

大跨度结构多点地震反应计算方法的比较

罗超¹, 楼梦麟¹, 桂国庆²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 井冈山大学 建筑工程学院, 江西 吉安 343009)

摘要: 分析比较了直接求解法、位移输入法、相对运动法和大质量法 4 种不同多点地震动输入下大跨度结构地震反应的计算方法. 以一实际工程为例进行了算例计算和结果比较, 数值结果表明, 直接求解法、位移输入法和相对运动法 3 种方法的计算精度较高, 建议采用. 大质量法计算结构加速度反应精度较高, 但是位移和内力反应会出现严重的失真现象. 位移失真原因主要是由程序中数值积分引起的, 且大质量法并不能保证计算中的地震位移输入和实际的位移激励一致.

关键词: 多点地震激励; 直接求解法; 位移输入法; 相对运动法; 大质量法; 地震反应

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

Comparison for Calculation Methods of Long-span Structure under Multi-support Seismic Excitation

LUO Chao¹, LOU Menglin¹, GUI Guoqing²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China)

Abstract: Four calculation methods for the seismic response analysis of the long-span structure under the multi-support seismic excitation, such as direct method, displacement-input method, relative motion method and large-mass method, are compared. Based on a practical project in Shanghai, an illustrative example using these four methods respectively is presented. Results indicate that the direct method, displacement-input method and relative motion method are high-fidelity calculation methods and are recommended to use. The acceleration response calculated by large-mass method is accurate enough. However, the displacement response and internal force response calculated by large-mass method are seriously distorted. Main reason of the distortion is produced

by the numerical integration in the calculation procedure and the seismic displacement input during the analysis in large-mass method can not be equal to the true seismic displacement excitation surely.

Key words: multi-support seismic excitation; direct method; displacement-input method; relative motion method; large-mass method; seismic response

在大跨度的结构抗震设计中, 常常使用动力时程反应分析方法进行分析. 由于大跨度结构空间尺度较大, 因此, 地震中大跨度结构地面各支撑点处的地面运动有一定的差异. 各支撑点地面运动的差异性主要包括: 行波效应、部分相干效应、衰减效应和局部场地效应等. 正因为输入地震动的差异性, 在大跨度结构的动力时程分析中不能再简单地套用一致地震动输入方法, 而有必要采用多点地震动输入方法^[1].

对于时域的多点地震动输入求解方法, 常用的主要有以下几种: 直接求解法、位移输入法、相对运动法^[2]和大质量法^[3]等计算方法. 对于多点地震动输入的问题, 由于以上各种方法将地震动输入处理为等效输入荷载的方法不同, 计算结果也有较大区别. 前人对方法的计算误差也做过诸多讨论. 文献^[4]指出, 直接利用地面运动位移作为激励会引起较大的误差, 若要使用需采用非常小的激励步长和积分时间步长. 文献^[5]指出, 当输入地震动满足运动学关系时, 采用加速度输入和位移输入计算得到的结构反应是相同的; 而当地震动输入满足动力学关系式, 采用加速度输入和位移输入计算得到的结构反应的结构反应不仅有差别, 而且可能差别很大. 文献^[6]指出了应用通用有限元软件时使用大质量法可能会引起附加阻尼力, 文献^[7]分析了这种附加阻

收稿日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(91315301); 科技部国家重点实验室基础研究基金(SLDRCE08-A-07)

第一作者: 罗超(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为土-结构动力相互作用. E-mail: 365thinking@tongji.edu.cn

通讯作者: 楼梦麟(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗震防灾、土-结构相互作用、环境振动测试与分析. E-mail: lml@tongji.edu.cn

尼力引起的误差,并提出了修正办法.但是值得注意的是,这种误差并不是大质量法本身引起的,而是在某些通用有限元软件中无法形成分块阻尼矩阵,在形成阻尼矩阵时不得不使用附加大质量后的质量矩阵引起的.本文对上述几种多点地震动输入的区别和误差进行进一步的讨论,以得到各种方法的适用条件和适用范围.

1 运动方程

结构在多点地震动输入下的运动方程可由分块矩阵表示.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ \mathbf{u}_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_b(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:脚标 s 表示结构的非支撑节点, b 表示结构基础的各支撑点节点; \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}_b(t)$, $\dot{\mathbf{u}}_b(t)$ 和 $\mathbf{u}_b(t)$ 分别为地震作用下结构各支撑点处的绝对加速度、绝对速度和绝对位移; $\ddot{\mathbf{u}}_s(t)$, $\dot{\mathbf{u}}_s(t)$ 和 $\mathbf{u}_s(t)$ 分别为地震作用下结构非支撑节点的绝对加速度、绝对速度和绝对位移; $\mathbf{p}_b(t)$ 为地震作用时结构所受到的约束支座反力.

各类结构分析软件中关于多点激励下的各种计算方法都是基于式(1)的运动方程提出的,下文讨论不同方法的计算式.

1.1 直接求解法

对于直接求解法,可将式(1)的第1行展开如下:

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{u}_s(t) = -(\mathbf{M}_{sb}\ddot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{C}_{sb}\dot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{K}_{sb}\mathbf{u}_b(t)) \quad (2)$$

同时展开式(1)的第2行,可以求得支座反力为

$$\mathbf{p}_b(t) = \mathbf{M}_{bs}\ddot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{C}_{bs}\dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}_{bs}\mathbf{u}_s(t) + \mathbf{M}_{bb}\ddot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{C}_{bb}\dot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{u}_b(t) \quad (3)$$

式(2)即为多点输入下的平衡方程,当各支撑点处绝对加速度、绝对速度和绝对位移均为已知时,可对式(2)使用直接积分法求解,直接计算得到各点绝对加速度、绝对速度和绝对位移时程,并通过式(3)计算得到支座约束反力.

1.2 位移输入法

观察式(2),当质量矩阵为集中质量矩阵时,有 $\mathbf{M}_{sb} = \mathbf{0}$,且阻尼力较小常常可以被忽略^[4],因此式(2)可写成以下形式:

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{u}_s(t) = -\mathbf{K}_{sb}\mathbf{u}_b(t) \quad (4)$$

同理,式(3)可以写成以下形式:

$$\mathbf{p}_b(t) = \mathbf{M}_{bb}\ddot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{C}_{bb}\dot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{u}_b(t) + \mathbf{K}_{bs}\mathbf{u}_s(t) \quad (5)$$

式(4)即为绝对位移输入下的多点输入平衡方程.可对式(4)使用直接积分法求解,直接计算得到各点绝对加速度、绝对速度和绝对位移时程,并通过式(5)计算得到支座约束反力.

1.3 相对运动法

将总的运动反应分为拟静力位移向量 $\mathbf{u}^s(t)$ 和动力反应位移向量 $\mathbf{u}^d(t)$ 之和,因此有

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ \mathbf{u}_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^s(t) \\ \mathbf{u}_b^s(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^d(t) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中:上标 S 和 d 分别表示结构的拟静力反应和动力反应; $\mathbf{u}_b^s(t)$ 为结构约束处的地震位移,即为 $\mathbf{u}_b(t)$.为了计算拟静力位移,令所有时间导数项为零,可以注意到,此时总位移仅由拟静力作用产生.因此可以得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^s(t) \\ \mathbf{u}_b^s(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_b^s(t) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

展开式(7)第1行,可得

$$\mathbf{u}_s^s(t) = -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sb}\mathbf{u}_b^s(t) = \mathbf{\Phi}_c\mathbf{u}_b(t) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{\Phi}_c$ 为拟静力矩阵,表示约束自由度单位位移引起的结构内部自由度的静位移.展开第2行,可得

$$\mathbf{p}_b^s(t) = (\mathbf{K}_{bs}\mathbf{\Phi}_c + \mathbf{K}_{bb})\mathbf{u}_b^s(t) \quad (9)$$

将式(6)和式(8)代入式(2)中,可得

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{u}_s^d(t) = -(\mathbf{M}_{ss}\mathbf{\Phi}_c + \mathbf{M}_{sb})\ddot{\mathbf{u}}_b(t) - (\mathbf{C}_{ss}\mathbf{\Phi}_c + \mathbf{C}_{sb})\dot{\mathbf{u}}_b(t) \quad (10)$$

当阻尼与刚度成比例时,由式(8)可知式(10)右边第2项为 $\mathbf{0}$;当阻尼力较弹性恢复力和惯性力较小时,一般可以忽略.因此,式(10)可近似写为

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{u}_s^d(t) = -(\mathbf{M}_{ss}\mathbf{\Phi}_c + \mathbf{M}_{sb})\ddot{\mathbf{u}}_b(t) \quad (11)$$

将式(6)和式(8)代入式(3),可得

$$\mathbf{p}_b^d(t) = \mathbf{M}_{bs}\ddot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{C}_{bs}\dot{\mathbf{u}}_s^d(t) + \mathbf{K}_{bs}\mathbf{u}_s^d(t) \quad (12)$$

式(11)即为相对运动法的运动方程.可以通过直接积分法求解,再通过叠加拟静力和动力反应得到结构的总反应.但是值得注意的是,由于相对运动法应用了叠加原理,因此只适用于线弹性体系,相较于其他几种方法有一定的局限性.

1.4 大质量法

大质量法是求解运动方程时在数学上的一种处理方法.大质量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_0 .在结构动力分析时,

并不约束这些节点自由度,而是在这些节点自由度处施加一组特殊的惯性力,即由附加质量在非一致支座运动下引起的惯性力,由此来模拟基础的非一致运动.此时,只改变原运动方程的质量矩阵,则式(1)可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{I1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ \mathbf{u}_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{I1} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中 \mathbf{M}_{I1} 为对角形式的附加大质量矩阵. 展开第 2 行,可得

$$\mathbf{M}_{bs}\ddot{\mathbf{u}}_s(t) + (\mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{I1})\ddot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{C}_{bs}\dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{C}_{bb}\dot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{K}_{bs}\mathbf{u}_s(t) + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{u}_b(t) = \mathbf{M}_{I1}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (14)$$

当 $m_0 \rightarrow +\infty$ 时,显然

$$\ddot{\mathbf{u}}_b(t) = \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (15)$$

由于计算机有效数字运算的需求,每一附加大质量 m_0 一般取结构总质量的 10^6 倍,避免大数运算带来的影响.此时式(15)可以近似地写为

$$\dot{\mathbf{u}}_b(t) \approx \dot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (16)$$

在使用大质量法进行求解时,对式(14)使用直接积分法求解,即可求得整个结构在绝对空间的反应.上式推导过程表明,大质量法只是数值意义上的近似方法.

1.5 不同方法应用中的几个问题

1.5.1 输入地震动参数

从上述 4 种计算方法可知,在进行大跨度结构体系多点地震反应分析时,需要输入的地震动参数略有不同.目前获得结构多点输入地震动参数的途径大致有 2 类,一类是实测地震动参数,由于实测强地震动参数多为加速度时程,若需要速度和位移的地震动输入,则需要采用数值积分的方法由实测加速度反应时程依次获得速度和位移,这时输入地震动满足运动学关系;另一类是通过工程场地土层二维或者三维数值模型的地震动反应计算得到,可以同时获得加速度、速度和位移时程,此时地震动输入满足动力学关系^[5].显然,直接求解法和位移输入法的求解过程需要地震动的位移时程,对于直接求解法,还需要加速度时程和速度时程;对于相对运动法,其拟静力反应的求解也需要位移时程,同时其动力反应的求解需要加速度时程;而大质量法则只需要加速度时程的输入.当采用实测地震动进行输入时,应用前 3 种方法需要对地震动加速度时程进行积分,

所得到的输入地震位移与输入地震加速度间满足运动学关系.当应用场地土层地震反应计算得到计算地震动参数时,输入地震位移与输入地震加速度间满足动力学关系,4 种计算方法在地震动输入问题上不再存在问题.多点输入地震动参数满足运动学关系或满足动力学关系对于上部大跨度结构的地震动反应计算结果会带来何种影响需要进一步研究,将另文讨论,本文采用计算地震动参数.

1.5.2 阻尼矩阵影响问题

在大型结构地震反应计算中,多采用有限单元法为数值计算方法.在不同的大型计算软件中,结构的阻尼矩阵建模方法是不同的.例如在 Ansys 软件中采用的是 Rayleigh 阻尼矩阵,而 LS-DYNA 软件中采用的是质量比例阻尼矩阵,以适应显式数值积分算法.对于长周期结构,比例阻尼矩阵的建模应引起充分重视,建模不当有可能严重低估结构体系的地震动反应,也可能大大高估结构体系的地震动反应^[8-11],这一问题在长周期多点地震反应分析中同样存在,问题性质相同,本文不作深入探讨.需要提出的是:在结构多点地震反应计算中,常常认为由速度输入引起的等效动荷载力较小而可以忽略,这一点是否合理,还需要探讨.

2 算例

为比较 4 种多点输入计算方法,以某三跨连续刚构桥为例,分别使用上述 4 种方法对此桥梁进行多点地震动输入.该桥梁跨径组合为 100 m + 160 m + 100 m,跨中梁高 3.8 m,墩顶梁高 9.8 m.如图 1 所示.

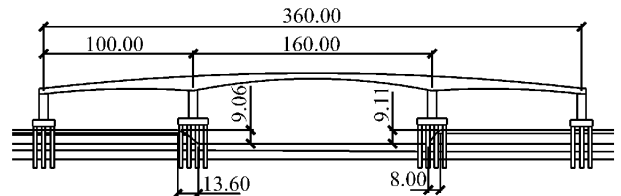


图 1 连续梁桥立面布置示意(单位:m)

Fig. 1 Elevation drawing of continuous rigid frame bridge(unit:m)

分别使用以上 4 种多点输入计算方法对该桥梁结构进行多点地震动输入和行波输入,其中多点地震动时程为该桥梁场地的自由场反应的计算结果,行波输入为该桥梁场地的自由场反应桥墩 1 处的计算结果,根据文献^[12],行波波速为 $2\,500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

值得注意的是,地震波在工程场地中的传播速度并非由表层土层介质的横波或纵波波速确定.土层自由场地震反应计算中下卧基岩面处的输入地震波为 1 条人工波和 2 条实测基岩波.人工波为该工程场地安评报告得到的 50 年设计基准期 10%超越概率的一条人工基岩波;实测基岩波分别为 Langcang 波和汶川地震中茂县地办地震台(051MXT)记录到的一条基岩波(以下简称汶川波).调整 2 条实测基岩波

的加速度峰值为与人工基岩波一致的 $0.8210 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,土层的非线性通过等效线性化方法考虑[13].土层自由场反应的计算参数和方法参考文献[14].限于篇幅,这里仅列出人工波作用下各桥墩处自由场反应的绝对加速度计算结果,如图 2 所示.需要指出的是,在使用大质量法进行计算时,大质量的大小通常为结构总质量的 $10^6 \sim 10^8$ 倍之间,本文将每个大质量取为结构总质量的 10^6 倍.

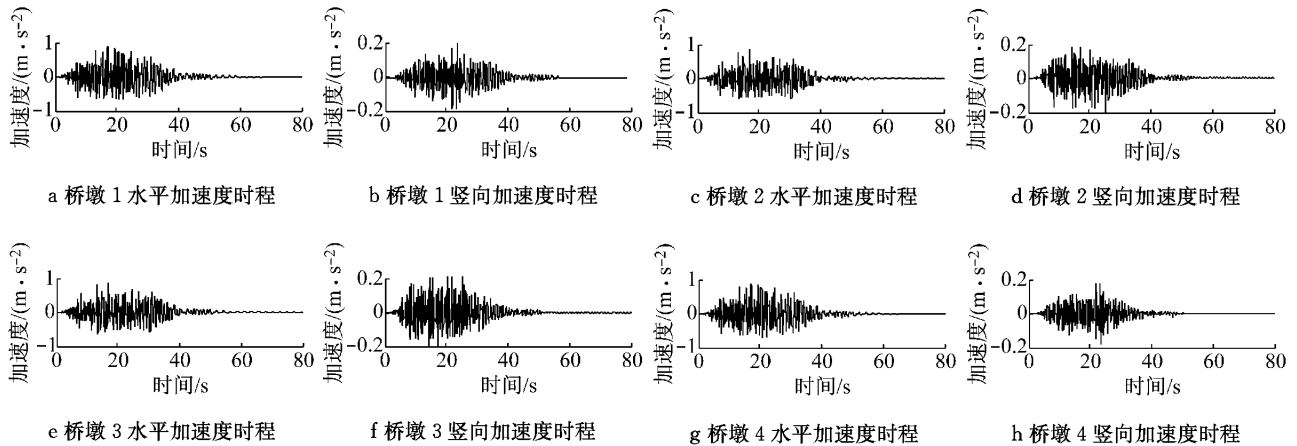


图 2 人工波作用下各桥墩处绝对加速度时程

Fig.2 Absolute acceleration time history of the pier under artificial seismic wave

3 计算结果及分析

3.1 计算结果

使用 4 种计算方法对桥梁结构进行多点地震反应分析,其典型部位的反应峰值如表 1 所示,其相对

误差见表 2.以上 4 种方法均使用 MATLAB 软件编程实现,并同时使用 Ansys 软件实现大质量法,经对比,使用 MATLAB 软件编制的大质量法计算程序与 Ansys 软件计算的结果完全相同,下文不列出其计算结果.

表 1 不同计算方法的桥墩的峰值反应

Tab.1 Representative peak response of bridge pier of different calculation methods

计算方法	桥墩	墩顶水平加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	墩顶水平位移/cm	墩底剪力/($\times 10^3 \text{ kN}$)	墩底轴力/($\times 10^3 \text{ kN}$)	墩底弯矩/($\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$)
直接求解法	1	0.96,1.62,1.66	3.65,2.73,3.65	11.36,16.23,19.89	4.60,7.87,8.27	173.96,194.06,260.54
	2	0.90,1.78,1.69	3.56,2.74,3.62	15.22,23.39,19.80	5.94,11.08,13.11	167.42,266.93,216.97
	3	0.91,1.81,1.70	3.61,2.78,3.63	14.28,21.88,18.87	5.99,12.3,14.31	160.74,249.37,206.58
	4	0.97,1.64,1.66	3.64,2.74,3.65	11.08,14.80,18.71	4.05,7.62,7.98	156.77,179.20,246.52
相对运动法	1	0.95,1.63,1.61	3.65,2.74,3.65	11.37,16.05,19.70	4.57,7.84,8.14	173.34,190.59,257.27
	2	0.92,1.80,1.65	3.56,2.75,3.62	15.20,23.36,19.43	5.76,10.87,12.73	166.68,265.57,213.46
	3	0.92,1.83,1.67	3.60,2.79,3.64	14.27,21.78,18.45	5.80,12.04,13.86	159.72,247.72,202.72
	4	0.97,1.65,1.61	3.63,2.74,3.65	10.86,14.63,18.57	4.03,7.60,7.88	156.35,175.70,243.49
位移输入法	1	0.95,1.62,1.67	3.65,2.73,3.69	11.36,16.29,20.01	4.60,7.85,8.48	174.34,194.57,261.41
	2	0.90,1.79,1.70	3.56,2.74,3.66	15.16,23.70,19.68	5.93,11.05,13.49	167.62,269.60,218.59
	3	0.91,1.82,1.72	3.60,2.78,3.67	14.21,22.12,18.74	6.03,12.22,14.81	160.89,251.42,208.22
	4	0.98,1.64,1.66	3.63,2.73,3.69	11.03,14.90,18.82	4.05,7.61,8.19	157.23,179.32,247.17
大质量法	1	0.90,1.64,1.46	1 054.73,4.14,164.48	367.87,15.48,17.10	43.11,7.55,7.30	6 154.35,183.19,242.49
	2	0.94,1.81,1.53	1 045.11,4.17,164.17	57.39,23.96,20.16	49.78,10.56,12.06	321.02,274.17,424.85
	3	0.92,1.86,1.55	1 095.01,4.26,172.96	301.75,25.02,18.41	313.49,16.31,26.20	6 094.68,276.91,1 335.75
	4	0.93,1.65,1.54	1 129.77,4.25,175.08	94.97,13.51,21.16	259.86,8.75,23.68	7 639.06,159.25,1 057.20

注:第 1 个逗号前为人工波对应数值,逗号间为 Langcang 波对应数值,最后值为汶川波对应数值。

表 2 不同计算方法的桥墩的峰值反应相对误差

Tab.2 Error of peak response of bridge pier of different calculation methods

%

桥墩	响应物理量	人工波			Langcang 波			汶川波		
		相对运动法	位移输入法	大质量法	相对运动法	位移输入法	大质量法	相对运动法	位移输入法	大质量法
1	墩顶水平加速度	-0.70	-0.41	-6.14	0.55	-0.33	1.24	-2.85	0.41	-11.99
	墩顶水平位移	-0.06	-0.09	28 804.82	0.28	-0.12	51.29	0.19	1.16	4 409.75
	墩底剪力	0.09	-0.04	3 138.23	-1.11	0.38	-4.61	-0.94	0.63	-14.03
	墩底轴力	-0.56	0.05	837.78	-0.36	-0.31	-4.02	-1.65	2.48	-11.75
	墩底弯矩	-0.36	0.22	3 437.74	-1.78	0.26	-5.60	-1.25	0.33	-6.93
2	墩顶水平加速度	1.56	0.14	3.95	0.75	0.12	1.45	-2.28	0.70	-9.29
	墩顶水平位移	-0.12	-0.10	29 223.66	0.29	-0.07	52.39	0.23	1.15	4 440.37
	墩底剪力	-0.13	-0.44	277.00	-0.14	1.33	2.44	-1.91	-0.64	1.80
	墩底轴力	-3.05	-0.22	737.91	-1.90	-0.27	-4.68	-2.93	2.89	-8.01
	墩底弯矩	-0.44	0.12	91.75	-0.51	1.00	2.71	-1.62	0.75	95.82
3	墩顶水平加速度	1.34	0.02	1.71	0.73	0.04	2.38	-2.24	0.86	-9.10
	墩顶水平位移	-0.12	-0.09	30 258.41	0.27	-0.10	53.23	0.23	1.11	4 666.16
	墩底剪力	-0.08	-0.50	2 013.43	-0.49	1.10	14.32	-2.24	-0.66	-2.44
	墩底轴力	-3.11	0.65	5 136.26	-2.15	-0.69	32.57	-3.19	3.47	83.08
	墩底弯矩	-0.63	0.09	3 691.57	-0.66	0.82	11.04	-1.87	0.79	546.60
4	墩顶水平加速度	-0.58	0.54	-4.34	0.40	-0.47	0.53	-3.31	-0.18	-7.38
	墩顶水平位移	-0.06	-0.05	30 963.66	0.25	-0.10	55.38	0.18	1.11	4 701.93
	墩底剪力	-2.01	-0.40	757.20	-1.13	0.66	-8.73	-0.74	0.57	13.10
	墩底轴力	-0.44	0.12	6 318.94	-0.20	-0.17	14.84	-1.23	2.61	196.81
	墩底弯矩	-0.27	0.29	4 772.77	-1.95	0.06	-11.13	-1.23	0.26	328.84

由于直接求解法未经过任何近似处理,因此将其作为“精确解”,其余 3 种方法的峰值计算结果误差见表 2,其中误差 e 的计算式为

$$e = \frac{r_i - r_1}{r_1} \times 100\% \quad (17)$$

式中: $r_i (i=2,3,4)$ 分别代表使用位移输入法、相对运动法和大质量法计算得到的桥梁某一地震反应的峰值; r_1 为使用直接求解法得到的桥梁某一地震反应的峰值。

3.2 几种计算方法对多点地震输入适用性分析

由以上峰值和时程的计算结果可以得到以下结论:

(1) 对于结构的加速度反应,4 种方法计算得到的结果非常接近,其中相对运动法、位移输入法和 大质量法计算的最大误差分别为 3.31%,0.86% 和 11.99%。4 种方法的加速度反应计算结果均具有相当好的精度。

(2) 对于结构的位移和内力反应,在相对运动法中,输入位移的计算结果精度较高,最大误差分别为 3.19% 和 3.47%。而大质量法的计算结果与其他 3 种方法的计算结果相差巨大,从波形上可以明显看出其计算结果严重失真。显然,大质量法并不适用于计算结构的内力和位移反应。

3.3 大质量法计算结果失真原因分析

由于大质量法位移和内力反应计算结果严重失

真,需要对其失真原因进行分析,绘制了在人工基岩波作用下的不同位置反应的时程计算结果,限于篇幅,仅绘制桥墩 2 的时程计算结果,即图 3~7。从图 3~7 中可以看出,大质量法的位移和内力计算结果出现了严重的基线漂移现象。由于在数值积分中常常会产生基线漂移的现象,而本文中的大质量法的计算过程中采用了 Newmark- β 法进行数值积分,位移和内力的漂移现象可能正源于此。

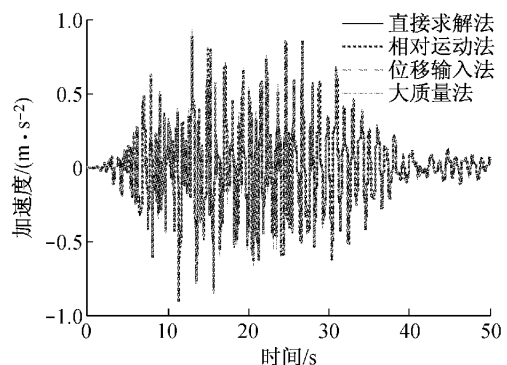


图 3 墩底水平加速度时程

Fig.3 Horizontal acceleration time history of top of the pier

为分析大质量法计算结果失真的原因是否是由数值积分引起的,将支座处地震动加速度时程进行数值积分成位移,积分方法为梯形积分,积分公式如下:

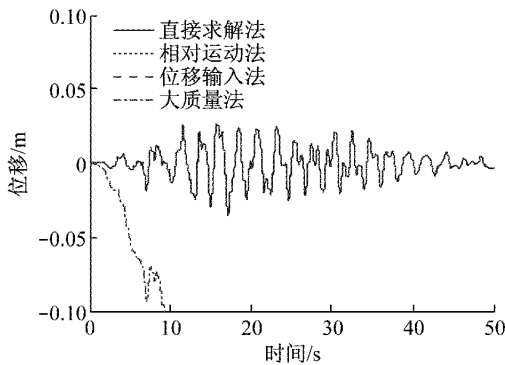


图 4 墩顶水平位移时程

Fig. 4 Horizontal displacement time history of top of the pier

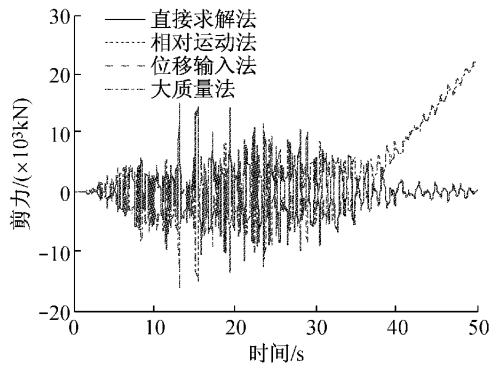


图 5 墩底剪力时程

Fig. 5 Shear force time history of the bottom of the pier

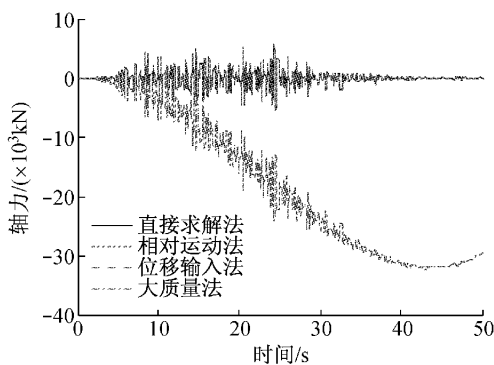


图 6 墩底轴力时程

Fig. 6 Axial force time history of bottom of the pier

$$v(j) = \sum_{k=1}^j (a(k+1) + a(k)) \Delta t / 2 \quad (18)$$

$$u(j) = \sum_{k=1}^j (v(k+1) + v(k)) \Delta t / 2 \quad (19)$$

式中: $a(k)$, $v(k)$ 和 $u(k)$ 分别为加速度、速度和位移时程中第 k 个点的数值; Δt 为时间步长。

对桥墩 1 处计算得到的加速度时程依照式(18)和式(19)进行积分, 将积分结果与使用大质量法计算得到的桥墩 1 处的位移反应结果进行对比, 如图 8

所示。

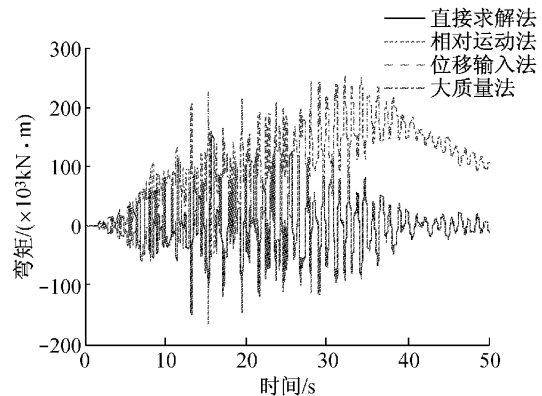


图 7 墩底弯矩时程

Fig. 7 Bending moment time history of bottom of the pier

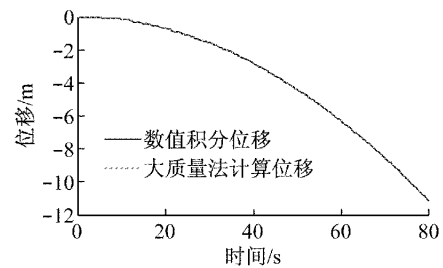


图 8 数值积分位移和大质量法计算位移对比

Fig. 8 Comparison of integral displacement and calculation displacement by large mass method

由此, 可以明显看出, 通过大质量法计算得到的桥墩 1 处的位移时程实质上即为对桥墩 1 处的加速度时程进行数值积分直接得到的. 而结构的内力反应又取决于结构各节点的位移. 因此, 当使用大质量法进行多点地震动输入计算时, 由于结构各点的地震动输入不尽相同, 因此对其进行数值积分得到的位移也就很有可能会发生基线漂移的情况, 而又由于各支承点处时程积分得到的位移的漂移情况不可能完全一致, 由此引发了大质量法的内力和位移计算结果失真。

3.4 大质量法对行波地震动输入的适用性分析

根据上节的分析, 在多点地震动输入的情况下, 由于各支撑点处加速度时程积分得到的位移时程漂移情况各不相同, 此时结构的位移反应和内力反应会出现严重失真的现象. 而对于行波输入的情况, 各点地震动时程的位移积分结果应该一致, 也就是说结构的内力反应有可能不出现基线漂移的情况. 因此, 本节探讨大质量法对行波输入的适用性。

对结构进行行波输入, 地震波选择图 2 中桥墩 1

处的地震动时程,行波波速为 $2\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 绘制墩底剪力时程如图 9 所示. 从图中可以明显看出,墩底剪力时程也发生了严重的失真现象. 由此可以看出,大质量法对于行波输入也不适用.

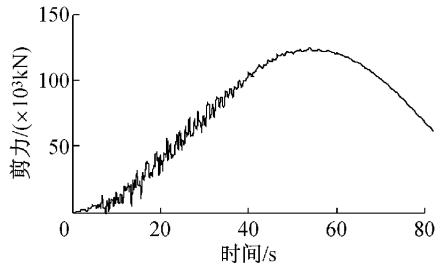


图 9 墩底剪力时程

Fig. 9 Axial force time history of bottom of the pier

3.5 大质量法计算结果失真原因再分析

根据 3.3 节的分析,使用大质量法在进行行波地震动输入时可能适用. 但是由 3.4 节的计算结果可知,使用大质量法在行波地震动输入时,计算得到的内力结果依然有可能出现失真的现象. 为讨论失真现象出现的原因,同时考虑到 3.5 节分析的结构位移和内力发生漂移的原因可能来源于数值积分,输入地震波均选择进行基线校正后的加速度时程. 设计以下几种工况进行计算.

(1) 工况 1. 仅对桥梁结构桥墩 1 处使用大质量法进行加速度输入,输入时程为基线校正后的 3.4 节中桥墩 1 处的输入加速度时程.

(2) 工况 2. 仅对桥梁结构桥墩 2 处使用大质量法进行加速度输入,输入时程为基线校正后的 3.4 节中桥墩 2 处的输入加速度时程.

(3) 工况 3. 仅对桥梁结构桥墩 3 处使用大质量法进行加速度输入,输入时程为基线校正后的 3.4 节中桥墩 3 处的输入加速度时程.

(4) 工况 4. 仅对桥梁结构桥墩 4 处使用大质量法进行加速度输入,输入时程为基线校正后的 3.4 节中桥墩 4 处的输入加速度时程.

根据叠加原理,对上述 4 种工况计算得到的结果进行叠加即为使用大质量法对 4 个桥墩同时进行输入的计算结果. 4 种工况下桥墩 1 墩底的加速度和位移计算结果见图 10 和图 11.

从图 10 可以看出,桥墩 2、桥墩 3 和桥墩 4 处的地震动输入对于桥墩 1 处的加速度反应影响很小;而从图 11 中则可以看出,桥墩 2、桥墩 3 和桥墩 4 处的地震动输入对于桥墩 1 处的位移反应影响很大. 因此,在使用大质量法进行行波输入时,任何一个支撑处的位移反应都是所有支撑点地震动输入共同作

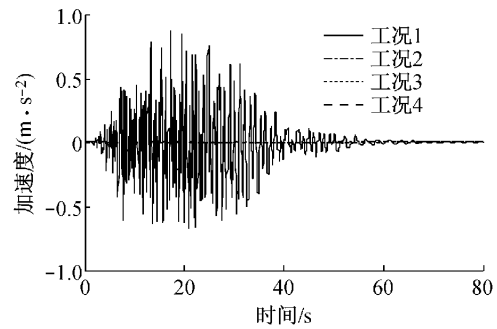


图 10 各工况下桥墩 1 处加速度时程

Fig. 10 Acceleration time history of pier 1 under different conditions

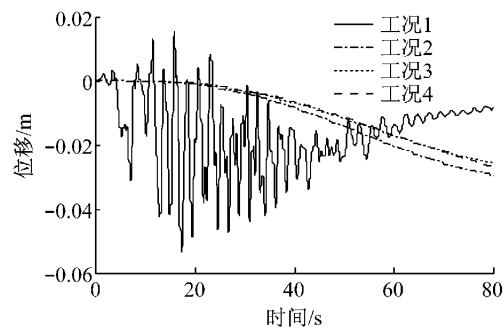


图 11 各工况下桥墩 1 处位移时程

Fig. 11 Displacement time history of pier 1 under different conditions

用的结果而非仅仅是此支撑点处作用的结果. 所以在使用大质量法对结构进行行波输入时,虽然表面上看各支撑点处的加速度与输入非常接近,但是实际上各支撑点处的位移可能会有相当大的差别.

从式(14)也可以看出,当附加质量足够大时,大质量法仅能保证 $\ddot{u}_b(t) \approx \ddot{u}_g(t)$,而不能保证 $\dot{u}_b(t) \approx \dot{u}_g(t)$ 和 $u_b(t) \approx u_g(t)$,即不能保证计算中的输入地震位移和输入地震速度等于实际地震位移激励和速度激励. 因此,使用大质量法计算得到的位移并不可靠,同时由位移引起的内力反应计算结果也并不可靠. 因此使用大质量法进行多点激励计算得到的结构位移和内力反应失真也就不足为奇了.

4 结语

(1) 通过峰值和时程计算结果的比较可知,直接求解法、相对运动法和位移输入法均是适用于多点激励的计算方法.

(2) 使用大质量法进行结构多点地震动输入计算时所得结构加速度反应具有一定的精度,但是结构位移和速度反应在不同地震波作用下有可能出现

失真的现象. 因此对于需要求解内力和位移反应的多点地震动输入计算不宜使用大质量法进行计算.

参考文献:

- [1] 潘旦光,楼梦麟,范立础. 多点输入下大跨度结构地震反应分析研究现状[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(10):1213.
PAN Danguang, LOU Menglin, FAN Lichu. Status of seismic response analysis of long-span structures under multiple support excitations[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2001, 29(10): 1213.
- [2] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures[M]. New York; McGraw-Hill, 1975.
- [3] Leger P, Ide I M, Paultre P. Multiple-support seismic analysis of large structures[J]. Computers & Structures, 1990, 36(6): 1153.
- [4] Wilson E L. Three dimensional static and dynamic analysis of structures: A physical approach with emphasis on earthquake engineering[M]. Altant; Computers and Structures, Inc, 1998.
- [5] 楼梦麟,李强. 关于结构系统地震输入模式问题的讨论[J]. 世界地震工程, 2008, 24(2): 21.
LOU Menglin, LI Qqiang. Discussion on seismic excitation of structural system[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(2): 21.
- [6] 黄小国,胡大琳,张后举. 行波效应对大跨度连续刚构桥地震反应的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008, 28(1): 72.
HUANG Xiaoguo, HU Dalin, ZHANG Houju. Effects of traveling wave to seismic response of long span rigid-framed bridge[J]. Journal of Chang' an University; Natural Science, 2008, 28(1): 72.
- [7] 周国良,李小军,刘必灯,等. 大质量法在多点激励分析中的应用、误差分析与改进[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 48.
ZHOU Guoliang, LI Xiaojun, LIU Bideng. Error analysis and improvements of large mass method used in multi-support seismic excitation analysis[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 48.
- [8] 楼梦麟,张静. 大跨度拱桥地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 22.
LOU Menglin, ZHANG Jing. Discussion on damping models for seismic response analysis of long-span bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 22.
- [9] 楼梦麟,董云. 大型直流电压发生器塔架结构地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 35.
LOU Menglin, DONG Yun. Seismic response analysis of large-scale DC voltage generator tower structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 35.
- [10] 楼梦麟,邵新刚. 深覆盖土层 Rayleigh 阻尼矩阵建模问题的讨论[J]. 岩土工程学报, 2013;35(7):1272.
LOU Menglin, SHAO Xingang. Discussion on modeling issues of Rayleigh damping matrix in soil layer with deep deposit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013; 35(7): 1272.
- [11] 楼梦麟,邵新刚. 土层地震反应显式计算中阻尼矩阵系数的选取[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(8): 1126.
LOU Menglin, SHAO Xingang. Coefficient selection of damping matrix in explicit calculation of soil layer seismic response[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2013, 41(8): 1126.
- [12] 楼梦麟,杨燕,潘小樟,等. 汶川地震中上海高层建筑动力反应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 82.
LOU Menglin, YANG Yan, PAN Xiaozhang, et al. Dynamic response analysis of high-rise buildings in Shanghai during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 82.
- [13] Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(4):1003.
- [14] 罗超,楼梦麟,桂国庆. 确定大跨连续刚构桥地震动输入时程方法比较[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 414.
LUO Chao, LOU Menglin, GUI Guoqing. Comparing time history methods of input ground motion for large span continuous rigid frame bridge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 414.
- [15] 杨坤,史庆轩,赵均海,等. 高强箍筋约束高强混凝土本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 34.
YANG Kun, SHI Qinxuan, ZHAO Junhai. Study on constitutive model of high-strength concrete confined by high-strength stirrups[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 34.
- [16] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames; Part I. Formulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711.
- [17] Saatcioglu M, Grira M. Confinement of reinforced concrete columns with welded reinforced grids [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 29.
- [18] YI Weijian. Experiments and theoretical study of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2012.

(上接第7页)