

李敏, 黄天璨. 近断层地震动作用下超高层结构地震响应分析[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 84–89. [LI Min, HUANG Tiancan. Analysis of Seismic Responses of Super High-rise Structure Under Near-fault Ground Motion [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 84–89]

近断层地震动作用下超高层结构地震响应分析

李 敏, 黄天璨

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广东广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广东广州 510405;
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广东广州 510405)

摘要: 研究了近断层脉冲型地震动作用下超高层结构的影响。选取了近断层脉冲型地震、近断层无脉冲型地震和普通地震动, 用三类地震动对超高层结构进行了7度(0.1 g)罕遇水准地震作用下的动力时程分析, 对比分析三类地震动作用下超高层结构的动力响应。结果表明: 近断层脉冲型地震动的脉冲特性放大了超高层结构的响应; 近断层脉冲型地震动作用下结构响应在加强层处的突变值大于无脉冲型地震动及普通地震动作用下的突变值; 近断层脉冲型地震动作用下结构的最大层间位移角出现下移的趋势。

关键词: 近断层脉冲型地震动; 超高层结构; 动力分析; 结构响应

中图分类号: TU973.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)04-0084-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.014

Analysis of Seismic Responses of Super High-rise Structure Under Near-fault Ground Motion

LI Min, HUANG Tiancan

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance Earthquake Mitigation and Structural Safety Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: A super high-rise structure with the natural vibration period exceeding 6s was selected to study the effects of Super High-rise Structure under near-fault pulse-type ground motions. First of all, near-fault pulse-type ground motions, non-pulse-type ground motions and general ground motions were selected. The spectrum properties and characteristics of three types of ground motion were analyzed and compared. Then, the three types of selected ground motion records were taken as inputs to carry out elastic-plastic time-history analysis under rare earthquake action on an out-of-code high-rise building in 7-degree seismic fortification region with basic

收稿日期: 2018-08-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703600)

作者简介: 李 敏(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事超高层结构抗震研究。

E-mail: joylimin@163.com.

通信作者: 黄天璨(1982-), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要从事结构非线性分析。

E-mail: maya_htc@163.com.

ground acceleration of 0.1g. And the results of internal force response and displacement response were compared and analyzed for the structure under different types of ground motions. The results show that the pulse characteristics of near-fault pulse-type ground motions amplify the response of super-high-rise structures; The mutation value of inter-story drift ratio and floor story shear of super-high-rise structure under near-fault pulse-type ground motions is greater than the value under non-pulse-type ground motions and general ground motions; the maximum inter-story drift angle of the structure has a trend to move down under the near-fault pulse-type ground motions.

Keywords: Near-fault pulse-type ground motions; Super high-rise structure; Dynamic analysis; Structural response

0 引言

近年来大地震频繁发生,不少的高层建筑在地震下遭到破坏。已有研究表明,拥有速度脉冲特性的近断层地震动对高层结构有很大的潜在破坏能力^[1-3]。近断层地震动对结构的破坏与速度脉冲相关,相比于无速度脉冲型地震动,速度脉冲增大了长周期结构的瞬时输入能^[4]。作用于长周期结构地震动脉冲特性更为显著,地震动的脉冲特性对长周期结构有更大的破坏作用^[5-8]。

虽然有学者开展了建筑结构在近断层脉冲型地震动作用下的相关研究,但大多数的研究都是以多层结构为研究对象,对高层和超高层结构在近断层脉冲型地震动作用下的研究极少。为深入研究近断层地震动速度脉冲特性对超高层结构动力响应的影响,本文选取近断层脉冲型地震动、近断层无脉冲型地震动和普通地震动各3条作为输入,以一个高度为523.75 m的框架-核心筒为研究对象,研究三种输入对超限高层结构动力响应的影响。

1 工程概况

本文所用算例是一个超高层的实际工程模型,该结构体系采用巨型框架-核心筒-伸臂桁架钢-混凝土混合结构,结构高度为523.75 m,地上109层。由6根主巨柱12根次巨柱和桁架组成外框架,核心筒居中布置,整楼共有4个加强层(分别布置在第30、61、84、107层)。结构的核心筒、框架柱和连梁等主要构件的混凝土强度等级采用C60,楼板的混凝土强度等级采用C30,钢筋采用HRB400,钢材采用Q345B。结构所在地的抗震设防烈度为7度(0.1 g),设计地震分组为第三组,场地类别为Ⅲ类。典型结构平面布置图如图1所示。

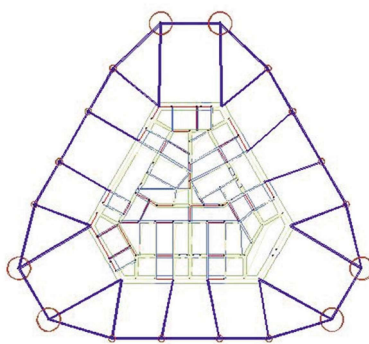


图1 典型结构平面布置示意图

Fig.1 Typical floor plane

2 计算模型

2.1 单元类型

采用ABAQUS通用有限元软件建立结构三维有限元模型如图2所示,有限元模型中的剪力墙采用分层壳单元,对巨柱和连梁采用纤维梁柱单元,楼板采用壳单元。



图2 结构有限元模型

Fig.2 Finite element model for structure

2.2 材料模型

(1)混凝土材料模型采用损伤塑性模型,此模型依据 Lubliner^[9] 和 Lee^[10]提出的损伤塑性模型确定。当混凝土进入塑性状态时,其抗拉和抗压强度下降,该材料模型采用受拉损伤因子 d_t 和受压损伤因子 d_c 两个参数模拟混凝土材料塑性状态时不可逆转的损伤。设置拉压刚度恢复系数模拟混凝土材料在循环荷载下的受力情况。混凝土单轴拉压应力-应变关系曲线采用 GB50010-2010《混凝土结构设计规范》^[11]中给出的曲线,图3和图4分别为混凝土在受拉和受压两种状态的应力应变曲线及损伤示意图。

混凝土材料在单向反复荷载作用下,由于其抗拉强度较小、一旦开裂抗拉刚度不再恢复。在弹性状态时承受压力时、混凝土由拉力产生的裂缝闭合,抗压刚度恢复初始的刚度。图5是混凝土材料在外荷载作用下的拉压刚度恢复示意图。

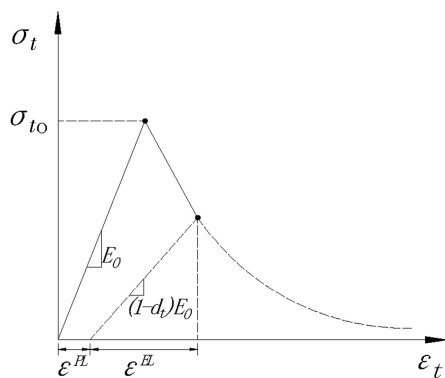


图3 混凝土受拉应力-应变曲线及损伤示意图

Fig.3 Tensile stress-strain and damage-strain relationship of concrete

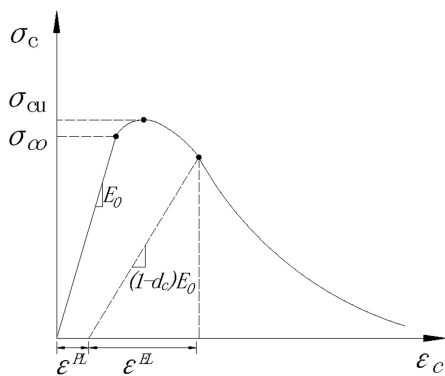


图4 混凝土受压应力-应变曲线及损伤示意图

Fig.4 Compressive stress-strain and damage-strain relationship of concrete

混凝土材料在单向反复荷载作用下,由于其抗拉强度较小、一旦开裂抗拉刚度不再恢复。在弹性状态时承受压力时、混凝土由拉力产生的裂缝闭合,抗压刚度恢复初始的刚度。图5是混凝土材料在外荷载作用下的拉压刚度恢复示意图。

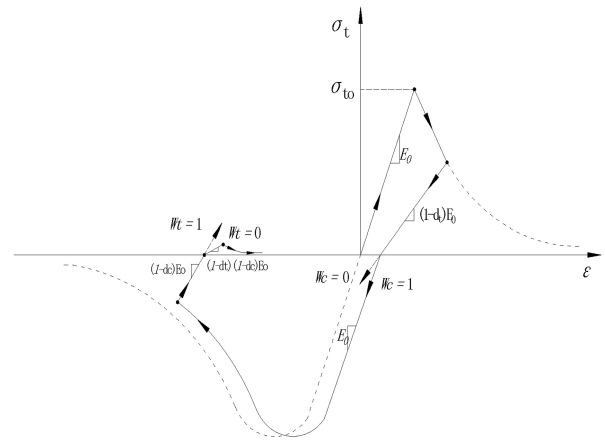


图5 循环荷载下拉压刚度恢复示意图

Fig. 5 Stiffness recovery under cyclic loading

(2)本文采用双折线强化模型描述钢材的应力-应变关系;考虑反复荷载作用下的包辛格效应。钢材本构模型如图6所示。

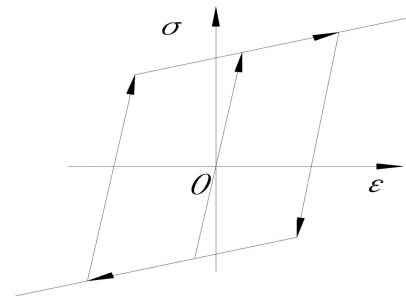


图6 钢材应力-应变恢复力模型

Fig. 6 Stress-strain hysteretic model of steel

2.3 结构基本动力特性

为了验证 ABAQUS 模型的正确性,结合 PKPM 模型对其进行校核。表1和表2分别为 PKPM 模型和 ABAQUS 模型的质量、周期的对比。

PKPM 与 ABAQUS 软件计算的模型质量误差为 1.15%; ABAQUS 模型与 PKPM 模型相比,周期误差均在 5%以内,满足工程精度要求。由此可得 ABAQUS 模型是准确的,能够反映结构的动力特性,可用于后面的计算分析。

表 1 模型质量对比 (t)

Table 1 The comparison of the model mass (t)

PKPM(I)	ABAQUS(II)	II-III/I
405710	401048	1.15%

表 2 PKPM 模型与 ABAQUS 模型周期对比

Table 2 The comparison of period and frequency in PKPM model and ABAQUS model

振型	振型描述	周期/s		
		PKPM(I)	ABAQUS(II)	II-III/I
1	X 向一阶平动	8.35	8.24	1.32%
2	Y 向一阶平动	8.13	8.01	1.48%
3	一阶扭转	3.67	3.57	2.72%
4	X 向二阶平动	2.96	2.93	1.02%
5	Y 向二阶平动	2.81	2.79	0.71%
6	二阶扭转	1.87	1.83	2.13%
7	X 向三阶平动	1.49	1.42	4.70%
8	Y 向三阶平动	1.39	1.32	3.60%
9	三阶扭转	1.21	1.19	1.65%
10	X 向四阶平动	1.08	1.06	1.85%
11	Y 向四阶平动	1.07	1.05	1.87%
12	四阶扭转	1.02	0.99	2.94%
13	X 向五阶平动	1.01	0.98	0.97%
14	Y 向五阶平动	0.93	0.91	2.15%
15	五阶扭转	0.81	0.80	1.23%

3 地震动的选取

选取的三类地震动信息如表 3 所示, 其中近断层脉冲和无脉冲型地震波为台湾集集地震中不同台站测得的地震波。三类地震动的加速度反应谱如图 7~10 所示。

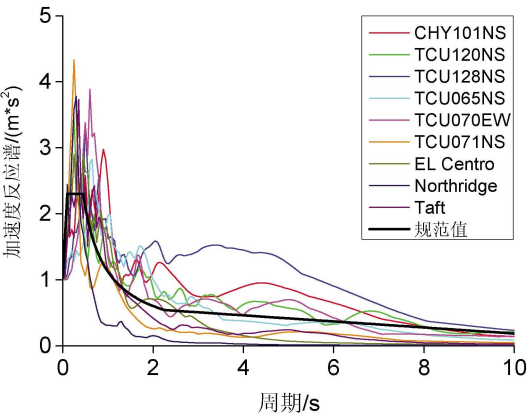


图 7 类地震动加速度反应谱

Fig.7 Acceleration response spectra

表 3 地震波信息

Table 3 The information of seismic waves

近断层脉冲型	近断层无脉冲型	普通地震动
台站/分量	台站/分量	台站/分量
CHY101NS	TCU065NS	EL Centro
TCU120NS	TCU070EW	Northridge
TCU128NS	TCU071NS	Taft

4 结构动力时程分析对比

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[12]规定, 将所选的 9 条地震波 PGA 均调幅至 220 gal, 然后沿第一阶平动周期方向输入结构进行计算, 提取结构各层响应进行对比分析。

4.1 结构内力

图 7~图 10 分别为三类不同类型地震动作用下的楼层剪力以及楼层剪力平均值。

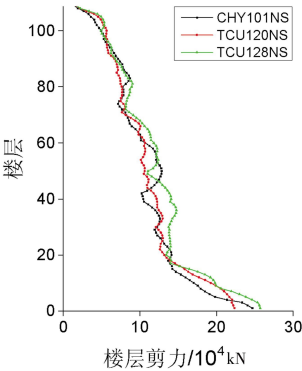


图 8 近断层脉冲型地震动作用下楼层剪力

Fig.8 Story shear under near-fault pulse-type ground motions

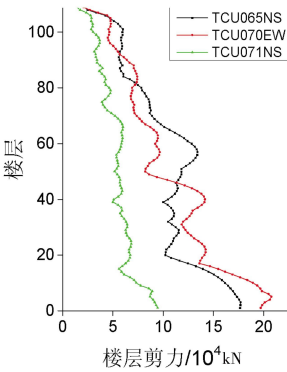


图 9 近场无脉冲型地震动作用下楼层剪力

Fig.9 Story shear under non-pulse-type ground motions

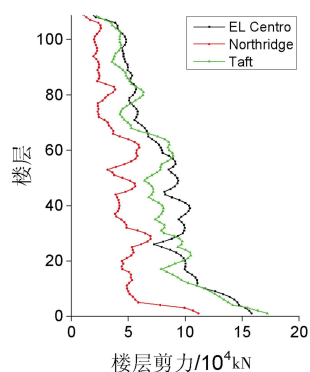


图 10 普通地震动作用下楼层剪力

Fig.10 Story shear under general ground motion

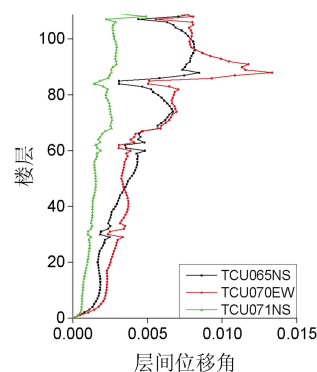


图 13 近断层无脉冲型地震动作用下层间位移角

Fig.13 Inter-story drift angle under non-pulse-type ground motion

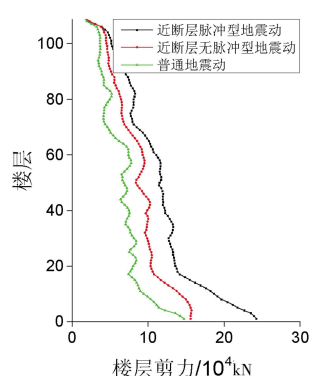


图 11 三类地震动作用下楼层剪力平均值

Fig.11 Average story shear under hree types of ground motion

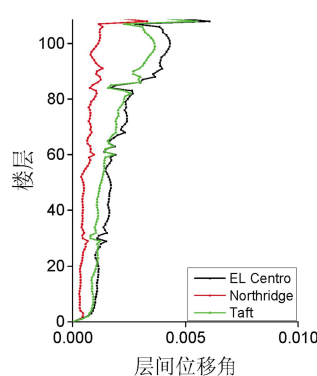


图 14 普通地震动作用下层间位移角

Fig.14 Inter-story drift angle under general ground motion

从图 11~图 14 可以看出,楼层剪力由下到上逐渐减小,加强层及其附近的剪力存在一定的波动。近断层脉冲型地震动作用下楼层剪力大于近断层无脉冲型地震动作用下的楼层剪力。

4.2 层间位移角

图 11~图 14 分别为三类不同类型地震动作用下的层间位移角及层间位移角的平均值。

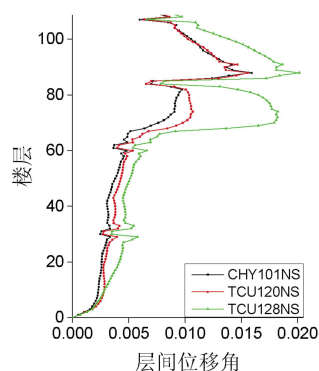


图 12 近断层脉冲型地震动作用下层间位移角

Fig.12 Inter-story drift angel undernear-fault pulse-type ground motion

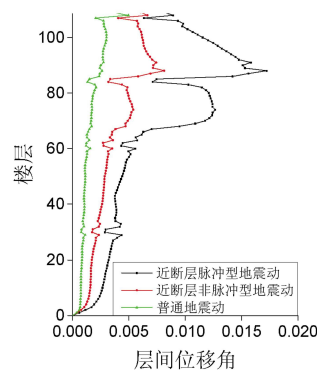


图 15 三类地震动作用下楼层位移角平均值

Fig.15 Average inter-story drift angle under three types of ground motion

表 4 近断层脉冲型地震动作用下结构顶点位移及最大层间位移角

Table 4 Roof displacements and maximum inter-story drift angle under near-fault pulse-type ground motions

近断层脉冲型地震动	最大顶点位移/m	最大层间位移角	最大层间位移角所在楼层
CHY101NS	1.966	0.016	88
TCU120NS	2.432	0.016	88
TCU128NS	2.720	0.020	88
平均值	2.372	0.017	/

表 5 近断层无脉冲型地震动作用下结构顶点位移及最大层间位移角

Table 5 Roof displacements and maximum inter-story drift angel under non-pulse-type ground motions

近断层无脉冲型地震动	最大顶点位移/m	最大层间位移角	最大层间位移角所在楼层
TCU065NS	0.946	0.008	88
TCU070EW	1.591	0.013	88
TCU071NS	0.481	0.005	108
平均值	1.006	0.008	/

表 6 普通地震动作用下结构顶点位移及最大层间位移角

Table 6 Roof displacements and inter-story drift ratios under general ground motions

普通地震动	最大顶点位移/m	最大层间位移角	最大层间位移角所在楼层
EL-Centro	0.312	0.006	108
Northridge	0.061	0.003	108
Taft	0.246	0.005	108
平均值	0.206	0.005	/

(1)不同类型地震波作用下结构响应差别较大。对比 9 条地震动作用下结构响应,近断层脉冲型地震动 TCU128NS 波作用下结构响应最大。从图 7 可以发现近断层脉冲型地震动加速度反应谱长周期成分较多,加速度反应谱对超高层结构影响巨大。

(2)结构楼层位移和层间位移角被地震动速度脉冲特性放大。近断层脉冲型地震动作用下结构响应突变最明显,结构层间位移角在中上部楼层严重超出规范限值。

(3)三类地震动作用下结构楼层位移变化趋势相近,从底部至楼层顶部楼层位移持续增大。层间位移角变化趋势为先增大后减小,在加强层处(30、61、84 和 107 层)有向内缩进的趋势。受地震动脉冲特性影响,结构 60 层以上的结构层间位移角变化剧烈,有明显的向外突变。

5 结论

使用不同类型地震动对自振周期超过 6 s 的超高层结构进行大震弹塑性时程分析,得到以下结论:

(1)近断层脉冲型地震动作用下结构的层间位移角和楼层剪力出现了明显的突变现象。由于地震动脉冲特性放大了加强层处的结构响应,使结构在加强层处偏于不安全。

(2)比较三类地震动作用下结构响应可以看出,无脉冲特性的近断层地震动与普通地震动作用下结构响应差别不大,近断层脉冲型地震动作用下结构响应最大,中上部楼层的层间位移角严

重超出规范限值。

(3)相比较于普通地震动,近断层地震动作用下结构的最大层间位移角出现的位置向楼层下部移动,近断层脉冲型地震动作用下楼层最大层间位移角集中出现在第 88 层。

(4)从以上图表分析可以看出,依据规范的方法进行计算得到的结构响应可能小于近断层脉冲型地震动作用下结构响应,使结构偏于不安全。建议对超高层结构抗震设计时应进行近断层脉冲型地震动作用下结构的抗震性能验算。尤其对基本自振周期超过 6 s 的结构,不能忽视地震动脉冲特性对其影响,应控制相应地震动作用下结构的楼层位移和层间位移角。

参考文献:

[1] Li C F, Li Y B. Identification of Near-Field Pulse-Like Ground Motions Recorded at Bajiao Station during the Mainshock of the Great Wenchuan Earthquake [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250-253: 2546-2553.

[2] 陈波,谢俊举,温增平. 汶川地震近断层地震动作用下结构地震响应特征分析[J]. 地震学报, 2013,35(2): 250-261.

[3] 谭平,谈忠坤,周福霖. 近场地震动特性及其弹性与塑性谱的研究[J]. 华南地震, 2008, 28(2): 1-9.

[4] 左琼,吴强,陈少林. 速度脉冲型地震动瞬时输入能特性研究[J]. 工业建筑,2009, 46(s1):186-189.

[5] 杨迪雄,赵岩,李刚. 近断层地震动运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007,27(2):133-140.

[6] 杨迪雄,王汉兵,李刚. 近断层地震动对短肢剪力墙高层结构地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):106-115.

[7] 崔臻,盛谦. 近断层/远场地震动作用下控制性岩体结构对地下洞室地震稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(1):53-67.

[8] 张莹,孙广俊,李鸿晶. 近断层速度脉冲对 RC 框架的地震反应影响[J]. 防灾减灾工程学报,2017,37(3):368-373.

[9] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A Plastic-Damage Model for Concrete [J]. International Journal of Solids & Structures, 1989, 25(3):299-326.

[10] Lee J, Fenves G L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010: 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB5011-2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.