

# 基于隔震技术的桥梁结构抗采动变形抗地震保护<sup>\*</sup>

刘书贤<sup>1,2</sup>, 魏晓刚<sup>1</sup>, 张 弛<sup>1,3</sup>, 麻凤海<sup>4</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000;  
3. 本溪钢铁集团建设有限责任公司, 辽宁 本溪 117000; 4. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 为了提高采动区桥梁在竖向开采沉陷变形作用下的抗变形隔震能力, 提出抗开采沉陷变形隔震保护控制的思想, 首先分析了桥梁抗开采沉陷变形隔震保护控制的原理, 提出一种新型的抗开采沉陷变形隔震保护控制装置, 并分析了其抗采动变形抗地震的保护原理, 其次利用数值分析软件建立一座三跨连续板桥有限元模型, 对比分析了在开采沉陷变形和地震耦合作用下该装置的竖向抗变形隔震效果, 并量化分析了开采沉陷和地震对桥梁结构损害程度, 提出的抗变形隔震双重保护装置可以有效地抵御煤矿采动对桥梁的损害, 减小桥梁结构的地震动力响应。抗变形隔震双重保护装置有效改善了采动区桥梁结构的抗震性能和抗开采沉陷变形性能, 为我国矿区桥梁工程的安全建设和运营提供了科学的理论方法和依据。

**关键词:** 抗采动变形; 开采沉陷; 隔震技术; 采动区

**中图分类号:** V442.5<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)01-0086-08

## 0 前言

近年来, 随着我国煤炭工业和铁路公路的迅猛发展, 越来越多的桥梁不可避免的要建在煤矿采动区。如何科学合理地安全开采出桥梁下的煤炭(周国铨, 崔继宪, 1983; 何国清等, 1991), 并保证矿区桥梁的安全使用成为矿区工程建设亟待解决的科学问题。

煤矿采动区开采沉陷变形对桥梁的危害极大, 从20世纪50年代开始, 煤炭科学研究总院唐山分院设计出了抗采动铁路桥梁, 并先后在唐家庄矿铁路桥等桥梁、板塘铁路隧道、薛枣线、林密铁路线等多条桥梁隧道和铁路线下进行开采试验研究, 但其保护效果不理想(周国铨, 崔继宪, 1983); 河海大学在淮南矿区针对淮河大堤的煤矿采动损害现状, 针对堤身下沉5~9 m的情形进行了安全论证和加固技术措施, 其保护效果较好, 但是目前尚未形成可靠的理论与技术供参考和借鉴(周国铨, 崔继宪, 1983; 何国清等, 1991)。国外关于采动区桥梁保护问题相关的文献相对较

少, Nicholas (2004) 总结了美国 Arizona 州 Prior 矿区高速公路抗变形设计问题的复杂性, 简单介绍了桥梁抵抗开采沉陷变形的保护问题; Yokoyama 等 (1985) 针对日本 Tokyo Bay 的 Daiba 隧道由于水体下采煤所引起的不均匀下沉, 介绍了其合理有效的抵抗开采沉陷变形的保护措施与方法; Sung-Oong Choi (2000) 分析了 Moon-Kyung 大桥由于煤炭开采引起的不均匀沉降所造成的破坏, 并对其进行检测、加固维修。

采动区桥梁结构抗采动保护与抗地震保护是对立统一的, 抗震设计和抗开采沉陷变形设计的共同点是提高桥梁结构的抗变形能力(魏晓刚, 2012)。通过对矿区的实际调查可知, 采动区的桥梁结构虽然已经进行抗震设计, 但是由于采动区开采沉陷变形引起桥墩结构产生拉伸和压缩应力产生了一定程度的次生损伤(刘书贤等, 2013a), 造成桥墩等主要受力构件的水平抗剪、抗弯能力显著降低, 同时可能引起主梁等其他承载结构构件的受力超过其设计承载能力, 在发生地震时桥梁结构次生损伤会进行损伤演化灾变, 必然会发生比较严重的桥梁结构破坏甚至倒塌现象。本文

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-10-10.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51174038) 辽宁省教育厅科研项目(L2012111) 中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2012-319) 辽宁工程技术大学市场调研信息立项基金(SCDY2012010) 资助。

针对采动区某三跨连续板桥,利用有限元数值分析计算方法分析其在采用抗开采沉陷变形隔震双重保护装置后(刘书贤等,2011,2012,2013a),在煤矿开采沉陷变形和地震耦合作用下抗开采沉陷变形隔震双重保护装置的竖向抗开采变形和水平隔震效果,量化分析了开采沉陷和地震对桥梁结构的损伤破坏程度。

## 1 抗开采沉陷变形隔震保护控制装置

建筑隔震技术(胡聿贤,2006)主要是通过建筑的底部设置由橡胶支座或阻尼器等部件组成的隔震层,来延长建筑结构体系的自振周期,减少输入到上部结构的水平地震作用,以此来降低地震对建筑物的危害(周福霖,1997)。国内外大量试验以及工程经验表明(胡聿贤,2006;周福霖,1997):隔震结构一般可使结构的水平地震加速度反应降低60%左右(滕军,2009),但不能降低地表变形对结构的竖向作用(刘书贤等,2010)。

煤矿采动区属于抵抗地震不利的场地,发生地震时原有的地表移动变形有可能会加剧,甚至产生较大的震陷(刘书贤等,2013b),使得地面运动具有比较复杂的空间特性,导致传统的隔震技术(胡聿贤,2006;周福霖,1997)在采动区的桥梁结构保护具有一定的局限性。基于此,本文设计了抗开采沉陷变形隔震保护装置(国家实用新型专利号:ZL201220526127.3),主要是利用碟形弹簧较好的竖向隔震性能、形状记忆合金SMA的超弹性性能、橡胶支座和粘滞阻尼器的水平抗震特性(魏晓刚,2012),此装置主要用于煤矿沉陷区的建(构)筑物保护,以实现抵抗开采沉陷变形所引起的地表不均匀沉陷以及良好的水平隔震作用。

### 1.1 装置构成

采动区抗开采沉陷变形隔震保护装置主要由抗开采沉陷变形隔震保护支座(图1)、信号采集器和外接计算机组成,其中主要是依靠信号采集器采集地表移动变形数据,通过调节粘滞性阻尼器来压缩(释放)蝶形弹簧,从而实现采动区桥梁结构很好的抵抗地基不均匀沉陷和水平隔震保护作用。

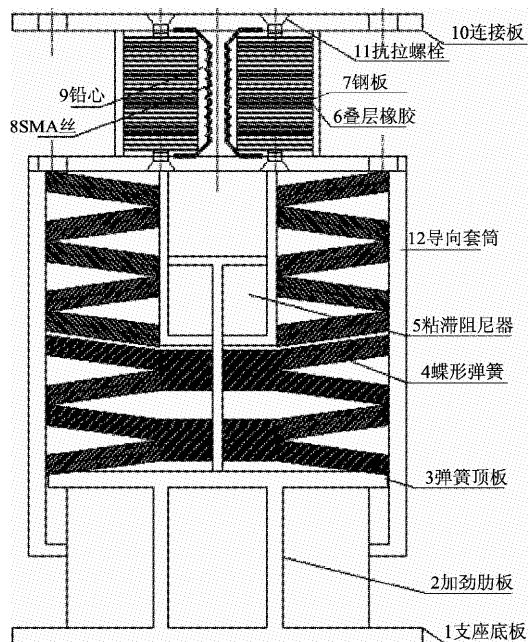


图1 抗开采变形隔震保护支座

Fig. 1 Protection bearing of anti-mining deformation isolation

### 1.2 工作原理

抗开采沉陷变形隔震保护支座主要由碟形弹簧(主要作用是竖向隔振和抵抗地基不均匀沉降)、竖向放置的筒式粘滞阻尼器(竖向隔振和调节碟形弹簧)、铅芯橡胶隔震支座(内含SMA丝,主要是为了防止支座的倾覆和保证及时复位)以及导向套筒等组成。碟形弹簧和粘滞阻尼器在导向套筒内以并联的方式进行组合来保证合适的竖向刚度和阻尼,其主要作用是保证桥梁结构能够有效的抵抗地表的移动变形以及具备良好的竖向隔震性能(刘书贤等,2011;魏晓刚,2012)。

抗变形隔震保护支座实现桥梁结构抵抗开采沉陷变形和地基不均匀沉陷的保护功能如下(魏晓刚,2012):抗变形隔震保护支座根据煤矿沉陷区的地表移动变形,依靠粘滞阻尼器来调节(压缩或释放)蝶形弹簧,保证桥梁基础的水平位置不变,以此缓解(消除)地基的不均匀沉降对桥梁结构的危害。发生地震时,抗变形隔震保护支座将筒式粘滞阻尼器和碟形弹簧机械锁死(此时保护装置下部结构的竖向刚度大),整个保护装置的水平隔震作用主要由上部水平隔震支座来完成,有效的减小水平地震作用对桥梁结构的危害(魏晓刚,2012)。

## 2 抗开采沉陷变形隔震保护装置的采动区桥梁计算模型

### 2.1 地震作用下普通隔震桥梁的动力学方程

地震作用下, 设置有水平隔震层的桥梁结构的动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_g \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2c & -c & 0 \\ -c & c+c_b & -c_b \\ & -c_b & c_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2k & -k & 0 \\ -k & k+k_b & -k_b \\ 0 & -k_b & k_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}.$$

式中:  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  分别为桥墩、盖梁、水平隔震层的质量;  $c$ 、 $c_b$  分别为桥墩、水平隔震层的阻尼系数;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_b$  分别为桥墩、盖梁、水平隔震层的刚度;  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $\ddot{x}_g$  分别为桥墩、盖梁、梁体、地面的运动加速度 (图 2)。

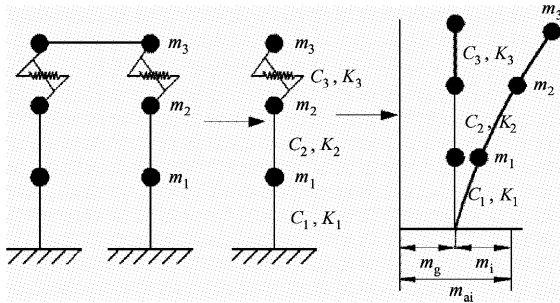


图 2 隔震桥梁结构的计算模型

Fig. 2 The calculation model of isolation bridge structure

### 2.2 地震作用下抗开采沉陷变形隔震桥梁的动力学方程

发生地震时, 抗开采沉陷变形隔震保护支座可以充分发挥保护装置上方的水平隔震支座内部的形状记忆合金丝 SMA 的超弹性性能, 从而有效的保证隔震装置的安全性。形状记忆合金丝 SMA 所提供的滞回恢复力为

$$F(x_s, \dot{x}_s) = \sigma(x_s, \dot{x}_s) A \cos \theta, \quad (2)$$

$$x_s = (\sqrt{(0.5(L+w) + x_b)^2 + h^2} - l_0) / l_0. \quad (3)$$

式中:  $l_0$  为形状记忆合金丝 SMA 的初始长度,  $x_s$  为形状记忆合金丝 SMA 的应变,  $x_b$  为水平隔震层相对水平位移,  $x_b = x_s - l_0$ 。

则地震作用下抗开采沉陷变形隔震桥梁的动力学方程为

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

式中:  $\mathbf{E}$  为控制力的方向指示矩阵 (周福霖, 1997), 对于隔震结构, 可以设  $\mathbf{E} = \{0, -1, 1\}^T$ ;  $\mathbf{U}$  为一维控制力向量 (周福霖, 1997), 令  $\mathbf{U}(t) = F_{\text{SMA}}$ , 其中,  $F_{\text{SMA}}$  为抗开采沉陷变形隔震保护支座中上部水平隔震层中形状记忆合金 SMA 丝的恢复力, 其余符号意义同式 (1)。

此时与式 (4) 相对应的状态方程为

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{W}\ddot{\mathbf{X}}_g(t), \quad (5)$$

$$\text{其中: } \mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{I}_1 \end{bmatrix}.$$

式中:  $\mathbf{A}$  为  $2n \times 2n$  维的系统矩阵,  $\mathbf{B}$  为  $2n \times 1$  维控制装置位置指示矩阵,  $\mathbf{Y}(t)$  为反映  $2n$  维状态的向量,  $\mathbf{W}$  为表示地震作用的  $2n$  维向量,  $\mathbf{I}_n$  为  $n$  维单位矩阵。

### 2.3 动力学方程的离散化分析

地震发生时分析体系的运动方程, 需要对被动控制力进行离散化处理, 以此来保证所建立的运动方程 (基于连续时间系统) 的合理性和准确性 (胡聿贤, 2006)。

对方程进行离散化分析时, 首先需要将时间离散化, 在单位时间  $\Delta t$  内地震荷载控制力向量  $\mathbf{U}(t)$  可以视为常量, 此时  $\mathbf{U}(t) = \mathbf{U}(k\Delta t)$ ,  $\ddot{u}_\sigma(t) = \ddot{u}_\sigma(k\Delta t)$ ,  $k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$ 。

在周期时间间隔  $[k\Delta t, (k+1)\Delta t]$  内, 动力学方程 (5) 的解析解为

$$Y[(k+1)\Delta t] = e^{A\Delta t}Y(k\Delta t) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A[(k+1)\Delta t-\tau]} [BU(\tau) + W\ddot{u}_g(\tau)] d\tau = e^{A\Delta t}Y(k\Delta t) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A[(k+1)\Delta t-\tau]} [BU(k\Delta t) + W\ddot{u}_g(k\Delta t)] d\tau. \quad (6)$$

$$\text{令 } Y_{k+1} = Y[(k+1)\Delta t], Y_k = Y(k\Delta t), U_k = U(k\Delta t), \ddot{u}_{gk} = \ddot{u}_g(k\Delta t).$$

则式(6)可转换为

$$Y_{k+1} = GY_k + HU_k + W_1\ddot{u}_{gk}. \quad (7)$$

其状态转移矩阵为  $G_{2n \times 2n} = e^{A\Delta t}$ , 而

$$\begin{aligned} H_{2n \times r} &= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A[(k+1)\Delta t-\tau]} B d\tau \\ &= e^{A\Delta t} \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A[k\Delta t-\tau]} B d\tau. \end{aligned}$$

$$\text{令 } \sigma = \tau - k\Delta t, \text{ 则 } H_{2n \times r} = e^{A\Delta t} \int_0^{\Delta t} e^{-A\sigma} B d\sigma$$

$$\text{令 } t = \Delta t - \sigma, \text{ 则 } H_{12n \times r} = \int_0^{\Delta t} e^{At} B d\tau = (e^{A\Delta t} - I)A^{-1}B \quad (8)$$

同理可得:

$$\begin{aligned} W_{12n \times r} &= \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{A[(k+1)\Delta t-\tau]} W d\tau \\ &= (e^{A\Delta t} - I)A^{-1}W. \end{aligned} \quad (9)$$

通过分析可知:  $H, G, W_1$  都是只与时间  $\Delta t$  相关的常数矩阵, 式(9)即为离散化后地震发生时桥梁结构的动力学方程。

### 3 有限元算例分析

某矿区三跨钢筋混凝土连续桥梁, 其跨度为  $3 \times 24 \text{ m}$ , 桥主梁的宽度为  $15 \text{ m}$ , 高度为  $1.7 \text{ m}$ , 横截面积  $9.11 \text{ m}^2$ , 桥梁混凝土强度为 C40, 其密度为  $2550 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $3.50 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ , 上部桥梁结构的总质量  $2400.8 \text{ t}$ ; 设桥墩的配筋率为  $0.01$ , 此时桥墩弹性模量可近似为  $34 \text{ GPa}$ 。设桥墩高  $9 \text{ m}$ , 其截面积  $7.98 \text{ m}^2$ , 桥梁所在的矿区场地为 II 类场地, 该矿区的抗震设防烈度为 8 度, 设计加速度为  $0.2 \text{ g}$ ; 对于普通橡胶隔震支座, 其水平刚度为  $3805 \text{ kN/m}$ , 阻尼比为  $5\%$  (滕军, 2009)。

基于有限元分析软件 ANSYS, 建立三跨连续梁桥有限元模型 (图 3), 其中桥墩和主梁采用 BEAM 单元, 忽略场地土的柔性, 采动区桥梁模型的顶部支座的连接方式为铰接; 采用抗开采沉陷变形隔震保护支座的桥梁模型, 采用弹簧单元 Combin40 来实现竖向抵抗开采沉陷变形和水平隔震支座的双线性模型, 其中有限元分析 ANSYS 软件中的单元生死功能可以用来模拟煤炭开采所引起的地表的不均匀沉降。

为了保证采动区开采沉陷变形的时间周期与地震动发生时间有比较明确的区别性和可对比性, 选用地震波时应采用强震记录时长较长的 (魏晓

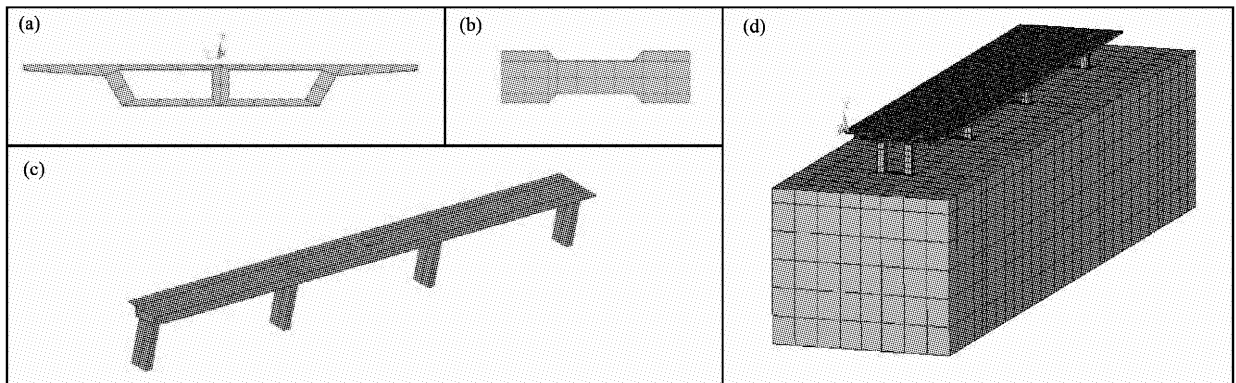


图3 三跨连续梁桥三维有限元模型

(a) 主梁横截面网格划分; (b) 桥墩横截面网格划分; (c) 三跨连续梁桥有限元模型; (d) 采动区桥梁结构整体模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of the three-span continuous beam-bridge

(a) mesh generation of girder cross-section; (b) mesh generation of pier cross-section; (c) finite element model of three-span continuous beam-bridge; (d) integrated model of bridge structure in mining subsidence area

刚, 2012)。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010), 选择了阪神地震波, 但是考虑到低频成分在该地震波所占的比例较大(低频成分对于验证抗开采沉陷变形隔震保护装置的隔震作用效果不明显), 只从中选取了阪神地震波加速度较大的 20 s (5~25 s 之间) 记录做为算例分析的地震波的整体输入(图 4)。

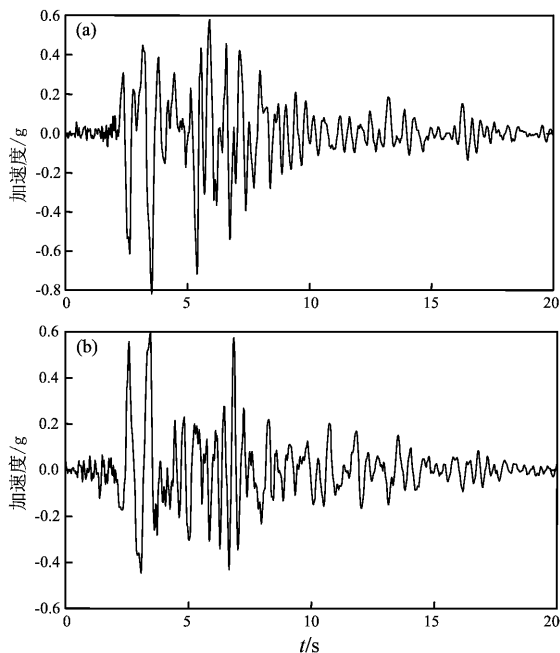


图 4 日本阪神地震波(截取后)

(a) 东西向; (b) 南北向

Fig. 4 Waveform of Osaka-Kobe earthquake in Japan (after the intercept)  
(a) EW direction; (b) SN direction

## 4 计算结果分析

为了保证准确分析采动区桥梁结构在煤矿开采沉陷变形和罕遇地震作用下损伤破坏程度, 首先分别对开采沉陷变形和阪神地震波单独作用下, 矿区的桥梁柱端位移的时程曲线进行分析判断(图 5)。

通过分析图 5 可知: 桥梁在煤矿采动损害的影响下, 其柱端的位移时程曲线与矿区地表各种的移动变形(地表水平变形、倾斜、下沉、地表曲率、剪切变形以及扭转变形等)密切相关, 并且是一个长期发展和损伤破坏的过程, 在煤炭开采初期桥梁破坏较小, 随着煤炭开采的进行其地表的沉陷移动变形的不断发展桥梁结构柱端位移加

剧, 表明其破坏严重; 桥梁结构在发生地震时, 是一个瞬间破坏的过程, 在地震发生过程中, 桥梁柱端的位移随着地表的移动变形的加剧而在短时间内达到最大, 此时震害现象严重。

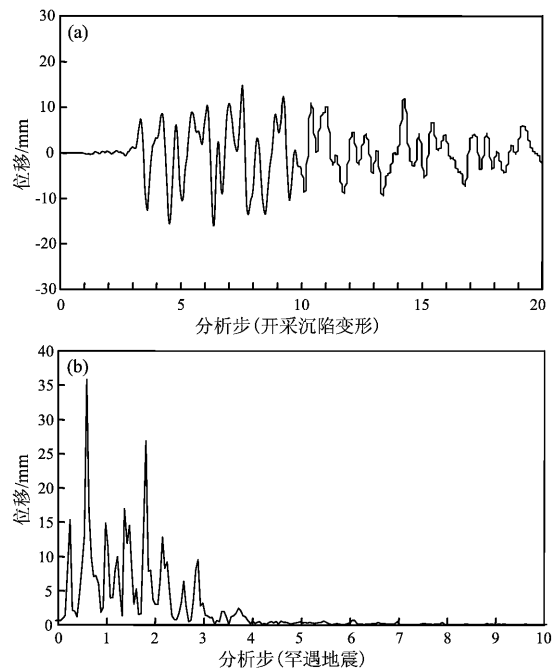


图 5 桥梁柱端位移时程曲线

(a) 仅发生开采沉陷变形; (b) 仅发生地震

Fig. 5 Displacement time-history curve of column end of bridge

(a) only mining subsidence deformation; (b) only earthquake

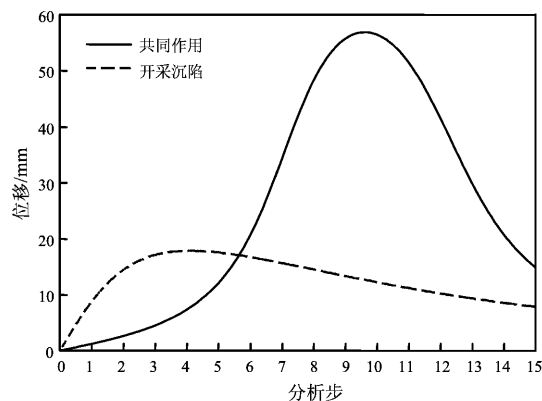


图 6 采动区桥梁柱端位移响应时程曲线

Fig. 6 Displacement response time-history curve of column end of bridge in mining subsidence area

通过分析图 6 可以发现: 煤矿采动桥梁的柱端位移随着煤炭开采过程呈现出先急剧增加后缓慢减小的趋势, 其峰值位移为 19.23 mm, 说明在煤

矿采动损害影响下桥梁结构的损伤演化是长期缓慢发展的；在煤矿采动和地震联合作用下，桥梁结构的柱端位移迅速增加为 58.27 mm，峰值位移增加了 203.02%，当地震动结束时，其柱端位移迅速下降，最后基本上达到仅有煤矿采动单一荷载作用下的桥梁结构的位移变化趋势。由此可知：煤矿采动对桥梁结构的次生损伤在地震作用下加速发展，两种不同成灾机制的灾害荷载对桥梁结构的危害相互影响不容忽视。

通过对比设置不同保护支座的采动区桥梁结构隔震效果（图 7）可知：采用普通隔震支座的采动区桥梁结构的  $x$  向相对位移峰值为 0.014 3 m， $z$  向位移的峰值为 0.034 9 m；采用抗开采沉陷变形隔震保护支座的采动区桥梁结构的  $x$  向相对位移峰值为 0.011 9 m， $z$  向位移的相对峰值是 0.023 2 m。分析峰值位移可知：在抗开采沉陷变形隔震双重保护支座的隔震保护下桥梁结构的最大位移绝对值比设置普通橡胶隔震支座的  $x$  向位移减少 20.2%， $z$  向位移减少 33.5%；由此可知抗开采沉

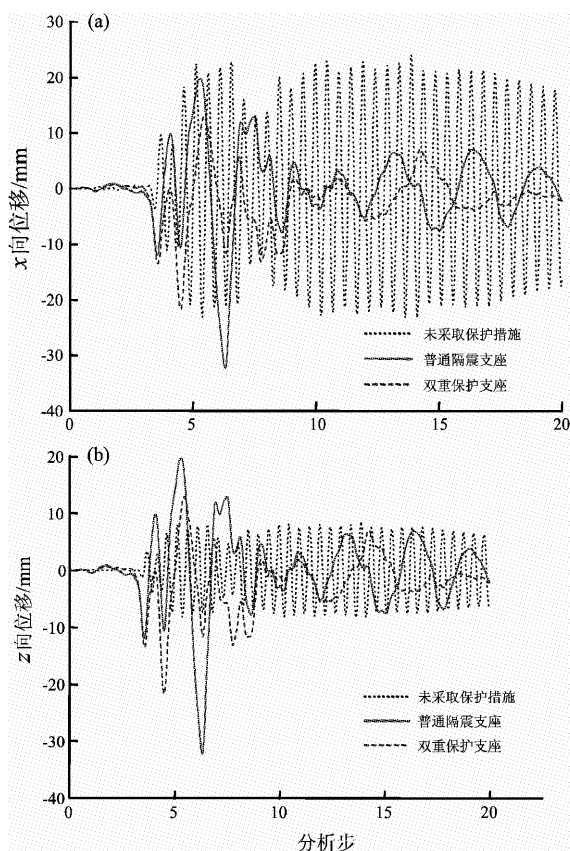


图 7 阪神波作用下桥梁柱端位移时程曲线  
Fig. 7 Displacement time history curve of column end of bridge under Hanshin wave

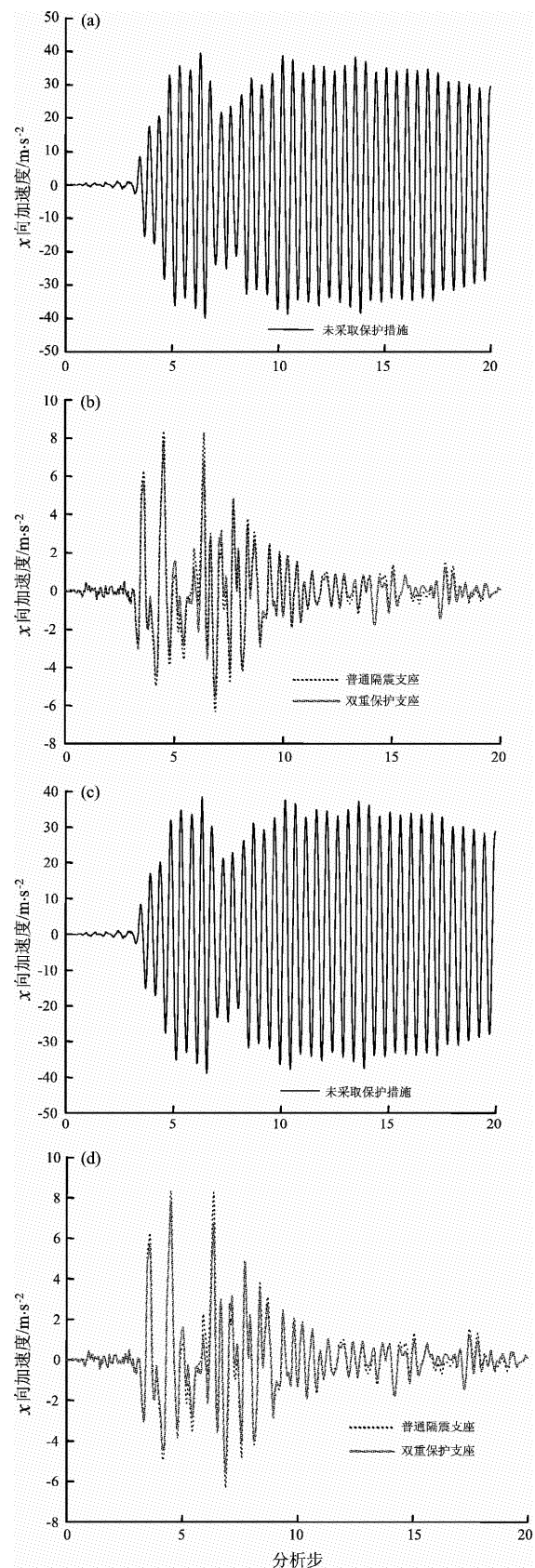


图 8 阪神波作用下桥梁柱端加速度时程曲线  
Fig. 8 Acceleration time history curve of column end of bridge under Hanshin wave

陷变形隔震双重保护支座的隔震效果相对较好,在罕遇地震作用下其减小位移的控制效果较为理想。

分析图 8 可知,未采用任何保护措施煤矿采动桥梁的绝对加速度峰值  $x$  向为  $41.22 \text{ m/s}^2$ ,  $z$  向为  $39.57 \text{ m/s}^2$ ;采用普通隔震支座的煤矿采动桥梁的绝对加速度峰值  $x$  向为  $10.29 \text{ m/s}^2$ ,  $z$  向为  $8.89 \text{ m/s}^2$ ;采用抗开采沉陷变形隔震双重保护支座的采动区桥梁结构绝对加速度峰值的  $x$  向为  $8.09 \text{ m/s}^2$ ,  $z$  向为  $7.57 \text{ m/s}^2$ 。

经比较发现抗开采沉陷变形隔震双重保护支座与普通隔震支座相比其隔震效果控制理想:采动区桥梁结构的绝对加速度  $x$  向峰值加速度减小 27.19% 左右,  $z$  向减小 17.44% 左右;与未采取任何保护措施采动区桥梁结构相比,峰值加速度  $x$  向减小了 409.52% 左右,  $z$  向 422.72% 左右;由此可知:隔震支座可以有效的减小地震对桥梁的破坏,减小输入到桥梁结构的能量,达到保护桥梁的目的;而抗开采沉陷变形隔震双重保护支座对普通的隔震而言,其适宜的水平刚度和竖向刚度能够保证在地震作用下控制位移的效果更加合理,其隔震耗能效果更为理想。

## 5 讨论

煤矿采动对桥梁结构的损伤破坏是长期缓慢发展的,同时存在于煤炭开采过程中和煤炭开采完成后相当长的时间内,所以矿区桥梁建设设计需要考虑抗采动变形设计;煤矿采动对桥梁所造成的次生损伤在地震作用下不断发展,是导致煤矿采动桥梁结构破坏倒塌的不可忽略的因素;对

于矿区桥梁结构进行设计施工时,需要同时考虑到煤矿采动损害、地震震害破坏以及二者的耦合致灾力学机制,采取切实有效的抗开采沉陷变形隔震保护装置,保证桥梁结构具有良好的抗震性能和抗采动变形性能。

## 参考文献:

- 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 1991. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟,等. 2013a. 采动区建筑物抗变形隔震装置的力学性能分析[J]. 实验力学,28(4):542-548.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟,等. 2013b. 煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J]. 中国矿业大学学报,42(4):526-534.
- 刘书贤,魏晓刚,魏亚强. 2010. 采动区建筑物抗震抗变形双重保护作用机理分析[J]. 防灾减灾工程学报,30(S):305-308.
- 刘书贤,魏晓刚,魏亚强. 2011. 基于隔震技术的采动区半主动双重保护装置减震分析[J]. 土木工程与管理学报,28(4):1-5.
- 滕军. 2009. 结构振动控制的理论、技术与方法[M]. 北京:科学出版社.
- 魏晓刚. 2012. 考虑土-结构相互作用的采动区建筑物抗震抗变形双重保护装置减震分析[D]. 阜新:辽宁工程技术大学.
- 周福霖. 1997. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社.
- 周国铨,崔继亮. 1983. 建筑物下采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社.
- Nicholas M. . 2004. Priznar. Technical Group on Abandoned Underground Mines Fourth Biennial[M]. Abandoned Underground Mine Workshop.
- Sung-Oong Choi. 2000. Engineering Site Characterization in The MOON - KYUNG Limestone[J]. Stanford Rock Fracture Project, V(11):1-9.
- Yokoyama, Akira, Tottori, et al. 1985. Solving the Problem of Uneven Settlement of Shield and Immersed Tunnel in Deep Soft Ground[M]. Czech: Czechoslovak Tunnelling Committee.
- GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].

## Analysis on Anti-mining Deformation and Anti-seismic Protection of Bridge Structure based on Isolation Technology

LIU Shu-xian<sup>3,2</sup>, WEI Xiao-gang<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1,3</sup>, MA Feng-hai<sup>4</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(3. Benxi Iron and Steel Group Construction Co., LTD, Benxi 117000, Liaoning, China)

(4. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

### Abstract

In order to improve the anti-deformation and isolation ability of bridges under the action of vertical mining subsidence deformation in the mining areas, the control thoughts of double protection of anti-mining subsidence deformation and anti-seismic has been put forward. Firstly, basing on analyzing the principle of double protection of anti-mining subsidence deformation and anti-seismic of the bridge, we put forward a new type of isolation protection control device of anti-mining subsidence deformation and analyzed the protection principle of anti-mining deformation and anti-seismic. Secondly, we build the finite element model of a continuous slab bridge across three spans by the numerical analysis software to analyze and compare the vertical anti-deformation isolation effect of the double protection device under the coupled action of mining deformation and earthquake, and quantitatively analyze the damage degree of bridge structure caused by the mining subsidence and earthquake to put forward that double protection device of anti-deformation isolation can resist the damage of the bridge caused by coal mining effectively, and it can also decrease the dynamic response of the bridge caused by earthquake. The double protection device of anti-mining deformation subsidence deformation and anti-seismic can improve the performance of anti-mining and anti-seismic of bridge structure in mining area effectively, therefore it can provide scientific theory method and basis for mining bridge project safety construction and operation in our country.

**Key words:** anti-mining deformation; mining subsidence; isolation technology; mining areas