

# 地震作用下基于粘弹性模型的低层联排建筑碰撞响应分析

蒋禹<sup>1</sup> 郭雨辰<sup>1</sup> 张济强<sup>2</sup> 戴奇轩<sup>1</sup>

1 浙江建设职业技术学院, 浙江省杭州市, 311231;

2 厦门兴才职业技术学院, 福建省厦门市, 361024;

**摘要:** 为了研究低层联排建筑在地震作用下的碰撞响应, 对紧密排列的 5 个单层相邻建筑采用粘弹性碰撞模型进行模拟分析。结果表明: 结构自振周期相差较大的相邻建筑间更易发生碰撞, 结构的碰撞对相邻建筑的峰值位移响应有一定的影响。

**关键词:** 粘弹性碰撞模型; 相邻建筑; 地震作用; 碰撞响应

**DOI:** 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 051

## 引言

在地震中相邻建筑由于结构振动不同步, 相对位移超过结构间距, 引起相邻建筑发生碰撞, 甚至造成建筑主体结构坍塌<sup>[1-3]</sup>。而多个建筑连续密集排列, 在地震过程中发生碰撞的可能性更大, 更易造成地震灾害<sup>[4-6]</sup>。

研究相邻结构碰撞问题, 首先要确定相邻结构的模型。Jankowski<sup>[7]</sup>, Anagnostopoulos<sup>[8]</sup>, 蒋姗<sup>[9]</sup>等用集中质量模型相继研究了单自由度体系和多自由度体系的相邻结构碰撞问题。Papadrakakis<sup>[10]</sup>通过建立精细化的三维模型, 对相邻建筑的碰撞过程中的扭转现象进行分析。为提高相邻结构碰撞响应的精确度, 国内外学者对多种碰撞模型进行研究。Goldsmith<sup>[11]</sup>提出线弹性模型来研究物体间的相互碰撞。Anagnostopoulos<sup>[8]</sup>用 Kelvin 模型来研究地震中结构的相互碰撞, 通过引入阻尼系数来考虑非弹性碰撞。Muthukumar<sup>[12]</sup>使用 Hertz 模型模拟地震作用下碰撞冲击中能量损失对碰撞响应的影响。Jankowski<sup>[7]</sup>在 Kelvin 模型和 Hertz 非线性模型的基础上应用碰撞过程中的能量等效方法建立了一种非线性粘弹性 Hertz-Damp 模型, 更加精确的模拟了地震作用下相邻结构的碰撞过程。

目前, 对地震作用下低层联排建筑的碰撞响应研究较少。姚小琪<sup>[13]</sup>采用线弹性碰撞单元对低层联排毗邻建筑在地震作用下的碰撞响应规律进行了模拟, 探讨了不同分布型式下结构碰撞破坏规律。然而, 结构碰撞过程是一种非常复杂的力学行为, 具有明显的粘弹性特征, 线弹性模型无法准确描述钢筋混凝土等材料的碰撞过程, 影响了地震作用下相邻结构的碰撞响应精度。为此, 本文采用粘弹性碰撞模型, 对地震作用下低层联排建筑碰撞响应进行分析, 探讨结构间的响应规律。

## 1 低层联排建筑模型

选取相邻等高的 5 个单层建筑为研究对象。采用集中质量法, 假设每个建筑的质量与刚度都集中于结构顶部, 其中, 建筑 A 与建筑 B 具有相同结构特性, 建筑 A、建筑 C、建筑 D 及建筑 E 的结构特性互不相同。结构简化模型如图 1 所示。

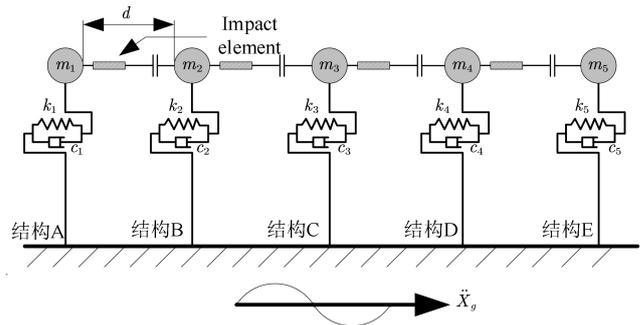


图 1 低层联排建筑示意图

为更好的模拟结构碰撞过程中的粘弹性特点, 反映结构碰撞中逼近和分离过程, 本研究采用 Jankowski 改进的 Hertz-Damp 模型, 其碰撞示意图如图 2 所示。

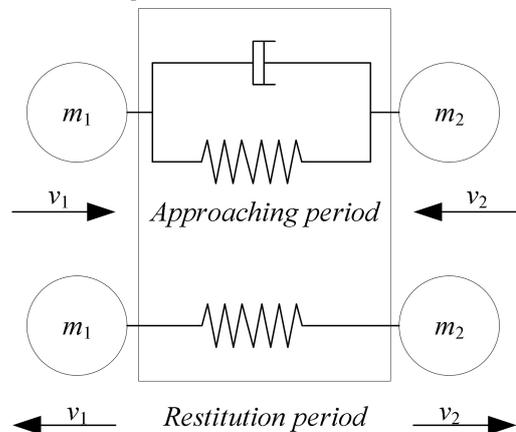


图 2 Jankowski 碰撞模型示意图

其碰撞力计算公式为:

$$F(t) = k\delta^3(t) + c\dot{\delta}(t) \quad \delta(t) > 0 \text{ 且 } \dot{\delta}(t) > 0$$

$$F(t) = k\delta^3(t) \quad \delta(t) > 0 \text{ 且 } \dot{\delta}(t) \leq 0 \quad (1)$$

$$F(t) = 0 \quad \delta(t) \leq 0$$

式中， $\delta$ 为相对位移，可按照 $\delta = x_i - x_{i+1} - d$ 计算。

### 2 低层联排建筑碰撞的运动学方程

本文研究的低层联排建筑碰撞的运动学方程为：

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + F = -M\ddot{X}_g \quad (2)$$

式中， $\ddot{X}$ 、 $\dot{X}$ 、 $X$ 和 $\ddot{X}_g$ 分别结构的加速度、速度、位

表1 Kobe地震记录

地震波	地震日期	观测台	峰值加速度/g	震级	震源深度/km
Kobe	1995.01.17	OKJMA	0.8210	6.9	0.6

### 3.1 碰撞力响应分析

将相邻结构间距设置为0.3cm，在地震动Kobe的作用下，结构间碰撞力响应如图3所示。在该地震动激励下，仅有结构C与结构D间发生碰撞，最大碰撞响应发生在21.152s，最大碰撞力为142kN。通过对比结构单参数发现，结构B与C间质量差异、刚度差异最大，分别相差57.14%、66.67%；结构C与D之间的自振周期差异最大，相差23.75%。说明，地震作用下，低层联排建筑间自振周期差异越大越容易发生碰撞。

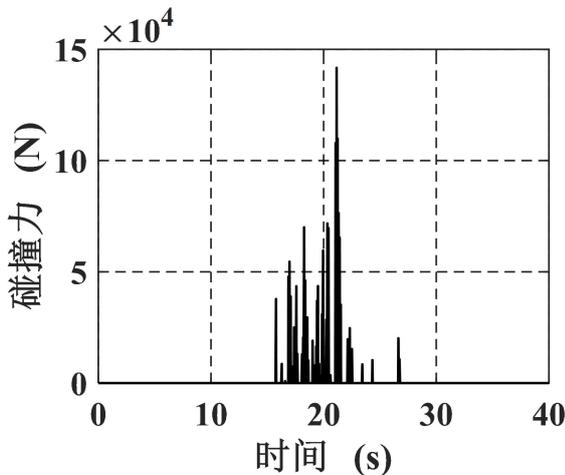


图3 结构C与结构D间碰撞力响应

### 3.2 位移响应分析

将单体结构之间间距依次设置为0、0.3cm、1cm、3cm、5cm和无穷大，并依次提取结构C和结构D在Kobe地震动作用下正负向峰值位移。受碰撞力影响，结构C和结构D的正负向峰值位移响应如图4所示。由图可知，结构的正负向峰值位移基本符合以下规律，即：随着结构间距的增加，结构正负向峰值位移逐渐增大，仅结构D的正向峰值位移随着间距的增加先减小后增大。其中，结构D的刚度较小，自振周期接近0.1s。

移和地震加速度向量。碰撞力向量可表示为  $F = \{F_{AB}, F_{BC} - F_{AB}, F_{CD} - F_{BC}, F_{DE} - F_{CD}, -F_{DE}\}^T$ 。M和K分别为结构的质量和刚度矩阵，结构阻尼采用瑞利阻尼模型，可由公式  $C = \alpha M + \beta K$  计算。

### 3 模拟结果分析

本文以Kobe地震波为激励进行低层联排建筑碰撞反应时程分析，其地震动详细信息见表1。数值积分采用四阶龙格库塔法，时间步长为0.001s。

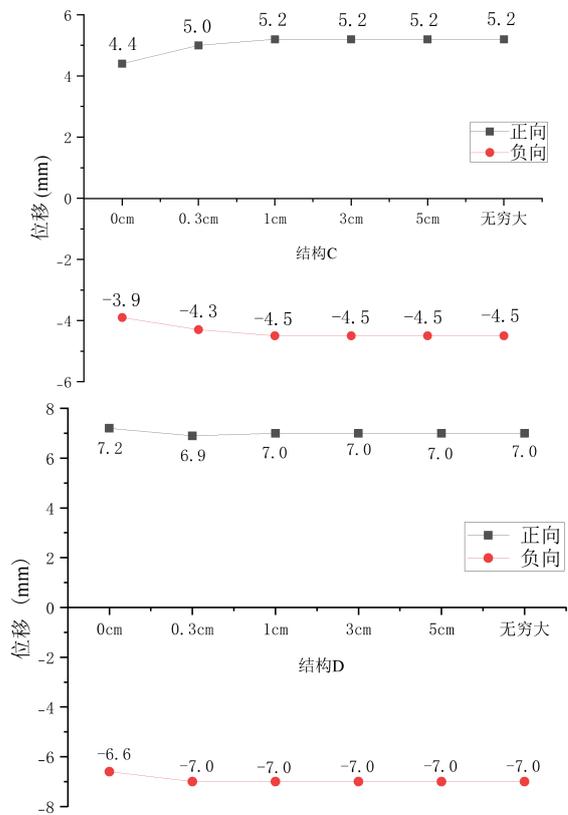


图4 结构C和结构D峰值位移响应

### 4 结语

本文对地震作用下低层联排建筑间的碰撞响应进行了相应的研究。计算并讨论了发生碰撞的结构的碰撞力和位移响应。得出以下结论：

(1) 低层联排建筑在地震作用下的碰撞响应受结构自振周期影响较大，相邻结构的自振周期差异越大越容易发生碰撞；

(2) 当结构间发生碰撞时，刚度较小的结构，其峰值位移响应更易受到影响，随着结构间距的增加，结构的峰值位移逐渐趋于稳定。

## 参考文献

- [1] F. R. Rojas, J. C. Anderson. Pounding of an 18-Story Building During Recorded Earthquakes [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(12): 1530-1544.
- [2] ANAGNOSTOPOULOS S. Earthquake induced pounding: State of the art [C]. *Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering*. 1995: 897-905.
- [3] J. G. Anderson, P. Bodin., J. N. Brune. Strong Ground Motion from the Michoacan, Mexico Earthquake [J]. *Science*, 1986, 233(47): 1043-1049.
- [4] 张井财. 基于粘弹性理论的碰撞力模型及其在碰撞TMD中的应用 [D]. 哈尔滨工程大学, 2017.
- [5] G. A. Tselentis. The Athens Earthquake of 7 September 1999 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(5): 1143-1160.
- [6] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震灾害调查与启示 [J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 10-19.
- [7] JANKOWSKI R. Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34(6): 595-611.
- [8] ANAGNOSTOPOULOS S A. Pounding of buildings in series during earthquakes [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1988, 16(3): 443-456.
- [9] 蒋姗. 地震作用下相邻不等高单层框架结构碰撞反应分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] M. Papadrakakis. Three dimensional simulation of structural pounding during earthquakes [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 122(5): 423-431.
- [11] GOLDSMITH W. *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids* [M]. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1960.
- [12] MUTHUKUMAR S, DESROCHES R. A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(7): 811-828.
- [13] 姚小琪. 地震作用下低层联排毗邻建筑的碰撞响应分析 [D]. 北京交通大学, 2019.