

考虑行波效应的二维框架结构的地震响应

姜迎春¹, 刘铁林², 栾 宇¹

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要:运用波动方法研究二维框架结构的地震响应. 对二维框架结构进行空间离散构造出被研究块体, 建立被研究块体的动力学方程, 推导空间离散段的段间内力与端部位移关系式; 在时间域上交替运用被研究块体动力学平衡方程和段间内力与端部位移关系式进行递推计算, 给出结构地震响应分析的波动方法. 该方法易于求解考虑行波效应的结构地震响应问题. 分别针对水平和竖向地震作用情况, 分析了二维框架结构柱的剪力和梁端弯矩的行波效应. 结果表明: 考虑行波效应时, 柱的剪力和梁端弯矩存在增大现象, 一些柱的剪力或梁端弯矩甚至出现竖向地震作用比水平地震作用大的现象. 框架结构的地震响应应该考虑竖向和水平地震的行波效应.

关键词:框架结构; 波动方法; 行波效应; 竖向地震

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)03-0331-08

震害调查表明: 竖向地震对工程结构具有破坏作用. 1985年四川自贡地震时, 震中区的震害现象主要特征是房屋砖墙水平横缝, 钢筋混凝土柱头出现明显的挤压破坏(混凝土压碎、钢筋压曲), 竖向地震力对结构的破坏作用明显^[1]. 1995年日本神户地震时, 许多房屋中间层产生挤压破坏, 高架桥桥墩中部膨胀并出现压屈破坏, 这些均是竖向地震力作用下巨大的竖向惯性力冲击造成的^[2]. 结构抗震设计规范越来越重视竖向地震作用.

地震作用时, 各支承点的地震激励在空间和时间上存在差异^[3], 其中行波效应是引起差异的原因之一. 目前, 针对大跨度桥梁、空间结构的行波效应问题, 开展了许多研究工作^[4-6]; 针对框架结构的竖向地震问题, 也进行了许多研究工作^[7-10], Rambabu^[11]研究水平多点激励作用下平面框架结构的地震响应, 结果表明短跨度结构也应该考虑行波效应问题.

本文针对水平和竖向地震作用下框架结构的动力响应问题, 给出了波动分析方法, 该方法易于处理多点激励的地震波输入. 首先构造被研究块体^[12], 建立被研究块体的动力学方程, 推导空间离散段的段间内力与端部位移关系式; 再利用动力学方程和段间内力与端部位移关系式, 在时间域上进行递推运算, 完成算法的实现过程. 分别在竖向和水平地震作用下, 利用提出的波动方法, 分析了考虑行波效应时, 二维框架结构的地震响应, 对比了柱的剪力和梁端弯矩的计算结果, 并同时给出了它们的竖向地震作用占水平地震作用的比例.

1 波动分析的控制方程

为模拟二维框架结构中弯曲波的传播过程, 首先介绍了被研究块体的概念, 并对被研究块体建立动力学平衡方程. 其次由端部力与端部位移的关系式推导出段间内力(轴力、剪力和弯矩)与端部位移之间的关系式.

1.1 被研究块体的动力平衡方程

图1中的阴影部分给出梁柱节点处和梁段(或柱段)两种形式的被研究块体示意图. 图(a)表示梁柱节点处的被研究块体, 由相邻上下空间离散的半个柱段和左右空间离散的半个梁段(含楼板)及斜梁离

收稿日期: 2011-11-24 修改稿日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972144)

作者简介: 姜迎春(1978-), 女, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要从事结构动力分析.

散的半个梁段构成. 图(b)表示柱段或梁段构成的被研究块体, 由沿构件轴向方向相邻各半段组成. 柱段可以是整个柱子也可以是对整个柱子进行空间离散所给出的柱段; 梁段可以是一个梁也可以是对一个梁进行空间离散所给出的梁段.

第 i 个被研究块体由与第 i 节点相关联的 n 个梁段或柱段的一半组成. 图 2 为组成第 i 个被研究块体的第 l 段段间内力分配给第 i 个被研究块体的受力图. N_l 、 V_l 和 M_l 分别为空间离散的第 l 段中部截面处的段间轴力、剪力和弯矩.

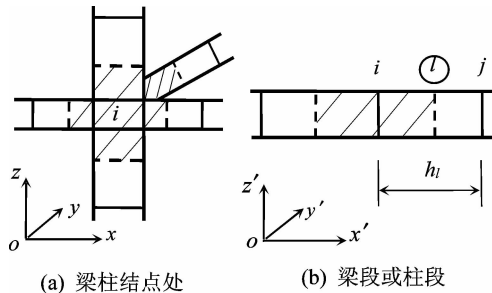


图 1 被研究块体 i 的示意图

Fig. 1 Sketch of investigated lump i

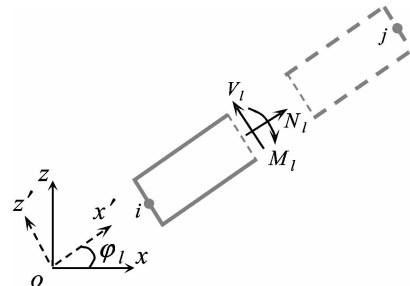


图 2 与被研究块体 i 相连的第 l 单元段间内力图

Fig. 2 Free-body diagram for one half-length of element l belonging to investigated lump i

根据图 2 中受力图中力的分配方式, 可以列出第 i 个被研究块体瑞雷阻尼形式的动力学方程组为

$$m_i \ddot{u}_i = \sum_{l=1}^n (N_l \cos \varphi_l - V_l \sin \varphi_l) - \alpha m_i \dot{u}_i \quad (1)$$

$$m_i \ddot{w}_i = \sum_{l=1}^n (N_l \sin \varphi_l + V_l \cos \varphi_l) - \alpha m_i \dot{w}_i \quad (2)$$

$$J_i \ddot{\theta}_i = \sum_{l=1}^n (M_l - V_l \frac{h_l}{2}) - \alpha J_i \dot{\theta}_i \quad (3)$$

式中: m_i 为第 i 个被研究块体的质量; J_i 为第 i 个被研究块体绕 y 轴(通过 i 点)的转动惯量; φ_l 为第 l 段的轴向 x' 与轴 x 的夹角; \ddot{u}_i 、 \ddot{w}_i 分别为第 i 个被研究块体沿 x 轴和 z 轴的加速度; $\ddot{\theta}_i$ 为第 i 个被研究块体绕 y 轴的角加速度; \dot{u}_i 、 \dot{w}_i 分别为第 i 个被研究块体沿 x 轴和 z 轴的速度; $\dot{\theta}_i$ 为第 i 个被研究块体绕 y 轴的角速度; h_l 为第 l 段的长度; α 为质量阻尼系数.

1.2 段间轴力、剪力和弯矩与端部位移的关系式

由端部力与端部位移的关系式推导出空间离散段的段间轴力、剪力和弯矩与端部位移关系式. 第 l 段端部力和段间内力如图 3 所示. 图 3 中 N_i 、 V_i 、 M_i 为第 l 段 i 端轴力、剪力、弯矩; N_j 、 V_j 、 M_j 为第 l 段 j 端轴力、剪力、弯矩. 段间内力以左半段的中间截面处坐标轴正方向为正方向.

根据梁理论, 第 l 段端部力与端部位移的关系如下

$$N_i = \frac{(EA)_l}{h_l} (u'_i - u'_j) \quad (4)$$

$$V_i = \frac{12(EI)_l}{h_l^3} (w'_i - w'_j) - \frac{6(EI)_l}{h_l^2} (\theta'_i + \theta'_j) \quad (5)$$

$$M_i = \frac{6(EI)_l}{h_l^2} (w'_j - w'_i) + \frac{4(EI)_l}{h_l} \theta'_i + \frac{2(EI)_l}{h_l} \theta'_j \quad (6)$$

式中: $(EI)_l$ 、 $(GA)_l$ 、 $(EA)_l$ 分别为第 l 段的弯曲刚度、剪切刚度及抗拉刚度; u'_i 、 w'_i 、 θ'_i 分别为第 l 段第 i 端的轴向位移、横向侧移和转角; u'_j 、 w'_j 、 θ'_j 分别为第 l 段第 j 端的轴向位移、横向侧移和转角.

由左半段的平动和转动平衡方程, 可得第 l 段的段间轴力 N_l 、段间剪力 V_l 和段间弯矩 M_l 分别为

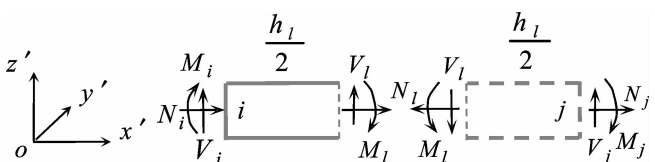


图 3 第 l 段段间内力及端部位移受力图

Fig. 3 Free-body diagrams of the left (solid line) and the right (dashed line) parts of element l by an imaginary plane cutting at the median cross section

$$N_l = \frac{(EA)_l}{h_l}(u'_j - u'_i)$$
(7)

$$V_l = \frac{12(EI)_l}{h_l^3}(\omega'_j - \omega'_i) + \frac{6(EI)_l}{h_l^2}(\theta'_i + \theta'_j)$$
(8)

$$M_l = \frac{(EI)_l}{h_l}(\theta'_j - \theta'_i)$$
(9)

式(7)~(9)为空间离散段 l 段的段间轴力 N_l 、剪力 V_l 和弯矩 M_l 与端部位移的关系. 当采用瑞雷阻尼形式时,段间轴力 N_l 、剪力 V_l 和弯矩 M_l 可写为:

$$N_l = \frac{(EA)_l}{h_l}(u'_j - u'_i) + \beta \frac{(EA)_l}{h_l}(\dot{u}'_j - \dot{u}'_i)$$
(10)

$$V_l = \frac{12(EI)_l}{h_l^3}(\omega'_j - \omega'_i) + \frac{6(EI)_l}{h_l^2}(\theta'_i + \theta'_j) + \beta \left[\frac{12(EI)_l}{h_l^3}(\dot{\omega}'_j - \dot{\omega}'_i) + \frac{6(EI)_l}{h_l^2}(\dot{\theta}'_i + \dot{\theta}'_j) \right]$$
(11)

$$M_l = \frac{(EI)_l}{h_l}(\theta'_j - \theta'_i) + \beta \frac{(EI)_l}{h_l}(\dot{\theta}'_j - \dot{\theta}'_i)$$
(12)

式中: \dot{u}'_i 、 $\dot{\omega}'_i$ 、 $\dot{\theta}'_i$ 分别为第 l 段第 i 端的轴向速度、横向速度和角速度; \dot{u}'_j 、 $\dot{\omega}'_j$ 、 $\dot{\theta}'_j$ 分别为第 l 段第 j 端的轴向速度、横向速度和角速度; β 是刚度阻尼系数.

1.3 局部坐标系与整体坐标系位移之间的关系

被研究块体动力平衡方程是在整体坐标系中建立的,针对所求出的加速度进行积分,可以给出整体坐标系中的位移,而计算段间内力时需要用局部坐标系下的位移,这就需要两种坐标系下位移之间的相互转换关系. 第 i 个被研究块体的轴向、横向位移和转角在局部和整体坐标系中的关系式为

$$u'_i = u_i \cos \varphi_l + w_i \sin \varphi_l$$
(13)

$$w'_i = -u_i \sin \varphi_l + w_i \cos \varphi_l$$
(14)

$$\theta'_i = \theta_i$$
(15)

2 算法实现

交替运用给出的被研究块体动力学平衡方程和段间内力与端部位移的关系式在时间域上进行递推运算,实现二维框架结构动力响应的波动分析. 由水平和竖向加速度时间积分可以给出各离散时间步的水平和竖向位移,将位移时程施加到结构基础加载点上. 如果在所有基础施加相同的位移时程,则为一致激励,如果在各基础加载点上输入不同的位移时程,就意味着进行多点激励输入. 上述操作表明,本文方法不需要传统的多点激励控制方程,多点激励问题易于实现和求解,具体实现过程如下:

Step1:由 t 时刻加在基础点上地震波加速度和各被研究块体(不包括基础加载点)的 \ddot{u}_i^t 、 \ddot{w}_i^t 、 $\ddot{\theta}_i^t$, 时间积分给出 $t + \Delta t$ 时刻各被研究块体(包括基础加载点)的 $u_i^{t+\Delta t}$ 、 $w_i^{t+\Delta t}$ 和 $\theta_i^{t+\Delta t}$;

Step2:利用式(13)~(15),计算出局部坐标系中的 $u_i^{\prime t+\Delta t}$ 、 $w_i^{\prime t+\Delta t}$ 和 $\theta_i^{\prime t+\Delta t}$;

Step3:利用式(10)~(12),计算出各段的段间轴力 $N_l^{t+\Delta t}$ 、剪力 $V_l^{t+\Delta t}$ 和弯矩 $M_l^{t+\Delta t}$;

Step4:利用式(1)~(3),计算给出 $\ddot{u}_i^{t+\Delta t}$ 、 $\ddot{w}_i^{t+\Delta t}$ 和 $\ddot{\theta}_i^{t+\Delta t}$.

由 Step1~Step4 进行递推计算,可给出各个时刻的各被研究块体的平动和转动位移、各段段间轴力、剪力和弯矩,上述过程实现了二维框架结构动力响应波动分析的数值计算.

3 计算实例

表 1 地震记录

Tab. 1 Seismic records used

3.1 地震波及二维框架结构计算模型

计算所用的地震波选用 PEER (<http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>) 数据库中 Imperial Valley 波和 Northridge 波(见表 1). 按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中 8 度设防的设防烈度水准要求,将水平地震波峰值加速度调整为 0.2 g,竖

地震名称	记录站	方向	PGA/g
Imperial Valley (1979/10/15)	5057 El Centro	A-E03140	0.179
	Array # 3	A-E03-UP	0.031
Northridge (1994/01/ 17 12:31)	90011	BLF296	0.128
	Montebello-Bluff Rd.	BLF-UP	0.076

向地震波峰值加速度调整为 0.13 g.

图 4 为二维框架结构示意图,图中 u_f 、 w_f (f 分别为基础 A、B、C、D) 分别表示各基础点的地震波位移输入时程. 当各基础点为相同的位移时程时,为一致输入. 当各基础点位移时程有时间延迟时,即可用于研究行波效应. 本文中地震波沿 A→B→C→D 方向上有时间延迟.

研究对象为三跨三层钢筋混凝土二维框架结构,首层层高 5.0 m,其他层层高 4.5 m. 梁、柱混凝土强度等级均为 C25,钢筋强度等级为 HRB335. 首层柱截面为 450 mm×450 mm,其他层柱截面为 400 mm×400 mm. 各层梁截面尺寸均为 250 mm×600 mm. 板厚 100 mm,有效宽度为 2.3 m. 实际计算时,结构阻尼比取为 0.05,每根柱离散成均匀的 2 段,梁离散成均匀的 3 段,时间步长取 0.25 ms. 图 4 中标明柱端截面和梁端截面的编号,编号 1—6 表示左侧边柱三根柱的柱端截面,7—12 表示左侧中柱的柱端截面,13—18 表示右侧中柱的柱端截面,19—24 表示右侧边柱的柱端截面,编号 25—30 表示一层由左到右的梁端截面,31—36 表示二层梁端截面,37—42 表示三层梁端截面.

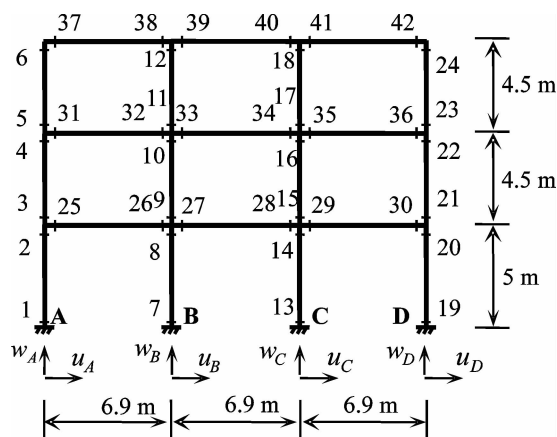


图 4 二维框架示意图

Fig. 4 Sketch of the plane frame structure

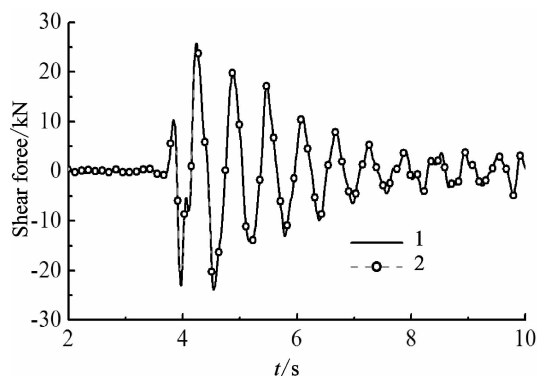


图 5 柱端 6 号截面剪力时程对比曲线

Fig. 5 Comparison of shear forces of No. 6 cross section

3.2 方法有效性验证

图 5 是水平一致地震激励 Imperial Valley 波作用下,本文方法和有限元方法计算给出的 6 号截面剪力时程曲线的对比图. 图中线 1 表示用本文方法的计算结果,线 2 表示有限元方法(Wilson- θ 法)的计算结果. 图中可看出两条弯矩的时程曲线吻合很好,从计算结果的数据看,两者之间存在细小的差别,但对比图中反映不出细小的数值差别. 图中只画 2~10 s 的时程对比曲线,其他时间段两条曲线吻合也很好. 事实上,其它截面柱的剪力和梁端弯矩时程对比曲线吻合也很好,由于篇幅关系未给出它们的对比图. 结果表明:本文提出的波动方法是一种有效的结构动力响应分析方法.

3.3 计算结果分析

(1) 柱的剪力最大值比较曲线

图 6 表示只考虑竖向地震输入时,不同波速情况下,柱的剪力最大值的比较曲线. 所谓柱的剪力最大值是指选取柱的剪力时程记录中的最大值. 图中 Uniform 表示不考虑行波效应的一致激励问题,180 m/s 和 170 m/s 表示中软土的两个地震波,100 m/s 和 80 m/s 表示软弱土的两个地震波. 竖向一致激励时,中柱各层剪力值均比边柱小;考虑行波效应时,随波速减小而柱的剪力值增大. 图 7 表示只考虑水平地震作用时,柱的剪力最大值的对比曲线. 水平一致激励时,中柱各层剪力值均比边柱大;考虑行波效应时,Imperial Valley 波作用下,一层左边柱的剪力值随波速减小而增大;Northridge 波作用下,一层左边柱和右边柱的剪力值随波速减小而增大. 其它柱的剪力值均随波速减小而减小.

无论是水平地震还是竖向地震作用,一致激励时,柱的剪力均具有对称性.

图 8 表示柱的剪力最大值的比值. 图中 V/H 表示竖向地震作用产生的柱剪力最大值与水平地震作用产生的柱剪力最大值的比值. 由图可见:同一波速中,竖向地震作用的柱的剪力值所占比例值顶层大于底层;三种不同波速情况下,波速越小竖向地震作用产生的柱剪力所占的比例值越大,考虑行波效

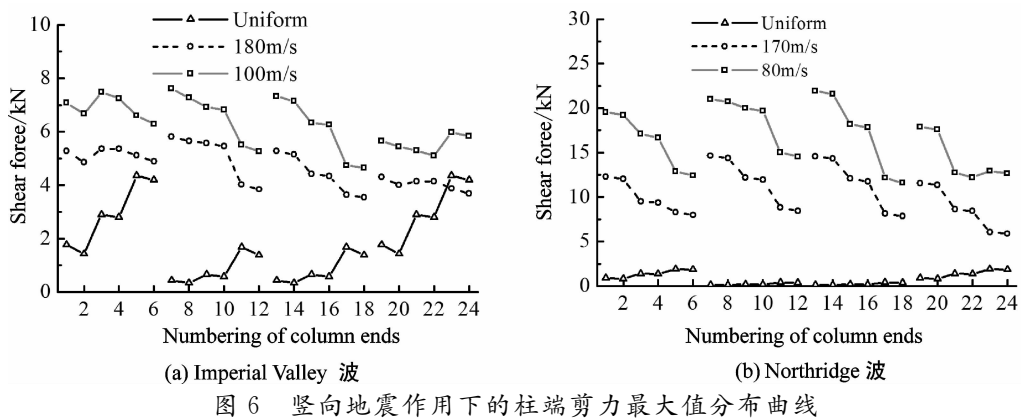


Fig. 6 Distributions of maximum shear forces at column ends subjected to vertical seismic load

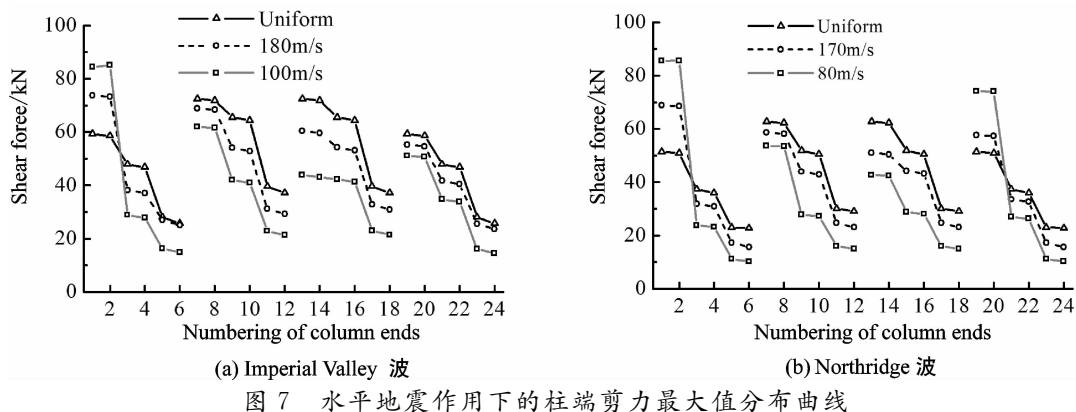


Fig. 7 Distributions of maximum shear forces at column ends subjected to horizontal seismic load

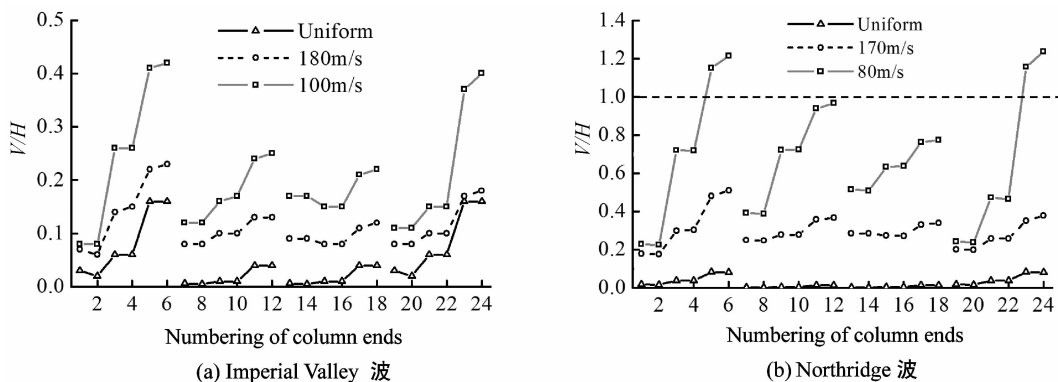


Fig. 8 Ratios of column shear forces between vertical and horizontal seismic excitations

应时,竖向地震作用不应忽略.地震波的传播速度较低时,由竖向地震作用所产生的一些柱端剪力甚至超过了由水平地震作用所产生的柱端剪力,例如, Northridge 波作用时,竖向地震作用下顶层边柱的柱端剪力值大于水平地震产生的剪力值.

(2) 梁端弯矩最大值比较曲线

图 9 表示只考虑竖向地震输入时,不同波速情况下,梁端弯矩最大值的比较曲线.所谓梁端弯矩最大值是指选取梁端弯矩时程记录中的最大值.竖向一致激励时,边跨梁截面(图 4 中编号为 25、30、31、36、37、42 的截面)的梁端弯矩值小于同层的其它梁端弯矩值;地震波传播速度较低时,各梁梁端弯矩值增大.

图 10 表示只考虑水平地震输入时,梁端弯矩最大值的比较曲线.考虑行波效应时,各梁端弯矩最大值随波速减小而减小.边跨梁截面的梁端弯矩值大于同层的其他截面梁端弯矩.

无论是水平地震还是竖向地震作用,一致激励时,各层梁的梁端弯矩具有对称性.

图 11 表示梁端弯矩最大值的比值.图中 V/H 表示竖向地震作用产生的梁端弯矩最大值与水平地

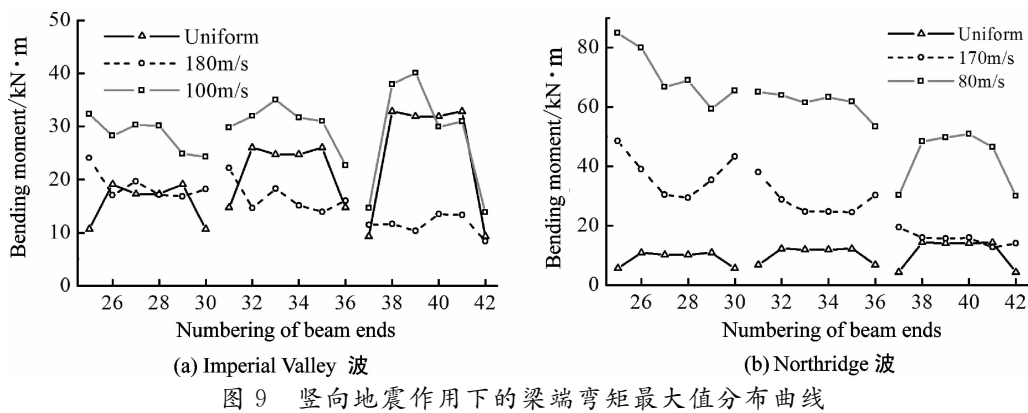


图9 竖向地震作用下的梁端弯矩最大值分布曲线

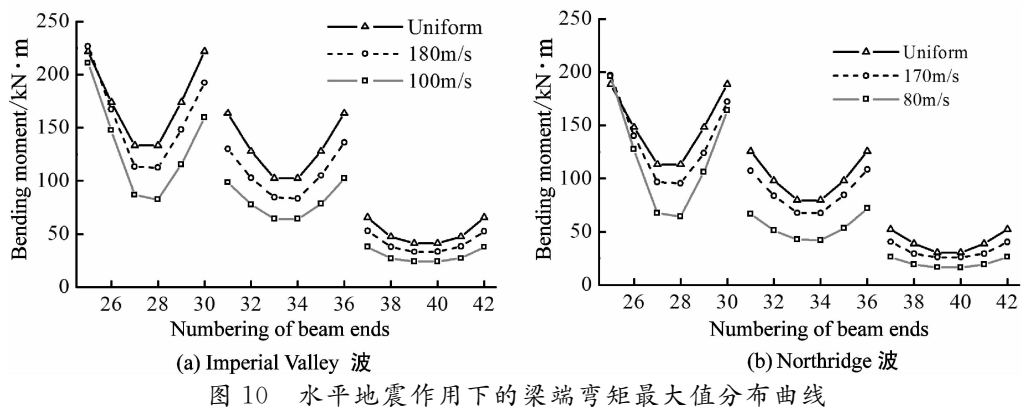


图10 水平地震作用下的梁端弯矩最大值分布曲线

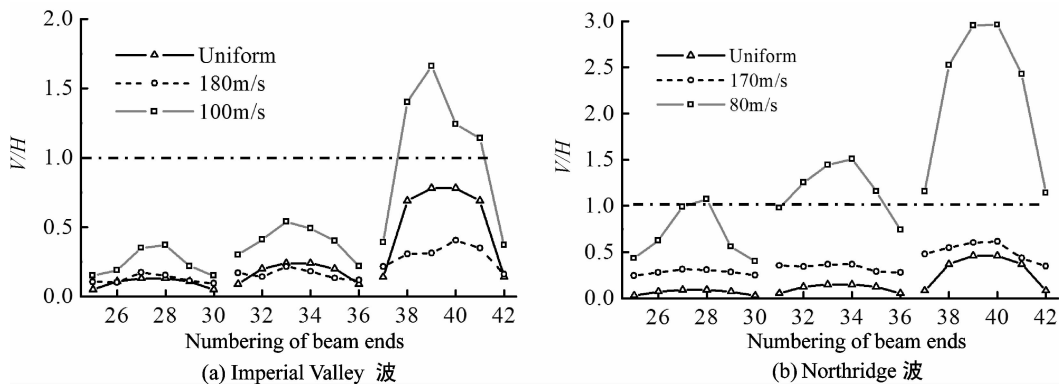


图11 竖向与水平地震的梁端弯矩值的比值

Fig. 11 Ratios of beam-end bending moments between vertical and horizontal seismic excitations

震作用产生的梁端弯矩最大值的比值. 由图可见:地震波的传播速度较低时,由竖向地震作用所产生的一些梁端弯矩甚至超过了由水平地震作用所产生的梁端弯矩,例如,Imperial Valley 波作用时,竖向地震作用下顶层中部的梁端弯矩值大于水平地震产生的弯矩值;Northridge 波作用时,波速 80 m/s 时,各层均出现竖向地震作用下梁端弯矩值大于水平作用所产生的梁端弯矩.

4 结 论

笔者提出了一种二维框架结构地震响应的波动分析方法. 该方法物理意义明确,易于考虑多点地震输入问题,无需使用经典的多点激励动力方程.

对于二维框架结构,无论是水平还是竖向地震,一致激励时,柱的剪力和梁端弯矩均出现对称性. 水平地震作用下,一致激励时,各层边柱的剪力最大值均小于中柱的剪力最大值,临近边柱的梁端弯矩最大值大于同层内其它截面处梁端弯矩最大值;而考虑行波效应时,底层边柱的剪力最大值出现增大现

象,而各梁端处的弯矩最大值出现减小现象.竖向地震作用下考虑行波效应时,柱的剪力最大值和梁端弯矩最大值存在增大现象.当地震波的传播速度较低时,竖向地震产生的柱端剪力和梁端弯矩出现超过水平地震产生的柱端剪力和梁端弯矩的现象.

对于框架结构的地震响应,应该考虑竖向和水平的行波效应问题.

参考文献 References

- [1] 陈念英. 竖向地震力与自震害[J]. 工程抗震, 1986(1): 28-29.
CHEN Nian-ying. Vertical earthquake force and seismic damage in Zigong city[J]. Earthquake resistant engineering, 1986(1): 28-29.
- [2] PAPAZOGLU A J, ELNASHAI A S. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1996, 25: 1109-1137.
- [3] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. 2nd edition. Prentice-Hall, USA. 2001.
- [4] 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.
- [5] ZHANG Y H, LI Q S, LIN J 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.
- [6] 何庆祥, 沈祖炎. 结构地震行波效应分析综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 50-57.
HE Qing-xiang, SHEN Zu-yang. Review of structural seismic analysis of traveling wave effects[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 50-57.
- [7] JU S H, LIU C W, WU K Z. 3D Analyses of buildings under vertical component of earthquakes[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1196-1202.
- [8] SALAZAR A R, HALDAR A. Structural responses considering the vertical component of earthquakes[J]. Computers and Structures, 2000, 74(2): 131-145.
- [9] 周靖, 周飞, 蔡健, 等. 脉冲型竖向地震作用下大跨度 RC 带腋撑框架结构弹塑性动力响应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 113-119.
ZHOU Jing, ZHOU Fei, CAI Jian, et al. Seismic elastic-plastic response of long-span RC frame structure with haunched members subjected to pulse-like vertical ground motions[J]. Engineering mechanics, 2010, 27(6): 113-119.
- [10] 李碧雄, 邓建辉, 王哲. 5·12 汶川地震底框砖房震害启示[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(3): 342-347.
LI Bi-xiong, DENG Jian-hui, WANG Zhe. Lessons from the performances of masonry structures with ground RC frame suffered 5·12 Wenchuan earthquake[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2010, 42(3): 342-347.
- [11] RAMBABU K V, Allam M M. Response of an open-plane frame to multiple support horizontal seismic excitations with soil - structure interaction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299: 388-396.
- [12] LIU Tie-lin, LIU Kai-shin, ZHANG Jin-xiang. Unstructured grid method for stress wave propagation in elastic media [J]. Comput. Methods Appl Mech. Engrg., 2004, 193(23/26): 2427-2452.

Seismic response of plane frame structure considering the wave passage effect

JIANG Ying-chun¹, LIU Tie-lin², LUAN Yu¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The wave-based method is presented in this article for the earthquake response of plane frame structure. The

spatial discrete segments of plane frame structure are used to form the investigated lumps. The dynamic equations of the investigated lumps and the relations between interior forces and end displacements have been derived. By applying the dynamic equations and the relations alternately in time domain, the wave-based method was presented for seismic response analysis of plane frame structure. The method can be easily used to solve the problem of structural seismic response considering wave passage effect by using the proposed method. Comparisons of the shear forces of columns with the bending moments of beams are carried out for a plane frame structure respectively subjected to horizontal and vertical seismic excitations. It showed that the effect of wave passage may lead the column shear forces and beam-end bending moments to an increase. Some column shear forces and beam-end bending moments caused by the vertical excitations are even greater than those caused by the horizontal excitations. So seismic wave passage effect should be considered for the seismic response analyses of plane frame structure.

Key words: *plane frame structure; wave-based method; wave passage effect; vertical earthquake*

Biography:JIANG Ying-chun, Candidate for Ph. D., Dalian 116024, P. R. China, Tel: 0086-13889204250, E-mail: yingchun. j@gmail. com

(上接第 309 页)

[11] 杨文星. 单自由度体系非线性地震能量反应分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2002.

YANG Wen-xing. Nonlinear analysis on seismic energy response of SDOF system [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2002.

[12] 熊仲明, 王佳, 郭瑜. 基于耗能减震结构耗能装置的优化设置的研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(2): 166-171.

XIONG Zhong-ming, WANG Jia, GUO Yu. Research on optimization setting based on passive energy dissipation structural device [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2011, 43(2): 166-171.

Study on the simplified method of energy analysis based on sliding isolation structure

XIONG Zhong-ming^{1,2,3}, ZHANG Ping-ping¹, WEI Jun^{2,4}, LIU Xiao-tong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of arch. & tech., Xi'an 710055, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou 215011, China;

3. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215011, China)

Abstract: A large amount of calculation and complex analysis is involved in the nonlinear seismic response analysis of the multi-DOF shear structure isolation system with the energy method, not ready for use in engineering practice. In order to solve these problems, this paper, through its analysis of free vibration equation, finds an equivalent system to simplify the solution of the isolation system. And the influence of three elements of near-fault ground motion on the total input energy was simply analyzed. Finally, a five-storey framework isolation structure model under the action of earthquake is respectively analyzed by energy method and the simplified calculation method. Compared with the results, it shows the method proposed is rather safe, which also provides the reference for the seismic design of the project.

Key words: *sliding base-isolation; analysis of energy method; earthquake response*

Biography:XIONG Zhong-ming, Professor, Ph. D, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-62663671. E-mail: xiong_zhongming@yahoo. com. cn