

文章编号:1671-6833(2010)04-0006-05

# 地震作用下工业厂房高低跨伸缩缝处碰撞反应分析

刘 强, 苏泽斌

(集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘 要:** 针对工业厂房高低跨在地震作用下伸缩缝处的碰撞现象, 采用非线性时程积分法, 研究了地震作用下工业厂房高低跨相邻跨结构的非同向振动特性和伸缩缝处的碰撞效应。通过对刚体碰撞模型分析, 推导出阻尼常数与恢复系数间的关系表达式, 在此基础上建立了厂房高低跨相邻跨结构伸缩缝处的碰撞模型, 并对伸缩缝间隙、相邻跨周期参数进行了影响分析。分析结果表明: 当相邻高低跨结构周期相差较大时, 会导致伸缩缝处相邻高低跨结构较大的相对位移和碰撞, 碰撞导致低跨结构地震反应增大; 伸缩缝间隙大小对碰撞力影响较大, 但对结构位移的影响不是很明显。

**关键词:** 高低跨工业厂房; 非同向振动; 碰撞效应; 碰撞模型; 参数分析

**中图分类号:** TU352.1

**文献标识码:** A

## 0 引言

在地震作用下, 结构的碰撞被认为是影响结构地震反应和结构抗震性能的一个重要因素。历次地震灾害中都大量报道了土木结构碰撞震害<sup>[1-2]</sup>, 地震震害表明: 在相邻建筑连接构造处的碰撞是引起结构破坏的主要原因之一。国内外学者对地震作用下伸缩缝处相邻桥梁体间的碰撞效应进行了大量的研究<sup>[3-6]</sup>。而对工业厂房及一般建筑的碰撞研究基本上还是空白。

典型的工业厂房多为不等高多跨连续结构, 其中间跨高度可达 30 m 以上, 而边跨高度相对较低。如图 1 所示。由于相邻跨结构的动力特性(振动周期)相差较大, 在地震作用下导致相邻跨结构发生非同向振动, 造成伸缩缝处相邻跨结构体的碰撞和产生较大的相对位移, 这将对结构产生推拉、挤压等作用, 致使牛腿混凝土压碎、撞裂、墙体变形等破坏现象。我国为地震多发区, 发震频繁且烈度高, 而多跨工业厂房的抗震性能研究基本上还是空白, 笔者研究了在伸缩缝处, 相邻跨结构体的碰撞对厂房结构地震反应的影响。得到的规律和结论, 为减轻地震作用下高低跨工业厂房在伸缩缝处的碰撞效应提供依据。

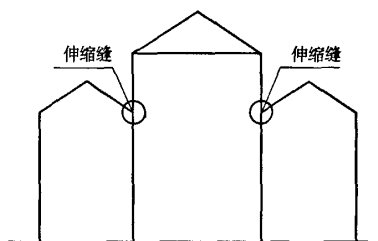


图1 典型的多跨连续厂房

Fig.1 A typical multi-span continuous industry buildings

## 1 碰撞过程模型及恢复系数计算

图2为线性阻尼碰撞过程模型<sup>[7]</sup>,  $F(x, \dot{x})$ 表

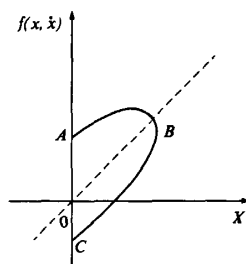


图2 接触力-变形关系曲线

Fig.2 Curves of contact force-deformation function

收稿日期:2010-03-14; 修订日期:2010-06-13

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2009J01258);福建省教育厅科技项目(JA08141);福建省建设厅科技项目(2008-38-23)

作者简介:刘强(1967-),男,福建福州人,集美大学副教授,博士生,主要从事工程抗震与减震控制研究,E-mail:liutang007@yahoo.com.cn

示接触力,  $x$  表示接触变形,  $\dot{x}$  表示接触速度, 它们都是接触时间的函数.  $A$  点为碰撞开始时间,  $v_+$  为碰撞前的相对速度;  $C$  点为碰撞结束点,  $v_-$  为碰撞后的相对速度. 则  $AB$  为碰撞加载阶段, 相对速度大于零;  $BC$  为碰撞后卸载阶段, 相对速度小于零;  $B$  点为两阶段的转换点, 速度为零且变形最大.

若不考虑碰撞过程中的变形, 仅用一个恢复系数来表达两物体  $m_1, m_2$  碰撞时的状态:

$$e = -\frac{v_-}{v_+} = -\frac{v_{1-} - v_{2-}}{v_{1+} - v_{2+}} \quad (1)$$

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = 1/2 m_1 (v_{1+}^2 - v_{1-}^2) +$$

$$1/2 m_2 (v_{2+}^2 - v_{2-}^2) = 1/2 m v^2 (1 - e^2) \quad (2)$$

其中  $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ . 可以看出, 恢复系数的大小表示了碰撞前后动能变化的幅度, 实质就是动能损失. 根据能量守恒  $\Delta T = W$ , 即碰撞过程的动能损失等于接触力所做的功.

最常见的线性阻尼模型为:

$$f(x, \dot{x}) = \begin{cases} k_n x + c_n \dot{x} & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (3)$$

这时, 可把碰撞过程看作一个单自由度振动系统:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_n \dot{x} + k_n x = 0 \\ x(0) = 0, \dot{x}(0) = v_0 \end{cases} \quad (4)$$

求得解析式解为

$$x(t) = \frac{v_0}{w_d} e^{-\xi w_d t} \sin(w_d t) \quad (5)$$

$$\dot{x}(t) = v_0 e^{-\xi w_d t} \left[ \cos(w_d t) - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(w_d t) \right] \quad (6)$$

式中:  $w_n = \sqrt{k_n/m}$ ;  $w_d = w_n \sqrt{1-\xi^2}$ ;

$$\xi = \frac{c_n}{2\sqrt{k_n m}} = \frac{c_n}{2w_n m}$$

对于实际的两体碰撞,  $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ .

假设接触时间时半个有阻尼的固有周期  $T_d/2$ , 则整个接触过程中接触力所做的功为:

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{T_d/2} c_n \dot{x}(t)^2 dt \\ &= \frac{1}{2} m v_0^2 (1 - \exp(-2\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2})) \end{aligned} \quad (7)$$

根据  $\Delta T = W$ , 可得阻尼系数与恢复系数之间的关系为

$$\xi = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (8)$$

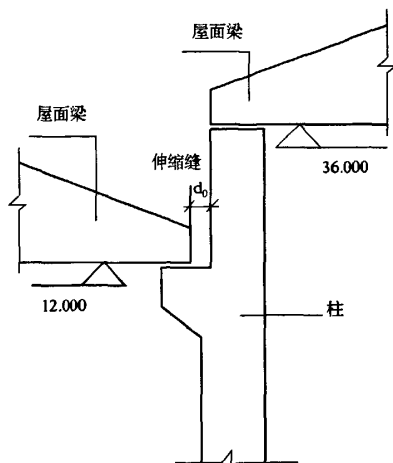
且接触阻尼为

$$c_n = 2\xi \sqrt{k_n m} \quad (9)$$

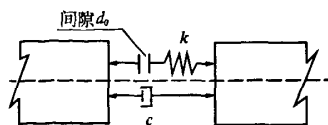
## 2 厂房高低跨伸缩缝处结构计算模型和碰撞效应分析

### 2.1 结构计算模型

某典型的高低跨连续两跨厂房如图 3(a) 所示 (高跨结构柱顶标高 36 m, 低跨结构柱顶标高 12 m), 计算模型中的梁体采用弹性单元, 柱采用弹塑性单元, 混凝土纤维的应力-应变采用 Mander 模型<sup>[8]</sup>, 而钢筋的应力-应变采用理想的弹塑性模型. 单元的质量采用堆积质量代表. 混凝土结构的阻尼比取 0.05, 计算时采用瑞利阻尼, 计算模型见图 3. 为了模拟相邻两体之间的非同向振动可能导致的伸缩缝处碰撞, 伸缩缝采用图 3(b) 所示的接触单元模型.



(a) 结构模型



(b) 伸缩缝模型

图 3 结构计算模型

Fig. 3 Computer model

接触单元的非线性-位移关系为:

$$f = \begin{cases} k(d_0 + x_s) & (d_0 + x_s < 0) \\ 0 & (d_0 + x_s \geq 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $d_0$  为伸缩缝的初始间隙;  $x_s$  为地震作用下伸缩缝处相邻两体的相对位移;  $k$  为接触刚度建议取为梁体的轴向刚度<sup>[9]</sup>. 对于完全弹性碰撞, 恢复系数  $e=0$ ; 完全塑性碰撞, 恢复系数  $e=1$ . 对于混凝土材料<sup>[10]</sup> 建议取 0.65. 阻尼按公式(8)、(9)计算取得.

## 2.2 伸缩缝处的碰撞效应分析

根据以上计算模型,假定取伸缩缝间隙为 0.05 m,输入南北向 EL-centr 地震波,地震波加速度峰值调整为 0.4 g. 计算出低跨结构的基本周期为 1.65 s,高跨结构的基本周期为 2.68 s. 由于相邻高低跨处的两结构的基本振动周期相差很大,必然导致高低跨处两结构的伸缩缝处发生碰撞和产生相对位移. 现按不考虑碰撞和考虑碰撞两种情形进行碰撞效应对比分析.

(1) 不考虑碰撞效应时,计算出高低跨伸缩缝处(即柱牛腿面标高处)两结构地震反应位移和高低跨处两结构的地震反应的相对位移时程曲线,如图 4,5 所示;从图 4 可以看出:由于相邻高低跨结构的振动频率相差较大,在 EL-centro 地震波输入情况下,伸缩缝处相邻跨结构产生非同向振动,在伸缩缝处高跨的结构位移峰值达到 0.33 m,而在低跨处结构位移峰值达到 0.14 m. 同时从图 5 可以看出:导致伸缩缝处相邻高低跨两结构较大的相对位移,伸缩缝处的相邻高低跨最大相对位移为 0.35 m,超过了伸缩缝间隙,过大的相对位移不仅会导致伸缩缝处相邻高低跨结构的碰撞,还可能导致屋面梁和柱腿的破坏.

(2) 考虑碰撞效应后,计算出高低跨伸缩缝处(柱牛腿面标高处)两结构的地震反应的相对位移和碰撞力时程曲线,如图 6,7 所示. 由图 6 可以看出,考虑结构碰撞效应后,高低跨处相邻两结构的相对位移明显减小,最大峰值减小到 0.25 m. 但从图 7 看出:产生碰撞效应后,会在碰撞接触面产生较大的碰撞力,瞬间的最大碰撞力达到 21 000 kN. 同时计算结果还发现在伸缩缝处的高低相邻跨结构碰撞导致低跨结构位移反应增加,最大到 0.226 m,高跨结构在伸缩缝处位移减小至 0.261 m.

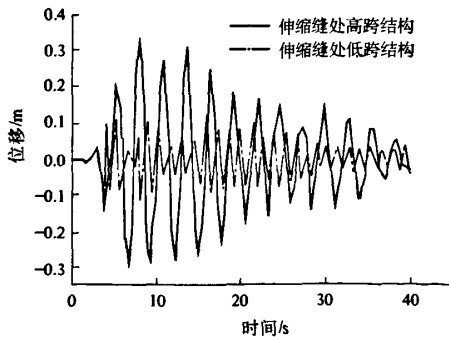


图 4 伸缩缝处高低跨结构位移反应

Fig. 4 Displacement responses of adjacent high-low-span

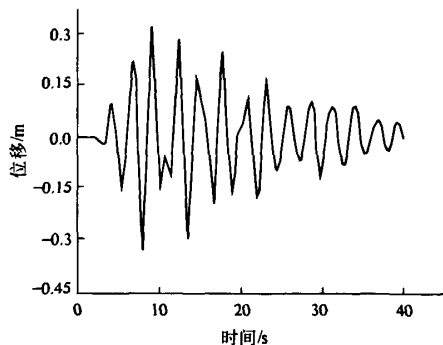


图 5 伸缩缝处高低跨结构相对位移

Fig. 5 Relative displacements between adjacent structures at the movement joints adjacent high-low-span adjacent structures at the movement joints

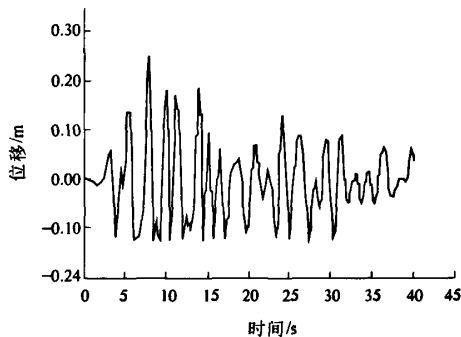


图 6 伸缩缝处高低跨结构相对位移(碰撞效应)

Fig. 6 Relative displacements between adjacent high-low-span (with pounding effect)

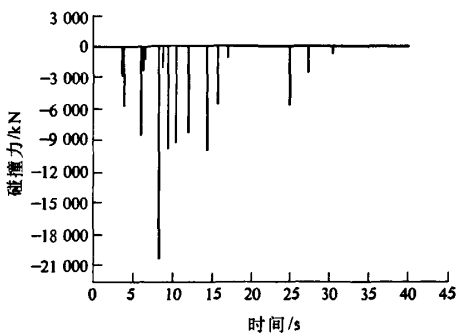


图 7 伸缩缝处的碰撞力

Fig. 7 The impact force at the movement joints structures at the movement joints

## 3 主要参数对碰撞效果影响分析

我们知道,在地震作用下考虑伸缩缝处的高低相邻跨结构的碰撞效应和相对位移的影响因素有很多:如不同的地震动参数、伸缩缝间隙、接触单元的刚度、恢复系数、屋架跨径以及阻尼等. 笔者主要研究分析是高低跨伸缩缝处两结构的基本

自振周期比值和伸缩缝间隙对结构碰撞效应的影响。在进行地震反应分析时,由于篇幅有限只计算给出了 EL-Centro 地震波(加速度峰值调整到 0.4 g)输入下结构的反应。

3.1 碰撞时高低相邻跨结构的周期比对结构位移和碰撞力大小的影响

取伸缩缝间隙取为 0.05 m 时,在 EL-Centr 波输入情况下,高跨结构和低跨结构在伸缩缝处(牛腿标高处)的位移峰值随相邻跨结构周期的变化,如图 8 所示。 $D_0/D_p$  表示考虑碰撞效应后的结构(在牛腿面标高处)位移峰值与相应不考虑碰撞效应结构位移峰值之比。图 9 为当伸缩缝间隙取为 0.05 m 时,在 EL-Centro 波输入情况下,伸缩缝处接触面碰撞力与相邻跨结构周期比的关系。从图 8,9 中可以看出,(1)碰撞使低跨结构在伸缩缝处位移放大,最大可达 1.73 倍左右;而高跨结构在伸缩缝处位移反应减小;(2)相邻跨结构的周期比对碰撞效应影响较大,当相邻跨结构的周期比在 0.55~1.0 范围内时,从总体趋势看,伸缩缝处的碰撞力随相邻跨结构周期比增加而减小,当相邻跨结构的周期比接近 1 时,就认为没有碰撞。

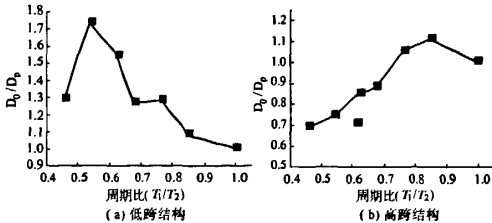


图 8 伸缩缝处高低跨结构位移峰值反应  
Fig. 8 Maximum displacements responses between adjacent high-low-span structures at the movement joints

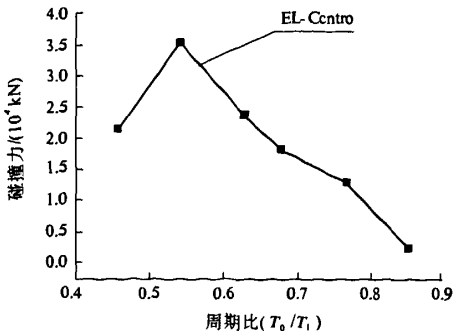


图 9 伸缩缝处最大碰撞力  
Fig. 9 Maximum pounding force at the movement joints

3.2 碰撞时相邻跨结构的伸缩缝间隙对结构位移和碰撞力大小的影响

表 1 为伸缩缝间隙分别取 0.03 m,0.05 m 和

0.10 m 时,低跨结构和高跨结构在伸缩缝处(牛腿标高处)的位移峰值比(考虑碰撞效应/不考虑碰撞效应)。从表 1 得知伸缩缝的间隙大小,对高低跨在伸缩缝处的结构位移反应有一定的影响,但影响不大,平均在 15% 以内。图 10 为伸缩缝间隙变化对碰撞力大小的影响(图中纵坐标为计算出的碰撞力除以间隙取为 0.05 m 时碰撞力)。从图中可以看出:当相邻跨结构周期比一定时,碰撞力随间隙减小而减小。

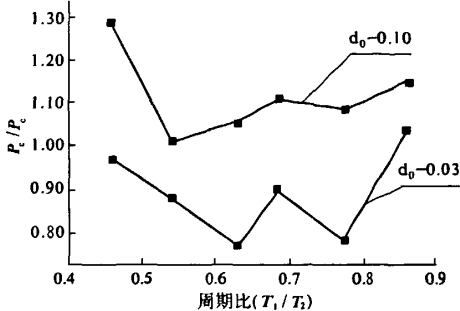


图 10 伸缩缝间隙变化对碰撞力的影响  
Fig. 10 The pounding force with gap values

表 1 伸缩缝间隙变化对相邻高低跨处结构位移峰值反应的影响

周期比	低跨结构位移峰值比			高跨结构位移峰值比		
	$d_0/m$	$d_0/m$	$d_0/m$	$d_0/m$	$d_0/m$	$d_0/m$
	(0.03)	(0.05)	(1.0)	(0.03)	(0.05)	(1.0)
0.45	1.21	1.26	1.19	1.53	1.42	1.36
0.55	1.72	1.68	1.48	1.32	1.14	1.15
0.65	1.36	1.25	1.33	0.96	0.93	1.21
0.75	1.25	1.03	1.26	1.09	1.06	1.06
0.85	1.12	1.02	0.95	0.94	1.23	1.16

4 结论

影响工业厂房高低跨伸缩缝处地震反应的因素很多并且非常复杂,笔者通过对刚体碰撞模型分析,推导出阻尼常数与恢复系数间的关系表达式,在此基础上建立了厂房高低相邻跨在伸缩缝处结构的碰撞模型,初步研究了在伸缩缝处相邻跨结构体的碰撞对结构地震反应的影响。

(1) 伸缩缝处的碰撞不但导致伸缩缝处接触面较大的碰撞力,还会引起低跨结构顶层位移反应的较大增加,对结构的抗震不利。而高跨结构位移反应相对减小。

(2) 相邻跨结构的周期比对碰撞效应影响较大,当相邻联的周期比在 0.55~1.0 范围内时,

从总体趋势上,碰撞效应随相邻跨结构的周期比增加而减小。

(3) 伸缩缝的间隙大小对碰撞力的大小影响较大,当相邻跨结构周期比一定时,碰撞力随间隙减小而减小;但伸缩缝的间隙对相邻跨结构的位移反应的影响不明显,影响平均在 15 % 以内。

#### 参考文献:

- [1] 胡庆昌. 考虑房屋撞击的抗震设计若干概念[J]. 建筑结构,1995,(01):10-14.
- [2] 唐曹明. 解决已有建筑物地震时碰撞问题的几点讨论[J]. 建筑结构学报,2001,22(1):76-78.
- [3] STAVROS A, ANAG N. Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004,33:897-902.
- [4] 李建中,范立础. 非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应[J]. 土木工程学报,2005,38(1):84-90.
- [5] 王军文,李建中,范立础. 非规则梁桥伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响[J]. 土木工程学报,2006,39(1):54-59.
- [6] 吴乃森,王元生,何涛. 大跨度钢筋混凝土拱桥地震反应分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(3):30-34.
- [7] 秦志英,陆启韶. 基于恢复系数的碰撞过程模型分析[J]. 动力学与控制学报,2006,4(4):294-298.
- [8] MANDER J B, PRIESTLY M J N, PARK R. Theoretical stress strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineer ASCE,1988,114(8):123-129.
- [9] PRAVEEN K M. Dynamics of seismic pounding at expansion joints of concrete bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics ASCE,1998,124(7):181-187.
- [10] ROBERT J K, KRZYSZTOF W, YOZO F. Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2000,29:195-212.

### Analysis of Pounding Effects at Expansion Joints in High - low - span of Industry Structures under Earthquakes

LIU Qiang, SU Ze - bing

(College of Engineering Technology, Ji Mei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on pounding phenomenon at expansion joints of high-low-span industry structures under earthquakes, nonlinear time-history integration method is employed to study the characteristics of out-of-phase vibrations and pounding effects of adjacent high-low-span industry structures at expansion joints. The relational expression between damping constant and resuming coefficient is deduced based on a rigid-body pounding model. The pounding model of pounding under earthquakes is presented. Effects of the gap distance and the differences in the periods of adjacent structures are analyzed. The results indicate that strong earthquakes can lead to large relative displacements and pounding of adjacent structures at expansion joints due to the differences in the periods of adjacent structures. The pounding amplifies the responses of low-span structure. Furthermore, pounding force rises with increase in gap distance, but the structural displacement response change is not obvious.

**Key words:** high-low-span industry structure; out-of-phase vibration; pounding effect; pounding model; parameter analysis