

文章编号: 1674-9057(2014)04-0679-05

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2014.04.013

# 近断层脉冲地震动对框剪结构的破坏作用分析

吴大群<sup>1</sup>, 李明<sup>2</sup>, 杨永强<sup>3</sup>

(1. 常州工学院 常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 江苏 常州 213002;

2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 100084; 3. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 近断层脉冲型地震动对结构具有巨大的潜在破坏作用, 而有关高层钢筋混凝土框剪结构(HRCFS)受其影响的研究较少。为此, 采用合成近断层脉冲型地震动(NPGM)的方法, 合成了加速度峰值、脉冲速度峰值、脉冲速度峰值比及脉冲周期不同的NPGM, 计算了一个22层HRCFS在上述地震动作用下的时程反应, 分析了该HRCFS整体破坏指数随上述参数的变化。结果表明, 该结构的整体破坏指数在上述地震动作用下的值均较小; 随加速度峰值变化无明显规律; 与脉冲速度峰值和脉冲速度峰值比近似呈线性增加的关系; 与脉冲周期近似呈二次抛物线关系。由此说明, HRCFS在NPGM作用下具有良好的抗震性能, 并且不能单独以加速度峰值作为表征NPGM对HRCFS破坏作用的参数。

**关键词:** 近断层; 脉冲; 框剪结构; 破坏作用

**中图分类号:** P315

**文献标志码:** A

在众多的自然灾害中, 地震是危害人类生命安全和正常生活的最严重灾害之一。随着城镇化的发展, 人们的工作、生活空间更加密集, 地震所引发的灾害和次生灾害必将更加严重。深入了解地震产生地震动的形式, 采取相应的结构设计和措施, 以减少或避免建筑结构在地震中的破坏, 一直是各国土木工程师和地震学家努力的方向<sup>[1-11]</sup>。

通过对近十年来国内外发生的破坏性地震的研究, 如1994年Northridge地震(6.7级)、1999年台湾Chi-Chi地震(7.6级)和同年土耳其的Izmir地震(7.4级)等, 科研人员发现, 这些地震之所以会引起更为严重的破坏, 有一部分原因在于这些地震呈现了与以往地震不同的基本特征, 其中, 最为典型的的就是近断层脉冲特征<sup>[2-6]</sup>。因此, 深入分析近断层脉冲型地震动对结构地震反应的影响, 为结构抗震设计提供依据, 成为地震学家和土木工程师的研究重点。以往的研究主要是分析这类地震动对多高层钢筋混凝土框架结构

的影响<sup>[7-9]</sup>, 而分析其对高层钢筋混凝土框剪结构影响的研究较少。为此, 文献[4]分析了不同类型近断层脉冲型地震动对高层钢筋混凝土框剪结构的影响, 本文在该文献的基础上, 研究了近断层脉冲型地震动各要素对高层钢筋混凝土框剪结构破坏作用的影响。

## 1 输入地震动的合成

方向性效应和滑冲效应均可引起近断层脉冲型地震动, 其中, 方向性效应根据断层破裂方向与场地的关系可分为向前方向性效应、向后方向性效应和介于二者之间的中性方向性效应, 通常所说的方向性效应均指向前方向性效应。向前方向性效应不但是近断层脉冲型地震动产生的主要原因之一, 并且是引起工程结构加重破坏的重要原因之一<sup>[4, 10]</sup>。理论研究表明, 受向前方向性效应影响的地震动速度时程中会出现两个相反方向的连续半脉冲<sup>[4, 10-11]</sup>。图1为近断层脉冲型地震动

收稿日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308356)

作者简介: 吴大群(1967—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 结构抗震设计理论, 279368823@qq.com。

通讯作者: 李明, 博士, 副教授, dingxianxing@126.com。

引文格式: 吴大群, 李明, 杨永强. 近断层脉冲地震动对框剪结构的破坏作用分析[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 679-683.

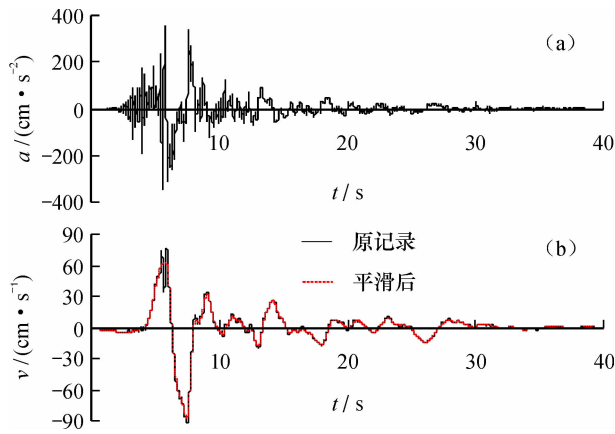


图1 近断层脉冲型地震动加速度(a)和速度(b)时程曲线  
Fig.1 Acceleration (a) and velocity (b) time history curves of near-fault ground motion

的加速度和速度时程曲线，图1b包含原记录和平滑后速度时程，平滑处理的目的是为定义近断层脉冲型地震动各要素，即脉冲速度峰值、脉冲速度峰值比和脉冲周期<sup>[9]</sup>。脉冲速度峰值为平滑后速度时程的最大值，脉冲速度峰值比为平滑后速度时程最大值和其临近第二大值的比值，脉冲周期为平滑后速度时程最大值和其临近第二大值对应时间差值的2倍。

加速度峰值(PGA)、脉冲速度峰值(PGV)、脉冲速度峰值比(PGV<sub>R</sub>)和脉冲周期(T<sub>p</sub>)是表征脉冲型地震动的重要参数，为分析这些参数对高层钢筋混凝土框剪结构的破坏作用，采用文献[4]合成近断层脉冲型地震动的方法：合成了加速度峰值为100、150、200、250、300、350、400、450、500和600 cm/s<sup>2</sup>的10条地震动，合成时保证地震动的脉冲速度峰值均为40 cm/s、脉冲速度峰值比均为1、脉冲周期均为3 s；合成了脉冲速度峰值分别为10、30、45、60、75、90、105、120、140和170 cm/s的10条地震动，合成时保证加速度峰值均为300 cm/s<sup>2</sup>、脉冲周期均为3 s、脉冲速度峰值比均为1；合成了脉冲速度峰值比分别为1、0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4和0.3的8条地震动，合成时保证加速度峰值均为300 cm/s<sup>2</sup>、脉冲周期均为3 s、脉冲速度峰值均为60 cm/s；合成了脉冲周期分别为1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、5和6 s的9条地震动，合成时保证加速度峰值均为300 cm/s<sup>2</sup>、脉冲速度峰值均为40 cm/s、脉冲速度峰值比均为1。由于篇幅所限，以下仅给出了每种变化参数中两条合成地震动的速度时程曲线(图2)。

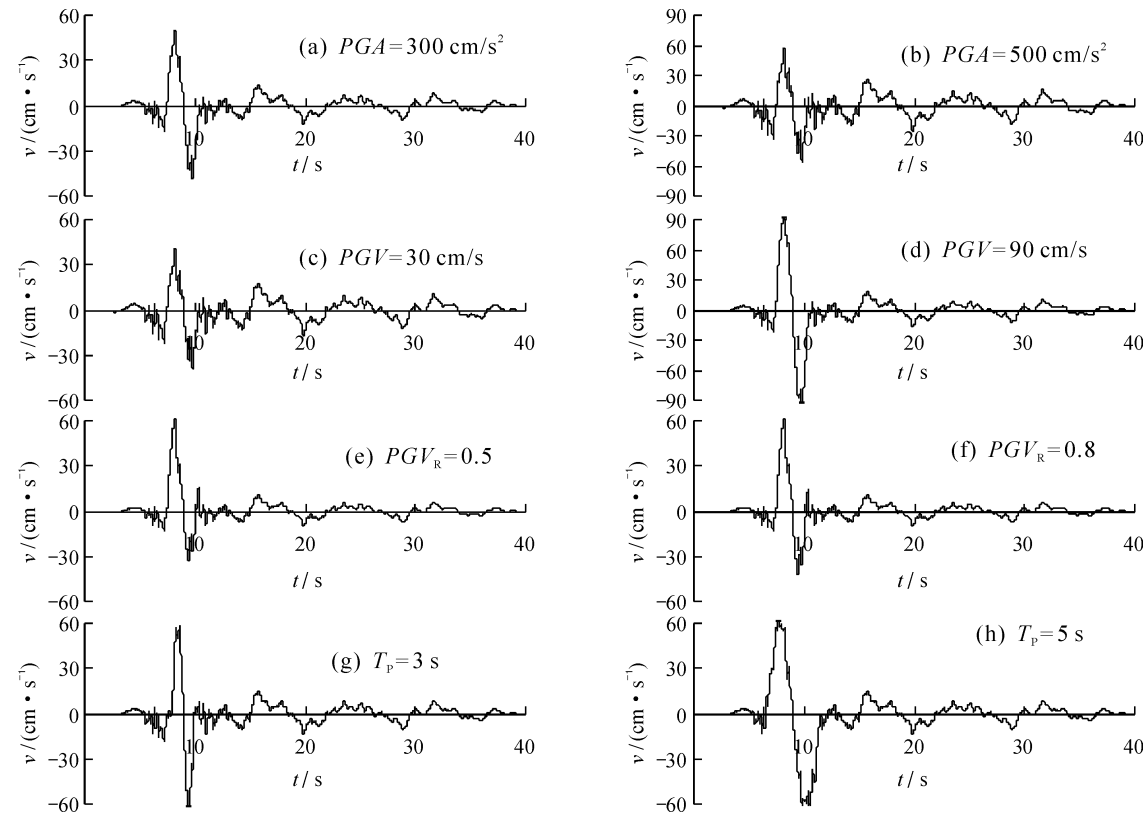


图2 部分合成的近断层脉冲型地震动速度时程曲线  
Fig.2 Part Synthetic velocity time history curves of near-fault ground motion

2 计算模型及计算方法

2.1 计算模型

计算模型与文献 [4] 选用同种模型，即一个 22 层高层钢筋混凝土框剪结构，其第 1 振型对应的自振周期为 2.21s，平面布置如图 3。计算模型的详细参数取值，如截面尺寸、层高、配筋以及混凝土和钢筋强度等级等情况列于表 1。

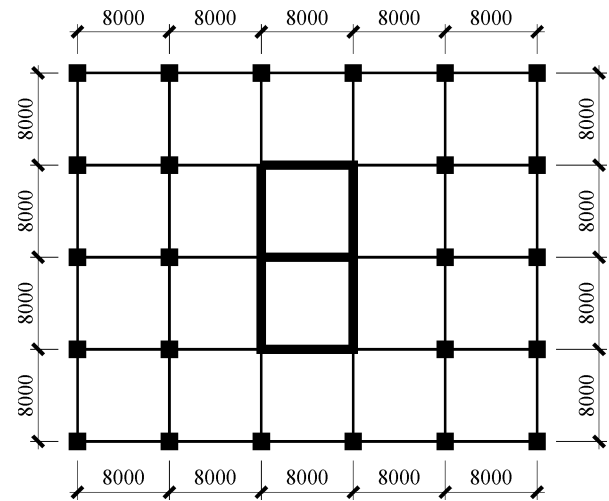


图 3 框剪结构平面布置图  
Fig. 3 Layout of the frame-shear structure

表 1 计算模型的详细参数

Table 1 Detail parameters of the model for calculation	
类 别	取 值
层高/mm	1 层高 4 200; 2~8 层高 5 000; 9~22 层高 4 300
混凝土强度等级	1~3 层 C60; 4~10 层 C50; 11~17 层 C40; 18~22 层 C30
柱截面尺寸/mm	1~3 层 1 300×1 300; 4~8 层 1 200×1 200; 9~16 层 1 100×1 100; 17~22 层 1 000×1 000
柱配筋/mm <sup>2</sup>	1~3 层 4 926; 4~7 层 4 426; 8~16 层 3 706; 17~22 层 3 576
梁截面尺寸 (mm) 及配筋 (mm <sup>2</sup> )	1~22 层 500×700, 纵筋 1~3 层 6 872, 4~22 层 5 890; 箍筋 $\phi 8@100/200$
剪力墙厚 (mm) 及配筋 (%)	1~5 层 600, 6~8 层 500, 9~17 层 400, 18~22 层 300, 1~3 层 0.51; 4~22 层 0.45
荷载/(kN·m <sup>-2</sup> )	1~3 层 12; 4~9 层 10; 10~22 层 6

2.2 计算方法

结构时程反应计算采用美国纽约州立大学推出的 IDARC 大型平面结构非线性反应分析程序，在计算过程中，采用楼板平面内刚度无限大的假

定。钢筋混凝土构件的恢复力模型采用 Park 三线型骨架曲线模型，构件的滞回规则采用刚度退化系数  $\alpha = 8.0$ 、强度退化系数  $\beta = 0.1$  和捏缩效应系数  $\gamma = 0.5$  来综合反映，塑性采用集中塑性铰的方法考虑<sup>[4-5]</sup>。

2.3 计算结果分析

结构的动力响应一般通过结构的楼层剪力、层间位移角和顶层位移 3 个参数来描述，但这些参数不能反映结构的整体破坏情况，因此，采用结构整体破坏指数来描述结构在地震动作用下的破坏程度<sup>[4, 8]</sup>。结构整体破坏指数的计算过程为：首先计算每个楼层中各构件的构件破坏指数  $DI_i$  (式(1))；然后将各构件的破坏指数加权求和得到楼层破坏指数  $DI_j^a$  (式(2))；最后将楼层破坏指数加权求和得到结构整体破坏指数  $OSDI$  (式(3))。

$$DI_i = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_{i,d}^e; \tag{1}$$

$$DI_j^a = \sum_i \frac{E_{i,a}^e}{\sum E_{i,a}^e} DI_i; \tag{2}$$

$$OSDI = \sum_j \frac{E_{j,a}^e}{\sum E_{j,a}^e} DI_j^a. \tag{3}$$

式中： $\theta_m$  为第  $i$  构件端部截面的最大转角； $\theta_u$  为第  $i$  构件端部截面的极限转角； $\theta_r$  为第  $i$  构件截面可恢复转角； $\beta$  为第  $i$  构件强度衰减参数； $M_y$  为第  $i$  构件端部基面屈服弯矩； $E_{i,d}^e$  为第  $i$  构件端部截面处消散的能量； $E_{i,a}^e$  为单元吸收的能量； $E_{j,a}^e$  为层吸收的能量。

一般认为当  $OSDI = 0$  时，结构处于弹性状态，无损坏；当  $0 < OSDI < 0.4$  时，结构轻微损坏；当  $0.4 \leq OSDI \leq 1.0$  时，多处混凝土被压碎，钢筋屈服外露，结构破坏严重；当  $OSDI > 1.0$  时，结构部分整体倒塌<sup>[5]</sup>。为书写方便，以下将结构整体破坏指数简称为破坏指数。上文合成的地震动作为输入地震动，采用时程分析法，计算了上文高层钢筋混凝土框剪结构的破坏指数，结果如图 4 所示。

可以看出：高层钢筋混凝土框剪结构的破坏指数 ( $OSDI$ ) 随加速度峰值的变化无明显规律，变化范围不大；随脉冲速度峰值和脉冲速度峰值比的增加而增大，增加趋势近似呈线性关系，并且随脉冲速度峰值比的增加  $OSDI$  增加速度最快，

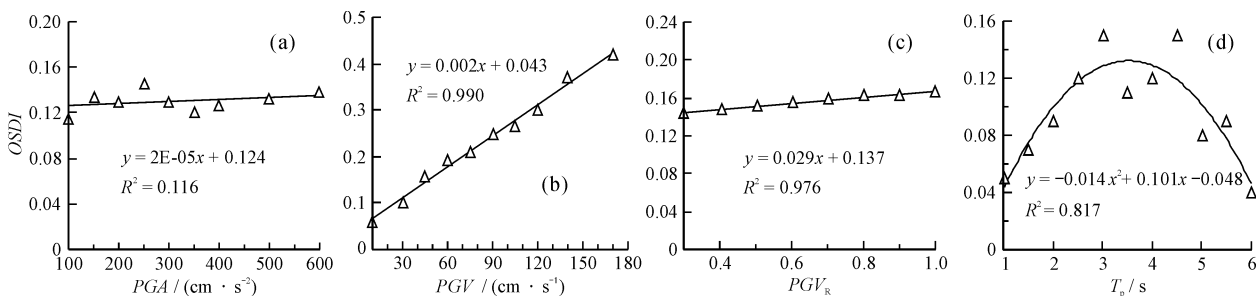


图4 破坏指数随脉冲型地震动各参数的变化

Fig. 4 Changes of damage index with the parameters of near-fault ground motion

随脉冲速度峰值的增加  $OSDI$  增加速度次之, 由此说明, 近断层脉冲型地震动对高层钢筋混凝土框剪结构的破坏作用有其特殊性, 不能仅以加速度峰值作为表征近断层地震动对其破坏作用的参数; 高层钢筋混凝土框剪结构的破坏指数, 与脉冲周期近似呈二次抛物线关系, 在脉冲周期大于结构第 1 振型对应的自振周期 2.21 s 时, 破坏指数最大, 而当脉冲周期小于或远大于结构第 1 振型对应的自振周期时, 破坏指数很小, 约为最大值的 1/3, 由此说明并不是所有的近断层脉冲型地震动对结构均具有较大的破坏作用, 脉冲周期与结构第 1 振型对应的自振周期关系, 是影响该破坏作用的重要因素。图 4a 中, 输入地震动的加速度峰值为  $600 \text{ cm/s}^2$ , 接近现行抗震规范烈度为 9 度时对应的时程分析所用地震动加速度最大值; 图 4b ~ 4d 中, 输入地震动的加速度峰值均为  $300 \text{ cm/s}^2$ , 接近现行抗震规范烈度为 7.5 度时对应的时程分析所用地震加速度最大值。在这些条件下, 高层钢筋混凝土框剪结构的破坏指数均小于 0.4, 即仅表现出轻微破坏, 表明在近断层区域, 高层钢筋混凝土框剪结构具有良好的抗震性能。

### 3 结 论

从上述分析, 可得出如下结论:

(1) 高层钢筋混凝土框剪结构破坏指数 ( $OSDI$ ), 随加速度峰值变化规律不明显, 随脉冲速度峰值和脉冲速度峰值比的增加而增大, 增加趋势近似呈线性关系, 并且随脉冲速度峰值比的增加  $OSDI$  增加速度最快, 随脉冲速度峰值的增加次之, 而与脉冲周期近似呈二次抛物线关系, 当脉冲周期略大于结构第 1 振型对应的自振周期时, 近断层脉冲型地震动对高层钢筋混凝土框剪结构

的破坏作用最大, 远离时较小。

(2) 近断层脉冲型地震动对高层钢筋混凝土框剪结构破坏作用有其特殊性, 不能单独以加速度峰值作为表征对其破坏作用的参数, 应综合考虑脉冲速度峰值、脉冲速度峰值比及脉冲周期与结构第一振型对应自振周期的关系。

(3) 在近断层脉冲型地震动作用下, 高层钢筋混凝土框剪结构具有良好的抗震性能。

### 参考文献:

- [1] 谭平, 潘兆东, 王磊, 等. 基于能量原理的 TMD 系统减震性能分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32 (3): 335 - 341.
- [2] Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include amplitude and duration effects of rupture directivity [J]. Seism. Res. Lett., 1997, 68 (1): 199 - 222.
- [3] Somerville P G, Graves R W. 地震强地面运动的特征描述 [J]. 何玉庆, 译. 国际地震动态, 2006, 327 (3): 12 - 18.
- [4] 李明, 刘勇, 孙哲哲, 等. 不同类型近断层脉冲型地震动对框架剪力墙结构的影响 [C] // 第 21 届全国结构工程学术会议论文集, 北京: 中国力学学会工程力学编辑部, 2012: 49 - 52.
- [5] 李明. 近断层地震动对结构抗震设计的影响研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [6] 公茂盛, 鹿嶋俊英, 谢礼立, 等. 基于结构强震记录的结构时变模态参数识别 [J]. 振动与冲击, 2010, 29 (5): 171 - 175.
- [7] 赵风新, 韦韬, 张郁山. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响 [J]. 工程力学, 2008, 25 (10): 180 - 188.
- [8] 李爽, 谢礼立, 郝敏. 地震动参数及结构整体破坏相关性研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 506 - 512.
- [9] 李明, 谢礼立, 翟长海. 近断层脉冲型地震动重要参数的

识别方法 [J]. 世界地震工程, 2009, 25 (4): 133 – 139.

[10] 胡进军. 近断层地震动方向性效应及超剪切破裂研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.

[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.

[11] 王栋. 近断层地震动的上/下盘效应研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.

Analysis of the damage effect of near-fault pulse ground motion on frame-shear structure

WU Da-qun<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, YANG Yong-qiang<sup>3</sup>

(1. Changzhou Key Lab of Construction Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Near-fault pulse ground motion is a large potential damage on structure, yet there is little research about cause. NPGMs with different peak ground acceleration (*PGA*), peak ground velocity (*PGV*), peak ground velocity ratio(*PGV<sub>R</sub>*) and pulse time period (*T<sub>p</sub>*) are composited by NPGM method. Time history response of a 22-floor HRCFS is calculated by inputting the above ground motions, and the variations of the overall structure damage index (*OSDI*) of HRCFS with the above parameters is analyzed. The result shows that all the values of *OSDI* are small without obvious relationship with *PGA*. *OSDI* changes with *PGV* and *PGV<sub>R</sub>* in a proximate linear relationship, and changes with *T<sub>p</sub>* in a proximate para-curve relationship. It can be concluded that HRCFS has good seismic performance under the NPGMs;the damage effect of NPGM on HRCFS can't be measured by *PGA* only.

**Key words:** near-fault; pulse; frame-shear structure; damage effect