

文章编号:1673-2049(2016)05-0100-08

# 跨断层桥梁非一致激励输入模型适用性研究

惠迎新<sup>1</sup>,王克海<sup>2</sup>,何文杰<sup>3</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 2. 交通运输部公路科学研究院,北京 100088;  
3. 中交公路规划设计院有限公司,北京 100088)

**摘要:**为研究适用于跨断层桥梁的地震动输入分析模型,以 1 座跨断层桥梁为例,分别计算了非一致激励位移输入模型和大质量法加速度输入模型的地震响应,探讨了 2 种输入模型的适用性及模型误差产生原因。结果表明:位移输入模型可考虑永久地面位移对结构地震响应的影响,能够真实反映跨断层桥梁在地面运动结束之后桥墩具有的残余内力和变形,适用于跨断层桥梁非一致激励地震响应分析,而大质量法加速度输入模型对此无法考虑,可能导致不合理也是不安全的计算结果;在运用通用有限元计算软件进行加速度输入模型多点激励分析时,应首先核查与拟输入加速度时程对应的位移时程是否存在永久地面位移,若存在永久地面位移,则建议改为位移输入模型进行计算,否则将可能得到失真的计算结果。

**关键词:**多点激励;跨断层桥梁;位移输入模型;加速度输入模型

**中图分类号:**U442.55 **文献标志码:**A

## Applicability Research on Multi-support Excitation Input Model of Bridges Crossing Fault

HUI Ying-xin<sup>1</sup>, WANG Ke hai<sup>2</sup>, HE Wen-jie<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;  
2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;  
3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to study the applicable ground motion input analysis model for bridge crossing fault (BCF), the seismic response of multi-support excitation displacement input model and acceleration input model of large mass method were calculated respectively with a BCF as an example, and the applicability of two models and the reasons of model error were discussed. The results show that displacement input model can consider the influence of permanent ground displacement on seismic response of structures, and the residual internal force and deformation of bridge pier of BCF after ground motion can be truly reflected. The displacement input model is suitable for the multi-support excitation seismic response analysis of BCF. However, without considering the residual internal force and deformation, the calculation results by acceleration input model of large mass method can be unreasonable and unsafe. When using the general finite element software to analyze multi-support excitation of acceleration input model, whether there is a permanent ground displacement in the displacement time history corresponding to the input acceleration time history should be checked firstly. If there is permanent ground displacement, it

收稿日期:2016-01-23

基金项目:宁夏自然科学基金项目(NZ16006);宁夏大学高水平人才科研启动基金项目(BQD2015)

作者简介:惠迎新(1985-),男,内蒙古阿拉善盟人,讲师,工学博士,E-mail:huiyx@seu.edu.cn。

is recommended to use the displacement input model to calculate, otherwise it will be possible to obtain the distortion calculation results.

**Key words:** multi-support excitation; bridge crossing fault; displacement input model; acceleration input model

## 0 引言

跨越活动断层的桥梁结构地震时具有较大的破坏风险,为此许多国家和地区出台了相关规范和条例以禁止在活动断层之上新建桥梁。然而对于跨越峡谷、河流等障碍物的桥梁结构,往往因各种客观条件限制,不得不采用桥梁形式跨越活动断层。

目前针对跨断层桥梁的研究工作尚处在初始阶段,仅有少量学者对此进行了研究。Park 等<sup>[1-2]</sup>对土耳其杜杰地震中发生严重破坏的跨断层桥梁博卢 1 号高架桥的抗震性能进行了分析,认为跨断层效应是影响减隔震桥梁地震响应的重要因素。Goel 等<sup>[3-4]</sup>研究了跨断层常规中小跨直线桥和曲线桥地震响应需求的简化计算方法。Saiidi 等<sup>[5]</sup>以两跨刚构桥为研究对象,首次开展了跨断层桥梁的振动台试验,推进了该领域的研究工作。杨怀宇等<sup>[6]</sup>以跨断层简支桥梁为例,采用多点激励时程分析方法研究了跨断层效应对结构地震响应的影响。惠迎新等<sup>[7-9]</sup>从震害、地震动输入、分析模型及地震响应等方面对跨断层桥梁的抗震问题进行了较为系统的研究。

跨断层桥梁由于发震断层地表相对错动导致断层两侧支撑具有不同的甚至完全相反的地面运动特征,应采用多点激励输入模型计算其在地震作用下的结构地震响应。在进行结构多点激励分析时,基于位移输入法的位移输入模型和大质量法加速度输入模型在各类大跨桥梁、房屋建筑结构中广泛应用<sup>[10-11]</sup>,以往很多文献对这 2 种模型在多点激励输入中的适用性进行了探讨、论证<sup>[12-13]</sup>,认为 2 种输入模型的运动方程均建立在绝对坐标系下,计算结果中包含了结构的拟静力反应和动力反应,既适用于线性结构也适用于非线性结构的地震响应分析。在既有考虑行波效应、部分相干效应以及局部场地效应的多点激励研究中,采用的输入地震动时程均为未包含永久地面位移的简单地震波,而对于以长周期、永久地面位移为主要特征的跨断层桥梁地震动激励,以往研究中采用的位移输入模型和大质量法加速度模型是否同样适用有待于进一步研究。

为此,本文以 1 座跨断层桥梁为例,结合跨断层

桥梁的地面运动特点,以位移输入模型和大质量法加速度输入模型作为地震动输入,对比分析不同模型和不同地震动激励下的结构响应,探讨适用于跨断层桥梁的地震动输入模型。

## 1 非一致激励位移输入模型

采用集中质量矩阵,地震激励作用下桥梁结构在绝对坐标系中的分块运动平衡方程为<sup>[14]</sup>

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ab} \\ \mathbf{M}_{ba} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_a \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{aa} & \mathbf{C}_{ab} \\ \mathbf{C}_{ba} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_a \\ \dot{\mathbf{u}}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_a \\ \mathbf{R}_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_a$  为绝对坐标系下结构非支承节点的运动向量; $\mathbf{u}_b$  为绝对坐标系下已知结构支承节点的运动向量; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,其下标 aa, bb, ab (ba) 分别表示结构非支承节点自由度、支撑节点自由度和它们的耦合项; $\mathbf{R}_a$  为作用在结构自由节点上的外力向量,对于地震激励作用下的结构来说  $\mathbf{R}_a = \mathbf{0}$ ;  $\mathbf{R}_b$  为作用在支承节点上的外力向量。

将式(1)部分展开,可以得到关于未知运动向量  $\ddot{\mathbf{u}}_a, \dot{\mathbf{u}}_a, \mathbf{u}_a$  的动力平衡方程,即

$$\mathbf{M}_{aa} \ddot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{M}_{ab} \ddot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{C}_{aa} \dot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{C}_{ab} \dot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{K}_{aa} \mathbf{u}_a + \mathbf{K}_{ab} \mathbf{u}_b = \mathbf{0} \quad (2)$$

如采用集中质量模型,则有  $\mathbf{M}_{ab} = \mathbf{0}$ , 整理可得

$$\mathbf{M}_{aa} \ddot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{C}_{aa} \dot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{K}_{aa} \mathbf{u}_a = -\mathbf{K}_{ab} \mathbf{u}_b - \mathbf{C}_{ab} \dot{\mathbf{u}}_b \quad (3)$$

式(3)即为应用位移输入模型求解结构响应的动力平衡方程,对式(3)采用直接积分法求解,可计算得到各点绝对加速度、绝对速度和绝对位移时程。

位移输入模型不仅适用于一致激励输入还适用于非一致激励输入,既适用于线性结构也适用于非线性结构,直接得到的计算结果是绝对量值,当前被认为是一种求解结构地震反应的具有普遍性和有效性的计算模型。在采用相同的数值积分方法和积分步长时,位移输入模型可获得比加速度输入模型更高的计算精度<sup>[15]</sup>。

## 2 非一致激励大质量法加速度输入模型

大质量法<sup>[16]</sup>是求解运动方程时的一种数字处

理方法,假设结构基础或支承点处附加质量足够大的集中质量单元  $M_{II}$ 。在结构动力分析时,释放基础运动方向的约束,并在大质量点施加动力  $R_I(t)$  以模拟基础的非一致地面运动,其中

$$R_I(t) = M_{II} \ddot{u}_g \quad (4)$$

式中:  $M_{II}$  为结构基底集中大质量矩阵;  $\ddot{u}_g$  为基底大质量激励(加速度)。

此时,动力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} + M_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} \\ C_{ba} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ M_{II} \ddot{u}_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)展开,整理得

$$M_{aa} \ddot{u}_a + M_{ab} \ddot{u}_b + C_{aa} \dot{u}_a + C_{ab} \dot{u}_b + K_{aa} u_a + K_{ab} u_b = 0 \quad (6)$$

$$M_{ba} \ddot{u}_a + M_{bb} \ddot{u}_b + M_{II} \ddot{u}_b + C_{ba} \dot{u}_a + C_{bb} \dot{u}_b + K_{ba} u_a + K_{bb} u_b = M_{II} \ddot{u}_g \quad (7)$$

将式(7)等号两边同除以  $M_{II}$  得

$$\frac{M_{ba} \ddot{u}_a}{M_{II}} + \frac{M_{bb} \ddot{u}_b}{M_{II}} + \ddot{u}_b + \frac{C_{ba} \dot{u}_a}{M_{II}} + \frac{C_{bb} \dot{u}_b}{M_{II}} + \frac{K_{ba} u_a}{M_{II}} + \frac{K_{bb} u_b}{M_{II}} = \ddot{u}_g \quad (8)$$

当  $M_{II} \rightarrow +\infty$  时,式(8)等号左边的第 1, 2, 4, 5, 6, 7 项均等于 0, 从而可得

$$\ddot{u}_b = \ddot{u}_g \quad (9)$$

由于计算机有效数字运算的需求,附加大质量一般取结构总质量的  $1 \times 10^4$  倍  $\sim 1 \times 10^8$  倍,以避免大数运算导致的数值计算发生奇异,进而保证了基础激励处的加速度逼近于确定数值。此时式(9)可近似写为

$$\ddot{u}_b \approx \ddot{u}_g \quad (10)$$

将式(10)代入式(6),由于在有限元分析中一般采取集中质量的方式,所以  $M_{ab} = 0$ , 进一步整理可得其他节点求解方程,即

$$M_{aa} \ddot{u}_a + C_{aa} \dot{u}_a + K_{aa} u_a \approx -K_{ab} u_b - C_{ab} \dot{u}_b \quad (11)$$

式(11)即为应用大质量法求解结构响应的动力平衡方程,对式(11)使用直接积分法求解即可得到整个结构在绝对空间的反应。

### 3 模型建立及地震动输入

#### 3.1 模型的建立

以 1 座跨越走滑断层的独塔斜拉桥为研究对象,活动断层穿过该桥的第 1 跨,断层走向与桥位基本垂直,桥梁布置及断层走向如图 1 所示,其中  $F_p$  为平行于断层方向的地震动分量。采用 SAP2000

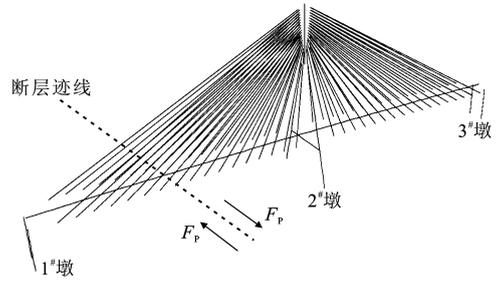


图 1 桥梁布置和断层走向

Fig. 1 Layout of Bridge and Fault Trend

结构分析程序建立该桥计算模型;由于本文仅对地震动输入模型的适用性进行定性研究,计算单元均采用线弹性单元,其中主梁和桥墩采用三维线弹性单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟,桩土相互作用采用承台底加 6 个自由度的弹簧模拟。时程分析采用 Newmark- $\beta$  直接积分法,其中参数  $\alpha = 0.5$ , 参数  $\beta = 0.25$ 。为避免采用 Rayleigh 阻尼对 2 种输入模型计算结果可能产生的误差,时程分析中采用常数阻尼,阻尼比为 5%。

#### 3.2 地震动输入

地震时走滑断层在平行于断层方向表现为滑冲效应,即由于断层滑动突然升高或降低形成台阶,也称之为永久地面位移。滑冲效应使得断层两侧支承在平行于断层方向呈典型多点激励运动特征<sup>[17]</sup>。因此,本文分析中以该方向为例,进行多点激励地震响应分析。对于断层中的某点而言,可认为在平行于断层方向断层两侧桥梁支承地震动输入方向相反,数值相等<sup>[18]</sup>。图 2 为断层两侧桥墩地震动输入方向示意。

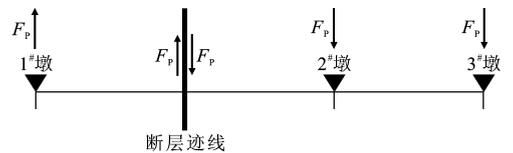


图 2 地震动输入方向示意

Fig. 2 Schematic of Ground Motion Input Direction

为对比分析多点激励位移输入模型和大质量法加速度输入模型在跨断层桥梁中的适用性,计算中以未包含永久地面位移的常规地震动 El Centro 波和包含永久地面位移的集集地震 TCU049 波作为地震动激励,分别采用上述 2 种输入模型进行结构地震响应分析。

El Centro 波和集集地震 TCU049 波对应 2 种输入模型的加速度时程和位移时程分别如图 3, 4 所示,其中  $g$  为重力加速度。图 3(b) 和图 4(b) 所示位

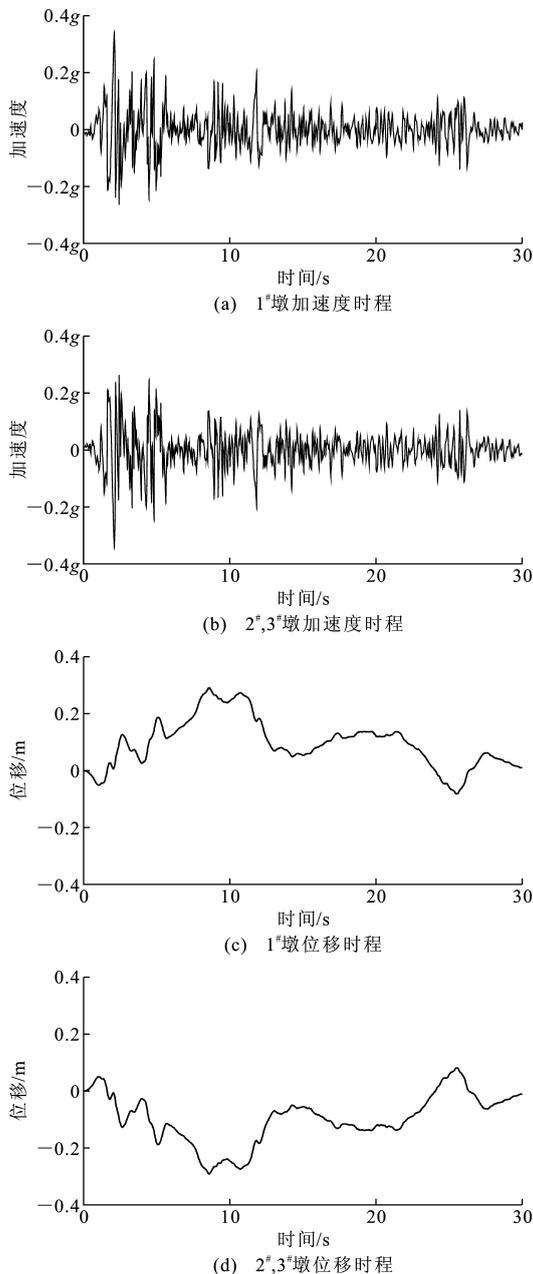


图3 El Centro波断层两侧加速度时程和位移时程  
Fig. 3 Acceleration and Displacement Time Histories of El Centro Wave on Fault Both Sides

移时程分别由图3(a)和图4(a)所示加速度时程经基线修正后积分得到。对于包含永久地面位移的震动时程,采用改进基线修正方法<sup>[8]</sup>以满足速度时程末尾部分速度为0,位移时程末尾部分与时间轴基本平行的基线修正准则<sup>[12,19]</sup>。

## 4 计算结果及分析

限于篇幅,本文未将各墩墩底内力及加速度、位移时程比较全部罗列,仅列出了1<sup>#</sup>墩和3<sup>#</sup>墩的墩底弯矩响应时程和墩顶位移时程比较。由于对位移

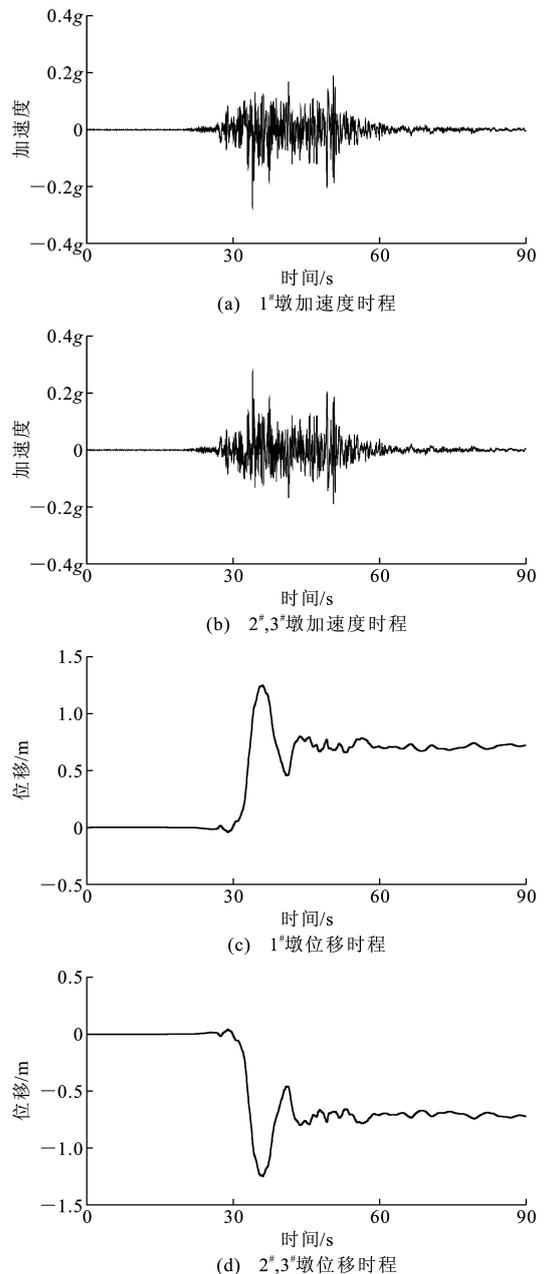


图4 TCU049波断层两侧加速度时程和位移时程  
Fig. 4 Acceleration and Displacement Time Histories of TCU049 Wave on Fault Both Sides

输入模型直接求解所得计算结果未经过任何近似处理,因此将其作为精确解,相对误差表示加速度输入模型计算值相对于位移输入模型的差值。

### 4.1 El Centro波作用下的结构地震响应

表1为2种输入模型下各墩墩底内力及墩(塔)顶加速度、位移最大值比较。图5,6分别为1<sup>#</sup>墩和3<sup>#</sup>墩的墩底弯矩响应和墩顶位移时程比较。

由表1可知:2种输入模型作用下各墩墩底内力及墩(塔)顶加速度、位移最大值较为接近,墩底内力最大相对误差出现在墩底轴力响应,相对误差为

表 1 El Centro 波结构地震响应对比  
Tab. 1 Comparison of Seismic Responses of Structure Under El Centro Wave

桥墩编号	响应参数	位移输入模型	加速度输入模型	相对误差
1#	墩底轴力/kN	720	743	3.2%
	墩底剪力/kN	3 396	3 467	2.1%
	墩底弯矩/(kN·m)	78 870	80 585	2.2%
	墩顶位移/m	0.283	0.289	2.1%
	墩顶加速度	0.524g	0.533g	1.7%
2#	墩底轴力/kN	102 921	105 607	2.6%
	墩底剪力/kN	25 001	25 766	3.1%
	墩底弯矩/(kN·m)	345 573	352 264	1.9%
	墩顶加速度	0.967g	0.983g	1.7%
3#	墩底轴力/kN	521	531	1.9%
	墩底剪力/kN	4 977	4 912	-1.3%
	墩底弯矩/(kN·m)	108 865	111 552	2.5%
	墩顶加速度	0.529g	0.536g	1.3%

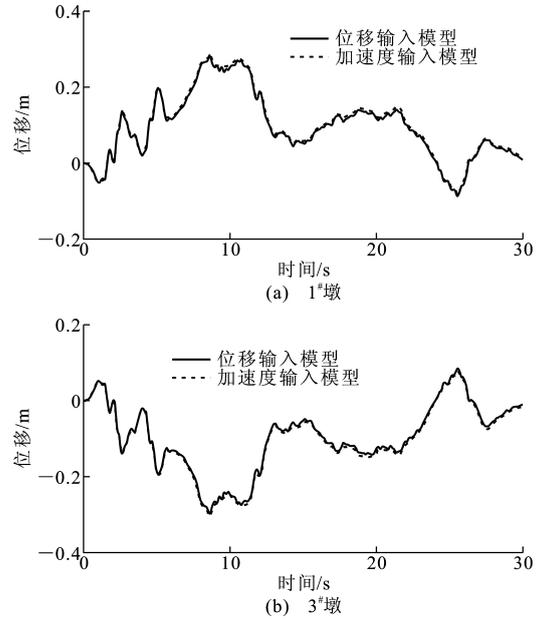


图 6 El Centro 波墩顶位移时程对比  
Fig. 6 Comparison of Displacement Time Histories of Pier Top Under El Centro Wave

表 2 TCU049 波结构地震响应对比  
Tab. 2 Comparison of Seismic Responses of Structure Under TCU049 Wave

桥墩编号	响应参数	位移输入模型	加速度输入模型	相对误差
1#	墩底轴力/kN	1 773	1 421	-19.8%
	墩底剪力/kN	4 436	3 572	-19.5%
	墩底弯矩/(kN·m)	115 985	93 233	-19.6%
	墩顶位移/m	1.243	0.956	-23.1%
	墩顶加速度	0.533g	0.430g	-19.4%
2#	墩底轴力/kN	49 600	51 694	4.2%
	墩底剪力/kN	10 202	12 156	19.1%
	墩底弯矩/(kN·m)	359 316	313 794	-12.7%
	墩顶加速度	0.563g	0.571g	1.4%
3#	墩底轴力/kN	2 180	1 660	-23.9%
	墩底剪力/kN	6 150	5 919	-3.8%
	墩底弯矩/(kN·m)	157 388	154 469	-1.9%
	墩顶加速度	0.547g	0.442g	-19.2%

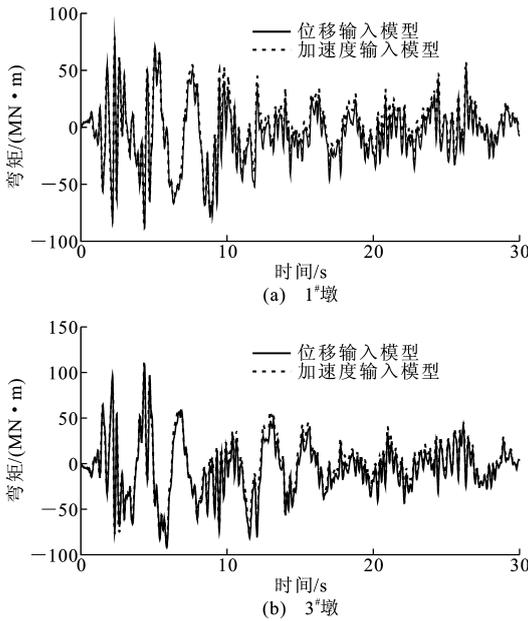


图 5 El Centro 波墩底弯矩响应对比  
Fig. 5 Comparison of Bending Moment Responses of Pier Bottom Under El Centro Wave

3.2%；各墩墩顶位移和加速度响应最大相对误差分别为 2.6%和 1.7%。由图 5 可知,2 种输入模型作用下 1# 墩和 3# 墩墩底弯矩响应数值较为接近,波形及变化趋势基本一致,图 6 所示的墩顶位移时程具有相同规律。

4.2 TCU049 波作用下的结构地震响应

表 2 为 TCU049 波作用下 2 种输入模型各墩

墩底内力和墩顶加速度、位移最大值比较。由表 2 可知,与常规地震动激励的计算结果不同,2 种输入模型各墩墩底内力和墩顶加速度、位移最大值差别较大,除 2# 墩个别计算响应参数外,位移输入模型计算响应最大值总体大于加速度输入模型,且相差较大,最大相对误差达 23.9%。

图 7,8 分别为 TCU049 波作用下 1# 墩和 3# 墩

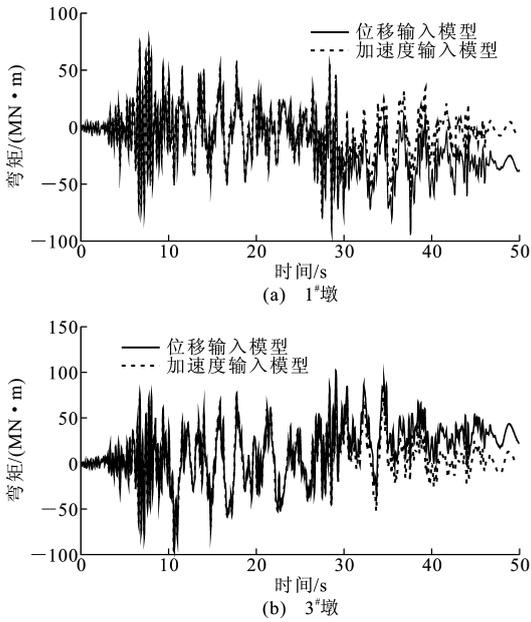


图 7 TCU049 波墩底弯矩响应对比

Fig. 7 Comparison of Bending Moment Responses of Pier Bottom Under TCU049 Wave

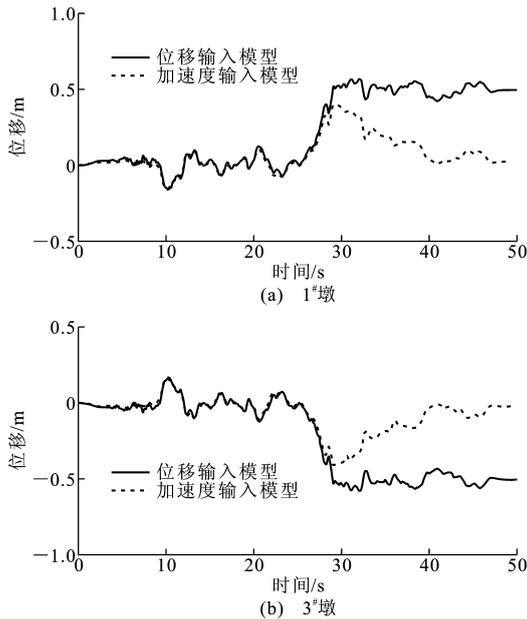


图 8 TCU049 波墩顶位移时程对比

Fig. 8 Comparison of Displacement Time Histories of Pier Top Under TCU049 Wave

的墩底弯矩响应和墩顶位移时程比较。从结构响应看,断层错动之前,2种输入模型作用下1<sup>#</sup>墩和3<sup>#</sup>墩的墩底弯矩响应和墩顶位移时程的大小和曲线形状基本一致。断层错动后,位移输入模型的结构响应向不同方向偏离原振动平衡位置,随后沿新的平衡位置往复振荡,地震动结束后存在残余弯矩和位移。加速度输入模型在断层错动后弯矩响应和位移

响应仍沿原振动平衡位置振荡,地震动结束后变形和内力值趋于0。

### 4.3 2种输入模型的适用性分析

由以上不同特性地震动输入下的计算结果可得到以下结论:

(1)在以常规地震动(未包含永久地面位移)作为输入对跨断层桥梁进行结构地震响应分析时,位移输入模型和改进大质量法加速度输入模型所得到的结构响应规律、趋势基本一致,数值非常接近,最大相对误差仅为3.2%,满足工程计算精度小于5%的要求。显然,2种方法均适用于常规地震动作用下的多点激励地震响应分析。

(2)在以包含永久位移地震动作为输入对跨断层桥梁进行结构地震响应分析时,位移输入模型和改进大质量法加速度输入模型所得到的结构响应规律、趋势及响应峰值存在显著差异。位移输入模型可考虑断层错动导致的永久地面位移对结构地震响应的影响,能够真实反映跨断层桥梁在地面运动结束之后桥墩具有的残余内力和变形,符合跨断层桥梁震害特征<sup>[7]</sup>,适用于跨断层桥梁的多点激励响应分析。加速度输入模型对此无法考虑,可能导致不合理也是不安全的计算结果。

### 4.4 大质量法加速度输入模型误差原因分析

由大质量法求解结构动力响应平衡方程的推导过程可知,尽管直观上大质量法的地震动输入形式为基底加速度( $\ddot{u}_g$ ),但其本质仍为通过基底位移( $u_g$ )求解结构地震响应[式(11)]。若将大质量法输入模型动力平衡方程式(11)中的约等号用等号代替,则与位移输入模型结构动力平衡方程式(3)一致。采用大质量法加速度输入模型计算地震响应时, $\ddot{u}_g \Rightarrow u_g$ 的计算过程是导致地震响应计算出现误差的关键环节,而非大质量法本身。

图9为不含永久地面位移的El Centro波分别在2种输入模型下计算所得到的1<sup>#</sup>墩和3<sup>#</sup>墩墩底位移时程。由图9可知,2种输入模型的墩底位移时程基本相同,故2种输入模型计算所得的内力响应相同。对于未包含永久地面位移的常规地震动,大质量法加速度输入模型在 $\ddot{u}_g \Rightarrow u_g$ 过程中,计算结构内力响应的墩底位移时程实质上是由输入墩底的加速度时程经数值积分直接得到的,这与文献[12]的研究结论一致。

然而,对于包含有永久地面位移的地震动,这一结论并不一定适用。图10为包含永久地面位移的TCU049波分别在2种输入模型下计算所得到的

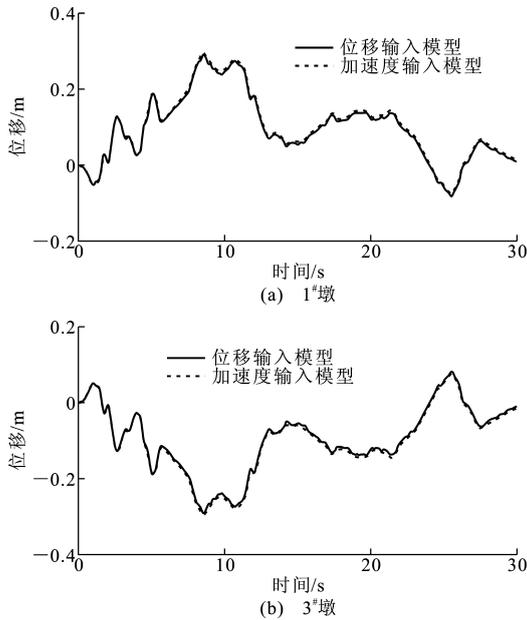


图9 El Centro波墩底位移时程

Fig. 9 Displacement Time Histories of Pier Bottom Under El Centro Wave

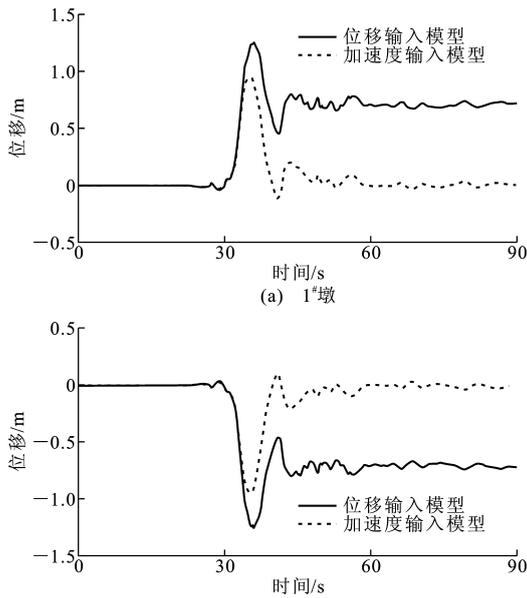


图10 TCU049波墩底位移时程

Fig. 10 Displacement Time Histories of Pier Bottom Under TCU049 Wave

1<sup>#</sup>墩和3<sup>#</sup>墩墩底位移时程。由图10可知,2种输入模型的墩底位移时程波形存在相似之处,但在断层错动后2种输入模型的变化趋势不同,大质量法基底输入在由加速度时程转化为位移时程的过程中滤去了永久地面位移部分,致使地震动结束后位移时程趋于0,故2种输入模型计算所得的内力响应存在差异。

综合上述分析可得如下结论:采用大质量法加

速度输入模型对包含永久地面位移的地震动激励进行计算时,结构响应误差并不是大质量法本身引起的,而是由于SAP2000有限元分析软件内置计算程序未考虑包含永久地面位移的情况,在 $\ddot{u}_g \Rightarrow u_g$ 数值积分过程中滤去了永久地面位移部分,致使地震动结束后位移时程趋于0。

基于上述分析,在运用通用有限元计算软件进行加速度输入模型多点激励分析时,应首先对拟输入的加速度时程进行数值积分,确认对应的位移时程是否存在永久地面位移。若存在永久地面位移,则建议改为位移输入模型进行计算,否则将可能得到失真的计算结果。

## 5 结语

(1)在对跨断层桥梁进行非一致激励分析时,位移输入模型可考虑断层错动导致的永久地面位移对结构地震响应的影响,能够真实反映跨断层桥梁在地面运动结束之后桥墩具有的残余内力和变形,符合实际震害特征,适用于跨断层桥梁的非一致激励响应分析。加速度输入模型对此无法考虑,可能导致不合理也是不安全的计算结果。

(2)在运用通用有限元计算软件进行加速度输入模型多点激励分析时,应首先对拟输入的加速度时程进行数值积分,确认对应的位移时程是否存在永久地面位移。若存在永久地面位移,则建议改为位移输入模型进行计算,否则将可能得到失真的计算结果。

## 参考文献:

### References:

- [1] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the Seismic Performance of the Bolu Viaduct Subjected to Near-fault Ground Motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1249-1270.
- [2] UCAK A, MAVROEIDIS G P, TSOPELAS P. The Response of the Seismically Isolated Bolu Viaduct Subjected to Fault Crossing[C]//LESHKO B J, MCHUGH J. Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession. Reston: ASCE, 2013: 817-826.
- [3] GOEL R K, CHOPRA A K. Linear Analysis of Ordinary Bridges Crossing Fault-rupture Zones[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(3): 203-215.
- [4] GOEL R, QU B, TURES J, et al. Validation of Fault Rupture-response Spectrum Analysis Method for

- Curved Bridges Crossing Strike-slip Fault Rupture Zones[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(5):644-651.
- [5] SAIIDI M S, VOSOOGHI A, CHOI H, et al. Shake Table Studies and Analysis of a Two-span RC Bridge Model Subjected to a Fault Rupture[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(8):182-190.
- [6] 杨怀宇, 李建中. 断层地震动对隔震桥梁地震响应的影响[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2015, 43(8):1144-1152.
- YANG Huai-yu, LI Jian-zhong. Response Analysis of Seismic Isolated Bridge Under Influence of Fault-crossing Groundmotions[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(8):1144-1152.
- [7] 惠迎新, 王克海, 李冲. 跨断层地表破裂带桥梁震害研究及抗震概念设计[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(10):51-57.
- HUI Ying-xin, WANG Ke-hai, LI Chong. Study of Seismic Damage and Seismic Conceptual Design of Bridges Across Fault Surface Rupture Zones[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(10):51-57.
- [8] 惠迎新, 王克海. 基于多点激励位移输入模型的跨断层桥梁地震动输入方法[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2015, 45(3):557-562.
- HUI Ying-xin, WANG Ke-hai. Earthquake Motion Input Method for Bridges Crossing Fault Based on Multi-support Excitation Displacement Input Model[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2015, 45(3):557-562.
- [9] 惠迎新, 王克海, 吴刚, 等. 跨断层桥梁地震响应分析及合理跨越角度研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13):6-11, 17.
- HUI Ying-xin, WANG Ke-hai, WU Gang, et al. Seismic Responses of Bridges Crossing Faults and Their Best Crossing Angles[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(13):6-11, 17.
- [10] 柳国环, 李宏男, 田利. 九江长江大桥在多点多维地震激励下的反应分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9):204-209, 224.
- LIU Guo-huan, LI Hong-nan, TIAN Li. Response Analysis of Jiujiang Yangtze River Highway Bridge Under Spatially Variable Earthquake Ground Motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(9):204-209, 224.
- [11] 杨庆山, 刘文华, 田玉基. 国家体育场在多点激励作用下的地震反应分析[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(2):35-41.
- YANG Qing-shan, LIU Wen-hua, TIAN Yu-ji. Response Analysis of National Stadium Under Specially Variable Earthquake Ground Motions[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(2):35-41.
- [12] 罗超, 楼梦麟, 桂国庆. 大跨度结构多点地震反应计算方法的比较[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2015, 43(1):8-15.
- LUO Chao, LOU Meng-lin, GUI Guo-qing. Comparison for Calculation Methods of Longspan Structure Under Multi-support Seismic Excitation[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(1):8-15.
- [13] 周国良, 李小军, 喻焜, 等. 结构地震作用的基底激励模型及其适用性[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(增2):82-88.
- ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, YU Tian, et al. Applicability Research on Base Excitation Models Used in Structural Seismic Response Analysis[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(S2):82-88.
- [14] CHOPRA A K. *Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*[M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- [15] 田玉基, 杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. *工程力学*, 2005, 22(5):170-174.
- TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan. Analysis Models and Methods for Structural Seismic Responses[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(5):170-174.
- [16] LEGER P, IDE I M, PAULTRE P. Multiple-support Seismic Analysis of Large Structures[J]. *Computers & Structures*, 1990, 36(6):1153-1158.
- [17] SOMERVILLE P G, SMITH N F, GRAVES R W, et al. Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity[J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1):199-222.
- [18] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the Seismic Performance of the Bolu Viaduct Subjected to Near-fault Ground Motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(13):1249-1270.
- [19] 于海英, 江汶乡, 解全才, 等. 近场数字强震仪记录误差分析与零线校正方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(6):1-12.
- YU Hai-ying, JIANG Wen-xiang, XIE Quan-cai, et al. Baseline Correction of Digital Strong-motion Records in Near-field[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6):1-12.