有连接,可以在地震时产生向上及向左右的移动,但在正常使用荷载及小震作用下不会发生滑动;允许其在地震后留有不会影响未来使用的残余位移,但对于转动来说,要求其转角小于 0.001 弧度。

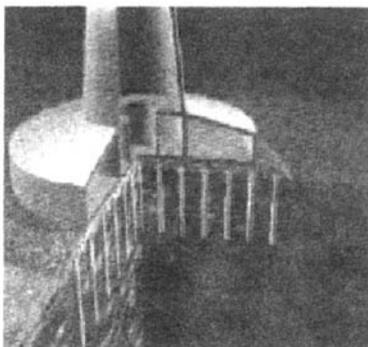


图 6 主塔基础与垫层

Fig. 6 Foundation and reinforced mat of the main tower of the Rion-Antirion bridge

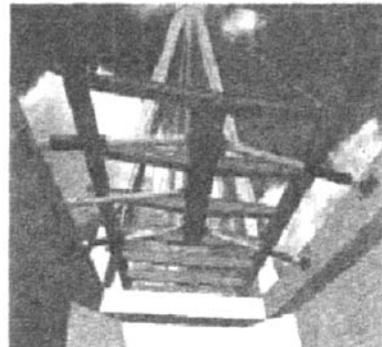


图 7 主桥桥塔处隔震系统布置图

Fig. 7 The isolation system in the pylon of the Rion-Antirion bridge

该桥主桥上部结构横桥向为减小动力作用下主梁的摇摆(在最强烈地震作用下,主塔与桥面之间可以以1.6m/s的速度产生约3.5m的相对位移),在桥塔与主梁之间设置了4个粘性阻尼器与1个弹性限位装置(见图7)。当侧向荷载不超过弹性限位装置的设计能力时,主梁保持与下部结构的刚性连接;当弹性限位装置失效时,主梁在粘性阻尼器的控制下自由摆动。引桥上部结构的隔震装置由提供竖向支撑并延长横向周期的隔离器和粘性阻尼器组成(见图8)

该桥纵向采用全漂浮体系,沿纵桥向,主梁可自由消化由温度与板块运动引起的位移;主桥两端连接引桥的位置必须容纳大量的梁端位移(由温度、活载和地震力引起)。在活载作用下,纵向位移可达到2.5m。极限状态下,有可能产生最大5m的运动。因此,梁端支撑设置了高14m、能承受竖向荷载和梁体纵向位移的竖向钢架(见图9)。箱梁和钢架间的连接和箱梁与塔基的连接类似,采用了支柱和2套阻尼器。桥梁两端分别设有2个大型毛勒伸缩缝,伸缩量 $2 \times 1.5\text{m}$ ,在地震时允许其破坏。

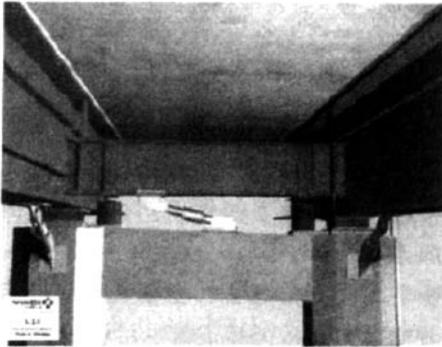


图8 引桥隔震系统布置图

Fig.8 The isolation system in the approach of the Rion-Antirion Bridge

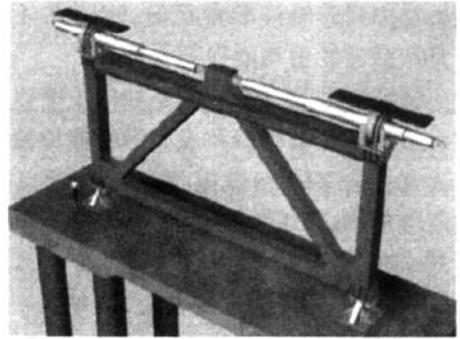


图9 过渡墩处隔震系统布置图

Fig.9 The isolation system in the transition of the Rion-Antirion Bridge

### 3 结论与展望

减隔震技术已经广泛的应用于各类桥梁结构中,可以根据结构自身特点,采用在不同的位置设置不同的减隔震装置,来提高桥梁结构的整体抗震性能。但是,正如前面所讲,并非所有情况都适合采用减隔震技术,对于不同的场地条件、不同的地震波,各种减隔震装置的减震效果也不一样。因此,在进行地震分析时,应该根据具体情况,经过具体分析确定采用合适的减隔震装置,来达到减隔震目的。

根据阻尼特性的不同,阻尼器可以分为滞变阻尼器与粘滞阻尼器两大类。滞变阻尼器效果与结构反应位移有关,而粘滞阻尼器效果与结构反应的速度有关。当结构设置阻尼器时,由于没有相对充分的变形与速度,使得阻尼器的耗能作用发挥不明显,这时就需要改变结构阻尼器的布置方式来提高阻尼器的作用,关于如何通过布置阻尼器来提高阻尼器的作用效果还需要进行进一步的研究。

组合隔震装置的研究越来越受到大家的关注,但是如何合理的确定组合隔震装置各自参数,使减隔震装置系统在不同水平的地震作用下处于不同的工作状态,以实现多级的性能指标的目的,还需要进行更多的研究。

希腊的 Rion-Antirion Bridge 为适应其桥址处断层运动时将产生的较大位移,采用了基础隔震的方法。对于基础隔震在建筑结构的隔震设计中已得到了较为广泛的应用,但是对于桥梁结构而言,对于基础隔震还需要进行更多的研究,来适应各种不同的应用条件。

目前国内的桥梁抗震设计规范中没有明确的减隔震设计指导原则,有许多问题还需要进行试验研究和理论分析,以便找到一种可靠、通用、准确、合理的计算理论和计算方法,为减隔震技术在桥梁工程中推广使用打下基础。

## 参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [2] 范立础,胡世德,叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 叶爱君,胡世德,范立础. 超大跨度斜拉桥的地震位移控制[J]. 土木工程学报,2004,37(12):38-43.
- [5] 郭磊,李建中,范立础. 大跨度连续梁桥减隔震设计研究[J]. 土木工程学报,2006,39(3):81-84.
- [6] 蒋建军,李建中,范立础. 桥梁板式橡胶支座与粘滞阻尼器组合使用的减震性能研究[J]. 公路交通科技,2004,22(8):44-48.
- [7] 王志强. 隔震桥梁分析方法及设计理论研究[D]. 上海:同济大学,2000.
- [8] 苗启松,戚承志. 关于基础隔震结构阻尼作用的讨论[J]. 结构工程师,2003(增刊):140-145.
- [9] 龚一琼. 梁式桥的减隔震体系研究[D]. 上海:同济大学,2001.
- [10] Kelly M. The role of damping in seismic isolation. [J] Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1999,28(1):3-20.
- [11] Constantinou M C. Damping system for new and retrofit construction[C]//Proceedings of the FIB 2003 Symposium Concrete Structures in Seismic Regions, Athens,2003.
- [12] Infanti S, Papanikolas P, Castellano M G. Seismic protection of the Rion-Antirion bridge[C]//Proceedings of 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia,2003.
- [13] Teyssandier J P. Corinthian crossing[J]. Civil Engineering,2002(10):42-49.
- [14] Morgenthal G, Calvi G M. Dynamic behavior and passive seismic control of the Rion-Antirion bridge[C]//Bergen; Proceeding of Fourth Symposium on Strait Crossings,2001.
- [15] Pecker A. A seismic foundation design process, lessons learned from two major projects: The Vasco da Gama and the Rion-Antirion bridges[C]//La Jolla, California: ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit,2003.
- [16] Pecker A. Enhanced seismic design of shallow foundations: example of the Rion-Antirion bridge[C]//4th Athenian Lecture on Geotechnical Engineering, 2006.
- [17] 叶爱君,胡世德,范立础. 大跨度桥梁抗震设计实用方法[J]. 土木工程学报,2001,34(1):1-6.
- [18] 谢礼立,周雍年,赵兴权. 工程隔震概论[M]. 北京:地震出版社,1996.
- [19] 王志强,胡世德,范立础. 东海大桥粘滞阻尼器参数研究[J]. 中国公路学报,2005,18(3):37-42.
- [20] 冯凌云,叶爱君. 多跨连续梁桥的减隔震应用研究[J]. 桥梁建设,2005,15(6):5-7.
- [21] 范立础,袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究[J]. 同济大学学报,1989,17(4):447-455.
- [22] 董学武,周世忠. 希腊里翁-安蒂里翁大桥的设计与施工[J]. 世界桥梁,2004,(4):1-4.
- [23] 陈开利,刘海燕. 美国金门桥的抗震加固[J]. 国外桥梁,1999,(3):47-52.
- [24] Usami T, Lu Z, Ge H. A seismic upgrading method for steel arch bridges using buckling-restrained braces[J]. Earthquake Engineering And Structural Dynamics,2005,34(3):471-496.
- [25] 周云,宗兰,张文芳,等. 土木工程抗震设计[M]. 北京:科学出版社,2005:326-347.
- [26] 赵勤贤. 我国基础隔震技术的发展[J]. 建筑技术开发,2004,11:100-103.