

文章编号:1001-8360(2012)04-0110-08

## 新型客站随机地震响应的控制策略

国 巍<sup>1,2</sup>, 余志武<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 高速铁路建造过程中出现的新型客站往往以房桥合一为特征, 其综合了房屋建筑和桥梁结构二者的特点, 抗震与减震设计必然不同于一般结构物。本文首先建立在新型客站中设置层间隔震和混合减震控制的基本模型, 并基于随机地震输入和虚拟激励法推导高效计算表达式。在此理论基础之上, 研究层间隔震技术的减震效果和工作机理, 指明层间隔震存在的缺陷。继而针对层间隔震的不足, 在房桥合一客站中引入混合减震控制策略, 其在层间隔震基础上通过设置连接阻尼器实现减小桥梁位移和避免梁体碰撞的目的, 深入研究层间隔震与连接阻尼器的工作机理, 提出混合减震策略的优化设计方法。研究表明: 层间隔震与混合控制策略在房桥合一新型客站随机地震响应控制中是可行且有效的。

**关键词:** 房桥合一; 层间隔震; 混合控制; 阻尼器; 优化策略

中图分类号:U291.1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2012.04.018

## Control Strategy of Stochastic Seismic Responses of the New Type Station Structure

GUO Wei<sup>1,2</sup>, YU Zhi-wu<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory of High-speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The new type station structure appearing during construction of high-speed railways is often characterized by station-bridge integrating and it combines the characteristics of both station and bridge, which means that its seismic design differs from conventional structures. In this paper, the fundamental numerical models of storey isolation and hybrid control of the integrated station-bridge structure were established, and by introducing the random input of earthquake responses and the pseudo-excitation method the efficient calculation expression was derived. On the basis of the theoretical derivation, the damping effect and working mechanism of the storey isolation technique were studied and its defects were also pointed out. In view of the deficiencies of storey isolation, the hybrid control strategy was proposed which was to install viscous dampers between adjacent bridges to achieve the aim of reducing bridge displacement and avoiding beam impact. The working mechanism of the hybrid control strategy covering storey isolation and viscous dampers connection was deeply studied, and accordingly the optimized design method was put forward. The research shows that the storey isolation and hybrid control strategy are feasible and effective in control of stochastic seismic responses of integrated station-bridge structures.

**Key words:** integrated station-bridge structure; storey isolation; hybrid control; damper; optimization strategy

收稿日期:2010-08-08;修回日期:2010-11-22  
基金项目:国家自然科学基金(50938008,51108466);中国博士后资助基金(20110491277)  
作者简介:国巍(1982—),男,山东淄博人,讲师,博士。  
E-mail:wei.guo.86@gmail.com

随着我国高速铁路的发展,大量铁路客站正在修建或已筹备修建,许多新技术和新工艺也随之应用,其中具有代表性的结构新形式——房桥合一新型客站受到行业内外的广泛关注。此种新型客站因其独特的结

构形式,可以充分满足换乘功能、多模式交通转换和交通线的立体化,并有足够的转换空间与综合交通体系中的多种交通方式相衔接,因此在高速铁路客站建设中备受青睐。然而,由于新型客站形式上兼具房屋建筑和桥梁结构特征,并依据建筑与桥梁的不同布置和构造方式呈现出桥式客站、建式客站和建桥一体化等多种形式,结构新型且独特,现阶段工程设计和建设中尚无相应指导规范,实际操作中往往单一采用桥梁规范、建筑规范或二者的设计包络,这必然会导致一定的设计偏差。因此,此类新型结构形式的相关理论方法仍有待进一步完善。同时,作为一种重要公共建筑,房桥合一结构的抗震设防具有重要的研究意义和价值。

作为一种重要的被动控制技术,隔震技术按照位置可区分为基础隔震和层间隔震两类。基础隔震在理论上已较为成熟<sup>[1-3]</sup>,并有许多工程实例。我国也已将基础隔震结构的设计纳入《建筑抗震设计规范》(GB 5001—2001)。相对而言,层间隔震的减震机理并不同于基础隔震,近年来国内外学者在此领域多有研究。日本免震构造协会在专著中详解了层间隔震的几种主要构造形式<sup>[4]</sup>;李向真等<sup>[5]</sup>采用模态综合法建立了层间隔震结构的简化分析模型;祁皓等<sup>[6]</sup>基于双质点模型研究层间减震原理和相应参数设置;周福霖等<sup>[7-8]</sup>阐述了层间隔震的减震原理,并从能量角度采用设计能量谱分析了地震中层间隔震结构的能量耗散和分配;赵新卫等<sup>[9]</sup>对在地铁车辆段大平台与上部结构设置层间隔震技术进行了应用研究;蓝宗建等<sup>[10]</sup>在巨型框架结构附属子框架结构进行了层间隔震研究,指出了大质量隔震子框架的减震工作机理。关于层间隔震在房桥合一新型客站中的应用,刘文光等<sup>[11-12]</sup>做过一定的研

究工作,指出橡胶隔震层可设置于房屋建筑与桥梁结构之间以实现协同减震,并基于平动单自由度的时程分析模型给出了优化参数,然而由于地震动具有随机特性,单纯时程分析具有一定局限性。同时,在房桥合一结构中应用层间减震技术也会导致一些技术困难和问题,如桥梁结构振动大位移引起的大空间需求,房屋建筑与桥梁结构或多个桥梁结构之间的碰撞隐患等,作者前期研究工作中已指出此点<sup>[13]</sup>。

在前人研究的基础上,本文采用随机地震输入和虚拟激励法<sup>[14]</sup>,推导可用于房桥合一结构随机分析的高效计算表达式,并对新型客站中应用层间隔震的减震效果和工作机理进行研究,指出其参数优化方法及存在的问题,提出层间隔震与多个桥梁之间设置连接阻尼器的混合减震控制策略,研究此策略的减震机理和优化设计方法。

### 1 基本模型

房桥合一新型客站兼具房屋建筑和桥梁结构二者的特征,根据各部分布置与构造不同又可分为桥式客站、建式客站和建桥一体化等几种类型。本文研究工作主要针对建式客站,这类客站的典型例子是京沪高速铁路天津西站。图 1(a)给出设置层间隔震的新型客站结构示意图,其中隔震装置安装于房屋建筑与桥梁结构的连接处;图 1(b)给出设置混合减震控制的新型客站结构示意图,其中混合减震控制由层间隔震和连接阻尼器共同组成,阻尼器连接各个桥梁结构。鉴于地震动具备随机特性,且目前非线性随机分析应用于实际工程尚存在一定困难,而工程中出现的各种非线性情况可采用等效线性化方法进行处理,因此本文直接采用线性模型建立两种减震技术数值模型。

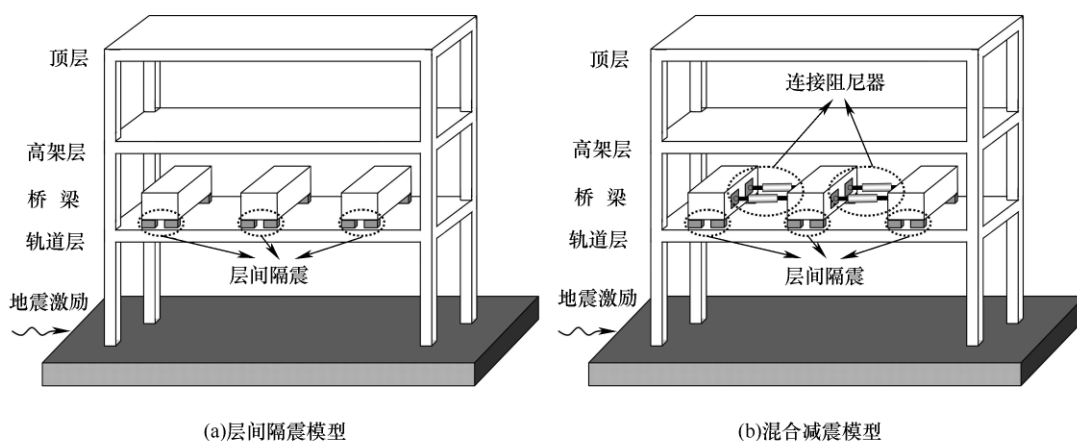


图 1 房桥合一客站减震控制示意图  
隔震的数值模型

#### 1.1 层间隔震

基于隔震层线性假定,可建立房桥合一结构层间

$$M_s \ddot{U}_s + C_s \dot{U}_s + K_s U_s = -M_s E_s \ddot{u}_g + E_{bs} F'_{bs} \quad (1a)$$

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_b + \mathbf{F}_{bs} = -\mathbf{M}_b \mathbf{E}_b \ddot{u}_g \quad (1b)$$

式中:  $\mathbf{M}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$  和  $\mathbf{K}_s$  分别为  $n$  个自由度房屋建筑的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\mathbf{U}_s = [u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{sn}]^T$  为房屋建筑相对于地面的位移响应向量;  $\mathbf{M}_b = \text{diag}(m_{b1}, \dots, m_{bm})$  为  $m$  个桥梁结构的质量矩阵;  $\mathbf{U}_b = [u_{b1}, \dots, u_{bm}]^T$  为桥梁结构相对于地面的位移响应向量;  $\ddot{u}_g$  为地面运动加速度;  $\mathbf{E}_s$  和  $\mathbf{E}_b$  分别为房屋建筑和桥梁结构的地震荷载作用位置向量;  $\mathbf{E}_{bs}$  为桥梁结构作用于房屋建筑的力作用位置矩阵;  $\mathbf{F}'_{bs}$  为桥梁结构作用于房屋建筑的外力向量;  $-\mathbf{F}_{bs}$  为房屋建筑作用于桥梁结构的外力向量, 其与  $\mathbf{F}'_{bs}$  互相为反作用力。假定各桥梁结构均放置于房屋的第  $l$  层, 因此可知  $\mathbf{F}_{bs} = \mathbf{F}'_{bs} = [c_{b1}(\dot{u}_{b1} - \dot{u}_d) + k_{b1}(u_{b1} - u_d), \dots, c_{bm}(\dot{u}_{bm} - \dot{u}_d) + k_{bm}(u_{bm} - u_d)]^T$ ;  $c_{bi}$  和  $k_{bi}$  分别为第  $i$  个桥梁结构隔震层的阻尼系数和刚度系数。

基于式(1), 可建立房桥合一结构动力平衡方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{u}_g \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \mathbf{0}_{n \times m} & \mathbf{M}_b \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{C}_s^{(b)} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_b \end{bmatrix}$  和  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_s^{(b)} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_b \end{bmatrix}$  分别为房桥合一结构体系的质量、阻尼和刚度矩阵, 结构体系的总自由度数为  $n+m$ ;  $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}_s$ 、 $\mathbf{C}_b$ 、 $\mathbf{K}_b$  在上文中均已有定义;  $\mathbf{C}_{sb}$ 、 $\mathbf{C}_{bs}$ 、 $\mathbf{K}_{sb}$ 、 $\mathbf{K}_{bs}$  分别为房屋建筑与桥梁结构的阻尼和刚度交叉项, 主要体现隔震支座的阻尼和刚度特性, 可由式(1)变换得到;  $\mathbf{C}_s^{(b)}$ 、 $\mathbf{K}_s^{(b)}$  为房屋建筑与桥梁结构动力耦合作用在房屋建筑上阻尼和刚度部分的体现, 其与  $\mathbf{C}_{sb}$ 、 $\mathbf{K}_{sb}$  项共同构造了与相对响应有关的阻尼力和弹性力, 同样可由式(1)变换得到;  $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s^T, \mathbf{U}_b^T]^T$  为该结构体系相对于地面的位移向量;  $\mathbf{E} = [\mathbf{E}_s^T, \mathbf{E}_b^T]^T$  为荷载作用位置向量。

基于以上阐述, 本文建立了设置层间隔震的房桥合一结构统一数值模型, 即式(2)。显而易见, 由于桥梁结构底部设置隔震层, 导致结构体系的非比例阻尼特性, 实模态分解方法不再可行。

## 1.2 混合减震控制

类似于层间隔震单一控制, 基于隔震层和连接阻尼器的线性假定, 同样可建立混合减震控制下房桥合一结构数值模型:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s = -\mathbf{M}_s \mathbf{E}_s \ddot{u}_g + \mathbf{E}_{bs} \mathbf{F}'_{bs} \quad (3a)$$

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_b + \mathbf{F}_{bs} + \mathbf{F}_d = -\mathbf{M}_b \mathbf{E}_b \ddot{u}_g \quad (3b)$$

式中参数定义同上文。相比式(1), 式(3)中多了桥

梁结构之间的相互作用力  $\mathbf{F}_d$ , 此力是由连接阻尼器所产生的,  $\mathbf{F}_d = [f_{d1}, \dots, f_{di}, \dots, f_{dm}]^T$ , 其中  $f_{d1} = c_{d1}(\dot{u}_{b1} - \dot{u}_{b2}) + k_{d1}(u_{b1} - u_{b2})$ ,  $f_{dm} = c_{d(m-1)}(\dot{u}_{bm} - \dot{u}_{b(m-1)}) + k_{d(m-1)}(u_{bm} - u_{b(m-1)})$ , 当  $1 < i < m$  时,  $f_{di} = c_{d(i-1)}(\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{b(i-1)}) + k_{d(i-1)}(u_{bi} - u_{b(i-1)}) + c_{di}(\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{b(i+1)}) + k_{di}(u_{bi} - u_{b(i+1)})$ ;  $c_{d1}, \dots, c_{d(m-1)}$  为各阻尼器阻尼系数;  $k_{d1}, \dots, k_{d(m-1)}$  为各阻尼器刚度系数。

基于式(3), 可类似前文建立动力平衡方程式

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{u}_g \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \mathbf{0}_{n \times m} & \mathbf{M}_b \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{C}_s^{(b)} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_b \end{bmatrix}$  和  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_s^{(b)} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_b \end{bmatrix}$  分别为房桥合一结构体系的质量、阻尼和刚度矩阵, 结构体系的总自由度数为  $n+m$ ;  $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}_s$ 、 $\mathbf{C}_s^{(b)}$ 、 $\mathbf{K}_s^{(b)}$ 、 $\mathbf{C}_{sb} = \mathbf{C}_{bs}^T$ 、 $\mathbf{K}_{sb} = \mathbf{K}_{bs}^T$ 、 $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s^T, \mathbf{U}_b^T]^T$ 、 $\mathbf{E} = [\mathbf{E}_s^T, \mathbf{E}_b^T]^T$  定义均同前文。与式(2)不同的是,  $\mathbf{C}_b$  和  $\mathbf{K}_b$  为设置层间隔震和连接阻尼器之后桥梁结构的阻尼和刚度矩阵, 其不仅包含层间隔震参数, 同时包括连接阻尼器参数, 其具体表达可由式(3)得到。至此, 已建立设置层间隔震和连接阻尼器混合减震控制的房桥合一结构数值模型。此模型同样体现了非比例阻尼特征, 实模态无法解耦运算。

## 2 随机计算方法

### 2.1 高效随机分析

由于地震实际上为不可重现的单次随机过程, 确定性时程输入和分析具有很大的局限性, 需要进行大量运算才可得到可靠结果, 这往往是难以实现的。近年来, 学者们开展了一系列随机地震响应研究, 并给出了几类地震随机输入模型, 如 Clough-Penzien 模型、Kanai-Tajimi 模型等, 根据规范确定模型参数取值。然而, 传统随机分析的低效率限制了其工程应用, 林家浩提出了虚拟激励法<sup>[14]</sup>, 可避免繁杂计算, 简化理论推导, 是一种精确方法。因此本文采用虚拟激励法对房桥合一结构体系进行随机分析。首先将地震动转化为弦波输入

$$\ddot{u}_g(t) = \sqrt{S_{\ddot{u}_g}(\omega)} e^{r\omega t} \quad (5)$$

$$r = \sqrt{-1}$$

式中:  $S_{\ddot{u}_g}(\omega)$  为地震功率谱密度函数。基于正弦输入, 可定义响应  $U = U_\omega e^{r\omega t}$ , 并根据式(2)或式(4)可知

$$U = U_\omega e^{r\omega t} = H M E \sqrt{S_{\ddot{u}_g}(\omega)} e^{r\omega t} \quad (6)$$

式中:  $H = -(K - \omega^2 M + r\omega C)^{-1}$ 。可知响应  $U$  的功率谱密度函数矩阵

$$S_U = U^* U^T \quad (7)$$

通过对式(7)的功率谱矩阵积分可以得到响应均方值。该矩阵运算方法形式简单可行,且因推导并无任何前提假定,具有广适性,对于线性和非线性分析均适用。然而,由于需要进行矩阵求逆运算以得到 $H$ ,病态矩阵情况下可能会出现计算问题,大自由度结构矩阵运算也会带来较大的计算量。基于此,林家浩还提出了一种基于实模态矩阵的处理方法<sup>[14]</sup>,可有效避免病态矩阵运算,并且某种程度上可减小运算量,本文不再赘述。

## 2.2 减震控制指标

在结构减震控制中,控制指标一般分为相对位移和绝对加速度两类。控制相对位移是为了避免建筑本身的破坏,控制绝对加速度是出于保护仪器设备和舒适度要求。在本文所研究房桥合一结构中,从相对位移角度来说,通常关注房屋建筑顶层相对地面位移、层间相对位移、桥梁结构相对房屋建筑的位移等。同时由于前人研究已指出层间隔震设计有可能加大隔震层下部结构的响应,所以房屋建筑隔震层下部楼层的相对位移同样需要加以关注。从加速度角度来说,因高架层往往为人群密集区,需要控制高架层的绝对加速度,桥梁结构上因可能会停留列车,同样需控制其加速度,以避免地震作用下过大加速度导致的列车倾覆、脱轨等危险。在本文研究中,首先以未设置层间隔震和混合减震控制下房桥合一结构的响应为初始响应,定义此时房屋建筑响应为 $U_{s,0} = [u_{s1,0}, u_{s2,0}, \dots, u_{sn,0}]^T$ 、 $\ddot{U}_{s,0} = [\ddot{u}_{s1,0}, \ddot{u}_{s2,0}, \dots, \ddot{u}_{sn,0}]^T$ ,桥梁结构响应为 $U_{b,0} = [u_{b1,0}, u_{b2,0}, \dots, u_{bm,0}]^T$ 、 $\ddot{U}_{b,0} = [\ddot{u}_{b1,0}, \ddot{u}_{b2,0}, \dots, \ddot{u}_{bm,0}]^T$ ,以此初始响应对优化目标进行标准化处理,同时在分析中采用为各响应的均方根值。下文将以此标准化指标对层间隔震和混合减震控制进行研究,定义设置减隔震控制之后房屋建筑响应为 $U_s = [u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{sn}]^T$ 、 $\ddot{U}_s = [\ddot{u}_{s1}, \ddot{u}_{s2}, \dots, \ddot{u}_{sn}]^T$ ,桥梁结构响应为 $U_b = [u_{b1}, u_{b2}, \dots, u_{bm}]^T$ 、 $\ddot{U}_b = [\ddot{u}_{b1}, \ddot{u}_{b2}, \dots, \ddot{u}_{bm}]^T$ 。以房屋和桥梁位移响应为例,进行标准化处理。

$$\bar{U}_s = [\bar{u}_{s1}, \bar{u}_{s2}, \dots, \bar{u}_{sn}]^T = [u_{s1}/u_{s1,0}, u_{s2}/u_{s2,0}, \dots, u_{sn}/u_{sn,0}]^T \quad (8a)$$

$$\bar{U}_b = [\bar{u}_{b1}, \bar{u}_{b2}, \dots, \bar{u}_{bm}]^T = [u_{b1}/u_{b1,0}, u_{b2}/u_{b2,0}, \dots, u_{bm}/u_{bm,0}]^T \quad (8b)$$

其中, $\bar{U}_s = [\bar{u}_{s1}, \bar{u}_{s2}, \dots, \bar{u}_{sn}]^T$ 、 $\bar{U}_b = [\bar{u}_{b1}, \bar{u}_{b2}, \dots, \bar{u}_{bm}]^T$ 为标准化的位移响应向量,如式(8)定义所示,标准化位移向量 $\bar{U}_s$ 和 $\bar{U}_b$ 分别表征减隔震控制措施在房屋

建筑和桥梁结构的减震效果,可作为减震控制指标,同时,标准化的加速度向量 $\bar{\ddot{U}}_s$ 和 $\bar{\ddot{U}}_b$ 可类似建立。需要说明的是,作者在文献[13]中已经初步介绍新型客站层间隔震的减震机理和参数优化,本文是对该问题更为深入的研究,具体解释了其缺陷所在,并研究了其鲁棒性,在此基础上进一步提出混合控制策略。

## 3 层间隔震

### 3.1 减震机理

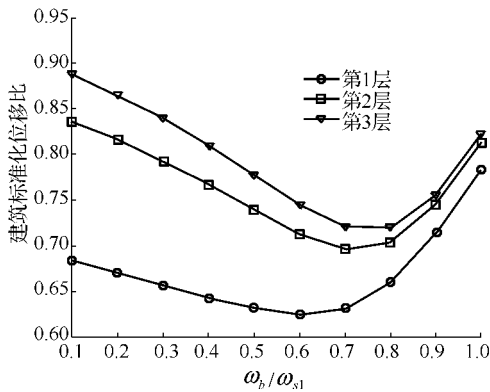
首先对房桥合一结构中设置层间隔震的减震机理进行研究。如图1(a)所示,一个3层客站建筑,指定其参数设置为: $m_{s1} = m_{s2} = m_{s3} = 2 \times 10^5$  kg,  $k_{s1} = k_{s2} = k_{s3} = 0.8 \times 10^9$  N/m。客站建筑阻尼假定为 Rayleigh 阻尼,令其前两阶模态阻尼比为  $\xi_{s1} = \xi_{s2} = 0.05$ ,从而可构造阻尼矩阵。建筑第1层上支撑有单个桥梁结构,其质量参数为: $m_b = m_{s1}$ ,以体现大质量特征。地震动为随机输入,随机模型采用 Kanai-Tajimi 模型,其可描述为

$$S_{u_g} = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (9)$$

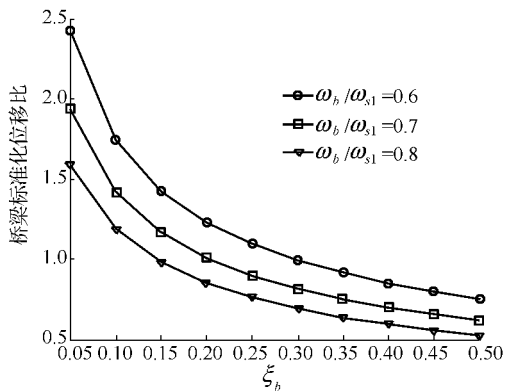
式中: $\omega_g$ 为场地土频率; $\xi_g$ 为场地土阻尼比。对应规范 GB 50011—2001 中的一类场地和第三场地分组可知, $\omega_g = 13.96$  rad/s,  $\xi_g = 0.72$ 。本文取强度因子  $S_0 = 0.0006$  m/s<sup>3</sup>。为简便起见,本文研究的控制目标仅限于相对位移,即选取轨道层位移  $u_{s1}$ 、第2层位移  $u_{s2}$ 和顶层位移  $u_{s3}$ ,桥梁结构相对于建筑的位移  $u_b$ ,各量标准化后则为  $u_{s1}/u_{s1,0}$ 、 $u_{s2}/u_{s2,0}$ 、 $u_{s3}/u_{s3,0}$ 、 $u_b/u_{b,0}$ ,以上各量在随机分析中均取均方根值。

作者前期研究<sup>[13]</sup>和文献[10]均已指出:如需控制房屋建筑响应,阻尼较大时,其变化对减震效果影响甚小,层间隔震装置无需优化阻尼特征,取最大阻尼即可,同时需对隔震层刚度进行优化;如需控制桥梁结构响应,则应增大隔震层阻尼,避免调整已优化过的刚度特征。因此,此处令隔震层阻尼为大值,即令阻尼比  $\xi_b = 0.2$ ,通过改变隔震层的刚度特征  $\omega_b = \sqrt{k_b/m_b}$ ,研究层间隔震减震效果和参数最优取值。图2(a)给出了改变隔震层刚度对应的房屋建筑各层响应的变化,可看到存在最优圆频率取值,在  $\omega_b/\omega_{s1} = 0.4 \sim 0.9$  范围内房屋建筑各层均可控制减震 20%~30%以上。这里最优刚度分别取为  $\omega_b/\omega_{s1} = 0.6, 0.7, 0.8$ ;图2(b)给出了最优刚度下阻尼改变对桥梁结构响应(相对于建筑结构的响应)的控制效果,可以看到阻尼增大会有效控制桥梁结构响应。综上所述可知,刚度合理优化的层间隔震装置可有效控制新型客站中房屋建筑响

应,同时可通过增大阻尼耗能以限制桥梁结构的过大位移。此外,为了说明大阻尼改变对房屋建筑减震的影响,图 3 给出了  $\xi_b = 0.2, 0.3$  时各层标准化响应的对比,可以看到隔震层阻尼变化对房屋建筑减震效果影响确实不大。



(a) 隔震层刚度对建筑响应的影响( $\xi_b=0.2$ )



(b) 隔震层阻尼对桥梁响应的影响( $\omega_b/\omega_{s1}=0.7$ )

图 2 层间隔震对客站地震响应的影响

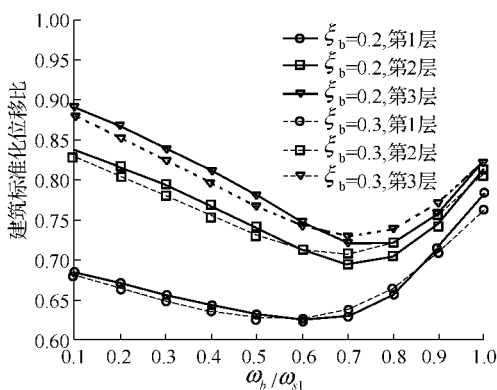


图 3 隔震层阻尼对建筑地震响应的影响

为了研究不同地震输入下隔震装置的减震效果,表 1 给出随机模型对应不同场地类型和地震分组的参数取值,并按序号定义。图 4 给出同一个隔震参数设置下改变地震输入模型参数对减震效果的影响,可见层间隔震装置受地震输入影响较小,在不同地震输入下均可发挥一定减震功能,即意味着隔震装置对地震

输入不敏感,对于输入的鲁棒性较强。

表 1 随机地震输入模型序号

场地类别	I ( $\omega_g, \xi_g$ )	II ( $\omega_g, \xi_g$ )	III ( $\omega_g, \xi_g$ )	IV ( $\omega_g, \xi_g$ )
设计地震第一组	1(25.13, 0.64)	4(17.95, 0.72)	7(13.96, 0.80)	10(9.67, 0.90)
设计地震第二组	2(20.94, 0.64)	5(15.71, 0.72)	8(11.42, 0.80)	11(8.38, 0.90)
设计地震第三组	3(17.95, 0.64)	6(13.96, 0.72)	9(9.67, 0.80)	12(6.98, 0.90)

注:表中数值为“序号( $\omega_g, \xi_g$ )”; $\omega_g$  的单位为 rad/s。

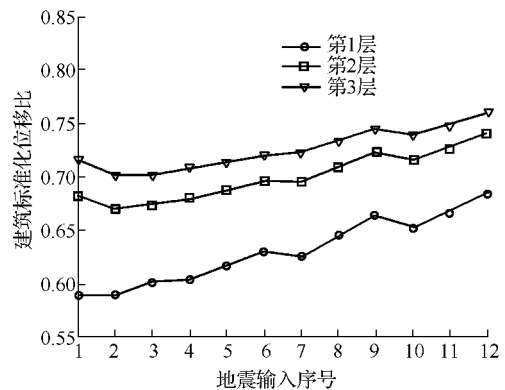
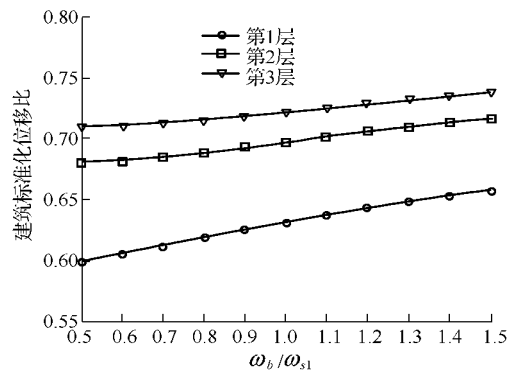
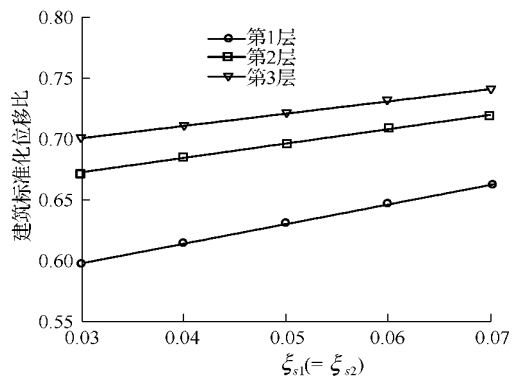


图 4 同一隔震配置对不同地震输入的减震效果



(a) 改变建筑刚度



(b) 改变建筑阻尼比

图 5 建筑结构特征改变对层间隔震效果的影响

图 5(a)给出房屋结构刚度改变对固定隔震参数配

置下减震效果的影响;图 5(b)给出房屋结构阻尼改变对减震效果的影响,可以看到不论是刚度还是阻尼参数改变对隔震层减震效果影响均较小。因此可以说,房桥合一结构中的层间隔震设置对结构参数具备较强的鲁棒性,这点明显区别于调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)装置。这主要是由于此时层间隔震装置的工作机理并不同于 TMD 装置:本文的层间隔震通过阻尼力和弹性力提供反力以减小地震响应,TMD 装置则主要通过弹性力作用于结构物,依靠调谐吸能来减震,阻尼力只占较小部分。国内部分文献中称此层间隔震为大质量 TMD 装置,有待商榷。

### 3.2 参数优化方法

在高速铁路客站中不可能仅有一条线路通过,因此对于建式客站而言,实际房屋建筑上往往支撑有多个桥梁结构,且多个梁体通常为同一尺寸,具备相同质量。此时有两种优化策略:单桥模型和多桥模型。所谓单桥模型即假定所有桥梁结构下隔震层的刚度和阻尼特征一致,各桥梁呈现为同步振动,可简化为单个桥梁结构进行分析;多桥模型指的是各桥梁结构下隔震层参数设置不同,导致各桥并不一致振动,不可简化为单一桥梁来进行分析。采用单桥模型和多桥模型的优化结果并不相同。

基于单桥模型进行参数优化按照本文 4.1 节即可,相应减震效果也已阐述。基于多桥模型进行参数优化,此时为避免较小质量情况,令:  $m_{b1} = m_{b2} = m_{b3} = m_{s1}/2$ ,其余参数设置均同前文。阻尼特征无需优化,取大阻尼即可,即  $\xi_b = 0.2$ ,而鉴于各桥隔震层刚度不一致,可能存在多种组合和分布。本文引入一种规则分布以进行研究,令各桥梁隔震层刚度成比例分布于单桥模型最优刚度值附近,参考前文,令单桥模型最优圆频率为  $\omega_b = 0.7\omega_{s1}$ ,则取  $\omega_{b1} = (1-\mu)\omega_b$ ,  $\omega_{b2} = \omega_b$ ,  $\omega_{b3} = (1+\mu)\omega_b$ ,其中  $\mu(0 \leq \mu < 1)$ 为刚度变异系数,体现各桥梁隔震层刚度变化百分比。文献[13]已证明为达到最优减震效果,存在一个最优的  $\mu$  值。图 6 给出了随着  $\mu$  值改变隔震层减震效果的变化。从图中可以看到,随着  $\mu$  的变化减震效果发生一定改变,总存在一个最优的  $\mu$  值,此时相比于单桥模型其减震效果略好。图 7 给出了  $\mu=0.3$  时多桥模型减震效果的优化曲线,可看到相对于单桥模型,多桥模型曲线更平缓更低,说明其更稳定,减震效果更好。然而,此时由于多个桥梁结构不一致振动,存在碰撞隐患,同时隔震刚度弱化的桥梁结构,如具备  $\omega_{b1} = (1-\mu)\omega_b$  特征的桥梁,其相对侧移可能更大,需要更大空间,如图 8 所示。以上这些缺陷都是在采用多桥模型中不可避免的,即相对于单桥模型,多桥模型在实现增加减震效果的同时也付出

了一定代价。综上所述,根据多桥模型的优势和缺陷,本文利用其各桥的不协调振动,提出通过连接阻尼器来实现减小桥梁位移且避免桥梁碰撞的目的,进而研究层间隔震与连接阻尼器共同工作的混合减震控制策略。

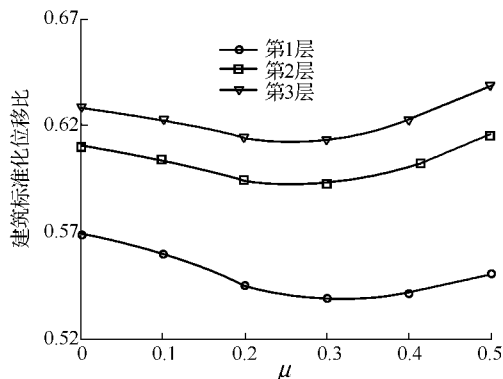


图 6 多桥模型不同参数配置对减震效果的影响

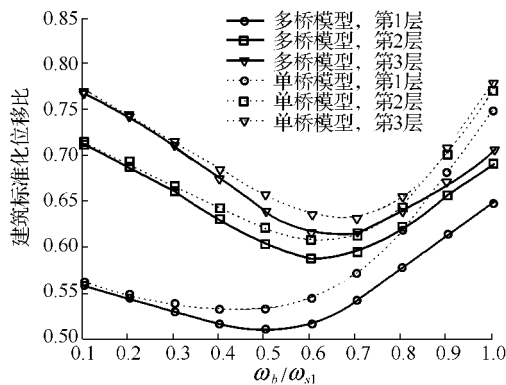


图 7 单桥模型和多桥模型减震效果的对比

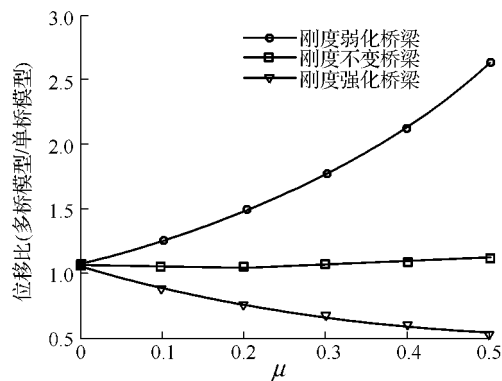


图 8 多桥模型的各桥位移响应

## 4 混合减震控制

鉴于上文所述层间隔震存在的缺陷,如多桥模型可能存在的桥梁不协调振动的碰撞效应,部分桥梁需要大空间等,本文借鉴朱宏平等[15]在邻近结构间设置连接阻尼器的控制方法,在层间隔震基础上通过桥梁之间连接阻尼器实现混合减震控制,以解决层间隔震单一控制存在的问题。此部分研究采用前文所述模型

参数,层间隔震采用多桥模型最优参数设置,在此基础上设置连接阻尼器。为方便研究,阻尼器采用线性黏滞阻尼器,研究连接阻尼器的控制效果和工作机理。

#### 4.1 协同减震机理

如上文所述,采用多桥模型,且隔震层参数已优化设置,即: $\omega_b = 0.7\omega_{s1}$ 、 $\xi_b = 0.2$ 、 $\mu = 0.3$ ,并可知隔震层阻尼系数  $c_{b1} = 2m_{b1}\xi_b\omega_{b1}$ 。鉴于当邻近结构运动差异大时减震效果更优<sup>[15]</sup>,本文在刚度弱化桥梁和刚度强化桥梁之间安装连接阻尼器,通过改变阻尼器参数研究桥梁结构相对建筑位移的控制情况。

图 9 给出了黏滞阻尼器参数改变下桥梁结构响应的控制情况,可以看到随着阻尼增大桥梁结构响应会被有效控制。图 10 给出了黏滞阻尼器最优参数设置下隔震层参数的减震效果优化曲线,可见连接黏滞阻尼器的设置对隔震层的减震效果影响甚小(除了非常接近  $\omega_{b2}/\omega_{s1} = 1$  的频率段),从而使得多桥模型保留了其减震优势。综合来说,黏滞阻尼器在与层间隔震多桥模型的联合应用中是可行的,二者协同发挥减震作用:层间隔震控制房屋建筑响应,黏滞阻尼器控制桥梁结构过大位移,同时并不影响多桥模型减震。

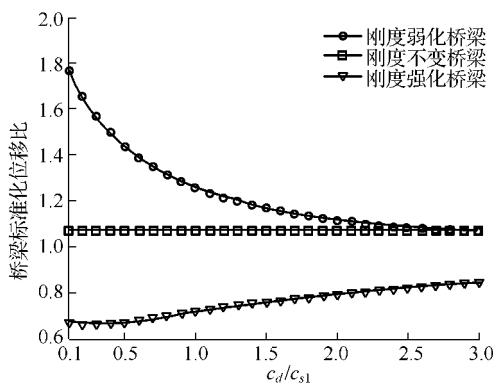


图 9 连接黏滞阻尼器对桥梁响应的减震效果

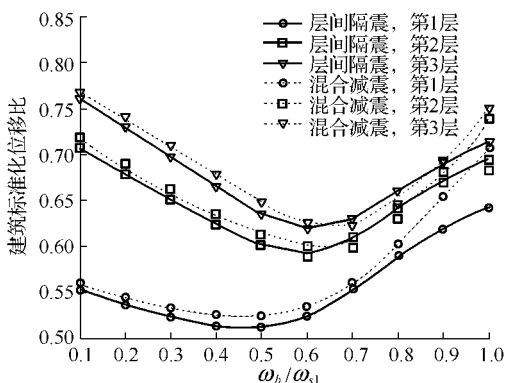


图 10 层间隔震与混合控制减震效果的对比

#### 4.2 优化设计步骤

基于前文研究,这里提出房桥合一结构中混合减震控制的优化设计步骤,对于层间隔震与黏滞阻尼器而言,可进行分步优化。

(1) 给定隔震层可提供的大阻尼,按照单桥模型优化隔震层刚度特征,实现客站房屋建筑的最优减震效果。

(2) 调整各桥梁结构的频率分布,类似文中算例,优化频率改变的百分比  $\mu$ ,实现多桥模型的最优减震效果,得到相应参数最优设置。

(3) 验证桥梁结构响应是否满足容许值以及是否可能发生梁体碰撞,如满足且无碰撞隐患则停止运算,所得参数即为层间隔震下的最优值;如不满足,则在桥梁结构之间设置连接黏滞阻尼器,求解阻尼器的最优参数,实现桥梁结构响应控制,至此完成混合减震控制的优化设计。

## 5 结论

本文研究建式客站中层间隔震与混合减震控制方法的有效性和参数优化方法。基于新型客站独特的结构形式,首先建立层间隔震和混合减震控制的数值模型,并基于虚拟激励法推导相应高效计算表达式。在此理论基础上,研究层间隔震的减震效果和工作机理,指出其存在的缺陷,进一步提出层间隔震与连接阻尼器的混合减震控制技术,该控制技术在地震中可更好保护房屋建筑与桥梁结构。基于本文研究工作,得出以下结论:

(1) 在新型客站中设置层间隔震以控制房屋建筑的地震响应是可行的,且具备较高鲁棒性,其通过阻尼力和弹性力提供反力以抵抗和耗散地震输入,工作机理不同于 TMD 装置,并不体现调谐吸振特性。

(2) 层间隔震的单桥模型与多桥模型两种参数优化方法各具特色,单桥模型中桥梁结构一致振动,无碰撞隐患;多桥模型桥梁可能发生碰撞,刚度弱化的部分桥梁存在较大侧移,然而其减震效果和稳定性更好。两种优化方法可视不同工况加以区别采用。

(3) 为解决多桥模型优化方法存在的缺陷,本文提出了混合减震控制策略,其通过层间隔震与连接阻尼器的协同工作一方面可减小房屋建筑的地震响应,一方面可有效控制各桥梁结构的位移,避免碰撞发生。该混合控制策略是可行的、有效的,且其设计步骤简单明了,适用于工程应用。

参考文献:

- [1] Kelly J M. Aseismic Base Isolation Review and Bibliography [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5 (4):202-216.
- [2] Buckle I G, Eefi M, Mayas R L. Seismic Isolation: History, Application, and Performance—A World View [J]. Earth-

- quake Spectra, 1990, 6(2): 161-198.
- [3] Jangid R S, Data T K. Seismic Behaviour of Base Isolated Building a State-of-the-Art-Review [J]. Journal of Structures and Buildings, 1995, 110: 186-203.
- [4] 日本免震构造协会. 图解隔震结构入门[M]. 叶列平, 译. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 李向真, 欧海龙, 林舒. 层间隔震结构计算模型的简化分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 121-125.  
LI Xiang-zhen, OU Hai-long, Lin Shu. Simplified Analysis on Calculation Model of Interlayer Seismic Isolation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 121-125.
- [6] 祁皓, 林云腾, 郑国琛. 层间隔震结构工作机理研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 239-243.  
QI Kai, LIN Yun-teng, ZHENG Guo-chen. Research on Working Mechanism of Story Isolation Structure [J]. Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 239-243.
- [7] 周福霖, 张颖, 谭平. 层间隔震体系的理论研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 1-8.  
ZHOU Fu-lin, ZHANG Ying, TAN Ping. Theoretical Study on Story Isolation System [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 1-8.
- [8] 张颖, 谭平, 周福霖. 层间隔震结构的能量平衡 [J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 204-208.  
ZHANG Ying, TAN Ping, ZHOU Fu-lin. Energy Balance of Story Isolation System [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 204-208.
- [9] 赵新卫, 栾锡富, 彭凌云. 层间隔震技术在地铁车辆段大平台上部土地开发上的应用研究 [J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 110-114.  
ZHAO Xin-wei, LUAN Xi-fu, PENG Ling-yun. Research on Storey Isolation Technology Applied to Exploitation of the Land Above the Platform of the Car Depot for Ba-wang-Fen Subway [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 110-114.
- [10] 蓝宗建. 巨型框架多功能减振结构体系在地震和强风作用下的振运分析 [D]. 南京: 东南大学, 2002.
- [11] Feng D M, He W F, Yang Y Q, Liu W G. Numerical Response Analysis and Shaking Table Tests for Bridge and Building Complex Structural System (Part I: Complex Structure Dynamic Test Research) [C]//14th WCEE, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [12] Liu W G, Yang Q R, Hua L, He W F. Numerical Response Analysis and Shaking Table Tests for Bridge and Building Complex Structural System (Part II: Parameter Optimum and Earthquake Response Analysis) [C]//14th WCEE, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [13] 国巍, 余志武, 国振. 房桥合一结构层间隔震优化策略研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(待定).  
GUO Wei, YU Zhi-wu, GUO Zhen. Research on Optimization Strategy of Storey Isolation in the Integrated Station-Bridge Structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32 (in press).
- [14] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 朱宏平, 杨紫健, 唐家祥. 利用连接装置控制两相邻结构的震动响应 [J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 56-61.  
ZHU Hong-ping, YANG Zi-jian, TANG Jia-xing. Control of the Seismic Response of Two Adjacent Structures Using a Damped Link [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(1): 56-61.

(责任编辑 时 博)