

# 长周期地震动脉冲特性对 RC 框架结构响应的影响研究

王 博, 杨 柯, 刘伯权, 吴 涛

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 建立远场类谐和地震动、近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动的简化等效模型, 以某 12 层 RC 框架结构为例, 分析研究长周期地震动脉冲特性对结构地震响应的影响。结果表明: 结构上部的层间剪力均随脉冲周期的增大而减小, 脉冲周期对结构下部楼层剪力的影响规律不明显; 楼层位移随脉冲周期的增大而增大; 最大层间位移角所在楼层位置随脉冲周期的增大趋于下移; 在远场类谐和地震动作用下的结构最大位移响应大于相同脉冲周期下的其他两种长周期地震动; 结构最大层间位移角随远场类谐和地震动脉冲持时的增大而趋于增大, 但其所在楼层位置不变。

**关键词:** 长周期地震动; 高层框架结构; 脉冲特性; 简化等效模型; 弹塑性地震响应

**中图分类号:** TU973<sup>+</sup>.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)04-0538-07

## Study on the influences of pulse characteristics for long-period ground motions on the response of RC frame structure

WANG Bo, YANG Ke, LIU Boquan, WU Tao

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The simplified equivalent models for far-field harmonic-like ground motion, near-fault forward-directivity ground motion and near-fault fling-step ground motion were established, and the influence of pulse characteristics on the elastic-plastic seismic responses were analysed based on one 12-layer RC frame structure. Results show that the floor shear for the superstructure decreases with the increase of pulse period, while the influence law of pulse period on the structural base shear is not obvious. The floor displacement increases with the increase of pulse period; the floor location of maximum interstory drift ratio moves down with the increasing of pulse period. The maximum displacement responses under far-field harmonic-like ground motion are larger than those under two other types of long-period ground motions with the same pulse period, and the maximum interstory drift ratio has the increasing trend with the increasing of pulse duration, but the floor location remains unchanged.

**Key words:** long-period ground motion; high-rise frame structure; pulse characteristic; simplified equivalent model; elastic-plastic seismic response

富含长周期成分的长周期地震动易使超高层建筑等长周期结构发生震害<sup>[1-4]</sup>。远场类谐和地震动、近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动等特殊长周期地震动区别于普通地震动的重要特征之一是其具有低频脉冲特性<sup>[5-8]</sup>。研究长周期地震动脉冲特性对结构响应的影响规律是揭示长周期地震动作用机理需要解决的关键问题之一。考虑构建长周期地震动的简化等效模型, 通过调整脉冲参数来分析其脉冲特性对结构响应的影响是一种可行的研究思路<sup>[9-13]</sup>。

本文首先根据各长周期地震动的时程特点, 基于经验模态分解(EMD)方法提取其脉冲段; 然后构建可兼顾地震动时程特征与结构响应的长周

期地震动简化等效模型; 最后以某高层 RC 框架结构为分析对象, 研究长周期地震动脉冲特性对结构地震响应的影响。

### 1 长周期地震动脉冲段的提取

针对各长周期地震动的脉冲特点, 将近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动的脉冲段由参数“脉冲速度峰值”和“脉冲周期”表征; 远场类谐和地震动还需增加“脉冲持时”参数来反映其往复循环的“长持时”振动特征。本文定义首次与最后到达 0.5 倍脉冲速度峰值之间的时程为脉冲持时。

考虑到经验模态分解(EMD)在处理地震动信号方面的有效性<sup>[14]</sup>, 首先基于 EMD 获取地震动速

度时程的各本征模态函数(IMF);然后, 去掉高频 IMF 分量后将其余分量进行叠加, 得到低频速度时程;最后, 采用零点法与峰值法确定各脉冲特征参数, 即可提取各长周期地震动的脉冲段。图 1 为基于 EMD 分解得到的远场类谐和地震动 ILA056-NS 速度时程的各 IMF 分量。图 2 为基于长周期地震动低频速度时程的脉冲段提取过程。其中, 图 2(a)中蓝色线代表地震动 ILA056-NS 正负 0.5 倍的脉冲速度峰值, a、c 两点间的时间差为脉冲持时。通过峰值法与零点法可最终确定其 8 个脉冲速度峰值与 8 个脉冲周期。图 2(b)中 c 点为近断层向前方向性地震动 TCU094-NS 的脉冲速度峰值, a~b, b~d, d~e 为 3 个半脉冲, 脉冲周期为各半脉冲对应点时间差的 2 倍。图 2(c)中 b 点为近断层滑冲型地震动 TCU052-NS 的脉冲速度峰值, 脉冲周期为 a、c 点时间差的 2 倍。

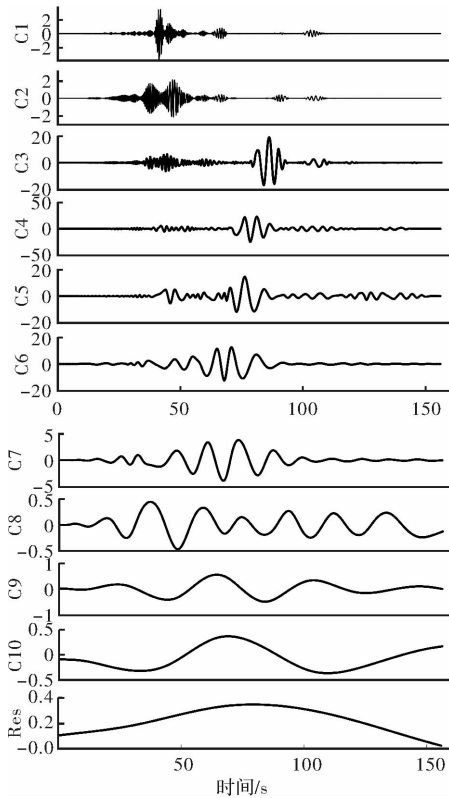
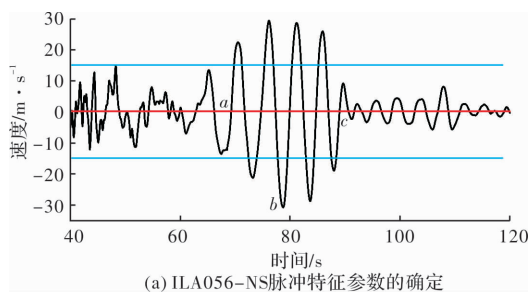
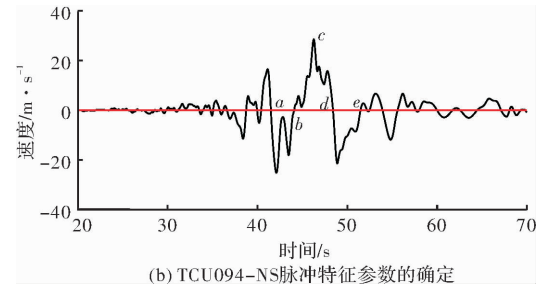


图 1 远场类谐和地震动 ILA056-NS 速度时程的 IMF 分量

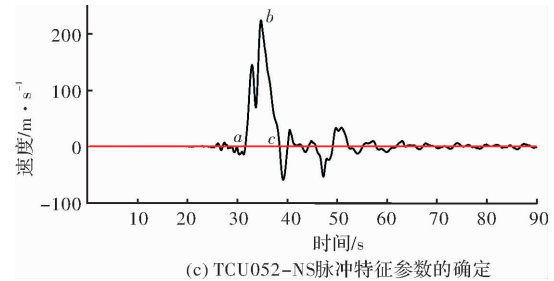
Fig. 1 IMF components of velocity time history for far-field harmonic-like ground motion ILA056-NS



(a) ILA056-NS 脉冲特征参数的确定



(b) TCU094-NS 脉冲特征参数的确定



(c) TCU052-NS 脉冲特征参数的确定

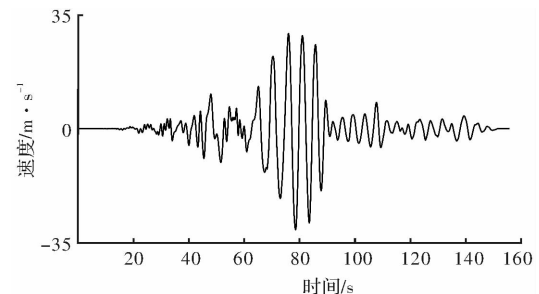
图 2 代表性长周期地震动脉冲段提取

Fig. 2 Extraction of pulse segment for representative long-period ground motions

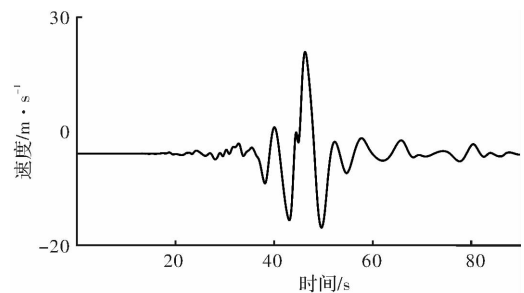
## 2 长周期地震动简化等效模型

统计分析表明, 构成长周期地震动低频时程的前两个 IMF 分量中存在部分高频信息, 且相较于地震动的脉冲周期, 其卓越周期极小。为与其他低频分量区分, 将此类含有高频信息的低频分量定义为主脉冲分量, 其他低频分量定义为主脉冲分量。如此, 低频速度时程即由非脉冲分量构成的非脉冲时程和主脉冲分量构成的主脉冲时程两部分组成。图 3 为 3 条地震动的主脉冲时程。

对于长周期地震动的速度主脉冲时程, 可采用简谐函数简化。其中, 简谐波周期  $T_s$  取脉冲周期的平均值, 见式(1)。



(a) ILA056-NS



(b) TCU094-NS

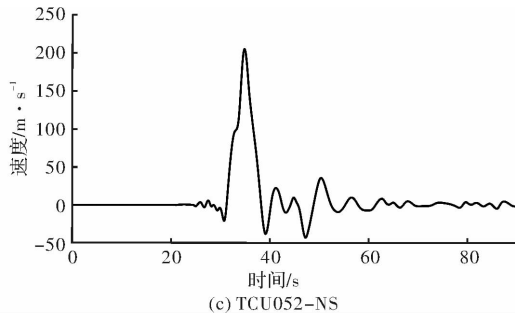


图 3 三条长周期地震动的速度主脉冲时程  
Fig. 3 Velocity main pulse time-history curves of three long-period ground motions

$$T_s = \frac{\sum T_{pi}}{n} = \frac{2t_p}{n} \quad (1)$$

式中,  $T_{pi}$  为确定的第  $i$  个脉冲周期;  $n$  为半脉冲个数;  $t_p$  为脉冲持时。

简谐波的幅值  $v_s$  可按照面积相等原则由式(2)计算得到。简谐波的持时采用确定的脉冲持时  $t_p$ 。

式(3)为长周期地震动主脉冲简化模型表达式。图 4 为三条代表性地震动的主脉冲简化时程。

$$v_s = \frac{S}{\int_{t_0}^{t_0+t_p} \sin \frac{2\pi t}{T_s} dt} = \frac{S}{n \int_{T_s/2}^{T_s/2} \sin \frac{2\pi t}{T_s} dt} = \frac{\pi S}{n T_s} \quad (2)$$

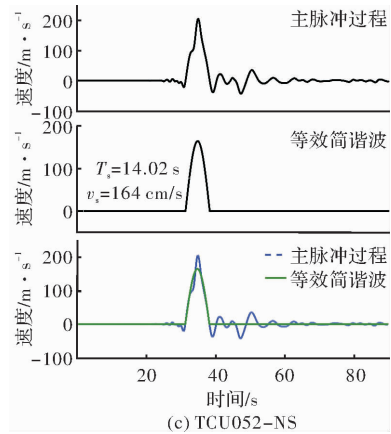
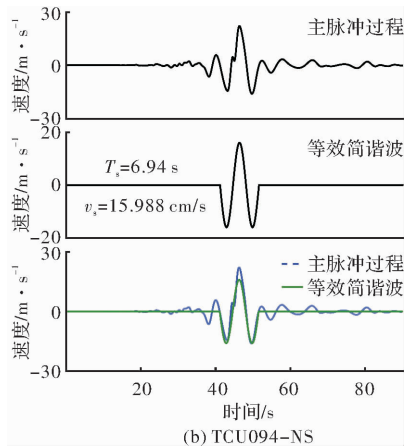
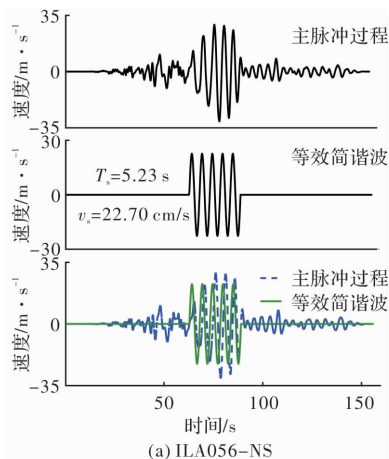


图 4 三类长周期地震动速度主脉冲时程的简化

Fig. 4 Simplification of velocity main pulse time-history curves for three types of long-period ground motions

式中,  $S$  为原脉冲段所包围的面积。

$$v(t) = \begin{cases} \frac{\pi S}{n T_s} \sin\left(\frac{n\pi}{t_p}(t - t_i)\right) & t_i \leq t \leq t_i + t_p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $t_i$  为脉冲段的起始时刻。

基于上述分析, 本文提出长周期地震动简化等效模型的构建方法如下:

(1) 不考虑主脉冲时程中较小峰值的脉冲成分, 主脉冲时程用简谐函数等效代替;

(2) 直接叠加非主脉冲时程, 同时为考虑高频分量对结构响应的影响, 叠加第 1 个高频 IMF 分量。

为验证所提简化等效模型的合理性, 对比分析了 45 条长周期地震动与其简化模型的弹性及弹塑性反应谱。限于篇幅仅列出代表性地震动 ILA055-EW 的反应谱对比情况, 如图 5 所示。

### 3 脉冲特性对 RC 框架结构弹塑性地震响应的影响分析

#### 3.1 分析步骤

(1) 建立有限元分析模型。依据我国现行规范<sup>[15-16]</sup>设计某 12 层 RC 框架结构; 采用 ABAQUS 有限元软件建立模型(见图 6)。结构基本自振周期为 2.22 s。梁柱构件采用纤维杆模型模拟, 选用梁单元 B31 及单轴滞回本构模型子程序 PQ-Fiber<sup>[17]</sup>; 楼屋面板采用壳模型模拟, 选用壳单元 S4R 及 ABAQUS 软件自带的混凝土塑性损伤本构模型。

(2) 构造变脉冲特征参数的长周期地震动。按照本文提出的简化等效模型构建方法对三条长周期地震动 (ILA056-NS、TCU094-NS、TCU052-

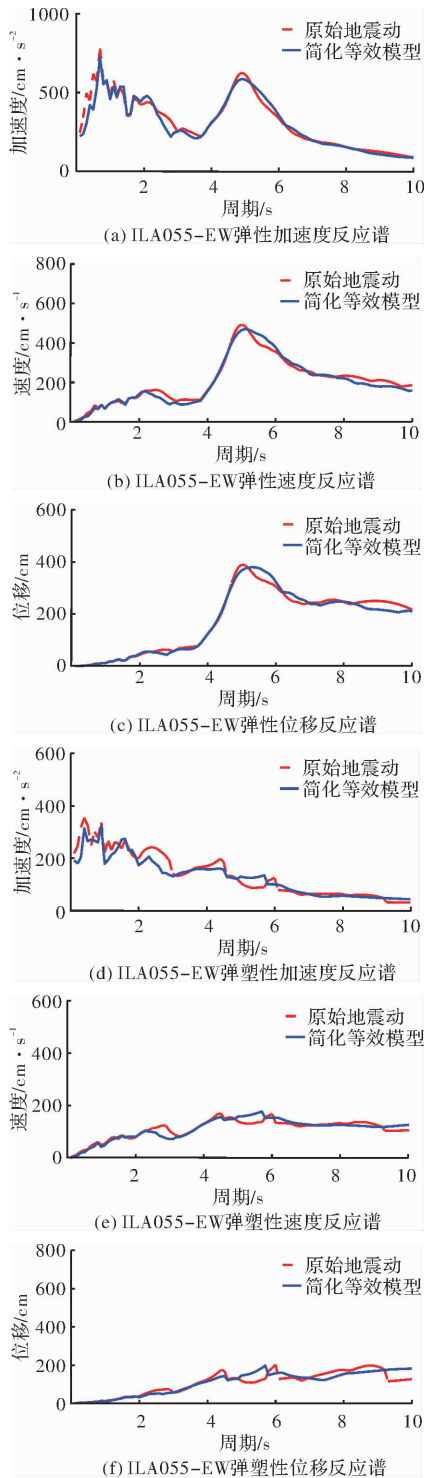


图5 ILA055-EW 简化等效模型的反应谱验证

**Fig. 5 Validation of the response spectra for ILA055-EW** NS)进行简化,分别取脉冲周期  $T_s$  与结构基本自振周期  $T_0$  之比为 0.5、0.8、1.0、1.2 与 1.5,构造得到变脉冲周期的长周期地震动.对于 ILA056-NS(远场类谐波和地震动),分别取脉冲持时为  $T_0$  减  $2T_s$ 、 $T_0$  减  $T_s$ 、 $T_0$ 、 $T_0$  加  $T_s$ 、 $T_0$  加  $2T_s$ ,构造变脉冲持时地震动.最终,得到 9 条基于 ILA056-NS 的变脉冲特征参数地震动及各 5 条分别基于 TCU094-NS 和 TCU052-NS 的变脉冲特征参数地

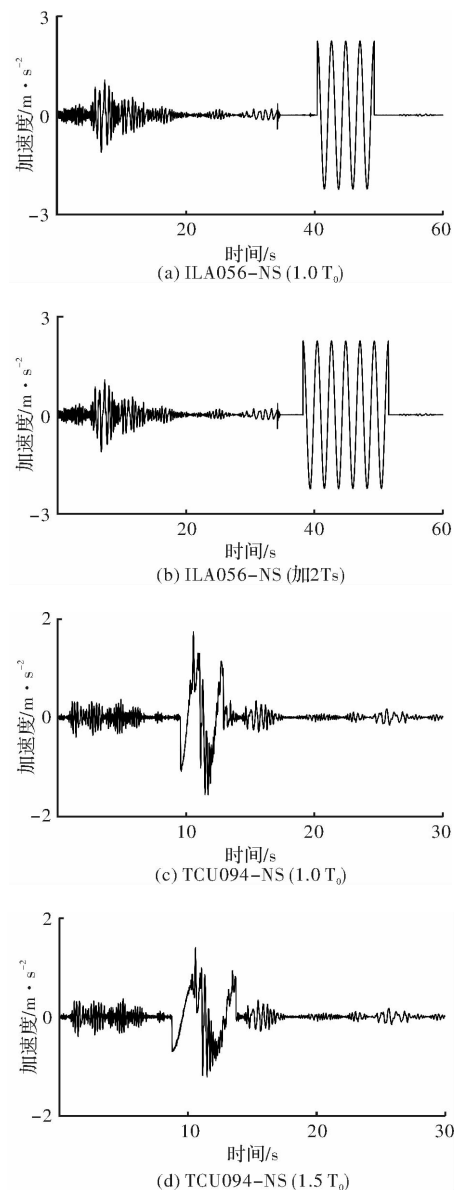
震动.图 7 为部分变脉冲特征参数地震动的加速度时程曲线.

(3)弹塑性地震响应计算与分析.分别计算结构在各变脉冲特征参数地震动作用下的弹塑性地震响应并对比分析脉冲特征参数对其的影响规律.



图6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model



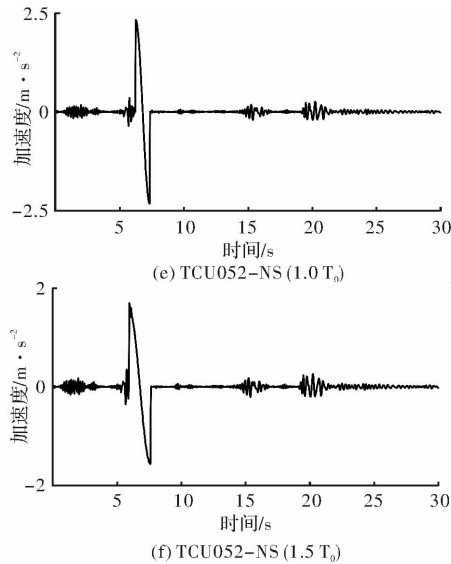


图7 部分变脉冲参数的地震动加速度时程( $T_0$ 为结构基本自振周期)

Fig.7 Acceleration time-history curves with variable pulse parameters ( $T_0$  is the fundamental natural period)

### 3.2 计算结果及分析

长周期地震动的脉冲周期对结构层间剪力、楼层位移及层间位移角的影响情况见图8~图11。

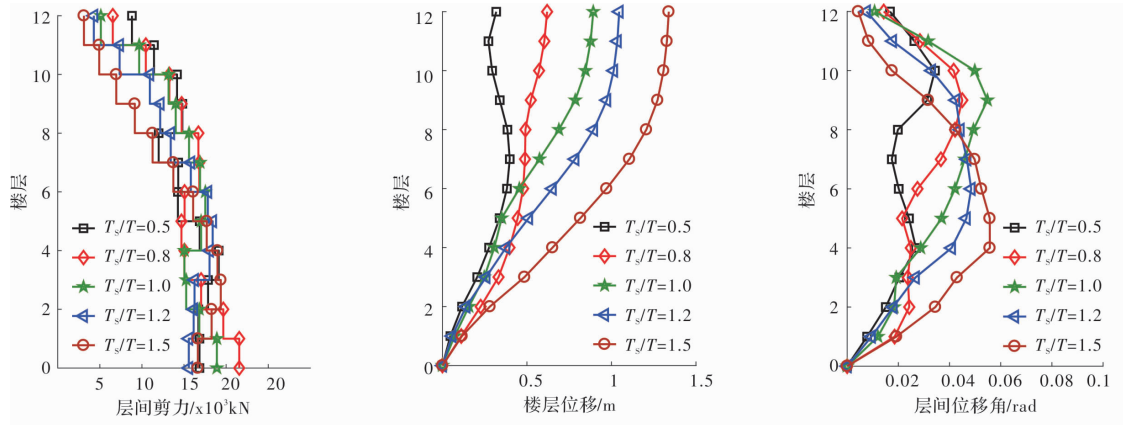


图8 远场类谐和地震动脉冲周期对结构响应的影响

Fig.8 Influence of pulse period of far-field harmonic-like ground motion on structural response

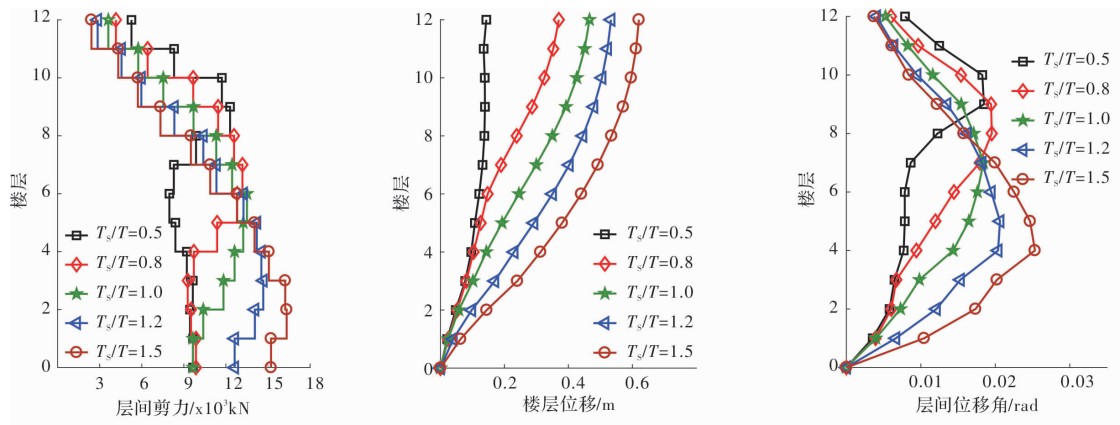


图9 近断层向前方向性地震动脉冲周期对结构响应的影响

Fig.9 Influence of pulse period of near-fault forward-directivity ground motion on structural response

图12为远场类谐和地震动ILA056-NS脉冲持时对结构响应的影响。

由图8~图10可以看出,三种长周期地震动作用下,结构上部的层间剪力均随脉冲周期的增大而减小,结构下部的层间剪力无明显规律。近断层滑冲型地震动的脉冲周期对结构下部的层间剪力几乎无影响。楼层位移随脉冲周期的增大而不断增大。图8中 $T_s/T=0.5$ 时楼层位移曲线走势不同,初步分析认为这是因为该脉冲周期激发了结构的高阶振型。由图11可以看出,远场类谐和地震动作用下的结构最大位移响应明显大于相同脉冲周期下的其他两种长周期地震动。

由图12可以看出,结构层间剪力曲线在不同脉冲持时下较为一致,说明远场类谐和地震动脉冲持时对结构层间剪力的影响不大;楼层位移曲线随脉冲持时的增大而出现拐点且拐点位置随之上移,另脉冲持时的增大使得拐点以下楼层的楼层位移随之增大,但其对拐点以上楼层的楼层位移几乎无影响;随着脉冲持时的增大,结构的最大层间位移角所处楼层位置不变(第9层)。



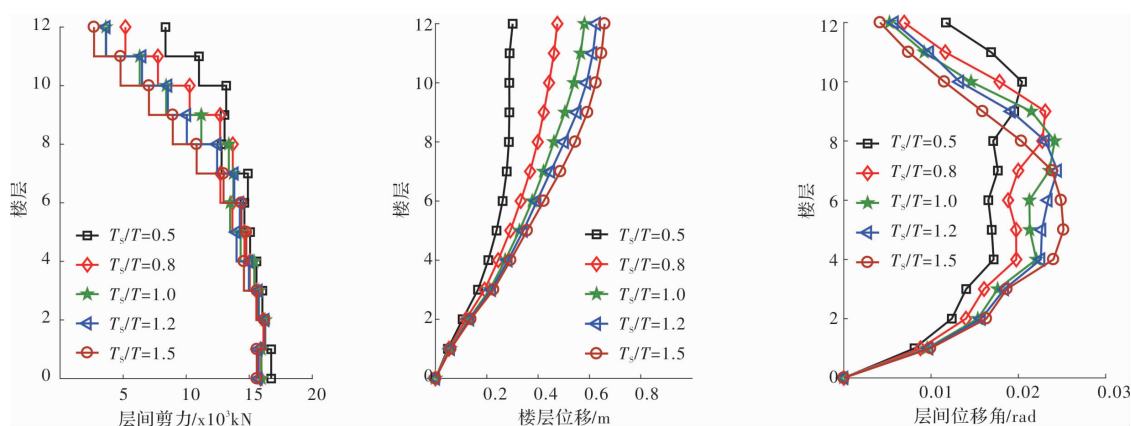


图 10 近断层滑冲型地震脉冲周期对结构响应的影响

Fig. 10 Influence of pulse period of near-fault fling-step ground motion on structural response

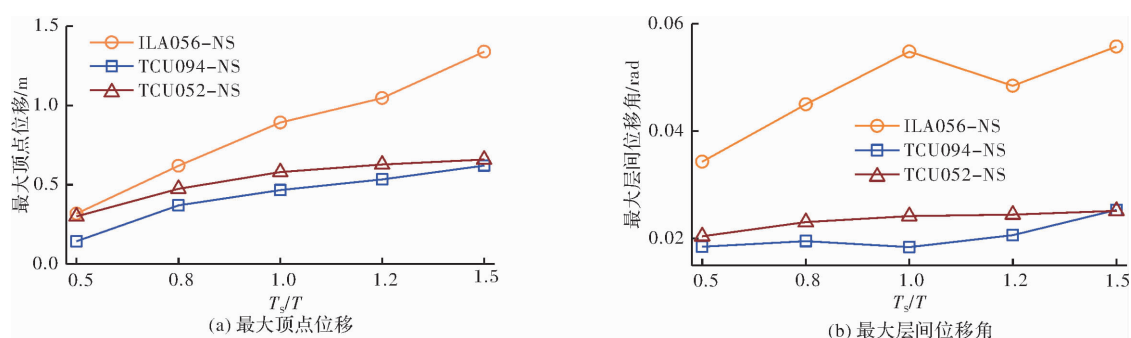


图 11 三类变脉冲周期长周期地震作用下结构的最大位移响应

Fig. 11 The maximum displacement responses under three types of long-period ground motions with variable pulse periods

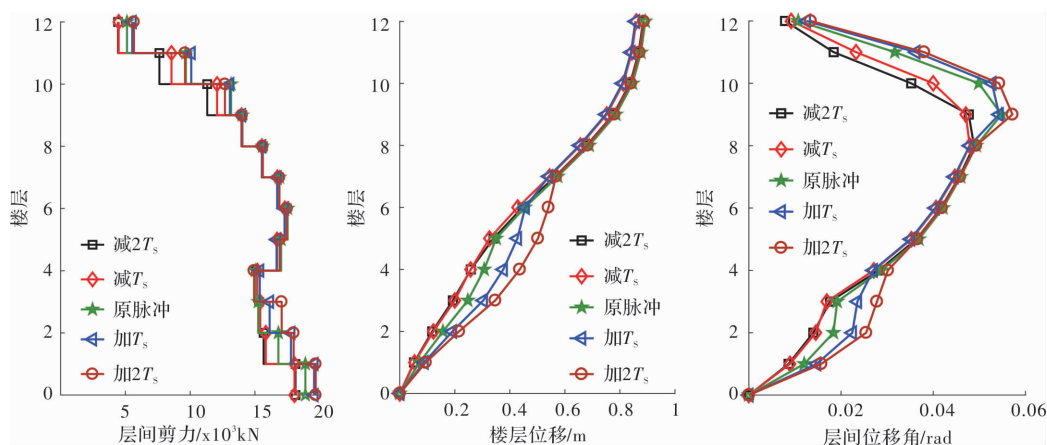


图 12 远场类谐和地震脉冲持时对结构响应的影响

Fig. 12 Influence of pulse duration of far-field harmonic-like ground motion on the structural responses

## 4 结 论

(1) 提出了基于经验模态分解(EMD)的长周期地震动脉冲段提取方法与简化等效模型构建方法, 并通过反应谱对比验证了其合理性。

(2) 结构上部的层间剪力随长周期地震动脉冲周期的增大而减小, 其中, 近断层滑冲型地震动脉冲周期对下部结构层间剪力几乎无影响; 楼层位移随脉冲周期的增大而增大。在远场类谐和和地

震动作用下结构的最大位移响应大于同脉冲周期的其他两种长周期地震动。

(3) 远场类谐和和地震动的脉冲持时对结构层间剪力的影响不大; 随着脉冲持时的增大, 楼层位移曲线出现拐点且拐点位置随之上移, 另脉冲持时的增大使得拐点以下楼层的楼层位移随之增大, 但其对拐点以上楼层的楼层位移几乎无影响; 结构的最大层间位移角所处楼层位置并不随着脉冲持时的增大而改变。

## 参考文献 References

- [1] 李英民, 刘烁宇, 戴明辉. 长周期地震动及其在超高层建筑抗震校验中的应用[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 53-60.  
LI Yingmin, LIU Shuoyu, DAI Minghui. Long-period ground motion and its application in seismic checking of super high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11): 53-60.
- [2] 王博, 代慧娟, 吴涛, 等. 近场与远场长周期地震动对高层结构作用机理比较分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 123-130.  
WANG Bo, DAI Huijuan, WU Tao, et al. Comparative analysis of action mechanisms for high-rise structures under near-fault and far-field long-period ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 123-130.
- [3] ZHOU Y, PING T Y, GONG S M, et al. An improved defining parameter for long-period ground motions with application of a super-tall building[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 462-472.
- [4] 王博, 白国良, 代慧娟. 典型地震动作用下长周期单自由度体系地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 190-196, 214.  
WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan. Seismic response analysis of long-period SDOF system under typical ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15): 190-196, 214.
- [5] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立, 等. 特殊长周期地震动的参数特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 28(6): 20-27.  
XU Longjun, HU Jinjun, XIE Lili. On characteristics of ground motion parameters for special long-period ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 28(6): 20-27.
- [6] 王博, 刘伯权, 吴涛, 等. 长周期地震动低频脉冲特性及反应谱分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 142-151.  
WANG Bo, LIU Boquan, WU Tao, et al. Analysis of low-frequency pulse characteristics and response spectrum for long-period ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 142-151.
- [7] 江义, 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 103-110.  
JIANG Yi, YANG Dixiong, LI Gang. Effects of forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic responses of high-rise steel structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 103-110.
- [8] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. Earthquake Spectra[J]. 2006, 22(2): 367-390.
- [9] 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.  
LI Ming. Study of the effect of near-fault ground motion on structural seismic design[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010.
- [10] REZA S, RODRIGUEZ A M, MOHAMED E. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures[J]. Engineering structures, 2011, 33: 767-779.
- [11] SASANI M, BERTERO V V. Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Upper Hutt, New Zealand, 2000.
- [12] AGRAWAL A K, XU Z, HE W L. Ground motion pulse-based active control of a linear base-isolated benchmark building[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 13(23): 792-808.
- [13] HU R P, XU Y L, ZHAO X. Long-period ground motion simulation and its impact on seismic response of high-rise buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(7): 1285-1315.
- [14] 王博, 白国良, 王超群, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的长周期地震动能量时频分布比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 71-80.  
WANG Bo, BAI Guoliang, WANG Chaoqun, et al. Comparative study on energy time-frequency distribution of long-period ground motions based on Hilbert-Huang Transform [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 71-80.
- [15] GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50011-2010. Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [16] JGJ3-2010. 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
JGJ3-2010. Technical specification for concrete structures of tall building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [17] 陆新征, 蒋庆, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
LU Xinzhen, JIANG Qing, LIAO Zhiwei, et al. Elastoplastic analysis of buildings against earthquake[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2015.

(编辑 桂智刚)