

文章编号:1673-2049(2019)04-0094-08

远场长周期地震动有效峰值对高层 RC 框架结构 弹塑性响应的影响

王 博,李 哲,吴 涛,刘伯权

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为研究远场长周期地震动对高层结构地震响应的影响机理,分别选取 10 条长周期地震动与 10 条普通地震动,并根据中国现行抗震设计规范设计某高层 RC 框架结构,采用 ABAQUS 软件建立有限元模型进行计算分析。首先,对比分析长周期地震动与普通地震动作用下的结构响应特征;然后,基于经验模态分解(EMD),将长周期地震动分解为包含不同频域信息的本征模态函数(IMF)分量,并依次去掉各 IMF 分量后将剩余分量叠加重构成新的地震动,通过对比每条新地震动与原始地震动作用下的结构响应,分析各 IMF 分量对结构弹塑性地震响应的影响程度。结果表明:长周期地震动作用下高层结构的各地震响应均大于普通地震动;与结构自振周期接近且峰值较大的 IMF 分量对地震响应影响较大,第 1 个高频 IMF 分量具有降低结构响应的有利干扰作用;长周期地震动的有效峰值和有效峰值率显著大于普通地震动,从而初步揭示了长周期地震动作用下高层结构的地震响应大于普通地震动的内在机理。

关键词:长周期地震动;高层结构;有效峰值;经验模态分解;弹塑性时程分析

中图分类号:TU313

文献标志码:A

Influence of Effective Peak of Far-field Long-period Ground Motion on Elastoplastic Response of High-rise RC Frame Structures

WANG Bo, LI Zhe, WU Tao, LIU Bo-quan

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

Abstract: In order to investigate the influence mechanism of the far-field long-period ground motions (LPGMs) on the seismic responses to high-rise structures, 10 LPGMs and ordinary ground motions were selected respectively, and a high-rise RC frame structure was designed according to the current seismic design code of China. Meanwhile, the finite element model of the high-rise RC frame structure was established by ABAQUS software for calculation and analysis. Firstly, the structural response characteristics under the long-period ground motions (LPGMs) and ordinary ground motions were compared. Then, the LPGMs were decomposed into different intrinsic mode functions (IMFs) with different frequency information based on empirical mode decomposition (EMD). Each IMF component was taken out and the residual IMFs were added to

收稿日期:2018-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51708037);陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JQ5078);

中国博士后科学基金项目(2017M610616);陕西省博士后科研资助项目(2017BSHEDZZ111);

西安市科技计划项目(201805045YD23CG29(6));中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102288111)

作者简介:王 博(1985-),男,河南南阳人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:chnwangbo@chd.edu.cn.

reconstruct the new ground motions. Through the comparison of the structural responses between the original LPGM and the new ground motions, the influence degree of the IMF on the structural response was investigated. The results show that the seismic response of high-rise structures under LPGMs is larger than those under ordinary ground motion. The IMF components, which is close to the structural natural vibration period and has a larger peak value, has a greater impact on the seismic response, and the first high-frequency IMF component has the favorable interference effect of reducing structural response. The effective peak value and effective peak rate of LPGMs are significantly larger than those of ordinary ground motion, thus the internal mechanism that the seismic responses of high-rise structures under LPGMs are larger than those under ordinary ground motions is preliminarily revealed.

Key words: long-period ground motion; high-rise structure; effective peak; empirical mode decomposition; elasto-plastic time-history analysis

0 引 言

长周期地震动因含有丰富的低频成分而易使超高层建筑、大跨桥梁、大型储液罐等结构发生震害^[1]。现行抗震设计理论由于未充分考虑长周期地震动的影响而难以确保结构的抗震安全。近年来,长周期地震动对结构的影响研究已成为十分重要和紧迫的课题^[2],不少学者已围绕长周期地震动特性及其对高层建筑结构的影响开展了大量的研究工作^[3-19]。既有研究表明,超高层结构在长周期地震动作用下的地震响应明显大于普通地震动,然而目前对其内在机理尚未能揭示清楚。

鉴于此,本文以某高层 RC 框架结构为例,在长周期地震动与普通地震动作用下结构地震响应对比分析的基础上,基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[20],将长周期地震动分解为包含不同频域及峰值信息的多个分量,分析不同分量对结构响应的的影响程度,进而提出长周期地震动有效峰值的概念,尝试从频域的角度揭示长周期地震动作用下高层结构地震响应大于普通地震动的内在原因。

1 长周期地震动作用下高层框架结构地震响应分析

1.1 地震动基本信息

表 1 为本文分析用的 10 条长周期地震动与 10 条普通地震动的基本信息。图 1 为代表性长周期地震动 ILA056-NS 的时程曲线与傅里叶幅值谱。

1.2 有限元模型建立

依据中国现行规范^[21]设计一个 12 层钢筋混凝土框架结构,平面布置如图 2 所示,柱混凝土强度等

级为 C40,梁、板混凝土强度等级为 C30,抗震设防烈度为 7 度,场地类别为Ⅲ类。采用 ABAQUS 软件建立有限元模型,如图 3 所示。

对于梁柱构件与楼屋面板,分别采用梁单元 B31 与壳单元 S4R 进行模拟。梁柱构件-混凝土的材料本构选用 PQ-Fiber 模型中的 UConcrete02;钢筋本构选用 PQ-Fiber 模型中的 USteel02;楼屋面板采用 ABAQUS 软件自带的混凝土塑性损伤本构模型^[22]。

1.3 结构弹塑性地震响应分析

将表 1 所示长周期地震动及普通地震动的峰值加速度(PGA)均调整至 $220 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,以反映设计时预期遭遇的 7 度大震情况,对所建立的框架结构有限元模型进行弹塑性地震响应时程分析。

图 4 为计算得到的 2 类地震动作用下结构平均最大层间剪力、楼层位移及层间位移角分布情况。对比分析表明,长周期地震动作用下结构最大层间剪力、楼层位移及层间位移角均大于普通地震动,且最大层间位移角超过规范规定的 1/50 限值。

2 长周期地震动作用下控制结构响应的 IMF 分量分析

2.1 分析方法

图 5 为分析本征模态函数(IMF)分量对结构弹塑性地震响应影响程度所采用的技术路线。

2.1.1 基于 EMD 的长周期地震动分解

EMD 是 Hilbert-Huang 变换(HHT)的重要组成部分^[14]。基于经验模态分解,可将非平稳信号分解为若干个本征模态函数。图 6 为代表性长周期地震动 ILA056-NS 基于经验模态分解得到的 8 个 IMF 分量 C1~C8 与 1 个残量,表 2 为不同 IMF 分

表 1 长周期地震动的基本信息

Tab. 1 Basic Information of Long-period Ground Motions

地震动类型	编号	地震名称	台站-分量	断层距/km	场地类型
长周期地震动	1	Chichi (1999 年,M7.6)	ILA004-NS	86.60	E
	2		ILA004-EW	86.60	E
	3		ILA005-NS	84.90	D
	4		ILA048-NS	86.70	E
	5		ILA055-EW	88.10	E
	6		ILA056-EW	89.80	E
	7		ILA056-NS	89.80	E
	8		TCU006-EW	72.50	D
	9		TCU010-EW	82.20	C
	10		TCU010-NS	82.20	C
普通地震动	1	Imperial Valley (1940 年,M6.5)	EL CENTRO	12.00	D
	2	Coalinga (1983 年,M6.4)	CANTUA CREEK	23.80	B
	3	Ninghe (1976 年,M6.9)	TIANJIN	31.60	C
	4	Northridge (1994 年,M7.4)	GRA074	31.20	C
	5	California (1952 年,M7.4)	KERN COUNTRY	42.30	C
	6	Kobe (1995 年,M6.9)	KAKOGAWA	22.50	C
	7	Taiwan Smart (1986 年,M7.3)	SMART007	54.20	C
	8	Tabas (1978 年,M7.4)	TABAS	11.80	B
	9	Westmoreland (1981 年,M5.9)	PARACHUTE TEST SITE	20.47	D
	10	Whittier Narrows (1987 年,M5.9)	HOLLYWOOD STORAGE	23.10	B

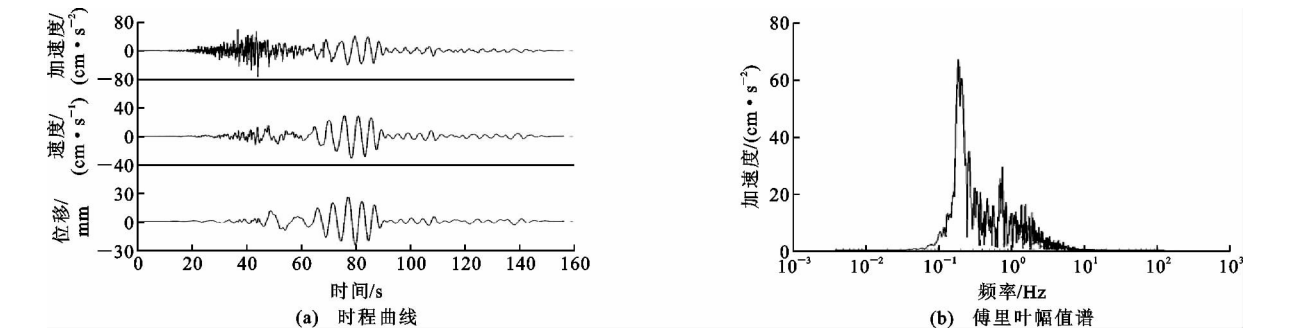


图 1 ILA056-NS 地震波的时程曲线与傅里叶幅值谱

Fig. 1 Time-history Curves and Fourier Amplitude Spectrum of ILA056-NS Wave

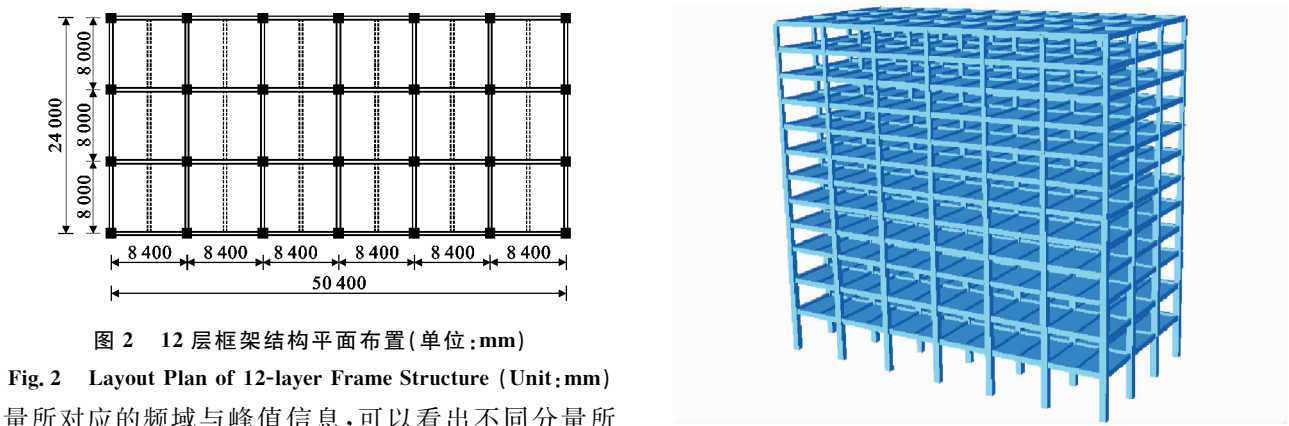


图 2 12 层框架结构平面布置 (单位:mm)

Fig. 2 Layout Plan of 12-layer Frame Structure (Unit:mm)

量所对应的频域与峰值信息,可以看出不同分量所处的频域不同,从第 1 个分量到最后一个分量,峰值依次减小,且趋于低频。

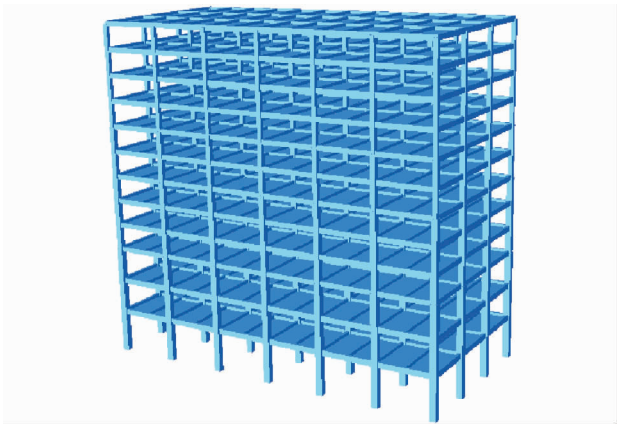


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model

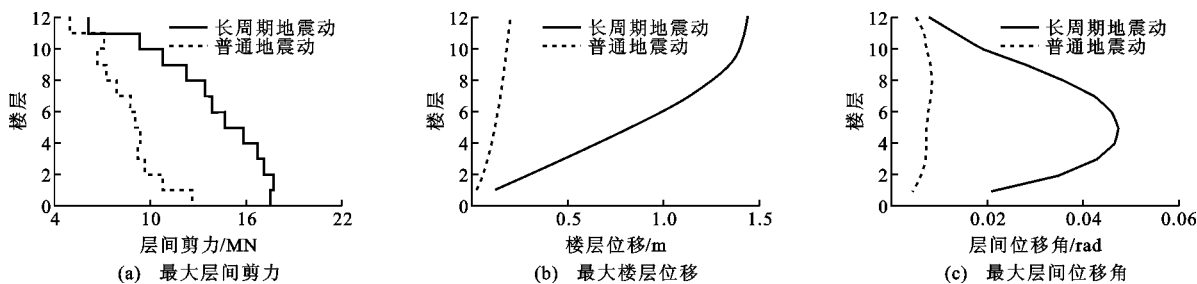


图 4 长周期地震动与普通地震动作用下结构响应平均值对比

Fig. 4 Comparison of Average Structural Responses Under Long-period Ground Motions and Ordinary Ground Motions

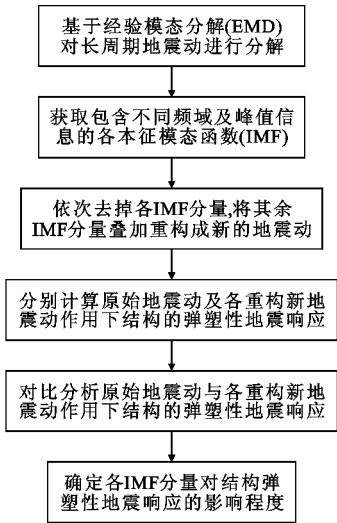


图 5 分析过程技术路线

Fig. 5 Technical Route for Analysis Process

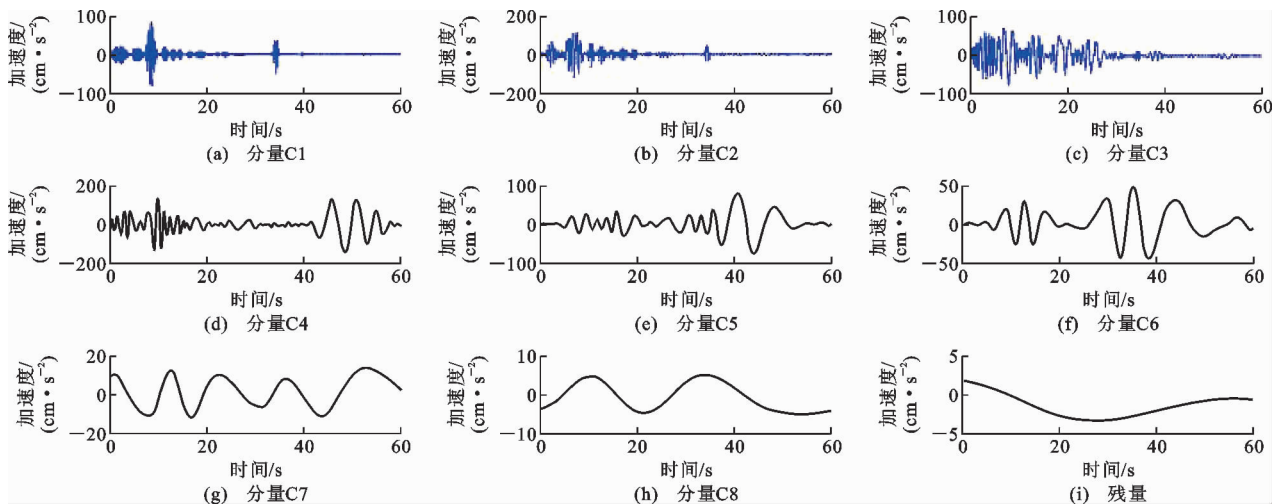


图 6 ILA056-NS 地震动 IMF 分量

Fig. 6 IMF Components of ILA056-NS Wave

不同 IMF 分量对结构响应的影响情况。为量化各 IMF 分量对结构响应的影响程度,定义偏差度为原始地震动与重构地震动所对应响应值之差占原始地震动所对应响应值的百分比。偏差度越大,说明所去掉的该 IMF 分量对结构响应的影响程度越大;反

2.1.2 长周期地震动的重构

依次去掉原始地震动的每一个 IMF 分量,将其余 IMF 分量叠加重构成新的地震动。统计分析表明,长周期地震动的最后 2 个或 3 个 IMF 分量峰值较小,且所处频段对应的周期较大,考虑到本文分析用结构的基本自振周期为 2.22 s,远小于此类分量对应的周期,因此,为简化计算,在分析 IMF 分量对结构弹塑性地震响应的影响时不予考虑。以 ILA056-NS 地震动为例,最后 2 个 IMF 分量忽略不计,分别去掉第 1~6 个 IMF 分量,即可得到 6 条新地震动,依次命名为 M1~M6。

2.1.3 长周期地震动 IMF 分量对结构响应的影响程度分析

分别计算原始长周期地震动及各新地震动作用下结构的弹塑性地震响应,通过对比分析即可得到

之,偏差度越小,说明所去掉的该 IMF 分量对结构响应的影响程度较弱。

2.2 计算结果分析

图 7 为长周期地震动 ILA056-NS 所对应的原始地震动与各重构地震动作用下的结构楼层剪力、

表 2 ILA056-NS 地震动的主要频域信息

Tab. 2 Main Frequency Domain Information of ILA056-NS Wave

IMF 分量	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
频域/Hz	4.00~25.00	1.00~15.00	0.55	0.20	0.18	0.10	0.08	0.04
加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.812	1.166	0.765	1.456	0.804	0.486	0.138	0.052

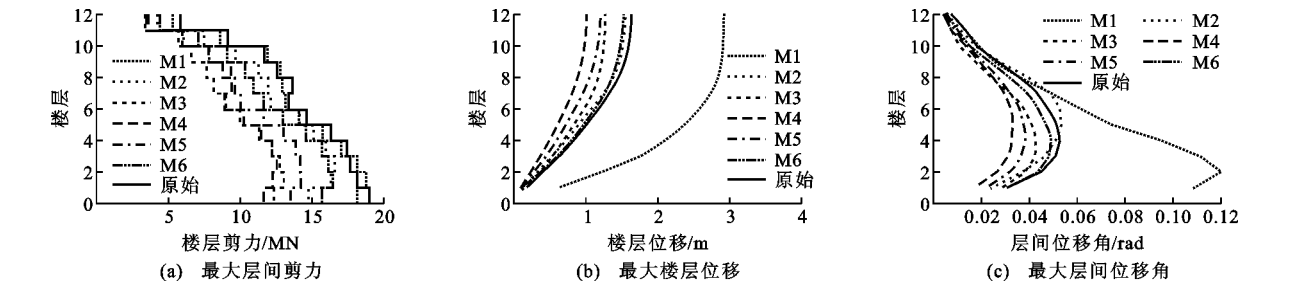


图 7 长周期原始地震动与各新地震动作用下的结构响应对比

Fig. 7 Comparison of Structural Responses Between Original and New Long-period Ground Motions

楼层位移及层间位移角对比情况。表 3 为结构顶点最大位移及偏差度的计算结果。

由图 7 和表 3 可知：

(1)对于 ILA056-NS 地震动,除第 1 个 IMF 分量外,当去掉其他 IMF 分量时,结构响应均有不同程度的减小,当去掉第 3~5 个 IMF 分量时,最大顶点位移减小幅度较大。分析认为,各 IMF 分量所包含的频域信息及峰值情况会综合决定其对结构响应的影响程度,当去掉与结构基本自振周期较接近且峰值较大的 IMF 分量时,结构响应会有较大幅度的减小。

(2)当去掉第 1 个 IMF 分量时,最大顶点位移会出现较大幅度的增大。初步分析认为,这是由于第 1 个高频 IMF 分量对结构响应具有干扰作用,不容忽视。

为验证高频 IMF 分量的干扰作用,分别计算纯高频地震动(第 1 个 IMF 分量)、不含高频地震动(由第 3~6 个 IMF 分量叠加重构而成的地震动)以及由含高频地震动(第 1 与第 3~6 个 IMF 分量叠加重构而成的地震动)作用下的结构响应,如图 8 所示。分析表明,由于第 1 个 IMF 分量主要是高频分量,与结构基本自振周期偏离较大,因此,在纯高频地震动作用下的结构响应较小;去掉该高频 IMF 分量后,在不含高频地震动的作用下结构响应却显著大于原始地震动,同时,在叠加该高频 IMF 分量重

构而成的含高频地震动作用下,结构响应与原始地震动比较接近。采用其他长周期地震动进行计算亦得到同样的结论。这说明,虽然长周期地震动高频 IMF 分量对高层结构响应的直接影响较小,但其对高层结构响应的干扰作用是不容忽视的。

3 长周期地震动有效峰值计算与分析

上述分析表明,长周期地震动不同 IMF 分量对结构响应的影响程度不同。控制高层结构地震响应的 IMF 分量主要是指与结构基本自振周期接近且峰值较大的 IMF 分量,此外,第 1 个高频 IMF 分量的干扰作用不容忽视。为便于分析,可将对结构响应影响较大的 IMF 分量叠加重构成新的地震动,称为有效长周期地震动。有效长周期地震动的加速度峰值为有效峰值,有效峰值占原始地震动峰值加速度的百分比为有效峰值率。

以 ILA056-NS 地震波为例,该框架结构的有效长周期地震动由第 3~6 个 IMF 分量与第 1 个高频 IMF 分量叠加重构而成,其有效地震动与原始地震动加速度时程比较如图 9 所示。分别计算表 1 中 20 条地震动对应于本文分析所用框架结构的有效峰值与有效峰值率,如表 4 所示。由表 4 可知,长周期地震动的有效峰值与有效峰值率均大于普通地震动,这是由于普通地震动的 IMF 分量主要集中于高频段,对高层框架结构影响较大的低频 IMF 分量较

表 3 结构最大顶点位移与偏差度计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Maximum Top Displacement and Deviation Degree of Structure

地震动	原始	M1	M2	M3	M4	M5	M6
位移计算值/m	1.64	2.92	1.55	1.27	1.02	1.21	1.53
偏差度/%	0.00	-78.05	5.49	22.56	37.80	26.22	6.71

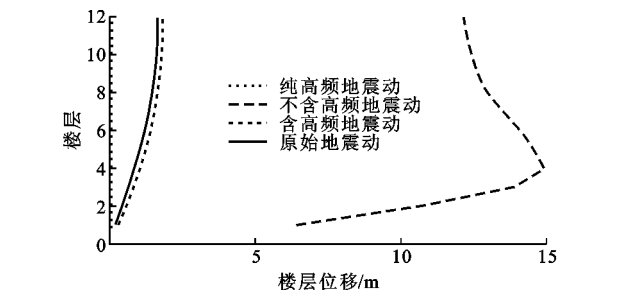


图 8 ILA056-NS 高频 IMF 分量对结构楼层位移响应的影响

Fig. 8 Influence of High-frequency IMF Component of ILA056-NS Wave on Floor Displacement Response

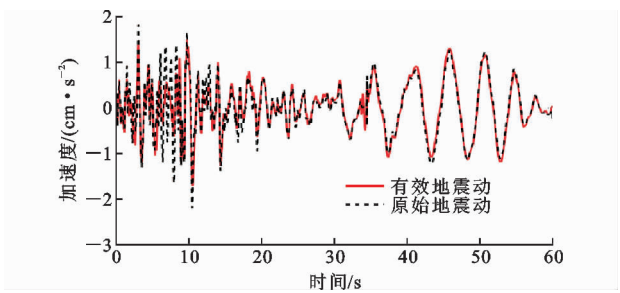


图 9 ILA056-NS 有效地震动与原始地震动加速度时程比较

Fig. 9 Comparison of Acceleration Time-history Curves Between Valid and Original ILA056-NS Waves

表 4 有效峰值和有效峰值率计算结果					
Tab. 4 Calculation Results of Valid Peaks and Valid Peak Ratios					
地震动类型	台站-分量	有效峰值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效峰值平均值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效峰值率/ %	有效峰值率 平均值/%
长周期地震动	ILA004-NS	184.96	182.79	84.07	83.09
	ILA004-EW	189.86		86.31	
	ILA005-NS	198.88		90.40	
	ILA048-NS	182.58		82.99	
	ILA055-EW	170.96		77.71	
	ILA056-EW	173.86		79.03	
	ILA056-NS	172.81		78.55	
	TCU006-EW	171.75		78.07	
	TCU010-EW	189.35		86.07	
	TCU010-NS	192.85		87.66	
普通地震动	EL CENTRO	45.32	43.82	20.60	19.92
	CANTUA CREEK	62.48		28.40	
	TIANJIN	65.39		29.72	
	GRA074	46.05		20.93	
	KERN COUNTRY	33.22		15.10	
	KAKOGAWA	31.81		14.46	
	SMART007	65.67		29.85	
	TABAS	26.58		12.08	
	PARACHUTE TEST SITE	34.45		12.39	
	HOLLYWOOD STORAGE	27.26		15.66	

少且峰值较小引起的,这也是导致长周期地震动作用下高层结构的地震响应普遍大于普通地震动的内在原因。

4 结 语

- (1)长周期地震动作用下的结构最大层间剪力、楼层位移及层间位移角均大于普通地震动,且最大层间位移角超过规范规定的 1/50 限值。
- (2)基于经验模态分解得到了远场长周期地震动的各 IMF 分量,研究表明与结构自振周期接近且

- 峰值较大的 IMF 分量对地震响应影响较大,第 1 个高频 IMF 分量对结构响应具有较大的干扰作用。
- (3)计算分析表明,远场长周期地震动的有效峰值及有效峰值率均普遍大于普通地震动,从而从频域的角度揭示了导致长周期地震动作用下高层结构地震响应大于普通地震动的内在原因。
- (4)为进一步研究远场长周期地震动对高层结构的影响机理,后续将会对有效长周期地震动的参数量化控制及长周期地震动高频分量对结构响应的干扰机理等问题进行深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 周福霖,崔鸿超,安部重孝,等.东日本大地震灾害考察报告[J].建筑结构,2012,42(4):1-20.
ZHOU Fu-lin, CUI Hong-chao, SHIGETAKA Abe, et al. Inspection Report of the Disaster of the East Japan Earthquake by Sino-Japanese Joint Mission[J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20.
- [2] 肖从真,徐培福,杜义欣,等.超高层建筑考虑长周期地震影响的另一种控制方法[J].土木工程学报, 2014, 47(2): 12-22.
XIAO Cong-zhen, XU Pei-fu, DU Yi-xin, et al. Another Controlling Method on Long-period Seismic Responses for Super High-rise Buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 12-22.
- [3] 李英民,赵晨晓,谭潜.基于HHT地震动分量分离的长周期地震动界定方法[J].振动与冲击, 2018, 37(7): 164-171, 219.
LI Ying-min, ZHAO Chen-xiao, TAN Qian. Classification Method for Long-period Ground Motions Based on Component Decomposition with HHT[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 164-171, 219.
- [4] 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 Bo-quan, 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.
- [5] 王博,刘伯权,吴涛,等.远场长周期地震动频谱特征周期与强度指标研究[J].振动与冲击, 2018, 37(7): 211-219.
WANG Bo, LIU Bo-quan, WU Tao, et al. Characteristic Periods and Intensity Indexes for Far-field Long-period Ground Motion Frequency Spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 211-219.
- [6] 周靖,方小丹,江毅.远场长周期地震动反应谱拐点特征周期研究[J].建筑结构学报, 2015, 36(6): 1-12.
ZHOU Jing, FANG Xiao-dan, JIANG Yi. Characteristic Periods of Response Spectrum for Far-field Long-period Seismic Ground Motions[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 1-12.
- [7] 杜东升,王曙光,刘伟庆,等.长周期地震动影响因素及频谱参数研究[J].建筑结构学报, 2014, 35(增1): 1-8.
DU Dong-sheng, WANG Shu-guang, LIU Wei-qing, et al. Study on Affecting Factors and Spectral Parameters of Long Period Ground Motions[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(S1): 1-8.
- [8] 李雪红,王文科,吴迪,等.长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J].振动工程学报, 2014, 27(5): 685-692.
LI Xue-hong, WANG Wen-ke, WU Di, et al. The Bounded Method and Characteristics Analysis for Long-period Ground Motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(5): 685-692.
- [9] 吴琼,陈清军.高层框架结构长周期地震反应分析[J].结构工程师, 2011, 27(1): 78-84.
WU Qiong, CHEN Qing-jun. Analysis on Long-period Seismic Responses for High-rise Frame Structures[J]. Structural Engineers, 2011, 27(1): 79-84.
- [10] 王博.多类型长周期地震动作用下高层结构的动力行为与设计方法研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2013.
WANG Bo. Study on Dynamic Behavior and Design Method of High-rise Structures Under Multi-type Long-period Ground Motions[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [11] 马华,曹飞,唐贞云,等.高层框架结构 E-Defense 振动台试验弹塑性时程对比分析[J].地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 143-149.
MA Hua, CAO Fei, TANG Zhen-yun, et al. Comparative Analysis of E-Defense Shaking Table Test and Nonlinear Time History Simulation for High-rise Frame Structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 143-149.
- [12] ARIGA T, KANNO Y, TAKEWAKI I. Resonant Behavior of Base-isolated High-rise Buildings Under Long-period Ground Motions[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2006, 15(3): 325-338.
- [13] CHEN Q J, YUAN W Z, LI Y C, et al. Dynamic Response Characteristics of Super High-rise Buildings Subjected to Long-period Ground Motions[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1341-1353.
- [14] CHUNG Y L, NAGAE T, HITAKA T, et al. Seismic Resistance Capacity of High-rise Buildings Subjected to Long-period Ground Motions: E-Defense Shaking Table Test[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(6): 637-644.
- [15] TAKEWAKI I, MURAKAMI S, FUJITA K, et al. The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Response of High-rise Buildings Under Long-period Ground Motions[J]. Soil Dynamics and Earth-

- quake Engineering, 2011, 31(11): 1511-1528.
- [16] 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 Guo-liang, DAI Hui-juan. Seismic Response Analysis of Long-period SDOF System Under Typical Ground Motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15): 190-196, 214.
- [17] 郭 彦, 刘文光, 何文福, 等. 长周期地震波作用下超高层框架-核心筒减震结构动力响应分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 68-77.
- GUO Yan, LIU Wen-guang, HE Wen-fu, et al. Dynamic Response Analysis of Super High-rise Frame-core Tube Structure Under Long-period Ground Motions[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 68-77.
- [18] 韩建平, 苏彦兵. 长周期地震动输入下某超限高层结构反应分析——以汶川地震和日本东北地震记录为例[J]. 建筑结构, 2014, 44(18): 59-62.
- HAN Jian-ping, SU Yan-bing. Seismic Response Analysis of an Out-of-code High-rise Building Under Long-period Ground Motion: Case Studies of Wenchuan Earthquake and Japan Tohoku Earthquake Records[J]. Building Structure, 2014, 44(18): 59-62.
- [19] 陈清军, 袁伟泽, 曹丽雅. 长周期地震波作用下高层建筑结构的弹塑性动力响应分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(3): 403-410.
- CHEN Qing-jun, YUAN Wei-ze, CAO Li-ya. Elastoplastic Dynamic Response Analysis of High Rise Structures Under Long Period Ground Motion[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(3): 403-410.
- [20] 张郁山. 希尔伯特-黄变换(HHT)与地震动时程的希尔伯特谱——方法与应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2003.
- ZHANG Yu-shan. Hilbert-Huang Transform (HHT) and Hilbert Spectrum of Earthquake Ground Motion — Study of Methods and Applications[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2003.
- [21] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [22] 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 Xin-zheng, JIANG Qing, MIAO Zhi-wei, et al. Elastoplastic Analysis of Buildings Against Earthquake[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.