DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.06.33

基于质量比和间隙比的相邻等高 RC 框架结构碰撞反应分析

周奎,林杰

(上海理工大学土木工程系,上海 200093)

摘 要: 地震作用下,相邻建筑结构由于明显的动力特性差异以及没有足够的间距,容易使结构遭受严重的碰撞破 坏甚至倒塌。采用简化的 Hertz – damp 碰撞模型将相邻结构简化为带间隙的非弹性杆单元,以相邻 3 层 RC 框架 结构为例,以 OpenSees 软件平台为依托研究结构在地震作用下的碰撞反应,分析两相邻结构在不同的间隙比和质 量比工况下,地震碰撞对其结构特性的影响以及影响两相邻等高 RC 框架结构间地震碰撞的因素。研究表明:间隙 比及质量比是影响相邻等高 RC 框架结构间碰撞效应的两大因素。

关键词:碰撞作用;质量比;间隙比;相邻等高 RC 框架结构;简化 Hertz – damp 模型;地震中图分类号:TU375.4 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2015)06-0178-05

Analysis of collision response for RC frame structure of adjacent equal high based on ratios of mass and clearance

ZHOU Kui, LIN Jie

(Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Under the action of earthquake, adjacent structure is easy to suffer from severe damage or even collapse due to obvious difference of dynamic property and lack of adequate space. The paper adopted a simplified Hertz – damp pounding model to simplify the adjacent structure into inelastic truss element with gap pounding model, took the adjacent three – store RC frame structure as a case to study the seismic action of pounding response based on OpenSees, analysis the seismic effect on the structural property and the impact factors of the pounding between two adjacent contour RC frame structures under different conditions of mass ratio and clearance ratio. Research shows that the clearance ratio and mass ratio are the two important factors of affecting the effect between two adjacent equal height RC frame structures.

Key words: collision effect; mass ratio; clearance ratio; adjacent equal height RC frame structure; simplified Hertz - damp model; earthquake

地震是一种严重的自然灾害,世界各地震害统 计表明,结构碰撞是造成结构破坏、倒塌的重要原因 之一^[1]。

1985 年 Mexico City 地震发生后引起了世界各 国学术界和工程界对于相邻建筑结构之间碰撞问题 的广泛关注,并对该问题展开了系统的试验研究和 理论分析^[2]。然而在多种碰撞结构体系中,相邻等 高框架结构之间的碰撞是一类典型且不容忽视的碰 撞问题。

1968年日本 Tokachi – Oki 地震期间, 某 3 层高的 商业学校在受到相邻等高且质量是其 3 倍的刚性结构

的碰撞后发生了严重的碰撞破坏(结构发生错位)。

1976年的 Friuli 地震期间,通过伸缩缝隔开的 等高相邻 10 层的 RC 框架结构发生了碰撞灾害。 2003年 Bingol 地震期间,位于市中心的两栋中层办 公楼发生了严重的碰撞破坏,并且震害显示随着高 度的增加,碰撞效应越明显。鉴于此国内外学者对 于此类问题进行了一系列试验与理论上的研究:Davis^[3]、Chau等^[4]和 Jankowski^[5]都曾用单点碰撞模 型来模拟过相邻等高结构间的地震碰撞; Papadrakakis等^[6]进行了两座两层等高相邻钢筋混凝土 框架的地震碰撞振动台试验,分别进行了两座试验

收稿日期:2015-04-21; 修回日期:2015-06-08

作者简介:周奎(1970-),男,安徽铜陵人,博士,副教授,从事工程结构抗震、结构健康监测与损伤识别研究。

结构无碰撞试验和无间隙碰撞试验,并且将试验结 果与拉格朗日乘子算法数值模拟结果进行了比较, 得出两者吻合的较好;Jankowski^[7]用非线性的粘弹 性碰撞单元模拟碰撞,两相邻结构物用弹塑性多自 由度集中质量模型模拟,研究了相邻的两个3层等 高建筑物之间的碰撞,得出碰撞对于较柔、较轻的结 构有显著影响,而对于较刚、较重的结构其影响可以 忽略;周奎等^[8]基于 Kelvin 碰撞单元和动力弹塑性 分析,建立相邻等高7 层钢筋混凝土框架结构模型, 从结构层间位移角、楼层剪力和碰撞力3 个方面,研 究了在不同防震缝宽度工况下,楼层碰撞破坏对相 邻结构响应的影响,并且探讨了在不同间距下结构 碰撞响应的规律。

本文选取两相邻3层钢筋混凝土框架结构作为 结构楼层处碰撞模型,基于 OpenSees 软件采用简化 的 Hertz - damp 碰撞模型,分析两结构间在不同间 隙比和质量比工况下地震碰撞对相邻等高 RC 框架 结构的结构特性的影响以及影响相邻等高 RC 框架 结构间地震碰撞的因素。

1 结构碰撞模型建立

1.1 碰撞模型

本文采用简化的 Hertz - damp 碰撞模型(带间 隙的非弹性杆单元模型如图 3 所示)来模拟等高相 邻 RC 框架结构间的地震碰撞效应如图 1 所示,其 碰撞力 - 变形曲线如图 2。



图1 相邻等高结构简化模型



图 2 带间隙的非弹性杆单元力 - 变形曲线

模型的碰撞力通过如下公式计算:

$$F_{c} = \begin{cases} K_{h}(u_{1} - u_{2} - g_{p})^{n} + c_{h}(\dot{u}_{1} - \dot{u}_{2}) & u_{1} - u_{2} - g_{p} \ge 0\\ 0 & u_{1} - u_{2} - g_{p} < 0 \end{cases}$$
(1)

式中: c_h 为阻尼系数; K_h 为 Hertz 碰撞模型中的碰 撞弹簧刚度系数; u_1 和 u_2 为接触体的位移; g_p 为相 邻结构间的间距; n 为 Hertz 系数,通常取 3/2。

本文采用简化后的碰撞模型在碰撞过程中的耗 能采用下式计算:

$$\Delta E = \frac{K_h \delta_m^{n+1} (1 - e^2)}{n+1}$$
 (2)

式中: δ_m 为最大侵入值; e为恢复系数。

如上图 2 所示本文采用双折线碰撞模型来模拟 相邻结构之间的碰撞,非弹性杆单元碰撞模型的参 数为:初始刚度 K_{d} 、应变强化刚度 K_{2} 和屈服变形 δ_{y} 。由杆单元模型和 Hertz – damp 碰撞模型的最大 碰撞力 F_{m} 相等可得出杆单元的有效刚度 K_{eff} 的表 达式:

$$K_{eff} = K_h \sqrt{\delta_m} \tag{3}$$

用初始刚度 K_{i1} 和应变强化刚度 K_{i2} 来表示有效 刚度:

$$K_{eff}\delta_m = K_{i1}\delta_{\gamma} + K_{12}(\delta_m - \delta_{\gamma}) \tag{4}$$

杆单元模型的力 – 变形曲线所包含的面积 A_s 可以用初始刚度 K_{l1} 、应变强化刚度 K_{l2} 、屈服变形和最大侵入值 δ_m 来表示:

 $A_{s} = (K_{1} - K_{2})\delta_{\gamma}(\delta_{m} - \delta_{\gamma})$ (5)

假设杆单元模型的力 - 变形曲线所包含的面 积 A_s 等于碰撞过程中的能量耗散 ΔE ,且屈服变形 δ_y 和最大侵入值 δ_m 的关系用式 $\delta_y = a\delta_m$ (其中由应变 强化刚度大于0,屈服参数a需满足表达式 $a < 1 - 2(1 - e^2)/5$)来表示,则弹性杆单元的刚度参量可 由下式得到:

$$\begin{cases} K_{i1} = K_{eff} + \frac{\Delta E}{a\delta_m^2} \\ K_{i2} = K_{eff} - \frac{\Delta E}{(1-a)\delta_m^2} \end{cases}$$
(6)

从以上公式得出,只要给定Hertz碰撞弹簧刚度 系数 k_h ,恢复系数e,最大侵入值 δ_m 和屈服系数a就 可以将带间隙的非弹性杆单元模型各参数确定。

1.2 结构模型参数

结构为等高相邻 RC 框架结构,分别以 A、B 表示,简化模型见图 1。结构 A(左)层高均为 3.3 m, 柱截面尺寸 450 mm × 450 mm,梁截面尺寸 600 mm × 400 mm,梁柱混凝土强度等级均取 C50;结构 B(右) 层高均为 3.3 m, 柱截面尺寸 500 mm × 500 mm, 梁截面尺寸 600 mm × 400 mm, 梁柱混凝土强度 等级取 C65。结构等效阻尼比均取为 0.05, 相邻结构简化模型参数见表 1。

表1 结构简化模型参望

参数	结构 A(左)	结构 B(右)
框架平面布置尺寸/mm	6600×6600	6600×6600
各楼层质量/ kg	5×10^{5}	8×10^{5}
各层层间抗侧刚度/ kN/r	$n 0.78 \times 10^5$	1.27×10^{5}

本文选取简化的 Hertz - damp 模型即碰撞单元 采用带缝隙的非弹性杆来模拟相邻结构的碰撞,构 建 OpenSees 碰撞模型如图 3 所示,并且在本文中并 未采用传统的集中质量模型,而是在 OpenSees 中构 建梁、柱、楼板组合而成的完整框架模型。该模型较 之集中质量模型,更切合相邻框架结构的实际情 况^[9],其中包括初始刚度等参数(见表 2)。考虑实 际地震动的随机性,本文选取 3 条有代表性的强震 记录作为地震动输入,分别为 El Centro(1940, NS) 波、Northridge(1994, 90)和 Taft(1952, N21E)波,加 速度峰值统一调整为 3.4 m/s²,地震动持时统一取 20 s,分析采用 0.02 s 常时步分析,选取的 3 条地震 动具体信息见表 3。

为了便于研究伸缩缝间隙以及质量对碰撞的影响,本文在研究中引入了几个无量参数:间隙比: $r_c:r_c = \Delta_c/\Delta_{max};式中:\Delta_c 为伸缩缝间隙; \Delta_{max} 为避$ $免碰撞发生所需的最小伸缩缝间隙。质量比<math>m_B/m_A$, 并使质量比在 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 变化进行分 析,伸缩缝间隙取 0.05 m。



图 3 带间隙的非弹性杆单元碰撞模型

表 2 简化的 Hertz - damp 碰撞模型参数

Hertz 碰撞弹簧刚度/	恢复	最大侵	屈服	屈服
$k_h / 10^{10} (N \cdot m^{-1})$	系数 e	入值 δ_m /m	系数 a	位移/m
2.84	0.8	0.016	0.1	0.0016

表3 地震动输入

地震事件	时间	台站	地震动分量	震级	PGA∕ g
IMPERIAL VALLEY	1940	EL CENTRO ARRAY#9	I – ELC – UP	6.95	0.205
NORTHRIDGE	1994	CASTAIC – OLD RIDGE ROUTE	ORR – UP	6.7	0.217
KERN COUNTY	1952	TAFT LINCOLN SCHOOL	TAF111	7.36	0.178

2 结果分析

为了研究相邻等高 RC 框架结构之间地震碰撞 的影响因素,本文分析了间隙比和质量比对相邻等高 RC 框架结构间地震碰撞的影响,以评价其重要性。

2.1 间隙比的影响

2.1.1 间隙比对碰撞力的影响 根据《建筑抗震设计规范 GB50011 - 2010》^[10]规定,取 $\Delta_{max} = 100$ mm。现调整间隙比范围:0(无间隙)~1.5之间,以研究伸缩缝间隙变化对位移和碰撞力的影响。其中 El Centro 波作用下的各层碰撞点处碰撞力 - 间隙比关系图以及 3 种波作用下顶层碰撞点处碰撞力 - 间隙比关系如下图 4 所示。

图 4 给出了无间隙和间隙比分别为 0.1、0.3、 0.5、0.9、1.0、1.2、1.5(即 $\Delta_c = 0$ 、 $\Delta_c = 0.01$ m, $\Delta_c = 0.03$ m, $\Delta_c = 0.05$ m, $\Delta_c = 0.09$ m, $\Delta_c =$

0.10 m, Δ_{g} = 0.12 m, Δ_{g} = 0.15 m) 时的碰撞力。



碰撞力 – 间隙比关系图

从图4可以看出,El Centro 波作用下,顶层碰撞 点最大碰撞力通常出现在间隙比为0.1~0.3之间, 而非出现在无间隙的情况下。间隙比大于0.3时, 碰撞力随间隙比增大明显减小。间隙比为1.0时, 底层碰撞力为0。间隙比大于等于1.2时,底层与 第二层碰撞力均为0。间隙比0~0.9时,结构A、B 发生多点碰撞,碰撞力按楼层3、楼层2、楼层1逐渐 减小,顶层碰撞力最大。由图 5 所示, Northridge 波 和 Taft 波作用下,顶层碰撞点处碰撞力与间隙比碰 撞力呈现规律同与 El Centro 波作用时相近。最大 碰撞力均出现在间隙比为0.1~0.3之间,但与无间 隙情况相比,增幅不大。间隙比大于等于0.9时,顶 层碰撞点处碰撞力明显减小。实际设计时,应避免 将防震缝宽度值设置在间隙比0.1~0.3内,以减小 相邻结构的碰撞破坏。间隙比为0.9~1.5时,结构 碰撞破坏情况明显减轻,是较为合适的间隙比取值。 2.1.2 间隙比对位移的影响 分析程序结果,间隙 比取0(无间隙)~1.5时,不同间隙比对各层每层 碰撞点位移影响与2.1.1分析结果较为相近,即位 移按楼层3、楼层2、楼层1逐渐减小,且顶层位移值 最大。现取碰撞力最大时的间隙比,即间隙比为0.3 时各层碰撞点处位移为例分析。图 6~8 分别为 El Centro 波、Northridge 波、Taft 波作用下,间隙比为0.3 时刚性结构各层碰撞点处位移,从图中可以看出,间 隙比为 0.3 时即最大碰撞力出现时,不同楼层的位 移依次增大。放大或缩小两相邻结构的位移与输入 地震波的特征周期有很大关系。







为了更清楚的分析不同间隙比对框架位移的影响,给出结构 B(刚性结构)顶层碰撞点处位移随间隙比的变化图(如图9所示)。



图 9 El Centro 波作用下位移包迹曲线

从图 9 中可以看出 El Centro 波作用下,不同间 隙比对结构顶层碰撞点处位移产生一定的影响,间 隙比越大,结构顶层碰撞点处位移越大,但间隙比对 节点正位移影响不大,对节点负位移的影响较为明 显。楼层 1、楼层 2、楼层 3 碰撞点处位移变化规律 同上文分析,依次增大。

2.2 质量比的影响

为了研究质量比对相邻等高 RC 框架结构间地 震碰撞响应的影响,将结构 A(左)的质量保持不 变,定义质量比为 m_B/m_A , 使质量比在 1、1.5、2、 2.5、3、3.5、4 变化进行分析,伸缩缝间隙取0.05 m。 2.2.1 质量比对碰撞力的影响 如图 10 结构 B 在 3种波的作用下顶层碰撞点处碰撞力-质量比关系 曲线中我们可以明显地看出,随着质量比的增大即 结构 B 质量和刚度的增大,顶层碰撞点处碰撞力也 明显增大。该趋势表明相邻等高 RC 框架结构中刚 性结构质量越大,碰撞破坏越严重。而在不同地震 波作用下,随着质量比的增大,顶层碰撞点处碰撞力 的增幅有明显不同:在3种地震波作用下,质量比小 于2时,顶层碰撞点处碰撞力的变化不明显;当质量 比大于2时,顶层碰撞点处碰撞力明显增大。较之 Northridge 波与 Taft 波,结构 B 在 El Centro 波作用 下,顶层碰撞点处碰撞力对质量比的变化最为敏感, 而在 Northridge 波作用下,顶层碰撞点处碰撞力对 182



图 10 顶层碰撞点处碰撞力 – 质量比关系曲线

2.2.2质量比对位移的影响 由上述分析,当质量 比大于2时,对结构顶层碰撞点处碰撞力影响较为 明显。现就质量比大于2时,分析质量比对位移的 影响。图 11~13 为 El Centro 波作用下,质量比分 别为2、3、4时结构B(右)各层碰撞点处位移。对比 变化规律可得出, El Centro 波作用下, 各层碰撞点 处位移依次增大,且同一楼层碰撞点处位移随质量



图 14~16 为 El Centro 波、Northridge 波、Taft 波 作用下,质量比分别为2、3、4时结构B(右)顶层碰 撞点处质量比-位移变化图。对比变化规律可得 出:不同地震波作用下,质量比变化对顶层碰撞点处 位移影响程度不同。其中 Northridge 波作用下,质 量比变化对顶层碰撞点处位移影响较不明显,这与 质量比变化对碰撞力的影响较为吻合:Taft 波作用 下,不同质量比工况下,顶层碰撞点处位移明显不 同,并且当质量比为4时,顶层碰撞点处位移明显增 大; El Centro 波作用下,质量比为2、3、4时,顶层碰 撞点处位移依次增大,且变化幅度介于 Taft 波与 Northridge 波之间。



3 结 语

本文针对相邻结构的碰撞问题,选取了3层相 邻等高 RC 框架结构模型,利用简化的 Hertz - damp 碰撞模型在 OpenSees 软件平台上进行数值模拟分 析,从相邻结构之间的间隙比和质量比两方面入手, 研究了在不同间隙比与质量比的工况下,地震碰撞 对相邻等高 RC 框架结构的结构特性的影响以及影 响相邻等高 RC 框架结构间地震碰撞效应的因素, 得出以下结论:

(1)间隙比是影响相邻等高 RC 框架结构碰撞

效应的主要因素之一,碰撞力随楼层位置的递增呈 递减规律。各层碰撞点最大碰撞力通常出现在间隙 比为0.1~0.3之间,而非出现在无间隙的情况下。 当间隙比大于等于0.9时,顶层碰撞点处碰撞力明 显减小。

(2)相邻等高 RC 框架结构在实际设计时,应避 免将防震缝宽度值设置在间隙比0.1~0.3内,以减 小结构碰撞破坏的程度,而间隙比为0.9~1.5时, 结构碰撞破坏程度明显减轻,是较为合适的间隙比 取值。

(下转第188页)

溇屋1碰撞占

楼层2碰撞点

楼层3碰撞点

时间/s

m = 2

30

时间/s

 $m_{\rm o}/m_{\rm c}$ 3 有可塑性、膨胀性、流变性、大变形的特点,严重影响 工程的稳定性,这就需要对软岩料填筑面板堆石坝 进行深入研究。

本文在研究软岩料湿化及流变特性的基础上, 通过对软岩料在不同填筑范围下面板堆石坝的应力 变形进行三维有限元分析,对比两种方案计算结果, 得出以下结论:

(1)当次堆石区上游边界线由偏向下游改为偏向上游,即软岩料填筑范围扩大时,坝体的垂直位移增长27.2%;坝体的向下游水平位移增12.7%、向上游水平位移增长10.8%;混凝土面板挠度增长11.1%;坝体顺坡向压应力增长54.4%、拉应力增长21.1%;

(2)在本工程实例中,当堆石区上游边界线由 偏向下游方向改为偏向上游方向时,坝体应力变形 均有所增加,但都在安全范围内。因此,可以采用扩 大软岩料利用范围的方法减小工程造价,缩短工期。

参考文献:

- [1] 胡 洲, 刁心宏, 王继飞. 浅谈软岩流变性的研究[J]. 江 西科技, 2006, 24(3): 309 313.
- [2]花俊杰,常晓林,周伟.高堆石坝流变研究进展[J].水 利发电学报,2010,29(4):194-199.
- [3] 孙 钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展 [J]. 岩石力学与工报,2007,26(6):1081-1106.
 - (上接第182页)

(3)质量比对于相邻等高 RC 框架结构间的地 震碰撞效应也有显著影响。随着质量比增大,结构 顶层碰撞点碰撞力明显增大。不同地震波作用下, 随质量比增大,顶层碰撞点处碰撞力的增幅有明显 不同。并且在不同地震波作用下,质量比变化对顶 层碰撞点处位移影响程度也不同。

参考文献:

- [1] 邹宏德, 蓝宗建. 相邻建筑结构碰撞问题的探讨[J]. 工业建筑, 2002, 32(4): 49-52.
- [2] 刘 鹏,郑凯锋,何伟,等. 地震中结构碰撞的接触单元
 模型的改进算法[J]. 重庆大学学报,2012,35(2):
 135-142.
- [3] Davis O R. Pounding of buildings modelled by an impact oscillator[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1992, 21(3): 253 - 274.
- [4] Chau K T, Wei X X. Pounding of structures modelled as non - linear impacts of two oscillators [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2001, 30(5): 633-651.

- [4] 蒋涛,付军,周晓文.软岩筑面板堆石坝技术[M].北 京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] 柏树田,周晓光,晁华怡.软岩堆石料的物理力学性质 [J].水力发电报,2002(4):34-44.
- [6] 卢廷浩,高贵全,陈 剑. 蓄水后土石坝应力变形有效应 力算法[J]. 岩土力学,2005,26(2):247-250.
- [7] 苏桐鳞.软岩料填筑混凝土面板堆石坝的应力变形及稳 定分析[D].西安:西安理工大学.2011.
- [8] 米占宽. 高面板坝坝体流变性状研究[D]. 南京:南京水 利科学研究院. 2001.
- [9] 王 刚. 湿化变形对软岩料填筑面板堆石坝应力变形的 影响研究[D]. 西安:西安理工大学. 2012.
- [10] 付 军,周小文面板坝软岩料的工程特性[J]. 长江科学 院院报,2008,25(4):67-72.
- [11] 徐泽平, 邵宇, 梁建辉. 软岩筑面板堆石坝的坝体断面 分区研究[J]. 水利学报, 2004, 35(1):62-66.
- [12] 孔青. 盘石头水库混凝土面板堆石坝次堆石区坝料设计 [J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(1):50-54.
- [13] 李全明,于玉贞,张丙印,等. 黄河公伯峡面板堆石坝三维 湿化变形分析[J]. 水力发电学报,2005,24(3):24-29.
- [14] 关志诚. 混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究[M]. 北 京:中国水利水电出版社. 2005.
- [15] 徐泽平, 王志强, 吕生玺. 九甸峡混凝土面板堆石坝应 力变形分析[J]. 水力发电, 2010, 36(11):67-70.
- [16] 赵一新. 深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形动力有 限元分析[D]. 西安:西安理工大学. 2009.
- [5] Jankowski R. Earthquake induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (10): 2818 – 2829.
- [6] Papadrakakis M, Mouzakis H P. Earthquake simulator testing of pounding between adjacent buildings [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1995, 24(6): 811-834.
- [7] Jankowski R. Non-linear modelling of earthquake induced pounding of buildings[C] //. Mechanics of the 21st Century – Proc, XXI ICTAM, 2004.
- [8]周奎,郭耀,殷惠君.地震作用下钢筋混凝土框架的 结构碰撞分析[J].水资源与水工程学报,2013,24 (4):111-114.
- [9] 祝 文. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土框架结构碰撞分析 [D]. 上海:上海理工大学, 2014.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011 2010.
 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.