

文章编号:1000-582X(2009)08-0920-05

空间地震动作用下大跨度拱桥地震响应分析

李正英, 李正良

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘要:基于空间非平稳地震动场模型,应用谐波合成法模拟生成了用于空间地震动输入的地震动加速度时程。在此地震动输入下,以重庆菜园坝大桥作为模型原型,采用时程分析方法详细研究了此种大跨度拱与刚构组合桥在一致输入、行波输入和多点输入下的地震响应特性。分析结果表明,地震动空间变化对主拱的轴力和拱桥跨中构件对称反应影响显著,使其大部分反应明显增大;而刚构的大部分内力都有减小。

关键词:拱桥;空间地震动;地震响应

中图分类号: TU331.4

文献标志码: A

Seismic response of long-span arch bridge under spatially variable seismic excitation

LI Zheng-ying, LI Zheng-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Based on a spatial nonstationary model of seismic ground motion, the seismic acceleration time history are simulated by the wave superposition method. And then taking CaiYuanBa arch bridge in Chongqing as original model, this paper utilizes time-history analysis method to analyze the seismic response characteristic of this type of long-span arch bridge by support consistent or multi-support seismic excitation. The numerical results indicate that the spatial variation of seismic ground motion have significant effect on the response of the arch bridge. Thrust of arch rib and vertical displacement, internal force of arch crown are increased greatly, but most internal forces of stiffener support are reduced.

Key words: arch bridges; spatially variable seismic excitation; seismic response

中国是一个多地震的国家,自唐山地震以来,抗震防灾工作正日益受到重视。大跨度拱桥作为公路交通的枢纽,是城市的交通生命线,一旦地震使交通线遭到破坏,可能导致的生命财产及间接经济损失是巨大的。现有的研究表明^[1-6],地震动的空间变化对大跨度拱桥的抗震安全性有重要的影响,由于大跨度拱桥结构形式复杂,需要对不同的拱桥结

构作具体的分析。基于非一致地震动场模型,通过数值模拟方法生成具有特定相干特性并满足特定功率谱的空间地震动时程。将该地震动加速度时程作为空间地震动输入,以重庆菜园坝大桥作为模型原型,研究了该类型大跨度拱桥在一致输入、行波输入和多点输入下的地震反应特性。

收稿日期:2009-03-10

基金项目:国家重大基础研究前期专项(2003CCA01500)

作者简介:李正英(1975-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事结构工程研究,(Tel)13193079475;
(E-mail)Lizhengy@yahoo.com.cn.

李正良(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,从事工程力学与结构工程研究。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

1 空间地震动输入

对于大跨度拱桥的抗震分析,不仅要考虑地震动的时变化,而且应该考虑地震动的空间变化。常用的考虑地震动空间变化方式是采用行波模型,它只考虑了时滞效应。事实上,导致地震动空间变化的主要因素有地震动的时滞效应、部分相关效应、局部场地效应^[7-9],因此行波模型具有一定的局限性。随着美、日等国的研究者在一些地震活动频繁的地区建立密集台阵,获得了大批高质量的观测数据,为地震动空间变化的研究提供了宝贵的资料,使得地震动场模拟的随机过程理论逐步完善。随机地震动场模型的出发点是在各个不同的地面支承处输入不同的自功率谱来考虑局部场地的变化,而不同支承处地面运动的相关性则用所谓的相干函数模型来反映。根据空间非一致地震动场模型,采用数值模拟方法生成地震动加速度时程,以便用于大跨度拱桥的空间地震动响应分析。

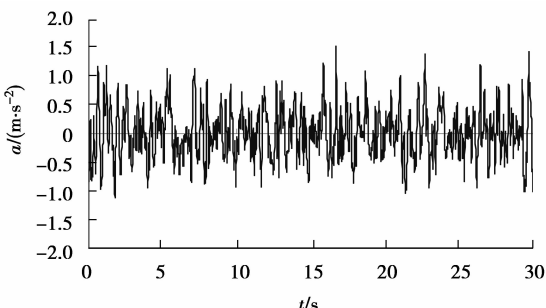
在空间变化地震动的模拟中,一般采用功率谱密度矩阵描述较为方便。已知地震动场各点的自功率谱密度函数,则不同点之间的互谱密度函数可表示为

$$S_{jk}(\omega) = \sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}\rho_{jk}(l,\omega)e^{-i\omega \frac{l}{v}}, \quad (1)$$

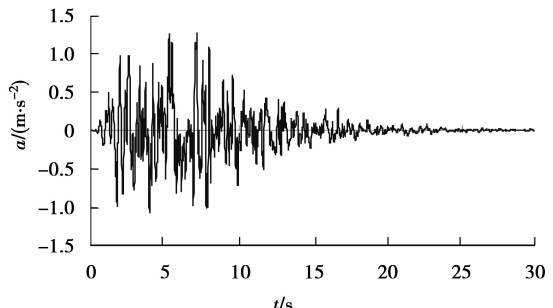
其中: $S_{jj}(\omega)$ 、 $S_{kk}(\omega)$ 为 j 、 k 两点的自功率谱密度矩阵; $\rho_{jk}(l,\omega)$ 为两点地震动的相干函数; l 为两点在地震波传播方向上的投影距离; v 为地震波视波速。

自功率谱模型采用 Clough-Penzien 模型^[10]

$$S(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \cdot \frac{\frac{\omega^4}{\omega_f^4}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2}\right)^2 + 4\xi_f^2 \frac{\omega^2}{\omega_f^2}} S_0, \quad (2)$$



(a) 平稳过程加速度时程



(b) 非平稳过程加速度时程

其中: ω_f 、 ξ_f 为与滤波特性有关的参数,可根据结构和场地的具体情况确定。

相干函数采用屈铁军—王君杰—王前信(QWW)模型^[11]

$$\rho_{jk}(l,\omega) = \exp[-a(\omega) \cdot l^{b(\omega)}], \quad (3)$$

$$\text{其中: } a(\omega) = 0.000\ 016\ 78\omega^2 + 0.001\ 219; \quad (4)$$

$$b(\omega) = -0.005\ 5\omega + 0.767\ 4. \quad (5)$$

考虑强度非平稳随机过程,功率谱密度矩阵表示为

$$S(\omega,t) = |A(t)|^2 S(\omega) = |A(t)|^2 \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \text{复共轭} & & \cdots & \cdots \\ & & & S_m(\omega) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, $A(t)$ 为强度包线函数,按下式取值

$$A(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2, & 0 \leq t < t_1; \\ 1.0, & t_1 \leq t < t_2; \\ e^{-c(t-t_2)}, & t_2 \leq t < t_d. \end{cases} \quad (7)$$

该桥址附近场地属中硬场地,故设为 II 类场地,按三角级数法^[12]合成了随后将用于大跨度拱桥抗震分析的地震动时程样本。抗震分析需要模拟 4 个支点的震动时程,各点位置如图 2 所示。模型参数取值见表 1,合成的震动加速度时程样本及模拟功率谱和目标功率谱(对数坐标)的比较见图 1。

表 1 算例功率谱模型参数取值

$\omega_g /$ (rad · s)	ξ_g	ω_f (rad · s ⁻¹)	ξ_f	S_0 (cm ² / (rad · s ²))	t_1 / s	t_2 / s	c / s^{-1}
15.71	0.72	1.57	0.72	33.16	2	8	0.286

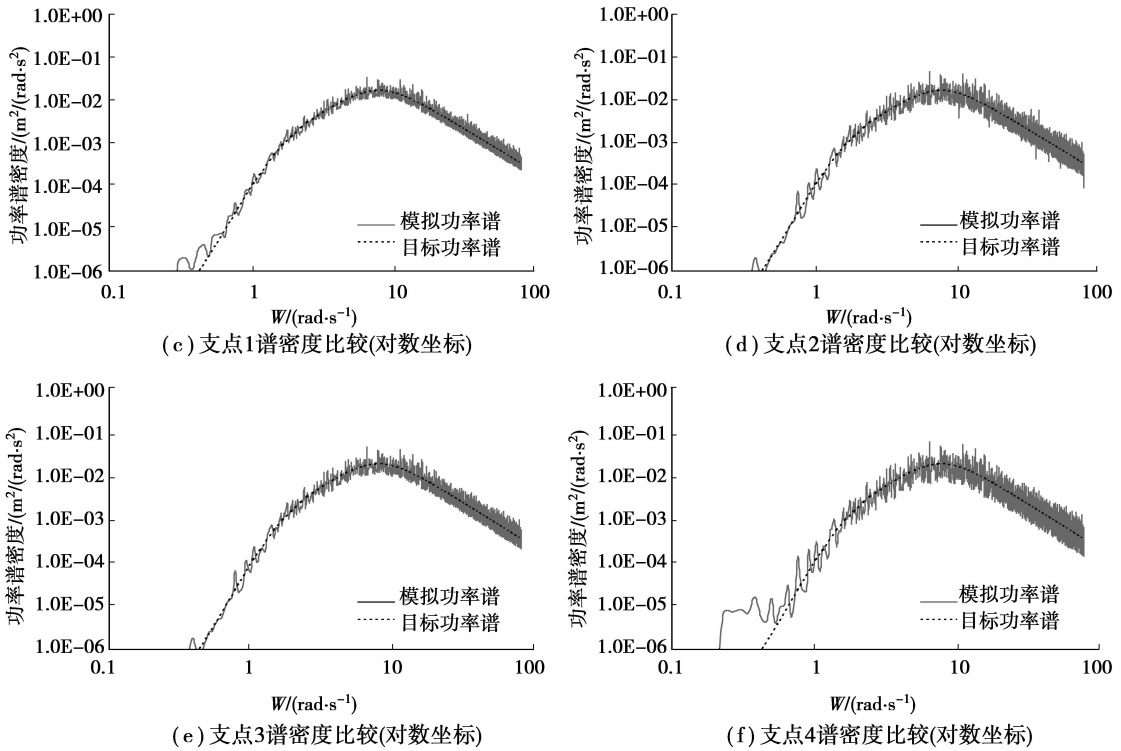


图1 算例加速度时程及模拟功率谱和目标功率谱的比较

2 大跨度拱桥多点激励下地震反应分析方法

对于大跨度的结构,由于其支座空间位置的变化引起地震地面运动的差异导致多点激励问题的产生。目前分析结构多点激励地震响应常采用时程分析法中的相对运动法。相对运动法将位移分解成动力位移和拟静力位移,有助于理解结构在非一致激励下的性能,且该法求解比较简单。因此,采用相对运动法,运动方程写成分块矩阵的形式为^[13]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sg} \\ \mathbf{M}_{gs} & \mathbf{M}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s \\ \dot{\mathbf{x}}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sg} \\ \mathbf{C}_{gs} & \mathbf{C}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s \\ \dot{\mathbf{x}}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sg} \\ \mathbf{K}_{gs} & \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_g \end{Bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

式中: \mathbf{x}_s 为结构非支承节点位移; \mathbf{x}_g 为支承节点位移。质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵中的非对角项反映了结构非支承节点自由度与支承节点自由度间的相互影响。对于位移可写成

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{ts} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{ps} \\ \mathbf{x}_{pg} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

$\{\mathbf{x}_{ts}\}$ 为动位移分量, $\{\mathbf{x}_{ps}\}$ 为拟静力位移分量。由拟静力位移的定义可知,拟静位移与支点位移间应满足

$$\mathbf{x}_{ps} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sg} \mathbf{x}_{pg} = \mathbf{R} \mathbf{x}_{pg}, \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sg}, \quad (11)$$

\mathbf{R} 称为影响矩阵。假设单元质量矩阵采用集中质量矩阵,由式(8)的第一组方程,并略去右端阻尼项,得到线性结构在多点激励地震作用下运动方程的一般形式为

$$\mathbf{M}_{ss} \dot{\mathbf{x}}_{ts} + \mathbf{C}_{ss} \dot{\mathbf{x}}_{ts} + \mathbf{K}_{ss} \mathbf{x}_{ts} = -\mathbf{M}_{ss} \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}_{pg}, \quad (12)$$

对于运动微分方程(12)的求解,采用Wilson- θ 法数值积分方法得到动力反应。考虑多点激励时,结构节点总位移响应为动力位移 \mathbf{x}_{ts} 再叠加上拟静力位移 \mathbf{x}_{ps} ,而要求拟静力位移 \mathbf{x}_{ps} ,关键是先求出支承点地震位移时程列向量 \mathbf{x}_g 。记 $\mathbf{x}_{gi}(t)$ 为单点地震位移时程,则将各支承点的 $\mathbf{x}_{gi}(t)$ 组合即可得到 \mathbf{x}_g 。 $\mathbf{x}_{gi}(t)$ 可通过已知的地震加速度时程积分得到,如果直接对加速度时程二次积分得到的位移时程则会出现漂移现象,因此必须对加速度波形的基线进行修正。近似认为地震起始位移和速度为零,先对加速度积分得到速度;所有速度取平均值;对速度进行修正,原速度减去速度平均值;再积分求得地震位移时程 $\mathbf{x}_{gi}(t)$;最后将各支承点的 $\mathbf{x}_{gi}(t)$ 组合得到 \mathbf{x}_g ,从而求得拟静力位移 \mathbf{x}_{ps} 。

按照上述原理,基于Visual C++6.5操作平台编制了三维可视化有限元程序3DFIN_BRIDGE。该程序主要包括单元、结点、荷载、材料、截面等类对

象,另外有一个有限元方法类,里面的成员函数是各种有限元分析方法,可进行静力分析、模态分析、一致及多点激励时程分析等^[14]。

3 大跨度拱桥地震响应分析

3.1 全桥模型

重庆市菜园坝大桥主桥采用 Y 形刚构与提篮式钢箱系杆拱、钢桁梁的组合结构。系杆拱桥主跨 420 m,对称布跨的边跨和侧跨分别为 102、88 m,主桥总长 800 m,是目前同类桥梁中跨径最大的轻轨两用无推力式钢箱系杆拱桥。以该桥作为模型原型,以下采用杆系有限元建立简化的中承式拱桥模型。拱肋采用空间梁单元模拟,吊杆和拉索采用空间杆单元模拟。桥面采用单脊式模型建模,轴线通过主梁断面的扭心,整个主梁的刚度以及分布质量集中在轴线上,通过短刚臂与拉索形成“鱼骨式”模型,同时质量惯性矩也通过短刚臂调节。三维拱桥全桥计算模型如图 2 所示。边界条件,墩底:固接;桥面主梁与桥墩:铰接,约束 $x、y、z$ 方向平动自由度。

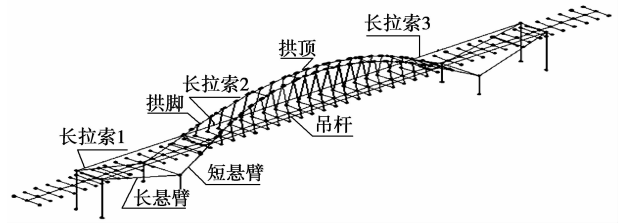


图 2 拱桥有限元模型

3.2 计算结果分析

按前述方法合成地震动,并选择三条地震动时程样本作为输入地震激励,分别采用纵向一致输入、行波输入和多点输入形式,求其地震响应。每种地震动输入形式中,取三条地震动输入下的反应平均值作为结果来进行分析。求得三种输入方式下结构的总位移,各控制截面的总位移峰值变化见图 3,其中对于行波、多点输入,总位移=动位移+拟静力位移。三种输入情况下,主拱主要截面振动位移见表 2,各控制截面的内力比较见图 4,吊杆及拉索的轴力见表 3。

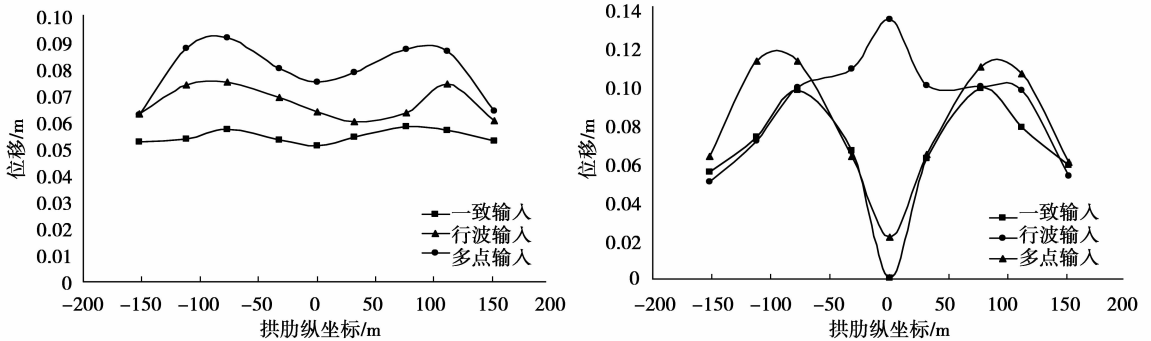


图 3 各种输入方式下拱肋控制截面总位移变化图

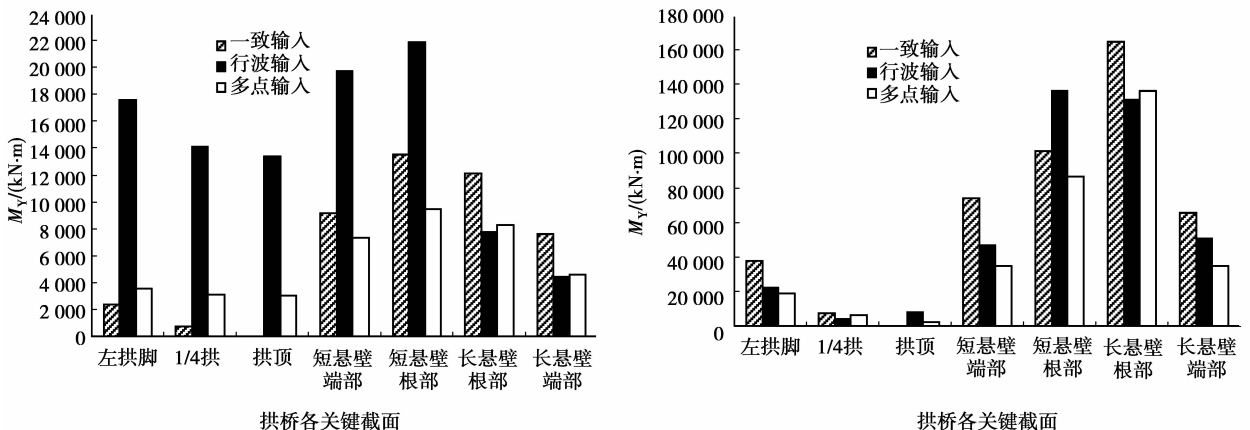


图 4 纵向输入下各关键截面内力比较

表2 控制截面的动位移峰值比较 m

位移分量	U_x			U_z		
	纵向	行波	多点	纵向	行波	多点
激励方式						
拱脚	0.051 9	0.045 2	0.050 5	0.057 3	0.043 6	0.056 3
1/4拱	0.058 4	0.036 2	0.084 7	0.101	0.087 0	0.107 0
拱顶	0.051 6	0.023 8	0.067 2	4.81E-05	0.117 1	0.019 3
主梁跨中	0.075 8	0.007 9	0.018 0	0.007 1	0.121 6	0.019 2

表3 纵向输入下吊杆及拉索轴力 KN

构件	输入方式		
	一致输入	行波输入	多点输入
左边跨吊杆	2 819.50	1 838.2	1 419.80
中跨吊杆	62.69	777.2	181.57
右边跨吊杆	2 312.70	1 376.8	1 391.80
长拉索1	4 629.9	3 156.8	4 464.20
长拉索2	287.17	3 157.6	632.90
长拉索3	4 991.60	2 694.3	4 691.40

在纵向地震动输入下,振动以面内竖弯为主,主要激起主拱的纵向和竖向位移,横向位移较小,因此未给出横向位移结果。从计算结果可看出,在纵向一致及多点输入下,主拱的最大竖向位移在1/4跨附近;但行波输入下,主拱的最大竖向位移发生在拱顶处,说明行波输入对拱顶竖向位移影响最大,行波输入下拱顶竖向位移较一致激励下有显著增大,主要原因是考虑了行波效应后拱桥的对称振型被激发,导致拱顶的竖向动位移明显增加,桥面主梁跨中竖向位移的变化趋势与拱顶相似。

纵向三种输入方式下,主拱的最大纵向位移均在1/4拱附近。从振动位移时程曲线来看,1/4拱、拱顶以及拱脚的纵向动位移在行波输入较一致输入下有所减小,主要是由于行波输入下其非对称振型被抑止。但考虑拟静力位移的影响,从图3、4中的拱肋总位移来看,行波输入下主拱各截面的纵向位移比一致输入下均有增加,说明在震动纵向输入形式下,拟静力位移对主拱的纵向反应有较大影响。

从计算结果来看,震动的空间变化对该类型大跨度拱桥的各部分内力有不同的影响。一致输入、行波输入和多点输入下,行波输入下拱脚的轴力增加明显,增加了6.5倍,多点输入下,轴力增大0.5倍,与一致输入相比,拱脚面内弯矩有少许减小;1/4拱的轴力在行波输入下也是增加很大,与一致输入相比,增加了17.6倍,弯矩变化不大;拱顶的内力受空间震动输入影响最大,一致输入下,拱顶的轴力及弯矩都很小,行波输入及多点输入下,拱顶轴力及

面内弯矩显著增加;对于刚构,与拱交接的短悬臂端部和根部的轴力在行波输入下有较大的增大,短悬臂根部的弯矩有一定增大,其余内力在行波和多点输入下相比于一致输入均有不同程度的减小。

对于吊杆和拉索,边跨吊杆在行波输入和多点输入下的拉力均有减小。相反,跨中吊杆的拉力明显增大,行波输入下,跨中吊杆拉力增大了11.3倍,多点输入下增加1.89倍。对于长拉索,两边跨的长拉索在行波输入下轴力减小,多点输入下轴力与一致输入相当;中跨长拉索在行波输入下轴力显著增大。

综上所述,在各种输入工况中,纵向行波输入对跨中构件影响最大,拱顶内力以及跨中吊杆和拉索轴力均有显著增大,主要是由于行波效应激发对称振型,从而引起跨中反应明显增大;另外,行波输入下拱肋各截面轴力增加明显。

4 结 论

根据非一致地震动场模型,通过数值模拟方法生成用于空间震动输入的地震动时程。在此地震动输入下,以重庆菜园坝大桥作为模型原型,详细研究了大跨度拱桥在一致输入、行波输入和多点输入下的地震响应特性。计算结果表明,由于行波效应激发对称振型,对拱跨中构件的面内内力及竖向位移影响显著,使其反应明显增大;行波输入和多点输入下,除与拱交接的短悬臂的轴力在行波输入下有较大增大外,刚构的大部分内力都有减小;另外这两种输入方式中,拟静力作用对主拱纵向位移有一定影响。

参考文献:

- [1] 王君杰,王前信,江近仁. 大跨拱桥在空间变化地震动下的响应[J]. 振动工程学报,1995, 8(2):119-125.
WANG JUN-JIE, WANG QIAN-XIN, JIANG JIN-REN. Seismic response of long-span arch bridge under spatial variable seismic excitation [J]. Journal of Vibration Engineering, 1995, 8(2):119-125.
- [2] SOYLUK K. Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2004, 26(11):1573-1583.
- [3] 童申家,吴星,李纲. 大跨钢管混凝土拱桥地震行波效应分析[J]. 桥梁建设,2008(2):27-30.
TONG SHEN-JIA, WU XING, LI GANG. Analysis of seismic traveling wave effect on long span concrete-filled steel tube arch bridges[J]. Bridge Construction, 2008(2):27-30.

(下转第936页)

- 419(4): 557-569.
- [4] MURAI T, MATSUOKA S, MIYAMOTO S, et al. Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy extrusions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141(2):207-212.
- [5] KLEINER S, UGGOWITZER P J. Mechanical anisotropy of extruded Mg-6% Al-1% Zn alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 379(1/2): 258-271.
- [6] GALIYEV A, KAIBYSHE R, GOTTSTEIN G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(7): 1199-1206.
- [7] KIM W J, AN C W, KIM Y S, et al. Mechanical properties and microstructures of an AZ61 Mg alloy produced by equal channel angular pressing [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47(1): 39-44.
- [8] VOGEL M, KRAFT O, DEHM G, et al. Quasi-crystalline grain-boundary phase in the magnesium die-cast alloy ZA85 [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45(5): 517-526.
- [9] KIM W J, SAY K. Micro-extrusion of ECAP processed magnesium alloy for production of high strength magnesium micro-gears [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(7): 1391-1395.
- [10] WATANABE H, MUKAI T, ISHIKAWA K, et al. Realization of high-strain-rate superplasticity at low temperatures in a Mg-Zn-Zr Alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 307(1/2): 119-128.
- [11] DELVALLE J A, CARREN F, RUANO O A. Influence of texture and grain size on work hardening and ductility in magnesium-based alloys processed by ECAP and rolling [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(16): 4247-4259.
- [12] BARNETT M R, KESHAVARZ Z, BEER A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 5093-5103.
- [13] FIGUEIREDO R, LANGDON T. The development of superplastic ductilities and microstructural homogeneity in a magnesium ZK60 alloy processed by ECAP [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 430(1/2): 151-156.
- [14] MEHROTRA P, M LILLO T, AGNEW S R. Ductility enhancement of a heat-treatable magnesium alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(10): 855-858.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第 924 页)
- [4] 郑家树. 地震动拟合与大跨度桥梁抗震综述 [J]. *西南民族大学学报*, 2008, 34(4): 772-775.
ZHENG JIA-SHU. Earthquake fitting and long span bridge seismic review [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities*, 2008, 34(4): 772-775.
- [5] HAO H. Arch response to correlated multiple excitations [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993(22): 389-404.
- [6] LIANG S. Seismic design for steel trussed arch to multi-support excitations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(6): 725-734.
- [7] ZHANG Y H, LI Q S, LIN I H, et al. Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(4): 620-629.
- [8] CHOUW N, HAO H. Study of SSI and non-uniform ground motion effect on pounding between bridge girders [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005(8): 717-728.
- [9] SOYLUK K. Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges [J]. *Engineering Structures*, 2004 (9): 1573-1583.
- [10] RUIZ P, PENZIEN J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquakes [R]. California: University of California, 1969.
- [11] 屈铁军, 王君杰, 王前信. 空间变化的地震动功率谱的实用模型 [J]. *地震学报*, 1996, 18: 55-62.
QU TIE-JUN, WANG JUN-JIE, WANG QIAN-XIN. Model of power spectrum for spatial variable seismic ground motion [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996, 18(1): 55-62.
- [12] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成—合成实例 [J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(6): 25-32.
QU TIE-JUN, WANG QIAN-XIN. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion—application of fundamental formulas [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, 18(6): 25-32.
- [13] 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, 2000.
- [14] 李正英. 大跨度拱桥地震反应特性及减震控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- (编辑 侯湘)