

不同地震动作用下高耸结构的地震响应规律研究

黄健辉¹, 陈彦江¹, 许维炳^{1*}, 王瑾¹, 沈铂坦¹, 李娜娜²

¹北京工业大学城市建设学部, 北京

²上海城建职业学院土木与交通工程学院, 上海

Email: *hjh201802@126.com

收稿日期: 2021年5月29日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

摘要

高耸结构具有自振周期长、对低频激励敏感、抗震性能要求高等特点, 为明确高耸结构在不同地震强度作用下的动力响应规律, 本文以某典型高耸电视塔结构为原型, 按照1:20缩尺比例设计制作了其缩尺模型。分别开展了二类场地地震动、长周期非脉冲型地震动、近断层脉冲型地震动在小震、中震条件下的一系列振动台试验。结果表明: 高耸结构在地震动作用下为多阶振型参与振动; 高耸结构在不同类型地震动作用下的动力响应规律大致遵循: 长周期地震动 > 脉冲型地震动 > 二类场地地震动; 当脉冲型地震动的速度脉冲周期接近于原结构基本振动周期时, 高耸结构的地震响应较同类型地震动更为显著; 高耸建筑顶部在长周期和脉冲型地震动作用下具有显著的鞭梢效应。

关键词

高耸建筑, 振动台试验, 地震强度, 动力响应

Research on Seismic Response Law of Towering Structures in Different Ground Motion

Jianhui Huang¹, Yanjiang Chen¹, Weibing Xu^{1*}, Jin Wang¹, Botan Shen¹, Nana Li²

¹Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing

²School of Civil and Traffic Engineering, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai

Email: *hjh201802@126.com

Received: May 29th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 黄健辉, 陈彦江, 许维炳, 王瑾, 沈铂坦, 李娜娜. 不同地震动作用下高耸结构的地震响应规律研究[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 554-560. DOI: 10.12677/hjce.2021.106062

Abstract

Towering structure has the characteristics of long natural vibration period, sensitive to low frequency excitation and high requirements for seismic performance. In order to clarify the dynamic response rule of towering structure under different earthquake intensities, this paper takes a typical towering TV tower structure as the prototype and designs a scaling model according to 1:20 scaling scale. A series of shaking table tests were carried out under the conditions of minor and moderate earthquakes, such as ground motion of the second type, long period non-pulsed ground motion, and near-fault pulsed ground motion. The results show that the high-rise structure vibrates with multiple modes under the action of ground motion. The dynamic response law of towering structures under different types of ground motion follows roughly: long period ground motion > pulsed ground motion > secondary field vibration; when the velocity pulse period of the pulse type ground motion is close to the basic vibration period of the original structure, the seismic response of the high-rise structure is more significant than that of the same type ground motion. The top of tall buildings has significant whipping effect under long period and pulse type ground motion.

Keywords

Towering Structures, Vibrator Test, Seismic Intensity, Dynamic Response

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现阶段高耸建筑已成为解决城市人口密集、减缓城市人口住宅压力的重要措施。国内外超高层建筑层出不穷,如迪拜哈利法塔(828 m)、和天津 117 大厦(621 m)、广州电视塔(600 m)、纽约新世贸大厦(541 m)等。与中低高度建筑结构相比,超高层建筑具有自振周期大、多阶阵型参与振动、地震和风振响应显著、对长周期及具有速度脉冲的近断层脉冲型地震动敏感等特点[1] [2] [3]。研究高耸结构在不同地震强度作用下的动力响应规律,可以为高耸结构在工程实践中的应用提供相关研究依据,具有一定的工程实用价值。

鉴于此,本文以某典型高耸电视塔结构为原型,按照 1:20 缩尺比例设计制作了缩尺试验模型。选取了二类场地地震动、长周期非脉冲型地震动、近断层脉冲型地震动三种地震动作为激励输入,通过一系列振动台试验,对比分析了不同地震动对高耸结构地震动力响应的影响规律。

2. 试验概况

2.1. 试验模型设计和测点布置

本文以某典型的高耸广播电视发射塔为原型。原型塔的主体结构材料均为 Q345 钢。原型结构总高度为 308 米,总重为 133,588 kN。依据该结构的仿真足尺模型得到原型塔前三阶平动阵型自振频率分别为 0.132、0.719 和 1.340,均低于 2 Hz,地震荷载作用下该模型将具有典型的多阶振型参与振动特性。

综合考虑试验场地及振动台技术参数,确定本次试验模型的几何相似比为 1/20。试验模型等效质量

密度为 2，缩尺试验模型高度和重量分别为 11 米和 32.2 kN。试验模型材料采用 Q345 钢，基于相似关系 [4] 确定了本试验加速度幅值相似系数取值为 10。为避免试验模型倾覆及多项地震动造成局部构件损伤，本试验未考虑竖向地震动作用；同时由于结构的对称性，试验过程仅考虑沿水平 X 轴方向输入地震动。为测量试验模型的地震响应，在 X 轴方向沿模型高度六分点布置有加速度和位移计传感器，设计制作的试验模型如图 1 所示。



Figure 1. Test model drawing

图 1. 试验模型图

2.2. 试验模型基本动力参数分析

通过振动台系统输入白噪声信号，得到模型前三阶振型频率，如表 1 所示。

Table 1. Comparison of the first three order formation parameters of the model

表 1. 模型前三阶阵型参数对比

自振频率	仿真缩尺模型(Hz)	相似关系(Hz)	实验结果(Hz)	比值	
				仿真缩尺/ 相似关系	试验结果/ 相似关系
X 向一阶平动	1.73	1.87	1.64	0.93	0.95
X 向二阶平动	9.81	10.17	9.20	0.96	0.94
X 向三阶平动	18.03	18.95	16.49	0.95	0.91

由表 1 可知，缩尺有限元模型前三阶振动频率与通过相似关系得到的频率数据基本一致。且缩尺试验模型的实测振动频率与缩尺有限元模型数据同样吻合较好。缩尺有限元模型与制作模型同样有效，均能反映原型塔的实际动力特性。

2.3. 试验模型基本动力参数分析

原型结构所处场地为二类场地，抗震设防烈度为 7 度，设计地震分组为第一组，原型结构阻尼比为

0.02。依据《建筑抗震设计规范》确定模型塔的设计地震反应谱，通过 PEER ground motion database 选取了 3 条二类场地设计地震动以及相同场地条件下的 4 条近断层脉冲型地震动和 5 条长周期非脉冲型地震动，各地震动详细信息见表 2。

Table 2. Test vibration parameters

表 2. 试验各地震动参数

地震动类型	RNS	地震动名称	年份	M	断层距(km)	Tp (s)	PGA (g)
二类场地地震动	56 (130)	San Fernando	1971	6.61	61.79	/	0.071
	56 (220)	San Fernando	1971	6.61	61.79	/	0.071
	83	San Fernando	1971	6.61	52.64	/	0.074
脉冲型地震动	2457	Chi-Chi_Taiwan-03	1999	6.20	19.65	3.18	0.187
	900	Landers	1992	7.28	23.62	7.50	0.245
	6911	Darfield_New Zealand	2010	7.00	7.29	9.92	0.450
长周期非脉冲型地震动	69 (249)	San Fernando	1971	6.61	58.99	/	0.029
	69 (339)	San Fernando	1971	6.61	58.99	/	0.029
	74	San Fernando	1971	6.61	193.91	/	0.007
	90 (042)	San Fernando	1971	6.61	124.41	/	0.017
	90 (132)	San Fernando	1971	6.61	124.41	/	0.017

注：同一个 RSN 的两条地震动分别代表两个水平分量(垂直于断层和平行于断层方向)。

由于原型结构的设防烈度为 7 度，对应的小震和中震加速度峰值分别为 0.035 g 和 0.1 g。依据相似理论，试验地震动输入的加速度峰值分别调整为 0.35 g 和 1.0 g，本试验所有工况的地震动均沿水平方向单向施加。

3. 试验结果分析

3.1. 二类场地地震动

图 2 给出了原结构试验模型在二类场地地震动作用下的顶部绝对位移响应时程曲线，同时表 3 给出了试验模型在二类场地地震动作用下的各动力响应参数。

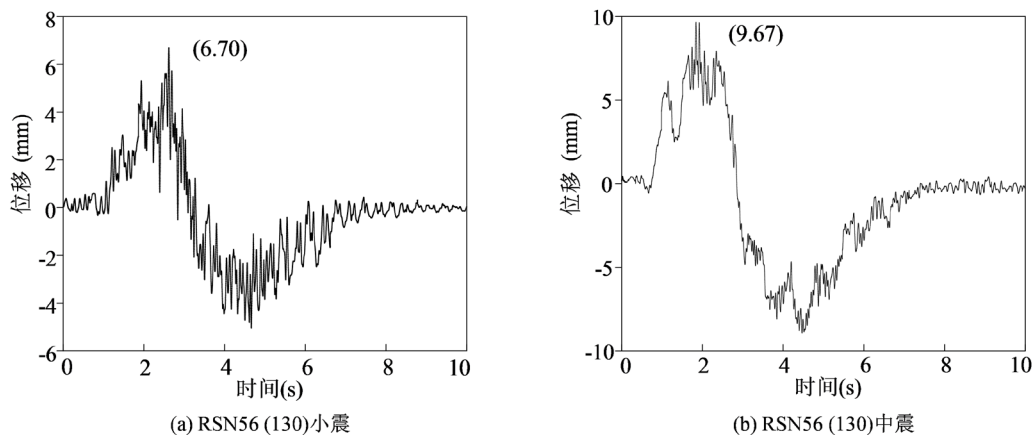


Figure 2. The displacement time history response at the top of the test model

图 2. 试验模型顶部位移时程响应

Table 3. The dynamic response parameters of the test model
表 3. 试验模型各动力响应参数

地震动类型	RNS	加速度峰值	绝对位移峰值(mm)	绝对加速度峰值(m/s ²)	相对位移峰值(mm)
二类场地	56 (130)	0.35 g	6.70	1.73	3.42
	56 (220)		2.52	1.27	1.52
	83		4.63	1.62	2.66
	均值		-	4.62	1.54
	56 (130)	1.00 g	9.67	4.21	9.15
	56 (220)		5.44	3.48	5.93
	83		8.50	4.00	8.88
	均值		-	7.87	3.90

由图 2 和表 3 可知, 试验模型在中震作用下的动力响应明显大于小震作用下的动力响应。中震作用下的绝对位移均值是小震作用下的 1.7 倍; 中震作用下的顶部绝对加速度峰值均值是小震作用下的 2.5 倍; 且试验模型在中震作用下的顶底部相对位移均值是小震作用下相应数值的 3.16 倍。

3.2. 脉冲型地震动

图 3 和表 4 分别给出了试验模型在脉冲型地震动作用下的顶部绝对位移响应时程曲线和各动力响应参数。

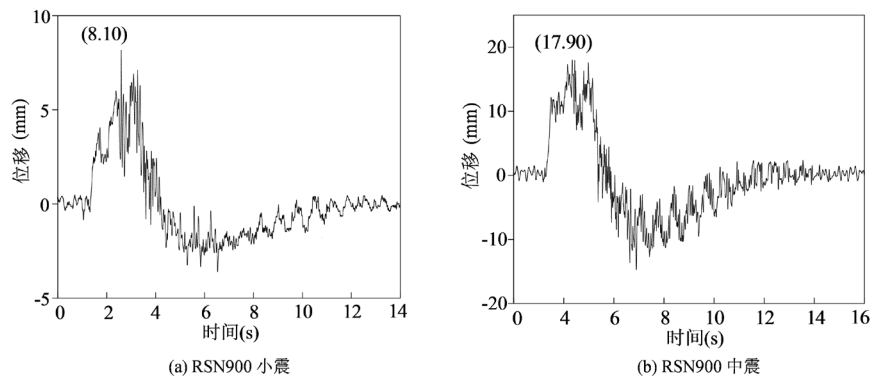


Figure 3. The displacement time history response at the top of the test model

图 3. 试验模型顶部位移时程响应

Table 4. The dynamic response parameters of the test model
表 4. 试验模型各动力响应参数

地震动类型	RNS	加速度峰值	绝对位移峰值(mm)	绝对加速度峰值(m/s ²)	相对位移峰值(mm)
近断层脉冲型	2457	0.35 g	4.68	3.01	3.70
	900		8.10	5.13	5.97
	6911		6.02	4.30	3.66
	1492		7.17	4.97	5.63
	均值		-	6.49	4.35
	2457	1.00 g	7.79	7.01	9.12
	900		17.90	12.07	12.63
	6911		9.93	10.19	7.32
	1492		16.11	11.82	11.15
	均值		-	12.93	10.27

由图3和表4可知,脉冲型地震动作用下,试验模型在不同地震强度作用下的动力响应规律与二类场地地震动作用下的响应规律基本一致:试验模型在中震作用下的动力响应明显大于小震作用下的动力响应。试验模型在中震作用下的顶部绝对位移均值、顶部绝对加速度峰值均值和顶底部相对位移峰值均值分别是小震作用下相应数值的1.99倍、2.36倍和2.12倍。此外,试验模型在脉冲型地震动RSN900作用下的位移响应和加速度响应明显大于其他脉冲型地震动作用下的相应响应。

3.3. 长周期非脉冲型地震动

图4给出了试验模型在长周期非脉冲地震动RSN74作用下的顶部绝对位移响应时程曲线,同时表5给出了试验模型在各长周期非脉冲地震动作用下的各动力响应参数。

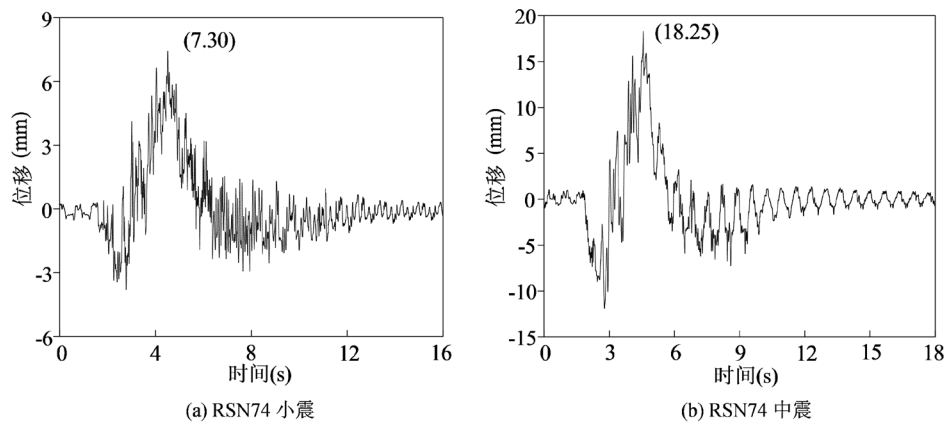


Figure 4. The displacement time history response at the top of the test model
图4. 试验模型顶部位移时程响应

Table 5. The dynamic response parameters of the test model
表5. 试验模型各动力响应参数

地震动类型	RNS	加速度峰值	绝对位移峰值(mm)	绝对加速度峰值(m/s ²)	相对位移峰值(mm)		
长周期非脉冲型	69 (249)	0.35 g	7.57	3.56	5.39		
	69 (339)		6.84	2.61	4.90		
	74		7.30	5.27	5.67		
	90 (042)		8.24	4.31	3.93		
	90 (132)		6.91	4.79	3.84		
	均值		-	7.37	4.11	4.75	
	69 (249)		1.00 g	16.72	10.29	14.03	
	69 (339)			16.05	8.63	14.88	
	74			18.25	13.16	13.45	
	90 (042)			12.67	10.70	9.67	
	90 (132)			11.03	12.81	11.30	
	均值			-	14.94	11.12	12.67

由图4和表5可知,与二类场地地震动和脉冲型地震动作用下的规律一致,试验模型在长周期非脉冲型地震动中震作用下的动力响应更显著。例如,试验模型在小震作用下的顶部绝对位移均值、顶部加速度均值和顶底部相对位移分别为7.37 mm、4.11 m/s²和4.75 mm;而试验模型在中震作用下的相应响应均

值分别达到 14.94 mm、11.12 m/s² 和 12.67 mm。

3.4. 不同地震动作用下动力响应对比

由图 2~4 和表 3~5 可知, 试验模型在三类地震作用下的位移响应均以低频响应为主, 符合超高层结构的响应特点; 三类地震动作用下, 随着输入地震动加速度的增大, 试验模型的顶部位移响应、顶部加速度响应及顶底部相对位移响应均显著增大; 依据对上述三个动力参数分析可知, 试验模型在近断层脉冲型地震动和长周期非脉冲型地震动作用下的动力响应显著大于在二类场地震动作用下的动力响应, 且这种现象随着地震动加速度峰值的增大而愈加显著。

试验模型在部分地震动工况下的顶底部相对位移峰值大于顶部绝对位移, 符合超高建筑为多阶振型参与振动的特点[3] [5]。当近断层脉冲型地震动的速度脉冲周期接近结构基本振动周期时, 试验模型的动力响应幅值将显著增大, 这与 Somerville [6]、Shih [7] 和 Sehhati [8] 等的研究结果类似; 高耸结构在脉冲型地震动和长周期非脉冲型地震动作用下的顶底部相对位移响应显著大于二类场地震动作用下的响应, 试验模型顶部“鞭梢效应”更显著。

4. 结论

以某典型高耸电视塔结构为原型, 设计制作了 1:20 的缩尺比例试验模型。在小震、中震条件下, 开展了二类场地震动、长周期非脉冲型震动、近断层脉冲型震动作用下的一系列振动台试验。试验结果表明:

- 1) 高耸结构为多阶振型参与振动, 在不同类型震动作用下的动力响应差异显著, 地震激励强度越高, 激励输入时间越长, 结构动力响应越明显, 大致遵循: 长周期震动 > 脉冲型震动 > 二类场地震动。
- 2) 当脉冲型震动的速度脉冲周期接近于原结构基本振动周期时, 高耸结构的震动动力响应在同类型震动中更为显著。
- 3) 高耸结构顶部在长周期非脉冲型震动和近断层脉冲型震动作用下具有明显的鞭梢效应。

参考文献

- [1] 姬淑艳, 刘芯鄢, 戴明辉. 某超高层结构在长周期震动下的结构响应分析[J]. 特种结构, 2019(4): 16-21, 39.
- [2] 姬淑艳, 刘烁宇, 李英民. 远场长周期震动作用下超高层建筑响应特性[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 1-10.
- [3] Takewaki, I., Fujita, K. and Yoshitomi, S. (2013) Uncertainties in Long-Period Ground Motion and Its Impact on Building Structural Design: Case Study of the 2011 Tohoku (Japan) Earthquake. *Engineering Structures*, **49**, 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.038>
- [4] 王天稳. 土木工程结构[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
- [5] 田春雨, 张宏, 肖从真, 等. 上海中心大厦模型振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 47-52.
- [6] Somerville, P. (2000) Seismic Hazard Evaluation. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **33**, 371-386. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.3.371-386>
- [7] Shih, M.H., Chen, C.L. and Sung, W.P. (2007) Collapse Analysis of Building Structures under Excitation of Near-Fault Ground Motion with Consideration of Large Deformation and Displacement. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **16**, 165-180. <https://doi.org/10.1002/tal.308>
- [8] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., Elgawady, M., et al. (2011) Effects of Near-Fault Ground Motions and Equivalent Pulses on Multi-Story Structures. *Engineering Structures*, **33**, 767-779. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.032>